

修士論文

騒音下における MFP 動作音の 印象評価に関する研究

平成 23 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

桜川 夏木

目 次

第 1 章	序論	4
1.1	研究背景	4
1.2	本研究の目的	4
1.3	本論文の構成	6
第 2 章	印象評価実験システム	7
2.1	一対比較法	7
2.1.1	結果の表示について	7
2.1.2	実験方法	8
2.2	聴覚刺激（試験音）の準備	8
2.3	まとめ	10
第 3 章	騒音下における印象評価実験	11
3.1	評価実験 1（評価項目:望ましくない 望ましい）	11
3.1.1	試験音と背景音（実験 1）	11
3.1.2	実験結果 1	12
3.2	評価実験 2（評価項目:気になる 気にならない）	12
3.2.1	評価項目の変更	12
3.2.2	試験音と背景音（実験 2）	13
3.2.3	実験結果 2	13
3.3	まとめ	14
第 4 章	背景音がない場合の評価指標	16
4.1	物理的評価指標について	16
4.2	各種物理的評価指標の説明および算出方法	16

4.2.1	等価騒音レベル $L_{Aeq}[dB]$ [12]	16
4.2.2	ラウドネス $N[sone]$ [13]	17
4.2.3	ダイナミックラウドネス $DN[sone]$ [16]	19
4.2.4	ラウドネスレベル $LN[phon]$ [13]	19
4.2.5	シャープネス $S[acum]$ [13]	19
4.2.6	ダイナミックシャープネス $DS[acum]$	20
4.2.7	変動強度 $F[vacil]$ [13]	21
4.2.8	Comfort Index CI [15]	21
4.2.9	物理的評価指標の算出方法	22
4.3	物理的評価指標との関係	23
4.4	まとめ	24
第 5 章	騒音下における評価指標	27
5.1	背景音による影響を考慮した物理的評価指標の検討	27
5.1.1	指標 1 (増分ラウドネスレベル ΔLN_D)	27
5.1.2	指標 2 (マスクトラウドネスレベル LN_P)	28
5.2	まとめ	28
第 6 章	結び	32

第1章 序論

1.1 研究背景

昨今、職場環境の改善が進み、オフィス内は以前に比べ随分と静かになったと言われる。その一方で IT 化の進行によりオフィス内に設置される OA 機器が増加し、それらの発する音が新たな騒音（室内環境音）として意識されるようになってきている。特に大掛かりな機械駆動系を有する MFP（複合機）やプリンタは動作音が比較的大きく静音化・快音化が求められており、メーカーも様々な対策を講じている。

静音化は文字通り「音を静かにすること」すなわち音響パワーレベルを下げることであり、これまでの対策の主流であった。これに対し、快音化とは「その音に対して人が受ける印象を良くすること」である。このような考え方は静音化対策が技術的に一段落した昨今、機器のコストパフォーマンスや付加価値を向上させるという観点から注目されている考え方である。既に洗濯機や掃除機など様々な製品で快音化対策が講じられており [1]、MFP やコピー機などの製品においても音質評価が盛んになりつつある [2][3][4]。これらと同様、本研究も MFP 動作音の快音化のための標準的な設計指標を確立することを目標に進めてきた企業との共同研究の延長線上に位置するものである。

図 1.1 に関連する過去の研究結果および本論文の位置付けを簡単に示す。

1.2 本研究の目的

現在、各メーカーは MFP 動作音の快音化のため多数の音質に関する印象評価実験（心理物理実験）を実施している。しかし、この種の実験には金銭的成本だけでなく多大な人手と労力（人的コスト）を要するため、機器開発の初期段階で試行錯誤的に手軽に実験を繰り返すというわけにはいかず、快音化のための対策作業が非効率的になってしまうという問題があった。

そこで、本研究グループでは MFP 動作音の印象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、印象評価実験（試聴実験）を行わずに MFP 動作音がユーザーにどんな印象を与える

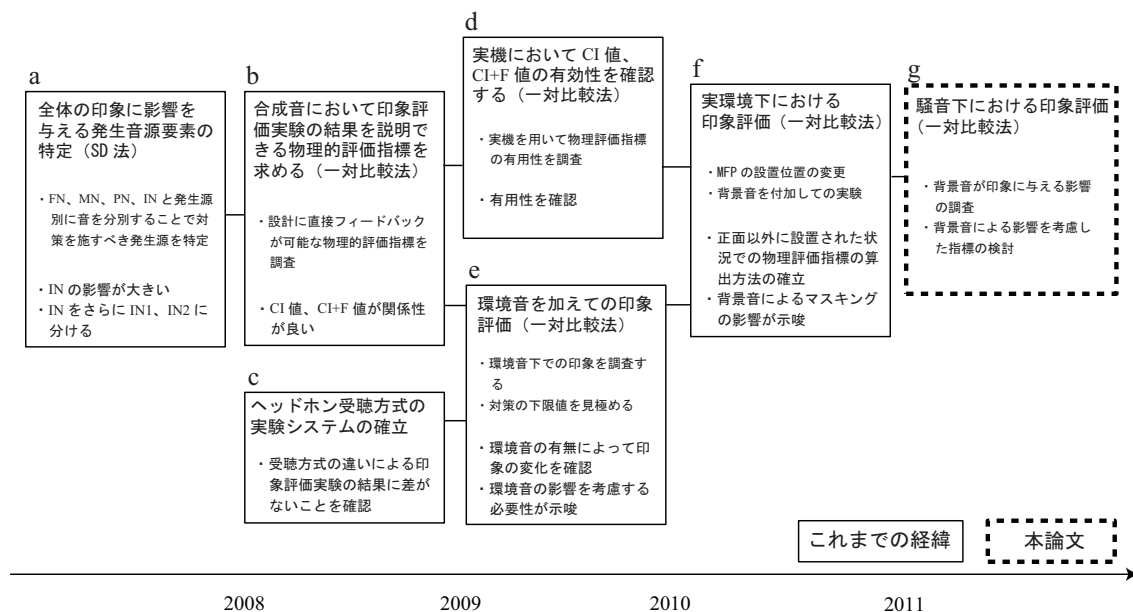


図 1.1: 本研究グループにおけるこれまでの経緯と本論文の位置付け

のかをある程度予想できるようにしたいと考えている。

これまでの研究で、MFP 動作音の全体の印象に影響を与える音源要素を特定するために発生源別に音を分離・評価した結果、用紙の衝突音やレジストモータの始動音など、我々が衝撃性音 (IN) と分類した音が印象に与える影響が大きいことが判明した (図 1.1a) [5][6]。その後、分析結果を設計に直接フィードバックできるように印象評価実験の結果を説明できる物理的評価指標を調査した。その結果、機械要素毎に収録した音を様々な条件で合成した MFP の合成音および実機音の印象 (一対比較法によって得られるプリンタ音としての望ましさの尺度) と CI 値および $CI + F$ 値との対応関係が良いことが確認された。(図 1.1b,d) [7][8]。また、これまでの印象評価では純粋に動作音のみに着目していたが、最近の静音化の動向を見るとこれからは使用環境、特に背景音の影響を加味した評価も必要と考え、昨年度の研究では MFP の設置位置やオフィス内の背景音などを考慮し、より現実に近い条件下における印象評価実験を行った (図 1.1f) [8]。その結果、背景音の存在により一部の印象評価結果に変化が認められた。そこで本研究では MFP の機種と背景音の種類を増した追従実験を行い、背景音が印象評価に及ぼす影響の調査とともに、騒音下においても使用可能な評価指標を見出すことを目的とした (図 1.1g)。

具体的には、先行研究での評価機種に新たにメーカーの異なる 5 機種を加えて、背景音なしの条件と以下の 3 つの背景音を付加した条件で一対比較法による追従実験を実施した。

- ピンクノイズ（提示レベル L_{Aeq} : 45dB）
- ピンクノイズをカットオフ周波数 1kHz の HPF に通した音（提示レベル L_{Aeq} : 55dB）
- ピンクノイズをカットオフ周波数 1kHz の LPF に通した音（提示レベル L_{Aeq} : 55dB）

また、一対比較法で用いる設問をより適切と思われる項目に変更し、評価項目の変更による結果の違いについても調査した。

1.3 本論文の構成

以下に本論文の構成を示す。

第2章では、印象評価実験の実験方法、手順について述べる。

第3章では、騒音下における一対比較法による実験結果について述べる。

第4章では、本論文で「物理的評価指標」と呼んでいる指標について説明し、3章で行った背景音がない場合の実験結果と指標との対応関係について調査した結果を述べる。

第5章では、背景音による影響を考慮した物理的評価指標を提案し、3章で行った騒音下における実験に対して関係性を調査した結果を述べる。

第6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 印象評価実験システム

本研究を遂行するにあたり、動作音の印象を評価するための印象評価実験が必要となる。本章ではそのための実験システムと実験結果を分析する手法について説明する。

2.1 一対比較法

一対比較法 [9] は、各刺激を一対ずつ比較し、順位付けを行う手法である。自分が設定した尺度について、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ポイントが異な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適しているかを回答させる。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。一対比較法には Scheffe の一対比較法、Bradley の一対比較法、Thurstone の一対比較法などがある [9]。本研究では刺激として MFP 動作音を用いる為、試験音が相互に類似したものである。そこで先行研究より印象評価には算出された順位について差の検定 [10] を行うことの出来る Scheffe の一対比較法を採用し、刺激間の有意差の有無も確認している。

