

内容

超低周波音計測に関する調査研究 平野琴	5
幾つかの問題点	5
1. はじめに	5
2. 超低周波音の計測	5
2.1 超低周波音の定義	5
2.3.2 人為活動	6
3.5 計測機器に関する現状の課題	6
6. まとめ	7
問題点の検討	8
1. はじめに	8
波長と物体の大きさ	9
“疑似音”については、	18
“風雑音”については、	21
“超低周波音の発生源は地球上至るところに存在する。”	23
G 特性音圧レベルと 1/3 オクターブ解析	32
G 特性音圧レベルの計算での問題	35
2. 超低周波音の計測	39
2.1 超低周波音の定義	39
2.3.2 人為活動	42
「風車騒音・低周波音による健康被害」	43
低周波音問題の変遷と計測値	49
G 特性音圧レベルの問題点	54
・平成 22 年、環境省の調査	56
風車音の特徴と“頭痛”	67
風車音と交通騒音のグラフのズレの補正について	73
Q6 『参照値』に科学的な根拠はありますか？	93
3.5 計測機器に関する現状の課題	97
ソリトンの尻尾	99
気圧計での計測値	101
6. まとめ	102
風車音をどのように計測すべきかの考察が欠けている。	108
防風スクリーンの効果は次のものである。	109
G 特性音圧レベル ISO-7196	115
精密騒音計（低周波音測定機能付） NL-62	118
4. オプション製品	120
録音データの解析方法	122

超低周波音の測定方法	125
7. 1 波形収録	125
7. 1. 1 リオン社	125
7. 1. 2 アコー社	133
7. 2 風の影響について	136
7. 2. 1 風車の近くでは、マイクに風が当たらなくても超低周波音が計測される。	136
7. 2. 2 風車が無ければ、マイクに風を当てても音圧の高い超低周波音は発生しない。	137
風車音の特徴	139
グラフ密度	139
Wavelet 解析	140
周波数スペクトルとエネルギー分布	141
風速の変化と音圧	144
強風時の波形	147
健康被害と原因	148
6. 1 アノイアンスとラウドネス	148
6. 1. 1 唾液コルチゾール検査	153
6. 1. 2 カナダ政府の HP	154
6. 1. 3 「風車騒音の人への影響」	158
6. 2 間接的な健康影響（安眠妨害）	169
6. 2. 1 風車による睡眠へ影響	169
6. 2. 2 ガタツキ閾値	169
6. 2. 3 圧力変動の感知	171
6. 2. 4 不眠による被害	175
6. 3 風車音による直接的な健康被害（頭痛）	186
6. 3. 1 超低周波音の解析と発生の仕組み	186
6. 3. 2 圧縮と膨張	200
6. 3. 3 音響キャビテーション	204
6. 3. 4 潜水病についての資料	214
風車の運動と金属疲労での倒壊について	223
天罰	228
減衰の仕方と音源の形	234
・音源の形と予測式	236
・点音源、線音源、面音源	236
石狩湾での計測結果	240
垂直軸	244
被害の予測と指針値、環境基準値	254
7. 4 指針値マジック	264
環境省の見解の変遷と弁護士、学者の見解	273
アンケート用紙	278
本マニュアルの使い方	281
1. 本マニュアルに用いる用語	283

2. 超低周波音・低周波音の発生源と被害	286
3. 測定の方法	292
4. 超低周波音・低周波音の被害があった場合の対処方法	293
4. 1 超低周波音・低周波音問題の診断手順	293
4. 2 発生状況の把握（状況調査）	295
4.2.2 発生状況	297
(2) 現象の発生性状（持続的か間欠的か）	298
5. 超低周波音・低周波音の測定方法	302
5. 1 測定計画	302
5.1.1 測定量	302
5.1.2 超低周波音・低周波音の測定系列	305
5.1.3 超低周波音・低周波音の測定機器	308
(4) 周波数分析器	314
(5) データレコーダ等	315
5.1.4 測定時期	316
(4) 風の影響	317
5.1.5 測定場所および測定点の選定	324
(3) 距離減衰の測定	326
(4) 指向性の測定	326
(5) 発生源周辺の音圧レベル分布の測定	328
(6) 特定の音源が対象でない場合の音圧レベル分布測定	328
5.1.6 人員配置	333
5. 2 現場測定方法	334
(2) 精密騒音計（低周波音圧レベル計）の周波数補正特性	336
5.2.2 レベルレコーダによる記録	337
(4) G 特性音圧レベルの測定	338
G 特性と ISO7196	338
G 特性による補正の問題点	342
(5) レベルレコーダによるレベル波形のモニター	349
(6) 衝撃性低周波音のレベルレコーダ記録	349
5.2.3 レベル処理器による測定	349
5.2.4 実時間周波数分析器による測定	350
(2) 衝撃性低周波音の周波数分析	350
(3) 超低周波音・低周波音の発生状況のモニター	351
5.2.5 超低周波音・低周波音の録音	351
(2) 校正信号の録音	352
(4) 録音時のアナウンス	352
5.3.1 気象条件、地形等による影響	352
5.3.2 暗騒音の影響	354
5.3.3 風雑音の影響	355
G 特性音圧レベルと低周波音問題対応の手引書（H16.6）	357

5.3.4	その他の注意事項.....	391
5.3.5	発生源の状況の記録	391
5. 4	音圧レベル指示値の読み取り方法	391
5.4.2	1/3 オクターブバンド音圧レベル	393
5. 5	測定結果に付記すべき事項.....	395

超低周波音計測に関する調査研究 平野 琴

の問題点に関して、幾つか確認します。

論文の内容は、超低周波音の計測での圧力計と精密騒音計の長所と短所、それらの関係を丁寧に調べたものであり、基本的な概念に関しての丁寧な説明がある。精密騒音計と気圧計の計測範囲に関連して、機能の相互補完の可能性について述べている。しかし、残念な記述も幾つかある。

幾つかの問題点

1. はじめに

音は高さ（周波数）、大きさ（音圧）といった、音源の状態を反映した情報を含む。人が聴感として知覚できる音は 20 Hz から 20 kHz とされ、これより低い音は超低周波音と呼ばれる。「音」としての知覚が難しいため、生活の中で意識する機会は少ないものの、超低周波音の発生源は地球上至るところに存在する。超低周波音は巨大な物体の振動から生じることが多いが、これは周波数が低くなるほど音の波長は長くなり、例えば 1 Hz では 340 m にも達することからも想像できよう。火山噴火や津波などの大規模な地球物理現象、工場や風力発電施設が発生源として挙げられるほか、航空機の超音速飛行や、小型惑星探査機や隕石など宇宙からの飛来物の大気圏突入時にも生じる 1)。

2. 超低周波音の計測

2.1 超低周波音の定義

空气中を伝搬する音は、周波数が低い順から、超低周波音（Infrasound）または低周波音（Low frequency sound/noise）、可聴音（Audible sound）、空中超音波または高周波音（Ultrasound）と呼ばれることが多い。低周波数域に関しては、可聴音の下限周波数である 20 Hz を基準として、これより低周波数の音を超低周波音とし、超低周波音と可聴音の低周波数域の音をまとめて低周波音とすることが多い。しかし、用語定義や周波数範囲について分野間の統一が為されていないため、異なる定義が混在する（図 1）。以下に分野ごとの用語の使い分けを整理する。

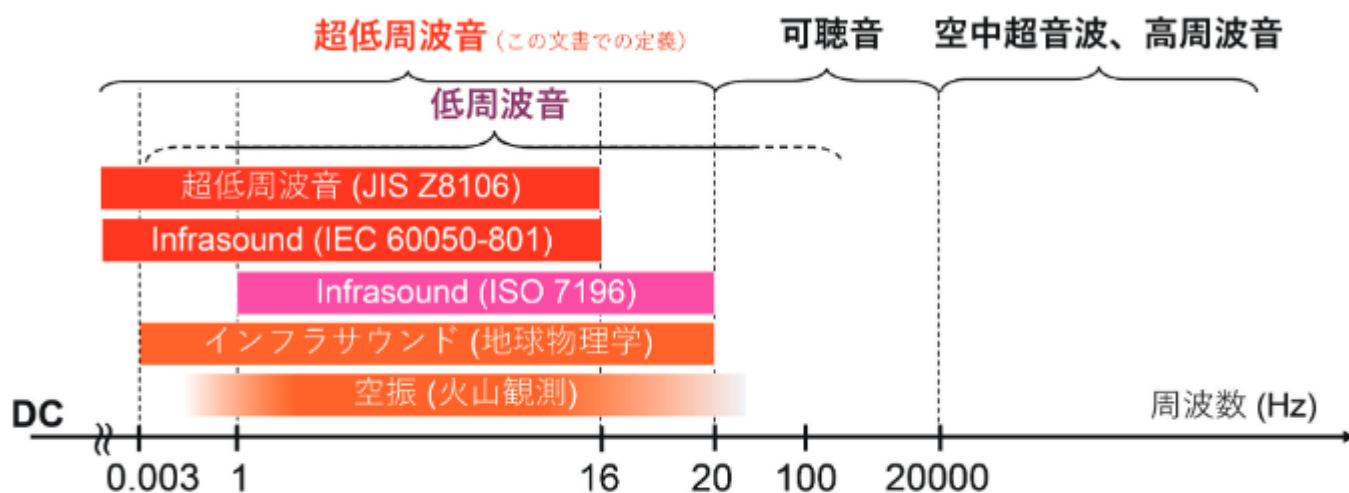


図1 周波数による音の分類

また、1995 年に発行された ISO 7196 は、低周波音に対する人体感覚を評価するための周波数重み付け特性（G 特性）を規定しているが、ここでは 1 Hz から 20 Hz の音を特に超低周波音と定義している 14)。

2.3.2 人為活動

風力発電用風車

再生可能エネルギーの世界的な導入を受けて、日本でも 1990 年頃から風力発電施設の建設が進んだ。風力発電用風車の騒音（風車騒音）への苦情や健康上の不安を感じるという訴えが度々寄せられたことから、風車騒音の評価と人間に対する影響の調査が国内外で行われた 42) ,43)。2010 年から 2012 年にかけて行われた、日本における風車騒音の実測調査では、図 3 に示すように 30 Hz 以下では風車騒音は聴覚閾値曲線を下回る、すなわち聴感的に知覚できていないことが分かった 44)。

また、2012 年から 2018 年にかけて欧州地域で行われた「Metrology for a Universal Ear Simulator and the Perception of Non-audible Sound (EARS プロジェクト)」は、聴覚閾値を下回る音圧レベルの音響刺激に対しては脳波応答が見られないことを報告している 26)。環境省の検討会は、調査の結果を踏まえて風車騒音は可聴域、あえて言うならば低周波数域での騒音として議論すべきとの見解を示している 42)。

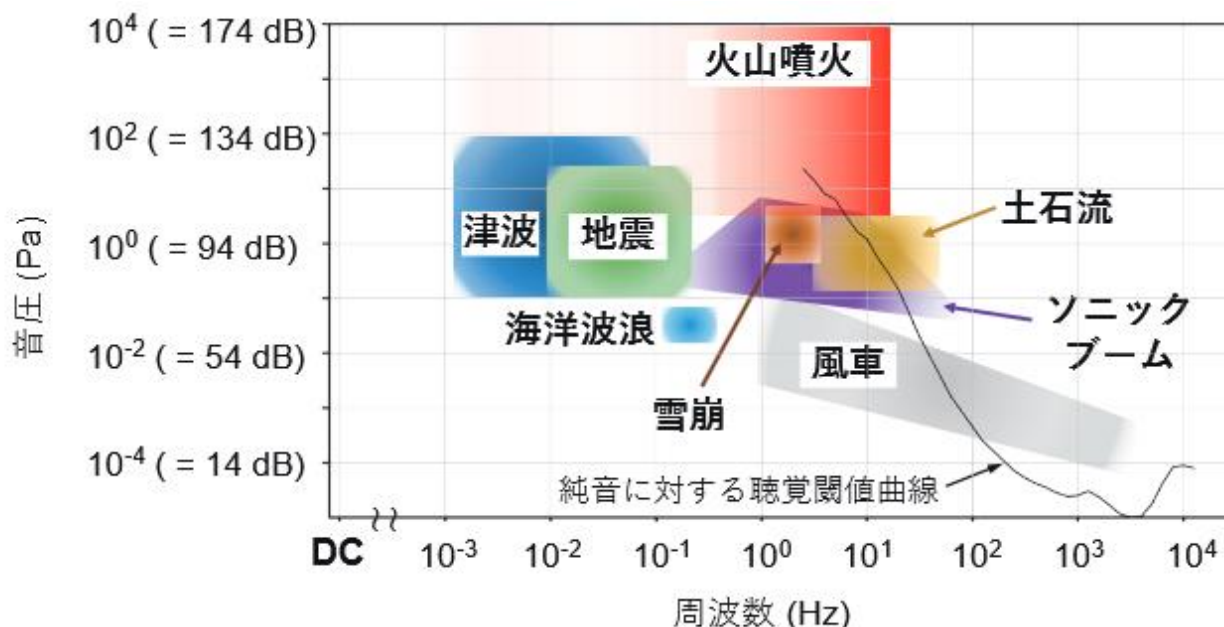


図 3 計測対象現象に対応する周波数および音圧の範囲。聴覚の閾値曲線については、20 Hz より上の周波数域は ISO 226:2003、20 Hz 以下は EARS Project の結果を引用した^{25),26)}。なお、音響分野では 20 μ Pa を 0 dB として扱う。

3.5 計測機器に関する現状の課題

噴火口の位置推定など複数の測定点でのデータを解析処理する際に前提となるのが、同一の測定点では計測機器が異なっても同一波形が計測されることである。

しかし実際は、機器の種類や型式が異なると計測される音圧波形に違いが生じる例が複数報告されている 62) ,63)。

マイクロホンと気圧計の典型的な時間応答波形の例を図 6 に示す。気圧計では幅 2 秒程度のパルスが計測されるような圧力変動は、マイクロホンでは異なる波形として計測される。

この問題の理由を考えるために、計測機器の周波数特性が出力波形に与える影響を、簡単なモデルで検討した。

6. まとめ

20 Hz 以下の周波数の音である超低周波音は、可聴音と比較して減衰しにくく、遠方まで音源の情報が伝達されるという特性を有する。この特性を生かし、火山噴火など大規模自然災害由来の超低周波音を遠隔観測することで、防災・減災に役立てるニーズが強まりつつある。

このような現状を鑑み、本調査研究では超低周波音計測の現状と課題について調査し、今後の対応について考察した。

超低周波音はマイクロホンで測定可能な周波数下限と気圧計で測定可能な周波数上限が重なる周波数域であり、両方の機器を用いた計測が行われている。しかし、1 Hz 以下については、音響標準・圧力標準ともに標準が整備されておらず、計測機器の校正法も未確立である。

低周波音計測機器の校正ができないため、観測に用いる機器によって計測結果に違いが生じることが問題となっている。

従来の音響標準は 20 Hz 以上 20 kHz 以下の可聴域を中心に整備されてきた。近年、校正周波数範囲の拡張が行われているものの、その下限は 1 Hz 程度であり、各国 NMI は周波数下限のさらなる低域化に取り組んでいる。しかし、既存のカプラ校正法やレーザーピストンホン法を 1 Hz 以下に適用した場合、様々な問題点が顕在化することが分かってきた。そのため、NMIJ の音波振動標準研究グループでは、液柱型圧力計の原理を用いた音圧発生装置を開発中である。まずは当該装置によりマイクロホンの感度校正を行い、当該装置では校正できないような気圧計などは当該装置で校正したマイクロホンを参照標準とした比較校正により、各機器の振幅・位相の校正を可能とする計画である。校正値を踏まえてユーザーが計測機器の調整あるいは測定値の補正を行うことで、機器により測定結果に違いが生じる問題の多くが解決し、超低周波音計測を通じてより信頼性の高い情報を得られるようになると期待される。

これらに関して、その問題点を確認する。

問題点の検討

1. はじめに

音は高さ（周波数）、大きさ（音圧）といった、音源の状態を反映した情報を含む。人が聴感として知覚できる音は 20 Hz から 20 kHz とされ、これより低い音は超低周波音と呼ばれる。「音」としての知覚が難しいため、生活の中で意識する機会は少ないものの、**超低周波音の発生源は地球上至るところに存在する。超低周波音は巨大な物体の振動から生じることが多いが、これは周波数が低くなるほど音の波長は長くなり、例えば 1 Hz では 340 m にも達することからも想像できよう。**火山噴火や津波などの大規模な地球物理現象、工場や風力発電施設が発生源として挙げられるほか、航空機の超音速飛行や、小型惑星探査機や隕石など宇宙からの飛来物の大気圏突入時にも生じる 1)。

の部分では、誤解を招きかねない記述がある。

波長と物体の大きさ

“超低周波音は巨大な物体の振動から生じることが多いが、これは周波数が低くなるほど音の波長は長くなり、例えば 1 Hz では 340 m にも達することからも想像できよう。”

の部分である。

風力発電の業者が、平成 16 年に千葉県南房総市での住民説明会で配布した資料には、専門家、中野有朋氏の経歴と意見が乗せられていた。

中野 有朋 (ナカノ アリトモ)
昭和31年、早稲田大学第一理工学部応用物理学学科卒。石川島播磨重工業(株)(IHI)入社。昭和52～59年、石川島防音工業(株)代表取締役社長。昭和62～平成3年、IHI技監。
日本音響学会理事、日本騒音制御工学会副会長・理事、宇都宮大・東海大・早大大学院講師、横浜市環境審議会委員・環境影響評価審査会委員、日本産業機械工業会環境装置部会副部会長など歴任。現在、中野環境クリニック所長、騒音対策コンサルティングに従事。栃木県大規模小売店舗立地審議会委員、栃木県環境審議会専門委員、日本産業機械工業会環境装置部会顧問。工学博士、技術士(応用理学)

中野氏は、日本音響学会理事、日本騒音制御工学会副会長・理事、だそうです。

資料の中には、中野氏の見解が、

TVの「今回の測定値」では、10Hzの音圧レベルは50dB程度となっています。緑線の参照値90dBより40dB小さく(1万分の1)です。
20Hzの場合は、30dB程小さく千分の1の大きさ(レベル)です。
1Hzから10Hzに対する参照値はありませんが、1Hzの感覚閾値(感じることができる値)は130dB以上であり、5Hzでは110dB以上です。
これは多くの文献にあり、これらをもとに超低周波の国際規格も定められています。
「今回の測定値」の1Hzは70dBですから感覚閾値130dBより百万分の1も小さい値であり、5Hzの場合は40dB小さく1万分の1です。
このような微少な超低周波音で交感神経の緊張や頭痛などは健常者であれば起こるはずがありません。

【結言】

三崎地区風力は、風車周辺および住宅内では「健常者の人体に感知される超低周波音」は存在せず、建具をがたつかせる超低周波音も存在しないことから、周辺の生活環境を保全する上において支障はないものと考えられます。

と書かれていた。

最後の部分

“このような微少な超低周波音で交感神経の緊張や頭痛などは健常者であれば起こるはずがありません。”とあります。

これが正しいならば、超低周波音による圧迫感を感じると言ったとたんに“健常者ではない”とされてしまう。

これでは、超低周波音による被害を訴えることが出来なくなってしまいます。訴えたとたんに、業者の説明を信じた近所の人からは、“健常者ではない”とみなされてしまいます。

肉体的に障害が無い人が“健常者ではない”と言われたら、聞いた人は“気が狂っている”と言われたと思います。

ひどい言い方です。しかも、これを配って住民説明会をするのですから、企業の活動、企業の存在そのものに疑問を持ちます。

また、“超低周波音は風車から発生しない”と言っています。

しかし、昔の環境省は

“4. [低周波音防止技術の概要](#)

4.1.5 風車

風車の超低周波音の発生原理は基本的には送風機のいわゆる回転音と呼ばれるものと似ている。大型発電用風車の場合は、羽根の枚数が少なく、回転数も小さいために正常運転でも超低周波音を発生することがある。

その基本周波数 f (Hz) は、翼の回転数を R (rpm)、翼枚数を Z (枚) とすると

$$f = RZ/60 \text{ (Hz)}$$

で与えられ、この基本周波数とその高次の周波数が卓越する。

大型発電用風車の場合は、一般に翼枚数は 1～3 枚 (3 枚が主)、回転数は 30～60 (rpm) 程度であり、基本周波数は数 Hz 以下になる。“

(基本周波数の倍音も出ている。)

と言っていました。これで計算すると、大型風車では、 $f = RZ/60 = 0.5$ (Hz) となります。これは、超低周波音が出ているという事になります。

最近の環境省は、この部分を隠蔽するために、“風雑音”だから、防風スクリーンで低減させなさい。残っていたら除外音処理をして取り除きなさいと言っています。

学者の方で、この“超低周波音”＝“風雑音”の部分を計測して議論している方を見つけることが出来ません。本巢氏が計測と解析をして“風雑音”の問題点を解明してくれることを期待します。

資料の“理論”は、物理学の常識を破壊する内容でした。

風車の回転音

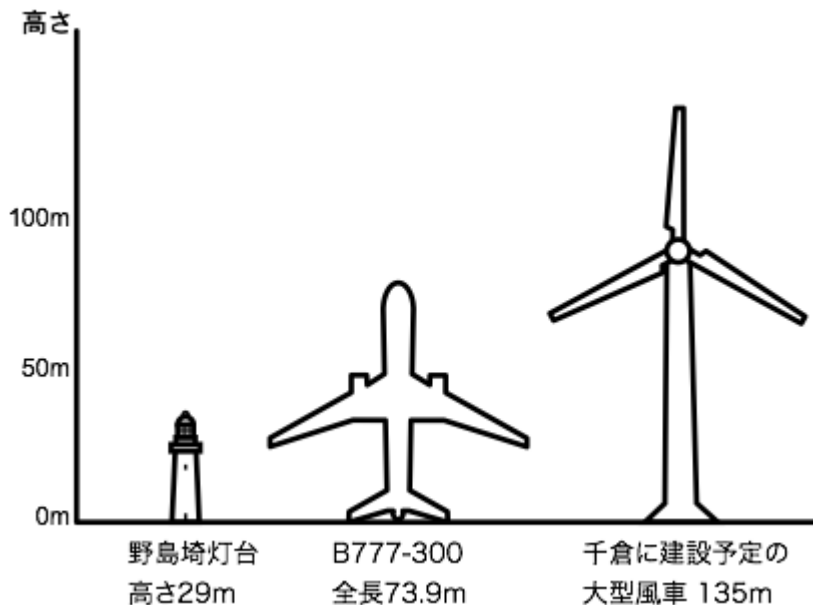
- 扇風機の羽根の回転は、早く回るので羽が目には見えませんがブーンという音が聞こえます。これが回転音です。これは羽の回りの空気が逃げるひまがないので圧縮されて音波が発生します。
- この音は「回転数に羽の枚数を掛けた周波数」の回転音になります。
- 風車の場合は羽が見えるくらい回転音が遅い(1分間に16～18回転程度)ため、羽にあたる空気が回りに逃げ空気がかき回されているだけで回転音は発生しません。

風車から原理的に超低周波音は発生しません

- 音は物体の振動によって発生します。「振動する物体の寸法が音の波長」が基本原理です。
- 超低周波音は1Hz～20Hzで波長は340m～17mの大きな波です。この寸法の物体が振動しないと超低周波音は発生しません。
- 風車には増速機、発電機などから構成されていますが超低周波音の波長より十分小さい寸法なので超低周波音を発生することはありません。

この主張は自己矛盾です。計画では、

CEF千倉ウィンドファーム計画
(2500kW×10基)



であり、風車の大きさは135mなので風車全体が振動するときには、中野氏の理論に従えば、2.5Hzの超低周波音（波長は $340/2.5=136\text{m}$ ）が発生する事になる。

こんなことが書いてあったら、“部外秘”としたくなるのは当然です。私なら、恥ずかしくて住民にも配布したくないと思うのですが、これについて、私に懸命に説明してくれた社員がいたのも事実です。このような資料を使って、南房総市では住民説明会が行われたことがあったのです。

田舎の住民が、大学の物理学科や数学科を卒業していることは無い。とでも思っているのでしょうか？

“振動する物体の寸法が音の波長”と言われても、ギターの弦は同じ長さなのに、波長の違う音が出ます。理論が正しければ、現実が間違っている事になります。このような理論を主張する“専門家”の意見を正しいとは思えません。

平野氏が、中野氏と同一の馬鹿げた主張をするとは思いませんが、平野氏の表現は、中野氏のような物理学を無視した主張に結び付きやすいのです。

中野氏の主張とは形が違いますが、“風車からは超低周波音は出ない”と言いう主張をする業者もいます。

平成20年度第3回三重県環境影響評価委員会

青山高原ウインドファーム風力発電増設事業に係る環境影響評価方法書に係る

調査審議概要

には、次の様に記録されている。

委員

幹事からの意見でもあるように、低周波音は評価項目としていただきたい。今回は規模も大きいので、少なくともモニタリングはしてほしい。低周波音については、資料が揃っていないので評価がむずかしいかもしれないが、安全側を見てほしい。もし、積極的にはずす理由があるのなら述べてほしい。

事業者

低周波音は、環境省の関係では100ヘルツ以下と定義されている。一般の可聴範囲である20ヘルツ以上

を騒音として評価する。20 ヘルツ未満は超低周波と区分する。20 ヘルツ未満の超低周波は最近の知見では風車からは発生しないとのことである。

風車は風がないと回らない。風があると木立等の音で暗騒音があるので、風車騒音との判別が困難であり、低周波音は評価が難しい。中部電力と信州大学、熊谷組で協同開発した音カメラで既設風車の騒音を測定してみたが、風車からの超低周波の発生は認められない。

委員

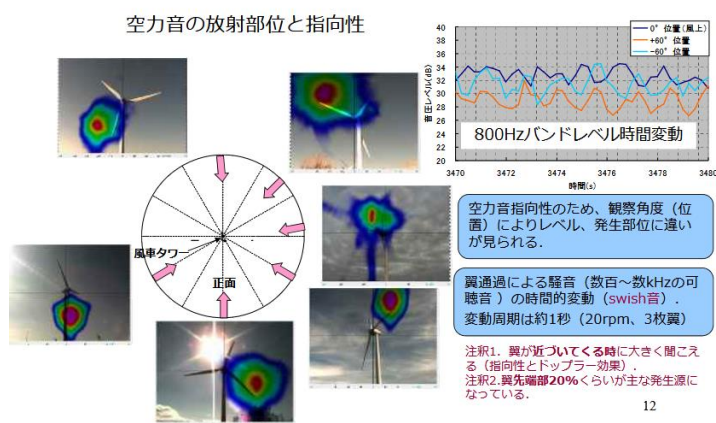
回答になっていない。評価は難しいのは分かっている。貴社がお持ちのデータ等は学会にアプローチされていない。データはあるかもしれないが、パブリックなデータとしてはないのでその見地からも測るべきである。そのデータが蓄積されてから判断することである。音カメラで分かるのは、音があるかどうかであって、影響があるかどうかではない。

ぜひやってほしい。

業者の回答の出鱈目さは、音響カメラの特性を見れば分かる。

風車ブレード（翼）空力音の発生源

（風車音の大部分はブレードの回転による空力音）



12

風車音の発生源探査（音響カメラ）



11

- ・音響カメラは音響ビームフォーミング法という手法を用いている。
- ・これは騒音発生源から十分に離れた位置から音の発生源を可視化するものである。
- ・多数のマイクロホン（カメラは48個）を用いて鋭い指向性（方向性）を持たせることにより、どの方向のどの部位からどのくらいの大きさの音が発生しているかを可視化することができる。

- ・仕様：マイクロホンアレイ
- ・型番：GFai Star48 Array
- ・寸法：最大スパン3.4m
- ・マイクロホン：1/4インチ48ch
- ・適合測定距離：3m-300m
- ・適合周波数範囲：100Hz-7kHz
- ・画像処理：アレイ中心のカメラを用いて音響イメージと実画像の重ね合わせが可能

音響カメラの適合周波数範囲は100Hz～7kHzになっています。従って、空力音は、100Hz～7kHzの範囲の音です。超低周波音は、音響カメラの測定範囲外のものなのです。

10 年経っても、三重県の委員の方は努力を続けています。

(仮称) ウインドパーク布引北風力事業に係る環境影響評価方法書に関する
三重県環境影響評価委員会小委員会 質疑概要

日時：平成 30 年 2 月 9 日（金）14：00～16：30

場所：サン・ワーク津 大研修室

委員：さきほど委員も事後調査をして下さいと言われました、また、幹事からも意見が出ていますが、私は超低周波音は事後調査ではなく環境影響評価項目に選定すべきだと思います。項目として入れない理由を幹事意見に対して書いていますが、騒音等の対応について、ここでは 20Hz 以下は比較できないからと書いていますが、耳で聞こえないということと体に影響がないということは、全く同じではない。ということとはよくあると思います。もちろん個人差も少しはあるでしょう。対応については指針も見ましたが、超低周波音と健康影響については直接関係ない、科学的な証拠はほとんどないというようなことが書いてあると思いますが、わからないからやらなくていいというのは間違っていると思います。統計的に有意ではないということと、何も関係がないということとは全く違うわけですから、これはやはり環境影響評価項目に選定すべきだと思います。そもそも風力発電が法アセスの対象になった理由のなかに、超低周波音あるいは低周波音の影響、健康への影響というのが真っ先に出てくることに留意していただいて、これはやはり選定するようにしていただきたいと思います。

事業者：項目の選定については、環境省からの指針が出る前は選定しておりました。超低周波音についても建具のがたつきや人が圧迫感を感じるかということで今まで評価をしていたのですが、いろいろな他事業者のアセス結果を見ても、最近では民家から風車の位置を 1km 以上離すとか、距離を確保することによって影響が小さいという準備書が提出されています。そういうこともあって、環境省が専門家を集めて検討会をされているということで、既設の風力発電所周辺のデータをもとに評価されたという内容、あとは国内外の研究である程度評価できるといいますか、いろいろな文献があるなかで判断できそうなものを集めたなかで最終的に評価された結果が、人体への直接的影響がないということを最新の知見と考えておまして、今回の選定項目に選定していないということになっています。

委員：「影響がない」と書いてあるのか、「影響があるという証拠がない」と書いてあるのか、どちらですか。

事業者：そのまま読みますと、「これまでに国内外で得られる研究結果を踏まえると風力発電施設から発生する騒音が、人の健康に直接的に影響を及ぼす可能性は低いと考えられる。また、風力発電施設から発生する超低周波音、低周波音と健康影響については明らかに関係を示す知見は確認できない。」

委員：私もそれを読んだので、覚えていたとおりですが、「確認できない」というのと「ない」というのは違うと思います。それで、これの影響を恐れている住民もいらっしゃるのではないかと、先ほど意見があったと思いますが、そういうことも踏まえますと、そこまで強い意志でやらない理由はないと思うのですがいかがでしょうか。

事業者：アセスについては最新の知見に基づいてということがございまして、先ほどの説明と重複するかもしれませんが全国の風力発電施設周辺で測定した結果からは、20Hz 以下の超低周波音については、人の感覚、閾値を下回り、また、その他の環境騒音と比べて特に低い周波数成分の卓越は見られないということで、風車から発生する超低周波音につきましては、その他、自然環境を含めまして車など他のものと比較して成分が卓越していることはないというようなデータも踏まえて、ただし、20Hz を超過すると聞こえ

る音として、低周波音として聞こえるということで、20Hz 以上の音につきましては騒音のところで新しいマニュアルに基づいて評価をしていきます。

委員：私もいま読まれたグラフ、自動車のグラフ、騒音のグラフも見ましたが、風力発電として超低周波音は出ているとは思わないのですが、不安に思う方が実際におられるなかで評価しないということは、住民との対話を大事にしている姿勢ではないと思います。

事業者：住民の方々が不安に思ってみえるということは我々も認識しておりますので、誠意をもって対応させていただきます。具体的に考えているのは、住民の方々は風車の音を直接聞いたことがない方もおみえになりまして、インターネットの極端な情報を見られて心配になってみえる方もおみえになりますので、既設の風力発電所への見学をご案内して、風車の音がどういったものなのかということを実際聞いていただいたり、騒音計、低周波音計などで数値をみていただいて、風車の動いているときと動いていないときの数値の比較などを実際見ていただきながら、風車から特殊な音が出ているものではないということを説明して、ご理解をいただくようにしたいと考えております。

事業者：委員もおっしゃられていますが、住民の皆様の合意形成を図ることは決して否定するものではありません。アセスの項目として評価対象からは、この指針に基づいて外させていただきましたが、住民の皆様からのご意見は真摯に受け止めておりますので、既設風力発電所の低周波音、超低周波音の影響については、既設発電所への見学を通じて皆様にご理解をいただくようなことをしていくつもりでございます。低周波音、超低周波音とはなんだろうということも、まずしっかり住民の皆様に説明をしていくことは決して否定するものではなく、しっかり説明して、まずは音の特性、距離との関係なども予測評価しながら、住民の皆様と合意形成を図っていくということをやっていくということが大前提です。

委員：予測評価までされるのであれば、項目として選ばばよいのではと思っているのですが。大してコストがかかるものではなく、指針に「してはいけません」と書いてあるわけではありませんし。

事業者：いま予測評価させていただきますと言ったのは、項目選定の騒音の中でという意味です。

委員：騒音の中でという意味が理解できなかったのですが、超低周波音も含めて予測評価されると、そういうことですか。

事業者：アセスの中では超低周波音として項目にあがっていないので評価しない。というのが逆に回答になります。ただし、住民の方からのご意見等で低周波音計において超低周波音の数値を知りたいというご要望があれば、私どもとして、アセスでは新しいマニュアルで超低周波音の評価手法が明確になっておりませんので、最新のマニュアルに基づいて騒音として 20Hz 以上の低周波音を予測評価していくということを考えています。

委員：測る、評価すること自体が、なぜそんなに嫌なのかという気持ちなのですが。例えば古いマニュアルにやり方が載っているのであれば、それでも良いのではないのでしょうか。新しいマニュアルに載っていないのであれば、ひとつ前のやり方でやれば良いのでは。

委員：ちょっとよろしいですか。既存施設の予測評価ではどうだったのでしょうか。超低周波音まで測られていますか。

事業者：既存施設では、ウインドパーク笠取でアセスをやっております、そのときは一連で低周波音を測ったと思います。

委員：人に対して何らかの形で影響があるという結果が出ていますか。

事業者：具体的に今お見せできるデータを持っておりません。

事業者：私の頭の整理をさせていただきますと、超低周波音という文言が今回の新しい指針で出てきた。

20Hz を閾値として、低周波、超低周波というものが整理された。低周波音というひとつのくくりの中で今までルールが決められていた。超低周波音は委員がおっしゃられるように環境省の解釈に基づくと、今まで

は低周波音に関するルールとして、しっかりしたマニュアルと指針ができてなかったと認識しています。しかしながら、低周波音という音に関しては残留騒音+5dB で評価しなさいということが明確になりました。したがって、アセスにおいては、20Hz 以上の低周波音については、アセス上しっかり指針とマニュアルで環境省が示された残留騒音+5dB で評価いたします。一方で、住民の皆様は超低周波音、低周波音という、まだご理解が得られていない状況にあり低周波音というところはしっかりご理解いただきながら、既設の風力発電設備を利用しながら G 特性の低周波音を測定できる機械も持っているので、しっかりご理解いただくような合意形成を図っていきます。という整理をしています。

委員：私の理解、環境省の委員会での風車騒音というのは、聞こえる騒音の問題であって A 特性音圧レベルでという理解をしております。

委員：今までは低周波音ということで 1~100Hz まで測っていたが、それが環境アセスにおいては分かれて、超低周波音は対象でなくなったということですか。

事業者：環境省の指針ではそうです。測定方法もそういう形で管理する。しきい値まで残留騒音+5dB という形で評価をしなさい。聞こえる音に対してですね。

委員：だから、聞こえないから騒音ではないということになるかと思います。分類的には。だけど、それに関して不安な人もいたりするので、20 Hz よりも低い音も騒音と同じように測ることができるのであれば、されたらどうかと思いますが。

事業者：測定器は低周波計と騒音計と違いますので。別のもので測ることはできますが。ご意見はよく理解しましたが、方法書では選定項目としては省かせていただいて、環境省の指針に基づく評価ということで、方法書に記載させていただいたというのが現状でございます。

委員：この空欄に○をつけること自体が禁じられているということなのですか。

事業者：禁じられていることはありません。

委員：それであれば○をつければいいのではと、私は思います。これ以上は時間がないので。

風車音での発生に関してカナダ政府の HP には、

[A Primer on Noise \(Date modified:2014-10-2\)](#)と、[Wind Turbine Noise and Health Study: Summary of Results \(Date modified:2014-10-30\)](#)があり、

A Primer on Noise には、次の記述もあります。

“音はどうやって作られるのか？

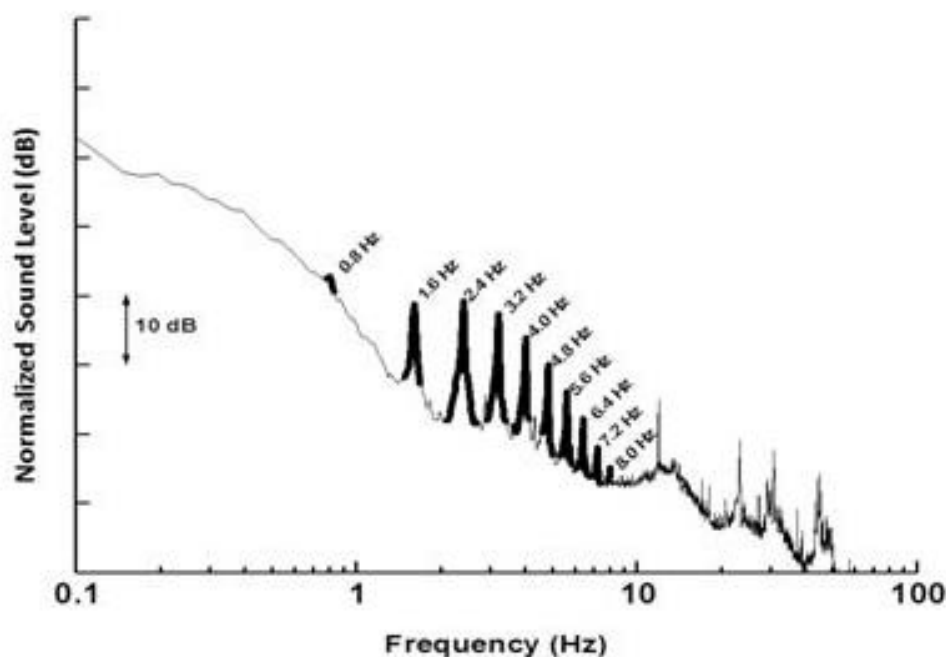
物体が前後に振動すると、空気圧がわずかに増減し、音波として空气中を伝搬します。科学者が音の周波数に言及するとき、彼らは音源が 1 秒間に生成する完全な音波の数、つまりサイクル/秒、またはヘルツ(Hz)を指します。人間の耳は極端に低い周波数や高い周波数にそれほど敏感ではないため、人々が音にどのように反応するかを理解しようとするとき、音の周波数は非常に重要です。固定されていませんが、一般的に、正常な聴覚を持つ若者は、通常、20Hz から 20,000Hz の周波数で通常の日常レベルの音を聞くことができますが、人間の耳は 2000Hz から 5000Hz の間の音に最も敏感です。“

“音源の回転周波数は、音を発している音源を特定するために使用できます。たとえば、毎分 16 回転(RPM)で回転する 3 枚のブレードを備えた風力タービンの基本周波数は、0.8 Hz(つまり、(3 ブレード X 16 RPM)を 60 秒で割った値)に対応します。したがって、この例では、特定の距離で測定された音において、風力タービンによる騒音レベルが、基本周波数と基本周波数の倍数で周波数ピークを示すのに十分なほど高い場合、風力タービン音をバックグラウンドノイズから分離することができます。これらの倍数は高調波と呼ばれ、

基本周波数が 0.8Hz のソースの場合、1.6Hz、2.4Hz、3.2Hz、4.0Hz、4.8Hz などになります。”

“グラフの X 軸は 0.1 ヘルツ(Hz)から 100Hz までの周波数を表し、Y 軸は測定された音の強さをデシベル (dB)で表します。この図は、夏の晴れた夜に 4 基の風力タービンから 2.5km 離れた場所で測定した例です。図の 0.8、1.6、2.4、3.2、4.0、4.8、5.6、6.4、7.2、8.0Hz のピークは、これらの特定の風力タービンがこれらの特定の周波数の音を生成することが知られているため、測定された音が風力タービンからのものであることを裏付けています。”

図2風力タービンの超低周波音測定 ←



“20Hz 未満の周波数は超低周波音に分類され、上記のように、通常発生する騒音レベルでは一般に人間の可聴範囲外になります。超低周波音は環境中で一般的であり、雷雨、火山、地震などの自然発生現象から発生する場合もあれば、ロケットの打ち上げ、爆発、一部の採掘活動などの人為的な発生源から発生する場合があります。超低周波音は、大型の風力タービンや大型ボイラーでも発生する可能性があります。低周波ノイズは、20Hz から約 200Hz の間の周波数を表すために使用されています。超低周波音や超低周波ノイズ(約 30Hz 未満)の知覚は、多くの場合、聞こえるものではなく、「感覚」または「圧力」として説明されます。このタイプの騒音は建物の外から建物の内部に簡単に伝わるため、レベルによっては、家の中の軽量構造物が振動したりガタガタしたりして、煩わしさを引き起こす可能性があります。”

と書かれていましたが、

風車からの超低周波音に関しては、その発生機構と発生する周波数との関連性まで含めて考えないと、せっかく計測しても、“疑似音”だとか“風雑音”だとか言われて、“除外音処理”を要求されます。

大きなものから音が出るだけでは世の中に通用しないのです。それぞれの超低周波音は、それぞれが発生する仕組みのよって、特別な性質を持つのです。そこまで説明しないと、問題点や責任を明確にすることができないのです。

“疑似音”については、

Journal of Occupational and Environmental Medicine (産業環境医学ジャーナル) の論文

Wind Turbines and Health

A Critical Review of the Scientific Literature

McCunney, Robert J. MD, MPH; Mundt, Kenneth A. PhD; Colby, W. David MD; Dobie, Robert MD; Kaliski, Kenneth BE, PE; Blais, Mark PsyD

Author Information

From the Department of Biological Engineering (Dr McCunney), Massachusetts Institute of Technology, Cambridge; Department of Epidemiology (Dr Mundt), Environ International, Amherst, Mass; Travel Immunization Clinic (Dr Colby), Middlesex-London Health Unit, London, Ontario, Canada; Dobie Associates (Dr Dobie), San Antonio, Tex; Environment, Energy and Acoustics (Mr Kaliski), Resource Systems Group, White River Junction, Vt; and Psychological Evaluation and Research Laboratory (Dr Blais), Massachusetts General Hospital, Boston.

Address correspondence to: Robert J. McCunney, MD, MPH, Department of Biological Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 77 Massachusetts Ave, 16-771, Cambridge, MA 02139 (mccunney@mit.edu).

The Canadian Wind Energy Association (CanWEA) funded this project through a grant to the Department of Biological Engineering of the Massachusetts Institute of Technology (MIT). In accordance with MIT guidelines, members of the CanWEA did not take part in editorial decisions or reviews of the manuscript. Drs McCunney, Mundt, Colby, and Dobie and Mr Kaliski have provided testimony in environmental tribunal hearings in Canada and the USA. The Massachusetts Institute of Technology conducted an independent review of the final manuscript to ensure academic independence of the commentary and to eliminate any bias in the interpretation of the literature. All six coauthors also reviewed the entire manuscript and provided commentary to the lead author for inclusion in the final version.

では、

The main problem with measuring low-frequency sound and infrasound in environmental conditions is wind-caused pseudosound due to air pressure fluctuation, because air flows over the microphone. With conventional sound-level monitoring, this effect is minimized with a wind screen and/or elimination of data measured during windy periods (less than 5 m/s [11 mph] at a 2-m [6.5 feet] height).³⁶ In the case of wind turbines, where maximum sound levels may be coincident with ground wind speeds greater than 5 m/s (11 mph), this is not the best solution. With infrasound in particular, wind-caused pseu-

dosound can influence measurements, even at wind speeds down to 1 m/s.¹² In fact, many sound-level meters do not measure infrasonic frequencies.

“環境条件下での低周波音と超低周波音の測定における主な問題は、マイクロホンの上を空気が流れるため、気圧の変動による風による疑似音です。従来の騒音レベルモニタリングでは、風の強い期間(2m(6.5 フィート)の高さで 5m/s(11mph)未満)に測定されたデータを排除することで、この影響を最小限に抑えます。36 風力タービンの場合、最大騒音レベルが 5 m / s(11 mph)を超える地上風速と一致する可能性があるため、これは最善の解決策ではありません。特に超低周波音では、風速が 1m/s 以下の場合でも、風による疑似音が測定に影響を与える可能性があります。12 実際、多くの騒音計は超低周波周波数を測定していません。”

と書いてあります。

Wind Turbines and Health

A Critical Review of the Scientific Literature

では

風がマイクに当たって発生する風雑音とは違って、上空で発生した気圧変動が原因で、その影響が騒音計に記録された。と主張しているとも理解できます。

Over を“表面”と訳せば、疑似音は、日本の風雑音に近い意味になるが、これについては、風がマイクの表面を流れなくても、超低周波音が計測されることは示したので、

“多くの騒音計は超低周波周波数を測定していません。”

は誤りで、

“多くの騒音計は超低周波周波数を正しく測定しています。”

と書き直さなくてはなりません。

Over を“上空”と訳せば、風がマイクに当たらない状態で超低周波音が計測されたとしても、特に困りません。超低周波音として記録される、疑似音が上空で発生しているのだと言い張れます。

これで、超低周波音の責任から風車を開放し、矛盾や追及を回避できたように見えますが、それほど簡単ではありません。

上空を流れる空気による気圧変動が疑似音を発生させる原因ならば、風車のある所と、風車の無い所での疑似音に大きな違いがあるのは何故か。

日本の調査結果では、調査した 164 か所すべてで、超低周波音が記録されている、カナダ流に言えば、風車が存在する 164 か所全てで、疑似音がマイクの上空で発生している。そして、風車が有る場所での疑似音は、音圧が高く、規則的な周波数を持っている。

風が時々刻々変化するが、風車の近くで計測される疑似音の周波数は音圧に比べてかなり安定しているが、風車の無い所で計測される疑似音の音圧はとても低くて、周波数に規則性が無い。これから考えると、疑似音は風車が存在する場所でのみ観測される。と言える。

観測されるのだから、マイクの周辺での周期的な気圧変動が起きているのです。

風車音の指向性を考えれば、風車の周辺では、風車を中心とした指向性を持った音場が形成されている。と考えられる。

物理的な振動をいったん置いておくことにしても、風車が有って、稼働すれば、その周辺には、音圧が高く、規則的な周波数を持った、超低周波音の音場が出来ます。これは、風車を中心として、超低周波音が放出されていることを意味しています。

さらに、考えてみましょう。

では、疑似音の元になる気圧変動が発生する場所は上空のどの位置なのでしょう？

また、記録された疑似音は規則的な周波数を持っています。これは、気圧変動が規則的な周期性を持っているのが原因です。

気圧変動が発生した元の場所から、騒音計までは、周期的な変動は、何を使って、どのように伝達されたのでしょうか？2つの間には空気が存在します。気体は横波を伝達しません。気体は縦波を伝達します。その縦波は普通は粗密波として、空気中を伝わります。大気の状態は、場所による密度の差はそれほどないので、等質空間と考えられます。

振動源が小さければ、同心球上の粗密波として、周囲の空間に伝わってゆきます。

疑似音の元になる、気圧の変動の領域はどこにあるのでしょうか？

私は、次の理由で、疑似音の発生場所は風車の場所だと考えます。

- ① 風車が無ければ、音圧が高く、規則的な周波数を持つ疑似音が計測されることは無い。
- ② 風車があれば、音圧が高い疑似音が計測される。(計測した 164 か所の全てで計測されている。)
- ③ 計測された疑似音は、風車を中心とした十字架型の指向性を持っている。

まず、③の性質から、気圧変動の最初の場所は、風車を含む直線の上にあることが分ります。

風車から離れた上空での風の様子は、風車が無い場所での風の様子と同じです。この場所では、騒音計に記録される、音圧が高く規則的な周波数を持つ変動の原因となるような気体の運動は起きりません。

もし、起きるならば、風車の無い場所でも同様の現象が起きるはずですが、そのような現象は起きません。したがって、気圧変動の最初の発生場所は、ブレードや塔のある位置に限定されるのです。

塔やブレードがあれば、空気の流れは妨げられて、気流に変化が起こります。もちろん、ブレードは回転し、塔も揺れます。

あとは、特別な振動数になる理由を、気流の変化で説明するか、塔の揺れから説明するかのどちらかです。気流の変化から説明できれば、疑似音とも言えますが、風車が無ければ気流の変化が起こらないのですから、この疑似音は、風車の存在が根本原因だと言えます。

塔の運動が原因ならば、風車から発生する超低周波音だと言えます。

では、風車が無い場所での、空気の流れによる気圧変動と、風車がある場所での気圧変動には、どのような違いがあるのでしょうか？

風車が存在しない場所（風車から 5 km 以上離れた場所）でも風は吹いています。地上付近にマイク置けば、マイクの上空を空気が流れます。気圧の変動も起きると思います。

結果として騒音計にデータが記録されます。超低周波音の領域（20 Hz 以下の領域）に属する成分も計測されますが、音圧が低くて、周波数に規則性はありません。

風車が有る場所では、空気が流れて、気圧変動が生じるのですが、気圧変動が騒音計に規則されたときには、音圧が高く、規則的な周波数を持つ気圧変動として記録されます。しかも、指向性を持っている気圧変動なのです。

空気が流れるのは、風車が有っても無くても同じです。違いは風車の存在です。

問題点を確認してゆきます。

記録された気圧変動は特別な周期を持っているのだが、なぜ風車の近くでは規則的な周期を持っているのでしょうか？この周期は、風の速度や方向によって決まるのでしょうか？

風の速度が同じでも、風車の回転数が違えば、気圧変動の周期が変化します。 $f = RZ / 60$ の周波数になる様に、音圧変動の周期が決まります。これは、風の音圧変動が風車の回転によって支配されることになります。

上空で発生した気圧変動の場所と、騒音計は離れています。気圧変動は空気によって伝えられます。

この伝わり方は、粗密波として伝わるのでしょうか？それとも別の形式で伝わるのでしょうか？

もし、粗密波として伝わるならば、音の性質と同じです。

上空の風による気圧変動は、風車が無くても発生するのか、風車が無ければ発生しないのか。の答えは出ています。

なぜ、風車が有れば、必ず、音圧の高い超低周波音が計測されるのに、上空で風が吹いていても、風車が無い場所では、音圧の高い超低周波音が計測されないのでしょうか？

“疑似音”は、風車が存在する 164 か所すべてで音圧が高く、規則的な周波数と指向性を持つ超低周波音として計測されています。風車が無ければ、音圧が低くて、乱雑な周波数の超低周波音が記録されます。

これまでの調査結果から、“音圧が高く、規則的な周波数と指向性を持つ超低周波音”は、回転軸が水平の風車が有れば、必ず計測され、無ければ計測されないのです。上空を吹く風は同じですから、風車の存在と風車の運動がこの超低周音の発生原因だと考えるべきです。

“風雑音”については、

環境省は、平成 29 年 5 月（2017 年）

[風力発電施設から発生する騒音等測定マニュアル](#)、

2.3.2 風車騒音

風力発電施設が稼働しているときの騒音を風車騒音と呼ぶ。本マニュアルにおける風車騒音は、地域の残留騒音に風力発電施設から発生する騒音が加わったものである。なお、周辺地域における風車騒音の騒音レベルはそれほど大きくないため、測定に際しては、間欠的な騒音や衝撃的な騒音等の一過性の騒音を除外する必要がある。

2.3.3 振幅変調音

音の大きさが周期性をもって時間的に変動する騒音。風車騒音では、風車のブレードが回転面内の 1 点を通過する周期に応じた振幅変調音（スイッチュ音）が生じる。

2.3.4 純音性騒音

風車によっては、騒音に純音またはそれに近い狭帯域の周波数成分（純音性成分）が含まれていることがあり、これを純音性騒音と呼ぶ。

2.3.5 風雑音

風がマイクロホンにあたることにより発生する雑音。測定においてはウインドスクリーン（防風スクリーン）を装着することにより風雑音を低減する必要がある（3.1(2)参照）。

風により発生する葉擦れ音や風音は自然音であり風雑音ではない。

“風雑音

風がマイクロホンにあたることにより発生する雑音。測定においてはウインドスクリーン（防風スクリーン）を装着することにより風雑音を低減する必要がある（3.1(2)参照）。

風により発生する葉擦れ音や風音は自然音であり風雑音ではない。”

“3.2 騒音の測定機器

(2) ウインドスクリーン（防風スクリーン）

風車の有効風速範囲の風況下で騒音を測定する際には、一般的に用いられる直径 10 cm 以下のウインドスクリーンでは、風雑音を十分に低減することはできない。風雑音の影響を低減するためには、より大型の、全天候型のウインドスクリーンを使用する必要がある。

風の影響が大きい場合には二重のウインドスクリーン等の、より性能の良いウインドスクリーンを使用する。

（注）二重ウインドスクリーン等を使用しても風雑音を十分に除外できない場合には除外音処理を行い、風雑音の影響範囲を除外する等の対応が必要である。”

と言っています。

風車音の場合は、計測された超低周波音が風車から出ているものであるとの根拠が必要になるのです。これに関しては、“超低周波音の解析と発生の仕組み”の中で、音圧がピーク値を取る周波数が、 $f=RZ/60$ としたときに、風車からは、 $f/3$ 、 $2/3f$ 、 f 、 $2f$ 、 $3f$ 、 $H z$ の音が出る事と、十字架型の指向性を持つことを説明します。

さらに、風車の近くでの 3 通りの計測結果と、風車から 20 k m 離れた場所でマイクに風を当てて計測した風雑音の性質の違いや、エネルギー分布から、風車の近くで計測される、離散的で規則性を持つ超低周波音が、風車の運動によって作られることを示します。

これによって、精密騒音計は、使い方を工夫すれば、風車からの超低周波音を計測できることと、それが“疑似音”でも“風雑音”でもないことを明確にします。

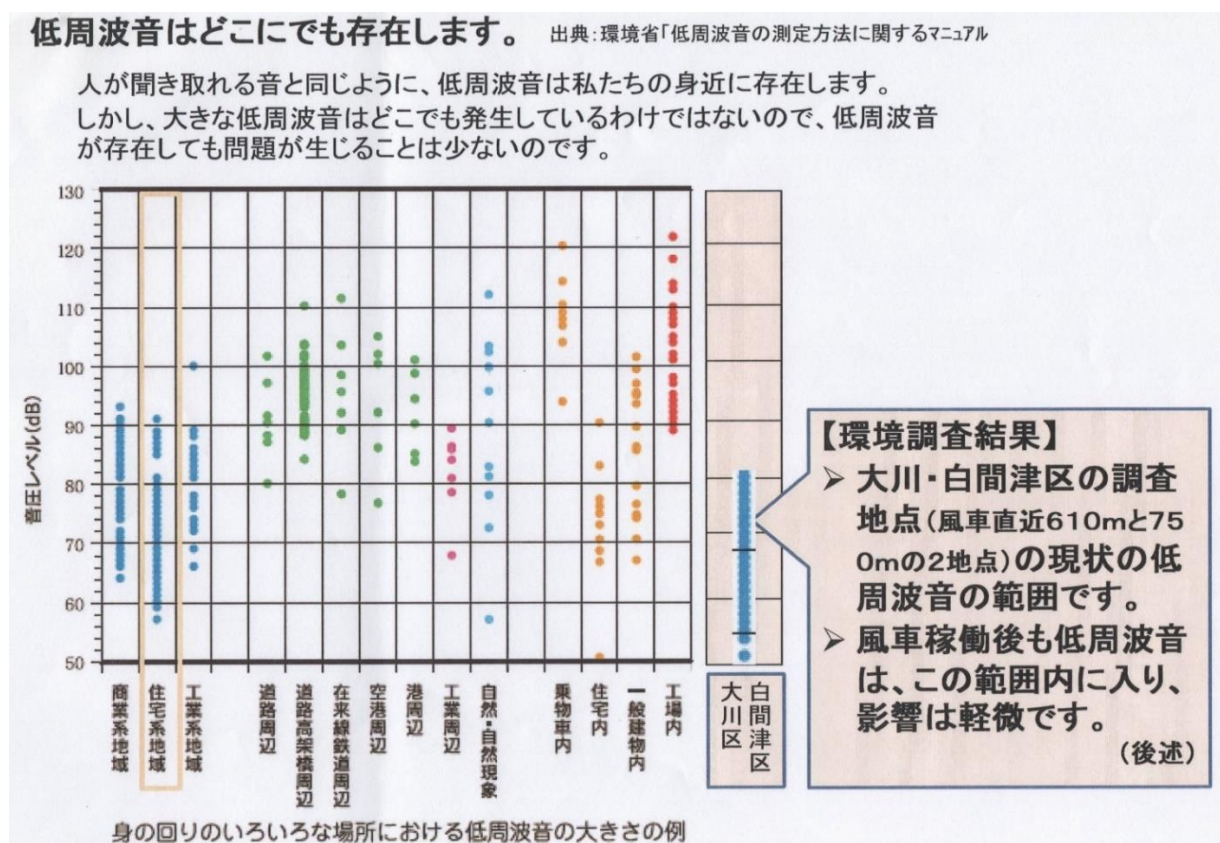
次は、

“超低周波音の発生源は地球上至るところに存在する。”

の問題に関して確認します。

“低周波音はどこにでも存在します”と主張する、次の図は、いろいろな場所での G 特性音圧レベルの値を示したものです。

右側の文章は、業者が追加したのですが、その意図は、“影響は軽微です。”と主張する事です。



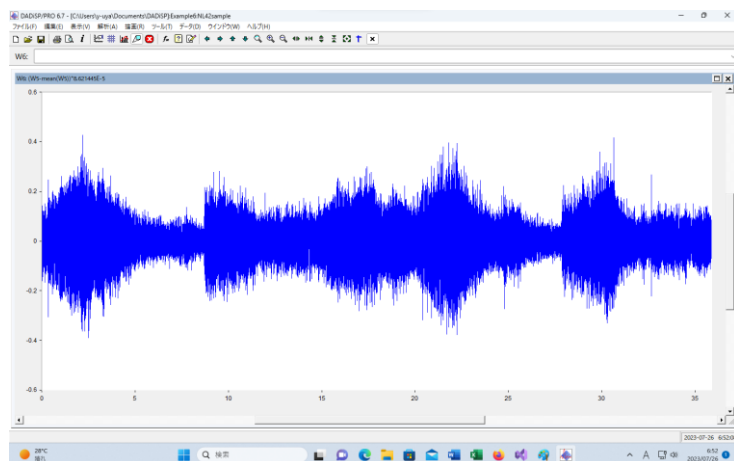
超低周波音の影響は、音圧レベルだけではなく、波形によっても影響が違ってきます。

波形の性質を調べるには、計測時のサンプリングレートを上げる事や、精密は周波数スペクトルが必要になります。周波数分解能は 0.01Hz よりも細かくなくてはならないのです。

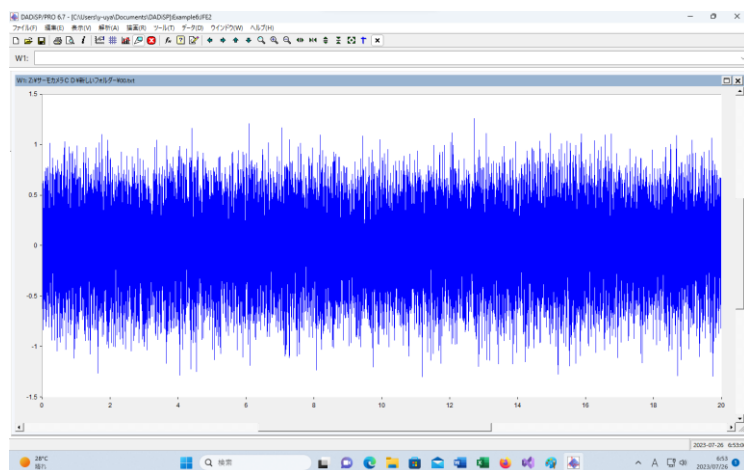
残念ながら、G 特性音圧レベルの値や 1/3 オクターブ解析は、被害の原因を隠蔽するものとして機能してしまうのです。

最初に、録音した波形を示します。

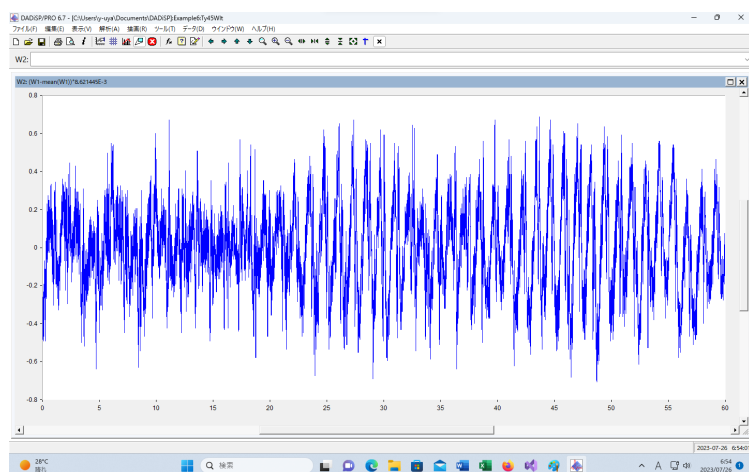
リオン社前の交通騒音



JFE の製鉄工場内の音



館山の風車音



タイプ4:周波数スペクトル

図 1．交通騒音（リオン社前） 0 ～5000Hz
最大音圧 0.0025[Pa]（379.4[Hz]）

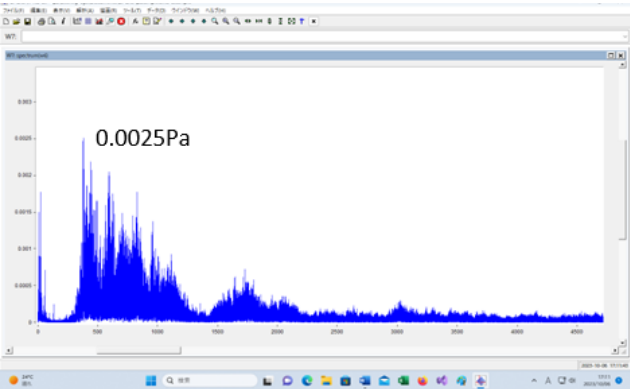


図 2．工場騒音（製鉄所内の音） 0 ～5000Hz
最大音圧 0.12[Pa]（12Hz）

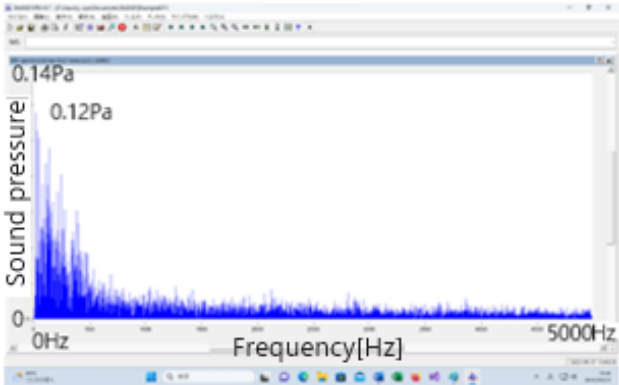


図 3．風車音（館山風の丘） 0 ～5000Hz
最大音圧 0.14[Pa]（0.8Hz）

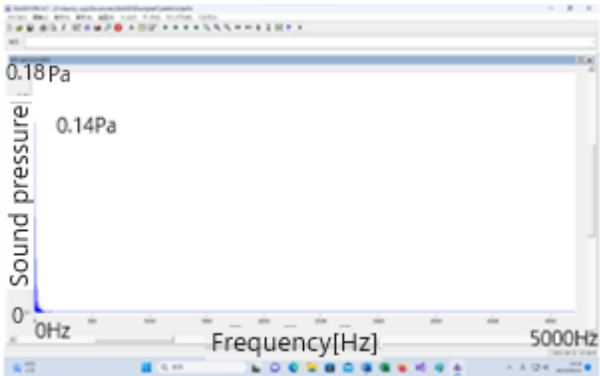


表 2．エネルギーの分布

エネルギー分布	0 ～20 H z	20 H z 以上
風車音	93%	7%
工場音	12%	88%
交通音	1%	99%

0～20Hz でのエネルギーの分布

Energy distribution	0～1Hz	1～20Hz	0～20Hz
Wind turbine	61.3%	38.7%	100.0%
Iron mill	0.04%	99.96%	100.0%

風車音で 20Hz 以上の周波数を持っている音のエネルギーを集めても、風車音全体のエネルギーの 7%以下です。93*0.613＝57%ですから、風車音全体のエネルギーの 57%は 1Hz よりも周波数が低い部分に含まれています。

交通騒音では、20Hz 以上の周波数を持っている音のエネルギーを集めると、交通騒音全体のエネルギーの 99%以上となります。

A 特性音圧レベル（騒音レベル、WTN）は 20Hz 以上の成分の持つエネルギーから計算される数値です。ですから、A 特性音圧レベルで風車音を評価してその影響を考えるとという事は、残りのエネルギー93%の影響を無視することになるのです。これでは、風車音による被害の原因が判明しないのは当然です。

音の強さ

音場内の 1 点において、単位面積を単位時間に通過する音響エネルギーを音の強さ（I または J と書く）と言います。単位は、(W/m²)

$$J = (p \cdot p) / (\rho \cdot c) \quad (W/m^2)$$

に注意して、音がマイクを通過するときの音の強さ (W/m²) を計算したものが次の表です。

JFE の製鉄所内では、全体のエネルギーは 10⁻⁴ (W/m²) 程度

W16: EngDistributionWm2(w1,0,20,200,5000)				
	1: No Units	2: No Units	3: No Units	4: No Units
1:	0.000051	0.000150	0.000232	0.000433
2:				

0～20Hz 0.000051 (W/m²)

20～200Hz 0.000150 (W/m²)

200～5000Hz 0.000232 (W/m²)

0～5000Hz 4.3E-004 (W/m²)

リオン社前での交通騒音では 全体のエネルギーは 10⁻⁵ (W/m²) 程度

W15: EngDistributionWm2(w6,0,20,200,24000)				
	1: No Units	2: No Units	3: No Units	4: No Units
1:	1.757791E-007	8.079829E-008	1.805011E-005	1.830650E-005
2:				

0～20Hz 1.757791E-007 (W/m²)

20～200Hz 8.079829E-008 (W/m²)

200～24000Hz 1.805011E-005 (W/m²)

0～24000Hz 1.8E-005 (W/m²)

風が弱いときの風車の近くでは、全体のエネルギーは 10⁻⁴ (W/m²) 程度

W15: EngDistributionWm2(w2,0,20,200,24000)				
	1: No Units	2: No Units	3: No Units	4: No Units
1:	2.432890E-004	2.138726E-005	1.627290E-007	2.648317E-004
2:				

0～20Hz 2.432890E-004 (W/m²)

20～200Hz 2.138726E-005 (W/m²)

200～24000Hz 1.627290E-007 (W/m²)

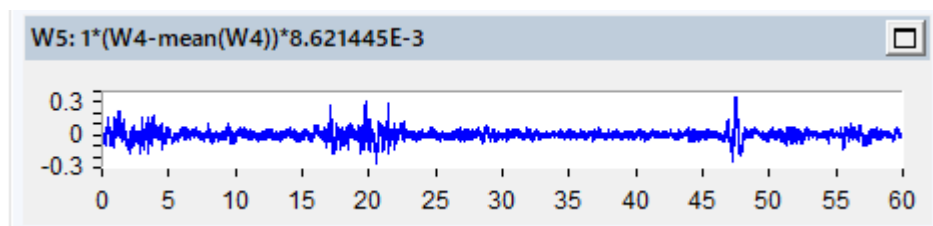
0～24000Hz 2.6E-004 (W/m²)

風が強いときの風車の近くでは、全体のエネルギーは 10⁻³ (W/m²) 程度

W9: EngDistributionWm2(w8,0,20,200,24000)				
	1: No Units	2: No Units	3: No Units	4: No Units
1:	1.492656E-003	2.285370E-005	6.942087E-008	1.515570E-003
2:				

0～20Hz 1.492656E-003 (W/m2)
20～200Hz 2.285370E-005 (W/m2)
200～24000Hz 6.942087E-008 (W/m2)
0～24000Hz 1.5E-003 (W/m2)

近くの神社でマイクに風を当てて測った音



でも計算してみた。

W6: EngDistributionWm2(w5,0,20,200,24000)				
	1: No Units	2: No Units	3: No Units	4: No Units
1:	8.227718E-006	3.912201E-007	2.117793E-007	8.829495E-006
2:				

0～20Hz 8.227718E-006 (W/m2)
20～200Hz 3.912201E-007 (W/m2)
200～24000Hz 2.117793E-007 (W/m2)
0～24000Hz 8.8E-006 (W/m2)

となりました。

纏めたものが次の表です。

周波数帯	0～20Hz	20～200Hz	200～24 k Hz	0～24 k Hz	単位
交通騒音	1.76E-07	8.08E-08	1.80E-05	1.80E-05	W/m2
神社風	8.23E-06	3.91E-07	2.12E-07	8.83E-06	W/m2
JFE工場	4.80E-05	4.01E-04	5.34E-04	9.84E-04	W/m2
風車弱風	8.19E-04	2.40E-05	3.82E-07	8.43E-04	W/m2
風車強風	1.49E-03	2.30E-05	6.94E-08	1.52E-03	W/m2

周波数の倍音構造

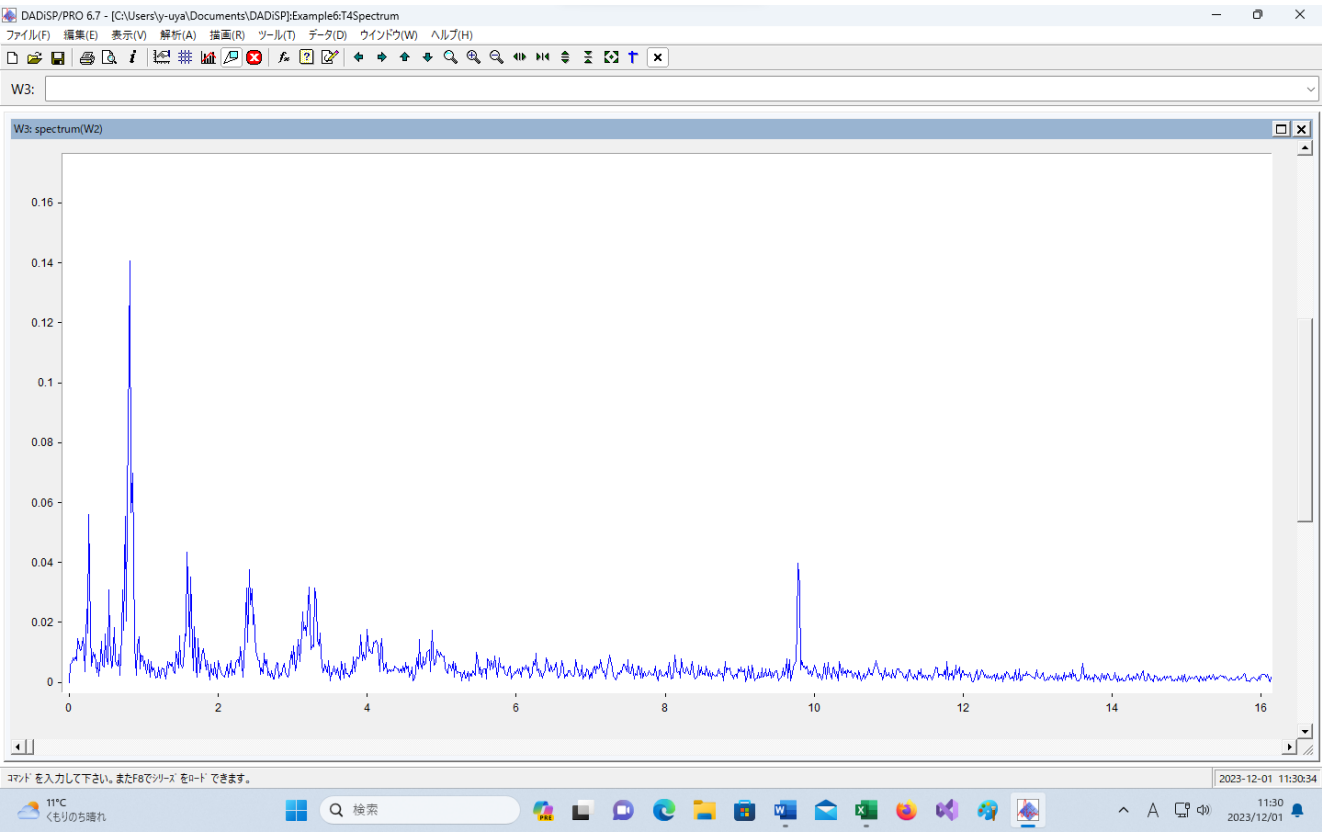


図.3 Wind turbine noise (0～25Hz)

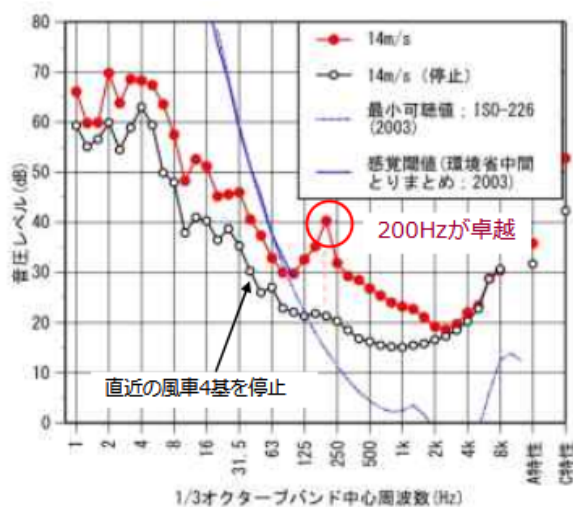
音圧がピーク値となるときにの周波数に、次のような規則性がある。

周波数	周波数/0.8167	音圧[Pa]
0.2667	0.3266	0.0560
0.5333	0.6530	0.0309
0.8167	1.0000	0.1405
1.5833	1.9387	0.0436
2.4167	2.9591	0.0377
3.2167	3.9387	0.0317
4.0000	4.8978	0.0177
4.8667	5.9590	0.0173
5.4667	6.6936	0.0101
6.2667	7.6732	0.0098

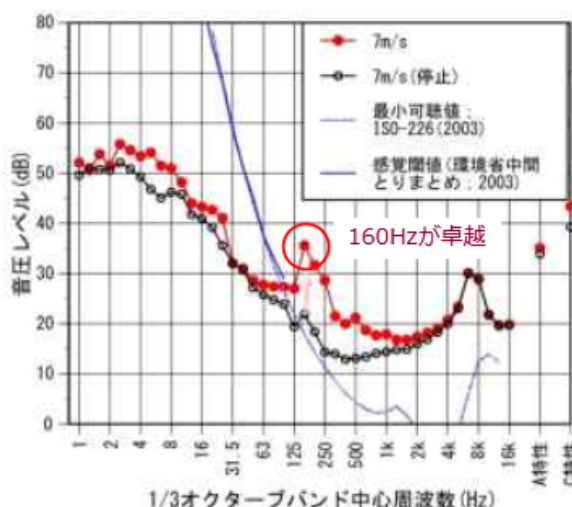
この性質は、波形を決定し、音圧変動を緩やかなものにします。
被害の根本的な原因がここにあるのです。

このような特殊な性質を持っている超低周波音は、すべての水平軸型の風車に於いて観測されました。

純音性成分が含まれる風車騒音



左；風車より240m、木造家屋-屋内



右；風車より350m、木造家屋-屋内

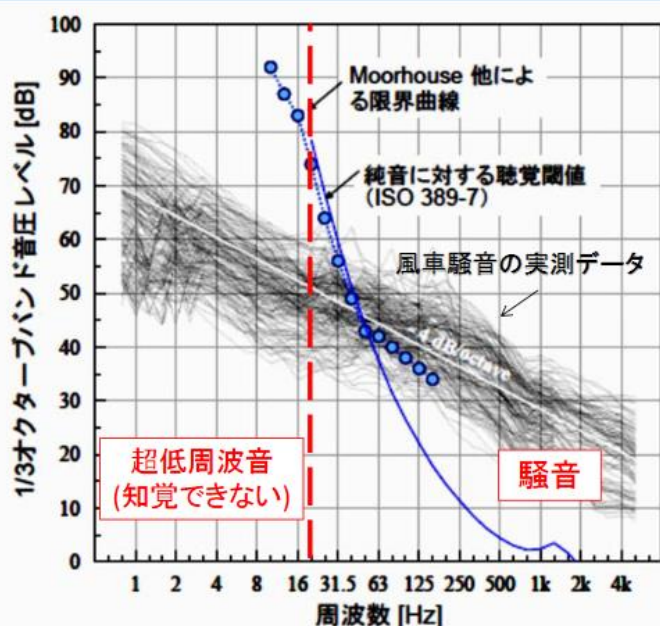
注釈. 純音性成分は機械（増速機など）の振動に起因しているケースが多い。但し、翼に窪みや傷がある場合に空力騒音が発生することもある。

出典. 環境省H21年度調査結果、<http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=12319>

9

左のグラフでは、200Hz での 40 dB に注目しているが、1～5Hz 辺りでの 65～70 dB については気にしていない。次のグラフでは、1Hz 辺りで高い音圧レベルを持っている超低周波音がすべての風車の近くで計測されていることを示しています。

これまでに得られた知見① 風車騒音に含まれる超低周波音



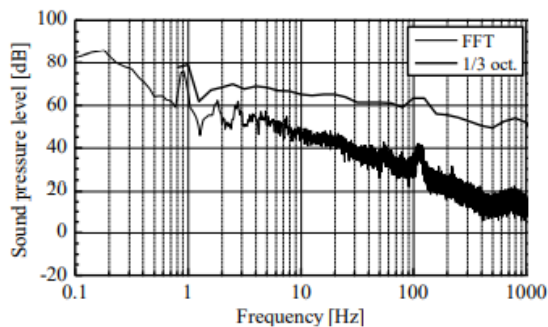
20Hz以下の超低周波音領域は、すべて知覚閾値を下回っている

**風車騒音は
超低周波音ではなく、
通常可聴周波数範囲の騒音の問題**

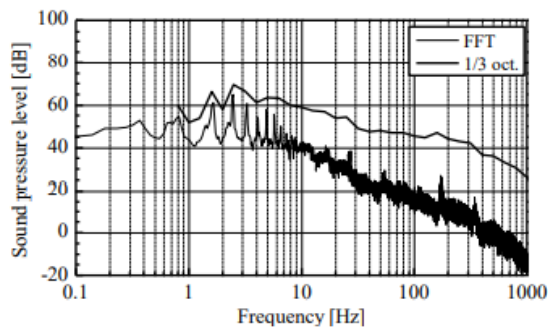
※全国29の風力発電施設の周辺の合計164測定点で騒音を測定

3

風車騒音のデータは、“[課題名 S2-11 風力発電等による低周波音の人への影響評価に関する研究](#)” にもあります。



図(2)-11 図(2)-9の音圧のスペクトル



図(2)-12 図(2)-10の音圧のスペクトル

この図は、20Hz よりも周波数の低い音が、非常に高いエネルギーを持った形で、風車騒音に含まれていることを示しています。左の図では、0.2Hz で 85 d B くらいになっています。

ただし、この数値は二重防風スクリーンを付けて計測した数値なので、1H z 辺りでは 38 d B 程度減衰した数値になっています。室内で二重防風スクリーンを外して測れば、左のグラフでの、1H z 辺りでの数値は、 $80+38=118$ d B になります。

[低周波音問題対応の手引書](#)には次の記載がある。

[巻末資料 1] 生活環境中における低周波音発生実態 1)

(1)生活環境中で観測される超低周波音の音圧レベル

生活環境中で観測される超低周波音の音圧レベルを図 1 に示す。

これによると、屋外で観測される超低周波音の音圧レベルは、G 特性音圧レベルで最大でも 130dB 程度である。通常の市街地屋外では G 特性音圧レベルで 55～95dB 程度、住宅内では G 特性音圧レベルで 50～90dB 程度、一般建物内では 65～

100dB 程度の音圧レベルが観測されている。また、道路・鉄道・空港・港周辺では 80～115dB 程度、乗り物内では 100～130dB 程度、波・滝・雷等の自然現象では 60～120dB 程度の音圧レベルが観測されている。乗り物内では比較的高い音圧レ

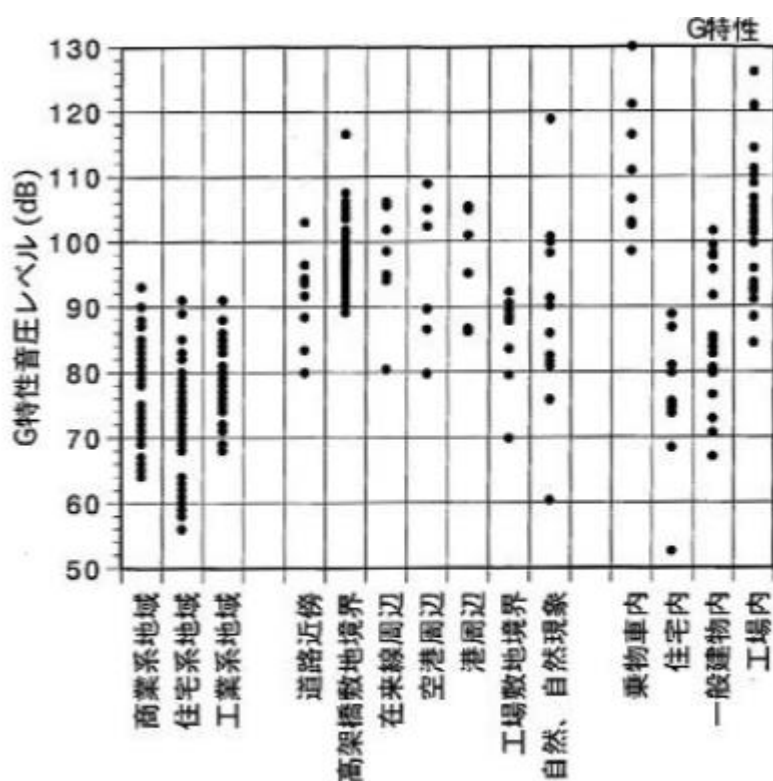


図1 生活環境中で観測された超低周波音のG特性音圧レベル

ベルが観測されているが、このうち、最も G 特性音圧レベルが高かったのは、後部窓を少し開けて高速走行した場合の乗用車内で、室内の共鳴により 130dB が観測された。

(2) 生活環境中で観測される低周波音の周波数特性 2), 3)

生活環境中で観測される低周波音の周波数特性の測定例を図 2～図 9 に示す。市街地で観測される低周波音は 40～80Hz 付近に主要成分がある。これらは道路交通等の背景騒音によると考えられる。道路・鉄道周辺で観測される低周波音は 20Hz 以上に主要成分がある。乗り物車内では、バス走行時のディーゼルエンジンによる 16Hz の帯域に卓越成分をもつ低周波音が、乗用車窓開け高速走行では室内の共鳴により発生する 16,20Hz の帯域に卓越成分をもつ低周波音が観測されている。雷の測定例では、可聴域に主要周波数成分がある。また、一般建物内で観測される低周波音のなかには、20Hz 以下に主要成分があるものもみられるが、これは換気用の大型空調機や送風機によるものと考えられる。

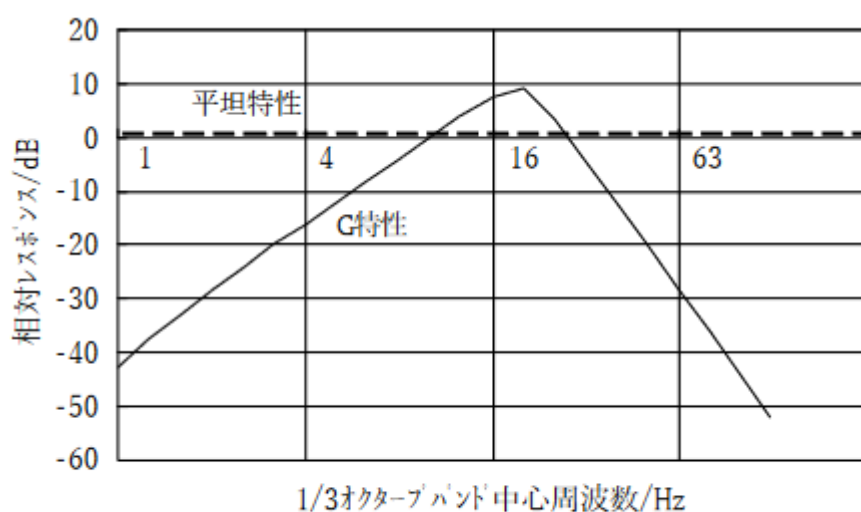


図-1.1 低周波音の周波数補正特性

なお、ISO7196 では、中心周波数は 0.25～315Hz になっているので、1/3 オクターブ解析は少し役に立つのですが、G 特性音圧レベルの値は、それほど役には立ちません。

(3) G 特性

0-315Hz の超低周波音に対して A 特性での重みづけを真似た周波数補正特性で、重みについては [ISO7196-1995](#) で 0.25～315Hz の範囲に対して規定されている。

Table 2 — Nominal frequency response

Nominal one-third-octave frequency Hz	Relative response dB
0,25	− 88,0
0,315	− 80,0
0,4	− 72,1
0,5	− 64,3
0,63	− 56,6
0,8	− 49,5
1,00	− 43,0
1,25	− 37,5
1,6	− 32,6
2,0	− 28,3
2,5	− 24,1
3,15	− 20,0

4,0	− 16,0
5,0	− 12,0
6,3	− 8,0
8,0	− 4,0
10,0	0,0
12,5	4,0
16,0	7,7
20,0	9,0
25,0	3,7
31,5	− 4,0
40	− 12,0
50	− 20,0
63	− 28,0
80	− 36,0
100	− 44,0
125	− 52,0
160	− 60,0
200	− 68,0
250	− 76,0
315	− 84,0

G 特性音圧レベルと1/3 オクターブ解析

「低周波音問題対応の手引書」の公表にあたって

2004 年 6 月 22 日 環境省環境管理局大気生活環境室

○手引策定の背景

近年、低レベルの低周波音に関する苦情が見受けられる。これらの苦情の多くは暗騒音が小さい静かな地域の家屋内において発生しており、すでに公表している「低周波音の測定方法に関するマニュアル」や「低周波音対策事例集」に記されている方法では対応できないケースも多くなっています。主な発生源は工場、作業場、店舗、近隣の家屋などに設置された設備機器等で、家屋内で観測される低周波音・騒音は 20～200Hz 程度の周波数域に主要周波数成分を持つものが多くみられます。

環境省は、このような苦情を的確に対応するため、(社)日本騒音制御工学会に委託し、同学会において平成 14 年 8 月学識経験者等からなる低周波音対策検討調査委員会が設置され、その対応について検討してきました。このたび、その結果が別途のように、固定発生源の低周波音問題対応のための「手引」、「評価指針」、「評価指針の解説」としてまとめられました。このなかで、従来の手法では対応の難しかった低レベルの低周波音に関する苦情に対処するための参照値が提案されました。

この検討に基づき、環境省はその主な内容を「低周波音問題対応の手引書」として公表するものです。

○手引書の役割

本手引書は、地方公共団体における低周波音問題対応に役立ててもらうために作成したものです。手引書では、苦情申し立ての受付から解決に至る道筋における、具体的な方法や配慮事項、技術的な解説などを盛り込んでいます。

地方公共団体の低周波音担当者及び公害苦情担当者又は専門家においては、本手引書を参考としながら、地

域の実情などを踏まえて適宜工夫を加えて活用していくことが大切です。

○手引書の検証・改善

本手引書は、現時点での集積データをもとにしたものです。今後、全国の各地方公共団体で活用していただき意見や要望を踏まえ、その有効性や課題などを検証し、必要に応じてその内容等についてよりよいものにしていくことを目指します。

○手引書の構成

本手引書は、低周波音問題対応のための「手引」、「評価指針」、「評価指針の解説」の3部構成になっています。それぞれの主な内容は以下の通りです。

①低周波音問題対応のための「手引」

苦情申し立ての受付から、低周波音の聞き取り調査、測定、評価、対策検討までの流れに沿って、具体的な方法や配慮事項について記載しています。

②低周波音問題対応のための「評価指針」

低周波音による建具等のがたつき、室内での不快感などについて苦情申し立てがあった場合に、**低周波音によるものかどうかを判断する目安となる値（参照値）**などを示しています。

とあり、

2004年は、平成16年です。平成12年10月に、“低周波音の測定方法に関するマニュアル”が出て、「低周波音問題対応の手引書」がそれを補足する形で、2004年6月22日に出ています。

○手引策定の背景

近年、低レベルの低周波音に関する苦情が見受けられる。これらの苦情の多くは暗騒音が小さい静かな地域の家屋内において発生しており、すでに公表している「低周波音の測定方法に関するマニュアル」や「低周波音対策事例集」に記されている方法では対応できないケースも多くなっています。

とあり、計測した後の対応の目安として、参照値が示されたわけです。

2004年（平成16年）の主な対象は、

“主な発生源は工場、作業場、店舗、近隣の家屋などに設置された設備機器等で、家屋内で観測される低周波音・騒音は **20～200Hz 程度の周波数域**に主要周波数成分を持つものが多くみられます。”

とあるように、20～200Hzの音でした。

20～200Hzならば、G特性音圧レベル、1Hzからの1/3オクターブ解析、参照値も活躍できたのですが、0～20Hzの間にエネルギーの93%が集中し、さらに0～1Hzの間にエネルギーの60%程度が集中している風車音に対して使うのは、やや無理筋という事になります。

その後、指針値が出てくるのです。これはA特性音圧レベルを使うことにして、超低周波音の部分を無視するという方針です。風車音のエネルギーの7%だけから、その影響を判断するという方針なのです。

参照値では、10%程度の人に被害が及ぶことに対しての配慮をしていたのですが、指針値は被害を受ける人が20%～30%になっても構わないという方針です。

北海道の寿都町では、風車音を環境基準値で評価し、老人ホームでの被害者が50%～70%になっても構わないという方針を採っています。

この原因は、環境省が、“風車騒音は超低周波音ではなく、通常可聴周波数範囲の問題”と言って、超低周波音の計測と解析を妨害したことにあります。

“風車音の問題は、そのエネルギーの93%を占める超低周波音の問題であり、風車音の成分である通常可聴周波数範囲のエネルギーは7%以下であり、しかも20Hz以上だけで比較すれば、他の環境騒音よりも騒

