

## 第2章 風車騒音に係る最新知見

### 1 最近の文献

風力発電所からの風車騒音に係る文献等については、巻頭に示された報告等に示されている。ここでは、その後に公表された資料として、国内外の最新の研究論文や調査報告書、学術書籍等を調査した。これにより、風車騒音が人に及ぼす影響を含めた新たな知見の収集、風車騒音の実態に関する再確認を行った。

以下において、文献等ごとに、その内容を整理した。

### 2 アメリカ・カナダ風力エネルギー協会報告書

(Wind Turbine Sound and Health Effects An Expert Panel Review)

2009年に米国とカナダの風力エネルギー協会は、医師、聴覚学者、音響専門家で構成される学際的な委員会を設置し、風力発電所への曝露に起因して起こり得る有害な健康影響に関する既往の科学的文献を検討するよう依頼した。同年12月に当該委員会は、その検討結果を取りまとめた報告書を提出した。

この専門家委員会では、主に風力発電所に直接関係する文献の見直しとそれの稼働に伴って起こり得る環境への曝露の再検討が実施された。「wind turbine and health effects」というキーワードを調べた文献を調査するとともに、「vibroacoustic disease」というキーワードについても文献を収集して検討を行っている。そこでは、起こり得る環境への曝露に関する検討として、低周波音(low-frequency sound)、超低周波音(infrasound)ならびに振動に着目している。

この大規模な文献調査と分析の結果を要約し、以下の主要な質問(課題)について見解を取りまとめている。

- ・風力発電設備の稼働がどのように人の聴覚の応答へ影響するのか？
- ・我々は、どのように音のラウドネスや周波数を決め、それがどのように耳へ影響するのか？
- ・風力発電設備は、どのように音を生成するのか？
- ・音は、どのように測定され、評価されるのか？
- ・振動とは何か？
- ・どのような曝露で、人は知覚し易いのか？
- ・低周波数範囲及び最も着目すべき超低周波数範囲の音は、人の健康に有害なのか、平均的な聴取能力よりも低いレベルでもそうなのか？
- ・人の前庭系は、どのように音に反応するのか？
- ・音の曝露でなにが有害影響となり得て、健康とどのように関係するのか？
- ・科学文献は、風力発電設備、低周波音、超低周波音について、どのように述べているのか？

なお、20 Hz以下の周波数は、通常、超低周波音と呼ばれるが、超低周波音と低周波音との境

界は厳密ではなく、一部の人はある周波数の超低周波音が高いレベルだと聴くことができる。低周波音は、習慣的に 10～200 Hz の間と言われているが、どの定義もあまり明確ではなく、健康との関わりの中で低周波音は一部の人々にとって懸念となっている。

風力発電設備から発せられる音は、機械的あるいは空力的なメカニズムのいずれかで発生する。前者が標準的な騒音制御技術で対応可能で、最新の風力発電設備では支配的な音源ではない。後者は、超低周波音の領域から低周波数騒音を越えて通常の可聴領域にまでわたる場合もある。特に、風車騒音で支配的な音源となっているのは、可聴域の騒音で、概ね 500～1000 Hz という中間周波数域で変調される傾向にあり、この帯域のレベルが約 1 回/秒などの割合で上昇下降している場合がある。

音の曝露による影響として、会話妨害、聴力損失、作業妨害、アノイアンス、睡眠妨害等が考えられ、音の大きさに著しく依存する。風力発電設備から一定の距離、離れることによって、会話妨害、聴力損失、作業妨害は生じないが、一部の人は、はうるさく感じたり、睡眠を妨げられたりする場合がある。このアノイアンスは、人により異なる主観的な反応であり、人々を苛立たせるかも知れないが、有害な健康影響でもないし、いかなる病気でもないことに注意する必要がある。慢性的にうるさく感じさせるあらゆる音(非常に小さな音を含む)が一部のの人に慢性的なストレスを与えるかも知れないが、多くの人々は騒音やその他のストレスへ定常的に曝され、もはやうるさく感じない。

風力発電設備から放射される超低周波音は、通常 50～70 dB 程度であり、もう少し高くなることもあるが、感覚閾値よりも十分低いレベルである。音響専門家の間では、風力発電設備からの超低周波音による健康の影響は考えられないという意見で一致している。

関連して、米国食品医薬品局(FDA)は、8～14 Hz の範囲で 70 dB の超低周波音を治療マッサージ用を使用することを許可している。稼働中の風力発電設備からの低周波音は、風が極端に乱れている場合に一部のの人にうるさく感じられることもあるかも知れないが、このレベルが健康に影響を及ぼすという証拠はない。もし健康に影響を及ぼすならば、都市環境下では、同じレベルの一般的な背景騒音により、そこに人々は住めないことになる。

風力発電設備から発生した低周波音と健康影響との関係に関する報告について慎重に検討した結果、推定される健康影響と曝露の程度との関係、報告された健康影響中の特異性の欠如、および分析における対照群の欠如、において特に疑問がある。具体的には、以下のような内容である。

- ①振動音響疾患(VAD)は、大きな圧力振幅を有する低い周波数(LPALF)の音の慢性的な曝露に伴う全身の多臓器疾患として定義されたが、実際は高周波数成分が卓越する音場であった。
- ②当初 100 Hz より高い周波数域が卓越した 90 dB 以上の音に伴う結果を、超低周波領域で 40～50 dB の聞こえない(inaudible)風車騒音による VAD のリスクに外挿している。しかも、これは 2 つの超低周波音への曝露を比較することのみに基づいて主張されている。

事例1では、8 Hzと10 Hzで約50 dBの低レベルの超低周波音に曝露され、鉄道や道路からの低周波音も含まれた。事例2では、8~16 Hzで約55~60 dBの超低周波音に曝露された。これらの曝露は感覚閾値より十分低く、都市域ではありふれた状況である。

さらに、この2つの事例は明らかに自主的に選択された苦情者である。これらの記述は、症例集積研究であり、潜在的な危険(つまり低周波音)への曝露と潜在的な健康影響(つまりVAD)との因果関係を理解する上で事実上無意味である。症例報告は、明確な因果関係が示される前に、大規模な研究、とりわけコホート研究や症例対照研究によって確認される必要がある。つまり、2つの家族の報告は、風車騒音と心膜の厚さが増すこと(VADの主要な症状は心臓や血管の構造が厚くなること)との関係について説得力のある科学的な証拠を示していない。

③風力発電症候群(Wind Turbine Syndrome)は、風力発電設備から空中伝搬した1~2 Hzの低レベルの超低周波音が前庭系に直接影響する、風力発電設備から空中伝搬した4~8 Hzの低レベルの超低周波音が口を通じて肺に入り横隔膜を振動させ、内臓または身体の内部器官へ振動を伝える、という2つの仮説に基づく。

まず、前庭系が低レベルの音と振動の両方に対して蝸牛よりも敏感である、と明らかに誤解している。1~2 Hzの低レベルの風車騒音が前庭系に直接影響するという信頼できる科学的根拠は存在しない。そもそも、1~2 Hzの低レベルの超低周波音は、身体中に元来存在する超低周波の背景音(例えば、1~2 Hzの心拍ほか、内臓等の内部騒音源からの音)に埋もれてしまう。同じことが4~8 Hzの低レベルの超低周波音についても言える。さらに、身体外からの低レベルの音が体内音を超えるような大きな刺激を身体内で引き起こすことはない。

次に、風力発電設備によって健康を害されたと考える人々を公募し電話インタビューしているため症例集積研究である。この特殊な症例集積研究は、得られる結果に重大なバイアスをもたらす。特に、風力発電設備近傍に住んでいない対照群に欠ける。さらに、風力発電症候群の症候は新しいものではなく、環境音に対するアノイアンスに関わるものとして公表済である。これらの症状は、極端で継続的なアノイアンスの事例に共通であり、これらの影響を受けた人のストレス反応に繋がる。風力発電症候群は、医学界で認知された診断ではない。

#### 【結論】

- ① 風力発電設備からの音は、人に対して聴力損失あるいはいかなる健康への影響に関するリスクも課さない。
- ② 風力発電設備からの可聴以下の低周波音や超低周波音は、人の健康へのリスクではない。
- ③ 一部の人は、風力発電設備からの音をうるさく感じるかも知れないが、アノイアンスは、病理学的なものではない。
- ④ 風力発電設備からの音に関する懸念の主な原因は、その変動する特性に起因し、一部の人は、これをうるさく感じ、その反応は、音の強度ではなく個人特性へ依存する。

とカナダ・アメリカ風力エネルギー協会の報告書では、記述されている。

### 3 オーストラリア国立保健医療研究評議会報告書

(Wind Turbines and Health A Rapid Review of the Evidence)

この報告書は、風力発電と人の健康への影響に関して、最新の文献に基づく証拠の検討から知見を提示することを目的として、「風力発電所による直接の病理学的な影響は無く、人への影響は既存の開発ガイドラインに従うことによって最小化される。」という主張が証拠によって支持されるか否かを明らかにしようとしたものである。

風力発電施設と人の健康への影響に関しては、2つの対立した見解があり、風力発電からの超低周波音、騒音、電磁波干渉、シャドウフリッカー、翼の反射光による健康への影響が主に懸念されている。

超低周波音(16 Hz未満と記述)と低周波音(low frequency noise)の境界については、しばしば混乱が生じている。そもそも音に対する人の感度、特に低い周波数の音(low frequency sound)に対する感度は、変化しやすく、様々な周波数に対して許容差がある。

風力発電施設の主要な騒音源は、モーターもしくはギヤボックス等から生じる機械騒音と風力発電の翼を通過した風により生じる空力騒音であるが、正常に稼動する最新の風力発電設備から生じる機械騒音は問題にならない。つまり、通常であれば主要な騒音源は、空力騒音であり、これらに加えて振幅変調、衝撃性、低周波数騒音や純音性のような特別な可聴特性を含む騒音も生成する。

風力発電からの騒音の影響に関して最も一般的に言われていることは、超低周波音と低周波音(low frequency noise)に関係する。超低周波音は、一般の環境中に存在すること、最近までの研究成果として風力発電から生じる超低周波音は無視できるレベルであり、低周波音は、通常僅かであることが明らかになった。なお、風力発電に伴う超低周波音ないし低周波音が健康に影響を及ぼす証拠はないと結論付けた報告書が多く存在する。

健康に及ぼす風力発電の影響に係る様々な研究では、アノイアンスの自己申告による知覚が殆どであるが、アノイアンスのような主観的作用を測定・定量化することは難しい。世界保健機関(WHO)は、アノイアンスが健康に影響を及ぼすとしているが広く受け入れられているものではなく、アノイアンスによって、結果として人々はストレス性の健康影響を受けるといった意見もある。風車騒音とアノイアンスに関する研究から、アノイアンス以外の健康への影響が風車騒音と直接的に相関しないこと、騒音によるアノイアンスについての過去の報告では、睡眠障害や不安感は、その騒音への曝露によるものと思われるが、一方、睡眠障害を有する者がその騒音を安易に評価することと同じくらいにアノイアンスを評価していることも見出された。

