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

Title	【課題研究報告書】音質評価指標を用いた感覚的快さと感覚的快くなさの評価に関する調査
Author(s)	谷口, 亮太郎
Citation	
Issue Date	2024-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/18909
Rights	
Description	Supervisor: 鵜木 祐史, 先端科学技術研究科, 修士(情報科学)

JAIST
JAPAN
ADVANCED INSTITUTE OF
SCIENCE AND TECHNOLOGY

Japan Advanced Institute of Science and Technology

課題研究報告書

音質評価指標を用いた感覚的快さと感覚的快くなさの評価に関する調査

谷口亮太郎

主指導教員 鵜木 祐史

北陸先端科学技術大学院大学
先端科学技術研究科
（情報科学）

令和６年３月

Abstract

Sound is intricately woven into our daily lives, exerting a profound influence on the comfort of our environment. There are research dedicated to designing sound for the purpose of enhancing comfort. Examples of such research include the design of sounds for mechanical products like automobiles, the development of alert signals to evoke attention in emergency situations,and the broader field of sound environment design, encompassing the intentional shaping of acoustic environments. The aim of sound environment design is to create environments with acoustics that are more comfortable than those found in reality. Beyond sound environment design, there is also research to design environments. Examples include research in light environment design, focusing on creating pleasant lighting environments, as well as color environment design, aimed at designing environments with pleasing color schemes. In light environment design, illumination level for safety and pleasantness are quantified and systematized based on factors such as illuminance, brightness, and color temperature. In color environment design, the Color Harmony Theory quantifies and systematizes the emphasis or harmony between elements through the contrast of C colors in the Munsell color system, providing a numerical framework for understanding their mutual interactions. In sound environment design as well, the design of acoustic environments can be achieved by considering factors such as sound pressure level and frequency. However, while effective in removing unpleasant sounds, it may not necessarily contribute to the addition of new sounds in sound environment design.

The objective of this study is to investigate the feasibility of representing both pleasantness and unpleasantness on a single axis. If it proves possible to represent both pleasantness and unpleasantness on a single axis, it is conceivable that this could be beneficial not only in removing noisy sounds but also in aiding the addition of new sounds in sound environment design.

To investigate the feasibility of representing both pleasantness and unpleasantness on a single axis, the first step involves confirming the effectiveness of a model for calculating sensory pleasantness. Subsequently, the consideration will extend to whether the same model can be used to explain sensory unpleasantness as well. Finally, based on the obtained results, the study will reflect on whether it is possible to represent both sensory pleasantness and unpleasantness on a single axis. The model utilized in this study is the Aures model for sensory pleasantness. The Aures model is capable of calculating sensory pleasantness based on roughness, sharpness, tonality, and loudness. Artificial sounds will be employed in the experiments. The assessment was carried out through Thurstone‘s method of paired comparison. Two experiments were conducted, one focusing on pleasantness and the other on unpleasantness. The correlation between experiments results and

Aures model result was investigated.

The correlation between the experiment about pleasantness and the results of the Aures model was 0.2346. The correlation between the experiment about unpleasantness and the results of the Aures model was -0.2142. The observed decrease in correlation may be attributed to differences in the impact of roughness, sharpness, tonality, and loudness on sensory pleasantness compared to the findings in the Aures study. In the Aures model of sensory pleasantness, an increase in roughness, sharpness, and loudness is associated with a decrease in sensory pleasantness, while an increase in tonality is associated with an increase in sensory pleasantness. The results of the experiment showed little difference in sensory pleasantness between pure tones and bandpass noise, and the bandpass noise was not perceived as unpleasant. However, the Aures model evaluated bandpass noise as unpleasant. However, given that sensory pleasantness is known to be influenced by roughness, sharpness, tonality, and loudness in previous studies, it is conceivable that improving the correlation may be achieved by investigating the specific impact of each factor on sensory pleasantness and adjusting the parameters of the Aures model accordingly.

The correlation between the experiments about pleasantness and experiments about unpleasantness was -0.9542. From the aforementioned observations, although there was a low correlation between the Aures model and the experimental results, it is conceivable that sensory pleasantness and unpleasantness can be represented on a single axis.

目 次

第 1 章　序論 **1**
1.1 はじめに 1
1.2 研究の背景 3
1.3 研究の目的 3
1.4 論文構成 4

第 2 章　関連研究 **6**
2.1 音質評価指標 6
2.2 音の快さの評価 7
2.3 音の不快さの評価 7
2.4 Aures の感覚的快さのモデル 8
2.5 問題点 8

第 3 章　研究の方略 **9**

第 4 章　評価実験 **11**
4.1 感覚的快さの評価実験 11
4.1.1 実験刺激 11
4.1.2 実験方法 12
4.1.3 実験参加者 15
4.1.4 実験装置 15
4.1.5 実験結果 16
4.1.6 考察 23
4.2 感覚的快くなさの評価実験 24
4.2.1 実験刺激 24
4.2.2 実験方法 24
4.2.3 実験参加者 24
4.2.4 実験装置 25
4.2.5 実験結果 25
4.2.6 考察 29

第 5 章　全体考察 **30**

第 6 章　結論 **32**
6.1　明らかにしたこと 32
6.2　残された課題 33

謝辞 **34**

参考文献 **35**

図 目 次

1.1 身の回りの音環境 2
1.2 論文構成 5

3.1 本研究の方略 10

4.1 実験で用いた GUI 13
4.2 実験環境の概略図 14
4.3 感覚的快さの実験結果 20
4.4 条件ごとの感覚的快さの実験結果 21
4.5 Aures の感覚的快さのモデルと感覚的快さの相関関係 22
4.6 感覚的快くなさの実験結果 26
4.7 条件ごとの感覚的快くなさの実験結果 27
4.8 Aures の感覚的快さのモデルと感覚的快くなさの相関関係 28

5.1 感覚的快さと快くなさの相関関係 31

表 目 次

4.1 実験刺激の条件 12
4.2 純音の実験刺激の対応表 17
4.3 広帯域雑音の実験刺激の対応表 18
4.4 実験刺激の対応表 19
4.5 周波数の対応表 19
4.6 音の大きさの対応表 19
4.7 Aures の研究との相違点 23

第1章　序論

1.1　はじめに

音を聴取したときの知覚的な性質は大きく分けて三つに分類できると言われている [1][2]．音の大きさ，音の高さ，音色のことであり音の三要素と呼ばれている [3]．音の三要素のうち，音の大きさと音の高さは一次元的な性質である [4]．音の大きさは,「大きいー小さい」という尺度で表現できる．音の高さは,「高いー低い」という心理的性質で表現できる．それに対して，音色は，多次元的な性質である．粗い，滑らか，快い，不快など様々な尺度で表現できる．音色は，JIS によれば,「聴覚にかかわる上の音の性質の一つで，2 音の大きさおよび高さが共に等しくても，その 2 音が異なった感じを与えるとき，その相違に相当する性質」と定義されている [3]．音色と似た言葉に，音質がある．どちらも同じ意味の性質として捉えられることが多いが，音質は音の良し悪しのように，価値判断までを含んでいる [1]．

音を物理的側面からみると，周波数，音圧といった物理量で規定できる．これまで音響心理学の分野では，人間の感覚を数値化した心理量と音の物理量を結びつける研究が数多く行われてきた [4]．騒音を評価する場合，等価騒音レベルなどの物理量が用いられる [5]．等価騒音レベルは騒音に関する環境基準にも採用されている [6]．等価騒音レベルは，騒音に対する主観的なうるささとおおむね対応し，騒音に対する心理学的反応を見積もるのに有効とみなされている [5]．一方，騒音レベルを一定として同一騒音レベルにおける音刺激の不快さの比較を行った実験がある．実験の結果，騒音レベルが等しくても，心理的不快感が異なることが示された [7]．この場合，物理量での評価のみでは不十分で，心理量での評価が必要になる [4]．正しく心理量を評価できれば，ヒトの感覚に近い音の評価ができ，音の印象評価や音デザインに利用できる．

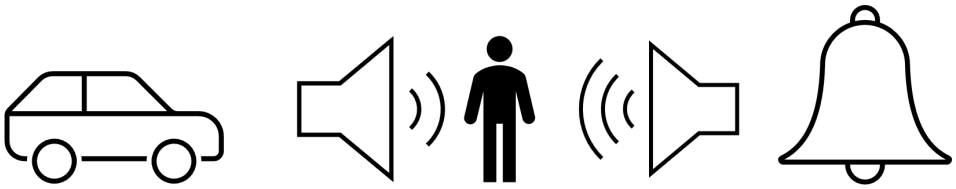

図 1.1: 身の回りの音環境

1.2 研究の背景

音は私たちの生活に深く結びついている．その影響は環境の快適性に大きな影響を与える [8]．快適にするために音をデザインする研究には，機械製品の音のデザインやサイン音のデザイン，公共空間の総合的な音環境デザインなどがある [9][10]．機械製品の音のデザインの研究としては，機械製品から発せられる不快な音の快音化がある [11]．サイン音のデザインの研究として，緊急時に注意を喚起する報知音の設計がある [12]．

音環境デザインは，実際により良い音環境をつくることを目的としている [13]．一般的にデザインという言葉は何かを付加することを意味するように受け取られるが，音環境デザインにおいては音を付加するばかりでなく，削除・修正あるいは整理するということも含まれる [13]．音環境デザインに関する研究として，1998 年 9 月にオープンした横浜ベイ・シェラトンホテル＆タワーズペデストリアンデッキ広場の音環境をデザインした研究がある [13]．評価方法は単語の自由記述によるアンケート手法である．調査の結果，利用者が空間から受ける印象がより良好な方向に変化していることが窺えた [13]

