

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 30 日現在

機関番号：72608

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26820246

研究課題名(和文) 風力発電施設から発せられる低周波性騒音の評価手法に関する研究

研究課題名(英文) Study on evaluation method for low frequency noise contained in wind turbine noise

研究代表者

横山 栄 (Yokoyama, Sakae)

一般財団法人小林理学研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：80512011

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では低周波数成分を含む風車騒音の評価手法を確立するために必要な科学的知見を蓄積することを目的として研究を遂行した。主に風車騒音に含まれる純音成分の心理的影響について実験室実験による聴感実験を実施してペナルティの可否を検討した。また、研究成果を論文投稿や国内外の学会などで積極的に公表し、風車騒音における先進諸外国の研究者らと情報交換を行って、ガイドライン策定に資する情報を収集した。

研究成果の概要(英文)：To establish the evaluation method for wind turbine noise containing low frequency components, the scientific knowledge was accumulated in this study. Auditory tests by laboratory experiment were performed on psychological effect of mainly tonal component(s) contained in wind turbine noise. Based on the experimental results, the application of penalty for tonal component(s) was discussed. Research findings were published initiatively by paper submission, conference presentation, etc. At the international conferences, meaningful information and opinions could be exchanged with researchers of some advanced countries about wind turbine noise and helpful information for guideline decision could be gathered.

研究分野：応用音響工学

キーワード：風車騒音 低周波音 聴感実験 評価手法 音場シミュレーション

### 1. 研究開始当初の背景

風力発電施設は、地球温暖化対策のための再生可能エネルギー利用として世界各国で建設されており、日本でも 2000 年頃から建設が本格化した結果、健康上の不安に関する苦情が近隣住民から訴えられるようになってきた。この新たな環境騒音問題に対して行政的な対応が必要となり、研究開始当初には環境省戦略指定研究「(S2-11)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(平成 22 年度～24 年度)」が終了し、環境省環境研究総合推進費「(5-1307)風力発電等による低周波音・騒音の長期健康影響調査に関する疫学研究(平成 25 年度～27 年度)」が開始され、この種の騒音に関する科学的知見が蓄積されつつあった。ただし、統一的な基準が整備されるには至っておらず、風車騒音の人間に対する心理的影響に対する学術的な調査研究が必要とされていた。(なお、本研究終了後の平成 29 年 5 月に環境省から「風車騒音に関する評価の指針」が公表された)

### 2. 研究の目的

風力発電施設から発生する騒音については、騒音のレベルは、施設周辺の住宅等では道路交通騒音等と比較して通常著しく高いものではないが、もともと静穏な地域に設置されることが多いために聞こえやすいことがある。また、風力発電施設のブレード(翼)の回転に伴い発生する音は、騒音レベルが周期的に変動する振幅変調音(スイッチュ音)として聞こえることに加え、一部の風力発電施設では特定の周波数が卓越した音(純音成分)が発生することもあり、騒音レベルは低いものの、より耳につきやすく、わずらわしさ(アノイアンス)につながる場合がある。このような風車という新たな騒音源による環境騒音問題に対して、その評価手法が確立されておらず、(超)低周波数成分を含む風車騒音の評価における周波数重み付け特性として、一般環境騒音の評価に用いられる A 特性(周波数重み付け特性)ではなく C 特性を用いる提案、振幅変調音(スイッチュ音)あるいは純音成分を含む騒音にペナルティを与える提案などもあるが、騒音が及ぼす生理・心理的影響との対応は十分には解明されていない。なお、私も参加した戦略指定研究(S2-11)では主に以下のテーマ(純音を除く)に着目した聴感実験を実施しており、本研究ではこれらの成果を積極的に公表するとともに、風車騒音に含まれる純音成分が及ぼす影響に関する聴感実験を実施して、低周波数成分を含む風車騒音の評価手法を確立するために必要な科学的知見を蓄積することを目的とした。

- ・低周波数領域の純音に対する聴覚閾値
- ・風車騒音に含まれる低周波数成分の可聴性
- ・A 特性によるラウドネス評価の可能性
- ・振幅変調音(スイッチュ音)の影響
- ・風車騒音に含まれる純音成分の影響

