

博士論文

低周波数帯域に純音性成分が含まれる騒音の評価に関する研究

米村美紀

目次

第 1 章	序論	4
1.1	背景	4
1.2	目的	5
1.3	論文の構成	6
第 2 章	既往研究	7
2.1	聴覚の仕組み	7
2.2	マスキングと聴覚フィルタ	7
2.2.1	マスキング	7
2.2.2	聴覚フィルタ	8
2.3	ラウドネス	16
2.3.1	純音のラウドネス	16
2.3.2	複合音のラウドネス	18
2.3.3	ラウドネス関数	19
2.3.4	マスキング効果に基づく純音性成分の評価	25
2.4	騒音評価に関する既往研究	28
2.4.1	騒音評価における心理属性の扱いに関する議論	28
2.4.2	一般の環境騒音を用いた評価実験	29
2.4.3	純音性成分を含む騒音の評価に関する研究	31
2.4.4	風車騒音の評価に関する研究	34
2.4.5	低周波音と振動感・圧迫感の評価に関する研究	36
2.4.6	騒音に関するガイドライン	38
2.5	まとめ	40
第 3 章	マスキング閾値の計測	41
3.1	目的	41
3.2	実験方法	41
3.2.1	実験システム	41
3.2.2	試験音の構成	41
3.2.3	実験参加者	42
3.2.4	評価方法	43
3.3	結果および考察	45
3.4	まとめ	47

第 4 章	純音性成分を含む騒音のラウドネス評価	51
4.1	目的	51
4.2	実験方法	51
4.2.1	試験音の構成	51
4.2.2	評価方法	52
4.2.3	被験者	52
4.3	結果および考察	56
4.3.1	主観的なラウドネスの変化	56
4.3.2	主観的評価値 S_c とラウドネス指標の値 S_s の対応関係	60
4.4	まとめ	68
第 5 章	純音性成分を含む騒音のわずらわしさ評価	73
5.1	目的	73
5.2	実験の概要	73
5.2.1	評価語の選定について	73
5.3	ベースノイズのレベル・周波数が及ぼす影響に関する実験（実験 1）	74
5.3.1	目的	74
5.3.2	実験方法	74
5.3.3	実験 1 のまとめ	87
5.4	就寝時を想定した評価実験（実験 2-A, B）	91
5.4.1	目的	91
5.4.2	実験方法	91
5.4.3	結果および考察	92
5.4.4	実験 2 のまとめ	97
5.5	日中を想定した評価実験（実験 3）	102
5.5.1	目的	102
5.5.2	実験方法	102
5.5.3	結果および考察	103
5.5.4	実験 3 のまとめ	104
5.6	主観的なラウドネスとわずらわしさの関係に関する考察	108
5.6.1	主観評価値間の定量的関係	108
5.6.2	各実験における内観報告	109
5.6.3	評価実験結果と内観報告の対応	111
5.7	評価指標間の違いに関する考察	112
5.7.1	ラウドネスの周波数-レベル特性に応じた重み付け音圧レベルの算出	112
5.7.2	レベル別重み付け係数を用いた音圧レベルによる Tonal Adjustment の考察	113
5.7.3	レベル別重み付け係数を用いた音圧レベルとラウドネス指標の相互関係	114
5.8	まとめ	116
5.8.1	主観的なわずらわしさ評価について	116
5.8.2	Tonal Adjustment について	116
5.8.3	騒音評価に用いる物理指標について	117

5.8.4	最小可聴値との関係について	117
第 6 章	純音性成分の可聴度に対する最小可聴値の影響を考慮した補正の提案	119
6.1	目的	119
6.2	補正方法	119
6.3	提案手法の検証	120
6.3.1	わずらわしさ評価実験（5 章）との関係	123
6.4	まとめ	125
第 7 章	総括	131
参考文献		135

第 1 章

序論

1.1 背景

騒音問題に関する研究は、かつては経済成長に伴って発生する過大な騒音（道路交通騒音，鉄道騒音，航空機騒音，工場における騒音など）への対策が目的であった。近年はそれらの騒音問題は徐々に解決され静穏な環境が実現されつつあるが，静穏になったからこそ新たに気づかれるようになった騒音問題もあり，その一つが純音性騒音である。

純音性騒音とは，特定の周波数に卓越した狭帯域成分をもつような騒音をいう。電化製品から発生することが多く，モーターなどの回転機構，コンプレッサ，変圧器をもつ機械等から，その作動機構に応じた周波数成分の音が強く発生することがある（冷蔵庫，掃除機，OA 機器，コンピュータの冷却ファンなど）。あるいは，風切り音により数百～数千 Hz の高い音が発生することがあるが，これも純音性騒音の一例である。純音性騒音は，「ブー」「ポー」「キーン」などと形容されるような音色をもち，たとえ騒音のレベルが低くても，この音質上の特徴によって騒音の不快感が増加するという影響が指摘されている。

純音性騒音による騒音問題と対策

日本国内では近年，エネルギー問題への関心から，再生可能エネルギー源としての風力発電施設や，省エネ機器として家庭用ヒートポンプ給湯器の導入が進んでいる。これらの機器から発生する騒音に 20～200 Hz 程度の低周波数純音性成分が含まれることがある。その騒音は音のレベルは高くないものの，夜間住宅地や郊外など静音な環境において長時間聴取されることがあり，睡眠妨害などの苦情の原因となっている [1, 2]。

風車騒音に関しては，2017 年 5 月に，環境省から「風力発電施設から発生する騒音に関する指針」が発布された [3]。その中で純音性成分が含まれることによるアノイアンス増加の可能性について指摘されており，問題として認識されている一方で，純音性に対してどのような評価を行うべきかは今後の課題として言及されるにとどまっている。また，家庭用ヒートポンプ給湯器からは 80Hz 以下の純音性成分が含まれることがあるが，機器の配置や室形状によっては，室内の特定の受聴点において低周波音が増幅されてしまうなどの物理的な予測・評価に関する検討は進んでいるものの [4]，聴感印象との対応についての知見は不足している。

純音性成分を含む風車騒音に関する評価ガイドラインは，風車の導入が早かった欧州を中心に整備が進んでいる。評価のガイドラインには，純音性成分の可聴性に関する指標を用い，それに応じた補正値を付して評価するといった施作がとられているものも多い [5]。日本においても，これら

のガイドラインを参考にしつつ、純音性騒音の評価やアセスメントの指針を制定する必要があると考えられる。

純音性騒音の評価に関する研究の必要性

現在広く用いられている環境騒音の評価に関するガイドライン・基準は、一般の環境騒音に関する研究・知見に基づいて整備されているが、これらの知見がそのまま純音性騒音に適応できるかどうかは検証が必要である（現状の評価方法では純音性騒音に関する聴感印象を十分把握できていないことは、純音性騒音が静穏な地域で問題となっていることから推察される）。純音性騒音といっても、音の発生源によって純音性成分の周波数や強度、騒音全体のレベルや周波数特性は様々であり、それによって聴感印象が変化することが考えられる。純音性騒音に対する予測・評価を適切に行うためには、騒音源に応じた評価実験による知見を蓄積する必要がある。

1.2 目的

上記の背景を踏まえ、次の2つを目的として、純音性騒音の聴感印象評価を行った。

純音性騒音に対する聴感印象の定量的把握 純音性成分が騒音の聴感印象に及ぼす影響を定量的に把握すること。具体的には、騒音の周波数特性、特に純音性成分の強度・周波数をパラメータとして印象評価を行い、聴感印象を予測するモデルに資する知見を得ること。

既存の指標との対応に関する検討 既存の騒音評価指標が、純音性騒音の聴感印象とどのような対応があるかを把握し、その適応性について検討すること。

上記2点を統合し、純音性成分を含む騒音の評価指針の検討における科学的根拠となる知見を得ることを本研究の目標とする。

1.3 論文の構成

本論文は7章構成である。第1章（本章）で背景・目的について述べた。2章では広帯域ノイズ中の純音の聴取に関する基礎的な知見や、実際の騒音評価に用いられる指標、本研究と関連の深い風車騒音、純音性騒音、低周波音の評価に関する既往研究について述べる。

3～5章では、図1.1に示す純音性騒音の評価モデル把握のために本研究で実施した3種類の評価実験について述べる。

3章：マスキング閾値の計測 純音性成分の聞こえに関する基礎的な聴覚特性の検討。環境騒音を模擬した広帯域ノイズに純音性成分が付加された場合、純音性成分が可聴となるレベルを物理量として評価する。

4章：ラウドネス評価 聴覚心理および騒音評価における基礎的な心理属性であるラウドネスに関する検討。純音性成分が付加された広帯域ノイズ全体のラウドネスを評価し、ラウドネス増加を定量的に把握する。

5章：わずらわしさ評価 騒音に対する総合的な聴感印象であるわずらわしさ評価に関する検討。純音性成分が付加された広帯域ノイズのわずらわしさを評価する。純音性成分の強度や周波数を変数としてわずらわしさ増分を評価するとともに、純音の可聴性やラウドネスとの関連を考察する。

6章では、それまでの結果を受けて、低周波数帯域における純音性成分の可聴性を評価するための指標の算出方法に関する提案について述べる。7章は総括である。

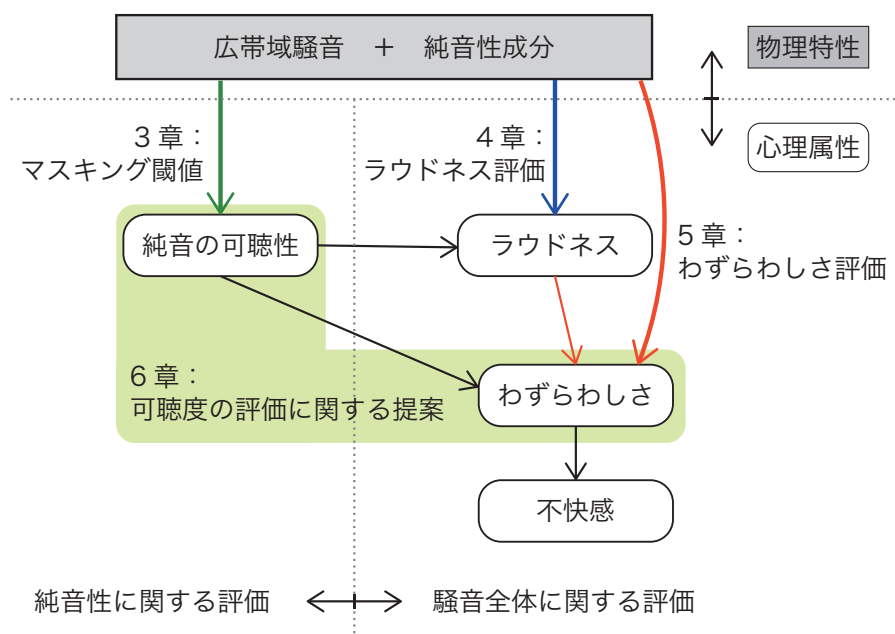


図 1.1: 純音性成分が含まれる騒音の評価モデルと関連する章

第 2 章

既往研究

本章では騒音評価の指標のもととなっている聴覚に関する既往研究（マスキング，ラウドネス）について述べたあと，3 章以降での検討で参考にした純音性騒音・風車騒音・低周波音の評価に関する研究事例について概要を記す。

2.1 聴覚の仕組み

音は空気の振動であるが，これが耳介で集められ，外耳道を経由して鼓膜に伝わる。空気の振動は，鼓膜において固体振動に変換され，耳小骨（つち骨・きぬた骨・あぶみ骨）を経由して増幅されてから，蝸牛の入り口である前庭窓（膜）に入力される。鼓膜から前庭窓までの間を中耳，蝸牛から先を内耳という。蝸牛管の内部はリンパ液で満たされており，入力された振動はリンパ液を介して基底膜の振動に変換される。基底膜は，蝸牛管に沿った帯のような形状で，音の入力があると，基底膜上に進行波が発生する。基底膜の振動は，前庭窓の近くは高周波数，蝸牛管の奥（蝸牛頂）の方は低周波数の振動入力によって駆動される。基底膜上に並んだ感覚細胞（毛状の器官をもつため，特に有毛細胞と呼ばれる）によって，機械的振動の様子が電位に変換され，聴神経が放電する（興奮）。詳細については，聴覚生理に関する書籍 [6, 7, 8] を参照されたい。このようにして，音の周波数が基底膜上の位置情報に変換されることにより，音の高さや音色を聞き取ることができる。

2.2 マスキングと聴覚フィルタ

2.2.1 マスキング

マスキング効果（あるいは単にマスキング）とは，聴取対象となる音（信号音）の聞き取りが，他の音（マスキング音）によって阻害されることをいう。

マスキングには，周波数マスキングと時間マスキングがある。前者は，信号音とマスキング音が同時に入力されている場合，後者は時間的にずれて入力される場合のマスキング効果を指す。ここでは，本論に関係の深い周波数マスキング（以降マスキングと表記）について述べる。なお，時間マスキングに関する研究も多く，一例をあげると，大きな音を聞いた直後には小さな音があっても検知されない，という効果が知られている。現在使われている音声信号の圧縮（mp3 など）には，振幅方向のデータ圧縮の際に，時間マスキングの特性が利用されている。

周波数マスキングは，マスキング音によって基底膜が励振されていると，信号音が加わってもその入力が埋没してしまい神経発火に寄与しない現象だと理解できる。そのためマスキングは，信号音

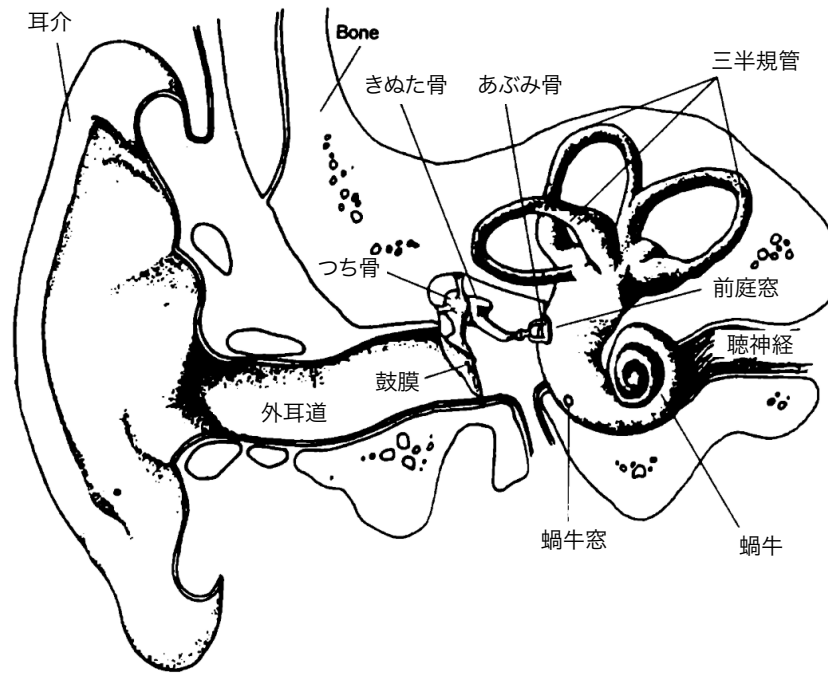


FIGURE 1.8 Illustration of the structure of the peripheral auditory system showing the outer, middle, and inner ear. Redrawn from *Human Information Processing*, by Lindsay and Norman (1972), by permission of the authors.

図 2.1: 人の聴覚器官 [7]

とマスキング音の周波数の相互関係に強く影響を受ける。たとえば、純音がノイズによってマスキングされる場合、純音の聴取を妨害するのは、ノイズの全帯域ではなく、信号音の周波数近傍の狭帯域成分のみである。これを、人間の聴覚における周波数分解機能における狭帯域フィルタと考え、次に述べる聴覚フィルタという概念を用いたモデル化が行われている。

2.2.2 聴覚フィルタ

内耳における周波数分析の機能は、基底膜上に周波数に関する狭帯域フィルタが並んでいるとも考えられる。その個々のフィルタを聴覚フィルタと呼ぶ。また、基底膜振動全体を近似するように聴覚フィルタを並べたものを聴覚フィルタバンクと呼ぶ。蝸牛の物理的な機構については、死体から得た標本や動物を使った実験によって調べられているが、生体中での働きについては計測できないため、聴覚フィルタを精度よく定式化することが求められる。聴覚フィルタの特性を調べるために、周波数マスキングを利用した計測が行われることが多い。本節では、次の3つの聴覚フィルタの推定と、それに深く関連する研究事例について述べる。

1. Fletcher の臨界比
2. Zwicker の臨界帯域
3. Patterson の聴覚フィルタ

2.2.2.1 Fletcher の臨界比

Fletcher(1940) は、次の仮定をもとに、ホワイトノイズ（全周波数帯域にわたり一様なスペクトルをもつノイズ）のもとでの純音の閾値を測定することで、臨界帯域幅を推定できると述べている [9]。

1. 純音の周辺の狭帯域周波数成分だけが、純音のマスキングに寄与する。この帯域のことを臨界帯域（Critical Band）と呼ぶ。
2. 雑音が純音をちょうどマスクするときの純音のパワーを、臨界帯域内の雑音のパワーで割ると、定数になる。

Fletcher はホワイトノイズを帯域制限した帯域雑音をマスキング音として、マスキング音の帯域幅を変えながら、純音のマスキング閾値を計測した。この雑音は 1 Hz あたりのパワー密度が一定であるから、帯域雑音のエネルギーは帯域幅に比例して増加し、純音の閾値も上昇する。この閾値の上昇分をマスキング量と考える。帯域雑音の幅がある値を超えると、純音の閾値は上昇しなくなる。聴覚フィルタの外の雑音は除去されてマスキングに参加しないという仮定から、このときの「それ以上広げても信号の閾値が上昇しなくなる帯域幅」のことを、臨界帯域幅（Critical Band Width）と呼んだ。

上記の仮定のうち、2 つ目については論文中で次のように定式化している。

帯域雑音が純音をちょうどマスクするとき（つまりマスキング閾値のとき）の、純音のインテンシティを I_m 、ノイズの 1 Hz あたりのインテンシティを I_f とする。人間が検知できる最小のインテンシティ（基準値）を I_0 とすれば、純音のインテンシティレベルと帯域雑音の 1 Hz あたりのインテンシティレベルの差 ΔL_I は、

$$\Delta L_I = 10 \log_{10}(I_m/I_0) - 10 \log_{10}(I_f/I_0) \quad (2.1)$$

となる。ここから、

$$\frac{I_m}{I_f} = 10^{\Delta L_I/10} \quad (2.2)$$

の関係式が得られる。Fletcher は式 2.2 の左辺 I_m/I_f を臨界比（Critical Ratio）と呼んだ。

図 2.2 は、さまざまな周波数の純音について、帯域雑音のバンド幅を変えながら臨界比を求めたものである。帯域雑音の幅を広げていくと純音の閾値は上昇し、臨界比と雑音の帯域幅は比例関係を示す。この領域では直線の傾きが 1 であると述べている。この比例係数はのちに検証実験によって異なることが指摘されているが、Fletcher が提唱した臨界帯域の考え方は後に継承されている。

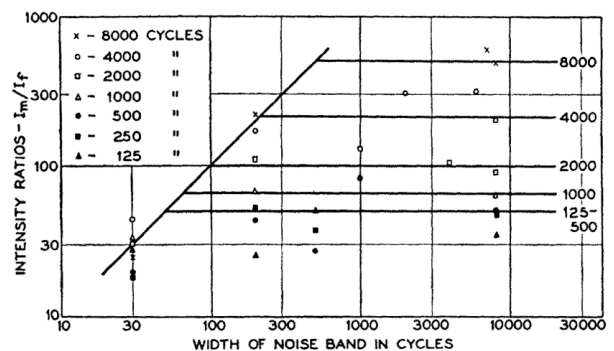
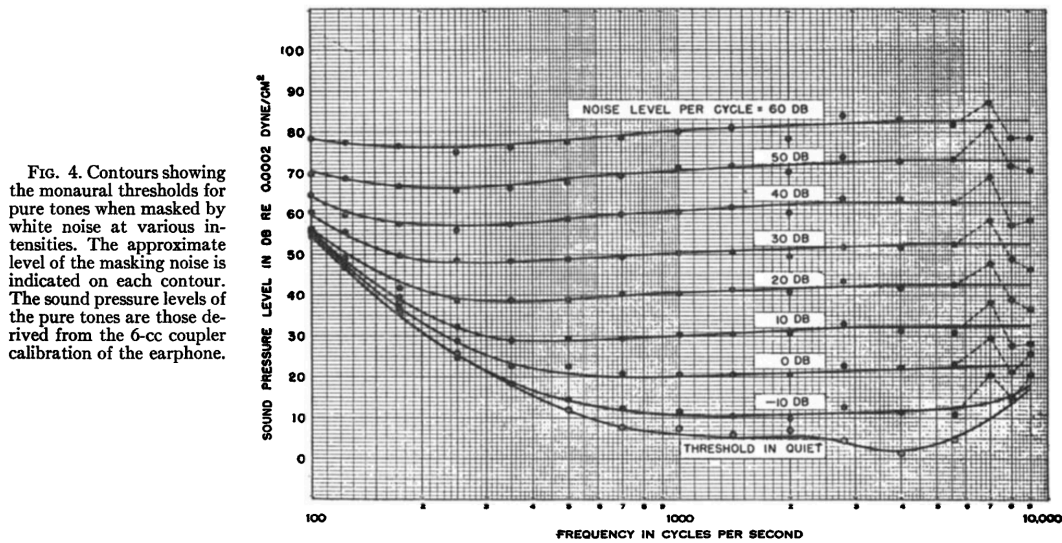


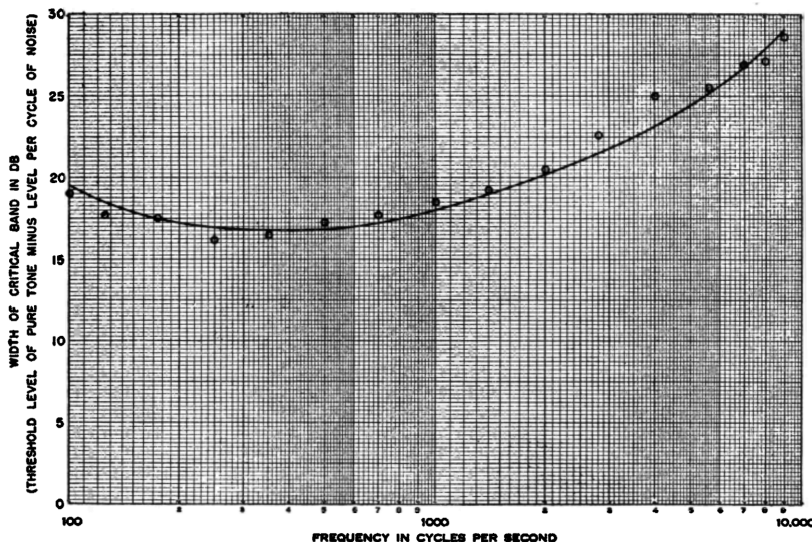
図 2.2: 臨界比とノイズのバンド幅の関係 [9]。ノイズのバンド幅を広げていくと、臨界比はやがて一定の値になる。周波数が高いほど、臨界比の上限値は大きくなる。

2.2.2.2 Hawkins and Stevens による実験

Hawkins and Stevens(1950) は、1 Hz あたりのエネルギーが -10, 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60 dB のホワイトノイズをマスキング音として、100 Hz から 10 kHz の純音のマスキング閾値を計測した [10]。図 2.3a はホワイトノイズのインテンシティレベルごとのマスキング閾値の実測値（点）と、その傾向をあらわす曲線を描いたものである。これによれば、ノイズのレベルが低い場合は、最小可聴値の影響によってマスキング閾値も高くなるが、最小可聴値と比べてノイズのレベルが十分高い領域では、ノイズのレベルが 10 dB 上がるとマスキング閾値もおおよそ 10 dB 高くなっている。この結果から純音のレベルとノイズのインテンシティレベルが一定の関係にあると考え、Fletcher の提案する臨界比に基づいて考察している。



(a) 様々なレベルのホワイトノイズ環境下での純音のマスキング閾値



(b) 純音のマスキング閾値とノイズスペクトル密度の比。試験音の絶対レベルによらず、概ね一定の関係を満たす。

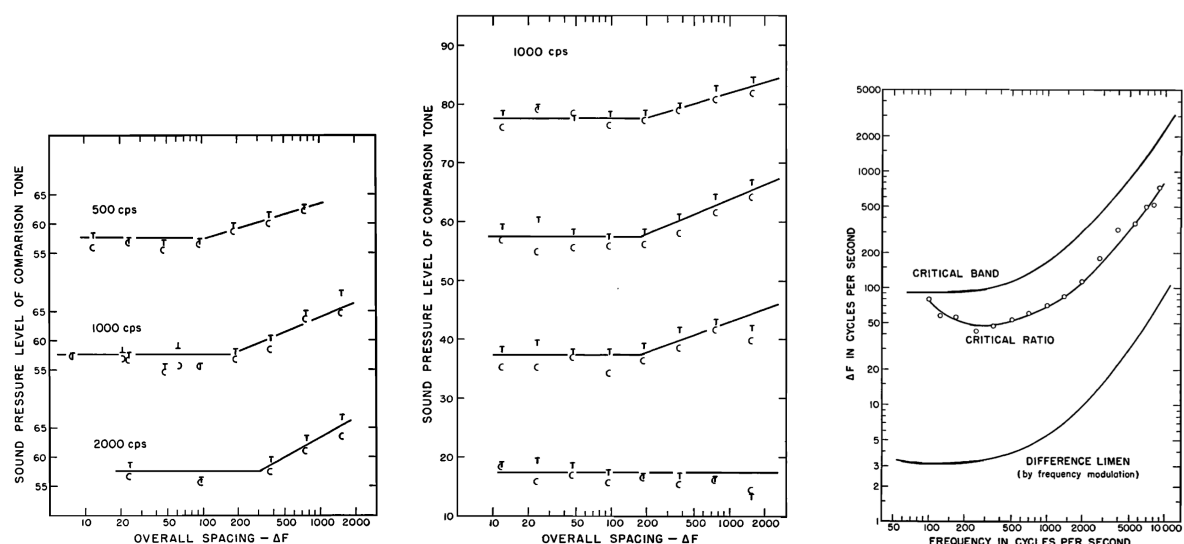
図 2.3: Hawkins and Stevens によるホワイトノイズ環境下のマスキング閾値 [10]

図 2.3b は、マスキング閾値における純音の音圧レベルから、ノイズの 1 Hz あたりの音圧レベルを引いたもの（式 2.1 における ΔL_I ）を純音周波数ごとに示したものである。臨界帯域幅は Hz 単位で記述されることが多いが、マスキング音がホワイトノイズであり帯域幅と、帯域内のノイズのエネルギーが一意に対応することから、縦軸のラベルが“Critical Band Width in dB”と表記されている。

2.2.2.3 Zwicker の臨界帯域幅, Frequenzgruppe

臨界帯域は、Fletcher によってはじめ提案されたが、様々な追検討を経て、現在は Zwicker の提唱する臨界帯域のことを一般に指すようになっている。Fletcher は、マスキング閾値から聴覚フィルタを推定したが、Zwicker はラウドネス計測によって聴覚フィルタを求めた。ラウドネスについては次節で述べるが、聴覚フィルタとしてのまとまりを優先してここで触れる。

Zwicker, Flottorp, and Stevens(1957) は、4 つの純音の複合音（以下、複合音と呼称）のラウドネスを、単一周波数の純音とのラウドネスマッチングで評価した [11]。複合音の中心周波数は固定したまま、最大の周波数と最小の周波数の差 ΔF を変えた複数の条件についてラウドネスを評価した。複合音の周波数間隔 ΔF が臨界帯域幅よりも小さければ、 ΔF を変えてもラウドネスは変化しないが、 ΔF が臨界帯域幅を超えればラウドネスが増加するという仮説のもと実験を行った。



(a) 中心周波数の異なる複合音での検討。変曲点が臨界帯域幅に相当し、中心周波数が高くなると臨界帯域幅が広がる。

(b) 呈示レベルによる違い。最もレベルが低い条件を除けば、レベルによらず同じ ΔF で変曲点となる。

(c) Fletcher の臨界比と Zwicker の臨界帯域の比較。一番下の曲線は周波数変化の知覚閾値で、臨界帯域はこれと同じ傾向である。

図 2.4: Zwicker et al. による検討 [11]

図 2.4a は、中心周波数 500, 1000, 2000 Hz の条件について、横軸に複合音の ΔF 、縦軸に単一周波数の音圧レベルを示したものである。プロットの点 T は単一周波数の音量を調整した場合、点 C は複合音の音量を調整した場合の結果で、よく対応している。仮説のとおり、 ΔF がある値を超えるとラウドネスが増加する傾向が見られた。図 2.4b は、中心周波数 1000 Hz の条件について、提示する音のレベルを変えた場合の反応である。20 dB の条件では変曲はみられないが、他の 3 条件については、呈示レベルが違っていても、同じ周波数幅 ΔF で変曲が確認されている。

Zwicker は同論文で、Fletcher の臨界比にもとづく臨界帯域幅と、自身が求めた臨界帯域（区別のため Frequenzgruppe と呼称）を比較している。図 2.4c 中の Critical Ratio（臨界比）の実線は、先述の Hawkins らの実験結果（図 2.3b）から求めた帯域幅である。Zwicker の求めた臨界帯域幅は、Fletcher の臨界帯域幅よりも広いが、500 Hz 以上の帯域での周波数依存性については同様の傾向である。

中心周波数 f [kHz] に対する臨界帯域幅 CBW[Hz] は、次のように定式化されている [12]。

$$\text{CBW} = 25 + 75(1 + 1.4f^2)^{0.69} \quad (2.3)$$

Zwicker は 20 Hz 以上の可聴な周波数帯域において矩形の聴覚フィルタが隣接して並んでいるようなモデルを考えた（聴覚フィルタは本来重なり合って連続的に配置されていると考えられていたが、計算の簡便のため隣接する区間に区切った）。中心周波数 50 Hz から 13.5 kHz の帯域について、低い帯域から順に $z=1\sim 24$ の番号を振り、各帯域における周波数幅を 1 Bark（バーク）と名付けた。 z [Bark] と中心周波数 f [kHz] は次式の関係にある。

$$z = 13 \tan^{-1}(0.76f) = 3.5 \tan^{-1}(f/7.5) \quad (2.4)$$

2.2.2.4 Masking Index

Zwicker はラウドネスの観点から聴覚フィルタの幅として臨界帯域幅を推定した。この臨界帯域幅とマスキングの関係は次に述べる実験によって検討されている。

マスキングノイズに Uniform Exciting Noise (UEN, 臨界帯域幅あたりのエネルギーが一樣になるような周波数特性をもつノイズ) を用いた場合の純音のマスキング閾値を測定し、純音のマスキング閾値と、その純音を中心とする臨界帯域内のノイズのエネルギーの比をとる。図 2.5 の下側のグラフは、臨界帯域ごとのエネルギーが 40 dB の UEN を用いたときの純音のマスキング閾値を一点鎖線で示している。ノイズの周波数特性（実線）からの差分をとると、周波数により値が異なり、低周波数では-2 dB 程度、高周波数では-6 dB 程度となる。これを Masking Index (a_v) [dB] と呼ぶ [13]。

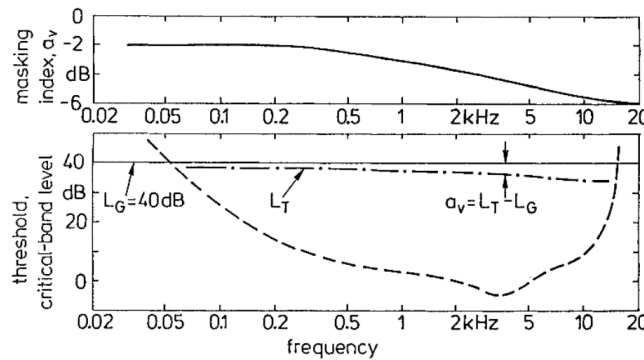


Fig. 6.17. Masking index on an expanded ordinate scale (*upper part*). Critical-band level of uniform exciting noise (*solid line*), masked threshold produced by this noise (*broken-dotted line*) and threshold in quiet (*broken line*) as a function of frequency (*lower part*). Critical-band level of the uniform exciting noise is 40 dB

図 2.5: Masking Index [13]。下段はノイズの周波数特性（実線）とそのノイズ下での純音のマスキング閾値（一点鎖線）を表し、その差 a_v masking index と呼ぶ（上段）。

2.2.2.5 マスキングのパワースペクトルモデル

Fletcher による臨界帯域幅は、矩形の聴覚フィルタを仮定してその帯域幅を実験から求めている。これは音響信号の位相・時間変化を無視して周波数特性にだけ着目し、信号音とマスキング音のパワースペクトルの重なりを考えるという観点である。これはのちに Patterson and Moore によってマスキングのパワースペクトルモデルと命名され次のように定式化された [14]。

マスキング音のパワースペクトルを $N(f)$ 、聴覚フィルタのパワースペクトルを $W(f)$ 、聴覚系内部にあると仮定する検出器の効率を定数 K とすると、信号音がうけるマスキング量（レベル） P_s が次式で推定できる。

$$P_s = K \int_{-\infty}^{\infty} N(f)W(f)df \quad (2.5)$$

2.2.2.6 Patterson の聴覚フィルタ

Patterson(1976) は、Fletcher らの実験には信号検出上誤差があることを指摘し、ノッチ雑音法を提案した [15]。ノッチ雑音とは、図 2.6 に示すようなホワイトノイズから狭い帯域部分を除去したもので、これとマスキングのパワースペクトルモデルを合わせることで聴覚フィルタの形状を推定する。この手法はノッチ雑音法 (notched-noise method) とよばれ、聴覚フィルタ推定のための計測法として現在も使われている。

信号音を挟む周波数領域 $[f_l, f_u]$ （添字は低周波数側 l と高周波数側 u を表す）で雑音を除去すると考える。ノイズのパワースペクトル $N(f)$ が、除去部分以外で一定値 N_0 ならば、聴覚フィルタのパワースペクトル $W(f)$ とプローブ音がうけるマスキングのレベルの関係を表す式 (2.5) は次のように表現できる。

$$P_s = KN_0 \left(\int_{-\infty}^{f_l} W(f)df + \int_{f_u}^{\infty} W(f)df \right) \quad (2.6)$$

このノッチ雑音の周波数範囲を変えながらプローブ音の閾値 P_s を計測することで、聴覚フィルタのパワースペクトル $W(f)$ を求めることができる。Patterson が求めた 1 kHz の聴覚フィルタを図 2.7 に示す。フィルタの傾斜は中心周波数によって異なるが、中心周波数 f_0 と中心周波数からの差 Δf の比に対しては一定の値になる (図 2.9)。フィルタのゲインには、音圧レベルに対する依存性があり、低い音圧に対しては増幅率が高く、逆に高い音圧に対しては増幅率が低くなる。フィルタ最大値からの相対値をとると、音圧レベルが高いときは周波数に対する勾配が緩やかに、音圧レベルが低いときは急峻になる (図 2.8)。

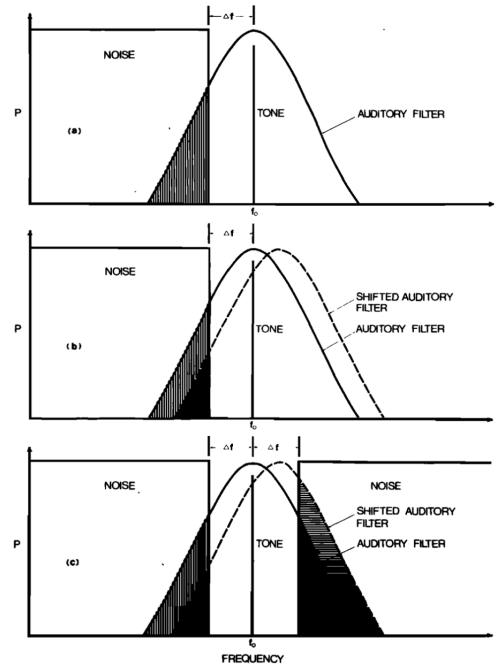


図 2.6: ノッチ雑音法の模式図 [15]。ノイズと聴覚フィルタが重なった部分（黒色）の積分値がマスキングに寄与する量を表す。

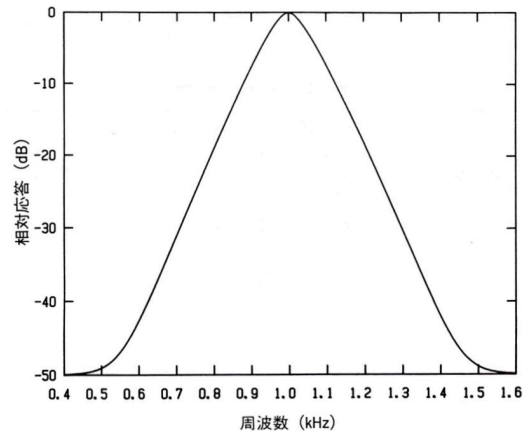


図 2.7: 中心周波数 1 kHz の聴覚フィルタ [8]

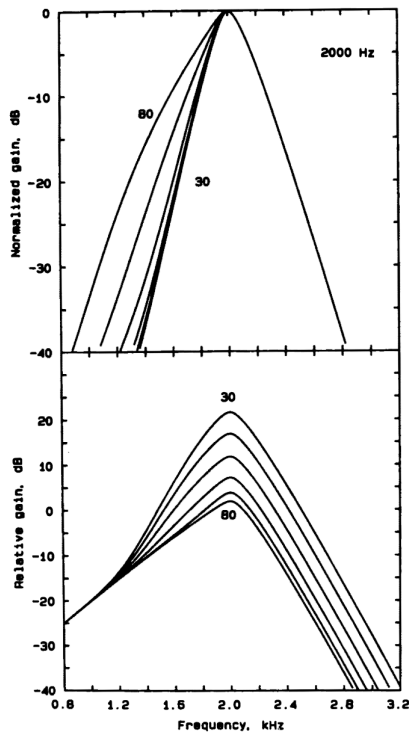


図 2.8: 中心周波数 2 kHz の聴覚フィルタのレベル依存性 [7]。レベルが低いほど聴覚フィルタのゲインは大きな値になる。

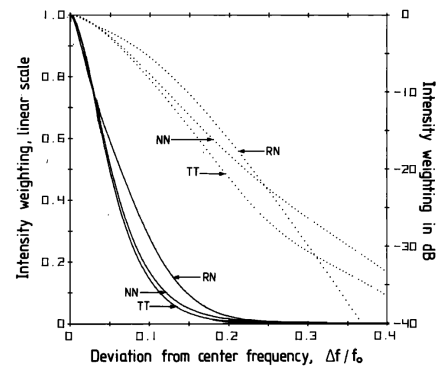


FIG. 2. Comparison of auditory filter shapes derived from the mean data in simultaneous masking for the three masker types: notched-noise (NN), two-tone (TT), and rippled-noise (RN). The solid curves are filter shapes plotted with linear intensity on the ordinate (left ordinate). The dotted curves are the same filters plotted with a logarithmic ordinate (right ordinate). Note that the filter derived from the rippled-noise data is not well specified when the absolute value of the intensity weighting function is less than 0.01.

図 2.9: 周波数とフィルタ利得の関係。横軸の f_0 は中心周波数, Δf はノッチ幅の 1/2 を表す。[16]

2.2.2.7 等価矩形帯域幅

聴覚フィルタは中心にピークをもつ三角形のような領域だが, Glasberg and Moore (1990) は, これをより簡易的に使えるように矩形フィルタに近似した等価矩形帯域幅 (Equivalent Rectangular Bandwidth, ERB) を提案した [17]。ピーク値が等しく, かこむ面積が等しくなるような矩形領域の幅で表される。健聴者の計測値から得られる ERB_N [Hz] は, フィルタ中心周波数を f [kHz] としして次のように定式化されている。

$$ERB_N = 24.7(4.37f + 1) \quad (2.7)$$

Zwicker の臨界帯域との Moore の等価矩形帯域幅の比較を図 2.10 に示す。100 Hz 以下の帯域で ERB_N の方が幅が狭いことがわかる。臨界帯域の番号は z [Bark] で表すが, 等価矩形帯域幅は ERB-Number[Cam] を単位とする。中心周波数を f [kHz] とすると次式で表される。

$$ERB_{\text{Number}} = 21.4 \log_{10}(4.37f + 1) \quad (2.8)$$

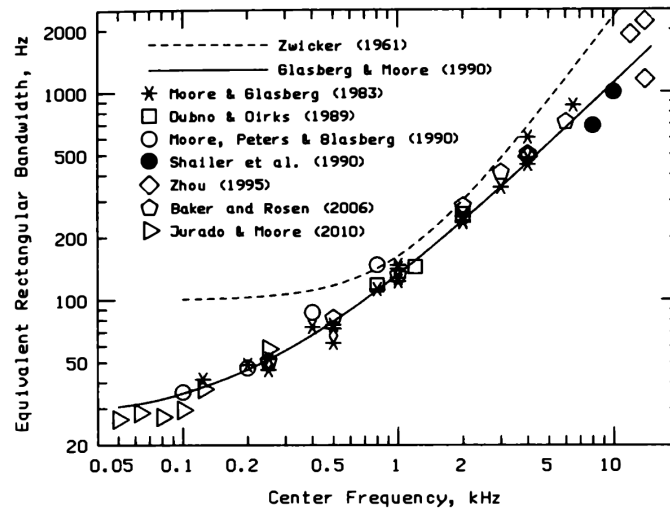


FIGURE 3.5 The dashed curve shows the “old” value of the critical bandwidth as a function of frequency (Zwicker, 1961). The solid curve shows the value of ERB_N of the auditory filter as a function of frequency. The solid curve was obtained by combining the results of several experiments using Patterson’s notched-noise method of estimating the auditory filter shape. Data are taken from Moore and Glasberg (1983b), Dubno and Dirks (1989), Moore *et al.* (1990), Shailer *et al.* (1990), Zhou (1995), Baker and Rosen (2006, data for the signal level of 30 dB SPL), and Jurado and Moore (2010).

図 2.10: 臨界帯域と等価矩形帯域幅の比較 [7]。Zwicker の臨界帯域 (破線) よりも, 等価矩形帯域幅 (実線) の方が低周波領域での精度が改善している。

2.3 ラウドネス

ラウドネスとは、音の強さ（物理量）に対する心理量で、「大きい／小さい」という量感を表す。JIS Z 8106 では「聴覚にかかわる音の属性の一つで、小から大に至る尺度上に配列される」と定義されている。音の知覚の三大属性（高さ、大きさ、音色）のうちの一つを担う基礎的な心理量である。

2.3.1 純音のラウドネス

ラウドネスに関する理論は、純音のラウドネスを基準として構築されている。ラウドネスは 1 kHz, 40 dB の音のラウドネスを基準として 1 sone とし、1 sone の刺激に対するラウドネスレベルを 40 phon と定めている。

2.3.1.1 純音の最小可聴値

純音の最小可聴値は、背景騒音のない環境下で純音が知覚できるようになるレベルの閾値を言う。理想的にはこのときの純音のラウドネスが 0 であると考ええる。最小可聴値は ISO 389-7 において値が決められている [18, 19]。

2.3.1.2 等ラウドネス曲線

音圧レベルが等しくても、周波数の異なる純音のラウドネスは一致するとは限らない。人間の聴覚の特性上、周波数の著しく高い／低い音では、中程度の周波数の音よりもラウドネスが小さく感じられる。1 kHz 純音を基準として、周波数 - レベルのグラフ上に同じラウドネスを与える純音のレベルを結んだ曲線を等ラウドネス曲線と呼ぶ。等ラウドネス曲線として、国際規格などで用いられてきたものは次の 3 種類である。

Fletcher-Munson の等ラウドネス曲線（1933） Fletcher and Munson によって計測された [20]。

実験時の音の呈示にはヘッドホンが使われ、それを自由音場条件に変換した。現在騒音評価によく用いられる A 特性音圧レベルの重み付け関数は、これの 40 phon の特性の逆特性として定められた。低周波域で直線的であるという特徴がある。

Robinson-Dadson の等ラウドネス曲線（1956） Robinson and Dadson によって、自由音場で計測されたデータから求めた曲線 [21]。ISO 226:1987 として規格化され、後述の Zwicker ラウドネスの算出にも使われている。500 Hz 以下の周波数帯域で垂れ下がりがあるが、後にこれが誤りであることが指摘され、改定された。

鈴木・竹島の等ラウドネス曲線（2004） Robinson and Dadson の曲線の改定を目的として日本、デンマーク、ドイツ、アメリカなどで行われた共同研究を、鈴木・竹島らがまとめ、ISO 226:2003 で規格化された [22]。後述の Moore-Glasberg ラウドネスの算出に使われている。500 Hz 以下の帯域の垂れ下がりがなくなり、250 Hz 以下では Robinson-Dadson 曲線と比べ 20 phon ずれるところもある。A 特性重み付けに用いられる 40 phon の曲線は Fletcher-Munson の等ラウドネス特性と似ている。

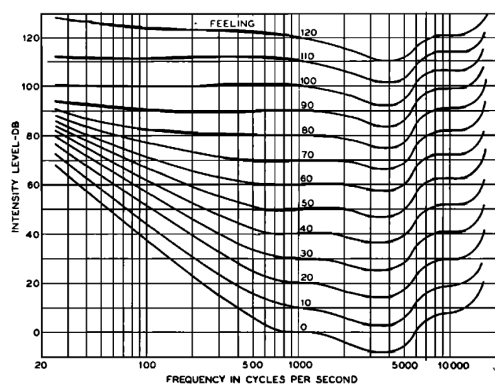


FIG. 4. Loudness level contours.

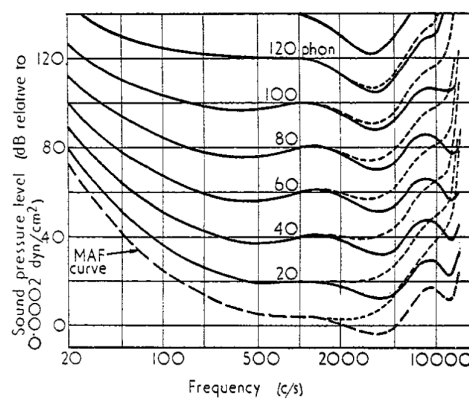
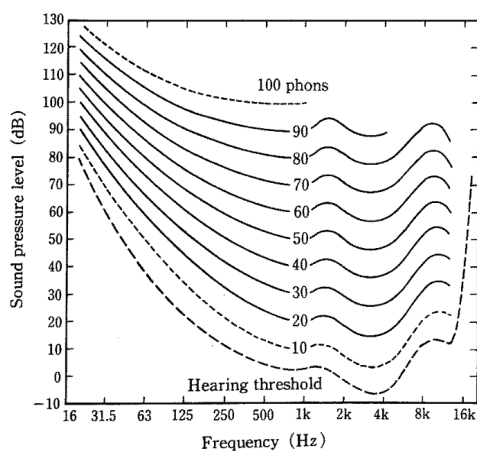


Fig. 8. Equal-loudness contours

— age twenty years; --- age sixty years.

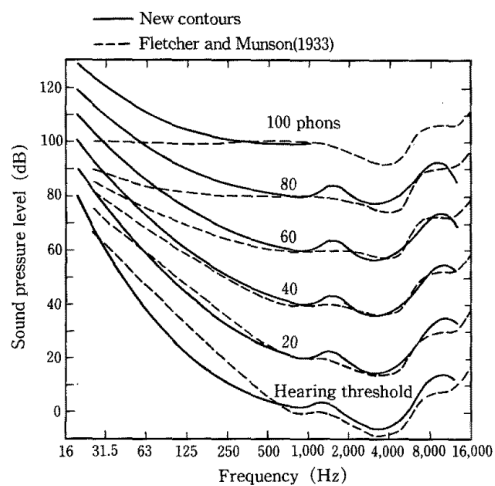
(a) Fletcher-Munson の等ラウドネス曲線 [20]

(b) Robinson-Dadson の等ラウドネス曲線 [21]

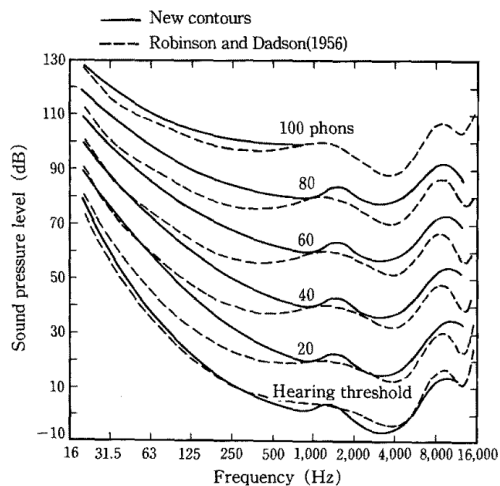


(c) 鈴木・竹島の等ラウドネス曲線 [22]

図 2.11: 等ラウドネス曲線



(a) Fletcher-Munson の曲線との比較



(b) Robinson-Dadson の曲線との比較

図 2.12: 鈴木・竹島の等ラウドネス曲線との比較 [22]

2.3.1.3 Stevens の冪乗則

Stevens は、音を含む以外の様々な刺激（視覚、聴覚、味覚など）について、刺激に対する感覚量が刺激の物理量の冪関数で表現されると考えた（Stevens の冪乗則）。感覚量を S 、物理量を I とすると、

$$S = kI^n \quad (2.9)$$

ここで k は比例定数で、冪指数 n は感覚の種類によって異なる値をとる。音のラウドネスについては、ラウドネス S が音の強さ I （インテンシティ、音圧の二乗に比例する）音のレベルが十分強いところでは、ラウドネスが音の強さ（インテンシティ）の冪乗に比例するという関係を示した。

純音のインテンシティを I とすると、その純音のラウドネス ψ は、

$$\psi = kI^n \quad (2.10)$$

ただし n は実験より求まる定数で、平均値は $n = 0.3$ と推定されている [24]。

Scharf and Stevens (1959) は、この式を閾値近傍のラウドネスを算出するための式に発展させた [25]。純音のインテンシティを I 、閾値における純音のインテンシティを I_o とするとき、

$$\psi = k(I - I_o)^n \quad (2.11)$$

実験により $n = 0.3$ と推定された。

2.3.1.4 マスキングされた純音のラウドネス

閾値付近におけるラウドネスは、その後 Hellman and Zwischlocki (1961) によって詳しく計測された [26]。Lochner and Burger (1961) は、最小可聴値が生理的なノイズによるマスキング効果による関数で表せると考えた。Hellman らの実験データを用い、Scharf and Stevens による式を次のように修正した [27]。

$$\psi = k(I^n - I_o^n) \quad (2.12)$$

ここで冪指数は $n = 0.27$ である。さらに Lochner らは、外部ノイズ環境下における純音のラウドネスを計測し、 I_o を生理的なバックグラウンドノイズ (physiological background noise) の実効的なインテンシティ I_p と、臨界帯域内の外部ノイズのインテンシティ I_e の和に拡張したモデル式を提案した。

$$\psi = k[I^n - (I_p + I_e)^n] \quad (2.13)$$

2.3.2 複合音のラウドネス

ラウドネスは純音のラウドネスを元にモデル化された。複合音のラウドネスは、複数の音のラウドネスを足し合わせることで得られるというモデルが Fletcher and Munson により提案され、現

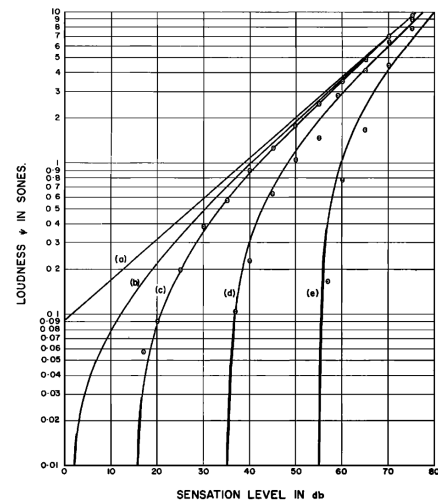


FIG. 3. Loudness of a 1000 cps pure tone in the presence of physiological noise [curve (b)] and octave band random noise that gives pure tone threshold levels of 15(c), 35(d), and 55 db(e). Experimental points are shown on the latter three curves obtained from the relation $\psi = k(I^n - I_o^n)$. The straight line (a) is the curve for $\psi = kI^n$.

