

修士論文

インクジェットプリンタ動作音の
印象評価尺度と物理的評価指標との関係

平成 28 年度

三重大学大学院 工学研究科
博士前期課程 物理工学専攻

高須 淳

目次

| | | |
|-------|---------------------------------|----|
| 第 1 章 | 序論 | 4 |
| 1.1 | 研究背景 | 4 |
| 1.2 | 先行研究 | 5 |
| 1.3 | 本研究の目的 | 6 |
| 1.4 | 本論文の構成 | 6 |
| 第 2 章 | 先行研究の概要 | 8 |
| 2.1 | 研究で用いた音に関する物理的評価指標 | 8 |
| 2.1.1 | 等価騒音レベル $L_{Aeq}[13]$ | 8 |
| 2.1.2 | シャープネス $S[13]$ | 8 |
| 2.1.3 | 変動強度 $F[13]$ | 9 |
| 2.1.4 | Comfort Index $CI[9]$ | 9 |
| 2.1.5 | $CI + F[1]$ | 9 |
| 2.2 | 印象評価実験 | 9 |
| 2.2.1 | 実験方法 | 10 |
| 2.2.2 | 試験音 | 10 |
| 2.2.3 | 実験結果の整理 | 11 |
| 2.3 | 実験結果と従来指標の対応関係 | 12 |
| 2.4 | まとめ | 13 |
| 第 3 章 | 新しい評価実験の方法 | 14 |
| 3.1 | 試験音 | 14 |
| 3.2 | 音量差の影響 | 14 |
| 3.2.1 | 予備実験の条件 | 15 |

| | |
|---|-----------|
| | 3 |
| 3.2.2 予備実験の結果 | 15 |
| 3.3 本実験に合わせた実験条件 | 16 |
| 3.4 不完全一対比較の解析方法と結果 | 18 |
| 3.5 まとめ | 20 |
| 第 4 章 従来指標と印象との対応関係 | 21 |
| 4.1 実験結果と従来指標との関係 | 21 |
| 4.2 印象と各指標との関係 | 22 |
| 4.3 まとめ | 23 |
| 第 5 章 新たな指標の探索 | 25 |
| 5.1 線形な回帰モデル | 25 |
| 5.2 交絡因子を加えた非線形な回帰モデル | 27 |
| 5.3 ニューラルネットワークを用いたモデル | 28 |
| 5.4 まとめ | 29 |
| 第 6 章 評価モデルとパラメータの関係 | 31 |
| 6.1 指標 Y_1, Y_2 におけるパラメータの働き | 31 |
| 6.2 指標 Y_3 におけるパラメータの働き | 33 |
| 6.3 S と F が印象に及ぼすメカニズム | 33 |
| 6.4 まとめ | 34 |
| 第 7 章 結び | 36 |
| 付 録 A 不完全一対比較法について | 41 |
| A.1 Scheffe の一対比較法における欠損のあるデータの解析 | 41 |

第1章 序論

1.1 研究背景

製品の価値観を決める基準の一つに音というものがある。自動車をはじめとして様々な音を発生する製品や機械が世の中には数多く存在しており、我々はそれらが発する音（機械動作音）にさらされて生活している。こうした機械動作音の中には人間の集中力を妨げるものがあり、それらは騒音と認識され問題となることもある。近年では製品の性能を追求するだけでなく、このような騒音の問題にも焦点が当たるようになってきた。騒音の問題を解決する方法としては、まず音のエネルギーレベルを下げる静音化対策が最初に試みられる。例えば、自動車騒音に対して排気部に消音機構を追加したり、タイヤの性能を向上させるなどの対策がそれにあたる。また屋外で使用する製品だけではなく、室内にあるエアコンやプリンタなどの動作音も静音化対策が行われ静かになる傾向にある。最近のプリンタに関して言えば、印刷速度を落とす代わりに動作音の音量を抑える静音モードを備えた機種も市販されるなど、印刷の性能ばかりではなく、音に対しても消費者側の関心が高まっている様子が見えてくる。しかし、騒音の問題は静音化対策により音を小さくするだけでは解決できないこともある。例えば、歯科や口腔外科で使われるドリルの音が患者に与える影響は音の大きさによる不快感のみに留まらず、ドリルの音特有の高周波を多く持つ「キーン」という音質が不快感を患者に与えていることが知られている。このような動作音が持つ音の質的な特徴に起因する問題に対しては、動作音自体の不快感を緩和させる試み（快音化対策）も行われている。騒音計で計測可能な音量を下げることを目的としている静音化対策とは違い、快音化対策を実施するには、その音が不快であるか否かを評価する音質評価が必須である。その音質評価には一般的に以下のような2つの方法がある。

1. 試聴実験を用いた官能評価や評価実験によって得られる人間の反応から印象を抽出する主観的な評価（抽出されて尺度化されたものを心理評価量などと呼ぶ）

2. 人間の耳や聴覚神経の機構に関する知見や多数の聴感試験の結果から導き出された音響評価量（物理量として測定されるため物理的評価指標とも呼ばれる）を用いた客観的な評価

前者の主観的な方法は評価毎に印象評価実験を行わなければならないため人的にも時間的にもコストが高く、新製品の開発や既存製品の騒音対策を検討する際には後者の客観的な方法が採用されることが多い。しかし、物理的評価指標も様々なものが提案されており、1つの評価量だけでは説明が困難な事例も多く、複数の心理音響評価量を用いた評価が必要となる。例えば、山田らは歯科用ドリルが人間に与える不快感を説明するために重回帰分析を用いて等価騒音レベル L_{Aeq} と音の鋭さを評価する指標であるシャープネス S 、音の変動感を評価する指標である変動強度 F を用いた独自の評価式を提案している [1]。その他の機械動作音に対しても様々な音質評価が行われている。

1.2 先行研究

当研究室における先行研究ではレーザー方式のプリンタ（MFP）動作音について、その印象（「気になる⇔気にならない」という表現）を物理的評価指標から定量的に説明できるモデルを構築し、快音化でコストのかかる印象評価実験（試聴実験）を省略してプリンタ動作音がユーザにどのような印象を与えるのかを予測しようと試みてきた [2][3][4]。

例えば、須賀 (2014) はレーザー方式とインクジェット方式の両印刷方式が競合する小型プリンタについて、印刷方式に関わらず動作音の印象に有効な物理的評価指標の探索を行った [5]。また、村田ら (2015) はインクジェット方式の小型プリンタについて動作音の印象に有効な物理的評価指標の探索を行った [6]。その結果、動作音の印象に対し Comfort Index (CI) に変動強度 (F) を加えた指標 ($CI + F$ と表記) が比較的良好な対応を示した。しかし、先行研究で用いられたインクジェット方式のプリンタの機種数は6機種と少なく、 $CI + F$ の有効性を強く主張することは難しい。また静音化が進むにつれ、発売時期により動作音の音量に大きな差が生じるようになってきており、試験音間の音量差が大きく開いた条件下での試聴実験の知見が得られていない状況にある。

1.3 本研究の目的

先行研究で用いた6機種 of インクジェット方式のプリンタ動作音の印象に対し、 L_{Aeq} や $CI + F$ が比較的良い対応を示すことが分かっている。しかし、動作音の印象評価に対する指標の有効性は試験音の少なさから確証を得ることが難しい。そこで、試験音数を増やすことにより L_{Aeq} や $CI + F$ の有効性を確認することを主眼として本研究では以下の3つの目的を設定した。

1. 試験音数を増した試聴実験を実施し、同一のスケール上の印象尺度値を得る（目的1）
2. 得られた尺度値と L_{Aeq} や $CI + F$ などの従来指標との対応関係を確認する（目的2）
3. 従来の指標よりさらに対応関係の良い指標を探索する（目的3）

上記の目的を達成するために、試験音の数を先行研究で用いられた試験音の3倍近くに増し（従来6機種⇒16機種）実験を行った。しかし、これまで行われていた印象評価実験（動作音に対する印象尺度値を得る実験）は一対比較法（浦の変法）に基づいており、1回の実験で評価できる試験音数には限度（6機種程度）がある。また、得られる尺度値も無次元の相対値であることから過去の試験結果を単純に蓄積して試験音数を増すことができない。そこで以下の2つの実験条件を加えることで、被験者に提示する直接比較の試行回数を制限し、実験を複数回に分けて行った。

1. 音量差が5dBを超える直接比較を実験から除く（条件1）
2. 最大音量差が7dB以下となるように実験を複数回に分ける（条件2）

この対策（条件設定）により実験結果が不揃い（本来240通り⇒190通り）となったため、欠損した一対比較データを解析する方法を適用し印象尺度値を得ることにした。また、先行研究で動作音の印象に有効であった指標と実験結果との対応関係を調査することで、従来指標の有効性を確かめた。また、重回帰分析やニューラルネットワークを用いて新しい評価指標の探索も試みた。

1.4 本論文の構成

以下に本論文の構成を示す。

第2章では本研究のきっかけであり、比較対象となるインクジェット方式のプリンタ動作音を扱った先行研究について実験方法や結果について概説する。

第3章では本実験で用いた試験音や本実験の実験方法や解析方法と実験結果について説明する。

第4章では本実験で得られた印象尺度値と従来指標との対応関係を調査した結果を説明する。

第5章では新たな指標の探索を行い、印象との対応関係を調査する。

第6章では第5章において探索した独自指標を算出するためのパラメータの役割を調査する。

第7章では本研究を総括し今後の課題について述べる。

第2章 先行研究の概要

本章では、本研究のベースとなる先行研究（村田 2015）で用いられた指標、実験方法や結果について概説する。

2.1 研究で用いた音に関する物理的評価指標

先行研究や本研究において、試験音（印象評価実験で用いられた動作音）に対して算出された物理的評価指標について解説する。なお、これらの評価指標はデジタル録音された試験音を“PSYSOUND3” [7] というソフトウェアで分析することにより一定の時間間隔で算出されるが、研究ではその代表値として試験音全体に対する平均値（ L_{Aeq} はパワ平均値、その他は算術平均値）を採用している。また、 CI と $CI + F$ はその代表値を用いて算出される二次指標である。

2.1.1 等価騒音レベル L_{Aeq} [13]

等価騒音レベル L_{Aeq} [dB] とは時々刻々と変動する音のエネルギーを時間平均した後に騒音レベル（聴覚の周波数特性を模したフィルタで聴覚補正した音圧レベル）に変換したものであり、環境騒音の指標として世界で広く使われている。また、日本においても環境基準として用いられている指標である。なお、我々は解析ソフトが算出する騒音レベルを基に 10 秒間（試験音の再生時間）の平均値として用いている。 L_{Aeq} についてはその定義に従い、代表値として算術平均ではなくパワ平均値を採用している。

2.1.2 シャープネス S [13]

シャープネス S [acum] は「鋭い—鈍い」といった印象尺度と関わりが強い指標であり、音質評価において取り扱われる金属因子とほぼ同じ性質を持つことが知られている。一般的に高域成分の優勢な音は「鋭い」、「かん高い」音色として高い値が算出される。

2.1.3 変動強度 F [13]

音の変動周波数が 5Hz 以下のとき、人間の感覚は実際の物理的な変動に追従し、その変動の様子を知覚できることが知られている。それは音が大きくなったり、小さくなったりする過程を追従し知覚しているのであり、低い変動周波数のときに感じる音の変動感の感覚量を定量的に算出する指標が変動強度 F [vacil] である。また、この変動の周期が非常にゆっくりとしている場合には変動感（ふらつき感）をあまり感じず、変動の周期がある程度速くなると変動感を強く感じる。一番変動感を強く感じるのは 1 秒間に 4 回の速さで変動をする場合（変動周波数が 4Hz）と言われている。さらに変動の周期が速くなると変動感は次第に小さくなっていく。

2.1.4 Comfort Index CI [9]

桑野らによって提唱されている指標 CI （Comfort Index）は交通騒音が様々な材質の壁や窓を通過して室内に透過した音に対する不快感と良い対応を示すことが知られている [9]。その値は等価騒音レベル L_{Aeq} とシャープネス S から

$$CI = (1/10) L_{Aeq} + S \quad (2.1)$$

で算出される。単位の異なる 2 つの指標（等価騒音レベル L_{Aeq} , シャープネス S ）から算出されるため無次元であり、値が大きくなるにつれ不快感が増すことを示す指標である。 L_{Aeq} と S に掛かる係数の比が単純であり、実務的に使いやすい指標である。

2.1.5 $CI + F$ [1]

上述の CI に変動強度 F の値を加えた指標であり、歯科治療用ドリル（歯科タービン）の音の印象に対して CI 以上に良い対応を示すとされている [1]。本論文ではこの CI に変動強度 F を加えた値を便宜上 $CI + F$ と表記する。先行研究 [6] においてインクジェット方式のプリンタ動作音に対しても印象との対応関係が比較的良好であった。

2.2 印象評価実験

先行研究では、プリンタ動作音の印象の尺度値を得るために、Scheffe の一対比較法（浦の変法）に基づく聴覚実験が行われた。本節ではその実験方法や試験音について簡単に紹介する。

2.2.1 実験方法

実験は簡易防音室内（三重大学工学部第二合同棟 6311 室）で行い、被験者はバイノーラル再生される試験音（プリンタ動作音）を密閉型ヘッドホンで聞きながら設問に回答した。図 2.1 にその実験風景を示す。全被験者が同じ条件で実験できるように、図 2.2 に示すような実験用のソフトウェアを作成したので、被験者はパソコン画面の指示に従い 1 人でも実験を進めることができる。実験に使用した機材を図 2.3（写真：図 2.4）に示す。写真左からヘッドホンアンプ（AUDIO TRAK Dr.DAC2）・PC（ソフトウェア）・ヘッドホン（audio-technica ATH-SX1a）である。

以下に具体的な実験手順を示す。

1. 画面上で名前を入力し、画面上の「開始」ボタンをクリックする。
2. 「基準音」をクリックして基準音を再生させる。
3. 「評価音」をクリックして評価音を再生させる。
4. 0 を含む $-3 \sim +3$ の 7 段階で設定した尺度にチェックを入れる。
5. 2～4 の手順を指定の回数繰り返す。

基準音や評価音の再生時間や回数はプログラムで制御されているが、ボタンをクリックするタイミングは被験者に任せられている。なお、本論文で紹介する実験では試験音を 2 回試聴しなければ先に進めないように設定した。また、順序効果をなくすため、基準音と評価音の入れ替えも含め全通りの提示を行っている。したがって、 n 個の試験音を使う場合、5. の指定の回数は nP_2 となる。ちなみに、被験者は正常な聴力を有する大学生および大学院生 20 名（21～24 才）で、基準音に対し評価音がどのくらい「気になる」ということを 7 段階評価している。

2.2.2 試験音

6 機種インクジェット方式のプリンタ動作音（印刷音）を無響室内で 5 方向（前・後・左・右・上）から収録し、これらにダミーヘッドで測定したオフィス内を想定した室内のインパルス応答を畳み込み、バイノーラル試験音を作成した。なお、試験音の長さは全て 10 秒で、給紙音を除いた印刷動作音のみとした。いずれの試験音もおよそ 2kHz を境に高域部にはインクジェット方式の

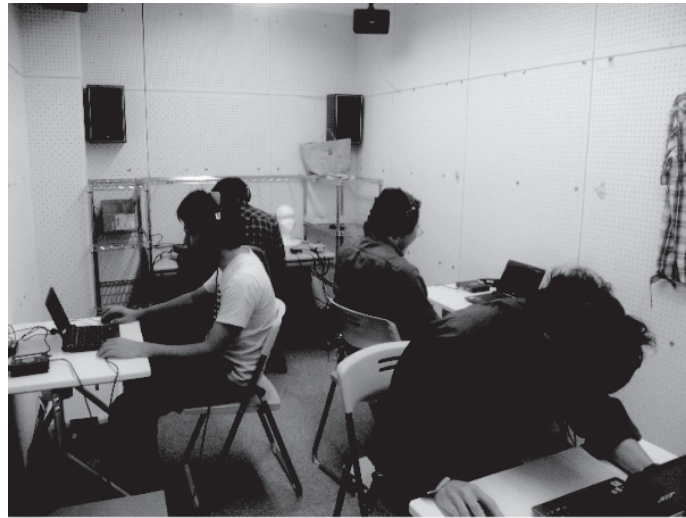


図 2.1: 実験風景

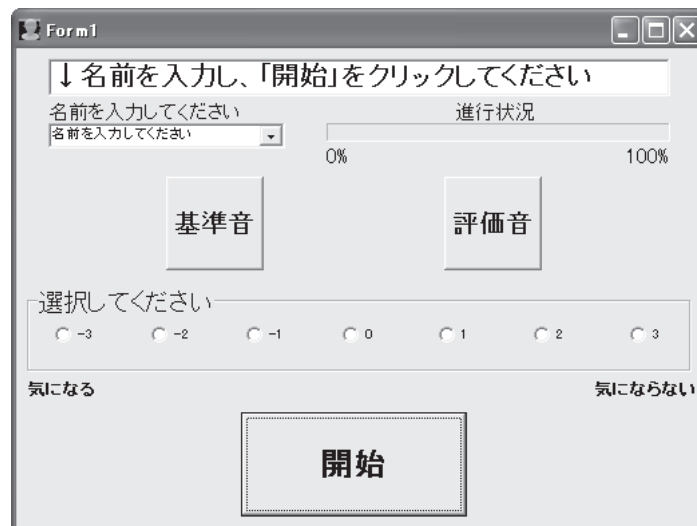


図 2.2: 実験用ソフトウェア

プリンタ特有のヘッドを往復運動させる駆動音を多く含んでおり、低域部には紙送り等のその他駆動系の音を多く含んでいる。

各試験音は実験時と同じ条件でヘッドホン再生した音を再びマイクロホンで収録し、分析ソフト PSYSOUND3[7] により、 L_{Aeq} 、シャープネス S (約 23ms 毎に算出される値の算術平均値)、変動強度 F (約 49ms 毎に算出される値の算術平均値) を算出した。

2.2.3 実験結果の整理

実験から得られた回答は統計処理されて試験音毎に 1 つの印象軸上にプロットされる尺度値 (yardstick value) に変換される。例として、先行研究の 6 機種 (A~F) の実験結果を図 2.5 に

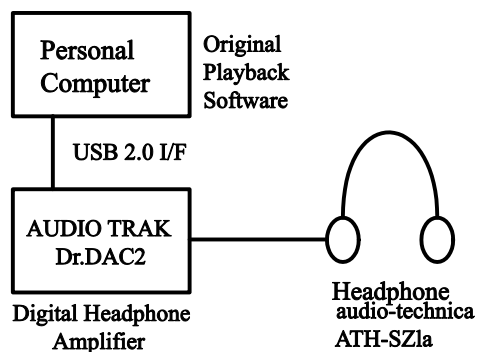


図 2.3: 再生装置の構成



図 2.4: 実験セット

示す。

なお、これらの尺度値は平均値を 0 とする相対値であり、図 2.5 の場合、右（正方向）に行くにつれて「気にならない」と解釈される。また、図 2.5 中の**は尺度値間に危険率 1% 以下、*は 5% 以下の有意差が認められたことを示している。