音レベルが低いので、通常可聴周波数の問題ではないのです。”

との認識が必要なのです。

低周波音の測定方法に関するマニュアル 平成 12 年 10 月 環境庁大気保全局

1. 本マニュアルに用いる用語

(1) 超低周波音

一般に人が聴くことができる音の周波数範囲は 20Hz-20kHz とされており、周波数 20Hz 以下の音波を超低周波音という。ここで取り扱う範囲は 1/3 オクターブバンド中心周波数 1-20Hz（またはオクターブバンド中心周波数 2-16Hz）の音波である。

(2) 低周波音

我が国における低周波音苦情の実態を考慮して、およそ 100Hz 以下の低周波数の可聴音と超低周波音を含む音波を低周波音という。従前、環境庁で低周波空気振動と呼んでいたものである。ここで取り扱う範囲は 1/3 オクターブバンド中心周波数 1-80 Hz（またはオクターブバンド中心周波数 2-63 Hz）の音波である。

(3) G 特性

1-20Hz の超低周波音の人体感覚を評価するための周波数補正特性で、ISO-7196 で規定された。可聴音における聴感補正特性である A 特性に相当するものである。この周波数特性は、10Hz を 0dB として 1-20Hz は 12dB/oct.の傾斜を持ち、評価範囲外である 1Hz 以下および 20Hz 以上は 24dB/oct.の急激な傾斜を持つ（図-1.1、表-1.1 参照）。

1-20Hz の傾斜は超低周波音領域における感覚閾値の実験結果に基づいている。

とある。

日弁連の意見書（p 8）

“(2) 低周波音の生理的な影響に関する調査

低周波音による生理的影響の有無について、環境省（2001年1月まで環境庁）は昭和51年度から調査を始めたが、昭和50年代には低周波音の生理的・心理的影響について明確な結論を得ることができなかった。

その後、低周波音を評価するためのG特性がISO7196で定められたこと、低周波音を測定する機器が開発されたこと、新幹線のぞみの低周波音問題などで社会的な関心が高まったことなどから、平成12年度には自治体向けの低周波音の測定マニュアルを配布し、地方自治体を通じて新しい知識や技術に基づいて再調査を行っている（「低周波音防止対策事例集」環境省・2002年3月）。

こうした**成果**を踏まえ、平成14年度には、“

とあるが、

これを“成果”とは言えません。騙されてはいけないのです。

ISO7196の内容を確認したのでしょうか？そこでの中心周波数や重みづけを確認したのでしょうか？確認して、少し計算すれば、安全安心と言って住民を騙す手段であることが明確になります。

ISO7196での中心周波数は0.25～315Hzです。ほとんどの資料が、ISO7196と言いながら、1Hzからになっています。大型風車では、0.5Hz辺りで最大音圧になります。ISO7196と言って、この範囲まで扱っているようなふりをして、実際は1Hzからでは、0.5Hzの問題を胡麻化している事になります。これは詐欺で

す。

G 特性音圧レベルの計算での問題

ある企業が、住民説明会で次の資料を配りました。

G 特性音圧レベルの予測値です。

予測地点	現況値	予測値	建設の影響による増分	参考値
一般①	68	68	0	100
一般②	60	61	1	100
一般③	58	64	6	100
一般④	54	63	9	100

モデルを作ってみました。

				一般①	一般②	一般③	一般④
	0.5Hz成分	1 Hz成分	1 Hz帯域騒音レベル d B	20Hz音源音圧Pa	20Hz音源音圧Pa	20Hz音源音圧Pa	20Hz音源音圧Pa
フィルタ前音圧Pa	0.4	0.5		0.015	0.006	0.0048	0.003
フィルタ前騒音レベル d B	86.02059991	87.9588		57.50122527	49.54242509	47.60422483	43.52182518
フィルタ後音圧Pa				0.015	0.006	0.0048	0.003
フィルタ後騒音レベル d B	86.02059991	87.9588		57.50122527	49.54242509	47.60422483	43.52182518
G特性重み付け	-64.3	-43		10	10	10	10
G特性重み付け後	21.72059991	44.9588	44.97935605	67.50122527	59.54242509	57.60422483	53.52182518
全体騒音レベル	LA=10*log10(10^(L1/10)+10^(L20/10))			67.52545704	59.69170185	57.83526848	54.09041341

四捨五入して現況値になる様にしてあります。

20Hz の音圧を変化させて、予測値になる様にしました。

	0.5Hz成分	1 Hz成分	1 Hz帯域騒音レベル d B	20Hz音源音圧Pa	20Hz音源音圧Pa	20Hz音源音圧Pa	20Hz音源音圧Pa
フィルタ前音圧Pa	0.4	0.5		0.0168	0.0074	0.0105	0.0093
フィルタ前騒音レベル d B	86.02059991	87.9588		58.48558572	51.36403448	54.40318607	53.34905906
フィルタ後音圧Pa				0.0168	0.0074	0.0105	0.0093
フィルタ後騒音レベル d B	86.02059991	87.9588		58.48558572	51.36403448	54.40318607	53.34905906
G特性重み付け	-64.3	-43		10	10	10	10
G特性重み付け後	21.72059991	44.9588	44.97935605	68.48558572	61.36403448	64.40318607	63.34905906
全体騒音レベル	LA=10*log10(10^(L1/10)+10^(L20/10))			68.50491406	61.46274683	64.4524959	63.41181752

20Hz の成分は、ほんの少し増加すると、予測値になってします。

1Hz の成分を変化させてみます。

	0.5Hz成分	1 Hz成分	1 Hz帯域騒音レベル d B	20Hz音源音圧Pa	20Hz音源音圧Pa	20Hz音源音圧Pa	20Hz音源音圧Pa
フィルタ前音圧Pa	0.4	3.4		0.015	0.006	0.0048	0.003
フィルタ前騒音レベル d B	86.02059991	104.609		57.50122527	49.54242509	47.60422483	43.52182518
フィルタ後音圧Pa				0.015	0.006	0.0048	0.003
フィルタ後騒音レベル d B	86.02059991	104.609		57.50122527	49.54242509	47.60422483	43.52182518
G特性重み付け	-64.3	-43		10	10	10	10
G特性重み付け後	21.72059991	61.60898	61.60942401	67.50122527	59.54242509	57.60422483	53.52182518
全体騒音レベル	LA=10*log10(10^(L1/10)+10^(L20/10))			68.49639252	63.70805306	63.06334882	62.23646404

0.5Pa から 3.4Pa に変化させると、ほぼ予測値の中に納まります。

0.5Hz 成分を変化させます。

	0.5Hz成分	1 Hz成分	1 Hz帯域騒音レベル d B	20Hz音源音圧Pa	20Hz音源音圧Pa	20Hz音源音圧Pa	20Hz音源音圧Pa
フィルタ前音圧Pa	39	0.5		0.015	0.006	0.0048	0.003
フィルタ前騒音レベル d B	125.8006922	87.9588		57.50122527	49.54242509	47.60422483	43.52182518
フィルタ後音圧Pa				0.015	0.006	0.0048	0.003
フィルタ後騒音レベル d B	125.8006922	87.9588		57.50122527	49.54242509	47.60422483	43.52182518
G特性重み付け	-64.3	-43		10	10	10	10
G特性重み付け後	61.50069223	44.9588	61.59593332	67.50122527	59.54242509	57.60422483	53.52182518
全体騒音レベル	LA=10*log10(10^(L1/10)+10^(L20/10))			68.49363321	63.6997371	63.05370055	62.22478951

0.4Pa から 39Pa まで変化させても、予測の範囲内です。

これは、G 特性での重みづけが、0.5Hz では-64.3 d B、1Hz では-43 d B、20Hz では+10 d B となっているからです。

1Hz 以下の成分がかなり大きくなっても予測値に納まります。G 特性音圧レベルの数値からは、頭痛や圧迫感の原因となる、最大音圧の部分は把握できないのです。計算の途中で、ほぼ 0 として扱われるのです。

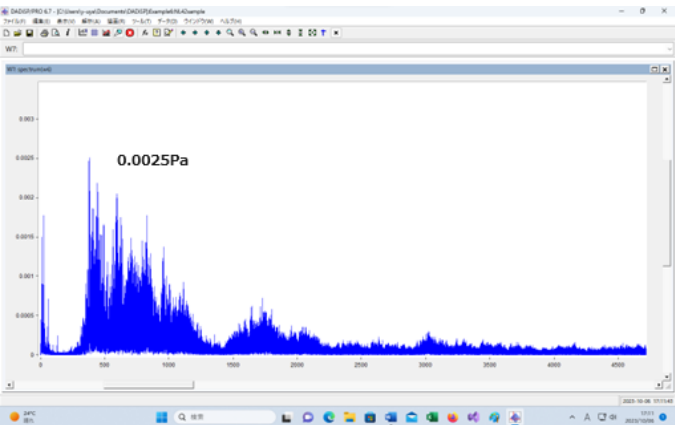
頭痛や圧迫感との関連性は認められなくなるのです。それを、“こうした**成果を踏まえ**”と言ってしまえば、勝負には勝てないのです。

大型化する風車では、0.5Hz での音圧が特に高くなるのですが、計算上は、音圧が $39/0.4=97.5$ 倍になっても、G 特性音圧レベルの値は変化しないのです。被害の原因を隠蔽してしまうのです。

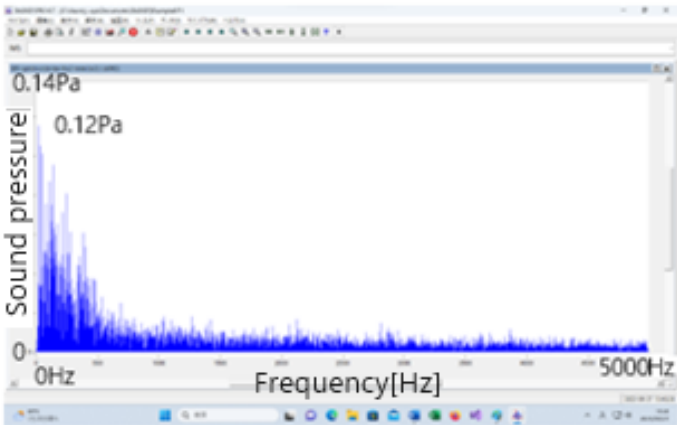
館山で計測した風車の場合、風が弱い時には 0.8Hz で 0.15Pa、風が強い時では 1Hz で 0.42Pa でした。少し圧迫感を覚えました。

なお、周波数スペクトルを確認すれば、

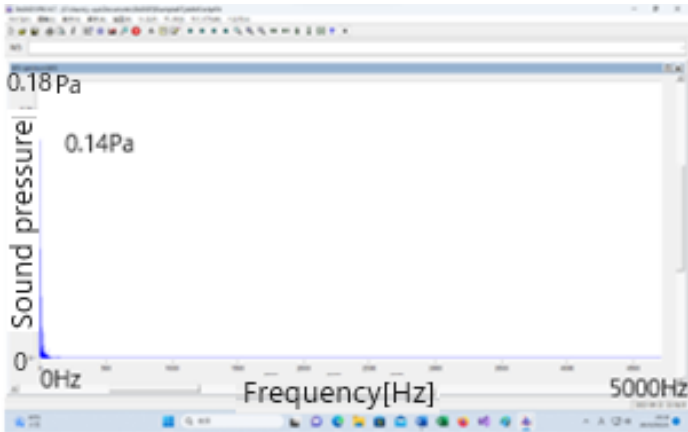
交通騒音（0～5000Hz）



工場騒音（0～5000Hz）



風車騒音（0～5000Hz）（風が弱い日）



エネルギーの分布は次の様になっています。

表 2. エネルギーの分布

エネルギー分布	0～20Hz	20Hz 以上
風車音	93%	7%
工場音	12%	88%
交通音	1%	99%

0～20Hz でのエネルギーの分布

Energy distribution	0～1Hz	1～20Hz	0～20Hz
Wind turbine	61.3%	38.7%	100.0%
Iron mill	0.04%	99.96%	100.0%

さて、 $93 \times 0.613 = 57\%$ ですから、風車音全体のエネルギーの 57% は 1Hz よりも周波数が低い部分に含まれています。風車音のエネルギー分布は 1 点集中型である、と言えます。

1Hz 以下を計算から実質的に除外すれば、風車音のエネルギーの 61.3% 以上を無視して評価することになるのです。

圧迫感、頭痛の原因となる部分か計算から除外されるので、被害の根拠が消えてしまいます。原因不目という事になるのですが、この計算を見れば、原因が分っているから、しれが不明になる様に計算方法を決めたのが、G 特性音圧レベルの計算方法だと言えます。

G 特性に関して、低周波音の測定方法に関するマニュアル 平成 12 年 10 月 環境庁大気保全局の資料には、

1～20 Hz の傾斜は、超低周波音領域における感覚閾値の実験結果に基づいている。

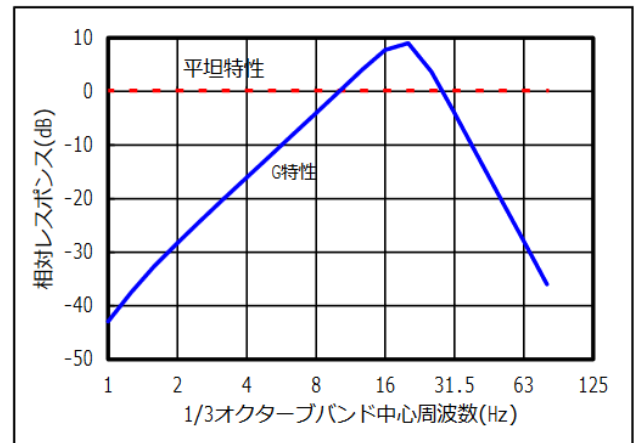
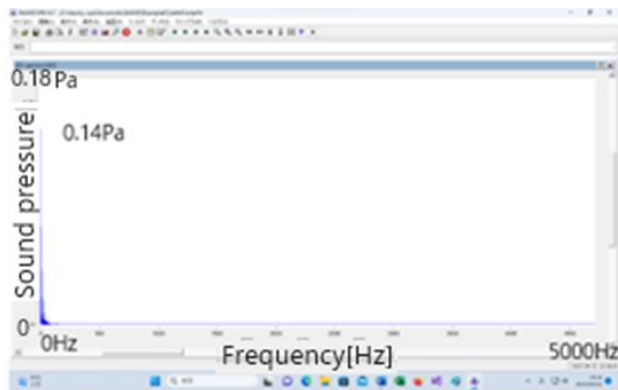


図-1.1 低周波音の周波数補正特性

ここには、1Hz 以上の重みづけしかありません。ISO7196 では、中心周波数 0.25Hz からの重みづけがのっています。

0.5Hz での重みは、-64.3 dB です。0.5Hz の音圧は、普通は 0.4Pa 程度ですが、大型化する風車では、0.5Hz での音圧が特に高くなるのですが、計算上は、音圧が $39/0.4=97.5$ 倍になっても、G 特性音圧レベルの値は変化しないのです。G 特性音圧レベルの数値は被害の原因を隠蔽してしまうのです。

ですから、G 特性を“成果”とは言えないのです。“先手を取られた”と判断すべきだったのです。

超低周波音はどこにでも存在しますが、風車の近くでは、強烈で、特殊な周波数特性を持っている超低周波音があるのです。音圧や周波数特性が、風車音での被害の原因になっているのです。

“超低周波音の発生源は地球上至るところに存在する。”

と言って済ませてしまえば、風車音の被害の原因を追究できないし、風車から超低周波音が出る仕組みも説明出来ません。被害と風車での超低周波音の関連も追及できないのです。

残念ながら、お気楽すぎる発言です。

2. 超低周波音の計測

2.1 超低周波音の定義

空气中を伝搬する音は、周波数が低い順から、超低周波音（Infrasound）または低周波音（Low frequency sound/noise）、可聴音（Audible sound）、空中超音波または高周波音（Ultrasound）と呼ばれることが多い。低周波数域に関しては、可聴音の下限周波数である 20 Hz を基準として、これより低周波数の音を超低周波音とし、超低周波音と可聴音の低周波数域の音をまとめて低周波音とすることが多い。しかし、用語定義や周波数範囲について分野間の統一が為されていないため、異なる定義が混在する（図 1）。以下に分野ごとの用語の使い分けを整理する。

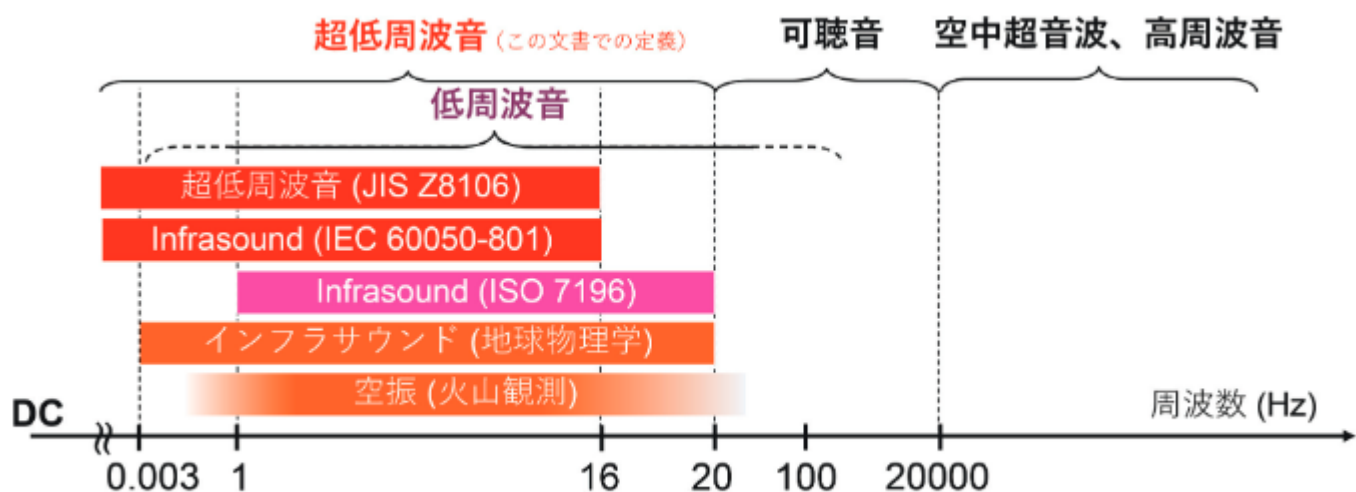


図 1 周波数による音の分類

また、1995 年に発行された ISO 7196 は、低周波音に対する人体感覚を評価するための周波数重み付け特性（G 特性）を規定しているが、ここでは 1 Hz から 20 Hz の音を特に超低周波音と定義している 14）。

の部分について考えます。

1. 文献の確認が不十分である。（確認したのならば、英語や日本語を理解する力が無い。）

Infrasound, sound with its frequencies lower than 20 Hz,

との書き出しであるが、

Infrasound, を自分がどのような意味で使うのかは、自由である。ただし、その意味を明確にする必要がある。しかし、他の人が使っている Infrasound, が自分の使っている言葉と意味が同じとは限らない。

“[Infrasound \(ISO7196\)](#)” と書いてしまった。周波数の範囲は、1～20Hz になっている。

さらに、p 71 では、

“1995 年に発行された ISO 7196 は、低周波音に対する人体感覚を評価するための周波数重み付け特性（G 特性）を規定しているが、ここでは 1 Hz から 20 Hz の音を特に超低周波音と定義している 14）。” と書いている。

[ISO7196](#)での Infrasound の定義は

“ISO 7196 は、低周波音に対する人体感覚を評価するための周波数重み付け特性（G 特性）を規定しているが、ここでは 1 Hz から 20 Hz の音を特に超低周波音と定義している”
のではない。

ISO7196 における“infrasound”の定義は、

3 Definitions

For the purpose of this International Standard. The following definitions apply.

3.1 infrasound: Sound of noise whose frequency spectrum lies mainly in the band from 1 Hz to 20 Hz.

となっている。

“infrasound”は、“1～20Hz の音波”ではなくて、“周波数スペクトルが主に 1Hz から 20Hz の帯域に入っている音”と定義されています。

まさに、風車音はこの性質を持っています。風車音のエネルギーの 93% は 1～20Hz の帯域に含まれていますので、風車音こそが“infrasound”そのもののなのです。

A 特性音圧レベルは、交通騒音の場合は音のエネルギーの 99% から計算される数値ですが、風車音の場合は音のエネルギーの 7% から計算される数値です。しかも最大音圧の部分を見逃しているのですから、圧迫感や頭痛の原因が不明なのは当然です。風車音のエネルギーの 93% を見逃している数値なのですから、風車音の影響を評価する数値にならないのは当然のことです。エネルギーの観点からすれば、風車音の問題は、超低周波音の問題そのもののなのです。

ISO7196 での重み付けは、0.25Hz～315Hz であり、範囲は 1～20Hz の範囲には収まらない。
これは、次の定義からの当然の結果である。

勝手に他人の定義を変更してはいけません。（公文書偽造、私文書偽造に近いと思います。）

[ISO7196](#) は英語で書いてあるから、分からなくても仕方ありませんが、小学生でも英語を習う時代ですので英語もしっかり勉強しましょう。

ISO7196 の定義では、発生する音を全体として捉えて、その性質を調べることになります。

詳細な波形、指向性、距離減衰の様子、周波数特性、周波数ごとの音圧、などを調べる必要があります。

これが分れば、

そのような音を発生する音源の大きさと形、運動の仕方が分ります。

運動の様子が分れば、金属疲労についても分ります。

さらに、

音響キャビテーションを考えれば、直接的な健康影響である“頭痛”の原因が風車音であることも分ります。

中心周波数を 0.25～315 Hz とした場合は、計測と解析で問題が発生します。問題を解決するのが嫌だとしても、勝手に他人の定義を変更してはいけません。

低周波音や超低周波音の計測や解析では困難な問題が発生します。

[低周波音の基礎および伝搬・影響・評価](#)（落合博明 氏）には、

“低周波音の測定にあたっては G 特性音圧レベルと 1/3 オクターブバンド音圧レベルを測定する”

とあるが、

たとえ、ISO7196 に従ったとしても、1/3 オクターブ解析では、中心周波数を使うので、0.692Hz～0.869Hz は全て 0.775Hz（0.8Hz）として表示され、正確な周波数が不明となり周波数の微小な変化や周波数の倍音構造が把握できません。

[低周波音の測定方法に関するマニュアル](#)には、（平成 12 年 10 月 環境庁大気保全局）

“3) 風雑音と低周波音の見分け方

風による音圧レベルと対象とする音圧レベルの違いを判別するのは簡単ではないが、次のような点に注意するとよい。

- ・多くの場合、対象とする低周波音は定常的、周期的あるいは特徴的な音圧レベルの変化を示すはずである。
- ・風による音圧レベルは、不規則に変化する。“

とある。

0.5Hz 辺りでの規則性を把握するには、音圧を細かく調べる必要がある。0.01Hz よりも細かく調べないと、規則性が見つからない。

[平成 22 年度 移動発生源の低周波音等に関する検討調査等業務報告書](#) には、

“風車音の計測に関しては、

- ・統一した方法はない
- ・計測機器が規格化されていない “

と書かれている。

風車音か否かの判断基準となる 0.5～0.8Hz の音の測定に関しては、統一した方法が無く、また JIS 規格も無い。この部分の計測と解析は、G 特性音圧レベルや 1/3 オクターブ解析の技術では出来ないのです。

“無ければ、自分で作れば良い。”という事で、風車音の詳細な性質を調べる為に必要な関数を作成し、具体的なデータを使って風車音の解析を行ってみました。

私は DADISP を使っているが、過去の計測データと比較するには、機能が足りないので、超低周波音で使う解析ソフト“[Noise & Infrasound Analysis](#)”を追加した。さらに、DADiSP/WAV オーディオ モジュールが必要です。

リオン社の精密騒音計 NL-62 に、波形収録プログラム NX-42WR を追加して、サンプリングレートは 48 kHz、平坦特性で（120 秒以上の時間）収録した Wav ファイルを解析する。

振動については、リオン社の振動レベル計 VM-55 に、波形収録プログラム VX-55WR を追加して収録した WAV ファイルを使いました。

2.3.2 人為活動

風力発電用風車

再生可能エネルギーの世界的な導入を受けて、日本でも 1990 年頃から風力発電施設の建設が進んだ。風力発電用風車の騒音（風車騒音）への苦情や健康上の不安を感じるという訴えが度々寄せられたことから、風車騒音の評価と人間に対する影響の調査が国内外で行われた⁴²⁾、⁴³⁾。2010 年から 2012 年にかけて行われた、日本における風車騒音の実測調査では、図 3 に示すように 30 Hz 以下では風車騒音は聴覚閾値曲線を下回る、すなわち聴感的に知覚できていないことが分かった⁴⁴⁾。

また、2012 年から 2018 年にかけて欧州地域で行われた「Metrology for a Universal Ear Simulator and the Perception of Non-audible Sound (EARS プロジェクト)」は、聴覚閾値を下回る音圧レベルの音響刺激に対しては脳波応答が見られないことを報告している²⁶⁾。環境省の検討会は、調査の結果を踏まえて風車騒音は可聴域、あえて言うならば低周波数域での騒音として議論すべきとの見解を示している⁴²⁾。

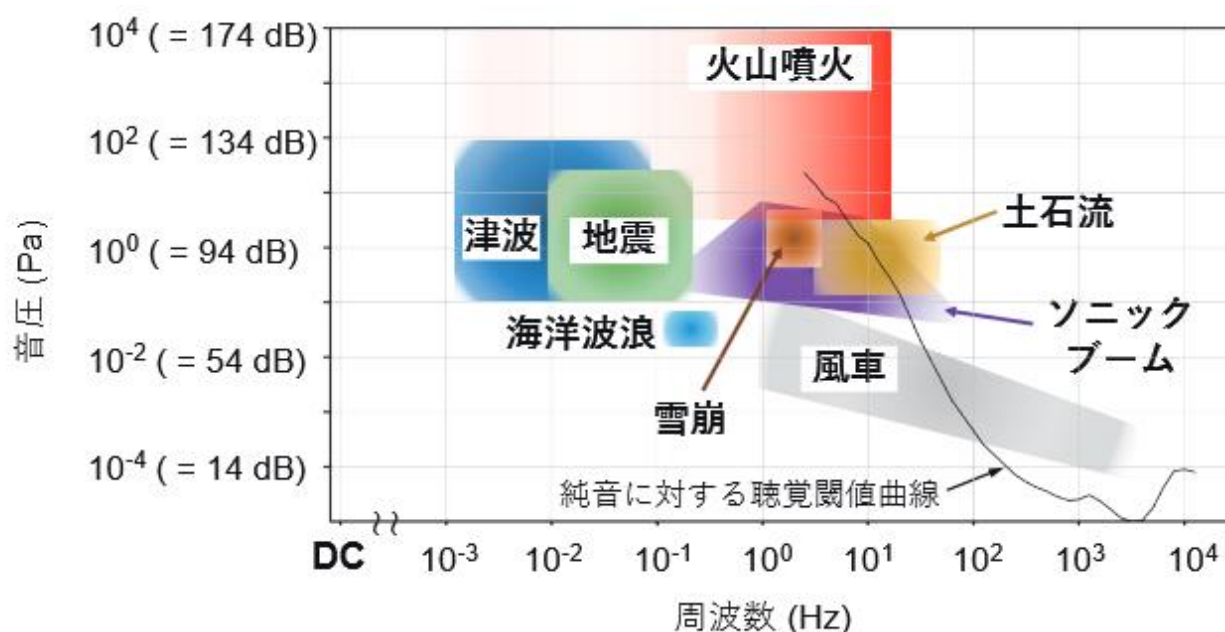


図3 計測対象現象に対応する周波数および音圧の範囲。聴覚の閾値曲線については、20 Hz より上の周波数域は ISO 226:2003、20 Hz 以下は EARS Project の結果を引用した^{25), 26)}。なお、音響分野では 20 μ Pa を 0 dB として扱う。

について考えます。

まず、

“風力発電用風車の騒音（風車騒音）への苦情や健康上の不安を感じるという訴えが度々寄せられた”
についてですが、被害の現状を見ようとしない姿勢が明確となっている。

被害の状況については、次の情報があります。

「風車騒音・低周波音による健康被害」

08年8月8日

「風車問題伊豆ネットワーク」事務局

I 健康被害について

1、臨床名 各国により異なる。公認されていない。

①日本 低周波音症候群＝外因性自立神経失調

超低周波空気振動健康被害（風車騒音被害に関して）

（以上すべて汐見医師＝元和歌山日赤病院内科部長）

また被害者は「風車病」と名づけている。

②アメリカ ウインド・タービン・シンドローム（風車病）

（元コロンビア大学教授、ニナ・ピアポント氏）

③ポルトガル 振動音響病（VAD）（航空宇宙環境医学関係学会・アルベス・ペレイラ教授）

④イギリス 健康被害＝風車騒音の不快感（アマンダ・ハリー医師）

2、症状 「夜眠れない、眠っていても起こされてしまう」など不眠症状を中心に、血圧上昇、めまい、動悸、頭痛、腹痛、耳鳴り、肩こり、手足のしびれ、吐き気、脱毛、顎の痛み、腹・胸の圧迫感、幻覚、癲癇、イライラ感、脱力感、不安、集中できない、疲れやすい、気持ちが悪くなる、など多様な自律神経失調症状が訴えられる。（癲癇はイライラ感が昂じて怒りやすくなることと思われる。イギリスに多いようである。）

前記臨床上の症状は低周波音との因果関係が病理学的に証明されていない。日本では、不定愁訴、自律神経失調と診断される。ポルトガルでは VAD（振動音響病）と診断されることが多くなっているとのことだが、公的には認定されていない。

しかし疫学的には、外形的に証明される。風車（音源）が停止すれば症状は消失する。また他地域に移動するなど風車（音源）から離れれば、同様に症状は消失する。このことは風車騒音・低周波音と健康障害との因果関係を外形的に明快に証明するものである。

3、自由記述、聞き取り、アンケート調査による訴えの内容の一部

1.ガラスの温室にいて耳鳴りがする。風が止まるとすっとする。（豊橋市伊良湖地区）

2.肩こりや耳鳴りがひどく、手に力が入らずミニトマトの収穫ができない。

（豊橋市渥美地区）

3.夜寝られず、仕事に集中できないため、ホテルに宿泊し出勤。（豊橋市細谷地区）

4.姫島に釣りに行った時、しばらく磯に横たわっていたら起き上がれなくなってしまった。起き上がっても体がふらついていた。（豊橋市細谷地区）

5.毎日が苦しくてまるで生殺しの状態だ。（豊橋市細谷地区）

6.ガラスが響く。おなかがおかしくなった。（豊橋市久美原地区）

7.夜眠れず、200万円かけて真空サッシにしたが変わらない。（湖西市）

8.夜寝られずうつ病になった。病院にいても治らない。（田原市）

9.家の床、壁が振動して眠ることができない。事業者と交渉、費用を負担してもらいホテル住まいをしていたが、昨年、県が低周波音の測定をおこない被害が出るレベルではないとされ、ホテルの費用保証は打ち切られた。県の測定は苦痛を感じる時の風向ではなかった。現在はアパートを借りて、夜になると家族で寝に

行っている。(田原市)

10.外耳の裏側が腫れ、頭痛がひどい。(東伊豆町)、

11.朝起床して左方向に行こうとするが、右へ右へと体が傾き、反対側へ行ってしまう。血圧が上昇した。(東伊豆町)

12.くも膜下出血で倒れ、亡くなられた。(東伊豆町)

13.頭痛がひどく、仕事をするのが困難、吐き気がする。閃光や影も不快だ。(イギリス)

14.風車が速く回っているとき、ストレスと極度の不安を感じる。(イギリス)

15.夜眠れない。頭痛で目覚め気分も悪い。昼は集中できない。騒音で押しつぶされる感じ、不快でくたくたになる。(イギリス)

16.ほとんど押しつぶされる感じ、騒音なんてもんじゃない。拷問だ。(イギリス)

17.生活も家もめちゃくちゃになった。短気になったような気がする。(イギリス)

18.風車ができる前の生活の質は失われた。もはや生活をコントロールすることはできない。庭に座って作業したり、家の中でゆったり過ごしたり、十分な睡眠をとったりすることはできない。(イギリス)

19.騒音で疲れる。わずらわしい。聞えるというより感じる。事業者は、われわれが証明しなければ問題を否定するが、どうやって証明できるというのだ。(イギリス)

20.地域の人は風車が良いものと間違った印象をもっているので疎外されている。退職後の家になるはずだったのに、安く売らなければならない。(イギリス)

21.家を離れると健康が回復する。(イギリス)

※イギリスの事例は、医師アマンダ・ハリー氏によるウェールズ、コーンウォール、北イングランド地方の風車近隣住民の疫学調査にもとづく論文「風車の騒音と健康」から引用した。同医師によると、フランス、ドイツ、アメリカ、ニュージーランド、オーストラリアでも同様の健康被害が訴えられているという。

また、アメリカの元コロンビア大学教授、ニナ・ピアポント氏もウィスコンシン州、オランダとドイツの国境付近、フランスなどの風車近隣住民の疫学調査から、頭痛、めまい、不安定、吐き気、疲労、耳鳴り、怒り、興奮、不安神経症、気持ちの落ち込み、集中力欠如、学習力不振などの身体異常と風車騒音との関連づけをしている。

4、家屋・動物への影響

①床下から振動が押し寄せて、家が震動する。(東伊豆町)

②戸や置物がガタガタする。(東伊豆町)

③音が屋根に覆いかぶさる。(東伊豆町)

④家の床、壁が振動し、寝ることができない。(豊橋市田原市)

⑤風車の方向にむかって犬が夜中吠えつづける。(東伊豆町)

⑥犬が部屋の中を駆けずり回り、壁をかきむしる。(東伊豆町)

⑦犬、猫が嘔吐する。(東伊豆町)

⑧小鳥がいなくなった。(東伊豆町)

⑨犬が散歩に行きたがらない。(豊橋市細谷地区)

⑩カラスがいなくなった。(豊橋市細谷地区)

⑪一帯の砂浜では海亀が産卵に上陸しなくなった。風車から1キロ以上離れたところには上陸している。(豊橋市細谷地区)

⑫シーズンになってもキスが釣れない。ちょっと離れると釣れる。(豊橋市細谷地区)

⑬ボラが跳ねる姿が見られない。(豊橋市細谷地区)

5、風車騒音・低周波音健康被害の発生状況

日本では、風車騒音・低周波音による健康被害が各地で多く訴えられているにも係らず、専門家による疫学調査はまったくおこなわれていない。環境省は「低周波音による直接的な意味での生理的影響を明確に証明しうるデータは得られなかった。しかし、いろいろな条件下で、頭痛、吐き気などの生理的影響を起こす可能性について調査・研究が必要である。」（環境省－参考資料－）としながら、実際は、低周波音健康被害の存在を認めず、調査・研究もしていない。この点に関しては、環境省をはじめとする所管官庁、音響工学研究者、医学研究者、医師などの意図的怠慢が指摘されても仕方がない。

ここでは、愛知県豊橋市細谷地区の被害者の会によるアンケート調査、わたしたちの聴き取り調査、静岡県東伊豆町天目地区住民自治会によるアンケート調査により、風車騒音・低周波音による被害の症状・発生状況について、簡単にまとめておく。

①豊橋市細谷地区の場合

渥美半島の付け根（浜名湖寄り）に位置する豊橋市細谷地区は、三浦半島などと同じように、山岳部を持たない段丘状の比較的平坦な土地である。一帯は赤ちそ、たばこなどの栽培が盛んな畑作地帯で、農家は集落をなすというより点在している。

世帯数、住民数は不明。

そこに一昨年のはじめに土地取得など住民の協力を得て、M&D グリーンエネルギー（株）により1基の風車が完成、1月末に稼動を開始した。たちまちのうちに被害の訴えが続出、3月には被害者の会が結成されている。被害を訴えた住民の数は26名、症状は前記した通りである。訴えの範囲は、風車から200m～700mにおよび、なかには900m、1300mも離れたところに住んでいる住民からの訴えもある。

被害住民は、事業者、市、県、国の所管官庁、その他への要望、要請、陳情、請願などの活動を現在も繰り返し続けている。

②東伊豆町熱川天目地区の場合

天城連山の主稜線を町境とする東伊豆町は、稜線から太平洋へと落ちるいくつかの支稜により厳しい地形をなしている。町民の居住区は海岸線近くの一部の平坦地がほとんどである。この厳しい地形と美しい海と山の景観を利用して40年ほど前から別荘地が開発されてきた。熱川天目地区はその一つである。標高700mほどの天目山とその北側の山との間の標高300m～450mのところに居住区が造られている。

居住区は別荘地として利用されるのみならず、現役を引退し、老後を静かな環境のなかで過ごそうとする人たちが、48世帯、96名が定住している。

昨年末、この天目山稜線上に、居住者への説明もなく10基の風車が建設され、直ちに試験運転が開始された。運転は5基前後が中心で全基運転は数日のみ、風況によっては10基全部が停まっている日もあった。4月8日に低気圧通過にともなう強風と落雷により2基のブレード3枚が破損（2枚は付け根から折損破壊して近くの町道一帯に飛散）、ナセル（発電機、増速機が収められている箱、タワー上部に取り付ける。）も壊れた。現在は運転停止中、原子力保安院の指導のもとに原因究明と安全対策が検討されている。この間の運転期間はほぼ3ヶ月、停止日数を考えると3ヶ月に満たない。

ところがこのわずかな期間に、それも試験運転開始から間もなく、風車騒音・低周波音による健康被害の訴えが続出した。アンケートによれば、定住48世帯のうち21世帯で前記症状などの被害の届けがあり、96名の定住者のうち30名あまりから身体変調（健康被害）の訴えがあった。世帯数では4割強、定住者数では3割強にもなる。一気に被害が出ているのだ。豊橋市細谷地区もそうだが、こうした被害の大量発生が風車による、20HZ以下の超低周波音を含む低周波騒音健康被害の特徴である。風車以外ではこうした短期間における被害の大量発生はみられない。

居住区は高齢者がほとんどである。高齢者はもともと持病をもっている方が多い。

そこに風車の低周波音が襲ってきた。高血圧や身体のふらつきに悩まされた方が多くいたと聞いている。な

かには血圧上昇からくも膜下出血などで倒れ、亡くなられた方が2名いる。そのほかに入院を余儀なくされた人が2名、外耳を腫らせた方もいる。風向と風速状態によっては歩行が自由にならない人もいた。風車が止まっている現在、血圧上昇、歩行困難、外耳の腫れ、頭痛、耳鳴り、めまい、その他などの多様な身体症状の訴えはない。症状は消失している。この秋以降に予定されている運転の再開、その後の本格稼動を前に、天目の人々は静かな日々を惜しむようにして生活している。

③風車からの距離と健康被害

風車による低周波音健康被害は超低周波音によるものと推測されている。超低周波音は、低周波音以上に距離減衰力が弱く、遠方まで伝播する。被害は、風車からの距離1 km以内に住む人に多発する傾向がみられるが、地形などにより1 kmを超えた遠方でも発生している。音波が遠方まで届くからである。

また山岳部では特に、地形の影響を考慮する必要がある。東伊豆町天目では、地形により風車から350m~700mの地点に3箇所、音が溜まると思われる場所があり、そこでは他の場所よりほぼ3倍の被害の訴えがある。また、風車から1キロ先に住んでいる人も被害を訴えている。(被害調査結果報告)豊橋市細谷地区でも1.3 km離れたところの住民に被害が出ている。ニア・ピアポント氏の報告では、オランダとドイツ国境に建設された風力発電施設では、1.9 kmまでの住民が不快を示しているという。またアマンダ・ハリー氏によれば、イギリスでも風車から1.6 km先で被害者が出ている。

II 風車の騒音と低周波音

1、騒音・低周波音・超低周波音

騒音とは、聴こえる音（可聴音）が不快を感じさせるレベルに達している状態のことである。ふつうそのレベルはA特性という測定方法で測られる。A特性では聴覚の特性にしたがって補正されて算出される。具体的にいうと、200Hz以下の周波数の音はあまり聴こえなくてもいい音として低く評価される。つまり、200Hz以下の周波数の音、特に100Hz以下の低周波音域の音については、測定の段階でフィルターがかけられて音圧（dB）が減算されて算出される。こうして聴覚に適した音のレベルが測定される。

しかし、200Hz以下の周波数の音も聴こえないわけではない。100Hzまでは聴こえる。音の強さ（dB）にもよるが、100Hz~20Hzまでの音も聴き取りにくい音、あるいは身体に感じる音として聴こえる、とされている。ピアノのもっとも低い音は27 dBである。A特性では、こうしたレベルの音が低く評価されて測定されることになる。

特別に音圧（dB）をあげない限り、まったく聴こえないとされるのは20Hz~1 Hzの超低周波音である。

（超低周波音について、ISO＝国際標準化機構は、音圧を100 dBにすれば感じることができ、120 dBでは聴こえる、としている。それほどの高音圧の超低周波音はふつう存在しない。）

2、低周波音・超低周波音の性質

風車から出される音は、100Hz以下の低周波音、なかでも20Hz以下の超低周波音の成分を多量に含む複合音である。これをA特性測定で正確に測って評価することは不可能だ。そもそも騒音測定器は超低周波音を測定できるようには作成されていない。

測定器は超低周波音を測定対象外となっている。

音とは、音波とよばれる空気振動とされる。この空気振動は「疎密の波」といわれる空気の圧力変動波である。圧力の疎密（強い圧力部分と弱い圧力部分）が波なのである。風車の低周波音に曝露されれば圧迫感を感じるのは当然である。圧力波を浴びているからである。水の場合も同じような圧力の変動により波やうねりが生じる。水の圧力変動では、圧力が大きい部分で人は圧死するといわれる。低周波音・超低周波音曝露でも人の身体は疎と密の波の変動する圧力を受けて圧迫されているのだ。

またさらに、音の空気振動は電磁波まどの光波と似ているとされる。波長の短い光波は可視光線として視覚で感じとる。可視光線より波長の長いマイクロ波、短波、長波などの電波は視覚で感じとれない。紫外線、

X線、γ線は可視光線よりさらに波長が短い。これらも知覚できない。

特段に波長の短い 20000Hz 以上の超音波（高周波音）を除いて波長の短い周波数帯域の音は聴覚で聴き取れる。波長の長い低周波音・超低周波音は聴き取ることは困難だ。低周波音が聴こえるとしても身体で感じるといったほうがふさわしいといわれる。

超低周波音は聴こえない音の波である。しかし、X線などと同じように、これらの音波は、身体を透過し、身体組織に影響を与えと考えられる。また、塀や壁などを透過・回折（回り込み）して部屋に進入してくる。窓を閉め、サッシを二重にしても遮蔽効果はないわけである。こうして風車近隣に住む住民は、居住地のどこにいても超低周波・低周波騒音にさらされ、超低周波・低周波騒音は、住民の体に進入して身体組織的、生理的に影響を与え、身体異常をもたらす健康をそこなわせると考えられる。

以上のことを前提に、以下、健康被害をもたらす低周波音・超低周波音について、いくつかのことを指摘しておく。

①汐見文隆医師の研究によると、健康被害をもたらす低周波音の周波数（Hz）レベル、音圧（dB）レベルは、従来、10Hz~40Hz とされ、音圧は被害者により差があり、50dB~80dB 近くまで（60dB 前後が多い）とされていた。低周波音の中でも 50Hz 以上の周波数帯域の音は、聴こえにくい聴こえる音として、被害をもたらすよりマスキング効果（音の消去効果）としては作用するとされる。

②風車から出される低周波音・超低周波音については、被害現地（愛知県田原市・愛媛県伊方町）での 1/3 オクターブバンドでの実測にもとづき、その測定値を分析すると、20Hz から下の周波数帯域にむかって、徐々に音圧が高まり、10Hz 以下ではさらに音のエネルギーが大きくなっている（音圧が高まっていく。）ことがわかる。

比較にあたっては、測定条件、地形などの考慮が必要だが、①風車稼働時と停止時、あるいは②高稼働時と低稼働時との音圧差をみると、周波数帯域により異なるものの、①では、ほぼ 10~15dB の音圧差になり（伊方町の場合）、②でも、10~17dB 程度の音圧差（田原市の場合）がある。風車の稼働により 20Hz 以下の超低周波音帯域で大きな空気振動エネルギーが伝播してきていることがわかる。

③前記の測定値を 20Hz 以上の周波数の低周波音帯域で比較すると、風車停止ないし低稼働では、稼働あるいは高稼働より多少のエネルギー減がみられる程度である。有意な差ではない。つまり、風車稼働にともなう音圧増は圧倒的に超低周波音の寄与によると考えることができる。

④風車稼働による 20Hz 以下の周波数帯域でのこのようなエネルギー量の高まりのなかで、10Hz 以下ではさらにその差が大きくなる。そのなかでも特に、2Hz と 3.15Hz は 70dB を超える卓越した音圧を示している。周辺は 60dB 以下である。卓越周波数と呼ばれるが、その周波数帯では周辺の周波数帯域より一段と高い音圧になっているということである。汐見医師はこの卓越値をとともなう周波数帯域が被害をもたらすとしている。

⑤風車が稼働しているときに、二重サッシの窓を閉めた状態で測定する。（伊方町）音圧はさほど下らない。音が窓を透過、あるいは回折して室内に滞留していること

がわかる。騒音は窓、壁により遮断できるが、低周波音、超低周波音は窓、壁を透過・回折して室内に入り込んでくるのがわかる。

3、超低周波音の伝播力と風車建設の距離規制（セットバック）

超低周波音は波長の長い空気振動（圧力変動波）である。その波長は 1Hz で 340m、10Hz で 34m、測定された卓越周波数の 2Hz では 170m にもなる。こうした波長の長い超低周波音は塀や壁を透過、回折するだけではない。伝播中の減衰力が弱く遠方まで伝わる。聴こえない音の波は聴こえる音の波と比べると、はるか遠くまで伝わっていくのである。

したがって風車の超低周波音による健康被害を出さないためには、人の居住区から遠く離して風車を建設す

るほかに方法はない。その距離は少なくとも 2 k m は必要である。2 k m の距離があればほぼ被害は防げると考えられる。イギリスのアマンダ・ハリー氏は、安全を見込んでとりあえず 1.5 マイル=2400m が必要としている。フランス医師会連合は 1.5 キロのセットバックを推奨している。ドイツは風車建設を海上に移した。2 k m のセットバックの国もあると聞く。N E D O の指導では日本は 200m である。

4、低周波音の音圧規制と参照値

産業の育成・発展を阻害ないし停滞させずに低周波音の音圧を規制することは不可能に違いない。各国で低周波音の音圧を法的に規制しないのは、多分、そのためである。しかし低周波音は人の健康をそこなう。特に風車の超低周波音による被害は甚大である。そこでヨーロッパ諸国は距離規制（ゾーニング）で問題を解消する方向に向い出した。日本はそれに追いつけないでいる。というより、いまだに事業者本位にしか考えていない。

距離規制（ゾーニング）の問題ばかりではない。音圧規制についても考え方が異なるようだ。ドイツ、デンマーク、オランダ、スウェーデン、ポーランドなどでは、低周波音に関して、規制基準あるいは推奨基準値を定めている。それらは日本の参照値よりずっと厳しい音圧レベルに設定されている。ポーランドが特に厳しく、基準に達すればおそらく被害は出ないだろう。しかしこれらは多分、法的規制値ではない。事業者に求められている努力目標基準値だと思われる。

これに対して日本の参照値は「苦情に関する参照値」である。苦情（被害ではない。）に対応するものとしての参照値、つまり苦情が訴えられた際の事業者の目安として定められたものである。「参照値を目安に苦情に対処せよ。」というわけだ。参照値そのものが事業者のために定められているのである。

環境省の「低周波音問題対応のための評価指針」には、次のように書かれている。「本参照値は、低周波音によるとと思われる苦情に対処するためのものであり、対策目標値、環境アセスメントの環境保全目標値、作業環境のガイドラインなどとして策定したものではない。」環境省もまた、低周波音健康被害の問題をはじめから事業者保護の立場で被害者を切り捨てて方向で考えているのである。

以上

汐見文隆医師著作一覧

- 1、「左脳受容説」－低周波音被害の謎を追う－（ロシナンテ社）
- 2、「低周波音症候群」－聞こえない騒音の被害を問う－（アットワークス社）
- 3、「わかったら地獄」－低周波音被害者の悲惨－（低周波騒音問題研究会）
- 4、「隠された健康被害」－低周波音公害の真実－（かもがわ出版）
- 5、「道路公害と低周波音」（晩聲社）
- 6、「低周波公害のはなし」（晩聲社）
- 7、「低周波音症候群を語る」－環境省”参照値”の迷妄－
- 8、「聞こえない音が人間を襲う」－低周波音による住民被害を追って－
（ロシナンテ社 月刊「むすぶ」No 4 5 2 掲載）

※風車騒音・低周波音被害に関する著作

- 1、「風力発電はこれでよいのか」－住民を襲う超低周波空気振動－
（ロシナンテ社 月刊「むすぶ」No 4 4 8 掲載）

低周波音問題の変遷と計測値

「低周波音問題対応の手引書」の公表にあたって

“2004 年 6 月 22 日 環境省環境管理局大気生活環境室

○手引策定の背景

近年、低レベルの低周波音に関する苦情が見受けられる。これらの苦情の多くは暗騒音が小さい静かな地域の家屋内において発生しており、すでに公表している「低周波音の測定方法に関するマニュアル」や「低周波音対策事例集」に記されている方法では対応できないケースも多くなっています。主な発生源は工場、作業場、店舗、近隣の家屋などに設置された設備機器等で、家屋内で観測される低周波音・騒音は **20～200Hz** 程度の周波数域に**主要周波数成分を持つもの**が多くみられます。

環境省は、このような苦情を的確に対応するため、(社)日本騒音制御工学会に委託し、同学会において平成 14 年 8 月学識経験者等からなる低周波音対策検討調査委員会が設置され、その対応について検討してきました。このたび、その結果が別途のように、固定発生源の低周波音問題対応のための「手引」、「評価指針」、「評価指針の解説」としてまとめられました。このなかで、従来の手法では対応の難しかった低レベルの低周波音に関する苦情に対処するための**参照値**が提案されました。“

とあるが、

ここでの考察の対象となる主な周波数は、**20～200Hz** である。

低周波音の測定方法に関するマニュアル

“2. 3 低周波音の卓越周波数と苦情内容

これまでの研究結果によれば、揺れやすい建具の場合、20Hz 以下では人が感ずるよりも低い音圧レベルでがたつくことがわかっている。実際の苦情についても同様な傾向があるかどうかを調べるため、既存の文献に掲載された事例の中から、苦情内容と低周波音の周波数特性が記載されているものについて、低周波音の卓越周波数と苦情内容を整理した(表-2.1 参照)文献にとりあげられた低周波音の苦情は物的苦情が多数を占めている。苦情発生時の低周波音の卓越周波数はおおよそ 3～50Hz の範囲に分布している。苦情内容別にみると、物的苦情のほとんどは「建具のがたつき」によるものである。物的苦情は、20Hz 以上の可聴域でがたつきが発生している例もみられるが、ほとんどの場合可聴域以下の周波数域で発生している。心理的・生理的苦情は「気分が悪い」、「発声音がうるさい」といったものであるが、苦情発生時の低周波音はいずれも可聴域の低周波音成分が卓越している。“

“5.1.1 測定量

(1) 低周波音の感覚及び睡眠への影響に関する評価に用いる測定量

超低周波音の感覚及び睡眠への影響に関しては、G 特性音圧レベルを測定する。

G 特性を持たない低周波音圧レベル計を用いる場合には、実時間周波数分析器等を用いて 1/3 オクターブバンドで周波数分析を行い、周波数分析結果に G 特性補正值(表-1.1 参照)を加えた後、エネルギー加算して G 特性音圧レベルを計算で求めてもよい。なお、衝撃性の超低周波音の場合は、オクターブバンド音圧レベルから G 特性音圧レベルを求めるのが望ましい。G 特性音圧レベルの計算例を表-5.1 に示す。

また、必要に応じて低周波音の周波数分析を行い、1/3 オクターブバンド音圧レベル(衝撃性の超低周波音の場合は、オクターブバンド音圧レベル)を測定する。

(2) 低周波音の建具等のがたつきに関する評価に用いる測定量

低周波音の建具等のがたつきに関する評価に関連する測定は、実時間周波数分析器等を用いて低周波音の周波数分析を行い、1/3 オクターブバンド中心周波数 **1～50Hz** の 1/3 オクターブバンド音圧レベルを測定する。

(3) 低周波音の圧迫感・振動感に関する評価に用いる測定量

低周波音の圧迫感・振動感に関する評価に関連する測定は、実時間周波数分析器等を用いて、1/3 オクターブバンド中心周波数 **1～80Hz** の 1/3 オクターブバンド音圧レベルを測定する。“とある。

1/3 オクターブ解析での中心周波数は、1～50Hz と 1～80Hz であり、主な低周波音の音源としては、**20～200Hz** 程度の周波数域に**主要周波数成分を持つもの**が多かったことになる。

その中で、参照値が提案された。

さらに、風車音に関しても

“ 4. [低周波音防止技術の概要](#)

4.1.5 風車

風車の超低周波音の発生原理は基本的には送風機のいわゆる回転音と呼ばれるものと似ている。大型発電用風車の場合は、羽根の枚数が少なく、回転数も小さいために正常運転でも超低周波音を発生することがある。

その基本周波数 f (Hz) は、翼の回転数を R (rpm)、翼枚数を Z (枚) とすると

$$f = RZ/60 \text{ (Hz)}$$

で与えられ、この基本周波数とその高次の周波数が卓越する。

大型発電用風車の場合は、一般に翼枚数は 1～3 枚 (3 枚が主)、回転数は 30～60 (rpm)

程度であり、基本周波数は数 Hz 以下になる。“

とあり、数 Hz とされている。

これに合わせて、計測するのは、1～80Hz に対する G 特性音圧レベルの値と、1～50Hz または 1～80Hz の 1/3 オクターブバンド音圧レベルである。

この様な背景があって、ガタツキ閾値は、**5Hz** 以上で定義されている。

影響を評価するための数値は、対象となるものの特徴に合わせて選ぶことになる。

大型風車では、 $f=RZ/60\text{Hz}$ とする時に、 $f=0.5\text{Hz}$ 程度になる。卓越した音圧を持つ周波数成分が、 $f/3$ 、 $2f/3$ 、 f 、 $2f$ 、 $3f$ 、 \dots 、 Hz となることは、風車音が発生する仕組みと、風車音の計測結果から分かる。

精密騒音計 NL-62 のオプション

4.3. FFT 分析プログラム

FFT 分析に加えメインチャンネルのオールパス値を測定する (図 6)。分析周波数範囲は 20 kHz でスペクトルは 8,000 ライン (フレーム時間 400 ms、周波数分解能 2.5 Hz) である。時間窓はレクタングラ、ハニングを用意している。また測定結果のレベルの高い上位 20 ラインの周波数とレベル値をリスト表示する機能を有する。

であるが、

周波数分解能が 2.5Hz では、 $f/3$ 、 $2f/3$ 、 f 、 $2f$ 、 $3f$ 、 \dots 、 Hz は、 $f=0.5$ の時は、0.17、0.33、0.5、1、2、3、 \dots 、 Hz となるが、 $0.17+2.5=2.67$ となり、0.17、0.33、1、2Hz の区別ができない。区別して計算するには、0.01Hz 程度の周波数分解能が必要です。これらのピーク値が分離できなければ、風車音の発生する仕組

みは分からない。

G 特性音圧レベルの問題点

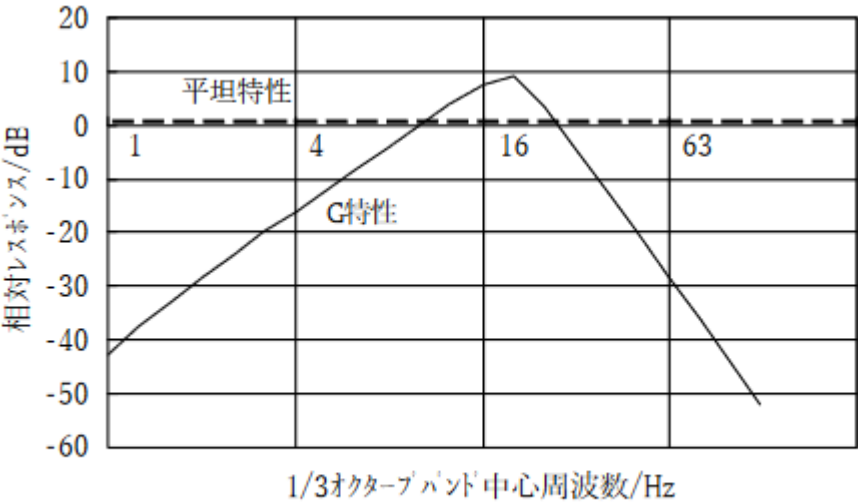


図-1.1 低周波音の周波数補正特性

表-1.1 基準周波数レスポンス及び許容差

中心周波数/Hz	平坦特性		G特性	
	基準レスポンス/dB	許容差/dB	基準レスポンス/dB	許容差/dB
1	0	±3	-43	±3
1.25	0	±3	-37.5	±3
1.6	0	±3	-32.6	±3
2	0	±2	-28.3	±2
2.5	0	±2	-24.1	±2
3.15	0	±1.5	-20	±1.5
4	0	±1	-16	±1
5	0	±1	-12	±1
6.3	0	±1	-8	±1
8	0	±1	-4	±1
10	0	±1	0	±1
12.5	0	±1	4	±1
16	0	±1	7.7	±1
20	0	±1	9	±1
25	0	±1	3.7	±1
31.5	0	±1	-4	±1
40	0	±1	-12	±1
50	0	±1	-20	±1
63	0	±1	-28	±1
80	0	±1.5	-36	±1.5

これは、0.25Hz や 0.5Hz の音は評価対象外です。

なお、ISO7196 では、中心周波数は 0.25～315H z になっているので、1/3 オクターブ解析はきちんと計測出来れば、少し役に立つが、G 特性音圧レベルの値は、それほど役には立ちません。

ただし、F F Tでの周波数分解能が 2.5H z では、 $0.25+2.5=2.75$ H z となるので、0.25, 0.315, 0.4, 0.5, 0.8, 1.00, 1.25, 1.6, 2.0, 2.5H z での数値は分離できない。

0.25H z と 0.315H z の間の音圧を詳しく調べるには、周波数分解能を 0.01H z 程度に上げる必要がある。これが出来なければ、I S O 7 1 9 6 に従った形での 1/3 オクターブ解析は出来ないのです。

(3) G 特性

0-315Hz の超低周波音に対して A 特性での重みづけを真似た周波数補正特性で、重みについては [ISO7196-1995](#) で 0.25～315Hz の範囲に対して規定されている。

Table 2 — Nominal frequency response			
Nominal one-third-octave frequency Hz	Relative response dB		
0,25	− 88,0	4,0	− 16,0
0,315	− 80,0	5,0	− 12,0
0,4	− 72,1	6,3	− 8,0
0,5	− 64,3	8,0	− 4,0
0,63	− 56,6	10,0	0,0
0,8	− 49,5	12,5	4,0
1,00	− 43,0	16,0	7,7
1,25	− 37,5	20,0	9,0
1,6	− 32,6	25,0	3,7
2,0	− 28,3	31,5	− 4,0
2,5	− 24,1	40	− 12,0
3,15	− 20,0	50	− 20,0
		63	− 28,0
		80	− 36,0
		100	− 44,0
		125	− 52,0
		160	− 60,0
		200	− 68,0
		250	− 76,0
		315	− 84,0

0.5Hz では、− 64.3 d B、1Hz では、− 43.0 d B の重みづけになっている。

G 特性音圧レベルの問題点

ある企業が、住民説明会で次の資料を配りました。

G 特性音圧レベルの予測値です。

予測地点	現況値	予測値	建設の影響による増分	参考値
一般①	68	68	0	100
一般②	60	61	1	100
一般③	58	64	6	100
一般④	54	63	9	100

モデルを作ってみました。

	0.5Hz成分	1 Hz成分	1 Hz帯域騒音レベル d B	一般① 20Hz音源音 圧Pa	一般② 20Hz音源音 圧Pa	一般③ 20Hz音源音 圧Pa	一般④ 20Hz音源音 圧Pa
フィルタ前音圧Pa	0.4	0.5		0.015	0.006	0.0048	0.003
フィルタ前騒音レベル d B	86.02059991	87.9588		57.50122527	49.54242509	47.60422483	43.52182518
フィルタ後音圧Pa				0.015	0.006	0.0048	0.003
フィルタ後騒音レベル d B	86.02059991	87.9588		57.50122527	49.54242509	47.60422483	43.52182518
G特性重み付け	-64.3	-43		10	10	10	10
G特性重み付け後	21.72059991	44.9588	44.97935605	67.50122527	59.54242509	57.60422483	53.52182518
全体騒音レベル	LA=10*log10(10^(L1/10)+10^(L20/10))			67.52545704	59.69170185	57.83526848	54.09041341

四捨五入して現況値になる様にしています。

20Hz の音圧を変化させて、予測値になる様にしました。

	0.5Hz成分	1 Hz成分	1 Hz帯域騒音レベル d B	20Hz音源音 圧Pa	20Hz音源音 圧Pa	20Hz音源音 圧Pa	20Hz音源音 圧Pa
フィルタ前音圧Pa	0.4	0.5		0.0168	0.0074	0.0105	0.0093
フィルタ前騒音レベル d B	86.02059991	87.9588		58.48558572	51.36403448	54.40318607	53.34905906
フィルタ後音圧Pa				0.0168	0.0074	0.0105	0.0093
フィルタ後騒音レベル d B	86.02059991	87.9588		58.48558572	51.36403448	54.40318607	53.34905906
G特性重み付け	-64.3	-43		10	10	10	10
G特性重み付け後	21.72059991	44.9588	44.97935605	68.48558572	61.36403448	64.40318607	63.34905906
全体騒音レベル	LA=10*log10(10^(L1/10)+10^(L20/10))			68.50491406	61.46274683	64.4524959	63.41181752

20Hz の成分は、ほんの少し増加すると、予測値になってします。

1Hz の成分を変化させてみます。

	0.5Hz成分	1 Hz成分	1 Hz帯域騒音レベル d B	20Hz音源音圧Pa	20Hz音源音圧Pa	20Hz音源音圧Pa	20Hz音源音圧Pa
フィルタ前音圧Pa	0.4	3.4		0.015	0.006	0.0048	0.003
フィルタ前騒音レベル d B	86.02059991	104.609		57.50122527	49.54242509	47.60422483	43.52182518
フィルタ後音圧Pa				0.015	0.006	0.0048	0.003
フィルタ後騒音レベル d B	86.02059991	104.609		57.50122527	49.54242509	47.60422483	43.52182518
G特性重み付け	-64.3	-43		10	10	10	10
G特性重み付け後	21.72059991	61.60898	61.60942401	67.50122527	59.54242509	57.60422483	53.52182518
全体騒音レベル	LA=10*log10(10^(L1/10)+10^(L20/10))			68.49639252	63.70805306	63.06334882	62.23646404

0.5Pa から 3.4Pa に変化させると、ほぼ予測値の中に納まります。（音圧は 7 倍です。）

0.5Hz 成分を変化させます。

	0.5Hz成分	1 Hz成分	1 Hz帯域騒音レベル d B	20Hz音源音圧Pa	20Hz音源音圧Pa	20Hz音源音圧Pa	20Hz音源音圧Pa
フィルタ前音圧Pa	39	0.5		0.015	0.006	0.0048	0.003
フィルタ前騒音レベル d B	125.8006922	87.9588		57.50122527	49.54242509	47.60422483	43.52182518
フィルタ後音圧Pa				0.015	0.006	0.0048	0.003
フィルタ後騒音レベル d B	125.8006922	87.9588		57.50122527	49.54242509	47.60422483	43.52182518
G特性重み付け	-64.3	-43		10	10	10	10
G特性重み付け後	61.50069223	44.9588	61.59593332	67.50122527	59.54242509	57.60422483	53.52182518
全体騒音レベル	LA=10*log10(10^(L1/10)+10^(L20/10))			68.49363321	63.6997371	63.05370055	62.22478951

0.4Pa から 39Pa まで変化させても、予測の範囲内です。（音圧は 98 倍です。）

これは、G 特性での重みづけが、0.5Hz では-64.3 d B、1Hz では-43 d B、20Hz では+10 d B となっているからです。

1Hz 以下の成分がかなり大きくなっても予測値に納まります。G 特性音圧レベルの数値からは、頭痛や圧迫感の原因となる、最大音圧の部分は把握できないのです。計算の途中で、ほぼ 0 として扱われるのです。

頭痛や圧迫感との関連性は認められなくなるのです。

大型化する風車では、0.5Hz での音圧が特に高くなるのですが、計算上は、音圧が $39/0.4=97.5$ 倍になっても、G 特性音圧レベルの値は変化しないのです。被害の原因を隠蔽してしまうのです。

風車音での低周波に関しては、G 特性音圧レベルの数値と、1Hz 以上での 1/3 オクターブ解析が使われてきた。最近ではこれを止めて A 特性音圧レベル数値だけで議論しようとする流れになっている。

これでは、風車音のエネルギーの 7% によって影響を評価することになる。さらに、人間の感覚器官を聴覚に限定することになる。

風車音の影響は、アノイアンス（不快感）とラウドネス（うるささ）の面から評価されてきた、ラウドネス（うるささ）を評価する数値としては A 特性音圧レベル（騒音レベル）が適切であるが、アノイアンス（不快感）を評価する数値としては不適切である。

理由は、交通騒音と風車音では、同一の A 特性音圧レベルの値に対して、“非常に不快”と感じる人の割合に大きな違いがあるからです。

・平成22年、環境省の調査

風力発電所に係る騒音・低周波音に関する問題の発生状況には、

“【風力発電所の現地調査のうち、騒音・低周波音に関する主な状況】

- ・ 建設前に実施した環境影響評価における予測結果よりも、実際の騒音レベルの方が大きい事例があった。
- ・ 風車から離れている住民（1km 程度）から、眠れない等の苦情が寄せられている事例があった。
- ・ 騒音の環境基準を満たしている地点からも苦情が生じている事例があった。
- ・ 騒音対策として、風車の夜間停止や出力抑制、苦情者宅での騒音対策工事（二重サッシ、エアコンの設置）の実施や、風車に高油膜性ギアオイルを取り付けた事例があった。

- ・ また、風車音と他の騒音源からの同等レベルの騒音を比較した場合、不快に感じる人の割合は風車音の方が高い⁵。

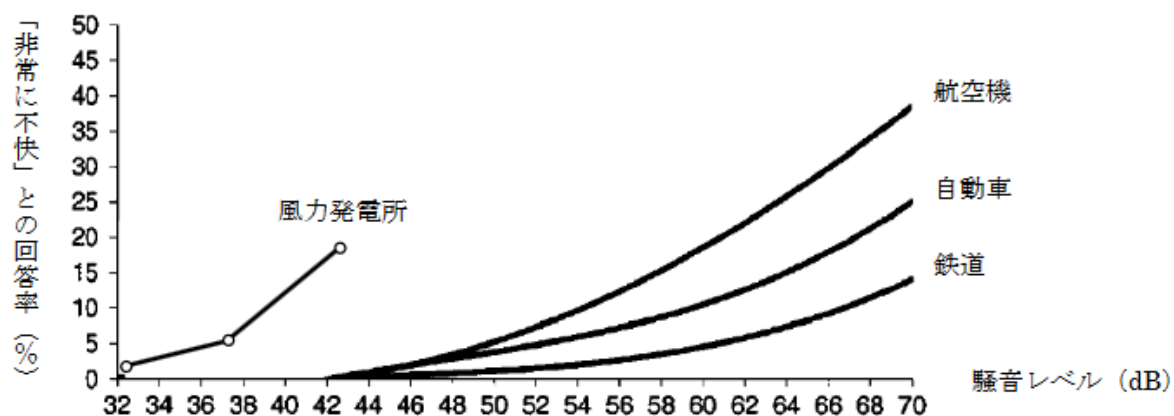


図8. 「非常に不快」との回答率と各種の騒音源からの騒音レベルの関係

（脚注3及び5の文献より環境省作成）

上のグラフは環境省が昔作ったグラフですが、A 特性音圧レベルの値が 42 dB のとき、交通騒音ではアノイアンス（不快感）を覚える人は 0% ですが、風車音の場合は 20% 程度の人が“非常に不快”と感じるのである。これでは安眠出来ないのは当然です。

ゆっくりとした圧力変動は、圧迫感として感じるが、音としては感じない。例えば、海に潜れば、外耳道に残っている空気の圧力は大きくなるが、大きな音がすると感じる人はほとんどいない。大きな音を認識で

きなくても、体に掛かる圧力は認識できる。

風車の振動が地中伝搬として伝わり、床を振動させれば、目が覚める。これは刺激を音として感じたわけではないのに、睡眠が妨害されることを意味する。

風車の、航空障害灯の光が窓から差し込めば、なかなか寝付けない。これは、A 特性音圧レベルの値とは関係が無い刺激であるが、睡眠を妨げる要素になっている。

風車音の評価を、A 特性音圧レベルの値に限定してはいけないのです。また、風車音の重要な部分を見逃すような、G 特性音圧レベルの値や 1Hz 以上での 1/3 オクターブ解析は、問題点を隠蔽する役割しか果たさないのです。

長期間継続する安眠妨害は、住民の健康を破壊する、地域社会を破壊する。交通事故は増える、仕事のミスは増える。子供は学校の授業中に寝る。体力が落ちて熱中症にかかりやすくなる。

生活できる場所ではなくなってしまいます。出て行った人は戻って来ません。引っ越しできる人は出てゆきます。出てゆけない人は、泣き寝入りすることになります。

風車音での A 特性音圧レベルの値と、交通騒音での A 特性音圧レベルの値が同じ時に、同じような被害が発生するならば、A 特性音圧レベルの値で被害状況を判断する事には意味があるが、アノイアンス（不快感）の面から考えれば、被害状況は全く違っている。アノイアンス（不快感）は、安眠妨害の要因となる。

ラウドネス（うるささ）の判断には、A 特性音圧レベルの値が適しているが、アノイアンス（不快感）や安眠妨害の程度を判断する値には向いていない。

しかも、A 特性音圧レベルの値を計算する時の対象となる周波数成分は 20Hz～20 kHz です。これだと、風車音のエネルギーの 7%だけを見て、その影響を判断すると言う無謀な企てになってしまいます。

大型風車の音では、0.5～1 Hz にエネルギーが集中しているので、上に書かれている G 特性音圧レベルの値と、1/3 オクターブ解析は、有効な手段とは言えません。

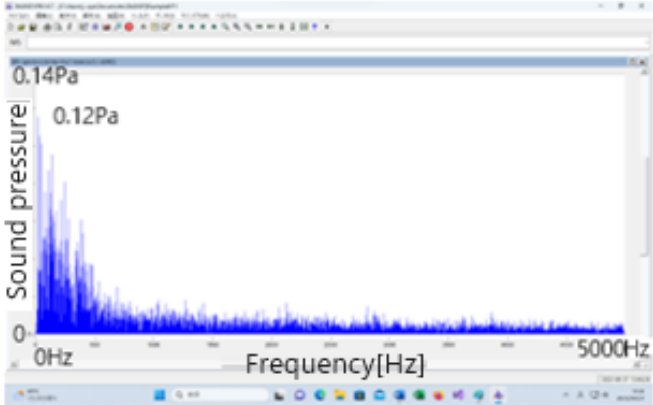
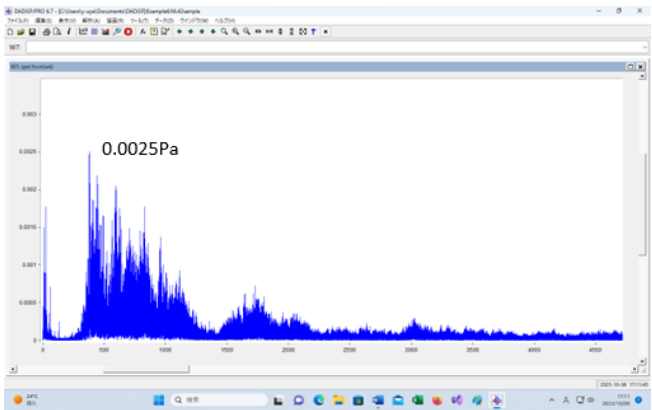
まして、A 特性音圧レベルの値を使うと言う発想は、風車音の被害を隠蔽しようとする企てに他なりません。

風車音の特徴はその離散的な周波数スペクトルとエネルギー分布にあります。

周波数スペクトル

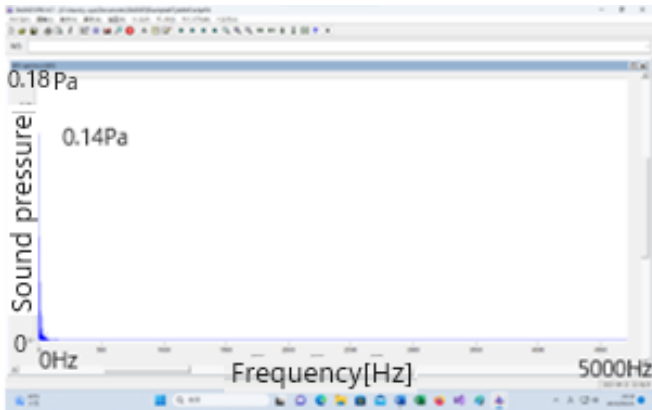
次のグラフは、音の成分を調べたものです。グラフが広がっていれば、低い周波数の成分から高い周波数の成分までいろいろ入っていることを意味しています。

交通騒音 (0～5 k Hz) ； 最大 0.0025[Pa] (379.4[Hz]) 製鉄所 (0～5 k Hz) ； 最大 0.12[Pa] (12Hz)



風車音 (0～5000Hz) ； 最大音圧 0.14[Pa] (0.8Hz)

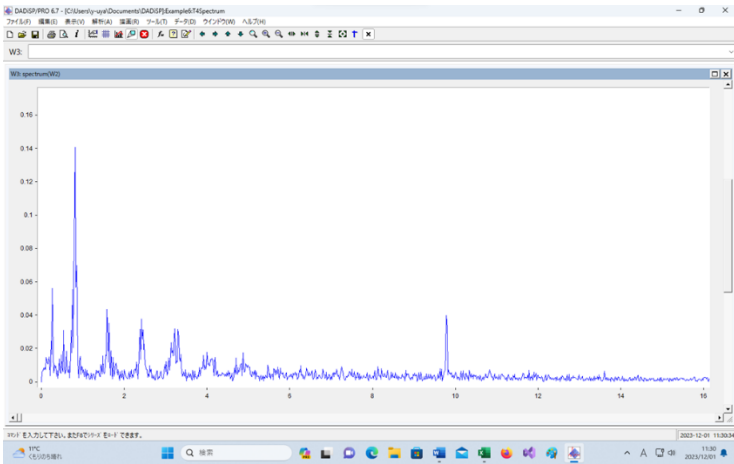
表 2．エネルギーの分布



エネルギー分布	0 ～ 20 H z	20 H z 以上
風車音	93%	7%
工場音	12%	88%
交通音	1%	99%

風車音は、左端の細い線で表されています。

実際の風車音で計測された音圧（パスカル）には、周波数の倍音構造があります。



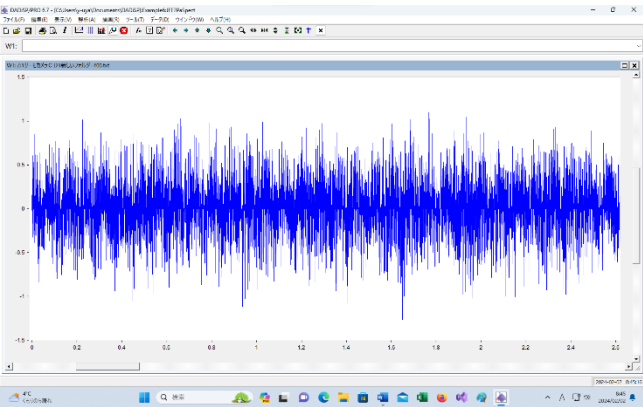
音圧 (パスカル) がピーク値となるときの周波数に、次のような規則性がある。

周波数	周波数/0.8167	音圧[Pa]
0.2667	0.3266	0.0560
0.5333	0.6530	0.0309
0.8167	1.0000	0.1405
1.5833	1.9387	0.0436
2.4167	2.9591	0.0377
3.2167	3.9387	0.0317
4.0000	4.8978	0.0177
4.8667	5.9590	0.0173
5.4667	6.6936	0.0101
6.2667	7.6732	0.0098

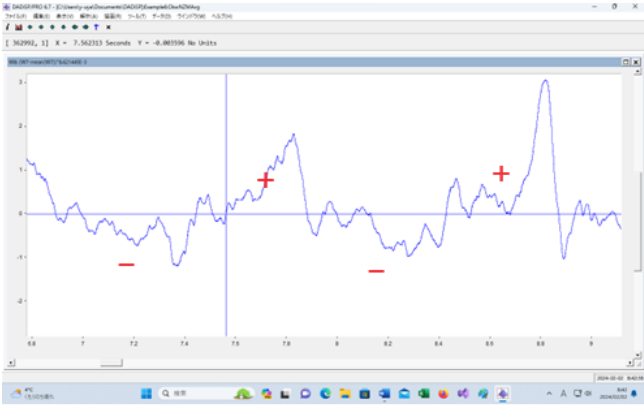
上のグラフの一番音圧が高い周波数 0.816Hz が、 $f = RZ/60$ に対応します。(R は 1 分間の回転数、Z は翼の枚数)。周波数が、 $f/3$ 、 $2f/3$ 、 f 、 $2f$ 、 $3f$ 、 \dots Hz の時に、音圧はピーク値を取ります。風車音が発生する仕組みを考えれば、必然的な結果です。

風車音の周波数特性は上のグラフにある様に、 $f=RZ/60\text{Hz}$ での音圧が特に高く、風速が増して音圧が高くなった時は、音圧の符号が、この周波数成分によって決定されます。

工場騒音の、2.6 秒間の波形



風車音の 2.2 秒間の波形



風速が大きい時は、人体の圧縮と膨張が、ゆっくりと繰り返されます。

風車音を受ける人間は、周波数 f に従った形の圧縮と膨張にさらされることになります。人間には気圧変動を感知する器官があるので、圧迫感によるアノイアンス（不快感）が発生します。これは睡眠を妨害します。

これまでに得られた知見④

風車騒音の人への影響

- これまでに国内外で得られた科学的知見を踏まえると、風車騒音が人の健康に直接的に影響を及ぼす可能性は低いと考えられる。ただし、風車騒音に含まれる振幅変調音や純音性成分等は、わずらわしさ(アノイアンス)を増加させる傾向がある。静かな環境では、風車騒音が35～40dBを超過すると、わずらわしさ(アノイアンス)の程度が上がり、睡眠への影響のリスクを増加させる可能性があることが示唆されている
- 風力発電施設から発生する超低周波音・低周波音と健康影響については、明らかな関連を示す知見は確認できなかった
- 景観のような視覚的な要素や経済的利益に関する事項等も、わずらわしさ(アノイアンス)の度合いを左右する

環境省水・大気環境局長

風力発電施設から発生する騒音に関する指針について

“これまでに国内外で得られた研究結果を踏まえると、風力発電施設から発生する騒音が人の健康に直接的に影響を及ぼす可能性は低いと考えられる。また、風力発電施設から発生する超低周波音・低周波音と健康影響については、明らかな関連を示す知見は確認できない。

ただし、風力発電施設から発生する騒音に含まれる振幅変調音や純音性成分等は、わずらわしさ（アノイアンス）を増加させる傾向がある。静かな環境では、風力発電施設から発生する騒音が 35～40dB を超過すると、わずらわしさ（アノイアンス）の程度が上がり、睡眠への影響のリスクを増加させる可能性があることが示唆されている。また、超低周波数領域の成分の音も含めた実験の結果、周波数重み付け特性として A 特性音圧レベルが音の大きさ（ラウドネス）の評価に適している。“

とあるが、

ラウドネスの評価には A 特性音圧レベルが適していても、アノイアンス（不快感）の評価には適していません。圧迫感による不快感に注目すれば、アノイアンス（不快感）に関連が深いのは、最大音圧だと考えられます。

これは、[電力中央研究所報告](#)には、

“音圧レベルとアノイアンス(※12)（不快さ）について調べた Møller の実験[2-18]によると、周波数が低い方が音圧レベルの上昇に対してアノイアンスが増加する割合が大きくなっている。

なお、Møller の実験では 18 人の正常な聴覚を持った被験者に対して行っている。各被験者は周波数・音圧レベルの異なるいくつかの純音を聞いたとき、不快さの割合を示す棒線上（両端に「全く不快に感じない

(not at all annoying)」、「非常に不快 (very annoying)」と記載されている)に印をつけることで主観的な不快さを回答している。

さらに、Subedi らの実験結果[2-19]によると、低周波音における音圧レベルと不快さの関係は音の周波数が固定した条件において、ほぼ比例関係を示すが、その比例定数は音の周波数によって変わっており、周波数が低いほど不快さは音圧レベルに対しても強く現れることが示されている。また、Subedi らは不快さと A 特性音圧レベルとの相関についても調べており、彼らの実験範囲において、不快さと A 特性音圧レベルは周波数に依存せず、ほぼ一定の相関を持つことが示されている。“

とあります。

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 の報告書 (p 14) には、不快感と A 特性音圧レベル (20Hz～) の関連を示す記述がある。

風車騒音とわずらわしさ (アノイアンス) との量・反応関係についても多くの研究がなされている。複数の報告により、同程度の音圧レベルにおいては、風車騒音は他の交通騒音よりもわずらわしさ (アノイアンス) を引き起こしやすいことが示唆されている。

表 1 の Kuwano らの研究により得られた、日本を対象とした、風車騒音と道路交通騒音を非常に不快であると感じた者の割合 (%HA) を図 7 に示す。この図によれば、非常に不快であるとの回答確率が 30% 程度となる騒音レベルは昼夜時間帯補正等価騒音レベル (Ldn) で 60dB 程度、20% 程度は 53dB 程度、10% 程度は 43dB 程度となる。

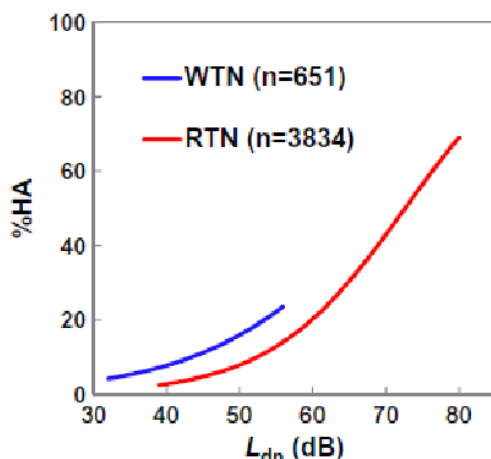


図 7 風車騒音 (WTN) と道路交通騒音 (RTN) の昼夜時間帯補正等価騒音レベル (Ldn)

※ と非常に不快と感じた者のパーセンテージ (%HA)

※ 風車騒音については、終日定常的に運転されていると仮定し、LAeq に 6dB を加算して Ldn を推計している。

なお、McCunney らは、多くの研究成果より、風車騒音と関連付けられるわずらわしさ (アノイアンス) との間は線形の関係が見られる傾向にあるが、わずらわしさ (アノイアンス) に関連する要因としては風車騒音は 9% から 13% の範囲の寄与にとどまり、景観への影響等、他の要因の寄与が大きいと考えられると報告している。

“同程度の音圧レベルにおいては、風車騒音 (20Hz 以上) は他の交通騒音 (20Hz 以上) よりもわずらわしさ (アノイアンス) を引き起こしやすいことが示唆されている。”

とありますが、

風車が見えなくても被害が出ます。

“南伊豆風車（被害）紀行（２）～承前”

“似たような証言は他の家でもあり、風車が山陰に隠れて見えない、1.5km くらい離れた家では、その見えない風車からの音は聞こえないのですが、回っているとき、ぴったり連動して住民が吐き気や胸の圧迫感、頭痛、耳鳴りなどに襲われていることが分かったそうです。

そのかたは、当初、見えない風車のことなど気にしていなかったのですが、昨年暮れから急に、そして、あまりに頻繁に気持ちが悪くなるので、体調がおかしくなる時間帯を記録していたところ、それが風車の稼働している時間とぴったり重なったのです。”

ということです。

風車が見えていても、風車が停止すれば被害は激減します。

石狩風車の低周波音測定結果と健康被害 元札幌医科大学講師・山田大邦氏の論文より 2018年2月8日には、

“2007年末、東伊豆の別荘地では1500基×10基の風力発電が運転を始めた直後から、住民のなかで健康被害が続出した。この因果関係を調べるため、事故で風車が停止しているとき、団地自治会が独自に疫学調査を実施した【表1】。不眠、血圧、胸・腹・歯・鼻・耳痛などの症状が、風車が停止することで大きく改善したことがわかる。

表1 東伊豆での風車停止中の被害改善調査（％）

風車からの距離(m)	500m未満	500～700m未満	700～900m未満	900m以上	生理的要素
不眠	71	27	13	0	距離が離れると改善
血圧	18	15	0	0	距離が離れると改善
リンパ腺の腫れ	6	2	0	0	距離が離れると改善
胸腹歯耳鼻痛	41	39	25	0	距離が離れると改善
煩い・イライラ	59	61	75	0	心理的要素も
頭痛・肩こり	41	39	81	33	心理的要素も
全体で改善	94	76	94	33	心理的要素も

注：事故停止中、住民121人中の77人が回答した。改善63人（改善率82％）。調査結果に転居（10戸）避難者は含まない。出典：三井大林熱川自治会（2009）。 ←

この結果を受けて住民が動き、今後は夜間に住宅直近の風車3基を停止すること、次に近い風車2基の回転数を4割減らすこと—という内容の協定を、自治会と事業者と東伊豆町の三者で結んだという。これによって睡眠障害は7割減った。ただし、それでも耐えられず転居した家族もいる。“とあります。

“風力発電所による近隣住民への影響に関する社会調査

本巢 芽美*1 丸山 康司 *2 “

でのアンケート結果では

既存の風力発電所と新規計画を想定した風力発電所の賛否について尋ねた

実際に風車音の影響を経験した人は、さらに新しく風車を建設する事に対して、どのように考えるかという観点からの資料が次のものです。

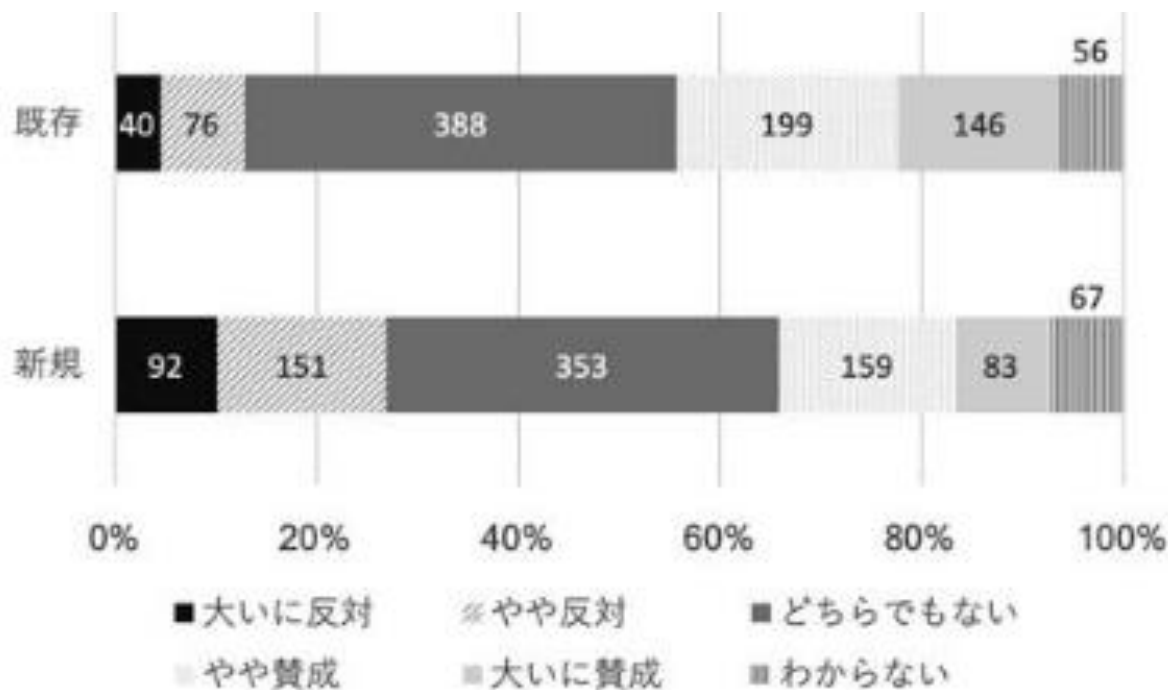


図5 風力発電所に対する地域住民の賛否

反対する人は2倍になり、賛成する人は、3割程度減少しています。

過去の建設時における業者の対応は、過去の出来事であり変化しないのですから、何が原因で賛成や反対の割合が変化したのかを調べる必要があります。

社会的な意義を理解し、風車音にも慣れた人なのに、新規の建設に対する反対が増えた原因は何かを考える必要があります。

山形県酒田市の市民の意見を確認しておきましょう。

アンケート名:酒田市広報 11 月特集「風のまち酒田の未来を考えるーカーボンニュートラルの実現に向けてー」質問5回答には、

① 今陸上風車から約2キロのところに住んでいますが、騒音で眠れない、起こされる日が年に何十日もあります。中心市街地から近い場所に建てることは公害となる可能性があります問題です。

大型の風車の音はどこまで聞こえますか。聞こえないくらい離すべきです。騒音規制ギリギリでは被害が出ているので、聞こえない位置まで離さなければなりません。促進区域の時点で遠くへ設定しなければ、事業者公募で否定できませんよね。事業者は何かと理由をつけて対応しません。結局市役所にクレームが行くのではないですか。一度決めたことは後戻りできないのでしょうか。今遠くへ設定すべきと考えます。もちろん地球温暖化対策は大切ですが、普通の住宅街に住んでいる人に健康への影響を出してまで推し進めるものではないのではないのでしょうか。苦しんでいる人を切り捨てないよう、切にお願いします。

② 洋上風力発電について、酒田市の特性からバードストライクを予防するという観点からも垂直軸型マグナム式風力発電を導入するのはいかがでしょうか。騒音低減、強風耐性の向上にも繋がり、また日本の技術／製造という意味でも市民の納得や信頼も得られやすいのではと考えます。供給の安定という意味で自然エネルギーは発展途上なのだと思いますが、海側の土地だからこそ得られる半永久的なエネルギーをうまく活用し、環境負荷や資源消費を軽減していけるよう、今後の発展を期待しております。

とあります。

風車音による被害は、A 特性音圧レベルの値で表現されるラウドネス（“うるさい”）という被害とは別の面があります。様々な不快感が生じています。この様な不快感は、交通騒音で生じることは極めて少ない。

アノイアンス（不快感）の内容については、
[鳥取県における発電用風車の騒音に係る調査報告](#) 十倉 毅・山本 和季・矢野 大地
には、

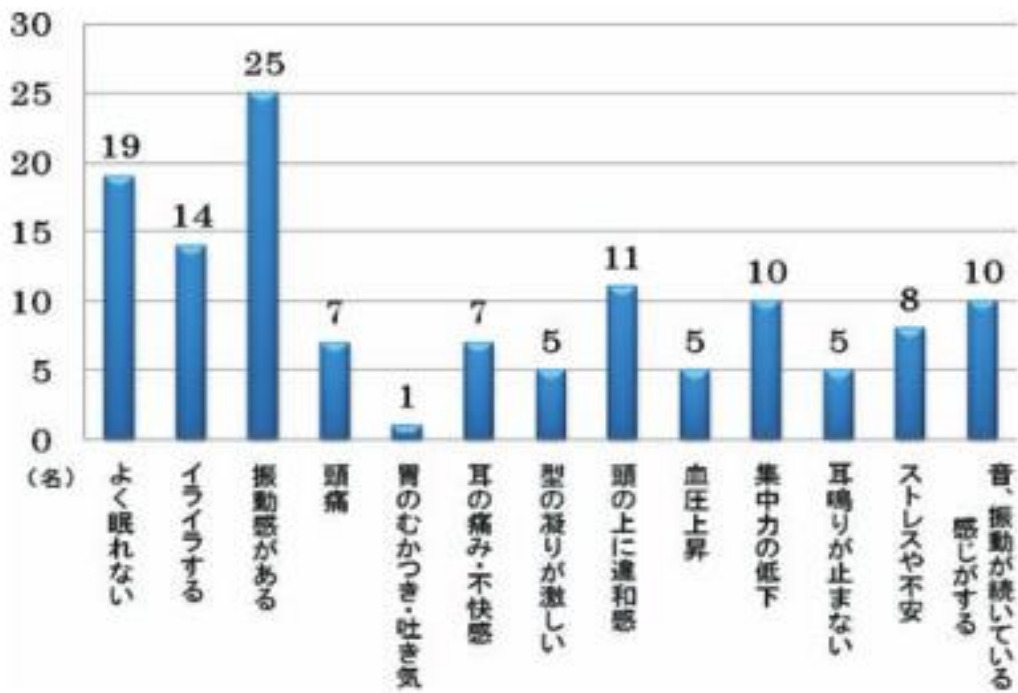


図2 苦情の訴え（「Q5」、複数回答を含む）

とあり、
他の資料では、低周波音による被害、

6. 低周波音苦情の分類

低周波音の苦情は人に関する苦情（心理的苦情、生理的苦情）と建物等に対する苦情（物的苦情）に大きく分けられる。低周波音苦情の分類を表-3に示す。

表-3 低周波音苦情の分類

心理的苦情	睡眠妨害、気分のいらいら
生理的苦情	頭痛、耳なり、吐き気、胸や腹の圧迫感
物的苦情	家具、建具(戸、障子、窓ガラス等)の振動、置物の移動、瓦のずれ

が書かれています。これは目をつむって風車を見ないようにしても、無くなることはありません。

もし、風車音の評価に A 特性音圧レベルを使うことが適切ならば、同じ A 特性音圧レベルの値に対して同

程度の被害や同じ種類の被害が発生しなくてはなりません。交通騒音の場合には、低周波音特有の苦情が、ほとんど出ない理由も説明する必要があります。これには、風車音の正確な分析が必要になるのです。

20Hz 以下の超低周波音は、聴覚閾値を下回っていても、感覚閾値を下回っているわけではありません。もちろん知覚閾値を下回っているのでもありません。

人間には気圧変動を感じる感覚器官があります。

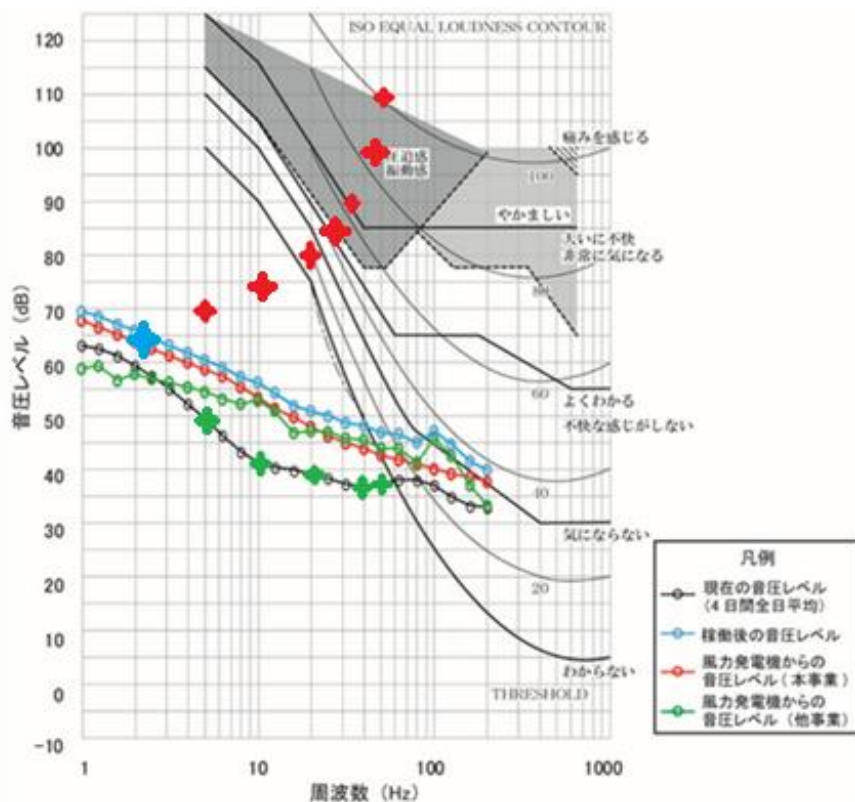
気圧の変化を感じる場所が内耳にあった —気象病や天気痛の治療法応用に期待—

(佐藤純教授らの共同研究グループ)【2019 年 1 月 29 日】

“プレスリリース

鳥類には気圧を感じる器官が耳に存在することが分かっています。彼らはこの能力を使って、自分の飛んでいる高度を知り、雨が降るかどうかなどの気象変化を予見し行動していると考えられています。一方、ほ乳類に気圧を感じる能力があるかどうか明らかになっていませんが、「猫が顔を洗うと雨が降る」などの言い伝えもあり、わたしたち人間においても、「天気が崩れると頭痛がする、ぜん息がでる」、「古傷が痛むので、明日雨が降るのが予知できる」など、臨床家の間ではよく知られた事実があることから、他の動物と同じように気圧の変化を感じている可能性があると言われてきました。この問題を慢性痛の治療の面から長年取り組んできた中部大学・生命健康科学部理学療法学科の佐藤純教授（愛知医科大学医学部客員教授）のグループは、愛知医科大学・医学部と日本獣医生命科学大学・獣医学部との共同研究により、マウスにも内耳の前庭器官に気圧の変化を感じる場所があることを、世界で初めて突き止めました。“

ガタツキ閾値に関しては、2Hz では、65 d B 程度がガタツキに関する感覚閾値になる。



さらに、[大型風車から発生した低周波振動の伝播に関する研究](#) 小野寺 英輝

に関しても考える必要がある。

そこには、

“研究成果の概要（和文）：大型風車の運転に伴って発生する地盤振動の伝播の様相に関して調べた。第一番目に行ったのは、振動の距離による変化を FFT による振動の周波数分析から明らかにし、その風車の立地する土質がその原因ではないかという仮説を得た。

次に、風車公害の進行の挙がっている地域で計測を実施し、付近住民の体感に関して、解的に説明を試みた。

一連の研究成果として、風車のアノイアンス問題は、空振に加えて地盤振動面からも解析を進めるべきではないかという示唆を得ることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで考慮されてこなかった、大型風車に起因する地盤振動が、昨今顕在化してきた風車周辺住民への健康被害の要因の一つではないかという事実を指摘している。

例えば、冬季は地盤が締まり、振動の減衰が少なく、夏・晴天時のアノイアンスが少ないことの説明、また、水田においてアノイアンスが十分に小さくなることに関しては、水と地盤の特性速度の差を表す音響インピーダンスの値が含水率とともに非線形に変化することによるのではないかということが示された。

このことは、今後の風車アノイアンス低減の一つの要素に関しての特性把握の基礎的知識となる。“と書かれている。

風車からの航空識別燈の光も睡眠を妨げる。この閾値は d B 単位では表現できないが、明るさも、風車による安眠妨害の感覚閾値として計測することが必要である。

様々な感覚器官で把握される風車被害を、知性で総合的に理解できるので、様々な感覚閾値の最小値が知覚閾値になる。それを表示するには、音の聴覚閾値（d B）の他に、音（1Hz）の圧迫感に関する閾値、振動での閾値(Gal)、光の明るさでの閾値（ルクス(lx)）が必要になる。

さらに、風車音では、超低周波音の領域に極めて高い音圧を持っている特別な周波数があることは、計測すればすぐに分かります。これは、圧迫感の原因そのものであり、風速が大きければ“頭痛”の原因にもなるのです。

風車音の特徴と“頭痛”

次のグラフは、音の成分を調べたものです。グラフが広がっていれば、低い周波数の成分から高い周波数の成分までいろいろ入っていることを意味しています。

図 1．交通騒音（リオン社前） 0 ～5000Hz

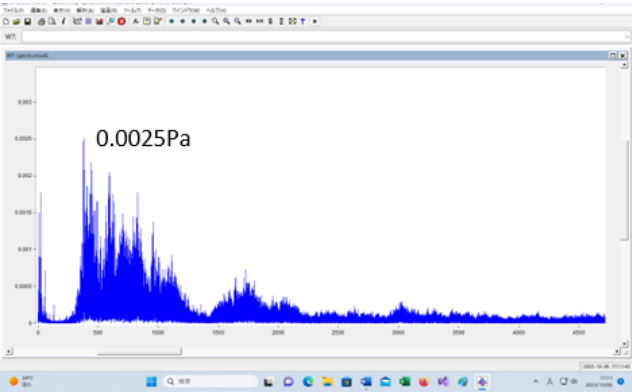


図 2．工場騒音（製鉄所内の音） 0 ～5000Hz

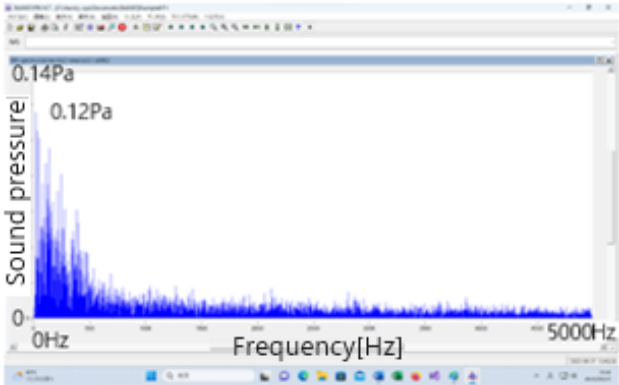


図 3．風車音（館山風の丘） 0 ～5000Hz

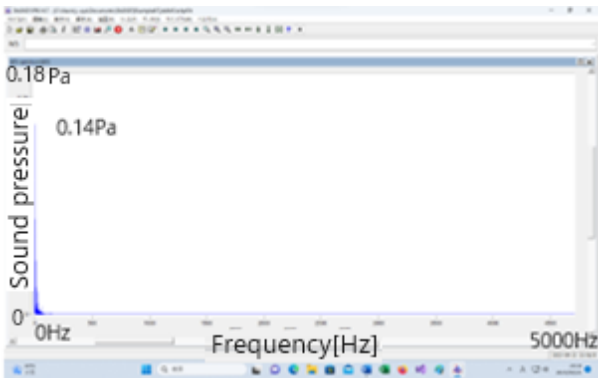


表 2．エネルギーの分布

エネルギー分布	0 ～20 H z	20 H z 以上
風車音	93%	7%
工場音	12%	88%
交通音	1%	99%

交通騒音や工場での音は、グラフが広がっていることから、いろいろな周波数成分が入っている広帯域の音ですが、風車音は左隅の 1 か所に集中しています。風車音の成分のほとんどが超低周波音と言われる 0 ～20H z の範囲に集中しています。

ISO7196 における“infrasound”の定義は、

3 Definitions

For the purpose of this International Standard. The following definitions apply.

