

風力発電等による低周波音・騒音の健康影響：疫学文献レビュー

クボ 久保 達彦* タツヒコ 蓮沼 英樹^{2*} ハスヌマ 蓮沼 英樹^{2*} ヒデキ 英樹^{2*} モリマツ 森松 嘉孝^{3*} ヨシタカ 嘉孝^{3*}
 フジノ 藤野 善久* ヨシヒサ 善久* ハラ 原 邦夫^{4*} クニオ 邦夫^{4*} イシタケ 石竹 達也^{3*} タツヤ 達也^{3*}

目的 環境負荷の少ないクリーンなエネルギーとして、風力発電の導入が先進国を中心に世界各国で進んでいる。一方で、風力発電施設からの低周波音・騒音に関して近隣住民の健康被害の訴えが報告されており、わが国においても風車騒音に係る基準やガイドライン策定の検討が行われている。そこで本研究では、今後、健康影響を考慮にいたした低周波音・騒音基準の設定を行う上で参考となる知見を明らかにすることを目的に、風力発電風車の近隣住民を対象にした疫学研究について文献レビューを実施した。

方法 風力発電風車からの騒音に伴う健康影響に関する疫学研究論文を、PubMed を用いて収集した。また最新の情報を収集するために関連国際学会 Inter-Noise 2013, Wind Turbine Noise 2015の抄録からも追補的に情報を得た。抽出された疫学研究論文を研究デザイン、研究対象者、曝露評価、アウトカム、交絡要因および研究結果に関する情報別に整理しエビデンステーブルを作成した。

結果 近隣住民を対象とした疫学研究として11件が抽出された（うち2件は国際学会抄録）。アウトカムとして、騒音の知覚（Perception）、アノイアンス（Annoyance：騒音によるうるささ）、ストレス、睡眠との関連が報告されていた。風車騒音とアノイアンス、主観的評価に基づく健康指標の間には統計的に有意な関連が繰り返し報告されていた。影響の大きさは、A特性音圧レベル1dB増加あたりオッズ比1.1程度と2つの研究が報告していた。その他のアウトカムでは影響の大きさに関して研究間比較ができなかった。交絡因子として、風力発電への姿勢、景観に対する姿勢、風力発電からの経済的恩恵、風車の可視性、音への感受性、健康への懸念との影響が報告されていた。

結論 風力騒音とアノイアンスについては、主観的評価に基づく健康指標の間には統計的に有意な関連が繰り返し報告されていた。ただし、アノイアンスが風力発電施設建設に対する心理的影響なのか、騒音曝露による心理的影響なのかについて、現状のエビデンスにおいてはその区別が明確にはつけられない状況であった。

Key words：風力発電，騒音，低周波音，アノイアンス，健康影響，疫学

日本公衆衛生雑誌 2017; 64(8): 403-411. doi:10.11236/jph.64.8_403

I 緒 言

環境負荷の少ないクリーンな電気エネルギーとして、自然風を利用して発電を行う風力発電の導入が先進国を中心に世界各国で進んでいる。Global Wind Energy Councilの調査によると、世界の風力

発電能力は、2004年末時点の47,620 MW から2014年末には369,597 MW と10年間で飛躍的に増加している¹⁾。

一方、風力発電施設からの低周波音・騒音に関して近隣住民からの苦情や健康被害の訴えが報告されている²⁾。日本の環境省が2010年に実施した実態調査（風力発電施設に係る騒音・低周波音の実態把握調査）³⁾によると、騒音・低周波音に関する苦情や要望書が提出されたことがある施設は16.5%であり、施設の稼働開始年度別では、2006年度以降、発生割合が高くなっている。最近では、新たな風力発電施設を設置する計画があっても、住民への健康影

* 産業医科大学医学部公衆衛生学

^{2*} 環境情報科学センター

^{3*} 久留米大学医学部環境医学講座

^{4*} 帝京大学大学院公衆衛生学研究科

責任著者連絡先：〒807-8555 福岡県北九州市八幡西区医生ヶ丘 1-1

産業医科大学医学部公衆衛生学 久保達彦

響が懸念され、計画変更せざるを得ない事案も出現している⁴⁾。

今後、風力発電のさらなる推進を図るためには、健康影響を考慮にいれた騒音基準を設定してガイドライン等で示すことが求められており、デンマーク、英国、オランダ等では風車による騒音規制基準やガイドラインの策定が進められている一方、日本を含む多くの国ではそのような設定はされておらず、国際的に騒音規制基準が統一される状況にも至っていない⁵⁾。

そこで本研究では、今後、健康影響を考慮にいれた低周波音・騒音基準の設定を行ううえで参考となる情報を収集することを目的として、風力発電風車の近隣住民を対象にした風力発電風車設置に伴う低周波音・騒音の健康影響を検討した疫学研究について文献レビューを実施した。