### 3. 研究の方法

#### (1) 風車騒音のモデル化

過年度に、環境省戦略指定研究(S2-11)において風力発電施設周辺 164 ヶ所で実施されたフィールド調査で得られた風車騒音の収録データを用い、風車騒音に含まれる純音成分に着目し、モデル化を試みた。評価手法としては、国際規格 IEC 61400-11:2012 に基づき、純音可聴度(以下、TA)を算出した。なお、純音性を定量的に評価する方法としては、一般環境騒音を対象とした ISO 1996-2:2007 や DIN 45681:2005 もあるが、風車騒音に特定した IEC 61400-11:2012 を含め、それらの基本的な考え方はほぼ同じである。TA の算出結果を図 3-1 に示す。分析対象とした 164 ヶ所中、158 ヶ所のデータについて純音成分(TA  $-3$  dB)が検出され(発生源近くは 29 ヶ所すべて)、その卓越周波数は、およそ 50～1,000 Hz、TA は  $-3$ ～ $+14$  dB の範囲にあることがわかった。なお、周波数特性は、風力発電施設からの距離によらず、発生源近くおよび居住エリアのいずれの結果についても、概ね  $-4$  dB/oct. band の傾きをもつ特性となっていた。

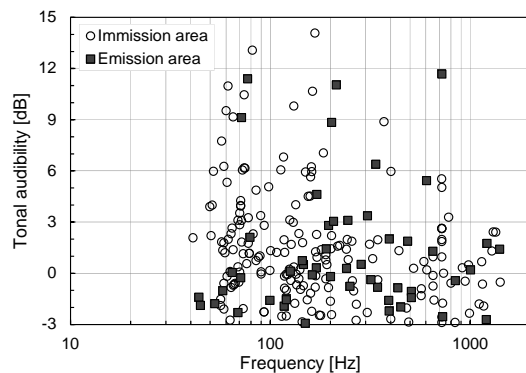


図 3-1 風車騒音に含まれる純音成分

#### (2) 実験システムの構築

低周波数領域を含む風車騒音の人間に対する心理的影響を実験室実験によって調べるために、(超)低周波数領域の周波数まで再生できる実験装置を整備した。(超)低周波数再生用の 16 台のウーファ(直径 40 cm)および中高音域再生用のスピーカを用いる方法と合わせ、ヘッドホン再生による方法(図 3-2)も構築した。被験者調整法による実験も行えるよう、実験協力者自身が手元のダイヤルを回して比較刺激のボリュームを任意に調整できるように実験システムを構成した。

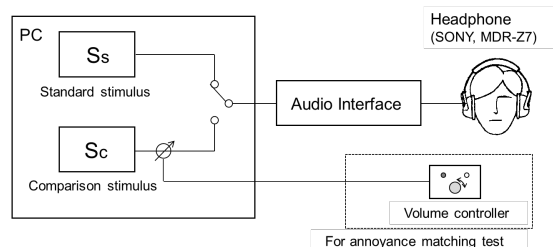


図 3-2 ヘッドホン再生による実験システム

### (3) 心理的影響評価

(超)低周波音領域まで考慮して構築した音響実験室内の再現音場において、特に風車騒音に含まれる低周波音領域の純音成分が及ぼす心理的影響について、その可聴性およびアノイアンスに着目した検討を行った。

#### 純音成分の可聴性

風車騒音の周波数特性 (-4 dB/oct. band) をモデル化したノイズに、風車騒音に含まれる純音成分の物理的特徴量を参考に、純音を重ね合わせて試験音を作成し(図 3-3)、一対比較法を用いた実験室実験によって純音成分の可聴性を検討した。標準刺激には純音成分を含まないモデルノイズを用い、比較刺激には 50, 100, 200, 400, 800 Hz の各純音について、純音可聴度 (TA) が -3 ~ +15 dB まで段階的に変化するようモデルノイズに合成し、計 35 種類の試験音を作成した。実験では標準刺激と比較刺激の聴感印象の違いについて 4 段階 (1.違いがわからない、2.わずかに違う、3.かなり違う、4.はっきり違う) で判断させた。20 ~ 40 歳代の男女 19 名の協力を得て実験を実施した。聴感実験の結果 (図 3-4)、比較刺激に含まれる純音の周波数によって多少の差異があるものの、概ね、純音可聴度 (TA) が 0 dB 程度でわずかな違いが感じられ、6 dB を超えると明らかに違いがわかる程度であることが示された。