さらに、風力発電に伴う騒音が知覚されることには、多くの要因が関与し、聴覚が視覚刺激によって強調された結果として騒音を否定的に評価する可能性があること、風力発電所近傍の住民に対する研究でアノイアンスと、風力発電設備が見えることに対する否定的な姿勢とが強く相関する

こと、さらに、風力発電から経済的な利益を得ている者が利益を得ていない者と同レベルの騒音に曝露された場合でもアノイアンスを報告しない傾向があることが明らかになった。

以上を要約すると、

- ① 感覚閾値以下の超低周波音が、生理的もしくは心理的な影響を生じさせるという信頼できる証拠はない。
- ② 最新の風力発電からの超低周波音は、風力発電所近傍の住民に健康被害を及ぼすようなレベルの音源とはならない。
- ③ 風力発電が人の健康に影響を及ぼすことを示す査読を受けた科学的な報告が無いことを調査結果が明確に示している。
- ④ 風力発電からの騒音は、聴力損失もしくはその他の人への健康影響のリスクを引き起こさない。風力発電から生じる可聴域以下の低周波音や超低周波音は、人の健康に対するリスクではない。
- ⑤ 風力エネルギーは、従来の他の発電方法よりも健康影響への関連は低く、むしろ人類の健康にとって有益である。
- ⑥ 現在のところ、問題となっている風力発電所からの騒音放射の中に、特別な特性について科学的に確認された事例はほとんどない。現段階で、信頼できる公表された文献は、騒音影響評価の計画段階に特別な特性を含めることに賛成していない。
- ⑦ 風力発電に関する超低周波音について多くの議論がメディア上で行われている一方で、超低周波音が最新の風力発電から発生しているという検証できる証拠はない。
- ⑧ 風力発電からの騒音が、風力発電症候群(WTS)と呼ばれる症状を引き起こすという主張があるが、超低周波音や低周波音に関連するWTSの症例を紹介している症例研究でしかない。査読を経て、学術雑誌に掲載されてはならず、音響学の専門家から厳しい批判を受けている。

#### 【結論】

- ① 風力発電のような再生可能エネルギーを利用した発電に伴う健康影響は、従来のそれほど評価されておらず公害を伴った発電と比べて、健康への影響とは関連していない。
- ② 学術論文、調査、文献調査や政府報告書を含む入手可能な証拠を再検討した結果、「風力発電所に係る直接の病理学的な影響はなく、人への影響は既存の開発ガイドラインに従うことによって最小化される。」という文章は、容認される。

とオーストラリアの報告書には、記述されている。

なお、報告書の検討過程で得られた風力発電に伴う影響を低減する方法についても下記のように述べている。

- ① 風力発電に関する地域社会の懸念を増やす要因として、自らの意志に反して不公平と思える風力発電騒音に曝露されること、工業的に奇抜とも思われ、記憶にも残りやすい風力発電の性質、マスコミによる頻繁な報道、社会的行動や地域社会の意見を無視した状況などがある。
- ② 風力発電に関する騒音問題を低減するために、風力発電の騒音に曝露される者を明らかにして、定められたセットバックを行い、調査研究によって支持されていない超低周波音に関する

噂を払拭するようなガイドラインを遵守すべきである。

- ③ このガイドラインには、高レベルのリスク評価、データ収集、影響評価、詳細な技術的検討、および地域との協議などの様々な手段が含まれているべきで、これによって風力発電所に対する反対が減少し、アノイアンスや関連する健康影響は、避けることができるだろう。

#### 4 Wind Turbine Noise 2011 の会議総括レポート

最新に開かれた風車騒音に係る国際会議「Wind Turbine Noise 2011」において報告された主要なテーマについて、会議総括として、以下のとおり報告されている。

- ① 風力発電設備からの騒音の中で、swish(シュッシュ)やそれに関連する thump(ドンドン)は、残された騒音の問題である。しかし、2005 年の最初の国際会議に比べて、これらに対する理解が進み、解決は遠くない。
- ② 超低周波音は、人々の知覚に関する問題として継続している。しかし、聴覚が超低周波音にどのように反応するかに関する新しい研究にも関わらず、この影響を裏付けるような証拠は見当たらない。
- ③ 昼間の風力発電設備からの騒音による主要な影響は、アノイアンスである。夜間における影響は、睡眠妨害である。これらが一部の人々に疾患に繋がるストレスへ導いている。風力発電設備からの低レベルの騒音による影響が想定される以上、なぜこの影響を生じるのかの解明についての研究が必要である。

##### 【参考原文】

- Swish, and its related thump, are the remaining problems in wind turbine noise. However, there has been real development in understanding of these since the first Wind Turbine Noise Conference in Berlin in 2005, and a solution may not be far away.
- Infrasound continues as a problem in public perception, but there has been no evidence to back this up, despite new studies in how the ear responds to infrasound.
- The main effect of daytime wind turbine noise is annoyance. The night time effect is sleep disturbance. These may lead to stress related illness in some people. Work is required in understanding why low levels of wind turbine noise may produce affects which are greater than might be expected from their levels.

#### 5 オレゴン州における風力エネルギー開発に係る戦略的健康影響評価

(Strategic Health Impact Assessment on Wind Energy Development in Oregon)

この報告書は、オレゴン州にある風力エネルギー施設からの健康影響について多くの質問が寄せられたことに対応し、同州健康局環境公衆衛生事務所が実施した戦略的健康影響評価の結果を示すものである。この戦略的健康影響評価は、オレゴン州における新規の風力エネルギー開発に対する健康に関連した質問を理解し、それに対応する関係者を支援しようとするもので、具体的には以下を目的としている。

- ①風力エネルギー施設からの健康影響に関する質問や懸念を理解し、オレゴン州の関係者のために最も優先順位の高い健康影響に関する証拠を評価すること。
- ②オレゴン州エネルギー省、エネルギー施設設置委員会、公衆衛生局、風力エネルギー産業および市民に対して、将来の風力エネルギー施設の設置判断を検討するための証拠に基づいた勧告を行うこと。
- ③健康影響評価に市民を参加させ、その他の関係者とともに適切で有用な情報を提供すること。
- ④健康影響評価を理解し知識を高め、特定の風力発電所の設置判断に役立ててもらうこと。

環境公衆衛生事務所は、この健康影響評価で取り扱う 5 つの課題を音(sound)、視覚影響(景観)、大気汚染、経済効果、社会における利害対立とし、音に関して得られた知見を以下のように整理している。

- ① 地域社会に存在する環境騒音は睡眠妨害、アノイアンス、ストレス、認知能力の低下と関係があり、それぞれ本来好ましいものではないが、身体的健康に影響を与えることもある。環境騒音に曝露されることによる慢性的な睡眠妨害やストレスは、心臓血管系疾患のリスクを増加させ、免疫力の低下、内分泌系の異常、精神障害、その他の障害を引き起こし得る。
- ② 音を騒音として感じるのは、音、人、社会的/環境的条件の要因に影響された主観的印象である。これらの要因によって、人々が音を個人あるいは集団としてどのように聞いているか、またそれにどのように反応するかが変動する。常に拒否的な社会反応と結びついている要因は、音源に対する恐怖、騒音に対する感受性、曝露される騒音の変化(すなわち、新たな音の発生あるいは音の大きさや質の顕著な変化)、および人工的な音の増加である。
- ③ 風力発電からの音は同じ大きさのレベルでも他の環境騒音や産業騒音に比べより気付かれやすく、うるさく感じられ、邪魔になるということを示すいくつかの証拠がある。

その理由としては、

- ①風力発電は、大きさと種類が変動する、すなわち、シュッシュュ(swishing)や脈打つ(pulsing)のような振幅変調の環境騒音を発生させる。一般に、変動音は定常あるいは一定の音よりもうるさく感じられるので、風力発電からの音は、他の環境音や産業に伴う音に比べてうるさく感じられるのであろう。
- ②他の環境音とは違って、風力発電からの音は夜間予想通りに小さくなるとは限らず、夜間には昼間と同じかあるいはより気付き易くなることもある。これによって近隣の住民の睡眠妨害が生じることがある。
- ③少数ながら疫学調査によれば、風車騒音はアノイアンス、ストレス感やいらいら感(irritation)、睡眠妨害の増加や生活の質の低下と関連し、欧州の研究では風車騒音によるうるささが 35～40 dBA を超えると発生し易くなることが分かっている。
- ④風力発電からの超低周波音(infrasound:20 Hzより低い周波数)は人によって知覚され得るレベルより低い。
- ⑤少数ながら現場調査によれば、風力発電施設の近郊で低周波音(low frequency sound:250 Hzより低い周波数)が人に聞こえるかそれに近いレベルになるかも知れないことが分かっている。し

かし、風力発電からの耳に聞こえる低周波音がうるささや妨害感の増加と関連性があるか否かを定める十分な証拠はない。

- ⑥風力発電の近くに住む人々は、遠く離れたところの人々に比べて風力発電からの音の影響を受け易い。その影響の程度は、施設からの距離、局地的な地形や水域、気象パターン、バックグラウンド騒音のレベルなど、場所の特性に依存する。
- ⑦オレゴン州では、事業者は新たに建設する風力エネルギー施設がオレゴン州環境省による規則に定められている風力発電に特化した騒音基準を満たすことを示さなければならない。このオレゴン州の騒音基準を満たすために、事業は、暗騒音レベルの中央値が36 dBAを超えないこと、あるいは、バックグラウンド騒音レベルの実測値を10 dBA以上、上回らないことが必要である。しかし、土地所有者にはこの基準を放棄する選択肢もあり、その場合、発電施設は屋外の騒音レベルを50 dBAまで増加させてもよい。

#### 【結論】

- ① オレゴン州において、風力エネルギー施設からの音がバックグラウンド騒音レベルを10 dBA以上増大させる、あるいは長期の屋外環境騒音レベルを35~40 dBA以上にすると、住民の健康と福祉に影響を与える。
- ② 風力発電からの音によって起こり得る影響としては、度を越さない程度の妨害感から深刻なアノイアンス、睡眠妨害、生活の質の低下などが考えられる。慢性的なストレスや睡眠妨害は、心臓血管系疾患、免疫機能の低下、内分泌系の障害、精神障害、その他の影響の危険性を高めることがある。長期にわたる健康影響の多くは、夜間の風力発電からの音による睡眠妨害によって引き起こされるか、あるいは悪化させられるかも知れない。
- ③ 我々の調査における不確実性の主な原因は、音に対する人の反応が主観的であり、人々が音をどのように感じ、反応し、また対処するかに大きな幅があることに関係する。また、以下の分野においても証拠が十分でないことも不確実性の原因である。
  - ・風力発電からの音に関する疫学的研究
  - ・風力発電からの音の振幅変調
  - ・風力発電による室内における低周波音(low frequency sound)の影響
- ④ 環境公衆衛生事務所は、騒音苦情に関する逸話的(anecdotal)な証拠を示し、オレゴン州で稼働している少数の施設における健康影響を報告しているが、我々は州内の稼働している施設による騒音による健康影響の頻度および程度を評価することはできない。

