

博士論文

主観評価に基づくヘッドレストスピーカを用いた
カーオーディオの音質最適化に関する研究

Study on sound quality optimization of car audio system with
headrest speakers based on subjective evaluation

宇都宮大学大学院 工学研究科
システム創成工学専攻

日高 倫明

Tomoaki Hidaka

2023 年 9 月

概 要

近年の自動車に求められる価値は、従来の価値である乗り心地の良さや運転のしやすさなどに加えて、移動空間としての室内の快適性が重視されている。このような背景のもと、本研究では快適性に重要な役割を担っているカーオーディオの音質に着目した。カーオーディオや車載インフォテインメントシステムの音質は、エンタテインメントとしての“快適さ”と報知音や音声情報が“聞きやすい”ことが求められるが、自動車室内は走行騒音や車室内特有の複雑な音響特性などの問題が存在している。これらに対して、DSP と複数のスピーカを用いた高度な信号処理を主体とする物理的特性の改善方法が実装され、効果を上げている。しかしながら、これらは高コストであること、および、昨今の自動車の電動化に伴う省電力の要求に対して、システムの消費電力が大きいため多くの車種に搭載して普及させることは難しい。また、これらのシステムに対して、“快適さ”や“聞きやすい”などの感性的な評価については不明である。そこで、本研究では車室内の音環境を考慮した快適で聞きやすいカーオーディオの音質を簡便な方法で実現する手段としてヘッドレストスピーカに提案し、主観評価に基づいて仕様の最適化を試行して、その有効性を検討した。

まずはじめに、試作したヘッドレストスピーカと標準のドアスピーカの比較実験を行った。実験は、任意に選んだ 10 ジャンルの 10 音源に対し、自動車走行時の車室内音響を想定して音質、快適性、付加価値、安全性の観点からブレインストーミング法により抽出した 12 個の評価語対を用いて、主観評価により行った。その結果、ヘッドレストスピーカは標準のドアスピーカに対して、ほとんどの評価項目で高い評価を得た。また、因子分析により「快適性」、「音場性」、および、「明瞭性」の 3 因子を抽出して比較したところ、ヘッドレストスピーカは「音場性」と「明瞭性」は優れていたが「快適性」が劣る結果であった。

そこで、「快適性」の向上を目指してヘッドレストスピーカの特長改善を行った。主要素であるスピーカユニットの設計変数の各効果を実験計画法により求め、各変数を組み合わせた時の周波数毎の重回帰式を導出して特性を予測した。その後、音質評価基準を設定して AHP (階層分析法) により重み付けを行い、多目的最適化手法を用いて評価基準をバランス良く満たすスピーカユニットを選定した。また、周波数 1kHz 以下の再生能力が不足していたため、エンクロージャと吸音材を組み合わせたスピーカ BOX 化 (スピーカシステム化) による改善を試行した。実験計画法と重回帰分析を用いて、選定したスピーカユニットとエンクロージャ・吸音材の設計変数の全組み合わせによる音響特性を予測した。その結果、全組み合わせにおいて 500~1kHz の再生能力が向上することが確認できた。そして、これらの最適化されたヘッドレストスピーカを、その特性により 4 つのタイプに分類した。

次に、カーオーディオの評価において、これまで用いてきた一般的な評価語が適切ではな

いと考へ、カーオーディオの音質評価に用いる評価語の適正化を行った。形容詞を組み合わせた 997 語の候補を用意し、適・不適をインターネットによるアンケートで調査した。この中で適正を示す回答が多く、回答傾向のばらつきが少ない 104 語に絞り込んだ。さらに 104 語を用いた主観評価実験を行い、回答傾向が類似する語群に分類後にパス解析にて各語群の代表語を求め、最終的に 11 語の評価語を選出した。また、各評価語間の因果関係を共分散構造分析により推論し、嗜好性を表す評価語「好き」に対して最も影響する評価語は「耳に優しい」であることを明らかにした。これにより、カーオーディオに求められる音質は“刺激が少ない自然な音質”であることが示唆された。

続いて、分類した 4 タイプのヘッドレストスピーカについて、選出した評価語 11 語と評価のばらつきが少なかった曲の中からの 3 曲を用いて主観評価実験を行い、快適性に最も優れるヘッドレストスピーカのタイプを選定した。また、この結果から、高評価となるヘッドレストスピーカの音響特性は、周波数ごとの音圧レベルが凸凹のないフラットな周波数特性カーブで、残響が短く、スムーズに収束することであることを明らかにした。これらの音質特性は、一般的にホームオーディオで求められる音質と同等で、ヘッドレストスピーカを用いることで、車室内の特殊な音響特性の影響を受けにくく、快適なカーオーディオの音質が実現できることを明らかにした。

以上により、快適性と明瞭性に優れたカーオーディオの音質を簡便な方法で実現する手段としてヘッドレストスピーカは有効であり、また、主観評価を主体的に活用することで、カーオーディオの音質の最適化が実現可能であることが証明された。

Abstract

In recent years, in addition to conventional values, such as ride comfort and ease of driving, interior comfort as a space for transportation has become more important in terms of the values demanded by automobiles. Against this background, this study focuses on the sound quality of car audio systems, which plays an important role in comfort. The sound quality of car audio systems and in-vehicle infotainment systems is required to provide ‘comfort’ as entertainment and ‘audibility’ of sound signals and voice information. However, the interior of a car has problems such as driving noise and complex acoustic characteristics peculiar to the cabin. In response to these problems, methods to improve the physical characteristics, mainly advanced signal processing using DSP and multiple loudspeakers, have been implemented and are proving effective. However, due to the recent demand for power conservation in response to the electrification of automobiles, the excessive cost of these systems and their high-power consumption make it difficult to install them in many vehicle models and to spread their use. In addition, the sensory evaluation of ‘comfort’ and ‘ease of listening’ for these systems is unknown. Therefore, in this study, we proposed headrest speakers as a means to realize comfortable car audio sound quality that considers the sound environment in the car cabin in a simple and easy way and examined their effectiveness by attempting to optimize their specifications based on subjective evaluations.

First, an experiment comparing prototype headrest speakers and standard door speakers was conducted. The experiment was conducted through subjective evaluation using 12 evaluation word pairs. They were extracted through a brainstorming method from the viewpoints of sound quality, comfort, added value, and safety for 10 sound sources of 10 arbitrarily selected genres, assuming the in-vehicle acoustics during car driving. As a result, the headrest speaker was rated higher than the standard door speaker in most of the evaluation items. Furthermore, a factor analysis was conducted to extract and compare the three factors of ‘comfort,’ ‘sound field’ and ‘intelligibility,’ and found that the headrest speakers were superior in ‘sound field’ and ‘intelligibility,’ but inferior in ‘comfort.’

Therefore, we improved the characteristics of the headrest speakers in order to improve ‘comfort.’ The effects of each design variable of the loudspeaker unit, which is the main element, were determined through experiment design, and multiple regression equations were derived for each frequency when each variable was combined to predict the characteristics. Subsequently, sound quality evaluation criteria were set and weighted by AHP, and a speaker unit that satisfied the evaluation criteria in a well-balanced manner was selected using a multi-objective optimization method. Furthermore, because the reproduction capability below 1k Hz was insufficient, a combination of enclosures and sound-absorbing materials was explored to improve the sound quality. Experiment design and multiple regression analysis were used to predict the acoustic characteristics of all combinations of design variables for the selected loudspeaker units, enclosures, and sound absorbing materials. Consequently, it was confirmed that the reproduction capability from 500 to 1k Hz was improved for all combinations. These optimized headrest speakers were then classified into four types

according to their characteristics.

Next, we considered that the general evaluation terms we have used thus far are not appropriate for evaluating car audio systems, so we conducted an optimization of the terms used to evaluate the sound quality of car audio systems. We prepared 997 candidate words by combining adjectives and surveyed their appropriateness using an Internet questionnaire. Among these, we narrowed the list to 104 words that received many appropriate responses and showed little variation in response trends. After conducting a subjective evaluation experiment using the 104 words and classifying them into groups of words with similar response tendencies, representative words for each group were obtained using path analysis. And finally, 11 evaluation words were selected. The causal relationship between the selected evaluation words and preference was inferred by covariance structure analysis, and it was clarified that the most influential evaluation word was 'easy on the ears' in relation to the evaluation word 'like,' which expressed preference. This suggests that the sound quality required for car audio systems is 'Natural sound quality with low stimulation.'

Then, to select the type of headrest speaker with the best comfort level, subjective evaluation experiments were conducted for the four types of headrest speakers using the 11 evaluation words selected and three songs. The songs were chosen from those that yielded the least variation in participants' survey responses. These results clarified that the acoustic characteristics of the highly evaluated headrest speakers were a flat frequency response curve with no unevenness in the sound pressure level at each frequency, short reverberation, and smooth convergence. Furthermore, these sound quality characteristics are equivalent to those generally required for home audio, and it was clarified that the use of headrest speakers can realize a comfortable car audio sound quality that is less affected by the special acoustic characteristics in the car cabin.

These results prove that headrest speakers are an effective means of achieving car audio sound quality that is both comfortable and intelligible in a simple way and that optimization of car audio sound quality can be achieved by utilizing subjective evaluations.

目次

第1章 序論.....	1
1.1 研究の背景.....	1
1.2 車室内音環境.....	2
1.2.1 車室内の騒音.....	2
1.2.2 車室内の音響特性.....	5
1.3 車室内音環境の改善に関する研究・実装事例.....	7
1.3.1 車室内騒音の改善事例.....	7
1.3.2 車室内音響特性の改善事例.....	8
1.4 研究の目的.....	10
1.5 論文の構成.....	10
第2章 ドアスピーカとヘッドレストスピーカの比較.....	11
2.1 はじめに.....	11
2.2 ヘッドレストスピーカについて.....	11
2.3 ドアスピーカとヘッドレストスピーカ比較実験.....	12
2.3.1 評価語の選定.....	12
2.3.2 実験刺激.....	12
2.3.3 実験方法.....	13
2.3.4 実験結果.....	14
2.4 考察.....	17
2.5 まとめ.....	18
第3章 ヘッドレストスピーカの音質の最適化.....	19
3.1 はじめに.....	19
3.2 スピーカユニットの音質改善.....	19
3.2.1 超薄型平板ダイナミックスピーカユニット.....	19
3.2.2 実験計画法による割り付け.....	20
3.2.3 測定方法.....	22
3.2.4 測定結果の解析.....	23
3.2.5 スピーカユニット特性の評価基準.....	35
3.2.6 設計パラメータの組合せによる特性値予測と最適化.....	38
3.2.7 最適化結果の検証.....	40
3.2.8 考察.....	42
3.2.9 まとめ.....	43
3.3 ヘッドレストスピーカシステムの音質改善.....	44
3.3.1 エンクロージャ・吸音材の仕様.....	44
3.3.2 実験計画法による割り付け.....	47
3.3.3 測定方法.....	49
3.3.4 測定結果の解析.....	50
3.3.5 スピーカシステムの特性予測.....	67
3.3.6 スピーカシステムの分類.....	69
3.4 まとめ.....	75

第4章 カーオーディオの評価に適した評価語の選出.....	76
4.1 はじめに.....	76
4.2 予備調査.....	76
4.2.1 調査方法.....	76
4.2.2 調査結果と評価語候補の絞り込み.....	82
4.3 評価語の適合性実験.....	85
4.3.1 試聴曲の選定.....	85
4.3.2 試聴実験の方法.....	85
4.3.3 試聴実験の結果.....	86
4.4 代表的な評価語の選出.....	88
4.4.1 回答結果による評価語の分類.....	88
4.4.2 各クラス内における代表語の選出.....	91
4.4.3 評価語間の関係性の分析.....	94
4.5 考察.....	98
4.5 まとめ.....	99
 第5章 快適なヘッドレストスピーカの選定.....	100
5.1 はじめに.....	100
5.2 快適性が高い仕様の検証.....	100
5.2.1 評価語の選定.....	101
5.2.2 実験刺激.....	101
5.2.3 実験方法.....	102
5.2.4 実験結果.....	106
5.3 考察.....	119
5.4 まとめ.....	121
 第6章 結論.....	122
謝辞.....	123
参考文献.....	124
本研究に関連する論文.....	127
学・協会誌等論文.....	127
国際会議発表論文.....	128
口頭発表論文.....	129

第1章 序論

1.1 研究の背景

生活水準の向上により物質的に満たされた現代社会では、人々は機能の多さや品質も良さだけでなく、感性的な要素や主情的な経験を求める傾向があり、ゆとりや豊かさ、快適さなどの心理的な要素が重視されるようになった。このような社会環境において、製品の質を高め、感性的な価値を向上させる取り組みとして、感性と工学を結びつける技術である「感性工学 (Kansei Engineering)」の重要性が高まっている。

感性工学は、長町によると「商品に抱いている心理的イメージを具体的な商品設計に翻訳し表現する技術」と述べている [1]。人間の感性や心理的な要素を科学的に解明して評価に活かすことで、魅力的で満足度の高い製品やサービスの提供が期待できる。その起源は、1970年の「情緒工学」から始まり、1986年にマツダの山本社長（当時）が”Kansei Engineering”という言葉を使用したことを受けて、感性工学に改称したとされている [2]。

「感性評価」はその要素技術で、官能検査におけるII型（嗜好型官能検査） [3]、いわゆる主観評価により心理量の数量化を行い、統計的处理によって感性と物理的条件との関係を明らかにすることが可能となる。自動車の分野では、その成り立ちも相まって感性工学は積極的に活用されており、安全性、運転負荷の軽減度合い、および、運転の楽しさなどの感性評価において様々な成果を上げている。また近年では、この感性評価の情報を活かし、感性的な価値を高める感性設計が様々な分野に導入されるようになってきた [4]。

さらに、感性設計を高い次元で実現する取り組みとして、最適化設計の手法を活用した方法が考えられている [5] [6]。最適化設計は、制約条件を満たしながら設計要求を最適な値（最大化、または、最小化）にするための設計変数の組み合わせを見つける手法で、データ科学が発達した現代においてその発展は著しい。従来の主な最適化手法である数理計画法（線形最適化、非線形最適化、多目的最適化など）と、比較的新しい遺伝的アルゴリズムやニューラルネットワークなど多数の手法があり、様々な分野で活用されている [7] [8]。感性的な価値を最適化するための具体的な方法は、感性評価で得られた数量化の情報を目的変数とし、設計者が要求する条件（設計変数）を説明変数に設定して、最も評価が高くなると予測される仕様（設計変数の組み合わせ）を求める手法である。なお、製品設計では、満足させたい感性的な価値が複数になる場合が多く、多目的最適化となるケースが多い [9]。

自動車の商品性においても、運動性能、安全性、信頼性などの工業製品としての基本的な品質要求と共に、心理的な快適さが強く求められるようになってきている。近年の自動車に求められる価値は、従来の価値である乗り心地の良さや運転のしやすさなどに加えて、移動空間としての室内の快適性が重視されている。車室内のデザインと色合い、視界、空調、室内音など、人間の五感に影響するその全てが対象となる。これらの感性的な価値を高い次元

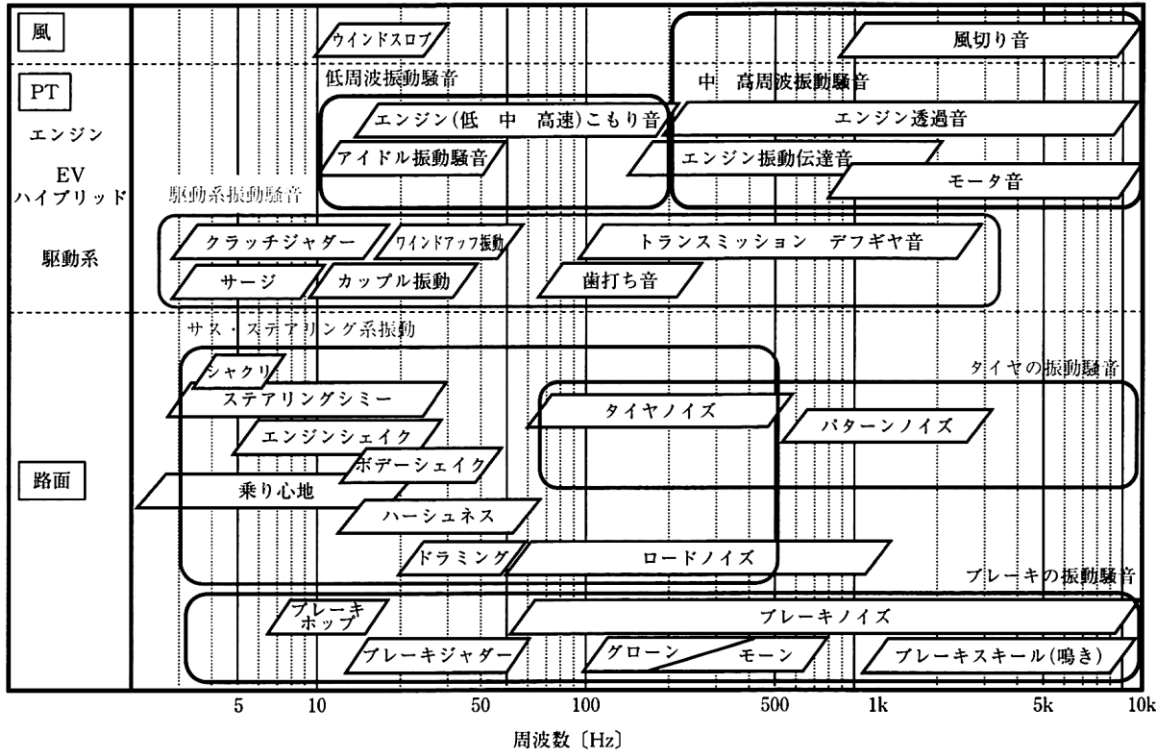
で満たすためには、感性設計と最適化設計の活用が有効であると考えられる。このような背景のもと、本研究では車室内空間における快適性に重要な役割を担っているカーオーディオの音質に着目した。カーオーディオの音質は、運転支援技術の発展により運転操作の負担低減が進み、自動運転技術の一般化によって運転タスクから解放されることが期待される近い将来では、移動をより快適に過ごす上で、今にも増して重要になることが予想される。また、昨今ではカーオーディオは車載インフォテインメントと呼ばれるようになり、従来の音楽やラジオに加えて、経路案内（カーナビゲーション）や交通情報の提供など、娯楽と情報を統合したシステムに進化している。このような背景により、カーオーディオや車載インフォテインメントシステムの音質は、感性的な価値であるカーオーディオ（エンタテインメント）としての“快適さ”と、報知音や音声情報（インフォメーション）の“聞きやすさ”が重要になると考えられる。しかしながら、自動車の室内は走行騒音や車室内特有の複雑な音響特性など多くの問題が存在しており、“快適さ”と“聞きやすさ”を両立させることは容易ではない。また、これら諸問題に対して、高度な信号処理を主体とした物理的特性の改善方法が実装されて効果を上げているが、これらの感性的な評価については、音色の印象に関する評価が行われた研究 [10][11] はあるが、“快適さ”、“聞きやすさ”については言及しておらず、感性的な価値の最適化までには至っていないのが現状と思われる。

1.2 車室内音環境

自動車の室内は、一般的な音楽ホールやホームオーディオなどの環境とは異なり、音楽聴取に適さない環境である。ここでは、車室内の音環境における問題点について、車室内の騒音と音響特性の観点から述べる。

1.2.1 車室内の騒音

自動車の室内は、図 1.1 に示す通りエンジンノイズ・ロードノイズ・風切り音（空力騒音）など [12]、カーオーディオの音を遮る騒音がいくつも存在する。これらは走行速度の増加に伴って大きくなる。図 1.2 に小型車（2003 年式 Honda FIT 2WD 1.5L）の車室内騒音の測定結果を示す [13]。この図から、走行速度が 80 km/h では車室内の騒音が A 特性音圧レベル 66 dB で、音楽や報知音・音声情報の音量が A 特性音圧レベル 65 dB に設定した場合は、この音量を上回ることがわかる。また、図 1.3 に示す騒音の周波数応答特性の測定結果から、走行速度が上がると騒音が増加し、カーオーディオ再生音の低中音域がマスキングされることがわかる。



出典：自動車技術ハンドブック 第1分冊 基礎・理論編 p.388

図 1.1 四輪自動車の振動騒音現象に対する一般的な周波数

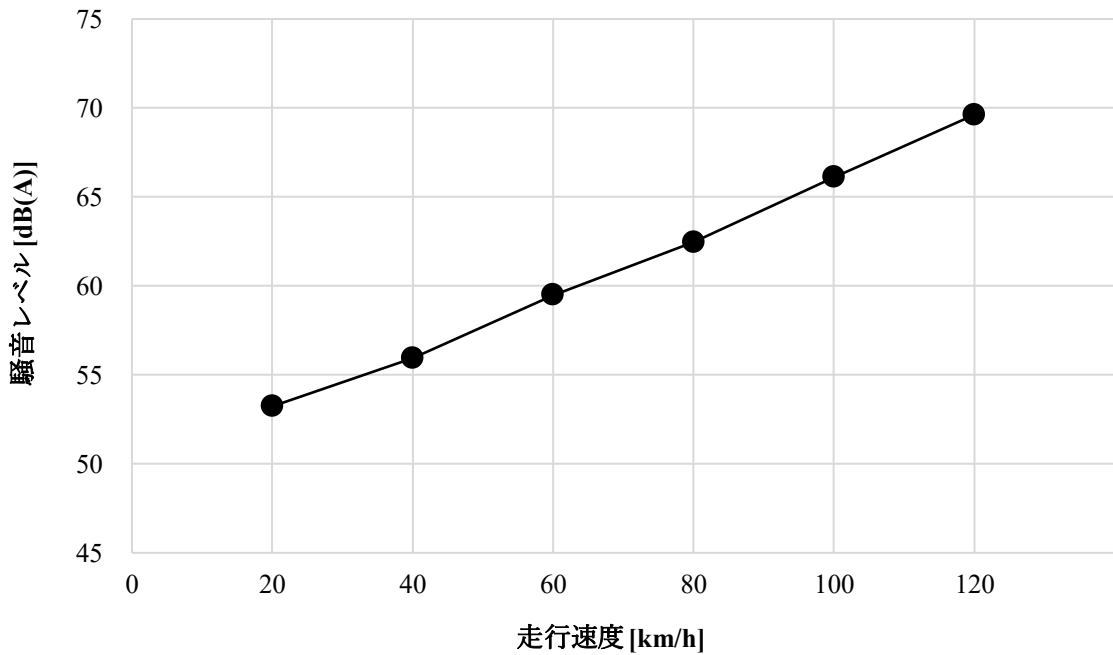


図 1.2 車両速度と車室内騒音の関係 (小型乗用車)

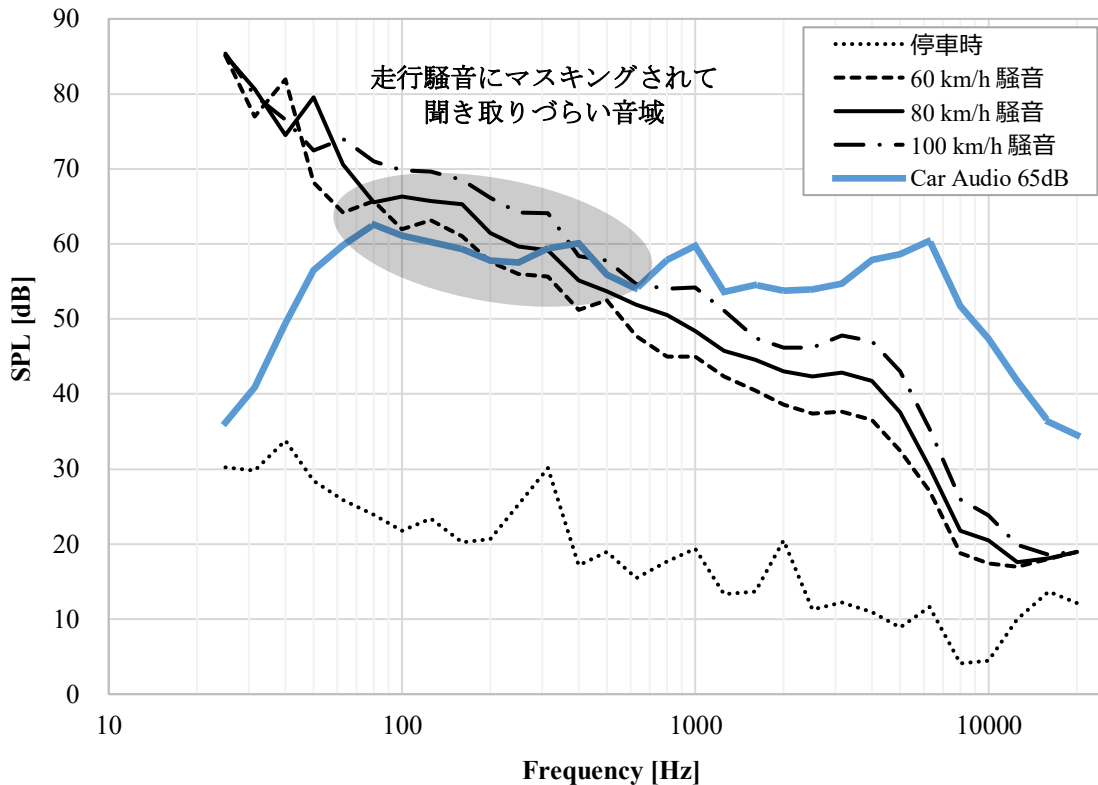


図 1.3 車室内騒音とカーオーディオの周波数応答特性

この影響は、停車時には快適な音質であっても、走行速度が増すと低中音域が聞こえにくい（聞き取れない）状況になり、“快適さ”が損なわれることになるかと予想できる。そこで、低中音域の増強が考えられるが、低中音域を増強した音質は明瞭さが失われてしまうために、音楽や報知音・音声情報に対して“聞きやすさ”が損なわれると予想される。

これらについて、低中音域の増強に対する実験を行った結果を図 1.4 に示す。この実験では、車室内の騒音特性を考慮して、低中音域を増強した 3 種類の補正フィルタを通過させた音源に対して、車室内騒音が 60 km/h と 100 km/h の時の主観評価を実施し、因子分析により分析した [14]。図 1.4 (a) に示す通り、速度が 60 km/h の時は低音補正が少ない -3 dB/oct. フィルタの快適性がやや高く、100 km/h 時は低音補正が多い -6 dB/oct. フィルタの快適性が高いことから、車室内騒音のマスクングに対する快適性への影響が確認できる。なお、低音補正が強すぎる場合は、快適性が低くなることが示唆されている [13]。また、図 1.4 (b) では、走行速度、即ち車室内騒音が増加するといずれの補正フィルタも明瞭性が低下するが、その増減よりも低音補正量の影響が大きいことが確認できる。

以上により、車室内の騒音は、カーオーディオ・インフォテイメントシステムから出力される音楽や報知音・音声情報に対して“快適さ”に影響を及ぼし、“聞きやすさ”は騒音の影響よりも音質（周波数応答特性）が重要であると言える。

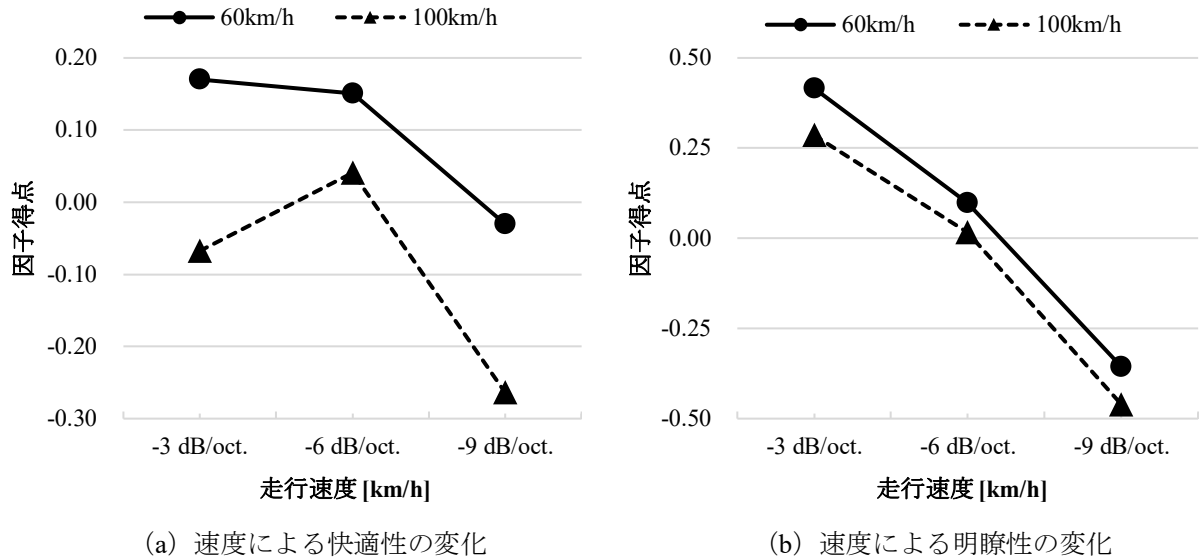


図 1.4 補正フィルタ毎の因子得点

1.2.2 車室内の音響特性

極端に狭く、様々な材質が使われている車室内空間は、音楽ホールや一般的なホームオーディオの聴取環境と異なり、複雑な音響特性となっている。この複雑な音響特性の解明には多数の先行研究がある。以下に、その代表的な問題点を記す。

① 音の反射

音を強く反射する特性を持つ前後側面のガラス（ウィンドシールド）と、複雑な形状をした樹脂製コンソール・合皮トリムなどの内装材で音の反射が生じる。特に側面ガラスは、正対する位置関係によって音が干渉し合い、周波数帯域によっては音を打消し合ったり、地強め合ったりするなどの大きな影響をもたらす [15]。

② 吸音

シート生地・天井材・床カーペットなどは、その材料の特性に応じて周波数帯域を吸音する。これら吸音の特性は、車室内騒音の低減には活用されている [16][17] が、音楽などの聴取環境における音響特性の改善を同時に考慮するのは極めて困難である。

③ スピーカ配置

一般的な車室内のスピーカ配置は、通常の足元に対面して設置されており、それぞれが干渉し合うことになる。また、前方左右ドア下部、後方左右ドア下部の4チャンネルスピーカ仕様の場合は、それぞれのスピーカから受聴位置（乗員の耳の位置）の距離が非対称となるために直接音に時間差が生じ、前述の反射音と合成されて音色の濁りとして知覚される [15][18]。

④ 狭い空間

車室内空間は乗用車では 3 m^3 程度で非常に狭い空間である。このように狭い空間のために残響時間は極めて短く、広がり感や奥行き感がない。一方、音楽ホールではその要とも言える残響時間は長く、ホームオーディオでも車室内環境と比べて 10 倍以上の響きがある [19]。また、空間の共振周波数による定在波の影響が生じる。定在波とは、「平行する反射面に囲まれた部屋の寸法関係によって複数の音波が同時に同じ点に達すると、干渉により互いに強め合ったり、打消し合ったりする現象である。また、定在波の重なり合うところでは大きな山谷（ピーク、ディップ）を生じさせる。狭い車室内空間ではこの現象が数百 Hz 以上間で分布し、再生音に大きな影響を及ぼす」 [20]。

図 1.5 に、小型車（2003 年式 Honda FIT 2WD 1.5L）において、純正カーオーディオ一体型カーナビゲーションと純正ドアスピーカ（4 スピーカ仕様）の組み合わせで、ピンクノイズを再生した時のドライバ頭部中心位置での周波数応答特性を示す。

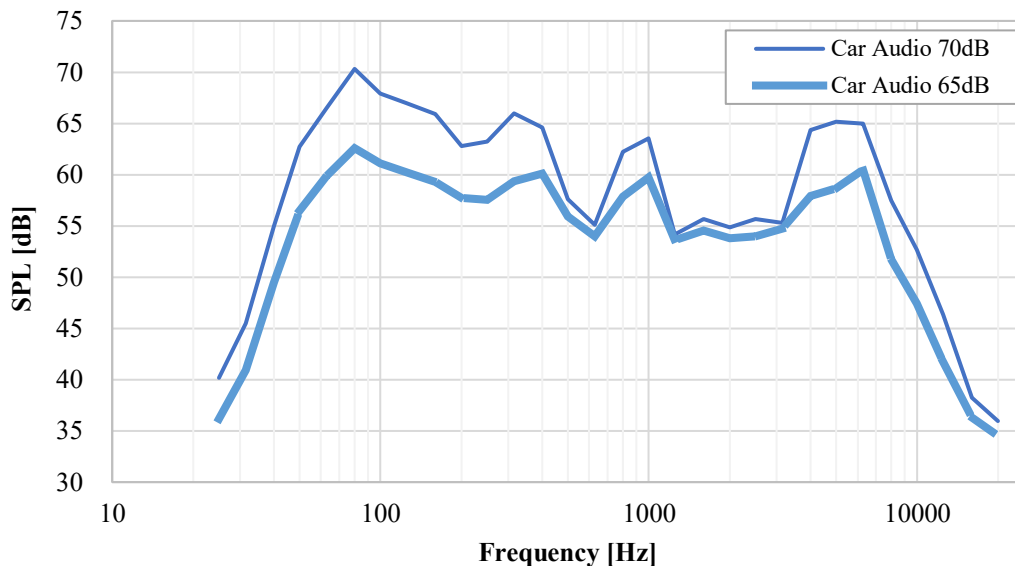


図 1.5 カーオーディオの周波数応答特性

本図に示す通り、再生音の周波数応答特性は、前述の①～④の原因により凸凹が発生している。音質の良し悪しは周波数応答特性だけでは決まらないが、このような周波数応答の大きな凸凹は意図しない極端に誇張された不自然な音になり、元の音楽とは随分と異なる印象になってしまう。また、再生音圧 65 dB(A) と音量を増加させた再生音圧 70 dB(A) を比較すると、630 Hz 付近と 1250～3150 Hz の音圧はほとんど変化しないことがわかる。このことから、音量調整だけでは快適で聞きやすい音質にすることは、困難であると言える。なお、側面ガラスを開けると 630 Hz 付近の音圧の上昇が見られた。これは、側面ガラスを開けたことにより、前述①の反射の影響が取り除かれたこと、または、④で述べた共振周波数が変化したことによるものと推測される。

1.3 車室内音環境の改善に関する研究・実装事例

1.3.1 車室内騒音の改善事例

車室内の騒音低減としては、防音・遮音・吸音材などの音響マテリアル [16]を利用した力学的な静音化対策が旧来から行われており、安定した効果が得られる(図 1.6)。しかしながら、前述(1.2.2 項②)の通り、吸音材による騒音対策は、カーオーディオからの音も同時に吸音してしまうために音響特性の改善との両立は難しい。また、静音効果を高めるための材料の組み合わせは、重量・コスト面などの課題がある。

また、近年ではエンジン騒音対策を中心としたアクティブノイズコントロール(ANC)と呼ばれる制御技術が、高級車の一部に搭載されて効果を上げている(図 1.7)。ANCは、主に低周波(低音域)のエンジン騒音、ロードノイズに対して、最大で6 dB程の低減効果があるとされている[21]。ただし、制御可能な室内空間に制約があることや、安定的に効果が得られるのは150 Hz以下の周波数帯域に限られる。また、現時点ではコスト面に課題があるため、中型以上の上級車種に限定されている。

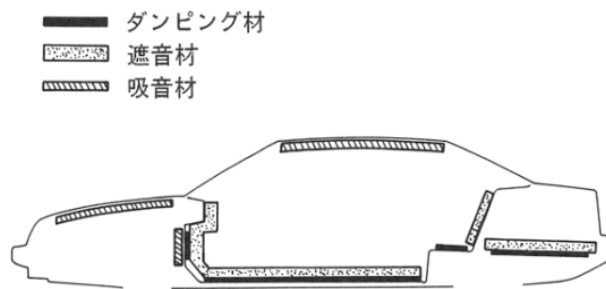
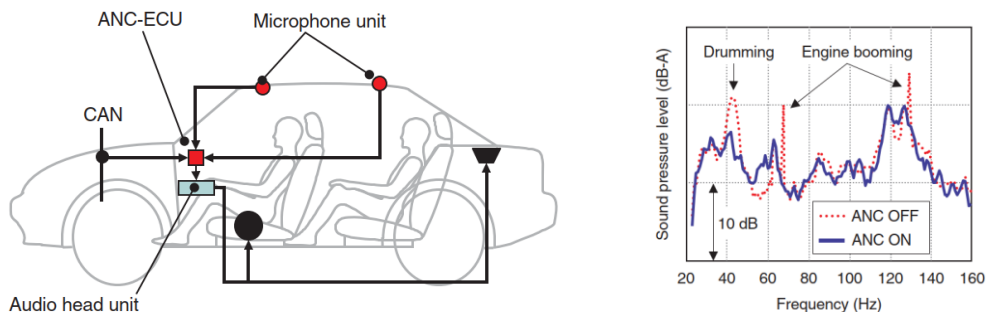


図 1.6 力学的静音対策(防音材の適用例)

山下, 中村, 自動車用防音材料, HONDA R&D Technical Review Vol.1 (1989), p.86 [16]より引用



(a) 統合 ANC 車載システム構成

(b) 低周波音統合 ANC システム効果

図 1.7 アクティブノイズコントロール(ANC)

井上ほか, 低周波音低減のための統合 ANC 技術の開発,
HONDA R&D Technical Review Vol.23 No.2 (2011), pp.118-119 [21]より引用

その他、低音域騒音のマスクング対策として理解しやすい方法では、車速に応じた音量の自動コントロールがある。但し、カーオーディオ再生音に対して、マスクングを受けない帯域の音圧も同時に増加させることになり、また、前述（1.2.2 項）で述べた車室内の音響特性の影響により、音量を上げて変化しない周波数帯域が存在するために不自然さを伴う。この改善として、低音域のダイナミックレンジを補正する方法がある [22]。これは、騒音中の音楽について狭帯域ごとのラウドネスが無騒音時と等しくなるように増幅する [11]。しかし、この方法による感性的な評価については、音色の印象に関する評価は行われているが、“快適さ”や“聞きやすさ”については不明である。

また、これらとは異なる最も簡便なアプローチとして、受聴位置（乗員の耳の位置）近くであるヘッドレストにスピーカを設置する方法がある。このヘッドレストスピーカ（図 1.8）は、主にオープンカーなど車室内騒音が大きい車種に古くから用いられてきた。ただし、ヘッドレスト周りの寸法制約により、幅広い音域をカバーするフルレンジスピーカの設置が困難なため、多くの場合は高音域専用の補助的なスピーカ（主にツイータ）となっており、メインスピーカとして用いられることはほとんどない。

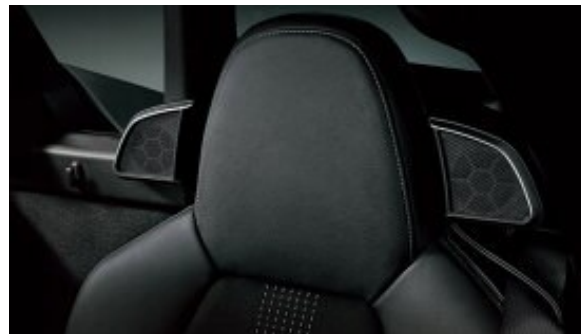


図 1.8 ヘッドレストスピーカの例

ホンダ S660 アクセサリーカタログ、スカイサウンドスピーカーシステム リヤ用、
ホンダアクセス（2021）、p.10 より引用

1.3.2 車室内音響特性の改善事例

車室内の複雑な音響特性の改善において最も簡易的な方法は、再生音の周波数特性を固定イコライザで平坦化させる方法で、近年のデジタル技術の進歩により、FIR (Finite Impulse Response : 有限インパルス応答) の応用による時間軸特性を考慮した補正が行われるようになった。ただし、図 1.5 に示した通り、定在波の影響があるためにその効果は限定的である。また、最近では DSP を用いた高度な信号処理が主体となってきている。各スピーカから受聴位置（乗員の耳の位置）への到達時間の補正、両耳間レベル差の補正、側面ガラス反射音の逆位相制御などの環境改善のための信号処理や、オーディオリスニングルームのような初期反射音や残響音をシミュレーションする音場制御など、複数のスピーカ設置（マルチス

ピーカ)と合わせて、様々な技術が実用化されている [23] (図 1.9)。また、プレミアム商品では、付加価値的な機能としてホームオーディオなどで人気のある立体音響も実現されている [24]。しかし、これらは高コストなために、高級車やハイエンド製品の一部に限定されているのが現状である。また、複雑なシステムのために効果が不安定になることや、消費電力が大きいなどの問題がある。

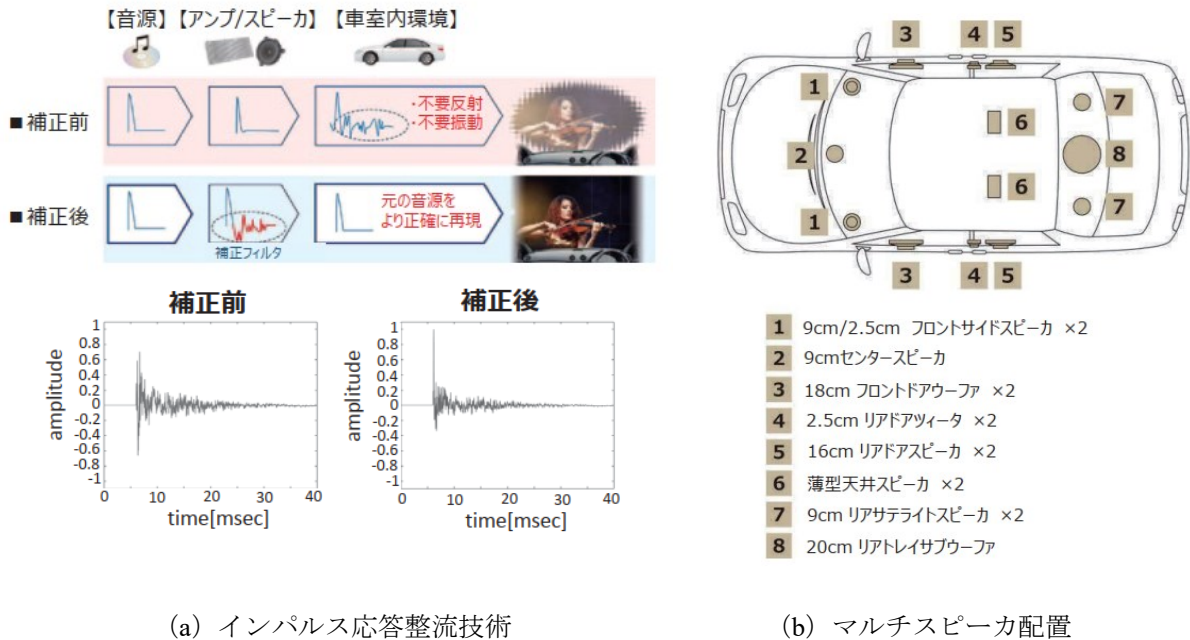


図 1.9 高度な信号処理による車室内音響の改善例

田林ほか, 新プレミアムサウンドシステム開発,
DENSO TEN Technical Review Vol.2 (2018), pp.5-6 [24] より引用

また、前述のヘッドレストスピーカーは、音響改善に関しても極めて効果的であると考えられる。ヘッドレストスピーカーは、受聴位置（乗員の耳の位置）とスピーカーの距離が近く、直接音が主体的になるために、車室内空間の音響特性の影響を受けにくく、小さな音量（低出力）でも再現性の高い音質が得られるという大きなメリットがある。ただし、前述の通り、寸法制約により小型スピーカー（或いはツイータ）しか設置できず、再生周波数帯域が高域に限定されるために補助的に用いることが一般的である。小型でも幅広い音域をカバーし、メインスピーカーとして成立できるヘッドレストスピーカーが望まれる。

1.4 研究の目的

1.2 節で述べた車室内の騒音と複雑な音響特性の諸問題に対して、自動車メーカーとカーオーディオメーカーが積極的に訴求している対策方法は、1.3 節の中で述べた DSP を用いた高度な信号処理によるシステムが主体である。しかし、これらは高コストのために、多くの車種に搭載することは難しい。また、昨今の自動車の電動化に伴う省電力化の要求に対して、システムの消費電力が大きいことも、普及させるための障害となっているのが現状である。今後、エントリークラスまでの幅広い車種に普及させるためには、コストが低い単純なシステムで、消費電力が少ない技術が望まれる。

そこで、本研究では快適な音質を簡便な方法で実現できる可能性があるヘッドレストスピーカに着目する。耳に近いヘッドレストスピーカは、車室内の音環境の影響を受け難く、小出力でもカーオーディオからの音楽や報知音・音声情報がよく聞こえるため、“快適さ”と“聞きやすさ”の両立が期待できる。ただし、現状のヘッドレストスピーカは補助的なスピーカに過ぎない。そこで、本研究ではこれをメインスピーカとして成立できるヘッドレストスピーカを創出し、主観評価に基づいて仕様の最適化を行うことで、快適で聞きやすいカーオーディオ音質を実現させ、快適性の高い移動空間の創造に貢献することを目指す。

1.5 論文の構成

第1章では、本研究の背景となる自動車に求められる価値と車室内の快適性について、カーオーディオの音質を中心に述べた。さらに、カーオーディオの音質を劣化させる車室内の音環境に関する問題点、改善事例、および、課題について触れた。そして、これらを簡便な方法で解決するヘッドレストスピーカの創出により、快適で聞きやすいカーオーディオ音質の実現を本研究の目的とすることを述べた。

第2章では、ヘッドレストスピーカを試作し、乗用車の標準的なドアスピーカとの比較を主観評価実験により行い、ヘッドレストスピーカの優位性を検証する。

第3章では、ヘッドレストスピーカの音質向上を目的に、主要素であるスピーカユニットの設計変数の見直し、および、エンクロージャ化による音響特性の最適化を検討する。

第4章では、カーオーディオの評価に適した評価語について、大規模なアンケート調査、および、試聴実験から得られた結果をもとに選出を行う。

第5章では、第3章で得られた特性の異なるヘッドレストスピーカ4種類について、第4章で選出した評価語を使った比較実験を行い、評価が高い仕様の考察から、快適性の高い音響特性を明らかにする。

第6章では、第2章から第5章までの結果を総括し、本研究の結論を述べる。

第2章 ドアスピーカーとヘッドレストスピーカーの比較

2.1 はじめに

本章では、第1章で述べた車室内の音環境に関する諸問題について、これらを簡便に解決する可能性があるヘッドレストスピーカーと、一般的な乗用車に標準で搭載されるドアスピーカー（標準ドアスピーカー）との比較実験について述べる。実験は、予め用意した音源10種類（音楽、音声）を用いてカーオーディオで再生し、車室内に設置されている標準ドアスピーカーと、試作のヘッドレストスピーカーから出力された音の印象をそれぞれ評価することで、試作ヘッドレストスピーカーの優位性の検証と課題について明らかにする。

2.2 ヘッドレストスピーカーについて

現在の一般的なカーオーディオのスピーカーは、車室内形状の制約のためにドア下部の足元側に設置されることが多い（図2.1）。そのため、車両走行時には車体下部から透過する走行騒音と重なり、大きな再生音量が必要となる。また、前述（1.2節）で述べたとおり、このスピーカーの配置と車室内特有の複雑な音響特性は、音楽などの再生に対して極めて不利な状況であり、音場は不自然になってしまうことが多い。

そこで、これらの状況を改善する快適な新しいカーオーディオの音質を目指して、ヘッドレストスピーカー（図2.2）を試作した。本試作品は、小さな音量でも良く聞こえる様に耳の近くにスピーカーを配置したものである。スピーカーはスペース効率の良い平面状のものを用意し、ヘッドレストに内蔵した。また、このスピーカーの配置は、車室内の複雑な音響特性の影響を受けにくいいため、“快適さ”と“聞きやすさ”の両立が期待できる。ただし、ヘッドレストスピーカーは後頭部からの再生となるため、若干の違和感がある。そこで、信号処理によってバイノーラル効果を付加することも想定している。



図 2.1 標準ドアスピーカー

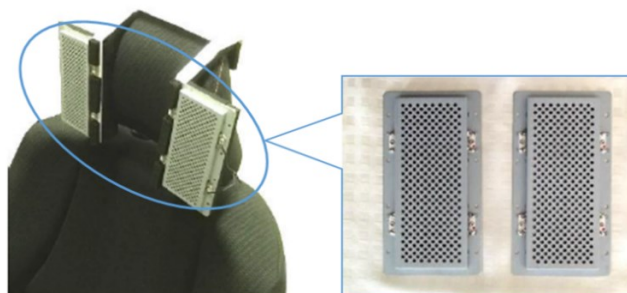


図 2.2 試作ヘッドレストスピーカー

2.3 ドアスピーカとヘッドレストスピーカ比較実験

本実験では、標準で搭載される一般的なドアスピーカとヘッドレストスピーカが聴取者の印象に与える影響を調査する。これより、ドアスピーカヘッドレストスピーカによる音場を評価し、標準のドアスピーカに対する優位性の検証を目的とする。

2.3.1 評価語の選定

本実験で使用した評価語は自動車走行時の車室内音響を想定し、音質、快適性、付加価値、安全性の観点から、ブレインストーミング法により表 2.1 に示す 12 個の評価語対を抽出した。それぞれの評価語は、実験参加者に 7 段階の評定尺度で評価させた。

表 2.1 実験に用いた評価語

分類	要素	評価語対
音質	明瞭感	はっきりした — ぼやけた
	広がり感	広がりがある — 広がりのない
	奥行き感	奥行きがある — 平面的な
嗜好	快適感	心地よい — 不快な
	爽快感	すっきりした — もやもやした
	嗜好感	好き — 嫌い
付加価値	臨場感	臨場感がある — 臨場感がない
	高級感	高級感がある — 安っぽい
	鮮度感	革新的な — 保守的な
安全	覚醒感	目覚めるような — 眠くなるような
	集中感	集中できる — 気が散る
	疲労感	疲れしない — 疲れる

2.3.2 実験刺激

実験で使用した音源（楽曲）は、J-POP、クラシック、ジャズ、ヒーリング、フュージョン、ポップス、ボーカル、ロック、自然音、および、ナレーションに分類される 10 種類とした。これらの音源は CD に記録した後、純正カーオーディオ一体型カーナビゲーション機の CD 機能により再生し、ドア下部（足元側）に設置された標準ドアスピーカ（4 スピーカ仕様）とヘッドレストスピーカのそれぞれでステレオ出力した。なお、参考としてヘッドレストスピーカでは立体音響効果の信号処理を事前に施した（RSS-10、ローランドを用いて処理）音源により、バイノーラルでの再生も合わせて行った。刺激の再生時間は約 10 秒である。本実験で用いた再生方式を表 2.2 に、表 2.3 に使用した音源を示す。各刺激は聴感上の音量を合わせるため、ピンクノイズ（ピーク-20 dB）を用いて、ダミーヘッド（4100 Head And Torso Simulator, Brüel & Kjaer）の測定により、B 特性音圧レベル 75 dB に調整した。

表 2.2 再生方式

オーディオシステム	出力位置	再生方式
標準カーオーディオ	ドアスピーカ	ステレオ再生
	ヘッドレストスピーカ	ステレオ再生
		(参考：バイノーラル再生)

表 2.3 実験に使用した音源

ジャンル	曲名	アーティスト
J-POP	Beginner	AKB48
クラシック	Piano Concerto In A Minor, Op.54-2.Intermezzo	Schumann
ジャズ	森の詩	Trio
ヒーリング	Only Time	Enya
フュージョン	Forget Me Nots	Patrice Rushen
ポップス	Born This Way	Lady GaGa
ボーカル	トイレの神様	植村花菜
ロック	I Was Born to Love	Queen
自然音	Sound of nature	(free content)
ナレーション	女性ナレーション+男性ナレーション+BGM	—

2.3.3 実験方法

実験は、車庫内でエンジンを止めた状態の自動車室内で行った。実験参加者はドライバーシートに座り、標準ドアスピーカのステレオ再生、ヘッドレストスピーカのステレオ再生、および、バイノーラル再生によるそれぞれの音の印象について、表 2.1 の 12 個の評価語に対して図 2.3 に示す 7 段階で評価させた。なお、順序効果を排除するため、各実験参加者に対する音の提示順序と評価語の提示順序はランダムとした。実験参加者は、聴覚正常な 20 代の男女 10 名とした。試行回数は 1 名につき、音源 10 種類 × 再生方式 3 種類 × 繰り返し 3 回の合計 90 回である。なお、実験参加者の疲労を考慮して、1 セッションあたり 15 試行で、セッションの間隔は 1 時間以上空けることとし、1 日最大 2 セッションまでとした。

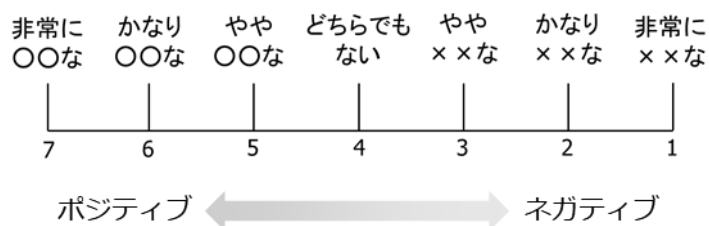


図 2.3 評価尺度 (7 段階)

2.3.4 実験結果

再生方式ごとの各評価得点の結果を図 2.4 に示す. 本図よりヘッドレストスピーカの 2 つの再生方式は, 標準ドアスピーカに比べて“はっきりした”, “すっきりした”, “臨場感がある”, “高級感がある”, および, “革新的な” の評価項目で高い得点となった. また, ヘッドレストスピーカのバイノーラル再生は, 標準ドアスピーカに比べてほとんどの項目で高い得点を示した. 一方, ヘッドレストスピーカのステレオ再生では, “広がりがある”, および, “疲れない” の項目で, 標準ドアスピーカに比べて低い得点となった.