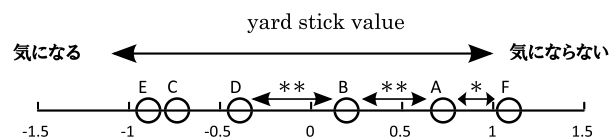
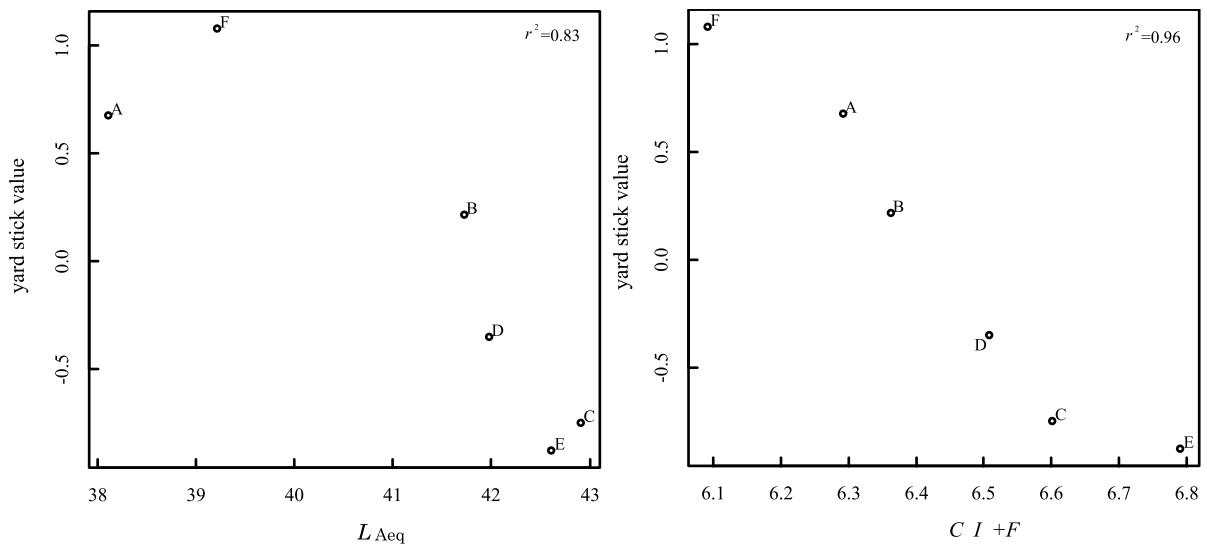


図 2.5: 先行研究の実験結果

2.3 実験結果と従来指標の対応関係

一般的な音の大きさの物理的評価指標である指標 L_{Aeq} と山田らが提唱する $CI + F$ と図 2.5 に示した動作音の印象尺度値（yardstick value）との対応関係を図 2.6 に示す。縦軸は印象尺度値であり、上方向（正方向）に行くにつれて「気にならない」という印象に対応している。一方、横軸は物理的評価指標である。 L_{Aeq} と $CI + F$ のいずれも印象尺度値と高い相関（ $r^2 > 0.80$ ）を示しており、特に $CI + F$ は印象尺度値上の試験音の順位を良く説明している（ $r^2 = 0.96$ ）。ただし、試験音数が少ないため、この結果に普遍性があると判断することは難しい。

図 2.6: L_{Aeq} , $CI + F$ との関係

2.4 まとめ

本章では、本研究の基礎となる先行研究（村田、2015）の内容を簡単にまとめた。内容としては、6機種のインクジェット方式のプリンタ動作音を評価対象とし、一対比較法により印象尺度値を得たところ、音の物理的評価指標である L_{Aeq} や $CI + F$ との対応関係がよいことを紹介した。特に $CI + F$ との対応関係が良く、決定係数が高い（ $r^2 = 0.96$ ）ことがわかった。

第3章 新しい評価実験の方法

前章で紹介したように、2つの音の物理的評価指標 (L_{Aeq} , $CI + F$) が動作音の印象と対応関係が良好であることがわかっている。しかし、試験音の数が6機種と少なく、インクジェット方式のプリンタ動作音の印象を説明するのに $CI + F$ が有効であると言い切るにはデータが不足していると考えられる。そこで、本研究では先行研究で用いた試験音に新たな試験音を10機種加えデータ数を約3倍に増して評価実験を行い、先行研究の結果を改めて確認することにした。ただし、実験方法を変更せずに試験音数だけを増すと比較回数が膨大になり、従来の手法のまま実験を実施することは現実的ではない。そこで本章では、本研究における実験方法を変更したので、使用する試験音の特徴と共にその手法について説明する。

3.1 試験音

先行研究において使用された6機種の試験音 (A~F) に新たに録音した7機種の試験音 (G~M) を加えた計13機種の試験音と、 L_{Aeq} の分布の空白域 (34~38dB) を埋めてバランスを取るために3機種 B, D, F の L_{Aeq} の値が5dB下がるように音量を調整した3機種の試験音 (N~P) を加えることにした。これらのことより、本研究で使用する試験音は16機種となった。

これらの試験音の関係性や分析ソフトウェア PSYSOUND3 で求めた L_{Aeq} , S , F の算出値を表3.1にまとめた。なお、試験音の長さは全て10秒で、給紙時の動作音を除いた印刷時 (モノクロ印字) の動作音のみとした。

3.2 音量差の影響

試験音を増やすことにより、先行研究より試験音が多彩になった。特に、各試験音の L_{Aeq} の分布域は広くなり、先行研究の時 (38~43dB) よりも10dBほど拡大 (33~48dB) している。先行研究の結果では L_{Aeq} と印象との対応関係が良かった ($r^2 = 0.83$) ことから、被験者にとって L_{Aeq} の差は試験音を評価する際、分かりやすい一つの基準であることが考えられる。そのため、従来

表 3.1: 試験音の一覧

| プリンタ機種 | L_{Aeq} [dB] | S [acum] | F [vacil] | 備考 |
|--------|----------------|------------|-------------|-----------------|
| A | 38.2 | 1.38 | 1.23 | 先行研究で使用 |
| B | 41.6 | 1.38 | 0.90 | " |
| C | 42.6 | 1.42 | 0.99 | " |
| D | 41.7 | 1.42 | 0.99 | " |
| E | 43.2 | 1.50 | 1.17 | " |
| F | 39.3 | 1.45 | 0.88 | " |
| G | 33.5 | 1.87 | 0.67 | 新たに追加 |
| H | 40.7 | 1.83 | 1.12 | " |
| I | 47.6 | 1.76 | 1.16 | " |
| J | 47.2 | 1.30 | 0.90 | " |
| K | 38.6 | 1.50 | 1.04 | " |
| L | 48.2 | 1.34 | 0.92 | " |
| M | 39.3 | 1.45 | 1.04 | " |
| N | 36.6 | 1.37 | 0.91 | B の音量を変更 (-5dB) |
| O | 37.0 | 1.42 | 0.99 | D " |
| P | 34.7 | 1.46 | 0.85 | F " |

通りの実験方法を用いた場合、 L_{Aeq} の差の拡大が被験者の回答行動に変化をもたらすことが懸念されるので2つの予備実験 I, II によりその有無を確認しておくことにした。

3.2.1 予備実験の条件

予備実験の条件を表 3.2 に示す。実験 II で用いる試験音は、本実験で用いる試験音の L_{Aeq} の最

表 3.2: 予備実験の条件

| 予備実験番号 | 試験音 | L_{Aeq} の最大差 | 被験者 |
|--------|-------------|----------------|-------------------|
| I | C,D,F,H | 3.3dB | 正常な聴力を有する大学生 20 名 |
| II | C,D,F,G,H,I | 13.6dB | 同上 |

大差である 14.6dB 程度になるように 16 機種の試験音の中から 6 機種 (C, D, F, G, H, I) を選択した。また実験 II の結果と比較するため、実験 I で用いる試験音は先行研究における L_{Aeq} の最大差である 5dB より小さくなるように、実験 II で用いる試験音の中から 4 機種 (C, D, E, H) の試験音を選択した。被験者は正常な聴力を有する 20 名の大学生で、実験 I, II ともに全て同じ被験者が評価している。

3.2.2 予備実験の結果

図 3.1 に実験 I, II の結果を示す。前章で説明したようにこの図では1つの印象尺度軸上に各試験音が相対的にプロットされており、右（正方向）に位置するほど「気にならない」と判断されたと解釈される。

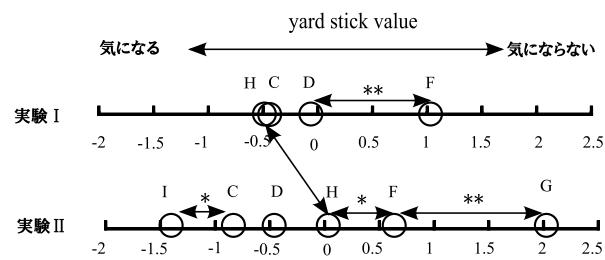


図 3.1: 予備実験 I,II の結果 (ヤードスティック)

実験 I と II を比較すると試験音 H, C, D 間の印象の並びが印象尺度値上で変化した。そこで、これらの印象尺度値と従来指標との対応関係を図 3.2 と図 3.3 に示す。これらの図を比較すると印象尺度値は、実験 I では L_{Aeq} より $CI + F$ との対応関係が良く、逆に実験 II では L_{Aeq} の方が対応関係が良いことがわかる。

これは実験 II において L_{Aeq} の差が大きい試験音の直接比較を行ったことにより、被験者の意識が「 L_{Aeq} の違い」、即ち音量感に強く誘導され、被験者は試験音間の音量差の大きさに関わらず、音量感を評価基準として用いたことが考えられる。実験 I に関しては、 L_{Aeq} の差が大きな試験音の直接比較が無かったため、 L_{Aeq} 以外の観点に関しても十分に考慮して試験音を評価していたのではないかと推察される。

このような試験音の組み合わせにより、実験結果が変わることは我々の意図するところではない。音量感 (L_{Aeq} の違い) 以外の要素が印象に影響を及ぼすのは音量差が少ないときであり、そのような状況において音質の良し悪しを議論することが多いと考えられるため、被験者に大きな L_{Aeq} の差を有する直接比較を避けて実験を行う必要があると考えられる。

3.3 本実験に合わせた実験条件

上述の問題点を改善するために、本実験では以下の 2 つの条件を設定する。

1. 試験音の音量差が 5dB を超える直接比較を提示しない (条件 1)
2. 最大音量差が 7dB 以下となるように実験を複数回に分ける (条件 2)

条件 1 は大きな L_{Aeq} の差を有する直接比較を除くために設定されている。しかし、この音量差の基準に関しては、被験者が判断基準を変える試験音の音量差が一意に定まっているとは考えられないため、音質を考慮して被験者が評価していたと考えられる先行研究で使用された試験音の最

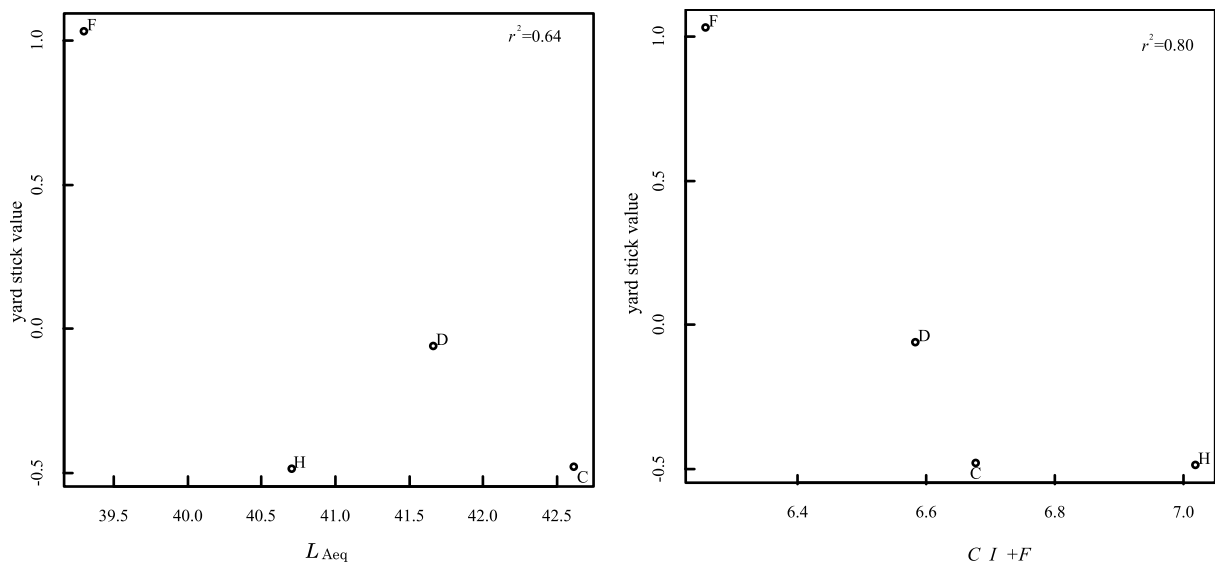


図 3.2: 予備実験 I と従来指標との対応関係

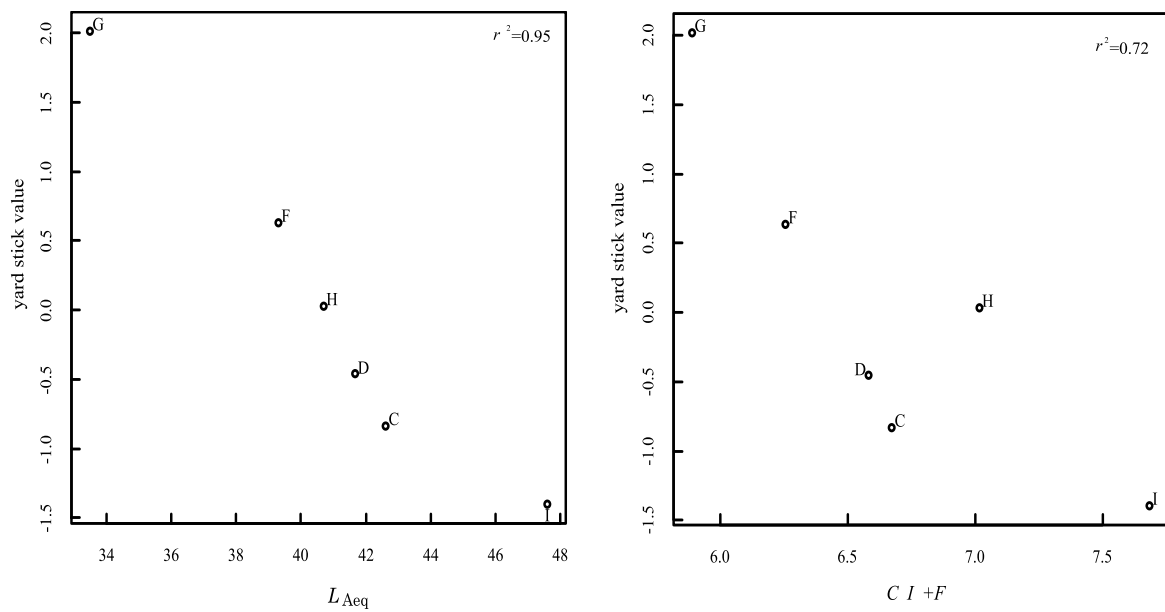


図 3.3: 予備実験 II と従来指標との対応関係

大の音量差である 5dB に設定した。条件 2 については直接比較を全て行くと 240 通りで条件 1 を考慮しても 187 通りと試行回数が膨大であり被験者に大きな負担が掛かる。そこで、試行回数を 30 回までと制限をかけて、なおかつ 1 回の実験で使用する試験音の最大の音量差が 7dB を超えないように試験音を選定して実験を複数回に分割した。これらの条件下で行われた実験の様子が分かるよう図 3.4 に各実験に関する試験音の内訳を示す。図 3.4 中のアルファベットは各試験音名を

示している。アルファベットの下もしくは右に記載されている値は各試験音の L_{Aeq} の値を示している。斜線の箇所は新たに加えた実験条件により実施されなかった直接比較を示しており、本実験で行われた各実験は実験 I～VII で示されている。また、被験者には第2章で説明した印象評価実験システムを用いて一対比較法により「基準音に対して評価音がどれほどプリンタ動作音とし“気になるか”あるいは“気にならないか”」の評価を求めた。なお、被験者は各実験ごとに正常な聴力を有する大学生 20 名である。全ての実験の被験者の大半は同じ被験者であるが、10 名程入れ替わりがあり、合計 30 名ほどの被験者である。

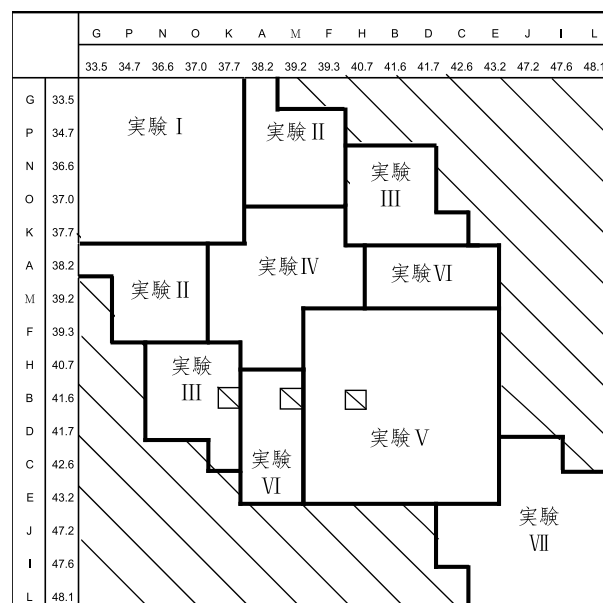


図 3.4: 実験の内訳

3.4 不完全一対比較の解析方法と結果

従来の解析方法では実験に用いた全試験音分の直接比較（240 通り）のデータを必要としたが、上記の条件により行われない直接比較があり、実質的には 187 通りの比較しか行われていない。このような欠損データのある一対比較を不完全一対比較と呼ぶことがあり、その解析方法がいくつか提案されている [10][11]。本研究では先行研究において高濱らが本研究とよく似た条件で行った実験があり、その時に用いられた比較判断の法則、カテゴリー判断の法則、Muller-Urban の重み付け [12] に基づく解析方法 [3]（解析方法の詳細は付録 A）を用いた。

解析結果を図 3.5 に示す。図 3.5 において、先行研究や予備実験では右（正）方向に行くにつれて「気にならない」という評価になるが、以降の章では実験結果と評価指標との対応関係を比較