音環境デザイン以外の環境デザインに光環境デザインや色彩環境デザインがある [14]．色彩環境デザインには，マンセル表色系というものさしが存在し，C 色の対比によって相互がどのように強調，あるいは調和されるかが，色彩調和理論として数値化・体系化されている [15]．光環境デザインでも，ものさしとして，照度，輝度，色温度などが存在し，安全性や快適性のための照度基準が数値化・体系化されている [14]．

一方，音環境デザインでは，ものさしとして騒音レベルや周波数特性が存在するが，これらは，騒音制御など不快な音を取り除くのには役立っても，新たに音を添加する際には役立たない [14]．

1.3 研究の目的

本研究では，音質評価指標を用いて，感覚的快さと感覚的快くなさを一軸で意味づけできるかを調査することを目的とした．本研究では，感覚的快さのモデルの有効性を確認し，同じモデルを用いて感覚的快くなさを評価できるか検討する．このモデルが正しく音の快さを評価できるならば，その逆の音の快くなさを評価できるかもしれない．これらは，聴取印象を制御可能な音のデザインや，機械製品の音や注意喚起を与える音のデザインをするための重要な知見となり，快適に過ごせる音環境の実現に期待できる [16]．

音質評価指標を用いて評価することで数値化することができ，もし一軸で意味づけできるならば体系化する助けとなり，音デザインでも不快な音を取り除くだけでなく，新たに音を添加する際にも役立つかもしれない．

1.4 論文構成

図 1.2 に本論文の構成を示す．各章では次のようなことが述べられる

第 1 章

音に関する基礎と，快適な音環境のための音のデザインについて説明し，本研究の目的を説明する．

第 2 章

音質評価指標，快さの評価および不快さの評価に関する研究を紹介する．

第 3 章

本研究の方略を示す.

第 4 章

評価実験により感覚的快さおよび感覚的快くなさについて軸を求める．その後，得られた結果と感覚的快さのモデルとの相関関係を調べる．

第 5 章

前章までの感覚的快さと快くなさの実験結果および本研究のコンセプトの総合的な考察を論じる．

第 6 章

本研究で明らかになったことと残された課題について述べる．

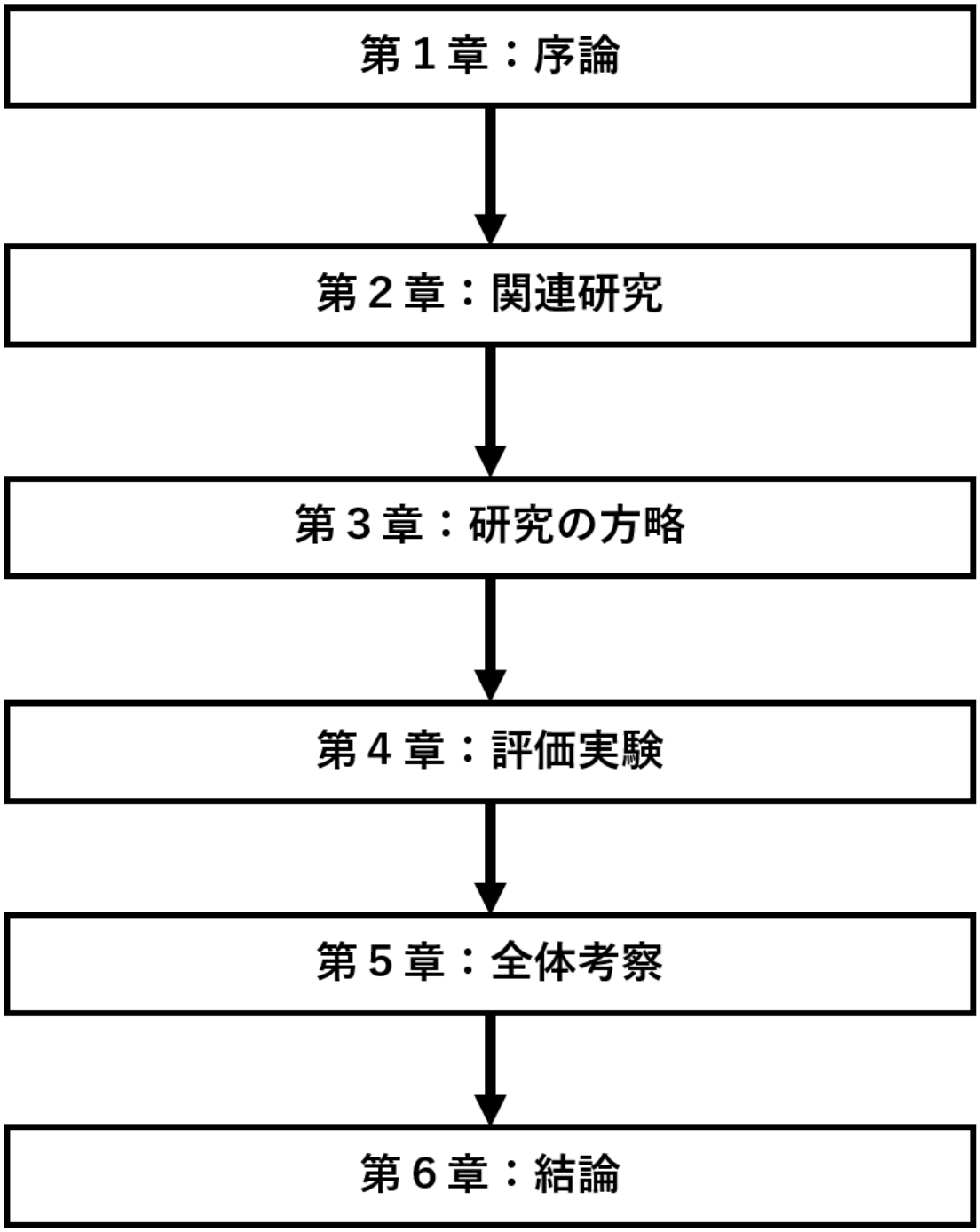

図 1.2: 論文構成

第2章　関連研究

2.1　音質評価指標

音色に関する研究として，音質評価指標がある [17]．音質評価は，音色の違いを音刺激の物理量と対応付けて，良し悪しの判断も含めて評価することである [18]．

音の大きさを表すラウドネスの単位は sone（ソーンと読む）である．音圧レベルが 40 dB で周波数が 1 kHz の純音の大きさを 1 sone と定義される [19]．

$$N = \int_0^{24Bark} N'(z)dz \quad \text{[sone]} \tag{2.1}$$

ここで，$N'(z)$ は臨界帯域ごとのラウドネス，z は臨界帯域番号である．音圧レベルのほかにも波形や継続時間，周波数にも依存する [4]．

音の鋭さを表すシャープネスの単位は acum（アキュームと読む）である．音圧レベルが 60 dB で，1 kHz を中心周波数とする臨界帯域幅の狭帯域雑音のシャープネスを 1 acum と定義される [4]．

$$S = 0.11\frac{\int_0^{24Bark} N'(z)g'(z)zdz}{\int_0^{24Bark} N'(z)dz} \quad \text{[acum]} \tag{2.2}$$

ここで，$g(z)$ はシャープネスの重みを表す．鋭さの感覚は，音のエネルギーが集中するスペクトル上での場所と，その場所におけるエネルギーの大きさに依存する [4]．

音の粗さを表すラフネスの単位は asper（アスパーと読む）である．音圧レベルが 60 dB，搬送波周波数が 1 kHz，変調周波数が 70 Hz，変調度が 1 の振幅変調音のラフネスを 1 asper と定義される [4]．

$$R = 0.3f_{mod}\int_0^{24Bark} \Delta L(z)dz \quad \text{[asper]} \tag{2.3}$$

ここで，f_{mod} は変調周波数，ΔL は臨界帯域ごとの興奮レベルの山と谷の差，z は臨界帯域番号である．変調度が 1 に近いほど主観的な粗さが大きくなり，粗さの感覚が変調度の自乗に比例することが知られている [4]．

ラフネスは，ラウドネスの時間変動から算出されているため，時間領域で定義されたラウドネスモデルが必要である．磯山らの研究では，聴覚フィルタバンクを利用したラウドネスモデルを構築した [20][21]．

2.2　音の快さの評価

音の快さの評価に関する研究は，機械製品の音の快音化など聴取者の嗜好にあわせた音のデザインに利用されている [11]．音質評価することにより，機械製品や自動車の車内音をデザインする研究は数多く存在する．中島は油圧ショベルの快音化について，騒音レベルと音質の両面での取り組みが重要であると示した [22]．機械騒音の音質の改善についての研究では，騒音の時間エンベロープ変動を抑えて，高周波数のスペクトル成分を低減させることが望ましいと報告した [23]．橋本の研究では，乗用車の車内音の快適性とラフネスには密接な関係があると示した．粗い音は不快で安っぽい音で，滑らかな音は快く高級な音という印象になるため，音の快適性を向上させるためには，粗さの低減が必要だと示した [24]．

2.3　音の不快さの評価

音の不快さを適切に測ることができれば，注意を向けやすい報知音の開発などに役立つ．

佐野らは，不快感情の認知に影響を与える音響的指標を調査した．その結果，不快感情の認知には有声部分の持続時間と最大基本周波数が関与していることを明らかにした．有声部分の持続時間の上昇と，最大基本周波数の減少が不快判断に影響することが示された [25]．

