

広島市立大学審査博士学位論文

自動車エンジン音における音質制御に関する研究

2023年3月

広島市立大学大学院  
情報科学研究科 博士後期課程  
システム工学系  
村井 研太

# 目次

|              |   |           |
|--------------|---|-----------|
| <b>第 1 章</b> | <b>緒言</b>                                     | <b>1</b>  |
| 1.1          | 研究背景 . . . . .                                | 1         |
| 1.2          | 研究目的 . . . . .                                | 2         |
| 1.3          | 本論文の構成 . . . . .                              | 2         |
| <b>第 2 章</b> | <b>自動車車室内音の構成要素及び車室内騒音対策</b>                  | <b>4</b>  |
| 2.1          | はじめに . . . . .                                | 4         |
| 2.2          | 騒音とは . . . . .                                | 4         |
| 2.3          | 自動車騒音 . . . . .                               | 4         |
| 2.4          | エンジン音 . . . . .                               | 5         |
| 2.5          | 各走行条件の音の要素 . . . . .                          | 7         |
| 2.6          | 騒音対策 . . . . .                                | 8         |
| 2.7          | 吸音制御 . . . . .                                | 10        |
| 2.8          | ANC とは . . . . .                              | 13        |
| 2.9          | サウンドデザイン . . . . .                            | 15        |
| <b>第 3 章</b> | <b>適応アルゴリズム</b>                               | <b>17</b> |
| 3.1          | はじめに . . . . .                                | 17        |
| 3.2          | FIR 型適応デジタルフィルタ [1] . . . . .                 | 18        |
| 3.3          | 最急降下法 [1] . . . . .                           | 19        |
| 3.4          | Least Mean Square アルゴリズム [31] . . . . .       | 20        |
| 3.5          | Filtered-x LMS アルゴリズム [32] . . . . .          | 21        |
| 3.6          | Harmonic Filtered-x LMS アルゴリズム [30] . . . . . | 22        |
| 3.7          | Command Filtered-x LMS アルゴリズム [31] . . . . .  | 24        |
| <b>第 4 章</b> | <b>自己組織化マップ (SOM)</b>                         | <b>26</b> |
| 4.1          | はじめに . . . . .                                | 26        |

|              |                                |           |
|--------------|--------------------------------|-----------|
| 4.2          | ニューロン研究 [33] . . . . .         | 26        |
| 4.3          | 自己組織化マップ [34] . . . . .        | 29        |
| 4.4          | SOM アルゴリズム [34] [35] . . . . . | 30        |
| 4.5          | スパースモデリング . . . . .            | 32        |
| <b>第 5 章</b> | <b>音の心理学的測定法</b>               | <b>35</b> |
| 5.1          | はじめに . . . . .                 | 35        |
| 5.2          | 音の定義 . . . . .                 | 35        |
| 5.3          | 心理学的測定法 . . . . .              | 36        |
| 5.4          | 因子分析 . . . . .                 | 38        |
| 5.5          | 因子得点の推定法 [41] . . . . .        | 42        |
| 5.6          | 一対比較法 . . . . .                | 42        |
| 5.7          | おわりに . . . . .                 | 45        |
| <b>第 6 章</b> | <b>吸音制御が聴感印象に与える影響について</b>     | <b>46</b> |
| 6.1          | はじめに . . . . .                 | 46        |
| 6.2          | 車内音の収録 . . . . .               | 46        |
| 6.3          | 収録音解析結果 . . . . .              | 47        |
| 6.4          | 形容詞選定実験 . . . . .              | 50        |
| 6.5          | 実験結果 . . . . .                 | 53        |
| 6.6          | おわりに . . . . .                 | 55        |
| <b>第 7 章</b> | <b>意図した自動車エンジン音の実現</b>         | <b>56</b> |
| 7.1          | はじめに . . . . .                 | 56        |
| 7.2          | SD 法による主観的印象の明確化 . . . . .     | 56        |
| 7.3          | 低減帯域が聴感印象に与える影響 . . . . .      | 65        |
| 7.4          | おわりに . . . . .                 | 69        |
| <b>第 8 章</b> | <b>適応音質制御によるエンジン音の聴感印象実験</b>   | <b>70</b> |
| 8.1          | はじめに . . . . .                 | 70        |
| 8.2          | 走行データによる各被験者の識別検討 . . . . .    | 70        |
| 8.3          | SOM による好みの音質の識別 . . . . .      | 77        |
| 8.4          | スパース性を用いた被験者識別の検討 . . . . .    | 81        |
| 8.5          | 制御アルゴリズム . . . . .             | 83        |
| <b>第 9 章</b> | <b>結言</b>                      | <b>85</b> |

|     |               |    |
|-----|---------------|----|
| 9.1 | まとめ . . . . . | 85 |
|     | 謝辞            | 87 |
|     | 参考文献          | 88 |
|     | 発表論文          | 91 |

# 第 1 章

## 緒言

### 1.1 研究背景

現在、自動車の騒音対策には受動騒音制御 (Passive Noise Control, PNC), 能動騒音制御 (Active Noise Control, ANC) が用いられている [1]. すなわち, 吸音材や防音材を用いた音圧の低減を目的とした騒音対策である. しかし, 騒音対策により静寂性を向上させていく一方で, 自動車は「運転する楽しみ」, 「乗る楽しみ」といった趣味としての面もあり, 趣味としての楽しさを求める人がいるのも確かである. このような運転手に対しては PNC により音を低減することでその喜びも低減することとなり, その商品の個性や特徴, 商品的価値を下げる要因となってきている. さらに, 近年自動車の高品質化に伴い, エンジン音については騒音対策からサウンドデザインへ推移している [2]. 自動車の加速走行時, 車内騒音に大きな影響を与えるのはエンジン音であり [3], 実際に能動騒音制御を用いたエンジン音に対するサウンドデザインの検討 [4] [5] はなされてきた. その中で騒音低減によって成される周波数特性変化が聴感印象に及ぼす影響も大きいという知見も得られている. しかし, PNC では単に吸音・遮音を対象にするのが一般的であり, サウンドデザインへの適用はない. ANC が 400Hz 以下の低周波帯域を対象とする一方で PNC はそれ以上の帯域を対象とする. 聴感的には PNC が対象とする周波数領域はラウドネス閾値が低く敏感であるので, PNC をサウンドデザインに適用することは有効性が高い. このように ANC と PNC では制御可能な周波数帯域が異なるため, 2つの制御を組み合わせることで車室内の音環境がさらに改善され, 新たな付加価値として商品価値の向上につながると思われる. そこで ANC および PNC での聴感印象制御の可能性を検討するため, 本研究では, 自動車の装備される周波数特性の制御による音質制御が聴感印象に与える影響について明確化した. PNC は吸音・遮音というイメージが高く, 車内の静粛性には寄与するもののエンジン音の感性評価で重要な「スポーティ感」については寄与が考えにくい. しかし, 「スポーティ感」は音圧が高ければ高いほど感じやすい [6] ため, 静粛性

が求められる昨今、音量ではなく音の特性に着目した「スポーティ感」が必要である。具体的には、「上質なスポーティ感」というイメージに着目し検討を実施した。「上質なスポーティ感」というと上質さとスポーティさといった一見、相反する印象を持ち、2つのイメージを兼ね備えた複雑な印象である。このような複雑なイメージでも低減特性と聴感印象を関連させることが可能となれば、自動車の商品的価値の向上につながると考えられる。手法としては、吸音材の低減量・低減範囲と聴感印象の関連付けをするため、一対比較法、MUSHRA法 (Multiple Stimuli with Hidden Reference and Anchor) [7] を用い主観印象評価により明確化した。なお、本検討で実施した聴感実験では、個人名が第三者に特定されることがないこと、参加は自由意志であり拒否における不利益はないこと、ならびに本研究の目的と内容を参加者へ説明し口頭と書面にて同意を得た。

## 1.2 研究目的

これまで述べてきたように、近年は、エンジン音の制御方法は騒音レベルの低減のみでなく、快音化への要求も高まっている。しかし、現在の騒音低減手法では不快な音だけでなくドライビング感、高揚感などポジティブな印象を持った音も低減する可能性もある。そうすることで、聴感印象の悪化につながり、自動車であれば自動車を楽しむ実感が損なわれる。また、ANCやPNCによる音圧の低減量や周波数帯域が聴感印象にどのように影響を与えるかは明らかになっていない。

そこで、本研究では、ANC、PNCを用いた音質制御によって聴感印象の操作の可能性について検討を行った。具体的には、自動車に装備される吸音材吸音材の低減量・低減範囲が聴感印象に与える影響についてを明確化した。また、「上質なスポーティ感」という1つの限定したイメージに着目し、限定したイメージの実現についての検討を行った。これにより、「上質なスポーティ感」と関連のある主観的印象を明確化し、音圧をどの程度コントロールすることで「上質なスポーティ感」を実現できるのか検討した。さらに、低周波数域に関してはPNCでは制御不可能であるため、実環境で低周波数域を制御するためのアルゴリズムについても検討を行った。

## 1.3 本論文の構成

なお、本論文は以下のようにになっている。

第1章では、本研究の背景と目的を述べた。

第2章では、エンジン騒音に対する概要とその騒音対策について述べた。

第3章では、主観印象評価と本研究で用いた手法について述べた。

第4章では、適応音質制御を用いる際の基本原理となる能動騒音制御について述べた。

第5章では、本研究で刺激音として用いた自動車エンジン音の収録条件について述べた。また、自動車エンジン音を構成する形容詞についても述べた。

第6章では、吸音制御が聴感印象へ与える影響に関する聴感印象実験について述べた。

第7章では、第6章で述べた結果より、吸音制御による聴感印象操作について述べた。

第8章では、適応音質制御を用いた聴感印象実験、個々の好みに適応する音質制御システムのアルゴリズムについて述べた。

最後に第9章では本研究を総括し、まとめと今後の展開とした。

## 第2章

# 自動車車室内音の構成要素及び車室内騒音対策

### 2.1 はじめに

エンジン音の騒音対策をするためには、まず自動車騒音の特徴に関する知識が必要である。そこで、本章では自動車騒音が走行する際に生じる騒音の構成要素であるエンジン音の概要、さらにその対策方法である PNC と ANC について述べる。

### 2.2 騒音とは

騒音は、「聞きたくない不快な音」や「邪魔な音」の総称であり、JIS Z 8106 音響用語（一般）[9]によると、騒音は「不快な又は望ましくない音、その他の妨害」と定義されている。騒音の例としては工場の騒音や自動車の走行音などが挙げられる。これらの騒音は人体に与える影響が大きく、集中力や認知力の低下を招いたり、心理的不快感による健康被害の原因にもなる。

### 2.3 自動車騒音

自動車が走行することにより、様々な騒音が発生する。発生する音は大きく分けて車内音と車外音に大別でき、車外音は騒音レベル規制を考慮しなければならないため、音質改善だけを言うことができない。一方、車内音は規制とは無関係であるため商品性向上を目的とした音質対策を行うことができる。車内騒音を構成する要素は主に「エンジン音」、「こもり音」、「ロードノイズ」、「風切り音」の4種類に分類できる[10]。図 2.1 に車内騒音の例を示す。



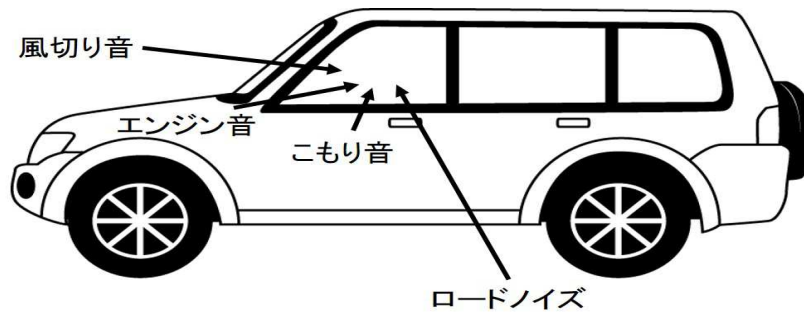


図 2.1 車内音騒音要素

「エンジン音」はエンジン回転数の 0.5 次成分を基本周波数とした複合周期音であり，主要な周波数帯域は 5 kHz 以下である。「こもり音」はエンジンの燃焼による振動や，路面からの振動が車体を伝播し車室内に音として放射された 20~250Hz の耳を圧するような低周波数帯域の音である [11]. 「ロードノイズ」は，路面とタイヤの摩擦により発生するランダム性の音であり，「風切り音」は自動車が高速度で走行することにより，車両周辺の気流が乱れることにより発生するランダム性の音であり，周波数帯域は 500Hz~2 kHz である.

## 2.4 エンジン音

### 2.4.1 エンジン音について [12]

エンジン音はエンジン回転に同期した周期性騒音の割合が大きい特徴がある. 図 2.2 に吸入工程を示す. これはエンジン音がクランク軸が回転する際に，各シリンダで起こる燃料の爆発によって生じる周期的な振動が車体に伝搬され，音として放出された振動放射音であるためである.

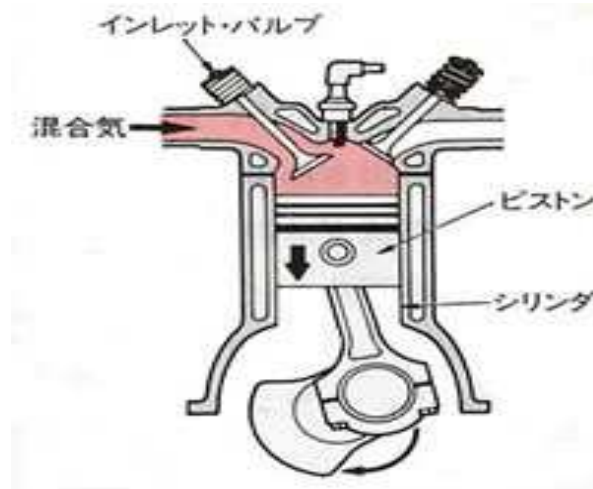


図 2.2 吸入工程 [12]

エンジン音は、エンジン回転に同期した周期性騒音の割合が大きい特徴がある。エンジン音とは、エンジンクランク軸が回転する際に、各シリンダで起こる燃料の爆発によって発生する加振力が車体に伝達されて、フロアパネルの一部を加振することで発生する振動放射音である。

エンジンが4気筒である場合には、図 2.3 に示すように、クランクシャフトが2回転する間に4つのシリンダがそれぞれ「吸入」、「圧縮」、「燃焼」、「排気」を繰り返す。このため、エンジン音はエンジン回転数の2倍の周波数を有する回転2次成分（燃焼1次成分）とその高調波成分のパワーが強い。

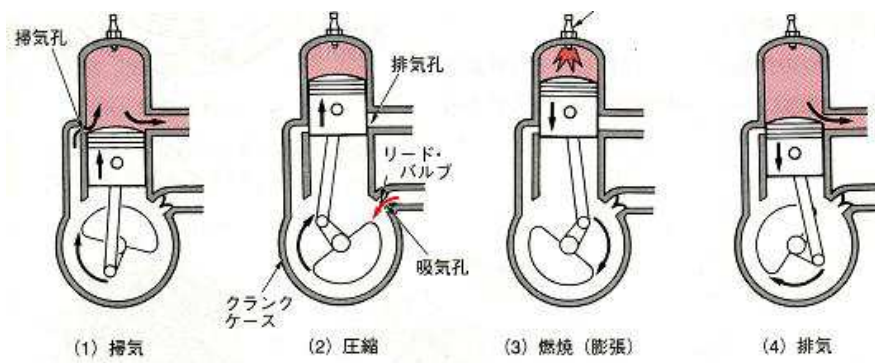


図 2.3 4サイクルエンジンの仕組み [12]

## 2.4.2 エンジン回転数 [12]

エンジンの回転数は1分間あたりのクランクシャフトの回転数を意味する rpm (Revolution Per Minute) という単位で表される。また、現在の自動車の主流である直列4気筒4サイクルエンジンは、クランクシャフトが1回転する間に2回の爆発がシリンダー内で発生する。これがエンジンの基礎となる音である。 $n$ 次振動は次の式によって周波数に変換することができる。

$$f = \frac{N}{60} n \times \frac{m}{2} [\text{Hz}] \quad (2.1)$$

$N$  : 回転数 [rpm]

$n$  : 次数

$m$  : 気筒数

例えば、エンジンの回転数が3000rpmである時の1次成分は、 $3000 \div 60 \times \frac{4}{2} = 100 [\text{Hz}]$ となる。

## 2.5 各走行条件の音の要素

### 2.5.1 加速走行時の音の要素

加速走行時の車室内音はエンジン音とこもり音が支配的である。また、加速走行時は音の音色が重要であり、多くの研究例がある [14] [15]。以下で、加速走行時の車室内音の「滑らかさ」「こもり感」に大きく影響するエンジンゴロゴロ音とこもり音について述べる。

#### エンジンゴロゴロ音

加速時のエンジン音で特に問題となるのは、ゴロゴロ音と呼ばれる間欠的で濁った音である。これは「滑らかな-粗い」という音色の重要な因子の1つである美的因子に対応する音色表現語で表現される。ゴロゴロ音が発生すると、騒音レベルが低くても不快感を与えられている [16] [17]。

#### こもり音

外部から進入してくる音が室内で共鳴し、定在波を形成することによって生じる 250Hz 以下のスペクトル成分である。加速時全体のこもり音の大きさは、各エンジン回転数毎にこもり音の大きさを求め、それらをエネルギー平均することにより算出される。

## 2.5.2 定常走行時の音の要素

定常走行時、特に 100km/h 走行時のような高速走行時の車室内音は、ロードノイズ、風切り音を中心であるが、車種によってはエンジン音やこもり音がかなり聞こえる場合がある [18]。以下で、定常走行時の音の要素の中心である、ロードノイズと風切り音について述べる。

### ロードノイズ

ロードノイズは、表面の荒い道路や、段差・継目のある道路で発生する 30~400Hz の音である。表面の荒いコンクリート舗装路でゴーといった音が聞こえることがある。

### 風切り音

風切り音は、高速で走行している時に窓の方から聞こえてくる空気の流れるような 500~5kHz の騒音である。この音は、自動車の表面の突起や段差によって空気の流れに渦が生じて音になり、ガラスやドア周辺の隙間あるいは天井など遮音度の低い部分から車室内に透過・進入して発生する。

## 2.6 騒音対策

### 2.6.1 これまでの騒音対策

これまでエンジン音等の騒音は人間にとって不快な音とされ、車室外・車室内ともに騒音対策が行われた。車室外騒音については、環境省が定めた騒音規正法により、騒音の許容限度が決められており（表 2.1）、その規正法をクリアするために自動車には図 2.4 に示すような騒音低減技術が施されている。車室内騒音については、主に吸音材や遮音材を用いた、PNC が行われている。また、最近では、騒音と逆位相の音を発生させて騒音を低減させる技術である ANC を用いた車室内騒音対策も行われている [19]。

表 2.1 自動車における騒音許容限度 [20]

単位: dB

| 自動車の種別      |                    | 許容限度設定目標値   |    |    | 施行年又は<br>施行予定年 |       |
|-------------|--------------------|-------------|----|----|----------------|-------|
|             |                    | 加速          | 定常 | 近接 |                |       |
| 大型車         | 前輪駆動車, トラクタ, クレーン車 |             | 82 | 83 | 99             | 平成13年 |
|             | トラック               |             | 81 | 82 | 99             | 平成13年 |
|             | バス                 |             | 81 | 82 | 99             | 平成10年 |
| 中型車         | 全輪駆動車              |             | 81 | 80 | 98             | 平成13年 |
|             | 全輪駆動車以外            | トラック        | 80 | 79 | 98             | 平成13年 |
|             |                    | バス          | 80 | 79 | 98             | 平成12年 |
| 小型車         | 軽自動車<br>以外         | 車両総重量1.7t以上 | 76 | 74 | 97             | 平成12年 |
|             |                    | 車両総重量1.7t以下 | 76 | 74 | 97             | 平成11年 |
|             | 軽自動車               | ボンネット型      | 76 | 74 | 97             | 平成11年 |
|             |                    | キャブオープン型    | 76 | 74 | 97             | 平成12年 |
| 乗用車         | 乗車定員6人以上           |             | 76 | 72 | 96(100)        | 平成11年 |
|             | 乗車定員6人以下           |             | 76 | 72 | 96(100)        | 平成10年 |
| 二輪<br>自動車   | 小型二輪自動車            |             | 73 | 72 | 94             | 平成13年 |
|             | 軽二輪自動車             |             | 73 | 71 | 94             | 平成10年 |
| 原動機付<br>自転車 | 第二種原動機付自転車         |             | 71 | 68 | 90             | 平成13年 |
|             | 第一種原動機付自転車         |             | 71 | 65 | 84             | 平成10年 |

※ ( )内はリアエンジンを示す。

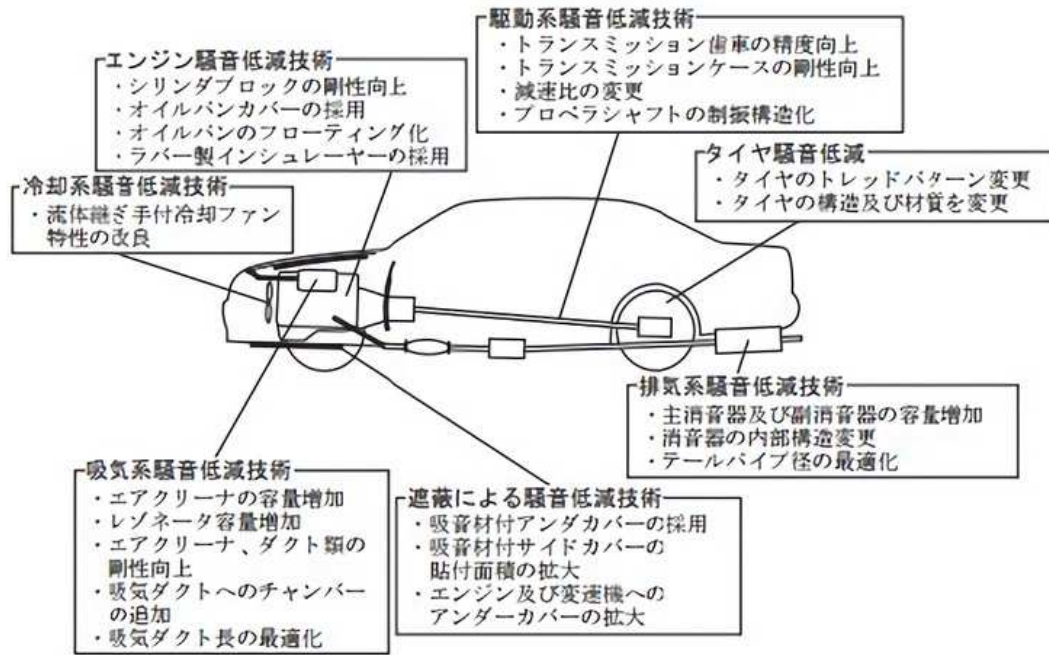


図 2.4 自動車の騒音対策 [23]

## 2.7 吸音制御

### 2.7.1 吸音材について [24]

第 2.6 節でも述べたように、自動車車室内及び車室外の騒音対策として吸音材が用いられている。この吸音材は自動車だけでなく、電気製品や住宅など、あらゆる製品の静粛性向上のために使用されている。

吸音材の「吸音」のメカニズムは大きく分けて表 2.2 の 3 つに分類でき、自動車の吸音には多孔質型吸音材が用いられている。そのため、自動車の吸音材は高周波成分に有効となる。

表 2.2 吸音材のメカニズム [24]

| 吸音機構             | メカニズム  | 吸音特性                    | 吸音材料                                 |
|------------------|--|-------------------------|--------------------------------------|
| 多孔質型吸音           | 骨格部分とその間の空隙から構成される材料に音が入射すると、音波は空隙中で骨格部分の周壁との摩擦や粘性抵抗、さらに骨格の振動などによって、音のエネルギーの一部が熱エネルギーとして消費される。 | 低音域での吸音性能が低く、高音域は高い     | グラスウール<br>フェルト<br>ウレタン<br>ロックウール     |
| 板振動型吸音           | 薄いベニヤ板のような気密な材料に音が当たると、板振動や膜振動をし、音のエネルギーの一部がその内部摩擦によって消費される。                                   | 低音域の共振周波数を吸音するが、吸音性能は低い | ベニヤ板<br>石こうボード<br>フレキシブルボード<br>合板    |
| 共鳴器型吸音<br>(穴あき板) | 空洞に孔があいた形の共鳴器に音が当たると、共鳴周波数の近くで孔の部分の空気が激しく振動し、音のエネルギーの一部が周辺との摩擦熱として消費される。                       | 低音域の共振周波数に対する吸音性能が非常に高い | 穴あき石こうボード<br>穴あきスレートボード<br>穴あきハードボード |

### 2.7.2 吸音・遮音の原理 [1]

空気中を伝わってきた音が、第2の媒質、例えばガラス繊維のような材料の表面に入り込む場合を考える。図 2.5 はこの場合の音のエネルギーを模式的に図示したものであって、入射エネルギー  $E_i$  の一部  $E_r$  は材料の中へ侵入せずに境界面から反射して再び空気中への伝搬を続ける。これに対して残りのエネルギー  $E_a$  は材料の内部へ入っていったその中を伝搬する。この場合、反射率が式 (2.2) となる。

$$r = \frac{E_r}{E_i} \quad (2.2)$$

これに対して材料中に侵入してゆく吸収エネルギー  $E_a$  と入射エネルギー  $E_i$  との比を吸音率という。すなわち式 (2.3) となる [1]。

$$\alpha = \frac{E_a}{E_i} = 1 - r \quad (2.3)$$

吸音率は一般に音の周波数及び入射角の関数である。

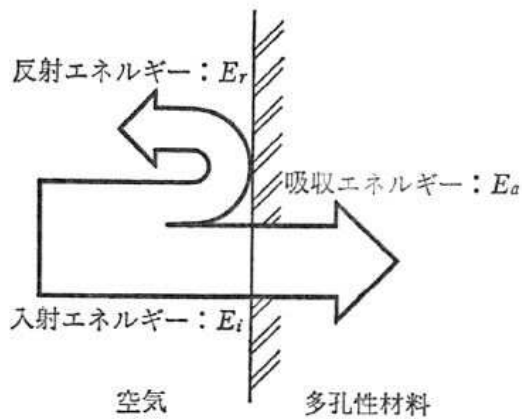


図 2.5 音波の反射と吸収 [1]

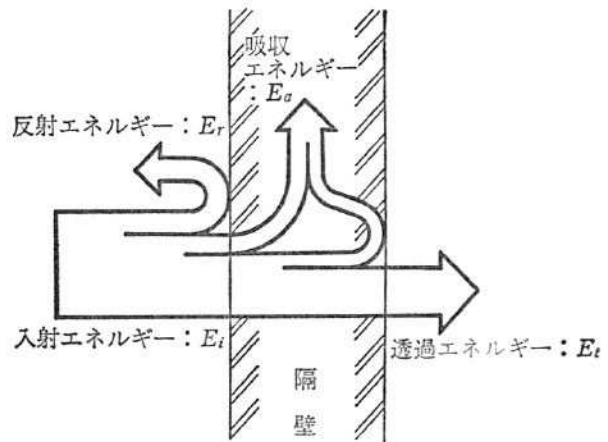


図 2.6 隔壁による吸音と遮音 [1]

次に図 2.6 のようにある厚さの隔壁に音波が入射する時、この壁体内へ侵入したエネルギーの一部は壁体内で失われるが、残りは隔壁の反対側へ抜けてゆく。入射エネルギー  $E_i$  に対する透過エネルギー  $E_t$  の比をこの隔壁の透過率と定義する [1]。すなわち式 (2.4) となる。

$$\tau = \frac{E_t}{E_i} \quad (2.4)$$

しかし実用的にはこれをデシベル値で式 (2.5) のように表した透過損失がよく用いられる [1]。

$$TL = 10 \log_{10} \frac{1}{\tau} = 10 \log_{10} \frac{E_i}{E_t} \quad [\text{dB}] \quad (2.5)$$

透過率  $\tau$  は 0 と 1 の間の数値を採るから、透過損失 TL は正の値であり、これが大きいほど透過エネルギーの減少の度合いが大きい。すなわち隔壁の遮音効果が優れているということになる。

透過率・透過損失は一般に音の周波数及び入射角の関数であるが、一重壁では隔壁材料の面密度によっても左右される。垂直入射の場合、透過損失がほぼ式 (2.6) に従って壁体の面密度  $\sigma$  [kg/m<sup>2</sup>] と周波数  $f$  [Hz] との積の対数によって与えられることを、透過損失に関する質量則という。

$$TL = 10 \log_{10} \sigma f - 44 \quad [\text{dB}] \quad (2.6)$$



## 2.8 ANC とは

ANC の原理は古くからあり, 1936 年に P.Lueg によって米国特許が取得された [25]. しかしながら, その当時の技術では適切な制御音を生成するには限界があり, 実用には至っていなかった. その後, 1980 年代後半に入り, デジタル技術の発展に伴い多くの研究がおこなわれるようになり, 現在ではノイズキャンセリングヘッドフォンや自動車エンジン音など様々な分野の騒音対策に用いられている.