図 2.13: 音圧レベルの異なるノイズでマスキングされた 1 kHz 純音のラウドネス [27]。プロットは実験値、曲線はモデル式を示す。

在も同モデルにもとづいて指標が定められている。

2.3.2.1 Fletcher のモデル

Fletcher and Munson (1933, 1937) は、ある周波数 f_k におけるラウドネスレベルが L_k であるような音について、 f_k に近い周波数帯域によるラウドネス $N_k = G(f_k, L_k)$ の和で複合音全体のラウドネス N が表されると考えた [20, 23]。

$$N = \sum_{k=1}^{k=n} b_k N_k = \sum_{k=1}^{k=n} b_k G(f_k, L_k) \quad (2.14)$$

$N_k = G(f_k, L_k)$ は、音の強さ-ラウドネスの関係が周波数とレベルによって異なることを考慮した関数である（等ラウドネス特性）。また総和の際にかかる係数 b_k は、マスキングの影響を考慮したもので、ある音がマスキングされるときは低周波側の音の影響を強く受けること、マスキング音とマスクされる音のレベル差によってマスキング量が変わること、 L_k の値によりマスキング量が変わること（レベル依存性）が考慮されている。この考え方は、現在用いられているラウドネスのモデルにも使われている。

2.3.3 ラウドネス関数

ラウドネスは心理量であるが、心理学的測定によらず、信号音のレベル・周波数特性からその音のラウドネスを求めるためのモデルが考案された。計算法は ISO 532 で国際規格化されており、以前は Stevens のラウドネスおよび Zwicker のラウドネスが、現在は Zwicker のラウドネスおよび Moore-Glasberg によるラウドネスが用いられている [29, 30]。

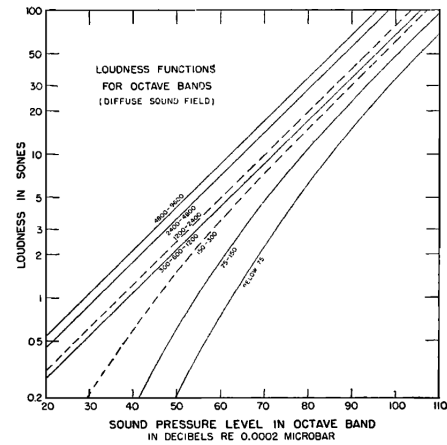
2.3.3.1 Stevens のラウドネス

Stevens は、様々な周波数帯域のバンドノイズのラウドネスを、1 kHz 純音とのラウドネスマッチングによって評価した [28]。音のレベルとラウドネスの対応関係を、中心周波数とバンド幅に応じてチャートにまとめている（図 2.14）。複合音のラウドネスを求める際には、複合音を帯域別に分割し、先述のチャートに基づいて、各帯域のラウドネスを求めたあと、次式を用いて音の総ラウドネス N を算出した。

$$N = N_m + F \left(\sum N_i - N_m \right) \quad (2.15)$$

ここで、 F はバンド幅によって決まる定数で、1 オクターブなら $F = 0.3$ 、 $1/3$ オクターブならば $F = 0.15$ である。 N_i は帯域別のラウドネス、 N_m は N_i のうち最大のものである。

Stevens によるモデルは ISO 532:1975-A として規格化されたが、Zwicker や Moore によってマスキングの効果について詳細に考慮したモデルが定着したため、近年改定された ISO 532:2017 には含まれていない。



2.3.3.2 Zwicker のラウドネス

Zwicker は、音刺激の入力が、聴神経において興奮（神経発火）に変換されることに着目し、興奮の起こる周波数とその強さで表現されるスペクトル（興奮パターン）の重ね合わせでラウドネスが記述されると考えた。対象とする音によって生じる興奮を E 、音の強さの基準 $I_0 = 10^{-12} \text{W/m}^2$ （人間の検知できる最小の入力）に対する興奮を E_0 とすると、ある帯域成分から生じるラウドネス N' は Stevens の冪乗則から次式で表される [13]。

$$N' = k \left(\frac{E}{E_0} \right)^\alpha \quad (2.16)$$

さらに聴覚器官には最小可聴値に対応するようなノイズが内在すると仮定する。最小可聴値での純音による興奮を E_{TQ} 、それに対応する臨界帯域内の内部ノイズによる興奮が定数 s を用いて E_{TQ}/s と表されると仮定し、次のモデル式を提案した。

$$N' = k \left(\frac{E_{TQ}}{sE_0} \right)^\alpha \left[\left(1 + \frac{sE}{E_{TQ}} \right)^\alpha - 1 \right] \quad (2.17)$$

実験により冪指数 $\alpha = 0.23$ であることがわかっている。この式は、 E が E_{TQ} より十分大きいときは、式 (2.16) に漸近する。

Zwicker 方式は ISO 532:1975-B で規格化され、現在も ISO 532-1:2017 で用いられている。定常音・時間変動音のラウドネスを算出することができる。ここでは、ISO 532-1:2017 に記されている定常音のラウドネスレベルの計算手順の概略を示す。図 2.15 に、ISO 532-1:2017 に示されているフローチャートを示す。

- 1：臨界帯域への分割、等ラウドネス特性の計算 中心周波数 25～12500 Hz の 1/3 オクターブバンドごとの音圧レベルを、 $z = 1 \sim 24$ Bark の臨界帯域ごとに割り振る。この際に、250 Hz 以下の帯域については、Robinson-Dadson の等ラウドネス曲線に基づき、低周波数領域におけるラウドネスのレベル・周波数特性を反映した重み付けをする。
- 2：外耳の伝達特性の計算 臨界帯域ごとに、外耳の伝達特性、自由音場／拡散音場の補正をし、補正レベル $L_{CB'}$ [sone/Bark] を算出する。
- 3：補正レベルからラウドネス密度への変換 先に求めた補正レベル $L_{CB'}$ が、式 2.17 における興奮 E に対応する。式 2.17 を用いて、1 Bark あたりのラウドネス（ラウドネス密度、Core loudness） N'_C を算出する。
- 4：ラウドネスの計算 N'_C の値に応じて、高周波数帯域側へのスロープを求め、Bark スケールに沿って配置したのちに、 $z=0$ から 24 Bark の区間を、0.1 Bark 刻みで加算して総ラウドネス N を得る。

$$N = \int_0^{24 \text{ Bark}} N'(z) dz \quad (2.18)$$

ISO 532:1975-B では、図 2.16 チャート上にラウドネス密度を記し、マスキング効果によるスロープを含めた領域（実線で囲まれた部分）の総面積を求めた。

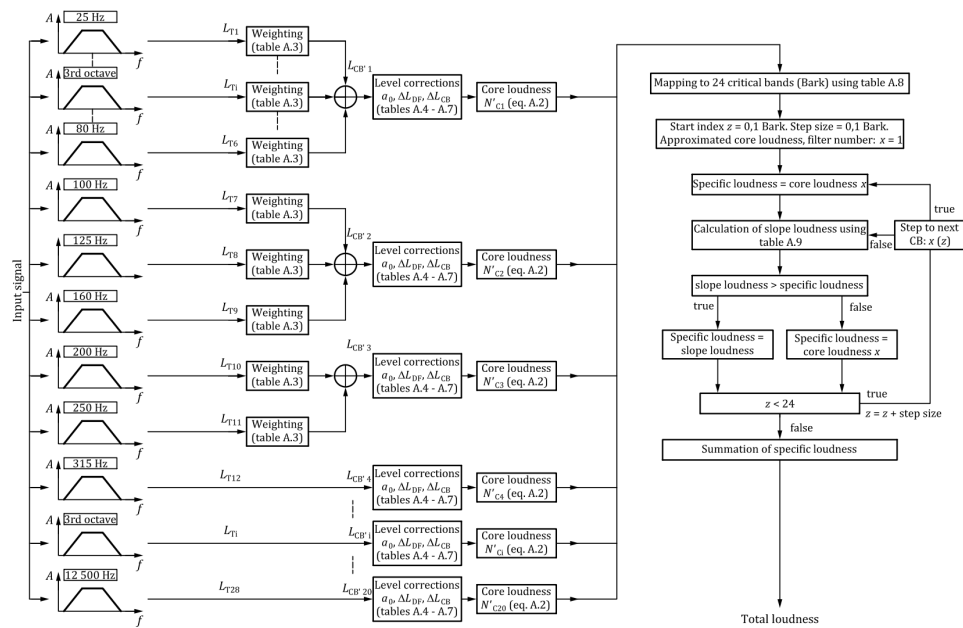
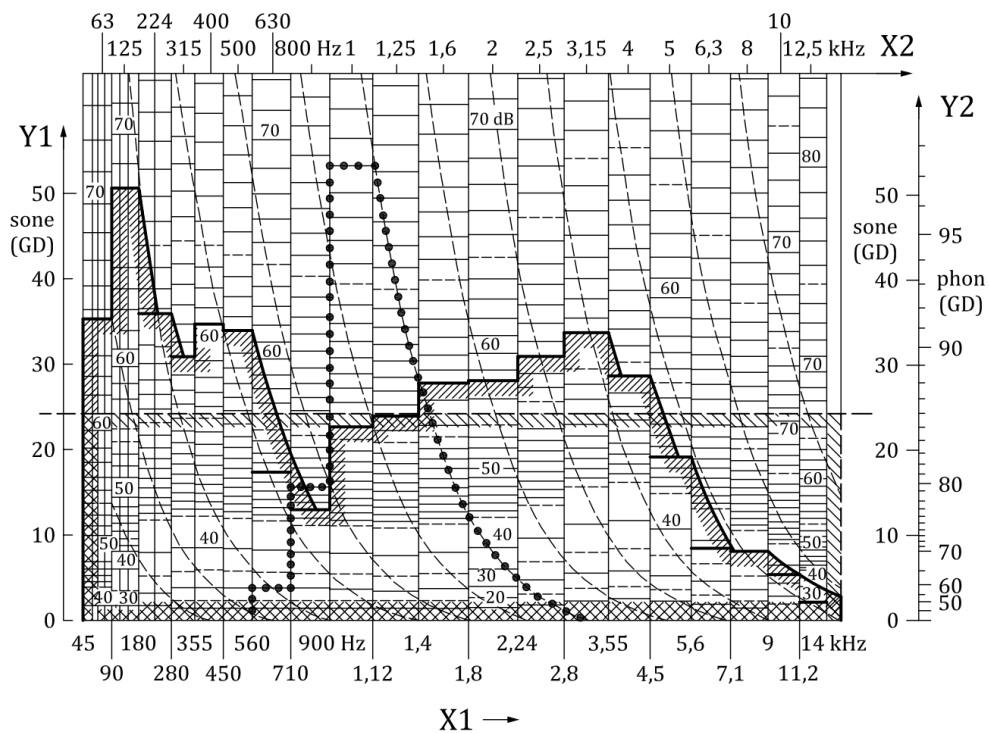


図 2.15: Zwicker ラウドネス算出のフローチャート [29]



Key

- X1 cut-off frequency of third-octave bands
- X2 centre frequency
- Y1 scale of total loudness
- Y2 scale of corresponding loudness level

図 2.16: ISO 532:1975-B で用いられていたラウドネスチャート [29]。図中の太い点線は、1 kHz の純音に対するラウドネス密度。

2.3.3.3 Moore-Glasberg のラウドネス

Moore-Glasberg のラウドネスは 2017 年から ISO 532 に加えられた計算法で、Zwicker ラウドネスの改良法として位置付けられる。定常音のラウドネスを計算することができる。

Moore-Glasberg 法では、入力信号から興奮パターンを算出するために、ノッチ雑音法によって得られた聴覚フィルタを重み付け関数として用いる。1 kHz 純音の入力があった場合の興奮パターンの算出方法を、図 2.17 に示す。聴覚フィルタには幅があるので、基底膜上で 1 kHz の位置にない聴神経においても、ゲインは少なくなるが、神経発火が起こる。図 2.17 の上側の図には、1 kHz にゲインをもつ 5 つの中心周波数の聴覚フィルタが書かれている。一番低域側のフィルタでは、1 kHz に対するゲインは -40 dB であり、これが下側の図の点 a に対応する。聴覚フィルタの中心周波数が 1 kHz に近づくに従ってゲインが増え、中心周波数 1 kHz のフィルタで最大となる（点 c）。中心周波数が高くなると、再びゲインが下がり（点 d, e）、1 kHz から十分離れると、神経発火が起らなくなる。このように、フィルタの中心周波数をずらしながら重ね合わせることで（周波数軸上における畳み込み）、下側の図のような入力信号に対する興奮パターンを得ることができる。この興奮パターンは、高周波数帯域側に広い裾をもち、高域側へのマスキングの特性を反映している。

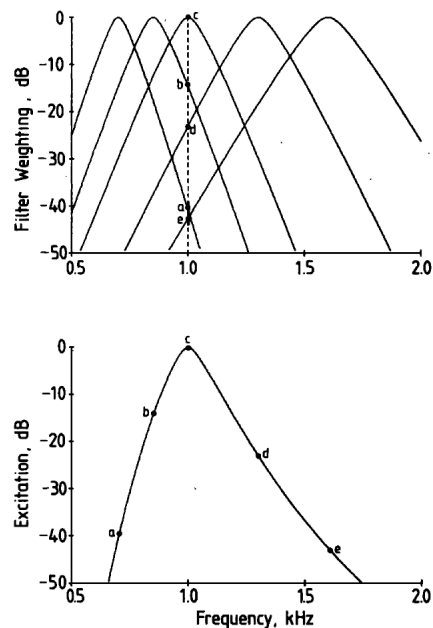


FIG. 3. Illustration of the derivation of an excitation pattern from filter shapes. At the top are shown simplified filter shapes at several center frequencies, with the form given by Eq. (6). The filter shape is assumed symmetrical, but the ERB increases with frequency in accord with Eq. (3). The excitation pattern for a 1-kHz tone (dashed line) is obtained by calculating the output of each filter as a function of filter center frequency.

図 2.17: 純音の近傍の聴覚フィルタ列から得られる興奮パターン [31]。高周波側に裾の広い形状になる。

図 2.18 は、ISO 532-2:2017 に示されているフローチャートである。計算の手順は Zwicker 法と大枠は同じである。Moore-Glasberg ラウドネスは、片耳ずつラウドネス密度を計算し、両耳間の相互作用を考慮してから総和をとるため、ブロック図が 2 行に分かれている。

- 1: 外耳・中耳の伝達特性の計算 中心周波数 25~16000 Hz の 1/3 オクターブバンドごとの音圧レベルを、ERB-Number ごとに割り振る。外耳および中耳の伝達特性として、レベルによらない周波数特性を反映した重み付けをする。
- 2: スペクトルから興奮パターンへの変換 ERB_N ごとの入力信号のスペクトルに対して、中心周波数を 0.1 Cam ずつずらしながら聴覚フィルタ $W(g)$ による重み付け和をとり、興奮パターンを得る。聴覚フィルタはレベルによって尖度や対称性が変化するような式で与えられ、これによりレベル依存性を算入する。
- 3: 興奮パターンからラウドネス密度への変換 Zwicker のラウドネスと同じく、ラウドネス密度 N' は興奮の冪乗に比例するという式 (2.16) に則っている。ラウドネス密度 N' [sone/Cam] を求める式は、最小可聴値やレベルによる非線形性を考慮して場合分けされており、最小可

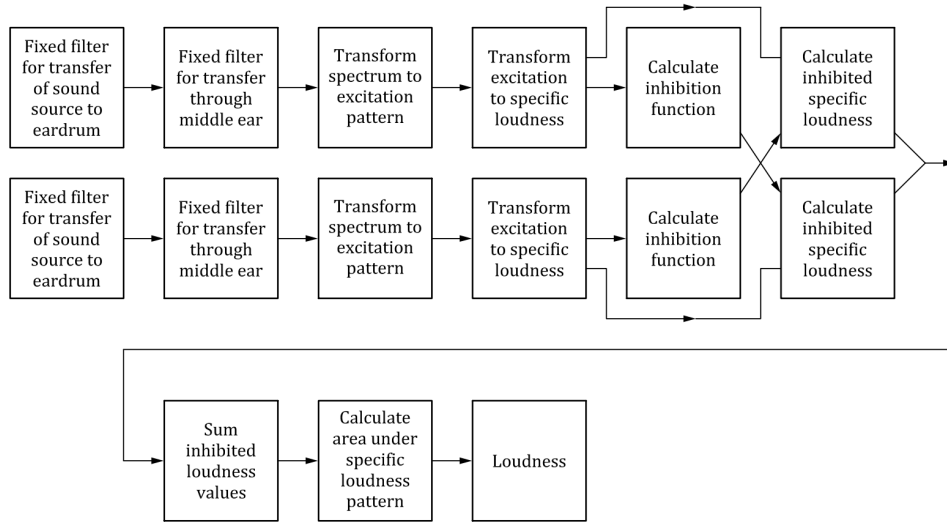


図 2.18: Moore-Glasberg ラウドネス算出のフローチャート [30]

聴値における興奮を E_{THRQ} とし、周波数別の、レベルに対する依存性を表すパラメータを A, G として、次式で表される。式中の A, G は、500 Hz 以下の低周波数領域に対して内耳でのゲインが低くなることを反映するために導入されたパラメータで、規格の中では数表で与えられる [32]。冪指数 α は、 G の値に応じて 0.2 から 0.27 の間の値をとる。

i. $E < E_{\text{THRQ}}$ の場合

$$N' = k \left(\frac{2E}{(E + E_{\text{THRQ}})} \right)^{1.5} [(GE - A)^\alpha - A^\alpha] \quad (2.19)$$

ii. $E_{\text{THRQ}} \leq E < 10^{10}$ の場合

$$N' = k [(GE - A)^\alpha - A^\alpha] \quad (2.20)$$

iii. $10^{10} \leq E$ の場合

$$N' = k \left[\frac{E}{1.0707} \right]^{0.2} \quad (2.21)$$

4: ラウドネスの計算 得られたラウドネス密度 N' を 1.8 Cam から 38.9 Cam の区間で、0.1 Cam 刻みで和をとって総ラウドネス N とする。

$$N = \int_{1.8}^{38.9 \text{ Cam}} N'(x) dx \quad (2.22)$$

Zwicker のラウドネスとの違いは、次の 2 点である。

聴覚フィルタの改定 臨界周波数の代わりにノッチ雑音法によって調べられた聴覚フィルタと ERB_N を用いており、特に 500 Hz 以下の低周波数帯域における周波数分解能が高くなった。

等ラウドネス曲線の改定 用いている等ラウドネス曲線の違い。ISO 226:2003 で改定された等ラウドネス曲線をもとに、レベルや周波数に関する依存性をより精密に反映するようなモデル

となっている。等ラウドネス曲線の改定では、500 Hz 以下の低周波数帯域において値が大きく改善していることから、Moore-Glasberg のラウドネスも、低周波数帯域においてより精度が向上したと考えられる。なお、Zwicker のラウドネスは、1975 年バージョンとの互換性を維持するために、Robinson-Dadson の等ラウドネス曲線を継続して使っている。

2.3.3.4 A 特性音圧レベル

1933 年に Fletcher-Munson による等ラウドネス特性とラウドネスの加算についての知見を受け、1936 年に騒音測定における重み付け特性として、A 特性と B 特性が提案された [33]。A 特性は 40 phon の等ラウドネス特性、B 特性は 70 phon の等ラウドネス特性の近似的な逆特性であり、人間の主観的なラウドネスの感覚特性を、騒音評価に取り入れようという意図で確立された。その後、100 phon の等ラウドネス特性の近似的な逆特性として C 特性も導入された。

A 特性音圧レベルは、現在環境音の評価で最もよく使われている物理量である。ラウドネスに関する周波数依存性を反映させるための重み付け関数として、Fletcher-Munson の 40 phon の等ラウドネス曲線の近似的な逆特性を用いて求められる。マスキングの影響や、音圧レベルによる依存性を考慮しないため、精密さでは先述のラウドネスレベルより劣るものの、日常ある種々の騒音に対する主観的なラウドネスとよく適合することが知られており、計算が簡便で騒音系などの計測機器にも内蔵しやすいことから広く使われている。ただし、特定周波数帯域に卓越した周波数成分をもつ複合音や、異なる周波数成分を持つ複数の音源がある場合など、マスキング効果の影響が考えられる音に関しては、主観的なラウドネスとの対応が変化する可能性が指摘されている [34]。

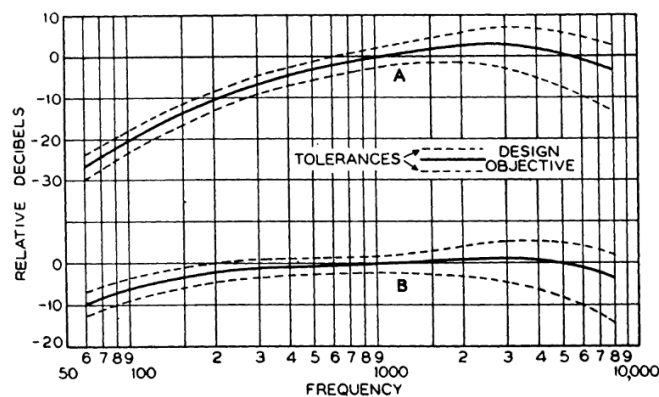


Fig. 1. Over-all free field frequency responses and tolerances for sound level meters

図 2.19: A 特性, B 特性の荷重係数 [33]

2.3.4 マスキング効果に基づく純音性成分の評価

2.3.4.1 Tonal Audibility

Tonal Audibility(純音性可聴度, TA) は, マスキング効果に基づいて考案された評価量である。指標算出の概要を図 2.20 に示す。聴取の対象となる純音性成分があるとき, その成分のマスキングに関わるのは周波数軸上の近傍にある成分であり, これをマスキング成分とよぶ。周波数の範囲は Zwicker の臨界帯域 (あるいはその近似式) で定める。臨界帯域内の周波数成分を, 純音性成分とマスキング成分に分け, そのエネルギーの比をとる。このエネルギー比は物理量であるが, そこに人間の聴覚特性を考慮した係数を加えて, TA=0 dB でマスキング閾値に相当するように補正する。

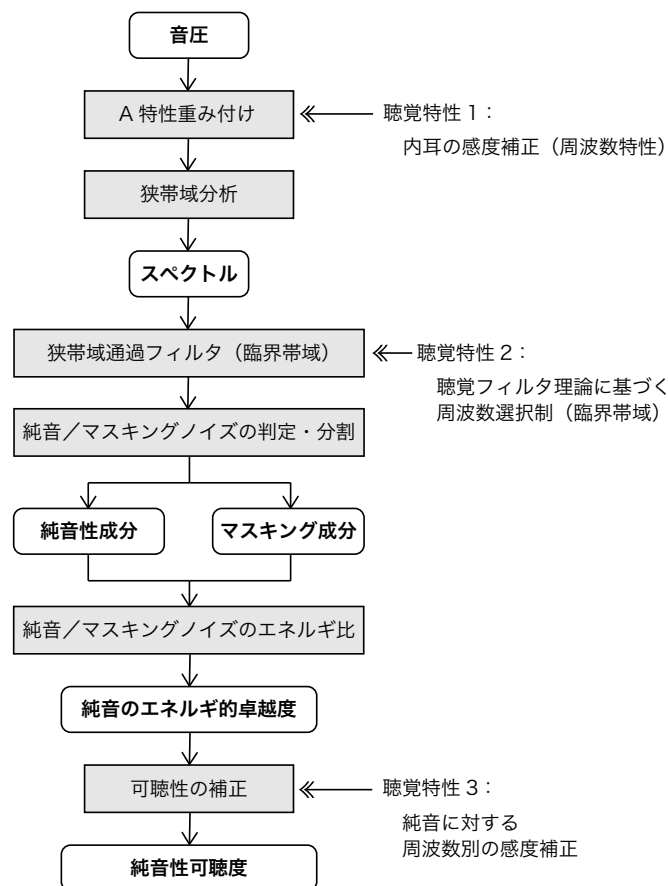


図 2.20: Tonal Audibility 算出の概要

TA は, Joint Nordic Method (ISO 1996-2:2007 で規格化) , ISO/PAS 20065 や, IEC 61400-11:2012 など複数の国際規格で定められている [35, 36, 37]。いずれも上で述べた考え方に則って計算されるが, 臨界帯域幅を求める式や, 純音性成分／マスキング成分の判定方法, 適用できる純音周波数の範囲などにわずかな違いがある。本論では, 50 Hz 以下の純音性成分に対しても適用できる IEC 61400-11:2012 を用いたため, これに記載されている計算方法について詳しく説明する。

IEC 61400-11:2012 では, 風車騒音の測定・評価方法を定めている。規格の前半では主に計測の仕方 (測定点の設置方法や風速にかかわるデータ整理の手法など) についての説明があり, 純音性成分の取り扱いについては 9.5 節に記載がある。TA の算出には①純音性成分の検出, ②臨界帯域内のスペクトルラインの分類, ③純音性成分の決定, ④マスキングノイズレベルの決定, ⑤純音卓

越度の算出, ⑥純音性可聴度の算出, の手順がある。

①純音性成分の検出

- a) 純音候補の検出 試験音を 10 秒ごとにエネルギー平均し, 1~2 Hz 幅の周波数分解能で狭帯域分析をする。このとき, 内耳における反応特性を反映するために A 特性重み付けをする。周波数スペクトル上の局所最大値を検出し, これを純音性成分の候補とする。
- b) 臨界帯域ごとへの分割 局所最大値の周波数 f_c [Hz] を中心とする臨界帯域を考える。臨界帯域幅は Zwicker によるもので, 次式で表される。

$$\text{Critical band width} = 25 + 75 \left(1 + 1.4 \left[\frac{f_c}{1000} \right]^{-2} \right)^{0.69} \quad (2.23)$$

- c) エネルギー平均値の算出 各臨界帯域ごとのエネルギー平均値 $L_{pn,avg}$ を算出する。平均の際には, 局所最大値とそれに隣接するスペクトルラインのエネルギーは除く。

- d) 純音性成分の判断 局所最大値が $L_{pn,avg} + 6$ dB を超えるなら, 純音性成分とみなす。

②臨界帯域内のスペクトルラインの分類

- a) $L_{70\%}$ の算出 臨界帯域内のスペクトルラインをエネルギーの低い順に並べた時, 低い方の 70 % に含まれるスペクトルラインのエネルギー平均から求める音圧レベル $L_{70\%}$ を算出する。

- b) スペクトルラインの分類 $L_{70\%} + 6$ dB を基準レベルとする。

- ・基準レベルよりエネルギーの低いスペクトルラインをマスキング成分と分類する。
- ・ $L_{pn,avg} + 6$ dB を超えるスペクトルラインを, 純音性成分に分類する。
- ・互いに隣接するスペクトルラインが純音性成分に分類される場合, 最大値をもつものを純音性成分とする。純音性成分に隣接するスペクトルラインについては, 最大値-10 dB の範囲に入るものだけに限り純音性成分と分類する。
- ・純音性成分, マスキング成分のいずれにも分類されなかったスペクトルラインは, この先の分析では無視される。

- ③純音性成分の決定 複数の純音性成分が検出された場合, レベルが最大のものの周波数を純音周波数として代表させる。純音性成分と分類されたスペクトルラインのエネルギー和から, 純音の音圧レベル $L_{pt,j,k}$ [dB] を算出する。

- ④マスキングノイズレベルの決定 マスキングノイズレベル $L_{pn,j,k}$ [dB] は次式で求められる。

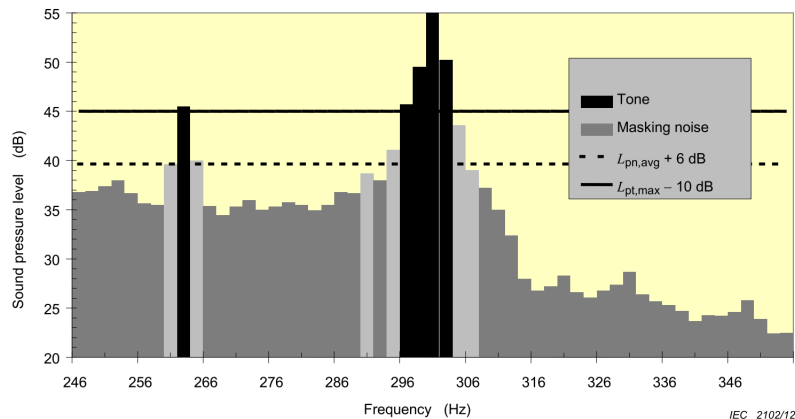


図 2.21: TA 算出におけるスペクトルラインの分類 [37]

$$L_{\text{pn},j,k} = L_{\text{pn,avg},j,k} + 10 \log \left[\frac{\text{Critical bandwidth}}{\text{Effective noise bandwidth}} \right] \quad (2.24)$$

ただし、 $L_{\text{pn,avg},j,k}[\text{dB}]$ はマスキングと分類されたスペクトルラインのエネルギー平均値である。Effective noise bandwidth は、ハニング窓についての補正を含めるため、周波数分解能の 1.5 倍の幅とする。

- ⑤純音卓越度の算出 純音性成分のエネルギーから、マスキング成分のエネルギーを引いたものを、純音性卓越度 (Tonality) $\Delta L_{\text{tn},j,k}[\text{dB}]$ とよび、次式で求められる。

$$\Delta L_{\text{tn},j,k} = L_{\text{pt},j,k} - L_{\text{pn},j,k} \quad (2.25)$$

- ⑥純音性可聴度の算出 純音性卓越度を人間の聴覚の周波数特性を加味した係数 L_a で補正し、TA とする。各スペクトルに対する純音性可聴度 $\Delta L_{a,j,k}[\text{dB}]$ は次式で定義される。

$$\Delta L_{a,j,k} = \Delta L_{\text{tn},j,k} - L_a \quad (2.26)$$

ここで L_a は可聴指標 (audibility criterion) で、純音周波数 f [Hz] に対し次式で表される。

$$L_a = -2 - \log \left[1 + \left(\frac{f}{502} \right)^{2.5} \right] \quad (2.27)$$

これは、2.2.2.4 項で述べた masking index を定式化したものである。

以上の手順で純音性可聴度を算出する。なお、IEC 61400-11:2012 には、TA=0 dB ならば純音性成分が可聴であると記載されており、TA が-3 dB を下回る場合は報告の必要はない。

2.4 騒音評価に関する既往研究

2.4.1 騒音評価における心理属性の扱いに関する議論

騒音の心理的不快感の評価においては、ラウドネス、ノイジネス、アノイアンスの心理的な3属性についてといった心理量を評価量とすることが多い。ラウドネスについてはJISによる定義があるが、ノイジネス・アノイアンスについてはJISで定義されていない。このことに関しては難波(1988)が整理して論じており、そこでの議論をここで紹介する[38]。

泉(1976)は、ラウドネス・ノイジネス・アノイアンスについて次のような定義を行なっている[39]。

1. ラウドネス 第1属性はエネルギーそのものの主観的評価で、British Standard (BS-661:1969)のラウドネスの定義と等しい。“大きさ”をこれにあてる。なお、BSのラウドネスの定義とは“音の強さに関する観察者の主観的印象(an observer's auditory impression of the strength of a sound)”のことである。
2. ノイジネス 第2属性は騒音の各種の物理的特性に基づく聴覚的不快感で、第1属性の要因であるエネルギー評価を包含する。ノイジネスおよび“やかましき”をこれにあてるが、それぞれ一般的用法の概念から非聴覚的要因を排除した外縁を持つ。
3. アノイアンス 第3属性は騒音に関わる不快感の総称で、第2属性による聴覚的不快感にこれから排除した非聴覚的不快感を加えたもので、アノイアンス及び“うるさき”をこれにあてる。

難波はノイジネスを「音そのものに付随した不快感(喧騒感)」, アノイアンスを「仕事, やすらぎ, 安眠を妨げる邪魔な音としての邪魔感」と述べており、音響用語辞典(日本音響学会編, コロナ社)[40]においても同様の記述がされている。また、Berglund et al.(1975)は被験者に対する教示で、ノイジネスは音質にかかわる評価、アノイアンスは音を聴く時の状況(論文中では「一日の仕事を終えて、自分の椅子にくつろいで座り新聞を読もうとしているところ」)を想像したときに騒音に対して覚えるいやな感覚についての評価であると説明している[41]。このように、ノイジネスは非音響的要素を排除した感覚、それに対してアノイアンスは非音響的な要素も含めた評価であると比較的明快に理解されている。難波は同時に、アノイアンスに及ぼす非音響学的要因は多様であり、その解明が課題であると指摘している。

難波はまた、ノイジネスとアノイアンスの測定の妥当性に関して、「ノイジネスのみに限るならば実験室実験である程度、ノイジネスを規定する要因を見出すことは可能である。なぜならば定義によりノイジネスを音響学的要因によって支配される側面であるから、音響学的要因の統制の可能な実験室で系統的に測定できるからである。」と述べる一方、アノイアンス測定に関しては困難であるという立場をとっている。実験による測定では、実験場面の緻密な設定をしても自発的な実験参加者が実際の騒音の被害者と(心理的にも)同じアノイアンスを経験することには限界があると指摘しており、非音響学的要因が関係するアノイアンスを物理量のみで予測・評価することが困難であろうと述べている。この難波の議論は30年前のものであるが、現在も、実験室実験においてアノイアンスを測定することの信頼性・妥当性は未だ検証できていないと考えられる。

また同文献[38]では、日本語で実施する際の注意点として評価語の扱いを挙げている。外国における研究では“*Noisiness*”, “*Annoyance*”がそのまま評価語として提示されることも多いが、日

本語では訳語が定まっておらず、よく用いられる「やかましさ」「うるささ」なども日常用語として定着しているため、慣用的な意味から切り離れた評価語として用いる場合に注意が必要である。騒音の印象評価においては、ノイジネス、アノイアンスといった音の属性を直接計測すると捉えるより、既往の研究事例における教示などを踏まえながら、実験に用いる刺激の特徴を表現するのに適切な用語をよく検討する必要があると述べている。

2.4.2 一般の環境騒音を用いた評価実験

本項では、純音性成分を含まないような一般の環境騒音を対象に行なった評価実験について述べる。ここで触れる知見は 30 年以上前に得られたものだが、現在も有用な知見として認められている。

2.4.2.1 異なる心理属性間の定量的関係に関する研究

Berglund et al. (1975) は、17 種類の航空機騒音を試験音として、ラウドネス、ノイジネス、アノイアンスそれぞれについて ME 法による評価実験を行い、3 属性間の定量的な関係について整理した。各属性の対応はいずれも線形な関係を示し、ラウドネスよりもノイジネス、ノイジネスよりもアノイアンスの方が傾きが急峻である（図 2.22a）。また、図 2.22b には、試験音のピークレベル（A 特性）と各属性の評価の関係を示したもので、物理的なレベルと主観的な判断がべき関数によく当てはまること、べき指数が判断する属性によって若干異なることがわかる。

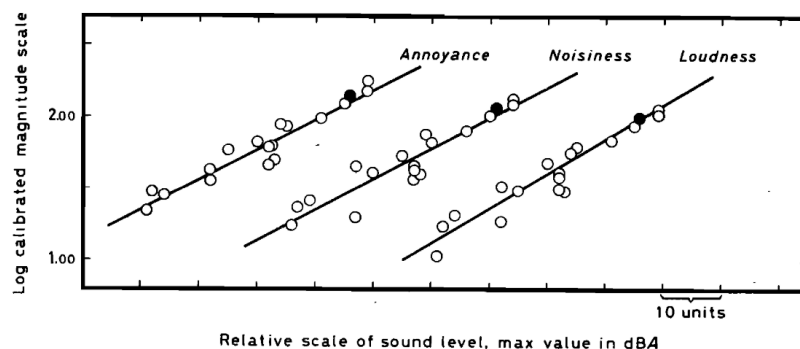
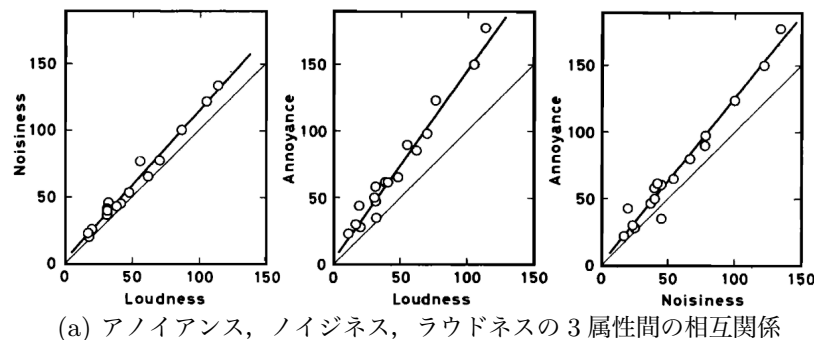


図 2.22: Berglund et al. の検討 [41]

2.4.2.2 主観的ラウドネスと等価騒音レベルに関する研究

難波ら (1985) は、さまざまな環境騒音および人工音について、ME 法を用いてラウドネスを評価させ、その等価騒音レベルとの関係を整理した [42]。同一種類の騒音では、試験音のレベルと主観的評価値が線形な関係を満たし、種類によって回帰線にやや違いがみられた (図 2.23)。 L_{Aeq} の値が同じでも、必ずしもラウドネスは同じとは限らないことを示唆する結果であり、その要因に周波数成分、時間特性、音源の種類が影響したと考えられると述べている。

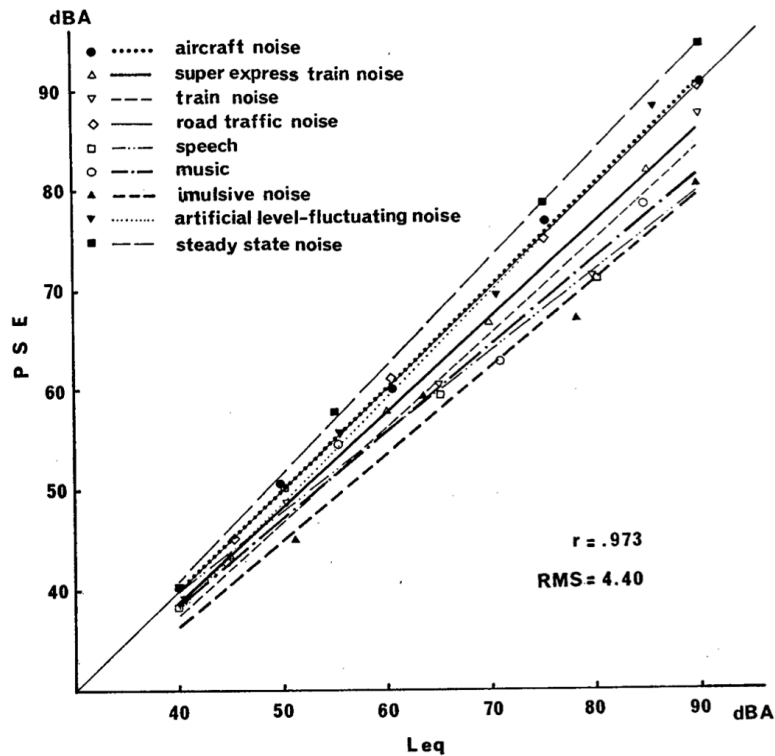


Fig. 4 Relation between L_{eq} and PSE, and regression lines between them of each noise source. It is found that L_{eq} is a good measure of the loudness of various kinds of noises as a first approximation. However, there is a slight, but systematical deviation from L_{eq} in PSE's of some noise sources, which suggests that some factor should be added to L_{eq} in order to decide the permissible level of these noise sources.

図 2.23: 試験音の等価騒音レベルとラウドネスの主観的等価点の関係 [42]。同種の音源同士は線形の関係にあるが、音源の種類によって回帰線の傾きが異なる。

2.4.3 純音性成分を含む騒音の評価に関する研究

2.4.3.1 就業環境における騒音のアノイアンス評価

Landström et al.(1995) は、就業環境における騒音のアノイアンスを評価した [43]。等価騒音レベルが 35～85 dB の就業環境（オフィス、研究所、工場）439 箇所を対象に音の収録と現場でのアノイアンス評価をおこなった。アノイアンスの尺度は図 2.24a に示す 100 mm の直線を用い、直線上の好きな位置に印をつけさせて左端からの長さを測って集計した。

騒音の周波数特性から、低音域優勢／中音域優勢／高音域優勢／純音性 4 つに分類し、アノイアンスと音圧レベルの関係を検討した (図 2.24)。純音性の騒音については、騒音のレベルと純音周波数によって、他のグループの騒音と比べてアノイアンスに影響があるかを調べた。結果として、音圧レベルが 55.5 dB 未満かつ低音～中音域優勢のグループでは純音性成分によりアノイアンスが 100 mm 中 9.8 mm 増加し、レベルにしておよそ 6 dB 分の増分であったと述べている。

この検討は、実験室実験ではないため、刺激の統制などの難しさに起因するとみられるばらつきは非常に大きい、多数のデータを取得したという資料的価値がある。

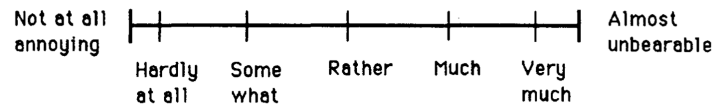


Fig. 2. The annoyance scale.

(a) アノイアンスの尺度 (縮小)

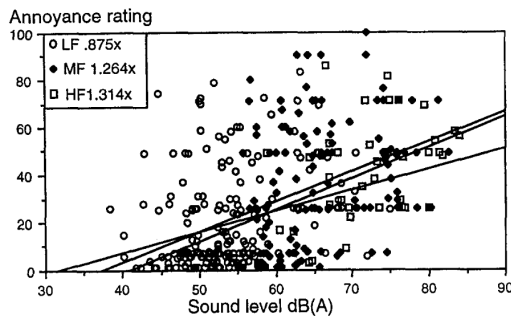


Fig. 3. Annoyance ratings as a function of the noise in dB(A) for the LF, MF, and HF groups (arithmetic mean values). Regression coefficients are given for the three groups.

(b) アノイアンス評価の結果

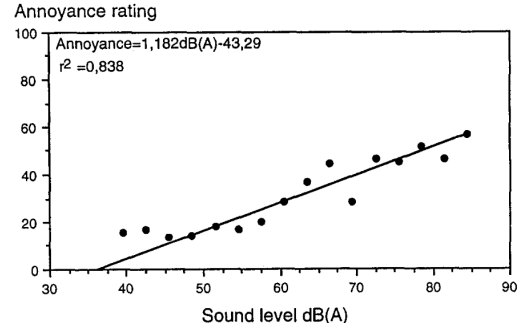


Fig. 4. Mean annoyance ratings as a function of mean noise levels in the 13 exposure level groups (arithmetic mean values).

(c) アノイアンス評価の結果 (騒音レベルごとの平均値)

図 2.24: Landström et al. による研究 [43]

2.4.3.2 純音性・衝撃性騒音のアノイアンス評価

Brambilla and Pedrielli (1996) は、道路交通騒音、銃撃音、ファン騒音、電源ノイズ、コンプレッサー、ピンクノイズ、ヘッドライヤー、髭剃り機の計 8 種類の騒音を、45, 55, 65 dB の 3 水準のレベルで呈示し、次の項目について評価させた [44]。

1. この騒音が夕方に自宅で聞こえたとしたらどれだけ不快 (annoying) か。

(全く…ない：0 ～ 9：非常に…)

2. この騒音はどれだけ衝撃性 (impulsive) か。(全く…ない：0 ～ 9：非常に…)

3. この騒音ははっきりと衝撃性だったか。(はい/いいえ)

4. この騒音はどれだけ純音性 (tonal) か。(全く…ない：0 ～ 9：非常に…)

5. 純音性成分の程度はどれだけだったか。

(聞こえない/気付く程度/明らかに聞こえる/卓越している)

6. この騒音ははっきりと純音性だったか。(はい/いいえ)

アノイアンス評価の結果を、道路交通騒音、衝撃性の騒音、純音性騒音の3つに分類して平均したところ、道路交通騒音に比べ衝撃性・純音性の騒音は低い呈示レベルのときにアノイアンスが高く、呈示レベルが高くなると、騒音の種類による差は小さくなった。ここから、衝撃性騒音・純音性騒音のペナルティをA特性音圧レベルで評価した。(図2.25)

この検討は、実験室実験によって純音性騒音を定量的に評価する実験手法を示したという点において有意義である。また、同じ音源でも、呈示レベルによってペナルティの値が変化するという結果は興味深い。

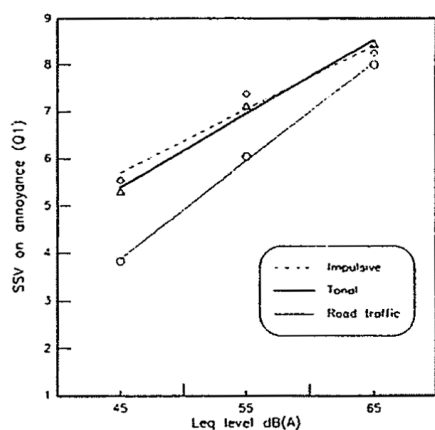


Fig 3. Dose-response relationships on annoyance for different types of sound

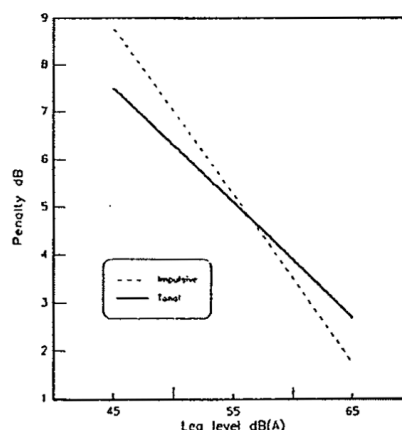


Fig 4. Tonal and impulsive penalties as function of L_{Aeq} level

図2.25: ノイズの種類別のアノイアンスとペナルティ [44]。細い実線は道路交通騒音、太い実線は衝撃性騒音、点線は純音性騒音を表す。

2.4.3.3 イギリスにおける純音性成分を含む風車の実態調査および印象評価

Hoare et al.(1996) は、風車騒音のアセスメント手法の検討を目的とし、イギリス国内にある風力発電施設を対象として、純音性成分を含む風車騒音の調査および印象評価を行った [46]。印象評価においては、試験音はすべて等価騒音レベルを 45 dB に調整して呈示され、10 名の被験者 (うち 6 名が風車騒音にかかわるワーキンググループのメンバー) が評価した。風車騒音は、200～2400 Hz に純音性成分をもち、その強度を Joint Nordic Method による純音性可聴度 (計算方法は IEC 61400-11:2012 と同様) にもとづき純音性を評価したところ、inaudible ($TA < 0$) , audible ($0 \leq TA < 6.5$) , prominent ($TA \geq 6.5$) の全カテゴリにわたっている。評価内容は、純音性成分の卓越度とペナルティに関する回答と、調整法によるラウドネス評価である。項目は次の通りで

ある。

- ノイズに混じって純音が聞こえるかどうか
(選択式：a. 聞こえない, b. 聞こえるが卓越はしていない, c. 卓越している)
- ペナルティを与えるとしたら、何 dB がよいか (自由回答)
- 風車の音の大きさに合うように、純音性成分を含まない広帯域ノイズの音量を調整せよ

この研究は、直接ペナルティの量をレベル単位で問う点の信頼性や妥当性については議論の余地があると考えられるが、騒音に対する感受性の強い人や、騒音に関する知識のある人を参加者として選ぶことで、少ない被験者数でも回答の信頼性を確保するとともに、平均よりも安全側の基準値を設定するという狙いがあると考えられる。Joint Nordic Method に基づいて算出される純音性の指標が、主観的な印象に適合しているかという観点も重要であろう。

2.4.3.4 低レベルの純音性騒音のペナルティの検討

Hongisto and Oliva(2018) は、室内の騒音を想定した 25 dB のモデル音を用いて、純音性騒音のアノイアンスが広帯域騒音と比べてどれだけ増加するかを調べた [45]。評価は 11 段階 (0 : not at all から 10 : very annoying) の評定尺度法によった。モデルノイズは、A 特性の逆特性をかけた低域優勢のノイズで、そこに 50, 110, 290, 850, 2100 Hz の純音を IEC 61400-11:2012 に定める TA = 5, 10, 18, 25 dB の 4 水準になるように付加し、純音性成分を含めた試験音全体のレベルが 25 dB になるよう調整したものをを用いた。リファレンスとして、純音を付加しないノイズを、19 から 45 dB の 2dB ステップで呈示し、そこからの増分としてペナルティを求めた。結果、290 Hz 以上の純音性成分を含むノイズでアノイアンスの増加がみられた。2100 Hz の純音性成分を含むノイズでペナルティが最大になり、その値は 12 dB だった (図 2.26b)。

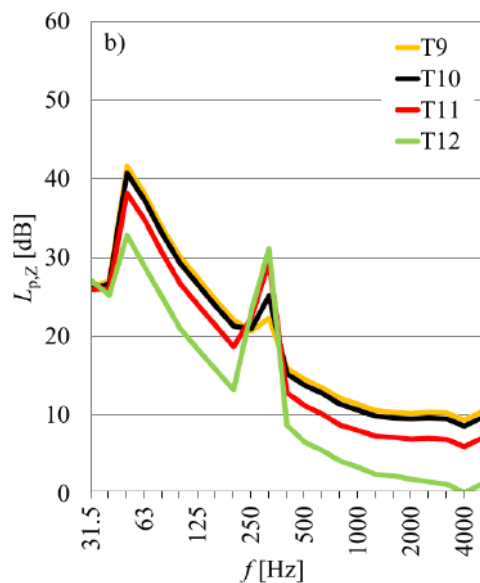
この検討では、純音性を最新の規格である IEC 61400-11:2012 に定める TA で統制していることに加えて、低騒音環境を想定している点において、本研究との関連が深い。試験音全体のレベルを 25 dB で統制することは、実務的な騒音測定・評価を想定した条件設定として意義があると思われるが、ベースノイズのレベルが TA の水準によって大きく変化し、TA=25 dB の条件では純音しか聞こえないような試験音となっている可能性もあり、実在する騒音環境との整合性については注意を要すると考えられる。

2.4.3.5 国内における検討

国内では近年、横山らにより純音性成分の可聴度およびアノイアンスに関する研究が行われている [47]。

可聴度に関しては、屋内外の風車騒音を模擬したノイズに純音性成分を付加したものと、付加しないベースノイズを対にして呈示し、その 2 音の違いの程度を「1 : 違いがわからない」「2 : わずかに違う」「3 : かなり違う」「4 : はっきり違う」の 4 段階で評価させた。純音性成分は周波数が 50, 100, 200, 400, 800 Hz の 5 水準、IEC 61400-11:2012 に定める TA が -3 から 15 までの 3 dB ステップになるよう調整した。結果として、違いに関する閾値 (被験者の半数が違いがわかると回答する純音の強度) を TA で評価したところ、TA=0 dB 前後が「違いがわからない」－「わずかに違う」の閾値、TA= 6～8 dB が「かなり違う」－「はっきりわかる」の閾値だった。

横山らは同様の試験音を用いてアノイアンスを調整法により評価している。100, 200, 400 Hz の純音を TA = -3 から 9 dB の 3 dB ステップで付加したノイズ (基準刺激, Ss) のアノイアンス



(a) 290 Hz, TA=5,10,17,25 dB の試験音の周波数特性

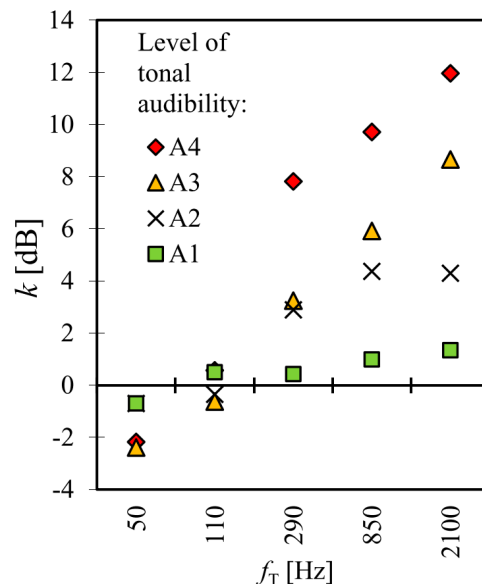


Figure 3. Penalty of tonal sounds as a function of tonal frequency, f_T , and tonal audibility level, which are depicted in Table II. The overall level of tonal sounds was 25 dB L_{Aeq} .

