

Environment Research and Technology Development Fund

## 環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

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  
(5-1710)

平成29年度～令和元年度

Study on method of assessing the annoyance by tonal components contained in wind turbine noise

〈研究代表機関〉

東京大学

〈研究分担機関〉

大成建設㈱

令和2年5月

## 目次

I. 成果の概要	4
1. はじめに（研究背景等）	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発の方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた主な成果	
6. 研究成果の主な発表状況	
7. 研究者略歴	
II. 成果の詳細	
II-1 純音性成分を含む騒音の心理評価に関する研究 （東京大学） 要旨	18
1. はじめに	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた成果	
6. 国際共同研究等の状況	
7. 研究成果の発表状況	
8. 引用文献	
II-2 純音性成分を含む騒音源の計測および予測技術に関する研究 （大成建設（株）） 要旨	42
1. はじめに	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた成果	
6. 国際共同研究等の状況	
7. 研究成果の発表状況	
8. 引用文献	
II-3 純音性成分を含む騒音の測定・評価に関する国内・国際規格に関する研究 （大成建設（株）） 要旨	65
1. はじめに	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発方法	

- 4. 結果及び考察
- 5. 本研究により得られた成果
- 6. 国際共同研究等の状況
- 7. 研究成果の発表状況
- 8. 引用文献

III. 英文Abstract

..... 83

## I. 成果の概要

課題名 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  
 課題代表者名 坂本 慎一（東京大学・生産技術研究所・教授）

研究実施期間 平成29～令和元年度

研究経費（累計額） 92,984千円  
 （H29年度：31,520千円，H30年度：29,944千円，R元年度：31,520千円）

本研究のキーワード 風力発電施設，家庭用ヒートポンプ給湯器，騒音評価，純音性成分，アノイアンス

### 研究体制

- （1）純音性成分を含む騒音の心理評価に関する研究（東京大学）
- （2）純音性成分を含む騒音源の計測および予測技術に関する研究（大成建設㈱）
- （3）純音性成分を含む騒音の測定・評価に関する国内・国際規格に関する研究（大成建設㈱）

### 1. はじめに（研究背景等）

我が国では、近年、省エネ・創エネに対する社会的要請の高まりとともに、再生可能エネルギーの導入や省エネ機器の推進が進められている。再生可能エネルギー源としての風力発電施設や、省エネ機器である家庭用ヒートポンプ給湯器が発する騒音には、20～200 Hz程度の低周波数領域に純音性成分が含まれることがある。それらの騒音は、レベルは低いものの、夜間に住宅地や郊外などの静穏な環境において長時間にわたって発せられることにより、地域住民からの苦情の原因となっている例が見られる。

風力発電設備から発せられる騒音に関しては、環境省より2017年5月に「風力発電施設から発生する騒音に関する指針」が策定された。その指針の中で、純音性成分が含まれることによるアノイアンス（不快感）の増加の可能性が指摘されているが、これに対してどのような評価を行うことが適切かについては今後の課題とされている。また、ヒートポンプ給湯器から発せられる騒音にも低周波数帯域の純音性成分が強く含まれることがあるが、そのような純音性成分を含む騒音と聴感印象との対応については知見が不足している。

風力発電施設や家庭用ヒートポンプ給湯器等の設備機器から発生する騒音や外装材から生じる風切音等の純音性の成分を含む騒音（純音性騒音）は、広帯域ノイズに比べて耳障りな印象を与えやすい。しかし、我が国の騒音の評価方法に、純音性の成分の影響を考慮できる手法は確立していない。一方、国外では、早くから純音性騒音の評価方法に関する研究が行われており、一部規格化されているものや、さらに改良を加える動きもある。それら規格の一部は国内の規格に転用されているものもあるが、独自に研究・開発されたものはない。そこで、本研究において、これまでに国外で開発された手法等を参考し、国際的な整合性を確認しながら、心理実験に基づき我が国に適した評価指標の開発に取り組む。また、環境騒音以外の研究分野における技術を応用することによって効率化を図りつつ、純音性騒音の室内への影響を予測する手法を開発する。

### 2. 研究開発目的

我が国では、風車騒音、家庭用ヒートポンプ給湯器などの設備機器による騒音の純音性を考慮した評価基準が現在には存在しない。そのような評価基準を提案するためには、我が国の生活環境において純音性成分を含む騒音に対して人が感じる不快感を定量的に調べ、適切な評価指標を提案する必要がある。また、評価指標の検討に際しては、ISOやIEC等、国際的に議論されている規格との整合性等についても確認・検討する必要がある。そこで、本研究では、風車騒音や家庭用ヒートポンプ給湯器等の設備機器、

自然換気・遮光のためのルーバー等で生じる風騒音に関して人間の感覚（うるささ感，不快感）と良い対応を示す物理量を求め，それら物理量から構成される騒音不快感の評価指標を構築する。その際，国際規格等との整合性に留意するため，評価指標，評価ランクの選定に対して，国内外の規格及び諸外国の評価制度との整合性を検討する。また，本研究で提案する評価指標は，地方公共団体職員や事業者が算出して利用することが想定されるため，評価指標の算出と評価を可能とするソフトウェアを提供する。

### 3. 研究開発の方法

#### II-1 純音性成分を含む騒音の心理評価に関する研究

本研究では，風力発電施設および家庭用ヒートポンプ給湯器から発せられる騒音を想定し，純音性成分を含む騒音の不快感を聴感評価実験によって調べ，さらにその騒音に含まれる純音性成分の強さと不快感の間の定量的な関係をあきらかにすることを目的とした3つの検討を行った。また，リアルタイムで純音性可聴度(Tonal Audibility)が計測できる測定機器を試作した。

##### (1) 純音のマスクング閾値に関する実験

広帯域に成分をもつノイズに純音が混在する場合，純音はノイズによるマスクングの影響を受ける。騒音に含まれる純音が聞こえ始めるレベルがマスクング閾値であり，純音性成分の評価において最も基礎的な聴覚特性である。

3種類の背景騒音と7種類の純音で構成する試験音における純音の強度を変えながら，純音のマスクング閾値を調べた。実験手法としては，ランダム化最尤適応法を適応しており，半無響室に設置した低音用スピーカ16台と，中・高音用スピーカ1台から構成される音源装置を用いて試験音を提示し，評価させた。背景騒音は，音響実験によく用いられる標準的なノイズとしてピンクノイズ，静穏な屋外環境の騒音を模擬したモデルノイズ（オクターブバンド毎のエネルギーが-4 dB/Oct.bandの傾きを有する），屋内環境の騒音を模擬するため，モデルノイズにハウスフィルタ（一般家屋の内外音圧レベル差の実測結果に基づいて遮音性能をモデル化したフィルタ）を処理した屋内ノイズの3種類を使用した。7種類の純音は，風車施設と給湯器から発生する純音周波数を考慮し40 Hz， 50 Hz, 80 Hz, 100 Hz, 160 Hz, 200 Hz, 400 Hzを対象とした。

##### (2) 純音性成分を含む騒音の大きさ感に関する聴感評価実験

純音性成分を含む騒音の不快感に影響する基礎的な要因として，大きさ感を検討した。背景騒音として上述の検討と同じくピンクノイズ（45 dB），モデルノイズ（45 dB），屋内ノイズ（35 dB）の3種類を対象とし，それぞれの背景騒音で，4種類の純音（40 Hz, 50 Hz, 100 Hz, 200 Hz）の強度がIEC 61400-11:2012に定めるTonal Audibilityが0, 5, 10, 15 dBとなるように調整した4水準と純音の付加しない1条件で計17条件を作成した。被験者調整法により聴感評価実験を実施した。標準刺激は純音性成分を含む騒音（継続時間4秒），比較刺激は，同じ種類の背景騒音で純音成分を含まないノイズ（継続時間4秒）とし，標準刺激と比較刺激が同じ大きさに聞こえるように，比較刺激の音量を手元のボリュームつまみで調整させた。

##### (3) 純音性成分を含む騒音のわずらわしさに関する聴感評価実験

純音性成分を含む騒音の音質に起因する不快感を実験室実験より検討するため，ノイジネス（本研究ではノイジネスを騒音の「わずらわしさ」と一貫して表現している）に関する聴感評価実験を行った。騒音のわずらわしさは，生活環境で受ける印象であるため，音を評価する際に状況を想定した検討が必要である。風力発電施設やヒートポンプ給湯器が問題になりやすい夜間の静穏な住宅地を想定し，下記の3つの状況を想定した実験条件を作成した。

- ✓ （実験3-1）背景騒音の種類（屋外，屋内）とレベルがわずらわしさに及ぼす影響
- ✓ （実験3-2）非常に静穏な環境を想定し，就寝時におけるわずらわしさの評価
- ✓ （実験3-3）日中に過ごす環境を想定した場合のわずらわしさの評価

純音性成分を強く含む騒音は，純音性成分を含まない広帯域騒音よりも不快感が高い。その不快感の増分を，一般的な広帯域騒音の評価におけるレベル増分として評価した量が，Tonal Adjustmentである。わずらわしさ評価実験で得られた7段階尺度による評定値に基づき，純音性成分を含むことによるTonal

Adjustmentを算出した。

(実験3-1) 背景騒音の種類とレベルがわずらわしさに及ぼす影響に関する実験

背景騒音に、モデルノイズと屋内ノイズをそれぞれ30 dBと35 dBになるように調整した上、純音周波数が31.5 Hz, 40 Hz, 50 Hz, 100 Hz, 200 Hz, 400 Hzの6周波数、純音強度 (Tonal Audibility) がおよそ0, 3, 6, 9, 12 dBとなるように付加した試験音と、比較のため、ベースノイズと同じ周波数特性をもつ広帯域ノイズ 25 dB, 30 dB, 35 dB, 40 dBの4段階に調整した試験音をランダム順序で提示し、下記の教示で7段階の評定尺度により評価させた。

「夜に就寝しようとしているときに、試験音がずっとなり続けている」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:「非常に煩わしい」の数字に割り当てて回答させた。

(実験3-2) 就寝時を想定したわずらわしさ評価

就寝時を想定し、背景騒音のレベルを25 dB, 30 dBに設定し(実験3-1)と同じ教示文と回答方法で実験を実施した。背景騒音は、モデルノイズと屋内のイズ2種類、純音周波数は、40 Hz, 50 Hz, 100 Hz, 200 Hz, 400 Hzの5周波数、純音強度 (Tonal Audibility) がおよそ0, 3, 6, 9, 12 dBとなるように付加した試験音と、比較のため、ベースノイズと同じ周波数特性をもつ広帯域ノイズ 20 dB, 25 dB, 30 dB, 35 dBの4段階に調整した試験音を用いた。

(実験3-3) 日中を想定したわずらわしさ評価

日中の聴取を想定し、背景騒音のレベルを35 dBとし実験を行った。背景騒音は、モデルノイズと屋内のイズ2種類、純音周波数は、40 Hz, 50 Hz, 100 Hz, 200 Hz, 400 Hzの5周波数、純音強度 (Tonal Audibility) がおよそ0, 3, 6, 9, 12 dBとなるように付加した試験音と、比較のため、ベースノイズと同じ周波数特性をもつ広帯域ノイズ 30 dB, 35 dB, 40 dB, 45 dBの4段階に調整した試験音を用いた。評価手法は(実験3-1)と同じであるが、日中の音環境を想定していることから、下記のように教示し回答させた。

「日中、居間でくつろいでいるときに、再生荒れる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:「非常に煩わしい」の数字に割り当てて回答させた。

#### (4) 純音性指標を測定可能な計測器の試作

純音性成分の可聴性に関する指標として、ISO/PAS 20065:2016やIEC 61400-11:2012等の国際規格に純音性可聴度(Tonal Audibility: TA)が定められている。純音性成分を有する騒音のデータ整備のために、簡便かつ汎用性の高い計測機器の開発が望ましい。そこで、スマートフォンによるアプリおよび多機能計測システムSA-A1(以降、SA-A1)で動作可能なTA計測アプリケーションソフトウェアを試作した。TAを規定した国際規格のうち、ISO/PAS 20065:2016が提供しているサンプルプログラムコードをベースとして試作品を開発し、実験室にてその精度を検討した。

## II-2 純音性成分を含む騒音源の計測および予測技術に関する研究

風車騒音、家庭用ヒートポンプ給湯器(以下、給湯器)、風騒音に関する物理特性を把握することを目的とした実測調査を行った。また、評価指標を得るための測定法、純音性騒音を直接的に測定できない場合に用いる純音性騒音の予測技術に関する検討を行った。

### (1) 騒音源の収集と物理的な特徴の把握

実音データの収集は、音源毎に異なる方法とし、下記のように行った。

- ✓ 風車騒音：先行研究(風力発電等による低周波音の人への影響評価に関する研究：環境研究総合推進費 S2-11(2010-12年度))より収録した全国34の風力発電事業所における164か所の録音データから代表的な純音性騒音を含む屋外の測定値8例(480データ)を対象とした。
- ✓ 給湯器騒音：2種類の機種(2物件)で計3回(異なる季節を含む)の実測調査を行い、2種類の機種を対象とした。
- ✓ 風騒音：風洞実験室において、3種類(手摺1, ルーバー2)の外装材に対する音響測定を実施した。1試験体当たり計390データ(受音点3点, 風速10条件, 風向きに対する部材の設置角度13条件)を取

集した。

物理量の分析方法は基本的にはスペクトル分析を採用し、必要に応じてオクターブバンド分析を行った。純音性成分の大きさを表す評価指標Tonal Audibilityは、国際規格（IEC61400-11, ISO1996-2, ISO/PAS20065）の分析方法を適用して求めた。ISO1996-2やISO/PAS20065が50 Hz以上の音源にのみ適応可能であるが、IEC6144-11は50 Hz未満の周波数帯域をもつ音源でも分析できる。いずれの計算方法においても純音性成分の検出能力には大きな差がないことが既往の研究で認められたため、音源の特徴により適応可能な分析手法を選択して使用した。

## （２）評価尺度の測定方法に関する検討

本研究で対象とする騒音源について、純音性成分を考慮した測定方法が規格化されているのは、風車騒音（IEC 61400-11:2012, JIS C1400-11:2017）のみである。一方、給湯器騒音と建物の外装材による風騒音に関する測定手法がないため適切な測定方法を検討した。

### ✓ 給湯器騒音

給湯器騒音に関しては、JIS C9220-2018（家庭用ヒートポンプ給湯器）とJIS C9815-1:2013（エアコンディショナおよび空気熱源ヒートポンプの定格音響パワーレベル-第一部：直吹き形室外機）により実験室測定法が規格化されているが、直接参照できる現場測定法は無い。現場実測では暗騒音の影響を受けるため測定手法の検討が難しい。そのため、幅11m×奥行16m×高さ15mの建屋内に3階建ての実験住宅が設置されている実験環境で測定を行い、その結果から測定方法の検討を行った。実録した給湯器騒音をスピーカから放射し、12 m ×6 m×4 mの部屋で288点、6 m×6 m×4 mの2部屋で計144点を測定点とした。再生音は、実測により得られた2種類の給湯器騒音を用いており、それぞれ25Hz, 42.5Hzを基音とした倍調成分などの純音性騒音を含む。

### ✓ 風騒音

風騒音については建設後に問題が生じないように設計段階で実験室測定を実施し、純音性騒音の生じない部材を選定している。しかし、風騒音の測定・評価に関する規格・基準等は存在しないため、評価機関毎で異なる測定・分析・評価手法を利用している。これらを標準化するため、実験室測定の要件（測定で用いる風洞施設や試験体の仕様、風向や風速等の測定条件の設定、測定点の設定方法）に関する検討を行った。

## （３）評価尺度の予測方法に関する検討

低い周波数帯域に純音性成分を持つ風車騒音と給湯器騒音に適用可能な室内騒音の予測手法を検討した。対象の騒音源直近の音圧レベルや対象室の窓前の音圧レベルから、室内騒音レベルを予測する手法を検討した。屋外騒音伝搬の検討には、FDTD法によるパラメトリックスタディを行った。また、その数値解析モデルと同様な条件で実測を行い、予測方法の有効性を検討した。

## II-3 純音性成分を含む騒音の測定・評価に関する国内・国際規格に関する研究

評価指標および指標による基準値に関して、国際規格、諸外国の評価基準、研究動向の情報を収集、整理し、「II-1 純音性成分を含む騒音の心理評価に関する研究」における、我が国の純音性騒音の評価に適した指標の検討に役立てるための基礎資料とするため、また、「II-2 純音性成分を含む騒音源の計測法・予測技術に関する研究」における、外部から室内への伝搬計算開発の基礎資料とするため、以下の調査を実施した。

（１）純音性成分を含む騒音の測定評価に関する国内外の規格：評価方法の基本となる理論、評価指標算出時の対象周波数、周波数重み付け、周波数帯域等の測定方法に注目して調査した。

（２）純音性成分を含む騒音の評価に関する研究プロジェクトの調査：国外における純音性成分を含む騒音の評価に関する研究プロジェクトについて、各国の評価手法および評価手法が決定される技術的背景、ガイドライン、測定方法、予測方法とその策定の経緯について調査した。

（３）純音性成分を含む騒音の評価指標の算出方法による差異に関する研究調査：純音性成分を含む騒音の代表的な評価指標として純音性可聴度（Tonal Audibility）は規格によって算出方法が異なる。それらの差異に注目して算出結果の比較に関する研究や、国際的なラウンドロビンテストを実施したプロジ

エクトの結果について調査した。

(4) **WHO環境騒音ガイドラインの調査**：2018年に改定されたWHO環境騒音ガイドラインに風車騒音が追加された。ガイドラインに規定された推奨値やその決定の根拠等について調査し、我が国の風車騒音に関する指針（風力発電施設から発生する騒音に関する指針：平成29年5月 環境省）と比較し、その関係性について考察した。また、わずらわしさのみならず健康被害に関する事項についても調査した。

(5) **純音性騒音の評価指標を算出可能な市販の分析器／ソフトの調査**：純音性成分を含む騒音の評価指標や基準値を策定した場合を想定し、国内外の複数の音響機器メーカーについて、純音性騒音の評価指標を計測可能な分析器およびソフトの開発状況を調査した。

(6) **低周波純音の伝搬計算に関する調査**：純音性成分を含んだ騒音の外部から室内への伝搬計算を行う場合、特に純音成分の周波数が低周波音領域にあると、室寸法と波長の関係から簡単なエネルギー計算では正確な予測ができない恐れがある。そこで、低周波純音成分を含む騒音の室内への伝搬計算に関する研究のうち、複雑な解析に頼らず簡易式によって予測する手法の研究について調査した。

(7) **提案評価指標および基準値の国際整合性に関する検討**：「II-1 純音性成分を含む騒音の心理評価に関する研究」で採用した純音性可聴度（Tonal Audibility）に基づくTonal Adjustmentの考え方が、国際規格や他国の規格との整合性に関して検討した。

## 4. 結果及び考察

### II-1 純音性成分を含む騒音の心理評価に関する研究

#### (1) 純音のマスクング閾値に関する実験

3種類の背景騒音を用いて調べたマスクング閾値は、図1に示すように80 Hz～400 Hzのマスクング閾値の平均は-2 dB～-4 dBで、ノイズの周波数特性の違いによる差異はほぼ見られず、同様の傾向であった。

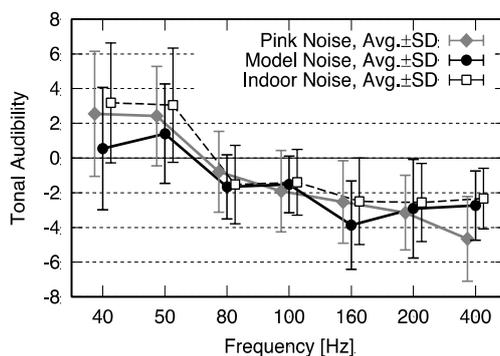


図1 マスクング閾値とTonal Audibilityの関係（本文中図4.1.2）

このことから、IEC-61400-11に規定されるTonal Audibilityは、背景騒音の周波数特性によらず、80 Hz～400 Hzの範囲の純音の可聴性を安定して評価でき、40 Hz、50 Hzの条件は、聴覚の絶対閾値の影響によりマスクング閾値が若干上昇した。この検討により、国際的に用いられる評価指標であるTonal Audibilityの妥当性を確認した。

#### (2) 純音性成分を含む騒音の大きさ感に関する聴感評価実験

本検討は、騒音の不快感の最も基礎的な要因である騒音の大きさ感に関する実験データの収集が目的である。被験者調整法により調べた純音性成分を含む騒音の大きさ感を、3種類の物理指標、ISO 532-1:2017によるZwickerのラウドネスレベル、ISO 532-2:2017によるMoore-Glasbergのラウドネスレベル、及びA特性音圧レベルによりTonal Audibilityとの関係で整理した。

純音の強度が増すほど主観的な音の大きさ感が大きくなり、大きさ感の増加量は、ピンクノイズ<モデルノイズ<屋内ノイズの順に大きくなる傾向を示した。一方、標準刺激 ( $S_s$ ) と被験者が調整した比較刺激 ( $S_c$ ) から算出した物理指標値の差分 ( $\Delta L_s = S_c - S_s$ ) は、ZwickerのラウドネスレベルおよびMoore-Glasbergのラウドネスレベルでは同じ、または上昇していた。一方、A特性音圧レベルによる評価では、ピンクノイズでは同じ、または上昇したが、モデルノイズと屋外ノイズでは、純音の強度が増すと一部の条件（100 Hzと200 Hz）で物理量の増分が減少（被験者が調整したレベルよりも標準刺激のレ

ベルの方が大きい)となる逆転現象が生じた。その原因として、純音強度が強くなると (Tonal Audibility 15 dB), 背景騒音がピンクノイズの場合はいずれの指標でも増加量は小さいが、背景騒音がモデルノイズおよび屋内ノイズのように低音域が優勢な場合は、ラウドネス指標の値が大きくなり、A特性音圧レベルおよびZwickerのラウドネスレベルでより急峻に増加することが示された。

Zwickerのラウドネスレベルを指標とした場合、 $\Delta L_s$  は-2 phon~2 phon であり、背景騒音による違いについては、純音性成分が非常に強いTA = 15 dBの条件で有意差が見られた。Moore-Glasbergのラウドネスレベルを指標とした場合、 $\Delta L_s$  は0 phon~4 phon であり、背景騒音による違いは小さかった。また、純音強度が強い条件でも有意差は見られず、評価が安定することが示された。A特性音圧レベルを指標とした場合、 $\Delta L_s$  は-5 dB~2 dB でばらつきが大きく、純音性成分が非常に強いTA=15 dBの場合には、ピンクノイズ条件では $\Delta L_s$ が正、モデルノイズおよび屋内ノイズ条件では $\Delta L_s$ が0または負となり、背景騒音の違いによって評価が最も大きく異なる結果となった。

この結果より、環境騒音評価に一般的に用いられているA特性音圧レベルは、一般的な居住環境下の背景騒音中で純音性成分が強い場合に主観的な大きさ感との乖離が大きく、過大に評価してしまうことになるという大きな問題点が示唆された。本研究の最も重要な開発目的である、騒音不快感の評価指標の構築に際して、環境行政で用いられることを前提とすればA特性音圧レベルを指標とすることになるため、本検討で示された特性を十分に考慮する必要がある。それに対してMoore-Glasbergのラウドネスレベルは、背景騒音の違いによらず安定した評価値を与えることが分かった。

### (3) 純音性成分を含む騒音のわずらわしさに関する聴感評価実験

本検討は、騒音の不快感の主要な要因である騒音のわずらわしさに関する実験データの収集を目的とし、3つの実験結果をまとめている。

#### (実験3-1) 背景騒音の種類とレベルがわずらわしさに及ぼす影響に関する実験

3種類の背景騒音を対象とした実験結果では、いずれの背景騒音の条件においても、Tonal Audibilityが高くなるに従い、わずらわしさの心理評価値が高くなる傾向が見られた。Tonal Audibilityが0 dBから12 dBに増加することに伴うわずらわしさ評価値の増分は、背景騒音30 dB条件で1.6 (7段階中)、35 dB条件で1.1であり、環境騒音のレベルが低い方が、純音性成分によるわずらわしさが増加しやすいことが分かった。モデルノイズ30 dBの条件では、低い周波数の純音 (31.5 Hz, 40 Hz, 50 Hz) が付加された場合にわずらわしさ評価が相対的に低い結果となり、最小可聴値の影響で低周波数純音が聞こえていなかった可能性がある。

#### (実験3-2) 就寝時を想定したわずらわしさ評価

就寝時を想定して背景騒音を25 dB, 30 dBに設定した実験条件でも、Tonal Audibilityの増加にしたがってわずらわしさも増加する傾向にあり、その増加の程度は純音周波数によって異なるものもあった。背景騒音25 dB条件ではTonal Audibilityが3 dB以上の条件で純音周波数による有意差が認められ、モデルノイズ25 dB, 30 dB, 屋内ノイズ25 dBで40 Hz, 50 Hzの条件よりも、100 Hz, 200 Hz, 400 Hzの純音周波数の方が、わずらわしさが高かった。屋内ノイズ30 dB条件では、純音周波数による有意差は認められなかった。

わずらわしさの評価値とラウドネスレベル $LL(Z)$ 、Moore-Glasbergのラウドネスレベル $LL(M)$ 、A特性音圧レベル $L_A$ の3種類の物理指標との対応を確認した結果、いずれの物理指標とも強い線形の関係が認められたが、純音周波数によるばらつきは $L_A$ 、 $LL(Z)$ 、 $LL(M)$ の順で大きい。また、同じ物理量でも純音性成分を含む試験音が純音を含まない試験音よりわずらわしさ評価が高くなっており、純音性成分が付加されることによりわずらわしさが増加していることが分かった。

純音性成分による不快感の増分を評価するTonal Adjustmentと上記の3種類の物理指標との関係から、 $LL(Z)$ 、 $LL(M)$ では、純音強度が強くなるに従ってTonal Adjustmentもおおよそ線形に増加するのに対し、 $L_A$ で評価した場合には、Tonal Audibilityが6以下の範囲では、純音強度が増すにしたがってTonal Adjustmentが増大するが、それ以上に純音強度が強くなると、横ばい、もしくは純音周波数によっては減少していく複雑な傾向であった。また、純音周波数が高い条件ほどTonal Adjustmentが高く、純音周波数が低い条件ではTonal Adjustmentが低い。就寝時想定では背景騒音レベルが低く、純音性成分の絶対レベルもそれほど高くはないが、低周波数領域では可聴閾が高くなるので、その影響が表れたものと考えられる。

## (実験3-3) 日中を想定したわずらわしさ評価

日中を想定して背景騒音を35 dBに設定した実験条件では、モデルノイズでは、200 Hz, 400 Hzの純音をもつ条件が40 Hz, 50 Hz, 100 Hzの条件よりわずらわしさが有意に高かったが、屋内ノイズでは純音周波数による差異は見られなかった。実験3-2と同様に、Tonal Adjustmentと3種類の物理指標との関係から、 $LL(Z)$ ,  $LL(M)$ では、純音強度が強くなるに従ってTonal Adjustmentもおおよそ線形に増加するが、 $L_A$ で評価した場合には、Tonal Audibilityが6 dBないし9 dB以下の範囲では、純音強度が増すに従いTonal Adjustmentが増大するが、それ以上になると横ばい、もしくは減少していく複雑な傾向が見られた。提示レベルが低い(実験3-2)の結果と比較すると、実験3-3の方がTonal Adjustmentが低く、背景騒音のレベルが低い静穏な環境下ほど、純音成分が不快感に及ぼす影響が大きいことを示している。

## 実験結果の総合的考察とA特性音圧レベルの評価におけるTonal Adjustmentに関する提案

純音成分とTonal Adjustmentの関係を調べた結果、Moore-Glasbergラウドネスレベルによる評価が最も線形性が強く、かつ、概ねまとまった結果が得られた。しかしながら、環境騒音の評価は、現在、国際的にA特性音圧レベルに基づいて行われているため、A特性音圧レベルによる評価におけるTonal Adjustmentについてさらに考察し、評価の指針に関する検討を行った。

広帯域成分をもつ一般的な環境騒音(青, 白抜き)と純音成分を含む環境騒音(赤, 塗りつぶし)のA特性音圧レベル( $L$ )と心理評価値( $r_N$ )との関係は図2ようになる。広帯域の一般的な環境騒音にある純音成分が加わると、心理的「わずらわしさ」が増え、その増分は $\Delta r_N (= r_{N,S} - r_{N,N})$ に表現できる。それと同時に、物理量( $L_A$ )も増え、その増加量は $\Delta L_{A,Tone}$ で表現できる。しかし、 $\Delta L_{A,Tone}$ の増分は一般的な環境騒音の物理量( $L$ )と心理評価値( $r_N$ )との対応関係(青, 回帰直線)からみると、心理的なわずらわしさ増分( $\Delta r_N$ )を物理相当値に換算した $\Delta L_{PSY}$ より小さい。その補正值としてTonal Adjustment  $K_T$ は以下の式(1)で求めることができる。

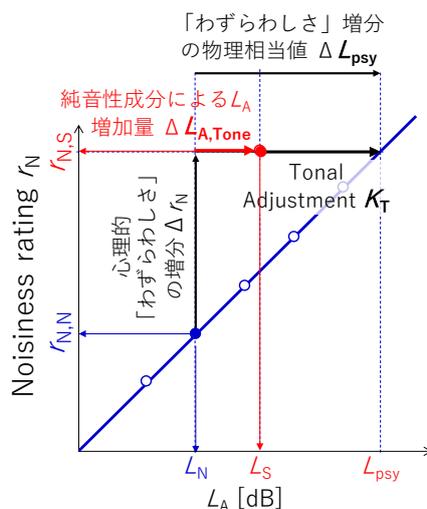


図2 Tonal Adjustmentのモデル (本文中図4.1.18(c))

$$K_T = \Delta L_{psy} - \Delta L_{A,Tone} \quad (1)(本文中式4.1.1)$$

モデルノイズと屋内ノイズが25 dB, 30 dB, 35 dBである実験結果により、実験条件ごとに純音周波数による有意差が認められなかった条件を同じ群とみなし、 $\Delta L_{PSY}$ と $\Delta L_{A,Tone}$ を用いて $K_T$ を算出した結果を図3に示す。

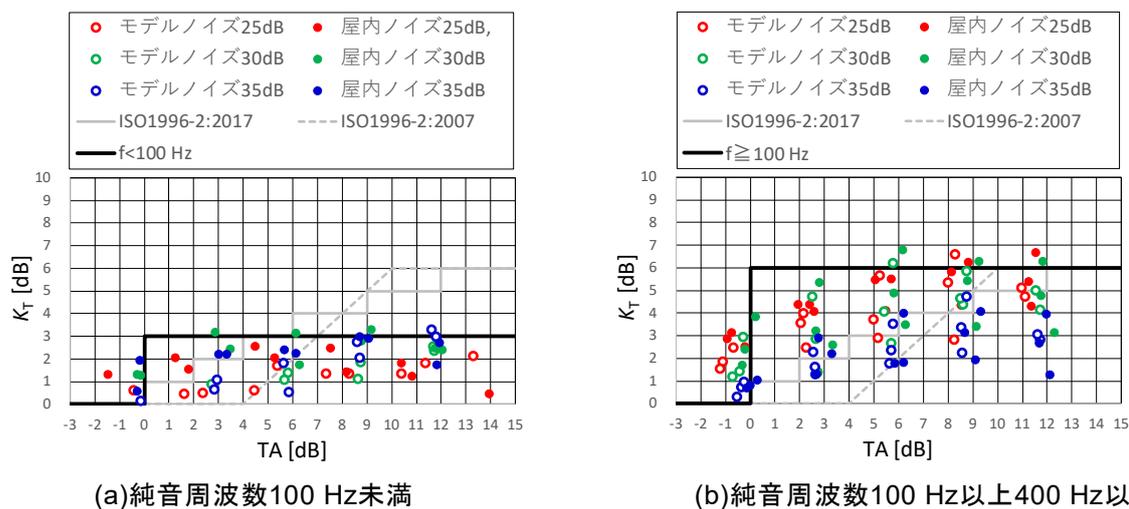


図3 Tonal AudibilityとTonal Adjustmentの関係（本文中図4.1.24）

図3より以下の傾向が考察できる。

- ✓ Tonal Audibilityが0 dB以上になると、Tonal Adjustmentが正の値となる。
- ✓ Tonal Adjustmentの値は背景騒音のレベルおよび種類によってばらつき、背景騒音レベルが低いほど大きくなる傾向がある。
- ✓ Tonal Adjustmentの最大値は、純音周波数が100 Hz未満の場合はおよそ3 dB、100 Hz以上の場合はおよそ6 dBとなる。

この結果により、図3に太実線で示すように、

$$K_T = \begin{cases} 0 & (TA < 0) \\ A & (TA \geq 0) \end{cases} \quad (2)(\text{本文中式}4.1.2)$$

純音周波数100 Hz未満のとき $A=3$ 、100 Hz以上のとき $A=6$ となるTonal Adjustmentを設定した。Tonal Adjustmentは、純音ペナルティとも呼ばれる。このTonal Adjustmentは、計測されたA特性音圧レベルに加算して評価レベルとする。本検討により提案した手法は、評価の手続きが単純であり、環境行政で用いるのに適している。

以上の検討結果より、人間の感覚（うるささ感、不快感）と良い対応を示す物理量を求め、その物理量から構成される騒音不快感の評価指標を構築するという研究目標を達成することができた。

#### (4) 純音性指標を測定可能な計測器の試作

簡便かつ精度の高い測定機器を開発することを目的に2種類の試作品を開発した。この試作により、評価指標の算出と評価を可能とするソフトウェアを提供するという研究目標を達成した。その一つは、携帯端末（ipod touch）に市販の民生品マイク（MicW社製、i437L）を組み合わせたものである。この試作品により人工的に作成した純音性成分を含む定常騒音のTAを測定し、別途同じ音を録音して電子計算機によりTAを計算した結果と比較した結果、両者は±1 dB未満の差で良好に一致した。この試作事例は、分析器、マイクロホンともに民生品であるため比較的安価に構成できるが、計測の精度に関しては十分な注意が必要である。すなわち、マイクロホンの性能（周波数特性、および感度）を予め把握した上で、使用者が適用範囲を適切に判断することが極めて重要となる。次に、RION社製騒音計と分析器SA-A1を組み合わせた構成で試作し、制度検証実験を行った。精度検証の結果、試作した分析システムによる測定値は、同時に録音した後にPC上で計算した結果と±1 dB未満の差で良好に一致することを確認した。この試作事例では騒音計を利用しているため、マイクロホンはIEC 61672-1に適合し、精度が保証されるが、分析システムと合わせ、計測システムは高価なものとなる。

## II-2 純音性成分を含む騒音源の計測および予測技術に関する研究

## (1) 騒音源の物理的な特徴

### ✓ 風車騒音

8例の風車騒音を分析した結果、純音性成分が40～200 Hzの範囲で分布しており、風車騒音の純音性成分を除く周波数（ベース音）は1オクターブあたり-4dBの傾きを示した。IEC61400-11に規定されるTonal Audibilityを算出した結果、風車騒音のTonal Audibilityは40～80Hz、160～200Hz付近で大きな値を示し、最大15dB程度の範囲に分布した。

### ✓ 給湯器騒音

冬期と中間期に2種類の給湯器を対象に実測を行った結果、機種や季節により発する純音性成分の周波数が異なることが分かった。冬期と中間期の通常運転を比較すると、冬期が中間期より純音性成分のピーク周波数が高周波数帯域に移動しており、騒音レベルも高い傾向を示した。冬期は、「霜取り運転」が見られ、騒音レベルは比較的低い純音性成分のピークが高くなる傾向を示した。これらの結果から、給湯器騒音の物理特性を把握するためには、中間期と冬期の両方調査する必要があることが示された。

実測データ（全132データ）を狭帯域分析すると、屋外で測定した給湯器騒音で純音性成分を除く周波数特性（ベース音）は250 Hz以下では0 dB/Oct.、それ以上の周波数では-5 dB/Oct.であった。IEC61400-11に規定されるTonal Audibilityを算出した結果、屋外で測定した場合40 Hz～2 kHzの周波数帯域に通常運転時で-3～15 dB、霜取り運転時は-3～21 dBに分布した。屋内で測定した場合40 Hz～2 kHzの周波数帯域で-3～18dBに分布した。

### ✓ 風騒音

風洞実験室に設置した手摺に代表風速（10m/s, 15m/s, 20m/s）で当てた場合に発生する風騒音の狭帯域分析を行った。流体音は、純音性成分の最大値がベース音より20～30 dB上昇したものと、70～80 dB上昇したものが見られた。一方、振動音は、ベース音から10～20 dB上昇し、ピークとなる周波数は広帯域にわたって多数観測された。IEC61400-11により、流体音と振動音のTonal Audibilityを算出した結果、流体音は風速10m/s以下では-3 dB～10 dB、風速10 m/s以上の条件では-3 dB～40 dBの範囲で検出され、振動音は-3 dB～18 dBの範囲で検出された。また、振動音においては、比較的低速である2.5 m/sでもTonal Audibilityが10 dBを上回る事例が観測された。

## (2) 評価尺度の測定方法に関する検討結果

### ✓ 給湯器騒音

#### 1) 音源特性の現場測定法

給湯器騒音の現場測定法を提案するため、純音性成分を考慮した設備機器の測定法に関する規格を調査した。参照した規格であるJIS Z8733-2000の附属書B.2には離散純音を放射する音源のためのマイクロホン配置（半球測定表面）が、附属書Cには平行六面体測定表面のマイクロホン配置が示されている。この規格を参考に、機器の周囲が開放された場所および音源に指向性がある場合は前者、沢山の反射物や暗騒音が大きい場合には後者によって測定するなど、現場の実情に即した測定点を選択し、実測を行うことを提案した。

#### 2) 室内騒音の現場測定法と代表値の算出方法

風車騒音や給湯器騒音などの低い周波数帯域に純音性成分を含む騒音の室内騒音の測定方法および室内の音圧レベルの代表値の算出方法として、ISO16283-3を参照する方法を提案した。この方法では、室中央付近5点の代表値と隅角部から0.3～0.4m離れた4点と床近傍2点と天井近傍2点を合わせた計8点の重みづけしたエネルギー合成により代表値を求める。この測定手法の有効性を検討するため、実測実験を行った結果、全点平均値に近いことを確認した。

### ✓ 風騒音

風洞施設による測定方法を標準化するため、風洞設備稼働時の暗騒音、試験体の設置方法、測定点の設置方法、実験条件の設定に関する検討を行った。

1) 風洞設備稼働時の暗騒音：試験体により発生する風騒音の純音性成分を正確に捉えるためには、送風機などから発生する騒音の低騒音化を図った低騒音型風洞を使用する必要がある。5種類の低騒音型風洞の稼働時暗騒音を検討した結果、異なる臨界帯域のTonal Audibilityをエネルギー和したTA<sub>sum</sub> と風速別の

騒音レベル  $L_{pA}$  を足した値が風速  $V_{wind}$  (m/s) + 50 より小さくなることを推奨する。

2) 風向角条件変更に伴う試験体設置条件：現場と近い環境で測定を行うためには、試験体の設置条件を考慮して、風向角毎に最適な配置を検討する必要がある。そのためには、試験体を回転させるターンテーブル付き試験体用架台を吹出口に向かって移動させることで試験体の裏側に風が作用しないようにしなければならない。そのため、平行移動可能なターンテーブル付き架台の設置が求められる。

3) 風洞実験における測定点の設定：測定点の設置場所により、卓越したピークの大きさや数が異なる場合があるため、風速および風向角の変化に伴って、最適な測定点位置が異なる。したがって、事前に予備実験で全体的な発音傾向を確認し、測定点位置や測定点数（多点同時測定）等を十分検討することが必要である。

4) 風洞実験条件の設定方法：風騒音は、わずかな条件の違いで発音性状が大きく変わる可能性があるため、限定した条件のみで実験・評価は望ましくない。実際に部材に作用する風速・風向角条件は離散的な条件ではないため、見落とし条件が発生しうる。そのような見落としを防ぐために「風速レンジ／風速レンジ代表値」および「風向角レンジ／風向角レンジ代表値」という概念を導入し、実験条件を選定することを提案した。

### (3) 評価尺度の予測方法に関する検討

#### ✓ 屋外騒音

給湯器室外機から対象室の窓前までの室外半閉空間における空間の共振による増幅を検討するため、FDTDによるパラメトリックスタディを行った。その結果、解析対象の空間での共振の影響により、予測値には10～20 Hz、および50 Hz以上にピークが見られた。また、住戸間の距離が広がると共振周波数は低下し、ピークの音圧レベルが小さくなる傾向を示した。2次のピークに関しては、音圧レベルの減衰傾向は距離が2 m以下では二次元音場の距離減衰の理論式  $10 \cdot \log(r)$  に近いことを確認した。

