

# 聴覚的協和・不協和感の知覚に関する研究

## ー楽音を用いた検討ー

総合研究大学院大学

文化科学研究科

メディア社会文化専攻

20080504

山本 由紀子

## 目次

第 1 章 研究の背景.....	1
1.1 はじめに.....	1
第 2 章 協和感研究の発展と課題.....	11
2.1 聴覚的協和感の理論(加法モデルまで).....	11
2.2 協和感・不協和感発生のメカニズム.....	17
2.2.1 協和感・不協和感の処理部位.....	17
2.2.2 協和感・不協和感の神経基盤.....	18
第 3 章 ピアノ音色の短 2 度音程の協和感知覚.....	25
3.1 実験の概要.....	25
3.2 実験 1.....	26
3.2.1 方法.....	26
3.2.2 結果.....	32
3.2.3 考察.....	33
3.3 実験 2.....	33
3.3.1 方法.....	33
3.3.2 結果.....	36
3.3.3 考察.....	38
3.4 実験 3.....	38
3.4.1 方法.....	38
3.4.2 結果.....	39
3.4.3 考察.....	40
第 4 章 多様な音色, 音程の協和感知覚.....	41
4.1 実験 4.....	41
4.1.1 方法.....	42
4.1.2 結果.....	52
4.1.3 考察.....	57
第 5 章 臨界帯域内の 3 成分以上の複雑な相互作用を考慮した不協和度推定モデル.....	59
5.1 提案モデル.....	59
5.2 結果.....	62
5.2.1 提案モデルの当てはまりと Sethares モデルの比較.....	62
5.2.2 ピークモデル 1 とその当てはまり.....	65
5.2.3 ピークモデル 2 とその当てはまり.....	67
5.3 考察.....	70

第 6 章 結論 .....	73
6.1 本研究のまとめ .....	73
6.1.1 全体の概要 .....	73
6.1.2 各章の成果と意義 .....	73
6.2 本研究の課題 .....	75
6.3 協和感研究の課題 .....	78
謝辞 .....	81
引用・参考文献 .....	83
本論文に関する研究発表 .....	89
付録 実験に用いた刺激の波形，パワースペクトル，等価騒音レベル .....	90

# 第 1 章 研究の背景

## 1.1 はじめに

我々の周囲には、自然環境音、人工音、音声、楽音といった多くの種類の音が存在する。これらの音はそれぞれ特徴的な音色を持ち、それは我々が音の発生源を認識する重要な手がかりとなっている。音色は、音の大きさ、音の高さと並んで、音の聴覚的属性の 3 要素とされている。音の大きさは大小、音の高さ(pitch)は高低というように一次的に表現することが可能であり、音の大きさは主に音圧、音の高さは主に周波数と関係していて、物理量との関係も比較的単純である(岩宮・小坂・小澤・高田・藤沢・山内, 2010)。それに対して、音色は「聴覚に関する音の属性の一つで、物理的に異なる二つの音が、たとえ同じ大きさと高さであっても異なった感じに聞こえる時、その相違に対応する属性」と JIS の規格で定義されている (JIS, 2000)。つまり、音の大きさと高さ以外の性質のすべてが音色とされるので、音色と物理量との関係は複雑であり、明らかになっていないことも多い。本論文が対象とする協和は、この音色の一側面と位置付けられる。

二つ以上の音に対して生じる協和感の大きさ(協和度)と音の物理的属性との関係に関する研究は、古代ギリシアの Pythagoras (B.C.582-B.C.496)らの研究に端を発する。18 世紀には Helmholtz (1821-1894)によって、協和ではなく音色の知覚についてであるが、音色が倍音の種類や数や強さによって決定されることが示され、Stumpf (1848-1936)は、不協和音程であっても純正律ではうなりを生じないことを明らかにした。これらの研究を経て、1960～1970 年代には、単純な構造の複合音の協和度に関して、音の物理的属性から高い精度で推定できるモデルが提案された。これらのモデルは実験データによく当てはまり、音楽心理学や聴覚の入門書、ハンドブック、一般書に引用されるほど知れ渡っている(岩宮・小坂・小澤・高田・藤沢・山内, 2010; 小方, 2007; 大山・今井・和気・菊池, 1994; 福島・斎藤・大串, 2001; 谷口, 2000)。

上述したような、高い精度で協和度を推定できるモデルの発表以降も現在に至るまで、協和感に関する研究は着実な進展を遂げている。特に近年では、協和感の神経生理学的裏付けを求める研究が行われるようになり、聴覚メカニズムを反映したモデルも構築されている。しかし、協和感研究にはいまなお多くの課題が指摘されている。音楽の演奏や鑑賞時に感じられる実際の不協和感とこれら協和感理論との乖離も、そのひとつである。例えば、不協和音程とされる短 2 度音程は、ピアノで演奏すると、そのほかの音程に比べて不協和感が強く感じられる。しかし、著者が演奏会でヴァイオリンによる高音域の弱音で聴取した時には、その短 2 度音程に不協和感はあまり感じられなかった。なぜ短 2 度音程であるのにも関わらず不協和感を感じられなかったのか、という疑問に対する答えは、楽典や管弦楽法からは得られなかった。楽典においては音程による協和の

分類はなされているが、音高による分類はなされておらず、管弦楽法においてもこうした楽音の不協和度に関する理論は存在していない。Allen Forte(1926 - 2014), Milton Babbitt (1916 - 2011)らによるピッチクラス・セット理論は、オクターヴが異なる音でもすべて同じ音名の音は(異名同音も同じ音と見做す)同じピッチクラスであるとして、調性音楽だけではなく無調音楽の分析にも用いられた(Forte, 1977, Babbitt, 1946)。つまり、短2度と短9度は同度と見做すこととなる。しかし、平均律の場合には、1オクターヴ上の音に0.01Hzの誤差が生まれるため、倍音の周波数の誤差も高次になるにつれ増大していく。また、Edmond Costèr (1905 - )による自然親和性を考慮した楽曲分析においても、半音関係の親和性は高いことになっているが(エドモン・コステール, 1998)、協和感覚的には疑問が残る。

このように、様々な理論はあれど、協和感・不協和感に関する考察には参考にならない。こうした疑問が、この協和感/不協和感研究の動機となった。

## 1.1 聴覚的協和感

### 1.2.1 音楽的協和感とその特徴

協和とは、音楽学的には『同時に鳴った二つ以上の音が快く調和して響く状態』(新音楽辞典 楽語, 1977)と定義される。複数の周波数成分からなる複合音に対しては、協和性ないしは不協和性の印象(協和感, 不協和感)が生じる状態を指す。

『二つ以上の音』は、音楽用語では2音は音程、3音以上は和音と呼ばれる。音程とは『2音間の高さのへだたり』(新音楽辞典 楽語, 1977)のことで、二つの意味がある。一つは横の流れ、旋律的な音程で、もう一つが縦の同時に2音が鳴る音程である。協和感研究では、和音は、調性感、調和感が関わってくるため、まず後者の意味の音程を対象とすることが多い。

音程にはへだたりに対応した種類がある。表1.1に西洋音楽文化における音程の名称と周波数比を、一般的に受けいれられている協和性の高い順に示す。Pythagorasは周波数比率が単純な比率であるほど協和性は高くなると考えていた(イアンブリコス, 2000)。表1.1に示している周波数比は、音階を構成する各音高間の周波数比を規定する方法である音律によって異なる。表1.1に示しているのは純正律(just intonation)の場合の周波数比である。純正律とは、協和音程である完全5度と長3度の組み合わせから構成された音律で、非常に澄んだ響きが得られる。Pythagorasが考案したと言われているピュタゴラス音律(Pythagorean scale)は、完全5度を積み重ねていくことで、音階の音高が得られていく。ところが、完全5度の周波数比率(3:2)を12回積み重ねた時に得られる音高と完全8度(2:1)を7回積み重ねた時の音高には周波数差が24セント(1/4半音)生じてしまう。この差はピタゴラス・コンマと呼ばれている。このピタゴラス・コンマにより、オクターヴの音高にずれが生じるため、純正律と同様に使用できる調が限定される。

表 1.1 音程の名称と純正律の周波数比(協和性の高い順)

音程の名称	周波数比率
完全 1 度(ユニゾン)	1:1
完全 8 度(オクターヴ)	2:1
完全 5 度	3:2
完全 4 度	4:3
長 6 度	5:3
長 3 度	5:4
短 3 度	6:5
短 6 度	8:5
長 2 度	9:8
長 7 度	15:8
短 7 度	16:9
短 2 度	16:15
増 4 度(三全音)	45:32

しかし、現代の音楽で主に用いられているのは純正律ではなく平均律(equal temperament)と呼ばれる音律である。平均律は、1 オクターヴを均等に 12 等分した音律である。隣り合う半音(短 2 度)の周波数比は等しく $\sqrt[12]{2}:1$ である。平均律の周波数比率を表 1.2 に示す。表 1.2 を見てわかるように、どの音程も複雑な周波数比率となっているため、純正律ほど澄んだ響きは得られない。平均律がなぜ純正律よりも多用されるようになったかには諸説あるが、主要な理由としては西洋音楽の複雑化により、一つの曲中で転調が多く求められるようになったからであろう。純正律では転調に対応できないため、すべての音程や和音などの響きが少しずつ濁ってはいるが総合的に安定した響きを得られる平均律が普及した。

表 1.2 音程の名称と平均律の周波数比

音程の名称	周波数比率
完全 1 度(ユニゾン)	1:1
完全 8 度(オクターヴ)	2:1
完全 5 度	$\sqrt[12]{128}:1$
完全 4 度	$\sqrt[12]{32}:1$
長 6 度	$\sqrt[4]{8}:1$
長 3 度	$\sqrt[3]{2}:1$
短 3 度	$\sqrt[4]{2}:1$
短 6 度	$\sqrt[3]{4}:1$
長 2 度	$\sqrt[6]{2}:1$
長 7 度	$\sqrt[12]{2048}:1$
短 7 度	$\sqrt[6]{32}:1$
短 2 度	$\sqrt[12]{2}:1$
増 4 度(三全音)	$\sqrt{2}:1$

このような 2 音以上が同時に鳴った時に生じる協和感には音楽的協和感 (musical consonance) と聴覚的協和感(sensory consonance, psychoacoustic consonance) の 2 種類がある(Terhardt, 1984) . 音楽的協和感は, 音楽経験や文化的背景に影響を受ける協和感, 聴覚的協和感は音楽経験や文化的背景に影響を受けない音そのものに感じる協和感である.

例えば音楽の文脈 (context) 中における音程や和音に対して感じる協和感は音楽的協和感であると言われている. 同じ音程や和音であっても, それが異なる調に挿入されると協和感は異なる. 他にも不協和音が多く使われているジャズに慣れていない人は, ジャズ音楽そのものに不協和を感じることもある. Descartes (1596-1650)は,『音楽提要』から 10 年後に, メルセンヌ神父へ宛てた手紙で, 協和音の音程の計算について語ったのち次のように述べた.『こうした計算はただ, いかなる協和音が最も単純であるか, あるいはお望みなら, 最も甘美で最も完全であるかを示すだけで, そのために最もここちよいということを示すに役立つものではありません』(掛下, 1977). つまり, 計算的に協和度が高い音程であっても, 聴取する人間の文化的背景や音楽経験によってはその通りには感じられないことがあるということと考えられる. これも音楽的協和感と言える.

西洋音楽という同じ枠組みの中においても, 時代が異なれば音楽的協和感も異なる. 10 世紀頃の教会音楽は完全 8 度 (2:1) , 完全 5 度 (3:2) , 完全 4 度 (4:3) の協和音程

を中心として構成されており、三全音と呼ばれる音は *diabolus in musica* (音楽の悪魔) と呼ばれ忌避されていた。三全音とはいわゆる増 4 度 (45:32) のことで、例えばドとファのシャープの音程である。しかし 18 世紀にもなればこの増 4 度は属 7 の和音と呼ばれる基本的な和音の中にも存在する音であり、忌避されることはなくなった。また、時代が同じでも、文化が異なると協和音に対する感じ方は大きく異なる。安土桃山時代に来日したポルトガルの宣教師 Luis Frois (1532-1597) は、その著書『ヨーロッパ文化と日本文化』(1585) において、『われわれはオルガンに合わせて歌う時の協和音と調和を重んずる。日本人はそれを姦し (*caxi maxi*) と考え、一向に楽しまない。』と述べている (ルイス・フロイス, 1991)。この日本音楽と西洋音楽の違いについて説明を補足すると、基本的に安土桃山時代の日本の音楽がモノフォニー(単旋律)の音楽であったことや、和声的音楽である雅楽においても西洋音楽では不協和音として取り扱われる音程が多く含まれていたことが理由であると考えられる(小野, 2005)。つまり、当時の日本人は彼らが聴いていた音楽には西洋音楽的な協和というものが存在しなかったため、西洋音楽を『一向に楽しまなかった』と言える。

この傾向は幕末、明治時代に入っても同様であったことが内藤 (2005) でも次のように確認できる。エドワード・モース (1838-1925) は日本の音(労働歌や生活歌)に強い関心を持っていたが、日本の伝統音楽に対しては『和声がない』と簡単に受け入れることはできなかった。曰く、『外国人の立場からいうと、この国民は所謂「音楽に対する耳」を持っていないらしい。彼らの音楽は最も粗雑なもののように思われる。和声(ハーモニー)の無いことは確かである。彼らはすべて同音で歌う。彼らは音楽上の声音を持ていず (*They have no voice*)、我国のバンジョーやギターに僅か似た所のあるサミセンや、ビワに合わせて歌う時、奇怪きわまる軋り声や、うなり声を立てる。』と、散々に否定している。また、日本人側からしても、西洋音楽に対する拒否反応があった。内藤 (2005) によれば、幕末当時きっての西洋通であった佐久間象山も、『西洋の音楽だけはまったく受け付けなかった』り、明治時代に入り、西洋音楽教育が進められた時代になっても『東京のある劇場で、劇中劇としてイタリアオペラが歌われたとき、観客に衝撃が走り、次いでプリマドンナの甲高い声に、聴衆の間から爆笑が起こったというバジル・ホール・チェンバレン(一八五〇〜一九三五)の証言もある』と述べられている。

音楽的協和感は聴取する人間の嗜好や文化的背景に左右されるところが大きい。また、音楽自体もリズム・メロディ・和声の 3 要素で構成されており、それぞれの要素が人間の心理に多様な作用を及ぼしている。音楽が人間の感情に作用することは旧約聖書をはじめ、Socrates (B.C.469?-B.C.399), Plato (B.C.427-B.C.347)らの時代から自覚されているが(プラトン, 2008)、音楽心理学研究においては、これら三要素のうちの一つを取り上げて研究するに留まっている部分が多い。

音楽自体を対象とした研究はまだ少ないが、Blood and Zatorre (2001)は音楽のどれか 1 要素ではなく、音楽そのものを用いて、参加者の感動(chills)した時の脳の血流量等



から活動部位を特定した。用いた音楽は2種類で、どちらかを参加者自身が自分の感動できる音楽として選択した。これは、全く異なる刺激を用いても参加者に生じる感情(この場合は感動)が同じであれば測定できるということになる。また、PET (Positron Emission Tomography)などを用いた測定が参加者の音楽経験や嗜好の個人差に左右されないということにもなる。今後の音楽的協和感研究においても参考になりうると思われる。

音楽的協和感研究がこのように発展途上である一方、聴覚的協和感に関する研究は、様々な聴覚現象の発見と関連して古くからなされてきた。

### 1.2.2 聴覚的協和感とその特徴

聴覚的協和感とは、音楽の文脈からは切り離された音に対する協和感であり、文化的背景や個人の音楽経験の影響をあまり受けないとされている。実際、Butler and Daston (1968) は音楽経験のないアメリカ人の学生と日本人の学生とに協和性を判断させ、その判断の間に違いが見られなかったと報告している。また、Fritz, Jentschke, Gosselin, Sammler, Peretz, Turner, Friederici, Koelsch (2009)は、独自の文化を持ち、西洋音楽から隔絶されているアフリカのマファ人を対象に、西洋音楽の表現する感情の認識についての実験を行った。マファ人および西洋文化圏の参加者を対象とし、マファの伝統音楽と西洋音楽とそれらをより不協和に改変した曲の選好を比較した。その結果、マファ人、西洋文化圏の参加者のどちらもオリジナルの協和性の高い曲を選好した。

Schellenberg and Trainor (1996) は、5年以上の音楽経験を持つ成人とそうでない成人とに、音程の弁別を課した。実験の刺激は、完全5度周波数比3:2音程を継時提示して、最後に不協和音程である増4度(45:32)音程、あるいは協和音程である完全4度(4:3)音程か完全5度音程を提示した。課題は、最後に提示した音程が先行する音と同じ音程の種類であるか異なる音程の種類であるかどうかを判断させたものであった(図1.1)。その結果、最後に不協和音程を提示した場合の方が、協和音程を提示した場合より異同弁別判断の成績が良かった。また、参加者の音楽経験は弁別成績には影響しなかったことから、成人は音楽経験によらない協和性の概念を持っていることが示唆される。



先行する音は完全 5 度，最後のターゲット音も完全 5 度



先行する音は完全 5 度，最後のターゲット音が増 4 度



先行する音は完全 5 度，最後のターゲット音が完全 4 度

図 1.1 Schellenberg and Trainor (1996)の実験刺激例

Schellenberg and Trainor (1996) は、先に述べた弁別課題を、オペラント条件づけを用いて 7 か月児に課したところ、弁別成績は成人と同パターンであった。Zentner and Kagan (1998) は、32 人の健康な 4 か月児に、協和音程からなる旋律と不協和音程からなる旋律とを聴かせて、注視時間と手足の動きを観察した。その結果、協和音からなる旋律提示時には音源方向への注視時間が長く、手足の動きが少なかった。同様の実験により 2 か月児でも、協和音程からなる旋律を好むことが示されている (Trainor, Tsang & Cheung, 2002)。さらに、Masataka (2006) は、聴覚障害者の両親を持つ生後 2 日の乳児と、健聴者の両親を持つ生後 2 日の乳児に、オリジナルの Mozart のメヌエットとそれを多くの不協和音を含むように改変した曲を提示し、注視時間を比較した。その結果、どちらの乳児もオリジナルのメヌエットを好み、選好の程度に両親の聴覚障害の影響はなかった。生後 2 日の乳児は極めて聴覚経験が少なく、特に両親が聴覚障害者の場合は、胎児期の聴覚経験も少ない。この結果は、そのような乳児でも協和音程を好むということを示している。これらの研究は純粋な聴覚的協和感を扱ったものではないが、協和感が音楽経験によらない生得的な側面を持つことを示唆している。

ヒト以外の動物における協和感も研究されている。Izumi (2000) は、ニホンザル (*Macaca fuscata*) には協和音と不協和音との弁別学習が可能であり、学習に用いた音程とは異なる音程に関しても弁別が可能であることを示した。Watanabe, Uozumi, and Tanaka (2005) は、ブンチョウ (*Padda oryzivora*) に音高の異なる同種の協和音と不協

和音(3 和音)を用いて弁別学習をさせた。その結果、ブンチョウは協和音と不協和音との弁別学習が可能であり、さらに学習に用いた刺激と音高が異なる協和音と不協和音との弁別もできることを示した。

Fannin and Braud (1971) は、ラット (*Rattus norvegicus*) に不協和音程である短 2 度 (16:15) と協和音程である完全 4 度 (4:3) を提示して、音提示と対応するレバーを押す頻度を比較した。その結果、協和音程である完全 4 度に対応するレバーをより多く押したことから、ラットも協和音を選好しているとした。Sugimoto, Kobayashi, Nobuyoshi, Kiriya, Takeshita, Nakamura, and Hashiya (2010) は、人間に育てられた生後 5 か月のチンパンジー (*Pan troglodytes*) の乳児に、オリジナルの協和音楽とその曲の一部を不協和音に変えた不協和音楽とを聴取させた。手首に装着した紐を引くことにより再生する曲を切り替えるようにして、曲の再生時間を比較したところ、協和音楽をより長時間再生させた。この結果から、音楽の経験をほとんど持たないチンパンジーの乳児が協和音楽を好むことが明らかになった。

このように聴覚的協和感とは文化や音楽経験にあまり依存せず、乳児やヒト以外の動物の一部にも共通した傾向がみられ、生得的な聴覚現象であることが示唆される<sup>1</sup>。

### 1.3 本研究の目的と構成

#### 1.3.1 本研究の目的

前節で述べてきたように、音楽的協和感とは音楽経験や文化的背景に影響を受ける協和感、聴覚的協和感とはそれらに影響を受けない音そのものに感じる協和感である。音楽的協和感について研究しようとする時に聴覚的協和感の知見は必要不可欠なものである。しかし、聴覚的協和感に関する研究は、1.2.2 において述べたように古くから行われていたにも関わらず、いまだに明らかになっていないことや多くの課題が存在する。

その課題の一つとして、聴覚的協和感研究の実験において用いられる刺激が単純な複合音に限られている、ということが挙げられる。1.1 で述べたように、我々の周囲にある音は多くの周波数成分を含んでいる。例えば、楽音では、臨界帯域幅の中に多くの成分が存在しているのが一般的である。しかし、実験で用いられる刺激音は、純音か、高々十数種類の純音を重ねて作られた極めて静的で疎な、単純な構造の音である。単純な複合音の性質が人間の発話音声や楽音にも成り立つとは限らない。

そこで、本研究では純音を重ねた単純な構造の複合音だけでなく、ピアノとオルガンの楽音を用いて、不協和度を測定した。Helmholtz (1877) は、不協和感はおもにうなり (beat) とざらつき感 (roughness) より生じ、協和感とは不協和感がないことであるとした。その得られた不協和度の測定値と先行研究によるモデルによって求められた予測値を

---

<sup>1</sup> ただし、McDermott and Hauser (2004) はサル目のワタボウシタマリン (*Saguinus oedipus*) が協和音への選好を示さなかったと報告しており、哺乳動物であれば協和音に選好を示すという訳ではない。

比較し，人間の聴覚的協和感覚について論じる．

### 1.3.2 本研究の構成

第 1 章では，音楽的協和感と聴覚的協和感について述べた．

第 2 章においては，聴覚的協和感の科学的研究について，先行研究を挙げる．主に加法モデルについての研究について述べるが，現在脳神経科学の発達により協和感に関する知見も深まっている．今後の展望とも関連することから，脳神経科学領域における協和感研究についても述べる．

第 3 章では，ピアノ音色の短 2 度音程を用いて不協和度を測定する．先行研究の理論モデルである加法モデルで，測定した不協和度が推定できるかを検証する．

第 4 章では，ピアノ音色だけではなく，先行研究で多く用いられてきた単純な複合音や，オルガン音色を用いて不協和度の測定を行う．また，短 2 度音程だけではなく，完全協和音程である完全 5 度や，臨界帯域内に 3 成分存在する 3 成分複合音なども用いて測定を行い，加法モデルで測定結果を推定できるかを検証する．

第 5 章では，第 3 章と第 4 章の実験結果をもとに，不協和度を推定する新たなモデルを提案し，加法モデルと推定精度を比較する．

第 6 章では，研究を総括して結論と課題を述べる．



## 第 2 章 協和感研究の発展と課題

### 2.1 聴覚的協和感の理論(加法モデルまで)

先に述べたように聴覚的協和感の理論的研究は、古くは古代ギリシアの Pythagoras によって、完全 8 度、完全 5 度、完全 4 度などの完全協和音程の周波数比が簡単な整数比であることが発見されたことに端を発する(イアンブリコス, 2000). Democritus (B.C.460?-B.C.370?)や Aristoxenos (生没年不詳)も二音の数理的な関係が協和と関わっているということを認識していた. その後, 17 世紀の G.W.Leibniz と Euler を経て, 音楽分野では, Rameau が 18 世紀に『自然原理に還元した和声論』で倍音と和声の関係に触れている. Rameau は, ソヴェールによる上方倍音の発見を受けて, 自然和音の説明を行った. 例えば長三和音は単なる比例計算に基づくのではなく, 倍音構造に根ざしているからだ, という理論である(Rameau, 1722).

完全 8 度の周波数比は 2:1, 完全 5 度の周波数比率は 3:2, 完全 4 度の周波数比率は 4:3 である. これらの音程は快く響き協和していると感じられるのに対し, 不協和音程と呼ばれる音程の周波数比率は複雑であると一般的に言われている. 具体的に短 2 度音程の周波数比は 16:15, 長 7 度音程の周波数比は 15:8 である.

Helmholtz (1877) は, 不協和感はおもにうなり (beat) とざらつき感(roughness) より生じ, 協和感は不協和感がないことであるとした. うなりとは, 二つの近接した周波数の音が同時に鳴ると, 一つの音の強弱が変化しているように聞こえる現象である. 近接する周波数  $f_1, f_2$  (Hz) の二つの純音  $A \sin(2\pi f_1 t)$ ,  $A \sin(2\pi f_2 t)$  からなる複合音は,

$$\begin{aligned} & A \sin(2\pi f_1 t) + A \sin(2\pi f_2 t) \\ &= 2A \cos\left(2\pi \frac{f_1 - f_2}{2} t\right) \cdot \sin\left(2\pi \frac{f_1 + f_2}{2} t\right) \end{aligned}$$

となる. この複合音のスペクトルを見ても周波数  $f_1$  と  $f_2$  の二つの成分が確認できるのだが, 波形を見ると図 2.1 のような振幅変動(波形の包絡線)を確認できる. 図の横軸は時間, 縦軸は音圧である. この複合音の振幅は  $|f_1 - f_2|$  (Hz) で変動する. つまり, うなりは振幅変動の知覚により生じている.

周波数差が小さいとうなりが遅く, あまり不協和感を与えないが, 周波数差が大きくなるとざらつき感が生じ, 大きな不協和感を与える. さらに周波数差が十分大きくなると, 2 音がきれいに分離して聞こえるようになり, ざらつき感も消えて不協和感を与えなくなる. Helmholtz は, このうなりやざらつき感が不協和感の原因で, 周波数差が 30 ~ 40 Hz の時にざらつき感は最大になるとした.

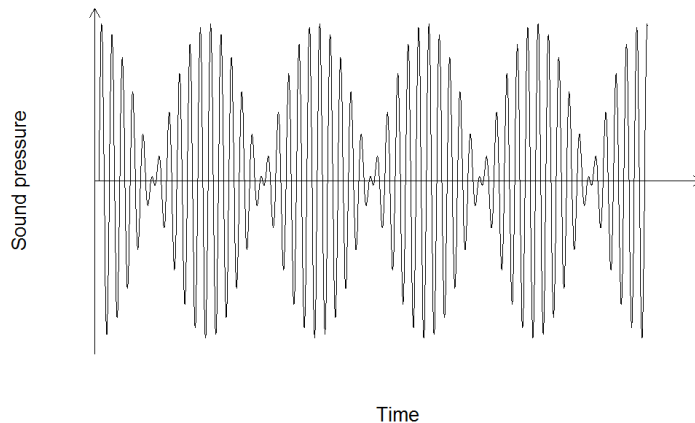
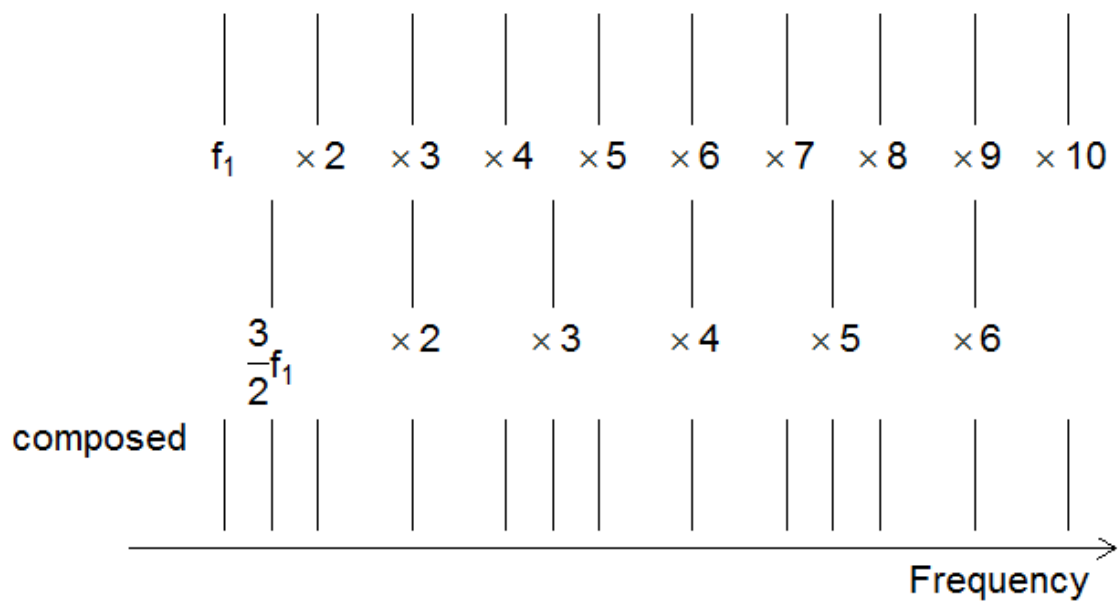


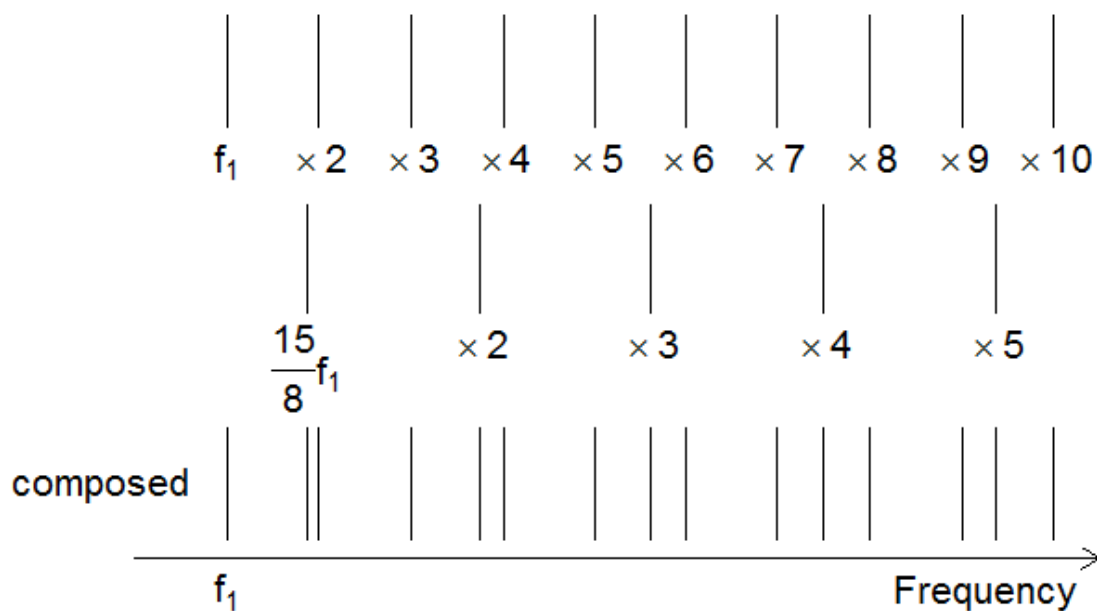
図 2.1 二つの純音の複合音の波形

二つの純音の複合音では、二つの音の周波数が離れているほど不協和度（不協和感の尺度）は小さくなるが、各音が倍音を持つ場合、周波数比が簡単な整数の比であれば、周波数が一致する共通倍音が多くなる。周波数が一致するとうなりやざらつき感が生じないことから、共通倍音を多く持つ複合音の不協和度は小さくなる。倍音とは、周期的複合音の成分中の基音以外の周波数成分のことで、基音の周波数の整数倍の周波数の音である。我々の周囲にある音は基本的に、一つの音に聞こえても多くの成分を含んでいる。時に基音よりも低い周波数の倍音が現れることもあるが、基音は大概の場合最も低い周波数であると考えてよい。

楽音などの複合音に含まれている成分の中には基音の整数倍にならない成分が多いが、特に楽音の場合は整数倍の倍音が強く発生し、その整数倍音が各楽音の音色を決定するとされている。基音を含む整数倍音の列のことを、倍音列と呼ぶ。図 2.2 に周波数比が簡単な整数の比になる例として協和音程である完全 5 度 (3:2) と、複雑な整数の比になる例として不協和音程である長 7 度 (15:8) との倍音構造を示す。横軸は周波数を表し、縦線は周波数に対応する音が含まれることを示す。完全 5 度の  $f_1$  は音程のうち低い方の音(根音)の基音で、 $\times 2$  は第 2 倍音、 $\times 3$  は第 3 倍音でそれぞれ基音  $f_1$  の 2 倍、3 倍の周波数である。 $3/2f_1$  は根音の完全 5 度上の音の基音である。その 2 音が同時に鳴った時の倍音構造が **composed** である。下の図の長 7 度も同様に、 $f_1$  は根音の基音、 $15/8f_1$  は根音の長 7 度上の基音である。この二つの音程の **composed** を比較してみると、完全 5 度音程では、根音( $f_1$ )の第 3 倍音と  $3/2f_1$  の第 2 倍音が共通倍音となっている。 $f_1$  の第 6 倍音と  $3/2f_1$  の第 4 倍音、 $f_1$  の第 9 倍音と  $3/2f_1$  の第 6 倍音も同様である。対して長 7 度は、 $f_1$  と  $15/8f_1$  の各倍音成分に共通倍音がない。共通倍音同士では基本的に不協和度は生じないため、異なる成分が多い複合音ほどうなりやざらつき感が大きくなり、不協和度も大きくなる。



完全5度 (3:2)



長7度 (15:8)

図 2.2 周波数比と倍音構造

これに対して、Stumpf(1897)は、音の融合感(tonal fusion)が協和感の本質であるという観点を提案した。融合感とは二つの音が溶け合って一つに聴こえる感覚のことである。Stumpf が提案した融合の法則とは、

- (1)音程の融合の程度 (融合度)は、二つの音が簡単な整数比であるほど高い
- (2)融合度は音域の影響を受けない



- (3)融合度は、二つの音の絶対的な強度にも相対的な強度にも無関係である
- (4)ある融合度を持つ二つの音の組み合わせに第 3, 第 4 の音を加えても、元の 2 音に注意を向けていると融合度は変わらない
- (5)ある融合度を持つ二つの音の組み合わせにおいて、これらに調和成分の倍音を加えると、融合度の高い組み合わせは融合度が増し、融合度が低い組み合わせは更に融合度が減少する
- (6)ある音程において、周波数が正しい関係より多少外れていても、その融合度にはあまり大きな影響を与えない
- (7)融合度は、空想的な表象であっても、同様に保続することができる
- (8)8 度(1 オクターヴ)を越えた関係にある 2 音の融合度は、その音を 1 オクターヴ内に移した場合に見られる融合度と等しい

の 8 条からなる。(1)~(3), (5), (6), (8)は音の物理特性で決まるが、(4)には心理的な要因が加わっている、(7)は取り立てて検討するようなことではないと伊福部は説明している(伊福部, 2008)。Stumpf の融合法則は Faist (1897)によって多少修正されており、例えば上記法則の(3)については、2 音の融合度には絶対的な強度差の影響は殆ど認められないが、相対的な強度差については、低い音の強い方が融合度が大きくなるとされている。谷口(2004)は、音の融合は協和の特徴の一つと言えるが、同等とみなすことには疑問を呈している。融合度と協和度の評定は一致せず、融合感の生理学的な説明もなかったため、うなりやざらつきが不協和感の原因であるという説が、長らく最も説得的な説として受け入れられてきた。本節で紹介するモデルもその説に基づいている。

Plomp and Levelt (1965) は、不協和度は 2 音の周波数差のみにより決まるものではなく、臨界帯域幅 (critical bandwidth) を考慮する必要があるとした(図 2.3)。臨界帯域幅とは 2 音がざらつきなくきれいに分離するようになる最小の周波数差のことで、2 成分の中心周波数が 500 Hz 以下の場合は 100 Hz 程度、それ以上の場合は中心周波数の 1/5 程度である (Zwicker, Flottorp & Stevens, 1957)。後に臨界帯域幅はより優れた方法で測定された(Moore & Glasberg, 1983; Glasberg and Moore, 1990)。Glasberg and Moore(1990)の等価矩形帯域幅(equivalent rectangular bandwidth; ERB)は、中心周波数を  $F(\text{kHz})$  の関数として、

$$\text{ERB}(F) = 24.7(4.37F + 1)$$

と表される。ERB の値は Zwicker, Flottorp, Stevens(1957)の値より小さく、特に低周波数帯域においては差が大きい。例えば、中心周波数が 500Hz の ERB は約 79Hz である。ただし、ERB が提案される以前の様々な聴覚機能のモデルの多くは Zwicker, Flottorp, Stevens(1957)の値を採用している。

聴取実験の結果に基づき、二つの純音からなる複合音 (dyad) の不協和度は、周波数差を臨界帯域幅で除した値の関数で、3 音以上の複合音の不協和度は各 dyad の不協和度の和であるとした(図 2.4)。本論文では、複合音の不協和度は複合音を構成する dyad

の不協和度の和であるとするモデルを，加法モデルと呼ぶことにする．

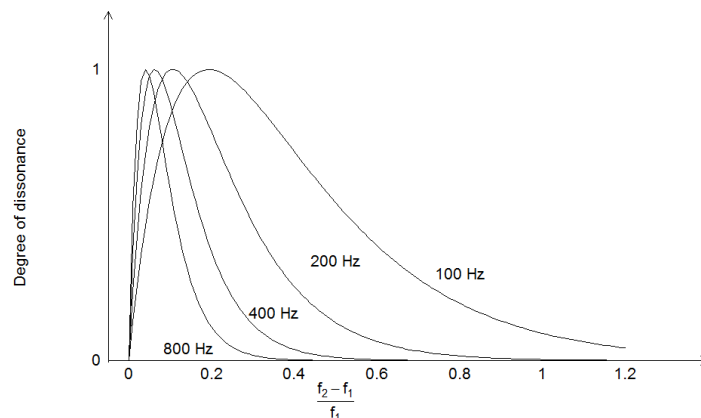


図 2.3 周波数 $f_1, f_2$  ( $f_1 \leq f_2$ ) の二つの純音からなる複合音の不協和度  
 図中の周波数は $f_1$ を示す  
 Sethares (2005) のモデルにより計算

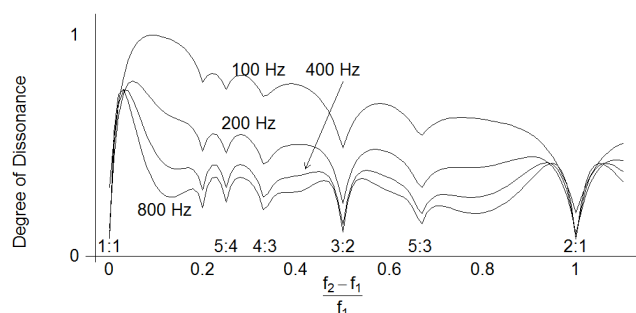


図 2.4  $f_1, f_2$  の第 6 倍音までからなる複合音の不協和度  
 図中の周波数は最も低い周波数を示す  
 Sethares (2005) のモデルにより計算

Plomp and Levelt による加法モデル (Plomp and Levelt モデル) の提案以降，複数の研究者によって，数式化された加法モデルが提案された (Kameoka & Kuriyagawa, 1969a, 1969b; Hutchinson & Knopoff, 1978, 1979; Sethares, 1993, 2005) .

Sethares(2005)は Plomp and Levelt により経験的に得られた不協和度の曲線(図 2.5)を数式化した．

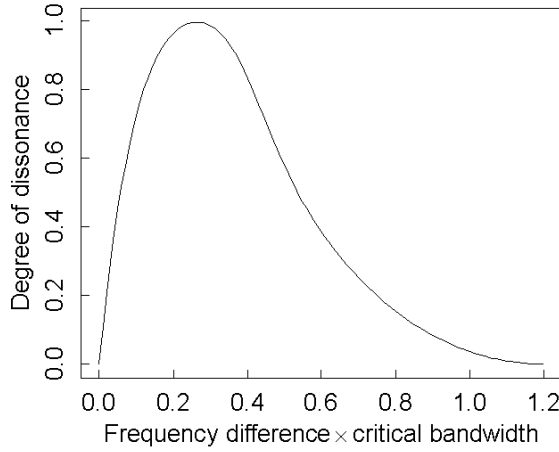


図 2.5 Plomp & Levelt の不協和曲線

Sethares のモデルは以下の通りである。

Plomp and Levelt の理論において、二つの純音によって生じる不協和は臨界帯域幅に対する二つの純音の周波数差の比を変数とする関数で表される。Sethares は二つの純音の周波数差を  $x$  とし、不協和度  $d$  を  $x$  の関数として表している。

$$d(x) = e^{-b_1 x} - e^{-b_2 x} \quad (2.1)$$

各成分の周波数を  $f_1 \dots f_n$ ，ラウドネス<sup>3</sup>を  $l_1 \dots l_n$  とする。Plomp and Levelt による実験結果から、 $b_1=3.5$ ， $b_2=5.75$  とし、曲線の上昇と下降する程度を表す。

$s_1=0.021$ ， $s_2=19$ ， $x^*=0.24$  とし、 $\text{dyad}(f_1, l_1), (f_2, l_2)$  の不協和度は、以下の式で求められる。

$$d(f_1, f_2, l_1, l_2) = l_{12} (e^{-b_1 s(f_2 - f_1)} - e^{-b_2 s(f_2 - f_1)}) \quad (2.2)$$

$$s = x^* / (s_1 f_1 + s_2) \quad (2.3)$$

$$l_{12} = \min(l_1, l_2)$$

ラウドネス  $l$  は、音圧レベル SPL により以下の式で近似的に求められる。

$$l = \frac{1}{16} \times 2^{\frac{SPL}{10}} \quad (2.4)$$

これらの式を元に、以下の式で  $n$  成分の不協和度  $D_F$  が算出される。

$$D_F = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d(f_i, f_j, l_i, l_j) \quad (2.5)$$

これらのモデルとは数式の形は異なるが、

<sup>3</sup>音の大きさの心理物理量。単位はフォン。

(1) Plomp and Levelt モデルでは、不協和度は周波数の差を臨界帯域幅で除した値のみの関数としたが、その後のモデルによると不協和度の計算に音圧も取り入れている

(2) Plomp and Levelt モデルでは隣接する周波数成分の対のみが不協和度の計算に用いられるが、その後のモデルではすべての周波数成分の対が不協和度の計算に用いられる

という点で共通している<sup>4</sup>。

これらのモデル、特に Kameoka and Kuriyagawa (1969a, 1969b) のモデルは聴取実験による不協和度の測定値によく当てはまった。また、これらの理論を基に、音楽における音高の構成法が提案されている (小畑, 2001)。

このように、聴覚的協和感は古くからその仕組みが研究され、発展してきた。Kameoka and Kuriyagawa による加法モデルによって聴覚的協和感研究は一応の完成を見たように思われるが、協和感のメカニズムがすべて明らかになったわけではない。協和感のメカニズムについて、明らかになっていることを概観する。

## 2.2 協和感・不協和感発生のメカニズム

### 2.2.1 協和感・不協和感の処理部位

Blood, Zatorre, Bermudez, and Evans (1999) は、同一メロディに協和音および不協和音の伴奏をつけた刺激を聴取させた時の脳血流の変化を PET を用いて観察した。その結果、傍辺縁系の海馬傍回、右楔前部の脳血流量は不協和度の増加と正に相関し、両側眼窩前頭皮質、梁下前帯状皮質、前頭極皮質の脳血流量は不協和度と負に相関することが明らかになった。さらに、刺激に対する快さに関する評定値は内側梁下前帯状皮質、右眼窩前頭皮質の脳血流量と正に相関し、左後帯状皮質、右海馬傍回の脳血流量と負に相関した。また、協和音および不協和音の刺激聴取時における両側上側回の脳血流量は、雑音聴取時におけるそれより大きかった。これらのことから、両側上側回は感情的解釈に先立ち音楽の聴覚的分析を行っている と解釈した。

Peretz, Blood, Penhune, and Zatorre (2001) は、両側の聴覚皮質の損傷により音楽の知覚と記憶に障害を持つ患者を用いて実験を行った。刺激はクラシック音楽の抜粋とそのオリジナルを不協和音が多く含まれるように改変したもので、各刺激の印象を評定させ、健常者による評定と比較した。その結果、患者のオリジナルの音楽と不協和に改変した音楽に対する快・不快の評定には差がなく、健常者の評定とは大きく異なった。しかし、嬉しい・悲しい、の評定は健常者との間に差がなかったことから、この患者は音楽に関するすべての感情を喪失しているわけではないことがわかる。さらに、この患者

---

<sup>4</sup> ただし、Kameoka & Kuriyagawa (1969b) のモデルは、不協和度自体には加法性が成り立たず、物理量と心理量の間にべき法則 (Stevens, 1957) を仮定し、不協和度に対応する物理量である不協和強度に加法性が成り立つとした。

の CT スキャンの画像と、前述の Blood et al. (1999) による健常者が不協和度の異なる和音を聴いた時の PET のデータを比較したところ、脳血流量が不協和度と関連した傍辺縁系は損傷しておらず、音楽の聴覚的分析を司る上側頭回が損傷していた。これらの結果から、不協和感は感情的な解釈に先立って上側頭回において処理されるとした。

Ayotte, Peretz, and Hyde (2002) は、複数の先天性失音楽 (congenital amusia)<sup>5</sup> の患者を用いて、先天性失音楽の性質を調べた。この研究においても Peretz et al. (2001) と同様に、先天性失音楽の人々は音楽の嬉しい・悲しい、の判断は健常者と変わらないにもかかわらず、協和性・不協和性に対して極めて鈍感な反応を示した。

Passynkova, Neubauer, and Scheich (2007) は、協和音および不協和音聴取時の脳波コヒーレンスを用いて、協和感・不協和感の処理における左右半球間および半球内間の関連性を解析した。コヒーレンスとは 2 組の時系列データの関連性の強さを周波数ごとに表したものである。その結果、 $\theta$  波帯域において、前頭部の半球間のコヒーレンス値は協和音聴取時に大きくなり、後頭部の半球間のコヒーレンス値は不協和音聴取時に大きくなった。また、 $\theta$  波帯域において、右半球内のコヒーレンス値は協和音聴取時により大きくなり、快さの評定と対応した。一方、 $\theta 2$  波帯域において、左半球内のコヒーレンス値は協和音および不協和音聴取時に統制条件より小さくなったことから、感情的な解釈なしに協和感・不協和感の処理を行っているとした。さらに、 $\alpha 1$  波帯域において、左半球前部と右半球後部の半球間のコヒーレンス値は親近性の評定と負に関連したことから、新奇な音楽の処理に関連しているとした。