II 研究方法

疫学研究の論文検索は、査読論文を中心に行うためPubMedを用いた。検索方法は、風力発電を定義する言葉として“wind turbine”, “wind turbines”, “pinwheel”, “wind mill”, “electricity produced by wind power”, “power generation by wind”, “wind electricity”, “wind force power generation”, “wind generation”, “wind-generated electricity”, “wind-generated power”, “wind-power generation”, “wind-powered electricity”, 低周波音・騒音を示す用語として“low-frequency noise”, “low-frequency wave”, “Wind turbine noise”, “Noise/adverse effects”を掛け合わせて行い、言語は英語とした。2015年4月30日時点で、上記キーワードにより検索された英語論文は79件であった。これらのうち、低周波音の物理工学の論文12件、イルカ、アザラシなど動物や水中騒音の影響に関する論文13件、低周波音に関する記述がない論文7件、近隣住民対象の疫学研究ではない論文38件を除外した。結果として、近隣住民を対象とした疫学研究の論文は9件であった。これに、国際騒音制御学会 (INTER-NOISE) 2013および風車騒音に関する国際会議 (Wind Turbine Noise) 2015の発表から得られた日本⁶⁾とカナダ政府^{7,8)}の研究2件を加えた。これら2件は、peer-reviewされた論文ではない。

これらの対象論文より、これまでの知見の整理と今後の課題を明らかにするため、研究デザイン、研究の実施された地域、研究対象者、曝露評価、アウトカム、交絡要因および研究結果に関する情報について整理した。なお本研究は個人情報を取り扱わない文献レビューであるため、倫理審査委員会による

審査は受けていない。

III 研究結果

1. 研究デザイン・研究地域

近隣住民を対象にした研究11件について、その研究デザインは断面研究が10件^{6,8~16)}、とそれらのうち3研究を統合したプール解析1件¹⁷⁾であった(表1)。研究地域は、アメリカ2件、オランダ2件、スウェーデン2件、ニュージーランド1件、ポーランド1件、カナダ1件、日本1件さらに、オランダとスウェーデンのプール解析1件であった。欧米での研究が大多数を占めていた。研究対象者数は、62~1,820人であった。

2. 曝露評価

研究で採用された曝露評価の指標としては、風力発電施設からの距離が2件、騒音モデル推計値が7件、騒音実測値を用いた研究が2件であった。

風力発電施設からの距離の2件の論文は、どちらも近隣住民と遠隔地住民との2群比較を行っていた。Nissenbaumら¹¹⁾は風力発電施設の近隣375~1,400mと遠隔地(3.3~6.6km)の住民を、Shepherdら¹³⁾は風力発電施設から2km以内の住民と8km以上離れた住民を対象にして比較検討していた。

騒音モデル推計値による研究では、風力発電機メーカーからの発生音に関する技術データを用いて、風速などの気象条件を設定し、住民の居住地における騒音レベルを推計していた。曝露指標としては、A特性音圧レベルが6件、昼夕夜平均騒音レベルが1件見られた。解析では、多くの論文で、カテゴリー化(例えば、30dB以下、30-34dB、35-39dB、40-44dB、45-50dB)を行って解析に用いていた。

騒音実測値を用いた研究では、Magariら⁹⁾は、住宅の屋内と屋外で等価騒音レベルの測定を各自宅の屋内外で行っていた。著者は、同研究が各自宅の騒音実測値を用いた初めての疫学研究であると主張していた。Yanoら⁶⁾は、夜間の屋外での等価騒音レベルの測定を行って、アノイアンス(Annoyance:騒音によるうるささ)との関連を検討していた。カナダ政府の研究⁸⁾では、騒音モデル推計値を疫学研究での曝露評価指標として用いるとともに、騒音測定も実施して推計値の妥当性を確認していた。

3. 健康影響評価指標

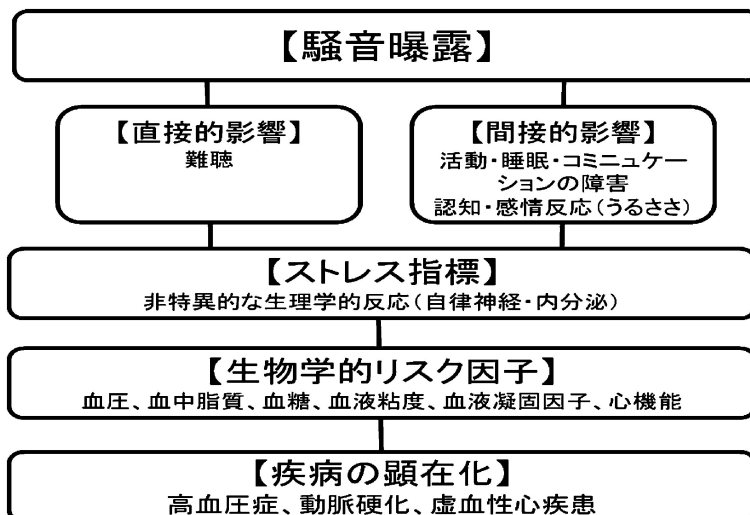
騒音曝露に伴うヒトの反応連鎖について過去には図1に示すようなモデルが提案されていた^{18,19)}。このモデルは風力発電等による低周波騒音を対象として提唱されているものではないが、騒音曝露と健康影響の関連を整理するモデルとして有用であるた