しやすいよう、正負を反転させ、左側を「気にならない」という評価になるよう試験音の順番を並べ替えた。

図 3.5 の印象尺度値上において、先行研究で用いた 6 つの試験音 (A~F) の並びは試験音 C, E のみ順位が反転し、他の試験音の並びは先行研究と同様であった。試験音 C, E の並びの変化に関してだが、先行研究において試験音 C, E の印象尺度値上の距離において、有意差が認められなかったため被験者の選定や実験を複数回行う中で順位が逆転することはあり得ると判断できるので、先行研究の試験音 A~F までの関係は本実験において再現されたと考える。また、試験音 B, D, F とそれらの試験音の L_{Aeq} のみを 5dB 下げた試験音 N, O, P の印象尺度値上の順位関係を確認すると、試験音 B, D, F の印象尺度値上の順位は $F \Rightarrow B \Rightarrow D$ であり、試験音 N, O, P の順位は $P \Rightarrow N \Rightarrow O$ と並び、順位関係が同じであることが確認できる。

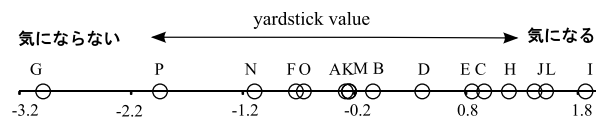


図 3.5: 実験結果 (yardstick value)

3.5 まとめ

本章では、実験に使用する試験音、実験方法、解析方法や実験結果について述べた。本研究では先行研究で用いた試験音数が6機種と少ないことから、新たに10機種の試験音を追加した。

試験音を追加したことで、試験音間の最大の音量差が広がることから、その音量差が実験結果（被験者の回答行動）に及ぼす影響を予備実験により確かめた。その結果、被験者は大きい音量差を持つ試験音を聞くことで、直接比較の音量差に関わらず試験音を L_{Aeq} のみの違いに基いて評価する傾向があることが分かった。また、従来の実験方法のままでは16機種の試験音を用いて1回の実験でその全ての組み合わせについて比較を行うことは現実的でないため、実験方法の改善が必要であることが分かった。

そこで、新たに2つの条件を実験に加えた。1つ目の条件は「音量差が5dBを超える直接比較を実験から除く」であり、2つ目の条件は「最大音量差が7dB以下となるように実験を複数回に分ける」である。

この2つの条件を加え実験を行い、得られた不完全一対比較データを解析することで各試験音の印象尺度値を算出した。その結果、先行研究で用いた6機種の試験音（A～F）の印象尺度値の相対関係は本実験においてもほぼ再現されており、音量（ L_{Aeq} ）を5dBだけ下げた試験音と調整前の試験音の印象尺度値上での並びも類似していることが確認できた。これらのことから、算出された尺度値は十分妥当であると判断した。

第4章 従来指標と印象との対応関係

先行研究において指標 $CI + F$, L_{Aeq} はインクジェット方式の動作音に対しその印象を説明するのに比較的有効であることが分かっている。そこで本章では、前章で得られた試験音の印象尺度値と指標 $CI + F$, L_{Aeq} との対応関係を調査し、先行研究の結果と比較する。

4.1 実験結果と従来指標との関係

先行研究において比較的有効であった指標 L_{Aeq} , $CI + F$ と前章で得られた印象尺度値（図 3.5）との対応関係を図 4.1 に示す。図 4.1 の縦軸は印象尺度値（図 3.5）を示しており、正の方向に行くにつれ「気になる」という評価となる。また、同図の横軸は各指標を示している。

図 4.1 において、 L_{Aeq} は先行研究同様、試験音との相関が高く決定係数は $r^2=0.84$ と高い値を示した。 L_{Aeq} と印象尺度値との順位関係をスピアマンの順位相関を用いて確認すると、先行研究における L_{Aeq} と印象との間にある順位相関は 0.89 であり、本実験における L_{Aeq} の順位相関は 0.94 であったことから、 L_{Aeq} は印象尺度値における大まかな試験音の並びを説明していることが分かる。このことから、先行研究同様、動作音の印象と L_{Aeq} は良い対応関係であることがわかった。しかし、印象尺度値上の試験音の並びを確認すると、印象尺度値上で $-1 \sim 1$ の間にプロットされている試験音の印象尺度値上の並びを L_{Aeq} では上手く説明できないように見える。

一方、 $CI + F$ と印象との対応関係は試験音 P～C までの印象軸上の並びを説明できており決定係数が 0.86 と高い。また、印象尺度値上で $-2 \sim 1$ の間にプロットされている試験音の印象尺度値上の並びを $CI + F$ は良く説明しており、順位相関も 0.97 である。しかし、試験音 G, P 間や E, H, L, J 間の印象尺度値上の並びは説明できず、先行研究の決定係数 ($r^2=0.96$) より低い値となっている。このことから、 $CI + F$ でもまだ説明できない試験音の印象があることが考えられる。最後に、各指標と印象との対応関係を比較すると相関や順位相関において共に $CI + F$ の方が高く、図 4.1 において試験音の並びも良いので、先行研究と同様に $CI + F$ の方が対応関係が良いと判断される。このことから、インクジェットプリンタ動作音に対し客観的な手法により音質評価を

行うときは、 L_{Aeq} だけで評価するのではなく、 L_{Aeq} を補正するように複数の物理的評価指標を組み合わせることで、動作音の印象を良く説明できることが示唆された。

ところで、 $CI + F$ を動作音に対する印象尺度値（すなわち図 4.1 の縦軸の値）の予測値と考えた場合の誤差についても検討を加えておく。ただし、 $CI + F$ は尺度値との対応関係がよいものの互いに無次元の指標であり、尺度値は実験毎に得られる相対値であること等からあくまで目安として記述する。回帰式と標本値の平均二乗誤差の平方根をとりこれを rms 誤差とする。 $CI + F$ による印象尺度値の rms 誤差は 0.37 であった。つまり図 4.1 を直線回帰して得られる印象尺度値の予測値は真値のまわりに標準偏差 0.37 で分布するといえるが、これをパーセントテージで示すことはできない。

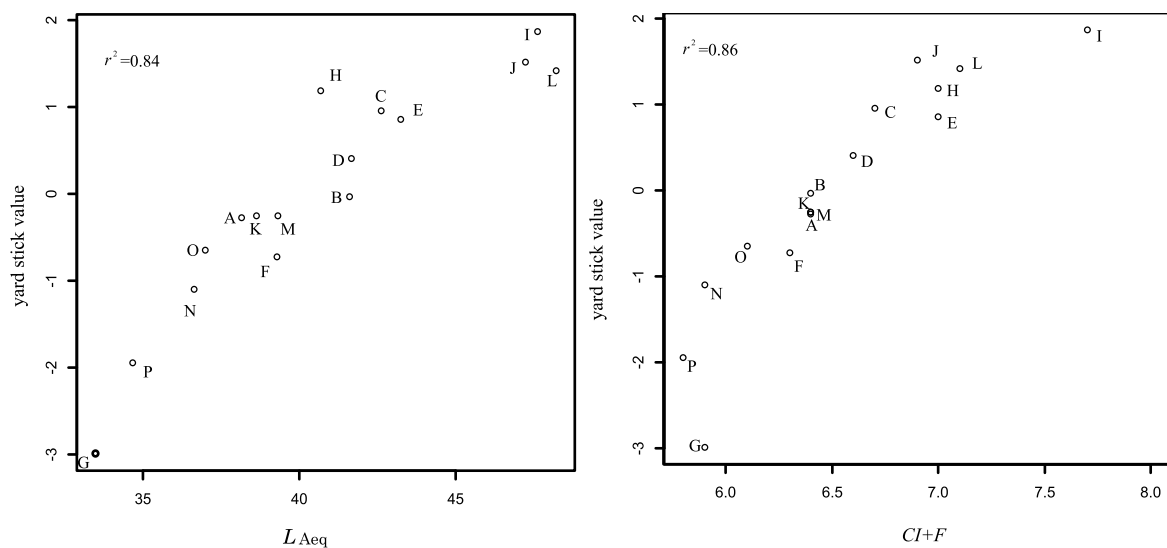


図 4.1: L_{Aeq} 、 $CI + F$ と印象との対応関係

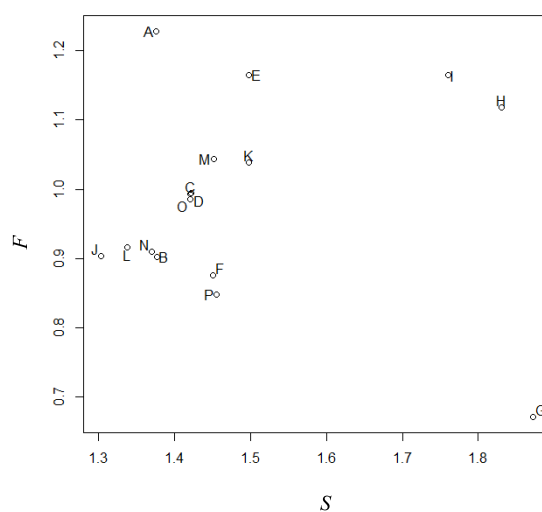
4.2 印象と各指標との関係

16 音の試験音のシャープネス S と変動強度 F の分布を調査することで、各試験音間の関係性を確かめた。シャープネス S と変動強度 F の散布図を図 4.2 に示す。縦軸は変動強度の値を示し、横軸はシャープネスの値を示している。試験音 G, H, I はシャープネスの値（約 1.8acum）が大きく、他の 13 音の試験音とは離れた位置にプロットされている。ここで、この 3 音の試験音を除き、試験音の印象と各指標との対応関係を調査した。16 音全ての試験音の印象と指標との相関、順位相関と 13 音の試験音の印象と指標との相関、順位相関を表 4.1 にまとめる。試験音 G, H, I を除

表 4.1: 指標と印象との相関

| 試験音数と相関 | L_{Aeq} | S | F | $CI + F$ |
|-----------|-----------|-------|------|----------|
| 16 音の決定係数 | 0.84 | 0.10 | 0.37 | 0.86 |
| 13 音の決定係数 | 0.90 | 0.15 | 0.04 | 0.93 |
| 16 音の順位相関 | 0.94 | -0.14 | 0.47 | 0.97 |
| 13 音の順位相関 | 0.96 | -0.32 | 0.26 | 0.96 |

くことで、 $CI + F$ の相関は大幅に上がり、決定係数は 0.93 とかなり高いことがわかる。このことから、シャープネス S の値が 1.3~1.5acum の試験音の印象と $CI + F$ との対応関係が良いことと、 S の値が高い試験音を含んだ場合、 $CI + F$ では完全に試験音間の印象を説明できないことがわかった。また、 L_{Aeq} も $CI + F$ と同様に決定係数が 0.90 と改善していることも確認できた。しかし、変動強度 F とシャープネス S は試験音 G, H, I を除いても、相関係数は以前低いままであるため、 $CI + F$ のような線形和のモデル式でインクジェットプリンタ動作音の印象を説明することは難しいと思われる。

図 4.2: シャープネス S と変動強度 F の散布図

4.3 まとめ

本章では、前章で得られた試験音の印象と先行研究において動作音の印象と比較的対応関係が良かった指標 $CI + F$, L_{Aeq} との対応関係を調査した。その結果、先行研究と同様に L_{Aeq} と試験音の印象との対応関係も良好であり、順位相関は 0.94 と高い値を示した。しかし、印象尺度値上

の $-1 \sim 1$ の範囲の試験音の順位関係を説明することはできなかった。

$CI + F$ と印象との対応関係も良好であり決定係数が 0.86 と高い値を示した。先行研究の結果 ($r^2=0.96$) と比較すると劣るような結果ではあるもの、順位相関は 0.97 と高く、印象尺度値上で $-2 \sim 1$ の範囲の順位関係をよく説明していた。また、 $CI + F$ が試験音の印象を全て説明できなかった1つの理由として、試験音の数を増やしたことで先行研究では使われなかった試験音 G のように変動強度が小さく、シャープネスが大きな試験音が追加され、 $CI + F$ ではその様な試験音の印象を説明することができないことが考えられた。

最後に、 L_{Aeq} の対応関係と $CI + F$ との対応関係を比較したところ、相関や順位相関の値の高さから、先行研究同様、 $CI + F$ と印象との対応関係の方が良いことが確認できた。このことから、インクジェットプリンタ動作音を客観的に音質評価する場合、 L_{Aeq} に S, F のような複数の物理的評価指標を追加して評価すると、動作音に対し人間が感じる不快感を良く説明できることが示唆された。

第5章 新たな指標の探索

前章で指標 $CI + F$ が先行研究の結果と同様にインクジェット方式のプリンタ動作音の印象と良好な関係にあることが分かり、動作音を L_{Aeq} のみよりもシャープネス S 、変動強度 F などの複数の指標と組み合わせて評価する方が適していることが示唆された。そこで本章では、 $CI + F$ に含まれる3つ指標、すなわち等価騒音レベル L_{Aeq} 、シャープネス S 、変動強度 F から算出される新たな指標を重回帰分析により探索する。また、非線形な項として指標間の交絡因子を追加した重回帰分析や階層ニューラルネットワークモデルを用いた新たな指標の導出も試みた。

5.1 線形な回帰モデル

インクジェット方式の動作音の印象を説明するための新たな指標を探索するにあたって、印象との対応関係が良い指標 $CI + F$ を参考にする。 $CI + F$ は

$$CI + F = (1/10)L_{Aeq} + S + F \quad (5.1)$$

で表されるように、各項の係数の比が単純で実務的に取り扱いやすい指標である。本研究では式中の各項の係数を変化させることで、 $CI + F$ より良い指標を探索することを試みる。以下に具体的な評価式の構成と重回帰分析を用いた係数の決定方法について述べる。

まず、回帰式として $CI + F$ の算出に用いられる3つの指標（等価騒音レベル L_{Aeq} 、シャープネス S 、変動強度 F ）と定数項の線形和を考える。これはつまり $CI + F$ と同じ考え方であるが、それぞれの指標に掛かる係数を変更することに相当する。そしてこの回帰式の算出値が実験で得られた印象尺度値になるべく一致するように重回帰分析により指標に掛かる係数や定数を決定する。重回帰分析に先立ち、3つの指標間の相関を調査して表 5.1 にまとめた。指標間に多少相関が認められる（ L_{Aeq} と F ）が、重回帰分析には支障がないと判断した。重回帰分析によって得られた印象尺度値の近似式を以下に示す。この式で得られる指標 Y_0 の値は印象尺度値の近似であり、

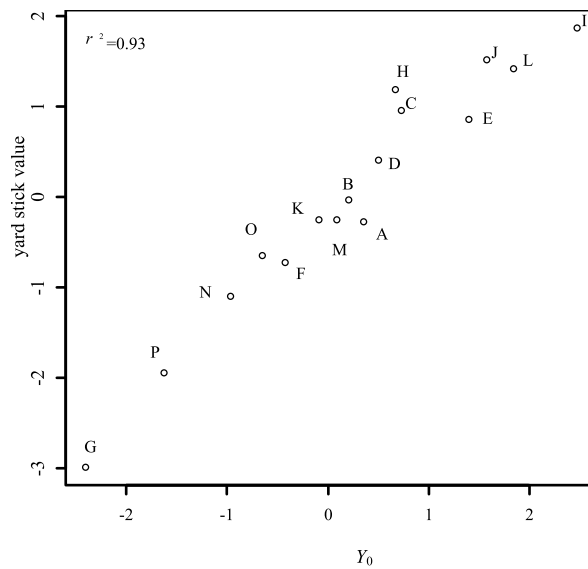
表 5.1: 指標間の相関

| | L_{Aeq} | S | F |
|-----------|-----------|-------|------|
| L_{Aeq} | 1 | -0.19 | 0.36 |
| S | -0.19 | 1 | 0.01 |
| F | 0.36 | 0.01 | 1 |

新たな評価指標とみなすことができる。なお解析には R 言語の `lm` 関数を使用した。

$$Y_0 = 0.2422L_{Aeq} + 0.07883S + 2.998F - 12.68 \quad (5.2)$$

指標 Y_0 と印象尺度値との対応関係を図 5.1 に示す。指標 Y_0 と印象との対応関係はよく。決定係

図 5.1: 印象と評価式 Y_0 と印象との対応関係

数は $CI + F$ の場合 ($r^2 = 0.85$) より高い値 ($r^2 = 0.93$) となった。一方、順位相関は 0.96 で $CI + F$ の場合 (0.97) とほぼ同じであるが、 $CI + F$ では説明できなかった試験音 G, P 間や試験音 J, H, L 間の印象軸上の並びが改善する方向にある。一方、試験音 K, A, M 間の並びは若干悪化しているように見える。また、印象尺度値が大きい (1~2) 試験音 C, E, H, I, J, L の並びは十分に説明できていない。ただし、これらの試験音だけで順位相関を算出すると、 $CI + F$ の場合で 0.54、指標 Y_0 の場合で 0.74 であることから、指標 Y_0 の方が対応が良いことがわかった。以上の結果から全体的に $CI + F$ よりも指標 Y_0 の方が印象との対応関係が良いと判断できる。

5.2 交絡因子を加えた非線形な回帰モデル

前節で得られた線形な回帰式（指標 Y_0 ）は全体的に $CI + F$ よりも印象尺度値との対応関係が良かったものの、尺度値の大きい試験音（C, E, H, I, J, L 等）に対してはまだ改善の余地があるように見受けられた。

そこで、試験的ではあるが次式のように等価騒音レベル L_{Aeq} 、シャープネス S 、変動強度 F を互いに掛け合わせた項を交絡因子として Y_0 の式に加えた非線形な回帰式についても検討する。

$$Y_1 = k_1 L_{Aeq} + k_2 S + k_3 F + k_4 L_{Aeq} \cdot S + k_5 L_{Aeq} \cdot F + k_6 S \cdot F + C \quad (5.3)$$

ただし、式中の $k_1 \sim k_6$ は各パラメータの係数を示し、 C は定数である。この式 (5.3) を基に R 言語の `lm` 関数を用い重回帰分析を行い以下の式を得た。

$$\begin{aligned} Y_1 = & 0.7229 L_{Aeq} - 0.8879 S + 1.723 F \\ & - 0.1549 L_{Aeq} \cdot S - 0.2921 L_{Aeq} \cdot F + 8.414 S \cdot F - 20.75 \end{aligned} \quad (5.4)$$

また、式 (5.3) はパラメータが多いため、AIC（Akaike's Information Criterion）

$$AIC = -2(\text{モデルの最大対数尤度}) + 2(\text{モデルのパラメータ数}) \quad (5.5)$$

を最小化するようにパラメータを選択した。具体的には R 言語の `stats` パッケージの `step` 関数を使用し回帰モデルを選出した。その結果、式 (5.3) から $L_{Aeq} \cdot S$ の項を除いた以下の回帰式が得られた。

$$Y_2 = 0.6547 L_{Aeq} - 3.323 S + 12.41 F - 0.4445 L_{Aeq} \cdot F + 4.940 S \cdot F - 23.01 \quad (5.6)$$

