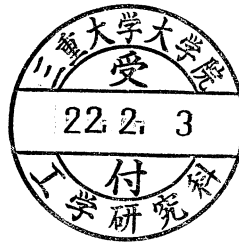


修士論文

MFP動作音の印象と音質評価パラメータ の関係



平成 21 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

津田 真友子

目次

第 1 章 序論	1
1.1 研究背景	1
1.2 本研究の目的	1
1.3 本論文の構成	2
第 2 章 印象評価のための音質評価パラメータ	3
2.1 音質評価パラメータの歴史	3
2.2 各種音質評価パラメータの説明	3
2.2.1 等価騒音レベル L_{Aeq} [dB]	3
2.2.2 ラウドネス N [sone] [6]	4
2.2.3 シャープネス S [acum] [6]	5
2.2.4 変動強度 F [vacil] [6]	5
2.2.5 ラフネス R [asper] [6]	6
2.2.6 Comfort Index CI [9]	7
2.3 音質評価パラメータの算出	7
2.4 まとめ	8
第 3 章 印象評価試験システム	9
3.1 試験方法について	9
3.1.1 結果の読み取りについて	10
3.2 スピーカ受聴方式	10
3.2.1 試験音の再生方法	10
3.2.2 試験方法	11
3.3 ヘッドホン受聴方式	11
3.3.1 室内伝達関数の測定	11
3.3.2 試験方法	12
3.3.3 ヘッドホン受聴方式の妥当性	12
3.4 まとめ	13
第 4 章 MFP 動作音と音質評価とパラメータの関係	14
4.1 評価試験 1	14
4.1.1 試験音 (試験 1)	14
4.1.2 条件 (試験 1)	15
4.1.3 結果 (試験 1)	15
4.1.4 音質評価パラメータとの関係 (試験 1)	15
4.2 評価試験 2	16
4.2.1 試験音 (試験 2)	16
4.2.2 条件 (試験 2)	16
4.2.3 結果 (試験 2)	16
4.2.4 音質評価パラメータとの関係 (試験 2)	16
4.3 評価試験 3	19
4.3.1 試験音 (試験 3)	19
4.3.2 条件 (試験 3)	20
4.3.3 結果 (試験 3)	20
4.3.4 音質評価パラメータとの関係 (試験 3)	20
4.4 評価試験 4	22
4.4.1 試験音 (試験 4)	22
4.4.2 条件 (試験 4)	22
4.4.3 結果 (試験 4)	22
4.4.4 音質評価パラメータとの関係 (試験 4)	23

4.5	まとめ	24
第 5 章	環境音を付加した試験	25
5.1	試験システムの改良	25
5.2	試験 5・6	26
5.2.1	試験音と環境音、試験条件（試験 5・6）	26
5.2.2	結果（試験 5・6）	26
5.3	まとめ	27
第 6 章	結び	29
付 録 A	純音補正の方法	33
A.1	試験音 O の異音について	33
A.2	JIS 規格に基づく純音補正	35
A.3	ISO 規格に基づく純音補正	36

第1章 序論

1.1 研究背景

昨今、職場環境の改善が進み、オフィスは以前に比べれば随分と静かになったと言われる。これは

- 壁、窓、間仕切り壁等の建物自体の遮音性能の向上
- エアコンの普及による窓の非開放

により外部や隣室からの音の侵入が抑制されたことに加え、

- オフィスの床面積の増加
- 吸音性の高い内装材の普及

など室自体の音響特性が改善されたためである。

一方でIT化の進行によりオフィス内に設置されるOA機器が増加した結果、それらの発する音も新たな騒音（室内環境音）として意識されるようになってきている。OA機器の中でも大掛かりな機械駆動系を有するMFP（複合機）やプリンタは主な音源が冷却ファンしかないパソコンに比べ動作音が大きく以前にも増して静音化が求められている。これに対してメーカーも様々な静音化・快音化の対策を講じており、MFP動作音を対象とした研究も盛んになりつつある [1]。

ここで、快音化とは「その音に対して人が受ける印象が良くなるようにする」ことで、静音化（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）とは異なり、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最近注目されている考え方である。既に洗濯機や掃除機等様々な製品で快音化対策が講じられており [2]、これらと同様に本研究もOA機器の動作音に快音化を取り入れ、騒音対策を実施することを視野においたものである。

1.2 本研究の目的

現在、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、メーカーと共同研究を進める中で、多数の音質に関する印象評価実験（心理物理実験）を行っている。しかし、この種の実験にはコストだけでなく多大な人手と労力を要するため、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点は否めない。

そこで、本研究では MFP 動作音の印象を物理評価量である音質評価パラメータから定量的に説明できるモデルを構築し、印象評価のための試聴実験を行わずに MFP 動作音がどんな印象を与えるのかをある程度予想できるようにしたいと考えている。

これまでの研究でも、MFP 動作音と一部の音質評価パラメータとの関連性について検討を行っているが [3] [4]、本研究では改めて各種パラメータとの関連性について調査することを目的とする。具体的な研究目的（ねらい）と内容を以下に列挙する。

- (1) 試聴実験（一対比較法）によって得られる動作音の総合評価値（プリンタ音としての望ましさ）を（複数の）音質評価パラメータから予測・説明する。
- (2) (1) の結果を基に別機種に対して実施された快音化対策が有効に機能したかを試聴実験により確認し、このことを音質評価パラメータで説明できるかを検証する。
- (3) 以上の研究を効率的に遂行するために実験システム（バイノーラル再生によるヘッドホン受聴方式）を整備する。
- (4) 今後の研究の発展方向を見極めるために、(3) のシステムを使い、環境音（背景雑音）が付加された場合の印象の変化の有無を調査する。

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、本論文で「音質評価パラメータ」と呼んでいるパラメータについて説明する。

第3章では、実験を行った環境、実験方法（特に受聴方式）、音質評価パラメータの解析方法について述べる。

第4章では、様々な MFP 動作音に対して一対比較法による実験を行った。それらの実験結果と、音質評価パラメータの関係について調査した結果を述べる。

第5章では、環境音を付加した実験について、その方法と検討結果について述べる。

第6章では、本研究を総括し今後の課題について述べる。

また、付録では第4章で述べる純音補正について詳述する。

第2章 印象評価のための音質評価パラメータ

本章では論文中で「音質評価パラメータ」と呼んでいる等価騒音レベル (L_{Aeq})、ラウドネス (Loudness: N)、シャープネス (Sharpness: S)、ラフネス (Roughness: R)、変動強度 (Fluctuation Strength: F)、Comfort Index (CI: CI) について、その概要や定義を必要な範囲で説明する。

また、これらのパラメータの算出に使用したソフトウェアについても簡単に述べる。

2.1 音質評価パラメータの歴史

音には「美的因子」「金属性因子」「迫力因子」の3つの要素からなる音の質があると言われている [5]。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、これらを実評価・定量化するために様々な音質評価パラメータが多くの研究者により考案され、一部は JIS や ISO 等の規格にも採用されたり、今後の採用が検討されている。

音質評価パラメータとして一般によく知られているものとしては、本論文で紹介するラウドネス (音の大きさ)、シャープネス (甲高さ)、ラフネス (荒さ感)、変動強度 (変動感)、Comfort Index (CI : 不快感) の他、トーンリティ (純音感) や AI (語音明瞭度)、不偏アノイアンスといったものが挙げられる [6] [7]。

2.2 各種音質評価パラメータの説明

2.2.1 等価騒音レベル L_{Aeq} [dB]

等価騒音レベル L_{Aeq} は物理量であるが、音圧レベルを耳の感度の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。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、その値は

$$L_{Aeq,T} = 10 \log_{10} \frac{1}{T} \int_0^T p_A^2(t) dt / p_0^2 \quad [\text{dB}] \quad (2.1)$$

と算出できる。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。簡単にいえば、 L_{Aeq} はある時間帯 T の平均的な騒音レベルを表していると考えてよい。 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
- 複合騒音の評価に利用できる
- 騒音の総合評価に利用できる

など多くの利点を有し、学術的関心も高く、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である。

2.2.2 ラウドネス N [sone] [6]

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。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）

といった現象がある。人間の耳は 2～4kHz 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いる。また、ある音が聞こえているときにもう一つの音を聞かせると、2 番目の音は 1 番目の音によってかき消され（マスクされ）聞こえなくなってしまう現象が知られている。これをスペクトルマスキングという。さらに、ある音が鳴り止んだ直後に別の音を短く鳴らした場合、後の音が前の音に掻き消されて聞こえなくなってしまう現象も知られている。これをテンポラルマスキングという。このような現象が影響して、人間が感じる音の大きさと単なる物理量とでは違いが生じるため、ラウドネスを算出する場合にはこの 3 つの現象を考慮する。

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。

- (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)。

$$z = 13 \arctan \frac{0.76f}{1000} + 3.5 \arctan \left(\frac{f}{7500} \right)^2 \quad [\text{Bark}] \quad (2.2)$$

ラウドネスは以下の式で定義される。

$$N = \int_0^{24} N'(z) dz \quad [\text{sone}] \quad (2.3)$$

2.2.3 シャープネス $S[\text{acum}]$ [6]

音の鋭さ、甲高さの評価量であ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、ラウドネスのデータを基に以下の手順で算出される。

- (1) ラウドネスと同様に、ラウドネス密度 $N'(z)$ を求める。
- (2) $N'(z)$ の面積の重心を求める。(この際、重み係数 $g'(z)$ を付す)
- (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あらわされる。

$$S = 0.11 \frac{\int_0^{24} N'(z) g'(z) z dz}{\int_0^{24} N'(z) dz} \quad [\text{acum}] \quad (2.4)$$

ここで、

N' : ラウドネス密度

$g'(z)$: 重み係数

z : 臨界帯域数

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 1[acum] となる。図 2.1 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、高い周波数の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。

2.2.4 変動強度 $F[\text{vacil}]$ [6]