快・不快感情を含んだ音声の音響特徴に関する研究では，快・不快感情によって，声の高さだけでなく声質にも差が確認された．[26]

不快な音の知覚と物理関連量の関係に関する研究では，周波数成分が高い位置に集中している音，変調周波数成分が低い位置に集中している音が不快と感じられることを明らかにした [12]．

岩宮らは，オートバイの排気音に対するライダーと非ライダーの意識の違いを調査した．調査の結果，非ライダーは音量が大きいほど，不快感を感じるのに対して，ライダーは音量と不快感の関係は明瞭ではないことが示された．このことからライダーと非ライダーには，オートバイの排気音に対して意識の違いが見られた [27]．また，環境音の快ー不快評価と音圧の関係を調べた研究では，不快な音は音圧が高くなるにつれて不快になるが，快い音でも音圧が高くなるにつれてやや快くなる傾向がみられた [8]．

2.4 Aures の感覚的快さのモデル

従来の研究から，音の感覚的快さはラフネス，シャープネス，トナリティ，ラウドネスの影響を受けることが知られている [28]．Aures はラフネス，シャープネス，トナリティ，ラウドネスが感覚的快さにどの程度影響するかを調査することで感覚的快さを算出するモデルを提案した [29]．提案されたモデルと実測値の相関関係は 90 %以上あった．以下にそのモデルを示す．

$$W = e^{-0.55R} e^{-0.113S} (1.24 - e^{-2.2K}) e^{-(0.023N)^2} \tag{2.4}$$

R，S，K，N はそれぞれラフネス，シャープネス，トナリティ，ラウドネスを表している．このモデルではラフネス，シャープネス，ラウドネスが大きくなるほど感覚的快さは減少し，トナリティが大きくなるほど感覚的快さは増加する [4]．

2.5 問題点

音質評価指標を用いることでヒトの感覚に近い音の評価ができる．しかし，同じ指標でも利用するモデルによって算出する値が異なることがある [4]．ラウドネスは ISO532 により標準化されている [30]．ラウドネス以外の他の指標についても標準化が望まれる．

快音と不快音の評価について，大部分は特定の音源についての快適さの追求であって，騒音対策の延長線上にあると思われる．つまり，これらの大部分は，不快な音を取り除くとか，不快な音をより快適にするという考え方に基づいている [8]．

Aures のモデルは感覚的快さを良く評価できることが知られている [29]．しかし，このモデルを利用して，感覚的快さの反対にあたる不快さを説明できるかまでは明らかにされていない．

第3章　研究の方略

本研究では，目的達成のために，図 3.1 に示した方略に沿って研究を進める．

不快音について精神物理学的測定で一対比較法と評定尺度法を行った研究がある [7]．結果は，一対比較法と評定尺度法では，刺激音に対する不快さの順序は一致したが，評定尺度法では音の呈示順序による効果が大きく表れた．また，絶対評価を行おうとして，評定尺度法を用いた実験では，短時間に複数の刺激音を聴かせた場合，被験者は前に呈示した音と比較しようとする傾向があり，得られた結果は相対値であるといわざるを得ない結果となった．これに対し，一対比較法では，判断が比較的に容易で信頼度も高い [31]．そのため評価方法は，一対比較法を採用する．

実験刺激は，Aures のモデルの各指標が感覚的快さにどの程度影響するかを調べるために，Aures の研究 [29] と同様に人工的な音を使用する．

まずは感覚的快さについてと感覚的快くなさについての 2 つの聴取実験を行う．順序効果を考慮して，実験参加者の半分は感覚的快さの実験を行った後に感覚的快くなさの実験を行い，もう半分は感覚的快くなさの実験を行った後に感覚的快さについての実験を行う．実験結果から，感覚的快さと感覚的快くなさの関係を調査する．最後に感覚的快さと感覚的快くなさを一軸で意味づけできるかを考察する．

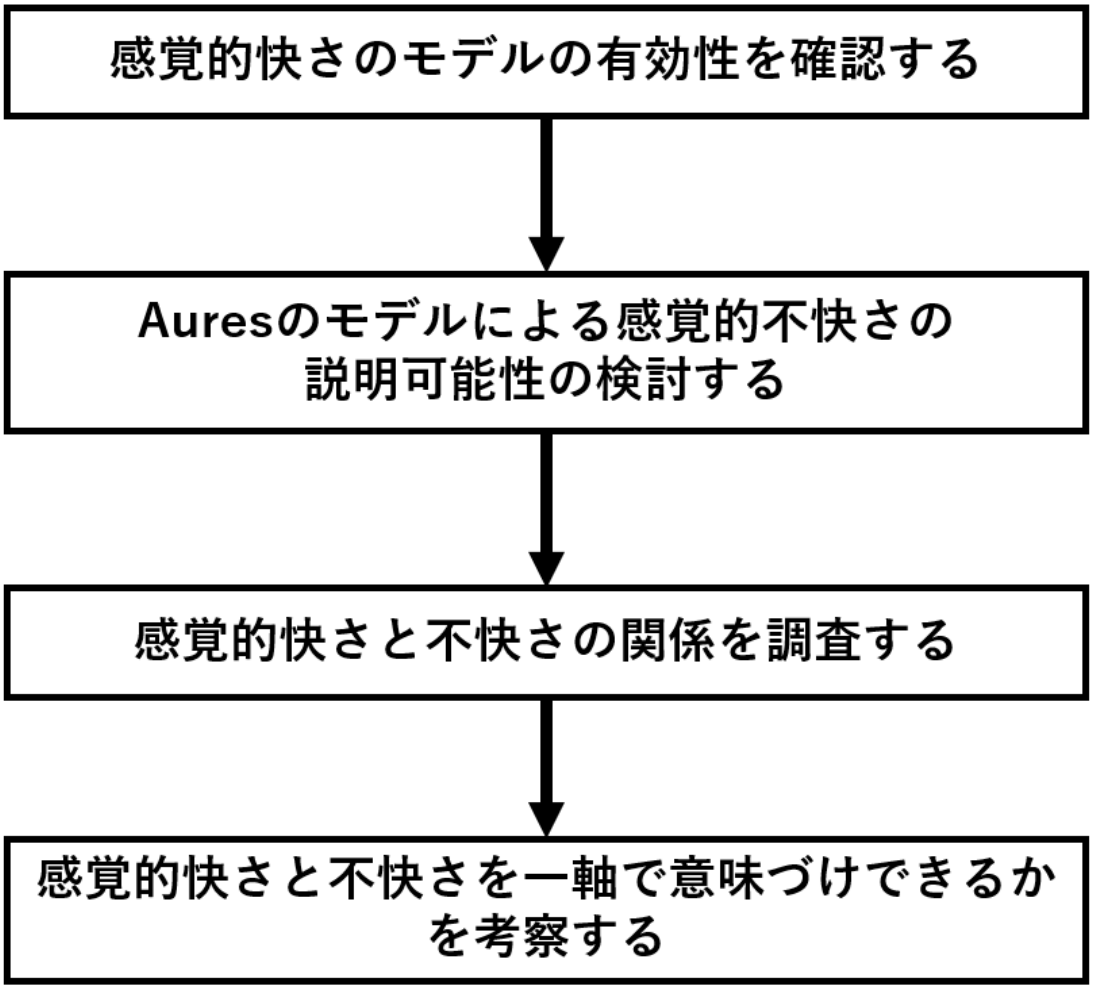
感覚的快さのモデルの有効性を確認する
Auresのモデルによる感覚的不快さの
説明可能性の検討する
感覚的快さと不快さの関係を調査する
感覚的快さと不快さを一軸で意味づけできるか
を考察する

図 3.1: 本研究の方略

第4章　評価実験

本研究では，サーストンの一対比較法により，感覚的快さと感覚的快くなさの軸を求める．聴取実験によって得られた結果と，Aures の感覚的快さのモデルの相関関係を調べることで，感覚的快さのモデルの有効性を確認して，同じモデルを用いて感覚的快くなさを評価できるか検討する．

4.1　感覚的快さの評価実験

この実験では，感覚的快さについての軸を求めることを目的とした．聴取実験によって得られる刺激間の相対距離と感覚的快さのモデルが算出した値との相関関係を調べることで，感覚的快さのモデルの有効性を調べる．

4.1.1　実験刺激

Aures のモデルはラフネス，シャープネス，トナリティ，ラウドネスを説明変数とした回帰モデルで構成されている．各指標が感覚的快さにどの程度影響するかを調べるために，人工的な音を使用する．表 4.1 に使用する音刺激の条件を示す．使用する音刺激の条件は，ラウドネスに関わる条件として 2 sone と 14 sone の 2 条件，ラフネスに関わる条件として振幅変調の変調度 0， 0.5， 1.0 の 3 条件，トナリティに関わる条件として搬送波は純音と帯域幅 1 kHz の広帯域雑音の 2 条件，シャープネスに関わる条件として中心周波数 500 Hz， 1 kHz，2 kHz， 4 kHz， 8 kHz の 5 条件の合計 60 種類である．

音刺激の提示時間が感覚的快さや不快さに影響を与える可能性が指摘されているため，実験刺激はすべて 1 秒に統一する [32]．

表 4.1: 実験刺激の条件

ラウドネス	2, 14 sone
変調度	0, 0.5, 1
搬送波	中心周波数
純音	0.5 kHz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz, 8 kHz
広帯域雑音	0.5 kHz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz, 8 kHz