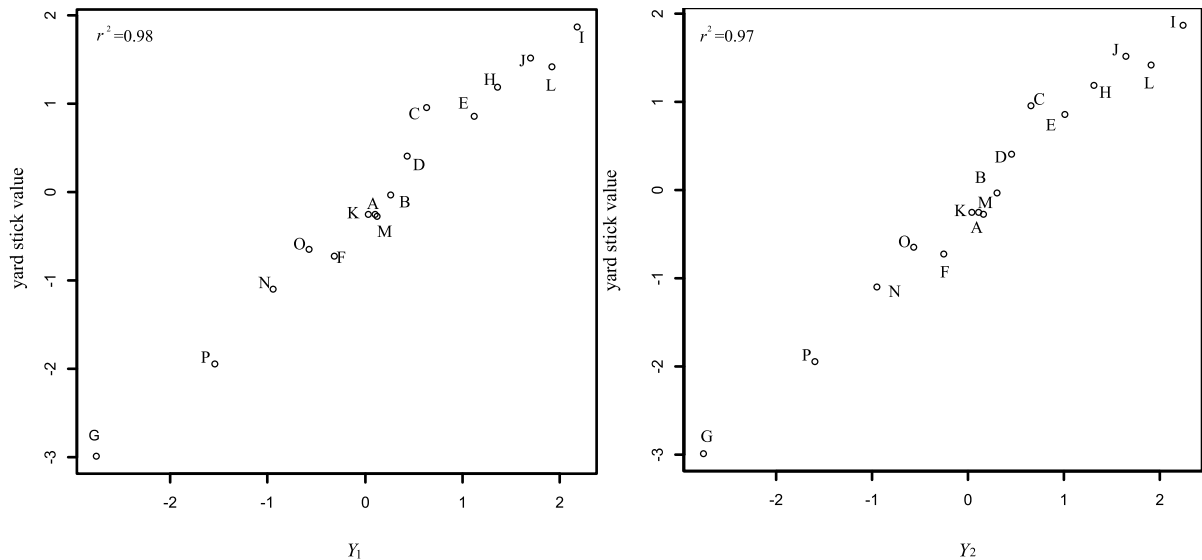
重回帰分析により得られた2つの指標 Y_1 , Y_2 と印象尺度値との対応関係を図 5.2 に示す。 Y_1 と印象との相関は高く ($r^2 = 0.98$)、試験音 O, F 間や C, E 間、J, L 間の印象尺度値上の並びを完全に再現するまでには至らないものの、従来指標 (L_{Aeq} , $CI + F$) や指標 Y_0 よりも試験音の印象尺度値上の並びをよく説明することができている。また、 Y_2 と印象との対応関係も良く、決定係数は 0.97 と Y_1 と同程度であり、図 5.2 を見る限りでは試験音間の印象尺度値上の並びは Y_1 と似たものになっている。

そこで、 Y_1 , Y_2 どちらがより適したモデル式か調査するため、各評価式と印象のスピアマンの順位相関を算出した。表 5.2 に指標 Y_1 , Y_2 と印象との相関と順位相関を示す。表 5.2 より相関は

表 5.2: 指標 Y_1 , Y_2 と印象との相関と順位相関

| 評価式 | 相関 | 順位相関 |
|-------|------|------|
| Y_1 | 0.99 | 0.98 |
| Y_2 | 0.98 | 0.98 |

Y_2 の方が若干低いですが、順位相関は等しいことが分かる。このことから、パラメータの少ない Y_2 の方が取り扱いやすい評価式だと考えられる。

図 5.2: 指標 Y_1, Y_2 と印象との対応関係

5.3 ニューラルネットワークを用いたモデル

前節において非線形な要素を取り入れた指標 Y_1 , Y_2 は線形和からなる指標 $CI + F$ や Y_0 よりも印象に対してよい対応関係を示すことが分かった。そこで、さらに自由度の高い非線形な回帰モデルとして階層型ニューラルネットワークを用いたモデルについて検討を加えた。

以下に解析の方法を説明する。入力要素はこれまでと同じく L_{Aeq} , F , S の3入力とし、実験から得られた16機種の試験音の印象を説明するように16個全てを学習データとしてネットワーク学習させた。また、ネットワークの構造は3層で入力層3素子、隠れ層2素子、出力層1素子（線形出力）とした。学習はユニット間の結合係数の初期値を乱数で変化させ10回試行し、二乗誤差の収束値が最小のものを採用した。なおニューラルネットワークの学習・評価にはR言語の `nnet` パッケージの `nnet` 関数を使用した。

ニューラルネットワークの予測値と実験結果との対応関係を図 5.3 に示す。縦軸は動作音の印象尺度値を示し、横軸はニューラルネットワークから得られた予測値を示している。以降便宜上ニューラルネットワークから得られた予測値を指標 Y_3 と表記する。指標 Y_3 と試験音の印象との相関、順位相関は共に高く決定係数は 0.99 であった。指標 Y_1, Y_2 では説明することができなかった試験音 O, F 間や C, E 間、J, L 間の印象尺度値上の並びを指標 Y_3 は良く説明している。また、試験音 A, K, M の印象軸上の並びはあまり良く説明してないが、それ以外の試験音の印象を指標 Y_3 は良く説明していることから、指標 Y_3 は重回帰分析により探索された指標 $Y_0 \sim Y_2$ や従来指標よりも対応関係が良い。

しかし、実験に用いた試験音のサンプル値を全て使いネットワークを学習させているため、過学習を起こしている可能性も考えられる。この問題は、ニューラルネットワークに限ったものではなく、前節までの指標 $Y_0 \sim Y_3$ においても該当するので、場合によっては過学習を緩和する対策が必要である。

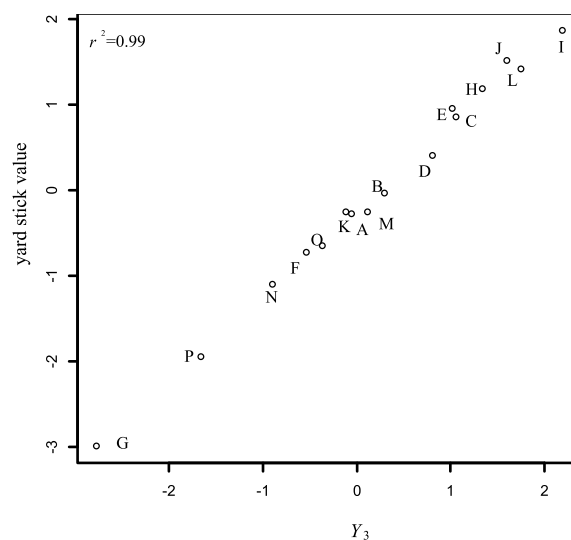


図 5.3: 印象とニューラルネットワークによる予測値と印象との対応関係

5.4 まとめ

本章では重回帰分析とニューラルネットワークを用いて新たな指標の探索を行った。探索した指標を表 5.3 にまとめる。まず、重回帰分析により 3 つの評価式 $Y_0 \sim Y_2$ を得た。指標 Y_0 は $CI + F$ の項をそのまま採用し、係数を変更したものである。印象と指標 Y_0 との対応関係は相関が 0.97 と

表 5.3: 指標の比較

| 指標 | 相関 | 順位相関 | L_{Aeq} | S | F | 評価モデル | 分析方法 |
|-----------|------|------|-----------|-----|-----|-------|-------------|
| L_{Aeq} | 0.92 | 0.94 | ○ | - | - | 線形 | 従来指標 |
| $CI + F$ | 0.93 | 0.97 | ○ | ○ | ○ | | 重回帰分析 |
| Y_0 | 0.97 | 0.96 | ○ | ○ | ○ | | |
| Y_1 | 0.99 | 0.98 | ○ | ○ | ○ | | |
| Y_2 | 0.98 | 0.98 | ○ | ○ | ○ | 非線形 | |
| Y_3 | 0.99 | 0.99 | ○ | ○ | ○ | | ニューラルネットワーク |

○：指標に用いたパラメータ

高く従来指標では説明できなかった試験音の印象尺度値上での並びを説明していた。

また、さらに非線形な項を加えた回帰式モデルについても検討した。評価式 Y_1 は Y_0 に交絡因子 ($L_{Aeq} \cdot S$, $L_{Aeq} \cdot F$, $S \cdot F$) を加えた 6 つのパラメータから成る評価モデルである。評価式 Y_2 は Y_1 に対し AIC を用い最適な変数を選択した評価式であり、 $L_{Aeq} \cdot S$ を除いた 5 つのパラメータから成り立っている。この 2 つの評価指標は従来指標よりも動作音の印象との対応関係が良く、決定係数も 1 に近い値を示した。順位相関はいずれも 0.98 と同じであるため、変数の少ない指標 Y_2 が Y_1 よりも優れた指標であると判断した。

Y_3 は L_{Aeq} , S , F を入力要素とする階層型ニューラルネットワークの出力として得られる印象尺度値の推定値である。 Y_3 は Y_2 よりも良い対応関係を示し、相関も高く動作音の印象尺度値上の並びを良く説明していた。このように指標に非線形な要素を加えることで 16 機種の試験音の印象をよく説明できることが分かった。しかし、過学習している可能性もあり評価モデルとしての有用性を確かめるためには、今後さらに試験音数を増やした実験や統計的な検定などを引き続き行っていくことが課題として挙げられる。

第6章 評価モデルとパラメータの関係

前章において、実験で用いた 16 機種 of 動作音に対して、従来指標よりも印象と対応の良い指標を探索した。その結果、指標 $Y_0 \sim Y_3$ が得られ、その中でも非線形な要素を取り入れた指標 $Y_1 \sim Y_3$ が、特に試験音との対応関係が良かった。そこで本章では、前章で求められた独自指標 $Y_1 \sim Y_3$ における L_{Aeq} , S , F 等の各パラメータの働きを調査する。

6.1 指標 Y_1 , Y_2 におけるパラメータの働き

独自指標 Y_1 , Y_2 で用いた各パラメータ (L_{Aeq} , S , F 等) が Y_1 , Y_2 に与える影響の度合いを調査するために、「各パラメータの係数が 0 である」という帰無仮説をたてて検定を行った。その結果を p 値 (有意確率) として算出し表 5.1 にまとめた。

表 6.1: Y_1 , Y_2 における各項の有意性の推定

| 項 | Y_1 に関する p 値 | Y_2 に関する p 値 |
|-------------------|--------------------------|--------------------------|
| L_{Aeq} | 2.37×10^{-5} ** | 2.57×10^{-7} ** |
| S | 0.25 | 0.031 * |
| F | 0.067 | 0.016 * |
| $L_{Aeq} \cdot S$ | 0.50 | なし |
| $L_{Aeq} \cdot F$ | 0.32 | 0.025 * |
| $S \cdot F$ | 0.16 | 0.071 |

** : 有意確率 1% 以下、* : 有意確率 5% 以下

表 5.1 より、指標 Y_1 , Y_2 は共に L_{Aeq} の p 値が最小であり、指標 Y_1 , Y_2 に対して一番大きな影響を及ぼしている項が L_{Aeq} であることが確認できた。このことから、 L_{Aeq} を他のパラメータ (S や F 等) が補正するように式が成立していると考えられることができる。

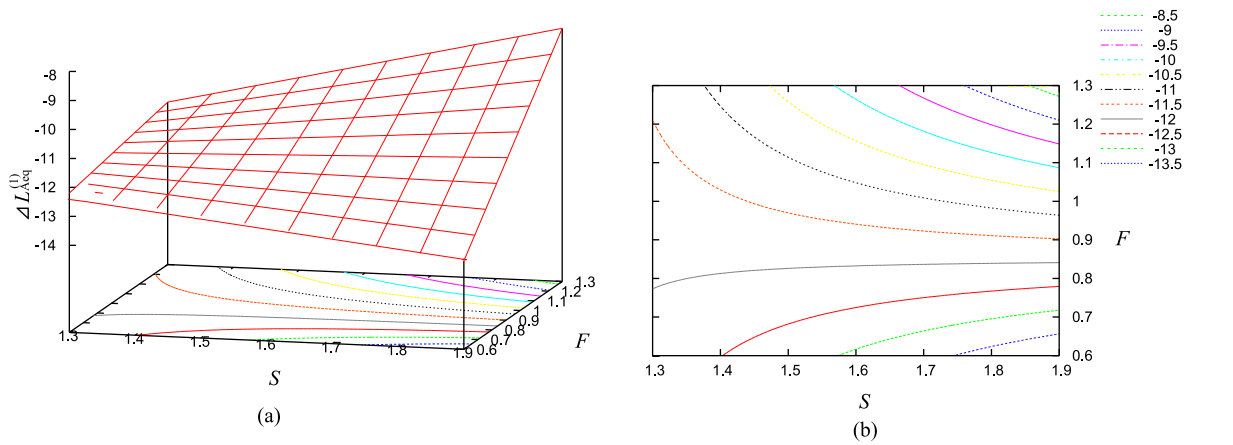
そこで、 L_{Aeq} に対し他のパラメータが与えている影響を確かめるため、 L_{Aeq} の値を試験音の平均値である 40.5dB に固定し、シャープネス S と変動強度 F を実験で使用した試験音の範囲内 ($1.3 \leq S \leq 1.9[\text{acum}]$, $0.6 \leq F \leq 1.3[\text{vacil}]$) で変化させ、 Y_1 , Y_2 の変化を調査した。ただし、パラメータの影響を確認することが目的であるため、 Y_1 と Y_2 をそのまま算出するのではなく、定数項を無視し ($C = 0$)、式全体を L_{Aeq} に対する係数で割った値をそれぞれ次式のように算出

した。

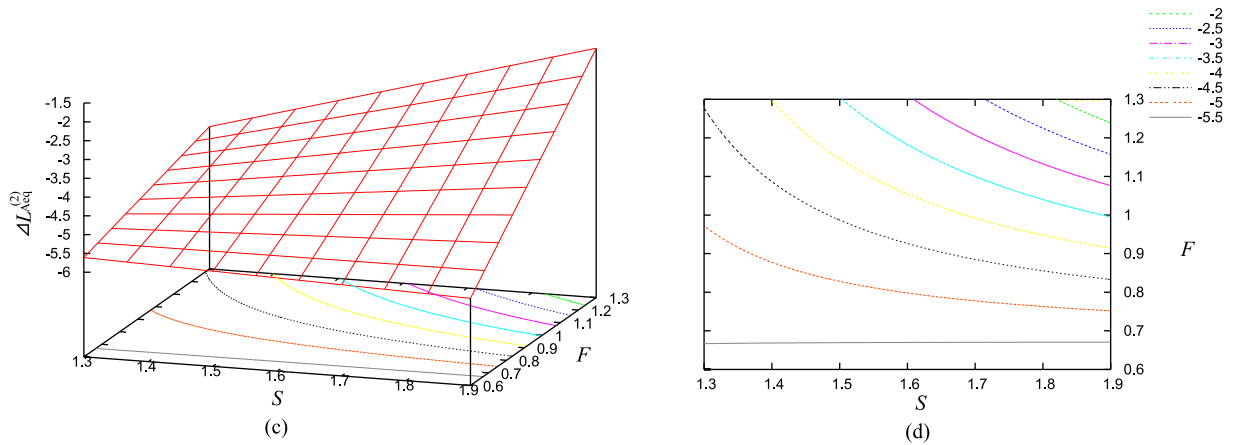
$$\Delta L_{\text{Aeq}}^{(1)} = (-0.8879S + 1.723F - 0.1549L_{\text{Aeq}} \cdot S - 0.2921L_{\text{Aeq}} \cdot F + 8.414S \cdot F)/0.7229 \quad (6.1)$$

$$\Delta L_{\text{Aeq}}^{(2)} = (-3.323S + 12.41F - 0.4445L_{\text{Aeq}} \cdot F + 4.940S \cdot F)/0.2422 \quad (6.2)$$

これらの値は S や F が指標に与える影響度を L_{Aeq} の値 (dB) に換算したものと考えられる。図 6.1 に S と F との関係を示す。



Y_1 の場合



Y_2 の場合

図 6.1: Y_1, Y_2 における S と F の影響

図 6.1(a), (b) より、変動強度 F の値が高くなるにつれシャープネス S が印象に与える影響が大きくなり、 F が 0.85vacil 付近では S の影響が小さくなることがわかる。一方で、 F が 0.85vacil よ

り小さいとき、 S の値が大きくなるほど音が不快ではなくなるという一般常識とは異なる傾向も読み取れる。しかしながら、 $F < 0.85$ の試験音は G のみであり、その傾向の確度は低いものと判断される。次に、図 6.1(c), (d) より、 Y_2 についても変動強度の値が高くなるにつれシャープネスが印象に与える影響が大きくなるという指標 Y_1 と同様の傾向が読み取れる。

ところで図 6.1 より $\Delta L_{Aeq}^{(1)}$ や $\Delta L_{Aeq}^{(2)}$ の最大差が 3.5~4dB であることから、 S や F の制御により、 L_{Aeq} を同程度下げたことと同じ印象の改善効果があると考えられる。つまり、快音化によって得られる効果は多く見積もっても静穏化対策において 3.5~4dB ほどの L_{Aeq} の低減効果に留まると解釈できる。

6.2 指標 Y_3 におけるパラメータの働き

前節で非線形な項を含む独自指標 Y_1, Y_2 におけるパラメータの役割について調べ、 F の値が大きくなるほど S の影響が大きくなることが分かった。本節では、ニューラルネットワークによる予測においてもこのような傾向があるかを確認する。

しかし、ニューラルネットワークの評価モデルは一種のブラックボックスになっており具体的な式を知ることは難しい。そこで、 L_{Aeq} の値を 16 機種の試験音の平均値である 40.5dB に固定し、 S と F を変化させ、指標 Y_3 を算出して図 6.2 に示した。図 6.2 の縦軸は変動強度 F 、横軸はシャープネス S であり、 Y_3 の大小をカラーマップ（赤色に近づくほど不快）で表した。図 6.2 より、 F と S の値が大きくなるほど赤色が濃くなっている。また、 F の値が 0.85~1vacil あたりは S の値に関わらず色の変化が少ないことから、シャープネスが印象に与える影響は大きくないことがわかる。このことから、指標 Y_1, Y_2 で見られた傾向が Y_3 でも確認できた。このように導出過程が異なる指標間で同じような傾向が認められたことは、今後新たな指標を探索する際にも考慮すべき事項であろう。

一方で 16 音の試験音の F と S の分布には偏りが認められるため、 F や S の影響についてより確度の高い議論を行うためには、この偏りを解消するように試験音を拡充していく必要がある。

6.3 S と F が印象に及ぼすメカニズム

前節までで見出された傾向（変動強度 F が大きくなるほどシャープネス S の影響が大きくなる）がどのようなメカニズムに基づくのかについて試験音のスペクトログラムを用い考察を試みる。考