### 2.2.2 協和感・不協和感の神経基盤

協和感の知覚に関連する聴覚メカニズムの概要は以下の通りである(内川, 2008; 村上, 2010)。音波はまず、外耳道を通して鼓膜を振動させる。鼓膜の振動は中耳の耳小骨(ツチ骨, キヌタ骨, アブミ骨)を通じて内耳へと伝えられる。内耳は、蝸牛と前庭器官と三半規管で構成される。

蝸牛の内部は前庭階, 中央階, 鼓室階の三つの部分に分かれているが、このうち、中央階と鼓室階を隔てるのが基底膜である。音波が鼓膜を振動させ、耳小骨を介して蝸牛に伝わると、蝸牛内のリンパ液の圧力変化によって、基底膜の根元(基部)から先端(頂部)へと向かう進行波が生じる。高周波音に対しては基部側が共振し、低周波音に対しては頂部側が共振する。基底膜は機械的に音の周波数解析を行っている。

基底膜の上には有毛細胞が載っており、基底膜が上下に動くとき有毛細胞も連動する。内有毛細胞が動くことで一次聴神経に神経伝達物質を放出し、一次聴神経の神経細胞の内部に神経パルスが生じる(これを発火する(fire)と呼ぶ)。外有毛細胞も連動するが、そ

---

<sup>5</sup> 失音楽は元々は後天的な(脳の損傷による)音楽機能の障害を指す用語として用いられてきたが、近年になって先天性の音楽機能の障害、明らかな脳の損傷を認めないような音楽機能の障害も含めて失音楽という用語が使われている(緑川, 2013)。

の動きは基底膜の振動を増幅する機能を持ち、小さな音への感度を上げることで、内有毛細胞の働きを促進している。

内有毛細胞の動きから一次聴神経に生じた神経パルスは、音の情報を蝸牛神経核に伝える。すなわち、音の各周波数成分の強さ、音圧波形の周期の情報は一次聴神経の発火頻度と発火感覚として符号化される。

蝸牛神経核は脳幹の下部にある、約 10 万個のニューロンを持つ組織である。この蝸牛神経核を介して、上オリーブ複合体、外側毛体核、下丘、内側膝状体を伝わって、側頭葉の聴覚皮質に到達する。聴覚皮質の中心領域には一次聴覚野(A1)、吻側部(R)、吻側側頭部(RT)という三つのサブ領域がある。聴覚皮質には約 1 億個のニューロンがあると言われており、この聴覚皮質ニューロンは正弦波刺激（純音）聴取時、聴神経の細胞は刺激の特定の位相に同期して発火する。この現象を位相固定と呼ぶ。

Fishman, Reser, Arezzo, and Steinschneider (2000) は、サルに振幅変調音を聴取させ一次聴覚野の神経細胞の活動を計測した。その結果、波形の包絡線、すなわち振幅変動の特定の位相に同期して神経細胞が発火する位相固定が観察された。また、Fishman, Volkov, Noh, Garell, Bakken, Arezzo, Howard, and Steinschneider (2001) は、ヒトとマカクに不協和度の異なる複合音を聴取させ、一次聴覚野の神経活動を調べた。その結果、位相固定の程度は音程の不協和度と正に相関することを示した。これらの結果から、一次聴覚野における神経細胞活動の位相固定は不協和感を表現しているとした。

Fishman らの研究結果は、うなりやざらつき感が不協和感の原因であるという Helmholtz の説を神経生理学的に裏付けたことになる。しかし、これで聴覚的協和感について完全に解明できた訳ではない。DeWitt and Crowder (1987) は、単一音と種類の異なるいくつかの音程とを提示し、それが単一の音か音程(二つの音)なのかを判断させた。音程を単一の音と誤判断した確率と反応時間を比較した結果、完全 8 度 (2:1) と完全 5 度 (3:2) が他の音程より誤判断率が高く、反応時間も長かった。この結果は完全協和音程である完全 8 度音程と完全 5 度音程は、音程でも一つの音のように聞こえているということを示している。完全 8 度音程と完全 5 度音程は Stumpf の融合感が高いということになり、この結果は Stumpf の融合説を裏付けるものとも考えることもできる<sup>6</sup>。

Bidelman and Krishnan (2009) は、音程を構成する二つの音を左右別々に提示する両耳分離聴パラダイムを用いて、音程の不協和度を測定した。うなりを生じる dyad を両耳分離聴すると、うなりはほとんど感じられないことが知られている。不協和感がうなりやざらつき感により生じているのであれば、不協和音程を両耳分離聴すると不協和感は生じないはずである。ところが、音程の協和度を評定させると、両耳分離聴の場合でも協和音程を高く評定した。

McDermott, Lehr, and Oxenham (2010) は、250 人以上の参加者を集めて複数の聴

---

<sup>6</sup> ただし、完全 8 度と完全 5 度以外の音程に関しては協和度と結果に明確な対応が見られなかったので、融合感が協和感の原因であるという証拠としては不十分である。

取実験を行った。一つの実験では、基本周波数が 250 Hz で第 10 倍音までの倍音成分からなる複合音から一部の成分を除いた調和的な複合音と、その複合音の各成分の周波数を僅かに変えた非調和的な複合音、成分間の周波数比を 2.0 より僅かに大きくした非調和的な複合音の、調和度と協和度（快さ）を評定させた。いずれの複合音においてもすべての音程はうなりやざらつき感が生じないほど離れていたが、調和的な複合音のほうが調和度、協和度が高く評定された。調和的な複合音を好む傾向は楽器演奏経験の年数と正に相関した。また、dyad を両耳分離聴および両耳聴で聴いた場合、うなりが生じる両耳聴の場合に、より不快であると評定された。調和性を操作した複合音における協和度と調和度の評定値には正の相関があったが、調和性を操作した複合音における協和度とうなりの大きさの評定値との間には相関がなかった。

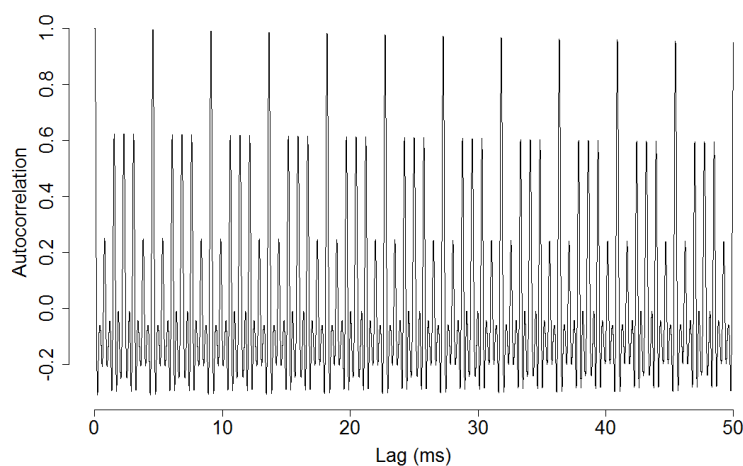
Cousineau, McDermott, and Peretz(2012) は、先天性失音楽の患者の、うなりの有無の判断やうなりのない音の選好、感情のこもった発話音声の感情の判断は、健常者と同様であるが、複合音が調和的であるか否かの判断は健常者とは異なり、調和的複合音や協和音も選好しないことを示した。

これらの結果から、McDermott et al. (2010) は協和性の基盤は調和性にあるとした。調和性は複合音が一つの音のように聴こえることである。これは Stumpf の融合に近い概念であるので、以降この考え方も併せて融合説と呼ぶことにする。周波数比が簡単な整数の比となる音程、例えば完全 5 度音程 (3:2) で、低い方の音の基本周波数を 200 Hz とすると、200, 300, 400, 600, 800, 900, ... (Hz) という倍音成分を持つが、この音は基本周波数が 100 Hz の完全 1 度音程 (1:1) , すなわち単一音のサブセットとなるので、一つの音のように聴こえる。一方、周波数比が複雑な整数の比となる音程では、対応する完全 1 度音程の基本周波数が非常に低くなる。30 Hz より低い音は和音を構成する音とは認識されないので(Pressnitzer, Patterson, & Krumboltz, 2001) , 対応する完全 1 度音程の基本周波数が 30 Hz より低くなる複合音は一つの音のように聴こえないという考え方である。Gill and Purves (2009)は、無限に近い音の組み合わせが可能であるにもかかわらず、音階が限られた音の組み合わせしか含まないことに注目し、様々な音階に用いられる音の組み合わせについて分析した。その結果、年代、文化に依存せず、音階に用いられる音は、完全 1 度音程のサブセットとなっていることを発見した。

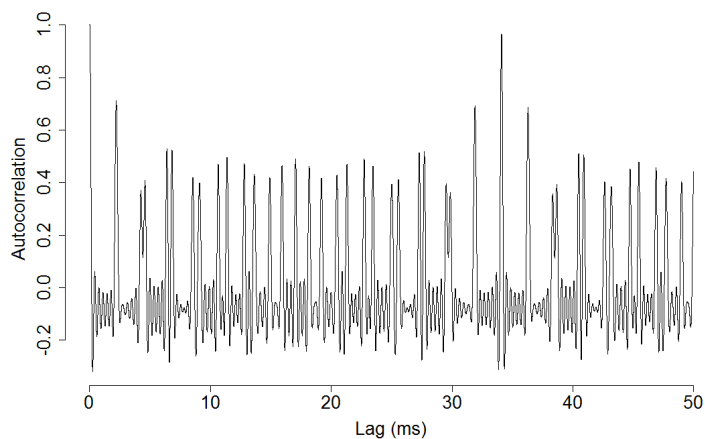
Tramo, Cariani, Delgutte, and Braidia (2001)は、協和音程（完全 5 度 (3:2) , 完全 4 度 (4:3) ）および不協和音程（短 2 度 (16:15) , 増 4 度 (45:32) ）聴取時のネコの聴神経繊維の神経細胞の発火間隔（interspike interval: ISI）を測定し、ISI の分布を解析した。神経細胞の発火は位相固定するので、発火間隔は刺激音の周期を反映する。そのため、ISI の分布は自己相関関数に相当し、音高をコードしている（Cariani & Delgutte, 1996）. 図 2.6 に完全 5 度音程および短 2 度音程の自己相関関数を示す<sup>7</sup>. 解析の結果、

<sup>7</sup> ISI の分布から導いたものではなく、音そのものの自己相関関数であることに注意され

協和音程聴取時の ISI のピークは音程を構成する二つの音の音高， missing fundamental<sup>8</sup>等のハーモニーに関連する音高を反映していた。一方，不協和音程聴取時の ISI の分布は不規則で，音程を構成する二つの音の音高やハーモニーに関連する音高を表現していなかった。これらの結果は，調和性を感じるための神経生理学的基盤の存在を裏付けるものと考えられる。このようなメカニズムにより協和度を計算する数理モデルも提案されている (Ebeling, 2008) 。



完全 5 度



短 2 度

図 2.6 完全 5 度音程および短 2 度音程の自己相関関数

Bidelman and Krishnan (2009) は，ヒトが不協和度の異なる音程を聴取した時の脳

たい。

<sup>8</sup> ある音の基本周波数やその周辺周波数が存在しなくても，その整数倍音が存在していた場合，存在していない基音が聞こえる現象。脳が音高を基本周波数だけではなく，倍音も知覚しているために起こる。



幹の周波数対応反応 (FFR) を解析した。FFR は音により誘発される頭頂部反応で脳幹に由来する反応である。FFR の波形は刺激音の波形と類似している。FFR 波形の自己相関関数のうち、根音の基本周波数とその倍音成分に相当する部分の割合である (脳幹内の神経活動として表現された) 音高の明確さ (neural pitch salience) が算出された。音高の明確さはその定義から単一音らしさ、すなわち融合度の指標と解釈することができる。音高の明確さと協和度の評定値との間には大きな正の相関があった。また、3 和音に関しても音高の明確さと協和度の評定値との間には大きな正の相関があった (Bidelman & Krishnan, 2011)。これらの結果は融合説を裏付けるものである。

しかしこのことは、うなりやざらつき感が不協和性の知覚においてほとんどあるいはまったく役割を果たしていないことを示している訳ではない。Johnson-Laird, Kang, and Leong (2012) は、

- (1) 少数の低い倍音成分からなる複合音は、あまり融合していなくても、その複合音をサブセットとして含む複合音より協和的であること
- (2) 倍音成分として第 4, 5, 7 倍音を持つ和音と第 4, 6, 7 倍音を持つ和音のどちらがより協和的であるか予測できないこと

を融合説の問題として挙げている。彼らは、不協和性の知覚において、調和性が不協和性の大きな傾向を、うなりやざらつき感が不協和性の微小な差異を決める、という理論を提案している。うなりやざらつき感は感覚的な過程により生じ、調和性は調性に関する暗黙的知識に基づく高次認知過程により決まるということで、彼らはこの理論のことを二重過程理論と呼んでいる。調和性が高次認知過程に基づくということは、調和性の選好が楽器演奏の経験と相関するという McDermott et al. (2010) の結果とも整合的である。

Minati, Rosazza, D'Incerti, Pietrocini, Valentini, Scaioli, Loveday, and Bruzzone (2009) は、音楽家および非音楽家に協和音や不協和音を聴取させ、fMRI による撮像および事象関連電位 (ERP) の測定を行った。その結果、協和音聴取時に主に前頭部の血流量が増加し、非音楽家においては右半球に側性化した。音楽家においては左右の非対称性は小さかった。さらに、協和度に応じて両群とも ERP の P1 成分の振幅が変化した。非音楽家においてのみ協和度に応じて N2 成分の振幅が変化した。Minati et al. (2009) は、音楽家は感情的処理に加え分析的処理も行っていると推測した。これらの結果は、二重過程理論を神経生理学的に裏付けていると考えることもできる。

ここまで概観したように、加法モデルの発表以降も現在に至るまで、聴覚的協和感に関する研究は着実な進展を遂げている。しかし、計算機的能力が飛躍的に向上し、複雑な音声刺激を作成することも容易になった現在においても、ほとんどの研究で少数成分からなる単純な複合音のみを用いている。音声や楽音をはじめとして我々が日常耳にする音の多くは、成分数が多く振幅が変動する複雑な音である。それにもかかわらず、モデルにより楽音の協和度ないしは不協和度を推定し、ヒトの知覚と比較した研究は見当

たらない.

本研究では, 少数成分からなる単純な複合音だけでなく, ピアノとオルガンの楽音を対象に不協和度を測定し, それを加法モデルが推定できるか検討する. まず, 第 3 章では, ピアノ音色の短 2 度音程を対象に検討を行う.



## 第3章 ピアノ音色の短2度音程の協和感知覚

### 3.1 実験の概要

第2章までに述べてきたように、協和感・不協和感研究においては楽音を使った研究がほとんどない。そこで、本研究では楽音を用いて不協和度の測定を行った。刺激は、学校音楽教育現場などで多くの人に馴染みある楽器としてピアノの音色を用いて構成した。測定した不協和度に加法モデルでどの程度当てはまるか調べた。

本研究で取り扱ったのは音程の協和感である。協和感というものは2音以上の音が同時に存在した場合に生じる。二つの音の高さの隔たりを音程と呼び、音程は二つの音の周波数の比に基づき分類される。周波数比の組み合わせは無限に存在するが、それぞれの音楽文化において使用される音程は限られている。先行研究の Plomp and Levelt (1965)や Kameoka and Kuriyagawa (1969ab)も音程の協和感を調べた。3音以上(和音)の場合、調性感が強く生じる。我々がよく耳にする西洋音楽(西洋音楽理論を基礎とした音楽)は、基本的に調性音楽である。調性は2音では決定されないが、3音の時にある程度規定される。音楽的協和感の研究をするに当たっては、調性を避けることはできないが、まず、聴覚的協和感について明らかにしていくため、今回は調性があまり感じられない音程を対象とする。

また、本実験では主として短2度音程を用いた。短2度は第1章の表1.1でも示したように、周波数比が複雑なほぼ最不協和と呼べる音程である(表3.1)。本実験では再現性を考慮してより一般的な音律である平均律を用いたが(表3.2)、協和音程と不協和音程の比較では、不協和度の差が大きすぎて、モデルの検討には向かないと考えられる。先行研究の実験や加法モデルの予測で、短2度音程の不協和度は音高による変化が大きいため、モデルの検討に適すと考えた。

表 3.1 音程の名称と純正律の周波数比

音程の名称	周波数比率
完全 1 度(ユニゾン)	1:1
完全 8 度(オクターヴ)	2:1
完全 5 度	3:2
完全 4 度	4:3
長 6 度	5:3
長 3 度	5:4
短 3 度	6:5
短 6 度	8:5
長 2 度	9:8
長 7 度	15:8
短 7 度	16:9
短 2 度	16:15
増 4 度(三全音)	45:32

表 3.2 音程の名称と平均律の周波数比

音程の名称	周波数比率
完全 1 度(ユニゾン)	1:1
完全 8 度(オクターヴ)	2:1
完全 5 度	$\sqrt[12]{128}:1$
完全 4 度	$\sqrt[12]{32}:1$
長 6 度	$\sqrt[4]{8}:1$
長 3 度	$\sqrt[3]{2}:1$
短 3 度	$\sqrt[4]{2}:1$
短 6 度	$\sqrt[3]{4}:1$
長 2 度	$\sqrt[6]{2}:1$
長 7 度	$\sqrt[12]{2048}:1$
短 7 度	$\sqrt[6]{32}:1$
短 2 度	$\sqrt[12]{2}:1$
増 4 度(三全音)	$\sqrt{2}:1$

### 3.2 実験 1

合成されたピアノ音色による短 2 度音程を用いて不協和度を測定し、音高が異なることで不協和度も異なるかを確認する。また、加法モデルである Sethares (2005) モデルがどの程度不協和度を推定できるかを予備実験として行った。

#### 3.2.1 方法

##### 3.2.1.1 参加者

正常な聴力を持つ成人男女 8 名(女性 5 名、男性 3 名)が参加した。特に専門的音楽教育(専門的ソルフェージュ教育、和声学習)を受けた者はいなかった。楽器経験はピアノやエレクトーンなどの鍵盤楽器を今までに経験した参加者が 6 名、その他の楽器経験者が 1 名であった。絶対音感を現在保持していると報告した参加者はいなかった。

実験に先立って、参加者には実験内容についてのインフォームドコンセントを行った。説明後、実験同意書にサインをもらい十分な理解を得たのち、音楽経験に関するアンケートと教示を行った。

##### 3.2.1.2 刺激

PC 制御によるシーケンサー(Finale 2004 ,Coda 社)によって生成した短 2 度音程を、microsoft GS Webtable Symth. (GS Format No.00 Acoustic Piano) で再生した。音源はサンプリング音源ではなく、合成されたピアノ音色である。

音律は再現性を考慮し、より一般的な音律である平均律を用いた。根音の音高は、 $C^4$  から  $H^4$  までの 1 オクターヴで、用いた各音の基本周波数は、表 3.3 の通りである。

表 3.3 実験 1 で用いた刺激音の各音の基本周波数

Pitch	Frequency(Hz)	Pitch	Frequency(Hz)
$C^4$	262.82	$G^4$	393.78
$C\#^4$	278.44	$G\#^4$	417.19
$D^4$	295.00	$A^4$	442.00
$D\#^4$	312.54	$A\#^4$	468.28
$E^4$	331.13	$H^4$	496.13
$F^4$	350.82	$C^5$	525.63
$F\#^4$	371.68		

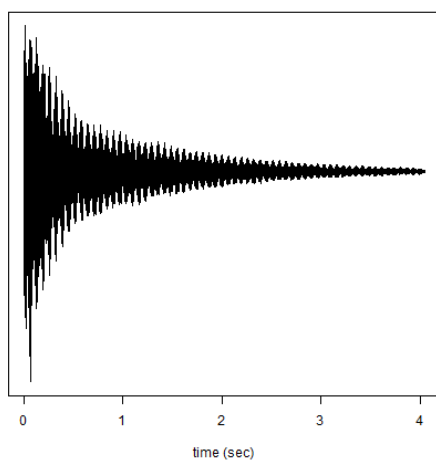
この  $C^4$  から  $C^5$  までの 13 音を組み合わせ、 $C\&Cis$ ,  $Cis\&D$ ,  $D\&Dis$ ,  $Dis\&E$ ,  $E\&F$ ,  $F\&Fis$ ,  $Fis\&G$ ,  $G\&Gis$ ,  $Gis\&A$ ,  $A\&Ais$ ,  $Ais\&H$ ,  $H\&C$  の 12 種類の短 2 度音程の WAV ファイルを作成した。量子化精度はすべて 16bit, サンプルレートは 22.05kHz とした。呈示時の音圧は小野測器の積分騒音計 LA-5111 と、B&K の Head and Torso Simulator Type4128 により測定した。等価騒音レベルは、表 3.4 の通りである。

表 3.4 ピアノ音の等価騒音レベル( $L_{Aeq}$ )の平均、最大レベルおよび最低レベル

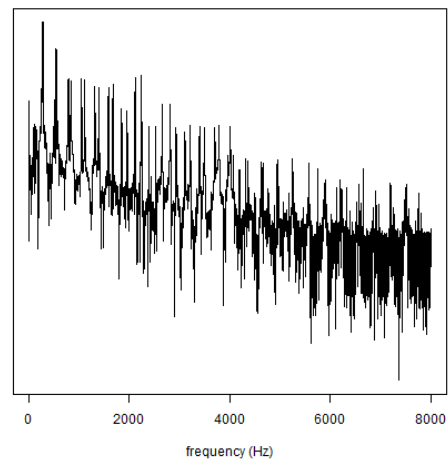
		Piano
minor 2nd ( $L_{Aeq}$ )	Mean	61.35
	Max/ min	63.5/58.8 $C\&Cis$ / $Ais\&H$

刺激の波形、パワースペクトルは図 3.1 の通りである。図の左列は波形で、縦軸は WAV ファイルの波形データに基づく（最大値を 1 とする相対的な）音圧。右列は対数パワースペクトルの密度で、縦軸は WAV ファイルの波形データに基づく対数パワー密度である。全刺激の波形とパワースペクトル、および音圧(等価騒音レベル)は付録を参照されたい。ここでは代表として、各音源の  $C\&Cis$  と  $A\&Ais$  の波形とパワースペクトルを示す。

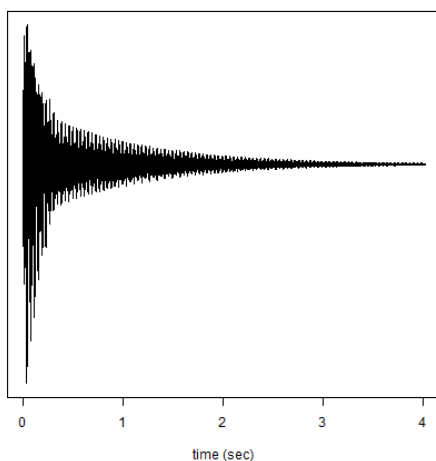
また、音色の特徴として、合成されたピアノ音色の単音  $A^4$  のパワーがピークとなる周波数とそのパワーを示す(表 3.5)。



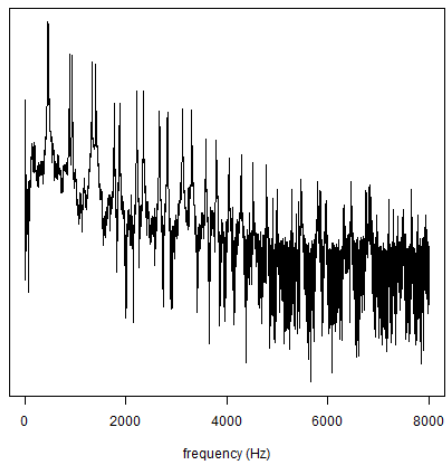
短 2 度 C&Cis 波形



短 2 度 C&Cis パワースペクトル



短 2 度 A&Ais 波形



短 2 度 A&Ais パワースペクトル

図 3.1 ピアノ音源の波形, パワースペクトル

表 3.5 合成されたピアノ音色の単音 A<sup>4</sup>のパワーがピークとなる周波数とパワー  
(基本周波数におけるパワーを原点とした値)

Frequency (Hz)	Relative power (dB)
439.9	0.00
879.9	-10.74
1319.6	-13.53
1766.7	-27.18
2212.0	-23.23
2662.6	-29.91
3116.5	-29.23
3574.2	-39.29
4046.8	-45.33
4511.3	-47.28

不協和度の測定は一対比較により行った。12 個の刺激を完全比較でする場合、刺激対内の呈示順序を無視すれば 66 回の比較が必要である。今回の測定では、参加者ごとに不協和度を測定しなかったため、参加者の負担が大きくなるように、効率的に測定する必要があった。そこで、予備実験等で不協和度を大雑把に推定しておき、不協和度が近い刺激をグループにしてグループ内で一対比較を行う。この時、不協和度が中位の刺激を比較基準として、すべてのグループに入れておく。例えば、12 個の刺激を一対比較する場合に、図 3.2 のように能力別に 4 つのグループに分割をして比較した場合には 21 回の比較で済む。

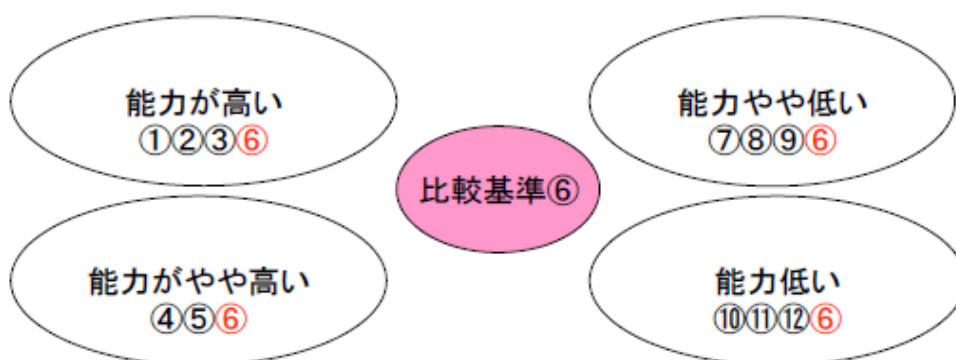


図 3.2 グループ分割例

### 3.2.1.3 手続き

参加者は最初に協和的な音、不協和的な音の判断の基本的教示を受けた。協和・不協和という言葉に対する認識は、特に音楽経験がない参加者の場合、個人差が大きいと思



われるため、Kameoka and Kuriyagawa (1960a)に倣い比較的共通認識を持ちやすい「澄んだ (clearness)」・「濁った (turbidity)」という言葉で判断した。また、教示では、実験で用いた短 2 度の微妙な判定をするのではなく、あくまで協和・不協和の概念を理解するため、音楽的協和と不協和のサンプルを聴取した。サンプルは、協和(澄んだ)の例として、オクターヴ(完全 8 度)および完全 5 度の完全協和音程、不協和(濁った)の例として長 7 度と長 2 度の不協和音程が呈示された。サンプル音を含め、すべての刺激はヘッドフォンで呈示された。

教示後、5 回の練習試行を経て、不協和度の測定を実施した。測定は一対比較法で行った。刺激はランダムな順で呈示され、前刺激の影響を防ぐために各刺激呈示前に桃色雑音(PN; pink noise)が挿入された。各試行は桃色雑音 500ms, interval 100ms, 先行刺激 4000ms, inter stimulus interval 500ms, 桃色雑音 500ms, interval 100ms, 後続刺激 4000ms, 協和性判断の順で呈示された。inter trial interval は 100ms とした(図 3.1)。また、協和性判断は「より澄んでいたのは 1)前 2)後」という指示が表示された。この指示に従い、より澄んでいると感じた刺激が先行刺激であったと感じた場合は数字キーの 1 を、後続刺激であったと感じた場合は数字キーの 2 を押すという形で反応を記録した(図 3.3)。

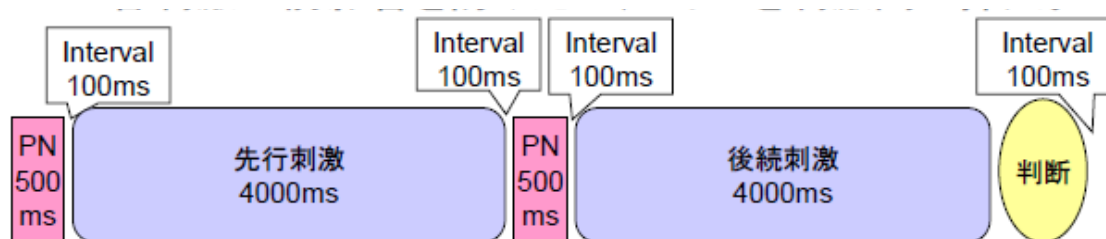


図 3.3 刺激音の提示順

協和判断を 42 試行×2 セット実施し、各参加者の結果に基づき、グループを再構成し、さらに 42 試行×3 セット実施した。よって総試行数は 210 試行(42×5 セット)であった。

### 3.2.1.4 データ解析法

一対比較により得られたデータは、Bradley-Terry モデル (Bradley and Terry, 1952) により尺度不協和度の尺度化を行った。

Bradley-Terry モデルは、刺激をグループに分割してグループ内で一対比較を行う不完全比較の場合でも、1 個の刺激が全グループに共通して含まれていれば、異なった比較群に含まれる刺激間の能力値を比較することができる。対象数が多い一対比較実験では比較回数が莫大になり、参加者への負担が大きいことが問題点である。しかしこのモ

デルを用いれば、比較回数を少なくすることができる。

Bradley-Terry モデルは、刺激間の相対的な能力値の大きさを推定するためのモデルである。このモデルでは刺激  $i$  と刺激  $j$  を比較した時に刺激  $i$  が選好される確率  $P_{ij}=P(i>j)$  が刺激  $i, j$  の能力  $\pi_i$ 、 $\pi_j$  により、

$$P_{ij} = \pi_i / (\pi_i + \pi_j) \quad (3.1)$$

が成立すると仮定する。

Firth(2005)は、 $P_{ij}$  を

$$q_{ij} = \log \frac{p_{ij}}{1-p_{ij}} \quad (3.2)$$

とロジット(logit)変換し、対数オッズ(odds) $q_{ij}$  で対象  $i, j$  の選好関係を表している。ロジット変換により(3.2)は以下のように変形される。

$$q_{ij} = \log \frac{\pi_i}{\pi_j} = \log \pi_i - \log \pi_j = \lambda_i - \lambda_j \quad (3.3)$$

ここで、 $\lambda_i = \log \pi_i$ 、 $\lambda_j = \log \pi_j$  である。

ロジット変換すると対数オッズが対数能力の差となり、対数能力が間隔尺度となっている。また、 $\lambda_i$  を用いると(3.2)式を次のように変形できる。

$$p_{ij} = \frac{\exp(\lambda_i)}{\exp(\lambda_i) + \exp(\lambda_j)} = \frac{1}{1 + \exp(\lambda_j) / \exp(\lambda_i)} = \frac{1}{1 + \exp\{-(\lambda_i - \lambda_j)\}} \quad (3.4)$$

$$p(Z) = \frac{1}{1 + \exp\{-Z\}} \quad (3.5)$$

(3.5)はロジスティック (logistic)関数と呼ばれる。(3.4)から、Bradley-Terry モデルは多変量ロジスティック回帰モデルに帰着されることが分かる。

以上のように、対数オッズと対数能力を用いることにより、推定が容易になることから、本論文では(3.3)を Bradley-Terry モデルとして扱い、対数能力で不協和度を表すことにする。不協和度  $\lambda_i$  の推定は最尤推定法を用いた。

推定には R (R Development Core Team, 2009) の Bradley-Terry パッケージ (Firth, 2008)を用いた。

モデルの当てはまりの評価には逸脱度(Dobson, 2002)を用いた<sup>9</sup>。モデルの最大尤度を  $L$ 、推定されるパラメタの最大個数を含んだ飽和モデル<sup>10</sup>の最大尤度を  $L_{sat}$  とすると、逸脱度  $D$  は

$$D = 2(\log L_{sat} - \log L) \quad (3.6)$$

<sup>9</sup>田中他 (2008)の訳で逸脱度となっているので、その訳語を用いた。久保 (2012)では、逸脱度は  $-2 \log L$  で、(3.6)式は残差逸脱度 (residual deviance の訳)となっていることに注意されたい。

<sup>10</sup>最大モデル、フルモデルと呼ばれることもある。

と表される．モデルのパラメタ数を  $p$ ，飽和モデルのパラメタ数を  $m$  とすると，逸脱度  $D$  は近似的に自由度  $m \cdot p$  の  $\chi^2$  分布に従う．逸脱度  $D$  が自由度  $m \cdot p$  の  $\chi^2$  の上側 5% 点や 1% 点を超えると，モデルは当てはまっていないと判断される．

例えば，12 個の刺激を刺激対の順序を無視して完全比較すると 66 通りの比較となるので，飽和モデルは各比較に 1 つのパラメタを割り当てる．そのため， $m = 66$  となる．一対比較では，各刺激に能力値(本研究では不協和度)を割り当てるが，原点は任意に設定できるので， $p = 11$  となる．Bradley-Terry モデルの逸脱度が自由度 55 の  $\chi^2$  分布の上側 5% 点や 1% 点を超えなければ，適切に尺度化できたとみなす．

### 3.2.2 結果

Bradley-Terry モデルによって各音程の不協和度を参加者ごとに算出した．参加者ごとに分割の仕方が異なるため，それぞれ自由度は異なった(16~20)．いずれの参加者においても，逸脱度は  $\chi^2$  分布の上側 5% 点より小さかった．したがって，Bradley-Terry モデルにより不協和度を適切に尺度化できたと考えられる．

不協和度の測定値および Sethares (2005) のモデルによる推定値を図 3.4 に示す．不協和度の推定値を不協和度の測定値に重ねて比較するために，モデルによる推定値が測定値に当てはまるようにスケールと原点を最小二乗法で変換した．縦軸は不協和度，横軸は各音程の根音の基本周波数である．黒い点は参加者ごとに算出した不協和度の平均値，エラーバーは平均値の 95% 信頼区間である．不協和度の測定値は，一対比較の結果に基づくため，原点は任意に定めることができる．ここでは，最も音高が低い C&Cis の不協和度を原点とした．実線は Sethares モデルによる推定値である．不協和度の推定値を不協和度の測定値に重ねて比較するために，モデルによる推定値が測定値に当てはまるようにスケールと原点を最小二乗法で変換した．測定値と Sethares モデルによる推定値との相関係数(Pearson の積率相関係数)は 0.13 であった．

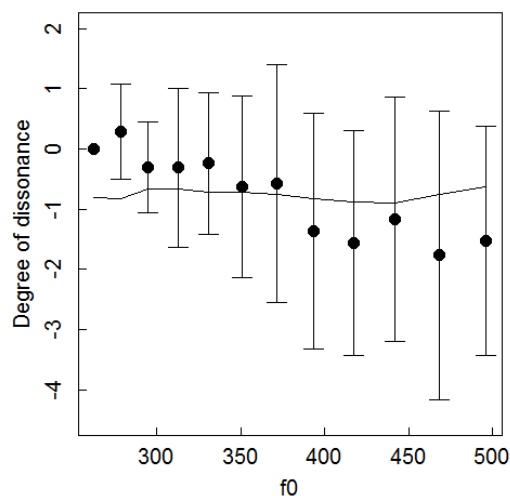


図 3.4 不協和度の測定値と Sethares の推定値

音高の異なる短 2 度音程間で不協和度に差があるか、一元配置分散分析を行ったところ、音高の効果が有意であった [ $F(11, 77) = 3.32, p < .01$ ].

### 3.2.3 考察

図 3.4 から、音高が高くなるほど、不協和度が下がっている(協和度が高くなっている)ことが読み取れる。このことから、同音程でも音高が異なれば不協和度も変化することが分かる。さらに、一対比較で、同音程での不協和感を比較するという微妙な差の比較が可能であるということも明らかになった。

実験 1 は予備実験として行ったが、測定と推定値の相関係数が 0.13 であったことから、加法モデルである Sethares モデルでは、ピアノ音色のような楽音の不協和度は推定できなかったと言える。

この実験 1 で用いた刺激は合成したピアノ音であったが、我々がよく耳にするのは本物のピアノから聴こえるいわゆる生音である。そこで、実験 2 では、実験 1 の刺激音と同様の楽譜生成ソフトである Finale の Garritan を用いて同様の不協和度測定を行う。Garritan は合成した音ではなく、サンプリングした生音を使用している。実験 2 では本実験として Garritan を用いて不協和度測定を行う。

また、聴覚的協和感は文化的背景や音楽経験にあまり依存しない協和感とされている。そこで、実験 2 では、実際に、音楽経験者と音楽非経験者の不協和感知覚に違いがないのかについても検討する。

## 3.3 実験 2

Garritan のサンプリング音源によるピアノ音色を用いた、短 2 度音程の不協和度を測定した。参加者は、音楽の専門知識を持つ音楽経験者と、専門知識を持たない音楽非経験者で、これら 2 群を比較する。

### 3.3.1 方法

#### 3.3.1.1 参加者

正常な聴力を持つ成人男女 14 名(女性 11 名、男性 3 名)が参加した。

そのうち 6 名は信州大学教育学部音楽教育専攻の大学生であり、全員専門的音楽教育(専門的ソルフェージュ教育、和声学習)を経験・現在まで学習中で、最低一つの楽器を 10 年以上経験していた。絶対音感保持者は 3 名であった。

残り 8 名は専門的音楽経験を持たない参加者であった。楽器経験を持つ者は多いが、音楽理論の専門知識を持った者はいなかった。

実験に先立って、参加者には実験内容についてのインフォームドコンセントを行った。説明後、実験同意書にサインをもらい十分な理解を得たのち、音楽経験に関するアンケート

ートと教示を行った。

### 3.3.1.2 刺激

楽音の種類はピアノ音であるが、生成は Make Music 社の Finale 2009 Garritan の “Steinway piano” を用いた。Finale は楽譜作成・作曲ソフトウェアであるが、Garritan はサンプリングした楽音を用いており、実験 1 で用いた合成された楽音よりも実際に我々が聴取する楽音に近い。また、演奏者の特徴や再現性などが問題点にならないメリットがある。

作成した刺激音は短 2 度音程である。音律は実験 1 と同様の平均律で、根音の音高は、 $C^4$  から  $H^4$  までの 1 オクターヴ、用いた各音の基本周波数も実験 1 と同様の表 3.3 の通りである。この  $C^4$  から  $C^5$  までの 13 音を組み合わせて、C&Cis, Cis&D, D&Dis, Dis&E, E&F, F&Fis, Fis&G, G&Gis, Gis&A, A&Ais, Ais&H, H&C の 12 種類の短 2 度音程の WAV ファイルを作成した。量子化精度はすべて 16bit, サンプルレートは 44.1kHz とした。呈示時の音圧は小野測器の積分騒音計 LA-5111 と、B&K の Head and Torso Simulator Type4128 により測定した。

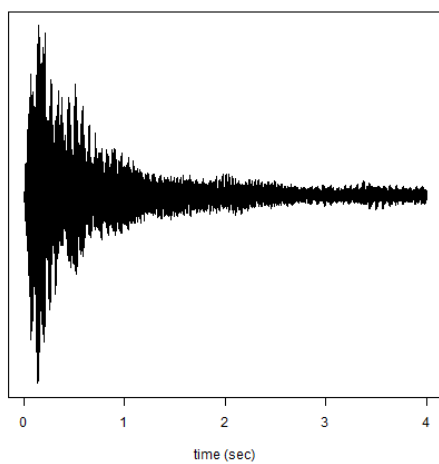
等価騒音レベルは表 3.6 の通りである。

表 3.6 ピアノ音の等価騒音レベル( $L_{Aeq}$ )の平均, 最大レベルおよび最低レベル

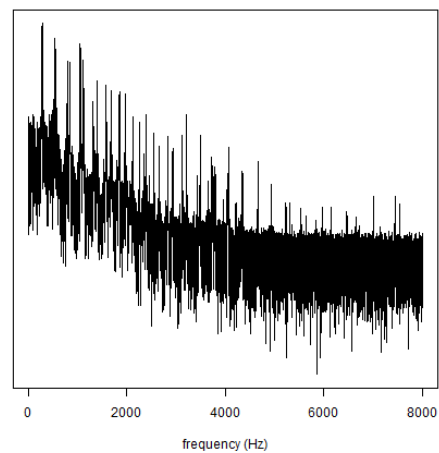
		Piano
minor 2nd ( $L_{Aeq}$ )	Mean	70.1
	Max/ min	74.6/66.6 F&Fis/ Gis&A

刺激の波形、パワースペクトルは図 3.5 の通りである。波形の縦軸は WAV ファイルの波形データに基づく（最大値を 1 とする相対的な）音圧。パワースペクトルの縦軸は WAV ファイルの波形データに基づく対数パワー密度である。全刺激の波形とパワースペクトル、および音圧(等価騒音レベル)は付録を参照されたい。ここでは代表として、各音源の C&Cis と A&Ais の波形とパワースペクトルを示す。

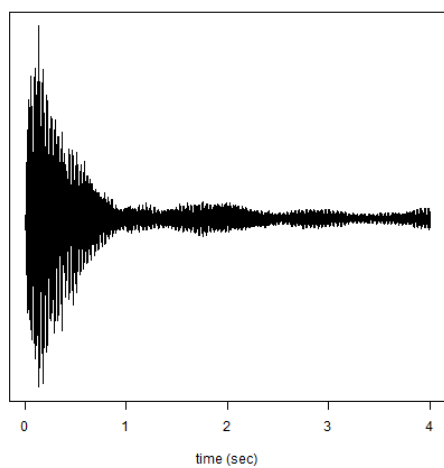
また、音色の特徴として、サンプリングピアノ音色の  $A^4$  単音のパワーがピークとなる周波数とパワーを示す(表 3.7)。



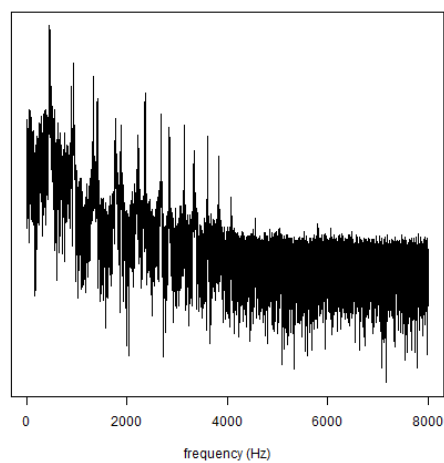
C&Cis 波形



C&Cis パワースペクトル



A&Ais 波形



A&Ais パワースペクトル

図 3.5 ピアノ音源の波形, パワースペクトル

表 3.7 サンプリングピアノ音色の単音 A<sup>4</sup>のパワーがピークとなる周波数とパワー  
(基本周波数におけるパワーを原点とした値)

Frequency (Hz)	Relative power (dB)
40.9	-28.40
97.6	-32.25
365.0	-33.30
439.8	0.00
881.5	-20.86
1322.8	-17.26
1766.6	-31.96
2217.4	-37.70
2672.4	-30.29
3131.8	-34.17
3597.1	-37.70
4077.8	-60.02
4556.9	-66.95
4840.1	-66.43

### 3.3.1.3 手続き，データ解析法

実験の手続きとデータ解析方法は実験 1 と同様である。

### 3.3.2 結果

Bradley-Terry モデルによって各音程の不協和度を参加者ごとに算出した．専門的音楽経験者 7 名中 6 名の各モデルの逸脱度は，自由度 25 の  $\chi^2$  分布の上側 5% 点である 37.7 よりも小さく，残りの 1 名のモデルの逸脱度は自由度 25 の  $\chi^2$  分布の上側 1% 点であるの 44.3 よりも小さかった．専門的音楽経験のない参加者 8 名中 5 名の逸脱度は，自由度 25 の  $\chi^2$  分布の上側 5% 点である 37.7 よりも小さく，2 名のモデルの逸脱度は自由度 25 の  $\chi^2$  分布の上側 1% 点である 44.3 よりも小さかった．残り 1 名のモデルの逸脱度は自由度 25 の  $\chi^2$  分布の上側 1% 点である 44.3 よりも大きかったため，この参加者のデータは以降の分析から除外した．他の参加者に関しては，Bradley-Terry モデルにより不協和度を適切に尺度化できたと考えられる．

音楽経験者，音楽非経験者それぞれの不協和度の測定値および Sethares モデルによる推定値を図 3.6 に示す．縦軸は不協和度，横軸は各音程の根音の基本周波数である．黒い点は参加者ごとに算出した不協和度の平均値，エラーバーは平均値の 95% 信頼区間である．不協和度の測定値は，一対比較の結果に基づくため，原点は任意に定めることができる．ここでは，最も音高が低い C&Cis の不協和度を原点とした．実線は

Sethares モデルによる推定値で、測定値と推定値の相関係数が負の場合は破線で示した。不協和度の推定値を不協和度の測定値に重ねて比較するために、モデルによる推定値が測定値に当てはまるようにスケールと原点を最小二乗法で変換した。測定値と推定値の相関係数が負の場合は、スケールと原点は測定値と重なるよう適当に変換した。音楽経験者の測定値と Sethares モデルによる推定値との相関係数 (Pearson の積率相関係数)は 0.05, 音楽非経験者の測定値と Sethares モデルによる推定値との相関係数は -0.11 であった。

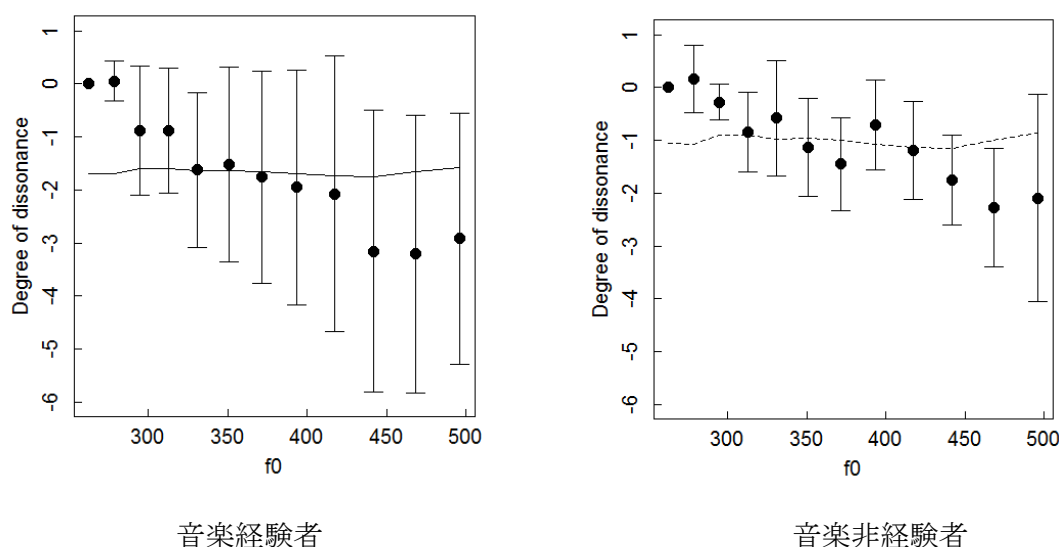


図 3.6 音楽経験者、音楽非経験者の不協和度の測定値と Sethares の推定値

音楽経験(経験あり・なし 2 水準)を被験者間要因、音程 (12 水準)を被験者内要因とする二元配置分散分析を行った。

経験の有無の主効果は有意でなく [ $F(1,11) = 1.03, p > .10$ ], 音程要因の主効果は有意であった [ $F(11,121) = 13.03, p < .001$ ]. また, 経験要因と音程要因の交互作用は, 有意ではなかった [ $F(11,121) = 0.87, p > .10$ ]. また, 音楽経験者と音楽非経験者の不協和度の測定値の相関係数は  $0.93(p < .001)$  であった。

