洋上風力発電施設から発生する音の健康影響について

青山学院大学
佐藤　敏彦

「酒田市沖洋上風力発電事業」住民学習会
令和７年６月２９日

本講演に関連して開示すべき利益相反の対象となる企業・組織との関連はありません

本日お話しすること

０．自己紹介
１．洋上風力発電施設から発生する音の種類と音圧レベル、特徴等
２．健康影響のリスク評価の方法
３．風車から発生する音・騒音による健康影響の課題と最新の知見
４．騒音対策・規制の動向
５．まとめ

期間	所　属	主な活動
1986～91	慶應義塾大学医学部 衛生学公衆衛生学	産業保健の有害物質健康リスク評価 アスベスト、有機溶剤等
1991～92	東京女子医科大学衛生学公衆衛生学	一般環境中の有害物質健康リスク評価 ディーゼル排ガス等
1992～95	米国ピッツバーグ大学公衆衛生大学院　環境産業保健学部	アレルギー物質の機序に関する研究（サイトカイン等）　公衆衛生インターネット教育
1995～99	東京女子医科大学衛生学公衆衛生学	シックハウス研究、ＥＢＭ教育
1999～2001	世界保健機関ジュネーブ本部	根拠に基づく保健政策、疾病負担研究（健康寿命）、世界保健報告
2001～08	北里大学医学部公衆衛生学	医療技術評価、診療ガイドライン作成（医療機能評価機構）低周波音の健康リスク評価に関与開始
2008～12	北里大学医学部臨床研究センター	臨床研究支援等
2012～現在	青山学院大学社会情報学部／（一社）ヘルスケアデータサイエンス研究所	健康情報学、ヘルスケアデータ分析・活用、人材教育

低周波音、騒音に関わる委員等

■環境省関連

・低周波音対策検討委員会委員（2004）

・風力発電施設の騒音・低周波音に関する 検討調査業務委員 （2012）

・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委員
（2013－2016）

・我が国の環境騒音に係るあり方に関する検討会委員（2023－2024）

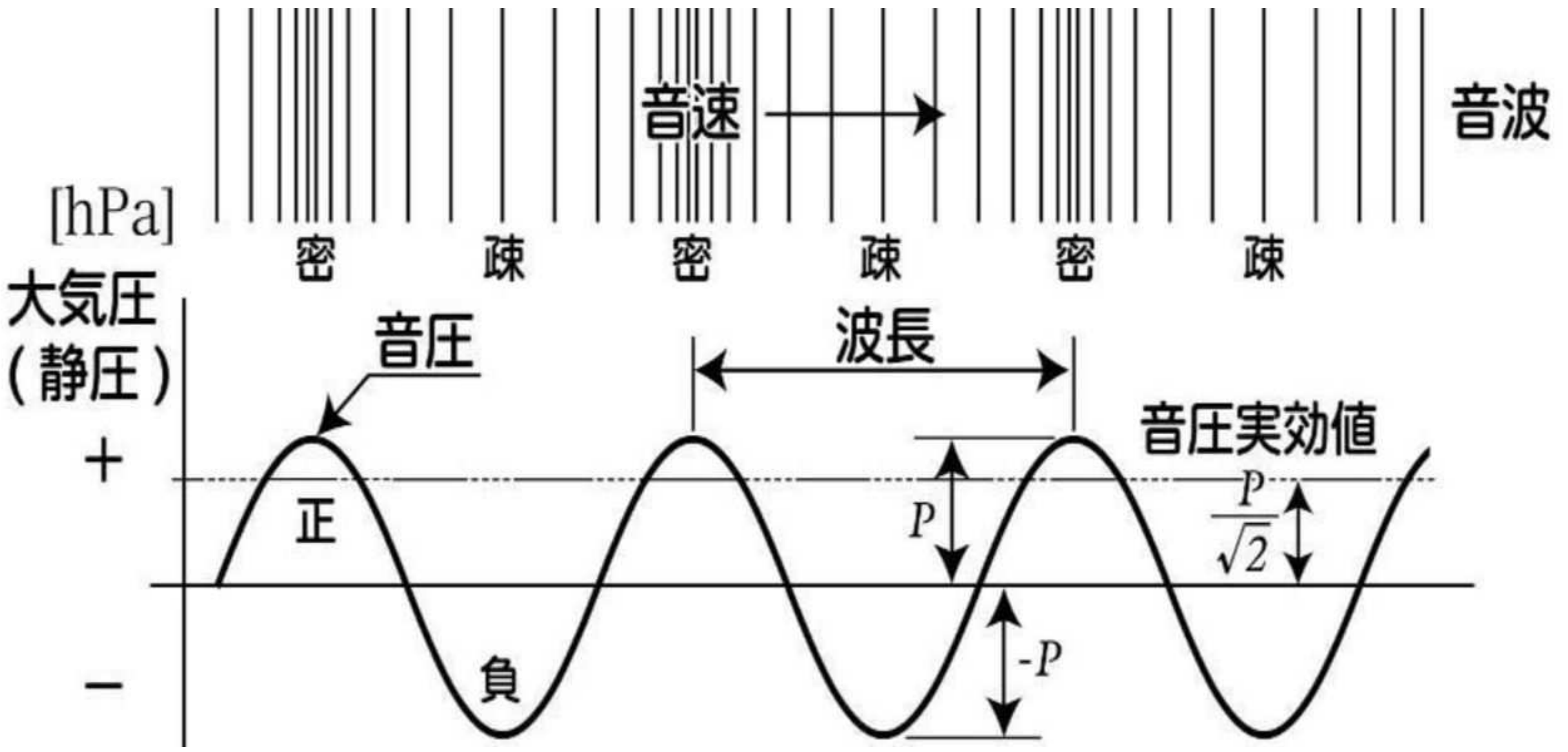
■消費者庁関連

・家庭用ヒートポンプ給湯機から生じる運転音・振動等により不眠等の
健康上の症状が発生したとされる事案に係る事故等原因調査　専門委員
（2013）

洋上風力発電施設から発生する音の種類と音圧レベル、特徴等

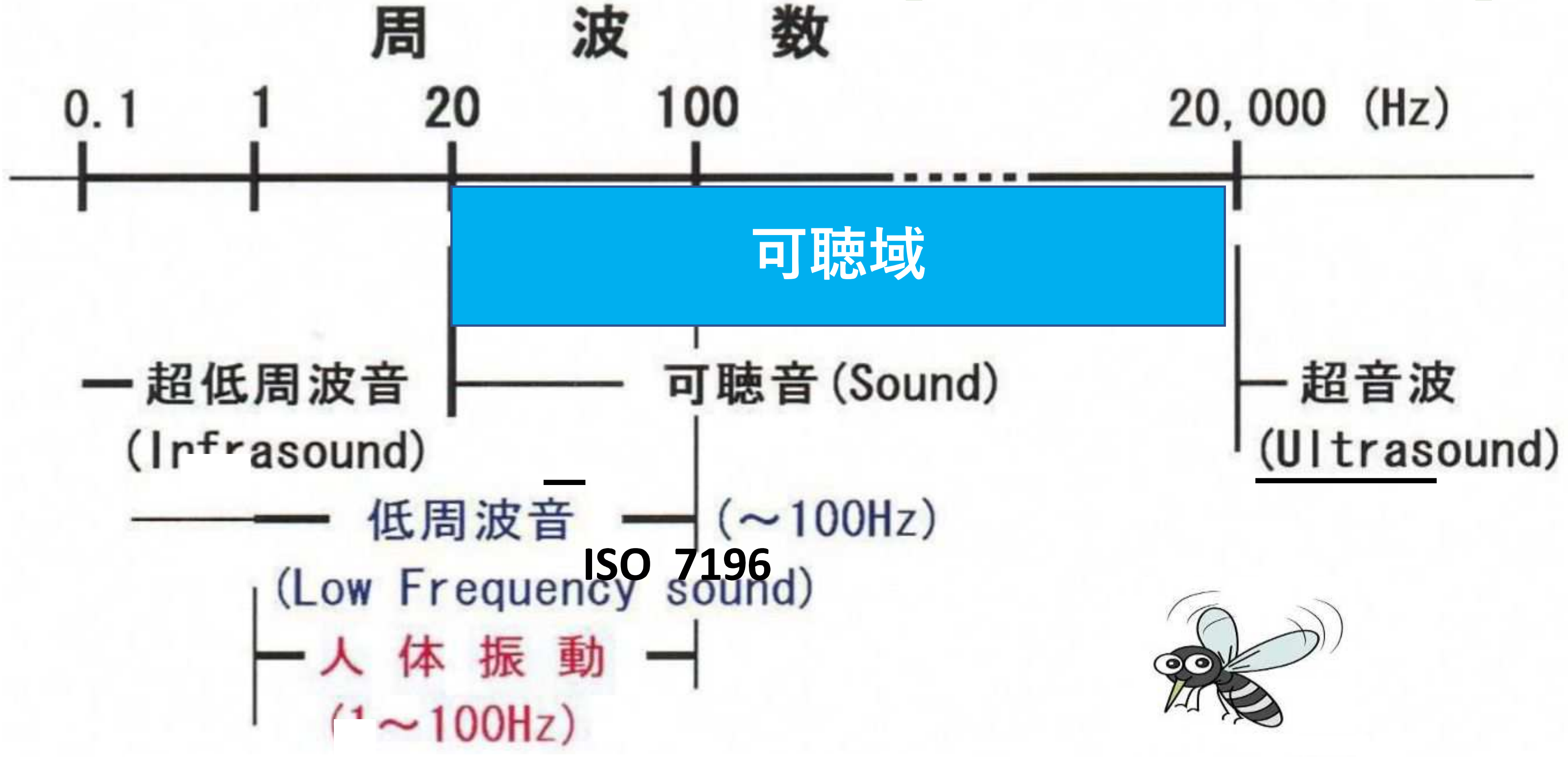
このパートのスライドは日本大学町田信夫名誉教授より一部
提供をいただきました

音とはそもそもどんなものでしょう？



- 空気の微小な圧力変動
- **周波数（単位はHz：ヘルツ）**：1秒間に繰り返される疎密波の数
- 周波数が大きいと高い音
- **音圧レベル（dB：デシベル）**＝音圧が高いと「大きな」音