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。

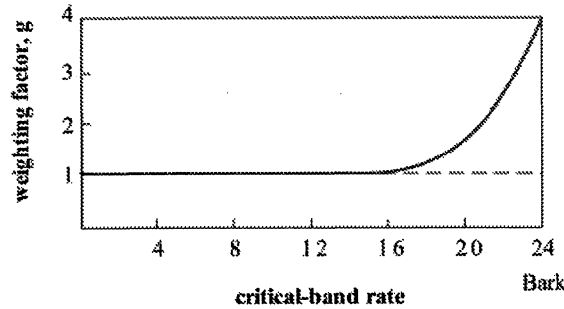


図 2.1: 重み係数 [6]

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 [8]。

$$V = \frac{0.008 \int_0^{24} \Delta L dz}{\frac{f_{\text{mod}}}{4} + \frac{4}{f_{\text{mod}}}} \quad [\text{vacil}] \quad (2.5)$$

ただし、

f_{mod} : 変調周波数 [Hz]

ΔL : テンポラルラウドネスの深さ [dB 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 1[vacil] としている。

2.2.5 ラフネス $R[\text{asper}]$ [6]

ラフネスの場合も、音の大きさや周波数が変調している場合に感じる。ただし、その変調周波数はもっと高く、1 秒間に 70 回ほど（変調周波数が 70Hz）の速さで変調をする場合に最も「粗い」と感じるといわれている。音を「粗い」と感じる時、人間の聴覚では、その音の変調を聞き取っているが、変動している音の一つ一つを分離して聞き取ることができないため、変動感ではなく粗さ感として感じることになる。

ラフネスの計算では、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ている。ラウドネスが変調周波数 70Hz に近い場合に、ラフネスが最も大きくなる。具体的には以下の式で定義される [8]。

$$R = 0.3 f_{\text{mod}} \int_0^{24} \Delta L dz \quad [\text{asper}] \quad (2.6)$$

ただし、

f_{mod} : 変調周波数 [kHz]

ΔL : テンポラルラウドネスの深さ

である。

ラフネスの基準となる音は、1kHz の純音を変調周波数 70Hz で 100 % AM 変調し、音圧レベルを 60dB とした音であり、この時のラフネスを 1[asper] としている。

2.2.6 Comfort Index CI [9]

桑野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ついて不快感と良い対応を示すことで知られている。その値は前出の等価騒音レベル L_{Aeq} とシャープネス S から

$$CI = (1/10)L_{\text{Aeq}} + S \quad (2.7)$$

で与えられる。

また桑野はこの CI に変動強度 F' の値を加えると同様の音に対して CI 以上に良い対応を示すとしている [10]。本論文ではこの CI に変動強度を加えた値のことを $CI + F'$ 値と表現することとする。

2.3 音質評価パラメータの算出

本研究では、各試験音の音質評価パラメータを、デジタル録音したデータから解析ソフトウェア “PsySound3” [11] を使用して算出した。

これは、MATLAB 上で ToolBox を導入することで動作し、PSYSOUND3 のホームページ上 (<http://psysound.wikidot.com/>) でダウンロードできるフリーソフトである。

実行画面例を図 2.2 に示す。

評価したい音が入った 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、様々な音質評価パラメータを算出することができる。なお、各パラメータの算出アルゴリズムの詳細を知るにはホームページやソースコード上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、パラメータ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するだけに留め、内部のアルゴリズムそのものについては検証するには至っていない。これは今後の課題である。

具体的なパラメータの算出手順は以下の通りである。

- (1) 分析対象となる信号のファイルを選び、
- (2) 校正信号のファイルを選び、その校正レベルを入力して、
- (3) 使用したいモジュール（アナライザ）を選択し実行すると、
- (4) 計算結果が出力される。

また、算出パラメータのグラフ描画や、csv 形式でのエクスポートも可能である。

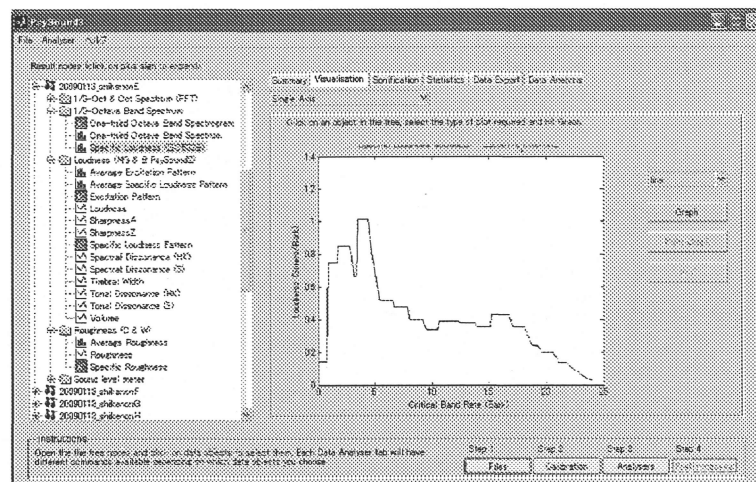


図 2.2: PSYSOUND3 実行画面例

2.4 まとめ

本章では、本研究で音質評価パラメータと呼んでいる評価量の定義について必要な範囲でその概要を説明した。また、これらパラメータの導出に利用したソフトウェアについても紹介した。

第3章 印象評価試験システム

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実験が必要となる。本章ではそのための実験システム（ハードウェア）と実験結果を分析する手法（ソフトウェア）について概説する。

これまでの関連研究では、被験者になるべく自然な形で MFP 動作音を聞いてもらうことを考え、MFP 本体とほぼ同じ大きさの 5ch のスピーカユニットを室内に設置し、そこから試験音（ドライソース）を再生させる方法を採用していた。しかし、この実験方法では条件を揃えるために被験者を同じ部屋に集める必要があるため

- 同時刻に被験者を集める手間を省きたい
- 環境音を付加した実験を行いたい

という理由から、現在では受聴方式としてバイノーラル録音した試験音をヘッドホンで受聴する方法（以下、「ヘッドホン受聴方式」とする）に移行している。

3.1 試験方法について

今回の実験では、試験音が類似したものとなるため、すべて Scheffe の一対比較法を採用した。

一対比較法 [12] 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「プリンタ動作音として望ましいか」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。さらに、その順位について差の検定を行うことにより、その刺激間の有意差の有無を明らかにすることもできる。

例えば、文字間の感覚のみが異なるいくつかの文章を用意し、「最も読みやすい文字間隔の文章はどれか」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 の一対比較法のほかに、Bradley の一対比較法、Thurstone の一対比較法など多くの種類がある。

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)

解析ソフトウェア SPSS, Excel など

3.1.1 結果の読み取りについて

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わされる。今回の実験では、「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）を“どちらでもない”を0とする7段階（-3～+3）で判断を求めたため、尺度軸は「プリンタ動作音として望ましくない⇔望ましい」となっている。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」と解釈されるが、尺度値はそれらの和が0になるように相対的に決定されており、値そのものに絶対的な意味はない。従って、4章以降に記述する各試験（#1～#6）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。

3.2 スピーカ受聴方式

この節ではスピーカ受聴方式で実験を行う際に、5ch のドライソースとして準備されている試験音をどのように処理したのか、また、どんな環境で試験を行ったのかについて述べる。

3.2.1 試験音の再生方法

各試験音は5ch のドライソースとして準備されている。スピーカ受聴方式ではこれを図 3.1 に示す5ch のスピーカユニットを使って再生することにした。再生装置のブロック図を図 3.2 に示す。このスピーカユニットをオフィスを想定した実験室（床面積約 60 m²）のほぼ中央に実機と同じ高さで設置し、被験者が正面方向約 1m 離れた位置で椅子に座った状態で試験音を聴く配置とした。

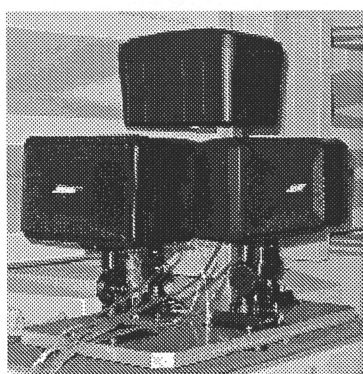


図 3.1: 使用したスピーカユニット

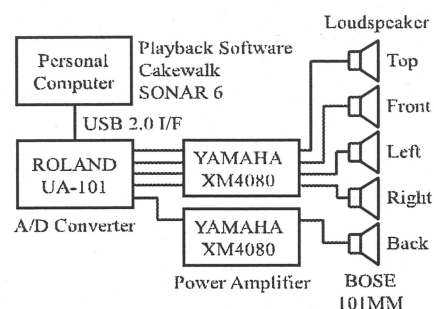


図 3.2: 再生装置の構成（スピーカ受聴）

3.2.2 試験方法

各試験では、5つの試験音からランダムに選ばれた基準となる音（基準音）と、対比して評価する音（評価音）について、「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）を“どちらでもない”を0とする7段階（-3～+3）で判断を求めた。

また、集計作業を効率よく実施するために、回答にはマークシートを用いた。

3.3 ヘッドホン受聴方式

本節ではヘッドホン受聴方式で実験を行う際に、5chのドライソースとして準備されている試験音をどのように処理したのか、また、どんな環境で実験が行われたのかについて述べる。

3.3.1 室内伝達関数の測定

実験状況を再現するために、事前にスピーカ受聴と同じ室内において、図 3.3 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、5chのスピーカユニットの各chとダミーヘッドの左右の耳の間のインパルス応答（ $5 \times 2 = 10$ 通り）を測定した。測定信号には TSP 信号（サンプルレート 44.1kHz, サンプル長 2^{16} ）を用いた。このインパルス応答を試験音のドライソースに畳み込むことで両耳に与える再生信号を作成する。

このようにして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ドライソースの試験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。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。