経験要因の主効果が有意ではなかったため, 経験の有無によって参加者を分けずに全参加者の不協和度の平均値とその 95%信頼区間を示す(図 3.7). 測定値と Sethares の推定値との相関係数は -0.03 であった。



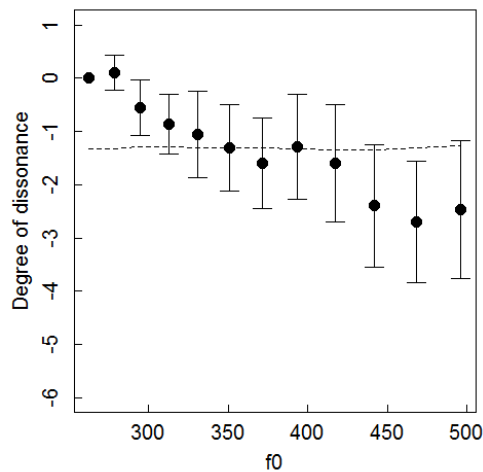


図 3.7 全参加者の不協和度の測定値と Sethares の推定値

### 3.3.3 考察

専門的音楽知識を持つ参加者と持たない参加者による実験を行ったが、経験による協和度の差はなかった。聴覚的協和感は音楽経験にあまり依存しないという先行研究の知見が、1 オクターヴ内の音高の異なる短2度音程という、不協和度の差が小さい場合においても同様に成り立つことが示された。

また、実験1の結果と同様に、Sethares モデルでは不協和度を推定できなかった。生音に近い音源であっても、ピアノ音色の不協和度は、加法モデルでは推定することができないことが確認された。

ただし、この実験では刺激をグループに分割した不完全比較により、比較回数を大幅に減らしており、先行研究の手続きとは異なる。そこで、分割しない完全な一対比較を行い、実験2における分割する手続きに問題がなかったことを実験3で確認する。

## 3.4 実験3

実験2では、参加者の負担を減らすために協和感が近い音程同士のみ比較することで、試行数を減らして測定を行ってきた。しかし、先行研究のように完全な比較を行わなかったことにより結果が変わった可能性がある。そこで、刺激をグループに分割せず、完全な比較を行い、実験2の結果と比較した。

### 3.4.1 方法

#### 3.4.1.1 参加者

正常な聴力を持つ男女6名(男性4名、女性2名)が参加した。それぞれ鍵盤楽器や管楽器などの楽器演奏経験はあったが、専門的音楽教育を受けた参加者はいなかった。

実験に先立って、参加者には実験内容についてのインフォームドコンセントを行った。説明後、実験同意書にサインをもらい十分な理解を得たのち、音楽経験に関するアンケートと教示を行った。

#### 3.4.1.2 刺激

刺激は実験 2 と同様の Garritan のサンプリング音源による “Steinway piano” のピアノ音色の短 2 度である。

#### 3.4.1.3 手続き、データ解析法

実験の手続きとデータ解析方法は実験 2 と同様である。ただし、刺激をグループに分割しない完全な一対比較である。呈示順序を考慮して、 $12 \times 11 = 132$  通りの刺激対を各 1 回比較した。不協和度の算出は参加者ごとでなく、参加者全員のデータを統合して行った。

### 3.4.2 結果

Bradley-Terry モデルが不協和度を尺度化できたか確認するために逸脱度を用いた。逸脱度は、48.1 で、自由度 55 の  $\chi^2$  分布の上側 5% 点の 73.31 よりも小さかったので、Bradley-Terry モデルにより不協和度を適切に尺度化できたと考えられる。

不協和度の測定値 Sethares モデルによる推定値を図 3.8 に示す。縦軸は不協和度、横軸は各音程の根音の基本周波数である。黒い点は実験によって得られた測定値、エラーバーは Bradley-Terry モデルにより算出した不協和度の 95% 信頼区間である。実線は Sethares モデルによる推定値で、測定値と推定値の相関係数が負の場合は破線で示した。不協和度の測定値と Sethares モデルとの相関係数 (Pearson の積率相関係数) は 0.13 であった。

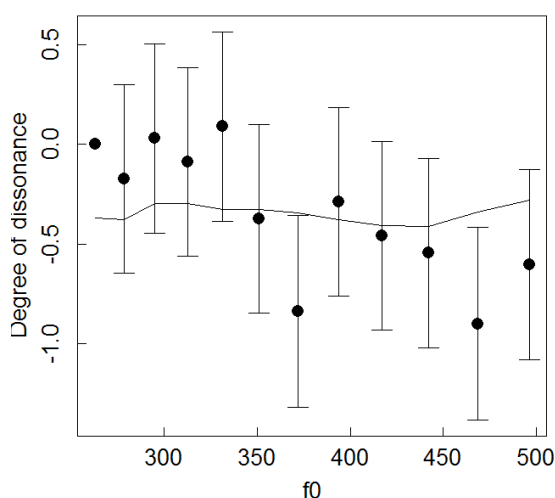


図 3.8 完全比較した不協和度の測定値と Sethares モデルの推定値

実験 2 の欠測がある場合の不協和度と、実験 3 の完全な比較をした場合の不協和度の相関係数は 0.80 ( $p < .01$ )であった。

### 3.4.3 考察

刺激をグループに分割しない完全な一対比較を行っても、実験 2 と同様に、ピアノ音の短 2 度音程の不協和度を Sethares モデルでは推定できなかった。また、実験 2 の欠測がある場合の不協和度と、実験 3 の完全な一対比較をした場合の不協和度の相関係数は 0.80 あったことから、刺激をグループに分割して測定した実験 2 の結果の妥当性が確認できた。すなわち、実験 2 でも、実験 3 でも、加法モデルである Sethares モデルはピアノ音色の不協和度を推定できなかったと言える。

加法モデルは音程の不協和度を dyad の不協和度の和として算出していた。これらのモデルは、基本周波数とその倍音のみで構成されている静的(static)な音程の不協和度を推定することができた。しかし、これらのモデルを楽音に適用しても同様に推定することができるという報告はこれまでになかった。Kameoka and Kuriyagawa (1969b) は、彼らのモデルは時間情報を扱わないので、振幅変動や連続スペクトルを含む楽音は取り扱えないと述べている。ピアノ音は振幅が時間的に変化するので、加法モデルである Sethares モデルで不協和度を推定できなかったのはある意味当然である。しかし、楽音の特徴は振幅変動だけではなく、非調和成分を多く含むことも挙げられる。加法モデルにおける非調和成分の扱いに関しては、モデルの開発者は言及していないが、不協和感知覚において、非調和成分が加法モデルの仮定しない影響を与える可能性がある。

また、実験 1～3 では、不協和度を測定しやすいと考えられたため短 2 度音程を用いたが、協和音程でも同様の結果に成り得るかは明らかとなっていない。また、ピアノ音は音圧の時 g 間的变化が大きいいため、加法モデルでは推定が難しかった可能性も考えられる。時間的变化があまりない楽音では、加法モデルで不協和度を推定できる可能性もある。これについては、次章で検討する。

## 第4章 多様な音色，音程の協和感知覚

### 4.1 実験4

第3章において，短2度音程のピアノ音の不協和度測定実験を行った．その結果，楽音であるピアノ音では不協和度を推定できなかった．しかし，最不協和である短2度音程以外の音程でも同様の結果となるかは明らかとなっていない．また，ピアノ音は発音時が最も音圧が強くすぐに減衰していく，時間変化が大きいという特性を持つ音である．音圧の変化が大きくない楽音でも同様の結果となるかも確かめる必要がある．さらに，協和感研究の実験で対象とされてきた単純な複合音において，音高の異なる同一音程で不協和度に差が出るかを確かめる必要がある．そこで，不協和音である短2度音程に加え，協和音程である完全5度音程についても不協和度を測定した．音色については音圧の減衰が速いピアノ音源に加え，音圧の変化の比較的小さいオルガン音源，12種類の周波数の純音からなる単純な複合音の不協和度を測定した．

加法モデルでは，成分数が多く，振幅が時間に伴い変動する楽音のような複雑な音の不協和度を高精度で予測できたという報告はない．楽音のような複雑な音の不協和感を予測できない理由として，Kameoka and Kuriyagawa (1969b)が述べているように，加法モデルは音の振幅スペクトルのみから不協和度を推定しているので，振幅変動を扱うことができないことが挙げられる．加法モデルの実験で用いられた複合音と楽音には成分数と時間変化のほかにも重要な違いがある．加法モデルの実験で用いられた単純な成分による音程において各成分が強く干渉するのは臨界帯域内に収まる隣接する1成分のみで，他の成分は臨界帯域幅程度かそれ以上離れているためあまり干渉しない(図4.1)．

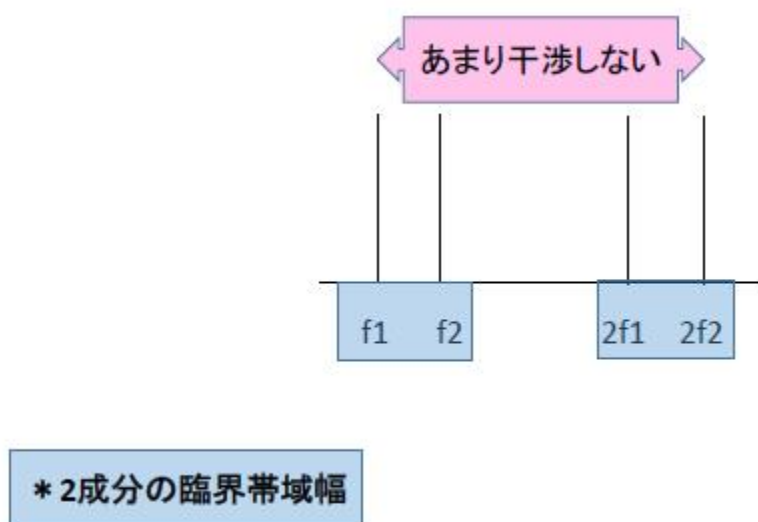


図 4.1 単純な複合音における成分間の干渉

第3章の実験2, 3で用いたピアノ音色のような多くの成分を持つ音は、非調和成分も多く含んでいるため、臨界帯域内にも3成分以上が同時に存在する。そのような場合、蝸牛基底膜においてさらに複雑な干渉が生じ、複合音の不協和度は各 dyad の不協和度の単純加算であるという加法モデルの仮定が成り立たなくなる可能性がある。

そこで、従来の研究が対象にしてきた離散で静的な音である12成分複合音と、時間変化が少ない楽音としてオルガン音色に加え、離散的で静的な音であるが臨界帯域内に3成分が同時に存在している複合音を用いてそれぞれの不協和度の測定を行った。

#### 4.1.1 方法

##### 4.1.1.1 参加者

68名の男女が実験に参加した。参加者の平均年齢は21.8歳、標準偏差は6.22であった。全員が正常な聴力を有した。また、専門的音楽教育(専門的ソルフェージュ教育、和声学習)を受けた者はいなかった。絶対音感所有者は3名であった。参加者の中には複数条件に参加した者もいた。

参加者数は、短2度の12成分複合音は22名、ピアノ音源は24名、オルガン音源は25名、完全5度の12成分複合音は24名、ピアノ音源は23名、オルガン音源は22名、3成分複合音は24名であった。

実験に先立って、参加者には実験内容についてのインフォームドコンセントを行った。説明後、実験同意書にサインをもらい十分な理解を得たのち、音楽経験に関するアンケートと教示を行った。

##### 4.1.1.2 刺激

作成した音程は短2度と完全5度音程である。完全5度は、比較のため、ピアノ音と12成分複合音も用いた。時間的变化があまりない楽音として新たにオルガン音、3成分複合音も作成した。

12成分複合音、3成分複合音は Scilab で生成した。ピアノ音、オルガン音は、Make Music 社の Finale 2009 Garritan を用いた。ピアノ音色は“Steinway piano”，オルガン音色は“hauptwerk all stops”である。このオルガン音色は、聴いた限りではフルー管+リード管+4+8+16フィート管のストップが選択されているようであるが、ピークを確認した結果、5度管も鳴っていることが分かった。Finale は楽譜作成・作曲ツールソフトであるが、Garritan はサンプリングした楽音を用いており、シンセサイザなどによる合成された楽音よりも実際に我々が聴取する楽音に近いと言える。また、演奏者の特徴や再現性などが問題点にならないというメリットがある。

音律は平均律、根音の音高は、C<sup>4</sup>からH<sup>4</sup>までの1オクターヴで、用いた各音の基本周波数は、表4.1の通りである。

表 4.1 実験で用いた刺激音の各音の基本周波数

Pitch	Frequency(Hz)	Pitch	Frequency(Hz)
C <sup>4</sup>	262.82	A# <sup>4</sup>	468.28
C# <sup>4</sup>	278.44	H <sup>4</sup>	496.13
D <sup>4</sup>	295.00	C <sup>5</sup>	525.63
D# <sup>4</sup>	312.54	C# <sup>5</sup>	556.89
E <sup>4</sup>	331.13	D <sup>5</sup>	590.00
F <sup>4</sup>	350.82	D# <sup>5</sup>	625.08
F# <sup>4</sup>	371.68	E <sup>5</sup>	662.25
G <sup>4</sup>	393.78	F <sup>5</sup>	701.64
G# <sup>4</sup>	417.19	F# <sup>5</sup>	743.36
A <sup>4</sup>	442.00		

短 2 度音程は、この C<sup>4</sup> から C<sup>5</sup> までの 13 音を組み合わせ、C&Cis, Cis&D , D&Dis, Dis&E, E&F, F&Fis, Fis&G , G&Gis, Gis&A, A&Ais, Ais&H , H&C の 12 種類の短 2 度音程の WAV ファイルを作成した。量子化精度はすべて 16bit, サンプルレートは 44.1KHz とした。

完全 5 度音程のピアノ音源, オルガン音源, 12 成分複合音の音律も平均律, 音高は C<sup>4</sup> から F#<sup>5</sup> までの音を用いた。各音の組み合わせは、C&G, Cis&Gis , D&A, Dis&Ais, E&H, F&C, Fis&Cis , G&D, Gis&Dis, A&E, Ais&Eis, H&Fis の 12 種類の完全 5 度音程の WAV ファイルを作成した。量子化精度, サンプルレートは短 2 度音程と同じとした。

3 成分複合音の音高は、350.82Hz(平均律における f<sup>1</sup>), 371.68Hz(平均律における F#<sup>1</sup>) を固定の 2 音とし、その 2 音に重ねる 3 音目を 12 音設定して合計 12 種類の 3 音を組み合わせた。3 音目の周波数は、350.82Hz と 371.68Hz の中心周波数である 361.1Hz から上下約 50Hz までの間の周波数とし、それぞれ 10Hz ずつの間隔とした(図 4.2)。

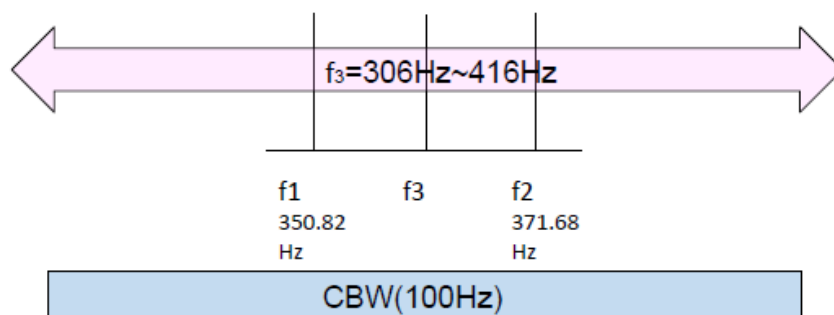


図 4.2 3 成分複合音

CBW は臨界帯域幅を表し，その幅は 100Hz (Zwicker, Flottorp and Stevens, 1957) ~ 60Hz (Glasberg and Moore, 1990)である

これは，これら 2 音の周波数帯域における臨界帯域幅が，100Hz (Zwicker, Flottorp and Stevens, 1957) ~ 60Hz (Glasberg and Moore, 1990)であることを考慮し，臨界帯域内の周波数同士の影響をより明確に比較できると考えたからである．3 音目の周波数は低い方から，306, 316, 326, 336, 346, 356, 366, 376, 386, 396, 406, 416(Hz)とした．これらの純音を組み合わせ，12 種類の 3 成分複合音の WAV ファイルを作成した．量子化精度，サンプルレートは短 2 度音程，完全 5 度音程と同じとした．

呈示時の音圧は小野測器の積分騒音計 LA-5111 と，B&K の Head and Torso Simulator Type4128 により測定した．等価騒音レベルは，表 4.2 の通りである．

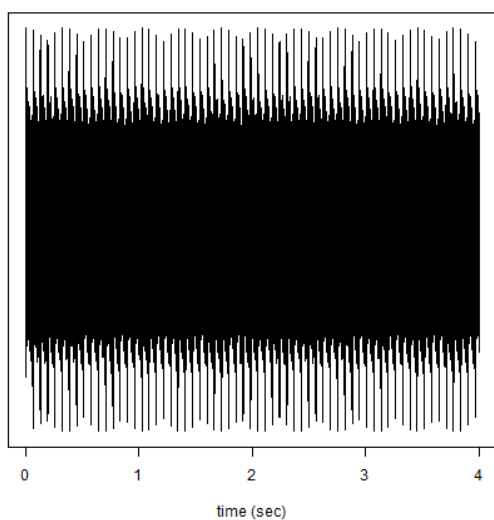
表 4.2 各刺激音の等価騒音レベル( $L_{Aeq}$ )の平均, 最大レベルおよび最低レベル

		Pure tone	piano	organ
Minor 2nd ( $L_{Aeq}$ )	Mean	64.9	70.1	56.1
	Max/ min	66.0/62.9 H&C/ C&Cis	74.6/66.6 F&Fis/ Gis&A	58.4/52.7 A&Ais/ Cis&D
Perfect 5th ( $L_{Aeq}$ )	Mean	50.6	47.5	58.1
	max/ min	51.2/50.1 C&G/ G&D	51.3/44.5 Dis&Ais/ D&A	60.1/55.5 A&E/ D&A
3 com ponent ( $L_{Aeq}$ )	Mean	61.2		
	max/ min	63.4/59.8 416/316		

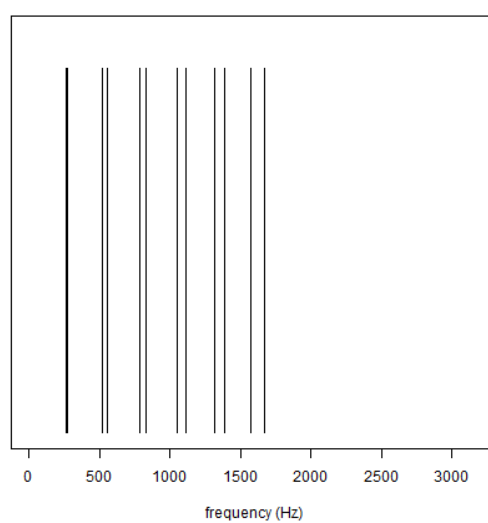
各音源の波形, パワースペクトルは図 4.3 の通りである. 波形の縦軸は WAV ファイルの波形データに基づく (最大値を 1 とする相対的な) 音圧. パワースペクトルの縦軸は WAV ファイルの波形データに基づく対数パワー密度である. 全刺激の波形とパワースペクトル, および音圧(等価騒音レベル)は付録を参照されたい. ここでは代表として, 各音源の C&Cis と A&Ais の波形とパワースペクトルを示す(図 4.3).

また, 各音色の特徴として, 各音色の単音 A<sup>4</sup> のパワーがピークとなる周波数とそのパワーを示す(表 4.3).

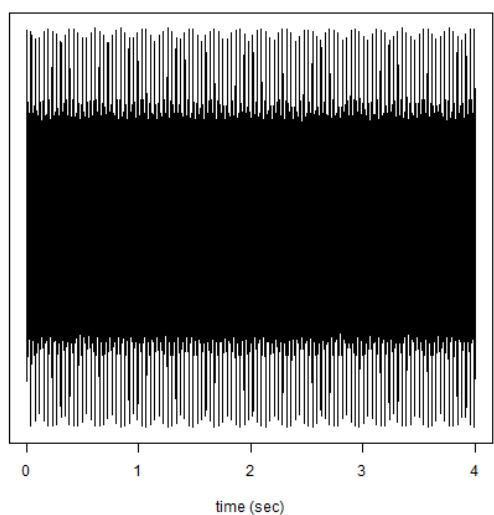




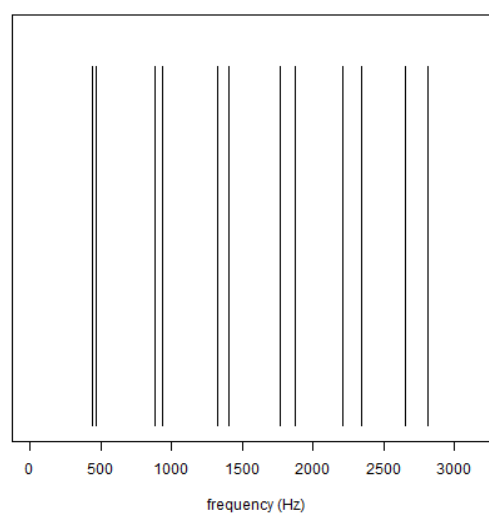
短 2 度 12 成分複合音 C&Cis 波形



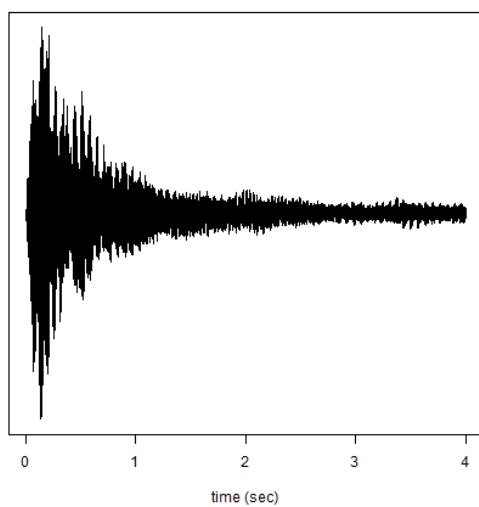
パワースペクトル



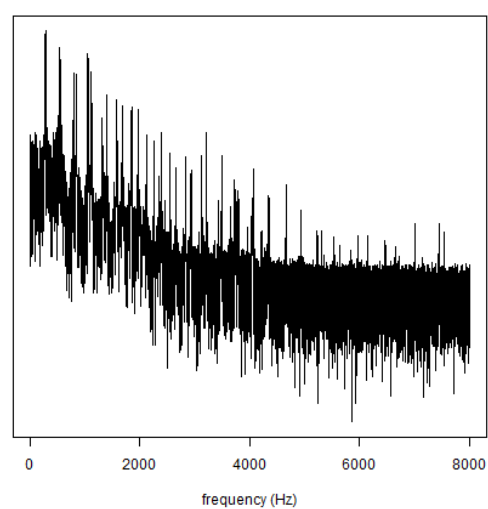
短 2 度 12 成分複合音 A&Ais 波形



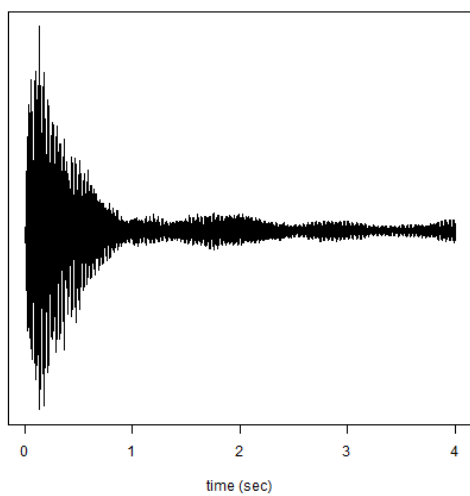
パワースペクトル



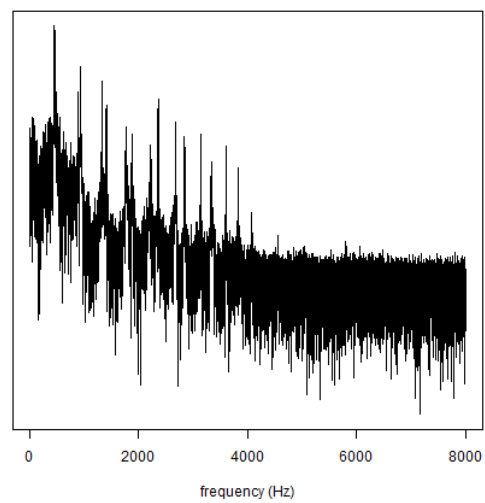
短 2 度ピアノ音 C&Cis 波形



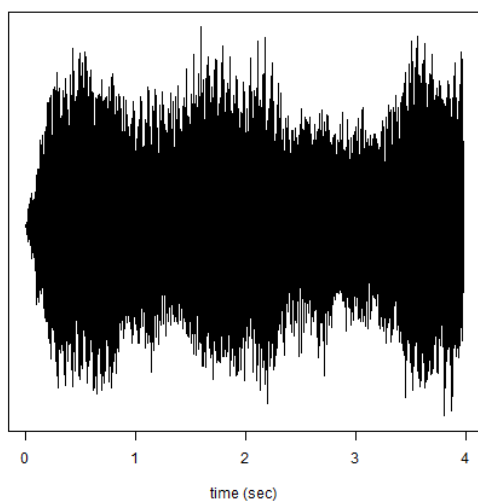
パワースペクトル



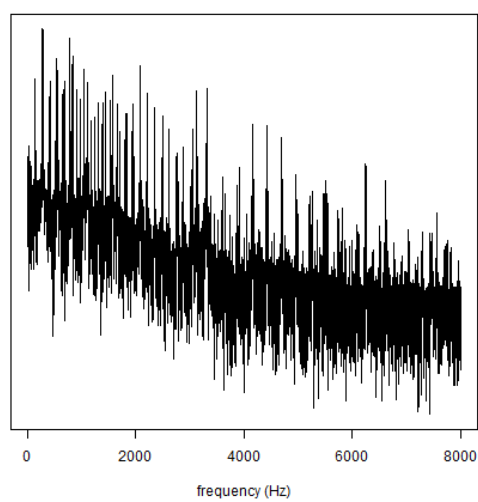
短 2 度ピアノ音 A&Ais 波形



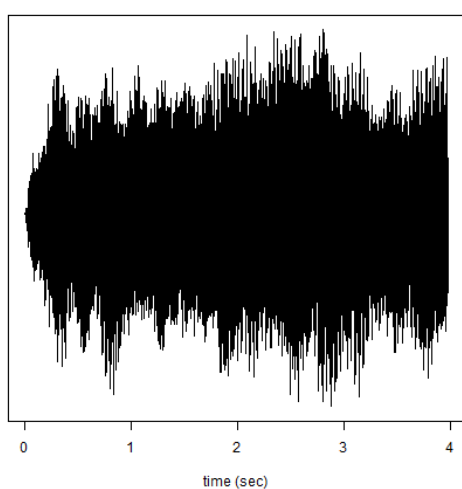
パワースペクトル



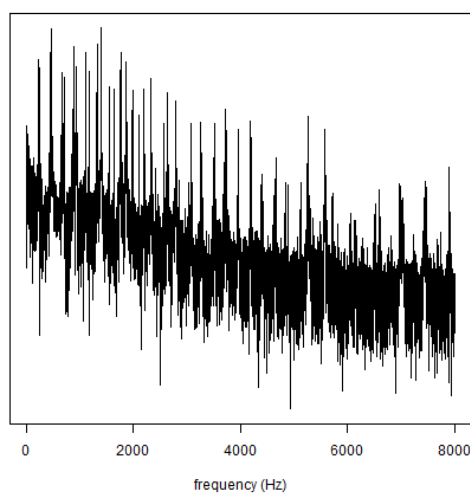
短 2 度オルガン音 C&Cis 波形



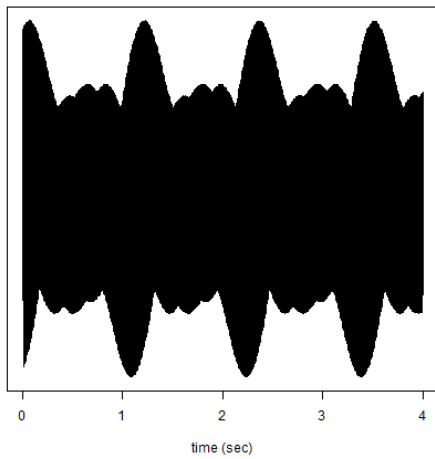
パワースペクトル



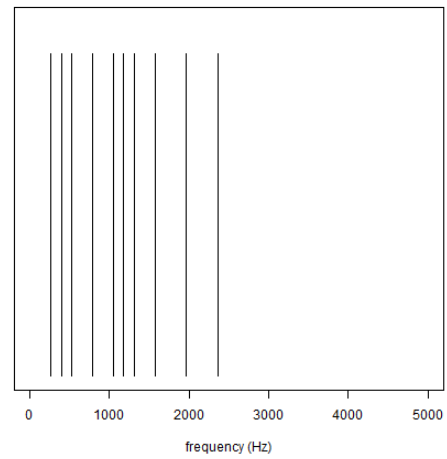
短 2 度オルガン音 A&Ais 波形



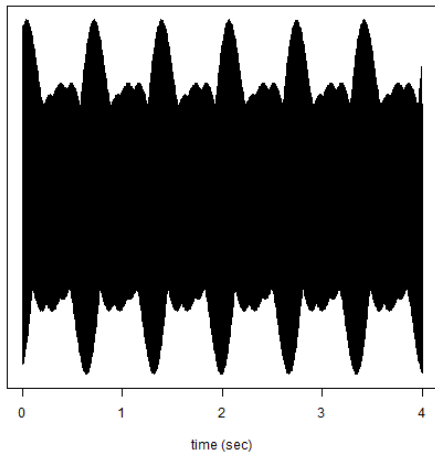
パワースペクトル



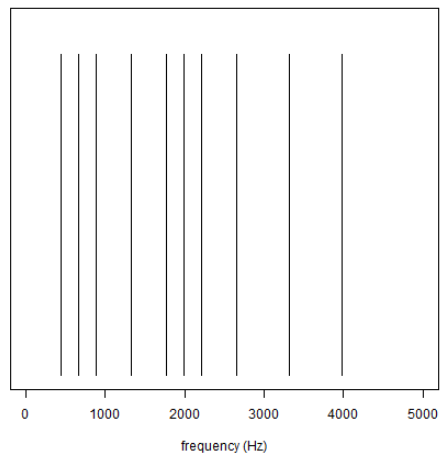
完全 5 度 12 成分複合音 C&G 波形



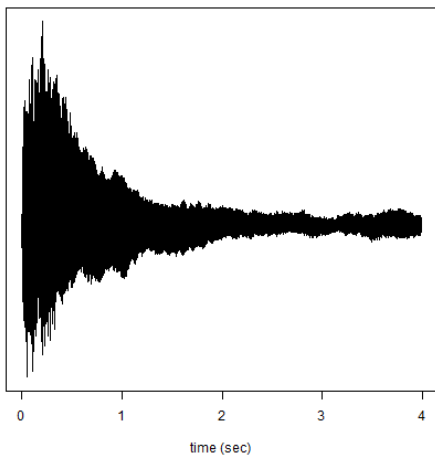
パワースペクトル



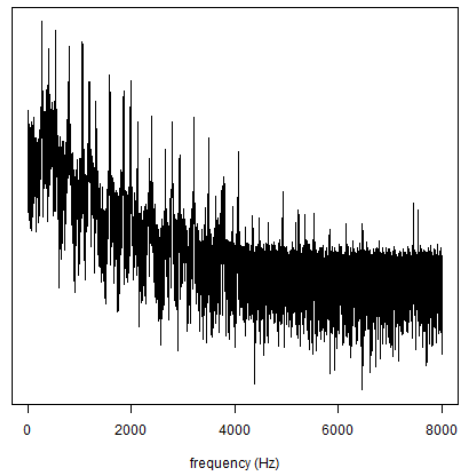
完全 5 度 12 成分複合音 A&E 波形



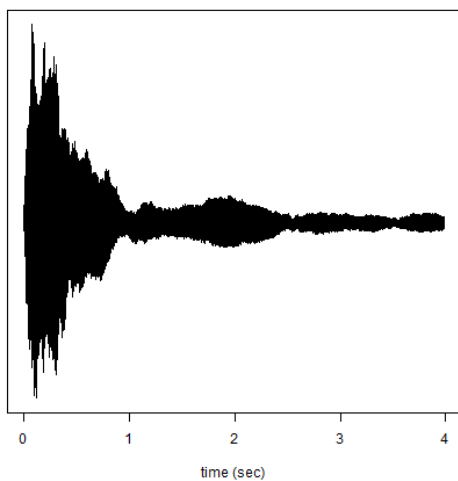
パワースペクトル



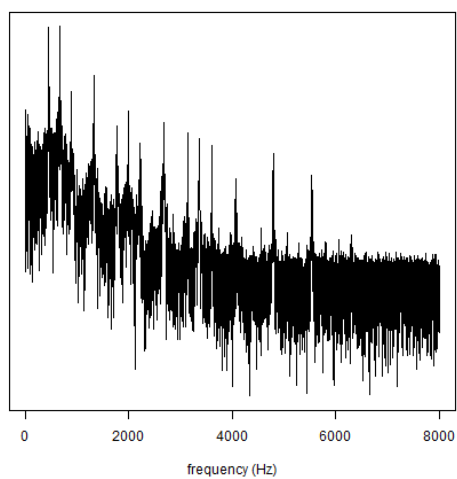
完全 5 度ピアノ音 C&G 波形



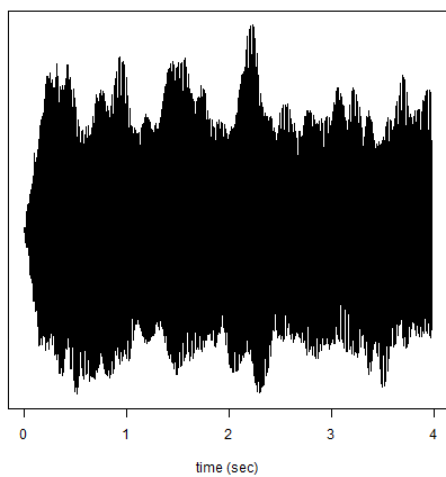
パワースペクトル



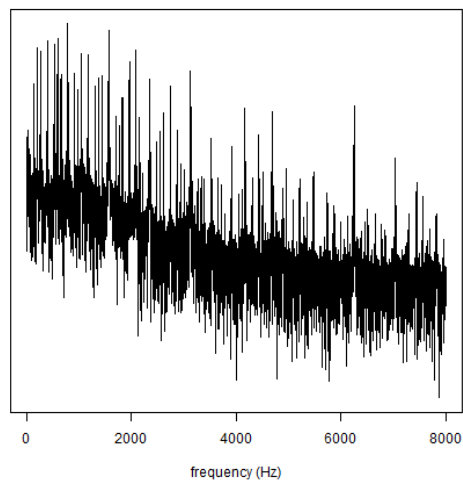
完全5度ピアノ音 A&E 波形



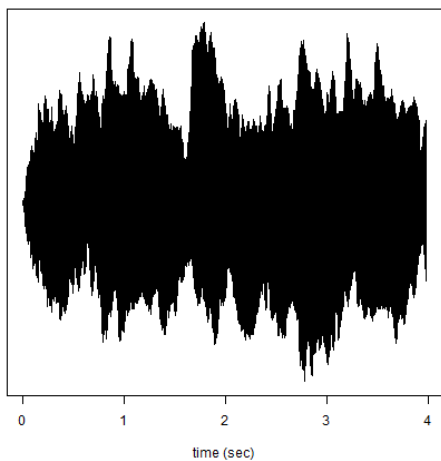
パワースペクトル



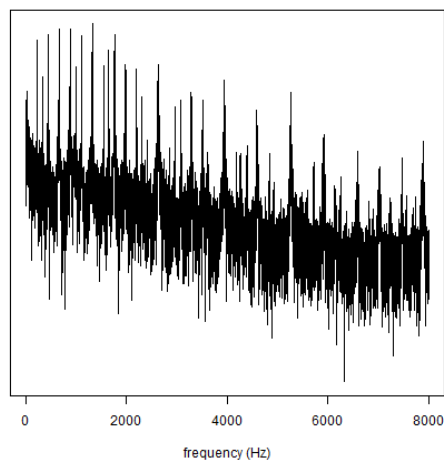
完全5度オルガン音 C&G 波形



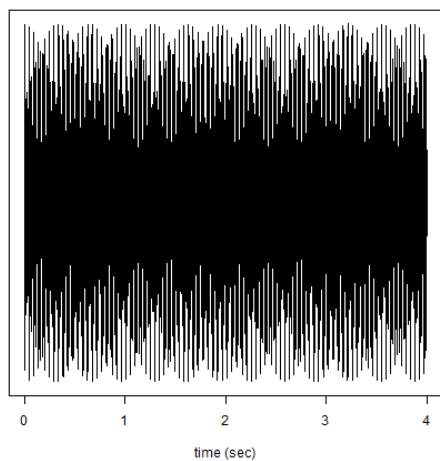
パワースペクトル



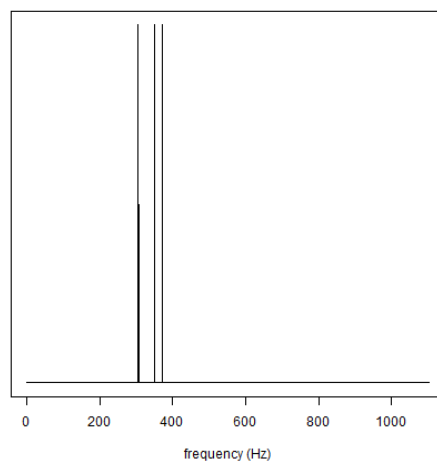
完全5度オルガン音 A&E 波形



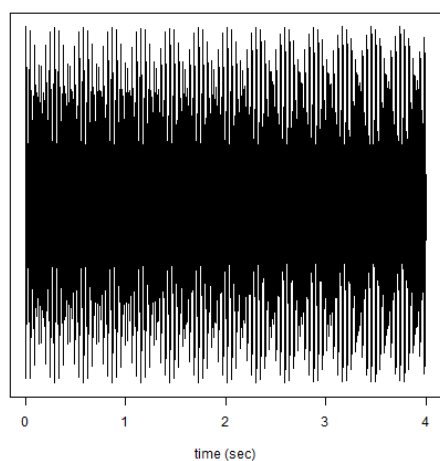
パワースペクトル



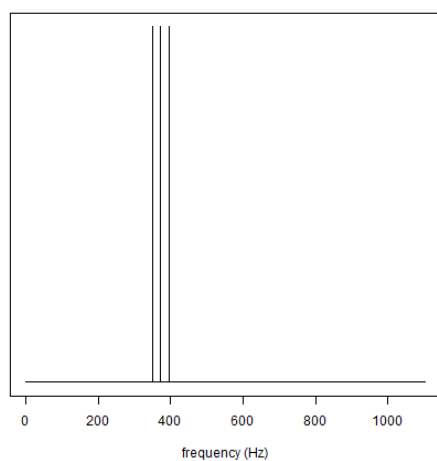
3 成分複合音 306Hz 波形



パワースペクトル



3 成分複合音 396Hz 波形



パワースペクトル

図 4.3 各音源の波形, パワースペクトル

表 4.3 (a)ピアノ音色 (b) オルガン音色の単音 A<sup>4</sup> のパワーがピークとなる周波数とパワー（基本周波数におけるパワーを原点とした値）

(a)

Frequency (Hz)	Relative power (dB)
40.9	-28.40
97.6	-32.25
365.0	-33.30
439.8	0.00
881.5	-20.86
1322.8	-17.26
1766.6	-31.96
2217.4	-37.70
2672.4	-30.29
3131.8	-34.17
3597.1	-37.70
4077.8	-60.02
4556.9	-66.95
4840.1	-66.43

(b)

Frequency (Hz)	Relative power (dB)
220.0	-4.38
439.5	0.00
659.8	-8.02
876.1	0.95
1099.6	-1.93
1316.4	0.04
1539.4	-10.79
1757.9	-0.82
1979.2	-12.94
2197.7	-14.09
2638.0	-14.43
3077.5	-25.29
3511.1	-24.41
4178.7	-46.66
4390.6	-41.89
4833.2	-43.65
5264.4	-30.43

#### 4.1.1.3 手続き

参加者は最初に協和的な音，不協和的な音の判断の基本的教示を受けた．協和・不協和という言葉に対する認識は，特に音楽経験がない参加者の場合，個人差が大きいと思われるため，Kameoka and Kuriyagawa(1960a)に倣い比較的共通認識を持ちやすい「澄んだ (clearness)」・「濁った (turbidity)」という言葉で判断した．また，教示では，実験で用いたような同音程同士の微妙な判定をするのではなく，あくまで協和・不協和の概念を理解するため，音楽的協和と不協和のサンプルを聴取した．サンプルは，協和(澄んだ)として，オクターヴ(完全 8 度)および完全 5 度の完全協和音程，不協和(濁った)として長 7 度と長 2 度の不協和音程が呈示された．サンプル音を含め，すべての刺激はヘッドフォンで呈示された．

教示後，5 回の練習試行を経て，不協和度の測定を実施した．測定は一対比較法で行った．12 種類の音程を対にし，呈示順序を考慮し 132 回の比較を行った．刺激はランダムな順で呈示され，前刺激の影響を防ぐために各刺激呈示前に桃色雑音(PN; pink noise)が挿入された．各試行は桃色雑音 500ms, interval 100ms, 先行刺激 4000ms, inter stimulus interval 500ms, 桃色雑音 500ms, interval 100ms, 後続刺激 4000ms, 協和性判断の順で呈示された．inter trial interval は 100ms とした(図 4.4)．刺激呈示後，モニタに「より澄んでいたのは 1) 前 2) 後」という指示が表示される．この指示に従い，より澄んでいると感じた刺激が先行刺激であったと感じた場合は数字キーの 1 を，後続刺激であったと感じた場合は数字キーの 2 を押すという形で反応を記録した．

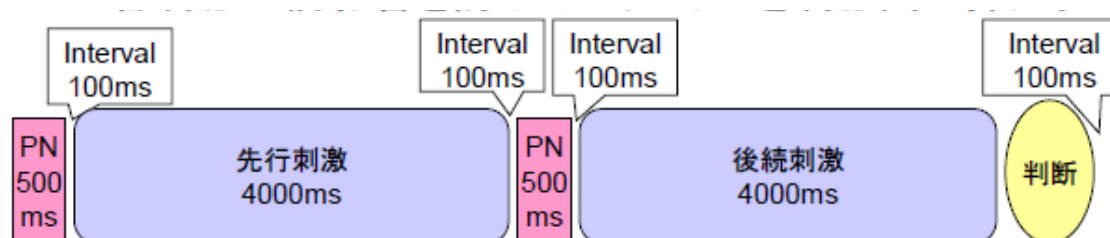


図 4.4 刺激音の提示順

#### 4.1.1.4 データ解析法

一対比較法で直接比較した 12 種類の刺激ごとに，すなわち音色，音程ごとに，Bradley-Terry モデルにより不協和度の尺度化を行った．実験 3 と同様に，参加者全員のデータを統合して不協和度を算出した．

#### 4.1.2 結果

Bradley-Terry モデルが不協和度を尺度化できたか確認するために逸脱度を用いた．

短 2 度音程の 12 成分複合音, 短 2 度音程のピアノ音源, 短 2 度音程のオルガン音源, 3 成分複合音, 完全 5 度音程の 12 成分複合音, 完全 5 度音程のピアノ音源, および完全 5 度音程のオルガン音源の逸脱度は, 各々 66.09, 73.17, 55.65, 65.19, 49.15, 55.43 および 43.76 であった. それらは, 自由度 55 の  $\chi^2$  分布の上側 5% 点の 73.3 より小さかった. したがって, Bradley-Terry モデルにより不協和度を適切に尺度化できたと考えられる.

Sethares (2005) のモデルによる不協和度の推定値を不協和度の測定値に重ねて比較するために, モデルによる推定値が測定値に当てはまるようにスケールと原点を最小二乗法で変換した. 相関係数が負の場合は破線でプロットした. 測定値と推定値の相関係数が負の場合は, 比較しやすいようにスケールと原点を適当に変換した.

各音源における不協和度の測定値と推定値を図 4.5 に示す. 縦軸は不協和度, 横軸は各音程の根音の基本周波数である. 黒い点は実験によって得られた測定値, エラーバーは Bradley-Terry モデルにより算出した不協和度の 95% 信頼区間である. 不協和度の測定値は, 一対比較の結果に基づくため, 原点は任意に定めることができる. ここでは, 最も音高が低い刺激の不協和度を原点とした. 実線は Sethares モデルによる推定値で, 測定値と推定値の相関係数が負の場合は破線で示した.

一対比較法で直接比較していない刺激間の不協和度の大小は比較できない. 例えば, 各音色, 各音程の 12 種類の刺激の中で最も音高が低い刺激の不協和度は 0 であるが, これらの刺激の不協和度が等しい訳ではない. ただし, 不協和度の差は意味を持つ. 例えば, 表 4.4 に示すように, 同じ短 2 度音程でも, ピアノ音の 12 種類の不協和度の標準偏差は 0.444 であるのに対して, オルガン音の 12 種類の不協和度の標準偏差は 0.314 で, ピアノ音のほうが不協和度のばらつきが大きい.