3.1 infrasound: Sound of noise whose frequency spectrum lies mainly in the band from 1 Hz to 20 Hz.

となっている。

“infrasound”は、“1～20Hz の音波”ではなくて、“周波数スペクトルが主に 1Hz から 20Hz の帯域に入っている音”と定義されています。

まさに、風車音はこの性質を持っています。風車音こそが“infrasound”そのものなのです。

A 特性音圧レベルは、交通騒音の場合は音のエネルギーの 99%から計算される数値ですが、風車音の場合

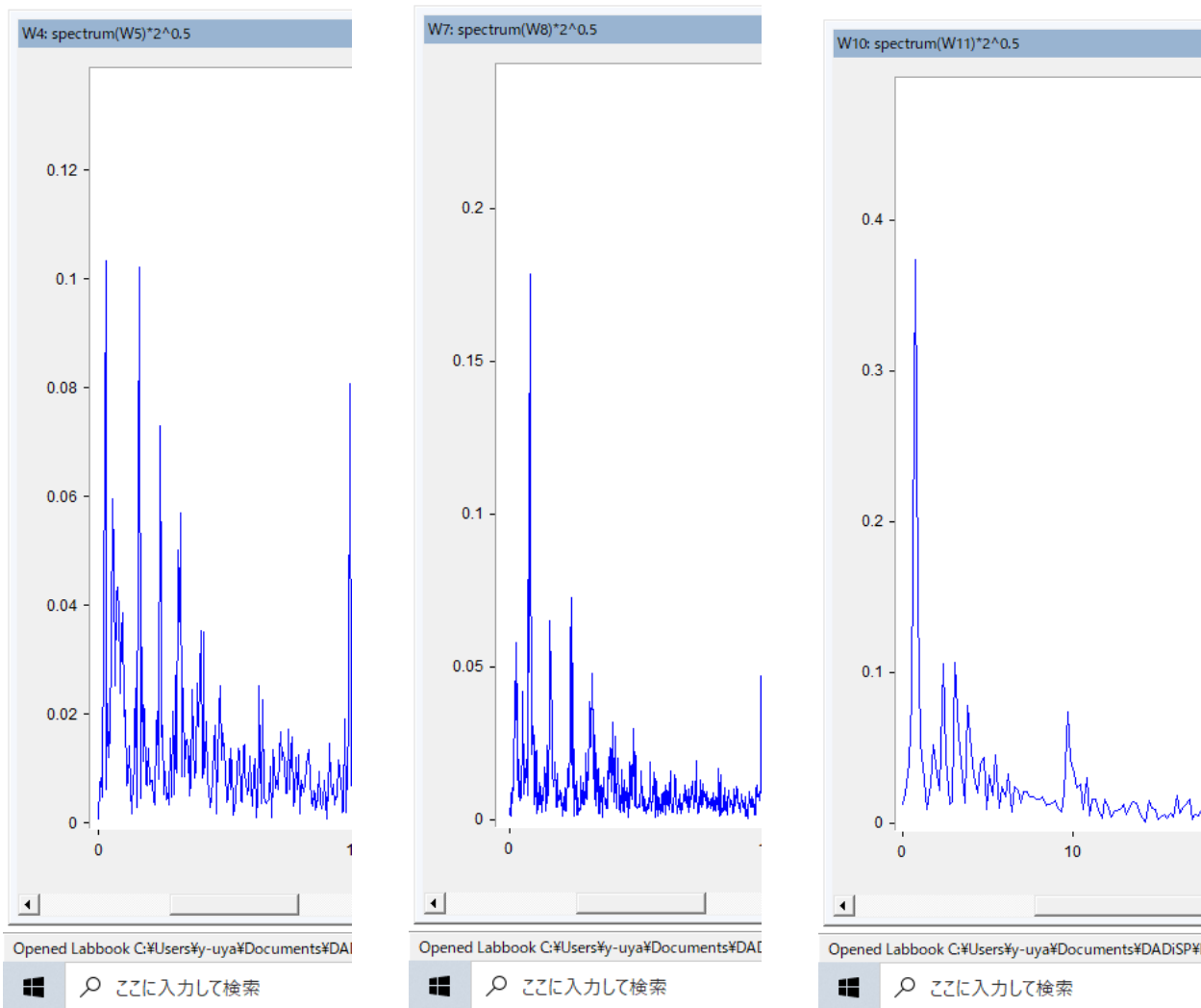
は音のエネルギーの 7%から計算される数値です。しかも最大音圧の部分を見逃しているのですから、圧迫感や頭痛の原因が不明なのは当然です。風車音のエネルギーの 93%を見逃している数値なのですから、風車音の影響を評価する数値にならないのは当然のことです。エネルギーの観点からすれば、風車音の問題は、超低周波音の問題そのもののようです。

音圧は、風速の変化で 2 倍程度になることがある。

揚力ベクトルの大きさは、風速の 2 乗に比例します。風速が 2 倍になれば、揚力ベクトルの大きさは 4 倍になります。

塔の側面の振幅も大きくなるので、風車音の音圧も大きくなるのです。周波数は 0.7Hz～0.9Hz の辺りで、かなり安定しているのですが、音圧はかなり変化します。

さて、音圧の変化は、次の様になっています。



0.104Pa

0.175Pa

0.37Pa

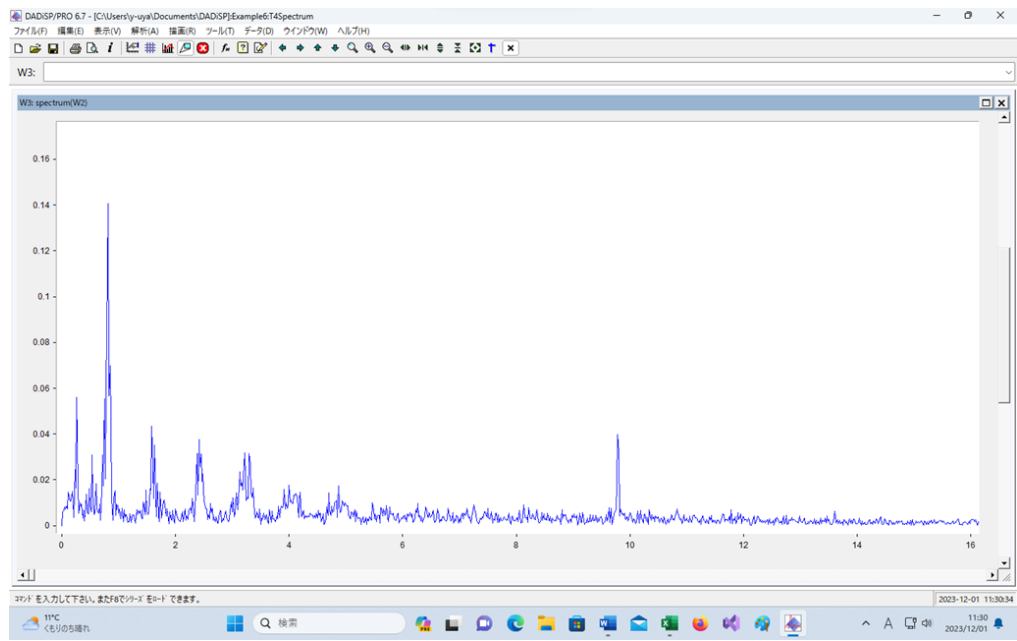
周波数スペクトルでの、0.8Hz 成分の音圧は平均すると 0.175Pa、弱いときは 0.104Pa、強いときは 0.37Pa です。強いときは、平均の 2 倍程度の音圧になっています。

平均して、0.175Pa の音圧で、A 特性音圧レベル (20Hz～) が評価されていて、指針値での限界にかなり近い場合において、1 時間に 1 回くらい、平均値の 2 倍以上の音圧になる状態が起きるのです。

これは、1 時間ごとに目覚まし時計が鳴るような状態に置かれると言う事です。いくら目覚まし時計が鳴っても、起きない人もいますが、普通の人目は目が覚めます。

そして、次の朝になり、子供は学校で居眠りできますが、大人は仕事です。車を運転する人もいますでしょう。事故でも起きたら、その責任は誰が取るのでしょうか？

実際の風車音で計測された音圧（パスカル）には、周波数の倍音構造があります。



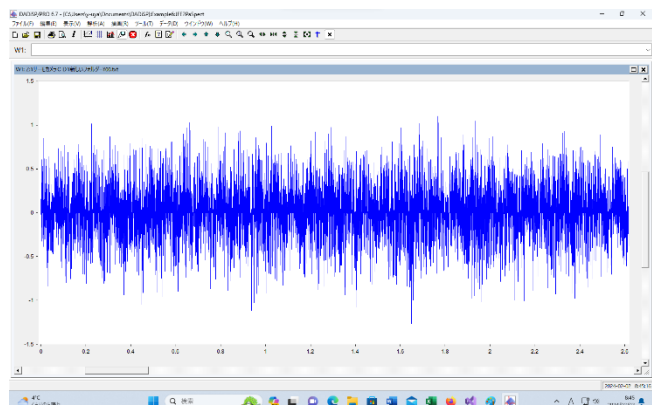
音圧（パスカル）がピーク値となるときの周波数に、次のような規則性がある。

周波数	周波数/0.8167	音圧[Pa]
0.2667	0.3266	0.0560
0.5333	0.6530	0.0309
0.8167	1.0000	0.1405
1.5833	1.9387	0.0436
2.4167	2.9591	0.0377
3.2167	3.9387	0.0317
4.0000	4.8978	0.0177
4.8667	5.9590	0.0173
5.4667	6.6936	0.0101
6.2667	7.6732	0.0098

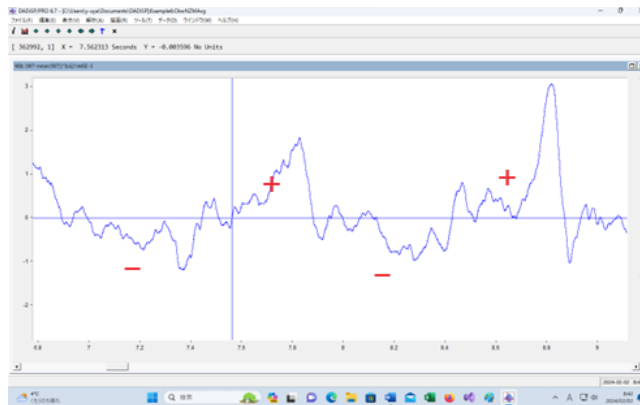
上のグラフの一番音圧が高い周波数 0.816Hz が、RZ/60 に対応します。（R は 1 分間の回転数、Z は翼の枚数）。他のピーク値の発生も必然的であり、明確な理由があります。

風車音の周波数特性は上のグラフにある様に、 $f=RZ/60\text{Hz}$ での音圧が特に高く、風速が増して音圧が高くなった時は、音圧の符号が、この周波数成分によって決定されます。

工場騒音の、2.6 秒間の波形

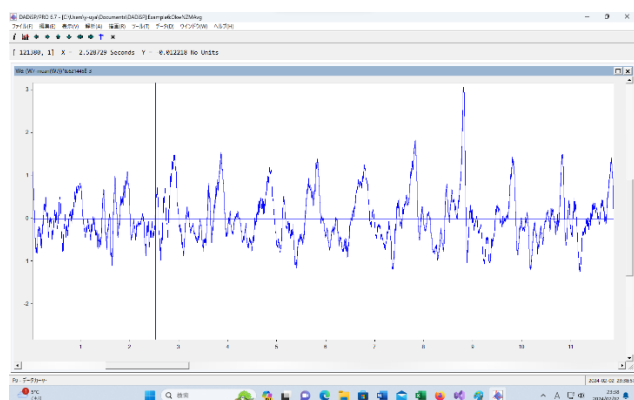


風車音の 2.2 秒間の波形

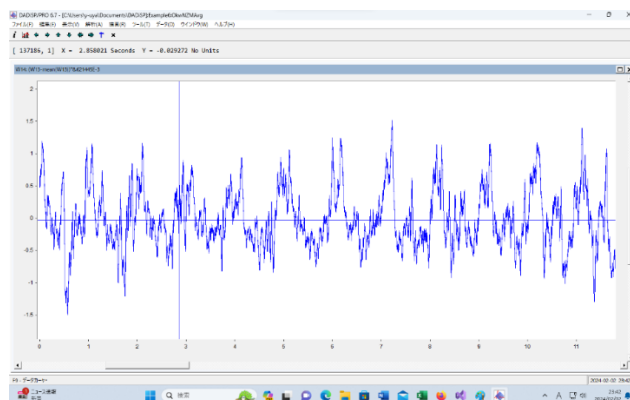


風速が大きい時は、人体の圧縮と膨張が、ゆっくりと繰り返されます。

音圧が高い（風が強い）ときの 12 秒間



音圧が低い（風が弱い）ときの 12 秒間



風が強い時の方が、音圧のプラス、マイナスがはっきりします。より強い形で、圧縮と膨張の過程が継続することになります。指向性があるので、この傾向は特定の方向に置いて強く現れます。

風が強い時は、 0.42Pa で 1Hz でした。風が弱い時は 0.15Pa で 0.8Hz でした。周波数の変化は小さいのですが、音圧の変化は大きいです。これから、多変量解析では、(PT=最大音圧*周期)の項目を設ければ良いことが分ります。

対象	周波数[Hz]	周期[S]	最大音圧	PT
車（強）	1	1	0.42	0.42
箱（中）	1	1	0.33	0.33
外（弱）	1	1	0.23	0.23
穏かな日	0.8	1.25	0.15	0.1875
JFE	12.5	0.08	0.096	0.00768
神社	1	1	0.01	0.01

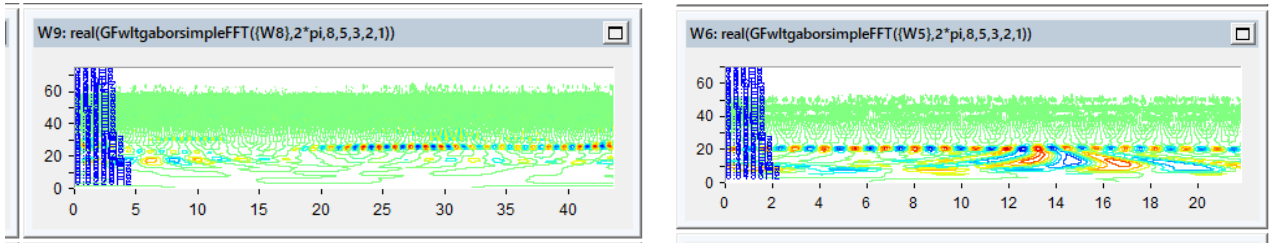
符号決定率=最大音圧/2番目の音圧

をかけた方がよさそうですが、ここでは保留しておきます。

さらに音響キャビテーションの影響を考えれば、体内に溶け込んでいる空気が析出して気体となる可能性が高くなるのは、風が強い時だという事になります。体内の気泡は、潜水病と同じですから、頭痛の原因になります。

風車音の指向性や風速の変化が激しい事から、条件を満たす時間は、普通は 20 秒程度ですが、風速、風向が安定している場合は、被害が大きくなると考えられます。

風車音の 2 分間の結果を並べて表示すれば、下のようになり、



0.8Hz 程度の周波数成分が、0.3 パスカル程度の強さで放出される状態が 100 秒程度継続することが分かります。共鳴や共振現象などを発生させ、寝ている人間を起こすには十分な継続時間です。

さらに、色が特に濃い部分は 20 秒程度継続します。この部分が継続すれば、高い音圧での影響を感知することになります。目が覚めるだけの影響ならば良いのですが、継続時間が長いと気泡発生の可能性が高くなります。

“泡のエンジニアリング” テクノシステム を参考にすれば、

1 1. 音場中の気泡の成長

圧力一定のもとでは、不凝縮ガスが過飽和でない限り、気泡は消滅する。これに対して、音響場の中に置かれた気泡では不足飽和状態でも、不凝縮ガスの析出による気泡の成長が見られる。この現象が音響キャビテーション発生の原因となり、また、液体中の溶存ガス除去促進にも利用される。

気泡への不凝縮ガス析出量は式(5.5.55)

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{4}{3}\pi R^3 \rho_g\right) = 4\pi R^2 D_{gL} \frac{\partial \rho_{gL}}{\partial r} \Big|_r \quad (2.5.55)$$

による。

液体中の濃度境界層厚さを δ_D とすれば、単位時期あたりのガス析出・溶解量は

$$\dot{m}_g \propto R^2 \times (\rho_{g\infty} - \rho_{g|W}) / \delta_D \quad (2.5.61)$$

となる。

これに踏まえて、図 2.5.6 に示す現象のメカニズムを説明する。

図 2.5.6



収縮時

$$p_g > p_{g0}$$

$$R < R_0$$

$$\delta_D > \delta_{D0}$$



平衡時

$$p_{g0}$$

$$R_0$$

$$\delta_{D0}$$



膨張時

$$p_g < p_{g0}$$

$$R > R_0$$

$$\delta_D < \delta_{D0}$$

まず、気泡表面液体の不凝縮ガス濃度 ρ_{gLW} はヘンリーの法則

$$\rho_{gLW} = \alpha p_g \quad (2.5.58)$$

にしたがって、収縮・膨張する圧力変動とともに、上昇・低下する。濃度が上昇する凝縮時には気泡内の不凝縮ガスが液体に溶解し、濃度が低下する膨張時にはガスは気泡へ析出する。

この際、気泡表面積は膨張時のほうが大きいため、**膨張・収縮の1サイクルで見るとわずかながら析出量が勝る**と考えられる。

音波の振動数が大きな場合には、液体内に溶けているガスの拡散が起こらないので、気泡の成長は鈍る。

振動数が小さい場合は、膨張したときは、液体内のガスが気泡内に析出し、気泡の周囲のガスの濃度が減少する。収縮が始まる前に液体内に溶け込んでいるガスの拡散によって濃度が元に戻る。

収縮によって、気泡内のガスが周囲の溶液に溶け込む。周囲の液体内に溶けているガスの濃度があまり下がっていないので溶け込む量は少なくなる。

この過程を繰り返して、**低周波の場合のほうが気泡は成長する**と考えられる。

次に、表面近傍液体中の不凝縮ガス濃度境界層は、膨張時には薄く、収縮時には厚くなる。境界層の厚さが薄くなるにつれて、拡散による物質輸送が顕著になることを考えると、やはり、膨張による析出量が収縮による溶解量を上回ることになる。

となっています。

大型風車では、風車の回転数 R が小さくなって、**0.5Hz 辺り**での音圧が最大となります。微小な気泡による頭痛や圧迫感などによる体調不良が増加すると予測されます。

超低周波音の中でも、1Hz のものが圧倒的に高い圧力を持っているので、その周期によって人体への圧力変動が決まってしまう。これに近い周波数のものが、同じような音圧で存在すれば、このようにはなりません。この点が、風車音と他の環境騒音の最も大きな違いです。

計測された 164 か所の風車音も、0.5～1Hz あたりの孤立した周波数の音が、他の周波数よりも極端に高い圧力を持つことは、すでに確認しました。計測対象となった全ての風車の近くでは、人体は強制的な、圧縮、膨張にさらされるのです。

これは、音響キャビテーションの影響を考えれば、体内に溶け込んでいる空気が析出して気体となる可能性がある事を意味しているのです。体内の気泡は潜水病と同じで頭痛の原因になります。

これは、風車音による直接的な健康への影響なのです。これは、極めて物理的な原因であり、風車音の周波数特性から引き起こされます。そして、回転軸が水平の風車が、上空と地上付近での風速差がある中で、ブレードに掛かる揚力によって回転することからの必然的な帰結です。

風車の物理的な構造が、健康障害を引き起こす根本的な原因なのです。

風車音と交通騒音のグラフのズレの補正について

エネルギー分布の数値に着目します。

エネルギー分布	0～20Hz	20Hz以上
風車音	93%	7%
工場音	12%	88%
交通音	1%	99%

風車音でのエネルギー分布は、20Hz以上が7%、0～20Hzが93%になっています。

風車騒音は9%から13%の範囲の寄与の部分に注意して、

不快感に関する風車音の周波数帯ごとの寄与は、20Hz以上の寄与が9%、0から20Hzの寄与が91%

と考えれば、数値的にはそれなりに整合性があります。

単純な発想ですが、検証する価値はあると考えます。

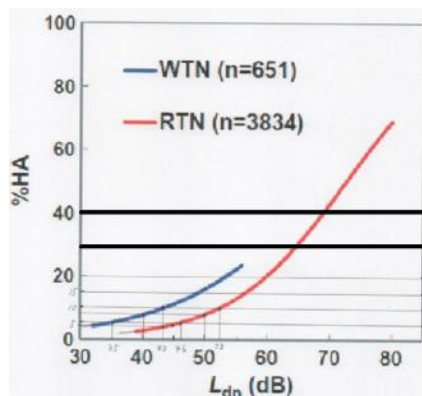
グラフを拡大して、水平線を引いて、交点の間隔を調べてみたら、次の様になりました。ズレの理由を次の様に考えました。

A特性音圧レベルで計算される騒音レベルは、風車音のエネルギーの7%と占める。この部分が、風車音全体のエネルギーの99%まで増加したとすれば、

$$DB7 = 10 * \log_{10} \left(\frac{p_1^2}{p_0^2} \right)$$
$$DB99 = 10 * \log_{10} \left(\frac{99}{7} * \frac{p_1^2}{p_0^2} \right) = DB7 + 11.5$$

となって、11.5dB増加します。

報告書（p14）にある、風車騒音と交通騒音の違いを表にすると、



%HA	風車騒音	交通騒音	差
30%	60dB	64dB	4dB
20%	53dB	60dB	7dB
10%	43dB	53dB	10dB
8%	40dB	50dB	10dB
5%	35dB	46dB	11dB
4%	30dB	43dB	13dB

“非常に不快である”と感じる人の割合にかなりの差があることが分かります。

風車音の騒音レベルを 11.5 d B だけ補正すれば、数値としては、ほぼ一致します。表を作れば、

%HA	風車騒音	交通騒音	差	補正風車音	交通騒音	差
30%	60 d B	64 d B	4 d B	71.5dB	64 d B	-7.5 d B
20%	53 d B	60 d B	7 d B	64.5dB	60 d B	-4.5 d B
10%	43 d B	53 d B	10 d B	54.5dB	53 d B	-1.5 d B
8%	40 d B	50 d B	10 d B	51.5dB	50 d B	-1.5 d B
5%	35 d B	46 d B	11 d B	46.5dB	46 d B	-0.5 d B
4%	30 d B	43 d B	13 d B	41.5dB	43 d B	1.5 d B

エネルギーの面から風車騒音の値を補正した数値を使えば、不快感を覚える人の割合が、ほぼ一致すると言えます。超低周波音を無視すれば、この違いの合理的な説明は出来ません。

となっていて、“騒音および超低周波音”が“騒音”に変えられたのです。これは、可聴音である 20Hz ～20 k Hz の範囲の音で評価するという意味になります。

これは、風車音のエネルギーの 93%以上を無視して、影響を評価するという考えなのです。これを無視すれば、根拠が不明となる被害が出てきます。

強引なこじつけで、“説明”をすることになります。

例えば、

周辺環境に対する影響の懸念が国内外で顕在化

- 騒音・低周波音については、騒音についての環境基準を満たしている場所においても、健康被害に係る苦情等の発生事例あり

注釈. 風力発電施設から発生する音は、通常、著しく大きいものではないが、もともと静穏な地域に建設されることが多いため、比較的小さな騒音レベル（A特性音圧レベル）であっても苦情等の発生事例がある。

として、被害の原因を、もともとの環境が“静穏”だったからと説明します。

1 年経てば、もはや“静穏”な環境ではなくなります。被害は減るのでしょうか？減ることは無く、引っ越しする人が増えるだけです。そもそも“健康被害に係る苦情等の発生事例”という言い方が、住民が嘘をついているかのような言い方です。“健康被害の発生事例”というべきです。

風車が見えるからだと考える人もいる。

- ・ 風力発電設備は相当の高さがあり、かつ、見通しの良い場所に設置される場合が多いことから、**景観への影響が生じる事例あり**

とか、

“なお、McCunney らは、多くの研究成果より、風車騒音と関連付けられるわずらわしさ（アノイアンス）との間は線形の関係が見られる傾向にあるが、わずらわしさ（アノイアンス）に関連する要因としては風車騒音は 9%から 13%の範囲の寄与にとどまり、景観への影響等、他の要因の寄与が大きいと考えられると報告している。”

という主張であるが、

見えない場合には、途中に山や壁がある。当然遮音効果がある。

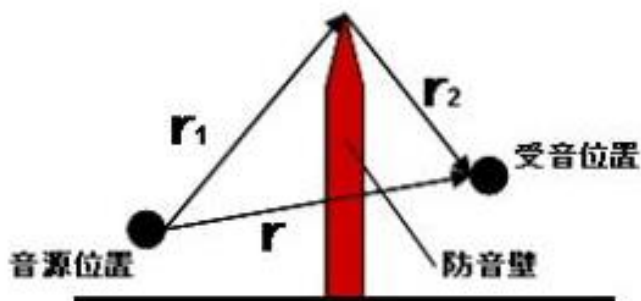
■ 防音壁の回折効果 計算方法

防音壁の効果計算例(直接音に対しての減衰量)

点音源に近い場合 減衰量 $=10\log(0.2+2\alpha/\lambda)+12.5$

線音源に近い場合 減衰量 $=10\log(0.4+2\alpha/\lambda)+8$

波長; λ (m) 行路差; $\alpha=r_1+r_2-r$ (m)



※注意

受信点での騒音値は、この上部を回折してきた音と、横からの回折音、及び、防音壁を透過してきた音の合成値となります。

その結果、風車からの水平距離が同じでも、受ける音圧が異なるので、見える場合の被害が大きいのです。

これに関しては、音圧を計測して比較すれば主張が正しいか否かはすぐ分かりますが、測ろうとはしません。

また、

“風車に反対だから健康影響を受ける”という事でも無いようです。

本巢氏の論文 [“風力発電所による近隣住民への影響に関する社会”](#) には次の様に書かれています。

“この（健康影響を受けていると主張する） 28 人の地域の風力発電所に対する賛否を確認すると、大いに反対が 3 人、やや反対が 6 人、どちらでもないが 13 人、やや賛成が 5 人、大いに賛成が 5 人、わからないが 1 人であった。健康影響が生じていても必ずしも反対するわけではなかった。”

よって、

“しかし、「風車音による不快感」と「風力発電所に対する賛否」は有効回答数が少ないが相関関係が認められた（Pearson の相関係数 $r=-0.830$ ，有意確率（両側） $p=0.001$ ）.”

については、卵が先か鶏が先かの議論ではなくて、

“風車が建設される前には、風車に賛成だったが、風車音による不快感を受けて、風車反対に立場を変え人”

と
“風車が建設される前には、風車に反対だったが、風車音を経験した結果、風車賛成に立場を変え人”
の割合を比較する必要があるのです。

また、健常者でないから、超低周波音を感じるのだと説明していた学者（中野氏）もいました。

【結言】

三崎地区風力は、風車周辺および住宅内では「健常者の人体に感知される超低周波音」は存在せず、建具をがたつかせる超低周波音も存在しないことから、周辺的生活環境を保全する上において支障はないものと考えられます。

風車音以外の外的要因に“わずらわしさ”の原因を求める見解もあります。

- **景観のような視覚的な要素や経済的利益に関する事項等も、わずらわしさ（アノイアンス）の度合いを左右する。**

環境省の方針の変化に賛同して新説を唱える学者も増えますが、住民が受けている風車音の音圧を正確に測定し、被害状況との統計的な関連性を追求しようとする研究者は極めて少ないのです。

明確な根拠を示さないで“新説”を唱えることは、科学の世界から離れて妄想の世界に突き進んでいるとしか思えません。

さて、本巢氏の論文では、

“風力発電所から同心円状に健康影響が広がっていることは本研究では確認できず、距離が健康影響に**直接関わり**があるとは言えなかった.”、

“風力発電所に対する賛否や風車音の不快感は、距離ではなく建設過程における住民への配慮といった事業の進め方と関連があると言える.”

と主張しているが、理解に苦しむ主張である。

まず、

“風力発電所から同心円状に健康影響が広がっていることは本研究では確認できず、距離が健康影響に**直接関わり**があるとは言えなかった.”、

について、

“風力発電所から同心円状に健康影響が広がっている”ことが確認できると思ったのでしょうか？
もし、確認できたとすれば、風車音が風車から同心円状に広がっている事になり、住民の体質も均一であ

り、地形の変化も同心円的に変化する場合でしょう。

残念ながら、風車音には指向性があり、等音圧面が風車から同心円状に広がることはありません。

風車音への反応には個人差が大きいので、たとえ等音圧面が同心円状に広がっても健康影響が同心円状に広がるとは考えられません。

風車と家屋の間に山があれば、音は遮蔽されて、音圧が低くなります。風車が見える場所と見えない場所では音圧が違うので、風車からの距離が同じでも健康影響の程度は異なります。

ですから、

“風力発電所から同心円状に健康影響が広がっていることは本研究では確認できず” となるのは当然のことなのです。

しかし、注意すべきは“直接関りがある”の表現です。

風車音は同心円状に広がらなくても、波面が拡大することは当然です。従って距離減衰が起きて、風車から遠く離れれば、風車音による健康影響は減少するのです。

風車から2kmでは、かなりの影響が有っても、風車から200km離れればほとんど影響は無くなるのです。“距離が健康影響に**直接関わり**があるとは言えなかった。”としても、“距離は健康影響に関りがあると言えるのです”

距離を離したり、回転する風車を減らして音を下げたりすれば、被害が減ることは確認されている。

2007年末、東伊豆の別荘地では1500基×10基の風力発電が運転を始めた直後から、住民のなかで健康被害が続出した。この因果関係を調べるため、事故で風車が停止しているとき、団地自治会が独自に疫学調査を実施した【表1】。不眠、血圧、胸・腹・歯・鼻・耳痛などの症状が、風車が停止することで大きく改善したことがわかる。

表1 東伊豆での風車停止中の被害改善調査（％）

風車からの距離(m)	500m未満	500～700m未満	700～900m未満	900m以上	生理的要素
不 眠	71	27	13	0	距離が離れると改善
血 圧	18	15	0	0	距離が離れると改善
リンパ腺の腫れ	6	2	0	0	距離が離れると改善
胸腹歯耳鼻痛	41	39	25	0	距離が離れると改善
煩い・イライラ	59	61	75	0	心理的要素も
頭痛・肩こり	41	39	81	33	心理的要素も
全体で改善	94	76	94	33	心理的要素も

注：事故停止中、住民121人中の77人が回答した。改善63人(改善率82％)。調査結果に転居(10戸)避難者は含まない。出典：三井大林熱川自治会（2009）。

この結果を受けて住民が動き、今後は夜間に住宅直近の風車3基を停止すること、次に近い風車2基の回転数を4割減らすことーという内容の協定を、自治会と事業者と東伊豆町の三者で結んだという。これによって睡眠障害は7割減った。ただし、それでも耐えられず転居した家族もいる。

転居して、風車から遠く離れれば、被害は無くなるのです。

次に、

“風力電所に対する賛否や風車音の不快感は、距離ではなく建設過程における住民への配慮といった事業の進め方と関連があると言える。”

については、

山形県酒田市の市民の意見を確認しておきましょう。

アンケート名:酒田市広報 11 月特集「風のまち酒田の未来を考えるーカーボンニュートラルの実現に向けてー」質問 5 回答には、

①

今陸上風車から約 2 キロのところに住んでいますが、騒音で眠れない、起こされる日が年に何十日もあります。中心市街地から近い場所に建てることは公害となる可能性があります。

大型の風車の音はどこまで聞こえますか。聞こえないくらい離すべきです。騒音規制ギリギリでは被害が出ているので、聞こえない位置まで離さなければなりません。促進区域の時点で遠くへ設定しなければ、事業者公募で否定できませんよね。事業者は何かと理由をつけて対応しません。結局市役所にクレームが行くのではないですか。一度決めたことは後戻りできないのでしょうか、今遠くへ設定すべきと考えます。もちろん地球温暖化対策は大切ですが、普通の住宅街に住んでいる人に健康への影響を出してまで推し進めるものではないのではないのでしょうか。苦しんでいる人を切り捨てないよう、切にお願いします。

②

洋上風力発電について、酒田市の特性からバードストライクを予防するという観点からも垂直軸型マグナム式風力発電を導入するのはいかがでしょうか。騒音低減、強風耐性の向上にも繋がり、また日本の技術／製造という意味でも市民の納得や信頼も得られやすいのではと考えます。供給の安定という意味で自然エネルギーは発展途上なのだと思いますが、海側の土地だからこそ得られる半永久的なエネルギーをうまく活用し、環境負荷や資源消費を軽減していけるよう、今後の発展を期待しております。

では、

“今陸上風車から約 2 キロのところに住んでいますが、騒音で眠れない、起こされる日が年に何十日もあります。”

という被害は、

“建設過程における住民への配慮といった事業の進め方”

とどのような関連を持っているのでしょうか？

仮に、業者の配慮があっても、“騒音で眠れない、起こされる日が年に何十日もあります”という現実は変えられないのです。

また、二番目の意見を書いた市民は、

回転軸が水平の風車は、超低周波音の発生装置そのものであるが、垂直軸の風車は全く異なる性質を持っていることを認識しています。業者は水平軸型の風車を諦めて垂直軸型の風車に変更してくれるのでしょうか？

業者は、“風力発電所に対する賛否”に関して、反対意見を表明できなくする工夫をしています。反対意見を表明できない事は賛成であることを意味しません。また、健康被害を受けていると表明出来ないことは、健康被害が無いという事ではありません。

“同心円”ではないことを持って、

“距離が健康影響に**直接関わり**があるとは言えなかった.”、

“風力電所に対する賛否や風車音の不快感は、距離ではなく建設過程における住民への配慮といった事業の進め方と関連があると言える.”

と主張は、健康被害の原因を隠蔽する結果となってしまいます。とても残念な結論です。

健康影響が同心円にならないことは、2018年10月31日の井上氏の講演の資料を見ればすぐに分かります。

環境省 九州地方環境事務所 環境対策課 主催

IHI
Realize your dreams

風力発電施設から発生する騒音について

期日：2018年10月31日(水) 13:30-15:00

会場：熊本地方合同庁舎 (B棟)

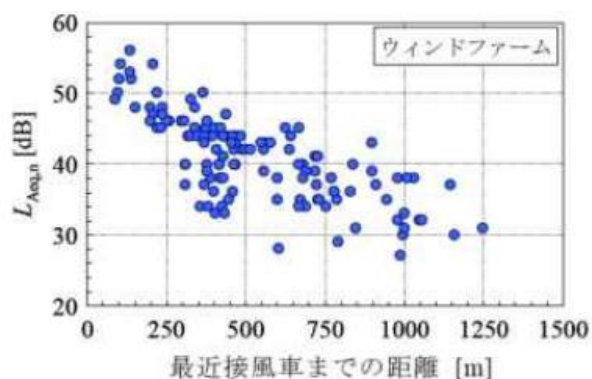
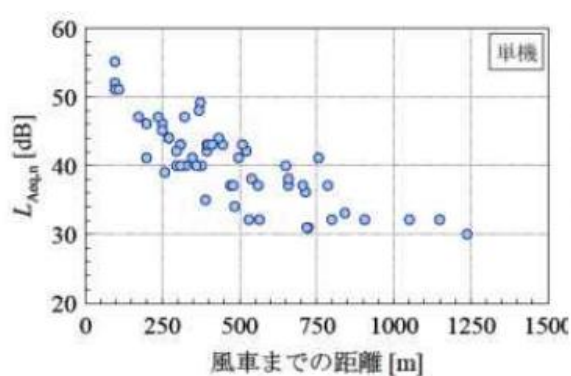
(熊本市西区春日2丁目10番1号)

株式会社アイ・エヌ・シー・エンジニアリング

技術本部 井上 保雄

inoue@inc.ihl.co.jp/03-3360-3227

測定点までの水平距離と風車騒音の関係



- ・風車騒音の距離による減衰は、**水平距離が遠くなるほどレベルが低下**。
- ・風車の機種、地形・植生、気象条件などによって、発生する音やその伝搬が異なることから、**距離と等価騒音レベルとの関係にはばらつきが生じる**。

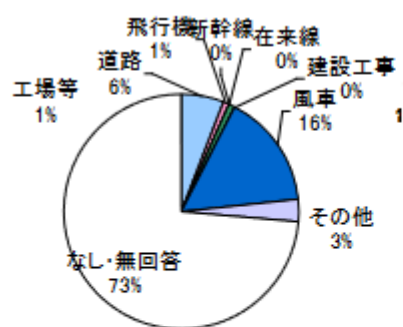
S2-11 風力発電等による低周波音の人への影響評価に関する研究
平成22～24年度

には、

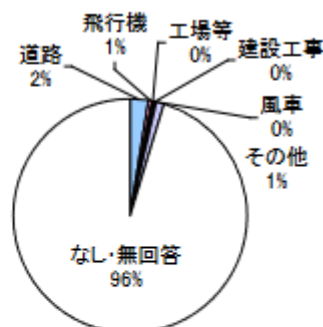
“つぎに「最も悩まされている音」に関する質問に対して「風力発電施設の音」を挙げた119件の回答につ

いて、物理量として風車からの距離 と風車の稼働時の騒音レベルとの関係を調べてみた。その結果、「悩まされたりうるさいと感じたことがある」に対する回答が「非常にある」の反応の割合は、最近接風車からの距離 が近いほど大きくなっている。また、風車稼働時の等価騒音レベルで整理した結果、「非常にある」及び「非常にある」＋「だいぶある」の反応の割合は、等価騒音レベルが高くなるほど大きくなる傾向が見られた。これらの傾向は、アンケート調査の結果を多重 ロジスティック解析の手法を用いて分析した結果でも確認された。”

とある。また、次のグラフもある。

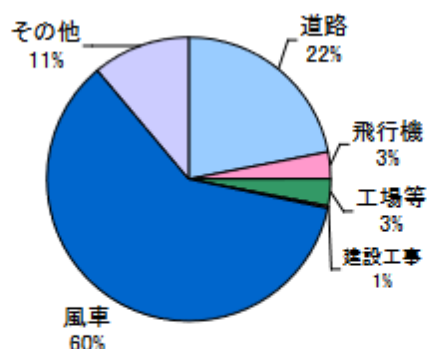


(a)風車周辺地域 (747件)



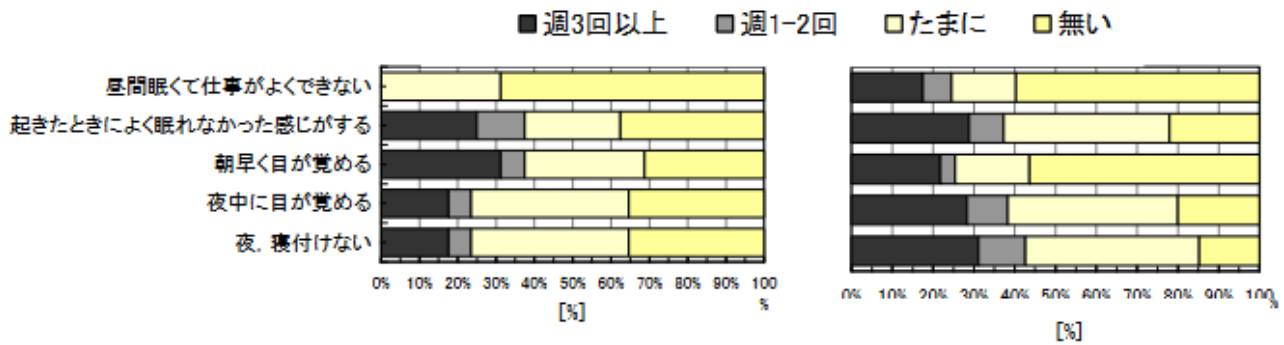
(b)対照地域 (332件)

図(2)-35 最も悩まされている音 (問4)



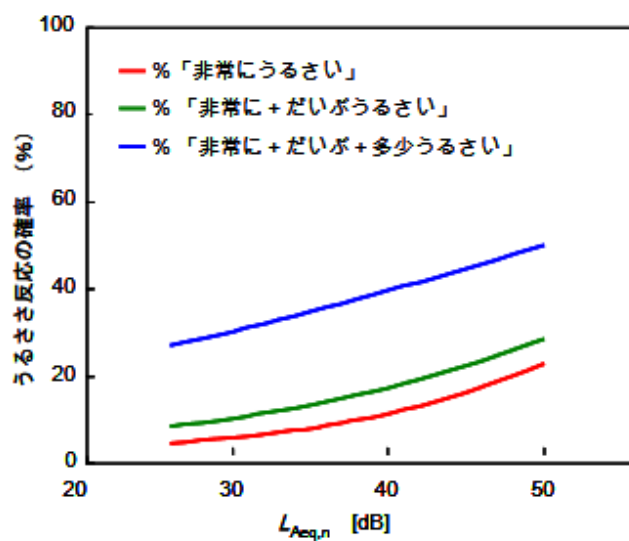
図(2)-37 問4で「最も悩まされている音」を挙げた回答 (197件/全回答747件) の内訳 (風車騒音を指摘した回答数は119件で全体の60%)

悩まされている音の種類では、風車以外は、夜間の音量が減るものがほとんどである。

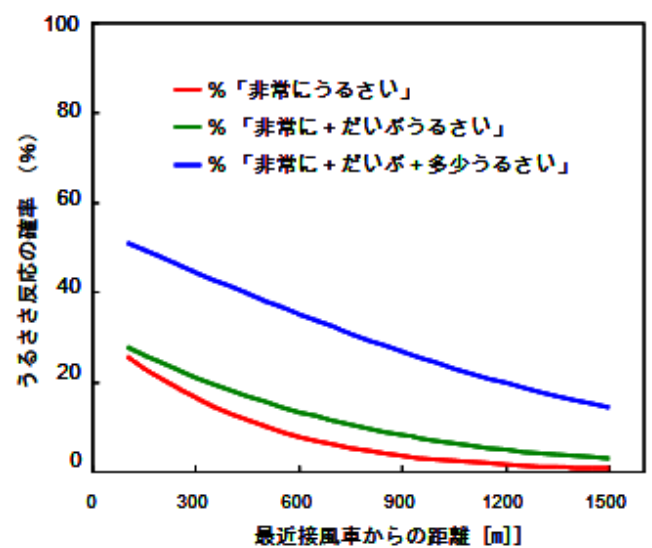


(a)風車騒音以外を挙げた回答 (78件) (b)風車騒音を挙げた回答 (119件)
図(2)-44 睡眠影響の状況 (問9(2))

重要なのは、睡眠が妨害されるか否かである。
距離と“うるささ”の関係も示されている。

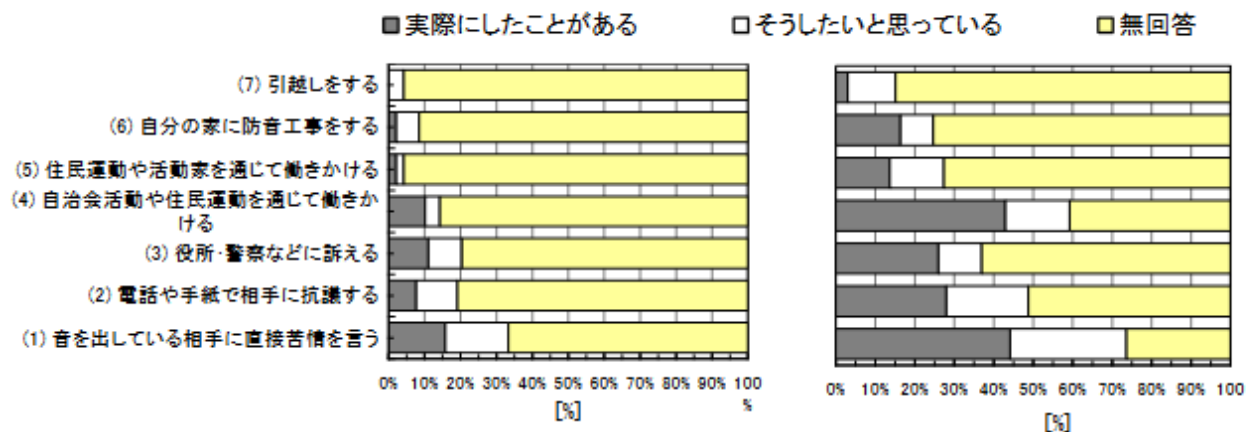


図(2)-62 $L_{Aeq,n}$ とうるささの反応
確率との関係



図(2)-63 距離とうるささの反応
確率との関係

被害を受けていて訴えたいと考えてはいるが、実行できない人が多い事も分ります。



(a)風車騒音以外を挙げた回答（78件） (b)風車騒音を挙げた回答（119件）
図(2)-42 迷惑を受けたときの対応（問8）

悩まされる原因の風車、それを建設して設けている業者に対して、否定的な見解を持つ人が増えるのは当然の結果である。

さて、

“風力発電所に対する賛否や風車音の不快感は、距離ではなく建設過程における住民への配慮といった事業の進め方と関連があると言える。”

“風力発電所による近隣住民の健康影響や賛否は、風力発電所からの近さによって決定づけられるのではなく、事業のやり方や風車音の不快感などその他の要因によって影響を受けると判断できる”

の部分が、本巢氏の論文の大きな特徴である。

“風力発電所に対する賛否”と“風車音の不快感”、“健康影響”、“風車音がどのように感じられるか”を意識的に混同して議論するのです。

“風力発電所に対する賛否”については、反対を表明する人、反対だが表明できない人、賛成を表明する人、賛成だが表明できない人、賛成でも反対でもない人、に分けて考えるべきです。

“風車音の不快感”については、不快感を表明する人、不快感はあるが表明できない人、不快感を覚えなない人、に分けて考えるべきです。

“健康影響”については、健康影響があると表明する人、健康影響はあるが表明できない人、健康影響がない人、に分けて考えるべきです。

“風車音がどのように感じられるか”については、感じ方の内容を分類し、関連しそうな風車音の影響を表す数値、A特性音圧レベル、G特性音圧レベル、最大音圧、最大音圧の時の周波数、最大音圧*周期、などとの関連性を調べる必要があります。

そして肝要なのは、これらをしっかり区別して調査することです。“同心円”は、関連性を測る魔法の道具ではないのです。

私の心配しすぎだとは思いますが、建設過程における住民への配慮があれば、風車音の不快感は生じない。

とか、

風車建設の意義を住民が理解するように業者が住民に説明すれば、風車音の不快感は生じない。

とか、

風車建設の意義を住民が理解すれば、風車音の不快感は生じない。

とか、

風車音の不快感が生じるのは、風車建設の意義を住民が理解していないからだ。

とか、

言い出すことは無いでしょうね。

“風力発電所に対する賛否や風車音の不快感は、距離ではなく建設過程における住民への配慮といった事業の進め方と関連があると言える。”

と主張するには、

建設過程での配慮の具体例、事業の進め方の具体例とその結果としての、賛否の状態や、建設後の風車音の不快感の調査が必要である。

そして、その関連性を明確に示す必要がある。

どのような配慮、進め方をしたら、風車音の不快感が減少するのでしょうか？

建設後に、業者が丁寧に説明をすれば、風車音の不快感が減少するのでしょうか？

残念ながら、風車音の不快感を減少させる効果のある、“建設過程における住民への配慮、事業の進め方”の具体例をこの論文から見つけることは出来なかった。

建設後の説明が有効なのか、それとも建設後は業者の丁寧な説明に効果が無いのか、その理由はなにか？
これこそが、論文の重要な根拠であり、主な論点となるべきものである。

少なくとも、

風車音の不快感を減少させる効果のある、“住民説明会資料”や配慮書、方法書、準備書
と、

風車音の不快感を減少させる効果のない“住民説明会資料”や配慮書、方法書、準備書
逆に、

風車音の不快感を増加させる効果のある“住民説明会資料”や配慮書、方法書、準備書
の具体例くらいは示して欲しいものです。

さらに、

“風力発電所に対する賛否や風車音の不快感は、距離ではなく建設過程における住民への配慮といった事業の進め方と関連があると言える。”

としたのでは論点があやふやになります。

“風力発電所に対する賛否は、距離ではなく建設過程における住民への配慮といった事業の進め方と関連があると言える。”

“風車音の不快感は、距離ではなく建設過程における住民への配慮といった事業の進め方と関連があると言える。”

と分けて議論すべきです。

“風力電所に対する賛否は、距離ではなく建設過程における住民への配慮といった事業の進め方と関連があると言える。”の場合には、風力電所に対する賛成を増やす効果のある、“住民説明会資料”や配慮書、方法書、準備書の具体例を示すべきです。

また、

“風車音の不快感は、距離ではなく建設過程における住民への配慮といった事業の進め方と関連があると言える。”の場合には、風車音の不快感を減少させる効果のある、“住民説明会資料”や配慮書、方法書、準備書の具体例を示すべきです。

後者が可能ならば、住民も、業者も助かります。これが示せれば、画期的な研究成果と言えるのですが、具体的なケースを見ると、反対を抑え込む方法についての調査や研究がされていることが多いのです。

なお、

不快感の減少と、“建設過程における住民への配慮といった事業の進め方”との関連を調べるには、風車音の影響が及ぶ範囲に於いて、事業の説明をして、その効果を検証する必要があります。住民への説明が風車から1kmの範囲内だけでは検証が出来ません。説明範囲を広げると、問題が発生します。

“風力発電施設から発生する騒音等への対応について”

平成28年11月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、のp29に書いてある、

“(注) 発電所の設置又は変更の工事の事業に係る計画段階配慮事項の選定並びに当該計画段階配慮事項に係る調査、予測及び評価の手法に関する指針、環境影響評価の項目並びに当該項目に係る調査、予測及び評価を合理的に行うための手法を選定するための指針並びに環境の保全のための措置に関する指針等を定める省令（平成10年6月12日 通商産業省令第54号）では、発電所一般において環境影響を受ける範囲であると認められる地域は、事業実施想定区域及びその周囲1kmの範囲内としている。”

との関係で、困ることが出てくる。（もちろん省令の趣旨は、検討会の解釈とは異なる。）

1km以上での影響を認めてしまうと、影響がないからと言って、風車から1km圏内での説明会しかやってこなかった事に矛盾する。

さて、

“風力発電施設から発生する騒音等への対応について”（検討会報告書）（p29）

にある次の記述

注）発電所の設置又は変更の工事の事業に係る計画段階配慮事項の選定並びに当該計画段階配慮事項に係る調査、予測及び評価の手法に関する指針、環境影響評価の項目並びに当該項目に係る調査、予測及び評価を合理的に行うための手法を選定するための指針並びに環境の保全のための措置に関する指針等を定める省令（平成10年6月12日 通商産業省令第54号）では、発電所一般において環境影響を受ける範囲であると認められる地域は、事業実施想定区域及びその周囲1kmの範囲内としている。

について確認したのですが、この文書をまとめる時の会議の記録があります。

平成 28 年度第 3 回（第 9 回）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議事録

日時：平成 28 年 11 月 11 日 10：00～11：55

場所：三田共用会議所大会議室

出席者

（座長） 町田信夫

（委員） 沖山文敏、落合博明、桑野園子、佐藤敏彦、塩田正純、橘秀樹、田中充、矢野隆

（環境省） 高橋水・大気環境局長、早水大臣官房審議官、行木大気生活環境室長、木村大気生活環境室長補佐、出口大気生活環境室振動騒音係主査

“測定範囲 1 k m についての議論” は次のものです。

【塩田委員】 塩田です。25 ページの 80 番に、調査を行う範囲の距離についての意見があります。その範囲の距離に対する考え方をもう少し親切に答えてあげたほうがよいのではないかと思います。これだと 1 k m でいいよと解釈されそうです。

【町田座長】 事務局どうぞ。

【行木大気生活環境室長】 ありがとうございます。ご指摘、そのとおりと思います。この点につきましては、測定方法に関するマニュアルのところでも、非常に大事な点として整理が重要な点と考えておりまして、マニュアルの作成におきましてご指摘も踏まえて、しっかりやっていきたいと思います。その旨、この考え方のこの部分の記載におきましても明記をするよう修正をしたいと思います。ありがとうございます。

【町田座長】 橘委員、どうぞ。

【橘委員】 ここで言う、推進費と書いてありますが、いわゆる戦略指定研究でやった全国調査では、一応 1 キロメートルを 100 メートルぐらいから 1 キロメートルぐらいを目安にしています。それでも、それ以上数キロメートルなんていったら、実質上とても無理です。そんなに測定点は選べません。1 点か 2 点増やすだけならできるでしょう。

それから、1 キロでももちろん音は風車、聞こえるところは聞こえます。だから、聞こえなくなるまではかれといったら、もう数十キロにわたって、あ、数十キロって、数キロにわたって測定しなきゃならなくなるという、実際マニュアルでそんなことを書いたら、実行不可能なマニュアルになってしまいます。だから安易に 1 キロ、それをもっと数キロにしますとか言われると困るなという。

【行木大気生活環境室長】 橘先生、説明が足りず、大変失礼いたしました。ご指摘のとおりでして、何よりもその調査におきましては、その対象となる施設とその周辺の地形の状況ですとか、土地利用の状況に応じて影響がありそうなところを選定して調査をしていくということが大事と思っております。日本はいろいろ、日本だけじゃないと思いますけれども、いろいろと個別の場所で状況も違いますから、単純に距離を指定するということは適切ではないと思っております。マニュアルにおきましては、そういった観点のどういったところが、最も影響が大きくなりそうなのか、どういったところで、その調査を行うのがいいという辺りを整理して書いていくということだと思っております。

塩田委員の当然の疑問に対して、橘委員は、範囲を拡大したくないという気持ちで発言したと推測されます。そんな橘委員も、風車音が数キロ先まで届くことはしっかりと認識しているのです。

こんなことがあって、

(座長) 町田信夫
(委員) 沖山文敏、落合博明、桑野園子、佐藤敏彦、塩田正純、橘秀樹、田中充、矢野隆
(環境省) 高橋水・大気環境局長、早水大臣官房審議官、行木大気生活環境室長、木村大気生活環境室長補佐、出口大気生活環境室振動騒音係主査
たちの作った報告書、
“風力発電施設から発生する騒音等への対応について”(検討会報告書)
の 29 ページの記述となりました。
学者の方々の見解は、経産省の趣旨とは異なる内容だと考えます。

山形県の認識：

“風力発電施設の稼働に伴う騒音の到達範囲は 1 km と規定されており、影響は小さい。”

“風力発電施設から発生する騒音等への対応について”(検討会報告書)：
(平成 10 年 6 月 12 日 通商産業省令第 54 号) では、発電所一般において環境影響を受ける範囲であると認められる地域は、事業実施想定区域及びその周囲 1 km の範囲内としている。

通産省令の記述：

- 一 第一種事業実施想定区域及びその周囲一キロメートルの範囲内の地域
- 二 既に入手している情報によって、一以上の環境の構成要素（以下「環境要素」という。）に係る環境影響を受けるおそれがあると判断される地域

法律の解釈は勝手に出来ませんが、解釈する根拠が必要です。山形県の条例を作り、騒音の到達範囲を 100m と規定してくれれば、山形県での風車騒音に関する問題はすべて解決できるかもしれません。やってみれば分かりますが、規定を作っても、騒音は規定を無視して拡散するのです。

被害の状況、風車が建設された地域の衰退の様子を見れば、計測範囲を 1 km にするような考え方が現実に合わせていないことは明白です。計測範囲、計測方法、被害の予測方法などに関しては、風車音の発生機構と周波数特性、指向性を考えた上での詳細な検討が必要です。

次は、
“2010 年から 2012 年にかけて行われた、日本における風車騒音の実測調査では、図 3 に示すように 30 Hz 以下では風車騒音は聴覚閾値曲線を下回る、すなわち聴感的に知覚できていないことが分かった 44).”
について考えます。

44) 橘秀樹ほか . S2-11 風力発電等による低周波音の人への影響評価に関する研究【報告書】(2012)
とあるが、

平野氏には日本語の理解力が無いように見えてしまう。

風力発電施設から発生する騒音等への対応について

平成28年11月 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
には、

“全国29の風力発電施設の周辺の合計164の測定点で得られた1/3オクターブバンド音圧レベルから、一般に風車騒音はオクターブ当り-4dBの傾きのスペクトル特性を持っていることが分かった。そのうち、すべての超低周波音領域における1/3オクターブバンド音圧レベルは、ISOの純音に関する聴覚閾値やMoorhouse他が提案している低周波音の評価のための限界曲線を下回っており（図3）、風車騒音の超低周波音領域の成分は、知覚できないレベルであることがわかった。本研究プロジェクトの一部として、暴露側における風車騒音に含まれている低周波数成分の可聴性が実験室実験で調べられているが、その結果でも超低周波数領域の成分は聞こえない／感じないということが確かめられている。これらの結果は、風車騒音は超低周波音による問題ではないということを示している。

□20Hz以上の可聴周波数領域では、およそ40Hz以上の周波数域で1/3オクターブバンド音圧レベルは上記の限界曲線並びにISO 389-7で規定されている聴覚閾値を超えている。これは、風車騒音は通常可聴周波数範囲の騒音として議論すべきであることを意味している。”

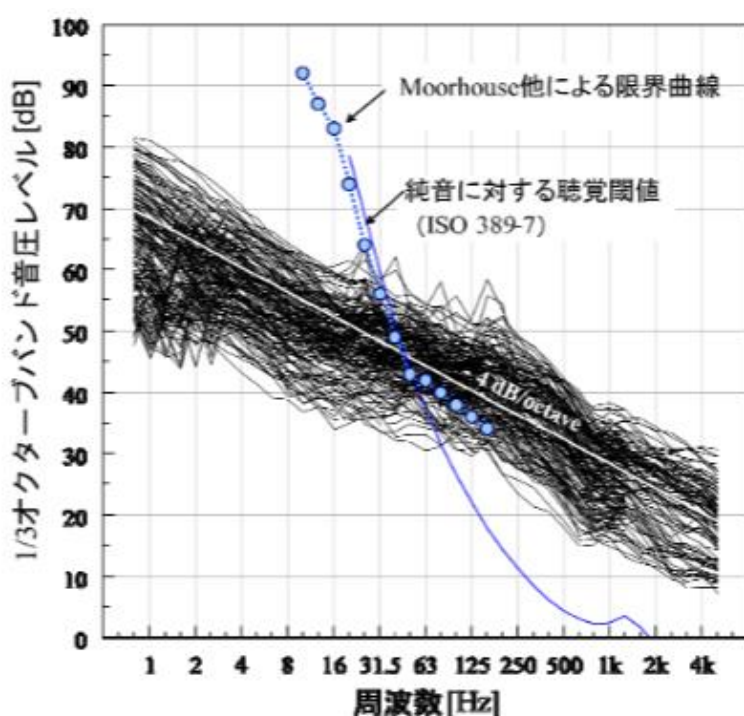


図3 全国29の風力発電施設周辺164地点における風車騒音の周波数特性の分析結果

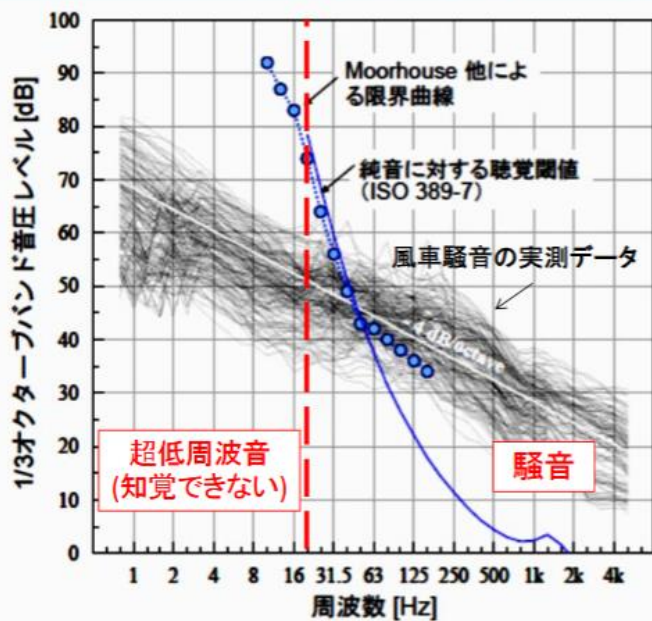
とある。

さらに、

平成28年11月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 報告書概要
には、

これまでに得られた知見①

風車騒音に含まれる超低周波音



20Hz以下の超低周波音領域は、すべて知覚閾値を下回っている

**風車騒音は
超低周波音ではなく、
通常可聴周波数範
囲の騒音の問題**

※全国29の風力発電施設の周辺の合計164測定点で騒音を測定

3

との記述もある。

“風車騒音の超低周波音領域の成分は、知覚できないレベルであることがわかった。”

の意味は、

“知覚閾値を下回る”

という事です。

聴覚閾値、感覚閾値、知覚閾値は異なる日本語であり、聴覚以外の感覚器官による風車の影響の感知もあるのです。

聴覚閾値、感覚閾値、知覚閾値の意味は何でしょう。日本語の単語を適切に使用する必要があります。いつの間にか摩り替えられる言葉として、聴覚閾値、感覚閾値、知覚閾値の3つがある。

聴覚閾値は、耳で聞いて、聞こえるか聞こえないかの境目と理解できるが、

感覚閾値の感覚は、聴覚による音の感知、指先の皮膚などでの触覚、半規管、耳石器での揺れや加速度の感知、内耳の前庭器官による気圧の変化の感知能力、などが考えられるが、それらの全てを意味しているのか、他の感覚をも意味しているのかが不明である。多様な感覚の閾値を決定できるような実験は誰がどのように行ってどのような評価を受けているのかを明確にする必要がある。

知覚閾値にいたっては、知覚とは、感覚器官への物理化学刺激を通じてもたらされた情報をもとに、外界の対象の性質、形態、関係および身体内部の状態を把握するはたらきのこと。感覚と知覚の概念に含意されている意味は、それらの概念の研究史と密接な関係を持っている。

これを踏まえて、“すべて知覚閾値を下回っている”と主張しているのが、報告書及び報告書概要なのです。決して、“聴覚閾値を下回っている”と言いたいのではないのです。

そのための誤訳が、“限界曲線”なのです。

風力発電施設から発生する騒音等への対応について

平成 28 年 11 月

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

“＜騒音の実測調査＞

平成 22 年度から平成 24 年度にかけて、環境研究総合推進費の公募型研究「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」（研究代表者：橘秀樹。以下、「推進費研究」とする。）において、我が国の風車騒音の実測調査が全国規模で行われた。この研究で得られた知見(5)を以下に示す。

□ 全国 29 の風力発電施設の周辺の合計 164 の測定点で得られた 1/3 オクターブバンド音圧レベルから、一般に風車騒音はオクターブ当り -4dB の傾きのスペクトル特性を持っていることが分かった。そのうち、すべての超低周波音領域における 1/3 オクターブバンド音圧レベルは、ISO の純音に関する聴覚閾値や **Moorhouse** 他が提案している低周波音の評価のための限界曲線を下回っており（図 3）、風車騒音の超低周波音領域の成分は、知覚できないレベルであることがわかった。本研究プロジェクトの一部として、暴露側における風車騒音に含まれている低周波数成分の可聴性が実験室実験で調べられているが、その結果でも超低周波数領域の成分は聞こえない／感じないということが確かめられている。これらの結果は、風車騒音は超低周波音による問題ではないということを示している。

□ 20Hz 以上の可聴周波数領域では、およそ 40Hz 以上の周波数域で 1/3 オクターブバンド音圧レベルは上記の限界曲線並びに ISO 389-7 で規定されている聴覚閾値を超えている。これは、風車騒音は通常可聴周波数範囲の騒音として議論すべきであることを意味している。“

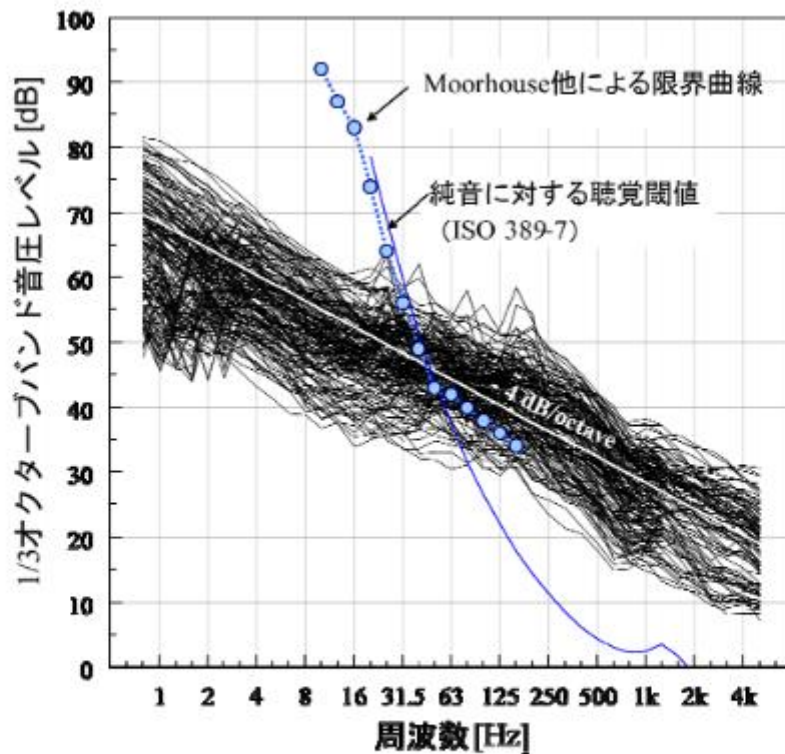


図 3 全国 29 の風力発電施設周辺 164 地点における風車騒音の周波数特性の分析結果

ここでは、“Moorhouse 他による限界曲線”というものも書いてある。

目的は、知覚閾値よりも音圧レベルが低いというためである。聴覚閾値、感覚閾値、知覚閾値では意味が違う。

人間には聴覚以外の感覚器官があり、“うるささ”以外の形で風車音の影響を感知できる。影響が無いと言うためには、他の感覚器官に対する影響も知覚できないと言う必要がある。そこで工夫したのが、“Moorhouse 他による限界曲線”である。

この線まで来なければ、他の感覚器官でも感知できないので、風車音の超低周波音の部分は、知覚閾値より小さく、知覚できないのだから、影響は無いと主張しているのである。

この部分をカットすると、他の感覚器官での感知による影響は無いですか？と聞かれてしまう。平野氏は、なぜかこの部分をカットしている。

引用する時に、本来の主張を変えてしまうのを曲解という。主張が全く違えば、捏造と言う。

風車音の影響を考える時には、ラウドネス（うるささ）とアノイアンス（不快感）を考えることが多い。“うるさい”と言う被害もあるが、それ以外の被害もあるからです。

このような被害の原因が風車の超低周波音ではないと主張する根拠が、“Moorhouse 他による限界曲線”だったのです。

もちろん、とんでもない主張ですが、これをと取り除くには理由が必要なのです。

馬鹿げた主張だから削除したのかもしれませんが、理由を説明することなく削除してはいけません。

元の論文には、次のように書かれています。

The proposed criteria curve is provided as guidance for environmental health officers in their evaluation of an LFN complaint, and **not as an absolute limit**.

This means that tonal sounds at, or just below, the threshold of the hearing should be considered as environmental sources potentially responsible for the complaint.

提案された基準曲線は、環境衛生担当者のためのガイダンスとして提供されています、LFN 苦情の評価であり、**絶対的な制限としての評価ではありません**。これは、騒音が聴覚閾値より大きい、または少しだけ小さい場合は、環境音源として考慮されるべきであることを意味します。

Criterion の意味は、

- 1. (判断・評価などの) 基準、規範、尺度、よりどころ
- 2. 特徴

語源は、ギリシャ語の基準 (分ける、決めるより) であり、これは、基準曲線と訳すべきです。基準は聴覚に関連する基準です。

ですから、基準曲線または参照曲線と訳すべきであり、“限界曲線” と言えば、その限界よりも低ければ問題なし。と聞こえてしまいます。

“not as an absolute limit” と書いてあるのに、まるで、“absolute limit.” と書いてあるかのように訳してはいけないのです。

もとの論文の中では、“Moorhouse 他による限界曲線” の具体的な数値は次のものです。

参考までに数値を確認しておきます。

もとの論文の中では、“Moorhouse 他による限界曲線” の具体的な数値は次のものです。

表 V: 提案された夜間参照曲線

Hz	10	12.5	16	20	25	31.5	40	50	63	80	100	125	160
dB	92	87	83	74	63	56	49	43	42	40	38	36	34

[ISO-389-7 \(2019 年、第 3 判\)](#) にある聴覚閾値の表の数値と、2 つの参照値などを纏めれば、次の表になります。

周波数Hz	5	6.3	8	10	12.5	16	20	25	31.5	40	50	63	80	100	125	160	200
物的参照値 dB	70	71	72	73	75	77	80	83	87	93	99						
心身参照値 dB				92	88	83	76	70	64	57	52	47	41				
聴覚閾値							78.1	68.7	59.5	51.5	44	37.5	31.5	26.5	22.1	17.9	14.4
聴覚閾値(旧)							78.5	68.7	59.5	51.5	44	37.5	31.5	26.5	22.1	17.9	14.4
夜間参照曲線				92	87	83	74	63	56	49	43	42	40	38	36	34	

100Hz の所の、聴覚閾値は 26.5 d B、“Moorhouse 他による限界曲線” (夜間参照曲線) での数値は 38 d B です。

限界曲線での数値が 38 d B ですから、この数値になるまでは知覚できないはずですが、26.5 d B の段階で聴覚は音を知覚します。

これは、“限界曲線”としたから矛盾する数値となるのです。本来の“参照曲線”と訳せば、100Hz の音は、26.5 d B になれば聴覚で知覚できるが、低周波音としての影響で苦情が出るほどの大きさではなく、38 d B 程度になっていたら、うるさくて苦情が出て当然なので、計測値が 38 d B に近かったら、低周波音に起因する問題と考えて、音の発生源についての調査をやってみましょう。というような数値であり、調査開始の目役となる数値だという事なのです。

10Hz での 92 d B は、心身での参照値と同じ数値になっています。参照値で、10Hz での 92 d B では、10% 程度の人が許容できないとする音圧レベルです。10% 程度の人が被害を受ける数値ですから、10Hz で 92 d B の数値が観測されたら、低周波音の問題として捉えて、調査を開始すべきです。これが、参照曲線の意味なのです。

ついでに、

“図 3 に示すように 30 Hz 以下では風車騒音は聴覚閾値曲線を下回る，すなわち聴感的に知覚できていないことが分かった 44).”

の部分ですが、聴覚閾値曲線は 20Hz 以上で定義されています。

グラフから確認できるのは、

“20Hz から 30 Hz の間では風車音は聴覚閾値曲線を下回る，すなわち聴感的に知覚できていないことが分かった 44).”

とすべきであり、

“30 Hz 以下では風車騒音は聴覚閾値曲線を下回る，すなわち聴感的に知覚できていないことが分かった 44).”

として、無いものとの比較をしてはいけません。例えば、1Hz の聴覚閾値は何 d B かが分からないのに、勝手に拡張してはいけません。

当然ですが、これはラウドネル（うるささ）の面からの比較であり、アノイアンス（不快感）の面からの比較ではありません。

アノイアンス（不快感）としては、圧迫感や床の振動なども考えられます。アノイアンスとしての知覚としてガタツキを考えれば、5Hz では 70 d B であり、推測ですが 2Hz では 65 d B 程度だと考えられます。

これは、聴覚では感知できなくても、風車音の影響は色々な形で知覚され、安眠を妨害するという事なのです。

アノイアンス（不快感）での安眠妨害は、“被害”であり、苦情や不安ではありません。

“風力発電用風車の騒音（風車騒音）への苦情や健康上の不安を感じるという訴えが度々寄せられた”これを、“被害報告があった”と理解できないならば、日本語を理解する力が無いと思われてしまいます。

健康被害に関しては、間接的な健康被害と、直接的な健康被害が考えられます。

もちろん、平野氏の見解が報告書に関係なく示されているならば、正しい主張だと言えますが、報告書の内容は平野氏の主張する内容では無いのです。これでは、文書の偽造になってしまいます。

風車からの超低周波音による被害に関しては、“聞こえなければ問題ない”とする立場に近いと思われる記述が見られる。被害の状況を見ようとしていない。低周波音問題の歴史についての認識が薄いように見受け

られる。平野氏は何のために研究活動を行っているのかが見えてこない。環境省や業者の味方をするのが目的のようにも見えてしまう。

次は、

“また、2012 年から 2018 年にかけて欧州地域で行われた「Metrology for a Universal Ear Simulator and the Perception of Non-audible Sound (EARS プロジェクト)」は、聴覚閾値を下回る音圧レベルの音響刺激に対しては脳波応答が見られないことを報告している (26).”