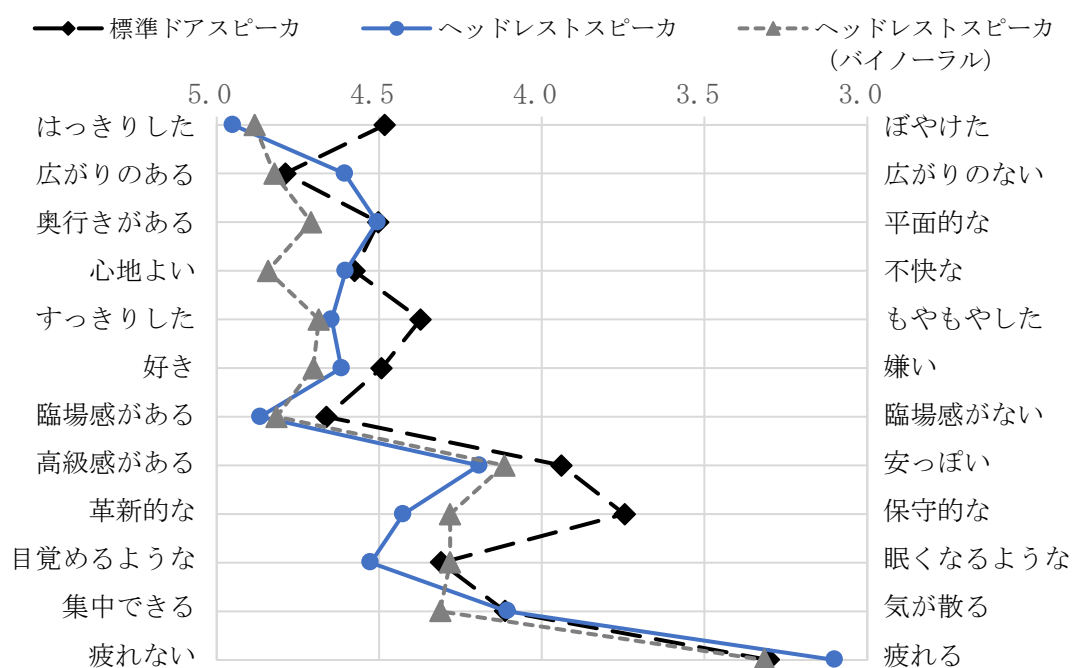


図 2.4 再生方式ごとの評価得点

次に, 因子分析の結果を表 2.4 に示す. 固有値が 1.0 以上の成分は第一から第三成分までとなっており, 累積寄与率は 66.9%であった. 従って, 第一から第三成分を主成分とし, バリマックス法を用いて分析した結果を表 2.5 に示す. 表より, 第一成分は, “奥行きがある”, “広がりがある”, “臨場感がある”, “高級感がある”, および, “革新的な” の音場の付加価値に関する評価語に高い負荷量を示したので, これを「音場性」因子とした. 第二成分は, “集中出来る”, “疲れない”, “心地よい”, および, “好き” の快適さに関する評価語に高い負荷量を示したため「快適性」因子とした. 第三成分は, “はっきりした”, “目覚めるような”, および, “すっきりした” の聞きやすさに関する評価語に高い負荷量を示したので「明瞭性」因子とした. 再生方式ごとの因子得点を表 2.6, 図 2.5 示す. ヘッドレストスピーカは, 標準ドアスピーカに対して「音場性」・「明瞭性」に優れるが「快適性」が劣っていた. また, バイノーラル再生では全因子で標準ドアスピーカを上まわる結果であった.

表 2.4 因子分析の寄与率

Factor	Primary eigenvalue		
	Total	Variance ratio [%]	Cumulative contribution ratio [%]
1	4.93	41.1	41.1
2	2.09	17.4	58.5
3	1.01	8.4	66.9
4	0.73	6.1	73.0
5	0.61	5.1	78.0
6	0.50	4.2	82.2
7	0.43	3.6	85.8
8	0.41	3.4	89.2
9	0.37	3.0	92.3
10	0.35	2.9	95.2
11	0.30	2.5	97.6
12	0.28	2.4	100.0

表 2.5 第一成分から第三成分の因子分析（バリマックス回転後）

Adjective	Factor		
	1st	2nd	3rd
奥行きがある	0.818	0.184	0.078
広がりがある	0.776	0.217	0.079
臨場感がある	0.758	0.106	0.269
高級感がある	0.666	0.305	0.172
革新的な	0.572	-0.200	0.394
集中出来る	0.144	0.835	0.032
疲れない	0.014	-0.807	0.172
心地よい	0.313	0.777	0.155
好き	0.413	0.644	0.297
はっきりした	0.266	0.320	0.736
目覚めるような	0.115	-0.348	0.727
すっきりした	0.275	0.495	0.648

表 2.6 スピーカタイプの因子得点

スピーカタイプ	快適性	音場性	明瞭性
標準ドアスピーカ	0.005	-0.065	-0.192
ヘッドレストスピーカ	-0.103	0.008	0.145
ヘッドレストスピーカ (バイノーラル)	0.098	0.057	0.047

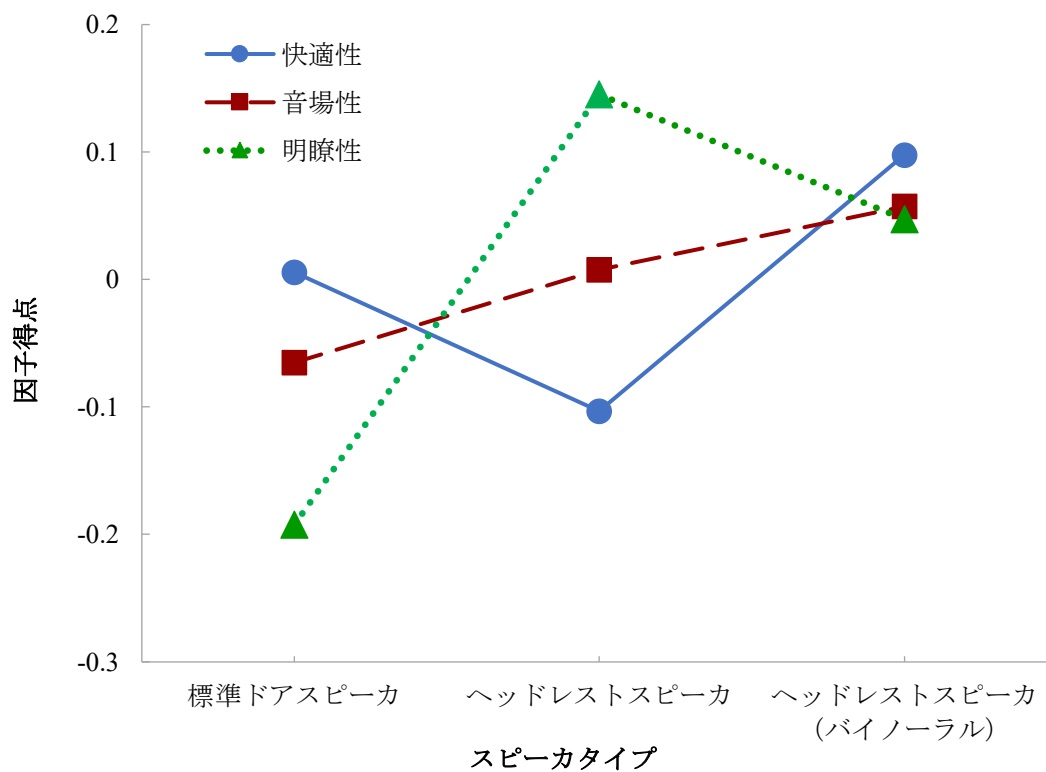


図 2.5 因子得点

2.4 考察

今回の実験結果において、ヘッドレストスピーカの2つの再生方式が、標準ドアスピーカに比べて、“はっきりした”、“すっきりした”、“臨場感がある”、“高級感がある”、“革新的な”の項目で高い評価となったことは、耳の近くにスピーカを設置したことにより、音楽がより明瞭に聞こえる様になったためと考えられる。また、ヘッドレストスピーカが標準ドアスピーカに比べて多くの項目で高い評価を示したのは、耳の近くのスピーカ配置が車室内特有の複雑な音響特性に影響され難いためであると考えられる。さらに、自動車用の装備品として重要な安全性に関する項目である“目覚めるような”、“集中できる”、“疲れない”について、標準ドアスピーカと同等以上のヘッドレストスピーカの評価結果は、車載スピーカとしての適性を示すものである。

また、標準ドアスピーカに対してヘッドレストスピーカのバイノーラル再生が優位となった因子分析の結果は、各因子に着目することで快適性を向上させるカーオーディオシステムを構築できる可能性があると言える。一方、ヘッドレストスピーカのステレオ再生では、“広がりがある”、および、“疲れない”の項目で標準ドアスピーカに比べて低い評価となっており、「快適性」の得点が低いことから、耳近くにスピーカを配置する場合は、ヘッドレストスピーカの音質改善が必要と思われる。

2.5 まとめ

本研究では、標準で搭載される一般的なドアスピーカに対し、快適なカーオーディオの音質にすることを目的に試作したヘッドレストスピーカの優位性について、主観的評価実験により検証した。

実験で使用した音源（楽曲）は、J-POP、クラシック、ジャズ、ヒーリング、フュージョン、ポップス、ボーカル、ロック、自然音、および、ナレーションに分類される10種類とし、ブレインストーミング法により12個の評価語対を用意し、7段階の評定尺度で評価させた。再生方式については、標準ドアスピーカによるステレオ再生、ヘッドレストスピーカによるステレオ再生、および、参考として準備したバイノーラル再生を含む3種類とした。

その結果、ヘッドレストスピーカは、標準ドアスピーカに比べてほとんどの評価項目で高い評価を得た。ただし、ヘッドレストスピーカによるステレオ再生では、“広がりがある”，および，“疲れない”の評価が低かった。

また、因子分析により「快適性」，「音場性」，および，「明瞭性」の3因子を抽出し，標準ドアスピーカとヘッドレストスピーカを比較したところ，ヘッドレストスピーカは「音場性」，「明瞭性」が優れていた。ただし，「快適性」の得点が低いため，音質の改善が必要なことが明らかになった。さらに，参考として準備したバイノーラル再生では，「快適性」，「音場性」，および，「明瞭性」の全てで標準ドアスピーカを上回ったことから，ヘッドレストスピーカは，バイノーラル再生などの信号処理がより効果的であると考えられる。

以上により，ヘッドレストにスピーカを配置するヘッドレストスピーカは，標準ドアスピーカより多くの点で優れていた一方で，“広がりがある”，および，“疲れない”，および，快適性に対する評価に弱点があるため，音質の改善が必要であることが明らかになった。

第3章 ヘッドレストスピーカの音質の最適化

3.1 はじめに

本章では、第2章で明らかとなったヘッドレストスピーカの快適性に関する弱点を解消し、標準ドアスピーカに対する優位性をさらに高めることを目的に実施したヘッドレストスピーカの音質改善について述べる。はじめに、主要素であるスピーカユニットの音響特性の最適化を試行し、次に、エンクロージャ・吸音材を用いたスピーカBOX化による音質の最適化を行う。さらに、最適化したヘッドレストスピーカについて音質の特徴ごとに分類して、カーオーディオに求められる“快適さ”と“聞きやすさ”を両立できる仕様を選定する。

3.2 スピーカユニットの音質改善

本節では、ヘッドレストスピーカの主要素であるスピーカユニットに対し、音響特性の最適化を行った内容を述べる。各設計パラメータに対して実験計画法にもとづく直交配列実験 [25] [26]を行い、これらの結果を用いて重回帰分析によりスピーカユニットの音質に関する特性値(周波数応答特性, 全音圧レベル, 低音域限界入力値)への影響を明らかにした。

3.2.1 超薄型平板ダイナミックスピーカユニット

本研究で取り上げる超薄型平板ダイナミックスピーカユニットの原理と構造を図 3.1 に示す。フレキシブルプリント回路(電気回路がプリントされたフィルム)が形成された振動板と、それを両側から磁石で挟む単純構造で厚さ 1 cm 程度の薄型化が可能である。この回路に電流を流すと、フレミングの左手の法則に従って生まれる力により振動板が運動して、周囲の空気を震わせて音が発生するダイナミック式のフルレンジスピーカである。このスピーカユニットの特徴は、振動板が全面駆動にすることで特定の分割振動がなく中高域周波数帯域での再生能力が優れており、ダンパーやエッジがないことから f_0 (最低共振周波数) が存在しないために広い周波数帯域にわたってインピーダンス特性がフラットで歪みが少なく、高忠実度再生が可能である [27]。

この設計において図 3.1 に示す通り、磁石については、厚さ (Magnet thickness), 間隔 (Magnet gap), 着磁ピッチ (Magnetized pitch), および、穴径の寸法 (Hole diameter) が自由に選択可能で、また、振動板については、厚さ (Substrate thickness), 回路パターンに伴う導体間隔 (Center-to-center spacing of conductor), 導体幅 (Conductor width), 導体厚さ (Conductor thickness), および、導体種類 (Conductor material) の選択自由度を持っており、これら複数の設計パラメータの様々な組み合わせにより、スピーカユニットとしての音質特性が大きく変化する。

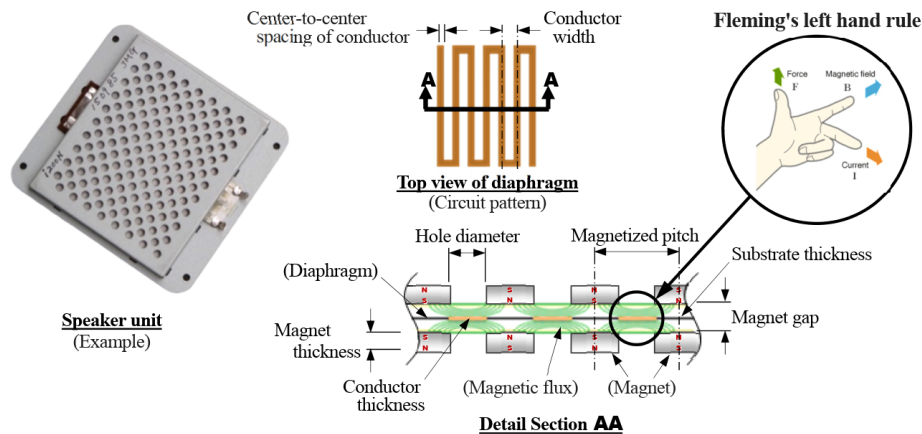


図 3.1 超薄型平板ダイナミックスピーカユニット

3.2.2 実験計画法による割り付け

特性の最適化を行うスピーカユニットは、低中音域の再生能力を向上させるため、第2章で用いたスピーカに対して面積を拡大（図3.2参照）することとした。実験に用いた試作スピーカの外形サイズを図3.2に示す。また、現在の製品製造設備の制約と実験規模が大きくなり過ぎないように配慮して、表3.1に示す9種類のパラメータを実験因子として取り上げた。また、それらについて現状の設計範囲の上・下限値を抽出し、それを2水準として直交表 $L_{16}(2^{15})$ に割り付けた。なお、これまでの設計経験から各因子間の互いの影響が十分に考えられるため、出来る限り交互作用が観測できるように配慮した。割り付けした結果を表3.2に示す。この割り付けに基づき、16通りの仕様のスピーカユニットサンプルを準備した。

表 3.1 平板スピーカの設計変数（実験因子・水準）

Design parameter	Unit	Lower limit	Upper limit
A : Magnet thickness	mm	1.0	3.0
B : Magnetized pitch	mm	3.0	6.0
C : Magnet gap	mm	1.0	3.0
D : Substrate thickness	μm	25	50
E : Conductor occupancy ratio	%	40	80
F : Hole diameter	mm	1.5	6.0
G : Aperture ratio	%	10	40
H : Conductor material	—	Al	Cu
I : Conductor thickness	μm	12	15

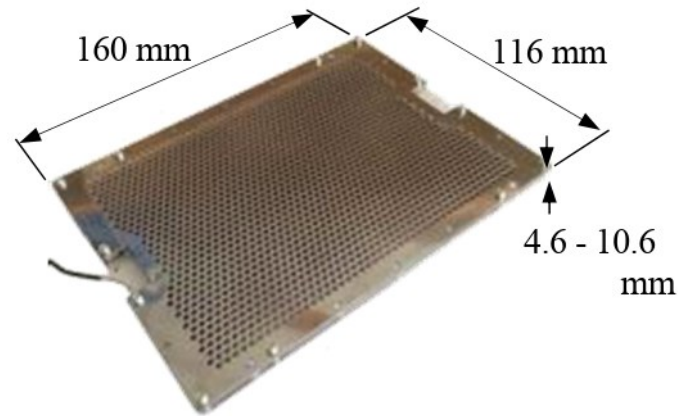


図 3.2 実験で用いた平板スピーカのサイズ

表 3.2 直交表による設計パラメータの割り付け結果 $L_{16}(2^{15})$

Sample No.	A	C	A×C	B	A×B	B×C	D	F	A×F	e	I	B×F	G	H	E
	a	b	ab	c	ac	bc	abc	d	ad	e	abd	cd	acd	bcd	abcd
	mm	mm		mm			μm	mm			μm		%	—	%
1	1.0	1.0		3.0			25	1.5			12		10	Al	40
2	1.0	1.0		3.0			25	6.0			15		40	Cu	80
3	1.0	1.0		6.0			50	1.5			12		40	Cu	80
4	1.0	1.0		6.0			50	6.0			15		10	Al	40
5	1.0	3.0		3.0			50	1.5			15		10	Cu	80
6	1.0	3.0		3.0			50	6.0			12		40	Al	40
7	1.0	3.0		6.0			25	1.5			15		40	Al	40
8	1.0	3.0	Interaction	6.0	Interaction	Interaction	25	6.0	Interaction	error	12	Interaction	10	Cu	80
9	3.0	1.0		3.0			50	1.5			15		40	Al	80
10	3.0	1.0		3.0			50	6.0			12		10	Cu	40
11	3.0	1.0		6.0			25	1.5			15		10	Cu	40
12	3.0	1.0		6.0			25	6.0			12		40	Al	80
13	3.0	3.0		3.0			25	1.5			12		40	Cu	40
14	3.0	3.0		3.0			25	6.0			15		10	Al	80
15	3.0	3.0		6.0			50	1.5			12		10	Al	80
16	3.0	3.0		6.0			50	6.0			15		40	Cu	40

3.2.3 測定方法

スピーカユニットサンプルの測定は、反射の影響が十分に少ない無響室で行なった。実験の状況を図 3.3 に示す。各仕様の効率を比較するために、事前に 1k Hz の正弦波において 0.25 W となるように入力パワーを調整した、その後、製品の想定している使用方法に合わせてスピーカユニット中心の表面から 10 cm の距離にマイクロホンを置き、周波数範囲：10 ~ 40k Hz のスイープ音を印加して、その時の周波数応答特性と全音圧レベル（オーバーオール値：OA）を騒音計により記録した。また、低音域での再生能力を観測するために、80 Hz、および、100 Hz の正弦波を印加しながら昇圧させて、全高調波歪み（THD）が 10 % を超えた時点での音圧レベルを低音域限界入力値として記録した。なお、製作過程での要因を取り除くため、測定順序はランダムに行った。

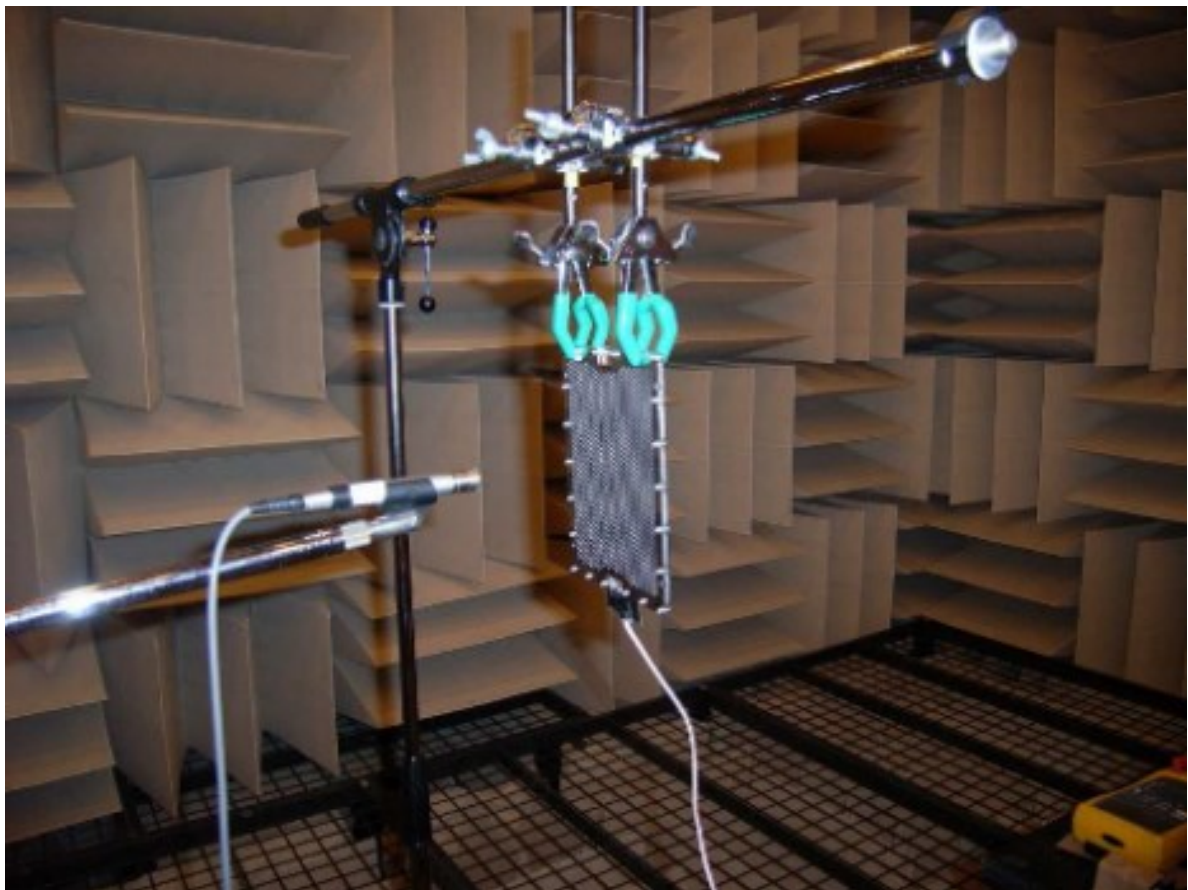


図 3.3 無響室での測定状況

3.2.4 測定結果の解析

直交配列実験により得られた周波数応答特性 (f), 全音圧レベル (OA), 80 Hz と 100 Hz の低音域限界入力値 (LD_{80} , LD_{100}) の測定結果に対して, それぞれを目的変数に, また, 各設計パラメータ (因子) を説明変数として重回帰分析により各々の関係式 (回帰式) を求め, 因子の主効果と交互作用を算出した. ここで, 連続値である周波数応答に対する因子効果の算出は, 測定時の周波数分解能 (測定器に依存: 10 ~ 40k Hz 範囲で 577 点) ごとに重回帰分析により回帰式を求め, これらを周波数順に繋いで応答特性とする方法とした.

なお, 重回帰分析において注意すべき点である回帰式の検定において, これらの回帰式 (周波数応答 577 式, 全音圧レベル 1 式, 低音域限界入力値 2 式) の決定係数は平均 0.883 と十分な精度であったことを確認した. また, 各式の回帰係数 (説明変数) において, 有意でない (各特性値と各設計パラメータの相関関係が低い) 係数は効果がほとんどないと考え, 回帰式から取り除いた.

以上の結果より得られた交互作用を含んだ回帰係数の一覧を表 3.3 に, 代表として周波数応答特性 1k Hz の回帰式を式 (3.1) ~ (3.4) 示す.

$$f_{(1\text{kHz})} = 74.3 + 1.31x_A + 1.57x_B - 2.35x_C - 0.06x_D + 0.03x_E - 0.40x_F - 1.57x_H + 0.67x_I + (1.42x_Ax_B - 0.26x_Ax_C + 0.26x_Ax_F - 0.77x_Bx_C) \quad (3.1)$$

$$OA = 76.6 + 1.39x_A + 1.78x_B - 2.43x_C - 0.07x_D - 0.01x_E - 0.16x_F - 0.03x_G - 2.35x_H + 0.71x_I + (1.03x_Ax_B - 0.21x_Ax_C + 0.44x_Ax_F - 0.80x_Bx_F) \quad (3.2)$$

$$LD_{80} = 34.4 + 1.38x_A - 0.58x_B + 6.75x_C + 0.18x_D - 0.13x_E - 0.33x_F - 0.05x_G + 1.75x_H + 2.42x_I + (1.75x_Ax_B + 0.50x_Ax_C - 0.78x_Ax_F + 1.67x_Bx_C - 0.37x_Bx_F) \quad (3.3)$$

$$LD_{100} = 43.4 + 2.60x_A + 6.06x_C - 0.08x_E + 0.58x_F - 3.13x_H + 1.96x_I + (2.21x_Ax_B - 1.81x_Ax_C - 0.47x_Ax_F + 1.96x_Bx_C) \quad (3.4)$$

- | | |
|--|-------------------------------------|
| x_A : 磁石厚さ (Magnet thickness), | x_B : 着路ピッチ (Magnetized pitch), |
| x_C : 磁石隙間 (Magnet gap), | x_D : 基材厚さ (Substrate thickness), |
| x_E : 導体占有率 (Conductor occupancy ratio), | x_F : 穴径 (Hole diameter), |
| x_G : 開口率 (Aperture ratio), | x_H : 導体種類 (Conductor material), |
| x_I : 導体厚さ (Conductor thickness) | |

表 3.3 (1) 各設計パラメータ (因子) の回帰係数

周波数 [Hz]	A	C	A×C	B	A×B	B×C	D	F	A×F	I	B×F	G	H	E	定数項	決定 係数
	磁石厚さ	磁石隙間	磁石厚さ × 磁石隙間	着磁ピッチ	磁石厚さ × 着磁ピッチ	着磁ピッチ × 磁石隙間	基厚さ	穴径	磁石厚さ × 穴径	導体厚さ	着磁ピッチ × 穴径	開口率	導体積率	導体 占有率		
10.0	0.31	1.61		0.57	0.61	1.02	0.06	-0.14	-0.41	-0.39	0.68	0.15	1.52	0.06	46.2	0.98
10.1	0.31	1.61		0.57	0.61	1.02	0.06	-0.14	-0.41	-0.39	0.68	0.15	1.52	0.06	46.2	0.98
10.3	0.31	1.61		0.57	0.61	1.02	0.06	-0.14	-0.41	-0.39	0.68	0.15	1.52	0.06	46.2	0.98
10.4	0.31	1.61		0.57	0.61	1.02	0.06	-0.14	-0.41	-0.39	0.68	0.15	1.52	0.06	46.1	0.98
10.6	0.31	1.61		0.57	0.61	1.02	0.06	-0.14	-0.41	-0.39	0.68	0.15	1.52	0.06	46.0	0.98
10.7	0.31	1.61		0.57	0.61	1.02	0.06	-0.14	-0.41	-0.39	0.68	0.15	1.52	0.06	45.9	0.98
10.9	0.21	1.77	0.29	0.69	0.48	0.95	0.06	-0.27	-0.39	-0.29	0.59	0.15	1.59	0.04	45.8	1.00
11.1		1.96	0.32	0.91	0.16	0.82	0.07	-0.52	-0.44		0.48	0.15	1.74		44.2	0.98
11.2		1.92		1.12	-0.35	1.00	0.04	-0.50	-0.69		0.49	0.14	2.37		45.3	0.92
11.4		1.60	-0.62	0.97	-0.50	1.03		-0.37	-0.58		0.50	0.15	2.66		47.4	0.90
11.5		1.47	-1.21	0.64	-0.42	0.97			-0.31		0.54	0.14	2.73	0.04	46.0	0.90
11.7	0.37	1.63	-1.48	0.42		1.05			-0.17		0.56	0.11	2.21	0.09	44.4	0.95
11.9	0.80	1.87	-1.56	0.29		1.07			-0.20	0.14	0.61	0.07	1.31	0.12	40.8	0.99
12.1	1.05	2.31	-1.59	0.25	0.14	0.95	0.02	0.09	-0.28	0.08	0.62	0.07	0.37	0.12	39.3	1.00
12.2	1.02	2.73	-1.51	0.34	0.07	0.82	0.03	-0.06	-0.22	-0.05	0.51	0.10	-0.26	0.10	40.3	1.00
12.4	0.98	2.76	-1.27	0.26		0.90	0.04	-0.24	-0.03	-0.19	0.32	0.13	-0.47	0.06	44.5	1.00
12.6	1.00	1.71	-1.90	0.22	0.40	0.66	0.07	-0.69	0.25	0.25	0.43	0.21	-0.22	-0.02	41.5	1.00
12.8	1.33	1.19	-1.54	-0.09	0.93	0.39	0.10	-0.93	0.63	0.40	0.21	0.23	-0.89	-0.05	42.4	1.00
13.0	1.45	0.90	-0.92	-0.23	1.38	0.16	0.11	-0.91	0.68	0.70	0.23	-1.34	-0.05	39.1	0.99	
13.1	1.36	0.82	-0.32		1.55		0.12	-0.77	0.50	1.04	-0.08	0.21	-1.81	-0.03	33.3	0.99
13.3	1.19	0.90	0.15	0.11	1.54	-0.26	0.14	-0.70	0.27	1.38	-0.11	0.18	-2.42	-0.02	28.0	1.00
13.5	0.81	1.42	0.18	0.45	1.28	-0.12	0.14	-0.68		1.56	-0.06	0.14	-2.56	-0.01	24.1	1.00
13.7	0.63	2.11		0.64	0.92	0.15	0.14	-0.76	-0.19	1.66		0.09	-2.34		22.0	0.99
13.9	0.70	2.57		0.69	0.78	0.33	0.09	-0.81	-0.34	1.54	0.10	0.06	-2.23		25.9	0.99
14.1	0.94	3.08	-0.33	0.80	0.90	0.44	0.03	-0.80	-0.45	1.47	0.19	0.06	-2.08	0.01	26.4	0.99
14.3	0.97	3.31		0.86	1.13	0.55		-0.88	-0.48	1.27	0.26	0.07	-1.78	0.03	28.1	0.96
14.5	0.86	3.10		0.80	1.15	0.88	-0.05	-0.89	-0.44	1.01	0.26	0.09		0.03	32.8	0.93
14.7	0.55	2.64		0.76	0.93	1.39	-0.06	-0.75	-0.49	0.89	0.21	0.11			37.8	0.92
15.0		2.19	0.50	0.96	0.75	1.80	-0.09	-0.58	-0.59	0.79	0.20	0.11	2.11		39.4	0.96
15.2		1.81	0.57	1.26	0.80	1.87	-0.13	-0.33	-0.52	0.52	0.22	0.12	2.63		43.2	0.97
15.4	-0.46	1.71	0.41	1.32	0.94	1.78	-0.16		-0.31	0.27	0.23	0.12	2.76	0.03	46.2	0.96
15.6		2.08		1.22	1.31	1.79	-0.13					0.14	2.02	0.04	45.2	0.88
15.8		2.13	-1.00	1.24	1.46	1.84	-0.12					0.16	1.75	0.06	43.7	0.85
16.1		2.25	-1.50	1.27	1.46	1.85	-0.11					0.16		0.05	43.8	0.81
16.3		2.40	-1.72	1.43	1.23	1.70	-0.09					0.15			45.6	0.76
16.5	1.08	2.52	-1.66	1.66	0.89	1.39						0.12			39.7	0.76
16.8		2.32	-1.21	1.74	0.75	1.16						0.08			43.4	0.79
17.0		2.00	-0.90	1.63	0.90	1.18				0.46		0.07			38.9	0.84
17.3		1.46	-0.68	1.55	1.08	1.19			0.39	0.81		0.07			35.6	0.86
17.5		1.04		1.45	1.19	1.12		-0.36	0.54	0.98		0.10			35.3	0.87
17.8		1.02		1.40	1.23	0.98		-0.57	0.59	0.94		0.12			36.4	0.88
18.0	0.63	1.40		1.49	1.18	0.77		-0.69	0.60	0.83		0.12			35.8	0.90
18.3	0.89	1.89		1.60	1.08	0.48	-0.05	-0.68	0.60	0.77	0.15	0.10			36.9	0.93
18.6	1.11	2.07		1.54	0.99		-0.06	-0.61	0.57	0.76	0.15	0.10		-0.03	38.2	0.94
18.8	1.20	1.92	-0.36	1.52	1.18	0.23	-0.06	-0.55	0.53	0.64	0.10	0.13		-0.04	39.0	0.97
19.1	1.19	1.78	-0.40	1.54	1.27	0.19	-0.05	-0.43	0.44	0.57		0.16	-0.50	-0.04	39.0	0.98
19.4	1.22	1.71	-0.52	1.60	1.42	0.24	-0.03	-0.34	0.34	0.50		0.18	-0.51	-0.03	38.1	0.99
19.7	1.24	1.70	-0.69	1.68	1.57	0.35		-0.33	0.25	0.47		0.19		-0.03	36.0	0.99
20.0	1.27	1.66	-0.78	1.66	1.63	0.49		-0.36	0.24	0.47		0.19		-0.01	35.6	0.98
20.2	1.28	1.56	-0.71	1.58	1.59	0.58		-0.38	0.29	0.54		0.18			35.2	0.96
20.5	1.25	1.49	-0.56	1.56	1.46	0.62		-0.38	0.32	0.65		0.16			34.8	0.94
20.8	1.18	1.48		1.64	1.34	0.57		-0.36	0.32	0.73		0.15			33.9	0.93
21.1	1.10	1.48		1.73	1.27	0.46		-0.34	0.32	0.78		0.16			32.9	0.93
21.4	1.09	1.42	-0.47	1.74	1.27	0.36		-0.31	0.33	0.81		0.17			32.3	0.94
21.8	1.21	1.26	-0.47	1.66	1.36	0.35		-0.33	0.32	0.85		0.17			32.0	0.95
22.1	1.24	1.15	-0.42	1.63	1.40	0.37		-0.37	0.30	0.86		0.17	-0.79		32.9	0.95
22.4	1.28	1.06		1.60	1.40	0.37		-0.42	0.28	0.86		0.17	-0.82		33.9	0.95
22.7	1.32	1.08		1.64	1.37	0.33		-0.46	0.24	0.85		0.17	-0.71		34.0	0.96
23.0	1.32	1.19		1.70	1.38	0.29		-0.48	0.21	0.83		0.18			33.5	0.97
23.4	1.28	1.31		1.74	1.43	0.28		-0.49	0.21	0.80		0.19			33.6	0.97
23.7	1.22	1.36		1.74	1.50	0.34		-0.52	0.25	0.76		0.19			34.4	0.97
24.1	1.15	1.29		1.70	1.54	0.40		-0.56	0.30	0.72		0.18			35.8	0.97
24.4	1.12	1.15		1.66	1.58	0.44		-0.59	0.34	0.70		0.18			37.0	0.96
24.8	1.12	1.05		1.63	1.61	0.45		-0.61	0.37	0.69		0.18			37.6	0.96
25.1	1.15	1.06		1.62	1.60	0.46		-0.60	0.38	0.67		0.18			38.0	0.96
25.5	1.23	1.12		1.58	1.57	0.48		-0.59	0.40	0.66		0.18			38.1	0.95
25.9	1.35	1.17		1.54	1.54	0.51		-0.59	0.43	0.67		0.18			37.9	0.95
26.2	1.41	1.12		1.53	1.49	0.53		-0.60	0.43	0.70		0.19			37.3	0.95
26.6	1.40	0.99		1.55	1.46	0.53		-0.59	0.41	0.74		0.20			37.0	0.96
27.0	1.36	0.87		1.58	1.46	0.53		-0.58	0.39	0.74		0.20			37.1	0.96
27.4	1.34	0.82		1.57	1.46	0.51		-0.56	0.38	0.74		0.20			37.4	0.95
27.8	1.35	0.84		1.52	1.47	0.48		-0.53	0.41	0.77		0.20			37.6	0.95
28.2	1.36	0.87		1.49	1.48	0.46		-0.52	0.42	0.80		0.20			37.1	0.95
28.6	1.36	0.86		1.53	1.49	0.46		-0.54	0.40	0.81		0.20			37.0	0.96
29.0	1.33	0.79		1.60	1.48	0.49		-0.56	0.37	0.78		0.21			37.3	0.97
29.4	1.28	0.67		1.66	1.47	0.52		-0.58	0.34	0.74		0.21			38.1	0.97
29.9	1.23	0.56		1.68	1.46	0.53		-0.58	0.33	0.71		0.21			38.9	0.97
30.3	1.19	0.50		1.65	1.46	0.53		-0.56	0.34	0.70		0.20			39.6	0.97
30.7	1.16	0.46		1.59	1.47	0.51		-0.54	0.35	0.69		0.20			40.4	0.96
31.2	1.16	0.42		1.57	1.49	0.53		-0.52	0.35	0.65		0.20			41.1	0.95
31.6	1.18			1.55	1.53	0.55		-0.52	0.36	0.61		0.20			42.5	0.94
32.1	1.22			1.57	1.53	0.59		-0.52	0.36	0.58		0.21			42.8	0.94
32.5	1.18			1.62	1.49	0.64		-0.50	0.33	0.58		0.20			42.9	0.94
33.0	1.13			1.63	1.47	0.67		-0.48	0.31	0.56		0.20			43.3	0.94
33.5	1.06			1.62	1.45	0.65		-0.50	0.30	0.59		0.20			43.3	0.94
34.0	1.06			1.61	1.43</											

表 3.3 (2) 各設計パラメータ (因子) の回帰係数

周波数 [Hz]	A	C	A×C	B	A×B	B×C	D	F	A×F	I	B×F	G	H	E	定数項	決定 係数
	磁石厚さ	磁石隙間	磁石厚さ × 磁石隙間	着磁ピッチ	磁石厚さ × 着磁ピッチ	着磁ピッチ × 磁石隙間	基板厚さ	穴径	磁石厚さ × 穴径	導体厚さ	着磁ピッチ × 穴径	開口率	導体積	導体 占有率		
36.0	1.27			1.52	1.51	0.73		-0.60	0.40	0.72		0.21		0.03	40.6	0.95
36.5	1.43			1.46	1.48	0.74		-0.58	0.43	0.77		0.21		0.03	39.8	0.96
37.0	1.49			1.45	1.45	0.70		-0.52	0.43	0.85		0.21		0.03	38.5	0.96
37.6	1.37		-0.37	1.54	1.47	0.69		-0.49	0.40	0.88		0.22	-0.75	0.03	38.2	0.97
38.1	1.25			1.59	1.46	0.70		-0.51	0.33	0.81		0.22	-0.76	0.03	39.6	0.96
38.7	1.15			1.58	1.45	0.73	-0.03	-0.55	0.29	0.71		0.22		0.03	42.4	0.96
39.2	1.17			1.56	1.49	0.73	-0.04	-0.60	0.31	0.73		0.22		0.03	42.2	0.96
39.8	1.30			1.56	1.51	0.69		-0.57	0.34	0.87		0.22		0.04	38.4	0.95
40.4	1.28			1.58	1.46	0.65		-0.50	0.32	0.91		0.22		0.04	37.7	0.95
41.0	1.16			1.63	1.40	0.73		-0.51	0.26	0.80		0.23		0.04	39.5	0.95
41.6	1.15			1.62	1.45	0.78	-0.03	-0.57	0.28	0.76		0.22		0.04	41.6	0.96
42.2	1.23			1.54	1.51	0.72		-0.55	0.35	0.87		0.22		0.05	38.7	0.96
42.8	1.20			1.53	1.48	0.70		-0.52	0.32	0.90		0.23		0.05	38.4	0.96
43.4	1.17			1.55	1.43	0.76	-0.03	-0.55	0.30	0.84		0.22		0.04	40.8	0.96
44.0	1.24			1.51	1.44	0.78	-0.03	-0.56	0.32	0.85		0.23		0.05	40.6	0.96
44.7	1.26			1.47	1.47	0.78	-0.03	-0.58	0.33	0.83		0.23		0.05	41.3	0.96
45.3	1.27			1.45	1.48	0.78	-0.03	-0.61	0.32	0.81		0.23		0.05	42.0	0.97
46.0	1.25			1.47	1.48	0.76	-0.04	-0.59	0.29	0.81		0.23		0.05	42.0	0.96
46.6	1.24			1.47	1.48	0.77	-0.04	-0.60	0.29	0.82		0.23		0.05	42.0	0.96
47.3	1.27			1.47	1.45	0.78	-0.04	-0.58	0.29	0.85		0.23		0.05	41.4	0.97
48.0	1.26	-0.40		1.46	1.45	0.80	-0.03	-0.57	0.30	0.85		0.23		0.05	42.2	0.97
48.7	1.26	-0.43		1.45	1.45	0.81	-0.03	-0.57	0.29	0.84		0.23		0.05	42.5	0.97
49.4	1.22	-0.45		1.46	1.44	0.80	-0.04	-0.56	0.27	0.85		0.23		0.05	42.7	0.97
50.1	1.24	-0.47		1.45	1.45	0.82	-0.04	-0.56	0.28	0.87		0.23		0.05	42.4	0.97
50.8	1.23	-0.52		1.45	1.47	0.83	-0.04	-0.58	0.29	0.88		0.23		0.06	42.3	0.97
51.6	1.18	-0.60		1.45	1.47	0.84	-0.03	-0.57	0.29	0.91		0.23		0.06	42.4	0.97
52.3	1.18	-0.64		1.46	1.47	0.84	-0.03	-0.55	0.28	0.92		0.23		0.06	42.3	0.97
53.1	1.21	-0.62		1.45	1.47	0.83	-0.03	-0.55	0.28	0.92		0.23		0.06	42.2	0.97
53.9	1.21	-0.64		1.44	1.46	0.84	-0.04	-0.55	0.28	0.90		0.23		0.06	42.8	0.97
54.6	1.19	-0.67		1.44	1.46	0.84	-0.04	-0.55	0.27	0.90		0.23		0.06	43.1	0.97
55.4	1.17	-0.71		1.45	1.46	0.85	-0.04	-0.55	0.27	0.91		0.23		0.06	43.0	0.97
56.2	1.16	-0.74		1.46	1.49	0.86	-0.04	-0.55	0.27	0.91		0.23		0.06	43.0	0.97
57.0	1.16	-0.75		1.46	1.49	0.86	-0.04	-0.56	0.26	0.91		0.23		0.06	43.3	0.97
57.9	1.18	-0.77		1.44	1.49	0.85	-0.04	-0.56	0.27	0.90		0.23		0.06	43.6	0.97
58.7	1.18	-0.81		1.44	1.50	0.86	-0.04	-0.55	0.27	0.89		0.23		0.06	44.0	0.97
59.6	1.16	-0.83		1.45	1.50	0.86	-0.04	-0.54	0.26	0.89		0.23		0.06	44.2	0.97
60.4	1.17	-0.83		1.46	1.49	0.85	-0.04	-0.54	0.26	0.90		0.23		0.06	44.0	0.97
61.3	1.17	-0.86		1.46	1.50	0.85	-0.04	-0.54	0.26	0.89		0.23		0.06	44.4	0.97
62.2	1.18	-0.88		1.45	1.51	0.86	-0.04	-0.55	0.27	0.89		0.23		0.06	44.7	0.97
63.1	1.19	-0.89		1.46	1.51	0.86	-0.04	-0.54	0.28	0.88		0.23		0.06	44.8	0.98
64.0	1.19	-0.90		1.46	1.50	0.85	-0.05	-0.54	0.27	0.88		0.23		0.06	44.9	0.98
64.9	1.17	-0.91		1.47	1.51	0.84	-0.05	-0.54	0.27	0.88		0.23		0.06	45.1	0.98
65.9	1.17	-0.91		1.47	1.53	0.84	-0.05	-0.54	0.27	0.88		0.23		0.06	45.3	0.97
66.8	1.17	-0.93		1.47	1.54	0.84	-0.05	-0.54	0.28	0.87		0.22		0.06	45.6	0.98
67.8	1.17	-0.95		1.47	1.53	0.84	-0.05	-0.54	0.28	0.86		0.22		0.06	45.9	0.98
68.8	1.18	-0.97		1.47	1.53	0.83	-0.05	-0.53	0.28	0.85		0.22		0.06	46.2	0.98
69.8	1.19	-0.98		1.47	1.54	0.83	-0.05	-0.53	0.29	0.85		0.22		0.06	46.4	0.98
70.8	1.20	-0.98		1.48	1.54	0.82	-0.05	-0.54	0.29	0.85		0.22		0.06	46.6	0.98
71.8	1.19	-0.99		1.48	1.54	0.81	-0.05	-0.54	0.28	0.84		0.22		0.06	46.8	0.98
72.9	1.20	-0.99		1.49	1.55	0.80	-0.05	-0.54	0.28	0.83		0.22		0.06	47.1	0.98
73.9	1.21	-0.99		1.48	1.55	0.79	-0.05	-0.55	0.28	0.83		0.21		0.06	47.3	0.98
75.0	1.22	-1.01		1.48	1.54	0.78	-0.05	-0.54	0.28	0.82		0.21		0.06	47.6	0.98
76.1	1.22	-1.03		1.49	1.54	0.77	-0.05	-0.54	0.28	0.81		0.21		0.06	47.9	0.98
77.2	1.23	-1.04		1.49	1.55	0.77	-0.05	-0.53	0.28	0.80		0.21		0.06	48.1	0.98
78.3	1.24	-1.05		1.48	1.55	0.77	-0.05	-0.53	0.29	0.79		0.21		0.06	48.4	0.98
79.4	1.25	-1.07		1.48	1.56	0.76	-0.05	-0.53	0.28	0.79		0.21		0.06	48.6	0.98
80.6	1.25	-1.08		1.48	1.57	0.76	-0.05	-0.53	0.28	0.79		0.20	-0.57	0.06	49.1	0.98
81.8	1.26	-1.10		1.48	1.58	0.76	-0.05	-0.53	0.28	0.79		0.20	-0.59	0.06	49.2	0.98
82.9	1.27	-1.11	-0.27	1.48	1.58	0.76	-0.05	-0.52	0.28	0.78		0.20	-0.60	0.06	49.4	0.98
84.1	1.28	-1.12	-0.27	1.48	1.58	0.76	-0.05	-0.51	0.28	0.78		0.20	-0.62	0.06	49.7	0.98
85.4	1.28	-1.13	-0.28	1.48	1.59	0.76	-0.05	-0.51	0.28	0.77		0.20	-0.63	0.06	49.9	0.98
86.6	1.29	-1.14	-0.28	1.48	1.60	0.76	-0.05	-0.51	0.28	0.78		0.19	-0.65	0.06	50.1	0.98
87.9	1.29	-1.16	-0.28	1.48	1.60	0.76	-0.06	-0.51	0.27	0.78		0.19	-0.67	0.06	50.3	0.98
89.1	1.30	-1.17	-0.29	1.48	1.60	0.76	-0.06	-0.50	0.27	0.77		0.19	-0.68	0.06	50.5	0.98
90.4	1.30	-1.18	-0.29	1.48	1.60	0.76	-0.06	-0.50	0.27	0.76		0.19	-0.68	0.06	50.7	0.98
91.7	1.30	-1.19	-0.30	1.48	1.60	0.76	-0.06	-0.50	0.27	0.76		0.19	-0.70	0.06	51.0	0.98
93.1	1.30	-1.20	-0.30	1.48	1.60	0.76	-0.06	-0.50	0.27	0.76		0.19	-0.73	0.06	51.1	0.98
94.4	1.30	-1.20	-0.30	1.48	1.60	0.75	-0.06	-0.50	0.27	0.76		0.18	-0.75	0.06	51.3	0.98
95.8	1.31	-1.21	-0.31	1.48	1.60	0.74	-0.06	-0.50	0.27	0.76		0.18	-0.76	0.06	51.5	0.98
97.2	1.32	-1.22	-0.31	1.48	1.60	0.74	-0.06	-0.50	0.27	0.76		0.18	-0.76	0.06	51.7	0.98
98.6	1.32	-1.23	-0.32	1.48	1.60	0.74	-0.06	-0.50	0.28	0.76		0.18	-0.76	0.06	52.0	0.99
100.0	1.31	-1.24	-0.33	1.48	1.61	0.74	-0.06	-0.50	0.27	0.76		0.18	-0.77	0.06	52.1	0.99
101.5	1.31	-1.24	-0.34	1.48	1.61	0.74	-0.06	-0.50	0.28	0.75		0.18	-0.78	0.06	52.3	0.99
102.9	1.31	-1.25	-0.34	1.48	1.61	0.74	-0.06	-0.50	0.28	0.75		0.17	-0.80	0.06	52.5	0.99
104.4	1.32	-1.27	-0.34	1.48	1.61	0.73	-0.06	-0.50	0.28	0.75		0.17	-0.81	0.06	52.7	0.99
105.9	1.32	-1.28	-0.35	1.48	1.61	0.73	-0.06	-0.50	0.28	0.75		0.17	-0.82	0.06	52.9	0.99
107.5	1.32	-1.29	-0.36	1.49	1.61	0.74	-0.06	-0.50	0.29	0.74		0.17	-0.83	0.06	53.1	0.99
109.0	1.32	-1.29	-0.36	1.49	1.61	0.73	-0.06	-0.50	0.29	0.74		0.17	-0.83	0.06	53.3	0.99
110.6	1.32	-1.29	-0.37	1.49	1.62	0.73	-0.06	-0.50	0.29	0.74		0.16	-0.84	0.06	53.4	0.99
112.2	1.31	-1.30	-0.38	1.50	1.62	0.73	-0.06	-0.50	0.29	0.73		0.16	-0.86	0.06	53.6	0.99
113.8	1.31	-1.31	-0.38	1.50	1.61	0.73	-0.06	-0.50	0.29	0.73		0.16	-0.86	0.06	53.8	0.99
115.5	1.31	-1.31	-0.38	1.50	1.61	0.72	-0.06	-0.49	0.29	0.73		0.16	-0.86	0.05	54.0	0.99
117.2	1.31	-1.32	-0.39	1.51	1.61	0.72</										