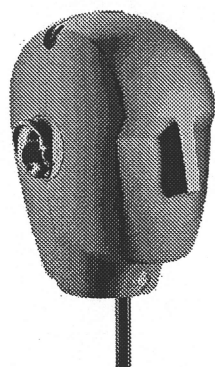


図 3.3: ダミーヘッド

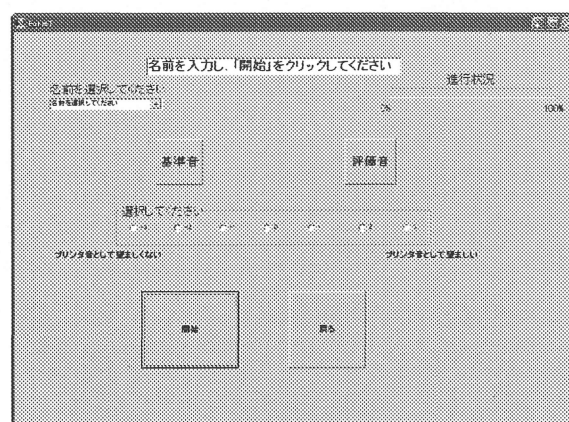


図 3.4: 実験用ソフトウェア

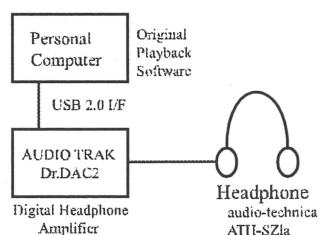


図 3.5: 再生装置の構成 (ヘッドホン受聴)

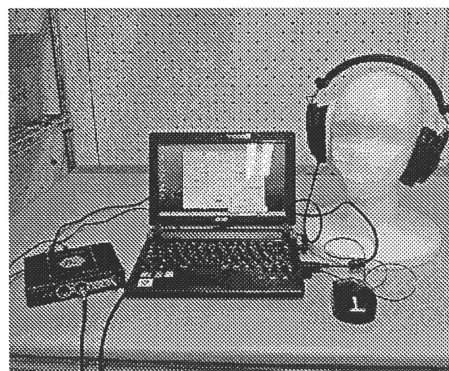


図 3.6: 実験セット

3.3.2 試験方法

試験は簡易防音室内で行い、試験音を密閉型ヘッドホンで聴取する。試験場所を選ばず同じ条件で個人毎に試験が可能となったこともあり、図 3.4 に示すような試験用のソフトウェアを作成し試験の自動化も試みた。試験に使用した機材を図 3.5（写真：図 3.6）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。

また、以下に具体的な試験手順を示す。

- (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。

3.3.3 ヘッドホン受聴方式の妥当性

後述する試験 1・2 の結果 (4.2.3) より、ヘッドホン受聴方式はスピーカ受聴方式の印象評価実験の結果とほぼ同様の結果が得られるため（試験音の順位に変化がないことから）、スピーカ受聴からの移行は無理のないものであると判断した。

3.4 まとめ

本章では、試験の方法として一対比較法の説明を、また、その受聴方式としてスピーカ受聴方式とヘッドホン受聴方式の二つの方法について説明を行った。

第4章 MFP 動作音と音質評価とパラメータの関係

本章では、3章に示した実験システムと手順に従って実施した様々な MFP 動作音（試験音）に対する印象評価試験（一対比較法）の結果を示す。また、評価試験で得られた各音の総合評価値（尺度値）と音質評価パラメータとの関連性を調査する。

4.1 評価試験 1

この試験では、これまでの関連研究 [3] [4] で使用してきた試験音に対する印象の総合評価値を求め、各試験音の音質評価パラメータとの関連性を調査する。

4.1.1 試験音（試験 1）

印象評価試験に用いる試験音は、共同研究相手先のメーカーから解析を依頼された MFP の一機種（機種 X と表記）の動作音で、発生音源を表 4.1 のように 5 分類（FN,MN,IN₁,IN₂,PN）したドライソース（無響室で収録された音）の合成音である。なお、これらの個別音源は関連先行研究 [3] で作成されたものである。5 分類された音のうち、IN₁ と IN₂ が実機動作音の印象の変化に与える影響が大きいと判断された [4] ため、これらの音の影響を詳細に調べることを目的に表 4.2 に示すようにそれぞれ音量を 5 段階に変化させた試験音の作成が行われた。なお、全ての音量の組み合わせは 25 通りであるが、試験方法（一対比較法）と試験実施の時間的制約から、評価対象とする音は表中の A,E,I,J,K の 5 種類のみに限定した。

表 4.1: MFP 動作音の分類（機種 X）

音の分類		各音が持つ要素
ファン音 (FN)		・冷却ファンの駆動音
モータ音 (MN)		・メインモータ（含ギア）の駆動音 ・レジストモータ（含ギア）の駆動音 ・イジェクトモータ（含ギア）の駆動音
衝撃性音 (IN)	(IN ₁)	・用紙の衝突音 ・用紙検出スイッチ動作音 ・その他（衝撃性の音）
	(IN ₂)	・レジストモータの始動音
用紙走行音 (PN)		・用紙とローラーやガイドとの摩擦音

表 4.2: 機種 X に関する試験音 (試験 1・2)

test sound	FN・MN・PN	IN ₁	IN ₂
A	ON	ON	ON
E	ON	OFF	ON
I	ON	ON	OFF
J	ON	-9dB	-9dB
K	ON	OFF	OFF

4.1.2 条件 (試験 1)

被験者は正常な聴力を有する大学生 10 名であり、被験者への試験音の提示は 3.2 で述べたスピーカ受聴方式とした。実験場所はオフィスを想定した大学内のゼミ室である。試験中、室内の空調等は停止させ、試験音以外の音は極力排除した状態を維持した。

4.1.3 結果 (試験 1)

試験結果 (各試験音の総合評価値を 1 つの軸上に配置したもの) を図 4.1 の下段に示す。

図より、試験音 K, J, E, I, A の順に評価が高いことがわかるが、有意な差と判断されたものは A-I 間 (**印: 有意水準 1%) のみである。従って断言はできないものの、I よりも E の評価が高いことから、IN₂ よりも IN₁ の音を削減する効果が高いと考えられる。IN₁ は用紙の衝突音、用紙検出スイッチやクラッチ等の動作音で、IN₂ に比し高域成分が優勢な衝撃性の音で、同じ衝撃性の音であっても印象に与える影響がより大きいと判断できる。

4.1.4 音質評価パラメータとの関係 (試験 1)

図 4.2(a) には各試験音の図 4.1 の横軸である総合評価値と 2 章で概説した各種音質評価パラメータとの関係をプロットした。ラフネスを除きいずれのパラメータとも決定係数 (r^2 値) で 0.6~0.9 程度の相関が認められる。なかでも、ラウドネスとの相関が高く、印象の大部分は音量感で決定されていることが示唆される結果となった。ただし、試験音 E と I のラウドネス N はほぼ同じであり、上述の IN₁ と IN₂ の違いを区別できていないことがわかる。この 2 つの試験音の関係のみ

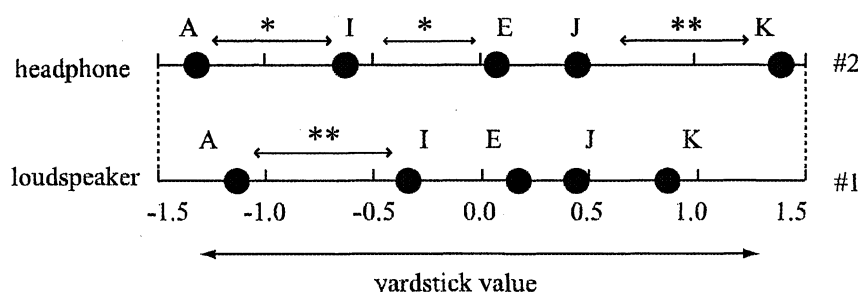


図 4.1: 試験 1・2 結果

に限れば、むしろシャープネス S や変動強度 F' の方がその違いを明確に捉えているように読み取れる。そこで、ラウドネスと同じように音量感を反映する等価騒音レベル L_{Aeq} とシャープネス S から算出される CI 値や、それに変動強度を加えた $CI + F'$ 値との関係を見たものが図 4.3(a) である。この図より特に $CI + F'$ 値と総合評価値との相関が非常に高く、試験音 E と I の印象の違いもうまく説明できているように見える。

4.2 評価試験 2

この試験は評価試験 1 と全く同じことを試験音の受聴方式を 3.3 で説明したヘッドホン受聴方式に変更したものである。試験の目的は、評価試験 1 の再確認と、受聴方式の変更が印象評価に影響を与えないかを確認することである。

4.2.1 試験音 (試験 2)

印象評価試験に用いる試験音は評価試験 1 と同じである。ただし、ヘッドホンから再生される音には、ダミーヘッドを使って測定した室 (評価試験 1 を実施したゼミ室) のインパルス応答が畳み込まれている。

4.2.2 条件 (試験 2)

被験者は正常な聴力を有する大学生 13 名であり、被験者への試験音の提示は 3.3 で述べたヘッドホン受聴方式である。ヘッドホン受聴は簡易防音室内で実施した。

4.2.3 結果 (試験 2)

試験結果を図 4.1 の上段に示す。試験音 K, J, E, I, A の配置順に変化はないが、ヘッドホン受聴方式の評価試験 1 と比べると試験音間に有意差 (**印: 有意水準 1%、*印: 有意水準 5%) が認められるものが多く、印象の差がより明確になったといえる。

この実験によっても試験音 I と E の順には変化がなく、有意水準 5% の有意差が認められることから、やはり、 IN_2 よりも IN_1 の音を削減する効果が高いことが再確認されたといえる。

また、試験音の順に変化はなく、受聴方式を変更しても印象評価に大きな影響は現れないことが確認された。(ただし、若干の変化があることも事実であり、これについては 5 章で後述する。)

4.2.4 音質評価パラメータとの関係 (試験 2)

評価試験 1 と同様、各種音質評価パラメータとの関係を図 4.2(b) と図 4.3(b) に示す。評価試験 1 とほぼ同じ傾向を示しており、先の結果を再確認する形となった。唯一異なる点はラフネスとの相関が認められる点である。ただし、ラフネスの値は 0.01 刻みでしか算出されないため、0.05～