#### ✓ 室内騒音

住戸の内外音圧レベル差に対して、室内で生じる共振の影響量を補正する計算式（ルームフィルタ）を提案した。室外の音圧レベルを  $L_{out}(f)$ 、ハウズフィルタ（内外音圧レベル差）を  $\Delta HF(f)$ 、ルームフィルタを  $\Delta RF(f)$  としたとき、室内への透過音の空間平均音圧レベル推定値  $L_{in}(f)$  を式(3)のとおり定義する。

$$L_{in}(f) = L_{out}(f) - \Delta HF(f) - \Delta RF(f) \cdot \dots \cdot (3) \text{ (本文中式4.2.4)}$$

提案式の妥当性を検討するため、実測値と予測値との対応を検討した結果、内外音圧レベル差の絶対値は若干異なるものの、共振や反共振となる周波数帯域の対応状況は良く、ルームフィルタは室内で生じる共振の影響を概ね再現しており良好な対応関係であることを確認した。

## II-3 純音性成分を含む騒音の測定・評価に関する国内・国際規格に関する研究

(1) 純音性成分を含む騒音の測定評価に関する国内外の規格：騒音に含まれる純音成分を評価する規格は、その対象音及び分析法により、Tonal Audibility（純音性可聴度）系、Tone Prominence（顕著）系、Perceived Noise Level 系に分けられる。Tonal Audibility系が、計算手法が最も明確であり、すでに風力発電施設に関する規格にも採用されているため、本研究における評価量として最もふさわしいと結論付けた。Tonal Audibility 系の規格は複数あるが、基本的な考え方は共通している。しかしながら、計算対象となる周波数範囲や周波数分解能、臨界帯域の計算方法等が異なっている。環境音の評価においてペナルティを与える基準として規定されているが、これについては学術的な根拠が希薄である。

(2) 純音性成分を含む騒音の評価に関する研究プロジェクトの調査：イギリス、デンマーク、フィンランドによる研究事例を調査し紹介した。イギリスに関しては、NMS Project 2.2の内容を再構成し、環境騒音の純音性の評価がTonal Audibility系に集約されていく流れを示した。また、ETSU報告では風車騒音のImmission系の評価方法を検討し、風車騒音の測定方法及び適切な騒音レベルとして暗騒音+5 dBを提案していることを示した。この報告書には、純音性騒音に対するペナルティを明確に記載しているが、主に技術者の経験に基づく根拠が大きく、現場において客観的に検証されていない。デンマーク環境省が実施した、欧州および北米、10ヶ国の風車騒音に関する測定評価手法やガイドラインの調査報告書”Rules and methods for noise from wind turbines in other countries”では、各国の住宅に対する風車騒音の影

響の予測方法，測定方法，規制値等がまとめられている。主な騒音指標は，A特性音圧レベルのエネルギー平均値 ( $L_{Aeq}$ ) であるが，一部の国では $L_{den}$ ，ドイツとデンマークでは， $L_r$ （騒音に明確な純音が含まれる場合には補正される $L_{Aeq}$ ），調査対象国の半分は $L_{A10}$ ， $L_{A50}$ ， $L_{A90}$ などの統計量を用いていると報告している。純音補正（ペナルティ）に関しては，5dB前後が最も多く，Tonal Audibilityの計算手法としてはISO1996-2 Annex C が多く使用されている。住宅への伝搬計算は，IEC 61400-11によって測定されたパワーレベルをもとに，ISO9613-2が多く使用されている。同じくデンマークの環境省の報告書 “Assessment of tone content in wind turbine noise at neighbors” では純音に対するペナルティとして，純音性可聴度が6.5dBを上回る場合一律に5dBを課すこととなっている。フィンランドのTurku Universityを中心行った純音性騒音の評価法に関する公共研究プロジェクトでは，音圧レベルが低い純音性騒音に対するアノイアンスに対するペナルティを提案しており，純音の純音性可聴度とその周波数を変数とするペナルティ計算関数を提案した。

（3）純音性成分を含む騒音の評価指標の算出方法による差異に関する研究調査：純音性成分を含む環境騒音のペナルティを設定する基準として用いられるTonal Audibilityを算出する3つの規格（ISO 1996-2 Annex C，IEC 61400-11，ISO/PAS 20065）による算出結果を比較検討した研究事例を調査し，純音性成分の検出能力に大きな差がないことが示された。

（4）WHO環境騒音ガイドラインの調査：2018年に公表されたWHO環境騒音ガイドラインでは，風車騒音に関する推奨値として「 $L_{den}$  45 dB未満」が提案された。日本の風力発電施設から発生する騒音に関する指針では，等価騒音レベルを評価指標として，特に静穏を要する地域における下限値 ( $L_{Aeq}$  35 dB) とそれ以外の地域の下限值 ( $L_{Aeq}$  40 dB) を提案している。対象とした騒音について $L_{Aeq}$  が24時間一定であると仮定すると， $L_{den}$  45 dBは $L_{Aeq}$  38.3 dBに相当するため，WHOガイドラインの推奨値と日本の指針値は，ほぼ同程度の水準であると判断できる。評価量に関しては， $L_{den}$ 単体を用いることを問題視する意見も多い。実際に，多くの国や地域でA特性音圧レベルに基づく騒音評価指標に加えて，地域特性，時間帯，風速，セットバック距離等を考慮しており，また，音響特性についても，S/N比，純音性成分，振幅変動成分，衝撃性成分，低周波音成分等に関する補正を取り入れている。

（5）純音性騒音の評価指標を算出可能な市販の分析器／ソフトの調査：国内外の音響機器メーカー8社について，規格に基づいて純音性可聴度を算出可能な分析器およびソフトの販売状況を調査した結果，ほとんどのメーカーで受音性可聴度を算出できるものを提供しておりISO 1996-2に準拠した計測機器やソフトウェアが多い。しかし，ソースコードが提供されているわけではないので，メーカーごとに計算値が異なる可能性がある。

#### （6）低周波純音の伝搬計算に関する調査

低周波純音成分を含む騒音の室内への伝搬計算を簡便化するため関連研究を調査した。拡散音場を仮定した室内の低周波音の伝搬計算を補正するWaterhouse補正を改良するため，床衝撃音の簡易予測方法に用いられる拡散音場を仮定した室内伝搬計算に低周波音の補正を加えて作成した補正曲線により，簡単なエネルギー計算で実際の波動現象を近似し精度の高い予測ができることを確認した。

#### （7）提案評価指標および基準値の国際整合性に関する検討

「II-1 純音性成分を含む騒音の心理評価に関する研究」で最終的に提案している，IEC 61400-11に準拠したTonal Audibilityに基づくTonal Adjustmentの考え方が，国際規格や他国の規格と整合性が取れているか検証した。Tonal Audibilityの算出方法は，IEC 61400-11とISO/PAS 20065に相違がなく，全く問題ない。Tonal Adjustmentは純音周波数が100 Hz以上と未満でペナルティを2段階に設けたが，100 Hz以下では騒音レベルが純音によるレベル上昇に対する評価が過剰になることを示す研究事例を考慮すれば，100 Hz未満のペナルティを小さくすることは，一つの合理的な方法と考えられる。また，その値も他の規格や基準と同程度であり，十分に整合性はとれているものと判断できる。

## 5. 本研究により得られた主な成果

### （1）科学的意義

純音性成分を含む環境騒音を対象に，聴感評価実験，測定・予測手法の開発，検討事例調査の3軸

で行った検討結果により、純音性成分を含む環境騒音を適切に評価する方法や基準に関する基礎的知見を得ることができた。

サブグループ1では、騒音中に含まれる、低周波数帯域の純音性成分が騒音のわずらわしさ（ノイジネス）に及ぼす影響を純音周波数に加えて、背景騒音の周波数特性の影響にも着目して調べた。その結果、広帯域騒音である背景騒音の周波数特性と、純音周波数およびその強度の関係が、A特性音圧レベルの指標値に大きな影響を及ぼし、その結果が純音強度に依存するTonal Adjustmentの特性に大きな影響を及ぼすことを示したことは大きな科学的成果である。また、騒音のラウドネス指標として、環境騒音の評価指標として国際的に用いられているA特性音圧レベルのほかに、ZwickerのラウドネスレベルおよびMoore-Grasbergのラウドネスレベルについても詳細に調べ、Moore-Grasbergのラウドネスレベルが、純音性成分が強い騒音に対しても主観的な大きさ感をよく反映した指標値を与えることを明らかにした。Moore-Grasbergのラウドネスレベルは、国際規格ISO 532-2に評価方法が明示されており、今後の騒音評価において活用が期待できる。

サブグループ2では、純音性成分を含む風車騒音、給湯器騒音、風騒音の物理的な特性を実測データにより明らかにし、それに加えて、現場及び実験室における測定手法を標準化するための基礎検討を行った。この検討結果は、これからデータを蓄積するためには欠かせない成果である。さらに、屋外の測定データと屋内の寸法により屋内へ伝搬する騒音を予測できる手法を提案しており、屋内における騒音問題を簡便な計算方法で予測できることで問題発生を事前に判断する基準を示すことができた。

サブグループ3では、国際規格、諸外国の評価基準の情報を収集、整理したことで、純音性成分を含む騒音の評価手法、測定手法、予測手法の成り立ちや、その実用化に対する様々な手法の長所や短所を分かりやすくまとめることができた。また、最新の研究動向をフォローすることで、今後どのように評価手法が変化していきそうか見通しを立てることができ、本研究課題の最重要成果であるサブテーマ1の評価手法や基準値が、世界的にも主流の手法であり、その技術水準も高いことが確認できた。この成果により、評価指標、評価ランクの選定に対して国内外の規格及び諸外国の評価制度との整合性を検討するという研究開発目標を達成した。

## （2）環境政策への貢献

### <行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

### <行政が活用することが見込まれる成果>

我が国では、現在、風力発電施設から発せられる騒音、家庭用ヒートポンプ給湯器などの設備機器による騒音の純音性を考慮した評価基準が存在しない。風力発電施設から発せられる騒音については、「風力発電施設から発生する騒音等への対応について（平成28年11月）」において、「純音性成分を含む場合のわずらわしさ（アノイアンス）への影響については現時点で科学的な知見が十分ではない」とされている。このような現状において、本研究で得られた、騒音中に含まれた純音性成分が騒音の「わずらわしさ」に及ぼす影響に関する聴感評価実験結果は、純音性成分を考慮した評価基準を策定する上での基礎データとして活用されることが見込まれる。

純音性成分の強度を評価する指標として、ISO PAS 20065:2017や、IEC 61400-11:2012で規定された指標の妥当性を検討した。この成果は、騒音中に含まれる純音性成分の測定評価法を検討する際の基礎データとして活用されることが見込まれる。

本研究では、上記の純音性評価指標により整理した、騒音の「わずらわしさ」評価の実験データに基づき、現在国際的に用いられている騒音の評価指標であるA特性音圧レベル評価における調整値Tonal Adjustmentを定量的に示した。この成果は、人間の感覚(うるささ感、不快感)と良い対応を示す物理量を求め、それら物理量から構成される騒音不快感の評価指標を構築するという本研究の研究開発目的を達

成した最重要事項である。また、評価指標、評価ランクの選定に対して、国内外の規格及び諸外国の評価制度との整合性を検討するという研究開発目標も達成し、その妥当性が確認されている。この研究成果は、環境行政において今後純音成分を含む騒音の評価方法を検討する際の基礎データとして活用されることが見込まれる。

近年、社会問題化している給湯器騒音等の測定時に本研究で提案した測定手法、評価尺度の算出方法、室内騒音の予測手法を適用することにより、各事案の測定結果を相互比較することが可能になる。

提案手法を行政が活用する際に、国際的な整合性を示すことができる。また、諸外国の手法や国際的な規格やガイドラインについてもまとめてあるため、我が国の手法と諸外国との比較を簡単に示すことができる。

## 6. 研究成果の主な発表状況

### (1) 主な誌上発表

特に記載すべき事項はない。

#### <査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

### (2) 主な口頭発表（学会等）

#### II-1

- 1) 佐々木奏子, 米村美紀, 李 孝珍, 坂本慎一, 低周波数領域の純音成分を含む騒音の大きさ感に関する聴感実験, 日本騒音制御工学会2017年秋季研究発表会講演論文集, 147-148, 2017.11
- 2) 米村美紀, 佐々木奏子, 李 孝珍, 坂本慎一, 定常ノイズに混在する低周波数純音の可聴度に関する聴感実験, 日本騒音制御工学会2017年秋季研究発表会講演論文集, 149-150, 2017.11
- 3) 米村美紀, 佐々木奏子, 辻村壮平, 李孝珍, 坂本慎一, 低周波数純音のマスクング閾値に関する聴感実験, 日本音響学会2018年春季研究発表会講演論文集, 829-830, 2018.3
- 4) 佐々木奏子, 米村美紀, 辻村壮平, 李孝珍, 坂本慎一, 低周波数領域に含まれる卓越した純音成分がわずらわしさを評価に及ぼす影響, 日本音響学会2018年春季研究発表会講演論文集, 831-832, 2018.3
- 5) 米村 美紀, 李孝珍, 坂本慎一, 低周波数純音成分を含むノイズのわずらわしさに関する評定尺度法による検討, 日本音響学会2019年春季研究発表会講演論文集, pp.605-606, 2019.3
- 6) Yonemura, Miki, Lee, Hyojin, Sakamoto, Shinichi, Measurement of masked threshold of low-frequency tones in outdoor and indoor environmental background noise, Proceedings of inter-noise 2019 16 to 19 June 2019 in Madrid, Spain, 2019
- 7) 米村美紀, 坂本慎一, 李 孝珍, 低周波数純音成分を含むノイズのわずらわしさに関する検討: 就寝時を想定した聴感評価実験, 日本音響学会2019年秋季研究発表会講演論文集, 433-436, 2019.9.5

#### II-2

- 8) 富高隆, 増田潔, 浜田由記子, 実験室における風騒音評価方法に関する検討, 日本音響学会2018年春季研究発表会 (2018)
- 9) 富高隆, 増田潔, 浜田由記子, 風騒音風洞実験における評価方法に関する検討, 日本音響学会建築音響研究会 (2019)
- 10) 富高隆, 増田潔, 浜田由記子, 外装材を対象とした風騒音風洞実験における現状と課題, 日本騒音制御工学会平成31(2019)年春季研究発表会 (2019)

#### II-3

- 11) K. Masuda, R. Tomotaka, Y. Hamada, Evaluation of Aerodynamic Noise Emitted from Claddings and External Components of Buildings, Inter-Noise 2017, Hong Kong, China, 2017
- 12) K. Masuda, R. Tomotaka, Y. Hamada, Laboratory Measurement of Aerodynamic Noise Emitted from

Cladding and External Components of Buildings, Inter-Noise 2018, Chicago, 2018

- 13) K. Masuda, H. Tanaka, Correction of Sound Pressure Levels Calculated for Small Rooms Using Diffuse-Field Theory, International Congress on Acoustics, Aachen, Germany, 2019

## 7. 研究者略歴

研究代表者

坂本 慎一

東京大学工学部卒業，博士（工学），現在，東京大学生産技術研究所・教授

研究分担者

- 1) 浜田 由記子

東京都立大学工学部卒業，学部卒，現在，大成建設（株），課長

- 2) 富高 隆

九州芸術工科大学芸術工学部卒業，修士，現在，大成建設（株），課長

- 3) 増田 潔

九州芸術工科大学芸術工学部卒業，博士（芸術工学） 現在，大成建設（株），部長代理

## II. 成果の詳細

### II-1 純音性成分を含む騒音の心理評価に関する研究

東京大学

生産技術研究所 人間・社会系部門

坂本 慎一

<研究協力者>

生産技術研究所 人間・社会系部門

李 孝珍

工学系研究科建築学専攻博士課程

米村 美紀

平成29～令和元年度研究経費（累計額）：40,729千円（研究経費は間接経費を含む）

（平成29年度：13,806千円，平成30年度：13,116千円，令和元年度：13,806千円）

#### [要旨]

風力発電施設，家庭用ヒートポンプ給湯器などの設備機器から発生する騒音の純音性を考慮した評価基準を検討するため，聴感評価実験による検討を行った。風力発電施設から発生する騒音に対して，欧州各国には，純音性成分が認められる場合に等価騒音レベル等の評価量に数デシベルのペナルティを加えて評価騒音レベルとする方法がとられている国がある。また，環境騒音評価の国際規格であるISO 1996-2には，純音性可聴指標であるTonal Audibilityの値に応じた調整値が規定されている。これら海外各国の評価方法を参考にしながら，我が国で問題となる騒音の特性に対する聴感評価実験を行った。

環境騒音に含まれる純音性成分の強度の指標として，ISO/PAS 20065:2016やIEC 61400-11:2012には，雑音にマスクされた純音性成分のマスクング閾値をベースとしたTonal Audibilityが規定されている。そこで，基礎的な検討として，環境騒音をモデル化した数種類の背景騒音に付加された純音のマスクング閾値の検討を行った。その結果，低い周波数の純音に対しては聴覚閾値の影響が大きいこと，Tonal Audibilityは背景騒音の周波数特性によらず安定した評価結果を与えること等が分かった。

大きさ感（ラウドネス）は，騒音を評価する上で最も基礎的な聴覚心理要素である。そこで，純音性成分が含まれた騒音の大きさ感に関する評価実験を行った。実験は被験者調整法によって行った。純音性成分を含む騒音の大きさ感と3種類のラウドネス指標との比較を行ったところ，Moore-Glasbergのラウドネスレベルが，背景騒音の特性や純音周波数によらず，騒音の大きさ感を最もよく反映すること，環境騒音の評価量として国際的に用いられているA特性音圧レベルによる評価では，純音周波数，背景騒音の周波数特性によるばらつきが大きく，特に純音強度が強いときに騒音の大きさ感を過大に評価してしまう問題点が指摘された。

音質に起因する心理影響として，わずらわしさ（ノイジネス）に着目した検討を行った。純音性成分を含む騒音は，その特有の音色によって耳につく，気になるといった反応が生起されると考えられるので，わずらわしさ（ノイジネス）を検討することにより，純音性成分を含む騒音が生み出す不快感をより適切に評価できる。さらに，得られた実験結果に基づき，Tonal Adjustmentに関する検討を行った。騒音の評価指標としてA特性音圧レベルを用いた場合，Tonal Adjustmentは背景騒音のレベル，純音の周波数によってばらつきが大きいこと，我が国においては，純音性成分を含む騒音に起因する問題が背景騒音レベルの低い状況で問題になることが多いことを鑑み，背景騒音レベルが低い条件を重要視した場合，純音周波数が100 Hz未満の場合Tonal Adjustmentが最大3 dB程度，100 Hz以上400 Hz以下の場合最大6 dB程度になること，等が指摘された。

#### [キーワード]

純音性成分，Tonal Audibility，ラウドネス，わずらわしさ，Tonal Adjustment

## 1. はじめに

我が国では、近年、省エネ・創エネに対する社会的要請の高まりとともに、再生可能エネルギーの導入や省エネ機器の推進が進められている。再生可能エネルギー源としての風力発電施設や、省エネ機器である家庭用ヒートポンプ給湯器が発する騒音には、20～200 Hz程度の低周波数領域に純音性成分が含まれることがある。それらの騒音は、レベルは低いものの、夜間に住宅地や郊外などの静穏な環境において長時間にわたって発せられることにより、地域住民からの苦情の原因となっている例が見られる。

風力発電設備から発せられる騒音に関しては、環境省より2017年5月に「風力発電施設から発生する騒音に関する指針」が策定された。その指針の中で、純音性成分が含まれることによるアノイアンス（不快感）の増加の可能性が指摘されているが、これに対してどのような評価を行うことが適切かについては今後の課題とされている。また、ヒートポンプ給湯器から発せられる騒音にも低周波数帯域の純音性成分が強く含まれることがあるが、そのような純音性成分を含む騒音と聴感印象との対応については知見が不足している。

純音性成分を含む騒音の評価方法に関しては、ヨーロッパの国々で研究が進んでおり、ISOやIEC等の国際規格によって純音性成分の評価指標の規格化が進んでいる。風力発電施設から発せられる騒音に含まれる純音性成分を、それらの指標で定量的に評価し、その値によって騒音の評価基準値にペナルティを与えるなどの対応をとっている国もある。我が国においても、それらの評価方法を参考にしつつ、我が国の騒音の実態や人々の生活実態に適合した評価方法を検討していく必要がある。

## 2. 研究開発目的

本研究では、本研究では、風車騒音や家庭用ヒートポンプ給湯器等の設備機器、自然換気・遮光のためのルーバー等で生じる風騒音に関して人間の感覚（うるささ感、不快感）と良い対応を示す物理量を求め、それら物理量から構成される騒音不快感の評価指標を構築することを目的とした。また、本研究で提案する評価指標は、地方公共団体職員や事業者が算出して利用することが想定されるため、評価指標の算出と評価を可能とするソフトウェアを提供することも目的とした。その目的を達成するため、具体的に下記の項目について検討を行った。

- (1) 純音のマスクング閾値に関する実験 機器から発せられる純音性成分を有する騒音は、広帯域な成分をもつ背景騒音に混入するため、純音はノイズによるマスクングの影響を受ける。ノイズに混入した純音が聞こえ始めるレベルがマスクング閾値であり、純音性成分の評価に際して最も基礎的な聴覚特性であるため、マスクング閾値を調べる実験を行う。
- (2) 純音性成分を含む騒音の大きさ感に関する聴感評価実験 騒音に対する人の感覚として、大きさ感（ラウドネス）は最も基礎的な属性である。純音性成分の混入が音の大きさ感に及ぼす影響を聴感評価実験によって詳細に調べ、騒音の物理評価量との関係を定量的に調べる。
- (3) 純音性成分を含む騒音のわずらわしさに関する聴感評価実験 騒音に対する人の感覚として、ラウドネスを包含し、さらに音質に関する印象も含んだ心理量であるノイジネスやアノイアンスを「わずらわしさ」として評価する聴感評価実験を行う。騒音のわずらわしさ評価では、その騒音を受ける状況設定が重要であるため、背景騒音の特性やレベルに応じた状況を想定した詳細な実験を行う。実験で得られた主観評価値を、環境騒音の評価量として最も一般的なA特性音圧レベルや、より詳細な知見に基づくラウドネスレベルといった物理評価量との定量的な関係として整理する。この検討結果に基づき、本研究の最も重要な研究開発目標である、人間の感覚（うるささ感、不快感）と良い対応を示す物理量を求め、それら物理量から構成される騒音不快感の評価指標を構築する。
- (4) 純音性指標を測定可能な計測器の試作 純音性成分を含む騒音を計測に際して物理的に評価するため、従来のA特性音圧レベルの他に、純音卓越度に基づく純音性指標を求めることが必要である。しかし、我が国において容易に入手できる標準的な騒音計測器には、そのような指標を算出できる機能はない。そこで、本研究において採用した純音性指標を算出し、評価を可能とする計測システムを試作し、評価指標の算出と評価を可能とするソフトウェアを提供するという研究開発目標を達成する。

以上の科学的知見を以て、純音性成分を含む騒音を評価するためのスキームを確立し、評価基準を策定する上で環境行政上の貢献の一つとすることを目的とした。

### 3. 研究開発方法

本サブグループでは、純音性成分を含む騒音の聴感評価実験を、東京大学生産技術研究所の音響実験設備を用いて行った。図3.1.1(1)、3.1.1(2)に、聴感評価実験を行った実験設備を示す。半無響室の壁面に設置された口径40 cmの低音用スピーカ16台と、中・高音用スピーカ1台から構成される音源装置から被験者に試験音を提示した。実験参加者を音源装置から3.5 m離れた椅子に着座させ、聴取位置正確に決めるため、試験時には頭をヘッドレストに軽く固定するように指示した。再生音の制御は、無響室外に設置したパーソナルコンピュータ (PC) ベースの制御器を実験者が操作することにより行った。

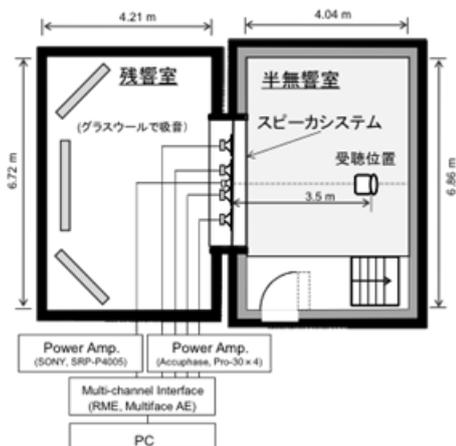


図3.1.1(1) 実験システムのブロック図



図3.1.1(2) 聴感実験の様子

#### (1) 純音のマスクング閾値に関する実験

広帯域に成分をもつノイズに純音が混在する場合、純音はノイズによるマスクングの影響を受ける。騒音に含まれる純音が聞こえ始めるレベルがマスクング閾値であり、純音性成分の評価において最も基礎的な聴覚特性であるため、マスクング閾値を詳細に調べる実験を行った。

試験音は、3種類の背景騒音と7種類の純音で構成した。試験音の構成を表3.1.1に、用いたマスクングノイズの特性を図3.1.2に示す。ピンクノイズは、音響実験で用いられる標準的なノイズとして選択した。モデルノイズは、オクターブバンド毎のエネルギーが-4 dB/Oct.bandの傾きを有するノイズであり、比較的静穏な屋外環境を模擬したノイズとして選択した。屋内ノイズは、図3.1.3に示すハウスフィルタリをモデルノイズに施すことにより作成した。このハウスフィルタリは、一般家屋の内外音圧レベル差の実測結果に基づいて遮音性能をモデル化したフィルタであり、本研究では、一重アルミサッシを有する家屋の特性を用いた。サブテマ2の調査により、風車騒音の含まれる純音周波数として、40～80 Hz、160～200 Hzが見られ、家庭用給湯設備の騒音に関して屋外では40～20 kHz、室内では40～2 kHzと幅広く分布するが、40 Hz、80 Hz、100 Hz、160 Hzで純音成分が特に強い例が見られた。この結果を参考とし、今回用いた聴感実験設備における再生精度を勘案して、聴感評価実験に用いる純音周波数を設定した。

表3.1.1 試験音の構成

マスクングノイズ (背景騒音)		純音周波数
種類	レベル(O.A)	
ピンクノイズ (0 dB/Oct.band)	55 dB	40 Hz, 50 Hz, 80 Hz, 100 Hz, 160 Hz, 200 Hz, 400 Hz
モデルノイズ (-4 dB/Oct.band)	45 dB	
屋内ノイズ (モデルノイズにハウスフィルタリを施したもの)	35 dB	

図3.1.1(2)に示した17台（大口径16台，小口径1台）の低音用スピーカのうち8台を純音再生用に，残りの9台をマスキングノイズ再生用に用いた。実験を通して，マスキングノイズは継続的に提示し，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提示した。実験参加者には，「ポー」，「プー」といった音が聞こえたと感じたときに，手元にあるスイッチを押して回答するように教示した。

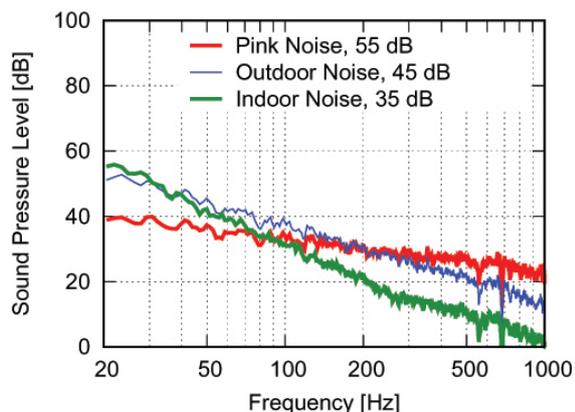


図3.1.2 マスキングノイズの周波数特性

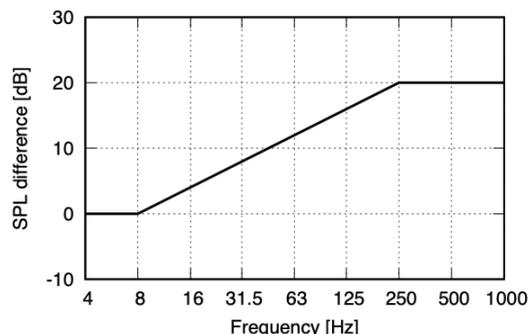


図3.1.3 実験に用いたハウスフィルタ  
(周波数帯域ごとの減衰量を表す)

マスキング閾値の実験手法としては，ランダム化最尤適応法<sup>2)</sup>を用い，本実験では次の手順を踏んで実施した（図3.1.4参照）。

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レベルから開始し，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提示する。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し， $L_7$  まで計測を行う。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  $L_{Thres}$  とする。被験者は聴覚正常な 20~30 歳代の男女 20 名であった。

$$L_{Thres} = \frac{L_2 + L_3 + L_4 + L_5 + L_6 + L_7}{6} \quad (3.1.1)$$

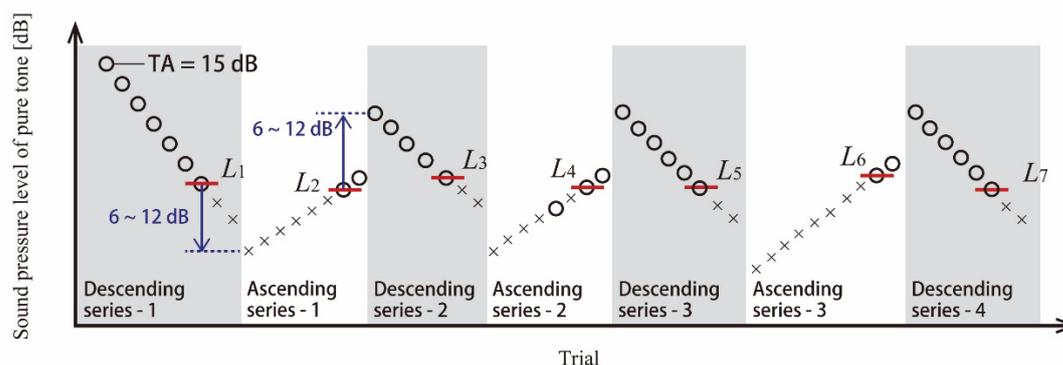


図3.1.4 本実験で採用したランダム化最尤適応法による実験の手順

## (2) 純音性成分を含む騒音の大きさ感に関する聴感評価実験

純音性成分を含む騒音の不快感に影響する基礎的な要因として、大きさ感を検討した。背景騒音として(1)の検討と同じくピンクノイズ、モデルノイズ、屋内ノイズの3種類とし、それらの背景騒音の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、周波数が40 Hz, 50 Hz, 100 Hz, 200 Hzの4種類、強度がIEC 61400-11:2012に定めるTonal Audibility (TA)が0, 5, 10, 15 dBとなるように調整し、4水準で付加した。試験音の周波数特性を背景騒音の種類ごとに図3.1.5, 3.1.6, 3.1.7に示す。図中には、参考として、ISO 28961:2012に定められた純音の最小可聴値の50パーセンタイル値を破線で示した。また、純音性成分を付加しないノイズも条件に加え、全部で17条件とした。ノイズの種類ごとに3つのセッションに分けて聴感評価実験を実施し、セッション内での試験音の提示順は被験者毎にランダム化した。

実験手法としては、被験者調整法を用いた。標準刺激は純音性成分を含む騒音、比較刺激は、同じ種類の背景騒音で純音成分を含まないノイズとした。標準刺激と比較刺激(継続時間4秒)を対にして提示し、標準刺激と比較刺激が同じ大きさに聞こえるように、比較刺激の音量を手元のボリュームつまみで調整するように教示した。調整が終わるまで、試験音は繰り返し提示した。各試験音対に対して、上昇系列、下降系列の実験をそれぞれ3試行ずつ(合計6試行)行い、それらの算術平均をその被験者の主観的等価点とした。被験者は、聴力に異常のない20歳代の男女15名であった。

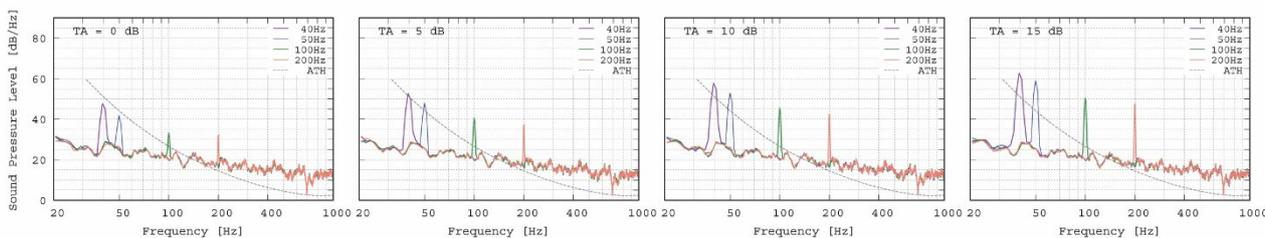


図3.1.5 ピンクノイズに純音を付加した試験音の周波数特性

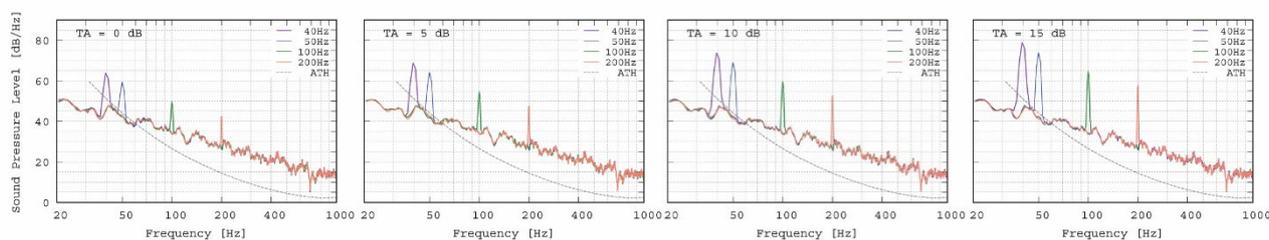


図3.1.6 モデルノイズに純音を付加した試験音の周波数特性

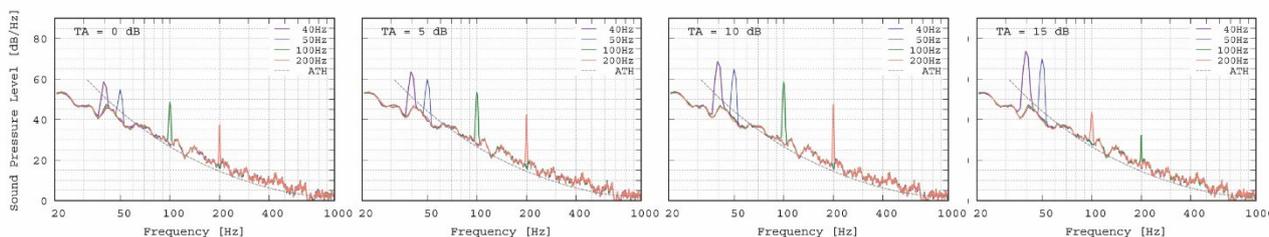


図3.1.7 屋内ノイズに純音を付加した試験音の周波数特性

## (3) 純音性成分を含む騒音のわずらわしさに関する聴感評価実験

騒音の評価では、大きさ感(ラウドネス)以外に、音質に起因する心理影響を考慮する必要がある。そのような心理量は、音響学的にはノイジネスと称され、ラウドネスとは別の評価項目として取り扱われる。また、ラウドネスやノイジネス以外に、音響以外の要素(例えば、経験等)も含んだ総合的な不快感はアノイアンスと称される。アノイアンスは、広域的な社会反応調査等を用いて検討されることが多い。通常の一般環境騒音は、広い周波数帯域にわたって成分を持つため、ラウドネスと、ノイジネス・

アノイアンスが良く対応することが知られているが、純音性成分を持つ騒音は特定の周波数にエネルギーが偏在し、特有の音質を持つため、そのような仮定が成り立つ保証はない。そこで、本項では、純音性成分を含む騒音の音質に起因する不快感を、実験室実験を用いて検討するため、ノイジネスに着目した検討を行う。ここで、ノイジネスとは音響学で取り扱われる一般的な学術用語であるが、本研究ではこれを騒音の「わずらわしさ」と一貫して表現することにした。

騒音のわずらわしさは、生活環境で受ける印象であり、ある程度状況を想定した検討が必要である。本研究で対象としている風力発電施設から発せられる騒音は、山間部など比較的静穏な地域で発生することが多いこと、ヒートポンプ給湯器から発せられる騒音は、静穏な住宅地で夜間に問題となることが多いことから、背景騒音のレベルが比較的低い状況を想定することとした。その上で、以下の3つの点に着目した実験的検討を行った。

(実験3-1) 背景騒音の種類(屋外, 屋内)とレベルがわずらわしさに及ぼす影響

(実験3-2) 非常に静穏な環境を想定し、就寝時におけるわずらわしさの評価

(実験3-3) 日中に過ごす環境を想定した場合のわずらわしさの評価

### 実験3-1 背景騒音の種類とレベルがわずらわしさに及ぼす影響に関する実験

試験音の構成を表3.1.2に、背景騒音の周波数特性を図3.1.8に示す。背景騒音は、前出のモデルノイズ(-4 dB/Oct. band)と屋内ノイズ(モデルノイズにハウスフィルタを施したもの)とし、そのA特性音圧レベルが30 dBおよび35 dBとなるものを用いた。背景騒音に付加される純音性成分は、周波数が31.5 Hz, 40 Hz, 50 Hz, 100 Hz, 200 Hz, 400 Hzの6周波数、純音強度はIEC 61400-11:2012に規定するTonal Audibilityがおおよそ0, 3, 6, 9, 12 dBとなるように調整した。また、比較のため、ベースノイズと同じ周波数特性をもつ広帯域ノイズを、A特性音圧レベルが25 dB, 30 dB, 35 dB, 40 dBの4段階に調整したものを条件に加えた。

表3.1.2 実験3-1の試験音の構成

種類 (周波数特性)	背景騒音		純音	
	A特性音圧レベル[dB]		周波数[Hz]	Tonal Audibility [dB]
モデルノイズ	30, 35		31.5, 40, 50, 100, 200, 400	0, 3, 6, 9, 12
-4 dB/Oct. band	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
+ハウスフィルタ	25, 30, 35, 40		なし	—

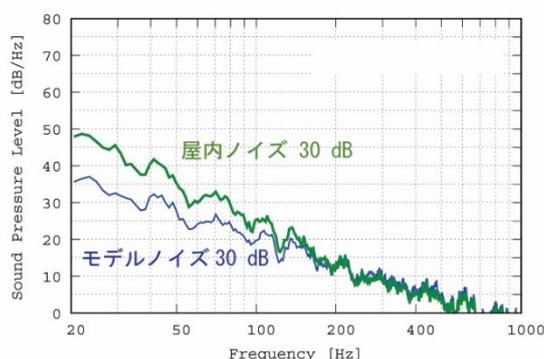


図3.1.8 背景騒音の周波数特性 (30 dB)

実験システムは(1), (2)の実験と同様である。実験参加者は、無響室内のスピーカの正面3.5 mの位置に着座して試験音を聞いた。一つの試験音の継続時間は10秒であった。試験音の再生が終わってから、「わずらわしさ」について評価し、実験者に口頭で伝えた。わずらわしさ評価は、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、試験音がずっとなり続けている」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。実験は休憩をはさみながら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、ランダムな順に提示した。実験参加者は、20～40歳代の男女40名であった。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、体調に不具合がないこと、耳に関する病気に患していないこと、日常的に聴力を損なうような大きな音の環境に晒されていないことを確認した。同時にWeinsteinの提案する騒音感受性に関するアンケート3,4)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。分析結果の信頼性を確保するため、前半2セッションと後半2セッションの回答値の相関が0.6以上となった28名の結果を分析に供した。

### 実験3-2 就寝時を想定したわずらわしさ評価

就寝時を想定し、低レベルの背景騒音の下でのわずらわしさを評価する実験を行った。背景騒音のレベルとして、A特性音圧レベルが25 dB、および30 dBの実験を別々に実施した（それぞれ、実験3-2(A)、実験3-2(B)とする）。試験音の構成を、表3.1.3、3.1.4に示す。

表3.1.3 実験3-2(A)（背景騒音レベル25 dB・就寝時想定）の試験音の構成

背景騒音		純音	
種類（周波数特性）	A特性音圧レベル[dB]	周波数[Hz]	Tonal Audibility [dB]
モデルノイズ	25	40, 50, 100, 200, 400	0, 3, 6, 9, 12
-4 dB/Oct. band	20, 25, 30, 35	なし	—
屋内ノイズ	25	40, 50, 100, 200, 400	0, 3, 6, 9, 12
+ハウスフィルタ	20, 25, 30, 35	なし	—

