

第3章 最新の研究等の収集・整理

3.1 背景

風力発電施設における、騒音・低周波音の発生・伝搬状況の把握が十分に行われていない状況にあるため、現在、国内外において、予測及び評価手法についての調査・研究が進められている。環境省は、平成20年度（2008年度）から情報収集を始め、その構造や設置場所の特性を踏まえた様々な検討を行っている。

騒音・低周波音の評価手法・評価指標等の検討について現在継続中の主要な調査研究には、以下に示す「環境省戦略指定研究」等がある。概要を以下に述べる。

表 3-1 新たな知見・情報の調査対象

区分	研究等 概要
① 現在継続中の主要な調査研究	<p>○環境研究総合推進費戦略指定研究開発領域公募課題「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」</p> <p>平成22～24年度の3カ年で、全国34施設（36箇所）での詳細測定、アノイアンス及びTHI質問票を用いた自覚的健康状態の調査、低周波数騒音に対する閾値等の基本検討等が実施されている。</p>
	<p>○環境省地球温暖化対策技術開発事業「騒音を回避・最小化した風力発電に関する技術開発」</p> <p>平成23年に風車騒音の計測と分析、低減対策の検討を行い、実際に低減対策を施した設備について効果の検証・評価が行われている。合わせて、制御システムや騒音の予測手法を開発が行われている。</p>
	<p>○(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）「次世代風力発電技術研究開発」</p> <p>NEDOでは、風力発電等に係る技術開発が進められているが、我が国特有の外部条件に適した風車設計の研究開発として風車騒音予測手法の開発も実施されている。</p>
② 文献・資料等（国内・海外）	<ul style="list-style-type: none"> ・平成23年度風力発電施設の騒音・低周波音に関する検討調査業務 報告書 ・環境省における騒音・低周波音に係る各種マニュアル、手引書、事例集等 ・15th International Meeting on Low Frequency Noise and Vibration and its Control (22nd – 24th May 2012) ・国際騒音制御工学会議 inter-noise 2012 ・各種文献（騒音制御、日本音響学会誌、等）、ホームページ等

3.2 環境研究総合推進費戦略指定研究開発領域公募課題「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」

3.2.1 目的

我が国では、平成12年頃から風力発電施設が建設され始めてきたが、近年、風力発電施設の近隣住民が騒音被害を訴えるケースが生じてきている。しかし、風車騒音に関してはまだ科学的知見が乏しく、評価基準が整備されるには至っていない状況にある。

そこでこの研究では、低周波数成分を含む風車騒音の影響について調べることを目的に、風車騒音の実測調査と施設周辺の住民を対象とした社会反応調査及びこの種の騒音に対する人間の生理・心理的反応を調べるための聴感評価実験等を平成22

～24年度の3年計画で実施している。これによって、風車騒音に対する行政的対応の指針ならびに環境影響評価のための事前評価手法の確立に資する基礎資料が蓄積された。

3.2.2 内容

この研究では、まず超低周波音領域まで測定可能な計測システムを開発し、それを用いて全国34施設（36箇所）の風力発電施設周辺の居住地域における風車騒音の暴露状況に関する実測調査を実施した。その結果から、風車騒音の実態把握、各種騒音評価量による分析及び風車騒音の特徴である振幅変調音の特性分析などを行った。この実測調査と同時に、風力発電施設周辺におけるインタビュー方式による社会反応調査を実施し、住環境に関する一般的印象や風車騒音によるアノイアンスの程度、風力発電に関する意見（評価）、睡眠影響、自覚的健康状態などについて調べた。これらの実測調査・社会反応調査は、地域特性が類似し、風車騒音の影響を受けていない地域（対照地域）18箇所を選定し、比較のための調査を行い、風車騒音の影響を受けている地域の結果と比較した。

これらの現地調査とは別に、低周波音に重点を置いてヒトの聴感反応を調べるための実験的研究も行った。そのために、まず東京大学生産技術研究所の音響実験室に超低周波音まで再生できる実験装置を作製し、これを用いて①低周波数の純音に対する聴覚閾値、②風車音に含まれる低周波数成分の可聴性及びラウドネスに対する寄与、③振幅変調音の聴感印象、④低周波数成分を含む一般環境騒音のラウドネス評価などの実験を行った。それらの結果から、一般的な風車騒音では可聴・可覚性に対する低周波数成分の寄与は小さいこと、風車騒音では振幅変調音がアノイアンスを高めていること、風車騒音の評価量としては、一般環境騒音の評価として一般的に用いられているA特性音圧レベル（騒音レベル）が適用できること、などが明らかになった（この研究の成果は、平成25年5月に取りまとめられる予定である）。

3.3 環境省地球温暖化対策技術開発事業「騒音を回避・最小化した風力発電に関する技術開発」

3.3.1 目的

騒音を回避・最小化した風力発電に関する技術開発の基礎的検討として、我が国特有の地形や風況を考慮した風車音の特性、発生部位の特定、低減対策等について精査し、その結果を踏まえて、機械に起因する純音成分を 5 dB 低減、翼の空力音を 3 dB 低減することを目的としている。それと同時に、ウインドファームの発生騒音を監視し、発電量との関係を踏まえて適正に運転を制御するシステムを開発することとしている。

3.3.2 内容

(1) 機械音低減技術の開発

1) 音源の特性、音の放射性状等の確認

既設の実稼働風車を対象として、風車近傍の騒音・低周波音、ナセル内騒音、各構成部位の振動を測定し、加振試験等によって騒音、振動の発生状況を把握する。また、コンピュータ数値モデルによる解析結果と比較検討し、風車構造物の振動伝搬、音響放射性状を明らかにすることとしている。

2) 低減技術の開発

吸・遮音材等を用いて増速機、発電機、ファン等を音源とするナセル及びタワーからの放射音の低減対策を検討し、実証試験を行う。また、アクティブ制振などの振動制御技術、制振材料の適用について開発・研究が行われる。

(2) 空力音低減技術の開発

ブレードの後縁形状や前縁表面粗度の変更等によるハード的な低減策と、風車の回転数制御等によるソフト的な低減策の開発が行われ、実証試験においてそれらの効果を確認する。また、ブレードで発生する空力音を予測し、発生音の低減に有効なブレード形状の開発・設計を可能とする手法の開発が行われる。

(3) 風車音自動監視・運転制御技術の開発

ウインドファームからの発生音を低減する方法として、気象条件に応じて風車運転制御による逸失発電量の最小化が可能となるような制御定数データベースを組み込んだ風車音の自動監視・制御システムの開発が行われている。この中には、風車の回転数制御及び最大出力制御と風車発生音の最適な運転制御手法の開発、騒音伝搬予測の検討も含まれている。

3.4 NEDO「次世代風力発電技術研究開発」

3.4.1 目的

風車音の計測と周波数分析、風車音の発生部位の特定及び風車音低減対策の精査を実施し、実風車を用いた低減対策により主要項目ごとに掲げた騒音低減目標の達成を図り、風車音の監視・制御システムや風車音の予測手法を開発することを目的としている。このうち、風車音予測手法の開発としては、個々の風車からの合成音が風力発電施設周辺地域でどのように分布するかを風車音特性、地形及び風況の影響等を考慮して予測するシミュレーション技術開発を行うものである。

3.4.2 内容

風車は、同じ時間であっても周辺地形や風況によって運転状態が異なることから、それぞれの風車から発生する音（音圧、周波数）も異なる。そこで、この事業においては、風車の運転状態を加味した風車合成音予測システムを構築することを目的としている。本システムで実装する機能は、①風車音源モデル、②風車音伝搬モデル、③風車音合成モデル、④同化技術・統計的補正モデルである。