2.1.1 結果の表示について

一対比較法の実験結果は1つの尺度軸（ヤードスティック）上に実験で使用した刺激をプロットすることで表す。評価は0を“どちらでもない”とする7段階（-3～+3）での判断を求めた。例えば評価項目を「基準音に比べて評価音がどれだけプリンタ動作音として望ましいと思うか」（あるいは望ましくないと思うか）とすると、尺度軸は「プリンタ動作音として望ましくない 望ましい」となる。試験音は尺度軸の右側にある（尺度値が大きい）ほど「プリンタ動作音として望ましい」と解釈できる。ただし尺度値はそれらの和が0になるように相対的に決定しており、値そのものに絶対的な意味はない。従って、3章以降に記述する各実験で得られた尺度値を相互に比較することはできない。

なお、試験音間の順位の信憑性を明らかにするためチューキーの HSD 検定による差の検定を行い、有意水準 5% のものには *、1% のものには ** を付している。

2.1.2 実験方法

実験は簡易防音室内で行い、被験者はバイノーラル再生される試験音を密閉型ヘッドホンで聞きながら実験を進める方式とした。図 2.1 にその実験風景を示す。被験者毎に同じ条件で実験が可能なので、図 2.2 に示すような実験用のソフトウェアを作成し実験の自動化を図り、被験者がパソコン画面の指示に従い実験を進める形式とした。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、**開始**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 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すべて任せられている。なお、本論文で紹介する実験はすべて再生回数 2 回ずつとした。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。（ n 個の試験音では（5）の指定の回数は nP_2 となる。）

また、背景音がある場合は、実験開始とともに背景音が再生（終了時まで連続再生）され、その状況下で試験音のみを順次切り替えて被験者に評価を求めるようになっている。

2.2 聴覚刺激（試験音）の準備

図 2.5 に示すダミーヘッド（NEUMANN KU100）を被験者が試験音を聞く位置に設置し、図 2.6 に示す 5ch のスピーカユニット（MFP 本体を想定した音源装置）の各 ch とダミーヘッドの左

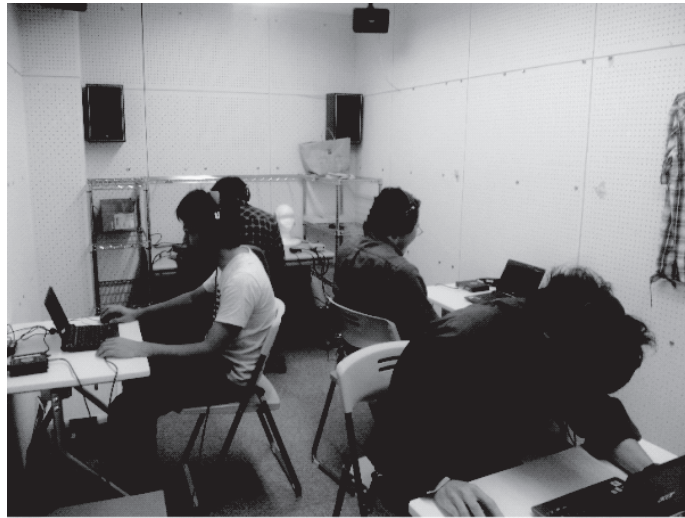


図 2.1: 実験風景

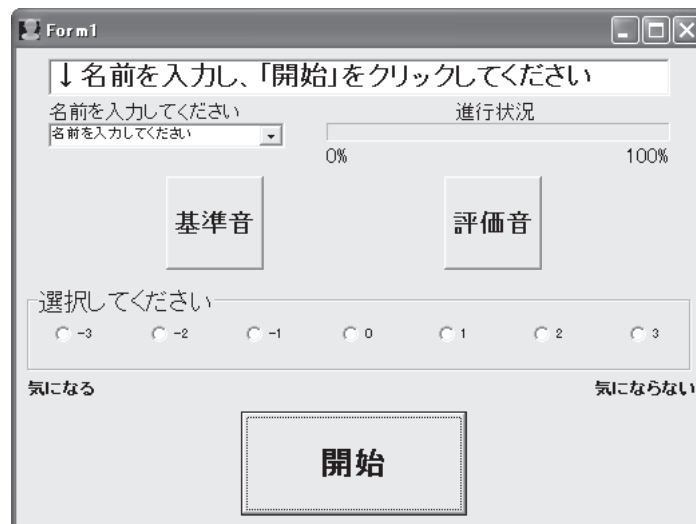


図 2.2: 実験用ソフトウェア

右の耳の間のインパルス応答（ $5 \times 2 = 10$ 通り）を測定した。測定にはインパルス信号の位相特性を変化させてエネルギーを時間軸上に拡散させた TSP 信号（サンプルレート 44.1kHz, サンプル長 2^{16} ）を用い、その応答を測定した後、位相特性を復元することで拡散したエネルギーを元に戻してインパルス応答を得た。このような測定手法はインパルス応答を測定する際に一般によく使われるものである。

測定したスピーカとダミーヘッド間のインパルス応答を 5ch（上、前、後、左、右）の 5 方向から録音されたドライソースとして準備されている MFP 動作音にデジタル的に畳み込むことで、バイノーラル再生用の試験音を作成した。このように試験音を作成することで、評価実験の際に実機を持ち込む必要がなくなり、設計・試作段階の MFP であっても評価実験を行うことが可能と

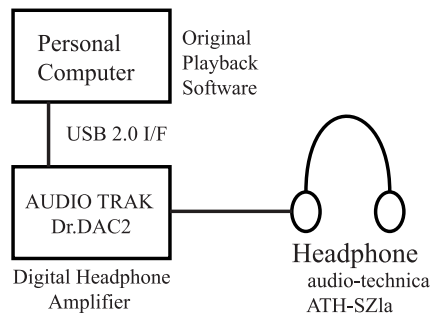


図 2.3: 再生装置の構成



図 2.4: 実験セット

なる。また、試験音の再生系（ヘッドホンアンプやヘッドホンなど）の特性をキャンセルするフィルタ処理も施した [11]。



図 2.5: ダミーヘッド



図 2.6: スピーカユニット

2.3 まとめ

本章では、一対比較法の説明および得られる結果の表示方法、実験方法を説明した。さらに、一対比較法を行うための聴覚刺激（試験音）の準備方法について説明を行った。

第3章 騒音下における印象評価実験

先行研究 [5][6] により対策すべき機械要素の特定、またその静音化対策が進んだ結果、MFP 動作音は年々静かになる傾向にある。これまでの印象評価では動作音のみに着目していたが、最近の静音化の動向を見ると使用環境、特に背景音の影響を加味した評価を実施すべき時期に差しかりつつあるのではないかとと思われる。例えば昨年の研究においても背景音の存在により一部の印象評価結果に変化が認められるものが始めている。そこで本章では、MFP の機種と背景音の種類を増やし、騒音下での印象評価実験を行う。

3.1 評価実験 1 (評価項目:望ましくない 望ましい)

3.1.1 試験音と背景音 (実験 1)

オフィスでプリンタが動作している状況を再現するため、オフィスを想定した大学の研究室 (学生居室、図 3.1) 内でインパルス応答を測定した。このインパルス応答は図 3.2 に示すようにダミーヘッドとスピーカユニットを正面で約 9m 離して設置し測定した。また、同図において矢印はダミーヘッドの向いている方向を示す。このインパルス応答をメーカーの異なる 5 機種の MFP (モノクロ機種、印刷枚数: 20~30 枚/分) のドライソースに畳み込み、5 つの試験音 (以後、試験音 A、B、C、D、E と表記) を作成した。なお、試験音の長さは全て 10 秒である。また背景音として一般的なオフィスを想定したレベル (L_{Aeq} : 45dB) のピンクノイズ (記号 N_P) を準備し、背景音がない状態 (記号 N_0 、動作音のみ) と、背景音を付加した状態での実験を行った。背景音としてピンクノイズを選んだ理由としては、

- 一般的な環境音の平均スペクトルがピンクノイズの平均スペクトルと似ている
- 定常音であるため背景音を考慮した実験の初期段階として解析がしやすいと判断した

などが挙げられる。被験者には「基準音に対して評価音がどれほどプリンタ動作音として“望ましいか”あるいは“望ましくないか”」の評価を求めた。図 3.3 に各試験音およびピンクノイズの平均スペクトルを示す。なお、被験者は正常な聴力を有する大学生 20 名である。