短 2 度音程の 12 成分複合音における Sethares のモデルによる不協和度の推定値は, 測定値との相関係数(Pearson の積率相関係数)が 0.80 ( $p < .01$ ), root mean square error (RMSE) は 0.21 で測定値の 95% 信頼区間の平均 0.25 より小さかった. Kameoka and Kuriyagawa (1969ab) のモデルによる推定値も, 測定値との相関係数, RMSE は同じであった. Hutchinson and Knopoff (1977, 1978) のモデル<sup>11</sup>による推定値と測定値との相関係数は 0.77 ( $p < .01$ ), RMSE は 0.22 で測定値の 95% 信頼区間の平均 0.25 より小さかった. 先行研究で用いられているような疎で静的な音による音程に関しては, 不協和度の差が比較的小さい音高が異なる短 2 度音程間でも, 不協和度を比較的良好に推定することができた. しかし, 短 2 度音程のピアノ音源の Sethares のモデルによる推定値と測定値の相関係数は 0.22, RMSE は 0.42 で, 測定値の 95% 信頼区間の平均 0.25 より大きく, 不協和度をよく推定できなかった. 同様に, 短 2 度音程のオルガン音源の Sethares モデルによる推定値と測定値の相関係数は 0.08, RMSE は 0.30 で測定値の 95% 信頼区間の平均 0.25 より大きく, 不協和度を推定できなかった. 振幅変動が大きい楽音には, Sethares モデルは当てはまらなかったと考えられる.

<sup>11</sup>実装は, Mashinter (2006)に基づく.



完全 5 度音程の 12 成分複合音における, Sethares のモデルによる不協和度の推定値と測定値の相関係数は-0.42 であった. また, Kameoka and Kuriyagawa モデルによる推定値と測定値の相関係数は-0.34, Hutchinson and Knopoff モデルによる推定値と測定値の相関係数も-0.39 であった. 完全 5 度音程の 12 成分複合音は先行研究で用いられる疎で静的な音程であったが, これらのモデルでは不協和度を推定できなかった. これは表 4.4 の 12 個の音程の不協和度のばらつきを示す標準偏差を見ると分かるように, 完全 5 度の 12 成分複合音の 12 種類の音程の不協和度の差が, 短 2 度音程の 12 成分複合音の 12 種類の音程の不協和度の差より小さいことによると考えられる. 完全 5 度の 12 成分複合音の 12 種類の音程の不協和度の測定値の標準偏差は 0.126 で, 短 2 度の 12 成分複合音の不協和度の測定値の標準偏差 0.362 の 0.35 倍にしかならなかった. また, 最も不協和度の高い E&H を基準とした時でも, 不協和度が有意になるのは C&G のみであった. さらに, Sethares のモデルによる, 完全 5 度の 12 成分複合音の 12 種類の音程の不協和度の推定値の標準偏差は, 短 2 度の 12 成分複合音の 12 種類の音程の不協和度の推定値の標準偏差の 0.16 倍にしかならなかった.

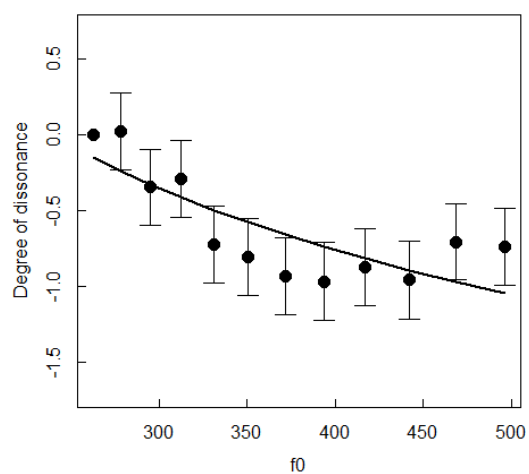
完全 5 度音程のピアノ音源の測定値と Sethares の理論値との相関係数は-0.10 で, やはり不協和度を推定できなかった.

完全 5 度音程のオルガン音源の Sethares のモデルによる推定値と測定値の相関係数は 0.18, RMSE は 0.25 で, 測定値の 95%信頼区間の平均 0.25 と同じで, やはり不協和度を推定できなかった.

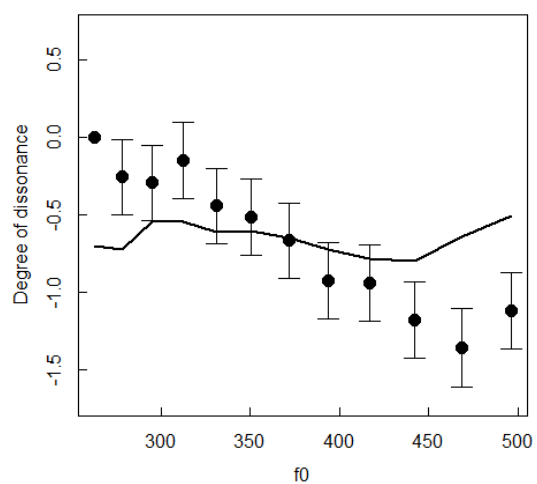
3 成分複合音の測定値と Sethares のモデルによる推定値との相関係数は 0.42, RMSE の値は 0.44 で, 測定値の 95%信頼区間の平均 0.25 より大きく, 不協和度をよく推定できなかった. Kameoka and Kuriyagawa のモデルによる推定値と測定値の相関係数は-0.13, Hutchinson and Knopoff のモデルによる推定値と測定値の相関係数は-0.21 で, これらのモデルでも 3 成分複合音の不協和度を推定できなかった.

表 4.4 各刺激音の不協和度の標準偏差、95%信頼区間

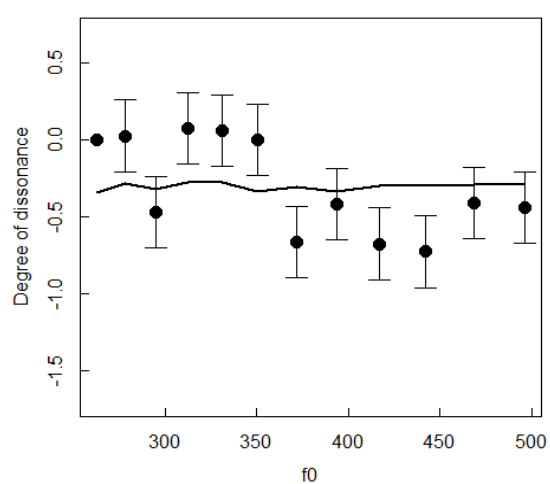
Interval	SD	Mean 95%-CI
Minor 2nd 12 component complex tones	<i>0.362</i>	<i>0.25</i>
Minor 2nd piano tone	<i>0.444</i>	<i>0.25</i>
Minor 2nd organ tones	<i>0.314</i>	<i>0.23</i>
3 component complex tones	<i>0.508</i>	<i>0.24</i>
Perfect 5th 12 component complex tones	<i>0.126</i>	<i>0.23</i>
Perfect 5th piano tones	<i>0.403</i>	<i>0.24</i>
Perfect 5th organ tones	<i>0.267</i>	<i>0.24</i>



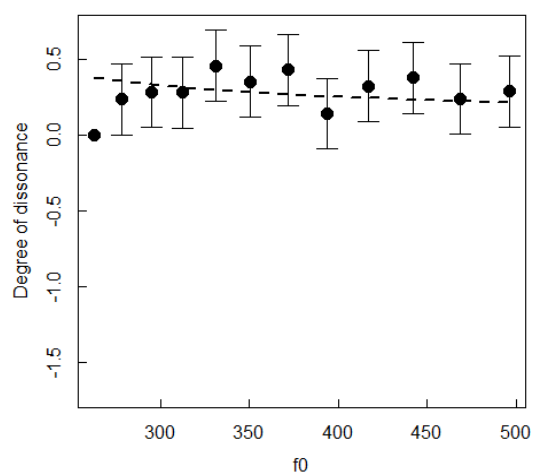
短 2 度 12 成分複合音



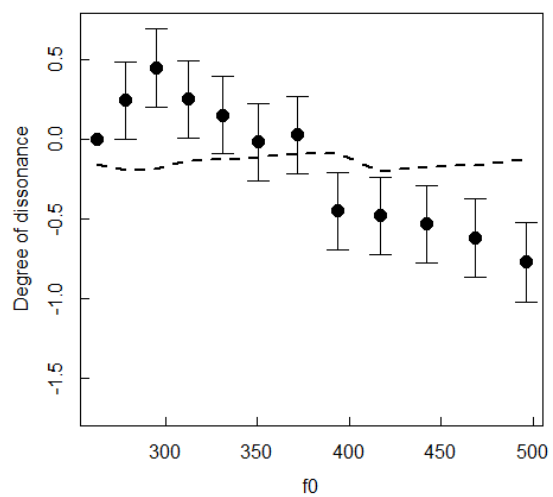
短 2 度ピアノ音



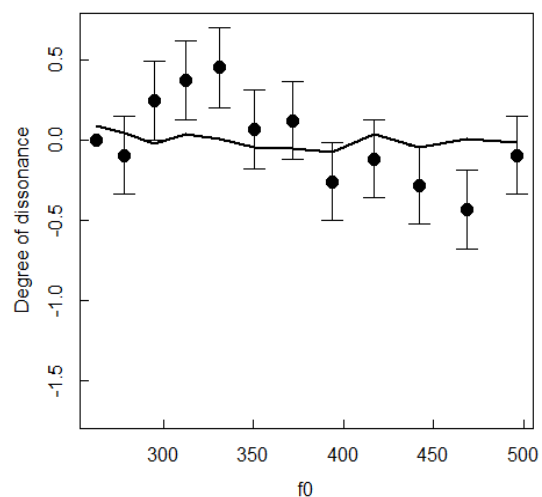
短 2 度オルガン音



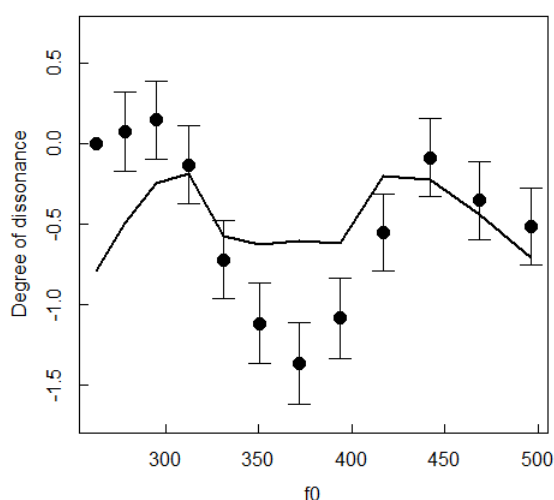
完全 5 度 12 成分複合音



完全 5 度ピアノ音



完全 5 度オルガン音



### 3 成分複合音

図 4.5 不協和度の測定値と Sethares モデルによる推定値

#### 4.1.3 考察

加法モデルは音程の不協和度を **dyad** の不協和度の和として算出していた。これらのモデルは、基本周波数とその倍音のみで構成されていて、振幅変動のない音程の不協和度を推定することができた。しかし、これらのモデルを楽音に適用しても同様に推定することができるという報告はこれまでになかった。Kameoka and Kuriyagawa (1969b) は、彼らの理論は時間情報を扱わないので、振幅変動や連続スペクトルを含む楽音は取り扱えないと述べている。加法モデルは時間情報を扱っていないので、振幅変動があり連続スペクトルを持つ楽音の予測は無理であるということになる。

実際、多数の成分を持ち振幅変動のあるピアノ音色とオルガン音色の短 2 度音程および完全 5 度音程の不協和度を測定したところ、Sethares (2005) の加法モデルによる推定値は当てはまらなかった。ピアノ音は音圧の減衰が速く振幅変動が大きく、オルガン音は減衰が遅く振幅変動が比較的小さいが、オルガン音色の音程の不協和度はピアノ音色の音程の不協和度と比べて、Sethares モデルの当てはまりは良くなかった。ピアノ音とオルガン音のスペクトルを比較すると、オルガン音の方がスペクトル構造が複雑で、このことが加法モデルによる推定を難しくしている可能性が考えられる。

振幅変動のあるピアノ音やオルガン音の不協和度を加法モデルが推定できないのは、ある意味当然である。しかし、楽音の特徴は振幅変動だけではなく、臨界帯域内に非調和成分を多く含むという特徴を持つ。臨界帯域内に 3 成分以上が同時に存在すると、加法モデルの仮定より複雑な相互作用が生じ、音程の不協和度は **dyad** 不協和度の和であるという関係が成り立たなくなる可能性がある。そこで、振幅変動がなく、臨界帯域内に 3 成分が同時に存在する 3 成分複合音を刺激として不協和度を測定した。

その結果、加法モデルは楽音の不協和度を推定できないだけでなく、離散スペクトル

で振幅変動もない 3 成分複合音の不協和度の推定もできなかった。これらの結果から、臨界帯域内に 3 成分以上が同時に存在すると、成分間の相互作用が複雑になり、従来のモデルが仮定している加算性が成り立たなくなることが明らかになった。

そこで、第 5 章では、臨界帯域内に 3 成分以上が同時に存在した場合には **dyad** 間で相互作用が働くと仮定して、不協和度を推定するモデルを提案する。

## 第 5 章 臨界帯域内の 3 成分以上の複雑な相互作用を考慮した不協和度推定モデル

### 5.1 提案モデル

Sethares モデル (Sethares, 2005) や Kameoka and Kuriyagawa モデル (Kameoka and Kuriyagawa, 1969ab), Hutchinson and Knopoff モデル (Hutchinson and Knopoff, 1977; 1978) のような加法モデルでは、振幅変動がなく、臨界帯域幅内に同時に 3 成分しか存在しない 3 成分複合音の不協和度を推定することができなかった。これにより、臨界帯域内における相互作用を考慮する必要性が明確となった。しかし、分析対象を 8kHz 以下に限定しても 2 万以上の周波数成分を持つ複合音の 3 成分以上の間の相互作用を完全に扱うのは計算量が大きすぎて困難である。そこで、相互作用を簡略化した重み関数により加法モデルを拡張したモデルを構築した。

提案モデルにおいては、まず 3 成分以上の間の相互作用を、不協和度がピークになる dyad が他の dyad の不協和度に影響を与えるという一方的な影響に簡略化する。(図 5.1)

- 不協和度がピークとなる 2 成分(dyad)の不協和度に、他の dyad の不協和度が影響されている

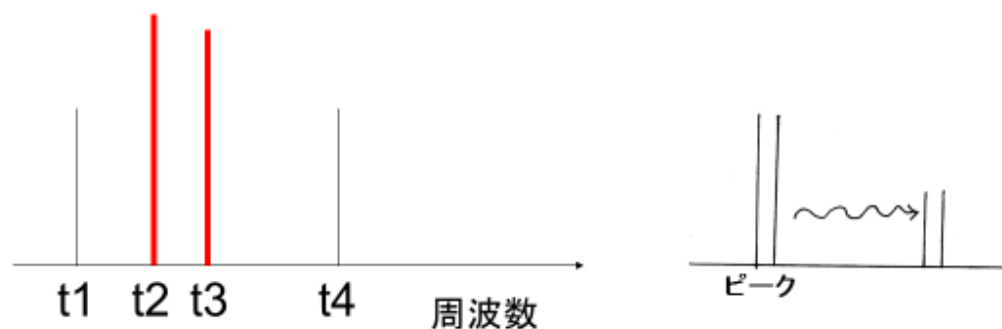
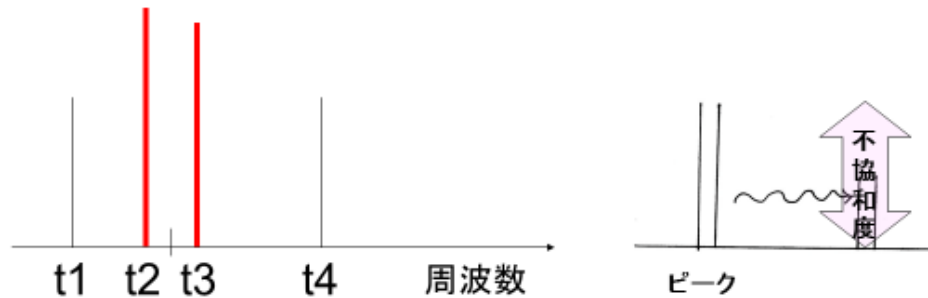


図 5.1 提案モデル仮説 1

さらに、不協和度がピークの dyad は中心周波数の近い dyad に影響を与える、つまり影響の度合いが中心周波数間<sup>12</sup>の距離に依存すると仮定する (図 5.2)

<sup>12</sup>二成分  $f_1, f_2$  の相乗平均。

- 不協和度がピークとなるdyadの中心周波数と,他のdyadの中心周波数との距離によって影響の度合いが変わる



58

図 5.2 提案モデル仮説 2

重みが中心周波数間の距離のみで決まるようにしたのは, パラメタ数を抑えてパラメタ推定の計算量を小さくするためである. 不協和がピークの dyad が影響を与える範囲をピークの作用域 (Region of Peak Effect: RoPE)と呼ぶ. 中心周波数間の距離を ピークの作用域/2 で除した値を  $x$  とする. 重み関数を  $g(x)$ として以下のように仮定する<sup>13</sup>.

1. ピークの作用域外には影響を与えない. すなわち,

$$g(x)=1 \quad \text{if } |x| \geq 1$$

が成り立つ.

2. ピークの作用域の境界において  $g(x)$ は滑らかにつながる. すなわち,

$$g'(1)=g'(-1)=0$$

が成り立つ.

3. 不協和度がピークとなる dyad および不協和度がピークとなる dyad と同じ中心周波数を持つ dyad には影響を与えない. すなわち,

$$g(0)=1$$

が成り立つ.

4.  $g(x)$ は左右対称である.

$$g(-x)=g(x)$$

<sup>13</sup> 重み関数を中心周波数間の距離を RoPE(の 1/2)で除した値の関数としたのは, dyad の不協和度を周波数差を臨界帯域幅で除した値の関数とした, Plomp and Levelt (1965)の不協和度モデルと同じ考え方である.

表現力と計算速度を考慮して、 $g(x)$ は多項式とした．上記の仮定を満たす  $g(x)$  は、8 次式の場合、

$$g(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } |x| \geq 1 \\ 1 + \beta_2 x^2 + \beta_4 x^4 + (-3\beta_2 - 2\beta_4)x^6 + (2\beta_2 + \beta_4)x^8 & \text{o.w.} \end{cases} \quad (5.1)$$

となる(図 5.3).  $\beta_2, \beta_4$  はパラメタである．中心周波数  $f_c$  (Hz) におけるピークの作用域  $RoPE(f_c)$  は、

$$RoPE(f_c) = \begin{cases} k_1 f_c + c & \text{if } f_c < f_\theta \\ k_2 (f_c - f_\theta) + (k_1 f_\theta + c) & \text{o.w.} \end{cases}$$

とした．

$k_1, c, k_2, f_\theta$  はパラメタである．

$g(x)$  を用いた不協和度の計算は以下のようになる．

$$D = \sum_{i < j} d(f_i, f_j, l_1, l_2) \prod_{k=1}^m g\left(\frac{\sqrt{f_i f_j} - f_{ck}}{0.5 RoPE(f_{ck})}\right) \quad (5.2)$$

ここで、 $d(f_i, f_j, l_1, l_2)$  は(2.1)～(2.5)で表される Setahres モデルにおける dyad の不協和度である． $f_{ck}$  は不協和度がピークとなる dyad の中心周波数である．(5.2)は各ピークから乗算的に影響を受けることを示している．

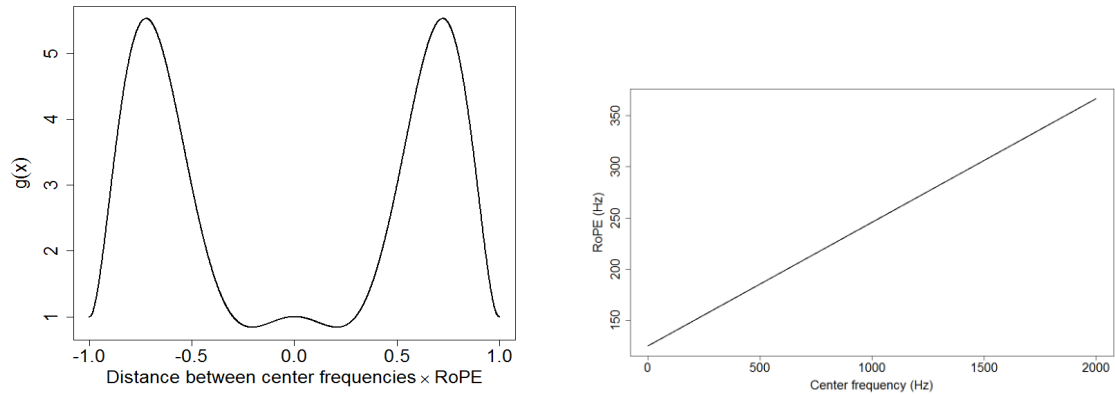


図 5.3 (a)仮定を満たす  $g(x)$ と(b)作用域

不協和度がピークとなる dyad の探索法は以下の通りである．まず、音程を構成する 2 音(dyad)  $T_1, T_2$  の音圧がピークとなる周波数を探索する．楽音の場合、音圧のピークは基本周波数のちょうど整数倍とはならない．この点を考慮して、基本周波数の整数倍だけではなくその周辺を探索して、音圧がピークとなる周波数を探索する． $T_1, T_2$  の音圧がピークとなる周波数を各々、



$$t_{11}, t_{12}, \dots, t_{1n1}, \\ t_{21}, t_{22}, \dots, t_{2n2}$$

とする.

次に, 各  $i$  ( $i=1, 2, \dots, n1$ ) において, 不協和度  $d(t_{1i}, t_{2j*})$  が最も大きくなる  $t_{2j*}$  を求める. 次に各  $j$  ( $j=1, 2, \dots, n2$ ) において,  $d(t_{1i*}, t_{2j})$  が最も大きくなる  $t_{1i*}$  を求める. これらから重複したものを取り除いた **dyad** をピークとした.

パラメタの推定は, 短 2 度の 12 成分複合音, 短 2 度及び完全 5 度のオルガン音, 3 成分複合音の不協和度測定値を利用して行った. 短 2 度及び完全 5 度のピアノ音は, パラメタ推定の計算量を低減することと, 他の音の測定値の当てはまりが良いパラメタ領域において, 安定して高い当てはまりを示したことから, パラメタ推定には使用しなかった. また, 完全 5 度の 12 成分複合音は測定値に当てはまる見込みがないことからパラメタ推定には使用しなかった. 提案モデルは, 12 成分複合音のように従来から扱われてきた複合音には加法モデルが当てはまることを前提に, 加法モデルを拡張したので, 従来方扱われてきた複合音の場合, 不協和度の推定は加法モデルによる推定値とあまり変わらなくなる. ところが, 第 4 章で示したように, 完全 5 度の 12 成分複合音の加法モデルによる推定値は測定値に当てはまらなかった. 完全 5 度の 12 成分複合音は, 音高の違いによる不協和度の測定値の差が小さく, 加法モデルで推定できなかったと考えられる. そのため, 提案モデルでも不協和度を精度高く推定することはできなかった.

パラメタの推定は, 短 2 度の 12 成分複合音の不協和度測定値への当てはまりが **Setahres (2005)** のモデルの当てはまり (相関係数 0.8) を下回らないように, それ以外の複合音の不協和度測定値への当てはまりが最大になるように行った.

$g(x)$  は 6 次式から 16 次式の当てはまりを比較した. 6 次式では, 3 成分複合音の不協和度測定値にさえ当てはまらなかった. 8 次式から 16 次式の当てはまりは各相関係数の差が 0.01 未満であったので, 8 次式を採用した. パラメタの値は,  $b_2 = -7.8756$ ,  $b_4 = 103.7033$ ,  $k_1 = 0.1208$ ,  $c = 124.9703$ ,  $k_2 = 0.1489$ ,  $f_0 = 1324.0641$  とした.

## 5.2 結果

### 5.2.1 提案モデルの当てはまりと **Sethares** モデルの比較

提案モデルで不協和度の計算を行った. 楽音の音程の不協和度の計算には, 音圧が最大音圧より 20db 以上小さく, ラウドネスも十分小さくなる 8kHz 以下の成分を対象とした. 成分数は約 23800 であった. 計算結果は以下ようになった. 各音源の測定値と提案モデルによる推定値を図 5.4 に示す. 縦軸は不協和度, 横軸は各音程の根音の基本周波数である. 黒い点は実験によって得られた測定値, エラーバーは **Bradley-Terry** モデルにより算出した不協和度の 95% 信頼区間である. 太い実線は提案モデル, 細い実線は **Setahres** モデルによる推定値で, 測定値と推定値の相関係数が負の場合は破線で示

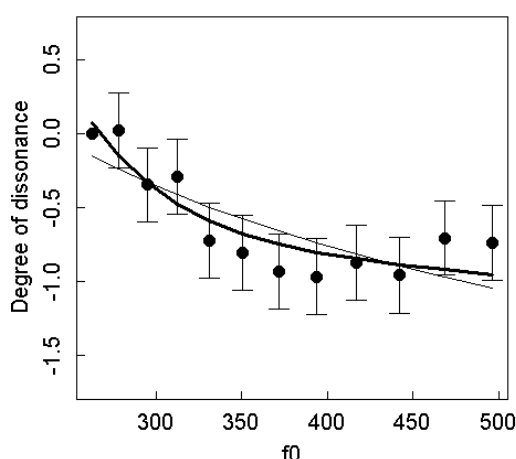
した．不協和度の推定値を不協和度の測定値に重ねて比較するために，モデルによる推定値が測定値に当てはまるようにスケールと原点を最小二乗法で変換した．測定値と推定値の相関係数が負の場合は，スケールと原点は測定値と重なるよう適当に変換した．

短 2 度音程の 12 成分複合音の提案モデルによる不協和度の推定値と測定値との相関係数(Pearson の積率相関係数)は  $0.90(p < .001)$ ，RMSE は 0.15 で 95%信頼区間の平均 0.25 よりも小さかった．短 2 度音程のピアノ音源の提案モデルによる推定値と測定値との相関係数は  $0.96(p < .001)$ ，RMSE は 0.13 で 95%信頼区間の平均 0.25 よりも小さかった．短 2 度音程のオルガン音源の提案モデルによる推定値と測定値との相関係数は  $0.70(p < .05)$ ，RMSE は 0.22 で 95%信頼区間の平均 0.25 よりも小さかった．

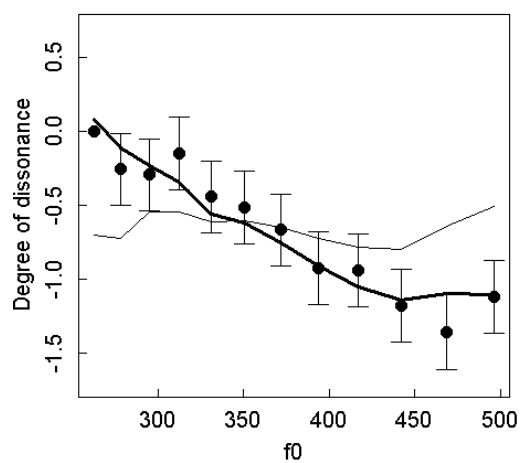
完全 5 度音程の 12 成分複合音の提案モデルによる推定値と測定値との相関係数は  $-0.50$  であった．完全 5 度音程のピアノ音源の提案モデルによる推定値と測定値との相関係数は  $0.88(p < .001)$ ，RMSE は 0.18 で 95%信頼区間の平均 0.25 よりも小さかった．完全 5 度音程のオルガン音源の測定値と提案モデルとの相関係数  $0.60(p < .05)$ ，RMSE は 0.21 で 95%信頼区間の平均 0.25 よりも小さかった．

3 成分複合音の提案モデルによる不協和度の推定値と測定値との相関係数は  $0.83(p < .001)$ ，RMSE は 0.27 で 99%信頼区間の平均 0.32 よりも小さかった．

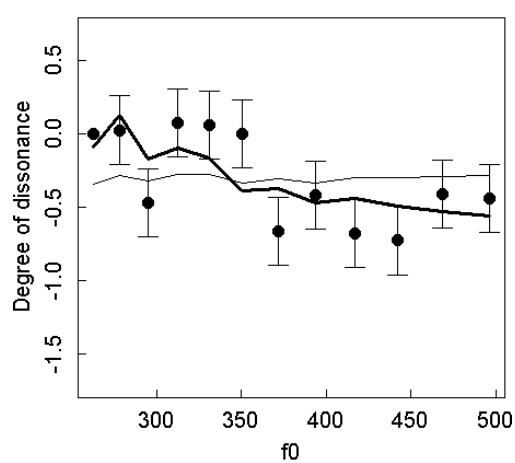
以上のように，相互作用を考慮したモデルによる不協和度の推定値の測定値への当てはまりは，完全 5 度の 12 成分複合音を除いて，Sethares のモデルより大幅に向上した．特に楽音の不協和度は Sethares のモデルではほとんど推定できていなかったが，提案モデルにより大幅に当てはまりが向上した．この結果は，臨界帯域内に多数の成分が存在する時に，成分間の複雑な相互作用の影響が大きいことを示している．



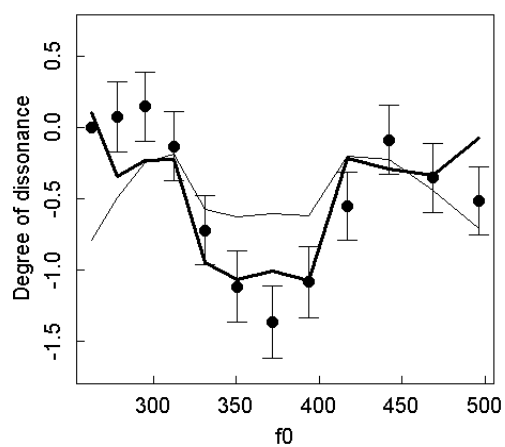
短 2 度 12 成分複合音



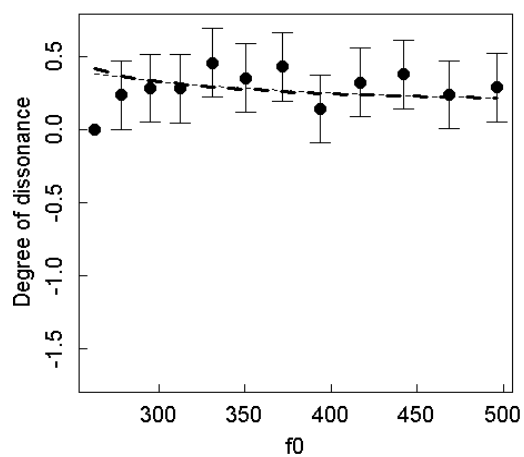
短2度 ピアノ音



短2度 オルガン音



3成分複合音



完全5度 12成分複合音

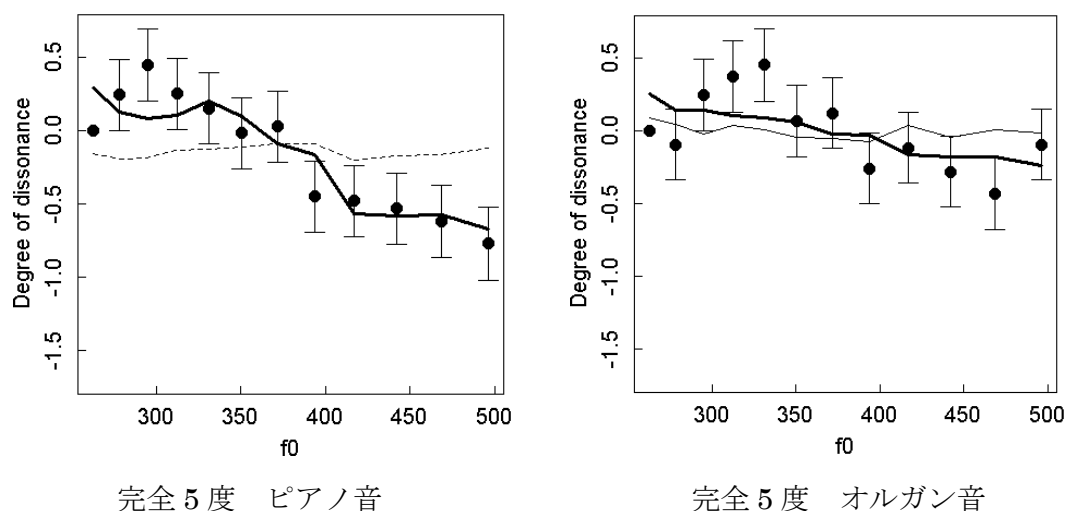


図 5.4 不協和度の測定値と提案モデルによる推定値

## 5.2.2 ピークモデル 1 とその当てはまり

提案モデルの比較として，刺激のスペクトルのピーク成分を抽出して，Sethares(2005)のモデルで不協和度を計算した．ここでは，このモデルをピークモデル 1 と呼ぶ．

図 5.5 に短 2 度のピアノ音と短 2 度のオルガン音，完全 5 度のピアノ音，完全 5 度のオルガン音の測定値とピークモデル 1 の推定値を示す．12 成分複合音と 3 成分複合音は，すべての成分がピークなので，通常の Sethares モデルの結果と変わらないため，図は割愛した．短 2 度のピアノ音の測定値とピークモデル 1 の推定値との相関係数は 0.93 ( $p < .001$ )，RMSE は 0.16，短 2 度のオルガン音の測定値とピークモデル 1 の推定値との相関係数は 0.36，RMSE は 0.28，完全 5 度のピアノ音の測定値とピークモデル 1 の推定値との相関係数は 0.78 ( $p < .01$ )，RMSE は 0.24，完全 5 度のオルガン音の測定値とピークモデル 1 の推定値との相関係数は 0.64 ( $p < .05$ )，RMSE は 0.20 であった．

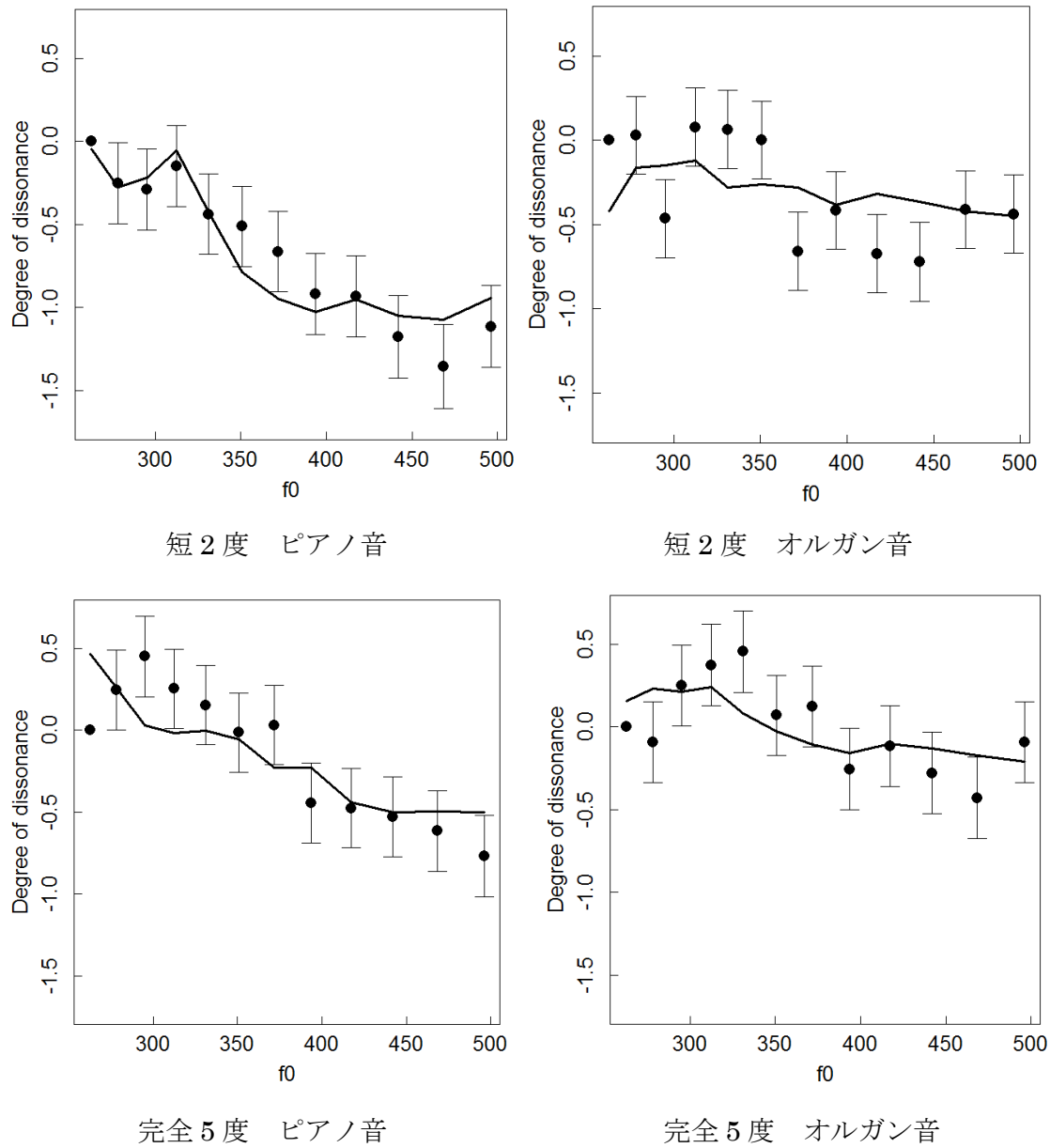


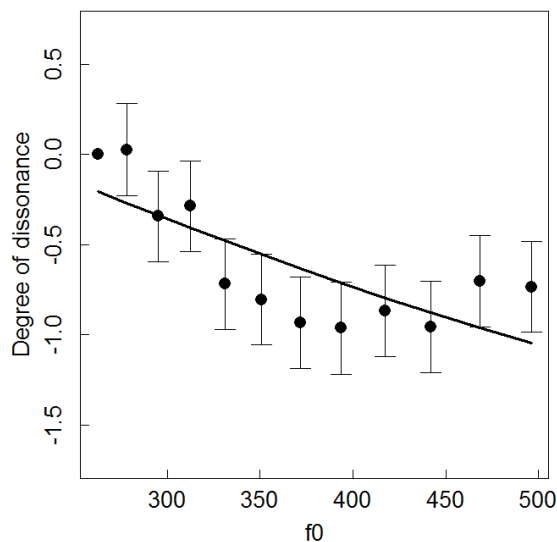
図 5.5 不協和度の測定値とピークモデル 1 の推定値

ピークモデル 1 による楽音の不協和度の推定値は、通常の **Sethares** モデルによる不協和度の推定値より大幅に測定値の当てはまりが向上した。特に、完全 5 度のオルガン音における推定値は、提案モデルによる推定値を、測定値との相関係数で 4% 上回った。また、短 2 度の 12 成分複合音、短 2 度のピアノ音、完全 5 度の 12 成分複合音、完全 5 度のピアノ音においては、提案モデルより測定値への当てはまりは若干劣るものの、良好な当てはまりであった。しかし、短 2 度のオルガン音および 3 成分複合音においては、提案モデルと比べて、測定値への当てはまりが大幅に劣った。

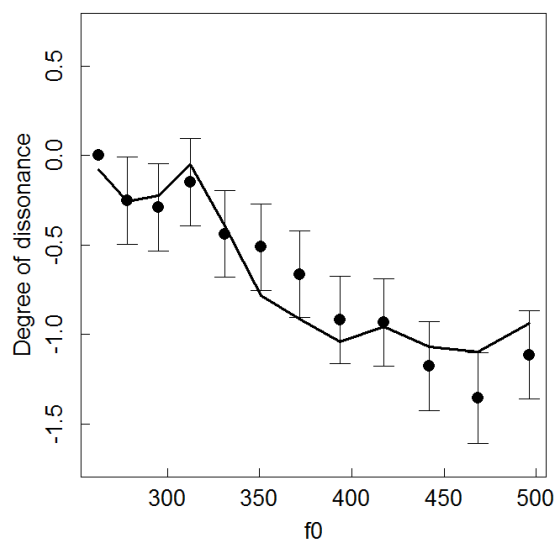
### 5.2.3 ピークモデル 2 とその当てはまり

ピークモデル 1 は、通常の Sethares モデルと比較して、楽音の不協和度の推定精度が大幅に向上した。しかし、短 2 度のオルガン音と 3 成分複合音における推定精度は、提案モデルに大幅に劣った。そこで、5.1 におけるピークの抽出法で抽出した dyad のみを Sethares(2005)のモデルを使って不協和度を計算した。ここでは、このモデルをピークモデル 2 と呼ぶ。

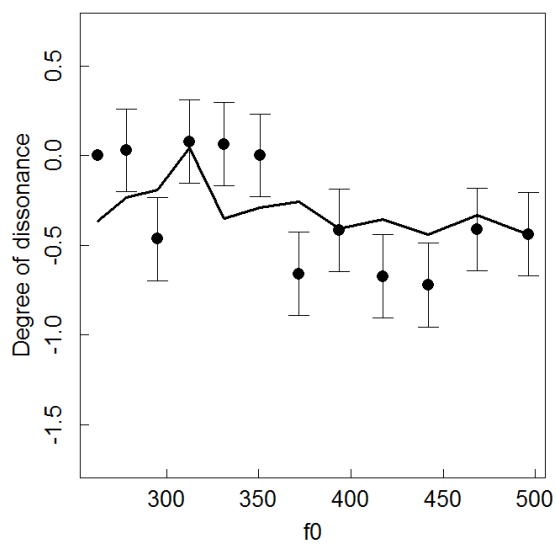
図 5.6 に短 2 度の 12 成分複合音、短 2 度のピアノ音と短 2 度のオルガン音、完全 5 度の 12 成分複合音、完全 5 度のピアノ音、完全 5 度のオルガン音の測定値と、3 成分複合音のピークモデル 2 の推定値を示す。短 2 度の 12 成分複合音の測定値とピークモデル 2 の推定値との相関係数は 0.77 ( $p < .01$ )、RMSE は 0.22、短 2 度のピアノ音の測定値とピークモデル 2 の推定値との相関係数は 0.93 ( $p < .001$ )、RMSE は 0.15、短 2 度のオルガン音の測定値とピークモデル 2 の推定値との相関係数は 0.43、RMSE は 0.27、完全 5 度の 12 成分複合音の測定値とピークモデル 2 の推定値との相関係数は -0.41、完全 5 度のピアノ音の測定値とピークモデル 2 の推定値との相関係数は 0.84 ( $p < .001$ )、RMSE は 0.21、完全 5 度のオルガン音の測定値とピークモデル 2 の推定値との相関係数は 0.68 ( $p < .05$ )、RMSE は 0.19、3 成分複合音の測定値とピークモデル 2 の推定値との相関係数は 0.08、RMSE は 0.49 であった。



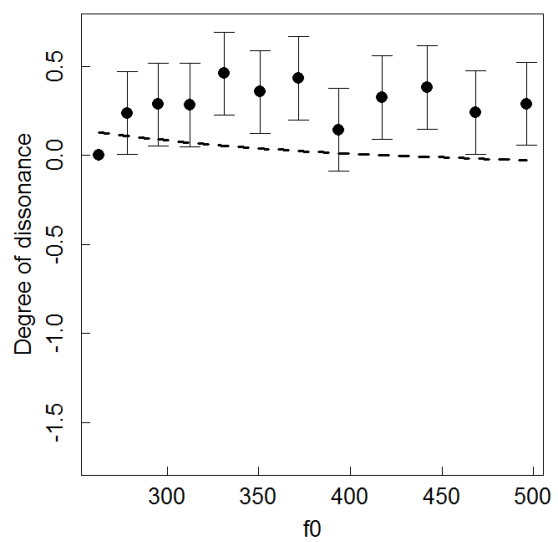
短 2 度 12 成分複合音



短 2 度 ピアノ音



短 2 度 オルガン音



完全 5 度 12 成分複合音

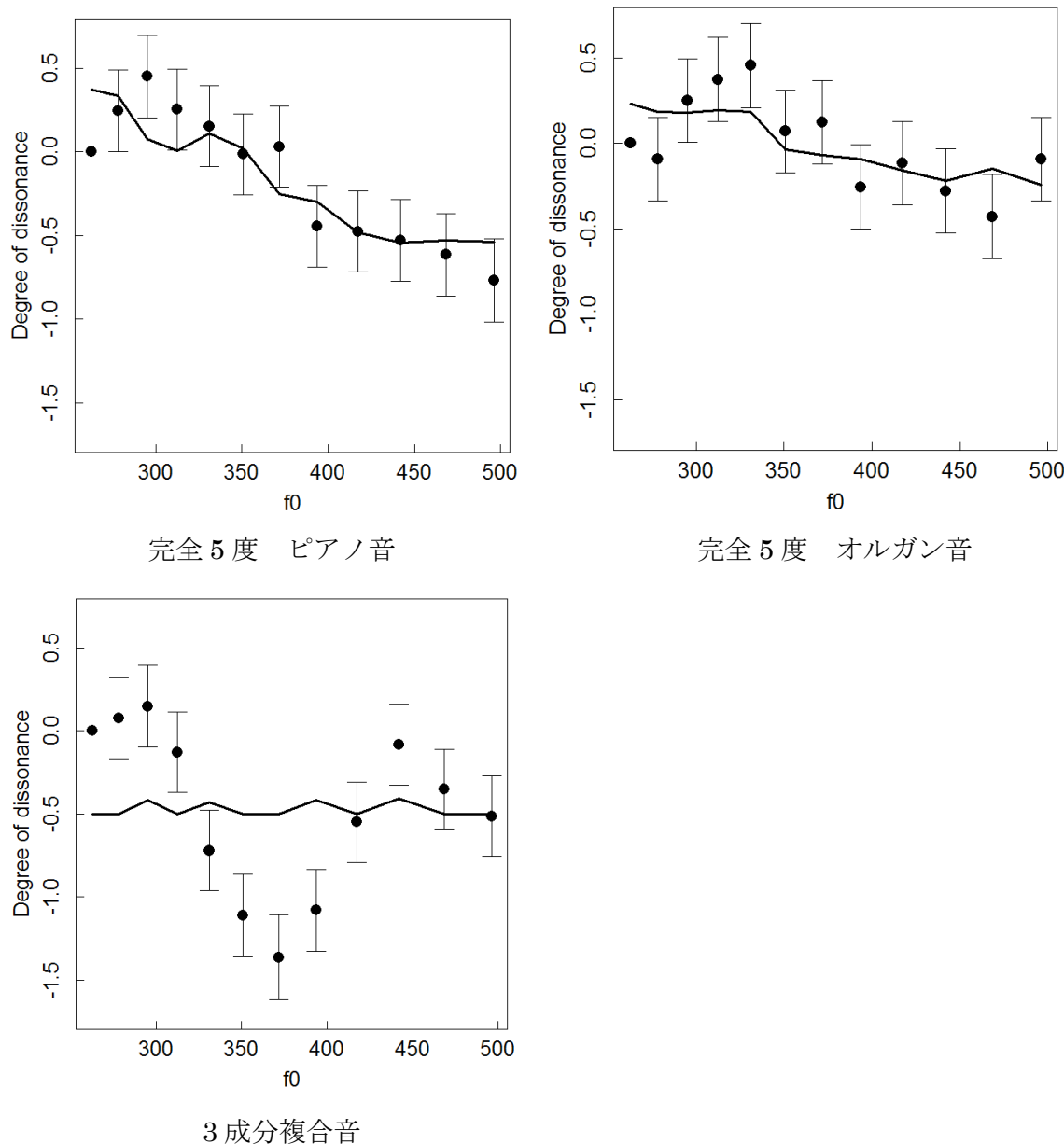


図 5.6 不協和度の測定値とピークモデル 2 の推定値

ピークモデル 2 による楽音の不協和度の推定値もピークモデル 1 と同様，通常の Sethares モデルによる不協和度の推定値より測定値の当てはまりがほぼ向上した．特に，完全 5 度のオルガン音においては，測定値への当てはまりが提案モデルを上回った．また，短 2 度の 12 成分複合音，短 2 度のピアノ音，完全 5 度のピアノ音においては，提案モデルより測定値への当てはまりは若干劣るものの，良好な当てはまりであった．しかし，短 2 度のオルガン音および 3 成分複合音においては，提案モデルと比べて，測定値への当てはまりが大幅に劣った．