平成24年（2012年）11月に行われた「NEDO 自然エネルギー成果報告シンポジウム2012」における発表によると、研究開発している本モデルにおいて音圧変動の再現が行うことができた等の成果が得られたということであるが、今後、モデルの精度検証及びモデル同化の実証をすべく事業者に協力を得てフィールドでの音計測を実施するとともに、事業者をはじめとする使用者が使えるようにプラットフォームの準備を進めていく段階であるということであった。

3.5 国内における過去の低周波音に関する研究について

3.5.1 概要

我が国では、風車音について、低周波音が問題であるとの声がある。しかし、風車から発生する低周波音の影響については、詳細は、必ずしも明らかになっていないのが実情である。

そこで、ここでは、国内における過去の低周波音に関する研究結果について整理した。このうち、最近の研究については「平成 23 年度報告書」の第 2 章に詳細に記載されていることから、原則として 5 年前（平成 20 年（2008 年））程度を目安とし、それより以前の研究に注目した。

整理にあたっては、まず、我が国における低周波音問題の変遷を記載し、そのあとに項目別の整理を行った。項目としては、計測・伝搬・影響・評価の 4 つを取り上げ、各項目について更に細分した。計測に関しては、①測定方法、②風雑音の影響、防風スクリーンの効果について、伝搬に関しては、①距離減衰、②家屋内外音圧レベル差について、影響に関しては、①低周波音暴露実験室、②聴覚・感覚閾値、③振動感覚閾値、④心理的影響、⑤生理的影響、⑥睡眠影響、⑦物的影響について、また、評価方法に関しては、心理的・生理的影響と物的影響の評価特性等について、それぞれ整理した。

3.5.2 内容

(1) 我が国における低周波音問題の変遷

はじめに、我が国における低周波音問題の変遷について簡単にまとめた。

我が国で低周波音問題が発生したのは昭和 45 年頃のことである。当初は工場・事業場や道路高架橋、ダムの放流等に起因して発生する超低周波音による建具のがたつき等の物的苦情が多くを占めていたが、昭和 55 年頃までに工場事業場で超低周波音の対策が進み、苦情件数は減少した。環境庁では、昭和 51 年から低周波音（当時は低周波空気振動と呼ばれた）の実態調査を開始し、昭和 59 年 12 月にそれまでの調査結果をとりまとめて公表している¹⁾。

その後、平成 5 年頃の新幹線の高速化に伴い、高速列車のトンネル突入時に発生する超低周波音による物的苦情が増えはじめ、環境庁では平成 6 年から低周波音に関する調査を再開した。これについては、トンネル緩衝工の設置等の対策が行われ、苦情は減少した。

環境庁では、調査委員会における検討結果を基に平成 12 年 12 月に「低周波音の測定方法に関するマニュアル」を公表し、全国実態調査を開始した²⁾。

平成 12 年以降、近隣の店舗や民家等に設置された空調室外機や冷凍機、ボイラー等の機器を発生源とする低周波音に係る不快感や不眠等の心身苦情が増加して

いる。苦情発生個所は暗騒音レベルが低く、観測される低周波音は音圧レベルの変動が小さく 20 Hz より高い周波数域に主要成分がある。寄せられた「低周波音苦情」の中には 100 Hz 以上の騒音が原因と思われるものや耳鳴り等の苦情申立者自身の問題が原因である場合も含まれており、対応が難しくなっている。そこで、環境省では、このような苦情に的確に対応するため、平成 16 年 6 月に「低周波音問題対応の手引書」を公表した³⁾。

(2) 低周波音の測定器、測定方法

超低周波音を計測するため、セラミックマイクロホンと振動レベル計を用いた低周波音測定器が開発された⁴⁾。測定周波数範囲は 1~90 Hz (1/3 オクターブバンド中心周波数で 1~80 Hz) である。昭和 51 年から環境庁では低周波空気振動(低周波音)の全国実態調査を開始したが、測定器に「低周波音マイクロホン+振動レベル計」を一部使用していたため、低周波空気振動の測定周波数範囲の上限が 1/3 オクターブバンド中心周波数 80 Hz となっている。

昭和 54 年には騒音計タイプの低周波音レベル計が、平成 11 年には G 特性と周波数分析機能が付いた低周波音レベル計が製品化された。

低周波音の測定方法については、社団法人 日本騒音制御工学会低周波音分科会により、低周波音、超低周波音の定義及び測定方法がとりまとめられた⁵⁾。この提案の考え方が平成 12 年に環境庁でまとめられた「低周波音の測定方法に関するマニュアル」の基になっている。このなかで、低周波音は 1/3 オクターブバンド中心周波数で 1~80 Hz の音波、超低周波音は 1~20 Hz の音波と定義している。評価量は G 特性音圧レベル(超低周波音)と 1/3 オクターブバンド音圧レベルとしている。1/3 オクターブバンド音圧レベルとしたのは、低周波音・低周波数騒音の評価加重特性が国内・海外とも定まっていないことによる。

環境庁により公表された「低周波音の測定方法に関するマニュアル」²⁾には、低周波音及び超低周波音の定義や低周波音を測定する際の測定方法、測定量、注意点などが記載されている。測定マニュアルの中で、1/3 オクターブバンド中心周波数 1~80 Hz の音波を低周波音、そのうち 1~20 Hz の音波を超低周波音と定義している。また、測定量は G 特性音圧レベル(超低周波音)と 1/3 オクターブバンド音圧レベルとしている。

低周波音は低い周波数域まで測定するため、風雑音の影響を受けやすい。大熊は、低周波音測定における防風スクリーンの風雑音低減効果を把握する目的で現場実験を実施した⁶⁾。それによると、直径 20 cm のウレタン製防風スクリーンでおおよそ 10~20 dB で、高さ 1.2 m に設置するよりも地上に設置した方が風による影響が少ないことが分かったとしている。

低周波音測定における風雑音低減の研究も行われており、落合らは、低周波音

測定の際に問題となる風雑音を低減するため、二重ネットと円筒ウレタンを組合せた低周波音の自動監視用防風スクリーンの開発⁷⁾、低周波音の現場測定用に開発した半球二重ネット構造の防風スクリーンに関する報告が行われている⁸⁾。

高橋（盛）らによる、セル数の異なる数種類のウレタン製フィルタ材を用いた円筒形ウインドスクリーンと二重ネットと円筒ウレタンを組合せたウインドスクリーンの風雑音低減効果の測定⁹⁾や高桑らによる信号処理を用いた風雑音低減¹⁰⁾、丹羽らによる風速等の情報を用いた風雑音低減の試み¹¹⁾も行われている。

(3) 低周波音の伝搬

低周波音問題が発生した当初は、苦情が発生して問題となった主な発生源は、工場・事業場や道路高架橋、鉄道トンネル、ダム放流等であったことから、距離減衰の測定は最大でも100～300 m程度までしか行われていない。この程度の範囲では、低周波音についても点音源であれば、-6 dB/倍距離で減衰する傾向がある。これより、遠方への伝搬については、発破や爆発、砲撃等のような大音圧の発生源による騒音・低周波音の測定結果しかない。

岡本らによる砲撃音の伝搬測定結果の報告の音圧ピーク値を用いた距離減衰結果をみると、600 m程度までは概ね-6 dB/倍距離で減衰する傾向がみられるが、それより遠方のデータは地形等による遮蔽の影響か、減衰が大きくなっている¹²⁾。また、井清らによる、現場で収録した発破音データから出した評価加重特性の違いによる距離減衰傾向の違いの比較によると、発生源からの距離が離れるとA特性音圧レベルは、低周波数域を考慮した他の周波数加重特性に比べて減衰が大きくなる傾向を示したとしている¹³⁾。