と報告書には記述されている。

さらに、将来の風力エネルギー施設の設置判断を検討するための証拠に基づいた勧告として以下を示している。

#### 【勧告】

- ① 風力発電からの音による健康影響の可能性を減らすために、計画者および開発事業者は風力発電から発生する音の屋外レベルが風車騒音に関するオレゴン州の基準に適合する、またはそれに近くなるように風力発電からの音の発生を低減するための方法を評価し実施すべきで



ある。その中には、以下のものがあり得る。

- ・計画段階において、風力発電からの音の伝搬や受音の大きさ等、場所に特有の要因を考慮すべきである。特に、夜間に実際に起こり得るか知覚される音のレベルについて考慮すべきである。
- ・局所的な条件が風力発電からの音の伝搬や特性をどのように変化させるのか(例えば、振幅変調音や夜間の音の発生に関するウィンドシア(wind shear)の影響)に関して、科学的証拠を評価し続けるべきである。

② 風力発電からの音に曝露された人々が感じるアノイアンスあるいは妨害感(disturbance)のレベルは、風力発電の見え方(visibility)、視覚的な影響、信頼、公平性・平等性および計画段階における地域社会(community)の係わり方等、風力エネルギー施設に対するその他の要素に対する個人の感じ方によっても異なる。風力発電用地の決定過程の一部として、開発事業者と計画者はこれらの点及び他の地域社会の懸念に対してはっきりと積極的に説明することによって、風力発電からの騒音による健康影響を低減することができよう。

③ 風力エネルギー施設の近くに住んでいる住民が開発に伴って起こり得る危険性と利益を理解し、もし住民が健康問題や心配事を持つ場合にはそれを報告する(あるいは報告できる)ということを実確なものとするべきである。

と報告している。

## 6 風力発電設備の健康影響の研究:独立専門家研究班の報告

(Wind Turbine Health Impact Study: Report of Independent Expert Panel)

マサチューセッツ州環境保護省は、同州公衆衛生省と協力して、風力発電への曝露に関連すると考えられる、確認されたあるいは潜在的な健康影響を見極め、特に科学的な知見に基づいた風力発電と公衆衛生に係る議論を促すために、独立した専門家による研究班を招集した。研究班による評価と報告の目的は、風力発電による騒音、超低周波音、振動、シャドーフリッカーが健康に影響を及ぼすかも知れないという市民の懸念に度々対応するマサチューセッツ州環境保護省や同州公衆衛生省、さらには地方自治体に対し、これらの懸念を調査し有益な情報を提供するような科学的な検討結果を示すことであり、その成果として本報告書が取りまとめられた。

学術論文やその他入手可能な調査報告書の詳細な検討と科学的な証拠としての説得力を考察し、研究班は風力発電の稼働に係る 3 つの要素、つまり騒音・振動、シャドーフリッカーおよび氷片落下に関して得られた知見を示した。以下は、風力発電に伴う騒音および振動に関する知見と人への健康影響に係るベストプラクティスを抜粋して述べる。

まず、風力発電による騒音と振動の生成について、

① 風力発電はその稼働中に望ましくない音(騒音と言われる)を発生する可能性がある。その音の性質は風力発電の設計に依存する。音の伝搬は主に距離に依存するが、風力発電の位置、周辺の地形および気象条件にも影響される。

- ・アップウィンド型とダウンウィンド型の風力発電は異なった音響的特性をもち、ダウンウィンド

型では主に翼とタワー背後で風速が低下している部分との相互作用に起因する。

- ・ストール制御型風力発電とピッチ制御型風力発電とでは、風速依存性が異なる。
- ・音の伝搬は、大気中の温度勾配による屈折、丘陵の斜面による反射および空気吸収による影響を受ける。これらの影響によって、風力発電近隣の住民は異なった音に暴露されることが分かっている。
- ・風力発電から発生し耳に聞こえる振幅変調音(whooshing:シューシューあるいはヒューヒュー)は夜間に大きく感じられ、時にはドンドンあるいはゴツンゴツン(thumping)と聞こえることもある。その原因は、i) 安定した大気条件では風速勾配が大きいこと、ii) 安定した大気条件では音が上方よりも下方へ屈折し易いこと、iii) 夜間は大気が安定し人間活動による騒音が低くなることによって、地表面近傍の暗騒音は低い、と考えられる。

②典型的な最新実用規模の風力発電の音響パワーレベルは 103 dB(A)程度であるが、この値は設計の細部や定格出力によって上下する。聞き取れる音は風力発電からの距離とともに急速に小さくなる。特に 400 m 以遠で、最新の風力発電に伴う騒音レベルは 40dB(A)以下であり、疫学研究においてアノイアンスに関連するレベルより小さい。

③超低周波音とは 20 Hz より低い周波数の(空気)振動をいう。超低周波音は、振幅が 100~110 dB を超えると聞こえたり感じられたりする。これよりもレベルが低い振動は感じられないことがいくつかの研究によって明らかにされている。風力発電近傍で測定され、文献で報告されている超低周波音の最高レベルは、100 m ぐらいに近づいても 5 Hz で 90 dB 以下であり、それより高い周波数ではそれ以下のレベルである。

④風力発電からの超低周波音は、連続的なシューシュー(whooshing)という音には無関係で、その原因でもない。

⑤可聴音、超低周波音に関わらず、どの周波数の圧力波も他の構造物あるいは物体に振動を発生させる可能性はある。しかし、そのような振動が発生するためには、波動は十分に大きい振幅(高さ)をもっている必要があり、また構造あるいは物体も波動を受け取ることができる条件(共振周波数)を備えている必要がある。

と述べている。

次に、騒音と振動に伴う健康影響について、

①風力発電に対する人の反応に関する疫学的研究の論文は自己申告によるアノイアンスに関するものがほとんどであり、この反応には音だけでなく、風力発電の見え方や風力発電事業に対する態度などが複雑に絡んでいるようである。

- ・風力発電(騒音)への暴露とアノイアンスの関連を示す疫学的証拠は限定されている。
- ・風力発電の視覚的な影響を切り離して風力発電からの騒音とアノイアンス(あるいはその逆)の関係の有無を決定できる疫学的証拠は十分ではない。
- ・風力発電からの騒音と睡眠中断との関係を示す疫学的研究に基づく証拠はないとは言えない。すなわち、風力発電によっては睡眠中断を引き起こすことはあると言える。

②非常に音が大きい風力発電は感受性が高い住民に対してある距離では睡眠中断を起こす可能性はあるが、静かな風力発電では同じ距離で浅い睡眠中でもそれを中断させるようなことはありそうにない。しかし、風力発電による騒音が睡眠中断を起こす特定の音圧の閾値を示す十

分な証拠はない。

- ③風力発電によるアノイアンスが睡眠問題あるいはストレスの原因となるかどうかについては、まだ十分に定量化されていない。風力発電によるものかどうかは別として、睡眠中断が気分や認識機能、ひいては全体的な健康や幸福感に悪影響を及ぼすことは明らかである。
- ④風力発電からの騒音が健康問題や病気を直接的に(すなわち、アノイアンスや睡眠による影響とは別に)引き起こすかどうかについては、十分な証拠はない(波線部は、原文中で斜体で記述されている)。
- ⑤風力発電から発生する超低周波音が前庭器官に直接影響を与えるという主張は科学的には明白にされてはいない。風力発電に近い場所における超低周波音のレベルでは前庭器官に影響を与えることはあり得ないという証拠はある。
- ・最新のアップウィンド型の風力発電設備から68 m離れた点で測定された超低周波音のレベルは、非聴覚的な感覚(体で部分的に感じる振動感、胸部の圧迫など)が生じるレベルよりも十分に低い。
  - ・超低周波音が構造物に伝わるとすれば、その構造物の内部にいる人々は振動を感じるようになる。別の問題では、このような構造的な振動が不安感や一般的なアノイアンスの感覚を引き起こすことが示されている。しかし、最新のアップウィンド型の風車について測定によってそのような現象が起こる証拠は何ら示されていない。
  - ・風力発電設備や風力発電所の近傍の地面上における振動測定の結果からみて、振動が構造物に影響することはあり得ない。
  - ・超低周波音と前庭器官とのカップリングのメカニズム(内耳の外有毛細胞(OHC)を介して)の可能性が提案されているが、まだ完全には理解されておらず、また十分な説明もされていない。風力発電近傍における超低周波音のレベルは、十分OHCで感じる大きさであることは示されている。しかし、風力発電によって発生する超低周波音が前庭を介して脳に影響するという証拠はない。
  - ・ネズミを用いた実験的研究で、周波数16 Hzで130 dBの強さの音に短時間暴露させたところ、心臓と脳の細胞の一時的(short-lived)な生化学的変化が認められたという限定的な証拠が示されている。このようなレベルは、最新の風力発電で測定される超低周波音のレベルを35 dB以上も上回っている。
- ⑥「風力発電症候群」として特徴づけられるような風力発電からの騒音に暴露されることによって生じる一連の健康影響に関しては、全く証拠はない。
- ⑦最も有力な疫学的研究では、風力発電からの騒音と心理的なストレスあるいは精神面の健康問題の間に関連性を認めていない。それより規模が小さく説得力が弱い二つの研究があるが、一方は両者の関係に言及しており、他方では言及していない。したがって、これらの研究における根拠の重さから考えて、風力発電からの騒音と心理的苦悩あるいは精神面の健康問題の関連性はないと結論づける。
- ⑧検討した疫学的根拠の中で、風力発電からの騒音と苦痛と肩こり、糖尿病、高血圧、耳鳴り、聴力障害、心臓血管系疾患、頭痛/偏頭痛との関連性を示すものは全くなかった。と報告書は述べている。

さらに研究班は、法令が入手可能で最も有用な情報に基づくものであり、多くの情報および研

究結果が得られるたびに改良されるという認識の下で、風力エネルギーに依存しながら公衆衛生も保全しようとする国々において「ベストプラクティス」が開発され採用されていると考え、次のように述べている。