### 5.3 考察

Kameoka and Kuriyagawa (1989b)によれば、彼らのモデルでは時間情報を扱わないので、振幅変動(振幅の時間的变化)や連続スペクトルを含む楽音は取り扱えない。彼らのモデルに限らず、加法モデルは時間情報を扱っていないので、振幅変動があり連続スペクトルを持つ楽音の推定はできないということになる。実際、第4章では、ピアノ音およびオルガン音による音程の不協和度を測定したところ、Sethares (2005)のモデルによる推定値の推定精度は低かった。

しかし、楽音の特徴は振幅変動だけではなく、臨界帯域内に非調和成分を多数含むことも挙げられる。そこで、第4章では楽音に加えて、振幅変動がなく、臨界帯域内に3成分が同時に存在する3成分複合音を刺激として不協和測定を行ったところ、Setharesモデルを始めとする加法モデルによる推定値の推定精度は低かった。これらの結果は、臨界帯域内に3成分以上が同時に存在すると、加法モデルの仮定より複雑な相互作用が生じ、相互作用が不協和感に影響を与えていることを示唆している。

本章では、第4章の結果を受け、成分間の相互作用を考慮した不協和度の推定モデルを提案した。楽音のように非常に多数の成分を持つ音の不協和度を計算する際の計算量を低減するため、不協和度がピークになる dyad に他の dyad の不協和度が影響されていると仮定し、重み関数を用いた単純なモデルを構成した。

提案モデルにより、第4章の実験で用いた刺激の音程の不協和度を計算したところ、完全5度の12成分複合音を除いて、Setharesモデルより推定精度が向上した。特に、楽音と3成分複合音における推定精度は大幅に向上した。

完全5度の12成分複合音の不協和度を推定できなかった理由として、以下のことが考えられる。従来の研究で用いられてきた、振幅変動がなく少数成分から成り、かつ臨界帯域内に3成分以上が同時に存在しない単純な複合音の不協和度は、加法モデルにより高い精度で推定できることが先行研究で示されてきた。提案モデルでも、その様に単純な複合音の不協和度は加法モデルで推定できることを前提としたため、重み関数はあまり効かず、加法モデルと類似した推定値となる。しかし、第4章の結果が示す通り、加法モデルが完全5度の12成分複合音の不協和度を推定できなかったため、提案モデルでも不協和度を推定することができなかった。第4章で述べたように、完全5度の12成分複合音の不協和度は、音高の違いによる変化が小さいので、推定が難しかったと考えられる。

短2度音程と完全5度音程、ピアノ音とオルガン音とにおける提案モデルの推定精度を比較すると、短2度音程より完全5度音程における推定精度が低かった。その理由として、表4.4に示すように、楽音においても、短2度音程より完全5度音程における不協和度の差が小さく、ピアノ音よりオルガン音において不協和度の差が小さかったことが挙げられる。また、ピアノ音とオルガン音のスペクトルを比べると、オルガン音の方がスペクトル構造が複雑であったことから、提案モデルのような単純なモデルでは推

定が難しかった可能性が考えられる。

興味深いことに、ピアノ音が音圧の減衰が速く、振幅変動が大きいのにに対し、オルガン音は音圧の減衰が遅く、振幅変動が小さいにも関わらず、ピアノ音における推定精度の方が高かった。提案モデルは相互作用を一方向の作用として扱ったり、重み関数を周波数のみの関数としたりと、非常に単純化されていて、時間情報も扱っていないにも関わらず、ピアノ音における不協和度を高精度で推定できた。このことは、臨界帯域内に存在する三つ以上の成分間に、加法モデルが仮定するよりも複雑な相互作用が生じ、その相互作用が不協和感に与える影響が非常に大きいという、第 4 章の仮説を支持する。

また、提案モデルとの比較対象として、スペクトルのピークを抽出して計算した 2 種類のピークモデルで不協和度の推定も行った。ピークモデルは非常に単純なモデルであるにも関わらず、通常の **Sethares** モデルと比較すると、楽音における推定精度が大幅に向上した。しかし、短 2 度のオルガン音、3 成分複合音における推定精度は低く、提案モデルの推定精度を大幅に下回った。これらの結果は、ヒトの不協和感知覚は、音圧のピークとなる成分に基づいて行われている訳ではないことを示している。

提案モデルは、重み関数を見れば分かるように、音圧がピークとなる周波数成分のみを抽出したり、不協和度がピークとなる **dyad** のみを抽出したりして不協和度を計算しているのではない。そこで、音圧がピークとなる周波数成分同士の **dyad** の不協和度が全体の不協和度に占める割合、すなわち寄与率を求めた。表 5.1 に示すように、提案モデルにおける寄与率は **Sethares** モデルにおける寄与率の 1/5 程度(短 2 度音程)、および 1/10 程度(完全 5 度音程)であった。これらは、不協和感の知覚には、加法モデルが仮定するよりも非調和成分の寄与が大きいことを示唆している。

表 5.1 音圧がピークとなる周波数成分同士の **dyad** の不協和度が全体の不協和度に占める寄与率(%)

	minor 2nd piano	minor 2nd organ	perfect 5th piano	perfect 5th organ
<b>Sethares (2005)</b>	$8.30 \times 10^{-4}$	$1.90 \times 10^{-3}$	$1.70 \times 10^{-4}$	$2.90 \times 10^{-4}$
<b>Proposed model</b>	$1.60 \times 10^{-4}$	$3.30 \times 10^{-4}$	$1.70 \times 10^{-5}$	$2.60 \times 10^{-5}$

提案モデルは相互作用を一方向の作用として扱ったり、重み関数を中心周波数のみの関数としたりと、非常に単純化されている。また、振幅変動も扱っていない、それにもかかわらず、**Sethares** モデルでは推定できなかった臨界帯域内に 3 成分が同時に存在する静的な複合音の不協和度を推定できただけでなく、大なり小なりの振幅変動を伴う楽音の不協和度を比較的高い精度で推定することができた。相互作用は不要で、一方向の作用であるとか、振幅変動は不要であると考えているわけではないが、この単純なモ

デルでもパラメタ推定には数日間の計算時間を要し<sup>14</sup>, より複雑なモデルのパラメタ推定はできなかった. 今後, より適切なモデルを構築することは課題であるが, ここで再度強調しておきたいのは, 相互作用の影響が不協和度に与える影響が大きいことである.

---

<sup>14</sup>計算には Intel Core i7-3960X Processor Extreme Edition を使用した.

## 第 6 章 結論

### 6.1 本研究のまとめ

#### 6.1.1 全体の概要

本研究では聴覚的協和感の知覚特性を明らかにすることを目的に、協和感研究において先行研究で主に用いられてきた単純な構造の複合音に加え、ピアノとオルガンの楽音における不協和度を一対比較法により測定し、不協和度を推定する代表的なモデルである加法モデルによる推定値と比較した。その結果、加法モデルは、従来から用いられてきた単純な複合音の不協和度については、微妙な差まで正確に推定することができたが、楽音の不協和度を推定することはできなかった。また、さら、先行研究で用いられてきたものより、さらに成分数が少ない、3 成分のみからなる単純な複合音でも、3 成分が臨界帯域内に存在すると、加法モデルでは不協和度を推定することができないことが明らかになった。

Kameoka and Kuriyagawa (1969)が述べているように、加法モデルは周波数と音圧のみの関数であり、時間や位相を取り入れていないので、振幅の変動や位相の効果を扱えない。したがって、振幅が時間的に変化する(振幅変動する)ピアノ音の不協和度を推定できなかったのは、ある意味当然である。しかし、楽音の特徴は振幅変動だけではなく、非調和成分を多く含むことも挙げられる。加法モデルにおける非調和成分の扱いに関しては、モデルの開発者は言及していないが、不協和感知覚において、非調和成分が加法モデルの仮定しない影響を与える可能性がある。

振幅の時間的な変化(振幅変動)のない少数成分の単純な複合音でも、3 成分が臨界帯域内に存在すると、加法モデルでは不協和度を推定することができなかったことから、臨界帯域内に 3 成分以上存在した場合には、加法モデルが仮定するより複雑な相互作用が生じ、不協和感の知覚に影響を与えていると考えた。この仮定を基に、成分間の相互作用を、簡略した重み関数により加法モデルを拡張する新たなモデルを提案した。この提案モデルは、加法モデルでも推定できた、従来から用いられてきた単純な複合音だけでなく、臨界帯域内に 3 成分を含む複合音、ピアノおよびオルガン音により音程の不協和度を推定することができた。

#### 6.1.2 各章の成果と意義

第 3 章では、ピアノ音を用いて、音高の異なる 12 種類の短 2 度音程の不協和度を一対比較により測定した。その結果、専門的な音楽教育を受けた音楽経験者と音楽非経験者の不協和度は同様の傾向を示した。聴覚的協和感が文化や音楽経験の影響をあまり受けないことが先行研究により明らかにされているが、先行研究の多くは、異なる種類の音程の不協和度を比較していた。本章で用いた刺激は、理論的にも経験的にも不協和度

の差がより小さいと考えられるが、音楽経験の有無にかかわらず同じ傾向を示したことは、聴覚的協和感が文化や音楽経験をあまり受けないことをさらに強く支持する証拠になる。

加法モデルにより不協和度を計算し、測定値と比較したところ、不協和度を正確に推定することはできなかった。

第4章では、振幅変動の大きいピアノ音に加え、振幅変動の比較的小さいオルガン音、先行研究で主に用いられてきた振幅変動のない少数成分からなる単純な複合音を用いて、不協和度測定を行った。音程は、不協和音程である短2度音程に加え、協和音程である完全5度音程も用いた。さらに、第3章で挙げた仮説を検討するために、振幅変動がない3成分のみから構成されるが、3成分が臨界帯域内に存在する単純な複合音の(3成分複合音)不協和度を測定した。

その結果、先行研究で主に用いられてきた、振幅変動のない少数成分からなる単純な複合音においては、完全5度音程の不協和度は、音高の違いによる不協和度の変化が小さく、加法モデルでは推定することができなかったが、短2度音程の不協和度は加法モデルで高い精度で推定することができた。音高の異なる同じ種類の音程の不協和度の差は小さいと考えられるが、加法モデルは高い精度で推定することができた。

しかし、ピアノ音だけではなく、より振幅変動が小さいオルガン音においても、加法モデルで不協和度を推定することはできなかった。さらに、振幅変動がない、3成分のみからなる単純な構造の音でも、加法モデルでは不協和度を推定することができなかった。

これらの結果は、たとえ振幅変動がなくても、臨界帯域内に3成分以上が同時に存在すると、従来のモデルが仮定しているより複雑な相互作用が生じ、その相互作用が不協和感の知覚に影響を与えるという仮説を支持する。

第5章では、第4章の結果を受けて、臨界帯域内に3成分以上が存在する場合に生じる相互作用を考慮した、不協和度の推定モデルを提案した。楽音のように非常に多数の成分を持つ音の場合、3項関係以上の相互作用をそのまま計算すると、計算量が莫大になり、現実的な時間で不協和度の計算ができない。そこで、不協和度がピークになるdyadに他のdyadの不協和度が影響されていると仮定し、重み関数を用いたモデルを構成した。提案モデルで、第4章で用いた刺激の不協和度を計算したところ、音高の違いによる不協和度の変化が小さかった、完全5度音程の単純な複合音を除き、短2度音程の単純な複合音に加え、臨界帯域内に3成分を含む複合音、ピアノおよびオルガン音により音程の不協和度を推定することができた。

提案モデルは振幅変動を扱っていないにもかかわらず、大なり小なり振幅変動のあるピアノ音やオルガン音の不協和度を推定することができた。この結果は、臨界帯域内に3成分以上が同時に存在した場合、加法モデルが仮定していない成分間の相互作用が不協和度の知覚に大きく影響を与えるという仮説をさらに支持するものである。興味深い

のは、ピアノ音が音圧の減衰が速く、振幅変動が大きいのに対し、オルガン音は音圧の減衰が遅く、振幅変動が小さいにもかかわらず、ピアノ音における推定精度の方が高かったことである。この結果は、振幅変動以外の要因が不協和度の知覚に与える影響が大きいことを示している。

これまで、協和感に限らず音色に関わる研究のうち、音色と音の物理的属性を関係づける研究で、楽音が用いられることは少なかった。これは楽音が様々な要素を含む複雑な音であるからと考えられる。楽音は、当然楽器によって音色が異なる。音色を決定するのは各音の周波数成分の構造や、振幅変動などが関わっている。楽音に限らず、我々が普段耳にするヒトの発話音声、環境音等は、非調和成分を多く含み、音圧が時間的に変化する。そのような複雑な音を計算機的能力が低かった時代に扱うのは不可能なので、その時代の音に関する実験で、純音や、純音を重ねた単純な構造の複合音が用いられたのは必然である。しかし、計算機的能力が飛躍的に向上し、複雑な音声刺激を作成したり、解析したりすることが容易になった現在においても、ほとんどの研究で少数成分からなる単純な複合音のみを用いている。

そのような背景の下、本研究では楽音を対象として不協和度を測定し、モデルによる推定を行い、臨界帯域内に3成分以上が同時に存在すると、加法モデルが仮定していない複雑な相互作用が生じ、相互作用が不協和度の知覚に大きく影響を与えるということを発見し、相互作用を考慮することにより楽音の不協和度も推定できることを示すことができた。

## 6.2 本研究の課題

本研究で提案したモデルは、ピアノ音とオルガン音の短2度音程および完全5度音程の不協和度を推定することができた。しかし、今後取り組むべき課題は多い。最初に挙げられるのは、モデルの短2度音程と完全5度音程以外の音程への適用である。先行研究で主に用いられてきたような、単純な複合音であれば、提案モデルの重み関数はあまり効果を持たないため、加法モデルと同様の推定を行うことから、加法モデルと同程度に不協和度を推定できることは予測できる。しかし、楽音の場合は、実際に不協和度を測定し、モデルによる推定値が当てはまるか調べる必要がある。

2番目に挙げられるのは、オルガン音の不協和度の推定精度がピアノ音の協和度の推定精度より低かった原因の特定である。オルガン音はピアノ音よりも振幅変動が小さいにもかかわらず、推定精度が低かった。その原因として、第5章では、オルガン音のほうがスペクトル構造が複雑であると述べたが、具体的にどのような物理的特性が影響しているのかは分からない。この原因を特定することにより、モデルを改良してオルガン音の不協和度の推定精度を向上させるだけでなく、他の楽器の音の不協和度の推定も可能になることが期待される。

3番目に挙げられるのは、3つ以上の音からなる和音の不協和度の推定である。異な

る和音は異なる協和感を与える。和音のうち、最も低い音(根音)と、根音の3度上の音(第3音)と、根音の5度上の音(第5音)の三つの音から成る和音を3和音(triad)と呼ぶ。3和音において、根音と第3音の音程が長3度(5:4)で根音と第5音の音程が完全5度(3:2)の音程を長3和音(major)、根音と第3音の音程が短3度(6:5)で根音と第5音の音程が完全5度(3:2)の音程を短3和音(minor)、根音と第3音の音程が短3度(6:5)で根音と第5音の音程が減5度(45:32)の音程を減3和音(diminished)、根音と第3音の音程が長3度(5:4)で根音と第5音の音程が増5度(8:5)の音程を増3和音(augmented)と呼ぶ。一般的な傾向として、最も協和性が高いのが長3和音で、以下短3和音、減3和音、増3和音の順となることが知られている。また、3和音だけでなく3和音に根音から7度上の音を加えた4和音を用いた聴取実験においても、この傾向が成り立つことが示されている(Roberts, 1986)。

加法モデルが扱ってきた単純な複合音であれば、和音の不協和度を加法モデルで予測できそうなものであるが、Cook and Fujisawa(2006), Cook(2009)は加法モデルでは3和音の不協和度を正しく予測できないことを示した。Cookらは、周波数 $f_1, f_2, f_3$  ( $f_1 < f_2 < f_3$ )の3音間に音程の等しさに基づく緊張性(tension)という概念を導入した。 $f_1, f_2$ からなる音程と $f_2, f_3$ からなる音程が等しいとき、緊張性は最大になり、二つの音程の差が大きくなるにつれて緊張性は小さくなる。倍音成分も含めて4音以上からなる複合音の緊張性は、すべての三つ組みの緊張性の和とした。この緊張性と Sethares (1993)の不協和度の重み付き和を和音の不安定性(不協和度)として、長3和音 短3和音、減3和音、増3和音の不協和度の順序を正しく予測できることを示した<sup>15</sup>。Cookらの他にも、Parncutt (1989), Johnson-Laird, Kang, and Leong (2012)らが和音の不協和度を推定するモデルを提案している。

本研究で提案したモデルを和音に適用し、不協和度を推定できるか検討し、もし推定できないようであれば、モデルを拡張して推定できるようにしたい。

4番目に挙げられるのは、時間や位相の扱いである。本研究で提案したモデルは時間や位相を扱っていないが、大なり小なり振幅変動のあるピアノ音やオルガン音の不協和度を推定することができた。しかし、時間や位相を扱う必要がないと考えている訳ではない。時間と位相の扱いについては、短時間フーリエ変換等の時間・周波数解析を利用して、モデルを拡張することを考えている。

位相の音色に与える影響はそれほど多くない。Helmholtz (1877)は、基本周波数や位相の異なる複合音を用いた実験を行ったが、位相が音色を顕著に変化させる効果を見出すことはできなかった。しかし、Plomp and Steeneken (1969)は、音の大きさと音高を一定にして、位相を変化させた複合音を用いて、参加者に音色の最も類似したペアと最も異なるペアを選択させた。その結果、すべての成分の位相が揃っている複合音と位相

---

<sup>15</sup> Cookらのモデルは3項関係を直接的に扱っているので、本研究で用いたような楽音の不協和度を現実的な時間で計算することはできない。

が  $90^\circ$  ずれている複合音のペアが最も音色が異なると判断され、位相の効果は周波数が低いほうが大きいことを見出した。また、Andersen and Jensen (2004)は、楽音の位相を操作することにより音質が大きく変化することを示した。

また、Pressnitzer and McAdams (1999) は位相が不協和感（ざらつき感）に与える影響を検討した。実験 1 では、次式で表される 3 成分複合音を刺激に用いた。

$$\frac{1}{2}\cos[2\pi(f_c - f_m)t] + \cos(2\pi f_c t + \phi) + \frac{1}{2}\cos[2\pi(f_c + f_m)t]$$

この複合音は、 $\phi$  の値に関わらず同一の振幅スペクトルを持つ。 $\phi = 0$  では、図 2.1 のように波形の包絡が正弦曲線となるが、 $\phi \neq 0$  では振幅は 0 にならず、図 6.1 に示すような谷の浅い変動となる。 $\phi$  の正負が逆の複合音は、振幅スペクトルと波形の包絡は同一で、波形の微細構造が異なる。このような刺激を用いて参加者にざらつき感を評価させた結果、 $|\phi|$  が増加するとざらつき感が減少し、 $\phi$  の正負が逆になるとざらつき感が変化するという非対称性が示された。

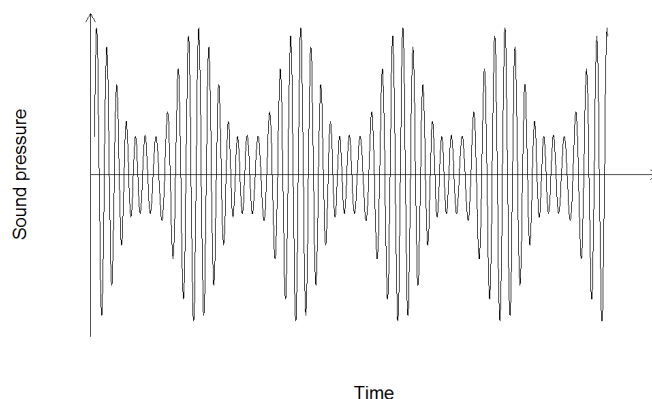


図 6.1 谷の浅い振幅変動

実験 2 では、振幅がゆっくり増加して急激に減衰する鋸歯状の波形を持つ音とそれを逆転再生させた音を刺激として、波形の包絡がざらつき感に与える影響を検討した結果、振幅スペクトルと波形の包絡の深さが一定でも逆転再生によりざらつき感が減少することが示された。

これらの結果は、不協和度を音圧と周波数のみの関数とする加法モデルでは説明できない。そこで、位相の効果を部分的に説明できる時間領域モデルも提案されている。Fastl and Zwicker (2006) は波形の包絡の深さ（ただし、物理量ではなく聴覚系における興奮レベル）と振幅変動の変調周波数の積に基づくざらつき感のモデルを提案した。Pressnitzer and McAdams (1999) は Giguere and Woodland(1994) の聴覚末梢系のモデルを用いたシミュレーションにより実験結果の再現を試みている。また、Tind and Jensen(2004) は Leman (2000) が開発したざらつき感の計算モデルを用いてシミュレーションを行い、位相によるざらつき感の複雑な変化を示している。さらに位相を操作することにより合成音の不協和



感を制御する方法を提案している。不協和度を制御することにより、効果音等に応用される合成音に、これまでは避けられてきた音の組み合わせを利用できる可能性を示唆している。

ただし、いずれのシミュレーションにおいてもここで述べた実験結果を完全に再現できた訳ではない。位相の効果については、今後解明されるべき課題であり、本研究を発展させることが、この課題の解決に貢献することを期待している。

最後に挙げられるのは、本研究の成果の神経科学的裏付けである。本研究では、臨界帯域内に3成分以上が存在すると、複雑な相互作用が生じると仮定し、相互作用を考慮した提案モデルは臨界帯域内に多数の非調和成分を持つ楽音の不協和度を推定することができた。臨界帯域内に3成分以上が存在すると、聴覚系にどのような影響があるのか、神経科学的に解明したい。第2章で紹介したように、近年、脳機能計測により、協和感知覚の神経科学的基盤が解明され始めている。本研究の成果の神経科学的基盤もぜひ解明したい。

### 6.3 協和感研究の課題

最後に、本研究に限らず協和感研究の課題を挙げておく。加法モデルの発表以降現在に至るまで、聴覚的協和感に関する研究は着実な進展を遂げている。特に近年には、聴覚的協和感の神経生理学的裏付けも行われるようになり、聴覚メカニズムを反映したモデルも構築されている。聴覚的協和感が乳児やヒト以外の動物の一部にも共通することを考慮すると、一般的な聴覚メカニズムに基づいた協和感の説明はより説得的であると考えられる。ここでは、本来なら研究されて然るべき課題を二つ挙げる。

一つ目の課題は、音楽的協和感への展開である。音楽の文脈中にある音の協和感である音楽的協和感は、文化的背景、個人の音楽経験といった音の物理特性やヒトの生理特性以外の影響が大きいことから、聴覚的協和感に比べて扱いにくく、研究はあまり進んでいない。和音の系列の物理特性および音楽経験、文化的背景と聴覚的協和感、ハーモニー、音楽的協和感の関係を明らかにしようという研究は見当たらない。聴覚的協和感とハーモニーに関する研究では、和音の系列を操作して参加者の期待(予想)を調べるというアプローチをとるものがある。Regnault, Bigand, and Besson (2001) は、和音の系列における最後の和音(ターゲット)を感覚レベル(聴覚的協和感)と認知レベル(ハーモニーの構造)で操作した刺激を呈示し、事象関連電位(event related potential; ERP)の測定を行った。その結果、認知レベルの操作の影響はターゲットのオンセット 300 ms 後に陽性方向のピークとして表れ、感覚レベルの操作の影響は認知レベルの影響より遅れて、ターゲットのオンセット 300 ~ 800 ms 後に陽性方向のピークとして表れた。また、これらの影響は独立であったことから、音楽を聴取している時の期待には独立した二つのメカニズムが寄与しているとした。この研究は、音楽的協和感の構成要素である聴覚的協和感とハーモニーを同時に扱っている点で重要である。期待はメロディのまとまりや自然さを反映しているので、ERP を指標としたり、プライミングを用

いて期待を評価したりする方法(Tillmann, Bigand, Escoffier, & Lalitte, 2006) は注目に値する。

音楽経験による協和感の個人内での変化を調べることは、期間が長すぎて難しいが、ヒト以外の動物であれば、音楽経験を完全にコントロールすることも可能である(Hauser and McDermott, 2003)。ヒト以外の動物を用いれば、熟達過程や文化の影響を限定的ではあるが、シミュレートできる可能性がある。そこで、著者らの研究グループはラット(*Rattus norvegicus*)を用いて、協和音と不協和音の選好の行動実験にも着手している(岩井・上原・望月・山本・大西, 2011)。

二つ目の課題は、音楽以外の認知活動と聴覚的協和感の関係、より広くは起源と機能の解明である。聴覚的協和感は音楽に特化したものではなく、一般的な聴覚現象である(Hauser & McDermott, 2003; Terhardt, 1984)。音楽において協和性が聴き手の印象に影響を与えるのは、その定義から現象としては当然である。しかしそれにとどまらず、協和性は学習、記憶、感情を伴う発話音声とも関わりがあることを示唆する知見が得られている。例えば、協和音程を含まない音階は協和音程を含む音階より学習が難しい(松永・阿部, 2009)、音程を刺激とする再認課題において、45 秒程度の保持間隔では不協和音程のほうが協和音程より再認成績が良い(Rogers & Levitin, 2007)、ネガティブな感情を伴う発話音声は相対的に不協和な音高構造をしている(Cook, Fujisawa & Takami, 2006)といった報告があり、協和性は知覚・認知のメカニズムとも密接に関わっているようである。

協和感の起源と機能の解明についても、Suga(1984)によると、ヒゲコウモリは、獲物や障害物の位置を把握するために反射波を聞いている。その大脳皮質には、特定の周波数と間隔の反射波にのみ反応する「組み合わせ感受性ニューロン」が存在する。反射波から計算される標的との相対速度と標的までの距離などを表す媒介変数の軸が、それぞれ異なった領域に地図上に配置されているという特徴を持っている。このヒゲコウモリのように、哺乳類の聴覚皮質にも何らかの情報媒介変数の軸が空間的に配置されている可能性が示唆されているが、ヒトやネコなどの哺乳類にとって生物学的、生存に意味のある音が特定されないと難しい(平原, 蘆原, 小澤, 宮坂, 2013)。協和感覚がヒトの生存に意味のある感覚である可能性はあり、音の協和性の違いによりヒトの生存に関連する知覚や行動に影響を与える可能性はある。協和が人間の認知活動の補助になる可能性があるとしたら、協和感のメカニズムを解明することの意義はさらに増す。

また、1.1 で述べた音色の JIS の定義「聴覚に関する音の属性の一つで、物理的に異なる二つの音が、たとえ同じ大きさと高さであっても異なった感じに聞こえる時、その相違に対応する属性」には備考として「音色は、主として音の波形に依存するが、音圧、音の持続変化にも関係する」と付記されている。これに対して、例えば音強や音高が異なっても楽器が異なれば音色が異なることは分かるため、異なる定義も提案されている。Pratt and Doak (1976)は、「音色とは、音の大きさ、高さ、持続感以外の、なんら

かの判断基準を用いて、二つの音を違うと判断できる感覚の性質のことである」と提言している(岩宮, 小坂, 小澤, 高田, 藤沢, 山内, 2010). これらの定義, 提案から, 音色という概念をいまだにあまり明確に説明できないことが分かる. 本論文の最初で, 協和もこの音色の一側面であると述べた. つまり, 逆に協和というものがどのようなものであるか, 協和について明確に述べられるようになれば, 音色の概念についても新たな見地から定義ができる可能性がある. 例えば, 本論文で不協和感は, 位相や時間的变化を考慮しなくてもある程度は推定できることが分かった. つまり, 人間が不協和を感じる大きな要素は臨界帯域内の非調和成分であると考えられる. 音色の定義が 2 音を比較して述べている限りは, それぞれ異なる音の協和度を推定することが可能である. あくまで可能性であるが, 協和感を絡めた音色概念の説明ができるかもしれない.

聴覚的協和感と学習, 記憶, 感情を伴う発話音声の関係に関する研究があることを述べたが, 音楽以外の認知活動における聴覚的協和感に関する研究はほとんどない. 不協和音が不快とされるのは不協和音が何らかの認知活動を阻害している可能性がある. うなりやざらつきは, 2 音の周波数の差が聴覚フィルタの分解能より小さい時に干渉が生じることにより発生するとされている. 仮に聴覚的不協和感の原因がうなりやざらつきであるなら, 例えば不協和な音高構造を持つ発話音声は聞き取りや話の内容の再生が阻害されるような可能性が考えられる.

以上のように, 協和感・不協和感は明らかになっていないことも多いが, 発展性のある分野だと言える. 今後は, さらに協和感知覚のメカニズムについて, 神経科学的, あるいは生物学的な視点から明らかにしていきたい.

## 謝辞

本研究を遂行し、学位論文をまとめるに当たり、多くの方のご支援とご指導をいただきました。この場で深く感謝し、御礼申し上げます。

主任指導教員である仁科エミ教授には、研究者としての基本姿勢やあり方など、いつもの確なご助言をいただきました。修士を出たばかりの、実に狭い世界で生きてきた私に様々な見地からご意見いただき、多くの経験をさせていただきました。深く感謝申し上げます。

同じく指導教員である大西仁准教授には、心理学の門外漢の私に、基礎から根気よくご教授いただきました。常に新しい手法、情報、知識と、数えきれないほどの学びを得ました。昼夜休日問わず、お忙しい中親身に対応していただきましたこと、深く感謝申し上げます。

元指導教員である放送大学教養学部 黒須正明教授には、ゼミ生として末席ながら参加させていただき、新鮮なご意見をいただきましたこと、御礼申し上げます。

審査委員長をお引き受けくださった児玉晴男教授を始めとして、メディア社会文化専攻の先生方には、折に触れて、様々な見地からご助言をいただきました。本研究の貴重な糧となっておりますことを、ここに深く御礼申し上げます。

外部審査委員をお引き受けくださった東京藝術大学音楽学部音楽環境創造科 亀川徹教授には、音響学的見地からの貴重なご助言と温かい励ましをいただきました。同じく外部審査委員をお引き受けくださった信州大学教育学部芸術教育講座 小野貴史准教授には、博士課程入学以前から現在に至るまで、折に触れて叱咤激励いただきました。常に新しい音楽学的知識をご教授いただき、本論文にも外部審査委員として鋭いご意見をいただきました。篤く御礼申し上げます。

また、本研究には、実験にご協力いただいた多くの皆様のご協力がありました。津田塾大学学芸学部国際関係学科(現早稲田大学人間科学学術院) 外山紀子教授を始めとした、津田塾大学の学生の皆様、明治学院大学の学生の皆様、信州大学の学生の皆様のご協力なくては、この研究はありません。

帝京大学文学部心理学科 望月要教授と心理学研究室の皆様にも、動物実験の貴重な機会をいただきました。今後の協和感知覚研究の発展に大きく関わる部分と考えます。皆々様に深く御礼申し上げます。

現職の飯田女子短期大学幼児教育学科の皆様にも、新任であるにも関わらず、ご理解と励ましをくださり、便宜を図っていただきました。御礼申し上げます。

長い学生生活の中で、多くの先輩たちの貴重なアドバイスをいただきました。特に、入学時から折に触れ気にかけてくださり、英語文献購読講座を立ち上げてくださった石原朗子様、同級生として共に励まし合いながら学んできた中尾教子様、大倉孝昭様に、

心から感謝申し上げます。

メディア社会文化専攻に関わる事務職員の皆様には、常に迅速に、的確に対応していただき、サポートしていただきました。感謝申し上げます。

最後に、常に励まし応援してくれた楽徒でもあり、研究者でもある光平有希さんを始めとした音楽に関わる友人たちと、温かく見守り支えてくれた二組の家族、一番の理解者であった夫と心を癒してくれた愛犬と愛猫に、心より感謝と御礼を申し上げます。

## 引用・参考文献

- Andersen, H.T., Jensen K. (2004). Importance and Representation of Phase in the Sinusoidal Model. *Journal of the Audio Engineering Society*, 52(11), 1157-1169.
- Ayotte, J., Peretz, I., Hyde, K. (2002). Congenital amusia: A group study of adults afflicted with a music - specific disorder. *Brain*, 125(2), 238-251.
- Babbitt, M. (1946). *The function of Set Structure in the 12 - tone system*. Princeton University.
- Bidelman, M.G., Krishnan, A. (2009). Neural correlates of consonance, dissonance, and the hierarchy of musical pitch in the human brainstem. *Journal of Neuroscience*, 29(42), 13165-13171.
- Bidelman, M.G., Krishnan, A. (2011). Brainstem correlates of behavioral and compositional preferences of musical harmony. *NeuroReport*, 22, 212-216.
- Blood, J.A., Zatorre, J.R., Bermudez, P., Evans, C.A. (1999). Emotional responses to pleasant and unpleasant music correlate with activity in paralimbic brain regions. *Nature Neuroscience*, 2(4), 382-387.
- Blood J.A., Zatorre J.R. (2001). Intensely pleasurable responses to music correlate with activity in brain regions implicated in reward and emotion. *PNAS*, 98(20), 11818-11823.
- Bradley R.A., Terry M.E. (1952). Rank analysis of incomplete block designs :the method of paired comparisons. *Biometrika*, 39, 324-345.
- Butler, W.J., Daston, G.P. (1968). Musical consonance as musical preference; A cross-cultural study. *Journal of general psychology*, 79(1), 129-142.
- Cariani, A.P., Delgutte, B. (1996). Neural correlates of the pitch of complex tones. I. Pitch and pitch salience. *Journal of Neurophysiology*, 76(3), 1698-1716.
- Cook, D.N. (2009). Harmony perception: Harmoniousness is more than the sum of interval consonance. *Music Perception*, 27(1), 25-42.
- Cook, D.N., Fujisawa, X.T. (2006). The psychophysics of harmony perception: Harmony is a three-tone phenomenon. *Empirical Musicology Review*, 1(2), 106-126.
- Cook, D.N., Fujisawa, X.T., Takami, K. (2006). Evaluation of the affective valence of normal speech using pitch substructure. *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 14(1), 142-151.
- Cousineau, M., McDermott, H.J., Peretz, I. (2012). The basis of musical consonance as revealed by congenital amusia. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(48), 19858-19863.

- DeWitt, A.L., Crowder, G.R. (1987). Tonal fusion of consonant musical intervals: The oomph in Stumpf. *Perception and Psychophysics*, 41(1), 73-84.
- Dobson J.A., Bamett A. (2008). 一般化線形モデル入門原著第 2 版. (田中豊, 森川敏彦, 山中竹春, 富田誠, 訳) 共立出版.
- Ebeling, M. (2008). Neuronal periodicity detection as a basis for the perception of consonance: A mathematical model of tonal fusion. *Journal of the Acoustical Society of America*, 124(4), 2320-2329.
- エドモン・コステール. (1998). 和声の変貌. (小宮徳文, 訳) 音楽之友社.
- Elliott, S., J. Ku, E., M. and Lineton, B, (2007). A state space model for cochlear mechanics. *Journal of the Acoustical Society of America*, 122(5), 2759-2771.
- Faist A. (1897). Versuche uber Tonverschmelzung. *Zsch Psychol Physio Sinnesorg*, 15, 102-131.
- Fannin, A.H., Braud, G.W. (1971). Preference for consonant over dissonant tones in the albino rat. *Perceptual and Motor Skills*, 32(1), 191-193.
- Fastl, H., Zwicker, E. (2006). *Psychoacoustics: Facts and Models*. Third-edition, Berlin: Springer.
- Firth D. (2005). Bradley-Terry models in R. *Journal of Statistical Software*, 12(1), 1-12.
- Firth D. (2008). Bradley Terry: Bradley-Terry models. R package version 0.8-7.
- Fishman, I.Y., Reser, H.D., Arezzo, C.J., Steinschneider, M. (2000). Complex tone processing in primary auditory cortex of the awake monkey. I. Neural ensemble correlates of roughness. *Journal of the Acoustical Society of America*, 108(1), 235-246.
- Fishman, I.Y., Volkov, O.I., Noh, D.M., Garell, C.P., Bakken, H., Arezzo, C.J., SteinSchneider, M. (2001). Consonance and Dissonance of Musical Chords: Neural Correlates in Auditory Cortex of Monkeys and Humans. *Journal of Neurophysiology*, 86, 2761-2788.
- Forte, A. (1977). *The structure of Atonal Music* (第 2 版). Yale University Press.
- Fritz T., Jentschke S., Gosselin N., Sammler D., Peretz I., Turner R., . . . Koelsch S. (2009). Universal recognition of three basic emotions in music. *Current Biology*, 19(7), 573-576.
- 福島邦彦, 斎藤秀昭, 大串健吾. (2001). 視聴覚情報処理. 森北出版.
- Giguere, C., Woodland, C.P. (1994). A computational model of the auditory periphery for speech and hearing research. I. Ascending path. *Journal of the Acoustical Society of America*, 95(1), 331-342.
- Gill Z.K., Purves D. (2009). A biological rationale for musical scales. *PLoS One*, 4(12), 1-9.
- Glasberg R.B., Moore C.J.B. (1990). Derivation of auditory filter shapes from notched-noise data. *Hearing research*, 47(1-2), 103-138.

- Hauser, D.M., McDermott J. (2003). The evolution of the music faculty: A comparative perspective. *Nature Neuroscience*, 6(7), 663-338.
- Helmholtz, H., L., F. (1877). *Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik*. Fourth edition, (Ellis J. Alexander, 訳) Braunschweig: Friedrich Vieweg und Sohn.
- 平原達也, 小澤賢司, 宮坂榮一, 蘆原郁. (2013). 音と人間—CD-ROM 付(音響入門シリーズ). コロナ社.
- 堀内久美雄 (編). (1977). *新音楽辞典 楽語*. 音楽之友社.
- Hutchinson, W., Knopoff, L. (1978). The acoustic component of Western consonance. *Interface*, 7(1), 1-29.
- Hutchinson, W., Knopoff, L. (1979). The significance of the acoustic component of consonance in Western triads. *Journal of Musicological Research*, 3, 5-22.
- イアンブリコス.(2000). *ピュタゴラス伝*.(佐藤義尚訳), 国文社
- 伊福部昭. (2008). 完本 管弦楽法. 音楽之友社.
- 岩井・上原・望月・山本・大西. (2011). ラットにおける協和音と不協和音の選好. *Animal*. 2011.
- 岩宮眞一郎, 小坂直敏, 小澤賢司, 高田正幸, 藤沢望, 山内勝也. (2010). 音色の感性学 : 音色・音質の評価と創造 (第 1 巻). (音響サイエンスシリーズ/日本音響学会, 編) コロナ社.
- Izumi, A. (2000). Japanese monkeys perceive sensory consonance of chords. *Journal of the Acoustical Society of America*, 108(6), 3073-3078.
- JIS. (2000). JIS Z 8106:2000 音響用語.
- Johnson-Laird, N.P., Kang, E.O., Leong, C.Y. (2012). On musical dissonance. *Music Perception*, 30(1), 19-35.
- 掛下栄一郎. (1977). デカルトと美学. *早稲田人文自然科学研究*, 15, 1-14.
- Kameoka, A., Kuriyagawa, M. (1969a). Consonance theory, part I: Consonance of dyads. *Journal of the Acoustical Society of America*, 45(6), 1451-1459.
- Kameoka, A., Kuriyagawa, M. (1969b). Consonance theory, part II: Consonance of complex tones and its computation method. *Journal of the Acoustical Society of America*, 45(6), 1460-1469.
- 久保拓弥. (2012). データ解析のための統計モデリング入門 : 一般化線形モデル・階層ベイズモデル・MCMC. 岩波書店.
- Leman, M. (2000). Visualization and calculation of the roughness of acoustical musical signals using the synchronization index model (SIM). *Proceedings of the COST G-6 Conference on Digital Audio Effects (DAFX-00)*.
- ルイス・フロイス. (1991). *ヨーロッパ文化と日本文化*. (岡田章雄, 訳) 東京: 岩波書店.
- Masataka, N. (2006). Preference for consonance over dissonance by hearing newborns of



- deaf parents and of hearing parents. *Developmental Science*, 9(1), 46-50.
- Mashinter, K. (2006). Calculating Sensory Dissonance: Some Discrepancies Arising from the Models of Kameoka & Kuriyagawa, and Hutchinson & Knopoff. *Empirical Musicology Review*, vol.1, no,2, pp.65-84
- 松永理恵, 阿部純一. (2009). 習得しやすい音階, 習得しにくい音階: 音階スキーマの普遍的特性. *電気通信情報通信学会技術報告*, 109(345), 35-40.
- McDermott, H.J., Lehr, J.A., Oxenham, J.A. (2010). Individual differences reveal the basis of consonance. *Current Biology*, 20, 1035-1041.
- McDermott, J., Hauser, M. (2004). Are consonant intervals music to their ears?: Spontaneous acoustic preferences in a nonhuman primate. *Cognition*, 94, B11-B21.
- 緑川晶. (2013). 音楽の神経心理学. 東京: 医学書院.
- Minati, L., Rosazza, C., D'Incerti, L., Pietrocini, E., Valentini, L., Scaioli, V., Bruzzone, G.M. (2009). Functional MRI/Event-related potential study of sensory consonance and dissonance in musicians and nonmusicians. *NeuroReport*, 20(1), 87-92.
- Moore, B.C.J., Glasberg, R.B. (1983). Suggested formulae for calculating auditory-filter bandwidths and excitation patterns. *Journal of the Acoustical Society of America*, 74(3), 750-753.
- 村上郁也. (2010). イラストレクチャー 認知神経科学: 心理学と脳科学が解く心の仕組み. オーム社.
- 内藤高. (2005). 明治の音-西洋人が聴いた近代日本. 中央公論新社.
- 小畑郁男 (2001). 「楽器の音色を視野に入れた音高構成理論の研究: 感覚的協和理論の音楽への応用」, 九州芸術工科大学博士論文.
- 小方厚. (2007). 音律と音階の科学: ドレミ…はどのようにして生まれたか. 講談社.
- 小野貴史. (2005). ルイス・フロイスの記述における中世日本の音楽観. *信州大学教育学部紀要*, 115, 99-106.
- 大山正, 今井省吾, 和気典二, 菊地正. (1994). 新編感覚・知覚心理学ハンドブック. 誠信書房.
- ParncuttR. (1989). *Harmony: A psychoacoustical approach*. Berlin: Springer.
- Passynkova, N., Neubauer, H., Scheich, H. (2007). Spatial organization of EEG coherence during listening to consonant and dissonant chords. *Neuroscience Letters*, 412, 6-11.
- Peretz, I., Blood, J.A., Penhune, V., Zatorre, R. (2001). Cortical deafness to dissonance. *Brain*, 124, 928-940.
- プラトン. (1979). 国家〈上〉. (藤沢令夫, 訳) 岩波書店.
- Plomp, R, Levelt, J.M.W. (1965). Tonal consonance and critical bandwidth. *Journal of the*

- Acoustical Society of America, 38, 548-560.
- Plomp, R., Steeneken, H.J.M. (1969). Effect of phase on the timbre of complex tones. *Journal of the Acoustical Society of America*, 46(2B), 409-421.
- Pratt L.R., Doak E.P. (1976). A subjective rating scale for timbre. *Journal of Sound and Vibration*, 45(3), 317-328.
- Pressnitzer, D., McAdams, S. (1999). Two phase effects in roughness perception. *Journal of the Acoustical Society of America*, 105(5), 2773-2782.
- Pressnitzer, D., Patterson, D.R., Krumbholz, K. (2001). The lower limit of melodic pitch. *Journal of the Acoustical Society of America*, 109(5), 2074-2084.
- Rameau, J. P. (1722). *Traite de L'harmonie Reduite a fes Principes naturels Divise en Quatre Livres*. (Philip Gossett, 訳) Paris: Jean-Baptiste-Christophe Ballard.
- Randel M. D. (2003). *The Harvard Dictionary of Music: Fourth edition*. Belknap Press: New.
- R Development Core Team. (2009). R: A language and environment for statistical computing. 参照先: R Foundation for Statistical Computing: <http://www.R-project.org>.
- Regnault, P., Bigand, E., Besson, M. (2001). Different brain mechanisms mediate sensitivity to sensory consonance and harmonic context: Evidence from auditory event-related brain potentials. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 13(2), 241-255.
- Roberts, A.L. (1986). Consonance judgements of musical chords by musicians and untrained listeners. *Acoustica*, 62, 163-181.
- Rogers, E.S., Levitin, J.D. (2007). Memory for musical intervals: Cognitive differences for consonance and dissonance. *Canadian Acoustics*, 35(3), 56-57.
- Schellenberg, G.E., Trainor, J.L. (1996). Sensory consonance and the perceptual similarity of complex-tone harmonic intervals: Tests of adult and infant listeners. *Journal of the Acoustical Society of America*, 100(5), 3321-3328.
- Sethares, A.W. (1993). Local consonance and the relationship between timbre and scale. *Journal of the Acoustical Society of America*, 94(3), 1218-1228.
- Sethares, A.W. (2005). *Tuning, Timbre, Spectrum, Scale*. Second edition, London: Springer-Verlag.
- Stevens, S.S. (1957). On the psychological law. *Psychological Review*, 64, 153-181.
- Stumpf, C. (1897). Neuere über Tonverschmelzung. *Zeitschrift für Psychologie*, 15, 280-354.
- Suga, N. (1984). The extent to which biosonar information is represented in the bat auditory cortex. 著: Edelman M.G., Galle W., Cowan M.W., *Dynamic Aspects of Neocortical Function*, 315-373. New York: John Wiley & Sons.