4.1.2 実験方法

この実験では，感覚的快さについての聴取実験を行う．方法はサーストンの一対比較法を採用した．実験参加者には，2 つの音を聴き比べて最初に再生された音と後の再生された音でどちらの音の方がより快く感じたか選択させた．図 4.1 に実験で使用した GUI を示す．実験刺激は最初の音が 1 秒間再生されて，0.8 秒間の休止時間があり，後の音が 1 秒間再生される．実験参加者が回答すると次の刺激対が再生される．

実験刺激が 60 種類あるため，そこから 2 つを選ぶ組み合わせの数は 1770 である．この実験では 3 日に分けて 1 日当たり 600 回の比較を行った．また，150 回の比較を行うごとに 10 分の休憩時間を取らせた．150 回の比較にかかる時間は 15 分前後であった．

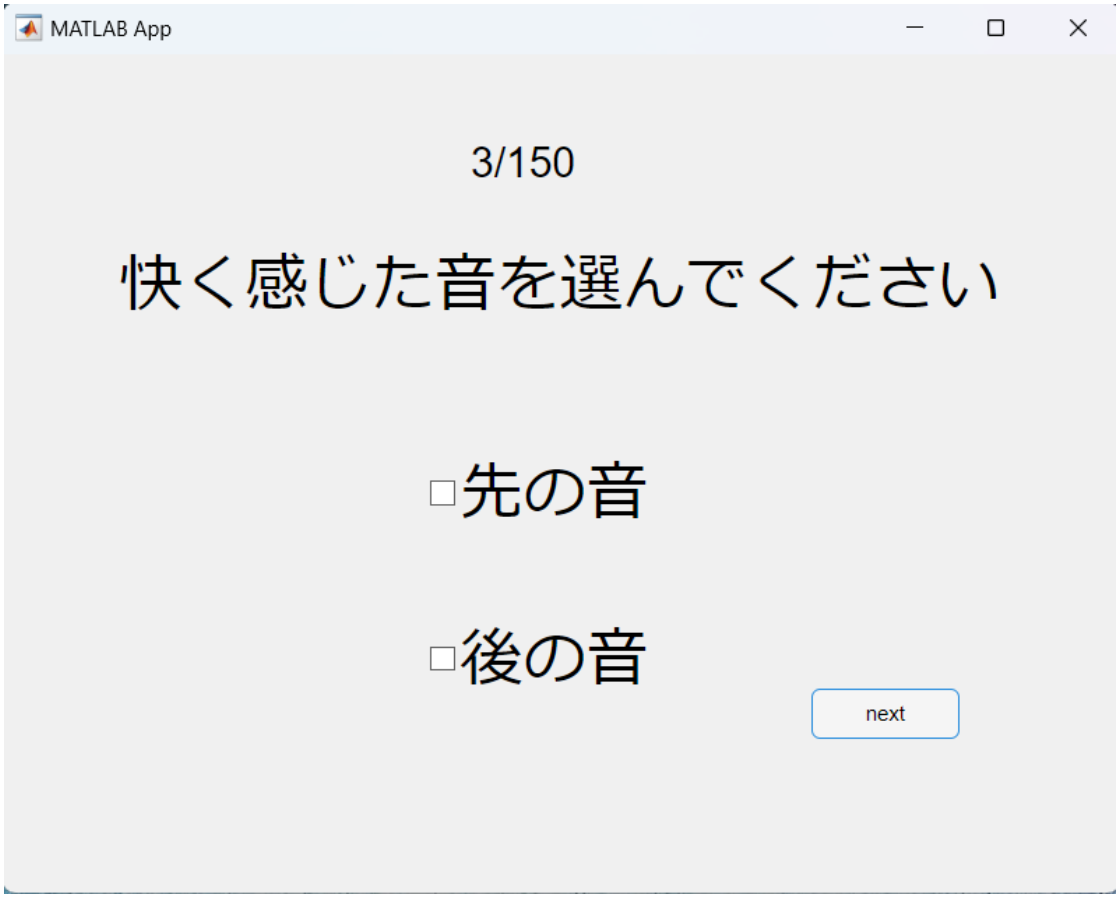

図 4.1: 実験で用いた GUI

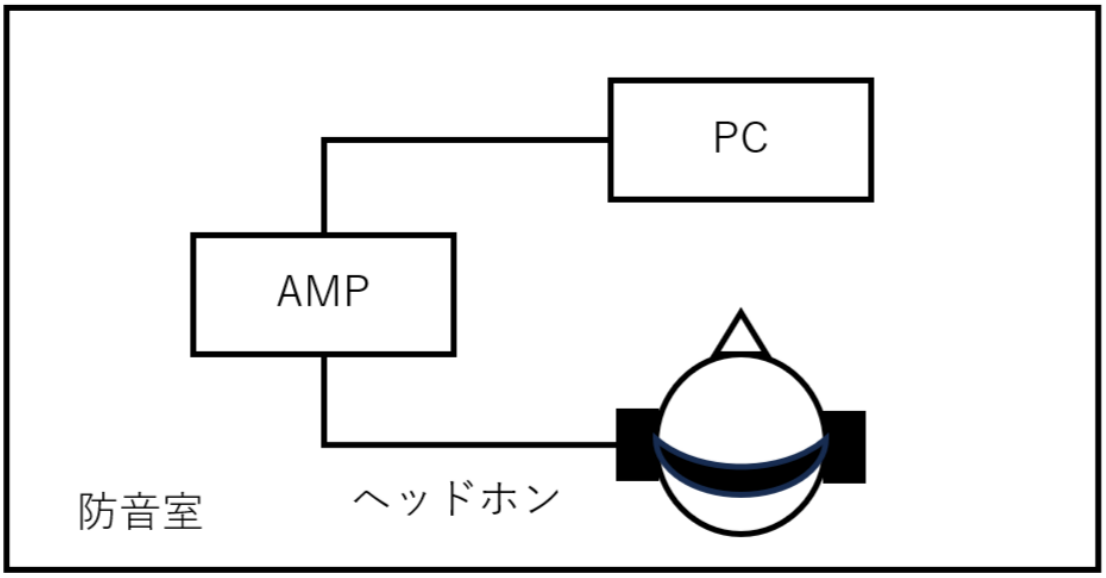

図 4.2: 実験環境の概略図

4.1.3　実験参加者

実験には大学院生 12 名 (男性 8 名, 女性 4 名) が参加した．順序効果を考慮して，快さの実験を行った後に快くなさの実験を行うグループと，快くなさの実験を行った後に快さの実験を行うグループの 2 グループに分けて行った．そのため，本実験では事前になにも実験を行っていないグループと，事前に快くなさについて同様の実験を行ったグループの 2 グループで実施した．

4.1.4　実験装置

実験は防音室内で実施した．音刺激の提示には，ヘッドホン（SENNHEISER HDA 200）とアンプ（audio-technica Stereo Headphone Amplifier AT-HA21）を利用した．刺激の提示制御は PC（Windows11）上のソフトウェア（Mathworks MATLAB R2023b）で行われた．提示する音刺激のオン・オフが不自然にならないように，音は台形の時間エンベロープで提示した．立ち上がりと立ち下がりの時間はそれぞれ 0.1 秒である．図 4.2 に実験環境の概略図を示す．

Aures の感覚的快さのモデルは，ラフネス，シャープネス，トナリティ，ラウドネスを用いて快さを算出する．それらの指標の算出に本研究では，SQAT というオープンソースを利用する [33]．SQAT は，MATLAB 向けのオープンソース音質分析ツールボックスである [?]．音声ファイルに対して迅速かつ正確な量的音質分析が可能で，透明性のある実装検証と，初期利用を支援する例題コードと音声ファイルも提供されてる．SQAT は，MATLAB ユーザーにとって効果的で信頼性の高い音質評価ツールである．

4.1.5 実験結果

図 4.3 に感覚的快さについての実験結果を示す．純音の実験刺激との対応を表 4.2，表 4.3 に広帯域雑音の実験刺激との対応を示す．横軸は刺激間の相対距離を表す．0 は快くも不快でもない．正の値に大きくなるほど快くて，負の値になるほど快くないということを表している．図 4.4 に条件ごとに分けた結果を示す．実験の結果から，ラウドネス以外の条件が同じ場合は，ラウドネスが小さい方が快いことが示された．変調度以外の条件が同じ場合は，基本的には変調度が小さい方がやや快いが大きな差はないということが示された．キャリア以外の条件が同じ場合は，純音でも広帯域雑音でも快さに大きな差がないことが示された．周波数以外の条件が同じ場合は，14 sone の純音では，8 kHz の音が最も快くなくて，広帯域雑音では，500 Hz の音が最も快くないという結果になった．

図 4.5 に感覚的快さについての実験結果と Aures のモデルの結果を示す．縦軸がモデルの結果で，横軸が聴取実験によって得られた刺激間の相対距離である．縦軸の値が大きくなるほど，感覚的快さのモデルで快いと評価していて，低いほど快くないとモデルが評価している．横軸は，図 4.3 と同じである．Aures のモデルと聴取実験の結果との相関関係は 0.2346 で，Aures の実験の結果よりもかなり低い．