図 3.1: インパルス応答測定場所

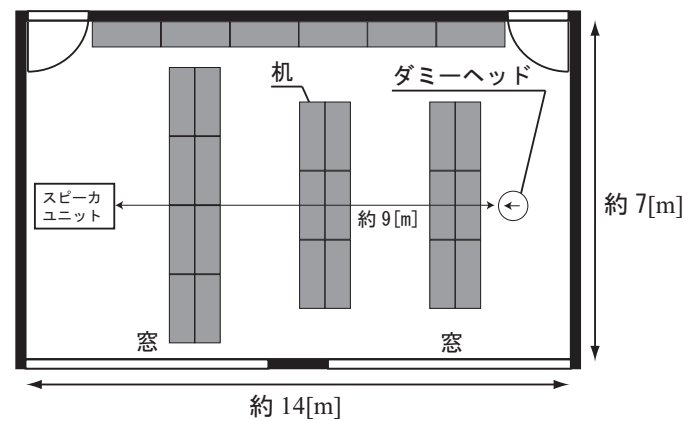


図 3.2: インパルス応答測定位置

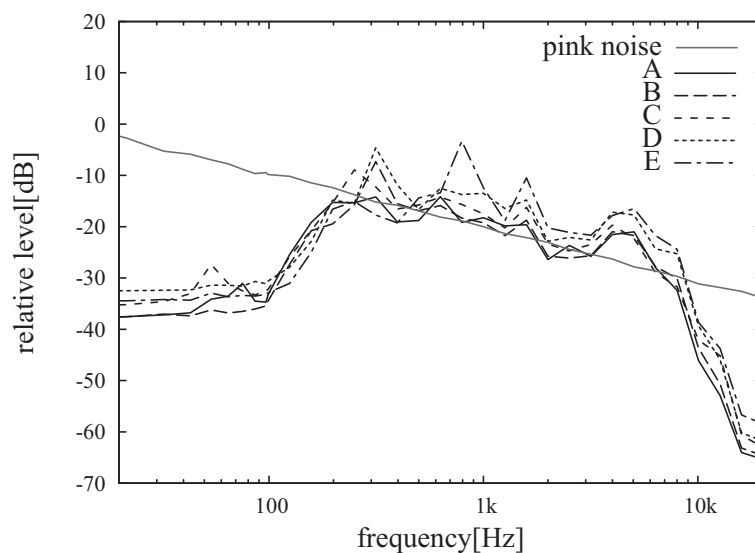


図 3.3: 試験音の平均スペクトル

3.1.2 実験結果 1

図 3.4 に実験結果を示す。背景音を付加したことで試験音 A,B の順位が入れ替わったが有意差が認められるほどではなかった。また試験音 A,B と C 間の有意差がなくなったことから、試験音 A,B,C の一部が背景音にマスクされたことにより、差が分かりづらくなつたと考えられる。

3.2 評価実験 2 (評価項目: 気になる 気にならない)

3.2.1 評価項目の変更

前述の実験では先行研究に習い、一対比較を行う評価項目(設問)を「基準音に対して評価音がどれほどプリンタ動作音として“望ましいか”あるいは“望ましくないか”」としていたが、被験

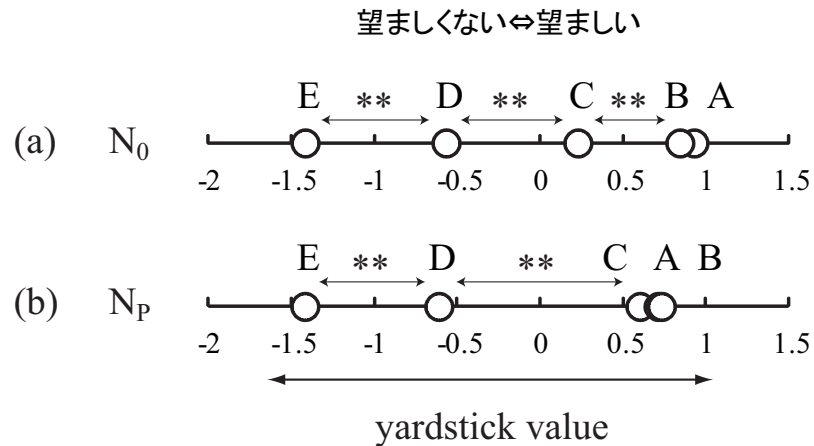


図 3.4: 実験結果 1 (ヤードスティック)

者からの「評価項目が分かりづらい」あるいは「漠然とし過ぎている」との指摘が多いため、評価項目を「基準音に対して評価音がどれほどプリンタ動作音として“気になるか”あるいは“気にならないか”」に変更した。これはクレーム対応の面からは“望ましいか”よりも適切な設問と考えられる。

3.2.2 試験音と背景音 (実験 2)

試験音は評価実験 1 と同様の 5 種類 (A ~ E) を用いた。これらの試験音は 1kHz を境に低域部には駆動系の音、高域部には衝撃性の音が多く含まれている。そこで、背景音は評価実験 1 と同様のピンクノイズ (記号 N_P 、提示レベル L_{Aeq} :45dB) に加え、これをカットオフ周波数 1kHz の HPF に通した音 (記号 N_H 、同 55dB) とカットオフ周波数 1kHz の LPF に通した音 (記号 N_L 、同 55dB) の 3 種類を使用し、背景音がない状態 (記号 N_0 、動作音のみ) を含めて 4 回の実験を行った。このような騒音は現実的ではないが、背景音が印象に与える影響を確認するために選定した。図 3.5 に背景音の平均スペクトルを示す。なお、被験者は正常な聴力を有する大学生 20 名である。

3.2.3 実験結果 2

図 3.6 に実験結果を示す。評価実験 1 の結果 (図 3.4) では背景音がない場合、試験音 A, B と C の間に有意差が見られたが、こちらの実験 (図 3.6(a)) では有意差が見られなかった。しかし各試

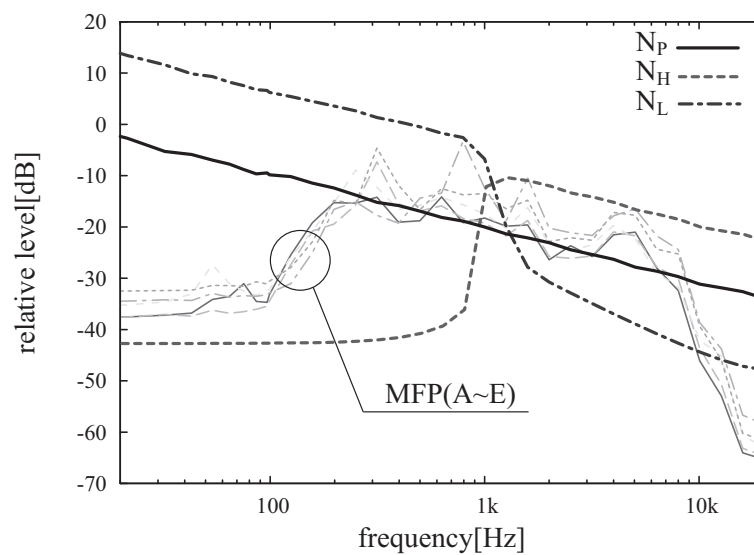


図 3.5: 背景音の平均スペクトル

騒音の順位に変化はなく、相対的な位置関係も似ており背景音 N_P の付加により試験音 A,B,C 間の差が縮小する傾向も同様である。また、同図 (c)、(d) より高域成分の多い背景音 N_H よりも低域成分の多い N_L の方が結果に及ぼす影響が大きいことがわかる。これは動作音全体への寄与も高い試験音 A,B,C の低域成分（主に駆動系の音）が背景音にマスクされた結果ではないかと思われる。

3.3 まとめ

本章では騒音下における MFP 動作音の印象評価実験を行った。評価項目に関わらず、背景音が付加されたことにより印象に変化が生じており、背景音によるマスキングなどの影響が再確認された。また実験数が少ないものの、MFP 動作音の低域がマスクされる方が高域がマスクされるよりも印象の変化が大きい傾向にあることがわかった。一対比較の評価項目を変更したことによる印象の変化が見られたが、この変化が項目の変更によるものなのか、被験者によるものなのかは今回の実験結果のみでは判断できない為、今後さらに被験者を増やしての追加実験などを行い確認していく必要がある。