表 3.3 (3) 各設計パラメータ (因子) の回帰係数

周波数 [Hz]	A	C	A×C	B	A×B	B×C	D	F	A×F	I	B×F	G	H	E	定数項	決定 係数
	磁石厚さ	磁石隙間	磁石厚さ × 磁石隙間	着磁ピッチ	磁石厚さ × 着磁ピッチ	着磁ピッチ × 磁石隙間	基板厚さ	穴径	磁石厚さ × 穴径	導体厚さ	着磁ピッチ × 穴径	開口率	導体積率	導体 占有率		
129.6	1.32	-1.38	-0.40	1.53	1.61	0.73	-0.07	-0.48	0.30	0.70		0.15	-0.90	0.05	55.5	0.98
131.4	1.31	-1.39	-0.40	1.53	1.61	0.73	-0.07	-0.47	0.30	0.70		0.14	-0.91	0.05	55.7	0.98
133.4	1.31	-1.40	-0.40	1.54	1.61	0.73	-0.07	-0.47	0.30	0.70		0.14	-0.92	0.05	55.9	0.98
135.3	1.31	-1.42	-0.41	1.54	1.62	0.74	-0.07	-0.47	0.30	0.69		0.14	-0.92	0.05	56.1	0.98
137.2	1.31	-1.42	-0.41	1.55	1.61	0.73	-0.07	-0.47	0.30	0.69		0.14	-0.93	0.05	56.3	0.98
139.2	1.30	-1.43	-0.41	1.55	1.61	0.73	-0.07	-0.47	0.30	0.68		0.14	-0.93	0.05	56.4	0.98
141.3	1.30	-1.44	-0.41	1.55	1.61	0.73	-0.07	-0.47	0.30	0.68		0.14	-0.94	0.05	56.6	0.98
143.3	1.29	-1.46	-0.41	1.55	1.61	0.72	-0.07	-0.47	0.30	0.68		0.14	-0.94	0.05	56.8	0.98
145.4	1.29	-1.47	-0.41	1.55	1.61	0.72	-0.06	-0.47	0.31	0.67		0.13	-0.95	0.05	57.0	0.98
147.5	1.29	-1.48	-0.41	1.56	1.60	0.72	-0.06	-0.47	0.31	0.67		0.13	-0.96	0.05	57.2	0.98
149.6	1.29	-1.50	-0.41	1.56	1.60	0.72	-0.06	-0.47	0.31	0.67		0.13	-0.97	0.05	57.3	0.98
151.8	1.28	-1.51	-0.42	1.55	1.60	0.71	-0.06	-0.47	0.31	0.66		0.13	-0.98	0.05	57.5	0.98
154.0	1.28	-1.52	-0.42	1.55	1.60	0.71	-0.06	-0.47	0.31	0.66		0.13	-0.99	0.05	57.7	0.98
156.2	1.28	-1.53	-0.42	1.55	1.60	0.71	-0.06	-0.47	0.31	0.66		0.13	-1.00	0.05	57.9	0.98
158.5	1.28	-1.55	-0.42	1.55	1.60	0.71	-0.06	-0.48	0.31	0.66		0.13	-1.01	0.05	58.0	0.98
160.8	1.28	-1.56	-0.43	1.55	1.59	0.71	-0.06	-0.48	0.31	0.66		0.12	-1.03	0.05	58.2	0.98
163.1	1.28	-1.57	-0.43	1.55	1.59	0.71	-0.06	-0.48	0.31	0.66		0.12	-1.05	0.05	58.3	0.98
165.5	1.29	-1.58	-0.44	1.54	1.59	0.70	-0.06	-0.48	0.31	0.66		0.12	-1.07	0.05	58.5	0.98
167.9	1.29	-1.59	-0.44	1.54	1.59	0.70	-0.06	-0.48	0.31	0.66		0.12	-1.09	0.05	58.6	0.98
170.3	1.29	-1.61	-0.45	1.54	1.59	0.71	-0.06	-0.48	0.31	0.66		0.12	-1.10	0.05	58.7	0.98
172.8	1.29	-1.62	-0.45	1.54	1.58	0.71	-0.06	-0.48	0.31	0.67		0.12	-1.12	0.05	58.9	0.98
175.3	1.29	-1.63	-0.45	1.54	1.58	0.71	-0.06	-0.48	0.31	0.67		0.11	-1.14	0.05	59.0	0.98
177.8	1.29	-1.65	-0.45	1.53	1.58	0.71	-0.06	-0.48	0.31	0.67		0.11	-1.15	0.05	59.1	0.98
180.4	1.30	-1.66	-0.45	1.53	1.57	0.71	-0.06	-0.48	0.31	0.67		0.11	-1.17	0.05	59.2	0.98
183.0	1.30	-1.67	-0.45	1.53	1.57	0.71	-0.06	-0.49	0.31	0.67		0.11	-1.18	0.05	59.4	0.98
185.7	1.30	-1.69	-0.45	1.53	1.57	0.71	-0.06	-0.49	0.31	0.67		0.11	-1.19	0.05	59.5	0.98
188.4	1.30	-1.70	-0.45	1.53	1.57	0.71	-0.06	-0.49	0.32	0.67		0.11	-1.20	0.05	59.6	0.98
191.1	1.30	-1.71	-0.45	1.53	1.56	0.71	-0.06	-0.49	0.32	0.67		0.11	-1.21	0.05	59.7	0.98
193.9	1.30	-1.73	-0.45	1.53	1.56	0.71	-0.06	-0.49	0.32	0.67		0.11	-1.22	0.05	59.9	0.98
196.7	1.30	-1.74	-0.45	1.53	1.56	0.71	-0.06	-0.49	0.32	0.67		0.10	-1.22	0.05	60.0	0.98
199.5	1.30	-1.75	-0.44	1.53	1.56	0.71	-0.06	-0.50	0.32	0.67		0.10	-1.22	0.05	60.1	0.98
202.4	1.30	-1.76	-0.44	1.53	1.55	0.72	-0.06	-0.50	0.32	0.67		0.10	-1.22	0.05	60.3	0.98
205.4	1.30	-1.77	-0.43	1.53	1.55	0.72	-0.06	-0.50	0.32	0.67		0.10	-1.23	0.05	60.4	0.98
208.3	1.30	-1.78	-0.43	1.53	1.55	0.72	-0.06	-0.50	0.32	0.67		0.10	-1.23	0.05	60.6	0.98
211.3	1.30	-1.79	-0.43	1.54	1.55	0.72	-0.06	-0.50	0.32	0.67		0.10	-1.24	0.05	60.7	0.98
214.4	1.30	-1.80	-0.43	1.54	1.55	0.72	-0.06	-0.49	0.32	0.67		0.10	-1.25	0.05	60.8	0.98
217.5	1.30	-1.81	-0.42	1.54	1.55	0.73	-0.06	-0.49	0.32	0.67		0.09	-1.26	0.04	61.0	0.98
220.7	1.30	-1.82	-0.42	1.53	1.55	0.73	-0.06	-0.49	0.32	0.67		0.09	-1.28	0.04	61.1	0.98
223.9	1.30	-1.83	-0.42	1.53	1.55	0.74	-0.06	-0.49	0.32	0.67		0.09	-1.29	0.04	61.2	0.98
227.1	1.31	-1.84	-0.42	1.53	1.55	0.74	-0.06	-0.49	0.32	0.67		0.09	-1.30	0.04	61.3	0.98
230.4	1.31	-1.84	-0.42	1.53	1.55	0.74	-0.06	-0.48	0.32	0.67		0.09	-1.32	0.04	61.4	0.98
233.7	1.31	-1.84	-0.42	1.53	1.56	0.75	-0.06	-0.48	0.32	0.67		0.09	-1.32	0.04	61.6	0.98
237.1	1.31	-1.85	-0.41	1.53	1.55	0.75	-0.06	-0.48	0.31	0.68		0.09	-1.33	0.04	61.7	0.98
240.6	1.31	-1.86	-0.41	1.53	1.55	0.75	-0.06	-0.48	0.32	0.68		0.08	-1.34	0.04	61.8	0.98
244.1	1.31	-1.86	-0.41	1.53	1.55	0.75	-0.06	-0.48	0.32	0.68		0.08	-1.35	0.04	61.9	0.98
247.6	1.31	-1.87	-0.40	1.53	1.55	0.75	-0.06	-0.48	0.32	0.68		0.08	-1.36	0.04	62.0	0.98
251.2	1.30	-1.88	-0.40	1.53	1.55	0.75	-0.06	-0.48	0.32	0.68		0.08	-1.36	0.04	62.2	0.98
254.8	1.30	-1.89	-0.40	1.53	1.55	0.74	-0.06	-0.48	0.32	0.68		0.08	-1.37	0.04	62.3	0.98
258.5	1.30	-1.90	-0.39	1.53	1.55	0.74	-0.06	-0.48	0.32	0.68		0.08	-1.38	0.04	62.4	0.98
262.3	1.31	-1.92	-0.39	1.53	1.55	0.74	-0.06	-0.49	0.32	0.68		0.08	-1.40	0.04	62.5	0.98
266.1	1.31	-1.94	-0.38	1.53	1.55	0.73	-0.06	-0.49	0.33	0.68		0.08	-1.42	0.04	62.6	0.98
269.9	1.32	-1.95	-0.37	1.53	1.55	0.73	-0.06	-0.50	0.33	0.68		0.08	-1.44	0.04	62.7	0.98
273.8	1.33	-1.97	-0.36	1.53	1.55	0.73	-0.06	-0.50	0.33	0.68		0.08	-1.46	0.04	62.8	0.98
277.8	1.33	-1.99	-0.36	1.53	1.54	0.73	-0.06	-0.50	0.32	0.68		0.08	-1.48	0.04	62.9	0.98
281.8	1.34	-2.00	-0.36	1.53	1.54	0.74	-0.06	-0.49	0.32	0.68		0.08	-1.50	0.04	63.1	0.98
285.9	1.35	-2.02	-0.36	1.53	1.53	0.74	-0.06	-0.49	0.31	0.67		0.07	-1.52	0.04	63.3	0.98
290.1	1.35	-2.03	-0.35	1.54	1.52	0.75	-0.06	-0.49	0.31	0.67		0.07	-1.54	0.04	63.4	0.98
294.3	1.35	-2.04	-0.36	1.54	1.52	0.75	-0.06	-0.49	0.31	0.67		0.07	-1.54	0.04	63.5	0.98
298.5	1.35	-2.04	-0.37	1.54	1.52	0.75	-0.06	-0.49	0.31	0.67		0.07	-1.54	0.04	63.6	0.98
302.9	1.35	-2.04	-0.38	1.54	1.52	0.75	-0.06	-0.50	0.32	0.67		0.07	-1.53	0.04	63.7	0.98
307.3	1.35	-2.04	-0.40	1.55	1.52	0.75	-0.06	-0.50	0.32	0.66		0.07	-1.53	0.04	63.8	0.98
311.7	1.37	-2.02	-0.42	1.55	1.53	0.76	-0.06	-0.51	0.32	0.66		0.07	-1.52	0.04	63.9	0.98
316.2	1.38	-2.01	-0.43	1.54	1.53	0.77	-0.06	-0.51	0.32	0.66		0.07	-1.50	0.04	63.9	0.98
320.8	1.35	-2.02	-0.42	1.55	1.53	0.76	-0.06	-0.49	0.30	0.68		0.07	-1.52	0.04	63.8	0.98
325.5	1.32	-2.04	-0.41	1.56	1.53	0.75	-0.06	-0.50	0.30	0.67		0.07	-1.53	0.04	64.0	0.98
330.2	1.29	-2.08	-0.40	1.57	1.51	0.74	-0.06	-0.50	0.31	0.65		0.07	-1.52	0.04	64.4	0.98
335.0	1.30	-2.09	-0.39	1.58	1.52	0.74	-0.06	-0.51	0.31	0.65		0.07	-1.52	0.04	64.6	0.98
339.8	1.30	-2.09	-0.39	1.58	1.52	0.74	-0.06	-0.51	0.31	0.65		0.06	-1.54	0.04	64.8	0.98
344.7	1.30	-2.09	-0.39	1.58	1.52	0.74	-0.06	-0.51	0.31	0.64		0.06	-1.54	0.04	65.0	0.98
349.7	1.30	-2.10	-0.38	1.59	1.52	0.74	-0.06	-0.51	0.31	0.64		0.06	-1.55	0.04	65.1	0.98
354.8	1.30	-2.11	-0.38	1.59	1.52	0.74	-0.06	-0.50	0.31	0.64		0.06	-1.55	0.04	65.3	0.98
360.0	1.30	-2.11	-0.37	1.60	1.52	0.73	-0.06	-0.50	0.31	0.63		0.06	-1.54	0.04	65.4	0.98
365.2	1.30	-2.11	-0.36	1.61	1.51	0.73	-0.06	-0.50	0.31	0.62		0.06	-1.51	0.04	65.6	0.98
370.5	1.29	-2.12	-0.35	1.61	1.50	0.73	-0.06	-0.50	0.31	0.62		0.06	-1.51	0.04	65.7	0.98
375.8	1.28	-2.13	-0.34	1.61	1.50	0.72	-0.06	-0.50	0.31	0.61		0.06	-1.53	0.04	66.0	0.98
381.3	1.29	-2.12	-0.33	1.61	1.50	0.73	-0.06	-0.50	0.30	0.61		0.06	-1.54	0.04	66.1	0.98
386.8	1.28	-2.12	-0.33	1.61	1.51	0.73	-0.06	-0.50	0.31	0.60		0.05	-1.54	0.04	66.3	0.98
392.4	1.28	-2.12	-0.33	1.61	1.51											

表 3.3 (4) 各設計パラメータ (因子) の回帰係数

周波数 [Hz]	A	C	A×C	B	A×B	B×C	D	F	A×F	I	B×F	G	H	E	定数項	決定 係数
	磁石厚さ	磁石隙間	磁石厚さ × 磁石隙間	着磁ピッチ	磁石厚さ × 着磁ピッチ	着磁ピッチ × 磁石隙間	基板厚さ	穴径	磁石厚さ × 穴径	導体厚さ	着磁ピッチ × 穴径	開口率	導体積率	導体 占有率		
466.4	1.26	-2.17	-0.27	1.61	1.54	0.73	-0.07	-0.46	0.31	0.62		0.04	-1.51	0.04	67.9	0.98
473.2	1.26	-2.18	-0.27	1.61	1.54	0.74	-0.07	-0.46	0.31	0.62		0.04	-1.52	0.04	68.0	0.98
480.0	1.26	-2.18	-0.27	1.61	1.54	0.74	-0.07	-0.46	0.31	0.63		0.04	-1.53	0.03	68.0	0.98
487.0	1.26	-2.19	-0.27	1.61	1.54	0.74	-0.07	-0.46	0.30	0.63		0.04	-1.54	0.03	68.1	0.98
494.0	1.27	-2.19	-0.27	1.61	1.54	0.74	-0.07	-0.46	0.30	0.63		0.04	-1.56	0.03	68.2	0.98
501.2	1.27	-2.21	-0.28	1.60	1.53	0.75	-0.07	-0.46	0.30	0.63		0.04	-1.57	0.03	68.3	0.98
508.5	1.28	-2.22	-0.28	1.60	1.52	0.75	-0.07	-0.46	0.29	0.63		0.04	-1.58	0.04	68.4	0.98
515.8	1.28	-2.23	-0.28	1.60	1.52	0.76	-0.07	-0.46	0.29	0.63		0.04	-1.60	0.04	68.6	0.98
523.3	1.28	-2.24	-0.28	1.59	1.51	0.76	-0.07	-0.47	0.28	0.63		0.04	-1.61	0.04	68.7	0.98
530.9	1.29	-2.25	-0.28	1.59	1.51	0.77	-0.07	-0.47	0.28	0.63		0.04	-1.62	0.04	68.8	0.98
538.6	1.28	-2.26	-0.28	1.59	1.51	0.77	-0.07	-0.47	0.27	0.63		0.04	-1.62	0.04	69.0	0.98
546.4	1.28	-2.27	-0.28	1.59	1.51	0.77	-0.07	-0.47	0.27	0.64		0.04	-1.62	0.04	69.1	0.98
554.3	1.28	-2.27	-0.28	1.59	1.51	0.77	-0.07	-0.47	0.27	0.64		0.03	-1.62	0.04	69.1	0.98
562.3	1.29	-2.27	-0.28	1.59	1.51	0.77	-0.07	-0.46	0.27	0.64		0.03	-1.61	0.04	69.2	0.98
570.5	1.29	-2.27	-0.28	1.60	1.51	0.77	-0.07	-0.46	0.27	0.64		0.03	-1.60	0.03	69.3	0.98
578.8	1.29	-2.26	-0.27	1.60	1.51	0.78	-0.07	-0.46	0.27	0.64		0.03	-1.60	0.03	69.4	0.98
587.2	1.29	-2.26	-0.27	1.60	1.51	0.78	-0.07	-0.45	0.27	0.64		0.03	-1.60	0.03	69.5	0.99
595.7	1.29	-2.26	-0.27	1.60	1.51	0.78	-0.07	-0.45	0.27	0.64		0.03	-1.61	0.03	69.7	0.99
604.3	1.29	-2.26	-0.26	1.60	1.51	0.78	-0.07	-0.45	0.27	0.64		0.03	-1.62	0.03	69.9	0.99
613.1	1.29	-2.26	-0.26	1.60	1.51	0.77	-0.07	-0.45	0.27	0.64		0.03	-1.62	0.03	70.0	0.99
621.9	1.29	-2.27	-0.26	1.60	1.51	0.77	-0.07	-0.45	0.27	0.64		0.03	-1.62	0.03	70.1	0.99
631.0	1.29	-2.27	-0.26	1.60	1.50	0.78	-0.07	-0.45	0.27	0.64		0.03	-1.61	0.03	70.2	0.99
640.1	1.28	-2.27	-0.26	1.60	1.49	0.78	-0.07	-0.44	0.27	0.64		0.02	-1.61	0.03	70.3	0.99
649.4	1.28	-2.26	-0.26	1.60	1.48	0.78	-0.07	-0.44	0.27	0.64		0.02	-1.60	0.03	70.4	0.99
658.8	1.28	-2.27	-0.27	1.60	1.48	0.78	-0.07	-0.44	0.27	0.64		0.02	-1.61	0.03	70.6	0.98
668.3	1.28	-2.27	-0.27	1.60	1.47	0.78	-0.07	-0.44	0.27	0.64		0.02	-1.62	0.03	70.7	0.98
678.0	1.28	-2.28	-0.27	1.60	1.47	0.78	-0.07	-0.44	0.27	0.64		0.02	-1.63	0.03	70.9	0.98
687.9	1.28	-2.29	-0.27	1.59	1.46	0.78	-0.07	-0.44	0.27	0.64		0.02	-1.63	0.03	71.1	0.98
697.8	1.28	-2.29	-0.27	1.59	1.46	0.78	-0.07	-0.44	0.27	0.64		0.02	-1.63	0.03	71.2	0.98
707.9	1.29	-2.30	-0.27	1.58	1.45	0.78	-0.06	-0.44	0.27	0.64		0.02	-1.63	0.03	71.3	0.98
718.2	1.29	-2.30	-0.28	1.58	1.45	0.78	-0.06	-0.43	0.27	0.65		0.02	-1.63	0.03	71.4	0.98
728.6	1.28	-2.30	-0.28	1.58	1.45	0.78	-0.06	-0.43	0.27	0.64		0.02	-1.63	0.03	71.6	0.98
739.2	1.27	-2.31	-0.27	1.59	1.46	0.78	-0.06	-0.43	0.27	0.64		0.02	-1.63	0.03	71.8	0.99
749.9	1.27	-2.31	-0.27	1.59	1.46	0.78	-0.06	-0.43	0.27	0.63		0.02	-1.64	0.03	72.0	0.99
760.8	1.28	-2.32	-0.27	1.59	1.46	0.77	-0.06	-0.43	0.27	0.63		0.02	-1.65	0.03	72.2	0.99
771.8	1.28	-2.32	-0.27	1.59	1.45	0.77	-0.06	-0.43	0.27	0.63		0.01	-1.65	0.03	72.2	0.99
783.0	1.29	-2.32	-0.26	1.59	1.45	0.77	-0.06	-0.42	0.27	0.64			-1.64	0.03	72.7	0.98
794.3	1.29	-2.31	-0.25	1.60	1.45	0.77	-0.06	-0.42	0.27	0.64			-1.63	0.03	72.7	0.98
805.8	1.29	-2.31	-0.24	1.60	1.45	0.76	-0.06	-0.42	0.28	0.64			-1.63	0.03	72.8	0.99
817.5	1.29	-2.32	-0.24	1.60	1.44	0.76	-0.06	-0.42	0.28	0.65			-1.63	0.03	72.9	0.99
829.4	1.29	-2.33	-0.25	1.59	1.44	0.76	-0.06	-0.42	0.28	0.65			-1.62	0.03	73.0	0.99
841.4	1.29	-2.32	-0.25	1.59	1.44	0.76	-0.06	-0.41	0.27	0.65			-1.63	0.03	73.1	0.99
853.6	1.30	-2.32	-0.25	1.59	1.44	0.76	-0.06	-0.41	0.27	0.65			-1.64	0.03	73.1	0.99
866.0	1.30	-2.32	-0.26	1.59	1.43	0.77	-0.06	-0.41	0.27	0.66			-1.64	0.03	73.2	0.99
878.5	1.30	-2.33	-0.26	1.58	1.42	0.77	-0.06	-0.41	0.26	0.66			-1.63	0.03	73.4	0.99
891.3	1.30	-2.34	-0.26	1.58	1.42	0.77	-0.06	-0.41	0.26	0.66			-1.62	0.03	73.6	0.99
904.2	1.30	-2.35	-0.27	1.58	1.42	0.77	-0.06	-0.41	0.25	0.66			-1.63	0.03	73.8	0.99
917.3	1.31	-2.35	-0.27	1.58	1.42	0.78	-0.06	-0.40	0.25	0.66			-1.64	0.03	73.9	0.99
930.6	1.32	-2.35	-0.27	1.58	1.41	0.78	-0.06	-0.40	0.25	0.66			-1.63	0.03	74.1	0.99
944.1	1.32	-2.35	-0.27	1.58	1.41	0.78	-0.06	-0.40	0.25	0.66			-1.61	0.03	74.2	0.99
957.7	1.32	-2.36	-0.27	1.58	1.41	0.78	-0.06	-0.40	0.25	0.66			-1.60	0.03	74.3	0.99
971.6	1.32	-2.37	-0.26	1.58	1.41	0.78	-0.06	-0.41	0.26	0.66			-1.59	0.03	74.3	0.99
985.7	1.31	-2.36	-0.26	1.57	1.42	0.77	-0.06	-0.41	0.26	0.67			-1.57	0.03	74.2	0.99
1000.0	1.31	-2.35	-0.26	1.58	1.42	0.77	-0.06	-0.40	0.26	0.67			-1.57	0.03	74.3	0.99
1014.5	1.32	-2.35	-0.25	1.58	1.41	0.77	-0.06	-0.39	0.26	0.67			-1.56	0.03	74.5	0.99
1029.2	1.31	-2.35	-0.24	1.58	1.40	0.77	-0.06	-0.39	0.26	0.67			-1.57	0.03	74.6	0.99
1044.1	1.31	-2.34	-0.24	1.58	1.40	0.77	-0.06	-0.38	0.25	0.67			-1.57	0.03	74.7	0.99
1059.3	1.30	-2.33	-0.24	1.58	1.40	0.77	-0.06	-0.38	0.25	0.66			-1.56	0.03	74.9	0.99
1074.6	1.30	-2.33	-0.24	1.58	1.39	0.77	-0.06	-0.37	0.25	0.66			-1.55	0.03	75.2	0.99
1090.2	1.30	-2.35	-0.26	1.57	1.39	0.78	-0.06	-0.37	0.25	0.66			-1.54	0.03	75.4	0.99
1106.0	1.30	-2.36	-0.27	1.57	1.38	0.79	-0.06	-0.37	0.24	0.66			-1.54	0.03	75.6	0.99
1122.0	1.32	-2.37	-0.28	1.57	1.38	0.80	-0.06	-0.38	0.24	0.66			-1.54	0.03	75.7	0.99
1138.3	1.32	-2.38	-0.29	1.57	1.38	0.81	-0.06	-0.38	0.25	0.67			-1.54	0.03	75.7	0.99
1154.8	1.31	-2.39	-0.29	1.56	1.38	0.81	-0.06	-0.38	0.25	0.67			-1.52	0.03	75.8	0.99
1171.5	1.32	-2.39	-0.28	1.56	1.37	0.81	-0.06	-0.38	0.24	0.67			-1.52	0.03	75.8	0.99
1188.5	1.32	-2.38	-0.28	1.56	1.36	0.80	-0.06	-0.37	0.24	0.67			-1.53	0.03	75.9	0.99
1205.7	1.31	-2.38	-0.28	1.56	1.36	0.80	-0.06	-0.36	0.24	0.68			-1.52	0.03	76.0	0.99
1223.2	1.30	-2.38	-0.27	1.57	1.36	0.79	-0.06	-0.36	0.24	0.68			-1.51	0.03	76.1	0.99
1240.9	1.30	-2.38	-0.26	1.57	1.36	0.79	-0.06	-0.35	0.24	0.68			-1.52	0.03	76.3	0.99
1258.9	1.30	-2.37	-0.25	1.56	1.36	0.79	-0.06	-0.36	0.23	0.68			-1.52	0.03	76.4	0.99
1277.2	1.30	-2.36	-0.25	1.56	1.36	0.79	-0.06	-0.36	0.23	0.68			-1.51	0.03	76.5	0.99
1295.7	1.30	-2.36	-0.26	1.56	1.36	0.79	-0.06	-0.36	0.23	0.68			-1.53	0.03	76.7	0.99
1314.5	1.29	-2.36	-0.26	1.56	1.36	0.79	-0.06	-0.36	0.23	0.68			-1.54	0.03	76.9	0.99
1333.5	1.29	-2.35	-0.25	1.56	1.36	0.80	-0.06	-0.36	0.23	0.68			-1.55	0.03	77.0	0.99
1352.9	1.28	-2.35	-0.26	1.56	1.36	0.79	-0.06	-0.36	0.23	0.69			-1.56	0.03	77.0	0.99
1372.5	1.27	-2.33	-0.24	1.57	1.36	0.78	-0.06	-0.36	0.22	0.70			-1.57	0.03	76.9	0.99
1392.4	1.26	-2.31	-0.23	1.58	1.37	0.77	-0.06	-0.36	0.22	0.71			-1.60	0.03	76.8	0.99
1412.5	1.23	-2.31	-0.23	1.59	1.39	0.76	-0.06	-0.38	0.21	0.71			-1.60	0.03	76.9	0.99
1433.0	1.20	-2.31	-0.23	1.61	1.41	0.76	-0.06	-0.39	0.19							

表 3.3 (5) 各設計パラメータ (因子) の回帰係数

周波数 [Hz]	A	C	A×C	B	A×B	B×C	D	F	A×F	I	B×F	G	H	E	定数項	決定 係数
	磁石厚さ	磁石隙間	磁石厚さ × 磁石隙間	着磁ピッチ	磁石厚さ × 着磁ピッチ	着磁ピッチ × 磁石隙間	基厚さ	穴径	磁石厚さ × 穴径	導体厚さ	着磁ピッチ × 穴径	開口率	導体積	導体 占有率		
1678.8	1.08	-2.28	-0.21	1.67	1.43	0.74	-0.06	-0.42	0.15	0.74	0.07		-1.84	0.03	77.8	0.99
1703.1	1.07	-2.30	-0.23	1.69	1.43	0.75	-0.06	-0.43	0.14	0.73	0.07		-1.84	0.03	78.1	0.99
1727.8	1.06	-2.33	-0.25	1.71	1.43	0.76	-0.06	-0.44	0.14	0.72	0.07		-1.81	0.02	78.5	0.99
1752.9	1.06	-2.36	-0.27	1.71	1.43	0.77	-0.06	-0.45	0.14	0.71	0.07	0.01	-1.83	0.02	78.5	0.99
1778.3	1.07	-2.35	-0.25	1.71	1.43	0.77	-0.06	-0.45	0.15	0.71	0.07	0.01	-1.84	0.02	78.7	0.99
1804.1	1.08	-2.35	-0.25	1.70	1.44	0.77	-0.06	-0.45	0.15	0.71	0.07	0.01	-1.86	0.02	78.8	0.99
1830.2	1.07	-2.36	-0.27	1.70	1.46	0.79	-0.06	-0.46	0.13	0.70	0.07	0.01	-1.86	0.02	78.9	0.99
1856.7	1.06	-2.33	-0.27	1.70	1.46	0.79	-0.06	-0.46	0.13	0.70	0.08	0.01	-1.90	0.02	78.8	0.99
1883.7	1.05	-2.31	-0.28	1.70	1.45	0.78	-0.06	-0.46	0.14	0.70	0.08	0.01	-1.94	0.02	78.9	0.99
1911.0	1.05	-2.29	-0.28	1.70	1.44	0.78	-0.06	-0.46	0.14	0.70	0.08	0.01	-1.98	0.02	78.8	0.99
1938.7	1.05	-2.29	-0.29	1.71	1.43	0.77	-0.06	-0.46	0.14	0.70	0.07	0.02	-1.99	0.02	79.0	0.99
1966.8	1.05	-2.29	-0.30	1.72	1.43	0.78	-0.06	-0.46	0.15	0.69	0.07	0.02	-2.00	0.02	79.2	0.99
1995.3	1.06	-2.29	-0.31	1.73	1.43	0.79	-0.06	-0.47	0.15	0.70	0.07	0.02	-1.99	0.02	79.3	0.99
2024.2	1.08	-2.28	-0.31	1.72	1.44	0.79	-0.07	-0.47	0.15	0.69	0.07	0.02	-2.00	0.02	79.4	0.99
2053.5	1.06	-2.28	-0.33	1.72	1.45	0.79	-0.07	-0.48	0.15	0.68	0.07	0.02	-2.03	0.02	79.5	0.99
2083.3	1.06	-2.26	-0.34	1.73	1.45	0.80	-0.07	-0.48	0.15	0.67	0.07	0.02	-2.07	0.02	79.6	0.99
2113.5	1.05	-2.24	-0.32	1.74	1.45	0.80	-0.07	-0.48	0.15	0.66	0.07	0.02	-2.09	0.02	79.6	0.99
2144.1	1.05	-2.21	-0.32	1.74	1.44	0.81	-0.07	-0.48	0.15	0.66	0.07	0.02	-2.13	0.02	79.6	0.99
2175.2	1.05	-2.21	-0.33	1.73	1.44	0.80	-0.07	-0.49	0.16	0.65	0.06	0.02	-2.14	0.02	79.8	0.99
2206.7	1.06	-2.20	-0.36	1.73	1.44	0.81	-0.07	-0.49	0.16	0.65	0.06	0.02	-2.15	0.02	79.9	0.99
2238.7	1.06	-2.19	-0.39	1.73	1.45	0.81	-0.07	-0.51	0.17	0.66	0.06	0.02	-2.15	0.02	79.9	0.99
2271.2	1.06	-2.18	-0.41	1.73	1.46	0.81	-0.07	-0.52	0.18	0.65	0.06	0.03	-2.15	0.02	79.7	0.99
2304.1	1.07	-2.16	-0.40	1.74	1.47	0.82	-0.07	-0.52	0.18	0.65	0.05	0.03	-2.19	0.02	79.8	0.99
2337.5	1.08	-2.13	-0.39	1.74	1.47	0.83	-0.07	-0.52	0.18	0.64		0.03	-2.19	0.02	80.0	0.99
2371.4	1.09	-2.11	-0.40	1.73	1.48	0.84	-0.08	-0.52	0.18	0.63		0.03	-2.22	0.02	80.4	0.99
2405.8	1.09	-2.10	-0.42	1.73	1.49	0.84	-0.08	-0.53	0.17	0.62		0.03	-2.25	0.02	80.5	0.99
2440.6	1.10	-2.10	-0.44	1.72	1.49	0.85	-0.08	-0.54	0.17	0.61		0.03	-2.27	0.01	80.5	0.99
2476.0	1.10	-2.10	-0.44	1.73	1.48	0.84	-0.08	-0.54	0.18	0.62		0.03	-2.29	0.01	80.3	0.99
2511.9	1.11	-2.11	-0.45	1.74	1.46	0.84	-0.08	-0.54	0.18	0.63		0.03	-2.30	0.01	80.1	0.99
2548.3	1.11	-2.11	-0.47	1.75	1.47	0.84	-0.08	-0.55	0.18	0.63		0.03	-2.33	0.01	80.3	0.99
2585.2	1.12	-2.09	-0.48	1.75	1.48	0.84	-0.08	-0.55	0.18	0.63		0.03	-2.36	0.01	80.5	0.99
2622.7	1.13	-2.07	-0.47	1.75	1.48	0.85	-0.08	-0.56	0.18	0.62		0.03	-2.41	0.01	80.7	0.99
2660.7	1.15	-2.05	-0.48	1.74	1.48	0.86	-0.08	-0.56	0.18	0.62		0.03	-2.45	0.01	80.7	0.99
2699.3	1.16	-2.04	-0.48	1.75	1.48	0.87	-0.08	-0.56	0.18	0.62		0.03	-2.44	0.01	80.6	0.99
2738.4	1.16	-2.04	-0.50	1.75	1.47	0.86	-0.08	-0.56	0.18	0.63		0.03	-2.44	0.01	80.4	0.99
2778.1	1.16	-2.03	-0.51	1.76	1.47	0.86	-0.09	-0.56	0.18	0.64		0.02	-2.45	0.01	80.4	0.99
2818.4	1.16	-2.02	-0.51	1.78	1.47	0.85	-0.08	-0.57	0.18	0.64		0.02	-2.45	0.01	80.5	0.99
2859.2	1.15	-2.01	-0.51	1.79	1.48	0.86	-0.08	-0.58	0.18	0.63		0.02	-2.48	0.01	80.7	0.99
2900.7	1.15	-2.01	-0.51	1.79	1.49	0.86	-0.09	-0.58	0.18	0.62		0.02	-2.49	0.01	80.8	0.99
2942.7	1.15	-2.01	-0.52	1.80	1.48	0.87	-0.09	-0.58	0.18	0.62		0.02	-2.48	0.01	80.9	0.99
2985.4	1.16	-1.99	-0.53	1.80	1.47	0.86	-0.09	-0.58	0.18	0.62		0.02	-2.49	0.01	80.8	0.99
3028.7	1.18	-1.98	-0.53	1.81	1.46	0.87	-0.09	-0.58	0.17	0.62		0.02	-2.49	0.01	80.8	0.99
3072.6	1.19	-1.96	-0.55	1.81	1.48	0.87	-0.09	-0.59	0.17	0.63		0.02	-2.51	0.01	80.8	0.99
3117.1	1.17	-1.95	-0.58	1.82	1.51	0.87	-0.09	-0.60	0.17	0.63		0.02	-2.53	0.01	80.8	0.99
3162.3	1.17	-1.95	-0.59	1.84	1.50	0.87	-0.09	-0.61	0.17	0.63		0.02	-2.52		81.2	0.99
3208.1	1.19	-1.93	-0.58	1.87	1.47	0.88	-0.09	-0.60	0.18	0.62		0.02	-2.47		81.2	0.99
3254.6	1.21	-1.91	-0.56	1.88	1.46	0.89	-0.09	-0.60	0.17	0.61		0.02	-2.46	0.01	80.9	0.99
3301.8	1.22	-1.91	-0.59	1.86	1.48	0.89	-0.09	-0.61	0.17	0.60		0.01	-2.50	0.01	81.3	0.99
3349.7	1.21	-1.92	-0.63	1.86	1.51	0.88	-0.09	-0.63	0.17	0.60		0.01	-2.55		81.8	0.99
3398.2	1.20	-1.92	-0.64	1.91	1.48	0.89	-0.09	-0.63	0.18	0.61		0.01	-2.53		81.2	0.99
3447.5	1.21	-1.89	-0.62	1.95	1.44	0.90	-0.09	-0.62	0.17	0.61		0.01	-2.47		81.1	0.99
3497.4	1.24	-1.87	-0.61	1.94	1.43	0.91	-0.09	-0.61	0.16	0.60			-2.46		81.8	0.99
3548.1	1.27	-1.85	-0.63	1.91	1.48	0.91	-0.09	-0.62	0.16	0.60			-2.51		81.9	0.99
3599.6	1.27	-1.85	-0.66	1.93	1.50	0.92	-0.09	-0.64	0.16	0.60			-2.52		81.6	0.99
3651.7	1.27	-1.84	-0.66	1.99	1.46	0.93	-0.09	-0.63	0.16	0.61			-2.47		81.1	0.99
3704.7	1.28	-1.85	-0.67	2.01	1.44	0.94	-0.09	-0.63	0.15	0.63			-2.40		81.1	0.99
3758.4	1.31	-1.83	-0.68	2.01	1.45	0.93	-0.09	-0.64	0.15	0.62			-2.41		81.4	0.99
3812.9	1.33	-1.80	-0.70	2.00	1.49	0.93	-0.10	-0.65	0.14	0.61			-2.46		81.6	0.99
3868.1	1.34	-1.77	-0.71	2.02	1.49	0.93	-0.10	-0.66	0.15	0.62			-2.49		81.2	0.99
3924.2	1.34	-1.76	-0.72	2.06	1.47	0.93	-0.10	-0.67	0.14	0.66			-2.47		80.6	0.99
3981.1	1.34	-1.77	-0.73	2.10	1.46	0.93	-0.10	-0.67	0.14	0.68			-2.44		80.5	0.99
4038.8	1.37	-1.73	-0.75	2.09	1.49	0.91	-0.10	-0.67	0.12	0.67			-2.51		80.9	0.99
4097.3	1.37	-1.66	-0.80	2.06	1.52	0.90	-0.11	-0.69	0.13	0.67			-2.52		81.0	0.99
4156.7	1.40	-1.69	-0.82	2.09	1.49	0.91	-0.11	-0.69	0.14	0.68			-2.45		80.8	0.99
4217.0	1.42	-1.71	-0.84	2.15	1.47	0.92	-0.11	-0.68	0.13	0.70	-0.07	-0.01	-2.39		80.8	0.99
4278.1	1.45	-1.67	-0.86	2.14	1.50	0.90	-0.11	-0.68	0.11	0.71	-0.07	-0.02	-2.45		81.1	0.99
4340.1	1.48	-1.64	-0.88	2.13	1.50	0.91	-0.12	-0.69	0.11	0.69	-0.07	-0.02	-2.45		81.4	0.99
4403.0	1.50	-1.65	-0.91	2.19	1.47	0.91	-0.12	-0.69	0.11	0.69	-0.08	-0.03	-2.33		81.0	0.99
4466.8	1.52	-1.65	-0.95	2.24	1.47	0.92	-0.12	-0.70	0.10	0.70	-0.08	-0.03	-2.25		80.7	0.99
4531.6	1.54	-1.64	-1.00	2.25	1.49	0.93	-0.12	-0.70		0.72	-0.08	-0.03	-2.26		80.8	0.98
4597.3	1.55	-1.64	-1.06	2.26	1.47	0.94	-0.12	-0.71		0.73	-0.09	-0.03	-2.17		80.8	0.98
4663.9	1.56	-1.64	-1.10	2.30	1.43	0.95	-0.13	-0.70		0.75	-0.11	-0.03	-2.06		80.5	0.98
4731.5	1.56	-1.65	-1.15	2.32	1.44	0.95	-0.13	-0.70		0.77	-0.12	-0.03	-1.99		80.5	0.98
4800.1	1.58	-1.64	-1.22	2.34	1.44	0.96	-0.13	-0.71		0.80	-0.12	-0.04	-1.97	-0.02	81.2	0.98
4869.7	1.59	-1.67	-1.28	2.39	1.41	0.97	-0.14	-0.72		0.81	-0.15	-0.04	-1.88	-0.02	81.1	0.98
4940.3	1.60	-1.69	-1.31	2.42	1.39	0.99	-0.14	-0.73		0.83	-0.16	-0.04	-1.79	-0.02	81.3	0.99
5011.9	1.61	-1.67	-1.36	2.43	1.42	1.01	-0.14	-0.74		0.83	-0.16	-0.04	-1.86	-0.02	81.7	0.99
5084.5	1.60	-1.69	-1.44	2.48	1.39	1.										

表 3.3 (6) 各設計パラメータ (因子) の回帰係数

周波数 [Hz]	A	C	A×C	B	A×B	B×C	D	F	A×F	I	B×F	G	H	E	定数項	決定 係数
	磁石厚さ	磁石隙間	磁石厚さ × 磁石隙間	着磁ピッチ	磁石厚さ × 着磁ピッチ	着磁ピッチ × 磁石隙間	基板厚さ	穴径	磁石厚さ × 穴径	導体厚さ	着磁ピッチ × 穴径	開口率	導体積率	導体 占有率		
6043.0	1.41	-1.77	-0.70	1.96	1.04	1.04	-0.09	-0.30	0.39	0.58	0.08	-0.01	-2.76	-0.03	82.2	0.99
6130.6	1.41	-1.83	-0.69	1.84	1.09	1.03	-0.08	-0.25	0.41	0.51	0.08	-0.02	-2.71	-0.02	82.5	0.99
6219.4	1.43	-1.88	-0.49	1.80	0.99	0.98	-0.07	-0.14	0.40	0.46	0.13		-2.43	-0.02	81.5	0.98
6309.6	1.44	-1.93	-0.35	1.67	1.05	0.96	-0.06		0.38	0.39	0.20	-0.02	-2.47		81.9	0.97
6401.0	1.44	-1.99		1.58	1.05	0.93	-0.05		0.39	0.32	0.25	-0.03	-2.21		82.8	0.96
6493.8	1.48	-2.06		1.49	0.99	0.90	-0.05	0.15	0.39	0.27	0.31	-0.03	-2.01		83.0	0.96
6588.0	1.51	-2.08		1.43	1.03	0.92	-0.04	0.25	0.39		0.37	-0.04	-2.08		86.2	0.95
6683.4	1.57	-2.04		1.35	0.98	0.82	-0.03	0.31	0.38		0.43	-0.04	-1.76		85.6	0.94
6780.3	1.64	-2.05		1.20	1.01	0.77		0.40	0.35		0.48	-0.04	-1.61	0.02	83.1	0.93
6878.6	1.68	-1.96	0.44	1.19	0.99	0.72		0.46	0.34		0.53	-0.05	-1.53	0.02	82.4	0.94
6978.3	1.66	-1.88	0.52	1.14	0.88	0.70		0.48	0.36		0.55	-0.04	-1.33	0.02	82.3	0.93
7079.5	1.65	-1.82	0.50	1.09	0.88	0.77		0.54	0.37		0.57	-0.05	-1.60	0.03	82.0	0.93
7182.1	1.55	-1.62	0.50	1.21	0.72	0.77		0.54	0.43		0.57	-0.05	-1.57	0.03	81.6	0.93
7286.2	1.55	-1.58	0.44	1.05	0.74	0.85	-0.04	0.58	0.43		0.57	-0.05	-1.79	0.03	83.7	0.93
7391.8	1.49	-1.38	0.46	1.20	0.67	0.87		0.58	0.45		0.57	-0.06	-1.84	0.03	81.4	0.92
7498.9	1.42	-1.29	0.45	1.07	0.67	0.89	-0.04	0.63	0.49		0.61	-0.06	-1.96	0.04	83.5	0.94
7607.6	1.44	-1.15	0.43	1.14	0.65	0.94	-0.04	0.62	0.52		0.59	-0.08	-1.96	0.04	82.7	0.93
7717.9	1.36	-0.99	0.51	1.11	0.58	0.94	-0.04	0.67	0.57		0.62	-0.08	-2.04	0.04	83.1	0.94
7829.8	1.37	-0.89	0.47	1.11	0.55	0.96	-0.04	0.65	0.64		0.58	-0.08	-2.23	0.05	82.9	0.94
7943.3	1.37	-0.75	0.66	1.04	0.46	0.94	-0.04	0.69	0.71		0.57	-0.08	-2.46	0.04	83.2	0.96
8058.4	1.42	-0.72	0.65	0.95	0.49	0.87	-0.03	0.67	0.82		0.53	-0.09	-2.92	0.04	83.6	0.96
8175.2	1.52	-0.64	0.93	0.80	0.43	0.81		0.71	0.90		0.49	-0.08	-3.19	0.04	83.0	0.96
8293.7	1.53	-0.46	0.90	0.74	0.40	0.81		0.77	1.00		0.49	-0.09	-3.64	0.05	82.8	0.97
8414.0	1.56		1.09	0.71	0.29	0.86		0.85	1.06	0.22	0.48	-0.09	-3.62	0.05	78.8	0.97
8535.9	1.64		1.08	0.66	0.28	0.89		0.90	1.10		0.48	-0.11	-4.02	0.05	82.0	0.97
8659.6	1.58		1.30	0.62	0.15	0.97		0.95	1.19	0.18	0.49	-0.09	-4.12	0.05	79.6	0.99
8785.2	1.56		1.38	0.53	0.14	1.10		0.99	1.24		0.53	-0.10	-4.67	0.05	82.4	0.99
8912.5	1.52	-0.10	1.50	0.50	0.10	1.17	0.03	1.00	1.30	0.03	0.55	-0.07	-4.66	0.05	81.2	1.00
9041.7	1.61	-0.02	1.52	0.57	0.18	1.21	0.04	0.97	1.31	-0.05	0.52	-0.09	-4.88	0.04	82.2	1.00
9172.8	1.71	-0.27	1.50	0.51	0.22	1.27	0.06	1.02	1.35		0.55	-0.07	-4.96	0.04	81.6	1.00
9305.7	1.77	-0.17	1.60	0.56	0.26	1.30	0.07	1.03	1.40	-0.10	0.52	-0.08	-5.19	0.03	82.7	1.00
9440.6	1.95	-0.48	1.53	0.59	0.34	1.25	0.08	1.05	1.42		0.53	-0.08	-5.25	0.02	81.7	0.99
9577.5	2.03	-0.55	1.54	0.65	0.37	1.24	0.09	1.06	1.46		0.51	-0.09	-5.13	0.01	81.9	0.99
9716.3	2.03	-0.84	1.52	0.72	0.35	1.16	0.11	1.10	1.51		0.53	-0.08	-5.04		82.4	0.99
9857.1	2.05	-1.03	1.51	0.74	0.32	1.17	0.12	1.16	1.54		0.58	-0.07	-5.02		81.7	0.98
10000.0	1.98	-1.41	1.40	0.82	0.33	1.07	0.13	1.23	1.55		0.62	-0.06	-5.18		81.4	0.97
10145.0	1.99	-1.66	1.45	0.89		0.95	0.14	1.23	1.51		0.65	-0.06	-5.06	-0.04	83.2	0.96
10292.0	1.77	-1.79	1.36	0.94		1.00	0.15	1.21	1.39	0.40	0.63	-0.07	-4.70	-0.05	78.5	0.97
10441.2	1.48	-1.88	1.38	0.94		1.00	0.16	1.14	1.18	0.52	0.60	-0.09	-4.25	-0.07	78.5	0.98
10592.5	1.32	-2.19	1.32	0.99		0.91	0.17	1.00	1.07	0.61	0.57	-0.09	-4.06	-0.09	78.8	0.97
10746.1	1.25	-2.36	1.11	1.04		0.83	0.17	0.87	0.99	0.59	0.53	-0.08	-3.92	-0.10	79.9	0.96
10901.8	1.39	-2.76	0.98	0.96		0.77	0.18	0.69	1.00	0.58	0.46	-0.06	-3.97	-0.11	79.8	0.94
11059.9	1.95	-3.32	1.17	0.63	0.64	0.50	0.20	0.35	1.16	0.74	0.25		-4.87	-0.13	80.8	0.92
11220.2	1.90	-3.31		0.69	0.68	0.60	0.18		1.05				-4.52	-0.11	90.8	0.87
11382.8	2.00	-3.34		0.64	0.73	0.58	0.14		0.98				-4.26	-0.11	91.2	0.90
11547.8	2.00	-3.35		0.64	0.76	0.55	0.10		0.93				-3.88	-0.10	91.5	0.92
11715.2	1.96	-3.44		0.63	0.75	0.44	0.08		0.91				-3.41	-0.09	91.8	0.91
11885.0	2.02	-3.56	-0.88	0.46	0.74	0.36	0.05	-0.41	0.83		-0.17		-3.13	-0.08	94.0	0.93
12057.3	2.11	-3.78	-1.23		0.79	0.38		-0.61	0.73		-0.34		-3.04	-0.07	97.7	0.93
12232.1	1.96	-3.59	-1.44		0.63	0.47		-1.01	0.51		-0.61		-2.38	-0.07	98.2	0.97
12409.4	2.26	-3.87	-2.16	-0.33	0.77	0.26	-0.04	-1.33	0.53	-0.62	-0.77	0.04	-2.69	-0.05	107.9	0.98
12589.3	2.70	-4.45	-3.18	-0.63	1.04		-0.14	-1.69	0.67	-1.26	-0.97	0.08	-3.44		118.4	0.98
12771.7	1.89	-5.75	-3.53	-0.64		-1.00	-0.18	-1.88		-1.56	-1.05		-5.81		131.7	0.94
12956.9	2.07	-5.53	-2.29	0.51	0.78	-0.78	-0.10	-1.23	0.34	-0.79	-0.60	0.07	-5.10	-0.04	111.7	0.96
13144.7	1.93	-5.77	-1.78	1.07	0.75	-0.81	-0.08	-0.94	0.29	-0.47	-0.41	0.09	-5.38	-0.07	105.5	0.97
13335.2	1.91	-6.02	-1.28	1.39	0.69	-0.90	-0.07	-0.81	0.29		-0.34	0.09	-6.01	-0.09	99.0	0.98
13528.5	1.82	-6.21	-0.85	1.66	0.73	-0.89	-0.06	-0.70	0.36		-0.26	0.10	-6.29	-0.11	98.6	0.99
13724.6	1.63	-6.45	-0.59	1.84	0.80	-0.95	-0.06	-0.66	0.43		-0.16	0.14	-6.22	-0.12	98.4	1.00
13923.6	1.54	-6.85	-0.31	1.99	0.97	-1.12	-0.04	-0.73	0.52		-0.10	0.18	-6.33	-0.13	97.9	1.00
14125.4	1.22	-7.14	-0.07	2.10	0.89	-1.29	-0.04	-0.77	0.57	0.10	-0.07	0.20	-6.22	-0.13	96.6	1.00
14330.1	0.55	-7.31	0.25	2.18	0.49	-1.46	-0.06	-0.89	0.61		-0.09	0.21	-5.69	-0.12	99.0	1.00
14537.8		-7.25	0.89	2.34	0.40	-1.41		-1.17	0.62		-0.19	0.22	-5.36	-0.11	97.6	0.99
14748.6		-6.92	1.07	2.14	0.70	-0.93		-1.24	0.40		-0.16	0.20	-5.47	-0.13	99.2	0.98
14962.4		-6.94	1.01	1.90	0.92	-0.64		-1.34	0.28	0.43		0.19	-5.40	-0.15	95.4	0.98
15179.2		-6.96	0.66	1.62	1.25	-0.42	-0.06	-1.28	0.21	0.61		0.20	-5.89	-0.17	96.6	0.99
15399.3		-6.95	0.47	1.35	1.69	-0.28	-0.09	-1.18	0.22	0.77	0.11	0.20	-7.05	-0.18	97.1	0.99
15622.5	0.45	-6.92	0.32	0.91	2.03	-0.29	-0.13	-1.07	0.34	1.09	0.21	0.21	-8.07	-0.20	95.6	1.00
15848.9	0.97	-6.71	0.60	0.48	2.43	-0.40	-0.17	-1.12	0.50	1.47	0.22	0.21	-9.55	-0.21	93.0	1.00
16078.7	1.30	-6.55	1.08	0.34	2.71	-0.45	-0.20	-1.30	0.61	1.52	0.16	0.22	-10.53	-0.20	92.7	1.00
16311.7	1.38	-6.08	1.31	0.35	3.16	-0.22	-0.21	-1.43	0.49	1.44	0.15	0.21	-11.43	-0.17	92.4	1.00
16548.2	1.02	-5.17	1.76	0.87	3.84	0.09	-0.22	-1.68	0.13	1.33	0.23	0.19	-12.98	-0.11	88.9	1.00
16788.0	0.67	-5.28	1.32	0.81	3.80	0.35	-0.23	-1.50	0.18	1.16	0.31	0.19	-12.56	-0.10	91.0	1.00
17031.4	0.71	-6.19	0.48	0.26	3.31	0.75	-0.19	-1.15	0.61	0.72	0.24	0.18	-10.60	-0.14	99.0	1.00
17278.3	0.63	-6.90	0.31	-0.36	2.96	0.71	-0.17	-0.97	1.11	0.70	0.13	0.21	-9.48	-0.16	101.5	1.00
17528.7	1.02	-6.91	0.68	-0.86	2.85	0.78	-0.16	-0.86	1.39	0.67	-0.12	0.21	-9.94	-0.15	101.0	0.99
17782.8	1.77	-6.85	1.44	-1.44	2.97	0.65	-0.13	-0.94	1.62	0.72	-0.44	0.22	-11.60	-0.13	99.9	0.99
18040.6	1.00	-6.03	0.97	-1.37	2.17	0.97	-0.20	-0.39	1.51	0.35	-0.26	0.19	-10.45	-0.09	102.5	1.00
18302.1	0.51	-5.41	0.91	-1.39	1.74	1.08	-0.24	-0.08	1.52	0.21	-0.13	0.21	-9.40			