に関しては、

欧州における超低周波音知覚に関する研究動向*

“2.2 超低周波音発生装置の開発

EARS プロジェクトでは、MEG や fMRI を利用した脳反応も調査するために、対象周波数範囲における各音響刺激 (2.5 Hz~24.2 kHz) について、磁気環境下でも聴覚閾値を十分に上回る音圧レベルで提示できる音源発生装置が新たに開発された [2]。この音源装置では、約 38 cm 径の動電型スピーカから各音源信号を放射し、直径 14 mm、長さ 8 m のチューブを介して挿入型イヤホンに伝送し、各実験協力者の外耳道に提示された。“

とあるので、

この実験では、刺激はイヤホンを通じて聴覚に対して与えられる。

風車音では、体全体が音圧の変動の影響を受ける。風車音に関する実験だと言うならば、体全体が圧力変動を受ける必要がある。

平野氏は、参照値の内容を検討しなかったのでしょうか？

Q6 『参照値』に科学的な根拠はありますか？

A6 『参照値』は平成 15 年に独立行政法人産業総合研究所において実施した聴感実験データから、一般被験者の 90% の人が寝室で許容できるレベルとして設定したものです。この聴感実験では、**低周波音を発生させた実験室に被験者を部屋に入れて、被験者の反応を調査することで行いました。なお、被験者は、実験室の中で、耳だけでなく全身が低周波音に浴しており、いわゆる骨導音の影響も実験の中で自然に含まれ、総合的に把握されていると考えられます。**

その実験が、風車音の被害を調べるのに適した実験なのか、あるいは風車音の被害の原因を隠蔽するために使われる実験なのかを明確にする必要があります。

体全体が圧迫される形の刺激を受ける訳ではないので、音響キャビテーションは引き起こされないし、体全体に対する圧迫として感知されるような内容の実験ではない。

重要なのは、体全体がゆっくりとした圧迫と吸引を受ける場合の反応です。

従って、

“環境省の検討会は、調査の結果を踏まえて風車騒音は可聴域、あえて言うならば低周波数域での騒音とし

て議論すべきとの見解を示している”

との見解は、風車音の性質を無視した実験結果を、無理やり風車音の性質の判定に使うことになるので、実験としての意味が無いのです。

これは、風車音の影響を聴覚に対する影響に限定して考えることになり、睡眠への影響はラウドネス（うるささ）よりも、アノイアンス（不快感）の方が大きいことを否定する結果になります。

また、

“環境省の検討会は、調査の結果を踏まえて風車騒音は可聴域、あえて言うならば低周波数域での騒音として議論すべきとの見解を示している 42)．“

に関しては、

全く持って非論理的な結論としか言えません。その理由は、

[報告書概要](#)では、

これまでに得られた知見④

風車騒音の人への影響

- これまでに国内外で得られた科学的知見を踏まえると、風車騒音が人の健康に直接的に影響を及ぼす可能性は低いと考えられる。ただし、風車騒音に含まれる振幅変調音や純音成分等は、わずらわしさ(アノイアンス)を増加させる傾向がある。静かな環境では、風車騒音が35～40dBを超過すると、わずらわしさ(アノイアンス)の程度が上がり、睡眠への影響のリスクを増加させる可能性があることが示唆されている
- 風力発電施設から発生する超低周波音・低周波音と健康影響については、明らかな関連を示す知見は確認できなかった
- 景観のような視覚的な要素や経済的利益に関する事項等も、わずらわしさ(アノイアンス)の度合いを左右する

6

風車騒音の調査・予測・評価

- 風車騒音は、騒音レベル(A特性音圧レベル)で測定する
- 測定の際には、一時的に近隣を通過する自動車の音等の一過性の交通騒音や、定常的には発生しない人工音・自然音等の影響は、適切に除外音処理を行う
 - ※90%時間率騒音レベル(L_{A90})に2dB加算することで代替することも可
- 風力発電施設周辺の住宅等、風車騒音が人の生活環境に影響を与えるおそれがある地域を対象とする
 - ※発電所アセス省令では事業実施区域から1kmを環境影響を受ける範囲としている
- 測定は、年間の状況を正確に把握するため、風力発電施設が稼働する代表的な気象条件毎(原則四季毎、ただし気象条件の変動が小さい場合等は、調査回数を減らすことができる)に、稼働する風が安定して吹いている状況で行う
- 残留騒音は、昼間(6:00～22:00)と夜間(22:00～6:00)の時間帯について、それぞれ把握する

※ 今後、具体的な測定・評価手法を定めたマニュアルを策定予定 9

風力発電施設から発生する騒音に関する指針について

“これまでに国内外で得られた研究結果を踏まえると、風力発電施設から発生する騒音が人の健康に直接的に影響を及ぼす可能性は低いと考えられる。また、風力発電施設から発生する超低周波音・低周波音と健康影響については、明らかな関連を示す知見は確認できない。ただし、風力発電施設から発生する騒音に含まれる振幅変調音や純音性成分等は、わずらわしさ(アノイアンス)を増加させる傾向がある。静かな環境では、風力発電施設から発生する騒音が 35～40dB を超過すると、わずらわしさ(アノイアンス)の程度が上がり、睡眠への影響のリスクを増加させる可能性があることが示唆されている。また、超低周波数領域の成分の音も含めた実験の結果、周波数重み付け特性として A 特性音圧レベルが音の大きさ(ラウドネス)の評価に適している。”

となっている。

“わずらわしさ(アノイアンス)の程度が上がり、睡眠への影響のリスクを増加させる可能性があることが示唆されている。”

ならば、

アノイアンスの評価に適した数値を指標として選ぶべきであるが、アノイアンスの指標ではなく、ラウドネスの指標でしかない数値(A 特性音圧レベル)を選ぶことは、被害状況と指標の関連がほとんど無いものをわざわざ選んだとしか言えない。

不快感の一つに圧迫感があるのですから、最大音圧を指標に選ぶのが当然である。

3.5 計測機器に関する現状の課題

噴火口の位置推定など複数の測定点でのデータを解析処理する際に前提となるのが、同一の測定点では計測機器が異なっても同一波形が計測されることである。

しかし実際は、機器の種類や型式が異なると計測される音圧波形に違いが生じる例が複数報告されている(62) ,63)。

マイクロホンと気圧計の典型的な時間応答波形の例を図 6 に示す。気圧計では幅 2 秒程度のパルスが計測されるような圧力変動は、マイクロホンでは異なる波形として計測される。

この問題の理由を考えるために、計測機器の周波数特性が出力波形に与える影響を、簡単なモデルで検討した。

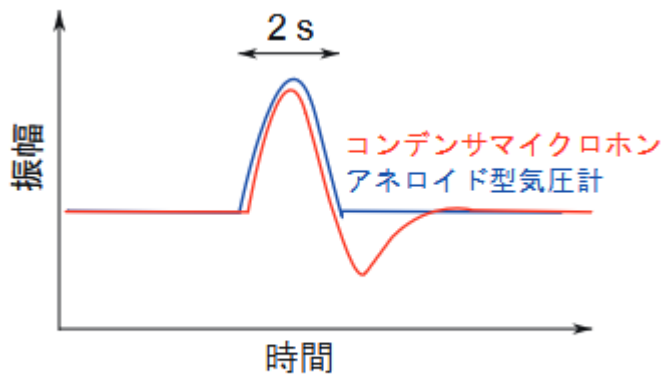


図6 マイクロホンと気圧計の時間応答波形の比較

として、

伝達関数やバタワースフィルタの話に移ってゆくが、自然現象とデジタル信号の世界の区別がついていないと思われる。

風車音の性質を実際の計測結果を使って確認する作業をしていない。

精密騒音計とオプションのソフトを組み合わせても、大型風車の超低周波音を解析してその性質を把握することは出来ません。収録した波形をコンピュータで解析する必要があります。解析用のソフトが見つからなければ、自分で作ることも必要になります。

平野氏は、この部分には触れていないので、大型風車の音も、市販の精密騒音計とオプションのソフトで解析できると思い込んでいるように見受けられます。

“[Noise & Infrasound Analysis](#)”の開発には3年くらいかかった。議論の途中で解析結果を書いておきます。[HPに計測データ\(WAVファイル\)が掲載してある](#)ので、波形解析ソフトを持っていたら、自分で確認してみてください。

平野氏は、風車音に関しての計測と解析をしないで議論していた。

自然現象の観測では、その現象の物理的な性質を考えなければ、気圧計の波形と精密騒音計の波形のどちらがより正確に自然現象を切り取っているかを判断できない。

観測対象の性質がパルスに近いならば、それをソリトンとして考えるべきである。
ソリトンの性質を少し調べれば、精密騒音計の方が正しいことが分る。

デジタルの世界での矩形波は自然界で見つけるのは困難です。

“幅 2 秒程度のパルスが計測されるような圧力変動”

とあるが、

物理学の常識である、

$$F = M \alpha$$

$$v = \alpha t$$

$$l = (1/2) \alpha t^2$$

という式や

$$PV = nRT$$

という式を忘れたのでしょうか？

音圧がパルス状に変化することは可能だと考えているのでしょうか？

気圧が変化するとして、 $PV = nRT$

の中にある V が変化すると考えたばあい、 V が $1/2$ になるには、半部の空気分子が移動する必要がある。

$$l = (1/2) \alpha t^2$$

を考えれば、 1 だけ移動するには、時間がかかる。

音圧がパルス状に変化するには、瞬間移動が必要になる。

自然界の現象でパルス状の音圧変動があったと考える平野氏は、
新しい物理学、瞬間移動が可能な物理学の体系を構築する必要がある。

瞬間移動よりは、ソリトンを選ぶべきだと考えます。

ソリトンの尻尾

p 77、図 6

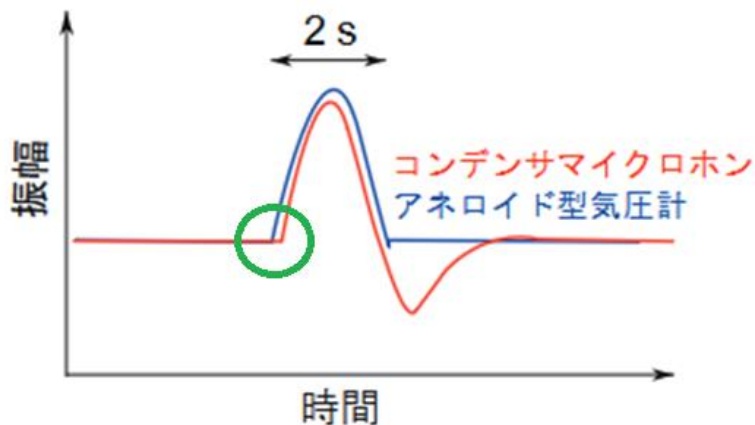


図6 マイクロホンと気圧計の時間応答波形の比較

津浪の場合は、赤い線が津波の性質に合っている。

火山噴火でも、圧力変動に関しては、赤い線になると考える。

ただし、緑の○を付けた部分に関しては、青い線は、計測間隔が荒いので数値だけを考えればそうなるかもしれないが、赤い線は、高いサンプリングレートを持っているのだから、滑らかな線になると考える。

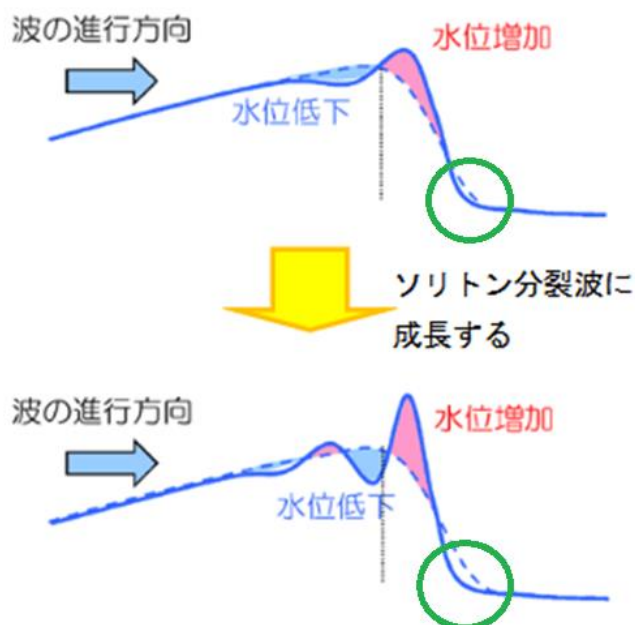
風車音の計測が嫌いな平野氏は、図6の観測結果をデジタルデータの形で入手したのでしょうか？
気圧計の計測値の時間間隔は何秒だったのでしょうか？

コンデンサマイクロホンでの計測値の時間間隔は何秒だったのでしょうか？

これは、表示されたグラフが適切か否かを判断するのに必要な情報です。

これらの検討をしないで、デジタル信号処理の世界に飛び込んではいけないと考えます。

ソリトン分裂波を考慮した津波シミュレーション



津波の到達から後続波・減衰に至る全過程を予測する

津浪では、ソリトンに尻尾がある

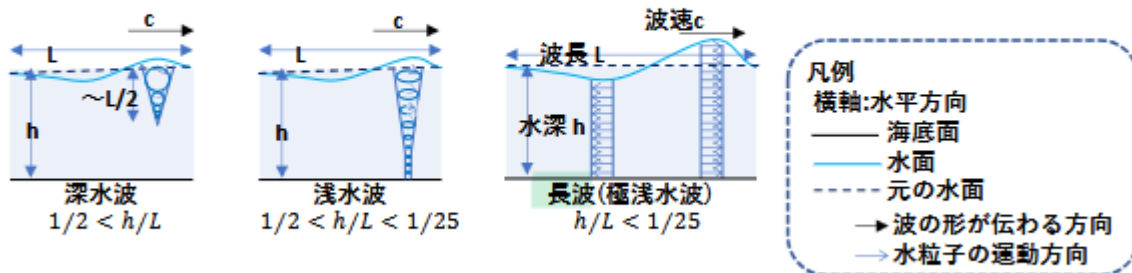
外洋の津波の特徴～微小振幅の長波

微小振幅波：水深(h)に比べて波高(H)が非常に小さい。

→ 津波の支配方程式において(H/h)の高次の非線形項を無視でき、計算しやすい。

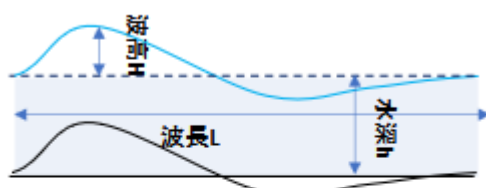
長波：水深(h)に比べて波長(L)が非常に長い。

→ 鉛直方向の運動が水平方向の運動に比べて無視できる
水面から水底までがほぼ等しく動く波



水深波長比による波の分類と水粒子の軌道

(参考)



- ・ 例えば、
2011年東北地方太平洋沖地震
の波源では、
波長 $L \sim 1,000,000\text{m}$
水深 $h \sim 1,000\text{m}$
波高 $H \sim 10\text{m}$

気圧計での計測値

精密型デジタル気圧計 MODEL T-75

製品の特徴

精密型気圧計 ModelT-75 は好評だった T-68 の後継機種として、機能を絞り込み、よりシンプルに発展させたもので、大気圧を高精度に測定できる気圧計です。気圧の検出部にはシリコン静電容量型の圧力センサを複数個使用し、その測定値を比較、処理することで、高精度を実現しています。この方式ならではの長期安定性など優れた性能をもっています。

- 0.01hPa ごとの高精度測定
- 600～1100hPa の広範囲測定
- アナログ信号出力
- 明るく見やすい表示（※仕様欄表示参照）
- 空気取込口装備
- RS-232C 信号入出力装備
- 気象庁検定、JCSS 校正可能
- RoHS 対策品
- 優れた長期安定性(0.1hPa/年※)

※本製品における平均的なオフセット値で性能を保証するものではありません

測定範囲	600～1100hPa
hPa 最小表示単位	0.01hPa
検出方法	シリコン静電容量型電気式気圧発信器
精度	±0.15hPa 以内↓ (当社校正用標準器を使用した当社規定の検査方法による)
表示	赤色 LED(文字大約 15×25 mm) ※、6 桁
測定間隔	センサー検出間隔約 1 秒↓ 測定値出力約 1 秒
デジタル信号入出力	RS-232C
アナログ信号出力	DC0～IV
出力範囲	600～1100hPa の間で上下限值を↓ 10hPa 刻みで設定可能

測定間隔が大きすぎる。
精度が低すぎる。

6. まとめ

20 Hz 以下の周波数の音である超低周波音は、可聴音と比較して減衰しにくく、遠方まで音源の情報が伝達されるという特性を有する。この特性を生かし、火山噴火など大規模自然災害由来の超低周波音を遠隔観測することで、防災・減災に役立てるニーズが強まりつつある。

このような現状を鑑み、本調査研究では超低周波音計測の現状と課題について調査し、今後の対応について考察した。

超低周波音はマイクロホンで測定可能な周波数下限と気圧計で測定可能な周波数上限が重なる周波数域であり、両方の機器を用いた計測が行われている。しかし、1 Hz 以下については、音響標準・圧力標準ともに標準が整備されておらず、計測機器の校正法も未確立である。

低周波音計測機器の校正ができないため、観測に用いる機器によって計測結果に違いが生じることが問題となっている。

従来の音響標準は 20 Hz 以上 20 kHz 以下の可聴域を中心に整備されてきた。近年、校正周波数範囲の拡張が行われているものの、その下限は 1 Hz 程度であり、各国 NMI は周波数下限のさらなる低域化に取り組んでいる。しかし、既存のカプラ校正法やレーザーピストンホン法を 1 Hz 以下に適用した場合、様々な問題点が顕在化することが分かってきた。そのため、NMIJ の音波振動標準研究グループでは、液柱型圧力計の原理を用いた音圧発生装置を開発中である。まずは当該装置によりマイクロホンの感度校正を行い、当該装置では校正できないような気圧計などは当該装置で校正したマイクロホンを参照標準とした比較校正により、各機器の振幅・位相の校正を可能とする計画である。校正値を踏まえてユーザーが計測機器の調整あるいは測定値の補正を行うことで、機器により測定結果に違いが生じる問題の多くが解決し、超低周波音計測を通じてより信頼性の高い情報を得られるようになると期待される。

さて、

“本調査研究では超低周波音計測の現状と課題について調査し、今後の対応について考察した。”

であるが、

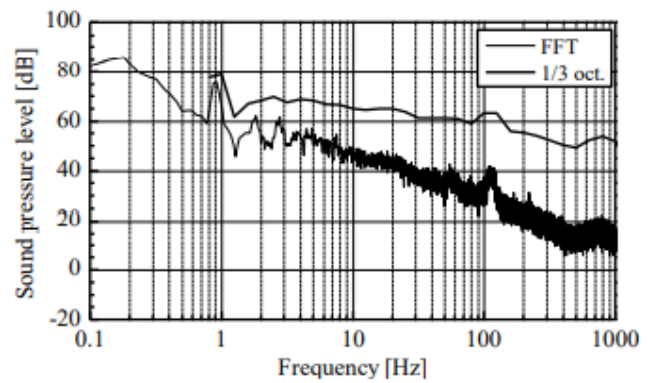
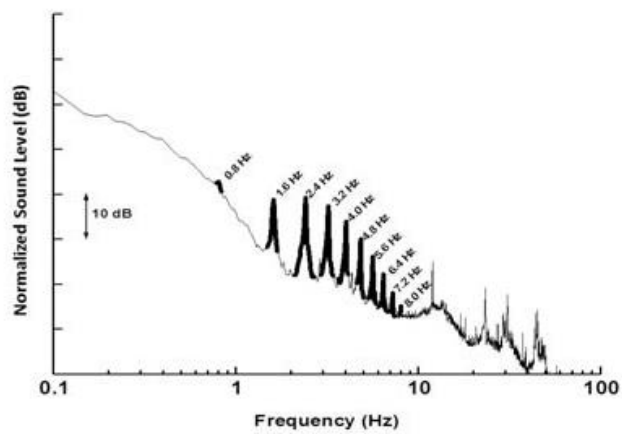
風車音の面から見ると、課題の把握さえも出来ていない。

大型風車が立ち並ぶ時代であるにも関わらず、小型風車や低周波音問題の時代の計測がそのまま残っている。G 特性音圧レベルと 1 Hz からの 1/3 オクターブ解析です。更に、FFT の使い方もせっかくの技術を捻じ曲げた使い方になっている。

これらによって、風車音被害の原因が隠蔽されているのです。

例えば、
次のグラフですが、次の様にすれば作れます。

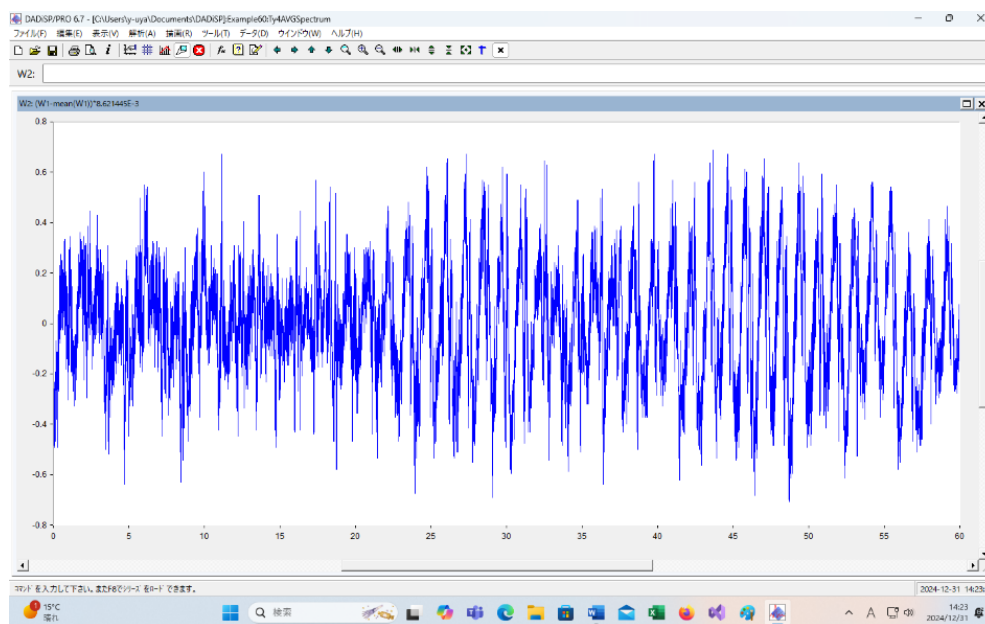
図2風力タービンの超低周波音測定



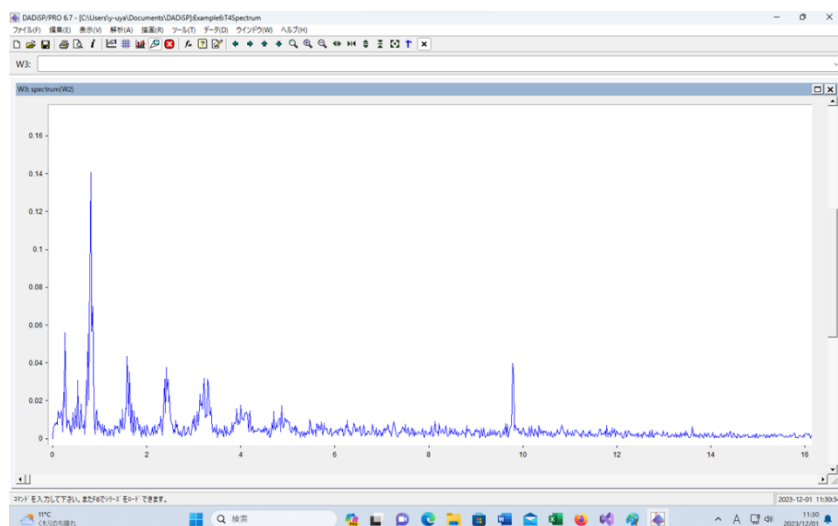
図(2)-11 図(2)-9の音圧のスペクトル

ただし、このグラフには問題があります。

風車音の波形は次のグラフです。



周波数スペクトルとピーク値です。



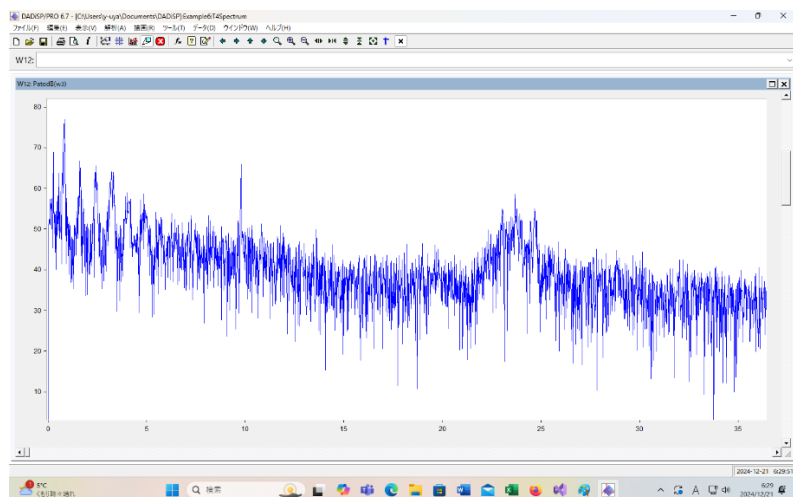
周波数	周波数/0.8167	音圧[Pa]
0.2667	0.3266	0.0560
0.5333	0.6530	0.0309
0.8167	1.0000	0.1405
1.5833	1.9387	0.0436
2.4167	2.9591	0.0377
3.2167	3.9387	0.0317
4.0000	4.8978	0.0177
4.8667	5.9590	0.0173
5.4667	6.6936	0.0101
6.2667	7.6732	0.0098

1.2Hz では、0.005Pa であり、6.2667Hz での音圧 0.0098Pa の半分程度です。4.8Hz の音圧は、0.017Pa 程度であり、0.005Pa の 3 倍です。

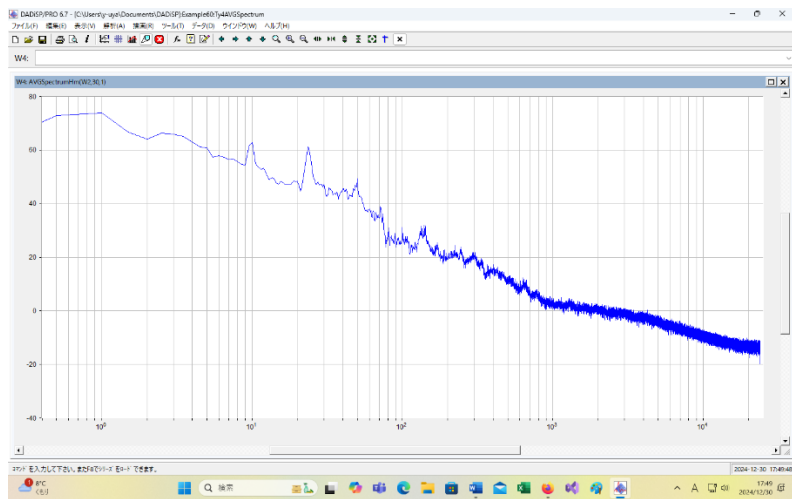
カナダのグラフは、計算方法が風車音の超低周波音の性質把握や超低周波音が発生する仕組みを解明できないグラフです。更に、直接的な健康被害である“頭痛”との関連を見つけれられないグラフなのです。

上のグラフの一番音圧が高い周波数 0.816Hz が、RZ/60 に対応します。(R は 1 分間の回転数、Z は翼の枚数)。他のピーク値の発生も必然的であり、明確な理由があります。

上のグラフを、単純に dB 表示に変えると、次のぎざぎざのあるグラフになるのです。

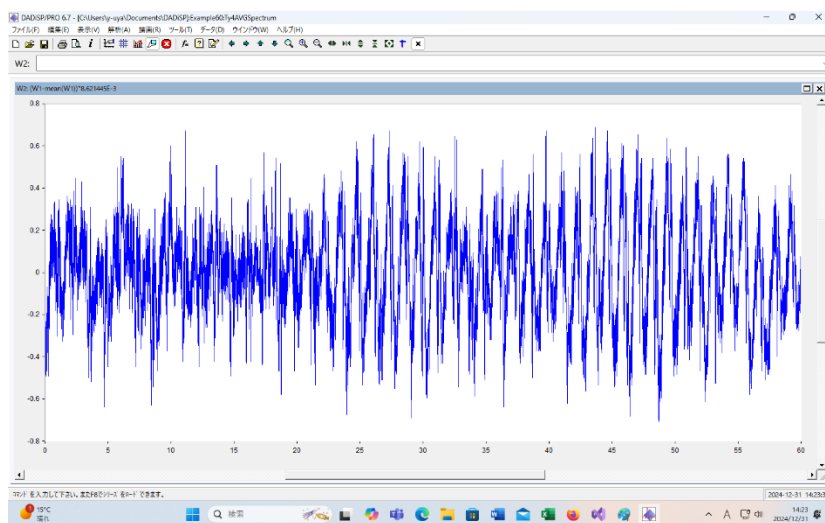


周波数スペクトルを 30 回計算して、その平均値を取ってから、同様の処理をすると次のグラフになります。

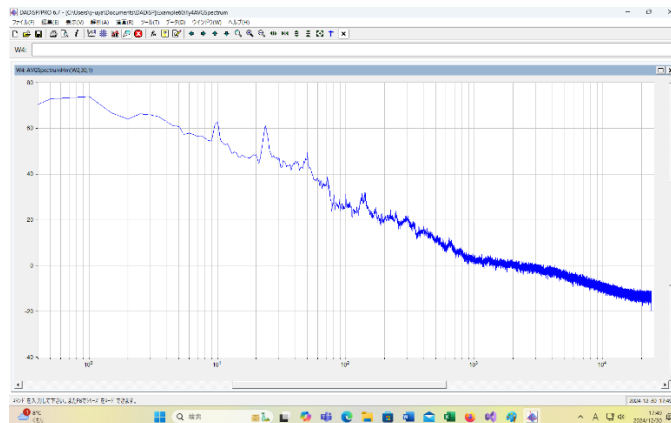
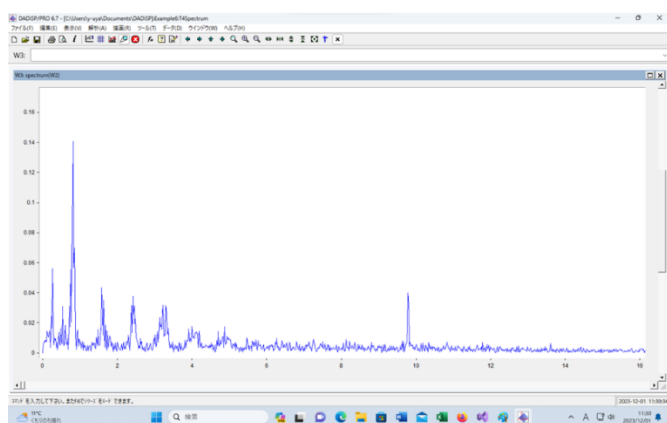


風車音の特徴が消えてしまっています。

このグラフでは、風車音が発生する仕組みを解明出来ません。



からの処理で、2つのグラフが得られます。



左を選べば、風車音が発生する仕組みや頭痛が起きる理由を解明できるが、右のグラフを選べば風車音被害の原因は究明できなくなります。

どちらを選択するかは、被害を実際に起きていると考えるか、被害の可能性が有ると考えるかの違いです。超低周波音の解析技術は色々です。掲げる課題と方針によってその技術の価値が決まって来るのです。

左の最大音圧レベルは 0.81Hz で 76.9 dB ですが、右の最大音圧レベルは 73.8 dB です。
平均を取った結果、音のエネルギーが半分の数値になっています。

音圧レベルが 1dB の場合、

$$1 = 10 \log(p_1^2 / p_0^2)$$

$$p_1^2 = 10^{(1/10)} \times p_0^2$$

$$= 10^{(1/10)} \times 4 \times 10^{-10}$$

$$= 5.036 \times 10^{-10}$$

ここで音のエネルギーが 2 倍（同じ音量を出している音源の個数が 1 個から 2 個になった場合）の音圧レベルは、

$$L = 10 \log(2 \times p_1^2 / p_0^2)$$

$$= 10 \log(10.072 / 4)$$

$$= 10 \times 0.4$$

$$= 4 \text{ dB}$$

となります。1dB の音と 1dB の音を合わせると 4dB になるという事です。

上記の式は次のように変形できます。

$$L = 10 \log(2 \times p_1^2 / p_0^2)$$

$$= 10 \log(2) + 10 \log(p_1^2 / p_0^2)$$

$$= 10 \times 0.3 + 1$$

$$= 3 + 1$$

$$= 4 \text{ dB}$$

$$\ast 4\text{dB} \text{ (2 個の場合)} - 1\text{dB} \text{ (1 個の場合)} = 3\text{dB}$$

つまり、エネルギーが 2 倍になると 3dB 増加するという事です。

また、

“1 Hz 以下については、音響標準・圧力標準ともに標準が整備されておらず、計測機器の校正法も未確立である。”

ならば、

平野氏自身が標準を提案すれば良いのです。提案しないのは、研究者としては怠慢以外の何者でもありません。

また、

“校正値を踏まえてユーザーが計測機器の調整あるいは測定値の補正を行うことで、機器により測定結果に違いが生じる問題の多くが解決し、超低周波音計測を通じてより信頼性の高い情報を得られるようになると期待される。”

ですが、

計測値の妥当性は、物理学的な検証を含めて考える必要があります。

2つの計測結果が同一の値であったとしても、両方とも間違っている可能性が有ります。

正しさの根拠として、物理学的な根拠が必要です。

平野氏は、風車音が発生する仕組みとその性質の関連を課題にしていない。だから、視野が狭くなり、聴覚閾値だけと比較して、安全であるかのような書き方をしてしまうのです。これは、学問が退化したと言う具体例です。

計測値の関係を調べるには、周波数分解能を一致させておかないと計測値の比較が困難になる。ISO7196での中心周波数は、0.25, 0.315, 0.4, 0.5, 0.8, 1.00, 1.25, 、Hzである、

F F Tでの周波数分解能が 2.5H zでは、 $0.25+2.5=2.75$ H zとなるので、0.25, 0.315, 0.4, 0.5, 0.8, 1.00, 1.25, 1.6, 2.0, 2.5H zでの数値は分離できない。

0.25H zと0.315H zの間の音圧を詳しく調べるには、周波数分解能を0.01H z程度に上げる必要がある。これが出来なければ、ISO7196に従った形での1/3オクターブ解析は出来ないのです。

他にも残念な点がある。

1. 文献の確認が不十分である。(確認したのならば、英語や日本語を理解する力が無い。)
2. 風車音はどのように計測すべきかの考察が欠けている。
3. 風車音の性質を実際の計測結果を使って確認する作業をしていない。
4. 風車音が発生する仕組みを考えようとしない。
5. 現実には起きている被害を見ようとしない。
6. 被害と風車音の関連を追及しない。

では、詳しく見てゆきます。

風車音をどのように計測すべきかの考察が欠けている。

次のグラフは、1/3 オクターブ解析の結果である。

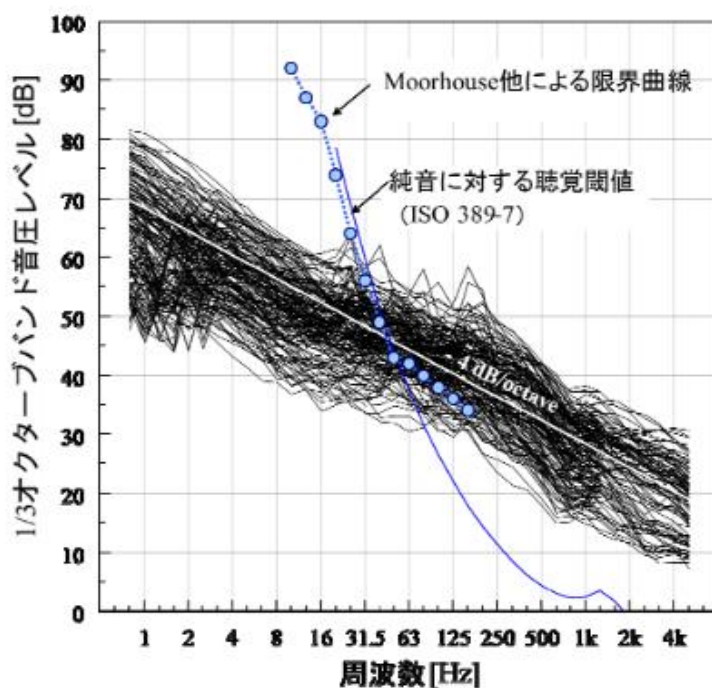
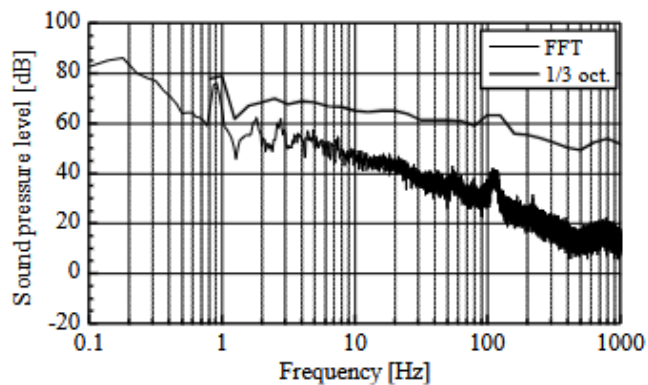


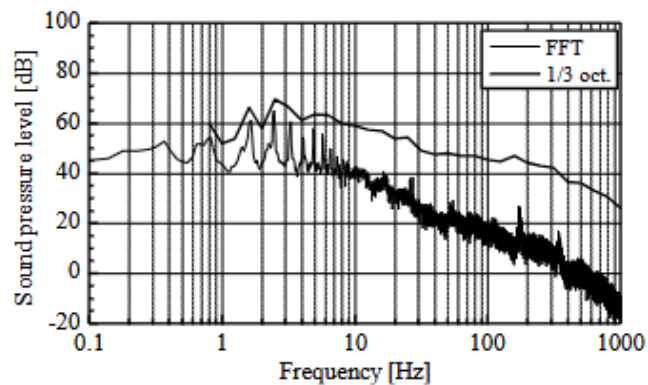
図 3 全国 29 の風力発電施設周辺 164 地点における風車騒音の周波数特性の分析結果

定義域を拡張したグラフもある。

図(2)-10 2,500 kW風車7機の施設から561m離れた点における音圧とその自己相関関数



図(2)-11 図(2)-9の音圧のスペクトル



図(2)-12 図(2)-10の音圧のスペクトル

これらのグラフは、二重防風スクリーンを使って計測されたものです。

課題名 S2-11 風力発電等による低周波音の人への影響評価に関する研究

課題代表者名 橘秀樹（千葉工業大学附属総合研究所教授）

研究実施期間 平成 22～24 年度

にある、



試作・2次Wind Screen
(DH -160)

20cmφ全天候型Wind Screen
(RION WS-03)

計測用1/2 in.マイクロホン

写真(1)-1 本研究で試作した二次防風スクリーン

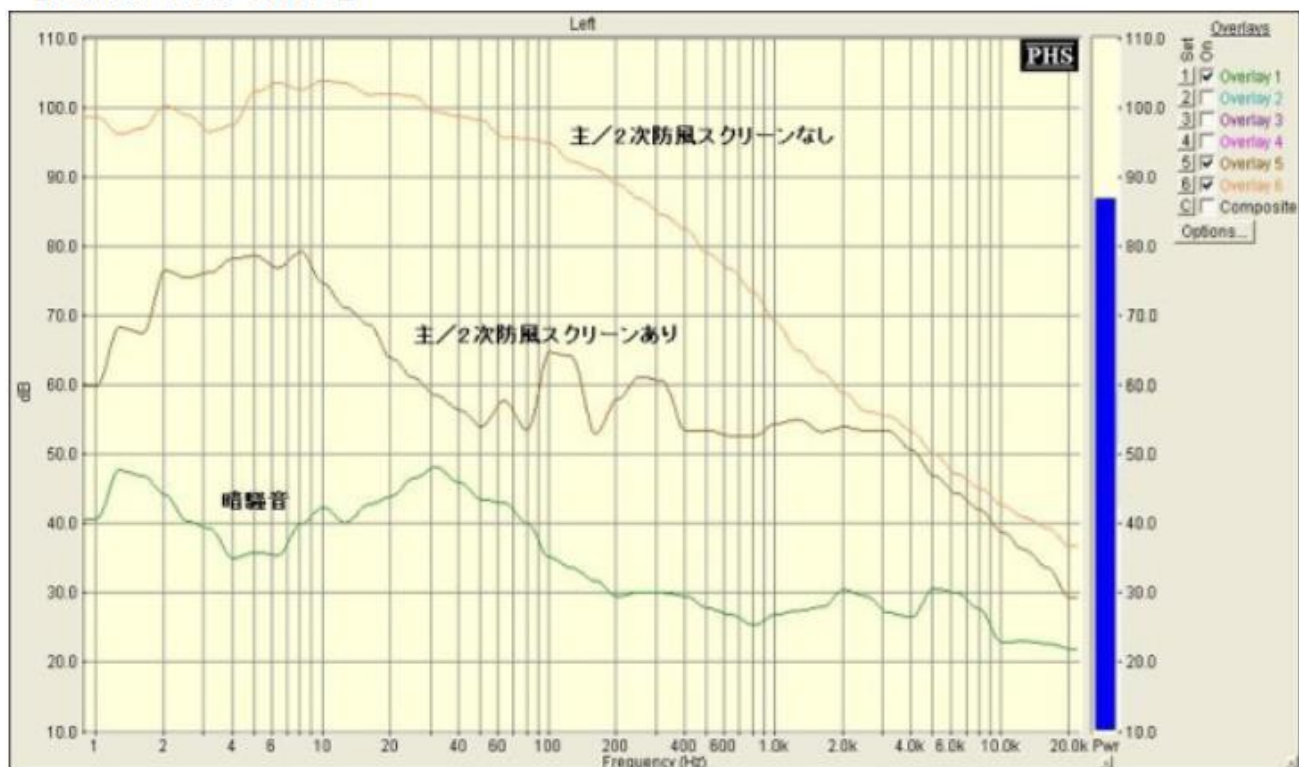
二重防風スクリーンの機能は、
[防風スクリーン](#)の効果は次のものである。

2次防風スクリーン Φ460×230(H)

主防風スクリーン Φ90半割内蔵

組 立 : 簡易取り付け方式 (約10分)

【風切音減少効果】



1Hz で 38 d B、5Hz で 20 d B 程度の減衰があります。

音の大きさに〇〇デシベルの差があるとは？	大きさは何倍なのか
60デシベルの差とは→	百万倍の差
50デシベルの差とは→	10万倍の差
40デシベルの差とは→	1万倍の差
30デシベルの差とは→	1千倍の差
20デシベルの差とは→	100倍の差
10デシベルの差とは→	10倍の差

dBの差 = $10 \log(1/A)$

二重防風スクリーンを付けて計測した結果は、1～500Hz の間では、20 d B～40 d B 程度の減衰となるので、実際の音圧の 1/100～1/10000 程度の数値として観測されます。1Hz では、38 d B の減衰です。

普通の防音窓には、このような特別な効果はありません。

20Hz～200Hz の音ならば、防音窓も少しは効果があったのですが、

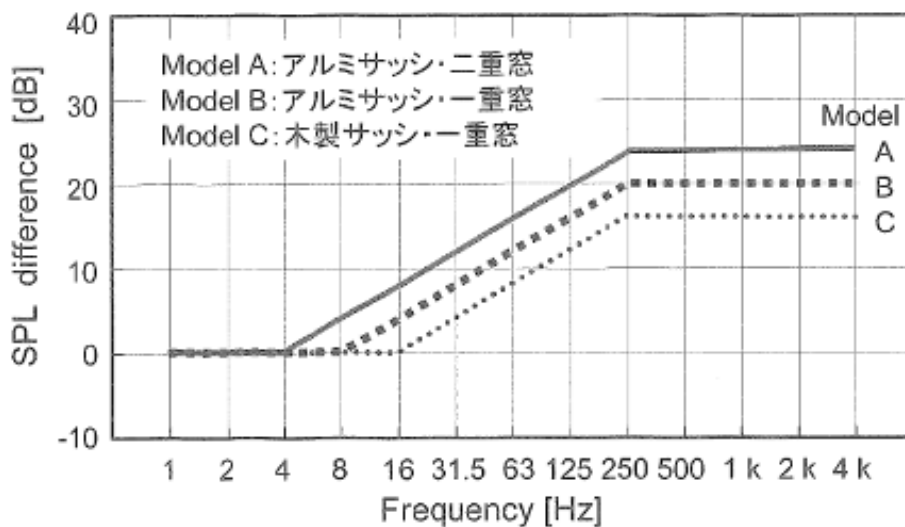


図 4 開口部構造別のハウスフィルター・モデルの案

二重防風スクリーンを付けて計測した結果、1Hz で 80 d B だった場合は、室内での音圧レベルは $80+38=118$ d B となるのです。計測の時は、二重防風クリーンのお陰で、38 d B だけ小さい数値として計測されるが、家の中へ入ってくるときは、減衰しないで入ってくることになります。

風車からの 0.5Hz～4Hz の音に対して防音効果のある材質が見つかりません。計測結果の数値は低く見せかけても、被害は減らないのです。

このような計測の結果、被害者が単なるクレーマーであるかのような扱いを受ける事になるのです。

根本的な原因は風車の構造（水平な回転軸）にあるのです。

この事は市民の常識です。分からないふりをするのは、環境省と学者くらいのものです。

昔の環境省は

“ 4. [低周波音防止技術の概要](#)

4.1.5 風車

風車の超低周波音の発生原理は基本的には送風機のいわゆる回転音と呼ばれるものと似ている。大型発電用風車の場合は、羽根の枚数が少なく、回転数も小さいために正常運転でも超低周波音を発生することがある。

その基本周波数 f (Hz) は、翼の回転数を R (rpm)、翼枚数を Z (枚) とすると

$$f = RZ/60 \text{ (Hz)}$$

で与えられ、この基本周波数とその高次の周波数が卓越する。

大型発電用風車の場合は、一般に翼枚数は 1～3 枚 (3 枚が主)、回転数は 30～60 (rpm) 程度であり、基本周波数は数 Hz 以下になる。“

(基本周波数の倍音も出ている。)

と言っていました。これで計算すると、大型風車では、 $f = RZ/60 = 0.5 \sim 1$ (Hz) となります。これは、超低周波音が出ているという事になります。

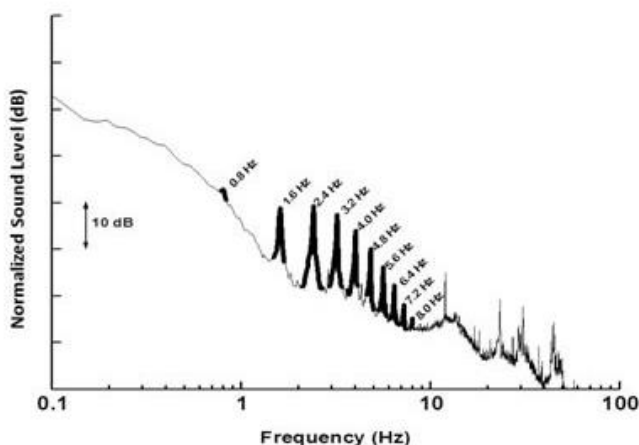
(正確に言えば、基本周波数を f とするき、 $f/3$ 、 $2f/3$ 、 f 、 $2f$ 、 $3f$ 、 \dots 、 H_z の周波数が卓越するのです。)

なお、 $f = RZ/60$ (Hz) に関しては、

カナダ政府の HP にある、[ノイズ入門](#)には次のグラフがあります。

The X-axis on the graph depicts frequencies from 0.1 Hertz (Hz) to 100 Hz and the Y-axis corresponds to the strength of the measured sound in decibels (dB). The figure is an example of a measurement taken at **2.5KM from four wind turbines** on a clear summer night. The peaks in the figure at 0.8, 1.6, 2.4, 3.2, 4.0, 4.8, 5.6, 6.4, 7.2 and 8.0 Hz confirm that the measured sound is from the wind turbines because these particular wind turbines are known to produce sound in these specific frequencies.

グラフの X 軸は 0.1 ヘルツ (Hz) から 100Hz までの周波数を表し、Y 軸は測定された音の強さをデシベル (dB) で表します。この図は、夏の晴れた夜に 4 基の風力タービンから **2.5km 離れた場所** で測定した例です。図の 0.8、1.6、2.4、3.2、4.0、4.8、5.6、6.4、7.2、8.0Hz のピークは、これらの特定の風力タービンがこれらの特定の周波数の音を生成することが知られているため、測定された音が風力タービンからのものであることを裏付けています。

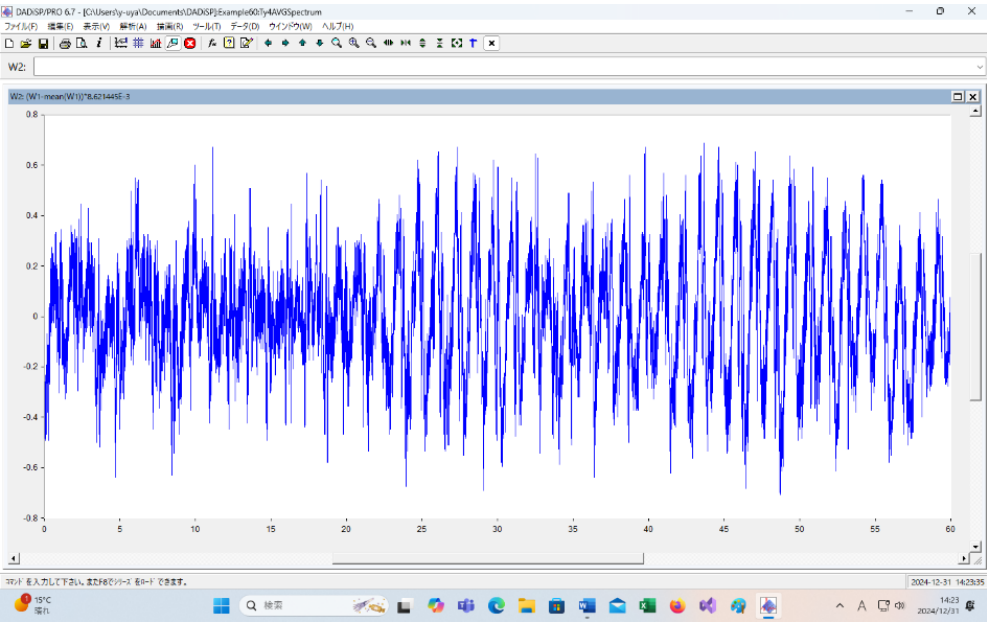


このグラフでは、1.2Hz での音圧が、4.8Hz での音圧と同程度になっています。

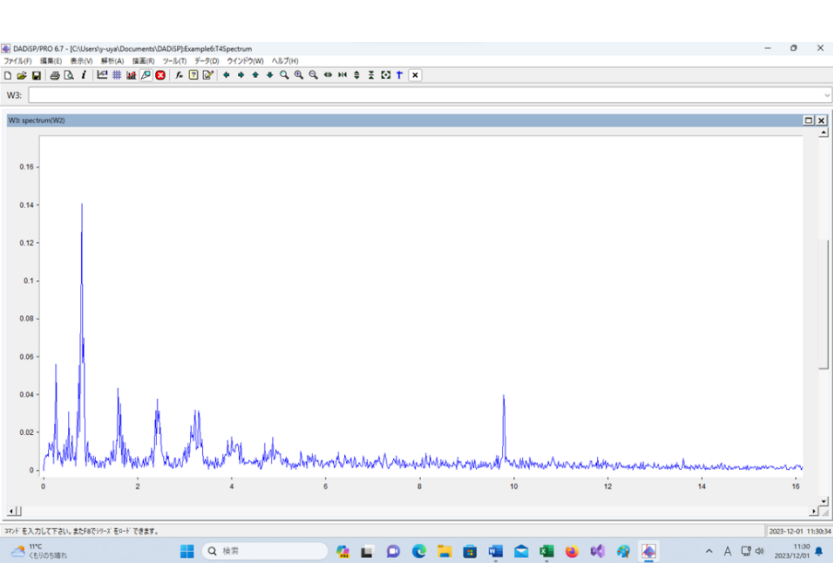
風車音が発生する仕組みを考えれば、この数値は大きすぎる値です。

ただし、このグラフには問題があります。

風車音の波形は次のグラフです。



周波数スペクトルとピーク値です。



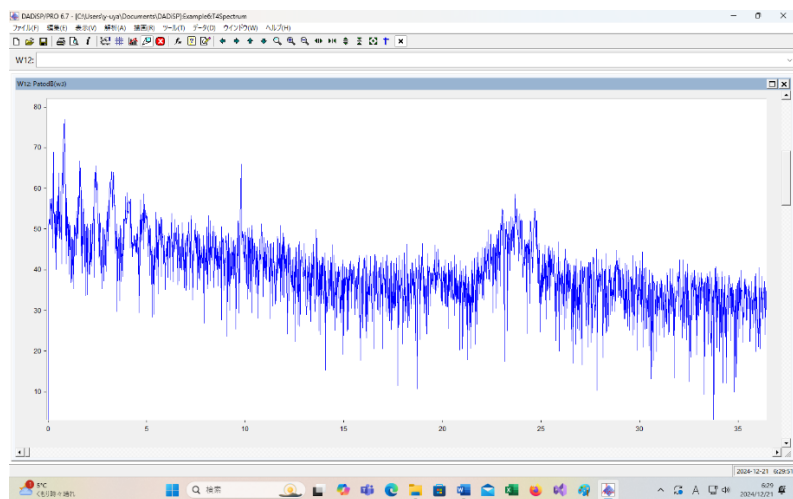
周波数	周波数/0.8167	音圧[Pa]
0.2667	0.3266	0.0560
0.5333	0.6530	0.0309
0.8167	1.0000	0.1405
1.5833	1.9387	0.0436
2.4167	2.9591	0.0377
3.2167	3.9387	0.0317
4.0000	4.8978	0.0177
4.8667	5.9590	0.0173
5.4667	6.6936	0.0101
6.2667	7.6732	0.0098

1.2Hz では、0.005Pa であり、6.2667Hz での音圧 0.0098Pa の半分程度です。4.8Hz の音圧は、0.017Pa 程度であり、0.005Pa の 3 倍です。

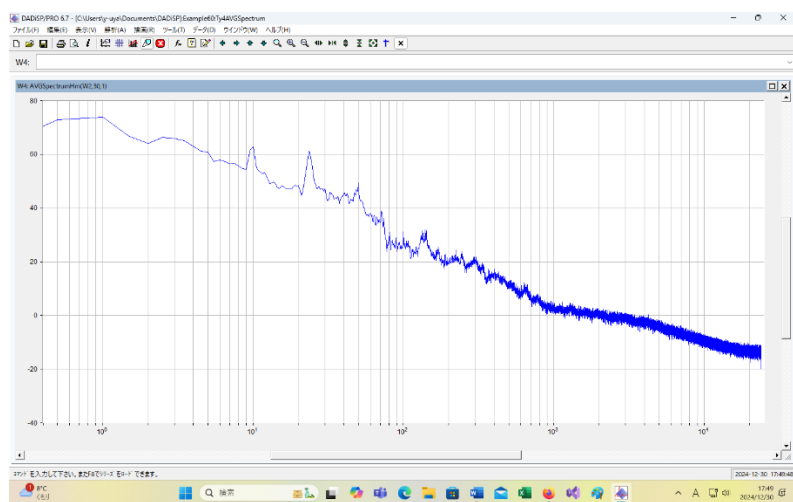
カナダのグラフは、計算方法が風車音の超低周波音の性質把握や超低周波音が発生する仕組みを解明できないグラフです。更に、直接的な健康被害である“頭痛”との関連を見つけれられないグラフなのです。

上のグラフの一番音圧が高い周波数 0.816Hz が、RZ/60 に対応します。(R は 1 分間の回転数、Z は翼の枚数)。他のピーク値の発生も必然的であり、明確な理由があります。

上のグラフを、単純に dB 表示に変えると、次のぎざぎざのあるグラフになるのです。

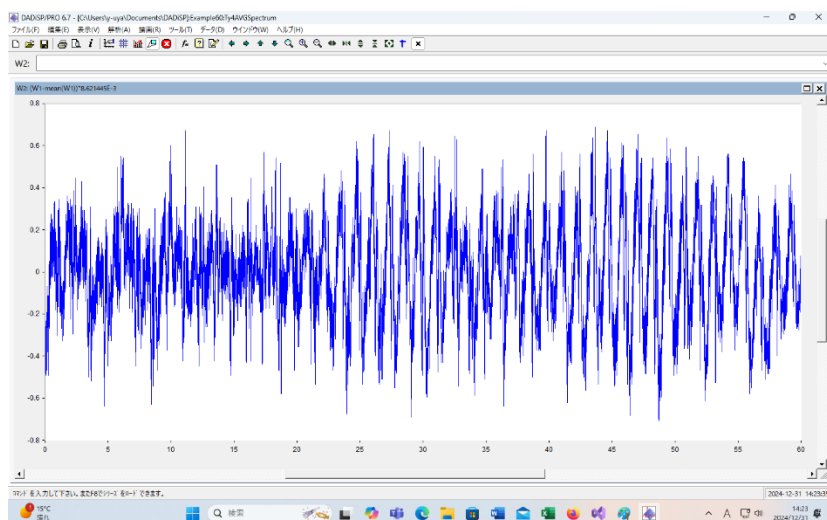


周波数スペクトルを 30 回計算して、その平均値を取ってから、同様の処理をすると次のグラフになります。

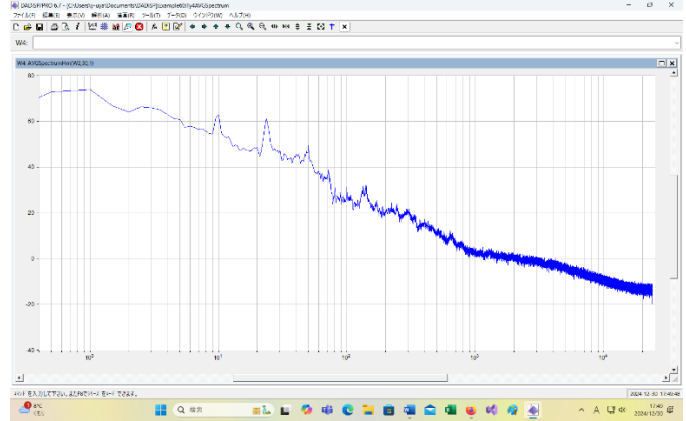
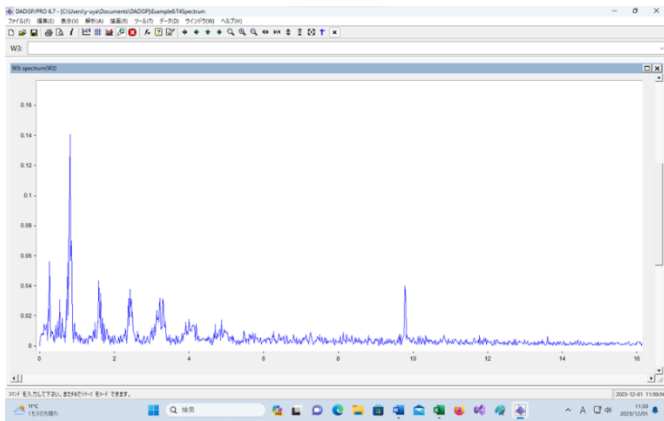


風車音の特徴が消えてしまっています。

このグラフでは、風車音が発生する仕組みを解明出来ません。



からの処理で、2 つのグラフが得られます。



左を選べば、風車音が発生する仕組みや頭痛が起きる理由を解明できるが、右のグラフを選べば風車音被害の原因は究明できなくなります。

どちらを選択するかは、被害を実際に起こしていると考えるか、被害の可能性が有ると考えるかの違いです。超低周波音の解析技術は色々です。掲げる課題と方針によってその技術の価値が決まって来るのです。

左の最大音圧レベルは 0.81Hz で 76.9 d B ですが、右の最大音圧レベルは 73.8 d B です。平均を取った結果、音のエネルギーが半分の数値になっています。

音圧レベルが 1dB の場合、

$$1 = 10 \log(p_1^2 / p_0^2)$$

$$p_1^2 = 10^{(1/10)} \times p_0^2$$

$$= 10^{(1/10)} \times 4 \times 10^{-10}$$

$$= 5.036 \times 10^{-10}$$

ここで音のエネルギーが 2 倍（同じ音量を出している音源の個数が 1 個から 2 個になった場合）の音圧レベルは、

$$L = 10 \log(2 \times p_1^2 / p_0^2)$$

$$= 10 \log(10.072 / 4)$$

$$= 10 \times 0.4$$

$$= 4 \text{ dB}$$

となります。1dB の音と 1dB の音を合わせると 4dB になるという事です。

上記の式は次のように変形できます。

$$L = 10 \log(2 \times p_1^2 / p_0^2)$$

$$= 10 \log(2) + 10 \log(p_1^2 / p_0^2)$$

$$= 10 \times 0.3 + 1$$

$$= 3 + 1$$

$$= 4 \text{ dB}$$

$$\text{※} 4\text{dB} \text{（2 個の場合）} - 1\text{dB} \text{（1 個の場合）} = 3\text{dB}$$

つまり、エネルギーが 2 倍になると 3dB 増加するという事です。

G 特性音圧レベル ISO-7196

3.3 測定量

低周波音の測定量は、参照値の基礎となる実験結果が周波数別に示されていることから、1/3 オクターブバンド音圧レベルを測定する。なお、20Hz 以下の超低周波音については ISO-7196 に評価加重特性が規定されていることから、超低周波音による心身への不快感に関する評価にあたっては、G 特性音圧レベルとする。

(3) G 特性

0-20Hz の超低周波音に対して A 特性での重みづけを真似た周波数補正特性で、重みについては [ISO7196-1995](#) で 0.25～315Hz の範囲に対して規定されている。

Table 2 — Nominal frequency response			
Nominal one-third-octave frequency Hz	Relative response dB		
0,25	− 88,0	4,0	− 16,0
0,315	− 80,0	5,0	− 12,0
0,4	− 72,1	6,3	− 8,0
0,5	− 64,3	8,0	− 4,0
0,63	− 56,6	10,0	0,0
0,8	− 49,5	12,5	4,0
1,00	− 43,0	16,0	7,7
1,25	− 37,5	20,0	9,0
1,6	− 32,6	25,0	3,7
2,0	− 28,3	31,5	− 4,0
2,5	− 24,1	40	− 12,0
3,15	− 20,0	50	− 20,0
		63	− 28,0
		80	− 36,0
		100	− 44,0
		125	− 52,0
		160	− 60,0
		200	− 68,0
		250	− 76,0
		315	− 84,0

0.5Hz では、− 64.3 d B、1Hz では、− 43.0 d B の重みづけになっている。

これだと、0.5Hz での音圧が 2 倍になっても、G 特性音圧レベルの数値はほとんど変化しない。これは、圧迫感によるアノイアンス（不快感）を把握する数値としては、G 特性音圧レベルの数値は不適當であることを意味しています。

人間の感覚器官が聴覚だけならば、ラウドネス（うるささ）だけに注目すれば良いのですが、人間には他の感覚器官もあり、人間の体は物理的な影響もうける。

風車音の被害を把握するには、8つの観点が必要です。

音がうるさい

圧迫感や吐き気などによる不快感

直接的な健康被害としての頭痛

音が原因の建具や床のガタツキを感じる

夜間の光（航空障害灯）による安眠妨害

風車の陰によるイライラ

風車振動の地中伝搬（[大型風車による地盤振動伝播](#) 小野寺 英輝）

音源としての風車の形と距離減衰、風車音の指向性

です。

どれが起きても、睡眠を妨げられます。

風車での被害としては、安眠妨害が重要です。安眠出来ない日が続けば、健康被害が生じます。この場合は、（風車音→安眠妨害→健康被害）となるので、“間接的な健康被害”と表現することにします。特徴は、風車の影響が、時間的な継続性を持っている形で影響していることです。

頭痛は健康被害です。一定の条件が整えば、風車音の性質による物理的な現象として、直接的に発生します。“頭痛は直接的な健康被害”と言えます。

風車と安眠妨害の関係を詳しく考えます。

- ① 風車音発生→粗密波として聴覚に作用→ラウドネス（うるささ）として知覚→覚醒
- ② 風車音発生→ゆっくりした圧力変動として作用→アノイアンス（圧迫感が中心）として知覚→覚醒
- ③ 風車音発生→建具や床の振動として作用→2 次的な音によるラウドネス（うるささ）として知覚→覚醒
- ④ 風車音発生→建具や床の振動として作用→振動そのものをアノイアンスとして知覚→覚醒
- ⑤ 風車の振動→振動の地中伝搬→建具や床の振動→振動そのものをアノイアンスとして知覚→覚醒

- ① のケースは、聴覚閾値以下であれば起こらないと考えられます。
- ② のケースは、圧迫感等の不快感として、風車音の影響が知覚されますので、参照値と指針値の関係を見れば、超低周波音の領域では、圧迫感の閾値は、聴覚閾値よりも小さいのです。
- ③ のケースは、2 Hz では 65 dB もあれば、ガタツキによる安眠妨害が起きる事から、超低周波音の領域にある音については、ガタツキとして風車の影響を知覚して、覚醒する場合の閾値は 65 dB 以下であると言えます。グラフを見れば、全国 164 か所の風車の半数がこの条件を満たしていることが分ります。
- ④ のケースは、③のケースと同様です。
- ⑤ のケースは、（[大型風車による地盤振動伝播](#) 小野寺 英輝）を見れば、

“大型風車の運転に起因する低周波音(空気振動；周波数 20～100Hz 程度)に関する問題も認識されてきた。ただし、この空気振動は、距離により指数関数的に減少するので、大型風車による騒音はアノイアンス(不快感)はあるにせよ、受忍限度内とした判決がある(1)。

しかし、健康被害の訴えが存在すること自体は否定できない(2)。この事実は、減衰率の大きい空気振動(空振)だけではなく、距離による減衰が空気中に比して少ない、地盤内の振動伝播も検討すべきではないかということを示唆する。

“次に、これまでの計測結果とヒアリング内容を対照してみたい。ヒアリングによると、風車の稼働に伴う体調への影響は、ある限定された状況で、強度が増すという申告を得た。今般のヒアリングにおいては、具体的には以下の 3 項目が挙げられた。

1. 雨の日には 24 時間強い不快感を感じる
2. 水田にいとると楽になる
3. 冬がひどく、夏はいくらかよい“

“計測データを見ると、Ⅲでは、Ⅳ、Ⅴと比較して 0.1~2Hz の範囲の振幅値も大きくなっている。この領域の振動は、俗にいう船酔いの原因となる振動(揺動)周波数(8)に近接している。風車から直線距離で 950m 離れたⅥに関しても距離減衰に伴い値は非常に僅かであるが、振動特性は類似しており、これも、およそ 1Hz 以下で上昇がみられる。Ⅷに関しては、0.08Hz 程度以下での上昇があるが、他の 2 つに比してその傾きは小さい。”

“これらのうち、アノイアンス申告が顕著であったのがⅥ関係地域であり、次いでⅧ地(民間の作業所)であるが、後者は風車に近接していることから、一般の空力騒音によるものではないかと考えられる。”
として、詳細な研究結果が示されています。

これは、超低周波音の知覚ではありませんが、風車の影響であり、アノイアンス(不快感)と関連が深く、睡眠を妨害すると言えます。

超低周波音(知覚できない)

は、

超低周波音(聴覚での感知は困難だが、圧迫感や振動の形で知覚されて、安眠妨害による間接的な健康被害の原因となる)

と書き換える必要があります。

さらに、

“20Hz 以下の超低周波音領域は、すべて知覚閾値を下回っている”

は、

“20Hz 以下の超低周波音領域は、聴覚閾値を下回っているが、超低周波音は、圧迫感や振動としても知覚される。振動に関しては 2Hz では 65dB 程度が閾値となり、全国 164 か所の風車の半数以上で、この閾値を上回っている”

と書き換えるべきです。

被害での、圧迫感に関係の深い最大音圧を確認するには、G 特性音圧レベルや 1/3 オクターブ解析での数値では無理です。

さらに、風車音と他の環境騒音を比較するには、計算できる最大周波数を大きくする必要があります。また、周波数分解能を高く(0.01Hz 程度)して、周波数と音圧の関係を細かく調べることも必要です。

また、“風雑音”の問題も解決する必要があります。

2. 概要

NL-62 は精密騒音計 NL-52 / 普通騒音計 NL-42 の上位機種であり、従来製品である低周波音レベル計 NA-18A の後継機種に位置付けられる。

本器は騒音計の各種法規である計量法、JIS C 1509-1:2005 クラス 1、IEC 61672-1:2002 Class 1、ANSI S1.4-1983、ANSI S1.43-1997 に加え ISO 7196:1995（G 特性） に適合する。またウインドスクリーン装着時、マイクロホン延長時も同規格に適合する。

NL-62 の主な機能は NL-52 と同じであるため、小林理研ニュース No. 113（2011/7）を参照するとして、ここでは新規開発したマイクロホン UC-59L およびオプション製品について述べる。

3. マイクロホン UC-59L（特許出願中）

3.1. 特徴

UC-59L は IEC 61672-1（JIS C 1509-1）が規定する Class1 の騒音計に使用することができる 1/2 インチエレクトレットコンデンサマイクロホンで、さらに低周波領域から可聴領域までの広い周波数範囲（1 Hz～20 kHz） を測定することができる。

3.2. 構造

図 2 に UC-59L の断面図を示す。UC-59（測定周波数範囲：10 Hz～20 kHz）と基本的な構造は同じであるが、背気室と外部との間に形成される通気路を狭く、長くすることによって音響インピーダンスを大きくし、カットオフ周波数を低周波領域まで伸ばしている。通気路は気圧調整スペーサによって形成され、絶縁物とスペーサ上部の構造物に挟まれることで、背気室と外部をつなぐトンネルとなって背気室と外部との気圧を調整する働きを持つ。通気路がない場合、背気室は密閉された状態となり、外部の気圧変化に追従できなくなる。逆に通気路が大きい場合は外部の気圧変化への追従が速くなり、低周波数の感度が低下する。

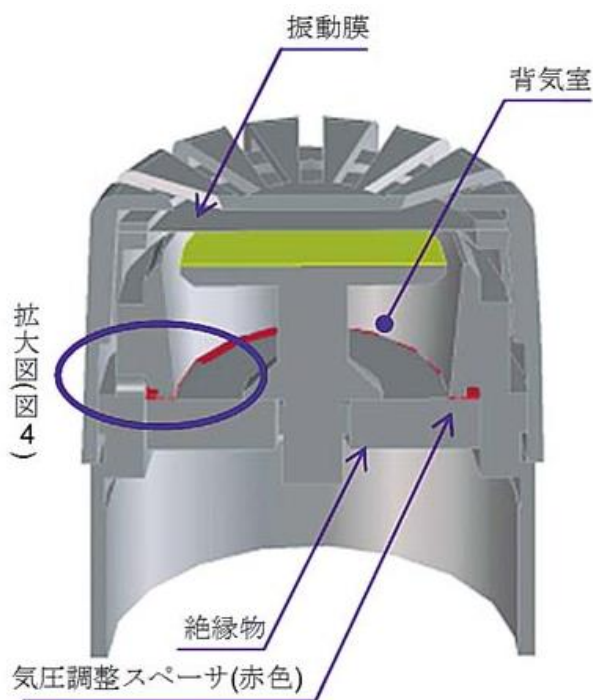


図2 UC-59Lの断面図

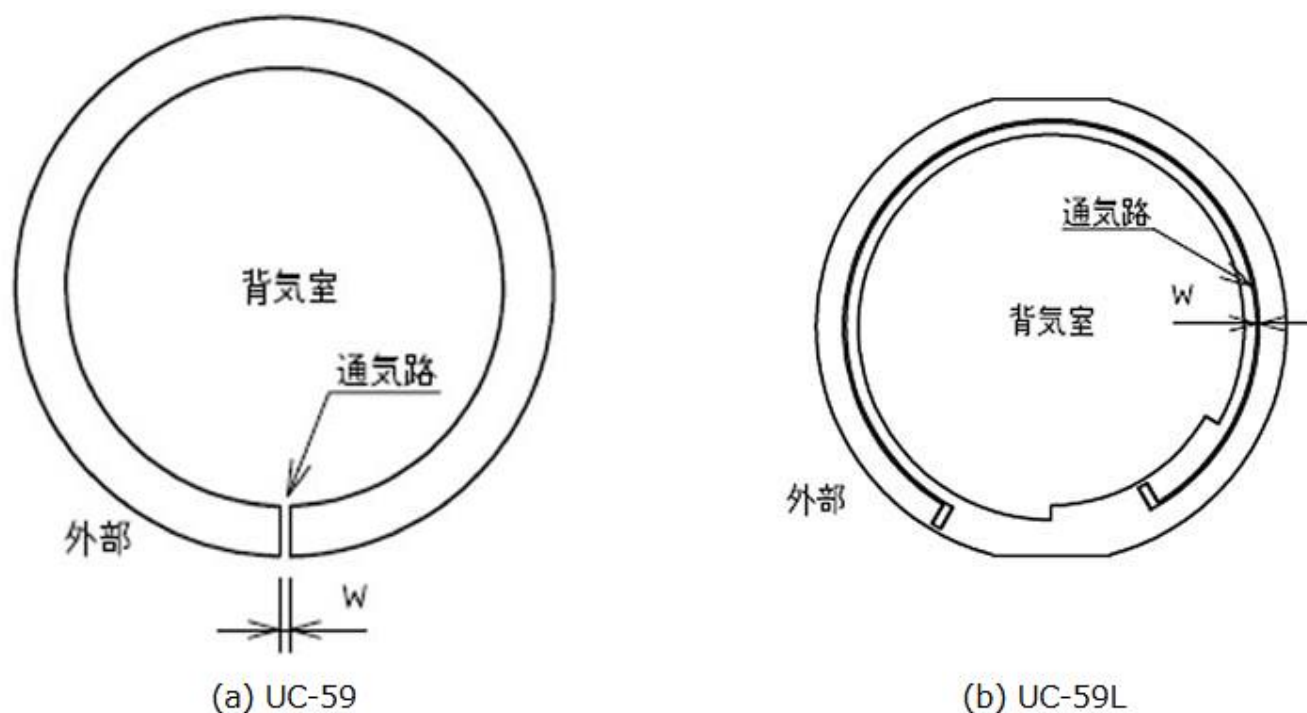


図3 気圧調整スペーサ

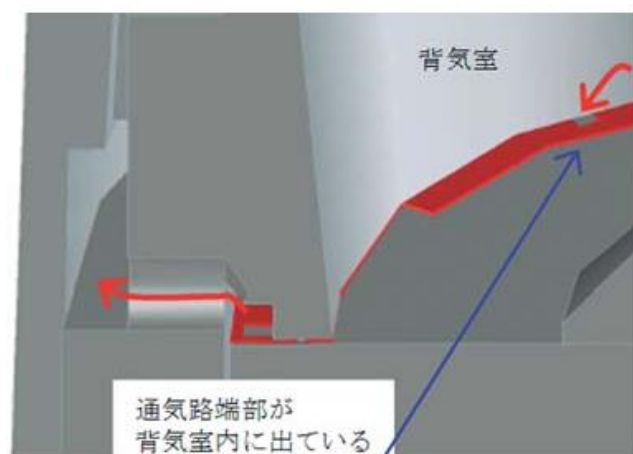


図4 気圧調整時の空気の流れ
(赤矢印が空気の流れを示す)

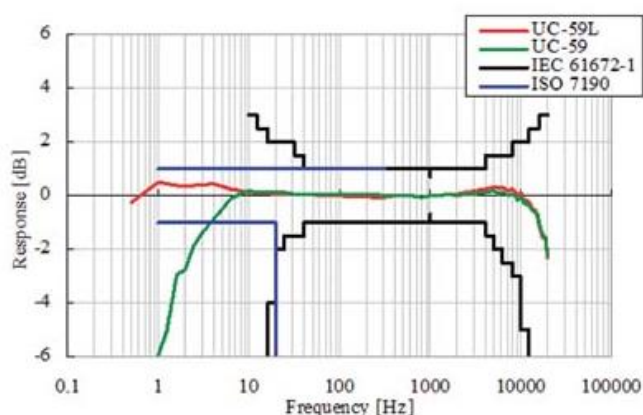


図5 UC-59LとUC-59の代表周波数特性

3.3. 周波数特性

図5に UC-59L と UC-59 の代表周波数特性を示す（但し、UC-59L の 1Hz 未満、UC-59 の 10Hz 未満については参考値）。規格として IEC 61672-1 Class1 と ISO 7190 を示す。UC-59L は 1 Hz～20 kHz まで規格に十分対応していることがわかる。

3.4. 超低周波音のトレーサビリティ

可聴域においては音響カプラを使用した相互校正法（JIS C 5515 付属書 2 参照）によってマイクロホンを校正するが、1 Hz～20 Hz の校正には音響カプラ内でピストンを振動させることによって発生する音圧を用いる。ピストンの変位と音響カプラの容積から音圧を算出することによってマイクロホンを校正することができる。

2011 年度から産業技術総合研究所で超低周波音の校正サービスが開始されたことにより、超低周波音の音圧感度におけるトレーサビリティが確立された。

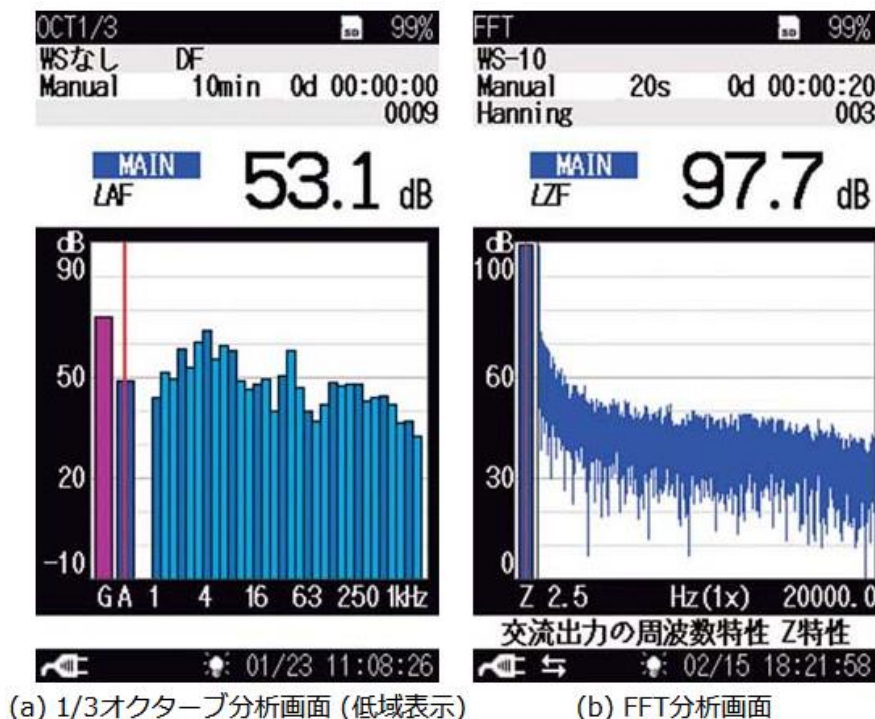


図6 各種オプション画面例

さて、

4. オプション製品

4.1. 波形収録プログラム

音圧波形は PCM 形式の WAVE ファイルとしてストアデータと共に SD カードに記録（録音）される。そのため、コンピュータ上で音圧波形の再生や再分析が可能である。サンプリング周波数は 48 kHz、24 kHz、16 kHz から選択でき、量子化ビット数は 24 bit、16 bit に対応している。

4.2. オクターブ・1/3 オクターブ実時間分析プログラム

1/3 オクターブ分析は 1 Hz～20 kHz の計 44 バンドを同時に演算することができる（図 6）。各バンドおよびオールパス値の 100 ms 毎のデータを自動記録する機能を有し、測定データは CSV 形式で SD カードに保存される。その他、室内騒音等級（NC 値）や任意に選択された周波数バンド間の合成（パーシャルオーバーオール）も表示可能である。

4.3. FFT 分析プログラム

FFT 分析に加えメインチャンネルのオールパス値を測定する（図 6）。分析周波数範囲は 20 kHz でスペクトルは 8,000 ライン（フレーム時間 400 ms、周波数分解能 2.5 Hz）である。時間窓はレクタングュラ、ハニングを用意している。また測定結果のレベルの高い上位 20 ラインの周波数とレベル値をリスト表示する機能を有する。

であるが、

0.5Hz の 2 倍は 1Hz であり、周波数分解能が 2.5Hz では、これらの区別ができないので、“FFT 分析プログラム” は使えない。

ISO7196 での 1/3 オクターブ解析は、0.25Hz から 315Hz なので、“オクターブ・1/3 オクターブ実時間分析プログラム” も使えない。

使えるのは、“波形収録プログラム” だけです。

サンプリング周波数は 48 k Hz、量子化ビットは他のデータとの比較を考えて 16bit とする。
FFT の計算対象は 60 秒または 120 秒以上の計測データとする。

[低周波音の基礎および伝搬・影響・評価](#)（落合博明 氏）には、

“低周波音の測定にあたっては G 特性音圧レベルと 1/3 オクターブバンド音圧レベルを測定する”
とあるが、

たとえ、ISO7196 に従ったとしても、1/3 オクターブ解析では、中心周波数を使うので、0.692Hz～0.869Hz は全て 0.775Hz（0.8Hz）として表示され、正確な周波数が不明となり周波数の微小な変化や周波数の倍音構造が把握できません。

[低周波音の測定方法に関するマニュアル](#)には、（平成 12 年 10 月 環境庁大気保全局）

“3) 風雑音と低周波音の見分け方

風による音圧レベルと対象とする音圧レベルの違いを判別するのは簡単ではないが、次のような点に注意するとよい。

- ・多くの場合、対象とする低周波音は定常的、周期的あるいは特徴的な音圧レベルの変化を示すはずである。
- ・風による音圧レベルは、不規則に変化する。“

とある。

0.5Hz 辺りでの規則性を把握するには、音圧を細かく調べる必要がある。0.01Hz よりも細かく調べないと、規則性が見つからない。

[平成 22 年度 移動発生源の低周波音等に関する検討調査等業務報告書](#) には、

“風車音の計測に関しては、

- ・統一した方法はない
- ・計測機器が規格化されていない “

と書かれている。

風車音か否かの判断基準となる 0.5～0.8Hz の音の測定に関しては、統一した方法が無く、また JIS 規格も無い。この部分の計測と解析は、G 特性音圧レベルや 1/3 オクターブ解析の技術では出来ないのです。

“無ければ、自分で作れば良い。”という事で、風車音の詳細な性質を調べる為に必要な関数を作成し、具体的なデータを使って風車音の解析を行ってみました。

私は DADISP を使っているが、過去の計測データと比較するには、機能が足りないので、超低周波音で使う解析ソフト“[Noise & Infrasound Analysis](#)”を追加した。さらに、DADiSP/WAV オーディオ モジュールが必要です。

リオン社の精密騒音計 NL-62 に、波形収録プログラム NX-42WR を追加して、サンプリングレートは 48 k Hz、平坦特性で（120 秒以上の時間）収録した Wav ファイルを解析する。

振動については、リオン社の振動レベル計 VM-55 に、波形収録プログラム VX-55WR を追加して収録した WAV ファイルを使いました。

録音データの解析方法

6. 1 G特性音圧レベル波形の記録

G特性を内蔵した精密騒音計（低周波音圧レベル計）を用いて G特性音圧レベルが録音してある場合には、録音器の出力をレベルレコーダの入力に接続して録音器を再生しそのまま低周波音のレベル波形記録を行う。はじめに、校正信号で解析系列の校正をする。次に、測定レンジを確認したのち、低周波音のレベル波形をレベルレコーダに記録させる。その際、レベルレコーダの動特性 SLOW（時定数は 1 秒）、紙送り速度は 1mm/s または 3mm/s とする。

平坦特性で録音してある場合、G特性の周波数補正回路があれば、その回路を通した出力信号をレベルレコーダで記録させれば、G特性音圧レベル波形を記録することができる。

6. 2 レベル処理器による統計処理

録音器の出力をレベル処理器の入力に接続して、一定時間毎の統計値を算出する。統計値の算出にあたっては、あらかじめ定めた時間内の最大値あるいはパワー平均値を算出する。レベル処理器の動特性は SLOW（時定数は 1 秒）に設定する。統計処理にあたっては、低周波音のレベル波形をレベルレコーダで記録させ、風の影響や対象外の発生源による影響のない区間をあらかじめチェックしておき、その区間を分析する。

6. 3 実時間周波数分析器による周波数分析

録音器の出力を実時間周波数分析器の入力に接続して低周波音のレベル波形をレベルレコーダでモニターしながら周波数分析を行う。はじめに、校正信号で解析系列の校正をする。次に、測定レンジを合わせたのち周波数分析を行う。

その際、実時間周波数分析器の動特性 SLOW（時定数は 1 秒）として 1/3 オクターブバンド分析を行う。周波数分析にあたっては、アナウンスメモ等を耳で確認しながら低周波音のレベル波形をレベルレコーダで記録させ、風の影響や対象外の発生源による影響のない区間をあらかじめチェックしておき、その区間を分析する。

変動の大きい低周波音や衝撃性の低周波音で、5Hz 以下の周波数帯域に主な成分がある場合には、オクターブバンドで周波数分析を行う。1/3 オクターブバンド分析の場合、5Hz 以下では正確な値が測定できない。

6. 4 風車音の録音と解析

リオン社の機材の場合、

UC-59L と SA-A1 では、周波数範囲 DC～20kHz または 0.25Hz～20kHz

NL-62A 測定範囲 1Hz～20000Hz

NL-52A 測定範囲 10Hz～20000Hz

NL-42A 測定範囲 20Hz～8000Hz

NL-27 測定範囲 20Hz～8000Hz

NA-28 測定範囲 12.5Hz～20000Hz

となっていて、一番低い周波数まで測れるのは、SA-A1 で 0.25Hz である。一見すると、SA-A1 以外では、0.5～0.8 Hz の音の計測や解析が不可能であるように見えるが、そうではない。

NL-62 と SA-A1 は同じマイクを使っている。波形収録プログラム（NX-42WR、SX-A1WR）を組み込めばマイクに掛かる音圧の変動を符号付整数の形で WAV ファイルとして記録することが出来る。

音圧変動を記録するときに、サンプリングレートを 48kHz とし、数値を 16 ビットの符号付整数として記録した場合

は、NL-62 でも、SA-A1 でも同じ数値が WAV ファイルに記録される。

測定範囲に差があるのは、計算量を多くして周波数分解能を上げているからである。周波数成分を調べるには FFT の計算が必要となる。

騒音計はスイッチを入れた直後に画面に計測結果が表示されなくてはならない。計測で 60 秒かかれば 60 秒間は、画面が停止したままとなる。

48000*1 個 (1 秒間) のデータに対して、FFT を計算すれば、同じ個数の数値が得られ、周波数の刻み幅を h Hz とすれば、 $h*48000*1=48000$ となるので、 $h=1$ Hz となり、周波数スペクトルは 0 Hz から、24000 Hz までの範囲であり、刻み幅 1 Hz で表示されることになる。

48000*60 個 (1 分間) のデータに対しての周波数スペクトルは、0 Hz ~ 24000 Hz までの範囲を、刻み幅 $h=0.01667$ Hz で表示する。

120 秒間の計測結果を解析すれば、周波数分解能は 0.0083 Hz になるので、120 秒間のデータで計算すれば、定常的、周期的な性質を持つ風車からの超低周波音と他の雑音の違いが区別できる。

処理時間、必要な周波数分解能からみて、NL-62 (+波形収録ソフト NX-42WR) だけでは WAV ファイルの解析は不可能なのです。

符号付の整数で表現できる範囲は、負の数に 2 の補数を使うとき、16 ビットの符号付きの整数では $-2^{15} \sim 2^{15}-1$ の範囲の値が使用される。負の数の個数が 1 つ多い。

騒音計で計測できる音圧の範囲については、精密騒音計 (低周波音測定機能付) NL-62 取扱説明書に最大で 148 dB だと記載されている。

表示・出力フルスケール の項に、出力電圧のフルスケールで、設定できる範囲は 70 dB ~ 130 dB までで、10 dB 刻みだと書かれている。

ここで、130 dB を選んだときは、WAV ファイル名は
NL_001_20220503_111400_130dB_0008_0000_ST0001

となり、名前の中央部分から、出力電圧のフルスケールを 130 dB に設定したことが分かります。

WAV ファイルへ記録するデータは、もう少し大きな音圧にも対応できるようになっていて、(表示出力フルスケール値 +13) dB が WAV ファイルのフルスケール値となる。

設定で 130 dB とすれば、WAV ファイルでのフルスケール値は 143 [dB] であり、これは、 $2 \times 10^{(-5)} \times 10^{(143/20)} = 282.5075088$ [Pa] に相当する。

実効値で 282.5075088 Pa (143 dB) となる値を、WAV ファイルにどのような数値として記載するかについては、ファイルによって異なる。

16 ビットの符号付整数は $\{+2^{(15)}-1\} \sim (-2^{15})$ の範囲であり、音圧が -282.5075088 Pa となる場合に対して、負の整数 $-2^{15} = -32768$ を対応させる。

この時、整数値 1 は、 $-282.5075088 \text{ Pa} / (-2^{(15)}) = 8.62144497 \times 10^{(-3)} \text{ Pa}$ (実効値) を意味する。整数値 k は、 $k \times 8.62144497 \times 10^{(-3)} \text{ Pa}$ (実効値) を意味する

計算が面倒な場合は、AS-70 (試用版は無料です。) にデータを読み込ませて、次の操作をすればよい。

表示 — ファイル情報 として、Value/Bit の値 (8.621445E-5) を使えばよい。

PC での周波数スペクトルの計算では、読み込んだ符号付き整数のデータに対して、平均値を引いてから、パスカル値にするために、8.621445E-5 を掛ける。

この周波数スペクトルがあれば、風車音の特徴が判明する。

と修正する

最後の部分は、

参 考 資 料

- 1) 高橋厚太,賀川和哉,長嶋久畝,川端浩和,田中元史,小垣哲也,濱田幸雄,風車ナセル・タワーの振動解析,風力エネルギー利用シンポジウム Vol.40,p.251-254,2018
- 2) 菊島義弘,長島久敏,橋本晶太,鯨岡政斗,濱田幸雄,川端浩和,小垣哲也,風速が風車騒音指向性に及ぼす影響について,風力エネルギー利用シンポジウム Vol.38 p. 69-72, 2016
- 3) Dai-Heng CHEN,増田健一,尾崎伸吾,円筒の弾塑性 純曲げ崩壊に関する研究, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.74, No.740, p. 520-527, 2008
- 4) 今井巧,流体力学(前編),裳華房,第 17 版,1990
- 5) 石田幸雄,風車の振動解析,Journal of JWEA Vol.34 No.4, 2010
- 6) M.S.Howe, 空力音響学, 共立出版、初版、2015
- 7) 橘秀樹, 福島昭則, 落合博明,低周波数騒音に対するハウスフィルタのモデル化,日本騒音制御工学会研究発表会講演論文集, Vol. 2017:春季 p.13-16, 2017
- 8) Vesna Rubežić, Igor Djurović, Ervin Sejdić, Average Wavelet Coefficient-Based Detection of Chaos in Oscillatory Circuits, COMPEL The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering 36(1):188-201, January 2017
- 9) 石井俣夫編集,泡のエンジニアリング,テクノシステム, 初版, 2005
- 10) 環境省 HP より
4. 低周波音防止技術の概要
平成 22 年度 移動発生源の低周波音等に関する検討調査等業務報告書
低周波音の測定方法に関するマニュアル
- 11) 前川真帆香,低周波音被害の社会問題化,修士論文, 2009
- 12) ノイズ入門(A Primer on Noise), Government of Canada

と修正する

超低周波音の測定方法

7. 1 波形収録

7. 1. 1 リオン社

[平成22年度 移動発生源の低周波音等に関する検討調査等業務報告書](#) には、
“風車音の計測に関しては、
・統一した方法はない
・計測機器が規格化されていない”
と書かれている。

風車音か否かの判断基準となる $0.5\sim 0.8\text{Hz}$ の音の測定に関しては、統一した方法が無く、また JIS 規格も無い。この部分の計測と解析は、G 特性音圧レベルや $1/3$ オクターブ解析の技術では出来ないのです。

“無ければ、自分で作れば良い。”という事で、風車音の詳細な性質を調べる為に必要な関数を作成し、具体的なデータを使って風車音の解析を行ってみました。必要なモジュール： DADiSP/WAV オーディオ モジュール

リオン社の精密騒音計 NL-62 に、波形収録プログラム NX-42WR を追加して、サンプリングレートは 48kHz 、平坦特性で収録した Wav ファイル。

比較対象は、JFE の工場内での騒音データ、リオン社前の道路騒音のデータなどです。
振動については、リオン社の振動レベル計 VM-55 に、波形収録プログラム VX-55WR を追加して収録した WAV ファイルを使用しました。

NL-62 には、波形収録機能があります。これは、

● 概要

本器に、波形収録プログラム NX-42WR をインストールすると、音圧波形を PCM 形式の WAVE ファイルとしてストアデータと共に SD カードに記録（録音）することができます。

記録した WAVE ファイルは、PC 上でストア時の音圧波形を再生、確認することや再分析することが可能となります。“

というものです。

NL-62 と SA-A1 は同じマイクを使っている。波形収録ソフトを組み込めばマイクに掛かる音圧の変動を符号付整数として記録することが出来る。

音圧変動を記録するときに、サンプリングレートを 48kHz とし、数値を 16 ビットの符号付整数として記録した場合は、NL-62 でも、SA-A1 でも同じ数値が WAV ファイルに記録される。

測定範囲に差があるのは、計算量を多くして周波数分解能を上げているからである。周波数成分を調べるには FFT の計算が必要となる。

騒音計はスイッチを入れた直後に画面に計測結果が表示されなくてはならない。計測で 60 秒かかれば 60 秒間は、画面が停止したままとなる。

48000*1 個（1 秒間）のデータに対して、FFT を計算すれば、同じ個数の数値が得られ、周波数の刻み幅を $h \text{ Hz}$ とすれば、 $h * 48000 * 1 = 48000$ となるので、 $h = 1 \text{ Hz}$ となり、周波数スペクトルは 0Hz から、24000Hz までの範囲であり、刻み幅 1Hz で表示されることになる。

48000*60 個（1 分間）のデータに対しての周波数スペクトルは、0Hz～24000Hz までの範囲を、刻み幅 $h = 0.01667 \text{ Hz}$ で表示する。

120 秒間の計測結果を解析すれば、周波数分解能は 0.0083Hz になるので、120 秒間のデータで計算すれば、定常的、周期的な性質を持つ風車からの超低周波音と他の雑音の違いが区別できる。

処理時間、必要な周波数分解能からみて、NL-62（+波形収録ソフト NX-42WR）だけでは WAV ファイルの解析は不可能なのです。

符号付の整数で表現できる範囲は、負の数に 2 の補数を使うとき、16 ビットの符号付きの整数では $-2^{15} \sim 2^{15}-1$ の範囲の値が使用される。負の数の個数が 1 つ多い。

騒音計で計測できる音圧の範囲については、精密騒音計（低周波音測定機能付）NL-62 取扱説明書に最大で 148dB だと記載されている。

表示・出力フルスケール の項に、出力電圧のフルスケールで、設定できる範囲は 70dB～130dB までで、10dB 刻みだと書かれている。

ここで、130dB を選んだときは、WAV ファイル名は
NL_001_20220503_111400_130dB_0008_0000_ST0001

となり、名前の中央部分から、出力電圧のフルスケールを 130 dB に設定したことが分かります。

WAV ファイルへ記録するデータは、もう少し大きな音圧にも対応できるようになっていて、（表示出力フルスケール値+13）dB が WAV ファイルのフルスケール値となる。