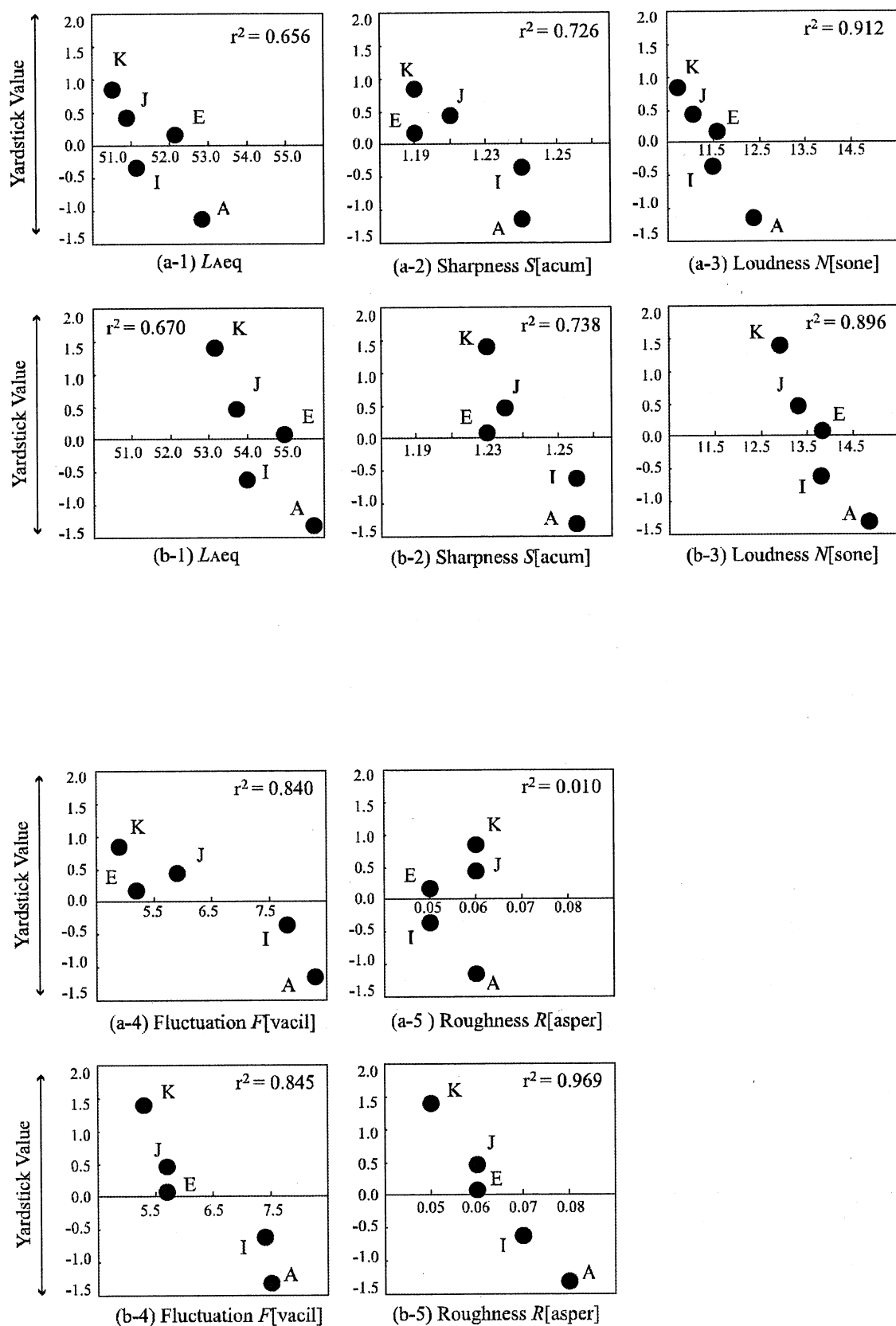


図 4.2: 試験1・2結果 (音質評価パラメータ込)

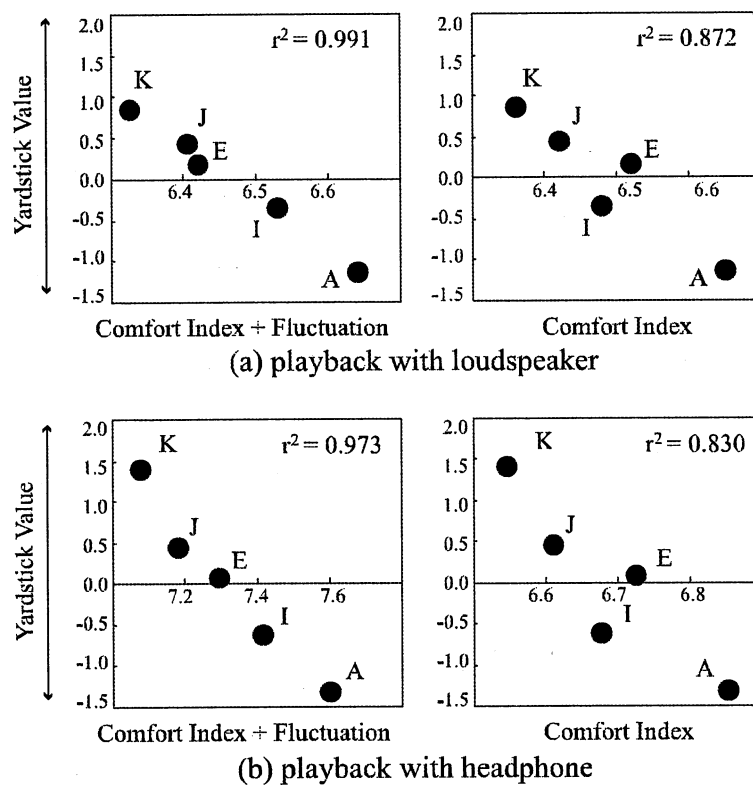


図 4.3: 試験 1・2 結果 (音質評価パラメータ込) $CI, CI + F'$

0.08 の範囲で求められた値との相関が高いからと言って直ちに影響度が高いとはいうのは少々危険である。

また、 $CI + F'$ 値と総合評価値との相関が高いのも評価試験 1 と同じであり、試験音 E と I の印象の違いもうまく説明できている。

ここまでの実験結果をみる限り、一機種に対する検討結果であるが、 $CI + F'$ 値と動作音の総合的な印象との対応関係が良いと言えそうである。

4.3 評価試験 3

評価試験 1・2 の結果をふまえて、共同研究相手先のメーカーが別機種に対して衝撃性音を低減させる対策を始めた。その効果を確認するため対策前後の実機音を評価することとなった。これにより、対策効果を確認すると共に、動作音の印象評価と音質評価パラメータとの関係に普遍性があるかを検証する。

4.3.1 試験音 (試験 3)

評価試験 1・2 で使用したのとは別機種 (機種 Y と表記) の MFP について、現状の動作音 O と衝撃性音を重点的に改良した後の動作音 M の 2 種類を用いた。

以下では対策前後の動作音をそれぞれ記号 O と M で表す。これら動作音のスペクトルを図 4.4 に示す。(スペクトル形状が似ているため、O は右目盛、M は左目盛で 12dB の差を付けてプロットしている点に注意)

動作音の比較は一対比較法によるが、この音は音源別の収録は行なっておらず、対象となる試験音の種類が少なすぎるため、O の再生レベルを 3dB ずつ減じた O_{0dB} , O_{-3dB} , O_{-6dB} の 3 種類と M の再生レベルを 3dB ずつ増した M_{0dB} , M_{+3dB} , M_{+6dB} の 3 種類、合わせて 6 種類の試験音を使用した。ちなみに M_{0dB} の L_{Aeq} は O_{0dB} に比べ 1dB 程度の低下となっている。

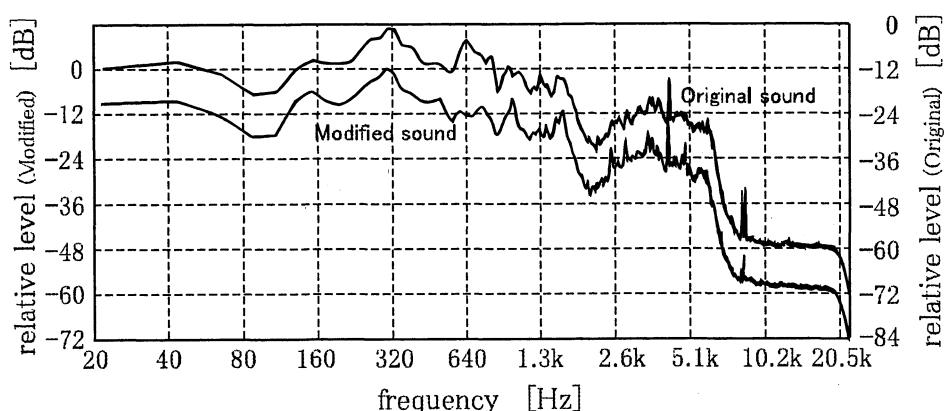


図 4.4: 機種 Y: 試験音 O と M のスペクトル

4.3.2 条件 (試験 3)

被験者は正常な聴力を有する大学生 12 名であり、被験者への試験音の提示はヘッドホン受聴方式とした。ヘッドホン受聴は簡易防音室内で実施した。

4.3.3 結果 (試験 3)

図 4.5 に示す試験 3 の結果を見ると、 O_{-6dB} と M_{0dB} の尺度値がほぼ等しく、 O_{-3dB} と M_{3dB} 、さらに O_{0dB} と M_{6dB} も比較的近い値を示していることがわかる。また、3つのグループ間に有意差も認められる。以上のことから、対策により全体の騒音レベルを 6dB 下げたのとはほぼ同等の効果が得られたことがわかる。

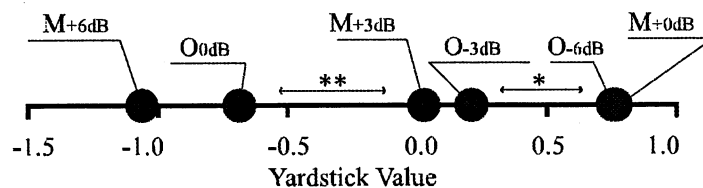


図 4.5: 試験 3 結果

4.3.4 音質評価パラメータとの関係 (試験 3)