表 3.3 (7) 各設計パラメータ (因子) の回帰係数

周波数 [Hz]	A	C	A×C	B	A×B	B×C	D	F	A×F	I	B×F	G	H	E	定数項	決定 係数
	磁石厚さ	磁石隙間	磁石厚さ × 磁石隙間	着磁ピッチ	磁石厚さ × 着磁ピッチ	着磁ピッチ × 磁石隙間	基板厚さ	穴径	磁石厚さ × 穴径	導体厚さ	着磁ピッチ × 穴径	開口率	導体重量	導体占有率		
21752.0	1.83	-4.95	3.22	-1.86	3.98	-0.58	-0.16	-1.13	0.26	0.38	0.08	0.55	-5.97	-0.01	75.0	1.00
22067.3	0.83	-3.72	3.69	-0.94	4.14	-0.84	-0.25	-1.57	-0.30	0.79	0.35	0.58	-7.20		69.8	1.00
22387.2	1.40	-4.39	2.97	-1.20	3.57	-0.36	-0.22	-1.51	0.10	0.37	0.16	0.56	-6.81	-0.05	80.3	1.00
22711.7	0.86	-4.07	2.54	-1.00	3.12	0.16	-0.25	-1.42			0.29	0.54	-5.64	-0.07	87.1	1.00
23040.9	0.31	-4.18	2.73	-0.66	3.13	0.34	-0.24	-1.54	-0.11		0.45	0.53	-5.90	-0.09	88.8	1.00
23374.9	-0.50	-4.89	1.92		3.32	0.77	-0.23	-1.63	-0.25		0.59	0.53	-6.37	-0.11	90.3	0.99
23713.7	-1.25	-5.59	1.00	0.56	3.54	1.34	-0.17	-1.71	-0.34	-0.44	0.63	0.55	-5.98	-0.14	95.1	0.98
24057.5	-1.03	-5.16	0.96	0.55	3.00	1.14	-0.17	-1.31			0.38	0.51	-6.32	-0.10	86.4	0.99
24406.2		-5.25		0.84	2.45	1.28	-0.13	-0.93				0.48	-5.61	-0.09	80.7	0.96
24760.0		-5.10		0.96	1.79	1.23	-0.11	-0.58		0.93		0.44	-5.65	-0.07	65.2	0.95
25118.9	0.93	-4.87		1.04	1.29	0.99	-0.09			1.26	-0.48	0.43	-5.73	-0.05	54.3	0.94
25483.0	1.24	-4.62	-1.08	1.41	0.95	0.80				1.58	-0.76	0.42	-5.44		40.3	0.93
25852.3	1.08	-4.16	-1.85	1.93	0.64	0.81		0.45		2.00	-0.91	0.40	-4.50		30.0	0.94
26227.1	0.99	-4.20	-1.89	2.09	0.78	0.98		0.58	0.54	2.32	-0.96	0.37	-4.82		25.0	0.96
26607.3	0.84	-4.26	-1.83	2.19	1.06	1.38	-0.07	0.49	0.59	1.98	-0.90	0.34	-5.70	0.03	32.3	0.99
26992.9	0.93	-4.49	-2.13	2.31	1.60	1.84	-0.10	0.37	0.85	1.68	-0.96	0.33	-5.72	0.05	35.8	1.00
27384.2	1.34	-4.54	-1.95	2.07	2.14	1.75	-0.10	0.26	0.96	1.67	-0.97	0.33	-4.82	0.08	33.2	1.00
27781.1	1.69	-5.44	-0.77	2.00	2.98	1.32	-0.06	0.33	0.70	1.64	-0.72	0.30	-4.44	0.10	31.1	0.99
28183.8		-6.64	-1.33	3.00	3.88	1.69		0.56	0.65	2.08	-0.64	0.26	-5.89	0.14	21.5	0.96
28592.4		-6.07	-1.07	3.18	3.44	1.40		-0.21	-0.15	1.20	-0.21	0.39	-5.31	0.09	33.7	1.00
29006.8	-0.74	-5.84	-0.93	2.62	2.74	1.02	-0.04	-0.41	-0.49	0.60	-0.19	0.40	-6.26	0.11	45.8	1.00
29427.3		-5.03	-0.41	2.25	2.47	1.29				0.62	-0.25	0.40	-6.12	0.12	40.3	1.00
29853.8	0.60	-4.46	-0.12	2.43	2.49	1.13	0.01	0.18	0.07	0.81	-0.34	0.43	-5.64	0.13	31.6	1.00
30286.6	1.34	-4.54	-0.18	2.43	2.61	0.94	0.05	0.31	0.20	1.02	-0.58	0.46	-6.22	0.12	24.3	1.00
30725.6	1.22	-4.90	-0.43	2.35	3.10	1.05	0.12	0.28	0.57	1.26	-0.79	0.51	-7.32	0.13	17.2	1.00
31170.9	2.27	-3.76	-0.58	1.36	3.61	1.17	0.09	-0.17	1.02	0.58	-0.83	0.62	-4.98	0.15	22.4	1.00
31622.8	1.84	-3.07	-0.58	1.89	3.20	1.00	0.07	-0.18	0.55	0.31	-0.47	0.64	-4.71	0.15	23.3	1.00
32081.2	1.82	-3.87		1.93	3.20	0.67	0.05	-0.42	0.19	0.53	-0.46	0.63	-5.55	0.10	28.0	1.00
32546.2	1.60	-3.93	0.22	2.49	3.10	0.52	0.02	-0.10		0.94	-0.38	0.58	-6.10	0.10	22.2	1.00
33017.9	1.83	-3.56	0.79	2.46	3.52	-0.19	0.04	-0.38	-0.23	1.33	-0.39	0.56	-7.28	0.11	16.8	1.00
33496.5	1.91	-3.29	1.83	2.16	3.79	-0.87	0.02	-0.72	-0.52	1.69	-0.42	0.60	-8.78	0.11	13.3	1.00
33982.1	2.21	-3.34	0.48	2.10	2.92		0.08	-0.14	-0.63	0.86	-0.54	0.51	-5.78	0.09	22.9	0.99
34474.7	2.22	-3.25		1.69	2.35	0.36	0.07		-0.71	0.44	-0.51	0.42	-4.89	0.08	33.0	0.99
34974.4	2.47	-3.11	0.35	1.30	1.92	0.23	0.09	0.40	-0.87	0.56	-0.55	0.38	-4.27	0.09	30.8	0.99
35481.3	2.37	-3.47		0.97	1.82	0.44	0.10	0.44	-0.86	0.36	-0.43	0.36	-4.35	0.08	36.5	0.99
35995.6	2.37	-3.90		0.69	1.69	0.40	0.10	0.58	-0.96		-0.24	0.34	-3.68	0.08	42.5	0.98
36517.4	2.39	-3.67			1.22		0.11	0.72	-0.87	0.50	-0.33	0.35	-3.54	0.07	38.0	0.94
37046.7	2.35	-3.65			0.97	0.55	0.08	1.04	-0.72		-0.31	0.30	-5.02	0.05	49.0	0.95
37583.7	2.22	-3.29		-0.72	0.59	0.66	0.06	1.53	-0.78		-0.31	0.28	-5.84	0.03	53.3	0.96
38128.5	1.76	-2.95		-1.06		0.93	0.06	1.70	-0.69		-0.24	0.28	-6.55		57.2	0.97
38681.2	1.71	-2.69		-1.18		1.15	0.07	1.82	-0.72			0.26	-7.35		57.4	0.95
39241.9	1.51	-2.83		-1.22		1.30	0.10	1.59	-0.56			0.26	-7.50		58.1	0.96
39810.7	1.75	-3.39		-1.02	-0.47	1.36	0.10	1.28	-0.34		-0.19	0.26	-7.99		59.3	0.97
OA	1.39	-2.43	-0.21	1.78	1.03	0.80	-0.07	-0.16	0.44	0.71		-0.03	-2.35	-0.01	76.6	0.99
LD(80)	1.38	6.75	0.50	-0.58	1.75	1.67	0.18	-0.33	-0.78	2.42	-0.37	-0.05	1.75	-0.13	34.4	1.00
LD(100)	2.69	6.06	-1.81		2.21	1.96		0.58	-0.47	1.96			-3.13	-0.08	43.4	0.94

これらの回帰式に基づいて算出した各設計パラメータの特性感度を図 3.4～図 3.7 に示す。図中において、各主効果図は水準を上げた場合（水準 1 → 水準 2）の音圧増減量を表す。また、各交互作用図に示す値は、互いの因子が同じ水準の場合（例えば、磁石厚さ：水準 1 … 1.0 mm × 磁石隙間：水準 1 … 1.0 mm）では“+”（プラス）、互いの因子が異なる水準の場合（例えば、磁石厚さ：水準 1 … 1.0 mm × 磁石隙間：水準 2 … 3.0 mm）では“-”（マイナス）に作用する音圧の増減量を表す。なお、図中で負の値の場合はその逆を表す。

各設計パラメータの効果をみると、周波数応答特性については、図 3.4 (a) に示す通り、“磁石厚さ”、“着磁ピッチ”、“導体厚さ”が増すと、低音域（20 Hz 付近）～高音域（6k Hz 付近）の音圧が一定に上昇する効果がある一方、図 3.4 (b) に示す通り、“磁石隙間”、“基材厚さ”、“穴径”が増すと音圧が低下する傾向を示した。また、図 3.4 (c) に示す通り、“開口率”、“導体占有率”を上げると 50 Hz 付近を中心とした低中音域（1k Hz 付近まで）と高音域（10k Hz 以上）の音圧が上昇し、“導体種類”を銅（Cu）にすると、周波数が高くなるほど音圧を減少させる結果となった。また、交互作用は図 3.5 (a) に示す通り、に示す通り、“磁石厚さ”と“着磁ピッチ”、“磁石隙間”と“着磁ピッチ”、“磁石厚さ”と“穴径”を各々同時に増やした場合は、主効果の上昇分を帳消しにする音圧の減少が見られ、図 3.5 (b) に示す通り、“着磁ピッチ”と“穴径”を同時に増やす場合には、高音域（10k Hz 以上）で大きく変動する複雑な特性が見られた。

全音圧レベルについては、図 3.6 (a) に示す通り、“磁石厚さ”、“着磁ピッチ”、“導体厚さ”の各設計パラメータは、値を増やすと音圧が増加するが、図 3.6 (b) に示す通り、これらも各々を同時に増やすと音圧が減少する交互作用があった。

低音域限界入力値では、図 3.7 (a) に示す通り、80 Hz と 100 Hz で多少の相違はあるが、“磁石隙間”を増やすことが限界入力値の増加に最も効果的で、次いで“導体厚さ”、“磁石厚さ”の順となった。但し、図 3.7 (b) に示す通り、“磁石厚さ”と“着磁ピッチ”、“着磁ピッチ”と“磁石隙間”をそれぞれ同時に増加させると、限界入力値が大きく減少する交互作用があった。以上の通り、本研究で扱うスピーカユニットは、各設計パラメータの選択に対して非常に複雑な特性を示した。

また、これらの関係式より算出した各サンプルの予測値と測定値の平均誤差を確認したところ、周波数応答特性：±0.7 dB（相対誤差率 1.0 %）、全音圧レベル：±0.4 dB（相対誤差率 0.5 %）、低音域限界入力値（80 Hz）：±0.4 dB（相対誤差率 0.5 %）、低音域限界入力値（100 Hz）：±2.0 dB（相対誤差率 2.5 %）の精度であった。

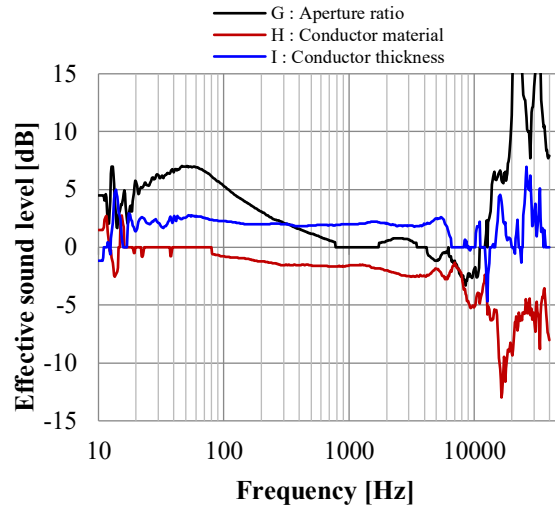
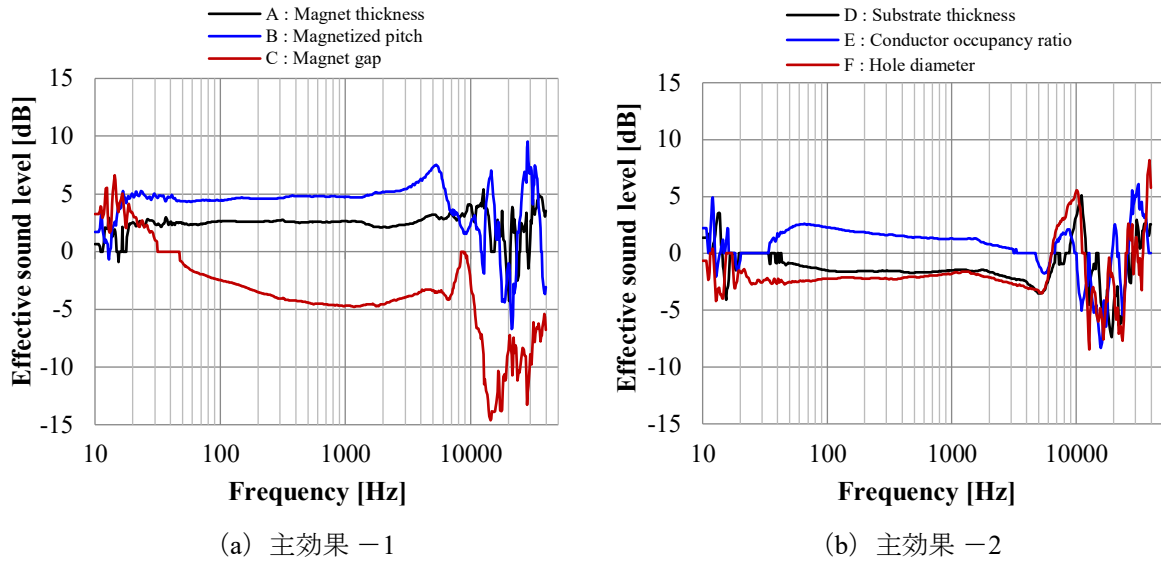


図 3.4 設計パラメータの主効果 (周波数特性)

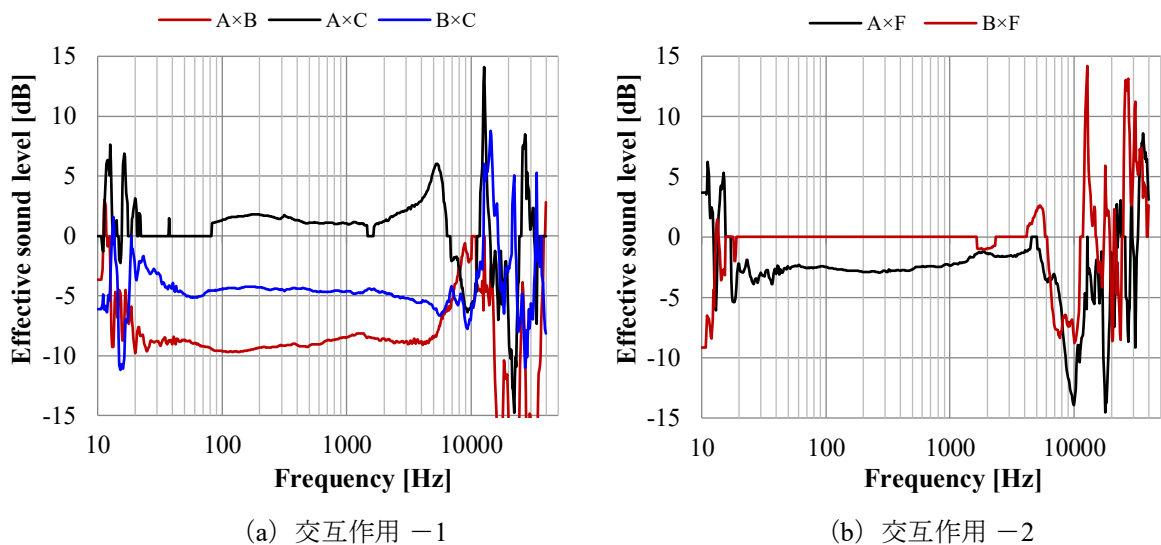
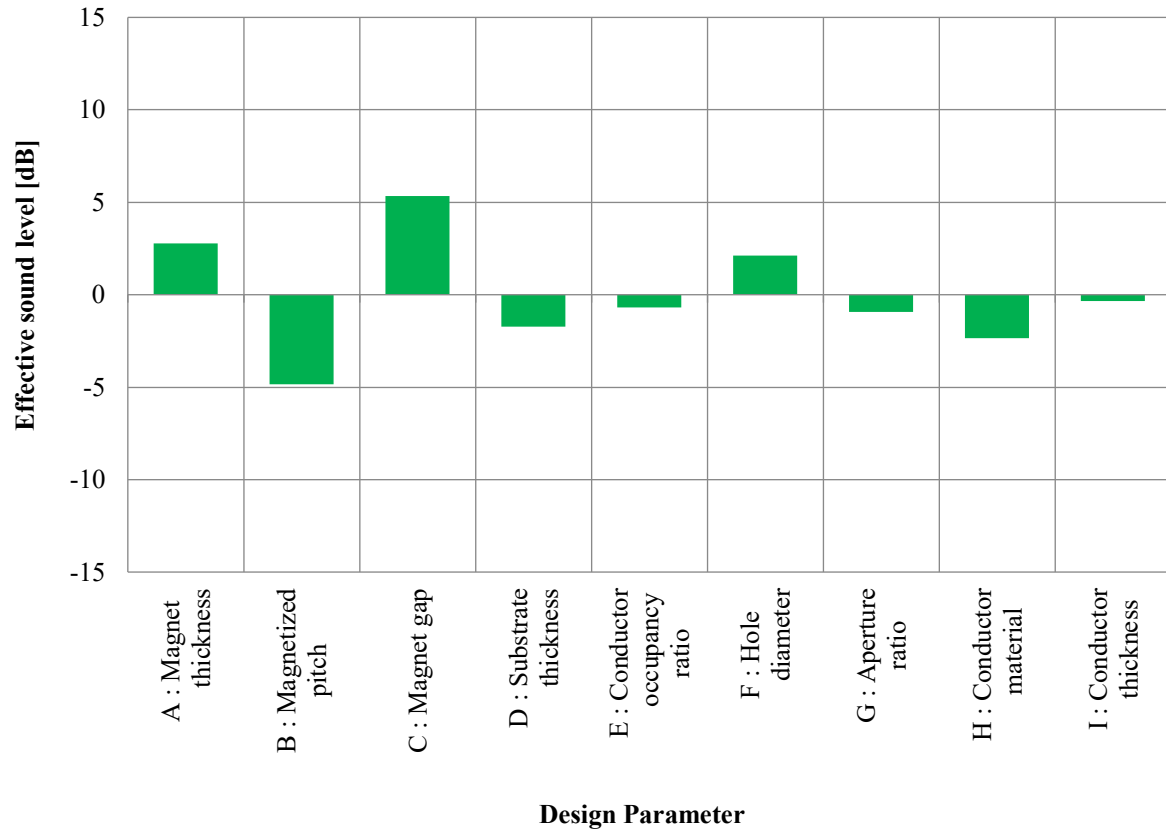
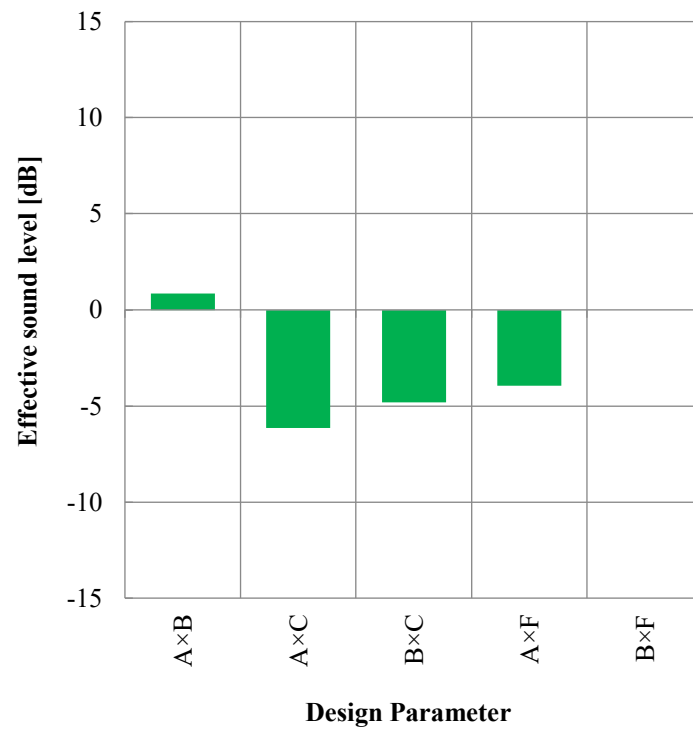


図 3.5 設計パラメータの交互作用 (周波数特性)

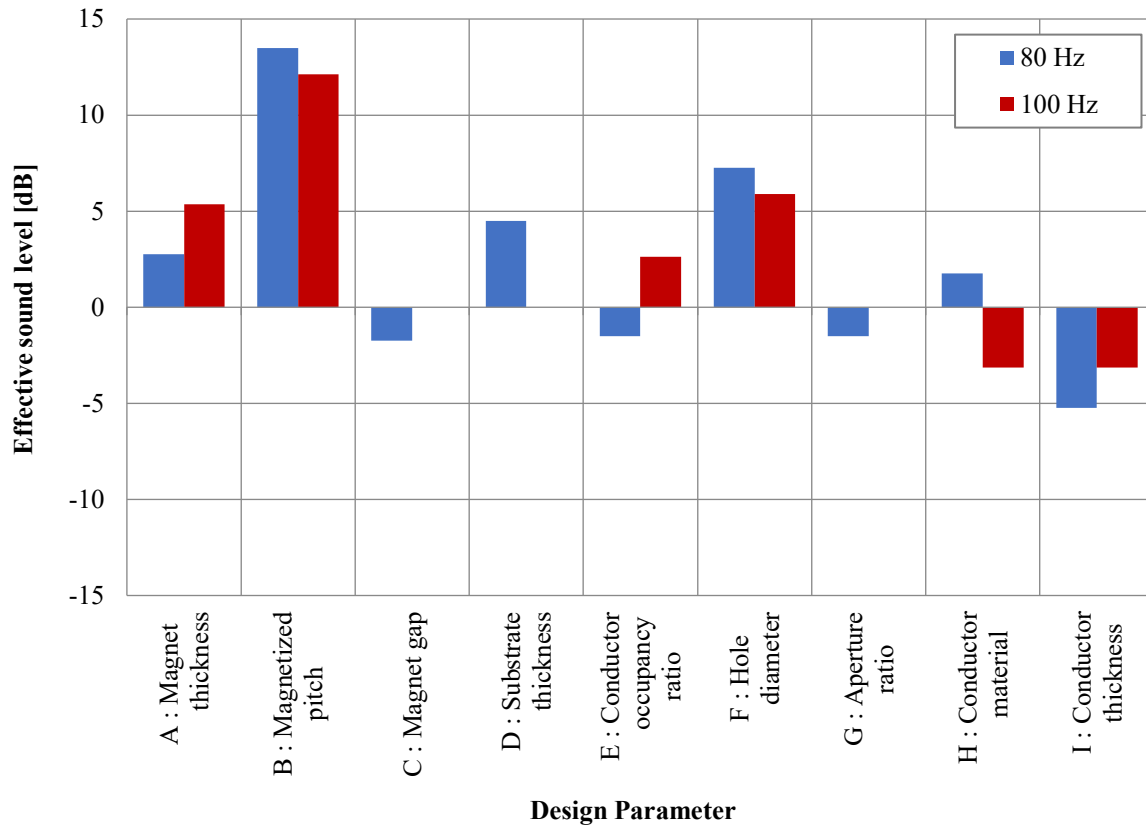


(a) 主効果

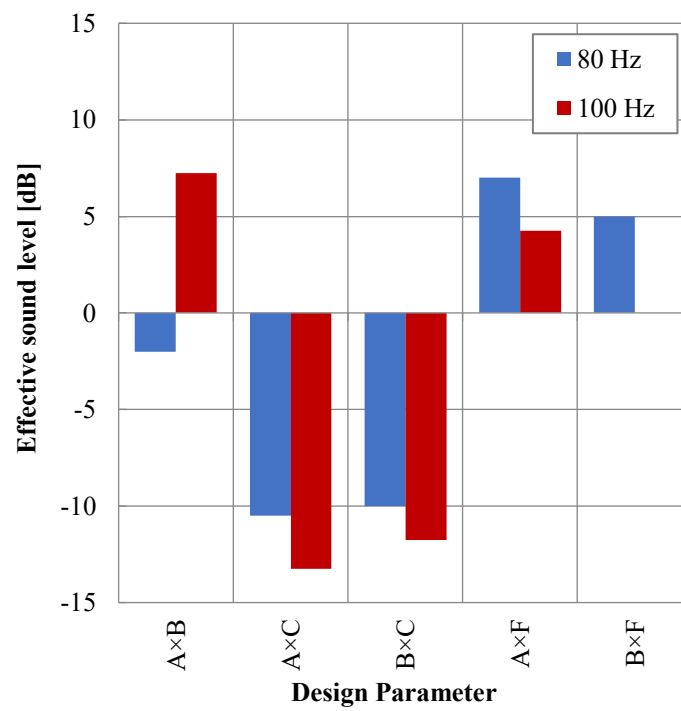


(b) 交互作用

図 3.6 各設計パラメータの効果 (全音圧レベル)



(a) 主効果



(b) 交互作用

図 3.7 各設計パラメータの効果 (低音域限界入力値)

3.2.5 スピーカユニット特性の評価基準

昨今のスピーカユニット製品に求められている高性能化には、幾つかの条件が考えられる。スピーカユニットの高性能化の条件 [28] において、どれをどの程度満足させるかはスピーカの方式や商品の目的によって異なり [29], また、その評価方法はメーカーごとに様々である [30] [31]. 一方、高忠実度再生のスピーカ特性の一般化された評価方法として感性評価による方法 [32] も提案されているが、いずれも明確な判断項目と評価基準は見られない。そこで、設計パラメータの適切な選択にあたり、本研究で扱うスピーカユニットの性質を考慮して、スピーカユニットの音質特性の適切さを表す基本的な条件として、“入出力効率が優れていること”, “周波数応答特性が平坦であること”, “歪が少ないこと”, および, “再生周波数帯域が広いこと” について取り上げ、それぞれに対して評価項目を設定してこれを評価基準とした。これらの評価項目を図 3.8, および, 表 3.4 に示す。

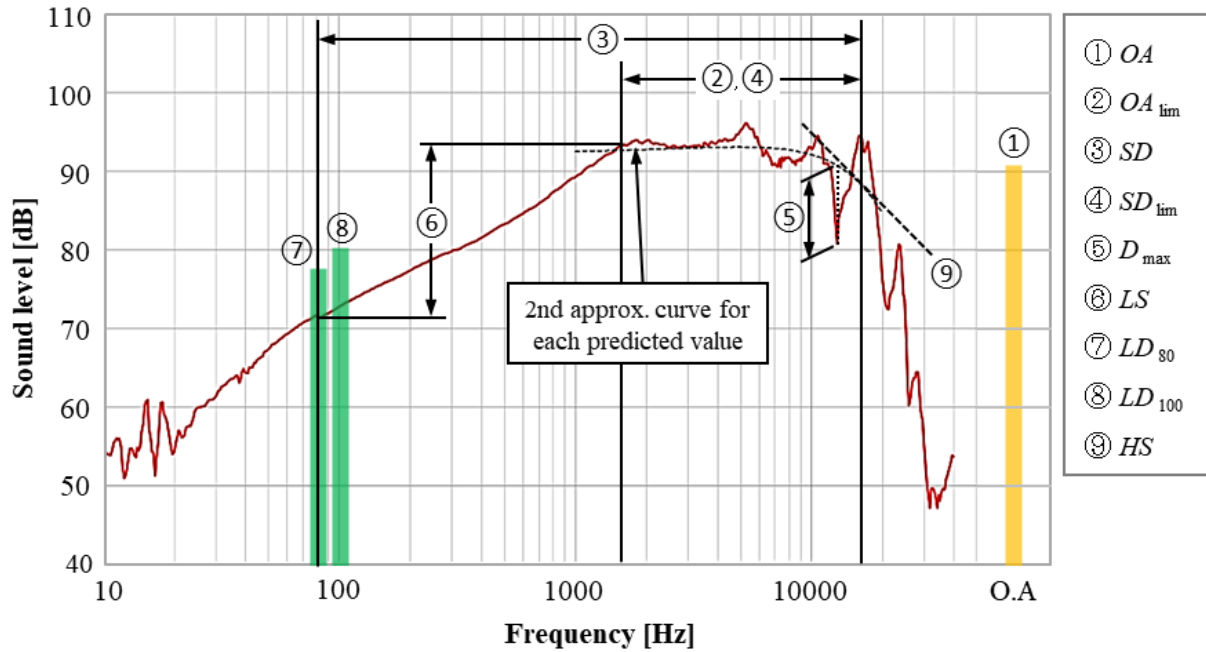


図 3.8 周波数応答特性における評価特性値

表 3.4 スピーカの音質に関する評価項目と評価特性値の基準

Evaluation item	Evaluation characteristics		Frequency range [Hz]	Optimization
Speaker efficiency	① OA	Overall Level	by Sound level meter	Maximize
	② OA_{lim}	Average of each frequency sound level	1.6k ~ 16k	Maximize
Variability, frequency characteristic	③ SD	Standard Deviation of each frequency sound level	80 ~ 16k	Minimize
	④ SD_{lim}	Standard Deviation between approximation curve of sound level	1.6k ~ 16k	Minimize
	⑤ D_{max}	Max difference between approximate curve of Sound level	1.6k ~ 16k	Minimize
Capability, low range	⑥ LS	Difference between 1.6k Hz to 80 Hz sound level	80 ~ 1.6k	Minimize
	⑦ LD_{80}	Sound level of THD 10% at 80 Hz	80	Maximize
	⑧ LD_{100}	Sound level of THD 10% at 100 Hz	100	Maximize
Capability, high range	⑨ HS	Slope of 1.6k Hz on the approximate curve of sound level	16k	Minimize

次に、これら9種類の評価項目に対して、設計者の意思を反映できるようにAHP (Analytic Hierarchy Process : 階層分析法) を用いて重要度を定めた。図3.8, および、表3.3に示す評価項目について、① OA と② OA_{lim} を“出力音圧”, ③ SD と④ SD_{lim} と⑤ D_{max} を“周波数の暴れ”, ⑥ LS と⑦ LD_{80} と⑧ LD_{100} を“低音域再生能力”, および、⑨ HS を“高音域の伸び”として、スピーカ設計者が製品設計時に意識する性能に再整理し、2階の階層構造とした。そして、AHPの手法に基づいて、これらの“出力音圧”, “周波数の暴れ”, “低音域再生能力”, および、“高音域の伸び”の4つの性能に対して各々一対比較で重要性を5段階で評価し、これらの幾何平均から1次階層の重要度を求めた。さらに、①～⑨の項目についても4つの性能ごとに分けて同様に評価し、2次階層の重要度を算出した。その後、各階層の重要度を掛け合わせることで総合重要度を算出した。これより得られた階層構造と重要度を図3.9に示す。図中において、それぞれの項目枠内に各重要度を、総合重要度を最終行に示す。なお、AHPにおける各評価項目の一対比較は、スピーカ設計に関する知識と経験が十分に深い技術者1名と研究者1名で協議しながら実施した。また、AHP手法において、整合度指数(C.I.)が0.1以下であれば問題ないと言われており[33]、今回の結果は0.095と良好な値であった。

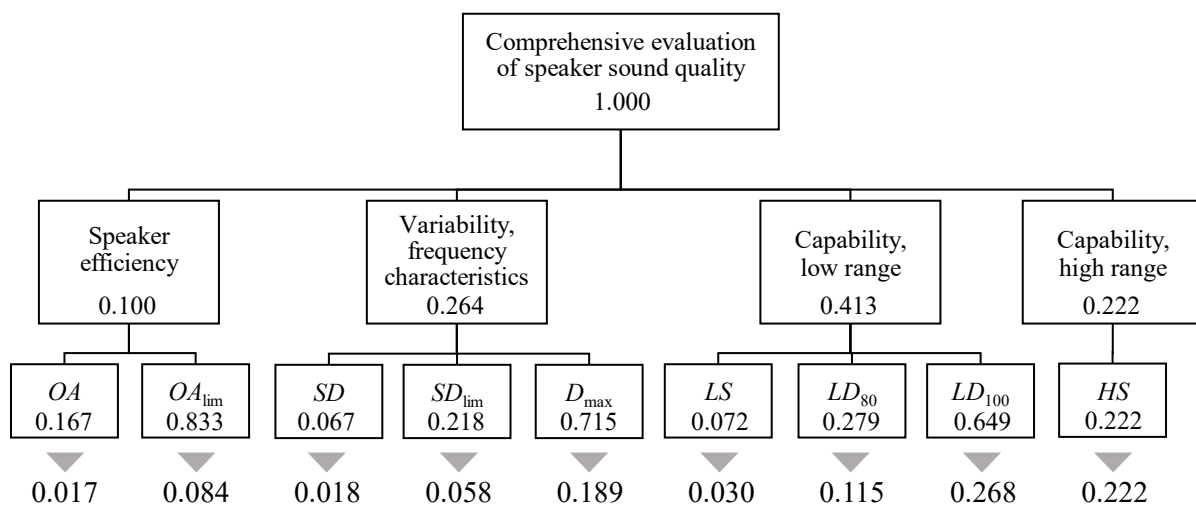


図 3.9 AHPによる評価特性値の重み付け

3.2.6 設計パラメータの組合せによる特性値予測と最適化

スピーカユニットの特性値を予測するのにあたり、各設計パラメータは現状の設備・工具・材料から判断して表 3.5 に示す値に限定した。これらの値を使って、直交配列実験の解析により得られた式 (3.1) ~ (3.4) (周波数応答 577 式, 全音圧レベル 1 式, 低音域限界入力値 2 式) を用いて、 $52 \times 26 \times 3 = 4800$ 通りの全組合せによる各特性値の予測計算を行った。予測計算結果による特性値の変動範囲を表 3.6 に示す。

表 3.5 予測に用いた設計パラメータ値

Design parameter		Level value				
		1	2	3	4	5
A : Magnet thickness	mm	1.0	1.2	2.0	2.4	3.0
B : Magnetized pitch	mm	3.0	6.0	—	—	—
C : Magnet gap	mm	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
D : Substrate thickness	μm	25	50	—	—	—
E : Conductor occupancy ratio	%	40	80	—	—	—
F : Hole diameter	mm	1.5	6.0	—	—	—
G : Aperture ratio	%	10	20	40	—	—
H : Conductor material	—	0 (Al)	1 (Cu)	—	—	—
I : Conductor thickness	μm	12	15	—	—	—

表 3.6 予測計算結果による特性値の変動範囲

Evaluation item	Predicted value [dB]					
	Minimum	Maximum	Average	Median	Standard deviation	Range
① OA	75.5	97.9	86.5	86.6	4.1	22.4
② OA_{lim}	79.3	100.1	89.4	89.4	3.9	20.7
③ SD	4.66	10.3	7.29	7.34	1.03	5.60
④ SD_{lim}	0.49	4.54	1.77	1.68	0.73	4.05
⑤ D_{max}	2.08	30.5	9.08	7.91	4.53	28.4
⑥ LS	11.7	25.6	18.9	19.3	2.95	14.0
⑦ LD_{80}	53.9	104.6	77.8	78.0	7.85	50.8
⑧ LD_{100}	58.1	102.8	83.1	83.4	7.13	44.8
⑨ HS	0.04	26.7	10.5	10.4	5.14	26.6

次に、表 3.5 の各設計パラメータの適切な組合せの選択を多目的最適設計問題として、これを重み付けによる単一目的最適設計問題へ変換して探索した [34]。各項の重み付けは 3.2.5 項の AHP から得られた総合重要度を活用し、式 (3.5) に示す線形和を評価式として、全組合せの総合評価値を算出して順位付けを行った。なお、各特性値の単位の影響を取り除くために、最大化したい評価値 (OA , OA_{lim} , LD_{80} , LD_{100}) は最小値が 0 で最大値が 1 に、最小化したい評価値 (SD , SD_{lim} , D_{max} , LS , HS) は最大値が 0 で最小値が 1 になるように、評価値ごとに正規化した値を用いた。これによる最適化結果の上位 5 仕様を表 3.7 に示す。

これら上位 5 仕様の各設計パラメータを確認すると、“A：磁石厚さ”は 1.0 mm（上位 1 位を除く），“B：着磁ピッチ”は 3.0 mm，“F：穴径”は 6.0 mm，および，“H：導体種類”はアルミ（Al）に集約される結果となった。

$$C.E. = 0.017 OA + 0.084 OA_{lim} + 0.018 SD + 0.058 SD_{lim} + 0.189 D_{max} + 0.030 LS + 0.115 LD_{80} + 0.268 LD_{100} + 0.222 HS \quad (3.5)$$

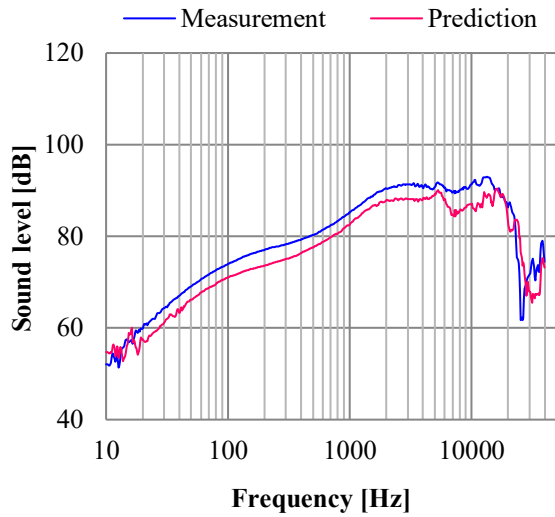
表 3.7 最適化結果の上位 5 仕様

Ranking		1	2	3	4	5	Average (All types)	
Prototype No.		1377	670	217	862	29		
<i>C.E.</i>		0.519	0.517	0.511	0.508	0.491	0.420	
A : Magnet thickness	mm	1.2	1.0	1.0	—	1.0	—	
B : Magnetized pitch	mm	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	—	
C : Magnet gap	mm	2.0	2.5	1.5	3.0	1.0	—	
D : Substrate thickness	μm	25	50	25	50	25	—	
E : Conductor occupancy ratio	%	40	80	40	80	40	—	
F : Hole diameter	mm	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	—	
G : Aperture ratio	%	40	40	10	40	20	—	
H : Conductor material	—	Al	Al	Al	Al	Al	—	
I : Conductor thickness	μm	12	15	12	15	12	—	
Speaker efficiency	OA	dB	83.5	81.7	86	80	87.4	86.5
	OA_{lim}	dB	87.6	85.4	88.9	83.8	90.5	89.4
Variability, frequency characteristics	SD	dB	6.4	5.1	8.0	5.1	7.8	7.29
	SD_{lim}	dB	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	1.77
	D_{max}	dB	3.1	2.9	3.7	2.9	3.2	9.08
Capability, low range	LS	dB	17.3	15.1	24.1	14.5	22.6	18.9
	LD_{80}	dB	76.8	85.8	77	87.6	74.6	77.8
	LD_{100}	dB	86.2	91.7	84	94.2	81.6	83.1
Capability, high range	HS	dB	0.2	4.7	4.5	6.2	0.9	10.5

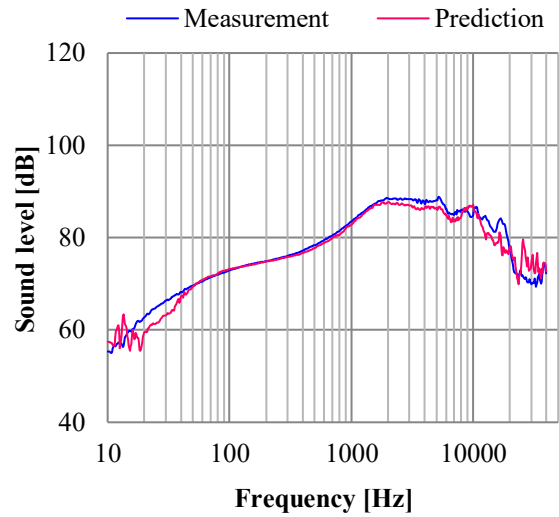
3.2.7 最適化結果の検証

前述の評価式より求めた総合評価値の上位 5 仕様の各特性値を確認すると、 SD_{lim} 、 D_{max} 、および、 HS は平均値より良好な値（この場合はより低い値の方が望ましい）となり、また、 LD_{100} も上位 4 種類までは平均値よりも良好な値（この場合はより大きい値の方が望ましい）となった。一方で、その他の特性値は平均値よりも良好な値とはなっていない。そこで、この結果を判断するために、これら上位 5 仕様のスピーカを試作して設計者が試聴したところ、ほぼ意図した性能が得られており、特に 4 番目 (No.862) がフィーリングにおいて最も適切であることを確認した。これらより、スピーカ音質特性の適切さを表す“入出力効率が優れていること（能率が良いこと）”、“周波数応答特性が平坦であること”、“歪が少ないこと”、および、“再生周波数帯域が広いこと”を同時に満足する結果が得られた。

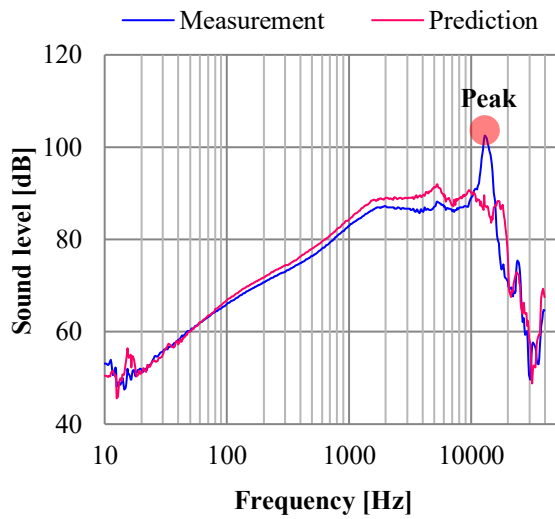
周波数応答特性について詳細にみると、1k Hz 以下のレベルは低いが 20k Hz までは平坦で、それ以上では急激に落ち込むタイプ（図 3.10 (a), (c)）と、1k Hz 以下のレベルは高いが 10k Hz 以上では徐々に下がって行くタイプ（図 3.9 (b), (d), (e)）に分かれる傾向であった。また、これらの予測値と測定結果の平均誤差を確認したところ、周波数応答特性： ± 2.1 dB（相対誤差率 2.9 %）、全音圧レベル： ± 3.3 dB（相対誤差率 4.1 %）、低音域限界入力値（80 Hz）： ± 2.7 dB（相対誤差率 3.6 %）、低音域限界入力値（100 Hz）： ± 5.5 dB（相対誤差率 7.1 %）と良好な精度が得られた。ただし、図 3.9 (c) ~ (d) に示す仕様において、予測値にはない 14k ~ 16k Hz 付近の周波数ピークが見られた。これはスピーカの組み立て誤差が影響している可能性があるため、組み立て方法と寸法精度の見直しを検討する必要があると考えられる。



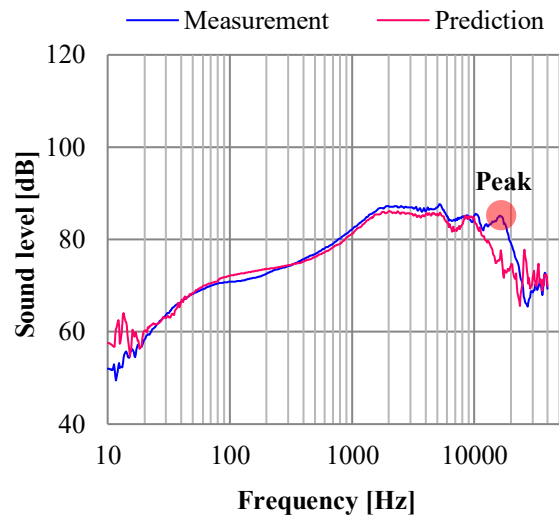
(a) Prototype No.1377



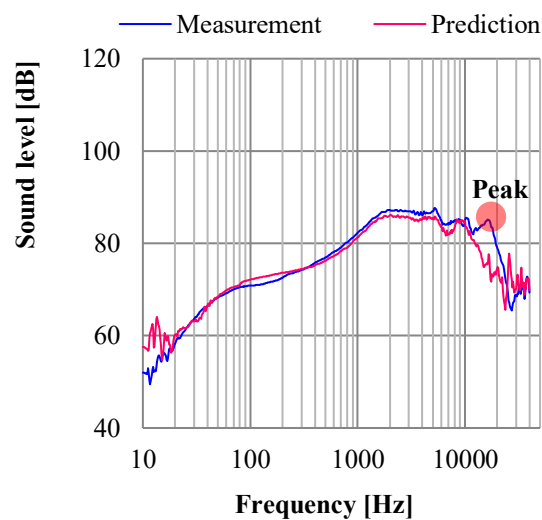
(b) Prototype No.670



(c) Prototype No.217



(d) Prototype No.862



(e) Prototype No.29

図 3.10 周波数応答特性の予測計算と測定結果の比較

3.2.8 考 察

直交配列実験により得られた各設計パラメータの効果を観察すると，“磁石厚さ”，“着磁ピッチ”，“導体厚さ”，“導体占有率”が増加すると音圧が上昇し，“磁石隙間”，“穴径”が増加すると音圧が低下する傾向は，磁力の強さに音圧が影響していると考えられる．また，“基材厚さ”の増加，もしくは，“導体種類”を銅（Cu）にすると音圧が低下することは，振動板の重さが音圧に影響を及ぼしていると考えられる．さらに，“開口率”，“導体種類”を変えることで周波数特性が部分的に変化する傾向は，形状特性や材料特性が音質に影響を与えていると考えられる．これらの結果は，これまでに得ている設計者の経験（磁力が高ければ音量が大きくなる．磁石から距離がある場合，および，振動板が重くなれば音量が出ない．銅の導体は高音域の音質に悪影響がある）に従っていると言える．一方で，今回の実験で明らかになった複雑な交互作用の存在は，経験と勘に頼るだけでは複数の性能が連動する設計パラメータの適切な選択は難しいことを示している．

次に，本研究で得られた評価式による最適化結果を観察すると，各特性値において SD_{lim} ， D_{max} ， HS ，および， LD_{100} 以外は平均値よりも良好な値とはならなかった．これは，AHP で得られた重要度（図 3.9 参照）において， D_{max} ， HS ，および， LD_{100} の重み付けが大きく優先される傾向のため，他の特性は良好な値を同時に満たすことができないことを示している．このことから，それぞれの特性値の間にはトレードオフの関係があると推測される．さらに，周波数応答特性の傾向において 2 つのタイプ（1k Hz 以下のレベルは低いが 20k Hz までは平坦でそれ以上では急激に落ち込むタイプ，1k Hz 以下のレベルは高いが 10k Hz 以上では徐々に下がって行くタイプ）に分かれる傾向であったことは，低音域と高音域の特性も同様にトレードオフの関係が推測される．以上のことから，これらにはパレート解と言われる複数の目的を同時に満たすことが不可能な実行可能解 [7] の存在が考えられる．しかし，全ての特性が平均値を上まわることを最適化に期待する設計者にとって，このパレート解の存在は容易には理解し難く，実際の設計において多目的最適設計問題を単一目的最適設計問題へ変換することの難しさを表していると言える．これを簡便に解決するための方法として，本研究で実施した総合評価の上位数種類の試作による最終確認は，有効な手段の一つと考える．ただし，今回の最終確認はフィーリング判断のみであったため，主観評価実験による印象比較が必要と考える．

また，今回の最適化においては，1k Hz 以下の周波数帯域では特に目立った音圧の改善が出来なかった．これは，本スピーカユニットの構造としての限界であると考えられる．1k Hz 以下の周波数帯域の改善として，平面サイズの拡大，および，エンクロージャと吸音材を組み合わせたスピーカ BOX 化（システム化）などが考えられる．

3.2.9 まとめ

本節では、ヘッドレストスピーカの主要素であるスピーカユニットに対し、9種類の設計パラメータによる音響特性の最適化を試行した。はじめに、実験計画法に基づく直交配列実験を行い、重回帰分析により関係式を導出して各設計パラメータの主効果と交互作用効果を明らかにした。その後、AHP（Analytic Hierarchy Process：階層分析法）を用いてスピーカの音質特性値の重要度を求め、それらを重み係数として総合評価値を算出する評価関数を設定した。これらの関係式と評価関数を用いて、現実的に製作可能な4800通りの設計パラメータの組合せの中から総合評価値の上位5仕様を抽出し、これに従う仕様の試作品を製作して設計者の試聴による最終確認にて最適な仕様を選出した。これにより、スピーカ音質特性の適切さを表す“入出力効率が優れていること（能率が良いこと）”，“周波数応答特性が平坦であること”，“歪が少ないこと”，および，“再生周波数帯域が広いこと”を同時に満足する結果が得られた。なお、これらの試作品の音質測定を行なって予測値と精度を比較した結果、全般的に良好な精度であったことを確認した。

以上より、経験と勘だけでは難しい最適化設計に対して、本研究で実施した実験計画法と重回帰分析、および、AHPを組み合わせた手法により、比較的容易に適切な設計パラメータが選択できると共に、設計者の意思を反映できる最適化の手法として有効なことが確認できた。

今後は1k Hz以下の周波数帯域の改善として、平面サイズの拡大、および、エンクロージャと吸音材を組み合わせたスピーカBOX化（システム化）の検討を行う。

3.3 ヘッドレストスピーカシステムの音質改善

本節では前節（3.4 節）で最適化されたスピーカユニットに対し、1k Hz 以下の周波数帯域の性能改善を検討する、

スピーカ設計では、様々なパラメータを適切に選択する必要がある。スピーカユニット単体の音響特性はもちろんのこと、これを取り付けるエンクロージャやエンクロージャ内部に詰める吸音材による影響も大きい。本研究では、前節のスピーカユニット単体に加え、エンクロージャ、吸音材を含めた 3 因子を設計パラメータとした実験計画法によるスピーカの測定実験を行い、設計パラメータの組み合わせ毎の周波数応答特性、および、残響特性について調査することで、ヘッドレストスピーカの仕様の最適化を行う。

また、最適化したヘッドレストスピーカを音質の特徴ごとに分類し、カーオーディオに求められる“快適さ”と“聞きやすさ”を両立する仕様を検討する。

3.3.1 エンクロージャ・吸音材の仕様

① エンクロージャ（筐体）

スピーカユニットから放射される音は、前方向と後方向で位相が 180 度異なり、回折によって後方向への音が前方向へ回り込む。そのため、振動板より大きな直径の波長の音の場合は打ち消しあい、音圧が著しく低下する現象が起きる。エンクロージャ（Enclosure）はスピーカユニットを格納する筐体であると同時に、スピーカユニット後方へ放射される音を遮断し、このような現象を防ぐため目的で使用される。

本実験で使用するエンクロージャの例を図 3.11 に示す。3D CAD ソフト（Solidworks）を用いて設計し、熱溶解積層型 3D プリンタ（UP BOX, Beijing Tiertime Technology Co.,Ltd 製）により造形を行った。材質は PLA 樹脂（ポリ乳酸）とした。測定実験時には、スピーカユニットの振動によるエンクロージャへの影響を抑えるため、エンクロージャとスピーカユニットの間にスポンジを貼り付けて緩衝材とし、スピーカユニットはスクリューとナットで固定した。なお、エンクロージャ底面にはヘッドレストバーを通す穴が空いており、実験時にはこの穴により自動車座席シートに設置した。



(a) 正面



(b) 側面



(c) 背面

図 3.1 1 エンクロージャ（筐体）を座席に設置した様子

また、エンクロージャ背面の円半径（背面 R）を設計パラメータとして設定した。円半径のサイズは、ヘッドレスト付近のスペースを考慮して 85 ～ 95 mm の範囲とした。この場合、図 3.13 の通り、円半径が小さい場合はエンクロージャ内部の体積は大きくなり、半径が大きい場合はエンクロージャ内部の体積は小さくなる。背面 R が 85 mm の場合のエンクロージャの体積は約 2,972 cm³。95 mm の場合の体積は約 1,690 cm³となる。