Table 1 風力発電等による低周波音・騒音の健康影響に関する疫学研究

| 著者 | 国 | 研究デザイン/時期 | 対象者 | 曝露評価 | アウトカム | 交絡因子(統計的有意な因子を掲載) | 結果概要 |
|--|-------------|-------------------------------|--|--|---|---|------|
| 1 Shannon R, Magari et al. (2014) ⁹⁾ | 米国・ニューヨーク州 | 断面研究/2011年10~11月 | 風力発電施設の敷地内および周辺の住民62人 | 屋内と屋外で等価騒音レベル (L_{eq} , L_{Aeq}) を測定。 | 質問票 • Perception • Annoyance • 自己申告の健康影響 | 風力発電機からの騒音と Annoyance との間には明確な関連は見られなかった。風力発電による健康影響への懸念と、睡眠障害・ストレスの有病率との間には、相関が見られた。 | |
| 2 Pawlaczek-Luszczynska et al. (2014) ¹⁰⁾ | ポーランド | 断面研究/2011年3~6月 | ポーランドの中心部と北西部にある3つの風力発電施設の近隣住民156人 | A 特性音圧レベルを推計し、4カテゴリー (30-, 35-, 40-, 45-50 dB) に分類 | 質問票 • Perception • Annoyance • 自己申告の健康影響 • 精神健康状態 (GHQ-12) | 屋外では風力発電機の音により Annoyance を感じただ人のオッズ比は、A 特性音圧レベルの上昇とともに増加した。 (OR = 2.1, 95%CI: 1.22-3.62, 5 dB 増加あたり) • 風力発電機への姿勢 • 景観に対する姿勢 • 景観への感受性 • 音への感受性 • 景観の感受性 | |
| 3 Michael A Nissenbaum et al. (2012) ¹¹⁾ | 米国・メイン州 | 断面研究/2010年3~6月 | 風力発電施設の近隣 (3.75~1,400 m) の住民38人、遠隔地 (3.3~6.6 km) の住民41人 | 距離 (2群比較) | 質問票 • 睡眠の質 (PSQI) • 日中の眠気 (ESS) • HRQOL (SF-36v2) | 風力発電施設から1.4 km以内の近隣住民では、遠隔地の住民よりも、睡眠の質が悪く、SF-36v2の精神的健康度も悪かった。 • 風力発電施設からの距離、PSQI, ESS, SF-36v2の精神的健康度の間には量反応関係が見られた。 | |
| 4 R. H. Bakker et al. (2012) ¹²⁾ | オランダ | 断面研究/2007年4月 | 風力発電施設の周辺住民725人 Response Rate: 37% | A 特性音圧レベルを推計し、5カテゴリー (<30, 30-, 35-, 40-, 45-) に分類 | 質問票 • Annoyance • 睡眠影響 • 精神健康状態 (GHQ-12) | 風力発電機の騒音レベルと Annoyance との間は量反応関係が見られた。 • 風力発電機の音を、不快音として認識している者にとっては、音への(長期的)曝露が睡眠障害や精神的苦痛とも関連していた。 • 風力発電機の音を認識しない、または音による障害を受けていないと感じている住民に対しては、健康影響は見られなかった。 | |
| 5 Daniel Shephard et al. (2011) ¹³⁾ | ニュージーランド | 断面研究/2010年 | 風力発電施設から2 km以内の住民39人、8 km以上離れた住民158人 | 距離 (2群比較) | 質問票 • HRQOL (WHOQOL-BREF) | 風力発電施設から2 km以内の近隣住民は、遠隔地の住民と比較して、環境に係わる生活の質 (QOL) が低く (P=0.018)、快適性も低く (P=0.001)、健康状態も悪かった (P=0.017)。 • 社会面・心理面では、近隣と遠隔地の住民の間には、相違は見られなかった。 | |
| 6 Eja Pedersen et al. (2009) ¹⁴⁾ | オランダ | 断面研究/2007年4月 | 風力発電施設から半 km以内の住民2.5万人 | A 特性音圧レベルを推計 | 質問票 • Annoyance • Perception | 音圧レベルと Annoyance に相関係数が見られ、屋外では相関係数 (r=0.50, P<0.001)、屋内では相関係数 (r=0.36, P<0.001) であった。 | |
| 7 Eja Pedersen et al. (2007) ¹⁵⁾ | スウェーデン | 断面研究/2005年 | 7地域の風力発電機の近隣住民754人 | A 特性音圧レベルを推計 | 質問票 • Annoyance • Perception | 風力発電機からの騒音の認知に関するオッズ比は、音圧レベルが増すことで増加 (OR 1.3; 95%CI: 1.25-1.40)、Annoyance に関するオッズ比も、音圧が増すことで増加した (OR 1.1, 95%CI: 1.01-1.25)。 | |
| 8 Eja Pedersen et al. (2004) ¹⁶⁾ | スウェーデン | 断面研究/2000年 | 風力発電機のノイズ 30 dBA 以上の5地域の住民351人 | A 特性音圧レベルを推計 騒音レベル (L_{den}) を推計 | 質問票 • Annoyance • Perception | 風力発電機の騒音は、その他の航空機や交通の騒音等と比べて、比較的低い音圧レベルで Annoyance に感じる。32.5 dBA 以下では Annoyance を感じ人はなく、35.0 dBA 以上で Annoyance を感じる人が増加した。 • 音圧レベルと Annoyance は相関係数が見られた (r=0.421, P<0.001)。 | |
| 9 Sabine A. Janssen et al. (2011) ¹⁷⁾ | スウェーデンとオランダ | 断面研究/3研究のデータ統合(上記No. 6, 7, 8) | オランダ725人 (上記No. 6)、スウェーデン754人 (No. 7) と341人 (No. 8) | A 特性昼夜夜平均等価騒音レベル (L_{den}) を推計 | 質問票 • Annoyance | 風力発電機からの比較的低い騒音レベルの曝露により、Annoyance が誘発されることが示唆された。風力発電から経済的な恩恵を受けている住民の間でより低く、住居から風力発電機が見えた居住者でより高かった。 | |
| 10 Takashi Yano et al. (2013) ¹⁶⁾ | 日本 | 断面研究/2010~2012年 | 風力発電機を所有する36地域の住民747人と、所有しない16地域の住民332人 | 夜間の等価騒音レベル (L_{Aeq}) を測定 | 聞き取り調査 • Annoyance | 風力発電機の夜間等価騒音レベル (L_{Aeq}) と Annoyance について、量反応関係がみられた (P<0.01)。 | |
| 11 カナダ保健省 ¹⁸⁾ | カナダ | 断面研究/2012年 | オンタリオとブリティッシュコロンビアの2地域で、風力発電施設から600 m以内全世帯と600 m~10 kmから無作為抽出した世帯の1,238人 | A 特性音圧レベルを推計 騒音レベルを推計 確認のため、4,000時間以上の測定を実施 | 質問票 • 睡眠の質 (PSQI) • 自己申告の健康影響 • ストレス (PSS) • HRQOL (WHOQOL) • Annoyance • 毛髪コルチゾール血圧 • 安静時心拍数、睡眠効率 | 風力発電機からの騒音は、主観的指標である PQS1、自己申告の健康影響、PSS、HRQOL とは関連は見られなかったが、ブリティッシュコロンビアの関連が見られた。客観的指標である血圧、安静時心拍数、睡眠効率、ストレス、スハイオイオマーカ-の毛髪中コルチゾールと統計的に有意な関連は見られなかった。 | |