図 4.6 に、試験 3 の尺度値と、 L_{Aeq} , S , CI , $CI + F'$ 値のの関係を示す。

ここで注目すべき点は M_{0dB} の L_{Aeq} が O_{0dB} に比べ 1dB 程度しか低下していないということである。それにもかかわらず、4.5 の結果によれば、 L_{Aeq} を 6dB 低下させたのと同等の改善効果が得られていることになる。他のパラメータについても尺度値との相関を調べたが高い決定係数 r^2 を示すものは無く、これらのパラメータから実験結果を説明することは難しいようである。

これは、実験に使用した音が実質 O と M の 2 種類しかなく、試験音の種類が少なすぎたためであること、また、試験音 O に機器の不調に起因する（「キューキュー」という）異音が入っていたため印象が余計に悪くなってしまったことが考えられる。

しかし、この異音を 2 章の音質評価パラメータで調査したものの、うまく表現できるものはないかった。

そこで、試験音 O_{0dB} , O_{-3dB} , O_{-6dB} の L_{Aeq} に、JIS-Z8731 にある「純音補正」[13] の章を参考に、環境騒音の評価で行われている L_{Aeq} の純音補正を機械騒音である MFP 動作音にも適応することを試みた。この JIS の規格では純音補正は 5dB 程度が妥当とされているだけで具体的な算出方法には言及していない。一方、この規格の元となっている国際規格である ISO1996-2 は、2007 年に改定され、その附属書で補正量の具体的な算出方法の考え方が示されている [14]。これを参考にして試算した結果では、試験音 O の純音補正量は約 3dB でよいことが分かった。（JIS 規格、ISO 規格による試算の詳細については付録 A で述べる。）

そこで、補正の効果を見るために L_{Aeq} に 3dB または 5dB を付加し、再度 $CI + F$ 値を求め尺度値との関係を見た。補正した結果の図を 4.7 に示す。これを見ると、純音補正を行うことで平行に並んでいた O と M の試験音が混ざり合った形となり、すべての結果が 1 つの直線（または曲線）上に集約されたように見え、決定係数 r^2 も大きくなっている。ただし、補正量としてどちらの値が適当なのかは、これだけで判断するのは難しい。

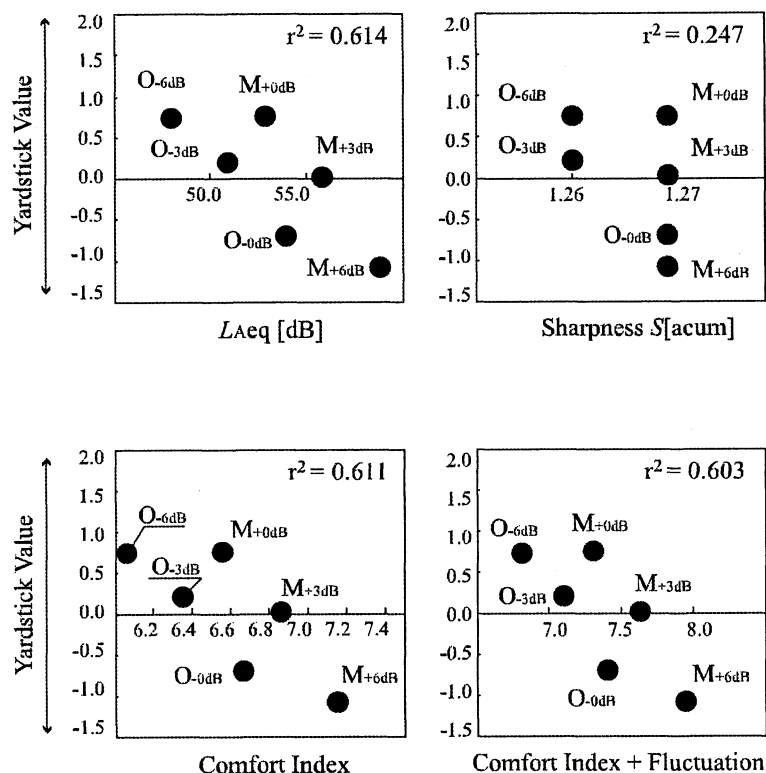


図 4.6: 試験 3 と音質パラメータの関係

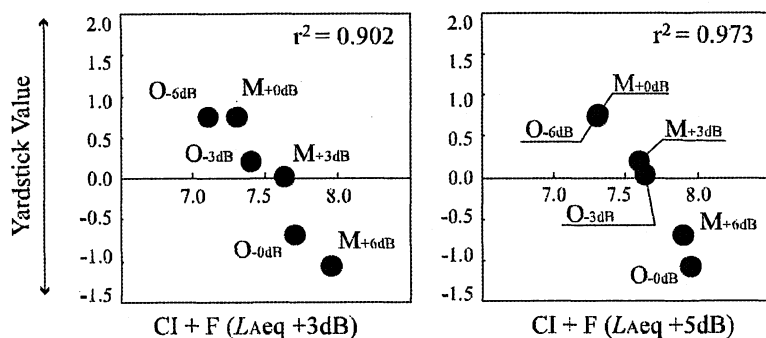


図 4.7: 試験 3 と音質パラメータの関係（純音補正付加）

4.4 評価試験 4

試験3では試験音が元々O,Mの2種類しかなく、これらの音量を増減した試験音を作成するといふときわめて特殊な条件下での実験であった。これを受けて共同研究相手先が試験音をさらに改良した音や異音が入っていない正規版の試験音、対抗機種の試験音（機種Pと表記）を用意したため、音源の種類を増やした実験を行うことが可能になった。そこで、試験4では、試験音の種類を増やすことによって試験3では出来なかった音質評価パラメータからの試験結果の算出を目指した。

4.4.1 試験音（試験4）

試験4では、試験3に使用したO,O_{-6dB},Mの試験音に加えて

- 異音が入っていたOを修理後再収録した音O'（異音無）
- Mの改良版であるM'
- 別機種（機種P）のMFP動作音P

の3種類を含めた合わせて6種類の試験音を使用した。それぞれの試験音の特徴を表4.3にまとめておく。

表 4.3: 試験音（試験4）

試験音	試験音の内容	異音の有無
O	試験3の試験音O	○
O'	Oの再収録音	×
O _{-6dB}	実験3のO _{-6dB}	○
M	試験3の試験音M	×
M'	Mを改良した音	×
P	機種Pの試験音（参考程度）	×

4.4.2 条件（試験4）

被験者は正常な聴力を有する大学生14名であり、被験者への試験音の提示は3.3で述べたヘッドホン受聴方式とした。ヘッドホン受聴は簡易防音室内で実施した。

4.4.3 結果（試験4）

試験4の結果を図4.8に示す。

試験音M'がO_{-6dB}とほぼ同じ位置にあることから、異音の混入した音Oに対して6dBの低減の効果が認められ、試験3の結果が裏付けされていることがわかる。ただし、Oから異音をなくしたO'とM'にあまり差が見えないことから、Oに混入していた異音がMFP動作音全体に大きな影響を与えていることも確認できた。

4.4.4 音質評価パラメータとの関係 (試験4)

図 4.9 に各試験音の尺度値と $CI + F'$ の関係を示す。

相関は比較的高いものの、 O_{-6dB} が他の試験音に比べて外れた結果となっていることが目につく。この O_{-6dB} と O には試験3同様異音が入っているため、これらの L_{Aeq} に 3dB または 5dB の純音補正を与え、 $CI + F'$ 値を再計算し尺度値との関係を見直したのが図 4.10 である。これから、 L_{Aeq} に補正をかけたことで、二つの試験音は全体的に CI 値が大きな値となり、うまく直線に乗ってることが分かる。ただし、5dB の補正は若干大きすぎたようで、補正後は逆に相関を下げる結果となってしまっている。ここから、適正な補正値をかける必要があることが分かる。

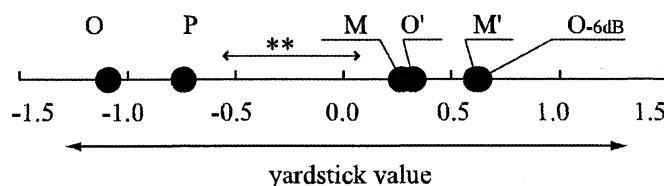


図 4.8: 結果 (試験4)

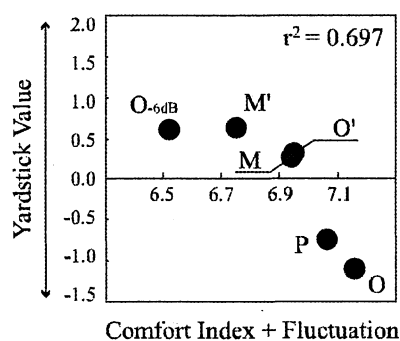


図 4.9: 試験4と音質パラメータの関係

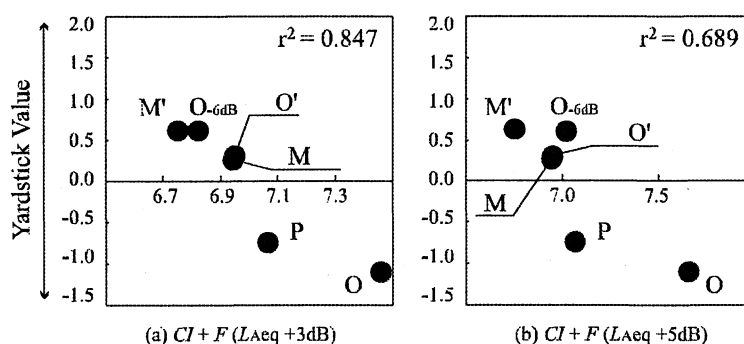


図 4.10: 試験4と音質パラメータの関係 (純音補正付加)

4.5 まとめ

試験1～4からわかったことを以下に列挙する。

- スピーカ受聴からヘッドホン受聴に移行しても評価に大きな影響は無いと判断される。
- 機種Xに関しては、 $CI + F$ 値が動作音の総合的な印象とよい対応をしている。
- 機種Xから機種Y、Pに変更しても $CI + F$ 値と動作音の総合的な印象との対応関係は良い。
- 異音が入っている場合、環境騒音でいう「純音補正」をかけることで印象との対応が良くなることが示唆された。ただし、補正值の適切な算出方法についてはまだ不明な点も多く、今後の検討課題といえる。