設定で 130 dB とすれば、WAV ファイルでのフルスケール値は 143 [dB] であり、これは、 $2 \times 10^{(-5)} \times 10^{(143/20)} = 282.5075088 \text{ [Pa]}$ に相当する。

実効値で 282.5075088Pa（143dB）となる値を、WAV ファイルにどのような数値として記載するかについては、ファイルによって異なる。

16 ビットの符号付整数は $\{+2^{(15)}-1\} \sim (-2^{15})$ の範囲であり、音圧が -282.5075088 Pa となる場合に対して、負の整数 $-2^{15} = -32768$ を対応させる。

この時、整数値 1 は、 $-282.5075088 \text{ Pa} / (-2^{(15)}) = 8.62144497 \times 10^{(-3)} \text{ Pa}$ （実効値）を意味する。
整数値 k は、 $k * 8.62144497 \times 10^{(-3)} \text{ Pa}$ （実効値）を意味する

計算が面倒な場合は、AS-70（試用版は無料です。）にデータを読み込ませて、次の操作をすればよい。

表示 — ファイル情報 として、Value/Bit の値（8.621445E-5）を使えばよい。

PC での周波数スペクトルの計算では、読み込んだ符号付き整数のデータに対して、平均値を引いてから、

パスカル値にするために、 $8.621445\text{E-}5$ を掛ける。

この周波数スペクトルがあれば、表 1 の様に風車音の特徴が判明する。

計測機材も解析ソフトも新しいものがあります。私は、波形解析ソフト DADISP と WAV オーディオ モジュールと Noise&Infrasound Analysis を組み合わせて使っています。

それを使って、風車の近くでの“風雑音”と風車が無い場所での“風雑音”を比べてみれば、この考え方が間違っていることが分ります。

風車の近くに車を止めて、精密騒音計を車内に置き、風下側の窓を開けて録音しました。この場合は、マイクに直接風が当たることは無いのですが、最大音圧が $0.14[\text{Pa}]$ (0.8Hz) の“風雑音”が記録されました。

家の近くにある、長尾神社の階段にマイクを置いて、マイクに風が当たる状態で録音をした結果では、 $0.00047[\text{Pa}]$ (0.4Hz) の“風雑音”が記録されました。

この結果から、
風車の近くでの“風雑音”は音圧が極めて高く、その周波数に規則性がある。

風車の無い場所での“風雑音”は音圧が低く、周波数が規則性を持たない。
ことが分りました。全く性質が異なる 2 種類の“風雑音”があるのです。

後ほど詳しく書きますが、周波数と風車の振動の関連を調べれば、風車の近くでの“風雑音”は“風車からの超低周波音”と呼ぶのが正しいことが分ります。風車音から“風雑音”を分離することは不可能なのです。

また、風車音が広帯域の音であると主張する人もいるので、具体例を見ながら、簡単に検討します。

最初に、音の特徴を把握する為に幾つかの騒音の周波数スペクトルを比較します。

(横軸は周波数ヘルツ [Hz]、縦軸は音圧パスカル [Pa])

0～5000Hz の範囲で、3 つの音を比較してみます。

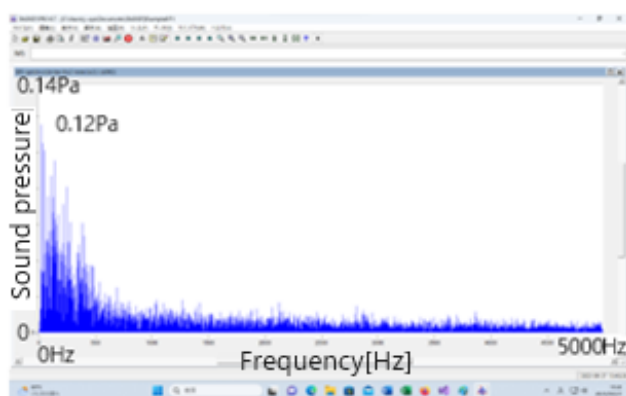


Fig. 1 JFE の製鉄所内の音 (0～5000Hz) ; 最大音圧 $0.12[\text{Pa}]$ (12Hz)

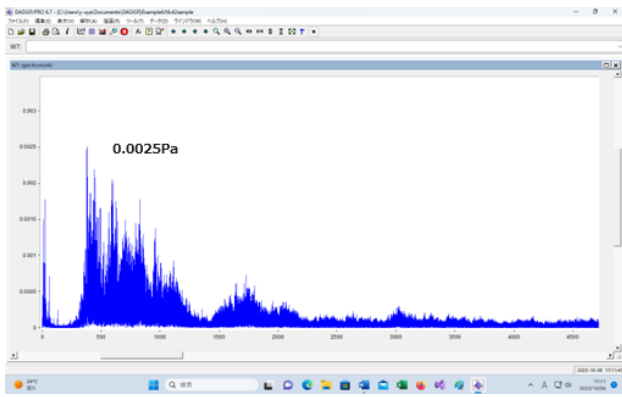


Fig.31 リオン社前の道路の騒音 (0～5000Hz)：最大音圧 0.0025[Pa] (379.4[Hz])

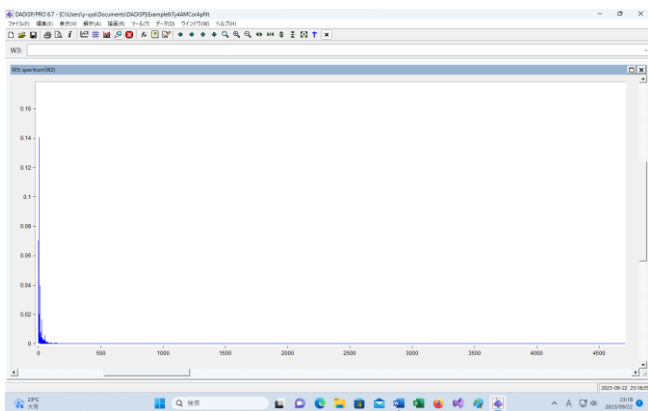


Fig. 2 風車の近くで計測した音 (0～5000Hz)；最大音圧 0.14[Pa] (0.8Hz)

JFE の製鉄所内の音とリオン社前の交通騒音は広帯域の音と言えるが、風車音は左隅の 0.8Hz の近くに集中しているので広帯域の音とは言えません。

次は、0～25Hz の範囲で、風車音と近所の長尾神社の境内での音を比較します。

Fig. 3：弱風するとき風車の近くで計測した音 (0～25Hz)、Fig. 4：長尾神社境内の音 (0～25Hz)

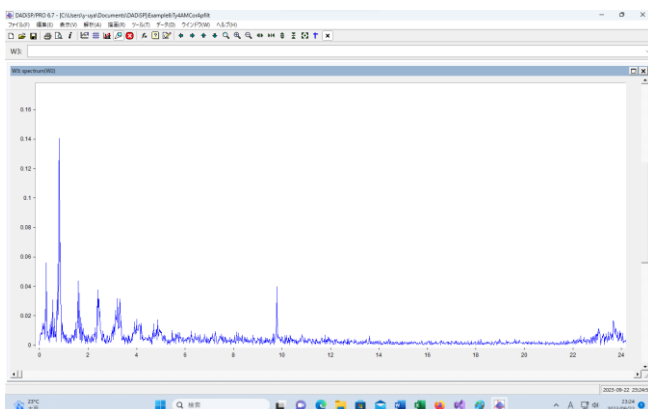


Fig. 3 風車の近くで計測した音 (0～25Hz)；最大音圧 0.14[Pa] (0.8Hz) (強風では 0.42Pa)

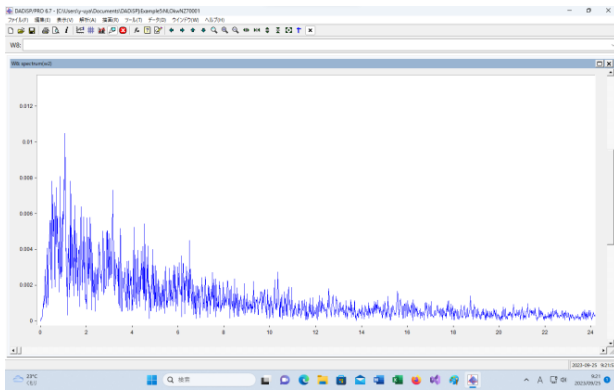


Fig. 4 長尾神社境内の音 (0～25Hz)；最大音圧 0.0105[Pa] (1. 1Hz)

図 3，4 は 0～25Hz 範囲での、風車の近くで車内に機材を置き風下の窓を開けて計測した音、最大音圧 0.14[Pa] (0.8Hz)と、マイクを神社の階段に置き、風が当たる状態で計測した音、最大音圧 0.0105[Pa] (1. 1Hz)との比較である。

“風雑音”には、風車の近くでの音圧が高く規則的な周波数を持つものと、風車の無い場所での音圧が低く周波数に規則性がないものがあり、この 2 種類の“風雑音”の区別することが必要になります。

周波数に明確な規則性がある音を“風雑音”の一言で片づけてはいけません。規則性を持つ理由を明確にしなくてはなりません。

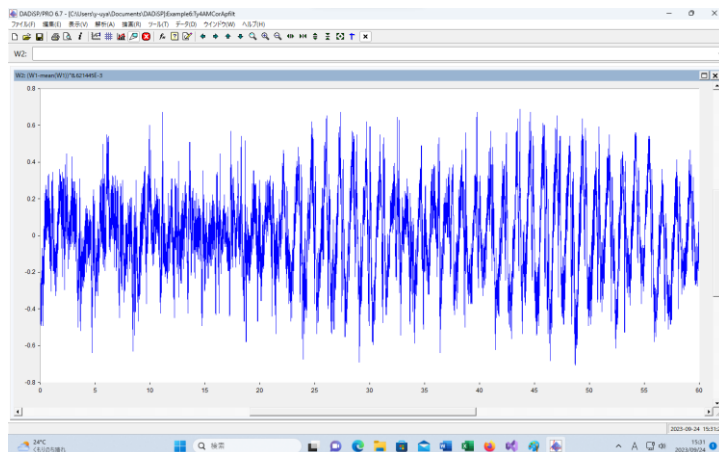
風車から、このような規則性を持つ音が発生する理由を調べれば、“風雑音”という用語が不適切であることが明確になります。後ほど、発生する仕組みが明確になれば、この音は“風車からの超低周波音”というべきであることが分ります。

風雑音の除去は簡単です。風車が無い場所（風車から 10 k m くらい離れた場所）で、風の強い日に計測すれば、“風車による風雑音”は排除できます。“風車の近くでの風雑音”と“風車が無い場所での風雑音”の 2 種類があるのです。

“風車の近くでの風雑音”は、その周波数が特別な構造を持っていて、風車の回転と深くかかわっています。これは、風車からの超低周波音というべきものです。

もし、風雑音というならば、風車の近くと風車の無い場所での風雑音の性質が違う理由を説明しなくてはなりません。

風車音のグラフは、次のものです。



FFT を使えば、風車音を各周波数帯に分割できます。

FIG. 5 は、青を 0～20Hz、緑を 20～200Hz、赤を 200～24 k Hz の成分として風車音を分割した結果です。

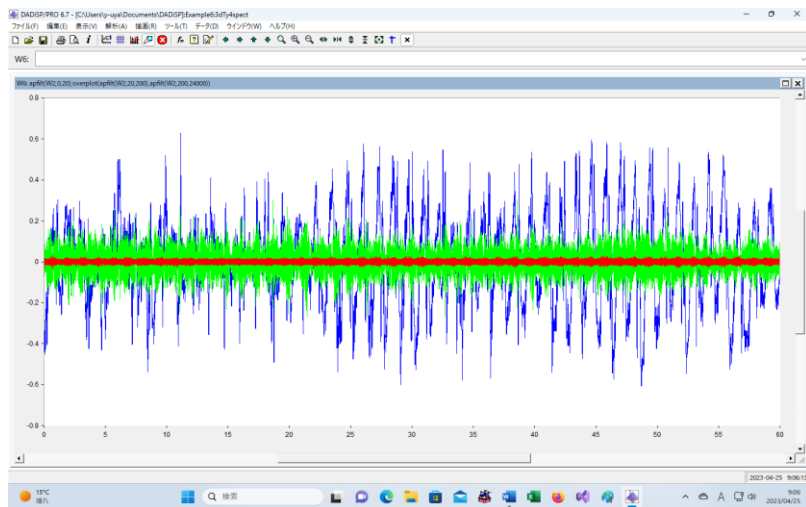


Fig.5 Separated Wind turbine noise

200Hz～24kHz の成分(赤)に振幅変調が見られるが、音圧が極めて低く、空気減衰やエネルギー透過率を考えれば、室内での影響は弱く、逆に低周波音や超低周波音のエネルギーが高く、この部分の影響が大きい。

エネルギー分布の計算とグラフの滑らかさを考えると、サンプリング周波数は 48 k Hz、計算対象とするデータ量は、60 秒あるいは 120 秒の計測データが必要となります。

風車音がどのようにして発生するかを考えるには、風車音の細かな特徴に注意することが大切です。

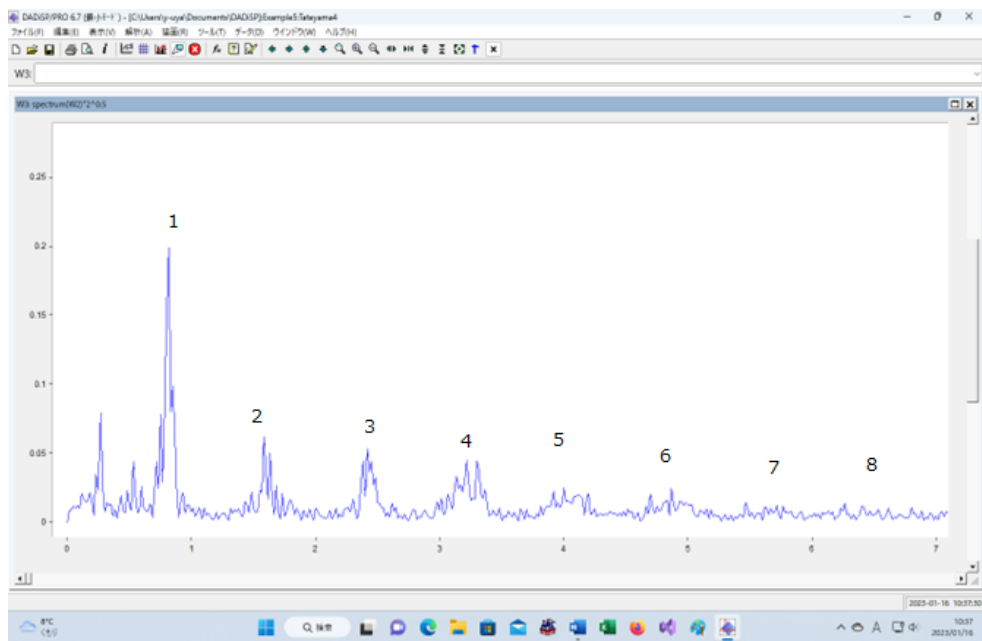


表 3 は、音圧のピーク値とその時の周波数を対応させたものです。

ピーク値の				0.816667の倍数			
周波数	倍率1	倍率2	音圧				
0.266667	1		0.05604				
0.533333	1.999996		0.03093802				
0.816667	3.062497	1	0.1405225	0.816667	1	0.816667	
1.583333	5.937491	1.938774	0.0435531	1.633334	2	1.633334	2
2.416667	9.06249	2.959183	0.02416667	2.450001	3		
3.216667	12.06249	3.938774	0.03173804			3.266668	4
4.000000	14.99998	4.897957	0.01772484	4.083335	5		
4.866667	18.24998	5.959182	0.01728335			4.900002	6
5.466667	20.49998	6.693875	0.01009538	5.716669	7		
6.266667	23.49997	7.673467	0.00978232			6.533336	8
9.783333	36.68745	11.97959	0.03974005				

Table 3 Frequencies of the peak values

エネルギーの分布

図 1．交通騒音（リオン社前） 0 ～5000Hz
最大音圧 0.0025[Pa] (379.4[Hz])

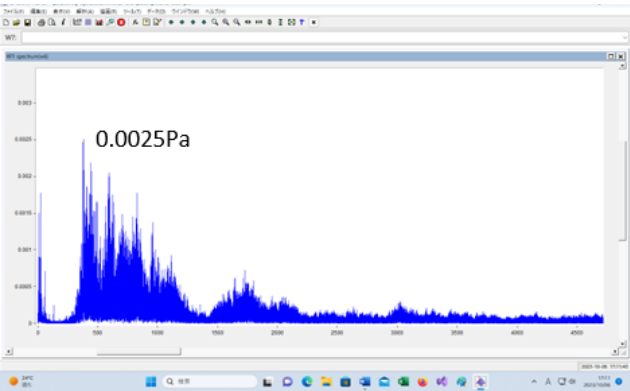


図 2．工場騒音（製鉄所内の音） 0 ～5000Hz
最大音圧 0.12[Pa] (12Hz)

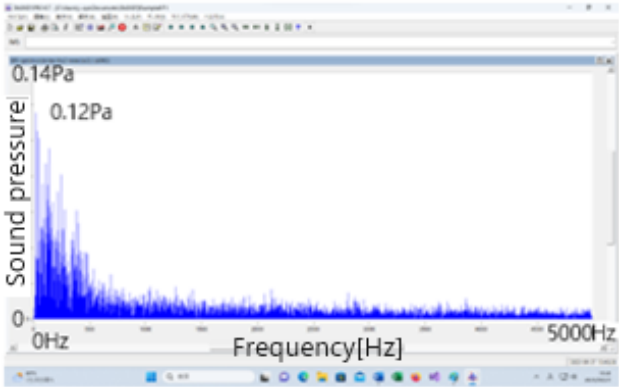


図 3．風車音（館山風の丘） 0 ～5000Hz
最大音圧 0.14[Pa] (0.8Hz)

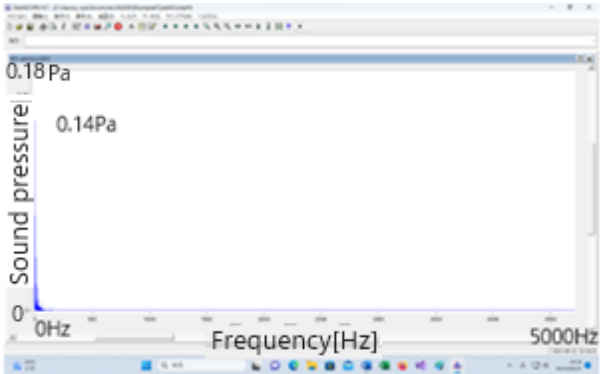


表 2．エネルギーの分布

エネルギー分布	0 ～20 H z	20 H z 以上
風車音	93%	7%
工場音	12%	88%
交通音	1%	99%

0～20Hz でのエネルギーの分布

Energy distribution	0～1Hz	1～20Hz	0～20Hz
Wind turbine	61.3%	38.7%	100.0%
Iron mill	0.04%	99.96%	100.0%

風車音で 20Hz 以上の周波数を持っている音のエネルギーを集めても、風車音全体のエネルギーの 7%以下です。 $93 \times 0.613 = 57\%$ ですから、風車音全体のエネルギーの 57%は 1Hz よりも周波数が低い部分に含まれています。

交通騒音では、20Hz 以上の周波数を持っている音のエネルギーを集めると、交通騒音全体のエネルギーの 99%以上となります。

音のエネルギーを調べると、次の表になります。

周波数帯	0～20Hz	20～200Hz	200～24 k Hz	0～24 k Hz	単位
交通騒音	1.76E-07	8.08E-08	1.80E-05	1.80E-05	W/m ²
神社風	8.23E-06	3.91E-07	2.12E-07	8.83E-06	W/m ²
JFE工場	4.80E-05	4.01E-04	5.34E-04	9.84E-04	W/m ²
風車弱風	8.19E-04	2.40E-05	3.82E-07	8.43E-04	W/m ²
風車強風	1.49E-03	2.30E-05	6.94E-08	1.52E-03	W/m ²

風車音のエネルギーは桁違いなのです。

7. 1. 2 アコー社

普通騒音計 TYPE 6236

取扱説明書

2. WAV ファイルのヘッダ情報(Windows 標準)

4 byte	'R' 'T' 'F' 'F'	RIFF ヘッダ	
4 byte	これ以降のファイルサイズ (ファイルサイズ - 8)		
4 byte	'W' 'A' 'V' 'E'	WAVE ヘッダ	
4 byte	'f' 'm' 't' ' ' (←スペース含む)	fmt チャンク	
4 byte	バイト数	fmt チャンクの バイト数	リニア PCM 16(10 00 00 00)
2 byte	フォーマット ID		リニア PCM 1(01 00)
2 byte	チャンネル数		モノラル 1(01 00)
4 byte	サンプリングレート Hz		48kHz 48000(80 BB 00 00)
4 byte	データ速度 (Byte/sec)		48kHz 16bit モノラル 48000×2 = 96000 (00 77 01 00)
2 byte	ブロックサイズ (Byte/sample×チャンネル数)		16bit モノラル 2(02 00)
2 byte	サンプルあたりのビット数 (bit/sample)	WAV フォーマットでは 8bit か 16bit	16bit 16(10 00)
4 byte	'd' 'a' 't' 'a'	data チャンク	
4 byte	バイト数 n	波形データのバイト数	
n byte	波形データ		

7) Wave (生波形データ出力) : W

W:送信 → 返事: データ

16 ビットバイナリーの AD 生値出力

計測終了 (E) コマンドで終了します。

: データ内容

4 8 k Hz サンプリング毎 (20.8 μ s) の波形 (音圧変動) を連続的に排出する。

値は、16 ビットの符号付整数であり、


```

0|0000000 00000000 : 0
0|0000000 00000001 : 1
0|0000000 00000010 : 2
0|1111111 11111111 : 32767
1|1111111 11111111 : -1
1|1111111 11111110 : -2
1|0000000 00000000 : -32768

```

最大値+32767 から最小値-32768 までの値である。

レンジの最大値が 100 d B の場合は、計測での余裕を 8 d B としている

Measurement day, Measurement time, Frequency-weight, Level Range, Time setting

24/03/17,02:20:00,Z,100dB,003h00m00s

ファイルの注釈には、100 d B と書かれている。

余裕分の 8 d B とを加えると、 $100+8=108$ d B になる。

これに相当する音圧（実効値）を P とすれば、

$108=20\log(P/(20*10^{(-6)}))$ より、 $P=5.023772912$ （パスカル）となり、 $-P=-5.023772912$ パスカルの値を $-32768=-(2^{15})$

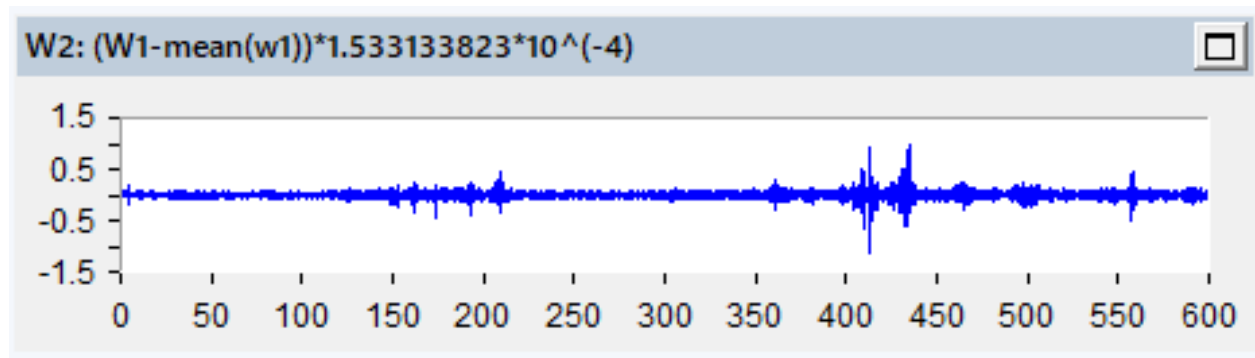
に対応させる。

整数+1 は、 $5.023772912/32768=1.533133823*10^{(-4)}$ （パスカル）に対応し、

整数値 k は、 $5.023772912*(k/32768)=1.533133823*10^{(-4)}*k$ （パスカル）に対応する。

（マニュアルを上のように理解しました。）

読み込んだ符号付き整数を、パスカル値に変換するには、 $1.533133823*10^{(-4)}$ を掛けることになる。



後は、同じです。

アコー社の機器で計測したデータを 1/3 オクターブ解析にかけ、さらに、リオン社前の道路の音、JFE の製鉄所内の音、千葉県館山市の風車音（強風時）、マイクに風を当てて測った神社での音、石狩湾近くの数か所で、風車群の音から計算した平坦特性での音圧レベルを比べてみると次の様になります。

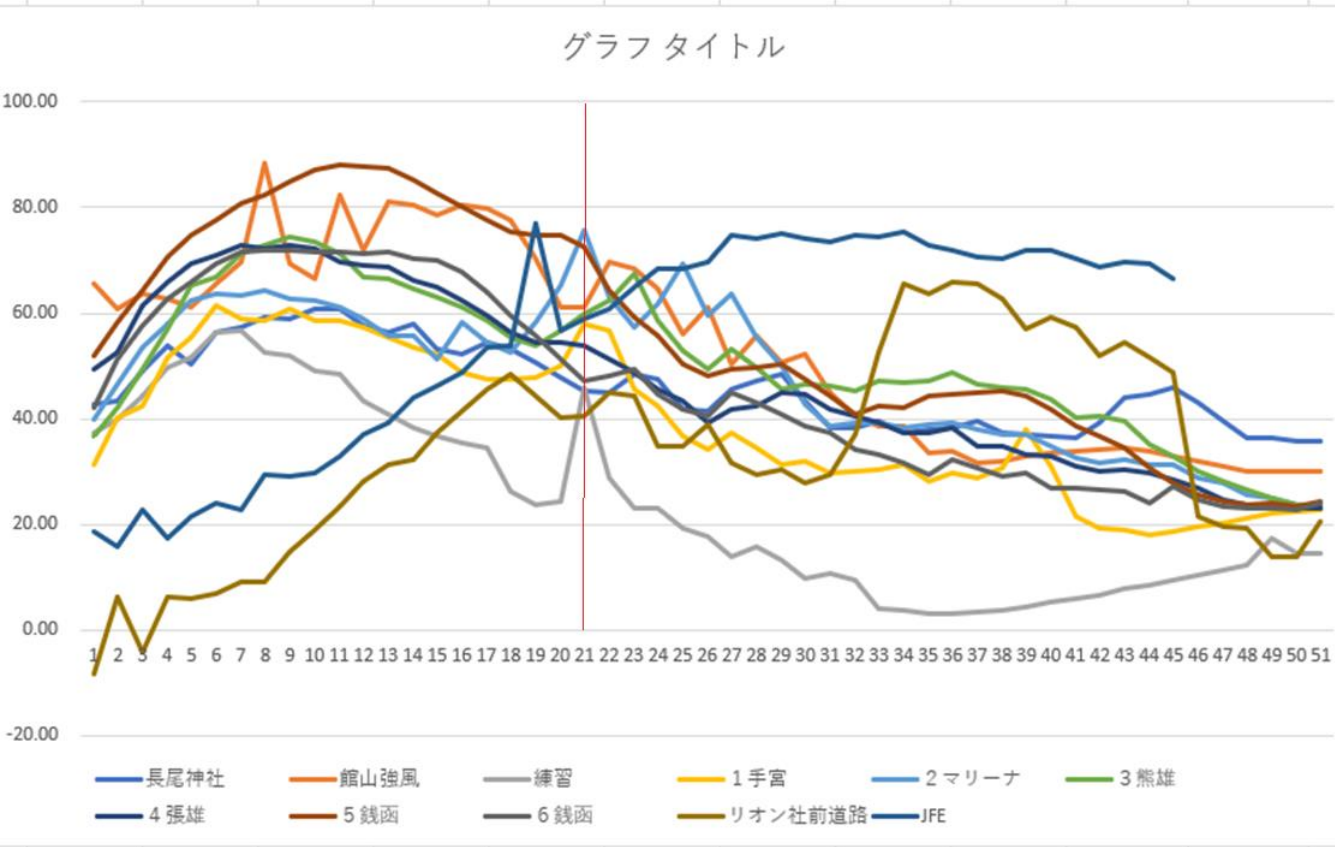
なお、番号と中心周波数（0.19Hz～20000Hz）の関係は次の表です。

番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
中心周波数	0.19	0.25	0.32	0.40	0.50	0.63	0.80	1.00	1.25	1.60	2.00	2.50	3.15	4.00	5.00	6.30	8.00

番号	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
中心周波数	10.00	12.50	16.00	20.00	25.00	31.50	40.00	50.00	63.00	80.00	100.00	125.00	160.00	200.00	250.00	315.00	400.00

番号	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51
中心周波数	500.00	630.00	800.00	1000.00	1250.00	1600.00	2000.00	2500.00	3150.00	4000.00	5000.00	6300.00	8000.00	10000.00	12500.00	16000.00	20000.00

20Hz は、21 番のところでは、（1/3 オクターブ解析での平坦特性音圧レベルのグラフです。）



グラフの中央部分（8 番～33 番、1H z～315H z）の辺りでは、風車音は、全体として周波数が大きくなると音圧レベルが減少するが、交通騒音などは周波数が高くなると音圧レベルが上昇する。

8 番（1Hz）から 15 番（5H z）辺りでの違いが大きい。これを風車からの超低周波音だと認めたくない人はこの部分を“風雑音”というのですが、風車音が発生する仕組みを考えて、詳細な周波数を確認すれば、離散的な特徴から風車の超低周波音だと分かるのです。

7. 2 風の影響について

超低周波音（0～20Hz）を比較する場合は、エネルギーが 100 倍から 1000 倍なので、心配する必要は無い。ただし、

A 特性音圧レベルの計算では対象が 20Hz 以上になるので、注意する必要がある。特に 200Hz 以上に関しては交通騒音や風の影響などの方が大きい。

風車から離れた場所では、風の他に様々な音源があるので、その影響が大きく、風車による影響を評価するには、超低周波音の部分の計測が不可欠である。

風車の近くでエネルギー比率を測り、それぞれの帯域成分が減衰したとして、到達風車音の中の可聴域成分を推定する。

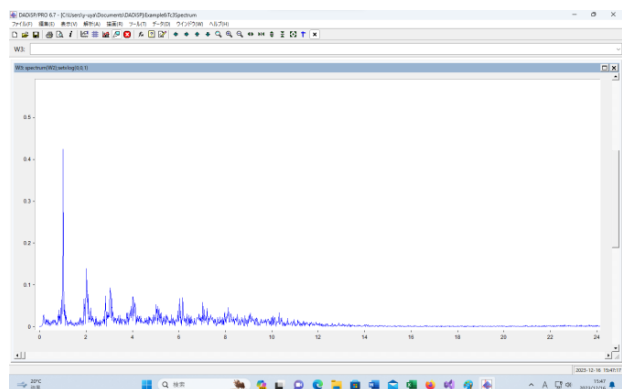
7. 2. 1 風車の近くでは、マイクに風が当たらなくても超低周波音が計測される。

風車の近くでの計測で、

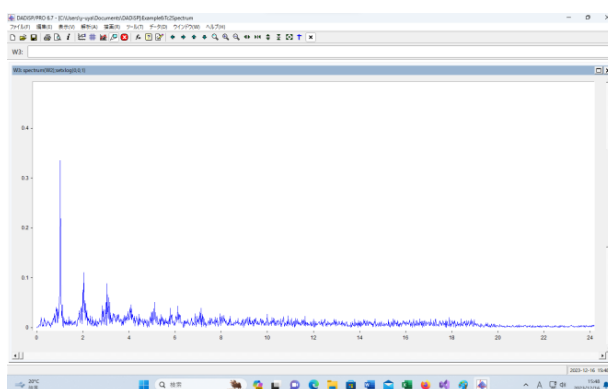
騒音計をビニール袋に入れて、それを段ボール箱に入れて、ビニールをかぶせて、



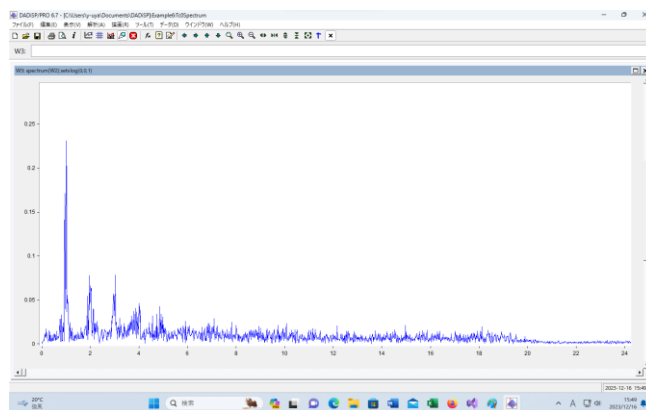
袋と箱に入れドアを閉めた場合は、Max. 0.42Pa



袋と箱に入れドアを開けた場合は Max. 0.33Pa



袋から出して箱の上においた結果は Max. 0.23Pa



音圧の違いに関しては、音の反射を考慮する必要があります。

風車が近くにあれば、マイクに風が当たらなくても、マイクに風が当たっても、音圧が高く、規則的な周波数を持った超低周波音は、どちらの場合でも記録されます。

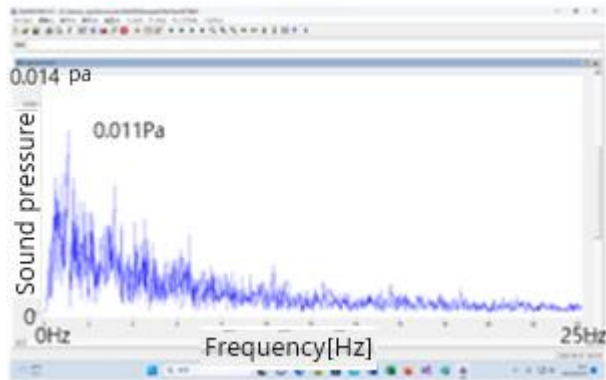
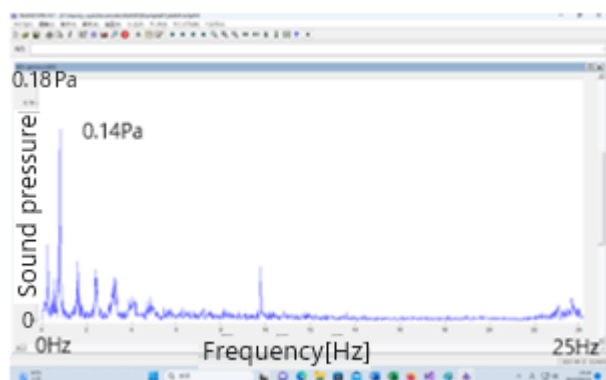
7. 2. 2 風車が無ければ、マイクに風を当てても音圧の高い超低周波音は発生しない。

風車が無い場所で、マイクに風を当てて計測すれば、音圧が低くて、周波数に規則性が無い、超低周波音が計測されます。風車が有る場所では、音圧が高く、規則的な周波数を持っている超低周波音が計測されます。

左が風車の近くの音、右は風車がない場所でマイクに風を当てて収録した音の超低周波音の部分です。

図 5. 風車音（館山風の丘） 0 ～25Hz

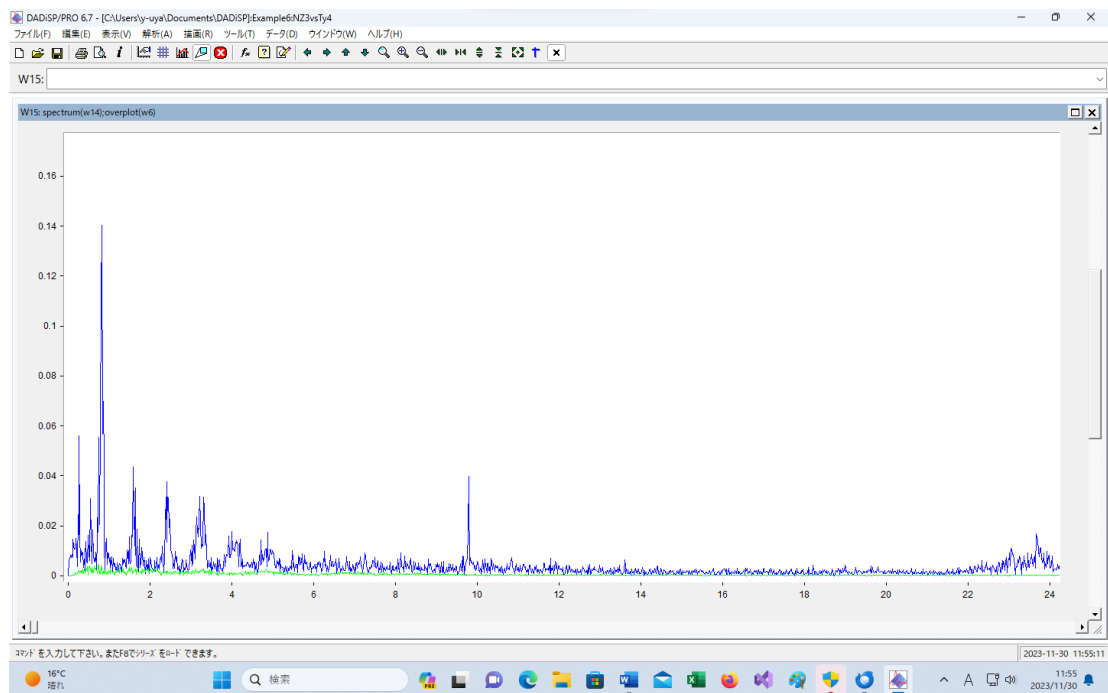
図 6. 長尾神社の音 0 ～25Hz



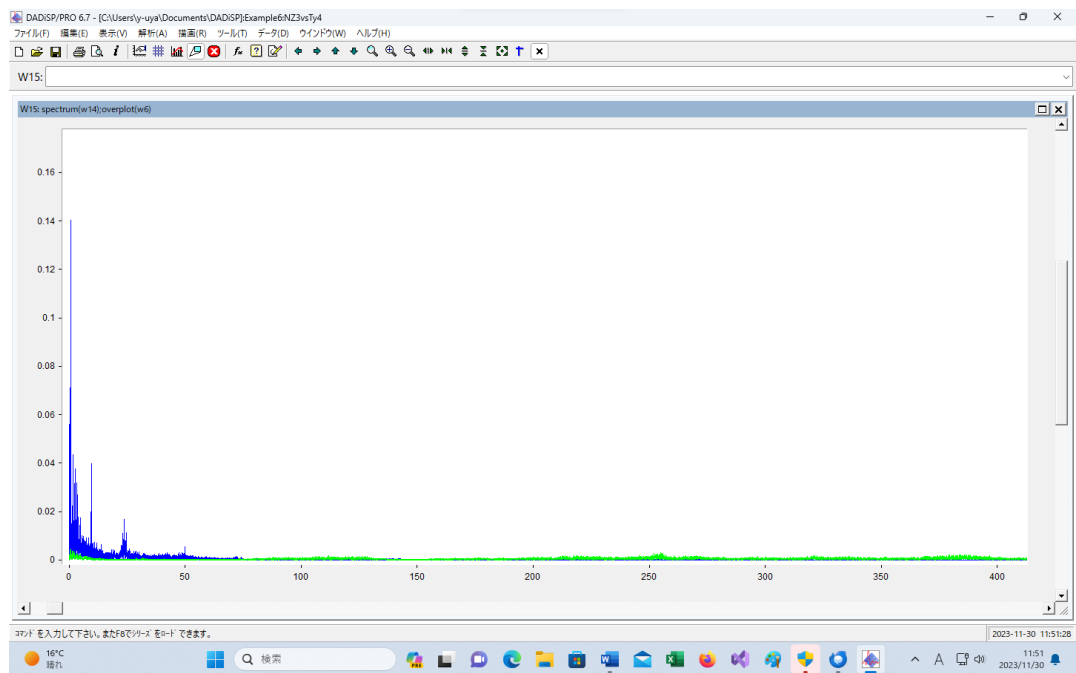
風車の近くでは 0.14Pa、風車が無い場所では 0.01Pa の音圧を持っている超低周波音が存在します。だから、風車の近くでは音圧が 10 倍です。音圧は、風速で変化します。風車の近くで 0.37Pa、風車が無い所で 0.003Pa の時もあります。これだと音圧は 100 倍です。

次のグラフは、青い線が風車の近くの超低周波音、緑の線が風車が無い場所での超低周波音です。

0～24Hz までの拡大図、風車音（青）と神社の音（緑）の周波数スペクトル



0～400Hz までの拡大図、風車音（青）と神社での音（緑）の周波数スペクトル



風車が無い場所では、マイクに風が当たることが原因の“風雑音”は、音圧が低くて、超低周波音の領域での周波数に規則性はありません。

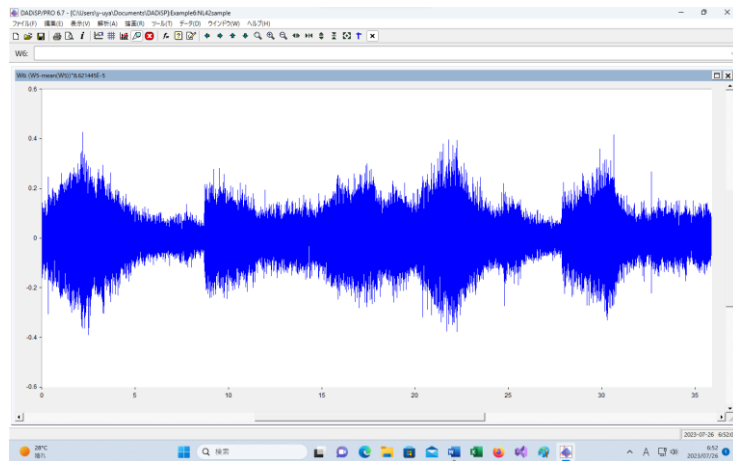
風車の近くでの離散的なピーク値の音圧の関係について、そうなる理由を説明することも必要です。

風車音の特徴

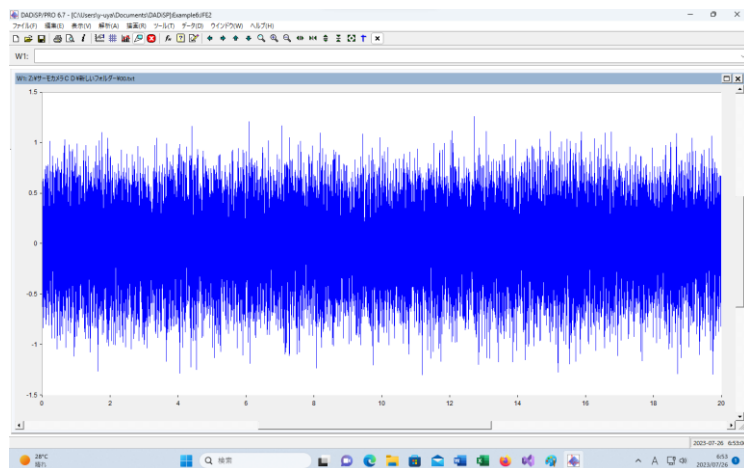
グラフ密度

最初に、録音した波形を示します。

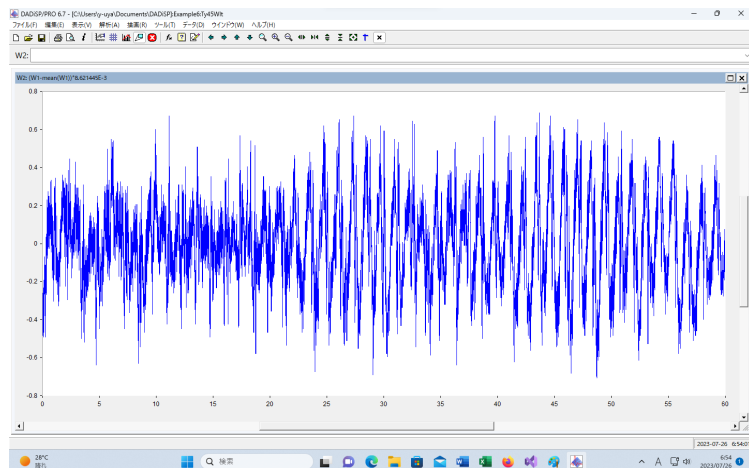
リオン社前の交通騒音



JFE の製鉄工場内の音



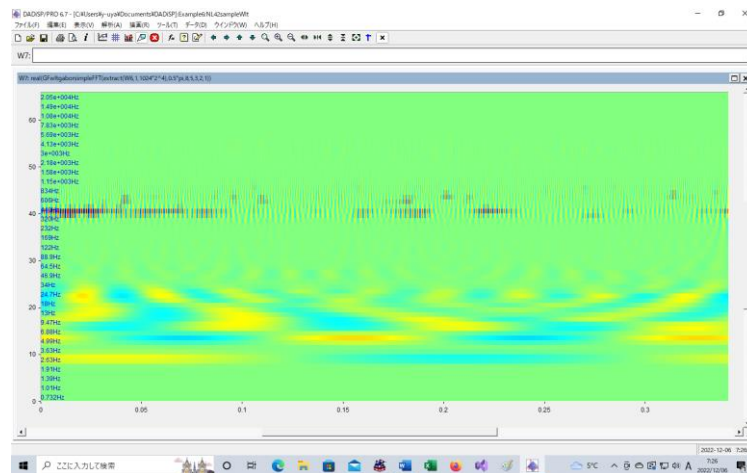
館山の風車音



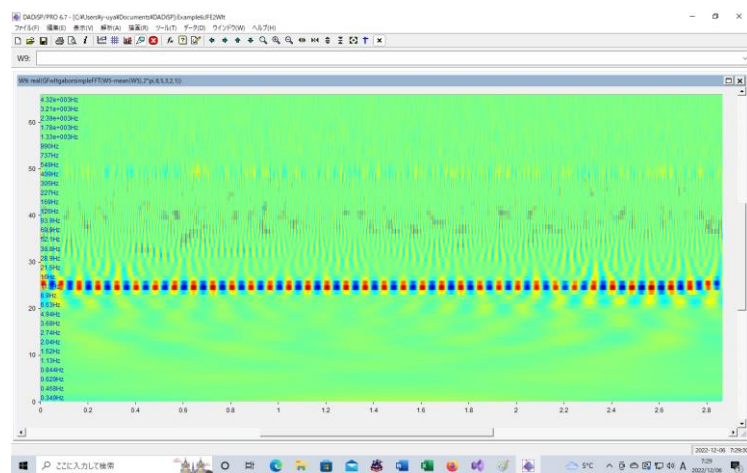
Wavelet 解析

タイプ3: Wavelet 解析

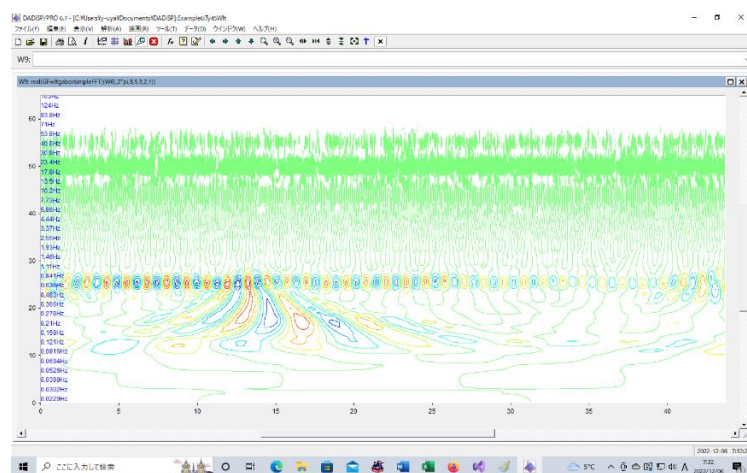
交通騒音 (0Hz 以上)



工場騒音 (0Hz 以上)



風車騒音 (0Hz 以上)



周波数スペクトルとエネルギー分布

タイプ4:周波数スペクトル

図 1．交通騒音（リオン社前） 0～5000Hz
最大音圧 0.0025[Pa]（379.4[Hz]）

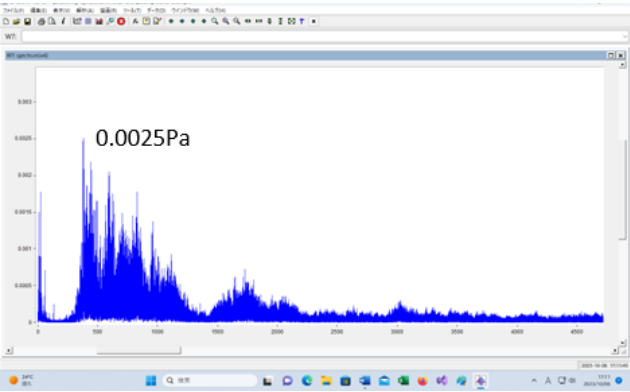


図 2．工場騒音（製鉄所内の音） 0～5000Hz
最大音圧 0.12[Pa] (12Hz)

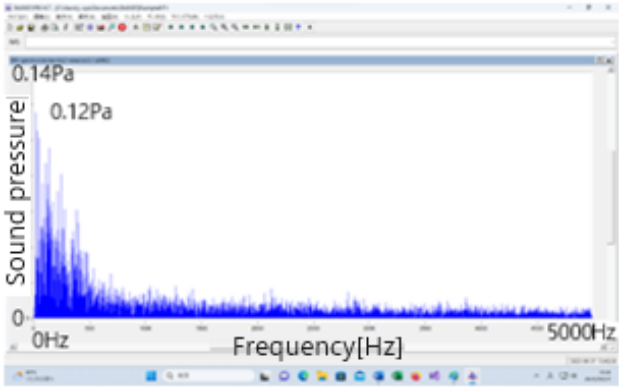


図 3．風車音（館山風の丘） 0～5000Hz
最大音圧 0.14[Pa] (0.8Hz)

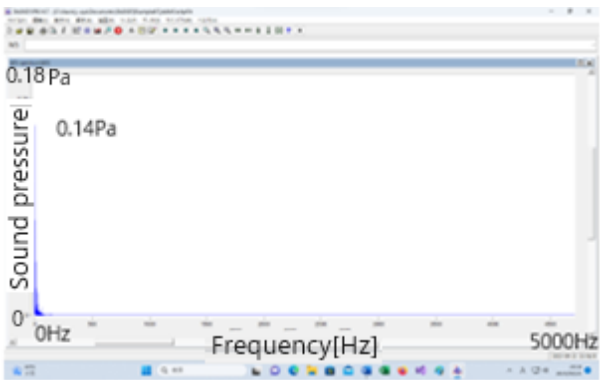


表 2．エネルギーの分布

エネルギー分布	0～20 H z	20 H z 以上
風車音	93%	7%
工場音	12%	88%
交通音	1%	99%

0～20Hz でのエネルギーの分布

Energy distribution	0～1Hz	1～20Hz	0～20Hz
Wind turbine	61.3%	38.7%	100.0%
Iron mill	0.04%	99.96%	100.0%

風車音で 20Hz 以上の周波数を持っている音のエネルギーを集めても、風車音全体のエネルギーの 7%以下です。93*0.613=57%ですから、風車音全体のエネルギーの 57%は 1Hz よりも周波数が低い部分に含まれています。

交通騒音では、20Hz 以上の周波数を持っている音のエネルギーを集めると、交通騒音全体のエネルギーの 99%以上となります。

A 特性音圧レベル（騒音レベル、WTN）は 20Hz 以上の成分の持つエネルギーから計算される数値です。で

すから、A特性音圧レベルで風車音を評価してその影響を考えるとという事は、残りのエネルギー93%の影響を無視することになるのです。これでは、風車音による被害の原因が判明しないのは当然です。

音の強さ

音場内の 1 点において、単位面積を単位時間に通過する音響エネルギーを音の強さ（I または J と書く）と言います。単位は、(W/m²)

$$J = (p * p) / (\rho c) \quad (W/m^2)$$

に注意して、音がマイクを通過するときの音の強さ (W/m2) を計算したものが次の表です。

周波数帯	0～20Hz	20～200Hz	200～24 k Hz	0～24 k Hz	単位
交通騒音	1.76E-07	8.08E-08	1.80E-05	1.80E-05	W/m2
神社風	8.23E-06	3.91E-07	2.12E-07	8.83E-06	W/m2
JFE工場	4.80E-05	4.01E-04	5.34E-04	9.84E-04	W/m2
風車弱風	8.19E-04	2.40E-05	3.82E-07	8.43E-04	W/m2
風車強風	1.49E-03	2.30E-05	6.94E-08	1.52E-03	W/m2

周波数の倍音構造

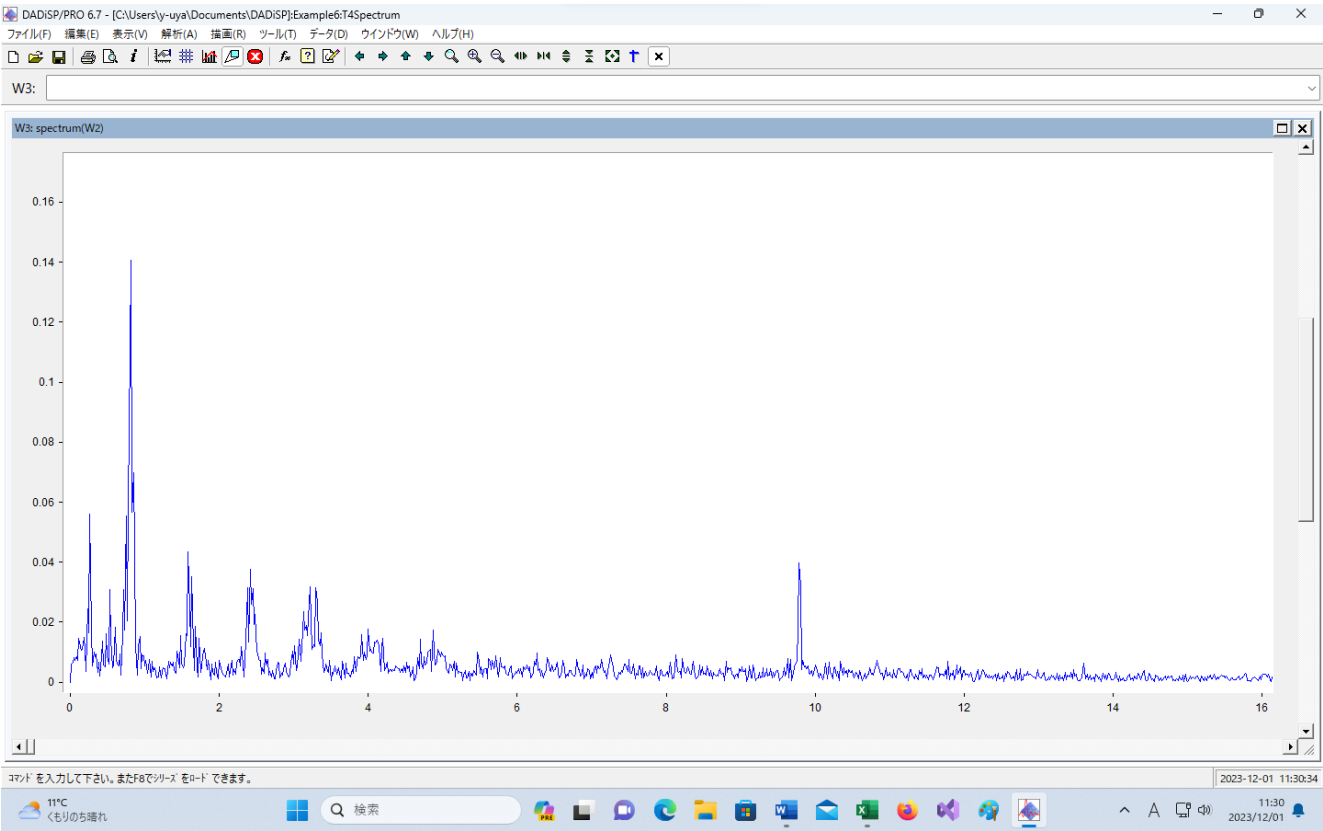


図.3 Wind turbine noise (0～25Hz)

音圧がピーク値となるときの周波数に、次のような規則性がある。

周波数	周波数/0.8167	音圧[Pa]
0.2667	0.3266	0.0560
0.5333	0.6530	0.0309
0.8167	1.0000	0.1405
1.5833	1.9387	0.0436
2.4167	2.9591	0.0377
3.2167	3.9387	0.0317
4.0000	4.8978	0.0177
4.8667	5.9590	0.0173
5.4667	6.6936	0.0101
6.2667	7.6732	0.0098

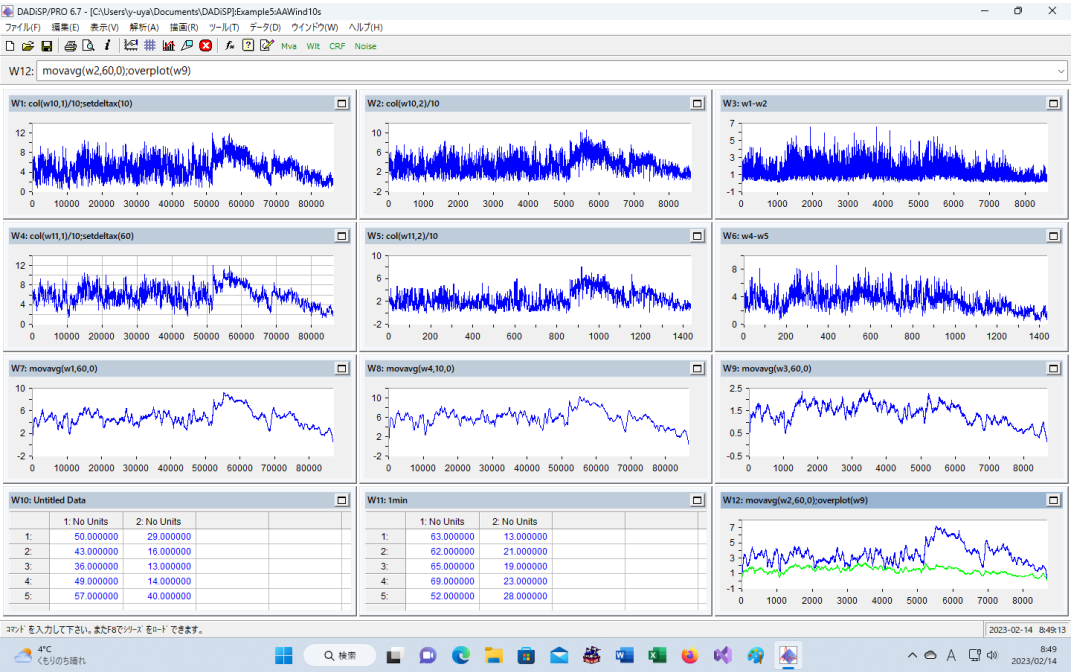
風速の変化と音圧

次の表は、気象庁が計測したデータを、気象業務支援センターから入手したものです。

年	月	日	時	分	秒	前10秒間最大瞬間風速	前10秒間最小瞬間風速	前10秒間風程
						0.1m/s	0.1m/s	
2019	2	2	0	12	40	147	124	132
2019	2	2	0	12	50	146	107	131
2019	2	2	0	13	0	122	82	102
2019	2	2	0	13	10	105	65	83
2019	2	2	0	13	20	112	71	82

（前 10 秒間風程は、10 秒間に風が進む行程を意味します。132 は秒速 13.2m の風速です。）
風速も風向も不安定なのです。

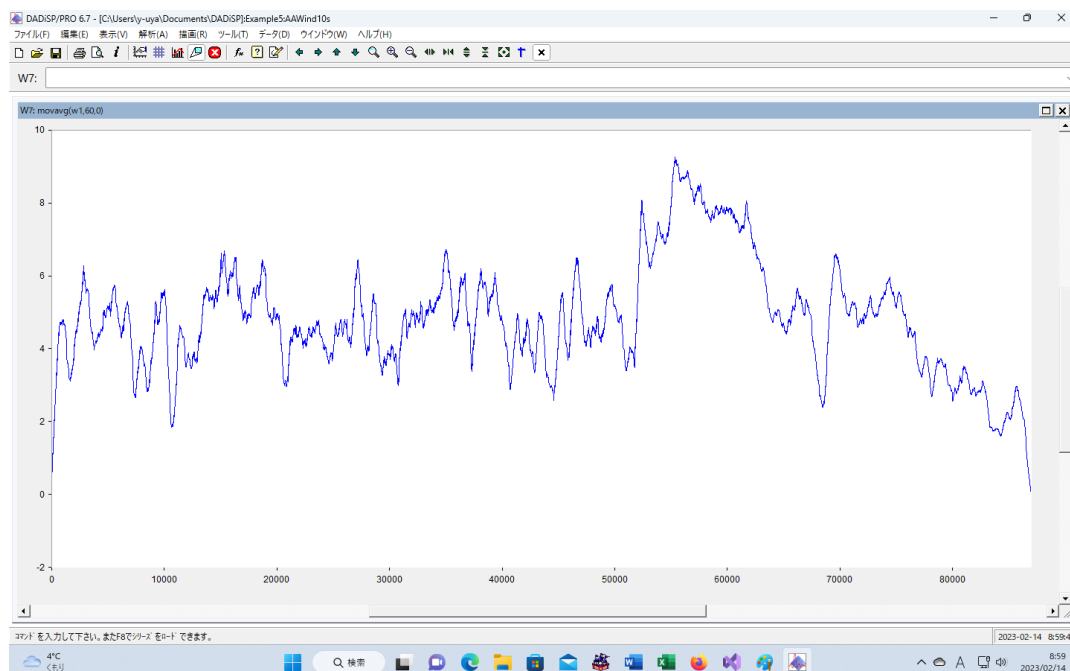
風の強さの変動：



（上のグラフは、2019 年1月1日の24時間分の記録です。）

W1（上段左）は、前 10 秒間最大瞬間風速の値（10 秒ごと）、
w2（上段中央）は、前 10 秒間最小瞬間風速の値（10 秒ごと）、
w4（2段目左）は、最大瞬間風速（3秒間移動平均）の値（1分ごと）、
w5（2段目中央）は、最小瞬間風速（3 秒間移動平均） の値（1分ごと）、
です。

w1 の移動平均をとると、



となります。

ピーク値は、2820、5640、6780、10070、15030、16310、18720、、、秒の辺りです。

秒	分	経過（分）
2820	47	
5640	94	47
6780	113	19
10070	168	55
15030	251	83
16310	272	21
18720	312	40

上の表を見れば、1時間に1回くらい風車に強い風が当たることが分かります。

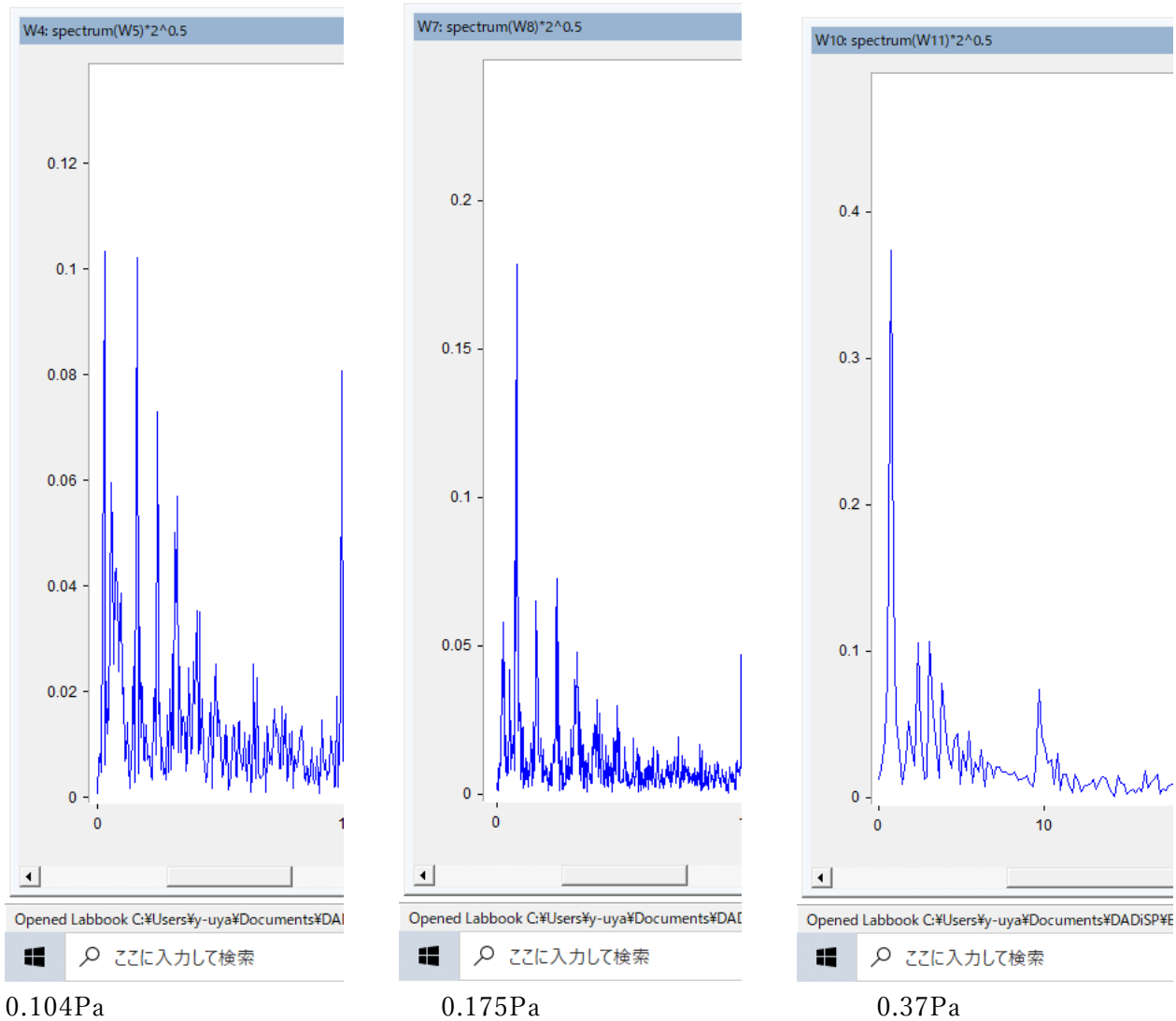
強い風が当たれば、揚力ベクトルが大きくなり、風車の振動も大きくなります。その結果風車から発生する音も大きくなります。

揚力ベクトルの大きさは、風速の2乗に比例します。風速が2倍になれば、揚力ベクトルの大きさは4倍になります。

塔の側面の振幅も大きくなるので、風車音の音圧も大きくなるのです。

周波数は 0.7Hz～0.9Hz の辺りで、かなり安定しているのですが、音圧はかなり変化します。

さて、音圧の変化は、次の様になっています。

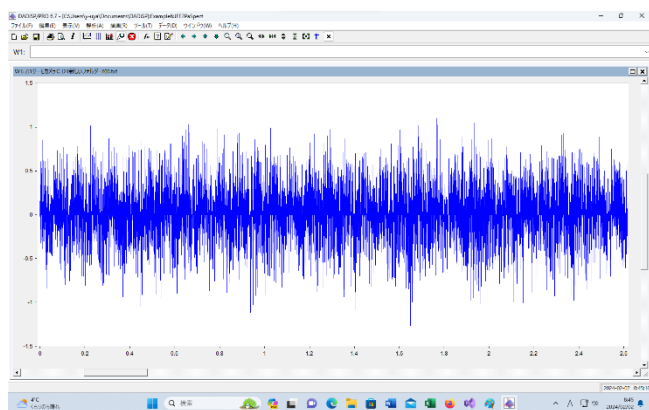


周波数スペクトルでの、0.8Hz 成分の音圧は平均すると 0.175Pa、弱いときは 0.104Pa、強いときは 0.37 Pa です。強いときは、平均の 2 倍程度の音圧になっています。

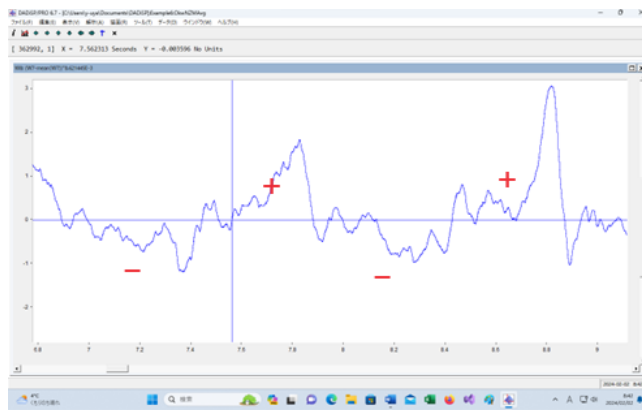
平均して、0.175 パスカルの音圧で、A 特性音圧レベル（20Hz～）が評価されていて、指針値での限界にかなり近い場合において、1 時間に 1 回くらい、平均値の 2 倍程度の音圧になる状態が起きるのです。これは、1 時間ごとに目覚まし時計が鳴るような状態に置かれると言う事です。いくら目覚まし時計が鳴っても、起きない人もいますが、普通の人には目が覚めます。

強風時の波形

工場騒音の、2.6 秒間の波形

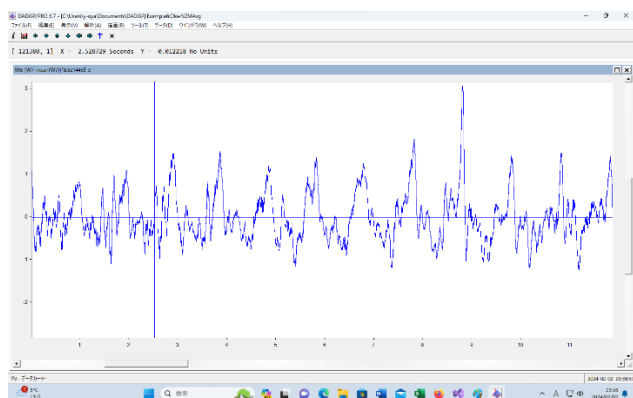


風車音の 2.2 秒間の波形

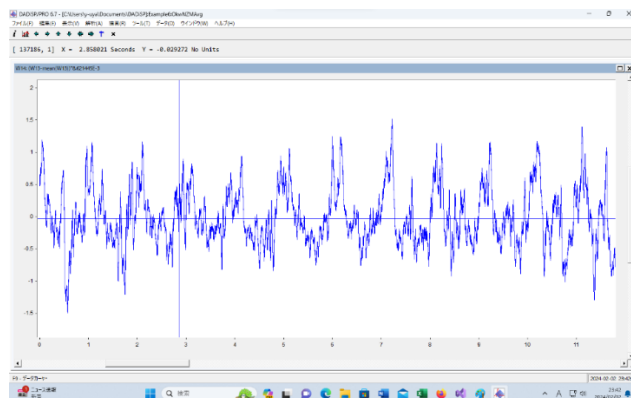


これが、圧縮と膨張が、ゆっくり繰り返される原因です。

音圧が高い（風が強い）ときの 12 秒間



音圧が低い（風が弱い）ときの 12 秒間



風が強い時の方が、音圧のプラス、マイナスがはっきりします。より強い形で、圧縮と膨張の過程が継続することになります。指向性も同様の効果を及ぼすと考えます。

風が強い時は、 0.42Pa で 1Hz でした。風が弱い時は 0.15Pa で 0.8Hz でした。周波数の変化は小さいのですが、音圧の変化は大きいです。

健康被害と原因

6. 1 アノイアンスとラウドネス

都道府県知事 市長・特別区長 殿 環境省水・大気環境局長

“風力発電施設から発生する騒音に関する指針について”

“風力発電施設から発生する騒音に含まれる振幅変調音や純音性成分等は、わずらわしさ（アノイアンス）を増加させる傾向がある。静かな環境では、風力発電施設から発生する騒音が 35～40dB を超過すると、わずらわしさ（アノイアンス）の程度が上がり、睡眠への影響のリスクを増加させる可能性があることが示唆されている。また、超低周波数領域の成分の音も含めた実験の結果、周波数重み付け特性として A 特性音圧レベルが音の大きさ（ラウドネス）の評価に適している。”

とある。

ラウドネス（うるささ）の評価に、A 特性音圧レベル（騒音レベル）の数値が適しているのだが、アノイアンス（不快感）の評価には適していない。

騒音レベルの数値が同じでも、風車音でのアノイアンスと交通騒音でのアノイアンスには、大きな違いがある。

鳥取県における発電用風車の騒音に係る調査報告（十倉 毅・山本 和季・矢野 大地）

での、聴覚での“うるささ”以外の被害は次のものである。

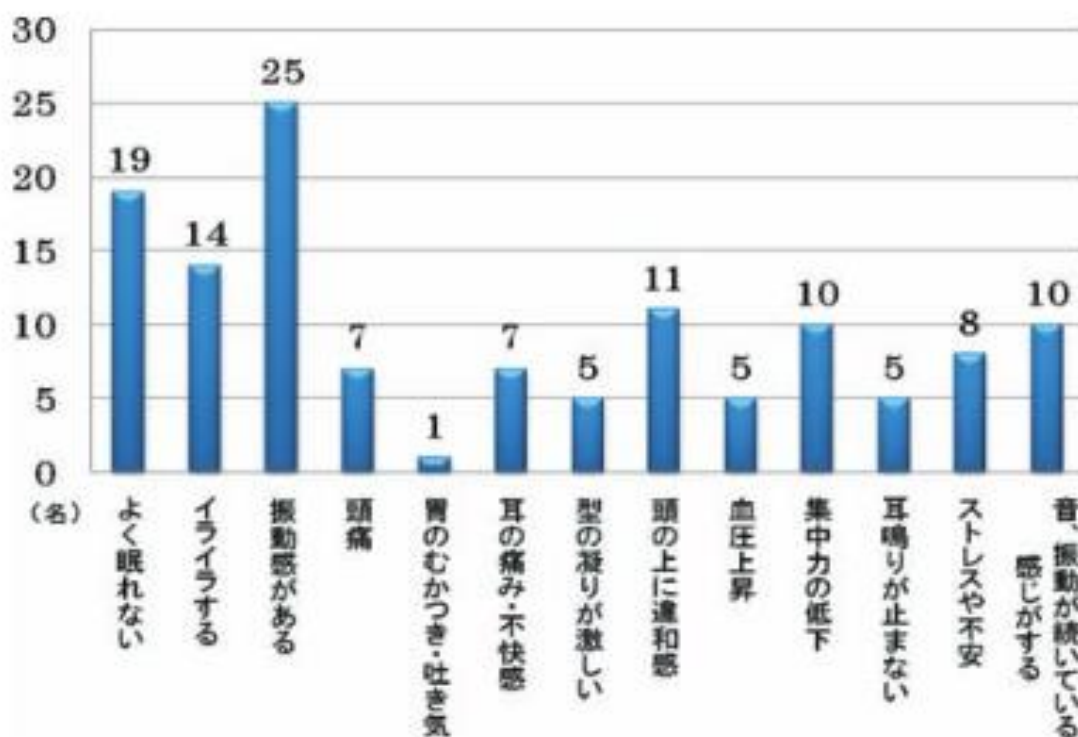


図2 苦情の訴え（「Q5」、複数回答を含む）

石狩風車の低周波音測定結果と健康被害 元札幌医科大学講師・山田大邦氏の論文より 2018年2月8日

には、
 “2007年末、東伊豆の別荘地では1500基[※]×10基の風力発電が運転を始めた直後から、住民のなかで健康被害が続出した。この因果関係を調べるため、事故で風車が停止しているとき、団地自治会が独自に疫学調査を実施した【表1】。不眠、血圧、胸・腹・歯・鼻・耳痛などの症状が、風車が停止することで大きく改善したことがわかる。

表1 東伊豆での風車停止中の被害改善調査（％）

風車からの距離(m)	500m未満	500～700m未満	700～900m未満	900m以上	生理的要素
不 眠	71	27	13	0	距離が離れると改善
血 圧	18	15	0	0	距離が離れると改善
リンパ腺の腫れ	6	2	0	0	距離が離れると改善
胸腹歯耳鼻痛	41	39	25	0	距離が離れると改善
煩い・イライラ	59	61	75	0	心理的要素も
頭痛・肩こり	41	39	81	33	心理的要素も
全体で改善	94	76	94	33	心理的要素も

注：事故停止中、住民121人中の77人が回答した。改善63人(改善率82%)。調査結果に転居(10戸)避難者は含まない。出典：三井大林熱川自治会（2009）。

この結果を受けて住民が動き、今後は夜間に住宅直近の風車3基を停止すること、次に近い風車2基の回転数を4割減らすことーという内容の協定を、自治会と事業者と東伊豆町の三者で結んだという。これによって睡眠障害は7割減った。ただし、それでも耐えられず転居した家族もいる。”とあります。

・平成22年、環境省の調査

風力発電所に係る騒音・低周波音に関する問題の発生状況には、

“【風力発電所の現地調査のうち、騒音・低周波音に関する主な状況】

- 建設前に実施した環境影響評価における予測結果よりも、実際の騒音レベルの方が大きい事例があった。
 - 風車から離れている住民（1km 程度）から、眠れない等の苦情が寄せられている事例があった。
 - 騒音の環境基準を満たしている地点からも苦情が生じている事例があった。
 - 騒音対策として、風車の夜間停止や出力抑制、苦情者宅での騒音対策工事（二重サッシ、エアコンの設置）の実施や、風車に高油膜性ギアオイルを取り付けた事例があった。
- ・また、風車音と他の騒音源からの同等レベルの騒音を比較した場合、不快に感じる人の割合は風車音の方が高い⁵。

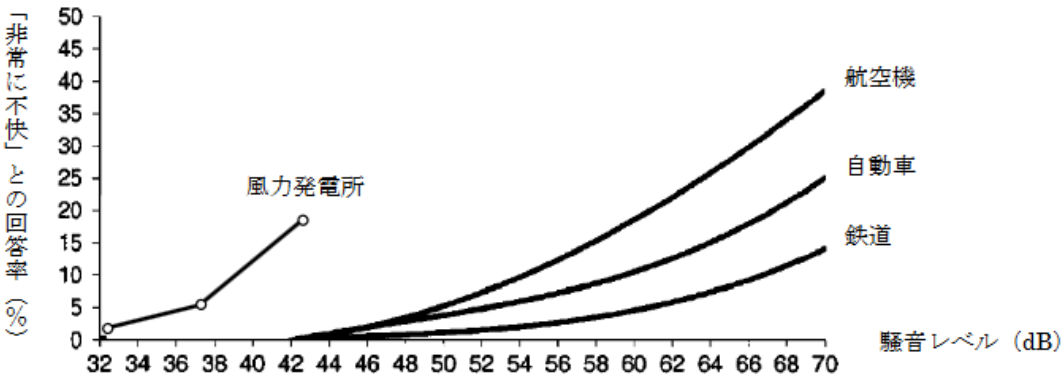


図8. 「非常に不快」との回答率と各種の騒音源からの騒音レベルの関係
 （脚注3及び5の文献より環境省作成）

②風力発電所からの騒音・低周波音に関する訴え

□ Nina Pierpont は、風力発電所の近くに住む 10 家族（38 名）に対する症例調査を行っている 6。それによれば、風力発電所から発生する低周波音により、内耳の器官が影響を受けて、様々な健康被害（睡眠障害、頭痛、耳鳴り、めまい、吐き気、頻脈、集中力低下、記憶障害、倦怠感、パニック症状等）が生じているとされている。“

とあります。

環境省が作った上のグラフは、“不快感”という観点で風車音と他の環境騒音を比較すれば、A 特性音圧レベル（騒音レベル）が 42 dB のとき、風車音では 20% 程度の人が“非常に不快”と感じるが、一般の環境騒音では、“非常に不快”と感じる人はいないことが分ります。

参 考 資 料—低周波音の基礎知識—の・参考 2 -のページには、

．低周波音の苦情と実態

c.1 低周波音苦情の分類

低周波音の苦情は人に関する苦情（心理的苦情、生理的苦情）と建物等に対する苦情（物的苦情）に大きく分けられる。それぞれの苦情内容は以下に示すとおりである。

- （1）心理的苦情 気分のいらいら、胸や腹の圧迫感
- （2）生理的苦情 頭痛、耳なり、吐き気、
- （3）睡眠影響
- （4）物的苦情 家具、建具（戸、障子、窓ガラス等）の振動、置物の移動

このうち、人体に関する苦情は、低周波音との因果関係がはっきりしない場合も少なくない。物的苦情では、振動が原因であると思われていたものが、実は低周波音が原因であったという場合もある。

住民が風車建設に反対する理由や、風車による不快感、わずらわしさ（アノイアンス）、うるさい、健康影響、健康被害 の内容ですが、

住民と風車の距離にあまり影響されないグループ。

業者の説明や事業の進め方に対する不快感、風車建設時の騒音や振動、建設後の道路、山の斜面の崩落、河川にたまる土砂の撤去（農業用水の確保に手間がかかる）、建設後の緑化の為に蒔いた外来種の種で在来種が消えてしまう、植相の変化による影響、動物の行動変化による被害の増加（食物となる植物が減る）、外来種によって増えてしまう草刈りの回数（人件費やガソリン代などの増加）、希少種のバードストライクによる、食物連鎖の崩壊と害獣（ネズミ）の増加

住民と風車の距離に影響されるグループ。

風車が見えるという景観上の問題、家具、建具（戸、障子、窓ガラス等）の振動、置物の移動、瓦のずれ、風車による振動の問題（地中伝搬、共振、強制振動）、風車からの強い光“航空障害灯”の問題、風車の回転でのフリッカーの問題、近づくとき気分が悪くなる、低周波音を感知、風車の騒音がうるさい、風車からの音による不快感、不眠、睡眠障害、なかなか寝付けない、よく眠れない、何度も目が覚める、うるさい、胸や腹の圧迫感、頭痛がする、吐き気がする、耳鳴り、めまいがする、鼻血、血圧、リンパ腺の腫れ、胸腹歯耳鼻痛、肩こり、平衡感覚、頭の中で太鼓がなっているようだ、憂鬱になる、怒る、集中できない、

神経質になる、緊張する、不安になる、気分のいらいら、コルチゾール検査の数値

住民の社会活動や経済活動に影響を与えるグループ。

眠くて仕事でミスをする、眠くて授業中に寝て、学力が落ちる、居眠り運転で交通事故を起こす、体力が落ちて潜水時間が減る（収入の減少）、安眠妨害での体調不良や体力低下、体調不良者の増加による医療費の増加、転出者が増えて税収が減る、人が減り、地域の行事に支障がでる、漁場が狭くなり収入が減る、魚種の変化で収入が減る、風力発電に対する賛否、業者からの保証金や地域への金銭の支払い

などが考えられます。

このうちで、

安眠妨害を引き起こしそうな不快感を集めてみると、

ラウドネス（うるささ）関連の刺激や状態

風車の騒音がうるさい

アノイアンス（不快感）関連の刺激や状態（ラウドネス以外のもの）

風車が見えるという景観上の問題、家具、建具（戸、障子、窓ガラス等）の振動、置物の移動、風車による振動の問題（地中伝搬、共振、強制振動）、風車からの強い光“航空障害灯”の問題、風車の回転でのフリッカーの問題、近づくと気分が悪くなる、低周波音を感知、風車からの音による不快感、不眠、なかなか寝付けない、よく眠れない、何度も目が覚める、うるさい、胸や腹の圧迫感、頭痛がする、吐き気がする、耳鳴り、めまいがする、鼻血、血圧、リンパ腺の腫れ、胸腹歯耳鼻痛、肩こり、平衡感覚、頭の中で太鼓がなっているようだ、憂鬱になる、怒る、集中できない、神経質になる、緊張する、不安になる、気分のいらいら、

評価の指標となる数値

コルチゾール検査の数値、A 特性音圧レベル（騒音レベル）、G 特性音圧レベル、1/3 オクターブ解析での数値、最大音圧と周波数、振動レベル計での計測値

アノイアンス（不快感）の内容は様々です。ラウドネス（うるささ）もその一部です。

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 の報告書（p 14）には、不快感と A 特性音圧レベル（20Hz～）の関連を示す記述がある。（これは、統計的な分析結果です。）

“風車騒音とわずらわしさ（アノイアンス）との量-反応関係についても多くの研究がなされている。複数の報告により、同程度の音圧レベルにおいては、風車騒音は他の交通騒音よりもわずらわしさ（アノイアンス）を引き起こしやすいことが示唆されている。

表 1 の Kuwano らの研究により得られた、日本を対象とした、風車騒音と道路交通騒音を非常に不快であると感じた者の割合（%HA）を図 7 に示す。この図によれば、非常に不快であるとの回答確率が 30%程度となる騒音レベルは昼夜時間帯補正等価騒音レベル（Ldn）で 60dB 程度、20%程度は 53dB 程度、10%程度は 43dB 程度となる。

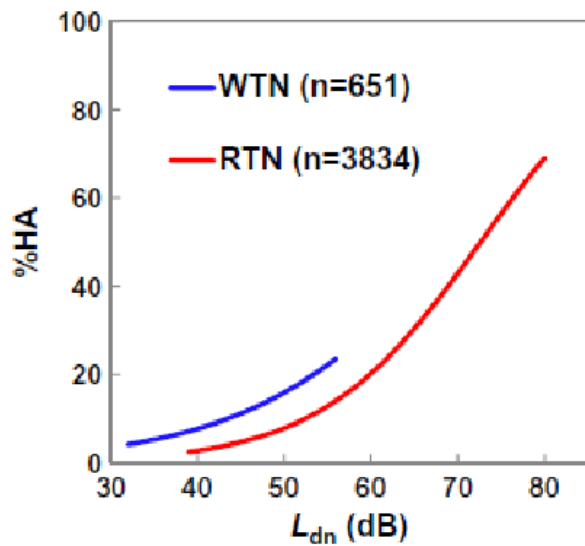


図 7 風車騒音（WTN）と道路交通騒音（RTN）の昼夜時間帯補正等価騒音レベル（ L_{dn} ）※ と非常に不快と感じた者のパーセンテージ（%HA）

※ 風車騒音については、終日定常的に運転されていると仮定し、 L_{Aeq} に 6dB を加算して L_{dn} を推計している。

なお、McCunney らは、多くの研究成果より、風車騒音と関連付けられるわずらわしさ（アノイアンス）との間は線形の関係が見られる傾向にあるが、わずらわしさ（アノイアンス）に関連する要因としては風車騒音は 9%から 13%の範囲の寄与にとどまり、景観への影響等、他の要因の寄与が大きいと考えられると報告している。“

不快感が継続すれば、ストレスが溜まります。その程度を評価するものとして、コルチゾール検査があります。

6. 1. 1 唾液コルチゾール検査

唾液コルチゾール検査 「副腎疲労（アドレナル・ファティーグ）」という言葉をご存じでしょうか？近年、体調不良で検査をしても原因がわからないという不安を訴える患者様が増えています。現代人は、日常的にさまざまなストレスを受けています。副腎から分泌されるコルチゾールは、このストレスから私たちの心身を守ってくれています。しかし、強いストレスが慢性的に続くと、副腎も疲れ、コルチゾールの分泌が追い付かなくなり、身体にさまざまな症状が現れます。

以下の症状に覚えはありませんか？ 朝、起きるのがつらい ぐっすり眠っても、まだ疲労感がある 塩辛い食べ物が無性に欲しくなる 以前楽しんでいたこともすべて億劫に感じる 日常的なことがとても疲れる 性欲の低下 ストレスに対処出来ない、イライラしやすい 病気や怪我、外傷から回復するのに時間がかかる ベッドや椅子から立ち上がる時、クラクラする 軽度のうつ（人生に何の意味も感じられない） 人生の全てがむなしい PMS（月経前症候群）の悪化（手足のむくみ、頭痛、乳房の張り、下腹部の痛み、ふさぎ、不安、怒り、イライラがひどくなる） カフェインがないと仕事ができない 思考がまとまらず、ボーっとする 記憶があやふや 午前10時まで目覚めない 午後3時から4時の間はぼんやりしている 夕食後、やっと元気になる 仕事はかどらない（医者も知らないアドレナル・ファティーグ ジェームズ・L・ウィルソン著 中央アート出版社より引用） 146 146 上記の症状に 1 つでも当てはまれば、副腎疲労の可能性が考えられます。もし、4 つ以上当てはまる場合には、「唾液コルチゾール検査」で十分に副腎が働いているかどうか調べてみることをお勧めします。副腎疲労 の治療は、原因となるストレスの同定・除去や、生活習慣の改善、サプリメントを用いた栄養療法などが中心となります。唾液コルチゾール検査の方法 一日 4 回（8 時、12 時、16 時、24 時）唾液の採取をします。唾液中に含まれるコルチゾールの日内変動を調べます。 正常な場合：朝の値が最も高く、時間が経つにつれて下がります。 副腎機能が低下している場合：朝の値が低くなるなど、分泌パターンに変化が見られます。こういった値の変化によって副腎疲労の度合いが分かります。（唾液の接種だけの検査ですので、身体への負担はほとんどありません。） 検査費用：15,000 円（税別） ※自費診療 この検査を含めた場合、診断書の発行費用は、1 回あたり 2 万円程度です。

6. 1. 2 カナダ政府の HP

Wind Turbine Noise and Health Study: Summary of Results

“風車騒音と健康に関する調査:結果の概要” には、

“コルチゾールはストレスのバイオマーカーとして確立されており、伝統的に血液や唾液から測定されます。しかし、血液や唾液からの測定値は、コルチゾールの短期的な変動を反映しており、時間帯、食物摂取量、体位、短時間のストレスなど、疫学研究で制御することが非常に困難な多くの変数の影響を受けます。コルチゾールは成長するにつれて髪に取り込まれるため、毛髪サンプル中のコルチゾールを測定することで、このような懸念は大幅に解消されます。1 ヶ月あたり 1cm の予測可能な平均成長率で、髪のコルチゾールを測定することで、ストレスへの曝露の月を遡及的に調べることができます。したがって、コルチゾールは、WTN への長期曝露がストレスに関連する主要なバイオマーカーの 1 つに及ぼす潜在的な影響を評価するのに特に有用です。”

“重回帰分析の結果から、毛髪コルチゾール濃度と知覚ストレス尺度のスコアとの間に一貫性が見られた(すなわち、この尺度のスコアが高いほど毛髪コルチゾールの濃度が高い)が、どちらの指標も WTN への曝露によって有意な影響を受けないことがわかった。同様に、自己申告による高血圧(高血圧)は測定された血圧の上昇と関連していたが、測定された血圧または安静時心拍数と WTN 曝露との間に統計的に有意な関連は観察されなかった。”

“多くの変数が測定された睡眠に有意な影響を与えたことがわかりますが、参加者の自宅の近くで計算された屋外の WTN レベルは、睡眠効率、覚醒速度、覚醒時間、総睡眠時間、または眠りにつくのにかった時間と関連していることがわかりました。”