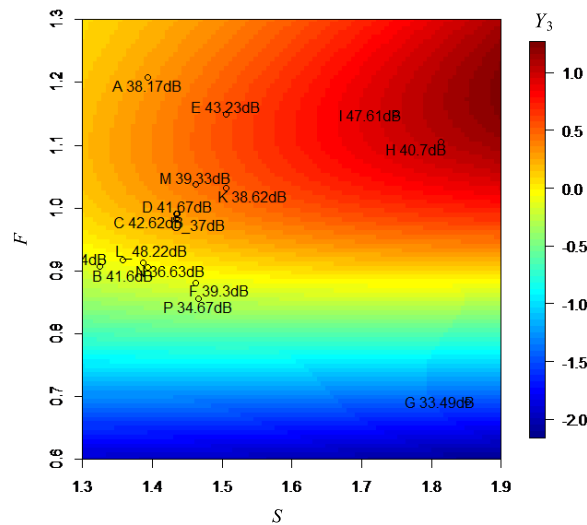


図 6.2: 印象とニューラルネットワークによる予測値との対応関係

察に用いる試験音は D と F である。これらの試験音は以下のように L_{Aeq} と S の値がほぼ等しく、 F の値が異なるものである。

1. 試験音 D : $L_{Aeq}=41.7[\text{dB}]$, $S=1.42[\text{acum}]$, $F=0.99[\text{vacil}]$
2. 試験音 F : $L_{Aeq}=39.3[\text{dB}]$, $S=1.45[\text{acum}]$, $F=0.88[\text{vacil}]$

それぞれの試験音のスペクトログラムを図 6.3 に示す。これらの図より、変動強度 F の高い試験音 D ではプリンタ動作音に起因する（0～6kHz 帯域に現れる）赤色の縦縞（ヘッドの駆動音）が試験音 F よりもはっきりと認められる。このことが試験音 D の変動強度 F が高くなる一因だと考えられる。変動強度 F とシャープネス S が高い場合には高音域のエネルギーが増すため、この縦縞が高い周波数まで伸びることになる。これが印象の悪化に繋がっている可能性が考えられる。

6.4 まとめ

本章では、前章で探索した指標 $Y_1 \sim Y_3$ においてパラメータの働きを調査した。その結果、重回帰分析を用いて算出した非線形な事項を含む指標 Y_1 , Y_2 においては変動強度 F の大小によって、シャープネス S の影響度が変わり、変動強度 F の値が大きい程シャープネス S の影響が大きくなる回帰式が得られていることが分かった。また、ニューラルネットワークにより作成した指標 Y_3

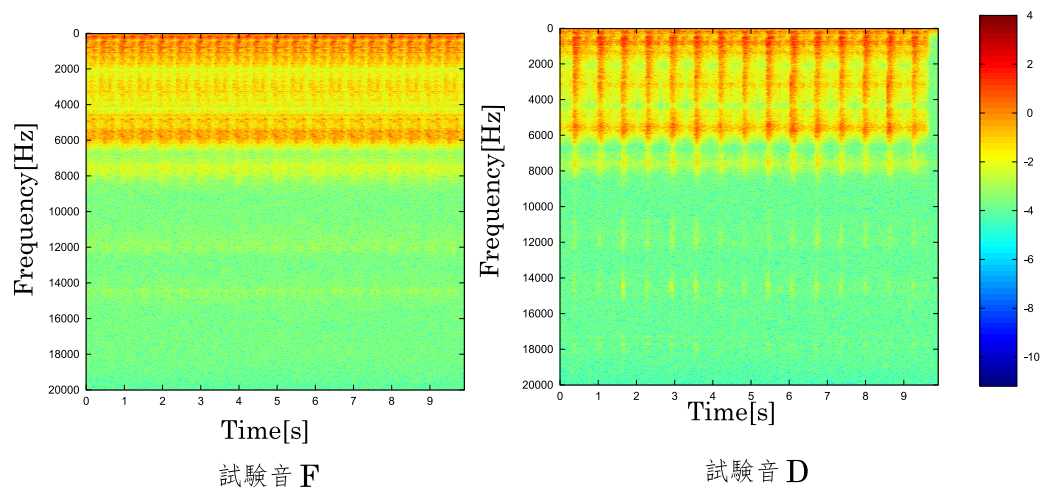


図 6.3: 試験音 D, F のスペクトログラム

においても同様な傾向が確認できた。このことから、この傾向は新たな指標探索時に考慮すべき要素であることが分かった。

また、試験音 D, F のスペクトログラムの比較から、高い周波数帯域にまで及ぶヘッドの駆動音を聞くことで不快感が増す可能性が示唆された。

第7章 結び

本研究ではインクジェット方式のプリンタ動作音について以下の3点を研究の目的として設定した。

1. 試験音数を増やす。
2. 得られた尺度値と L_{Aeq} や $CI + F$ などの従来指標との対応関係を確認する。
3. 新たな指標を探索し、指標の意味合いについて調査する。

そこで、本研究では、一般に市販されているインクジェット方式のプリンタ 16 機種 of 動作音に対して印象評価実験を行い動作音の印象を得て、従来指標と印象との対応関係を調査し、新たな指標を探索した。なお、16 機種のうち 6 機種は先行研究で用いた試験音である。

第2章では、本研究のきっかけであり、比較対象となるインクジェット方式のプリンタ動作音を扱った先行研究について実験方法や結果について概説した。先行研究において、従来指標 L_{Aeq} と $CI + F$ は実験結果から得られた印象との対応関係が比較的良好であり、特に $CI + F$ が印象尺度値上に並ぶ動作音の印象をよく説明していたことがわかっている。

第3章では、本実験で用いた 16 機種の試験音や試験音数を増やしたことで生じた問題に対しての対策を説明して実験結果を得た。具体的には、試験音の最大の音量差が先行研究と比べ大幅に広がったため、その音量差が実験に及ぼす影響を2つの予備実験を行うことにより確かめた。その結果、被験者は大きな音量差を持つ2つの試験音を直接比較することで、被験者の意識が音量感に誘導され L_{Aeq} のみで全ての試験音を評価する傾向にあることが分かった。このような結果は我々の意図したものではない。また、本実験において試験音を増やしたことで全ての試験音の比較を1回の実験で被験者に行わせることも困難である。そこで、従来の実験方法に以下の新たな条件を2つ加えた実験を行った。

1. 試験音の音量差が 5dB を超える直接比較を提示しない（条件 1）

2. 最大音量差が7dB以下となるように実験を複数回に分ける（条件2）

条件1を設定することで欠損したデータを解析する必要が生じたため、高濱ら（2009）が用いた解析方法を使い実験結果を得た。先行研究の結果と比較すると先行研究で使用された試験音の印象尺度値上での並びは本実験においても再現されていることが分かった。

第4章では、従来指標 L_{Aeq} , $CI + F$ との対応関係を調査し、第3章で得られた実験結果と比較した。 L_{Aeq} と実験結果との対応関係は全ての試験音の印象を説明することができなかったが相関が0.92と高く、先行研究で確認した相関と近い値を示していた。また、順位相関が0.94と高かったことから、先行研究と同様に L_{Aeq} はインクジェットプリンタ動作音に対し比較的有效な指標だと考えられた。 $CI + F$ に関しては実験結果との相関は0.93と先行研究ほどの相関は得られず、説明することができない印象尺度値上の試験音の並びはあるものの、多くの試験音の印象尺度値上での並びを説明しており、順位相関が0.97と高く、 L_{Aeq} よりも $CI + F$ と印象との対応関係が良好であることが確認できた。このことから、インクジェットプリンタの動作音を評価する場合、 L_{Aeq} のみで評価を行うよりも複数の指標を用いて評価を行う方が良いことが示唆された。また、シャープネスの値が1.3~1.5acumの試験音に限定すれば $CI + F$ と印象との対応関係が良好であった。

第5章では、従来指標 $CI + F$ よりインクジェット方式のプリンタ動作音の印象との関係が良好な指標を探索するため、 $CI + F$ の算出に用いられる3つの物理的評価指標（等価騒音レベル L_{Aeq} 、シャープネス S 、変動強度 F ）を用いた線形和の指標を重回帰分析により求めた結果、指標 Y_0 を得た。指標 Y_0 と印象との相関は高く（ $r^2 = 0.93$ ）、 $CI + F$ よりも試験音の印象との対応関係が良好であった。

しかし、一部の印象軸上の試験音の並びに関しては説明できなかったため、非線形な要素として交絡因子を加えた指標 Y_1 を得た。指標 Y_1 は指標 Y_0 と比べると式中の項が2倍近くあることからAICに基づき式中の項（ $L_{Aeq} \cdot S$ ）を削減した指標 Y_2 も得た。指標 Y_1 , Y_2 は共に印象との相関が高く（ Y_1 の相関:0.99、 Y_2 の相関:0.98）、指標 Y_0 よりも印象との対応関係が良好であった。また、指標 Y_1 , Y_2 は共に相関、順位相関（0.98）が高いことから、式中の項が少ない Y_2 の方が優れた指標だと判断した。

最後に、階層型ニューラルネットワークにより指標 Y_3 を得た。入力層3素子、隠れ層2素子、出力層1素子という比較的単純な構造でありながら、相関、順位相関が共に1に近い値を示した。このことより、非線形な要素を加えることでインクジェットプリンタ動作音の印象と指標との関係

は良くなることが分かったが、過学習している可能性があり、実験で用いた試験音との対応関係しか論ずることができないため、交差検定などの過学習を避ける対策やさらに試験音を増やした実験を行うことが今後の課題である。

第6章では、第5章で得られた指標の中で特に対応関係の良かった指標 $Y_1 \sim Y_3$ において、各パラメータの役割について調査した。その結果、指標 Y_1, Y_2 では、印象を主に L_{Aeq} が説明しており、 S, F ならびに交絡因子は L_{Aeq} を補正するような役割があり、 S と F の関係を調査したところ F の値によって S が印象に及ぼす影響が変化し、変動強度 F の値が大きくなるにつれシャープネス S の影響も大きくなる傾向が認められた。また、ニューラルネットワークにより得られた指標 Y_3 においても同様な傾向が確認された。このように、導出過程が異なる指標間で同じような傾向が確認されたことから、今後新たな指標を探索する上で考慮すべき傾向であることがわかった。

最後に試験音のスペクトログラムを調査したところ、被験者は高い周波数帯域に強い変動感を持つ動作音を聞くことで不快に感じる事が予測された。

今後の課題として

- 試験音の機種を追加した実験の実施と、従来指標や本研究で探索した指標 $Y_1 \sim Y_3$ の有効性の検討
- 重回帰分析やニューラルネットワークによる解析における、交差検定などの過学習を解消するための対策
- シャープネス S が $1.5 \sim 1.8 \text{ acum}$ の値を持つ試験音の追加

などが挙げられる。

謝辞

本研究の遂行及び本論文作成に際し、終始多大なる御指導並びに御助言を賜った竹尾隆教授、野呂雄一准教授、修士論文の審査をしてくださった西野隆典准教授、ならびに無響室の使用に当たりご協力いただいた寺島貴根准教授に心より感謝の意を表します。また、本研究のために御協力下さった山本好弘技官並びに院生、学部生諸氏に深く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 山田,“歯科タービン音の印象に關与する音質評価パラメータに關する研究”, 日本音響学会 (春),3-7-8,2009.
- [2] 今泉,“MFP 動作音の音源分離と合成音を用いた音質評価” 三重大学修士論文,2008.
- [3] 高濱,“MFP 動作音の構成要素が音質評価に与える影響” 三重大学修士論文,2009.
- [4] 津田,“MFP 動作音の印象と音質評価パラメータの關係” 三重大学修士論文,2010.
- [5] 須賀,“小型プリンタ動作音の印象評価に關する研究” 三重大学修士論文,2014.
- [6] 村田,“騒音下における小型プリンタ動作音の音質評価に關する研究” 三重大学修士論文,2015.
- [7] <http://psysound.wikidot.com/>
- [8] 岩宮, 良く分かる最新音響の基礎と仕組み, 株式会社 秀和システム,(2007).
- [9] 桑野,“音質デザインの方向性”, 日本音響学会誌 64 卷 9 号,pp.551-555,2008.
- [10] 山本,“一対比較法における不完備行列の計数処理”, 大阪市立大学家政学部紀要・第 15 卷,1967,pp19-24.
- [11] 長沢,“シェッフェの一対比較法の改良 (4) — 不完全一対比較データの解析—”, 人間工学, 第 29 卷特別号,1993,pp360-361.
- [12] 田中, 心理学的測定法, 東京大学出版,(1977).
- [13] 久野, 野呂,一音を診る—騒音の計測と評価 dB と L_{Aeq} , 技報堂出版,(2006).

付 録 A 不完全一対比較法について

一対比較法は、各刺激を一對ずつ比較し、順位付けを行う手法である。あらかじめ設定された尺度について、どちらの刺激がどの程度合致しているかを知るために使用する。

実験では、設定した基準について比較する数種の刺激を用意し、それを2つずつ取り上げ、先の刺激に対して後の刺激がどれだけ設定した基準として望ましいかを回答させる。そこから得られたデータを集計し、分析した結果、尺度に対する各刺激の順位が算出される。

例えば、文字の間隔のみが異なるいくつかの文章を用意し、「最も読みやすい文章はどれか」という尺度のもとで、実験を実施する。そうすることにより、被験者(一般の読者)は、どの程度の文字間隔があれば読みやすいと感じるかということを知ることができる。

一対比較法には Scheffe の一対比較法や、Bradley の一対比較法、Thurstone の一対比較法など多くの種類がある。本論文では Scheffe の一対比較法を用いており、欠損のあるデータからの解析を行うために比較判断の法則、カテゴリー判断の法則、Muller-Urban の重み付け [12] に基づき解析した。

一対比較法を用いた実験に必要なもの

刺激 視覚刺激・聴覚刺激・触覚刺激・嗅覚刺激・味覚刺激など

被験者数 20 人程度 (Scheffe の一対比較法の場合)

推奨ソフトウェア Excel

A.1 Scheffe の一対比較法における欠損のあるデータの解析

本実験において得られるデータは欠損のあるデータである。本研究ではそれらのデータについて比較判断の法則、カテゴリー判断の法則、Muller-Urban の重み付けを組み合わせることによって解析を行っている。以下に解析の手順を示す。

評点データ数の集計

各比較の評点（ $-3 \sim +3$ ）ごとにデータ数 $n[k][i, j]$ を集計する。 k は評点、 i は基準音（ $1 \sim 16$ ）、 j は評価音（ $1 \sim 16$ ）である。図 A.1、A.2 に本論文の実験で得られた各評点のデータ数を例示する。

累積確率を計算する

比較ごとのデータ数は $n[i, j]$

$$n[i, j] = \sum_{k=-3}^3 n[k][i, j] \quad (\text{A.1})$$

であり、評点データを $n[i, j]$ で割り、累積確率 $p[k][i, j]$ を計算する。

$$p[k][i, j] = \sum_{l=-3}^k \frac{n[l][i, j]}{n[i, j]} \quad (\text{A.2})$$

図 A.3 に本論文の実験で得られた、累積確率 $p[-3][i, j]$ の表を例示する。

正規分布得点を計算する

累積確率 $p[k][i, j]$ から正規分布得点 $z[k][i, j]$ ($k = -3 \sim +2$)

$$z[k][i, j] = \text{norminv}(p[k][i, j]) \quad (\text{A.3})$$

として標準正規分布も累積分布関数の逆関数を計算する。Excel で $z[k][i, j]$ を算出する場合、NORMSINV 関数を用いる。図 A.4 に本論文の実験で得られた、評点 $[-3]$ における正規分布得点 $z[-3][i, j]$ の表を例示する。

z 値平均のための Muller-Urban の荷重の計算

z 値平均のための Muller-Urban の荷重

$$w[k][i, j] = \frac{y^2[k][i, j] \cdot n[i, j]}{p[k][i, j] \cdot (1 - p[k][i, j])} \quad (k = -3 \sim +2) \quad (\text{A.4})$$

ただし

$$y[k][i, j] = \frac{\exp\left(\frac{-z^2[k][i, j]}{2}\right)}{\sqrt{2\pi}} \quad (\text{A.5})$$

を計算する。（図 A.5）

カテゴリー幅の計算

カテゴリー幅を

$$d[k][i, j] = z[k][i, j] - z[k-1][i, j] \quad (k = -2 \sim +2) \quad (\text{A.6})$$

により計算する。例として $d[-2][i, j]$ を図 A.6 に示す。

カテゴリー幅平均のための重みの計算

カテゴリー幅平均のための重みを

$$w'[k][i, j] = \left(\frac{1}{w[k][i, j]} + \frac{1}{w[k-1][i, j]} \right)^{-1} \quad (k = -2 \sim +2) \quad (\text{A.7})$$

により計算する。例として $w'[-2][i, j]$ を図 A.8 に示す。

重み付きカテゴリー幅の計算

$d[k][i, j]$ に $w'[k][i, j]$ を掛け重み付きカテゴリー幅 $d'[k][i, j]$

$$d'[k][i, j] = d[k][i, j] \cdot w'[k][i, j] \quad (\text{A.8})$$

を得る (図 A.8)。

カテゴリー境界の計算

以下の様にカテゴリー境界を決定する (表 A.1)。

$$d''[k] = \sum_{i=1}^{16} \sum_{j=1}^{16} \frac{d'[k][i, j]}{N[k]} \quad (k = -2 \sim +2) \quad (\text{A.9})$$

$$N[k] = \sum_{i=1}^{16} \sum_{j=1}^{16} w'[k][i, j] \quad (k = -2 \sim +2) \quad (\text{A.10})$$

$k = 0$ のとき

$$t[0] = \frac{d'[0] \cdot d'[+1]}{d'[-1] + d'[+1]} \quad (\text{A.11})$$

$0 < k \leq 2$ のとき

$$t[k] = t[k-1] + d'[k] \quad (\text{A.12})$$

$-3 \leq k < 0$ のとき

$$t[k] = t[k+1] - d'[k+1] \quad (\text{A.13})$$

表 A.1: カテゴリー境界

| k | -3 | -2 | -1 | 0 | +1 | +2 | +3 |
|----------------------|-------|-------|------|------|------|------|----|
| $\Sigma d'[k][i, j]$ | | 308 | 415 | 205 | 370 | 278 | |
| $N[k]$ | | 278 | 423 | 486 | 370 | 259 | |
| $d'[k]$ | | 1.11 | 0.98 | 0.42 | 0.99 | 1.07 | |
| $t[k]$ | -2.30 | -1.19 | 0.21 | 0.21 | 1.21 | 2.29 | |

尺度値（カテゴリー判断の法則）の計算

尺度値 $R[k][i, j]$

$$R[k][i, j] = t[k] - z[k][i, j] \quad (\text{A.14})$$

を計算する (図 A.9)。ここで得られる尺度値とは、刺激 i と刺激 j を比較した際の差に対する尺度値である。

重み付き尺度値（カテゴリー判断の法則）の計算

$w[k][i, j]$ を $R[k][i, j]$ に掛けた後、以下のように平均尺度値を計算する (図 A.10)。これがカテゴリー判断の法則から得られる尺度値と対応した値である。

$$R[i, j] = \frac{\sum_{k=-3}^2 (w[k][i, j] \cdot R[k][i, j])}{\sum_{k=-3}^2 w[k][i, j]} \quad (\text{A.15})$$