第5章 環境音を付加した試験

一対比較法の実験方法として、スピーカ受聴からヘッドホン受聴に移行したことで、試験音を提示する際に、任意で環境雑音を入れることができるようになった。それに伴い、環境雑音を付加した際にどれだけ動作音の印象に変化が生じるかについて調査したので、本章ではその結果について述べる。

5.1 試験システムの改良

図 5.1 は自作した実験管理ソフトウェアが一対比較実験時に被験者に提示する画面である。被験者は、この画面の指示に従い、ヘッドホンでバイノーラル再生される試験音を聞きながら、一人で実験を進めることが可能である。なお、試験音はバイノーラル形式の wav ファイルとして事前に準備しソフトウェアに登録するだけでよい。

このシステムだけでは第 4 章の評価試験 2～4 となら変わらないが、環境音を付加した本章の評価試験 5・6 を行うに当たり、バイノーラル録音された室内環境音（背景音）を付加した状況で実験ができるようにソフトウェアを改修した。当初背景音を動作音と合成したファイルを作成して運用することを考えたが、昨今のパソコンではソフトウェアから複数のオーディオファイルを同時再生させても、実時間でミキシング再生が可能であることを確認できたため、環境音も動作音と同様に個別に登録する形とした。実際の実験手順では、実験の開始とともにまず環境音が再生（終了時まで連続再生）され、その状況下で動作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。

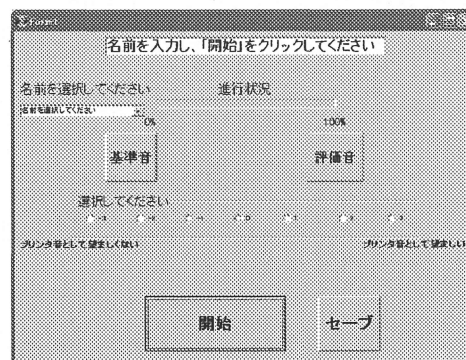


図 5.1: 改良後の試験ソフトウェア

5.2 試験5・6

ここでは、環境雑音を入れた実験とその結果について述べる。

5.2.1 試験音と環境音、試験条件（試験5・6）

評価試験はすべてヘッドホン受聴方式で実施され、被験者は試験5で大学生15名、試験6で大学生10名である。使用した試験音は前章の試験2と同じA,E,I,J,Kの5種類の動作音である。

環境雑音は2種類用意し、試験5ではホワイトノイズを、試験6ではMFPの使用が想定される実際のオフィスの環境音をバイノーラル録音したもの（以下「オフィスノイズ」と記す）を用いた。なお、オフィスノイズの主要な音源はパソコンの動作・操作音、話し声、空調音である。

試験1・2・5・6についてまとめたものを表5.1に示す。

表 5.1: 試験1・2・5・6の実験条件

実験	試験音	被験者	受聴方式	環境音の有無
#5	A,E,I,J,K	大学生 15 名	ヘッドホン受聴	有 (white noise)
#6	A,E,I,J,K	大学生 10 名	ヘッドホン受聴	有 (office noise)
#2 (参考)	A,E,I,J,K	大学生 13 名	ヘッドホン受聴	無
#1 (参考)	A,E,I,J,K	大学生 10 名	スピーカ受聴	無

5.2.2 結果（試験5・6）

図 5.2 の上段より試験2（背景雑音無し）の結果#2、試験5（ホワイトノイズを付加）の結果#5、試験6（オフィスノイズを付加）の結果#6、試験1（スピーカ受聴）の結果#1を示す。

同図#2と#5から、環境雑音としてホワイトノイズを付加したことにより、特に試験音EとIの配置順が入れ替わり、試験音EやIとJの間には有意差 (**印1%) も読み取れる等、動作音の印象が変化していることが確認できる。

この実験結果は以下のように解釈可能である。試験音EはIN₂よりも高域成分が優勢で印象評価の悪化を招きやすい衝撃性音IN₁を除いた動作音であるが、元々レベルの低い高域成分の音はホワイトノイズにマスクされやすく、動作音からIN₁の音が無くなっていることを被験者が聞き分けるのは難しい。したがって、IN₁を無くした効果を被験者がそれほど実感できなくなったため、評価が悪化したものと考えられる。

以上のような印象の変化が実環境でも起こり得ることを確認するため、実際のオフィスで収録した音を背景雑音とした結果が#6である。ホワイトノイズほどではないものの、やはり同様な印象の変化が見られる。

また、環境雑音を付加した（#2→#5 or #6など）ことでA-I間の差がはっきりする一方で、J-K間の差が縮小するという傾向（有意水準等の変化）から、評価結果が同図#1のスピーカ受聴方式の結果に近づいているようにも見て取れる。ヘッドホン受聴方式では原理上動作音以外の音はなく、つまり背景雑音が全くない状態を再現しているの対し、スピーカ受聴方式の試験は通常

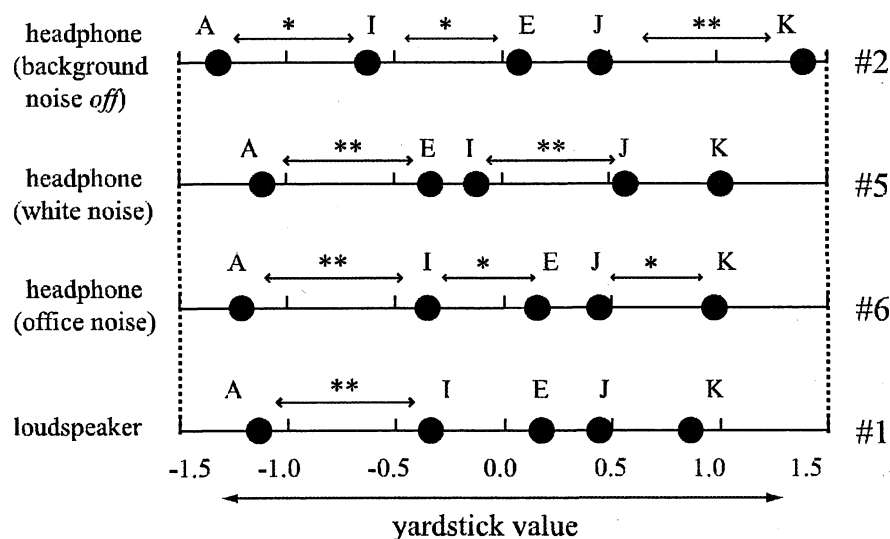


図 5.2: 試験1・2・5・6の結果

の室内で実施しているため、いくら背景雑音をコントロールしたとしても完全に無くすることは不可能である。したがって、程度の差はあるものの何らかの背景雑音に加わった結果であり、ヘッドホン受聴方式に背景雑音を加えた結果がこれに類似した傾向を示すことは興味深い。この点に関しては、今後も被験者数を増す等、実験を重ねて確認していかなければならないが、MFP 動作音の印象評価において環境音（背景雑音）の影響を考慮する必要性を示唆しているものと思われる。

5.3 まとめ

本章では2種類の背景雑音を付加したMFP動作音の印象評価試験を実施した結果、評価結果に変化が生じることを確認した。すなわち、背景雑音が印象評価に影響を与えることを確認した。つまり、MFP動作音の印象評価において環境音（背景雑音）の影響を考慮する必要性を示唆する結果となった。しかし、現状ではその影響の程度を音質評価パラメータ等を使って定量的に説明するには至っておらず、これは今後の課題である。これに関連して最後に図5.3に代表的な試験音AとK、背景雑音の平均周波数スペクトルを示すが、試験音の平均スペクトルの間には大きな差異は認められないため、これらのデータから背景雑音の影響を議論することは難しい。つまり、平均スペクトルの形状に大きく関わるモータなどの定常騒音ではなく、平均スペクトルの形状に大きく変化させないが短時間にエネルギーの集中する衝撃性音のマスキング効果について検討することが課題解決の鍵と思われる。

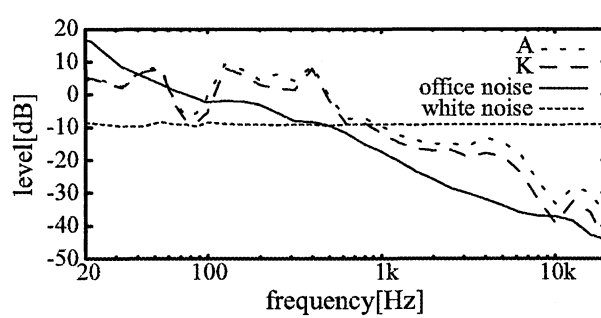


図 5.3: 試験音の平均スペクトル

第6章 結び

本研究では MFP 動作音の快音化対策を効率的に進めるために、本来は印象評価試験を通して得る MFP 動作音の印象を定量的に扱うことができ、設計に直接フィードバック可能な新たな音質評価尺度を求めることを目的とした。

これを達成するために、本論文では様々な MFP 動作音に対して印象評価試験を行い、その結果を音質評価パラメータと比較することで、印象を定量的に扱うことのできそうなパラメータを探索した。

第2章では、本論文で「音質評価パラメータ」と呼んでいるパラメータ（等価騒音レベル L_{Aeq} 、ラウドネス N 、シャープネス S 、ラフネス R 、変動強度 F' 、Comfort Index(CI)) について説明した。

第3章では、実験を行った環境や実験方法（特に受聴方式）について述べた。受聴方式では「スピーカ受聴」と「ヘッドホン受聴」という二つの方法で試験を行ったが、結果に大きな差異がないことも分かった。

第4章と第5章では印象評価実験の結果を紹介した。以下に、評価試験を行った結果わかったことをまとめて列挙する。なお、各番号 (1)~(4) は 1.2 に列挙した目的と対応している。