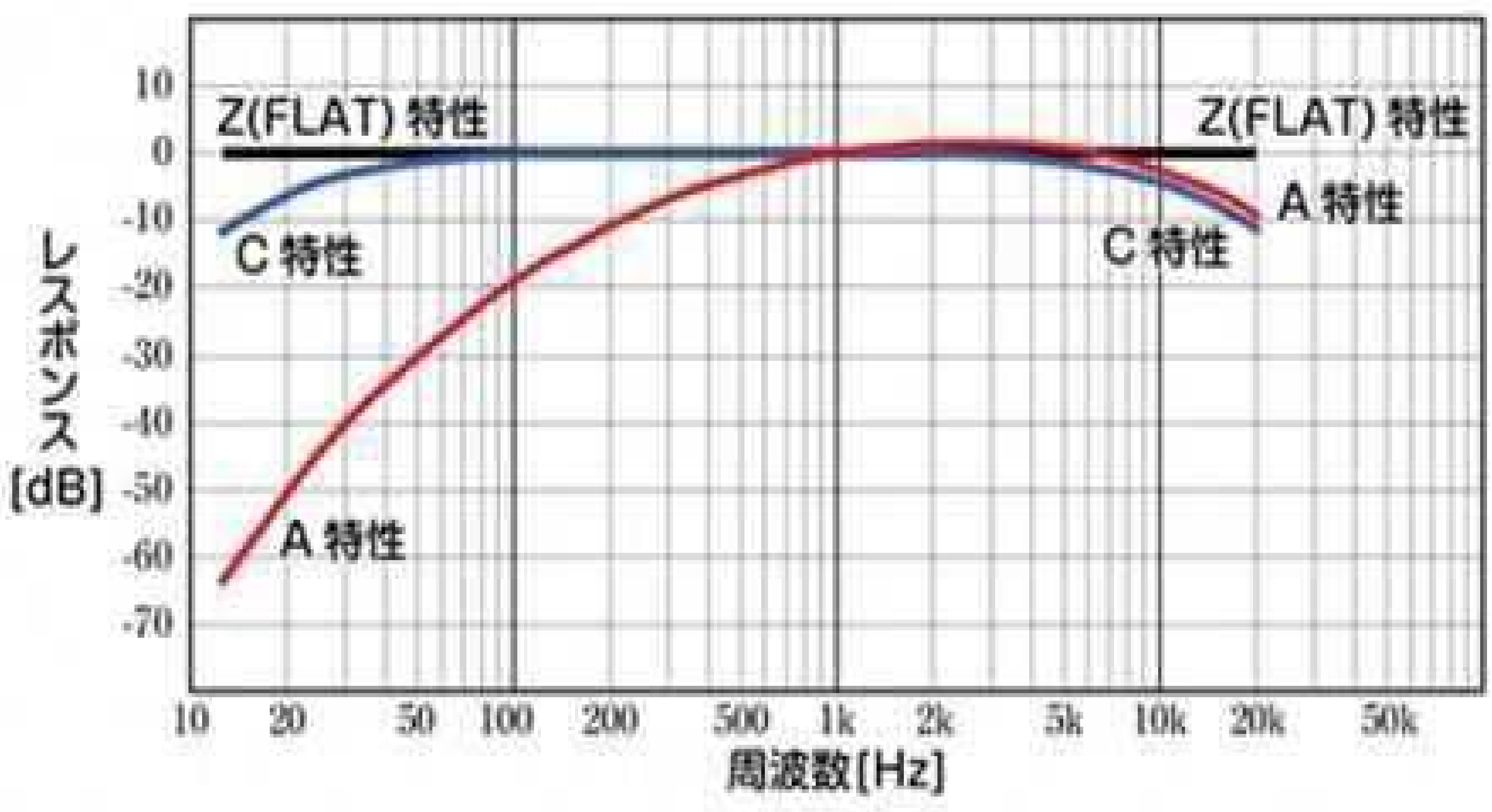
周波数と可聴域（聞こえる音）



低周波騒音Low Frequency Noise（LFN）

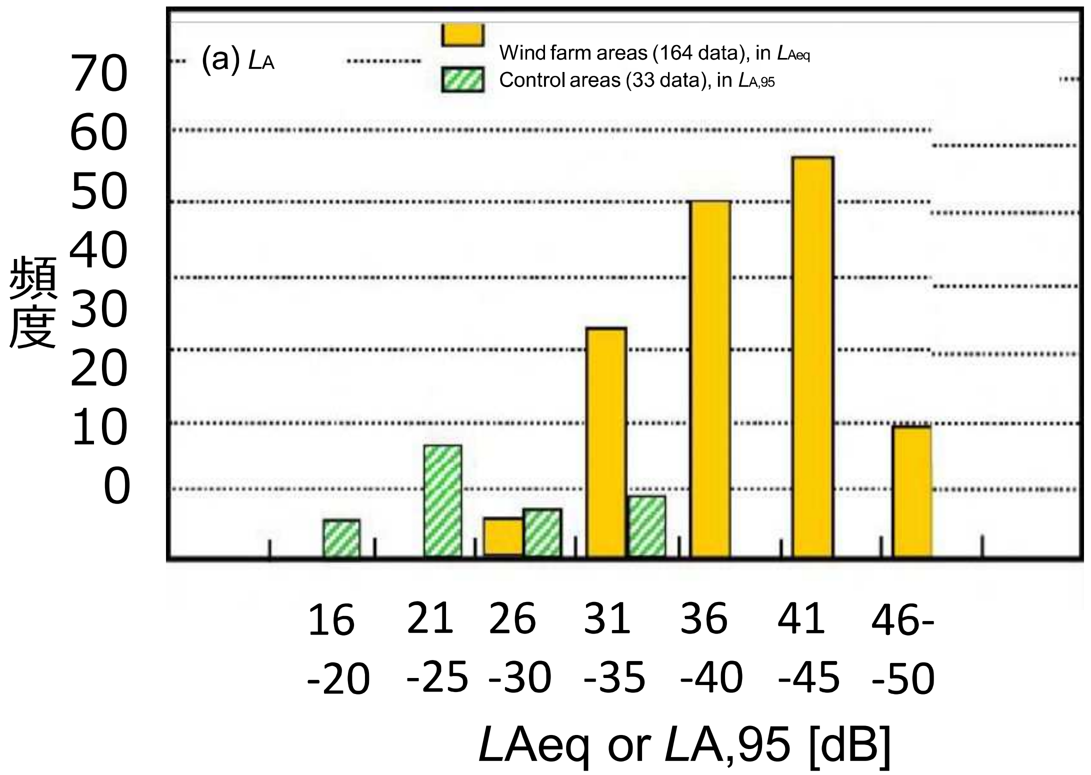
低周波音Low Frequency Sound（LFS）

音圧レベルの表し方について
ーA特性（d BA）とは何でしょう？周波数による重みづけ方法

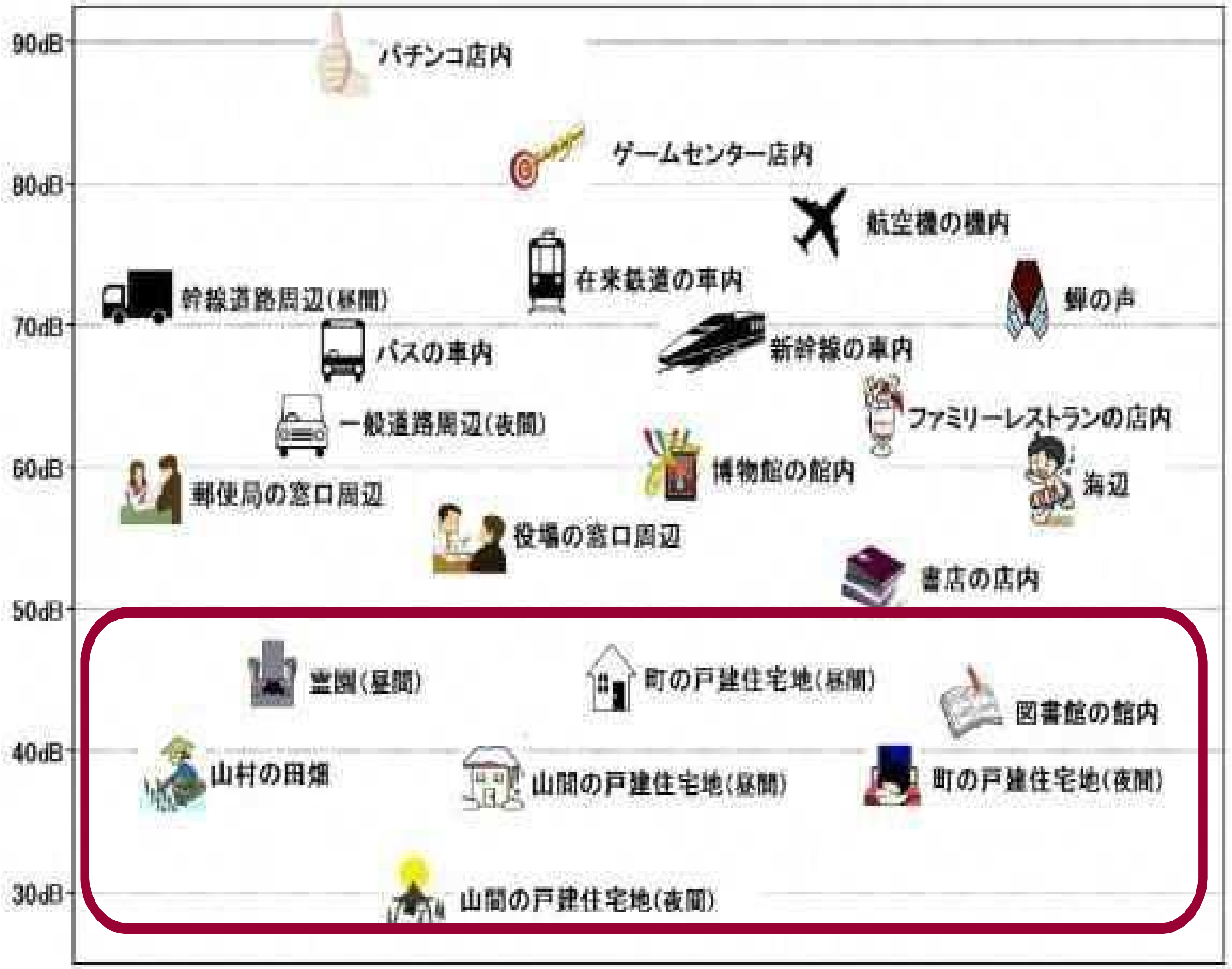


人の聴覚の「周波数特性」
に基づいて
各周波数の音圧レベルを
「重みづけし、
一つの値にするもの