低周波音の家屋内外音圧レベル差については、環境庁による実態調査の結果がある。低周波音の苦情発生個所の家屋内外で測定された低周波音の音圧レベル差を家屋構造別及び窓構造別に整理した報告によると、コンクリート造は木造家屋や木造モルタル家屋と比較して、より内外音圧レベル差が若干大きい。木造家屋や木造モルタル家屋の内外音圧レベル差については、6.3 Hz以下ではほとんどなく、8 Hz以上ではおよそ3 dB/oct.の傾向を示している³⁾。落合らによる、航空機から発生する低周波音を対象とした家屋内外の音圧レベル差の測定によると、アルミサッシ窓の木造家屋における内外音圧レベル差は6.3 Hz以下ではほとんどなく、8 Hz以上ではおよそ5 dB/oct.の傾向を示したとしている¹⁴⁾。

(4) 低周波音暴露実験室

低周波音の被験者実験を行うための実験室には、聴力測定室のようなボックスタイプと被験者が数人入れるようなある程度の大きさを持つものに大別される。例えば、前者には山梨大学の実験室が、後者には財団法人 小林理学研究所¹⁵⁾、独

立行政法人 産業技術総合研究所や独立行政法人 労働安全衛生総合研究所、東京大学生産技術研究所¹⁶⁾等の実験室がある。後者の方は、実験室の容積が大きくなると、音圧レベルが上がらない、周波数が高くなると場所によって音圧レベルが異なるなどの問題点はあるが、ボックスタイプに比べて閉塞感は少ないという利点がある。

(5) 低周波音の閾値

低周波音の閾値測定は、時田や山田、町田、犬飼をはじめとして、多くの研究者により測定されており、ほとんど同様なデータが得られている。20 Hz 以上については、ISO 226 : 2003 あるいは ISO 389-7 : 2005 に示された最小可聴値の値とほぼ同じであり、20 Hz 未満についてはおよそ -12 dB / oct. の傾向を示している。海外における測定結果と比較してもほぼ同様の傾向を示している。

倉片らは、低周波音・可聴音の閾値をパーセンタイル値で表示した。それによると、閾値のばらつきは $\pm 6 \text{ dB}$ 程度であることが分かった¹⁷⁾。

犬飼らは、被験者実験により、一般成人と高齢者の低周波音による閾値を比較した。その結果、30～50 才代では一般成人との差はごくわずかであるが、60 才代、70 才代では閾値は上昇し、一般成人よりも数 dB 以上大きな音でないと感知できないことが分かったとしている¹⁸⁾。60 才代以上で閾値が上昇する傾向は、戦略研究における実験結果¹⁶⁾と類似している。

山田らは、低周波音の苦情申立者の感覚閾値を測定している。それによると、苦情申立者は健聴者と比べて特に感度が良いという結果は得られなかったとしている。また、低周波音の苦情申立者は、低周波音を知覚すると反応が激しく、感受性が強かったとしている¹⁹⁾。

犬飼らは、一般成人と苦情申立者を対象に聴覚閾値を測定した。それによると、苦情申立者の年齢が 40 才以上であったこともあって、閾値は一般成人より高かったとしている²⁰⁾。

山田らは、聾者の感覚閾値を測定し、健聴者（学生）の閾値と比較した。これによると、聾者の閾値は健聴者の閾値より 30 dB 程度大きかったとしている²¹⁾。

岡本らは、耳栓やイヤーマフを被験者に装着させて超低周波音の閾値を測定している。それによると、耳栓をした場合の閾値は耳栓をしない場合よりも 25 dB 程度高い結果となっている²²⁾。

松本らは、10 Hz、20 Hz 及び 40 Hz の純音による閾値と、同じ周波数より高周波数側をカットした広帯域ノイズの閾値を測定し比較している。同じ周波数で比較すると広帯域ノイズの閾値は純音による閾値よりも大幅に低くなったように見えるが、閾値を決定しているのは 40 Hz 以下の低周波音ではなく、さらに高い周波数域の可聴域の音であることを示唆する結果となっていた²³⁾。

Ryuらは、150 Hz以下の周波数域において、2つあるいはそれ以上（2～6つ）の複合音を提示した場合の閾値を被験者実験により求めた。それによると、2つの周波数成分から成る複合音の場合、両成分の音圧レベルが等しい場合には閾値に変化はみられなかったが、閾値の周波数特性と同等の音圧レベル差を持たせて2音を提示した場合（感覚的に同等な場合）には閾値が低くなる傾向がみられたとしている²⁴⁾。

倉片らは、2つの純音で周波数0.5～8 Hzのビートを発生させ、閾値を測定したところ、最大値ではなくエネルギー平均値で閾値が決まることが分かったとしている²⁵⁾。

(6) 低周波音の振動感覚閾値

高橋（幸）は、低周波音を暴露されたときに生じる振動感覚の閾値を、20～50 Hzの周波数について実験室実験により検討した。その結果、振動感覚閾値は聴覚閾値に比べて5～15 dB高かった。また、周波数が大きくなるにつれて振動感覚閾値も低くなる傾向がみられたが、40 Hzで最も低くなる傾向がみられたとしている²⁶⁾。

(7) 低周波音の心理的影響

中村らは、低周波音（1/3オクターブバンドノイズ）を被験者に提示し、あらかじめ用意された言葉の中から提示音に最も近いと思われる感覚の言葉を記載する実験を行い、40 Hz付近を中心として「圧迫感、振動感」が特に強く感じられることが分かったとしている²⁷⁾。

犬飼らは、低周波音が継続して発生している場合を想定した不快感及び居間・寝室等における許容値を実験的に求めた。その結果、周波数が低くなるとより大きな音でないと同じ不快感に感じないこと、居間・寝室等で低周波音を聞いた場合、低い不快感でも許容できない傾向がみられることが分かったとしている²⁸⁾。

また、犬飼らは、低周波音による「居間の許容値」について、一般成人と高齢者の被験者実験結果を比較した。その結果、20～50才代では差が小さく、60才代、70才代では一般成人との差が顕著になることが分かったとしている¹⁸⁾。

さらに、犬飼らは、一般成人と苦情申立者について閾値及び低周波音による「居間の許容値」を被験者実験により求め、一般成人と苦情申立者の結果を比較した。それによると、苦情申立者は高齢の人が多かったため閾値は一般成人より高かった。一方、許容値については、苦情申立者は音が聴こえただけで許容できない傾向がみられ、一般成人の許容値より低かった²⁹⁾。その後、環境省の「低周波音問題対応の手引書」に関連して、一般成人と苦情申立者に対して聴覚閾値及び居間・寝室の許容値について実験室実験が行われた。実験結果は、上記の実験結果と同様に、苦情申立者の閾値は一般成人より高く、許容値は一般成人より低かった。

許容値の結果を基に、寝室の許容値の10%タイル値を「心身に係る苦情に関する参照値」とした。また、実験では狭帯域ノイズとその複合音に対する許容値についても検討が行われた²⁰⁾。

(8) 低周波音の生理的影響

岡井らは、低周波音による生体反応を調べるための予備的な実験として、超低周波音を暴露して心電図、心拍数、血圧、呼吸数、脳波、まばたき及び胃の運動を調べている。提示レベルは110~120 dB程度、暴露時間は最大で1時間程度である。その中で、周波数20 Hz：音圧レベル120 dB（以下、同じ。）の低周波音暴露時に呼吸波形の脱落、眼振の発症、悪心・嘔吐（風邪等の健康障害のある被験者）等がみられた例があったことも報告している³⁰⁾。