表3.1.4 実験3-2(B)（背景騒音レベル30 dB・就寝時想定）の試験音の構成

背景騒音		純音	
種類（周波数特性）	A特性音圧レベル[dB]	周波数[Hz]	Tonal Audibility [dB]
モデルノイズ	30	31.5, 40, 50, 100, 200, 400	0, 3, 6, 9, 12
-4 dB/Oct. band	25, 30, 35, 40	なし	—
屋内ノイズ	30	31.5, 40, 50, 100, 200, 400	0, 3, 6, 9, 12
+ハウスフィルタ	25, 30, 35, 40	なし	—

わずらわしさ評価は、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、試験音がずっとなり続けている」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。実験は休憩をはさみながら3セッションに分けて実施した。試験音は繰り返し回数3回とし、ランダムな順に提示した。実験には、上記2つの実験にそれぞれ30～40歳代の男女20名ずつが参加した。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、体調に不具合がないこと、耳に関する病気に患していないこと、日常的に聴力を損なうような大きな音の環境に晒されていないことを確認した。併せてWeinsteinの提案する騒音感受性に関するアンケート3,4)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。分析結果の信頼性を確保するため、全参加者のうち、1-2セッション間、2-3セッション間の回答の相関係数がそれぞれ0.6以上となった実験参加者の回答を採用した。その結果、実験3-2(A)では18名、実験3-2(B)では17名の結果を分析に供した。

### Tonal Adjustmentに関する検討

純音性成分を強く含む騒音は、純音性成分を含まない広帯域騒音よりも不快感が高い。その不快感の増分を、一般的な広帯域騒音の評価におけるレベル増分として評価した量が、Tonal Adjustmentである。わずらわしさ評価実験で得られた7段階尺度による評定値に基づき、以下のような方法でTonal

Adjustmentを算出した。なお、この方法は、Brambilla and Pedrelli (1996)<sup>9)</sup>による方法に倣っている。

図3.1.9は、純音性成分をいくつかの異なる強度で含む騒音のわずらわしさ評価値(▲)と、いくつかの異なるA特性音圧レベルの純音性成分を含まない広帯域騒音のわずらわしさ評価値(○)を示した模式図である。一般的に、広帯域騒音のわずらわしさの評価値は、A特性音圧レベルと非常に相関が高く、線形関係にある。図中の直線は、広帯域騒音に対してA特性音圧レベルとわずらわしさの関係を表す回帰直線である。

ここで、純音性成分を含む騒音のわずらわしさと同じわずらわしさを与える広帯域騒音のレベル(図中、 $L^*$ )を、回帰直線を用いて算出する。算出されたレベルと、その試験音と分析して得られたレベル $L_S$ の差分を、Tonal Adjustment  $K_T$ とする。なお、Tonal Adjustmentの記号量表記 $K_T$ は、ISO 1996-2における記号量表記に準じた。

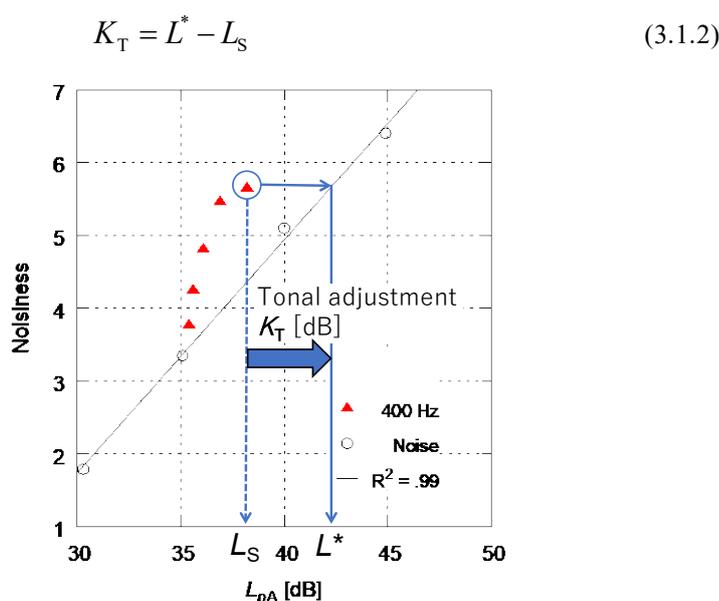


図3.1.9 Tonal Adjustmentの算出方法

### 実験3-3 日中を想定したわずらわしさ評価

日中の聴取を想定し、背景騒音のレベルを35 dBとし、実験3-2と同様のシステムで実験を行った。試験音の構成を表3.1.5に示す。評価方法についても同様に7段階の評定尺度法を用いたが、実験参加者への教示では「日中、居間でくつろいでいるときに、再生荒れる音がずっと鳴り続けている」状況を想定させた。実験参加者は、30～40歳代の男女20名であった。実験3-2のときと同様に、オーディオメータによる聴力測定、聴力および騒音感受性に関するアンケートも行った。分析結果の信頼性を確保するため、1-2セッション間、2-3セッション間の回答の相関係数がそれぞれ0.6以上となった16名の結果を分析に供した。

表3.1.5 実験3-3 (背景騒音レベル35 dB・日中想定) の試験音の構成

背景騒音		純音	
種類 (周波数特性)	A特性音圧レベル[dB]	周波数[Hz]	Tonal Audibility [dB]
モデルノイズ	35	40, 50, 100, 200, 400	0, 3, 6, 9, 12
-4 dB/Oct. band	30, 35, 40, 45	なし	—
屋内ノイズ	35	40, 50, 100, 200, 400	0, 3, 6, 9, 12
+ハウスフィルタ	30, 35, 40, 45	なし	—

また、実験3-2と同様、Tonal Adjustmentの検討を行い、実験3-2の結果と併せ、背景騒音のレベルと関連付けた考察を行った。

実験結果の総合的考察とA特性音圧レベルの評価におけるTonal Adjustmentに関する提案

背景騒音のレベル、種類をパラメータとした実験結果を総合的に考察した。本研究で定量的に検討するTonal Adjustmentのモデルを明示するとともに、Tonal Adjustmentに影響する要因を個別に検討して条件によるばらつきの要因や一般的な傾向を整理した上で全ての実験結果を整理し、Tonal Adjustmentに関する検討を行った。

#### (4) 純音性指標を測定可能な計測器の試作

純音性成分の可聴性に関する指標としては、ISO/PAS 20065:2016やIEC 61400-11:2012等の国際規格に純音性可聴度(Tonal Audibility: TA)が定められている。ある周波数の純音のマスクングに寄与するノイズの周波数帯域を臨界帯域といい、対象となる純音の前後近傍に位置する周波数帯域となる。規格によって詳細は異なるが、この臨界帯域中のマスクングノイズと純音性成分のエネルギー比に人間の聴覚特性を基に求めた係数を加味した量がTAと定義されている。純音性成分を有する騒音のデータ整備のため、簡便かつ汎用性の高い計測機器の開発が望ましい。そこで、スマートフォンによるアプリおよび多機能計測システムSA-A1(以降、SA-A1)で動作可能なTA計測アプリケーションソフトウェアを試作した。TAを規定した国際規格のうち、ISO/PAS 20065:2016には、サンプルプログラムコードが提供されている。そのため、本検討ではそのサンプルプログラムコードをベースとして開発を行った。図3.1.10に、ISO/PAS 20065:2016に示されたTA算出のフローを示す。

試作した機器による計測の精度を確認するため、図3.1.11に示すように、半無響室内で再生した純音性成分を含む騒音のサンプルを測定し、同時に録音した信号の分析結果と比較した。

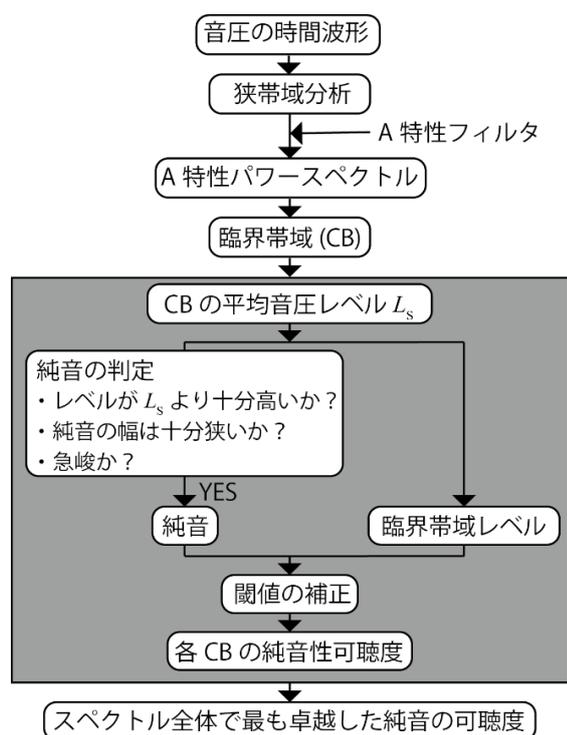


図3.1.10 ISO/PAS 20065に示されたTAの算出手順

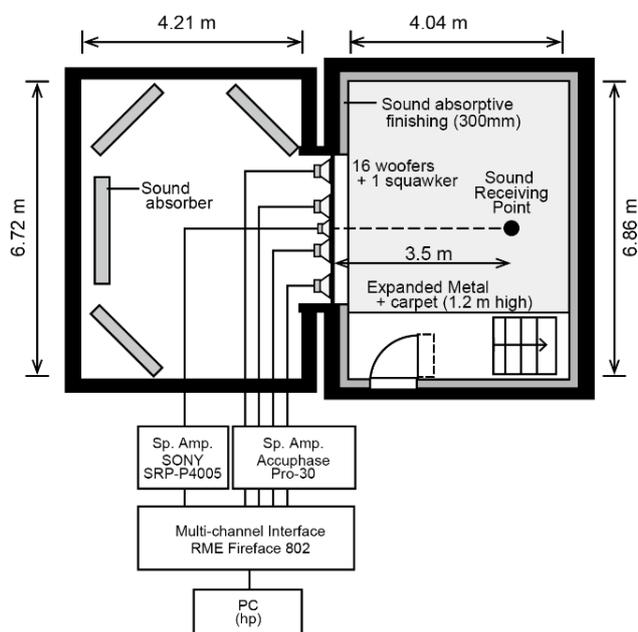


図3.1.11 精度検証のための実験

## 4. 結果及び考察

### (1) 純音のマスクング閾値に関する実験

本実験で用いた3種類の背景騒音による純音のマスクング閾値を図4.1.1(a), 4.1.1(b), 4.1.1(c)に示す。図の細実線は背景騒音の1 Hzあたりのレベル、破線はISO 28961による純音の絶対閾値の50パーセントイル値を示す。また太線は、臨界帯域に含まれるノイズのエネルギーを示す。マスクング閾値は、80~400 Hzではノイズの1 Hzあたりのエネルギーより10~13 dB程度高い結果であり、低周波数領域の40 Hz, 50 Hzでは、聴覚の絶対閾値の上昇に引っ張られる形でマスクング閾値が上昇した。純音の可聴性については、Tonal Audibility—純音性可聴度—を評価する手法としてISO 1996-2:2007, ISO/PAS 20065:2017およびIEC 61400-11:2012が規定されている。これらの適用周波数範囲は、IEC 61400-11:2012では20 Hz以上、ISO 1996-2:2007およびISO/PAS 20065:2017では50 Hz以上であり、規格により適用範囲が異なっている。今回の実験の純音周波数には50 Hz未満も含まれるため、評価指標としてIEC 61400-11:2012を採用した。

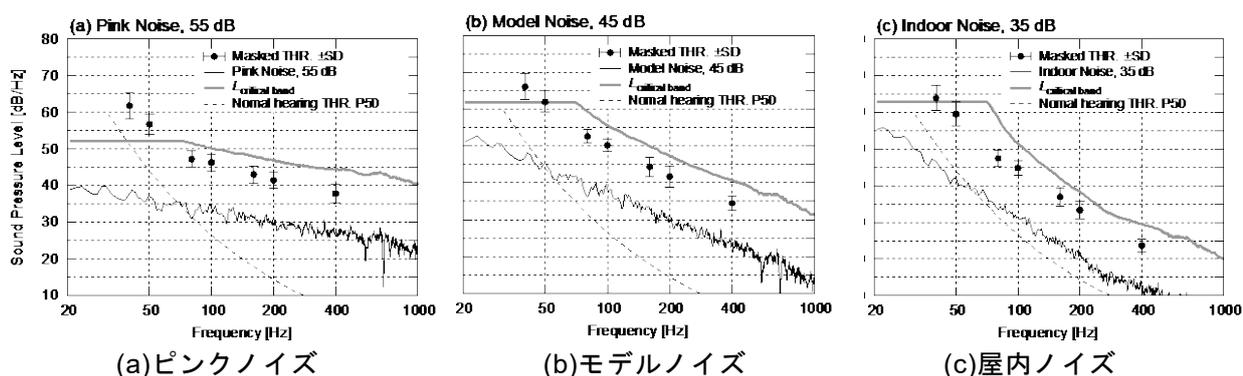


図4.1.1 マスクング閾値の測定結果

結果を図4.1.2に示す。80 Hz~400 Hzのマスクング閾値の平均は-2 dB~-4 dBで、ノイズの周波数特性の違いによる差異はほぼ見られず、同様の傾向であった。このことから、IEC-61400-11に規定されるTonal Audibilityは、背景騒音の周波数特性によらず、80 Hz~400 Hzの範囲の純音の可聴性を安定して評価できる指標である。Tonal Audibilityは、聴覚特性の周波数領域における補正であるA特性を掛けた上で、音の大きさ感に寄与する臨界帯域内のマスクングノイズのエネルギーと、着目する純音成分のエネルギーの比を計算し、さらに可聴指標で補正した物理量であるため、理論上はマスクング閾値が0 dBとなるが、実験結果は、-2~-4 dBがマスクング閾値となる結果であった。Tonal Audibilityのマスクング閾値のレベルに関しては、さらに詳細な検討が必要である。40 Hz, 50 Hzの低周波数領域では、マスクング閾値が1~3 dBとなり、ノイズの周波数特性によってややばらつきのある結果となった。この傾向は、ノイズのエネルギーではなく、聴覚の絶対閾値の影響であり、非常に低い周波数の純音の評価には絶対閾値の取り扱いを検討する必要があることが示唆された。

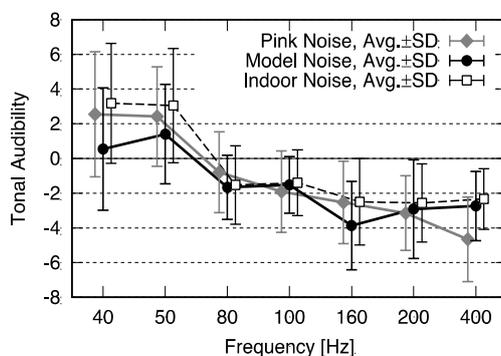


図4.1.2 マスクング閾値とTonal Audibilityの関係

### (3) 純音性成分を含む騒音のわずらわしさに関する聴感評価実験

#### 実験3-1 背景騒音の種類とレベルがわずらわしさに及ぼす影響に関する実験

7段階評価の結果の実験参加者28名の平均値を図4.1.8に示す。いずれの背景騒音の条件においても、Tonal Audibilityが高くなるに従い、わずらわしさの心理評価値が高くなる傾向が見られた。Tonal Audibilityが0 dBから12 dBに増加することに伴うわずらわしさ評価値の増分は、背景騒音30 dB条件で1.6(7段階中)、35 dB条件で1.1であった。このことから、環境騒音のレベルが低い方が、純音性成分による煩わしさが増加しやすい傾向が確認された。モデルノイズ30 dBの条件では、純音周波数が低い(31.5 Hz, 40 Hz, 50 Hz)場合にわずらわしさ評価が相対的に低い結果となった。これは、試験音のレベルが低いために、最小可聴値の影響で低周波数純音が聞こえていなかった可能性がある。この理由を検討するためにはより低いレベルの背景騒音を用いた実験を行う必要がある。また、実験手法に関して、複数のレベルの背景騒音を同じ実験で取り扱うことによって試験音のレベルレンジが大きくなると、音色に関する評価を感度高く検出することが難しくなる可能性も示唆された。

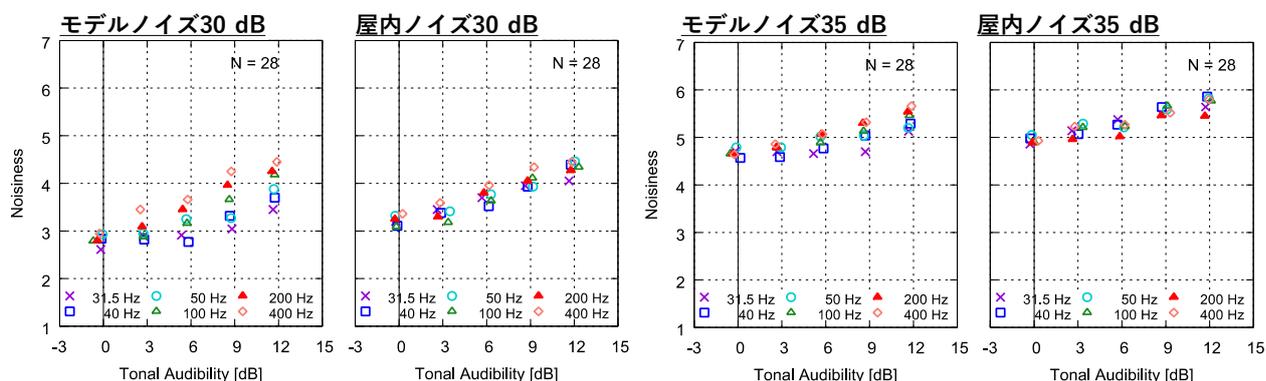


図4.1.8 実験3-1の結果 (背景騒音の種類とレベルの影響)

#### 実験3-2 就寝時を想定したわずらわしさ評価

実験3-2(A)について、Tonal Audibilityとわずらわしさ評価の実験参加者の平均値の関係を図4.1.9に、実験3-2(B)について、Tonal Audibilityとわずらわしさ評価の実験参加者の平均値の関係を図4.1.10に示す。実験参加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Tonal Audibility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くくって示した。全体として、Tonal Audibilityの増加にしたがってわずらわしさも増加する傾向にあり、その増加の程度は純音周波数によって異なるものもあった。

純音周波数による違いに着目すると、背景騒音25 dB条件(図4.1.9)ではTonal Audibilityが3 dB以上で純音周波数による有意差が認められ、低周波数である40 Hz, 50 Hzの条件よりも、100 Hz, 200 Hz, 400 Hzの純音周波数の方が、わずらわしさが高かった。モデルノイズ30 dBの条件(図4.1.10)でも100 Hzを境に傾向が分かれ、高い周波数の純音性成分ほ

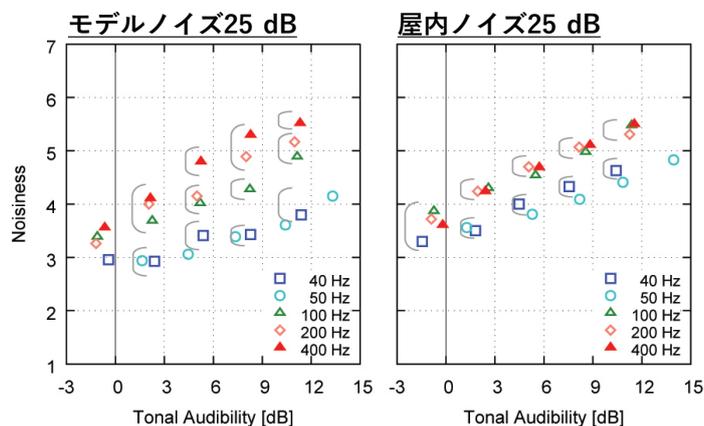


図4.1.9 実験3-2(A)の結果 (背景騒音レベル25 dB)

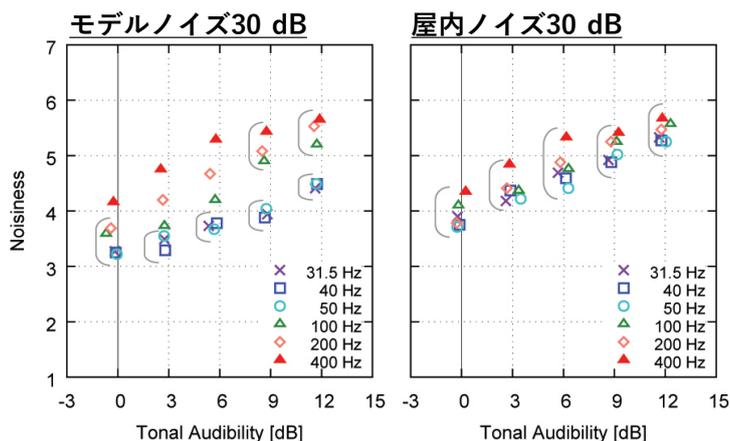


図4.1.10 実験3-2(B)の結果 (背景騒音レベル30 dB)

どわずらわしさが高くなる傾向が見られた。屋内ノイズ30 dB条件では、純音周波数による有意差は認められなかった。

### Tonal Adjustmentに関する検討

図4.1.11および4.1.12に、評価指標としてZwickerのラウドネスレベル $LL(Z)$ 、Moore-Glasbergのラウドネスレベル $LL(M)$ 、A特性音圧レベル $L_A$ の3種類について、試験音のレベルとわずらわしさの関係を示す。図中、○は、背景騒音と同じ周波数特性を有する広帯域ノイズに対するわずらわしさ評価値である。広帯域騒音に対しては、いずれの評価指標についても、試験音のレベルとわずらわしさ評価値の間に強い線形の関係が認められ、その回帰直線を併せて示した。純音性成分を含む試験音の評価は、いずれも回帰線よりも高いところに付置している。これは、純音性成分が付加されることによって、同じレベルの広帯域ノイズよりもわずらわしさが増加していることを示している。

評価指標の違いに着目すると、 $LL(Z)$ および $L_A$ では、純音性成分の強度が強くなった時のレベル値（図3.1.9の定義による $L_s$ ）が高く、かつ背景騒音の種類および純音周波数によるばらつきが大きい。特に低域の純音周波数である40 Hz、50 Hzにおいてその傾向が顕著になっている。それに対して、 $LL(M)$ では、純音性成分が加わった場合でも騒音のレベル指標はあまり変化しない。

図4.1.11、4.1.12よりTonal Adjustmentを算出した。結果を図4.1.13、4.1.14に示す。ラウドネスレベル $LL(Z)$ 、 $LL(M)$ で評価した場合、純音強度が強くなるに従ってTonal Adjustmentもおおよそ線形に増加するのに対し、一般的な騒音評価指標として用いられているA特性音圧レベル $L_A$ で評価した場合には、Tonal Audibilityが6以下の範囲では、純音強度が増すにしたがってTonal Adjustmentが増大するが、それ以上に純音強度が強くなると、Tonal Adjustmentが横ばい、もしくは純音周波数によっては減少していく複雑な傾向が見られた。

純音周波数による違いに着目すると、純音周波数が高い条件ほどTonal Adjustmentが高く、純音周波数が低い条件ではTonal Adjustmentが低くなった。就寝時想定では背景騒音レベルが低く、純音性成分の絶対レベルもそれほど高くはないが、低周波数領域では可聴閾が高くなるので、その影響が表れたものと考えられる。

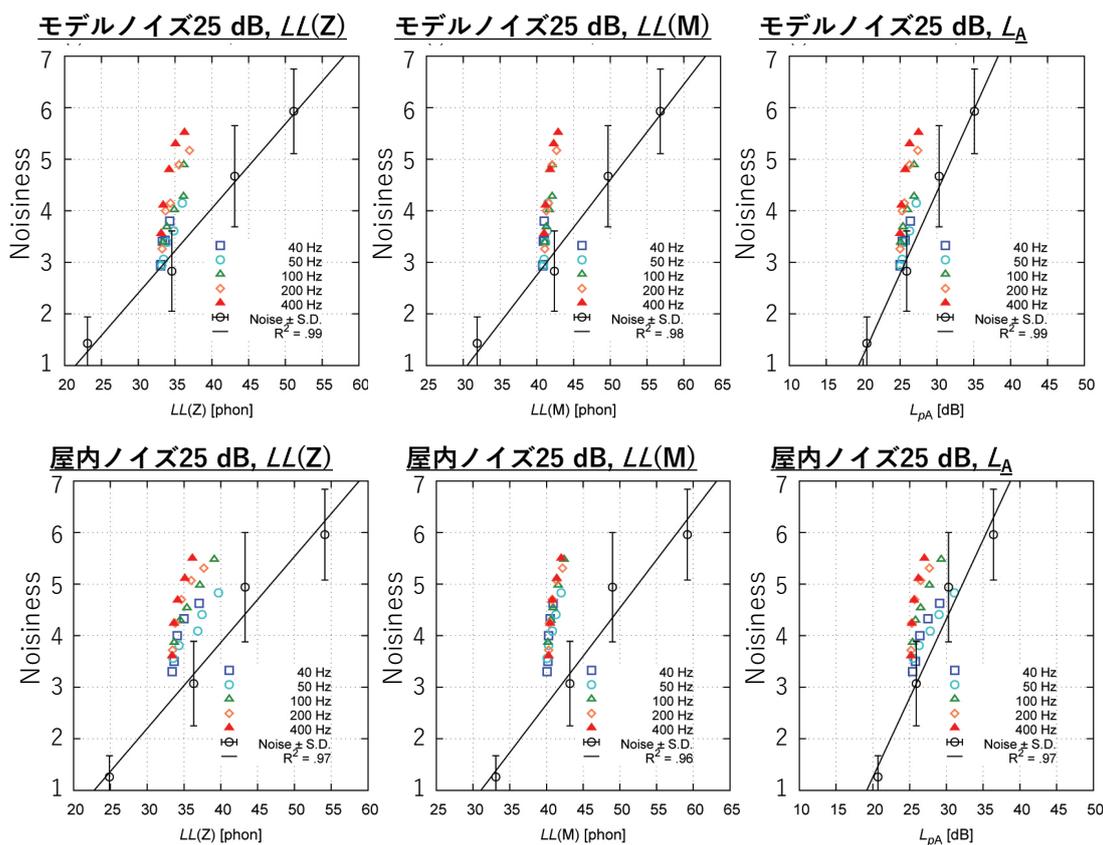


図4.1.11 わずらわしさとラウドネス指標の関係 (実験3-2(A))

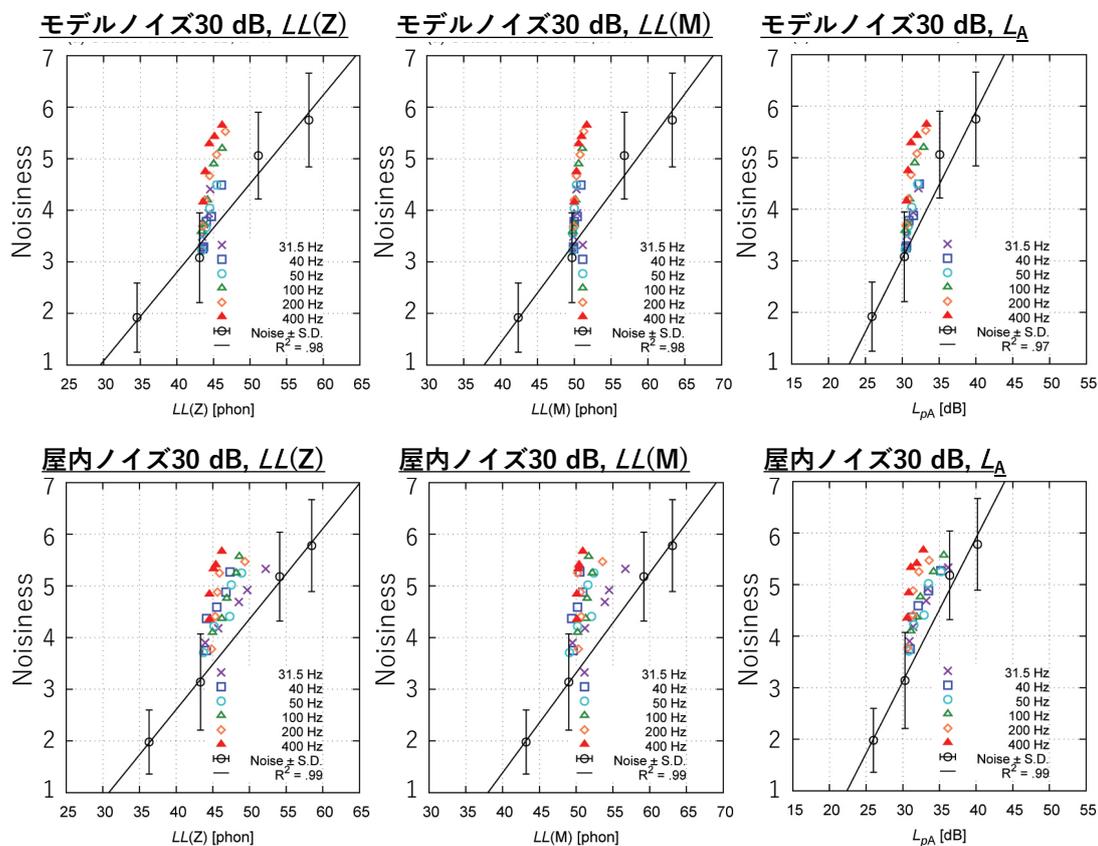


図4.1.12 わずらわしさとラウドネス指標の関係 (実験3-2(B))

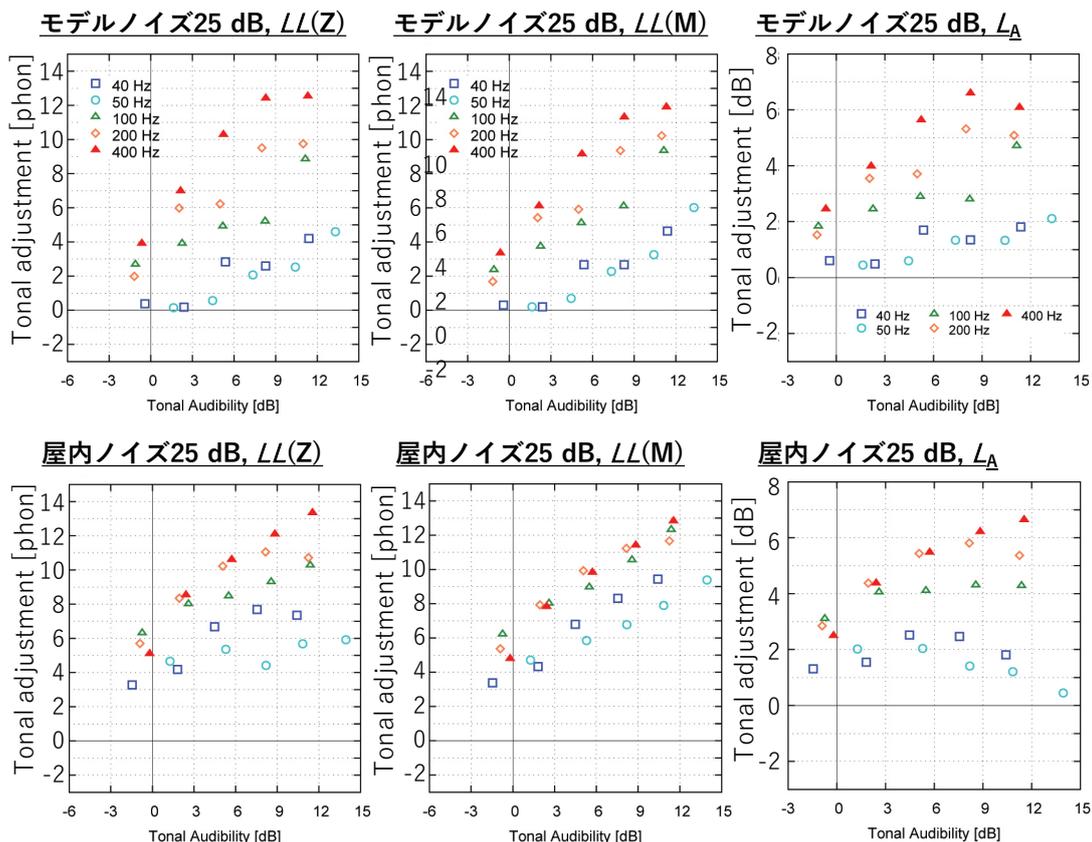


図4.1.13 Tonal AudibilityとTonal Adjustmentの関係 (実験3-2(A))

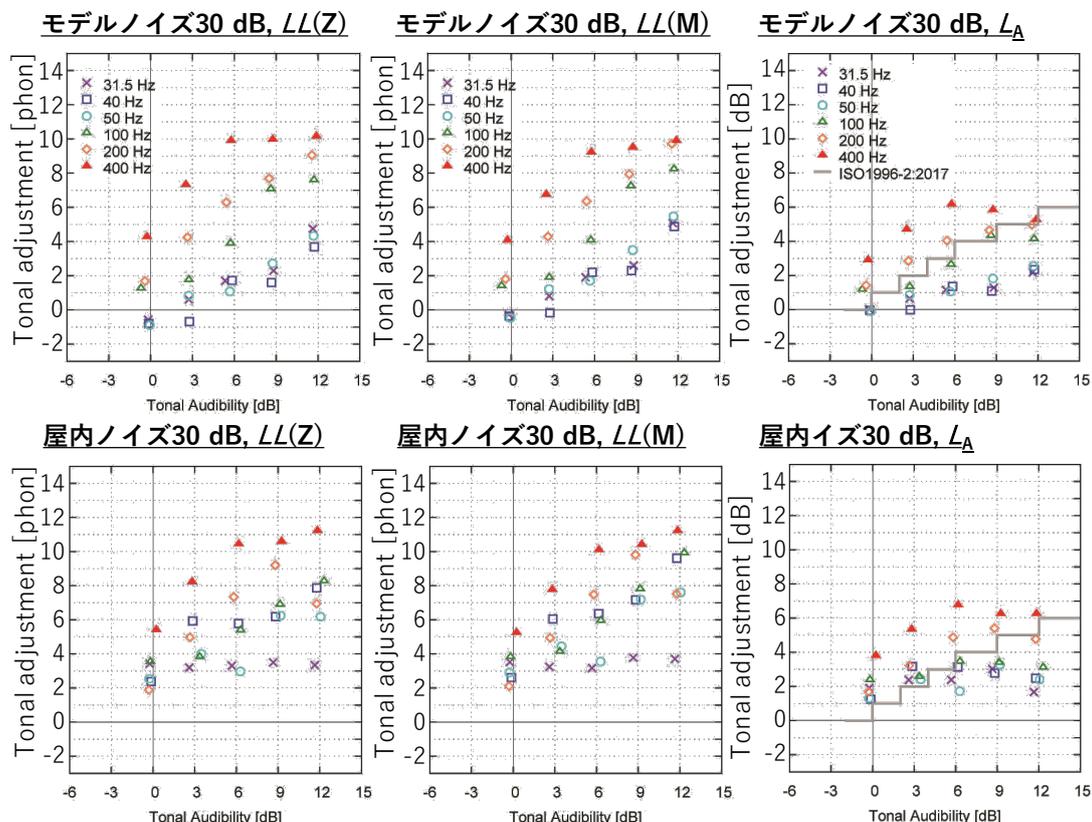


図4.1.14 Tonal AudibilityとTonal Adjustmentの関係 (実験3-2(B))

### 実験3-3 日中を想定したわずらわしき評価

Tonal Audibilityとわずらわしき評価の実験参加者の平均値の関係を図4.1.15に示す。実験参加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Tonal Audibility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。モデルノイズでは, 高い純音周波数の400 Hzと200 Hzで低い周波数の純音よりもわずらわしさが有意に高かったが, 屋内ノイズでは全ての純音強度で純音周波数による差異は見られなかった。

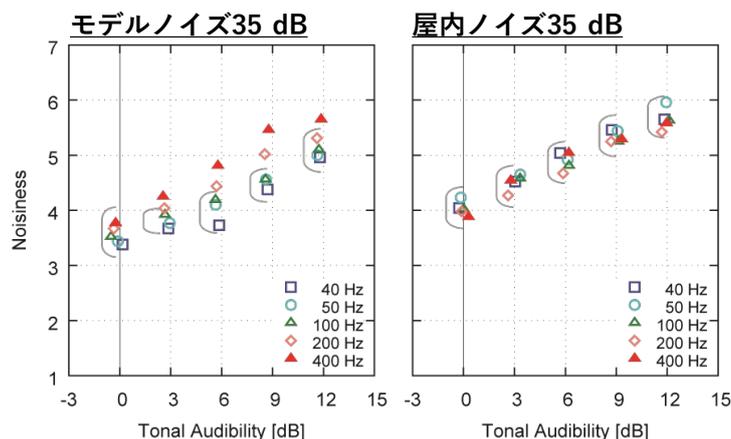


図4.1.15 実験3-3の結果 (背景騒音レベル35 dB)

### Tonal Adjustmentに関する検討

実験3-2と同様に, Tonal Adjustmentを算出した。わずらわしさとラウドネス指標の関係を図4.1.16に, Tonal AudibilityとTonal Adjustmentの関係を図4.1.17に示す。実験3-2と同様に, ラウドネスレベル $LL(Z)$ ,  $LL(M)$ で評価した場合, 純音強度が強くなるに従ってTonal Adjustmentも線形に増加するのに対し, A特性音圧レベル $L_A$ で評価した場合には, Tonal Audibilityが6ないし9以下の範囲では, 純音強度が増すにしたがってTonal Adjustmentが増大するが, それ以上に純音強度が強くなると, Tonal Adjustmentが横ばい, もしくは減少していく複雑な傾向が見られた。提示レベルが低い実験3-2の結果と比較すると, 実験3-3の方がTonal Adjustmentが低い。このことは, 背景騒音のレベルが低い静穏な環境下ほど, 純音成分が不快感に及ぼす影響が大きいことを示している。

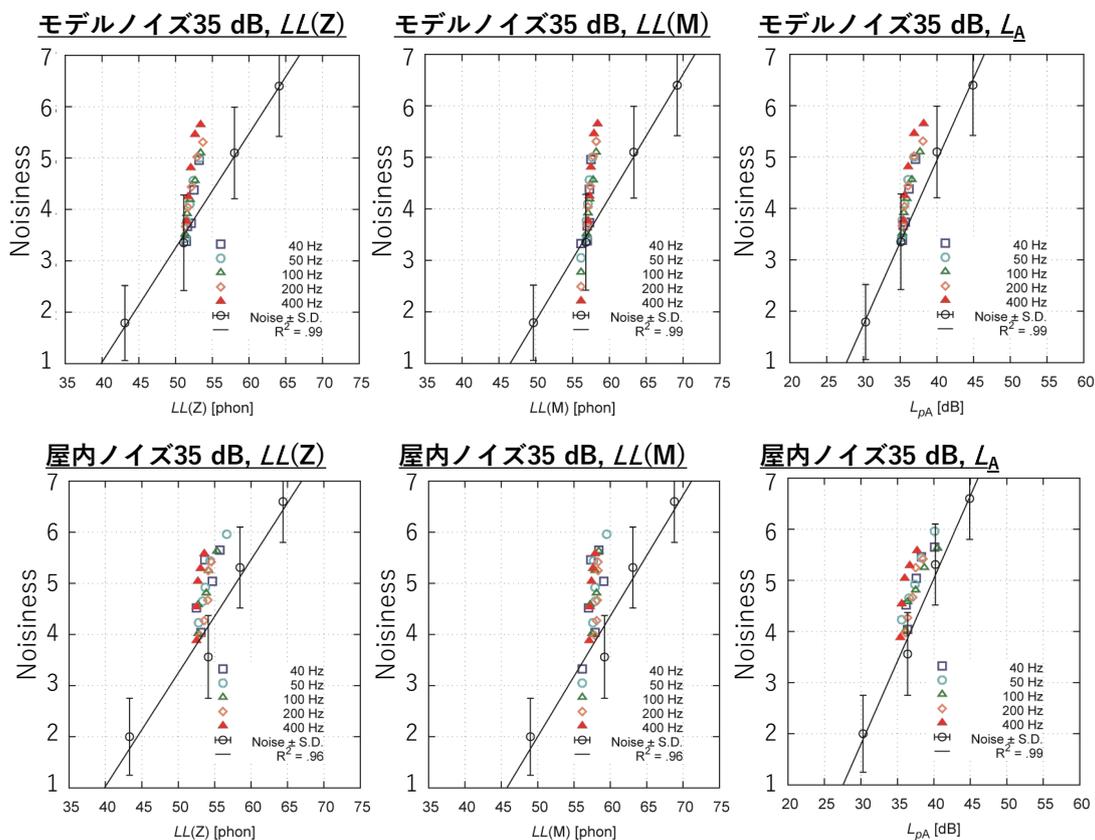


図4.1.16 わずらわしさとラウドネス指標の関係 (実験3-3)