表 4.2: 純音の実験刺激の対応表

実験刺激				音質評価		
搬送波	変調度	ラウドネス	周波数	ラフネス	シャープネス	トナリティ
純音	0	2	500 Hz	0.0005	0.6494	0.9862
純音	0	2	1 kHz	0.0005	1.0278	0.9935
純音	0	2	2 kHz	0.0004	1.5470	0.9367
純音	0	2	4 kHz	0.0003	2.8726	0.8192
純音	0	2	8 kHz	0.0003	6.5949	0.0000
純音	0	14	500 Hz	0.0012	0.6494	0.9972
純音	0	14	1 kHz	0.0013	1.0278	1.0034
純音	0	14	2 kHz	0.0009	1.5470	0.9459
純音	0	14	4 kHz	0.0006	2.8726	0.8281
純音	0	14	8 kHz	0.0006	6.5949	0.0000
純音	0.5	2	500 Hz	0.2513	0.6349	0.7877
純音	0.5	2	1 kHz	0.3632	1.0237	0.7676
純音	0.5	2	2 kHz	0.1684	1.5438	0.6913
純音	0.5	2	4 kHz	0.0980	2.8698	0.5678
純音	0.5	2	8 kHz	0.0671	6.5889	0.0000
純音	0.5	14	500 Hz	0.4589	0.6350	0.7000
純音	0.5	14	1 kHz	0.6940	1.0235	0.7057
純音	0.5	14	2 kHz	0.3512	1.5435	0.6412
純音	0.5	14	4 kHz	0.1855	2.8698	0.5349
純音	0.5	14	8 kHz	0.1407	6.5932	0.0000
純音	1	2	500 Hz	0.3036	0.6343	0.3939
純音	1	2	1 kHz	0.7568	1.0209	0.6303
純音	1	2	2 kHz	0.5697	1.5431	0.5190
純音	1	2	4 kHz	0.4354	2.8650	0.3735
純音	1	2	8 kHz	0.3205	6.6075	0.0000
純音	1	14	500 Hz	1.1041	0.6343	0.5689
純音	1	14	1 kHz	1.4827	1.0214	0.5663
純音	1	14	2 kHz	1.0754	1.5428	0.4744
純音	1	14	4 kHz	0.7614	2.8606	0.3462
純音	1	14	8 kHz	0.6587	6.5649	0.0000

表 4.3: 広帯域雑音の実験刺激の対応表

実験刺激				音質評価		
搬送波	変調度	ラウドネス	周波数	ラフネス	シャープネス	トナリティ
広帯域雑音	0	2	500 Hz	0.0156	0.6862	0.0263
広帯域雑音	0	2	1 kHz	0.0311	0.9857	0.0386
広帯域雑音	0	2	2 kHz	0.0253	1.5400	0.0192
広帯域雑音	0	2	4 kHz	0.0087	2.7931	0.0228
広帯域雑音	0	2	8 kHz	0.0024	6.1739	0.0000
広帯域雑音	0	14	500 Hz	0.2843	0.6908	0.0302
広帯域雑音	0	14	1 kHz	0.2112	0.9948	0.0266
広帯域雑音	0	14	2 kHz	0.1793	1.5454	0.0396
広帯域雑音	0	14	4 kHz	0.0890	2.7830	0.0225
広帯域雑音	0	14	8 kHz	0.0345	6.1926	0.0000
広帯域雑音	0.5	2	500 Hz	0.1304	0.6815	0.0290
広帯域雑音	0.5	2	1 kHz	0.1755	0.9814	0.0277
広帯域雑音	0.5	2	2 kHz	0.1576	1.5402	0.0179
広帯域雑音	0.5	2	4 kHz	0.0911	2.7955	0.0214
広帯域雑音	0.5	2	8 kHz	0.0451	6.1588	0.0000
広帯域雑音	0.5	14	500 Hz	0.6987	0.6823	0.0246
広帯域雑音	0.5	14	1 kHz	0.6070	0.9845	0.0535
広帯域雑音	0.5	14	2 kHz	0.5572	1.5508	0.0246
広帯域雑音	0.5	14	4 kHz	0.3032	2.7810	0.0255
広帯域雑音	0.5	14	8 kHz	0.1914	6.1650	0.0000
広帯域雑音	1	2	500 Hz	0.6805	0.6803	0.0321
広帯域雑音	1	2	1 kHz	0.8601	0.9794	0.0229
広帯域雑音	1	2	2 kHz	0.6798	1.5342	0.0201
広帯域雑音	1	2	4 kHz	0.4088	2.7725	0.0138
広帯域雑音	1	2	8 kHz	0.2158	6.1491	0.0000
広帯域雑音	1	14	500 Hz	1.8703	0.6844	0.0367
広帯域雑音	1	14	1 kHz	2.0095	0.9800	0.0203
広帯域雑音	1	14	2 kHz	1.7222	1.5367	0.0228
広帯域雑音	1	14	4 kHz	1.0682	2.7865	0.0098
広帯域雑音	1	14	8 kHz	0.6821	6.1445	0.0000