次に ANC の簡単な説明をする. ANC の原理は, 騒音に対して「同振幅, 逆位相の音を干渉させることにより消音する技術」である [1]. 具体的にはアクチュエータを動かして逆移送の音を生じさせて消音を実現する. 一般的に, アクチュエータとしてスピーカや加振器が用いられるが, 空気流量などをバルブでコントロールするものも存在する. このように稼働を用いているため, 適応騒音制御と呼ばれている. ANC は後述のホイヘンスの原理から, 波長の長い低周波騒音対策に有効な技術として注目されている. 一般的に ANC のメリットが出てくるのは 500Hz 以下の周波数域といわれている.

### 2.8.1 ANC の基本原理 [1]

- ホイヘンスの原理

ANC の消音原理は波の重ね合わせにより説明することができる. まず, 図 2.7(a) のように一次音源周辺の ANC を考える. ホイヘンス (Huygen's) の原理によると, 一次音源を取り囲む空間  $\Sigma$  上の二次音源 (secondary source) によって, 一次音源もしくは騒音源 (primary source) 周辺に形成される音場と同一の音場  $\Omega$  を形成することが可能である. そこで, 二次音源の位相を反転させた場合,  $\Omega$  内では一次音源で形成される音場と, 二次音源で形成される音場が同一振幅・逆位相となり, 重ね合わせにより完全にキャンセルされる.

続いて, 図 2.7(b) のように, 一次音源が制御対象空間  $\Omega$  外にある場合を考える. この場合も同様に制御対象空間  $\Omega$  を囲むように  $\Sigma$  を選ぶと,  $\Omega$  内の音をキャンセルすることができる. これが音場の ANC の基本原理である.

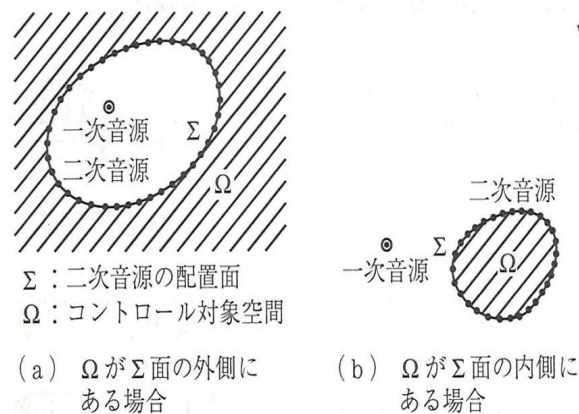


図 2.7 ANC の基礎原理 [1]

対象領域が三次元の場合は境界が面になり，理論的には無数の二次音源が必要になる．しかし，実際には制御音の波長に比べて十分短い間隔で二次音源を配置すれば効果が得られる．そのため波長の長い低周波音成分では粗い間隔の配置で十分であるが，波長の短い高周波音を対象とする場合はより密な配置が必要になる．このような原理により，ANC は低周波音成分に対して有効であり，高調波音成分に対しては実現が難しい．

- 消音のメカニズム

一方，ANC は二次音源によって制御点の音圧を最小にするが，粒子速度が最小となるとは限らない．そのため，一次音源，二次音，制御点 (control point) の位置関係によって消音のメカニズムが異なってくる．伊勢は音響インピーダンスを操作するという観点で ANC を分類し，図 2.8 のようにまとめている．

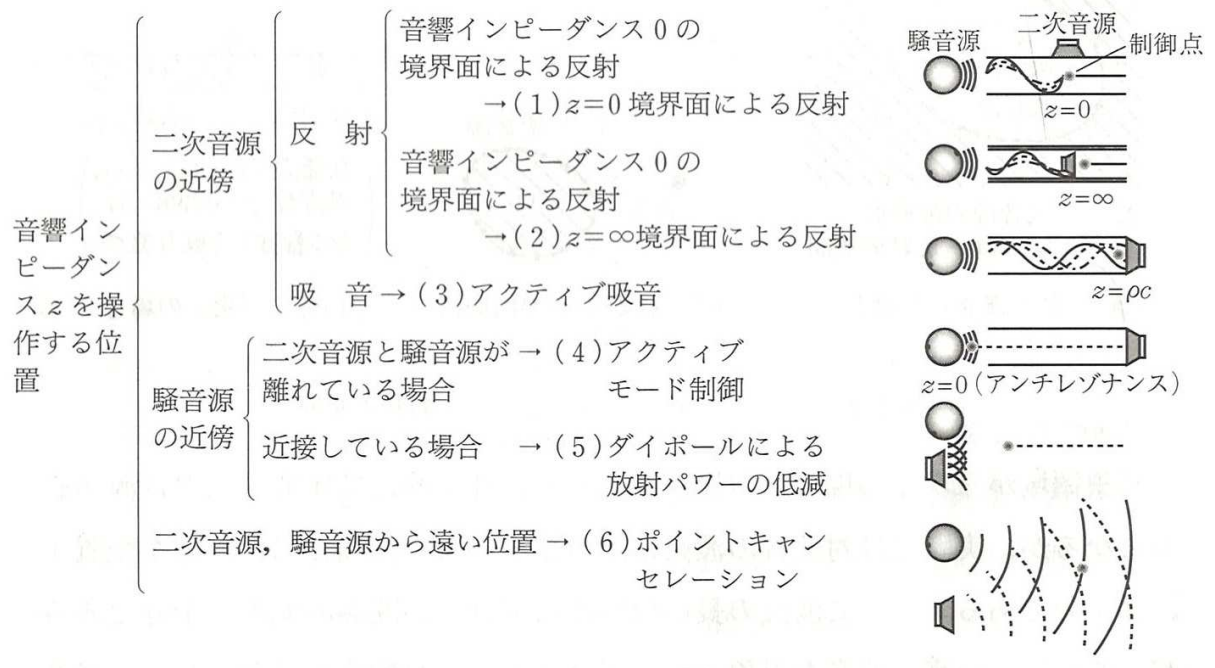


図 2.8 ANC の分類 [1]

## 2.9 サウンドデザイン

表 2.3 に、1970 年の車内騒音と 2000 年の車内騒音の平均騒音レベル値を示す。

表 2.3 車内騒音の A 特性音圧レベル [26]

| 年代     | 車速      | 騒音レベル |
|--------|---------|-------|
| 1970 年 | 100km/h | 70dB  |
| 2000 年 | 100km/h | 60dB  |

この表に示すように、前述のような騒音低減技術の向上により、車内騒音は小さくなっている。また、走行中の車内騒音は近年でも 60dB 程度であると環境省の騒音目安ガイドに定義されている。[21] [22]。しかし、必ずしも心地よい車内音環境を実現しているとは限らない。例えば、近年のハイブリット車や電気自動車の普及により、新たな議論が目立ち始めた。それは、エンジン音が小さすぎるため「自動車が近づいてきているのに気付かなかった」といった「静かすぎる」点である。このようなことから、接近車両検知システムに関する研究 [27] も行われており、「最低騒音値」の設定をしようという動きや、外部

に騒音を発生される装置の装着も検討されている。また、低騒音化に伴い、従来マスクングされていたため目立たなかった他の動作音が、相対的に大きく感じられ、新たな騒音として問題になることもある。

このように、現在では単に騒音を低減するだけでなく、車内の走行音をデザインすることで聴感印象を改善することも求められている [28]。こうした考えをサウンドデザインと呼ぶ [29]。

## 第 3 章

# 適応アルゴリズム

### 3.1 はじめに

ANC システムを構築するには，騒音の変動に対して逆に変動する制御音を作らなければならない。つまり，ANC を実現することを考えると，騒音の変動に対して追従することのできる制御系が必要ということになる。その解決のために，適応制御を用いる。ANC の適応制御システムでは，適応フィルタと呼ばれるデジタルフィルタが用いられる。適応フィルタとは，システムの特徴が未知の場合や，それを環境に応じて変化させたいとき，フィルタ係数を時変のパラメータとすることで特性を変化させることができるフィルタである。これは FIR 型 (Finite Impulse Response) と IIR 型 (Infinite Impulse Response) に大別されるが，安定性や取り扱いの容易さから FIR 型デジタルフィルタが利用されることが多い。なお，適応フィルタのフィルタ係数を更新するためのアルゴリズムを適応アルゴリズムと呼ぶ。ANC システムの適応制御アルゴリズムは，フィードフォワード型，フィードバック型またはこれらを組み合わせたアルゴリズムが用いられている。本章では，検討で用いた適応アルゴリズムに関して述べる。

### 3.2 FIR 型適応デジタルフィルタ [1]

図 3.1 に、FIR 型の適応フィルタを用いて ANC を行う場合の最も基本的なフィードフォワード型システムのブロック図を示す。

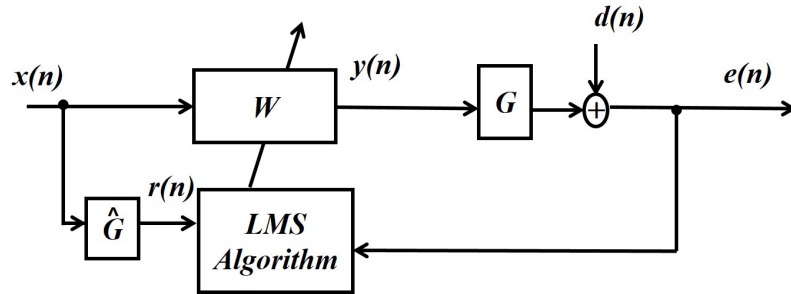


図 3.1 1 入力 1 出力適応デジタルフィルタ [1]

$k$  次のフィルタ係数を  $h_k(n)$  とすると、参照信号  $x(n)$  に対する出力信号  $y(n)$  は式 (3.1) のように表される。

$$y(n) = \sum_{k=0}^{K-1} h_k(n)x(n-k) \quad (3.1)$$

これらの出力信号はある点において重ね合わせの原理より、誤差信号  $e(n)$  となる。誤差信号  $e(n)$  は式 (3.2) のように表される。

$$e(n) = d(n) + y(n) \quad (3.2)$$

ANC システムではこの誤差信号を 0 にすることを目標としている。通常、適応アルゴリズムでは、誤差信号の平均二乗誤差を評価量とする。

二乗平均誤差  $\epsilon(n)$  は

$$\epsilon(n) = E[e^2(n)] \quad (3.3)$$

で表される。ここで  $E[\ ]$  は期待値操作を意味する。この二乗平均誤差は正の実数値のスカラー量であり、誤差信号の平均電力を表している。この式 (3.3) を変形すると、次の式 (3.4) となる。

$$\begin{aligned} \epsilon(n) = & E[d^2(n)] + 2 \sum_{k=0}^{K-1} h_k(n)E[d(n)x(n-k)] \\ & + \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{m=0}^{M-1} h_k(n)h_m(n)E[x(n-k)x(n-m)] \end{aligned} \quad (3.4)$$

が得られる。参照信号と制御対象信号がそれぞれ定常であり、かつ相互相関関数が時間差のみに依存すると仮定すると、二乗平均誤差  $\epsilon(n)$  (式 3.4) は、以下のように定義できる。

$$\epsilon(n) = P_d + 2 \sum_{k=0}^{K-1} h_k(n)p(k) + \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{m=0}^{M-1} h_k(n)h_m(n)r(m-k) \quad (3.5)$$

なお、 $P_d$  は制御対象信号のパワー、 $p(k)$  は制御対象信号  $d(n)$  と参照信号  $x(n-k)$  の相互相関関数、 $r(m-k)$  は参照信号  $x(n)$  に  $m-k$  の時間差を与えた時の自己相関関数を表す。式 (3.5) より、参照信号と制御対象信号がおのこの定常であり、かつ相互相関関数が時間差のみに依存する場合においては、二乗平均誤差は FIR フィルタ係数の二次関数であることがわかる。よって、二乗平均誤差は各フィルタ係数に対して単一の最小点を持つ鉢状の曲面として表現できる。そこで、式 (3.5) を  $k$  次のフィルタ係数  $h_k(n)$  で偏微分すると次式 (3.6) が得られる。

$$\frac{\partial \epsilon(n)}{\partial h_k(n)} = 2p(k) + 2 \sum_{m=0}^{M-1} h_m(n)r(m-k) \quad (3.6)$$

この結果を 0 とすると、フィルタ係数を、 $K$  次連立方程式の解として、求めることができる。

$$\sum_{m=0}^{M-1} h_m(n)r(m-k) = -p(k) \quad k = 0, 1, \dots, K-1 \quad (3.7)$$

### 3.3 最急降下法 [1]

逐次的に最適解を求める方法の一つとして、最急降下法 (method of steepest descent) がある。この方法はシステムのパラメータを任意の初期状態から、その値を繰り返し更新することで最適値へと近づける方法である [1]。この方法は、あるフィルタ係数に対して平均二乗誤差の一次導関数から勾配を求め、その勾配が負の方向に係数を更新することで最小平均二乗誤差に到達できることを利用している。

$\Delta(n)$  を時刻  $n$  における  $K$  次元勾配ベクトルとすると、その  $k$  番目の要素は式 (3.6) のようなフィルタ係数  $h_k(n)$  に関する二乗平均誤差の一次導関数と表される。

さらに、制御対象信号  $d(n)$  [1] が

$$d(n) = \sum_{m=0}^{M-1} h_m(n)r(m-k) + e(n) \quad (3.8)$$

と表現されることから，制御対象信号と参照信号の相互相関関数  $p(k)$  は

$$p(k) = - \sum_{m=0}^{M-1} h_m(n)r(m-k) + E[e(n)x(n-k)] \quad (3.9)$$

と表される．この関係を用いると，勾配ベクトルの各要素は

$$\Delta(n) = 2E[e(n)x(n-k)] \quad k = 0, 1, \dots, K-1 \quad (3.10)$$

と与えられる．よって最急降下アルゴリズムによるフィルタ係数の更新式

$$\begin{aligned} h_k(n+1) &= h_k(n) + \frac{1}{2}\mu[-\Delta(n)] \\ &= h_k(n) - \mu E[e(n)x(n-k)] \quad k = 0, 1, \dots, K-1 \end{aligned} \quad (3.11)$$

を得ることができる．ここで， $\mu$  はステップサイズパラメータ (step size parameter) と呼ばれるもので，正のスカラー量であり，サンプリングごとの適応フィルタの係数更新量の制御パラメータである．また，収束係数とも呼ぶ．この収束係数  $\mu$  は誤差信号  $e(n)$  の収束性能に関係する重要なパラメータであるため，この適切な収束係数の選択が重要となる．

### 3.4 Least Mean Square アルゴリズム [31]

最急降下法は勾配ベクトルを求めるときに二乗誤差の期待値を求める．一般的に，期待値を求めるためには無限の観測結果が必要であり，求めることはほとんど不可能に近い．この問題を回避するために，二乗平均誤差の瞬時値を用いたアルゴリズムが，LMS アルゴリズムである．

式 (3.10) の期待値演算を省略し，勾配ベクトルの瞬時値  $\hat{\Delta}(n)$  を

$$\hat{\Delta}(n) = 2e(n)x(n-k) \quad k = 0, 1, \dots, K-1 \quad (3.12)$$

とおく．この関係を用いるとフィルタの更新式は次式のように定式化できる．

$$\begin{aligned} h_k(n+1) &= h_k(n) + \frac{1}{2}\mu[-\hat{\Delta}(n)] \\ &= h_k(n) - \mu e(n)x(n-k) \quad k = 0, 1, \dots, K-1 \end{aligned} \quad (3.13)$$

フィルタの更新式に必要なものが，収束係数  $\mu$ ， $n$  サンプル目における誤差信号  $e(n)$ ，入力信号  $x(n-i)$  だけであるので，単純に実現できる．このように，LMS アルゴリズムはリアルタイムに収束係数を更新し， $e(n)$  を最小化することが求められる，ANC システムにおいては高い有用性があり広く用いられている．



### 3.5 Filtered-x LMS アルゴリズム [32]

3.4節では、図3.1に示されるように未知システム  $W$  伝達特性のみを考えてきた。しかし、実際の ANC システムに LMS アルゴリズムを適用する場合、制御スピーカと誤差センサ間にも空間があるため、これらの伝達特性を考慮する必要がある。この時、適応フィルタの出力である制御信号  $y(n)$  から伝達特性を経由した信号  $z(n)$  までの二次経路特性  $C$  が  $J$  次の FIR フィルタ  $G_j$  で表現できるとすると、 $z(n)$  は次式のように表すことができる [1]。なお、 $J$  は  $G_j$  のフィルタ長を表し、 $j = 0, 1, \dots, J-1$  である。

$$z(n) = \sum_{j=0}^{J-1} G_j y(n-j) \quad (3.14)$$

ここでの誤差信号  $e(n)$  は、

$$\begin{aligned} e(n) &= d(n) + z(n) \\ &= d(n) + \sum_{j=0}^{J-1} G_j y(n-j) \\ &= d(n) + \sum_{j=0}^{J-1} G_j \sum_{k=0}^K h_k(n) x(n-k-j) \end{aligned} \quad (3.15)$$

と表される。

LMS アルゴリズムの時と同様に、瞬時二乗値をフィルタ係数  $h_k(n)$  で偏微分すると、

$$\frac{\partial \hat{e}(n)}{\partial h_k(n)} = -2E[e(n) \sum_{j=0}^{J-1} G_j x(n-k-j)] \quad (3.16)$$

となり、参照信号  $x(n)$  に二次経路特性が畳み込まれた項を含む形となる。よって、ANC システムを構築する場合、二次経路特性を模擬したフィルタをあらかじめ測定する必要がある。この測定された二次経路特性を  $\hat{G}_j$  と表し、入力信号に  $\hat{G}_j$  を畳み込んだ信号を濾波参照信号  $r(n)$  と表す。よって  $r(n)$  は

$$r(n) = \sum_{j=0}^{J-1} \hat{G}_j x(n-k-j) \quad (3.17)$$

と与えられる。

参照信号  $x(n)$  を二次経路特性をモデリングしたフィルタ  $\hat{G}_j$  で濾波して得られる濾波参照信号  $r(n)$  を適応フィルタの更新に用いる。

このように、濾波参照信号  $r(n)$  を、適応フィルタの更新に用いる LMS アルゴリズムであることからこのアルゴリズムは Filterd-x LMS(FxLMS) アルゴリズム (Widrow and Stearns, 1985 [32]) と呼ばれる。以上より、Filterd-x LMS アルゴリズムのブロック図は図 3.2 のように表現できる。

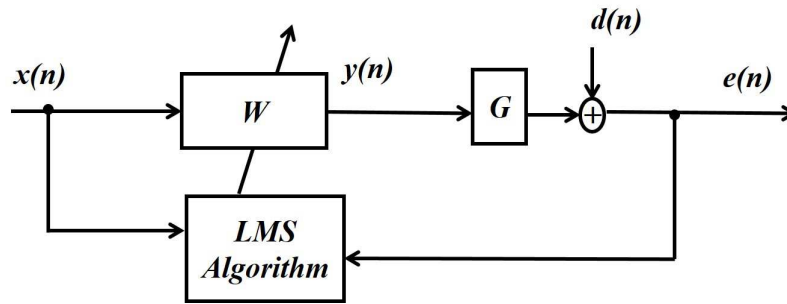


図 3.2 Filtered-x LMS アルゴリズムのブロック図 [1]

また、FxLMS アルゴリズムによる適応フィルタの更新式は以下の式 (3.18) のように表現できる。

$$h_k(n+1) = h_k(n) + \mu e(n)r(n-k) \quad k = 0, 1, \dots, K-1 \quad (3.18)$$

### 3.6 Harmonic Filtered-x LMS アルゴリズム [30]

ANC では、一般的に、複数の参照信号を用いることで消音効果をよくすることができる。しかし、消音効果を高くするには、複数の参照センサを必要となり、コストの増加やシステムの複雑化といった問題が生じる。この問題を解消するためのアプローチとして、Harmonic Filtered-x LMS(HFxLMS) アルゴリズムがある。このアルゴリズムは騒音の調波構造に着目し、騒音のピーク成分のみを低減制御するアルゴリズムである。調波構造の特性を図 3.3 に示す。

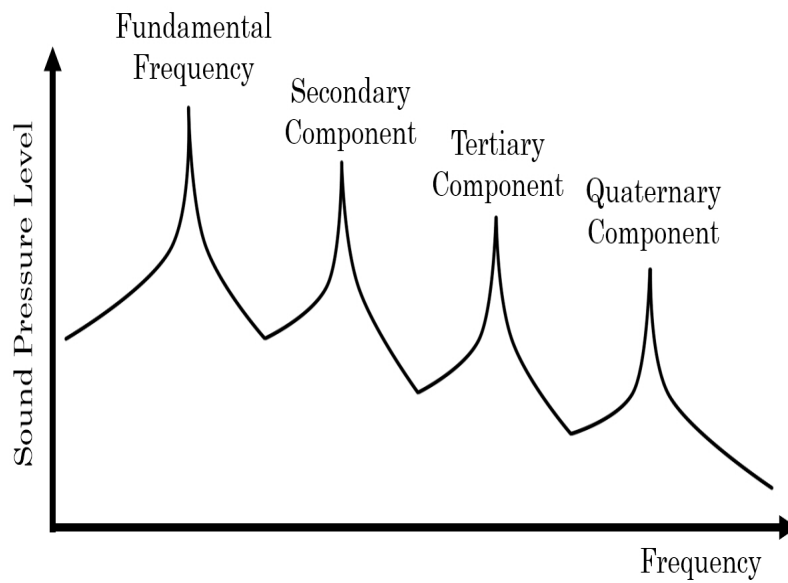


図 3.3 調波構造の例

このアルゴリズムでは、基本周波数を得るためにパルス信号を用いる。エンジンの場合を考えるとエンジンの点火パルス信号のような、エンジンの回転と同期したパルス信号を用いる。そして、このパルス信号からは、立ち上がりや立下りの間隔から基本周期  $T_f$  を導出する。パルス信号及び立ち上り立下りの間隔を図 3.4 に示す。