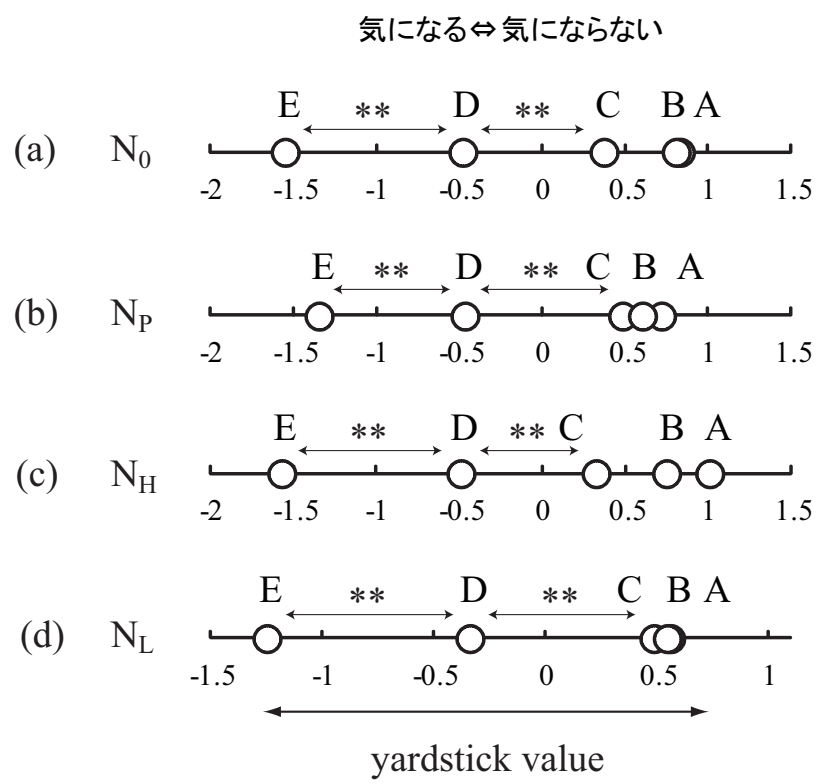


図 3.6: 実験結果 2 (ヤードスティック)

第4章 背景音がない場合の評価指標

本章では論文中で「物理的評価指標」と総称している各種評価指標についてその概要や定義を必要な範囲で説明し、前章で行った背景音がない場合の実験結果との対応関係について調査した結果を述べる。なお、ここで取り上げる指標は等価騒音レベル (L_{Aeq})、ラウドネス (Loudness: N)、ダイナミックラウドネス (Dynamic Loudness: DN)、ラウドネスレベル (Loudness Level: LN)、シャープネス (Sharpness: S)、ダイナミックシャープネス (Dynamic Sharpness: DS)、変動強度 (Fluctuation Strength: F)、Comfort Index (CI) である。また、これらの物理的評価指標の算出に使用したソフトウェアについても概説する。

4.1 物理的評価指標について

音には「美的因子」「金属性因子」「迫力因子」の3要素からなる音の質があると言われている[12]。これは等価騒音レベルなどといったいわゆる「音の大きさ」だけではカバーできない「音の質」を評価するものであり、現在、これらの評価・定量化を目的に様々な物理的評価指標が多くの研究者により考案され、一部はJISやISO等の規格に採用あるいは今後の採用が検討されている。

音の物理的評価指標として一般によく認知されているものとして本章で紹介する等価騒音レベルやラウドネス (音の大きさ)、シャープネス (甲高さ)、変動強度 (変動感) がある。この他にも、ラフネス (荒さ感)、トナリリティ (純音感) やAI (語音明瞭度)、不偏アノイアンス等々が知られており、Comfort Index (不快感) のように研究者が独自に提唱する指標も多々存在する[13][14][15]。

4.2 各種物理的評価指標の説明および算出方法

4.2.1 等価騒音レベル L_{Aeq} [dB][12]

等価騒音レベル L_{Aeq} は物理量であるが、音圧レベルを人間の耳の感度 (周波数特性) に留意して補正することによって「音の大きさ」を定量化しようというものである。人間の耳は2k ~ 4kHz

付近が最も感度がよく、低音と高音で感度が悪くなる特性を持つことが分かっており、これを近似する補正特性（A 特性という）をもつフィルタを通して音圧を求めたものが A 特性音圧 $p_A(t)$ である。そして、これをレベル表示したものが、いわゆる騒音レベル（A 特性音圧レベル）である。

L_{Aeq} の英語による正式名称は equivalent continuous A-weighted sound pressure level（A 特性実効音圧レベル：騒音計で測った音圧の実効値のレベル）であり、その値は A 特性音圧 $p_A(t)$ から

$$L_{Aeq,T} = 10 \log_{10} \frac{1}{T} \int_0^T p_A^2(t) dt / p_0^2 \quad [\text{dB}] \quad (4.1)$$

で算出できる。ここで

T ：観測時間

$p_A(t)$ ：A 特性音圧 [Pa]

$p_0 = 20 [\mu\text{Pa}]$

である。この式からわかるように L_{Aeq} は 2 乗平均音圧をレベル表示したものであり、いわゆる実効値レベルである。簡単にいえば、 L_{Aeq} はある時間帯 T を代表する平均的な騒音レベルと考えてよい。

L_{Aeq} は評価量として

- 合理的で分かりやすい
- 測定及び予測が容易である
- 複合騒音の評価や騒音の総合評価に利用できる

など多くの利点を有し、国内外において様々な騒音の評価量として採用されている。しかし、個々の騒音の評価では必ずしも L_{Aeq} が最適というわけではない。聴力への影響、会話（聴取）妨害、睡眠妨害、作業妨害、心理的、情緒的影響（うるささ、騒がしさ）など様々な側面があり、 L_{Aeq} のみで全てに対応することは困難とされている。

4.2.2 ラウドネス $N[\text{sone}][13]$

ラウドネスとは、本来、音の大きさに関する感覚量のことであるが、ここで述べるラウドネスとは、その量を音の物理評価量（スペクトル情報など）からヒトの聴覚特性を考慮した計算モデルによって近似的に求めるものである。（研究者の名前を付けて、Zwicker ラウドネスと呼ぶ場合もある。）これは定常音に関しては既に ISO 532B で規格化されている。

一般にヒトの音の大きさの感じ方に影響するものとしては

- 耳の周波数特性
- スペクトルマスキング（周波数軸上で起こる現象）
- テンポラルマスキング（時間軸上で起こる現象）

といった現象が知られている。このうち1番目の耳の周波数特性については既に述べたように L_{Aeq} の算出過程でも一定の補正（A特性）がかけられて考慮されているものである。2番目以降はいわゆるマスキングと呼ばれる現象で、ある音が聞こえているときにもう一つの別の音を聞かせると、前者の音（マスキーマスク）が後者の音（マスキーマスク）によってかき消され（マスキーマスク）聞こえなくなってしまう現象のことである。前者と後者の音が同時に鳴っており、それぞれのスペクトル構造が異なっているような場合に発生するマスキングをスペクトルマスキング（あるいは同時マスキング）という。また、前者と後者の音が同時に鳴るのではなく、短い時間間隔で離れた位置関係にある場合をテンポラルマスキング（あるいは継時マスキング）という。このような現象が影響して、人間が感じる音の大きさは前述の L_{Aeq} だけでは説明できないとされている。従って、より正確に音の大きさを評価するためには、マスキングを考慮したラウドネスの算出が必要である。

ISO532Bによるラウドネスの計算方法の概要は、以下の通りである。（ISO532Bではテンポラルマスキングは考慮されていないことに注意されたい。）

1. 対象音をフーリエ変換し、音響パワースペクトルを得る。
2. 1を臨界帯域に分離し、帯域ごとのエネルギーを計算する。
3. スペクトルマスキングの効果を計算する。
4. ラウドネス密度 $N'(z)$ [sone/Bark]（横軸：臨界帯域 z [Bark]、縦軸：ラウドネス密度）を計算する。
5. ラウドネス密度を全帯域 0～24Bark について積分し、ラウドネス N を得る。

ここで、臨界帯域数（Bark）とは可聴周波数帯域において臨界帯域幅に相当する周波数帯域が等間隔になるような周波数尺度のことである。周波数軸から Bark 軸への変換式を以下に示す（ f [Hz] は通常周波数軸における周波数）。

$$z = 13 \arctan \frac{0.76f}{1000} + 3.5 \arctan \left(\frac{f}{7500} \right)^2 \quad [\text{Bark}] \quad (4.2)$$

ラウドネスはこの臨界帯域数の軸に沿ってラウドネス密度 $N'(z)$ を以下のように積分することで求められる。

$$N = \int_0^{24} N'(z) dz \quad [\text{sone}] \quad (4.3)$$

4.2.3 ダイナミックラウドネス $DN[\text{sone}][16]$

ダイナミックラウドネスは Chalupper と Fastl のダイナミックラウドネスモデルに基づいた後述するソフトウェア PSYSOUND3 にも実装されている物理的評価指標である。本論文では DN と表記する。ラウドネスとの違いとして、短時間ごとにラウドネス密度を計算し、テンポラルマスキングを考慮している点が挙げられる。PSYSOUND3 では各時間 (2ms 毎) で計算したダイナミックラウドネス密度を時間関数 $N'_D(z, t)$ とし、これを基に各時刻で求められるラウドネス $N_D(t)$ の時間平均を最終的に評価値として出力する。また、各時間で計算されたダイナミックラウドネス密度 $N'_D(z, t)$ を csv 形式でエクスポートすることも可能である。また、テンポラルマスキングを考慮しているため非定常音に対する評価にも有効であるとされている。