環境庁では、昭和51~59年にかけて低周波音（当時は低周波空気振動と呼ばれた）に関する実態調査や実験を行った。生理的な影響に関しては、心拍数、呼吸数、まばたき（及び眼振）、血圧及び脳波誘発電位を生理的指標とし、ストレス反応については尿中ホルモンを指標として、低周波空気振動暴露実験室において被験者暴露実験を実施した³⁾。その結果は以下のとおりである。

①心拍数、呼吸数及びまばたき数については、例えば、10 Hz：110 dBといったかなり高いレベルの低周波空気振動の暴露によっても、その変化は一定の傾向を示さず、有意な変化はみられなかったとしている。また、暴露中に悪心や嘔吐等の医学的に重要な特殊反応はみられなかったとしている。

②血圧については10 Hz：110 dB、20 Hz：100 dB、40 Hz：90 dBの低周波空気振動を被験者に暴露して実験を行っている。それによると、10 Hz：110 dBの収縮期血圧の変化についてのみ有意な変化が得られたが、それ以外の条件では有意な変化は検出されず、実験で設定した暴露条件下では、低周波空気振動が血圧へ及ぼす明確な影響はみられなかったとしている。

③脳波誘発電位については、100 Hz以上の、高い周波数領域の方が反応ありの割合が高いという結果が得られ、音圧レベルと反応の有無に関しては、明確な関係は得られなかったとしている。

④ストレス反応（尿中ホルモン量）については、定常純音の低周波空気振動では、例えば10 Hz：110 dBといった高いレベルの暴露によっても有意な変化はみられなかったとしている。2~20 Hzの成分を有する変動模擬音の低周波空気振動では、暴露レベル $L_{50} = 75$ 、85及び95 dB、変動幅 $\Delta = 6$ dB及び16 dBの暴露条件のうち、 $L_{50} = 95$ dB、変動幅 $\Delta = 16$ dBで有意な変化がみられたのみで、それ以外の条件では有意な変化は検出されなかったとしている。また、全体的に見て、実験に用いた暴露条件下では、低周波空気振動が副腎機能に対して大きな影響を与えるという結果は得られなかったとしている。

町田は、自身の研究も含めた低周波音の暴露実験による生理影響の研究に関するレビューをとりまとめている。それによると、実験条件では、試験音の周波数は2～100 Hz程度、音圧レベルは感覚閾値を中心に50～120 dB程度、試験音の提示時間は数分から1時間程度である。実験結果では、感覚閾値以上で生理反応が現れるようであるが、一定の傾向を見出すには至っていないとしている³¹⁾。

(9) 低周波音の睡眠影響

環境庁で昭和51～59年にかけて行われた低周波音に関する実態調査、実験の中で、睡眠影響については、低周波空気振動（定常純音）のみを暴露した場合と、建具のがたつき音も併せて暴露した場合について実験を行っている^{31),32)}。

①低周波空気振動のみによる睡眠影響に関する実験結果によると、一般環境中に存在するレベル程度の低周波空気振動の暴露では、睡眠に対する影響は現れなかったが、これより高いレベル（例えば10 Hz：100 dB）の低周波空気振動暴露によって、浅い睡眠に影響が現れ始めるという結果が得られたとしている。

②低周波空気振動に建具のがたつき音を付加した場合の睡眠影響に関する実験では、10 Hz：100 dBの低周波空気振動、騒音レベル30 dB、50 dBのがたつき音及びこれらを複合した暴露音を用いて睡眠実験を行っている。実験結果によると、がたつき音と低周波空気振動と組み合わせた場合には、どちらか睡眠妨害の大きい方の影響のみが現れる傾向がみられ、複合暴露によって妨害が増大するという所見は得られなかったとしている。

(10) 低周波音の物的影響

環境庁で昭和51～59年にかけて行われた低周波音に関する実態調査、実験の中で、建具のがたつき等の物的影響についても実験を行っている。実験では、15種類の建具を対象に各建具の揺れやすい3つの周波数を選択し、定常的な低周波音（純音）を用いて、低周波音による建具のがたつき始める音圧レベルを求めている。これによると、揺れやすい建具では、低周波音の音圧レベルが5 Hz：70 dB、20 Hz：80 dB程度からカタカタと音を発生してがたつき始めることが分かったとしている³³⁾。

落合らは、低周波音による建具のがたつき始める音圧レベルを定常的な低周波音（純音）を用いて実験的に求めた。実験した周波数範囲は2～50 Hz、対象とした建具は63種類である。併せて、建具のがたつきに寄与する要因についても実験的に検討した。それによると、建具のがたつき始める音圧レベルは建具の大きさ・重さ・種類・取付け条件等によって異なり、30～40 dB程度のばらつきがあることが分かった。また、環境庁による調査で得られた「低周波音による建具のがたつき閾値（昭和52年）」（以下、「建具のがたつき閾値」という。）は、周波数別に得

られた建具のがたつき始める音圧レベルの「平均-標準偏差」に相当するとしている³⁴⁾。

国松らは、低周波音による建具のがたつきについて、個別要素法 (DEM) を用いた低周波音正弦波入力に対する建具の応答解析を行った。それによると、建具の接触回数を基に、解析結果が「建具のがたつき閾値」³³⁾と傾向的に概ね一致するとしている³⁵⁾。

一ノ瀬らは、低周波音による窓振動の共振特性と衝撃波形 (単発波形) の低周波音による建具のがたつき始める音圧レベルを測定するのに適した計測器の時定数について検討した。その結果、窓の振動は、1/6 oct.程度の幅の共振現象であること、低周波音レベル計の時定数は 0.63 秒又は 1.0 秒が適していることが分かったとしている³⁶⁾。

落合らは、道路高架橋周辺で収録した実音を用いて建具のがたつき実験を行い、定常純音による建具のがたつき閾値と比較したところ、実音の最大値と概ね対応があることが分かった。また、バースト音と定常音の比較では、バースト音の継続時間が 1 秒以上では、ほぼ定常音のがたつき閾値と変わらないことが分かったとしている³⁷⁾。

(11) 低周波音の評価方法

低周波音の評価方法として、評価重み特性によるものと、評価曲線と周波数分析結果とを比較するものがある。

○低周波音による心理的・生理的反応に関する評価方法

中村らは、低周波音の優先感覚実験結果²⁷⁾により導かれた、低周波音特有の感覚「圧迫感・振動感」に基づく低周波音の評価加重特性”LSL”を提案した。LSL 特性は 2~500 Hz で提案されており、50 Hz を基準 (相対レスポンス 0 dB) として低周波数側及び高周波数側とも急な傾斜な特性となっている³⁸⁾。このほか、測定事例等では、中村らによる優先感覚実験結果の、「圧迫感・振動感」や「気になる-気にならない」の評価曲線と低周波音の周波数分析結果を比較している例も見受けられる。

犬飼らは、低周波音が可聴音と複合した場合の心理反応との適合性を考慮した評価加重特性”LF”を提案した。LF 特性は 5~500Hz で提案されているが、100 Hz 以下では A 特性に比べて傾斜が緩やかになっている³⁹⁾。犬飼らは、低周波音 (純音) と 1/3 オクターブバンドノイズを用いた心理実験を行い、低周波音の不快感評価のための周波数荷重特性を推定し、その信頼性等について検討している。それによると低周波音とノイズの複合音では A 特性よりも LF 特性の方が対応よく、不快感評価に使えることが示唆されたとしている⁴⁰⁾。

中野は、2～20 Hz について ISO 提案の G1 特性（後の G 特性）をベースにした超低周波音の感覚閾値に基づく A1 特性、A 特性のうち 20～90 Hz を抜き出した A2 特性を提案している⁴¹⁾。