“ストレス対策

毛髪コルチゾール、血圧、安静時心拍数の測定値を知覚ストレス尺度に加えて適用し、WTN への曝露がストレスに関連していることが知られている生理学的変化と関連している可能性をより完全に評価しました。コルチゾールはストレスのバイオマーカーとして確立されており、伝統的に血液や唾液から測定されます。しかし、血液や唾液からの測定値は、コルチゾールの短期的な変動を反映しており、時間帯、食物摂取量、体位、短時間のストレスなど、疫学研究で制御することが非常に困難な多くの変数の影響を受けます。コルチゾールは成長するにつれて髪に取り込まれるため、毛髪サンプル中のコルチゾールを測定することで、このような懸念は大幅に解消されます。1 ヶ月あたり 1cm の予測可能な平均成長率で、髪のコルチゾールを測定することで、ストレスへの曝露の月を遡及的に調べることができます。したがって、コルチゾールは、WTN への長期曝露がストレスに関連する主要なバイオマーカーの 1 つに及ぼす潜在的な影響を評価するのに特に有用です。

重回帰分析の結果から、毛髪コルチゾール濃度と知覚ストレス尺度のスコアとの間に一貫性が見られた(すなわち、この尺度のスコアが高いほど毛髪コルチゾールの濃度が高い)が、どちらの指標も WTN への曝露によって有意な影響を受けないことがわかった。同様に、自己申告による高血圧(高血圧)は測定された血圧の上昇と関連していたが、測定された血圧または安静時心拍数と WTN 曝露との間に統計的に有意な関連は観察されなかった。”

“5.3 煩わしさと健康

WTN の不快感は、血圧、片頭痛、耳鳴り、めまい、PSQI のスコア、知覚ストレスなど、いくつかの自己申告による健康への影響と統計的に関連していることがわかった。

WTN の不快感は、測定された毛髪コルチゾール、収縮期血圧、拡張期血圧と統計的に関連していることがわかりました。

自己報告および測定された健康エンドポイントに関する上記の関連は、特定の騒音レベルまたはタービンからの特定の距離に依存せず、多くの場合、道路交通騒音の不快感についても観察されました。

カナダ保健省は、これらの症状が風力タービンへの曝露よりも前からあったのか、あるいは風力タービンへの曝露によって悪化した可能性があるのかを知る方法がないが、この調査結果は、長期にわたる高い不快感と健康との潜在的な関連性を裏付けている。

調査結果は、健康と福祉への影響が、風力タービンへの曝露以上に、コミュニティの不快感に影響を与える活動に部分的に関連している可能性があることを示唆しています。

ウ. 客観的に測定された結果

客観的に測定された健康アウトカムは一貫しており、対応する自己申告の結果と統計的に関連していることがわかった。WTN は、多重回帰モデルの適用後、毛髪コルチゾール濃度、血圧、安静時心拍数、または測定された睡眠(睡眠潜時、覚醒、睡眠効率など)に関連していることは観察されませんでした脚注 6。 “

とありますが、

不快感の原因を 20Hz 以上の成分に限定してはなりません。

ですから、

WTN (Wind Turbine Noise) ではなく WTS (Wind Turbine sound) とする必要があるのです。

とある内容を表にすれば次のようになります。

特徴は、コルチゾール検査の結果と、被害者の訴えには相関性があるが、WTN の数値との相関性は薄いという事です。関連性を表にすれば、次のようになります。

(×は関連性無し、○は関連性あり、△は三段論法で関連性ありと判断できるものを表します。)

	WTN	睡眠	心拍数	血圧	コルチゾール	不快感	知覚	片頭痛	耳鳴	めまい
WTN		○	×	×						
睡眠障害	○									
心拍数	×									
血圧	×				△	○	△	△	△	△
コルチゾール				△		○	○	△	△	△
不快感				○	○		○	○	○	○
知覚ストレス				△	○	○		△	△	△
片頭痛				△	△	○	△		△	△
耳鳴り				△	△	○	△	△		△
めまい				△	△	○	△	△	△	

被害者の知覚ストレス、高血圧などの訴えが、体調の具体的変化を伴っていることが、コルチゾール検査で証明されていることを示しています。被害者は、正直であり嘘ではないのです。

追加すべき項目は、最大音圧と、その周波数です。

音響キャビテーションでの、気泡発生条件、周波数が低くて音圧が高い。に関連するからです。

カナダ健康省の調査

- カナダ健康省の調査は、風力発電施設の近傍に居住している住民を対象にしており、一時的な影響だけではなく長期的な影響も考慮している

*環境省「風力発電施設から発生する騒音等の評価手法に関する検討会」(平成25年5月～平成28年11月)

について確認しました。

カナダ政府の HP にある、

Wind Turbine Noise and Health Study: Summary of Results

には、

となっています。

“風車騒音と健康に関する調査:結果概要”(Wind Turbine Noise and Health Study: Summary of Results)の問題点は、WTN (Wind Turbine Noise) と健康の関連を調査する。との方針にあります。

本来ならば、超低周波音での最大音圧との関連を調べるべきなのに、20Hz 以上を対象とする WTN との関連を調べても、上手くは行かないのです。

調査結果は、次の様になりました。

	WTNレベル	睡眠障害	心拍数	WTN不快感	血圧	コルチゾール	知覚ストレス	片頭痛	耳鳴り	めまい
WTNレベル		○	×		×					
睡眠障害	○									
心拍数	×									
WTN不快感					○	○	○	○	○	○
血圧	×			○		△	△	△	△	△
コルチゾール				○	△		○	△	△	△
知覚ストレス				○	△	○		△	△	△
片頭痛				○	△	△	△		△	△
耳鳴り				○	△	△	△	△		△
めまい				○	△	△	△	△	△	

低周波音被害に関する日本の研究結果の項目は相互に関連しているが、WTNとの関連は薄いのです。

表-3 低周波音苦情の分類

心理的苦情	睡眠妨害、気分のいらいら
生理的苦情	頭痛、耳なり、吐き気、胸や腹の圧迫感
物的苦情	家具、建具(戸、障子、窓ガラス等)の振動、置物の移動、瓦のずれ

● 聴力影響, 頭痛, 耳鳴り, 糖尿病, 高血圧, 循環器疾病等の健康影響については, 統計的に有意な知見は認められていない

従って、ここでの“統計的に有意な知見”とは、WTN（A特性音圧レベル、騒音レベル）と“低周波音苦情”の項目との統計的に、深い関連性は認められなかったという意味です。

風車音の特徴をWTNで表現できると考えてことが間違いの原因です。WTNは20Hz以上の周波数から計算されます。風車音では、20Hz以上の周波数を持っている成分のエネルギーは全体の7%です。

WTNの数値は、可聴域での被害“うるさい”との関係は深いのですが、圧迫感や頭痛などの不快感との関連は薄いのです。このような低周波音による被害との関連を求めるには、圧迫感に注目すれば、圧迫の原因そのものである最大音圧を多変量解析での項目にしなくてはならないのです。

安眠妨害に関係が深いのは、ラウドネス（うるささ）ではなく、アノイアンス（不快感）なのです。風車音による被害としての安眠妨害を評価する数値は、圧迫感に注目して考えれば、最大音圧をパスカル値で表現した数値なのです。

アノイアンス（不快感）は、風車音の大きな特徴であり、1日中続く風車音は、長期間にわたり継続的に安眠妨害を引き起こす。

その結果、風車音→安眠妨害→健康被害の形で、風車音は間接的に健康被害を引き起こす。

風車から出る超低周波音は、離散的な周波数構造を持っていて、強風時の波形を見れば、音響キャビテーション

ョンにおける気泡発生条件を満たす。体内に発生する微小な気泡によって、潜水病の状態と同じ状態になるので、頭痛が起きる。これは風車音による直接的な健康被害である。

6. 1. 3 「風車騒音の人への影響」

風車騒音の人への影響

- これまでに国内外で得られた科学的知見を踏まえると、風車騒音が人の健康に**直接的**に影響を及ぼす可能性は低いと考えられる。ただし、**風車騒音に含まれる振幅変調音や純音成分等は、わずらわしさ（アノイアンス）を増加させる傾向がある**。静かな環境では、風車騒音が35～40dBを超過すると、**わずらわしさ（アノイアンス）の程度が上がり、睡眠への影響のリスクを増加させる可能性があることが示唆されている**。
- 風力発電施設から発生する**超低周波音・低周波音と健康影響については、明らかな関連を示す知見は確認できない**。
- 景観のような視覚的な要素や**経済的利益**に関する事項等も、**わずらわしさ（アノイアンス）の度合いを左右する**。

周辺環境に対する影響の懸念が国内外で顕在化

騒音・低周波音については、**騒音についての環境基準を満たしている場所においても、健康被害に係る苦情等の発生事例あり**

注釈. 風力発電施設から発生する音は、通常、著しく大きいものではないが、もともと静穏な地域に建設されることが多いため、比較的小さな騒音レベル（A特性音圧レベル）であっても苦情等の発生事例がある。

質問：“明らかな関連”ですが、何がどのように示されたときに、貴社は“明らかな関連”があると認めますか？

（答え）

明らかな関連に関して

“明らか”の意味は色々である。数学の命題で、証明を省いて“明らか”と書いてある事も多いが、初学者にとっては決して明らかではない。

例えば、“ $2+3$ ”を計算せよと言われたら、“ $2+3=5$ ”と答える人がほとんどだと思います。

では、

“ $2+3=5$ を証明せよ。”と言われたら、どうしますか？“明らか”でしょうか？

“ $\sqrt{2}$ が無理数であることを証明せよ。”と言われたら、どうしますか？“明らか”でしょうか？

“ π が超越数であることを証明せよ。”と言われたら、どうしますか？“明らか”でしょうか？

“超低周波音・低周波音と健康影響については、明らかな関連を示す知見は確認できない”ですが、“風車の運転を止めれば不眠や体調不良が無くなり、運転すれば不眠や体調不良が起きる。”から、関連は明らかである。

と主張したら、関連を認めるのでしょうか？たぶん、企業は認めないのだと思います。

では、風車音が原因で、体内に小さな気泡が発生することを、物理的、数学的に、解明して、コンピュータシミュレーションで示したら、関連が“明らか”になったと認めるのでしょうか？

9) 石井俣夫編集,泡のエンジニアリング,テクノシステム, 初版, 2005

この本の、音響キャビテーションに関する内容をさらに研究すれば、現在の物理と数学から見て、関連が明らかになったと言える。と考えます。

実際に被害を受けて苦しんでいる人がいても、その原因を究明し、問題を解決することが出来ないならば、科学の価値は無い。

1/3 オクターブ解析を使い周波数の特定さえもしようとしない。家の中で振動レベル計を使う提案もしない。これでは、問題は決して解決しない。

もちろん調査は必要だが、調査の前に、“健常者の人体に感知される超低周波音は存在せず、建具をがたつかせる超低周波音も存在しない”と言うような考えを流布し、被害を訴えさせなくする風潮を改める必要がある。

また、被害を苦情と言い換え、単なる主観や経済的利益の問題にすり替えてはいけない。

風車建設前の広域的な健康調査とその数値化、風車建設後の広域的な健康調査とその結果の比較。

風車を中心に 3 km 圏内の広域的な健康調査と、10 Km 以内に風車が無くて住民構成が似ている地域のある点を中心とした半径 3 km の地域の健康調査との統計的な比較など、できることは沢山ある。

用語の確認：

検討会報告書「風力発電施設から発生する騒音に関する指針について」には

(注)「超低周波音」についての補足

我が国では、苦情の発生状況を踏まえ「低周波音」という用語が「おおむね 100Hz 以下の音」として定義され用いられてきたが、国際的には、「低周波音」の周波数範囲は国によりまちまちで定まったものではない。一方、IEC(国際電気標準会議)規格 61400 シリーズにより、20Hz 以下を「超低周波音」(infrasound)、20~100Hz を「低周波音」(low frequency noise)と定義しており、国内ではこれを受けた JIS C 1400-0:2005(風車発電システム-第0部:風力発電用語)で同様に定義されている。これを踏まえ、環境影響評価法において個別事業種ごとの技術的な指針として定められた主務省令では、「騒音(周波数が 20~100Hz までの音を含む)」とした上で、「超低周波音(周波数が 20Hz 以下の音)」と規定しており、「低周波音」という用語を用いないこととされた。これらの状況を踏まえ、本報告書では、20Hz 以下の音を「超低周波音」とし、それ以外の音(周波数が 20~100Hz までの音を含む)を「騒音」と表記すると書いてある。

“騒音”と付けば、“(周波数が 20～100Hz までの音を含む)を「騒音」”になってしまう事を考えれば、騒音レベル(20Hz 以上の成分から計算する数値である、A 特性音圧レベル)について、交通騒音と風車音の計測結果が同じ値だったときには、風車音の 99%のエネルギーから求められた数値と、風車音のエネルギーの 7%から求められた数値が同じであることを意味しています。

風車音で最大音圧となるのは 0.8Hz 辺りであり、超低周波音の領域です。圧迫による不快感はこの最大音圧と深い関連を持つので、聴覚で聞こえない音ではあるが、圧迫による不快感、わずらわしさ、アノイアンスとして、影響を及ぼすのだから、交通騒音と風車音では、A 特性音圧レベルが同一でも、アノイアンスに関しては差が出るのです。

風車騒音が

■ 風車騒音は超低周波音ではなく、通常可聴周波数範囲の騒音(=聞こえる音)の問題。

可聴域範囲の騒音の問題ならば、アノイアンスに差が出てはいけないのです。なぜなら、可聴域の音の強さ(A 特性音圧レベル)が同一なのですから、同一の結果が生じなくてはならないのです。

景觀に原因があるのなら、トレーラーに実験室を載せて、風車に近づきながらの目隠し実験をして、因果関係を明確にする必要があるのです。この目隠し実験をすれば、風車に対する賛否との関連も明確になります。

” 検討会報告書「風力発電施設から発生する騒音等への対応について」“には、報告書(p 14)に、

“風車騒音とわずらわしさ(アノイアンス)との量・反応関係についても多くの研究がなされている。複数の報告により、同程度の音圧レベルにおいては、風車騒音は他の交通騒音よりもわずらわしさ(アノイアンス)を引き起こしやすいことが示唆されている。

表 1 の Kuwano らの研究により得られた、日本を対象とした、風車騒音と道路交通騒音を非常に不快であると感じた者の割合(%HA)を図 7 に示す。この図によれば、非常に不快であるとの回答確率が 30%程度となる騒音レベルは昼夜時間帯補正等価騒音レベル(L_{dn})で 60dB 程度、20%程度は 53dB 程度、10%程度は 43dB 程度となる。

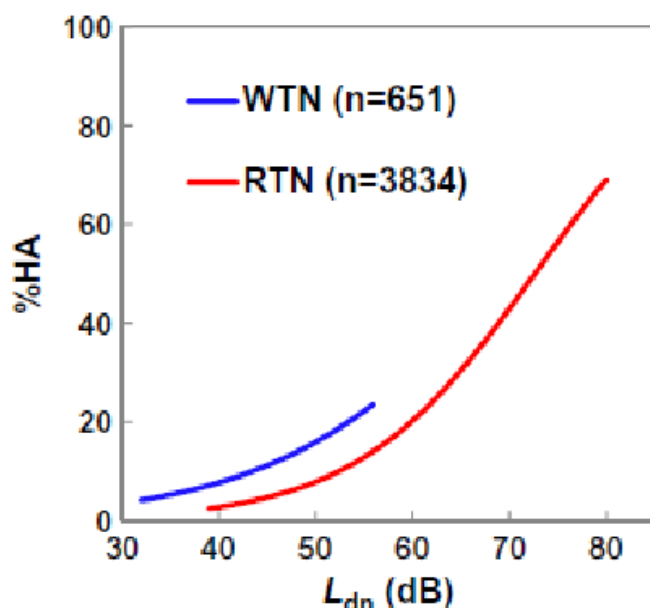


図 7 風車騒音(WTN)と道路交通騒音(RTN)の昼夜時間帯補正等価騒音レベル(L_{dn})※と非常に不快と感じた者のパーセンテージ(%HA)

※ 風車騒音については、終日定常的に運転されていると仮定し、LAeq に 6dB を加算して Ldn を推計している。

なお、McCunney らは、多くの研究成果より、風車騒音と関連付けられるわずらわしさ（アノイアンス）との間は線形の関係が見られる傾向にあるが、わずらわしさ（アノイアンス）に関連する要因としては風車騒音は 9%から 13%の範囲の寄与にとどまり、景観への影響等、他の要因の寄与が大きいと考えられると報告している。”

と書かれている。

下の表は、風車音のうちで、“風車騒音（20Hz 以上）”として扱われるものは、7 %であることを示す。

エネルギー分布	0 ～20 H z	20 H z 以上
風車音	93%	7%
工場音	12%	88%
交通音	1%	99%

風車音のアノイアンスへの寄与を考えると、“風車騒音（20Hz 以上）”の寄与は 7 %、超低周波音の寄与が 93%と考えることもできる。これに関しては、多変量解析を使えばより明確となる。

A 特性音圧レベルでの数値は低いのだが、交通騒音の場合に比べて、同一の A 特性音圧レベルであっても、より大きな被害が出ています。レベルがそれほどではなくても被害が出る原因を見つける必要があります。

風車騒音を日本で実測した結果、周辺の住宅等音の影響を受け得る場所では、時間平均A特性音圧レベルで26～50dB（書店や美術館の中程度）であり、それほど高いレベルではなかった

これらの音の影響は、騒音値の基準と目安（日本騒音調査ソーチャー）の資料によれば、

うるさい	かなりうるさい。かなり大きな声を出さないと会話ができない	7 0 db	・騒々しい事務所の中 ・騒々しい街頭 ・セミの鳴き声（2 m） ・やかんの沸騰音（1 m）
	大きく聞こえ、うるさい。声を大きくすれば会話ができる	6 0 db	・洗濯機（1 m） ・掃除機（1 m） ・テレビ（1 m） ・トイレ（洗浄音） ・アイドリング（2 m） ・乗用車の車内
普通	大きく聞こえる、通常の会話は可能	5 0 db	・静かな事務所 ・家庭用クーラー（室外機） ・換気扇（1 m）
	聞こえるが、会話には支障なし	4 0 db	・市内の深夜 ・図書館 ・静かな住宅地の昼

静か	非常に小さく聞こえる	3 0 db	・ 郊外の深夜 ・ ささやき声
	ほとんど聞こえない	2 0 db	・ ささやき ・ 木の葉のふれあう音

であることが分かります。

交通騒音での基準値の表と比較してみます。

地域の類型	基準値	
	昼間	夜間
A A	5 0 デシベル以下	4 0 デシベル以下
A 及び B	5 5 デシベル以下	4 5 デシベル以下
C	6 0 デシベル以下	5 0 デシベル以下

(注)

- 1 時間の区分は、昼間を午前 6 時から午後 1 0 時までの間とし、夜間を午後 1 0 時から翌日の午前 6 時までの間とする。
- 2 A A を当てはめる地域は、療養施設、社会福祉施設等が集合して設置される地域など特に静穏を要する地域とする。
- 3 A を当てはめる地域は、専ら住居の用に供される地域とする。
- 4 B を当てはめる地域は、主として住居の用に供される地域とする。
- 5 C を当てはめる地域は、相当数の住居と併せて商業、工業等の用に供される地域とする。

住宅街での交通騒音での基準値は昼間で 55 d B、夜間で 45 d B です。

騒音レベル (WTN) の値が同じでも、不快感を覚える人の比率は、交通騒音と風車音では差があります。

WTN は不快感の指標にはなりえないのです。指標として役立つためには、同じ WTN の値の時に、不快感を覚える人の割合が同じになる必要があります。

WTN は、交通騒音の場合は、そのエネルギーの 99% 以上から計算された数値だが、風車音の場合には、そのエネルギーの 7% 以下の部分から計算された数値なのです。したがって、風車音と交通騒音の共通の物差しにはなりえないのです。

グラフのズレについて 6 ～ 9 d B との解説もありますが、グラフを拡大して、水平線を引いて、交点の間隔を調べてみたら、次の様に 4 ～ 13 d B になりました。

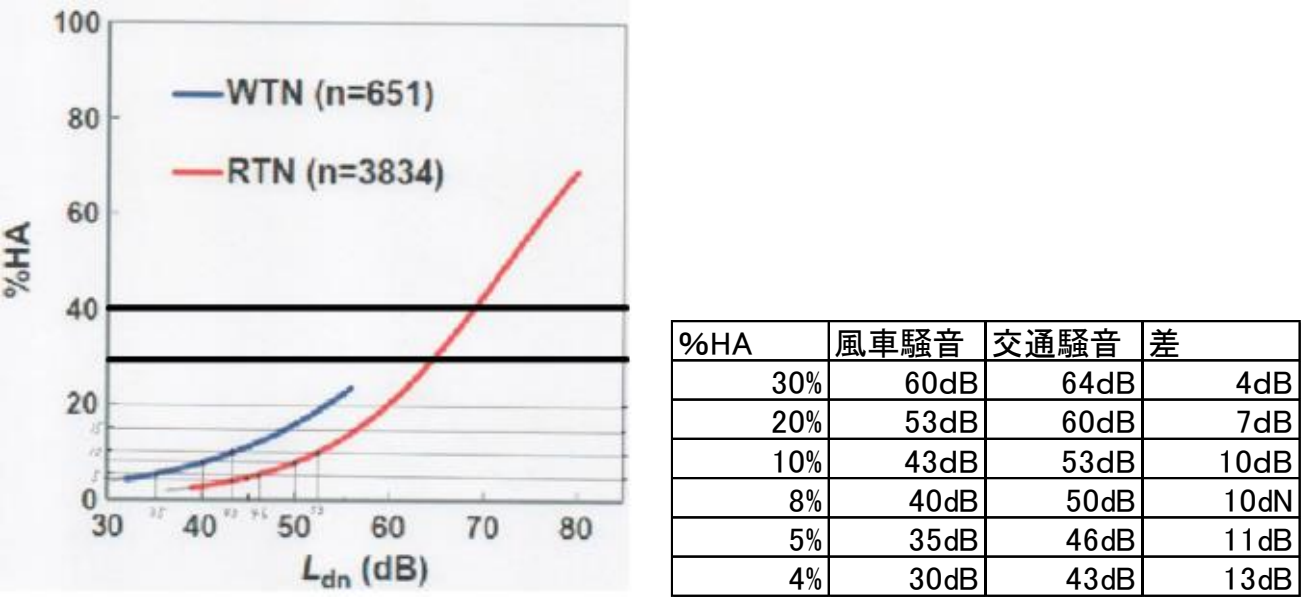
ズレの理由を次の様に考えました。

A 特性音圧レベルで計算される騒音レベルは、風車音のエネルギーの 7% と占める。この部分が、風車音全体のエネルギーの 99% まで増加したとすれば、

$$DB7 = 10 * \log_{10} \left(\frac{p_1^2}{p_0^2} \right)$$

$$DB99 = 10 * \log_{10} \left(\frac{99}{7} * \frac{p_1^2}{p_0^2} \right) = DB7 + 11.5$$

となって、11.5 d B 増加します。
 報告書（p 14）にある、風車騒音と交通騒音の違いを表にすると、



“非常に不快である”と感じる人の割合にかなりの差があることが分かります。
 風車音の騒音レベルを 11.5 d B だけ補正すれば、数値としては、ほぼ一致します。表を作れば、

%HA	風車騒音	交通騒音	差	補正風車音	交通騒音	差
30%	60 d B	64 d B	4 d B	71.5dB	64 d B	-7.5 d B
20%	53 d B	60 d B	7 d B	64.5dB	60 d B	-4.5 d B
10%	43 d B	53 d B	10 d B	54.5dB	53 d B	-1.5 d B
8%	40 d B	50 d B	10 d B	51.5dB	50 d B	-1.5 d B
5%	35 d B	46 d B	11 d B	46.5dB	46 d B	-0.5 d B
4%	30 d B	43 d B	13 d B	41.5dB	43 d B	1.5 d B

エネルギーの面から風車騒音の値を補正した数値を使えば、不快感を覚える人の割合が、ほぼ一致すると言えます。超低周波音を無視すれば、この違いの合理的な説明は出来ません。

交通騒音の場合は、53 d B の場合は、10%の人が非常に不快であると感じ、風車音の場合は、20%の人が非常に不快であると感じます。過去の研究結果から考えれば、不快感の内容に大きな違いがあるのです。

なお、この p 14 の記述は、“特定の周波数が卓越した音（純音性成分）”についての分析ではなく、風車騒音の一般的な性質を、交通騒音との比較において述べている事に注意する必要がある。
 風車騒音で 35 d B は、交通騒音で 46 d B の場合と同じ被害が出ます。5%の人が、“非常に不快である”と思う数値です。単純に“不快である”と思う人をその 2 倍と仮定すれば、合計で 15%の人が不快感を覚える数値です。普通は、風車は夜間も停止しません。AA 地区で、夜間で 46 d B の騒音がある場合の被害が想定されます。言葉で言えば、“やや大きく聞こえるが、通常の会話は可能”のレベルです。これでは病人は安眠できません。眠れなければ、体力も落ちます。病気が治るとは思えません。対策が必要です。

もちろん、健康な人でも安眠できる状態ではありません。

(防音効果を見捨てて考えれば、)

風車騒音は屋外で計測した A 特性音圧レベル (20 Hz~) を使って評価します。

住宅地域での指針値の下限として 40 dB が示されています。風車騒音での 40 dB は、被害状況を比べながら交通騒音に対応させると、交通騒音での 50 dB に相当します。

風車は夜間も停止しません。もし、風車音で 40 dB の音が夜間放出されると、被害は、夜間に於いて交通騒音 50 dB が発生している状況と同程度の被害が出ます。

交通騒音で 50 dB だと、8%の人が“非常に不快である”と感じます。他の統計結果と比較すれば、“不快である”と感じる人の割合は、その2倍で、16%程度だと推測できます。

合計は、24%になります。上の表では“大きく聞こえる、通常の会話は可能”ですから、24%程度の人が、“睡眠の妨げとなる”と考えるのは当然の結果だと判断できます。

もちろん、眠りが浅くなっても、翌日死亡することはほとんどありません。そんな日が毎日続けば、車を運転中に居眠りします。子供は、学校の授業中に居眠りします。

死亡事故や、生涯賃金の減少が予測できます。もちろん、これは風車騒音 (0Hz 以上) による直接の影響ではありません。風車騒音 (0Hz 以上) は、毎日毎日ほんの少しだけ、安眠を妨げただけです。風車には責任はありません。眠い時に運転した人が悪いのです。眠いからと言って授業中に居眠りした生徒が悪いのです。

(となりますが、室内での影響を考えると、もう少し複雑になります。)

これだけでも、大きな問題ですが、風車騒音 (0Hz 以上) のエネルギーを考えるともっと大きな問題があることが分かります。

これを検討するには、風車騒音でのグラフと、交通騒音でのグラフがずれている理由を考えなくてはなりません。

その理由については、次の事項を手掛かりにして考えてみます。

つぎに「最も悩まされている音」に関する質問に対して「風力発電施設の音」を挙げた 119 件の回答について、物理量として風車からの距離 と風車の稼働時の騒音レベルとの関係を調べてみた。その結果、「悩まされたりうるさいと感じたことがある」に対する回答が「非常にある」の反応の割合は、最近接風車からの距離 が近いほど大きくなっている。また、風車稼働時の等価騒音レベルで整理した結果、「非常にある」及び「非常にある」+「だいたいある」の反応の割合は、等価騒音レベルが高くなるほど大きくなる傾向が見られた。これらの傾向は、アンケート調査の結果を多重 ロジスティック解析の手法を用いて分析した結果でも確認された。

残念ながら、このアンケートと分析では、10~13 dB の差を説明できません。

“わずらわしさ (アノイアンス) に関連する要因としては風車騒音は 9%から 13%の範囲の寄与にとどまり”とあり、アノイアンスの他の原因で 91%から 87%の影響力を与えるものとして、“景観への影響”を与えるのは、乱暴すぎます。

わずらわしさ (アノイアンス) に関してのこの差の原因を“景観への影響”としても数値的な誤差の説明とはなりません。影響力が 9%~13%しかないものに責任を負わせてはいけません。“他の要因”について考える必要があります。

音の持つエネルギーの全体量に注目すれば、この差 10~13 dB の原因に関する手掛かりが見つかります。

聴覚に対応した周波数重みである A 特性で重み付けした音圧 P_A から騒音レベル L_A (A 特性音圧レベル) (dB) を求める式は次のようになります。

$$L_A = 10 \log_{10} \frac{P_A^2}{P_0^2} = 20 \log_{10} \frac{P_A}{P_0}$$

P_A : 測定された周波数重み A 付きの (瞬時) 音圧の実効値

P_0 : 基準となる音圧の実効値 (20 μ Pa) (Pa はパスカルという圧力単位)

乱暴な考察だが、100/7=14 (全体のエネルギーは、20Hz 以上の成分の持つエネルギーの 14 倍) に注目して、考えると、

騒音 (低周波音)・超低周波音の大きさの表し方

音圧レベル<物理的な大きさ>

音響出力は音圧の
二乗に比例する

$$L_p = 10 \cdot \log_{10}(p^2 / p_0^2)$$

L_p : 音圧レベル (dB)

dB 値 (参考): 0.002 Pa = 40 dB,

p : 音圧実効値 (Pa)

0.00002 (2×10^{-5}) Pa = 0 dB

p_0 : 基準音圧 2×10^{-5} (Pa) (=20 μ Pa)

* OA 音圧レベル (dB), 1/3 オクターブバンド音圧レベル (dB)

を参考にして計算すれば、A 特性音圧レベル (20Hz~) が 40 dB すなわち、

$$40 = 10 \cdot \log_{10}((P / P_0)^2)$$

のときに、全体のエネルギー (14 倍) を含めた評価は、

$$10 \cdot \log_{10}(((P / P_0)^2 \cdot 14)) = 40 + 10 \cdot \log_{10} 14 = 40 + 10 \cdot 1.1 = 51$$

となる。(1 dB の誤差が出るが、近似値としては良い値だと考えます。)

音のエネルギーが 14 倍になった時には、可聴域のエネルギーを評価して 40 dB の場合に、全体のエネルギーを評価した値が 51 dB になると考えます。

これは、計測音のエネルギーの全体を横軸にして測れば、青いグラフは、11 デシベル分だけ、右に動くと言う事になる。赤いグラフは、20Hz 以上の音が全体のエネルギーの 99% を占めるので動かない。

全体のエネルギーを横軸に取った形で比較すれば、風車音と交通音の差はほとんどないことになる。

これならば、測定と数値化が難しい“アノイアンス”を持ち込まなくても、グラフのズレが説明できる。

もちろん、より精密な考察が必要となるが、少なくとも手がかりは得られたと考えます。

交通騒音 (0Hz 以上) では、高い音圧を持っているのは 400Hz 程度の周波数成分なので、これに対しては防音窓の設置でかなり防げるが、風車騒音 (0Hz 以上) では、高い音圧を持っているのは 0.5Hz とか 0.8Hz の周波数成分であり、風車騒音 (0Hz 以上) のエネルギーの 93% が超低周波音 (0Hz~20Hz) の部分であるので、この周波数の音はエネルギー透過率が高いので防音窓では防げないのです。

これらの数値は、屋外での計測値です。
このエネルギー分布と音の透過率を考えながら、室内の状況を考えます。

石竹達也 氏の研究内容に、

最近接風車から約1,000 m離れた地区の屋内外
の超低周波音レベルおよび騒音レベル

- G特性等価音圧レベル $L_{\text{Geq},n}$ は、屋内で44～55 dB、屋外で48～59 dBであった。屋内外音圧レベル差は最大で7 dB程度：超低周波音領域で窓および壁の遮音効果は小さい。
- 等価騒音レベル $L_{\text{Aeq},n}$ は、屋内で16～32 dB、屋外で30～51 dBであった。屋内外音圧レベル差は4～24 dBで、ばらつきあり

と書かれている。

これを使って考えてみます。
音の全体のエネルギーを 100%とします。93%が超低周波音（0Hz～20Hz）、7%が騒音（20Hz 以上）のエネルギーだとします。
A 特性音圧レベル（20Hz～）で 40 d B の風車騒音では、エネルギーの 7%に対する評価値が 40 d B となっています。この部分に対しては、防音窓によって 24 d B の減衰が得られます。従って、16 d B となって、次の表から

静か	非常に小さく聞こえる	3 0 db	・ 郊外の深夜 ・ ささやき声
	ほとんど聞こえない	2 0 db	・ ささやき ・ 木の葉のふれあう音

ほとんど聞こえないレベルとなる。

超低周波音（0Hz～20Hz）の部分は 7 d B しか減衰しません。
そこで、次のように考えてみます。
交通騒音（20Hz 以上）で 50 d B に相当する風車騒音（0Hz 以上）について、
騒音（20Hz 以上）の部分が 40 d B、超低周波音（0Hz～20Hz）の部分を加えた合計が 50 d B だとします。

さて、騒音レベルの計算ですが、次の資料を確認します。

【参考】：1/3 オクターブのデータより 1/1 オクターブのデータへの変換

既知の 1/3 オクターブデータの dB 値より対応する 1/1 オクターブバンドデータの dB 値へ変換するには、求めたい 1/1 オクターブバンドに対応する 1/3 オクターブバンドデータの dB 値の和を計算します。例えば、1/1 オクターブの中心周波数 1000 Hz のバンドデータ値を求める場合、対応する 1/3 オクターブのバンドデータが次のような dB 値であるとき；

800 Hz	73 dB
1000 Hz	77 dB
1250 Hz	75 dB

；中心周波数 1000Hz の 1/1 オクターブバンド値は次の式から求められます。

$$10 \log_{10} \left(10^{\frac{73}{10}} + 10^{\frac{77}{10}} + 10^{\frac{75}{10}} \right) = 80 \text{ (dB)} \quad \text{式 11-7}$$

この計算では、各周波数帯の音のエネルギーの和に対しての騒音レベルを計算しています。

音圧の 2 乗が音の強さ（エネルギー）に比例することから、この帯域でのエネルギーの大きさを $P_{1/1}^2$ とすれば、エネルギーの和を考えると、（ $J = (p * p) / (\rho c)$ ）を考え、適当な定数を掛けて考える。）

$$(P_{800})^2 + (P_{1000})^2 + (P_{1250})^2 = P_{1/1}^2$$

が成立する。

$$L_{800} = 10 * \log_{10}(P_{800}/P_0)^2$$

より $L_{800}/10 = \log_{10}(P_{800}/P_0)^2$ 、よって、 $(P_{800}/P_0)^2 = 10^{L_{800}/10}$

となり、

$$\begin{aligned} L_{1/1} &= 10 * \log_{10}(P_{1/1}/P_0)^2 \\ &= 10 * \log_{10}(((P_{800})^2 + (P_{1000})^2 + (P_{1250})^2)/P_0^2) \\ &= 10 * \log_{10}(10^{L_{800}/10} + 10^{L_{1000}/10} + 10^{L_{1250}/10}) \end{aligned}$$

となります。

そこで、

$$\begin{aligned} (P_L)^2 + (P_H)^2 &= P_T^2 \\ 40 &= 10 * \log_{10}(P_H/P_0)^2 \\ 50 &= 10 * \log_{10}(P_T/P_0)^2 \end{aligned}$$

とすれば、

$$\begin{aligned} (P_L/P_0)^2 &= (P_T/P_0)^2 - (P_H/P_0)^2 \\ &= 10^5 - 10^4 \end{aligned}$$

$$10 * \log_{10}(P_L/P_0)^2 = 10 * \log_{10}(10^5 - 10^4) = 10 * (4 + \log_{10} 9) = 49.5$$

この部分が、7 d B 減衰すれば、42.5 d B

$$10 * \log_{10}(P_{L425}/P_0)^2 = 42.5$$

とおくと、

$$(P_{L425}/P_0)^2 = 10^{4.25}$$

さらに、

$$40 = 10 * \log_{10}(P_H/P_0)^2$$

での減衰が 24 d B なので、

$$40 - 24 = 16 = 10 * \log_{10}(P_{H16}/P_0)^2$$

とにおいて、

$$(P_{H16}/P_0)^2 = 10^{1.6}$$

$$(P_{L425}/P_0)^2 + (P_{H16}/P_0)^2 = 10^{4.25} + 10^{1.6}$$

このとき、

$$10 * \log_{10}((P_{L425}/P_0)^2 + (P_{H16}/P_0)^2) = 10 * \log_{10}(10^{4.25} + 10^{1.6}) = 42.5$$

となります。

エネルギーの全体を考えると、室内での風車騒音（0Hz 以上）は、交通騒音（20Hz 以上）に変換して考えた場合の 42.5 d B に相当すると言えます。

交通騒音（20Hz 以上）で 45 d B だった場合はどうなるかと考えると、これは、24 d B の減衰がそのまま使えて、室内では 21 d B になると言えます。

交通騒音（20Hz～100Hz）で 40 d B だった場合は、24 d B の減衰があれば、16 d B になります。

交通騒音に対しては、家は防音窓を付ければ、安眠を保証してくれます。

周波数が高ければ、防音窓は私たちの生活を守ってくれますが、周波数が低い風車超低周波音（ISO7196）の場合には、守ってはくれないのです。

屋外で測った時の、風車騒音（0Hz 以上）での 40 d B は、室内での交通騒音（20Hz 以上）の 42.5 d B に相当します。防音対策をした後の室内での、16 d B と 42.5 d B では、大きな違いがあります。

普通	大きく聞こえる、通常の会話は可能	5 0 db	・ 静かな事務所 ・ 家庭用クーラー（室外機） ・ 換気扇（1 m）
	聞こえるが、会話には支障なし	4 0 db	・ 市内の深夜 ・ 図書館 ・ 静かな住宅地の昼
静か	非常に小さく聞こえる	3 0 db	・ 郊外の深夜 ・ ささやき声
	ほとんど聞こえない	2 0 db	・ ささやき ・ 木の葉のふれあう音

風車が大型化すると、この傾向はさらに顕著になります。従って、

“これらの結果は、風車騒音は超低周波音（ISO7196）による問題であるということを示している。”

“風車騒音（0Hz 以上）は通常可聴周波数範囲の騒音（20Hz 以上）としてではなく、超低周波音（ISO7196）の問題として議論すべきであることを意味している。”

のです。

ここでは、聴覚を中心に考えたが、圧力の感知や、共振による揺れの感知、共振による 2 次的な騒音の発生も検討が必要です。A 特性音圧レベル（2 0 Hz～）はこれを表現できません。

6. 2 間接的な健康影響（安眠妨害）

6. 2. 1 風車による睡眠へ影響

風車音の影響は聴覚に対してだけではなく。風車音の被害を把握するには8つの観点が必要です。

音がうるさい

圧迫感や吐き気などによる不快感

直接的な健康被害としての頭痛

音が原因の建具や床のガタツキを感じる

夜間の光（航空障害灯）による安眠妨害

風車の陰によるイライラ

風車振動の地中伝搬（大型風車による地盤振動伝播 小野寺 英輝）

音源としての風車の形と距離減衰

です。

どれが起きても、睡眠を妨げられます。

6. 2. 2 ガタツキ閾値

銭函での G 特性音圧レベルは 67.950932 d B ですから、100 d B よりは低い数値です。

ISO7196 の中心周波数での、平坦特性での音圧レベルは、

中心周波数 (Hz)	0.25	0.315	0.4	0.5	0.63	0.8	1	1.25	1.6	2	2.5
銭函 (平坦特性 d B)	51.39	57.76	62.60	65.99	69.41	71.60	71.82	71.97	71.45	71.53	71.33
中心周波数 (Hz)	3.15	4	5	6.3	8	10	12.5	16	20	25	31.5
銭函 (平坦特性 d B)	71.54	70.30	69.88	67.92	63.91	59.42	55.67	51.17	47.02	48.24	49.40
中心周波数 (Hz)	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	
銭函 (平坦特性 d B)	44.68	41.86	40.38	44.90	42.97	40.98	38.58	37.28	34.08	33.15	

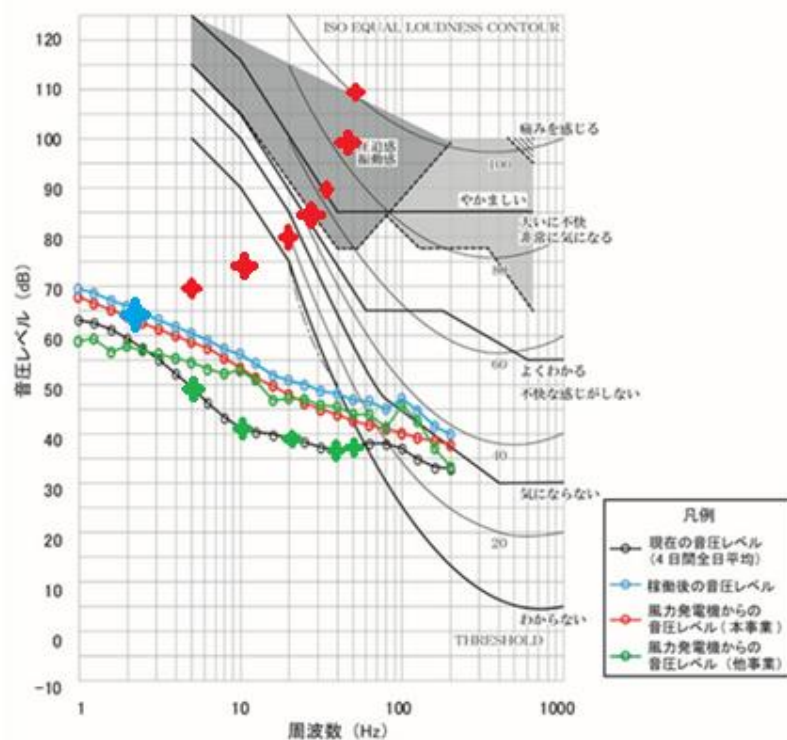
5Hz では 69.88≒70 d B、1.25Hz では 71.97 d B です。ガタツキ閾値の数値、5Hz で 70 d B になっています。

表1 低周波音による物的苦情に関する参照値

1/3 オクターブバンド 中心周波数 (Hz)	5	6.3	8	10	12.5	16	20	25	31.5	40	50
1/3 オクターブバンド 音圧レベル (dB)	70	71	72	73	75	77	80	83	87	93	99

ガタツキが起きて、夜中に目が覚めても不思議ではありません。

上の表では、周波数が下がればガタツキ閾値も小さくなります。



上の図から、2Hz で 65 d B 程度で、ガタツキが起きると考えられます。

6. 2. 3 圧力変動の感知

音は粗密波であり、密になった場合は人体に掛かる大気圧は増加し、疎になった場合には大気圧は減少する。次の研究報告によれば、この気圧の変化を感知できると考えられる。

これは、1 Hz の粗密波を、音として感知するのではなく、大気圧の変動として感知できるという意味です。根拠は、次の論文です。

気圧の変化を感じる場所が内耳にあった —気象病や天気痛の治療法応用に期待— （佐藤純教授らの共同研究グループ）

【2019 年 1 月 29 日】

プレスリリース

鳥類には気圧を感じる器官が耳に存在することが分かっています。彼らはこの能力を使って、自分の飛んでいる高度を知り、雨が降るかどうかなどの気象変化を予見し行動していると考えられています。一方、ほ乳類に気圧を感じる能力があるかどうか明らかになっていませんが、「猫が顔を洗うと雨が降る」などの言い伝えもあり、わたしたち人間においても、「天気が崩れると頭痛がする、ぜん息がでる」、「古傷が痛むので、明日雨が降るのが予知できる」など、臨床家の間ではよく知られた事実があることから、他の動物と同じように気圧の変化を感じている可能性があると言われてきました。この問題を慢性痛の治療の面から長年取り組んできた中部大学・生命健康科学部理学療法学科の佐藤純教授（愛知医科大学医学部客員教授）のグループは、愛知医科大学・医学部と日本獣医生命科学大学・獣医学部との共同研究により、マウスにも内耳の前庭器官に気圧の変化を感じる場所があることを、世界で初めて突き止めました。

研究成果のポイント

マウスの内耳の前庭器官に気圧の変化を感じる場所と能力があることを突き止めました。

このメカニズムを明らかにすることで、気象病や天気痛の有効な治療法の確立に繋がります。

研究の背景、概要と成果

「雨が降ると古傷が痛む」「頭痛がする」「気分が落ち込む」など、天気の崩れが体調に影響したり病気を悪化させたりすることは「気象病や天気痛」と呼ばれ、古くから知られていますが、そのメカニズムははっきりとは分かっていません。佐藤教授らは、以前より、天気の崩れにより気圧が変化すると内耳がその変化を感じとって脳に伝え、その結果、さまざまな疾患が発症したり悪化したりするという仮説（図 1）を提唱してきましたが、今回の研究成果により、本来は平衡感覚を司る前庭器官に、気圧を感じる部位と機能もあることが確かめられました。

実験の内容は次のとおりです。

マウスを人工的に気圧が変えられる装置にいて、天気の変化に相当する微小な低気圧に一定時間暴露します。その後、脳を取り出し、内耳の前庭器官からの感覚情報を中継する延髄の前庭神経核細胞の活動を観察しました。すると、前庭神経核のうち、おもに半規管（一部、球形囊）からの情報が集まる上前庭神経核細胞において、神経細胞が興奮すると増える特殊な蛋白質（c-Fos タンパク質）が細胞内に増加していることを発見しました。一方、他の部位からの感覚情報が集まる神経核細胞に変化はなく、気圧の変化を与えていないマウスでも変化はみられませんでした（図 2）。

図 1

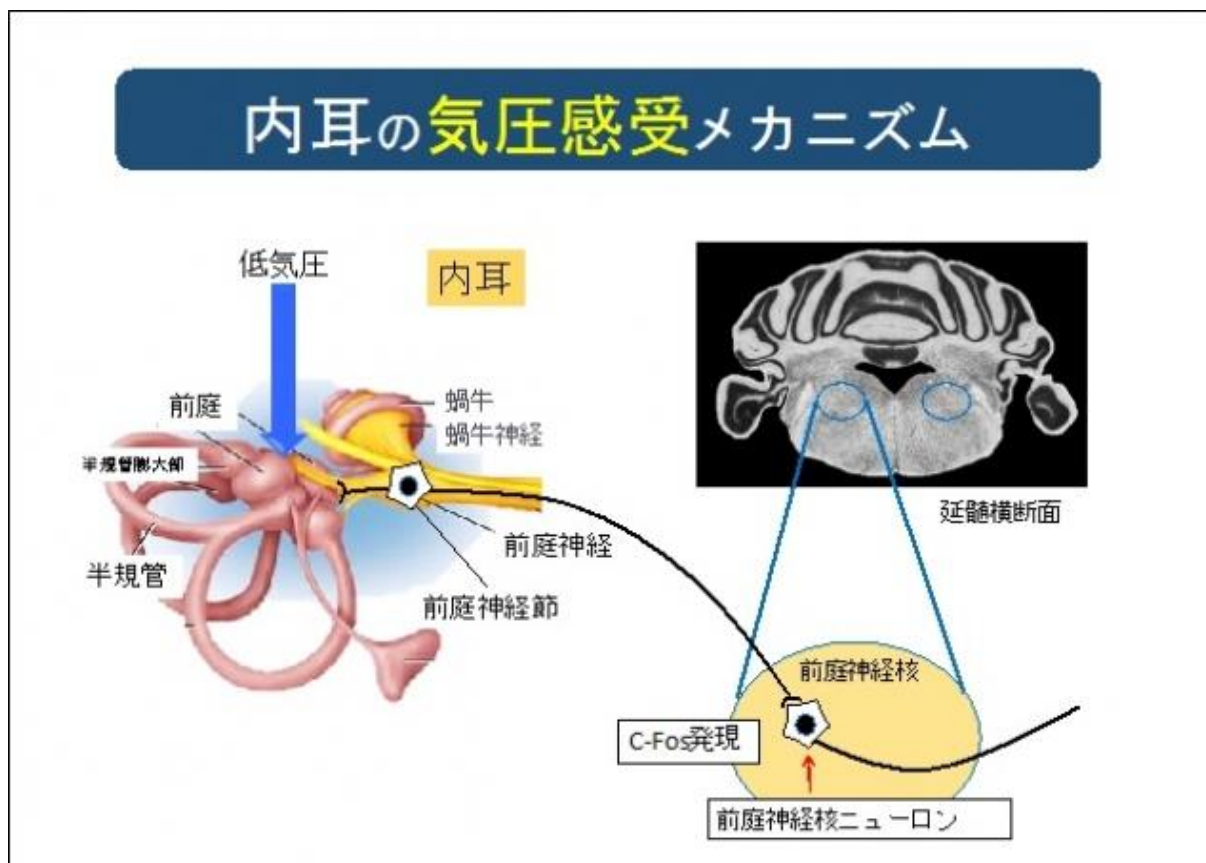
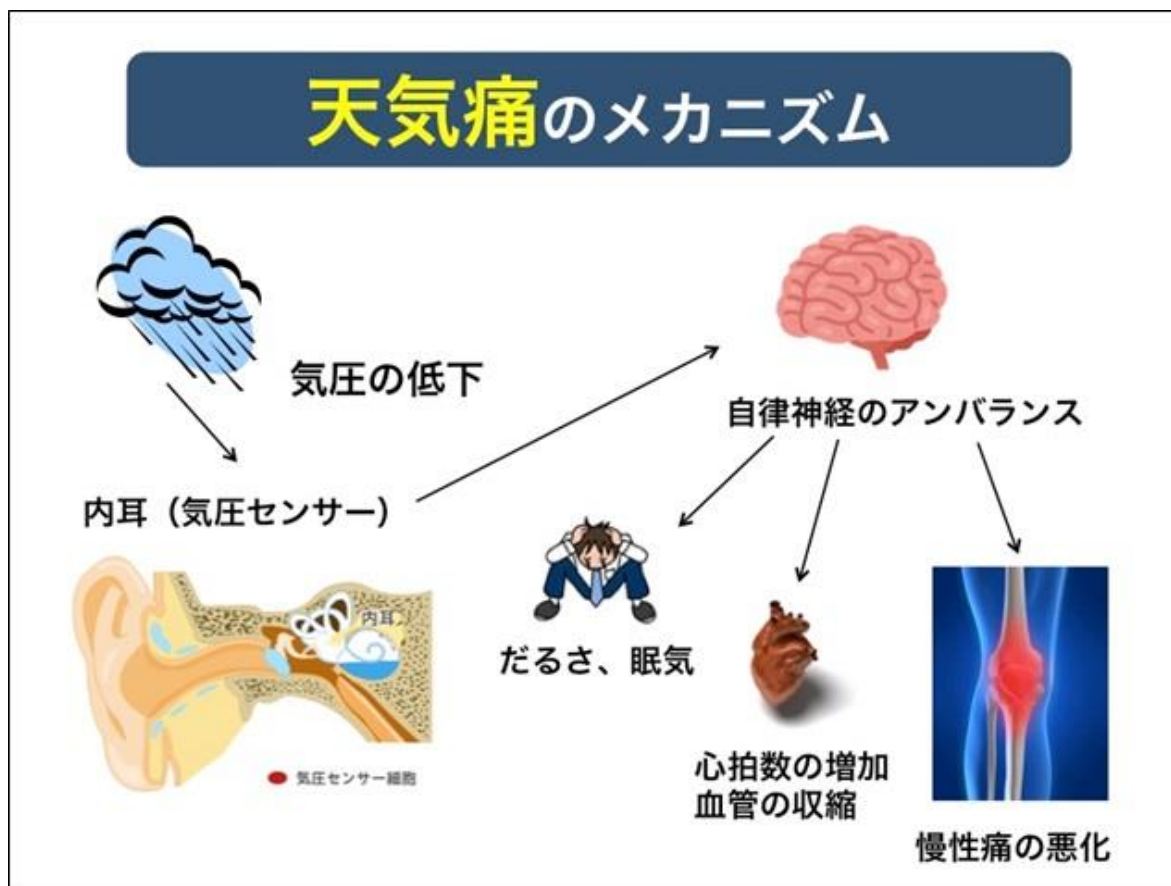


図 2



今後の展開

今回の研究成果から、私たち人間においても天気の変化によって前庭器官が気圧の微妙な変化を感じとり、脳にその情報が伝わり、結果として古傷や持病の痛みを呼び覚ましたり、めまいや気分の落ち込みといった不調を起こすものと考えられます。これまで、平衡感覚のみを感じていると考えられてきた内耳の半規管に気圧の変化を感じる能力があることが分かりました。今後も研究を続け、どのようなメカニズムで前庭器官が気圧の変化を感じ取るのかを明らかにしていきます。また、このメカニズムを明らかにすることで、気象病や天気痛の有効な治療法の確立に繋げていきます。

研究成果の公表

本研究成果は、2019年1月25日午後2時（米国東海岸時間）、PLOS ONE 誌オンライン版として掲載されました。

論文題名：

Lowering barometric pressure induces neuronal activation in the superior vestibular nucleus in mice
(低気圧はマウスの上前庭神経核ニューロンを興奮させる)

問い合わせ先

佐藤純（中部大学 生命健康科学部 理学療法学科教授）

E-mail : jsato[at]isc.chubu.ac.jp ※アドレスの[at]は@に変更してください。

これは、粗密波としての超低周波音を気圧変動として感知できる可能性を意味しています。もちろん、これは聴覚による感知ではありません。

周波数が 0.5 (Hz) の音を考える。

波長は、 $340/0.5=680\text{m}$ 、波は、1秒間に 0.5 回、したがって、2秒に 1 回の割合で繰り返す。

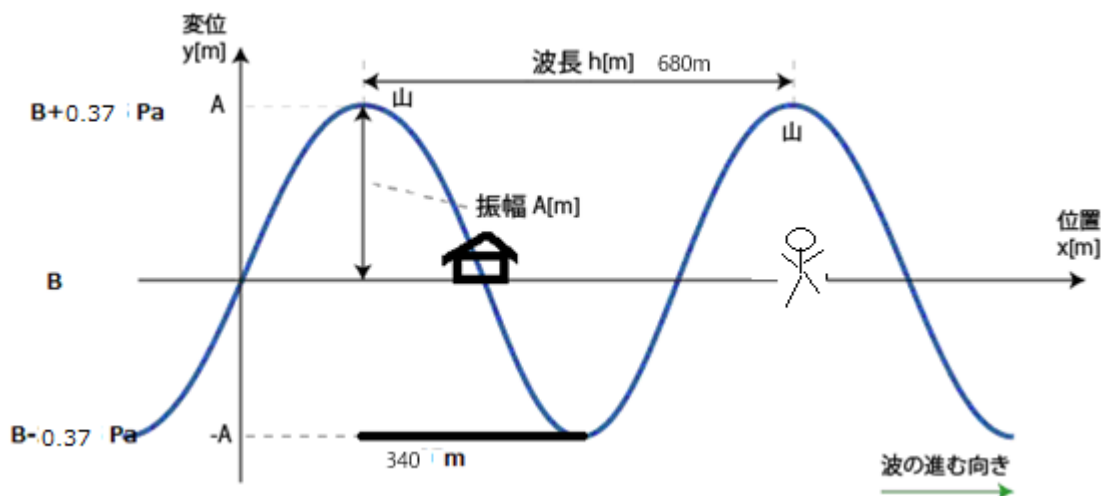
音圧を 0.37 (Pa) とし、ある時刻 t を固定すれば、下の図のようになる。

右の人物（風船のように反応すると考える）は、

気圧が高くなった中にいるので、押しつぶされている。

1秒後には波が右に 340m 進むので、気圧が低くなり、膨張する。

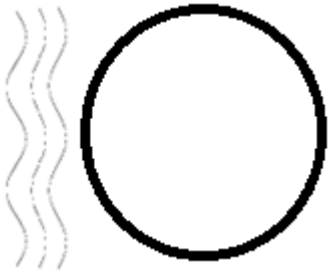
2秒後には、波は 680m 進むので、気圧が高くなり、押しつぶされる。



押しつぶされたり、膨張したりすれば、圧迫感を覚えるのは当然です。これは、聴覚での把握とは言えませ

ん。

周波数が高ければ、風船の表面は振動するでしょう。これは、鼓膜が振動するのと同じですから、この場合は、音を聴覚で感知したと言えます。



ですから、表面が振動する反応と、表面が振動しないで押しつぶされたり膨張したりする反応の2種類があると考えられます。

音に対して、聴覚での“うるささ”としての感知と、体に対する圧力変動を“圧迫感”として感知する場合の2種類があると考えerべきです。こちらは、頭痛などとの関連が考えられます。

従って、超低周波音の感知には、聴覚メカニズムによらないものがある。と考えるべきです。

人間の体は、人体に加わる圧力の変化に敏感に反応することは、七浦地区に住み海に潜ってアワビを採っている人ならば皆が知っています。深く潜ったり、浮き上がったたりする動作を繰り返すと、頭痛がしたり、鼻血が出たり、耳が痛くなったりします。人体に加わる圧力変動の観点からの議論する必要があります。

私も海に潜って漁をします。潜り始めて1週間くらいは頭痛がします。圧力変化に体が直接反応して、鼻血が出たり、耳が痛くなったりします。

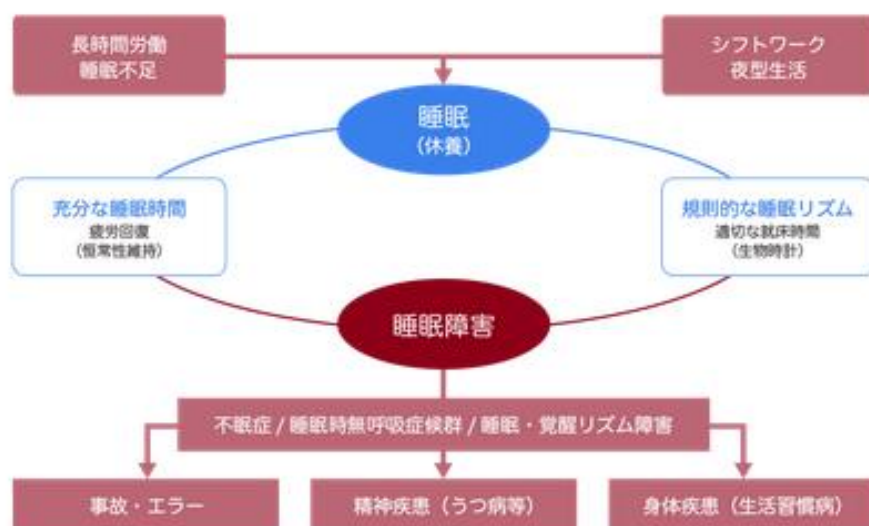
6. 2. 4 不眠による被害

安眠が妨害される要因としては、“音がうるさい”、“圧迫感や不快感がする”、“頭痛がする”、“振動を感じる”などがあります。

睡眠と生活習慣病との深い関係（厚生労働省）

質の悪い睡眠は生活習慣病の罹患リスクを高め、かつ症状を悪化させることが分かっています。睡眠問題は「睡眠習慣」と「睡眠障害」の問題に分けられます。睡眠習慣については睡眠不足やシフトワークなどによる体内時計の問題、睡眠障害については睡眠時無呼吸と不眠症の問題を取り上げ、それぞれ生活習慣病との関係を明らかにします。

「睡眠習慣」と「睡眠障害」の問題



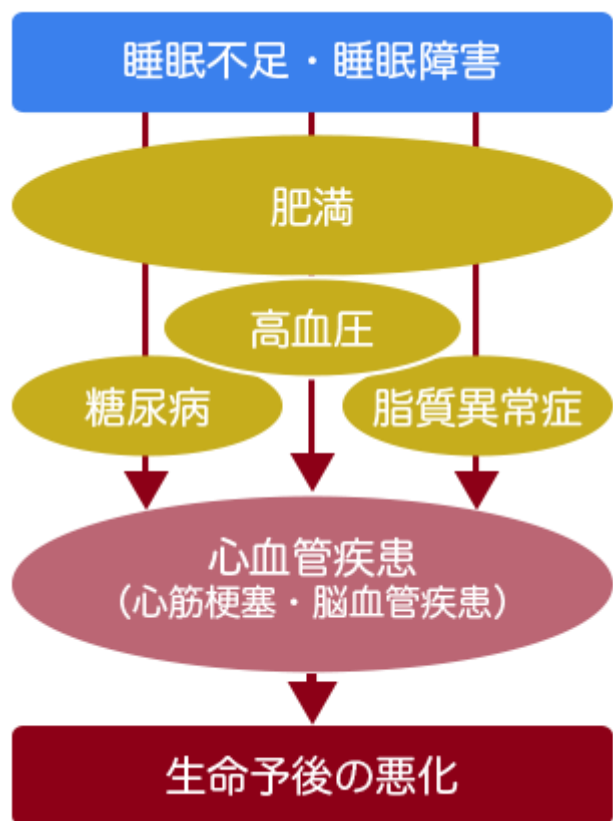
日本人、特に子供たちや就労者の睡眠時間は世界で最も短いと言われています。【図 2】は就労者の男女別の睡眠時間を国際比較した結果です。日本人の睡眠時間が如何に短いかわかりいただけたと思います。とりわけ女性は家事や育児の負担が大きいため男性よりもさらに睡眠時間が短く、平日・週末を問わず慢性的な寝不足状態にあると言えます。

慢性的な睡眠不足は日中の眠気や意欲低下・記憶力減退など精神機能の低下を引き起こすだけではなく、体内のホルモン分泌や自律神経機能にも大きな影響を及ぼすことが知られています。一例を挙げれば、健康な人でも一日 10 時間たっぷり眠った日に比較して、寝不足（4 時間睡眠）をたった二日間続けただけで食欲を抑えるホルモンであるレプチン分泌は減少し、逆に食欲を高めるホルモンであるグレリン分泌が亢進するため、食欲が増大することが分かっています。ごくわずかの寝不足によって私たちの食行動までも影響を受けるのです。実際に慢性的な寝不足状態にある人は糖尿病や心筋梗塞や狭心症などの冠動脈疾患といった生活習慣病に罹りやすいことが明らかになっています。

また日本人の約 2 割は交代勤務に従事しています。夜勤に入ることによって、体内時計と生活時間との間にずれが生じやすくなります。体内時計にとって不適切な時間帯に食事を取ることで生活習慣病の原因のひとつになると推測されています。夜間には体内時計を調節する時計遺伝子の一つである BMAL1 遺伝子とそ

の蛋白質が活性化しますが、この蛋白質は脂肪を蓄積し分解を抑える作用を持っています。すなわち「夜食べると太る」という我々の経験は科学的にも正しかったわけです。夜勤中についつい間食をしている方にとっては耳の痛い話ではないでしょうか。

睡眠障害と生活習慣病



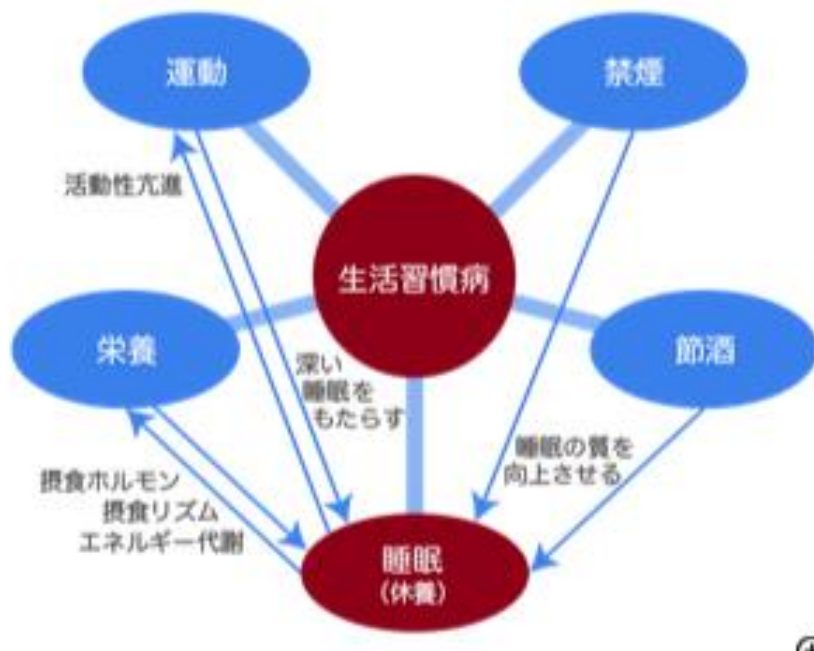
睡眠障害もまた生活習慣病の発症に関わっています。以前から生活習慣病患者さんでは睡眠時無呼吸症候群や不眠症の方が多くことが知られていました。その後の多くの研究によって、睡眠障害が生活習慣病の罹患リスクを高め症状を悪化させることや、その発症メカニズムが明らかになりつつあります。

例えば睡眠時無呼吸症候群の患者さんでは、夜間の頻回の呼吸停止によって「低酸素血症と交感神経の緊張（血管収縮）」「酸化ストレスや炎症」「代謝異常（レプチン抵抗性・インスリン抵抗性）」などの生活習慣病の準備状態が進み、その結果として5～10年後には高血圧・心不全・虚血性心疾患・脳血管障害などに罹りやすくなります。

また慢性不眠症の患者さんもまた、「交感神経の緊張」「糖質コルチコイド（血糖を上昇させる）の過剰分泌」「睡眠時間の短縮」「うつ状態による活動性の低下」など多くの生活習慣病リスクを抱えています。入眠困難や中途覚醒・早朝覚醒など不眠症状のある人では良眠している人に比較して糖尿病になるリスクが1.5～2倍になることが知られています。

睡眠障害もまた生活習慣病のひとつ

21世紀における国民健康づくり運動（健康日本21）では「栄養・食生活の管理」「身体活動・運動」「禁煙・節酒」などと並んで「十分な睡眠の確保」に取り組んできました。不規則な食事・運動不足・ニコチン・アルコール過飲によって睡眠状態は悪化しますので、これら生活習慣を改善することは良質な睡眠を保つことにもつながります。逆に言えば睡眠障害もまた生活習慣病のひとつと考えるべきでしょう。



日々の生活の中で睡眠時間はともすれば犠牲になりがちです。ただし今回ご紹介したように長期にわたり睡眠不足を続けたり、睡眠障害を放置したりするとは私たちの健康を大きく害します。睡眠問題は静かにしかし着実に心身の健康を蝕みます。睡眠習慣の問題や睡眠障害を放置せず、ご自分の睡眠状態に疑問を感じたら、かかりつけ医もしくは睡眠専門医に相談をしてみましょう。

安眠妨害は、拷問の手段なのです。

睡眠妨害が拷問の技法であることは、昔から知られています。

PhantaPorta
パンタポルタ



魔女狩りの常套手段！ 人間性を奪う拷問「睡眠妨害」の恐怖

拷問の歴史

西洋史

狸穴醒

歴史・文化

今回は道具を使わず、眠りを妨げることで犠牲者を従わせる「睡眠妨害」の拷問を紹介します。

嘘の自白、精神異常、果ては死……睡眠妨害の末路

眠りによる休息は、あらゆる生物にとって必要不可欠なものです。それだけに、睡眠の妨害は非常に効果の高い拷問となりえます。

睡眠妨害の拷問は古くから行われていましたが、古代や中世では拷問に残酷さが求められたためあまり目立っていませんでした。しかし、近世以降になると盛んに用いられるようになります。

睡眠妨害のうちもっとも原始的な拷問はなんでしょう？

それは、24 時間体制で見張りをつけて眠らせないようにしておくというものです。犠牲者は監房に閉じ込められ、居眠りをすれば執行人に棒でこづかれます。その状態で歩き続けなければならないこともありました。もちろん飲食は最低限だけ、または禁止です。

こうして長時間眠れずにいると、犠牲者の精神は追い詰められ、誘導尋問に乗りやすくなりますし、無実であっても言われた通りのことを自白してしまいます。

また限界に達すれば精神に異常をきたすこともあり、方法によっては死んでしまうことすらありました。

こうした睡眠妨害は、犠牲者の身体に傷が残りにくいことから、現代でも密かに行われ続けているといえます。

睡眠は、健康な生活にとって極めて重要なのです。

疲労物質と睡眠

疲労とは？疲労の原因と回復方法

公開日：2016年7月25日 12時00分

更新日：2019年8月5日 15時59分

疲労とは

疲労は「疲れ」とも表現され、痛みや発熱と同様に「これ以上、運動や仕事などの作業を続けると体に害が及びますよ」という人間の生体における警報のひとつです。疲労は、人間が生命を維持するために身体の状態や機能を一定に保とうとする恒常性（ホメオスタシス）のひとつとして、痛みや発熱などと並んでそれ以上の活動を制限するサインとして働いています。

疲労の定義

日本疲労学会では、「疲労とは過度の肉体的および精神的活動、または疾病によって生じた独特の不快感と休養の願望を伴う身体の活動能力の減退状態である」¹⁾と定義されています。疲労は、心身への過負荷により生じた活動能力の低下のことを言い、思考能力の低下や、刺激に対する反応の低下、注意力の低下、注意散漫、動作緩慢、行動量の低下、眼のかすみ、頭痛、肩こり、腰痛などがみられます。

疲労の原因

自律神経の中枢部では、身体の器官や組織の調節を行い、絶えず生命維持のための身体機能を一定に保っています。運動時には、運動強度や体調に応じて呼吸や心拍、体温などの機能の調節を行っており、身体にかかる負荷に合わせて生体機能のコントロールを行う自律神経の中枢も働きます。運動によって体にかかる負荷が大きくなるほど、自律神経の中枢にかかる負荷も大きくなり、自律神経の中枢がある脳がダメージを受けることで疲労が起こるとされています。

疲労を起こすのは活性酸素による酸化ストレスで、神経細胞が破壊されるからであると考えられています。運動などのエネルギーをたくさん使う活動では、酸素が多く消費されるとともに活性酸素も多量に発生します。活性酸素が発生すると、活性酸素を分解して体内から除去する抗酸化酵素が働くようになっていますが、発生する活性酸素の量が抗酸化酵素の働きを上回ると自律神経の細胞や筋肉が活性酸素によって攻撃されて疲労へとつながります。

加齢や紫外線を浴びることは活性酸素の影響を受けやすくなるため、疲労が起こりやすくなります。睡眠障害や睡眠時無呼吸症候群も疲労を蓄積させる原因となることが言われています。

乳酸は疲労物質か？

「乳酸は疲労物質」という考え方がされていましたが、現在では乳酸が疲労を起こす物質であるという考えは間違いであるとされています。疲労した筋肉では乳酸の濃度が高くなり、筋肉のパフォーマンス低下がみられるけれども、乳酸がパフォーマンスの低下をもたらすのではないとされています²⁾³⁾。

最新の研究では、高負荷の運動時に、糖質がエネルギーとして使われる際に乳酸が産生され、筋肉の細胞のエネルギー源として再利用されることがわかっています。運動中の脳内でも神経細胞のエネルギー源として乳酸が働くことも確認されています²⁾。

疲労と病気

疲労によって身体の機能を一定に保つ恒常性が乱れると自律神経失調症の症状がみられるようになります。疲れが蓄積すると防衛反応としてステロイドホルモンが分泌されます。ステロイドホルモンが多量に分泌されると、血管の老化による動脈硬化やインスリン抵抗性による高血糖・肥満などのリスクが高まり、高血圧、糖尿病、脂質異常症などの生活習慣病、メタボリックシンドロームにかかりやすくなって心筋梗塞や脳梗塞などの原因となります。ステロイドホルモンは免疫を下げる作用もあり、さらに疲労が蓄積することで免疫系が働きにくくなり、がんの進行から身体を守る防衛機能も低下します。

疲労の回復方法

良質な睡眠をとることが疲労回復に最も効果的であるとされています。1日3食のバランスのとれた食事を摂り、生活リズムを整えること、食事は眠る時間の3時間前に済ませておき、眠る1～2時間前に8分程度、38～40度のぬるま湯にみぞおちの辺りまでつかることが質のよい睡眠を招きます。

との記事も公開されています。

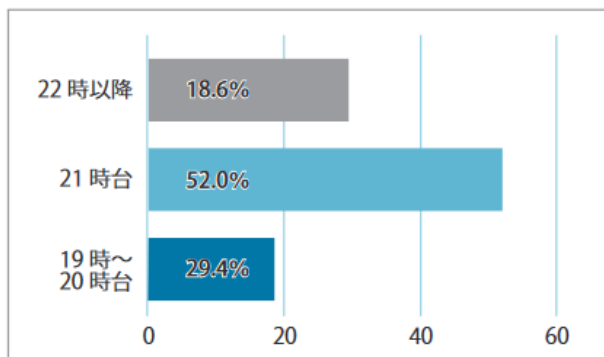
子どもの睡眠と成長ホルモン ～夜9時までに眠り、朝7時までに起きる～

健康だより

☎ 保健予防室 ☎ 36-1154

睡眠は子どもの成長に大きくかかわっています。3歳児健康診査状況からみると、南房総市では夜型の傾向が進んでいることが伺えます。子どもの成長には、食事や運動だけではなく、睡眠を意識した生活リズムを整えることが大切です。夜9時までに眠り、朝7時までに起きることが理想です。

身体の成長や健康の維持には、『成長ホルモン』と呼ばれるホルモンの働きが関与しています。『成長ホルモン』は①免疫力の増強、②筋肉の発達、③骨を伸ばす役割を担っています。睡眠時、とくに入眠直後の深い眠り(ノンレム睡眠)の間に多く分泌されます。



子どもの就寝時間
(令和2年度3歳児健康診査から)

睡眠の質を高めるために

◇朝起きたら太陽の光で体内時計をリセット

朝強い光を浴びることで、体内時計をリセットしてくれ、脳と体を目覚めさせます。まずは、朝早く起きることからはじめ、日中天気の良い日は外でたくさん遊ばせましょう。

◇ブルーライトを遮断し、灯りは暗く

遅くまで、テレビ、ゲーム、スマホなどをしていると夜はなかなか眠れません。寝る前のテレビやスマホは避け、部屋の明かりを消して静かな環境を整えましょう。

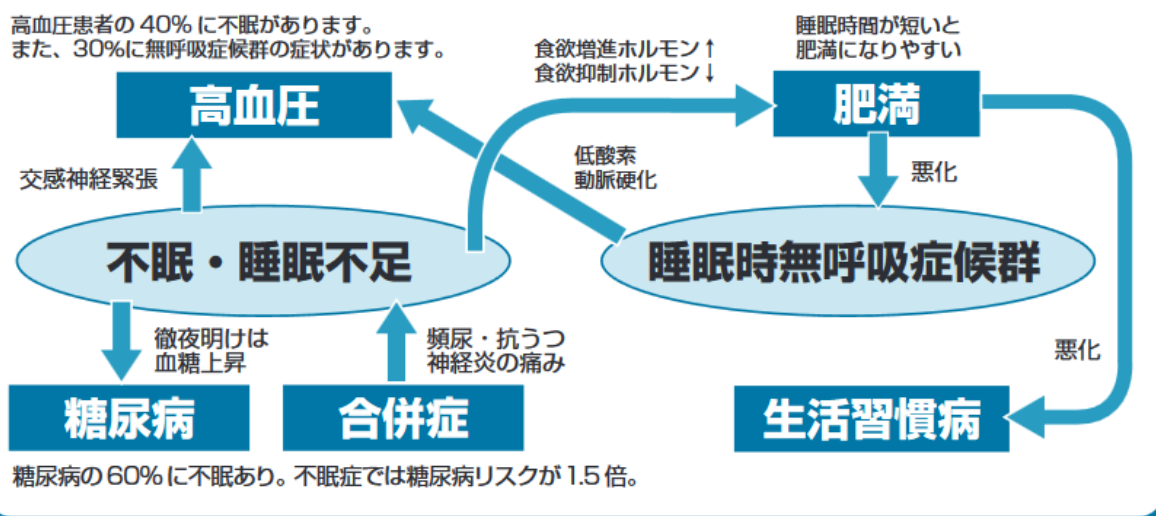
◇休日でもいつもと同じ時間に起床する

休み前の夜更かし、眠れなかった分を補おうと休日に多く睡眠時間を確保すると、より生活リズムが崩れてしまいます。休日でも平日と同じ時間に就寝・起床し、眠気がある場合は短時間の午睡を取り入れましょう。

子どもの夜型化には大人の生活習慣が影響を与えています。大人の生活習慣を見直すことが大切です。大人にとっても睡眠は重要です。睡眠不足は糖尿病や心筋梗塞などの生活習慣病や認知症のリスクを高めます。

不眠・睡眠不足と生活習慣病との悪循環

高血圧患者の40%に不眠があります。
また、30%に無呼吸症候群の症状があります。



騒音での不眠は、学生の成績にも大きく影響します。睡眠不足の生徒は授業中に居眠りします。それを教員に注意され、教員とのトラブルとなることも多い。体力低下で体育の授業中の事故も増えると考えられる。この件数についての実態調査をする。

風車の近くに住む生徒の成績の分布、風車から 10 km 以上はなれたところに住む生徒の成績の分布を調査する。学校には、風車建設前の生徒の成績データが残っている。各家庭にも成績通知表が残っている。これを持ち寄れば、風車建設前と建設後の成績の変化が数値化できる。これらの値を、風車建設前と建設後で比較する。

睡眠不足の問題は、生徒の学力が低下となり、生涯賃金にも大きく影響する。先生に居眠りを注意されてトラブルを起こし、不登校になることも考えられます。

これが被害であることは明白です。

海に潜ってアワビを採る漁師にとっては、睡眠不足は命に関わる大問題です。夏の暑いときに畑で草取りをする人にとっても、体力不足での熱中症は命に関わる事柄です。トラックで荷物を運ぶ人にとっても、睡眠不足は交通事故に直結する重大問題です。

この常識を無視して、

“これらの音によりわずらわしさ（アノイアンス）を増加させ、睡眠への影響のリスクを増加させる可能性があることが示唆されている。”と言われたら、“お前たちを拷問にかけてやる。”と宣言しているとしか思えません。いくら、環境省のお役人様が偉いといっても、このようなことは受け入れられません。

朝早くから、車を運転する人にとっては命に係わる重大な事柄です。居眠り運転は運転する人だけではなく、歩行者や、他の車を巻き込む事故の起きる可能性が大きくなります。

命に係わる事柄です。もちろん、騒音が 1 日だけとか、夕方 6 時から朝 6 時までは風車を止めるとかの配慮があれば、少しは危険性が減少するでしょうが、1 年中、24 時間うるさくされたら、住民は困り果てます。

“直接的”と“明らかな”と言う言葉で騙そうとしてはいけません。

“風車騒音が人の健康に直接的に影響を及ぼす可能性は低い”との表現は、“風車騒音が人の健康や労働に対して間接的に影響を及ぼし、地域社会を崩壊させる可能性は極めて高い”と言い換えるべきです。

風車騒音は、

わずらわしさ（アノイアンス）に伴う睡眠影響を生じる可能性はあるものの、人の健康に直接的に影響を及ぼす可能性は低いと考えられる。

に関しては、

風車騒音の意味が問題になる。

そして、

人間の健康に直接的に影響を及ぼすの意味も問題です。

風車音を浴びて、数日後に死亡したと言うような事態は聞いたことが無い。

強烈な放射線を浴びて、数日後に死亡した人はいる。放射線と風車からの音はだいぶ違います。

極めて周波数が高い、超音波では、直接的と言える被害も出ています。もちろん、超音波を聴覚で捉えることは出来ません。聴覚閾値以下の音です。しかし、この聴覚閾値以下の超音波に人間の体は直接反応します。超音波を使った美顔器でも、使い方によっては事故が起きます。

この場合は、超音波を感知したと言うよりは、超音波に直接反応したと言うべきでしょうが、聴覚閾値に至らない音が、人体に直接作用して被害を生む事もあることが分かります。

“超音波を使った美容施術” 規制が必要か検討へ 消費者事故調

2022 年 7 月 27 日 7 時 07 分

エステサロンなどで超音波の技術を使った美容施術を受けた結果、やけどやシミができるといった事故が相次いでいるとして、消費者庁の安全調査委員会が調査の中間結果を報告し、機器の使用などに関して法令による規制が必要かを検討していくことを明らかにしました。

事故が相次いでいるのは、エステティックサロンなどで行われている、肌のたるみを取ったり痩身（そうしん）効果を得たりするために「HIFU」と呼ばれる機器で超音波を照射する施術です。

去年から調査を進めている消費者庁の安全調査委員会、いわゆる消費者事故調が 26 日に調査の中間結果を報告しました。

それによりますと、2015 年 11 月からことし 5 月末までの間に 110 件の事故の情報が寄せられ、このうち 76 件はエステサロンで起きていて、

内訳は

▽やけどが 45 件、

▽皮膚が赤く腫れる、シミができたなどの「皮膚障害」が 23 件、

▽マヒが残ったといった「神経・感覚の障害」が 13 件などとなっています。

これまでの調査では、施術者が施術の内容や注意事項などを十分に説明しておらず、利用者がリスクを理解していないケースも多いことや、非常に強い照射能力があり、やけどなどを引き起こすおそれがある機器がエステ店で広く使われていることが分かったということです。

事故調は今後、機器の使用などに関して法令による規制が必要かどうかなどをまとめ、今年度内に再発防止への提言を示したいとしています。

超低周波音（ISO7196）のケースは、超音波とは違いますが、可能性に関しては慎重に確認することが必要です。

“音波が、人間の健康に直接的に影響を及ぼす” 可能性があるような現象としては、強烈な超低周波音による音響キャビテーションや、強烈な超音波による障害の 2 つが考えられる。

風車音で、音響キャビテーションが起こるかどうかについては、シミュレーションのプログラムが必要です。

確かに、“人の健康に直接的に影響を及ぼす可能性は低い” と言えるでしょうが、“人の健康に間接的に影響を及ぼす可能性は極めて高い” とも言えます。

一度建設された風車は、約 20 年間、昼も夜も住人に対して、超低周波音（ISO7196）を浴びせます。

不眠を訴える人が多く出ます。不眠が継続すると、問題が起きるのです。

これは、農漁村地区の人にとっては重要な問題です。安眠できなければ、朝早く起きたときに眠気が残ります。良く眠れなければ体力も落ちます。

夏に、朝早く起きて海老網の手伝いをしている方の睡眠時間は極端に短くなってしまいます。眠くてぼんやりした頭で、バイクに乗って港に向かう。とても危険なことです。

車を運転するときに、居眠り運転をする可能性も高くなります。人身事故も十分予想されます。

夏に、草刈や草取りの農作業をする人も多いです。体力が落ちている人が、炎天下で農作業をしたら、熱中症になってしまいます。

熱中症で畑に倒れているところを、他の人に見つけてもらって、病院に行った方もいるとの話も聞いています。

海に潜って、アワビを採る人にとっても、睡眠不足は大変危険です。体調不良で潜っていて気分が悪くなるのは、良くあることです。眠れなくて体力が落ちれば、漁獲高にも影響します。

良く眠れない原因となる風力発電施設を作ることは、私たちの命を縮めることであり、漁業による収入の減少を招くことです。

不眠は被害なのです。苦情ではありません。

環境省の HP の資料には、“これらの音によりわずらわしさ（アノイアンス）を増加させ、睡眠への影響のリスクを増加させる可能性があることが示唆されている。”と書かれている。

この常識を無視して、

これまでに得られた知見④

風車騒音の人への影響

- これまでに国内外で得られた科学的知見を踏まえると、風車騒音が人の健康に直接的に影響を及ぼす可能性は低いと考えられる。ただし、風車騒音に含まれる振幅変調音や純音成分等は、わずらわしさ(アノイアンス)を増加させる傾向がある。静かな環境では、風車騒音が35～40dBを超過すると、わずらわしさ(アノイアンス)の程度が上がり、睡眠への影響のリスクを増加させる可能性があることが示唆されている
- 風力発電施設から発生する超低周波音・低周波音と健康影響については、明らかな関連を示す知見は確認できなかった
- 景観のような視覚的な要素や経済的利益に関する事項等も、わずらわしさ(アノイアンス)の度合いを左右する

6

“静かな環境では、風車騒音が 35～40 d B を超過すると、わずらわしさ（アノイアンス）の程度が上がり、睡眠への影響のリスクを増加させる可能性があることが示唆されている”

と言われたら、“お前たちを拷問にかけてやる。”と宣言しているとしか思えません。いくら、大学の先生や、環境省のお役人様が偉いといっても、このようなことは受け入れられません。

朝早くから、車を運転する人にとっては命に係わる重大な事柄です。居眠り運転は運転する人だけではなく、歩行者や、他の車を巻き込む事故の起きる可能性が大きくなります。

命に係わる事柄です。もちろん、騒音が1日だけとか、夕方6時から朝6時までは風車を止めるとかの配慮があれば、少しは危険性が減少するでしょうが、1年中、24時間うるさくされたら、住民は困り果てます。

**ある． 静かな環境では、風車騒音が35～40dBを超過すると、
わずらわしさ（アノイアンス）の程度が上がり、睡眠への影
響のリスクを増加させる可能性があることが示唆されている．**

- **景観のような視覚的な要素や経済的利益に関する事項等も、
わずらわしさ（アノイアンス）の度合いを左右する．**

が正しいとすれば、

被害を防ぐには、被害者全員が経済的利益を受ければ良いことになります。そうすれば睡眠への影響のリスクを減らせるのです。

正しい見解です。

被害者全員に十分な補償金を支払い、被害が風車の無い地域へ移住できるだけの経済的な補償をすれば良いのです。被害者に対して、風車が無い地域に新しい家と土地と仕事を提供すれば良いのです。

さらに、

- **風力発電施設から発生する超低周波音・低周波音と健康影響
については、明らかな関連を示す知見は確認できない．**

では、A 特性音圧レベルによる基準値と、健康被害との明らかな関連を示す知見は確認できたのであろうか？

確認できたのならその根拠を示して欲しい。

明らかな関連が確認できないにも関わらず、A 特性音圧レベルによる、基準値を使うならば、その合理的な理由を示して欲しい。

関連性に関しては、風車音や騒音の影響による諸症状のアンケートと、その地域での環境騒音、風車音の計測を、道路での騒音による被害地域、工場騒音による被害地域、鉄道騒音による被害地域、風車音の被害地域でも、全く同様に行って、結果を比較すれば、関連を示す知見は得られる。

まさか、A 特性音圧レベルによる基準値と、風車被害との明らかな関連性が無いのに、基準値を指標として使う事を提唱しているのでは無いでしょうね。

人間にとって、睡眠は極めて重要である。睡眠を妨害されたら、“健康で文化的な生活”を送ることは出来ない。

憲法で保障された、基本的人権を侵害されているのである。

6. 3 風車音による直接的な健康被害（頭痛）

6. 3. 1 超低周波音の解析と発生の仕組み

超低周波音の解析と発生の仕組み

Analysis of Infrasound and Generation Mechanism

宇山 靖政

Yasumasa UYAMA

Personal member of Japan Wind Energy Association.

Abstract

This document provides the results of analysis of the sound from wind turbine, and the mechanism of infrasound generation.

The part of the infrasound near the wind turbine is described as wind noise and the frequency is not examined in detail. However, when this feature is investigated, it becomes clear that the directivity of the wind turbine sound, the shaking of the top of the tower, and the vibration around 40 m above the ground of the tower are related, and it is found that the wind turbine generates directional infrasound. For wind noise, "Low-frequency wind noise is caused by wind hitting the microphone. This noise has a louder component as the frequency decreases. In the frequency range of about 5 Hz or less (in some cases about 10 Hz or less), it is difficult to eliminate wind noise." It is said,

Even if the wind is strong, the component of 10 Hz or less in a place where there is no wind turbine has an extremely low sound pressure and no regular wind noise. Even if the wind is not so strong, near the wind turbine, the sound pressure of the component below 10 Hz is high, and wind noise with regularity appears.

This is either to think that there are two types of wind noise: "wind noise in places where there are no wind turbine" and "wind noise in places where there are wind turbines", or to think that infrasound with high sound pressure is generated from wind turbine.