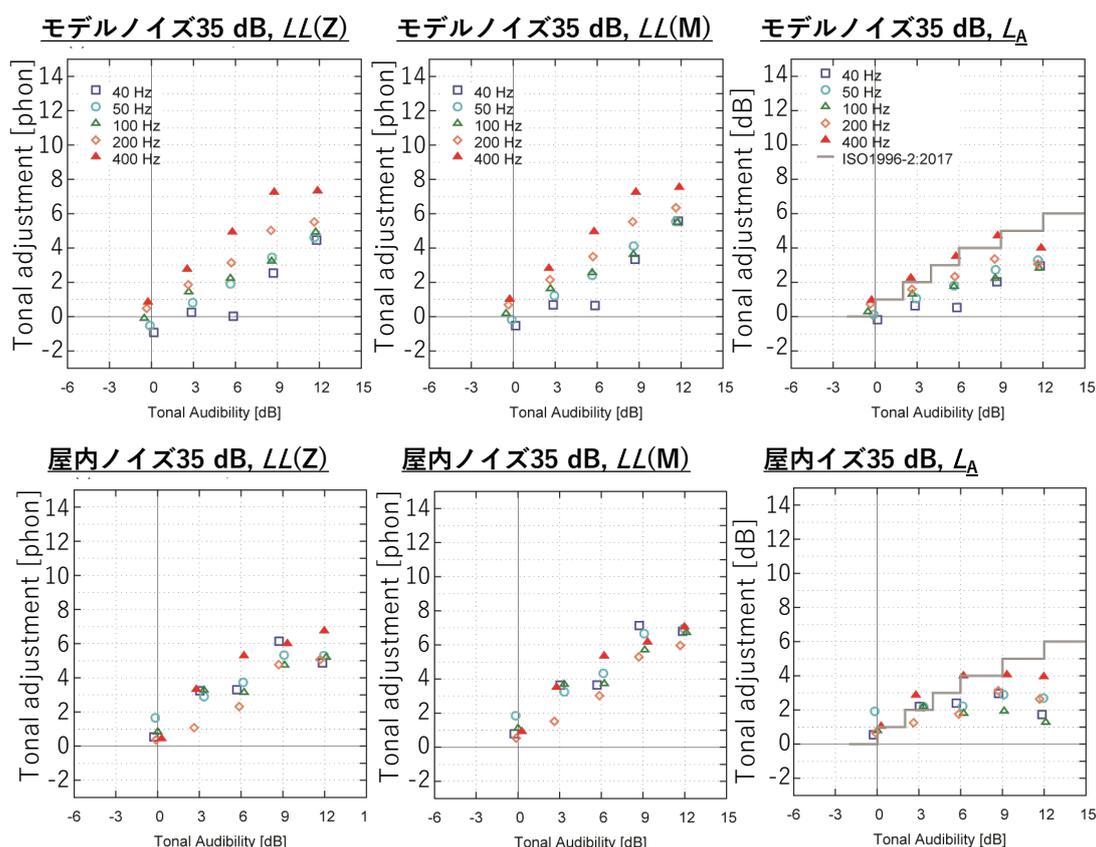


図4.1.17 Tonal AudibilityとTonal Adjustmentの関係（実験3-3）

### 実験結果の総合的考察と A 特性音圧レベルの評価における Tonal Adjustment に関する提案

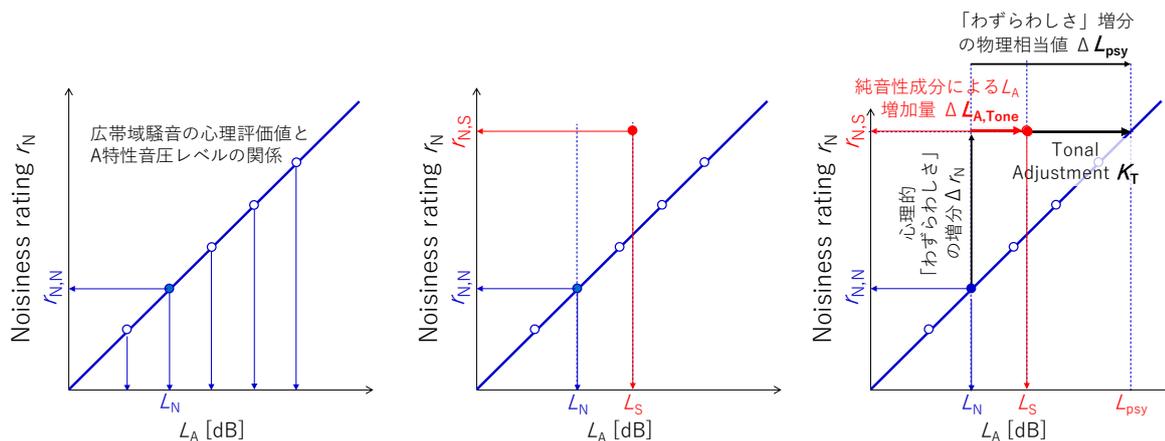
ラウドネス指標別に、純音性成分とTonal Adjustmentの関係を調べた結果、Moore-Glasbergラウドネスレベルによる評価が最も線形性が強く、かつ、概ねまとまった結果が得られたが、A特性音圧レベルによる評価では、純音周波数や背景騒音の特性によるばらつきが大きく、やや複雑な傾向を示す結果となった。しかしながら、環境騒音の評価は、現在、国際的にA特性音圧レベルに基づいて行われているため、本研究の最も重要な研究開発目的である、騒音不快感の評価指標の構築も、A特性音圧レベルに基づいて行わなければならない。そこで、A特性音圧レベルによる評価におけるTonal Adjustmentについてさらに考察し、評価の指針に関する検討を行った。

#### 1) 純音性成分を含む騒音の評価モデル

最初に、特定の純音性成分を含まない広帯域に成分をもつ一般的な環境騒音の心理評価値とA特性音圧レベルの物理指標値の関係を図示すると、図4.1.18 (a)のようになる。広帯域に成分をもつ定常騒音の心理評価値とA特性音圧レベルは、非常に高い相関関係があることが知られている。次に、この広帯域騒音（A特性音圧レベル $L_N$  dBで、心理評価値を $r_{N,N}$ とする）に、ある純音性成分が加わった場合の心理評価値が図4.1.18 (b)のように $r_{N,S}$ となり、純音性成分が加わったことによりA特性音圧レベルが $L_S$ に変化したとする。このとき、純音性成分が加わった騒音わずらわしさと等価となる広帯域騒音のレベルは図4.1.17 (c)の $L_{psy}$ であり、心理的な「わずらわしさ」の増分を $\Delta r_N (= r_{N,S} - r_{N,N})$ 、純音性成分が加わったことによる $L_A$ の増加量を $\Delta L_{A,Tone} (= L_S - L_N)$ とし、「わずらわしさ」の増分のA特性音圧レベル相当値を $\Delta L_{psy}$ 、Tonal Adjustmentを $K_T$ とすると、次式の関係がある。

$$K_T = \Delta L_{psy} - \Delta L_{A,Tone} \quad (4.1.1)$$

すなわち、Tonal Adjustmentは、純音性成分の付加による煩わしさの増分をA特性音圧レベルに置き換えた物理量と、純音性成分の付加により、物理的に増加する指標値の増分の2つの要素によって決定されることを示す。この2つの要素について、本研究で得られた実験結果に基づき、それぞれ考察する。



(a)広帯域騒音の評価 (b)純音性成分を有する騒音の評価 (c)Tonal Adjustmentのモデル

図4.1.18 純音性成分を有する騒音のTonal Adjustmentの考え方

2) 純音性成分が含まれた騒音と心理的にわずらわしさが等価な広帯域騒音レベル $L_{psy}$ の導出

図4.1.9, 4.1.10, 4.1.15によれば, 背景騒音レベル25 dB条件 (モデルノイズ, 屋内ノイズとも), 30 dB条件 (モデルノイズ) および35 dB条件 (モデルノイズ) の場合は, 100 Hz未満の低周波数純音に対する心理評価結果と100 Hz以上の純音に対する心理評価結果の間に有意な差異が認められ, 背景騒音レベル30 dB条件 (屋内ノイズ) と35 dB条件 (屋内ノイズ) の場合には純音周波数間に有意差が認められない結果であった。そこで, 有意差が認められなかった評価結果を同じ群として取り扱い, 純音性成分が含まれた騒音の心理評価値と, 純音強度の指標値であるTonal Audibilityとの関係を回帰直線で表すと図4.1.19のようになり, 高い相関が認められる ( $R^2 > 0.77$ )。全ての条件の回帰式をまとめると, 表4.1.1のとおりである。

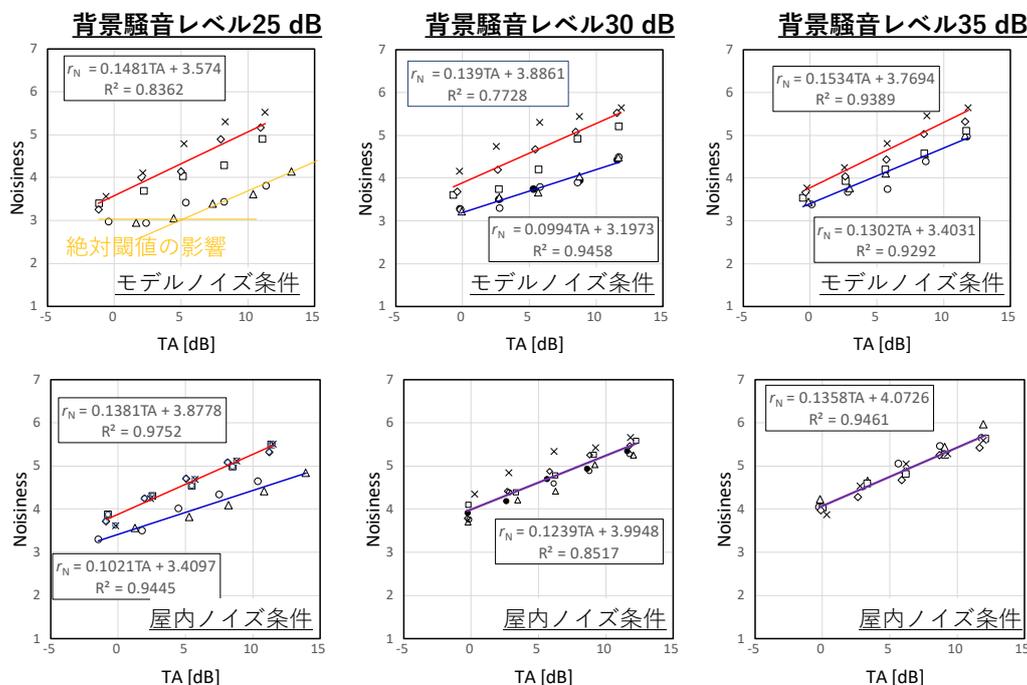


図4.1.19 純音性成分を含む騒音のTonal Audibilityとわずらわしさの関係

一方, 純音性成分を含まない広帯域騒音のわずらわしさとA特性音圧レベルの関係は図4.1.20のようになり, 両者の相関は極めて高い ( $R^2 > 0.97$ )。回帰式をまとめると, 表4.1.2のとおりである。

表 4.1.1 と表 4.1.2 の回帰式より，それぞれの背景騒音，純音周波数の条件において，Tonal Audibility と，その騒音のわずらわしさに相当する広帯域騒音の A 特性音圧レベル  $L_{psy}$  の関係を式として表すことができる。そのようにして求めた  $L_{psy}$  と，背景騒音レベルの差を計算すれば，わずらわしさの増分の A 特性音圧レベル相当値  $\Delta L_{psy}$  を求めることができる。求めた  $\Delta L_{psy}$  を図 4.1.21 に示す。図中には，ISO1996-2:2007 および ISO 1996-2:2017 に規定された Tonal Adjustment を併せて示す。 $\Delta L_{psy}$  は Tonal Audibility に対して線形な関係であり，その傾きは ISO 1996-2:2017 に近い。背景騒音のレベルによる違いに着目すると，背景騒音レベルが低いほど  $\Delta L_{psy}$  の値は大きい。また，Tonal Audibility が 0 dB であっても， $\Delta L_{psy}$  は 1 dB~4 dB となり，純音成分が可聴となって不快感を生じさせている可能性がある。

表4.1.1 純音性成分を含む騒音のTonal Audibilityとわずらわしさの回帰式

背景騒音 レベル	背景騒音 周波数特性	純音周波数	回帰式 (TA:Tonal Audibility, $r_N$ :わずらわしさの心理評価値)
25 dB	モデルノイズ	< 100 Hz	絶対閾値の影響大のため設定せず
		$\geq 100$ Hz	$r_N = 0.148 \cdot TA + 3.57$ ( $R^2 = 0.84$ )
	屋内ノイズ	< 100 Hz	$r_N = 0.138 \cdot TA + 3.89$ ( $R^2 = 0.98$ )
		$\geq 100$ Hz	$r_N = 0.102 \cdot TA + 3.41$ ( $R^2 = 0.94$ )
30 dB	モデルノイズ	< 100 Hz	$r_N = 0.139 \cdot TA + 3.89$ ( $R^2 = 0.77$ )
		$\geq 100$ Hz	$r_N = 0.099 \cdot TA + 3.20$ ( $R^2 = 0.95$ )
	屋内ノイズ	< 100 Hz	$r_N = 0.124 \cdot TA + 3.99$ ( $R^2 = 0.85$ )
		$\geq 100$ Hz	
35 dB	モデルノイズ	< 100 Hz	$r_N = 0.153 \cdot TA + 3.77$ ( $R^2 = 0.94$ )
		$\geq 100$ Hz	$r_N = 0.130 \cdot TA + 3.40$ ( $R^2 = 0.93$ )
	屋内ノイズ	< 100 Hz	$r_N = 0.136 \cdot TA + 4.07$ ( $R^2 = 0.95$ )
		$\geq 100$ Hz	

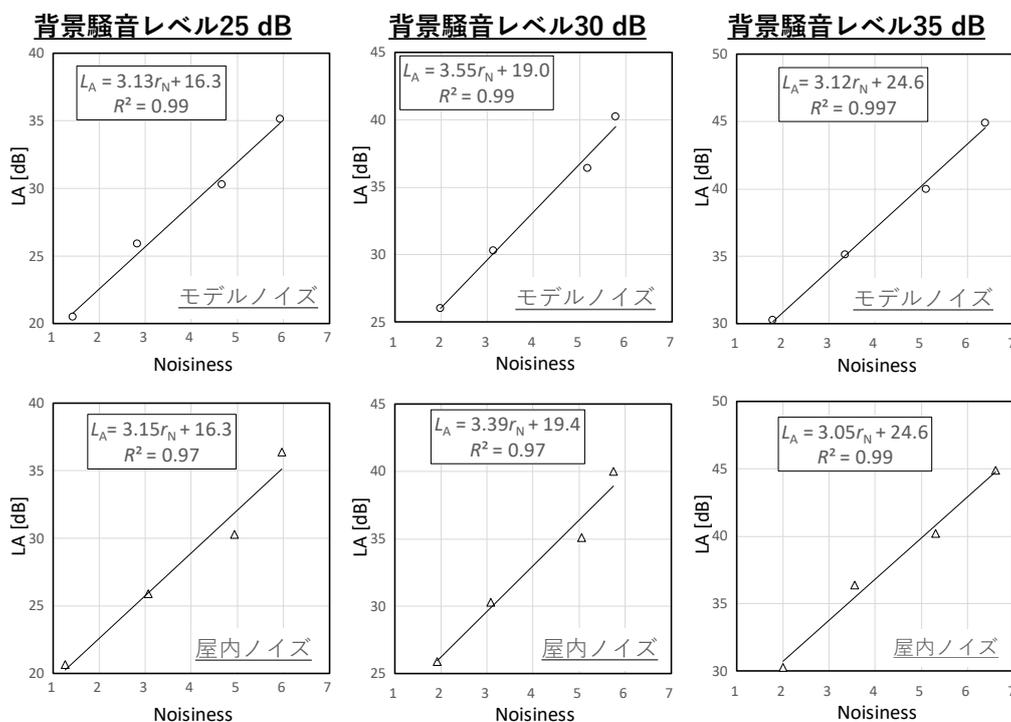
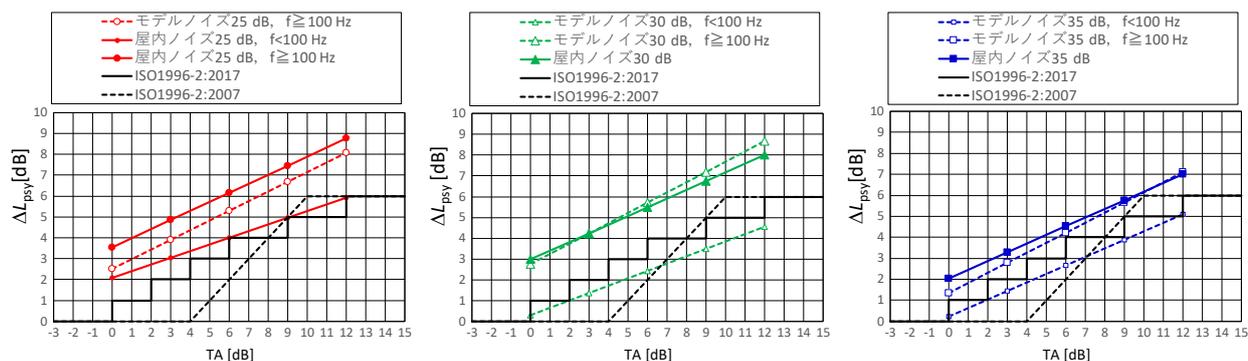


図4.1.20 広帯域騒音のわずらわしさとA特性音圧レベルの関係

表4.1.2 広帯域騒音のわずらわしさとA特性音圧レベルの関係式

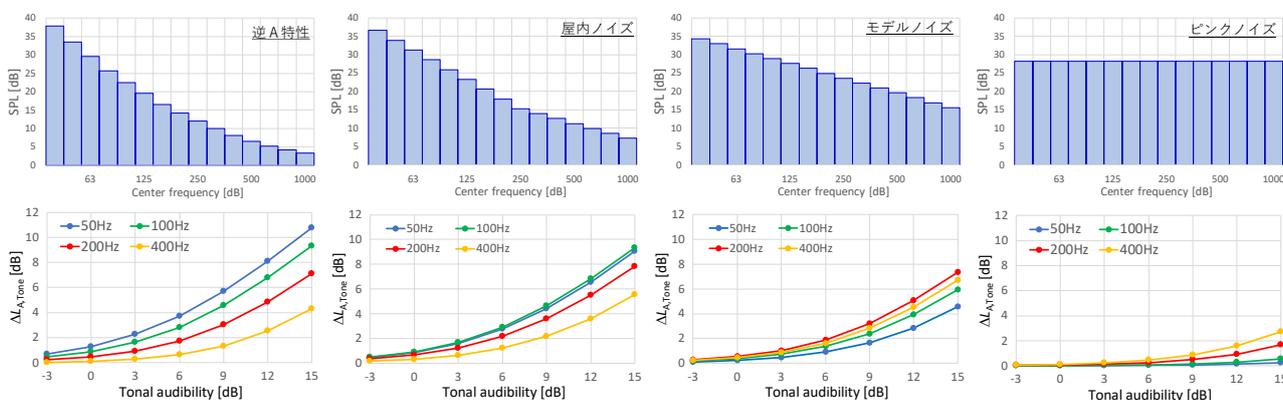
実験	背景騒音	回帰式 ( $L_A$ : A特性音圧レベル, $r_N$ :わずらわしさの心理評価値)
	周波数特性	
3-1(A)	モデルノイズ	$L_A = 3.13 \cdot r_N + 16.3$ ( $R^2 = 0.99$ )
	屋内ノイズ	$L_A = 3.15 \cdot r_N + 16.3$ ( $R^2 = 0.97$ )
3-2(B)	モデルノイズ	$L_A = 3.55 \cdot r_N + 19.0$ ( $R^2 = 0.99$ )
	屋内ノイズ	$L_A = 3.39 \cdot r_N + 19.4$ ( $R^2 = 0.97$ )
3-3	モデルノイズ	$L_A = 3.12 \cdot r_N + 24.6$ ( $R^2 = 0.997$ )
	屋内ノイズ	$L_A = 3.05 \cdot r_N + 24.6$ ( $R^2 = 0.99$ )

図4.1.21 Tonal Audibilityと $\Delta L_{psy}$ の関係

### 3) 純音性成分が加わったことによる $L_A$ の増加量 $\Delta L_{A,Tone}$

背景騒音の周波数特性として、本研究における聴感評価実験で採用したモデルノイズ，屋内ノイズに加え，低周波数領域の成分がより卓越した逆A特性の周波数特性をもつノイズ，高周波数帯域の成分がより卓越したピンクノイズをとり上げ，それらの背景騒音に単一の純音が付加された時の $L_A$ の増加量 $\Delta L_{A,Tone}$ を計算した（図4.1.22）。図4.1.22は，上段に背景騒音の周波数特性を示している。下段のグラフの横軸は付加した純音のTonal Audibility，縦軸が $\Delta L_{A,Tone}$ の値であり，純音周波数が50 Hz，100 Hz，200 Hz，400 Hzの結果を示している。

背景騒音の周波数特性によって $\Delta L_{A,Tone}$ の値は大きく異なり，Tonal Audibilityが15 dBの場合に，背景騒音の種類によって $\Delta L_{A,Tone}$ に10 dB以上の差がある場合もある（例えば50 Hz純音における逆A特性ノイズとピンクノイズの差）。また，純音周波数の違いによる $\Delta L_{A,Tone}$ の変化の傾向は背景騒音によって異なり，低周波数成分が優勢な背景騒音下では純音周波数が低いほど $\Delta L_{A,Tone}$ が大きくなるが，低周波数成分が優勢な背景騒音の下では逆に純音周波数が低いほど $\Delta L_{A,Tone}$ が小さくなっている。このように， $\Delta L_{A,Tone}$ は，背景騒音の特性と純音周波数に大きく依存する。したがって， $\Delta L_{psy}$ と $\Delta L_{A,Tone}$ の双方の値によって決まるTonal Adjustment  $K_T$ は，背景騒音の周波数特性と純音周波数に依存して様々な値をとり得る。

図4.1.22 いくつかの背景騒音の周波数特性を想定した場合の $\Delta L_{A,Tone}$ 

### 4) Tonal Adjustmentの傾向

図4.1.21, 4.1.22をもとに, Tonal AudibilityとTonal Adjustment  $K_T$ の関係を求めた結果を図4.1.23に示す。純音が付加されることによる煩わしさの増分のA特性音圧レベル相当値 $\Delta L_{psy}$ はTonal Audibilityと線形の関係にあり, 純音強度が強くなるほど $\Delta L_{psy}$ は増加していくが, 本研究で一般環境騒音として想定したモデルノイズや屋内ノイズの周波数特性の条件では, 純音が付加されることによるA特性音圧レベルそのものの増加幅 $\Delta L_{A, Tone}$ がさらに大きくなるため, Tonal Adjustmentは純音強度と線形の関係にあるわけではなく, ある程度純音強度が強くなると横ばいとなる。この傾向は, 図4.1.14, 4.1.17に示す実験結果に見られる傾向と一致している。

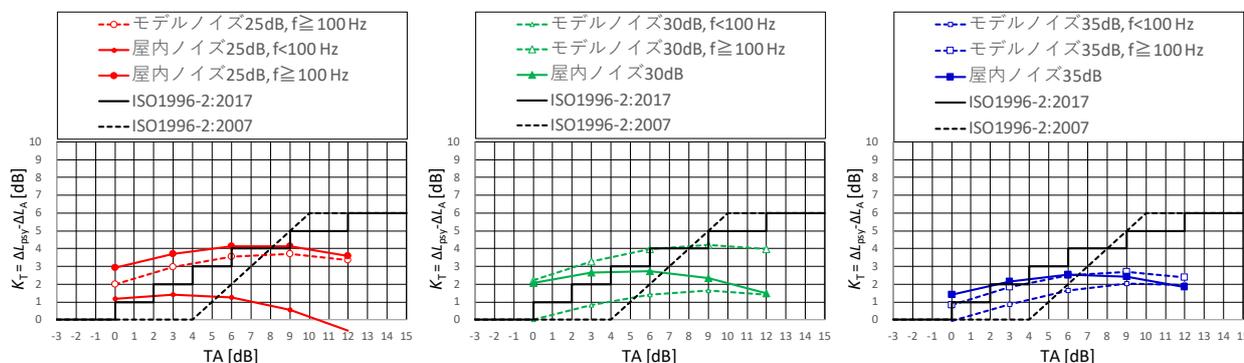


図4.1.23 Tonal AudibilityとTonal Adjustment  $K_T$ の関係

## 5) 聴感評価実験結果に基づくTonal Adjustmentの提案

本項では, 上述1)から4)の考察, およびわずらわしさの実験結果に基づき, 本研究における研究開発目的の最重要項目である, 騒音不快感の評価指標を構築する。

上述1)~4)の考察では, Tonal Adjustmentが純音の強度に応じてどのように変化するか, 一般的な傾向を見出すために, 実験結果を大きくグループに分けて平均値を算出し, それらを基に議論を展開した。しかしながら, 実験3-2および3-3の考察で述べたように, 図4.1.14, 4.1.17にみられる結果にはばらつきが大きい。そのため, 平均値のみを用いた議論では, 条件設定によって出現可能性のある強い影響を取りこぼしてしまう恐れがある。したがって, 聴感実験結果で得られた全てのデータに基づいてTonal Adjustmentを検討する。

上述3), 4)では, 純音周波数が100 Hz未満の低周波数領域にある場合と, 100 Hz以上の周波数領域にある場合でわずらわしさの心理評価値に差があるとしている。そこで, 純音周波数100 Hzを境として, 実験で得られたTonal Adjustment  $K_T$ を分類し, Tonal Audibilityとの関係として整理した。結果を図4.1.24(a), 4.1.24 (b)に示す。

Tonal Adjustment  $K_T$ は, 純音周波数100 Hz未満の場合には0 dBから3 dBの間に, 純音周波数が100 Hz以上の場合には0 dBから7 dBの間に広く分布している。大まかな傾向として, Tonal Audibilityが0 dBのときにもTonal Adjustment  $K_T$ は0~2 dB (100 Hz未満), 0~4 dB (100 Hz以上) あり, Tonal Audibilityが3 dB~6 dBまで大きくなるにつれてTonal Adjustment  $K_T$ も大きくなり, Tonal Audibilityがそれ以上になると横ばいとなる。純音周波数が100 Hz以上の場合, 背景騒音レベルが35 dBのときにはTonal Adjustmentが比較的小さく, 25 dBないし30 dBのときには比較的大きくなる傾向も見られる。

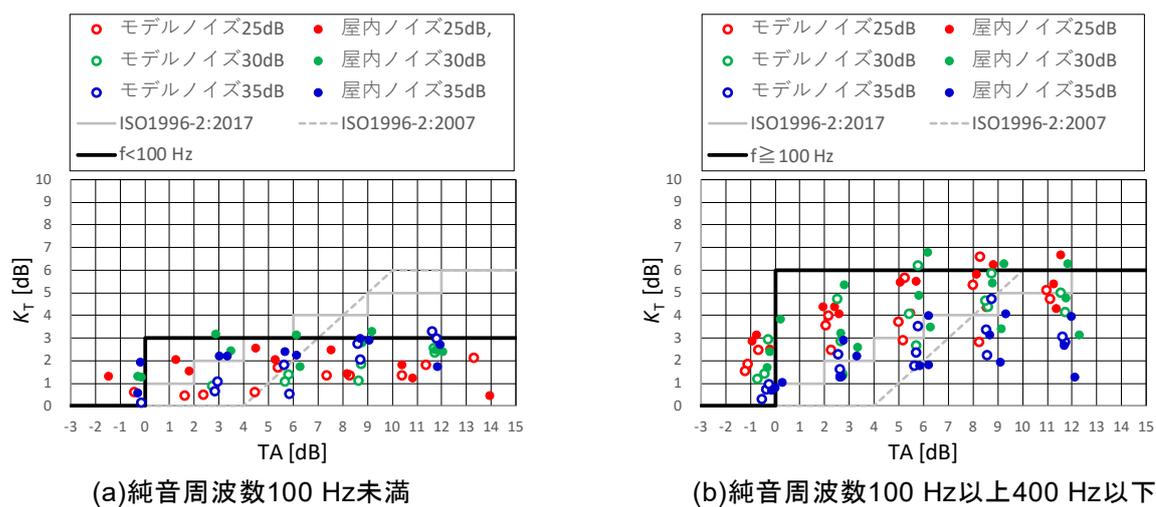
以上, 聴覚評価実験により得られた結果より, 以下の傾向が分かった。

- ✓ Tonal Audibilityが0 dB以上になると, Tonal Adjustmentが正の値となる。
- ✓ Tonal Adjustmentの値は背景騒音のレベルおよび種類によってばらつき, 背景騒音レベルが低いほど大きくなる傾向がある。
- ✓ Tonal Adjustmentの最大値は, 純音周波数が100 Hz未満の場合はおおよそ3 dB, 100 Hz以上の場合はおおよそ6 dBとなる。図4.1.24には, Tonal Audibility 0 dBを境にTonal Adjustmentがステップ状に変化する,

$$K_T = \begin{cases} 0 & (TA < 0) \\ A & (TA \geq 0) \end{cases} \quad (4.1.2)$$

ただし、純音周波数100 Hz未満のとき $A=3$ 、100 Hz以上のとき $A=6$ となる関数を示した。

Tonal Audibilityを環境行政に取り入れることを想定した場合、評価の手続きが単純であることが求められる。また、純音成分を含む騒音が問題となる地域は暗騒音レベルが低い静穏な地域であり、また問題となる時間帯が夜間であることを考慮すると、平均値ではなく、最大値に近い値を基準値とすることが妥当であると考えられる。



(a)純音周波数100 Hz未満

(b)純音周波数100 Hz以上400 Hz以下

図4.1.24 Tonal AudibilityとTonal Adjustmentの関係

そこで、問題となる純音の周波数別に、図4.1.24に太実線で示す値をTonal Adjustmentとする評価指標を提案する。Tonal Adjustmentは、純音ペナルティとも呼ばれる。すなわち、対象機器の騒音を受聴点で計測したA特性音圧レベルに、同時に測定したその騒音のTonal Audibilityから式(4.1.2)で計算されるTonal Adjustmentを加算することにより評価レベルを算出する。この評価指標は、評価の手続きが単純であり、環境行政で用いるのに適している。

以上の検討結果より、人間の感覚（うるささ感、不快感）と良い対応を示す物理量を求め、その物理量から構成される騒音不快感の評価指標を構築するという研究目標を達成することができた。

#### (4) 純音性指標を測定可能な計測器の試作

本研究の研究開発目的である、評価指標の算出と評価を可能とするソフトウェアを提供することに資するため、スマートフォンアプリの試作と、分析システムの試作を行った。試作したスマートフォンアプリを図4.1.25に示す。この試作例は、携帯端末 (ipod touch) に市販の民生品マイク (MicW社製, i437L) を組み合わせたものである。この試作品を用いて、人工的に作成した純音成分を含む定常騒音のTAを測定し、別途同じ音を録音した後、電子計算機によりTAを計算した結果と比較することによって、試作機器の精度検証を行った。精度検証結果を図4.1.26に示すが、両者は±1 dB未満の差で良好に一致した。この試作事例は、分析器、マイクロホンともに民生品であるため比較的安価に構成できるが、計測の精度に関しては十分な注意が必要である。すなわち、マイクロホンの性能（周波数特性、および感度）を予め把握した上で、使用者が適用範囲を適切に判断することが極めて重要となる。なお、スマートフォン自体に付属するマイクロホンの性能は不明である上、特に低周波数帯域の純音を計測する場合には高性能なマイクロホンが必要となるため、本アプリを公開する予定はない。

次に、RION社製騒音計と分析器SA-A1を組み合わせた構成で試作したシステムを図4.1.27に、精度検証結果を図4.1.28に示す。精度検証の結果、試作した分析システムによる測定値は、同時に録音した後PC上で計算した結果と±1 dB未満の差で良好に一致することを確認した。この試作事例では騒音計を

利用しているため、マイクロホンはIEC 61672-1に適合し、精度が保証されるが、分析システムと合わせ、計測システムは高価なものとなる。

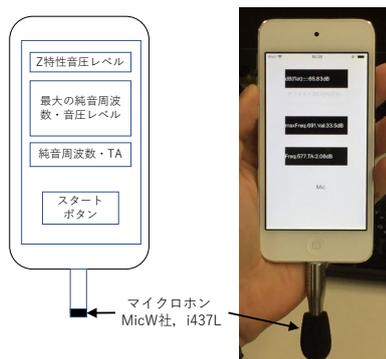


図4.1.25 TA計算のためのアプリの試作

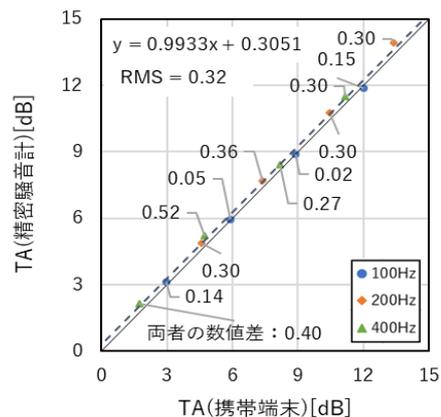


図4.1.26 試作したアプリの精度検証結果



図4.1.27 TA計算のための分析システムの試作

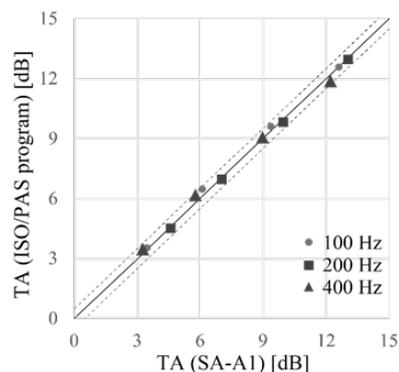


図4.1.28 試作した分析システムの精度検証結果

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

騒音中に含まれる、低周波数帯域の純音性成分が騒音のわずらわしさ(ノイジネス)に及ぼす影響を、純音周波数に着目して系統的に調べた例は、これまで、我が国にも少数ながらあるが、純音周波数に加えて、背景騒音の周波数特性の影響にも着目し、本研究ほど系統立てて調べた事例はない。広帯域騒音である背景騒音の周波数特性と、純音周波数およびその強度の関係が、A特性音圧レベルの指標値に大きな影響を及ぼし、その結果が純音強度に依存するTonal Adjustmentの特性に大きな影響を及ぼすことを示したことは大きな科学的成果である。また、騒音のラウドネス指標として、環境騒音の評価指標として国際的に用いられているA特性音圧レベルのほかに、ZwickerのラウドネスレベルおよびMoore-Grasbergのラウドネスレベルについても詳細に調べ、Moore-Grasbergのラウドネスレベルが、純音性成分が強い騒音に対しても主観的な大きさをよく反映した指標値を与えることを示した。Moore-Grasbergのラウドネスレベルは、国際規格ISO 532-2に評価方法が明示されており、今後の騒音評価において活用が期待できる。

### (2) 環境政策への貢献

#### <行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

#### <行政が活用することが見込まれる成果>

我が国では、現在、風力発電施設から発せられる騒音、家庭用ヒートポンプ給湯器などの設備機器による騒音の純音性を考慮した評価基準が存在しない。風力発電施設から発せられる騒音については、「風

力発電施設から発生する騒音等への対応について（平成28年11月）」において、「純音性成分を含む場合のわずらわしさ（アノイアンス）への影響については現時点で科学的な知見が十分ではない」とされている。このような現状において、本研究で得られた、騒音中に含まれた純音性成分が騒音の「わずらわしさ」に及ぼす影響に関する聴感評価実験結果は、純音性成分を考慮した評価基準を策定する上での基礎データとして活用されることが見込まれる。

純音性成分の強度を評価する指標として、本研究において、ISO PAS 20065:2017や、IEC 61400-11:2012で規定された指標の妥当性を検討した。この成果は、騒音中に含まれる純音性成分の測定評価法を検討する際の基礎データとして活用されることが見込まれる。

本研究では、上記の純音性評価指標により整理した、騒音の「わずらわしさ」評価の実験データに基づき、現在国際的に用いられている騒音の評価指標であるA特性音圧レベル評価における調整値Tonal Adjustmentを定量的に示した。この成果は、人間の感覚(うるささ感, 不快感)と良い対応を示す物理量を求め、それら物理量から構成される騒音不快感の評価指標を構築するという本研究の研究開発目的を達成した最重要事項である。この研究成果は、環境行政において今後純音性成分を含む騒音の評価方法を検討する際の基礎データとして活用されることが見込まれる。

## 6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

#### <論文（査読あり）>

特に記載すべき事項はない。

#### <その他誌上発表（査読なし）>

特に記載すべき事項はない。

### (2) 口頭発表（学会等）

- 1) 佐々木奏子, 米村美紀, 李 孝珍, 坂本慎一, 低周波数領域の純音成分を含む騒音の大きさ感に関する聴感実験, 日本騒音制御工学会2017年秋季研究発表会講演論文集, 147-148, 2017.11
- 2) 米村美紀, 佐々木奏子, 李 孝珍, 坂本慎一, 定常ノイズに混在する低周波数純音の可聴度に関する聴感実験, 日本騒音制御工学会2017年秋季研究発表会講演論文集, 149-150, 2017.11
- 3) 米村美紀, 佐々木奏子, 辻村壮平, 李孝珍, 坂本慎一, 低周波数純音のマスキング閾値に関する聴感実験, 日本音響学会2018年春季研究発表会講演論文集, 829-830, 2018.3
- 4) 佐々木奏子, 米村美紀, 辻村壮平, 李孝珍, 坂本慎一, 低周波数領域に含まれる卓越した純音成分がわずらわしさ評価に及ぼす影響, 日本音響学会2018年春季研究発表会講演論文集, 831-832, 2018.3
- 5) 米村 美紀, 李孝珍, 坂本慎一, 低周波数純音成分を含むノイズのわずらわしさに関する評定尺度法による検討, 日本音響学会2019年春季研究発表会講演論文集, pp.605-606, 2019.3
- 6) Yonemura, Miki, Lee, Hyojin, Sakamoto, Shinichi, Measurement of masked threshold of low-frequency tones in outdoor and indoor environmental background noise, Proceedings of inter-noise 2019 16 to 19 June 2019 in Madrid, Spain, 2019
- 7) 米村美紀, 坂本慎一, 李 孝珍, 低周波数純音成分を含むノイズのわずらわしさに関する検討: 就寝時を想定した聴感評価実験, 日本音響学会2019年秋季研究発表会講演論文集, 433-436, 2019.9.5

### (3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

### (4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 東京大学駒場リサーチキャンパス公開（生研公開2018）（2018年6月8日，9日）にて成果紹介
- 2) 東京大学生産技術研究所次世代育成オフィス（ONG）依頼授業 テーマ：音響工学：音の心理と技術の接点（2018年11月16日，受講者：群馬県立前橋女子高校，37名）
- 3) 東京大学駒場リサーチキャンパス公開（生研公開2019）（2019年5月31日，6月1日）にて成果紹介

### (5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

### (6) その他

- 1) 佐々木奏子：日本騒音制御工学会2017年度研究奨励賞，2018年5月
- 2) 米村美紀：日本騒音盛業工学会2017年度研究奨励賞，2018年5月
- 3) Miki Yonemura, I-INCE Young Professional Congress Attendance Grants (YP Grants), 2019.6
- 4) 米村美紀：日本音響学会第19回学生優秀発表賞，2019年9月

## 8. 引用文献

- 1) H. Tachibana, “Modelling of house filter for wind turbine noise,” *6<sup>th</sup> Int. Conf. Wind Turbine Noise*, 2015.
- 2) H. Takeshima et al., “Equal-loudness contours measured by the randomized maximum likelihood sequential procedure,” *Acta Acoust. United with Acust.*, 87, (3), 389-399, 2001.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.