風車の騒音レベル（A特性による）はどのぐらいでしょう



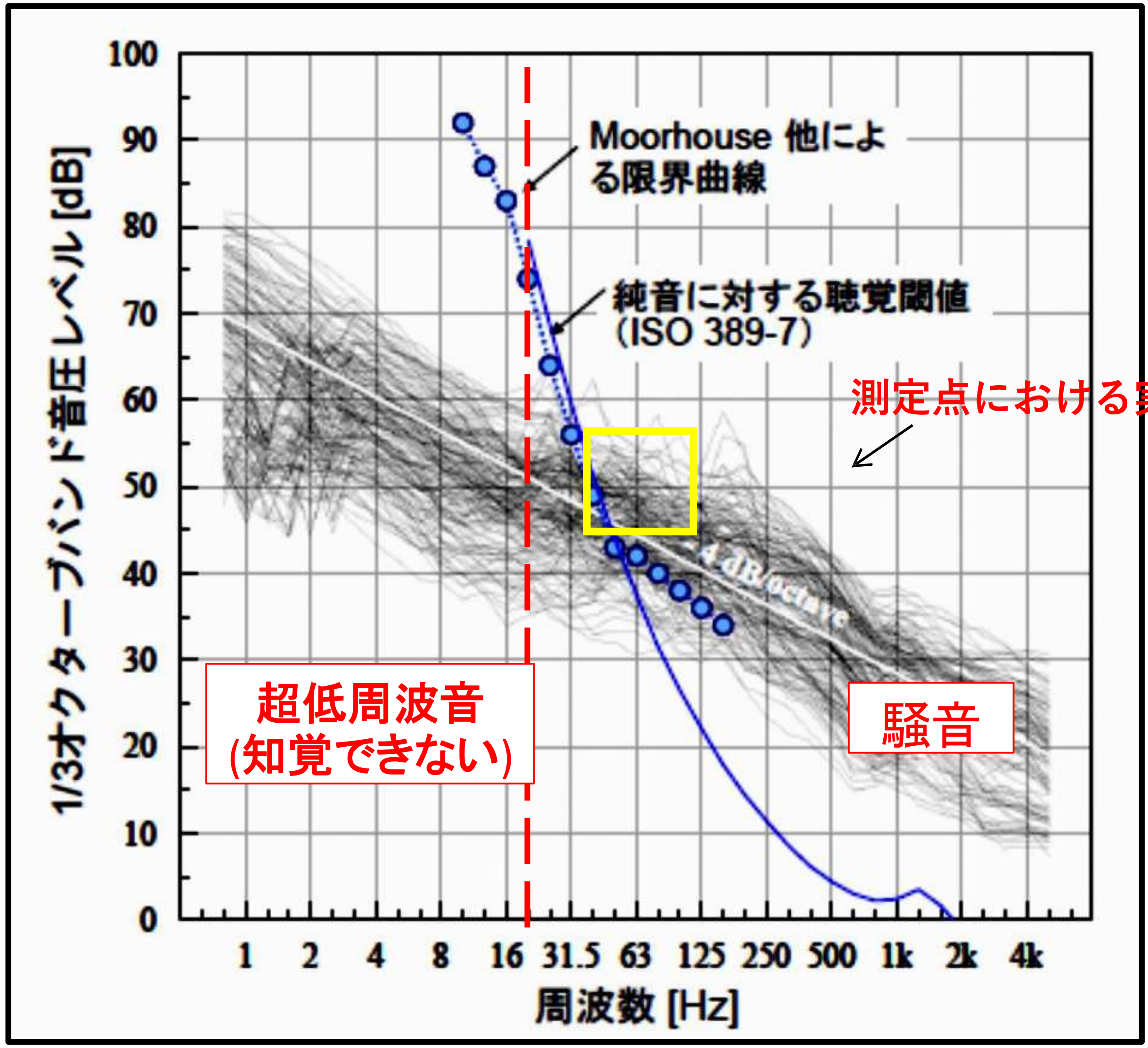
環境省「風力発電等による低周波音の人への影響評価に関する研究（戦略指定研究）」2010－2013



騒音の目安

出典　全国環境研協議会　騒音小委員会

風力発電から発生する音圧レベル（周波数毎）はどのぐらいでしょうか



全国29の風力発電施設の周辺
合計164箇所での測定結果

出力400～3000KW

測定点は距離90～1250m

「限界曲線」は苦情発生の可能性を評価する指標、超低周波音の感覚閾値に近い値とされている.