A 特性音圧レベル: ヒトが感じる音の大きさを評価するために、A 特性の周波数重みづけ特性をつけて評価した音圧レベル。騒音レベルともいう。記号は L_{Aeq} 。
等価騒音レベル: 変動する騒音の騒音レベルをエネルギー別に重みをつけて求めた一日の等価騒音レベル。記号は L_{den} 。
昼夜夜平均等価騒音レベル: 昼間、夕方、夜間の時間帯別に重みをつけて求めた一日の等価騒音レベル。記号は L_{den} 。

図1 騒音暴露に伴うヒトの反応連鎖 (文献18,19より改編)



め、本稿においてレビュー結果をこのモデルに習い、騒音曝露-騒音の知覚 (Perception) -アノイアンス (Annoyance) -ストレス指標 (Stress indicators) -各疾病の生物学的リスク因子 (biological risk factor) -疾病 (disease) と整理して報告する。

騒音の知覚をアウトカムとして採用した疫学研究は5件で、いずれもアウトカムとして騒音の知覚とアノイアンスをセットで研究に組み入れていた。一般的に風車騒音は、道路交通騒音などの他の騒音に比べて低い値であるが、風力発電は農山村部で設置されることが多いため、静かな環境で過ごしてきた住民にとっては、風車音を認知しやすく、アノイアンスを感じやすいことが指摘されていた¹⁴⁾。また、一般的に音の認知は、昼間よりも夜間により認知されやすいことも指摘されていた。これは夜間に暗騒音 (風力発電が停止した時にも、その場所に存在する騒音) が低くなることに加え、夜間に接地逆転層が生じやすいことにより音の屈折による影響も加わって、音が認知されやすくなるためとされている¹⁴⁾。知覚する風車騒音の大きさは30-35 dBA 前後であり、風車騒音を認知するとそれだけアノイアンスを感じる者の割合が高くなるという報告がある。Pedersen ら (2004)¹⁶⁾は、騒音の知覚の割合が30.0-32.5 dBA では39% (n=27, 95%信頼区間 (95% CI): 27-50%) であったが、35.0-37.5 dBA では、85% (n=53, 95%CI: 77-94%) と急激に増加したと報告している。そしてアノイアンスは30.0-32.5 dBA では0%であったが、35 dBA を超えると12%、37.5 dB を超えると28%に増加したと報告している。

アノイアンスをアウトカムとした疫学研究は9件^{6,8~10,12,14~17)}と最も多かった。このうち風車騒音とアノイアンスとの統計的に有意な関連が検出され

た論文は8件あった^{6,8,10,12,14~17)}。これら8件のうち、音圧レベルに対するアノイアンスのオッズ比を求めた2件の論文のオッズ比を比較すると、Pedersen ら (2007)¹⁵⁾は、2004年にスウェーデンの7地域で実施し、A特性音圧レベル1 dBA 増加あたりのアノイアンスのオッズ比は、1.1 (95%CI 1.01-1.25) と報告していた。Pawlaczyk-Luszczynska ら¹⁰⁾は、ポーランドの156人の対象者について、A特性音圧レベル推計値を求め、5 dB おきの4カテゴリー (30-, 35-, 40-, 45-50 dBA) に分類して解析した結果、そのカテゴリー増加あたり、アノイアンスに対するオッズ比は2.1 (95%CI: 1.22-3.62) であり、音圧レベルとアノイアンスの間に量反応関係があったと報告していた。この結果は、カテゴリー間の差を等しく5 dB と仮定して1 dB 増加あたりに換算するとオッズ比1.16に相当し、Pedersen らのオッズ比1.1とほぼ等しい。一方、風車騒音とアノイアンスとに関連が見られなかったとする論文は、Magari ら⁹⁾の研究1件のみであり、風車騒音とアノイアンスとの明確な統計的に有意な相関関係は見られなかったと報告している。