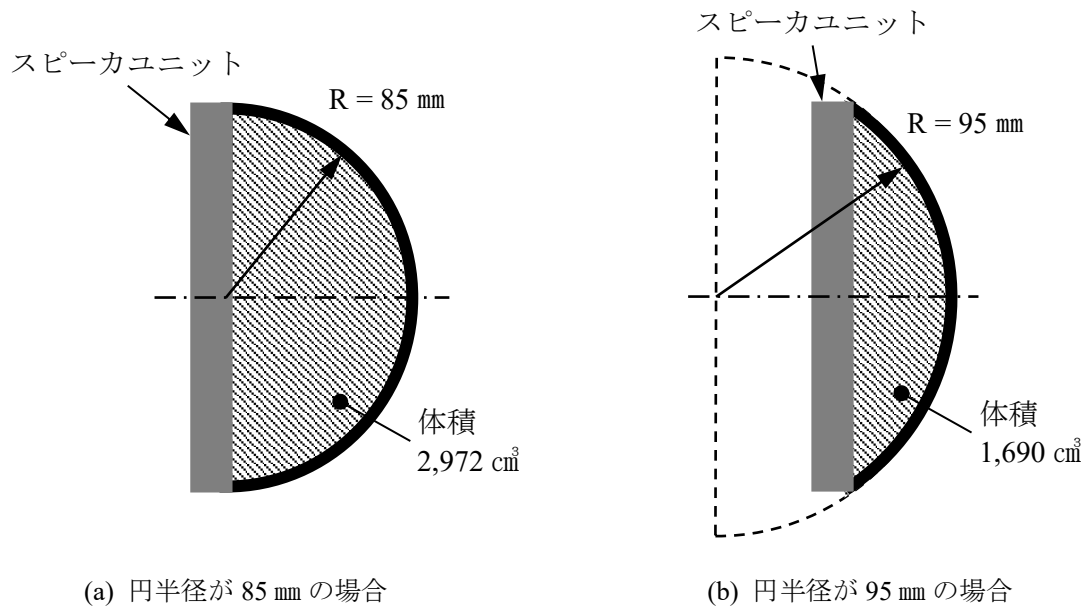


図 3.1 2 円半径の変化による形状の変化

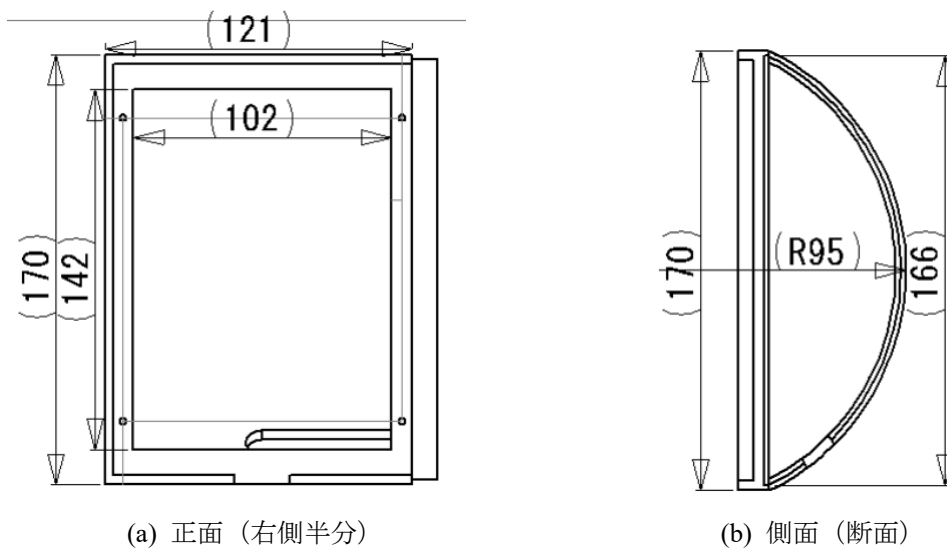


図 3.1 3 エンクロージャ（筐体）形状

② 吸音材

吸音材は音を減衰させる効果のある素材のことで、スピーカでは反響音の減衰や残響時間の調節等に用いられる。前述①の通り、スピーカユニットは後方（エンクロージャ側）に対しても音を放射することから、それらの音を吸収する目的でエンクロージャ内部に設置する。材質は密度 32 kg/m^3 のグラスウール（図 3.14）を使用し、厚さ 20 mm のものを最大 2 枚重ねた 40 mm とすることで、設計パラメータを設定した。



図 3.14 吸音材として用いたグラスウール

3.3.2 実験計画法による割り付け

実験は多元配置実験で行い、3.2 節で選出したスピーカユニットに加え、エンクロージャ、吸音材を含めた 3 因子、設計パラメータは実験規模と現状の設備・工具・材料で製作可能な設計パラメータ値を考慮して、表 3.8 に示す通りとした。従って、測定するヘッドレストスピーカは表 3.9 に示す全組合せ $5 \times 2 \times 3 = 30$ 仕様となる。

表 3.8 多元配置実験のパラメータ一覧

因子	単位	設計パラメータ（水準）				
		1377	670	217	862	29
A:スピーカユニット	試作 No.	1377	670	217	862	29
B:エンクロージャ（筐体）	mm (背面 R)	85	95	—	—	—
C:吸音材	mm (厚さ)	0	20	40	—	—

表 3.9 実験スピーカ組合せ一覧

サンプル No.	スピーカユニット No.	エンクロージャ (筐体) 背面 R サイズ [mm]	吸音材厚さ [mm]
1	1377	85	0
2	1377	85	20
3	1377	85	40
4	1377	95	0
5	1377	95	20
6	1377	95	40
7	670	85	0
8	670	85	20
9	670	85	40
10	670	95	0
11	670	95	20
12	670	95	40
13	217	85	0
14	217	85	20
15	217	85	40
16	217	95	0
17	217	95	20
18	217	95	40
19	862	85	0
20	862	85	20
21	862	85	40
22	862	95	0
23	862	95	20
24	862	95	40
25	29	85	0
26	29	85	20
27	29	85	40
28	29	95	0
29	29	95	20
30	29	95	40

3.3.3 測定方法

本実験における実験環境を図 3.15 に示す。スピーカサンプルの測定は、暗騒音の少ない防音室で行った。防音室内に自動車用座席シートを用意し、ユニット、エンクロージャ、吸音材を使用してスピーカサンプルを組み立てた後、座席シートに設置した。実験の音量は固定とし、ピンクノイズをスピーカ（片側のみ）より出力して、A 特性音圧レベル 65 dB になるよう騒音計を用いて調整した。測定は使用するスピーカユニットの想定している使用方法に合わせて、スピーカユニットの中心の表面から 10 cm の距離にマイクロホン（Brüel & Kjaer, 4190）を置き、周波数範囲：10～40k Hz のスイープ音を印加して、その時の周波数応答特性、および、ステップ応答を記録した。



図 3.15 実験環境

3.3.4 測定結果の解析

多元配列実験により得られた 30 種類のサンプルの周波数応答特性 (f) , および、過渡応答 (ステップ応答) 特性 (SR) の測定結果に対し、それぞれを目的変数に、また、各設計パラメータ (因子) を説明変数として重回帰分析により各々の関係式 (回帰式) を求め、因子の主効果と交互作用を算出した。ここで、連続値である周波数応答に対する因子効果の算出は、測定時の周波数分解能 (測定器に依存: 10 ~ 40k Hz 範囲で 577 点) , 過渡応答は時間分解能 (測定器に依存: -0.1 ms ~ 7 ms 範囲で 681 点) ごとに重回帰分析により回帰式を求め、これらを繋いで応答特性とする方法とした。

なお、各式の回帰係数 (説明変数) において、有意でない (各特性値と各設計パラメータの相関関係が低い) 係数は効果がほとんどないと考え、回帰式から取り除いた。また、重回帰分析の回帰式の検定においては、周波数応答 575 式、過渡応答 681 式の決定係数が平均 0.856, 0.872 と十分な精度であったことを確認した。

以上の結果より得られた交互作用を含んだ周波数応答特性の回帰係数を表 3.10、過渡応答特性の回帰係数を表 3.11 に、周波数応答特性 1k Hz、過渡応答 2 ms の回帰式を代表として式 (3.6)、式 (3.7) 示す。

$$\begin{aligned}
 f_{(1kHz)} = & 64.0 - 0.283x_A - 0.767x_B - 0.267x_C + 3.10x_D + 0.118x_E + 0.172x_F \\
 & + (-1.67x_F^2 - 1.11x_Ax_E - 4.22x_Bx_E + 2.22x_Cx_E - 41.1x_Dx_E \\
 & - 2.92x_Ex_F + 77.1x_Ax_F + 85.8x_Bx_F + 37.9x_Cx_F + 26.7x_Dx_F \\
 & - 1.31x_Ax_F^2 - 1.54x_Cx_F^2 - 0.60x_Dx_F^2 - 0.29x_Ex_F^2 \\
 & + 0.03x_Fx_F^2) \times 10^{-3}
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

$$\begin{aligned}
 SR_{(2ms)} = & 0.695 - 0.247x_A - 0.621x_B - 0.268x_C - 0.339x_D - 0.007x_E - 0.010x_F \\
 & + (-0.019x_F^2 + 3.66x_Ax_E + 6.97x_Bx_E + 4.11x_Cx_E + 3.76x_Dx_E \\
 & + 0.12x_Ex_F - 1.85x_Ax_F - 1.65x_Bx_F - 1.56x_Cx_F - 1.25x_Dx_F) \times 10^{-3} \\
 & + (1.21x_Ax_F^2 + 1.77x_Bx_F^2 - 0.02x_Cx_F^2 + 1.90x_Dx_F^2) \times 10^{-5}
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

- x_A : スピーカユニット No.670 の時に 1, それ以外は 0 を代入,
 x_B : スピーカユニット No.217 の時に 1, それ以外は 0 を代入,
 x_C : スピーカユニット No.862 の時に 1, それ以外は 0 を代入,
 x_D : スピーカユニット No.29 の時に 1, それ以外は 0 を代入,
 x_E : エンクロージャ背面 R サイズ [mm],
 x_F : 吸音材の厚さ [mm]

表 3.10 (3) 各設計パラメータ (因子) の回帰係数【周波数応答】

Table with columns for frequency [Hz] and various parameters (A, B, C, D, E, F, F^2, AxE, BxE, CxE, DxE, ExF, AxF, BxF, CxF, DxF, AxF^2, BxF^2, CxF^2, DxF^2, ExF^2) and rows for regression coefficients and determination coefficients. The table contains 44 columns and 50 rows of data.

表 3.10 (7) 各設計パラメータ (因子) の回帰係数【周波数応答】

周波数 [Hz]	A	B	C	D	E	F	F ²	A×E	B×E	C×E	D×E	E×F	A×F	B×F	C×F	D×F	A×F ²	B×F ²	C×F ²	D×F ²	E×F ²	定数項	決定 係数	
	SP670	SP217	SP862	SP29	筐体 背面 R	吸音厚	吸音厚 ²	SP670 × 筐体 背面 R	SP217 × 筐体 背面 R	SP862 × 筐体 背面 R	SP29 × 筐体 背面 R	筐体 背面 R × 吸音厚	SP670 × 吸音厚	SP217 × 吸音厚	SP862 × 吸音厚	SP29 × 吸音厚	SP670 × 吸音厚 ²	SP217 × 吸音厚 ²	SP862 × 吸音厚 ²	SP29 × 吸音厚 ²	筐体 背面 R × 吸音厚 ²			
単位	×1						×10 ⁻³															×1		
20480.0	-14.70	-14.10	2.53	-32.10	-0.024		0.01	74.4	77.8	-40	321							-0.36	-0.54	-0.52	2.38		69.6	0.89
20777.9	-16.30	-9.29	-3.05	-22.50	-0.051	0.040	-0.37	100	45.6	18.9	234							-0.01	-1.07	-0.7	1.5		71.0	0.87
21080.1	-6.48	-6.94	-1.48	-3.54	-0.100		-0.07											-0.73	-0.45	-0.33	2.09		75.8	0.84
21386.7	-13.20	-23.90	-10.80	-35.50	-0.287	-0.066		48.9	149	86.7	350		35.8	60.4	35	133							92.9	0.90
21697.8	-34.00	-28.30	-19.00	-27.40	-0.223	-0.275	5.06	253	162	136	277		306	296	319	270		-5.17	-5.92	-6.44	-4		88.3	0.96
22013.4	-35.40	-23.10	-32.40	-25.90	-0.137	0.183	4.85	252	72.2	259	256	-5.03	289	263	341	253		-4.71	-5.5	-6.58	-3.81		81.9	0.98
22333.6	-27.90	-25.90	-24.90	-37.70	-0.253	0.435	-11.5	161	75.6	173	407	-7.83	320	216	309	237		-5.92	-5.31	-6.65	-4.19	0.19	92.1	0.98
22658.4	-31.20	-68.70	-20.30	-16.10	-0.139	-0.048	2.15	241	592	152	236							-0.26	-1.85	-1.55	-1.05		77.9	0.98
22988.0	-18.50	-47.80	-31.00	6.66	0.001	-0.052	1.4	106	370	261	-4.44												64.7	0.96
23322.4	-9.74	-36.10	-26.50	-27.70	-0.358	-0.062	-9.9	20	276	236	379							0.65	1.33	-1.3	0.84	0.12	94.7	0.95
23661.6	-29.10	-20.30	-36.30	-61.60	-0.500	-0.362	-8.08	256	178	350	737		371	280	378	329		-7.58	-4.87	-9.87	-6.33	0.18	104.5	0.90
24005.8	0.72	24.00	-18.80	-33.10	-0.024	-0.394	8.35	-43.3	-256	184	389		388	313	437	295		-7.04	-5.58	-10.6	-4.65		57.8	0.74
24355.0	0.28	3.76	2.35	1.12		-0.053							105	85.8	3.33	72.5							51.8	0.56
24709.2	12.60	19.00	5.70	56.50	0.055	-1.970	37	-101	-149	-24.4	-588	22.1										-0.42	44.0	0.48
25068.6	58.20	70.50	38.50	129.00	0.615	-1.570	41.5	-598	-724	-368	-1380	17.7						1.28	1.66	-0.52	-1.81	-0.48	-9.5	0.63
25433.2	73.50	60.30	62.80	102.00	0.588	0.030		-750	-607	-618	-1060		5	-8.33	-62.1	-95							-10.0	0.72
25803.2	51.60	24.50	38.50	74.50	0.427	0.052		-511	-238	-352	-747		-26.3	-42.9	-75.4	-115							2.0	0.72
26178.5	54.20	9.42	41.40	76.90	0.420		0.43	-567	-160	-407	-794							0.24	-0.09	-0.99	-2.18		4.3	0.86
26559.3	51.20	12.20	42.70	69.60	0.363	-0.393		-533	-236	-424	-763	4.12											15.5	0.85
26945.6	24.70	3.55	15.80	69.00	0.290			-264	-152	-146	-799												25.3	0.83
27337.5	23.90	-6.69	21.10	67.00	0.194	0.020		-273	-60	-219	-806												35.1	0.86
27735.2	25.60	-8.87	22.10	50.30	0.129	-0.506		-291	-52.2	-228	-637	5.78											41.2	0.88
28138.6	16.60	-22.40	10.60	3.37	0.166		-0.14	-214	108	-119	-158							0.43	0.32	-0.55	3.57		39.1	0.89
28547.9	10.40	-30.00	18.60	-30.20	0.100		-0.18	-150	200	-218	194							0.65	-0.52	0.04	3.49		46.3	0.89
28963.1	2.22	-29.30	7.79	-55.30	0.027		-0.09	-60	196	-91.1	461							0.07	-0.54	-0.71	3.04		52.4	0.92
29384.4	-3.64	-18.20	5.35	-57.40	-0.011	0.076	-1.2	7.78	77.8	-63.3	468							0.29	-1.38	-0.45	2.93		54.8	0.95
29811.8	0.67	-24.30	6.14	-3.84	-0.029		4.8	-32.2	113	-61.1	-137							0.07	-0.69	-0.47	2.71	-0.06	56.9	0.97
30245.4	-7.20	-30.30	-0.99	16.80	-0.091			62.2	148	13.3	-338												61.1	0.96
30685.3	-1.12	-19.10	0.61	-12.10	-0.117																		64.1	0.95
31131.7	-1.53	-20.50	6.34	13.50	-0.081	0.003	-6	-13.3	36.7	-80	-257		5.42	38.8	-18.8	-81.3					0.06		62.3	0.96
31584.5	-3.54	-15.30	-1.50	-8.55	-0.072	0.014							4.17	25.4	-17.9	-133							61.8	0.92
32043.9	-2.96	-15.10	-0.03	-6.76	-0.108	0.076	-1.23						-11.7	26.3	-49.2	-112							63.3	0.93
32510.0	7.74	-2.39	15.70	21.90	0.110	0.074	-1.09	-92.2	-128	-157	-288		-22.9	10	-36.7	-107							41.6	0.95
32982.8	18.40	3.79	33.70	21.50	0.132	0.037		-182	-162	-330	-273		-19.2	-26.7	-41.3	-89.6							37.5	0.95
33462.6	2.93	-18.50	14.60	12.70	0.072	0.052	-0.76	-8.89	77.8	-122	-190		7.08	-12.9	-7.92	-68.3							42.8	0.97
33949.3	-7.86	-23.20	2.35	1.38	-0.130	0.012		104	100	8.89	-93.3		20.8	7.92	-5.42	-60							61.3	0.97
34443.1	-8.44	-5.40	-1.05	7.74	-0.051	0.036	-1.01	100	-120	33.3	-178		24.6	37.9	9.58	-47.1							53.8	0.97
34944.1	0.23	-15.50	1.70	-8.87	-0.110																		57.6	0.94
35452.4	0.12	-15.30	1.72	-9.13	-0.110																		56.6	0.94
35968.0	-6.12	-2.54	3.47	3.69	-0.056	0.014		63.3	-137	-28.9	-163												52.8	0.97
36491.2	-6.28	0.66	-0.49	-1.58	0.017		3.88	57.8	-168	3.33	-118											-0.04	48.1	0.98
37022.0	-6.70	-6.45	-3.27	-7.42	-0.021	0.023	2.67	57.8	-71.1	30	-47.8						0.32	-0.58	-0.16	0.14	-0.03	51.2	0.99	
37560.5	-1.26	-11.60	-0.43	-11.00	-0.048	0.017	-0.34										0.31	-0.41	0.01	0.41			52.4	0.99
38106.8	-5.88	-9.78	-3.19	-16.00	-0.069	0.023	2.29	54.4	7.78	33.3	71.1						0.48	-0.48	-0.04	0.66	-0.03	51.4	0.99	
38661.1	-6.08	-12.10	-3.40	-21.00	-0.108	0.019	2.49	60	54.4	35.6	134						0.38	-0.61	0.07	0.91	-0.03	52.1	0.98	
39223.4	-5.66	-11.60	-1.19	-23.50	-0.081	0.028	5.13	50	66.7	10	163						0.2	-1.14	-0.19	1.02	-0.06	46.8	0.98	
39793.9	-4.09	-5.29	5.26	-26.60	-0.032		4.9	35.6	-1.11	-48.9	184						-0.1	-1.1	-0.65	0.96	-0.05	40.7	0.97	

表 3.17 (7) 各設計パラメータ (因子) の回帰係数【過渡応答】

Table with 20 columns (A-F, F^2, AxE, BxE, CxE, DxE, ExF, AxF, BxF, CxF, DxF, AxF^2, BxF^2, CxF^2, DxF^2, ExF^2, 定数項, 決定係数) and 60 rows (5.500 to 6.406). Includes sub-headers for time [ms] and unit.

これらの回帰式に基づいて算出した各設計パラメータの特性感度を図 3.16, 図 3.17 に示す。各主効果図は水準を一つ上げた場合（エンクロージャ背面 R サイズ：85 → 95 mm, 吸音材の厚さ：0 → 20, または, 20 → 40 mm）の効果量を表す。図 3.16 より, 周波数応答特性においては「エンクロージャ背面 R サイズ」, および, 「吸音材の厚さ」が増すと 300 ~ 500 Hz の音圧が低下する傾向で, さらに 1k ~ 10k Hz で大きな増減が見られる。また, 「吸音材の厚さ」を 20 mm 増加させると 90 ~ 300 Hz の音圧を平均 0.5 dB 増加させることが分かる。残響特性を表すステップ応答においては, 図 3.17 に示す通り「エンクロージャ背面 R サイズ」の影響はあまり大きくないが, 「吸音材の厚さ」は残響特性に大きな影響を及ぼしている。この様に, エンクロージャサイズ・吸音材量と音質の関係は複雑であることがわかった。

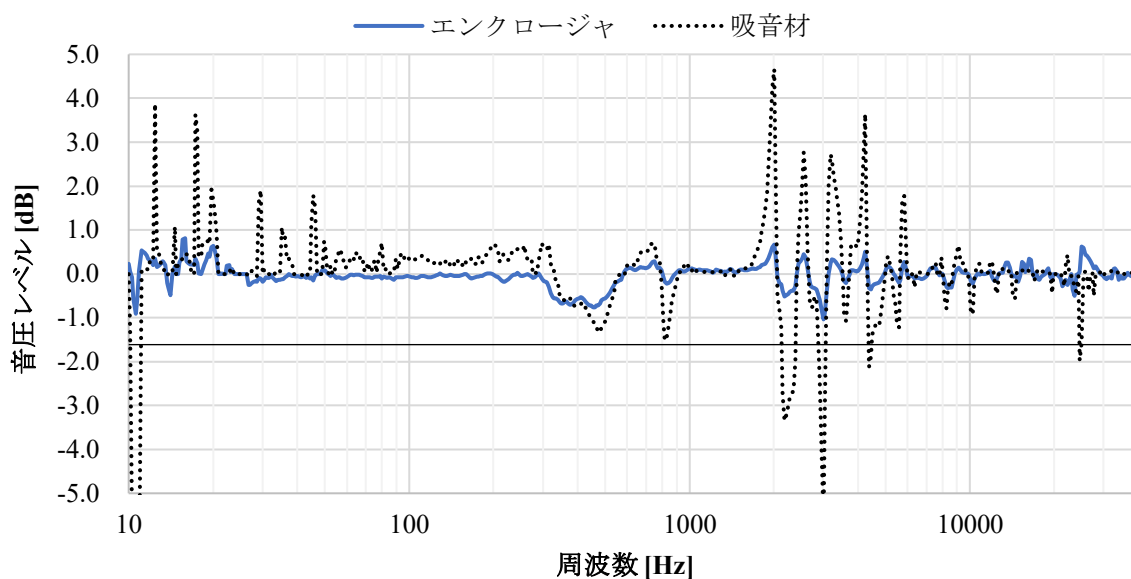


図 3.16 エンクロージャ・吸音材の主効果（周波数応答）

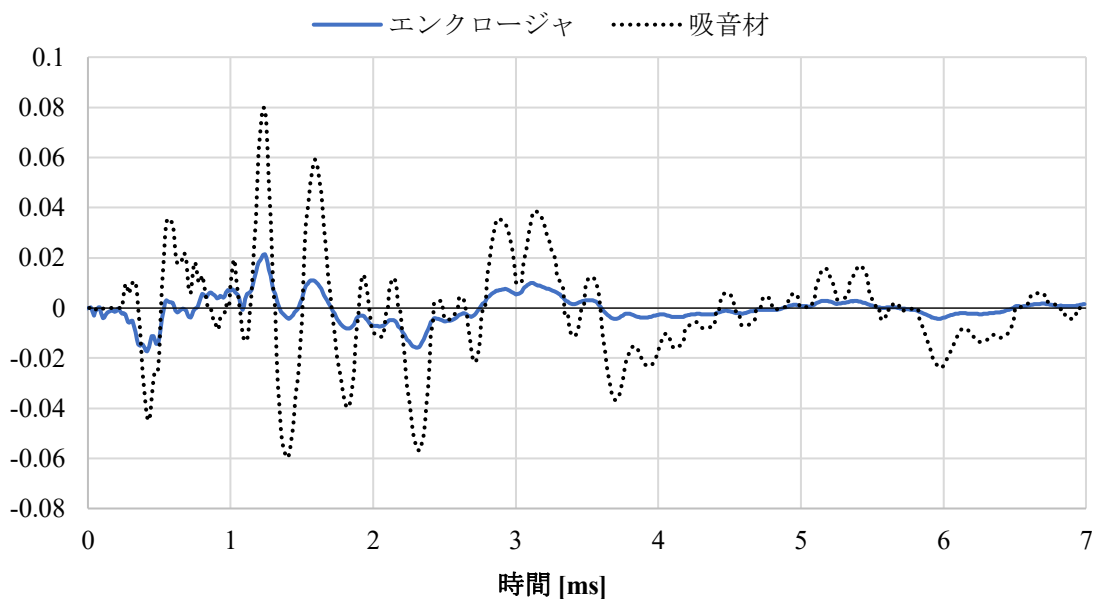


図 3.17 エンクロージャ・吸音材の主効果（過渡応答（ステップ応答））

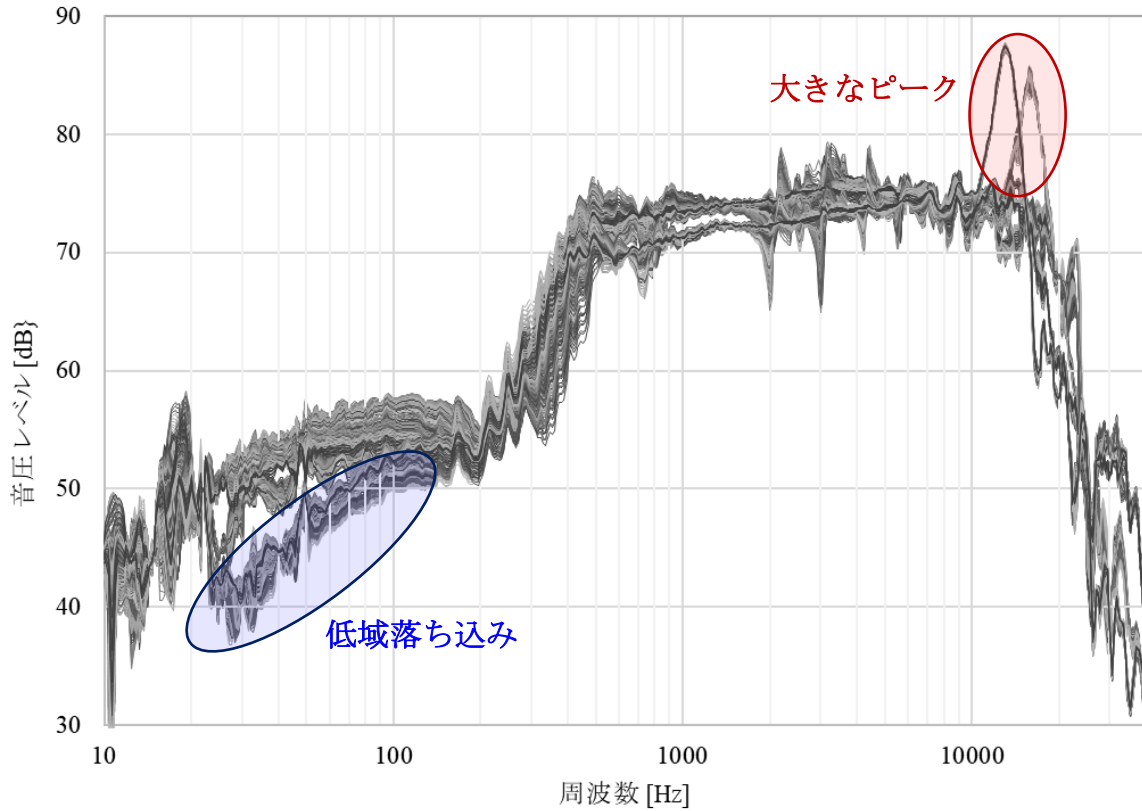
3.3.5 スピーカシステムの特性予測

前節（3.3.4 節）で得られた回帰式（周波数応答 575 式，過渡応答 681 式）を元に，表 3.12 に示す各設計パラメータ値の全組合せ仕様（スピーカユニット 5 種類× エンクロージャ 9 種類× 吸音材 11 種類）495 通りの特性値予測を行った。

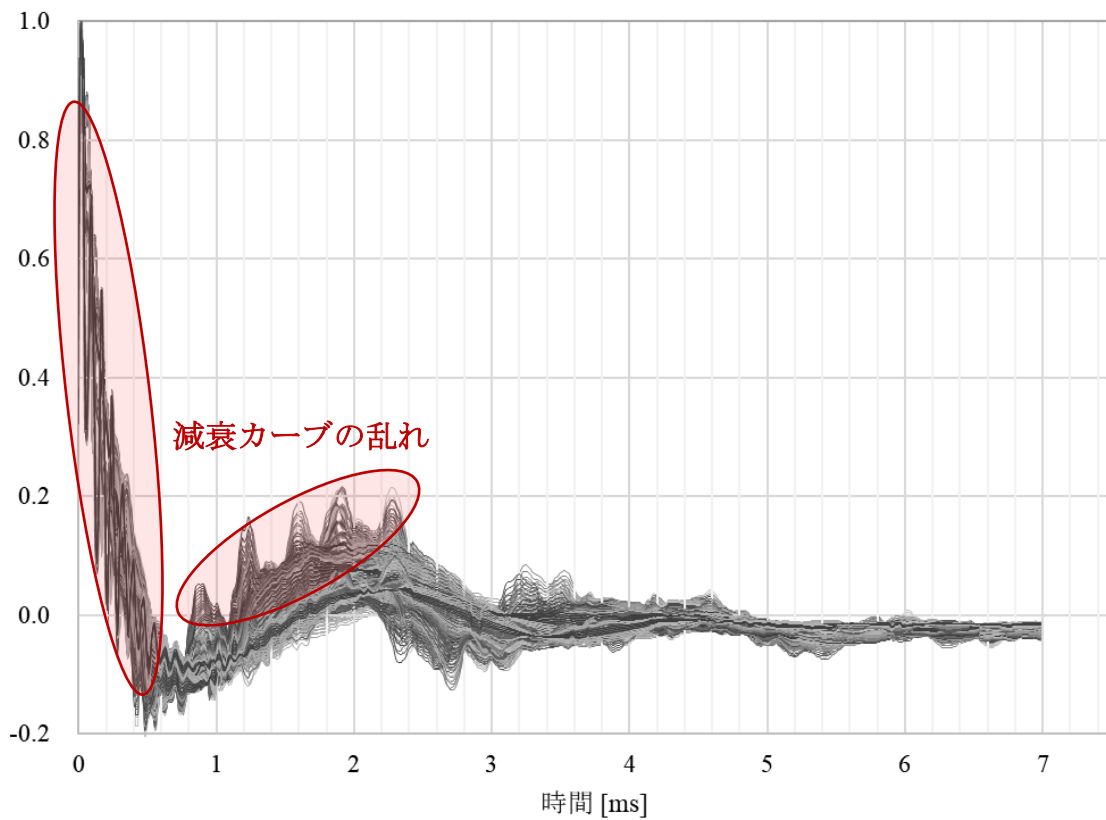
表 3.19 ヘッドレストスピーカ特性値予測の仕様一覧

因子	単位	設計パラメータ（水準）										
		1377	670	217	862	29	—	—	—	—	—	—
A:スピーカユニット	試作 No.	1377	670	217	862	29	—	—	—	—	—	—
B:エンクロージャ	mm (背面 R)	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95
C 吸音材	mm (厚さ)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	—	—

図 3.18 にスピーカ 495 種類全ての周波数応答特性および過渡応答特性を重ねて表示したグラフを示す。周波数応答特性に着目すると，エンクロージャ化により改善を期待した 1k Hz 以下の周波数の音圧レベルが全体的に向上している。詳細に見ると，スピーカユニット単体に比べて 500 ~ 1.6k Hz の広い範囲で改善されたことがわかる。また，評価項目別にそれぞれ確認すると，30 ~ 200 Hz において音圧レベルの落ち込みが生じているスピーカがあることわかる。また，スピーカユニットの最適化においても同様な現象が見られた 4k ~ 16k Hz の周波数において，大きなピークが生じているスピーカをいくつか確認した。また，過渡応答特性では，減衰カーブに大きな乱れを生じさせるスピーカが複数存在していることがわかった。



(a) 周波数応答特性



(b) 過渡応答特性

図 3.18 応答特性グラフ (全 495 種類を重ねて表示)

3.3.6 スピーカシステムの分類

3.3.5 節で予測した全 495 種類のヘッドレストスピーカの特徴について観察すると、類似するグループに別れる特性が見られたため、特徴別に分類を行った。分類にあたり、周波数応答特性、および、過渡応答特性に対する評価項目を設定した。

周波数応答特性の評価項目は、ヒトの可聴域が 20 ~ 20k Hz であること、および、スピーカの応答特性を考慮して、30 ~ 20k Hz を 6 帯域に分割した。周波数の分割は、30 ~ 200 Hz (低域)、200 ~ 500 Hz (低中域)、500 ~ 4k Hz (中域)、4k ~ 10k Hz (中高域)、10 k ~ 16k Hz (高域)、16k ~ 20k Hz (超高域) に設定し、それぞれの合成音圧値を評価した。加えて、30 ~ 20k Hz における応答グラフの滑らかさを表す平滑度を評価した。また、過渡応答特性における評価項目は、応答グラフと時間軸で囲まれた領域の面積で表される残響時間と、応答グラフの滑らかさを表す平滑度とした。これらの評価項目を表 3.13、図 3.19 に示す。

なお、本稿における合成音圧とは、対象帯域における全サンプリング点の合成された音圧レベルであり、各音のエネルギーを加算した合成音の音圧レベルを差す。各サンプル点における音圧レベルを L_i としたとき、式 3.8 で表される [35]。

$$\text{合成音圧： } L = 10 \log_{10} \left(\sum_i 10^{\frac{L_i}{10}} \right) \quad (3.8)$$

$$\text{平滑度： } S = \frac{1}{n} \sum_i (\hat{x}_i - x_i) \quad (3.9)$$

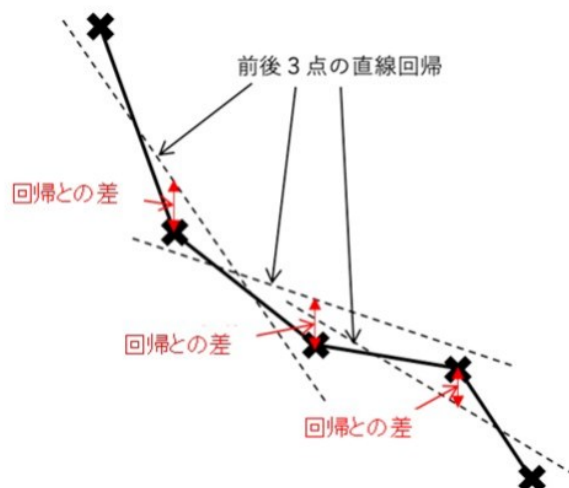
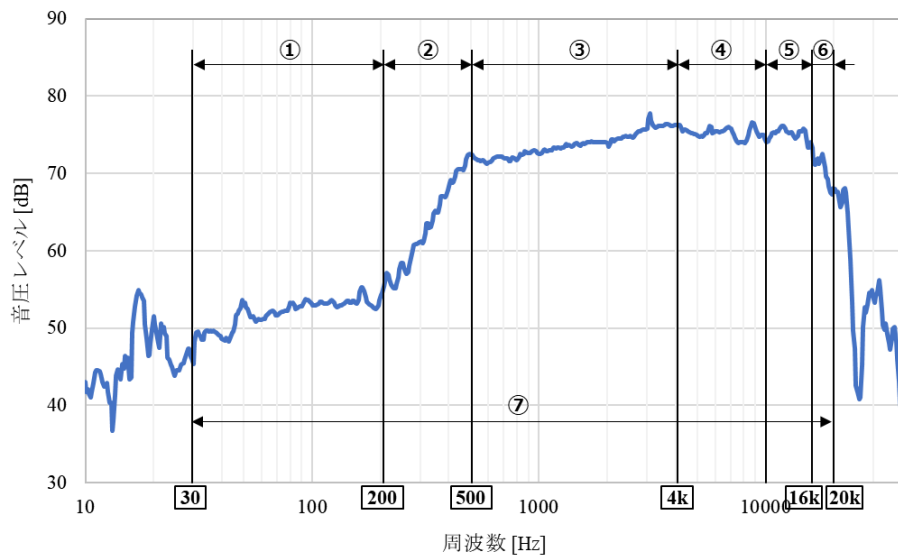


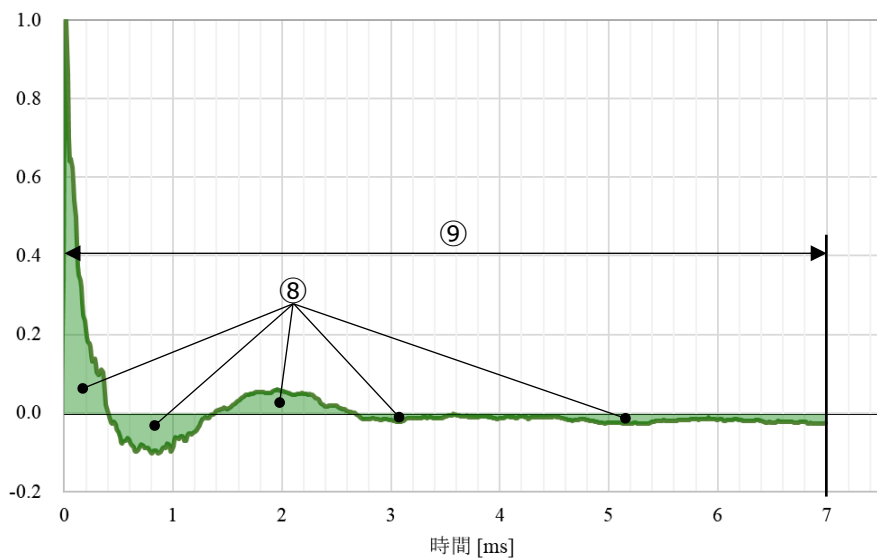
図 3.19 平滑度計算における回帰方法

表 3.20 周波数応答と過渡応答の評価項目

評価項目	評価特性		範囲
周波数応答	① SP_1	30~200 Hz の合成音圧	30~200 Hz
	② SP_{lm}	200~500 Hz の合成音圧	200~500 Hz
	③ SP_m	500~ 4k Hz の合成音圧	500~ 4k Hz
	④ SP_{mh}	4k~10k Hz の合成音圧	4k~10k Hz
	⑤ SP_h	10k~16k Hz の合成音圧	10k~16k Hz
	⑥ SP_{hh}	16k~20k Hz の合成音圧	16k~20k Hz
	⑦ SM_{FR}	30~20k Hz の平滑度 (曲線の滑らかさ)	30~20k Hz
過渡応答	⑧ A	時間軸と応答曲線で囲まれた面積 (残響)	0~7 ms
	⑨ SM_{SR}	過渡応答曲線の平滑度 (曲線の滑らかさ)	0~7 ms



(a) 周波数応答特性



(b) 過渡応答特性

図 3.20 応答特性の評価項目

以上の9種類の評価項目について、495種類のヘッドレストスピーカごとに値を算出し、特徴を判断し易くするために主成分分析を用いて次元削減を行った。分析結果を表3.14、図3.21に示す。第3主成分までの累積寄与率が81.8%であることから、第3主成分までを扱うこととした。

これらをもとに、階層型クラスタリング手法のk-meansにより4つのクラスタに分類した。その後、各クラスタの重心に近い仕様をそれぞれの代表仕様として、表3.15に示す4タイプを選定した。主成分得点による散布図とクラスタによる分類結果を図3.22に示す。

表 3.2 1 主成分分析結果

変数名		主成分 1	主成分 2	主成分 3	累積寄与度
固有値		4.429	1.517	1.419	
寄与率		49.2 %	16.9 %	15.8 %	
累積寄与率		49.2 %	66.1 %	81.8 %	
① SP _l	30～200 Hz の音圧	-0.902	0.123	0.248	89.0
② SP _{lm}	200～500 Hz の音圧	-0.290	0.047	0.745	64.1
③ SP _m	500～ 4k Hz の音圧	-0.918	-0.223	-0.271	96.5
④ SP _{mh}	4k～10k Hz の音圧	-0.088	0.764	-0.490	83.2
⑤ SP _h	10k～16k Hz の音圧	0.968	0.085	0.185	97.9
⑥ SP _{hh}	16k～20k Hz の音圧	-0.172	-0.684	-0.554	80.5
⑦ SM _{FR}	30～20kHz の平滑度	0.295	-0.525	0.055	36.5
⑧ A	グラフ面積 (残響)	-0.869	-0.215	0.342	91.9
⑨ SM _{SR}	過渡応答曲線の平滑度	0.933	-0.263	0.166	96.7

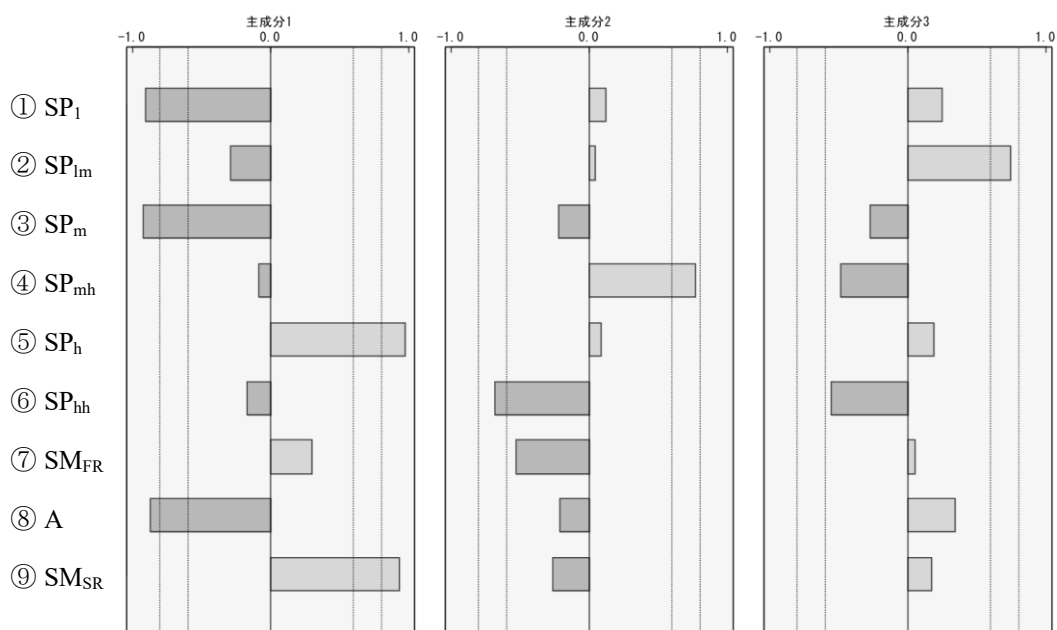


図 3.2 1 各主成分の主成分負荷量

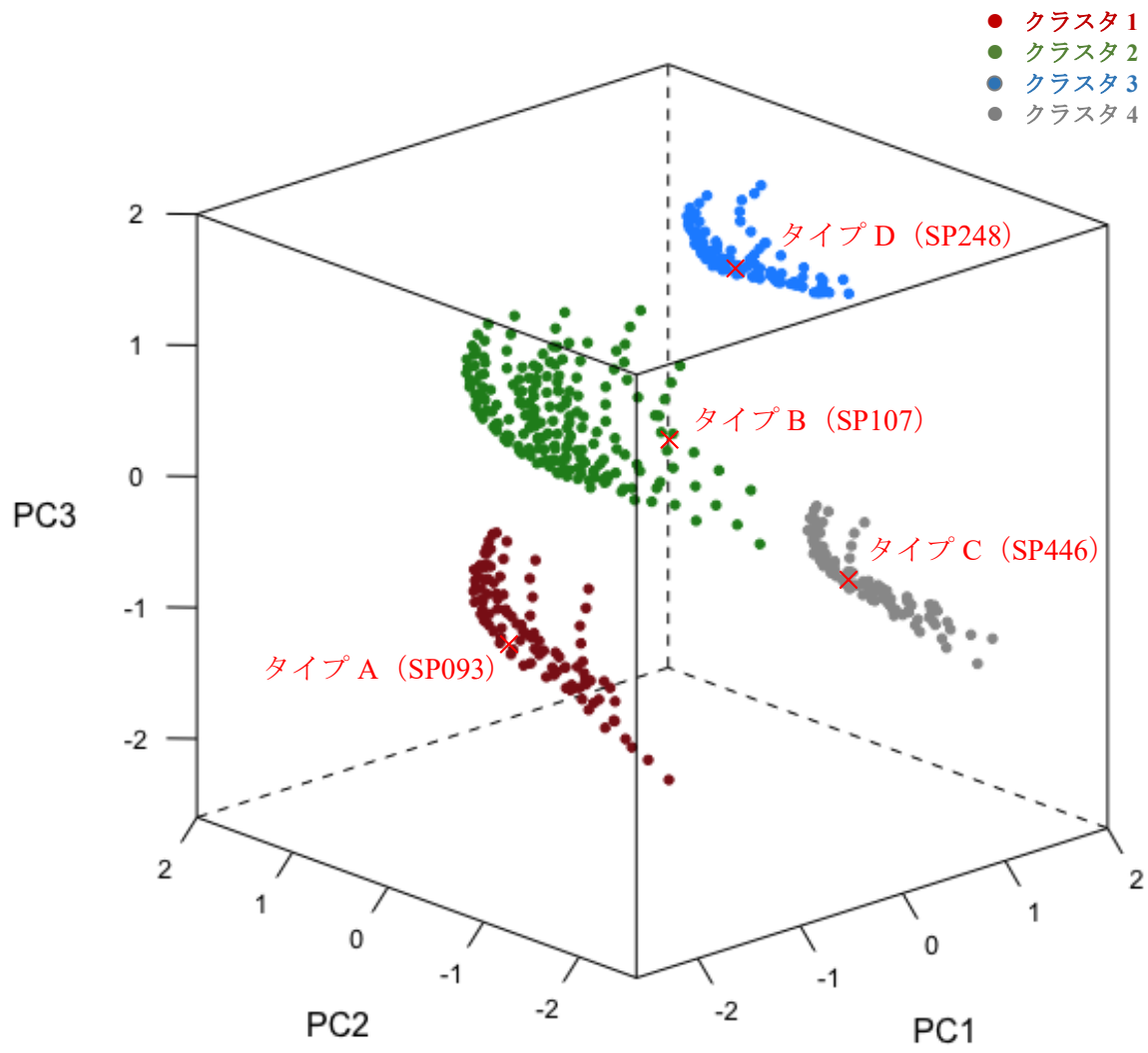


図 3.2 2 主成分得点の散布図

選定した4タイプをスピーカの仕様について表 3.15 に示す。また、それぞれをタイプ A～D とし、その特徴についての考察を表 3.13 に、応答特性を図 3.23、図 3.24 に示す。

表 3.2 2 選定したヘッドレストスピーカの仕様

試作スピーカ No.			SP093	SP107	SP248	SP446	
実験スピーカ No.			1377	670	29	446	
スピーカユニット番号			89	92	90	90	
背面 R [mm]			40	0	20	20	
吸音材厚さ [mm]			1377	670	29	446	
周波数 応答特性	①	SP _l	30～200 Hz の合成音圧	73.1	77.0	72.3	71.6
	②	SP _{lm}	200～500 Hz の合成音圧	82.9	82.7	84.1	83.3
	③	SP _m	500～ 4k Hz の合成音圧	95.5	95.6	93.6	94.9
	④	SP _{mh}	4k～10k Hz の合成音圧	93.2	92.0	92.4	92.0
	⑤	SP _h	10k～16k Hz の合成音圧	90.1	88.5	97.9	93.4
	⑥	SP _{hh}	16k～20k Hz の合成音圧	83.0	79.1	74.6	91.9
	⑦	SM _{FR}	30～20k Hz の平滑度	0.098	0.175	0.124	0.108
過渡 特性	⑧	A	グラフ面積 (残響)	0.308	0.479	0.306	0.332
	⑨	SM _{SR}	過渡応答曲線の平滑度	0.0007	0.0008	0.0023	0.0020
主成分得点	第1主成分 (PC1)		-0.116	-0.844	1.477	0.659	
	第2主成分 (PC2)		1.557	-1.098	0.866	-1.174	
	第3主成分 (PC3)		-1.681	0.714	0.906	-0.626	

表 3.2 3 選定した4タイプの特徴

タイプ	試作 スピーカ No.	特徴	
		周波数応答特性	過渡応答特性 (残響)
A	SP093	500～20k Hz フラット	残響少なくスムーズに収束
B	SP107	30～500 Hz 豊か	残響多い (後半に乱れあり)
C	SP248	13k Hz 付近にピークあり	残響少ない (前半に乱れあり)
D	SP446	16k Hz 付近にピークあり	残響少し多い (前半に乱れあり)

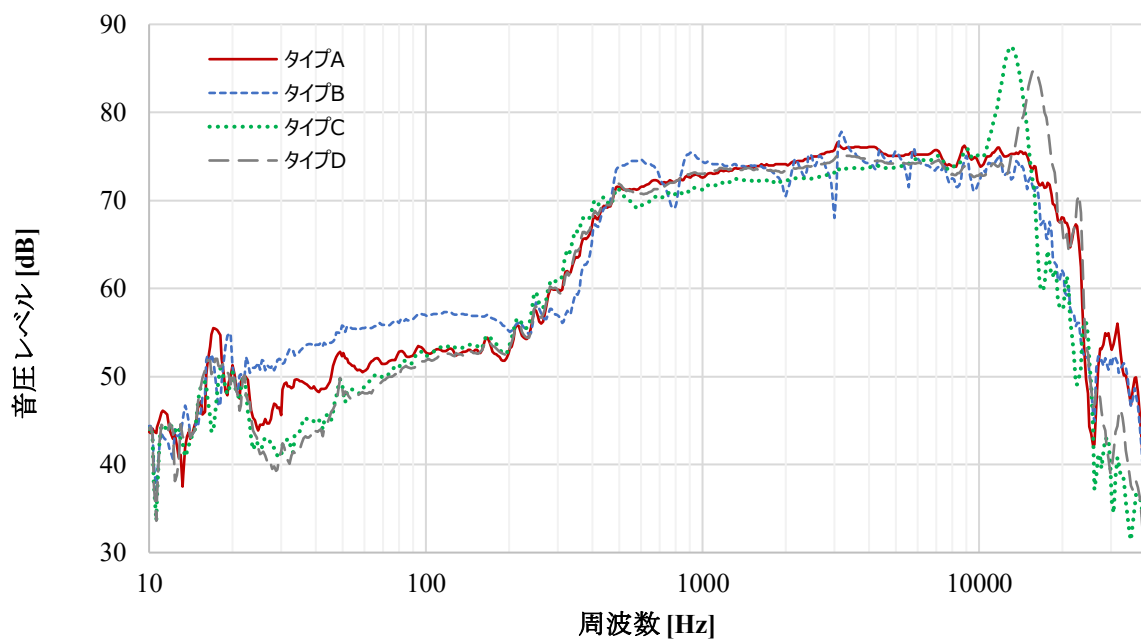


図 3.2.3 選定した4タイプの周波数応答特性

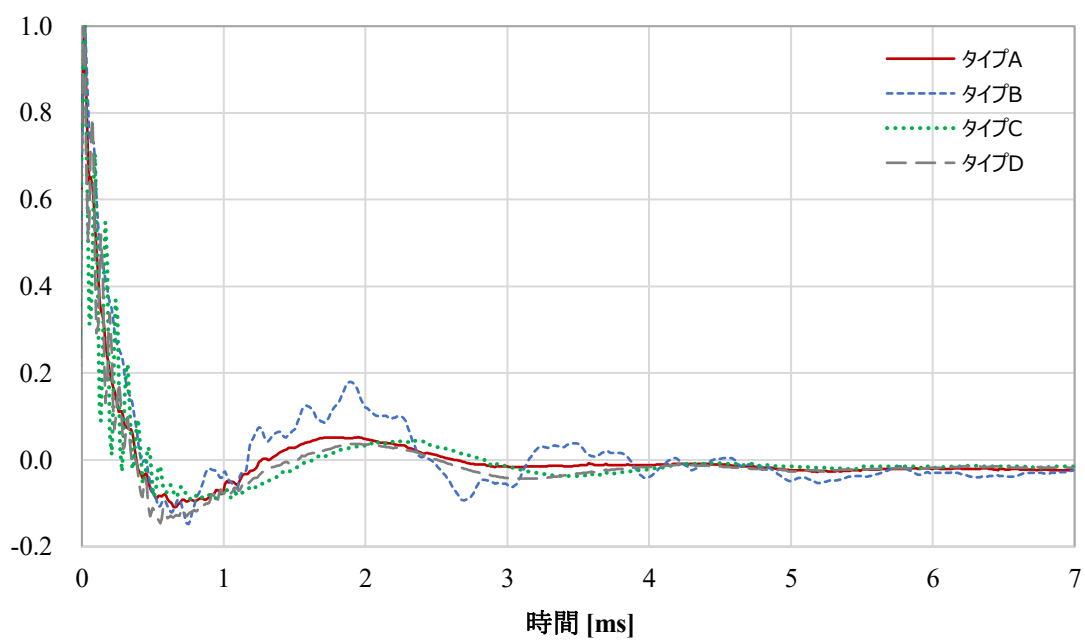


図 3.2.4 選定した4タイプの過渡応答特性 (残響)

3.4 まとめ

本章では、第2章で明らかとなった標準ドアスピーカに対する優位性を高めることを目的に、主要素であるスピーカユニットの特性の最適化と、エンクロージャ・吸音材を用いたスピーカシステム化による音質の改善を試行した。

はじめに、スピーカユニットの設計変数の各効果を実験計画法により求め、各変数を組み合わせた時の周波数毎の重回帰式を導出して特性を予測した。その後、音質評価基準を設定してAHPにより重み付けを行い、各設計パラメータの適切な組合せの選択を多目的最適設計問題として、これを重み付けによる単一目的最適設計問題へ変換し、評価基準をバランス良く満たすスピーカユニットを4800仕様の中から5仕様を選定した。

次に、周波数1k Hz以下の再生能力が不足していたため、エンクロージャによる改善を行った。選定したスピーカユニットとエンクロージャ・吸音材の設計変数を組み合わせた495仕様について、同様に実験計画法と重回帰分析により音響特性を予測し、500～1k Hzの再生能力が改善できたことを確認した。

さらに、予測した495仕様の周波数応答特性と過渡応答特性をもとに、主成分分析とクラスタ分析を用いて解析した結果、特徴別に4タイプに分類できることがわかった。そして、各タイプの代表仕様を選定した。

以上により、スピーカユニットの特性の最適化とエンクロージャ・吸音材を用いたスピーカBOX化(スピーカシステム化)により、ヘッドレストスピーカの音質改善が実現された。

以上により、選定した4タイプのヘッドレストスピーカの中で最適な仕様を選出することを目的に、次章では主観評価による比較実験を実施する。

第4章 カーオーディオの評価に適した評価語の選出

4.1 はじめに

主観評価において、評価語の選定は特に重要である。音質を評価する語は古くから多くの研究 [36] [37] [38]が行われており、音楽ホールやホームオーディオ再生音の評価においては、「鋭い」、「粗い」、「濁った」などの語を用い、その印象を主観評価実験によって数量化する方法が採られている [39]。カーオーディオの音質評価の研究においても、これらの評価語を代用している場合が多く [14] [40] [41]、第2章の主観評価実験においても、これらと同様に一般的な音質評価語を用いた。しかしながら、カーオーディオの聴取環境は、音楽ホールやホームオーディオなどに比べて、複雑な音響特性をもたらす極端に狭い車室内空間であること、および、運転タスクへの影響など、求められる音質に違いがあるため、そのまま代用できるとは考えにくい。したがって、カーオーディオの音質評価における適切な評価語を検討する必要がある。そこで、本章では、カーオーディオの音質評価に用いる適切な語の選出を行う。また、嗜好性が評価に最も大きく影響すると考えられるため、選出された評価語と嗜好性について統計的に因果関係を推論し、カーオーディオに求められる音質を明らかにする。

4.2 予備調査

カーオーディオの音質評価に適切な語の選出にあたり、まず初めに、幅広い多くの評価語候補から絞り込む方法として、リサーチ会社の協力のもと、インターネットを利用したアンケートによる予備調査を実施した。

4.2.1 調査方法

予備調査の対象者は10～70代の男女計5,000人とした。調査に合わせて表4.1に示すスクリーニングを行ない、職業(SC5)が「音響・オーディオ関連」、「マスコミ関係」、「コンサルティング会社・市場調査会社」の人は、意図的な回答を避けるために対象外とした。また、運転免許(SC6)を持たない人、および、自動車の乗車頻度(SC7)が「1年に数日程度」、あるいは、「まったく乗らない」と回答した人は、カーオーディオの聴取に不慣れと思われるために対象外とした。また、音楽への興味度合いが評価語に影響すると考え、「楽器がある程度演奏できる」(SC10)と回答した人を「楽器経験者」、**「オーディオの関心度」**(SC11)において表4.2に示す質問のいずれかに対して「あてはまる」、または、「ややあてはまる」と回答した人を「オーディオ愛好家」、どちらにも属さない人を「一般回答者」と定義して評価語選別の参考とした。

調査で使用する語は、幅広い評価語候補を用意するために、オーディオ雑誌、先行研究

[37][38][39], 参考書籍 [42], および, 広辞苑 [43]を参考に, ブレインストーミングにより表 4.3 に示す 997 語を抽出した. その後, これらの語について, 「カーオーディオの音質を評価する言葉として, どの程度ふさわしいと思うか」の問いに対し, 「非常にふさわしい」: 5点, 「ふさわしい」: 4点, 「どちらともいえない」: 3点, 「ふさわしくない」: 2点, 「全くふさわしくない」: 1点の5段階で回答させた.