## II-2 純音性成分を含む騒音源の計測および予測技術に関する研究

大成建設㈱

技術センター都市基盤技術研究部 環境研究室 浜田 由記子  
 技術センター都市基盤技術研究部 環境研究室 富高 隆

平成29～令和元年度研究経費（累計額）：28,603千円（研究経費は間接経費を含む）  
 （平成29年度：9,696千円，平成30年度：9,210千円，令和元年度：9,696千円）

### 【要旨】

本サブテーマでは、風車騒音、家庭用ヒートポンプ給湯器からの発生音（以後、給湯器騒音）、外装材による風切音（以後、風騒音）を対象とした、純音性騒音に関する音源情報の収集とサブテーマ1への情報提供、サブテーマ1で評価指標と定めたTonal Audibilityの測定方法と予測方法の提案を担当する。

音源情報としては、①純音成分を除く騒音の全体的な周波数特性の傾向（ベース音）、②純音性成分の含まれる周波数と純音性可聴度（Tonal Audibility）の大きさの対応、をまとめた。Tonal Audibilityの測定方法に関しては、規格化されている風車騒音以外の給湯器騒音に関する現場測定法、風騒音の実験室測定法を提案した。Tonal Audibilityの予測方法については、屋外の純音性騒音伝搬の特徴を整理し、屋外の窓近傍から室内への予測手法を提案した。

### 【キーワード】

騒音測定、周波数特性、純音性成分、測定手法、予測手法

### 1. はじめに

サブテーマ2では、風車騒音、給湯器騒音、風騒音に関する実音の収集と物理的な特徴の整理を行う。また、評価指標を得るための測定法、純音性騒音を直接的に測定できない場合に用いる純音性騒音の予測技術に関する検討を行う。

### 2. 研究開発目的

本サブテーマの目的は3項目から成る。第1は、サブテーマ1への音源情報の提供である。サブテーマ1で行う聴感実験では、実音を模擬したモデル音源を用いる。モデル音源の検討には、純音性騒音の特徴（例えば、騒音の大きさや全体的な周波数特性、純音性成分の発生しやすい周波数の情報、純音性成分の大きさの情報など）が必要となる。そこで、純音性騒音を実測調査し、上記のような音源の特徴をまとめた情報と、測定した実音データ自体をサブテーマ1へ提供する。第2は、サブテーマ1で規定された評価尺度を測定する場合に必要となる、測定手法の提案である。既往の規格類を参考として、音源ごとに測定手法を定義するとともに、既往の規格が無い場合は新たな測定手法を提案する。第3は、予測手法の提案である。様々な理由から、居住者宅において純音性成分を持つ騒音を直接、調査することは難しい。このため、純音性騒音の評価に用いる室内の音圧レベルを屋外の音源データから簡易に予測する手法を提案する。

### 3. 研究開発方法

#### （1）騒音源の収集と物理的な特徴の把握

実音データの収集は音源毎に異なる方法とした。

風車騒音の検討対象を表3.2.1に示す。これは、先行研究<sup>1)</sup>で収録した全国34の風力発電事業所における164か所の録音データから代表的な純音性騒音を含む屋外の測定値8例(480データ)を選出したもので、集合型風力発電所（ウィンドファーム：WF）や単機の風車から221～901 m離れた地点の測定値である。

給湯器騒音は、2物件で計3回の実測調査を行い、機種による純音性成分の違いを検討した。測定条件

の概要と測定器の設置状況を図3.2.1に示す。既往報告<sup>2)</sup>で指摘された外気温度が低い場合に室外機の発生音が大きくなる傾向を検証するため、住戸1では異なる季節で計2回の測定を行い、発生音の季節変動を検討した。

風騒音は図3.2.2に示す風洞実験室において、3種類（手摺1，ルーバー2）の外装材に対する音響測定を実施した。1試験体当たり計390データ（受音点3点，風速10条件，風向きに対する部材の設置角度13条件）を収集し，分析を実施した。給湯器騒音と風騒音の測定・分析系統図を図3.2.3に示す。

物理量の分析方法は基本的にはスペクトル分析を採用し，必要に応じてオクターブバンド分析を行った。純音性成分の大きさを表す評価指標Tonal Audibilityは，表3.2.2に示す国際規格（IEC61400-11，ISO1996-2，ISO/PAS20065）の分析方法を適用して求めた。Tonal Audibilityの計算に用いたFFT分析手法の概要を表3.2.3に示す。

ここで，測定した物理量からTonal Audibilityを分析する際には，規格ごとに適用可能な周波数帯域が異なる点に注意する必要がある。表3.2.2に示す通り，純音性成分が50Hz未満にある場合はIEC6144-11のみが適用可能であり，50 Hz以上であればISO1996-2やISO/PAS20065が適用可能となる。既往研究<sup>3)</sup>には，顕著な純音性成分がある場合には，IEC61400-11，ISO1996-2，ISO/PAS20065のいずれの計算方法を用いても純音性成分の検出能力には大きな差が認められないと報告されていることから，音源の特徴により適応可能な分析手法を選択する手続きとする。

表3.2.1 風車騒音の検討対象

	データ名	設置状況	風車からの距離	騒音レベル(dB) (IEC61400-11分析値)
1	W02M05_T7	Wind-farm	464m	43.9
2	W20M05_T5	Wind-farm	340m	48.6
3	W22M01_T7	単機	173m	46.1
4	W25M04_T8	Wind-farm	901m	41.4
5	W28M06_T4	Wind-farm	221m	52.1
6	W28M07_T1	Wind-farm	375m	46.5
7	W29M01_T8	単機	370m	47.6
8	W29M04_T7	単機	400m	43.8

表3.2.2 Tonal Audibilityの分析方法に関する比較

Standards	ISO 1996-2 Annex C	IEC 61400-11	DIN 45681	ISO/PAS 20065
A-weighted spectrum	Yes	Yes	Yes	Yes
Frequency range [Hz]	from 50	from 20	from 90	from 50
Frequency resolution [Hz]	$\Delta f_{eff} < 0.05 \times \Delta f_T$	1 to 2	1.9 to 4.0	1.9 to 4.0
Critical band width $\Delta f_c$ [Hz]	$0.2f_T$ ( $f_T > 500$ ) 100 ( $f_T \leq 500$ )	$25 + 75 \cdot (1 + 1.4 \cdot [f_T/1000]^2)^{0.69}$		
Cut-off freq. of CB	$f_T = 0.5 \times (f_H + f_L)$		$f_T = \sqrt{f_H \times f_L}$	
Estimation of masking noise	Linear regression	Statistical method	Iterative method	Iterative method
Evaluation time duration	60 s (or about 10 s)	at least 10 s × 10 spectra		at least 3 s × 12 spectra
Penalty $K_T$	Specified	Not specified	Specified	Specified in ISO 1996-2:2017 Annex J
Sample source code	Not provided	Not provided	Provided	Provided

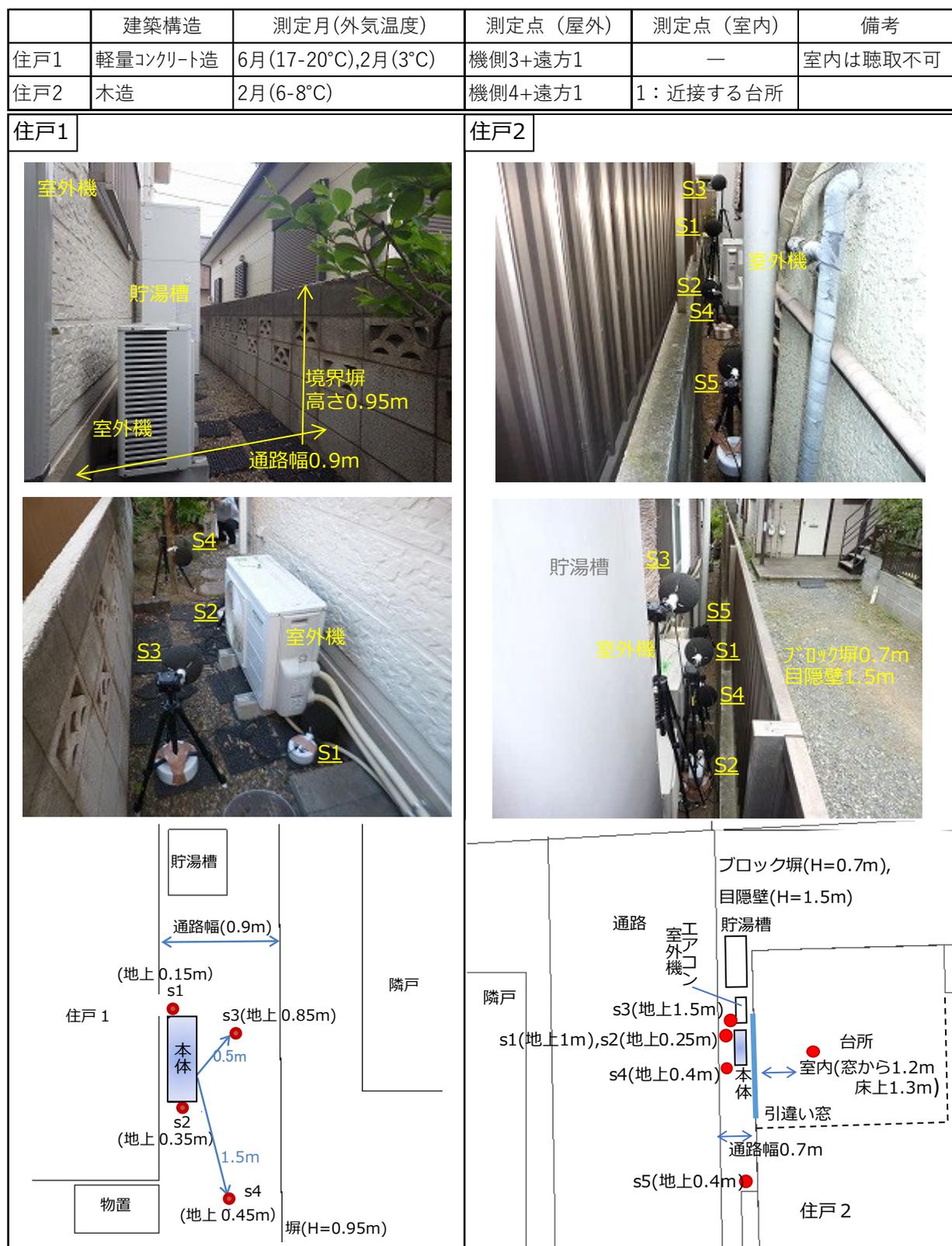
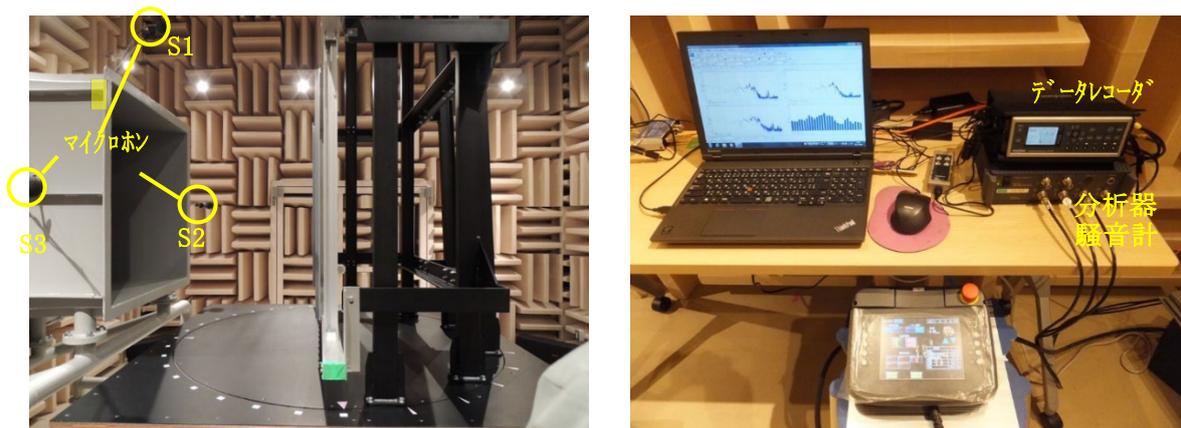


図3.2.1 給湯器騒音の測定状況



<マイクロホン設置状況>

<騒音計, データレコーダ, 分析器>

図3.2.2 風騒音の測定状況

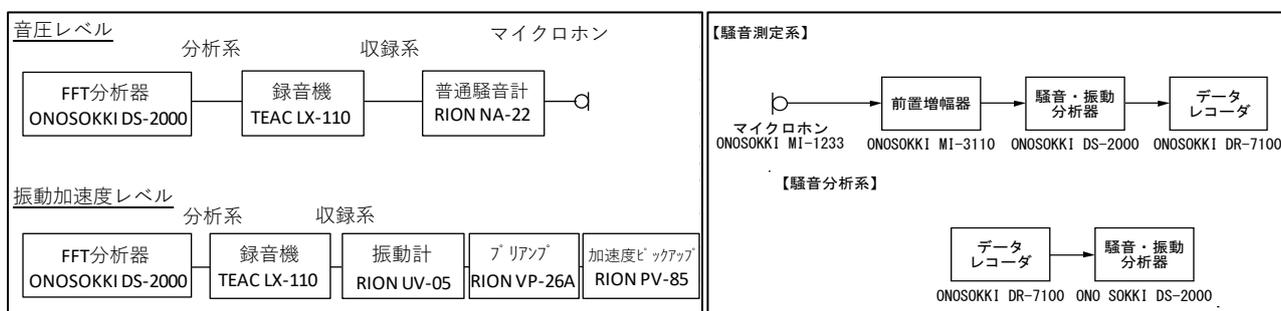


図3.2.3 測定・分析系統図 (左：給湯器騒音, 右：風騒音)

純音性成分の特徴の整理方法としては, 図3.2.4左に示す「純音成分を除く騒音の全体的な周波数特性の傾向(ベース音)」と, 図3.2.4右に示す「純音性成分の含まれる周波数と純音性可聴度(Tonal Audibility)の大きさ」とのマトリクスを求めた。

表3.2.3 FFT分析条件

FFT設定	風車騒音/給湯器			風騒音
	IEC	ISO	PAS	IEC
周波数特性	A特性	A特性	A特性	A特性
レンジ(Hz)	24k	24k	24k	10k
分解能(Hz)	1.46	2.93	2.93	1.56
窓関数	Hann	Hann	Hann	Hann
平均化時間	風車騒音(周波数の時間変動あり): 10秒毎 給湯器(周波数の時間変動なし): 全区間 風騒音(周波数の時間変動なし): 全区間			
規格名	IEC 61400-11, ISO 1996-2, ISO/PAS 20065			

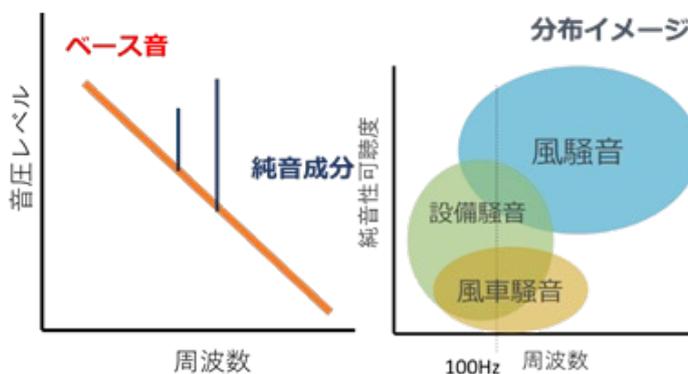


図3.2.4 騒音の整理方法のイメージ

(2) 評価尺度の測定方法に関する検討

対象の騒音源について純音性成分を考慮した測定方法が規格化されているのは, 風車騒音 (IEC 61400-11:2012, JIS C1400-11:2017) のみである。そこで, 給湯器騒音, 風騒音に関する測定法を検討した。

### <給湯器騒音>

給湯器騒音に関しては、JIS C9220-2018（家庭用ヒートポンプ給湯器）とJIS C9815-1:2013（エアコンディショナおよび空気熱源ヒートポンプの定格音響パワーレベル-第一部：直吹き形室外機）により実験室測定法が規格化されているが、直接参照できる現場測定法は無い。

図3.2.1(住戸2)の事例は本体からの距離が2 m程度の受音点でも暗騒音と稼働音とのS/Nは確保できたが、図3.2.1(住戸1)の事例は室外機本体に近接した点（0.1 m～0.5 m）のみ暗騒音と稼働時発生音のS/Nが確保されていた。本体から1.5m離れた点ではS/Nが10dB未満の周波数もあった。このように個々の現場測定から測定方法を検討することは難しい。そこで、暗騒音の影響を受けにくい、幅11 m×奥行16 m×高さ15 mの建屋内に3階建ての実験住宅が設置されている実験環境で測定を行い、その結果から測定方法の検討を行った。

図3.2.5に実験環境の概要を示す。幅11 m×奥行16 m×高さ15 mの建屋内に3階建ての実験住宅が設置され、建屋と実験住宅間には異なる幅の通路がある。音源はスピーカからの再生音とした。スピーカの配置は通路幅が約2 m（条件W）と約1.3 m（条件E）の場合の2条件とし、振動板をいずれも建屋の壁向きに設置した。再生音は図3.2.1(住戸1)の機側0.5 mで録音した図-3.2.6に示す室外機運転音で現地と同等のレベルで提示した。

建物内外の測定点は、建物外部については外壁から0.6 m離れ、居室の幅と階高に相当する範囲を水平1.2 m、高さ1.45 mピッチで分割した点とした。室内測定点は3室とも壁や天井、床面から0.3m離れた範囲を0.6 mピッチで分割した点で、居室Lは計288点、居室Sw・Seは計144点とした。測定状況を図3.2.7に示す。

室内測定は表3.2.4のとおりスピーカが面する窓を有する居室のみを対象としており、計4条件の測定ケースを検討した。再生音には、図3.2.6（機側における測定値）に示すとおり、25 Hz、42.5 Hzとこれらを基音とした倍調成分などの純音性騒音を含んでいる。

表3.2.4 実験住宅の寸法と測定条件

	幅(m)	奥行(m)	天井高(m)	外壁面積(m <sup>2</sup> )	表面積(m <sup>2</sup> )	スピーカ条件
居室L	3.43	7.21	2.4	8.2	100.5	W,E
居室Sw	3.43	3.61	2.4	8.2	58.6	W
居室Se	3.43	3.43	2.4	8.2	56.5	E

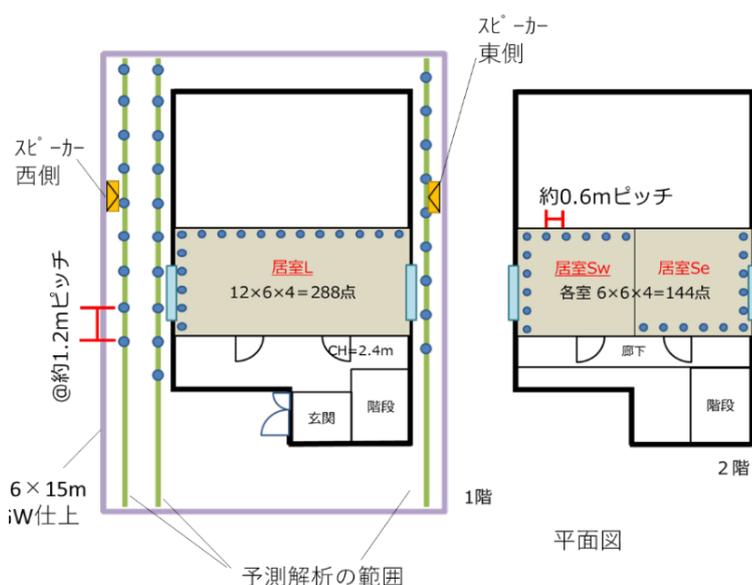


図3.2.5 実験室と測定点の概要

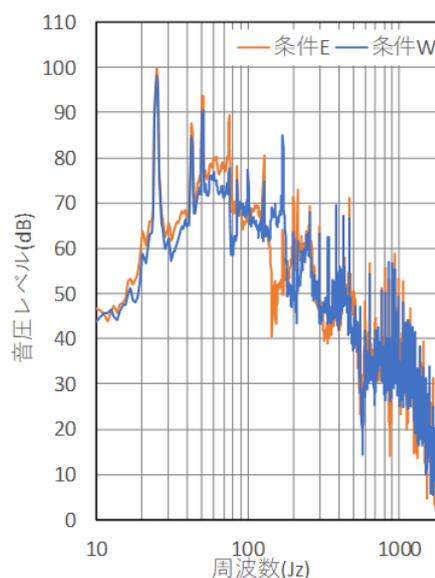


図3.2.6 提示音の周波数特性



図3.2.7 測定状況

### <風騒音>

風騒音については建設後に問題が生じないように設計段階で実験室測定を実施し、純音性騒音の生じない部材を選定している。しかし、風騒音の測定・評価に関する規格・基準等は存在しないため、評価機関毎で異なる測定・分析・評価手法を利用している。これらを標準化するため、実験室測定の要件（測定で用いる風洞施設や試験体の仕様、風向や風速等の測定条件の設定、測定点の設定方法）に関する検討を行った。

### (3) 評価尺度の予測方法に関する検討

低い周波数帯域に純音性成分を持つ風車騒音と給湯器騒音に適用可能な室内騒音の予測手法を検討した。図3.2.8に示すとおり、対象の騒音源直近の音圧レベル $L_{pn}$ や対象室の窓前の音圧レベル $L_{out}$ から、室内騒音レベル $L_{in}$ を予測する手法を検討した。

$$\text{室内音圧レベル予測値} : L_{in}(f) = 10 \cdot \log(10^{((L_{out}(f) - \Delta HF(f) - \Delta RF(f))/10)} + 10^{(L_{BGNin}(f)/10)})$$

$$\text{窓前音圧レベル予測値} : L_{out}(f) = 10 \cdot \log(10^{((L_{pn}(f) - \Delta G_{out}(f))/10)} + 10^{(L_{BGNout}(f)/10)})$$

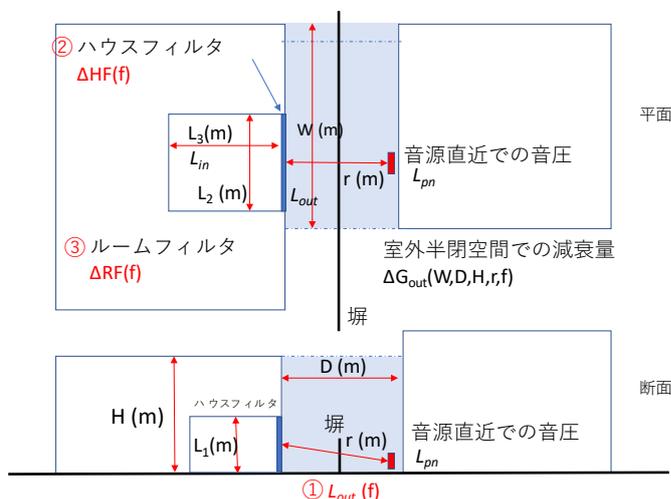


図3.2.8 予測手法の考え方

屋外騒音伝搬の検討には、時間領域有限差分法（FDTD法）によるパラメトリックスタディの計算値を用いた。検討に際し、図3.2.5の実測環境を表3.2.5、図3.2.9、図3.2.10に示すFDTD法の数値解析モデルとして再現し、図3.2.9の赤線および図3.2.5の緑線で示した3か所の実測値と予測値との対応が図3.2.11のように良いことを確認した。パラメトリックスタディの条件を図3.2.12に示す。

表3.2.5 FDTD解析の条件

境界条件	壁面の表面インピーダンスにより境界の粒子速度を更新
空間の格子幅	25mmの3次元格子
時間ステップ幅	0.04ms
計算時間	1.5m/s
音源	図3.2.8参照(スピーカの振動板に相当するセル境界に粒子速度の時間波形を付与)

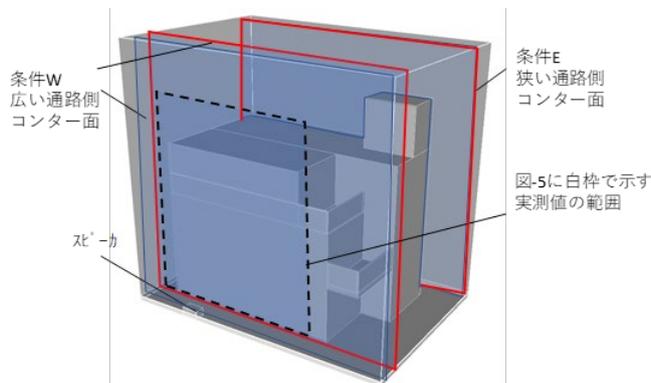


図3.2.9 数値解析モデルのイメージ

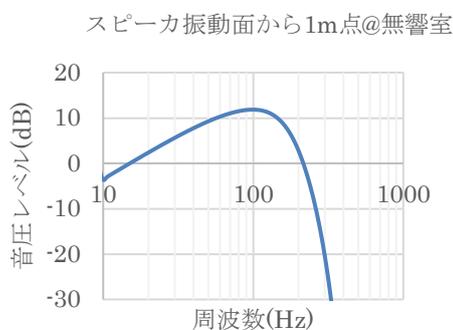


図3.2.10 音源モデルの設定

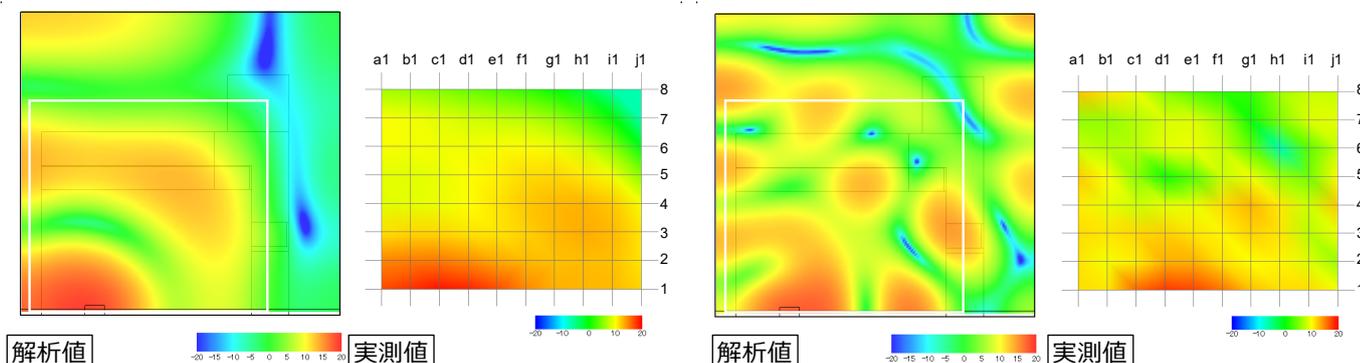
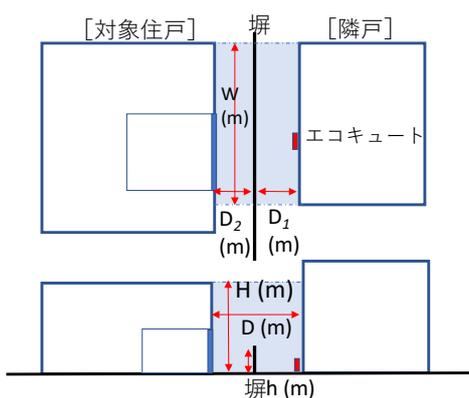


図3.2.11 条件Wにおける解析値と実測値との対応 (左25Hz, 右50Hz) 白枠は実測の範囲



室外半閉空間の増幅  
→FDTDによるパラメトリックスタディ

◇住戸間距離  $D = D_1 + D_2$

1.0~3.0 (m)

$D_1$ : 隣戸~塀

0.5, 1.0, 1.5 (m)

$D_2$ : 塀~対象住戸

0.5, 1.0, 1.5 (m)

塀高さ  $h=1.0$ (m)

◇重なる住戸の幅  $W=10.0$ (m)

◇重なる住戸の高さ  $H=6.0$ (m)

	1	2	3	4	5	6	7
隣戸(音源)	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
	0.5	0.5	1.0	1.0	1.5	1.0	1.5
	0.5	1.0	0.5	1.0	1.0	1.5	1.5
対象住戸	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0

図3.2.12 屋外騒音伝搬の検討条件

## 4. 結果及び考察

### (1) 騒音源の物理的な特徴

#### <風車騒音>

図4.2.1に風車騒音の狭帯域分析結果8例を重畳して示す。図より40～200 Hzの範囲に風車騒音の純音性成分が見られる。8例(図4.2.2左)と先行研究(図4.2.2右)の1/3オクターブバンド分析結果を比較すると、風車騒音の純音性成分を除く周波数(ベース音)は1オクターブ当たり-4 dBの傾きを示し、先行研究と同様の傾向と考えられる。純音性騒音8例についてIECの手順でTonal Audibilityを求め、周波数との対応をみた結果を図4.2.3左に示す。風車騒音のTonal Audibilityは40～80 Hz, 160～200 Hz付近で大きな値を示し、概ね先行研究(図4.2.3右)と同様の最大15 dB程度の範囲に分布する傾向が見られた。また8例中6例で複数の周波数帯域に純音性成分が分布する特徴も見られた。

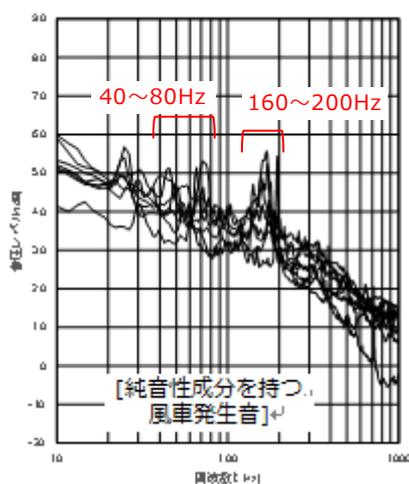


図4.2.1 風車騒音の特徴

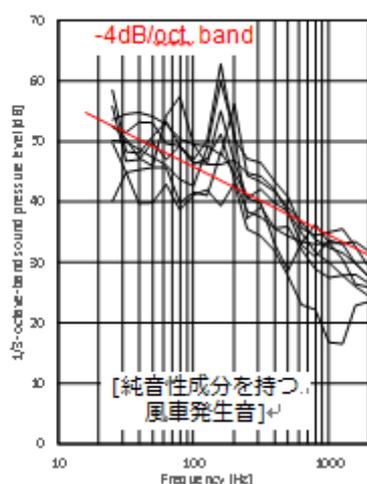


図4.2.2 1/3オクターブバンド分析値における風車騒音のベース音

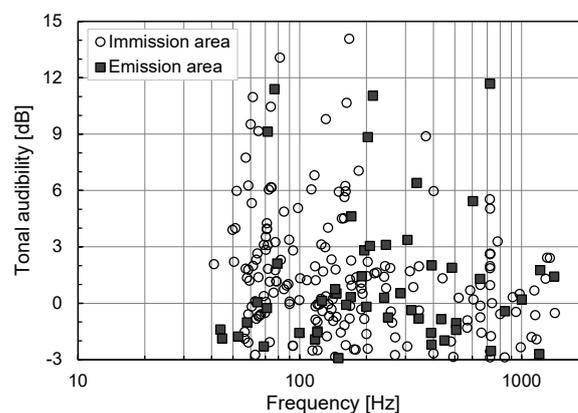
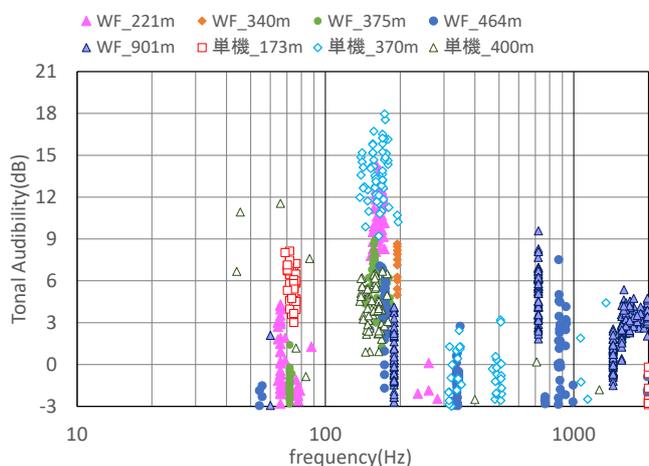
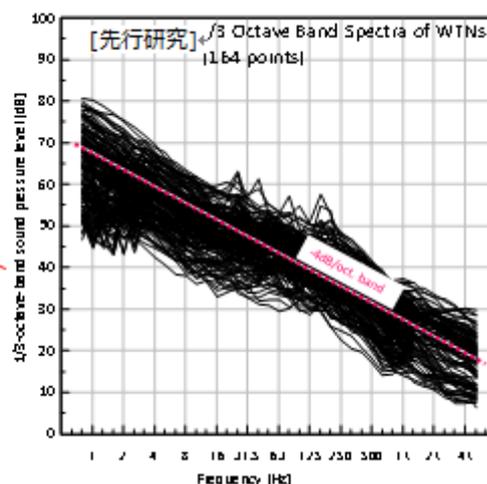


図4.2.3 風車騒音のTonal Audibility (左：純音性騒音を含む8例，右：先行研究)

#### <給湯器騒音>

給湯器騒音の通常運転における狭帯域分析結果を図4.2.4に示す。図4.2.4左は2つの住戸を比較した結果で、機種により純音性成分の周波数に違いが見られる。図4.2.4右は同一住戸(住戸1)の冬季と中間期の通常運転の結果である。冬季は、純音性騒音のピーク周波数が中間期よりも高い帯域に移動しており、全体的な音圧レベルは冬季の方が大きいものの純音の突出量は中間期より減少する傾向が見られる。

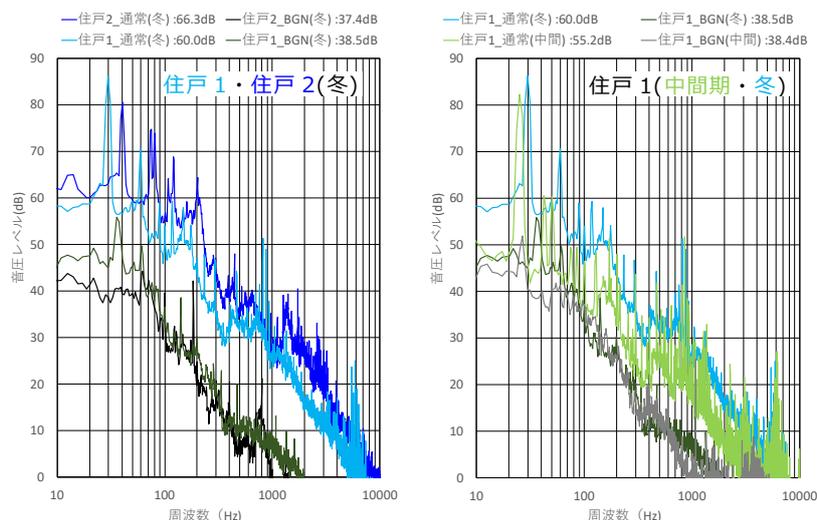


図4.2.4 通常運転の周波数特性（左：機種差，右：季節変動）

次に、冬期の夜間における発生音（50，63，80 Hz）の時間変化を図4.2.5に示す。発生頻度や時間長は異なるが、両住戸とも通常運転とは発生音の特徴が異なる「霜取り運転」が見られた。図4.2.6は冬期の運転モードを比較した狭帯域分析結果である。両住戸とも霜取り運転時は通常運転よりも発生音の騒音レベルは低下するが鋭い純音性成分は増加している。

これらの結果より、給湯器騒音の純音性騒音の特性を把握するには、中間期と冬季の両方を調査する必要性が考えられる。

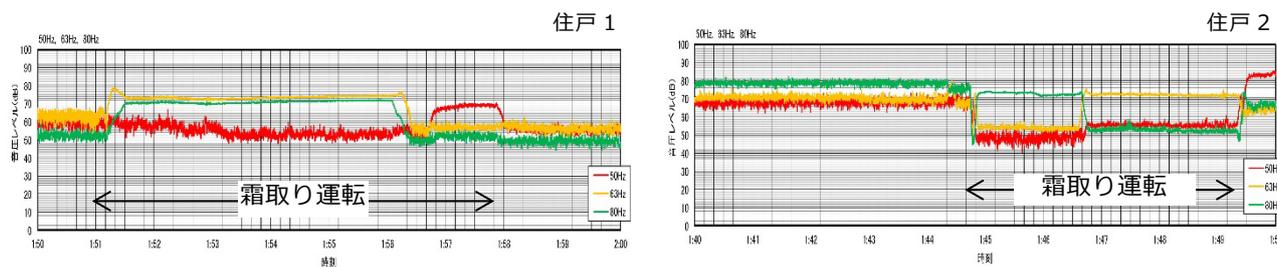


図4.2.5 冬季測定における給湯器騒音の時間変化（1/3オクターブバンド50～80 Hz）

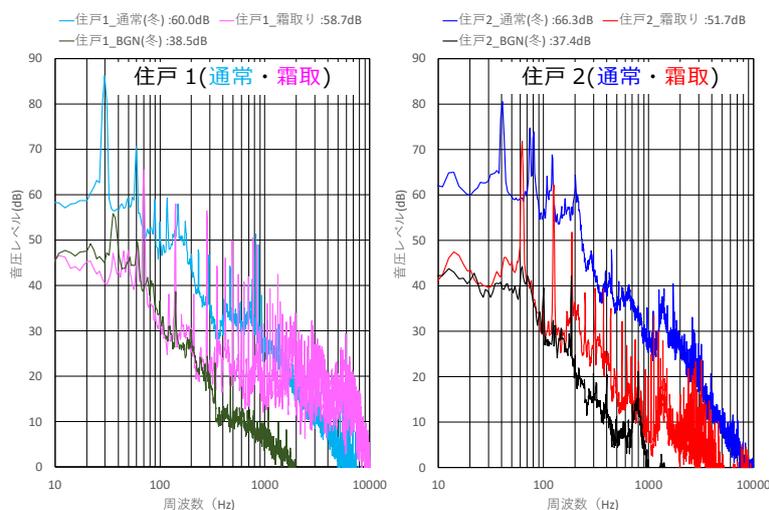


図4.2.6 冬期における運転モードの比較（左：住戸1，右：住戸2）

次に、給湯器騒音の実測値等（全132データ）に関する狭帯域分析値を測定場所別に重畳して図4.2.7に示す。図4.2.7右は室内の測定値であるが、機器停止時の暗騒音と運転時の発生音とのS/Nが不十分なデータが多い。そこで、給湯器騒音の周波数特性の特徴を図4.2.7左の屋外測定値から検討し、図中に緑線で示す。純音性成分を除く周波数（ベース音）は、1オクターブバンド当りの変化量が250 Hz迄は0 dB、それ以上の周波数範囲で-5 dBと考えられる。

さらに、IECの手順で求めたTonal Audibilityと周波数との対応を検討した結果を図4.2.8に示す。屋外の分析結果では40～20 kHzの周波数帯域にTonal Audibilityが分布し、通常運転は17 dB、霜取り運転は21 dBまでの値を示す。室内の分析結果では40～2 kHzの周波数帯域で18dBまでの範囲にTonal Audibilityが分布する。霜取り運転の純音性成分（+印、×印）は屋外では大きい室内では通常運転と同等の分布範囲にあり、運転モードによる影響は小さいと考えられる。