自記式調査票による問診でQOLやメンタルヘルス、睡眠の質を健康指標として検討した疫学研究は5件あり^{8,9,11~13)}、うち4件で低周波音と統計的に有意な関連を報告していた。QOLのスケールとしてWHOQOL-BREF^{8,13)}、SF-36v2¹¹⁾、メンタルヘルスのスケールとしてGHQ-12¹²⁾、睡眠の質のスケールとしてPSQI (Pittsburgh Sleep Quality Index)、ESS (Epworth Sleepiness Scale) を用いた研究^{8,11)}があった。なおMagari ら⁹⁾の研究は、独自の自記式質問票を用いていたが、質問票に対する詳細な記述はなかった。Shepherd ら¹³⁾は、WHOQOL-BREF

を用いて、風力発電から2 km以内の住民は、遠隔地の住民と比較して、睡眠の質が低かった ($P < 0.01$) と報告している。Nissenbaumら¹¹⁾は、風力発電施設から1.4 km以内の研究参加者は、1.4 km以上離れて住む研究参加者よりも、PSQIスコア、ESSスコア、SF-36v2精神状態スコアが悪かった、すなわち、睡眠状態が悪く、日中に眠気が感じられ、精神状態が悪かったと報告していた。Bakkerら¹²⁾は、睡眠障害に関する質問を、“ない”、“年1回以上”、“月1回以上”、“ほとんど毎日”の4択で、月1回以上を睡眠障害ありとして解析に用いていた。30 dBA以下の対照群に対する45 dBA以上の曝露群の睡眠障害のオッズ比は、年齢、性別、経済的恩恵を調整して、2.98 (95%CI: 1.35–6.60) であったと報告していた。

自記式調査票より妥当性のある結果を導くために客観的指標を用いた研究が近年行われるようになっていった。カナダ政府の研究⁸⁾では、睡眠効率、血圧、安静時心拍数、ストレスのバイオマーカーである毛髪中コルチゾールが測定されていた。風車騒音と、睡眠効率、血圧、毛髪中コルチゾールとの関連は、いずれも観察されなかった。

4. 交絡因子

近隣住民を対象にした研究から、統計的に有意な関連が見られた交絡因子を抽出したところ、風力発電への姿勢 (Attitude to wind turbines in general)^{9,10,15,16)}、景観に対する姿勢 (Attitude to visual impact)^{6,9,10,14~16)}、風力発電からの経済的恩恵 (Economic benefits)^{8,12,14,17)}、風車の可視性 (Visibility)^{8,14,15,17)}、音への感受性 (Sensitivity)^{6,8,10,14,16,17)}、健康への懸念 (Health concerns)⁸⁾、との影響が報告されていた。

これらの交絡因子のアノイアンスに対するオッズ比として、Pawlaczyk-Luszczynskaら¹⁰⁾は、風力発電への姿勢オッズ比39.36 (95%CI: 10.89–142.29)、景観に対する姿勢オッズ比16.29 (95%CI: 6.00–44.26)、景観を汚されたことへの感受性オッズ比6.56 (95%CI: 2.86–15.05)、音への感受性オッズ比3.43 (95%CI: 1.53–7.70) に有意な関連を報告していた。同様に Pedersenら (2007)¹⁵⁾は、風力発電への姿勢オッズ比13.4 (95%CI: 6.03–29.59)、景観に対する姿勢オッズ比14.4 (95%CI: 6.37–32.44)、風車の可視性オッズ比10.9 (95%CI: 1.46–81.92)、音への感受性オッズ比2.5 (95%CI: 1.14–5.63) との関連を報告していた。これらの交絡因子の影響については、オッズ比で小さくとも2.5、最大で39.36と非常に強い関連が報告されており、風力発電等による低周波音による健康影響を検

討する疫学研究においては交絡因子として大きなポテンシャルを持っている。

IV 考 察

1. 健康影響

風力発電施設からの低周波音に関する疫学研究レビューの結果、風車騒音とアノイアンスとの関連では8件中7件、風車騒音とストレス指標との関連では5件中4件で、統計的に有意な関連を報告していた。影響の大きさとしては、アノイアンスのオッズ比を求めた2つの研究では、A特性音圧レベル1 dB増加あたり、どちらもオッズ比1.1程度であった。その他のアウトカムでは、影響の大きさに関して、研究間比較ができなかった。騒音基準に関しては、都市の生活騒音問題と同じように、音が小さくても気になる人は存在し、騒音の知覚の割合が高いとアノイアンスのリスクにつながるとの指摘がされている¹⁶⁾。このことから、今後、風車騒音対策を講じる際には、騒音の知覚に留意することがまず重要である。なお本研究のレビュー範囲では、知覚する風車騒音の大きさは30–35 dBA前後であったが¹⁶⁾、30 dB以下でも知覚する居住者がいる¹⁴⁾。