環境省では、地方公共団体職員を対象として、室外機やボイラー等の固定発生源から低周波音に係る苦情が発生した際の対応方法として「低周波音問題対応の手引書」をとりまとめている。その中で、発生源の稼働状況と苦情申立者側の物理量の変化や苦情申立者の反応との間に対応関係が認められた場合に、苦情の原因が低周波音か否かを判断するための目安となる値として「参照値」が示された⁵⁾。このうち、低周波音による不快感等の心理的・生理的苦情に関しては、「低周波音による心身に係る苦情に関する参照値」が示されている。なお、犬飼⁴²⁾や町田⁴³⁾の文献に、この参照値の根拠となったデータ等の解説が記載されている。

松井は、基底膜の変位と不動毛での機械的電気変換メカニズム（順応を含む）に基づくことにより、100 Hz 以下の臨界帯域内において、周波数に依存せずに純低周波音の知覚を評価できる可能性のある指標を見出したとしている⁴⁴⁾。しかし、前出の Ryu らによる実験²⁴⁾によれば、複合音の周波数特性（周波数的な音圧レベル）により影響が異なるという結果が得られており、今後更なる検討・考察が望まれる。

○低周波音による物的反応に関する評価方法

中村らは、LSL 特性に加えて、建具のがたつき実験結果に基づく Lx 特性も提案している。Lx 特性は 5～10 Hz が平坦特性で、10 Hz より高い周波数では -12 dB / oct. の傾斜となっている⁴⁵⁾。

中野も、A1 特性、A2 特性に加えて、2～20 Hz の周波数範囲について -6 dB / oct. の傾斜を持つ建具のがたつきを考慮した B1 特性を提案している⁴¹⁾。

環境省より公表された「低周波音問題対応の手引書」では、建具のがたつき等の物的苦情を対象とした「低周波音による物的苦情に関する参照値」も示されている。なお、落合⁴⁶⁾の文献に、参照値の根拠となったデータ等の解説が記載されている。

測定事例等では、環境庁による「建具のがたつき閾値」³³⁾と低周波音の周波数分析結果を比較している例も見受けられる。

井上は、超低周波音に係る苦情が発生した場合の診断、調査、防止対策方法及び目標値について述べ、既存の事例を基に対策の目標値として「建具のがたつき閾値」より 10 dB 低い値を提案している⁴⁷⁾。

3.6 その他の文献・資料等について

国内外の騒音関連学会において、平成 24 年度に発表された論文のうち風車騒音に関する深いものを調査した。

3.6.1 15th International Meeting on Low Frequency Noise and Vibration and its Control (22nd - 24th May 2012)

この会議は低周波数の騒音・振動に関する国際会議で、隔年に開催されており、今回は 15 回目である。この会議で発表された論文のうち、風車騒音に関する論文の概要は以下のとおりである。

- ① Brian Howe, Nick McCabe, Sean Ferguson : Infrasonic measurements, pre- and post-commissioning, Ontario wind farm.

概要：カナダ・オンタリオ州の風力発電施設を対象として行われた超低周波音領域の音圧レベル測定について報告している。地中にウインドスクリーンを装着したマイクロホンを設置する方法による長期にわたる屋外測定と住宅（2 軒）の内部における有人測定である。内外で類似した結果が得られたとしている。

- ② Jørgen Jakobsen : Danish regulation of low frequency noise from wind turbines.

概要：デンマークの風車騒音に関する法令（2012 年 1 月より施行）では、低周波音に関する新しい内容が追加された。この新たな規制では、室内における低周波音の 10~160 Hz（1/3 オクターブバンド）の周波数範囲における A 特性音圧レベルが 20 dB 以下と規定された。

- ③ Mahtab Kamali, Siva Sivothythaman and Stephen McColl : Analysis of Models for Audible and Low Frequency Noise Prediction for Wind Turbine Case Studies.

概要：再生可能エネルギー利用としての風力発電の最近の傾向について概観し、風車騒音の低周波音問題についてデンマークにおける問題を概説している。

- ④ Christian Sejer Pedersen, Henrik Møller, Steffen Pedersen : Low-frequency noise from large wind turbines – additional data and assessment of new Danish regulations.

概要：最近の大型風車では低周波数成分が大きくなっており、デンマークの新しい騒音規制では低周波騒音の規制が付け加えられた。この報告では 3.6 MW までの風車のデータが追加された。その中で、250 Hz 以下の帯域に主成分

が示された。したがって低周波数成分が重要であることは間違いない。デンマークの規制では計算に基づいて室内の音圧レベルを予測することになっているが、それでは過小評価になるおそれがある。

⑤ Werner Richarz, Harrison Richarz : Can Infrasonic Lift Noise from Wind Turbine Rotors Contribute to Audible Sound?

概要：風車騒音の自己相関関数から風車のブレードの通過周波数で周期的なパルスが生じていることが分かる。その振幅から風車騒音の低周波数成分のパワーが分かるが、それは 50 %あるいはそれ以下である。自己相関関数の形は最初の数個の倍音成分で決まり、それより高い倍音成分は位相がランダムになるため自己相関関数の形には大きく影響しない。低周波数のパルスは実際には非可聴で、位相がランダムになった成分が振幅変調音となって聞こえている。

⑥ Thomas Sørensen : Experiences with the New Danish Rules for the Calculation of Low Frequency Noise from Wind Turbines.

概要：2012年2月に改正されたデンマークの風車騒音の規制では、風車からの低周波騒音に関する条件が付け加えられた。それには風車からの発生騒音の低周波数成分の測定方法と伝搬計算モデルが含まれている。しかし、これらを実際に適用する際には多くの問題があり、それらについて実例を基に述べている。

⑦ Bruce Walker : Time domain analysis of low frequency wind turbine noise.

概要：超低周波音及び低周波音の位相も正確に把握できるフィールド測定に適した測定システムを開発した。このシステムでは、複数の対を組んで相互相関関数を求めることによって音源位置の推定も可能である。本報告では、このシステムの進歩及び実際の適用例を示す。それと同時に聴覚閾値とアノイアンスの判定をするための低周波数までの再生が可能なシステムを組み立てた。

⑧ Hiroo Yano, Tatsuya Ohta, Hideki Tachibana : Development of measurement system for wind turbine noise.

概要：平成22年度から開始された風車騒音に関する環境省戦略指定研究に関する発表で、風車騒音の測定用の広帯域音圧レベル計の試作、風雑音を防ぐためのウインドスクリーンの開発を行い、その性能を調べるために実施した実験的検討の結果を述べている。

- ⑨ Hideki Tachibana, Shinichi Sakamoto, Sakae Yokoyama, Hiroo Yano : Audibility of low frequency sounds – Part 1: Experiment on hearing thresholds for pure tones.

概要：平成 22 年度から開始された風車騒音に関する環境省戦略指定研究に関する発表で、低周波数の音に対するヒトの可聴性を調べるための実験的研究として、実験設備の作成、それを用いた基礎的実験として行われた 20～200 Hz までの純音に対する聴覚閾値の実験結果が報告されている。

- ⑩ Sakae Yokoyama, Shinichi Sakamoto, Hiroo Yano, Hideki Tachibana : Audibility of low frequency sounds – Part 2: Audibility of low frequency components in wind turbine noises.