(b) 純音周波数別の TA とペナルティの関係

図 2.26: Hongisto による検討 [45]

を、付加しないベースノイズ（比較刺激, Sc）の音量を調整することで評価させ、アノイアンスの増分をを試験音の A 特性音圧レベル $L(S_s)$ との主観的等価点の A 特性音圧レベル $L(S_c)$ の差として整理した。純音性成分に対し敏感な被験者群、中程度の被験者群、敏感でない被験者群の 3 つに分けられ、敏感な被験者群では、TA の増加にともないアノイアンスも単調に増加するが、敏感でない被験者群は TA によらずアノイアンスの増加はみられなかった。

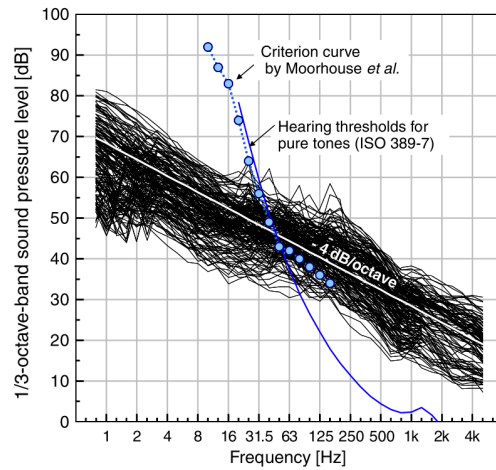
これらの研究は、環境騒音を模擬したモデル音を用いて実験条件をよく制御して得られた結果という点で意義がある。また、最近になって制定された国際規格である IEC 61400-11:2012 による TA を用いて整理された基礎的な聴感印象に関するデータである。

2.4.4 風車騒音の評価に関する研究

橘らは、2010～2013 年に、風車騒音を対象とした大規模な調査・分析および印象評価に関する研究を行なった。そのうち本研究に関わる部分について述べる。

2.4.4.1 風車騒音の周波数特性

29 箇所の実測データを基に、風車騒音の周波数特性を -4 dB/oct. の傾きをもつスペクトルにモデル化した [48]。これは、のちに風車騒音だけでなく、種々の環境騒音についてもこの周波数特性が概ね当てはまることから、残留騒音（自動車、航空機など、特定の音源がない状況での騒音）の周波数特性としても用いられている。



(a) Measurement results of WTN at 164 points around 29 wind farms.

図 2.27: 風車騒音の実測データとそのモデル化 [48]

2.4.4.2 ハウスフィルタ

騒音が屋内に侵入する時の周波数特性を把握することを目的に、木造サッシ、一重窓サッシ、二重サッシの家屋を対象にして屋内外の音圧レベル差を求め、ハウスフィルタとして提案した [49]。図 2.28a～c は、実際に測定した屋内外の音圧レベル差を示したもので、それをモデル化したのが図 2.28d である。ここで提案されたフィルタは、先述の横山らの検討でも用いられている。

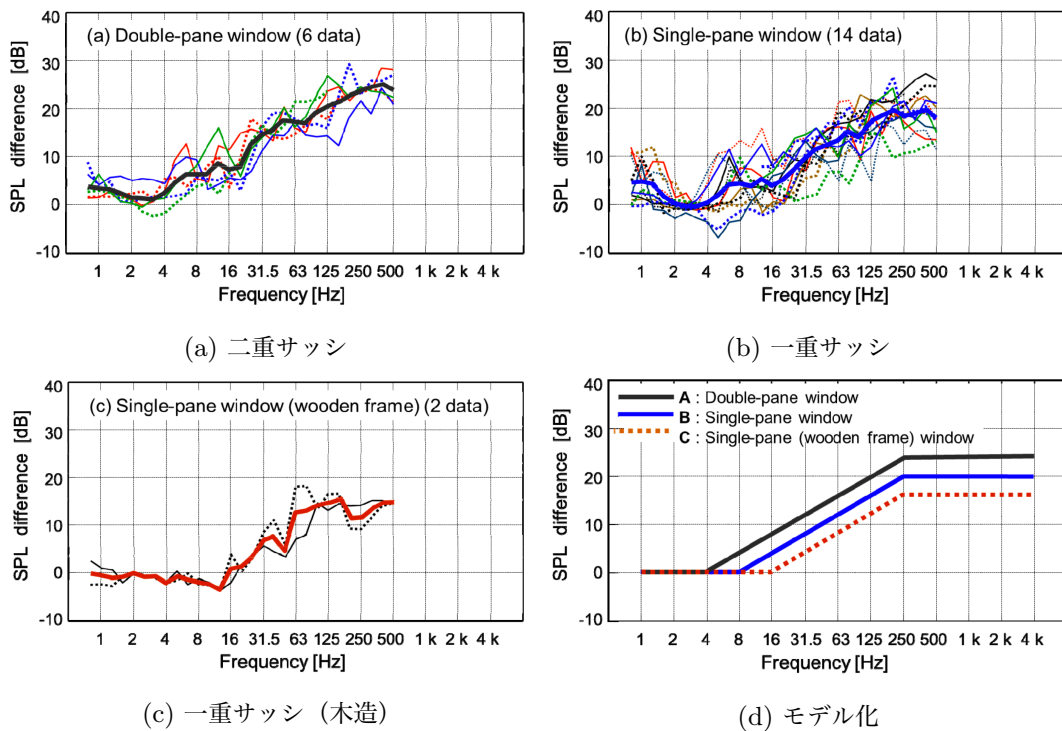


図 2.28: ハウスフィルタ [49]

2.4.4.3 低周波成分

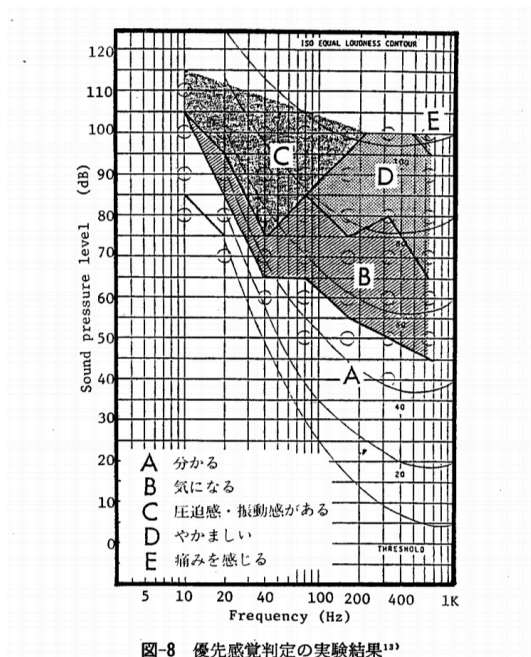
風車騒音に関する苦情として、低周波音による健康影響を訴えるものがあつたことを受け、風車騒音に含まれる低周波成分が聴感的に影響を及ぼしているかを調べるため、ラウドネスマッチングおよび可聴性に関する実験を行った [50]。試験音は、等価騒音レベル 35～56 dB の風車騒音と、同じ音源にローパスフィルタ（カットオフ周波数：125 Hz および 63～10 Hz の 1/3 オクターブバンド中心周波数）をかけたものである。この試験音を断続的に再生し、可聴かどうかを判断させた。結果として、20 Hz でカットオフした試験音は最も呈示レベルの高い試験音でも 70 % 以上の人が聞こえないと判断しており、20 Hz 以下の成分は聴感上影響しないということが示唆された。

2.4.5 低周波音と振動感・圧迫感の評価に関する研究

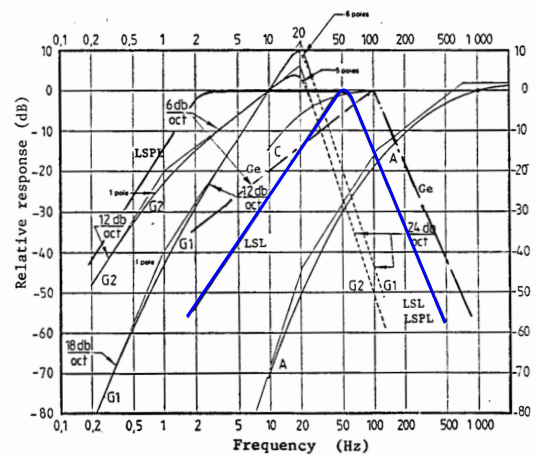
時田は、10 Hz から 500 Hz の純音を呈示し、その印象として、うるささ、低い音が気になるかどうか、不快感、振動感、圧迫感などの印象について評価させる実験を行った [51]。その結果、数 Hz から 100 Hz の範囲の低周波音に特有な代表的感覚として、「振動感・圧迫感」があると述べている。振動感・圧迫感は、40 Hz 付近で最も感じやすく、周波数が高域または低域側にずれると同じ音圧レベルでも振動感を感じにくくなる（図 2.29a）。実験の結果から、振動感・圧迫感の感覚閾値と LSL 曲線の対応がよいと結論づけた。LSL 曲線は、40～50 Hz をピークとし、低周波・高周波側でそれぞれ -12 dB/oct の特性をもつ曲線で（図 2.29b）、はじめ低周波音に対する感覚特性として提案されたが、この検討を経て振動感・圧迫感の評価に用いることができるとして再提案された。

また、高橋（2013）は、低周波音を聞いたときに感じる「頭部の振動感」に着目し、その閾値を調べた [52]。それによれば、最小可聴値からおよそ 10 dB 高い値で振動感を感じると報告されている。また、振動感覚については、臨界帯域のようなものを考え、ある幅をもつ周波数範囲内のエネルギーが寄与するのではないかと述べている。

40～50 Hz の純音は、電源ノイズや空調の室外機、ヒートポンプ給湯器からの騒音に含まれることがあるため、これらの騒音による不快感の要因として振動感・圧迫感についても考慮する必要があると考えられる。



(a) 低周波音の感覚閾値 [51]



(b) 低周波音評価における荷重曲線 [51]

図 2.29: 時田らの検討

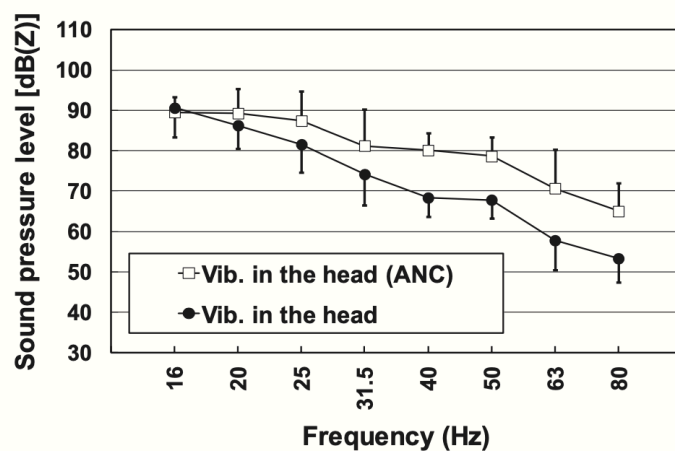


図 2.30: 低周波音に対する聴覚閾値と振動感の閾値 [52]

2.4.6 騒音に関するガイドライン

国内外で用いられている環境騒音に関する評価ガイドラインの一例を紹介する。

2.4.6.1 風車騒音に関する基準・ガイドライン

風力発電施設の導入が早くから進められていた欧州を中心に、複数の地域で風車騒音に関する評価ガイドラインが制定されている [5]。評価法の詳細は自治体によって様々で、補正值など設定の根拠となるデータも明らかでないものが多いが、ほとんどの地域で周波数重み付けに A 特性を用いており、時間帯や地域類型に応じて値を設定している。欧州を中心とするいくつかの地域では、風車特有の音響的特性として純音性、衝撃性、振幅変調に応じた補正值を加えている自治体も多い。表 2.31 は、国・地域別のガイドラインの概要をまとめたものである。

2.4.6.2 WHO Environmental Noise Guideline

WHO 欧州地域事務局は、環境騒音曝露による健康影響の観点から評価ガイドラインを作成しており、最新版が 2018 年に発表された [53]。ガイドラインは、騒音源別（道路交通騒音、航空機騒音、鉄道騒音など）に、健康影響に関する項目（心臓血管系疾患、アノイアンス、睡眠影響、聴力損失などの）それぞれについてガイドライン曝露レベル（騒音曝露レベルの推奨値）を記載している。参照する研究の件数や内容によって、それぞれのエビデンスの質を「非常に低い」から「高い」までの 4 等級に分けている。風車騒音に関しては、健康影響としてアノイアンスの観点から、ガイドライン曝露レベルとして $L_{den}=45$ dB が定められているが、参照研究が不足しておりエビデンスの質は低いとされている。また、諸外国のガイドラインで言及されている時間変動性や純音性についての記載はされていない。

2.4.6.3 騒音に係る環境基準（環境省）

日本での騒音評価においては、環境省が「騒音に係る環境上の条件について生活環境を保全し、人の健康の保護に資する上で維持されることが望ましい基準」として環境基準を定めている [54]。評価指標は等価騒音レベル（A 特性音圧レベルを長時間平均して得られる値）を用い、表 2.1 に示すように、時間帯や地域類型の別に値を定めている。

表 2.1: 騒音に係る環境基準

地域の類型	基準値	
	昼間（6～22 時）	夜間（22～6 時）
AA	50 dB 以下	40 dB 以下
A および B	55 dB 以下	45 dB 以下
C	60 dB 以下	50 dB 以下

類型 AA：特に静穏を要する地域

A：専ら居住の用に供される地域

B：主として居住の用に供される地域

C：相当数の住居と合わせて商業、工業等の用に供される地域

国/地方	騒音指標	地域の類型				備考
		田園地域	住宅地域	工業地域に近い住宅地域	その他の地域	
Denmark	L_r (6 m/s) L_r (8 m/s)	42 dB (6 m/s) 44 dB (8 m/s)	37 dB (6 m/s) 39 dB (8 m/s)	—	—	TA, IM L_{pALF}
Norway	L_{den}	45 dB				—
Sweden	$L_{Aeq}@8\text{ m/s}$	35 dB	40 dB			TA
Belgium–Flanders	L_{Aeq}	昼：48 dB 夕/夜：43 dB	昼：44 dB 夕/夜：39 dB	昼：48 dB 夕/夜：43 dB	昼：45–60 dB 夕/夜：39–55 dB	SB
Belgium–Wallonia	L_{Aeq}	45 dB				SB
France	L_{Aeq}	昼 (07:00–22:00)：暗騒音レベル+5 dB 夜 (22:00–07:00)：暗騒音レベル+3 dB				SB
Germany	L_r	昼：60 dB 夜：45 dB	昼：50–55 dB 夜：35–40 dB	昼：60 dB 夜：45 dB	昼：45–70 dB 夜：35–70 dB	TA, IM SB
The Netherlands	L_{den}, L_{night}	L_{den} : 47 dB, L_{night} : 41 dB				—
United Kingdom	$L_{A90,10min}$	昼：暗騒音レベル+5 dB (最低 35 dB 又は 40 dB) 夜：暗騒音レベル+5 dB (最低 43 dB)				TA
New Zealand	$L_{A90,10min}$	35 dB 又は暗騒音 +5 dB の高い方の値	40 dB 又は暗騒音+5 dB の高い方の値			AM TA
South Australia	風車騒音： $L_{Aeq,10min}$ 暗騒音： $L_{A90,10min}$	35 dB 又は暗騒音 +5 dB の高い方の値	40 dB 又は暗騒音+5 dB の高い方の値			TA
Canada–Alberta	L_{Aeq}	夜 (22:00–07:00)：40–56 dB (住戸密度及び道路/鉄道の近接度・航空機の頻度の別に 9 段階に設定)				—
Canada–Ontario	L_{Aeq}	地域類型ごとに、高さ 10 m における風速ごとに限度値を設定				—
USA	騒音一般 EPA: L_{dn}	屋外： L_{dn} 55 dB 屋内： L_{dn} 45 dB		—	—	—
Colorado–Arapahoe county	L_{Aeq}	—	昼：<55 dB 夜：<50 dB	—	昼：<65, 80 dB 夜：<60, 75 dB	SB
Georgia	L_{Aeq}	55 dB				SB
Illinois	一般環境騒音について、オクターブバンドごとに限度値を設定。					—
Indiana–Tipton County	オクターブバンドごとに限度値を設定					—
Michigan	L_{Aeq}	55 dB 又は暗騒音+5 dB の高い方の値				—
Michigan–Huron County	L_{A90}	50 dB 又は暗騒音+5 dB の高い方の値				TA
Minnesota	L_{Aeq}	50 dB			—	—
Minnesota–Lincoln county	L_{Aeq}	50 dB			—	SB
Nevada–Lyon County	L_{Aeq}	55 dB				SB
New Mexico–San Miguel County	L_{Aeq}	暗騒音以下				SB
New York–Town of Jefferson	L_{A10}	—	50 dB 又は暗騒音+5 dB	—	—	TA SB
North Carolina	L_{Aeq}	55 dB			—	SB
Oregon	L_{A50}	昼：55 dB, 夜：50 dB				—
Pennsylvania–Potter County	L_{Aeq}	暗騒音+5 dB				SB
Wisconsin	L_{Aeq}	昼：50 dB, 夜：45 dB				TA, SB
Wisconsin–Shawano County	L_{Aeq}	暗騒音+5 dB 1/3 オクターブバンド限度値				TA, IM SB
Wyoming	風車騒音に関する州としての法律はないが、セットバック距離を規定。					SB
Wyoming–Larimaie County	L_{Aeq}	50 dB				SB

注 (表中の量記号、略号は以下のとおり)

L_{Aeq} ：等価騒音レベル (時間平均 A 特性音圧レベル)

L_r ：評価騒音レベル (等価騒音レベルに純音性及び衝撃性に対する補正を加えた値)

L_{den} ：昼夜夜時間帯補正等価騒音レベル

L_{night} ：夜間等価騒音レベル

L_{dn} ：昼夜時間帯補正等価騒音レベル

L_{A90} ：90%時間率騒音レベル

L_{A50} ：50%時間率騒音レベル

L_{A10} ：10%時間率騒音レベル

L_{PALF} ：室内における低周波騒音の評価指標 (Denmark)

AM：振幅変調 (Amplitude Modulation) 音に対する考慮 (ペナルティ)

TA：純音成分の可聴性 (tonal audibility) に対する考慮 (ペナルティ)

IM：衝撃性 (Impulsiveness) 成分に対する考慮 (ペナルティ)

SB：セットバック距離 (set-back distance) の設定

図 2.31: 世界各国における風車騒音の基準・ガイドラインの比較 [5]

2.5 まとめ

本章では、聴覚および騒音評価に関する既往研究について述べた。概要と本研究との関連を次に示す。

聴覚に関する知見

騒音中の純音の聴取に関する基礎的な現象としてマスキング効果、ラウドネスに関する知見についてまとめた。マスキング効果、ラウドネスはいずれも聴覚心理実験によって求められる心理量であるが、これをモデル化し規格化された指標として、純音性の評価指標である Tonal Audibility (TA), ラウドネス指標（ラウドネスレベル, A 特性音圧レベル）があり、騒音評価指標として使われているものもある。本研究では、続く 3～6 章で行った心理実験の結果について物理指標を用いた検討を行う際、ここで述べた指標の定義や算出方法に着目して検討・考察を進めた。

騒音評価に関する知見と本研究との関連

騒音評価に関しては、心理属性（ラウドネス, ノイジネス, アノイアンス）に関する語義の議論に触れたあと、一般の環境騒音の定量的な評価実験について述べた（1.4.2 項）。一般の環境騒音を対象として実施された検討に関する知見は、現在でも多くの騒音評価に広く当てはまるが、本論文の 4, 5 章で実施した純音性騒音のラウドネスとわずらわしさの評価において、既知の知見と同様の傾向が得られるどうか検討を行った。

1.4.3～1.4.5 項では、本研究の対象とした純音性成分を含む騒音と同様な騒音に関する調査・評価研究について述べた。

1.4.3 項 純音性成分を含む騒音の評価に関する知見について述べた。過去に行われた研究の多くは実音を試験音として用いているため、実験条件の統制（純音の強度や試験音の周波数特性）が不十分であるが、アノイアンスの定量的評価の手法について様々な検討が行われている。本研究では特に 5 章（わずらわしさの評価）で行なった検討で Brambilla and Pedrielli [44] の手法を参考にした。

1.4.4 項 国内での風車騒音の調査および評価に関する研究は、本研究での実験条件の設定において参考にした。

1.4.5 項 低周波音に特有な振動感・圧迫感に関する知見は、5 章わずらわしさ評価において、特に低い周波数の純音性成分を含む騒音の評価に関する考察で参照した。

1.4.6 項 実務的な騒音評価におけるガイドラインの現況把握として、国際的に参照されている WHO, 国内の環境基準, 風車騒音に関する諸外国のガイドラインを示した。

第 3 章

マスキング閾値の計測

3.1 目的

マスキング効果は、純音性成分の可聴性を考えるための最も基礎的な現象であり、ISO/PAS 20065:2016 や IEC 61400-11:2012 などでは定められている純音性可聴度の指標も、マスキング効果に基づいて考案されている。これまでに行われているマスキング閾値の測定は、聴覚フィルタの推定を主目的として測定されてきたため、マスキングノイズとしてホワイトノイズが多く用いられてきた。一方で、実在する環境音は、低周波数領域のエネルギーが比較的高い周波数特性をもつことが多い。そこで本実験では、環境騒音下における純音性成分の可聴性を調べることを目的とし、環境騒音を模擬したモデルノイズ 2 種類、および参考としてピンクノイズの計 3 種類の広帯域ノイズをマスキングノイズとして、40 Hz から 400 Hz の低周波数領域の純音のマスキング閾値を計測した。

3.2 実験方法

3.2.1 実験システム

実験は、東京大学生産技術研究所内の半無響室で実施した。システムの模式図を図 3.1 に、実験室内の様子を図 3.2 に示す。無響室と残響室が対になっており、被験者は無響室側で音を聴取する。無響室内壁面に低音用スピーカ (Fostex, FW405N) 16 台と中高音用スピーカ (AURATONE, SUPER-SOUND-CUBE) 1 台を設置し、残響室は吸音材を配置してエンクロージャとして用いている。被験者はスピーカ正面 3.5m の位置に着座した。被験者の両耳間中央において、12.5 Hz から 20 kHz までの帯域で特性がフラットになるようフィルタをかけて調整した。

3.2.2 試験音の構成

マスキングノイズとして 3 種類の広帯域ノイズを用いた。そのうち 2 つは環境騒音を模擬したモデルノイズである。一つは屋外騒音を模擬したノイズで、オクターブバンド分析において -4 dB/oct. の傾きをもつような周波数特性をもつ（以下屋外ノイズと呼称）[48]。また、このノイズが屋内に侵入した場合の周波数特性として、図 3.4 に示す一般家屋（一重窓）の遮音性能を模擬したフィルタ [49] 処理をしたものを作成し屋内ノイズとした。また参考として標準的な騒音源に用いられることの多いピンクノイズも用いた。受聴位置での呈示レベルは、ピンクノイズ 55 dB、屋外ノイズ 45 dB、屋内ノイズ 35 dB となるよう調整した。

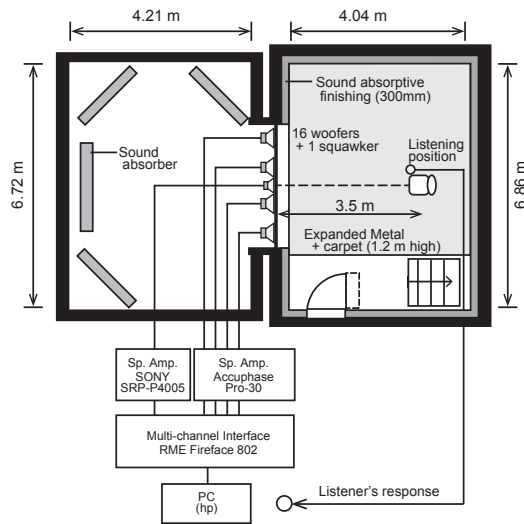


図 3.1: 実験システムの概略図

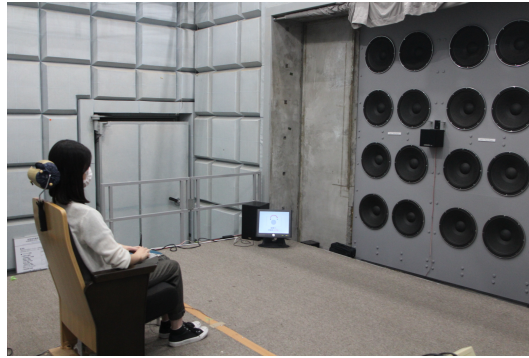


図 3.2: 実験室内の様子

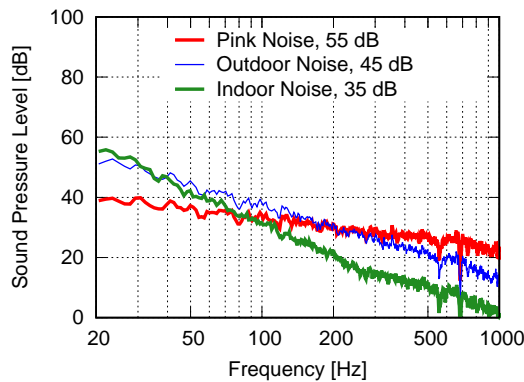


図 3.3: マスキングノイズの周波数特性

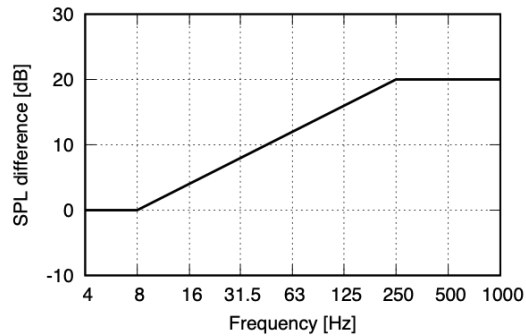


図 3.4: 一般家屋（一重窓）の遮音性能を模擬したフィルタ

用いた純音の周波数は 40, 50, 80, 100, 160, 200, 400, 500 Hz の 8 種類である。セッションは 3 つに分け、ピンクノイズ、屋外ノイズ、屋内ノイズの順に実施した。また、各セッション内での呈示順は、わかりやすいと思われる 500 Hz から順に、周波数を下げていった。各セッションの最初に実施する 500 Hz 純音は練習と位置づけ、400 Hz 以下の純音について結果を分析した。

3.2.3 実験参加者

実験参加者は 20 代～30 代の男女 20 名である。実験の実施前にオーディオメータを用いて 125 Hz ～4 kHz 純音の聴力を測定し、両耳全ての帯域で 15 HL 以下であることを確認した。また聴力に関するアンケートを実施し、体調に不具合のないこと、耳に関する病気に罹患していないこと、聴力を損なうような大きな音の環境に日常的には晒されていないことなどを確認した。アンケート用紙を章末に示す（図 3.10）。

3.2.4 評価方法

低域用スピーカのうち 8 台を純音再生用に、残りの 9 台（低域 8 台、中高域 1 台）をマスキングノイズ再生用に用いた。実験中を通して、マスキングノイズは継続的に呈示し、その環境下で継続時間 2 秒の純音を、レベルを変えながら断続的に呈示した。被験者には、「ポー」「ブー」といった音が聞こえたと感じた時に、手元にあるスイッチを押して回答するよう教示した。教示文を章末の図 3.8 および図 3.9 に示す。

3.2.4.1 ランダム化最尤適応法

評価にはランダム化最尤適応法（Randomized Maximum Likelihood Sequential Procedure, 以下 RMLSP と略記） [55] を用いた。RMLSP は竹島らによって提案された手法である。本実験では、次の手順を踏んで実施した。

下降系列 1 : 最初の試行は、純音のレベルが十分大きく、被験者がはっきりと聞き取れると考えられる $TA=15$ dB から開始し、2 dB ずつ純音のレベルを下げる。2 回連続で聞こえなかった場合に、聞き取れた最小のレベル (L_1) をその被験者のマスキング閾値の参照値とする。

上昇系列 1 : 純音の音圧レベルを L_1 より 6~12 dB 低い値に設定し、十分低い値から 1 dB ずつレベルを上昇させる。2 回つづけて純音が聞こえるまで呈示する。2 回連続して正反応があった場合に「可聴だった」と判断し、そのときに聞き取れた低い方の音圧レベルをもって L_2 とする。

下降系列 2 : 純音の音圧レベルを L_2 より 6~12 dB 高い値に設定して、十分にはっきり聞こえるところから下降系列を開始する。純音の音圧を 1 dB ずつ下げ、2 回つづけて反応が返ってこなくなるまで続ける。純音を聞き取れた最小のレベルをもって L_3 とする。

このように、下降系列と上昇系列を交互に繰り返す。 L_7 まで計測を行う（図 3.5）。参照値である L_1 を除いた 6 つの測定値の算術平均をもって、その被験者のマスキング閾値とする。

$$L_{\text{threshold}} = \frac{L_2 + L_3 + L_4 + L_5 + L_6 + L_7}{6} \quad (3.1)$$

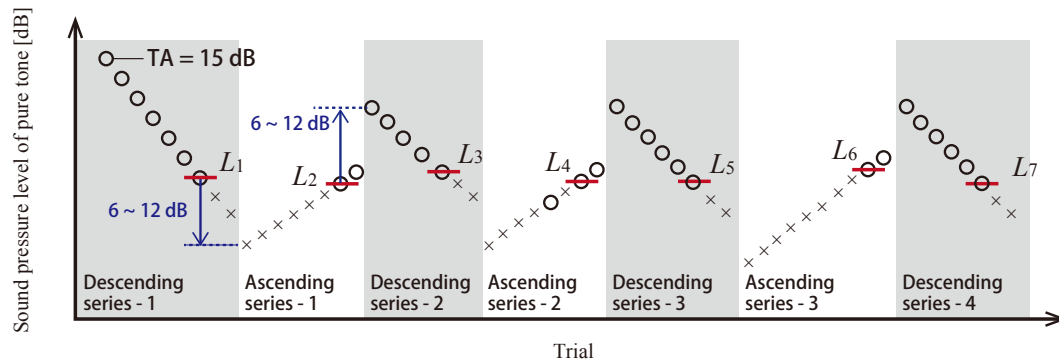


図 3.5: ランダム化最尤適応法による評価方法

従来の閾値の測定においては、Békésy 法、極限法、恒常法などがよく用いられる。詳細については参考文献 [56] を参照されたい。ここでは各手法の概要と特徴を簡潔に示す。

恒常法 刺激をランダムに呈示する方法。後述の適応法や極限法と異なり、刺激の大きさや変化方法に関する手掛かりを被験者に与えないため、最も正確で適法範囲が広いとみなされている。ただし、所要時間が長いために被験者の疲労や単調感を招き、実験のはじめと終わりで反応に変化が出る場合がある。テスト音のレベルの変化範囲や呈示回数によって結果の値に影響がでる。

極限法 一定のステップ幅で、一定の方向に刺激を変化させ、各ステップ毎に被験者の判断を求める方法。閾値の測定だけでなく、試験音対などをつかってラウドネスなどの比較をして主観的等価点を求めることもできる。上昇系列と下降系列を交互に行う。系列の開始地点は、判断が容易なレベル（閾値測定なら、はっきり聞こえるほど大きい／聞こえないほど小さい）に設定する。開始レベルを固定すると被験者に手掛かりを与えてしまうため（ステップ数をかぞえることで見当をつけてしまうなど）、数種類の異なる開始レベルを用いる。

適応法 被験者の反応に応じて刺激の呈示レベルを変化させる方法を、総合して適応法とよぶ。

Békésy 法 閾値測定に特化した適応法の一つ。Békésy によって発案された。Békésy tracking とも言われる。刺激音を十分大きい音量から再生し、被験者は音が聞こえている間は手元のスイッチを押す。スイッチが押されている間は、一定の速さ（例えば毎秒-2 dB など）で呈示レベルが減少する。音が聞こえなくなり、被験者が手元のスイッチを離すと、下降と同じ速さで音圧が上がりはじめ、再び音が聞こえるようになると被験者はスイッチを押す。このように被験者の閾値付近で信号レベルを上下させながら閾値を測定する。この手法は実施時間が少なく済むため被験者負担が少なく効率が良いが、呈示レベルのレンジが狭くなりやすいという欠点がある。またスイッチを押すタイミングがずれると検出の誤差となる。

これらに比べ、今回用いた RMLSP では、次の利点がある。

レンジ効果の抑制 ：レンジ効果とは、各被験者の閾値が、呈示されている試験音のレンジの中央に寄ってしまう現象をいう。RMLSP では、各系列で得られたマスキング閾値を元に次の系列での再生レベルを決めるが、これによって実験者側の実験デザイン（レベル設定）によるバイアスを回避することができる。また、系列間の切り替え時に、6～12 dB の間でランダムにレベルをジャンプさせることで、再生レンジが毎回変化し被験者に手掛かりを与えない。

被験者負担の低減 ：はじめの下降系列の測定で、その被験者の閾値を大まかに把握し、そこを中心としたレベルレンジで純音が再生される。その被験者の閾値に対して明らかに高い／低いレベルでの呈示を回避することで、実験時間を短縮し、被験者への負担を軽減することができる。

3.3 結果および考察

実験参加者 20 名のうち、回答に一貫性があると判断された 19 名についてデータを分析した結果を図 3.6 に示す。図中の赤点は被験者平均値、エラーバーは標準偏差を示す。また、参考として ISO 389-7:2005 による最小可聴値の 50 パーセンタイル値を青の破線で示す。80 Hz 以上では、マスキング閾値はノイズフロアから 10~13 dB 高いレベルで、ノイズの周波数特性による大きな傾向の違いは見られなかった。一方、40, 50 Hz の純音は比較的高い値となった、これは、純音の最小可聴値が高いために聞き取りづらくなったと考えられる。Hawkins et al. [10] はホワイトノイズ (-10 から 60 dB/Hz) をマスキングノイズとし、100 Hz から 10 kHz の純音について、Békésy 法によるマスキング閾値の計測を行なっているが、500 Hz 以下の純音の閾値はノイズフロアのレベルから 16~18 dB 高くなるという結果が得られている。また、マスキングノイズのレベルが低い条件では最小可聴値の影響により閾値が相対的に高くなると述べている。今回の結果は、ノイズフロアとの差については 5 dB 程度の違いはあるものの概ね傾向が同様であったと言える。

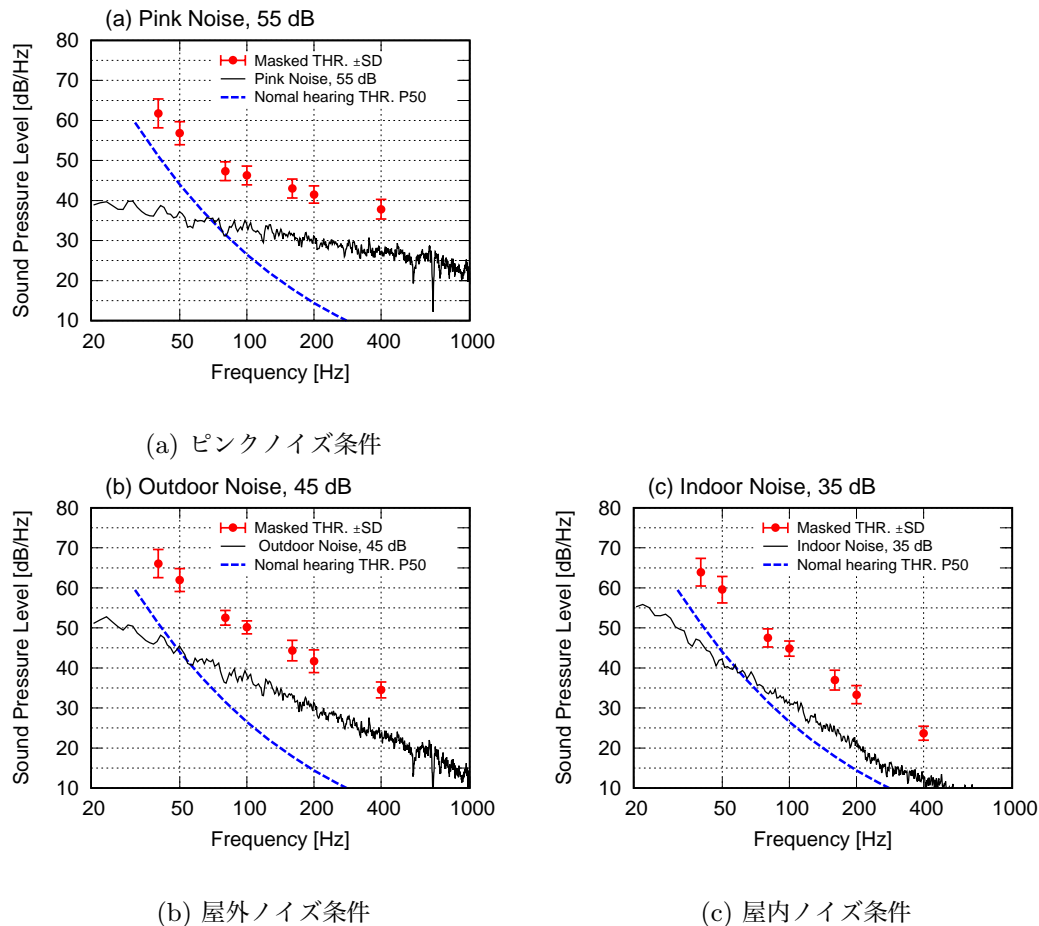


図 3.6: マスキング閾値計測の結果

TA による検討

欧州を中心とする諸外国で風車騒音の純音性の評価に用いられている TA は、マスキング効果に基づいて騒音中の純音性成分の可聴性を評価する量である。たとえば IEC 61400-11:2012 には”A tone is audible if the tonal audibility is above 0 dB.”と記述があり、TA がマスキング閾値を基準とした量であると考えられる。そこで、マスキング閾値と TA の関係を検討するため、今回の実験で得られたマスキング閾値を TA で評価した。TA は、IEC 61400-11:2012 に基づいて算出した。結果を図 3.7 に示す。

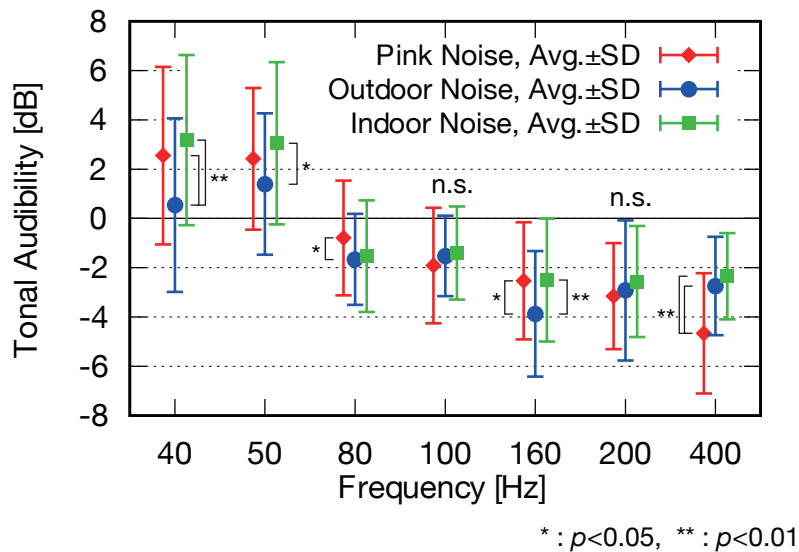


図 3.7: マスキング閾値における TA

40,50 Hz について 40,50 Hz の純音については、前節の結果で述べたように、最小可聴値の影響でマスキング閾値が高くなる傾向であった。しかし、TA はレベルの絶対値を考慮せず、マスキングノイズと純音性成分のエネルギーの相対関係で決まるため、純音のレベルが高くなった分だけ TA も高かった。

80 Hz 以上について 80 Hz 以上の純音については、マスキング閾値がおおよそ $TA = -1$ dB から -4 dB にあたる。純音周波数・マスキングノイズの周波数特性によらずおおよそ一定の値を取っていることから、TA は、環境騒音を模擬したマスキングノイズ環境下の閾値にかかわる評価量として有効であると言える。

同一の純音周波数において、マスキングノイズの 3 種類による傾向の差が認められるかを確認するために、分散分析 (Tukey の多重比較) を行い、有意差がみとめられたものについてはアスタリスクで示した。純音周波数 7 条件のうち、5 条件において 5% または 1% 水準で有意差がみとめられたが、レベルの差は最大で 2.3 dB であり、ノイズ毎の系統的な差もみられないことから、概ね同一の傾向とみなしてよいと考えられる。

IEC 61400-11:2012 には $TA = 0$ dB で純音が可聴となるとの記述があったが、今回の実験で得られた値は 0 よりも低かった。この原因は明らかではないが、実験方法の違いが要因となった可能性がある。マスキング閾値は、臨界帯域内のマスキングノイズ／純音性成分のエネルギー比を、可聴指数で補正して求める量であるが（詳細は 2 章に記載）、この可聴指数の根拠と考えられる実験は Maiwald によって行われている [57]。Maiwald の実験は、次の 3 点において今回の条件と異なる。

1. マスキングノイズとして、ホワイトノイズを用いたこと
2. ヘッドホンを用い、片耳に刺激を呈示したこと
3. Békésy 法によって評価を行なったこと

マスキングノイズの周波数特性については対実験による検証が必要であるが、今回用いた 3 種類のノイズに関しては大きな差がみられなかったことから、ノイズの周波数特性によって系統的な差異が生じるとは考えにくい。音の呈示手法の違いについては今後検討の必要である。評価手法に関しては、既往研究では被験者負担が少ない Békésy 法を用いているのに対し、今回ランダム化最尤適応法を用いた精密な実験を行ったために、より低いレベルでも純音が聴取可能となった可能性が考えられる。評価方法の違いによる系統的な差異については、今後検証実験を通して検討する必要がある。

3.4 まとめ

本章では、純音の聞き取りに関する最も基礎的な量として、環境騒音を模擬したマスキングノイズ下での低周波数純音のマスキング閾値を計測し、以下の結果が得られた。

- マスキングノイズとの相対関係をみると、試験音の呈示レベルが最小可聴値よりも十分高い領域では、純音のマスキング閾値はノイズフロアより 10～13 dB 程度高かった。周波数 50 Hz 以下の純音については、最小可聴値の影響で純音の閾値が高くなった。以上の結果は過去の検討と概ね一致する傾向を示している。
- 騒音中に含まれる純音性成分の可聴性の評価量として IEC 61400-11:2012 に定められている Tonal Audibility と、今回計測されたマスキング閾値の関係を調べたところ、最小可聴値の影響がなかったと思われる 80 Hz～400 Hz については、 $TA = -1 \sim -4$ dB と安定した値であり、ノイズの種類による系統的な差異は見られなかった。
- TA は、異なる周波数特性の広帯域騒音中の純音のマスキング閾値を安定して評価できる量であることが示唆された。一方、IEC 61400-11:2012 では「 $TA=0$ dB 以上で可聴となる」と記載されているが、実験で得られた値は 0 dB より低い値であり、この差異の原因は明らかでない。また、最小可聴値の高い低周波領域においては、 TA が高くても純音性成分が聞こえない可能性があることに注意すべきである。

今後の課題としては、得られたマスキング閾値と過去の研究事例の整合性を確認するため、試験音として用いる純音の周波数をより高い周波数帯域に広げるほか、マスキングノイズとしてホワイトノイズを用いること、マスキングノイズのレベルを段階的に変えた条件について実験を行う必要がある。また、測定方法として、ランダム化最尤適応法に加え、Békésy 法などの異なる方法による測定を行い、測定方法の違いによる差異について検討する必要がある。

被験者の皆様へ

低周波数純音のマスキング閾値に関する聴感実験の手続きについて

➤ 背景

日常生活の中の環境騒音は、図1のように様々な周波数の音が混ざっていますが、風力発電施設や家庭用ヒートポンプ給湯器など、図2のような特定の周波数の成分（純音成分）を顕著に含む騒音を発するものもあり、その騒音が問題となることもあります。

この実験は、騒音中に含まれる純音成分が聴感印象に及ぼす影響を調べるための基礎的な検討です。定常的なノイズが鳴っている環境での純音の聴覚閾値を調べることを目的としています。

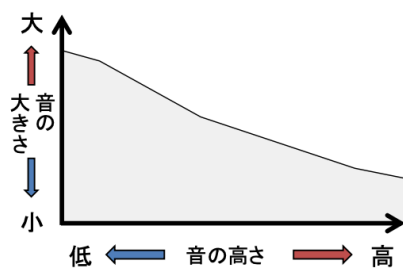
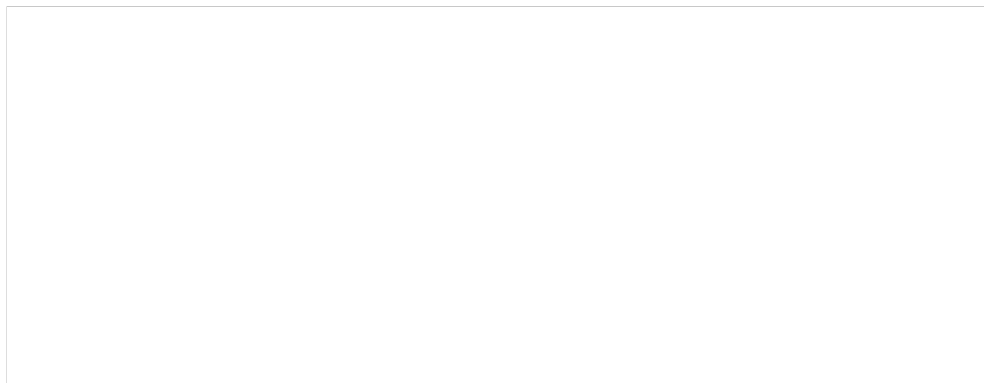


図1 一般的な環境騒音

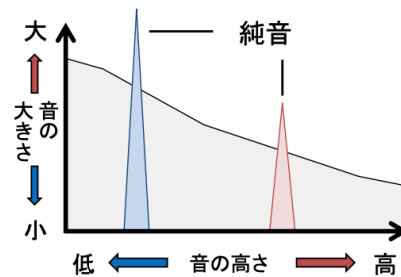


図2 純音成分を含む騒音

図 3.8: 教示文 (1 / 2 ページ)

➤ 実験の手順

実験中は、一定のレベルでノイズが流れています。ノイズに混じって、段階的な大きさに調整した純音が断続的に再生されます。

純音が聞こえると感じたときに、手元にあるスイッチのボタンを押し、聞こえなくなったらボタンを離してください。

試験音は、ノイズ3種類と純音8種類を組み合わせたもので、全24条件です。

➤ 注意事項

・標準的な聴力では聞こえないような小さな音が再生される場合もありますが、前後の回答とは独立に、できるだけ直感で判断してください。

・頭の位置によって、音の聞こえが変わる可能性があります。実験中は、椅子に深く座り、ヘッドレストに頭をつけた姿勢で音を聞いてください。

・実験にかかる時間は約1時間半程度です。全体を3部に分け、途中で休憩をはさみますが、それ以外でも、疲れで判断が難しくなったと感じたときは、随時休憩をとりますので、遠慮なくお伝えください。また、実験中に気分が悪くなった場合は、即座に中止しますので、必ず申し出てください。

・衣服の擦れる音などが、試験音の聴取の妨げになることがありますので、音の出やすいものは極力身につけないようお願いいたします。

➤ まずは、練習をしていただきます。

図 3.9: 教示文 (2 / 2 ページ)

アンケート質問用紙①

登録番号 _____

※差支えのない範囲で以下の設問にお答えください。

1. 本日の体調はいかがですか？ 良い 悪い
〈悪い〉の場合、詳細を教えてください。
()
2. 現在あるいは過去に、音の聞き取りに何らかの異常を感じたことがありますか？ はい いいえ
〈はい〉の場合、詳細（時期、症状、完治したか、等）を教えてください。
()
3. 耳鳴りが気になることがありますか？ はい いいえ
〈はい〉の場合、どちらの耳でどのように聞こえるかを教えてください。（例：ピー、ゴー、シャー）
()
4. 耳に関わるケガや病気のために通院した経験はありますか？ はい いいえ
〈はい〉の場合、詳細を教えてください。
()
5. 薬の接種や注射によって音が聞き取りにくくなった経験はありますか？
または現在、音の聞こえに影響があるといわれた薬をお飲みですか？ はい いいえ
6. 騒音の高い場所で、長時間仕事（アルバイト）をした経験はありますか（例：工場） はい いいえ
〈はい〉の場合、勤務期間、騒音の大きさ等の詳細を教えてください。
()
その大きな音を聞いたときに耳栓をつけていましたか？ はい いいえ
7. 大きな音量で聞く音楽コンサートによく行きますか？
ほとんどない ときどき（年に1回程度）行く よく（年に2回以上）行く
8. 楽器を演奏しますか？ はい いいえ
〈はい〉の場合、楽器の種類や、演奏していた（いる）期間を教えてください。
()
9. ヘッドホンステレオ・イヤホンをよく使いますか？
ほとんどない ときどき（週2時間未満）使う よく（週2時間以上）使う
10. バイク、チェーンソー、銃撃（砲火）、爆竹、爆発等の大音量に曝された経験はありますか？ はい いいえ
〈はい〉の場合、どのような種類の音をどの程度の頻度で受けたかを教えてください。
()
11. 家族に若いころから聴力障害を持つ人はいますか？また過去にいましたか？（差支えなければお答えください） はい いいえ
〈はい〉の場合、どのような症例かを教えてください。
()
12. 過去に聴力検査を受けたことがありますか？ はい いいえ
〈はい〉の場合、いつどこで受けましたか？
()

ご協力いただき、ありがとうございました。

図 3.10: 聴力に関するアンケート

第 4 章

純音性成分を含む騒音のラウドネス 評価

4.1 目的

ラウドネスは騒音に対する心理属性（ラウドネス，ノイジネス，アノイアンス）のうち音のエネルギーに関わる最も基礎的な属性である。一般の広帯域騒音については，音の物理的なエネルギーと主観的なラウドネスの関係が調べられており，主観的なラウドネスを予測するための指標として，ISO 532-1,2:2017 でラウドネスレベルが定められるほか，ラウドネス特性を簡易的に反映した A 特性音圧レベルが広く用いられている。一方で，純音性成分が含まれる騒音のラウドネスに関しては実験的検討が少ない。

そこで本章では，純音性騒音に対する聴覚心理反応の基礎として，純音性成分が含まれたノイズを用い，卓越する純音性成分が主観的なラウドネスに及ぼす影響について調べた。加えて，主観的評価値とラウドネス指標による物理的評価値の対応について考察した。