表 4.4: 実験刺激の対応表

搬送波	変調度	色
純音	0	青
純音	0.5	薄青
純音	1	桃
広帯域雑音	0	青
広帯域雑音	0.5	薄青
広帯域雑音	1	紫

表 4.5: 周波数の対応表

形	周波数
+	500 Hz
o	1 kHz
x	2 kHz
△	4 kHz
▽	8 kHz

表 4.6: 音の大きさの対応表

太さ	ラウドネス
小	2 sone
大	14 sone

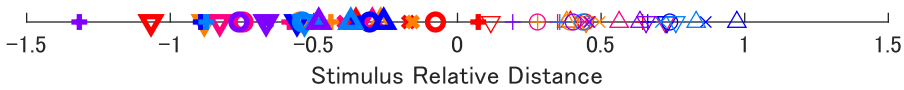

図 4.3: 感覚的快さの実験結果

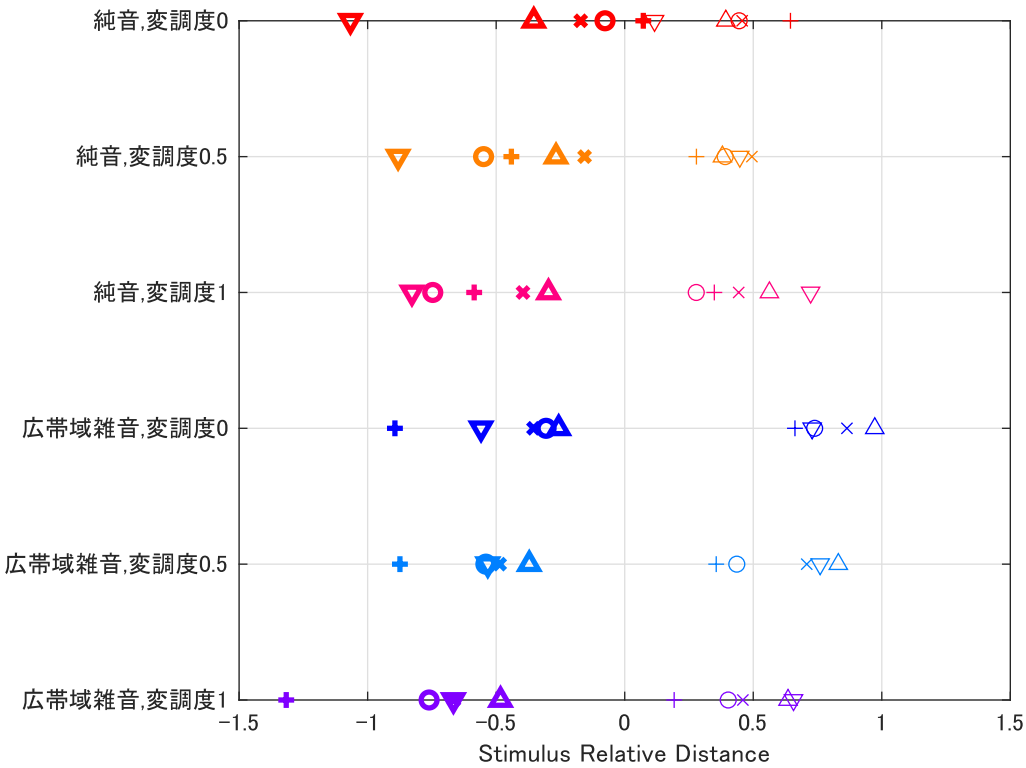

図 4.4: 条件ごとの感覚的快さの実験結果

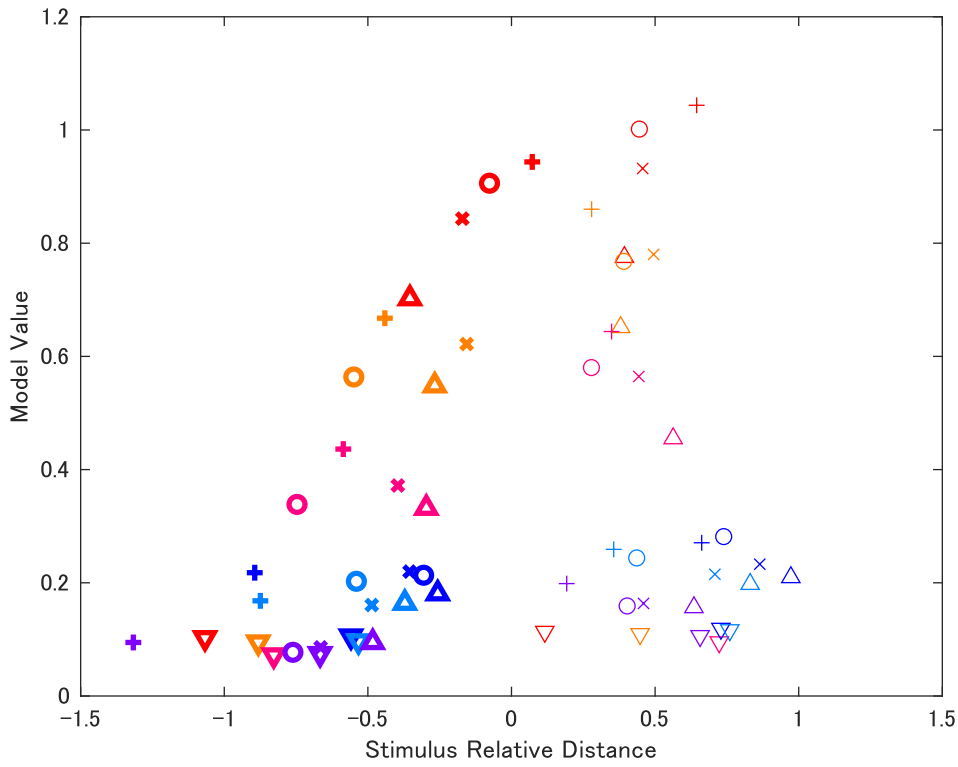

図 4.5: Aures の感覚的快さのモデルと感覚的快さの相関関係

表 4.7: Aures の研究との相違点

	本研究	Aures の研究
音刺激	人工的な音 60 種類	人工的な音 80 種類
実験方法	一対比較法	マグニチュード推定法
ラフネスのモデル	Daniel & Weber のモデル	Aures のモデル
シャープネスのモデル	DIN 45692:2009	v. Bismarck のモデルの修正版
トナリティのモデル	Aures のモデル	Aures のモデル
ラウドネスのモデル	ISO 532-1:2017	Zwicker ‘ s のモデル

4.1.6 考察

Aures の感覚的快さのモデルと聴取実験の結果の相関関係が低い要因として，感覚的快さのモデルに用いられた各指標と感覚的快さに与える影響が正しくなかったことが考えられる．Aures の感覚的快さのモデルでは，ラフネス，シャープネス，ラウドネスが大きくなるほど快さは減少して，トナリティが大きいほど快さは増す．しかし，聴取実験の結果では，トナリティが大きい純音とトナリティが小さい広帯域雑音を比較して，快さに差はなかった．

この実験は Aures の研究を参考に行った．表 4.7 に Aures の研究との相違点を示す．音刺激については，Aures の研究と同じような人工的な音を使用した．実験方法については，Aures の研究では一対比較法では時間がかかり過ぎるため，マグニチュード推定法で行っていたが，本研究では，感覚的快さについてマグニチュード推定法のような絶対評価を行う方法は実験参加者にとって困難だと考えたため，休憩を入れながら一対比較法で行った．Aures の感覚的快さを算出するのに用いる指標についても，用いたモデルが異なるため，本研究では Aures のモデルと実験結果の相関関係が低くなったとも考えられる．

4.2 感覚的快くなさの評価実験

この実験では，感覚的快くなさについての軸を求めることを目的とした．聴取実験によって得られる刺激間の相対距離と感覚的快さのモデルの結果の相関関係を調べることで，感覚的快さのモデルで感覚的快くなさを評価できるか検討する．

4.2.1 実験刺激

Aures のモデルはラフネス，シャープネス，トナリティ，ラウドネスを説明変数とした回帰モデルで構成されている．各指標が感覚的快さにどの程度影響するかを調べるために，人工的な音を使用する．表 4.1 に使用する音刺激の条件を示す．使用する音刺激の条件は，ラウドネスに関わる条件として 2 sone と 14 sone の 2 条件，ラフネスに関わる条件として振幅変調の変調度 0， 0.5， 1.0 の 3 条件，トナリティに関わる条件として搬送波は純音と帯域幅 1 kHz の広帯域雑音の 2 条件，シャープネスに関わる条件として中心周波数 500 Hz， 1 kHz，2 kHz， 4 kHz， 8 kHz の 5 条件の合計 60 種類である．

音刺激の提示時間が感覚的快さや不快さに影響を与える可能性が指摘されているため，実験刺激はすべて 1 秒に統一する [32]．

4.2.2 実験方法

この実験では，感覚的快さについての聴取実験を行う．方法はサーストンの一対比較法を採用した．実験参加者には，2 つの音を聴き比べて最初に再生された音と後の再生された音でどちらの音の方がより快く感じたか選択させた．図 4.1 に実験で使用した GUI を示す．実験刺激は最初の音が 1 秒間再生されて，0.8 秒間の休止時間があり，後の音が 1 秒間再生される．実験参加者が回答すると次の刺激対が再生される．

実験刺激が 60 種類あるため，そこから 2 つを選ぶ組み合わせの数は 1770 である．この実験では 3 日に分けて 1 日当たり 600 回の比較を行った．また，150 回の比較を行うごとに 10 分の休憩時間を取らせた．150 回の比較にかかる時間は 15 分前後であった．

4.2.3 実験参加者

実験には大学院生 12 名（男性 8 名, 女性 4 名）が参加した．順序効果を考慮して，快さの実験を行った後に快くなさの実験を行うグループと，快くなさの実験を行った後に快さの実験を行うグループの 2 グループに分けて行った．そのため，本実験では事前になにも実験を行っていないグループと，事前に快さについて同様の実験を行ったグループの 2 グループで実施した．

4.2.4 実験装置

実験は防音室内で実施した．音刺激の提示には，ヘッドホン（SENNHEISER HDA 200）とアンプ（audio-technica Stereo Headphone Amplifier AT-HA21）を利用した．刺激の提示制御は PC（Windows11）上のソフトウェア（Mathworks MATLAB R2023b）で行われた．提示する音刺激のオン・オフが不自然にならないように，音は台形の時間エンベロープで提示した．立ち上がりと立ち下がりの時間はそれぞれ 0.1 秒である．図 4.2 に実験環境の概略図を示す．

Aures の感覚的快さのモデルは，ラフネス，シャープネス，トナリティ，ラウドネスを用いて快さを算出する．それらの指標の算出に本研究では，SQAT というオープンソースを利用する [33]．SQAT は，MATLAB 向けのオープンソース音質分析ツールボックスである [?]．音声ファイルに対して迅速かつ正確な量的音質分析が可能で，透明性のある実装検証と，初期利用を支援する例題コードと音声ファイルも提供されてる．SQAT は，MATLAB ユーザーにとって効果的で信頼性の高い音質評価ツールである．

4.2.5 実験結果

図 4.6 に感覚的快くなさについての実験結果を示す．表 4.2 に純音の実験刺激との対応を，表 4.3 に広帯域雑音の実験刺激との対応を示す．横軸は刺激間の相対距離を表す．0 は快くも不快でもない．正の値に大きくなるほど快くなくて，負の値になるほど快いということを表している．図 4.7 に条件ごとに分けた結果を示す．実験の結果から，ラウドネス以外の条件が同じ場合は，ラウドネスが大きい方が快くないことが示された．変調度以外の条件が同じ場合は，基本的には変調度が大きい方がやや快くないが大きな差はないということが示された．搬送波以外の条件が同じ場合は，純音でも広帯域雑音でも快くなさに大きな差がないことが示された．周波数以外の条件が同じ場合は，2 sone の純音では，変調度 0 と変調度 0.5 では，8 kHz の音が最も快くなくて，広帯域雑音では，快さの実験と同様に，500 Hz の音が最も快くないという結果になった．

図 4.8 に感覚的快くなさについての実験結果と Aures のモデルの結果を示す．縦軸がモデルの結果で，横軸が聴取実験によって得られた刺激間の相対距離である．縦軸の値が大きくなるほど，感覚的快さのモデルで快いと評価していて，低いほど快くないとモデルが評価している．横軸は，図 4.6 と同じである．Aures のモデルと聴取実験の結果との相関関係は -0.2142 であった．Aures の研究では，感覚的快さのモデルと聴取実験の相関関係が 0.9 以上であったため，この実験では -0.9 になると予想していたが，予想よりもかなり低い結果になった．