4.2.4 ラウドネスレベル $LN[\text{phon}][13]$

ラウドネスをレベル表示したものであり、本論文では LN と表記する。1kHz の純音を基準に人が聞いたときに大きさの等しい音圧レベルをラウドネスレベルと呼び、単位は $[\text{phon}]$ である。たとえば、音圧レベル 70dB の 1kHz の純音と大きさの等しい音はその周波数構造に関わらず 70phon と表現される。また、ラウドネス N との関係は以下の式で定義される。

$$LN = 10 \log_2 N + 40 \quad [\text{phon}] \quad (4.4)$$

4.2.5 シャープネス $S[\text{acum}][13]$

音の鋭さ、甲高さを評価量するシャープネスは高い音と低い音のバランスによって決まり、ラウドネス密度関数を基に以下の考え方により算出される。

1. ラウドネス N と同様に、ラウドネス密度 $N'(z)$ を求める。
2. $N'(z)$ および重み係数 $g'(z)$ より式 (4.5) に従い算出される。
3. 周波数軸上で高音側にいくほどシャープネスは高く評価される。

具体的にシャープネスは以下の式で求められる。

$$S = 0.11 \frac{\int_0^{24} N'(z) g'(z) z dz}{\int_0^{24} N'(z) dz} \quad [\text{acum}] \quad (4.5)$$

$$g'(z) = \begin{cases} 1 & (z < 14) \\ 0.00012z^4 - 0.0056z^3 + 0.1z^2 - 0.81z + 3.51 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (4.6)$$

ここで、

N' : ラウドネス密度 [sone/Bark]

$g'(z)$: 重み係数

z : 臨界帯域数 [Bark]

である。シャープネスの基準となる音は 1kHz を中心とした狭帯域雑音で、帯域幅が 1Bark の音圧レベル 60dB であり、この時、シャープネスは 1acum となる。図 4.1 にラウドネスの重み係数 $g'(z)$ を示す。このように臨界帯域が高くなるごとに重みが増すことで、高い周波数成分を含む音ほどシャープネスが高く算出されるようになっている。なお、本論文では Zwicker と Fastl の算出モデルを採用している。

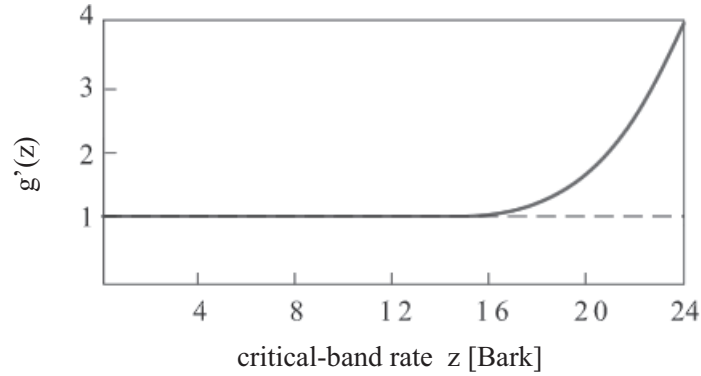


図 4.1: 重み係数 [13]

4.2.6 ダイナミックシャープネス $DS[\text{acum}]$

シャープネスの算出に用いるラウドネス密度 $N'(z)$ をダイナミックラウドネス密度 $N'_D(z, t)$ に置き換え、各時刻毎に $S_D(t)$ を算出したものであり、代表値としてその時間平均を用いる。本論文では DS と表記する。

4.2.7 変動強度 $F[\text{vacil}]$ [13]

人間は、音の大きさが変動する（大きい小さいを繰り返す）場合と、周波数が変動する（高い低いを繰り返す）場合に変動感を感じる。この変動の周期が非常にゆっくりの場合には変動感（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（変調周波数が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。

変動強度の計算では、ラウドネスの時間履歴にどれだけ変動成分が含まれているかを調べることで計算を行っている。ラウドネスが変調周波数4Hzに近い場合に、変動強度が大きくなる。具体的には、以下の式で定義される[17]。

$$F = \frac{\int_0^{24} \log_{10} \left(\frac{N'_{\max}}{N'_{\min}} \right)}{\frac{f_{\text{mod}}}{4} + \frac{4}{f_{\text{mod}}}} [\text{vacil}] \quad (4.7)$$

ただし、

f_{mod} : 変調周波数 [Hz]

N' : ラウドネス密度 [sone/Bark]

である。

変動強度の基準となる音は、1kHzの純音を変調周波数4Hzで100%AM変調し、音圧レベルを60dBとした音であり、この時の変動強度を1vacilとしている。

純音以外の複合音に対する詳細な計算手順については、本研究では後述するソフトウェアPSYSOUND3に委ねており、原時点は把握できていないため詳説は割愛する。

4.2.8 Comfort Index CI [15]

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で知られている。その値は前述の等価騒音レベル L_{Aeq} とシャープネス S から

$$CI = (1/10)L_{\text{Aeq}} + S \quad (4.8)$$

で算出され、指標であるため特に単位はない。

また桑野らはこの CI に変動強度 F の値を加えると歯科治療用ドリル（歯科タービン音）の音の印象に対して CI 以上に良い対応を示すとしている [18]。本論文ではこの CI に変動強度 F を加えた値のことを $CI + F$ 値と表現する。

4.2.9 物理的評価指標の算出方法

本研究ではデジタル録音された各試験音に対して上述の物理的評価指標を、解析ソフトウェア“PSYSOUND3”[19]を使用して算出した。PSYSOUND3 では等価騒音レベル、ラウドネス、ダイナミックラウドネス、シャープネス、ダイナミックシャープネス、変動強度、ラフネスが算出可能であり、これらの値と印象評価実験で得られる尺度値との対応関係を先行研究 [7][8] より調査している。

なお、PSYSOUND3 ではラウドネスレベルおよび Comfort Index を直接計算することができない為、算出された値に基づいて定義式に従いそれぞれ計算している。

PSYSOUND3 は、シドニー大学の Densil Cabrera らのグループを中心に開発されているフリーソフトであり、MATLAB 上で ToolBox を導入することで動作する。なお、PSYSOUND3 本体はホームページ上 (<http://psysound.wikidot.com/>) からダウンロードできる。

実行画面例は図 4.2 に示す通りであり、評価したい試験音と校正信号のデジタルデータ（wav ファイル）と、その測定時の校正信号のレベルを指定することで、物理的評価指標を算出することができる。なお、各物理的評価指標の算出アルゴリズムの詳細を知るにはホームページや公開されているソースコードに記載されている参考文献に依るか、ソースコードそのものを解読する必要がある。本研究では、物理的評価指標を算出したソフトウェアを明示することで結果の再現性を保証しているだけで、現時点で内部のアルゴリズムそのものについて十分に検証するには至っていない。これは今後の課題である。

具体的な物理的評価指標の算出手順は以下の通りである。

1. 分析対象の wav ファイルを選択
2. 校正信号の wav ファイルを選択、校正レベルを入力
3. 使用したいモジュール（アナライザ）を選択、実行
4. 分析結果の表示

また、分析結果は数値で表示されるだけでなく、グラフ描画や CSV 形式でのエクスポートも可能である。

4.3 物理的評価指標との関係

前述の指標の中でも、これまでの研究結果から MFP 動作音の印象評価との対応関係が良いとされている L_{Aeq} および CI との関係を調査した。図 3.4(a) の横軸である実験で得られた尺度値との関係を図 4.3(a) に、同様に図 3.6(a) の横軸である尺度値との関係を同図 (b) に示す。これらの指標とはいずれも決定係数 (r^2) が高く、尺度値と高い相関関係を示しており、背景音がない場合はこれらの指標で十分説明できていることが再確認された。

次に、 L_{Aeq} をマスキングを考慮した感覚量であるラウドネスレベルに置き換えた新たな指標について検討する。図 4.4 に指標の算出過程のイメージを示す。物理評価指標の算出に使用した PSYSOUND3 にはテンポラルマスキングを考慮しながら各音のラウドネス密度を 2ms 間隔で算出し、CSV 形式のファイルに書き出す機能が実装されている。そこで、書き出されたデータ ($N'_D(z, t)$) に相当、同図 (a)) より各時刻におけるラウドネスレベル $LN_d(t)$ およびシャープネス $S_d(t)$ を算出する (同図 (b))。ここで、 CI に音の大きさの要素として加味されている L_{Aeq} を LN_d に、シャープネス S を S_d に置き換えた以下のような指標 CI_d を考え、こちらも各時刻において $CI_d(t)$ を算出した (同図 (c))。

$$CI_d = (1/10)LN_d + S_d \quad (4.9)$$

これらの時間平均値をそれぞれ LN_D 、 CI_D とする。これらの指標は PSYSOUND3 で算出されるダイナミックラウドネス DN をレベル表示したものおよびダイナミックシャープネス DS と算出手順は同様であり、ほぼ同等の値を示している。しかし、PSYSOUND3 の内部処理が不明確であるため、今回はテンポラルマスキングを考慮した指標としてこれらを採用する。図 4.3 と同様に、図 4.5 に LN_D および指標 CI_D と 3 章の背景音がない場合の実験結果との関係を示したが、いずれの指標も実験結果と高い相関関係を示している。これらの指標は動的なラウドネス密度を基に算出しているため、衝撃性の音を含む MFP 動作音の評価により適していると思われたが、今回の実験結果では L_{Aeq} および CI と大きな差は見られなかった。現在、印象評価においては比較的定常的な印刷時の動作音について評価を行っている為、今後さらに非定常な動作音の評価をする際にはより有効に機能することが期待される。