4.2 実験方法

実験は東京大学生産技術研究所内の半無響室で実施した。再生システムは前章と同一である。

4.2.1 試験音の構成

試験音の構成を表 4.1 に，ベースノイズの周波数特性を図 4.1 に示す。ベースノイズには，前章と同じ 3 種類のノイズ（ピンクノイズ，屋外ノイズ，屋内ノイズ）を用い，被験者の両耳間中央位置においてそれぞれ A 特性音圧レベルが 45, 45, 35 dB となるように調整した。純音性成分は，純音周波数が 40, 50, 100, 200 Hz の 4 種類，強度は IEC 61400-11:2012 に定める TA が 0, 5, 10, 15 dB となるよう 4 水準で付加した。また，純音性成分を付加しないノイズも条件に加え，17 条件とした。ノイズ種類ごとに 3 つのセッションにわけて実施した。セッション内での試験音の呈示順は被験者ごとにランダム化した。

試験音の周波数特性を図 4.2～図 4.4 に示す。図中には参考として，ISO 389-7:2005 に定められた純音の最小可聴値（Absolute Hearing Threshold, ATH）の 50 パーセンタイル値を破線で示した。また表 4.2～表 4.4 に試験音の音圧レベル，ISO 532-1, 2:2017 に定められたラウドネスレベル

を示す。各ラウドネスレベルは、ISO 532-1, 2 と共に配布されているプログラムに、1/3 オクターブバンド音圧レベルを入力して算出した。なお、Zwicker 法によるラウドネスレベルを $LL(Z)$ 、Moore-Glasberg 法によるラウドネスレベルを $LL(M)$ と表記した。

4.2.2 評価方法

評価は被験者調整法により行なった。基準音として純音性成分を含むノイズを、比較音として純音性成分を付加しないノイズを用いた。基準音と比較音（各 4 秒）を対にして呈示し、被験者は手元にあるツマミを操作して、基準音と同じ大きさに感じられるよう比較音の音量を調整した。調整が終わるまで、試験音対は繰り返し呈示した。系列の開始レベルは上昇・下降それぞれ 3 種類ずつ設定し、調整ごとにランダムなレベルから始まるようにした。1 条件の評価につき、上昇系列と下降系列を 3 回ずつ、上昇→下降→下降→上昇→上昇→下降の順で 6 回調整させ、6 回の音圧レベルの算術平均をもって、その被験者の主観的等価点とした。教示文を章末に示す（図 4.19～4.21）。

4.2.3 被験者

実験参加者は、20 代の男女 15 名である。実験の実施前にオーディオメータを用いて 125 Hz～4 kHz 純音の聴力を測定し、両耳とも全ての帯域で 15 HL 以下であることを確認した。また、聴力に関するアンケートを行い、体調に不具合のないこと、耳に関する病気に罹患していないこと、聴力を損なうような大きな音の環境に日常的には晒されていないことなどを確認した。

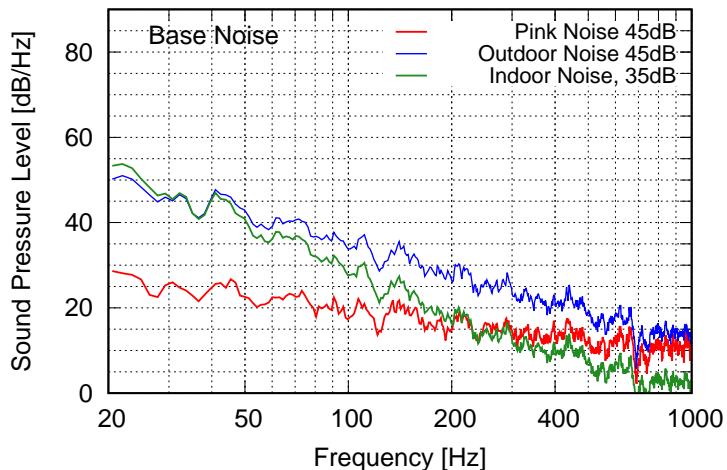


図 4.1: ベースノイズの周波数特性

表 4.1: 試験音の構成

ノイズ 種類, A 特性音圧レベル	純音	
	周波数 [Hz]	TA [dB]
ピンクノイズ, 45 dB	{40, 50, 100, 200}	{0, 5, 10, 15}
屋外ノイズ, 45 dB		
屋内ノイズ, 35 dB		
	なし	-

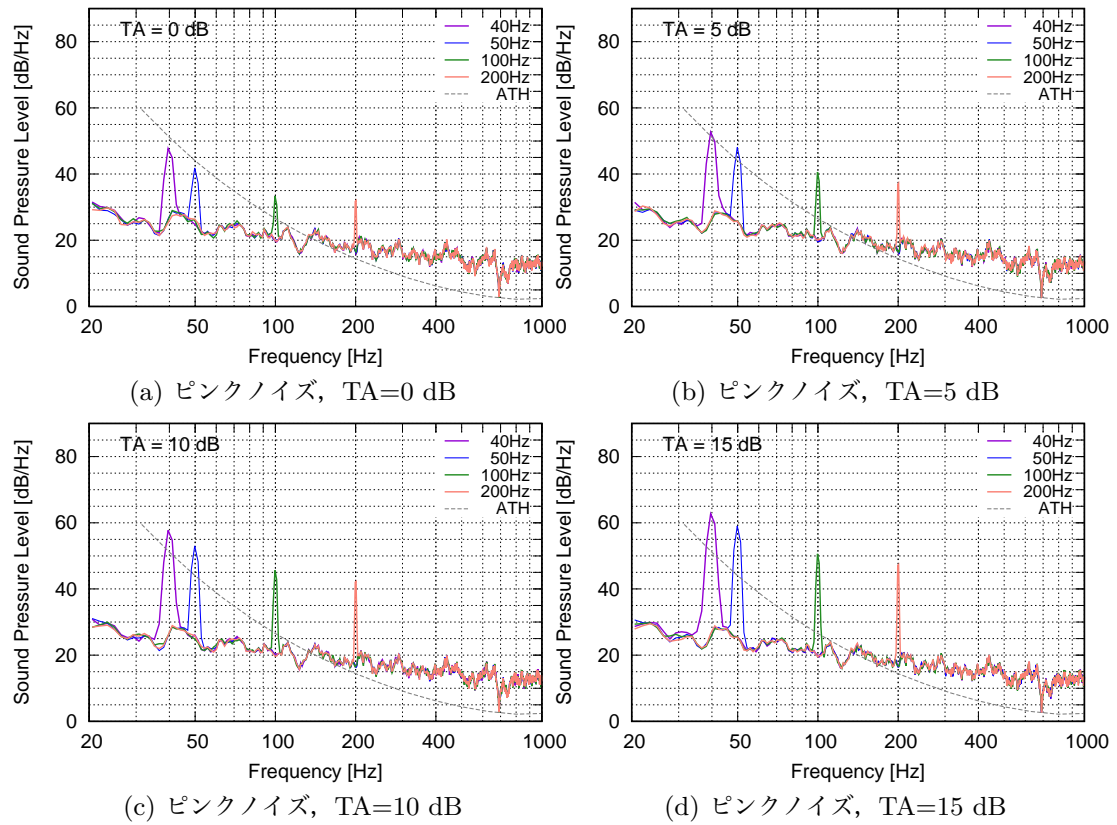


図 4.2: ピンクノイズに純音を付加した試験音の周波数特性

表 4.2: ピンクノイズに純音を付加した試験音のラウドネスレベル・A 特性音圧レベル

純音周波数	TA [dB]	$LL(Z)$ [phon]	$LL(M)$ [phon]	L_A [dB]
なし	-	63.7	69.8	45.2
40	0.5	63.7	69.8	45.2
	4.9	63.7	69.8	45.2
	9.5	63.9	69.8	45.3
	14.8	64.3	69.9	45.3
50	0.61	63.6	69.8	45.2
	4.64	63.7	69.8	45.2
	9.51	64.0	69.9	45.3
	15.54	64.5	70.1	45.4
100	-0.13	63.5	69.9	45.2
	5.42	63.8	70.1	45.2
	10.25	64.0	70.0	45.3
	15.30	64.5	70.4	45.5
200	0.09	63.8	69.9	45.3
	4.94	63.8	69.9	45.3
	10.22	64.5	70.4	45.6
	15.28	65.2	70.8	46.2

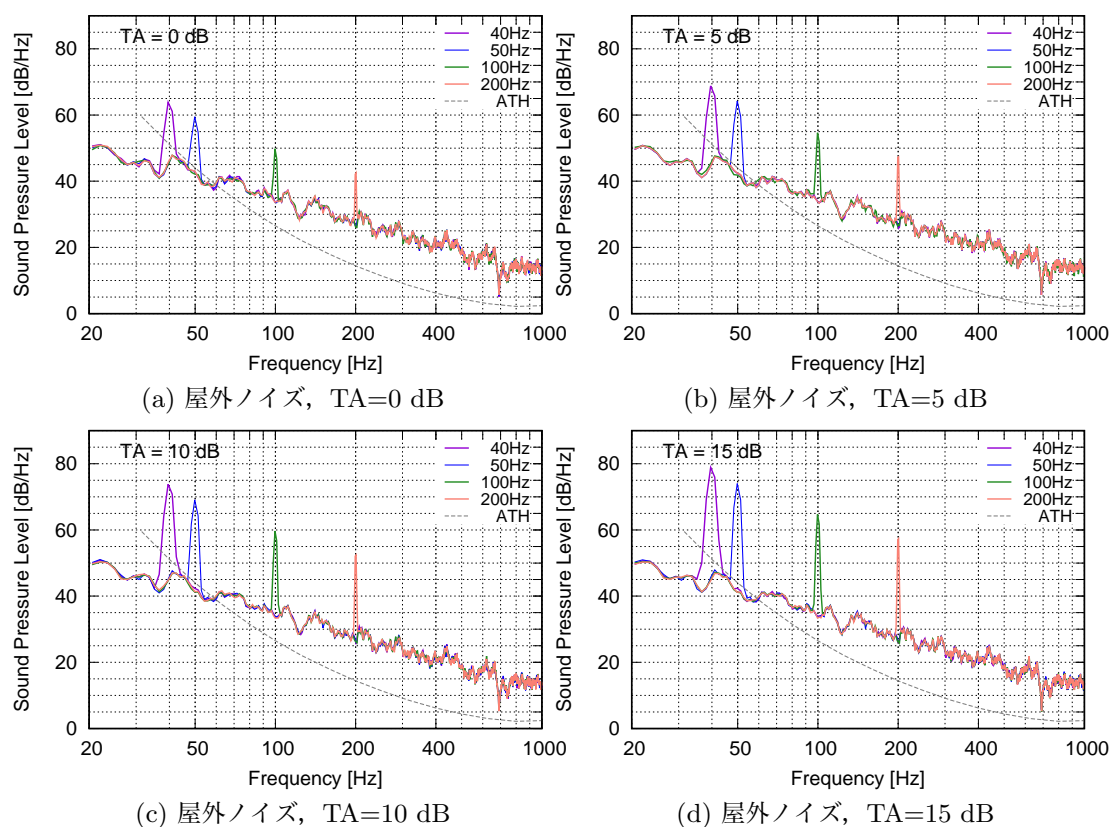


図 4.3: 屋外ノイズに純音を付加した試験音の周波数特性

表 4.3: 屋外ノイズに純音を付加した試験音のラウドネスレベル・A 特性音圧レベル

純音周波数	TA [dB]	$LL(Z)$ [phon]	$LL(M)$ [phon]	L_A [dB]
なし	-	63.7	68.6	45.0
40	0.16	64.0	68.8	45.1
	5.50	64.4	68.9	45.5
	10.40	65.3	69.1	46.5
	15.35	67.9	69.8	48.7
50	0.39	63.9	68.7	45.1
	5.14	64.5	69.0	45.5
	9.80	65.2	69.2	46.3
	14.65	67.1	69.9	48.1
100	-0.12	64.0	68.9	45.2
	4.91	64.4	69.1	45.6
	9.92	65.2	69.6	46.9
	14.91	67.3	70.5	49.4
200	0.51	64.0	68.9	45.3
	5.38	64.5	69.1	46.0
	10.40	65.5	69.7	47.6
	15.43	67.2	70.6	50.7

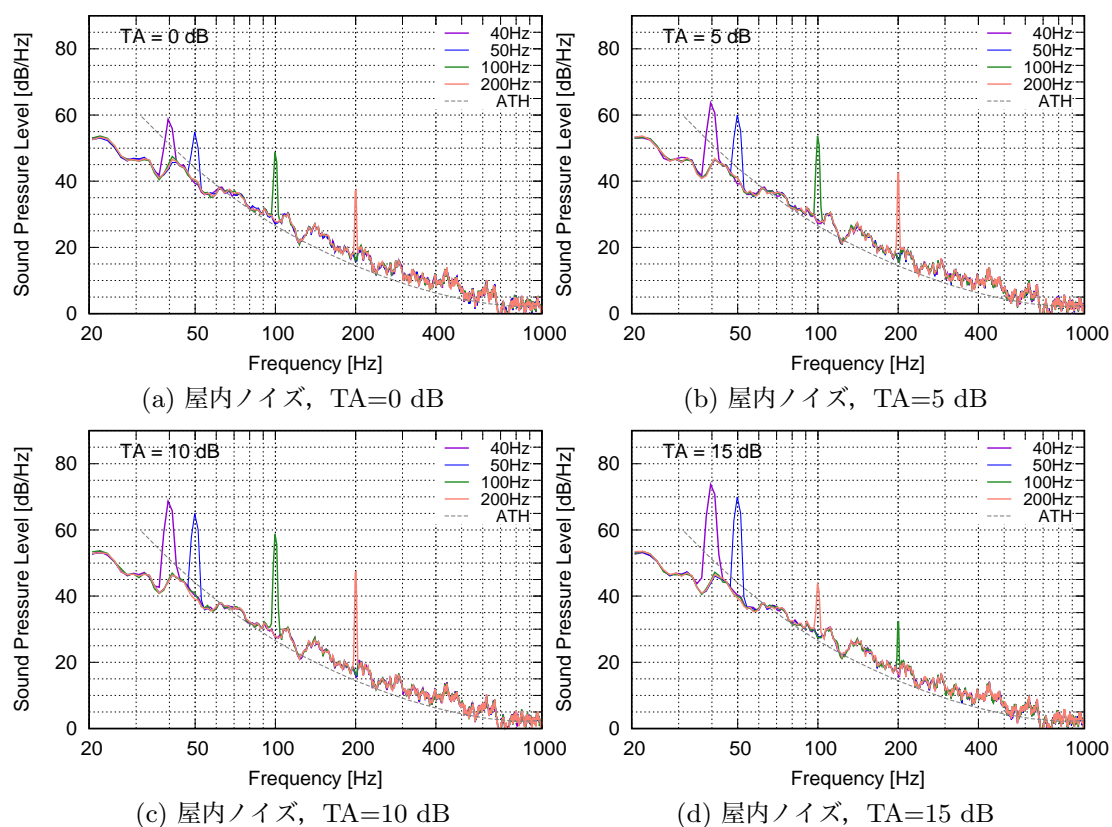


図 4.4: 屋内ノイズに純音を付加した試験音の周波数特性

表 4.4: 屋内ノイズに純音を付加した試験音のラウドネスレベル・A 特性音圧レベル

純音周波数	TA [dB]	$LL(Z)$ [phon]	$LL(M)$ [phon]	L_A [dB]
なし	-	50.4	55.3	34.8
40	-0.40	50.6	55.3	35.3
	4.60	51.5	55.8	36.3
	9.70	53.1	56.1	38.5
	14.72	56.0	57.1	42.4
50	0.25	50.8	55.5	35.6
	5.16	51.7	55.9	36.4
	10.14	53.6	56.5	38.6
	15.09	56.6	57.6	42.1
100	-0.16	51.1	55.7	36.5
	5.04	51.9	56.1	36.4
	9.81	53.4	56.9	38.7
	14.83	56.1	58.3	42.3
200	0.08	50.8	55.6	35.3
	5.20	51.7	56.0	35.9
	10.25	53.0	56.7	37.6
	15.29	54.9	57.9	40.6

4.3 結果および考察

評価の結果をラウドネスレベルおよび A 特性音圧レベルを指標として図 4.5, 図 4.6, および図 4.7 に示す。図中の黒の×は、基準音 (Standard Stimuli, Ss) を録音・分析して得られた物理評価指標の値, 丸または四角のプロットは、被験者が調整した比較音 (Compared Stimuli, Sc) のレベルから算出した各指標による主観的等価点の 15 名分の平均値, エラーバーは t 分布による 95 % 信頼区間を示す。各グラフの左端のプロットは、純音性成分を付加しないノイズの評価結果である (none と表記)。図 4.5 には、TA の違いによるラウドネス評価値 (Sc) の差について、Tukey の多重比較で有意差が認められたものをアスタリスクで示した。

4.3.1 主観的なラウドネスの変化

純音強度が増すほど主観的なラウドネス評価値 (Sc) は増加する傾向がみられた。ベースノイズまたは純音周波数によって、ラウドネス評価値に差異があるかどうかを比較する。純音なし条件と比べて、ラウドネスの有意な増加がみられたのは次の条件である。

ピンクノイズ 純音周波数 40, 50, 100 Hz の TA = 10 dB 以上, 200 Hz の TA = 15 dB

屋外ノイズ 純音周波数 40, 50 Hz の TA = 5 dB 以上, 100, 200 Hz の TA = 10 dB 以上

屋内ノイズ 純音周波数 40, 50 Hz の TA = 5 dB 以上, 100, 200 Hz の TA = 10 dB 以上

ベースノイズによる違い

40, 50, 100 Hz 純音を付加した条件では、ラウドネスの増加量はピンクノイズ条件<屋外ノイズ条件<屋内ノイズ条件の順に大きくなった。特に、環境騒音を模擬した低域優勢のノイズに周波数 100 Hz 以下の純音を付加した条件で、ラウドネスの増加が大きかった。200 Hz 純音を加えた条件では、ベースノイズによる傾向の違いは見られなかった。

純音周波数による違い

ピンクノイズをベースノイズとする条件では、純音周波数によらずラウドネスの増加が最大 2 phon (TA=15 dB 条件) であった。屋外ノイズ, 屋内ノイズ条件では、純音周波数が低いほどラウドネス増加量が大きかった。

実験終了後のヒアリングでは、「低い音は、風のような音 (ベースノイズ) と一体となって大きく感じられた」「高い音は分離して聞こえた」「高い音ははっきり聞こえるが、大きい感じはしなかった」といった内観報告があり、これは実験結果の傾向とも整合する。

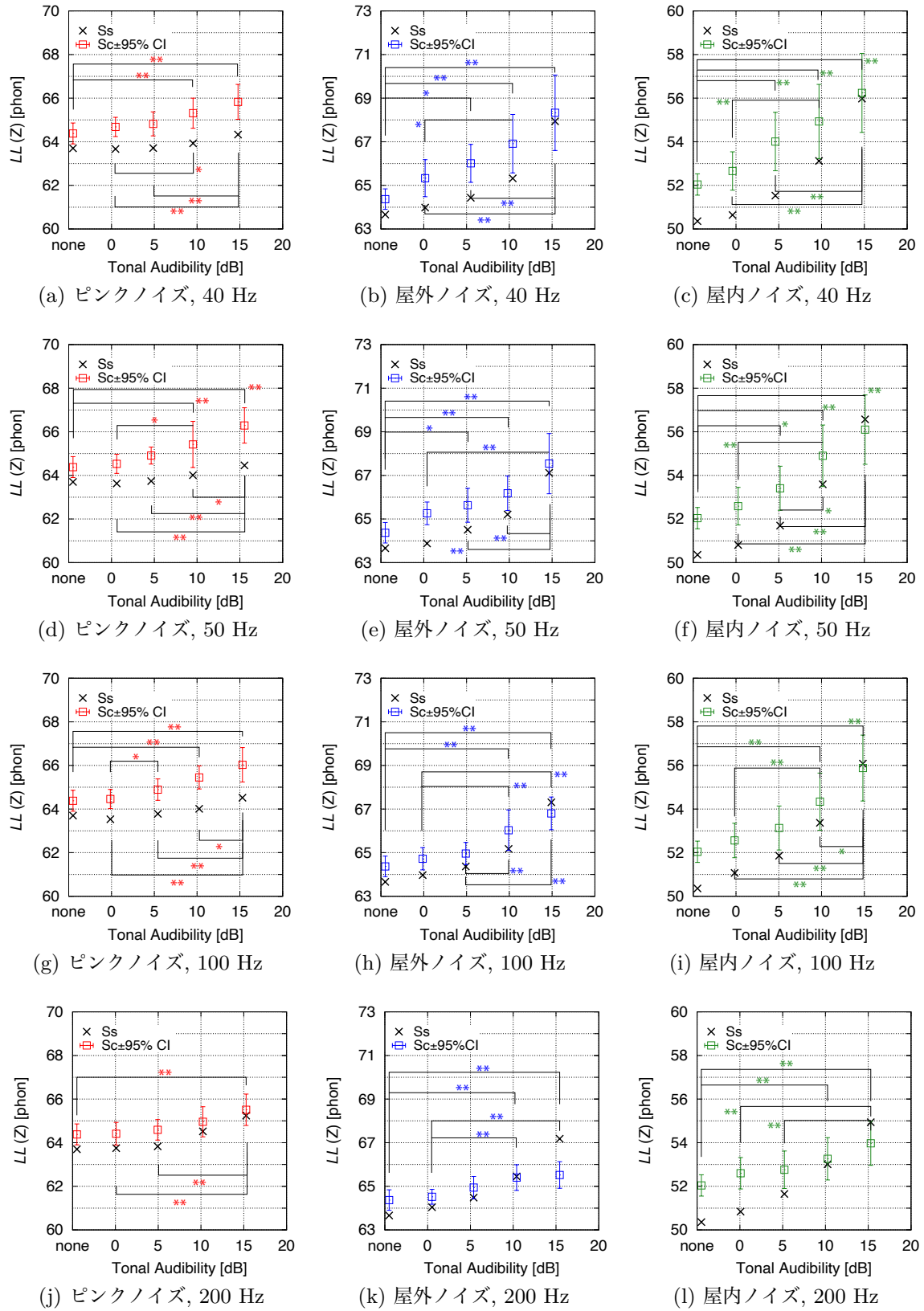


図 4.5: ラウドネス評価の結果 (Zwicker ラウドネス)。Sc 間で有意差の認められたものをアスタリスクで示した (*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$)

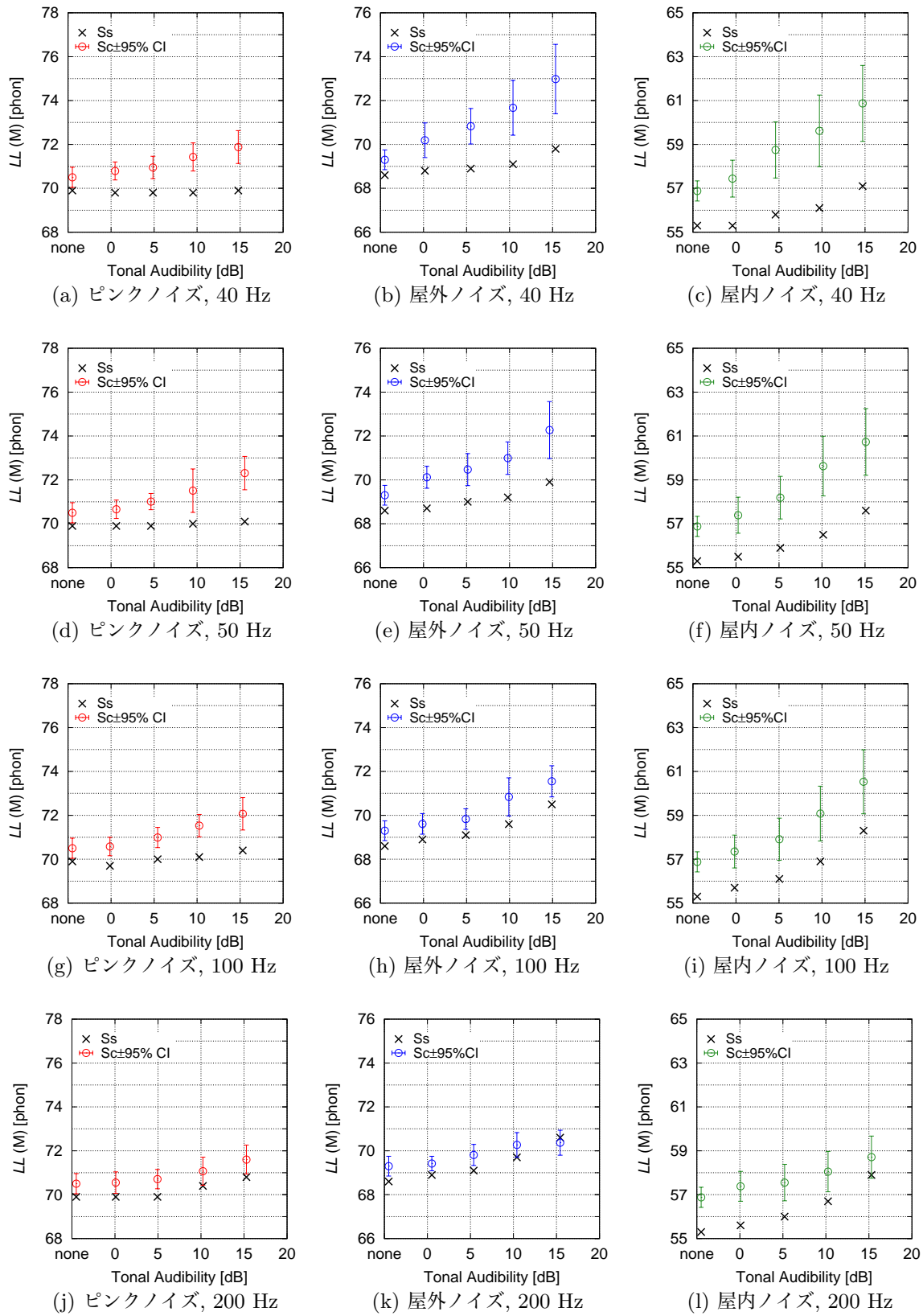


図 4.6: ラウドネス評価の結果 (Moore-Glasberg ラウドネス)

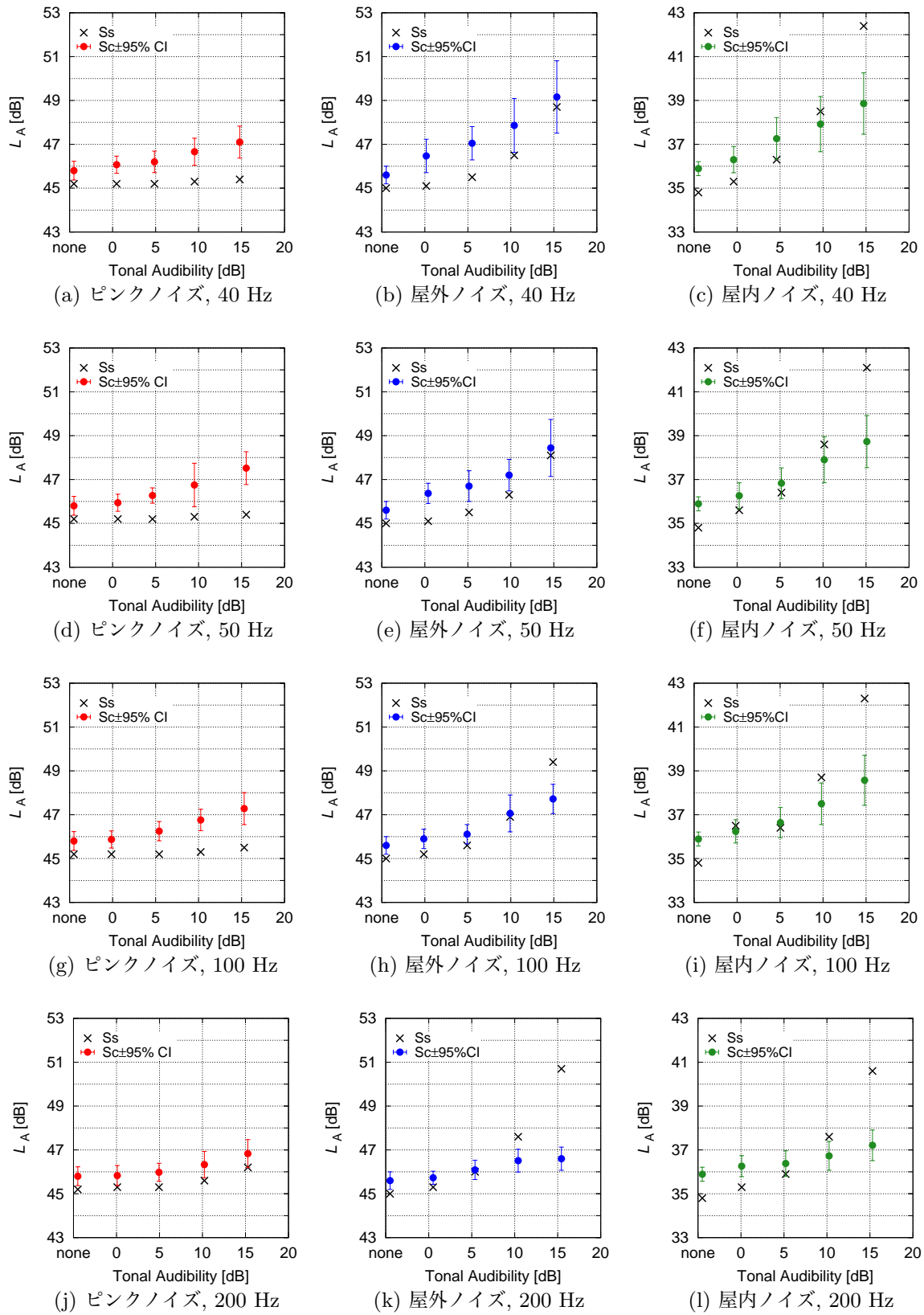


図 4.7: ラウドネス評価の結果 (A 特性音圧レベル)

4.3.2 主観的評価値 S_c とラウドネス指標の値 S_s の対応関係

次に、ラウドネスの主観的評価値 (S_c) と、試験音の録音データから算出した物理的なラウドネス指標の値 (S_s) の対応関係について検討する。

4.3.2.1 ラウドネス指標値の傾向

まず、ラウドネス指標の値 S_s の変化に着目する。図 4.5, 図 4.6, および図 4.7 中に×で示したラウドネス指標の値のうち、3 種類のノイズにそれぞれ 50, 200 Hz 純音を付加した計 6 条件について、ラウドネス指標値の変化を図 4.8a～c に指標別に示す。

TA が高くなると、付加する純音のエネルギーが大きくなるためラウドネス指標の値は増加するが、指標およびベースノイズの種類によって増加量が異なった。ピンクノイズ条件はいずれの指標でも増加量が小さく、純音性成分を含まない条件と比べると、TA=15 dB における増加量は最大 2 phon または 2 dB だったが、屋外/屋内ノイズ条件の方が増加量が大きく、全体としては低域優勢のノイズほど増加量が大きかった。

$LL(Z)$, L_A を指標として用いると、TA=10 から 15 dB において指標の値が大きく増加した(図 4.8a, c)。屋外ノイズ条件では、純音周波数の低い 50 Hz 純音の条件の方が増加量が大きかった。屋内ノイズ条件では、同等、または 200 Hz 純音の条件の方が増加量が大きく、ベースノイズおよび純音周波数の組み合わせによって傾向が異なることがわかった。

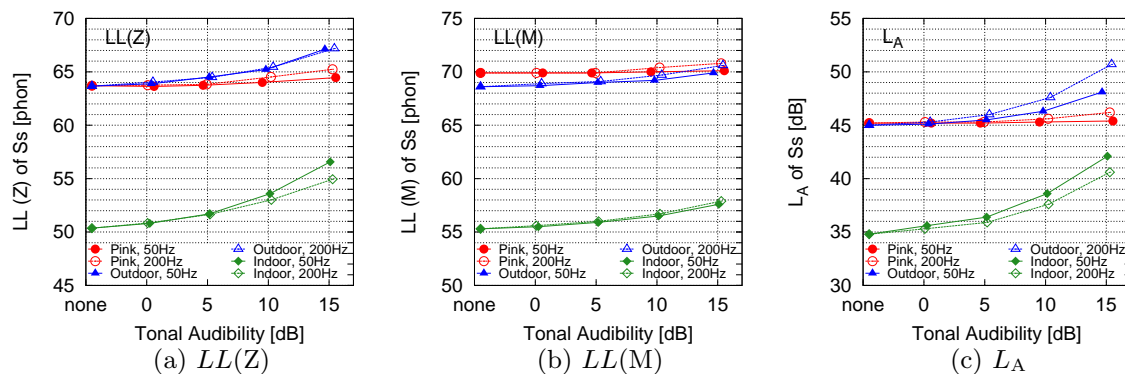


図 4.8: 試験音のラウドネス指標値の変化

4.3.2.2 主観的評価とラウドネス指標値の対応

ベースノイズによる違い

先に述べたラウドネス指標の値 S_s が、実験によって得られた主観的なラウドネス S_c と整合しているかを検討するため、 S_s からみた S_c の増分 $\Delta L_s = S_c - S_s$ を算出した。純音周波数 4 水準 (40, 50, 100, 200 Hz) それぞれについて、ベースノイズによる比較をしたものを図 4.9～図 4.12 に示す。プロットは被験者平均値、エラーバーは評価値 (S_c) の 95% 信頼区間を示す。各 TA の水準について、ベースノイズの種類を要因とした分散分析 (Tukey の多重比較) を行い、5 %水準で有意差が認められたものについてはアスタリスクで示した。

- (a) Zwicker ラウドネス ΔL_s は -2 phon ～ +2 phon であった。ベースノイズによる違いに関しては、最大 1～2 phon の有意差がみられた。このうち、純音周波数 50, 100, 200 Hz, TA=15 dB の条件で有意差がみられたが、この理由として、図 4.8 で指摘したように、屋内外の模擬ノイズにおいて TA の高い条件での物理的なラウドネス指標値の増加したことが要因であると考えられる。
- (b) Moore-Glasberg ラウドネス ΔL_s は 0～4 phon であった。純音周波数 100 Hz 以下の条件では、TA の増加に伴って ΔL_s の値も増加し、純音周波数が低いほど増加量が大きかった。ノイズによる差は最大で 1 phon 程度と小さく、TA の高い条件では有意差はみられなかった。
- (c) A 特性音圧レベル ΔL_s は -5 ～ 2 dB であり、TA が高くなるとピンクノイズでは ΔL_s が増加、低域優勢の屋内・屋外ノイズで ΔL_s が減少し 0 または負となる傾向であった。ノイズによる差は 3 指標のうちで最も大きく、TA=10, 15 dB の条件において最大で 5 dB の有意差がみられた。これは、(a) $LL(Z)$ と同様に、TA=10 から 15 dB において指標の値が大きく増加することが要因である。

以上のように、ベースノイズの種類によって、主観的評価とラウドネス指標値の対応に差異が生じることが分かった。指標による違いとして、 $LL(Z)$, L_A による評価では $LL(M)$ よりも ΔL_s が 0 に近く、物理指標 S_s は主観的なラウドネス S_c を過小評価しづらいと言える一方でベースノイズの周波数特性によって対応が変化するという結果になる。逆に $LL(M)$ による評価では、TA が高くなるほど ΔL_s は増加する一方、ベースノイズの種類によらず安定した値となった。このことから、Moore-Glasberg ラウドネスレベルを指標とすれば、ベースノイズの種類によらず評価ができると考えられる。

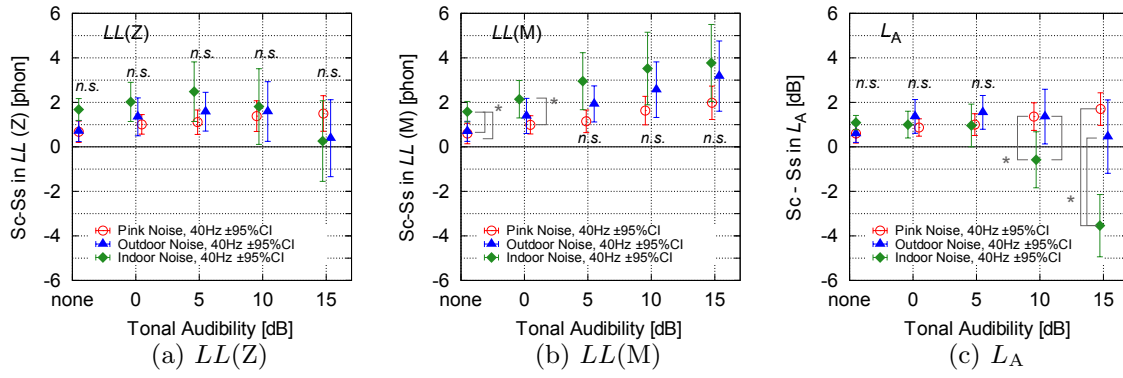


図 4.9: Ss からの Sc の増分 ΔL_s (40 Hz 条件)

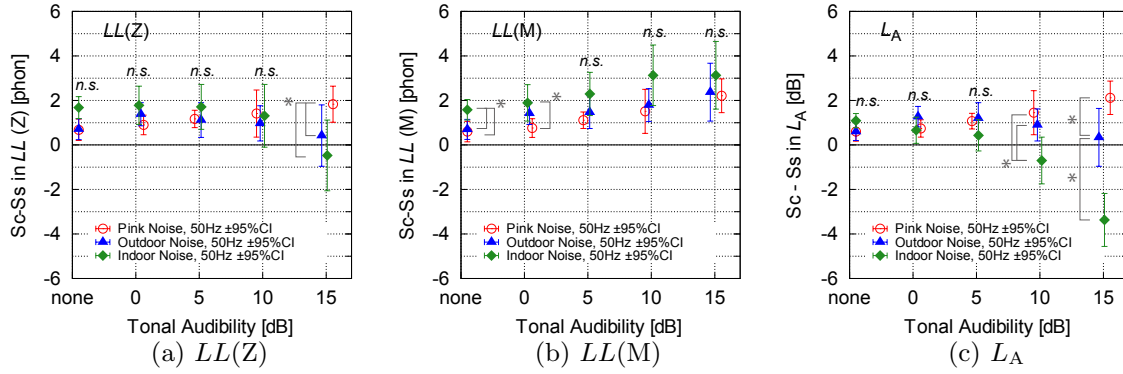


図 4.10: Ss からみた Sc の増分 ΔL_s (50 Hz 条件)

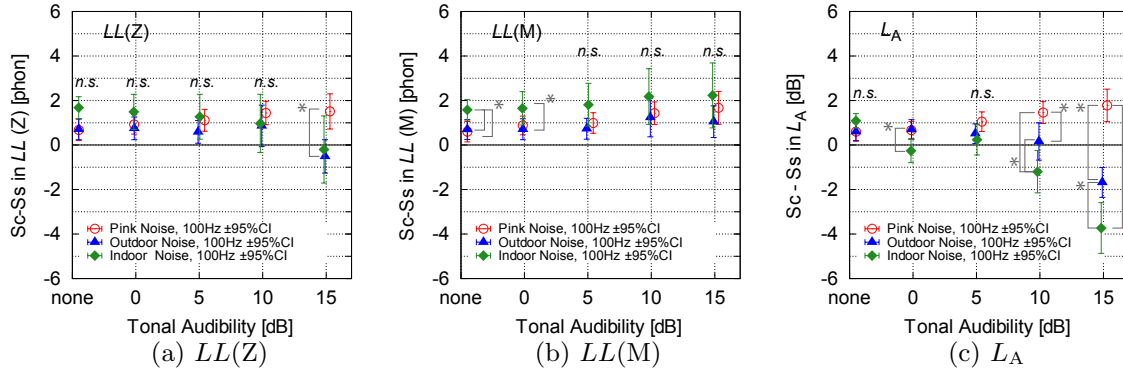


図 4.11: Ss からみた Sc の増分 ΔL_s (100 Hz 条件)

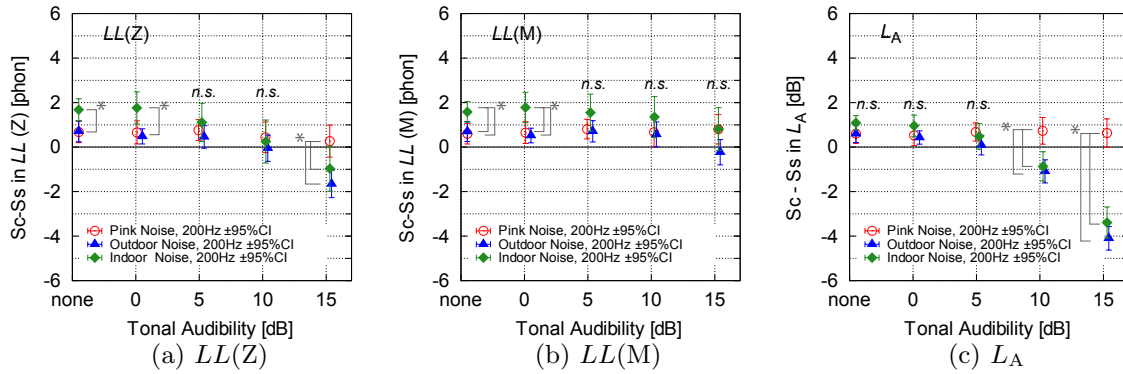


図 4.12: Ss からみた Sc の増分 ΔL_s (200 Hz 条件)

純音周波数による違い

ラウドネスの増分における純音周波数の影響について検討するため、 $\Delta L_s = S_c - S_s$ をベースノイズ別にまとめたものを図 4.13～4.15 に示す。

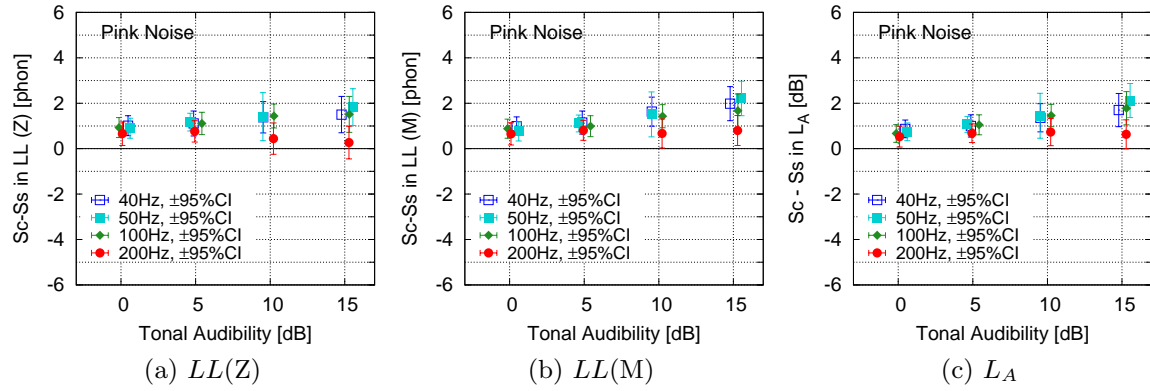


図 4.13: S_s からの S_c の増分 ΔL_s (ピンクノイズ条件)

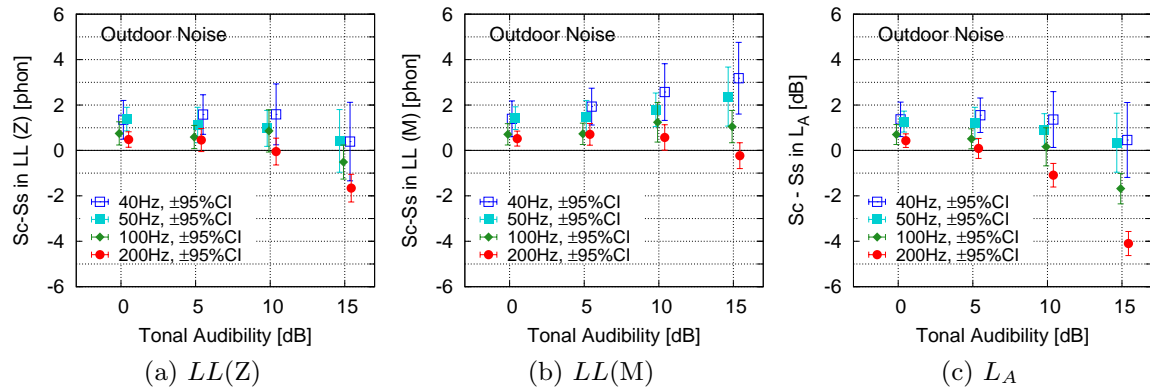


図 4.14: S_s からの S_c の増分 ΔL_s (屋外ノイズ条件)

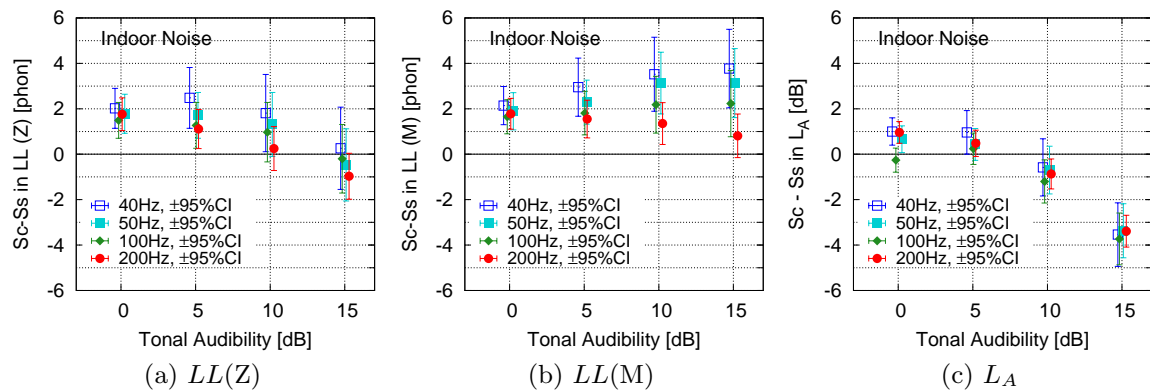


図 4.15: S_s からの S_c の増分 ΔL_s (屋内ノイズ条件)

ピンクノイズ (図 4.13) いずれの指標も, ΔL_s は 0 ~ 2 phon または 0 ~ 2 dB であり, Sc は Ss よりやや高いか同等であった。200 Hz 条件では ΔL_s がやや小さい値をとる傾向にあった。

屋外ノイズ (図 4.14) ΔL_s は, 純音周波数が高いほど値が小さくなる傾向だった。特に $LL(Z)$ と L_A は, TA が高くなると ΔL_s が小さくなる傾向だった。これは図 4.8 に示したように, TA が増えたときの Ss の増加傾向が, Sc の増加傾向を上回ることによって起る。この乖離によって TA が高い条件で Ss と Sc の大小関係が逆転することもあった。

屋内ノイズ (図 4.15) $LL(Z)$, L_A では TA が高くなるほど ΔL_s が小さくなった。一方, $LL(M)$ は, 多くの条件で $\Delta L_s > 0$ であり, 物理指標の値は主観的ラウドネスより小さな値となった。他の指標と比べると, 低域のエネルギーが優勢な条件 (40, 50, 100 Hz 純音を付加した条件) で特に ΔL_s が大きく, TA が高くなっても, $Sc-Ss$ が減少傾向に転じることはなかった。

屋内/屋外ノイズをベースノイズとした条件では, 純音周波数やラウドネス指標によって傾向に差異が見られた。これは, ①主観的なラウドネスの増加量が純音周波数によって異なること (4.3.1 で指摘), ②物理的なラウドネス指標の増加傾向が試験音の周波数特性によって異なること (4.3.2.1 で指摘) の 2 つが要因となっていると考えられる。そのうち②について次節で考察する。

4.3.2.3 指標間の差異に関する考察

指標間で見られた差異の要因について, 指標の算出方法の違いに基づき考察した。表 4.5 に, 3 指標の主な相違点を示す。

今回用いた指標は, いずれも等ラウドネス曲線をもとにした重み付けを経て算出される。等ラウドネス曲線は, 周波数と音圧レベルに対して非線形であるのが特徴である。1000 Hz 以上の帯域では音圧レベル [dB] とラウドネスレベル [phon] が概ね 1:1 の比例関係にあるが, 低周波領域ではコンタ曲線の間隔が狭くなっており, 周波数・音圧レベルによっては, 数 dB の音圧レベルの増加に対し, ラウドネスレベルが 10 phon 以上増加することもある。

ラウドネスレベルの算出方法の詳細については第 2 章で述べたが, Zwicker 法, Moore-Glasberg 法ともに, 音圧入力を周波数帯域別に分割してから帯域別のラウドネスレベルを求める際に, 各帯域の音圧レベルに応じたラウドネスの重み付け特性を反映させる計算方法をとっている。Zwicker ラウドネスは ISO 226:1987 に定められる Robinson-Dadson の等ラウドネス曲線, Moore-Glasberg ラウドネスでは ISO 226:2003 で改定された鈴木-竹島の等ラウドネス曲線に従うような重み付けをしている。その後, 帯域別に求めたラウドネスを全周波数帯域にわたって加算する際に, 帯域間の周波数マスキング効果の影響も考慮されている。

A 特性音圧レベルは, A 特性重み付け関数を用いて算出される値である。A 特性重み付け関数は, Fletcher-Munson の等ラウドネス曲線における 40 phon の等ラウドネス曲線を, 1 kHz を基準にして近似したものである。計算の簡便のため, ラウドネス特性のレベル依存性を考慮せずに一律に同じ重み付け関数を用いる。マスキング効果は考慮されない。

表 4.5: ラウドネス指標の主な相違点

指標	$LL(Z)$	$LL(M)$	L_A
帯域分割幅	臨界帯域	ERB_N	-
等ラウドネス曲線	R-D 曲線	鈴木-竹島 曲線	F-M 曲線 (40 phon)
ラウドネス特性のレベル依存性	考慮する	考慮する	考慮しない
マスキング効果	考慮する	考慮する	考慮しない

これらの3つの指標のうち、帯域分割幅と等ラウドネス特性にともに最新のものをを用い、マスキングの効果も考慮した Moore-Glasberg のラウドネスレベルが最もラウドネスを精度よくモデル化した指標だと考えられる。他の2指標では、低域優勢の屋内・屋外ノイズにおいて、 $TA = 10$ dB または 15 dB の条件で S_s が急に増加する傾向であったが、これは、図 4.15 で示したように、主観的な評価値と乖離する傾向だった。一方 $LL(M)$ ではこの傾向はみられなかった。

Moore-Glasberg ラウドネスと Zwicker ラウドネスの比較

まず、同様の方法で算出される Moore-Glasberg ラウドネスと Zwicker ラウドネスを比較する。この2指標は、いずれも ISO 532:2017 で定められており、算出方法の大枠は同じである。両者の違いは、(1) 帯域分割幅：Zwicker 法では帯域の分割に臨界帯域を用いていたのに対し、Moore-Glasberg 法では ERB_N を用いること、(2) 等ラウドネス曲線のバージョン：Zwicker 法では 1956 年の実験により求めた等ラウドネス曲線、Moore-Glasberg 法では 2003 年に改定された等ラウドネス曲線を使うこと、の2点である。この相違によって、Moore-Glasberg ラウドネスは低周波領域の精度が改善されていると考えられる。

この違いのうち、(2) 等ラウドネス特性に着目する。ISO 226:2003 での改定前後のラウドネス曲線の違いを図 4.16 に示す。R-D 曲線でみられた 500 Hz 以下の帯域での垂れ下がりが、鈴木 - 竹島のラウドネス曲線では直線的に変更されている。改定後の曲線では、同じ音圧レベルに対して生じるラウドネスが、 250 Hz では 10 phon 程度、 50 Hz では 20 phon 程度低い値になり、周波数が低いほど差が広がる。Zwicker ラウドネスでは、この低周波部分のラウドネスレベルが大きく評価されたために、純音性成分の強度が高い試験音でラウドネスレベルが急増したと考えられる。