表 4.1 スクリーニング項目

SC1	性別
SC2	年齢
SC3	住まい (都道府県)
SC4	結婚
SC5	職業 (11 種類)
SC6	運転免許 (有無)
SC7	車の乗車頻度 (5 種類)
SC8	車の使用目的 (5 種類)
SC9	所有車タイプ (10 種類)
SC10	楽器がある程度演奏できる (16 種類)
SC11	オーディオの関心度 (表 6.2 参照)

表 4.2 オーディオへの関心度に関する調査質問

1	「オーディオ」が趣味のうち, 上位 3 つに入る
2	「音楽鑑賞」が趣味のうち, 上位 3 つに入る
3	オーディオの音質にこだわりがある
4	オーディオ機器にお金をかけている
5	オーディオ系の雑誌を定期購読している

表 4.3 (1) 評価語候補

No.	評価語	No.	評価語	No.	評価語	No.	評価語	No.	評価語
1	愛くるしい	51	安全な	101	大げさな	151	か細い	201	凶悪な
2	愛らしい	52	安息な	102	オーソドックスな	152	かまびすしい	202	仰々しい
3	敢え無い	53	安定した	103	おおまかな	153	痒い	203	強固な
4	青臭い	54	安楽な	104	おかしな	154	か弱い	204	器用な
5	あからさまな	55	いい加減な	105	奥深い	155	軽い	205	強力な
6	明るい	56	言い難い	106	奥ゆかしい	156	軽々しい	206	強烈な
7	明るすぎる	57	言い辛い	107	惜しみない	157	軽やかな	207	極限の
8	飽き足りない	58	意外な	108	おしゃれな	158	かわいい	208	拒絶した
9	飽きっぽい	59	いかがわしい	109	遅い	159	かわいた	209	清らかな
10	明らかな	60	いかつい	110	おぞましい	160	かわいらしい	210	気弱な
11	悪質な	61	敵めしい	111	恐ろしい	161	変わった	211	嫌い
12	あくどい	62	生き生きした	112	穏やかな	162	感慨深い	212	ざらざらした
13	浅い	63	息苦しい	113	落ち着いた	163	頑固な	213	気楽な
14	あざとい	64	勇ましい	114	落ち着く	164	頑丈な	214	煌びやか
15	あさはかな	65	意地悪い	115	男っぽい	165	簡素な	215	きれいな
16	鮮やかな	66	忙しい	116	おとなしい	166	寛大な	216	金属性の
17	味気ない	67	痛々しい	117	大人びた	167	かん高い	217	緊張した
18	味わい深い	68	いたたまれない	118	おびただしい	168	感動する	218	緊張する
19	汗臭い	69	著しい	119	おぼろげ	169	簡便な	219	クールな
20	暖かい	70	一様な	120	おめでたい	170	気重い	220	臭い
21	温かい	71	一貫した	121	重い	171	気が知れない	221	くすぐったい
22	新しい	72	一般的な	122	思いも寄らない	172	気軽な	222	くだくだしい
23	暑い	73	愛おしい	123	重々しい	173	聞き苦しい	223	くだらない
24	厚い	74	いぶかしい	124	重苦しい	174	聞きづらい	224	屈強な
25	厚かましい	75	忌々しい	125	おもしろい	175	聞き取りやすい	225	屈託のない
26	暑苦しい	76	癒される	126	面白おかしい	176	ぎくしゃくした	226	くつろいだ
27	あっけない	77	卑しい	127	愚かな	177	ごちない	227	くどい
28	あっさりした	78	いやらしい	128	女っぽい	178	きざっぽい	228	暗い
29	あでやかな	79	異様な	129	温和な	179	ギスギスした	229	クラシックな
30	あどけない	80	色っぽい	130	快適な	180	気忙しい	230	暗すぎる
31	危ない	81	陰気くさい	131	輝かしい	181	規則正しい	231	クリアな
32	危なげない	82	胡散臭い	132	果敢な	182	汚い	232	狂おしい
33	危なっかしい	83	薄い	133	限りない	183	汚らしい	233	苦しい
34	あほらしい	84	薄気味悪い	134	画一的な	184	几帳面な	234	軽快な
35	あまい	85	薄っぺらな	135	革新的な	185	きつい	235	汚らわしい
36	あまずっぽい	86	疑わしい	136	香しい	186	気強い	236	気高い
37	怪しい	87	美しい	137	過酷な	187	気に入らない	237	けたたましい
38	あやふやな	88	うっとうしい	138	カサカサした	188	気にならない	238	けだるい
39	荒々しい	89	うつろな	139	がさつな	189	気になる	239	ケチな
40	粗い	90	うるさい	140	かすかな	190	気恥ずかしい	240	けっこうな
41	ありえない	91	麗しい	141	かすれた	191	気品がある	241	げげげしい
42	ありがたい	92	うれしくなる	142	固い	192	気まずい	242	下品な
43	ありきたりな	93	衛生的な	143	堅苦しい	193	決まりが悪い	243	煙い
44	ありふれた	94	エキゾチックな	144	型破りな	194	気味が悪い	244	陰しい
45	荒れた	95	えぐい	145	かっこいい	195	気難しい	245	元気な
46	淡い	96	えげつない	146	かっこわるい	196	きめこまかい	246	厳粛な
47	あわただしい	97	エネルギーな	147	かったるい	197	気持ちよい	247	健全な
48	哀れな	98	エレガントな	148	活動的な	198	気持ち悪い	248	幻想的な
49	安易な	99	円満な	149	悲しい	199	きゅうくつな	249	現代風な
50	安心する	100	大きい	150	悲しくなる	200	清い	250	厳密な

表 4.3 (2) 評価語候補

No.	評価語	No.	評価語	No.	評価語	No.	評価語	No.	評価語
251	濃い	301	雑な	351	丈夫な	401	静的な	451	正しい
252	恋しい	302	さっぱりしている	352	ショックな	402	正当な	452	だだっ広い
253	豪華な	303	さびしい	353	庶民的な	403	精密な	453	ただならぬ
254	高級感がある	304	寒い	354	白々しい	404	生命力のある	454	妥当な
255	神々しい	305	さやかな	355	じれったい	405	せかせかした	455	たどたどしい
256	好調な	306	ザラザラした	356	芯がある	406	せこい	456	楽くなる
257	公平な	307	ざらっぼい	357	辛気臭い	407	切実な	457	頼もしい
258	合理的な	308	さりげない	358	人工的な	408	絶対的な	458	タフな
259	小汚い	309	騒がしい	359	神聖な	409	絶大な	459	堪らない
260	小気味よい	310	爽やかな	360	しんどい	410	切ない	460	駄目な
261	こぎれい	311	残酷な	361	浸透力がある	411	狭い	461	容易い
262	心地よい	312	斬新な	362	芯のある	412	狭苦しい	462	多様な
263	心苦しい	313	残念な	363	シンプルな	413	せわしい	463	頼りない
264	心強い	314	幸せな	364	親密な	414	忙しない	464	だらしない
265	心細い	315	しおらしい	365	吸い込まれる	415	繊細な	465	怠い
266	心もとない	316	しがない	366	崇高な	416	鮮明な	466	たるんだ
267	心安い	317	刺激的な	367	未恐ろしい	417	善良な	467	他愛無い
268	快い	318	しけっぼい	368	すがすがしい	418	洗練された	468	単純な
269	心弱い	319	静かな	369	好かない	419	粗悪な	469	男性的な
270	小賢しい	320	自然な	370	好き	420	爽快な	470	単調な
271	こすい	321	したたか	371	少ない	421	造作ない	471	ダンディな
272	個性的な	322	しっかりした	372	優れない	422	壮絶な	472	淡泊な
273	こそばゆい	323	しつこい	373	透け透けた	423	騒々しい	473	団らんのでない
274	応えられない	324	しっとりした	374	すごい	424	相対的な	474	団らんのな
275	ごつい	325	しとやかな	375	健やかな	425	俗っぼい	475	弾力がある
276	こっけいな	326	しなやかな	376	すさまじい	426	束縛された	476	小さい
277	ごつごつした	327	しのびがたい	377	涼しい	427	そぐわない	477	近い
278	こっぴどい	328	慈悲深い	378	すっきりした	428	底知れない	478	近しい
279	事新しい	329	渋い	379	酸っぱい	429	そこはかとない	479	力強い
280	孤独な	330	しぶとい	380	素敵	430	底深い	480	力ない
281	事々しい	331	縮まらない	381	ストロングな	431	そそっかしい	481	知的な
282	子供っぼい	332	縮りのない	382	素直な	432	素っ気ない	482	緻密な
283	小生意気	333	しみったれ	383	すばやい	433	そつない	483	ちゃんちゃらおかしい
284	小憎らしい	334	地味な	384	すばらしい	434	ソフトな	484	注意深い
285	この上ない	335	じめじめした	385	図太い	435	素朴な	485	忠実な
286	好ましい	336	湿った	386	スポーティな	436	粗末な	486	抽象的な
287	古風な	337	湿っぼい	387	速やか	437	粗野な	487	調和した
288	細かい	338	しめやか	388	スムーズな	438	空々しい	488	チョロイ
289	細やか	339	充実感がある	389	ずるい	439	対照的な	489	痛快な
290	小難しい	340	集中できる	390	ずる賢い	440	大胆な	490	疲れない
291	こもった	341	自由な	391	鋭い	441	タイトな	491	疲れる
292	こよない	342	柔軟な	392	澄んだ	442	平らな	492	月並みな
293	ゴリゴリした	343	主観的な	393	正確な	443	耐え難い	493	拙い
294	ごろごろした	344	順調な	394	清潔な	444	堪えない	494	恙ない
295	怖い	345	順当な	395	精巧な	445	高い	495	慎ましい
296	さえた	346	情趣豊かな	396	正式な	446	逞しい	496	つまった
297	冴えない	347	上手な	397	誠実な	447	巧みな	497	つまらない
298	ささやかな	348	上等な	398	正常な	448	猛々しい	498	冷たい
299	差し出がましい	349	情熱的な	399	清楚な	449	ダサイ	499	つやっぼい
300	定かでない	350	上品な	400	贅沢な	450	多彩な	500	つやのある

表 4.3 (3) 評価語候補

No.	評価語	No.	評価語	No.	評価語	No.	評価語	No.	評価語
501	つややか	551	長たらしい	601	粘っこい	651	悲惨な	701	不用意な
502	強い	552	長細い	602	粘り強い	652	密やか	702	不要な
503	強気な	553	嘆かわしい	603	根深い	653	酷い	703	不良の
504	辛い	554	和やか	604	眠い	654	人恋しい	704	古い
505	つんざくような	555	名残惜しい	605	眠くなる	655	等しい	705	古臭い
506	手厚い	556	情けない	606	眠たい	656	人懐かしい	706	古めかしい
507	手痛い	557	なだらか	607	望ましい	657	人懐っこい	707	平易な
508	丁寧な	558	ナチュラルな	608	長閑な	658	響く	708	平穏な
509	手薄い	559	懐かしい	609	伸びやか	659	秘めやかな	709	閉鎖的な
510	デカイ	560	懐かしくない	610	鈍い	660	ひもじい	710	平坦な
511	手堅い	561	なっていない	611	呪わしい	661	冷やっこい	711	平凡な
512	手軽な	562	何気ない	612	呑気	662	冷やかな	712	平面的な
513	的確な	563	生暖かい	613	のんびりした	663	表情豊か	713	平和な
514	適切な	564	生新しい	614	馬鹿くさい	664	平等な	714	下手な
515	適当な	565	生意気	615	馬鹿高い	665	ひ弱な	715	朗らか
516	適度な	566	生々しい	616	馬鹿でかい	666	平たい	716	ぼけた
517	手厳しい	567	生温い	617	馬鹿な	667	広い	717	誇らしい
518	出鱈目な	568	艶めかしい	618	儂い	668	貧弱な	718	誇り高い
519	手近な	569	生易しい	619	馬鹿馬鹿しい	669	品のない	719	欲しい
520	手緩い	570	涙ぐましい	620	歯がゆい	670	貧乏くさい	720	保守的な
521	手短な	571	滑らか	621	測りがたい	671	分厚い	721	細い
522	デラックスな	572	なめらかな	622	計り知れない	672	不安定な	722	細長い
523	照れくさい	573	悩ましい	623	莫大な	673	不安な	723	ほっとする
524	どうしようもない	574	なよやかな	624	爆発した	674	不安になる	724	程近い
525	動的な	575	馴れ馴れしい	625	激しい	675	不快な	725	程遠い
526	尊い	576	軟弱な	626	はしたない	676	不可欠な	726	程よい
527	ド偉い	577	似合う	627	恥づかしい	677	不吉な	727	骨っぽい
528	遠い	578	似合わない	628	肌寒い	678	不気味な	728	ほのか
529	どぎつい	579	似合わない	629	肌触りの良い	679	複雑な	729	微笑ましい
530	特異な	580	煮え切らない	630	はっきりした	680	ふくよかな	730	ぼやけた
531	特徴ある	581	苦い	631	発展した	681	膨らんでいる	731	ぼろい
532	毒々しい	582	苦々しい	632	はっとする	682	不潔な	732	ほろ苦い
533	溶け合った	583	賑々しい	633	果てしない	683	不健康な	733	本格的な
534	とげとげしい	584	賑やか	634	派手な	684	不合理な	734	ぼんやりした
535	突拍子もない	585	憎い	635	花恥づかしい	685	相応しい	735	真新しい
536	ドデカイ	586	憎々しい	636	甚だしい	686	不思議な	736	マイルドな
537	とてつもない	587	憎らしい	637	華々しい	687	不自然な	737	禍々しい
538	整った	588	濁った	638	華やか	688	ふしだらな	738	間が悪い
539	途方もない	589	似つかわしい	639	婆くさい	689	無事な	739	紛らわしい
540	乏しい	590	鈍い	640	幅広い	690	不調和な	740	真面目な
541	とぼとぼした	591	抜きがたい	641	速い	691	吹っ切れている	741	貧しい
542	止めどない	592	抜けがよい	642	腹立たしい	692	ふっくらした	742	間違えやすい
543	鳥肌がたつ	593	抜け目ない	643	ばらばらな	693	不束な	743	待ち遠しい
544	取るに足りない	594	温い	644	遥かな	694	ふてぶてしい	744	真っ新な
545	トロい	595	願わしい	645	晴れやかな	695	太い	745	まとまっている
546	泥臭い	596	寝苦しい	646	引き込まれる	696	不当な	746	まともな
547	鈍感な	597	妬ましい	647	引き締まった	697	無難な	747	まどろっこしい
548	どん底の	598	ねちっこい	648	引きも切らない	698	腑に落ちない	748	まばらな
549	ナウい	599	熱心な	649	低い	699	不満足な	749	丸っこい
550	長い	600	熱っぽい	650	久しい	700	不明な	750	丸みのある

表 4.3 (4) 評価語候補

No.	評価語	No.	評価語	No.	評価語	No.	評価語	No.	評価語
751	まるやかな	801	物憂い	851	喜ばしい	901	大きく感じる	951	整然としている
752	回りくどい	802	もの恐ろしい	852	弱い	902	奥行きがある	952	センスの良い
753	満足する	803	物堅い	853	弱々しい	903	奥行きを感じる	953	センスの悪い
754	見事な	804	物悲しい	854	楽な	904	押し出し感がある	954	鮮度が高い
755	短い	805	物狂おしい	855	リアリティがある	905	音が走る	955	存在感がある
756	惨めな	806	物寂しい	856	理屈っぽい	906	音に包まれている	956	調和の取れた
757	未熟な	807	物静か	857	利口な	907	音の方向が分かる	957	作りが丁寧な
758	水っぽい	808	ものすごい	858	立派な	908	音の方向がわからない	958	透明感がある
759	瑞々しい	809	もの足りない	859	流行の	909	重みがある	959	何の音か分かる
760	淫らな	810	物珍しい	860	良好な	910	音像がまとまっている	960	何の音か分からない
761	乱れた	811	物々しい	861	凛々しい	911	音像がぼやけている	961	温もりがある
762	満ち足りた	812	もやもやした	862	冷淡な	912	音量感がある	962	粘り気がある
763	密接な	813	脆い	863	露骨な	913	開放感がある	963	伸びのある
764	みっともない	814	やかましい	864	ロマンチックな	914	ガッツのある	964	歯切れの良い
765	醜い	815	優しい	865	論理的な	915	気が重くなる	965	歯切れの悪い
766	耳新しい	816	安っぽい	866	若い	916	気が散る	966	迫力がある
767	耳ざとい	817	安らかな	867	わがままな	917	気が和む	967	幅のある
768	耳障りな	818	安らぐ	868	若者向きの	918	気が抜ける	968	腹が立つ
769	みみっちい	819	野性的な	869	わかりにくい	919	気が楽になる	969	バランスが良い
770	魅力的な	820	やせた	870	わかりやすい	920	聞き続けたい	970	馬力がある
771	無関心な	821	やばい	871	若々しい	921	聞き続けたくない	971	張りのある
772	無限の	822	野暮ったい	872	ワクワクする	922	虚脱感を感じる	972	引っ込みがつかない
773	惨い	823	疾しい	873	わざとらしい	923	距離感がつかめる	973	響きのある
774	むさい	824	やみがたい	874	僅かな	924	気楽でない	974	表現力がある
775	むき苦しい	825	ややこしい	875	煩わしい	925	距離感がつかめない	975	広がりがある
776	蒸し暑い	826	やりきれない	876	忘れがたい	926	切れ味の良い	976	広がりが無い
777	虫が好かない	827	やるせない	877	忤しい	927	切れがよい	977	拡がり感のある
778	難しい	828	柔らかい	878	割り切れない	928	緊張感がある	978	深みのある
779	胸糞が悪い	829	憂鬱な	879	悪い	929	空気感がある	979	浮遊感がある
780	胸苦しい	830	優雅な	880	割れた	930	気配がある	980	雰囲気が良い
781	むなし	831	有効な	881	愛情を感じる	931	元気がある	981	雰囲気感がある
782	胸を打つ	832	優秀な	882	焦りを感じる	932	コクがある	982	ボリュームのある
783	無理な	833	有能な	883	圧迫感がある	933	心が躍る	983	まれにしか耳にしない
784	目新しい	834	愉快な	884	厚みのある	934	心にしみる	984	耳に優しい
785	明確な	835	豊かな	885	安定感がある	935	心に響く	985	目が覚める
786	明瞭な	836	ゆったりとした	886	威圧感がある	936	質感がある	986	メリハリがある
787	迷惑な	837	夢のような	887	居心地の良い	937	実存感がある	987	物がいい
788	目がない	838	緩い	888	位置感がある	938	実体感がある	988	ゆとりのある
789	目覚ましい	839	揺るぎない	889	意味のある	939	情感にあふれた	989	余韻が鮮明な
790	目覚めるような	840	緩やか	890	意味のない	940	情景が思い浮かばない	990	余韻のある
791	珍しい	841	緩んだ	891	イメージが広がる	941	情景をイメージできる	991	よく耳にする
792	目出度い	842	良い	892	イライラする	942	情景をイメージできない	992	リズムがよい
793	めばしい	843	容易な	893	色気がある	943	情報量が多い	993	立体感がある
794	めまぐるしい	844	陽気な	894	違和感のある	944	情報量が少ない	994	立体感がない
795	女々しい	845	幼稚な	895	印象が深い	945	食欲の沸かない	995	輪郭がくっきりした
796	面倒くさい	846	よく深い	896	インパクトがある	946	食欲の沸く	996	臨場感がある
797	もだしがたい	847	汚れた	897	ウキウキする	947	真理を感じる	997	臨場感がない
798	もったいない	848	よそよそしい	898	潤いのある	948	スケール感がある		
799	もっともらしい	849	よどみない	899	エコーが鮮明な	949	生気のある		
800	もどかしい	850	より良い	900	遠近感がある	950	生気のない		

4.2.2 調査結果と評価語候補の絞り込み

調査結果について、回答者の属性別の得点比率を図 4.1 に示す。音楽への興味度合いが高い“楽器経験者”と“オーディオ愛好家”は、どちらにも属さない“一般回答者”と比べて判断が曖昧な「どちらともいえない」の比率が低く、適性を表す「ふさわしい」と「非常にふさわしい」、および、不適性を表す「ふさわしくない」と「全くふさわしくない」の比率が高い傾向であった。これらより、“楽器経験者”と“オーディオ愛好家”は評価語の適・不適の判別基準を独自に持っていると考えられるため、“一般回答者”と分離して評価語を選出した。また、年齢別では図 4.2 に示す通り、年齢が上がるに連れて「どちらともいえない」の比率が下がり、「ふさわしい」、「非常にふさわしい」、および、「ふさわしくない」、「全くふさわしくない」の比率が増加する傾向が見られた。但し、各評価語の判別結果と年齢の低高に関連性が見られなかったため、特に分離は行わなかった。また、その他の属性（性別 SC1, 居住地 SC2, 結婚歴 SC3, 車利用頻度 SC7, 車の利用目的 SC8, 車のタイプ SC9）による回答比率には、特に目立った違いは見られなかった。

評価語候補の絞り込みは、歪度 (Skewness) と尖度 (Kurtosis) [44]を用いた。歪度は分布の左右対称性を表す統計量で、「どちらでもない」を中央値とした正規分布を仮定した場合に、歪度が 0 より小さい場合は右に偏った分布を示す。これにより「ふさわしい」と「非常にふさわしい」の回答が多い語が判別できる。また、尖度は正規分布に対してどれだけ尖っているかを表す統計量で、尖度が 0 より大きい場合は尖っている分布を示し、これにより回答傾向が似通っている語の判別が可能である。以上をもとに、歪度 0 以下で尖度 0 以上の語について、“楽器経験者”、“オーディオ愛好家”、“一般回答者”の属性別に上位 80 語を抽出し、重複を併合して 104 語に絞り込んだ。図 4.3 に全評価語候補の回答の歪度・尖度の分布と評価語の選定範囲（ハッチング部分）を、表 4.4 に選出した評価語を示す。

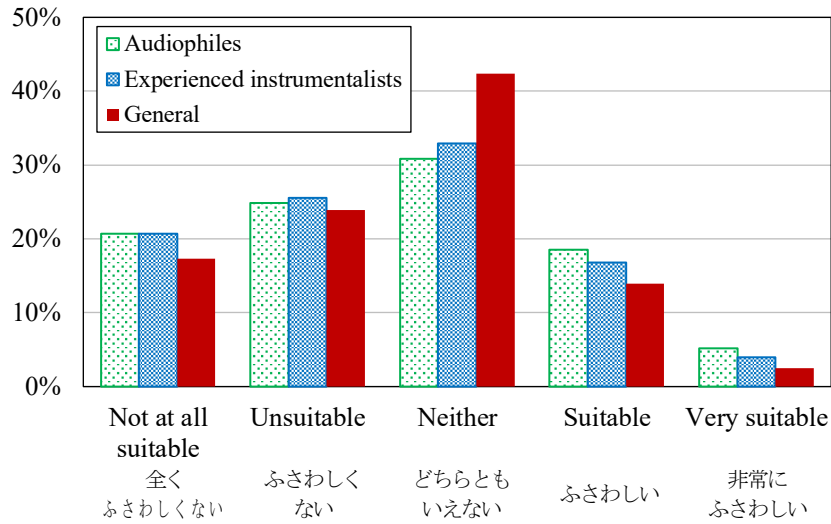


図 4.1 回答者の属性別得点比率

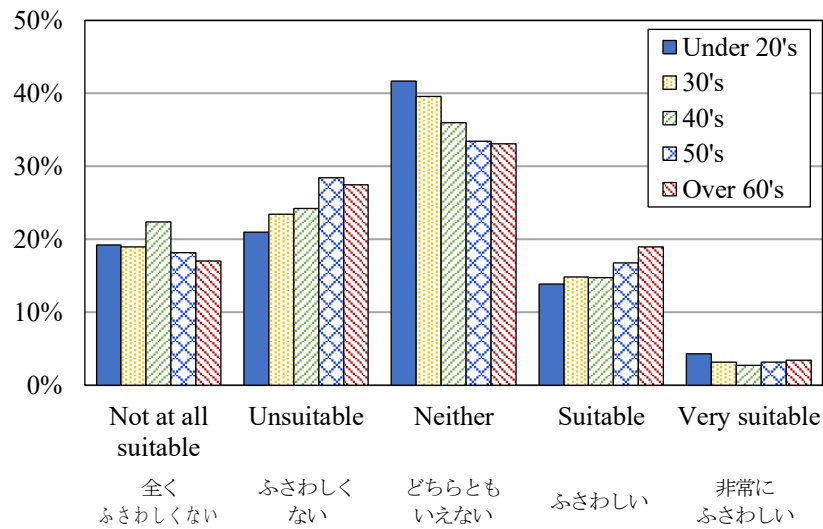


図 4.2 回答者の年齢別の得点比率

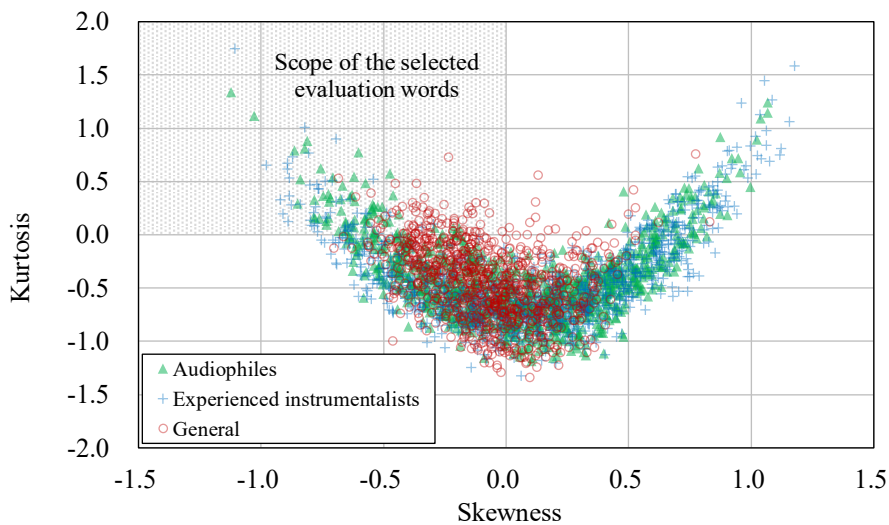


図 4.3 全評価語候補の回答の歪度・尖度の分布

表 4.4 事前調査結果をもとに選定した評価語

1	Cozy	心地よい	27	Captivating	魅力的な	53	Ear friendly	耳に優しい	79	Relieved	ほっとする
2	Feels good	気持ちよい	28	Immersive	引き込まれる	54	Textured	質感がある	80	Soft	ソフトな
3	Good rhythm	リズムがよい	29	Happy	幸せな	55	Deep	深みのある	81	Tight	張りのある
4	Bright	明るい	30	Impactful	インパクトがある	56	Brisk	すがすがしい	82	For young people	若者向きの
5	Sense of spread	広がりがある	31	Pure	澄んだ	57	Orderly	整った	83	Sense of atmosphere	雰囲気がある
6	Reasonable	程よい	32	Good atmosphere	雰囲気が良い	58	Harmonious	調和が取れた	84	Profound	味わい深い
7	Fun	楽しくなる	33	Solid	しっかりした	59	Wonderful	すばらしい	85	Expressive	表情豊か
8	Light	軽快な	34	Three-dimensional	立体感がある	60	Good	良い	86	Polished	洗練された
9	Airy	軽やかな	35	Mild	マイルドな	61	Pleasing	素敵	87	Like	好き
10	Enjoyable	快適な	36	Steady	安定した	62	Want to keep listening	聞き続けたい	88	Expansive	イメージが広がる
11	Clear	クリアな	37	Comfortable	居心地の良い	63	Warm	暖かい	89	Big sound	ボリュームのある
12	Stable	安定感がある	38	Exciting	心が躍る	64	Characteristic	特徴ある	90	Lively	生き生きした
13	Rich	豊かな	39	Awaken	目が覚める	65	Kind	優しい	91	Surrounded by sound	音に包まれている
14	Fine	良好な	40	Articulate	はっきりした	66	Moving	心に響く	92	Delightful	小気味よい
15	Satisfied	満足する	41	Sense of space	開放感がある	67	Good taste	センスの良い	93	Clear-cut	歯切れの良い
16	Balanced	バランスが良い	42	Beautiful	きれいな	68	Easy to hear	聞き取りやすい	94	Touching	胸を打つ
17	Reverberant	響きのある	43	Powerful	力強い	69	Prolonged	伸びやか	95	Clear reverberation	余韻が鮮明な
18	Intense	迫力がある	44	Moderate	適度な	70	Simple	シンプルな	96	Definite	明確な
19	Resounding	響く	45	Preferable	好ましい	71	Sharp	切れ味のよい	97	Refreshed	爽やかな
20	Natural	ナチュラルな	46	Calming	落ち着く	72	Energetic	元気がある	98	Easy to understand	わかりやすい
21	Has warmth	温もりがある	47	Defined	メリハリがある	73	Crisp	切れがよい	99	Radiant	晴れやかな
22	Extensive	伸びのある	48	Feel at ease	安らぐ	74	In harmony	調和した	100	High quality	高級感がある
23	Sense of volume	音量感がある	49	Sense of presence	存在感がある	75	Better	より良い	101	Transparent	透明感がある
24	Pleasant	快い	50	Fresh	爽快な	76	Relaxed	くつろいだ	102	Calm	穏やかな
25	Cheerful	元気な	51	Orthodox	オーソドックスな	77	Thrilling	ワクワクする	103	Can identify sound	何の音か分かる
26	Authentic	本格的な	52	Clean	すっきりした	78	Distinct	鮮明な	104	Youthful	若々しい

4.3 評価語の適合性実験

選出した 104 語の評価語を用いて、カーオーディオに対する音質評価の適合度合いについて、試聴実験を実施した。

4.3.1 試聴曲の選定

実験に使用した楽曲は、20 ジャンル (J-POP, クラシック, クラブ, ジャズ, ソウル, 自然音, ハードロック, ヒーリング, ヒップホップ, ファンク, フォーク, フェュージョン, プログレッシブ, ポップス, ロック, ワールド, 演歌, 歌謡曲, 合唱, 舞踏曲) から各 5 曲の計 100 曲とした。なお、楽曲の強い印象による評価結果への影響を考慮して、誰もが知っていると思われる人気有名曲の選曲は極力避けるようにした。

4.3.2 試聴実験の方法

実験参加者は、聴覚が正常な 20~60 代の男女 100 人ずつの計 200 人とし、予備調査と同様にスクリーニング (項目は表 6.1, 6.2 参照) により実験参加者を“一般回答者”, “楽器経験者”, “オーディオ愛好家”に分類し、全体に対して“楽器経験者”が 50%, “オーディオ愛好家”が 25%含まれるようにした。なお、実験は“宇都宮大学ヒトを対象とする研究倫理審査委員会”の承認を得ると共に、実験参加者には事前に文書と口頭によるインフォームド・コンセントを得て実施した。

試聴曲はサビ区間の約 30 秒間を対象とし、ITU-RBS.1770-3 に基づく平均ラウドネス値を -23 LUSF に調整して全ての曲が同じ大きさに聞こえるように配慮した。再生音量は、ピンクノイズを用いてラウドネスレベルを 14.1 sone (A 特性音圧レベルで約 65 dB 相当) に調整し、事前に実験目的を文書と口頭で説明した上で、PC からヘッドホン (SRH840, SHURE) を介して実験参加者に聴かせた。その時に表 6.3 に示す評価語 104 語を提示し、聴取している曲に対して「カーオーディオの音質を表現する言葉として、どの程度あてはまると思うか」の問いに対し、図 4.4 に示す 5 段階の間隔尺度で評価させた。なお、順序効果を避けるために、試聴曲の提示順はランダム化した。

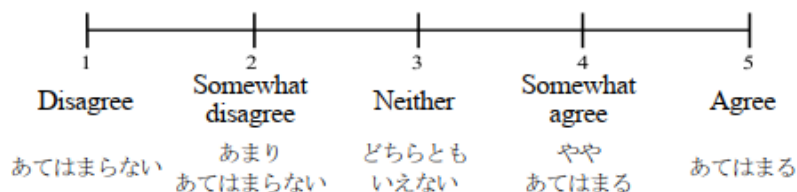


図 4.4 評価尺度 (5 段階)

4.3.3 試聴実験の結果

本実験に得られた5段階の評価尺度による分布を図4.5に示す。評価が曖昧な「どちらともいえない」の回答が28%、優劣がわかる回答は72%（良い評価：47%、悪い評価：25%）となり、曖昧な回答を大きく上回る結果が得られた。以上により、カーオーディオの音質評価に対して、選出された104語の評価語を用いることで、曖昧な評価を極力避けながら、音質の優劣の評価が可能であることが確認できた。

なお、実験に使用した全100曲の評価のばらつき具合について標準偏差（SD：standard deviation）により判断すると、評価全体の標準偏差1.12に対して、ジャンルではポップ（Pop）が標準偏差0.94で最も評価のばらつきが少なく、自然音（Nature）は標準偏差1.26で最も評価のばらつきが多かった。参考として、カーオーディオの音質設計において、安定した評価結果を得るには評価のばらつきが少ない選曲が有効であると考え、ジャンル毎の標準偏差とジャンル内で最も評価のばらつきが少なかった（標準偏差が小さい）曲を表4.5に示す。

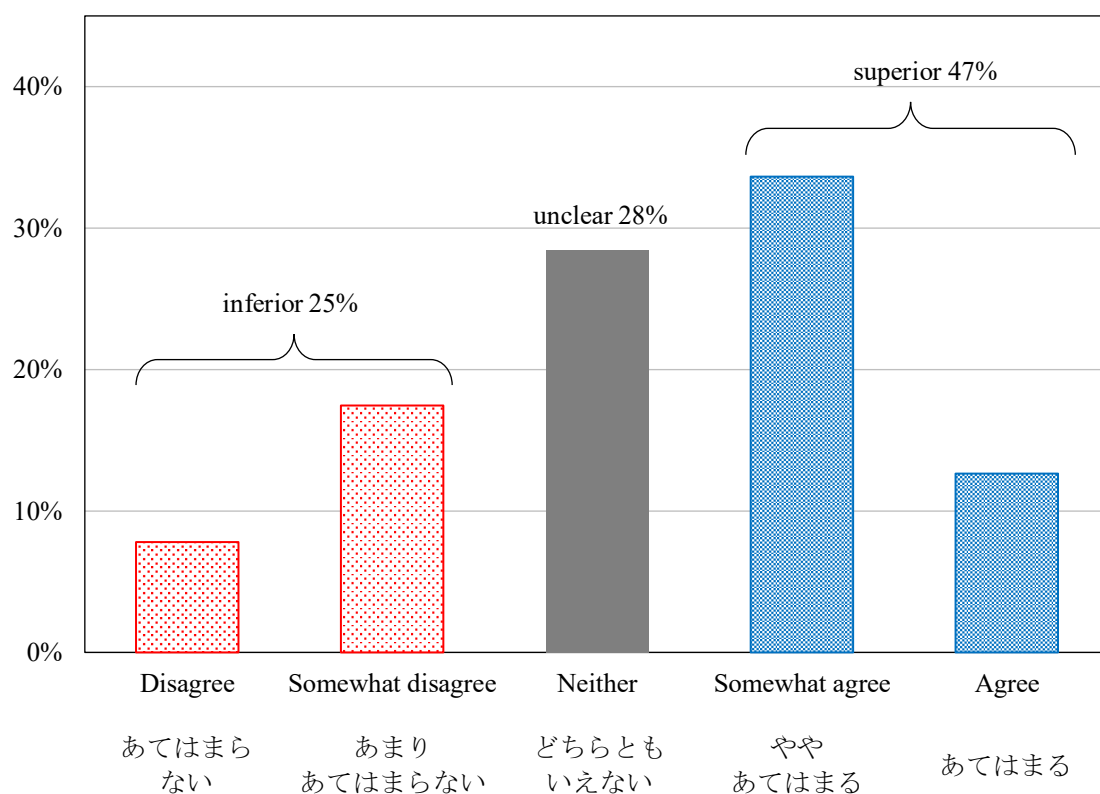


図 4.5 評価尺度の割合

表 4.5 評価のばらつきが少ない音源一覧

ジャンル	ジャンル別 標準偏差	曲名	アーティスト	標準偏差
J-POP	1.05	君がくれた日	Natural High	0.93
クラシック	1.00	Five Novelettes, Op.15 - II	Aleksandr Glazunov	0.90
クラブ	1.21	The Situation (Original Mix)	Blank & Jones	1.14
ジャズ	1.04	Big Swing Face	Buddy Rich Big Band	0.98
ソウル	0.96	I Just Wanna Stop	Gino Vannelli	0.88
自然音	1.26	Jungle	free sound source	1.11
ハードロック	1.14	I'm sorry	flyleaf	1.10
ヒーリング	1.16	Energy Cleaning	free sound source	1.06
ヒップホップ	1.09	Nothing Like L.A	Ice Cube	1.04
ファンク	1.05	Lettsanity	Lettuce	1.01
フォーク	1.03	Me and My Friend	Julie Doiron	1.00
フュージョン	1.01	3rd Degree	Fourplay	0.95
プログレッシブ	1.11	Sleepless	King Crimson	1.03
ポップス	0.94	Alright	Shiloh	0.89
ロック	1.09	Two Girls	Ringo Deathstarr	1.05
ワールド	1.05	Hoch auf dem gelben Wagen	Franzl Lang	0.99
演歌	1.15	真っ赤な純情	長谷川真吾	1.09
歌謡曲	1.09	恋するカレン	Otaki Eiichi	0.98
コーラス	1.00	Lord I Want to be a Christian	unknown	0.92
舞踏曲	1.11	¿Quién será?	Pablo Beltrán Ruiz	1.08

4.4 代表的な評価語の選出

前述の通り、抽出した 104 語の評価語はカーオーディオの音質評価に有用なことが確認できた。しかし、語意が重複している可能性が高く、また、104 語の全ての語を用いた評価は非効率であると考えられる。よって、さらに評価語を絞り込むために、回答傾向が類似する評価語をグループ化し、それらの中から代表する語の選出を施行した。

4.4.1 回答結果による評価語の分類

実験結果の回答傾向が似通っている評価語をグループ化する方法として、Ward 法による階層型クラスタ分析を行った。距離の計算はユークリッド距離を用い、図 4.6 に示す通り意味的なまとまりを考慮して 10 のクラスタに分類した。分類された評価語を表 4.6 に示す。なお、嗜好性を表す評価語と考えられる、「程よい (6. Reasonable)」、「良好な (14. Fine)」、「満足する (15. Satisfied)」、「快い (24. Pleasant)」、「幸せな (29. Happy)」、「好ましい (45. Preferable)」、「すばらしい (59. Wonderful)」、「良い (60. Good)」、「より良い (75. Better)」、「好き (87. Like)」の 10 語は除いて分析した。

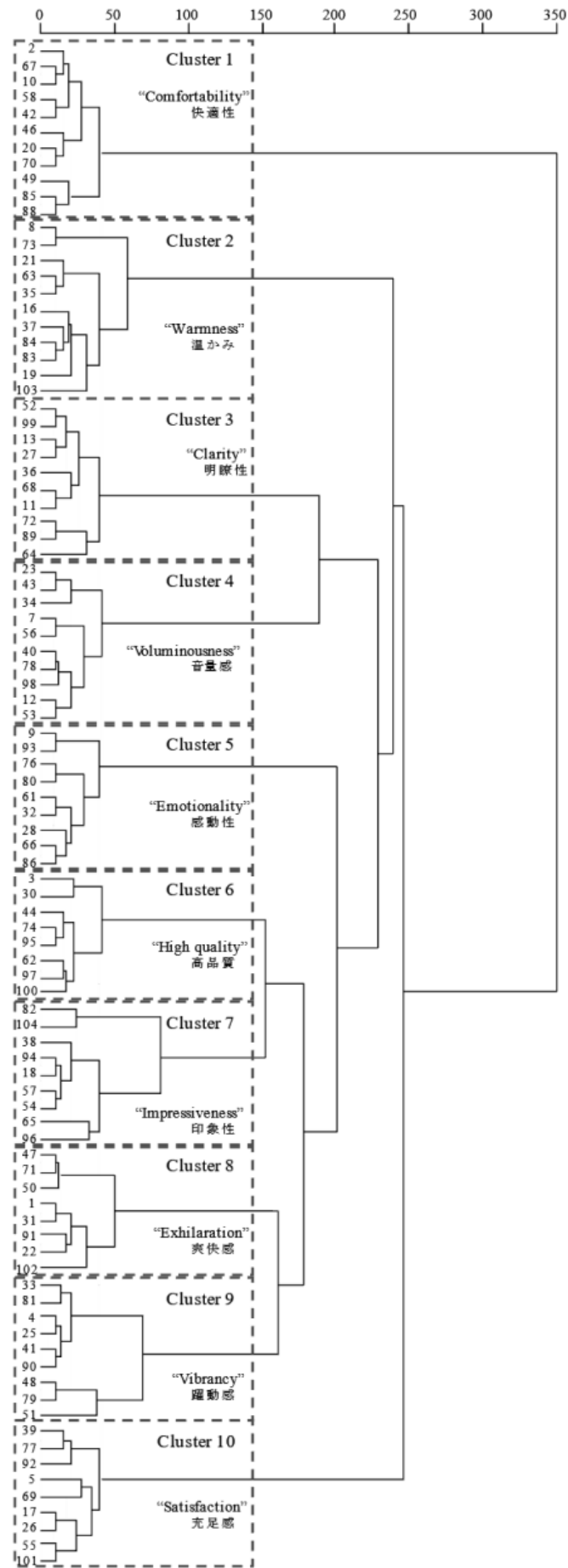


図 4.6 評価語のクラスタ分析結果

表 4.6 クラスタ分析結果

No.	クラスタ 1 快適感	No.	クラスタ 2 暖かさ	No.	クラスタ 3 明瞭性	No.	クラスタ 4 音量感	No.	クラスタ 5 感動性
2	Feels good 気持ちよい	8	Light 軽快な	11	Clear クリアな	7	Fun 楽しくなる	9	Airy 軽やかな
10	Enjoyable 快適な	16	Balanced バランスが良い	13	Rich 豊かな	12	Stable 安定感がある	28	Immersive 引き込まれる
20	Natural ナチュラルな	19	Resounding 響く	27	Captivating 魅力的な	23	Sense of volume 音量感がある	32	Good atmosphere 雰囲気が良い
42	Beautiful きれいな	21	Has warmth 温もりがある	36	Steady 安定した	34	Three-dimensional 立体感がある	61	Pleasing 素敵
46	Calming 落ち着く	35	Mild マイルドな	52	Clean すっきりした	40	Articulate はっきりした	66	Moving 心に響く
49	Sense of presence 存在感がある	37	Comfortable 居心地の良い	64	Characteristic 特徴ある	43	Powerful 力強い	76	Relaxed くつろいだ
58	Harmonious 調和の取れた	63	Warm 暖かい	68	Easy to hear 聞き取りやすい	53	Ear friendly 耳に優しい	80	Soft ソフトな
67	Good taste センスの良い	73	Crisp 切れがよい	72	Energetic 元気がある	56	Brisk すがすがしい	86	Polished 洗練された
70	Simple シンプルな	83	Sense of atmosphere 雰囲気感がある	89	Big sound ボリュームのある	78	Distinct 鮮明な	93	Clear-cut 歯切れの良い
85	Expressive 表情豊か	84	Profound 味わい深い	99	Radiant 晴れやかな	98	Easy to understand わかりやすい		
88	Expansive イメージが広がる	103	Can identify sound 何の音か分かる						
No.	クラスタ 6 高品質感	No.	クラスタ 7 印象性	No.	クラスタ 8 音の伸び	No.	クラスタ 9 躍動感	No.	クラスタ 10 充足感
3	Good rhythm リズムがよい	18	Intense 迫力がある	1	Cozy 心地よい	4	Bright 明るい	5	Sense of spread 広がりがある
30	Impactful インパクトがある	38	Exciting 心が躍る	22	Extensive 伸びのある	25	Cheerful 元気な	17	Reverberant 響きのある
44	Moderate 適度な	54	Textured 質感がある	31	Pure 澄んだ	33	Solid しっかりした	26	Authentic 本格的な
62	Want to keep listening 聞き続けたい	57	Orderly 整った	47	Defined メリハリがある	41	Sense of space 開放感がある	39	Awaken 目が覚める
74	In harmony 調和した	65	Kind 優しい	50	Fresh 爽快な	48	Feel at ease 安らぐ	55	Deep 深みのある
95	Clear reverberation 余韻が鮮明な	82	For young people 若者向きの	71	Sharp 切れ味のよい	51	Orthodox オーソドックスな	69	Prolonged 伸びやか
97	Refreshed 爽やかな	94	Touching 胸を打つ	91	Surrounded by sound 音に包まれている	79	Relieved ほっとする	77	Thrilling ワクワクする
100	High quality 高級感がある	96	Definite 明確な	102	Calm 穏やかな	81	Tight 張りのある	92	Delightful 小気味よい
		104	Youthful 若々しい			90	Lively 生き生きした	101	Transparent 透明感がある

4.4.2 各クラスタ内における代表語の選出

クラスタ分析により分類された各クラスタの評価語群は、試聴実験による回答結果が類似している語である。そのため、共分散選択を用いたグラフィカルモデリング（Graphical Modeling 以下 GM と略す）の無向独立モデルによる分析を行い、各クラスタ内の評価語間の関係性を明らかにして、クラスタを代表する評価語を選出することとした。

ここで用いた GM とは、偏相関行列を利用して探索的に変数間の関係性やその関連構造を明らかにするもので、偏相関を利用することで擬似相関（第 3 の変数の影響による見かけ上の相関）を取り除くことができ、また、グラフ理論に基づくパス図で表現されるため、変数間の関係を把握しやすい。また、共分散選択は、偏相関係数が最も小さい値を 0 と置きかえた（パスを切断）モデルの指標値と、0 と置く前のモデルの指標値との比較を繰り返し、指標値が悪化した時点の一つ前のモデルを採用する方法である [45]。このとき、パスを切断していない変数間には、直接的な関係があることを表す。そこで、本研究では各クラスタ内の語群において、切断したパスが最も少ない語を、そのクラスタを代表する評価語とした。なお、対象の語が複数存在する場合は、評価が曖昧になりにくい語を選出するために、各々の評価平均点が最も高い語とした。また、モデルの当てはまりの良さの判定には、以下の代表的な指標値がある。

- RMSEA（Root Mean Square Error of Approximation, 近似値の二乗平均平方根誤差）

χ^2 値が期待値より大きくなった分を自由度 1 つ、観測値 1 つあたりの値として評価

- GFI（Goodness of Fit Index, 適合度指標）

重回帰分析における決定係数に相当する指標

- AGFI（Adjusted GFI, 自由度調整済み適合度指標）

重回帰分析の自由度修正済み決定係数に相当する指標

- NFI（Normed Fit Index, 基準化適合度指標）

分析モデルと独立モデル（全ての変数が無相関とするモデル）の χ^2 値の比較

- SRMR（Standardized Root Mean square Residual, 標準化残差平方平均）

相関係数の残差の大きさ

これらは共に 0～1 の範囲をとり、RMSEA と SRMR は 0.1 以上が「悪い」、0.05 未満で「非常に良い」、GFI, AGFI, NFI は 0.9 未満が「悪い」、0.95 以上が「非常に良い」とされている [45] [46] [47]。本研究では、これらの中で標本サイズが考慮できる特徴があり、通常よく利用される RMSEA を用い、0.1 以上の場合は当てはまりが悪いと判断し [45]、悪化した時点の前のモデルを採用した。分析結果の一例として、クラスタ 1 のモデルと偏相関係数を図 4.7, 表 4.7 に示す。この結果によると、「ナチュラルな (20. Natural)」と「きれいな (42.