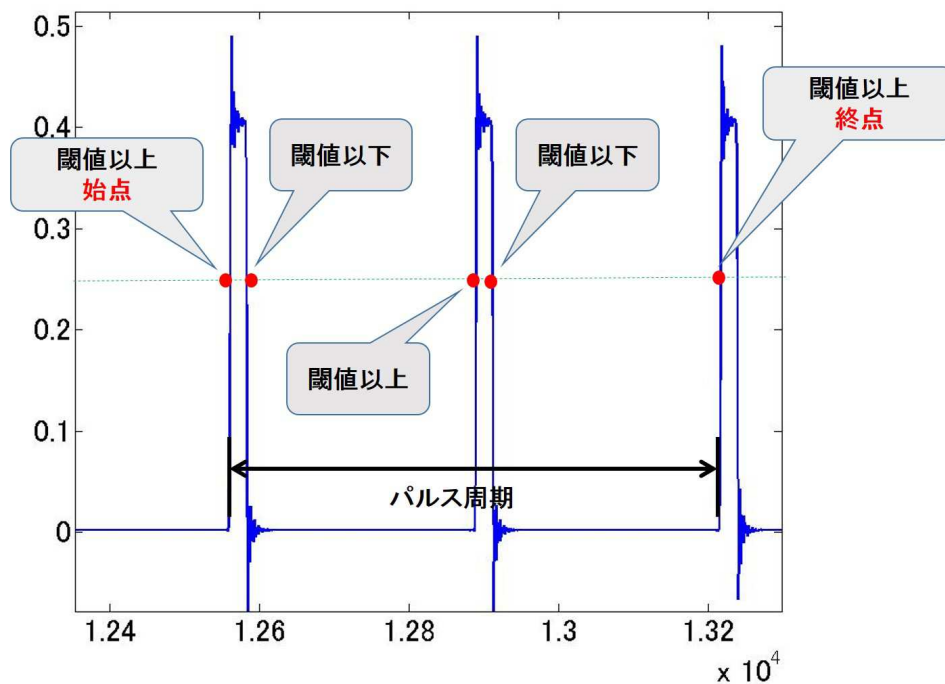


図 3.4 パルス信号及びパルス間隔

その基本周期から、基本周波数  $F_f$  を導出することができる。具体的には、ある閾値を設定し、その閾値をパルスの数値が超えた点を始点とし、再びパルスの数値が閾値を超えた点を終点とすることで周期を導出し、その周期をもつ正弦波を生成する。その基本周波数、及び次数成分の正弦波を参照信号として用いる。つまり、このアルゴリズムは参照信号をパルス信号に同期して周波数が変化する正弦波にしたアルゴリズムである。フィルタの更新式は、FxLMS アルゴリズムと同様である。

このアルゴリズムは、パルス信号を参照信号として用いるため、マイクロフォンなどを使用しない利点がある。そのため、ロードノイズなどの外乱の影響を受けにくく安定した制御が可能となる。また、参照信号に応じた適応フィルタを有しているため、各周波数で最適な収束係数を設定することができる。このことにより、制御対象周波数を高速に低減可能となる。

### 3.7 Command Filtered-x LMS アルゴリズム [31]

これまで述べてきたアルゴリズムは騒音を低減するアルゴリズムである。この節では、騒音を低減するのではなく、騒音の音質を制御する技術に関して紹介する。そのような技術の一つとして、ANC を応用した適応音質制御 (ASQC, Active Sound Quality Control) 技

術が提案されている。ここで、ASQC のアルゴリズムの一つである、Command Filtered-x LMS アルゴリズム (C-FxLMS). について述べる。このアルゴリズムは、FxLMS アルゴリズムを拡張したアルゴリズムとなっており、騒音を理想となる音へ変化させるアルゴリズムである。C-FxLMS アルゴリズムのブロック図を図 3.5 に示す。

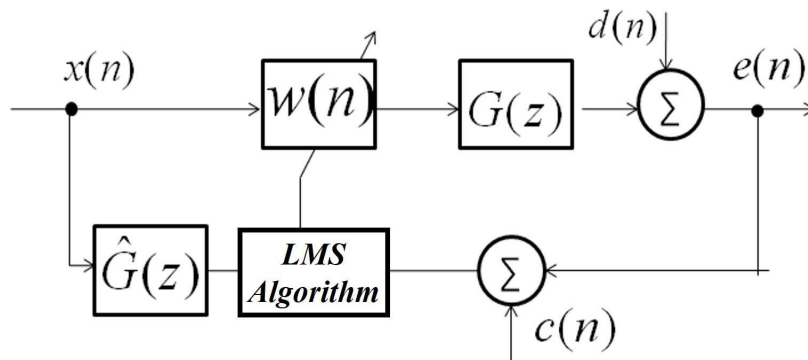


図 3.5 Command Fx-LMS アルゴリズムのブロック図 [31]

ここで、 $x(n)$  は参照信号、 $W(n)$  は適応フィルタ、 $d(n)$  は制御対象信号、 $y(n)$  は制御信号、 $e(n)$  は誤差信号、 $G$  は二次経路特性、 $\hat{G}$  は二次経路特性を経た制御信号の推定値、 $e'(n)$  は疑似誤差信号、 $c(n)$  は指令信号を示している。疑似誤差信号  $e'(n)$  は、式 (3.19) に示す。

$$e'(n) = e(n) + c(n) \quad (3.19)$$

$$\mathbf{W}(n+1) = \mathbf{W}(n) - \mu e'(n) \mathbf{r}(n) \quad (3.20)$$

式 (3.19) のように、誤差信号  $e(n)$  と指令信号  $c(n)$  との差である、疑似誤差信号  $e'(n)$  が小さくなるように上の式 (3.20) の更新式を用いて適応フィルタを更新する。

## 第 4 章

# 自己組織化マップ (SOM)

### 4.1 はじめに

本実験では各被験者のデータから特徴量を自動で算出し、識別を行うことを考える。そこで、各被験者の多次元データを 2 次元で表現する自己組織化マップ (Self-Organizing Maps, SOM) を用いる。自己組織化マップでは、識別結果を視覚的に結果を表すことができる。本実験では、音質制御を行う際の制御信号を好みによって制御するため自己組織化マップを用いることが最良と考えられる。本研究では、収録したデータを自己組織化マップを用い、各被験者の識別を行った。この章では、本実験で用いた自己組織化マップとそのアルゴリズムについて述べる。

### 4.2 ニューロン研究 [33]

まず、SOM ができるまでには、ニューロン研究というものが関わっている。ニューロン研究とは、人間の脳内で行われている情報処理の仕組みを、認知心理学的に、生理学および解剖学を基礎にした脳神経科学の分野で、さらには数理的に脳の仕組みを解剖するという研究である。神経細胞 (ニューロン) の構造および機能に関しては 20 世紀初めにはすでに細かく調べられ、図 4.1 に模式的に現在明らかになっているニューロンの構造を示す。

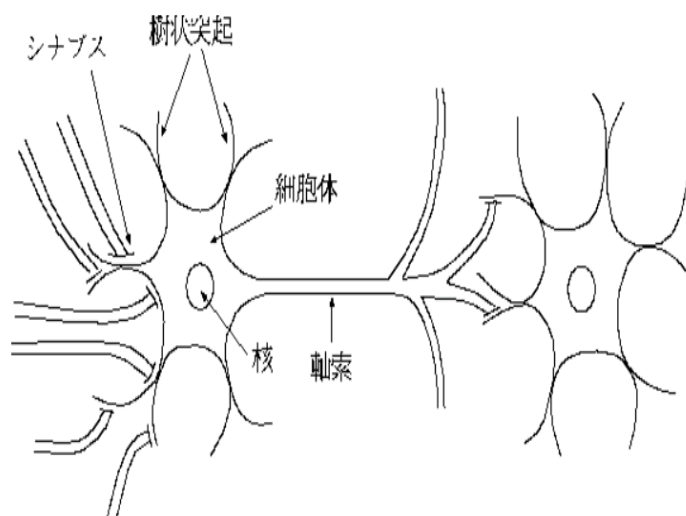


図 4.1 生物学的ニューロンの構造 [33]

また, その機構を形式ニューロンの形で初めて McCulloch(マッカロ)と Pitts(ピッツ)が数式化モデル化した. そして, 基本的なニューロンのモデルを図 4.2 に示す.

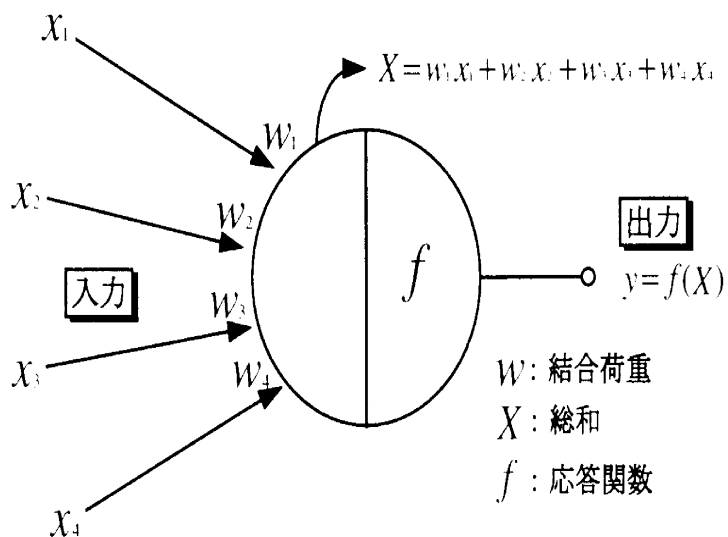


図 4.2 マッカロとピッツのニューロンモデル [33]

その基本は, 線形しきい値素子であり, 次式で示される.

$$y = f_h\left[\sum_{i=0}^n x_i w_i - \theta\right] \quad (4.1)$$

これは, 多数の入力  $x_i$  の線形加重和  $\sum x_i w_i$  があるしきい値  $\theta$  より大きい場合に "1", そうでない場合に "0", を出力するものである. このように彼らは, このアルゴリズムを用い

て情報処理が可能であることを示した。その後、生体のニューロンが学習する様を細かく分析しそれを学習則に取り込んだ。つまり、教師信号とニューロンの出力信号との差を入力側にフィードバックしてニューロン側の結合重みを逐次更新する。こうして、ニューロン出力は教師信号を学習することとなる。この様子を模式的に示したものを図 4.3 示す。

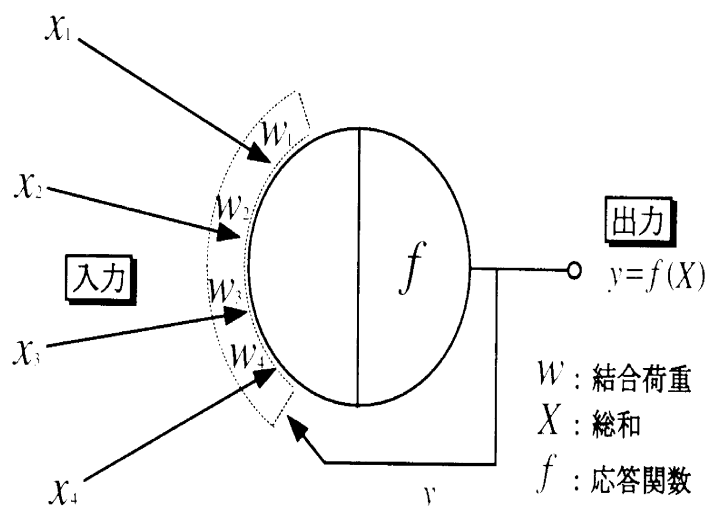


図 4.3 教師信号を学習するニューロンモデル [33]

図 4.3 に示したモデルを元にパーセプトロンと呼ばれるニューロモデルが提案された。パーセプトロンはパターン学習や認識そして汎化能力を併せ持つ高次の情報処理能力を持つ最初のモデルである。しかし、パーセプトロンには学習や認識する際に限界があるため、新たなニューロモデルの検討として Kohonen(コネホン) が脳内で行われていると考えられているものと同様な自己組織化能力を持つ連想記憶のモデルを提案した。これが自己組織化マップである。



### 4.3 自己組織化マップ [34]

4.2.1 で説明したように脳内で行われる情報処理をニューロンモデルとして考え SOM の元となっている。現在の SOM の形は、1982 年に Kohonen により発案され、現在までに様々な論文が紹介されている。Kohonen によると SOM は以下のように定義されている。

- ・高次元データの視覚化のための新しく有効なソフトウェアツールである。
- ・入力データ類似度を、SOM の基本的な形の中で描画する。
- ・高次元のデータ間に存在する非線形な統計学的関係を、簡単な幾何学的関係をもつ像に変換する。
- ・それらは通常は 2 次元のノードの格子上に表示される。

このように SOM は、位相と距離といった最も重要な関係を保存しながら、原始的データの要素を表示画面上に圧縮するので、ある種の抽出を生成すると考えられる。視覚化と抽出という 2 つの面は、プロセス解析、機械の知覚機能、制御、通信のような複雑な仕事において、多くの方法で利用することができる。つまり、SOM の特徴として多次元データの関係を 2 次元平面状の距離として表し、視覚的に理解し易いという特徴を持っている。

## 4.4 SOM アルゴリズム [34] [35]

次に SOM のアルゴリズムについて述べる. Kohonen は生物の神経細胞, 主として脳の情報処理のしかたを以下の式にまとめた.

$$m_i(t+1) = m_i(t) + h_{ci}(t)[x(t) - m_i(t)] \quad (4.2)$$

この数式は, 神経細胞 (ノード)  $i$  が時刻  $t$  で処理している情報処理能力を  $m_i(t)$  とするとき, 外部から入力信号  $x(t)$  が入り, 細胞は, この入力信号を学習して次の時刻には入力信号により近い情報処理能力  $m_i(t+1)$  を持つようになる. このとき  $x(t)$  が  $n$  次元の入力ベクトルであれば, 参照ベクトルとも呼ばれる  $m_i(t)$  は同じ  $n$  次元の要素を持つ. なお,  $t = 0, 1, 2, \dots$  は離散時間座標である.

式 (4.2) の関係より SOM は 2 層のネットワークとなっている. 第 1 層は  $n$  次元の入力層  $x(t)$  であり, 第 2 層は出力を視覚的に見るため 2 次元に配列されている. 第 2 層の競合層のベクトルは参照ベクトル  $m_i(t)$  で表され, 入力層の次元に合わせ  $n$  個の要素を持っている. この様子を図 4.4 に示す.

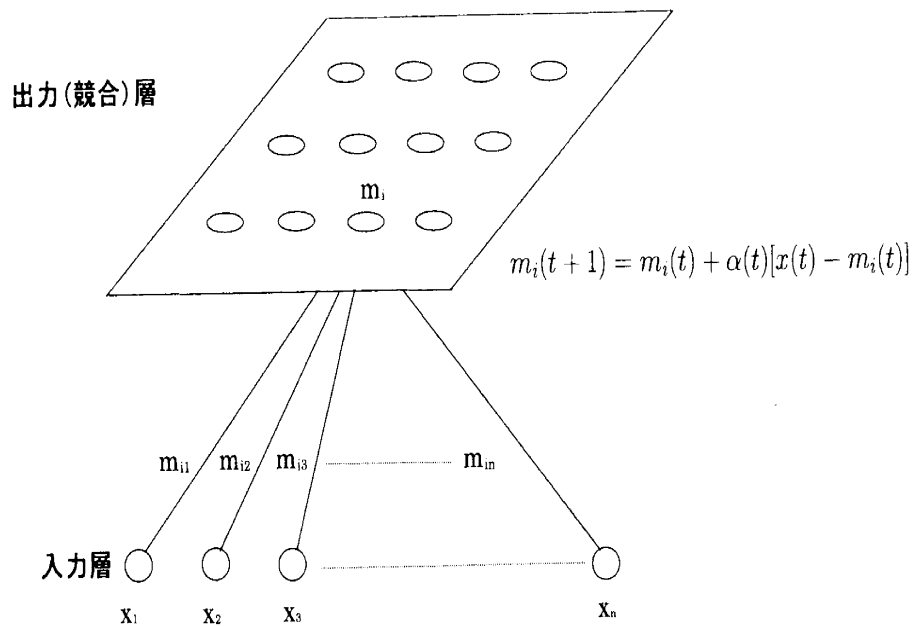


図 4.4 多次元入力ベクトルから 2 次元競合層内の単一参照ベクトル  $i$  との結合の様子 [33]

また, 学習は次のように行われる. 入力ベクトル  $x(t)$  は, ユークリッド距離  $|x - m_i|$  を最

小にするノード  $i$  を探し, それに添え字  $c$  を付け加えれば以下の式で定義される.

$$|x - m_c| = \min |x - m_i| \tag{4.3}$$

式 (4.3) で求められた参照ベクトル  $m_c(t)$  を持つユニットを勝者ユニットと呼ぶ. 式 (4.2), (4.3) での学習について説明する. 図 4.5 はその様子を示したものである.

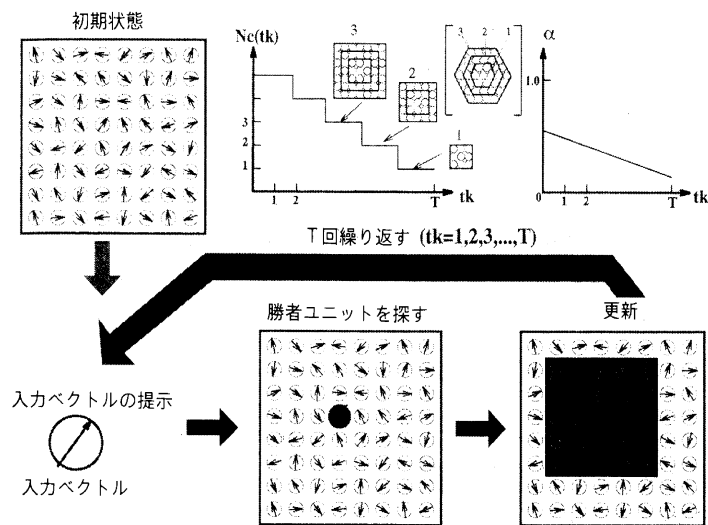


図 4.5 式 (4.2), (4.3) を用いた SOM 学習図 [33]

- ・まず入力信号が提示されると, その信号に一番近いユニットが判別され反応する. それが勝者ユニットである.
- ・そして勝者の回りに近傍領域が図中正方形の中に囲った正方形のように定義される.
- ・近傍内のすべてのユニットは, 式 (4.2) に従って入力ベクトルを学習し, 近傍内のユニットは入力ベクトルの方向に少し動く.
- ・以上を繰り返し行う.

このとき, 近傍サイズは最初大きくしておき,  $N_c = N_c(t)$  と時間の関数で, 図 4.5 に示すように段々に学習と共にそのサイズを減らしていく. そして, 最後には勝者ユニットのみを学習させるようにする.

式 (4.2) による学習中, 近傍  $N_c$  内のノードに関しては  $h_{ci} = \alpha(t)$  で,  $N_c$  外のノードに関しては  $h_{ci} = 0$  である. つまり, 近傍の外側のユニットは学習しない. 結局, 近傍関数は次式で表される.

$$\begin{aligned} h_{ci} &= \alpha(t) && (i \in N_c \text{では}) \\ h_{ci} &= 0 && (\text{以外では}) \end{aligned} \quad (4.4)$$

このとき、 $\alpha(t)$  の値を学習率係数と呼び、 $0 < \alpha(t) < 1$  で値を持つ。 $\alpha(t)$  と  $N_c$  の大きさは両方とも学習時間が経つにつれて普通、単調減少させる。 $\alpha(t)$  は次の式のように定義しても良い。

$$\alpha(t) = \alpha_0(1 - t/T) \quad (4.5)$$

ここで、 $\alpha_0$  は  $\alpha$  の初期値であり、普通 0.2~0.5 の値を選ぶ。T は行われるべき学習での予定された全更新学習回数である。ただし、式 (4.2) 中、比例係数の  $\alpha(t)$  は、学習のはじめでは大きな値をとるようにし、学習が進んでくるとだんだん小さい値に設定する。また、近傍領域  $N_c = N_c(t)$  も式 (4.4) と同様に減らしていてもよい。つまり、次式となる。

$$N_c(t) = N_c(0)(1 - t/T) \quad (4.6)$$

ここで、 $N_c(0)$  は初期値である。

Kohonen の SOM アルゴリズムを整理すると以下のようなになる。

1. 入力ベクトルと最もよく一致する競合層での勝者ユニットを探す。
2. この勝者ユニットに近傍ユニットを式 (4.2) に従って更新する。学習が進むにつれて、近傍のサイズを減らし、また学習率係数の値も式 (4.5) のように減らしていく。

## 4.5 スパースモデリング

### 4.5.1 スパースモデリングとは [36]

スパースモデリングとは、少数の因子によるデータの表現方法である。量、質共に肥大化を遂げ続けるデジタルデータに対する信号処理を考える場合、データの背後に潜む統計構造を少数の因子を用いて表せるため重宝さえれている。スパースモデリング自体は、様々な分野から独立に提案されており、圧縮センシング技術や、機械学習といった分野にも強い影響を与えている。その中でも、統計学で最もよく用いられるスパースモデリングは、パラメータに何らかの制約を入れて損失関数を最小化する手法である、 $L_1$  正則化である。その代表が、Tibshirani の提案した LASSO(Least Absolute Shrinkage and Selection Operator)

である. LASSO は, 回帰モデルの損失関数にパラメータ  $L_1$  ノルムに基づく正則化項を加えた正則化損失関数を最小化することによってパラメータを推定する方法で, 推定の安定化とともに変数選択も行うことができる.

#### 4.5.2 LASSO アルゴリズム [36]

まず, 問題の背後にある説明因子を  $N$  次元の信号  $x = (x_1, x_2, \dots, x_N)$  と表し, この信号が作用  $A$  を介して,  $M$  次元の観測信号  $y = (y_1, y_2, \dots, y_M)$  を与えるというモデルを考える. ここで, 作用  $A$  が線形混合行列とすると, 説明因子  $x$  と観測信号  $y$  との関係は  $y = Ax$  と定式化できる. ただし,  $A$  は,  $M \times N$  の行列であり, 各列ベクトル  $a_n$  を基底とすると,  $A$  は基底の集合と考えられる. ( $A = a_1, a_2, \dots, a_n$ ). スパースモデリングの文脈では, 行列  $A$  は基底の集合という意味合いから辞書行列あるいは観測行列と呼ばれる場合がある. 辞書行列としては様々な与えられ方が提案されており, 画像などの信号に対しては, ウェーブレット基底を与える手法などが一般的に用いられる. ここで, 辞書行列  $A$  が与えられたときに, 観測信号  $y$  から, 原信号  $x$  を推定することを考える. 推定したい変数の数 (次元)  $N$  と観測データ数  $M$  が等しく,  $A$  がランク落ちしない場合は, 逆行列を考えれば事足りる. しかし, 往々にして推定したい変数のほうが多い場合や, 観測に雑音が含まれるような場合には, この問題は不良設定問題となるため, 推定解  $\hat{x}$  に対して何らかの制約の情報を与えて解く必要がある. すなわち, 説明因子は観測データを説明するために  $\|y - Ax\|^2$  が小さいだけでなく, 制約の条件  $\phi(x)$  も同時に小さくするような解を獲得することが必要になる. 例えば, 推定解のベクトル  $x$  の  $l_2$  ノルム  $\|x\|^2$  が大きくならないことを制限として与えなければ,  $\lambda$  を制御パラメータとして,

$$\hat{x} = \arg \min_x \frac{1}{2} \|y - Ax\|^2 + \lambda \phi(x) \quad (4.7)$$

$$\phi(x) = \|x\|_2^2 \quad (4.8)$$

を満たすような解を候補として考える必要がある. 式 (4.7) の第 1 項は  $x$  による観測データ  $y$  へのフィッティングを表し, 第 2 項の関数  $\phi(x)$  は,  $l_2$  ノルムが大きくなるようにする制約条件を表す.  $\lambda$  は, それぞれの大きさのトレードオフを担っている. この問題は, 縮小推定の一環であるリッジ回帰問題と呼ばれ, その解としては,  $\hat{x} = (AA^T + \lambda I)^{-1} A^T y$  を用いればよいことが知られている. ただし,  $I$  は単位行列である. また, ベイズ推定の立場から, 式 (4.7) を眺めると, 第 1 項目は, データの観測に基づく尤度関数  $p(y|x; A) = \frac{1}{Z_{pri}(\lambda)} \exp(-\frac{1}{2} \|y - Ax\|^2)$  に対応し, 第 2 項目は, 事前分布

$p(x) = \frac{1}{Z_{pri}(\lambda)} \exp(-\lambda\phi(x))$  に対応すると考えられるので、式 (4.8) の最小化問題は、事前確立  $p(x|y; A)$  の最大化 (maximum a posteriori:MAP) 法に対応している。スパースモデリングでは、観測データ  $y$  に現れる事象が  $x$  に含まれる少数の非ゼロ要素に対応する基底から生成されていることを仮定している。スパースなベクトルを表すような条件を式 (4.8) の  $\phi(x)$  として、どのように与えるか考える。多くの場合、制約条件には  $l_0$  ノルムや、 $l_1$  ノルムの最小化といった制約を与えることが多い。すなわち

$$L(x, \lambda) = \frac{1}{2} \|y - Ax\|^2 + \lambda \|x\|_p \tag{4.9}$$

という定式化である。ここで、 $l_p$  ノルム  $\|x\|_p$  は、

$$\|x\|_p = \begin{cases} (\sum_{n=1}^N |x_n|^p)^{1/p} & 0 < p \leq 1 \\ \sum_{n=1}^N \delta(x_n) & p = 0 \end{cases} \tag{4.10}$$

としている。ただし、

$$\delta(x_n) = \begin{cases} 1, & x \neq 0 \\ 0, & x = 0 \end{cases} \tag{4.11}$$

であり、 $l_0$  ノルム  $\|x\|_0$  は、非ゼロ要素の個数を表す。これらの条件がスパースなベクトルを解としやすくする理由を図 4.6 に示す。図では、観測信号が一次元、推定信号が二次元であるため、図中の直線が、 $y - Ax = 0$  の解集合であり、誤差  $\epsilon$  を許容した領域  $\frac{1}{2} \|y - Ax\|^2 \leq \epsilon$  が網掛けした領域である。この誤差  $\epsilon$  を徐々に大きくしていったときに最初に等ノルム面  $\|x\|_p = 1$  に接触する箇所が解となる。 $l_2$  ノルムを考えた場合、等ノルム面は円になるため、スパースな解を生成しにくい。  $0 \leq p \leq 1$  の場合は、等ノルム面が軸の部分で尖った形になるため、スパースな解を与えやすくなる。