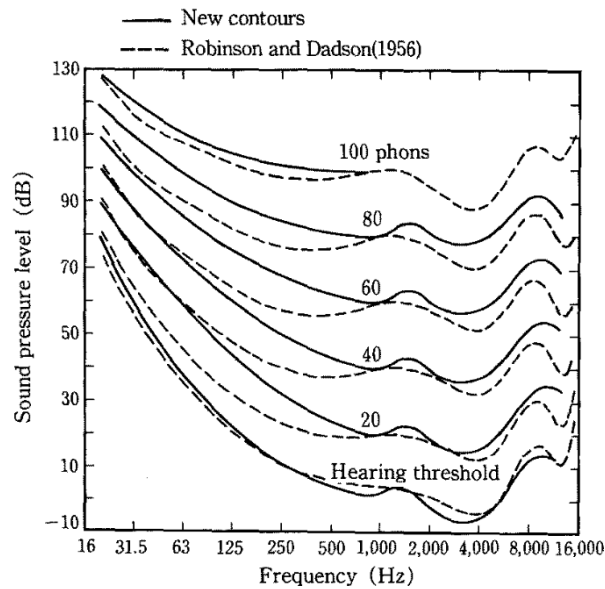


図 4.16: 等ラウドネス曲線の比較 [22]。実線は鈴木-竹島の曲線 (2003), 破線は R-D 曲線 (1956)

Moore-Glasberg ラウドネスと A 特性音圧レベルの比較

Moore-Glasberg ラウドネスレベルと A 特性音圧レベルは、算出方法が複数の点で異なるが、ここでは先の議論と同様に等ラウドネス特性に着目した。Moore-Glasberg ラウドネスは、帯域別に等ラウドネス特性（音圧－ラウドネスの関係）を参照して重み付けをするが、A 特性音圧レベルは、40 phon の等ラウドネス曲線の近似特性を用いる。つまり、試験音の各帯域のラウドネスレベルが 40 phon であれば、A 特性による重み付けは等ラウドネス特性をちょうど反映させることになる。

例として屋外ノイズに 40 Hz 純音を TA=15 dB で付加したときの試験音の周波数特性（1/3 オクターブバンドレベル）を、20, 30, 40 phon の等ラウドネス曲線とともに示す（図 4.17）。この試験音の各帯域のエネルギーは、純音成分を含むバンドを除く多くの周波数帯域で 40 phon の等ラウドネス曲線よりも 15 dB 程度低いいため、40 phon よりも低いレベルの等ラウドネス曲線を適用するのが適切であると考えられる。レベルによる重み付け特性の違いを近似的に求めるために、次の方法で 40 phon 以下のラウドネスレベルに対応した重み付け係数の試算を行なった。

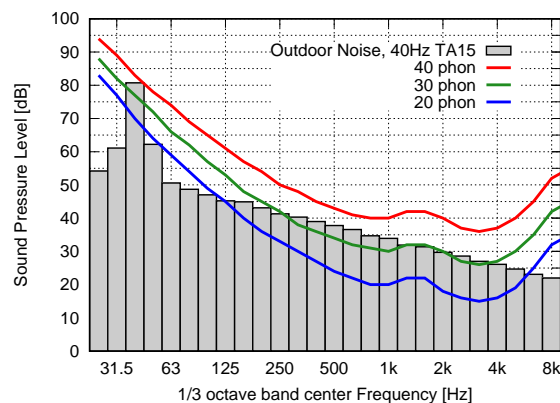


図 4.17: 試験音の 1/3 オクターブバンド周波数特性と鈴木-竹島の等ラウドネス曲線

▷ 40 phon 以下のラウドネスレベルに対応した重み付け係数の試算

A 特性と同様な近似的な重み付け係数を、最小可聴値および 10～30 phon の等ラウドネス曲線をもとに試算した。A 特性は、1 kHz に対する重み付けが 0 となるような相対値で与えられているが、これに対応する特性を考えるために、次の手順で重み付け係数を試算した。

1. 鈴木・竹島の等ラウドネス曲線（最小可聴値（absolute hearing threshold, ATH），10～40 phon）における音圧レベルの値 $L(l, f)$ を 1/3 オクターブバンド間隔で読み取る。ただし l はラウドネスレベルを表すインデックスで $l = \text{ATH}, 10, 20, 30, 40 \text{ phon}$ ， f は中心周波数である。各曲線において 1 kHz からの相対値 $\Delta L_{1k}(l, f)$ を求める。

$$\Delta L_{1k}(l, f) = L(l, f) - L(l, 1\text{kHz}) \quad (4.1)$$

2. ATH, 10～30 phon について、A 特性重み付けのもととなる 40 phon 等ラウドネス曲線からの差分 $\Delta L_{1k,40}(l, f)$ を求める。これが、A 特性重み付けからの差分に相当すると考える。

$$\Delta L_{1k,40}(l, f) = \Delta L_{1k}(l, f) - \Delta L_{1k}(40 \text{ phon}, f) \quad (4.2)$$

3. A 特性重み付け $\Delta L_A(f)$ に、 $\Delta L_{1k,40}(l, f)$ を加えて補正したものを、各ラウドネスレベルに対応する重み付け係数 $\Delta L_l(f)$ とする。

$$\Delta L_l(f) = \Delta L_A(f) + \Delta L_{1k,40}(l, f) \quad (4.3)$$

なお、1 kHz 以上は等ラウドネス曲線が互いに平行で差が一様であるとみなした。

得られた重み付け係数を図 4.18 に示す。100 Hz 以下では、A 特性と 20 phon 以下の荷重特性で 5 dB 以上の差がある。周波数が低いほど差が広がり、31.5 Hz では、20 phon の特性の方がおよそ 10 dB 値が小さい。

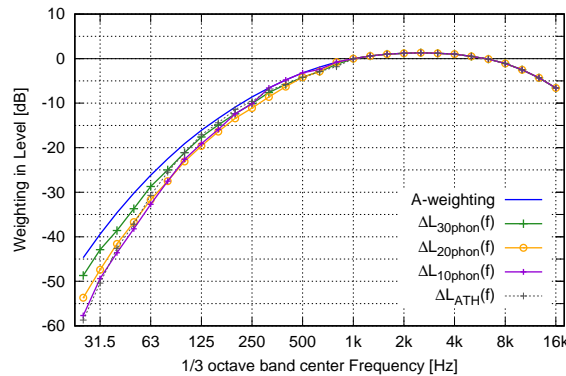


図 4.18: 得られた重み付け係数

図 4.18 に示すように、低周波領域においては等ラウドネス特性のレベルによる差異が大きくなるため、低域優勢の周波数特性をもつ音に、レベルの異なるラウドネス曲線を用いた重み付けを施すと、ラウドネス特性の不整合に由来する影響が特に大きくなると考えられる。

4.4 まとめ

本章では、純音性成分を付加したノイズのラウドネス評価を行い、ベースノイズの周波数特性と付加する純音の強度・周波数をパラメータとして、ラウドネスの増加傾向を把握した。また、試験音の物理特性をもとに算出されるラウドネス指標について、主観的な評価値との差に着目しながら、その算出方法の観点から考察を行い、次の結論を得た。

純音性成分のラウドネスへの寄与

純音性成分を含むノイズのラウドネスは、純音性成分の強度が高くなるほど増加し、純音性成分を含まない条件と比べると、TA=5 dB 以上でラウドネスの有意な増加が認められた。増加の程度はベースノイズの周波数特性および純音周波数によって異なった。低域優勢の周波数特性をもつベースノイズ条件は、ラウドネスの増加が大きく、また 40, 50 Hz の低周波数純音を付加した条件ではラウドネスレベルの増加が特に顕著だった。

純音性騒音のラウドネスと指標との対応

Zwicker ラウドネス、Moore-Glasberg ラウドネス、A 特性音圧レベルの 3 種類の指標を用いて、主観的なラウドネス評価値 S_c と試験音の音圧レベルから算出される物理的なラウドネス指標値 S_s の対応関係を $\Delta L_s = S_c - S_s$ として検討した。ピンクノイズ条件に関してはいずれの指標でも ΔL_s に大きな違いは見られなかったが、屋外・屋内の環境騒音を模擬した低域優勢のノイズをベースノイズとした条件については、TA=10 dB 以上の条件において ΔL_s が指標によって異なった。

Zwicker ラウドネスと A 特性音圧レベルでは、TA の高い条件では S_s が S_c を上回って大きく増加したが、Moore-Glasberg ラウドネスではそのような傾向はみられず、いずれのベースノイズの種類でも安定した値をとった。この違いの要因は各指標の算出時に用いる等ラウドネス特性の差異によるものだと考えられ、低周波数領域の精度が向上した Moore-Glasberg ラウドネスを指標として用いるのが適当だと考えられる。

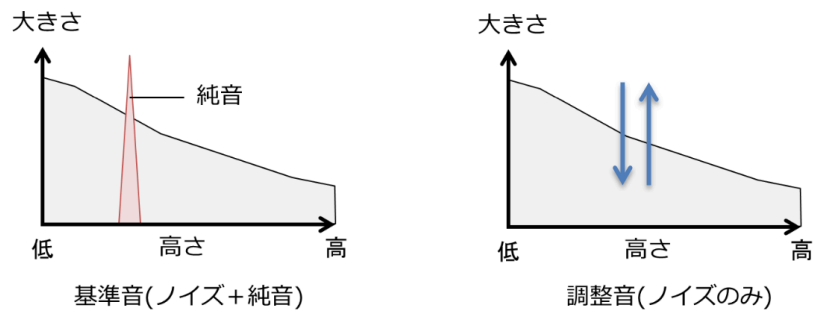
被験者の皆様へ

純音が含まれた騒音のラウドネス（大きさ）に関する実験

➤ 実験の概要

ノイズに純音を付加した音（基準音）と、ノイズのみの音（調整音）の対を聴き比べて、ラウドネス（大きさ）が同じになるように、調整音の音量を変えていただきます。

★ ラウドネスとは、音をどれだけ大きく感じたかを指す感覚量です。



試験音は異なるノイズや純音を組み合わせたものですが、純音が聞こえないくらい小さいものや、純音が入っていないものも含まれています。

1～3部それぞれ17条件ずつあります。

図 4.19: 教示文 (1 / 3 ページ)

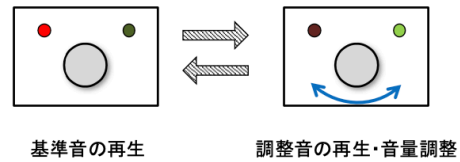
被験者の皆様へ

純音が含まれた騒音のラウドネス（大きさ）に関する実験

実験の手続きについて

◇基準音（4 秒）と調整音（4 秒）の対が繰り返し再生されます。最初の音（基準音）と同じ大きさとなるように，2 番目の音（調整音）の音量を手元のつまみで調整してください。

◇基準音が再生されている間は赤のランプ，調整音が再生されている間は，緑のランプが点灯します。



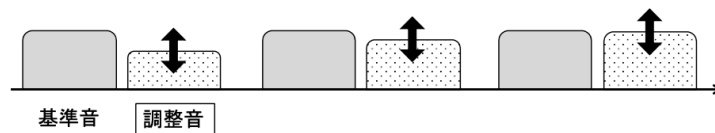
◇試験音の対は，調整が終わるまで繰り返し再生しますので，焦らず落ち着いて判断してください。調整が終わりましたら実験者に「終わりました」とお伝えください。

◇実験条件は全部で51条件あり，17条件ずつ3セットに分けて実験を行います。

ひとつの条件に対して，下に示す調整①（上昇系列）と調整②（下降系列）を，3回ずつ行っていただきます。

《調整①》 上昇系列 （レベルを上げながら調整する）

調整音が，はじめ小さい音量で再生されます。つまみを時計回りにまわして，音量を上げながら調整してください。



大きくなりすぎたと思ったら，反対方向に回して小さくしても結構です。

《調整②》 下降系列 （レベルを下げながら調整する）

調整音が，はじめ大きい音量で再生されます。つまみを反時計回りにまわして，音量を下げながら調整してください。

小さくなりすぎたと思ったら，反対方向に回して大きくしても結構です。

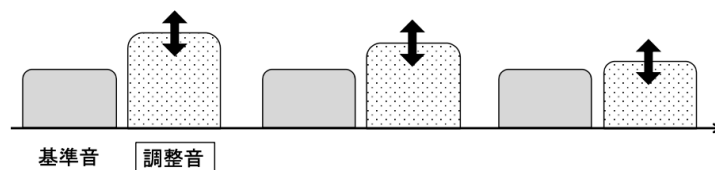
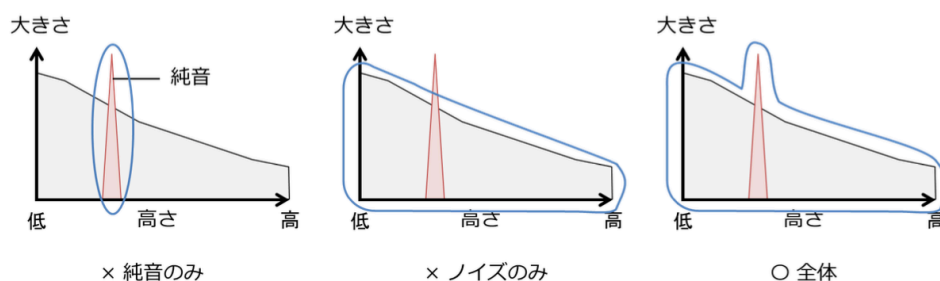


図 4.20: 教示文 (2 / 3 ページ)

◇注意事項

・この実験は、音に対する単純な心理的反応を測ることを目的としています。音の微妙な違いを問う場合もありますが、前後の回答とは独立に、直感で回答してください。

・条件によっては、基準音が複数の音に分離して聴こえたりすることがあります。そのような場合でも、音の一部のみに注目するのではなく、音全体の大きさを判断するようにしてください。



・頭の位置によって、音の聞こえが変わる可能性があります。実験中は、椅子に深く座り、ヘッドレストを使用して、できるだけ頭の位置を変えないようにしてください。

・長時間の実験となります。途中で休憩をはさみますが、疲れで判断が難しくなったと感じた場合、あるいは気分が悪くなった場合には、随時休憩をとりますので、遠慮なくお伝えください。

・実験の内容に関して疑問点などございましたら、いつでも実験者にお尋ねください。

◇まずは、練習をしていただきます。

図 4.21: 教示文 (3 / 3 ページ)

第 5 章

純音性成分を含む騒音のわずらわしさ 評価

5.1 目的

前章ではラウドネスの検討を行なったが、ラウドネスは聴覚心理のうち最も単純な感覚であり、ラウドネスを包含しさらに音質に関する印象も考慮した心理量としてノイジネスやアノイアンスがある。騒音に関する基準は、騒音に対するアノイアンス（総合的な不快感）が過大にならないことを判断基準として定められる。一般の環境騒音のような広帯域騒音については、ラウドネスとアノイアンスがよく対応することが報告されているが [41]、純音性騒音に関する評価研究は不足している。加えて純音性成分が含まれる騒音に関わる騒音問題では、夜間など静穏な地域において「耳につく」といった苦情が寄せられており、これらの心理影響を考えるためにはラウドネスだけでなく音質も含めた総合印象を評価し、その特徴をとらえる必要がある。

これを踏まえ、本章では、純音性成分の周波数および強度が音のわずらわしさに与える影響を定量的に把握することを目的とし、音質も含めた音の総合的な印象について評価を行った。

5.2 実験の概要

本章では大きくわけて 3 つの実験を実施した。

1. ベースノイズのレベルや周波数特性によって、純音性成分がわずらわしさに及ぼす影響に差異があるかどうかの検討
2. 就寝時を想定した場合のわずらわしさ評価
3. 日中過ごす環境を想定した場合の用いたわずらわしさ評価

5.2.1 評価語の選定について

騒音の評価において考慮される音の属性として、ラウドネス以外にはノイジネス・アノイアンスを用いることが多い。このうちノイジネスは音響的要素に起因する印象、アノイアンスは、非音響的要素（その場の状況など）も含めた総合的な印象を指す。既往の純音性騒音の評価の研究では、アノイアンス評価が行われているが、難波の議論 [38] をふまえると、実験室実験でアノイアンス

を評価することの妥当性には議論の余地がある。そこで本実験では、あくまで音そのものに対する印象（ノイジネス）を評価することとした。ただし、純音性騒音の問題は、静かな環境で長時間聴き続けるという状況が特徴であることから、このような状況を想定するよう教示することとした。

評価語の候補として、うるささ、やかましさ、わずらわしさなどがあったが、予備実験を経るなかで、今回用いた比較的レベルの低い試験音は、音色が気になったとしても「うるさい」「やかましい」印象にはならない、という内観報告があったことから、「わずらわしさ」を用いることとした。

実験実施の際には、わずらわしさの意味として『聞こえてくる音の大きさや音色によって、耳障りに感じたり、いやな感覚を覚えたりすること』と教示し、音の総合的な印象として判断するよう説明した。

5.3 ベースノイズのレベル・周波数が及ぼす影響に関する実験 (実験 1)

5.3.1 目的

ベースノイズの周波数特性とレベルによって、純音性成分のわずらわしさへの寄与の程度に違いが現れるかを調べることを目的とし、2種類の周波数特性、および2種類の呈示レベルで試験音を構成して評価を行った。また、ラウドネス評価の実験（第4章）における内観報告で、純音周波数が低いものには振動感を感じるという所見が複数あった。低周波音による振動感・圧迫感については、2章で触れたように時田や高橋による検討例があり [51, 52]、騒音に対する印象に影響を与えると考えられることから、わずらわしさに加えて振動感・圧迫感の程度についても同時に評価を行った。

5.3.2 実験方法

5.3.2.1 試験音の構成

試験音の構成を表 5.1 に、ベースノイズの周波数特性を図 5.1 に示す。ベースノイズのレベルを 30, 35 dB とし、そこに IEC 61400-11:2012 に定める TA がおよそ 0, 3, 6, 9, 12 dB となるように純音を付加した。純音の周波数は 31.5, 40, 50, 100, 200, 400 Hz の 6 水準である。また比較のため、ベースノイズと同じ周波数特性の広帯域ノイズを、25, 30, 35, 40 dB の 4 段階の音圧レベルに調整したものも条件に加え、全 128 条件について評価させた。例として、ベースノイズのレベルが 30 dB の場合の周波数特性を図 5.2 および 5.3 に示す。

表 5.1: 試験音の構成

種類	ノイズ	純音	
	A 特性音圧レベル [dB]	周波数 [Hz]	TA [dB]
屋外ノイズ	30, 35	31.5, 40, 50, 100, 200, 400	0, 3, 6, 9, 12
	25, 30, 35, 40	なし	-
屋内ノイズ	30, 35	31.5, 40, 50, 100, 200, 400	0, 3, 6, 9, 12
	25, 30, 35, 40	なし	-

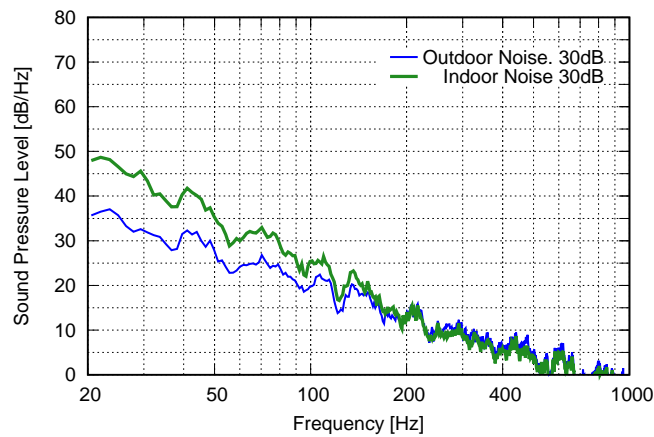


図 5.1: ベースノイズの周波数特性 (30 dB)

5.3.2.2 評価方法

実験システムは、前章までと同じものを用いた。被験者は、無響室内のスピーカの正面 3.5 m の位置に着座して音を聞いた。試験音の継続時間は 10 秒である。音の再生が終わってから、「わずらわしさ」と「振動感・圧迫感」の 2 項目について評価・回答させた。

わずらわしさ評価 7 段階の評定尺度法を用いた。「夜に就寝しようとしているときに試験音がずっと鳴り続けている」という状況を想定した場合の音のわずらわしさを、1:「全くわずらわしくない」から 7:「非常にわずらわしい」の数字に割り当てて回答させた。

振動感・圧迫感の評価 状況の想定とは無関係に、音そのものに振動感を感じるかどうかを、「A: 感じない」「B: 少し感じる」「C: はっきり感じる」の 3 段階で評価させた。

実験は休憩を挟みながら 4 セッションに分けて実施した。試験音は繰り返し回数 2 回とし、ランダムな順に呈示した。教示文を節末に示す (図 5.11, 5.12)。

5.3.2.3 実験参加者

被験者は 20~40 代の男女 40 名である。実験の実施前にオーディオメータを用いて 125 Hz~4 kHz 純音の聴力を測定し、両耳全ての帯域で 15 HL 以下であることを確認した。4 章と同様に、実験前に聴力に関するアンケートを実施し。体調に不具合のないこと、耳に関する病気に罹患していないこと、聴力を損なうような大きな音の環境に日常的には晒されていないことなどを確認した (図 3.10)。同時に Weinstein の提案する騒音感受性に関するアンケート [58, 59] を行うとともに、普段の就寝時の騒音環境について、気になる音があるかどうかを書面およびヒアリングで確認した。騒音に関するアンケート用紙は節末に示す (図 5.13)。回答の信頼性を確保するため、前半 2 セッションと後半 2 セッションでの回答値の相関が 0.6 以上となった 28 人について結果を分析した。

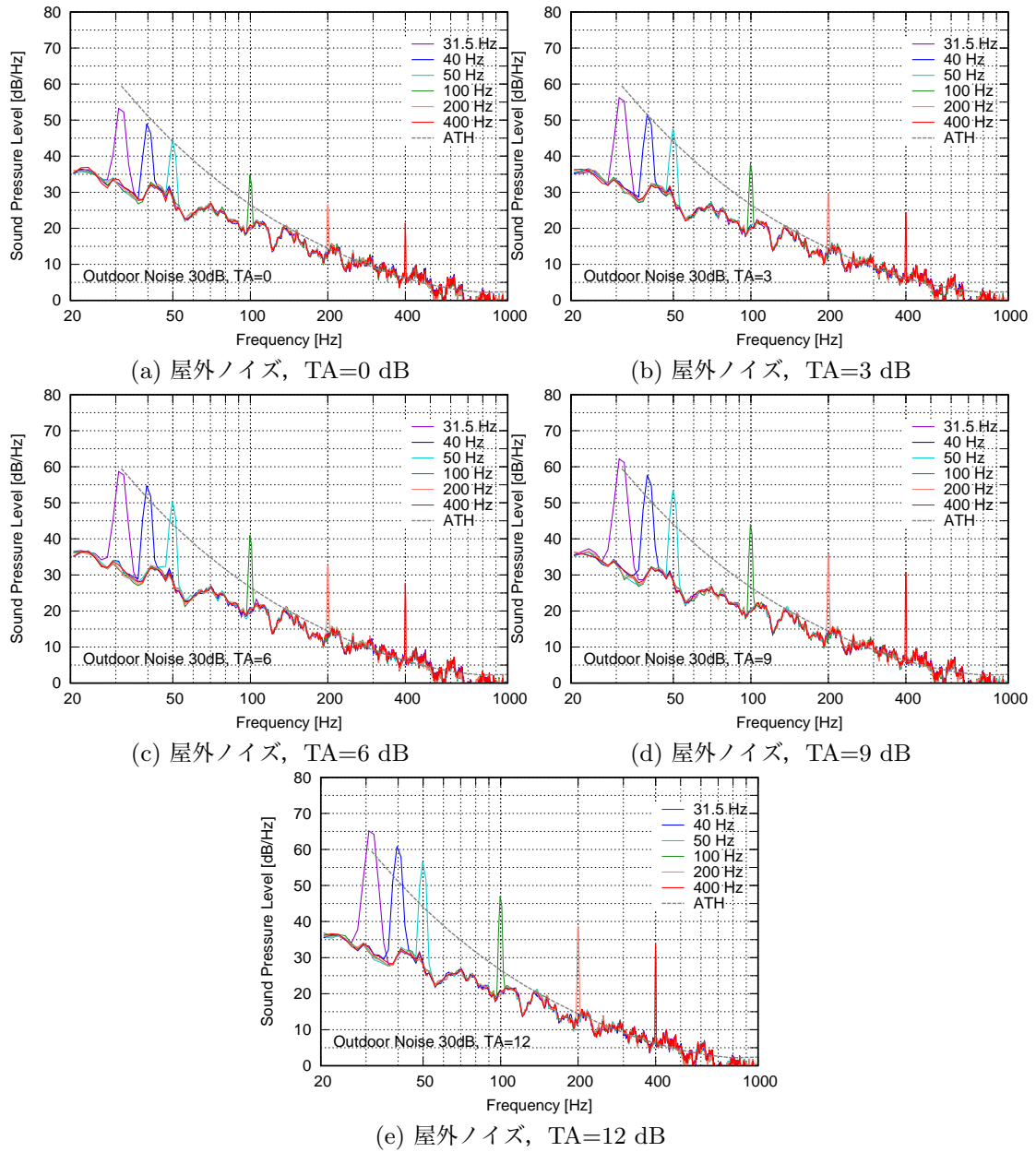
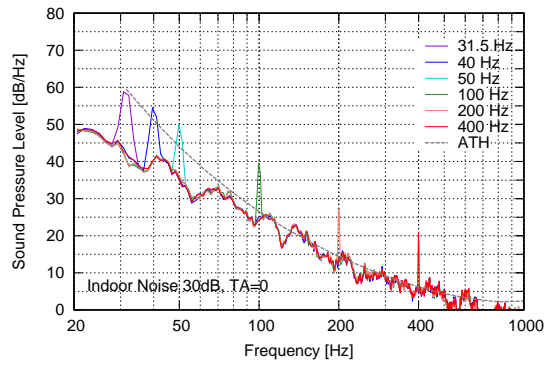


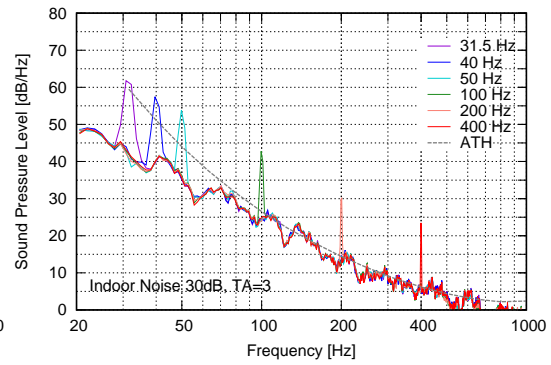
図 5.2: 屋外ノイズに純音を付加した試験音の周波数特性

表 5.2: 屋外ノイズに純音を付加した試験音のラウドネスレベル・A 特性音圧レベル

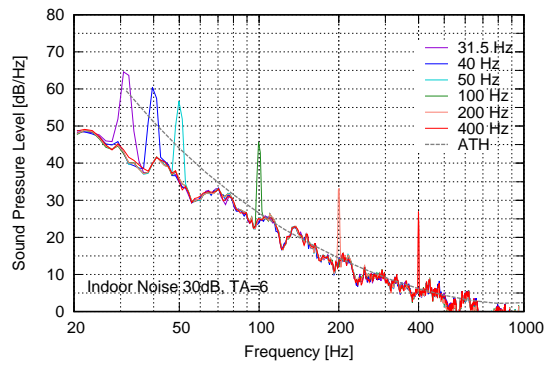
純音周波数 [Hz]	TA [dB]	$LL(Z)$ [phon]	$LL(M)$ [phon]	L_A [dB]	純音周波数 [Hz]	TA [dB]	$LL(Z)$ [phon]	$LL(M)$ [phon]	L_A [dB]
なし	-	43.1	49.7	30.3					
31.5	-0.18	43.4	49.9	30.5	100	-0.69	43.4	49.8	30.4
	2.74	43.5	49.9	30.6		2.74	43.7	50.0	30.7
	5.35	43.7	50.0	30.9		5.73	44.2	50.2	31.0
	8.81	44.4	50.4	31.5		8.62	45.0	50.6	31.7
	11.63	44.6	50.3	32.2		11.72	46.2	51.1	32.9
40	-0.13	43.5	49.9	30.5	200	-0.41	43.5	49.9	30.5
	2.79	43.7	49.9	30.6		2.65	43.8	50.0	30.8
	5.83	44.0	50.0	30.9		5.43	44.5	50.3	31.2
	8.66	44.7	50.4	31.5		8.5	45.4	50.8	32.0
	11.74	46.1	50.9	32.3		11.56	46.6	51.3	33.2
50	-0.06	43.4	49.8	30.4	400	-0.26	43.6	50.0	30.6
	2.73	43.6	49.8	30.6		2.53	43.9	50.3	30.8
	5.68	44.0	49.9	30.8		5.77	44.4	50.6	31.2
	8.75	44.5	50.0	31.3		8.76	45.1	51.0	32.0
	11.68	45.4	50.3	32.1		11.89	46.2	51.7	33.3



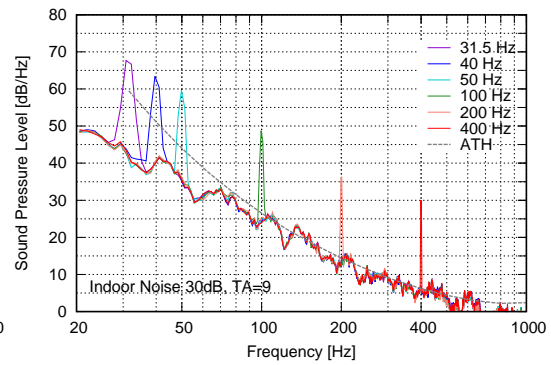
(a) 屋内ノイズ, TA=0 dB



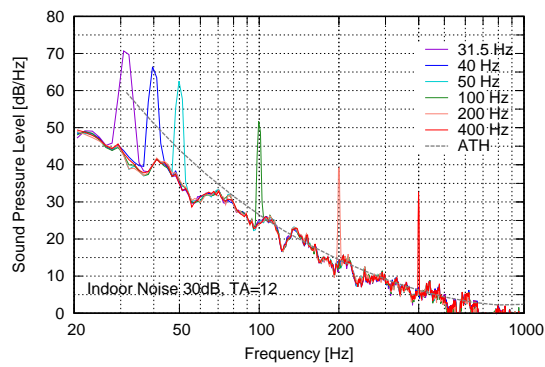
(b) 屋内ノイズ, TA=3 dB



(c) 屋内ノイズ, TA=6 dB



(d) 屋内ノイズ, TA=9 dB



(e) 屋内ノイズ, TA=12 dB

図 5.3: 屋内ノイズに純音を付加した試験音の周波数特性

表 5.3: 屋内ノイズに純音を付加した試験音のラウドネスレベル・A 特性音圧レベル

純音周波数 [Hz]	TA [dB]	$LL(Z)$ [phon]	$LL(M)$ [phon]	L_A [dB]	純音周波数 [Hz]	TA [dB]	$LL(Z)$ [phon]	$LL(M)$ [phon]	L_A [dB]
なし	-	43.3	49.0	30.3					
31.5	-0.24	44.0	49.5	30.9	100	-0.19	45.0	50.2	31.1
	2.61	45.8	51.2	31.4		3.36	46.2	51.3	31.9
	5.68	48.6	53.9	33.2		6.30	46.9	51.5	32.4
	8.65	49.7	54.5	33.4		9.14	48.2	52.2	34.2
	11.64	52.2	56.7	36.2		12.31	48.6	51.7	35.6
40	-0.12	44.1	49.6	31.0	200	-0.29	44.8	50.3	30.7
	2.87	44.2	49.4	31.3		2.66	45.3	50.7	31.4
	6.15	45.5	50.2	32.1		5.81	45.6	50.6	31.4
	8.81	46.8	50.9	33.5		8.8	45.9	50.2	32.2
	11.77	47.4	50.5	35.2		11.77	49.4	53.6	33.6
50	-0.26	43.7	49.1	30.8	400	0.24	44.5	50.1	30.6
	3.48	45.2	50.2	31.5		2.82	44.5	50.1	30.8
	6.29	47.3	52.1	32.9		6.17	45.1	53.7	31.1
	9.18	47.5	51.6	33.5		9.25	45.4	50.4	31.9
	12.05	48.9	52.4	35.2		11.83	46.23	50.9	32.8

5.3.2.4 わずらわしさ評価について

7段階評価の結果の被験者 28 名分の平均値を図 5.4 および 5.5 に示す。また図 5.6 および 5.7 には、純音周波数別に分けてプロットしエラーバーで標準偏差を示した。グラフ左端 (none と付記) には、純音性成分を付加しないベースノイズに対する評価値を示した。いずれのベースノイズ条件でも、TA が上がるとわずらわしさが高くなる傾向がみられた。

ノイズの周波数特性による違い (同レベルで、周波数特性の異なるベースノイズの条件間比較)

30 dB 条件 屋外ノイズ条件では、TA = 3 dB 以上で周波数によりばらつきがあり、純音周波数が低いほど、わずらわしさ評価が低くなる傾向がみられた。一方、屋内ノイズ条件では平均値の差はみられなかった。屋内ノイズ条件では低周波数領域のレベルが低く、付加する純音のレベルも低かったため、最小可聴値の影響で純音性成分が聞こえづかったことが要因のひとつとして考えられる。

35 dB 条件 どちらのベースノイズの条件も同様の傾向だった。

試験音のレベルによる違い (同じ周波数特性で、レベルの異なるベースノイズの条件間比較)

30 dB 条件での評価値はおおよそ 3 から 4.5 (7 段階中)、35 dB 条件の評価値はおおよそ 4.5 から 6 であり、平均のとり値の領域は重複しなかった。よって今回の実験では、純音性成分が付加されても、ベースノイズのレベルが 5 dB 低ければ全体的にわずらわしさは低く評価されると言える。

TA = 0 dB と 12 dB を比較したときのわずらわしさの増加量は、30 dB 条件では最大で 1.6 (7 段階中)、35 dB 条件では最大で 1.1 であり、呈示レベルが高いと、純音性成分の寄与がより小さかった。

屋外ノイズ 30 dB 条件では、純音周波数の低い (31.5, 40, 50 Hz) 条件で、わずらわしさ評価が低くなる傾向だった。これには試験音のレベルが低いために、最小可聴値の影響で純音が聞こえづかったことが要因となった可能性がある。この検討のためには、より低いレベルの試験音を用いて評価を行う必要があるため、次節の実験で扱うこととした。また実験手法に関しては、ベースノイズのレベルは大きく変えずに、周波数特性の異なる試験音群を用いた評価実験を行うほうが、音色の違いについて詳細な評価が可能であると考えられる。

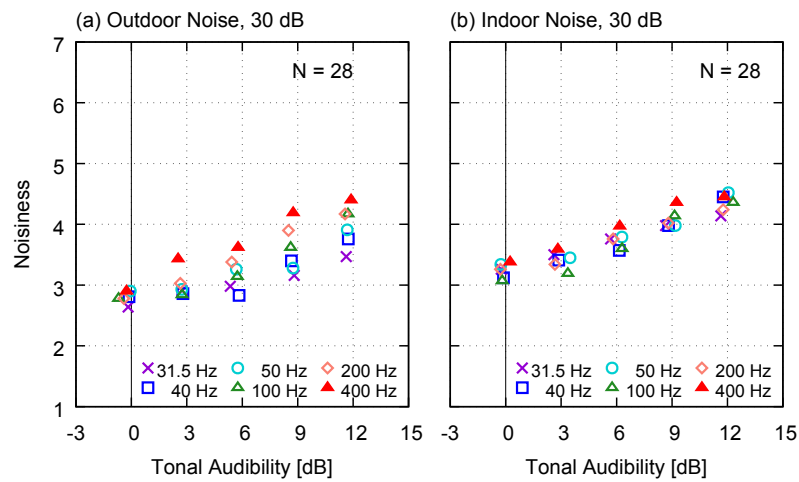


図 5.4: TA とわずらわしさ評価の平均値の関係 (30 dB 条件)

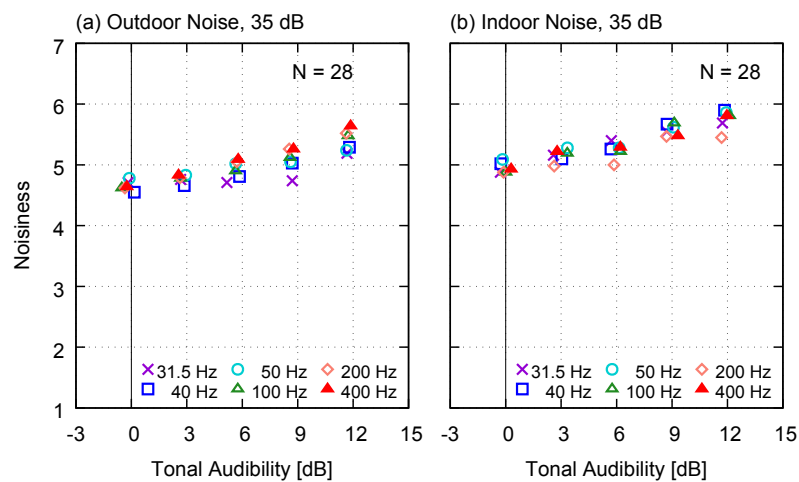
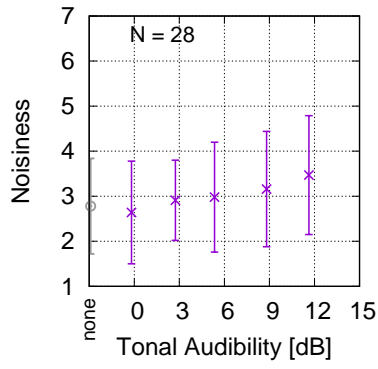
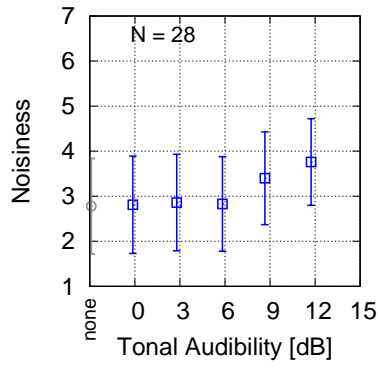


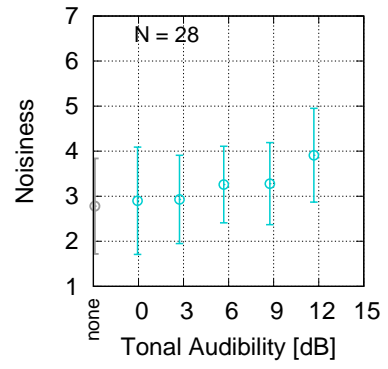
図 5.5: TA とわずらわしさ評価の平均値の関係 (35 dB 条件)



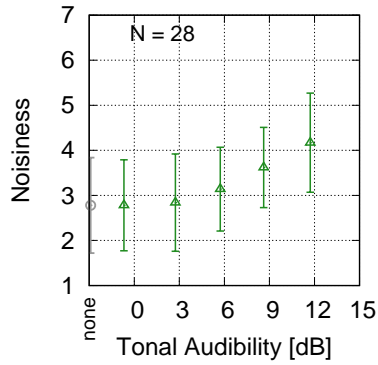
(a) 30 dB, 31.5 Hz



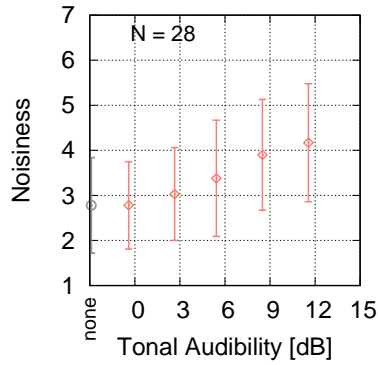
(b) 30 dB, 40 Hz



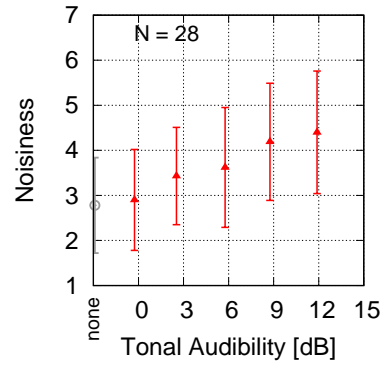
(c) 30 dB, 50 Hz



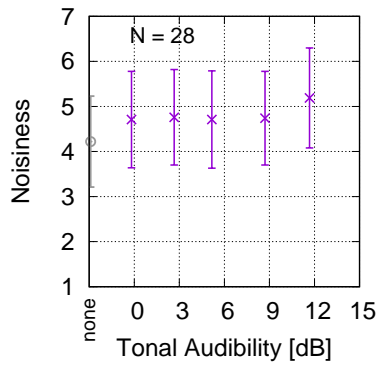
(d) 30 dB, 100 Hz



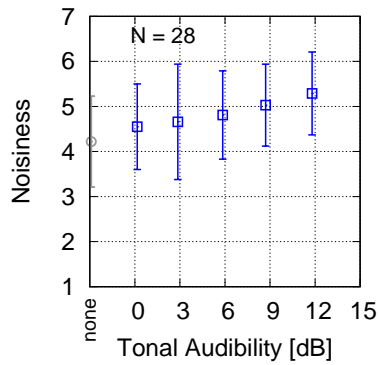
(e) 30 dB, 200 Hz



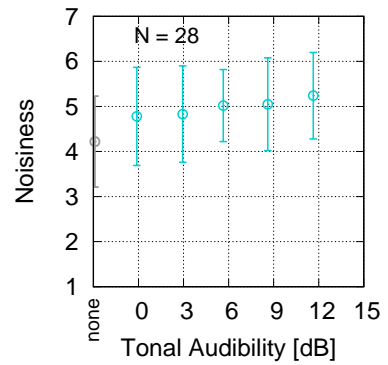
(f) 30 dB, 400 Hz



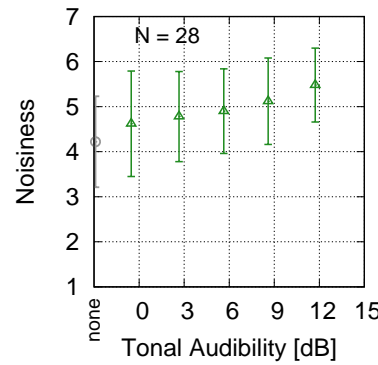
(g) 35 dB, 31.5 Hz



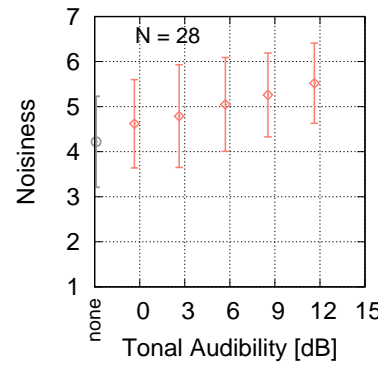
(h) 35 dB, 40 Hz



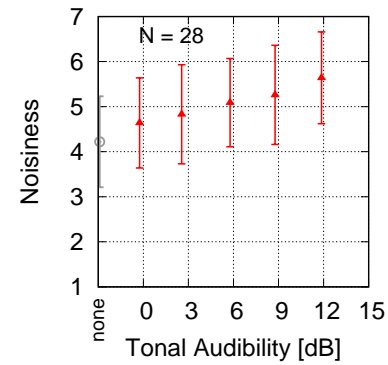
(i) 35 dB, 50 Hz



(j) 35 dB, 100 Hz

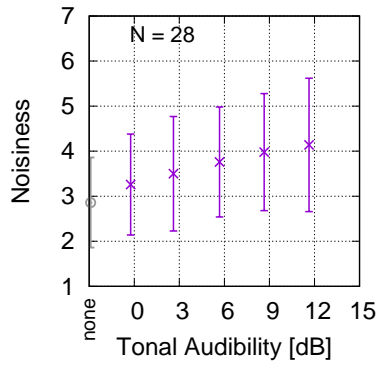


(k) 35 dB, 200 Hz

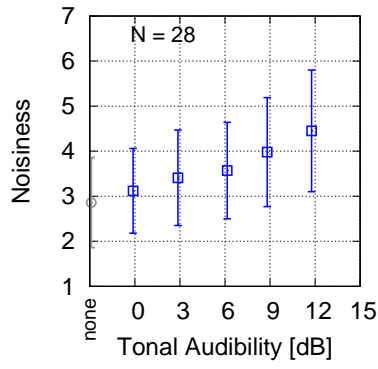


(l) 35 dB, 400 Hz

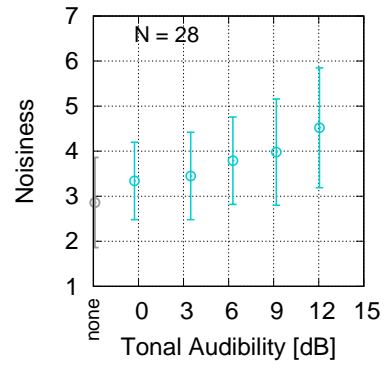
図 5.6: 屋外ノイズ条件



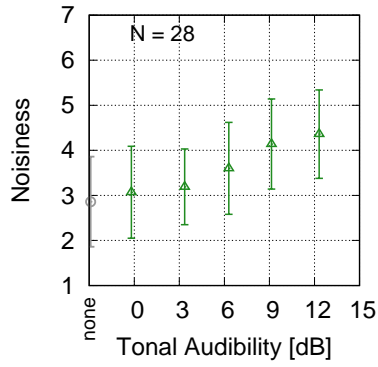
(a) 30 dB, 31.5 Hz



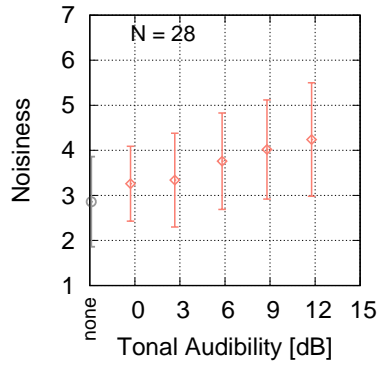
(b) 30 dB, 40 Hz



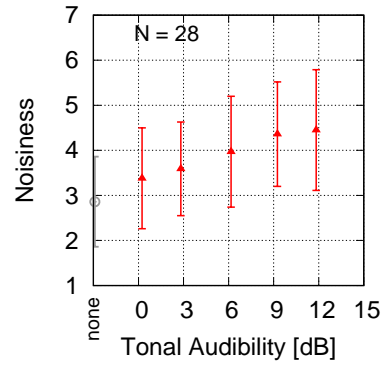
(c) 30 dB, 50 Hz



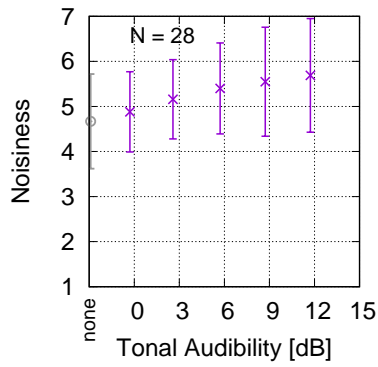
(d) 30 dB, 100 Hz



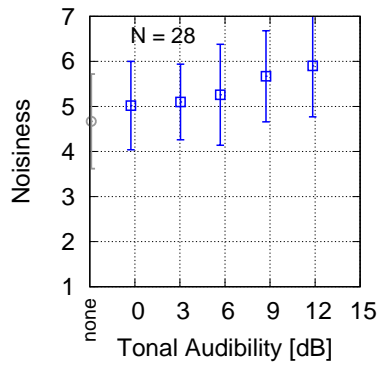
(e) 30 dB, 200 Hz



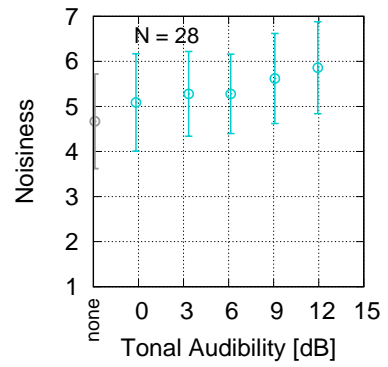
(f) 30 dB, 400 Hz



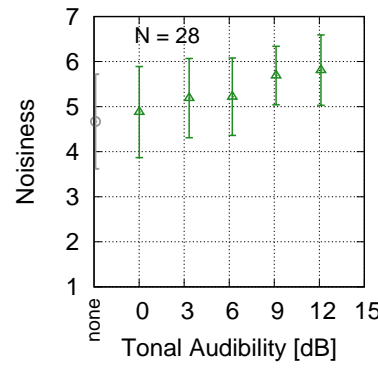
(g) 35 dB, 31.5 Hz



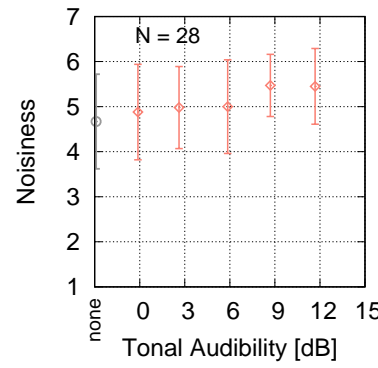
(h) 35 dB, 40 Hz



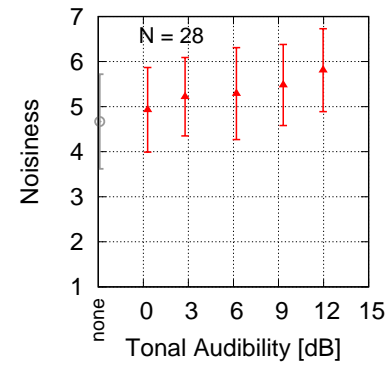
(i) 35 dB, 50 Hz



(j) 35 dB, 100 Hz



(k) 35 dB, 200 Hz



(l) 35 dB, 400 Hz

図 5.7: 屋内ノイズ条件

5.3.2.5 振動感・圧迫感に関する評価

振動感・圧迫感について、各試験音について得られた 28 名 × 2 回の計 58 回答のうち、少しでも振動感を感じる（B：少し感じる＋C：はっきり感じる）という回答の割合と、C：はっきり感じるという回答の割合を求めた。回答の割合と、付加した純音周波数を中心周波数とする 1/3 オクターブバンド音圧レベルの関係を図 5.8～図 5.10 に示す。図中に、ISO 389-7:2005 による聴覚閾値と、聴覚閾値＋10 dB のレベルを示した。また、純音性成分を付加しない広帯域ノイズについても、A 特性音圧レベルのオーバーオール値と、振動感に関する回答の割合の関係を図 5.8 に示す。

純音性成分を含まない広帯域ノイズに対する回答をみると、屋内ノイズ条件では振動感があるという回答があり、試験音の呈示レベルが高いものほど回答率が増加したが、屋外ノイズ条件ではそのような回答はなかった。

純音周波数 100 Hz 以下の条件では、純音性成分の強度が増すと振動感も増加した。ノイズのレベルが異なっても、1/3 オクターブバンド音圧レベルが同程度であれば振動感についての回答率が近い値をとったことから、ノイズ全体ではなく、純音性成分近傍の狭帯域の成分によって振動感が引き起こされていると考えられる。

200, 400 Hz の条件は、純音の強度が増しても振動感には影響しなかった。屋内ノイズ条件では 0.5 程度と約半数の回答があったが、これは純音性成分を含まないノイズに対する回答結果（図 5.8）を考慮すると、純音性成分の寄与ではなくノイズに起因する振動感・圧迫感であると考えられる。