一般的に疫学的知見をもとに因果推論を行う際には、①関連の一貫性、②関連の強固性、③関連の特異性、④関連の時間性、⑤関連の整合性などを考慮する必要がある (米国公衆衛生局長諮問委員会の5基準)。これらの観点からすると、既存の疫学研究では、①関連の一貫性、②関連の強固性については、ある程度一貫しているといえるだろう。一方で③関連の特異性については、心理的影響であるアノイアンスを健康評価に用いることが、風力発電施設建設に対する心理的影響なのか、騒音による心理的影響なのか区別がつきにくいことなど、未だ認めがたい状況にある。言い換えると、社会心理的要因による交絡の調整が今後の課題である。この課題の原因の一つに、アノイアンスを自記式質問票による健康評価を行っているため、測定手段バイアスの影響を受けやすいことが指摘できる。そのため、カナダの研究では、主観的指標と客観的指標の両方をアウトカムとして用いている。両者の指標がどの程度乖離しているかを示すことも可能となる。今後は、主観的指標のみならず、客観的指標を用いた研究 (例えば終夜睡眠ポリグラフ検査等) を用いた研究が行われることが望ましいと考えられる。④関連の時間性に関連して、いずれの研究も断面研究であり、関連性は評価できるものの現状では因果関係は評価できていない。今後、風力発電施設の運転・停止前後での健康影響の変化を観察する追跡研究が求められ

る。なお、本レビューでは疫学研究のみを評価したため、動物実験研究等との整合性に関する基準である⑤関連の整合性に関する考察はできない。

2. 曝露評価

過去の研究において曝露評価手法としては「風力発電施設からの距離」を用いた研究が見られたが、ガイドライン等の策定に向けては施設近郊群と遠隔地群の群間比較するだけでなく、風車からの距離と健康指標影響に関する量反応関係を検討する研究が少なくとも求められる。一方で、平坦でない複雑な地形や隣接する建物が風力発電機のノイズを増幅させ、推計値以上の音圧レベルとなっていることがありと指摘されており^{14,15)}、この課題は研究結果の一般化を困難にする要因となっている。また Pawlaczyk-Luszczynska ら¹⁰⁾は、A特性音圧レベルを測定し、屋外推計値と屋外測定値は平均で0.7 dBA(95% CI: -2.6-1.2)の差があったと報告しており、屋外推計値の妥当性確認を行っていた。騒音モデル推計値による騒音曝露量評価には限界があり、今後は Pawlaczyk-Luszczynska らが実施したように推計値に加えて、部分的にでもサンプリングにより実測値測定を行って推計値の妥当性を確認することで、より妥当性の高い曝露評価を行っていくことが期待される。さらに、家屋外壁等の遮音効果や窓の開閉状況にも相当の個体差があることが想定され、このことも一般化をより難しくしていると考えられる。また、睡眠障害を検討するにあたっては、通常は夜間に床に就き、日中よりも夜間に騒音の知覚、アノイアンスが高まることから、Yano ら⁶⁾のように夜間の等価騒音レベルを曝露指標として用いるなど、測定時間についても考慮した曝露評価指標を実施することが望ましいと考えられる。

3. 交絡要因の考慮

統計的に有意な関連が見られた交絡因子としては、風力発電への姿勢、景観に対する姿勢、風力発電からの経済的恩恵、風車の可視性、音への感受性との影響が報告されていた。結果に示した通り、いずれのオッズ比も2以上と大きく、これらの交絡因子を考慮しなければ、騒音自体によるオッズ比のエビデンスレベルは十分ではないと思われた。この件に関連して、交絡要因の調整が適切になされず、科学雑誌上での議論が沸き起こっている事例が1件ある。Nissenbaum ら¹¹⁾は、睡眠の質の評価スケールとして PSQI、日中の眠気のスケールとして ESS、HRQOL として SF-36v2 を用いた。風力発電施設から1.4 km 以内の研究参加者は、1.4 km 以上離れて住む研究参加者よりも、睡眠状態が良好でなく、日中に眠気が感じられ、精神状態のスコアが悪いと

いう結果が得られ、更に性別、年齢、同一世帯を調整後、風力発電施設からの距離と、PSQI, ESS, SF-36v2 MCS との関連を評価したところ有意な量反応関係が認められたと報告している。しかし、Barnard ら²⁰⁾は、Nissenbaum ら¹¹⁾が風力発電施設反対運動に参加した経緯を指摘しつつ、研究者バイアスやサンプリングバイアスの可能性に加え、風力発電施設に対する住民の考えや経済的恩恵といった交絡因子が考慮されていない点を問題と指摘し、科学的根拠として不十分と指摘した。この事例からもわかるように、交絡因子が適切に取り扱われていなければ、エビデンスの社会応用においてはむしろ論争を招くことさえある。このような課題への対処として、過去の研究には住民への説明時に、真の研究目的を伏せて実施している研究も見られるが、被験者の研究参加に関する自由意思の尊重の観点からは異議も残る手法である¹³⁾。Maffei ら²¹⁾は、風力発電施設の近隣住民を対象にした実験的研究において、経済的恩恵を受けている人を除外基準とする研究デザインを採用していた。このような層別解析を採用することが現実的かつ論争の少ない方法かもしれない。