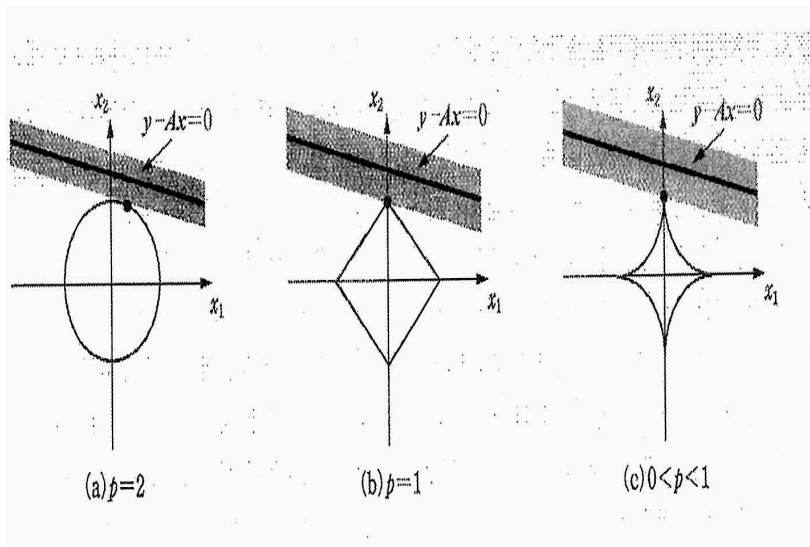


図 4.6  $l_p$  ノルムによるスパース解生成 [36]

## 第 5 章

# 音の心理学的測定法

### 5.1 はじめに

音環境やシステムが快適であるか、不快であるかというのは、人が主観的に評価するものであり、測定したデータから快不快を判断するのは非常に困難である。そのため、快適な音環境を実現するには、どのような環境が人にとって快適または不快であるかを調査する必要がある。このような心理的事象を記述する場合には、言語による記述が行われることが多い。しかし、言語は多義性を持つため、受け取り手にとって曖昧な記述になりやすい。これを避けるためには数量的に記述する必要がある。この数量的記述には心理学的測定法が用いられ、数量化された人間の印象が物理的条件と対応付けされる。これにより、環境に対する人の印象を明らかにすることで、より快適な音環境実現のための対応策についての指針を得ることが期待される。

本章では、音の心理学的測定法として代表的な手法である SD 法 (semantic differential) について述べた。これらは、音の聴感評価だけでなく様々な評価の心理学的手法として使用されている。

### 5.2 音の定義

JIS Z 8106 音響用語 (一般) によると、音は「音波又はそれによって起こされる聴覚的感覚」と定義されている。つまり、音は音波すなわち物理現象としての音と、聴覚すなわち感覚としての意味の両面を持っている。そして音響心理学の課題は、音の物理量と関連付けて聴覚の性質を明らかにすることである。楽器を鳴らすことは物理的に音を発生させる典型だが、鳴らし方によって、聞こえ方もまた規則的に変化する。

このように、音の物理量と聴覚の間には、通常かなり精度のよい対応関係が見られるので、周波数と高さ、振幅と大きさ、スペクトル構造と音色の関係など、従来より種々の法

則が得られている。ただし、現実の楽器音はかなり複雑なスペクトル構造とその時間的変化を伴い、周波数の高さが必ずしもピッチの高さに対応せず、また、振幅の大きさが聞こえの大きさに対応するとは限らない。さらに音色に関しては、スペクトル構造だけでなくそれ以外のほとんどあらゆる物理量が関与して、一義的な法則性の確立には程遠い現状にある。

音響心理学では、音の世界を対象として人々が外界をいかに認識するか、すなわち、音源が人々にいかなる主観的印象を与えるのかを明らかにすることを目的としている。

## 5.3 心理学的測定法

### 5.3.1 測定の水準 [37]

心理学的測定法は、その名の通り測定法の一つである。Stevens [37]によると、”測定とは、規則に従って対象あるいは事象に数を割り当てること”である。そこで、いかなる規則に従って数を割り当てるかで、Stevensは測定には表5.1に示す4つの水準が存在するとしている。この4つの水準は大別すると定性的データと定量的データの2種類に分けられ、名義尺度と順序尺度が定性的データに、間隔尺度と比率尺度が定量的データに該当する。



表 5.1 尺度水準 [37]

| 尺度水準                     | 特徴  | 典型例                    | 代表値                        |
|--------------------------|---|------------------------|----------------------------|
| 名義尺度<br>(nominal scale)  | 単に分類するために整理番号として割り当てたもの、名義尺度の数値が同じならば同じ分類、数値が異なれば異なる分類に属する。 | 血液型<br>男女の性別<br>電話番号   | 度数<br>最頻値                  |
| 順序尺度<br>(ordinal scale)  | 順序には意味があるが、その間隔には意味がない数値を割り当てたもの                            | 好きなスポーツの順位<br>マラソンの順位  | 最頻値<br>中央値                 |
| 間隔尺度<br>(interval scale) | 目盛りが等間隔になっている(等間隔であると仮定されている)もの                             | 知能指数<br>摂氏の温度<br>客の満足度 | 最頻値<br>中央値<br>算術平均         |
| 比例尺度<br>(ratio scale)    | 原点の決め方が定まっていて、間隔にも比率にも意味があるもの                               | 身長<br>体重<br>金額<br>絶対温度 | 最頻値<br>中央値<br>算術平均<br>幾何平均 |

### 5.3.2 尺度構成法 [38]

音の心理的側面を測定する方法には、精神物理学的測定法や尺度構成法が用いられる [38]。精神物理学的測定法とは、呈示する刺激と、それに対する反応として体験された心理感覚との間の関係を、定量的に把握する方法で、調整法 (method of adjustment)、極限法 (method of limits) などの様々な測定法が開発されている。この測定法で測定の対象となるのは、刺激閾、弁別閾、主観的等価点などである。一方、音の印象を測定する場合には、尺度構成法が有効である。この尺度構成法は、間隔尺度、比率尺度を構成するのに、大別して直説法と間接法の 2 つに分類される。

直接法は、被験者に直接比率もしくは間隔によって反応させる方法である。これには ME 法 (magnitude estimation)、MP 法 (magnitude production)、等現間隔法などが含まれる。

間接法は、観察者に 2 つの刺激のどちらが大きいか、あるいは好きかといった判断や、いくつかの刺激を継時的に評価尺度を用いて判断させ、これらの序数尺度上の判断から、何らかの仮定 (例えば正規分布の仮定) を設けて、計算で間隔尺度を算出する方法である。これには、一対比較法、系列範疇法、順位法などが含まれる。

以降で、本研究において音の評価に用いた、間接法に含まれるSD法について述べる。

## SD法

代表的な心理学的測定法として一対比較法が挙げられるが、この手法は主として単一の次元を測定するものである。一方、現実の知覚は、決して一次元ではなく多次元的であるが、多次元に測定することが困難なために一次元に限定するか、あるいは次元のものの仮定して測定を行っていたといえる。

多次元的な手法の1つとして、SD法が挙げられる。SD法はアメリカの心理学者のOsgoodが対象の意味の測定のために開発した方法であり、心理学的実験でよく用いられている[39]。SD法は、「遅い-速い」や「明るい-暗い」など両極の形容詞対によって作られた評価尺度を複数用いて対象の評価を行う。各評価尺度対に対して5段階や7段階の両極性の尺度で複数の被験者に回答させ、各評価尺度段階を得点とするリケルト尺度(Likert scale)を用いて数値化して、次節で述べる因子分析により評価次元を抽出する。

この方法の特徴は、イメージによる心理的な多次元性を持つこと、さらに量的把握が可能なことにある。さらに実施が簡単であるので、聴感印象やデザインの評価などに用いられている。

## 5.4 因子分析

### 5.4.1 因子分析とは [40]

因子分析は、多くの研究で用いられる多変量解析の手法の1つである。因子分析は、複数の変数の関係性を基にした構造を探る際によく用いられる。また、因子分析で扱うデータは、すべて定量データである。

因子分析を行う目的は、因子を見つけることである。因子とは、実際に測定されるものではなく、測定された変数間の相関関係を基に導き出される「潜在的な変数」である。言い換えると、因子分析とは「ある観測された変数が、どのような潜在的な因子から影響を受けているか」を探る手法である。

### 5.4.2 共通因子と独立因子 [40]

因子には共通因子と独立因子があり、測定された変数の全てに影響を及ぼす因子を共通因子という。これに対して、ある特定の因子にのみ影響を及ぼす因子を独立因子という。共通因子も独立因子もともに、直接的には観察することができない「潜在的な因子」である。我々が直接知ることができる観測変数のデータには、潜在的な共通因子と独立因子が関係している。さらに、共通因子にはいくつか複数のものがあることが想定される。その

ような共通因子を探ることが因子分析の目的である。

なお、一般に「因子」という時には共通因子のことを指す。また、因子分析では、独自因子は「誤差」としての扱いを受ける。因子分析のイメージを図5.1に示す。

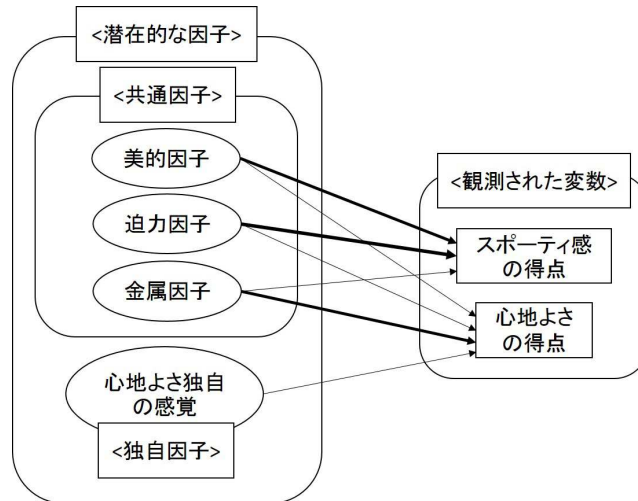


図 5.1 因子分析イメージ [40]

### 5.4.3 因子負荷量 [40]

いくつかある因子が、各変数に及ぼす割合はそれぞれ変数によって異なるが、この割合を因子負荷量という。また、各因子が各個体に及ぼす影響力を因子得点という。つまり、因子得点は因子の大きさを表しており、因子得点が高い個体はその因子に影響されている割合が高いと言える。

因子負荷量を求めるには、変数の分散、共分散の関係式から得られた式(5.2)を用いる。  $n$  個の変数  $x_1, x_2, \dots, x_n$  がそれぞれ  $p$  個の共通因子で決まると考え、共通因子で決まらない部分は独自因子  $e$  で補う。因子の因子負荷量を  $a_{1,m}, a_{2,m}, \dots, a_{p,m}$  ならびに共通因子を  $f_1, f_2, \dots, f_p$  として、  $m$  番目の変数  $x_m$  を式(5.1)のように表す。そして、式(5.3)の条件のもとで式(5.2)の連立方程式を解くことにより因子負荷量が決まる。

$$x_m = a_{1,m}f_1 + a_{2,m}f_2 + \dots + a_{p,m}f_p + e_m (m = 1, 2, \dots, n) \tag{5.1}$$

$$\left. \begin{aligned} (s_1^2 - X)a_{i,1} + s_{1,2}a_{i,2} + s_{1,3}a_{i,3} + \dots + s_{1,n}a_{i,n} &= 0 \\ s_{2,1}a_{i,1} + (s_2^2 - X)a_{i,2} + s_{2,3}a_{i,3} + \dots + s_{2,n}a_{i,n} &= 0 \\ s_{3,1}a_{i,1} + s_{3,2}a_{i,2} + (s_3^2 - X)a_{i,3} + \dots + s_{3,n}a_{i,n} &= 0 \\ &\vdots \\ s_{n,1}a_{i,1} + s_{n,2}a_{i,2} + s_{n,3} + \dots + (s_n^2 - X)a_{i,n} &= 0 \end{aligned} \right\} \tag{5.2}$$

( $s_m^2$ :  $x_m$ の分散,  $s_{l,m}$ :  $x_l, x_m$ の共分散)

$$X = a_{i,1}^2 + a_{i,2}^2 + \cdots + a_{i,n}^2 \quad (5.3)$$

ここで、 $X$  は因子の寄与量を表しており、固有値と呼ばれる。この固有値が大きいほど、その因子と分析に用いた変数群との関係が強いことを意味する。そのため、因子は変数の数だけ抽出されるが、固有値からいくつ因子が存在し得るかを判断する材料となる。因子数の決定には、他にも累積寄与率やスクリープロットから決める方法がある。

#### 5.4.4 回転 [38] [40]

図 5.2 に、因子負荷量の散布図の例を示す。第 1 因子の周辺に 5 つの尺度が固まっていることが分かり、この図から因子の特性を解釈しようとする解釈に無理が生じてしまう。そこで因子分析では、バリマックス回転 (varimax rotation) やプロマックス回転 (promax rotation) といった軸を回転させる操作が行われる。軸を原点を中心に回転させることにより、より明確に潜在的な因子を見出すことが可能となる。図 5.3 に最も一般的なバリマックス回転による因子負荷量の散布図を示す。

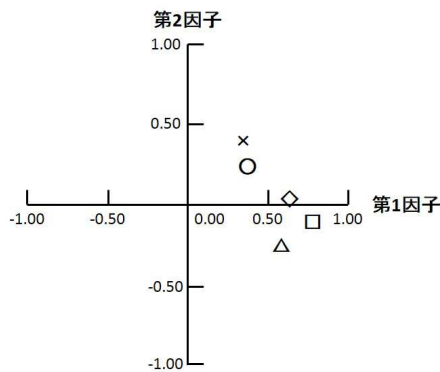


図 5.2 回転前 [38]

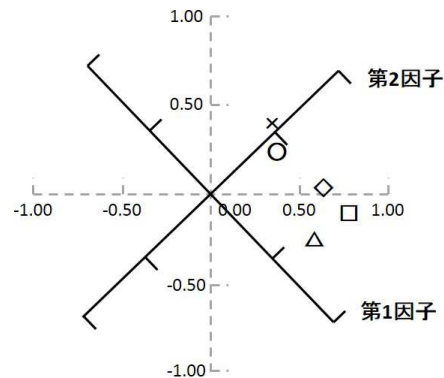


図 5.3 バリマックス回転 [38]

バリマックス回転では、図 5.3 のように縦軸と横軸が直角であることを保って回転させる。このようなことから直交回転と呼ばれる。このように回転させた結果、3 つの尺度が第 1 因子に、残りの 2 つの尺度が第 2 因子に近づく。

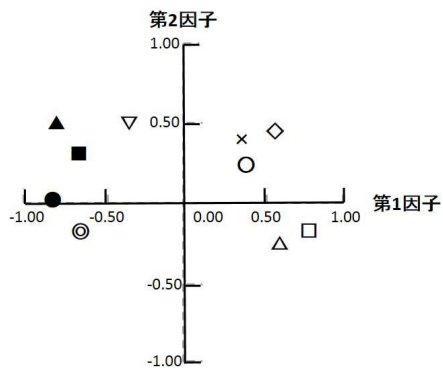


図 5.4 回転前 [38]

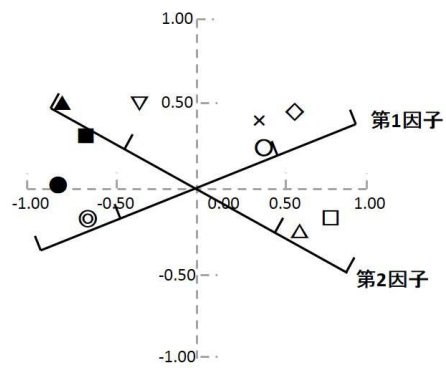


図 5.5 プロマックス回転 [38]

プロマックス回転では、図 5.5 のように縦軸と横軸をそれぞれ別々に回転させるので、2つの軸が直交ではなく斜めになる。そのため斜交回転とも呼ばれている。プロマックス回転は軸をそれぞれ別に回転させるので、因子間に相関があってもかまわない。また、因子間の相関が0の時に2つの軸は直交になる。

## 5.5 因子得点の推定法 [41]

5.4.3 節でも述べたように、因子得点は各因子が各個体に及ぼす影響力を示している。この影響力は因子負荷量のみで解釈するのが難しい場合もあるため、因子得点も併せて算出されている。

因子得点は、式 (5.4) から推測された式 (7.2.5) を計算することで求められる。式 (5.4) は共通因子  $f_1, f_2, \dots, f_p$  を変量  $x_1, x_2, \dots, x_n$  の一次式として推定したものであり、この式から推定された第  $j$  番目の標本の共通因子が因子得点である。

$$\left. \begin{aligned} f_1 &= b_{1,1}x_1 + b_{2,1}x_2 + \dots + b_{n,1}x_n \\ f_2 &= b_{1,2}x_1 + b_{2,2}x_2 + \dots + b_{n,2}x_n \\ &\vdots \\ f_p &= b_{1,p}x_1 + b_{2,p}x_2 + \dots + b_{n,p}x_n \end{aligned} \right\} \quad (5.4)$$

$$\left. \begin{aligned} f_{1,j} &= b_{1,1}x_{1,j} + b_{2,1}x_{2,j} + \dots + b_{n,1}x_{n,j} \\ f_{2,j} &= b_{1,2}x_{1,j} + b_{2,2}x_{2,j} + \dots + b_{n,2}x_{n,j} \\ &\vdots \\ f_{p,j} &= b_{1,p}x_{1,j} + b_{2,p}x_{2,j} + \dots + b_{n,p}x_{n,j} \quad (j = 1, 2, \dots, N) \end{aligned} \right\} \quad (5.5)$$

また、係数は式 (5.6) のようにまとめられ、因子得点係数行列と呼ばれる。  $B$  の第 1 列は第 1 因子に関係し、第 2 列は第 2 因子に関連する。

$$B = \begin{bmatrix} b_{1,1} & b_{1,2} & \dots & b_{1,p} \\ b_{2,1} & b_{2,2} & \dots & b_{2,p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{i,1} & b_{i,2} & \dots & b_{i,p} \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

## 5.6 一対比較法

### 5.6.1 一対比較法とは [42] [43]

一対比較法 (method of paired comparison) は、数個の刺激を二つずつ対にして判断を求める方法である。また間接法の中でも特に判断にやさしく、適用範囲が広いという特徴がある。判断がやさしいため、判断の信頼性も高く、特に微妙な差を判断する場合に適した方法である。ただ、二つの刺激を対にして比較するので、継続時間の長い刺激には適用が

難しい.  $n$  個の刺激を二つずつ組み合わせて判断を求めると、刺激対の数、すなわち判断の回数は、

$$(\text{判断回数}) = {}_n C_2 = \frac{n(n-1)}{2} \quad (5.7)$$

となる. したがって、あまり刺激の数が多いと組み合わせの対の数が多くなり、実験に時間を要するので、一般には5~10個くらいが適当とされている. また、刺激を継時的に提示し、その提示順序が影響すると考えられる場合には、 $A \rightarrow B$ ,  $B \rightarrow A$  両方の順序で、すなわち  $n(n-1)$  個の組み合わせで判断を求める必要がある.

一対比較法のうちのシェッフエの比較判断法則の浦の変法 [44] の適用例について述べる.

### 5.6.2 シェッフエの一対比較法 (浦の変法) [44]

[考え方] パネリスト  $k$  が、コーヒー  $A_i$  と  $A_j$  をこの順序で比較したときの採点を  $x_{ijk}$  とするとき、その採点の内容を次のようにわけて考えることにする.

$$x_{ijk} = (\alpha_i - \alpha_j) + (\alpha_{ik} - \alpha_{jk}) + \gamma_{ij} + (\delta + \delta_k) + \varepsilon_{ijk} \quad (5.8)$$

ここで各記号の意味は、次のとおりである.

- $t$ ; 試料数
- $i$ ; 先に提示された試料
- $j$ ; 後で提示された試料
- $N$ ; パネリストの総数
- $k$ ; パネリストの番号.  $k = 1, 2, \dots, N$
- $\alpha_i, \alpha_j$ ; 試料  $A_i$  と  $A_j$  に対して、パネル全体がもっている平均的な嗜好度を示し、解析を容易にするために、 $\sum_{i=1}^t \alpha_i = 0$  という条件を設定する.
- $\alpha_{ik}, \alpha_{jk}$ ; 試料  $A_i$  と  $A_j$  に対して、パネリスト  $k$  がもっている嗜好度の個人差. つまり、パネリスト  $k$  の嗜好度とパネルの平均嗜好度との差を意味する. したがって、パネリスト  $k$  は試料  $A_i$  に対して、 $\alpha_i + \alpha_{ik}$  の嗜好度をもつことになる. ここでも、

$$\sum_{i=1}^t \alpha_{ik} = 0, \quad \sum_{k=1}^N \alpha_{ik} = 0$$

という条件をおく.

- $\gamma_{ij}$  ; 組合せの効果を示す.

$$\sum_{j=1}^t \gamma_{ij} = 0, \quad \gamma_{ij} = -\gamma_{ji}$$

とする.

- $\delta$  ; 平均の順序効果
- $\delta_k$  ; 順序効果の個人差であって,

$$\sum_{k=1}^N \delta_k = 0 \tag{5.9}$$

とする.

- $\varepsilon_{ijk}$  ; 誤差. 平均 0, 分散  $\sigma^2$  の正規分布に従う.

そしてこれらの推定値は, 次式によって与えられる.

$$\text{平均嗜好度 ;} \quad \hat{\alpha}_i = \frac{1}{2tN} (x_{i..} - x_{.i.}) \tag{5.10}$$

$$\text{嗜好度の個人差 ;} \quad \hat{\alpha}_{ik} = \frac{1}{2t} (x_{i.k} - x_{.ik}) - \hat{\alpha}_i \tag{5.11}$$

$$\text{組合せの効果 ;} \quad \hat{\gamma}_{ij} = \frac{1}{2N} (x_{ij.} - x_{.ji.}) - (\hat{\alpha}_i - \hat{\alpha}_j) \tag{5.12}$$

$$\text{平均の順序効果 ;} \quad \hat{\delta} = \frac{1}{t(t-1)N} x_{...} \tag{5.13}$$

$$\text{順序効果の個人差 ;} \quad \hat{\delta}_k = \frac{1}{t(t-1)} x_{..k} - \hat{\delta} \tag{5.14}$$

また, 各効果の平方和は, 次式によって計算する.  $S$  の記号の意味は表 5.2 に示す.

$$S_\alpha = \frac{1}{2tN} \sum_i (x_{i..} - x_{.i.})^2 \tag{5.15}$$

$$S_{\alpha(B)} = \frac{1}{2t} \sum_i \sum_k (x_{i.k} - x_{.ik})^2 - S_\alpha \tag{5.16}$$

$$S_\gamma = \frac{1}{2N} \sum_i \sum_{j>i} (x_{ij.} - x_{.ji.})^2 - S_\alpha \tag{5.17}$$

$$S_\delta = \frac{1}{Nt(t-1)} x_{...}^2 \tag{5.18}$$

$$S_{\delta(B)} = \frac{1}{t(t-1)} \sum_k x_{..k}^2 - S_\delta \tag{5.19}$$

$$S_e = S_T - S_\alpha - S_{\alpha(B)} - S_\gamma - S_\delta - S_{\delta(B)} \tag{5.20}$$

$$S_T = \sum_i \sum_j \sum_k x_{ijk}^2 \tag{5.21}$$



これらの平方和に対する自由度を、表 5.2 に示す。

| 要因     | 平方和             | 自由度   |
|--------|-----------------|---|
| 主効果    | $S_\alpha$      | $t - 1$   |
| 主効果×個人 | $S_{\alpha(B)}$ | $(t - 1)(N - 1)$                                |
| 組合せ効果  | $S_\gamma$      | $\frac{1}{2}(t - 1)(t - 2)$                     |
| 順序効果   | $S_\delta$      | 1   |
| 順序×個人  | $S_{\delta(B)}$ | $N - 1$   |
| 誤差     | $S_e$           | $t^2N - \frac{t^2}{2} - 2tN + \frac{3}{2}t - 1$ |
| 総平方和   | $S_T$           | $t(t - 1)N$                                     |

表 5.2 自由度表

分散分析の結果、主効果が有意になったならば、次にどの  $\alpha_i$  と  $\alpha_j$  間に有意差があるかを確かめる。

そのためには、まず次のヤードスティック  $Y$  を計算する。

$$Y = q \sqrt{\frac{\hat{\sigma}^2}{2Nt}} \quad (5.22)$$

ただし、 $q$  はスチューデント化された範囲の表から求める。このとき、数表中の記号  $k$  は試料数であり、本章の  $t$  に相当する。 $f$  は分散分析表での誤差の自由度に等しい。また  $\hat{\sigma}^2$  は、分散分析表での誤差の不偏分散の値を用いる。

次に、 $\alpha_i - \alpha_j$  の信頼区間を次式によって求める。

$$\hat{\alpha}_i - \hat{\alpha}_j - Y \leq \alpha_i - \alpha_j \leq \hat{\alpha}_i - \hat{\alpha}_j + Y \quad (5.23)$$

この信頼区間が、+側と-側にまたがっているならば  $\alpha_i$  と  $\alpha_j$  に差があると言えない。区間が+側にあるならば、 $\alpha_i > \alpha_j$  であり、-側にあるならば、 $\alpha_i < \alpha_j$  と考える。