100 Hz 以下の純音を含む条件について、少しでも振動感を感じる割合が 0.5 になるレベル L_{B+C} と純音の最小可聴値の関係を検討した。

31.5, 40, 50 Hz 純音を付加した条件 屋内ノイズ条件では、 L_{B+C} はおよそ閾値＋10 dB であった。屋内ノイズ条件では、純音を付加しないノイズだけでも振動感を生じさせるため、 L_{B+C} は閾値と同程度のレベルだった。高橋は低周波数純音に起因する振動感覚の閾値は、聴覚閾値＋10 dB 程度であると述べており、今回の結果もそれと概ね沿うものとなった。振動感を「少し感じる」－「はっきり感じる」の間のレベル差はおよそ 10 dB であった。

100 Hz 純音を付加した条件 L_{B+C} は閾値よりおよそ 20 dB 高かった。時田ら [51] によれば、振動感・圧迫感は LSL 特性（50 Hz をピークに -12 dB/oct. の傾きをもつ荷重特性）と対応がよいと述べられており、これを考慮すると今回の結果は妥当な値であると考えられる。

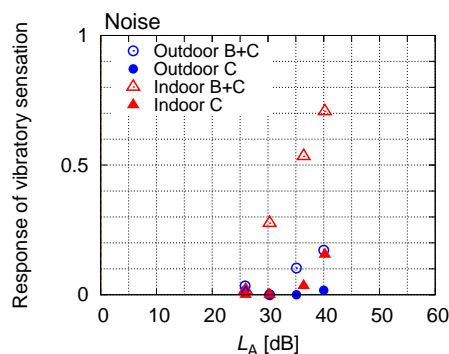
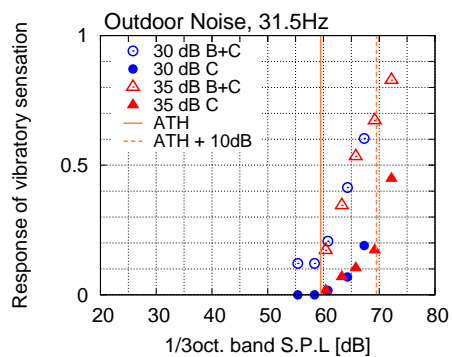
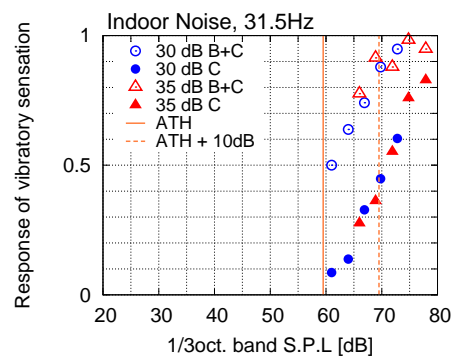


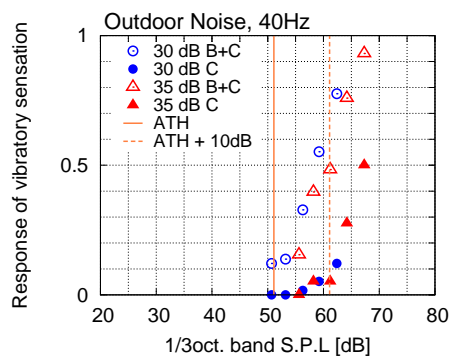
図 5.8: 広帯域ノイズの A 特性音圧レベルと振動感・圧迫感の関係



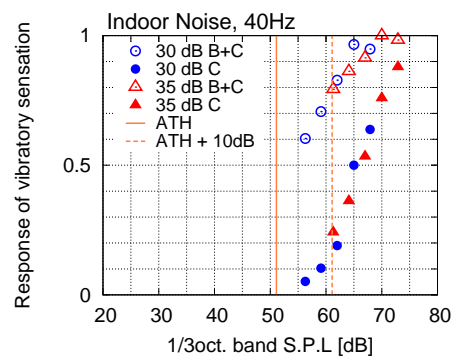
(a) 屋外ノイズ, 31.5 Hz



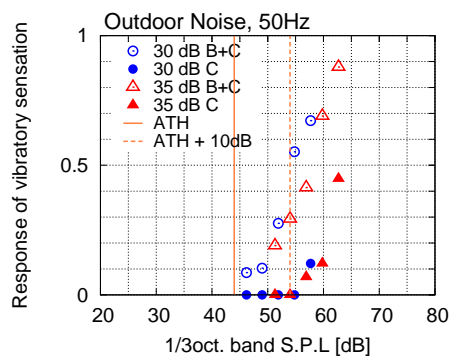
(b) 屋内ノイズ, 31.5 Hz



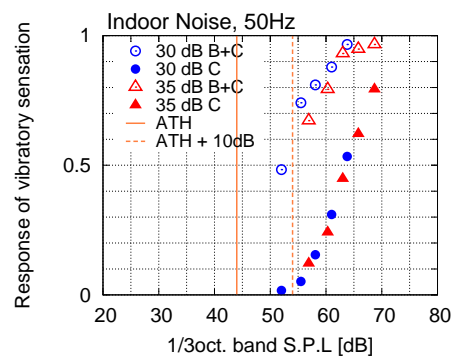
(c) 屋外ノイズ, 40 Hz



(d) 屋内ノイズ, 40 Hz

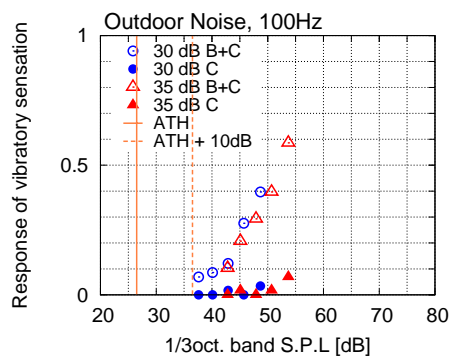


(e) 屋外ノイズ, 50 Hz

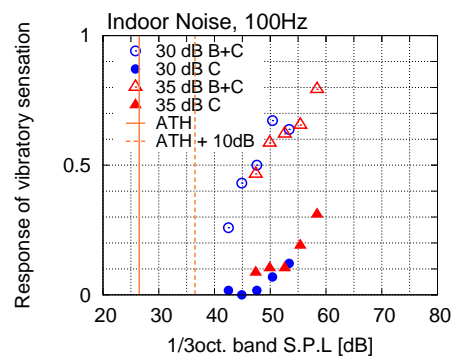


(f) 屋内ノイズ, 50 Hz

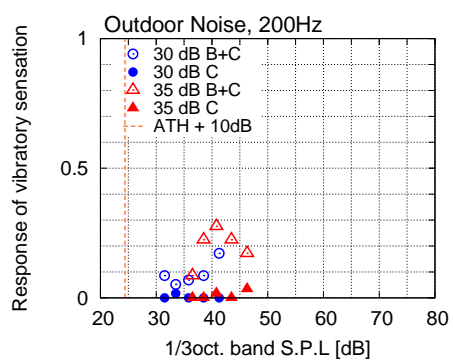
図 5.9: 純音のレベルと振動感・圧迫感の関係-1



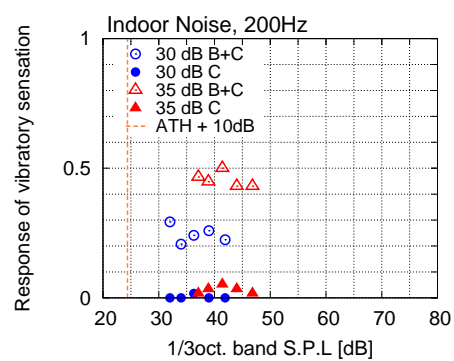
(a) 屋外ノイズ, 100 Hz



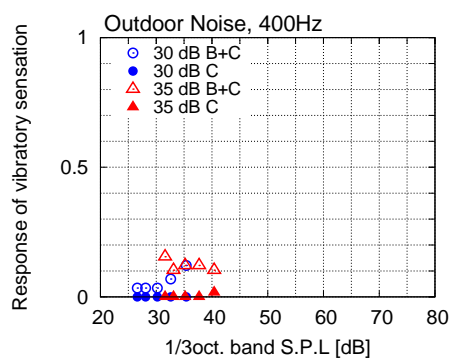
(b) 屋内ノイズ, 100 Hz



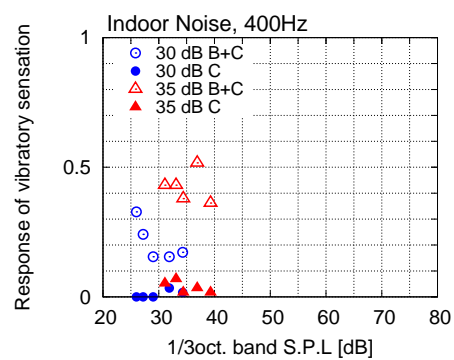
(c) 屋外ノイズ, 200 Hz



(d) 屋内ノイズ, 200 Hz



(e) 屋外ノイズ, 400 Hz



(f) 屋内ノイズ, 400 Hz

図 5.10: 純音のレベルと振動感・圧迫感の関係-2

5.3.3 実験 1 のまとめ

実験 1 では、純音性成分を含む騒音のわずらわしさについて、ベースノイズの周波数特性およびレベルによって傾向の違いがあらわれるかどうか確認することを目的として、わずらわしさ評価および振動感・圧迫感の評価を行った。

わずらわしさ評価において次の知見を得た。

- TA が高くなるとわずらわしさが増加するが、試験音のレベルが高い条件では純音性成分の寄与によるわずらわしさ増加量が小さくなる可能性がある。
- 呈示レベルが低い場合、最小可聴値の影響によって 50 Hz 以下の純音性成分を含む騒音についてわずらわしさが低くなる。
- 試験音のレベルレンジを大きく設定すると、音色に関する詳細な評価が検出しづらくなる可能性がある。

また、低周波数純音を含む音から受ける振動感について、ベースノイズの種類、および純音性成分の周波数とレベルに着目した検討を行い、次の知見を得た。

- 100 Hz 以下の純音性成分を含む音は、振動感を生じさせる可能性がある。
- ベースノイズのレベルが異なっても、純音性成分の絶対レベルが同じであれば、同様の振動感を生じさせる。
- 振動感を感じるようになるレベルは、31.5, 40, 50 Hz 純音では聴覚閾値 + 10 dB 程度であり、既往研究とも整合した。100 Hz 純音は、閾値 + 20 dB 程度だった。

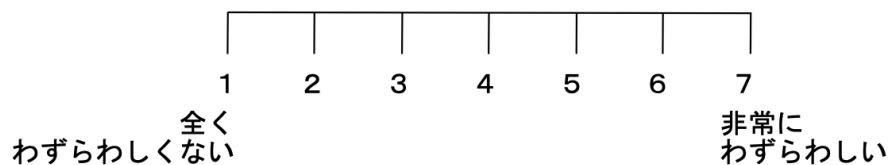
被験者の皆様へ

低周波数純音を含む騒音のわずらわしさに関する実験：実験の手続きについて

◇試験音が10秒間再生されます。音をすべて聞いて、(1)音のわずらわしさと(2)音から受ける振動感について評価してください。

(1) わずらわしさの評価

あなたが夜に就寝しようとしているときに、これらの音がずっとなっていると想定してください。聞こえてくる音のわずらわしさの程度を1～7の数字にわりあててください。



この実験では、「聞こえてくる音の大きさや音色によって、耳障りに感じたり、いやな感覚を覚えたりすること」を総称してわずらわしさと表現しています。

(2) 振動感の評価

音から受ける振動感について、あてはまるものを1つ選んでください。

- A. 感じない
- B. 少し 感じる
- C. 強く 感じる

判断ができれば、2つまとめて口頭で回答してください。(例：5 B，1 Aなど)

➤ 注意事項

◇様々な大きさ・音質の試験音が再生されます。音の特定の部分のみに注目するのではなく、音全体のわずらわしさを判断するようにしてください。

特に、わずらわしさと別に振動感を回答していただきますが、振動感によってわずらわしが増す場合は、それも加味して質問(1)の程度を判断するようにしてください。

◇この実験は、音に対する単純な心理的反応を測ることを目的としています。音の微妙な違いを問う場合もありますが、前後の回答とは独立に、直感で回答してください。

◇頭の位置によって、音の聞こえが変わる可能性があります。実験中は、椅子に深く座り、できるだけヘッドレストを使用してください。

◇長時間の実験となります。途中で休憩をはさみますが、疲れで判断が難しくなったと感じたときには、随時休憩をとりますので、遠慮なくお伝えください。また疑問点などございましたら、いつでも実験者にお尋ねください。

➤ まずは、練習をしていただきます。

1. 日常生活の音に関する以下の項目について、あてはまりの程度を1～6の数字で答えてください。

	項目	全く あてはまらない	どちらかといえば あてはまらない	どちらかといえば あてはまる	よく あてはまる	非常によく あてはまる
1	テレビやオーディオをたまに大音量で鳴らしている人がいると気になる。	1	2	3	4	5
2	物音で、すぐに目が覚める。	1	2	3	4	5
3	近所の人が騒がしいと気になる。	1	2	3	4	5
4	たいていの騒音はすぐに気にならなくなる。	1	2	3	4	5
5	時々、騒音でイライラする。	1	2	3	4	5
6	何かに集中しようとしているときには、たとえば好きな音楽でも邪魔になる。	1	2	3	4	5
7	騒がしいところでは落ち着かない。	1	2	3	4	5
8	周囲の状況にかかわらず集中できる。	1	2	3	4	5
9	睡眠中や作業中に騒がしくされると腹が立つ。	1	2	3	4	5
10	音に対して敏感である。	1	2	3	4	5

2. 普段の就寝時における騒音に関して、差し支えない範囲で以下の設問にお答えください。

2-A 就寝時に気になる騒音はありますか。 [はい ・ いいえ]

2-B それほどのような騒音ですか。

☐ 車 ☐ 鉄道 ☐ 航空機 ☐ 家電などの電化製品の音 ☐ 工事の音

☐ その他（具体的に：_____）

図 5.13: 騒音に関するアンケート

5.4 就寝時を想定した評価実験（実験 2-A, B）

5.4.1 目的

本節では，就寝時を想定した場合において，騒音に含まれる純音性成分の周波数や強度がわずらわしさに及ぼす影響を把握することを目的とする。就寝時を想定した低レベルの試験音として，ベースノイズのレベルをそれぞれ実験 2-A：25 dB，実験 2-B：30 dB にした 2 つの試験音群を用い，2 種類の実験を行った。

5.4.2 実験方法

5.4.2.1 試験音の構成

表 5.4 および表 5.5 に試験音の構成を示す。実験 2-A では 25 dB ベースノイズ，実験 2-B では 30 dB ベースノイズの試験音を用いた。レベル調整したベースノイズに純音を付加し，IEC 61400-11:2012 に定める TA がおよそ 0, 3, 6, 9, 12 dB となるように調整した。純音周波数は，実験 2-A では 40, 50, 100, 200, 400 Hz の 5 水準，実験 2-B ではそれに 31.5 Hz を加えた 6 水準とした。また，比較のため，ベースノイズと同じ周波数特性の広帯域ノイズを，5 dB ステップの 4 水準に調整したものも条件に加えて評価させた。条件数は，実験 2-A で 58 条件，実験 2-B で 68 条件である。

表 5.4: 試験音の構成（実験 2-A）

種類	ノイズ	純音	
	A 特性音圧レベル [dB]	周波数 [Hz]	TA[dB]
屋外ノイズ	25	40, 50, 100, 200, 400	0, 3, 6, 9, 12
	20, 25, 30, 35	なし	-
屋内ノイズ	25	40, 50, 100, 200, 400	0, 3, 6, 9, 12
	20, 25, 30, 35	なし	-

表 5.5: 試験音の構成（実験 2-B）

種類	ノイズ	純音	
	A 特性音圧レベル [dB]	周波数 [Hz]	TA[dB]
屋外ノイズ	30	31.5, 40, 50, 100, 200, 400	0, 3, 6, 9, 12
	25, 30, 35, 40	なし	-
屋内ノイズ	30	31.5, 40, 50, 100, 200, 400	0, 3, 6, 9, 12
	25, 30, 35, 40	なし	-

5.4.2.2 評価方法

本実験ではわずらわしさに関する 7 段階の評定尺度法による評価を行った。前節の実験と同様に「夜に就寝しようとしているときに試験音がずっと鳴り続けている」という状況を想定させ、10 秒間試験音を聴取したあとに 7 段階の数字を口頭で回答させた。

試験音は繰り返し回数 3 回とし、ランダムな順に呈示した。実験は 3 セッションに分けて実施した。

5.4.2.3 実験参加者

実験 2-A, B それぞれについて、30~40 代の男女 20 名が参加した。実験の実施前にオーディオメータを用いて 125 Hz~4 kHz 純音の聴力を測定し、両耳とも全ての帯域で 15 HL 以下であることを確認した。実験前に聴力に関するアンケートを実施し、体調に不具合のないこと、耳に関する病気に罹患していないこと、聴力を損なうような大きな音の環境に日常的には晒されていないことなどを確認した。併せて騒音に関するアンケートを行い、普段の就寝時の騒音環境について、気になる音があるかどうかを書面およびヒアリングで確認した。

全参加者のうち、実験の 3 回のセッションでの回答について、1-2 回目、2-3 回目の相関係数がそれぞれ 0.6 以上となった被験者の回答を採用した。実験 2-A では 18 人、実験 2-B では 17 人の回答を用いて結果の分析を行った。

5.4.3 結果および考察

図 5.14 および図 5.15 に、TA とわずらわしき評価の被験者平均値を示す。全体としては、TA の増加にともなってわずらわしさも増加する傾向にあり、増加の程度は純音周波数によって異なるものもあった。被験者と純音周波数を要因とする分散分析 (Tukey の多重比較) を行い、同じ TA の水準で純音周波数による有意差 (5% 水準) が認められなかったグループを灰色の線で括って示した。

純音周波数による違い 図 5.14(a) 屋外ノイズ 25 dB 条件と (b) 屋内ノイズ 25 dB 条件では、TA = 3 dB 以上で純音周波数による有意差が認められ、40, 50 Hz 純音の条件と、100 Hz 以上の純音の条件では、後者の方がわずらわしさが高かった。同図 (a) では、100, 200, 400 Hz の純音周波数の条件間にも有意差が認められる組み合わせがあった。屋内ノイズ条件では 100 Hz 以上の条件では有意差はみられなかった。

屋外ノイズ 30 dB 条件でも、100 Hz を境に傾向がわかれ、純音周波数が高いほどわずらわしさが高くなる傾向だった。屋内ノイズ 30 dB 条件は、純音周波数による有意差は認められなかった。

TA による違い 図 5.16 および図 5.17 に、ベースノイズの種類および純音周波数別の回答の平均値を示した。グラフの左端には純音性成分を付加しないベースノイズに対する評価の平均値 (none と表示) をプロットした。エラーバーは標準偏差を示す。TA を要因とする分散分析 (Tukey の多重比較) を行い、純音性成分を含まない条件に対し有意差 (5 % 水準) が認められた条件については、プロットの右肩にアスタリスクで示した。また、TA に関して有意差が認められなかった条件は黒線で括って表示した。

ベースノイズ 25 dB に 40, 50 Hz 純音を付加した条件では、TA=3 dB または 6 dB 以下ではベースノイズのみの条件と有意差がみられなかった。TA は、純音のエネルギーと臨界帯域内のマスキングエネルギーの相対関係から算出され、絶対値を考慮しないため、ノイズレベルが低い領域では純音のレベルが低くなり、純音の最小可聴値に近い値となる。これにより、TA の値としては可聴であることが期待されても、音圧レベルの絶対値から考えると聴取が困難になると考えられる。

TA の差が 3 dB の条件（隣り合う条件）間では有意差がみられないものが多いが、6 dB 以上異なると多くの条件で有意差が認められた。ただし、30 dB のベースノイズに 400 Hz 純音を付加したものは、TA=6~12 dB で有意差がみられなかった。これはわずらわしさ評価が全体的に高く、TA が高い条件で頭打ちとなったと考えられる。内観報告によれば「高い音が混ざっているものは音が小さくても気になる」という所見が多く聞かれたが、この所見と対応するデータであると考えられる。

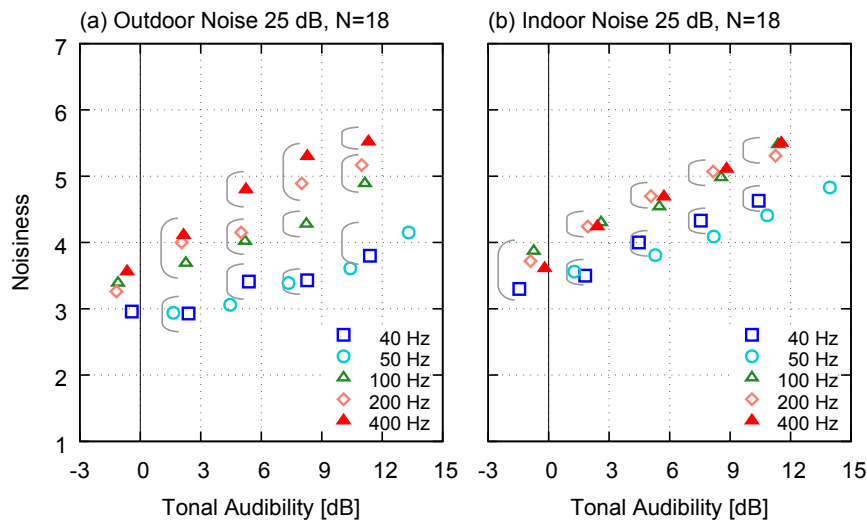


図 5.14: 結果 (25 dB 条件)

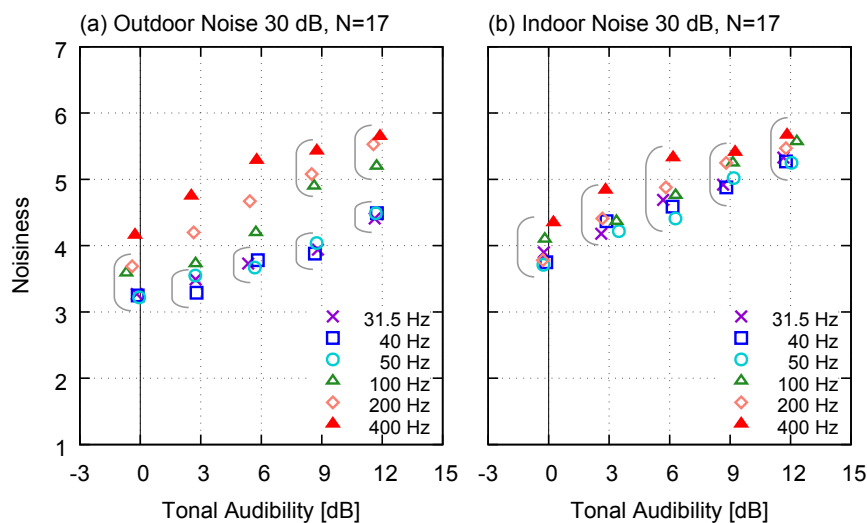
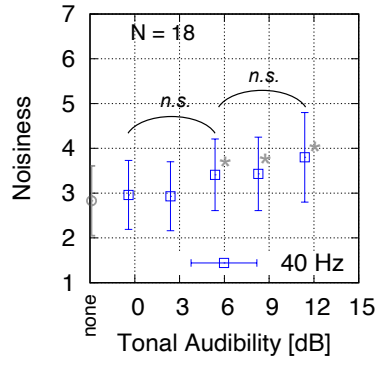
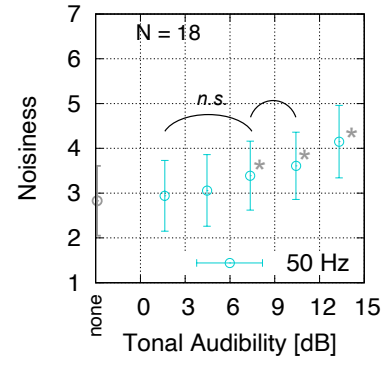


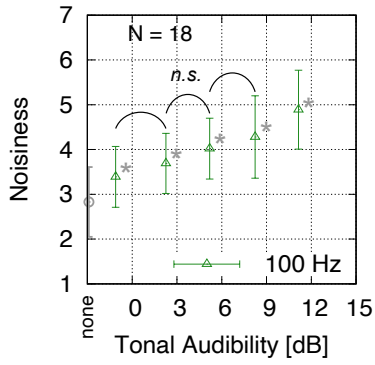
図 5.15: 結果 (30 dB 条件)



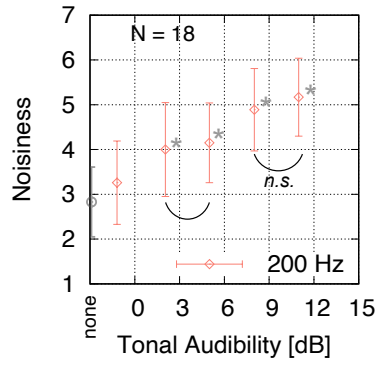
(a) 屋外ノイズ, 40 Hz



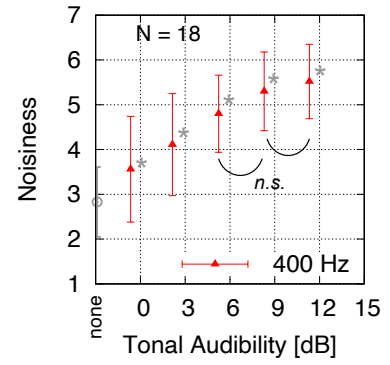
(b) 屋外ノイズ, 50 Hz



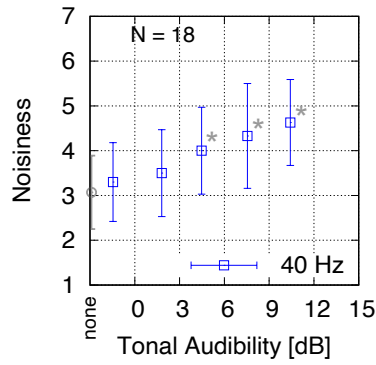
(c) 屋外ノイズ, 100 Hz



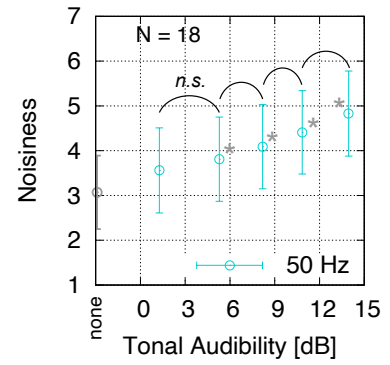
(d) 屋外ノイズ, 200 Hz



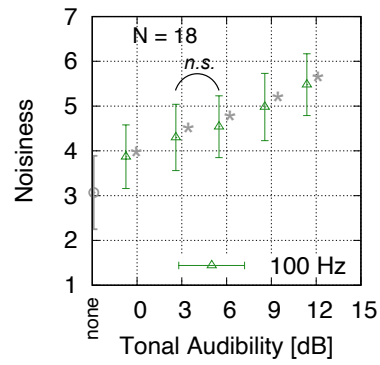
(e) 屋外ノイズ, 400 Hz



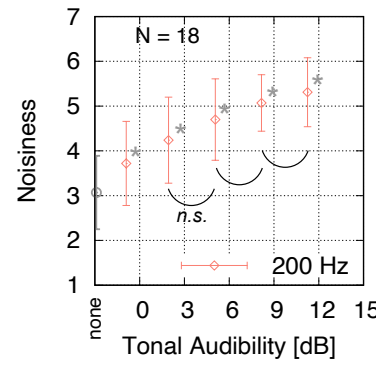
(f) 屋内ノイズ, 40 Hz



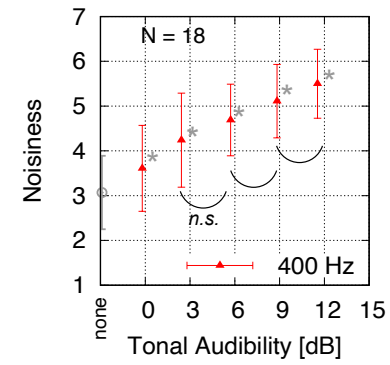
(g) 屋内ノイズ, 50 Hz



(h) 屋内ノイズ, 100 Hz

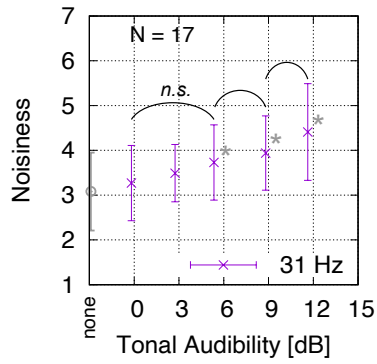


(i) 屋内ノイズ, 200 Hz

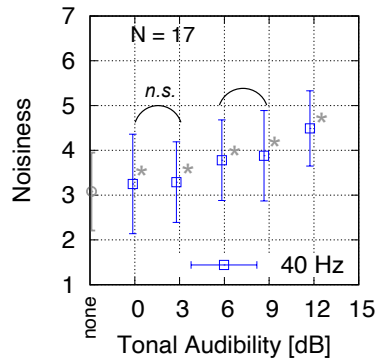


(j) 屋内ノイズ, 400 Hz

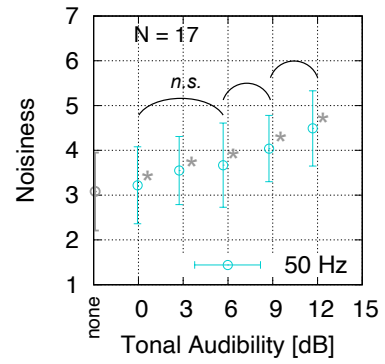
図 5.16: ベースノイズ 25 dB 条件



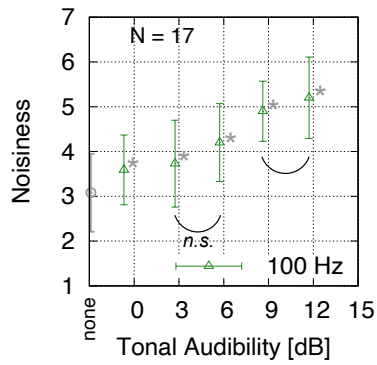
(a) 屋外ノイズ, 31.5 Hz



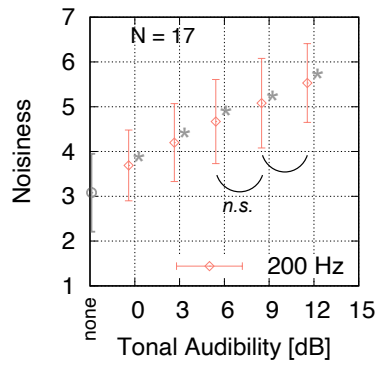
(b) 屋外ノイズ, 40 Hz



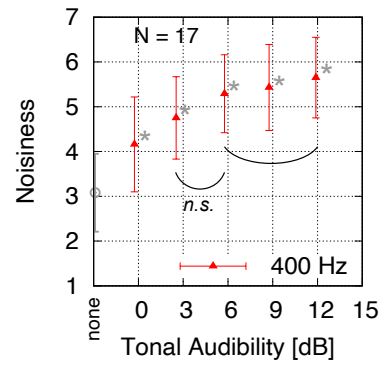
(c) 屋外ノイズ, 50 Hz



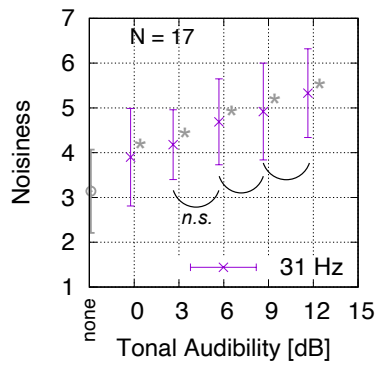
(d) 屋外ノイズ, 100 Hz



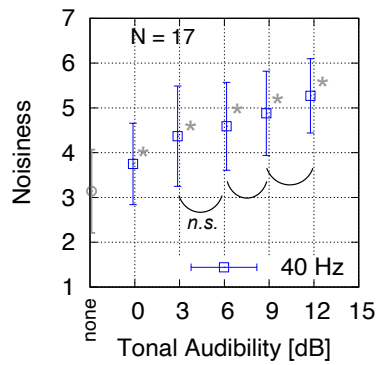
(e) 屋外ノイズ, 200 Hz



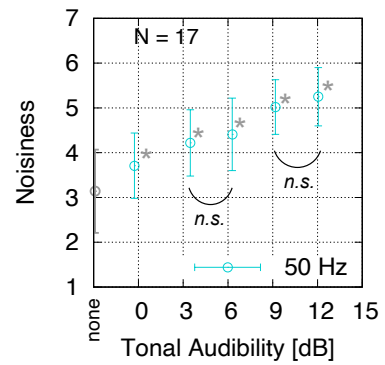
(f) 屋外ノイズ, 400 Hz



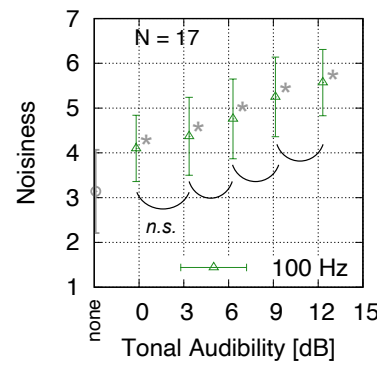
(g) 屋外ノイズ, 31.5 Hz



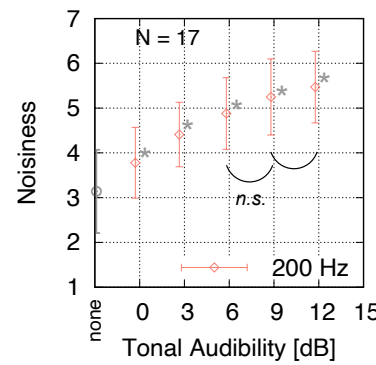
(h) 屋外ノイズ, 40 Hz



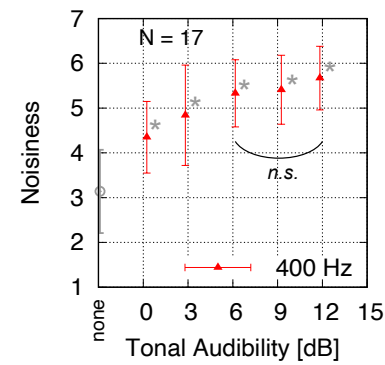
(i) 屋外ノイズ, 50 Hz



(j) 屋外ノイズ, 100 Hz



(k) 屋外ノイズ, 200 Hz



(l) 屋外ノイズ, 400 Hz

図 5.17: ベースノイズ 30 dB 条件

5.4.3.1 騒音評価における Tonal Adjustment に関する検討

広帯域ノイズは、レベルとわずらわしさに線形の関係が認められ、純音性成分を含むノイズはそれよりもわずらわしさが高かった。この7段階尺度でのわずらわしきの増分を、次に述べる方法でラウドネス指標におけるレベル相当値として評価した。

Brambilla and Pedrielli(1996) [44] と同様の方法で、純音性成分によるわずらわしきの増加量をラウドネスレベルおよび A 特性音圧レベルで評価した。ISO1996-2:2017 では、騒音が純音性成分を含むとき、TA の値に応じて Tonal Adjustment [dB] を加えて評価する方法が定められているが [60]、今回算出する量がそれと同等であることから、今後 Tonal Adjustment と呼称する。算出方法は次の通りである。

図 5.18 は、屋外ノイズ 30 dB をベースノイズとして 400 Hz 純音を付加したときの、A 特性音圧レベル L_A とわずらわしきの関係を示している。ここで、図中の丸のプロットは、ベースノイズと同じ周波数特性の試験音を、音圧レベルを変えて呈示したもののわずらわしき評価値である。一般に、広帯域ノイズのわずらわしきやうるさは、ラウドネスレベルや A 特性音圧レベルと線形の関係のみたすといわれているが、今回の実験でもその傾向がみられた。広帯域ノイズに対する評価値を線形回帰し、レベルとわずらわしきの関係を求める。

次に、純音性成分を含む騒音のわずらわしき評価値から、「同じわずらわしきを与える広帯域ノイズのレベル（図中の L^* ）」を回帰線を用いて算出する。ここで算出されたレベルから、その試験音を録音・分析して得られたレベル L_s を引いたものを Tonal Adjustment ΔL とする。

$$\Delta L = L^* - L_s \quad (5.1)$$

図 5.19 および 5.21 に、試験音のレベル ($LL(Z), LL(M), L_A$) とわずらわしきの関係を示す。図中の白丸は、ベースノイズと同じ周波数特性の広帯域ノイズに対する評価値である。純音性成分を含まないベースノイズに対する評価値である。レベルと評価値に線形の関係が認められ、その回帰線も併せて示した。純音性成分を含む試験音の評価は、いずれも回帰線（純音性成分を含まない広帯域ノイズのレベルから予測されるわずらわしき）よりも高く、純音性成分が含まれることによって、同じレベルの広帯域ノイズよりもわずらわしきが増加していることがわかる。また、(a) $LL(Z)$ 、(c) L_A による評価では、純音性成分の強度が強くなったときに試験音のレベル L_s が高くなり、特に純音周波数が 40、50 Hz の条件でこの傾向が顕著である。これについては後で詳しく述べる。

ここから、式 5.1 を用いて Tonal Adjustment を算出した。結果を図 5.20 および図 5.22 に示す。また、各図 (c) には、参考として ISO1997-2:2017 に定められている Tonal Adjustment も示した。大局的には、TA が高くなると Tonal Adjustment も増加する傾向だった。

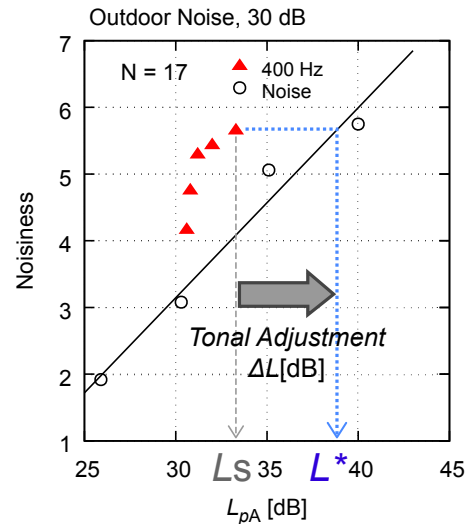


図 5.18: Tonal Adjustment の算出

実験 2-A：ベースノイズ 25 dB 条件

Tonal Adjustment は、ラウドネスレベルでは最大で 14 phon、A 特性音圧レベルでは最大で 6 dB 程度だった。

純音周波数による違い 純音周波数の高い条件ほど、Tonal Adjustment が高くなった。特に屋内ノイズ条件で値の差が大きい。7 段階評価における周波数別の傾向と同様の傾向が見られた。屋内ノイズ条件を $LL(M)$ で評価したものが最も周波数別のばらつきが小さかった。

ベースノイズの周波数特性による違い ラウドネスレベルでの評価に関しては、屋内ノイズ条件では 40, 50 Hz 純音の条件で値が低い。これは低周波帯域におけるレベルの低い屋内ノイズ条件で、閾値による影響が強くなったことが要因として考えられる。

評価指標による違い 40, 50 Hz 純音の $TA=9$ dB 以上の条件については、 $LL(M)$ の方が $LL(Z)$ よりも Tonal Adjustment が高く、全体に単調な増加傾向がみられた。これは、 TA が高い条件で試験音の $LL(Z)$ が急に増えることに起因するものである。それ以外の周波数・ TA の条件では、 $LL(Z)$ 、 $LL(M)$ は同様の値をとった。 L_A による評価は、最大で 6 dB 程度であり、ISO 1996-2:2017 に記載されている値と同等であった。屋内ノイズに 40, 50 Hz の低周波数純音を含む騒音では、 $TA = 6$ dB で Tonal Adjustment が最大になり、その後減少する傾向だった。

実験 2-B：ベースノイズ 30 dB 条件

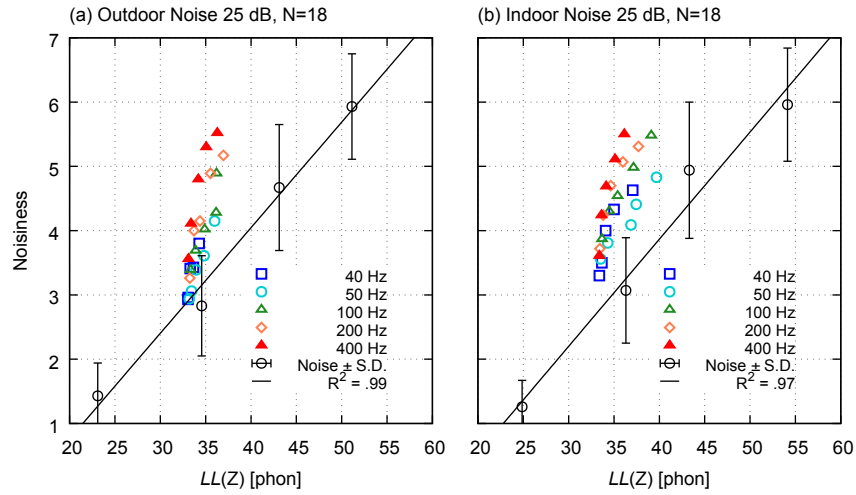
Tonal Adjustment は、ラウドネスレベルでは最大で 12 phon、A 特性音圧レベルでは最大で 6 dB 程度だった。ラウドネスレベルでの Tonal Adjustment の平均値は実験 2-A よりも 2 phon 低かった。

純音周波数による違い 純音周波数の高い条件ほど、Tonal Adjustment が高くなるのは実験 A と同様であった。実験 B では純音周波数の条件と 31.5 Hz も含まれているが、屋外ノイズについては 40, 50 Hz と同じ傾向だった。屋内ノイズでは、ラウドネスレベルでの Tonal Adjustment が、40, 50 Hz 条件と異なり横ばいであるが、これは試験音のレベル S_s が高くなることに起因する。

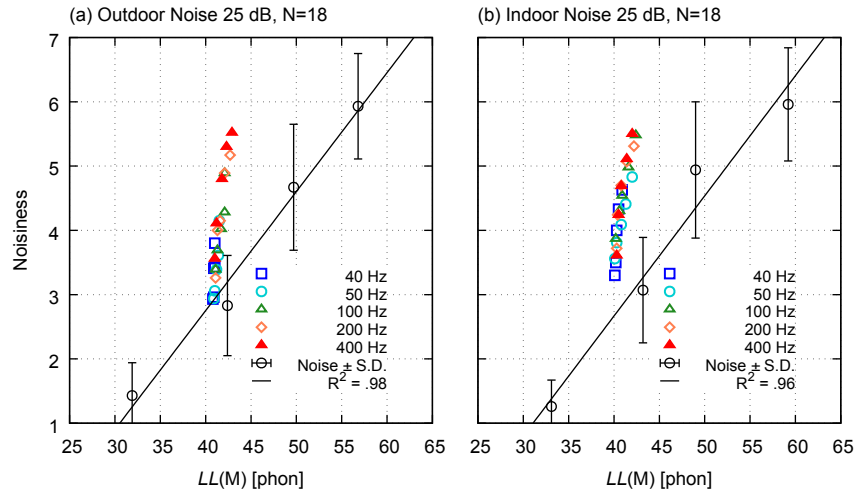
評価指標による違い $LL(Z)$ 、 $LL(M)$ は、いずれの条件においても同様の値をとった。 L_A による評価は、最大で 6 dB 程度であり、ISO 1996-2:2017 に記載されている値と同等であった。

5.4.4 実験 2 のまとめ

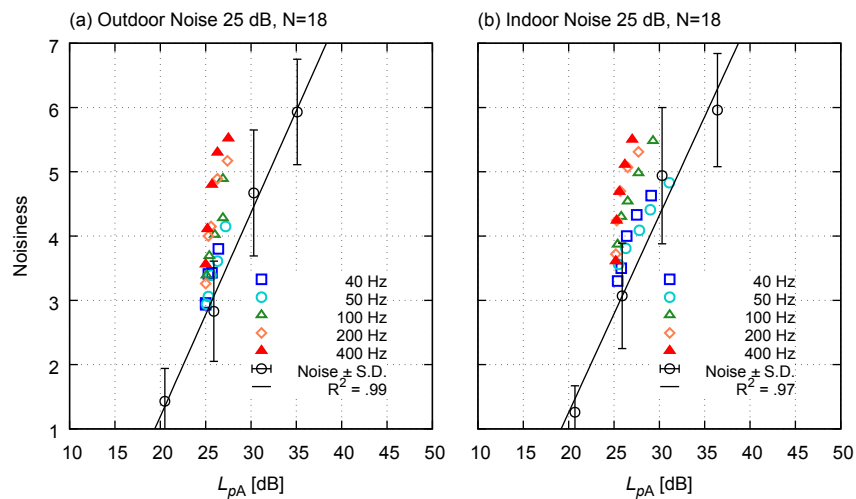
就寝時を想定した条件としてベースノイズのレベルを 25, 30 dB の 2 水準に設定した試験音について、わずらわしさの評価実験を行い、わずらわしさの増分を Tonal Adjustment として評価し TA との関係で整理した。既往研究での報告や実験 1 の結果から、呈示レベルが異なると Tonal Adjustment の値に差が出ると考えられたが、呈示レベルが高い方が Tonal Adjustment の値がやや低くなり、既往の報告と同様の傾向を示した。評価指標によって TA と Tonal Adjustment の関係が異なったが、これについては 5.6 節で詳しく検討する。また、純音周波数が高いほど Tonal Adjustment の値が大きくなる傾向だった。この要因の一つとして、低周波数領域での最小可聴値が影響していると考えられた。



(a) Zwicker ラウドネスレベル

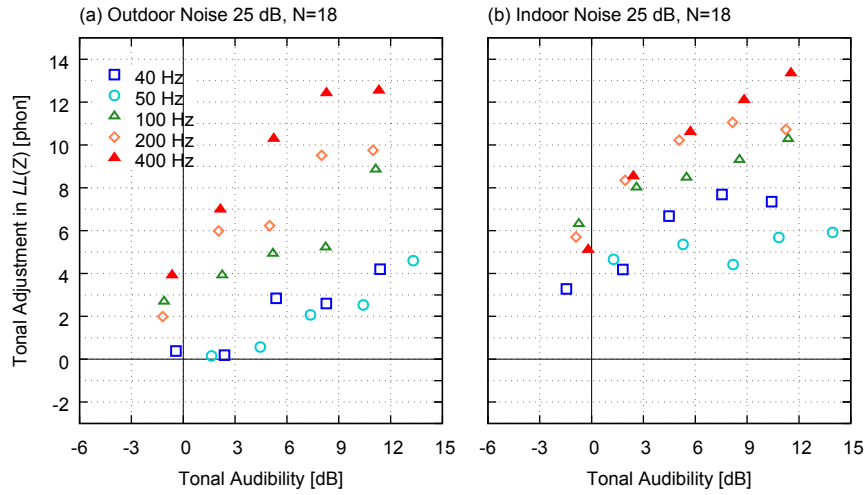


(b) Moore-Glasberg ラウドネスレベル

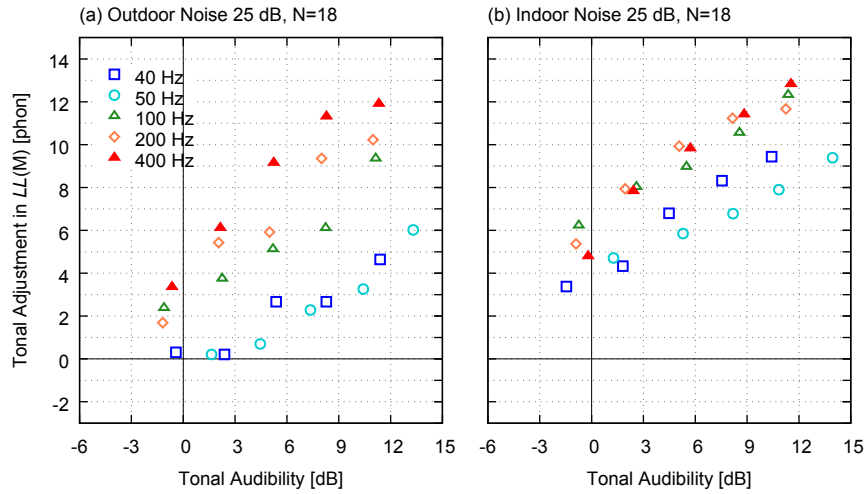


(c) A 特性音圧レベル

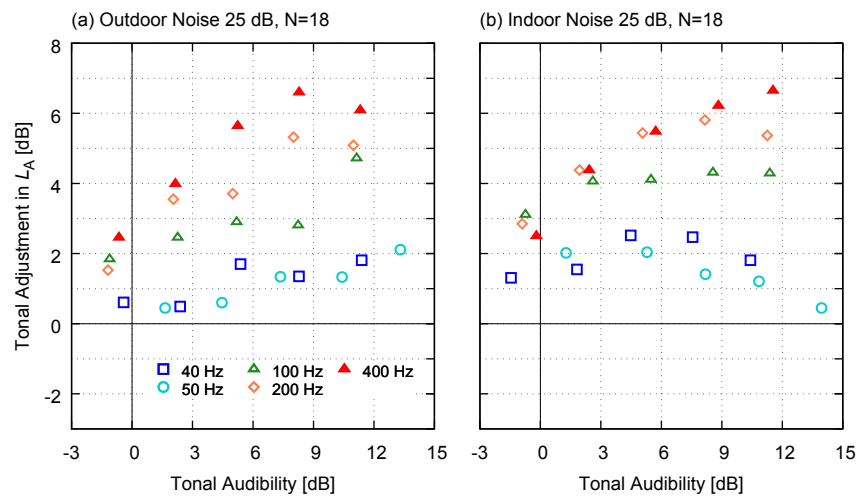
図 5.19: わずらわしさとラウドネス指標の関係 (ベースノイズ 25 dB 条件)