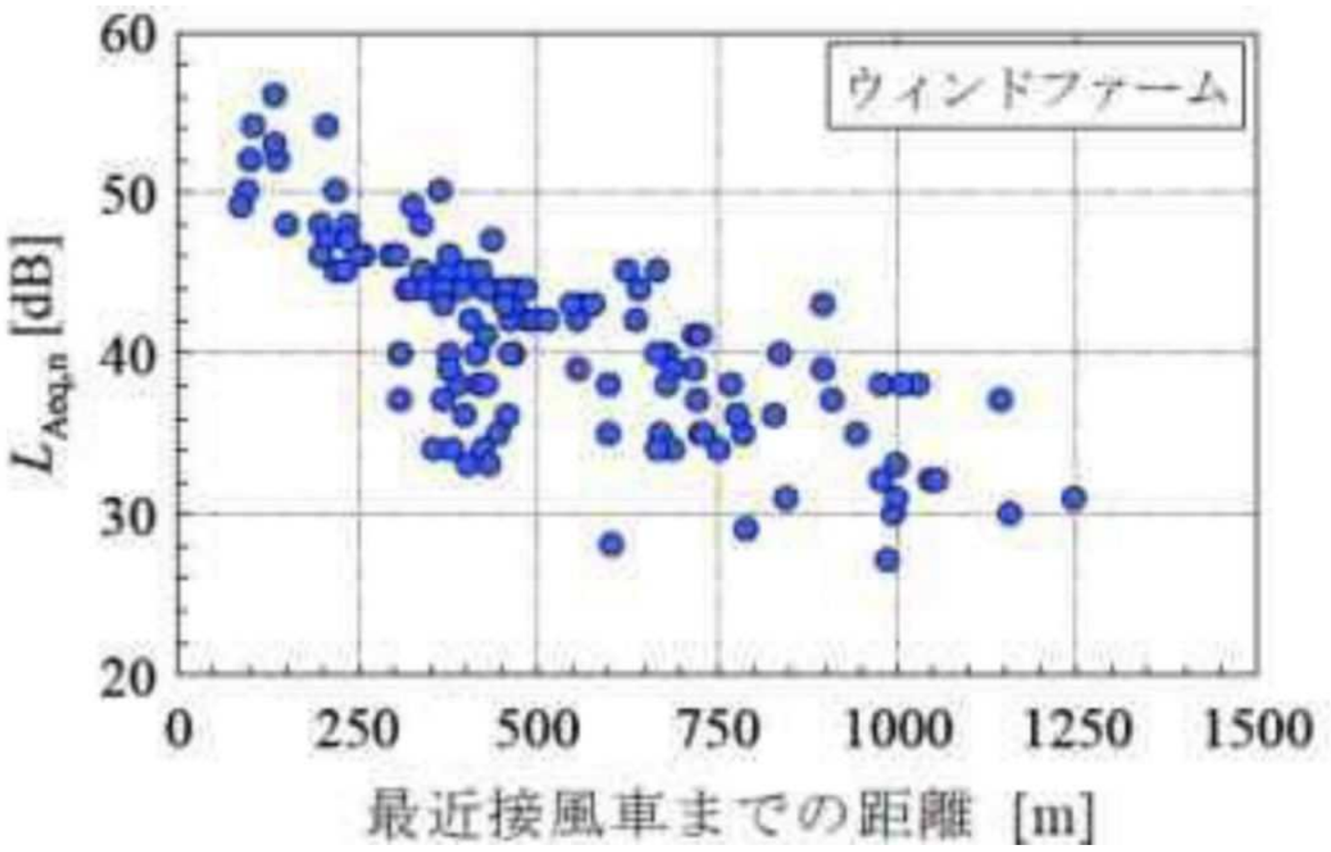
*平成22-24年度環境省戦略指定研究領域研究課題(S2-11風力発電等による人への影響評価に関する研究：研究代表者橘秀樹）より

測定対象となった風力発電施設

ID	Scale of the wind farms and geographical features	Measurement
W01	1 turbine of 1.98 MW on a hill of a peninsula	Dec. 2010
W02	7 turbines of 2.5 MW in mountainous area	Jan. 2011
W03	10 turbines of 2 MW in mountainous area	Feb. 2011
W04	10 turbines of 1.3 MW in mountainous area	Mar. 2011
W05	9 turbines of 1.5 MW on a tableland	Feb. 2011
W06	6 turbines of 1.5 MW on a tableland	Feb. 2011
W07	9 turbines of 2.3 MW along the ridge of a mountain	Aug. 2011
W08	21 turbines of 2.4 MW in mountainous area	Oct. 2011
W09	9 turbines of 1.5 MW along a coast	Dec. 2011
W10	1 turbine of 1.5 MW in the skirts of a mountain	Dec. 2011
W11	1 turbine of 1.98 MW on a mountaintop along a coast	Jan. 2012
W12	5 turbine s of 1.99 MW in a hilly area	Aug. 2011
W13	1 turbine of 1 MW in a plain	Nov. 2011
W14	17 turbine s of 2 MW along the ridge of a mountain	Dec. 2011
W15	15 turbines of 2.5 MW along the ridge	Jan. 2012
W16	5 turbines of 3 MW along a coast	Jan. 2012
W20	2 turbine s of 400 kW, 4 turbines of 600 kW and 2 turbines of 1.5 MW in flat farmlands	Oct. 2011
W22	1 turbine of 1.95 MW on a mountaintop	Aug. 2012
W23	1 turbine of 1.955 MW in a plain along a coast	Aug. 2012
W24	10 turbines of 1.3 MW on a mountaintop	Sep.–Oct. 2012
W25	8 turbines of 1.3 MW along the ridge of a mountain	Oct. 2012
W27	20 turbines of 1 MW, 5 turbines of 1.5 MW and 14 turbines of 1.65 MW in a vast grassland	Sep. 2012
W28	5 turbines of 1.5 MW and 1 turbine of 2.5 MW (not operated) on a hill along a coast	Oct. 2012
W29	1 turbine of 1.5 MW in gently sloping mountainous area	Oct. 2012
W30	10 turbines of 2 MW around a gently sloping mountainous area	Nov. 2012
W31	1 turbine of 600 kW on a hill	Jan. 2013
W32	1 turbine of 1 MW between harbor facilities and a coastal park	Sep. 2012
W33	1 turbine of 400 kW in a hilly park	Sep. 2012
W34	10 turbines of 1.95 MW in farmlands	Sep. 2012

- 陸上設置
- １基600KW～3MW
- １基～39基
- 総出力600KW～50MW

風力発電からの距離と音圧レベル



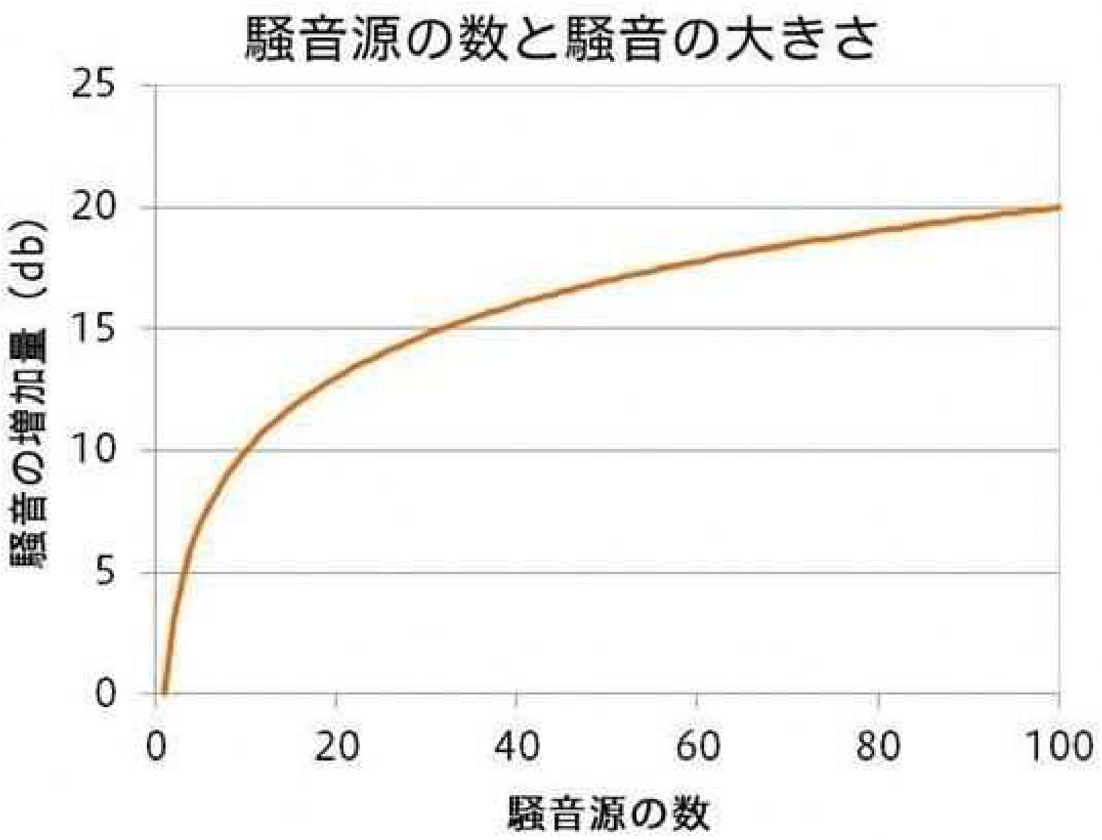
- 水平距離が遠くなるほどレベルが低下する
- **出力の大きさ（発生源での騒音レベル）・風向き・地形でばらつきが生じる**

風車の数が増えるとどうなるか？

- **理論的には**

同じ出力の風車の数がn倍になると発生騒音レベルは右のような曲線になる

2倍で３ｄB
10倍で１0dB
100倍で20dB 増加する



風車騒音の特徴

＜立地環境と周辺環境＞

- 静穏な地域に設置されることが多いため，風車騒音レベルは比較的低くても，気になりやすい特徴がある

＜発生する音の特徴・性質＞

- 風力発電施設のブレード（翼）の回転に伴い発生する音は，場所や風向等によっては，シュー，シューといった振幅変調音（AM音，スウィッシュ音（Swish））として聞こえる