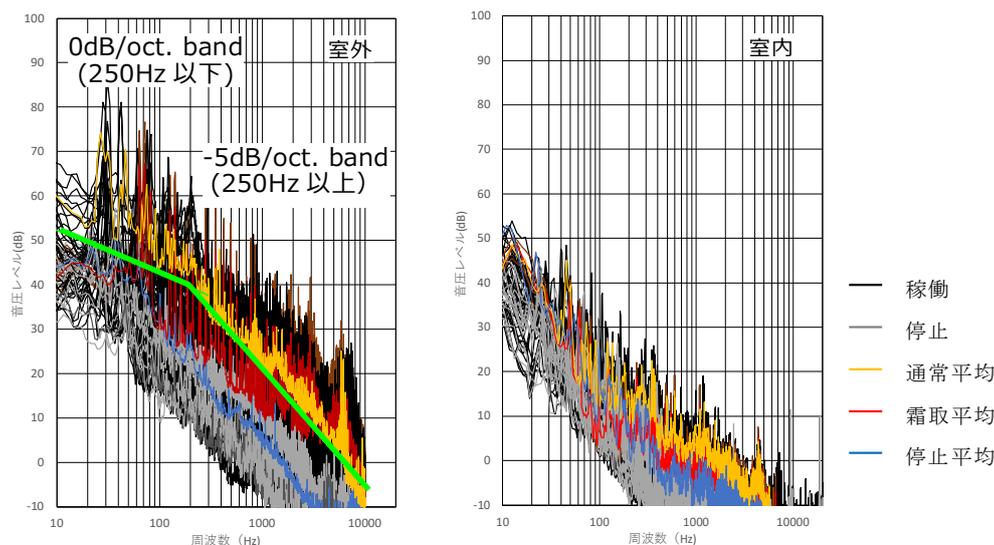


図4.2.7 給湯器騒音の周波数特性（左：屋外，右：室内）

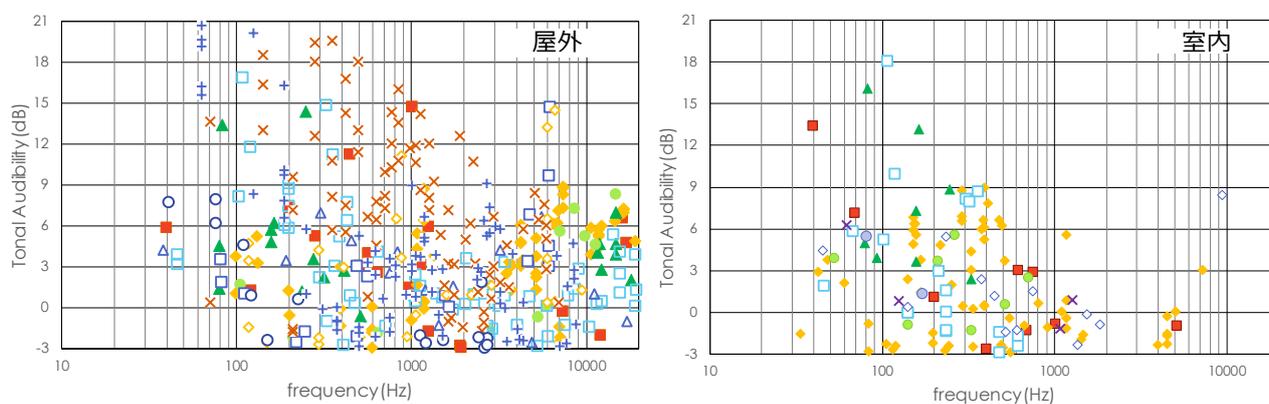


図4.2.8 給湯器騒音のTonal Audibility

#### <風騒音>

図4.2.9に手摺の代表風速（10 m/s、15 m/s、20 m/s）における風騒音の狭帯域分析結果を、図4.2.10には純音の発生している代表的な周波数特性の例を示す。風騒音の純音性成分の最大値は、流体音①ではベース音より20～30 dB程度、流体音②ではベース音から70～80 dB程度上昇している。一方、振動音は純音性成分がベース音から10～20 dB程度上昇し、広帯域にわたって数多く観測されているのがわかる。

次に、風騒音を流体音と振動音に分類し、それぞれIECの手順によるTonal Audibilityを整理した結果を図4.2.11に示す。流体音の場合、風速：10 m/s 以上の風速条件において、-3 dB以上のTonal Audibilityが多く検出される傾向があり、Tonal Audibilityの最大値は40 dB（風速：22.5m/s）であった。一方、振動音では、Tonal Audibilityの最大値は18 dB（風速：15 m/s）と流体音と比較して値は小さいものの、比較

的低風速である風速：2.5 m/s から10 dB を上回るTonal Audibilityが検出されている。また、-3 dB を上回るTonal Audibilityが複数、広帯域にわたって検出される条件が多数確認された。

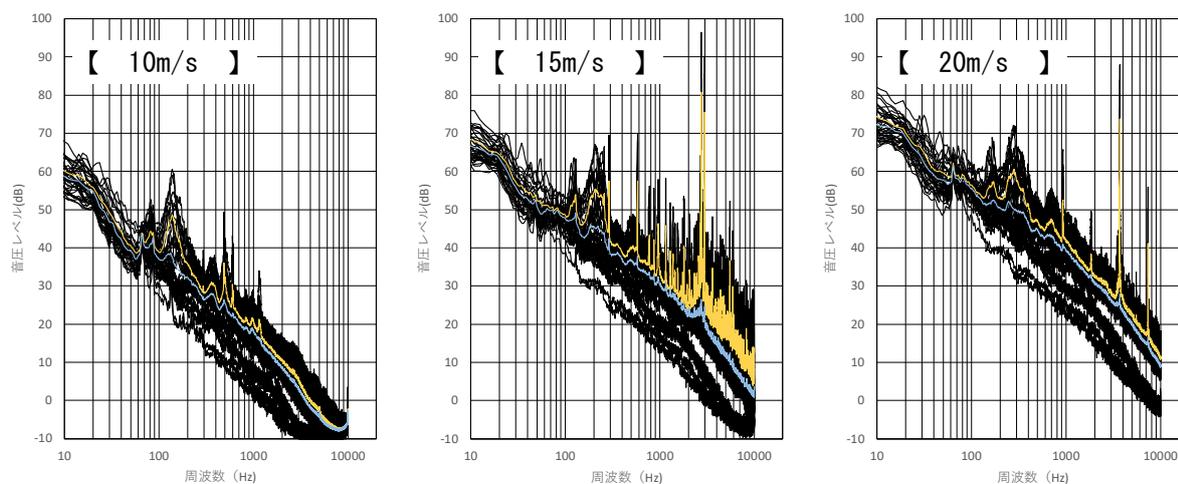


図4.2.9 風騒音のベース音の特徴（手摺の例，黄色：エネルギー平均値，水色：算術平均値）

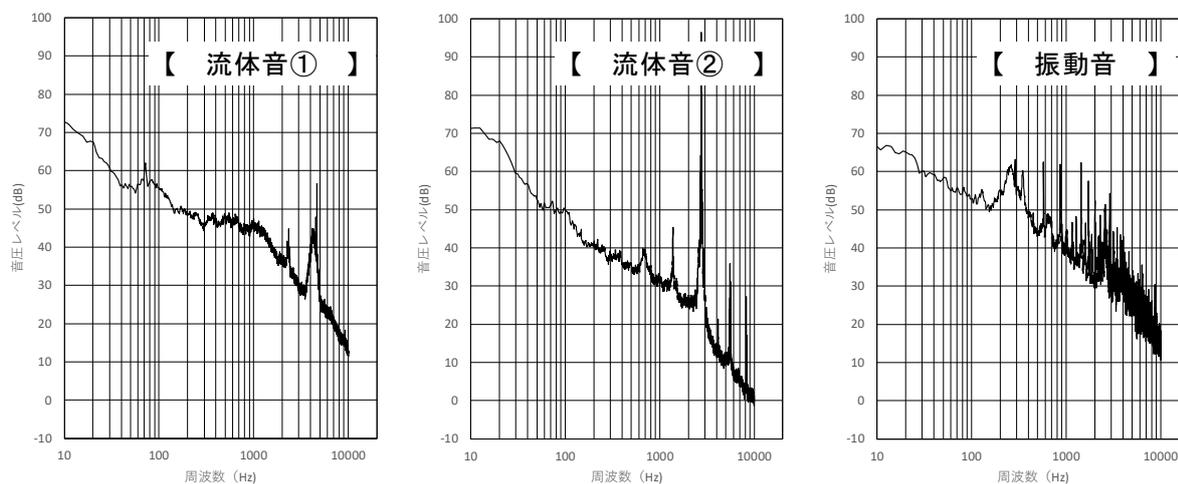


図4.2.10 風騒音における代表的な純音発生特性（手摺の例）

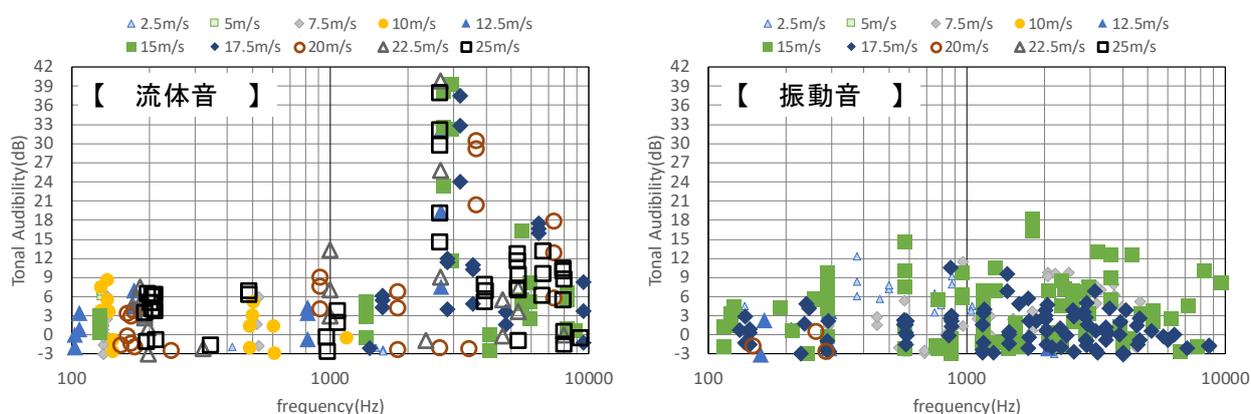


図4.2.11 風騒音における代表的なTonal Audibility

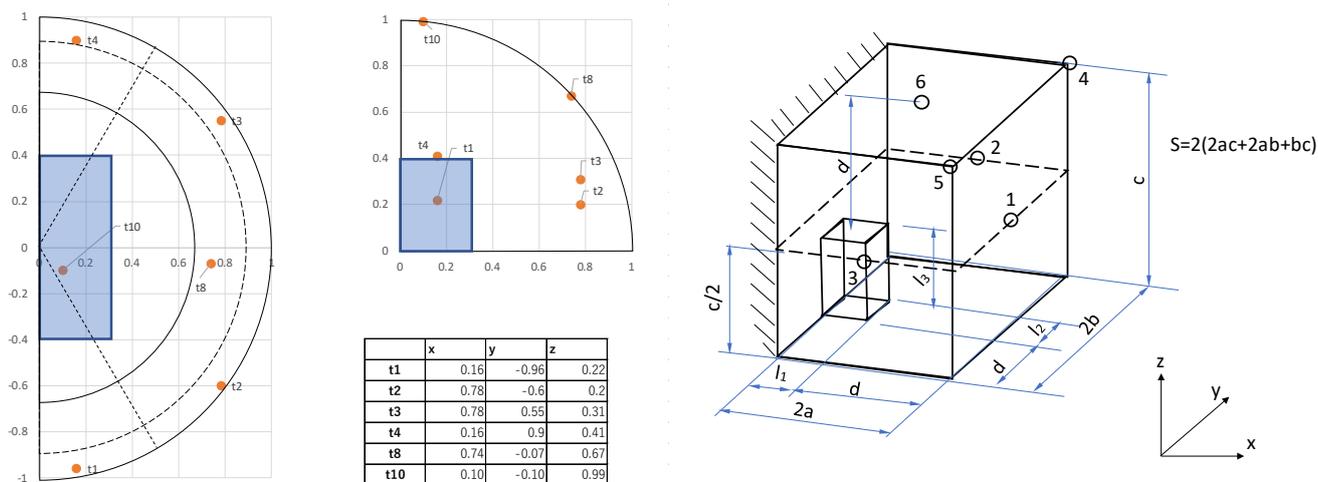
以上の結果から、風車騒音・給湯器騒音と風騒音では発生する純音の周波数やレベルが大きく異なることが示された。これら3種の騒音の分析結果と収録した実音データはサブテーマ1へ提供した。

(2) 評価尺度の測定方法に関する検討結果

〈給湯器騒音〉

1) 音源特性の現場測定法

給湯器騒音の狭帯域分析結果のメーカーからの入手は非常に難しい。そこで、設備機器の測定法に関する規格を調査し、純音性成分を考慮した測定法が記載された規格を選出した。参照する規格はJIS Z8733-2000（音響-音圧法による騒音源の音響パワーレベルの測定方法-反射面の準自由音場における実用測手方法）である。この規格の附属書B.2には離散純音を放射する音源のためのマイクロホン配置（図4.2.12左、半球測定表面）、附属書Cには図4.2.12右に示す平行六面体測定表面のマイクロホン配置が示されており、対象機器の配置によっていずれかを選択するよう指示されている。例えば、機器の周囲が開放された場所の場合は前者、沢山の反射物や暗騒音が大きい場合には後者、指向性のある音源は前者、等である。この規格を参照して現場の実情に即した測定点を選択し、実測を行うことを提案する。



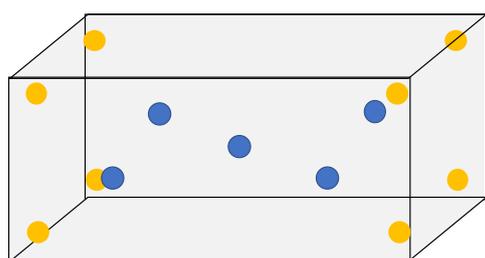
◇測定点：半球面に設定 JIS Z8733:2000 附属書B.2 (離散純音を放射する音源) ◇測定点：平行六面体に設定 JIS Z8733:2000 附属書C  
 ✓ 半径：r=1m 距離：d=0.25m以上 できれば1m

図4.2.12 JIS Z8733:2000に基づく給湯器騒音の現場測定法の提案

2) 室内騒音の現場測定法と代表値の算出方法

風車騒音や給湯器騒音などの低い周波数帯域に純音性成分を含む騒音の室内騒音の測定方法および室内の音圧レベルの代表値の算出方法として、ISO16283-3 Acoustic – Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements – Part3:Façade sound insulation を参照する方法を提案する。

当該規格では、25 m<sup>3</sup>未満の居室で1/3オクターブバンド中心周波数の3つの周波数帯域(50 Hz, 63 Hz, 80 Hz)の測定を行う際のマイクロホン配置と代表値の算出方法とを規定している。規格による測定点は図4.2.13に示す2種類、計9点であり、L<sub>2</sub>（室中央付近5点の代表値）と、L<sub>2,corner</sub>（室の隅角部から0.3~0.4 m離れた4点の代表値、床近傍2点と天井近傍2点）を図4.2.13に示す (4.2.1) 式により重み付けしたエネルギー合成を行って代表値を求める。隅角部からの測定距離は、規定の範囲内であれば均一にする必要はない。



- ◇測定点
- ✓ 室内代表5点 L<sub>1</sub> ●
- ✓ 端部から0.3~0.4m L<sub>2</sub> ●
- 4か所（床・天井を2か所ずつ）

✓ 代表値（係数は検討中）

$$L_{2,LF} = 10 \times \log_{10} \left( \frac{10^{L_1/10} \times 2 + 10^{L_2/10} \times 1}{3} \right) \dots (4.2.1)$$

図4.2.13 ISO16283-3に基づく風車騒音・給湯器騒音の現場測定法の提案式

測定手法の検証のため、実験住宅の室内測定点の全点平均値 $L$ と提案手法による算出値との対応を比較した結果を図4.2.14に示す。(4.2.1)式による代表値 $L_{2,LF}$ 、中央5点から算出した代表値 $L_2$ 、文献<sup>3)</sup>の(4.2.2)式による代表値 $L_{2,LF}'$ について、全点平均値を基準とした比較を行った。数値が0に近いほど全点平均値との対応が良いことを表す。 $L_2$ と比較してISOや文献<sup>3)</sup>の提案式による代表値は全点平均値に近い。ISO提案式は(4.2.2)式による代表値よりも当てはまりは低いが200Hz以下の帯域で危険側の数値になっていない。この結果から、室内の代表値の算出方法としてはISOの計算式を提案する。

$$L_{2,LF}' = 10 \times \log_{10} \left( \frac{10^{L_1/10} \times 5 + 10^{L_2/10} \times 1}{6} \right) \dots (4.2.2) \text{ 文献}^3) \text{ による提案式}$$

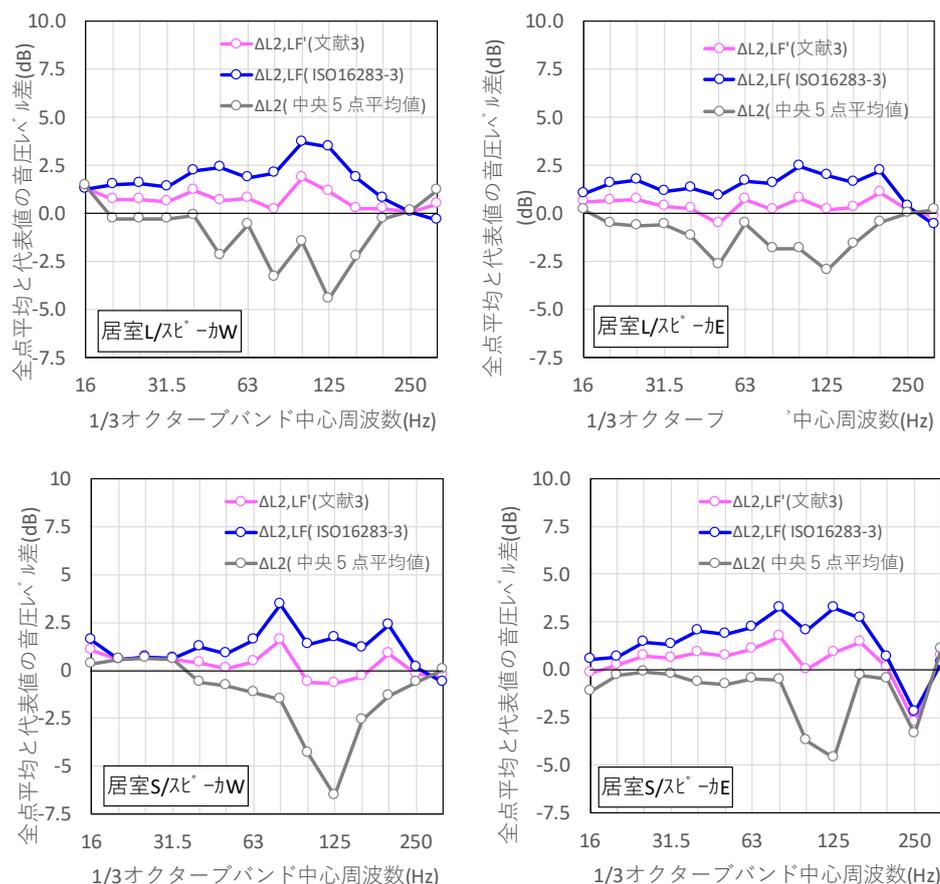


図4.2.14 室内測定値の全点平均値と提案式による代表値との比較

### ＜風騒音＞

#### 1) 風洞施設稼働時の暗騒音 推奨値

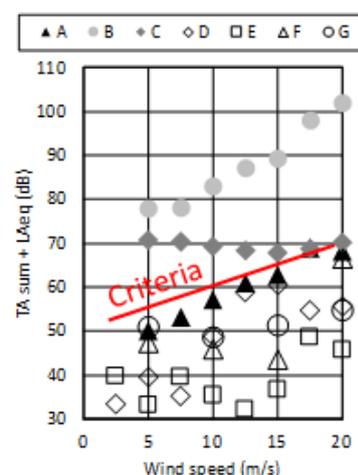
聴感上障害となる風騒音は、比較的大きな純音性成分を有することが多い。主に構造用の風洞実験で使用される一般風洞は、風洞施設稼働時の発生音に対する消音対策は講じていないため、送風機の回転数に対応する純音性のノイズ成分が多数確認される場合が多く、風騒音の検出に対しては適していない。したがって、外装材から発生する風騒音の純音性成分を確実に捉えるためには、送風機等から発生する騒音の低騒音化を図った低騒音型風洞を使用することが推奨される。

表4.2.1に示す一般風洞 (B, C) と低騒音型風洞 (A, D, E, F, G) を対象として、風洞施設稼働時の暗騒音を風速別に測定した結果を図4.2.15に示す。測定結果の評価としては、風速別の騒音レベル： $L_{pA}$ だけでなく、送風機の回転数に対応するノイズ成分の影響を考慮するため、異なる臨界帯域の純音性可聴度：Tonal Audibility (TA) をエネルギー和した $TA_{sum}$ を算出し、両者を合成した $TA_{sum} + L_{pA}$ を風速： $V_{wind}$  (m/s) 別に整理した。この結果より、風騒音風洞実験で使用する風洞施設の暗騒音としては、以下の(4.2.3)式を満足することが推奨される。

$$TA_{SUM} + L_{pA} \leq 50 + V_{wind} \quad \dots (4.2.3)$$

表 4.2.1 検討対象とした風洞施設仕様

Wind tunnel facility	Silencer for measurement space	Measurement space
A	Yes	Normal room
B	No	Test section in tunnel
C	No	Test section in tunnel
D	Yes	Hemi-anechoic room
E	Yes	Hemi-anechoic room
F	Yes	Anechoic room
G	Yes	Anechoic room

図 4.2.15 風洞施設別  $V_{wind} - TA_{sum} + L_{pA}$  比

## 2) 風向角条件変更に伴う試験体設置条件

風洞実験における風向角制御方法としては、ターンテーブルを用いることが一般的である。その際、実建物で対象部材が設置される条件を考慮して、風洞吹出口と試験体との位置関係を設定する必要がある。例えば、設備開口部に採用されるガラリは、図 4.2.16 に示すように外壁面に組み込まれる場合が多いため、ガラリの裏側に対して風が作用する可能性は極めて低い。風洞実験における試験体の配置例を図 4.2.16 (a), (b) に、またその条件における風洞実験結果を図 4.2.17 (a), (b) に示す。図 4.2.16 (a) のように風洞吹出口芯と試験体芯を合わせた状態でターンテーブルを回転させた場合、ガラリ表側だけでなく裏側にも風が直接作用することで表側の気流性状にも影響を及ぼし、流体音が検出できていない。一方、実現象に近づけるために、図 4.2.16 (b) のように、試験体の裏側に風が作用しにくい配置にした場合、ガラリ表側部材先端部で発生する剥離・再付着に伴う比較的大きな流体音が確認されている。したがって、実現象に近づけるためには、対象とする試験体の設置条件を考慮して、風向角毎に最適な配置を検討する必要がある。

ここで、外装材ルーバーを対象として実施した風洞実験における風向角別の試験体設置位置を図 4.2.18 に示す。0°から風向角を時計回りの方向に回転させるにしたがって、ターンテーブル付き試験体用架台を吹出口に向かって左側（平面写真の上側、立面写真の奥側）に移動させ、試験体の裏側に風が作用しないようにしている例である。このような試験体位置を再現可能にするためには、ターンテーブルだけでなく、平行移動可能なターンテーブル付き架台の設置が求められる。

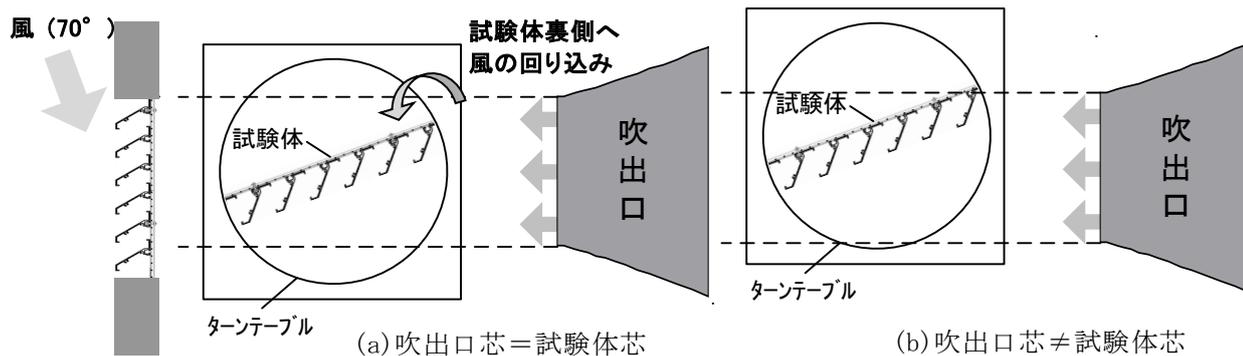


図 4.2.16 実建物におけるガラリ設置状況と風洞実験における試験体配置例 (風向角 : 70°)

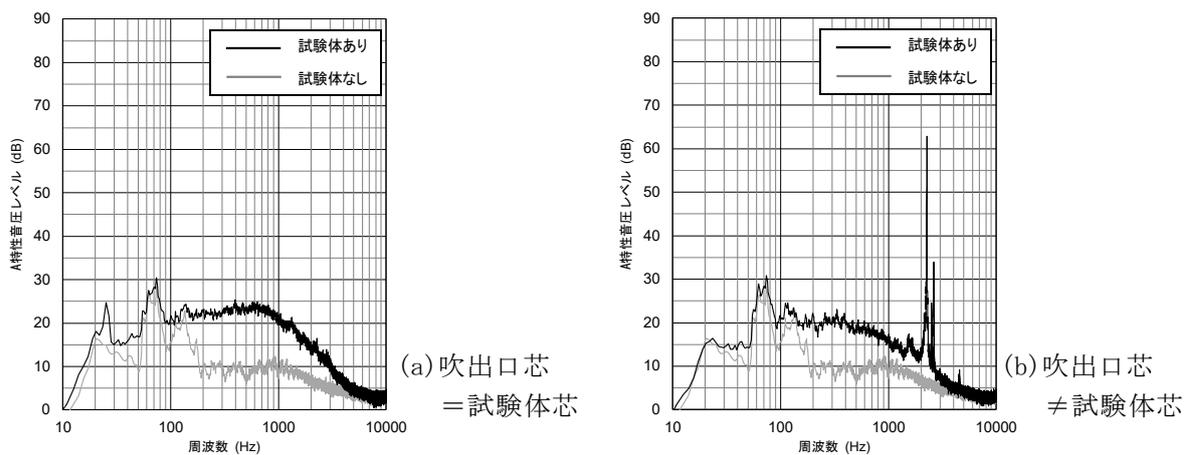


図 4.2.17 試験体配置の違いによる風洞実験結果比較 (試験体 : ガラリ, 風速 : 10m/s, 風向角 : 70°)

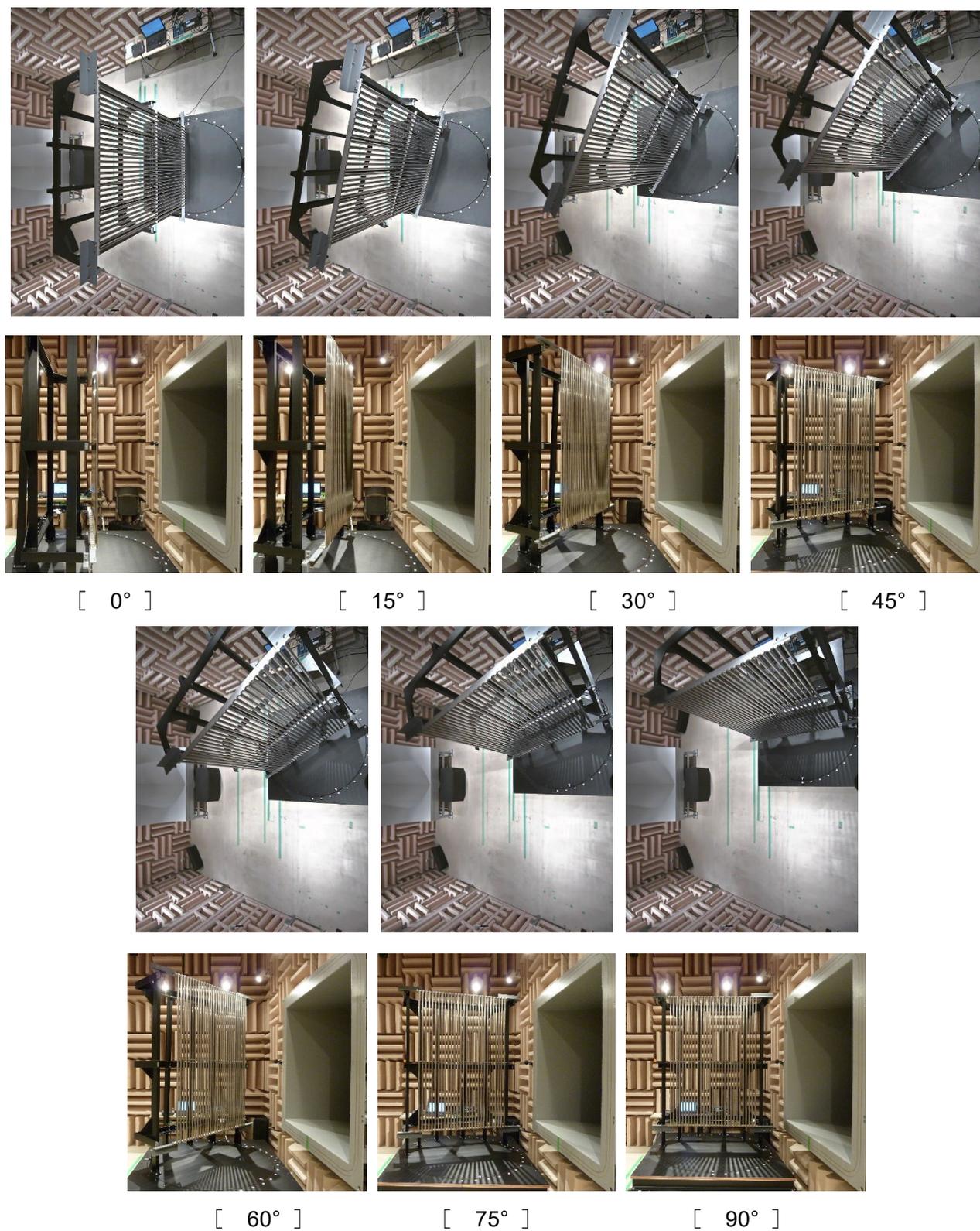


図 4.2.18 風向角別 試験体設置位置 (0°~90°@15°ピッチ)

### 3) 風洞実験における測定点の設定

風洞実験における測定点として、風が直接作用しにくい点を選定することは大前提である。また、図 4.2.19に示すように、試験体によっては非常に鋭い指向性を持つ風騒音が発生し、測定点の違いにより

卓越するピークの大きさや本数が異なる場合があるため、風速・風向角の変化に伴って、最適な測定点位置が変化することが想定される。したがって、事前に予備実験で全体的な発音傾向を確認し、測定点位置や測定点数（多点同時測定，図4.2.20参照）等について十分な検討を行うことが求められる。

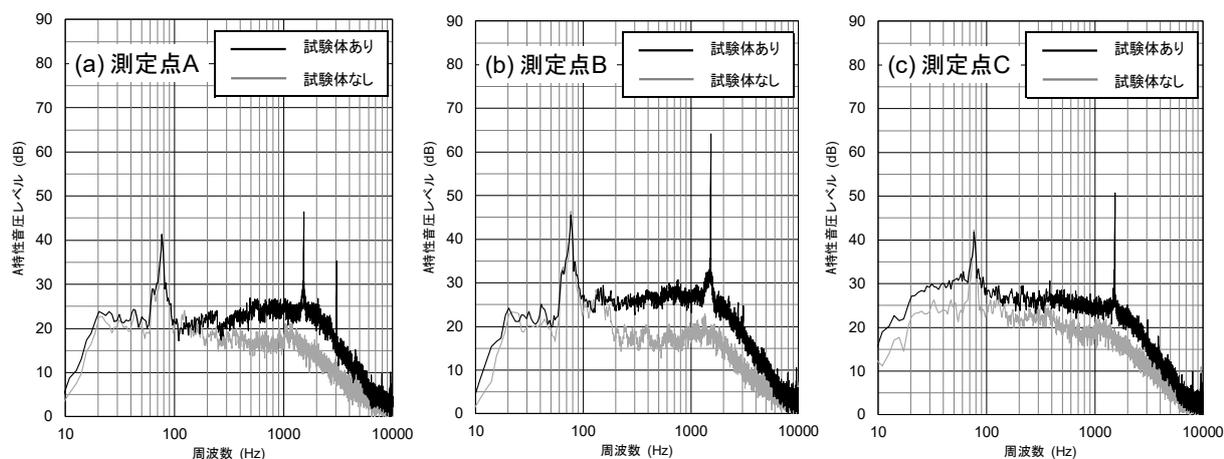
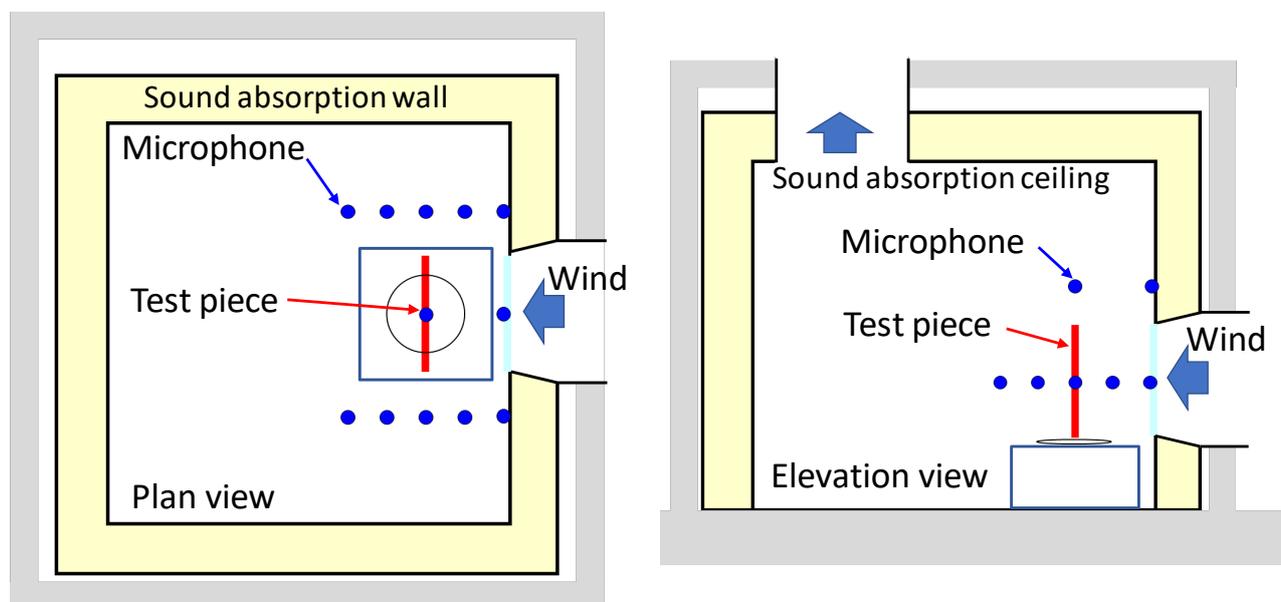


図 4.2.19 同一試験体・同一風速・風向角条件における風洞実験結果 測定点別比較



(a) 平面図

(b) 立面図

図 4.2.20 風洞実験における多点同時測定を行う場合の測定点の例

#### 4) 風洞実験条件の設定方法

風洞実験における主な実験条件は「風速」と「風向角」である。風騒音は、わずかな条件の違いで発音性状が大きく変わる可能性があり、限定した条件のみで実験・評価を行うことは部材性能評価を行う上で望ましくない。例えば表4.2.2 (a) に示すように、「風速：2.5 m/s ピッチ，風向角：15°ピッチ」で風洞実験・評価を行うことにより、様々な風速・風向角範囲における部材の発音性状を把握することが可能となる。しかしながら、実際に部材に作用する風速・風向角条件は、表4.2.2 (a) のような離散的条件ではないため、その間の風速・風向角における発音性状を見落とすことになる。

そこで、このような見落としを防ぐために「風速レンジ／風速レンジ代表値」および「風向角レンジ／風向角レンジ代表値」という概念（表 4.2.3）を導入し、実験条件を選定することを提案する。

表 4.2.2 風騒音風洞実験手順および実験評価結果マトリクスの例

(a) First Step 【聴感予備実験】		風向角レンジ代表値								
純音性成分が確認 (Y or N)		0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°		
風速レンジ代表値	連続変化	2.5 m/s	N	N	N	N	N	N	N	
		5 m/s	N	N	N	N	N	N	N	
		7.5 m/s	N	N	N	N	Y	N	N	
		10 m/s	N	N	N	N	Y	Y	N	
		12.5 m/s	Y	N	N	N	Y	Y	N	
		15 m/s	Y	Y	N	N	Y	Y	N	
		17.5 m/s	Y	N	N	N	Y	N	N	
20 m/s	N	N	N	N	Y	N	N			

(b) Second Step 【風速制御】		風向角レンジ代表値: 60°								
評価値: TA (dB)		風向角								
		52.5°	55°	57.5°	60°	62.5°	65°	67.5°		
風速レンジ代表値 : 15 m/s	風速	13.5 m/s				13.9				
		14 m/s				15.3				
		14.5 m/s				16.1				
		15 m/s				23.4				
		15.5 m/s				21.0				
		16 m/s				21.4				

(c) Third Step 【風向制御】		風向角レンジ代表値: 60°								
評価値: TA (dB)		風向角								
		52.5°	55°	57.5°	60°	62.5°	65°	67.5°		
風速レンジ代表値 : 15 m/s	風速	13.5 m/s								
		14 m/s								
		14.5 m/s								
		15 m/s	25.4	25.2	23.2	23.4	20.9	22.4	21.8	
		15.5 m/s								
		16 m/s								

(d) 計測結果の記録		風向角レンジ代表値							
評価値: TA+LAeq (dB)		0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	
風速レンジ代表値	2.5 m/s	52	52	52	52	52	52	52	52
	5 m/s	57	57	57	57	57	57	57	57
	7.5 m/s	59	59	59	59	65	59	59	59
	10 m/s	62	62	62	62	70	62	62	62
	12.5 m/s	75	65	65	65	80	75	65	65
	15 m/s	80	78	70	70	95	85	70	70
	17.5 m/s	76	72	72	72	80	72	72	72
	20 m/s	75	75	75	75	80	75	75	75

表 4.2.3 本検討で導入する風速レンジ・風向角レンジ

風速レンジ代表値	2.5m/s	5m/s	7.5m/s	10m/s	12.5m/s	15m/s	17.5m/s	20m/s	
風速レンジ 下限値/上限値	0.5m/s	3.5m/s	6m/s	8.5m/s	11m/s	13.5m/s	16m/s	18.5m/s	20m/s

風向角レンジ代表値	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	
風向角レンジ 下限値/上限値	0°	7.5°	22.5°	37.5°	52.5°	67.5°	82.5°	90°

風騒音の実験手順をまとめると以下の通りである（表 4.2.2 参照）。

- ①各風向角レンジ代表値で風向角一定のもと、風速を連続的に変化させ、聴感にて発音の有無を確認し、発音を確認された風速レンジ・風向角レンジ条件（発音条件）を把握する。
- ②ある発音条件（例えば、風速：15 m/s，風向角：60°）において、風向角レンジ代表値（60°）で一定の下、風速レンジ下限値：13.5 m/s から上限値：16 m/s を 0.5 m/s ピッチで可変させたときの発音性状を確認し、最も大きな発音を確認される風速（15.0 m/s）を抽出する。
- ③上記②で抽出された風速（15.0 m/s）で一定の下、風向角レンジ下限値：52.5°から上限値：67.5°を 2.5°ピッチで可変させたときの発音性状を確認し、最も大きな発音を確認される風向角（52.5°）を抽出する。
- ④上記②および③より最も大きな発音を確認された、風速：15.0 m/s，風向角：52.5°で得られる評価値を、風速レンジ：15 m/s，風向角レンジ：60°における評価値として採用する。
- ⑤聴感上発音を確認されなかった条件においては、風速レンジ代表値・風向角レンジ代表値を実験条件として得られた評価値を採用する。

### （3）評価尺度の予測方法に関する検討

#### <屋外騒音>

給湯器室外機から対象室の窓前までの室外半閉空間における空間の共振による増幅を検討するため、FDTDによるパラメトリックスタディを行った。解析結果の代表的な4点の音圧レベル計算値を図4.2.21に示す。解析対象の空間の共振の影響により、予測値には10～20 Hz，および50 Hz以上にピークがみられている。住戸間の距離が広がると共振周波数は低下し、ピークの音圧レベルは住戸間距離が大きいほど小さい傾向を示す。音源側は扉との距離でグルーピングされ、直上方向に比べて側方の減衰量は小さい。