(a) Zwicker ラウドネスレベル

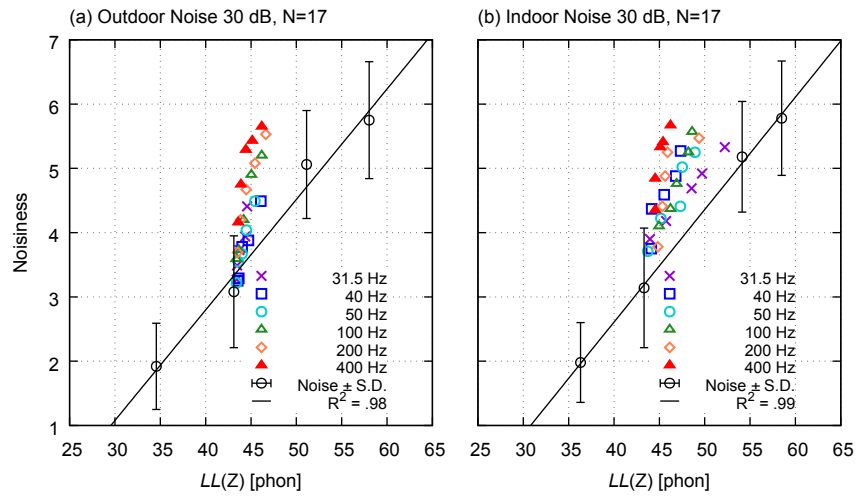


(b) Moore-Glasberg ラウドネスレベル

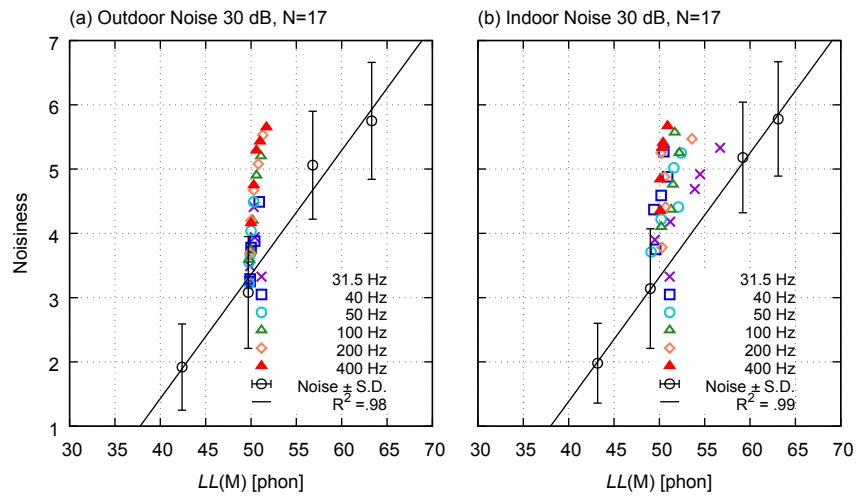


(c) A 特性音圧レベル

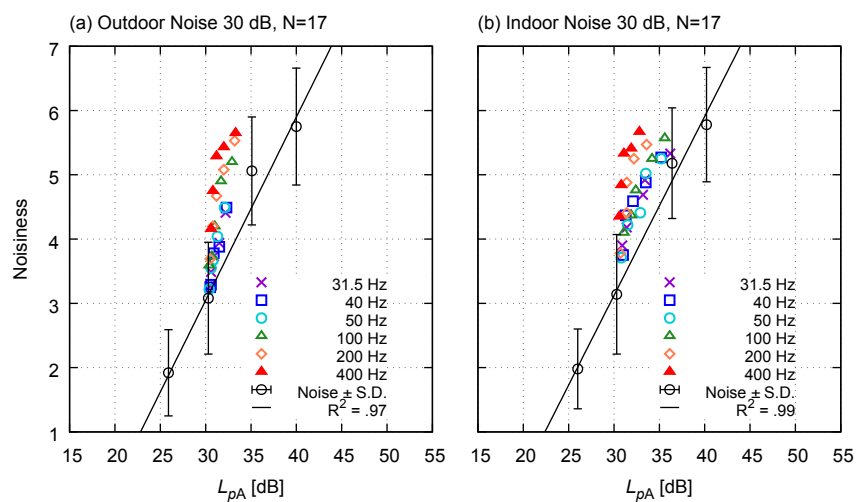
図 5.20: TA と Tonal Adjustment の関係 (ベースノイズ 25 dB 条件)



(a) Zwicker ラウドネスレベル

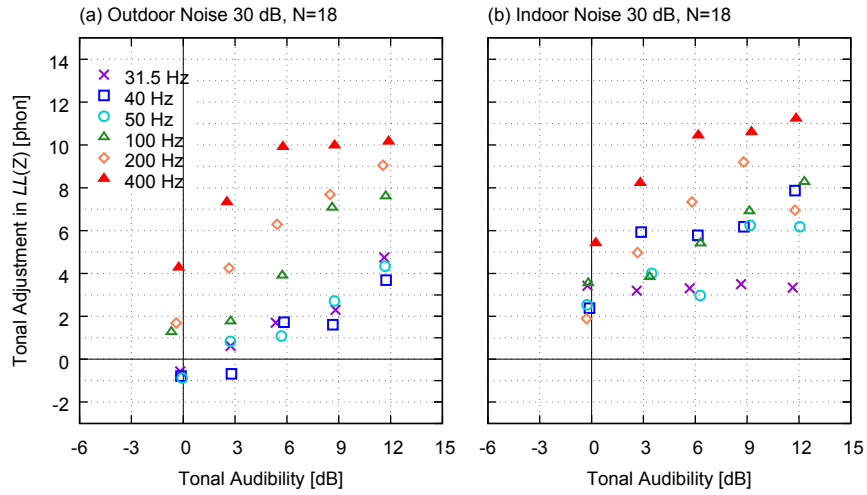


(b) Moore-Glasberg ラウドネスレベル

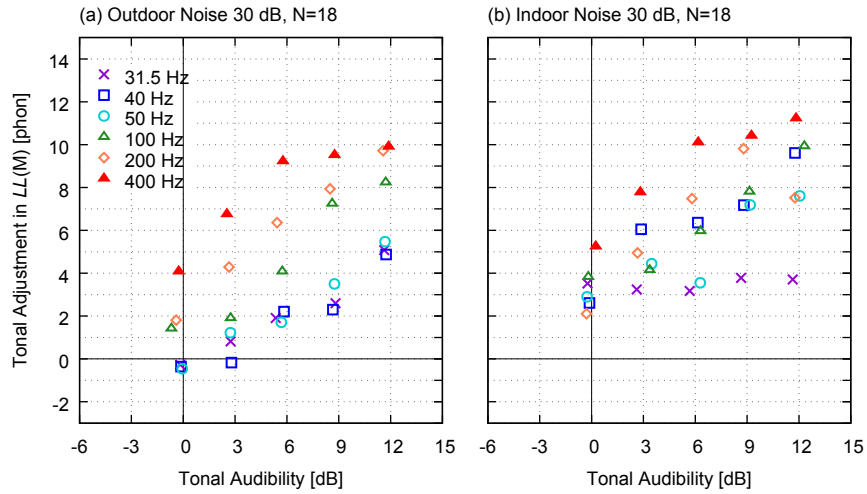


(c) A 特性音圧レベル

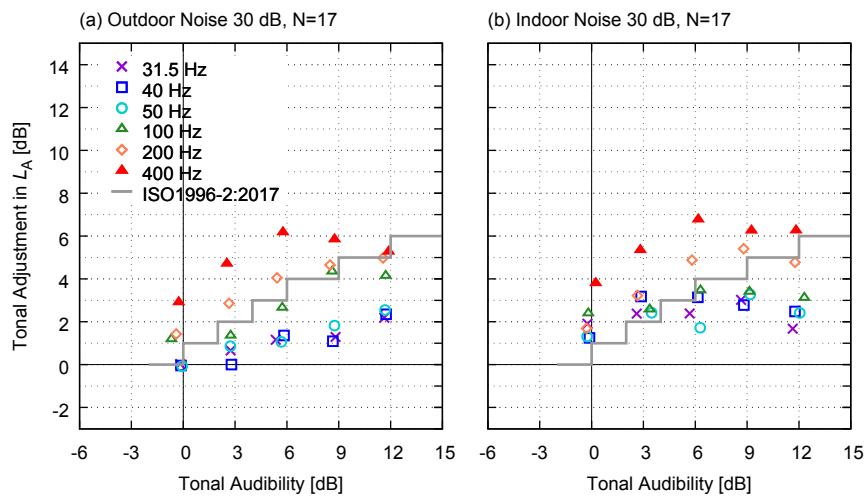
図 5.21: わずらわしさとラウドネス指標の関係 (ベースノイズ 30 dB 条件)



(a) Zwicker ラウドネスレベル



(b) Moore-Glasberg ラウドネスレベル



(c) A 特性音圧レベル

図 5.22: TA と Tonal Adjustment の関係 (ベースノイズ 30 dB 条件)

5.5 日中を想定した評価実験（実験 3）

5.5.1 目的

呈示レベルや聴取状況の想定が異なると、純音性成分がわずらわしさに及ぼす影響が変化する可能性が考えられる。本節では、このことを明らかにすることを目的として、日中の聴取を想定した呈示レベルを設定してわずらわしさ評価を行い、実験 2-A, B で得られた結果との差異を検討した。

5.5.2 実験方法

5.5.2.1 試験音の構成

試験音の構成を表 5.6 に示す。日中、住宅での聴取を想定し、ベースノイズのレベルを 35 dB とし、そこに TA がおよそ 0, 3, 6, 9, 12 dB となるよう純音を付加した。試験音の継続時間は 10 秒とした。実験は 3 セッションにわけて実施した。試験音の繰り返し回数は 3 回とし、セッション内でランダムな順に呈示した。

表 5.6: 試験音の構成

種類	ノイズ	純音	
	A 特性音圧レベル [dB]	周波数 [Hz]	TA[dB]
屋外ノイズ	35	40, 50, 100, 200, 400	0, 3, 6, 9, 12
	30, 35, 40, 45	なし	none
屋内ノイズ	35	40, 50, 100, 200, 400	0, 3, 6, 9, 12
	30, 35, 40, 45	なし	none

5.5.2.2 評価方法

本実験ではわずらわしさに関する 7 段階の評定尺度法によって評価した。「日中、居間でくつろいでいるときに、再生される音がずっと鳴り続けている」という状況を想定させた。評価の尺度は前節と同様の 7 段階尺度とし、試験音を聞き終わったあとに、試験音のわずらわしさを 1 から 7 の数字に割り当てて回答させた。

5.5.2.3 実験参加者

被験者は 30～40 代の男女 20 名である。実験に先立って聴力検査を実施し、125 Hz から 4 kHz について、聴力が両耳とも 15 HL 以下であることを確認した。また、書面のアンケートにより体調不良のないこと、耳に関する病気に罹患していないこと、聴力を損なうような大きな音に日常的にさらされる環境にないことなどを確認した。あわせて、日中に気になる騒音があるかどうかを、書面とヒアリングにより確認した。回答の担保のため、3 回のセッションでの回答について、1-2 回目と 2-3 回目の相関が 0.6 以上だった 16 人について結果を分析した。

5.5.3 結果および考察

TA と 7 段階評価の被験者 16 名分の平均値の関係を図 5.23 に示す。

同じ TA の水準で、純音周波数による有意差をみたところ、屋外ノイズでは 400 Hz と 200 Hz の試験音で他の純音周波数の試験音よりもわずらわしさが有意に高かった。100 Hz 以下の条件では有意差は見られなかった。屋内ノイズでは、5 水準すべての TA で純音周波数による差異はみられなかった。実験 2-A, B では、屋外ノイズをはじめとする低周波領域のエネルギーの低い試験音については、50 Hz 以下の低周波数純音を付加した条件のわずらわしさが低かったが、今回の試験音はレベルが高かったために最小可聴値の影響が少なく、40, 50 Hz の条件も他の純音周波数の条件と近い回答値になったと考えられる。

純音周波数ごとの結果は図 5.24 に示す。図中のエラーバーは標準偏差を示す。グラフ左端 (none と付記) には、純音性成分を付加しない、35 dB のベースノイズに対する評価値を示した。純音性成分を含まない条件と比べて有意差が認められたデータ点にはアスタリスクを付して示した。TA の条件の違いによる有意差がみられなかった試験音については黒線で括弧で示した。

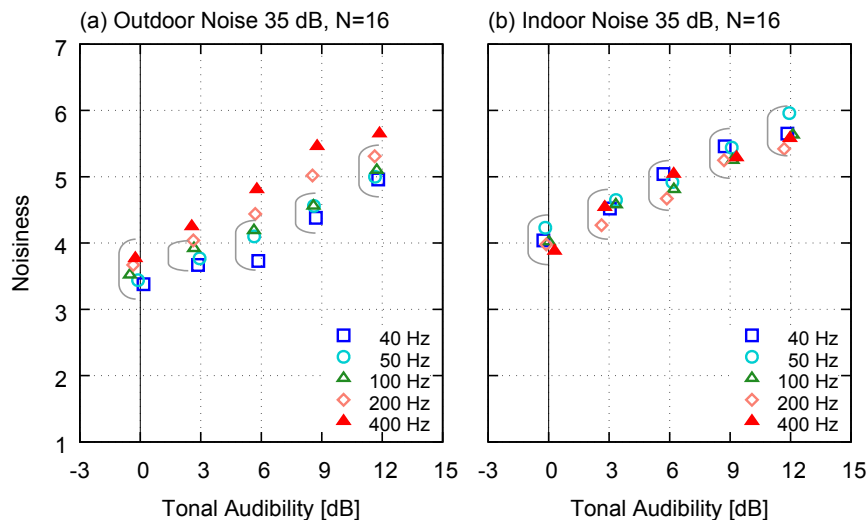


図 5.23: TA とわずらわしさ評価の関係 (35 dB 条件)

5.5.3.1 Tonal Adjustment の検討

前節と同様に Tonal Adjustment を算出した。結果を図 5.26 に示す。Tonal Adjustment の値は、ラウドネスレベルでの評価では TA=0 dB のときにおよそ 0 phon で、TA の増加に伴って単調に増加し、TA=12 dB で最大 8 phon だった。A 特性音圧レベルでの評価では、屋外ノイズの場合は純音周波数 200 Hz 以上の条件では TA=9 dB から横ばい、屋内ノイズの場合は全ての純音周波数で TA=6 dB から横ばいまた減少傾向となり、最大で 5 dB であった。

実験 2-A, B：就寝時を想定した実験との比較

実験 3 は、就寝時を想定した実験 2-A, B と呈示レベルおよび想定する状況が異なる。この差異が結果に及ぼす影響について考察する。

純音周波数による傾向 屋外ノイズでは、400 Hz 条件で最も Tonal Adjustment が高くなる傾向は同じだった。一方屋内ノイズでは、実験 2-A, B で純音周波数が高いほど Tonal Adjustment が高くなる傾向だったが、実験 3 では同傾向はみられなかった。この要因として、試験音のレベルが高いと、50 Hz 以下の低周波数純音性成分の聴取に純音の最小可聴値がおよぼす影響が小さくなるためだと考えられる。

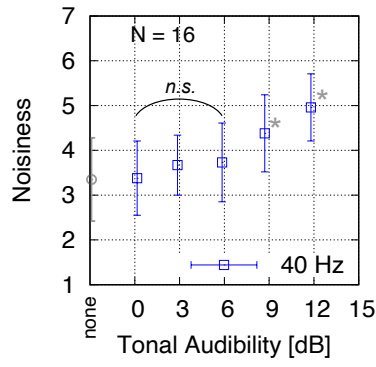
試験音のレベルの違いによる影響 呈示レベルが高くなると、Tonal Adjustment は小さくなる傾向だった。閾値の影響がないと考えられる 400 Hz 条件では、ベースノイズのレベルが 25, 30, 35 dB の場合の Tonal Adjustment の最大値 (TA=12 dB) がラウドネスレベルでそれぞれ 12, 10, 8 phon であり、やや小さくなる傾向だった。

TA = 0 dB のときの Tonal Adjustment の値をみると、屋外ノイズ条件では、どの呈示レベルでもおよそ 0 phon だが、屋外ノイズ条件では、25, 30 dB 条件 (実験 2-A, B) では 0 phon より高い。一方で 35 dB 条件ではノイズの周波数特性によらず 0 phon だった。

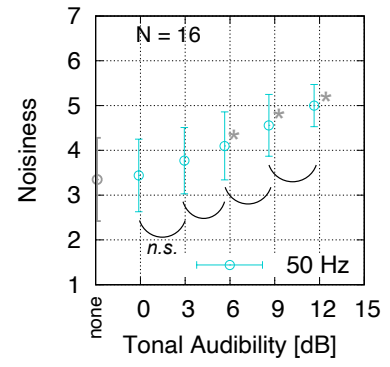
5.5.4 実験 3 のまとめ

試験音の呈示レベルや想定する状況によって純音性成分がわずらわしさに及ぼす影響が変化するかどうかを調べることを目的とし、日中の聴取を想定したベースノイズ 35 dB 条件で、実験 2-A, B (就寝時想定) と同様の検討を行った。わずらわしさの増分を Tonal Adjustment で評価したところ、その値は実験 2-A, B よりも低くなった。また、純音周波数による違いについては、屋外ノイズ条件では純音周波数が高くなるほどわずらわしさが高くなる傾向がみられたが、屋内ノイズ条件では有意差はみられなかった。これは実験 2-B と同様の結果であるが、屋外ノイズ条件における周波数間の差は、実験 3 での結果の方が小さかった。

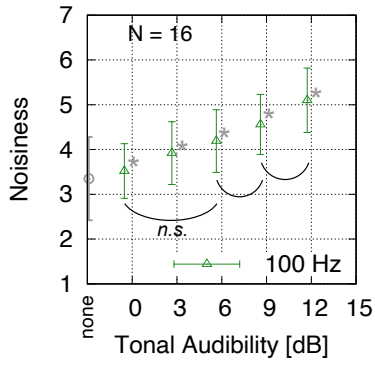
Tonal Adjustment の値および周波数間の差異の両方から、試験音のレベルが高いほど、純音性成分がわずらわしさに及ぼす影響が小さくなる傾向がみられた。これは、Brambilla and Pedrielli による既往の検討 [44] と同様の結果であると言える。



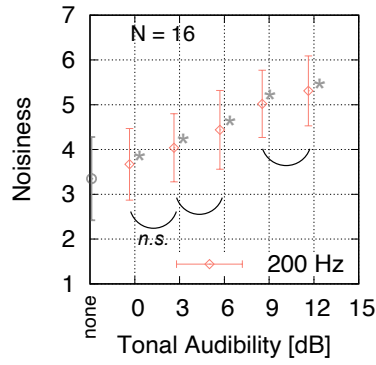
(a) 屋外ノイズ, 40 Hz



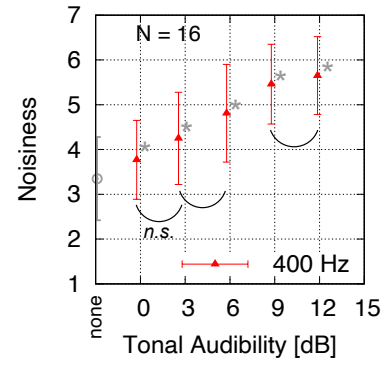
(b) 屋外ノイズ, 50 Hz



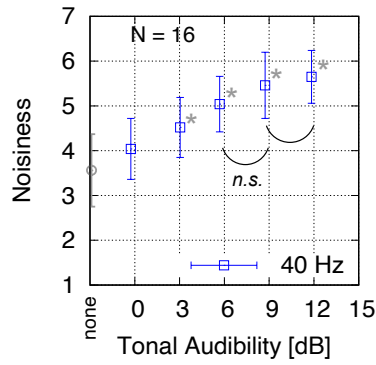
(c) 屋外ノイズ, 100 Hz



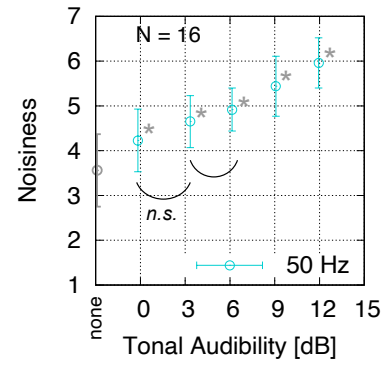
(d) 屋外ノイズ, 200 Hz



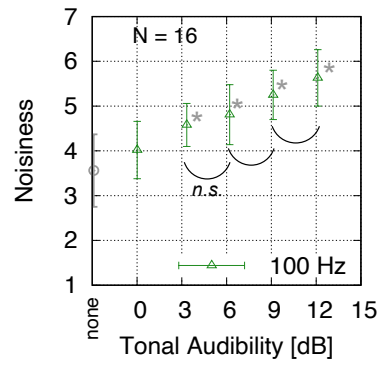
(e) 屋外ノイズ, 400 Hz



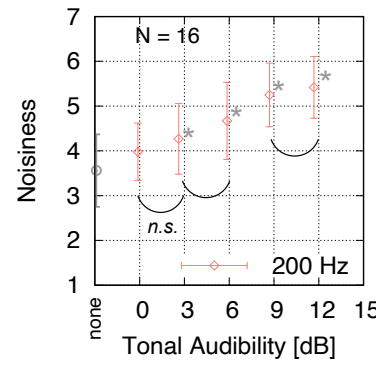
(f) 屋内ノイズ, 40 Hz



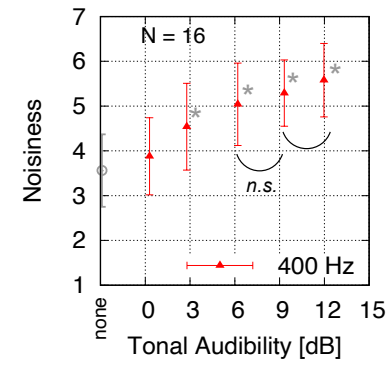
(g) 屋内ノイズ, 50 Hz



(h) 屋内ノイズ, 100 Hz

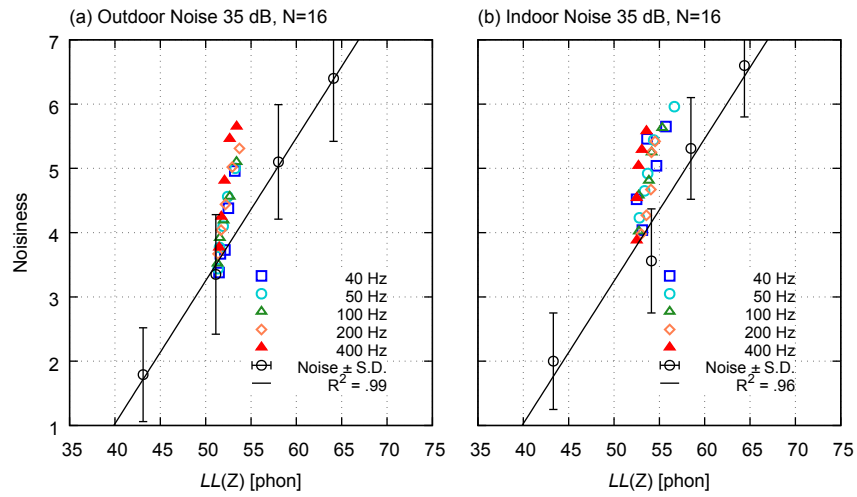


(i) 屋内ノイズ, 200 Hz

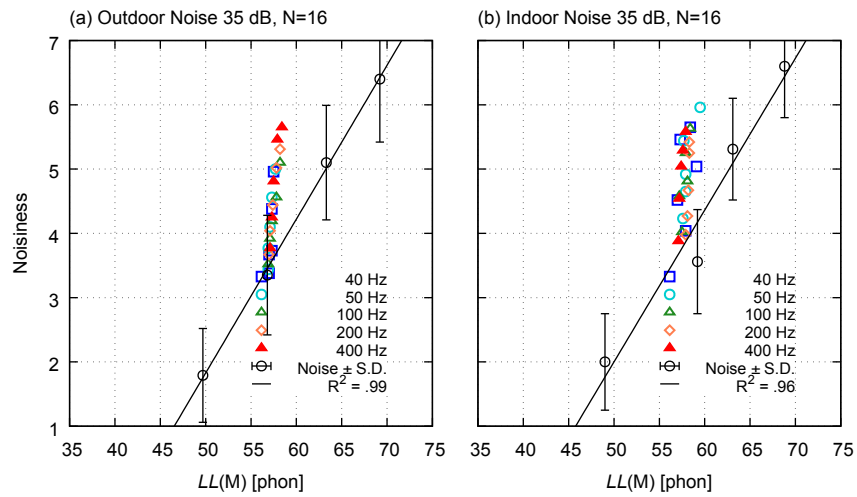


(j) 屋内ノイズ, 400 Hz

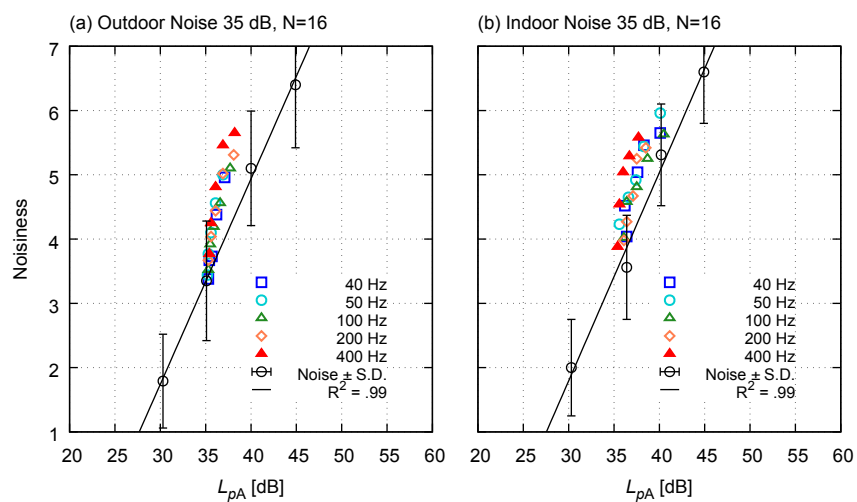
図 5.24: ベースノイズ 35 dB 条件



(a) Zwicker ラウドネスレベル

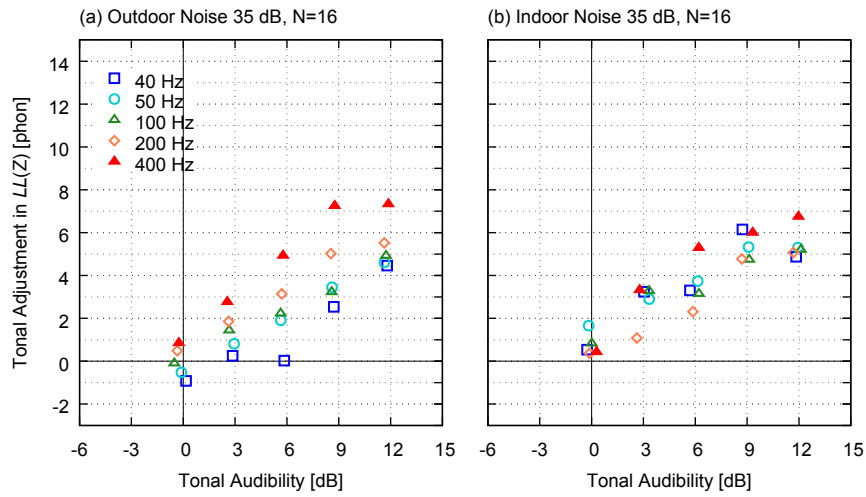


(b) Moore-Glasberg ラウドネスレベル

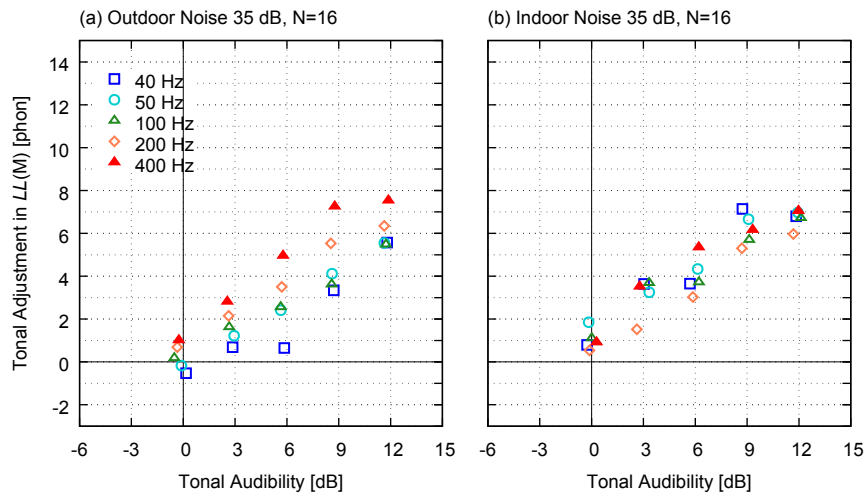


(c) A 特性音圧レベル

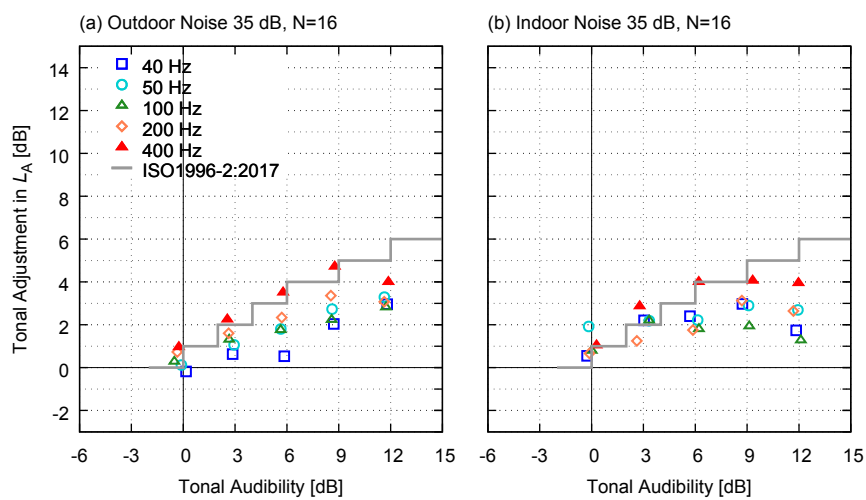
図 5.25: わずらわしさとラウドネス指標の関係 (実験 3)



(a) Zwicker ラウドネスレベル



(b) Moore-Glasberg ラウドネスレベル



(c) A 特性音圧レベル

図 5.26: TA と Tonal Adjustment の関係 (実験 3)

5.6 主観的なラウドネスとわずらわしさの関係に関する考察

主観的なラウドネスとわずらわしさの相互関係については、Berglund et al. (1975) などの検討があり、それによれば、音に関する心理属性（ラウドネス、ノイジネス、アノイアンス）は相互に線形的関係にあることがわかっている [41]。本研究では、屋内ノイズ 35 dB に純音を付加した条件について、4, 5 章でそれぞれラウドネス、わずらわしさ（心理属性のうちノイジネスにあたる項目）の双方について定量的評価を行なったので、本節でその関係について考察する。

5.6.1 主観評価値間の定量的関係

図 5.27 に、実験 3 の結果のうち屋内ノイズ（35 dB）に 40, 50, 100, 200 Hz 純音を付加した条件について、TA とわずらわしさの関係を示す。被験者、純音周波数、および TA を要因とする分散分析を行ったところ TA にのみ主効果が認められたため、わずらわしさに対し TA を説明変数とする単回帰分析を行い回帰線を示した。

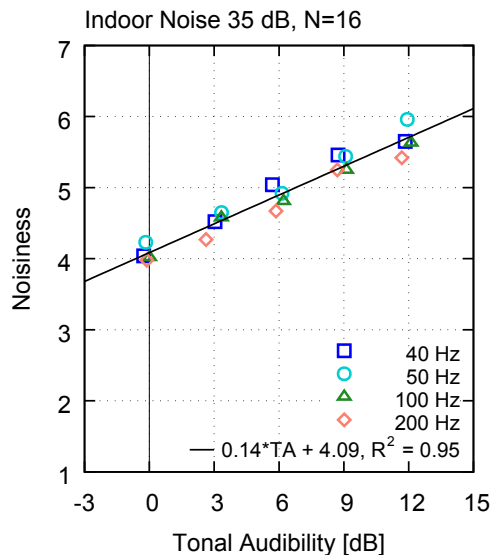


図 5.27: TA とわずらわしさ評価の関係および線形回帰（データは図 5.23 と同一）

ラウドネス評価とわずらわしさ評価では、ベースノイズの条件は同一であるが TA の条件が異なり、ラウドネス評価では TA = 0, 5, 10, 15 dB の 4 水準、わずらわしさ評価では TA = 0, 3, 6, 9, 12 dB の 5 水準を実験条件とした。これらの実験結果の対応をとるため、図 5.27 に示した回帰線を用いて、TA = 0, 5, 10, 15 dB におけるわずらわしさを推定した。主観的なラウドネスの評価値 ($LL(M)$) と、回帰線から推定したわずらわしさの関係を図 5.28 に示す。わずらわしさはいずれの条件も 7 段階中 4~6 程度の評価であるが、ラウドネスは純音周波数によって変域が異なった。200 Hz 純音を付加した条件は、100 Hz 以下の純音を付加した条件よりもラウドネスに対するわずらわしさの増分が大きかった。

Berglund et al. (1975) による実験では、主観的なラウドネスとノイジネスに線形関係が認められたが [41]、本検討でも純音周波数 4 水準ごとに線形回帰を試みたところ、決定係数は 0.95 から

0.99 となり強い線形性を示した。一方で、純音周波数 100 Hz 以下と 200 Hz 条件では回帰線の傾きが大きく異なった。

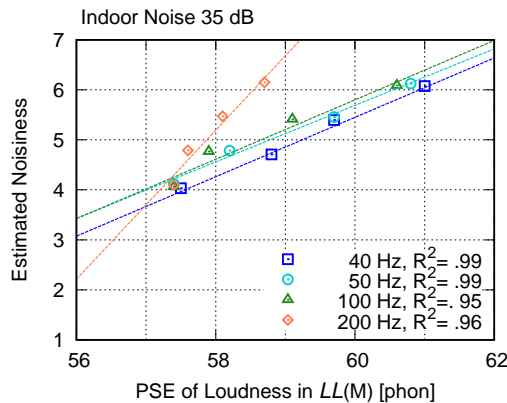


図 5.28: 主観的ラウドネスとわずらわしさ（推定値）の関係

既往研究との比較

Berglund et al. の検討で用いた試験音はすべて航空機騒音であったため音質も類似していたと考えられるが、難波ら (1985) の行った種々の騒音を試験音とした等価騒音レベルとラウドネスの対応に関する実験では、試験音の種類によって対応関係がわずかに異なり、要因として周波数特性、時間変動性や音源の種類が影響した可能性が指摘されている [42]。難波らによる結果は物理指標の値と心理属性の対応関係であり、本節の検討と直接比較することはできないが、難波らの指摘したような音質に関わる要素によって、心理属性間の対応関係に差異が生じた可能性がある。

この議論を参考にすると、今回の結果は純音性成分の周波数が 100 Hz 以下の条件と 200 Hz の条件で音質が異なったために反応が分かれたと推察される。次項では、この音質の違いについて、被験者の内観報告をもとに考察する。

5.6.2 各実験における内観報告

純音周波数によって、主観的なラウドネスとわずらわしさの間の関係に差異がみられた。今回の実験では、ラウドネスは「音の量感に関する印象」、ノイズネスは「大きさや音質による総合的な印象」として教示し実験を行なったので、純音周波数によって2つの心理属性の対応に差異がみられた要因は、試験音の音質に関わる印象にあると推察される。そこで考察のため、それぞれの実験終了後に被験者からきかれた内観報告のうち、音質に関わる内容と考えられるコメントを示す。なお括弧書きは筆者による補筆である。

5.6.2.1 ラウドネス評価の際の内観報告

3種類の広帯域ノイズ（ピンクノイズ、屋外ノイズ、屋内ノイズ）に 40, 50, 100, 200 Hz 純音を付加した試験音を用いたラウドネスマッチング実験終了後、評価にあたって印象に残っている音、特に大きさや音色に関して印象に残っているものがあるかを口頭でインタビューした。

環境騒音を模擬したノイズ（屋外ノイズ、屋内ノイズ）をベースノイズとした条件に対するコメ

ントは次の通りである。

- 屋内ノイズ (35 dB) に対するコメント

- 音が低いものものは合わせやすかった。プーという音（その場で音の高さを声で示してもらい、200 Hz 純音と判断された）が混ざっているものは評価が難しいが、大きさにはあまり寄与しないように感じた
- 分離して聞こえるものは調整が難しかった
- 低い音は圧力のような感覚で、大きく感じた。高い音はノイズとは別の音として聞こえる
- (付加した音の高さが) 低いものはノイズと馴染む
- 混ざっている音が大きいと、その音とノイズの比較になるので（音色が大きく異なっており）合わせづらい

- 屋外ノイズ (45 dB) に対するコメント

- 高い音はよく聞こえるけれど「大きい」印象ではなかった。低い音のほうが大きく感じる
- 低い音のほうが圧迫感があり、大きく感じるが、高い音はそこまで大きくは感じない
- 低音は、うるさいというより音の厚みを感じる。音量につながるかは試験音による。

純音周波数の比較的高い試験音は純音がベースノイズから分離して感じられ、音全体のラウドネスには寄与しにくく、比較刺激として用いたベースノイズから音色が大きく異なるため評価しづらくなる傾向がみられた。一方で、純音周波数の低い試験音はベースノイズとの分離の程度は少なく全体として大きく評価されたと考えられる。

また、ピンクノイズ (45 dB) をベースノイズとした条件については次のようなコメントがあった。

- 高い音が入っていると、大きい感じ、うるさい感じがする。やや合わせづらかった
- (純音の高さが) 低いほうがやりづらい。音が混ざっているのがはっきりとわかり、耳に残る感じがする。高いほうは紛れて聞こえた
- ノイズに近い音が混ざっていると、足し算のような感じで大きさが増え調整しやすかった
- 低めの音が混ざっているものは、そこまで大きく感じない。高さがマッチしたときは大きく感じる
- 低音が強いものが大きく感じられた。音叉くらいの音域 (200 Hz 純音と考えられる) は違和感がない

環境騒音を模擬した屋内外ノイズと比べると、純音周波数が高い条件での分離した印象が少ない傾向にあったように推察される。このことから、ベースノイズの周波数特性と純音周波数の組み合わせによって、騒音全体の印象に及ぼす寄与が変化する可能性が考えられる。

5.6.2.2 わずらわしさ評価の際の内観報告

屋外ノイズ、屋内ノイズに 40, 50, 100, 200, 400 Hz の純音を付加した試験音を用いたわずらわしさ評価実験の後、特に印象に残っている音がどのようなものであったかを、口頭でインタビューした。

- 高音の方が、低い音よりもわずらわしかった
- 低い音（ベースノイズと思われる）の中にピーというふうに二重に入っているものが耳障り。小さくても気になった
- 高い音が耳についた。背景の音とは別の音に感じるとうっとおしい。紛れているうちはそうでもない
- 低い音が強いものは、地鳴りのようでわずらわしさが強い。高音が入っていると、耳鳴りしているように感じられてわずらわしく、小さくても気分が悪くなりそう
- 低音が響くものは不快に感じた。高く外れたような音があると、音量のわりに気になった

純音周波数の高低どちらがよりわずらわしいかは被験者によって異なったが、音に対する印象として、高い音はベースノイズから分離して聞こえ、音量が大きくなっても耳につく／気になると回答する参加者が複数みられた。

5.6.3 評価実験結果と内観報告の対応

評価実験から得られた定量的関係から、主観的ラウドネスとわずらわしさは既往研究で報告されているのと同様に線形な関係にあることがわかった。その対応関係は純音周波数によって異なり、今回実施した条件では純音周波数 200 Hz の試験音では他の条件と比べ、同じラウドネスでもわずらわしさが高い傾向であった。

この要因を内観報告に求めたところ、大局的には、純音周波数が低くベースノイズと一体となって聞こえるものはラウドネスに影響を及ぼし、純音周波数が高く純音性成分が分離して聞こえるものは耳につく、という傾向があると考えられる。図 5.27 に示すように、わずらわしさ TA との関係で整理すると純音周波数による傾向の違いはみられないが、わずらわしさの要因である音量や音質といった心理属性に還元して考えると、

純音周波数の低い条件 ラウドネスが増加することによってわずらわしさが増加する

純音周波数の高い条件 ラウドネスは高くないが、「耳につく」などといった音質的な特徴によりわずらわしさが増加する

という差異があると考えられ、純音周波数によって音全体の大きさおよび音質に関する寄与度が異なることが示唆される。今回はベースノイズとして屋内ノイズを用いているが、周波数特性の異なるノイズをベースノイズとした場合に、純音周波数によって心理属性に及ぼす影響が同様に変化するかどうかは今後実験によって検証する必要がある。

5.7 評価指標間の違いに関する考察

本章では、主観的な印象と、物理的な騒音評価指標の差異として Tonal Adjustment を算出した。実務的な騒音評価の現場で最もよく用いられるのは A 特性音圧レベルであるが、これを評価指標とすると、屋内ノイズに 100 Hz 以下の低周波数純音を加えた条件については、TA が増加すると A 特性音圧レベルが大きく増加するために、Tonal Adjustment が横ばいまたは減少する傾向だった。一方、低周波数領域における精度が改善されたラウドネス指標である Moore-Glasberg ラウドネスではその傾向はみられなかった。

この指標間の差異については 4.3 節で定性的な考察を行い、低周波数帯域における音圧レベル-ラウドネスの関係（等ラウドネス特性）の非線形が原因だと考えられた。A 特性重み付けは、試験音のレベルによらず 40 phon の等ラウドネス曲線に基づく重み付けをするが、Moore-Glasberg ラウドネスでは、帯域別の音圧レベルに応じて等ラウドネス特性に従うような重み付け係数を設定している。ラウドネスレベルではマスキング効果も考慮するという違いもあるが、今回みられた差異の主因が等ラウドネス特性であるという仮説を検証するため、レベルに応じて等ラウドネス特性を詳細に反映するような重み付け音圧レベルを試算し、定量的考察を行った。

5.7.1 ラウドネスの周波数-レベル特性に応じた重み付け音圧レベルの算出

5.7.1.1 40 phon 以下のラウドネスレベルに対応した重み付け係数の試算（再掲）

A 特性に対応するような近似的な重み付け係数を、最小可聴値および 10~30 phon の等ラウドネス曲線をもとに試算したものを図 5.29 に示す。算出方法は 4.3.2 項と同一である。周波数が低いほどレベルによる重み付け係数の差が広がる。

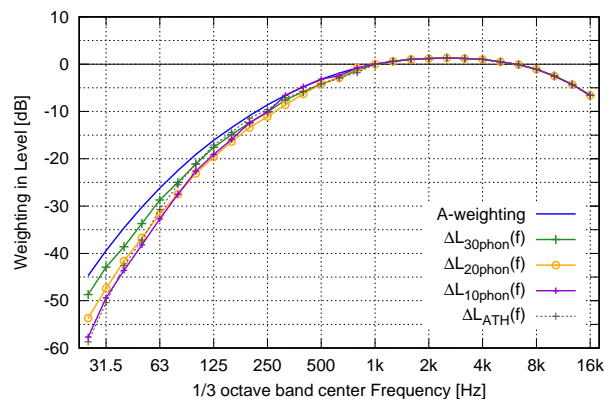


図 5.29: 得られた重み付け係数（図 4.18 再掲）

5.7.1.2 重み付け音圧レベルの算出

試験音の 1/3 オクターブバンド音圧レベルを求め、各バンドがおよそ何 phon に相当するかを判定する。図 5.30a は、屋内ノイズ 30 dB に 50 Hz 純音を $TA = 12$ dB で付加した試験音の 1/3 オクターブバンド音圧レベルに、等ラウドネス曲線を重ねたものである。この図において、最小可聴値と同程度かそれ以下のバンド（灰色の棒）は $\Delta L_{ATH}(f)$ を、10 phon と同程度のバンド（紫色）

は $\Delta L_{10}(f)$, 20 phon と同程度のバンド（黄色）は $\Delta L_{20}(f)$ を使って判定されたラウドネスレベルの重み付け係数を用いて重み付けをする。1 kHz 以上は、レベルによらず A 特性と同じ重み付けをする。重み付け後の 1/3 オクターブバンド音圧レベルを図 5.30b の棒グラフに示す。このスペクトル得られるレベル和を重み付け音圧レベル $L_{p,weighted}$ とした。同図には比較のため、A 特性重み付けによる音圧レベルを折れ線で示した。これをみると、100 Hz 以下の低周波数帯域において、A 特性重み付けはラウドネスを過大評価している可能性があることが分かる。

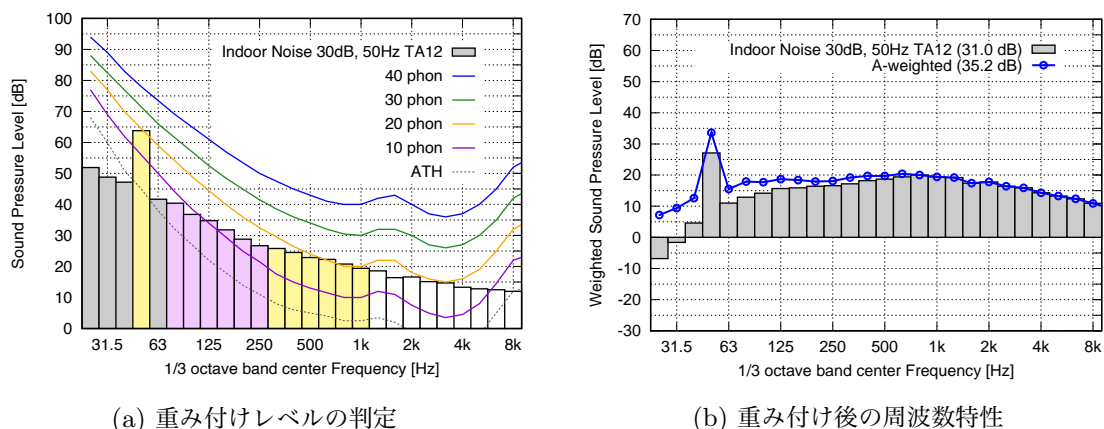


図 5.30: レベル別重み付け係数によるレベル計算

5.7.2 レベル別重み付け係数を用いた音圧レベルによる Tonal Adjustment の考察

上記の方法で算出した重み付け音圧レベル ($L_{p,weighted}$ と表記) を用いて、実験 2-B のうち、屋外ノイズ 30 dB に純音性成分を付加した条件について再度 Tonal Adjustment を求めた。 $L_{p,weighted}$ とわずらわしさの関係を図 5.31 に示す。 $L_{p,weighted}$ では、A 特性音圧レベルと比べると 100, 50, 40 Hz の純音周波数を含む条件で音圧レベルの増加が少ない。ここから算出した Tonal Adjustment と TA の関係を図 5.32 に示す。A 特性音圧レベルでは、100 Hz 以下の純音を含む条件で、TA = 6 dB 以上の条件で Tonal Adjustment が横ばいまたは減少傾向にあったが、 $L_{p,weighted}$ ではその横ばいの傾向が緩和された。

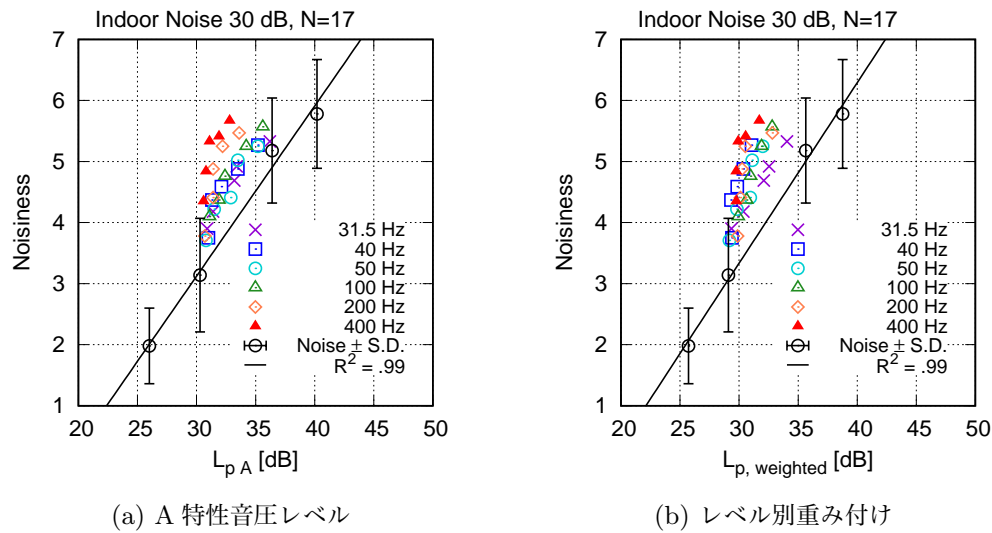


図 5.31: 音圧レベルとわずらわしさ評価の関係

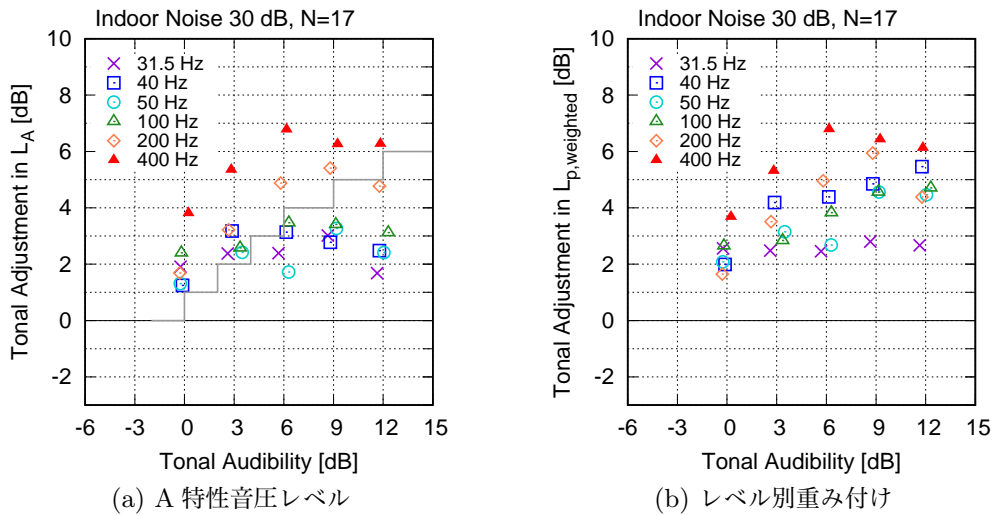


図 5.32: TA と Tonal Adjustment の関係

5.7.3 レベル別重み付け係数を用いた音圧レベルとラウドネス指標の相互関係

今回試算した重み付け音圧レベル $L_{p,weighted}$, A 特性音圧レベル, および Moore-Glasberg ラウドネスレベルの算出方法の概要を表 5.7 に示す。重み付け音圧レベルは, A 特性音圧レベルにおける等ラウドネス特性の扱いを, 鈴木-竹島の等ラウドネス曲線をレベルに応じて反映させるよう変更したものである。一方, Moore-Glasberg ラウドネスレベルは, 同じ鈴木-竹島の等ラウドネス特性を用いるのに加え, 帯域分割とマスキング効果においてより詳細に聴覚メカニズムを反映したラウドネス指標として構成されている。この 3 指標で比較すると, 重み付けレベル $L_{p,weighted}$ は A 特性音圧レベルと Moore-Glasberg ラウドネスレベルの中間にあたるラウドネス指標と位置付けることができる。

図 5.31, 5.32 において A 特性音圧レベルと重み付け音圧レベル $L_{p,weighted}$ の比較を行い, ラウドネス特性を要因とする違いについて言及したが, 重み付け音圧レベルで評価した場合に, 試

表 5.7: ラウドネス指標の算出方法の概要

指標	$LL(M)$	$L_{p,weighted}$	L_A
帯域分割幅	ERB_N	1/3 オクターブバンド	-
等ラウドネス曲線	鈴木-竹島 曲線	鈴木-竹島 曲線	F-M 曲線 (40 phon)
ラウドネス特性のレベル依存性	考慮する	考慮する	考慮しない
マスキング効果	考慮する	考慮しない	考慮しない

験音のレベルとわずらわしさの関係が純音周波数によらない傾向を示し、それによって Tonal Adjustment が TA の増加に伴って増加することは、Moore-Glasberg ラウドネスレベルを指標に用いたときと同様の傾向である。A 特性音圧レベルから等ラウドネス特性にかかわる部分を変更した重み付け音圧レベルが、Moore-Glasberg ラウドネスレベルに類似した傾向を示すことから、A 特性音圧レベルと Moore-Glasberg ラウドネスレベルの差異の主因が等ラウドネス特性にあることが推察される。

5.8 まとめ

本章では、純音性騒音の不快感に関する印象を調べることを目的とし、31.5 から 400 Hz の低周波数純音を付加したモデル音を用いてわずらわしさの定量的な評価を行った。加えて、音の印象に関わる特性として低周波音特有の感覚である振動感・圧迫感に着目して評価を行い、既往の報告とそぐわない結果が得られた。わずらわしさの評価については、就寝時想定、日中想定として異なる呈示レベルで評価を行い、純音性成分が付加されることによるわずらわしさの増加量を、物理的な騒音評価指標からの差分に置き換えた Tonal Adjustment として評価した。