- 機種によっては，内部の増速機や冷却装置等から，ウィーン，あるいはブーンといった純音性の音（純音性成分）が発生

⇒ **騒音レベルは低いが，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**

健康影響のリスク評価の方法

「健康影響」の分類について

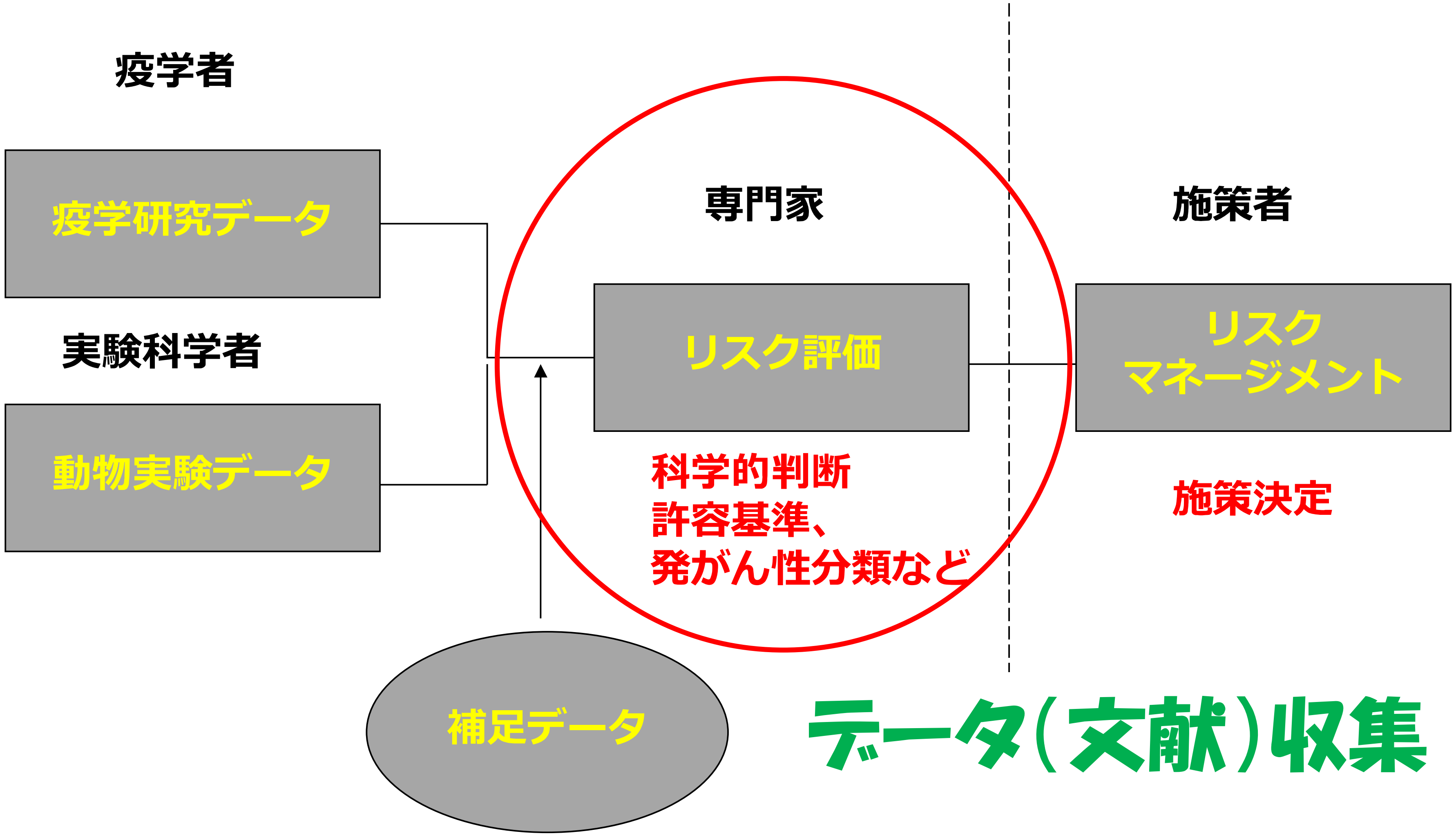
- 急に起こるもの（急性影響）と
  徐々に、継続して起こるもの（慢性影響）

- 可逆性変化（曝露をやめると元に戻る）と
  不可逆性変化（曝露をやめても継続するもの）

標的臓器（影響を受ける臓器）は曝露原因によって異なる

リスク評価のプロセス

リスク＝ハザード x 曝露量



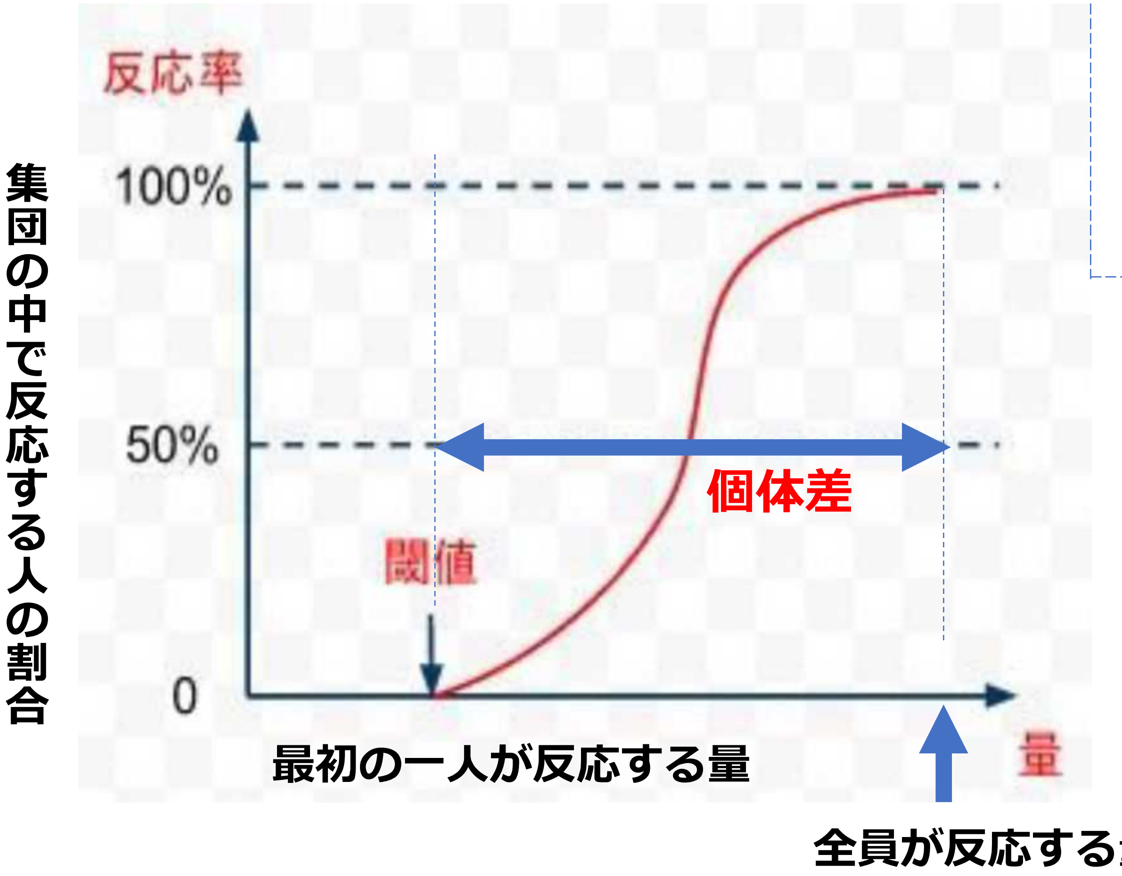
データ(文献)収集

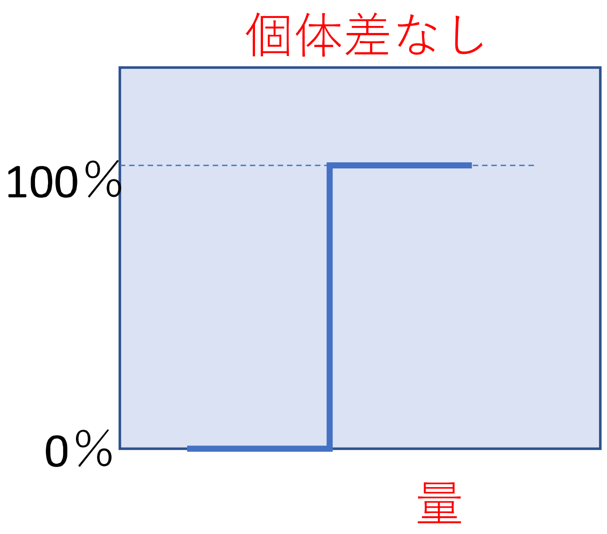
曝露量の重要性について
ー毒性学の父：パラケルスス（1493-1541）

「全てのものは毒であり、毒でないものなど存在しない。その服用量こそが毒であるか、そうでないかを決めるのだ」

“The dose makes the poison”