- Sugimoto, T., Kobayashi, H., Nobuyoshi, N., Kiriya, Y., Takeshita, H., Nakamura, T., & Hashiya, K. (2010). Preference for consonant music over dissonant music by an infant chimpanzee. *Primates*, 51, 7-12.
- 谷口高士. (2000). 音は心の中で音楽になる: 音楽心理学への招待. 京都: 北大路書房.
- Tenney, J. (1988). A History of 'Consonance' and 'Dissonance'. N.Y.: Excelsior Music Publishing.
- Terhardt, E. (1984). The concept of musical consonance: A link between music and psychoacoustics. *Music perception*, 1(3), 276-295.
- Tillmann, B., Bigand, E., Escoffier, N., Lalitte, P. (2006). The influence of musical relatedness on timbre discrimination. *European Journal of Cognitive Psychology*, 18(3), 343-358.
- Tind, E., Jensen, K. (2004). Phase models to control roughness in additive synthesis. *International Computer Music Conference Proceedings*.
- Trainor, J.L., Tsang, D.C., Cheung, W.V. (2002). Preference for sensory consonance in 2- and 4-month-old infants. *Music Perception*, 20(2), 187-194.
- Tramo, M.J.P., Cariani, A., Delgutte, B., Braida, D.L. (2001). Neurobiological foundations for the theory of harmony in Western tonal music. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 930, 92-116.
- 内川恵二(編). (2008). 聴覚・触覚・前庭感覚, 朝倉書店
- Watanabe, S., Uozumi, M., Tanaka, N. (2005). Discrimination of consonance and dissonance in Java sparrows. *Behavioural Processes*, 70, 203-208.
- Zentner, M.R., Kagan, J. (1998). Infants' perception of consonance and dissonance in music. *Infant Behavior & Development*, 21(3), 483-492.
- Zwicker, E., Flottorp, G., Stevens, S.S. (1957). Critical bandwidth in loudness summation. *Journal of the Acoustical Society of America*, 29, 548-557.

## 本論文に関する研究発表

### ○学術論文

山本由紀子, 仁科エミ, 大西仁「協和感研究の動向と課題 ―聴覚的協和感を中心として―」 2015年6月 認知科学 vol.22 no.2 pp.282-296 [第1章, 第2章, 第6章]

### ○国内学会口頭発表

山本由紀子, 仁科エミ, 大西仁「ピアノによる短二度音程における sensory consonance の測定」 2009年6月 日本音楽知覚認知学会 pp.79-84 [第3章]

山本由紀子, 仁科エミ, 大西仁「ピアノによる短二度音程における sensory consonance の測定Ⅱ」 2009年9月 日本音楽知覚認知学会 pp.99-104 [第3章]

山本由紀子, 仁科エミ, 大西仁「ピアノによる短二度音程における sensory consonance の測定Ⅲ」 2010年5月 日本音楽知覚認知学会 pp.117-122 [第3章]

山本由紀子「ピアノおよびオルガン短二度の協和度測定」 2010年10月 音楽音響芸術研究会 pp.5-6 [第3章, 第4章]

山本由紀子, 仁科エミ, 大西仁「楽音を含む音程の協和感と不協和感について」 2013年11月 電子情報通信学会 HIP 研究会 pp.7-12 [第1章, 第3章, 第4章]

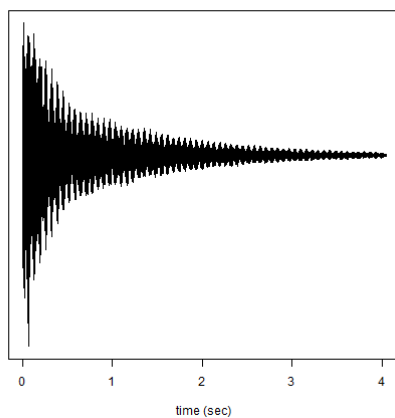
山本由紀子, 仁科エミ, 大西仁「一対比較法による感性情報の評価」 2009年11月 電子情報通信学会 第7回 QoS ワークショップ (ポスター発表) [第3章, 第5章]

岩井直子, 上原秀一, 望月要, 山本由紀子, 大西仁「ラットにおける協和音と不協和音の選好」 2011年9月 Animal.2011 (ポスター発表) [第2章]

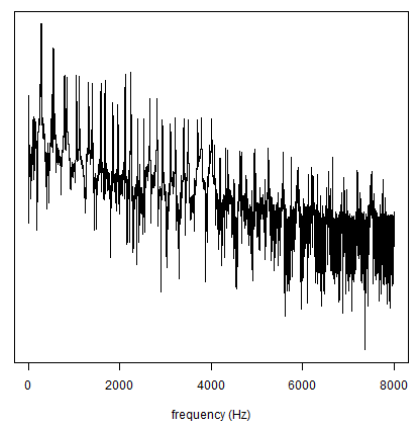
## 付録 実験に用いた刺激の波形, パワースペクトル, 等価騒音レベル

実験 1~実験 4 で用いた音声刺激の波形, パワースペクトル, 等価騒音レベルを示す. 図の左列は波形で, 縦軸は WAV ファイルの波形データに基づく (最大値を 1 とする相対的な) 音圧. 右列は対数パワースペクトル密度で, 縦軸は WAV ファイルデータに基づく対数パワー密度である. 刺激呈示時の音圧 (等価騒音レベル) は小野測器の積分騒音計 LA-5111 と, B&K の Head and Torso Simulator Type 4128 により測定したものである.

### 1. 短 2 度, シンセサイザーピアノ音の波形とパワースペクトル

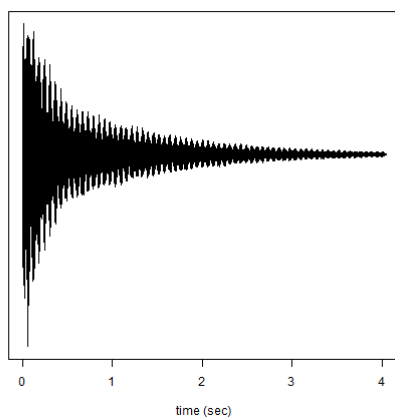


C&Cis

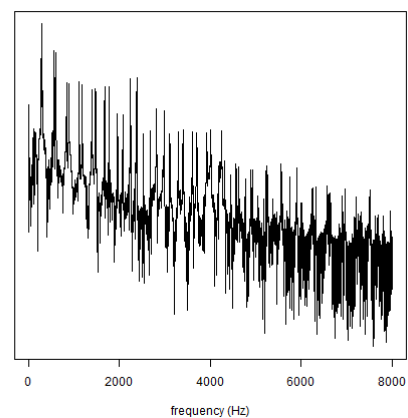


C&Cis

等価騒音レベル 63.5 L<sub>Aeq</sub>

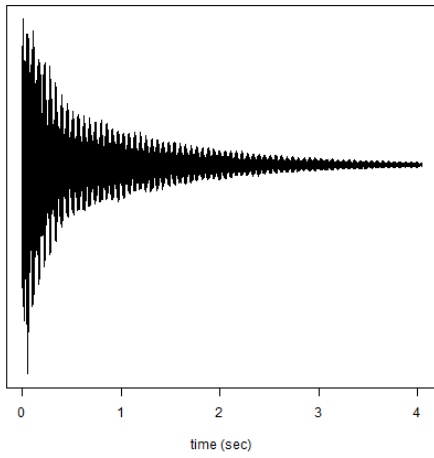


Cis&D

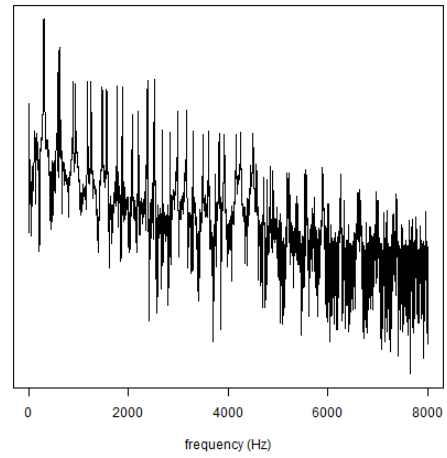


Cis&D

等価騒音レベル 61.6 L<sub>Aeq</sub>

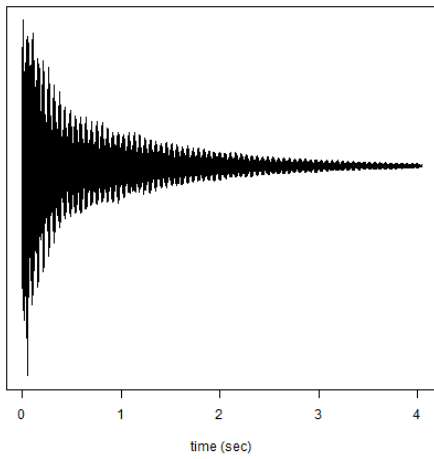


D&Dis

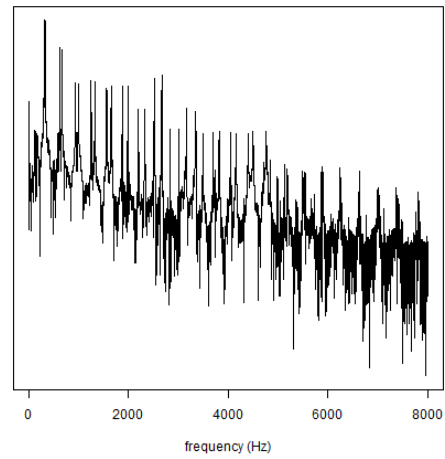


D&Dis

等価騒音レベル  $63.2 L_{Aeq}$

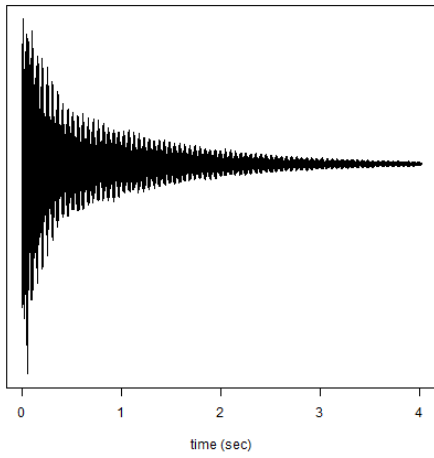


Dis&E

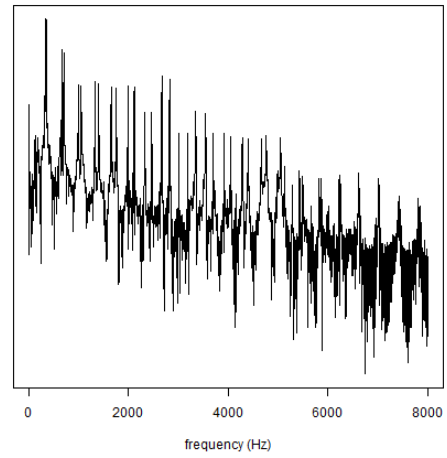


Dis&E

等価騒音レベル  $63.4 L_{Aeq}$

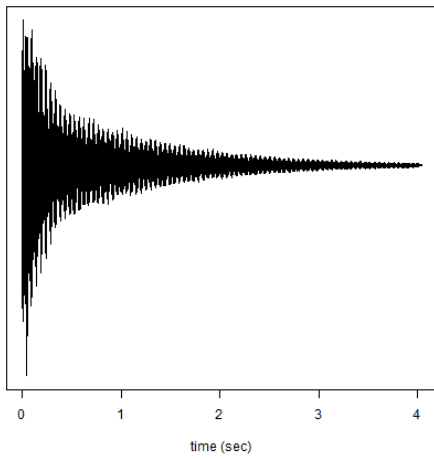


E&F

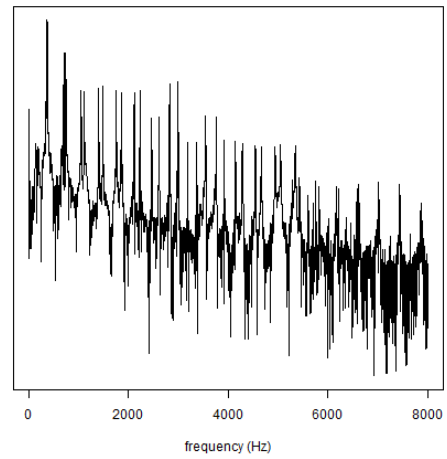


E&F

等価騒音レベル 61.9  $L_{Aeq}$

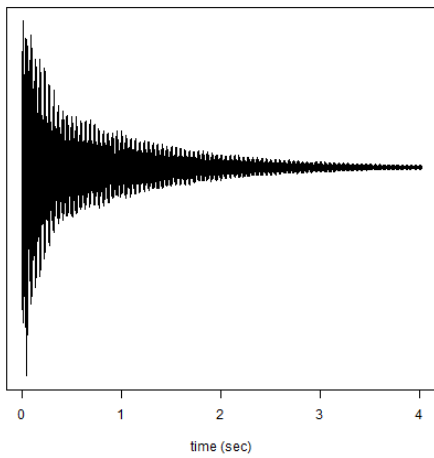


F&Fis

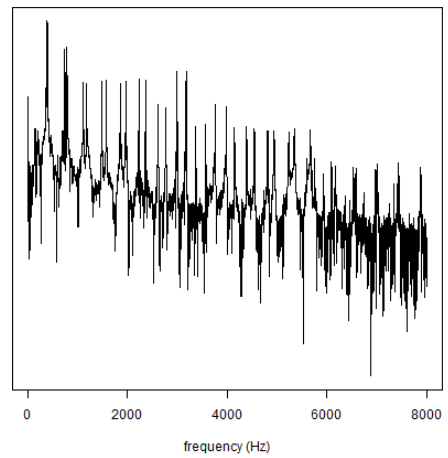


F&Fis

等価騒音レベル 61.0  $L_{Aeq}$

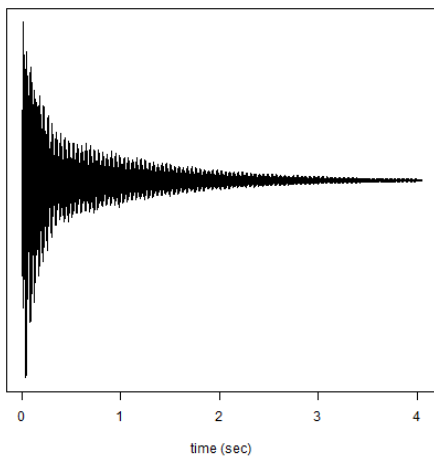


Fis&G

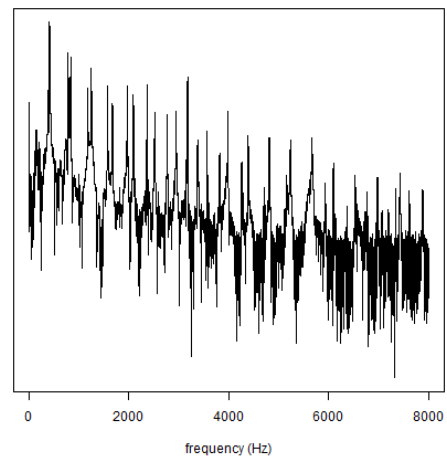


Fis&G

等価騒音レベル  $61.3 L_{Aeq}$



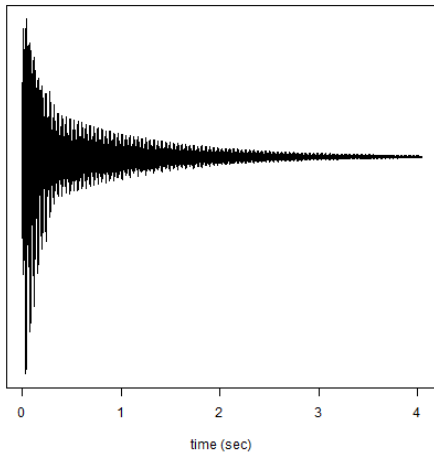
G&Gis



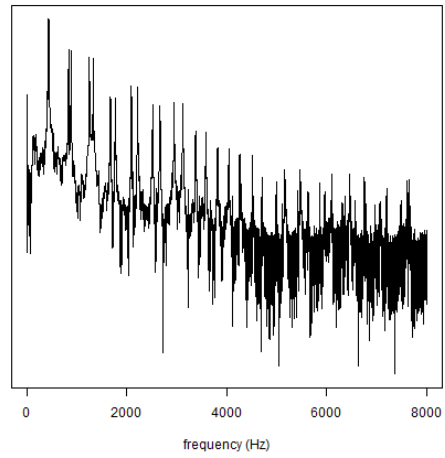
G&Gis

等価騒音レベル  $61.9 L_{Aeq}$



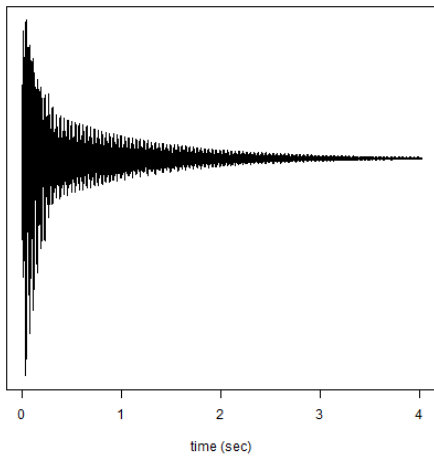


Gis&A

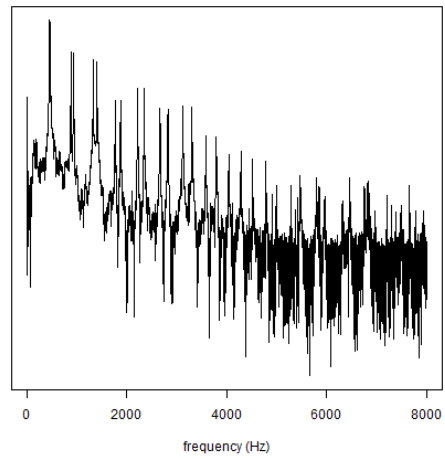


Gis&A

等価騒音レベル  $61.1 L_{Aeq}$

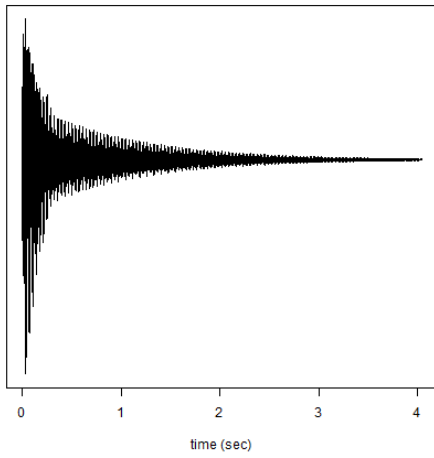


A&Ais

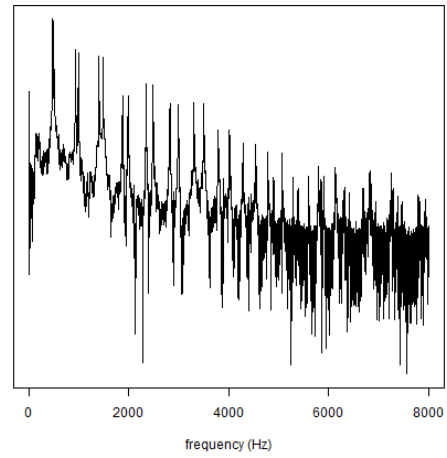


A&Ais

等価騒音レベル  $59.1 L_{Aeq}$

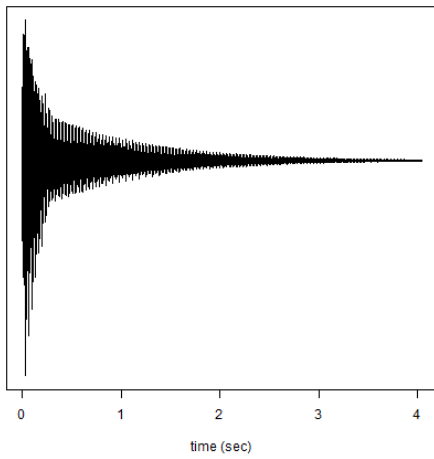


Ais&H

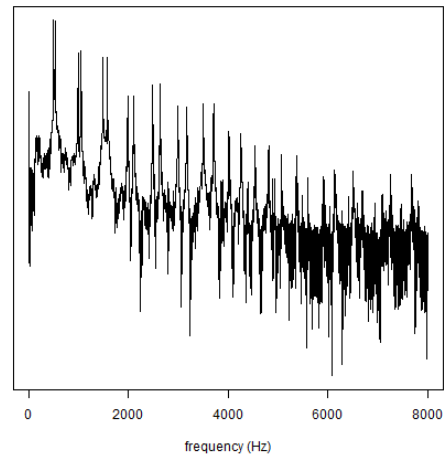


Ais&H

等価騒音レベル 58.8  $L_{Aeq}$



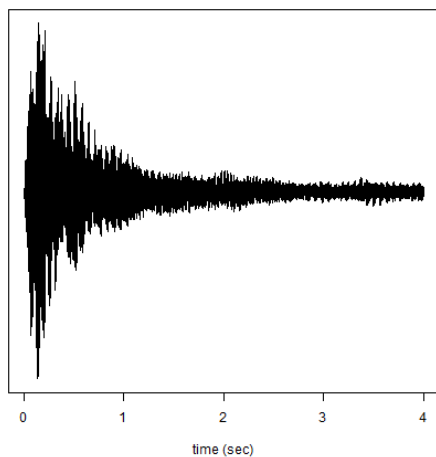
H&C



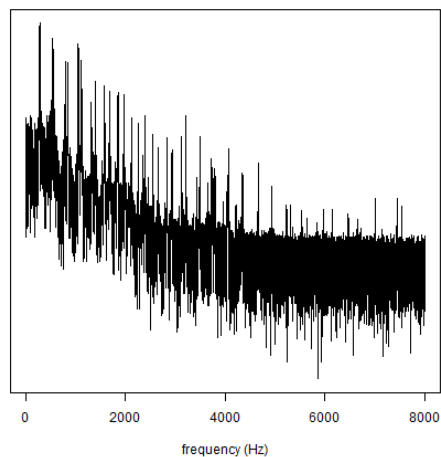
H&C

等価騒音レベル 59.4  $L_{Aeq}$

## 2. 短2度, サンプリングピアノ音, 波形とパワースペクトル

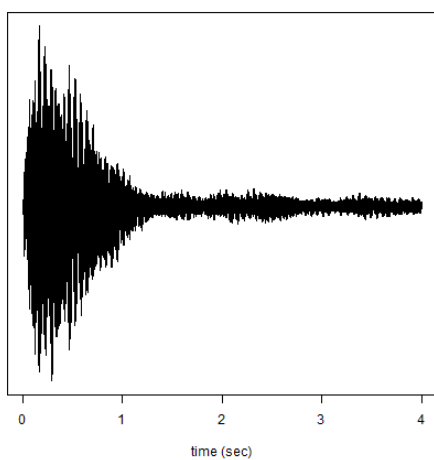


C&Cis

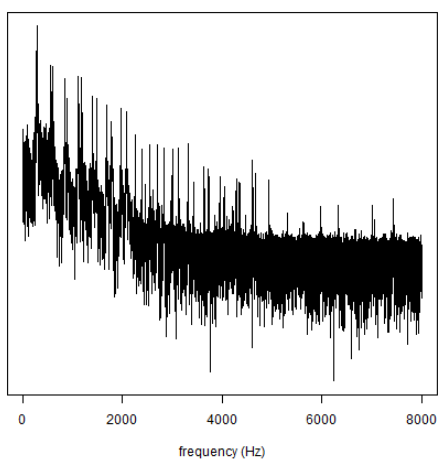


C&Cis

等価騒音レベル 69.4 LAeq

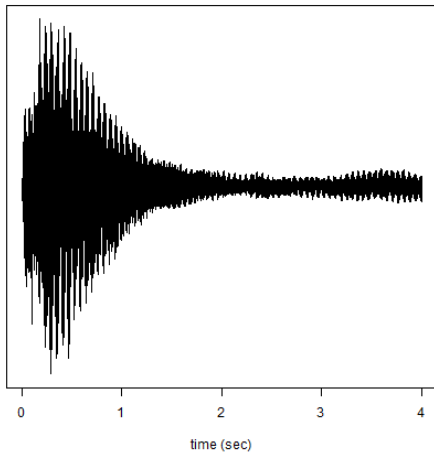


Cis&D

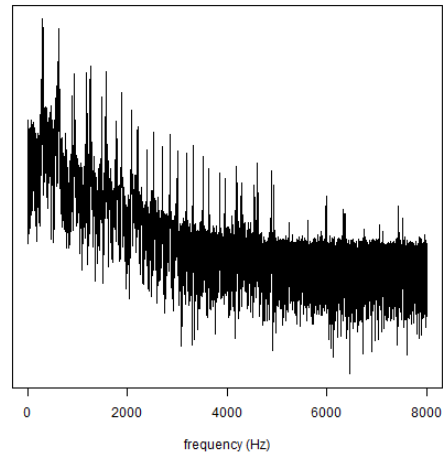


Cis&D

等価騒音レベル 67.7 LAeq

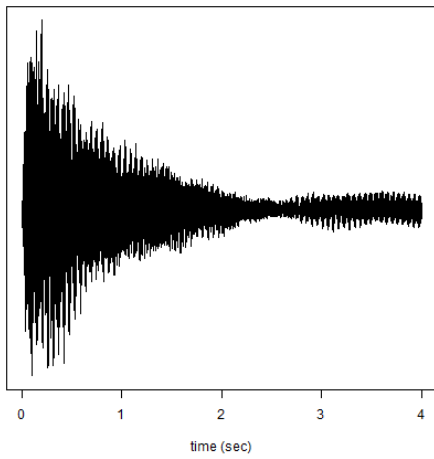


D&Dis

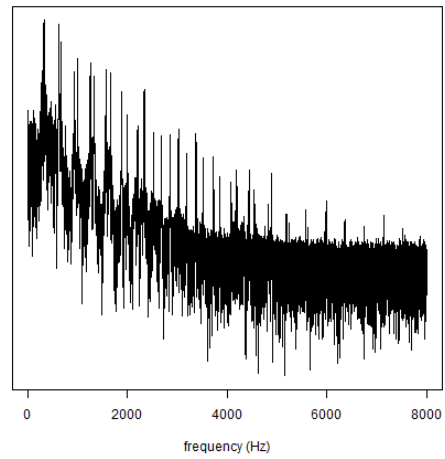


D&Dis

等価騒音レベル 71.4  $L_{Aeq}$

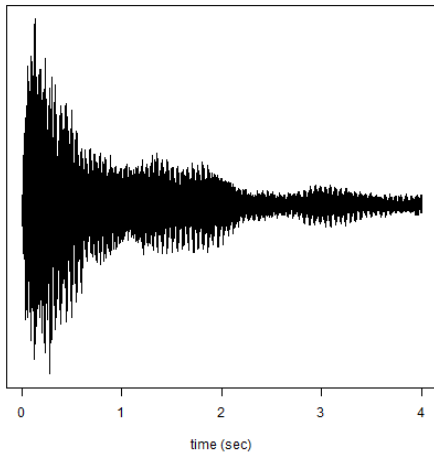


Dis&E

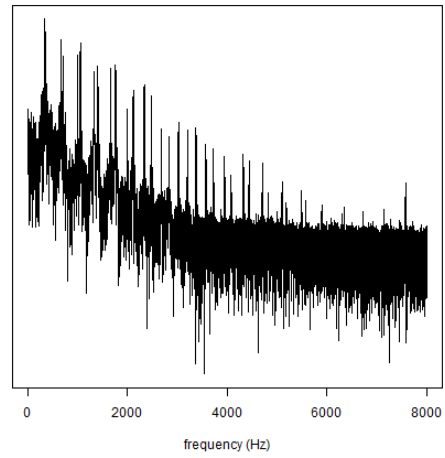


Dis&E

等価騒音レベル 71.6  $L_{Aeq}$

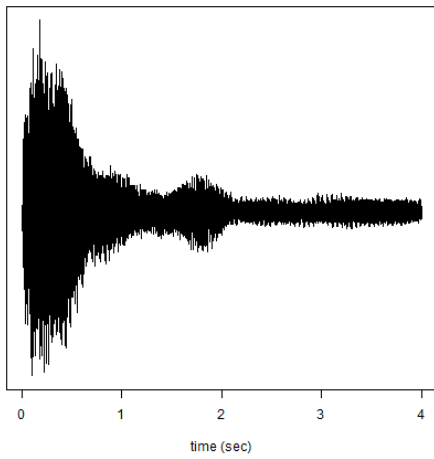


E&F

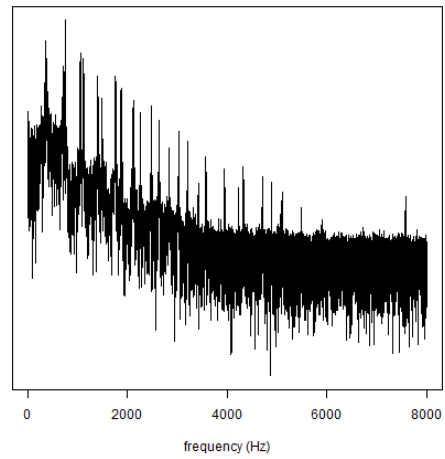


E&F

等価騒音レベル 69.7  $L_{Aeq}$

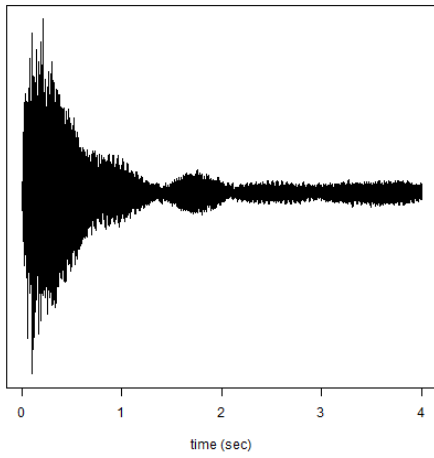


F&Fis

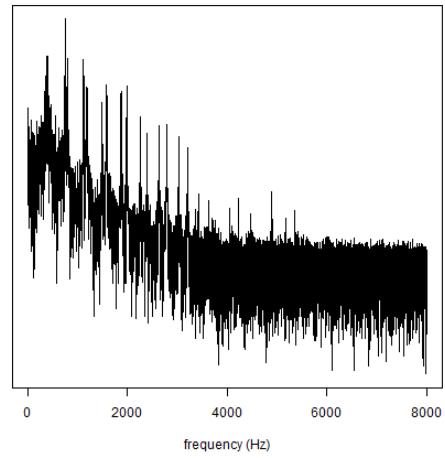


F&Fis

等価騒音レベル 74.6  $L_{Aeq}$

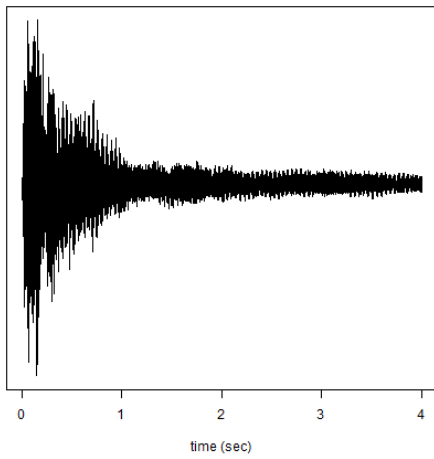


Fis&G

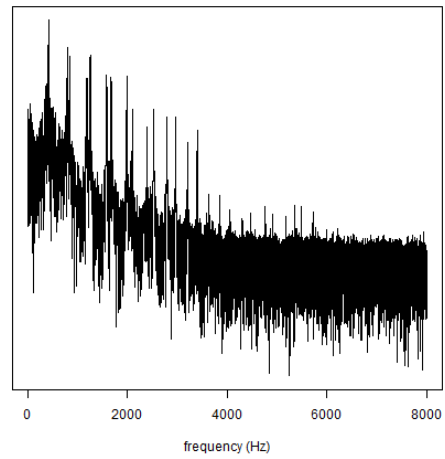


Fis&G

等価騒音レベル 73.6  $L_{Aeq}$

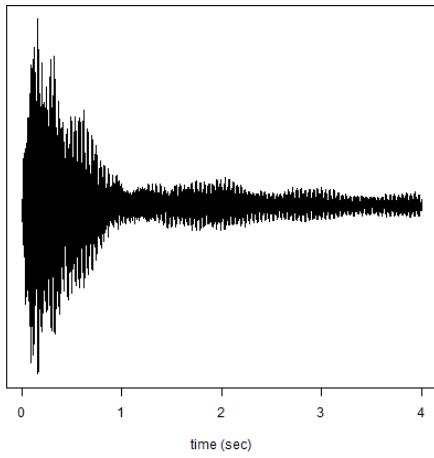


G&Gis

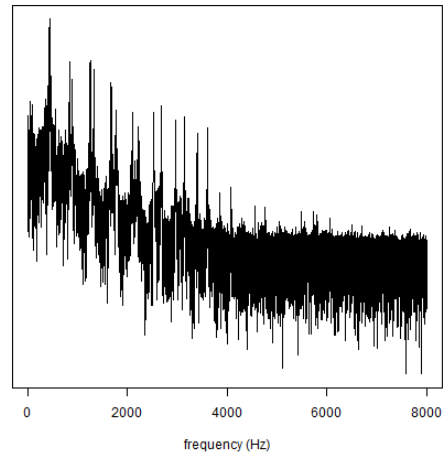


G&Gis

等価騒音レベル 68.3  $L_{Aeq}$

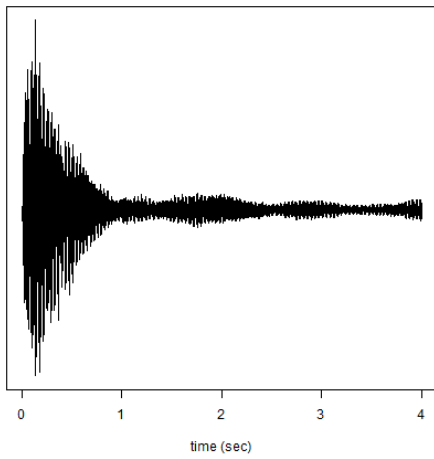


Gis&A

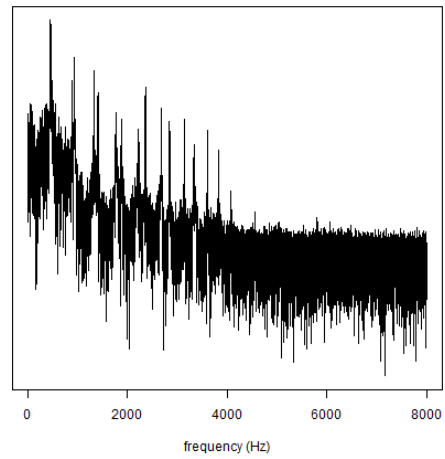


Gis&A

等価騒音レベル 66.6 L<sub>Aeq</sub>

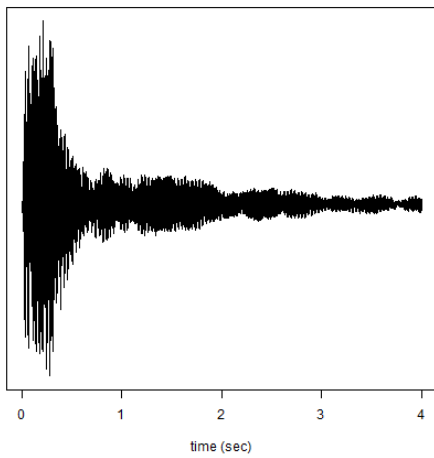


A&Ais

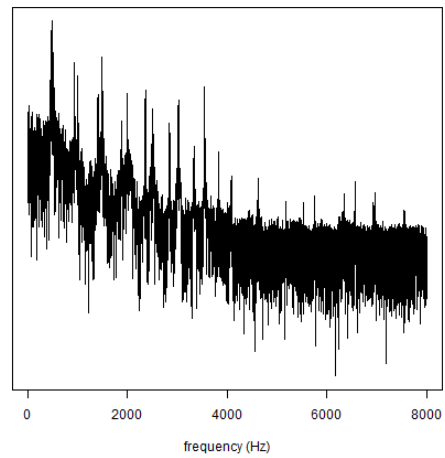


A&Ais

等価騒音レベル 67.6 L<sub>Aeq</sub>

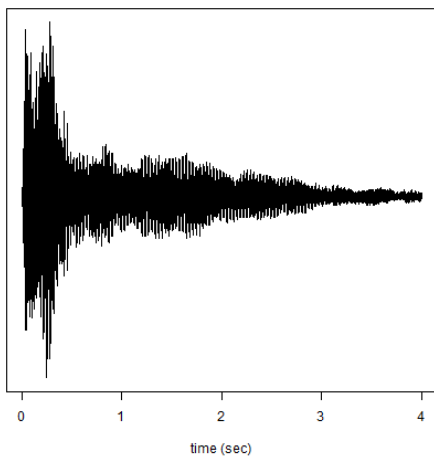


Ais&H

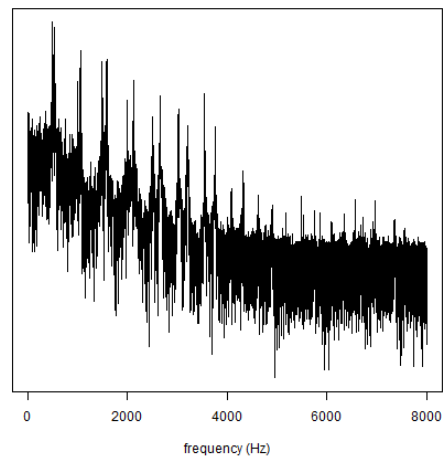


Ais&H

等価騒音レベル 69.3  $L_{Aeq}$



H&C

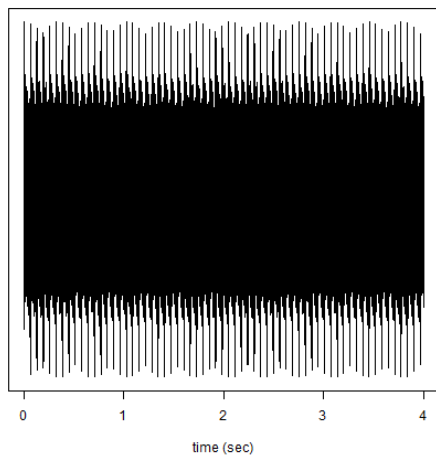


H&C

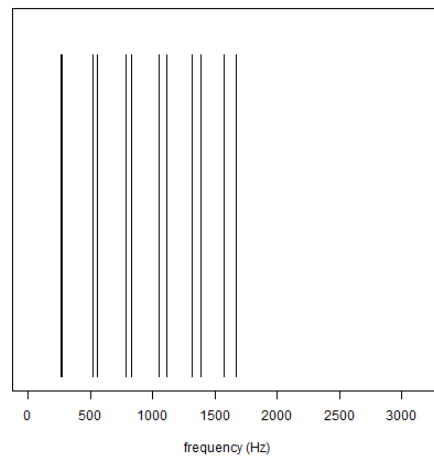
等価騒音レベル 71.7  $L_{Aeq}$



### 3. 短 2 度, 12 成分複合音, 波形とパワースペクトル

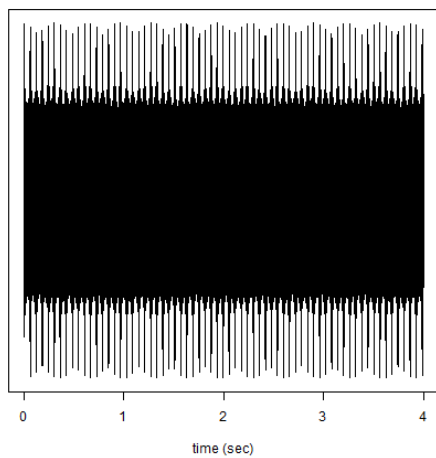


C&Cis

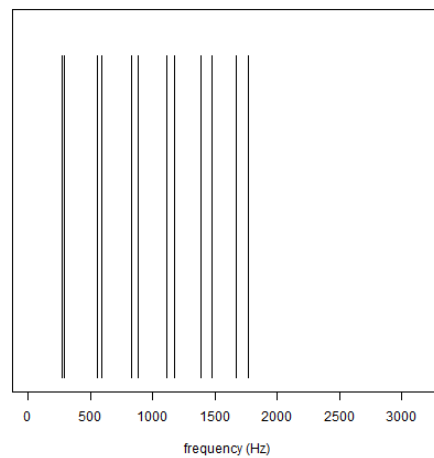


C&Cis

等価騒音レベル 62.9 LAeq

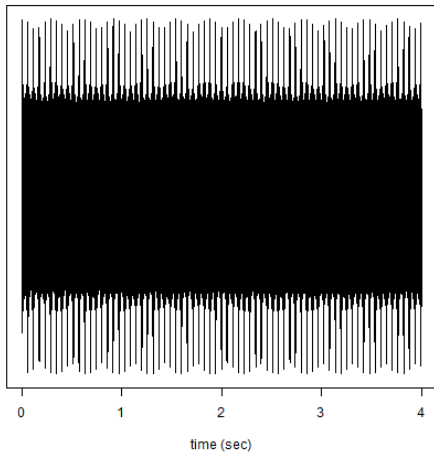


Cis&D

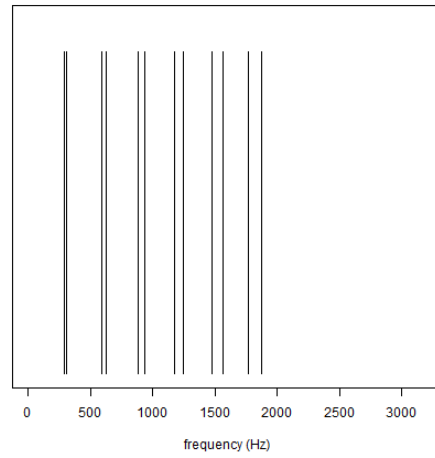


Cis&D

等価騒音レベル 63.4 LAeq

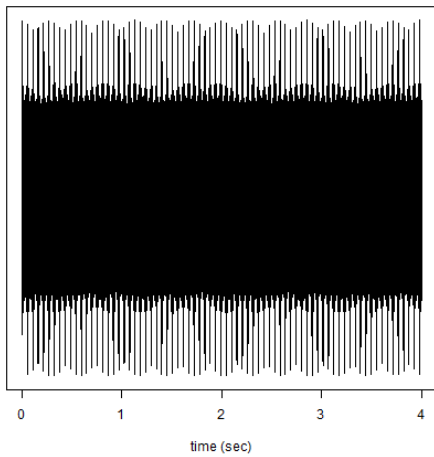


D&Dis

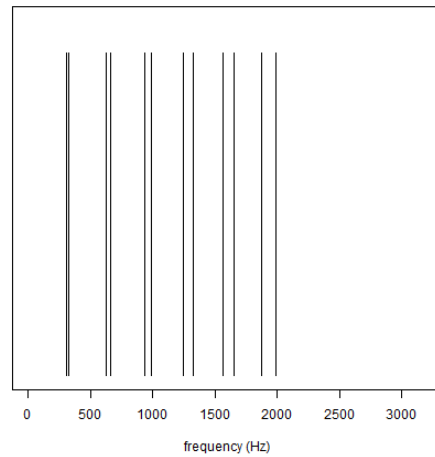


D&Dis

等価騒音レベル 63.8 LAeq

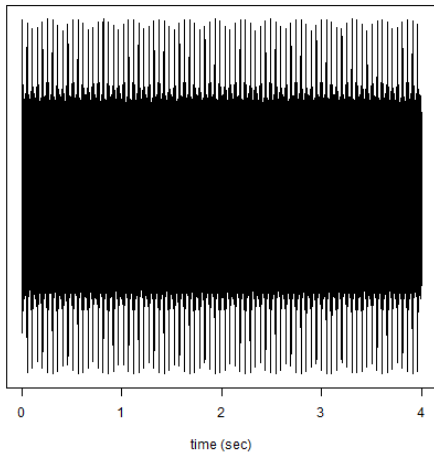


Dis&E

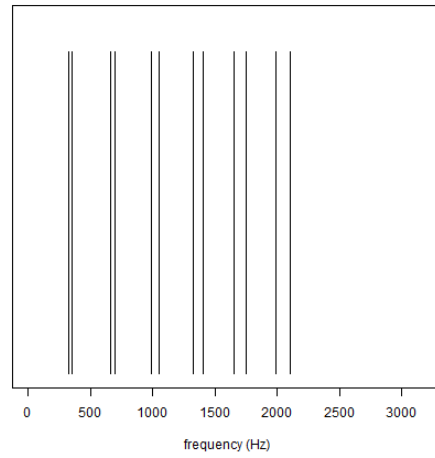


Dis&E

等価騒音レベル 64.2 LAeq

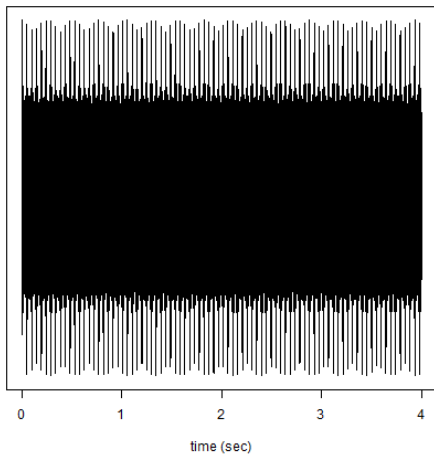


E&F

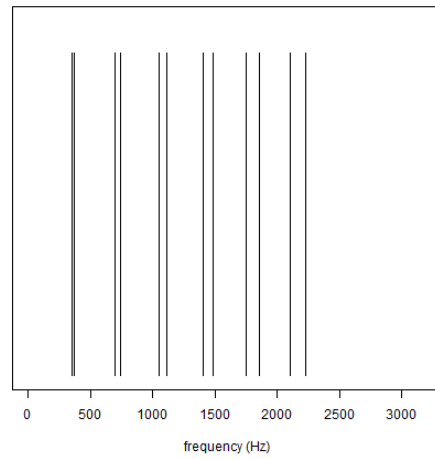


E&F

等価騒音レベル 64.8 LAeq

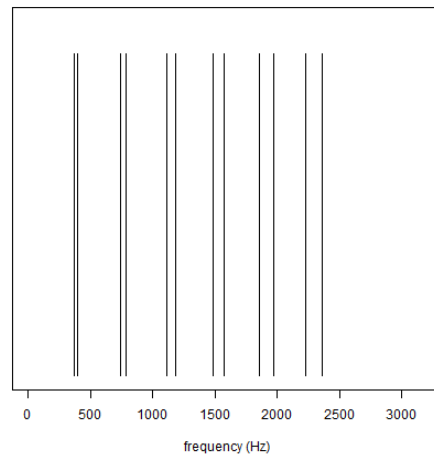
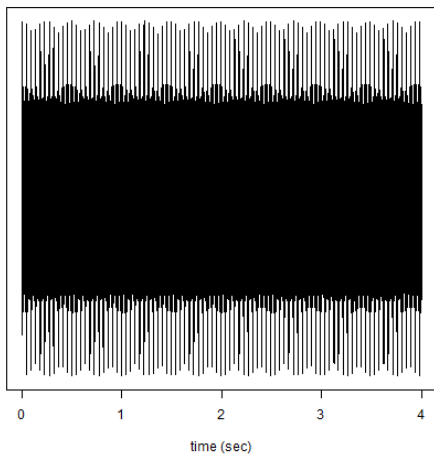