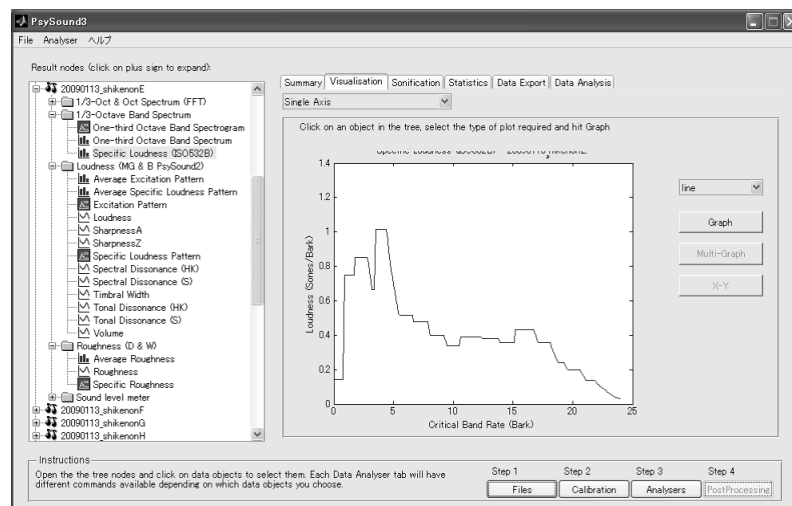
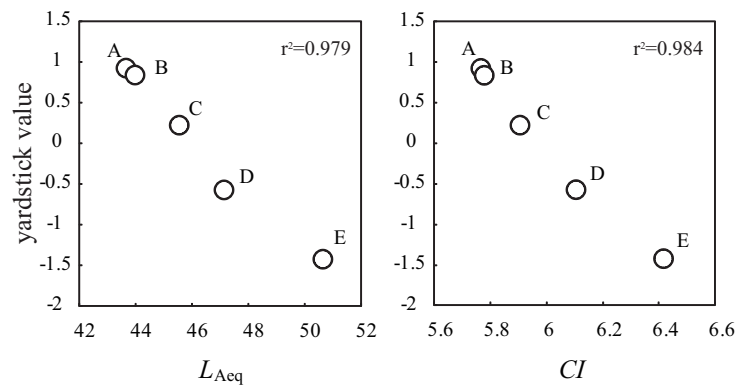


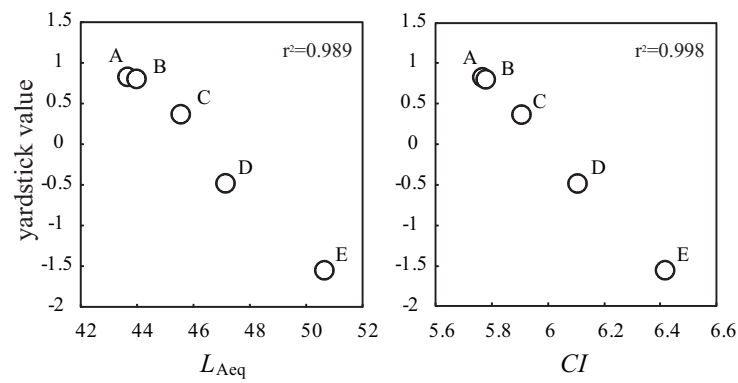
図 4.2: PSYSOUND3 実行画面例

4.4 まとめ

本章では、本研究で物理的評価指標と呼んでいる評価量の定義、およびこれらの物理的評価指標の導出に利用したソフトウェアの概要について説明した。また、背景音がない場合における MFP 動作音全体の印象（前章の一対比較法で得られる尺度値）と L_{Aeq} 、 CI 、 LN_D および CI_D との対応関係について調査した。その結果、高い相関関係が認められた。背景音が付加された場合については、背景音の有無による印象の変化を動作音のみから算出したこれらの指標で説明することは出来ないため、次章では背景音を付加したことによる印象の変化、特にマスキングの影響を考慮した指標について考える。



(a) 「望ましくない ⇄ 望ましい」の尺度



(b) 「気になる ⇄ 気にならない」の尺度

図 4.3: L_{Aeq} および CI との関係 (背景音なし N_0)

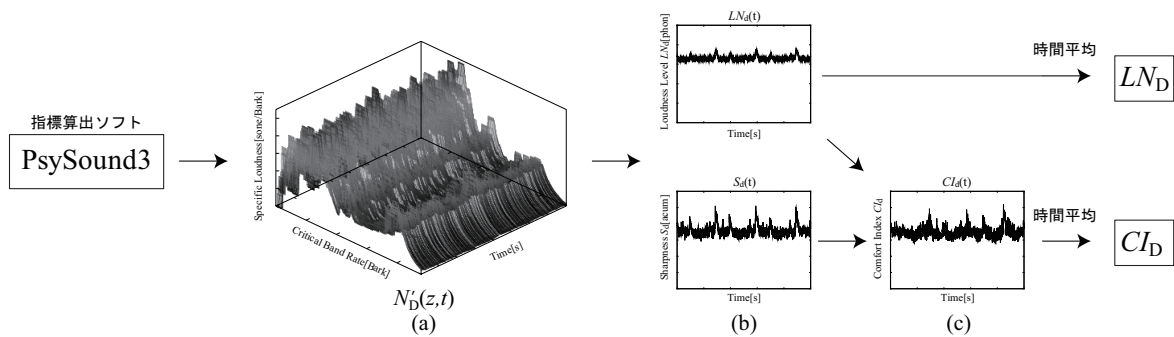
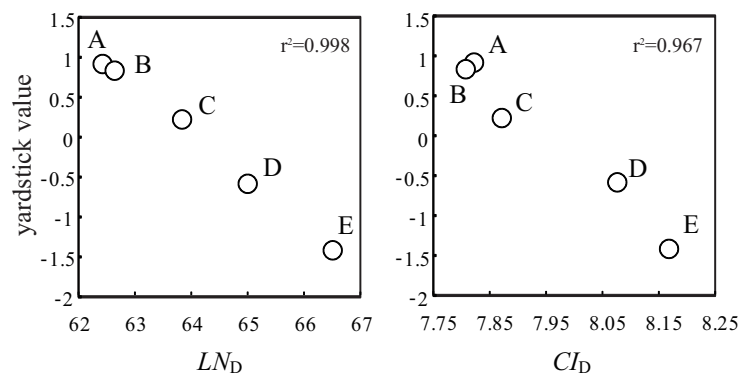
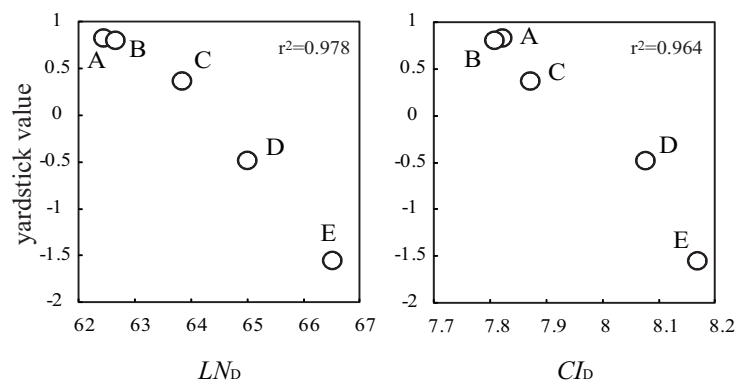


図 4.4: LN_D および CI_D の算出過程



(a) 「望ましくない ⇄ 望ましい」の尺度



(b) 「気になる ⇄ 気にならない」の尺度

図 4.5: LN_D および CI_D との関係 (背景音なし N_0)

第5章 騒音下における評価指標

3章の実験では背景音が加わったことにより、一部の機種間にあった印象の差が縮小する傾向が認められた。この現象は相対的に印象の良い低騒音の機種に集中しておりマスキングの影響が考えられる。一般に背景音が存在する状況下で特定の音の大きさを評価する際にはマスキングの影響を考慮すべきとの考え方がある。本研究における MFP 動作音の印象評価においても、今以上に機器の静音化が進めば前章で対応関係を調査した L_{Aeq} 等の指標値は小さくなり、動作音の印象は計算上はどこまでもよくなってしまふ。しかしながら、背景音の存在により計算値ほどの印象の改善が見込めないことは容易に想像できる。また、過度な静音・快音化対策はコストの増大を招くため、今後は背景音の影響も考えながら、過剰スペックにならない効果的な対策、すなわちそれ以上の対策が不要となる目標（下限）値を意識しながらの対策が望まれる。そこで、本章では背景音による影響を考慮した物理評価指標について検討する。