概要：平成 22 年度から開始された風車騒音に関する環境省戦略指定研究に関する発表で、現場で測定された風車騒音とモデル音を用いて風車騒音の低域成分の可聴性について M 系列相関の手法を適用して行った聴感実験の結果を報告している。この実験では、一般の風車騒音に含まれている超低周波音領域の成分は非可聴であることを確認している。

3.6.2 国際騒音制御工学会議 inter-noise 2012

この会議は騒音・振動制御を主な内容とする国際会議で、世界各地で毎年開催されている。この会議で発表された論文のうち、風車騒音に関する論文の概要は以下のとおりである。

- ① Hideki Tachibana, Hiroo Yano, Shinichi Sakamoto, Shinichi Sueoka : Synthetic research program on wind turbine noise in Japan.

概要：平成 22 年度から開始された風車騒音に関する環境省戦略指定研究に関する発表で、この研究プロジェクトで行われている全国規模の実測調査と社会反応調査、低周波音の聴感印象に関する実験室実験の概要が報告された。

- ② Valentin Buzduga, Sarah Taubitz : On the Characterization of the Secondary Windscreens Used in Wind Turbine Noise Measurements.

概要：風車騒音の音響パワーレベル測定に関する国際規格 IEC61400-11 に関して、二次防風スクリーンの性能測定について技術的な検討結果を述べている。

- ③ Jesper Gomes : Noise Source Identification with Blade Tracking on a Wind Turbine.

概説：風車騒音の発生メカニズムの解析のためにアレーマイクロフォンを用いた Beam Forming の手法が有効であるとし、その原理と応用、効用について述べている。

- ④ Charlie Pearson, Will Graham, Tamás Bertényi : Phased array measurement and simulation of vertical axis wind turbine noise.

概説：垂直軸風車の騒音発生メカニズムについて、風車の翼に対する乱流の作用、翼の上で騒音が発生する条件などシミュレーションによる検討結果について述べている。

- ⑤ Conny Larsson, Olof Öhlund : Variations of sound from wind turbines during different weather conditions.

概要：風車騒音の伝搬に影響を与える気象条件及び地域条件について検討するために、スウェーデンの森林地域、湾（水上）及び複合的な地表条件の地域において、1～2年間にわたる長期観測を行った結果が報告されている。

- ⑥ Lars S. Søndergaard : Noise from wind turbines under non-standard conditions.

概要：風車騒音の発生メカニズムに関して、翼に対する風の入射条件について二つの方法による実験的研究の結果を述べている。

- ⑦ Peter McPhee, Amy Barad, Tyler Studds, Leigh Cameron, Martha Broad, Nils Bolgen : Development of a pre-construction acoustic methodology for wind energy projects.

概要：風車騒音の環境影響評価の手法について、The Massachusetts Clean Energy Center (MassCEC)が開発した騒音予測、実測、データ分析などの方法の概要を報告している。

- ⑧ Peter H. Guldberg : Analysis of background low frequency sound levels at four wind energy sites.

概要：風力発電施設建設前の暗騒音について、風車の稼働条件の風速以上の条件における低周波数（12.5～500 Hz）のレベルを4カ所で測定した結果について報告している。

- ⑨ Lawrence Cheung, Giridhar Jothiprasad, Hao Shen : Large eddy simulation of airfoil self-noise.

概要：風車の翼近傍における騒音の発生メカニズムについて Large Eddy Simulations (LES)による解析結果と実測結果の比較について述べている。

- ⑩ Seunghoon Lee, Soogab Lee : Wind turbine noise reduction by means of serrated trailing edges.

概要：風車の流体力学的騒音を低減するために、翼端を鋸歯状にすることによる効果を実験的に調べた結果、5 dBA の低減効果が得られたとしている。

- ⑪ Takashi Ohmura, Masamitsu Nakanishi, Nozomi Sakurai, Akira Shimada, Atsushi Kawabara : Investigation, prediction and assessment of wind turbine noise and infrasound in Japan.

概要：日本における風車騒音の現状とそれに対する取り組み方に関する環境省の方針、特に 2012 年から施行される環境影響評価法に風車騒音が含まれることなどを紹介している。

- ⑫ Martin T. Schiff, Shannon R. Magari, Clinton E. Smith, Annette C. Rohr : Evaluation of wind turbine-related noise in western New York State.

概要：米国ニューヨーク州における風力発電施設周辺の 5 カ所と風車騒音がない対照地域 2 カ所で気象条件と騒音の測定を行い、社会反応調査との対応について調べた結果を報告している。

- ⑬ David S. Michaud, Steven E. Keith, Katya Feder, Tara Bower : Health Impacts and Exposure to Wind Turbine Noise: Research Design and Noise Exposure Assessment.

概要：カナダでも風力発電が増加しており、事業者は 2025 年には総発電量の 25 % を占める見込みを示している。しかし、風車騒音による健康影響が懸念されている。この問題に対する Health Canada と Statistics Canada の共同研究の方針が述べられている。

- ⑭ Francisco de Assis Leandro Filho : Evaluation of the structural response of typical wind turbines by stochastic methods.

概要：風車の構造力学、発電量などを確率統計学的に考察し、解析ソフト ANSYS を用いて検討した結果を述べている。

- ⑮ Malgorzata Pawlaczyk-Luszczynska, Adam Dudarewicz, Kamil Zaborowski, Malgorzata Zamojska, Malgorzata Waszkowska, Mariola Sliwinska-Kowalska : Annoyance related to noise from wind turbines in subjective assessment of people living in their vicinity.

概要：風力発電施設周辺における騒音レベルの計算値とインタビュー方式による Golberg General Health Questionnaire GHQ-12 を含む住民反応調査の結果の

対応を調べており、騒音レベルが大きくなると反応が高くなること、また視覚的な影響もアノイアンスに関連することなどを述べている。

- ⑩ Stephen E. Ambrose, Robert W. Rand, Carmen M. E. Krogh : Falmouth, Massachusetts wind turbine infrasound and low frequency noise measurements.

概要：マサチューセッツ州 Falmouth に建設された風力発電周辺で予想外の騒音及び健康影響が発生した。その周辺における騒音測定と健康影響について調査した結果、風速、風車の騒音発生出力と健康影響の症状の間に高い相関があったとしている。

- ⑪ Alec N. Salt, Jeffery T. Lichtenhan : Perception-based protection from low-frequency sounds may not be enough

概要：哺乳動物の聴覚は低周波数の音に対しては内毛細胞(IHC)より外毛細胞(OHC)の方が感度が高く、知覚できないようなレベルの低周波音にも反応するとの前提で、話声の領域に含まれるような高音域成分の有無によって低周波数の音に対する耳の感度が変化することを実験データによって示し、聴覚的に知覚されないような低周波数の音も耳は感知し、それによって人間に影響を与えている可能性があるとしている。

その他に、風車騒音によるアノイアンスに関する以下の論文が発表された。

- ⑫ Carmen ME Krogh, Roy D Jeffery, Jeff Aramini, Brett Horner : Annoyance can represent a serious degradation of health: wind turbine noise a case study.
- ⑬ Carmen ME Krogh, Roy D Jeffery, Jeff Aramini, Brett Horner : Wind turbine noise perception, pathways and effects: a case study.
- ⑭ Carmen ME Krogh, Roy D Jeffery, Jeff Aramini, Brett Horner : Wind turbines can harm humans: a case study.

3.6.3 日本騒音制御工学会 2012 年春季研究発表会講演論文集

日本騒音制御工学会は、「騒音・振動及びその制御に関する学術・技術の発展と普及を図り、もって生活環境の保全と向上に寄与すること」を目的としており、毎年、春季と秋季に研究発表会が開催されている。2012 年春季研究発表会で発表された論文のうち、風車騒音に関する論文の概要は以下のとおりである。

- ① 坂本慎一、横山栄、矢野博夫、橘秀樹：低周波性騒音に関わる聴感実験 — その 1. 純音閾値.