曝露量－反応関係





「曝露量が増えていくと徐々に影響が発現する人の割合が増えてくる」

量－影響関係

例）一酸化炭素の場合

CO_2濃度(ppm)	血中COHb濃度(%)	健康影響
35以下	0－10	軽い頭痛、めまい
50	10－20	激しい運動時息切れ
100	20－30	拍動性頭痛、体動時息切れ
200	30－40	激しい頭痛、悪心、嘔吐
300－500	40－50	頻脈、意識混濁、失神
800－1200	50－80	意識消失、痙攣、呼吸不全、失神
1900	80－	死亡（即死）

曝露量（濃度）が高くなればなるほど、
強い症状が出る！

リスク評価のための研究方法にはどのようなものがあるのでしょうか

- **動物実験**

  例）マウスに低周波音を曝露させて影響を調べる。
  長期間の強い曝露が可能

- **人を用いた実験**

  例）人に曝露室で低周波音を曝露させて反応を調べる。
  通常、短時間。倫理的配慮が必要。

- **人（集団）を対象とした疫学研究（調査）**

  例）実際に低周波音に曝露している人集団と、曝露していない人集団を比較して差異を調べる

騒音による健康影響の課題と最新の知見

（一般的な）音の健康影響にはどのようなものが考えられるでしょうか

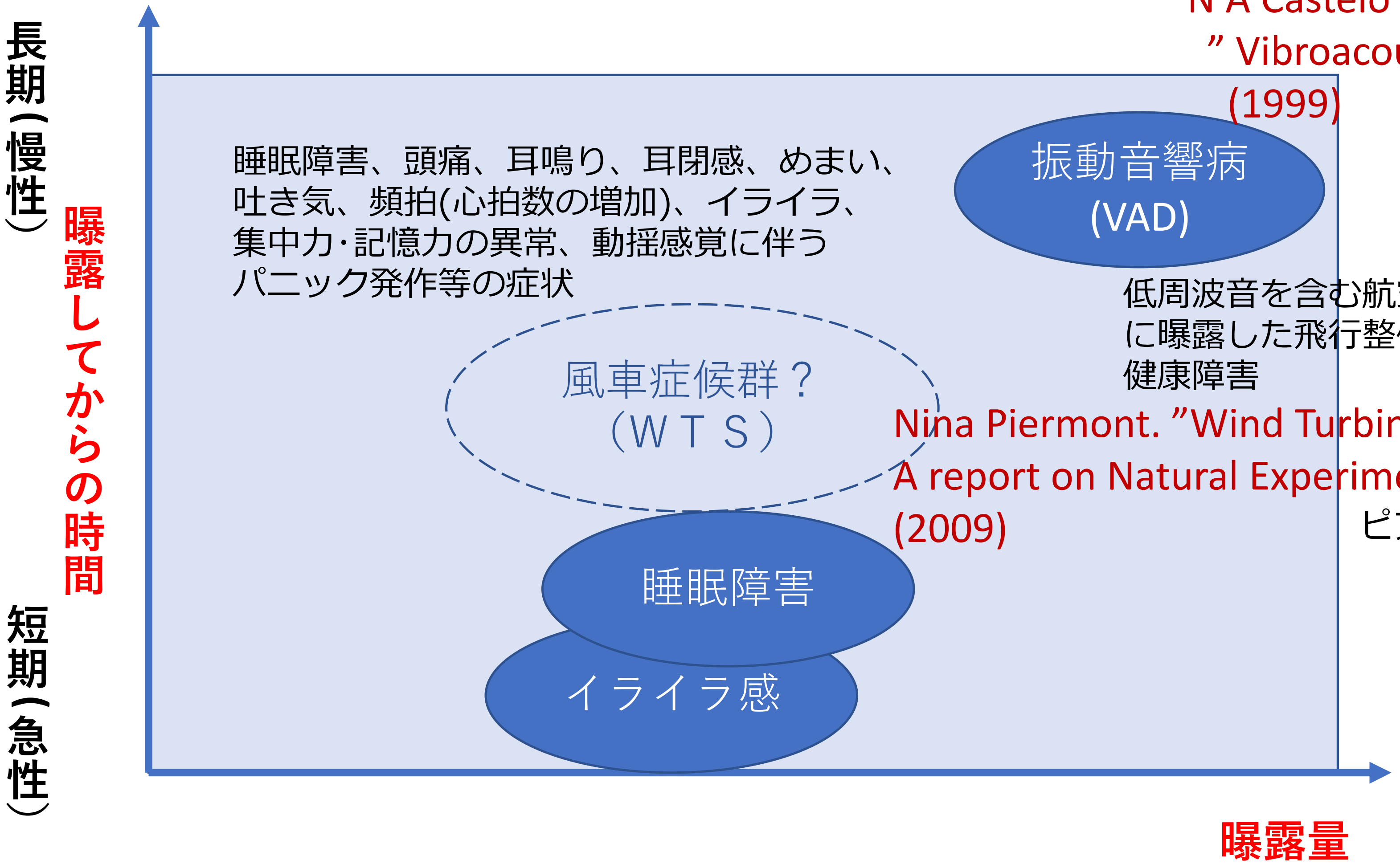
- 聴力損失：慢性/急性　主として不可逆性
- いらいら感（アノイアンス）：急性　可逆性
- 睡眠障害
- 耳鳴り
- 高血圧症：慢性　可逆性？
- 心臓疾患：慢性　不可逆性　器質性

主観的なもの（本人の訴え）と
客観的なもの(検査等でわかるもの）、
あるいはその両方、がある

風車から発生する音・騒音による健康影響の課題と最新の知見

- **健康影響を評価することの難しさ**
  - ー主たる影響は「アノイアンス（イライラ感）」「睡眠影響」
    非特異的影響かつ客観的評価が困難
  - ー個体差　感受性の違い
  - ー低周波音の健康影響の評価　感覚閾値と聴覚閾値の違い
    「よくわからないもの」への不安

「低周波音」曝露によるかもしれないとされている健康影響にはどのようなものがあるのでしょうか？



N A Castelo Branco , M Alves-Pereira,et al
” Vibroacoustic disease: some forensic”
(1999) ペレイラ博士（ポルトガル）

低周波音を含む航空機エンジン音
に曝露した飛行整備士等に起こる
健康障害

Nina Piermont. ”Wind Turbine Syndrome:
A report on Natural Experiment”
(2009) ピアモント博士（米国）

「科学的知見」は論文として発表されるもの
但し、すべての論文が同一の価値を持つわけではありません！

批判的吟味（Critical Appraisal)が必要

1．目的（リサーチクエスチョン）が明確か

2．方法は妥当か、質はどうか

（曝露量評価、アウトカム評価の方法、バイアスの可能性）

3．結果は適正に示されているか

4．結果の解釈は妥当か、論理の飛躍はないか

（種差、現実との乖離）

以上より

- Meaningfulness（意味）
- Validity（妥当性）
- Reliability （信頼性）
- Relevance（臨床的意義） を、評価する

「風車騒音と健康」に関する科学論文

Review > J Acoust Soc Am. 1996 May;99(5):2985-3002. doi: 10.1121/1.414863.

Sources and effects of low-frequency noise

B Berglund [1], P Hassmén, R F Job

Affiliations — collapse

Affiliation

1 Institute of Environmental Medicine, Karolinska Institute, Stockholm, Sweden. bb@psychology.su.se

> J Acoust Soc Am. 2004 Dec;116(6):3460-70. doi: 10.1121/1.1815091.

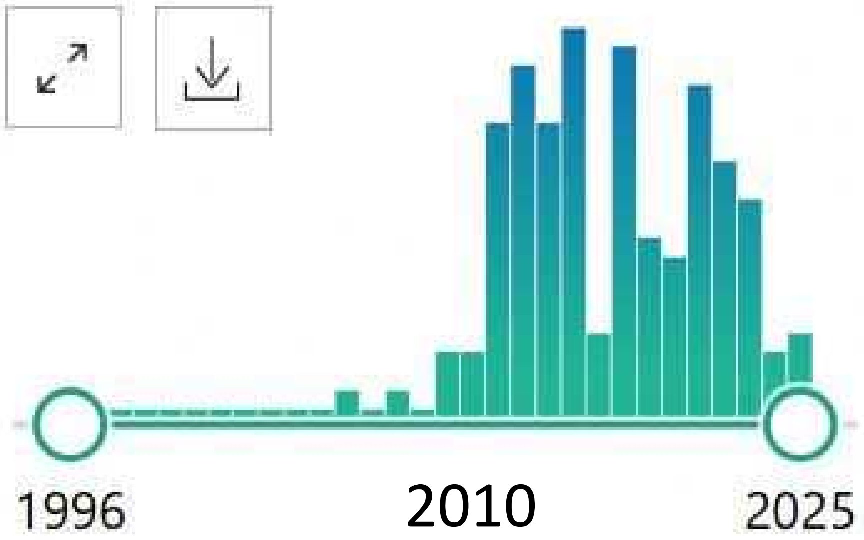
Perception and annoyance due to wind turbine noise--a dose-response relationship

Eja Pedersen [1], Kerstin Persson Waye

> Occup Environ Med. 2007 Jul;64(7):480-6. doi: 10.1136/oem.2006.031039. Epub 2007 Mar 1.