Beautiful) 」が選択の対象となるが、前述の通り、評価平均点から 3 点減算した値の 2 乗値が、「ナチュラルな」:0.020, 「きれいな」:0.013 であったため、「ナチュラルな」を選択した。同様に、事前に除いた嗜好性を表す 10 語についても GM を行い、代表する語「好き」を選出した。本手法により選出した評価語を表 4.8 に示す。

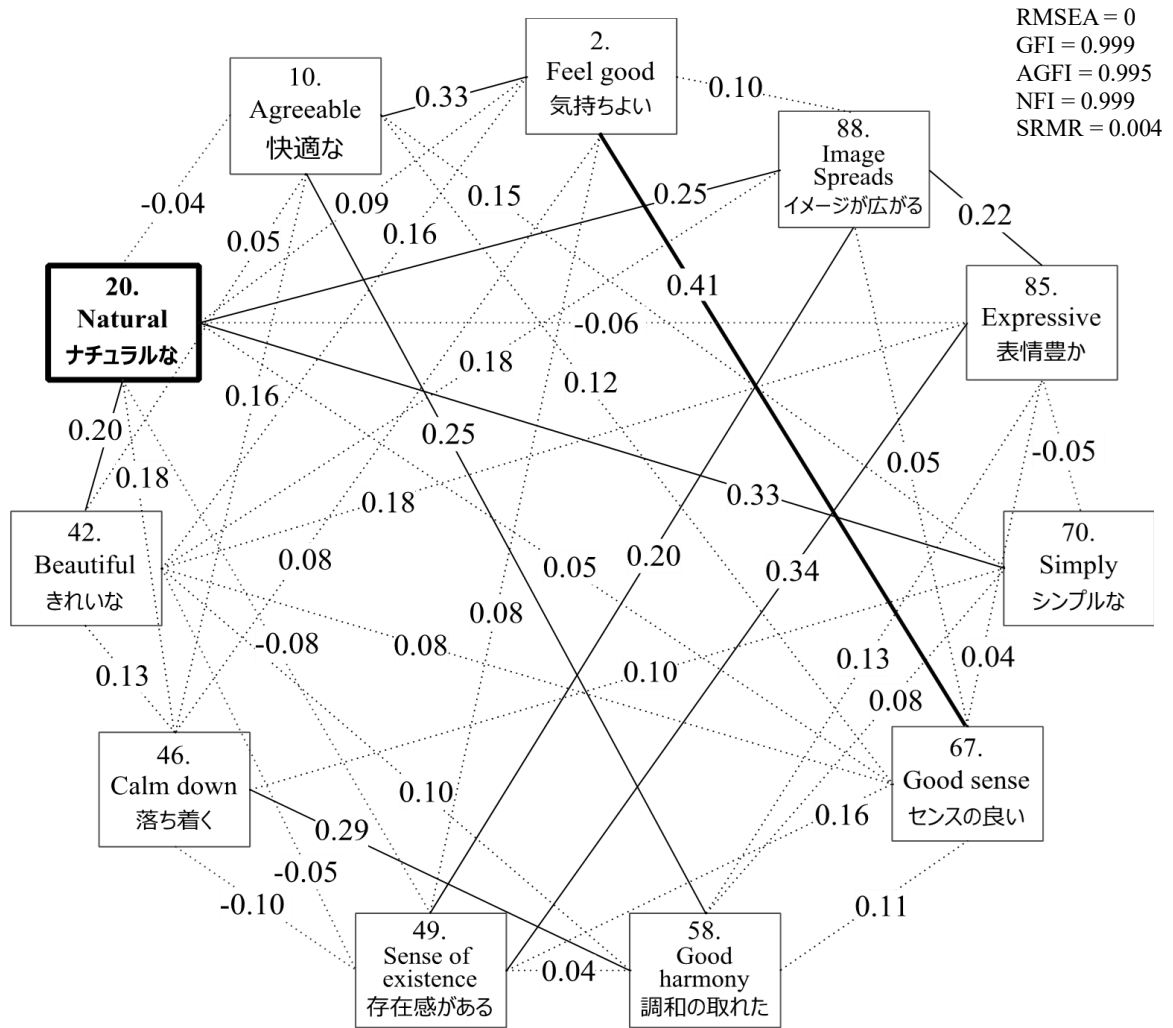


図 4.7 クラスタ 1 のグラフィカルモデル

表 4.7 クラスタ 1 の評価語 (No.) 偏相関行列

No.	2	10	20	42	46	49	58	67	70	85	88
2	1	0.33	0.09	0.16	0.08	0.08	0	0.41	0	0	0.10
10	0.33	1	-0.04	0.05	0.16	0	0.25	0.12	0.15	0	0
20	0.09	-0.04	1	0.20	0.18	-0.08	0	0.05	0.33	-0.06	0.25
42	0.16	0.05	0.20	1	0.13	-0.05	0.10	0.08	0	0.18	0.16
46	0.08	0.16	0.18	0.13	1	-0.10	0.29	0	0.10	0	0
49	0.08	0	-0.08	-0.05	-0.10	1	0.05	0.16	0	0.34	0.20
58	0	0.25	0	0.10	0.29	0.05	1	0.11	0.08	0.13	0
67	0.41	0.12	0.05	0.08	0	0.16	0.11	1	0	0.04	0.05
70	0	0.15	0.33	0	0.10	0	0.08	0	1	-0.05	0
85	0	0	-0.06	0.18	0	0.34	0.13	0.04	-0.05	1	0.22
88	0.10	0	0.25	0.16	0	0.20	0	0.05	0	0.22	1
偏相関係数を 0 と置いた数	3	3	1*	1*	3	2	3	2	5	3	4

※評価平均値... “20. ナチュラルな : 3.14”, “42. きれいな : 3.12”

表 4.8 選出された評価語

クラスタ No.	評価語 No.	評価語	
1	20	Natural	ナチュラルな
2	37	Comfortable	居心地の良い
3	99	Radiant	晴れやかな
4	53	Ear friendly	耳に優しい
5	28	Immersive	引き込まれる
6	62	Want to keep listening	聞き続けたい
7	38	Exciting	心が躍る
8	102	Calm	穏やかな
9	33	Solid	しっかりした
10	5	Sense of spread	広がりがある
嗜好性	87	Like	好き

4.4.3 評価語間の関係性の分析

選出した代表的な評価語（表 4.8）について、嗜好性への影響度合いを検討するために、共分散構造分析により各評価語間の因果関係を分析した。

共分散構造分析は、観測データをもとに構成概念や観測変数の関係性を検討する統計手法として、仮説を反映したモデルを構成することができる [45]。一方で、選出した評価語 11 語間は複雑な関係性が想定され、仮説モデルを構成するのは容易でない。そこで、これら 11 語を用いた共分散選択による GM を事前に行い、共分散選択後の偏相関係数を参考に嗜好性の代表語である「好き (87. Like)」を目的変数とする（パスの矢印方向を「好き」とする）モデルを検討した。共分散選択後の偏相関係数を表 4.8 に示す。

表 4.9 選択された評価語 (No.) の偏相関行列

No.	20	37	99	53	28	62	38	102	33	5	87
20	1	0.09	0	0.15	0	0.10	0	0.18	0.09	0.08	0
37	0.09	1	0.08	0.08	0.09	0.16	0	0.09	0	0.06	0
99	0	0.08	1	0.07	0.05	0	0.11	0	0.09	0.08	0.06
53	0.15	0.08	0.07	1	0	0	-0.06	0.25	-0.04	0	0.62
28	0	0.09	0.05	0	1	0.09	0	0.09	0	0.15	0.05
62	0.10	0.16	0	0	0.09	1	0.10	0.07	0.07	0	0.04
38	0	0	0.11	-0.06	0	0.10	1	0	0.08	0	0.12
102	0.18	0.09	0	0.25	0.09	0.07	0	1	0	0.12	-0.08
33	0.09	0	0.09	-0.04	0	0.07	0.08	0	1	0.05	0.05
5	0.08	0.06	0.08	0	0.15	0	0	0.12	0.05	1	0
87	0	0	0.06	0.62	0.05	0.04	0.12	-0.08	0.05	0	1

これらの結果を元に、「ナチュラルな (20. Natural)」、「居心地の良い (37. Comfortable)」、および、「広がりがある (5. Sense of spread)」の 3 語は、「好き」との偏相関係数が 0 のために直接的な関係がないと仮定してパスを切断した。また、偏相関係数が 0 でない箇所は、語句の意味合いを考慮してそれぞれのパス方向を仮定し、これを初期モデルとした。なお、モデルの妥当性評価には、 χ^2 検定と以下の代表的な指標値を用いた。

- TLI (Tucker-Lewis Index, Tucker-Lewis 指標)

NFI (前述) に対して、自由度 (df : degrees of freedom) の影響を考慮した指標

- CFI (Comparative Fit Index, 比較適合度指標)

TLI に対して、標本サイズを考慮した指標

- RMSEA (Root Mean Square Error of Approximation, 近似値の二乗平均平方根誤差)

χ^2 値が期待値より大きくなった分を自由度 1 つ、観測値 1 つあたりの値として評価

これらの指標値は通常 0~1 の範囲で、一般的に χ^2 検定では p 値が 1.0 に近い値、CFI, TLI は 0.95 以上、RMSEA は 0.05 以下の場合に当てはまりが良いと判断される [45] [46] [47].

以上により作成した初期モデルに対して、指標値を参考にモデルの修正を行い、データに対する当てはまりが十分であると判断できる結果を得た。最終モデルを図 4.8、パス係数の推定値を表 4.10 に示す。これらのパス係数は、各語が直接影響を及ぼす方向に対する因果関係（直接効果）の推定値を表し、表 4.10 では上段に非標準化解（non-std. solution）、下段に標準化解（std. solution）を記した。ここで、非標準化解はデータを基準化しないで求めた解、標準化解は分散を 1 に基準化して求めたときの解を表す。パス係数の大きさを解明するときは非標準化解、強さを解明するときは標準化解を用いると判断しやすい。例えば、非標準化解では「晴れやかな (99. Radiant)」→「好き (87. Like)」において、「晴れやかな (99. Radiant)」の評価が 1 増えると「好き (87. Like)」の評価が 0.05 増えることが分かり、標準化解では「好き (87. Like)」に対して「晴れやかな (99. Radiant)」は 0.05、「心が躍る (38. Exciting)」は 0.09 であることから、「心が躍る (38. Exciting)」の方の影響が大きいことが判断できる。但し、今回の実験ではそれぞれの値は単位を持たない 5 段階の評価値であるため、解に大きな違いは生じていない。なお、「好き (87. Like)」に対する各評価語の影響度を判断するために、図 8 のパス係数は標準化解を記した。また、図中の R^2 は矢印先の語を目的変数、矢印元の語を説明変数とした回帰分析の決定係数を示し、矢印元が矢印先を説明できる割合を表す。例えば、「耳に優しい (53. Ear friendly)」は「ナチュラルな (20. Natural)」と「広がりがある (5. Sense of spread)」からパスを受けており、 $R^2=0.11$ であるので、「耳に優しい (53. Ear friendly)」は「ナチュラルな (20. Natural)」と「広がりがある (5. Sense of spread)」で説明できる部分が 11%、この 2 語では説明できない他の要因による影響が 89% と解釈できる。

これらの結果から、嗜好性を表す「好き (87. Like)」に最も直接的に影響を与える語は「耳に優しい (53. Ear friendly)」(パス係数 0.66 : 図 4.8, 表 4.10 下段参照) である。但し、「耳に優しい (53. Ear friendly)」は、「居心地の良い (37. Comfortable)」, 「晴れやかな (99. Radiant)」, および、「穏やかな (102. Calm)」の 3 語に関係があり、これらは幾つかの語を経由して間接的に「好き (87. Like)」に影響を与えている。この間接効果は、経由する各語間のパス係数を掛け合わせることで求めることができる。例えば、「耳に優しい」→「居心地の良い」→「引き込まれる」→「好き」の間接効果は $0.12 \times 0.12 \times 0.04 = 0.0006$, 「耳に優しい」→「居心地の良い」→「聞きたい」→「好き」は $0.12 \times 0.16 \times 0.04 = 0.0008$ と微小ではあるが、「好き (87. Like)」に影響を及ぼしている。このように、評価語ごとに「好き (87. Like)」に対するすべてのパス経路の間接効果を算出し、直接効果と合算することで各評価語の総合効果 (Total effect) を求めた。算出結果を表 4.10 に示す。これらから、嗜好性を表す評価語「好き (87.

Like) 』に対して最も影響する評価語は「耳に優しい (53. Ear friendly) 』で、次いで「ナチュラルな (20. Natural) 』, 「広がりがある (5. Sense of spread) 』の順であった. したがって, 多くの人が求めるカーオーディオの音質は “刺激が少ない自然な音質” であると言える.

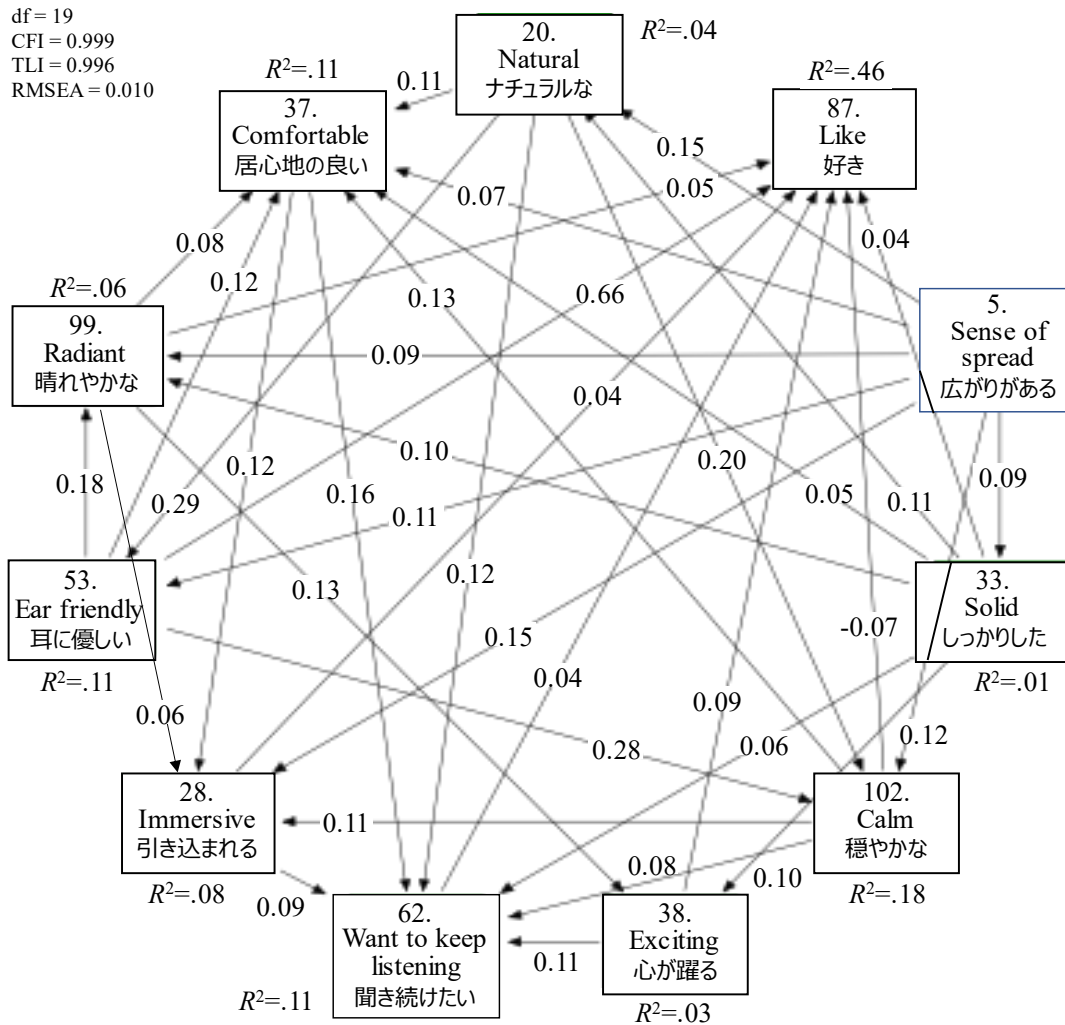


図 4.8 評価語の最終モデル

表 4.1 0 評価語のパス相関係数 (評価語 No.)

No.	20	37	99	53	28	62	38	102	33	5	R ²
20									0.13	0.16	0.04
									0.11	0.15	
37	0.11		0.09	0.13				0.12	0.06	0.07	0.11
	0.11		0.08	0.12				0.13	0.05	0.07	
99				0.18					0.11	0.09	0.06
				0.18					0.10	0.09	
53	0.28									0.11	0.11
	0.29									0.11	
28		0.11	0.06					0.10		0.15	0.08
		0.12	0.06					0.11		0.15	
62	0.12	0.17			0.01		0.11	0.08	0.08		0.11
	0.12	0.16			0.09		0.11	0.08	0.06		
38			0.14						0.11		0.03
			0.13						0.10		
102	0.21			0.30						0.14	0.18
	0.20			0.28						0.12	
33										0.08	0.01
										0.09	
87			0.05	0.67	0.04	0.04	0.09	-0.06	0.04		0.46
			0.05	0.66	0.04	0.04	0.09	-0.07	0.04		

表 4.1 1 評価語の「好き」に及ぼす影響 (標準解)

評価語 No.	評価語	総合効果
20	Natural ナチュラルな	0.19
37	Comfortable 居心地の良い	0.01
99	Radiant 晴れやかな	0.06
53	Ear friendly 耳に優しい	0.66
28	Imm ersive 引き込まれる	0.05
62	Want to keep listening 聞き続けたい	0.04
38	Exciting 心が躍る	0.10
102	Calm 穏やかな	-0.06
33	Solid しっかりした	0.08
5	Sense of spread 広がりがある	0.12

4.5 考察

クラスタ分析を用いて分類した後に GM により選出した 10 語について、各語の関係性を共分散構造分析の結果から、図 4.8 と表 4.10 のパス係数が示す通り、ほとんどの語の関係性は低く、平均 0.12 (標準化解) であった。このことから、各評価語の回答結果が互いに影響し合うことは少なく、選出した評価語の語意はほぼ重複していないと言える。よって、選出した 10 語は代表的な評価語として適正であると判断した。

また、第 2 章の主観評価実験で用いた評価語に対して、今回、選出した評価語で同じものは「広がりがある (5. Sense of spread)」のみで、「心地よい (1. Cozy)」と「居心地が良い (37. Comfortable)」が似通った意味合いを持っているものの、その他は異なる評価語が選出された。これは、“評価をさせたい研究者・開発者”と“評価をする人”の思惑がそれぞれ異なることを表していると考えられる。第 2 章で用いた評価語を考察すると、専門的で機能や性能を評価する語が中心になっていると言える。一方、今回の選出した評価語は、“評価する人”の心理状態を表わす語が中心になっている。このことから、商品・製品を“評価する人”すなわち“消費者”は、機能や性能ではなく、心理的な価値に重きを置いて、商品・製品の良し悪しを判断 (評価) していると思われる。したがって、“消費者”が求める感性的な価値を測る場合においては、今回の選出した評価語が適切であると考えられる。

続いて、共分散構造分析により明らかとなった各評価語と嗜好性を表す「好き (87. Like)」との因果関係について考察する。嗜好性を表す「好き (87. Like)」に最も影響が大きい「耳に優しい (53. Ear friendly)」は、カーオーディオの音質評価における特有の事象と思われる。自動車室内は、音楽ホールやホームオーディオなどの聴取環境と異なり、速度に伴って騒音が増減するために音量調整を頻繁に行う必要がある、この時、刺激が強く、大きすぎる音は好まれず、適度な音量調整が重要であることを示していると考えられる。次に影響が大きい「ナチュラルな (20. Natural)」と「広がりがある (5. Sense of spread)」は、「好き (87. Like)」へ向かうパスは切断されており、補助的な評価語である可能性が高い。また、「心が躍る (38. Exciting)」は、「耳に優しい (53. Ear friendly)」に対して一般的に相反する語意が想像される。これらの偏相関係数は相反関係を示す極めて弱い負の関係 (-0.06 : 表 4.8 参照) にあるため、両立は難しいと考えられる。ただし、「好き (87. Like)」に対する影響は小さい (総合効果 0.10: 表 4.10 参照) ため、重要度は低いと思われる。また、「穏やかな (102. Calm)」は、「好き (87. Like)」に対する偏相関係数は極めて弱い負の関係 (-0.08 : 表 4.8 参照) があり、共分散構造分析による総合効果でも負の関係 (-0.06 : 表 4.10 参照) となっている。これは、運転中に多少の緊張状態を保ちたい気持ちが現れた結果ではないかと思われる。

本研究の分析方法 (評定尺度法, クラスタ分析, GM, および, 共分散構造分析) は、従来、単独で用いられることが多いクラスタ分析に対して、偏相関係数を利用する GM と組

み合わせることで、疑似相関を取り除いた評価語 10 語への絞り込み（表 4.8 参照）が可能となった。また、嗜好性を表す「好き（87. Like）」に対する各評価語の関係性と影響度の分析において、偏相関係数を利用する共分散構造分析を用いることで、疑似相関を取り除いた各評価語の影響度が定量化できると共に、主体的な評価語が「耳に優しい（53. Ear friendly）」であり、間接的に影響を及ぼす補助的な評価語が「ナチュラルな（20. Natural）」と「広がりがある（5. Sense of spread）」であることを明らかにすることができた。

また、今回の調査対象者の多くは、共分散構造分析によりカーオーディオに対して“刺激が少ない自然な音質”を求めていることが明らかになったが、これは周辺の音による安全確認や運転中に音楽に集中しすぎないなど、運転タスクを邪魔しない音質が求められていると考えられる。但し、将来的に運転タスクからほぼ解放される高い自動運転レベルが一般化すれば、これらの重要性が変化する可能性が十分に考えられる。この際には、本研究で選出した評価語 11 語を用いて試聴評価を再実施し、今回の評価結果と比較することで、その変化が確認できると考える。

4.5 まとめ

自動運転技術の一般化により、移動中の車室内空間を快適にするカーオーディオの音質はますます重要になると想定し、カーオーディオの音質評価に適切な評価語の選出を行った。オーディオ雑誌、先行研究 [36][37][38]、広辞苑 [43]などを参考に 997 語の評価語候補を抽出し、インターネットを利用した予備調査により、評価語にふさわしいと思われる 104 語を選出した。その後、語意に重複のない語を選び出すために、104 語を用いた試聴実験を実施して評価結果をクラスタ分析により 10 分類し、グラフィカルモデリングによって評価語の絞り込みを行った。その結果、「ナチュラルな」、「居心地の良い」、「晴れやかな」、「耳に優しい」、「引き込まれる」、「聞き続けたい」、「心が躍る」、「穏やかな」、「しっかりした」、「広がりがある」、および、嗜好性を表す「好き」を加えた 11 語を選出した。

また、選出した 11 語の因果関係について、嗜好性が評価に最も大きく影響すると考え、嗜好性を表す「好き」を目的変数として共分散構造分析を行った結果、「耳に優しい」の影響が最も高く、次いで「ナチュラルな」と「広がりがある」であった。以上により、多くの人が求めるカーオーディオの音質は“刺激が少ない自然な音質”であることが示唆された。

第5章 快適なヘッドレストスピーカの選定

5.1 はじめに

第3章では、標準ドアスピーカに対してヘッドレストスピーカ優位性を高めることを目的に、主要素であるスピーカユニットの音響特性の最適化と、エンクロージャ・吸音材を用いたスピーカBOX化（システム化）による音質の最適化を行い、特徴別に4タイプに分類して、各タイプの代表仕様を選定した。本章では、これらの4タイプのヘッドレストスピーカに対して、第4章で選出した嗜好性を含む評価語11語と、評価のばらつきが少なかった3曲を用いて主観評価実験により比較し、快適性が高いヘッドレストスピーカを探索する。また、この結果をもとに、高評価となるヘッドレストスピーカの音響特性を明らかにする。

5.2 快適性が高い仕様の検証

第5章で選定した4タイプのヘッドレストスピーカ（表5.1, 図5.1）の比較を行い、快適性に優れる仕様を選定する。

表 5.1 ヘッドレストスピーカ4タイプの特徴（表3.12 再記載）

タイプ	実験 スピーカ No.	特徴	
		周波数応答特性	過渡特性特性（残響）
A	SP093	500~20k Hz フラット	残響少なくスムーズに収束
B	SP107	30~500 Hz 豊か	残響多い（後半に乱れあり）
C	SP248	13k Hz 付近にピークあり	残響少ない（前半に乱れあり）
D	SP446	16k Hz 付近にピークあり	残響少し多い（前半に乱れあり）

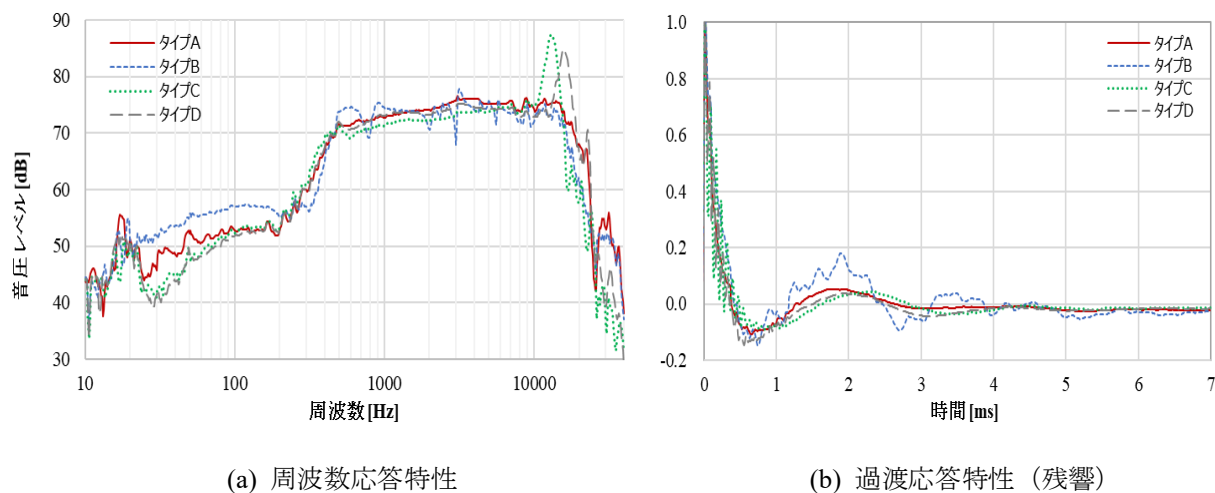


図 5.1 4タイプの応答特性（図3.23, 図3.24 再記載）

5.2.1 評価語の選定

実験で使用した評価語は、第4章で選出した評価語11語（表5.2）を用い、尺度構成法による評価を行った。

表 5.2 選出された評価語（表 4.8 再記載）

1	Natural	ナチュラルな
2	Comfortable	居心地の良い
3	Radiant	晴れやかな
4	Ear friendly	耳に優しい
5	Immersive	引き込まれる
6	Want to keep listening	聞き続けたい
7	Exciting	心が躍る
8	Calm	穏やかな
9	Solid	しっかりした
10	Sense of spread	広がりがある
11	Like	好き（嗜好性）

5.2.2 実験刺激

実験で使用した音源（楽曲）は、第6章で評価ばらつきが少なかった曲の中から、実験規模を考慮して、今回の実験参加者が日常的に良く耳にする馴染み深いジャンルと想定されるソウル、フォーク、ポップスの3曲を用いた。表5.3に実験に使用した音源を示す。これらの周波数応答特性を図5.2に示す。

表 5.3 実験に使用した音源

ジャンル	曲名	アーティスト
ソウル	I Just Wanna Stop	Gino Vannelli
フォーク	Me and My Friend	Julie Doiron
ポップス	Alright	Shiloh

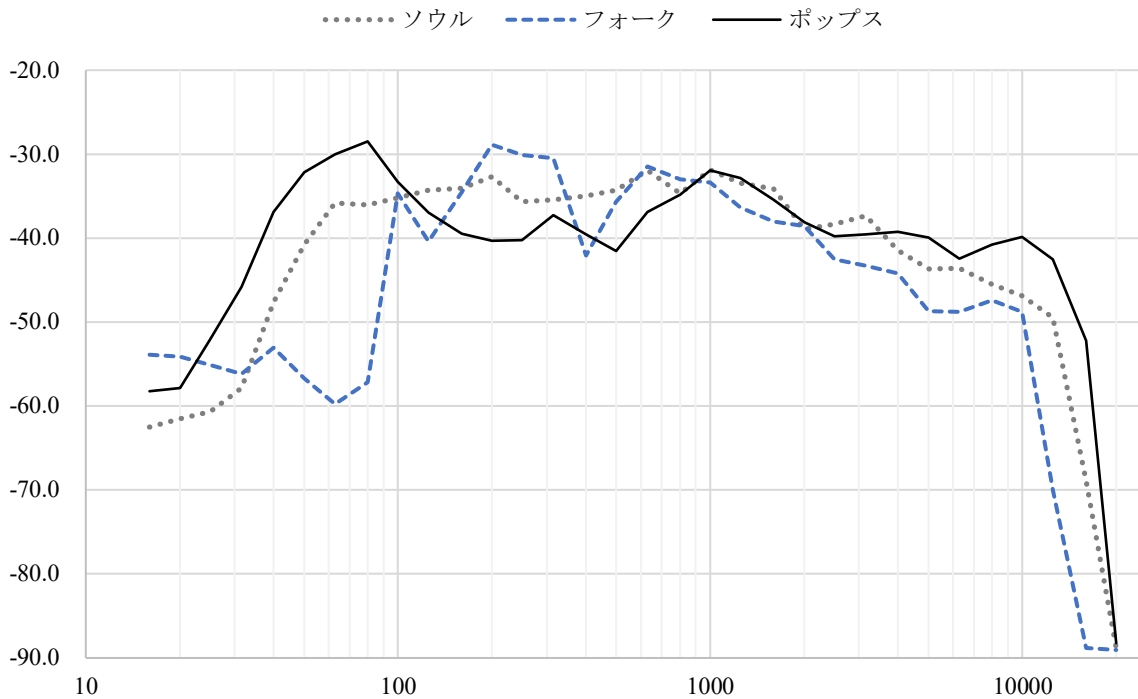


図 5.2 実験音源の周波数応答特性

5.2.3 実験方法

実験は、防音室 (D-30) にヘッドレストスピーカを設置した自動車用シートを持ち込んで行った。実験中は、蛍光灯で室内の照度を一定に保った。実験参加者をシートに着座させて、実験者が楽曲提示用 PC (dynabook PAZ35GB-SNH) から各楽曲を提示した。評価は図 5.3 に示す評価フォームを評価入力用タブレット (Apple iPad Pro 11 インチ, モデル番号: A1980)) に表示し、タブレットを実験参加者自身の手元で保持させ、試行ごとに 7 段階の評価を入力させた。実験環境を図 5.4 に示す。

実験では、4 タイプのスピーカについて、それぞれ 3 曲の楽曲を提示した。順序効果を考慮してスピーカの提示順は実験参加者ごとにランダムとし、楽曲の提示順についてもスピーカ別にランダムとした。実験参加者が回答の入力を終了するまで、各 30 秒の楽曲をリピート再生で提示し続け、評価の終了を確認した後に次の楽曲提示へ移行した。なお、楽曲の聴取を確実に行わせるため、楽曲提示開始後 30 秒間 (1 回目の楽曲提示) は評価の回答を禁止とし、楽曲の聴取に集中させた。また、実験は実験参加者 1 人当たり 2 セッション行い、1 セッション当たり楽曲 6 曲 (スピーカ 2 タイプ分) を提示した。なお、同一実験参加者の次セッションの実施は、最低 1 時間空けるようにした。

また、音楽への興味度合いが嗜好性の評価に影響すると考え、実験参加者の音響に関する属性について把握をするために以下の設問を示し、実験開始前にアンケート調査を実施した。表 5.4 に回答結果を示す。

【音楽聴取に関するアンケート】

1. 順序尺度設問

- 音楽鑑賞の頻度
(たまに, 週数回, 毎日)
- オーディオへの関心
(全く関心がない, あまり関心がない, 少し関心がある, とても関心がある)

2. 名義尺度設問 (0:当てはまらない, 1:当てはまる)

- 好きな音楽ジャンル
(J-POP, ロック, テクノ・EDM, クラシック, その他)
- 普段使用するデバイス
(イヤホン, ヘッドホン, スピーカ)
- 楽器演奏の経験有無
(なし, あり)

しっかりした *								
	1	2	3	4	5	6	7	
あてはまらない	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	あてはまる
ナチュラルな *								
	1	2	3	4	5	6	7	
あてはまらない	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	あてはまる
引き込まれる *								
	1	2	3	4	5	6	7	
あてはまらない	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	あてはまる
穏やかな *								

図 5.3 評価フォーム例



図 5.4 実験環境

表 5.4 アンケート調査結果

実験 参加者	鑑賞 頻度	好きな音楽ジャンル					普段使用するデバイス			オーディオ 興味	楽器 経験
		J-POP	ロック	テクノ EDM	クラシ ック	他	イヤホン	ヘッド ホン	スピーカ		
A	毎日	●					●	●	●	とても	●
B	毎日		●				●		●	とても	
C	週数回			●			●		●	とても	●
D	毎日		●			●		●	●	とても	●
E	毎日	●					●		●	ない	
F	週数回				●		●			少し	●
G	毎日		●				●		●	とても	●
H	毎日	●	●				●		●	とても	
I	毎日					●	●			少し	●
J	たまに			●			●			少し	
K	毎日					●			●	少し	
L	週数回	●					●		●	あまり	●
M	毎日					●	●	●		あまり	●
N	毎日	●					●		●	少し	
O	毎日	●						●		少し	
P	毎日	●					●			あまり	
Q	毎日	●							●	あまり	●
R	毎日		●				●			あまり	
S	週数回					●	●			あまり	
T	毎日	●					●			とても	●
U	週数回	●					●		●	少し	
V	毎日			●		●	●			とても	●
W	週数回		●				●			あまり	●
X	週数回				●		●			少し	●
Y	毎日	●					●		●	少し	
Z	毎日	●					●			少し	
AA	毎日		●				●			あまり	
AB	毎日		●						●	とても	
AC	毎日	●					●			少し	
AD	毎日	●					●			とても	●
AE	毎日			●			●		●	少し	
AF	毎日	●							●	少し	●
AG	たまに	●					●			あまり	●
AH	毎日			●			●	●		少し	
AI	毎日	●						●		少し	
AJ	毎日					●			●	とても	●
AK	毎日	●							●	あまり	
AL	毎日					●			●	あまり	
AM	毎日			●			●		●	とても	●
AN	毎日	●					●			少し	●

5.2.4 実験結果

① 評価得点

ヘッドレストスピーカ 4 タイプの評価結果を図 5.5 に示す。全般的にタイプ A の評価が高く、タイプ B の評価が低い結果となった。タイプ A は“ナチュラルな”，“居心地の良い”，“耳に優しい”，“引き込まれる”，“聞き続けたい”，“心が躍る”，“穏やかな”，“しっかりした”，および、嗜好性を表す“好き”の 9 項目の得点が最も高く、特に“聞き続けたい”の評価が圧倒的に高い。また、その他の評価語においても他 3 タイプと大きな差はない。一方で、タイプ B は“穏やかな”の得点以外の項目が他 3 タイプより劣り、嗜好性を表す“好き”においては大きく下回った。タイプ C, D は“晴れやかな”と“広がりがある”がタイプ A を上回っているが，“聞き続けたい”の評価が低く、さらにタイプ D は“居心地の良い”，“耳に優しい”の評価が低いことから、聞き疲れすることが考えられる。

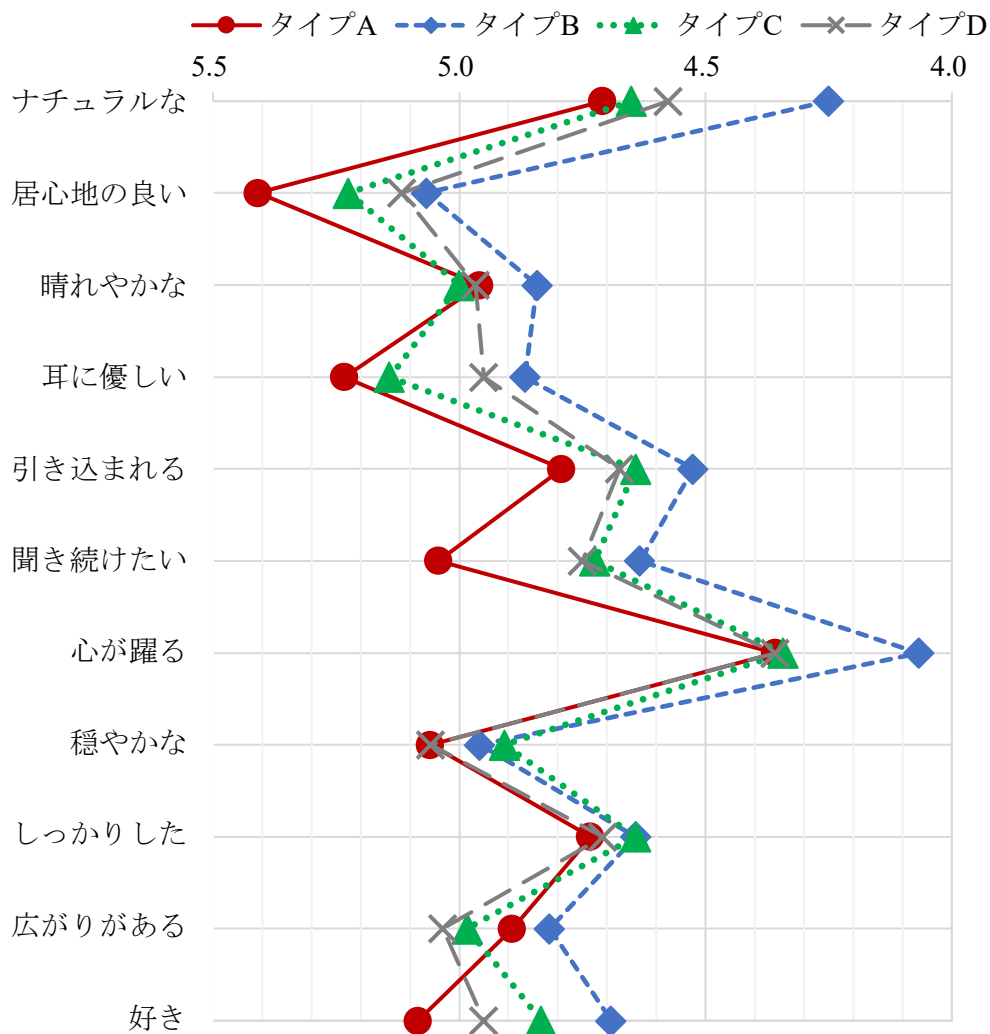


図 5.5 ヘッドレストスピーカ タイプ別 評価得点

次に、楽曲別の「好き」を除く全評価語における平均評価得点を表 5.5, 図 5.6 に示す。全平均得点 4.81 に対して最も得点が高い曲は“ソウル”で 5.11, 最も得点が高い曲は“フォーク”で 4.60 であった。ただし、いずれも評価得点の中央値 4 を上回るポジティブ側の評価であった。また、標準偏差値に着目すると、平均得点と同様に“ソウル”が回答のばらつきが最も小さく 1.28, “フォーク”が回答のばらつきが最も大きく 1.46 の結果であった。スピーカタイプ別では大きな差はないものの、いずれの楽曲でもタイプ A の得点が高く、タイプ B の得点が高い。また、“ソウル”はタイプ B 以外ではほとんど評価に差がなく、“フォーク”ではタイプ B・D の得点が高い。“ポップス”では得点の高い順にタイプ A, D, C, B となっている。なお、タイプ D は“ソウル”の特定が高い一方で、“フォーク”の得点が高くなっていることから、不得意な曲であると考えられる。このタイプ D の特性を表 5.1, 図 5.1 により確認すると、残響がタイプ A・C に比べて多く、同様に得点が高いタイプ B も残響が多いことから、“フォーク”は残響の影響が大きいと思われる。

次に、嗜好性の評価語「好き」に対する楽曲別の平均評価得点を表 5.6, 図 5.7 に示す。平均得点 4.63 に対して、“好き”を除く全評価語（表 5.5）と同様に“ソウル”が最も高く 5.11, “フォーク”が最も低く 4.69 であった。また、標準偏差値では“ソウル”が回答のばらつきが最も小さく 1.20, “ポップス”が回答のばらつきが最も大きい 1.34 の結果であった。スピーカタイプ別の評価については、図 5.7 の示す通り、全評価語の平均得点の傾向と大きな差はないが、全般的にタイプ A が好まれている。また、タイプ C の“フォーク”と“ポップス”では、全評価語の結果に対して評価の逆転が見られた。これを図 5.5 の各評価語のタイプ B・C・D の得点により確認すると、「聞き続けたい」の評価が低いことが影響していると考えられる。

実験参加者の属性による嗜好性の層別平均得点を表 5.7, 図 5.8 に示す。ここでは、音楽への興味度合いが嗜好性の評価に影響すると考え、前述の実験参加者の音響に関するアンケートにおいて、「オーディオへの関心」が“少し関心がある”と“とても関心がある”と回答した人を（表 5.4 “オーディオ興味”列 参照）を“オーディオ愛好家”（14 人）とし、楽器経験があると回答した人を“楽器経験者”（5 人）、“オーディオ愛好家”と“楽器経験者”のどちらにも該当する人を“両方（14 人）”とし、そのどちらにも該当しない人を“どちらでもない人”（7 人）として比較した。図 5.8 を見ると、“楽器経験者”は他の層と比較して全体的に得点が高く、“両方”は“オーディオ愛好家”と似通った評価傾向であった。また、楽曲別と同様に、どの層でもタイプ A が好まれている結果であった。ただし、“オーディオ愛好家”はタイプ D の得点がタイプ A と同点、“両方”ではタイプ D がタイプ A をわずかに上回っている。また、“楽器経験者”は、他の層よりもタイプ C の評価が低かった。“どちらでもない人”では、4 タイプの中でタイプ D が最も低い評価であった。

表 5.5 楽曲別の全評価語の平均得点（評価語“好き”を除く）と標準偏差

	楽曲	タイプ A	タイプ B	タイプ C	タイプ D	全タイプ平均
平均	ソウル	5.11	4.89	5.09	5.14	5.05
	フォーク	4.75	4.50	4.67	4.50	4.60
	ポップス	4.90	4.61	4.72	4.83	4.77
	全曲	4.93	4.67	4.83	4.82	4.81
標準偏差	ソウル	1.28	1.29	1.27	1.25	1.28
	フォーク	1.40	1.47	1.47	1.50	1.46
	ポップス	1.32	1.30	1.27	1.29	1.30
	全曲	1.34	1.36	1.35	1.38	1.36

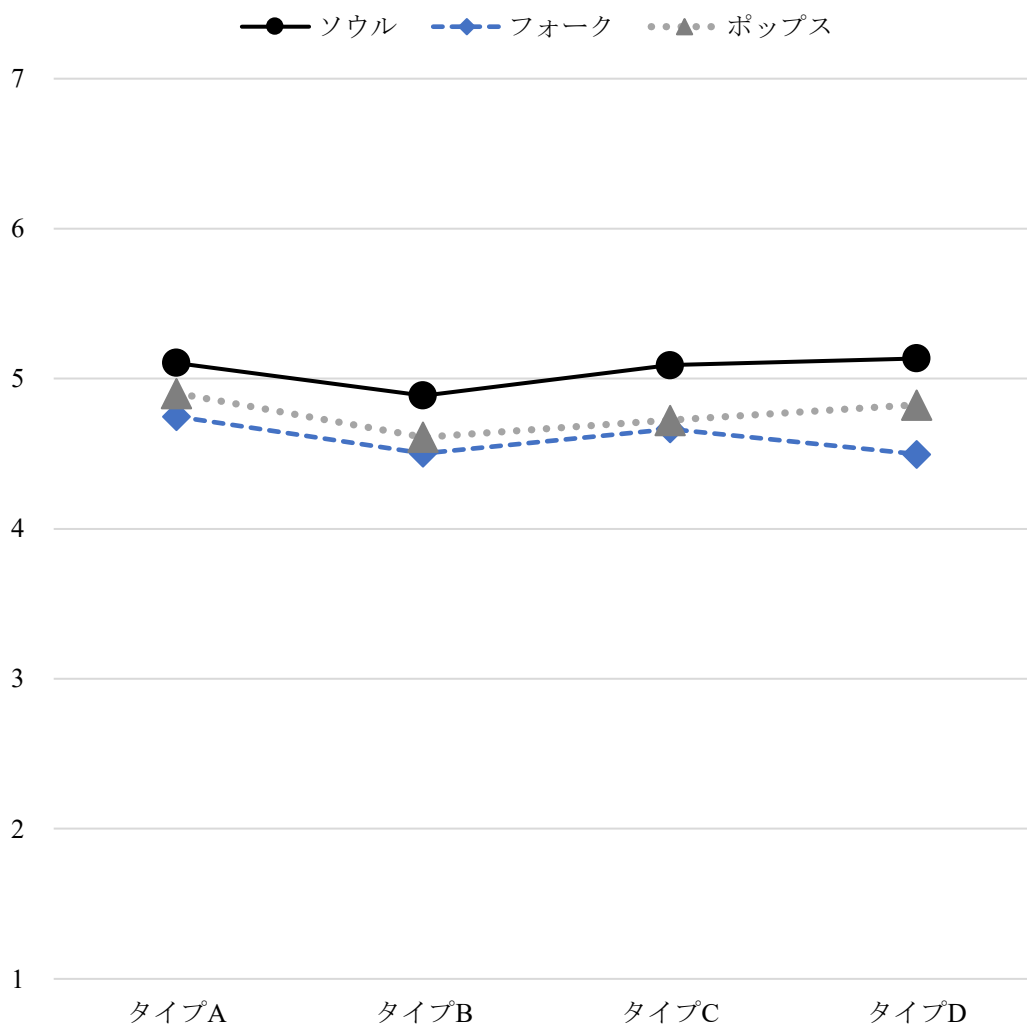


図 5.6 楽曲別 全評価語の平均得点（評価語「好き」を除く）

表 5.6 楽曲別の嗜好性“好き”の平均得点と標準偏差

	楽曲	タイプ A	タイプ B	タイプ C	タイプ D	全タイプ 平均
平均	ソウル	5.25	4.88	5.08	5.23	5.11
	フォーク	4.85	4.50	4.80	4.60	4.69
	ポップス	5.15	4.70	4.63	5.03	4.88
	全曲	4.68	4.52	4.65	4.66	4.63
標準偏差	ソウル	1.13	1.19	1.27	1.17	1.20
	フォーク	1.15	1.36	1.27	1.22	1.26
	ポップス	1.24	1.52	1.28	1.21	1.34
	全曲	1.50	1.53	1.45	1.46	1.49

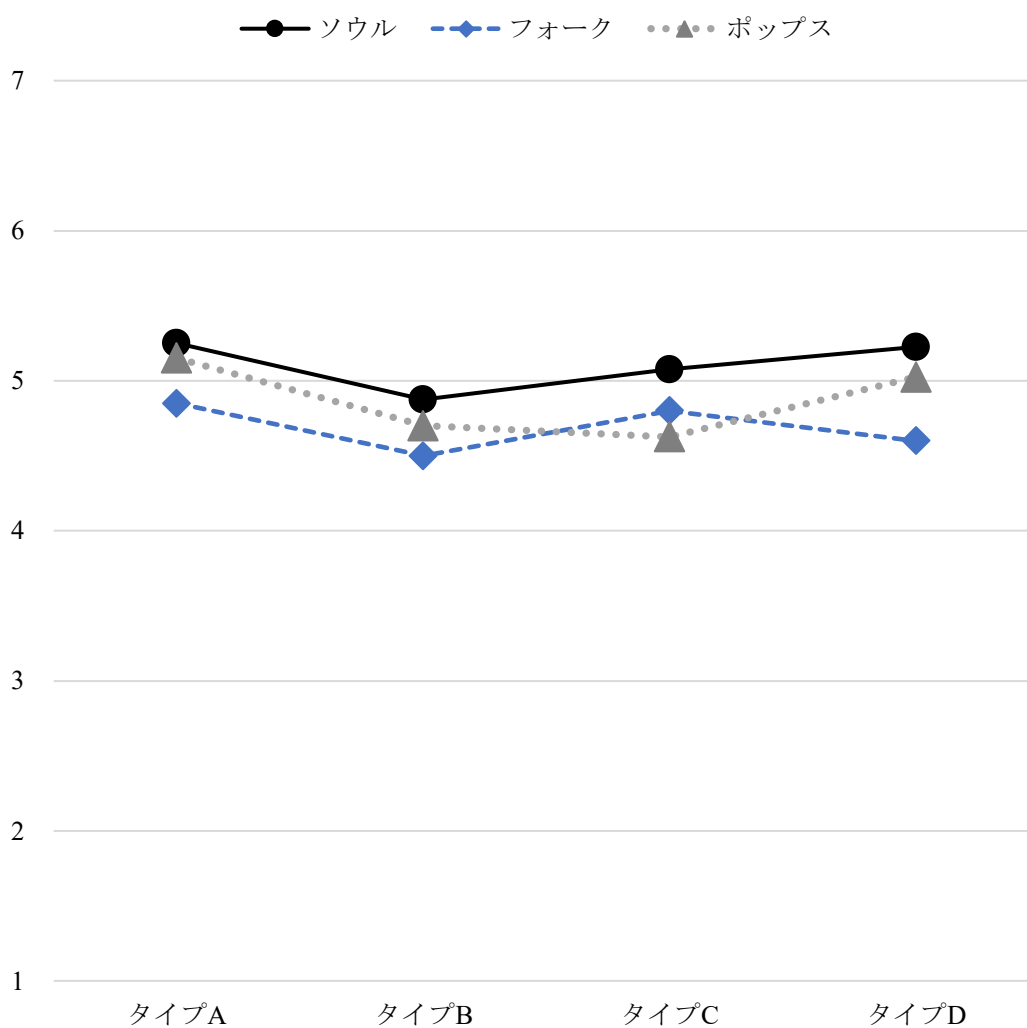


図 5.7 楽曲別 嗜好性“好き”の平均得点

表 5.7 実験参加者 属性別 嗜好性“好き”の平均得点と標準偏差

	実験参加者属性	人数	タイプ A	タイプ B	タイプ C	タイプ D	全タイプ平均
平均	オーディオ愛好家	14	5.19	4.81	5.00	5.19	5.05
	楽器経験者	5	4.87	4.33	4.27	4.60	4.52
	両方	14	5.02	4.71	4.88	5.07	4.92
	どちらでもない人	7	5.14	4.67	4.81	4.48	4.77
	全員	40	4.92	4.67	4.83	4.82	4.81
標準偏差	オーディオ愛好家	14	1.18	1.65	1.23	1.05	1.31
	楽器経験者	5	0.96	0.87	1.00	1.14	1.02
	両方	14	1.28	1.22	1.38	1.30	1.30
	どちらでもない人	7	1.12	1.28	1.26	1.30	1.27
	全員	40	1.34	1.36	1.35	1.38	1.36