換算正規分布得点の計算

以下の計算により換算正規分布得点 $z'[i, j]$ を得る (図 A.11)。

$$z'[i, j] = \frac{R[i, j] - R[j, i]}{2} \quad (\text{A.16})$$

換算確率の計算

換算正規分布得点 $z'[i, j]$ より換算確率 $p'[i, j]$

$$p'[i, j] = \text{normcdf}(z'[i, j]) \quad (\text{A.17})$$

を計算する (図 A.12)。Excel で $p'[i, j]$ を算出する場合は NORMSDIST 関数を用いる。

荷重の計算

以下の式により荷重を算出する（図 A.13）。

$$w''[i, j] = \frac{N'[i, j] \cdot y'^2[i, j]}{p'[i, j] \cdot (1 - p'[i, j])} \quad (\text{A.18})$$

$$\text{ただし } N'[i, j] = n[i, j] + n[j, i] \quad (\text{A.19})$$

$$y'[i, j] = \frac{\exp(\frac{-z'^2[i, j]}{2})}{\sqrt{2\pi}} \quad (\text{A.20})$$

また、荷重付き得点ベクトルは

$$Z[j] = \sum_{i=1}^{16} (w''[i, j] \cdot z'[i, j]) \quad (\text{A.21})$$

で計算される。

荷重行列の計算

荷重 w'' の符号を逆にすることで荷重行列 $W[i, j]$ が得られる。

$$W[i, j] = -w''[i, j] \quad (i \neq j) \quad (\text{A.22})$$

ただし対角成分については

$$W[i, i] = \sum_j^{16} w''[i, j] \quad (i = j) \quad (\text{A.23})$$

とする（図 A.14）。

尺度値の計算

荷重行列 $W[i, j]$ の最初の列及び行の要素を除いた行列 W_{11} を作成し、逆行列 W_{11}^{-1} を求める（図 A.15）。さらに $Z[j]$ の最初の列を除いた Z_1 を用いて

$$a_i = W_{11}^{-1} \cdot Z_1^T \quad (\text{A.24})$$

が尺度値となる。ここで、一つ目の刺激（表中 A）は原点となるので尺度値は 0 となる（図 A.16）。

そのため、本論文中的印象尺度値 a'_i

$$a'_i = a_i - \bar{a_i} \quad (\text{A.25})$$

は a_i から a_i の平均値 $\bar{a_i}$ を引いた値である。

| 評点[-3]のデータ数 | | | | | n[-3][i,j] | | | | | | | | | | | | |
|-------------|----|---|---|---|------------|---|---|----|---|---|---|---|---|---|----|---|--|
| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | |
| A | | 0 | 0 | 1 | 4 | 0 | 0 | 5 | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| B | 0 | | 2 | 2 | 3 | 0 | 0 | | | 7 | | 4 | | 0 | 0 | | |
| C | 0 | 0 | | 0 | 1 | 0 | | 1 | 2 | 2 | 0 | 0 | 0 | | 0 | | |
| D | 0 | 0 | 2 | | 1 | 0 | | 0 | 6 | 3 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | | |
| E | 0 | 0 | 2 | 0 | | 0 | | 3 | 2 | 1 | 0 | 0 | | | | | |
| F | 0 | 0 | 6 | 1 | 3 | | 0 | 2 | | | 0 | | 0 | 0 | 1 | 1 | |
| G | 15 | 9 | | | | 6 | | | | | 4 | | 5 | 6 | 10 | 2 | |
| H | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | | | | 3 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | | |
| I | | | 0 | 0 | 0 | | | | | 0 | | 0 | | | | | |
| J | | 0 | 0 | 0 | 0 | | | 1 | 1 | | | 0 | | | | | |
| K | 0 | 0 | 3 | 0 | 2 | 0 | 0 | 13 | | | | | 0 | 0 | 1 | 0 | |
| L | | 0 | 0 | 0 | 0 | | | 6 | 2 | 0 | | | | | | | |
| M | 0 | 0 | 0 | 2 | 2 | 0 | 0 | 10 | | | 0 | | | 0 | 0 | 0 | |
| N | 0 | 1 | | 4 | | 3 | 0 | 8 | | | 3 | | 4 | | 0 | 0 | |
| O | 0 | 1 | 7 | 2 | | 1 | 0 | 6 | | | 0 | | 2 | 0 | | 0 | |
| P | 2 | | | | | 1 | 0 | | | | 6 | | 8 | 1 | 2 | | |

| 評点[-2]のデータ数 | | | | | n[-2][i,j] | | | | | | | | | | | | |
|-------------|----|----|----|---|------------|----|---|----|----|---|----|----|----|---|---|---|--|
| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | |
| A | | 4 | 13 | 5 | 10 | 0 | 0 | 10 | | | 0 | | 0 | 0 | 1 | 0 | |
| B | 1 | | 10 | 4 | 6 | 0 | 0 | | | 8 | | 8 | | 0 | 0 | | |
| C | 0 | 0 | | 2 | 4 | 0 | | 0 | 10 | 5 | 0 | 5 | 0 | | 0 | | |
| D | 0 | 0 | 7 | | 9 | 0 | | 5 | 10 | 7 | 0 | 10 | 1 | 1 | 0 | | |
| E | 0 | 0 | 3 | 0 | | 0 | | 8 | 7 | 6 | 0 | 8 | 0 | | | | |
| F | 1 | 5 | 8 | 6 | 12 | | 0 | 9 | | | 5 | | 3 | 0 | 2 | 0 | |
| G | 5 | 10 | | | | 11 | | | | | 13 | | 13 | 9 | 9 | 7 | |
| H | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | | | | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | |
| I | | | 2 | 1 | 0 | | | | | 4 | | 2 | | | | | |
| J | | 0 | 4 | 0 | 1 | | | 0 | 5 | | | 2 | | | | | |
| K | 7 | 6 | 11 | 8 | 5 | 1 | 0 | 7 | | | | | 0 | 1 | 0 | 0 | |
| L | | 0 | 0 | 0 | 0 | | | 3 | 5 | 2 | | | | | | | |
| M | 5 | 0 | 7 | 4 | 6 | 0 | 0 | 10 | | | 1 | | | 0 | 3 | 0 | |
| N | 5 | 10 | | 8 | | 5 | 1 | 11 | | | 7 | | 9 | | 4 | 0 | |
| O | 0 | 7 | 4 | 6 | | 5 | 0 | 10 | | | 2 | | 6 | 2 | | 1 | |
| P | 11 | | | | | 8 | 0 | | | | 5 | | 8 | 7 | 7 | | |

| 評点[-1]のデータ数 | | | | | n[-1][i,j] | | | | | | | | | | | | |
|-------------|----|----|----|----|------------|---|---|----|---|---|----|---|---|---|---|---|--|
| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | |
| A | | 8 | 4 | 12 | 5 | 6 | 0 | 3 | | | 3 | | 1 | 4 | 7 | 0 | |
| B | 4 | | 6 | 4 | 10 | 0 | 0 | | | 4 | | 5 | | 0 | 3 | | |
| C | 1 | 0 | | 0 | 4 | 0 | | 10 | 6 | 7 | 2 | 8 | 0 | | 1 | | |
| D | 1 | 4 | 7 | | 8 | 0 | | 7 | 4 | 8 | 2 | 6 | 5 | 0 | 1 | | |
| E | 0 | 0 | 5 | 0 | | 0 | | 6 | 9 | 9 | 0 | 9 | 1 | | | | |
| F | 14 | 13 | 2 | 9 | 3 | | 0 | 6 | | | 9 | | 9 | 2 | 6 | 0 | |
| G | 0 | 1 | | | | 2 | | | | | 3 | | 2 | 4 | 0 | 8 | |
| H | 1 | 0 | 6 | 5 | 4 | 1 | | | | 8 | 1 | 5 | 0 | 0 | 0 | | |
| I | | | 1 | 0 | 4 | | | | | 3 | | 5 | | | | | |
| J | | 0 | 5 | 0 | 3 | | | 6 | 9 | | | 5 | | | | | |
| K | 9 | 3 | 3 | 11 | 10 | 3 | 0 | 0 | | | | | 7 | 1 | 0 | 0 | |
| L | | 0 | 1 | 2 | 4 | | | 3 | 6 | 4 | | | | | | | |
| M | 13 | 9 | 12 | 8 | 7 | 1 | 0 | 0 | | | 9 | | | 1 | 3 | 0 | |
| N | 8 | 8 | | 6 | | 8 | 0 | 1 | | | 6 | | 5 | | 6 | 0 | |
| O | 4 | 8 | 7 | 11 | | 4 | 0 | 4 | | | 14 | | 6 | 6 | | 1 | |
| P | 5 | | | | | 9 | 1 | | | | 8 | | 3 | 9 | 8 | | |

| 評点[0]のデータ数 | | | | | n[0][i,j] | | | | | | | | | | | | |
|------------|---|---|---|---|-----------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|--|
| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | |
| A | | 1 | 1 | 0 | 0 | 2 | 0 | 1 | | | 3 | | 0 | 7 | 7 | 1 | |
| B | 3 | | 1 | 5 | 0 | 1 | 0 | | | 0 | | 2 | | 0 | 4 | | |
| C | 3 | 1 | | 2 | 4 | 1 | | 1 | 1 | 2 | 5 | 0 | 3 | | 3 | | |
| D | 2 | 5 | 0 | | 1 | 1 | | 2 | 0 | 1 | 4 | 0 | 3 | 1 | 1 | | |
| E | 1 | 2 | 2 | 5 | | 0 | | 3 | 0 | 1 | 3 | 2 | 1 | | | | |
| F | 2 | 1 | 2 | 3 | 1 | | 0 | 1 | | | 1 | | 4 | 2 | 4 | 0 | |
| G | 0 | 0 | | | 1 | | | | | | 0 | | 0 | 1 | 0 | 2 | |
| H | 1 | 0 | 1 | 4 | 3 | 0 | | | | 2 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | | |
| I | | | 2 | 2 | 1 | | | | | 4 | | 4 | | | | | |
| J | | 0 | 0 | 0 | 2 | | | 4 | 2 | | | 6 | | | | | |
| K | 3 | 4 | 1 | 1 | 3 | 1 | 0 | 0 | | | | | 5 | 4 | 5 | 1 | |
| L | | 1 | 2 | 2 | 3 | | | 3 | 2 | 7 | | | | | | | |
| M | 2 | 7 | 1 | 2 | 4 | 6 | 0 | 0 | | | 3 | | | 2 | 2 | 0 | |
| N | 2 | 0 | | 2 | | 0 | 1 | 0 | | | 3 | | 2 | | 4 | 3 | |
| O | 6 | 2 | 2 | 1 | | 2 | 0 | 0 | | | 3 | | 3 | 2 | | 2 | |
| P | 0 | | | | | 1 | 1 | | | | 0 | | 0 | 2 | 2 | | |

図 A.1: 1. 評点データ数 $n[k][i,j]$

| 評点[+1]のデータ数 | | | | | n[+1][i,j] | | | | | | | | | | | |
|-------------|----|----|----|----|------------|---|---|---|---|---|----|---|----|----|----|---|
| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P |
| A | | 4 | 2 | 2 | 0 | 4 | 0 | 1 | | | 10 | | 16 | 6 | 4 | 4 |
| B | 4 | | 1 | 4 | 1 | 8 | 1 | | | 1 | | 0 | | 11 | 9 | |
| C | 6 | 12 | | 13 | 7 | 1 | | 8 | 1 | 4 | 10 | 6 | 10 | | 8 | |
| D | 9 | 6 | 1 | | 1 | 6 | | 6 | 0 | 1 | 10 | 1 | 10 | 6 | 10 | |
| E | 5 | 8 | 7 | 10 | | 4 | | 0 | 0 | 2 | 15 | 1 | 11 | | | |
| F | 2 | 1 | 2 | 1 | 0 | | 3 | 1 | | | 5 | | 4 | 11 | 5 | 1 |
| G | 0 | 0 | | | | 0 | | | | | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| H | 11 | 7 | 8 | 9 | 9 | 3 | | | | 4 | 3 | 3 | 4 | 2 | 8 | |
| I | | | 10 | 5 | 7 | | | | | 7 | | 7 | | | | |
| J | | 7 | 9 | 6 | 7 | | | 7 | 3 | | | | | | | |
| K | 1 | 5 | 2 | 0 | 0 | 7 | 1 | 0 | | | | | 6 | 8 | 14 | 2 |
| L | | 6 | 12 | 6 | 9 | | | 4 | 5 | 7 | | | | | | |
| M | 0 | 4 | 0 | 3 | 0 | 5 | 0 | 0 | | | 7 | | | 7 | 8 | 1 |
| N | 4 | 0 | | 0 | | 4 | 0 | 0 | | | 1 | | 0 | | 5 | 9 |
| O | 8 | 1 | 0 | 0 | | 5 | 1 | 0 | | | 1 | | 2 | 6 | | 5 |
| P | 2 | | | | | 0 | 4 | 0 | | | 1 | | 0 | 1 | 1 | |

| 評点[+2]のデータ数 | | | | | n[+2][i,j] | | | | | | | | | | | |
|-------------|----|----|---|----|------------|----|----|---|---|---|----|---|----|----|----|----|
| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P |
| A | | 3 | 0 | 0 | 1 | 6 | 4 | 0 | | | 4 | | 3 | 2 | 1 | 8 |
| B | 7 | | 0 | 1 | 0 | 10 | 6 | | | 0 | | 1 | | 8 | 3 | |
| C | 6 | 6 | | 3 | 0 | 9 | | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 7 | | 5 | |
| D | 6 | 2 | 3 | | 0 | 9 | | 0 | 0 | 0 | 4 | 0 | 1 | 10 | 7 | |
| E | 11 | 8 | 1 | 4 | | 6 | | 0 | 2 | 0 | 2 | 0 | 6 | | | |
| F | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | | 12 | 0 | | | 0 | | 0 | 3 | 1 | 13 |
| G | 0 | 0 | | | | 0 | | | | | 0 | | 0 | 0 | 1 | 0 |
| H | 6 | 10 | 1 | 2 | 3 | 11 | | | | 0 | 11 | 6 | 11 | 13 | 10 | |
| I | | | 4 | 10 | 6 | | | | | 2 | | 1 | | | | |
| J | | 8 | 2 | 9 | 6 | | 2 | 0 | 0 | | | 0 | | | | |
| K | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 4 | 2 | 0 | | | | | 2 | 5 | 0 | 9 |
| L | | 7 | 5 | 8 | 3 | | 1 | 0 | 0 | | | | | | | |
| M | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 8 | 4 | 0 | | | 0 | | | 8 | 4 | 10 |
| N | 1 | 1 | | 0 | | 0 | 8 | 0 | | | 0 | | 0 | | 1 | 7 |
| O | 2 | 1 | 0 | 0 | | 2 | 4 | 0 | | | 0 | | 1 | 3 | | 4 |
| P | 0 | | | | | 1 | 5 | | | | 0 | | 0 | 0 | 0 | |

| 評点[+3]のデータ数 | | | | | n[+3][i,j] | | | | | | | | | | | |
|-------------|---|---|---|---|------------|----|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P |
| A | | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 16 | 0 | | | 0 | | 0 | 1 | 0 | 7 |
| B | 1 | | 0 | 0 | 0 | 1 | 13 | | | 0 | | 0 | | 1 | 1 | |
| C | 4 | 1 | | 0 | 0 | 9 | | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | | 3 | |
| D | 2 | 3 | 0 | | 0 | 4 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 1 | |
| E | 3 | 2 | 0 | 1 | | 10 | | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | | | |
| F | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | 5 | 1 | | | 0 | | 0 | 2 | 1 | 5 |
| G | 0 | 0 | | | | 0 | | | | | 0 | | 0 | 0 | 0 | 1 |
| H | 1 | 3 | 0 | 0 | 1 | 4 | | | | 0 | 5 | 3 | 5 | 5 | 2 | |
| I | | | 1 | 2 | 2 | | | | | 0 | | 1 | | | | |
| J | | 5 | 0 | 5 | 1 | | | 0 | 0 | | | 0 | | | | |
| K | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 4 | 17 | 0 | | | | | 0 | 1 | 0 | 8 |
| L | | 6 | 0 | 2 | 1 | | | 0 | 0 | 0 | | | | | | |
| M | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 16 | 0 | | | 0 | | | 2 | 0 | 9 |
| N | 0 | 0 | | 0 | | 0 | 10 | 0 | | | 0 | | 0 | | 0 | 1 |
| O | 0 | 0 | 0 | 0 | | 1 | 15 | 0 | | | 0 | | 0 | 1 | | 7 |
| P | 0 | | | | | 0 | 9 | | | | 0 | | 1 | 0 | 0 | |

| データ数 | | | | | n[i,j] | | | | | | | | | | | |
|------|----|----|----|----|--------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P |
| A | | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | | | | | 20 | 20 | 20 | 20 |
| B | 20 | | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | | | 20 | | 20 | | 20 | 20 | |
| C | 20 | 20 | | 20 | 20 | 20 | | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | | 20 | |
| D | 20 | 20 | 20 | | 20 | 20 | | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | |
| E | 20 | 20 | 20 | 20 | | 20 | | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | | | |
| F | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | | 20 | 20 | | | 20 | | 20 | 20 | 20 | 20 |
| G | 20 | 20 | | | | 20 | | | | | 20 | | 20 | 20 | 20 | 20 |
| H | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | | | | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | |
| I | | | 20 | 20 | 20 | | | | | 20 | | 20 | | | | |
| J | | 20 | 20 | 20 | 20 | | | 20 | 20 | | | 20 | | | | |
| K | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | | | | | 20 | 20 | 20 | 20 |
| L | | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | | 20 | 20 | 20 | | | | | | |
| M | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | | | 20 | | | 20 | 20 | 20 |
| N | 20 | 20 | | 20 | | 20 | 20 | 20 | | | 20 | | 20 | | 20 | 20 |
| O | 20 | 20 | 20 | 20 | | 20 | 20 | 20 | | | 20 | | 20 | 20 | | 20 |
| P | 20 | | | | | 20 | 20 | | | | 20 | | 20 | 20 | 20 | |