## 5.7 おわりに

本章では、代表的な心理学的計測法について述べた。一対比較法は、判断がやさしいという利点があり、それゆえ、結果の信頼性も高いことがわかった。また、二つの刺激に対して比較判断を求めるので、刺激間の差が微妙な場合にも適用できる。本研究では、異なる刺激音に対する聴感印象の変化について検討するために一対比較法を用いた。

## 第 6 章

# 吸音制御が聴感印象に与える影響について

### 6.1 はじめに

本章では、「上質なスポーティ感」と関連のあるエンジン音の実現のため、吸音材による制御可能な帯域の明確化を行った。ここで「上質なスポーティ感」というと上質さとスポーティさといった相反する印象を持ち、2つのイメージを兼ね備えた複雑な印象であるが、このような複雑なイメージでも低減特性と聴感印象を関連させることが可能となれば、自動車の商品的価値の向上につながると考えられる。そこで、本研究では「上質なスポーティ感」という印象に絞り検討を進め、特定の印象における印象操作の可能性を検討した。また、吸音材の有無によりどの程度印象に差異があるのか明確にするため、吸音材の装着時及び取り外した時の2パターンで聴感印象に与える影響についても検討を行った。

### 6.2 車内音の収録

#### 6.2.1 実験条件

車室内エンジン音の収録条件として、収録時の走行条件と吸音材取り外し位置について述べる。

まず、走行条件を表 6.1 に示す。走行条件は大きく分けて加速走行と定常走行の2つで、それぞれの走行条件に対して2速全開加速や3速 60km/h 定常走行、Dレンジの計6種類の走行パターンの車内音を収録した。

表 6.1 走行条件

| ギア   | 加速走行             | 定常走行            |
|------|------------------|-----------------|
| 2速   | 全開 (800–5000rpm) |                 |
| 3速   | 全開 (800–5000rpm) | 60km/h          |
| Dレンジ | 全開 (0–120km/h)   | 60km/h, 100km/h |

図 6.1 と図 6.3 に吸音材の取り外し箇所について示す。図より、エンジンルーム周りの吸音材とインストルメントパネルの吸音材を外した。なお、本実験では MAZDA ATENZA(セダンタイプ, ディーゼルエンジン) を使用して収録実験を行った。



図 6.1 吸音材取り外し箇所



図 6.2 エンジンルーム周りの吸音材

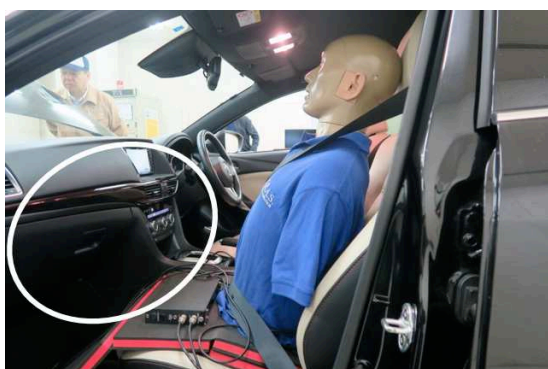


図 6.3 吸音材取り外し箇所



図 6.4 インストルメントパネルの吸音材

### 6.3 収録音解析結果

吸音材制御による低減帯域を明らかにするため、吸音材の有無による解析を行った。解析方法としては、定常走行音はエンジン音が常時定常であるため各周波数帯域を確認する

ため周波数解析を行った。加速走行音は時間軸で音源が変化するためスペクトログラムによる解析を行った。

### 6.3.1 定常走行音

#### 吸音材装着時とエンジンルームのみ吸音材を取り外した時の周波数解析

図 6.5 と図 6.6 に定常走行音を周波数解析した結果を示す。これは吸音材装着時とエンジンルーム周りのみ吸音材を取り外した時の 3 速 60km/h 定常走行音の解析結果である。結果を比較すると、吸音材の有無による変化がほとんどないことが確認できる。この結果は他の走行条件についても同様の結果となった。したがって、エンジンルーム周りの吸音材は車室内音にあまり影響を与えない可能性が考えられる。そのため、以降は吸音材装着時及びエンジンルームとインストルメントパネルの両方の吸音材を取り外した時の車室内エンジン音を用いて解析や実験を行った。

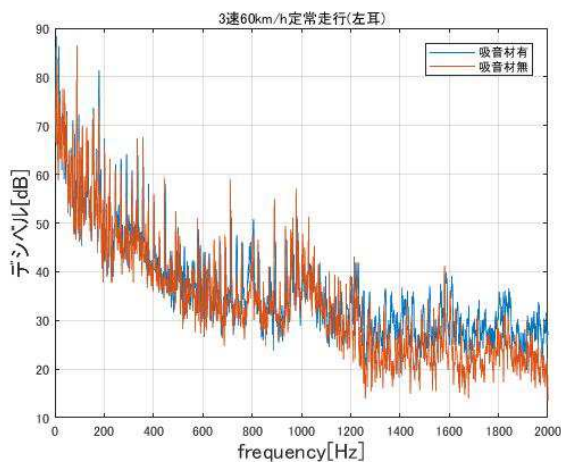


図 6.5 左耳位置での 3 速 60km/h 定常走行音比較

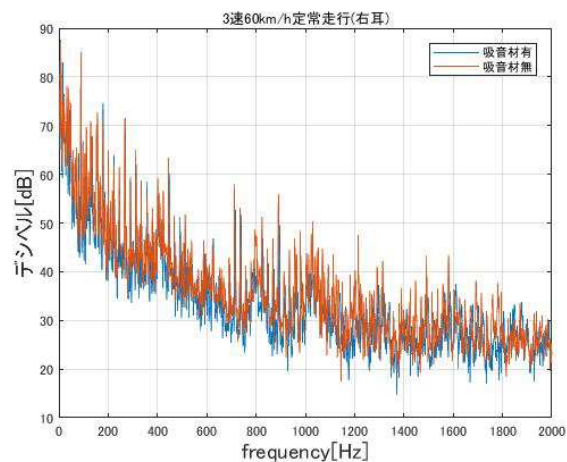


図 6.6 右耳位置での 3 速 60km/h 定常走行音比較

#### エンジンルーム、インストルメントパネル部分の吸音特性

図 6.7 と図 6.8 に吸音材装着時と吸音材を両方取り外した時の周波数解析結果を示す。この図は、3 速 60km/h 定常走行を行った際の収録音を吸音材の有無で比較した結果を示している。解析結果より、吸音材を装着することで 400Hz 付近から車室内エンジン音が低減しており、最大で約 12dB の低減が確認された。その他の定常走行条件についても同様の解析結果となった。この結果から、吸音材が車室内の静粛性に大きく影響していることが明らかとなった。さらに、この周波数解析により、400Hz 以降で吸音材による音圧レベルのコントロールが可能であることが明らかとなった。

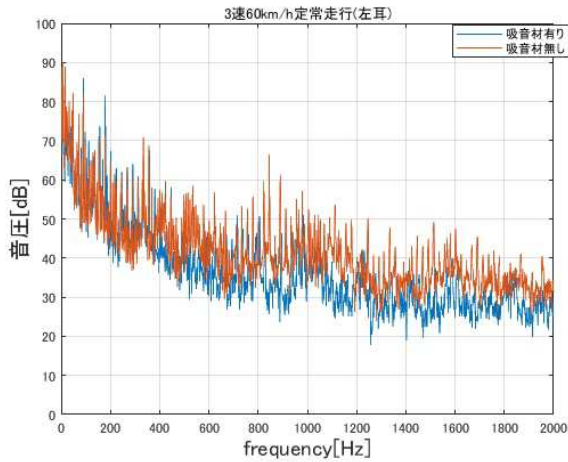


図 6.7 左耳位置での 3 速 60km/h 定常走行音比較

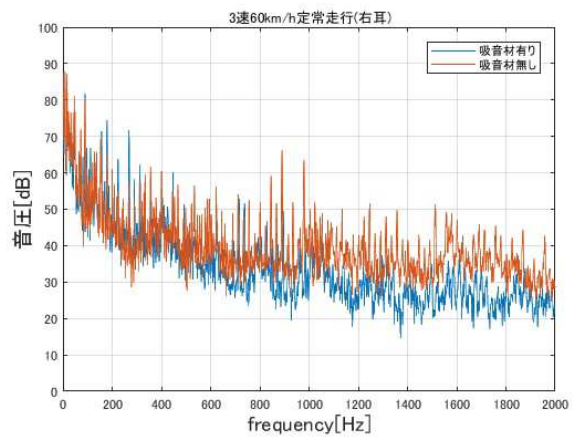


図 6.8 右耳位置での 3 速 60km/h 定常走行音比較

### 6.3.2 加速走行音

図 6.9 と図 6.10 に加速走行時の解析結果を示す. この図はそれぞれ, 回転数が 5000rpm になるまで 3 速全開加速した際の収録音のスペクトログラムを示している. 図 6.9 が吸音材装着時の加速音を, 図 6.10 が吸音材を外した時の加速音を示している. 解析結果から, 定常走行時と同様, 400Hz 以上で音圧が変化していることが分かる. 他の加速音についても 400Hz 以上で音圧の変化が確認された. この結果から, 吸音材を装着することで加速時のエンジン音も低減することが確認された.

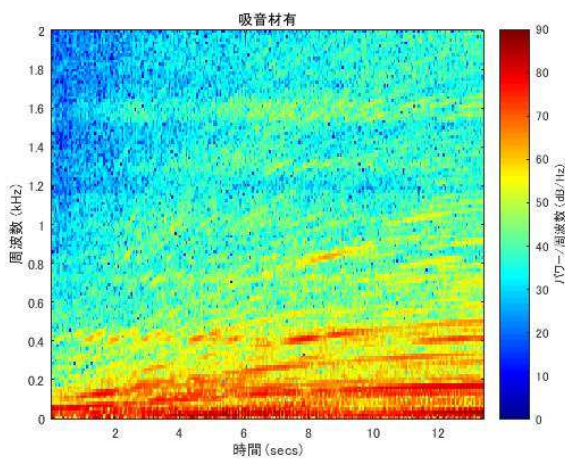


図 6.9 3 速全開加速音のスペクトログラム (吸音材装着時)

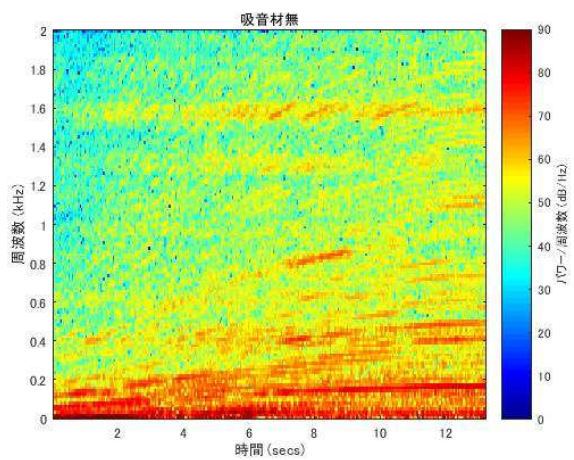


図 6.10 3 速全開加速音のスペクトログラム (吸音材取り外し時)



## 6.4 形容詞選定実験

「上質なスポーティ感」というイメージは非常に曖昧な表現であるため、単に車室内の音圧レベルを変化させるだけでは実現が難しい。したがって、「上質なスポーティ感」を実現するには、この言葉と対応のある主観的評価指標を明確化する必要がある。そこで、「上質なスポーティ感」と対応があると考えられる形容詞対をブレインストーミング、SD法及び因子分析を用いた2段階で選定した。

### 6.4.1 ブレインストーミングによる形容詞対の選定

まず、第1段階として「上質なスポーティ感」をテーマとし、自動車関連企業社員4名を含む計6名で、ブレインストーミングによる形容詞の選定を行った。選定の際には以下の点を配慮した[45]。

- 人によって受け取り方が違うような曖昧な解釈は避ける。
- 抽象的、理論的なものは避け、感覚的、直感的なものを用いる。
- 類似するものは1つにまとめ、全体の構成が変化に富むようにする。
- 価値判断に関するものは隔たりのないようにする（好き/嫌い）。
- SD法の基本尺度（評価性、力量性、活動性）や五感（視覚、聴覚、触覚、嗅覚、味覚）に関連するものは入れるようにする。
- 原則的に反対語を用いる。否定語を用いることもある。

以上を配慮し、形容詞が計45語選定された。選定された形容詞を表6.2に示す。

表 6.2 選定された形容詞対

|         |       |        |          |     |
|---------|-------|--------|----------|-----|
| 聞きなれた   | カッコいい | 単純な    | 激しい      | 楽しい |
| 伸びやかな   | 聞きやすい | 爽快な    | 暖かい      |     |
| 響きのある   | 綺麗な   | 速い     | 安らかな     |     |
| 柔らかい    | 奥ゆかしい | 繊細な    | 滑らかな     |     |
| スポーティな  | 快適な   | 力強い    | 高い       |     |
| 高級感のある  | 賑やかな  | 控えめな   | 重い       |     |
| 奥行きのある  | うるさい  | 澄んでいる  | 鋭い       |     |
| はっきりとした | 明るい   | ふわふわした | 連続した     |     |
| 締まっている  | 和的な   | 晴れやかな  | 熱い       |     |
| 加速感のある  | 興奮する  | 艶やかな   | 丸い       |     |
| 詰まったような | 迫力のある | 乾いた    | ワクワク感のある |     |

### 6.4.2 SD 法及び因子分析を用いた形容詞対の選定

得られた形容詞対から「上質なスポーティ感」との関連性の低い形容詞対は取り除く必要がある。そこで第2段階として、ブレインストーミングによって選定した形容詞対を用いたSD法(7件法)による聴感印象実験を行い、そこで得られたデータを因子分析によって3次元で表し、その3つの次元のどれかに含まれる形容詞対を最終的な形容詞対とした。

### 6.4.3 刺激音

被験者には吸音材を装着した時及びエンジンルームとインストルメントパネルの吸音を両方取り外した時の車室内エンジン音をそれぞれ呈示した。これらの刺激音の走行条件は、3速全開加速走行(800-5000rpm)である。したがって、被験者には2種類の刺激音を呈示した。

### 6.4.4 実験条件

聴覚健常者23名(いずれも20-24歳の大学生)を被験者とした。心理実験はエンジン音に注力し判断していただくため、図6.11に示すように広島市立大学にある無響室において実施した。



図 6.11 実験環境

### 6.4.5 実験方法

聴感印象実験は SD 法を用いて行った。被験者には 2 つの刺激音をそれぞれ呈示し、刺激音ごとに 45 語の形容詞対について評価させた（評価中も同じ刺激音を繰り返し呈示している）。刺激音は、ヘッドホンアンプ (SCYTHE, SDAR-2100) を介して密閉型ヘッドホン (Panasonic, RP-HT260) によって被験者の両耳に呈示した。実験の回答は、教示の後、エクセルのソフトを用いて回答させた。回答時のディスプレイの画面を図 6.12 に示す。各形容詞対ごとに「非常に」「かなり」「やや」「どちらでもない」の 7 段階で評価させ、その結果をポジティブ要因に近い方から +3, +2, +1, 0, -1, -2, -3 として得点化した。下記に実験手順に示す。

#### 実験手順

1. 準備ができたらカメラに向かって合図をさせ、実験を開始した。
2. 「ピッ」という合図音が流れ、1 秒後に 1 つめの刺激音を再生した。
3. 刺激音の判断結果に当てはまるラジオボタンを選択し、各刺激音に関連する形容詞の度合を選択させた。この時、できるだけ素早く直感で判断するよう指示をした。
4. 設問 1 を回答後合図を確認し、次の施行を開始させ上記と同様の施行をさせた。



5. 設問 2 まで実施し、実験は終了.



図 6.12 回答時のディスプレイ

## 6.5 実験結果

聴感印象実験によって得られたデータを基に因子分析を行った。今回は因子抽出に最尤法を、回転法としてプロマックス回転を用いて行った。表 6.3 に因子分析の結果を示す。この解析では、因子負荷量が  $\pm 0.4$  未満の形容詞対、他因子との因子負荷量の絶対値の差が 1.5 未満の形容詞対については除去対象として因子分析を行った。その結果、ブレインストーミングで得られた 45 語の形容詞対が表 6.3 に示す 30 語に絞られ、これを最終的な評価指標とした。

表 6.3 因子分析結果

| 形容詞対     |          | 美的因子   | 迫力因子   | 金属因子   |
|----------|----------|--------|--------|--------|
| かっこいい    | かっこ悪い    | 0.823  | 0.366  | -0.090 |
| 連続した     | 断片的な     | 0.797  | -0.089 | -0.478 |
| 聞きやすい    | 聞きにくい    | 0.777  | 0.005  | 0.000  |
| ワクワク感のある | ワクワク感のない | 0.775  | 0.244  | 0.063  |
| 高級感のある   | 安っぽい     | 0.754  | -0.029 | -0.300 |
| 快適な      | 不快な      | 0.728  | -0.272 | 0.163  |
| 安らかな     | 不安な      | 0.692  | -0.291 | 0.109  |
| 艶やかな     | 色気のない    | 0.641  | -0.143 | -0.176 |
| 伸びやかな    | 伸びのない    | 0.610  | -0.030 | 0.202  |
| 楽しい      | 退屈な      | 0.585  | 0.138  | 0.229  |
| 爽快な      | 鬱屈な      | 0.573  | 0.171  | 0.335  |
| 奥ゆかしい    | 下品な      | 0.560  | -0.381 | -0.083 |
| 澄んでいる    | 濁った      | 0.525  | -0.341 | 0.355  |
| スポーティな   | スポーティでない | 0.501  | 0.216  | 0.259  |
| 暖かい      | 冷たい      | 0.426  | -0.051 | -0.047 |
| 迫力のある    | 大人しい     | 0.180  | 0.876  | 0.103  |
| 控えめな     | 派手な      | -0.210 | -0.853 | -0.009 |
| 激しい      | 優しい      | -0.190 | 0.821  | 0.158  |
| 賑やかな     | 寂しい      | 0.009  | 0.645  | 0.191  |
| うるさい     | 静かな      | -0.207 | 0.623  | -0.084 |
| 興奮する     | 落ち着いた    | 0.380  | 0.616  | 0.010  |
| 柔らかい     | 硬い       | 0.382  | -0.591 | 0.080  |
| 繊細な      | 荒い       | 0.204  | -0.570 | 0.142  |
| ふわふわした   | ごつごつとした  | 0.114  | -0.507 | 0.304  |
| 重い       | 軽い       | 0.389  | 0.304  | -0.845 |
| 明るい      | 暗い       | -0.131 | 0.066  | 0.840  |
| 響きのある    | 響きのない    | -0.075 | 0.151  | 0.703  |
| 晴れやかな    | 曇った      | 0.251  | 0.183  | 0.629  |
| 鋭い       | 鈍い       | -0.104 | -0.051 | 0.615  |
| 高い       | 低い       | 0.017  | 0.060  | 0.581  |
| 因子寄与     |          | 7.318  | 5.184  | 4.031  |
| 因子寄与率    |          | 0.244  | 0.173  | 0.134  |
| 累積因子寄与率  |          | 0.244  | 0.417  | 0.551  |

## 6.6 おわりに

本章の実験では, 吸音材装着時及び取り外した時の車室内エンジン音の収録を行い, その収録音の解析を行った. また, 「上質なスポーティ感」に関連のある形容詞対の選定のため, 第1段階としてブレインストーミング, 第2段階としてSD法及び因子分析を行った. その結果, 「上質なスポーティ感」に関連のあると考えられる評価指標が30語選定された. したがって, 「上質なスポーティ感」は30語の形容詞対で表現することができる. 6章で述べる収録音を用いた聴感印象実験では, 得られた評価指標を用いて吸音材の有無が主観評価に与える影響, 周波数帯域の変化による聴感印象の影響についての検討を行った.

## 第 7 章

# 意図した自動車エンジン音の実現

### 7.1 はじめに

「上質なスポーティ感」を感じる車室内空間を実現するためには、この言葉と関連のある吸音材の主観的印象の明確化を行う必要がある。そこで、本章では選定した評価指標を用いた SD 法及び因子分析を行い、吸音材の主観的印象を明確化するための検討を行った。さらに、第 6 章で吸音材による低減範囲・低減量が明確化されたため、低減範囲を変化させることで自動車エンジン音に特定の印象を付加することが実現可能か検討を行った。

### 7.2 SD 法による主観的印象の明確化

本節では、前章で選定した評価指標を基に「上質なスポーティ感」に関連のある因子を明確化するため、SD 法の結果から因子分析を行った。

#### 7.2.1 刺激音

被験者には吸音材を装着した時及び吸音材を取り外した時の車室内エンジン音をそれぞれ呈示した。これらの刺激音の走行条件は、3 速 60km/h 定常走行と 3 速全開加速走行 (800-5000rpm) である。したがって、被験者には 4 種類の刺激音を呈示した。

#### 7.2.2 実験概要

聴覚健全者 32 名（男性 26 名、女性 6 名、20 代から 60 代）を被験者とした。聴感印象実験は図 7.1 に示すように株式会社ヒロタニの本社内会議室にて実施した。



図 7.1 実験環境

### 7.2.3 実験手法

聴感印象実験は SD 法を用いて行った。被験者には 4 つの刺激音を呈示し、刺激音ごとに 30 語の評価指標について評価させた（評価中も同じ刺激音を繰り返し呈示している）。刺激音は、ヘッドホンアンプ（SCYTHE, SDAR-2100）を介して開放型ヘッドホン（SENNHEISER, HD598）によって被験者の両耳に呈示した。実験の回答は、教示の後、6 章でも使用したエクセルのソフトを用いて回答させた。各形容詞対ごとに「非常に」「かなり」「やや」「どちらでもない」の 7 段階で評価させ、その結果をポジティブ要因に近い方から +3, +2, +1, 0, -1, -2, -3 として得点化した。実験手順を下記に示す。なお、刺激音は定常走行音、加速走行音の順で呈示した。

#### 実験手順

1. 被験者にヘッドホンをさせ準備完了後、合図をさせ実験を開始した。
2. 「ピッ」という合図音が流れ、1 秒後に 1 つめの刺激音を再生した。
3. 刺激音の判断結果に当てはまるラジオボタンを選択し、各刺激音に関連する形容詞の度合を選択させた。この時、できるだけ素早く直感で判断するよう指示をした。
4. 設問 1 を回答後合図を確認し、次の施行を開始させ上記と同様に実施した。
5. 設問 2 まで実施し、実験は終了。

#### 7.2.4 因子分析結果

聴感印象実験によって得られたデータについて因子分析を行った。形容詞対選定実験の時と同様、因子抽出に最尤法を、回転方法としてプロマックス回転を用いた。表 7.1 に因子分析の結果を示す。この解析では、因子負荷量が  $\pm 0.4$  以上のものはその因子に影響を与える形容詞対として定義している。因子を構成する形容詞対の組み合わせから、第一因子がスポーティ因子、第二因子が静寂因子、第三因子が迫力・高さ因子となった。

表 7.1 因子分析の結果

| 形容詞対     |          | 美的因子   | 迫力因子   | 金属因子   |
|----------|----------|--------|--------|--------|
| スポーティな   | スポーティでない | 0.823  | -0.600 | -0.039 |
| ワクワク感のある | ワクワク感のない | 0.817  | 0.029  | -0.210 |
| 楽しい      | 退屈な      | 0.792  | -0.156 | -0.078 |
| 爽快な      | 鬱屈な      | 0.750  | -0.015 | 0.065  |
| かっこいい    | かっこ悪い    | 0.708  | 0.157  | -0.230 |
| 伸びやかな    | 伸びのない    | 0.699  | 0.058  | 0.047  |
| 艶やかな     | 色気のない    | 0.691  | 0.123  | -0.231 |
| 明るい      | 暗い       | 0.672  | -0.159 | 0.313  |
| 晴れやかな    | 曇った      | 0.664  | 0.073  | 0.304  |
| 鋭い       | 鈍い       | 0.548  | -0.211 | 0.252  |
| 響きのある    | 響きのない    | 0.547  | 0.102  | 0.299  |
| 静かな      | うるさい     | -0.240 | 0.782  | -0.096 |
| 優しい      | 激しい      | -0.401 | 0.778  | 0.110  |
| 繊細な      | 荒い       | 0.107  | 0.705  | 0.110  |
| ふわふわした   | ごつごつとした  | -0.085 | 0.696  | 0.202  |
| 柔らかい     | 硬い       | -0.048 | -0.660 | 0.066  |
| 安らかな     | 不安な      | 0.132  | 0.611  | -0.005 |
| 快適な      | 不快な      | 0.348  | 0.592  | -0.119 |
| 奥ゆかしい    | 下品な      | 0.245  | 0.581  | -0.131 |
| 澄んでいる    | 濁った      | 0.363  | 0.530  | 0.081  |
| 重い       | 軽い       | 0.032  | -0.228 | -0.738 |
| 高い       | 低い       | 0.086  | -0.024 | 0.689  |
| 因子寄与     |          | 6.072  | 4.543  | 1.644  |
| 因子寄与率    |          | 0.276  | 0.206  | 0.075  |
| 累積因子寄与率  |          | 0.276  | 0.482  | 0.557  |

### 7.2.5 因子得点の算出

因子分析により、車室内エンジン音はスポーティ因子、静寂因子、迫力・高さ因子の3因子に分けられた。この結果から、吸音材装着時と取り外した時の因子得点を算出した。図7.2, 7.3, 7.4, 7.5に因子得点を示す。結果より、定常走行時は吸音材の有無に関わらず美的

因子が低くなっており、定常走行時はスポーティ感を感じにくいことが示唆された。また、走行条件に関わらず、吸音材装着時は静寂因子が高くなり、取り外すと美的因子と金属因子が高くなることが確認された。この結果から、車室内の静粛性とスポーティ感にはトレードオフの関係があることが示唆された。