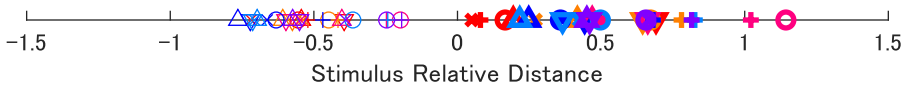

図 4.6: 感覚的快くなさの実験結果

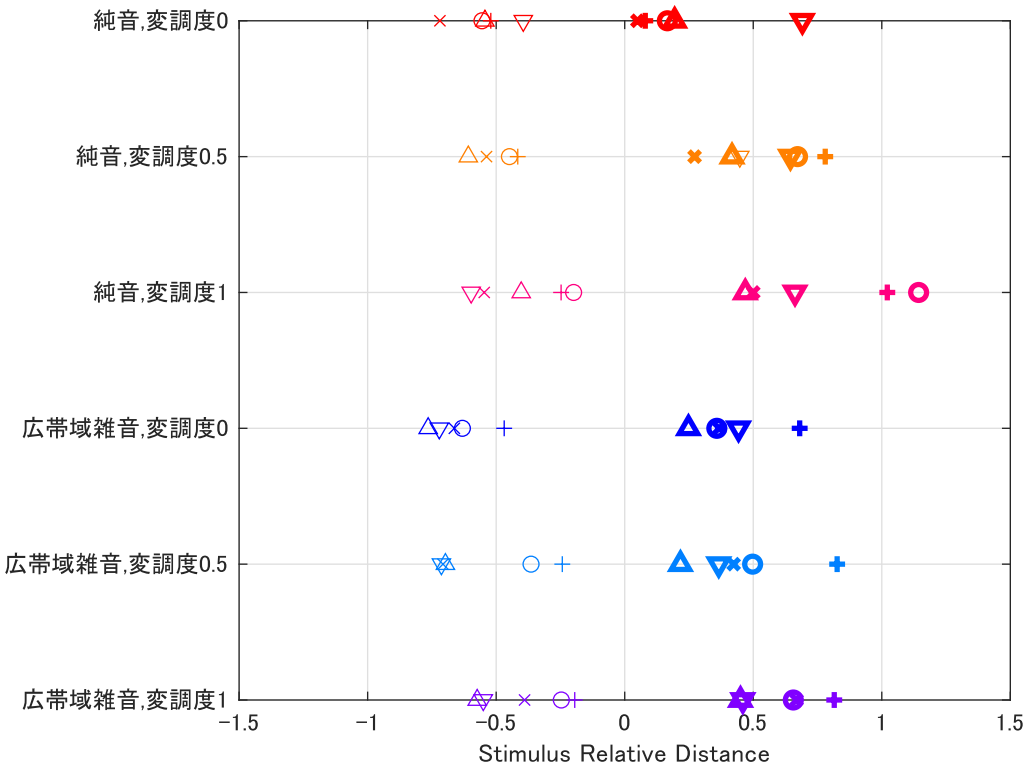

図 4.7: 条件ごとの感覚的快くなさの実験結果

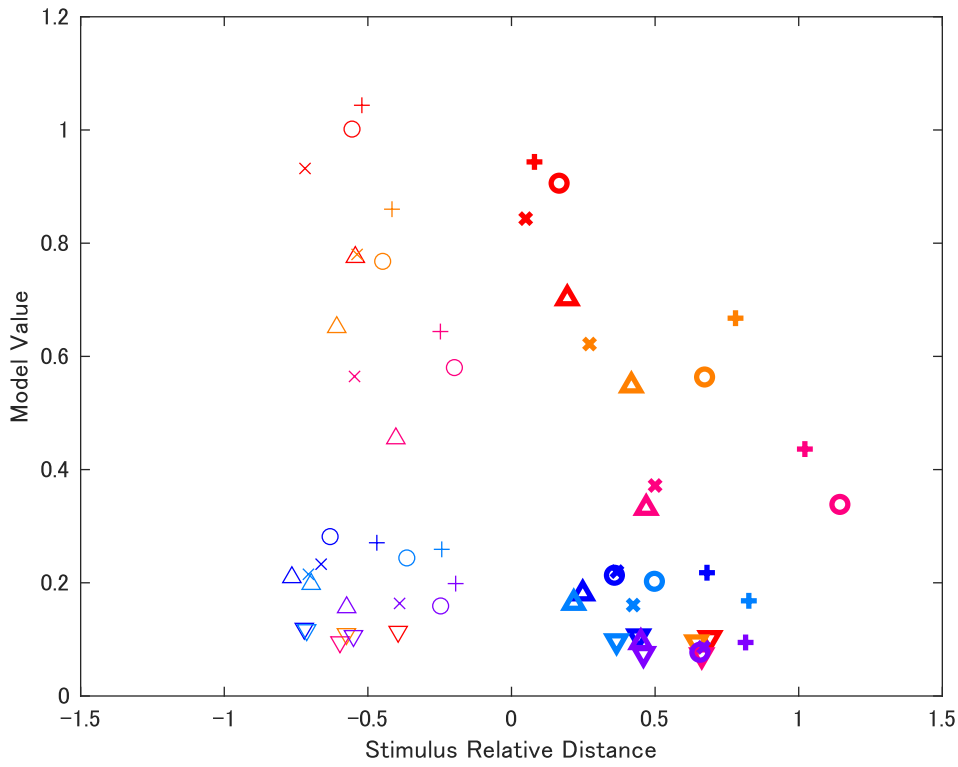

図 4.8: Aures の感覚的快さのモデルと感覚的快くなさの相関関係

4.2.6 考察

Aures の感覚的快さのモデルと聴取実験の結果の相関関係が低い要因として，Aures の感覚的快さのモデルに用いられた各指標の感覚的快さに与える影響が正しくなかったことが考えられる．Aures の感覚的快さのモデルでは，ラフネス，シャープネス，ラウドネスが大きくなるほど快さは減少して，トナリティが大きいほど快さは増す．しかし，聴取実験の結果では，トナリティが大きい純音とトナリティが小さい広帯域雑音を比較して，快さに差はなかった．

この実験は Aures の研究を参考に行った．表 4.7 に Aures の研究との相違点を示す．音刺激については，Aures の研究と同じような人工的な音を使用した．実験方法については，Aures の研究では一対比較法では時間がかかり過ぎるため，マグニチュード推定法で行っていたが，本研究では，感覚的快さについてマグニチュード推定法のような絶対評価を行う方法は実験参加者にとって困難だと考えたため，休憩を入れながら一対比較法で行った．Aures の感覚的快さを算出するのに用いる指標についても，用いたモデルが異なるため，本研究では Aures のモデルと実験結果の相関関係が低くなったとも考えられる．

第5章　全体考察

実験を行う前は，感覚的快さの評価実験では，Aures の研究と同様に 0.9 以上の相関関係を確認できて，感覚的快くなさの評価実験では，感覚的快さの評価実験とは逆に −0.9 くらいの相関関係になると予想していた．もしそうなれば，感覚的不快さも感覚的快さと同程度，ラフネス，シャープネス，トナリティ，ラウドネスの影響を受けると考えられて，Aures の感覚的快さのモデルで感覚的快さのみならず，感覚的不快さも評価できると考えていた．しかし感覚的快さの評価実験の結果は相関関係が 0.2346 で，低かった．感覚的快くなさの評価実験も，感覚的快さの評価実験の結果も相関関係が −0.2142 で，感覚的快さの評価実験と同様に低かった．

実験結果と Aures のモデルの相関関係が悪かった原因として，ラフネス，シャープネス，トナリティ，ラウドネスが感覚的快さに与える影響について Aures のモデルが正しく評価できていなかったことが考えられる．Aures の感覚的快さのモデルはラフネス，シャープネス，トナリティ，ラウドネスから算出することができ，各指標が感覚的快さに与える影響を統合することによって感覚的快さを算出する．本研究の聴取実験の結果では，Aures の感覚的快さのモデルの評価と同様にラウドネスが小さいほど快く，ラフネスについても変調度が小さいほど快く感じる傾向が見られた．しかし，トナリティについては，モデルが純音のトナリティを高く，広帯域雑音のトナリティを低く評価していたのに対して，聴取実験の結果では，純音と広帯域雑音で感覚的快さに差がみられなかった．

図 5.1 に感覚的快さの評価実験で得られた結果と感覚的快くなさの評価実験で得られた結果の相関関係を示す．縦軸は感覚的快くなさの聴取実験の結果を反転したものを表していて，横軸は感覚的快さの聴取実験の結果を表している．相関関係は 0.9542 ある．そのことから，Aures のモデルでは評価できなかったが，感覚的快くなさの結果を反転したものと感覚的快さの結果には正の相関関係があり，一軸で意味づけできる可能性が示された．

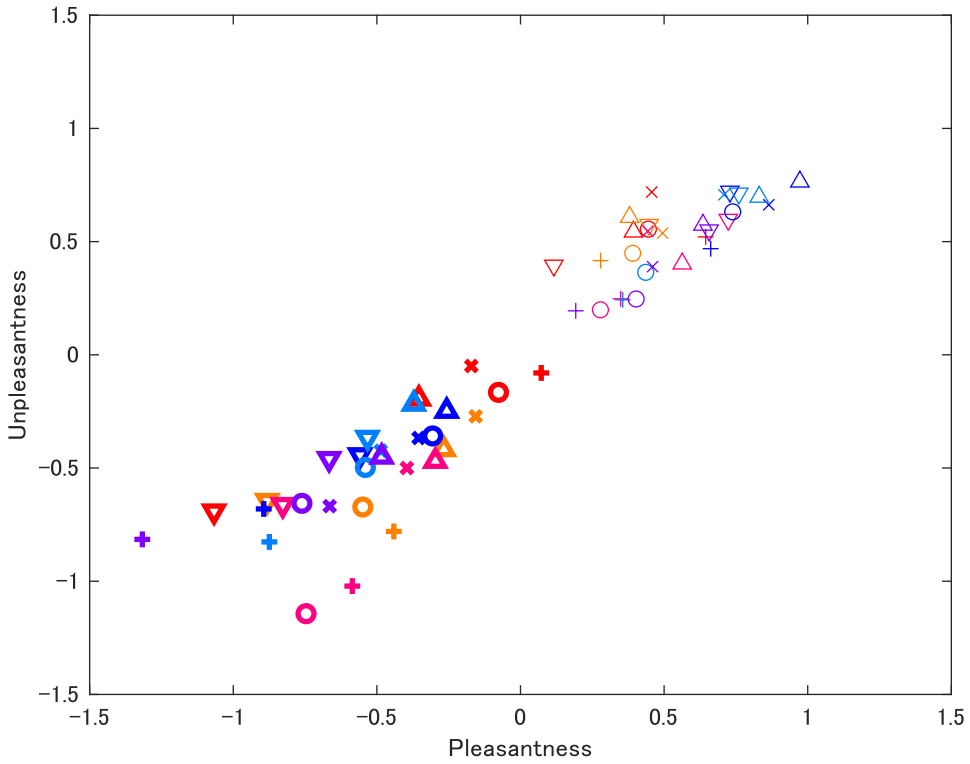

図 5.1: 感覚的快さと快くなさの相関関係

第6章　結論

6.1　明らかにしたこと

本研究では，音質評価指標を用いて，感覚的快さと感覚的快くなさを一軸で意味づけできるかを調査することを目的とした．そのため，まずは聴取実験により感覚的快さと感覚的快くなさについての軸を求めた．次に Aures の感覚的快さのモデルとの相関関係を調査することでモデルの有効性と感覚的快さのモデルを用いての感覚的快くなさの説明可能性の検討を行った．その結果，Aures の研究の結果と比較して，相関関係は低くなった．低くなった原因として Aures の感覚的快さのモデルの各指標が感覚的快さに与える影響を正しく評価できていないことが考えられる．とくに Aures の感覚的快さのモデルでは，トナリティが大きくなると快さは増加する．そのため，純音と広帯域雑音の快さは，純音は快く，広帯域雑音は快くないと評価する．しかし聴取実験の結果では，純音と広帯域雑音とでは，感覚的快さに大きな違いはない．