ある特定の慣行に対する根拠に重要性が高いことがあり得るため、ベストプラクティスは適用できる根拠によって以下のように分類できると述べている。

カテゴリ	名称	内容
1	学術研究に基づくベストプラクティス	客観的かつ広範な学術研究および評価に基づく最も高度に有効性が証明されている計画、活動あるいは戦略。
2	実地調査に基づくベストプラクティス	有効に機能し、好結果が得られることが示され、ある程度まで主観的あるいは客観的なデータに基づく計画、活動あるいは戦略。
3	見込みに基づくベストプラクティス	1 つの機関で採用し、初期の段階で試用した結果、長期の持続的な効果が見込める計画、活動あるいは戦略。見込みに基づく慣行は、その有効性を示すためにある程度の客観的な根拠が必要で、他の機関でも再現性が得られる可能性を持っている必要がある。

“Identifying and Promoting Promising Practices.” Federal Register, Vol. 68, No 131, July 2003. [www.acf.hhs.gov/programs/ccf/about\\_ccf/gbk\\_pdf/pp\\_gbk.pdf](http://www.acf.hhs.gov/programs/ccf/about_ccf/gbk_pdf/pp_gbk.pdf) を参照

風力エネルギー利用の経験を持ち、公衆衛生の保全を図っているいくつかの国では、騒音の悪影響を最小化するためのガイドラインを設定している。それらのガイドラインでは、1 日のうちの時間帯、土地利用、周辺の風速を考慮している。例えば土地利用について、ドイツでは工業地域、商業地域、村落の別で、デンマークでは人口過疎地域と住居地域の別となっている。

また、音圧レベルは、夜間の値を対象としている住宅あるいは建物に近い位置で評価するとしている。さらに世界保健機構 (WHO) では、住居地域における夜間の最大騒音レベルとして 40 dB(A)を推奨している。これらの値に合うために必要なセットバック距離は、WindPro あるいはそれに類似のソフトウェアによって計算することができる。このような計算は可能性の検討の一環として行われるべきである。以上のような考察から、研究班は両国のガイドラインをカテゴリ 3 の見込みに基づくプラクティスに属するが、実地調査に基づくベストプラクティスの側面もいらか備えていると考えている。

騒音限度値は、それを測定あるいは計算する場合の時間の長さによって変わる。例えば、しばしば引用される夜間の騒音上限値 40 dB(A)という WHO の推奨値は 1 年間の平均である(また、これは風力発電からの騒音に特化したものではない。)一方で、デンマークの騒音限度値は 10 分間の計算値である。これらの限度値は、疫学的研究がアノイアンスに関する無意味な報告を結びつけて求めた騒音レベルと一致している。

研究班は、新たな風力発電を設置する際の州全体の政策の一部として騒音限度値を含めるこ

とを推奨する。さらに、騒音レベルがこれらの値を上回った場合について、その範囲と対処の仕方についても考えておく必要がある。各種のエネルギー源による環境および健康影響、国および州のエネルギーの独立への目標、起こり得る影響の程度などの間のトレードオフについても考慮に入れる必要がある。

また、研究班は、風力発電の購入に関わっている人々が風力発電からの騒音特性、騒音の発生に影響する要因および騒音の制御を理解していることを勧める。ストール制御型風力発電とピッチ制御型風力発電とでは、特に風速が大きい場合に騒音の特性が異なる。ある種の風力発電では、適当な制御の方法(たとえば、ローターの回転速度を落とすなど)によって夜間の騒音を低減することが可能である。騒音を制御する方法を検討する際には、その製造者がこのような制御が可能であることを説明できなければならない。

研究班は、マサチューセッツ州に設置されている風力発電から発生する音を監視し評価する進行中の計画を推奨する。IEC 61400-11 は風力発電の騒音測定の標準的な方法を規定している。一般的に考えて、人口が多い地域における風車騒音を広範に評価する方法が推奨される。これらの評価は、現在、国際的な広がりをもって進められている風力発電からの騒音の発生およびその影響に関する広範な研究を参考として行われるべきである。そのような評価は、(風力発電の)設置に関するガイドラインを改良し、より高度のベストプラクティスを作るために有効であろう。屋外での測定で A 特性と C 特性の音圧レベルの差が 15 dB 以上となるような住宅の近傍については、さらに詳細な検討を行うことが推奨される。

## 7 風車騒音

(Wind Turbine Noise)

この書籍は、風車騒音について体系的に取りまとめられており、D. Bowdler 氏と G. Leventhall 氏が共同で監修した。2011 年 10 月に出版され、それぞれの専門家によって分担執筆されている。本書籍で議論される風力発電は、現代的で大型であり、3 枚の翼型羽根を持ち、ピッチあるいは失速制御を備えた 60 m ないしそれ以上のローター径である。しかし、記述の大部分、より広範囲な風力発電に対応し、現時点で知り得る事実を出来るだけ正確に述べることを目的としている。

### ① 基礎的指針(criteria)

本書籍の第 8 章に基礎的指針について記述されている。ここで、他の環境音の音源のように、計画・許認可の当局による風力発電施設に対して制定された規格は、その取り組み方にも量的にも異なる。ここでは、騒音規制についての評価を行うことより、むしろ異なる規制的な取り組みの概要や事例を示すことである。規制は時とともに変化するので、読者に関連当局に現行の規格を確認することを薦めている。

後述するが、幾つかの規格は 2010 年中に更新され、時とともに変化するものであり、むしろそれらの履行を確実に把握することが重要である。基礎的指針も、モデリングや測定方法を含む法令遵守のための評価方法を規定している。そのような方法が示されると、各々の区域における必要

条件を明確にするために、基礎的指針とともに、その手法を見直すことが重要である。関連する評価方法が異なるので、別の区域での基準を直接比較することは適切ではない。

これらの方法は、以下の議論の中で強調されるが、読者には着目する管轄区をより詳細に集中して見直すことを薦める。風力エネルギー施設に対して定められた規制限度や取り組み方は、他の環境騒音源がどのように評価されるかと一致するかも知れないし、しないかも知れない。管轄区の間で規制を比較する場合、その管轄区が他の環境騒音源をどのように規制しているかについての整合が考慮すべき重要な側面である。例えば、オーストラリアにおける 2 km の居住地域セットバック条件は、オランダや日本のように小さくて人口が密集する地域よりも風力エネルギー発電容量に影響しない。全体的に 2 つの異なる取り組み方がある。それは、絶対的限度と相対的限度である。

## ② 絶対的限度 (absolute limit)

絶対的限度は、超過できない、固定された数値による閾値を定める。数値による閾値は、一般的にオーバーオール A 特性レベルで示される。しかし、その他の基礎指針(例えば、オクターブバンドや 1/3 オクターブバンド)も定められるかも知れない。基礎指針は、プロジェクト特有の限度、すなわち、検討中の特定プロジェクトに起因する騒音を制限することや近傍の他の騒音源を考慮して全騒音量を定めること、という形を採るかも知れない。

## ③ 相対的限度 (relative limit)

風力エネルギー施設からの音響放射が風速に依存することは明らかな特性である。郊外に設置する時、現在の騒音レベルが風速の上昇に伴って上昇することは一般的である。相対限度、さもないと暗騒音プラス手法 (background plus approach) として知られるものはこれを考慮し、既存の騒音レベルに対して閾値を定めようとするもので、新しい騒音源による変化あるいは増加を規制する。

住居あるいは受音側における風が穏やかで暗騒音レベルが低いならば、実際的な風況下において高い騒音レベルの場合よりも、より低いレベルが要求される。別途記述するが、受音点の地表近傍における風速はハブ高さの風速と必ずしも関連しない。この差分が、過去 10 年において 40 m から 100 m へハブ高さが増加したことで相対限度をどのように扱うかを理解し考慮するために極めて重要である。この問題は付録 2 で簡単に議論される。相対限度について、既存のレベルあるいは基礎となる騒音レベルを決定するための方法や測定量も定めなければならない。ある程度の時間的・空間的な変動を考えることが最も自然である。当局が相対限度を適用する場合、そのような変動ないしバラツキをどのように扱うのかに関する指針を定めることが、プロジェクトとその周辺住民との双方に確信を与える。

## ④ 絶対的限度と相対的限度の組み合わせ

両方の取り組み方の組み合わせも定められている。このような取り組みでは、報告された既存の騒音レベルにかかわらず、有効な最低限度あるいは最高限度を定めるかも知れない。例えば、もし 8 dB の相対限度が定められ、既存のレベルが 48 dB であれば、50 dBA の規制的な最高限度は相対限度によって許容され得る 56 dB (48+8) よりも制限された限度となる。同様に、もし既存のレベルが 30 dBA であり、8 dB の相対的な閾値が 38 dB の限度を求めれば、40 dBA の規制的な最低限度はより高いレベルを許容することになる。相対限度と連携する時、規制的な最低限度ない

し最高限度の制定は、起こり得る極値を規制することに役立つ。

多くの規制が昼間に対してより高い限度を定めている一方で、プロジェクトは、夜間の稼働を制限するより、むしろ最も制限的な限度を設けることを選択するかも知れない。基礎指針に係る文書で言及されている他の話題は、超低周波音、低周波音 (low frequency sound)、純音性そして振幅変調を含むが、必ず規制されているとは限らない。

## 8 環境省戦略指定研究「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」において得られた研究成果概要(中間報告)

本研究は、風車騒音の生理・心理的影響等を明らかにし、環境影響評価に係る技術資料や影響の防止対策のための基本的な知見を得ることを目的に、平成 22 年度から 3 カ年計画で実施されている。3 つのサブテーマを設け、風車騒音の実測調査および地域住民に対する影響調査、風車騒音に係る聴感実験を中心に検討している。以下は、本研究に関する平成 23 年度秋季研究発表会(日本騒音制御工学会)での報告から概要を整理して示す。

### ① 曝露側(immission)の測定に用いる計測システムの開発

風車騒音の計測システムとして、低周波数から広帯域に用いることができる測定機器および風雑音を低減するためのウィンドスクリーンを開発・試作し、それらを用いた実測方法を報告している。この騒音および低周波音を同時に計測する広帯域音圧計は、測定周波数範囲 1 ~20 kHz において概ね平坦特性を有するマイクロホンを装着し、長時間の録音機能を具備している。

防風スクリーンは、防風性能以外にも運搬・設置の容易さ、防水性なども重視し、市販の 20 cm 径全天候型ウィンドスクリーンを 1 辺 16 cm の正五角形を 12 面組み合わせた 12 面体型で覆う方法を基本とし、必要に応じて 1 辺 50 cm の立方型防風スクリーンを付加する方法である。各防風スクリーンの音響透過性が測定され、12 面体型単独、立方型単独、両者の併用のいずれにおいても、4 kHz 以下の挿入損失が 1 dB 以下であることを確認している。風雑音の除去性能を屋外実験によって確認し、20 cm 径ウィンドスクリーンのみと比べ 12 面体型を併用することで約 6~10 dB、これに立方型を追加すると低減効果が約 3 dB 増加している。