図 A.2: 2. 評点データ数 $n[k][i,j]$

| 累積確率 | | $g[-3]0,0$ | | | | | | | | | | | | | | | |
|------|------|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--|
| A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | | |
| A | | 0 | 0 | 0.05 | 0.2 | 0 | 0 | 0.25 | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| B | | 0 | 0.1 | 0.1 | 0.15 | 0 | 0 | | | 0.35 | | 0.2 | | 0 | 0 | 0 | |
| C | | 0 | 0 | 0 | 0.05 | 0 | 0 | 0.05 | 0.1 | 0.1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| D | | 0 | 0 | 0.1 | 0.05 | 0 | 0 | 0 | 0.3 | 0.15 | 0 | 0.15 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| E | | 0 | 0 | 0.1 | 0 | 0 | 0 | 0.15 | 0.1 | 0.05 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| F | | 0 | 0 | 0.3 | 0.05 | 0.15 | 0 | 0.1 | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.05 | 0.05 | |
| G | 0.75 | 0.45 | | | | 0.3 | | | | | 0.2 | | 0.25 | 0.3 | 0.5 | 0.1 | |
| H | | 0 | 0 | 0.05 | 0 | 0 | 0.05 | | | 0.15 | 0 | 0.1 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| I | | | 0 | 0 | 0 | | | | | 0 | | 0 | | | | | |
| J | | 0 | 0 | 0 | 0 | | 0 | 0.05 | 0.05 | | | 0 | | | | | |
| K | | 0 | 0 | 0.15 | 0 | 0.1 | 0 | 0 | 0.65 | | | | 0 | 0 | 0.05 | 0 | |
| L | | | 0 | 0 | 0 | 0 | | 0.3 | 0.1 | 0 | | | | | | | |
| M | | 0 | 0 | 0 | 0.1 | 0.1 | 0 | 0 | 0.5 | | 0 | | | 0 | 0 | 0 | |
| N | | 0 | 0.05 | 0.2 | | 0.15 | 0 | 0.4 | | | 0.15 | | 0.2 | | 0 | 0 | |
| O | | 0 | 0.05 | 0.35 | 0.1 | | 0.05 | 0 | 0.3 | | 0 | | 0.1 | 0 | | 0 | |
| P | 0.1 | | | | | 0.05 | 0 | | | | 0.3 | | 0.4 | 0.05 | 0.1 | | |

図 A.3: 累積確率

| 正規分布得点 | | $z[-3]0,0$ | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------|----------|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--|--|
| A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | | |
| A | | | -1.64485 | -0.84162 | | | -0.67449 | | | | | | | | | | |
| B | | | -1.28155 | -1.03643 | | | | | -0.38532 | | -0.84162 | | | | | | |
| C | | | | -1.64485 | | | -1.64485 | -1.28155 | -1.28155 | | | | | | | | |
| D | | | -1.28155 | -1.64485 | | | | -0.5244 | -1.03643 | | -1.03643 | | | | | | |
| E | | | | | | | -1.03643 | -1.28155 | -1.64485 | | | | | | | | |
| F | | | -0.5244 | -1.64485 | -1.03643 | | | -1.28155 | | | | | | -1.64485 | -1.64485 | | |
| G | 0.67449 | -0.12566 | | | -0.5244 | | | | | -0.84162 | | -0.67449 | -0.5244 | 0 | -1.28155 | | |
| H | | -1.64485 | | | -1.64485 | | | | -1.03643 | | -1.28155 | | | | | | |
| I | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| J | | | | | | | -1.64485 | -1.64485 | | | | | | | | | |
| K | | | -1.03643 | | -1.28155 | | | 0.38532 | | | | | | -1.64485 | | | |
| L | | | | | | | -0.5244 | -1.28155 | | | | | | | | | |
| M | | | | -1.28155 | -1.28155 | | | 0 | | | | | | | | | |
| N | | -1.64485 | | -0.84162 | -1.03643 | | -0.25335 | | -1.03643 | | -0.84162 | | | | | | |
| O | | -1.64485 | -0.38532 | -1.28155 | | -1.64485 | -0.5244 | | | | -1.28155 | | | | | | |
| P | -1.28155 | | | | -1.64485 | | | | | -0.5244 | -0.25335 | -1.64485 | -1.28155 | | | | |

図 A.4: 正規分布得点

| z値の平均のためのMuller-Urbanの荷重 | | $w[-3]0,0=y[-3]0,0*(g[-3]0,0/(g[-3]0,0/n0,0))$ | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|----------|--|----------|----------|----------|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|--|
| A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | | |
| A | | | 4.47872 | 9.797334 | | | 10.77141 | | | | | | | | | | |
| B | | 6.844369 | 6.844369 | 8.527531 | | | | 12.06113 | | 9.797334 | | | | | | | |
| C | | | 4.47872 | | | | 4.47872 | 6.844369 | 6.844369 | | | | | | | | |
| D | | 6.844369 | | 4.47872 | | | | 11.51335 | 8.527531 | | 8.527531 | | | | | | |
| E | | 6.844369 | | | | | 8.527531 | 6.844369 | 4.47872 | | | | | | | | |
| F | | 11.51335 | 4.47872 | 8.527531 | | | 6.844369 | | | | | | | | 4.47872 | 4.47872 | |
| G | 10.77141 | 12.65951 | | | 11.51335 | | | | | 9.797334 | | 10.77141 | 11.51335 | 12.73239 | 6.844369 | | |
| H | | 4.47872 | | | 4.47872 | | | | 8.527531 | 6.844369 | | | | | | | |
| I | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| J | | | | | | | 4.47872 | 4.47872 | | | | | | | | | |
| K | | 8.527531 | | 6.844369 | | | | 12.06113 | | | | | | | 4.47872 | | |
| L | | | | | | | | 11.51335 | 6.844369 | | | | | | | | |
| M | | | 6.844369 | 6.844369 | | | | 12.73239 | | | | | | | | | |
| N | | 4.47872 | 9.797334 | | 8.527531 | | 12.43838 | | | 8.527531 | | 9.797334 | | | | | |
| O | | 4.47872 | 12.06113 | 6.844369 | 4.47872 | | 11.51335 | | | | 6.844369 | | | | | | |
| P | 6.844369 | | | | 4.47872 | | | | | 11.51335 | | 12.43838 | 4.47872 | 6.844369 | | | |

図 A.5: z 値平均のための Muller-Urban の荷重

| カテゴリ幅 | | $d[-2]0,0=z[-2]0,0-z[-3]0,0$ | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------|----------|------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|--|--|
| A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | | |
| A | | | 1.120453 | 1.366022 | | | 1.34898 | | | | | | | | | | |
| B | | 1.534899 | 0.757151 | 0.910772 | | | | | 1.05981 | | 1.094968 | | | | | | |
| C | | | 0.970364 | | | | | 0 | 1.534899 | 0.896231 | | | | | | | |
| D | | 1.15589 | 1.644854 | | | | | 1.366022 | 1.036433 | | 1.421754 | | | | | | |
| E | | 0.607062 | | | | | 1.162095 | 1.15589 | 1.259533 | | | | | | | | |
| F | | 1.048801 | 1.259533 | 1.710923 | | | 1.407213 | | | | | | | 0.60842 | 0 | | |
| G | 1.770515 | | | 1.560834 | | | | | | 1.878055 | | 1.956041 | 1.19889 | 1.644854 | 1.15589 | | |
| H | | 0.803232 | | | 0 | | | | 0.512033 | | 0 | | | | | | |
| I | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| J | | | | | | | 0 | 1.120453 | | | | | | | | | |
| K | | 1.560834 | | 0.896231 | | | | | | | | | | | 0 | | |
| L | | | | | | | 0.398739 | 0.896231 | | | | | | | | | |
| M | | | 0.757151 | 1.028204 | | | | | | | | | | | | | |
| N | | 1.770515 | 1.094968 | 0.783086 | | 1.898201 | | | | 1.036433 | | 1.226942 | | | | | |
| O | | 1.391507 | 0.510982 | 1.028204 | | 1.120453 | 1.366022 | | | | | 1.028204 | | | | | |
| P | 1.666872 | | | | 1.519192 | | | | | 0.650062 | | 1.094968 | 1.391507 | 1.15589 | | | |

図 A.6: カテゴリ幅

| カテゴリ幅平均のための重み | | | | $w[-2]_{ij}=1/(1/w[-2]_{ij}+1/w[-3]_{ij})$ | | | | | | | | | | | | |
|---------------|----------|--------|----------|--|----------|----------|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|
| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P |
| A | | | | 3.224415 | 5.293125 | | | 5.385703 | | | | | | | | |
| B | | | 4.414975 | 4.29256 | 5.095302 | | | | | 5.689922 | | 5.480505 | | | | |
| C | | | | | 3.163391 | | | 2.23936 | 4.414975 | 4.366499 | | | | | | |
| D | | | 4.44252 | | 3.313256 | | | | 5.293125 | 5.107068 | | 4.995549 | | | | |
| E | | | 4.185083 | | | | | 5.095302 | 4.44252 | 3.265956 | | | | | | |
| F | | | 5.756673 | 3.265956 | 4.759511 | | | 4.44252 | | | | | | | 2.936467 | 2.23936 |
| G | | 3.3083 | | | | 4.899008 | | | | | 4.559219 | | 4.185083 | 5.565013 | 3.313256 | 4.44252 |
| H | | | 3.073644 | | | 2.23936 | | | | 4.899008 | | 3.422185 | | | | |
| I | | | | | | | | | | | | | | | | |
| J | | | | | | | | 2.23936 | 3.224415 | | | | | | | |
| K | | | 4.899008 | | 4.366499 | | | | | | | | | | 2.23936 | |
| L | | | | | | | | 6.029629 | 4.366499 | | | | | | | |
| M | | | | 4.29256 | 4.414975 | | | | | | | | | | | |
| N | | 3.3083 | | 5.480505 | | 5.059101 | | 3.293 | | | 5.107068 | | 5.406004 | | | |
| O | | 3.293 | 6.176541 | 4.414975 | | 3.224415 | | 5.293125 | | | | | 4.414975 | | | |
| P | 4.366499 | | | | | 3.3083 | | | | | 6.029629 | | 5.480505 | 3.293 | 4.44252 | |

図 A.7: カテゴリ幅平均のための重み

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| A | | | | 3.612805 | 7.230524 | | | 7.265204 | | | | | | | | |
| B | | | 6.77654 | 3.250116 | 4.640659 | | | | | 6.030238 | | 6.00098 | | | | |
| C | | | | 3.06964 | | | | 0 | 6.77654 | 3.913392 | | | | | | |
| D | | | 5.135065 | | 5.449821 | | | | 7.230524 | 5.293136 | | 7.102442 | | | | |
| E | | | 2.540604 | | | | | 5.921224 | 5.135065 | 4.11358 | | | | | | |
| F | | | 6.037605 | 4.11358 | 8.143157 | | | 6.251571 | | | | | | | 1.786606 | 0 |
| G | | 5.857394 | | | | 7.646538 | | | | | 8.562462 | | 8.186195 | 6.67184 | 5.449821 | 5.135065 |
| H | | | 2.468851 | | | 0 | | | | 2.508453 | | 0 | | | | |
| I | | | | | | | | | | | | | | | | |
| J | | | | | | | | 0 | 3.612805 | | | | | | | |
| K | | | 7.646538 | | 3.913392 | | | | | | | | | | 0 | |
| L | | | | | | | | 2.404249 | 3.913392 | | | | | | | |
| M | | | | 3.250116 | 4.539497 | | | | | | | | | | | |
| N | | 5.857394 | | 6.00098 | | 3.961713 | | 6.250776 | | | 5.293136 | | 6.632851 | | | |
| O | | 4.582231 | 3.1561 | 4.539497 | | 3.612805 | | 7.230524 | | | | | 4.539497 | | | |
| P | 7.278395 | | | | | 5.025943 | | | | | 3.919632 | | 6.00098 | 4.582231 | 5.135065 | |

図 A.8: 重み付きカテゴリ幅

| 尺度値 | $R[-3]_{ij}=r[-3]-z[-3]_{ij}$ | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|-------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P |
| A | | | | -0.65235 | -1.45559 | | | -1.62272 | | | | | | | | |
| B | | | -1.01566 | -1.01566 | -1.26077 | | | | | -1.91189 | | -1.45559 | | | | |
| C | | | | -0.65235 | | | | -0.65235 | -1.01566 | -1.01566 | | | | | | |
| D | | | -1.01566 | | -0.65235 | | | | -1.77281 | -1.26077 | | -1.26077 | | | | |
| E | | | -1.01566 | | | | | -1.26077 | -1.01566 | -0.65235 | | | | | | |
| F | | | -1.77281 | -0.65235 | -1.26077 | | | -1.01566 | | | | | | | -0.65235 | -0.65235 |
| G | -2.9717 | -2.17155 | | | | -1.77281 | | | | | -1.45559 | | -1.62272 | -1.77281 | -2.29721 | -1.01566 |
| H | | | -0.65235 | | | -0.65235 | | | | -1.26077 | | -1.01566 | | | | |
| I | | | | | | | | | | | | | | | | |
| J | | | | | | | | -0.65235 | -0.65235 | | | | | | | |
| K | | | -1.26077 | | -1.01566 | | | -2.68253 | | | | | | | -0.65235 | |
| L | | | | | | | | -1.77281 | -1.01566 | | | | | | | |
| M | | | | -1.01566 | -1.01566 | | | -2.29721 | | | | | | | | |
| N | | -0.65235 | | -1.45559 | | -1.26077 | | -2.04386 | | | -1.26077 | | -1.45559 | | | |
| O | | -0.65235 | -1.91189 | -1.01566 | | -0.65235 | | -1.77281 | | | | | -1.01566 | | | |
| P | -1.01566 | | | | | -0.65235 | | | | | -1.77281 | | -2.04386 | -0.65235 | -1.01566 | |

図 A.9: 尺度値（カテゴリ判断の法則）

| 重み付き尺度値 | $w[-3]_{ij}=R[-3]_{ij}$ | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------|-------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P |
| A | | | | -2.92171 | -14.2609 | | | -17.479 | | | | | | | | |
| B | | | -6.95153 | -6.95153 | -10.7513 | | | | | -23.0595 | | -14.2609 | | | | |
| C | | | | -2.92171 | | | | -2.92171 | -6.95153 | -6.95153 | | | | | | |
| D | | | -6.95153 | | -2.92171 | | | | -20.4109 | -10.7513 | | -10.7513 | | | | |
| E | | | -6.95153 | | | | | -10.7513 | -6.95153 | -2.92171 | | | | | | |
| F | | | -20.4109 | -2.92171 | -10.7513 | | | -6.95153 | | | | | | | -2.92171 | -2.92171 |
| G | -32.0094 | -27.4907 | | | | -20.4109 | | | | | -14.2609 | | -17.479 | -20.4109 | -29.249 | -6.95153 |
| H | | | -2.92171 | | | -2.92171 | | | | -10.7513 | | -6.95153 | | | | |
| I | | | | | | | | | | | | | | | | |
| J | | | | | | | | -2.92171 | -2.92171 | | | | | | | |
| K | | | -10.7513 | | -6.95153 | | | -32.3543 | | | | | | | -2.92171 | |
| L | | | | | | | | -20.4109 | -6.95153 | | | | | | | |
| M | | | | -6.95153 | -6.95153 | | | -29.249 | | | | | | | | |
| N | | -2.92171 | | -14.2609 | | -10.7513 | | -25.4223 | | | -10.7513 | | -14.2609 | | | |
| O | | -2.92171 | -23.0595 | -6.95153 | | -2.92171 | | -20.4109 | | | | | -6.95153 | | | |
| P | -6.95153 | | | | | -2.92171 | | | | | -20.4109 | | -25.4223 | -2.92171 | -6.95153 | |

図 A.10: 重み付き尺度値（カテゴリ判断の法則）

| 換算正規分布得点 | | $z_{ij} = (R_{ij} - R_{(i)}) / 2$ | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------|----------|-----------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--|
| A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | | |
| A | -0.42359 | -1.30241 | -1.02874 | -1.52326 | 0.617252 | 3.0497 | -1.35336 | | | 0.822321 | | 0.91129 | 0.422077 | -0.21059 | 1.610519 | | |
| B | 0.423588 | | -1.18136 | -0.58323 | -1.26126 | 1.151786 | 2.533055 | -1.4533 | -1.71177 | 0.176256 | -1.49721 | 0.321124 | 1.077201 | 0.746106 | | | |
| C | 1.302406 | 1.181362 | | 0.680585 | 0.041077 | 1.827206 | | 0.028703 | -0.99098 | -0.38076 | 1.0179 | -0.69334 | 1.0446 | 1.348528 | | | |
| D | 1.028738 | 0.583234 | -0.68059 | | -0.95752 | 1.267951 | | -0.3599 | -1.54703 | -1.49016 | 0.934694 | -1.30412 | 0.47376 | 1.3532 | 1.12264 | | |
| E | 1.523258 | 1.261261 | -0.04108 | 0.957516 | | 1.795757 | | -0.91507 | -0.9131 | -0.6801 | 0.827747 | -0.83881 | 0.996559 | | | | |
| F | -0.61725 | -1.15179 | -1.82721 | -1.26795 | -1.79576 | | 1.918877 | -1.05496 | | | -0.75062 | | -0.65579 | 0.921513 | 0.035894 | 1.209881 | |
| G | -3.0497 | -2.53305 | | | -1.91888 | | | | | | -2.48788 | | -2.53982 | -1.8282 | -2.42097 | -1.34169 | |
| H | 1.353357 | 1.453303 | -0.0287 | 0.359895 | 0.915067 | 1.054959 | | | -0.42219 | 2.22575 | 0.667682 | 2.059667 | 2.103566 | 1.596436 | | | |
| I | | | 0.990979 | 1.547033 | 0.913104 | | | | 0.376257 | | 0.417773 | | | | | | |
| J | | 1.711769 | 0.380758 | 1.490165 | 0.680104 | | | 0.422186 | -0.37626 | | -0.02493 | | | | | | |
| K | -0.82232 | -0.17626 | -1.0179 | -0.93469 | -0.82775 | 0.750621 | 2.487881 | -2.22575 | | | | 0.064357 | 0.968298 | 0.661745 | 1.81829 | | |
| L | | 1.497213 | 0.693338 | 1.30412 | 0.838811 | | | -0.66768 | -0.41777 | 0.024928 | | | | | | | |
| M | -0.91129 | -0.32112 | -1.0446 | -0.47376 | -0.99656 | 0.655786 | 2.539822 | -2.05967 | | | -0.06436 | | | 1.361228 | 0.549911 | 1.907113 | |
| N | -0.42208 | -1.0772 | | -1.3532 | | -0.92151 | 1.828202 | -2.10357 | | | -0.9683 | -1.36123 | | -0.26268 | 1.027815 | | |
| O | 0.210589 | -0.74611 | -1.34853 | -1.12264 | | -0.03589 | 2.420973 | -1.59644 | | | -0.66174 | -0.54991 | 0.262683 | | 1.225598 | | |
| P | -1.61052 | | | | -1.20988 | 1.341685 | | | | -1.81829 | | -1.90711 | -1.02781 | -1.2256 | | | |