- (1) 動作音の総合評価値は音質評価パラメータの1つである CI 値に変動強度 F' を加えた $CI + F'$ 値との相関が高く ($r^2 = 0.973$)、予測の可能性を示すことができた。
- (2) 別機種に対する対策の効果（騒音レベルで -6dB 相当）が試聴実験により確認された。ただし、 $CI + F'$ 値との相関は (1) ほど高くないことがわかった。この原因を調査した結果、機器の不調に起因する異音が試験音に混入したことが原因と推察された。一つの可能性として、この異音の混入の影響を ISO1996-2 などで検討されている純音補正という考え方にに基づき等価騒音レベル L_{Aeq} に 3~5dB 程度の補正を付加したところ、 $CI + F'$ 値と総合評価値との相関が高く ($r^2 = 0.847$) なることが分かった。
- (3) バイノーラル再生方式の実験システムを整備した結果、実験時間を短縮でき、環境音が付加した実験が可能となった。
- (4) 白色雑音や実際のオフィスの環境音を付加した予備実験から、動作音の総合評価値（印象）の変化があることを確認できた。

最後に今後の課題を挙げておく。

- スピーカ受聴とヘッドホン受聴での結果に差異が生じた原因の調査
- 解析ソフトウェアのアルゴリズムの解説

- 多くの種類の MFP 動作音での試験
- 純音補正の必要性やその具体的な方法の確立
- 環境音が付加された場合の総合評価値の予測方法の確立
- 環境音が音質評価に与える影響の考察
- 多数の人数、多様な年齢層の被験者での実験

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] 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.
- [2] 藤原他,“掃除機騒音の快音化に向けた音質評価” 日本音響学会秋季研究発表会講演論文集,2-5-11(2005)
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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://isl.onosokki.co.jp/HP-WK/c.support/newreport/soundquality/index.htm>
- [7] 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>
- [8] E.Zwicker,H.Fastl,“Psychoacoustics - Facts and Models”,Springer,1999.
- [9] 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.
- [10] 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關する研究”, 日本音響学会 (春),3-7-8,2009.
- [11] <http://psysound.wikidot.com/>
- [12] 福田,“人間工学ガイドー感性を科学する方法ー”,サイエンティスト社,2004.
- [13] “環境騒音の表示・測定方法 附属書 1「適正な土地利用のための音響データの収集」 4.1.3 純音補正”,JISZ8731,1986.
- [14] “Annex C(informative) objectiv method for assessing the audibility of tones in noise - Reference method”,ISO1996-2(2007),2007.

付 録 A 純音補正の方法

ここでは、試験音 O に入っていた異音とはどのようなものか特徴をまとめるとともに、純音補正に関して JIS 規格・ISO 規格を基にどのように補正量を導き出したかを説明する。

A.1 試験音 O の異音について

試験音 O を他の試験音と比較しながら注意深く聞くと、「キューキュー」あるいは「ヒューヒュー」という機械が軋むような特徴的な音が断続的に混入していることがわかる。この音が耳につくと印象に悪影響を与えることは明らかであり、また他の動作音にはこのような音が含まれていないことから、ここではこの音を異音と呼ぶことにする。

まず、異音の正体をつかむために、試験音 O を 1/3 オクターブバンド毎に分解して聴き比べたところ、640Hz のバンドに異音が混入していることが確認された。そこで、音声加工ソフトで、その付近の帯域成分をカットしながら聴き比べていくと、異音の成分は 600～680Hz に存在することがわかった。（ちなみに、この帯域の成分をカットすると異音が無くなったように聞こえる。）

図 A.1 に異音として抽出された試験音 O の 600～680Hz の成分のみの波形を示すが、図よりこの音が定常音ではなく、0.6～2 秒と 2.8～4.3 秒付近で特に大きく断続的に発生している音であることがわかる。

このことは、短時間 FFT により求めた 650Hz 付近のスペクトログラム（図 A.2 および図 A.3）でも確認できる。650Hz に大きなピークが断続して現れており、それ以外にも 600～630Hz 付近にもいくつかのピークが認められる。これらが異音の正体であると考えられるが、発生原因については、共同研究先からは装置組み立て時の調整不良と説明されているだけで、その詳細は不明である。おそらく、回転機構のシャフトかギア部で発生した軋み音と推測される。

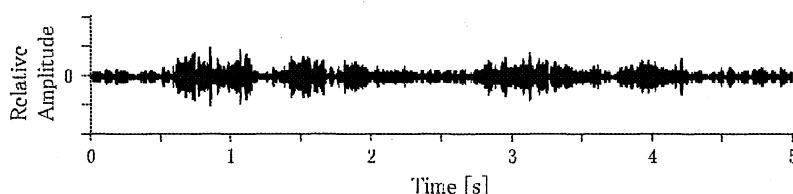


図 A.1: 試験音 O の異音

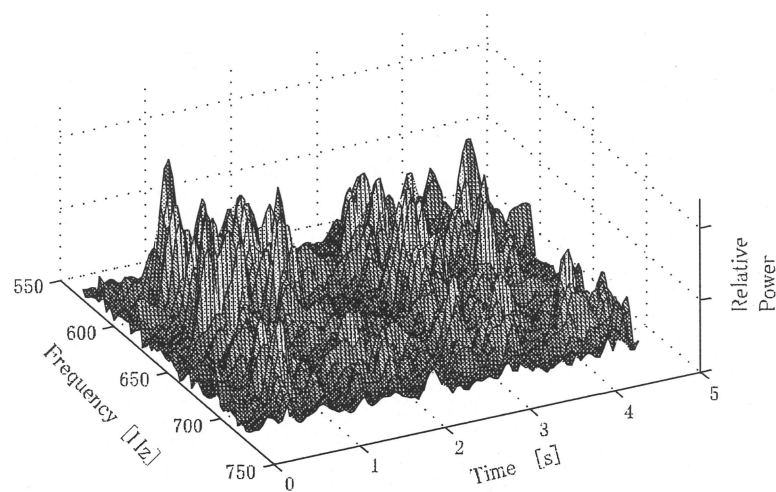


図 A.2: 試験音 O (3次元描画)

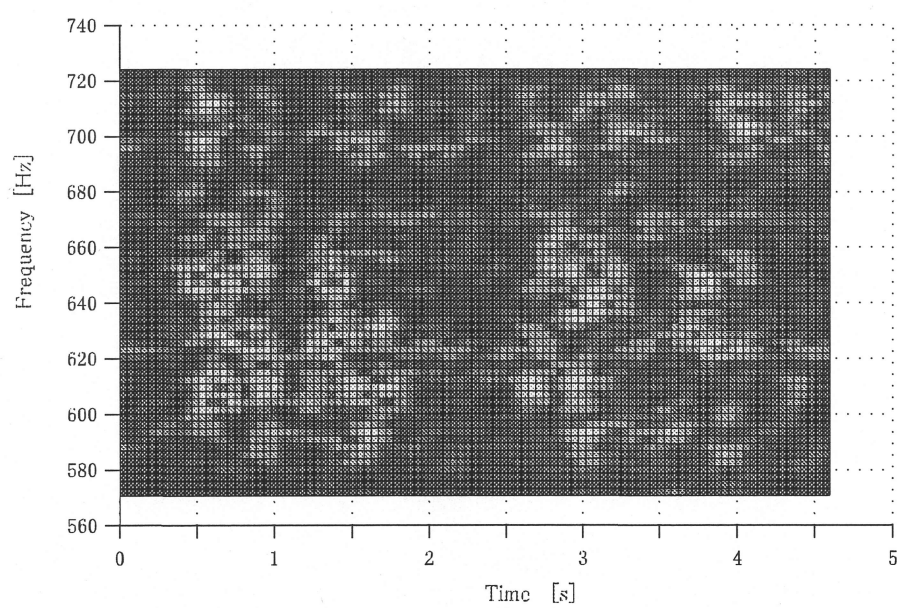


図 A.3: 試験音 O (2次元描画)

A.2 JIS 規格に基づく純音補正

さて、上述した異音がスペクトログラム上で鋭いピークを有することから、異音が純音性であると仮定して、JIS Z 8731 の附属書の記述にそって L_{Aeq} 値に加える補正量を求めることを考える。

まず、「JIS Z 8731 附属書 1（規定） 適正な土地利用のための音響データの収集」の「4.1.3 純音補正」には、以下のような記載がある。

ある特定の時間帯において、騒音に著しい純音性が認められる場合には、その時間帯について測定されたというか騒音レベルに補正值 K_1 を加えてもよい。その場合には、補正值を明記する。

（備考）一般に、ある 1/3 オクターブバンドにおけるレベルが隣接する周波数帯域における値よりも 5dB 以上大きくなっている場合には、その周波数帯域に卓越した純音成分が含まれていると考えてよい。騒音の中に純音成分が含まれているか否かを正確に調べるためには、さらに狭帯域周波数分析が必要である。純音成分が含まれていることが聴感的にも明らかで、1/3 オクターブバンド分析でもその存在が認められる場合には、補正值は 5～6dB とするのが適当であろう。

つまり、異音が純音性であるとの仮定がまず成り立つのかを 1/3 オクターブバンドレベルから判断する必要があることがわかる。そこで、試験音 O 全体の 1/3 オクターブバンドレベルを求めた結果を図 A.4 に示す。この図から、650Hz に近い 640Hz のバンドレベルにピークがあり、隣の 500Hz とは約 6dB、800Hz とは約 3dB の差があることが分かる。これは「隣接する周波数帯域における値よりも 5dB 以上大きく」の記述に合致していない。しかし、異音が定常的に発生していないことを考慮して、異音が発生している 1.35 秒～2.0 秒の時間帯のみで 1/3 オクターブバンドレベルを求めると図 A.5 のようになり、640Hz のバンドレベルが「隣接する周波数帯域における値よりも 5dB 以上大きく」の条件を満たしていることがわかる。この場合、JIS Z8731 による補正值は「5～6dB」と幅を有するが、この異音をはっきりと聞き取れるものの定常音でないことから、本論文では低めの 5dB と判断した。