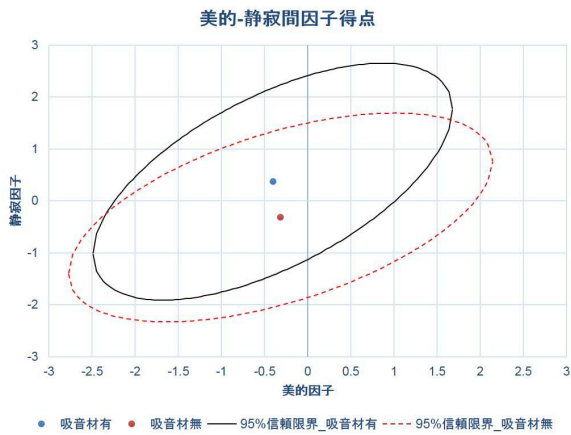


図 7.2 因子得点 (定常)

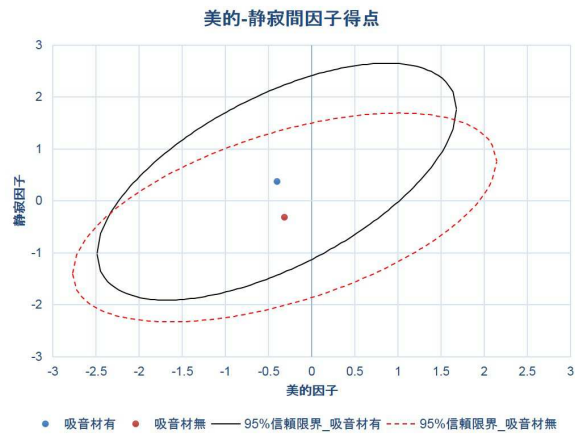


図 7.3 因子得点 (定常)

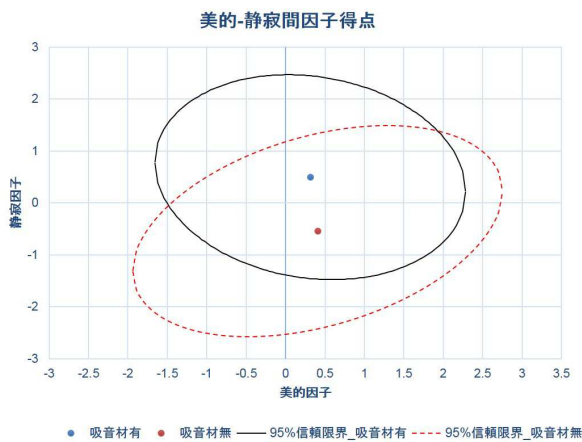


図 7.4 因子得点 (加速)

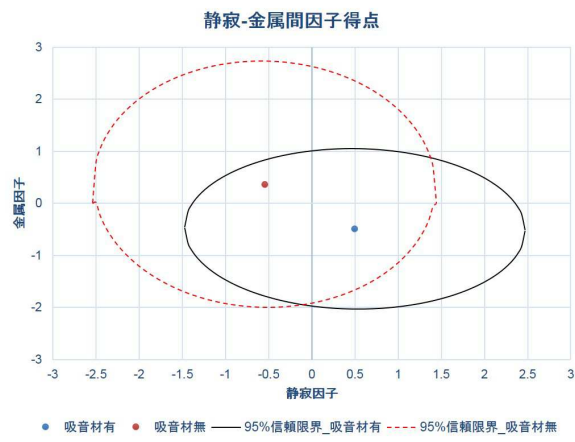


図 7.5 因子得点 (加速)

### 7.2.6 加速走行音のみによる因子分析

7.2.5 節で定常走行音からはスポーティ感を感じにくいことが示唆された。そこで、よりスポーティ感を感じられる加速走行音の実験データに絞って因子分析を行い、「上質なスポーティ感」に関連する吸音材の主観的印象の明確化を行った。因子分析では、因子抽出に最尤法を、回転方法としてプロマックス回転を用いた。表 7.2 に因子分析の結果を示す。各因子を構成する形容詞対の組み合わせから、第一因子が柔和因子、第二因子がスポーティ因子、第三因子が迫力・高さ因子となった。7.2.4 節の分析結果と比べると、加速走行音での因子分析では静寂因子がなくなっており、よりエンジン音の評価に適した因子構成となった。



したがって、今後はこの因子分析によって得られた因子及び形容詞対を評価を行う際の指標とした。

表 7.2 因子分析の結果

| 形容詞対    |          | 美的因子   | 迫力因子   | 金属因子   |
|---------|----------|--------|--------|--------|
| 繊細な     | 荒い       | 0.815  | 0.020  | -0.165 |
| 柔らかい    | 硬い       | 0.765  | 0.048  | -0.050 |
| 安らかな    | 不安な      | 0.761  | 0.101  | 0.107  |
| ふわふわした  | ごつごつとした  | 0.705  | -0.113 | -0.313 |
| 澄んでいる   | 濁った      | 0.686  | 0.357  | 0.026  |
| 優しい     | 激しい      | -0.401 | -0.255 | -0.160 |
| 高級感のある  | 安っぽい     | 0.643  | 0.139  | 0.385  |
| うるさい    | 静かな      | -0.642 | 0.288  | -0.216 |
| 快適な     | 不快な      | 0.591  | 0.225  | 0.215  |
| 興奮する    | 落ち着いた    | -0.588 | 0.446  | 0.210  |
| 奥ゆかしい   | 下品な      | 0.553  | 0.209  | 0.246  |
| 晴れやかな   | 曇った      | 0.212  | 0.792  | -0.201 |
| 伸びやかな   | 伸びのない    | 0.202  | 0.788  | 0.014  |
| 響きのある   | 響きのない    | 0.292  | 0.734  | -0.074 |
| 鋭い      | 鈍い       | -0.037 | 0.720  | -0.290 |
| スポーティな  | スポーティでない | -0.018 | 0.671  | 0.181  |
| 楽しい     | 退屈な      | -0.126 | 0.662  | 0.089  |
| 爽快な     | 鬱屈な      | 0.083  | 0.660  | -0.075 |
| 賑やかな    | 寂しい      | -0.441 | 0.617  | -0.070 |
| 明るい     | 暗い       | -0.206 | 0.609  | -0.087 |
| 重い      | 軽い       | -0.146 | -0.118 | 0.780  |
| 高い      | 低い       | -0.133 | 0.194  | -0.619 |
| 因子寄与    |          | 5.565  | 5.046  | 1.692  |
| 因子寄与率   |          | 0.253  | 0.229  | 0.077  |
| 累積因子寄与率 |          | 0.253  | 0.482  | 0.559  |

また、吸音材装着時及び取り外した時についてそれぞれ因子分析を行った。表 7.3 と表 7.4 に吸音材有無による因子分析結果を示す。因子分析により、吸音材装着時は 17 語、取り外した時は 20 語の形容詞対で表現された。また、分析結果を比較すると、吸音材の有無に

より表 7.5 に示すような印象の差が現れることが分かった。このことから、「うるさい」というネガティブな印象を取り除きつつ、「快適な」などポジティブな印象を付加できる可能性が示唆された。

表 7.3 因子分析の結果（吸音材装着時）

| 形容詞対     |          | 美的因子   | 迫力因子   | 金属因子   |
|----------|----------|--------|--------|--------|
| ワクワク感のある | ワクワク感のない | 0.992  | -0.129 | -0.245 |
| かっこいい    | かっこ悪い    | 0.829  | -0.022 | -0.139 |
| 楽しい      | 退屈な      | 0.757  | 0.201  | 0.000  |
| 艶やかな     | 色気のない    | 0.752  | -0.045 | -0.095 |
| 爽快な      | 鬱屈な      | 0.728  | 0.135  | 0.179  |
| スポーティな   | スポーティでない | 0.646  | 0.071  | 0.153  |
| 明るい      | 暗い       | 0.571  | 0.089  | -0.014 |
| 快適な      | 不快な      | 0.535  | -0.318 | 0.183  |
| 静かな      | うるさい     | -0.002 | 0.865  | 0.091  |
| 鋭い       | 鈍い       | 0.157  | 0.651  | 0.222  |
| 奥ゆかしい    | 下品な      | 0.335  | -0.643 | 0.139  |
| 優しい      | 激しい      | 0.259  | 0.602  | -0.332 |
| 重い       | 軽い       | 0.247  | 0.031  | 0.643  |
| 伸びやかな    | 伸びのない    | 0.386  | 0.044  | 0.491  |
| 響きのある    | 響きのない    | 0.178  | 0.049  | 0.457  |
| 因子寄与     |          | 4.817  | 2.145  | 1.229  |
| 因子寄与率    |          | 0.321  | 0.143  | 0.082  |
| 累積因子寄与率  |          | 0.321  | 0.464  | 0.546  |

表 7.4 因子分析の結果（吸音材取り外し時）

| 形容詞対     |          | 美的因子   | 迫力因子   | 金属因子   |
|----------|----------|--------|--------|--------|
| スポーティな   | スポーティでない | 0.866  | 0.010  | -0.122 |
| 伸びやかな    | 伸びのない    | 0.832  | -0.089 | -0.021 |
| ワクワク感のある | ワクワク感のない | 0.786  | 0.139  | -0.194 |
| 楽しい      | 退屈な      | 0.749  | -0.061 | -0.050 |
| 明るい      | 暗い       | 0.7351 | -0.110 | 0.311  |
| 艶やかな     | 色気のない    | 0.733  | 0.120  | -0.226 |
| 爽快な      | 鬱屈な      | 0.702  | -0.036 | 0.113  |
| 響きのある    | 響きのない    | 0.701  | 0.032  | 0.201  |
| かっこいい    | かっこ悪い    | 0.694  | 0.329  | -0.137 |
| 鋭い       | 鈍い       | 0.692  | -0.165 | 0.438  |
| 晴れやかな    | 曇った      | 0.677  | 0.021  | 0.283  |
| 静かな      | うるさい     | 0.109  | -0.719 | 0.013  |
| ふわふわした   | ごつごつとした  | 0.168  | -0.707 | -0.229 |
| 快適な      | 不快な      | 0.292  | 0.649  | -0.140 |
| 安らかな     | 不安な      | 0.231  | 0.586  | -0.078 |
| 優しい      | 激しい      | 0.392  | -0.578 | -0.304 |
| 繊細な      | 荒い       | 0.105  | 0.561  | 0.263  |
| 柔らかい     | 硬い       | 0.101  | 0.533  | -0.038 |
| 重い       | 軽い       | 0.189  | -0.002 | 0.783  |
| 高い       | 低い       | 0.050  | -0.207 | -0.682 |
| 因子寄与     |          | 6.491  | 2.954  | 1.867  |
| 因子寄与率    |          | 0.325  | 0.148  | 0.093  |
| 累積因子寄与率  |          | 0.325  | 0.472  | 0.566  |

表 7.5 形容詞対比較

| 吸音材装着時    | 吸音材取り外し時        |
|-----------|-----------------|
| 奥ゆかしい-下品な | 晴れやかな-曇った       |
|           | 安らかな-不安な        |
|           | ふわふわとした-ごつごつとした |
|           | 繊細な-荒い          |
|           | 柔らかい-硬い         |
|           | 高い-低い           |

## 7.3 低減帯域が聴感印象に与える影響

前節では、「上質なスポーティ感」を検討するため自動車エンジン音に含まれる構成因子について明確化した。その結果として吸音材の有無によって印象に差が現れることから意図したイメージを付加できる可能性が示唆された。そこで、本節では帯域毎の吸音制御による音質制御を行い「上質なスポーティ感」を持つ自動車エンジン音の実現について検討した。

### 7.3.1 刺激音について

本実験で用いた刺激音は第6章で確認された低減範囲を考慮し、吸音材取り外し時の自動車エンジン音(3速全開走行時)に制御を施した。低減範囲については、a) 400~1000Hz, b) 700~1500Hz, c) 1000Hz以降、以上3種の低減制御を行った。また、各周波数帯域の低減量についてはすべて10dBの低減を施している。図7.6, 7.7に用いた刺激音のスペクトログラムを示す。スペクトログラム解析より各帯域で低減されていることが確認できる。図に示した5種の刺激音を用い、以下の実験を行った。

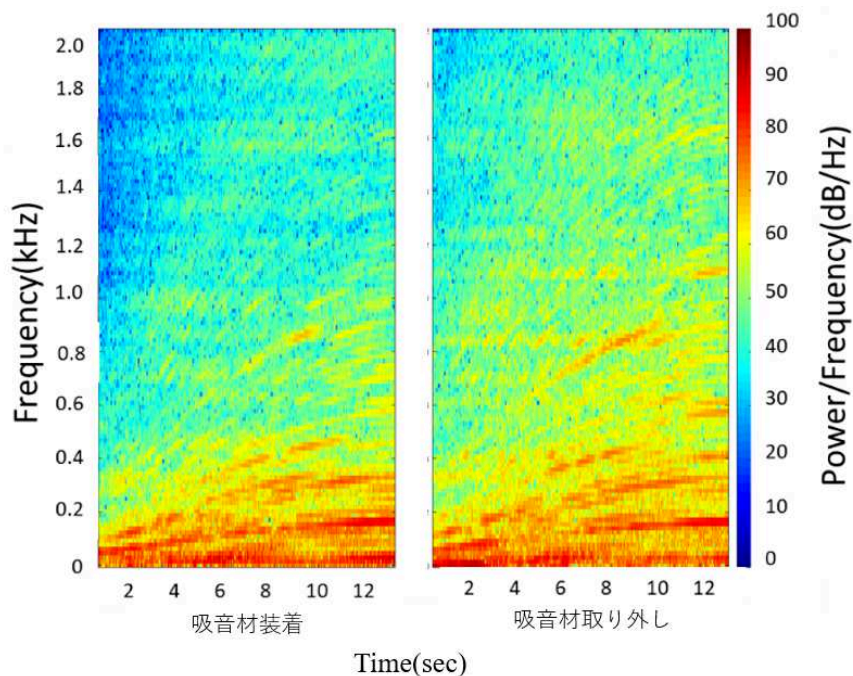


図 7.6 吸音材有無による

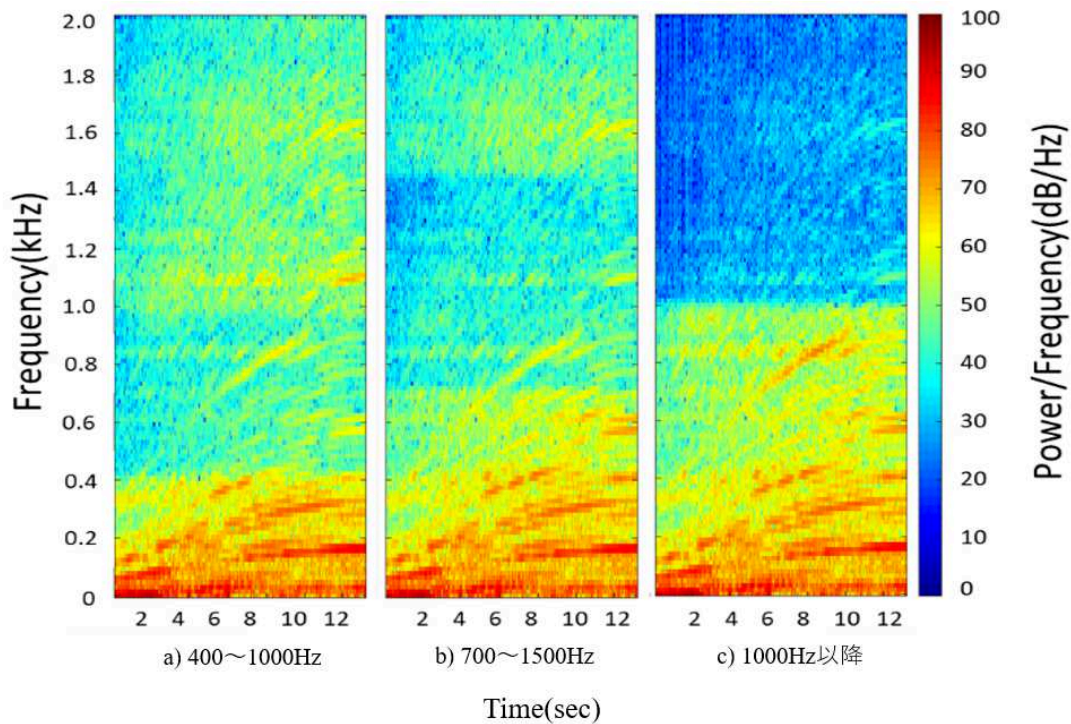


図 7.7 各周波数帯域による低減

### 7.3.2 実験概要

被験者として、聴覚健常者 41 名 (男性 32 名, 女性 9 名, 年齢 20~60 代) とした. SD 法と同様に実験環境については, 株式会社ヒロタニの本社内会議室で実施した. 図 7.8 に実験風景を示す. 刺激音は, ヘッドホンアンプ (HC6S Head Amplifier, RANE) を介し, 開放型ヘッドホン (SENNHEISER, HD650) によって被験者の両耳に呈示した. 被験者に音を呈示する際, 車内の音圧と同等になるよう校正を行い, 前節で示した刺激音を各被験者に一対比較法で呈示した. 実験手順について下記に示す. また, 図 7.9 に一対比較法の評価シート・刺激音の呈示例について示す. なお, 一対比較法を実施した際の刺激音の呈示順についてはランダムに呈示を行っている.

**実験手順**

1. 被験者にヘッドホンをさせ準備完了後、合図をさせ実験を開始した.
2. 「ピッ」という合図音が流れ、1秒後に1つめの刺激音を再生した.
3. 1つの試行で刺激音は2つあり、2つの刺激音が流れ終わった後、次の試行までの5秒間でより「上質なスポーティ感」だと感じた刺激音を選定させた.
4. 選択後、合図音が鳴り、次の試行が開始した.
5. 1セット終了次第実験は終了.



図 7.8 一対比較法実験環境



A,Bのどちらかのエンジン音について上質なスポーティ感があると感じるエンジン音を選択し、○で囲ってください。また、その際にどの程度快適かについても選択をしてください。

|       | 非常に | かなり | やや | 同程度 | かなり | やや | 非常に |   |
|-------|-----|-----|----|-----|-----|----|-----|---|
| 1. A  | -3  | -2  | -1 | 0   | 1   | 2  | 3   | B |
| 2. A  | -3  | -2  | -1 | 0   | 1   | 2  | 3   | B |
| 3. A  | -3  | -2  | -1 | 0   | 1   | 2  | 3   | B |
| 4. A  | -3  | -2  | -1 | 0   | 1   | 2  | 3   | B |
| 5. A  | -3  | -2  | -1 | 0   | 1   | 2  | 3   | B |
| 6. A  | -3  | -2  | -1 | 0   | 1   | 2  | 3   | B |
| 7. A  | -3  | -2  | -1 | 0   | 1   | 2  | 3   | B |
| 8. A  | -3  | -2  | -1 | 0   | 1   | 2  | 3   | B |
| 9. A  | -3  | -2  | -1 | 0   | 1   | 2  | 3   | B |
| 10. A | -3  | -2  | -1 | 0   | 1   | 2  | 3   | B |

図 7.9 一対比較法評価シート

### 7.3.3 実験結果

一対比較法の結果から最も「上質なスポーティ感」を感じる自動車エンジン音について各刺激間の対応も関連させ値を算出した。図 7.10 に一対比較法の計算結果を示す。図中に各刺激間で有意な差が確認されたものを記載している。図 7.10 に示すように最も「上質なスポーティ感」を感じるエンジン音は 1000Hz 以降の帯域を 10dB 低減させた音源であった。また、この音源は各刺激間の間でも有意差が確認できることから「上質なスポーティ感」を感じるエンジン音を各被験者が識別できていることを示している。この結果から、低減させる帯域を絞りこむことで、自動車エンジン音にこちらの意図した印象を付加できる可能性を示唆した。



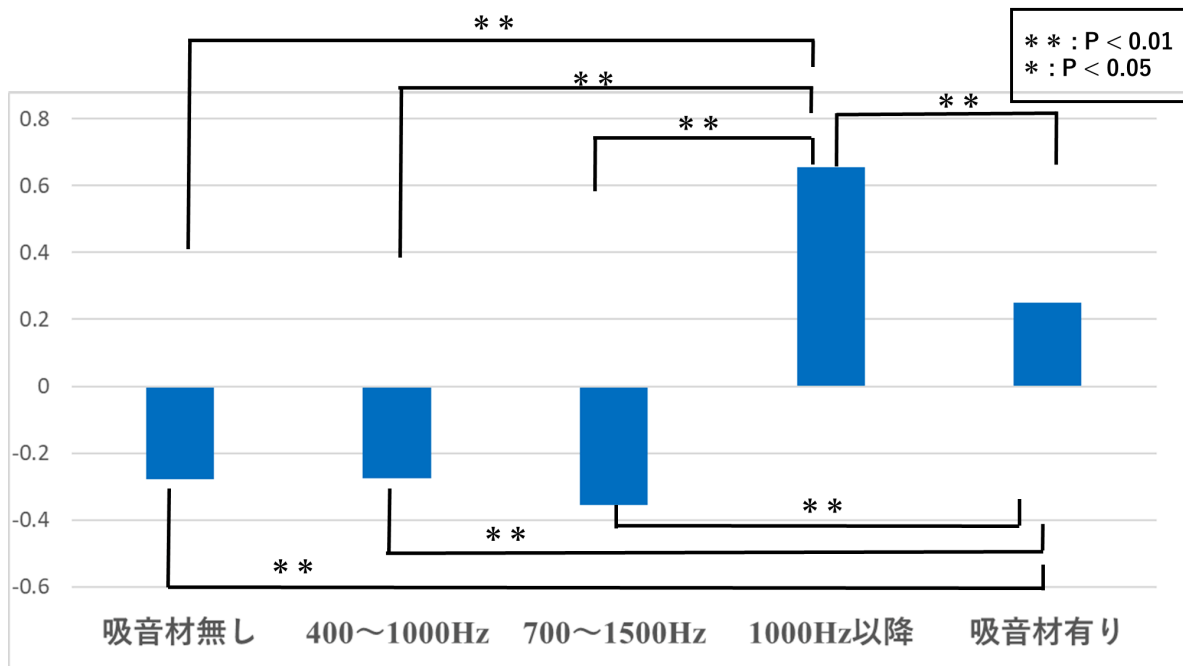


図 7.10 一対比較法結果

## 7.4 おわりに

本章の実験では、吸音材の有無が主観評価に与える影響を明確にするために、SD法を用いた聴感印象実験と因子分析及び因子得点の算出を行った。さらに、吸音制御によって自動車エンジン音に限定した印象の付加の可能性について検討を行った。SD法を用いた聴感印象実験の結果から、因子分析により、車室内エンジン音が柔和因子、スポーティ因子、迫力・高さ因子の3因子で構成されることが分かった。また、吸音材の有無で印象に差が現れることから、吸音材に意図したイメージを付加できる可能性が示唆された。そして、一対比較法を用い吸音制御により低減される周波数帯域を変化させることで「上質なスポーティ感」と対応のある周波数帯域の特定も確認された。「上質なスポーティ感」と対応のある周波数帯域は1000Hz以降の帯域であったが、そのほかの印象も同様に一対比較法を用いることで対応のある周波数帯域を特定することが可能であると考えられる。今後は今回の結果を基に「上質なスポーティ感」音質の実現に向けた検討を行う。具体的には、実環境において1000Hz以降に吸音特性を持つ吸音材を作成し、今回の実験と同様に「上質なスポーティ感」を感じるエンジン音となるか検討する予定である。

## 第 8 章

# 適応音質制御によるエンジン音の聴感印象実験

### 8.1 はじめに

本研究で提案したアルゴリズムを用いた制御後の信号の聴感印象を調査するため、聴感印象実験を行った。本章ではその概要及び結果について述べる。

### 8.2 走行データによる各被験者の識別検討

4章で紹介した SOM は、データから各被験者の特徴量を抽出し、SOM 上に座標として表現することができる。そこで、本章では、自動二輪車に乗っている被験者を募り、識別パラメータとなるデータを収録した。各被験者の収録データより識別を検討し、その結果を述べる。

#### 8.2.1 実験条件

本実験で用いるデータの収録方法、収録条件について以下に述べる。まず、本実験の被験者は、自動二輪車免許所有の 12 名 (男性 12 名, 年齢: 20 代~40 代, ドライバ歴: 3 年~28 年) とした。この 12 名の被験者のデータを収録し識別を行った。表 8.1 に本検討で扱った、車種及び走行条件、走行パターンについてまとめたものを示す。

表 8.1 実験条件

|        |  |
|--------|--|
| 実験車両   | SUZUKI GSX-R1000<br>(直列 4 気筒 4 ストロークエンジン搭載) [46]                                       |
| 走行パターン | A. 定常走行, B. 急ぎ走行   |
| 走行条件   | 1. 走行パターン A, B ともに 100km/h まで加速<br>2. 100km/h 到達後 5 秒間定常走行<br>3. アイドル状態から発進し, ギアの変更は自由 |
| 収録位置   | 1. アクセル開度信号<br>2. エンジン点火パルス<br>3. 座席シート上での振動<br>4. 両耳位置でのエンジン音<br>5. 時間当たりの速度          |

本検討では, 各被験者の差が大きく見られる運転パターンとして, 普段走行している定常走行と急いで走行している急ぎ走行の 2 パターンを収録した. また, 個々の差を顕著にだすためギアの変更は自由とし, 100km/h まで加速後 5 秒間の定常走行をさせた. この条件を基本タスクとし, 各被験者に実施した. 表 8.2 に, 使用した実験機器を示す. 使用した機器の詳細な仕様は付録に記す. なお, データ収録は半無響室内に設置されたシャーシ台走行時に行った. 収録データのサンプリング周波数は 44.1kHz である.