Wind turbine noise, annoyance and self-reported health and well-being in different living environments

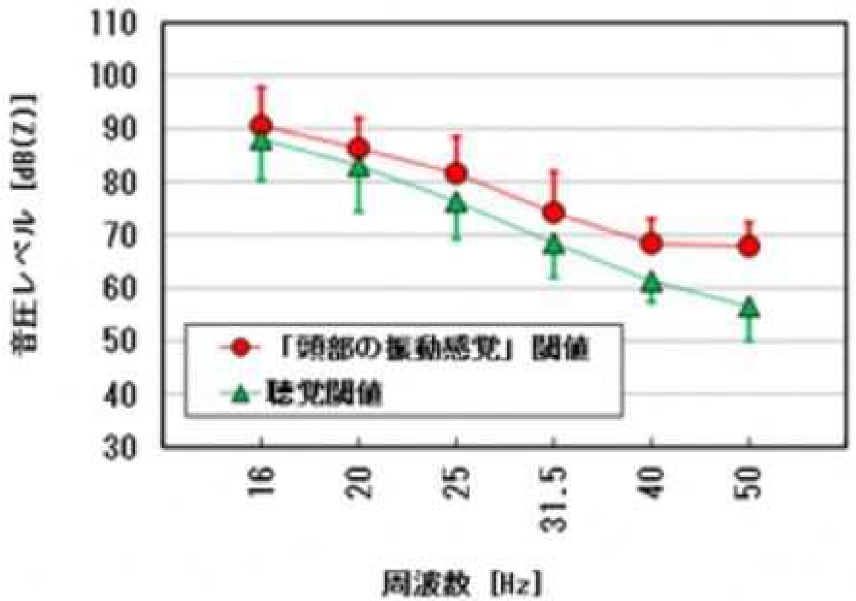
Eja Pedersen [1], Kerstin Persson Waye



- 1996年スウェーデンのグループが風車からの低周波音の健康への影響の可能性を指摘
- 2004年スウェーデンのペデルソン女史が風車騒音と「イライラ感」の関連を報告
- 1996年～2025年までに154論文

低周波領域の聴覚閾値と感覚閾値

右のグラフは、低周波域の純音による「頭部の振動感覚」閾値を調べた結果です。低周波音による振動感覚は頭部で知覚されやすいので、その閾値を調べました。その結果、「頭部の振動感覚」閾値は、聴覚閾値よりも数～10 dB以上も高いことが分かりました。このことから、振動感覚の誘起は低周波音の特徴ですが、基本的には低周波音も聴覚で知覚されると考えられます。



[Takahashi: J Low Freq Noise Vib Active Control,Vol.32, No.1-2 (2013) より]

低周波音に関する最新の知見の紹介

The Health Effects of 72 Hours of Simulated Wind Turbine Infrasound: A Double Blind Randomized Crossover Study in Noise-Sensitive, Healthy Adult

Marshall NS et al. Environmental Health Perspectives　131(3) March 2023

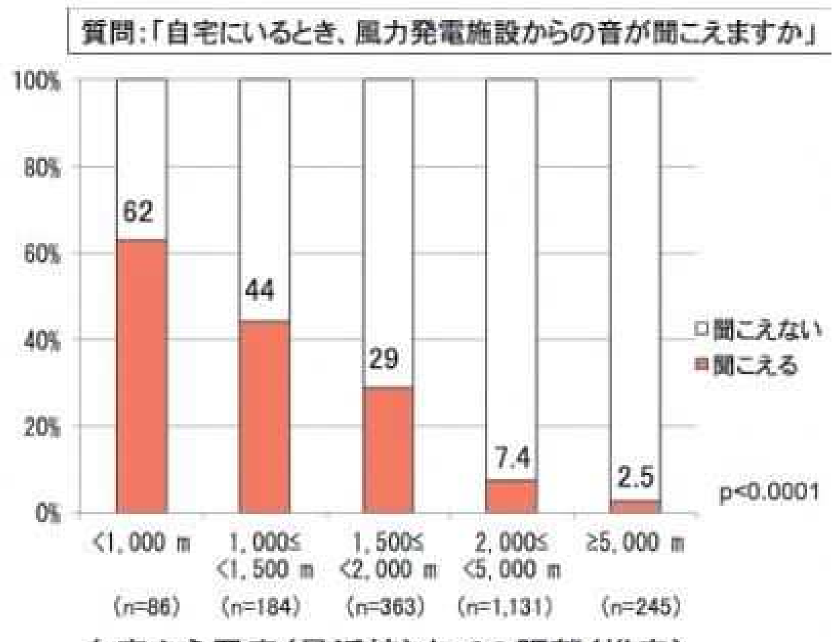
背景：風力タービン症候群（WTS）の患者は、自身の健康不良や特に睡眠障害をインフラサウンドの特有のパターンに起因すると主張している一方、これらの症状は心理的な起源であり、**ノセボ効果**に起因するという意見がある

方法：37人の音に感受性の高い健康成人に対し、72時間の超低周波音（1.6-20 Hz、音圧レベル約90 dB pk re 20 μPa、風力発電機の低周波音を模擬的に作成）曝露が人間の生理、特に睡眠に及ぼす影響をテストした。**無作為化二重盲検三群クロスオーバー研究**を実施しました。曝露は、低周波音（約90 dB pk）、擬似低周波音（同じスピーカーで低周波音を発生させない）および交通ノイズを曝露し、睡眠影響や生理的影響を測定

結果：交通騒音は睡眠に影響を与えたが低周波音は主観的、客観的にも影響が認められなかった

結論：風車から発生する超低周波音は風車症候群の原因とはいえない

風車から発生する騒音はどうか



図–1　風車までの距離と聞こえる割合の関係

（石竹ら　日本音響学会誌74巻5号（2018），pp.280–285）

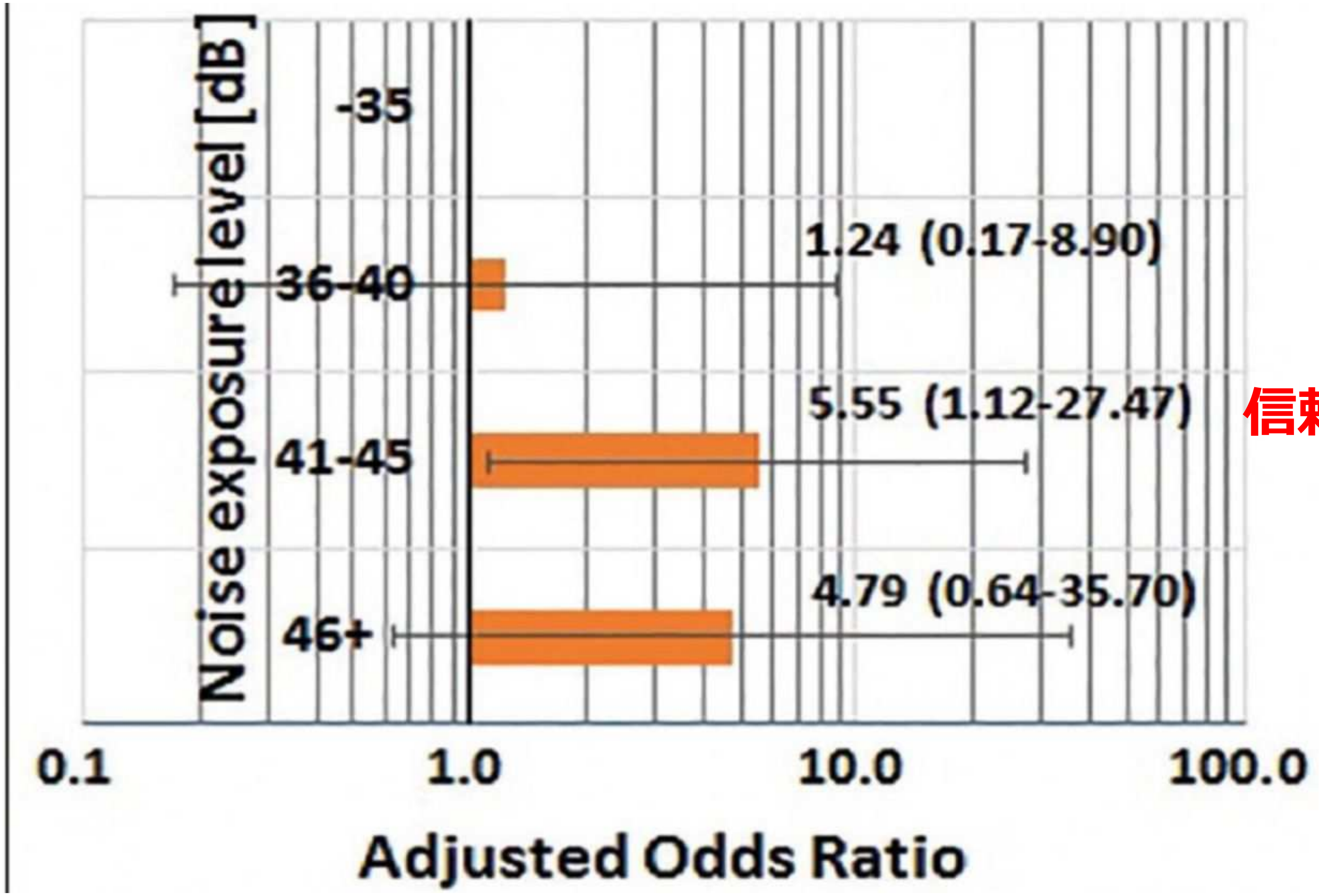
影山論文による騒音レベル別の「不眠症」有病率

Table 1.