F&Fis



F&Fis

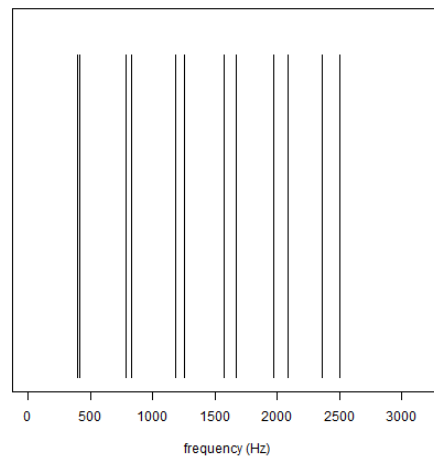
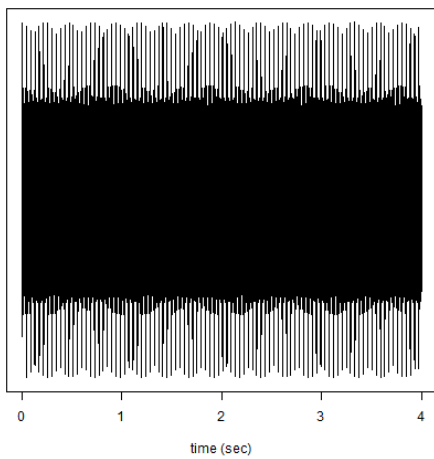
等価騒音レベル 65.2 LAeq