図 A.11: 換算正規分布得点

| 荷重 | | $w_{ij} = N_{ij} \cdot \mu \cdot (\sqrt{V_{ij}} \cdot \sqrt{V_{ji}}) / (R_{(i)} \cdot (1 - R_{(i)}))$ | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|----------|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--|
| A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | | |
| A | 0 | 23.85017 | 13.40278 | 17.15899 | 10.46386 | 22.14217 | 0.508405 | 12.70837 | 0 | 0 | 19.83271 | 0 | 18.71219 | 23.86135 | 25.05724 | 9.372525 | |
| B | 23.85017 | 0 | 15.06967 | 22.47938 | 13.96768 | 15.4776 | 1.851058 | 5.685861 | 0 | 8.174213 | 12.58935 | 10.79876 | 12.26287 | 16.50116 | 20.74119 | 0 | |
| C | 13.40278 | 15.06967 | 0 | 21.47674 | 25.44918 | 6.910338 | 0 | 25.45717 | 17.66565 | 24.15316 | 17.30502 | 21.33717 | 16.94453 | 0 | 12.77387 | 0 | |
| D | 17.15899 | 22.47938 | 21.47674 | 0 | 18.10928 | 13.87564 | 0 | 24.29014 | 10.16167 | 10.89005 | 18.40849 | 13.37932 | 23.45912 | 12.71049 | 15.87874 | 0 | |
| E | 10.46386 | 13.96768 | 25.44918 | 18.10928 | 0 | 7.243166 | 0 | 18.66341 | 18.68878 | 21.48198 | 19.7661 | 19.62951 | 17.59116 | 0 | 0 | 0 | |
| F | 22.14217 | 15.4776 | 6.910338 | 13.87564 | 7.243166 | 0 | 5.991669 | 16.80399 | 0 | 0 | 20.68888 | 0 | 21.74292 | 18.57995 | 25.45287 | 14.67603 | |
| G | 0.508405 | 1.851058 | 0 | 0 | 0 | 5.991669 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2.045009 | 0 | 1.823297 | 6.899938 | 2.360984 | 12.86682 | |
| H | 12.70837 | 5.685861 | 25.45717 | 24.29014 | 18.66341 | 16.80399 | 0 | 0 | 23.86054 | 3.496484 | 21.61611 | 4.735333 | 4.382456 | 9.545232 | 0 | 0 | |
| I | 0 | 0 | 17.66565 | 10.16167 | 18.68878 | 0 | 0 | 0 | 24.18331 | 0 | 23.89299 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| J | 0 | 8.174213 | 24.15316 | 10.89005 | 21.48198 | 0 | 0 | 23.86054 | 24.18331 | 0 | 25.45904 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| K | 19.83271 | 12.58935 | 17.30502 | 18.40849 | 19.7661 | 20.68888 | 2.045009 | 3.496484 | 0 | 0 | 0 | 0 | 25.42649 | 17.96895 | 21.67961 | 7.003794 | |
| L | 0 | 10.79876 | 21.33717 | 13.37932 | 19.62951 | 0 | 0 | 21.61611 | 23.89299 | 25.45904 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| M | 18.71219 | 12.26287 | 16.94453 | 23.45912 | 17.59116 | 21.74292 | 1.823297 | 4.735333 | 0 | 0 | 25.42649 | 0 | 0 | 12.60175 | 22.79513 | 6.105181 | |
| N | 23.86135 | 16.50116 | 0 | 12.71049 | 0 | 18.57995 | 6.899938 | 4.382456 | 0 | 0 | 17.96695 | 0 | 12.60175 | 0 | 24.8331 | 17.17146 | |
| O | 25.05724 | 20.74119 | 12.77387 | 15.87874 | 0 | 25.45287 | 2.360984 | 9.545232 | 0 | 0 | 21.67961 | 0 | 22.79513 | 24.8331 | 0 | 14.45916 | |
| P | 9.372525 | 0 | 0 | 0 | 0 | 14.67603 | 12.86682 | 0 | 0 | 0 | 7.003794 | 0 | 6.105181 | 17.17146 | 14.45916 | 0 | |

図 A.12: 換算確率

| 荷重付き得点および得点ベクトル | | $w_{ij} \cdot z_{ij}$ | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|----------|-----------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--|--|
| A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | | |
| A | -10.1026 | -17.4559 | -17.6521 | -15.9392 | 13.6673 | 1.550484 | -17.199 | | | 16.30886 | | 17.05224 | 10.07132 | -5.27679 | 15.09463 | | |
| B | 10.10263 | -17.8027 | -13.1107 | -17.6169 | 17.82688 | 4.68883 | -8.26328 | | -13.9924 | 2.218944 | -16.168 | 3.937902 | 17.77508 | 15.47513 | | | |
| C | 17.45586 | 17.80274 | | 14.61675 | 1.045373 | 12.62661 | 0.730707 | -17.5063 | -9.19852 | 17.61478 | -14.7939 | 17.70025 | | 17.22593 | | | |
| D | 17.65212 | 13.11075 | -14.6168 | | -17.3399 | 17.59364 | -8.7419 | -15.7204 | -16.228 | 17.20631 | -17.4482 | 11.114 | 17.19984 | 17.8261 | | | |
| E | 15.93917 | 17.61689 | -1.04537 | 13.33993 | | 13.00697 | -17.0783 | -17.0648 | -14.61 | 16.36132 | -16.4655 | 17.53063 | | | | | |
| F | -13.6673 | -17.8269 | -12.6266 | -17.5936 | -13.007 | | 11.49727 | -17.7275 | | -15.5295 | -14.2587 | 17.12166 | 0.913598 | 17.75626 | | | |
| G | -1.55048 | -4.68883 | | | -11.4973 | | | | | -5.08774 | -4.63085 | -12.6145 | -5.71588 | -17.2632 | | | |
| H | 17.19986 | 8.263279 | -0.73071 | 8.741904 | 17.07827 | 17.72753 | | | -10.0736 | 7.782298 | 14.4327 | 9.75321 | 9.218785 | 15.23835 | | | |
| I | | | 17.50629 | 15.72043 | 17.0648 | | | | 9.099135 | | 9.981857 | | | | | | |
| J | | 13.99237 | 9.198516 | 16.22796 | 14.60997 | | 10.07358 | -9.09913 | | | -0.63466 | | | | | | |
| K | -16.3089 | -2.21894 | -17.6148 | -17.2063 | -16.3613 | 15.52952 | 5.08774 | -7.7823 | | | | 1.636371 | 17.39736 | 14.34636 | 12.73493 | | |
| L | | 16.16804 | 14.79386 | 17.44824 | 16.46546 | | -14.4327 | -9.98186 | 0.634656 | | | | | | | | |
| M | -17.0522 | -3.9379 | -17.7003 | -11.114 | -17.5306 | 14.2587 | 4.63085 | -9.75321 | | | -1.63637 | | 17.15385 | 12.53529 | 11.64327 | | |
| N | -10.0713 | -17.7751 | | -17.1998 | | -17.1217 | 12.61448 | -9.21879 | | -17.3974 | | -17.1539 | | -6.52323 | 17.64908 | | |
| O | 5.276789 | -15.4751 | -17.2259 | -17.8261 | | -0.9136 | 5.715879 | -15.2383 | | -14.3464 | | -12.5353 | 6.523228 | | 17.72111 | | |
| P | -15.0946 | | | | -17.7563 | 17.26323 | | | | -12.7349 | | -11.6433 | -17.6491 | -17.7211 | | | |

図 A.13: 荷重

| 荷重行列 | | W | | | | | | | | | | | | | | | |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--|
| A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | | |
| A | 197.07 | -23.85 | -13.40 | -17.16 | -10.46 | -22.14 | -0.51 | -12.71 | 0.00 | 0.00 | -19.83 | 0.00 | -18.71 | -23.88 | -25.06 | -9.37 | |
| B | -23.85 | 179.45 | -15.07 | -22.48 | -13.97 | -15.48 | -1.85 | -5.69 | 0.00 | -8.17 | -12.59 | -10.80 | -12.26 | -16.50 | -20.74 | 0.00 | |
| C | -13.40 | -15.07 | 217.95 | -21.48 | -25.45 | -6.91 | 0.00 | -25.46 | -17.67 | -24.15 | -17.31 | -21.34 | -16.94 | 0.00 | -12.77 | 0.00 | |
| D | -17.16 | -22.48 | -21.48 | 222.28 | -18.11 | -13.88 | 0.00 | -24.29 | -10.16 | -10.89 | -18.41 | -13.38 | -23.46 | -12.71 | -15.88 | 0.00 | |
| E | -10.46 | -13.97 | -25.45 | -18.11 | 191.05 | -7.24 | 0.00 | -18.66 | -18.69 | -21.48 | -19.77 | -19.63 | -17.59 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| F | -22.14 | -15.48 | -6.91 | -13.88 | -7.24 | 189.59 | -5.99 | -16.80 | 0.00 | 0.00 | -20.69 | 0.00 | -21.74 | -18.58 | -25.45 | -14.68 | |
| G | -0.51 | -1.85 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | -5.99 | 34.35 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | -2.05 | 0.00 | -1.82 | -6.90 | -2.36 | -12.87 | |
| H | -12.71 | -5.69 | -25.46 | -24.29 | -18.66 | -16.80 | 0.00 | 171.25 | 0.00 | -23.86 | -3.50 | -21.62 | -4.74 | -4.38 | -9.55 | 0.00 | |
| I | 0.00 | 0.00 | -17.67 | -10.16 | -18.69 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 94.59 | -24.18 | 0.00 | -23.89 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| J | 0.00 | -8.17 | -24.15 | -10.89 | -21.48 | 0.00 | -23.86 | -24.18 | 138.20 | 0.00 | -25.46 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| K | -19.83 | -12.59 | -17.31 | -18.41 | -19.77 | -20.69 | -2.05 | -3.50 | 0.00 | 186.21 | 0.00 | -25.43 | 0.00 | -17.97 | -21.68 | -7.00 | |
| L | 0.00 | -10.80 | -21.34 | -13.38 | -19.63 | 0.00 | 0.00 | -21.62 | -23.89 | -25.46 | 0.00 | 136.11 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| M | -18.71 | -12.26 | -16.94 | -23.46 | -17.59 | -21.74 | -1.82 | -4.74 | 0.00 | 0.00 | -25.43 | 0.00 | 184.20 | -12.60 | -22.80 | -8.11 | |
| N | -23.86 | -16.50 | 0.00 | -12.71 | 0.00 | -18.58 | -6.90 | -4.38 | 0.00 | 0.00 | -17.97 | 0.00 | -12.60 | 155.51 | -24.83 | -17.17 | |
| O | -25.06 | -20.74 | -12.77 | -15.88 | 0.00 | -25.45 | -2.36 | -9.55 | 0.00 | 0.00 | -21.68 | 0.00 | -22.80 | -24.83 | 195.58 | -14.46 | |
| P | -9.37 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | -14.68 | -12.87 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | -7.00 | 0.00 | -6.11 | -17.17 | -14.46 | 81.65 | |

図 A.14: 荷重行列

| 逆行列 | W-1 | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|-----|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | |
| A | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B | | | 0.009587 | 0.00484 | 0.0048 | 0.0049 | 0.004328 | 0.004354 | 0.004636 | 0.005059 | 0.005214 | 0.004372 | 0.005297 | 0.004399 | 0.004236 | 0.004383 | 0.003835 |
| C | | | 0.00484 | 0.01001 | 0.005378 | 0.006053 | 0.004362 | 0.004052 | 0.0059 | 0.007142 | 0.006829 | 0.004751 | 0.006841 | 0.004799 | 0.003872 | 0.004365 | 0.003776 |
| D | | | 0.0048 | 0.005378 | 0.008191 | 0.005432 | 0.004445 | 0.004163 | 0.005442 | 0.006071 | 0.005889 | 0.004671 | 0.005942 | 0.004813 | 0.00419 | 0.004398 | 0.003875 |
| E | | | 0.0049 | 0.006053 | 0.005432 | 0.010854 | 0.004409 | 0.004062 | 0.005883 | 0.007433 | 0.007068 | 0.004897 | 0.006998 | 0.004903 | 0.003879 | 0.004151 | 0.00377 |
| F | | | 0.004328 | 0.004362 | 0.004445 | 0.004409 | 0.008344 | 0.005496 | 0.004592 | 0.004418 | 0.004437 | 0.004584 | 0.004434 | 0.00463 | 0.00451 | 0.004605 | 0.005048 |
| G | | | 0.004354 | 0.004052 | 0.004163 | 0.004062 | 0.005496 | 0.035941 | 0.004062 | 0.004091 | 0.004099 | 0.00474 | 0.004106 | 0.004677 | 0.005936 | 0.004941 | 0.009531 |
| H | | | 0.004636 | 0.0059 | 0.005442 | 0.005883 | 0.004592 | 0.004062 | 0.011125 | 0.006357 | 0.006945 | 0.004431 | 0.006858 | 0.004516 | 0.003962 | 0.004308 | 0.003779 |
| I | | | 0.005059 | 0.007142 | 0.006071 | 0.007433 | 0.004418 | 0.004091 | 0.006357 | 0.018719 | 0.009252 | 0.004728 | 0.009216 | 0.004783 | 0.00396 | 0.004296 | 0.003795 |
| J | | | 0.005214 | 0.006829 | 0.005889 | 0.007068 | 0.004437 | 0.004099 | 0.006945 | 0.009252 | 0.014716 | 0.00467 | 0.008578 | 0.004727 | 0.003971 | 0.004303 | 0.003794 |
| K | | | 0.004372 | 0.004751 | 0.004671 | 0.004897 | 0.004584 | 0.00474 | 0.004431 | 0.004728 | 0.00467 | 0.009516 | 0.004664 | 0.004819 | 0.004438 | 0.004535 | 0.004484 |
| L | | | 0.005297 | 0.006841 | 0.005942 | 0.006998 | 0.004434 | 0.004106 | 0.006858 | 0.009216 | 0.008578 | 0.004664 | 0.014744 | 0.004722 | 0.003981 | 0.004306 | 0.003797 |
| M | | | 0.004399 | 0.004799 | 0.004813 | 0.004903 | 0.00463 | 0.004677 | 0.004516 | 0.004783 | 0.004727 | 0.004819 | 0.004722 | 0.009626 | 0.004304 | 0.00458 | 0.004418 |
| N | | | 0.004236 | 0.003872 | 0.00419 | 0.003879 | 0.00451 | 0.005936 | 0.003962 | 0.00396 | 0.003971 | 0.004438 | 0.003981 | 0.004304 | 0.010333 | 0.004602 | 0.005436 |
| O | | | 0.004383 | 0.004365 | 0.004398 | 0.004151 | 0.004605 | 0.004941 | 0.004308 | 0.004296 | 0.004303 | 0.004535 | 0.004306 | 0.00458 | 0.004602 | 0.009073 | 0.004912 |
| P | | | 0.003835 | 0.003776 | 0.003875 | 0.00377 | 0.005048 | 0.008531 | 0.003779 | 0.003795 | 0.003794 | 0.004484 | 0.003797 | 0.004418 | 0.005436 | 0.004912 | 0.017384 |

図 A.15: W_{11}^{-1}

| 距離尺度 | | a[i]=W-1*2[i] | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------|---|---------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | a[i] | |
| A | | | | | | | | | | | | | | | | | 0 | |
| B | | | 0.143117 | -0.36452 | -0.10373 | -0.15451 | 0.324396 | 0.274535 | -0.53147 | -0.35094 | -0.28348 | 0.047047 | -0.2177 | 0.08139 | 0.348162 | 0.255654 | 0.288907 | -0.24315 |
| C | | | 0.072247 | -0.75397 | -0.1162 | -0.19085 | 0.326954 | 0.255462 | -0.67637 | -0.49549 | -0.37671 | 0.051118 | -0.28115 | 0.088787 | 0.318275 | 0.254581 | 0.284468 | -1.23885 |
| D | | | 0.071665 | -0.40506 | -0.19859 | -0.17126 | 0.333133 | 0.262496 | -0.62383 | -0.42117 | -0.32016 | 0.050256 | -0.24419 | 0.08906 | 0.344381 | 0.256513 | 0.291948 | -0.68482 |
| E | | | 0.073155 | -0.4559 | -0.11736 | -0.34224 | 0.330428 | 0.256095 | -0.67437 | -0.51565 | -0.38428 | 0.05269 | -0.28759 | 0.090722 | 0.318844 | 0.242127 | 0.28401 | -1.12931 |
| F | | | 0.064615 | -0.32859 | -0.09604 | -0.13901 | 0.700296 | 0.346494 | -0.52635 | -0.30646 | -0.2412 | 0.049321 | -0.18224 | 0.085674 | 0.370895 | 0.268576 | 0.380334 | 0.446111 |
| G | | | 0.065004 | -0.30519 | -0.08996 | -0.12807 | 0.41189 | 2.266024 | -0.46566 | -0.28383 | -0.22283 | 0.051009 | -0.16872 | 0.086545 | 0.487946 | 0.288166 | 0.718007 | 2.710327 |
| H | | | 0.069214 | -0.44443 | -0.11759 | -0.1855 | 0.344142 | 0.256118 | -1.27522 | -0.44097 | -0.37757 | 0.047675 | -0.28182 | 0.083551 | 0.325689 | 0.251282 | 0.28471 | -1.46071 |
| I | | | 0.075521 | -0.53799 | -0.13118 | -0.23437 | 0.331091 | 0.257954 | -0.72866 | -1.29862 | -0.503 | 0.050877 | -0.37873 | 0.088503 | 0.325539 | 0.250532 | 0.285928 | -2.1466 |
| J | | | 0.077843 | -0.52191 | -0.12724 | -0.22287 | 0.332516 | 0.258417 | -0.7961 | -0.64184 | -0.80006 | 0.050245 | -0.3525 | 0.087458 | 0.326396 | 0.25095 | 0.285835 | -1.79286 |
| K | | | 0.065273 | -0.35783 | -0.10092 | -0.1544 | 0.343532 | 0.298881 | -0.50789 | -0.32801 | -0.25387 | 0.102398 | -0.19167 | 0.089172 | 0.364777 | 0.264482 | 0.337778 | -0.02829 |
| L | | | 0.079083 | -0.51532 | -0.12839 | -0.22065 | 0.332356 | 0.258852 | -0.7861 | -0.63932 | -0.46634 | 0.050185 | -0.60592 | 0.087376 | 0.327266 | 0.251146 | 0.28604 | -1.68973 |
| M | | | 0.065669 | -0.36144 | -0.104 | -0.1546 | 0.347038 | 0.294908 | -0.51763 | -0.33183 | -0.25698 | 0.051858 | -0.19407 | 0.178112 | 0.353804 | 0.267098 | 0.332872 | -0.0292 |
| N | | | 0.063233 | -0.29165 | -0.09053 | -0.12231 | 0.338003 | 0.374273 | -0.4542 | -0.27475 | -0.21588 | 0.047752 | -0.16362 | 0.079641 | 0.849343 | 0.268391 | 0.409545 | 0.817242 |
| O | | | 0.065438 | -0.32878 | -0.09503 | -0.1309 | 0.34513 | 0.311511 | -0.49388 | -0.29799 | -0.23392 | 0.048795 | -0.17696 | 0.084734 | 0.378252 | 0.529182 | 0.370045 | 0.375623 |
| P | | | 0.05725 | -0.28442 | -0.08374 | -0.11887 | 0.378377 | 0.6009 | -0.43321 | -0.26329 | -0.20627 | 0.048245 | -0.15603 | 0.081754 | 0.446846 | 0.286482 | 1.309624 | 1.663641 |

図 A.16: $a[i,j]$