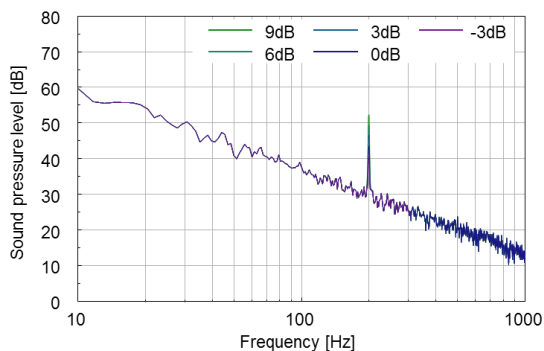


図 3-3 200 Hz の純音成分を含む試験音の例

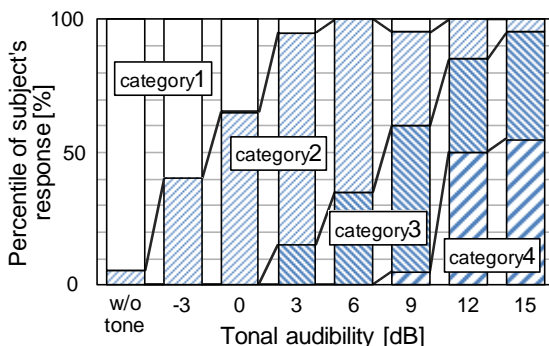


図 3-4 200 Hz の純音成分の可聴性

#### 純音成分に対するアノイアンス

風車騒音に純音成分が含まれる場合に、ペナルティを与えるかどうかを検討するために、上述の可聴性の検討に用いた試験音の一

部を用いて、アノイアンスマッチング実験を実施した。この実験では標準刺激に純音を含むノイズを用い、比較刺激に純音を含まないモデルノイズを用いて、両者のアノイアンスが等しくなるように比較刺激を調整させた。20 ~ 40 歳代の男女 18 名の協力を得て実験を実施した。聴感実験の結果 (図 3-5)、短期暴露による検討ではあるが、低周波音領域の純音成分がうるささを増大させる可能性が示され、その影響は 3 dB 程度であることがわかった。ただし、純音成分に対する反応には個人差も見られ、風車騒音の影響を評価する際のペナルティの可否については、今後、さらに、複数の純音が含まれる場合の影響なども含め、純音成分が及ぼす心理的影響に関する検討を続ける必要がある。

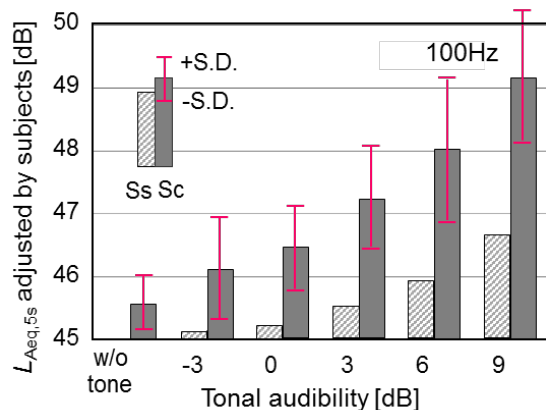


図 3-5 アノイアンスマッチング実験の結果

#### 居室内を想定した心理的影響評価

一般に、環境騒音の暴露状況の測定・評価は屋外を対象に行われるが、特に、夜間の睡眠影響が懸念されている風力発電施設から発せられる騒音については居室内に伝達した騒音が及ぼす心理的影響を検討することも重要である。この目的のために、低周波音騒音が一般の住居内に伝達する際の周波数領域の伝達特性をモデル化し、屋外で収録した風車騒音の特徴をモデル化したノイズを用いて、風力発電施設周辺の居室内における音環境を実験室内に再現することを試みた。この手法を適用し、上述の風車騒音に含まれる純音成分の可聴性に関する実験を実施した。聴感実験の結果、騒音の物理的な評価指標 (TA) と心理的影響の関係は屋外を対象とした場合と同様の傾向が見られたが、低周波音領域の純音成分が含まれる風車騒音が居室内に透過した場合、純音可聴度 (TA) が屋外よりも 3 dB 程度高くなる傾向が見られた。

#### (4) 研究成果の公表

論文投稿および国内外における学会発表等で積極的に研究成果を公表した。本研究期間内には、関連国際学会 (Inter-noise 2014, Forum Acusticum 2014, Wind Turbine Noise 2015, Inter-noise 2016, Wind Turbine Noise 2017 等) に参加して講演発表を行うことができ、

これまで風車騒音に関して後進国であった日本における研究成果を公表して、意見交換を行った。また、イギリスやドイツ、デンマークなどの風車騒音に関する先進諸外国における研究動向を把握し、ガイドライン策定に資する騒音評価指標や指針値、ペナルティの有無に関する情報も収集した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 心理的影響評価