Fis&G

Fis&G

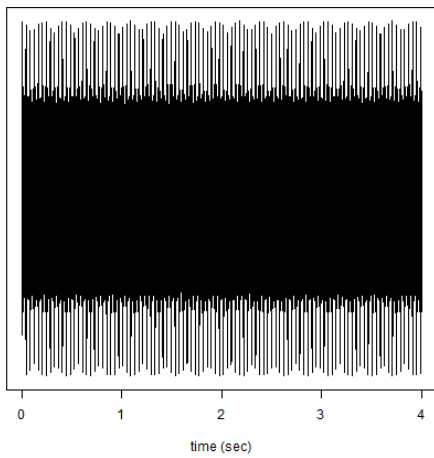
等価騒音レベル 65.4  $L_{Aeq}$



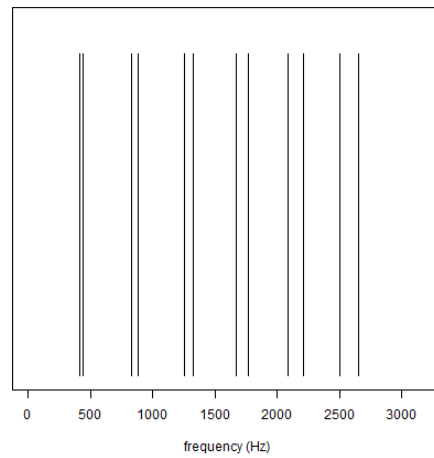
G&Gis

G&Gis

等価騒音レベル 65.7  $L_{Aeq}$

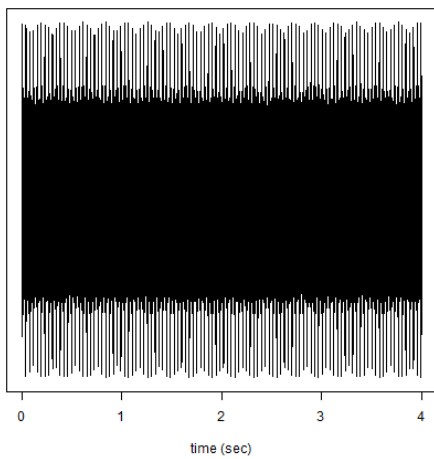


Gis&A

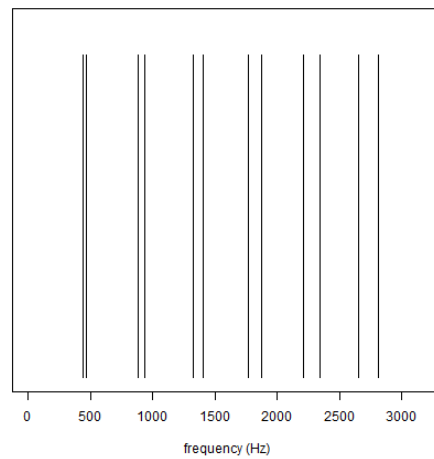


Gis&A

等価騒音レベル 65.8  $L_{Aeq}$

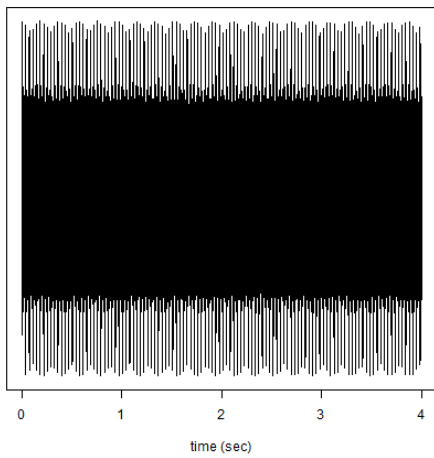


A&Ais

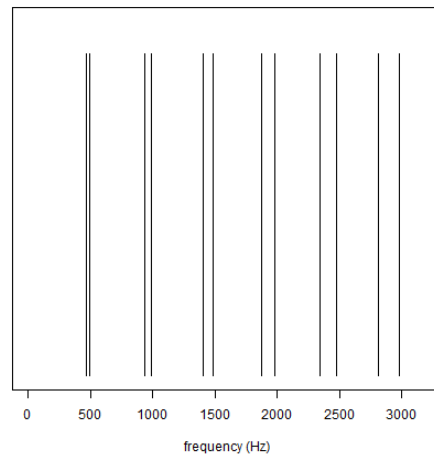


A&Ais

等価騒音レベル 65.9  $L_{Aeq}$

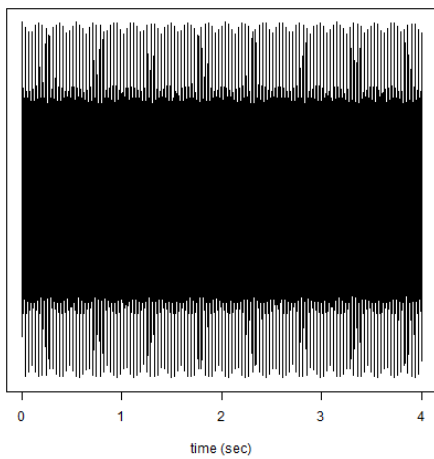


Ais&H

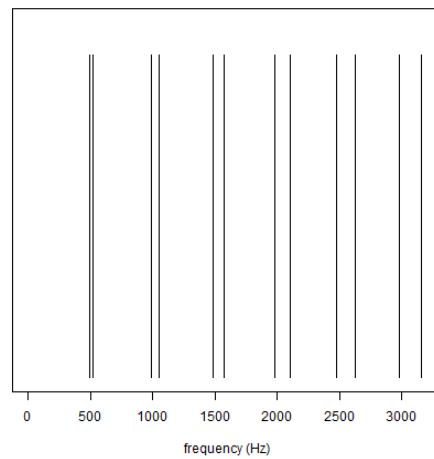


Ais&H

等価騒音レベル 65.9  $L_{Aeq}$



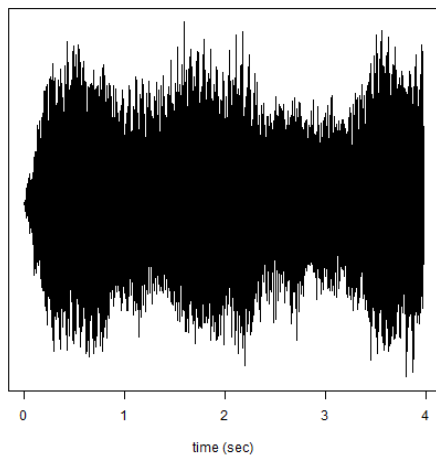
H&C



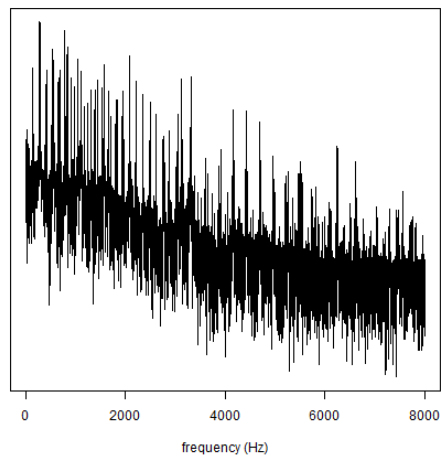
H&C

等価騒音レベル 66  $L_{Aeq}$

#### 4. 短 2 度, サンプリングオルガン音, 波形とパワースペクトル

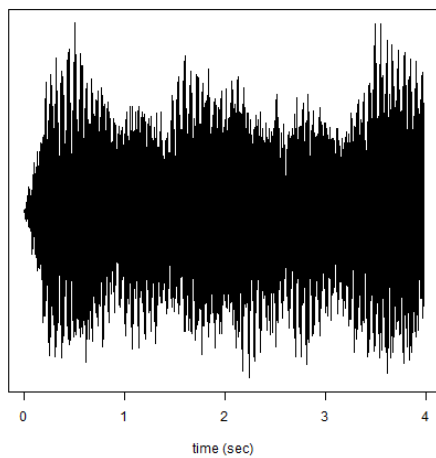


C&Cis

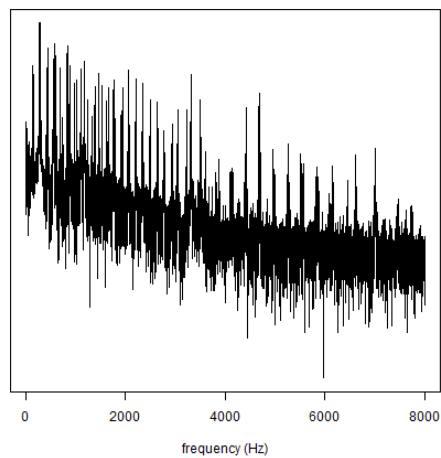


C&Cis

等価騒音レベル 53.78 LAeq

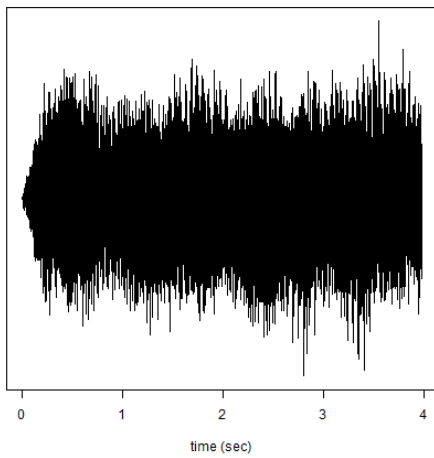


Cis&D

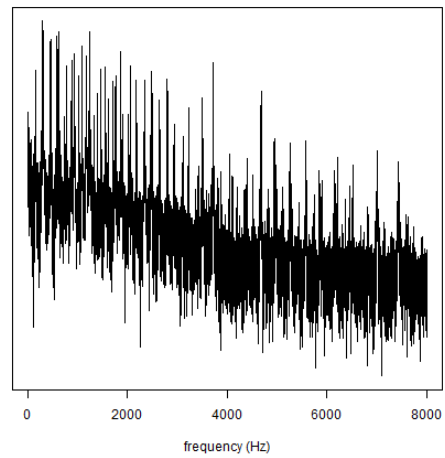


Cis&D

等価騒音レベル 52.68 LAeq

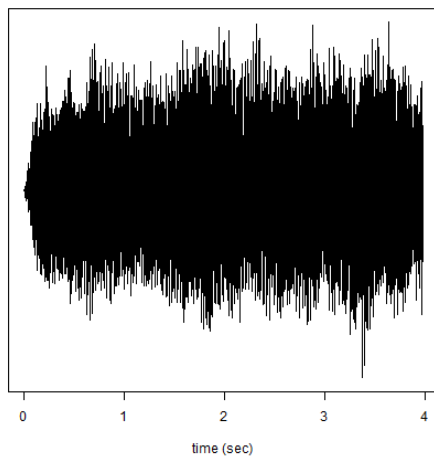


D&Dis

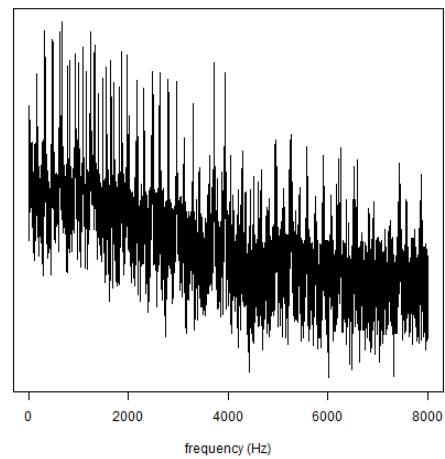


D&Dis

等価騒音レベル 53.7  $L_{Aeq}$



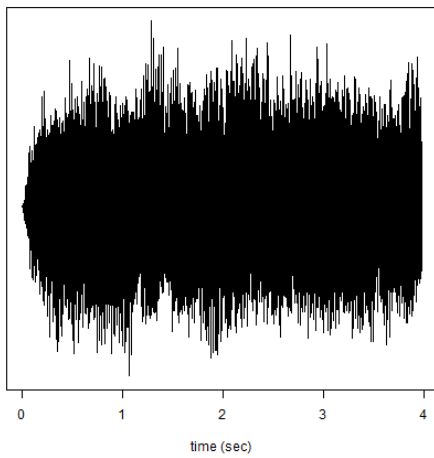
Dis&E



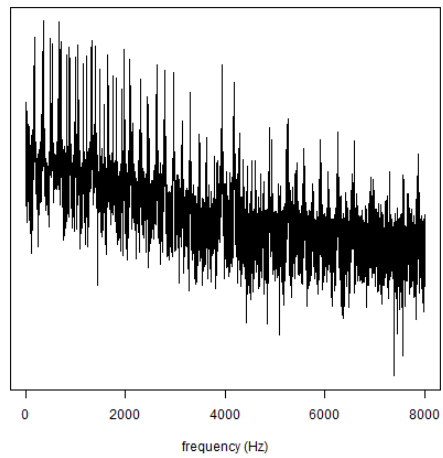
Dis&E

等価騒音レベル 57.24  $L_{Aeq}$



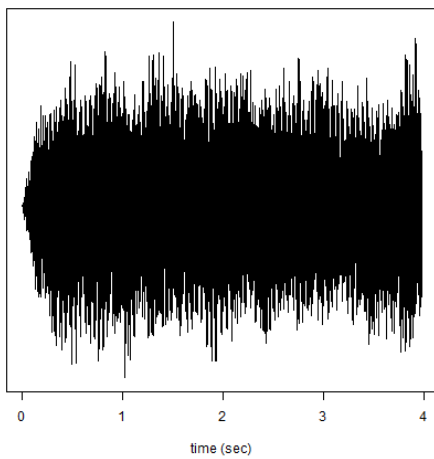


E&F

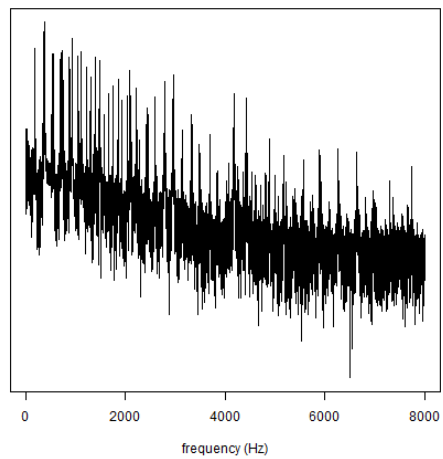


E&F

等価騒音レベル 56.42  $L_{Aeq}$

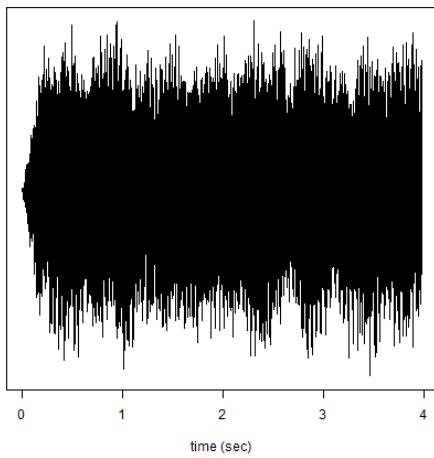


F&Fis

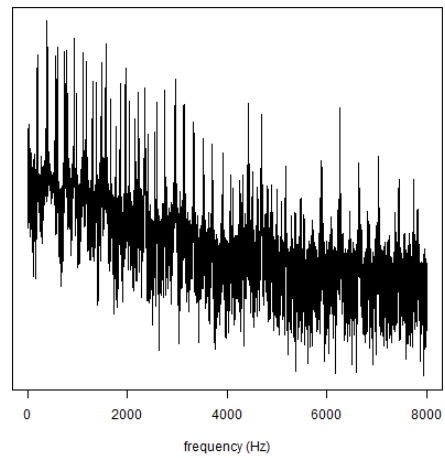


F&Fis

等価騒音レベル 55.56  $L_{Aeq}$

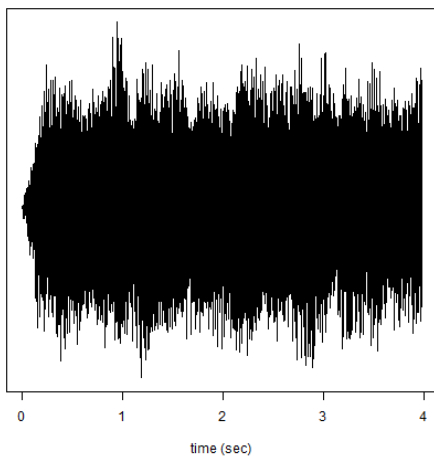


Fis&G

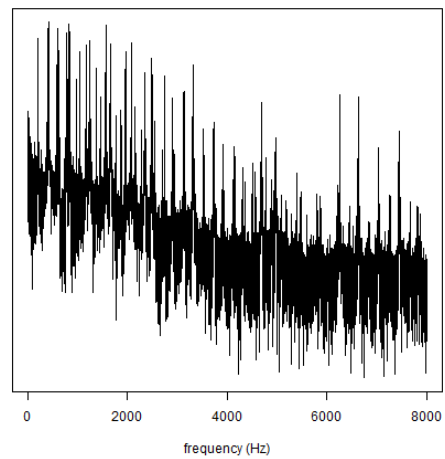


Fis&G

等価騒音レベル 57.88 LAeq

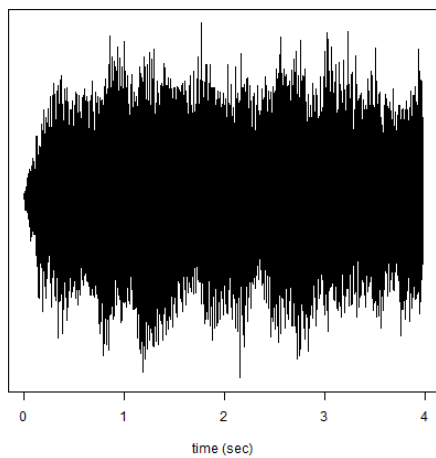


G&Gis

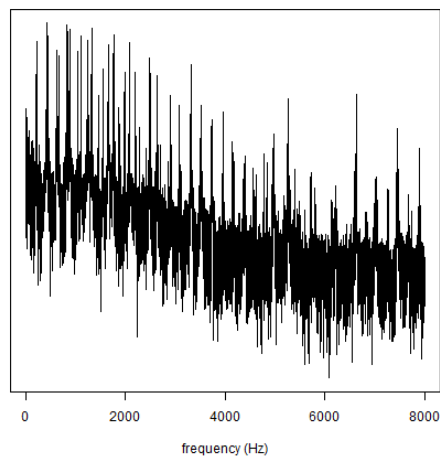


G&Gis

等価騒音レベル 54.62 LAeq

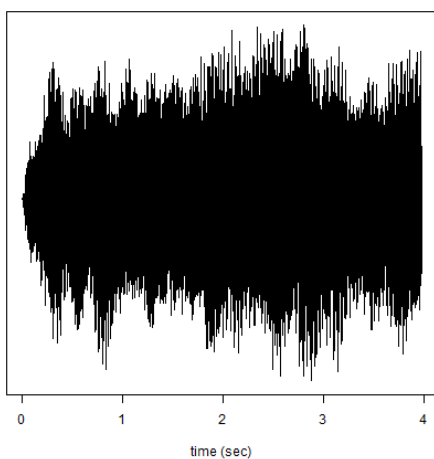


Gis&A

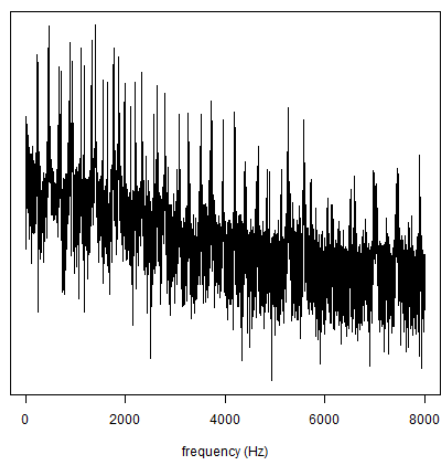


Gis&A

等価騒音レベル 56.68  $L_{Aeq}$

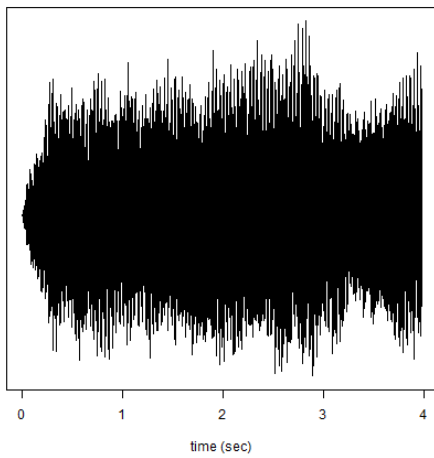


A&Ais

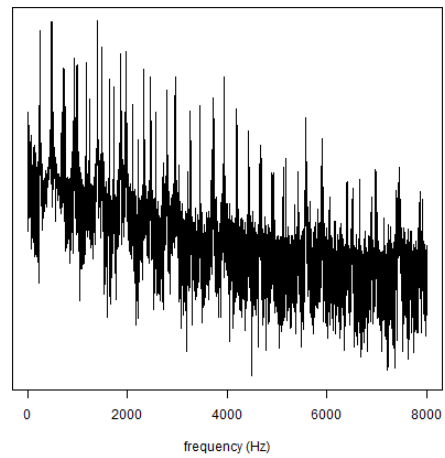


A&Ais

等価騒音レベル 58.36  $L_{Aeq}$

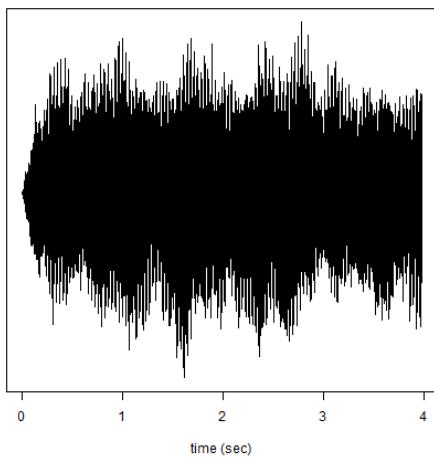


Ais&H

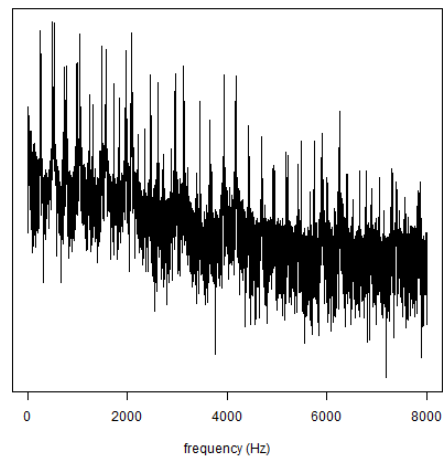


Ais&H

等価騒音レベル 58.08  $L_{Aeq}$



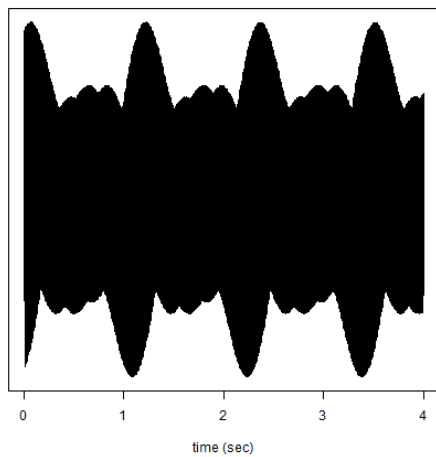
H&C



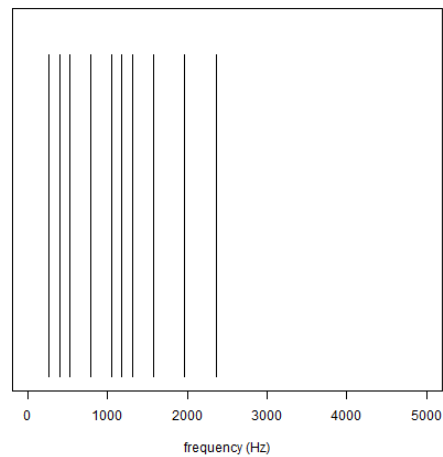
H&C

等価騒音レベル 57.74  $L_{Aeq}$

## 5. 完全5度，12成分複合音，波形とパワースペクトル

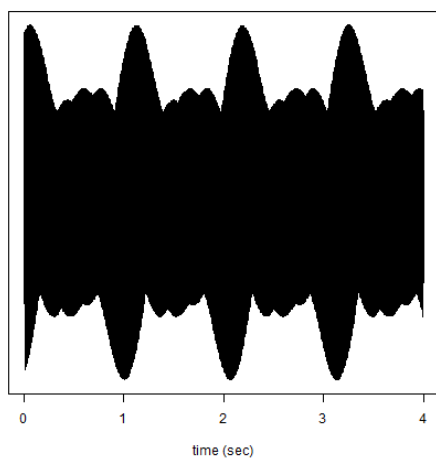


C&G

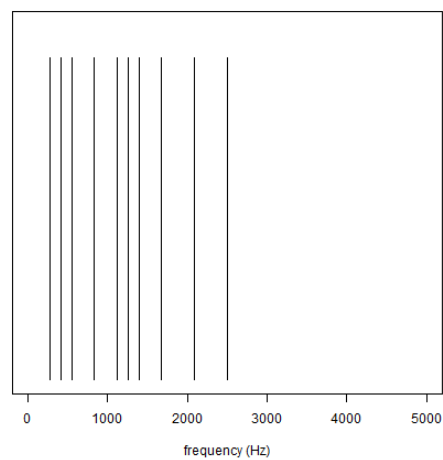


C&G

等価騒音レベル 51.18 LAeq

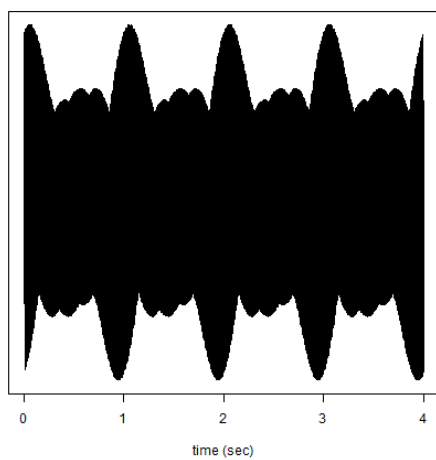


Cis&Gis

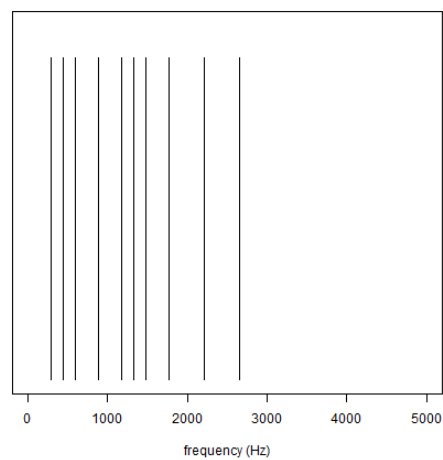


Cis&Gis

等価騒音レベル 51.02 LAeq

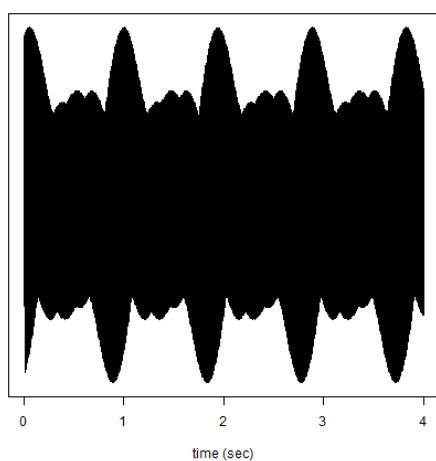


D&A

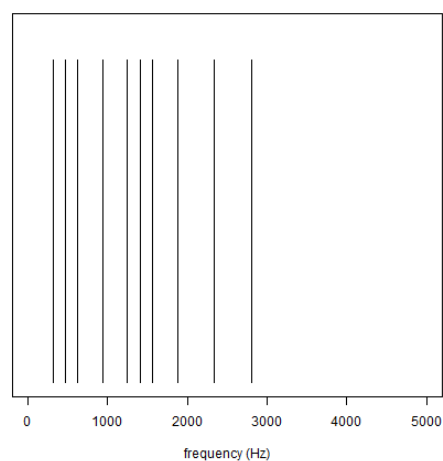


D&A

等価騒音レベル 50.74  $L_{Aeq}$

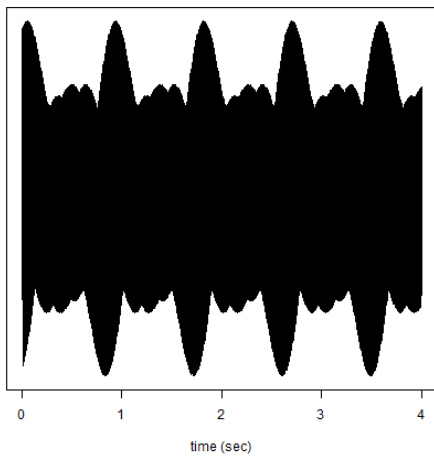


Dis&Ais

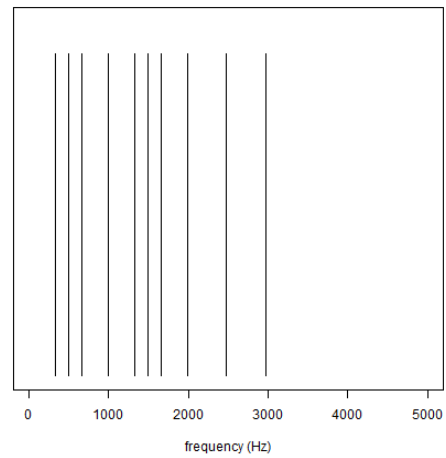


Dis&Ais

等価騒音レベル 51.04  $L_{Aeq}$

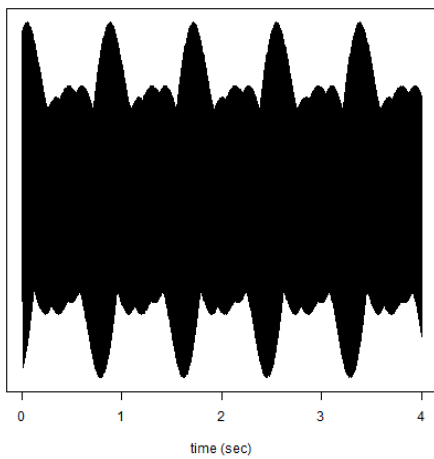


E&H

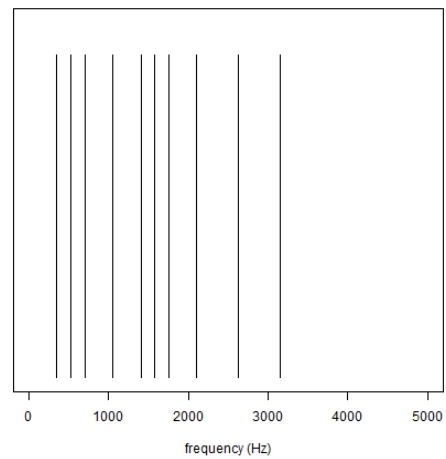


E&H

等価騒音レベル  $51.1 L_{Aeq}$

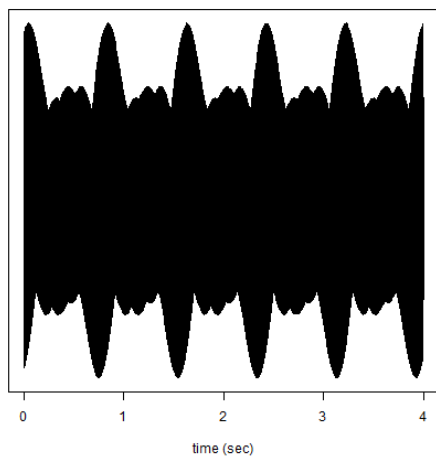


F&C

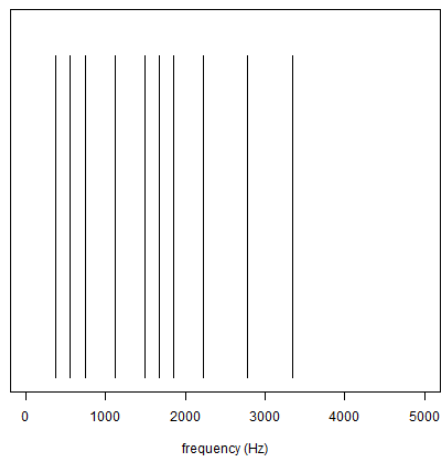


F&C

等価騒音レベル  $50.54 L_{Aeq}$

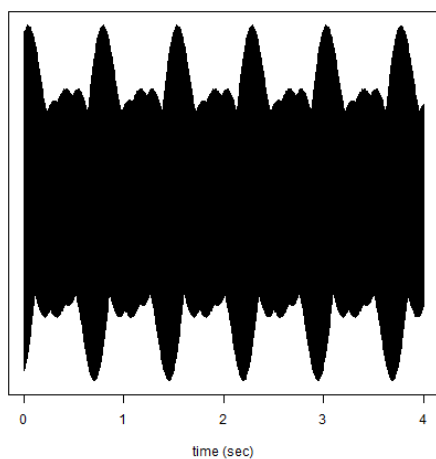


Fis&Cis

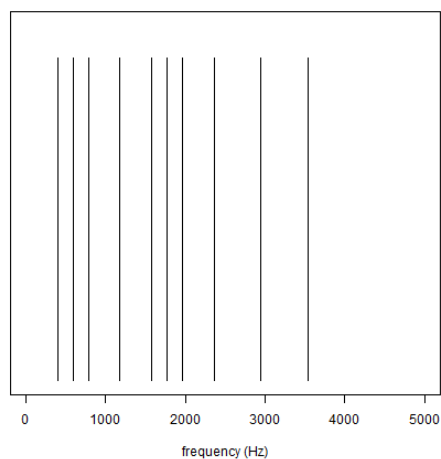


Fis&Cis

等価騒音レベル 50.34  $L_{Aeq}$



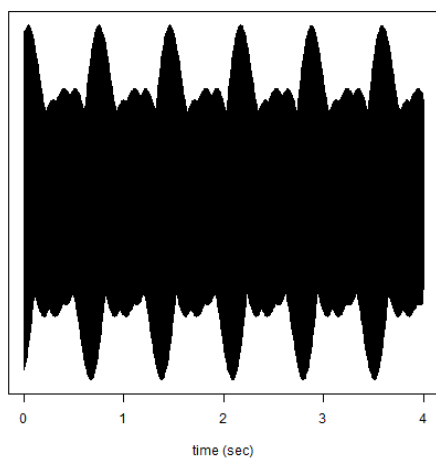
G&D



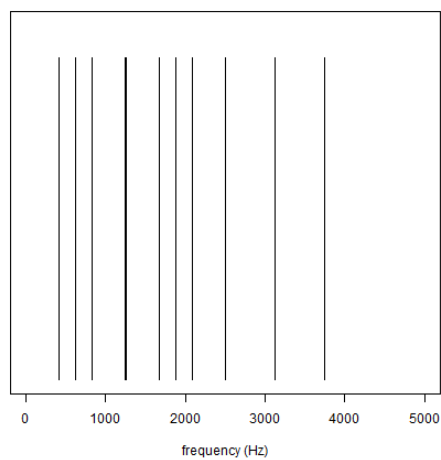
G&D

等価騒音レベル 50.12  $L_{Aeq}$



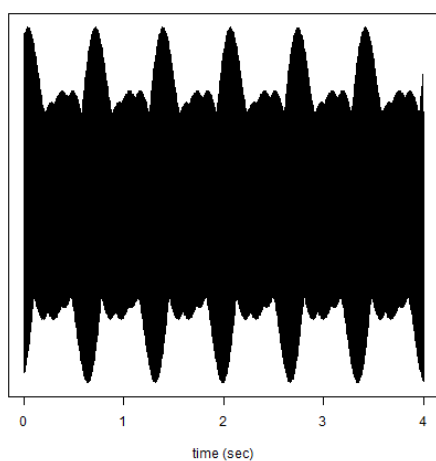


Gis&Dis

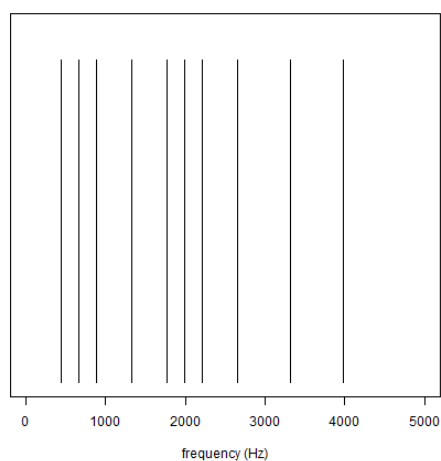


Gis&Dis

等価騒音レベル 50.56  $L_{Aeq}$

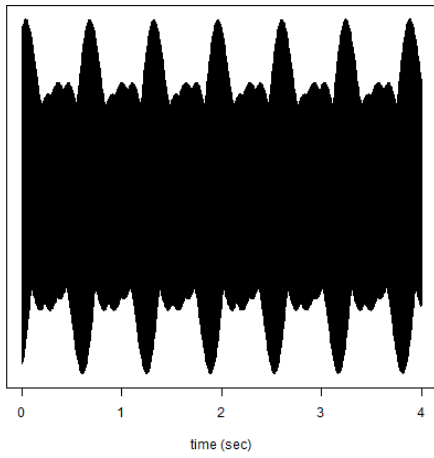


A&E

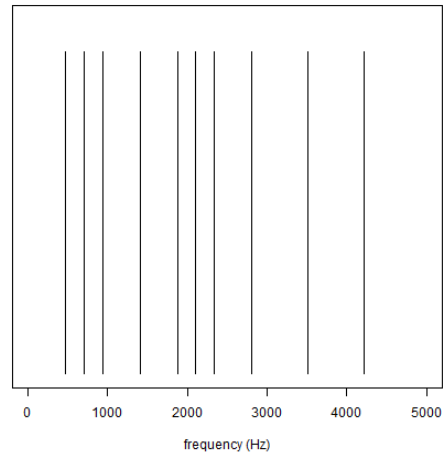


A&E

等価騒音レベル 50.34  $L_{Aeq}$

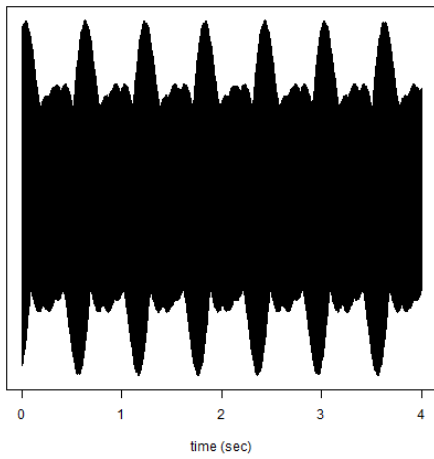


Ais&Eis

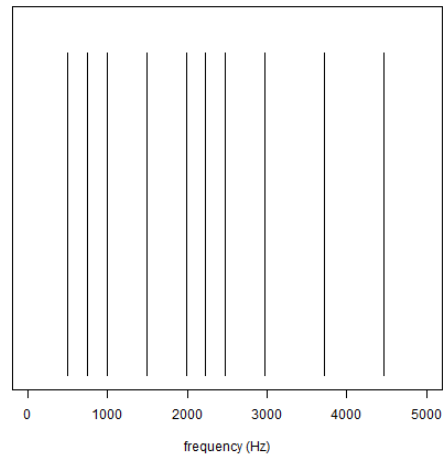


Ais&Eis

等価騒音レベル 50.16  $L_{Aeq}$



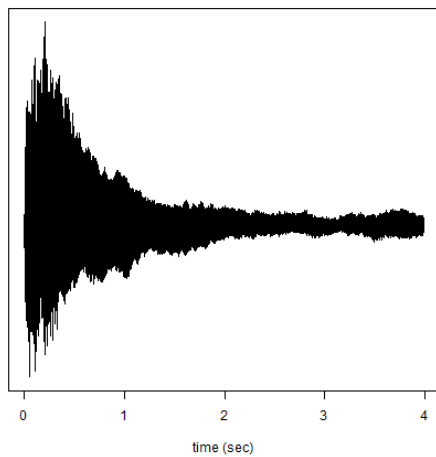
H&Fis



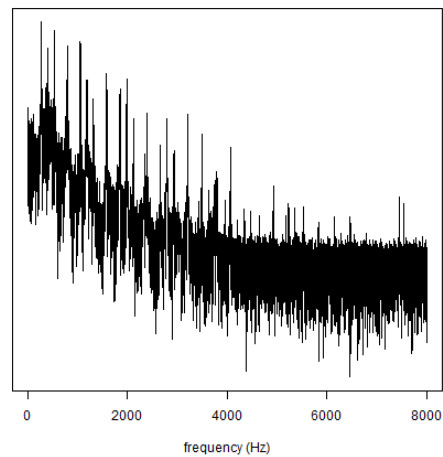
H&Fis

等価騒音レベル 50.16  $L_{Aeq}$

## 6. 完全5度，サンプリングピアノ音，波形とパワースペクトル

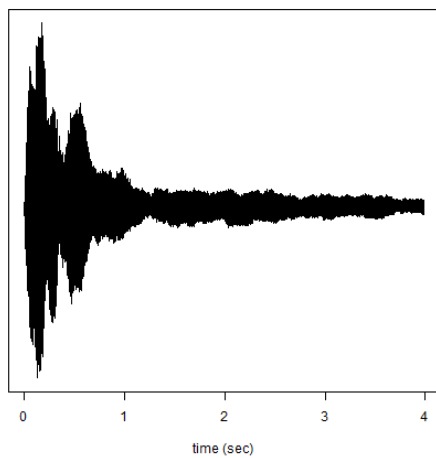


C&G

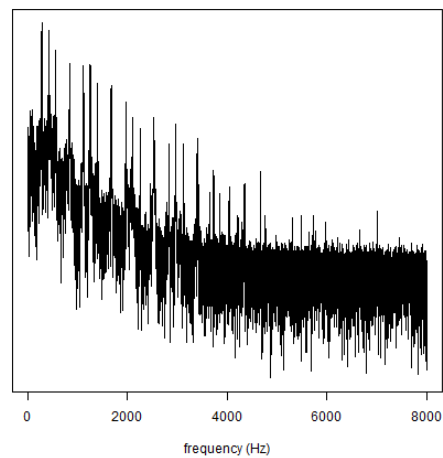


C&G

等価騒音レベル 47.8 LAeq

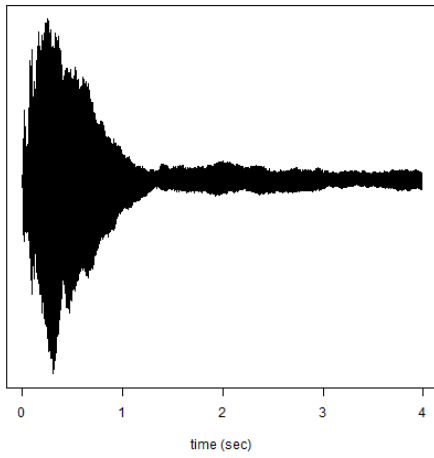


Cis&Gis

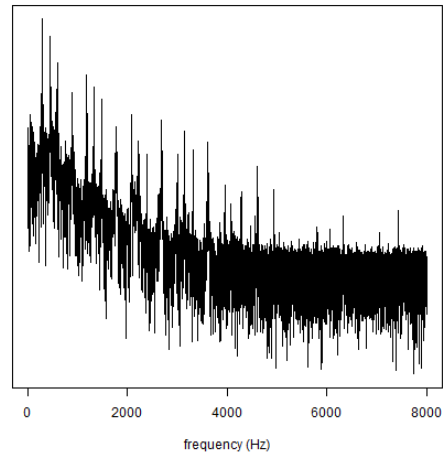


Cis&Gis

等価騒音レベル 46.02 LAeq

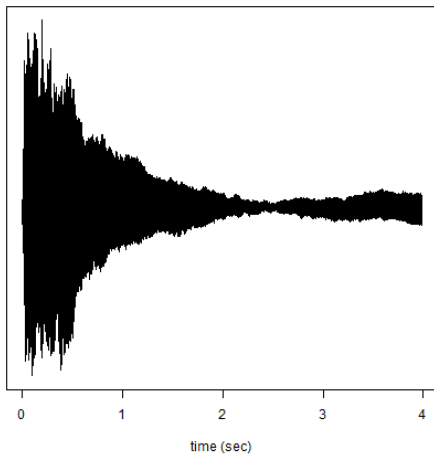


D&A

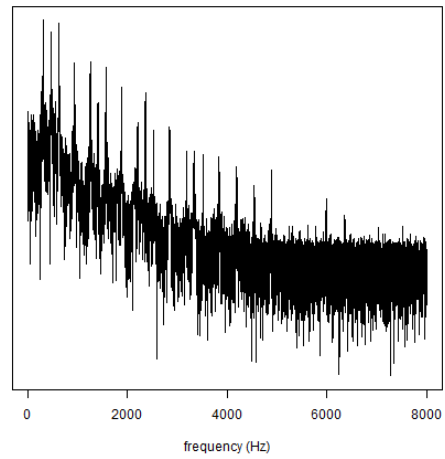


D&A

等価騒音レベル 44.46  $L_{Aeq}$

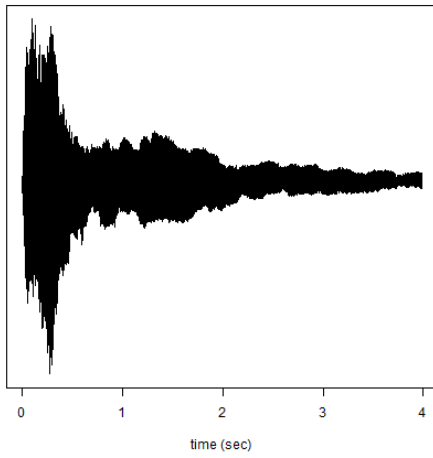


Dis&Ais

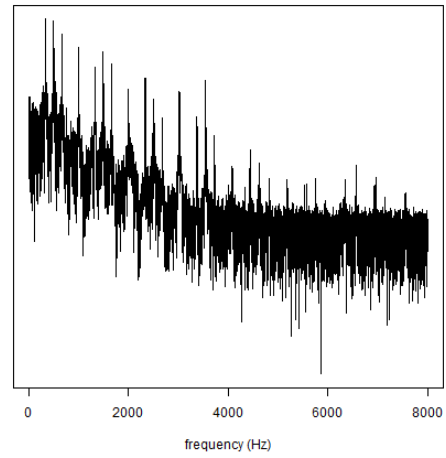


Dis&Ais

等価騒音レベル 51.3  $L_{Aeq}$

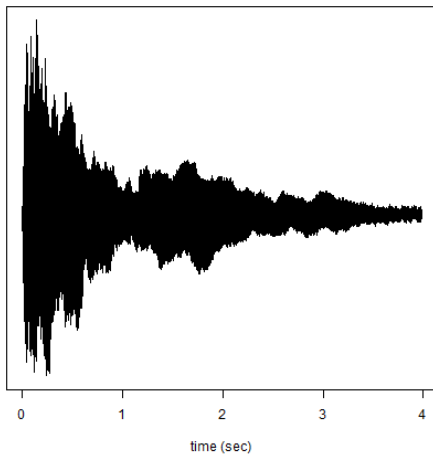


E&H

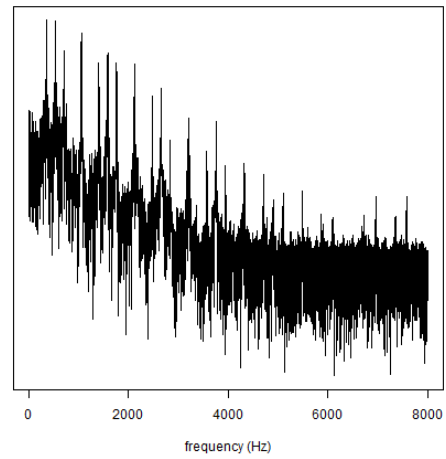


E&H

等価騒音レベル 46.28  $L_{Aeq}$

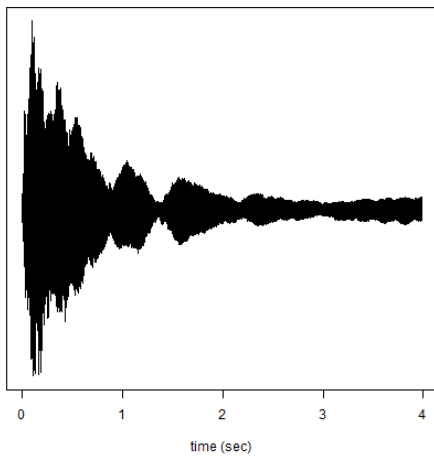


F&C

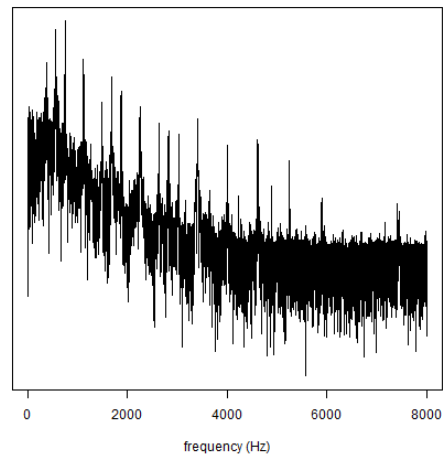


F&C

等価騒音レベル 46.58  $L_{Aeq}$

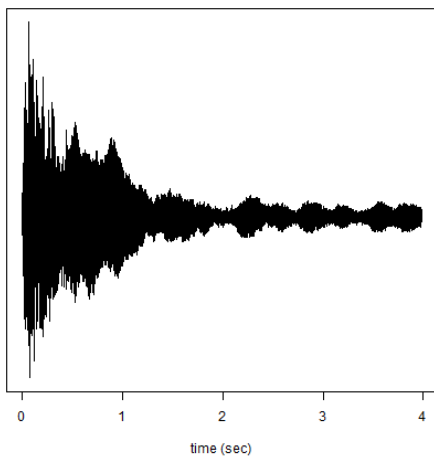


Fis&Cis

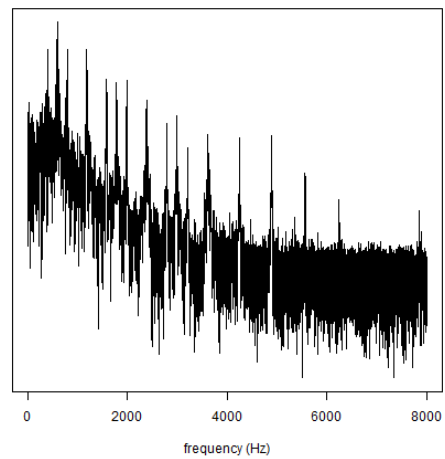


Fis&Cis

等価騒音レベル 47.06  $L_{Aeq}$

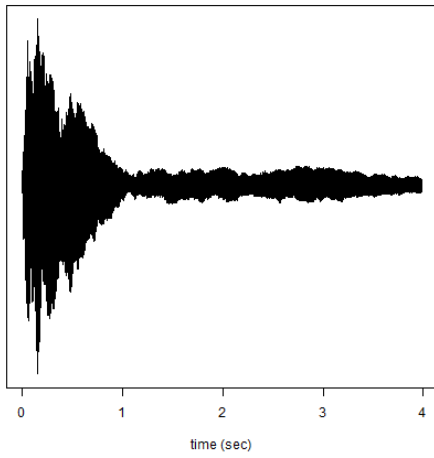


G&D

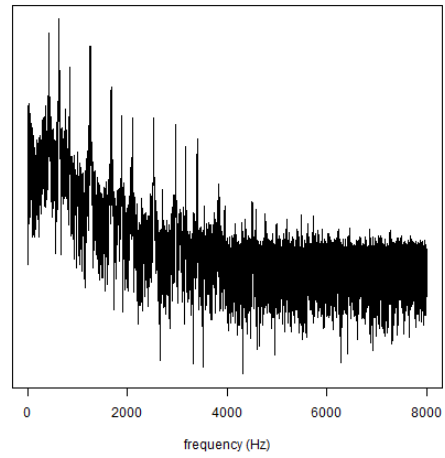


G&D

等価騒音レベル 49.52  $L_{Aeq}$

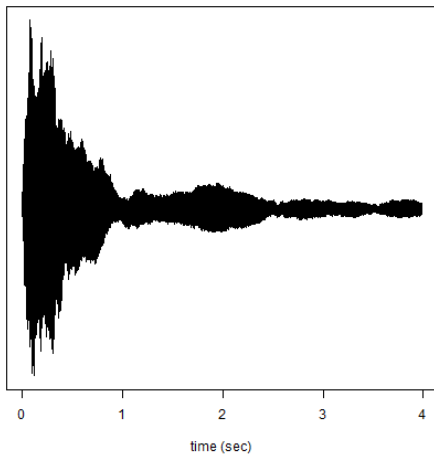


Gis&Dis

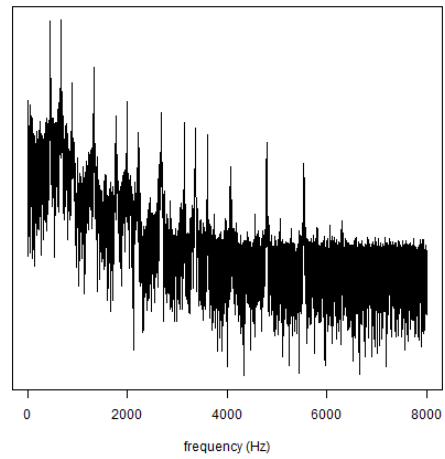


Gis&Dis

等価騒音レベル 46.32  $L_{Aeq}$

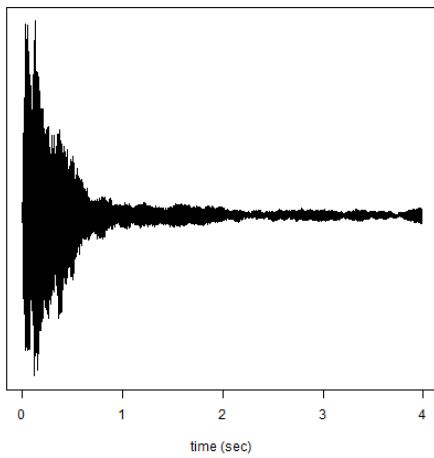


A&E

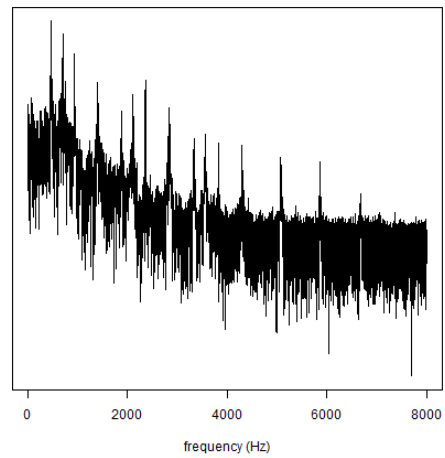


A&E

等価騒音レベル 48.62  $L_{Aeq}$

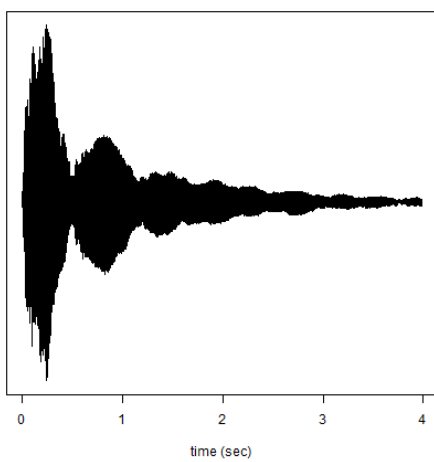


Ais&Eis

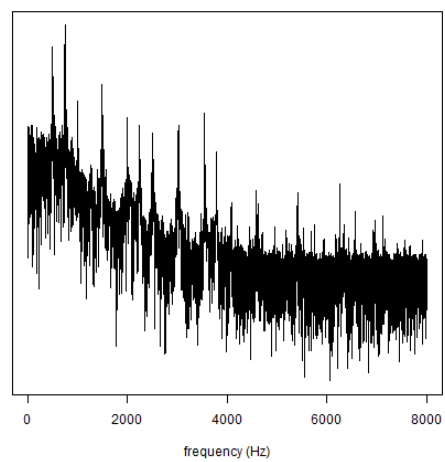


Ais&Eis

等価騒音レベル 49.08  $L_{Aeq}$



H&F

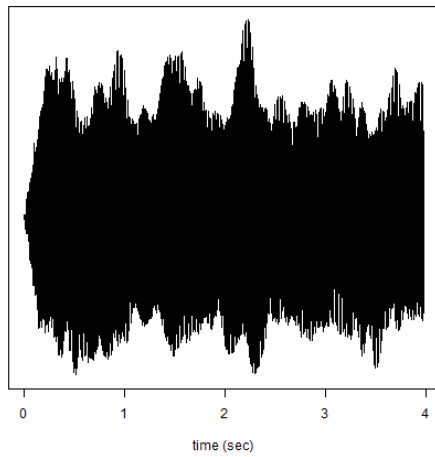


H&F

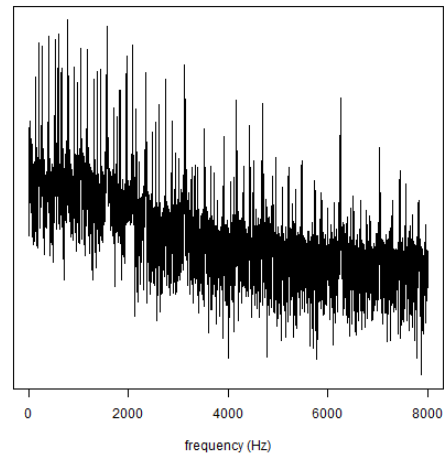
等価騒音レベル 47.32  $L_{Aeq}$



## 7. 完全5度，サンプリングオルガン音，波形とパワースペクトル

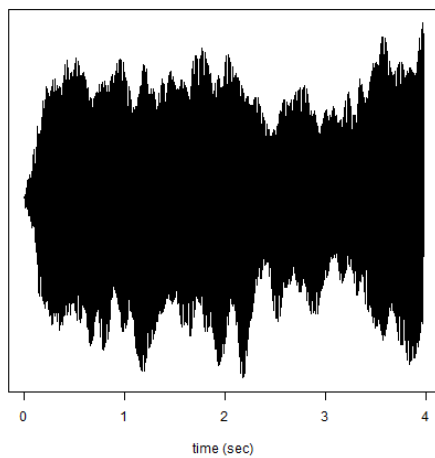


C&G

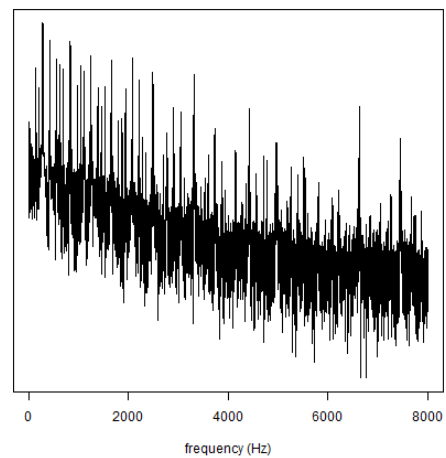


C&G

等価騒音レベル 57.52 LAeq

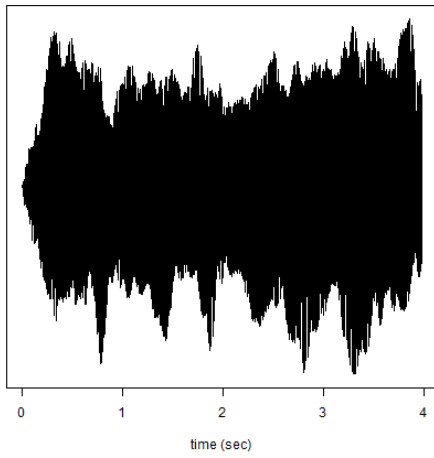


Cis&Gis

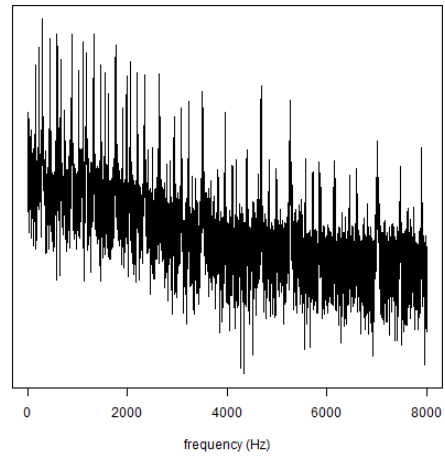


Cis&Gis

等価騒音レベル 56.5 LAeq

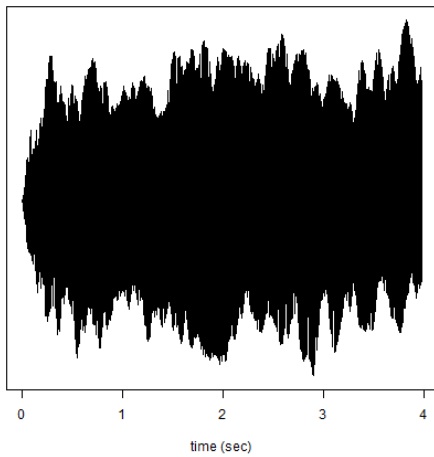


D&A

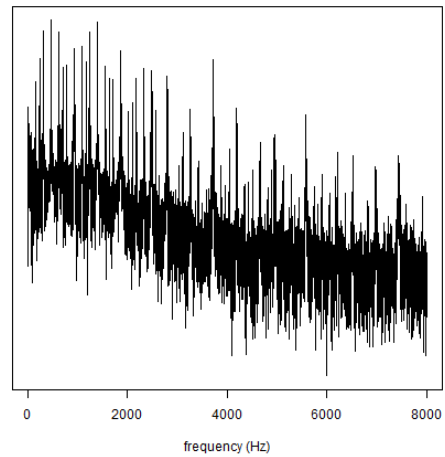


D&A

等価騒音レベル 55.54  $L_{Aeq}$

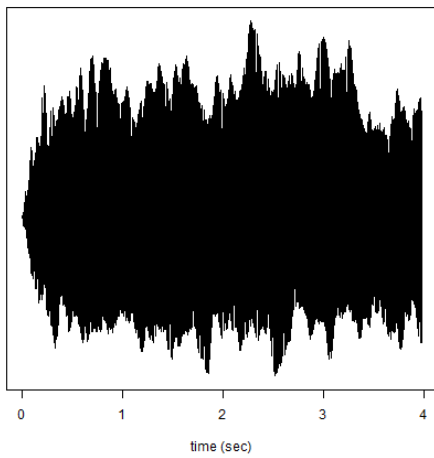


Dis&Ais

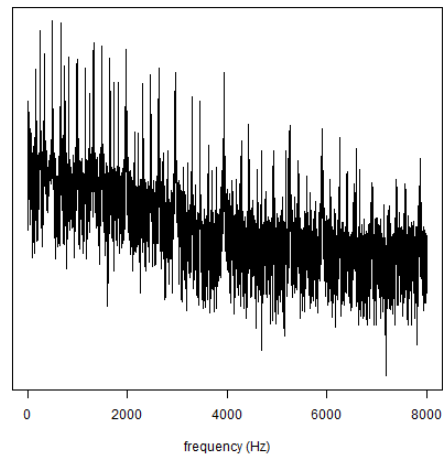


Dis&Ais

等価騒音レベル 59.38  $L_{Aeq}$

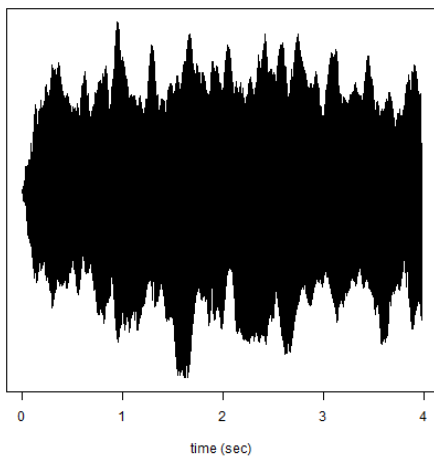


E&H

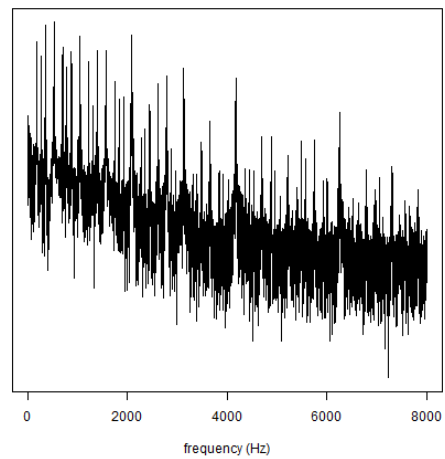


E&H

等価騒音レベル 57.08  $L_{Aeq}$

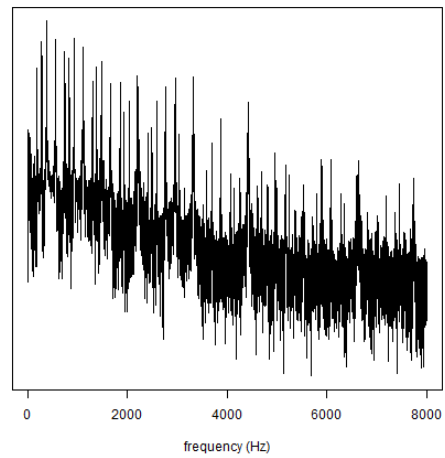
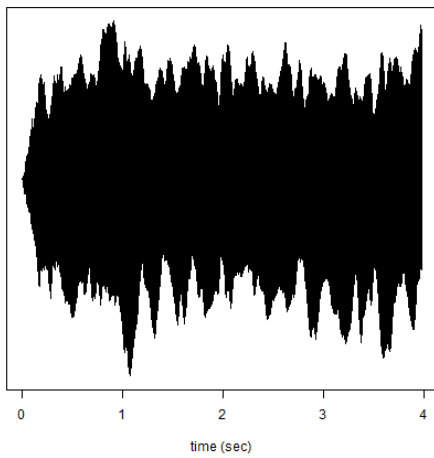


F&C



F&C

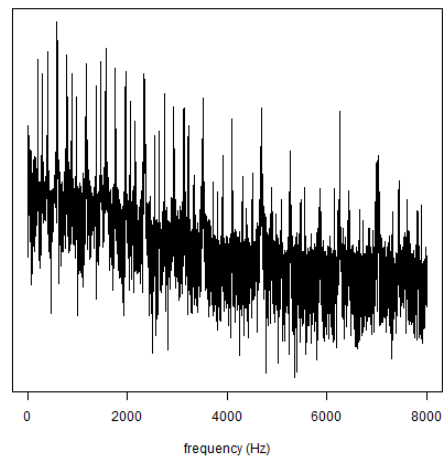
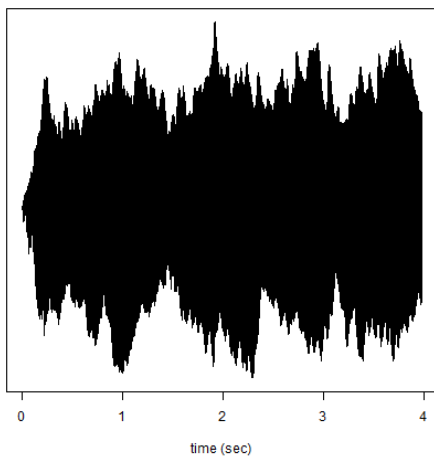
等価騒音レベル 58.16  $L_{Aeq}$



Fis&Cis

Fis&Cis

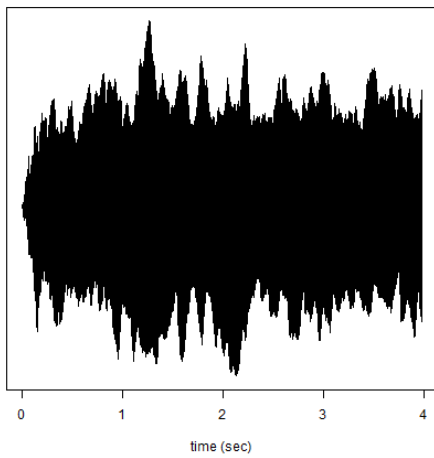
等価騒音レベル 59.38 LAeq



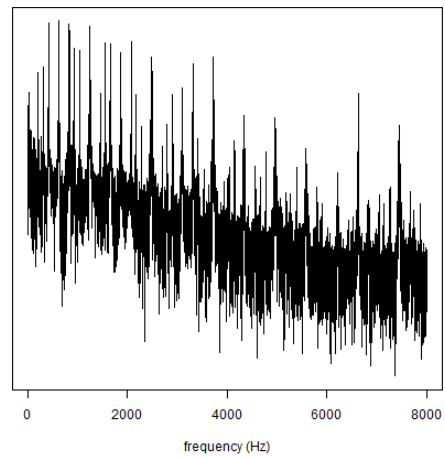
G&D

G&D

等価騒音レベル 57.2 LAeq

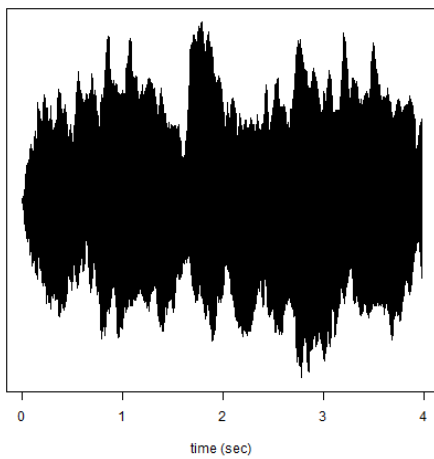


Gis&Dis

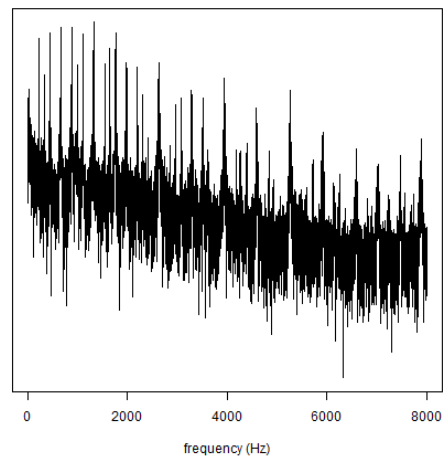


Gis&Dis

等価騒音レベル 56.94  $L_{Aeq}$

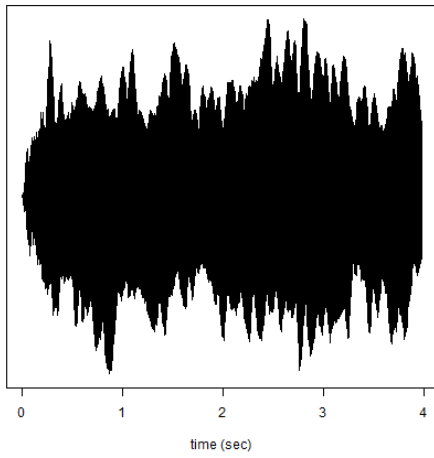


A&E

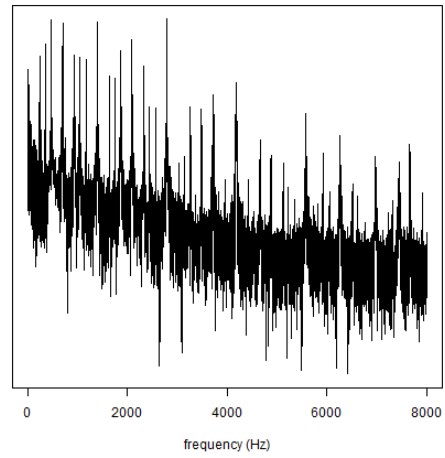


A&E

等価騒音レベル 60.08  $L_{Aeq}$

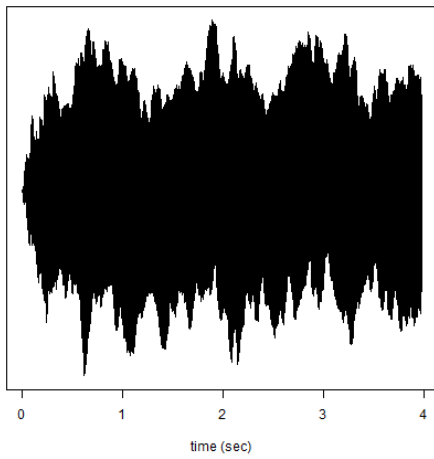


Ais&Eis

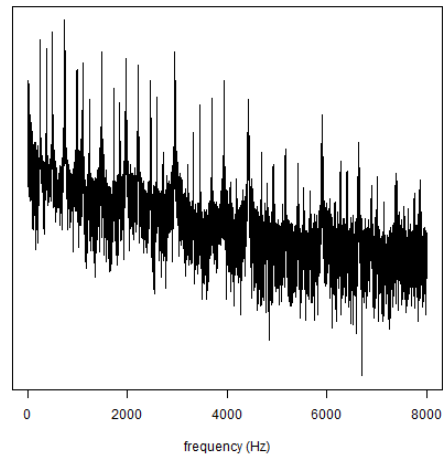


Ais&Eis

等価騒音レベル 59.9 LAeq



H&Fis

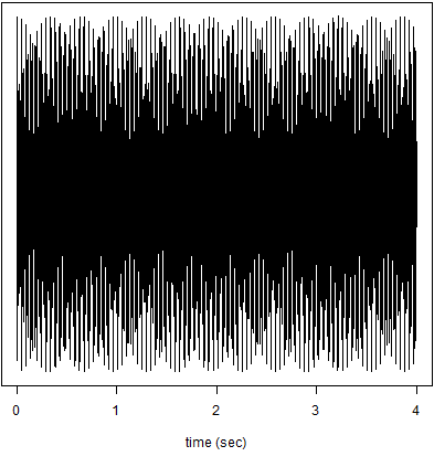


H&Fis

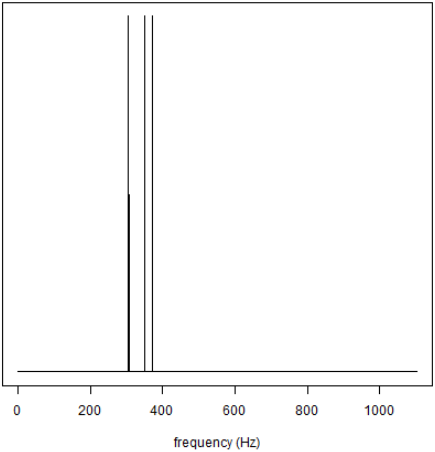
等価騒音レベル 59.42 LAeq

8. 3 成分複合音，波形とパワースペクトル

\*キャプションは固定されない f3 の周波数

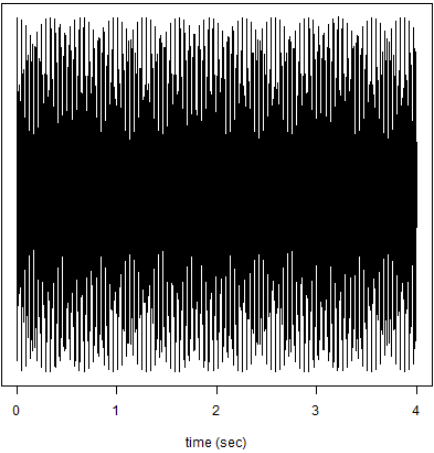


306

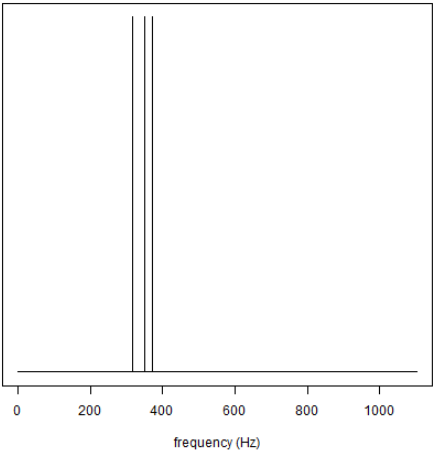


306

等価騒音レベル 59.86 LAeq

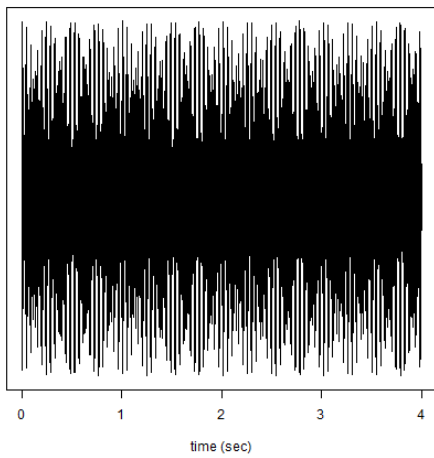


316

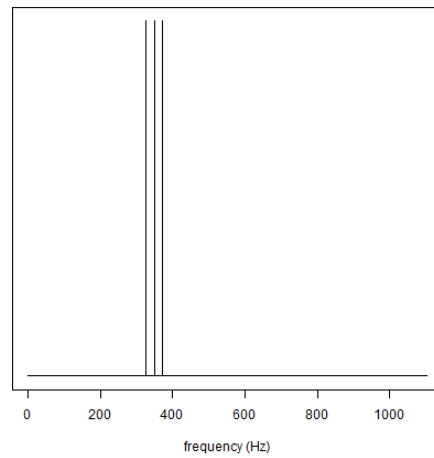


316

等価騒音レベル 59.78 LAeq

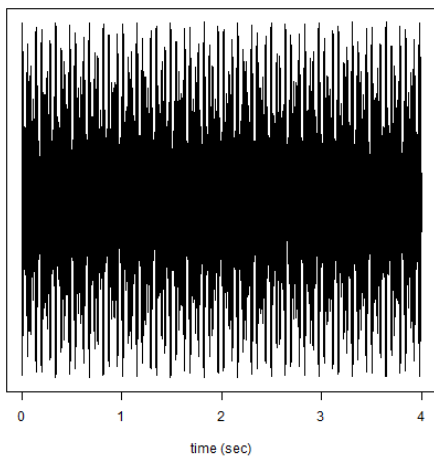


326

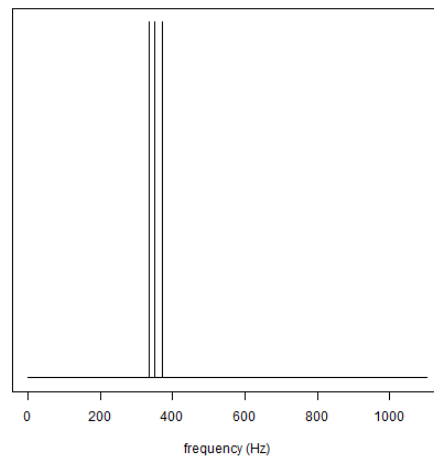


326

等価騒音レベル 59.86  $L_{Aeq}$



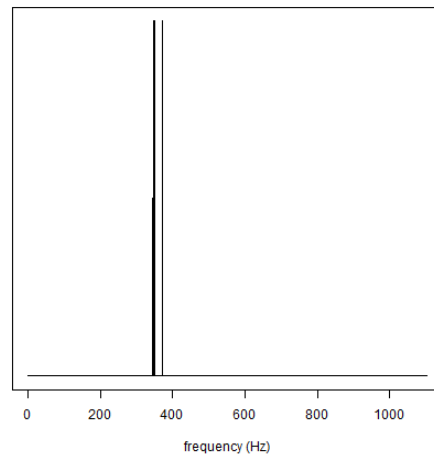
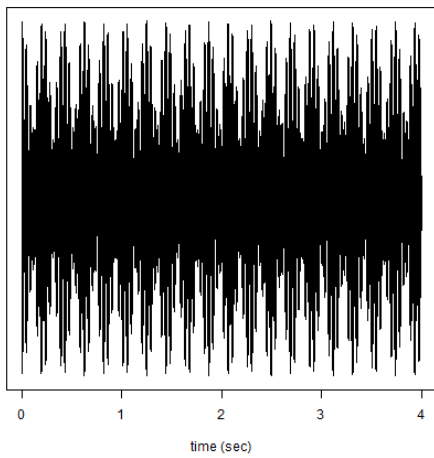
336



336

等価騒音レベル 59.98  $L_{Aeq}$

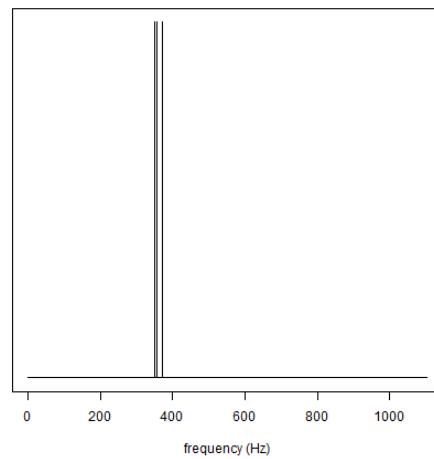
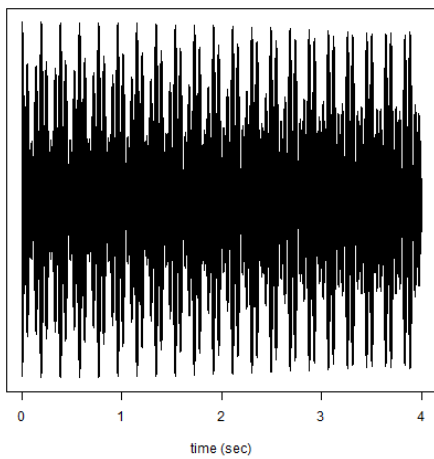




346

346

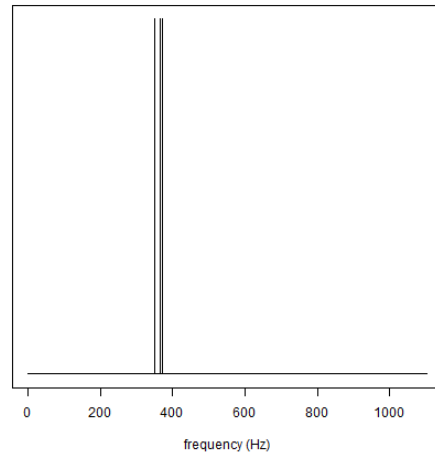
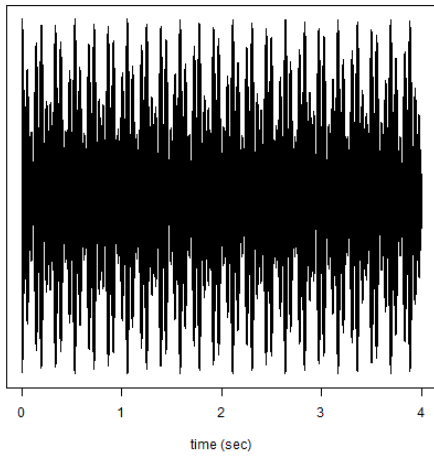
等価騒音レベル 60.22  $L_{Aeq}$



356

356

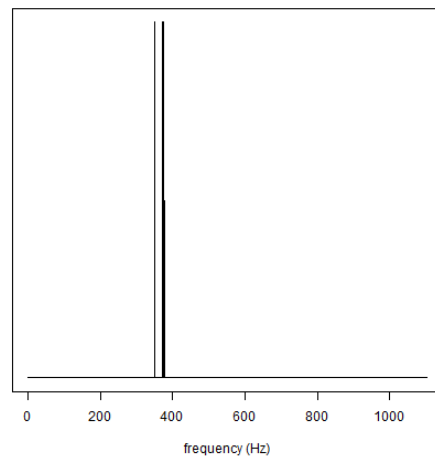
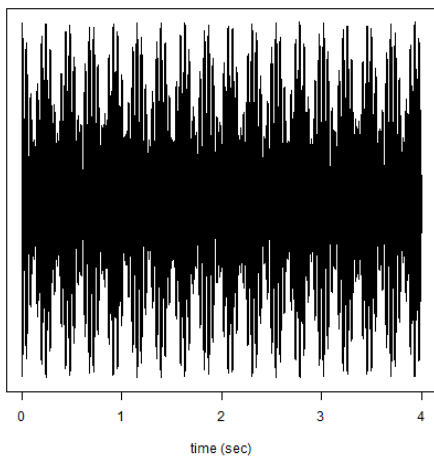
等価騒音レベル 60.56  $L_{Aeq}$



366

366

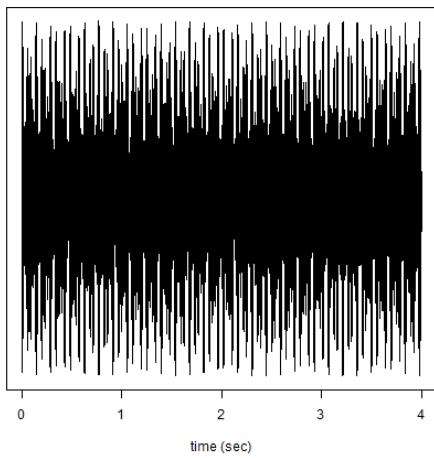
等価騒音レベル 60.98  $L_{Aeq}$



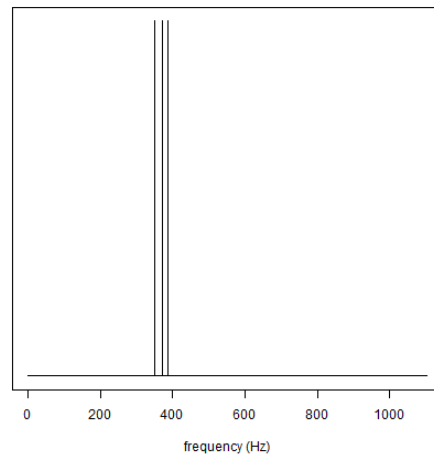
376

376

等価騒音レベル 61.7  $L_{Aeq}$

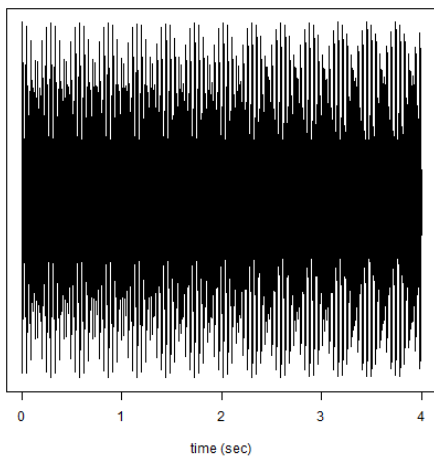


386

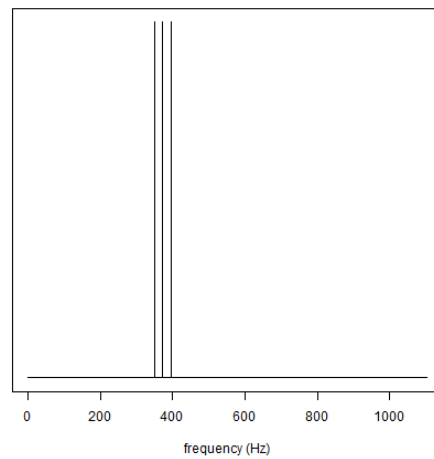


386

等価騒音レベル 62.3  $L_{Aeq}$

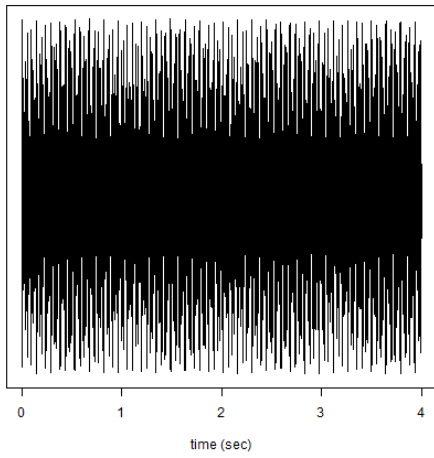


396

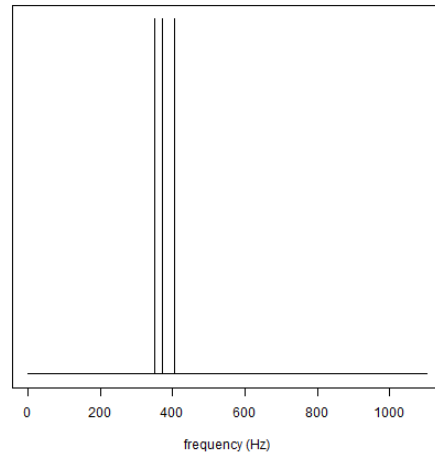


396

等価騒音レベル 62.6  $L_{Aeq}$

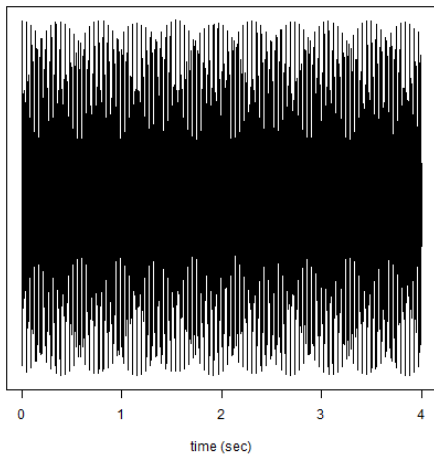


406

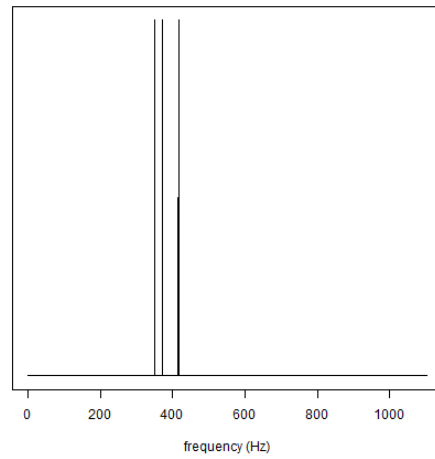


406

等価騒音レベル 62.96  $L_{Aeq}$



416



416

等価騒音レベル 63.4  $L_{Aeq}$