概要：平成 22 年度から開始された風車騒音に関する環境省戦略指定研究に関する発表で、低周波音の聴感特性を調べるための実験装置を作製し、その基礎的な応用として 10~200 Hz の純音に対するヒトの聴覚閾値を調べた結果を報告している。

- ② 横山栄、坂本慎一、矢野博夫、橘秀樹：低周波性騒音に関する聴感実験 — その 2. 風車音の可聴性.

概要：平成 22 年度から開始された風車騒音に関する環境省戦略指定研究に関する発表で、風車騒音に対するヒトの聴覚特性を調べる実験として、実際に収録した風車騒音を用いてその低周波数成分の可聴性について M 系列相関法を適用して調べた結果を報告している。

- ③ 田原靖彦、角田雅樹：超低周波音が脳波に及ぼす影響-若年層被験者を対象とした予備検討.

概要：超低周波音に暴露された時のヒトの脳波の変化を調べる実験として、スピーカ音源と脳波計を用いて、 α 波、 γ 波の発生などを予備的に調べた結果を報告している。

- ④ 渡辺敏夫：低周波音のマスクング特性について.

概要：低周波数領域のバンドノイズによるマスクング効果について、20 Hz、40 Hz のバンドノイズを用いてマスクング効果を調べた結果、3 つのグループに分かれることを報告している。

- ⑤ 松田礼、町田信夫：作業時における低周波音の影響.

概要：定常性低周波音と変動性低周波音に着目し、低周波音用チャンバを用いてそれらの感覚閾値を測定し、それ以上の場合の作業パフォーマンスに対する影響を調べている。

- ⑥ 落合博明、井上保雄、今泉博之、塩田正純、山田伸志：風車音の家屋内外音圧レベル差の測定事例。

概要：風車騒音問題では住宅室内の音圧が重要である。この論文では、環境省の委託で行われた実測調査の結果を窓構造別に整理した結果を報告している。

- ⑦ 久保田富夫、福田敦史、福原安里、野呂啓史、福原博篤：風力発電設備の騒音・低周波音計測の一手法とその測定事例。

概要：風車の発生騒音の測定に関して、風雑音の防止の方法、測定点の配置などについて、実験的に検討した結果を報告している。

3.6.4 日本騒音制御工学会 2012 年秋季研究発表会講演論文集

日本騒音制御工学会の 2012 年秋季研究発表会で発表された論文のうち、風車騒音に関する論文の概要は以下のとおりである。

- ① 小林知尋、福島昭則、岩瀬昭雄、橘秀樹：風車騒音に含まれる Swish 音の物理特性について。

概要：平成 22 年度から開始された風車騒音に関する環境省戦略指定研究に関する発表で、風車騒音に含まれる規則的な脈動音（swish 音）の物理的評価方法として、風車騒音の騒音レベルの Fast レベル記録と Slow レベル記録の差に着目し、その 90 %レンジの上端値と下端値の差を変動の大きさを示す指標とすることを提案している。

- ② 福島昭則、小林知尋、矢野博夫、橘秀樹：風力発電施設からの騒音・低周波音の測定における風の影響について。

概要：平成 22 年度から開始された風車騒音に関する環境省戦略指定研究に関する発表で、風車騒音の測定で大きな問題であるマイクロホンに対する風の影響について、単機の風力発電施設の周辺地域において同時測定した低周波音の相互相関に着目し、風雑音の影響を検討している。また風雑音による超低周波音域におけるレベル増加の傾向についても調べている。

3.6.5 日本音響学会 2012 年秋季研究発表会講演論文集

日本音響学会は、「音」に関するあらゆる分野の研究者や技術者が多数参加しており、毎年、春季と秋季に研究発表会が開催されている。2012 年秋季研究発表会で発表された論文のうち、風車騒音に関する論文の概要は以下のとおりである。

- ① 丸山勇祐、藤橋克己、島村亜紀子：風が建物屋内での音響計測にあたえる影響について その 2. 周波数特性.

概要：室内における音圧測定に対する外部の風の影響について継続的に検討を行い、風によって室内で生じる音圧は風速の 2 乗に比例することと、風の乱流強度に応じて大きくなることを見出しているが、この報告ではさらに音圧の周波数特性と風の乱れの周波数特性との関係について調べている。

- ② 土肥哲也、中右介：家屋内における低周波音の音圧レベル分布－低周波音・衝撃音発生装置を用いたフィールド試験－.

概要：低周波数成分を含む外部騒音の建物内への影響に関して、低周波数成分を含んだ定常音・衝撃音の両音源と模擬家屋を用いたフィールド実験を行い、家屋内音圧レベルの分布と内外レベル差に対する衝撃性の影響を実験的に調べた結果を報告している。

- ③ 横山栄、坂本慎一、矢野博夫、橘秀樹：風車音の可聴性に関する聴感実験.

概要：平成 22 年度から開始された風車騒音に関する環境省戦略指定研究に関する発表で、実際に録音した風車騒音とそのモデル音をローパスフィルタリングによって高音成分を段階的にカットした時の可聴性を M 系列関連の手法を用いて実験的に調べた結果、一般的な風車騒音に含まれる超低周波音及び可聴周波数領域の低周波数成分は非可聴であることを明らかにしている。

3.6.6 日本音響学会 2013 年春季研究発表会講演論文集

日本音響学会の 2013 年春季研究発表会で発表された論文のうち、風車騒音に関する論文の概要は以下のとおりである。

- ① 岡田恭明、吉久光一、東一樹、西村直人：風力発電施設から発生する騒音の測定事例－音響放射特性に関する基礎検討－.

概要：風力発電施設周辺の多くの点で実測調査を行った結果に基づき、ナセル上部の風速や風車の発電出力と風車の音響放射特性の関連、風車騒音の指向特性、距離減衰特性などを検討した結果を示している。

- ② 横山栄、坂本慎一、矢野博夫、橘秀樹：風車音に含まれる低周波数成分に関する聴感閾値実験.

概要：平成 22 年度から開始された風車騒音に関する環境省戦略指定研究に関する発表で、風力発電施設から放射される低周波数成分の可聴性について実験室における聴感実験の結果について報告している。この実験では、ローパスフィルタリングによって低周波数に限定した風車音の可聴閾値を調べた結果、1/3 オクターブバンドスペクトルが純音閾値曲線に下から接するあたりで「聞こえる/耳元で何かを感じる」という感覚が生じ始めることを明らかにしている。