感覚的快さについての聴取実験の結果とモデルの相関関係は 0.2346 で，感覚的快くなさについての聴取実験の結果とモデルの相関関係は -0.2142 である．また，感覚的快さの実験結果と感覚的快くなさの実験結果の相関関係は -0.9542 であった．聴取実験の結果とモデルの相関関係は低かったが，感覚的快さとモデルの相関関係と感覚的快くなさとモデルの相関関係はほとんど逆の結果になったことから，感覚的快さも感覚的快くなさも同程度のラフネス，シャープネス，トナリティ，ラウドネスの影響を受けていると考えられる．また，感覚的快さと感覚的快くなさの相関関係が高いことから，正確に感覚的快さを評価できるモデルがあれば，感覚的快さのモデルを用いて感覚的快くなさを説明することができ，感覚的快さと感覚的快くなさを一軸で意味づけすることができると考えられる．

6.2 残された課題

本研究では Aures の感覚的快さのモデルで感覚的快さを適切に評価できなかった．しかし先行研究から感覚的快さはラフネス，シャープネス，トナリティ，ラウドネスの影響を受けることが示されている．そのため，各指標が感覚的快さに与える影響を調査して，Aures の感覚的快さのモデルの係数を調整したら，聴取実験の結果と感覚的快さのモデルの相関関係は良くなると考えられる．Aures の感覚的快さのモデルの係数について，トナリティの部分の係数を 0 にした場合，モデルと実験結果の相関関係が 0.57 になり，相関関係が大きくなることを確認した．さらに，ラウドネスの部分の係数をもとの値よりも大きい 0.5 に変更した場合，モデルと実験結果の相関関係が 0.79 になり，さらに大きくなることを確認した．Aures の感覚的快さのモデルの係数を最適化したら，モデルと実験結果の相関関係がさらに大きくなると考えられる．

感覚的快さを算出するモデルは Aures のモデル以外にも存在するため，別の感覚的快さを算出するモデルでならば，感覚的快さと感覚的快くなさについて一軸で意味づけできる可能性がある．

謝辞

本研究の遂行にあたり，多くのご指導，ご助言を賜った，主指導教員である鵜木祐史教授に深謝いたします．また，研究室会議で数多くのご助言えをくださった木谷俊介講師，大田恭士氏，磯山拓都氏に深く感謝いたします．実験に参加してくださった研究室のメンバーに感謝いたします．

参考文献

[1] 高田正幸，“音質評価指標の計算法と適用事例,” 日本音響学会誌，vol.75，no.10，pp. 582-589, 2019.

[2] 岩宮眞一郎，“音質評価指標-入門とその応用-,” 日本音響学会誌, vol.66, no.12, pp.603-609, 2010.

[3] 日本音響学会, 音響用語辞典, コロナ社, 1988.

[4] 岩宮眞一郎, 音色の感性学, コロナ社，2010.

[5] 橘秀樹，“環境騒音の評価指標,” 騒音制御，vol.31，no.6，pp.421-425，2007.

[6] 環境省，“騒音に係る環境基準について,” 環境省. https://www.env.go.jp/press/2369.html（参照 2024-01-29）

[7] 三宅普司，田中豪一,“不快音の脳波に及ぼす影響,” 日本衛生学雑誌,vol.39,no.2,pp.523-534, 1984.

[8] 島井哲志，田中正敏，“環境音の快ー不快評価と音圧の関係，’’ 日本音響学会誌，vol.49，no.4，pp.243-252,1993.

[9] 岩宮眞一郎，“音響デザイン論，” 芸術工学研究，vol.1，pp.57-66，2004.

[10] 岩宮眞一郎, 音のデザイン感性に訴える音をつくる, 九州大学出版会,2007.

[11] 光音技術グループ.“心理音響分析システム-製品音の快音化へ向けた開発支援機器-”. 地方独立行政法人東京都立産業技術研究センター. https://www.iri-tokyo.jp/site/tiri-news/202105-04-setsubi.html（参照 2024-01-15）

[12] 高橋由美子，“不快な音の知覚とその物理関連量に関する研究,” 北陸先端科学技術大学院大学修士論文，2019.

[13] 中村ひさお，“公共空間における音環境デザイン,” 環境技術，vol.31,no.6,pp.37-43,2002.

[14] 古井亮太，“「音環境デザイン」の歴史的背景と概要,” 環境技術，vol.31,no.6,pp.442-447, 2002.

[15] 日高杏子，“色素系とは何か,” 情報の科学と技術，vol.71，no.3，pp.101-106，2021.

[16] 上羽貞行, 荒井隆行, 栗栖清浩, 倉片憲治, 坂本真一, 船場ひさお, 佐藤洋,“音バリアフリーの現状と課題” 日本音響学会誌,vol.63,no.12,pp.723-730,2007.

[17] 田中聡一郎，“Spectro-Temporal Modulation 分析を用いた音質評価指標と聴覚的顕著性の対応関係の検討,” 北陸先端科学技術大学院大学修士論文，2022.

[18] 小野測器. “音質評価指標とは”. 株式会社 小野測器.
https://www.onosokki.co.jp/HP-WK/c_support/newreport/soundquality/soundquality_1.htm（参照 2024-01-15）

[19] 鵜木祐史，“新しいラウドネス計算法・ISO 532-2:2017 Moore-Glasberg method,” 日本音響学会誌，vol.77，no.12，pp.790-797，2021.

[20] 磯山拓都，木谷俊介，鵜木祐史，“聴覚フィルタバンクを利用した音質評価指標の計算モデルの検討,” 信学技報，vol.122，EA2022 28-41，pp.78-83，Aug.2022.

[21] Isoyama Takuto, Kidani Shunsuke, Unoki Masashi,“Computational model for predicting sound quality metrics using loudness model based on gammatone/gammachirp auditory filterbank and its applications,”InterNoise23, pp.4996-5995,2023.

[22] 中島一，“油圧ショベルの極低騒音（iNDr）と快音化,” 建設の施工企画，vol.696，no.2，pp.29-34，2008.

[23] 橋本竹夫，“機械騒音の音質改善の手法，” 日本音響学会誌，vol.53，no.6，pp.450-455，1997.

[24] 橋本竹夫，“自動車における音質評価,” 騒音制御，vol.16，no.1，pp.4-7，1992.

[25] 佐野智子，“不快感情の認知に影響を与える音響的指標〜「はい」をターゲット語として,” 青山心理学研究，vol.5，pp.25-36，2005.

[26] 佐野智子，片山敦，引地聰，“快・不快感情を含んだ音声の音響特徴，” 日本心理学会発表論文集，vol.71，2007.

[27] 岩宮眞一郎，渡邊正智，高田正幸，“オートバイの排気音に対するライダーと非ライダーの意識の違い,” 騒音制御，vol.32，no.6，pp.425-436，2008.

[28] Aures W. von,“Der sensorische Wohlklang als Funktion psychoakustischer EmpfindungsgroBen,” Acustica, vol. 58, pp. 282-290, 1985.

[29] Aures W. von,“Berechungsverfahren für den sensorischen Wohlklang beliebiger Schallsignale (A model for calculating the sensory euphony of various sound),” Acustica, vol. 54, pp. 130-141, 1985.

[30] ISO 532-1: 2017, Acoustics - Methods for caluculating loudness - Part 1: Zwicker method.

[31] 難波精一郎, 桑野園子, 音の評価のための心理学的測定法, コロナ社,1998.

[32] J. W. Little and J. E. Mabry,“Sound Duration and its effect on judged annoyance,”J. Sound Vib.9, pp.247-262, 1969.

[33] Greco Feix Gil, Merino-Martinez Roberto, Osses Alejandro.“SQAT: a sound quality analysis toolbox for MATLAB (Version 1.0) [Computer software]”. zenodo.
https://doi.org/10.5281/zenodo.7934710 （参照 2024-01-15）

[34] Greco Feix Gil, Merino-Martinez Roberto, Osses Alejandro.“ggrecow/SQAT”. github.
https://github.com/ggrecow/SQAT （参照 2024-01-30）

[35] 平松幸三，小林聡，松井利仁，高木興一，山本剛夫 “生活環境音を用いた大きさ・うるささ・不快感の評定実験,” 日本音響学会誌，vol.44，no.5，pp.350-360，1988.