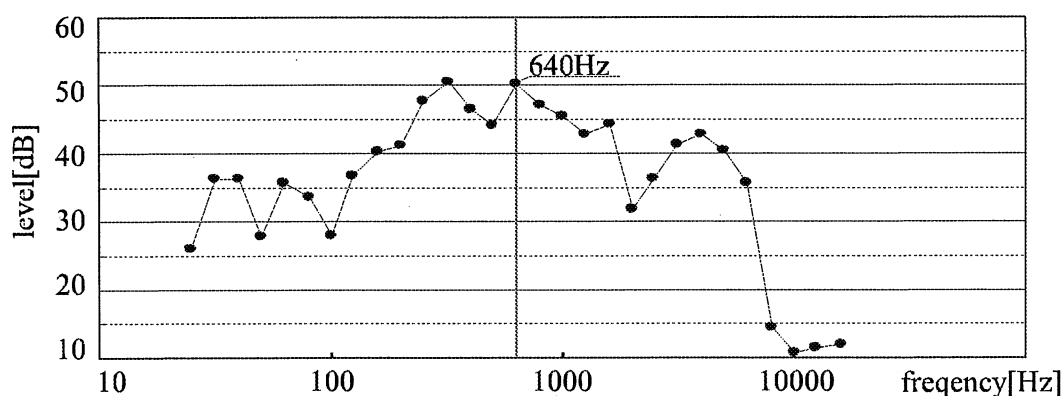


図 A.4: 試験音 O の 1/3 オクターブバンドレベル

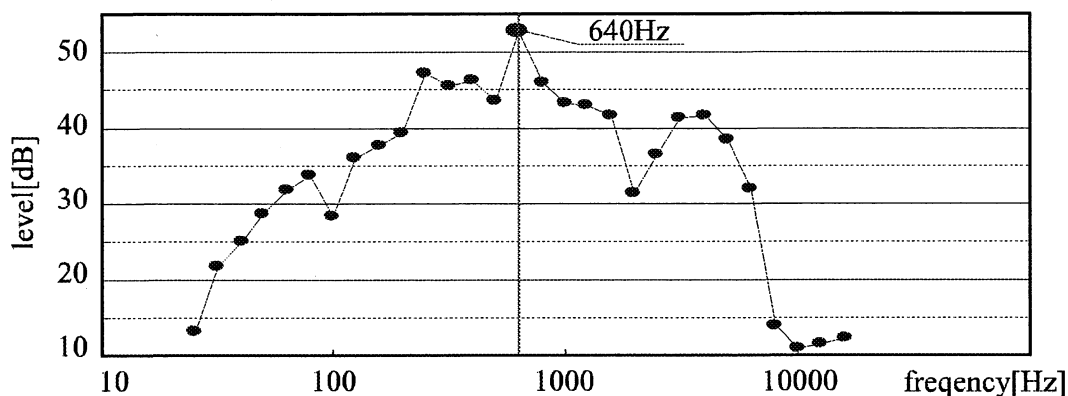


図 A.5: 試験音 O の 1/3 オクターブバンドレベル (1.35～2.0 秒時点)

A.3 ISO 規格に基づく純音補正

ISO の規格「ISO1996-2(2007)」の “Annex C (informative) objective method for assessing the audibility of tones in noise - Reference method” の中では、JIS Z 8731 附属書よりも詳しく純音補正の計算方法が示されている。

この中では、環境騒音において、クリティカルバンド (CB) 内に存在する 'tone (純音性の音、本論文の異音に相当) のレベル L_{pt} と Noise (その他の音) のレベル L_{pn} のレベル差から補正値を決定する手順が記述されている。

そこで、本論文でもまず、 L_{pt} と L_{pn} を求めることを考えた。以下に具体的な計算方法を示しておく。

最初に、試験音 O の異音の周波数が 650Hz 付近に存在することがわかっているため、

$$f_c = 650[\text{Hz}] \quad (\text{A.1})$$

として、ISO1996-2 に記載されている表 A.1 からクリティカルバンド幅を 130Hz と決定した。

表 A.1: Widths of critical bands

Centre frequency f_c [Hz]	50 to 500	Above 500
Bandwidth [Hz]	100	20 % of f_c

次に、試験音 O について、図 A.2 や図 A.3 を参考に 650Hz を中心とする CB の範囲 (585Hz～715Hz) で異音と推定されるピークが多く存在する時間-周波数範囲を図 A.6 の斜線部分のように決定し、その範囲に含まれる音を全て 'tone と仮定して L_{pt} を求め、それ以外の範囲の音を Noise として L_{pn} を求めることを考えた。

具体的には、図 A.2 や図 A.3 を求める際、短時間 FFT では時間軸を 100 フレームに分割しているため、図 A.6 の 'tone に相当するのは 62 フレーム分である。そこで、短時間 FFT で得られた 600～680Hz の成分の斜線部全体のパワ合成値 (63.0dB) をフレーム数 62 で割って平均パワーレ

ベルを求め、これを L_{pt} と見なした。計算結果は

$$L_{pt} = 63.0 + 10 + 10 \log_{10}(1/62) \simeq 45.1 \text{ [dB]} \quad (\text{A.2})$$

となった。一方、斜線部を含まない時間帯は 38 フレーム分あり、これが背景音すなわち Noise に相当すると考え、CB の範囲全体のパワ合成値 (56.92dB) をフレーム数 38 で割ることで L_{pn} を求めた。計算結果は

$$L_{pn} = 56.9 + 10 + 10 \log_{10}(1/38) \simeq 41.1 \text{ [dB]} \quad (\text{A.3})$$

となった。これらの結果から、 L_{pt} と L_{pn} の差 ΔL_t は 4dB と見積もられた。

さて、 ΔL_t と 'Tone の存在する CB の中心周波数が求まれば、ISO 1996-2(2007) Annex C では図 A.7 (横軸：中心周波数 f_c 縦軸： ΔL_t) を使って、純音補正值 K_t を読みとると書かれている。図中に $f_c = 650[\text{Hz}]$ と $\Delta L_t = 4[\text{dB}]$ の交差する点をプロットすると、 $K_t = 2[\text{dB}]$ と $K_t = 3[\text{dB}]$ のラインのほぼ中央に位置しており、純音補正值 K_t は約 2.5dB と読みとれる。

最後に、本論文では上述のような考え方に従って ΔL_t を求めたが、この方法が妥当であるかは ISO 1996-2(2007) Annex C の記述からは判断できないことを注意しておきたい。そもそも、この附属書の記述は (明示はされていないが) 定常的もしくは緩やかに変動する純音性の音 ('Tone と表現されている) を対象にしており、試験音 O に含まれる異音のように振幅が急激に変化する (断続的に発生する) 音に対してどこまで適用可能なか定かでない。また、衝撃性補正の必要性も本文には記載されているが、明確な補正量の導出方法は記載されていない。このように、純音補正や衝撃性補正に関してはまだまだ研究の余地が多く残されており、具体的な補正值の値については今後も見直しが必要であろう。そこで、ISO 1996-2(2007) による補正值をここでは 2.5dB と算出したが、本文中ではこれを JIS Z8731 の補正值 5dB と同じく 1 桁に丸め、3dB としてひとまず考察を進めることにした。

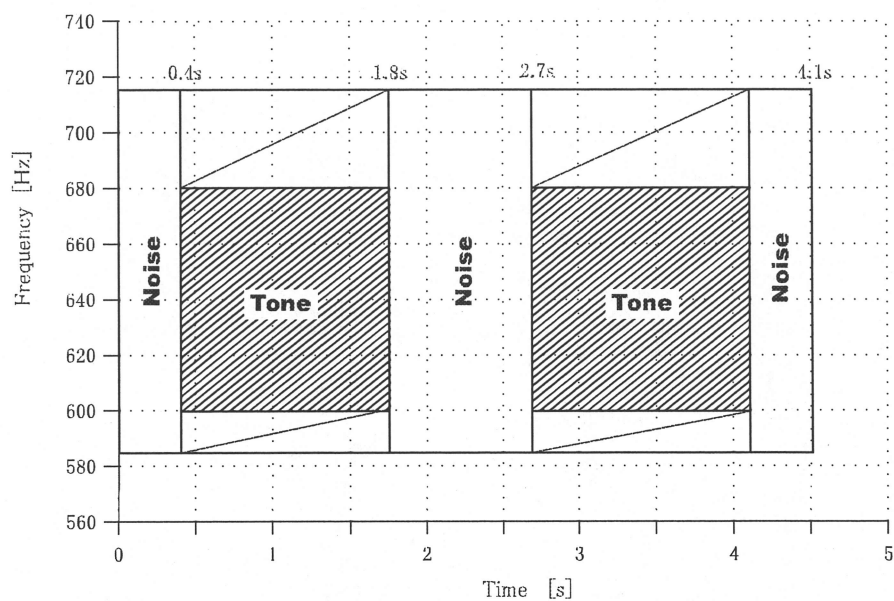


図 A.6: 試験音 O (2次元描画) 模式図

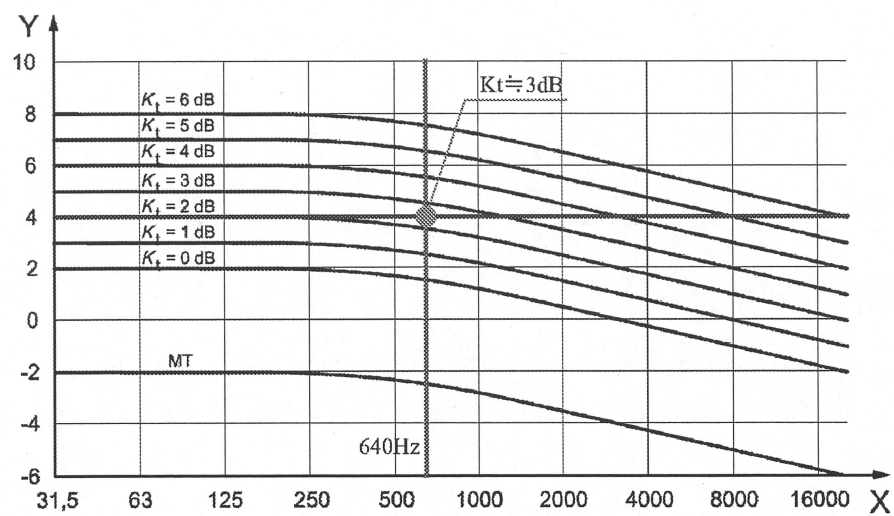


図 A.7: 補正値の決定 [14]