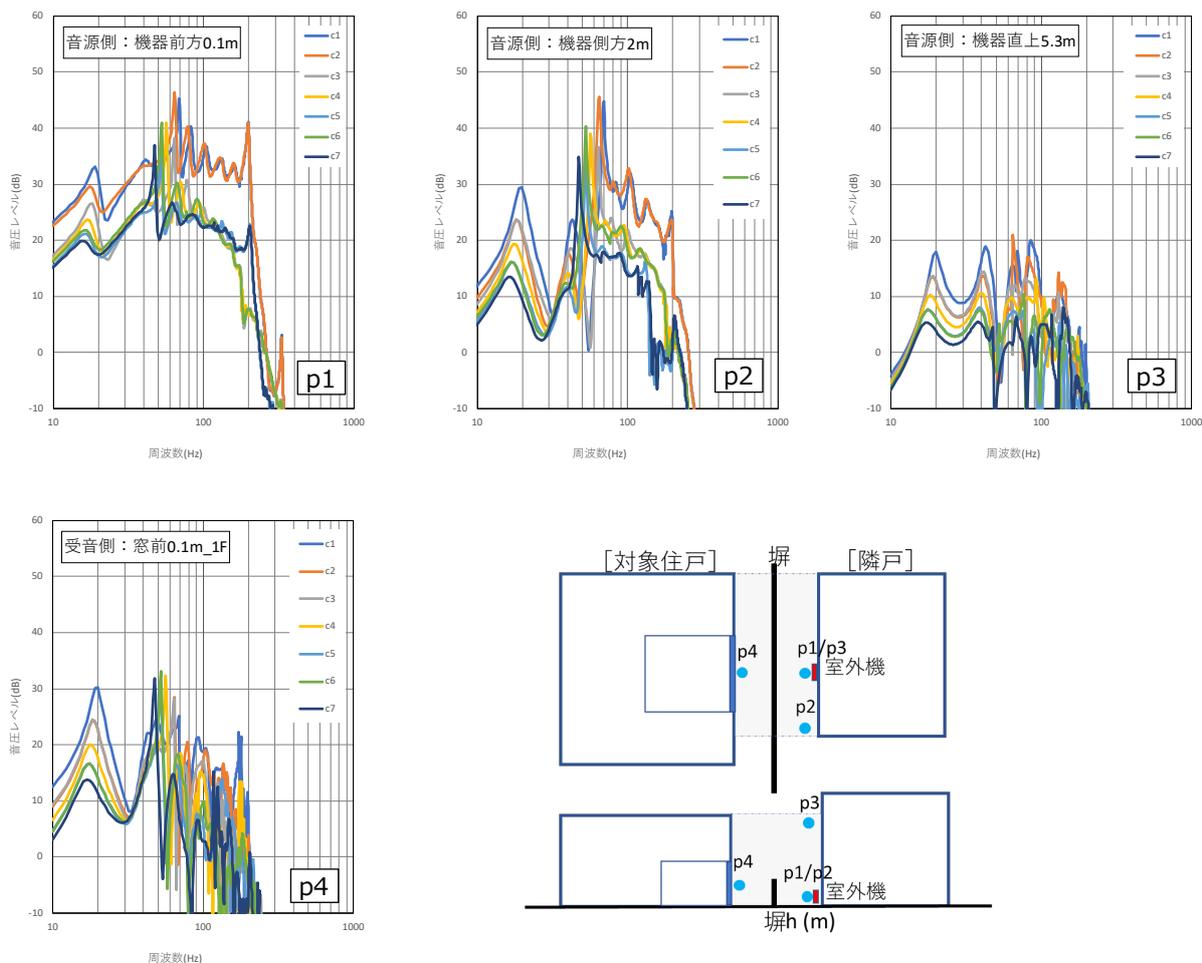


図4.2.21 パラメトリックスタディの計算結果（音圧レベル分布）

風車騒音や給湯器騒音の純音性成分に近い解析結果の2次のピークに関して、鉛直、水平、斜め方向の距離減衰の状況を抜粋して図4.2.22に示す。音圧レベルの減衰傾向は距離( $r$ )が2 m程度までは図中に点線で示す二次元音場の距離減衰の理論式 $10 \cdot \log(r)$ に近い。

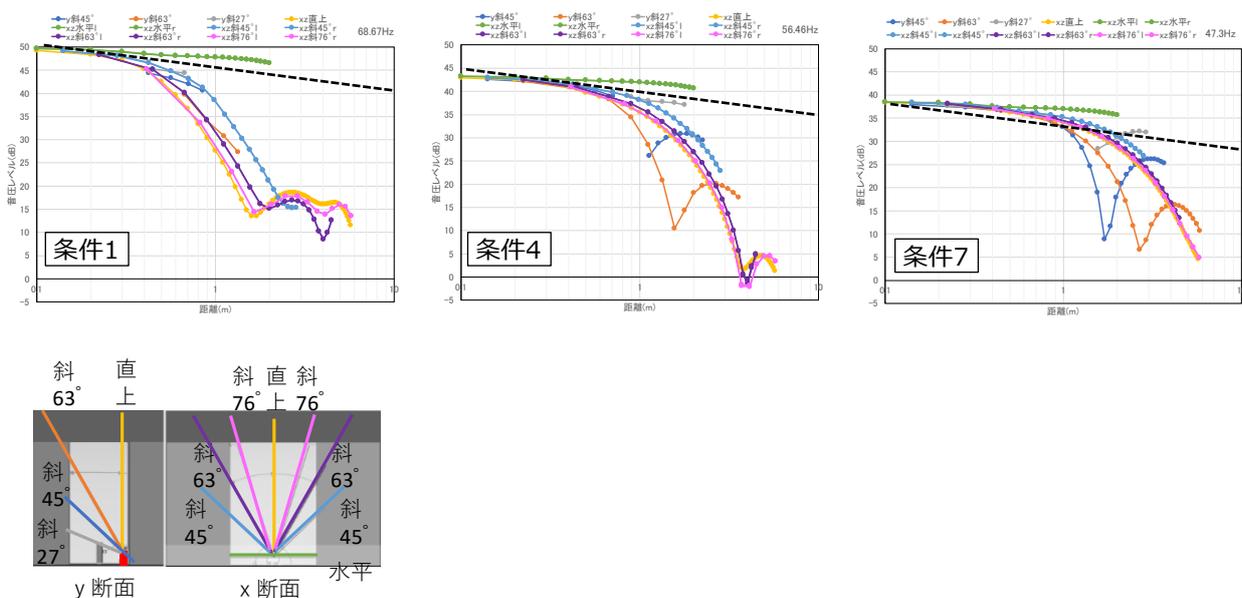


図4.2.22 パラメトリックスタディの計算結果（音圧レベル分布）

### <室内騒音>

住戸の内外音圧レベル差に対して、室内で生じる共振の影響量を補正する計算式（ルームフィルタ）を提案する。図3.2.8に示す室外の音圧レベルを $L_{out}(f)$ 、ハウスフィルタ（内外音圧レベル差）を $\Delta HF(f)$ 、ルームフィルタを $\Delta RF(f)$ としたとき、室内への透過音の空間平均音圧レベル推定値 $L_{in}(f)$ を(4.2.4)式のとおり定義する。

$$L_{in}(f) = L_{out}(f) - \Delta HF(f) - \Delta RF(f) \cdots (4.2.4)$$

提案式の妥当性を検討するため、図3.2.5の実験環境における内外音圧レベル差の実測値と予測値との対応を検討した。内外音圧レベル差の実測値（ $\Delta L_{Lw1}$ ,  $\Delta L_{Le1}$ ,  $\Delta L_{Sw1}$ ,  $\Delta L_{Se1}$ ）は、建物外部と室内の条件ごとに全点のエネルギー平均値を算出し、外部から内部の値を差引いて求めた。内外音圧レベル差の予測値（ $\Delta L_{L2}$ ,  $\Delta L_{Sw2}$ ,  $\Delta L_{Se2}$ ）は、橘らの提案した図4.2.25のハウスフィルタ<sup>6)</sup>と(4.2.5)式のルームフィルタのエネルギー和として算出した。ハウスフィルタは実験住宅の開口部がアルミサッシの一重窓であったことからmodel Bとした。ルームフィルタは表3.2.4に示す居室の内法寸法の実測値から計算した。

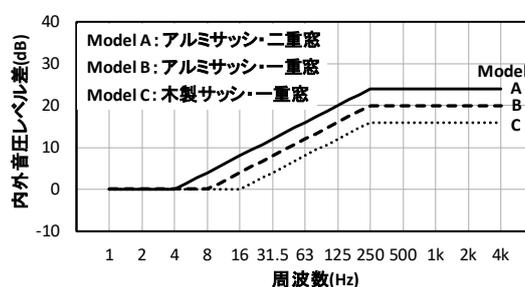


図4.2.25 文献<sup>6)</sup>によるハウスフィルタ（内外音圧レベル差）

居室L, 居室Swの狭帯域分析結果に関する内外音圧レベル差の実測値（ $\Delta L_{Lw1}$ ,  $\Delta L_{Sw1}$ ）と予測値（ $\Delta L_{L2}$ ,  $\Delta L_{Sw2}$ ）との対応を図4.2.26に示す。実測値のピークディップ周波数と同様の周波数帯域に予測値のピークディップがみられており、両者は良い対応を示す。なお、実測値 $\Delta L_{Lw1}$ の250Hz付近に予測値 $\Delta L_{L2}$ には見られない落込みが生じているが、これは掃出し窓のガラスがペアガラスであり、その共鳴透過の影響と考える。

図4.2.27に1/3オクターブバンド分析値に関する実測値（ $\Delta L_{Lw1}$ ,  $\Delta L_{Le1}$ ,  $\Delta L_{Sw1}$ ,  $\Delta L_{Se1}$ ）と予測値（ $\Delta L_{L2}$ ,  $\Delta L_{Sw2}$ ,  $\Delta L_{Se2}$ ）を比較して示す。内外音圧レベル差の絶対値は若干異なるものの、共振や反共振となる周波数帯域の対応状況は良く、ルームフィルタは室内で生じる共振の影響を概ね再現していると考えられる。

本件では建物の開口部仕様からハウスフィルタを一律model Bと選定して内外音圧レベル差を予測したが、実測値と予測値との対応は高かった。このことから、屋外で発生する純音性騒音に起因した聴感上の問題が対象居室で生じやすいかどうかを判断する基準として、本手法を利用することを提案する。

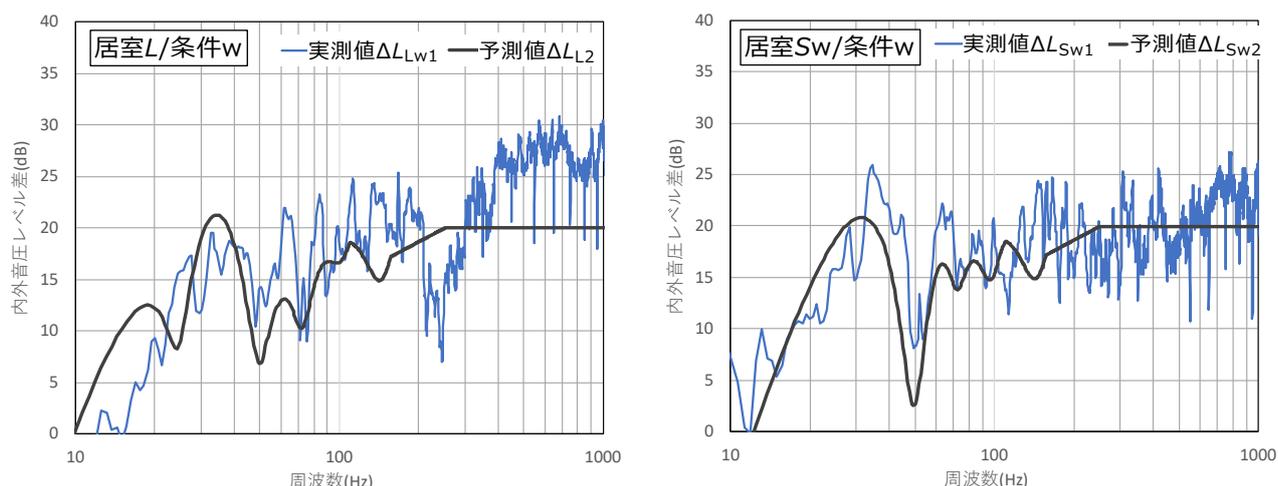


図4.2.26 条件Wにおける居室L, Swの内外音圧レベル差の実測値と予測値との対応(狭帯域分析結果)

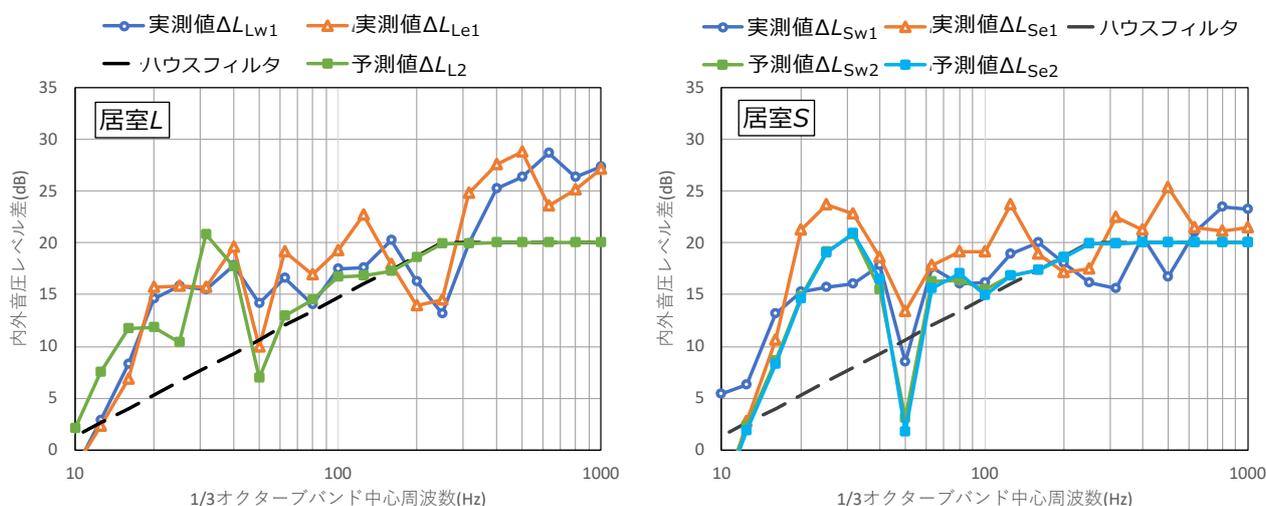


図4.2.27 内外音圧レベル差の実測値と予測値との対応(1/3オクターブバンド分析結果)

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

代表的な純音性騒音である風車騒音, 給湯器騒音, 風騒音に関する純音性成分の物理的な特徴が明らかになった。また, サブテーマ1で定義された純音性騒音の評価尺度 **Tonal Audibility** を得るため給湯器騒音の現場測定法や風騒音の標準測定手法を提案したことで, データの相互比較が可能となることが期待できる。さらに, 屋外の騒音データから精度良く室内騒音を予測する計算手法を提案したことにより, 屋外で発生する純音性騒音に起因した聴感上の問題が対象居室で生じやすいかどうかを判断する基準を示せたと考える。

### (2) 環境政策への貢献

#### <行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

#### <行政が活用することが見込まれる成果>

※IPCC等, 国際的な枠組みへの貢献も含まれます。

近年, 社会問題化している給湯器騒音等の測定時に本研究で提案した測定手法, 評価尺度の算出方

法、室内騒音の予測手法を適用することにより、各事案の測定結果を相互比較することが可能になると考える。

## 6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

#### <論文（査読あり）>

特に記載すべき事項はない。

#### <査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

#### <その他誌上発表（査読なし）>

特に記載すべき事項はない。

### (2) 口頭発表（学会等）

- 1) 富高隆, 増田潔, 浜田由記子：日本音響学会2018年春季研究発表会（2018）  
「実験室における風騒音評価方法に関する検討」
- 2) 富高隆, 増田潔, 浜田由記子：日本音響学会建築音響研究会（2019）  
「風騒音風洞実験における評価方法に関する検討」
- 3) 富高隆, 増田潔, 浜田由記子：日本騒音制御工学会平成31(2019)年春季研究発表会（2019）  
「外装材を対象とした風騒音風洞実験における現状と課題」

### (3) 知的財産権

- 1) 浜田由記子, 増田潔, 富高隆：大成建設株；「ルームフィルタ」出願準備中

### (4) 「国民との科学・技術対話」の実施

特に記載すべき事項はない。

### (5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

### (6) その他

特に記載すべき事項はない。

## 8. 引用文献

- 1) 風力発電等による低周波音の人への影響評価に関する研究：環境研究総合推進費 S2-11(2010-12年度)
- 2) 消費者安全法第23条第1項に基づく事故原因調査報告書：給湯器から生じる運転音・振動により不眠などの健康症状が発生したとの申出事案：消費者庁 消費者安全調査委員会, pp45-46 (2014.12)
- 3) T. Kobayashi and S. Yokoyama：8th International Conference on Wind Turbine Noise, “A comparison of standardized methods for prominence analysis of tonal components.”
- 4) 劉金雨, 佐久間哲哉：低周波領域における室内平均音圧レベル計測に関する実験的検討：日本音響

学会講演論文集 (2019.3)

- 5) 増田潔, 浜田由記子, 富高隆: 純音性成分を含む設備機器の室内騒音予測に関する検討 その1 ルームフィルターの導出: 日本建築学会大会梗概集 (2020.9)
- 6) 橘秀樹, 福島昭則, 落合博明: 低周波数性騒音に対するハウスフィルターのモデル化: 日本騒音制御工学会研究発表会講演論文集 (2017.4)

## Ⅱ－3 純音性成分を含む騒音の測定・評価に関する国内・国際規格に関する研究

大成建設株式会社

技術センター 都市基盤技術研究部

環境研究室

増田 潔

平成29(開始年度)～令和元年度研究経費（累計額）：23,652千円（研究経費は間接経費を含む）  
（平成29年度：8,017千円，平成30年度：7,617千円，令和元年度：8,017千円）

### 【要旨】

風力発電施設や家庭用ヒートポンプ給湯器等の設備機器から発生する騒音や外装材から生じる風切音等の純音性の成分を含む騒音に対する評価指標および指標による基準値に関して、諸外国の評価基準、研究動向の情報を収集、整理するとともに、本研究課題のサブテーマ1で提案された評価指標および基準値に対して、諸外国のものとの整合性についても検討し、妥当であることを示した。また、予測法に関する調査も行い、本研究課題のサブテーマ2で提案された室内への純音性騒音の伝搬予測手法の基礎原理を提供した。

### 【キーワード】

純音性騒音，評価指標，予測法，規格，騒音レベル，ペナルティ

### 1. はじめに（研究背景等）

風力発電施設や家庭用ヒートポンプ給湯器等の設備機器から発生する騒音や外装材から生じる風切音等の純音性の成分を含む騒音（純音性騒音）は、広帯域ノイズに比べて耳障りな印象を与えやすい。しかし、我が国の騒音の評価方法に、純音性の成分の影響を考慮できる手法は確立していない。一方、国外では、早くから純音性騒音の評価方法に関する研究が行われており、一部規格化されているものや、さらに改良を加える動きもある。それら規格の一部は国内の規格に転用されているものもあるが、独自に研究・開発されたものはない。これに対し、本研究課題のサブテーマ1では、心理実験に基づき我が国に適した評価指標の開発に取り組んでいる。その開発過程で、これまでに国外で開発された手法等を参考することは、開発成果が国際的な整合性を有するためにも重要である。また、サブテーマ2では、純音性騒音の室内への影響を予測する手法の開発に取り組んでいるが、より簡便な手法を短期間で開発するためには、環境騒音以外での研究分野での技術を応用することが効率的である。

そこで、本研究では、国内外の規格や純音性騒音の評価手法、純音性騒音の室内伝搬の予測手法の研究のあらゆる情報を収集、整理し、サブテーマ1および2に基礎資料を提供するとともに、最重要成果であるサブテーマ1の評価手法や基準値が国外の規格とも一定の整合性がとれているか評価する。

### 2. 研究開発目的

純音性の成分を含む騒音の評価指標およびその基準値を開発するにあたり、国内外の規格や純音性騒音の評価手法の研究の流れを収集、整理し、本研究課題のサブテーマ1に提供する。また、最終成果である評価手法や基準値が国外の規格とも一定の整合性がとれているか評価する。さらに、純音性騒音の室内への影響を予測する手法に関する研究事例を調査し、本研究課題のサブテーマ2に提供する。

### 3. 研究開発方法

評価指標および指標による基準値に関して、国際規格、諸外国の評価基準、研究動向の情報を収集、整理し、「Ⅱ－1 純音性成分を含む騒音の心理評価に関する研究」における、我が国の純音性騒音の評価に適した指標の検討に役立てるための基礎資料とするため、また、「Ⅱ－2 純音性成分を含む騒音源の計測法・予測技術に関する研究」における、外部から室内への伝搬計算開発の基礎資料とするた

め、以下の調査を実施した。

### (1) 純音性成分を含む騒音の測定評価に関する国内外の規格

表3.3.1に示す規格について、評価方法の基本となる理論、評価指標算出時の対象周波数、周波数重み付け、周波数帯域等の測定方法に注目して調査した。

表3.3.1 調査対象とした純音性成分を含む騒音の測定評価に関する国内外の規格

規格番号	タイトル	備考
ISO 1996-2	“Acoustics — Description, measurement and assessment of environmental noise — Part 2: Determination of environmental noise levels”	
DIN 45681	“Acoustics—Determination of tonal components of noise and determination of a tone adjustment for the assessment of noise immissions”	
ISO/PAS 20065	Acoustics — Objective method for assessing the audibility of tones in noise — Engineering method”	
IEC 61400-11:2012	“Wind turbines – Part 11: Acoustic noise measurement techniques”, (JIS C 1400-11:2017 “風力発電システム—第11部：騒音測定方法”)	
IEC PT 61400-11-2	“Wind energy generation systems - Part 11-2: Measurement of wind turbine noise characteristics in receptor position”	策定中
ANSI S1.13-2005	“Measurement of Sound Pressure Levels in Air”, Annex A (informative) Identification and evaluation of prominent discrete tones	
ECMA-74:2015	“Measurement of Airborne Noise emitted by Information Technology and Telecommunications Equipment” Annex D (informative) Identification and evaluation of prominent discrete tones	
ISO 7779:2010	“Acoustics -- Measurement of airborne noise emitted by information technology and telecommunications equipment”	
JIS X7779:2012	音響—情報技術装置から放射される空気伝搬音の測定” 附属書D（参考）顕著な離散周波数音の特定及び評価	
ISO 3891:1978	“Acoustics — Acoustics -- Procedure for describing aircraft noise heard on the ground” Annex B: Table for the calculation of perceived noise level, Annex C: Example of calculation procedure for the tone correction	
JIS C 9220:2011	“家庭用ヒートポンプ給湯機”	
JIS C 9815-1:2013	“エアコンディショナ及び空気熱源ヒートポンプの定格音響パワーレベル第1部：直吹き形室外機” 附属書B（参考）A特性音響パワーレベル純音調整音質指標	

## (2) 純音性成分を含む騒音の評価に関する研究プロジェクトの調査

表3.3.2に示す国外における純音性成分を含む騒音の評価に関する研究プロジェクトについて、各国の評価手法および評価手法が決定される技術的背景、ガイドライン、測定方法、予測方法とその策定の経緯について調査した。

表3.3.2 調査対象とした純音性成分を含む騒音の評価に関する研究プロジェクト

実施国	研究プロジェクトおよび報告書名	備考
イギリス	National Measurement System Acoustics Programme, NMS Project 2.2: Environmental Noise, WP1 - A critical review and inter-comparison of methods for quantifying tonal and impulsive features in environmental noise, The Working Group on Noise from Wind Turbines	
イギリス	“The Assessment & Rating of NOISE from wind farms”, Final Report, The Working Group on Noise from Wind Turbines	ETSU (Energy Technology Support Unit) Report
デンマーク	Assessment of tone content in wind turbine noise at neighbors	DELTA(Danish Electronics Light and Acoustics) Report
デンマーク	Rules and methods for noise from wind turbines in other countries	DELTA(Danish Electronics Light and Acoustics) Report
フィンランド	ANOJANSSI- Metrics of Noise Annoyance	TURKU University

## (3) 純音性成分を含む騒音の評価指標の算出方法による差異に関する研究調査

純音性成分を含む騒音の評価指標として代表的なTonal Audibility（純音性可聴度）は規格によって算出方法が異なる。そこで、それらの差異に注目して算出結果の比較に関する研究や、国際的なラウンドロビンテストを実施したプロジェクトの結果について調査する。

## (4) WHO環境騒音ガイドラインの調査

2018年に改定されたWHO環境騒音ガイドラインに風車騒音が追加された。当ガイドラインに関しては国内行政の関心も高い。そこで、ガイドラインに規定された推奨値やその決定の根拠等について調査し、我が国の風車騒音に関する指針（風力発電施設から発生する騒音に関する指針：平成29年5月 環境省）と比較し、その関係性について考察する。また、わずらわしさのみならず健康被害に関する事項についても調査する。

## (5) 純音性騒音の評価指標を算出可能な市販の分析器／ソフトの調査

純音性騒音の評価指標および基準値を策定した場合、行政によって簡便に測定できる分析器が存在することも重要である。そこで、国内外の複数の音響機器メーカーについて、純音性騒音の評価指標を計測可能な分析器およびソフトを販売しているかを調査する。

**(6) 低周波純音の伝搬計算に関する調査**

純音性成分を含んだ騒音の外部から室内への伝搬計算を行う場合，特に純音成分の周波数が低周波音領域にあると，室寸法と波長の関係から簡単なエネルギー計算では正確な予測ができない恐れがある。そこで，低周波純音成分を含む騒音の室内への伝搬計算に関する研究のうち，複雑な解析に頼らず簡易式によって予測する手法の研究について調査する。

**(7) 提案評価指標および基準値の国際整合性に関する検討**

「II-1 純音性成分を含む騒音の心理評価に関する研究」で最終的に提案しているTonal Audibilityに基づくTonal Adjustmentの考え方が，国際規格や他国の規格と整合性がとれているか検討する。

#### 4. 結果及び考察

##### (1) 純音性成分を含む騒音の測定評価に関する国内外の規格

表3.3.1に示された複数の国内外の規格について調査した結果、騒音に含まれる純音成分の特徴量分析に用いられる規格は、その対象音および分析法により、主に、Tonal Audibility（純音性可聴度）系、Tone Prominence（顕著）系、Perceived Noise Level 系に分けられることが分かった。その特徴を表4.3.1にまとめる。

このうち、Tonal Audibility系が、計算手法が最も明確であり、すでに風力発電施設に関する規格にも採用されているため、本研究における評価量として最もふさわしいと結論付けた。Tonal Audibility 系の規格は複数あるため、その特徴について表4.3.2にまとめる。

どの規格も基本的な考え方は共通であるが、計算対象となる周波数範囲や周波数分解能、臨界帯域の計算方法等が微妙に異なる。また、純音性可聴度の算出用ソフトウェアのサンプルコードが提供されている規格もあるが、誰しもが容易に実用化できるものではなく、また日本で入手可能な算出機能が搭載されている騒音計やソフトウェアは多くはないのが現状である。したがって、本研究課題では評価方法を提供するだけでなく、測定された音のデータからソフトウェア等により直接、純音性可聴度を算出できる環境を提供することも課題となる。

表4.3.1 騒音に含まれる純音成分の特徴量分析に用いられる規格の整理

	Tonal Audibility系	Tone Prominence系	Perceived Noise Level系
対象周波数	20 / 50 / 90 Hz ~ (規格による)	100 Hz ~ 10,000 Hz (89.1 Hz ~ 11,220 Hz)	50~10,000 Hz (1/3オクターブバンドの中心周波数)
周波数重み付け	A特性	重み付けなし (Z特性)	
周波数分析	FFTによる狭帯域分析	FFTによる狭帯域分析	1/3オクターブバンド分析
周波数分解能	1.0 Hz ~ 4.0 Hz (規格による)	対象離散周波数音の幅が、その周波数を中心とする臨界帯域幅の15%以下となるように設定する	
周波数帯域	臨界帯域 (critical band)	臨界帯域 (critical band)	1/3オクターブバンド
FFT時間窓	ハニング窓	ハニング窓	
備考	<p>主に、風車騒音を含む一般環境騒音に含まれる純音性成分を含む騒音の特徴量分析方法を規定している。ISO 1996-2:2007 (Joint Nordic Method ver.2:1999を基にした規格である)、DIN 45681:2005、ISO/PAS 20065:2017、IEC 61400-11:2012 (JIS C 1400-11:2017)等が規定されている。いずれも基本的な考え方は共通であるが、分析方法の詳細が一部異なる。</p> <p>尚、ISO 1996-2:2017附属書Kの簡易法は、25~10,000 Hzの範囲で1/3オクターブバンド分析に基づいて、離散的で顕著な周波数要素（純音）の有無を判定する。</p>	<p>に、情報技術装置から放射される空気伝搬騒音の測定方法を規定している。基本的には聞こえる離散周波数音（純音性成分）を分析対象とする。ECMA-74:2015、ANSI S1.13-2005、ISO 7779:2010 (JIS X 7779:2012)が規定されており、いずれの規格も内容についてはほぼ同一である。</p>	<p>主に、航空機騒音の評価に用いられる。ISO 3891:1978で規定されている。隣り合う1/3オクターブごとの音圧レベルの変化幅から純音補正値を算出し、主観的な音のうるさを考慮して求められた騒音レベルに加算して求める。補正量は0 dBから6.7 dBまでの範囲である。</p>

さらに、算出された純音性可聴度に基づいて、従来より環境音の評価に使用されている騒音レベルにどのようなペナルティを与えるかという点についても規定されているが、これについては学術的な根拠が希薄なため、我が国に適応するペナルティを国内における心理実験等の結果に基づき提案していくことが重要である。

表4.3.2 Tonal Audibilityの分析方法に関する比較

Standards	ISO 1996-2 Annex C	IEC 61400-11	DIN 45681	ISO/PAS 20065
A-weighted spectrum	Yes	Yes	Yes	Yes
Frequency range [Hz]	from 50	from 20	from 90	from 50
Frequency resolution [Hz]	$\Delta f_{\text{eff}} < 0.05 \times \Delta f_T$	1 to 2	1.9 to 4.0	1.9 to 4.0
Critical band width $\Delta f_C$ [Hz]	$0.2f_T$ ( $f_T > 500$ ) 100 ( $f_T \leq 500$ )	$25 + 75 \cdot (1 + 1.4 \cdot [f_T/1000]^2)^{0.69}$		
Cut-off freq. of CB	$f_T = 0.5 \times (f_H + f_L)$		$f_T = \sqrt{f_H \times f_L}$	
Estimation of masking noise	Linear regression	Statistical method	Iterative method	Iterative method
Evaluation time duration	60 s (or about 10 s)	at least 10 s $\times$ 10 spectra	at least 3 s $\times$ 12 spectra	
Penalty $K_T$	Specified	Not specified	Specified	Specified in ISO 1996-2:2017 Annex J
Sample source code	Not provided	Not provided	Provided	Provided

## (2) 純音性成分を含む騒音の評価に関する研究プロジェクトの調査

イギリスにおいて2001年から2004年に実施された研究プロジェクトのうち、環境騒音に含まれる純音性および衝撃性の騒音の定量化手法について調査した結果についてとりまとめられた報告書（NMS Project 2.2: 環境騒音, WP1-環境騒音に含まれる純音性および衝撃性の定量化方法に関する調査と比較）のうち、特に純音性評価に絞って重要箇所を抜粋再構成した。その中で得られた純音性成分の定量化手法の系統図を図4.3.1に示す。これにより環境騒音の純音性の評価が上述のTonal Audibility系に集約されていく流れが分かる。

また、同様にイギリスではあるが、風車騒音の評価方法に関するETSU報告書（“The Assessment & Rating of NOISE from wind farms”）についても調査を行った。本報告書はimmission系の評価法に関するもので、風車騒音の測定方法の概要を説明し、風力発電施設の開発を不適切に制限することなく、また、風力発電施設の開発者や地方自治体に過度なコストや行政的負担をかけることなく、風力発電施設周辺の住民を保護するために適切な騒音レベルを示している。その騒音基準としては基本的に昼間も夜間も暗騒音+5 dBに制限するべきとしている。

また、純音性騒音に対するペナルティが図4.3.2に示すように明確に記載されている。これらの値の導出に関しては、図4.3.3に示す他の規格におけるペナルティについても検討している。ただし、これらのペナルティの根拠としては、一部聴感実験の結果も参考にはされているが、技術者の経験に基づくところも大きく、現場において客観的に検証されてはいない。

以上のことから、わが国でもTonal Audibility系に絞って、自治体等においても簡易に使用できる測定・評価方法をまとめるとともに、聴感実験に基づいたペナルティを提案し、さらに現場における検証を行っていくことが重要と考えられる。

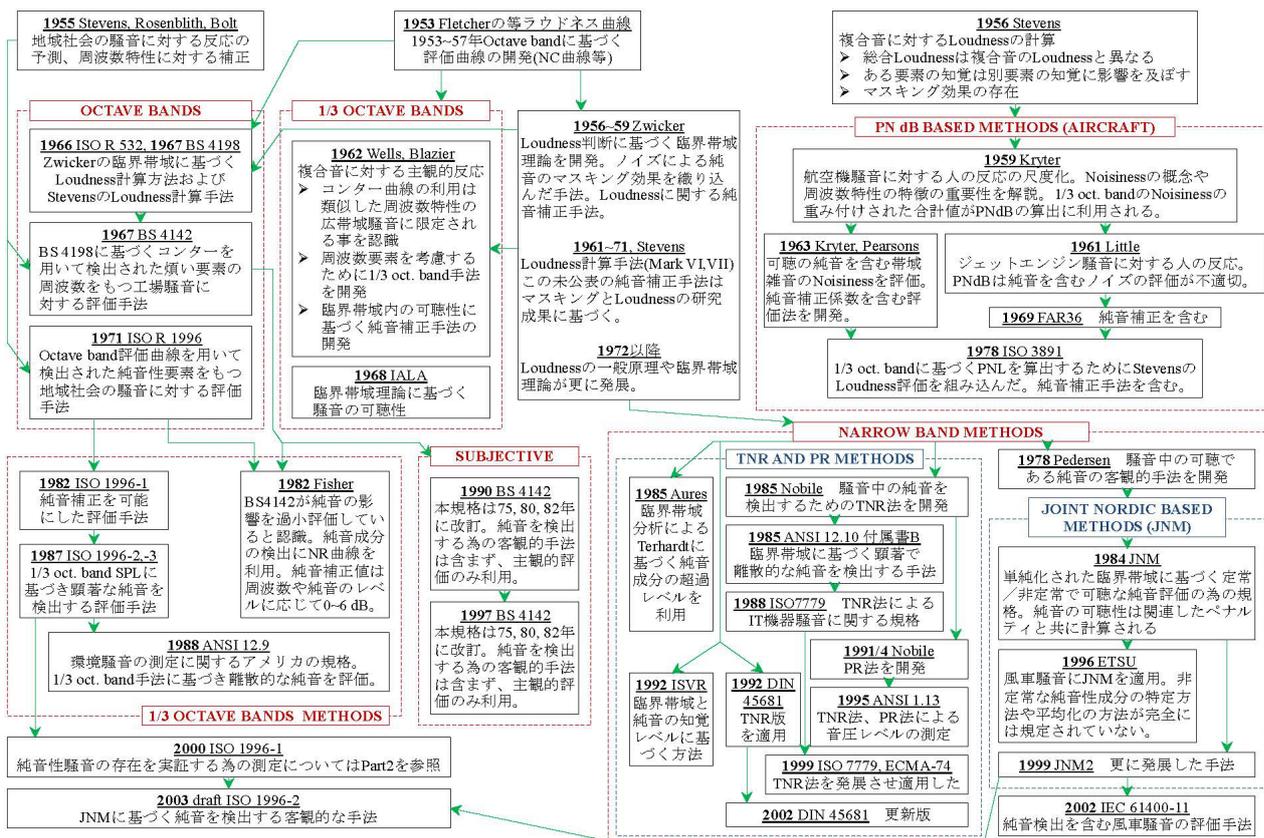


図4.3.1 純音性成分の定量化手法の系統図

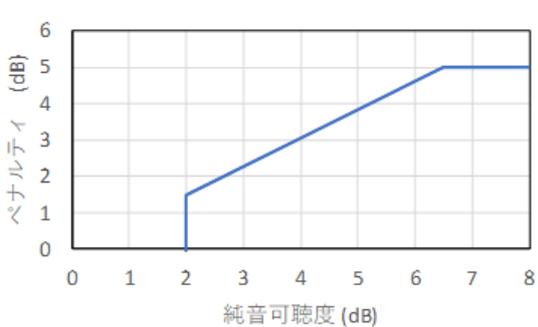


図4.3.2 純音性騒音に対するペナルティ (ETSU報告書)

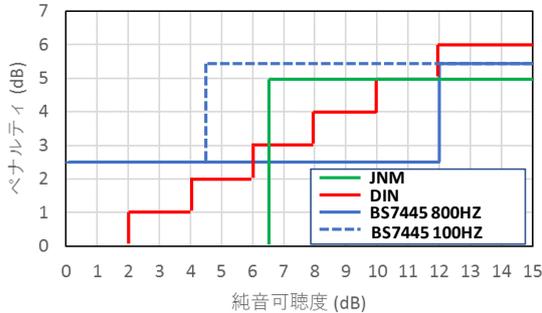


図4.3.3 様々な基準によるペナルティの比較 (ETSU報告書)

デンマーク環境省が実施した欧州および北米、10ヶ国の風車騒音に関する測定評価手法やガイドラインの調査報告書 (“Rules and methods for noise from wind turbines in other countries”) では、複数国における風車騒音の住宅に対する影響の予測方法、測定方法、規制値等がまとめられている。その概要を表4.3.3に示す。これによれば、主な騒音指標は、A特性音圧レベルのエネルギー平均値 ( $L_{Aeq}$ ) であるが、一部の国では  $L_{den}$  も使用されている。いくつかの国 (ドイツとデンマーク) では、 $L_r$  を使用している。 $L_r$  は騒音に明確な純音が含まれる場合には補正される  $L_{Aeq}$  である。調査対象国の半分は、騒音指標として  $L_{A10}$ ,  $L_{A50}$ ,  $L_{A90}$  などの統計量を用いている。純音補正 (ペナルティ) に関しては、5dB前後が最も多く、純音性可聴度の計算手法としてはISO1996-2 Annex C を使用しているところが多い。住宅への伝搬計算については、IEC 61400-11によって測定されたパワーレベルをもとに、ISO9613-2 (“Acoustics – Attenuation of sound during propagation outdoors – Part 2 : General method of calculation”) によるものが多い。ただし、ISO9613-2は外部までの計算手法であり、室内への計算は考慮されていない。

表4.3.3 10ヶ国の風車騒音に関する測定評価手法やガイドライン

	デンマーク	ノルウェー	スウェーデン	ドイツ	オランダ
評価指標	Lr	Lden	LAeq	Lr	Lden/Ln
純音補正	5 dB	5 dB	5 dB	3/6 dB	–
最近接距離	風車高さの4倍	–	–	戸建：300-1km, 住宅：500-1km	–
騒音規制値(拓かれた地域) [dB]	42/44 (6/8m/s)	45	40 (tone:35)	50/35 (d/n)	Lden 47, Ln 41
騒音規制値(騒音に敏感な地域) [dB]	37/39 (6/8m/s)		35(tone:30)	45/35 (d/n)	
風速 [m/s]	6 and 8	8	8	10	all
規制／ガイドライン	Executive Order no.1736, 21/12-2015	Norwegian Environment Agency:T-1442/2012	Guideline values for sound from wind power	TA Lärm, GMBI No.26/1998	Ministry of environment:3.14a amendment decision 2010/749
測定／計算法	PWL : Order No.1736 or IEC61400-11 計算 : Order No.1736, 21/12-2015. Toner: MST 6/1984 and No.16,31 and 47 (closely related to ISO1996-2, Annex C)	<u>PWL</u> : IEC61400-14 計算 : T-1442/2012 or Nord2000 近隣測定 : Elforsk report 98:24/1998 <u>Toner</u> : ISO1996-2, Annex C	<u>PWL</u> : IEC61400-14 計算 : Swedish Environmental Protection Agency report 6241,2010. 近隣測定 : Elforsk report 98:24/1998 <u>Toner</u> : ISO1996-2, Annex C	計算 : ISO9613-2 <u>Toner</u> : DIN 45681	<u>PWL</u> or計算 : Appendix 4 of Calculating Measurement Wind Turbine Sound 2011 based on IEC61400-11 or ISO9613-2:1996