5.1 背景音による影響を考慮した物理的評価指標の検討

5.1.1 指標 1（増分ラウドネスレベル ΔL_{ND} ）

ここでは背景音による影響を見るため、背景音に MFP 動作音が付加された場合の前章で述べた L_{ND} および CI_D の増分である ΔL_{ND} および ΔCI_D と尺度値との関係を調査した。図 5.1 に指標との関係を示す。これらの指標値はいずれも全体として尺度値と高い相関を示している。とくに図 4.5(a) に比べ、図 5.1(a) では背景音を付加したことで試験音 A,B,C 間で ΔL_{ND} の値が相対的に近づいており（同図 (a) 破線）、背景音のマスキングの影響で、これらのラウドネス感に差がなくなり印象が近づいたとの解釈を支持する結果となっている。 ΔCI_D についても、試験音 A,B,C の距離が相対的に近づいている傾向（同図 (a) 実線）が見られるが ΔL_{ND} ほどではないことがわかる。同図 (b) についても同様のことが言える。 ΔL_{ND} に関しては (d) を除けば背景音が付加されたことによる印象の変化をうまく説明できている（同図破線）。しかし、試験音 A,B,C 間の差が最も小さい (d) に関してはそれぞれの指標 ΔL_{ND} の値に開きが見られる（同図 (d) 一点鎖線）。

(c)、(d)における ΔCI_D 値も背景音による印象の変化を説明できているとは言えず、指標 CI_D に関しては S_D の項が有効に機能しているかの確認が必要である。今後、各試験音のラウドネスレベルを揃えての実験や、式 (4.9) の係数の見直しが課題として挙げられる。

5.1.2 指標2 (マスキトラウドネスレベル LN_P)

ここでは、Zwicker が提案するマスキングを考慮したラウドネス [20] (以下マスキトラウドネスと記す) の算出法に従った指標について検討を行う。評価音 (本研究では MFP 動作音) の各臨界帯域のラウドネス密度を N'_T 、マスキ (本研究では背景音) の各臨界帯域のラウドネス密度を N'_M とした場合のマスキングを考慮したラウドネス密度 (マスキトラウドネス密度) N'_P は次式で表わされる [20]。

$$N'_P = \begin{cases} 0 & (N'_T < 0.8N'_M) \\ N'_T & (N'_T > 2N'_M) \\ (10N'_T/6) - (8N'_M/6) & (0.8N'_M \leq N'_T \leq 2N'_M) \end{cases} \quad (5.1)$$

ここで、PSYSOUND3 によって書き出される動作音および背景音の短時間ラウドネス密度より $N'_P(z, t)$ を求め、そこから指標1 (増分ラウドネスレベル ΔLN_D) と同様にして各時刻におけるラウドネスレベル $LN_P(t)$ およびシャープネス $S_p(t)$ を求める。 CI_d と同様 CI に倣って、新たな以下のような指標を考えた。

$$CI_P = (1/10)LN_P + S_p \quad (5.2)$$

これらの時間平均値をそれぞれ LN_P 、 CI_P とする。図 5.2 に、 LN_P および CI_P と尺度値との関係を示す。これらの指標値はいずれも全体として尺度値と高い相関を示しているが、同図 (a)、(b)、(d) において LN_P および CI_P のいずれにおいても試験音 A,B,C 間で指標の開き (同図破線) が見えるため、背景音を付加したことによる印象の変化を説明できているとは言えない。指標1 (増分ラウドネスレベル ΔLN_D) と比較すると背景音 N_H を付加しての実験結果 (同図 (c)) との対応関係はよいことがわかる。

5.2 まとめ

本章では背景音による影響を考慮した物理的評価指標として、 ΔLN_D 、 ΔCI_D 、 LN_P および CI_P を提案した。これらの指標の中では、背景音が有る場合の評価方法として ΔLN_D が有効である可