風車騒音の評価における A 特性重み付けの適用可能性や振幅変調音の影響と併せ、風車騒音に低周波音領域の純音成分が含まれる場合のペナルティの可否について検討するため、うるささの印象に対する影響について被験者調整法によって調べた。その結果、低周波音領域の純音成分がうるささを増大させる可能性が示され、本研究で対象とした風力発電施設周辺で観測される音環境においてはその影響は 3 dB 程度であることがわかった。ただし、風車騒音の影響を評価する際のペナルティの可否について、イギリスやドイツなどの諸外国では純音可聴度 (TA) に応じて 0~5 dB のペナルティを設けており、今後、さらに純音成分が及ぼす影響に関する検討を続ける必要がある。

##### (2) わが国における風車研究の位置づけ

論文投稿や国際会議での講演発表を重ね、本研究における研究成果を公表し、また、イギリス、ドイツ、フランス、デンマーク等の風車騒音に関する先進諸外国の研究チームの研究者らと情報交換および意見交換などを通して交流を諮ることができた。その結果、先進諸外国の研究者による複数の論文中で、本研究で得られた成果が肯定的に引用されている。このことから、本研究で得られた風力発電施設から発せられる低周波音成分を含む騒音に関する心理的影響に関する研究成果は先進諸外国の研究者からも、概ね、コンセンサスを得ることができていると考える。

##### (3) 指針策定への貢献

本研究における成果を含む、これまでの風車騒音に関する研究成果を受けて、環境省水・大気環境局による「風力発電施設から発生する騒音等の評価手法に関する検討会(平成 25 年度~28 年度)」の報告書が昨秋に取りまとめられ、今年 5 月末に、「風力発電施設から発生する騒音に関する指針」が制定され、「残留騒音 +5 dB」という指針値が定められた。また、指針の制定に併せて「風力発電施設から発生する騒音等測定マニュアル」も作成された。ただし、風車騒音の評価において純音成分が検出された際、アノイアンスを増大させる可能性については言及されているが、ペナルティの可否については結論に至っておらず、今後の更なる議論が待たれるところである。

#### 5. 主な発表論文等

##### (雑誌論文)(計 2 件)

Sakae Yokoyama, Shinichi Sakamoto, Hideki Tachibana, “Perception of low frequency components in wind turbine noise”, Noise Control Eng. J., peer review, Vol.62, No.5, Sept-Oct 2014, 295-305.

Sakae Yokoyama, Shinichi Sakamoto, Sohei Tsujimura, Tomohiro Kobayashi, Hideki Tachibana, “Loudness experiment on general environmental noise considering low-frequency components down to infrasound”, Acoust. Sci. & Tech., peer review, Vol.36, No.1, 2015, 24-30.

##### (学会発表)(計 13 件)

Sakae Yokoyama, Tomohiro Kobayashi, Hideki Tachibana, “Subjective experiments on the perception of tonal component(s) contained in wind turbine noise”, Wind Turbine Noise 2017, 2017.5.2-5, Rotterdam (Netherlands).

Sakae Yokoyama, Tomohiro Kobayashi, Hideki Tachibana, “Perception of tonal components contained in wind turbine noise”, Inter-noise 2016, 2016.8.21-24, Hamburg (Germany).

Hideki Tachibana, Akinori Fukushima, Sakae Yokoyama, Tomohiro Kobayashi, “Practical methods for measuring and assessing wind turbine noise”, Inter-noise 2015, 2015.8.9-12, San Francisco (U.S.A.).

Sakae Yokoyama, Tomohiro Kobayashi, Shinichi Sakamoto, Hideki Tachibana, “Subjective experiments on the auditory impression of the amplitude modulation sound contained in wind turbine noise”, Wind Turbine Noise 2015, 2015.4.20-23, Glasgow (UK).

Tomohiro Kobayashi, Sakae Yokoyama, Akinori Fukushima, Toshiya Ohshima, Shinichi Sakamoto, Hideki Tachibana, “Assessment of tonal components contained in wind turbine noise in immission areas”, Wind Turbine Noise 2015, 2015.4.20-23, Glasgow (UK).

Sakae Yokoyama, Shinichi Sakamoto, Hideki Tachibana, “Audibility of low frequency components in wind turbine noise”, Forum Acousticum 2014, 2014.9.7-12, Krakow(Poland)

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

横山 栄 (YOKOYAMA Sakae)

一般財団法人小林理学研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：80512011