Prevalence rate (%) of insomnia by noise exposure level categories

		不眠		入眠困難	中途覚醒	早朝覚醒	浅い眠り
$L_{Aeq,n}$ or $L_{A95,n}$ (dB)	*n*	Insomnia		DIS	DMS	PMA	LOS
–30	156	0.7	1人	0.0	0.0	0.7	0.0
31-35	249	0.5	1人	0.5	0.5	0.0	0.5
36-40	329	0.7	2人	0.4	0.7	0.4	0.7
41-45	261	3.1	8人	2.2	3.1	1.3	2.6
46+	84	2.7	2人	2.7	1.4	2.7	2.7
Chi^2_{MH}	1079	5.3*		6.9**	6.0*	3.7	6.3**

不眠症が41dB以上では5倍発症するとされる根拠



信頼区間

疫学的因果関係（Hill の基準）

- 関連の強固性：要因Ａに曝露された群の疾患Ｂの発症率（罹患率）が、非曝露群に比べてどの程度高いか。高いほど強固。相対危険度やオッズ比で表される
- 関連の時間性：要因Ａへのばく露（原因）があり、その後疾患Ｂ(結果）が発生
- 関連の一貫性：要因Ａと疾患Ｂとの同じ関連が異なった地域、集団、時間でも一貫して得られること
- 生物学的納得性：要因Ａが疾患Ｂを招くという説得性のある形態学的、機能的な説明ができるか（メカニズムが特定される）
- 現時点の知識との整合性：発見された要因Ａと疾患Ｂの関連性は現在一般的に認められている疾患史や経過と矛盾しないかを判断。
- 量-反応関係：曝露量が多くなるほど影響の出る割合が増加する
- 類似性：要因Ａと疾患Ｂの関連性に、既に認められている因果関係でよく似たものがあるか
- 実験的証拠：要因Ａと疾患Ｂの関連について実験でえられた証拠があるか

過去の疫学研究の結果

1）カナダ政府(2014,2015)

- 2012年から2つの州　500m以内とそれより遠い10ｋm以内の居住者2000サンプルを対象
- 主観的（睡眠、アノイアンス、ＱＯＬ等）
- 客観的（睡眠、血圧，ストレスホルモン）を調べた
- Ａ特性35ｄＢを超えるとアノイアンスが有意に増加
- その他の影響に曝露との間に有意な関連性は認められなかった

2）オーストラリア国立保健医療研究委員会（2015）

- 文献調査
- 風力発電施設が人の健康に悪影響を与える科学的根拠は存在しないと結論
- 風車騒音とアノイアンスとの関連について質的には不十分であるものの一貫性のある科学的根拠が存在する。
- 睡眠影響についてはアノイアンスほどの一貫性は無い、不十分な科学的根拠は存在する
- 風車から発生する超低周波音と低周波成分を含む音が人の健康に影響を及ぼすことを示す科学的根拠は存在しない

3）日本「環境研究総合推進費研究」（2015）

- 鹿児島県の風力発電施設近隣住民を対象とした疫学調査
- 風車音が聞こえる場所、1500m以内、静穏地区、はアノイアンスや睡眠影響との間に関連がある
- 超低周波音は健康への直接影響は考えにくい
- 風力発電施設への「態度」や個人の音への感受性は睡眠障害発症に関係している

疫学研究の方法に問題点はないのか？

- 疫学は集団を対象にする
- 研究では曝露レベルにより集団を分けて、アウトカム（健康事象）の出現率を比較する
- 出現率に「有意な差」が認められるかは、統計学的手法により評価する
- 出現率が小さければ莫大な対象者数が必要
- アウトカムが非特異的なものであると「撹乱因子」（曝露要因以外で結果に影響する要因）の制御が困難

今後も引き続き調査すべきこと

- 影響個体差はどこから生じるのか？　（なぜ同居家族のなかでも症状を訴える人と訴えない人がいるのか？）
- 曝露感覚がない曝露レベルで身体に影響は起こりうるのか
  （内耳への影響の客観的評価等）
- より洗練された説得力のある疫学研究方法の開発
- 症例を集積して「高感受性」の有無と、その要因を調べる

騒音対策・規制の動向

WHOガイドライン（2018）騒音曝露（L_{den}/L_{night}）による健康影響に関するエビデンスの質の要約

優先的に扱う健康影響		道路交通騒音	鉄道騒音	航空機騒音	風車騒音
心臓血管系疾患	虚血性心疾患の罹患	高い	ー	非常に低い	ー
	高血圧の罹患	低い	低い	低い	ー
不快感	高度の不快感	中程度	中程度	中程度	低い
認知能力障害	読解・口頭能力	非常に低い	ー	中程度	ー
聴力障害と耳鳴り	永久性聴力障害	ー	ー	ー	ー
睡眠妨害	高度の睡眠妨害	中程度	中程度	中程度	低い

風車騒音に対しては不快感（アノイアンス）や睡眠妨害に対しても低いエビデンスとしている

勧告値と勧告の強さ

	道路交通騒音	鉄道騒音	航空機騒音	風車騒音
1　日の騒音（L_{den}）	53　dB/強い	54　dB/強い	45　dB/強い	45　dB/暫定的
夜間の騒音曝露（L_{night}）	45　dB/強い	44　dB/強い	40　dB/強い	—
対策効果	強い	強い	強い	暫定的

風車騒音に関する諸外国の基準等

国/地方	騒音指標	地域の類型 田園地域	 住宅地域	 工業地域に近い住宅地域	 その他の地域
Denmark	L_r（6 m/s） L_r（8 m/s）	42 dB（6 m/s） 44 dB（8 m/s）	37 dB（6 m/s） 39 dB（8 m/s）	–	–
Sweden	L_{Aeq}@8 m/s	35 dB	40 dB		
Belgium/ Wallonia	L_{Aeq}	45 dB			
France	L_{Aeq}	昼（07:00-22:00）：残留騒音レベル+5 dB 夜（22:00-07:00）：残留騒音レベル+3 dB (風車稼働時の騒音が35dBを超える場合)			
Germany	L_r	昼：60 dB 夜：45 dB	昼：50-55 dB 夜：35-40 dB	昼：60 dB 夜：45 dB	昼：45-70 dB 夜：35-70 dB
The Netherlands	L_{den} L_{night}	L_{den}: 47 dB L_{night}: 41 dB			
United Kingdom	$L_{A90,10min}$	昼：残留騒音レベル+5 dB（最低35 dBまたは40 dB） 夜：残留騒音レベル+5 dB（最低43 dB）			
New Zealand	$L_{A90,10min}$	35 dBまたは残留騒音+5dBの高い方の値	静穏を要する地域：40 dBまたは残留騒音+5 dBの高い方の値		
Australia/ Victoria	$L_{A90,10min}$	35 dBまたは残留騒音+5dBの高い方の値	静穏を要する地域：40 dBまたは残留騒音+5 dBの高い方の値		
Canada/ Manitoba	L_{Aeq}	40 dB（風速4 m/s）から53 dB（11 m/s）まで段階的に設定			
USA/ Maine	L_{Aeq}	静穏を要する地域；昼：55 dB，夜：45 dB 風力発電施設の敷地境界線上；終日75 dB			

世界各国における風車騒音の基準・ガイドラインの比較（一部抜粋改変）

我が国の風車騒音に関するガイドライン

評価の目安となる値：残留騒音＋５dBはなぜか？

- 日常の平均的な騒音レベルよりも平均して４～５ｄＢ騒音レベルが高くなると人はわずらわしさ（アノイアンス）を訴えるとする知見がある

（石竹ら　2018）

- 諸外国の風車騒音の評価において複数の国で＋５ｄＢが用いられていること.
我が国の調査結果を踏まえ、平成２８年１１月に「 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」で設定

本日のまとめ

- 洋上風力発電施設から**発生する音は出力および設置基数により異なる**
- 住民に達する音圧レベルは**距離が遠ざかるにつれて減衰**する
- 発生する音には**低周波領域の音も含まれる**
- これまでの研究結果からは、**低周波領域の音が「特異的な」影響を示す可能性については低い**と考えられている
- 風車から発生する音は**スラッシュ音という特徴的なもの**である
- 低周波領域の音も含め、**感覚閾値には個人差**がある
- 知覚することによる**反応についても個人差**がある
- 予防対策では正しい情報の周知により**住民に安心感を与えることが重要**である