この他に、風車騒音に対する測定点高さや風速の影響等も検討した結果として、主要な測定方法を以下のように提案している。

- ・測定地点:対象とする風力発電施設周辺(対象からおおよそ 1,000 m 以内)で、風車騒音の影響を受けていると思われる民家等の外部(庭等)で音圧を測定。
- ・音圧測定システム:広帯域音圧計のマイクロホンを 20 cm 系全天候型ウィンドスクリーンに 12 面型を二次防風スクリーンとして付加し、マイクロホン中心を地上 20 cm にする。
- ・風速測定システム:風車の近接点に基準点を設け、地上 4m における風向・風速を測定。

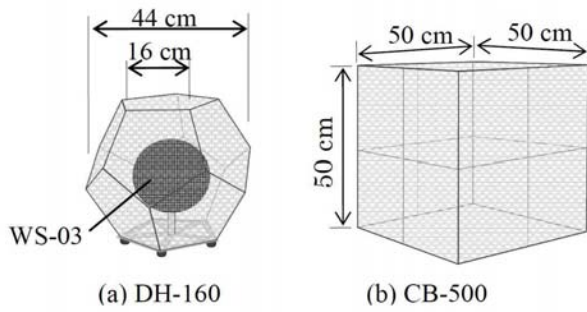


図 試作された二次ウィンドスクリーン

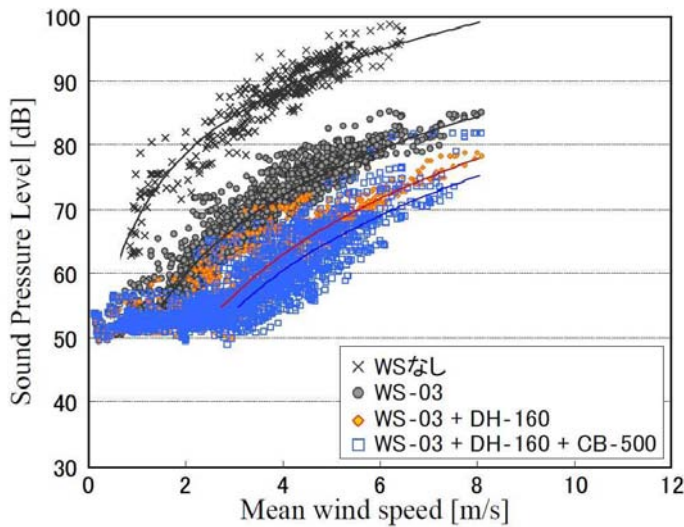


図 風雑音の低減性能の比較(定置実験)

## ② 風車騒音の評価量と周波数特性の分析方法

風車騒音について統一した測定方法や評価方法がないことを背景に、風車騒音の実測例を紹介し、他の騒音源の周波数特性と比較して、測定で把握しておくべき評価量や周波数特性の分析における注意点を報告している。

風車1基の定格出力が1,500 kW以上の6施設を対象として施設周辺の民家で騒音・低周波音を測定している。暗騒音が小さく風車騒音が卓越している時間帯の音圧レベルLA, LC, LGは、LAとLCが風車の羽根枚数と回転数の積の逆数(約1.3 s)の周期で変動しているのに対し、LGはこの周期に無関係に不規則に変動している。1/1 オクターブバンド音圧レベルの時間変動では、125, 250, 500 Hz および 1 kHz で LA や LC と同じ周期で変動しているが、16 Hz 以下ではそれが見られない。

また、暗騒音が小さく風車音大きい時間帯に対して、実測時間10分として除外音処理を施して算出した6施設毎の代表周波数特性(各施設7地点の算術平均値)を比較すると、高周波数に向かって-3~-4 dB/Oct.の周波数特性を示し、施設毎に特徴的な卓越成分が見られる(施設Aでは31.5 Hzと125 Hz、施設Bでは25 Hzと160 Hz)。



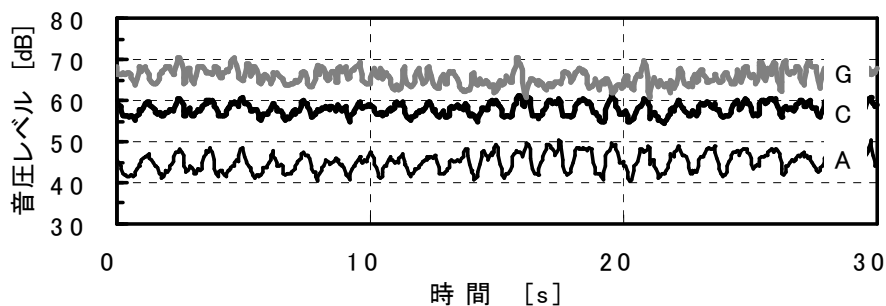


図 周波数重み特性音圧レベルの時間変動

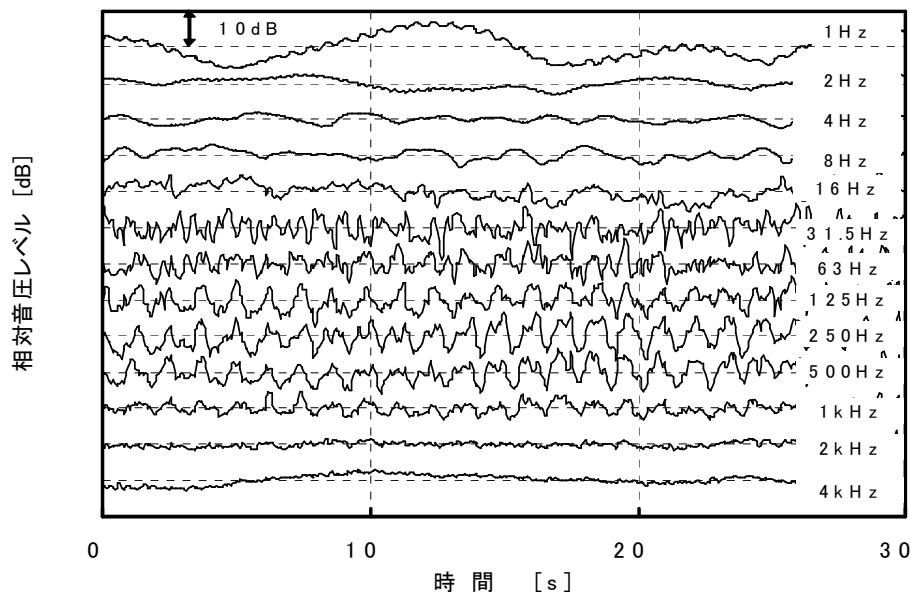


図 1/1 オクターブバンド音圧レベルの時間変動

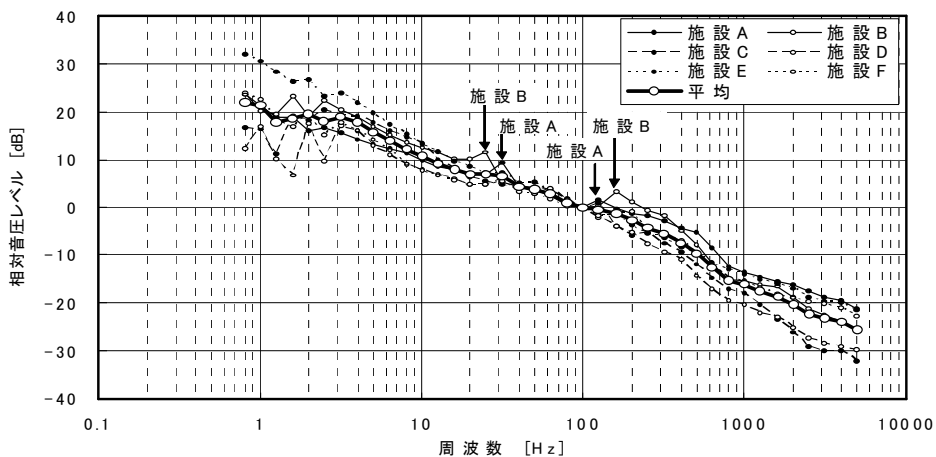


図 風車騒音の周波数特性

次に曝露側における評価量について、「簡潔かつ実務的で住民に説明しやすいこと」、「既存の方法とできる限り関連性があること」、「予測可能で、物理的な意味が明確であること」に着目して  $L_{peq}$  が適当とし、風車騒音のレベルが大きくないことから除外音処理が必要と指摘している。

環境基準や騒音規制法に基づく騒音評価において A 特性音圧レベルが使用され、低い周波

数域に大きな成分をもつ騒音(トンネル発破音等)に対して C 特性音圧レベルが適するととの指摘を参考にして、風車騒音の周波数スペクトル(A 特性)と各種の交通騒音のそれを比較している。風車騒音は A 特性で評価した場合 200~500 Hz の低い周波数域に主成分がありトンネル発破音等の周波数特性(C 特性)に近く、トンネル発破音等は C 特性による評価が必要との指摘があるため、風車騒音も LCeq による検討が必要と述べている。

周波数特性の分析では除外音処理が重要であるが、超低周波音領域の除外音は実音をモニタしても音源識別が困難であるため、周波数毎の音圧レベルの変動波形を参考にしながら現地の状況を踏まえて判断するしか方法はなく、その一方可聴域であれば実音モニタによる音源識別が可能としている。

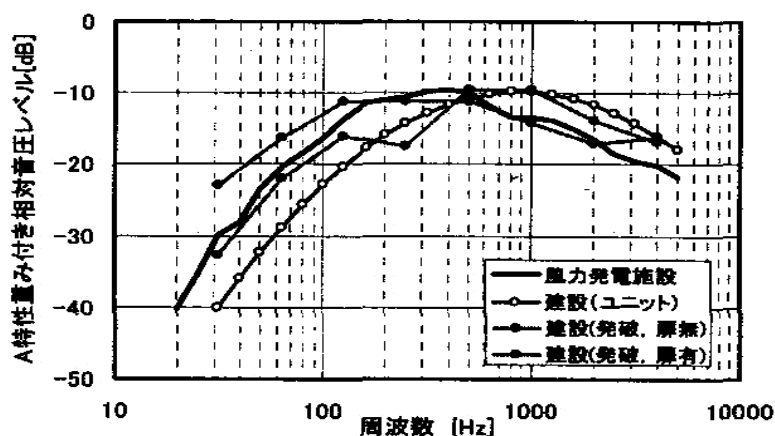


図 建設作業騒音と風車騒音との周波数特性の比較

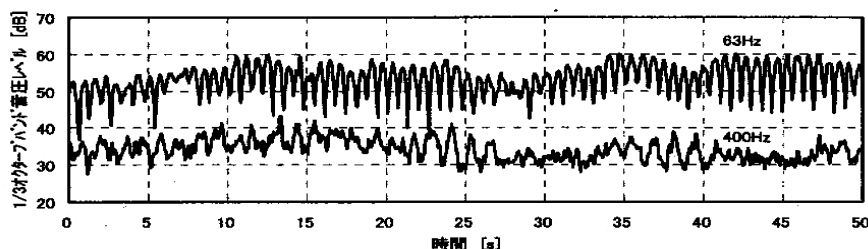


図 周波数毎の音圧レベルの変動波形を用いた除外音処理の例

### ③ 風車騒音の分析における暗騒音の影響除去と分析対象時間帯

風力発電施設周辺の民家における騒音の実測例を示し、暗騒音の影響を除去するための除外音処理の方法と曝露側の評価における分析対象時間の設定について、主に報告している。