表 8.2 収録機材

| 使用機材           | メーカー             | 型番                       |
|----------------|------------------|--------------------------|
| マイククロフォン       | 小野測器             | MI-1431                  |
| プリアンプ          | 小野測器             | MI-3111                  |
| 両耳マイク          | Brüel & Kjaer    | 4101-A                   |
| 加速度ピックアップ      | PCB PIEZOTRONICS | 320C15                   |
| デュアル出力非接触回転センサ | Penny + Giles    | NRH280DP                 |
| データ収集機器        | Brüel & Kjaer    | LAN-XI 3050 型 3050-B-060 |

## 8.2.2 実験準備

識別を行うための準備として収録データについて述べる。今回の実験では、速度、アクセル開度、座席位置での振動、点火パルス、耳位置でのエンジン音の 5 種について収録を行った。そこで、顕著に個々の差が大きく見られた、速度、アクセル開度の 2 つのデータについて解析を行った。図 8.1 に明確な個人の差の一例として被験者 A, B のデータを示す。図 8.1(a) は被験者 A の定常走行, 急ぎ走行時の速度データ, 同様に被験者 B の速度データを図 8.1(b) に示す。ここで、横軸は時間, 縦軸は速度とする。

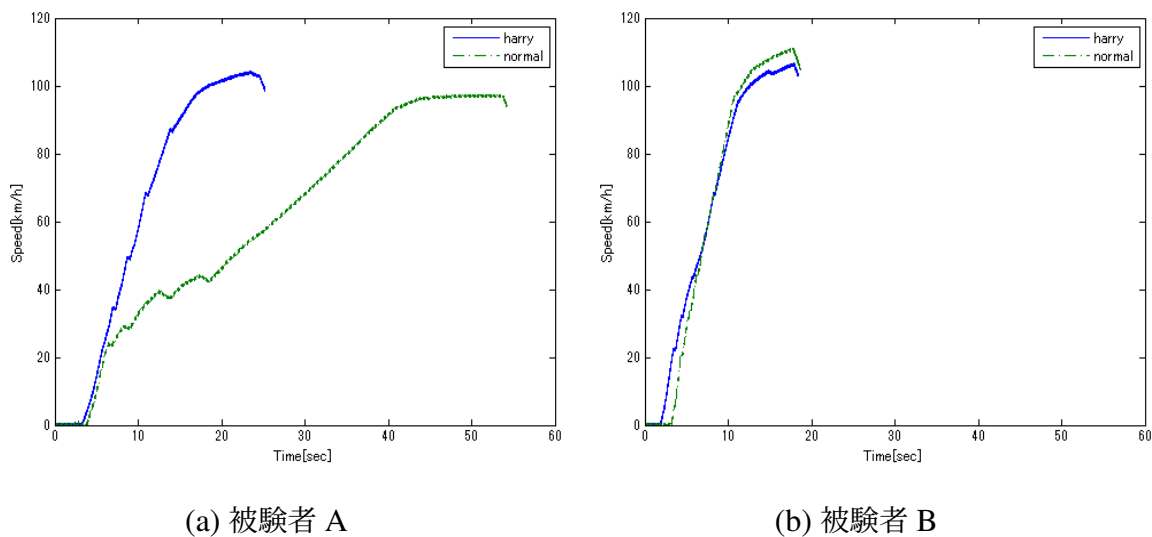


図 8.1 速度データ一例

被験者 A は急ぎ走行と定常走行で 100km/h に到達する時間に差が大きく見られた。大半の被験者でも被験者 A のようになることが確認できた。しかし、被験者 B のように 2 種の運転パターンであまり差が見られない被験者も確認された。これは、各被験者の急ぎ走行, 定常走行の差により運転パターンを区別することができる。エンジン音の好みの指標としてこの運転パターンを用いる。

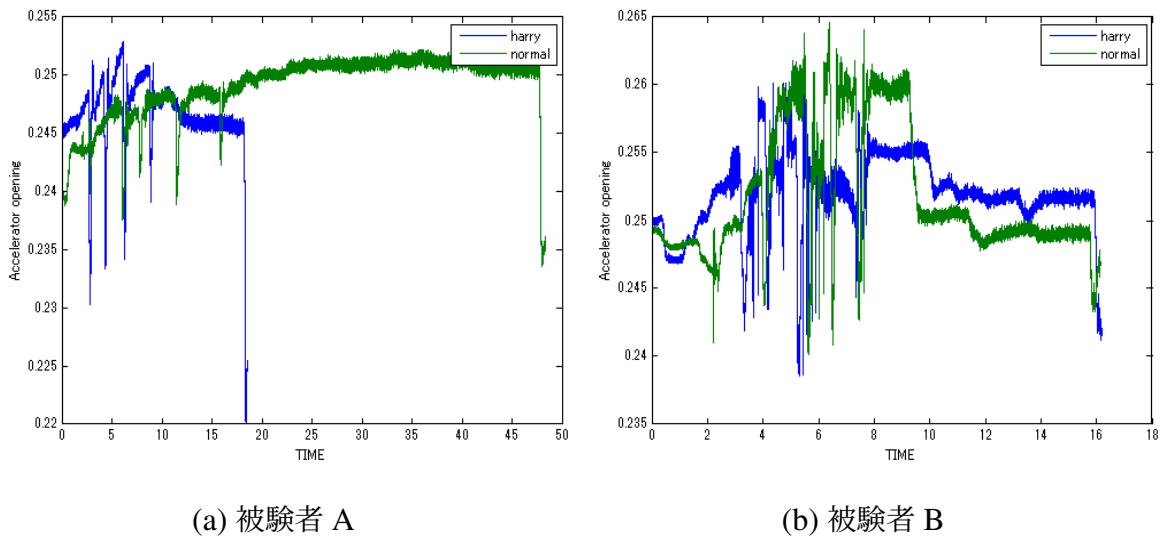


図 8.2 アクセル開度データ一例

図 8.2 にアクセル開度の時間当たりの変化を示す。横軸が時間、縦軸が電圧を示し時間当たりに示す図となっている。アクセル開度とは、アクセルの開閉により変化する電圧である。アクセルを開くことで、印加される電圧が増大する。よって、図のように山と谷が交互に現れ、ギアを変更した回数や、変更するまでの時間などを読み取ることができる。アクセル開度においても図 8.2 のように差が見られたが、速度データのほうがより差が見て取りやすい。よって、今回の識別検討の際は速度データを用いた。次に、図 8.3 に全被験者の定常走行時の速度データ、急ぎ走行時のデータを示す。

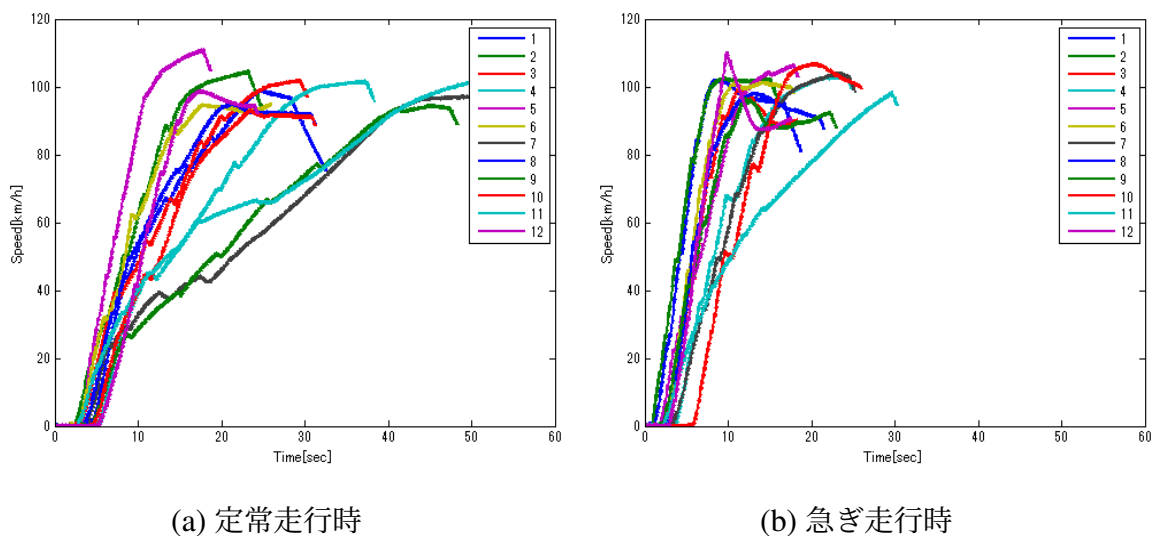


図 8.3 速度データ全被験者

定常走行時と急ぎ走行時を比較すると、定常走行時では、各被験者で大きくばらつきが見られるが、急ぎ走行時では 3~4 つのパターンに分かれていることが見て取れる。そのため、急ぎ走行時のデータをもとに SOM で速度データによる各被験者の識別を行った。

### 8.2.3 実験結果

前節で述べた各被験者のデータを SOM により識別を行った。これは、第 4 章で述べた原理をもとに MATLAB 上で行った。図 8.4 に自己組織化マップによる識別結果を示す。ここで SOM の各軸については、特定の値が定まっていないため、各被験者番号を SOM 上に記した。

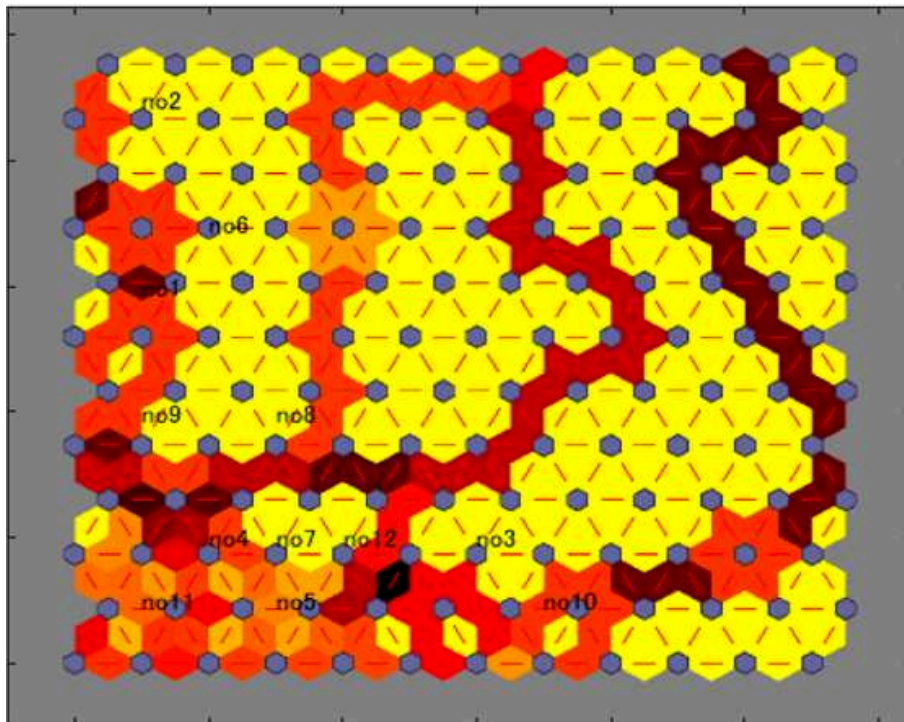


図 8.4 SOM による識別結果

図 8.4 には各被験者ナンバーが示してある。これは、各被験者の特徴量を座標軸で表現した値をマップ上にプロットしたものである。SOM の特徴として明るい色となっている点に隣接または近くにある各データは特徴が似ていることを示す。このため、データの特徴が似ている被験者番号ごとに固まっている。この結果より、図 8.5 に各被験者を 4 つのグループに識別した結果を示す。

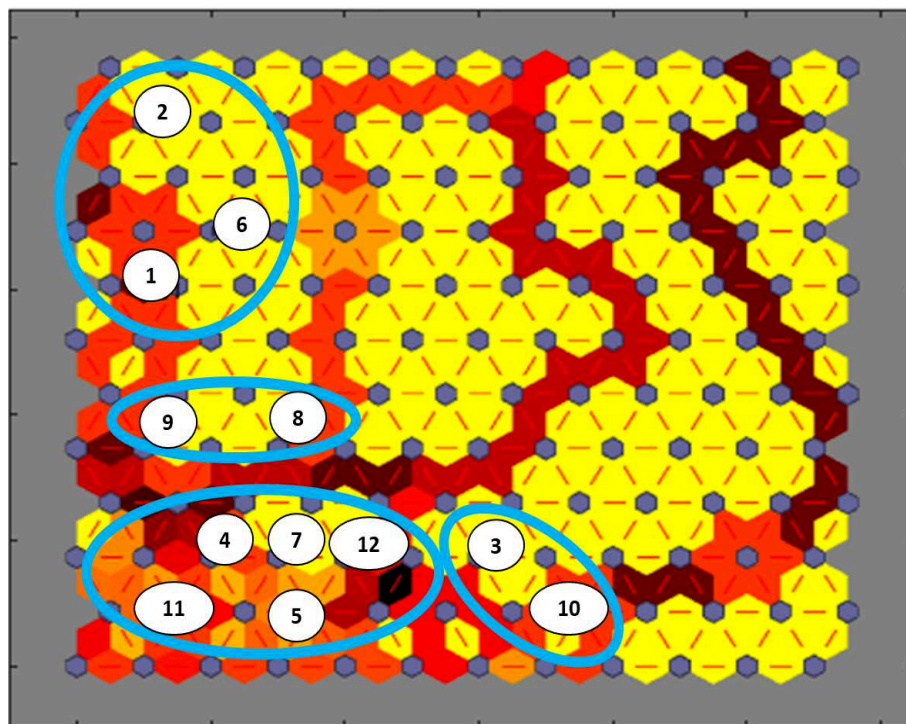


図 8.5 SOM によるグループ分け

図 8.5 のように SOM 上の各被験者の座標より, 各被験者を 4 つのグループに識別した. 各グループに属している被験者のパターンが類似していることを確認するため, 以下に各グループの速度データをまとめたものを記す.



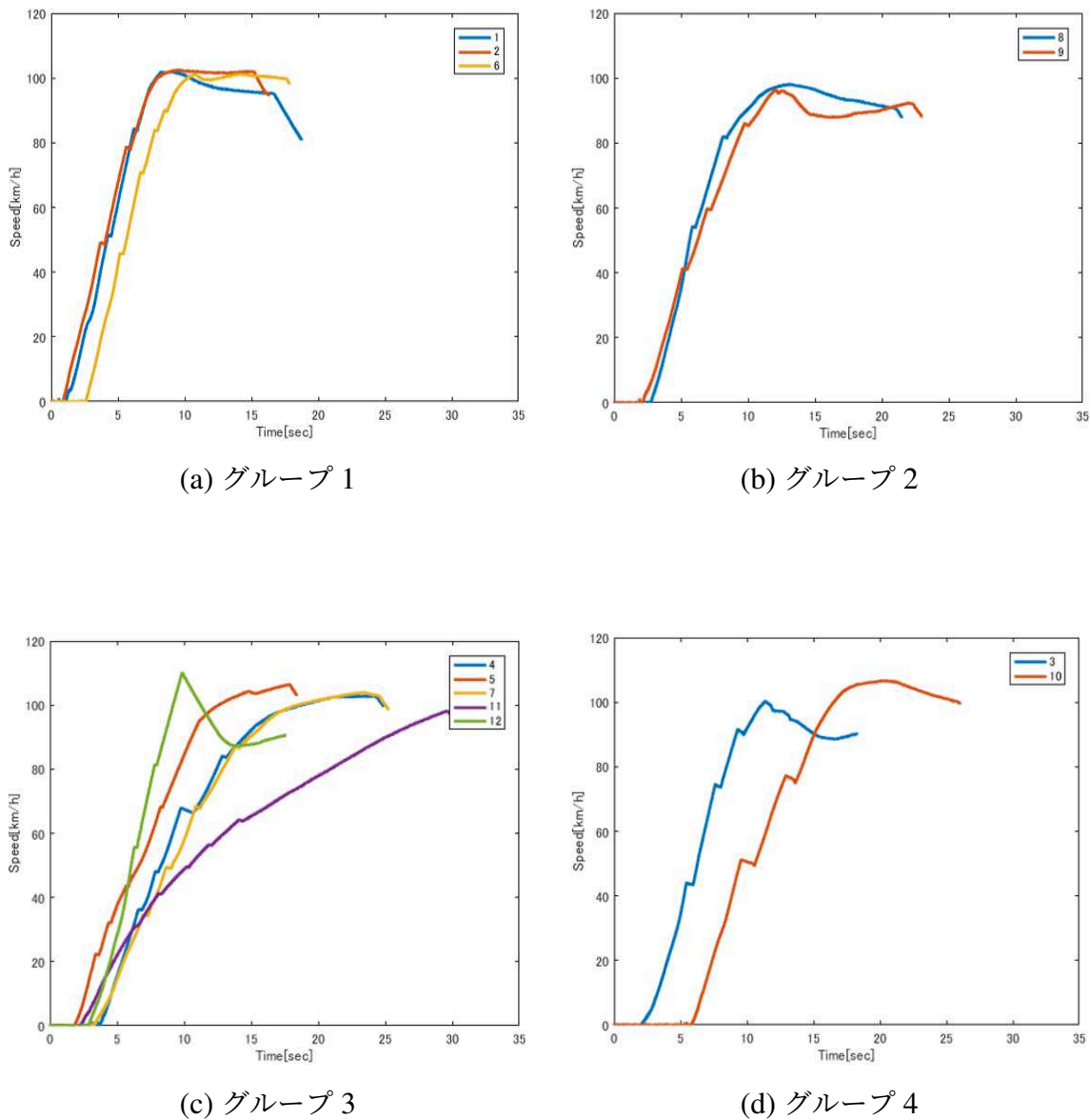


図 8.6 グループごとの結果

図 8.6 より、速度データにおける概形が似ているパターンが集まっていることが確認できる。これにより、SOM により識別された各グループが速度データの特徴により識別可能であるということが言える。これらの結果より、運転パターンによる SOM を用いた識別は可能であり、SOM の有用性が確認できた。

### 8.2.4 走行データによる識別のまとめ

本章では、各被験者の識別検討として、SOM を用いた識別を検討した。今回の実験では、個々の差が出やすいと考えられる、運転パターンを用いた識別を行った。また、各被験者の速度データを比較することでも識別されていることを確認し、有用性を示した。



本実験では速度データによる SOM を用いた識別しか行っていないが、定常走行、急ぎ走行などの運転パターンや収録データをより多くのパターンを収録することでより細分化した識別が可能であると考えられる。個々の好みに適応するためにもより多くの個々の好みに関する指標が必要であると考えられる。具体的な指標として、被験者の増加や運転パターンの増加が考えられる。また、ドライバ歴や好みの音楽などのドライバ自身の特徴も捉えるとより好みに適応できると思われる。

### 8.3 SOM による好みの音質の識別

前節で示した結果より SOM との対応づけをし、各被験者の好みの音質を探るため聴感印象評価実験を行った。本章ではその概要及び結果、音質制御アルゴリズムの詳細について述べる。

#### 8.3.1 実験条件

加速走行時のエンジン音に対し、調波成分の音圧レベルを段階的に変化させた。各被験者に快・不快感覚との関係について考察した。表 8.3 に用いたエンジン音について示す。なお、今回の実験では、快・不快感の差をつきやすくするため、原音と制御音の差が分かりやすい加速走行時のエンジン音を用いた。

表 8.3 検討車種

|      |  |
|------|--|
| 実験車両 | SUZUKI GSX-R1000(直列 4 気筒 4 ストロークエンジン搭載) [46]                   |
| 走行条件 | 1. 6th 加速走行 3000rpm<br>2. アイドル状態からフルスロットルの加速音, 3000rpm~4000rpm |

#### 8.3.2 実験準備

実験に用いた刺激音について述べる。本実験では、実際の車内音を想定し、A 特性音圧レベルが 70 dBA となるように、収録した音の振幅を調整した。さらに、原音に対して以下の処理を施し、刺激音を作成した。

- 1 次成分, 2 次成分の音圧を同時に 20dB 低減させた音
- 1 次成分, 2 次成分の音圧を同時に 20dB 増幅させた音

作成した刺激音と制御をしていない原音の 3 種を用い、各被験者の好みの音質を調査した。

### 8.3.3 実験方法

本実験の被験者は、前節でデータを収録した 12 名 (男性 12 名) を被験者とした。刺激音は PC(dynabook satellite 32bit, 東芝) からヘッドホン (audio-technica ART ATH-A500x MONITAR) を介し被験者の両耳に呈示した。今回の実験では一対比較法により刺激音を呈示したため、各刺激音を対にした計 6 回の判断を被験者に繰り返し行わせた。各刺激音に対する各被験者の評価は 7 尺度法の平均値より求めた。なお、実験の回答は教示のもと、評価用紙を用いて回答させた。3 種の刺激音に対し、より快適に感じる刺激音、及びその快適度について判断するよう教示した。一対比較法を用いたため、1 セットあたり 6 回の試行があり、実験時間は 5 分程度である。実験の詳細な進め方として以下に示す。また、実験の際に被験者に呈示した評価用紙を図 8.7 に示す。

#### 実験手順

1. 被験者にヘッドホンをさせ準備完了後、合図をさせ実験を開始した。
2. 「ピッ」という合図音が流れ、1 秒後に 1 つめの刺激音を再生した。
3. 1 つの試行で刺激音は 2 つあり、2 つの刺激音が流れ終わった後、次の試行までの 5 秒間でより快適だと感じた刺激音を選定させた。
4. 選択後、合図音が鳴り、次の試行が開始される。
5. 1 セット終了次第実験は終了。

A,Bのどちらかのエンジン音について快適と感じるエンジン音を選択し、○で囲ってください。また、その際にどの程度快適かについても選択をしてください。

|       |    | 非常に | やや | かなり | 同程度 | かなり | やや | 非常に |   |   |   |   |   |   |
|-------|----|-----|----|-----|-----|-----|----|-----|---|---|---|---|---|---|
| 1. A  | -3 | —   | -2 | —   | -1  | —   | 0  | —   | 1 | — | 2 | — | 3 | B |
| 2. A  | -3 | —   | -2 | —   | -1  | —   | 0  | —   | 1 | — | 2 | — | 3 | B |
| 3. A  | -3 | —   | -2 | —   | -1  | —   | 0  | —   | 1 | — | 2 | — | 3 | B |
| 4. A  | -3 | —   | -2 | —   | -1  | —   | 0  | —   | 1 | — | 2 | — | 3 | B |
| 5. A  | -3 | —   | -2 | —   | -1  | —   | 0  | —   | 1 | — | 2 | — | 3 | B |
| 6. A  | -3 | —   | -2 | —   | -1  | —   | 0  | —   | 1 | — | 2 | — | 3 | B |
| 7. A  | -3 | —   | -2 | —   | -1  | —   | 0  | —   | 1 | — | 2 | — | 3 | B |
| 8. A  | -3 | —   | -2 | —   | -1  | —   | 0  | —   | 1 | — | 2 | — | 3 | B |
| 9. A  | -3 | —   | -2 | —   | -1  | —   | 0  | —   | 1 | — | 2 | — | 3 | B |
| 10. A | -3 | —   | -2 | —   | -1  | —   | 0  | —   | 1 | — | 2 | — | 3 | B |

図 8.7 評価用紙

### 8.3.4 実験結果

表 8.4 に各被験者の聴感印象評価結果を示す。聴感印象実験の結果は、一対比較法の内、7 尺度で評価させた各被験者の平均の値が示してある。表の見方として、(0 - +20), (0 - -20), (-20 - +20) のように表現してあるが、(0 - +20) であれば 0 と 20 との比較を表している。( ) 内の左側の要素が強ければマイナスの値、右側の要素が強ければプラスの値となる。具体例として、1 番目の被験者は、刺激音 (0 - +20) の組み合わせのとき、評価の平均の値が負の値であれば制御なしを好み、正の値であれば 20dB 増幅した音源を好むということである。同様に、他の 2 種の音源でも判定し、最終的に 3 種のうちどの音質を好むかを右端「実験結果」の列に記した。

表 8.4 聴感印象実験結果

| 被験者 | (0 - +20) | (0 - -20) | (-20 - +20) | 実験結果   |
|-----|-----------|-----------|-------------|--------|
| 1   | -1        | -1        | -1          | なし     |
| 2   | -1        | 0         | 0           | なし     |
| 3   | -2        | -0.5      | -2          | 減衰     |
| 4   | -1.5      | 0.5       | -3          | 減衰     |
| 5   | -3        | 0         | -3          | 減衰     |
| 6   | -2.5      | -1        | -1          | なし     |
| 7   | 0.5       | 0         | -2          | 減衰     |
| 8   | 1         | 0         | 1.5         | 増幅     |
| 9   | 1.5       | 0         | 0           | なし, 増幅 |
| 10  | 1.5       | 0         | 2           | 増幅     |
| 11  | 0.5       | -1.5      | 2           | 増幅     |
| 12  | -1.5      | 0         | -1.5        | 減衰     |

表 8.4 の結果より、各被験者の好みの音質が判明した。また、実験結果より各被験者を 3 種の刺激音で識別したため 3 グループに分けることができる。図 8.8 に識別した各被験者の好みの音質を、前節の SOM で示した 4 つのグループに対応させたものを示す。図 8.8 では、各被験者の好む音質は、その被験者を囲む円の色と対応している。図 8.8 に、表 8.4 で求めた各被験者の好みの音質を示す。図 8.6 に示した 4 つのグループと、図 8.8 より聴感印象実験から求めた好みの音質を示す円は類似していることが分かる。従って、SOM により識別した各グループごとに好みの音質を当てはめることが可能となる。以上より、SOM と聴感印象実験結果から各被験者の特徴と好みの音質を対応づけることが確認できた。