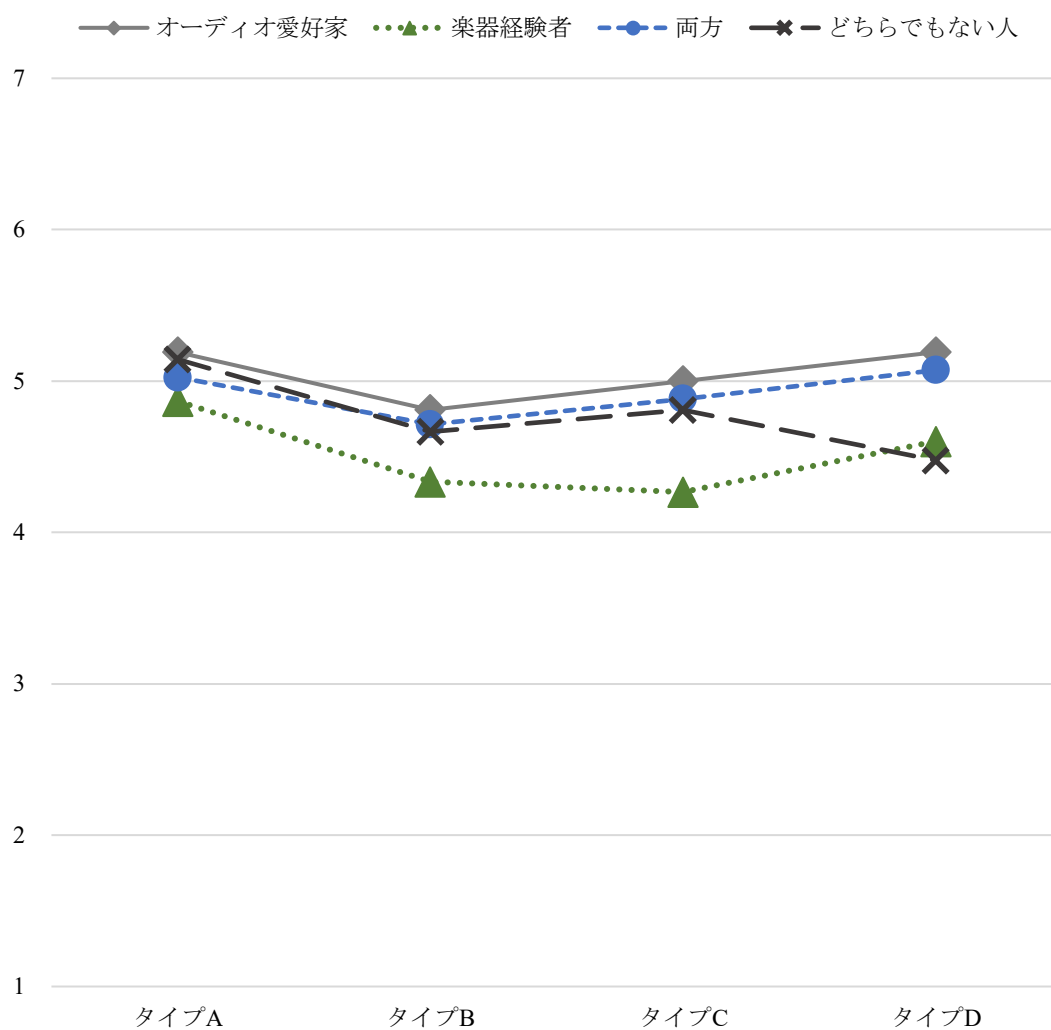


図 5.8 実験参加者 層別 (属性別) の嗜好性の平均得点

② 因子分析

次に、これらの評価結果を用いて因子分析を行なった。なお、評価語の“好き”は嗜好性の評価として扱ったため、これを除いた評価語 10 語で分析した。因子抽出法は最尤法を用い、第二成分までが固有値が 1 以上で、累積“寄与率が約 6 割であったことから、第一成分から第二成分を扱うこととした（表 5.8）。次に、第一成分から第二成分を主成分として、バリマックス法を用いて分析した結果を表 5.9 に示す。

表 5.8 因子分析の寄与率

成分	固有値	寄与率	累積寄与率
1	3.920	39.2%	39.2%
2	2.056	20.6%	59.8%
3	0.932	9.3%	69.1%
4	0.784	7.8%	76.9%
5	0.657	6.6%	83.5%
6	0.497	5.0%	88.5%
7	0.443	4.4%	92.9%
8	0.316	3.2%	96.0%
9	0.211	2.1%	98.2%
10	0.184	1.8%	100.0%

表 5.9 第一成分から第三成分の因子負荷量（バリマックス回転後）

評価語	因子	
	第一成分	第二成分
心が躍る	0.789	-0.069
晴れやかな	0.686	-0.013
聞き続けたい	0.575	0.485
引き込まれる	0.566	0.324
しっかりした	0.476	0.207
広がりがある	0.476	0.303
居心地の良い	0.413	0.728
耳に優しい	0.133	0.706
穏やかな	-0.118	0.658
ナチュラルな	0.224	0.552

ここで、第一成分は“心が躍る”，“晴れやかな”，“聞き続けたい”，“引き込まれる”，“しっくりした”，および，“広がりがある”の音の空間に関する評価語に高い負荷量を示したので、「音場性」因子とした。第二成分は，“居心地の良い”，“耳に優しい”，“穏やかな”，および，“ナチュラルな”の快適性に関する評価語に高い負荷量を示したため、「快適性」因子とした。

各スピーカタイプの因子得点を層別（属性別）に算出した結果の覧を表 5.10 に、そのグラフを図 5.9～5.13 に示す。

図 5.9 に示す通り、全平均の因子得点の比較では、タイプ A が「快適性」と「音場性」共に最も高く、タイプ B が最も低い評価となっている。また、「音場性」では、タイプ C と D は差がない結果である。

層別では、“オーディオ愛好家”（図 5.10）は、全平均（図 5.9）と同様に「快適性」はタイプ A が最も高い一方、「音場性」はタイプ C が最も高い結果となったが、タイプ A との差はわずかである。“楽器経験者”（図 5.11）では、タイプ D の「快適性」が圧倒的に高いが、「音場性」はタイプ別の差が小さい。これは、表 5.1、図 5.1 のタイプ別の特徴から判断すると、タイプ B・D は残響が多いこと、タイプ A・D は低音域（30～500 Hz）が他のタイプに比べて豊かであることが影響していると考えられる。このことから、“楽器経験者”は、他の層とは違った観点で評価していると思われる。また、“両方”（“オーディオ愛好家”で“楽器経験者”の人）（図 5.12）では、「快適性」は“オーディオ愛好家”の評価に類似しているが、タイプ Cの方がタイプ A よりわずかに上回り、「音場性」ではタイプ D が最も高く、次いでタイプ A の評価であった。“どちらでもない人”（“オーディオ愛好家”でも“楽器経験者”でもない人）（図 5.13）は、「快適性」・「音場性」ともタイプ A が高い結果であったが、評価が 2 番目以降の順位は他の層と大きく異なっている。

この様に、「快適性」については、全ての層でタイプ A の因子得点が上位であった。ただし、「音場性」については、層ごとに異なった傾向を示した。そこで、各層が重視する因子について、重回帰分析を用いて分析した。嗜好性を表す評価語の“好き”を目的変数、各因子を説明変数として分析した結果に対し、標準回帰係数をそれぞれの重要度とし、その割合を算出した。標準回帰係数の一覧を表 5.11、重要度割合の算出結果を図 5.16 に示す。“オーディオ愛好家”，“楽器経験者”，および，“両方”は「快適性」の重要度が 50 % を越えているが、「音場性」の重要度との差は大きくない。しかし，“どちらでもない人”は「音場性」の重要度が約 6 割で、他の層と異なっていることが明らかとなった。従って、音楽への興味度合いが高い層に製品を訴求する場合は、考慮が必要であると考えられる。

以上の結果から、快適性に優れた特性のヘッドレストスピーカとして、タイプ A を選出した。タイプ A の周波数応答特性を図 5.14、過渡応答特性を図 5.15 に示す。

表 5.10 属性別 スピーカタイプの因子得点

属性	タイプ	快適性	音場性
全平均	A	0.144	0.072
	B	-0.101	-0.124
	C	0.003	0.026
	D	-0.045	0.026
オーディオ愛好家	A	0.365	0.205
	B	0.075	0.036
	C	0.298	0.254
	D	0.167	0.176
楽器経験者	A	-0.150	-0.250
	B	-0.313	-0.202
	C	-0.590	-0.272
	D	0.066	-0.300
両方	A	0.120	0.049
	B	-0.062	-0.133
	C	0.183	-0.036
	D	-0.069	0.079
どちらでもない人	A	-0.043	0.080
	B	-0.379	-0.369
	C	-0.526	-0.097
	D	-0.505	-0.144

注記) 各層の因子で最も高い得点を“赤字”, 2番目を“青字”で示す。

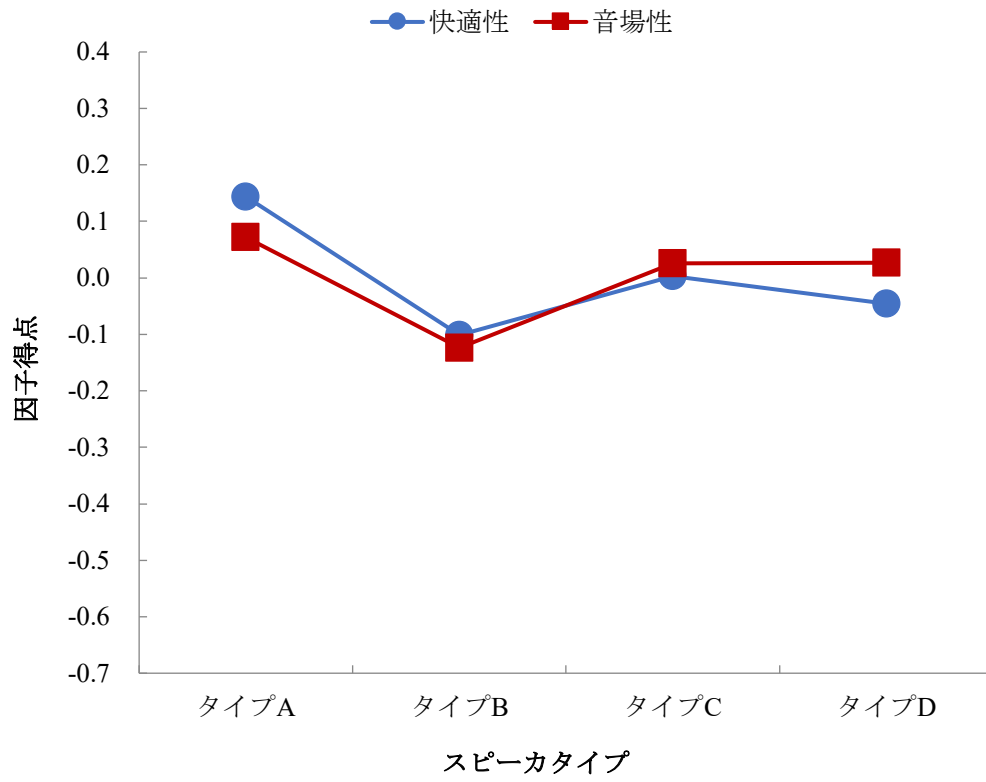


図 5.9 因子得点グラフ (全平均)

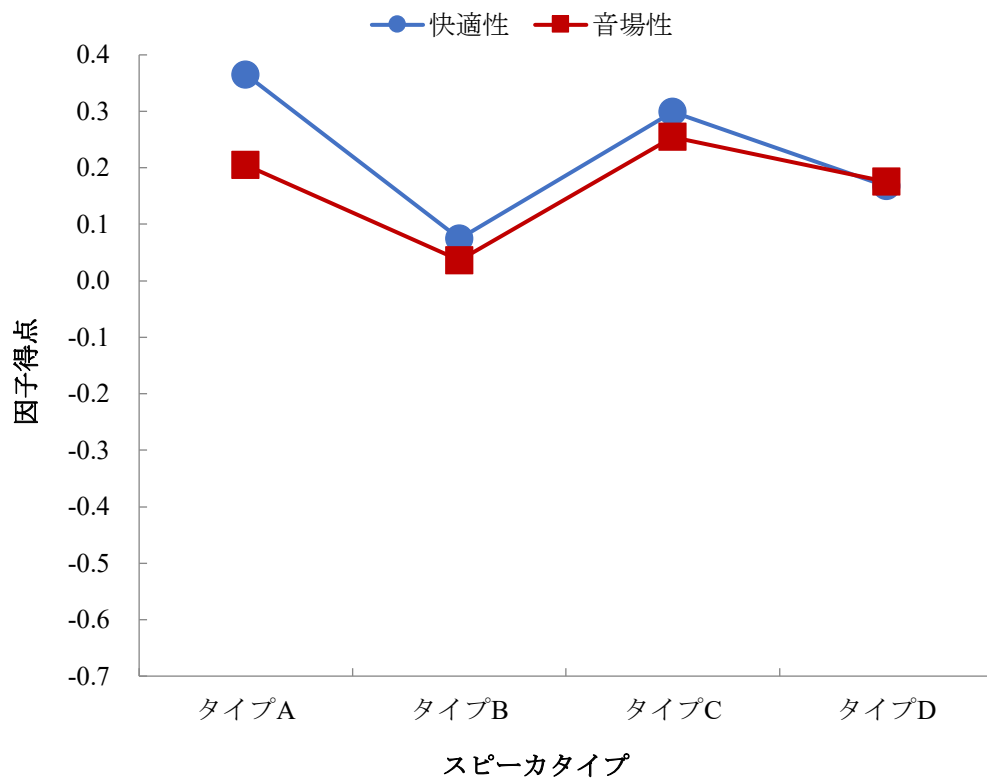


図 5.10 因子得点グラフ (オーディオ愛好家)

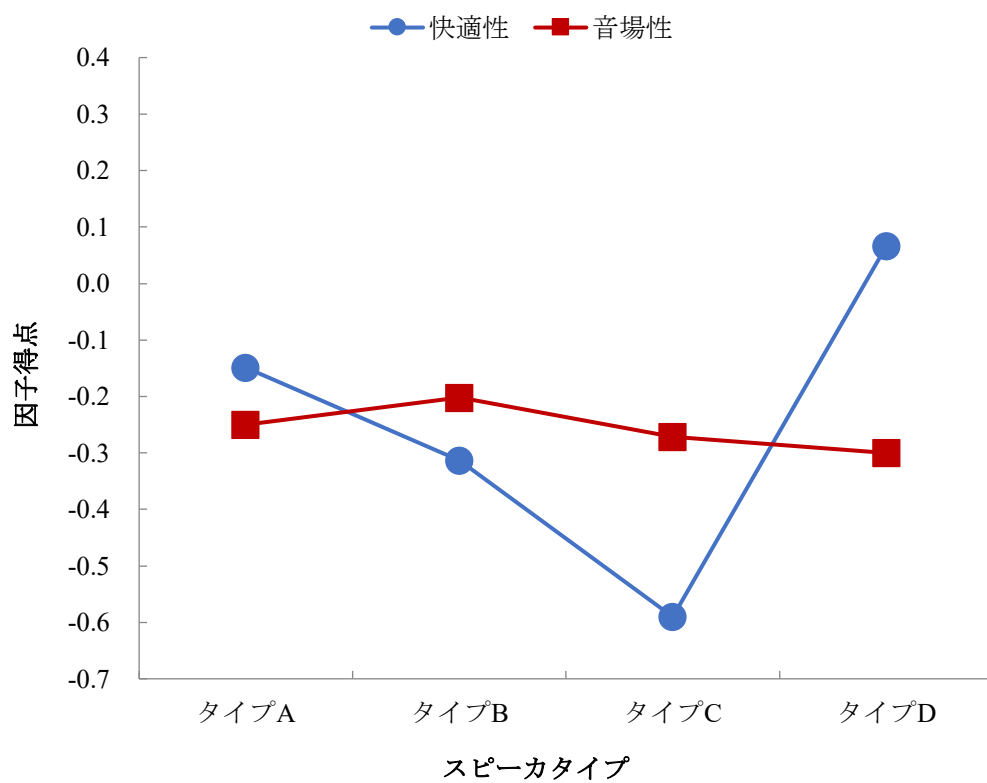


図 5.11 因子得点グラフ (楽器経験者)

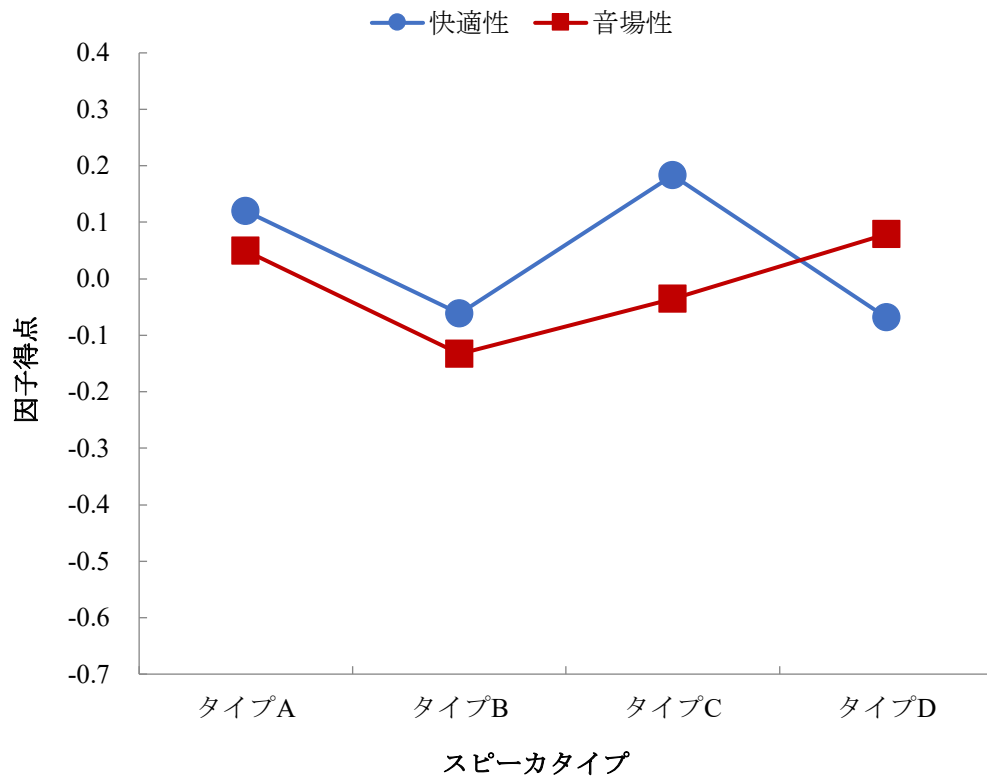


図 5.1 2 因子得点グラフ (両方 - オーディオ愛好家・楽器経験者)

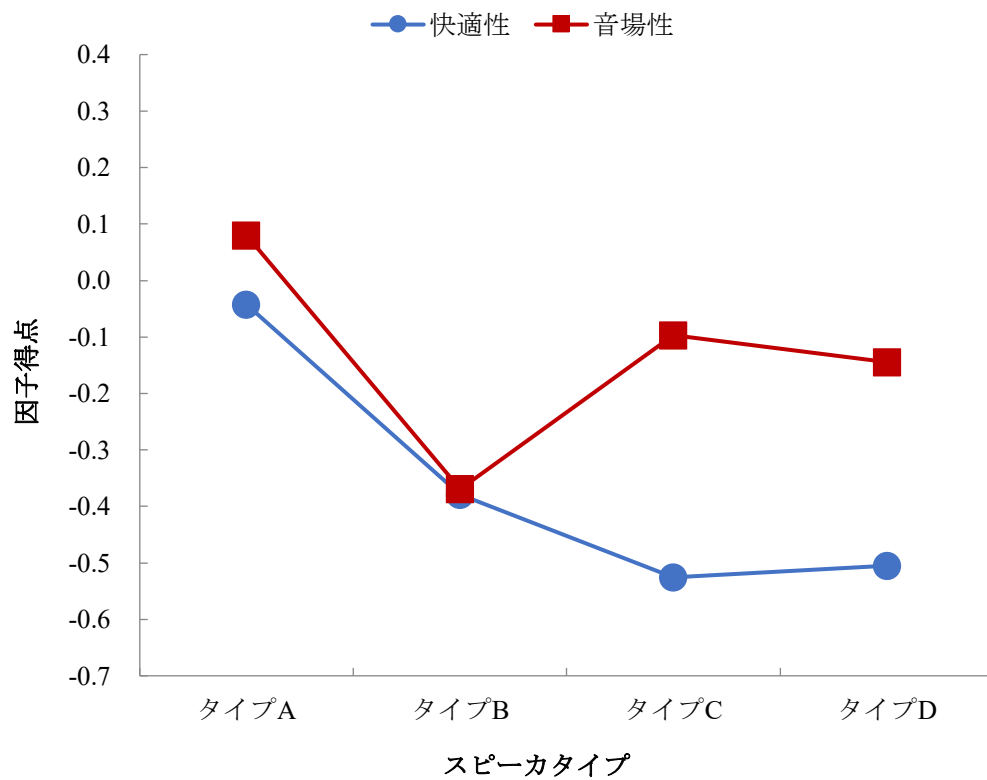


図 5.1 3 因子得点グラフ (どちらでもない人)

表 5.1 1 属性別 各因子の重み (重回帰分析結果)

	標準回帰係数		決定係数	自由度修正 済み 決定係数
	音場性	快適性		
全平均	0.545	0.469	0.628	0.626
オーディオ愛好家	0.627	0.476	0.658	0.655
楽器経験者	0.543	0.440	0.615	0.610
両方	0.567	0.444	0.639	0.632
どちらでもない人	0.438	0.595	0.592	0.577

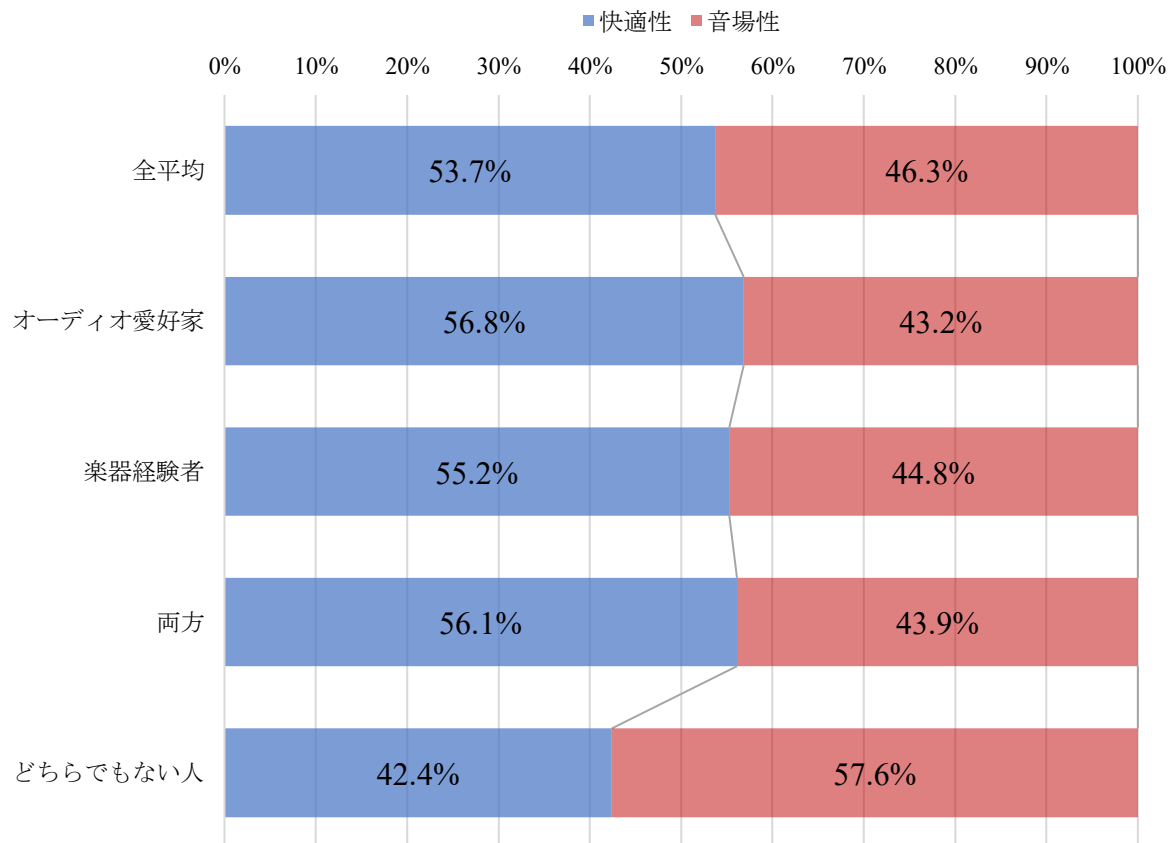


図 5.1 4 属性別 各因子の重要度割合

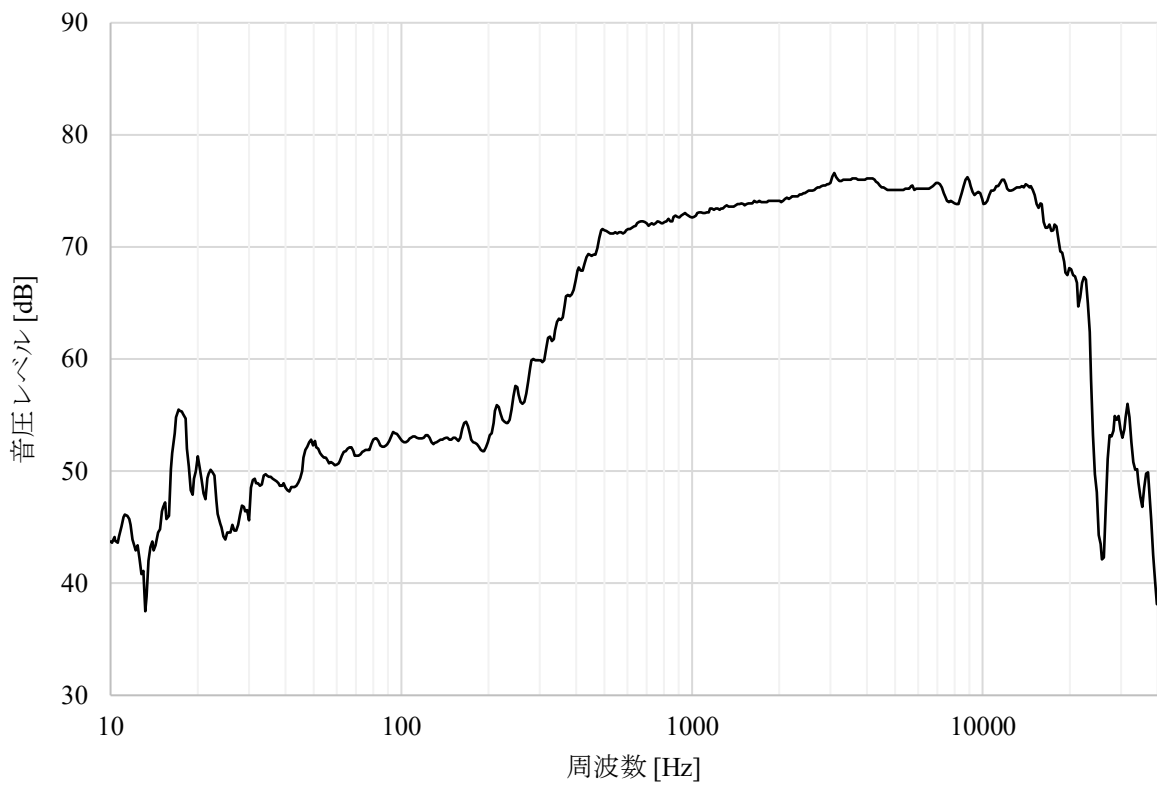


図 5.15 タイプ A の周波数応答特性

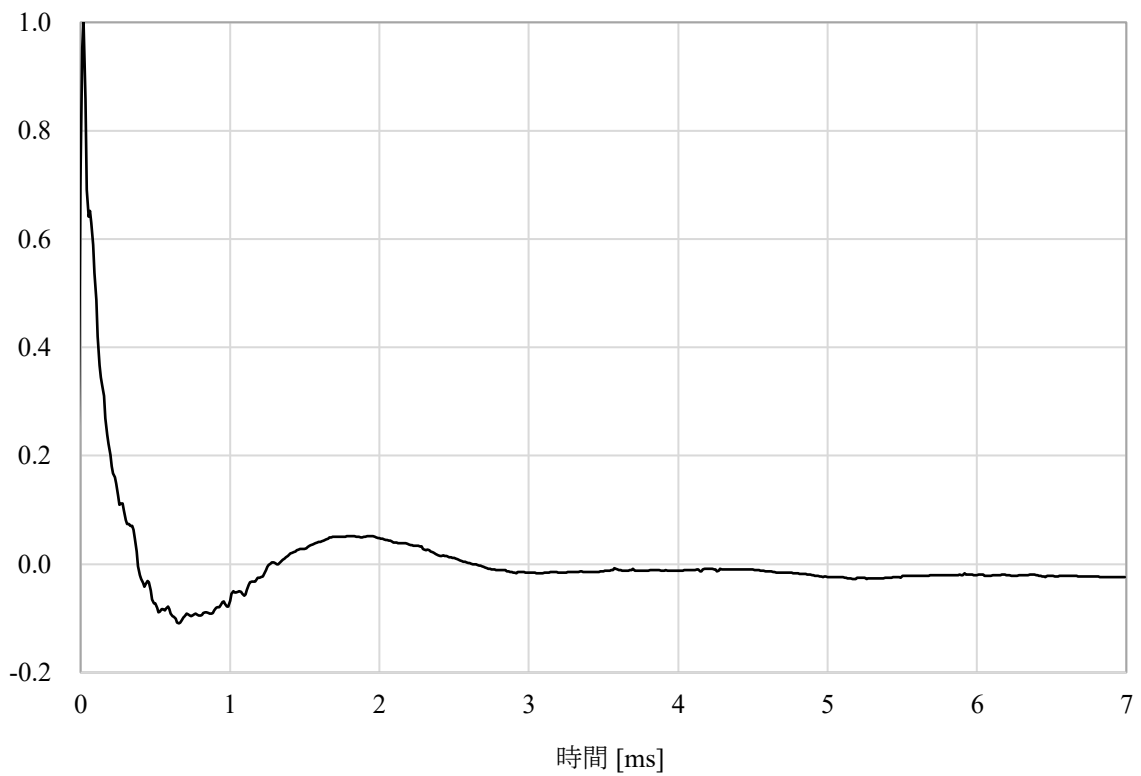


図 5.16 タイプ A の過渡応答特性

5.3 考察

まずはじめに、因子分析において抽出された「音場性」因子と「快適性」因子について考察する。これらの因子に含まれる評価語は、第2章で抽出された「音場性」因子と「快適性」因子にそれぞれ含まれる評価語と異なった結果となった。これは、そもそも用いた評価語が異なることが主原因だが、前述(4.5節 考察)の通り、今回の主観評価実験で用いた評価語は感性的な価値を表す語で、第2章で用いた評価語は機能や性能を評価する語であることに端を発していると考えられる。例えば、第2章の「音場性」因子に含まれる“奥行きがある”は、機能のイメージを表す語で心理的な状態を表す語とは言えない。一方で、今回の「音場性」因子に含まれる“引き込まれる”は心理的な状態を表す語である。“引き込まれる”は“奥行きがある”機能(あるいは状況)で生じる心理とすれば、“引き込まれる”は“奥行きのある”の上位の語であると考えられるため、ほぼ同等な因子を表していると思われる。「快適性」因子に含まれる評価語についても、同様に考えればほぼ同等な因子であると言える。“心地よい”は“居心地が良い”と同等な意味合いがあると考えられ、“疲れない”のは“耳に優しい”結果であると考えられる。

次に、第2章の因子分析において抽出された「明瞭性」因子が、今回の因子に現れていないことについて考察する。「音場性」因子、「快適性」因子と同様に、用いた評価語が異なることが主原因だが、そもそも今回の実験に用いた評価語の中に、明瞭を直接的に評価する語が含まれていないことがその要因である。これは、前述(4.5節 考察)の通り、明瞭性は機能や性能を表す語で、心理的な価値に重きを置く“評価する人”は意識していない可能性がある。表4.4に示した評価語候補には、“クリアな(11. Clear)”や“すっきりした(52. Clean)”, および、“聞き取りやすい(68. Easy to hear)”などの「明瞭性」に関する語が含まれていたが、表4.6に示す通り、クラスタ3「明瞭性」の語群の中からグラフィカルモデリング(Graphical Modeling)により“晴れやかな(99. Radiant)”が選出されている。この“晴れやかな”は、今回の因子分析では「音場性」因子に含まれており、「明瞭性」は独立した因子ではなく、「音場性」の一つであると考えられる。さらには、評価語の適合性実験(4.3節)における提示音は楽曲のみで行っており、報知音や音声情報(インフォメーション)が実験刺激に含まれていなかったことも、その一因の可能性があると考えられる。

続いて、前節においてタイプAの快適性が高いヘッドレストスピーカとして選出したことに対し、その音質の特徴から快適性に優れる音質について考察する。表5.12に示す通り、⑦ SM_{FR} (30~20kHzの平滑度)と⑨ SM_{SR} (応答曲線の平滑度)の値が他に比べて小さい。また、⑧ A (時間軸と応答曲線で囲まれた面積)の値も小さいことがわかる。

以上のことから、周波数ごとの音圧レベルが凸凹のないフラットな周波数特性カーブで、残響が短く、スムーズに収束することが、快適な音質を適えるための要素であると言える。

なお、これらの最適な音質は、一般的にホームオーディオで求められる音質と同等と思われる。従って、ヘッドレストスピーカを用いることで、車室内の特殊な音響特性の影響を受けにくい、快適なカーオーディオの音質が実現できると考えられる。

表 5.1 2 選定したヘッドレストスピーカの音響特性一覧（表 3.12 を抜粋して再記載）

評価項目	評価特性		タイプ A	タイプ B	タイプ C	タイプ D
周波数 応答 特性	①	SP _l 30～200Hz の合成音圧	73.1	77.0	72.3	71.6
	②	SP _{lm} 200～500Hz の合成音圧	82.9	82.7	84.1	83.3
	③	SP _m 500～4kHz の合成音圧	95.5	95.6	93.6	94.9
	④	SP _{mh} 4k～10kHz の合成音圧	93.2	92.0	92.4	92.0
	⑤	SP _h 10k～16k0Hz の合成音圧	90.1	88.5	97.9	93.4
	⑥	SP _{hh} 16k～20kHz の合成音圧	83.0	79.1	74.6	91.9
	⑦	SM _{FR} 30～20kHz の平滑度（曲線の滑らかさ）	0.098	0.175	0.124	0.108
過渡 特性	⑧	A 時間軸と応答曲線で囲まれた面積（残響）	0.308	0.479	0.306	0.332
	⑨	SM _{SR} 応答曲線の平滑度（曲線の滑らかさ）	0.0007	0.0008	0.0023	0.0020
因子 負荷量	第 1 主成分 (PC1)		-0.116	-0.844	1.477	0.659
	第 2 主成分 (PC2)		1.557	-1.098	0.866	-1.174
	第 3 主成分 (PC3)		-1.681	0.714	0.906	-0.626

5.4 まとめ

本章では、第3章で選定した4タイプのヘッドレストスピーカに対して、第4章で選出した評価語11語と、評価ばらつきが少なかった曲の中からの3曲を用いて主観評価実験により比較し、快適性が高いヘッドレストスピーカを探索した。

その結果、タイプAのヘッドレストスピーカの評価が全般的に高く、タイプBが最も低い評価であった。特にタイプAは、評価語の“聞き続けたい”において、他のタイプと比較して圧倒的に高い結果であった。

実験に使用した“ソウル”、“フォーク”、“ポップス”に対する各スピーカタイプの全評価語の平均得点では、タイプAは“フォーク”、“ポップス”の評価が高く、タイプDは“ソウル”の評価が高い一方で“フォーク”の評価が低く、残響の影響が大きいと思われる。

嗜好性の評価語「好き」については、全般的にタイプAが好まれている。また、タイプCの“フォーク”と“ポップス”の得点で、全評価語の平均得点に対して逆転が見られた。これは、タイプCの「聞き続けたい」の評価が低いことが影響していると思われる。

また、音楽への興味度合いが嗜好性の評価に影響すると考え、実験参加者のアンケート結果から、“オーディオ愛好家”、“楽器経験者”、“両方”、および、“どちらでもない人”に層別に分類して比較した。その結果、どの層でもタイプAが好まれていることがわかった。ただし、“オーディオ愛好家”はタイプAとDの評価が同等で、“両方”ではタイプDの評価がタイプAをわずかに上回った。また、“どちらでもない人”では、4タイプの中でタイプDが最も低い評価であった。

さらに、これらの得点を用いて因子分析を行い、「快適性」と「音場性」の2因子を抽出して4タイプを比較した。その結果、全平均ではタイプAが「快適性」と「音場性」の評価が最も高い結果を示した。層別の比較では「快適性」は全般的にタイプAが優れていたが、「音場性」については異なった傾向を示した。そこで、重回帰分析により層ごとの因子の重要度を分析した結果、“どちらでもない人”以外は「快適性」と「音場性」は同程度の重要度であった。一方、“どちらでもない人”は「音場性」の割合が高かった。従って、音楽への興味度合いが高い層を中心に製品を訴求する場合は、考慮が必要であると考えられる。

以上により、本研究において最も優れた特性の快適なヘッドレストスピーカとして、タイプAを選定した。また、この結果をもとに高評価となる音響特性を考察すると、周波数ごとの音圧レベルがフラットな特性で、残響が短く、スムーズに収束する特性が、快適な音質を適えるための要素であることが明らかとなった。これらの音質は、一般的にホームオーディオで求められる音質と同等と思われるため、ヘッドレストスピーカを用いることで、車室内の特殊な音響特性の影響を受けにくく、快適なカーオーディオの音質が実現できると考えられる。

第6章 結論

本研究は、車室内の音環境を考慮した快適なカーオーディオの音質を簡便な方法で実現するために、ヘッドレストスピーカを用いて主観評価に基づいた最適化を試行した。

第1章では、カーオーディオを聴取する際において、問題となる車室内の騒音と特殊な音響特性について明らかにし、スピーカを聴取点に近づけることによる優位性を提言し、ヘッドレストスピーカをメインスピーカとすることが最適であることを述べた。

第2章では、試作したヘッドレストスピーカと標準で搭載される一般的なドアスピーカの比較実験を主観評価により行った。その結果、ヘッドレストスピーカは標準のドアスピーカに対して、ほとんどの評価項目で高い評価を得た。また、因子分析により「快適性」、「音場性」、および、「明瞭性」の3因子を抽出して比較したところ、ヘッドレストスピーカは「音場性」と「明瞭性」は優れていたが、「快適性」が劣る結果であった。

第3章では、快適性の向上を目指してヘッドレストスピーカの特長改善を行った。主要素であるスピーカユニットに対して、実験計画法を用いて特性の最適化を実施し、さらにエンクロージャと吸音材を組み合わせたスピーカBOX化（スピーカシステム化）を行うことでヘッドレストスピーカの音質を改善すると共に、音質の特性別に4タイプに分類した。

第4章では、カーオーディオの評価において、これまで用いてきた一般的な評価語が適切ではないと考え、カーオーディオの音質評価に用いる適切な語の選出を行った。クラスター分析とグラフィカルモデリングを用いて、嗜好性の評価語を含む11語の評価語を選出した。また、各評価語間の因果関係を共分散構造分析により推論し、嗜好性を表す評価語「好き」に対して最も影響する評価語は、「耳に優しい」であることを明らかにした。これらから、カーオーディオに求められる音質は「刺激が少ない自然な音質」であることが示唆された。

第5章では、第3章で分類した4タイプのヘッドレストスピーカに対して、第4章で選出した評価語11語と評価ばらつきが少なかった3曲を用いて主観評価実験により比較し、本研究における快適性に優れるヘッドレストスピーカのタイプを選定した。また、この結果から、高評価となるヘッドレストスピーカの音響特性は、周波数ごとの音圧レベルが凸凹のないフラットな周波数特性カーブで、残響が短く、スムーズに収束することであることを明らかにした。これらの音質特性は、一般的にホームオーディオで求められる音質と同等な特性であり、ヘッドレストスピーカを用いることで、車室内の特殊な音響特性の影響を受けにくく、快適なカーオーディオの音質が実現できることを明らかにした。

以上により、快適性と明瞭性に優れたカーオーディオの音質を簡便な装置で適える方法として、ヘッドレストスピーカは有効であり、また、主観評価実験を主体的に活用することで、カーオーディオの音質の最適化が実現可能であることが証明された。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、多大なるご指導・ご助言を賜りました宇都宮大学 長谷川光司 教授、外山史 准教授、並びに、本論文をまとめるにあたり、熱心にご指導・ご教示を賜りました石川智治 教授、佐藤美恵 教授、長谷川まどか 教授に深く感謝致します。また、評価語の選定をまとめるにあたり、ご助言・ご指導を賜りました宇都宮大学 鶴田真理子 助教、実験や解析環境の準備にご支援いただいた技術専門職員の北本琢磨 様、多角的観点からご指導いただいた渡邊信一 准教授にも心から御礼申し上げます。

また、本研究を始めるきっかけを作ってくださった宇都宮大学 春日正男 名誉教授、試作スピーカの製作にご尽力いただくと共に音響を基本から教えてくださったライト・イアの大和誠 様、深夜に渡り時間を惜しまずスピーカの測定にご協力いただいた日本音響エンジニアリングの中川博 様、並びに、本研究に深く携わり、手伝っていただいた宇都宮大学 工学部 長谷川（光）研究室 卒業生の落合亨介さん、青木諒さん、飯田裕介さん、磯田和寿さん、佐藤公平さん、辻永智也さん、浅黄文音さん、星直拓さん、工藤滉大さん、そして、主観評価実験にご協力いただいた多くの宇都宮大学の学生の皆様、評価語の選定に関するインターネット調査にご協力いただいたクロスマーケティングとリサーチアンドデベロプメントの皆様、全ての方々に深く感謝致します。

本研究は、会社業務として商品化を目指して研究をスタートしたものの、方針変更の影響で途中から業務として取り組めなくなり、個人として日々の生活時間を削りながら続ける苦しい環境となりました。このような状況においても、長きに渡り励まし支えてくれた家族、同僚、全ての皆様に深く感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 長町三生, “感性工学とは”, 繊維と工業, Vol.50, No.8 (1994), pp.468-472.
- [2] 長沢伸也, “感性工学の基礎と現状”, 日本ファジィ学会誌, Vol.10, No.4 (1998), pp.647-661.
- [3] 戸田準, “日本食品工業学会誌にみる官能検査の型と手法”, 日本食品工業学会誌, 第41巻, 第3号 (1994), p.220.
- [4] 長町三生, 快適科学, 海文堂出版 (1992), pp.205-225.
- [5] 堤和敏, 太田優子, 佐々木啓介, “感性を考慮した建物屋根の最適設計に関する研究”, 第54回理論応用力学講演会 講演論文集 (2005), pp.246-247.
- [6] 下田昌利, 近藤晃, 劉陽, “感性和構造特性を評価関数とする自転車フレームの最適設計”, 日本機械学会論文集 (C編) (2013), pp.4014-4027.
- [7] 日本機械学会, 機械工学便覧 デザイン編 β 1 設計工学, 日本機械学会 (2007), pp.101-116.
- [8] 安達瑛士, 高榎義宏, “感性情報を含む多目的満足設計”, 日本機械学会論文集 (C編) 63巻, 605号 (1997), pp.279-284.
- [9] 矢川元基, 吉村忍, 松田聡浩, 感性和設計, 培風館 (1999), pp.91-96.
- [10] 三木聡, 橋本竹夫, 波多野滋子, 前康彦, 浅野重昭, “カーオーディオの音響特性と主観評価の対応”, 自動車技術会, 学術講演会前刷集 961 (1996), pp.211-214.
- [11] 富田敬史, 小澤賢司, 伊勢友彦, 鈴木陽一, “騒音による音色の劣化を補正する手法の性能比較 -カーオーディオイコライザの特性設定に関する考察 第2報-”, 日本音響学会講演論文集 (2003), pp.599-600.
- [12] 自動車技術ハンドブック編集委員会, 自動車技術ハンドブック 第4分冊: 基礎・理論編, 自動車技術会 (2015), p.388.
- [13] Hidaka, Kyosuke Ochiai, Yamato Makoto, Toshiyuki Kageyama, Hiroshi Hasegawa, “Consideration of the frequency characteristics of a sound system in a traveling vehicle”, KEER2014 (2014), pp.423-430.
- [14] Tomoaki Hidaka, Kyosuke Ochiai, Yamato Makoto, Hiroshi Hasegawa, “Study on the frequency characteristics of a car audio system during vehicle cruising”, ICSV22, Vol.2 of 8 (2015), pp.4410-4417.
- [15] 伊勢友彦, 齊藤望, “音環境としての車室内の課題”, 日本音響学会誌, 66巻, 6号 (2010), pp.282-287.
- [16] 山下剛, 中村光勇, “自動車用防音材料”, HONDA R&D Technical Review, Vol.1 (1989), pp.85-93.

- [17] 谷本隆一, 林英之, 今井守之, “高吸音シートの開発による車内騒音低減”, 日本機械学会論文集 (C 編) (2000), pp.3277-3282.
- [18] 仲田剛, “車でよい音で聴くための条件”, 日本オーディオ協会, カーオーディオ専門委員会, JAS Journal, Vol.59, No.3 (5月号) (2019), pp.14-16.
- [19] 長野武, 本島頭, 平野敏弘, “車室内音場制御と音場解析”, 富士通テン技法, Vol.7, No.2 (1989), p.35.
- [20] 自動車技術ハンドブック編集委員会, 自動車技術ハンドブック 第3分冊:人間工学編, 自動車技術会, 2016, pp.323-325.
- [21] 井上敏郎, ほか, “低周波音低減のための統合 ANC 技術の開発”, HONDA R&D Technical Review, Vol.23, No.2 (2011), pp.118-119.
- [22] 富田裕二, 本島頭, 加藤茂樹, “車室内騒音化における再生音のダイナミックレンジ制御方法についての一考察”, 富士通テン技報, Vol.18, No.2 (2000), pp.28-33.
- [23] 浜津昌浩, 橋本武志, 都倉健治, “最新のカーオーディオ技術”, 自動車技術会, 62 巻, 2号 (2008), pp.95-100.
- [24] 田林準史, ほか, “新プレミアムサウンドシステム開発”, DENSO TEN Technical Review, Vol.2 (2018), pp.3-11.
- [25] 荒木孝治, R と R コマンドーではじめる実験計画法, 日科技連出版社 (2010), pp.105-138.
- [26] 菅民郎, Excel で学ぶ実験計画法-シックシグマと重回帰分析-第2版, オーム社(2012), pp.94-220.
- [27] 奥田正直, 吉野正, 薄型平板スピーカー, 特許第 3192372 号, 国際特許分類第 7 版, 平成 13 年 7 月 23 日.
- [28] 佐伯多門, 新版スピーカー&エンクロージャー百科, 誠分堂新光社 (1999), p.25.
- [29] 松田醇, “平面スピーカ”, テレビジョン学会誌, Vol.43, No.7 (1989), pp.676-683.
- [30] 岩濱正男, 菅信敬嗣, 飯泉高正, 牧野薫, “平板スピーカの振動音響設計法開発”, 日本機械学会, Dynamics and Design Conference 論文集 (2001), pp.71.
- [31] 西村健, 飯塚健児, 米原秀春, 境克敏, 山根基宏, “平面スピーカ振動膜の開発”, 古河電工時報, No.108 (2001), pp.1-6.
- [32] 三井実, 石川智治, 宮原誠, “高忠実音再生に必要なスピーカ特性の検討”, ものづくり大学紀要, No.1 (2010), pp.14-21.
- [33] 八巻直一, 高井英造, 問題解決のための AHP 入門-Excel の活用と実務的例題, 日本評論社 (2005), pp.1-39.

- [34] 日本機械学会編, 機械工学便覧 デザイン編β1 設計工学, 丸善 (2007), pp.101-117.
- [35] 中野有明, “音と騒音の表わし方”, 環境技術学会 (1987), pp.568-570.
- [36] 曾根敏夫, 城戸健一, 二村忠元, “音の評価に使われることばの分析”, 日本音響学会誌, Vol.18, No.6 (1962), pp.320-326.
- [37] 宮原誠, 守田幸徳, “音質を表現する評価語の調査分析”, 日本音響学会誌, Vol.52, No.7, (1996), pp.516-522.
- [38] 石川智治, 冬木真吾, 宮原誠, “音質評価語の多次元空間におけるグルーピングと総合音質に重要な評価語”, 電子情報通信学会, 電子情報通信学会論文誌 A, Vol.J80-A (1997), pp.1805-1811.
- [39] 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 (2019), pp.582-589.
- [40] 中村光勇, 山下剛, “自動車の快適性と車室内音”, 日本音響学会誌, Vol.46, No.9 (1990), pp.759-763.
- [41] Ugolotti Emanuele, Gobbi Gino, Farina Angelo, IPA - A Subjective Assessment Method of Sound Quality of Car Sound Systems, AES 110th Convention Paper, Paper Number:5281 (2001).
- [42] 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) .
- [43] 新村出, 広辞苑, 第六版, 岩波書店 (2008), 3074p.
- [44] 社会情報サービス, 統計 WEB 統計用語集, (オンライン) 株式会社 社会情報サービス, 2022年5月28日, <https://bellcurve.jp/statistics/glossary/initial/a/> .
- [45] 豊田秀樹, 共分散構造分析 [R 編], 東京図書 (2015), 289p.
- [46] 川端一光, 岩間徳兼, R による多変量解析入門, オーム社 (2018), pp.144-158.
- [47] 朝野熙彦, 鈴木督久, 小島隆矢, 入門 共分散構造分析の実際, 講談社 (2005), p.122.

本研究に関連する論文

学・協会誌等論文

1. 日高 倫明, 大和 誠, 外山 史, 長谷川 光司,
“実験的アプローチによる平板ダイナミックスピーカーの設計パラメータの最適化”,
日本機械学会論文集, Vol.82, No.842 (2016), 頁数 13 頁.
2. 日高 倫明, 鶴田 真理子, 長谷川 光司,
“カーオーディオシステムの音質評価実験に用いる評価語の選出”,
自動車技術会論文集, Vol.53, No.6 (2022), pp.1146-1153.

国際会議発表論文

1. **Tomoaki Hidaka**, Makoto Yamato, Hiroshi Hasegawa, Masao Kasuga,
“Subjective evaluation of sound quality of a headrest acoustic system in a vehicle”,
Inter Noise 2013 (2013), Number of pages 6.
2. **Tomoaki Hidaka**, Kyosuke Ochiai, Yamato Makoto,
“Consideration of the frequency characteristics of a sound system in a traveling vehicle”,
KEER 2014 (2014) , Number of pages 8.
3. **Tomoaki Hidaka**, Kyosuke Ochiai, Makoto Yamato, Hiroshi Hasegawa,
“Study on the frequency characteristics of a car audio system during vehicle cruising”,
ICSV22 (2015), Number of pages 8.
4. Kazutoshi Isoda, **Tomoaki Hidaka**, Mariko Tsuruta-Hamamura,
“Investigation about selection of assessment words used for evaluation experiment of automobile
sound system”,
ICSV25 (2018), Number of pages 8.

口頭発表論文

1. 落合 亨介, 日高 倫明, 大和 誠, 景山 稔干, 長谷川 光司,
“自動車走行雑音を考慮した車室内音響システムの補正音の評価について”,
映像情報メディア学会 技術報告 (2014) .
2. 落合 亨介, 日高 倫明, 大和 誠, 景山 稔干, 長谷川 光司,
“自動車走行雑音を考慮した車室内音響の評価について”,
日本音響学会 第 141 回 研究発表会 (2015) .
3. 日高 倫明, 大和 誠, 外山 史, 長谷川 光司,
“平板ダイナミックスピーカ設計パラメータの実験的アプローチによる最適化の検討”,
日本機械学会 第 25 回 設計工学・システム部門講演会 (2015).
4. 青木 諒, 日高 倫明, 大和 誠, 長谷川 光司,
“カーオーディオの音質評価に関する評価語の調査”,
日本音響学会 2015 年秋季研究発表会 (2015).
5. 青木 諒, 日高 倫明, 長谷川 光司,
“車室内音響装置の音質評価に関する評価語の調査”,
日本音響学会 2016 年秋季研究発表会 (2016).
6. 青木 諒, 飯田 裕介, 日高 倫明, 長谷川 光司,
“自動車走行雑音を考慮した車室内音響の音質評価について”,
日本音響学会 2017 年春季研究発表会 (2017).
7. 飯田 裕介, 日高 倫明, 鶴田 (濱村) 真理子, 長谷川 光司,
“自動車車室内を対象とした音響評価に被験者の属性が与える影響について”,
日本音響学会 2017 年春季研究発表会 (2017).
8. 飯田 裕介, 日高 倫明, 鶴田 (濱村) 真理子, 長谷川 光司,
“自動車車室内音響の評価で用いられる評価語間の関係性についての調査”,
日本音響学会 2017 年秋季研究発表会 (2017).