暗騒音の影響を除外する一般的な方法として、a)音圧レベル波形による判断、b)実音をモニタすることによる判断、c)周波数特性による判断、を活用することが基本としている。風が強い日に実測された風車騒音を用い、暗騒音の影響を除外する前後での  $L_{peq,10min}$  とそのレベル差を、周波数重み特性 A 特性、C 特性および G 特性で比較している。その結果、レベル差は概ね 0~5 dB であり、A 特性音圧レベルで除外音処理の効果が顕著である。

分析対象日・時間帯として、数日間の測定の中から風車騒音が大きい日あるいは時間帯を対象とし、あわせて風車騒音のインパクトを検討するために風車が稼働していない時間帯を分析して暗騒音を把握することも重要である。その際、昼間は暗騒音の影響を受けやすい点を考慮し、基準となる時間帯を夜間(22:00～06:00)あるいは夕(19:00～22:00)と提案している。その上で、観測時間全体に対して除外音処理を施すことは実務的ではないとの理由から、観測時間1時間、実測時間を10分として除外音処理をして分析する方法を提案している。

以上の方法を実測結果(観測時間8時間、実測時間10分×8)に適用して算出した風車騒音の夜間時間平均周波数特性とLAeq, LReq, LGeqが大きい観測時間1時間の周波数特性とを比較したところ両者はほぼ一致し、結果としてLAeq, LReq, LGeqが大きい1～2時間を対象として詳細に分析することを提案している。

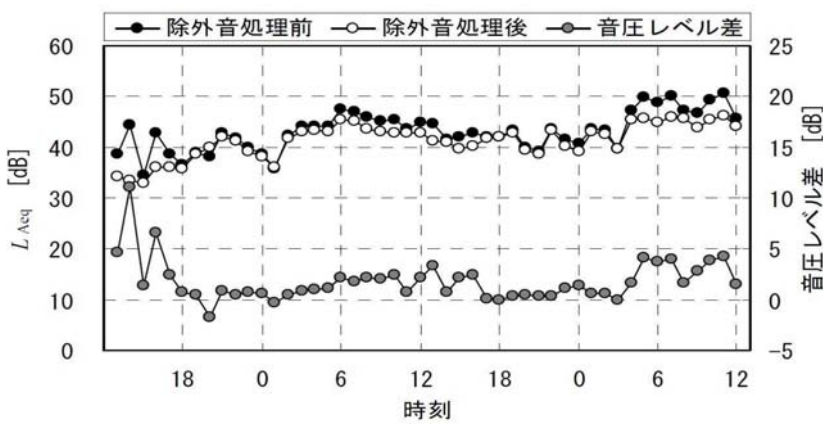


図 暗騒音の影響の除去例(A 特性音圧レベル)

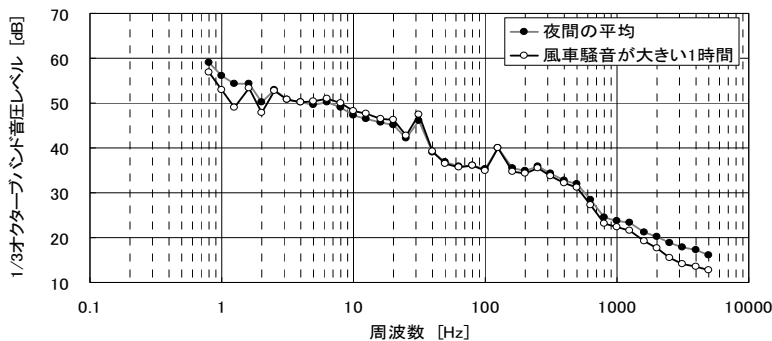


図 風車騒音が大きい1時間と夜間平均との周波数特性の比較

#### ④ 風力発電施設周辺における残留騒音の推定

風力発電施設周辺における騒音の実測結果を基にした残留騒音の推定方法を検討している。

対象とした風車のナセル上のカットイン風速(3 m/s)を指標に、それ未満の時間帯の95%時間率騒音レベルLA95と除外音処理を施して算出したLAeqを比較した結果、両者はよく一致することを確認している。

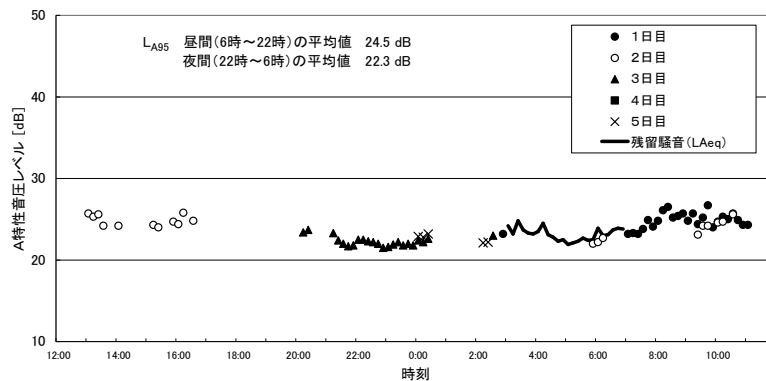


図 LA95と除外音処理したLAeqの時間変動

⑤ 低周波数域に主成分をもつ騒音計測用の防風スクリーンの開発

これまでに開発された二重ネット構造を保ちながらできる限りサイズを抑えた小型防風スクリーンを開発し、屋外における実測結果からその有効性を述べている。

試作された防風スクリーン(小型円筒形 WS)は高さ 200 mm、直径 200 mm の円筒形で二重ネット構造をしている。マイクロホンには 84 mm 径のウレタンフォームを被せ、それを 20 mm 厚の円筒形ウレタンフォームで再度覆って、その外側と内側にネット(それぞれ、1.59 mm メッシュと 80 μm メッシュ)を配置している。1 Hz~2 kHz の周波数範囲における挿入損失はほとんどない。

屋外で小型円筒形 WS を地上 1.2 m に設置した実験における風速と小型円筒形 WS の風雑音除去性能との関係は、9 cm 径球形防風スクリーンのそれと比べて約 10 dB 高い。これを風速 4~8 m/s に対する周波数別の低減効果と比較すると、特に 4~31.5 Hz の範囲で小型円筒形 WS は 8~10 dB 程度であった。既往の研究で得られているような二重ネットの効果は現れていない。

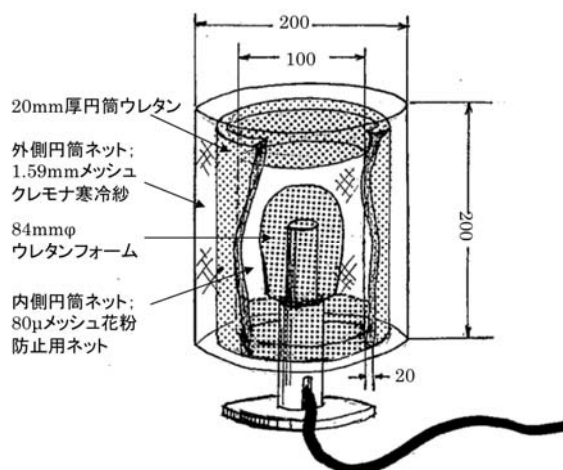


図 試作された小型円筒形 WS

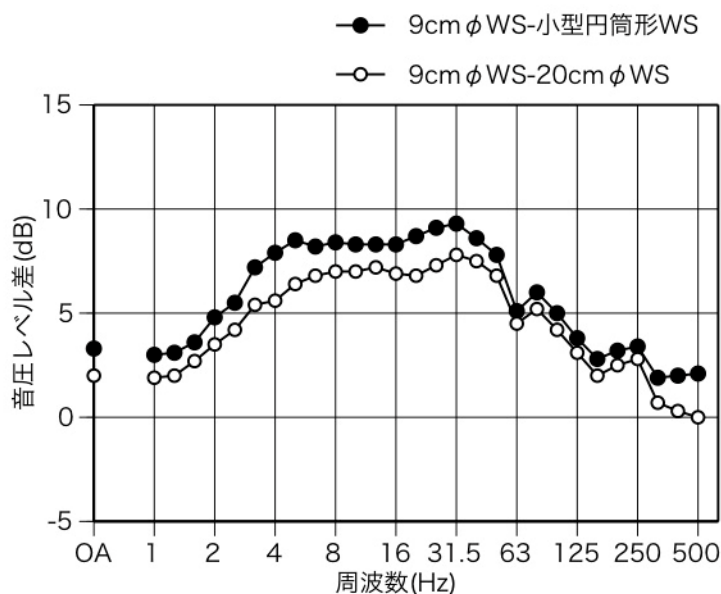


図 周波数別の風雑音低減効果

## 9 各国の風車騒音の基準

上述の書籍「風車騒音 (Wind Turbine Noise)」を基本に、各国の規制的な取り組み方に関して整理を行った。なお、最新の状況については、それぞれの関連当局に問い合わせる必要がある。

### (1) オーストラリア

オーストラリア環境保護遺産委員会 (EPHC) は、国家風力発電開発ガイドラインの草案を準備した。これは、オーストラリア規格 AS 4959 “音響学 - 風力発電機からの騒音の測定、予測および評価” (2010) に対する補足的な手引と位置付けられる。このガイドラインは、管轄地域に適用する基礎指針を開発する規制当局を支援することを目的としており、既存の L90 に基づく A 特性による相対限度の制定を示唆し、最低限度あるいは下限に関する条項も含んでいる。

既存の下限は管轄区内で異なり、35dBA から 40dBA の間で変化する。測定量も様々で、Leq、L10、L90、L95 が含まれる。45dBA よりも高い騒音の最低限度は居住地域に対する追加的な低減措置が実行されない限り望ましくないが、このガイドラインから、プロジェクト参加者あるいは利害関係者がより高い騒音レベルに同意するだろうと思われる。純音性について 5 dB のペナルティが示唆される。

このガイドラインは最大騒音レベルに言及しない。しかし、全稼働ないし提案されるプロジェクトに対して累積するレベルへの配慮を示唆する。そのようにすることがある地域における追加的な風力発電開発を難しくすることがある。ガイドラインは以下についても注意を呼び掛けている：

