

## 論文の内容の要旨

論文題目 低周波数帯域に純音性成分が含まれる騒音の評価に関する研究

氏 名 米村 美紀

### 1章：背景と目的

純音性騒音とは、特定の周波数に狭帯域の卓越した成分をもつような騒音をいう。純音性騒音は、「ブー」「ポー」「キーン」などと形容されるような音色をもち、たとえ騒音のレベルが低くても、この音質上の特徴によって騒音の不快感が増加するという効果が指摘されている。

日本国内では近年、エネルギー問題への関心から、風力発電施設や家庭用ヒートポンプ給湯器の導入が進みつつあるが、これらから発生する騒音に、20～200 Hz程度の低周波数純音性成分が含まれることがある。騒音のレベルは高くないが、夜間住宅地や郊外など静穏な環境において長時間聴取されることがあり、睡眠妨害などの苦情の原因となっている。風車騒音に関しては、2017年5月に、環境省から「風力発電施設から発生する騒音に関する指針」が發布された。その中で純音性成分が含まれることによるアノイアンス増加の可能性について触れられており、問題として認識されている一方で、純音性に対する評価の具体的な方法については今後の課題として言及されるにとどまっている。また、家庭用ヒートポンプ給湯器からは40 Hzとその倍音からなる純音性成分が含まれることがあるが、その聴感印象との対応に関する知見は不足している。

このような背景を踏まえ、本論文では、①純音性成分の卓越度・周波数が騒音の聴感印象に及ぼす影響を定量的に把握すること、②既存の騒音評価指標と純音性騒音の

聴感印象との対応を把握し指標の適応性について検討することの2点を目的として、純音性騒音を対象とした聴感評価実験を行った。

## 2章：既往研究

純音性騒音の評価にあたって、環境騒音中の純音性成分の聞こえの評価と、騒音全体の聴感印象の評価の2点に着目し、過去の研究事例を整理した。前半では、純音近傍のノイズ成分の妨害によって純音性成分の聴取が阻害される「マスキング効果」に関する聴覚分野の研究および、騒音評価の指標として広く用いられているラウドネス理論（およびそれをモデル化したラウドネス指標）に関する研究について述べ、騒音評価指標として国際規格IEC61400-11:2012に定めるTonal Audibility（純音性可聴度，TA）およびISO532-1,2:2017に定めるZwickerラウドネスレベルとMoore-Glasbergラウドネスレベルの概要を示した。2章の後半では本研究と関連の深い純音性騒音、風車騒音、低周波音の評価に関する既往研究を取り上げ、本論で参考にした実験の手法や、騒音評価ガイドラインの検討を目的とした評価研究についての概観を述べた。

3～5章では、本研究で実施した3つの評価実験について述べた。

## 3章：マスキング閾値の計測

騒音中に含まれる純音性成分の聞こえに関する基礎的な事項として、純音のマスキング閾値の計測を行った。従来の研究では、聴覚機構の解明を目的として一様な周波数特性をもつホワイトノイズが多く使われてきたが、本検討では実際の騒音環境における純音性成分の可聴性について検討するため、屋内外の環境騒音を模擬したノイズを用いた。

3種類のノイズに共通した結果として、100 Hzから400 Hzの純音については、マスキング閾値とノイズの相対関係に安定した関係がみられたが、50 Hz以下の純音については、マスキング閾値が比較的高かった。TAは純音性成分とマスキングノイズ成分のエネルギー比から算出されるが、この計算手法では最小可聴値の影響が考慮されないことが要因であると考察した。

## 4章：ラウドネス評価

音に関する心理量のうち最も基礎的な属性の一つであり、騒音評価にも広く用いられているラウドネス（大きさ感）の評価を行った。マスキング閾値の計測と同じく環境騒音を模擬したノイズに、異なる周波数と強度の純音を付加した刺激のラウドネスを評価させた。また、物理的なラウドネス指標として、ISO532-1,2:2017で定められているラウドネスレベル2種類と、騒音の評価で最も広く使われているA特性音圧レベルを用い、各試験音に対する物理的な指標の値と心理評価値の対応関係を、各指標の算出方法に基づいて考察した。

評価実験の結果、純音の強度が高いほどラウドネスは高くなったが、その増分は試験

音の周波数特性によって異なることがわかった。また、物理的なラウドネス指標との関係については、A特性音圧レベルでの評価ではベースノイズの周波数特性によって音圧レベルの増加傾向が大きく異なったが、Moore-Glasbergラウドネスレベルでは安定して評価できることがわかった。指標間の差異の要因としてラウドネス特性に関し考察を行い、3つの物理指標のうちでは低周波数帯域におけるラウドネス特性をより詳細に反映し精度の改善が図られている指標であり、これを用いた評価が適当であると結論づけた。