キーワード：超低周波音、風雑音、揚力ベクトル、回転モーメント、塔の振動

Key Words : Infrasound, wind noise, lift vector, moment of rotation, vibration of tower

1. はじめに

風車音の 5Hz 以下の成分を“風雑音”と考え“これを除去すれば本来の風車音が得られる。”との主張もあるが、周波数の分析と風車の振動原因の解明により、この音が“風車による超低周波音”であることを示す。

2. 計測機材と解析対象

計測機材：NL-62、NX-42WR、解析対象：千葉県館山市風の丘にある回転軸が水平の風車*1

3. 騒音の比較

特徴を示す為に周波数スペクトルを比較する。

(横軸は周波数ヘルツ[Hz]、縦軸は音圧パスカル[Pa])

Fig.1 : JFE の製鉄所内の音(0～5000Hz)

Fig.2 : 風車の近くで計測した音(0～5000Hz)

Fig.3 : 風車の近くで計測した音(0～25Hz)

Fig.4 : 長尾神社境内の音(0～25Hz)

図 1 図 2 は 0～5000Hz 範囲での比較であり、製鉄所内の音は広帯域だが、風車音は左隅の 0.8Hz の近くに集中しており広帯域の音ではない。

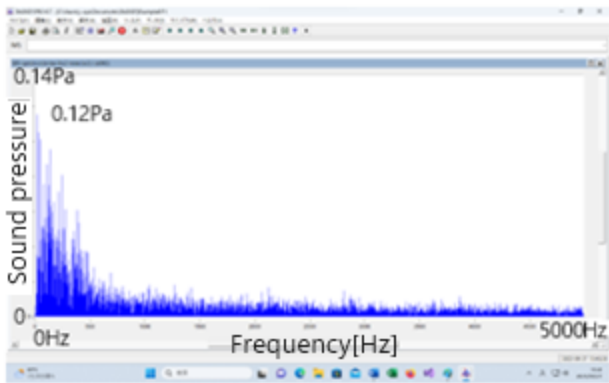


Fig.1 JFE iron mill ; Max 0.12[Pa](12Hz)

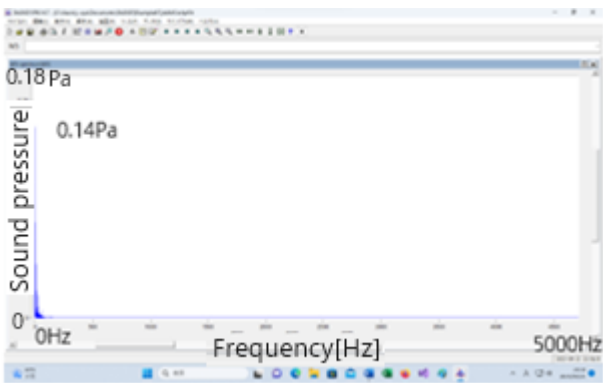


Fig.2 Wind turbine noise ; Max 0.14[Pa](0.8Hz)

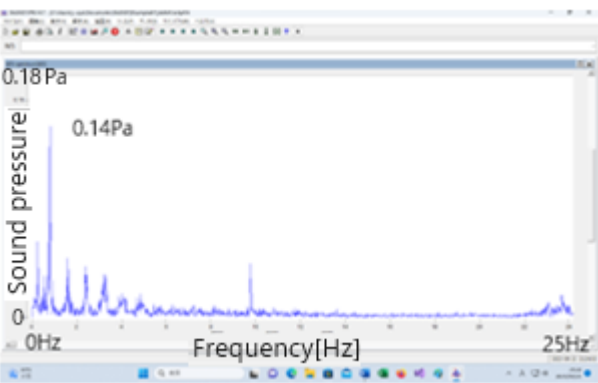


Fig.3 Wind turbine noise (0～25Hz)

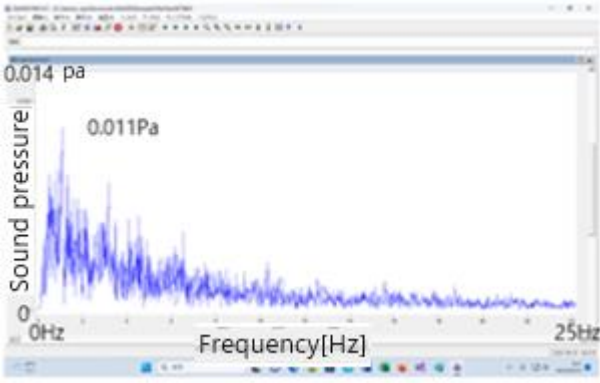


Fig.4 Nagao shrine (0～25Hz); 0.011[Pa](1.1Hz)

図 3 図 4 は 0～25Hz 範囲での、風車の近くで車内に機材を置き風下の窓を開けて計測した音（最大音圧 0.14[Pa] (0.8Hz)）と、近所の長尾神社の階段にマイクを置き風が当たる状態で計測した音（最大音圧 0.011[Pa] (1.1Hz)）との比較である。表 3 で風車の近くの“風雑音”の持つ規則性を詳しく記す。図 4 から風車の無い場所では音圧が低く周波数に規則性が無い事が分る。これらの“風雑音”の区別が必要である。

表 1 表 2 は周波数帯ごとのエネルギー分布である。

Energy distribution	0～20Hz	20～5kHz
Wind turbine	93%	7%
Iron mill	12%	88%

Energy distribution	0～1Hz	1～20Hz	0～20Hz
Wind turbine	61.3%	38.7%	100.0%
Iron mill	0.04%	99.96%	100.0%

Table 1 Energy distribution (0～5000Hz)

Table 2 Energy distribution (0～20Hz)

表 1 より、風車音を騒音（周波数 20Hz 以上）として考えると、音のエネルギーの 93%を無視することになる。その結果、圧迫感などの不快感の原因となる部分を除外した数値と不快感を訴える人の割合を比較することになり、交通騒音の場合に比べると大きな誤差が出る。

表 2 より、0.8Hz の部分が、0～20Hz の音のエネルギーの 61%を占めていることが分る。よって、超低周波音を 1～20Hz に限定してはならない。

4. 風車音と再生音

図 5 は NL-62 で記録した 60 秒間の風車音。図 6 は FFT を使って音を分割し、青を 0～20Hz、緑を 20～200Hz、赤を 200～24 k Hz の成分として表したもの。図 7 は図 5 の音を PC のスピーカで再生し、再度 NL-62 で収録した音を図 6 と同様に分割したもの。

図 6 では 200Hz～24kHz の成分に振幅変調が見られるが、音圧が極めて低く空気減衰やエネルギー透過率を考えれば室内への影響は弱い。逆に、超低周波音のエネルギーは大きく、その影響を慎重に調査すべきである。

なお、圧迫感を除けば、風車の近くで聞いた音とスピーカからの音の違いを聴覚では判別できなかった。

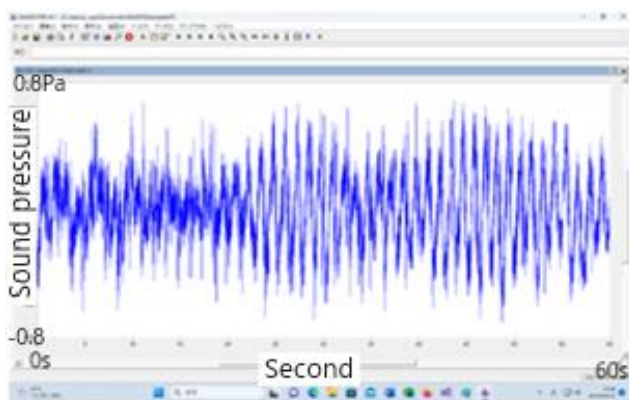


Fig.5 Wind turbine noise

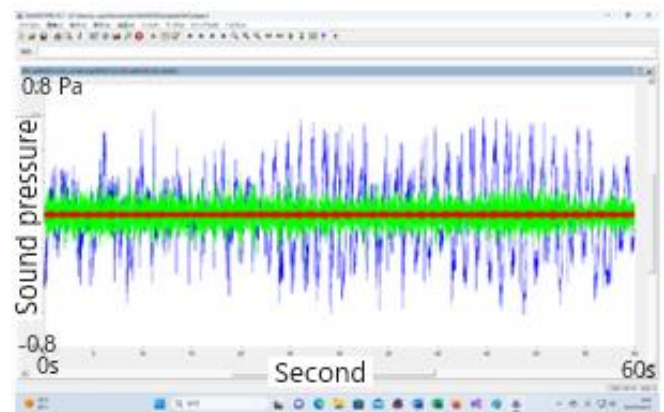


Fig.6 Separated Wind turbine noise

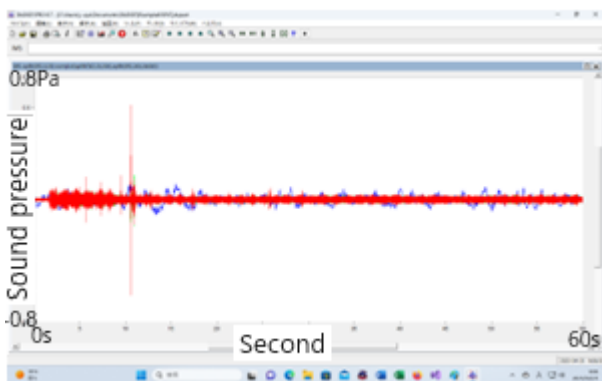


Fig.7 Separated sound from speaker

図 7 からスピーカ音には超低周波音が含まれない事が分る。大型のスピーカでも 1Hz 以下の音の再生は出来ない。これが風車音と実験室の再生音では圧迫感に差がでる原因である。実験をするならトレーラーの荷台

に実験室を作って風車の近くに行くしかない。

5. 風車音の細かな特徴

表 3 は、図 3 に於ける音圧のピーク値とその時の周波数を対応させたものである。

Frequency at peak[Hz]	Rate(1)	Rate(2)	Sound pressure[Pa]
0.2667	1.0000		0.0560
0.5333	2.0000		0.0309
0.8167	3.0625	1.0000	0.1405
1.5833	5.9375	1.9388	0.0436
2.4167	9.0625	2.9592	0.0242
3.2167	12.0625	3.9388	0.0317
4.0000	15.0000	4.8980	0.0177
4.8667	18.2500	5.9592	0.0173
5.4667	20.5000	6.6939	0.0101
6.2667	23.5000	7.6735	0.0098

Table 3 Frequencies of the peak values

最大音圧となるときの周波数 0.8Hz,は、翼の回転数を R(rpm)、翼枚数を Z(枚)とするときの $f = RZ/60$ [Hz] に合致する。他の周波数も含めて音が出る仕組みを解明すれば超低周波音が発生する理由が分る。

6. 周波数の細かな変動

$f = RZ/60$ [Hz] より、周波数は回転数によって変化する。図 8 の Wavelet のグラフから、0.73Hz から 0.87Hz の間で周波数が変化することが分る。

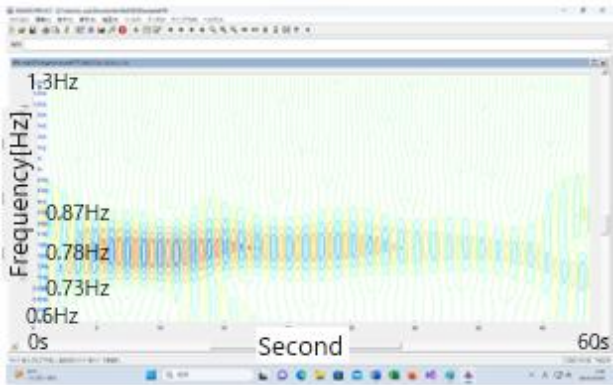


Fig.8 Fine fluctuation nearby 0.8Hz

Rotation (7times), a part of large table		
Brade pass	Time(second)	Frequency[Hz]
21	28[s]	0.75[Hz]
21	22[s]	0.95[Hz]
21	28[s]	0.75[Hz]
21	28[s]	0.75[Hz]
Average		0.8 [Hz]

Table 4 Fine fluctuation from video

表 4 はビデオ撮影した回転の様子から周波数を計算したものの一部である。周波数は風速の変化に対応して細かく変化し、図 8 の変化と一致する。

図 8 で色の濃い部分は音圧が高いことを示し、図 8 は 60 秒間の計測結果なので、音圧が高い状態が 20 秒程度継続することが分る。10 分間の計測結果から、0.8Hz に近い周波数成分の音圧は、風が弱いときは 0.10[Pa]、風が強いときは 0.37[Pa]、平均で 0.18[Pa]程度であることが分る。

7. 塔の振動方向と風車音の指向性

ナセルや、塔の地上 40m の側面の振動の方向や大きさ、音の指向性を揚力ベクトルの方向に注目しながら考える。(1.6Hz は小型風車で回転数が高いため。)

“風車ナセル・タワーの振動解析” 1)

では、ナセル部分について、“図 3 のローリング方向では 0.8Hz、1.6Hz、2.7Hz にゲインの増大が確認でき、ロータの偏芯が顕著には現れておらず、代わりに 1.6Hz に羽根数×回転数の振動が表れている。これは、上下左右の風速さと羽根数によるブレード変形振動が起因している” “図 4,5 はナセル振動の 210 度方向、300 度方向スペクトルを示す。” “210 度方向ではロータ回転周波数 0.5Hz が若干表れ、羽枚数×回転数 1.6Hz が顕著に表れている”、さらに、1) の図 6, 7 からタワー内 40m の振動にも、210 度方向、300 度方向に 1.6Hz の成分が表れていることが分る。

“風速が風車騒音指向性に及ぼす影響について” 2)

では、“200 度の位置のレベルが高くなっている。この位置はキャンセレーションメカニズムが働きレベルが低下する位置であり指向性の予測とは逆の現象が現れている。” とあり、20 度、110 度、200 度、290 度の方向で音圧が高いことが、2) の図 6 から分る。

“円筒の弾塑性純曲げ崩壊に関する研究” 3) を参考にすれば、塔の側面の変動は図 9 図 10 となる。

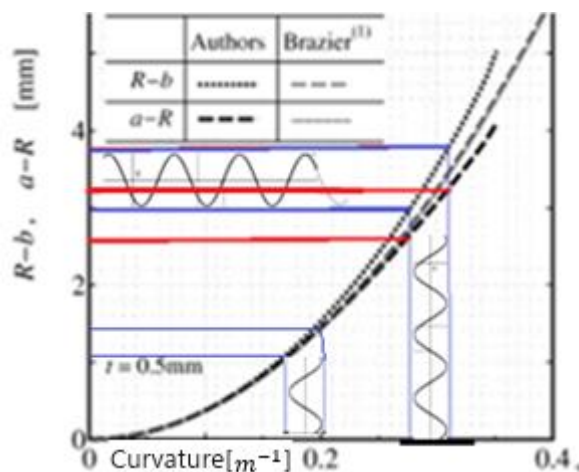


Fig.9 Force fluctuation and side vibration

図 9 は塔の側面が塔に掛かる力の変化に応じて振動することを示す。右の方が側面の振動幅が大きい。塔の断面は、図 10 の右側の様に円筒が曲がるときに楕円になる。加えられた力の方向の側面の振動と、それに直交する方向の側面の振動が発生する。その結果、風車音は指向性を持ち、周波数は塔に掛かる力の周波数と一致する。さらに、断面が円から楕円になれば、面積が減少するので塔内の容積が減少する。逆に断面が円に近づけば容積は増加する。塔の変形は塔内の気圧変動も引き起こす。

8. 風車にかかる力とその影響

“流体力学(前編)” 4)によれば、翼に働く揚力 L は、Kutta-Jopukowski の定理より、

$$L = \rho U \Gamma = 4\pi\rho U^2 \lambda \sin(\alpha - \delta) \quad (1)$$

で与えられ、揚力は、一様流の速度 U の 2 乗に比例する。

ブレードと塔の距離が近いことを考え、揚力 L の大きさや塔に対する回転モーメントが周期的に変化することを調べれば、塔の変形の様子と風車音の発生原因が分り、風車音の周波数と音圧の程度も分る。

“風車の振動解析” 5)では、揚力 L について述べた後で、風車に掛かる力について考察がされている。

“風速は高さにより変化するので、ブレードが回転すると、これらの力は周期的に変化する。その結果、ブレードとタワーに周期的励振力が加わる。”

“ブレードからタワーに加わる力の各振動数成分は、枚数倍となる。以上のように、回転速度の n 倍の振動数 $n P$ をもつ多くの励振力が加わる。” と述べている。

“回転速度の n 倍の振動数 $n P$ をもつ多くの励振力”としたのでは、風車音の指向性の考察が欠けていて、塔がどのように変形して音が出るのかという事に繋がらない。

“空力音響学” 6)には、振動する物体からどのように音が発生するかが書かれている。

風車の側面の振動を考えるには、塔に掛かる力の観点から、塔に掛かる回転モーメントに視点を移して計算する必要がある。塔の変形は、釣り竿が曲がる場合と似ている。釣り竿の変形は、釣り竿に対する回転モーメントで決る。上部の揺れは円形のままだも可能だが、側面の揺れは、切り口の変形を伴う。

風車は揚力によって回転し、ブレードの角度を変えて回転速度を調節する。回転開始時は回転方向の成分が大きくなるようにブレードの向きを調整し、定格出力運転時には揚力ベクトルの方向を $200 \sim 210$ 度の向きにして、ブレードの回転を抑える。この結果、揚力の回転軸方向の成分が大きくなる。

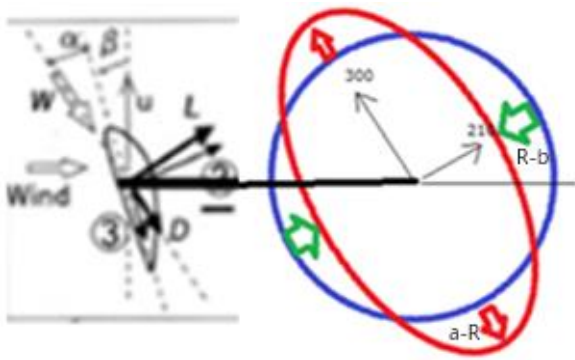


Fig.10 Lifting vector and modification

9. 塔に掛かる力と回転モーメント

(9桁の数値で計算し、最後に四捨五入した。)

ナセルや塔の揺れに関してはブレードが真上に来た時の揚力ベクトルの方向を重視すべきだが、ここでは、揚力ベクトルの回転軸方向への成分を考える。

単純化して、塔の高さは 100m 、ブレードの代りに、丸い標識のような形の板が中心から 50m の所に付いているとして、周波数を計算する。

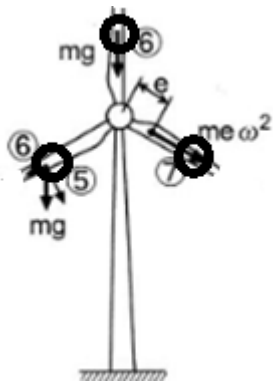


Fig.11 Wind turbine in balance

円盤の地上からの高さは $100 + 50 * \sin(\omega t + \theta)$ m となる。

上空では地表近くよりも強い風が吹く。上空での風速の予測式はいくつかあるが、ここでは次の予測式を使う。

高さ Z_{h1} での風速 V_{zh1}

高さ $Z_G(V)$ での風速の予測値 $V_{zG(V)}$

地表面粗度区分 V に応じた冪指数 $\alpha(V)$

としたときに、次の関係式

$$V_{zG(V)} / V_{zh1} = (Z_G(V) / Z_{h1})^{\alpha(V)} \quad (2)$$

が成立し、田園地帯では、 $\alpha(V) = 0.15$ である。

田園地域で、地上 10m の時の風速が 7[m/s] のときは、地上 $100 + 50 * \sin(\omega t + \theta)$ m での風速は

$$7 * ((100 + 50 * \sin(\omega t + \theta)) / 10)^{0.15} \quad [\text{m/s}] \quad (3)$$

となる。

空気密度を $1.23[\text{kg/m}^3]$ 、風力係数 $C_d = 1.2$ 、とすると風速 $V[\text{m/s}]$ のとき、 P : 風荷重 $[\text{N/m}^2]$ は

$$P = (V^2 / 2) * 1.23 * 1.2 \quad [\text{N/m}^2] \quad (4)$$

となり、標識の面積が $10[\text{m}^2]$ のとき、地上 10m で 7[m/s] の風が吹くときに、風車に取り付けてある丸い板にかかる力は、

$$P = \frac{\left(\left(7 * \left(\frac{(100 + 50 * \sin(\omega t + \theta))}{10} \right)^{0.15} \right)^2 \right)}{2} * 1.23 * 1.2 * 10 \quad [N] \quad (5)$$

となる。この力は風速の 2 乗に比例する。

この力によって引き起こされる風車を倒そうとする力は、回転軸を地表とブレードの回転面の共有する直線としたときの回転モーメントであり、

$$P * (100 + 50 * \sin(\omega t + \theta)) = k * (100 + 50 * \sin(\omega t + \theta))^{1.3} \quad [\text{Nm}] \quad (6)$$

となる ($k=181.24$)。ここでは

$$(100 + 50 * \sin(\omega t + \theta))^{1.3} \quad (7)$$

の部分に注目して考える。

ブレードのなす角は $2\pi/3$ なので回転モーメント M は、

$\omega=2\pi \cdot 0.8/3$ と置いたときに、

$$f(t) = (100 + 50 * \sin(\omega t))^{1.3} + (100 + 50 * \sin(\omega t + 2\pi/3))^{1.3} + (100 + 50 * \sin(\omega t + 4\pi/3))^{1.3} \quad (8)$$

とすれば、

$$M = k * f(t) = 181.24 * f(t) \quad [\text{Nm}] \quad (9)$$

となる。マクローリン展開

$$(1+x)^\alpha = 1 + \frac{\alpha}{1!}x + \frac{\alpha(\alpha-1)}{2!}x^2 + \frac{\alpha(\alpha-1)(\alpha-2)}{3!}x^3 + \dots \quad (10)$$

を使って計算する。(Sin での計算を示すが、cos でも同様となる。)

電卓での近似計算 (0.8Hz の根拠)

$$(100 + 50 * \sin(\omega t))^{1.3} = (100^{1.3})(1 + (1/2) * \sin(\omega t))^{1.3} \quad (11)$$

に注意して展開式に $(1/2)\sin(\omega t)$ を代入すれば、

$$(100 + 50 * \sin(\omega t))^{1.3} = 398.11 * \{1 + 0.65 \sin(\omega t) + 0.05 \sin^2(\omega t) - 0.006 \sin^3(\omega t) + \dots\} \quad (12)$$

となる。次の関係式に注意して計算する。

$$\sin(x) + \sin(x + 2\pi/3) + \sin(x + 4\pi/3) = 0 \quad (13)$$

$$\sin^2(x) + \sin^2\left(x + \frac{2\pi}{3}\right) + \sin^2\left(x + \frac{4\pi}{3}\right) = \frac{3}{2} \quad (14)$$

$$\sin^3(x) = (3\sin(x) - \sin(3x))/4 \quad (15)$$

なので、 \sin の 3 乗の和のうち、 $\sin(x)$ の和は 0 となり、 $\sin(3x)$ の和は

$$\sin(3x) + \sin\left(3\left(x + \frac{2\pi}{3}\right)\right) + \sin\left(3\left(x + \frac{4\pi}{3}\right)\right) = 3\sin(3x) \quad (16)$$

となるから

$$\sin^3(x) + \sin^3\left(x + \frac{2\pi}{3}\right) + \sin^3\left(x + \frac{4\pi}{3}\right) = -(3/4)\sin(3x) \quad (17)$$

よって、

$$f(t) \approx 1223.43 + 1.70\sin(3\omega t) \quad (18)$$

となる。

3 枚のブレードが、 $\sin(\omega t)$ 、 $\sin(\omega t + 2\pi/3)$ 、 $\sin(\omega t + 4\pi/3)$ に従って回転している場合には、塔にかかる回転モーメントは

$$M = k * f(t) \approx 221734.19 + 307.78\sin(3\omega t) \quad (19)$$

となり、ブレードの回転周波数が、0.26666Hz ならば、塔にかかるモーメントは 0.8Hz の周波数で変化する。ブレードの回転周期の 1/3 の周期で回転モーメントが変化することが分る。

(2) 不均等な場合 (0.27Hz, 0.53Hz の根拠)

次に、ブレードの 1 枚だけが他の 2 枚よりも少し大きい場合を考える。

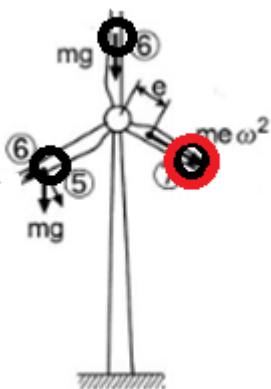


Fig.12 Wind turbine imbalance

大きな部分の面積が、 $10 * 1.003 = 10.03 \text{ m}^2$ だとすれば、この時、赤い丸の部分が受ける力は、

$$P = \frac{\left(\left(7 * \left(\frac{(100 + 50 * \sin(\omega t + \theta))}{10} \right)^{0.15} \right)^2 \right)}{2} \quad (20)$$

* 1.23 * 1.2 * 10 * 1.003 [N]

より、

$$P * (100 + 50 * \sin(\omega t + \theta)) = k * ((100 + 50 * \sin(\omega t + \theta))^{1.3} + 0.003 * (100 + 50 * \sin(\omega t + \theta))^{1.3}) \quad (21)$$

となる。 $\theta = 0$ のものが大きいとして、

$$g(t) = f(t) + 0.003 * (100 + 50 * \sin(\omega t))^{1.3} \quad (22)$$

を考える。((8) 式を使った。)

$$0.003 * (100 + 50 * \sin(\omega t))^{1.3} = 0.003 * 398.11 \{ 1 + 0.65 \sin(\omega t) + 0.05 \sin^2(\omega t) - 0.006 \sin^3(\omega t) + \dots \} \quad (23)$$

となり、冪乗の項を倍角で表現して計算すれば、

$$M = k * g(t) = 221955.93 + 139.77 \sin(\omega t) - 5.28 \cos(2\omega t) + 308.08 \sin(3\omega t) + \dots \quad (24)$$

を得る。これが、超低周波音での、0.27Hz、0.53Hz 成分が出現する根拠である。

(3) 0.8Hz、1.6Hz、2.4Hz、... が出現する根拠
次の命題に注目する。

命題 ; $(\sin x)^n$ は、定数と $\sin(mx)$ 、 $\cos(mx)$ ($m=1 \sim n$) の一次式で表現できる。(Cos も同様)

$n=1$ の場合は、 $(\sin x)^1 = \sin(1x)$ で正しい。

$n=k$ の時に成立すると仮定すると、

$$(\sin x)^{k+1} = f_k(x) * \sin x, \quad (25)$$

定数 * $\sin x$ は条件を満たし、

$$\sin(mx) * \sin x = -(\cos(mx+x) - \cos(mx-x))/2 \quad (26)$$

$$\cos(mx) * \sin x = (\sin(x+mx) + \sin(x-mx))/2 \quad (27)$$

となるので、(25) 式は、定数と $\sin(mx)$ 、 $\cos(mx)$ ($m=1 \sim k+1$) の一次式で表現できる。

よって、 $(\sin x)^n = f_n(x)$ は次の形で書ける。

$$f_n(x) = c_n + \sum_{m=1}^n a_m \sin(mx) + \sum_{m=1}^n b_m \cos(mx) \quad (28)$$

そこで

$$(\sin x)^n + \left(\sin\left(x + \frac{2\pi}{3}\right)\right)^n + \left(\sin\left(x + \frac{4\pi}{3}\right)\right)^n \quad (29)$$

を考えるには、1 次式の和

$$\sin(mx) + \sin\left(m\left(x + \frac{2\pi}{3}\right)\right) + \sin\left(m\left(x + \frac{4\pi}{3}\right)\right) \quad (30)$$

について調べればよいことになる。

$$m=3k, m=3k+1, m=3k+2 \quad (k=0,1,2,\dots)$$

の場合に分けて考える。

$m=3k$ の場合は、

$$\sin(3kx) + \sin\left(3kx + \frac{6\pi k}{3}\right) + \sin\left(3kx + \frac{12\pi k}{3}\right) = 3 * \sin(3kx) \quad (31)$$

$m=3k+1$ の場合は、

$$\sin((3k+1)x) + \sin\left((3k+1)x + \frac{6\pi k + 2\pi}{3}\right) + \sin\left((3k+1)x + \frac{12\pi k + 4\pi}{3}\right) = 0 \quad (32)$$

となる ($m=3k+2$ の場合も同様)。よって、

$$f_n(x) + f_n\left(x + \frac{2\pi}{3}\right) + f_n\left(x + \frac{4\pi}{3}\right) \quad (33)$$

には、 $\sin(3mx)$, $\cos(3mx)$ のような形の項と定数だけが残る。これが、0.8Hz より大きな周波数、1.6Hz、2.4Hz、3.2Hz、4.0Hz でピーク値となる理由である。

(8)(9) 式には、(10) の展開式を長くしても、

定数項と、 $\sin(3m\omega t)$, $\cos(3m\omega t)$ の項しか残らない。

塔には、ブレードの揚力による力のほかに、塔自体に吹き付ける風の力もあって風下に向かって少し曲がる。

高さによって風速が異なるので、ブレードの揚力は塔にかかる力を周期的に変化させる。3枚のブレードが完全に均等で風が安定していても、 $3 \cdot R/60[\text{Hz}]$ のほかに、 $2 \cdot 3 \cdot R/60[\text{Hz}]$ 、 $3 \cdot 3 \cdot R/60[\text{Hz}]$ 、 $4 \cdot 3 \cdot R/60[\text{Hz}]$ 、...の揺れが発生する。

さらに、1枚のブレードが少しだけ大きい場合や、風に対する角度が他の2枚と少しだけ異なる場合には、風車の変動に、 $R/60[\text{Hz}]$ の他に、 $2 \cdot R/60[\text{Hz}]$ 、 $3 \cdot R/60[\text{Hz}]$ 、の揺れも含まれる。

この力が塔に作用すれば、塔の切り口は楕円となり、塔の側面での振動が起きる。この結果、側面が大きく振動する方向への指向性を持った超低周波音が発生する。

規則的な周波数を持ち、ブレードの回転に起因する塔の振動で発生する音を“風雑音”と言ってはならない。

“風車から超低周波音が発生する”のである。

図4は“風雑音”を表すが、図3は風車からの超低周波音を表す。音の持つ指向性と周波数の規則性がその特徴である。

胴の部分に2つの太鼓、上部に笛を付けた楽器のようなイメージを図13に示す。これは、塔内の気圧変動も含めて、風車音の特徴を考えた上での、風車から音が発生する仕組みを表す模式図である。



Fig.13 Image of Wind turbine noise

10. 室内での計測とカオス理論

“低周波数騒音に対するハウスフィルタのモデル化”⁷⁾には、“室内の音場は特に低周波数領域では複雑で、物理的にも難しい問題を多く含んでいる。”と書かれている。

室内の音の解析は難しいが、カオス理論を使えば困難を克服できる。図14は、製鉄所内の騒音から故障している機械を見つける為の解析である。

1段目は騒音のグラフ、2段目は周波数スペクトル、3段目はWavelet解析。ここまでの解析では特徴が不明だが、“Average Wavelet Coefficient-Based Detection of Chaos in Oscillatory Circuits”⁸⁾を使えば4段目のグラフとなる。



Fig.14 Effect of Chaos theory

4 段目はラクダが座っているようなグラフで、コブが 1 つなら固有振動数が 1 つ、コブが 2 つなら固有振動数が 2 つの物の振動を表す。中央のグラフは固有振動数を 2 つ持つ四角い篩が原因であることを示している。

1 1. 風車音で留意すべき事項

音圧と圧迫感の関連を調べるには、最大音圧をパスカル値のまま扱う必要がある。また、音圧の変動に関しては、音響キャビテーションによる気泡発生の可能性も検討する必要がある。体内に小さな気泡が発生すれば、潜水病と同じ状態になり頭痛が起きる。ほんの少しの可能性でも詳細に検討すべきである。（“泡のエンジニアリング” 9）

1 2. まとめ

水平軸型の風車が超低周波音の発生装置そのものであることが示されたが、パリのエッフェル塔には、希望の灯が残っている。そこでは音も静かで振動も少ない垂直軸の風車が発電をしている。垂直軸型の風車から超低周波音が発生する要因は見あたらない。

（2015 年 2 月、エッフェル塔に 2 機の風力発電機が地上約 120 メートルの部分に設置された。）

1 3. 引用文献

- 1) 高橋厚太, 賀川和哉, 長嶋久敏, 川端浩和, 田中元史, 小垣哲也, 濱田幸雄, 風車ナセル・タワーの振動解析, 風力エネルギー利用シンポジウム Vol.40, p.251-254, 2018
- 2) 菊島義弘, 長島久敏, 橋本晶太, 鯨岡政斗, 濱田幸雄, 川端浩和, 小垣哲也, 風速が風車騒音指向性に及ぼす影響について, 風力エネルギー利用シンポジウム Vol.38 p. 69-72, 2016
- 3) Dai-Heng CHEN, 増田健一, 尾崎伸吾, 円筒の弾塑性 純曲げ崩壊に関する研究, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.74, No.740, p. 520-527, 2008
- 4) 今井巧, 流体力学(前編), 裳華房, 第 17 版, 1990
- 5) 石田幸雄, 風車の振動解析, Journal of JWEA Vol.34 No.4, 2010
- 6) M.S.Howe, 空力音響学, 共立出版、初版、2015
- 7) 橘秀樹, 福島昭則, 落合博明, 低周波数騒音に対するハウスフィルタのモデル化, 日本騒音制御工学会研究発表会講演論文集, Vol. 2017: 春季 p.13-16, 2017
- 8) Vesna Rubežić, Igor Djurović, Ervin Sejdić,

Average Wavelet Coefficient-Based Detection of Chaos in Oscillatory Circuits,
COMPEL The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic
Engineering 36(1):188-201, January 2017
9) 石井俣夫編集,泡のエンジニアリング,テクノシステム, 初版, 2005

6. 3. 2 圧縮と膨張

人体を半径 0.5m の球とみる。表面積は $4 \times 3.14 \times 0.5 \times 0.5 = 3.14 \text{ m}^2$

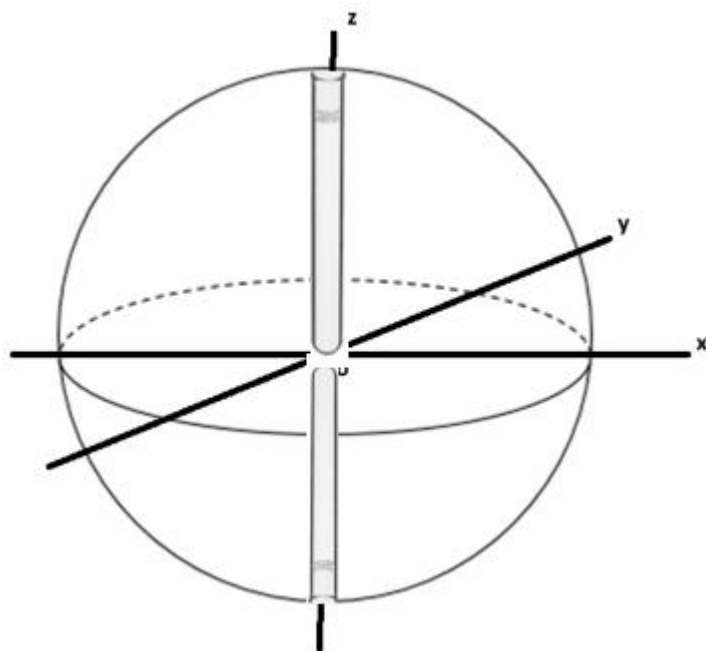
表面の部分は体重 (60 kg) に相当する質量を持ち、面密度は $60/3.14 = 19 \text{ kg/m}^2$

音 (平面波) の波面に対して、x 軸が垂直になっているとする。

音速は 340m/秒とする。

パスカル値については、1 パスカルは、1 [平方メートル](#) (m^2) の面積につき 1 [ニュートン](#) (N) の力が作用する圧力または応力と定義されている[\[1\]](#)。

ニュートンについては、1 ニュートンは、1 [kg](#) の[質量](#)を持つ物体に 1 [m/s²](#) の[加速度](#)を生じさせる力である。



北極と南極に向けた 2 本の試験管のような部分を考える。

試験管の半径を $r = 0.005 \text{ m}$ 、断面積を $ds = \pi \times 0.000025 = 0.0000785 \text{ [m}^2\text{]}$ 、

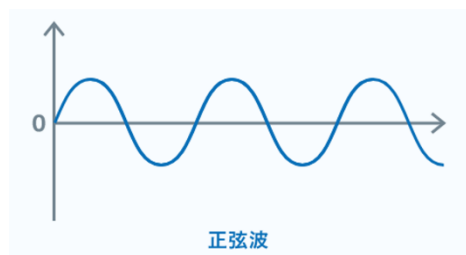
殻の部分の密度を $\rho = 19.1 \text{ kg/m}^2$ とする。

試験管の口の部分の質量は $M = \rho \times ds = 19 \times \pi \times 0.000025 = 0.0015 \text{ [kg]}$ となる。

この部分を、y z 平面に平行な平面波が通過すると考える。

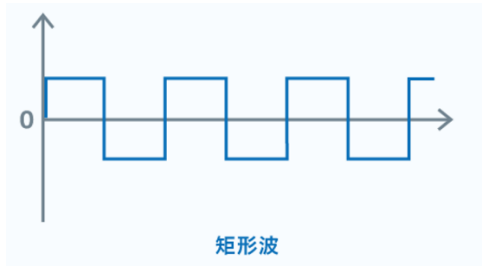
試験管の口の部分での音圧 $P(t)$ が

$$P(t) = A \sin \omega t$$



としたいのだが、

計算を簡単にするために、矩形波で考える。



音が来る前の大気圧を P_0 と置く。試験管の中の圧力も同じだったとする。
試験管の蓋に掛かる圧力は $P_0 + A$ と $P_0 - A$ の繰り返しとなる。

1000Hz の音波が通過する場合を考える。

音速は 340m/秒なので、波長は、 $340/1000 = 0.34\text{m}$

$P_0 + A$ の部分の長さは、 $0.17\text{m} = 170\text{ cm}$

この部分が蓋の部分を通ずる時間は、 $0.17/340 = 0.0005$ 秒

よって、0.0005 秒ごとに、蓋に掛かる圧力が変化することになる。

内圧が P_0 で外圧が $P_0 + A$ になったとすれば、蓋に掛かる力は（ $A \cdot$ 蓋の面積）パスカルになる。

この状態が dt 秒間継続したとすれば、 $F = m \alpha$ より、

$$A \cdot ds = M \alpha$$

$$\alpha = A \cdot ds / M$$

となり、 dt 秒後には、測度 $v1 = \alpha dt$ 、移動距離は初速度 $v0 = 0$ なので、

$$dl = (1/2) \alpha (dt)^2 + v0 \cdot dt$$

となる。

試験管の長さを、 L とすれば試験管の容積は $L \cdot ds$ となる。 dt 秒後の状態は、蓋が移動したので試験管内の容積は、 $ds \cdot (L - dl)$ に変わる。

容積が減ったので、管内の気圧が上がり P_1 となる。

とりあえず、管内の気体の温度は同じと仮定する。（あとで修正する）

$$P_1 \cdot ds \cdot (L - dl) = P_0 \cdot ds \cdot L$$

よって、 dt 秒後の状態は、

$$v1 = \alpha \cdot dt$$

$$dl = (1/2) \alpha (dt)^2$$

$$P_1 = P_0 \cdot L / (L - dl)$$

$$L_1 = (L - dl)$$

となる。

次は、外圧は $P_0 + A$ 、内圧は $P_1 = P_0 \cdot L / (L - dl)$ として考える。この時の初速度は $v1$ 、

蓋に掛かる圧力差は $P_0 + A - P_1$ 、これが蓋 ds の部分を押す。

加速度 α_1 として、 $(P_0 + A - P_1) \cdot ds = M \cdot \alpha_1$

$$\alpha_1 = \frac{(P_0 + A - P_1) \cdot ds}{M}$$

$$dl_1 = v1 * dt + \left(\frac{1}{2}\right) \alpha_1 * dt^2$$

$$v2 = v1 + \alpha_1 * dt$$

蓋が移動したので試験管内の容積は、 $ds * (L - dl - dl_1)$ に変わる。

試験管内の圧力 P_2 は、 $P_2 * ds * (L - dl - dl_1) = P_1 * ds * (L - dl) = P_0 * ds * L$ より、

$$P_2 = P_1 * (L - dl) / (L - dl - dl_1) = P_0 * L / (L - dl - dl_1)$$

$$L_2 = (L - dl - dl_1)$$

次は、外圧は $P_0 + A$ 、内圧は $P_2 = P_0 * L / (L - dl - dl_1)$ として考える。

蓋に掛かる圧力差は $P_0 + A - P_2$ 、これが蓋 ds の部分を押す。

加速度 α_2 として、 $(P_0 + A - P_2) * ds = M * \alpha_2$

初速度は $v2$

$$\alpha_2 = \frac{(P_0 + A - P_2) * ds}{M}$$

$$dl_2 = v2 * dt + \left(\frac{1}{2}\right) \alpha_2 * dt^2$$

$$v3 = v2 + \alpha_2 * dt$$

蓋が移動したので試験管内の容積は、 $ds * (L - dl - dl_1 - dl_2)$ に変わる。

試験管内の圧力 P_3 は、 $P_3 * ds * (L - dl - dl_1 - dl_2) = P_0 * ds * L$ より、

$$P_3 = P_0 * L / (L - dl - dl_1 - dl_2)$$

$$L_3 = (L - dl - dl_1 - dl_2)$$

次は、外圧は $P_0 + A$ 、内圧は $P_3 = P_0 * L / (L - dl - dl_1 - dl_2)$ として考える。

蓋に掛かる圧力差は $P_0 + A - P_3$ 、これが蓋 ds の部分を押す。

加速度 α_3 として、 $(P_0 + A - P_3) * ds = M * \alpha_3$

初速度は $v3$

$$\alpha_3 = \frac{(P_0 + A - P_3) * ds}{M}$$

$$dl_3 = v3 * dt + \left(\frac{1}{2}\right) \alpha_3 * dt^2$$

$$v4 = v3 + \alpha_3 * dt$$

蓋が移動したので試験管内の容積は、 $ds * (L - dl - dl_1 - dl_2 - dl_3)$ に変わる。

試験管内の圧力 P_4 は、 $P_4 * ds * (L - dl - dl_1 - dl_2 - dl_3) = P_0 * ds * L$ より、

$$P_4 = P_0 * L / (L - dl - dl_1 - dl_2 - dl_3)$$

$$L_4 = (L - dl - dl_1 - dl_2 - dl_3)$$

次は、外圧は $P_0 + A$ 、内圧は $P_4 = P_0 * L / (L - dl - dl_1 - dl_2 - dl_3)$ として考える。

蓋に掛かる圧力差は $P_0 + A - P_4$ 、これが蓋 ds の部分を押す力になる。

加速度 α_1 として、 $(P_0 + A - P_4) * ds = M * \alpha_4$
 初速度は v_4

$$\alpha_4 = \frac{(P_0 + A - P_4) * ds}{M}$$

$$dl_4 = v_4 * dt + \left(\frac{1}{2}\right) \alpha_4 * dt^2$$

$$v_5 = v_4 + \alpha_4 * dt$$

以下、同様。

となる。

dt=0.00125 秒、L=0.5m、M= $\rho * ds=0.0015\text{kg}$ 、A=1、として上記の計算をすれば、
 dt* k = 周期/2 となるまでは内部の圧力が上昇するが、その後は、外の気圧が、外圧は $P_0 - A$ となるので、
 試験管内の空気は膨張を開始する。この膨張は、周期/2 の間だけ継続する。その後、外圧は $P_0 + A$ となり、また、圧縮過程に入る。

最初の圧縮過程が終了する時点での試験管内の圧力は次の表のようになる。

周波数	0.5	1	2	10	20	50	100	200
周期/2	1	0.5	0.25	0.05	0.025	0.01	0.005	0.0025
内気圧	102400.9991	102400.9742	102400.861	102400.467	102400.369	102400.303	102400.132	102400.033

回数	外気圧	外力	気柱長さ	気柱体積	内気圧	内力	気圧差	外力－内力	初速度	加速度	終速度	移動距離 dl	開始秒	終了秒
0	102401	8.0384785	0.5000000000	0.00003925	102400	8.0384	1	7.85E-05	0	0.05233333	6.5417E-05	4.08854E-08	0	0.00125
1	102401	8.0384785	0.4999999591	3.925E-05	102400.0084	8.03840066	0.99162667	7.7843E-05	6.5417E-05	0.05189513	0.00013029	1.22314E-07	0.00125	0.0025
2	102401	8.0384785	0.4999998368	3.925E-05	102400.0334	8.03840262	0.96657677	7.5876E-05	0.00013029	0.05058418	0.00019352	2.02376E-07	0.0025	0.00375
3	102401	8.0384785	0.4999996344	3.925E-05	102400.0749	8.03840588	0.92513015	7.2623E-05	0.00019352	0.04841514	0.00025403	2.79719E-07	0.00375	0.005
4	102401	8.0384785	0.4999993547	3.92499E-05	102400.1322	8.03841037	0.86784356	6.8126E-05	0.00025403	0.04541715	0.00031081	3.53026E-07	0.005	0.00625
5	102401	8.0384785	0.4999990017	3.92499E-05	102400.2045	8.03841605	0.79554369	6.245E-05	0.00031081	0.04163345	0.00036285	4.21034E-07	0.00625	0.0075
6	102401	8.0384785	0.4999985806	3.92499E-05	102400.2907	8.03842282	0.70931554	5.5681E-05	0.00036285	0.03712085	0.00040925	2.90007E-08	0.0075	0.00875
7	102401	8.0384785	0.4999985516	3.92499E-05	102400.2966	8.03842328	0.70337617	5.5215E-05	0.00040925	0.03681002	0.00045526	2.87578E-08	0.00875	0.01
8	102401	8.0384785	0.4999985229	3.92499E-05	102400.3025	8.03842375	0.69748653	5.4753E-05	0.00045526	0.0365018	0.00050089	2.8517E-08	0.01	0.01125

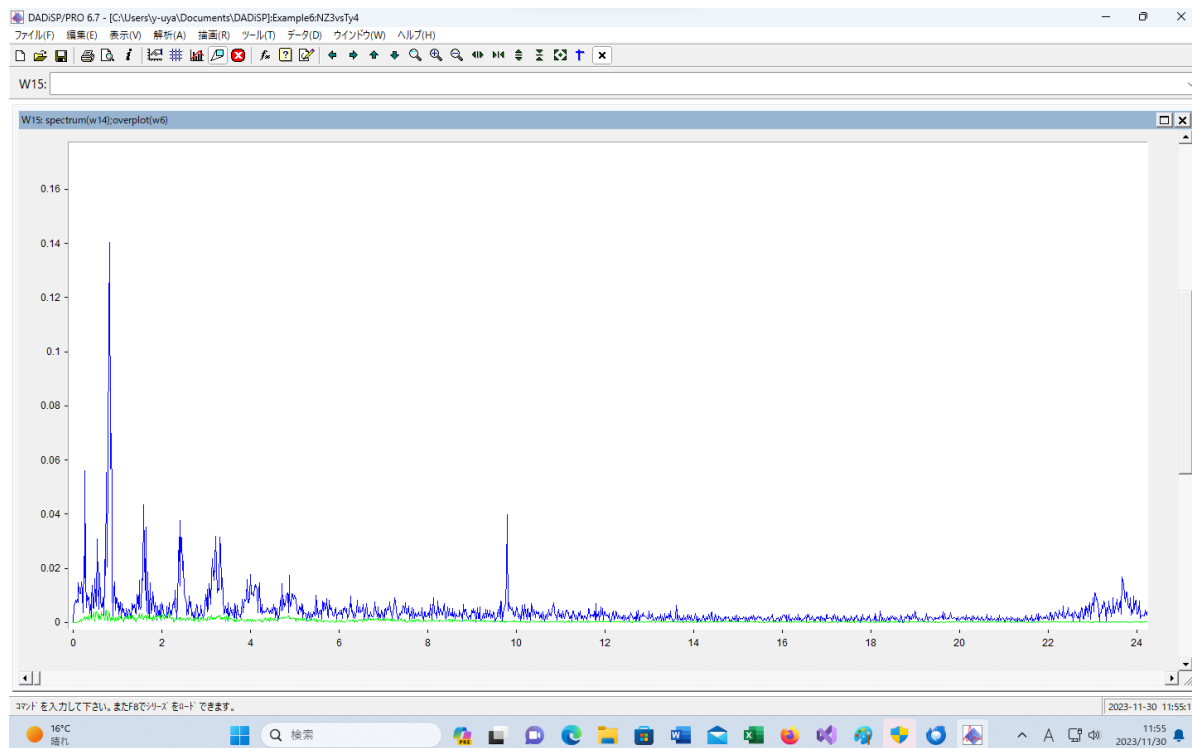
200Hz だと、気圧が 1 パスカル増加した時、中の圧力は 0.033 パスカル増えた後で減圧過程に入る。
 100Hz だと、気圧が 1 パスカル増加した時、中の圧力は 0.132 パスカル増えた後で減圧過程に入る。
 10Hz だと、気圧が 1 パスカル増加した時、中の圧力は 0.467 パスカル増えた後で減圧過程に入る。
 1Hz だと、気圧が 1 パスカル増加した時、中の圧力は 0.974 パスカル増えた後で減圧過程に入る。
 0.5Hz だと、気圧が 1 パスカル増加した時、中の圧力は 0.999 パスカル増えた後で減圧過程に入る。

周波数が低いほど、体内の圧力変動が大きくなる。
 200Hz 以上ならば、体内の圧力はほとんど変化しないが、10Hz 以下では、かなりの圧縮が起きる。
 これは、圧迫感ではなく、圧迫そのものです。

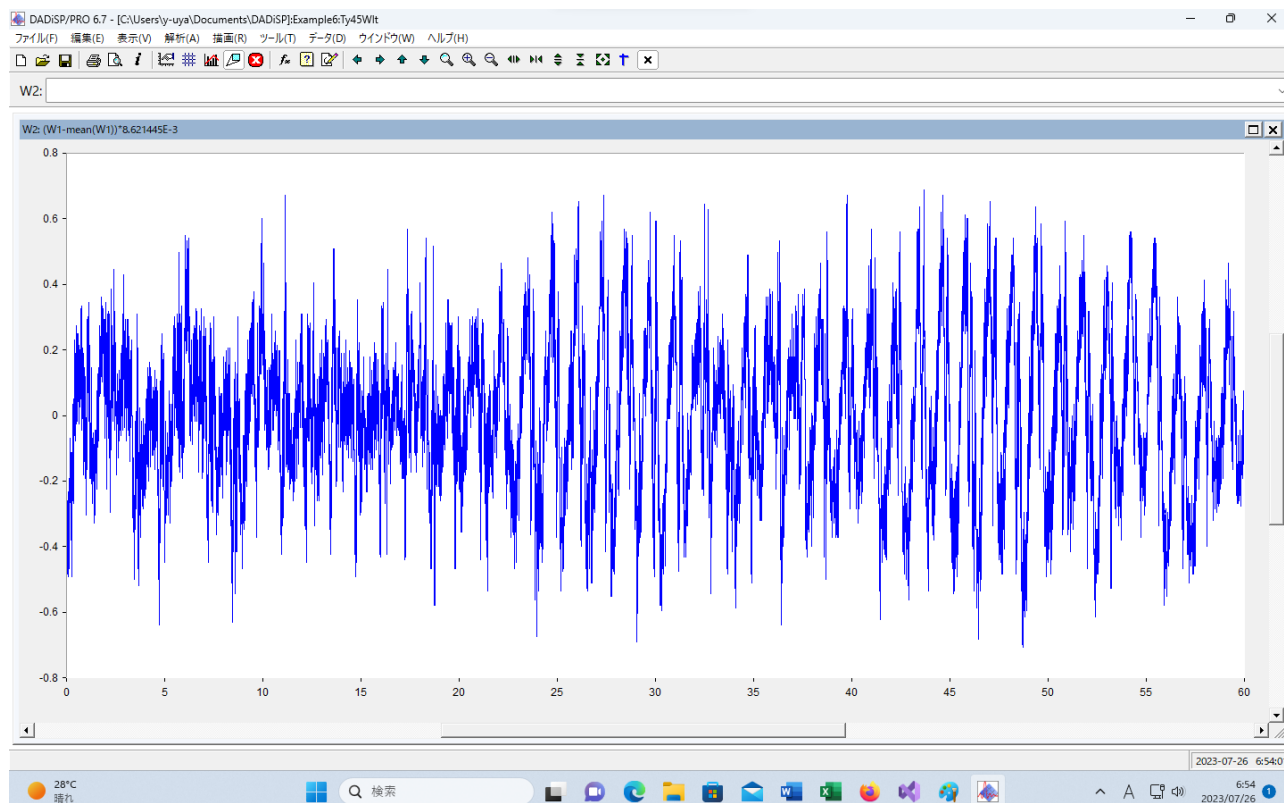
この圧力変動は、体内での気泡の溶解と発生の平衡状態を、発生が多い方に傾かせる。

6.3.3 音響キャビテーション

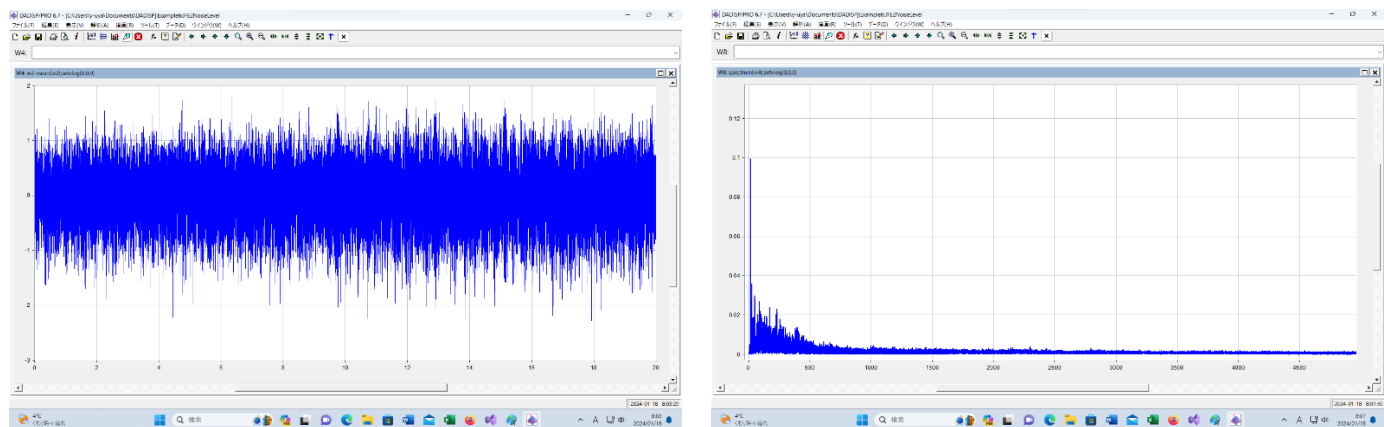
風車音の周波数スペクトルから、風車からの超低周波音は離散的であり、 $f=RZ/60=1\text{ Hz}$ の成分が卓越した音圧を持っていることが分ります。



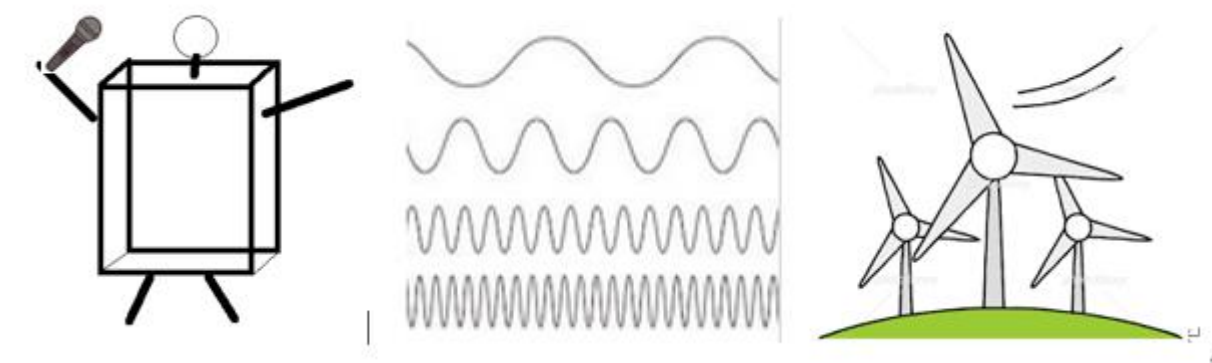
グラフは、1Hz の成分が卓越した音圧を持っているので、グラフの基本的な形を決定します。他の成分は、基本的なグラフに部分的な変動を与えるだけです。



JFE の工場での音の全体のグラフと周波数スペクトルは次のグラフです。

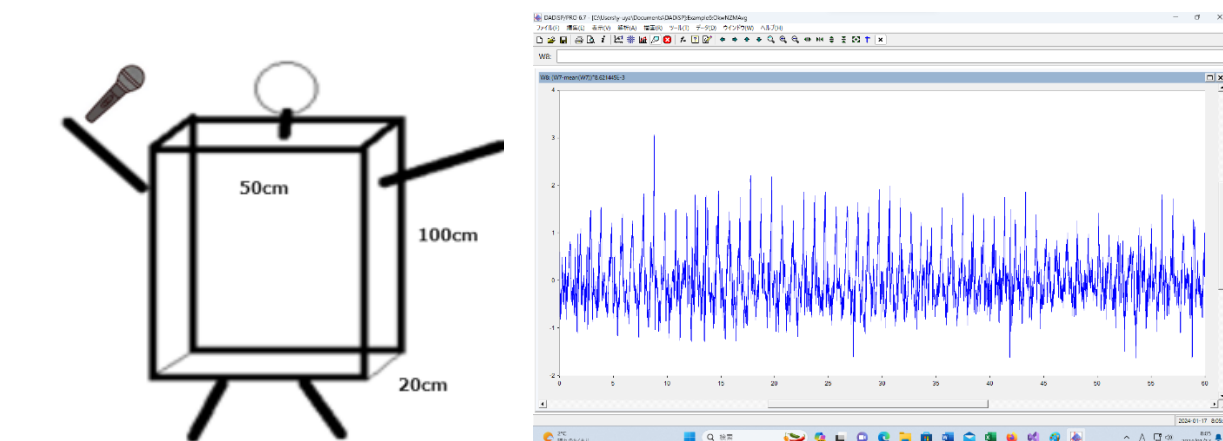


この性格の違は、人体に対する圧迫に仕方に影響します。



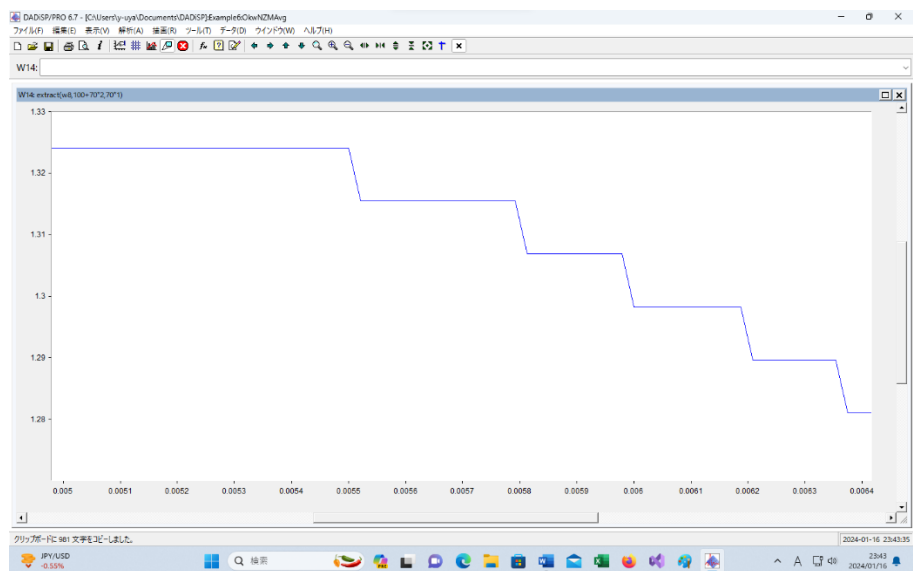
いろいろな波長の音が、秒速 340m で風車から人間まで届くとしします。人間の横幅 50 c m、胴長 100 c m、厚み 20 c m として、音は平面波としします。

音速が 340m ですから、体の右側から、マイクのある体の左側までは、 $0.5/340$ 秒です。マイクが音圧を計測する回数が 1 秒間に 48000 回だとすれば、 $0.5/340$ 秒では、 $48000 \times 0.5/340 = 70.6 = 70$ 回です。



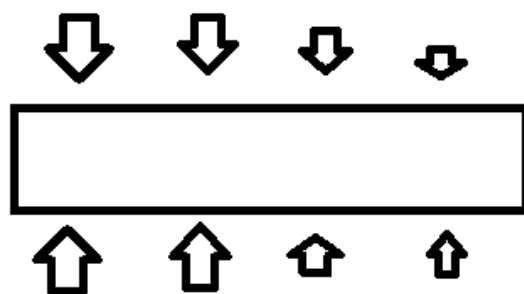
右側は、計測した風車音のデータです。これから 70 個分を取り出します。

音圧の、70 個の連続した数値のグラフは、



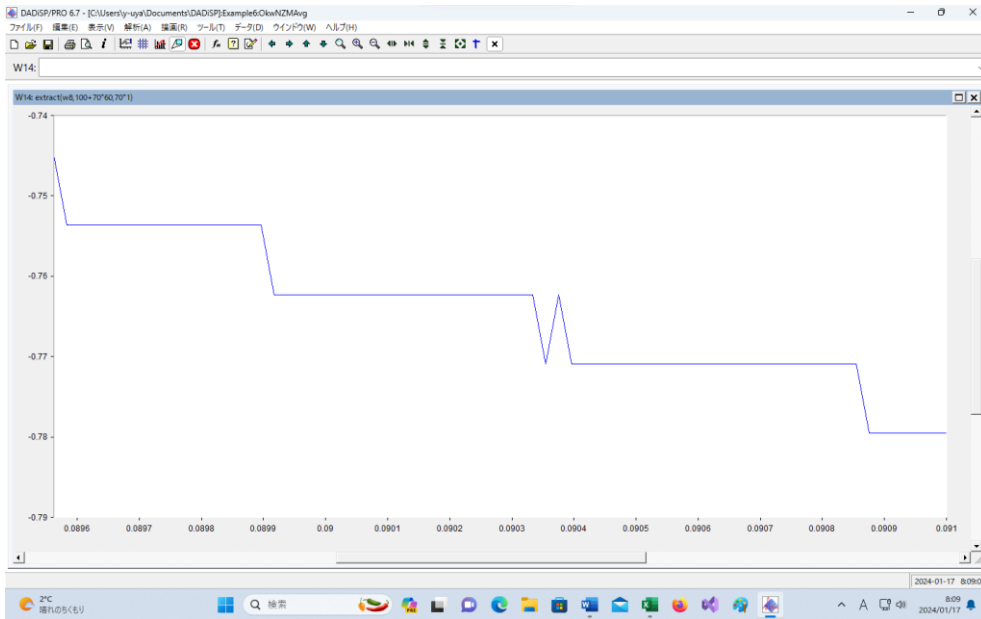
となり、数値は、

1.324106	1.324106	1.306864	1.289621
1.324106	1.324106	1.306864	1.289621
1.324106	1.324106	1.306864	1.289621
1.324106	1.324106	1.306864	1.289621
1.324106	1.324106	1.306864	1.289621
1.324106	1.324106	1.306864	1.289621
1.324106	1.315485	1.306864	1.289621
1.324106	1.315485	1.306864	1.280999
1.324106	1.315485	1.306864	1.280999
1.324106	1.315485	1.298242	1.280999
1.324106	1.315485	1.298242	
1.324106	1.315485	1.298242	
1.324106	1.315485	1.298242	
1.324106	1.315485	1.298242	
1.324106	1.315485	1.298242	合計
1.324106	1.315485	1.298242	91.74771
1.324106	1.315485	1.298242	
1.324106	1.315485	1.298242	平均
1.324106	1.315485	1.289621	1.310682



合計：91Pa、平均：1.3Pa です。この時は、体全体が押しつぶされる状態です。

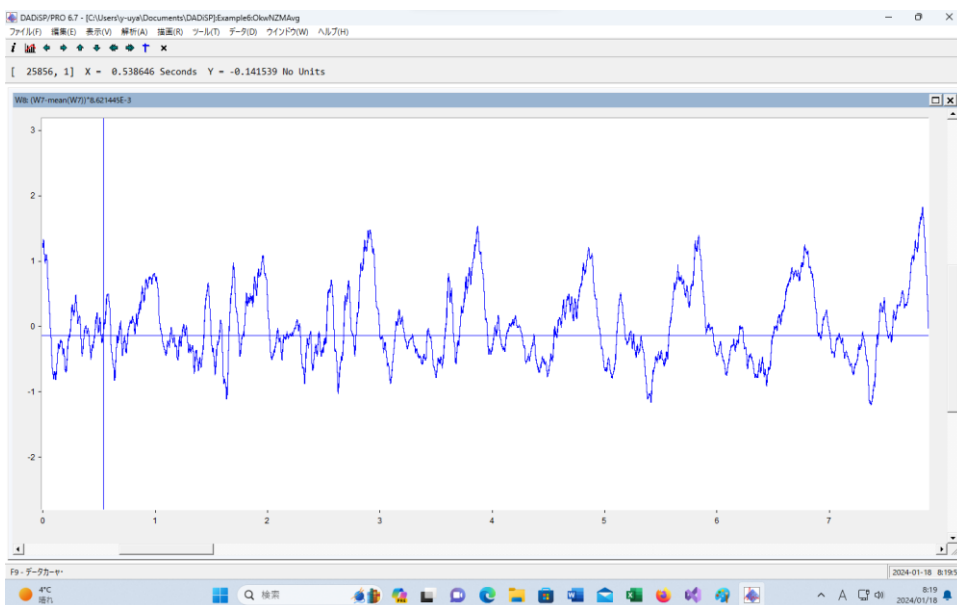
もちろん、



もう少し経つと、引っ張られて膨張する状態になります。

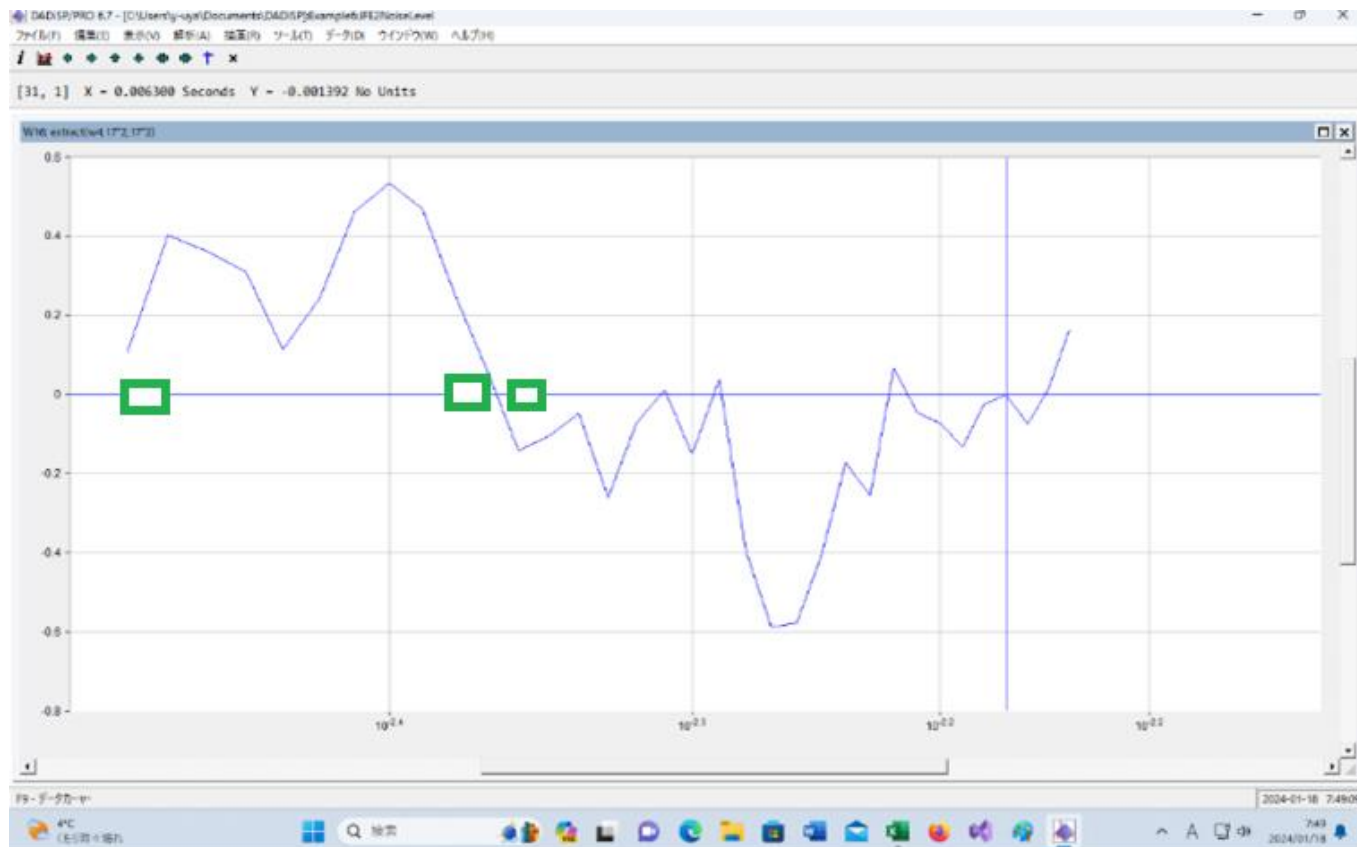
上のグラフの値は、 -0.77Pa 程度です。強制的に膨張させられている状態です。

風車音の場合は、 50 cm の全体が圧縮される時間が 0.5 秒、膨張させられる時間が 0.5 秒であることが次のグラフから分かります。



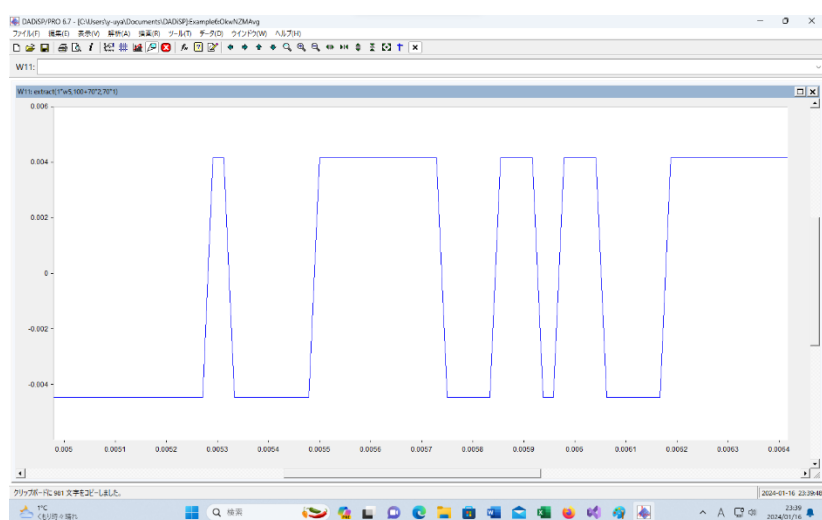
人間の体は、圧迫感を感じるというよりは、 0.5 秒ごとに圧縮と膨張を繰り返すのです。
物理的には圧力が周期的に変化するのです。

工場音の場合は、秒速 340mの音が 50 c mを通過するのに必要な時間は、0.001 秒です。0.002 秒間の波形を拡大してみれば、次のグラフになります。



圧縮、膨張の継続時間は $0.04 \cdot 2 \cdot 0.001 = 0.038$ 秒程度です。時間が短いので、皮膚が圧縮での運動を開始したとたんに膨張の動きを開始します。他は、50 c mの範囲内に圧縮と膨張が混在します。体内への圧力変動に要る影響は軽微だと考えられます。

神社での音の音圧の、70 個の連続した数値のグラフは、

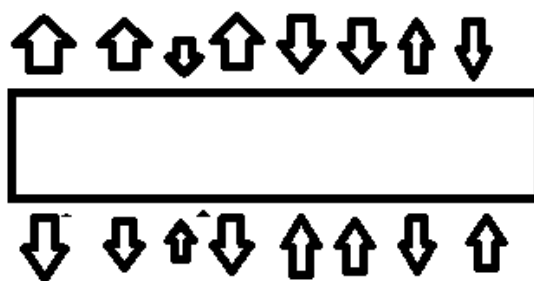


であり、

数値は、

-0.00446	-0.00446	-0.00446	0.00416
-0.00446	-0.00446	-0.00446	0.00416
-0.00446	-0.00446	0.00416	0.00416
-0.00446	-0.00446	0.00416	0.00416
-0.00446	-0.00446	0.00416	0.00416
-0.00446	0.00416	0.00416	0.00416
-0.00446	0.00416	-0.00446	0.00416
-0.00446	0.00416	-0.00446	0.00416
-0.00446	0.00416	0.00416	0.00416
-0.00446	0.00416	0.00416	0.00416
-0.00446	0.00416	0.00416	
-0.00446	0.00416	0.00416	
-0.00446	0.00416	-0.00446	
-0.00446	0.00416	-0.00446	
-0.00446	0.00416	-0.00446	
0.00416	0.00416	-0.00446	合計
0.00416	0.00416	-0.00446	-0.01919
-0.00446	-0.00446	-0.00446	
-0.00446	-0.00446	0.00416	平均
-0.00446	-0.00446	0.00416	-0.00027

合計：－0.01919Pa、平均：－0.00027Pa です。



押される場所と、引っ張られる場所が混在しているので、一方的に押しつぶされることはありません。

時間がたっても、プラスマイナスが混在する状況は、あまり変化しません。

風車は、50 c mの幅全体が押されるのですが、神社の音では、各部分ごとに押したり引いたりすることになるので、全体としての影響は 1/100 程度になってしまいます。

風車の場合（特別な周波数の音が極端に強い）は圧迫感を感じても、神社の音のような性質を持っている（沢山の周波数成分を持っている）場合には、圧迫感を感じないのです。

風車音の下では、人間の体は、圧迫感を感じるというよりは、0.5 秒ごとに圧縮と膨張を繰り返すのです。人体に掛かる、物理的な圧力が周期的に変化するのです。

超低周波音の中でも、1H z のものが圧倒的に高い圧力を持っているので、その周期によって人体への圧力変動が決まってしまう。これに近い周波数のものが、同じような音圧で存在すれば、このようにはなりません。この点が、風車音と他の環境騒音の最も大きな違いです。

計測された 164 か所の風車音も、0.5～1H z あたりの孤立した周波数の音が、他の周波数よりも極端に高い圧力を持つことも分ります。164 か所の計測対象となった全ての風車の近くでは、人体は強制的な、圧縮、膨張にさらされるのです。

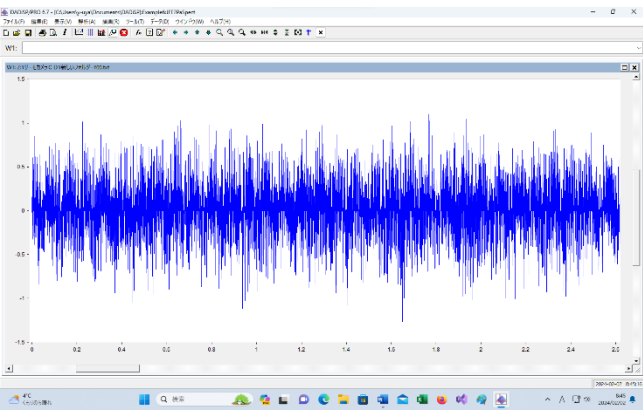
圧縮、膨張についてさらに確認します。

風車音は風速に変化によって変わります。速度が増せばブレードに掛かる揚力が増えます。揚力の大きさは風速の 2 乗に比例します。これによって、塔に掛かる回転モーメントも変化します。結果として塔の側面の振幅も増加します。音圧も変化します。

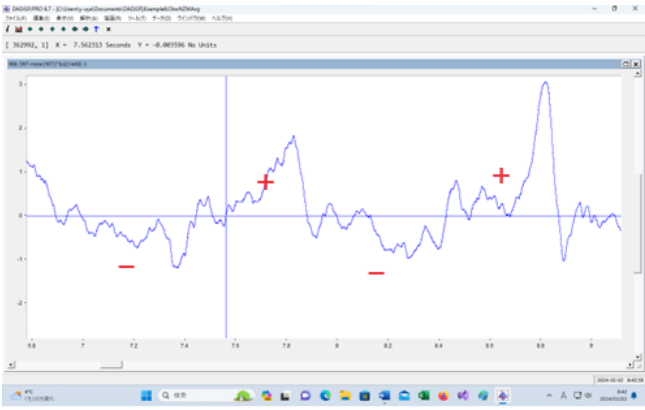
風が弱い時の音圧は 0.15Pa ですが、風が強いと 0.42Pa までは増加します。基本周波数は 0.8Hz から 1.0Hz 程度に増加します。

音圧の変動は大きいですが、周波数の変動は小さいです。

工場騒音の、2.6 秒間の波形

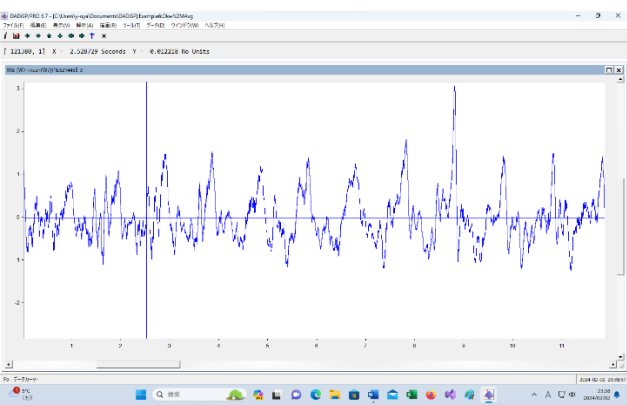


風車音の 2.2 秒間の波形

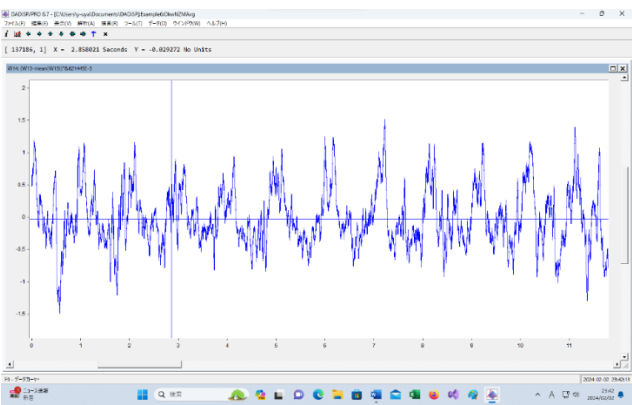


これが、圧縮と膨張が、ゆっくり繰り返される原因です。

音圧が高い（風が強い）ときの 12 秒間



音圧が低い（風が弱い）ときの 12 秒間



風が強い時の方が、音圧のプラス、マイナスがはっきりします。より強い形で、圧縮と膨張の過程が継続することになります。指向性も同様の効果を及ぼすと考えます。

風が強い時は、0.42Pa で 1Hz でした。風が弱い時は 0.15Pa で 0.8Hz でした。周波数の変化は小さいのですが、音圧の変化は大きいです。

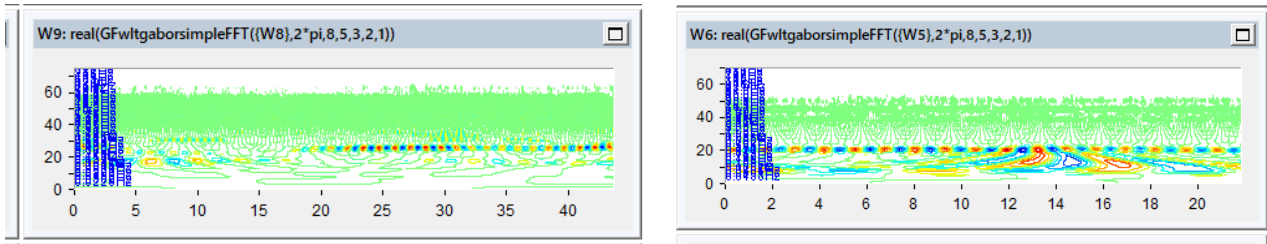
これから、多変量解析では、（PT＝最大音圧*周期）の項目を設ければ良いことが分ります。

対象	周波数[Hz]	周期[S]	最大音圧	PT
車（強）	1	1	0.42	0.42
箱（中）	1	1	0.33	0.33
外（弱）	1	1	0.23	0.23
穏かな日	0.8	1.25	0.15	0.1875
JFE	12.5	0.08	0.096	0.00768
神社	1	1	0.01	0.01

符号決定率＝最大音圧/2 番目の音圧
 をかけた方がよさそうですが、ここでは保留しておきます。

さらに音響キャビテーションの影響を考えれば、体内に溶け込んでいる空気が析出して気体となる可能性が高くなるのは、風が強い時だという事になります。体内の気泡は、潜水病と同じですから、頭痛の原因になります。

風車音の指向性や風速の変化が激しい事から、条件を満たす時間は、普通は 20 秒程度ですが、風速、風向が安定している場合は、被害が大きくなると考えられます。
 風車音の 2 分間の結果を並べて表示すれば、下のようになり、



0.8Hz 程度の周波数成分が、0.3 パスカル程度の強さで放出される状態が 100 秒程度継続することが分かります。共鳴や共振現象などを発生させ、寝ている人間を起こすには十分な継続時間です。
 さらに、色が特に濃い部分は 20 秒程度継続します。この部分が継続すれば、高い音圧での影響を感知することになります。目が覚めるだけの影響ならば良いのですが、継続時間が長いと気泡発生の可能性が高くなります。

“泡のエンジニアリング” テクノシステム を参考にすれば、

1 1．音場中の気泡の成長

圧力一定のもとでは、不凝縮ガスが過飽和でない限り、気泡は消滅する。これに対して、音響場の中に置かれた気泡では不足飽和状態でも、不凝縮ガスの析出による気泡の成長が見られる。この現象が音響キャビテーション発生の原因となり、また、液体中の溶存ガス除去促進にも利用される。

気泡への不凝縮ガス析出量は式(5.5.55)

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{4}{3}\pi R^3\rho_{\varepsilon}\right)=4\pi R^2D_{\varepsilon L}\frac{\partial\rho_{\varepsilon L}}{\partial r}\Big|_{\pi}\tag{2.5.55}$$

による。

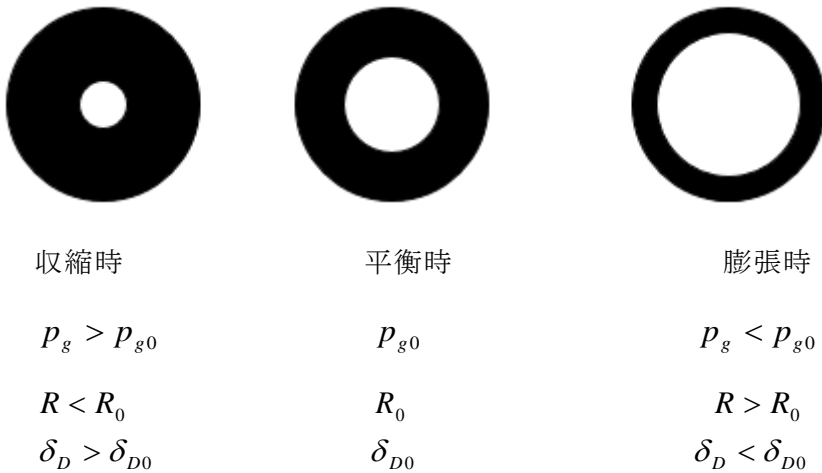
液体中の濃度境界層厚さを δ_D とすれば、単位時期あたりのガス析出・溶解量は

$$\dot{m}_{\varepsilon}\propto R^2\times(\rho_{\varepsilon i0}-\rho_{\varepsilon i\pi})/\delta_D\tag{2.5.61}$$

となる。

これに踏まえて、図 2.5.6 に示す現象のメカニズムを説明する。

図 2.5.6



まず、気泡表面液体の不凝縮ガス濃度 ρ_{gLW} はヘンリーの法則

$$\rho_{gLW} = \alpha p_g \quad (2.5.58)$$

にしたがって、収縮・膨張する圧力変動とともに、上昇・低下する。濃度が上昇する凝縮時には気泡内の不凝縮ガスが液体に溶解し、濃度が低下する膨張時にはガスは気泡へ析出する。

この際、気泡表面積は膨張時のほうが大きいため、膨張・収縮の 1 サイクルで見るとわずかながら析出量が勝ると考えられる。

音波の振動数が大きな場合には、液体内に溶けているガスの拡散が起こらないので、気泡の成長は鈍る。

振動数が小さい場合は、膨張したときは、液体内のガスが気泡内に析出し、気泡の周囲のガスの濃度が減少する。収縮が始まる前に液体内に溶け込んでいるガスの拡散によって濃度が元に戻る。

収縮によって、気泡内のガスが周囲の溶液に溶け込む。周囲の液体内に溶けているガスの濃度があまり下がっていないので溶け込む量は少なくなる。

この過程を繰り返して、低周波の場合のほうが気泡は成長すると考えられる。

次に、表面近傍液体中の不凝縮ガス濃度境界層は、膨張時には薄く、収縮時には厚くなる。境界層の厚さが薄くなるにつれて、拡散による物質輸送が顕著になることを考えると、やはり、膨張による析出量が収縮による溶解量を上回ることになる。

となっています。

大型風車では、風車の回転数 R が小さくなって、 0.5Hz 辺りでの音圧が最大となります。微小な気泡による頭痛や圧迫感などによる体調不良が増加すると予測されます。

超低周波音の中でも、 1Hz のものが圧倒的に高い圧力を持っているので、その周期によって人体への圧力変動が決まってしまう。これに近い周波数のものが、同じような音圧で存在すれば、このようにはなりません。この点が、風車音と他の環境騒音との最も大きな違いです。

計測された 164 か所の風車音も、 $0.5 \sim 1\text{Hz}$ あたりの孤立した周波数の音が、他の周波数よりも極端に高い

圧力を持つことは、すでに確認しました。計測対象となった全ての風車の近くでは、人体は強制的な、圧縮、膨張にさらされるのです。

これは、音響キャビテーションの影響を考えれば、体内に溶け込んでいる空気が析出して気体となる可能性がある事を意味しているのです。体内の気泡は潜水病を同じで頭痛の原因になります。

これは、風車音による直接的な健康への影響なのです。これは、極めて物理的な原因であり、風車音の周波数特性から引き起こされます。そして、回転軸が水平の風車が、上空と地上付近での風速差がある中で、ブレードに掛かる揚力によって回転することからの必然的な帰結です。

風車の物理的な構造が、健康障害を引き起こす根本的な原因なのです。

従って、水平軸型の風車は、最大の欠陥商品なのです。

それを陸地から 2 k m の距離に並べることは狂気の沙汰です。

6. 3. 4 潜水病についての資料

沖縄南部徳洲会病院総合健診センター

相馬 康 男

潜水業務の特殊性

(潜水業務関係者の方々へ)

スキューバダイビングは人気の高いマリンスポーツです。日本では老若男女を問わず誰でも気軽に参加できる安全なスポーツ、と思い込まされています。しかし、「潮流や濁りや有毒生物も存在する自然界の海と高水圧下と言う、陸上とは違う環境での活動」による、陸上生活では理解出来ない多くの問題があります。安全な潜水を行うにはⅠ.水圧の影響についての理解、Ⅱ.水中活動に適応する適切に管理された訓練そして、Ⅲ.潜水適性を確認する定期的な医学検診が不可欠です。

Ⅰ. 水圧による影響

ロシアの原潜クルスクや東シナ海での不審船引き上げの様に、水深 100 ㍎での危険性は誰でも納得します。では、水深何㍎から危険なのでしょう。潜水業務に関する唯一の法律「高気圧作業安全衛生規則(以下、高圧則と略します)」の第 1 条 1 項 2,3 号の定義は「潜水器を用いて圧縮空気の供給を受ける水中」または「大気圧を越える気圧下(海底トンネル内工事等の潜函工法)」となっていて、大気圧(1 気圧)よりも高い空気圧を呼吸する業務が対象になります。第 27 条は「(水中)作業時間の規定は水深 10 ㍎(2 気圧)を越える業務に限る」との但し書きもあります。実際問題として、モズク養殖漁師の最大水深は 8 ㍎を越えませんが重症な潜水障害が発生しています。法律論はさて置き、水圧による影響である「潜水障害(潜水病)」の主な項目を説明しておきましょう。

減圧症 動脈ガス塞栓症 窒素酔い 骨壊死酸素中毒 浅海失神 圧平衡不良 その他

炭酸飲料の泡から理解できる様に、圧力が高いと気体は液体(体内)へ溶け込めます。陸上の 1 気圧(大気圧)下でも体内には空気中の窒素が約 1 ㍎溶け込んでいます。潜水すると水深 10 ㍎毎に溶け込む空気が倍増します。例えば水深 20 ㍎(大気圧の 1 気圧 + 水深 20 ㍎での水圧 2 気圧 = 3 気圧)の深さに潜水すると、時間経過と共に体内窒素は陸上の 3 倍の 3 ㍎になります。このような窒素過剰状態のまま水面へ浮上して圧力が下がりますと、余分な 2 ㍎の窒素ガスが溢れ出し、泡となって血管を塞いだり色々な細胞や組織を圧迫して様々な障害が現れます。これを「減圧症(DCI)」と言い、僅かな気泡または気泡により生じた血栓でも脳脊髄や肺や心臓への血管が塞がれば即死します。更に、人体の 60%が水分で 20%以上は脂肪です。脂肪組織には水分の 5.3 倍の窒素が溶け込みますが、最も脂肪分と血流量が豊富な組織は脳脊髄神経系です。潜水病では血液中の気泡や血栓ばかりを考え勝ちですが、特に脳や脊髄の神経細胞内にできた気泡によって神経細胞が損傷を受ける事も忘れないで下さい。考え方として減圧症と脳梗塞や心筋梗塞は同じ病気です。つまり、その主な原因は① コレステロールや血栓(気泡)により組織に酸素と栄養を送る血管が塞まる。② 不整脈(潜水徐脈)により血流がヨドんで血液が固まり易くなって血管に塞まる。③ 高脂血症(乾燥空気の呼吸による脱水)により血液がドロドロとなり、血栓(と気泡)が出来易くなって血管に塞まる。④ 高血糖・ストレスで血液がベトベトになり、血栓が出来易くなって血管に塞まる。⑤ 高血圧(浮上と潜降による急激な圧変化)により血管に負担が掛かり脆くなって破れる。⑥ 肥満・喫煙・運動不足等により血管の弾力性がなくなる。等だからです。脳梗塞や心筋梗塞は発作から 3 時間以内に治療しないとひどい後遺症を残しますが、減圧症も速やかに治療を受けないとめまいや慢性関節痛、半身不随等の症状が一生続く事になります。また、

潜水直後は症状の有無に関係無く、必ず体内に気泡ができていたと言う事も常に意識して下さい。気泡が障害を起こすか起こさないかの差は紙一重です。更に、潜水後の飲酒は2脱水状態を引き起こします。特に水分補給のつもりでビールを飲む方が多いのですが、アルコールが体内に入ると、アルコールを排出させる為に水分も一緒に過剰に排出されて脱水状態(血液ドロドロ)を引き起こします。ダイビング前後のビールやお酒類は非常に危険です。

常識とは逆に、気体の大きさは水深が浅くなる程大きく膨張します。つまり、水面に近い程、体内気泡の膨張による危険性が高まります。水深30メートルから20メートルへ移動する場合と、水深10メートルから水面へ浮上する場合とでは、同じ10メートルの水深変化なのですが、空気の大きさには6倍の差があります。水面に近い程、肺や副鼻腔等の体内空間にある空気容積が大きく変化して身体に影響を及ぼします。水面近くでの急激な潜降や浮上は非常に危険です。例えば、水中で高圧空気を呼吸している時に、パニックや器材操作ミス等により安定した呼吸が出来ないまま急浮上してしまうと、水面近くで肺内の空気が大きく膨張して肺をパンクさせます。肺が破れると破れた肺血管に空気が吸い込まれて、特に脳への血管を塞いで意識を失って溺れます。これを「動脈ガス塞栓症(AGE) 旧称 エアエンボリズム」と呼びます。考え方として、1分間で水深10メートル付近から水面へ浮上する圧力差は、地上から上空1万8千メートル以上へ急上昇する気圧変化に相当します。この上昇能力はジェット戦闘機でも無理なのでミサイルやロケットが必要です。高々度へ急上昇するジェット戦闘機パイロットは、与圧服を着て体への圧力を上げて置かないと脳への血流が不足して失神します。ダイバーは全身で水圧を受けているので失神はしませんが、ジェット戦闘機以上の圧変化を体を受けています。陸上と違い、海水の密度は空気の800倍ありますから、少しの動きでも大きな水の抵抗を受けて体力を消耗します。生活習慣病対策としてプールでのエクササイズが有効なのはこの水の抵抗と浮力のお陰ですが、ダイバーにとっては大きな負担です。また、水深10メートルを越えて呼吸する空気は軽自動車のタイヤ圧に匹敵します。空気密度が高いと粘張度が上がって吸い難い吐き難い状態になり、少しでも動き過ぎると酸素不足や炭酸ガス過剰となります。更に、些細な衝撃でも体内の空洞部分(肺や副鼻腔、中耳、胃腸)にある高圧空気によって強烈な衝撃力が加わり損傷させます。しかし、実際に呼吸しているダイバーがこの「硬い空気」を認識する事はできないので、危機意識が持てません。