「風力発電所によって発生する低周波音 (low frequency noise) や超低周波音 (infrasound) のレベルは、通常、健康影響を引き起こすために要する最大レベルよりも十分小さい。結果として、これらのガイドラインは低周波音や超低周波音の特別な評価を求めない。しかし、苦情への対応を評価する手引を示す必要がある。」、また、「風力発電に伴う地盤振動は、施設境界外の人々に知

覚されそうにないので、これらのガイドラインで特に言及されない。」とされている。

2011年6月にオーストラリア議会は、審議を終え、「郊外の風力発電施設の社会的・経済的な影響」と題するレポートを発行し、そこで、下記のように推奨している。

- ・郊外の風力発電施設の計画や運用に関して州や地域によって採用される騒音規格は、影響を受ける住居内における低周波音と振動の影響を推計するための適切な手法を含むこと、
- ・住居と風力発電所の施設との間の分離基準に関する政策の開発を一層考慮すること、

オーストラリア・ビクトリア州は、2011年8月に風力エネルギー施設に対する政策と計画に係るガイドラインを改訂した。改訂されたガイドラインは、提案された風力発電施設の2km以内にある住民から同意を要求し、以下で議論されるニュージーランド規格6808(音響学 - 風力発電所からの騒音)の2010年改訂を参照している。

## (2) カナダ

風力発電からの音の評価のためのオンタリオ州環境省(MOE)のガイドラインは、最低限度と最高限度をもつ相対限度を定めた。現在の暗騒音レベルを定めるために監視を要求する代わりに、風に起因する暗騒音レベルの推定を定めた。規格は、ISO 9613の中で使用される様々なモデル変数も規定する。この規格では、穏やかな風速下で郊外にある住居において(限度は)実質的に40dBAとなる。

## (3) チェコ共和国

チェコ共和国で制定された産業ガイドラインが風力発電に適用され、昼間50dB(LAeq,8h)、夜間40dB(LAeq,1h)と報告されている。5dBAのペナルティが純音成分に対して課され、10Hzから160HzのZ特性による1/3オクターブバンドを評価することによって決定される。純音性を有するバンドは、可聴閾値と同時に5dB以上両隣のバンドを超えなければならない。IEC 61400-11による風下側の測定と受音点におけるISO 9613に基づいたプロジェクトレベルの推計を組み合わせ、法令遵守が図られる。

## (4) デンマーク

デンマークはIEC 61400-11による10m高さの風速6m/sと8m/sに対して絶対限度を定めた。風力発電の所有者でない住居から15m以内の屋外において、限度は6m/sの場合42dBA、8m/sの場合44dBAである。騒音に対して配慮が必要な地域では、6m/sの場合37dBA、8m/sの場合39dBAである。騒音に対して配慮が必要な地域、地域開発に関する文書で指定され、住居、夏場の別荘および娯楽地域を含んでいる。

規制は、測定方法とともに幾何拡散とオクターブバンドの空気吸収に基づく予測方法を定める。受音点において純音が確認された場合、5dBAのペナルティが課される。2011年11月、デンマーク環境相は、産業界、自治体および市民からの要請に応じて、風力発電に伴う低周波音(low frequency noise)に対する限度が明確化される、と声明を出した。この限度はデンマークのほかの産業に対して定められたものと類似すると考えられる。環境相は、「低周波音がそれ以外の騒音よりも有害であるという証拠は示唆されない。」し、「今日のデンマーク内にある風力発電施設は、極近傍であっても可聴閾値より低く、非常に弱い超低周波音を放射するのみである。したがって、超

低周波音は最新の風力発電施設について問題ではない。」と特に言及した。最終的な規則は2011年末までに出されると考えられる。

#### (5) ドイツ

ドイツの風力施設は、受音側の土地利用に対して A 特性による限度を定める騒音の技術指針 (TA Lärm) に従わなければならない。施設の複合による累積効果は、下表に示す限度を超えないように考慮されねばならない。

表 ドイツの騒音限度

受音側の土地利用	昼間 (dBA)	夜間 (dBA)
村や混合利用	60	45
都市住居地域	55	40
住居専用地域	50	35
健康への配慮を要する施設	45	35

#### (6) フランス

2006年のフランス近隣騒音規制は、風力発電からの騒音を明確に規制することを定めなかったが、許可を得て法令を遵守することを基本としている。これらの規制は、屋外で30dBAの最低限度で、昼間5dB、夜間3dBのLeqに基づいて評価される相対閾値を定める。加えて、屋内レベルが25dBAの最低限度(窓の開閉を加味)と、125Hzから250Hzのオクターブ中心周波数に対して7dB、500Hzから4000Hzのオクターブ中心周波数に対して5dBの相対オクターブバンド限度によって評価される。相対限度の規制的な特性と結果的な法令遵守の評価に関連する努力を仮定すれば、騒音対信号レベルをより正確に測定しなければならない風力発電近傍で、二者択一の限度を定めると考えられる。その限度は、受音点におけるレベルが適切な限度に従うように定められ、実行されれば、チェコの取り組み方を反映すると考えられる。

#### (7) イタリア

風力プロジェクトの法令遵守を適用可能な騒音限度で評価する特定の手引が検討されている。現在、風力発電施設に対する騒音限度はそれ以外の産業施設からのそれと類似した方法で定められている。絶対限度は、自治政府によって割り振られた区分けあるいは土地利用の分類に基づいている。これらの分類は、保護地域から専ら産業地域まで様々である。自治体が音響的な分類を定めていない場合(国レベルの方法に依存するよりはむしろ音響的な分類を割り当てるのが自治体に期待されるが)、国レベルの分類が適用される。

絶対的限度に加えて、この規制は住居内において昼間5dBA、夜間3dBA(Leq)の相対閾値も定めている。規制上の最低限度が、窓の開閉状態の両方において相対的な室内基準を評価するために定められている。窓が開いた状態で、室内レベルは適用される相対テストに対して昼間50dBAあるいは夜間40dBAを超えなければならない。窓が閉まっている状態で、同じように、室内レベルは昼間35dBAないし夜間25dBAを超えなければならない。Ziliani(2009)によって要約されたプロジェクトでは、住居において適用可能な屋外の絶対限度は昼間70dBA、夜間60dBAで

あった。Bartolazziら(2009)は住居における類似した屋外レベルを報告している。

表 自治体の土地利用互換ガイドライン

土地利用分類	昼間	夜間
I-保護地域	50	40
II-住居地域	55	45
III-混合地域	60	50
IV-専ら人間活動の地域	65	55
V-専ら産業地域	70	60
VI-産業地域	70	70

表 イタリアの国土利用互換ガイドライン

土地利用分類	昼間	夜間
全国土	70	60
A 区分:歴史的都市地区	65	55
B 区部:専ら住居地域	60	50
産業地域	70	70

## (8) オランダ

オランダにおける風車騒音に対する規制は、2010年に改訂された。従来の規制は、住居側の騒音レベルが10m高さの風速と相関するカナダ・オンタリオ州の場合に類似していた。新しいオランダの限度は、毎年のハブ高さにおける風速統計から個々の時間区分(昼間、夕方、夜間)に対して決定される長期平均音響パワーレベルに基づいている。限度はEU指標Lden(47 dBA)とともにLnight(41 dBA)である。

このオランダの予測モデルは、ISO 9613シリーズに類似しており、伝搬は風下条件で計算され、周期的な風上条件に伴う減衰を説明するために、その後で調整が加えられる。新たな必要条件では、優勢な風向が考慮され、受音点から風力発電を臨む角度に依存する補正項を導入している。また、風力発電自身の指向効果も補正されるが、これらの気象補正は2.5(卓越して風下側にある住居)から7.5 dBA(卓越して風上側にある住居)の範囲である。風力施設の法令遵守のための測定として長期間Ldenは課題が多いことで知られているため、提案された方法は、稼働記録を評価、実際の年間音響パワー分布を計算し、それによって受音点における音圧レベルが予測される。測定は、風力発電の音響パワーが許可段階で示されたレベルに従っているかを評価するために使用され、すなわち発電機の音響パワーレベルの検証を行っている。

47 dBAという屋外におけるLden限度は、風車騒音に対して屋内で非常にうるさい(highly annoyed)と訴える住民割合を8%に制限することに基づいている。41 dBAというLnight限度は、睡眠妨害を扱うために定められた。van den Bergやその参考文献で議論されるように、風車騒音と睡眠妨害の間の量反応関係はまだ十分に開発されていない。41 dBAというレベルは、音源は定かではないが、音によって少なくとも月に一度睡眠が妨害されたとメールによる調査で回答した人の



25 %と関連する。41 dBA に Lnight 限度を設定する過程で、WHO のヨーロッパにおける夜間騒音のガイドラインが考慮された。これらの閾値を決める過程で評価された住民は、風力施設から財政的な利益を得ていない人々である。利益を得ている人々にはうるささや睡眠妨害をわずかに見出せるかどうかである。

### (9) ニュージーランド

2010 年、ニュージーランドは、風力発電所からの騒音のための規格を更新した。New Zealand 規格 6808 音響学-風力発電施設からの騒音である。この規格では、風力発電所からの音のレベルが LA90(10min)値で 40 dBA あるいは(住居を含む)騒音に敏感な地域で LA90(10min)による現在のバックグラウンド騒音より 5 dBA 大きい値のいずれか大きい方を超えてはいけない。「風に起因するバックグラウンド騒音レベルがこの値(相対限度)より大きい場合に風力発電所からの音のレベルを固定値に制限することが音響的な利益を与えない。」ため、相対的限度は適切であると述べている。

付加的な規制が夕方や夜間の高い快適性を有する地域に対して課されるが、これらの限度は LA90(10min)値で 35 dBA より小さくなくていい。騒音限度は、騒音に敏感な地域に影響を及ぼす全ての風力発電所からの累積したレベルに適用されるべきである。計画されている新しい風力発電所の予測レベルが、現在の風力発電施設よりも少なくとも 10 dB 小さいならば、累積効果は考慮されない。予測が採用される場合、予測された Leq レベルは、上記の基礎指針によって法令遵守を評価する目的で L90 レベルと見なされる。特異な可聴特性にはペナルティ(例えば純音性、衝撃性、振幅変調)が課され、全てのペナルティの合計は 6 dB を超えない。超低周波音、低周波音(low frequency noise)あるいは地盤振動に係る付加的な規制は正当化されないと記されている。

風力発電所からの騒音レベルが IEC 61400-11 に従って決められた音響パワーレベルを用いた ISO 9613 で予測される。この規格はバックグラウンド騒音レベルや計画騒音レベルを測定・評価する手続きを定める。ハブ高さの風速が現在のバックグラウンド騒音レベルと計画騒音レベルの双方を評価する場合に使用される。