5.8.1 主観的なわずらわしさ評価について

純音性成分を含む騒音は、TA が高くなるほどわずらわしさが高かった。ベースノイズのレベルや周波数特性、純音性成分の周波数により、純音性成分がわずらわしさに及ぼす影響に違いが見られた。4 章で行なった主観的なラウドネスとの対応から、純音周波数が低い場合は試験音全体の大きさに関する影響、純音周波数が高い場合に「耳につく」といった音質に関する影響が大きくなるという傾向があり、純音周波数によって、音のラウドネスまたは音質に関する寄与の程度が異なることが示唆された。

5.8.2 Tonal Adjustment について

実務的な騒音評価においては、計測されたレベルと主観的なわずらわしさに線形の関係があることが期待されるが、そこに乖離がある場合は補正が必要であり、その乖離を定量的に示したのが Tonal Adjustment である。Tonal Adjustment は、純音周波数によって値が異なり、周波数が高いほど値が高かった。一方、諸外国で用いられている風車騒音のガイドラインは、純音周波数は考慮せず TA のみで補正值やペナルティを決定している。風車騒音から発生するような周波数の純音性成分（100 Hz 以上）に関しては一律な評価が可能としても、50 Hz 以下の低周波音を含むものについては、音色に関する印象やわずらわしさの増加量が異なることから、純音周波数を考慮した補正值を考案する必要性も考えられる。

今回の検討では、純音性の指標として国際的に広く使われている Tonal Audibility を純音の卓越度の指標として用いた。TA は、純音性成分の近傍の周波数帯域のマスキング効果から算出されるエネルギー的な卓越度であるが、これが純音性成分の聴感的な卓越度と一致するかどうかは改めて検討が必要である。実験の後の内観報告では、「高い音は小さくても耳につく」「低い音は紛れる感じがする」という所見が複数聞かれており、可聴度が同じ値でも、純音周波数やベースノイズの周波数特性によっては音質に関する「分離」や「卓越」のような印象に差異がみられた。Tonal Adjustment の値がノイズの周波数特性によって異なった理由も未解明であり、これを検証するためには、純音を単独で聴取する場合も含めた、様々なレベル・周波数特性をベースノイズとした検討を行い、純音性成分の聴感的な卓越度とノイズの周波数特性がどのような関係にあるかを調べる必要があると考えられる。

5.8.3 騒音評価に用いる物理指標について

本章では、騒音評価に用いられるラウドネス指標として、Zwicker ラウドネスレベル、Moore-Glasberg ラウドネスレベル、および A 特性音圧レベルを用いて Tonal Adjustment を算出した。Tonal Adjustment の値は用いる評価指標によって傾向が異なった。指標の算出方法に関する考察として、ラウドネス特性のレベル依存性を詳細に反映させる重み付け音圧レベルを試算し定量的検討を行うことで、上述の指標間の傾向の違いが、ラウドネス指標の算出で重み付け係数として用いる等ラウドネス曲線の違いに起因するものであることがわかった。

各指標で用いる等ラウドネス特性の差異は、250 Hz 以下の低周波数帯域において、周波数が低くなるほど大きくなるため、100 Hz よりも低い領域に卓越した成分をもつような騒音では、指標同士のずれが大きくなると考えられる。このような騒音の評価においては、低域の精度が向上した Moore-Glasberg ラウドネスレベルを用いるのが適切だと考えられる。将来的に、騒音評価ガイドライン策定において Tonal Adjustment のような補正値を検討するならば、このような指標の特徴を把握した上で、用いる指標を選択する必要があるだろう。

5.8.4 最小可聴値との関係について

今回の検討では、就寝時を想定した低い呈示レベルでの評価も行ったが、50 Hz 以下の純音性成分を含む騒音に対する評価のレベル依存性から、純音性成分の可聴性が、ノイズによるマスキング効果だけでなく、純音の最小可聴値による影響も受けていると考えられた。これについては、3 章のマスキング閾値の計測においても同様の影響がみられている。低周波数純音に対して可聴性を評価する際には、純音性成分とマスキングノイズのエネルギー比だけでなく、その絶対値と最小可聴値の関係についても考慮する必要があることが示唆された。これを踏まえ、最小可聴値に関する影響について次章で検討する。

第 6 章

純音性成分の可聴度に対する最小可聴値の影響を考慮した補正の提案

6.1 目的

Tonal Audibility は、純音性成分と、その近傍の臨界帯域内のマスキングノイズのエネルギーの比に基づいて算出され、その絶対値については考慮されない。しかし、第 3 章：マスキング閾値の計測、第 5 章：わずらわしさ評価における結果から、最小可聴値の影響によって、TA で算出されるよりも、純音性成分の可聴性が低くなると考えられる条件があった。就寝時や屋内などにおける騒音環境として十分ありうるレベル設定であることから、このような静穏な環境では、純音性成分の実際の可聴性と既存の TA の値にずれが生じる可能性がある。

そこで本節では、TA の算出において最小可聴値の影響を考慮した補正を加える方法を提案する。

6.2 補正方法

Lochner らによる、マスクされた純音のラウドネスの算出方法をもとに考える。Lochner らは、外部ノイズ環境下における純音のラウドネスについて、次のモデル式を提案している [27]。

$$\psi = k [I^n - (I_p + I_e)^n] \quad (6.1)$$

ここで、 ψ はラウドネス、 I は純音のインテンシティ、 I_p は生理的なバックグラウンドノイズ (physiological background noise) の実効的なインテンシティ、 I_e は臨界帯域内の外部ノイズ (external noise) のインテンシティである。

マスクされた純音のラウドネスに関する一連の議論を、Tonal Audibility の算出に援用する。Tonal Audibility では、インテンシティではなく音圧レベルを元に計算される。純音性成分の A 特性音圧レベルを L_{pt} 、臨界帯域内のマスキングノイズの A 特性音圧レベルを L_{tn} 、 L_a を可聴指数とすると、純音性可聴度 ΔL_a は次式で算出される。

$$\Delta L_a = L_{pt} - L_{tn} - L_a \quad (6.2)$$

この式におけるマスキングノイズのレベル L_{tn} を、「外部マスキングノイズと最小可聴値に相当する内部ノイズのレベル和」に拡張する。純音を中心とする臨界帯域内における内部ノイズの A 特性音圧レベルを L_{ATH} とすると、

$$\Delta L_a = L_{pt} - 10 \log_{10} \{ 10^{\frac{L_{tn}}{10}} + 10^{\frac{L_{ATH}}{10}} \} - L_a \quad (6.3)$$

ここで、最小可聴値に対応するノイズのレベル L_{ATH} が、最小可聴値の A 特性音圧レベルに等しいと仮定し、ISO 389-7:2005 に定められる純音の最小可聴値の 50 パーセンタイル値を式 6.3 に代入する。値を表 6.1 に示す。

表 6.1: 純音の最小可聴値

純音周波数 [Hz]	31.5	40	50	100	200	400
最小可聴値 [dB]	59.5	51.1	44.0	26.5	14.4	6.2
同上 (A 特性) [dB]	20.1	16.5	13.8	7.4	3.5	1.4

6.3 提案手法の検証

提案手法によって補正した可聴度の検証のため、第 3 章で行った実験のうち、試験音のレベルが低く最小可聴値の影響が強かったと考えられるベースノイズ 25, 30 dB の条件について比較した。補正前後の TA を表に示す。なお、各試験音の純音のレベル等の詳細は章末に記載した。

100 Hz 以上の純音性成分については、TA の値は補正前後でほとんど変わらなかった。これは最小可聴値がマスキングノイズのレベルに比べて十分低く、レベル和をとっても値に影響が少ないためである。一方、31.5, 40, 50 Hz の純音性成分を付加した音に関しては、多くの条件で補正後の TA が低くなった。特に、低周波領域のレベルが低い屋内ノイズ 25dB 条件では変化が顕著であった。条件ごとの変化の程度は次の通りである。

屋外ノイズ, 25 dB 条件	40 Hz 条件では TA がおよそ 5 dB, 50 Hz 条件ではおよそ 3 dB 低減
屋内ノイズ, 25 dB 条件	40 Hz 条件では TA がおよそ 2 dB, 50 Hz 条件ではおよそ 1.5 dB 低減
屋外ノイズ, 30 dB 条件	31.5, 40, 50 Hz 条件でそれぞれ TA がおよそ 4 dB, 2 dB, 1.5 dB 低減
屋内ノイズ, 30 dB 条件	31.5 Hz 条件で TA がおよそ 1.5 dB, 40, 50 Hz 条件ではおよそ 0.5 dB 低減

表 6.2: TA の比較 25 dB 条件

屋外ノイズ, 25 dB			屋内ノイズ, 25 dB		
純音周波数	TA	TA*(提案手法)	純音周波数	TA	TA*(提案手法)
40 Hz	-0.42	-5.65	40 Hz	-1.46	-3.51
	2.39	-2.90		1.81	-0.28
	5.38	0.09		4.48	2.43
	8.28	3.11		7.55	5.46
	11.39	6.13		10.42	8.38
50 Hz	1.64	-1.58	50 Hz	1.27	0.00
	4.46	1.63		5.29	3.97
	7.36	4.49		8.19	6.89
	10.42	7.42		10.84	9.58
	13.31	10.34		13.95	12.65
100 Hz	-1.11	-1.93	100 Hz	-0.74	-1.05
	2.26	0.95		2.6	2.27
	5.19	4.36		5.49	5.17
	8.24	7.40		8.56	8.24
	11.14	10.32		11.38	11.15
200 Hz	-1.19	-1.46	200 Hz	-0.9	-1.15
	2.05	1.77		1.94	1.70
	5	4.71		5.07	4.81
	8.01	7.74		8.16	7.91
	10.98	10.71		11.25	10.99
400 Hz	-0.65	-0.84	400 Hz	-0.2	-0.44
	2.15	1.97		2.42	2.18
	5.24	5.07		5.72	5.49
	8.29	8.11		8.83	8.59
	11.32	11.14		11.54	11.31

表 6.3: TA の比較 30 dB 条件

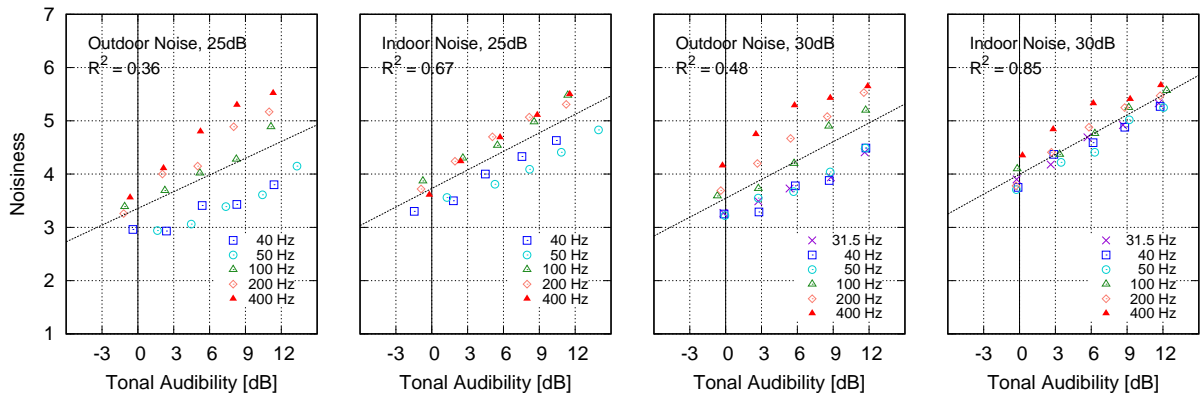
屋外ノイズ, 30 dB			屋内ノイズ, 30 dB		
純音周波数	TA	TA*(提案手法)	純音周波数	TA	TA*(提案手法)
31.5 Hz	-0.18	-4.31	31.5 Hz	-0.24	-1.80
	2.74	-1.34		2.61	1.07
	5.35	1.18		5.68	4.09
	8.81	4.66		8.65	7.08
	11.63	7.57		11.64	10.08
40 Hz	-0.13	-2.37	40 Hz	-0.12	-0.88
	2.79	0.52		2.87	2.12
	5.83	3.55		6.15	5.35
	8.66	6.36		8.81	8.03
	11.74	9.46		11.77	11.00
50 Hz	-0.06	-1.45	50 Hz	-0.26	-0.68
	2.73	1.38		3.48	3.06
	5.68	4.31		6.29	5.87
	8.75	7.35		9.18	8.76
	11.68	10.29		12.05	11.62
100 Hz	-0.69	-0.92	100 Hz	-0.19	-0.28
	2.74	2.50		3.36	3.27
	5.73	5.50		6.30	6.21
	8.62	8.39		9.14	9.05
	11.72	11.49		12.31	12.22
200 Hz	-0.41	-0.49	200 Hz	-0.29	-0.37
	2.65	2.56		2.66	2.58
	5.43	5.35		5.81	5.73
	8.50	8.41		8.80	8.73
	11.56	11.48		11.77	11.70
400 Hz	-0.26	-0.32	400 Hz	0.24	0.18
	2.53	2.48		2.82	2.76
	5.77	5.71		6.17	6.10
	8.76	8.61		9.25	9.18
	11.89	11.74		11.83	11.76

6.3.1 わずらわしさ評価実験（5 章）との関係

これらの補正した TA を用いて、TA とわずらわしさの 7 段階評価の関係、および TA と Tonal Adjustment の関係を整理した。

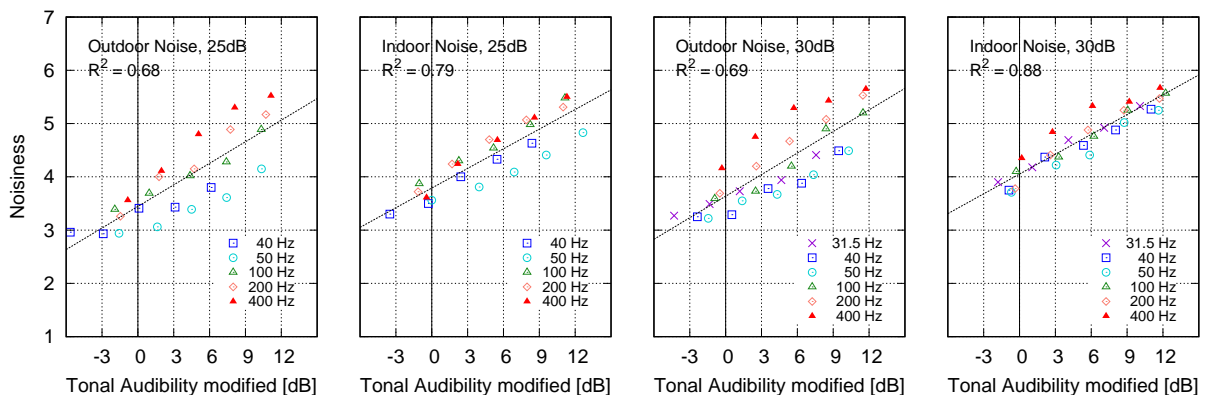
7 段階のわずらわしさ評価との関係

図 6.1 および図 6.2 に、TA と 7 段階のわずらわしさ評価の関係を示す。図 6.1 は規格に則った計算方法による TA、図 6.2 は今回提案した閾値の影響を考慮した計算方法による TA を用いて整理した。各条件について、TA を説明変数としてわずらわしさを線形回帰し、その決定係数 R^2 をグラフ中左上に示した。いずれの条件も、TA（提案手法）を用いることで周波数によるばらつきが減少し、決定係数の値が大きくなった。特に、屋外・屋外ノイズ 25 dB、屋内ノイズ 30 dB の 3 条件で変化が大きく、これは低周波数帯域のエネルギーが比較的低かったために純音の最小可聴値の影響が大きかったためと考えられる。



(a) 屋外ノイズ, 25 dB (b) 屋内ノイズ, 25 dB (c) 屋外ノイズ, 30 dB (d) 屋内ノイズ, 30 dB

図 6.1: 7 段階のわずらわしさ評価 (IEC 61400-11:2012 に定められた TA)

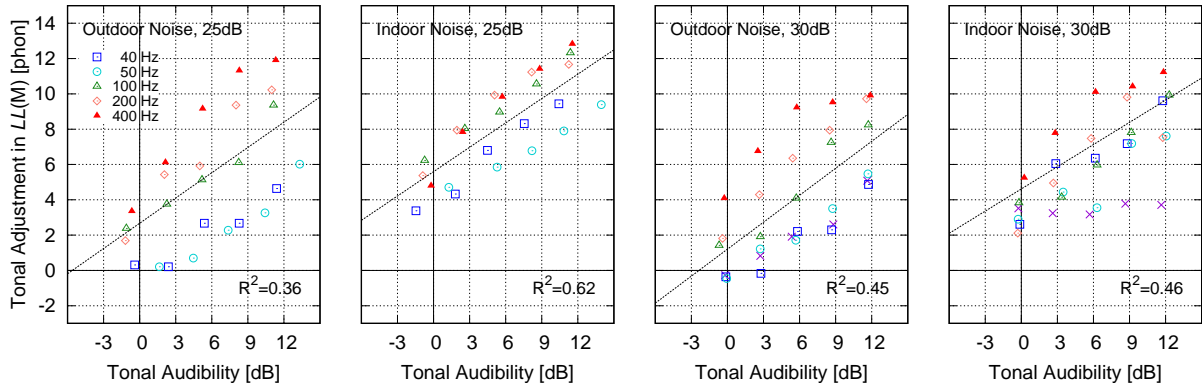


(a) 屋外ノイズ, 25 dB (b) 屋内ノイズ, 25 dB (c) 屋外ノイズ, 30 dB (d) 屋内ノイズ, 30 dB

図 6.2: 7 段階のわずらわしさ評価 (最小可聴値の補正を加えた TA)

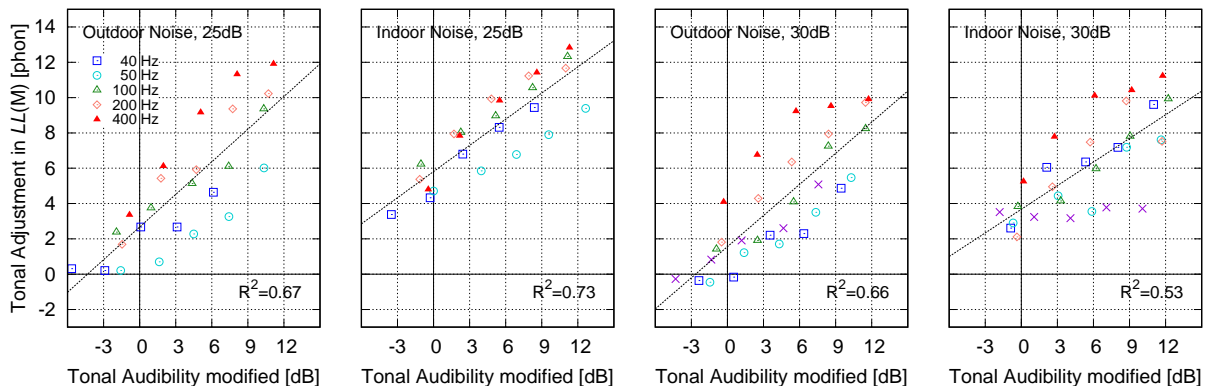
Tonal Adjustment との関係

図 6.3 および図 6.4 に、TA と Tonal Adjustment ($LL(M)$ による評価) の関係を示す。各条件について、TA を説明変数としてわずらわしさを線形回帰し、その決定係数 R^2 をグラフ中の右下に示した。わずらわしき評価と同様に、最小可聴値の影響を考慮した提案手法によって、どの条件についても周波数ごとのばらつきが改善し、線形性が増したと言える。



(a) 屋外ノイズ, 25 dB (b) 屋内ノイズ, 25 dB (c) 屋外ノイズ, 30 dB (d) 屋内ノイズ, 30 dB

図 6.3: Tonal Adjustment (IEC 61400-11:2012 に定められた TA)



(a) 屋外ノイズ, 25 dB (b) 屋内ノイズ, 25 dB (c) 屋外ノイズ, 30 dB (d) 屋内ノイズ, 30 dB

図 6.4: Tonal Adjustment (最小可聴値の補正を加えた TA)

6.4 まとめ

前章までの検討結果から、TA の算出において音圧レベルの絶対値が考慮されないことが要因となって、50 Hz 以下の純音性成分を含む騒音の純音の可聴性に乖離が発生する可能性が考えられた。そこで本章では、マスクされた純音のラウドネスに関する議論を参考に、TA の算出において最小可聴値の影響を算入する方法を提案した。前章で行ったわずらわしさ評価実験において、音圧レベルの低い条件では最小可聴値に起因するとみられるばらつきが見られたが、提案手法によって周波数別のばらつきが改善されたことから、可聴度の評価において、純音の最小可聴値を考慮に入れる必要性が示されたと考える。提案手法は、純音性成分のレベルが純音の最小可聴値より十分高い場合においては、規格に定められた TA とほとんど同じ値となり互換性を有するという利点もある。この提案手法による TA を用いれば、騒音のわずらわしさや Tonal Adjustment が TA と線形な関係を持つ量としてモデル化できる可能性が示唆された。

一方、純音周波数が高い条件の方がわずらわしさが高いという周波数別の傾向が多くの条件でみられたが、この原因は明らかでない。音質のうち、特にベースノイズの周波数特性と純音周波数の相対関係によって、純音の聴感的な卓越度や分離に関する印象が変化することについては検討を深める必要がある。また、本手法はあくまで簡易的な補正にとどまっており、臨界帯域でなく等価矩形帯域幅を用いる、より詳細にラウドネス理論を反映させる、といった聴覚に関するより新しい知見を導入した検討の余地がある。

表 6.4: TA の比較 屋外ノイズ, 25 dB 条件

純音周波数 [Hz]	最小可聴値 [dB]	純音 [dB]	ノイズ [dB]	最小可聴値と ノイズの和 [dB]	TA(補正前) [dB]	TA*(補正前) [dB]
40 Hz	16.5	10.40	12.82	18.05	-0.42	-5.65
		13.13	12.74	18.03	2.39	-2.90
		16.11	12.73	18.02	5.38	0.09
		19.19	12.91	18.08	8.28	3.11
		22.17	12.78	18.04	11.39	6.13
50 Hz	13.8	12.68	12.61	16.26	1.64	-1.58
		15.80	12.42	16.17	4.46	1.63
		18.66	12.42	16.17	7.36	4.49
		21.61	12.45	16.19	10.42	7.42
		24.57	12.54	16.23	13.31	10.34
100 Hz	7.4	11.10	14.22	15.04	-1.11	-1.93
		14.03	14.28	15.09	2.26	0.95
		17.35	14.17	15.00	5.19	4.36
		20.31	14.08	14.92	8.24	7.40
		23.33	14.20	15.02	11.14	10.32
200 Hz	3.5	12.24	15.47	15.74	-1.19	-1.46
		15.34	15.33	15.61	2.05	1.77
		18.28	15.33	15.61	5.00	4.71
		21.29	15.31	15.59	8.01	7.74
		24.33	15.39	15.66	10.98	10.71
400 Hz	1.4	12.37	15.22	15.40	-0.65	-0.84
		15.22	15.27	15.44	2.15	1.97
		18.31	15.26	15.43	5.24	5.07
		21.36	15.27	15.44	8.29	8.11
		24.45	15.33	15.50	11.32	11.14

表 6.5: TA の比較 屋内ノイズ, 25 dB 条件

純音周波数 [Hz]	最小可聴値 [dB]	純音 [dB]	ノイズ [dB]	最小可聴値と ノイズの和 [dB]	TA(補正前) [dB]	TA*(補正前) [dB]
40 Hz	16.5	15.23	18.69	20.74	-1.46	-3.51
		18.40	18.59	20.68	1.81	-0.28
		21.17	18.69	20.74	4.48	2.43
		24.13	18.58	20.67	7.55	5.46
		27.14	18.72	20.76	10.42	8.38
50 Hz	13.8	17.76	18.49	19.76	1.27	0.00
		21.58	18.29	19.61	5.29	3.97
		24.55	18.36	19.66	8.19	6.89
		27.37	18.53	19.79	10.84	9.58
		30.32	18.37	19.67	13.95	12.65
100 Hz	7.4	15.84	18.58	18.90	-0.74	-1.05
		19.11	18.53	18.85	2.60	2.27
		22.07	18.59	18.91	5.49	5.17
		25.08	18.53	18.85	8.56	8.24
		28.18	18.73	19.04	11.38	11.15
200 Hz	3.5	12.92	15.86	16.11	-0.90	-1.15
		15.78	15.88	16.12	1.94	1.70
		18.83	15.81	16.06	5.07	4.81
		21.93	15.81	16.06	8.16	7.91
		24.89	15.68	15.94	11.25	10.99
400 Hz	1.4	11.55	13.94	14.18	-0.20	-0.44
		14.17	13.94	14.18	2.42	2.18
		17.59	14.06	14.29	5.72	5.49
		20.69	14.06	14.29	8.83	8.59
		23.33	13.98	14.21	11.54	11.31

表 6.6: TA の比較 屋外ノイズ, 30 dB 条件

純音周波数 [Hz]	最小可聴値 [dB]	純音 [dB]	ノイズ [dB]	最小可聴値と ノイズの和 [dB]	TA(補正前) [dB]	TA*(補正前) [dB]
31.5 Hz	20.1	15.91	18.09	22.22	-0.18	-4.31
		18.91	18.17	22.25	2.74	-1.34
		21.38	18.03	22.20	5.35	1.18
		24.87	18.07	22.21	8.81	4.66
		27.83	18.20	22.26	11.63	7.57
40 Hz	16.5	16.07	18.20	20.44	-0.13	-2.37
		18.90	18.10	20.38	2.79	0.52
		21.95	18.13	20.40	5.83	3.55
		24.72	18.06	20.36	8.66	6.36
		27.84	18.09	20.38	11.74	9.46
50 Hz	13.8	15.97	18.03	19.42	-0.06	-1.45
		18.86	18.11	19.48	2.73	1.38
		21.80	18.12	19.49	5.68	4.31
		24.74	17.99	19.39	8.75	7.35
		27.70	18.02	19.41	11.68	10.29
100 Hz	7.4	17.24	19.93	20.17	-0.69	-0.92
		20.64	19.91	20.15	2.74	2.50
		23.67	19.94	20.18	5.73	5.50
		26.68	20.07	20.30	8.62	8.39
		29.71	20.00	20.23	11.72	11.49
200 Hz	3.5	18.35	20.80	20.88	-0.41	-0.49
		21.41	20.81	20.89	2.65	2.56
		24.24	20.85	20.93	5.43	5.35
		27.31	20.86	20.94	8.50	8.41
		30.32	20.80	20.88	11.56	11.48
400 Hz	1.4	18.32	20.78	20.83	-0.26	-0.32
		21.21	20.87	20.92	2.53	2.48
		24.41	20.84	20.89	5.77	5.71
		27.42	20.95	21.00	8.76	8.61
		30.47	20.87	20.92	11.89	11.74

表 6.7: TA の比較 屋内ノイズ, 30 dB 条件

純音周波数 [Hz]	最小可聴値 [dB]	純音 [dB]	ノイズ [dB]	最小可聴値と ノイズの和 [dB]	TA(補正前) [dB]	TA*(補正前) [dB]
31.5 Hz	20.1	21.49	23.73	25.29	-0.24	-1.80
		24.45	23.85	25.38	2.61	1.07
		27.32	23.64	25.23	5.68	4.09
		30.36	23.71	25.28	8.65	7.08
		33.39	23.75	25.31	11.64	10.08
40 Hz	16.5	21.55	23.67	24.43	-0.12	-0.88
		24.55	23.67	24.43	2.87	2.12
		27.66	23.52	24.31	6.15	5.35
		30.39	23.58	24.36	8.81	8.03
		33.40	23.63	24.40	11.77	11.00
50 Hz	13.8	21.43	23.69	24.11	-0.26	-0.68
		25.18	23.70	24.12	3.48	3.06
		28.02	23.73	24.15	6.29	5.87
		30.90	23.72	24.14	9.18	8.76
		33.79	23.75	24.17	12.05	11.62
100 Hz	7.4	22.09	24.29	24.38	-0.19	-0.28
		25.49	24.14	24.23	3.36	3.27
		28.41	24.12	24.21	6.30	6.21
		31.36	24.23	24.32	9.14	9.05
		34.40	24.10	24.19	12.31	12.22
200 Hz	3.5	18.86	21.20	21.27	-0.29	-0.37
		21.83	21.22	21.29	2.66	2.58
		24.89	21.13	21.20	5.81	5.73
		27.89	21.13	21.20	8.80	8.73
		30.89	21.16	21.23	11.77	11.70
400 Hz	1.4	17.75	19.70	19.76	0.24	0.18
		20.25	19.62	19.68	2.82	2.76
		23.69	19.72	19.78	6.17	6.10
		26.78	19.73	19.79	9.25	9.18
		29.44	19.81	19.87	11.83	11.76

第 7 章

総括

本論文は、近年国内で純音性騒音が騒音問題として認識されているものの、その評価の枠組みが定まっていないことを背景に、低周波数帯域に純音性成分が含まれる騒音を対象として、純音性成分の可聴性、ラウドネス、わずらわしさについて定量的な評価を行った。純音性成分の周波数や卓越度によって評価にどのような影響があるか、あるいは、国際規格で定められた評価指標（Tonal Audibility, ラウドネスレベル, A 特性音圧レベル）と、騒音に対する主観的評価がどのような関係にあるかに着目して考察を行った。総括として各章の概要を記す。

序論（1 章）

純音性騒音に関する騒音問題や、諸外国における評価の事例などの背景をもとに、本研究の目的について述べた。

既往研究（2 章）

聴覚に関する基礎知識として、マスキング効果およびラウドネスに関する聴覚モデル構築のために行われた研究の流れをまとめた。後半では、実務的な騒音評価の手法やそれに関連する研究事例として、純音性騒音・風車騒音・低周波音の評価に関する既往研究について述べた。

マスキング閾値の計測（3 章）

騒音中に含まれる純音性成分の聞こえに関する基礎的な検討として、マスキング閾値の計測を行った。従来の聴覚研究では、マスキングノイズとしてホワイトノイズを使った事例が多く、また 100 Hz 以下の低周波数純音については特に検討が不足していたため、本検討では、実際の騒音環境における低周波数帯域の純音性成分の可聴性について検討するために、屋内外の環境騒音を模擬したノイズを含めた 3 種類のノイズをマスキングノイズとして用い、40 Hz から 400 Hz の純音についてマスキング閾値の計測を行った。

3 種のノイズに共通した結果として、マスキング閾値は、ノイズフロアよりも 10 から 13 dB 高く、100 Hz から 400 Hz の純音のマスキング閾値における TA は -1 から -4 dB であった。また、50 Hz 以下の純音については、最小可聴値の影響でマスキング閾値が高くなる傾向がみられた。このことから、低周波数領域においては最小可聴値の影響で TA で評価されるよりも純音が聞き取りづらくなる可能性が示唆された。

ラウドネス評価（4 章）

音に関する心理量のうち最も基礎的な属性の一つであるラウドネス（大きさ感）の評価を行った。マスキング閾値の計測と同じく環境騒音を模擬したノイズに、異なる周波数と強度の純音を付加した刺激のラウドネスを評価させた。また、物理的なラウドネス指標として、ISO 532-1,2:2017 で定められているラウドネスレベル 2 種類と、騒音の評価で最も広く使われている A 特性音圧レベルを用い、各試験音に対する指標の値と心理評価値の対応関係を、各指標の算出方法に基づいて考察した。

主観的なラウドネスは、純音性成分の強度が高くなるほど増加したが、増加の程度はベースノイズの周波数特性や純音周波数によって異なった。また、物理的な指標の値に関しては、A 特性音圧レベルでは指標のとり値がベースノイズの周波数によって大きく変わってしまうのに対して、Moore-Glasberg ラウドネスはノイズの種類に対して安定した値をとった。ラウドネス指標の算出方法に基づく考察を行い、この違いが算出時に参照する等ラウドネス曲線に起因することがわかった。今回検討に用いた 3 指標のうちでは、低周波数領域におけるラウドネス特性をより詳細に反映している Moore-Glasberg ラウドネスを用いることが適切であると考えられた。Moore-Glasberg ラウドネスを用いた評価によれば、主観的なラウドネス評価値は、物理的なラウドネス指標の値よりも大きく、純音性可聴度が高くなるほど差は広がった。

わずらわしさ評価（5 章）

騒音に対する総合的な印象として、わずらわしさに関する評価を行った。環境騒音を模擬したベースノイズに周波数・強度の異なる純音を付加した刺激を用い、就寝時、あるいは日中自宅で静かに過ごしている時を想定して印象評価を行った。また、低周波音に特有な振動感・圧迫感についても評価を行い、既往研究と整合する結果を得た。

わずらわしさ評価の結果をもとに、純音性成分が含まれることによるわずらわしさの増分を、Tonal Adjustment としてラウドネスレベルまたは A 特性音圧レベルに換算して評価した。Tonal Adjustment は、音の印象のうちラウドネスを除いた音色に関する評価を反映する量だが、純音の強度が高くなるほど Tonal Adjustment が増加すること、純音周波数が高いほどわずらわしさが高いこと、ベースノイズのレベルと周波数特性によって Tonal Adjustment の値の傾向が異なることが結果として得られた。

Tonal Adjustment は、用いるラウドネス指標によって値が異なったが、その違いが低周波領域における音圧-ラウドネス特性の非線形性に起因することがわかった。また純音性成分の周波数による差異の一因として、純音の最小可聴値の影響が考えられるが、ベースノイズの周波数特性によって評価に差がみられることの要因は未解明であり、TA による可聴性の評価だけでなく、聴感的な純音性成分の卓越度を評価するような指標の検討が必要であろう。

純音性可聴度の最小可聴値による補正に関する提案（6章）

第3, 5章での検討で, 50 Hz 以下の低周波数帯域の純音性成分は, 純音の最小可聴値の影響により純音の聞き取りが困難になることが示唆された。一方で, TA はノイズと純音のレベルの相対値から算出されるため, 絶対値が考慮されない。そこで, マスクされた純音のラウドネスに関する議論を参考に, 純音の最小可聴値の影響を考慮した純音性可聴度の算出方法を提案した。

提案手法は, 最小可聴値が生体ノイズによるマスキングによって生じるというモデルを用いて, 外部のマスキングノイズのエネルギーに最小可聴値に相当する生体マスキングを加えた純音性可聴度を算出するというものである。この提案手法を用いて, 5章のわずらわしさ評価に用いた試験音の純音性可聴度を算出したところ, 純音の最小可聴値の影響が大きいと考えられる低レベル呈示かつ純音周波数の低い条件について, 純音性可聴度の値が最大で4 dB 低下した。なお試験音のエネルギーが最小可聴値に比べて十分大きいときは, 補正前後でTA の値がほとんど変わらないため, 互換性もあると考えられる。提案手法で, 5章におけるわずらわしさ評価の結果を整理しなおしたところ, 低レベル呈示条件において, 純音周波数によるばらつきがやや改善した。ただし本手法はあくまで簡易的な補正にとどまっており, 臨界帯域でなく等価矩形帯域幅を用いる, より詳細にラウドネス理論を反映させる, といった聴覚に関するより新しい知見を導入した検討の余地がある。

むすび

騒音評価に関する研究には, 騒音の音響的特性を正確に把握する物理的評価と, 騒音に対する人間の反応を調べる心理評価の2つの側面があり, 本研究は後者に照準をあてたものである。心理評価では, 与えた刺激に対する心理反応（快/不快感など）を計測し, 音の大きさ, 高さといった単純な量的変数と間の定量的関係を「評価モデル」として見出すことが大きな目的である。量的変数として, 心理反応と対応のよい物理指標値があれば, 時間と労力を要する心理評価実験を行わずとも心理反応を予測することが可能であり, 過去に行われてきた環境騒音の評価研究によって, 騒音に対するアノイアンスの予測・評価において, A 特性音圧レベルの有効性が確かめられてきたのも, これと同じアプローチである。

本研究で扱った純音性騒音は, 「耳につく」と形容されるような音質の特徴が不快感に影響を及ぼすというものであるが, ①「耳につく感じ」の発生メカニズム, ②「耳につく感じ」が騒音の不快感にどの程度影響するか, という2点を興味の対象とした。①「耳につく感じ」は純音が物理的に卓越することに起因する心理評価であり, この必要条件に純音の可聴性（マスキング閾値）が関わる。また, ②騒音の不快感は, 心理属性のうち音量と音質の両方を含むものであるから, ラウドネスと総合印象である「わずらわしさ」を調べることで, その現象を把握しようと試みた。

結果として, 純音性成分の強度が増すほどラウドネスやわずらわしさの評価が高くなりやすいという大局的な傾向が得られたが, 同時にベースノイズのレベルや周波数特性, 純音性成分の強度や周波数によって反応がそれぞれ異なることも明らかになった。本検討で純音性の指標として用いた純音性可聴度は, 純音性成分近傍の周波数帯域に着目した評価量であるが, 一方で純音性騒音に対する反応はベースノイズ全体の特性にも影響を受けるという結果であり, 純音性という周波数軸上の局所的な特徴量と, 騒音全体のグローバルな特性の関係をどのようにとらえるかについては今後さらなる検討が必要である。

一方、実務的な騒音の評価においては、既存の騒音評価指標による表現が明解であるので、「既往の騒音評価で用いられてきたラウドネス指標と、風車騒音の評価を主目的に整備された純音性可聴値という指標の組み合わせによって、純音性騒音に対する心理反応を説明・説明する」という観点で結果の整理を試みた。心理評価値と各指標の間に簡潔な関係が見出せれば、騒音評価ガイドラインとして、ラウドネス指標に純音性の影響を考慮した補正値を加えるような評価方法が提案できると考えた。しかし周波数特性による傾向の違いを説明するには、ラウドネス指標と純音性可聴度だけでは不十分であり、統一的な評価モデルを構築するには至らなかった。しかし既存の指標と今回得られた心理評価値の対応の不一致の要因を、等ラウドネス特性や最小可聴値といったヒトの聴覚特性に立ち返って考察することで、指標の特性とその適応範囲に関する知見が得られたことは有意義であったと考える。

今回の検討は、実際の騒音を模擬した刺激を用いたが、最初に立てた評価モデルの構築という目的を達成するためには、純音のみ／ノイズのみのような単純な要素に分解した場合の反応を調べてモデル化を試みる必要があるだろう。一方で、実際の純音性騒音はさらに複雑であり、複数の純音性成分が同時に含まれるケースも多い。条件が複雑化するのを避けるために今回の検討では扱わなかったが、複数の成分が含まれることにより聴感印象が変化する可能性は十分考えられる。今後の展望として、本論文で扱った広帯域ノイズに単一の純音が含まれた刺激に関する検討を足がかりとして、様々な音刺激に対する心理反応を包含するような議論への拡張が期待される。

参考文献

- [1] 橘秀樹, “我が国における風車騒音の実態”, 騒音制御, vol. 38, no. 6, pp.311-317, 2014.
- [2] 消費者安全調査委員会, “消費者安全法第 23 条 1 項に基づく事故等原因調査報告書 家庭用ヒートポンプ給湯器から生じる運転音・振動により不眠等の健康症状が発生したとの申出事案” 2014.
- [3] 環境省, “風力発電施設から発生する騒音に関する指針” 2017.
- [4] 角谷純平, 井上尚久, 佐久間哲哉 “家屋周辺における低周波音伝搬の数値解析 —隣戸と外構塀の配置の影響—” 日本音響学会春季研究発表会講演論文集, pp.841-842, 2018.
- [5] 橘秀樹, “諸外国における風車騒音に関するガイドライン,” 日本音響学会誌, vol. 71, no. 4, pp. 198 – 205, 2015.
- [6] 森周司, 香田徹 編, “聴覚モデル,” コロナ社, 2011.
- [7] B. C. J. Moore, *An Introduction to the Psychology of Hearing*, 6th Edition. 2012.
- [8] B. C. J. Moore, (大串健吾 訳), “聴覚心理学概論”, 誠心書房, 1994. (*An Introduction to the Psychology of Hearing*, 3rd Ed. の邦訳)
- [9] H. Fletcher, “Auditory patterns,” *Rev. Mod. Phys.*, vol. 12, no. 1, pp. 47 – 65, 1940.
- [10] J. E. Hawkins and S. S. Stevens, “The Masking of Pure Tones and of Speech by White Noise,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 22, no. 1, pp. 6 – 13, 1950.
- [11] E. Zwicker, G. Flottorp, and S. S. S. Stevens, “Critical band width in loudness summation,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 29, no. 5, pp. 113 – 115, 1957.
- [12] E. Zwicker and E. Terhardt, “Analytical expressions for critical - band rate and critical bandwidth as a function of frequency,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 68, no. 5, pp. 1523 – 1525, 1980.
- [13] H. Fastl and E. Zwicker, *Psychoacoustics: Facts and models*. 2007.
- [14] B. C. J. Moore and B. R. Glasberg, “Formulae describing frequency selectivity as a function of frequency and level, and their use in calculating excitation patterns,” *Hear. Res.*, vol. 28, no. 2 – 3, pp. 209 – 225, 1987.
- [15] R. D. Patterson, “Auditory filter shapes derived with Noise stimuli,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 59, no. 3, pp. 640 – 654, 1976.
- [16] B. R. Glasberg and B. C. J. Moore, “Comparison of auditory filter shapes derived with three different maskers,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 75, no. 2, pp. 536 – 544, 1984.
- [17] B. R. Glasberg and B. C. J. Moore, “Derivation of auditory filter shapes from notched-noise data,” *Hear. Res.*, vol. 47, no. 1 – 2, pp. 103 – 138, 1990.
- [18] ISO 389-7:2005 Acoustics — Reference zero for the calibration of audiometric equipment

— Part 7: Reference threshold of hearing under free-field and diffuse-field listening conditions

- [19] K. Kurakata, T. Mizunami, and K. Matsushita, “Percentiles of normal hearing-threshold distribution under free-field listening conditions in numerical form,” *Acoust. Sci. Technol.*, vol. 5, pp. 447 – 449, 2005.
- [20] H. Fletcher and W. A. Munson, “Loudness, Its Definition, Measurement and Calculation,” *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 12, no. 4, pp. 377 – 430, 1933.
- [21] D. W. Robinson and R. S. Dadson, “A re-determination of the equal-loudness relations for pure tones,” *Br. J. Appl. Phys.*, vol. 7, no. 5, pp. 166 – 181, 1956.
- [22] 鈴木陽一, 竹島久志, “人の等ラウドネス曲線の測定と国際規格,” *電気学会誌*, vol. 124, no. 11, pp. 715 – 718, 2004.
- [23] H. Fletcher and W. A. Munson, “Relation Between Loudness and Masking,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 9, no. 1, pp. 1 – 10, 1937.
- [24] S. S. Stevens, “The Measurement of Loudness,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 27, no. 5, pp. 815 – 829, 1955.
- [25] B. Scharf and J. C. Stevens, “The form of the loudness function near threshold,” *Proc. of 3rd International Congress on Acoustics*, 1961, pp. 80 – 82.
- [26] R. P. Hellman and J. Zwislöcki, “Some Factors Affecting the Estimation of Loudness,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 33, no. 5, pp. 687 – 694, 1961.
- [27] J. P. A. Lochner and J. F. Burger, “Form of the Loudness Function in the Presence of Masking Noise,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 33, no. 12, pp. 1705 – 1707, 1961.
- [28] S. S. Stevens, “Calculation of the Loudness of Complex Noise,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 28, no. 5, pp. 807 – 832, 1956.
- [29] ISO 532-1 Acoustics - Methods for calculating loudness Part 1: Zwicker method,” , 2017.
- [30] ISO 532-2 Acoustics - Methods for calculating loudness Part 2: Moore-Glasberg method,” 2017.
- [31] B. C. J. Moore and B. R. Glasberg, “Suggested formulae for calculating auditory - filter bandwidths and excitation patterns,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 74, no. 3, pp. 750 – 753, 1983.
- [32] B. C. J. Moore, “Development and current status of the ‘Cambridge’ loudness models,” *Trends Hear.*, vol. 18, pp. 1 – 29, 2014.
- [33] R. G. Mccurdy, “Tentative standards for sound level meters,” *Trans. Am. Inst. Electr. Eng.*, vol. 55, no. 3, pp. 260 – 263, 1936.
- [34] 難波精一郎, “知っているようで知らないラウドネス,” *日本音響学会誌*, vol. 73, no. 12, pp. 765– 773, 2017.
- [35] ISO 1996-2:2007, Acoustics— Description, Measurement and Assessment of Environmental Noise—Part 2: Determination of Environmental Noise Levels, 2007.
- [36] ISO/PAS 20065:2016 Acoustics — Objective method for assessing the audibility of tones in noise — Engineering method, 2016.
- [37] IEC 61400-11:2012 Wind turbines - Part 11: Acoustic noise measurement techniques, 2012

- [38] 難波精一郎, “ノイジネス・アノイヤンスについて,” 日本音響学会誌, vol. 44, no. 10, pp. 775 – 780, 1988.
- [39] 泉清人, “騒音の心理的不快感に関する属性についての考察 - 騒音のやかましさに関する研究 (13)”, 日本建築学会北海道 支部研究報告集, no. 46, pp.35 – 40, 1976.
- [40] 日本音響学会編, “新版 音響用語辞典,” コロナ社, 2003
- [41] B. Berglund, U. Berglund, and T. Lindvall, “Scaling loudness, noisiness, and annoyance of aircraft noise,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 57, no. 4, pp. 930 – 934, 1975.
- [42] 難波精一郎, 桑野園子, “種々の変動音の評価法としての Leq の妥当性並びにその適用範囲の検討,” 日本音響学会誌, vol. 38, no. 12, pp. 774 – 785, 1982.
- [43] U. Landström, E. Åkerlund, A. Kjellberg, and M. Tesarz, “Exposure levels, tonal components, and noise annoyance in working environments,” *Environ. Int.*, vol. 21, no. 3, pp. 265 – 275, 1995.
- [44] G. Brambilla and F. Pedrielli, “The Assessment of Tonal Components in the Environmental Noise: Features and Limitations of the Italian Legislation,” *Proc. of Inter-Noise 1996*, pp. 2531 – 2536, 1996.
- [45] V. Hongisto and D. Oliva, “Annoyance penalty of low-level tonal sounds,” *Euronoise*, pp. 1583 – 1587, 2018.
- [46] Hoare Lea and Partners, Bristol (United Kingdom) . Objective and subjective rating of tonal noise radiated from UK wind farms: Pt 2 (ETSU-W-32-00228-55/REP). United Kingdom, 1996.
- [47] S. Yokoyama, T. Kobayashi, and H. Tachibana, “Perception of tonal components contained in wind turbine noise,” *Proc. of Inter-Noise 2016. Hamburg*, pp. 2628-2639, 2016.
- [48] H. Tachibana, H. Yano, A. Fukushima, and S. Sueoka, “Nationwide field measurements of wind turbine noise in Japan,” *Noise Control Eng. J.*, vol. 62, no. 2, pp. 90 – 101, 2014.
- [49] H. Tachibana, “Modelling of house filter for wind turbine noise,” *6 th Int. Conf. Wind Turbine Noise*, 2015.
- [50] Yokoyama, S., Sakamoto, S., Tachibana, H. ”Perception of low frequency components in wind turbine noise.” *Noise Control Engineering Journal*, vol. 62, no. 5, 295 – 305. 2014.
- [51] 時田 保夫, “低周波音の評価について,” 日本音響学会誌, vol. 41, no. 11, pp. 806 – 812, 1985.
- [52] Y. Takahashi, “Vibratory sensation induced by low-frequency noise: The threshold for ‘vibration perceived in the head’ in normal-hearing subjects,” *J. Low Freq. Noise Vib. Act. Control*, vol. 32, no. 1 – 2, pp. 1 – 10, 2013.
- [53] World Health Organization. Regional Office for Europe., ☒☒ “Environmental noise guidelines for the European Region,” 2018.
- [54] 環境省告示 54 号, “騒音に係る環境基準について,” 2012.
- [55] H. Takeshima et al., “Equal-loudness contours measured by the randomized maximum likelihood sequential procedure,” *Acta Acust. united with Acust.*, vol. 87(3), pp. 389 – 399, 2001.
- [56] 難波誠一郎, 桑野園子, “音の評価のための心理学的測定法”, コロナ社, 1998.

- [57] D. Maiwald, “Beziehungen zwischen Schallspektrum, Mithörschwelle und der Erregung des Gehörs. (本文はドイツ語。英題: Correlations between Sound Spectrum, Masked Threshold, and the Stimulation of the Auditory) ,” *Acta Acust. united with Acustica*, vol. 18, no. 2, pp. 69 – 80, 1967.
- [58] N. D. Weinstein, “Individual differences in reactions to noise: A longitudinal study in a college dormitory,” *J. Appl. Psychol.*, vol. 63, no. 4, pp. 458 – 466, 1978.
- [59] 森尾謙一, 岸川洋紀, 松井利仁, 内山巖雄, 宮川雅充, 平松幸三, “騒音感受性評価尺度の妥当性に関する研究－騒音暴露実験による検討－,” 日本音響学会講演論文集 (2004 年秋季) , pp. 897 – 898, 2004.
- [60] ISO 1996-2:2017, Acoustics — Description, measurement and assessment of environmental noise — Part 2: Determination of sound pressure levels, 2017.

謝辞

本研究の遂行にあたり甚大なご指導を賜った本学 坂本慎一教授に深甚な感謝の意を表し上げます。大学院での課程を通して研究に対する姿勢をご教示いただきました。どんな疑問も看過せずに考え抜くことが説得力のある議論を導くということが一番の学びだったと考えています。根気強く丁寧なご指導のおかげで、はじめのうちは進捗報告すらままならなかった私も、最近はディスカッションができるようになり、知的好奇心とやりがいをもって研究に取り組むことができました。

ならびに本学 李孝珍特任助教には、研究室生活から実験の具体的なご指導まで全般にわたりお世話になりました。心理評価実験の計画・実施・データの分析の全面にわたり丁寧なご指導をいただきました。本研究では、予備検討も含め述べ 200 人以上の協力を得て心理評価実験を行いました。精査に耐えるデータを取得できたのも、ひとえに李さんのご指導の賜物です。深く感謝致します。

また茨城大学大学院 辻村壮平准教授には、心理評価実験における実験の妥当性、統計の取り扱いについて丁寧にご指導いただきました。一を聞けば十も百も返ってくるようなご指導のおかげで、本論文の内容にとどまらず心理評価の分野を広くお示しいただけました。厚く謝意を申し上げます。

一般財団法人 小林理学研究所の横山栄氏、小林知尋氏には、純音性騒音に関する国際的な動向について教えていただくとともに、心理実験の実施計画などに関して様々ご助言をいただきました。心よりお礼申し上げます。

なお本論文で報告した評価実験は、平成 29 年度環境研究総合推進費 5-1710「風力発電施設等の騒音に含まれる純音性成分による不快感の評価手法の研究」の枠組みにおいて実施しました。3 年間という短い期間ながらも注力して取り組む中で、騒音の評価の研究に携わる諸先生方からご指導いただく機会を得ることができ、大変幸運だったと思っています。

東京大学生産技術研究所坂本研究室の皆様には、公私にわたり大変お世話になりました。特に同期の菅原彬子さん、Marjorie Takai Tomy さん、そして本研究の 1 年目に一緒に取り組んだ佐々木奏子さんには感謝して止みません。

そして度々の評価実験参加のお願いを快く引き受けてくれた友人へ、参加くださったことへの感謝に重ねて、音って面白いねと言っていたことが何よりも励みになったことを申し添えたいと思います。

おわりに、長い学生生活を見守り続けてくれた友人と家族に感謝申し上げます。

令和 2 年 1 月

米村 美紀