■参考文献（第3章）

- 1) 環境庁大気保全局：低周波音空気振動調査報告書，昭和59年12月。(1984)
- 2) 環境庁大気保全局：低周波音の測定方法に関するマニュアル，平成12年10月。(2000)
- 3) 環境省環境管理局大気生活環境室：低周波音問題対応の手引書，平成16年6月。(2004)
- 4) 大熊恒靖：超低周波音の測定方法．音響技術，Vol.6, No.1, 9-16. (1977)
- 5) 日本騒音制御工学会低周波音分科会：低周波音測定方法の提案について．騒音制御，Vol.16, No.4, 198-203. (1992)
- 6) 大熊恒靖：低周波音測定器．騒音制御，Vol.4, No.4, 219-222. (1980)
- 7) 落合博明，牧野康一，山田一郎，月岡秀文，黒澤高弘，福島健二，横田明則：低周波騒音計測用防風スクリーンの開発．騒音制御，Vol.30, No.5, 408-417. (2006)
- 8) 落合博明，牧野康一，福島健二：低周波音の現場測定用防風スクリーンの検討．日本騒音制御工学会研究発表会講演論文集，233-236. (2008)
- 9) 高橋保盛，今泉博之，神宮司元治，国松直：二種類の屋外型スクリーンによる風雑音低減効果の比較．日本騒音制御工学会研究発表会講演論文集，7-10. (2002)
- 10) 高桑誠明，小谷章二，太田光雄：風雑音混入下における航空機騒音の一簡易推定法．日本騒音制御工学会技術発表会講演論文集，265-268. (2000)
- 11) 丹羽尚史，志村正幸，青木淳，立石賢吾，野村卓史，長谷部寛，山本稔，長船寿一，中藪信一，川崎康彦，伊藤芳樹，林孝明，岩井恒敬：低周波音測定における風ノイズの影響に関するフィールド予測式の検討．日本騒音制御工学会技術発表会講演論文集，157-160. (2011)
- 12) 岡本圭弘，月岡秀文，新居一重，竹中雄一，中村昭：大音圧衝撃音響の伝搬性状について．日本音響学会騒音研究会資料，N-92-48. (1992)
- 13) 井清武弘，国松直，今泉博之：爆発音の単発騒音暴露レベル等の距離減衰．日本騒音制御工学会技術発表会講演論文集，33-36. (1992)
- 14) 落合博明，牧野康一：低周波音の家屋内外レベル差の測定事例．日本騒音制御工学会研究発表会講演論文集，305-308, (2004)
- 15) 時田保夫，中村俊一，織田厚：低周波音域暴露実験室の構造と音響特性．日本音響学会誌，Vol.40, No.10, 701-706. (1984)
- 16) 坂本慎一，横山栄，矢野博夫，橘秀樹：低周波性騒音に関する聴感実験 - その1. 純音閾値．日本騒音制御工学会研究発表会講演論文集，7-10, (2012)
- 17) Kurakata K., Mizunami T.: Statistical distribution of normal hearing thresholds for low frequency tones. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, Vol.27, No.2, 97-104. (2008)

- 18) 犬飼幸男, 多屋秀人 : 低周波音の許容値における個人差及び年代差とその推定. 日本騒音制御工学会研究発表会講演論文集, 229-232. (2003)
- 19) 山田伸志, 北村敏也 : 騒音・低周波音に対する苦情者の心理状況の実態と心理分析. 日本騒音制御工学会技術発表会講演論文集, 279-282. (2000)
- 20) 犬飼幸雄, 多屋秀人, 山田伸志, 落合博明, 時田保夫 : 低周波音の聴覚閾値及び許容値に関する心理物理実験—心身に係る苦情に関する参照値の基礎データ. 騒音制御, Vol.30, No.1, 61-70. (2006)
- 21) 山田伸志, 渡辺敏夫, 小坂敏文 : 低周波音の感覚受容器. 騒音制御, Vol.7, No.5, 36-38. (1983)
- 22) 岡本健, 吉田昭男, 井上仁郎, 田丸浩志 : 超低周波音の人体に及ぼす影響. J.UOEH (産業医科大学雑誌) 特集号, 135-148. (1986)
- 23) Matsumoto Y., Takahashi Y., Maeda S., Yamaguchi H., Yamada K., Subedi J. K. : An investigation of the perception thresholds of band-limited low frequency noises: influence of bandwidth. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, Vol.22, 17-25. (2003)
- 24) Ryu J., Sato H., Kurakata K., Inukai Y. : Hearing thresholds for low-frequency complex tones of less than 150 Hz. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, Vol.30, No.1, 21-30. (2011)
- 25) Kurakata K., Mizunami T., Sato H. : Perceptual Effects of Low-Frequency Beating Tones. Proceedings of Inter-Noise. (2008)
- 26) 高橋幸雄 : 低周波音によって生じる振動感覚の閾値について. 日本騒音制御工学会研究発表会講演論文集, 185-188. (2007)
- 27) 中村俊一, 時田保夫, 織田厚 : 低周波音に対する感覚と評価に関する基礎研究. 昭和 55 年度文部省科学研究費「環境科学」特別研究, 1-20. (1981)
- 28) 犬飼幸男, 中村則雄, 多屋秀人 : 低周波音の等不快度曲線の推定と生活場面に応じた許容限界音圧レベル. 日本音響学会講演論文集, 2001 (1): 785-786. (2001)
- 29) 犬飼幸男, 多屋秀人, 山田伸志 : 騒音被害者における低周波音の感覚閾値及び許容音圧レベルについて. 日本騒音制御工学会研究発表会講演論文集, 23-26. (2002)
- 30) 岡井治, 斉藤正男, 西脇仁一, 森卓支 : 低周波音による一時間の生体反応. 日本騒音制御工学会技術発表会講演論文集, 225-227. (1979)
- 31) 町田信夫 : 低周波音暴露による生理反応について. 日本騒音制御工学会・技術報告会技術レポート, 第 7 号, 47-58. (1987)
- 32) 山崎和秀, 時田保夫 : 低周波音領域音波の睡眠に及ぼす影響. 日本音響学会秋季研究発表会講演論文集, 423-424. (1982)
- 33) 環境庁 : 昭和 52 年度低周波空気振動等実態調査 (低周波空気振動の家屋等に及ぼす影響の研究) 報告書. (1978)

- 34) 落合博明, 田矢晃一 : 低周波音による建具のがたつき始める音圧レベルについて. 騒音制御, Vol.26, No.2, 120-128. (2002)
- 35) 国松直, 井清武弘 : DEMによる低周波音入力に対する建具応答解析-純音入力に対するふすまの応答-. 騒音制御, Vol.17, No.6, 36-43. (1993)
- 36) 一ノ瀬和宏, 神谷治雄, 山田伸志 : 低周波音による窓のガタツキと振動特性. 日本音響学会講演論文集, 495~496. (1983)
- 37) 落合博明, 山田伸志 : 道路高架橋から発生する変動性低周波音による建具のがたつきについて. 騒音制御, Vol.31, No.1, 68-75. (2007)
- 38) 中村俊一, 時田保夫 : 低周波音公害評価のための測定器周波数加重特性の検討. 日本音響学会講演論文集, 131-132. (1981)
- 39) 犬飼幸男 : 低周波音評価の周波数加重特性について. 日本騒音制御工学会技術レポート, No.7, 19-31. (1987)
- 40) 犬飼幸男, 中村則雄 : 低周波音の不快感評価のための周波数荷重特性の推定. 日本騒音制御工学会研究発表会講演論文集, 195-198. (1998)
- 41) 中野有朋 : 低周波空気振動の測定・評価方法と評価値についての提案. 騒音制御, Vol.11, No.2, 103-105. (1987)
- 42) 犬飼幸男 : 低周波音の心身に係る苦情に関する参照値の科学的知見 I. 騒音制御, Vol.30, No.1, 29-35. (2006)
- 43) 町田信夫 : 低周波音の心身に係る苦情に関する参照値の科学的知見 II -参照値の基本的な考え方と諸外国の低周波音規制の動向-. 騒音制御, Vol.30, No.1, 36-42. (2006)
- 44) 松井利仁 : 複合低周波音の評価指標に関する考察. 日本騒音制御工学会秋季研究発表会講演論文集, 229-232. (2010)
- 45) 中村俊一, 時田保夫, 織田厚 : 低周波音公害評価に用いる計測器特性について. 日本騒音制御工学会技術発表会講演論文集, 225-228. (1981)
- 46) 落合博明 : 低周波音の物的苦情に関する参照値の科学的知見. 騒音制御, Vol.30, No.1, 43-47. (2006)
- 47) 井上保雄 : 低周波音の実態と対策. 騒音制御, Vol.23, No.5, 311-318. (1999)