### (10) 韓国

韓国は、産業音源に対して下表に示すガイドラインを定めた。これは風力発電にも適用される。

表 産業音源に対する韓国のガイドライン

地域	昼間(dBA)	夜間(dBA)
産業地域	70	60
住居と産業との混合地域	65	55
専ら住居地域	55	45
病院、健康施設等の地域	50	40

### (11) スウェーデン

スウェーデン環境保護庁(SEPA)は、風力発電に伴う騒音に関するガイドラインを定めた。SEPA

の Web サイトには、風力プラントからの騒音レベルが 10 m 高さの風速 8 m/s において Leq で 40 dBA を超えてはいけなると述べられている。静けさがあり適用可能な基本計画文書中に重要な価値として認められた地域に対して 35 dBA が定められている。純音性の騒音が受音点において存在すれば、5 dBA の純音ペナルティが課せられる。陸上施設に対して、A 特性に基づく 2 つの伝搬モデルが定められており、一つは最も近い風車までの距離が 1000 m 未満の場合で、他方はそれよりも長距離の場合である。

## (12) イギリス

イギリスで風力発電に対して共通して参照される騒音に係る必要条件是、通商産業部による「風力発電所からの騒音の評価」であり、一般に文書記号 ETSU-R-97 と呼ばれている。この文書に記述された方法は、公衆衛生員、風力発電操作員および独立した音響専門家を含む横断的な人々から構成された作業グループによって 1996 年に開発されている。ETSU-R-97 の目標は、推奨となるまで「風力発電所に対する不適切な規制を課すことなく、あるいは風力発電事業者や地方自治体にコストや行政的な負荷を過度に与えることなく、風力発電所の周辺住民の適切な保護を提案するような騒音レベルを示すこと。」であった。

ETSU-R-97 は、快適作業 (Quiet waking) と夜間で異なる限度が適用されるべきと述べている。快適作業の限度は、屋外における快適さを保全することを目指し、夜間の限度は、睡眠妨害を防ぐことを目指している。示された限度は、下表に要約され、風速の関数である。快適作業は、バックグラウンド騒音レベルが低く、騒音の最低限度は 35~40 dBA と定められた。正確な数字は、近隣住居の数、生成されるエネルギーに係る騒音限度の効果および騒音曝露の期間とレベルを含む多くの要因に依存する。

(注) 原本の「Quiet waking」について、ここでは快適作業と仮訳した。

表 許容される騒音レベルの基準

時間帯	許容される騒音レベル
快適作業 (Quiet waking hours)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・30~35 dB(A)よりも小さい LA90,10min に対して、35~40 dB(A)</li> <li>・30~35 dB(A)よりも大きい LA90,10min に対して、LA90,10min +5 dB(A)</li> </ul>
夜間	<ul style="list-style-type: none"> <li>・38 dB(A)よりも小さい LA90,10min に対して、43 dB(A)</li> <li>・38 dB(A)よりも大きい LA90,10min に対して、LA90,10min +5 dB(A)</li> </ul>

昼間あるいは快適作業よりも、夜間において高い騒音レベルが許容される点は興味深い。夜間の基準は、ETSU-R-97 で参照される睡眠妨害 35 dBA から導出され、窓を開けることによる減衰として 10 dBA の許容量、LAeq ではなく LA90 を使用することによる 2 dBA の補正を含んでいる。

上述のように、現在の L90 値を超える 5 dBA の相対値を評価するために、必要条件是背景騒音の測定に著しく依存する。ガイドラインはまた、影響を受ける土地所有者が風力発電所と財政的な関わりがある場合、レベルの増加を考慮すべきであると指摘する。Bowlder (2007) は、規制に係る届出書から事例を示し、モニタリング結果の解釈における課題と変化とについて議論している。

### (13) アメリカ

アメリカは、風力発電に対する連邦政府の騒音に係る必要条件を持ってない。僅かな州で産業騒音に対する規制があるのみである。それゆえに、風力発電を含む商業規模のエネルギー計画に関する騒音の必要条件是、地域のより様々であり、許可に際して州毎に様々な騒音に係る必要条件が課されている。例えば、オレゴン州における大規模な再生可能化石燃料プロジェクトでは、州に許可を求め、州から詳細な環境面のレビューを受けた。カリフォルニア州やワシントン州では、風力発電計画に対して州に許可を求めず、地方の市や郡が主導的な許可官庁である。

なお、オレゴン州は風力発電施設からの騒音を扱うための必要条件を改訂している。

### (14) 土地管理事務所 programmatic IEC

アメリカ内務省(DOI)土地管理事務所(BLM)は、12の西部に位置する州内の公用地264百万エーカーを管理する連邦官庁である。BLMは、管理する土地における風力エネルギーの開発に責任を持つ。BLMは、「西部アメリカ内のBLM管理地における風力エネルギー開発に関する最終環境影響評価宣言」を用意した(2005)。風力プロジェクトの騒音影響を評価するために関係する主要な事項は以下の通りである。

- ①BLM 管理地における多くの風力エネルギープロジェクトで広帯域騒音の大きな変動が一般的であり、10 dBの増加でさえ有害な社会反応の原因となることは考えにくい。
- ②典型的な郊外の環境に対して、背景騒音はおおよそ昼間 40 dB(A)、夜間 35 dB(A)、あるいはDNLで 35 dB(A)であると思われる。
- ③EPA ガイドラインは、概して静かな屋外において幅広い環境騒音の影響から公衆を保護するために昼夜間騒音レベル(Ldn)で 55 dB(A)を推奨する(1974)。このレベルは規制的な目標ではないが、安全に関する付加的なマージンを含み、アメリカ国民の中で最も配慮すべき人々を保護するために国際的な観点から保守的(なレベル)である。

上記事項は規制ではないが、BLM が個々のプロジェクトにおける騒音影響の重大さをどのように評価するかを示し、個々のプロジェクトがどのように騒音を扱うことを求められるのかに関するガイドラインを与える。

### (15) ワシントン州

ワシントン州の一般的な騒音規則が風力発電に適用され、州が独自に承認する騒音規格を開発にかかわる地方管轄区が許容する。初めに実施したのは、シアトルのような都市社会である。ワシントン州の騒音限度は、その低減に対する環境面の指摘(EDNA)に基づき、「最大許容騒音レベル(maximum permissible noise level)が定められた地域あるいはゾーン(または環境)」と定義されている。3つのEDNA指摘があり、それらは居住地域、商業/娯楽地域、産業/農業地域に概して対応する。下表は、居住地域のような騒音に配慮すべき地域(class A EDNA)と産業/農業地域(class C EDNA)における騒音に適用される最大許容レベルを要約する。

表 ワシントン州の騒音規制

統計指標	Class C EDNA からの最大許容騒音レベル (dBA)		
	Class A EDNA 受音点		Class C EDNA 受音点
	昼間 (7 am～10 pm)	夜間 (10 pm～7 am)	常時
Leq	60	50	70
L25	65	55	75
L8.3	70	60	80
L2.5	75	65	85

### (16) オレゴン州

オレゴン州騒音規制(オレゴン州行政規則 340 章 35 節)は、2 つの騒音規格を含んでおり、通常、「表 8 テスト」と「環境悪化テスト」と呼ばれている。「表 8 テスト」は、規則中の表 8 を参照し、プロジェクトによって発生する最大許容される統計的な騒音レベルを制限している。「環境悪化テスト」は、既存の L10 あるいは L50 を最大 10 dBA までの増加に制限している。

表 オレゴン州の「表 8 テスト」の最大許容レベル

	昼間 (7 am～10 pm) (dBA)	夜間 (10 pm～7 am) (dBA)
L50	55	50
L10	60	55
L1	75	60

規則は L50 で 26 dBA という最小バックグラウンド騒音 (minimum background) を受け入れることによって環境悪化規格に従うことを申請者に課している。これらの基準の評価は、大規模な風力エネルギープロジェクトの許可を監督する州官庁の要請に沿った最大保証音響レベルで稼働する全発電機で通常実施される。規則は、環境悪化規格から騒音低減に取り組む特性を免除する。騒音低減に取り組む住居に対して、50 dBA の「表 8 テスト」による限度が実施される。

### (17) コロラド州

コロラド州騒音規制は、風力発電に特に言及していない。この規制は、住居地域において夜間 50dBA を超える不動産線から放射される騒音が社会苦情を生むことに注意を促す。加えて、騒音が「断続性やうなり周波数あるいは甲高さによって不快でない。」ようにしなければならない。そして、規制は「周期的で衝撃性あるいは甲高い騒音」に対して 5dBA のペナルティを含む。これらの定性的な用語のいずれもが定義されていない。法令遵守のための測定は、風速が時速 5 mile (秒速 2.2 m) を超えない時に行う必要がある。コロラド州内の 340 を超える地方管轄区が付加的な騒音に係る必要条件を持つ。

### (18) イリノイ州

地域が独自の規格を定めるが、産業起因の音源に対するイリノイ州公害制御委員会 (IPCB) の騒音規制が風力発電に適用される。IPCB 規制は受音と音源の土地利用分類を特定する。土地

利用分類は通常、住居地域(class A)、商業/小売地域(class B)、農業/産業地域(class C)と関連する。郊外の住居を含む全ての住居が class A と考えられる。最も制約を受ける騒音規格は、下表に要約されるように、騒音を放射する class C と騒音を受ける class A に関して定められた基準を用いて住居における予測レベルを評価することによって決められる。限度はオクターブバンドのみについて定められ、風力発電プロジェクトについて 500 Hz ないし 1000 Hz オクターブバンドが制限限度となる傾向があることに注意を要するとしている。

表 イリノイ州の騒音規制-Class C(産業)から Class A(住居)へ発せられた音圧レベル

	オクターブバンド中心周波数(Hz)								
	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
昼間限度 (Leq) 7am-10pm	75	74	69	64	58	52	47	43	40
夜間限度 (Leq) 10pm-7am	69	67	62	54	47	41	36	32	32

#### (19) メイン州

「開発内の繰り返し作業」に対するメイン州環境保護局の騒音規制が風力発電に適用されるが、地域が州規制を 5 dBA 以上超えないとする独自規格を定めることができる。プロジェクトが開発前の1時間 Leq で昼間 45 dBA 以下、あるいは夜間 35 dBA 以下である地域に対して提案される時、保護されるべき住居地域における限度は、1時間 Leq で昼間 55 dBA、夜間 45 dBA となる。既存のレベルが 45 dBA/35 dBA を超えている場合、限度は結果的に昼間 60 dBA、夜間 50 dBA になる。純音性と短時間繰り返し音に対してペナルティが課せられる。

2011 年 9 月、メイン州環境保護委員会は住居地域や商業地域の近傍で稼働する商用風力発電に対して一層厳しい騒音規制を課すことを可決した。この提案は、夜間の騒音限度を 45dBA から 42dBA に下げることを含み、法令遵守がどのように評価されるかを更に詳細に示し、「短時間繰り返し音」がどのように評価されるかも明確にした。2011 年 10 月現在、州議会は委員会の提案を採択していない。