交絡因子としては他に、「風力発電による健康影響に心理的不安を持っていること」が報告されている。風力発電による健康影響に心理的不安を持つグループと、不安を持たないグループに分け、低周波音と偽の低周波音(無音)を10分間ずつ聞かせ、自記式質問票で健康影響スコア(頭痛、めまい、耳鳴り等)を比較した。その結果、心理的不安を持つグループは、偽の曝露後に自記式質問票での健康影響スコア(頭痛、めまい、耳鳴り等)が統計的に有意に増加し、不安を持たないグループは偽の曝露後に健康影響スコアに変化がなかったとの報告がある²²⁾。また、性別・年齢は、アノイアンスに影響がない⁹⁾とする研究もあれば、年齢は、アノイアンスに影響ある¹⁷⁾とする研究もある。こういった大きなオッズ比をもつ因子の情報を取得して、研究デザインにおいて考慮することが、関係者の合意形成に向けて求められていると言える。

合意形成に関して付言すると、近年、開発事業等に付随して欧米諸国では環境影響アセスメント(Environmental impact assessment: EIA)に加えて健康影響アセスメント(Health impact assessment: HIA)を実施する動きがある。HIAは、「政策、施策、開発計画などに関して特定の集団もしくは健康影響が懸念される一部のグループにおける健康影響(良い影響と悪い影響の両面について)を判断するための一連の手順や方法論のこと」(ウェールズ議

会政府による定義)であり, そのプロセスは健康影響評価の結果を利害関係者等の意思決定者に提供し, 意思決定者によって不利益を最小化し便益を最大化するような事業改善に役立てられることによって完了される。HIAは当事者参加を促し, またネガティブな影響のみならずポジティブな影響にも着目することで, 科学的根拠が必ずしも充分でないような健康影響に対しても現実的な対処方法を導き, 関係者の合意形成を促進する。今後, 本邦においてもEIAとともにHIAを実施することは, エビデンスが充足するまでの現実的な事業管理対応として関係者の選択肢となっていくだろう。

4. 既存のレビュー文献とその主な結論

Knopperら²³⁾は, 査読された研究論文から一般記事までを対象に文献レビューを行っていた。彼らは, 風力発電施設は, 住民にとってアノイアンスの原因となると結論づけていた。また主観的評価に基づく健康影響評価は, 人によっては, 風力発電施設を不快に感じる事が, 健康影響(例: 睡眠障害)を引き起こす可能性があるとし, 風力発電施設のみならず, 地域の環境を変えてしまう多くのプロジェクトも同様に, ある一定の割合で, アノイアンスを訴える人々がいる。風力による恩恵を受けている人々がいる一方で, 施設反対者にとっては, その施設の存在が重い負担となっていると指摘していた。

Schmidtら²⁴⁾は, 研究論文の文献レビューの結果, 風力発電からの騒音により, アノイアンス, 睡眠障害のリスクがあり, その影響は, 35 dB L_{Aeq} 前後であると結論づけている。しかし, すべての研究で, (研究協力者が全騒音曝露人口の一部であることによる)セレクションバイアスや(自記式質問票による評価のために生じる)情報バイアスが存在する。今後の研究では, 客観的な実証に焦点をあてた研究が望まれると指摘している。

V 結 論

風車騒音とアノイアンス, 主観的評価に基づく健康指標の間には統計的に有意な関連が繰り返し報告されている。アノイアンスについては, A特性音圧レベル1 dB増加あたりオッズ比1.1程度と2つの研究が報告していた。その他のアウトカムでは, 影響の大きさに関して, 研究間比較ができなかった。アノイアンスが風力発電施設建設に対する心理的影響なのか, 騒音曝露による心理的影響なのかについて, 現状のエビデンスにおいてはその区別が明確にはつけられない状況であった。

謝辞等

本研究は, 環境省環境研究総合推進費(5-1307)により実施したものである。本研究には利益相反に相当する事項はない。

(受付 2016. 8.10)
(採用 2017. 5.29)

文 献

- 1) Global Wind Energy Council. Global Wind Report 2014: Annual Market Update. 2015. http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2015/03/GWEC_Global_Wind_2014_Report_LR.pdf (2015年12月5日アクセス可能).
- 2) Farboud A, Crunkhorn R, Trinidad A. 'Wind turbine syndrome': fact or fiction? *J Laryngol Otol* 2013; 127(3): 222-226.
- 3) 環境省. 「風力発電施設に係る騒音・低周波音の実態把握調査」について(お知らせ). 2010. <http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=13011> (2015年12月5日アクセス可能).
- 4) 環境省. 宇久島風力発電事業に係る環境影響評価準備書に対する環境大臣意見の提出について(お知らせ). 2015. <https://www.env.go.jp/press/100207.html> (2015年12月5日アクセス可能).
- 5) Berger RG, Ashtiani P, Ollson CA, et al. Health-based audible noise guidelines account for infrasound and low-frequency noise produced by wind turbines. *Front Public Health* 2015; 3: 31.
- 6) Yano T, Kuwano S, Kageyama T, et al. Dose-response relationships for wind turbine noise in Japan. 42nd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering 2013 (INTER-NOISE 2013): Noise Control for Quality of Life. 2013; 4591-4598.
- 7) Michaud DS. Wind turbine noise and health study: summary of results. 6th International Conference on Wind Turbine Noise. 2015.
- 8) Health Canada. Wind Turbine Noise and Health Study: Summary of Results. <http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/noise-bruit/turbine-eoliennes/summary-resume-eng.php> (2017年6月5日アクセス可能).
- 9) Magari SR, Smith CE, Schiff M, et al. Evaluation of community response to wind turbine-related noise in western New York state. *Noise Health* 2014; 16(71): 228-239.
- 10) Pawlaczyk-Luszczynska M, Dudarewicz A, Zaborowski K, et al. Evaluation of annoyance from the wind turbine noise: a pilot study. *Int J Occup Med Environ Health* 2014; 27(3): 364-388.
- 11) Nissenbaum MA, Aramini JJ, Hanning CD. Effects of industrial wind turbine noise on sleep and health. *Noise Health* 2012; 14(60): 237-243.
- 12) Bakker RH, Pedersen E, van den Berg GP, et al. Impact of wind turbine sound on annoyance, self-reported sleep disturbance and psychological distress. *Sci Total*