## 5章：わずらわしさ評価

騒音に対する総合的な印象として「わずらわしさ」を評価する実験を行った。環境騒音を模擬したベースノイズに周波数・強度の異なる純音を付加した刺激を用い、就寝時、あるいは日中自宅で静かに過ごしている時を想定して印象評価を行った。また、低周波音に特有な振動感・圧迫感についても評価を行った。純音性成分を含む試験音は、同じ音圧レベルの広帯域ノイズよりもわずらわしさが高い結果が得られ、この純音性成分が含まれることによるわずらわしさの増分を、ラウドネス指標での相当値Tonal Adjustmentとして評価するとともに、指標による差異についても考察をした。また、4章のラウドネス評価との対応関係について、音質に関する内観報告をもとに定量的考察を行った。

Tonal Adjustmentは、純音の強度および周波数、ベースノイズの周波数特性およびレベルによって異なり、純音の強度および周波数が高く、ベースノイズのレベルが低い条件でその値が大きくなった。純音性成分の周波数による差異の一因として、純音の最小可聴値の影響を指摘した。ラウドネス指標に関する考察では、指標算出時に用いる等ラウドネス特性に着目した定量的な考察を行った。等ラウドネス曲線の特性を詳細に考慮した重み付けをした音圧レベルを試算・比較することで、指標間の違いが低周波領域における音圧-ラウドネス特性の非線形性に起因することを示した。一方、ベースノイズの周波数特性によって評価に差がみられることの要因については未解明であり、TAによる局所的な純音性の評価だけでなく、騒音全体の周波数特性と純音性成分の相互関係が音質へ及ぼす影響についてはさらなる検討が必要であると述べた。

6章では、3、5章において純音の可聴性とTAに乖離が生じた原因と考えられる最小可聴値に関する定量的検討を行った。

## 6章：純音性可聴度の最小可聴値による補正に関する提案

第3、5章での検討で、50 Hz以下の低周波数帯域の純音性成分は、純音の最小可聴値の影響によりTAで評価されるよりも純音の可聴性が低くなりうるが示唆された。要因として、現行のTAの算出において純音の最小可聴値が考慮されないことに着目した補正手法を提案した。提案に際しては、騒音環境下の純音のラウドネス評価において、最小可聴値を生体ノイズによるマスキングと見なしてマスキングノイズに加えるモデル

化を参照した。

提案手法は、純音性可聴度の算出において、マスキングノイズのレベルに生体マスキングとして純音の最小可聴値を加えるという手法である。検証のため5章におけるわずらわしさ評価の結果を再分析したところ、低レベル呈示条件において、低周波数純音性成分のTAの値が下方修正され、わずらわしさ評価およびTonal Adjustmentにおける周波数によるばらつきが改善した。試験音のエネルギーが最小可聴値に比べて十分大きいときは、同じ計算手法でもTAの値がほとんど変わらないため、互換性もあると考えられる。

以上に述べたように、純音性騒音を試験音として、純音の可聴性、ラウドネス、わずらわしさに関する評価実験を行い、結果を既存の指標である純音性可聴度、ラウドネスレベル、A特性音圧レベルで整理した。各指標による評価値と主観的評価値との関係を聴覚の仕組みに基づいて検討したところ、次のことが明らかになった。

- ・純音性可聴度は、騒音の絶対レベルを考慮せず、純音性成分とマスキングノイズのレベル比から算出されるため、試験音のレベルに対して純音の最小可聴値が比較的高くなりやすい50 Hz以下の純音については、TAが高くても最小可聴値の影響で純音の可聴性が低くなる可能性があること。

- ・低周波数領域における精度が最も精密にモデル化されているMoore-Glasbergラウドネスと簡易的なラウドネス指標であるA特性音圧レベルを比べると、低域にエネルギーを多く含む騒音について指標の値に乖離が生じたが、この乖離は、ラウドネス特性を詳細に反映することで解消されたことから、指標間の差異は等ラウドネス特性が低周波数帯域で非線形になることに起因すると考えられること。

- ・わずらわしさの増加量であるTonal Adjustmentは、TAが同水準でもベースノイズの周波数特性や純音周波数によって値が異なるため、TAのみをパラメータとするのではなく、ベースノイズの周波数特性や純音周波数の相対関係といった複数の要因を考慮する必要があると考えられること。

本研究は、既往の騒音評価で用いられてきたラウドネス指標と、マスキング理論にもとづく局所的な指標である純音性可聴度という2指標を組み合わせたモデルで純音性騒音に対する心理反応を予測する、という課題を設定し、純音の可聴性、ラウドネス、わずらわしさの評価を行なった。結果として、純音性成分の強度が増すほどラウドネスやわずらわしさの評価が高くなりやすいという大局的な傾向は得られたが、ベースノイズのレベルや周波数、純音性成分の強度や周波数によって反応がそれぞれ異なり、統一的な評価モデルを構築するには至らなかったが、これは今後の課題としたい。本研究において背景騒音および純音周波数それぞれをパラメータとして詳細にデータを取得したこと、指標に関しては等ラウドネス特性や最小可聴値といった聴覚特性まで還元して検討を行い、指標の特性とその適応範囲に関する知見を得たことは、今後の騒音評価に関する研究に貢献できるものとする。