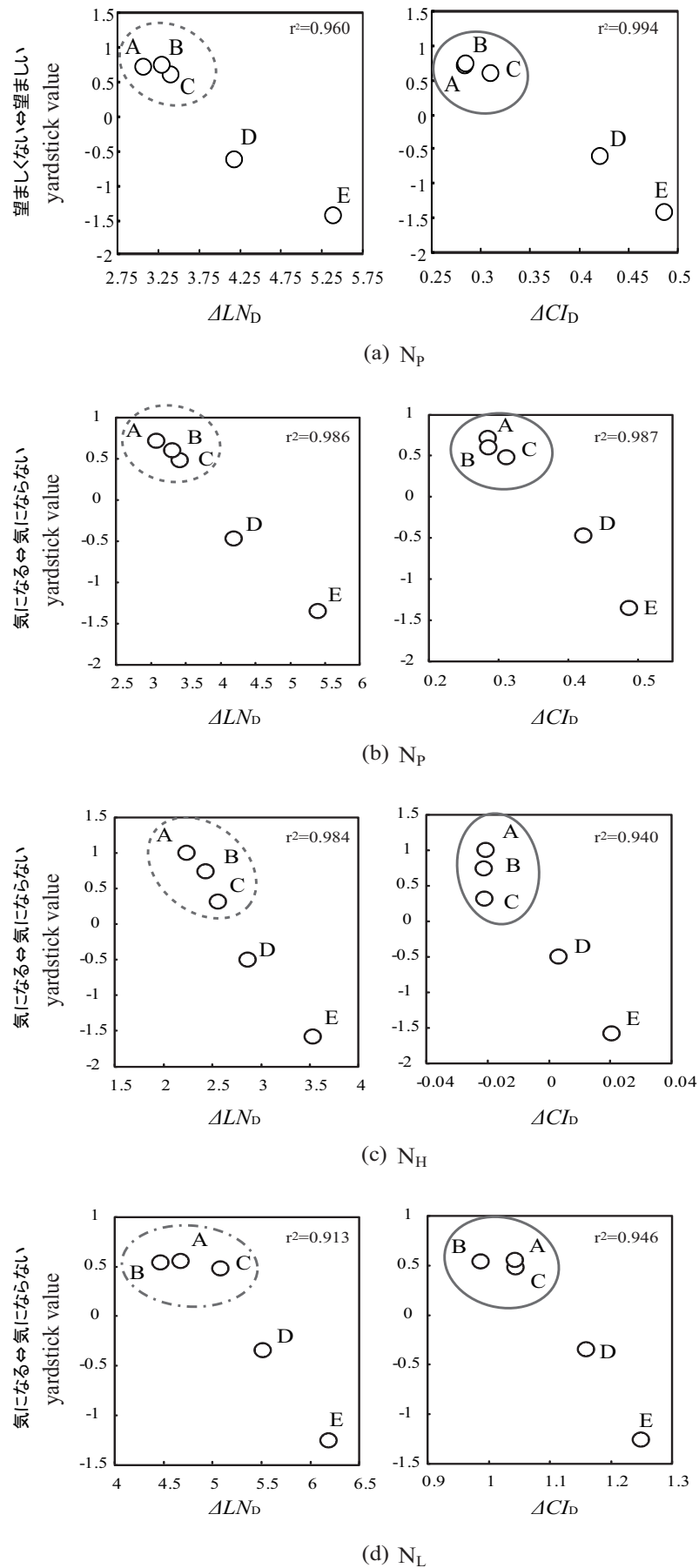


図 5.1: ΔLN_D および ΔCI_D との関係

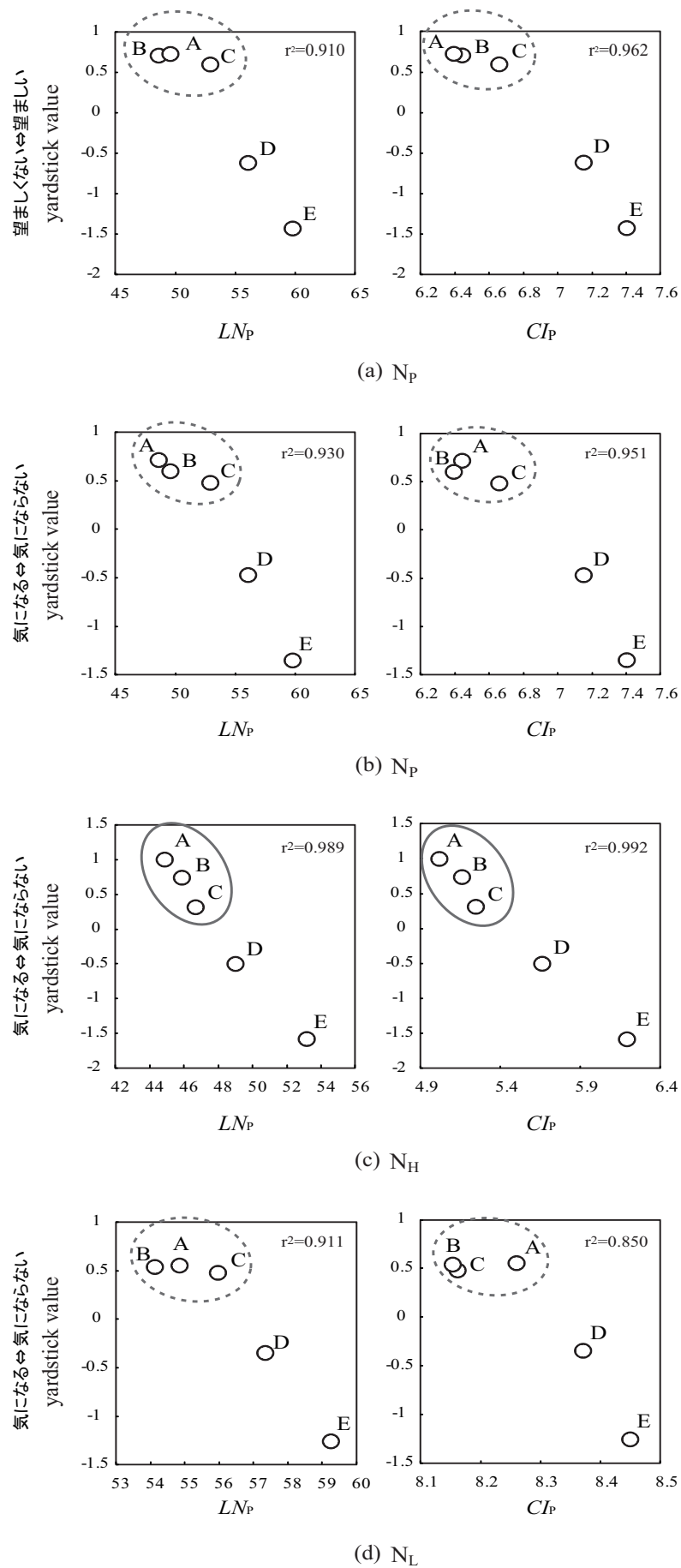


図 5.2: LN_p および CI_p との関係

能性が示唆された。しかし、今回の実験だけで直ちに有効であるとするにはサンプルが少ない為、今後追加実験を行い確認していく必要がある。

第6章 結び

先行研究で、背景音を付加しての MFP 動作音の印象評価実験を行った結果、一部の印象評価結果に変化が認められた為、本研究では騒音下における印象評価実験を追加し、背景音が印象評価に及ぼす影響の調査とともに、騒音下においても使用可能な評価指標を見出すことを目的とした。そこで、本論文ではメーカーの異なる 5 機種 of MFP 動作音に対して、背景音がない条件と下記の 3 つの条件で背景音を付加しての印象評価試験を行い、その結果と物理的評価指標との対応関係を調査した。

- ピンクノイズ（提示レベル L_{Aeq} : 45dB）
- ピンクノイズをカットオフ周波数 1kHz の HPF に通した音（提示レベル L_{Aeq} : 55dB）
- ピンクノイズをカットオフ周波数 1kHz の LPF に通した音（提示レベル L_{Aeq} : 55dB）

また、一対比較法で用いる設問をより適切と思われる項目に変更し、評価項目の変更による結果の違いについても調査した。

第 2 章では、印象評価実験の実験方法および手順について説明した。このシステムを用いることで、評価実験の際に実機を持ち込む必要がなくなり、設計・試作段階の MFP であっても評価実験を効率的に行うことが可能となった。

第 3 章では、騒音下における MFP 動作音の印象評価実験の結果を紹介した。その結果、比較的评价の高い 3 機種間で背景音が付加されたことによる印象の変化が生じており、マスキングによる影響が示唆される結果となった。今回の結果（機種）では、MFP 動作音の低域がマスクされる方が高域がマスクされるよりも印象の変化が大きい傾向にあることがわかった。また、一対比較の評価項目を変更したことにより印象の変化（有意差の有無など）が若干認められたが、相対的な位置関係については、ほぼ同等の結果が得られた。

第 4 章では、本論文で「物理的評価指標」と呼んでいる等価騒音レベル（ L_{Aeq} ）、ラウドネス（Loudness: N ）、ダイナミックラウドネス（Dynamic Loudness: DN ）、ラウドネスレベル（Loudness Level: LN ）、シャープネス（Sharpness: S ）、ダイナミックシャープネス（Dynamic Sharpness: DS ）、

変動強度 (Fluctuation Strength: F)、Comfort Index (CI) およびそれらの指標の算出法について説明した。また、3章の背景音がない場合における実験結果と物理評価指標との対応関係について調査した。その結果、 L_{Aeq} および CI と評価実験で得られる尺度値との対応関係がよいことが再確認された。また、テンポラルマスクングを考慮した指標として LN_D および CI_D を提案し、それらと尺度値との対応関係を調査したところ高い相関関係が見られた。

第5章では、3章の騒音下における実験結果と物理評価指標との対応関係について調査した。背景音による影響を考慮した物理評価指標として背景音に MFP 動作音が加わることで変化するラウドネスレベルの増分値 (増分ラウドネスレベル ΔLN_D) および ΔCI_D 、マスクトラウドネス密度を基に算出したラウドネスレベル (マスクトラウドネスレベル LN_P) および CI_P との対応関係を見たところ高い相関関係が認められ、特に ΔLN_D が有効である可能性が示唆された。しかし、現段階では背景音の存在による印象の変化を十分に説明できているとは言い難い。また、本論文では各時刻における指標値の時間平均値を最終的な評価量として用いたが、時間変動音に対する評価として平均値を用いることが適切かは検討の余地があると思われる。今後は別の統計量を用いての評価も考えられる。

今後の課題として

- 一対比較法で用いる評価項目の妥当性に関する検証
- MFP 動作音のラウドネスレベルを揃えての騒音下における印象評価実験の実施
- 背景音を変化させた追加実験を行い、背景音による影響を考慮した指標の有効性の確認
- 実際のオフィスでの雑音を付加した実験の実施

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、一対比較法についての御助言と御協力を賜った井須尚紀教授、ならびに共同研究を行った京セラミタの橋詰昌浩氏、土用秀明氏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] 藤原他, “掃除機騒音の快音化に向けた音質評価” 日本音響学会 (秋), 2-5-11, 2005
- [2] 酒見他, “MFP およびプリンター稼働音の衝撃性の評価について” 騒音・振動研究会資料, N-2009-75, 2009.
- [3] 桑野他, “コピー機の音の印象評価-音質評価指標の検討-”, 日本音響学会 (春), 3-3-1, 2010.
- [4] 難波他, “コピー機の音の印象評価-音質評価指標に基づく機器の改善”, 日本音響学会 (春), 3-3-2, 2010.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 津田, “MFP 動作音の印象と音質評価パラメータの関係” 三重大学修士論文, 2010.
- [8] 高松, “実環境下における MFP 動作音の印象評価に関する研究” 三重大学修士論文, 2011.
- [9] 福田, “人間工学ガイド 感性を科学する方法 ”, サイエンティスト社, 2004.
- [10] 森他, “心理学のためのデータ解析テクニカルブック”, 北大路書房, 1993.
- [11] 高松他, “バイノーラル録音用簡易ダミーヘッドの作成”, 電気関係学会東海支部連合大会講演論文集, O-173, 2009.
- [12] 久野, 野呂, “音を診る 騒音の計測と評価 dB と L_{Aeq} ”, 技報堂出版, 2006.
- [13] 小野測器技術レポート, “音質評価とは”, 小野測器 Web ページ
http://is1.onosokki.co.jp/HP-WK/c_support/newreport/soundquality/index.htm
- [14] 音の何でもコーナー, “Q and A(Q.149)”, 社団法人 日本音響学会ホームページ
<http://www.asj.gr.jp/qanda/index.html>
- [15] 桑野, “音質デザインの方向性”, 日本音響学会誌 64 巻 9 号, pp.551-555, 2008.
- [16] Chalupper, J. & Fastl, H., “Dynamic loudnessmodel DLM for normal and hearing-impaired listeners”, Acta Acustica, vol.88, pp.378-386, 2002.

- [17] 章忠, “人にやさしい家電製品や自動車などの音響デザインに関する研究”, 財団法人 日比科学技術振興財団平成 17 年度研究報告書, 2005.
- [18] 桑野, “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関する研究”, 日本音響学会 (春), 3-7-8, 2009.
- [19] <http://psysound.wikidot.com/>
- [20] E.Zwicker, “Procedure for Calculating Partially Masked Loudness Based on ISO 532 B”, *inter noise*, 1987.