- Environ 2012; 425: 42–51.
- 13) Shepherd D, McBride D, Welch D, et al. Evaluating the impact of wind turbine noise on health-related quality of life. *Noise Health* 2011; 13(54): 333–339.
 - 14) Pedersen E, van den Berg F, Bakker R, et al. Response to noise from modern wind farms in The Netherlands. *J Acoust Soc Am* 2009; 126(2): 634–643.
 - 15) Pedersen E, Persson Waye KP. Wind turbine noise, annoyance and self-reported health and well-being in different living environments. *Occup Environ Med* 2007; 64(7): 480–486.
 - 16) Pedersen E, Waye KP. Perception and annoyance due to wind turbine noise: a dose-response relationship. *J Acoust Soc Am* 2004; 116(6): 3460–3470.
 - 17) Janssen SA, Vos H, Eisses AR, et al. A comparison between exposure-response relationships for wind turbine annoyance and annoyance due to other noise sources. *J Acoust Soc Am* 2011; 130(6): 3746–3753.
 - 18) Babisch W. The noise/stress concept, risk assessment and research needs. *Noise Health* 2002; 4(16): 1–11.
 - 19) World Health Organization Regional Office for Europe. Night Noise Guidelines for Europe. 2009. <http://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/noise/publications/2009/night-noise-guidelines-for-europe> (2015年12月5日アクセス可能).
 - 20) Barnard M. Issues of wind turbine noise. *Noise Health* 2013; 15(63): 150–152.
 - 21) Maffei L, Masullo M, Gabriele MD, et al. Auditory recognition of familiar and unfamiliar subjects with wind turbine noise. *Int J Environ Res Public Health* 2015; 12(4): 4306–4320.
 - 22) Crichton F, Dodd G, Schmid G, et al. Can expectations produce symptoms from infrasound associated with wind turbines? *Health Psychol* 2014; 33(4): 360–364.
 - 23) Knopper LD, Ollson CA. Health effects and wind turbines: a review of the literature. *Environ Health* 2011; 10: 78.
 - 24) Schmidt JH, Klokner M. Health effects related to wind turbine noise exposure: a systematic review. *PLoS One* 2014; 9(12): e114183.
-

Influences of low-frequency and other noises produced by wind turbines: An epidemiological literature review

Tatsuhiko KUBO^{*}, Hideki HASUNUMA^{2*}, Yoshitaka MORIMATSU^{3*},
Yoshihisa FUJINO^{*}, Kunio HARA^{4*} and Tatsuya ISHITAKE^{3*}

Key words : wind turbines, noise, low-frequency noise, annoyance, health effect, epidemiology

Objectives Due to its' environment-friendly and clean energy characteristics, wind power has been increasingly used globally, particularly in advanced countries. However, concerns about health hazards, especially due to low-frequency and other noises generated from wind turbines, have been reported repeatedly. In order to manage adverse health effects appropriately, regulatory standards or guidelines that consider the health of residents need to be developed. To provide a scientific basis for the development of such regulatory standards and guidelines, this paper conducted a literature review to analyze epidemiological studies involving residents living in the vicinity of wind farms.

Methods Using the PubMed database, epidemiological papers that examined the health effects of noises produced by wind turbines were searched and collected. Additional papers were collected from the abstracts presented at relevant international academic conferences such as the Inter-Noise 2013 and Wind Turbine Noise 2015. An evidence table comprising the study design, subjects, exposure assessment, outcomes, confounders, and research results of each selected study was created.

Results A total of 11 papers were collected (2 of which were abstracts from the international academic conferences). These studies reported outcomes such as perception of noises, annoyance caused by the noises, and the association of the noises with stress and sleeplessness. Significant associations between the noises or annoyance produced by wind turbines and subjective adverse health effects were reported repeatedly. Two studies reported an odds ratio of 1.1 for an increase of 1 dB in the A-weighted sound pressure level as a factor representing the influence level. For other factors, it was not possible to compare the magnitude of the impact among the collected studies. Individual attitudes toward wind power and landscapes, economic benefits of wind farms, visibility of wind turbines, sensitivity to sounds, and concerns over health hazards were reported as confounders.

Conclusion Significant associations between the noises or annoyance produced by wind turbines and subjective adverse health effects were reported repeatedly. However, there was insufficient evidence to conclude whether the annoyance was caused by the psychological response to the construction of wind farms or by the actual exposure to noises generated by wind farms.

^{*} Department of Preventive Medicine and Community Health, School of Medicine, University of Occupational and Environmental Health

^{2*} Center for Environmental Information Science

^{3*} Department of Environmental Medicine, School of Medicine, Kurume University

^{4*} Graduate School of Public Health, Teikyo University