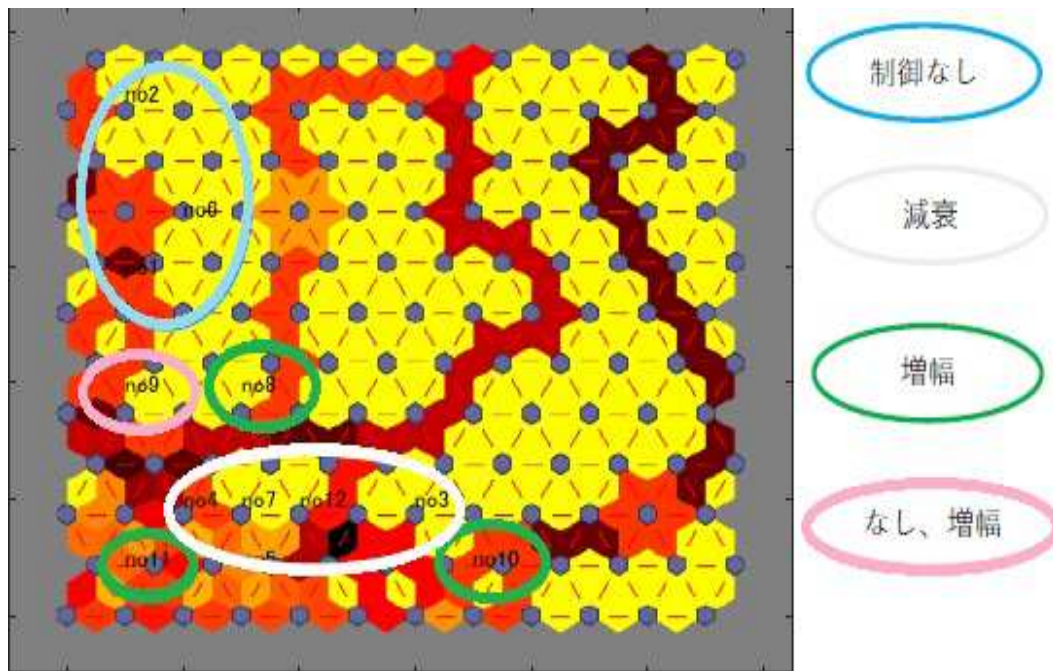


図 8.8 聴感実験結果と SOM

## 8.4 スパース性を用いた被験者識別の検討

前節まででは、走行データと好みの音質の対応付けから各被験者の走行データから好みの音質の識別について検討を行った。しかし、各被験者の走行データを収録し走行データをそのまま解析することでデータ数が多くなるというデメリットが考えられる。そこで、本節では、各被験者の走行データと好みの音質の対応付けを考えるが、走行を開始してからどの程度の時間が好みの音質と対応しているのか検討を行うため、スパース性を用いた検討を行い、好みの音質を識別する上での走行データを最小限にすることを検討した。

### 8.4.1 実験手法

本検討では、MATLAB(2017b)を用い、スパースモデリングによる識別を行った。識別を行う際の入力データとして、前節の聴感印象実験の結果と各被験者の時間当たりの加速度を入力とした。以上 2 種のデータを入力することで各時間当たりの回帰係数を算出した。各時間当たりの回帰係数を算出し、走行を始めてから何秒間の間が音の好みに関連しているか検討を行った。

### 8.4.2 実験結果

図 8.9 にスパースモデリングをし、算出した回帰係数の値を示す。図より、1, 3, 5 秒で回帰係数が高くなっていることが確認できる。これは、走行を開始してから 5 秒間の間のデータを解析することで好みを識別できる可能性が示唆された。

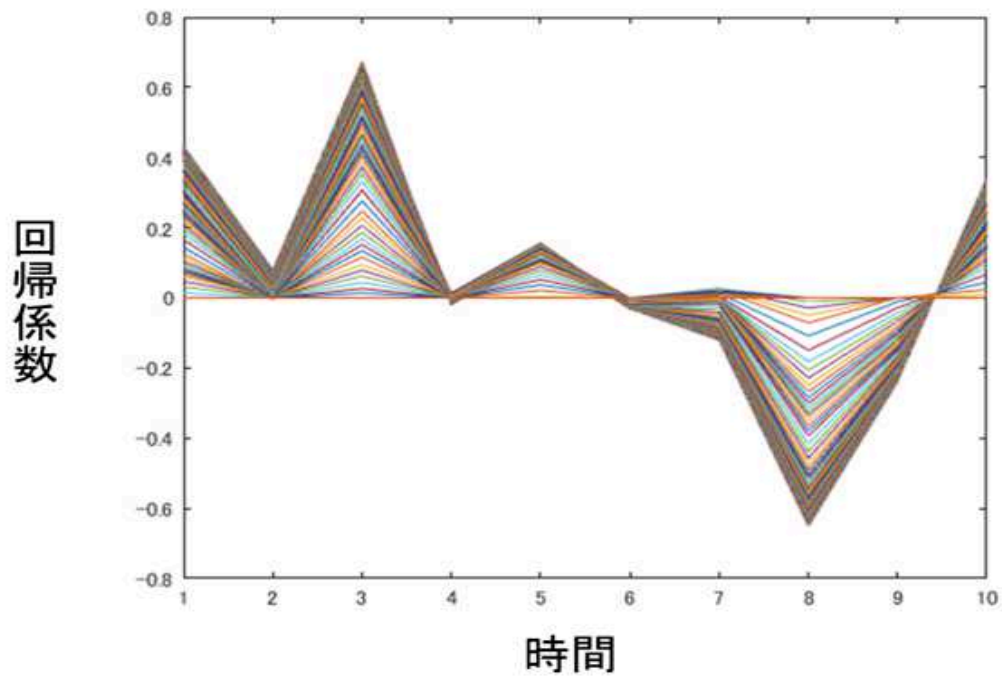


図 8.9 加速度と回帰係数の対応

## 8.5 制御アルゴリズム

本章では, SOM とスパース性を用いた識別結果と聴感印象実験による被験者の好みの音質との対応付けを行った. その結果, 各被験者の速度データによる識別結果と, 好みの音質との対応を確認した. 識別結果と聴感印象実験の結果より, SOM の識別結果と個々の好みの音質は関係していることが分かり, 速度データから好みの音質を求めることが可能となった. しかし, 対応がとれない被験者もいる. これは, 本実験では速度データによる識別しか行っていないことが原因として考えられる. さらに確実性のあるシステムとするためには, 各節の最後にも述べたように, より多くの識別データや被験者の特徴を捉える必要がある. また, 図 8.10 に実環境に適用するための提案アルゴリズムを示す.

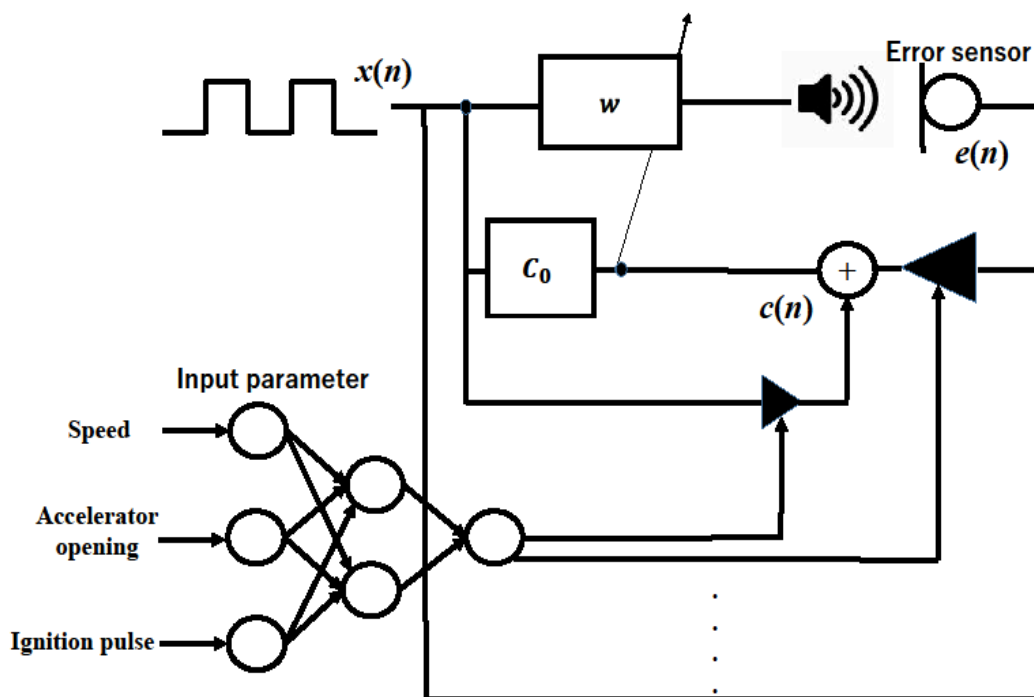


図 8.10 提案アルゴリズム

実環境で音質制御を行うために, 図 8.10 に示した Harmonic Command Filtered-x LMS アルゴリズム (HCFxLMS) を用いる. ここで,  $x(n)$  は入力信号,  $e(n)$  は誤差信号,  $c(n)$  は制御信号,  $c_0$  は二次経路特性を経た制御信号の推定値,  $w$  は適応フィルタを示す. 図 8.10 に示したアルゴリズムは, 識別された各被験者の特徴量から個々の好みに適応させるため, SOM の出力から制御信号  $c(n)$  を作成する. 具体的には, 図 8.10 に示したように, 各被験

者の好みに合った音質へ制御するため, SOM に被験者データを入力し, その出力として制御信号を出力するアルゴリズムである. 本検討では, 図 8.8 の結果より, 音質制御なしでは SOM の結果より出力する値は 0, 音質を減衰させる場合には ANC を行うため制御信号に音圧を低減する値, 音質を増幅させる場合には制御信号に与える値は 0, 誤差信号に与える値を変化させていくことで好みの音質に適応した音質へ変化させる. 今後はこのアルゴリズムを DSP などの演算装置への実装を試みる



## 第9章

# 結言

本章では、本研究で得られた知見をまとめ、今後の課題に関して述べる。

### 9.1 まとめ

エンジン音の騒音対策はサウンドデザインへと推移しており、低騒音化から快音化へと変化している。

そのため、本研究では

- 吸音制御が聴感印象に与える影響と意図した印象の付加に関する検討
- 適応音質制御を用いた個々の好みに適応した音質制御システムの基礎検討

以上の2つについて検討を行った。具体的には、吸音制御については人間の感性と吸音材による音質制御に着目し、「上質なスポーティ感」を感じる車室内空間の実現に向けた検討を行った。その検討を行うために、吸音材装着時及び取り外した時の車室内エンジン音の収録とその収録音を用いた「上質なスポーティ感」と対応がある主観的評価指標（形容詞対）の決定づけを行った。そして、その評価指標を用いて、吸音材が主観評価に与える影響を検討した。さらに、吸音制御によって意図した印象の付加について検討した。適応音質制御については、走行データから各被験者の好みの音質へ制御するアルゴリズムについて検討を行った。本研究により得られた知見について以下に示す。

#### 吸音制御が聴感印象に与える影響と意図した印象の付加に関する検討

- 吸音材装着時とエンジンルーム及びインストルメントパネルの吸音材を両方取り外した時の車室内エンジン音の音圧を比較すると、吸音材を装着することで400Hz

付近から最大 12dB 音圧が低減されることが確認された。このことより、収録音を加工する際の低減範囲が明確化された。

- 因子分析により、車室内エンジン音が柔和因子、スポーティ因子、迫力・高さ因子の3因子で構成することが明らかになった。
- 吸音材の主観的印象は、「スポーティな」や「静かな」などの形容詞で表現することが可能である。
- 吸音制御によって低減帯域を変化させることで「上質なスポーティ感」という限定した印象を付加できる可能性が示唆された。
- 吸音材開発において意図したイメージを付加できる可能性がある。

#### 適応音質制御を用いた個々の好みに適応した音質制御システムの基礎検討

- SOM による識別により、各被験者を4つのグループに分類できることを確認した。つまり、各被験者の運転パターンから被験者の傾向を自動識別することが可能となった。
- スパース性を用いることで好みの音質を識別する中で、走行開始5秒間の走行データで識別できる可能性が示唆された。
- SOM により識別を行ったが、本実験では速度データだけで識別を行ったため、おおまかな識別となってしまった。これは、他のデータも特徴量に加えることで対応できると考えられる。

本研究では、吸音制御の制御量、制御帯域を変化させることで、特定の印象をエンジン音に付加する可能性が示唆された。また、実環境において制御アルゴリズムを用いることで、好みに適応する音質制御の可能性についても示唆された。

#### 今後の課題

本研究により得られた知見から、今後以下のような検討を行う予定である。

- 各音域に対して受動騒音制御と能動騒音制御を組み合わせた音質制御
- 「上質なスポーティ感」以外の意図した印象の付加の検討
- 実環境での各被験者の好みに応じた音質制御の検討

# 謝辞

本研究を遂行するにあたり、多くのご支援とご指導をいただきました。

石光俊介教授には様々なご指導とご鞭撻をいただき深く御礼申し上げます。希望したテーマである音質制御に関する研究をさせていただきましたこと、親身なご指導により、本研究を円滑に進めることができましたことを銘記し、深く感謝致します。サウンドデザイン研究室に配属されてから6年間は私にとって大変貴重な経験となりました。博士後期課程まで研究を続けさせていただいたこと深く感謝致します。

そして、研究に必要となるデータの収録や、自動車及び自動二輪車に関する知識といった研究の根幹を成す部分で多くのご指導とご助力をいただきました、梶原雄平様、野口泰三様、山田雄三様、石井亮輔様をはじめとする株式会社ヒロタニの方々に感謝しております。

研究のための環境構築や発表会の際に貴重なアドバイスをいただきました広島市立大学情報科学研究科 中山仁史准教授に深く感謝致します。

本論文の査読をしていただき、ご指摘を下さいました広島市立大学情報科学研究科 岩城敏教授、藤坂尚登教授、中山仁史准教授に感謝申し上げます。

最後に、日頃から研究に関する事だけではなく、研究以外の面でもご協力を下さった、秘書の小泉梨花様、大平侑子様、サウンドデザイン研究室の皆様には深く感謝致します。

## 参考文献

- [1] 西村, 宇佐川, 伊勢, ”アクティブノイズコントロール”, コロナ社, (2006)
- [2] 斉藤, 吉崎, 早麻, ”快適・安全な自動車開発の技術動向”, The TRC NEWS No.108, (2009)
- [3] 星野博之, ”自動車車室内騒音の音質評価”, 日本音響学会誌 53 巻 6 号 pp.462-465 (1997)
- [4] Gonzalez, A., Ferrer, M., Diego, M., Piñero, G., Garcia-Bonito, J., : Sound quality of low-frequency and car engine noises after active noise control, Journal of Sound and Vibration, Vol. 265, Issue 3, pp. 663-679, 2003
- [5] Murai, K., Ishimitsu, S., Aramaki, Y., Takaki, T., Chino, T., Yoshida, K., Suzuki, K.,: Basic study of sound quality control based on individual preference, ICIC Express Letters Part B: Applications, Vol.9, No.8, pp.783-787, 2018.
- [6] Yamamoto, A., Ishimitsu, S., Sagawa, T., Ito, T., Aramaki, Y., Tanaka, D., Shibatani, N., Namekawa, K., Takagi, T., Chino, T., Yoshida, K., Suzuki, K., : Active sound quality control system for the engine sound and its effects on subjective preference, Proceedings of 23rd International Congress on Sound & Vibration, No.390, 6 pages, Athens, Greece, 2016.
- [7] International Telecommunication Union: ITU-R recommendation BS.1534, 2015.
- [8] 佐川他, 次数成分に着目した適応音質制御システムに関する研究, 広島市立大学修士論文 (2016)
- [9] JIS Z 8106 : 音響用語, [http://www.jisc.go.jp/pdfb6/PDFView/ShowPDF/yAMAAPqnOdiUW\\_baabxm](http://www.jisc.go.jp/pdfb6/PDFView/ShowPDF/yAMAAPqnOdiUW_baabxm)
- [10] 星野博之, 小澤義彦, ”車内音を構成する音の要素とその評価”, 豊田中央研究所 R & D レビュー Vol.30 No.3 pp.29-38(1995)
- [11] 今野, 大西, 小手川, “エンジンこもり音を低減するアクティブ騒音制御システム”, Panasonic Technical Journal Vol.54 No.4, (2009).
- [12] 自動車用語集, <http://www.1techicon.com/yougo/archives/000085.html>, (2016.1.15).

参照).

- [13] 長山 勲, ”初めて学ぶ基礎エンジン工学”, 東京電機大学出版社 (2008)
- [14] 八木橋渉, 今井ひろし, ”信号処理装置を用いた車室内加速時騒音評価に関する一考察”, 自動車技術会学術講演会前刷集 892号, pp.157-160 (1989)
- [15] 柘植和広, ほか3名, ”加速時車内騒音の音色に関する一考察”, 自動車技術 Vol.39 No.12 pp.1356-1361 (1985)
- [16] 山下 剛, 石井康夫, 中村光勇, 北村音一, ”自動車車室内音の音色評価について”, 日本ゴム協会誌 63 卷 3 号 pp.122-130 (1990)
- [17] 脇田敏裕, ”自動車の音色評価”, 豊田中央研究所 R & D レビュー Vol.27 No.3 (1992)
- [18] 村田秀樹, 大佐々吉宏, ”定常走行時車内音の音質評価について”, 自動車技術会学術講演会前刷集 942号 pp.145-148 (1994)
- [19] 佐野 久, 足立修一, 粕谷英樹, ”最小2乗法に基づく自動車のアクティブ騒音制御に関する研究”, 日本機械学会論文集 (C編) 61 卷 581号 pp.78-84 (1995)
- [20] 環境省 自動車単体騒音規制, <https://www.env.go.jp/houdou/gazou/1434/955/163.pdf>
- [21] 環境省 一般環境騒音について, <https://www.env.go.jp/air/ippan/index.html>
- [22] 騒音の大きさの目安, [http://www.city.fukaya.saitama.jp/ikkrwebBrowse/material/files/group/31/souon\\_ookisa.pdf](http://www.city.fukaya.saitama.jp/ikkrwebBrowse/material/files/group/31/souon_ookisa.pdf)
- [23] 屋代春樹他, ”自動車交通 1998”, 日産自動車 (1998)
- [24] JIS A 6301: 吸音材料, <http://www.jisc.go.jp/pdfa5/PDFView/ShowPDF/1gMAAJiP2-TVWThOYRKR>
- [25] Lueg Paul, ”Process of silencing sound oscillations,” US2043416 A, (1936).
- [26] 社団法人自動車技術会, JSAE SYMPOSIUM 「自動車の振動騒音問題とうまくつきあう方法」 - 研究開発の現場における事例を通して NVH の基礎を学ぶ- (2007).
- [27] 星野博之, ”ドライバ支援のための走行音による接近車両検知システム (特集: システム論文特集号)”, 日本音響学会誌 62(3), 265-274, (2006).
- [28] 浜田, 石光, 山本, ”実信号 Command LMS アルゴリズムによる適応音質制御”, 環境工学総合シンポジウム講演論文集 2010(20), 13-15, (2010).
- [29] 久保典央, ”自動車の音質評価”, B & K 技術講習会資料, (2007).
- [30] 上鹿庭, 石光, 滑川, 高木, 吉田, 鈴木, 千野, ”エンジン次数成分に着目した適応制御の高速化に関する検討”, 日本機械学会中国四国支部第 51 期講演会論文集 (2013).
- [31] L.E.Rees, Stephen J.Elliott, ”LMS-Based Algorithms for Automobile Engine Sound Proling”, inter-noise2003, pp.1026-1033, (2003).
- [32] Widrow, Bernard, Stearns, Samuel D, ”Adaptive Signal Processing (Prentice-hall Signal Processing Series)”, Pearson College Div(1985)
- [33] 徳高, 他 3 名, ”自己組織化マップの応用”, pp.1-15, 海文堂 (1999).

- [34] 徳高, 他 3 名, ” 自己組織化マップ” , pp110-114 , シュプリンガー・フェアラーク東京株式会社 (2005).
- [35] Kohonen, T, ”Self-organizing maps”, Maruzen Publishing, (2012).
- [36] 庄野, ”スパースモデリングの歴史と基本技術”, 電子情報通信学会誌, Vol. 99, No. 5, 2016
- [37] 相場 寛, ” 視覚と聴覚の心理物理学”, 精密機械 43 卷 12 号 pp.77-81 (1977)
- [38] 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)
- [39] 市原 茂, ” セマンティック・ディファレンシャル法 (SD 法) の可能性と今後の課題”, 人間工学 Vol.45 No.5 pp.263-269 (2009)
- [40] 柳井春夫, 前川真一, 繁柘算男, 市川雅親, ” 因子分析”, 朝倉書店 (1990)
- [41] 杉山高一, 藤越康祝, 小椋 透, ” 多変量データ解析”, 朝倉書店 (2014)
- [42] 日科技連官能検査委員会編, 新版官能検査ハンドブック, 日科技連出版社, (1973)
- [43] 品質管理誌編集委員会編, 新しい統計手法集 B 偏, 日科技連出版社 (1963)
- [44] 佐藤著, 統計的官能検査法, 日科技連出版社 (1985)
- [45] 石光俊介, 佐藤秀紀, 人間工学の基礎, 養賢堂 (2018 年)
- [46] Moto Map, ” GSX-R1000 : スペックシート”, [http://www.motomap.net/lineup/2009/mdl\\\_gsxr1000\\\_s.html](http://www.motomap.net/lineup/2009/mdl\_gsxr1000\_s.html), (2015.12.22 参照).

## 発表論文

- [1] 村井 研太, 石光 俊介, 荒槇 純裕 (広島市大), 高木 俊尚, 吉田 一紀, 千野 貴礼, 鈴木 健太 (スズキ), ”個々の好みに適応する音質制御システムの基礎検討”, 日本音響学会 2017 年 秋季研究発表会 講演要旨・講演論文 CD-ROM 1-1-13 pp.1331-1334 (2017 年 9 月 25 日 (月)~27 日 (水) 愛媛大学 城北キャンパス)
- [2] 村井 研太, 石光 俊介 (広島市大院), 山口 雄三, 野口 泰三 (株式会社ヒロタニ), ”車室内における吸音制御が与える聴感印象評価”, 日本音響学会 2018 年 秋季研究発表会 講演要旨・講演論文 CD-ROM 1-8-8 pp.523-526 (2018 年 9 月 12 日 (水)~14 日 (金) 大分大学 旦野原キャンパス)
- [3] 村井 研太, 北村 勇樹, 石光 俊介 (広島市立大), ”自動車における吸音材を用いたサウンドデザイン”, 第 20 回 IEEE 広島支部学生シンポジウム 論文集 CDROM A2-13 4 pages (2018 年 11 月 17 日 (土) ~18 日 (日) 鳥取大学 湖山キャンパス)
- [4] Kenta Murai, Shunsuke Ishimitsu, Yoshihiro Aramaki, Toshihisa Takaki Takanori Chino, Kazuki Yoshida and Kenta Suzuki, ”Basic Study of Sound Quality Control Based on Individual Preference”, 12th International Conference on Innovative Computing, Information and Control (ICICIC2017), Sound System and Applications, Kurume City, Japan, August 28-30, 2017
- [5] Kenta Murai, Shunsuke Ishimitsu, Naoaki Shibatani, Yoshihiro Aramaki, Toshimasa Takagi, Kazuki Yoshida, Kenta Suzuki and Takanori, ”Active Sound Quality Control Based on Individual Subjective Preference”, Chino, AES 2017 International Conference on Automotive Audio, Burlingame, San Francisco, CA, USA, September 8th-10th, 2017
- [6] Kenta Murai, Shunsuke Ishimitsu, Yoshihiro Aramaki, Toshihisa Takagi, Takanori Chino, Kazuki Yoshida, Kenta Suzuki, ”Active Sound Quality Control Adapted to Individual Preference”, SETC 2017 Small Engine Technology Conference, Jakarta, Indonesia, Small Engine Technology -Generating A Promising Future pp.19, November 15-17, 2017
- [7] Kenta Murai, Shunsuke Ishimitsu, Ryosuke Ishii, ”PASSIVE SOUND CONTROL WITH

- SOUND ABSORBERS IN AUTOMOBILE”, 25th International Congress on Sound and Vibration 8-12 July 2018 HIROSHIMA CALLING,6 pages
- [8] Kenta Murai, Shunsuke Ishimitsu, ”Active Sound Quality Control for Subjective Preference”, 47th Proceedings of 47th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering(inter-noise2018) No.1981 9 pages, CHICAGO, USA, August 26-29, 2018
- [9] Kenta Murai, Shunsuke Ishimitsu, Ryosuke Ishii, ”Effect of Sound Design by Passive Noise Control on Auditory Impression”, Proceedings of 47th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering(inter-noise2018) No.1502 8 pages, CHICAGO, USA, August 26-29, 2018
- [10] K.Murai and S.Ishimitsu, ”Study of controlling the intended sound impression by passive noise control”, 4th International Symposium on Information and Knowledge Management (ISIKM2020)Online, December 12-13, 2020
- [11] 村井 研太, 石光 俊介, ”吸音材による自動車エンジン音の感性制御”, JSKE 第 23 回日本感性工学会大会 (2021 年 9 月 2 日 (木) ~9 月 4 日 (土)) オンライン開催
- [12] 村井研太, 石光俊介, ”吸音材による自動車エンジン音から感じる “スポーティ感” の感性制御”, JSKE 第 17 回日本感性工学会春季大会・ISASE2022 7pages (2022 年 3 月 25 日~26 日) オンライン開催
- [13] K.Murai and. S.Ishimitsu, ”Control engine sound for individual preference by Active Sound Quality Control”, 24th INTERNATIONAL CONGRESS ON ACOUSTICS (ICA 2022) October 24 (Mon) - 28 (Fri), 2022 Gyeongju, Korea