	イギリス	フランス	オーストラリア 南オーストラリア州	オーストラリア ニューサウスウェールズ州	カナダ オンタリオ州
評価指標	LA90,10min	LA50,10min	LA90,10min/LAeq,10min	LA90,10min/LAeq,10min	LA90/LAeq
純音補正	1.5-5 dB	発生時間30%以下	5 dB	5 dB	5 dB
最近接距離	–	> 500m	–	–	–
騒音規制値(拓かれた地域) [dB]	35-40/ 43 (d/n)	35 or BGN+5/3(d/n)	40 or BGN+5	35 BGN+5	45-51dB,風速4-10m/s
騒音規制値(騒音に敏感な地域) [dB]	or BGN+5		35 or BGN+5		40-51dB,風速4-10m/s
風速 [m/s]	騒音最大まで	8, <5(BGN)	有効風速範囲	有効風速範囲	4-10
規制／ガイドライン	ETSU-R-97	Decree No.2006-1099, 2006. This applies to all types of noise sources.	Wind farms environmental guidelines 2009	Draft NSW Planning Guidelines Wind Farms 2011	Noise Guideline for Wind Farms 2008
測定／計算法	近隣測定 : ETSU-R-97 <u>PWL</u> : IEC61400-11 計算 : ISO9613-2 <u>Toner</u> : ETSU-R-97	測定 : draft: NF S 31-114, 2011. A new standard coming in 2016 (AFNOR 2015) 室内 : NF 31-010 <u>Toner</u> : NF S 31-114, 2011	近隣測定 : Wind farms environmental guidelines 2009 <u>PWL</u> : IEC61400-11 計算 : ISO1996-2 or CONCAWE	近隣測定 : Wind farms environmental guidelines 2009 <u>PWL</u> : IEC61400-11 計算 : ISO1996-2 or CONCAWE <u>Toner</u> : Draft NSW Planning Guidelines	近隣測定 : Compliance Protocol for Wind Turbine Noise, MOE 2011 計算 : ISO9613-2 <u>Toner</u> : ISO1996-2, Annex C

また、同じデンマークの環境省の報告書 ”Assessment of tone content in wind turbine noise at neighbors” の中にデンマークにおける純音に対するペナルティの決定方法が示されているが、当初提案された方法は純音性可聴度に対して漸進的なペナルティを用いていたが、最終的に純音性可聴度が6.5 dBを上回る場合一律に5 dBのペナルティが課されることとなった。その理由としては、段階的なペナルティはその

利用に際して複雑で難しいことが挙げられている。

フィンランドのTurku Universityを中心に実施されている純音性騒音の評価法に関する公共研究プロジェクトでは、音圧レベルが低い純音性騒音に対するアノイアンスに対するペナルティを提案している。これは心理音響実験に基づく結果から導出されており、実験においては、住宅内の典型的な規制レベルに近い音圧レベルで、非純音性騒音と比較して純音性騒音がどのように知覚されるかを被験者に評価させている。その結果、純音の純音性可聴度とその周波数を変数とするペナルティ計算関数（(4.3.1)式）

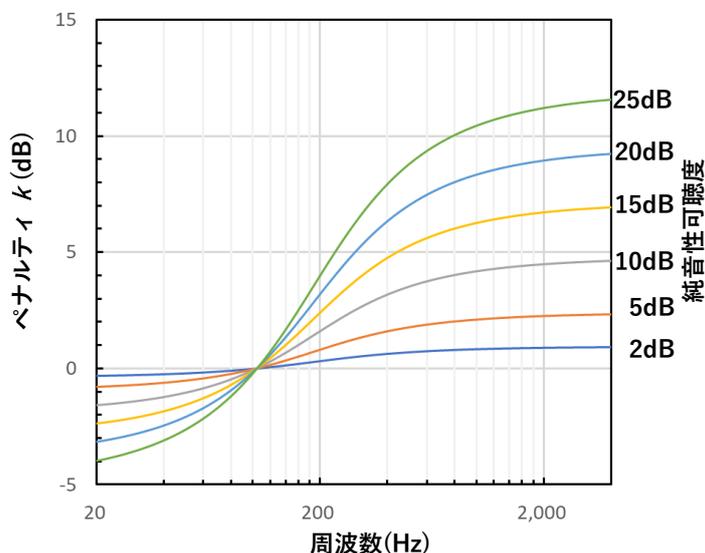


図4.3.4 ペナルティの予測例（文献3の計算式にて算出）

を提案している<sup>3)</sup>。

$$k(A_T, f_T) [dB] = -0.036A_T + 0.326A_T \tan^{-1} \left( 6 \left( \frac{f_T}{1000Hz} - 0.0858 \right) \right) \quad (4.3.1)$$

(4.3.1)式により計算されたペナルティを図4.3.4に示す。この関数の特徴は純音性可聴度(Tonal Audibility)が0 dBであれば、ペナルティはゼロとなる点、主に100 Hz以下の純音に対しては、正の純音性可聴度に対して負のペナルティが発生することにある。これは、純音による騒音レベルの上昇が、心理的なアノイアンスの上昇よりも急激である可能性を示している

### (3) 純音性成分を含む騒音の評価指標の算出方法による差異に関する研究調査

本研究課題では純音性成分を含む騒音の評価指標として騒音レベルに純音性可聴度からどのようにペナルティを決定するかということが重要となる。しかしペナルティを算出する上で根拠となる純音性可聴度は上でも述べたように複数の算出方法が提案されている。ここでは、算出方法が違うことで純音性可聴度の値にどの程度の差異が発生するか研究した事例（文献1および文献2）について調査した。

まず、文献1では、純音性成分を含む風車騒音に対して、表4.3.2に示す4つの規格のうち、DIN 45681を除く3つ規格の計算方法を用いて（DINは基本的にPASと同じ計算方法で、分析可能周波数の下限値のみ異なるため）、純音性可聴度の算出結果を比較公表している。分析に用いた風車騒音のデータを図4.3.5に示す。これらの純音性可聴度の3つの規格による計算結果を表4.3.4に示す。どの計算方法においても純音性成分の検出能力に大きな差は見られない。ただし、最も周波数が低い約76 Hzの純音性成分が検出された(a) W22M01の条件については、TAの分析手法によって、算出結果に4 dB程度の差が生じている。これは、特に100Hz以下の周波数帯域におけるマスキングノイズのスペクトルの傾斜が影響していると

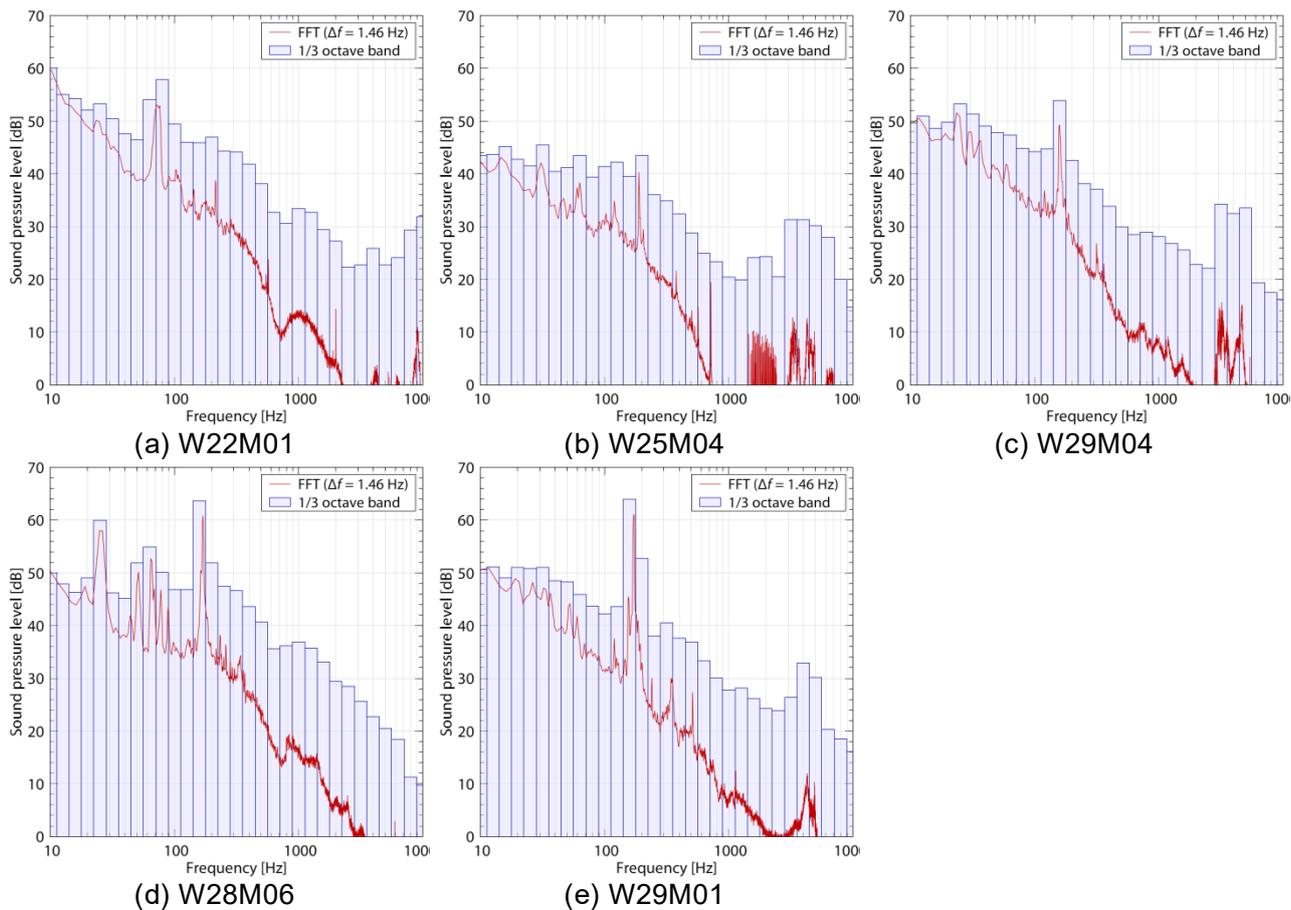


図4.3.5 比較分析に用いた風車騒音の周波数特性(文献1)

表4.3.4 純音性成分を含む風車騒音に対する計算結果 (文献1)

風車騒音	W22M01	W25M04	W29M04	W28M06	W29M01	
$L_{Aeq,30s}$	45.9 dB	40.3 dB	44.5 dB	52.7 dB	52.2 dB	
純音の周波数	76.2 Hz	189.0 Hz	720.7 Hz	158.2 Hz	171.4 Hz	
純音性可聴度の 計算値	ISO	5.3 dB	0.9 dB	4.3 dB	6.2 dB	12.2 dB
	IEC	2.5 dB	1.2 dB	4.5 dB	6.3 dB	12.1 dB
	PAS	6.4 dB	0.8 dB	3.8 dB	7.1 dB	11.5 dB

ISO: ISO 1996-2 Annex C, IEC: IEC 61400-11, PAS: ISO/PAS 20065

表4.3.5 国際ランドロビンテスト参加国とチーム数 (文献2)

country	country	country
Denmark 4	Spain 1	Netherland 1
Germany 3	Norway 1	Ireland 1
Japan 2	France 1	Finland 1
Canada 2	UK 1	Scotland 1
Australia 2	USA 1	India 1

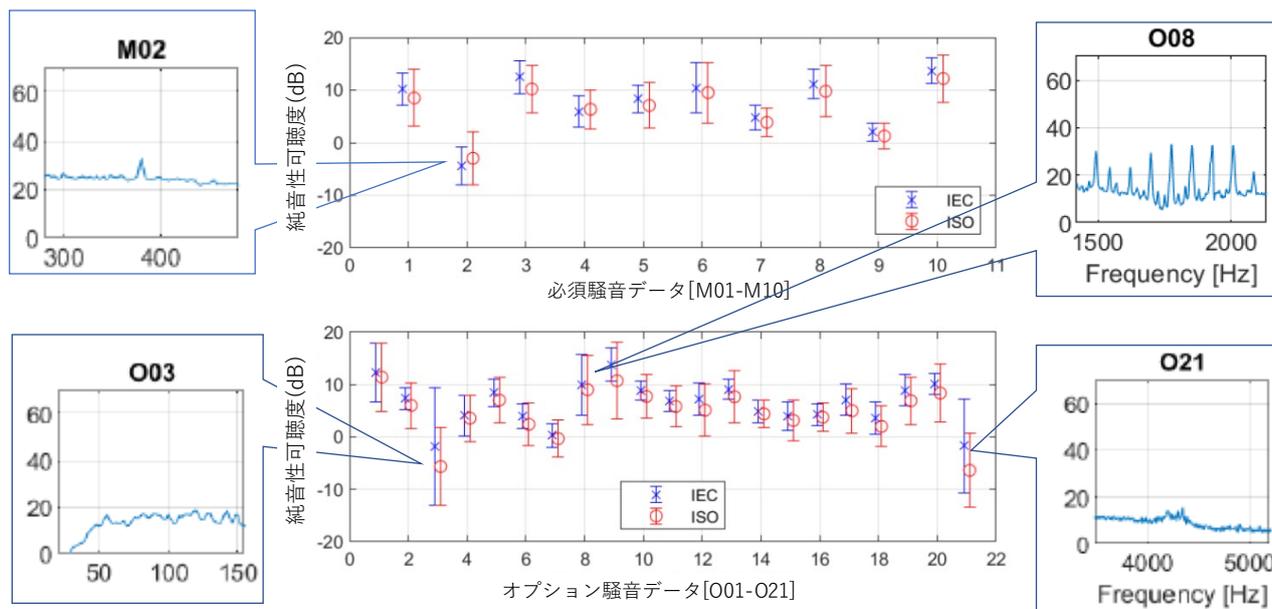


図4.3.6 ラウンドロビンの結果（文献2）

考えられる。次に純音性可聴度の算出に関する国際ラウンドロビンテストに関する文献2の内容についてまとめる。この文献は、IEC61400-11-2の策定に際しこの規格策定のプロジェクトリーダーを務めるLars Sommer SØNDERGAARD氏が実施した国際ラウンドロビンテストの結果を公表したものである。このラウンドロビンテストの目的は、IEC 61400-11：2012とISO / PAS 20065：2016の純音可聴度の計算結果を比較検討することにある。ラウンドロビンテストの参加者は、IEC / TC88 / MT 11のメンバーとISO / TC43 / SC1 / WG45のメンバー、さらに、風車騒音および純音性に関する研究の従事者である。参加者には、実際の風車騒音を含む10個の必須テスト騒音と21個のオプションテスト騒音のスペクトルデータが提供された。参加チーム数は23で、そのうち8チームがIECの方法のみで、3チームがISO/PASの方法のみで、12チームが両方の方法で純音可聴度の値を算出した。国別の参加者数を表4.3.5に示す。

ラウンドロビンテストの結果を図4.3.6に示す。図中上段は必須テスト、下段はオプションテストの結果で、吹き出しで示されているグラフは、テスト騒音のスペクトルデータである。これによれば、ラウンドロビンの結果に系統的な差異はない。図中O03やO21のテスト音のように際立った純音成分がないと若干差異が大きくなるが、他のテスト騒音のように際立った純音成分が存在すれば、純音性可聴度の値はほとんど変わらないことが分かる。

#### (4) WHO環境騒音ガイドラインの調査

2018年に公表されたWHO環境騒音ガイドラインでは、道路騒音、鉄道騒音、航空機騒音、風車騒音、レジャー騒音の種類ごとに推奨値が示されている。風車騒音に関する推奨値は「 $L_{den}$  45 dB未満」となる。 $L_{den}$ とは時間帯補正等価騒音レベルで、時間帯によって表4.3.6に示す重みづけをした等価騒音レベルである。前出の表4.3.3では10か国中2か国（ノルウェーとオランダ）が $L_{den}$ を使用している。

ここで、日本における風車騒音の評価との違いについて考察する。日本では、風力発電施設から発生する騒音に関する指針（平成29年5月：環境省）により、図4.3.7のように定められている。このように残留騒音の測定および風車騒音の評価には $L_{Aeq}$ を用いているため、推奨値の数値を直接比較することはできない。そのため、 $L_{den}$ による推奨値を $L_{Aeq}$ に換算することを試みる。

表4.3.6 時間帯補正等価騒音レベル $L_{den}$ 算出における時間帯区分と重み付け係数

時間帯区分	昼間	夕方	夜間
時間帯	7:00-19:00	19:00-22:00	22:00-07:00
時間数	12	3	9
重み付け	0 dB	5 dB	10 dB

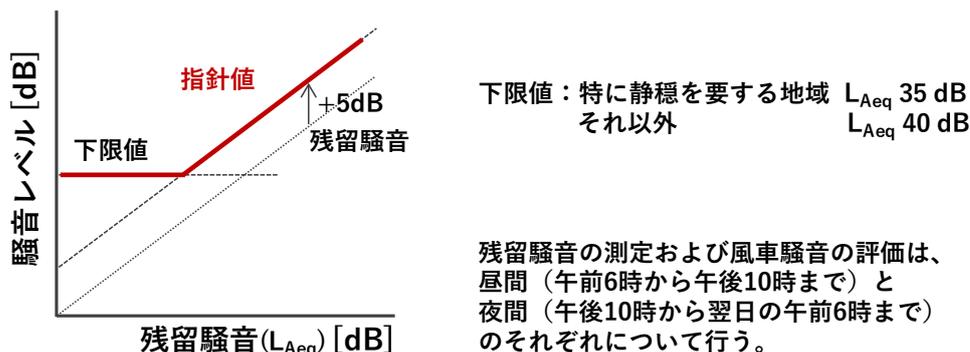


図4.3.7 日本における風車騒音に対する指針値（環境省）

対象とする騒音について $L_{Aeq}$ が24時間一定であると仮定すると、等価騒音レベル $L_{Aeq}$ を時間帯補正等価騒音レベル $L_{den}$ に換算する場合の増分は、次式のように計算できる。

$$10\log_{10}\left(\frac{12 \times 10^{\frac{0}{10}} + 3 \times 10^{\frac{5}{10}} + 9 \times 10^{\frac{10}{10}}}{24}\right) = 6.7\text{dB} \quad (4.3.2)$$

したがって、WHOガイドライン推奨値を $L_{Aeq}$ に読み替えると、

$$L_{Aeq} = 45(L_{den}) - 6.7 = 38.3\text{dB} \quad (4.3.3)$$

となり、これを日本における風車騒音に対する指針値と比較すると、特に静穏を要する地域における下限値 ( $L_{Aeq}$  35 dB) とそれ以外の地域の下限值 ( $L_{Aeq}$  40 dB) の中間値程度となっており、WHOガイドラインの推奨値と日本の指針値は、ほぼ同程度の水準と考えられる。

その他の健康影響におけるガイドラインについては表4.3.7のようにまとめられている。うるささ（アノイアンス）の有症率以外は実証研究と認められるものは存在していないということで、推奨値の根拠にはなっていない。うるささに関しても4つの個別の研究をまとめた論文を含む2つの研究<sup>4,5)</sup>(Janssen, et al., 2011; Kuwano, et al., 2014) が参照されているのみである。これらの研究の結果をまとめて図4.3.8に示す。図中に赤矢印で示すように、どちらの研究も $L_{den}$  45dBで非常に不快と感じた人の割合が10%に達しており、これが推奨値の根拠となっている。

表4.3.7 時間帯補正等価騒音レベル $L_{den}$ 算出における時間帯区分と重み付け係数

優先的に扱う健康影響の証拠の概要	基準レベル	証拠の品質	推奨値
虚血性心疾患 (IHD) の発生率 暴露レベルの評価には用いられず	5%リスク上昇	実証研究なし	無し
高血圧症の発生率 暴露レベルの評価には用いられず	10%リスク上昇	実証研究なし	無し
うるささ (アノイアンス) の有症率 4つの研究があり、その暴露反応曲線では、アノイアンス発生率10%は暴露レベル $L_{den}$ 45 dBに対応する。	10%リスク	低品質	<b><u><math>L_{den}</math> 45 dB</u></b>
難聴	上昇なし	実証研究なし	無し
子供の読解力・聴取理解力	1か月遅れ	実証研究なし	無し
睡眠妨害 対象となる6つの研究の結果は影響を明らかにしていない	3%リスク	低品質	無し

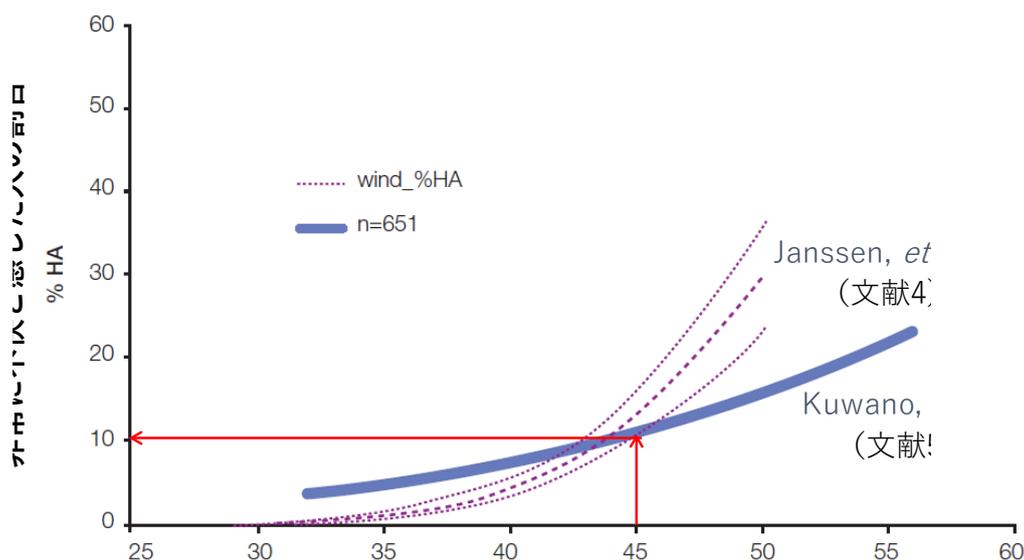


図4.3.8 風車騒音の「アノイアンス (うるささ)」の2つの研究結果の重ね描き

このWHOガイドラインに対して、2019年6月に開催された国際会議Wind Turbine Noise 2019 (WTN2019)では、風車騒音の研究者から以下のような意見が出された。

- ✓  $L_{den}$ は、人に影響を及ぼす可能性のある環境全体の騒音の影響を考慮していない。
- ✓  $L_{den}$ は、人に影響を及ぼす可能性のある純音性成分や振幅変調の潜在的影響を過小評価する。
- ✓  $L_{den}$ は屋外におけるA特性の年間平均値が風車騒音に対するヒトの反応について最も良い指標であるという仮定に基づいているが、今日まで蓄積されたデータはそれがアノイアンスの予測因子として十分ではないことを示唆するだろう。
- ✓  $L_{den}$ は夜間の騒音レベルに理論的な制限を課すが、 $L_{den}$ 単体だけでは睡眠への潜在的影響から保護することには適していない。
- ✓  $L_{den}$ は交通騒音の規制には適しているかもしれないが、 $L_{den}$  (単体) は風車騒音の規制値には理想的ではない。

以上のように、評価量として $L_{den}$ 単体を用いること自体を問題にする意見が多い。各国の風車騒音に関するガイドラインを見ても、多くの国や地域でA特性音圧レベルに基づく騒音評価指標に加えて、地域特性、時間帯、風速、セットバック距離等を考慮しており、また、音響特性についても、S/N比、純音成分、振幅変調成分、衝撃成分、低周波音成分等に関する補正を取り入れている。したがって、各国における風車騒音に関するWHOガイドラインの運用について、今後も注視する必要がある。

#### (5) 純音性騒音の評価指標を算出可能な市販の分析器／ソフトの調査

表4.3.8に示す国内外の音響機器メーカー8社について、2018年12月までの時点で公開されている情報を元に、表4.3.2に示した規格に基づいて純音性可聴度を算出可能な分析器およびソフトを販売しているかどうか調査した。これによれば、ほとんどのメーカーで受音性可聴度を算出できるものを提供しているが、特に、ISO 1996-2に準拠した計測機器やソフトウェアを提供しているところが多い。ISO/PASは1社もないが、これはDIN 45681と分析周波数の下限が異なるだけなので同等とみなせば、3社が対応している。その他の規格に対応しているものもあるが、環境騒音というよりは自動車製品や精密機器製品の発生音に使用することに特化しているものである。ISO 1996-2 については、ソースコードが提供されているわけではないので、メーカーごとに計算値が異なる可能性がある。したがって、今後は計算方法が明快なIECやISO/PASの製品が増えてくると思われる。本研究課題のサブテーマ1でもISO/PASによる方法で純音性可聴度を簡易的に測定できる計測器を開発しているので、その成果を利用することも可能である。

表4.3.8 純音性騒音の評価指標算出に対する各メーカーの対応

計測器メーカー		B&K	HEAD acoustics	Delta	Cirrus
純音性可聴度の計算に使用する規格	ISO 1996-2 Annex C	○ 騒音計		○ ソフトウェア	○ 騒音計
	IEC 61400-11	○ 測定・分析システム			
	DIN 45681	○ ソフトウェア	○ 測定・分析システム		
	ISO/PAS 20065				
	その他	・ JNM1999 ・ ANSI S1 13	・ ECMA-74		・ 独自計算法
計測器メーカー		Norsonic	Svantek	小野測器	リオン
純音性可聴度の計算に使用する規格	ISO 1996-2 Annex C	○ 騒音計	○ 騒音計		○ ソフトウェア
	IEC 61400-11				
	DIN 45681	○ 測定・分析システム			
	ISO/PAS 20065				
	その他			・ Tonality	

(6) 低周波純音の伝搬計算に関する調査

低周波純音成分を含む騒音の室内への伝搬計算に関する研究のうち、複雑な解析に頼らず簡易式によって予測する手法に関する研究について調査した。拡散音場を仮定した室内の低周波音の伝搬計算の補正值の代表的なものにWaterhouse補正がある<sup>6)</sup>。この手法はJISやISO規格などでも使用されている。しかし、実際の現象との乖離が見られる場合がある。床衝撃音の簡易予測方法の中に、拡散音場を仮定した室内伝搬計算に低周波音の補正を行っているものがあり、先に示したWaterhouse補正の欠点をカバーするものになっている<sup>7)</sup>。

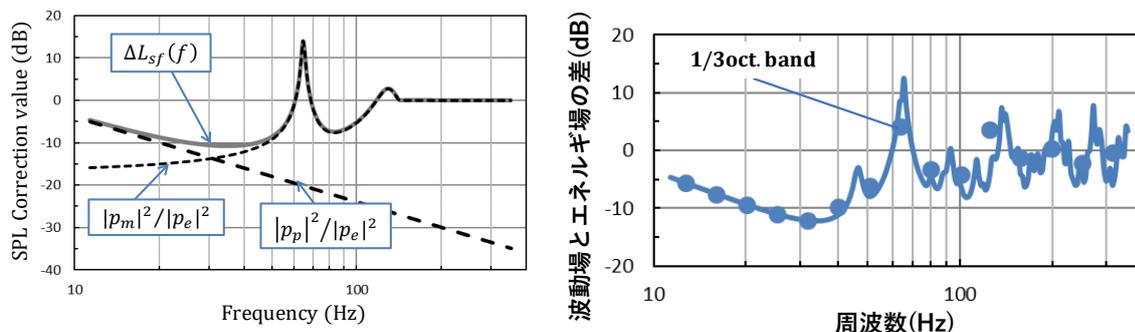


図4.3.10 3次元音場における補正值と波動計算値とエネルギー計算値差の例（文献7）

具体的には図4.3.9に示す1次元音場において、図4.3.9のグラフに示される波動計算値とエネルギー計算値との差分 $\Delta L_{sf}(f)$ を計算できる理論式を導出し、それらを最終的に3次元音場に適用させるべく変形した(4.3.4)式を提案している。

$$\Delta L_{sf}(f) = 10 \log_{10} \left[ |p_m|^2 / |p_e|^2 + |p_p|^2 / |p_e|^2 \right]$$

$$\frac{|p_p|^2}{|p_e|^2} = \frac{S_a c^2 \bar{\alpha}}{4 S_{eff} (2\pi f H)^2}$$

$$\frac{|p_m|^2}{|p_e|^2} = \begin{cases} \sum_{m=1}^2 [1 + 4|f - f_m|^2 / b_m^2]^{-1} \left[ \frac{b_m}{f_1} \tan^{-1} \frac{2f_1}{b_m} \right]^{-1}, & f < f_2 \\ \max \left( \sum_{m=1}^2 [1 + 4|f - f_m|^2 / b_m^2]^{-1} \left[ \frac{b_m}{f_1} \tan^{-1} \frac{2f_1}{b_m} \right]^{-1}, 1 \right) & f \geq f_2 \end{cases} \quad (4.3.4)$$

$$b_m = \frac{-\text{clog}_e(1 - \bar{\alpha}_m)}{6.27 \times H}$$

これを用いて図4.3.10のような補正曲線を計算し、簡単なエネルギー計算の結果に適用することで実際の波動現象を近似し精度の高い予測を行っている。

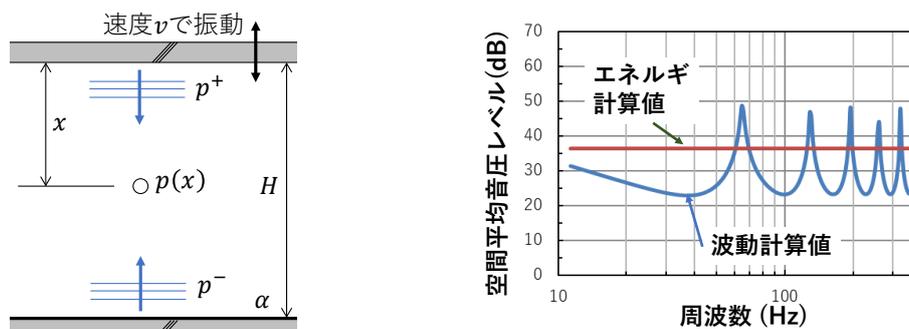


図4.3.9 1次元音場における波動計算値とエネルギー計算値の例（文献7）

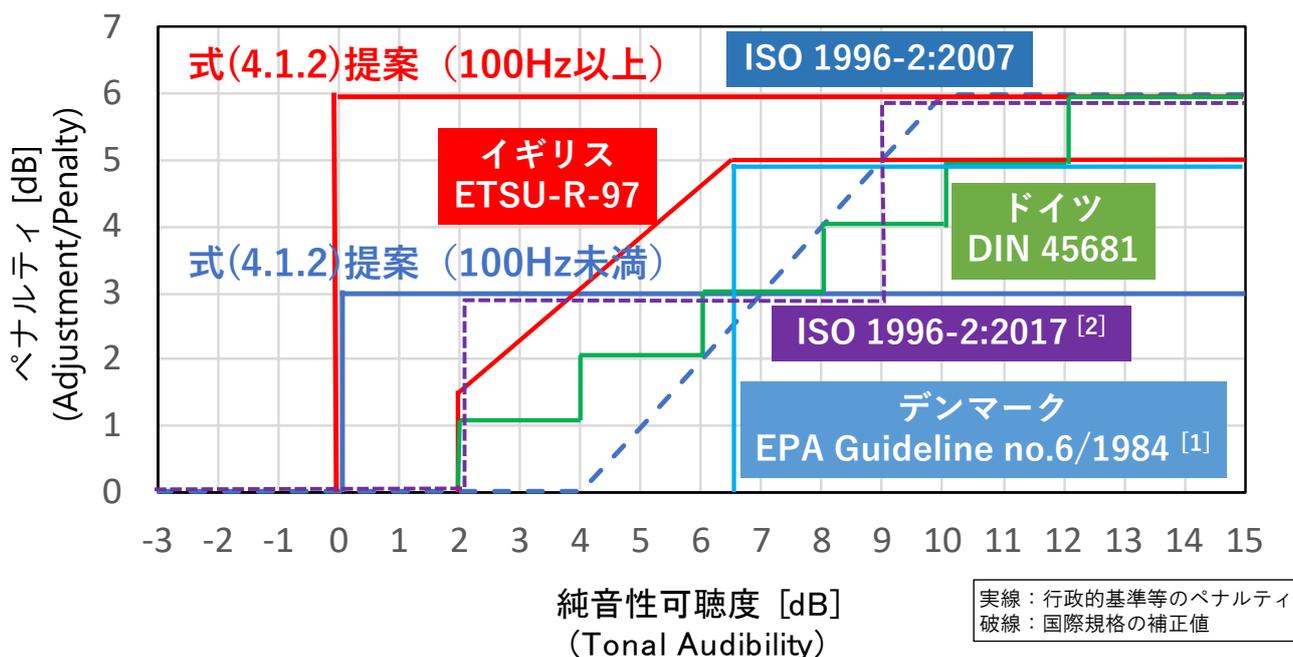
この計算手法を応用することで、本研究課題のサブテーマ2で開発している主に低い周波数領域における純音性騒音の室内への伝搬計算方法の精度を高くすることができるものと考えられる。

### (7) 提案評価指標および基準値の国際整合性に関する検討

本研究課題のサブテーマ1「純音性成分を含む騒音の心理評価に関する研究」で最終的に提案している、Tonal Audibility（純音性可聴度）に基づくTonal Adjustmentの考え方が、国際規格や他国の規格と整合性がとれているか検証する。

まず、基本となる純音性可聴度の算出はISO/PAS 20065によって行うため、全く問題ない。次にTonal Adjustmentであるが、これを諸外国で見られる騒音レベルに対するペナルティととらえ、国外の代表的なペナルティ曲線と比較して図4.3.11に示す。

今回サブテーマ1で提案した手法の特徴として、純音の周波数が100Hz以上か未満によって、ペナルティの値を変える点が挙げられる。図4.3.11に示した規格や基準では周波数によってペナルティ曲線を変更するものはないが、図4.3.4に示したように、100 Hz以下では騒音レベルが純音によるレベル上昇に対する評価が過剰になることを示す研究が存在することを考慮すれば、100Hz未満のペナルティを小さくすることは、一つの合理的な方法と考えられる。また、ペナルティの数値も各国の行政的基準では、純音性可聴度がある数値を超えた場合に一定のペナルティを与える場合が多いので、今回提案している手法のように、純音性可聴度が0dB以上の時に一定のAdjustmentを発生させる方法は同様にシンプルで使いやすい。また、その値も図4.3.11に示す通り、他の規格や基準と同程度であり、十分に整合性はとれているものと判断できる。



[1] EPA Guideline No.6/1984 (Denmark)

ペナルティを固定値としている理由は、段階的なペナルティはあまりにも複雑で難し過ぎる事である。T.A.が6.5dB以上の場合、一律に5dBのペナルティとする。

[2] ISO 1996-2:2017

騒音の主観的評価の精度の理由から、1 dBより大きな段階を採用することがより適切である事が多い。T.A.が2dB以上9dB未満の場合3dB、T.A.が9dB以上6dBのペナルティとする。

図4.3.11 提案しているAdjustmentと国際規格および国外の行政基準等のペナルティとの比較

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

国際規格、諸外国の評価基準の情報を収集、整理したことで、純音性成分を含む騒音の評価手法、測定手法、予測手法の成り立ちや、その実用化に対する様々な手法の長所や短所を分かりやすくまとめることができた。さらに、ハードウェアやソフトウェアの進歩も考慮して、精度と使いやすさの両立を図ることができる評価手法をまとめることができた。また、最新の研究動向をフォローすることで、今後どのように評価手法が変化していきそうか見通しを立てることができ、本研究課題の最重要成果であるサブテーマ1の評価手法や基準値が、世界的にも主流の手法であり、その技術水準も高いことが確認できた。この成果により、評価指標、評価ランクの選定に対して国内外の規格及び諸外国の評価制度との整合性を検討するという研究開発目標を達成した。

### (2) 環境政策への貢献

#### <行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

#### <行政が活用することが見込まれる成果>

提案手法を行政が活用する際に、国際的な整合性を示すことができる。また、諸外国の手法や国際的な規格やガイドラインについてもまとめてあるため、我が国の手法と諸外国との比較を簡単に示すことができる。

## 6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

特に記載すべき事項はない。

### (2) 口頭発表（学会等）

- 1) K. Masuda, R. Tomotaka, Y. Hamada: Inter-Noise 2017, Hong Kong, China, 2017  
“Evaluation of Aerodynamic Noise Emitted from Claddings and External Components of Buildings.”
- 2) K. Masuda, R. Tomotaka, Y. Hamada: Inter-Noise 2018, Chicago, 2018  
“Laboratory Measurement of Aerodynamic Noise Emitted from Cladding and External Components of Buildings.”
- 3) K. Masuda, H. Tanaka: International Congress on Acoustics, Aachen, Germany, 2019  
“Correction of Sound Pressure Levels Calculated for Small Rooms Using Diffuse-Field Theory.”

### (3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

### (4) 「国民との科学・技術対話」の実施

特に記載すべき事項はない。

#### (5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

#### (6) その他

特に記載すべき事項はない。

### 8. 引用文献

- 1) T. Kobayashi and S. Yokoyama : 8th International Conference on Wind Turbine Noise, “A comparison of standardized methods for prominence analysis of tonal components.”
- 2) L. S. SØNDERGAARD, C. T. and T. H. PEDERSEN : 8th International Conference on Wind Turbine Noise Lisbon, “Prominent tones in wind turbine noise - Round-robin test of the IEC 61400-11 and ISO/PAS 20065 methods for analyzing tonality content.”
- 3) V. Hongisto, P. Saarinen, D. Oliva: “Annoyance of low-level tonal sounds – A penalty model.” Applied Acoustics 145 (2019) pp.358–361
- 4) S. A. Janssen, H. Vos, A. R. Eisses, E. Pedersen: “A comparison between exposure-response relationships for wind turbine annoyance and annoyance due to other noise sources.” J. Acoust. Soc. Am. 130 (2011) pp.3746-3753
- 5) S. Kuwano, T. Yano, T. Kageyama, S. Sueoka, H. Tachibana: “Social survey on wind turbine noise in Japan.” Noise Control Eng. J. 62, (2014) pp.503-520
- 6) R. V. Waterhouse: “Interference patterns in reverberant sound fields.,” J. Acoust.Soc. Am., (1955) pp.247-258
- 7) K. Masuda, H. Tanaka: International Congress on Acoustics, Aachen, Germany, 2019 “Correction of Sound Pressure Levels Calculated for Small Rooms Using Diffuse-Field Theory.”

## III. 英文Abstract

**Study on method of assessing the annoyance by tonal components contained in wind turbine noise**

Principal Investigator: Shinichi SAKAMOTO

Institution: Institute of Industrial Science, The University of Tokyo  
4-6-1, Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153-8505, JAPAN  
Tel: +81-3-5452-6427 / Fax: +81-3-5452-6426  
E-mail: sakamo@iis.u-tokyo.ac.jp

Cooperated by: Taisei Corporation

[Abstract]

Key Words: Wind turbine noise, Domestic use heat source noise, Noise assessment, Tonal component, Annoyance

Three sub study groups were used to examine a method for assessing prominent tonal components in noise generated from wind power generation facilities, domestic use heat sources and aerodynamic noise emitted from claddings and external components of buildings. The study groups were

SG1 for a psychological experiment,

SG2 for a measurement and prediction method, and

SG3 to evaluate domestic and international standards for measurement and assessment.

In SG1, subjective tests on loudness and noisiness of tonal noises were conducted, and the relationship between the subjective sensations and physical criteria of Tonal Audibility was investigated. For loudness, the Moore-Glasberg method best fitted the subjective loudness of tonal noise. Evaluation by A-weighted sound pressure level,  $L_A$ , which is internationally used as a representative noise criterion, showed large variation due to the frequency characteristics of background noise and tonal frequency. It should be noted that  $L_A$  overestimates the subjective loudness as the tonal component becomes more prominent. Regarding noisiness, subjective responses were collected for three background noise levels and the Tonal Adjustment needed to correct the noisiness sensation caused by tonal components was investigated. Considering the fact that tonal noise becomes a problem when the background noise level is low, the SG1 suggested a Tonal Adjustment of 3 dB for tonal frequencies below 100 Hz, and 6 dB for tonal frequencies between 100 Hz and 400 Hz.

In SG2, the fundamental acoustic properties of wind turbine noise, domestic use heat source noise and aerodynamic noise emitted from external components of buildings were collected, and measurement and prediction methods of Tonal Audibility were proposed. The results from SG2 suggested a field measurement method for noise from domestic use heat sources, and a laboratory measurement method for aerodynamic noise from the external components of buildings, which have not been officially standardized yet. To predict Tonal Audibility, the features and characteristics of outdoor propagation of tonal noise were summarized, and a method was proposed for predicting noise propagation from outdoor sources to indoor occupants. The validity of the prediction method was confirmed by measurement

results.

SG3 was used to survey noise criteria on tonal noise in foreign countries and identify international research trends. The knowledge collected from the survey was used to examine the consistency of the evaluation criterion proposed from SG1 results with those of foreign countries and confirm the validity of the proposed criterion.