最近の研究では、潜水病にはなりそうもない軽度の潜水後に減圧治療を必要とした事例が数多く報告されています。これは肺に高圧空気が入っている為に、タバコや汚染空気、感染症等によって弱くなった肺や気管の一部分が破れて動脈ガス塞栓と同じ状況が発生していると考えられています。つまり、浅く短い潜水であっても必ず潜水障害の危険性がある事を忘れないで下さい。

高圧空気を呼吸すると、酒に酔ったのと同じように適切な判断が出来なくなります。これを「窒素酔い」と言います。極端な場合、水中で呼吸装置を口から外して笑い続けて溺れます。厄介なのは窒素酔いになっていると自覚できない点です。潜水慣れしていない方の単独潜水は危険です。水深30メートルを越えると窒素酔いになるとされていますが、酒の強さと同じで窒素圧に敏感な方もいますので、初心者では限界水深を18メートル以内にする必要があります(プロでも空気潜水の限界は40メートル)。珊瑚のサンゴ虫と同じように、骨にも骨の細胞があって常に新しい骨へと置き換えています。潜水を行うと骨細胞に栄養を送っている血管が塞がったり骨細胞自体への圧迫等によって骨の再生が止まってしまい、気付かない内に骨がボロボロになります。これを「減圧症性骨壊死」と言い、痛み等の症状が出た時点では殆ど手遅れで、人工関節埋め込み手術等が必要になります。

これら以外の潜水障害についてもダイビングスクールや潜水士講習で教わっている筈なのですが、忘れてしまったか、インストラクター自身が潜水障害を全く理解していないのが現状です。

II.適切な訓練

潜水士テキストは1998年に大幅に改定されましたが、基本となる高圧則は1972年9月30日以来殆ど改

定されていません。潜水士免許は筆記試験だけで交付されますから、泳げなくて水が怖い方でも一生資格を失う事はありません。また、この法律での潜水事業は海底油田や海中トンネル等の大規模工事で、浮上する前に体内の余分な窒素を抜く為の減圧停止を行うヘルメット式減圧潜水を前提としています。ですから、水面からホースを使ってダイバーに空気を送る方法と、減圧停止を無視した場合の緊急再圧の教育(送気員、再圧員)だけを義務付けてはいますが、スキューバ関係の教育規定が一切ありません。更に、保護されるべきダイバーは被雇用者に限られているので、「個人事業主」である孫受け作業ダイバーやガイドダイバーそして漁師はこの法律の適用を全く受けません。沖縄県の水上安全条例ではレジャーダイビング従事者に潜水士免許取得を義務付けていますが、認可制では無く届出制ですので徹底されてはいません。ダイビングショップのインストラクターは潜水士免許が無くても業務に従事しますし、所属営利団体に年会費と保険料さえ払い続ければ、一切の追加教育や更新訓練を受けなくてもインストラクター資格を失う事もあります。この様に潜水業務は法律的にも行政的にも曖昧なまま放置されているので、世間一般に限らず潜水従事者自身も業務に伴う危険性と教育訓練の必要性を再認識する機会がありません。そこで、潜水業務従事者として継続的な教育訓練を受けるべき項目を幾つか挙げておきます。

限界潜水深度及び時間の算出：高圧則では水深 10 ㍎以上へ潜水する場合、潜水障害を防止する必要上、潜水する前に潜れる限界水深と時間を計算するように義務付けています(第 27 条)。事業主がこの限界時間を超えた業務命令を行うと労働安全衛生法違反です。しかし、この法律での計算表を使う人、更には使える人は皆無と言っても過言ではありません。従来から、スキューバダイビングでは「タンク一本分の空気量」であれば減圧症にはならないとの認識が定着しています。しかし、この考え方には時代変化による錯覚があります。以前のタンクへの空気充填圧は 150 気圧でしたが、現在は 200 気圧と増えています。当然潜水可能時間も延長しますから潜水障害の危険性も高まるのですが、こう言った意識改革が出来ていません。

潜水現場に緊急再圧チャンバーと厳密な減圧停止の設備と人材が完備されていない限り、減圧潜水は極めて危険です。例えば、水深 34 ㍎に 1 時間潜水すると水深 9 ㍎で 10 分停止、6 ㍎で 27 分停止、3 ㍎で 34 分停止の合計 1 時間 11 分掛けて水面へ上がってこないで減圧症になります。漠然と 6 ㍎や 3 ㍎付近で適当に停止していれば減圧できる訳ではありません。所定的水深から 10 ㍎浅過ぎても深過ぎても正確な減圧は出来ません。浅過ぎれば窒素が抜け切れませんし深過ぎれば窒素が貯まって増えてしまいます。この厳密な減圧手順の認識が日本には完全に欠落していて、「取り敢えず減圧停止しておけば大丈夫」と思い込まされています。40 ㍎を越える大深度潜水の場合、母船上の加圧室で呼吸抵抗、酸素中毒、窒素酔いを防止する為のヘリウムを使った特殊ガスと圧力に慣れさせた後に目的の水深へと加圧室ごと潜降し、潜水業務中は加圧室を居住区域とする飽和潜水を繰返し、水中業務が終了したら加圧室内で加圧されたまま母船へと引き上げた後に厳密な減圧手順を行います。ここまでやっても大深度での安全は保障できません。アメリカ海軍の特殊部隊 (Navy Seals) ダイバーでさえ基本的に減圧潜水も反復潜水 (48 時間以内に 2 回以上潜ること) も禁止されています。スペースシャトルから宇宙服へ着替えて船外へ出る場合には、1 気圧の居住区からエアロックへと移り 0.3 気圧まで(水深換算すると水深 7 ㍎から水面への浮上に相当)12 時間掛けて減圧しないと宇宙空間へは出られません。宇宙も水中も圧力変化と装備以外には呼吸する空気が無い、と言う意味で同じような安全管理が必要な事を忘れないで下さい。

高圧則での水深 12 ㍎迄の無減圧潜水限界時間(減圧停止をせずに浮上できる限界時間)は 120 分です。これが 18 ㍎迄だと 55 分へと半減し、24 ㍎迄では 37 分しかありません。この値はヘルメット式潜水の様に一定の水深に留まる場合の限界なので、自由に水深を変えるスキューバはもっと長く潜れるとの勝手な解釈があります。理論的には逆で、浮いたり潜ったりの水圧変化が大きいと潜水障害の危険性が高まりますし、限界時間の計算自体が不可能になります。また、浮上速度は毎分 10 ㍎以下

4 と定められています(第 31 条)が、レジャーダイビング業界では毎分 18 ㍎と誤解されたままです。最近の

研究では水深 10 ㍎から水面までは毎分 6 ㍎以下が推奨されています。

最後に水中活動への順応性を維持する上で不可欠な継続的訓練です。二足歩行で陸上生活をする人間は、水中でも無意識に立ち姿勢を取りますから、移動の際には体全体で水の抵抗を受けてしまいます。海中では海底に手足を付いて支える事はありません。つまり、日常使わない筋肉を駆使して海底に対して水平方向に、フィンによりバランスを保たなければなりません。透明度が悪いまたは極端に透明度が良い場合、水底と水面の上下関係が判断できなくなってパニックを起こす危険性はベテランダイバーにもあります。タンクからの乾燥した空気を吸いますし、レギュレーターによる口だけからの呼吸となり、普段の鼻からの呼吸が出来ない違和感を伴います。更に、潜降すると保温スーツの生地が水圧で潰されて沈み気味となり、浮上すると逆に浮き気味になります。それぞれの水深での適正な中性浮力を保つ為には、精神的に安定した意識的な呼吸によって「肺の浮き袋機能」を活用しなければなりません。この様に、潜水業務では陸上とは全く違う状態でのバランス感覚を維持しておく必要があります。陸上の自転車でのバランス感覚等とは異なり、水中のバランス感覚はかなり継続的に訓練しておかなければ維持できません。また、安全索やホースで母船と結ばれているヘルメットダイバーと違い、スキューバダイバーは水面へ浮上した場合の潮流と風向のベクトルを、体感と視覚とコンパスによって浮上前に計算する訓練を積んでいないと、目標水面へ到達できずに漂流してしまいます。更に、人間は呼吸ができない状態になると 1 分程度で意識を失い溺れます。潜水訓練は厳重な安全管理と体系的プログラムに基づいて、教育能力と救難実績が豊富な指導者により実施されなければ効果は上らず評価も出来ませんし危険です。

器材管理：潜水器材は各メーカーから様々な型式のものが販売され、毎年モデルチェンジが繰り返されます。ここ 10 数年の製品はファッション性に重点が置かれ、信頼性に欠ける器材が殆どです。特に、水面での浮力確保と水中での浮力調節を行う BC(Buoyancy Compensator 浮力調整具)は、タンクからの給気と排気のボタンの位置が機種によりかなり異なり、使い慣れないと押し間違いを起こし、先に述べた急浮上や潜水墜落を招く危険性があります。また、タンクからの呼吸空気量を調整するレギュレーターも管理を怠ると吸い難いとか吐き難い等の呼吸困難、更には浸水する等の事態を招きます。高圧則第 34 条 2 項には潜水器材についての点検修理の規定もありますが、BC やレギュレーターに関する記述は一切有りません。ここでは法律上の勘違いが多い項目を幾つか挙げておきます。高圧則第 37 条 2 項でのボンベによる潜水時の携行物として時計、水深計、刃物そして救命胴衣が義務付けられています。つまり BC ではなくてタンクハーネスだけの潜水は違法です。

高圧則第 42 条 1 項では、水深 10 ㍎以上での業務には再圧室を設置または利用できるような措置を講じる必要があります。現実的には医療用酸素の準備及び外洋からの航空機搬送体制の整備ですが法律的な問題が解決されていません。

最後に「吹かし」についてお話します。そもそも「吹かし」は減圧停止が必要だったヘルメットダイバーが送気停止等により緊急浮上した際に、何かの理由で再圧室による緊急再圧が出来なくなったので、仕方なく 3 分以内に再度潜降して減圧停止手順を繰り返した事が始まりだと思われます。現場設置型の再圧チャンバーによる緊急再圧であっても何らかの症状が発現した場合は、緊急再圧を中止して、医師による治療へと変更します。しかし、この緊急再圧に関する理解が全く無いままに、ノウハウだけが漁師や作業ダイバーの世界へ間違っって伝わって「ベンズ」の治療方法として普及してしまったようです「吹かし」は治療方法ではなく、異常が全く無い場合に限った減圧停止の緊急避難方法です。医療機関での高圧酸素を使って、3.8 気圧 6 時間掛けても治療出来るとは限らないのに、長くて 1 時間程度の「吹かし」で治療できる筈がありません。長期的にみても「吹かし」は骨壊死や関節痛、めまい等の慢性減圧症を必ず悪化させます。

Ⅲ. 潜水適性

陸棲動物の人間にとって、空気の無い深く冷たい水中への漠然とした恐怖心を持つのは当然です。高所恐怖症と同じで、潜って遠い水面を実感しないと「深所恐怖症」なのかどうかは分かりません。この様に、潜水にも精神的・肉体的な適性があります。今まで述べてきました様に「ダイビングは誰でも参加できるレジャー」では無いのです。適性を欠いた状況でのダイビングは事故に直結します。医学的に潜水に適さない身体的疾患には以下の様な項目があります。

脳血管障害（一過性脳虚血発作、脳出血、くも膜下出血、脳梗塞

痙攣性疾患（てんかん、電解質異常による筋肉痙攣

心血管障害（心筋梗塞、狭心症、不整脈、先天性心奇形、自律神経障害

呼吸器疾患（喘息、自然気胸、肺嚢胞

耳（耳管機能異常、中耳炎、内耳炎、平衡感覚機能障害

代謝疾患（糖尿病、肝機能障害、腎機能障害

骨障害（慢性減圧症としての骨壊死、副鼻腔の炎症

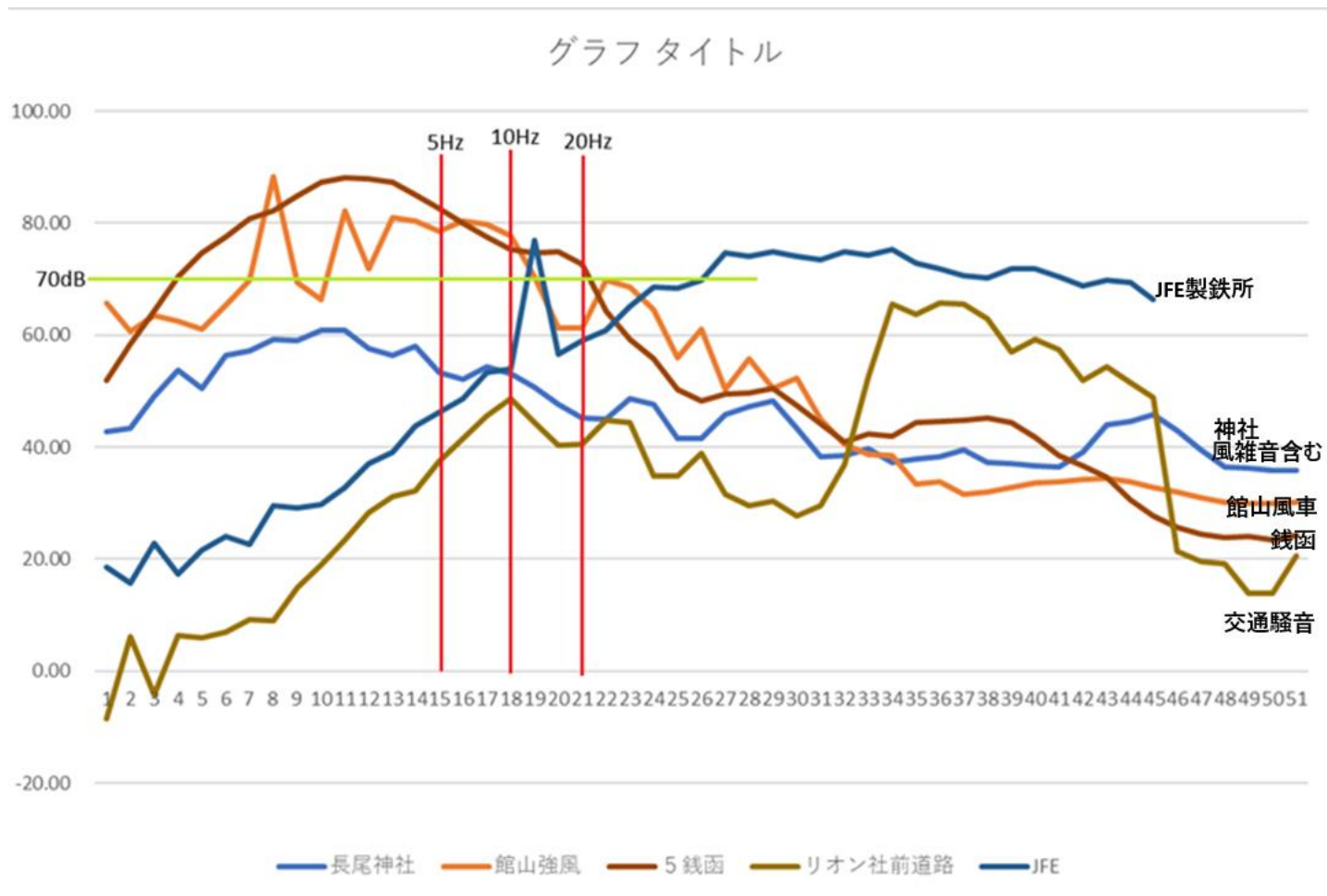
その他（妊娠による胎児への影響

陸上生活では何ら問題とならない疾患も潜水業務では絶対禁止となります。例えば、肺嚢胞は全く自覚症状がありませんが、潜水による圧力変化によって破裂する危険性があります。自然気胸を起こす肺嚢胞、喫煙や大気汚染、無症状の結核等の感染症による肺気腫・無気肺については、少なくとも就業前と半年毎の胸部レントゲン検査及び疑わしい場合の胸部 CT 検査が不可欠です。更に、生活習慣病を発症させる生活様式を続けている場合は脳卒中と心臓発作の危険性を確認する脳 MRI 検査と負荷心電図検査等も必要です。水中での発作は死に直結します。

高圧則では就業前と半年毎の「専門医」による検診を義務付けています(第 38 条)が、日本の医学教育では潜水業務に関する授業が有りません。再圧チャンバーのある病院であっても潜水障害を診断そして治療できる医師は極めて少数です。蛇足になりますが、日本では減圧症の診察で CT や MRI を撮って再圧チャンバー治療を行うと最高で 15 万円程度かかります。しかし、本人支払額は保険が使えますからその三割負担となり、業務の場合は全額労災保険なので個人負担はありません。治療費としてはかなり高額と思われるかもしれませんが、再圧治療には最低でも医師 1 名、心肺停止等の緊急事態に対応できるチャンバー内外の看護婦 2 名、チャンバーを操作する臨床工学技師 1 名の 4 名が、治療時間の 6 時間プラス診察と検査の時間で 8 時間以上掛かり切りになります。しかも患者到着は殆ど夜ですので徹夜での治療となります。更に、翌日は慢性患者の高気圧治療がありますから休めません。即ち、病院経営の面から考えると、減圧症治療は金額的にも時間的にもメリットは全く無いのでやらない方が得策です。ちなみに、海外で再圧チャンバーによる減圧症治療を受けようとする、最低でも \$4,000・(¥45 万円～¥60 万円)以上請求されますし、日本の健康保険も使えません。この様に、日本の潜水医療は制度的医療技術的に世界基準から大きく遅れているのです。

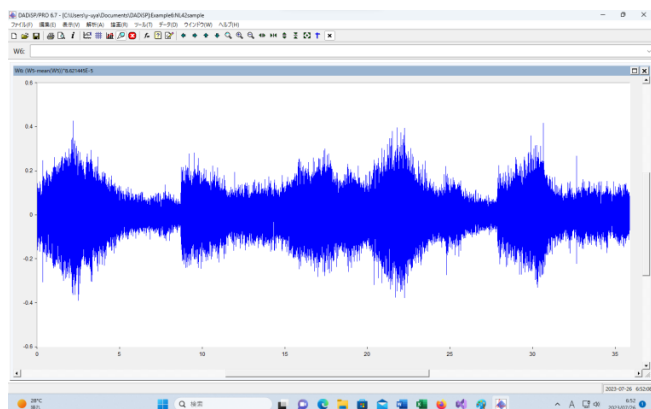
Infrasound としての風車音の性質を幾つか確認しましょう。

石狩湾の銭函、風車音、風をマイクに当てて測った音、JFE の製鉄工場の音、交通騒音を 0.25Hz からの 1/3 オクターブ解析で比較すれば、次のグラフになる。

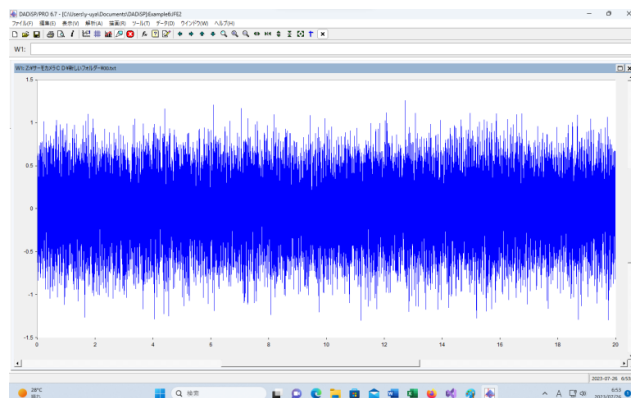


波形の比較

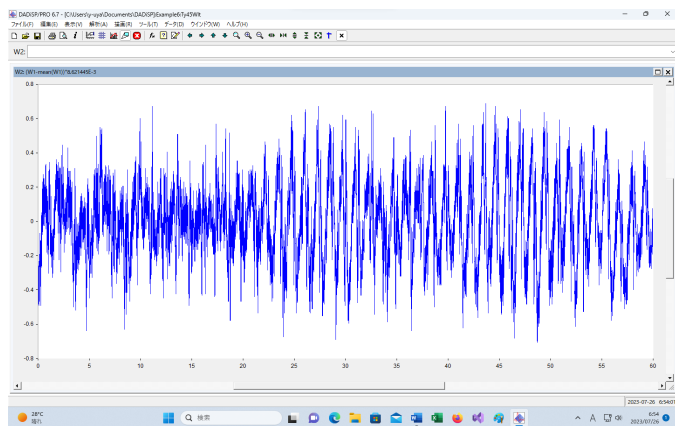
リオン社前の交通騒音



JFE の製鉄所内の音



館山の風車音



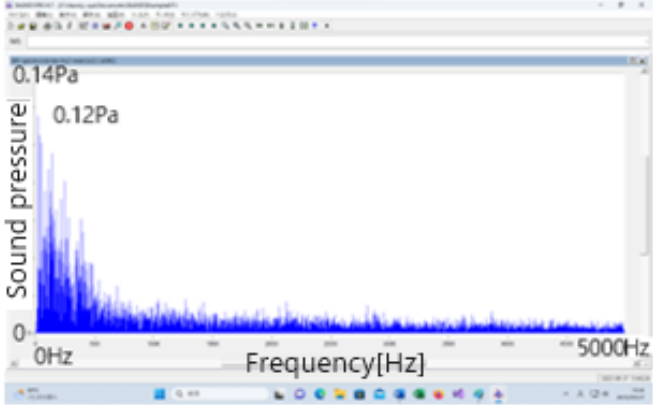
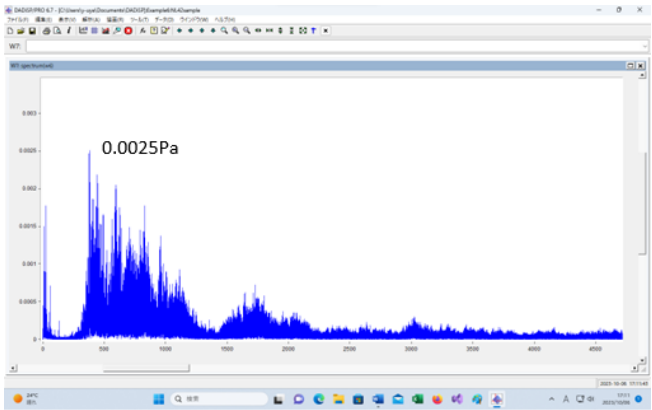
見てすぐわかるのは、風車音のグラフはスカスカです。他のグラフはぎっしり詰まっているという違いがあります。

原因は、風車音では高周波成分が微弱だからです。ほとんどが超低周波音なのです。高周波成分が強ければぎっしり詰まったグラフになります。

周波数スペクトル

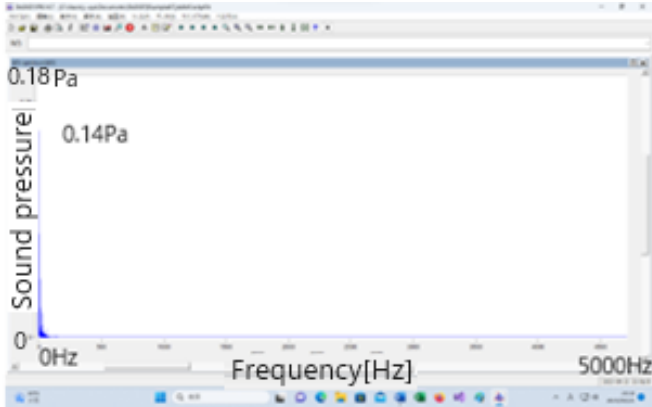
次のグラフは、音の成分を調べたものです。グラフが広がっていれば、低い周波数の成分から高い周波数の成分までいろいろ入っていることを意味しています。

交通騒音 (0～5 k Hz)：最大 0.0025[Pa] (379.4[Hz]) 製鉄所 (0～5 k Hz)：最大 0.12[Pa] (12Hz)



風車音 (0～5000Hz)；最大音圧 0.14[Pa] (0.8Hz)

表 2．エネルギーの分布



エネルギー分布	0～20 H z	20 H z 以上
風車音	93%	7%
工場音	12%	88%
交通音	1%	99%

風車音は、左端の細い線で表されています。

交通騒音や工場での音は、グラフが広がっていることから、いろいろな周波数成分が入っている広帯域の音ですが、風車音は左隅の 1 か所に集中しています。風車音の成分のほとんどが超低周波音と言われる 0～20 H z の範囲に集中しています。これは音のエネルギーの分布を表す表からも分ります。1 か所に集中していることが、大きな問題を引き起こします。

超低周波音の領域での特徴を比較すれば、次のようになります。

図 4. 交通騒音（リオン社前）0～24Hz、最大音圧 0.0015[Pa]（9.3Hz）

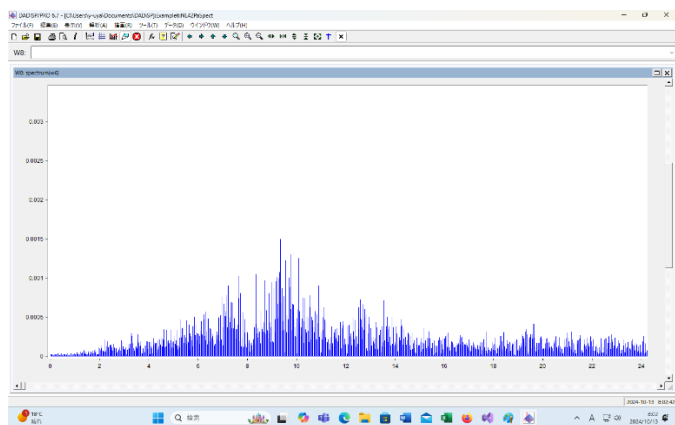


図 5. 工場騒音（製鉄所内の音）0～25Hz、最大音圧 0.1[Pa]（12.5Hz）

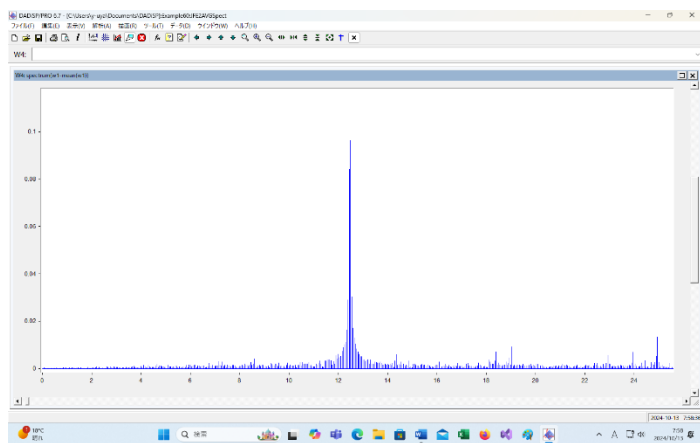
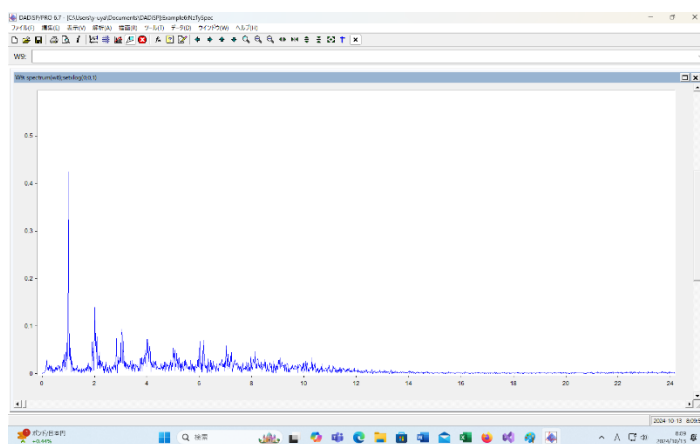


図 6. 風車音（強風）0～24Hz、最大音圧 0.42[Pa]（1Hz）



“Infrasound（平野琴）”を“以下本稿では、20 Hz 以下の周波数の大気圧変動を超低周波音として扱う。”
とえば問題は無い。

次は、

“音は高さ（周波数）、大きさ（音圧）といった、音源の状態を反映した情報を含む。”
であるが、

“音に含まれる周波数成分ごとの（音の高さごとの）、大きさ（音圧）や、指向性（どちらの向きに向かって大きな音が出るか）、距離による減衰の仕方、波面の形、といった、音源の状態や音源の運動を反映した情報を含む。これらの音について情報は、音源の形や、音源の運動の情報与えてくれる。運動の様子が分れば金属疲労で風車が倒壊する原因も分かる。”
とすべきです。

金属疲労に関連して、次のようなものがあります。

市民が風車の運動と金属疲労の関係に注目していることは**五十嵐委員**（山形県北部小型船漁業組合）の発言から分かります。風車の運動と音が発生する仕組み、音の指向性には深い関連があるのです。

風車の運動と金属疲労での倒壊について

山形県遊佐町沖における協議会意見とりまとめ

令和 5 年 3 月 2 9 日 山形県遊佐町沖における協議会

（３）洋上風力発電設備等の設置位置等についての留意点

②漁業との共存共栄の理念のもと、地域における漁業の状況等に鑑み、海岸線から１海里（１マイル）より陸側の海域には海底ケーブル及びその附属設備を除く洋上風力発電設備等（ブレード回転エリアを含む。）を設置し

ないこと。また、発電事業に支障を及ぼさない範囲で沖側からの設置を検討するとともに、陸寄りの発電設備の基礎等において生じる蛸集効果がサケ等の稚魚に影響を及ぼすことが懸念される場合には、関係漁業者と協議のうえ必要な対策を行うこと。（１海里は 1,852m）

（６）環境配慮事項について

①選定事業者は、環境影響評価法その他関係法令に基づき、発電事業に係る環境影響評価を適切に行うとともに、地域住民に対し丁寧に説明すること。

また、同法に基づく経済産業大臣の意見・勧告及び知事等の意見を踏まえ、必要な対策を講ずること。

②選定事業者は、洋上風力発電設備等の配置・規模・構造等の検討に当たり、騒音、鳥類、海生生物、景観その他地域住民の声を踏まえ必要と認められる項目を適宜設定するとともに、適切に調査・予測・評価を行い、想定され得る環境影響リスクの最小化に努めること。また、環境影響リスクへの対応に関して地元自治体から協議を受けた時は、選定事業者は協議に応じること。

③選定事業者は、超低周波音その他の発電事業の実施に伴う影響として地域住民から不安の声が示される場合には、その払拭に向け必要な措置を検討するとともに、地域住民に対して丁寧な説明・周知を行うこと。

④選定事業者は、環境影響評価における予測・評価には不確実性が伴うことから、工事中及び供用後においても、必要に応じて環境監視や事後調査（騒音、鳥類、海生生物等）を実施し、重大な環境影響が懸念された場合は、

追加的な環境保全措置を講ずること。また、環境影響評価の結果や環境監視、事後調査の状況等については、協議会構成員に適時報告すること。

筒井委員（吹浦地区まちづくり協議会）

１月より公募が始まり６ヶ月間の公募期間を経た後、審査評価がなされ今年の１２月には事業者が決定する運びと認識している。

ところで、沿岸地域に住む私たちにとって、１月１日の令和６年能登半島地震の発生と津波警報の発令は、大変な驚きであった。幸いにも東北地方には大きな被害はなかったものの、能登半島での活断層のずれに伴う大地の隆起や陥没の被害状況、その被害が海にも及んでいることを報道により知った。東日本大震災と原発事故はエネルギー政策や津波対策の大きな転換点となったが、今回の能登半島地震はさらに海底の活断層による地殻変動に対する防災対策の転換点になると感じる。

そこで、大変危惧することがある。現在、遊佐町沖洋上風力発電事業が予定されているわずか５km西側の先には、数多くの海底断層があり、断層運動によって盛り上がった海底地形が、酒田沖隆起帯。活断層地震が、遊佐・酒田沖で発生し、海底の隆起、陥没が波打つように生じた際、洋上風力発電施設の安全性を担保するだけの調査はなされているのか聞きたい。また、隆起、陥没が生じ、津波が発生した際の３０基に及ぶ洋上風力発電施設の安全基準はクリアされた上での建設計画であるのか。他人ごとではなく、わずか２２０年前、象潟から遊佐にかけ、激しく隆起、陥没している。吹浦地区は河口に位置し、漁港を有し、遊佐町の中でも最も津波や海底隆起などの影響を受ける地区である。洋上風力発電による環境や景観への影響の回避もさることながら、防災面でも安全性を確保できる計画でなければならない。波打つ大地の惨状を目にして、素朴に心配になった。

資源エネルギー庁 西尾補佐（オブザーバー）

洋上風力発電設備の安全性について回答させていただく。事業者選定の際には、洋上風力発電設備の基本設計を出していただき、一定の技術的基準を満たしているかどうかを確認する。

それに加え、洋上風力発電設備を実際に設置する前、工事を実施する前にも改めて電気事業法や港湾法に基づき、我が国の厳しい自然条件を踏まえた上で、全国一律の基準というより設置場所それぞれの実際の海底地盤を見て、固い地盤のところにしっかり風車を差し込めるのか、風がどれくらい吹くのか、波浪がどうなるのか、地震荷重がどれくらいになるのかといったところを確認し、安全であることが求められる。

こういった基準では、発電設備を設置する地域において５００年に一度発生する最大規模の地震や、５０年に一度発生する最大規模の台風に対しても構造上安全であるということを求めている。安全に関する技術基準については、諸外国と比べてすごく厳しいという指摘を受けるが、日本の厳しい自然条件を踏まえしっかり中長期にわたって風車が安全に運転できることが重要だと考えているので、こういった厳しい基準を踏まえながら、洋上風力発電設備の安全性を確保していきたい。

五十嵐委員（山形県北部小型船漁業組合）

先ほど経済産業省から安全に対してはそれなりの基準でやっているという説明があったが、調べたところ過去８年間で３８件の事故が起きており、年間にすれば４～５件、何らかの事故が起きているようだ。内容としてはブレードの破損等が２２件、火災が７件、ナセルの落下等が５件、タワーの倒壊等が４件。我々はこの下で操業しなければならない立場の人間であり、非常に危惧している。

今までは台風などの強風や雷によるものがほとんどだったと思う。ただ、2023 年 3 月 17 日に青森県の六ヶ所村で発生したタワーの倒壊は、風速が 8～10m 前後であり、そうしたレベルでも倒壊するということを考えると、我々はそこで商売するということは考えられない。命を懸けてまで、そこまでやる価値があるのかと思う。溶接面の金属疲労が原因とのことであったが、こういう状態でも事故が発生するととなると、本当に我々はそこで漁業を営んでいけるのか、逆に言えば安全を誰が担保してくれるのか、その辺も考えていただきたい。1 年前にこういう事故が発生しているわけで、これに関しての議論がこの会議で何もなされていないということもどうなのか、提言しておきたい。

資源エネルギー庁 西尾補佐（オブザーバー）

そうした不安を与えてしまうような事故があったということは大変申し訳なく思っている。
先ほども説明した通り、洋上風力発電設備は電気事業法に基づき、計画、設計がしっかりなされているか、経済産業省において確認しており、適切な施工等、維持管理がなされているのかも確認しているところであるが、どうしても溶接の不具合や施行の不備が発生してしまっている事例があるので、監督省庁としても適切に対処していきたい。

ここで驚くのは、五十嵐委員の見識に対しての、西尾補佐の意見である。水平軸型の風車の運動を確認すれば、

金属疲労が起きることは明白です。振動の様子やその原因を考えれば水平軸型風車は金属疲労の実験装置だと言えます。

- 1) 高橋厚太,賀川和哉,長嶋久敏,川端浩和,田中元史,小垣哲也,濱田幸雄,風車ナセル・タワーの振動解析, 風力エネルギー利用シンポジウム Vol.40,p.251-254,2018
- 2) 菊島義弘,長島久敏,橋本晶太,鯨岡政斗,濱田幸雄,川端浩和,小垣哲也,風速が風車騒音指向性に及ぼす影響について,風力エネルギー利用シンポジウム Vol.38 p. 69-72, 2016
- 3) Dai-Heng CHEN,増田健一,尾崎伸吾,円筒の弾塑性 純曲げ崩壊に関する研究, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.74, No.740, p. 520-527, 2008

この風車の塔での振動は、水平軸型の風車の物理的は宿命であることは後ほど示します。
さらに、風速や風向について、気象業務支援センターから入手できる資料を見れば、風速や風向が急激に変化するので、これに完全に対応して、ナセルの向きや、ブレードの角度を変えることは不可能です。

次の表は、気象庁が計測したデータを、気象業務支援センターから入手したものです。

年	月	日	時	分	秒	前10秒間最大瞬間風速	前10秒間最小瞬間風速	前10秒間風程
						0.1m/s	0.1m/s	
2019	2	2	0	12	40	147	124	132
2019	2	2	0	12	50	146	107	131
2019	2	2	0	13	0	122	82	102
2019	2	2	0	13	10	105	65	83
2019	2	2	0	13	20	112	71	82

（前 10 秒間風程は、10 秒間に風が進む行程を意味します。132 は秒速 13.2m の風速です。）
風速も風向も不安定なのです。

ナセルやブレードは重いのです。 $f = m a$ ですから、急速に向きを変えるには、とても大きな力が必要です。これは、機械的には風速や風向の変化には完全に対応することが出来ないことを意味します。

しかし、それを無視すれば、ナセルが横風を受けて、風車が壊れます。ブレードの方向転換の機械も常に大きな力で動くことになり、無理が重なれば、壊れてしまいます。

維持管理の前に、根本的な欠陥商品を、並べる事こそが問題なのです。構造自体が、物理的に見て故障の原因そのものなのです。

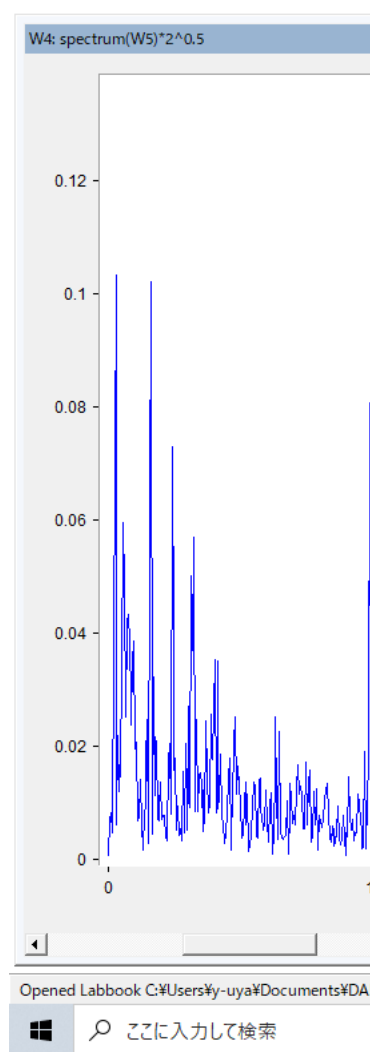
この事実を隠そうとしているのが、環境省の方針です。

二重防風スクリーンを付けろ、除外音処理をしろ。と言って超低周波音を隠せば、風車の振動と金属疲労の原因が隠せると思っているのかもしれませんが、そうはゆきません。

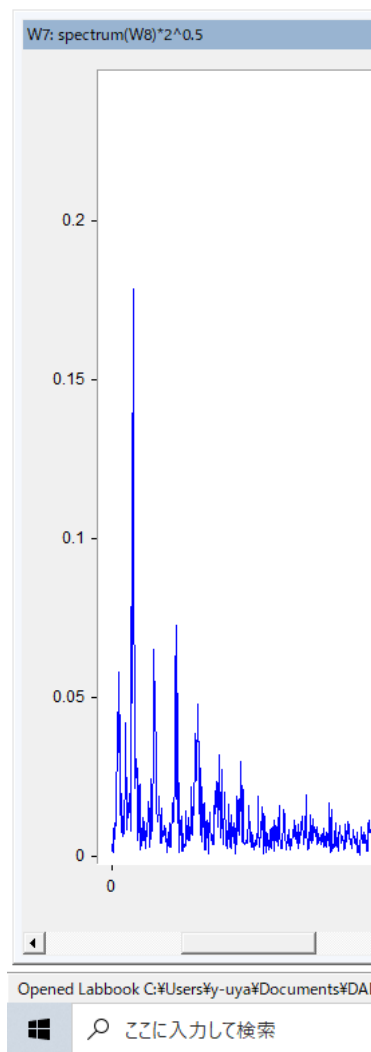
西尾補佐の発言が、問題点を意識的に隠蔽しているか、全くの勉強不足が原因なのかの判断はできませんが、どちらにしても、誠実さに欠ける不適當な発言なのです。

なお、風速の変化に対応して、音圧は次の様に変化します。

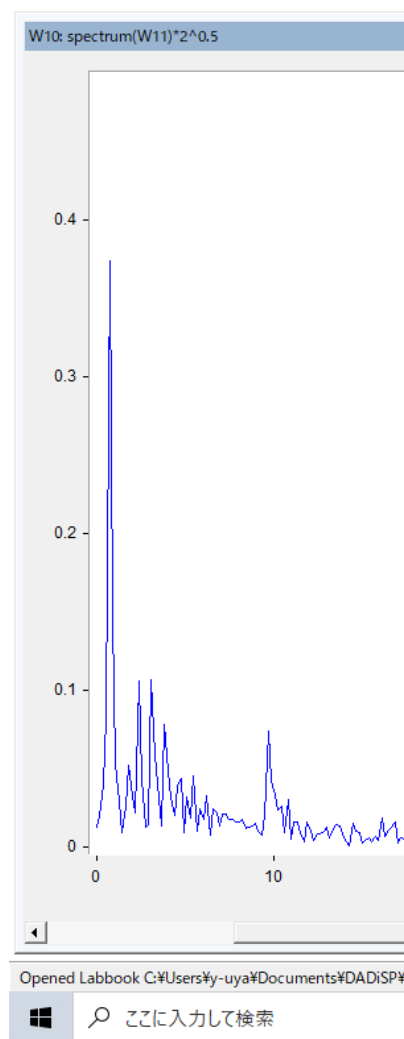
ブレードに掛かる揚力ベクトルの大きさは、風速の2乗に比例します。風速が2倍になれば、揚力ベクトルの大きさは4倍になります。塔の側面の振幅も大きくなるので、風車音の音圧も大きくなるのです。周波数は $0.7\text{Hz} \sim 0.9\text{Hz}$ の辺りで、かなり安定しているのですが、音圧はかなり変化します。



0.104Pa



0.175Pa



0.37Pa

周波数スペクトルでの、0.8Hz 成分の音圧は平均すると 0.175Pa、弱いときは 0.104Pa、強いときは 0.37Pa です。強いときは、平均の2倍程度の音圧になっています。

平均して、0.175Pa の音圧で、A 特性音圧レベル（20Hz～）が評価されていて、指針値での限界にかなり近い場合において、1 時間に 1 回くらい、平均値の 2 倍以上の音圧になる状態が起きるのです。

これは、1 時間ごとに目覚まし時計が鳴るような状態に置かれると言う事です。いくら目覚まし時計が鳴っても、起きない人もいますが、普通の人は目が覚めます。

そして、次の朝になり、子供は学校で居眠りできますが、大人は仕事です。車を運転する人もいます。事故でも起きたら、その責任は誰が取るのでしょうか？

天罰

人間に多くの恵みを与えてくれる大自然も、濡れ衣を着せられれば怒ります。そして、天罰が下ります。

風車からの超低周波音を“風雑音”と言ってはなりません。

この原因は、マイクに風が当たる事ではないのです。もし、マイクに風が当たる事が原因ならば、風車が無い場所でも、同じようは周波数スペクトルが現れなくてはなりません。

“風雑音”とは、考えることを止めました。研究者の資格はありませんと自ら宣言していることになるのです。

これを、風車からの超低周波音だと考えれば、この音は金属疲労による風車の倒壊の予測に役立つのです。

金属疲労は毎日の繰り返しですが、近年は台風が大型化しています。水平軸型の風車の最上部にあるナセルは、トラックのような形状です。横風を受けると、大きな被害が出ます。

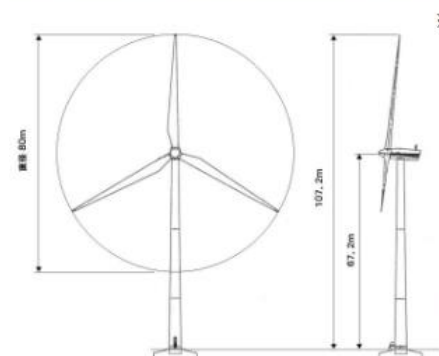
被害を避けるためには、風に対して正面を向けて、風の影響を小さくするのです。これが出来なくなると、次のような事故が起こります。

台風は今後も大型化します。この事故はこれからの起こるのです。

的山大島風力発電所：台風9号・10号によるブレード折損事故に関する報告（第4報）

風力発電所の概要

事業者名	株式会社の山大島(あづちおしま)風力発電所
出資比率	ミツウロコグリーンエネルギー:75% 平戸市:25%
発電所名	的山大島風力発電所
所在地	長崎県平戸市大島村前平
定格出力	32,000kW (2,000kW×16基)
運転開始	2007年3月
風車メーカー	Vestas Wind Systems A/S
機種	V80-2.0 定格出力:2,000kW
風車クラス	IECクラス:1A 設計風速50m/s(10min.ave)
ローター直径:80m ナセル本体:地上より67.2m	
カットイン:4m/s 定格風速:15m/s カットアウト:25m/s	



ブレード長さ:39m
重量:6,500kg / 1枚

※Vestas仕様書による

的山大島風力発電所 位置地図



事故の概要

台風9号時

2020年9月2日夕方から9月3日早朝にかけ、台風9号が的山大島の西側を通過した。このとき、発電所の風車全16機のうち8号風車、13号風車、16号風車の3機のブレードが破損した。

風車は台風通過前に風速25m/sのカットアウト風速を超えたため、保安停止中の7号風車を除き、全機自動でPause状態に移行していた。

Pause状態：風車は発電停止し、ブレードピッチはフェザリング状態で、ヨーは自動追従となります



8号風車:ブレード3枚破損



13号風車:ブレード1枚破損

台風10号時

台風9号通過から中2日、2020年9月6日夕方から9月7日早朝にかけ、台風10号が的山大島の西側を通過した。このとき、7号風車のブレードが破損した。

台風9号通過時に発生した故障により、事故機である4機については、ヨーイングに異常が生じており、風向の変化に追従できない状態となっていた。



16号風車:ブレード2枚破損



7号風車:ブレード1枚破損

ヨーイングとは、ナセルの向きを風の方向に向けることです。これが故障すれば、当然事故は起こります。

しかし、故障しなくても、事故が起こる可能性はあるのです。

風が、大きさと方向を激しく変化させることは、気象庁のデータから明らかです。

次の表は、気象庁が計測したデータを、気象業務支援センターから入手したものです。

年	月	日	時	分	秒	前10秒間最大瞬間風速	前10秒間最小瞬間風速	前10秒間風程
						0.1m/s	0.1m/s	
2019	2	2	0	12	40	147	124	132
2019	2	2	0	12	50	146	107	131
2019	2	2	0	13	0	122	82	102
2019	2	2	0	13	10	105	65	83
2019	2	2	0	13	20	112	71	82

(前10秒間風程は、10秒間に風が進む行程を意味します。132は秒速13.2mの風速です。)

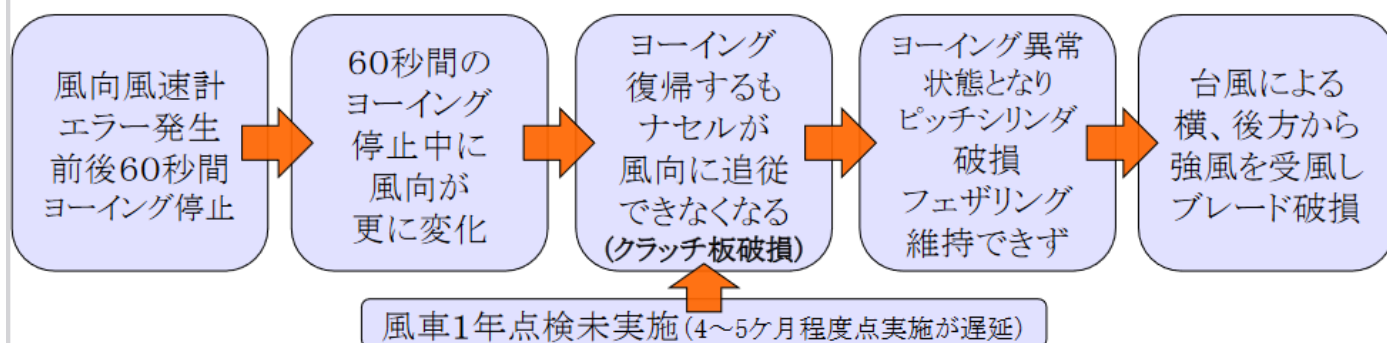
風速も風向も不安定なのです。

風の急激な変化についてゆくには、風車の向きを高速で変化させなくてはなりません。発電機の部分はとても重いので、激しく向きを変えればそれだけで壊れます。

構造から考えて、水平軸型の風車は、根本的な欠陥品なのです。

事故原因の推定（8号機、13号機）

【変更後】



8号機、13号機の事故原因について

この2機について、ヨーイング機能に異常を生じさせた原因として、計測範囲を超えた風速による、風向風速計のエラー発生が挙げられる。

風向風速計のエラーにより、風向とナセル方向の差異が拡大し、その状態で瞬間的に強い力が加わったことでクラッチ板が破損したものと推測する。クラッチ板については、前年度の1年点検実施から1年以上点検が行われておらず、メーカーが指定する1年毎の定期点検が適切に実施されていない状態であった。

ヨーイングに異常を生じさせた原因は、計測範囲を超えた風速によるエラーの発生、点検が適切に行われていないために生じたクラッチ板の破損であったと推測する。

世の中には、音も静かで、風に合わせて向きを変える必要のない風車もあります。パリのエッフェル塔に登ってみてください。

金属疲労

風車は壊れます。風車の事故の記事ですが、

金属疲労についても考慮する必要があります。飛行機の事故では金属疲労の話をよく聞きます。風車でも起こります。

金属疲労で1メートルの亀裂 京都・伊根町の風力発電所事故で専門家会議

広告

エンジニア諸君

スキル偏差値 70 へ

挑戦せよ

<GitHub> でスキル偏差値を見る

サクッと50秒でエンジニアスキル偏差値がわかる！

Findy

もっと見る

今年3月、太鼓山風力発電所（伊根町）で、風力発電機の鉄製タワーが折れ風車部分が落下した事故をめぐり、事故原因について検証している府の専門家会議が4日、京都市内で開かれ、金属疲労によって長さ約1メートルの亀裂ができ、それが広がったことで破断につながった、とする検証結果をまとめた。

同会議によると、外観調査や金属組織の分析から、3枚の羽根（長さ25メートル）と発電機など計45トンが溶接された鉄製タ

ワー（高さ50メートル）の上端部付近で、金属疲労による亀裂ができていたことを確認した。

ナセル落下を写真1-1にタワーの破断状況を写真1-2に示す。
また、タワートップ及びナセルの断面図を図1-3に示す。



写真1-1 ナセル落下

原因は、特別に大きな力が働いたというわけではなくて、金属疲労とことです。

金属疲労は、比較的小さい応力でも繰返し受けることで、材料に小さな割れが発生し、それが少しずつ進行して、最終的には破壊にいたる現象です。

金属疲労がなぜ問題になるのか？

金属が破壊するのにはいくつかのパターンがあります。

最も単純なケースとして引張試験のように応力をかけ続け破壊するものです。この場合、破壊の前に変形が起こるため、確認は容易です。

しかし、金属疲労の場合、大きな変形は起きずに小さな割れが起こるだけです。そのため、疲労の発生確認と破壊までの予想時間が困難です。

金属材料は自動車や航空機、建築物などに使用されています。これらはほとんど常に応力がかかる状態であるため、金属疲労が起こります。実際の金属材料の不具合や事故の多くはこの金属疲労が原因です。

さて、

1) 高橋厚太,賀川和哉,長嶋久畝,川端浩和,田中元史,小垣哲也,濱田幸雄,風車ナセル・タワーの振動解析, 風力エネルギー利用シンポジウム Vol.40,p.251-254,2018

には、ナセルと塔の側面が大きく揺れることが書かれています。

塔が揺れれば、塔が曲がります。塔の振動の周波数は、1.6Hz です。(比較的小さな風車なので回転数が大きいのでしょう。) この周波数 1.6Hz は、ブレードの回転数から計算した風車音の超低周波音のうちで、最も音圧が高くなる周波数と一致しています。

従って、風車からの超低周波音の周波数を正確に測ることは、風車に起きる金属疲労の状態を予測する方法の一つと言えるのです。

風車音の超低周波音の部分を解析しない、論文が、熊谷組の名前がついた形で公開されていることは、風車に関して、建設後の金属疲労に関心が無いのが熊谷組なのかと思われてしまいます。

2) 菊島義弘,長島久敏,橋本晶太,鯨岡政斗,濱田幸雄,川端浩和,小垣哲也,風速が風車騒音指向性に及ぼす影響について,風力エネルギー利用シンポジウム Vol.38 p. 69-72, 2016

には、風車音が指向性を持つことが書かれています。

計測結果では、1.6Hz の成分が目立ちます。

3) Dai-Heng CHEN,増田健一,尾崎伸吾,円筒の弾塑性 純曲げ崩壊に関する研究, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.74, No.740, p. 520-527, 2008

には、円筒が曲がる場合の曲面の変形について書かれています。この変形が大きな方向と風車音の持つ指向性とは一致しています。

5) 石田幸雄,風車の振動解析,Journal of JWEA Vol.34 No.4, 2010

を見れば、定常運転の時の、ブレードに掛かる揚力ベクトルの方向が、塔の振動方向であることが分ります。

もしも、金属疲労に関心があるならば、塔の振動を周波数が一致していて、しかも運動方向と指向性が一致している風車音を調べるべきだと考えます。

風雑音を風車からの超低周波音だと理解して、それが発生する仕組みを考えることが大切なのです。

次は、

“人が聴感として知覚できる音は 20 Hz から 20 kHz とされ、これより低い音は超低周波音と呼ばれる．「音」としての知覚が難しいため、生活の中で意識する機会は少ないものの、超低周波音の発生源は地球上至るところに存在する．“

の部分、

間違いではないが、風車の有る場所には、極めて高い音圧レベルの超低周波音が存在することの記述が無い。（複素関数の特異点のうちの、(m 位の) 極のように見えます。）

“人が聴感として知覚できる音は 20 Hz から 20 kHz とされ、これより低い音は超低周波音と呼ばれる．「音」としての知覚が難しいため、生活の中で意識する機会は少ないものの、超低周波音の発生源は地球上至るところに存在する．

しかし、風車の有る場所には、極めて高い音圧レベルの超低周波音が存在する。風車音の 20Hz 以上の成分は、他の環境騒音と大差は無いが、超低周波音に関しては桁違いの大きさがあり、圧迫感等の原因となる。

結果として、風車音の 20Hz 以上の部分が小さくても、不快感を持つ人が多くなる。

環境省が作ったグラフ

- また、風車音と他の騒音源からの同等レベルの騒音を比較した場合、不快に感じる人の割合は風車音の方が高い⁵。

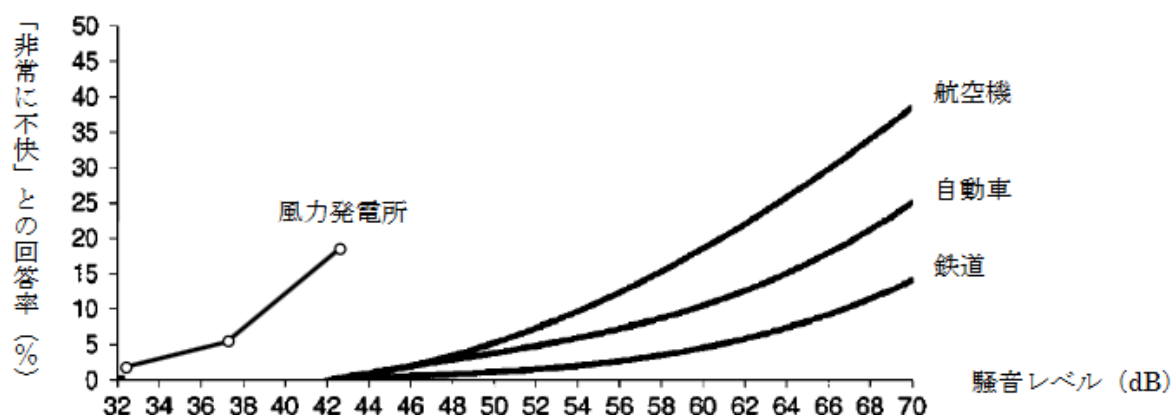


図8. 「非常に不快」との回答率と各種の騒音源からの騒音レベルの関係

(脚注3及び5の文献より環境省作成)

では、騒音レベルが 42 d B の時に、交通騒音では不快感を訴える人はいないが、風車音では 20%程度の人“非常に不快”と感じる。“

音の強さ

音場内の 1 点において、単位面積を単位時間に通過する音響エネルギーを音の強さ（I または J と書く）と言います。単位は、(W/m²)

$$J = (p * p) / (\rho c) \quad (W/m^2)$$

に注意して、音がマイクを通過するときの音の強さ(W/m2)を計算したものが次の表です。

周波数帯	0～20Hz	20～200Hz	200～24 k Hz	0～24 k Hz	単位
交通騒音	1.76E-07	8.08E-08	1.80E-05	1.80E-05	W/m ²
神社風	8.23E-06	3.91E-07	2.12E-07	8.83E-06	W/m ²
JFE工場	4.80E-05	4.01E-04	5.34E-04	9.84E-04	W/m ²
風車弱風	8.19E-04	2.40E-05	3.82E-07	8.43E-04	W/m ²
風車強風	1.49E-03	2.30E-05	6.94E-08	1.52E-03	W/m ²

風車からは、桁違いのエネルギーを持っている超低周波音が放出されるのです。

私の HP に計測データがあるので、自分で計算してみてください。

もちろん、エネルギーの違いだけでは、上のグラフにある様な“極めて快感”と感じる人の割合に大きな差は出ない。この原因は、風車音の波形の特殊性（周波数スペクトルの特殊性）にある。

これが、圧迫を生む原因であり、直接的な健康被害である頭痛の原因となっている。

減衰の仕方と音源の形

次は、

“発生源から離れるほど音は減衰するため、音響計測により得られる情報も減少するが、可聴音と比較すると超低周波音は減衰しにくい 2)。”

2.2 超低周波音の特性

音は空間的に拡散するため、音圧は音源からの距離にしたがって小さくなるが、それに加えて空気による吸収も減衰に影響する。

の部分だが、

減衰の仕方と音源の形の関係についての考察が足りない。

2) 菊島義弘,長島久敏,橋本晶太,鯨岡政斗,濱田幸雄,川端浩和,小垣哲也,風速が風車騒音指向性に及ぼす影響について,風力エネルギー利用シンポジウム Vol.38 p. 69-72, 2016
を確認する必要がある。

点音源ならば、上の論文にある様な指向性は生まれない。

物理の本で音源の形と距離減衰の形を確認することが必要です。

音源が平面ならば、音は減衰しない。

線音源では距離の 1 乗に反比例して減衰する。

点音源ならば、距離の 2 乗に反比例して減衰する。

石狩湾での風車音の計測結果を見れば、線音源と点音源の中間の減衰特性を示している。

洋上風力で、岸の近くに沢山並ぶ場合は、影響範囲と被害の大きさの予測計算にも大きく影響する。

計算が簡単だと言う理由で、ナセルの部分を点音源と考えて計算する場合が多いが、ナセルの部分は点音源になるような動きはしていない。

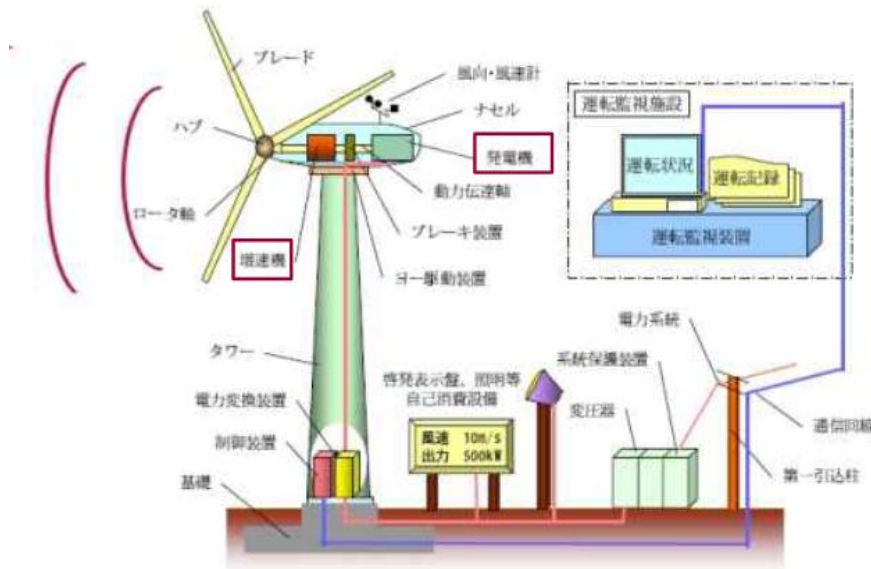
1) 高橋厚太,賀川和哉,長嶋久敏,川端浩和,田中元史,小垣哲也,濱田幸雄,風車ナセル・タワーの振動解析,

本来は、風車の塔の運動から、有限要素解析で減衰特性を計算すべきだと考える。(ただいま準備中です。)

- ・音源の形と予測式
- ・点音源、線音源、面音源

風車音の周囲への影響を評価するには、音の伝搬について調べる事と、予測値と影響の関係を確認する必要があります。音源の形が、点音源、線音源、面音源かによって伝搬の様子が変わります。点音源ならば音源からの距離の2乗に反比例して減衰します。線音源ならば音源からの距離に反比例して減衰します。平面波は減衰しません。

風力発電施設（風車）の構造と騒音

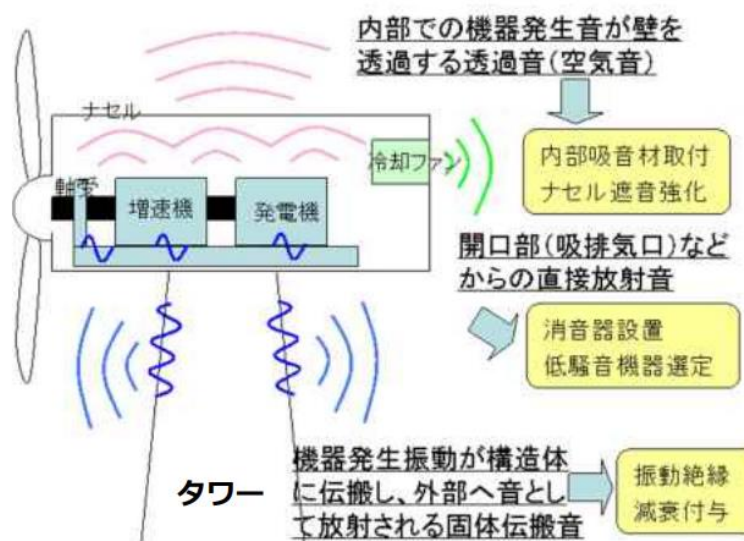


風車から発生する騒音はブレード（翼）が風を切ることによる空力音（支配的）と、増速機・発電機等に起因する機械音（換気扇等のナセル発生音と増速機等の振動伝搬に起因するタワーからの個体伝搬音、これは純音性の音で、わずらわしさにつながることもある）である。

8

機械音の発生メカニズム

- ・増速機歯車の噛合い等に起因する振動がナセルカバー、タワー等に伝搬、騒音を放射する。
- ・音の放射面積を勘案するとナセルよりもタワーの方が影響が大きい。



98

さらに、風車音は、指向性を持っていて、4方向に強い形で放出されます。

風車の塔は

1) 高橋厚太,賀川和哉,長嶋久敏,川端浩和,田中元史,小垣哲也,濱田幸雄,風車ナセル・タワーの振動解析, 風力エネルギー利用シンポジウム Vol.40,p.251-254,2018

にある様な運動をする。

塔の最上部の主な運動の方向は、ブレードに掛かる揚力ベクトルの方向である。更に、塔の側面の運動は、揚力ベクトルによって決まる方向と、それと直交する方向となる。

その結果、次の論文が示すように、風車からは強い指向性を持った音が出る。

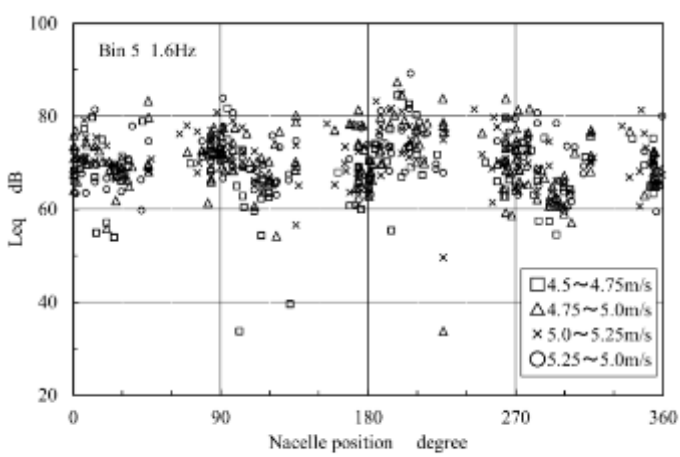


図 6 Bin 5 中心周波数 1.6Hz の指向性分布

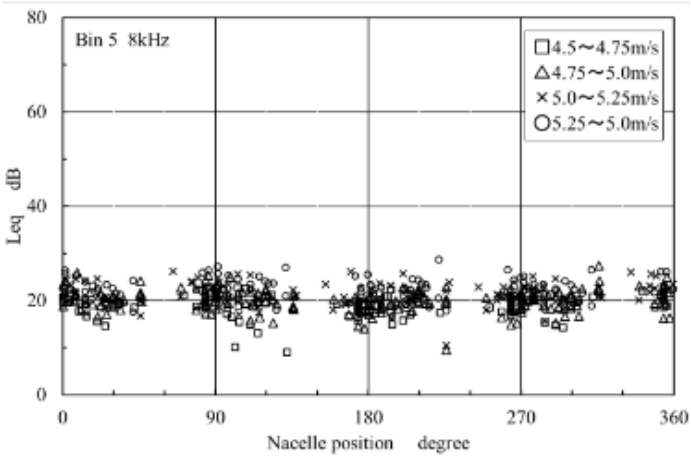
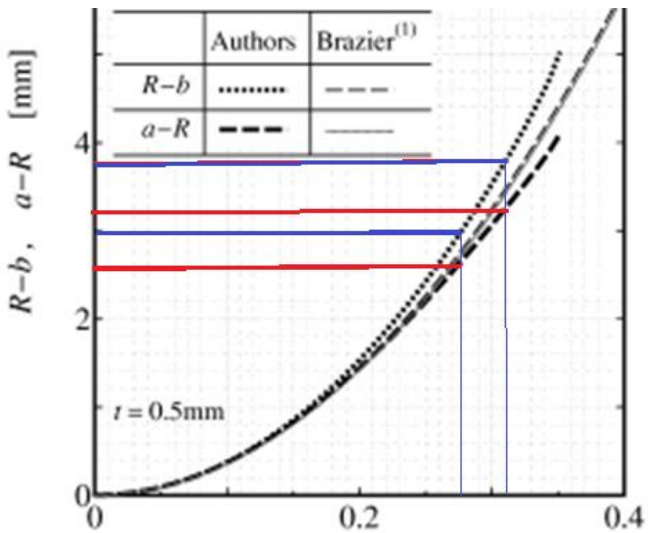
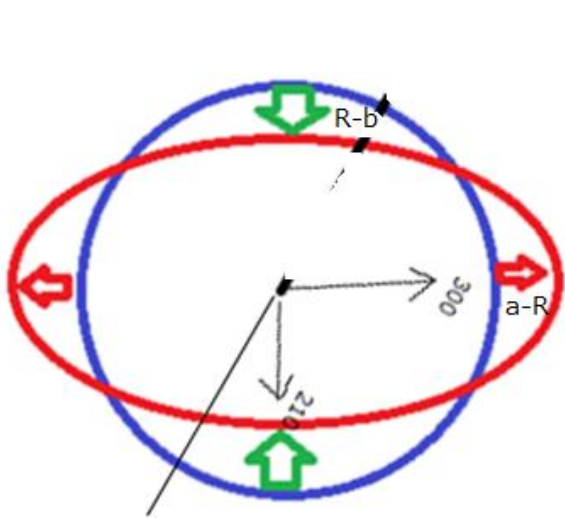


図 9 Bin 5 中心周波数 8kHz の指向性分布

2) 菊島義弘,長島久敏,橋本晶太,鯨岡政斗,濱田幸雄,川端浩和,小垣哲也,風速が風車騒音指向性に及ぼす影響について,風力エネルギー利用シンポジウム Vol.38 p. 69-72, 2016

揚力ベクトルが原因で、塔が変形して、塔の水平面での切り口が楕円形になることが次の論文に示されている。



上のグラフから、塔にかかる力が変動すれば、それと同じ周期的な変動が、 $R-b$ にも、 $a-R$ にも起きることが分かります。

傾き加減を見れば、 $R-b$ の方が傾きが大きいので、同じ力の変動に対して、 $R-b$ の方が大きく変化することです。これは、 a よりも b の方が大きく変化することを意味します。

3) Dai-Heng CHEN, 増田健一, 尾崎伸吾, 円筒の弾塑性 純曲げ崩壊に関する研究, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.74, No.740, p. 520-527, 2008

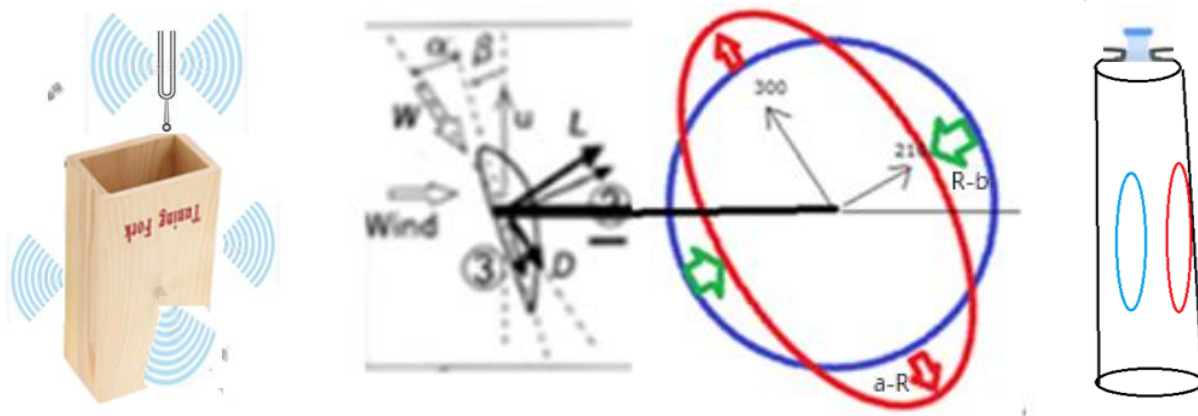
風車の側面が振動すれば、

6) M.S.Howe, 空力音響学, 共立出版、初版、2015

にある様に、その振動数に対応した音が周囲に拡散するのです。

音叉

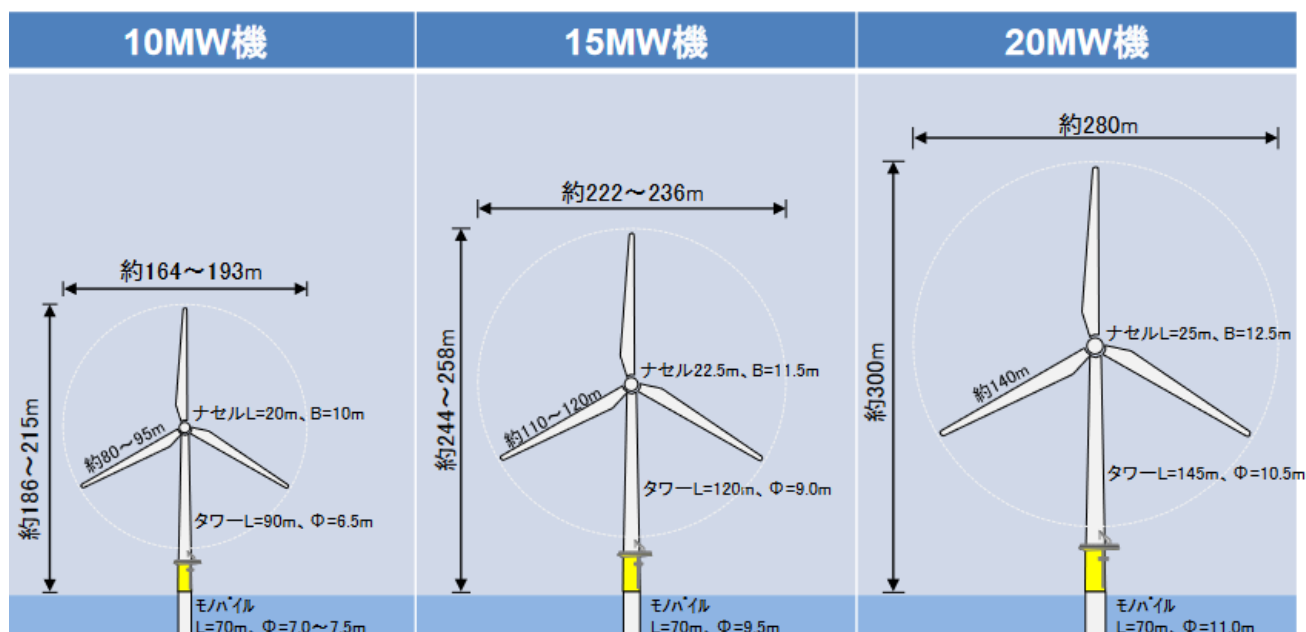
音叉セットと、共鳴箱に例えれば、



この他に、30 c m*30 c mのベニヤ板を用意しました。

左の音叉には、共鳴箱が無いので、ハンマーで叩いても、音は小さいく鳴っていました。

振動している音叉をベニヤ板にくっつけると音が大きくなりました。耳での感覚ですが、振動数は変化しないので、強制振動と考えられる。



塔の高さを 100m、直径を 10m とすると、円周は $2 * \pi * 10 = 60\text{m}$ 、これを 4 分割して、 $60/4 = 15\text{m}$ 1 つ当たりの振動面を $100\text{m} * 10\text{m}$ として考えます。
 $100\text{m} * 10\text{m}$ の響板 4 枚による音場が分れば良い。

風車の塔の中に縦にした音響箱が入っていて 4 方向に強い音がでる。というような状況です。

この向きは、風車が向いている方向によって決まります。風車の塔は大きいので、近くでは、面音源、やや遠方では線音源として扱う必要があります。

2) 菊島義弘,長島久敏,橋本晶太,鯨岡政斗,濱田幸雄,川端浩和,小垣哲也,風速が風車騒音指向性に及ぼす影響について,風力エネルギー利用シンポジウム Vol.38 p. 69-72, 2016

風車音の被害予測は、風車音の指向性や音源の形を考える必要があります。

音源の形を決めるには、音の発生する物理的な仕組みを解明する必要があります。

石狩湾での計測結果

アコー社の機器で計測したデータを 1/3 オクターブ解析にかけ、さらに、リオン社前の道路の音、JFE の製鉄所内の音、千葉県館山市の風車音（強風時）、マイクに風を当てて測った神社での音、石狩湾近くの数か所で、風車群の音から計算した平坦特性での音圧レベルを比べてみると次の様になります。

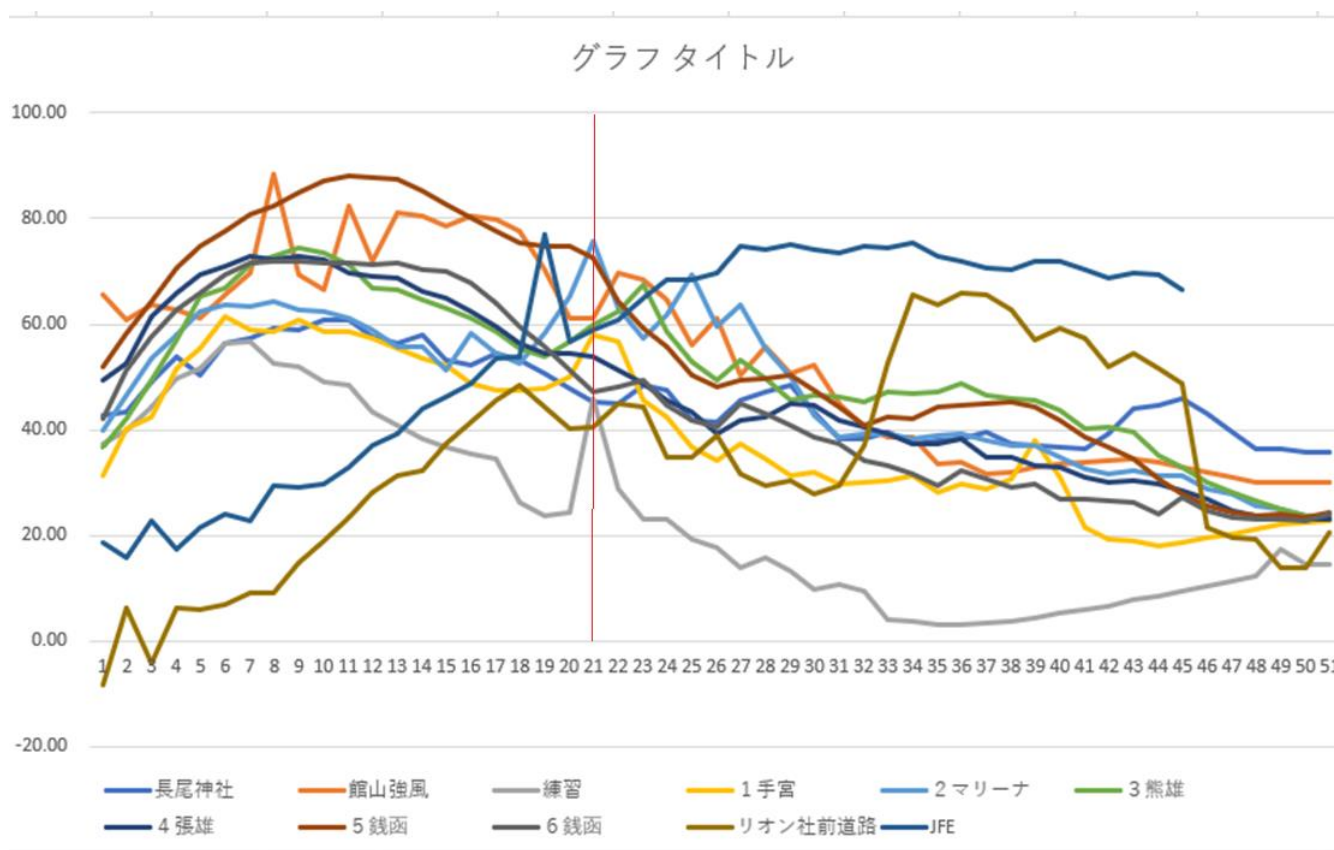
なお、番号と中心周波数（0.19Hz～20000Hz）の関係は次の表です。

番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
中心周波数	0.19	0.25	0.32	0.40	0.50	0.63	0.80	1.00	1.25	1.60	2.00	2.50	3.15	4.00	5.00	6.30	8.00

番号	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
中心周波数	10.00	12.50	16.00	20.00	25.00	31.50	40.00	50.00	63.00	80.00	100.00	125.00	160.00	200.00	250.00	315.00	400.00

番号	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51
中心周波数	500.00	630.00	800.00	1000.00	1250.00	1600.00	2000.00	2500.00	3150.00	4000.00	5000.00	6300.00	8000.00	10000.00	12500.00	16000.00	20000.00

20Hz は、21 番のところ。（1/3 オクターブ解析での平坦特性音圧レベルのグラフです。）



グラフの中央部分（8 番～33 番、1Hz～315Hz）の辺りでは、風車音は、全体として周波数が大きくなると音圧レベルが減少するが、交通騒音などは周波数が高くなると音圧レベルが上昇する。

8 番（1Hz）から 15 番（5Hz）辺りでの違いが大きい。これを風車からの超低周波音だと認めたくない人はこの部分を“風雑音”というのですが、風車音が発生する仕組みを考えて、詳細な周波数を確認すれば、離散的な特徴から風車の超低周波音だと分かるのです。

石狩湾の風車群の中心から 10 km、最も近い風車まで 5 km の銭函での数値を検討してみます。銭函での騒音レベル（A 特性音圧レベル）は、40.500459 dB です。

20Hz 以下では、風車音の音圧が高いのですが、20Hz 以上では、神社での音や JFE の工場音の音圧が高いのです。

騒音として、20Hz 以上の成分だけを考えれば、一般騒音の方が A 特性音圧レベル（A）が高いのです。

G 特性音圧レベル（G）（0.25～315Hz）を計算すれば、（距離にもよりますが）風車音の方が大きくなります。

結果として、一般騒音は G が小さく A が大きいので G-A は小さい数値になります。

風車音では、G が大きく A が小さいので、G-A は大きな値になります。

石狩湾では、海上で 14 基の風車が動いています。（さらに陸上に 22 基で合計 36 基）海の上に立つ、風車！その数 14 基！国内 2 例目の「大規模洋上風力発電所」です。

下の地図の①～⑥での計測結果です。（鈴木氏の「低周波音を測ってみた」小樽から銭函まで 2024/3/21）



	場所	開始時刻	測定時間	備考
①	手宮公園	16:17	10分	車通行1～2台、カラス
②	マリーナ	16:50	6分26秒	小型船のエンジンの音、監視船のアナウンス、海猫の鳴声
③	熊碓	17:09	10分	波の音、海猫の鳴声、交通量の多い道路近い
④	張碓	17:44	10分	車の通行3～4台
⑤	銭函	18:14	10分	強風、マイクに直接風が当たらないように車の向きを調整
⑥	銭函	18:25	10分	⑤と同じ場所でドアを閉めて測定

マリーナと熊碓を別とすれば、風車音の影響で、G-A が 20～30 程度になっていることが分ります。神社では、G-A=8.43 となっていて、風車音の影響が無いと判断できます。J F E の製鉄所では-0.46、リオン社前の道路では、-15.20 になっています。熊碓(くまうす)では、交通量が多い関係で 17.27 になっています。

G-A>15 の場合は、風車音の影響が大きい

G-A<10 の場合は、風車音の影響は小さい

と判断できます。

	G	A	G-A
手宮1、A=43.69, G=68.92	68.92	43.69	25.23
マリーナ2、A=48.93, G=85.08	85.08	48.93	36.15
熊確3、A=55.07, G=72.34	72.34	55.07	17.27
張確4、A=43.31, G=67.85	67.85	43.31	24.54
銭函5、A=52.62, G=87.06	87.06	52.62	34.44
銭函6、A=40.5, G=67.95	67.95	40.5	27.45
館山弱風、A=49.09, G=79.06	79.06	49.09	29.97
館山強風、A=47.74, G=82.92	82.92	47.74	35.18
神社、A=53.02, G=61.45	61.45	53.02	8.43
JFE製鉄所	81.42	81.88	-0.46
道路(リオン社前)	55.92	71.12	-15.20

・騒音の計測値と予測値の誤差

準備書などでは、風車を点音源として扱って、風車音の累積的な影響を予測します。しかし、風車音が指向性を持っている事実は、風車が点音源ではないことを示しています。

石狩湾にある 36 基の風車音の予測計算（点音源と仮定したもの）で、

$$L_n = L_W - 20 * \log R - 8 - \Delta L_{AIR}$$

を使った場合は、

風車36基	2000	3000	5000	7000	10000	15000	20000	25000
A	43.35	41.48	39.12	37.68	36.48	35.7	35.47	35.4
G	70	66.49	62.09	59.23	56.25	53	50.86	49.34

となるが、実測値よりはかなり小さい。

[線音源の場合（日本環境アメニティ株式会社）](#)の式（線音源と仮定したもの）、

$$L_n = L_W - 10 * \log R - 8 - \Delta L_{AIR}$$

を使うと大きすぎる数値となる。

風車音の指向性と振動面の大きさを考えて、
点音源と線音源の中間の式

$$L_n = L_W - 15 * \log R - 8 - \Delta L_{AIR}$$

を使うと実測値に近い数値、

風車36基	2000	3000	5000	7000	10000	15000	20000	25000
A	53.61	50.6	46.59	43.84	40.99	38.25	36.9	36.24
G	86.5	83.86	80.53	78.34	76.01	73.38	71.5	70.05

となる。

累積的な影響は大きく、石狩湾の近く、手稲山口（風車群の中心から 10 k m、一番近い風車から 5 k m）の団地では、ヘリコプターが近くに着陸するかのよう音が響いています。



風車からの距離は、銭函とほぼ同じです。

洋上風力発電では、イギリスは2001年には離岸距離の規制は無かったが、2003年には8～13 kmと規定した。2009年には22.2 km以上に変更した。
 ドイツ、オランダも22.2 km以上の離岸距離をとるようにしている。中国では離岸距離が10 km以上となっているが実際は20 km以上離して建設している。

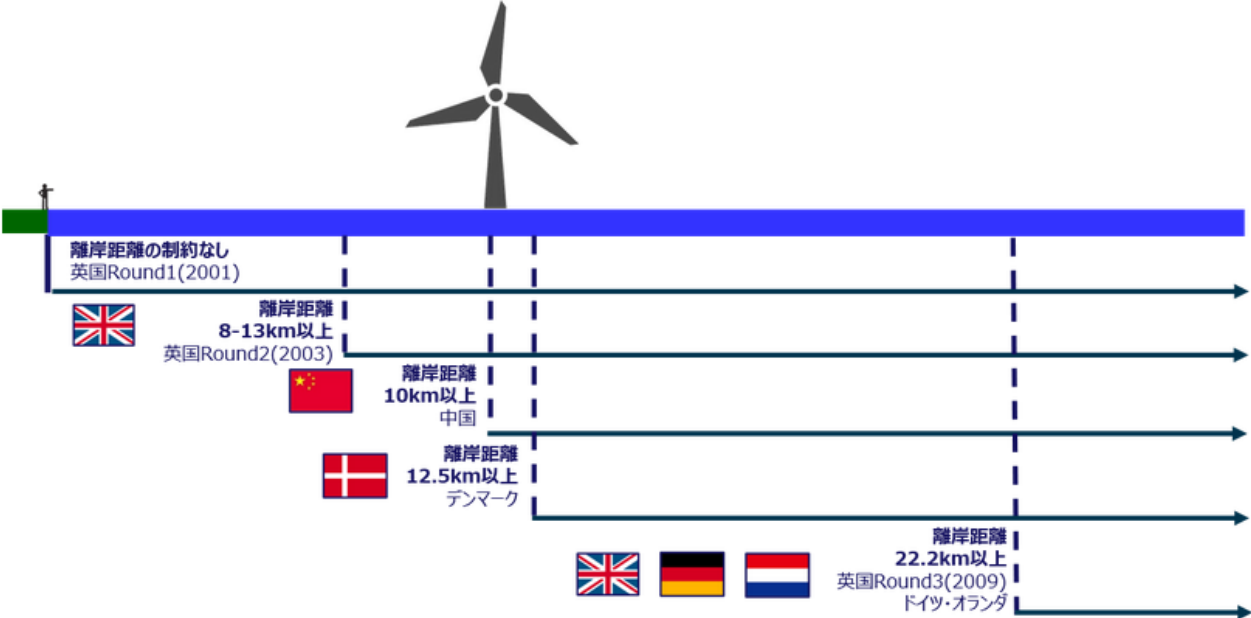


図 諸外国において洋上風力の立地を認める最低離岸距離

参考文献: BMT Cordah Limited, Everington, BSH, 国家能源局, Danish Energy Agency, Government of the Netherlands

超低周波音の部分詳しく調べれば、計測音の中での風車音の成分の大きさが推定できます。
 風車音が発生するときの仕組みを考えた予測式を作れば被害の程度が推測できます。
 遠方の音源の影響を把握する必要があります。

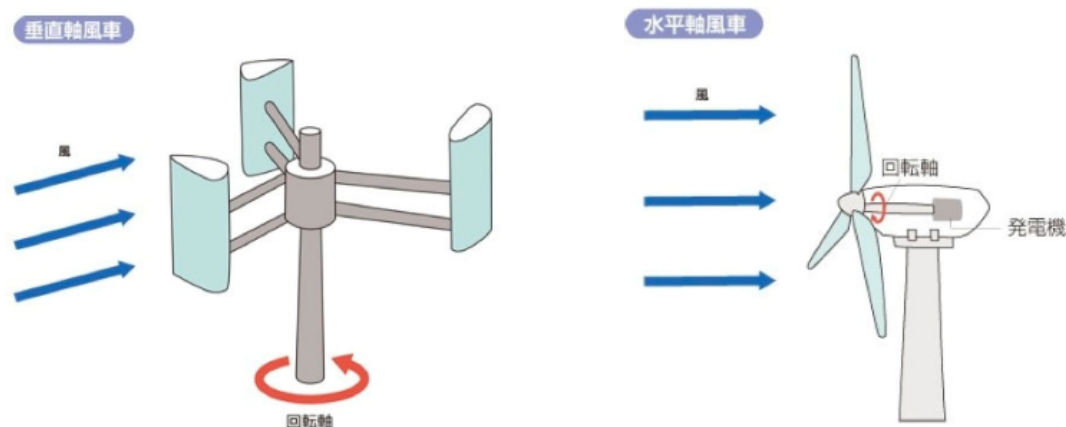
減衰の仕方や指向性などを調べれば、音源の形が分り、風車の運動が分かる。
 風車音による被害の原因も分るし、金属疲労で風車が倒壊する理由も分かる。

- 風車音での被害を防ぐ方法は3つ考えられる。
- 一つ目は、夜間の風車停止。
 - 二つ目は、垂直軸型の風車にする。
 - 三つ目は、??（自分で考えてみて下さい。）

垂直軸

[風車騒音の特徴と指針・測定マニュアルについて](#)、落合博明（小林理学研究所）には、下の説明がある。

風力発電機の種類



- 垂直軸風車：風向きに左右されず、発生する騒音は小さいが、軌道トルクが小さい。大規模化には向かない。
- 水平軸風車：最も普及している。高速で回転でき発電効率がよいが、方位制御機構が必要。騒音が発生する。
 - ▷ アップウインド型風車：タワーがブレードの風下側にある。
 - ▷ ダウンウインド型風車：タワーがブレードの風上側にある。

風力発電－風の力で発電 | エネルギー新時代 | J-Net21[中小企業ビジネス支援サイト] <http://j-net21.smrj.go.jp/develop/energy/introduction/2012011602.html>

垂直軸のものは、発生する騒音は小さいのです。

山形県酒田市の市民は

アンケート名:酒田市広報 11 月特集「風のまち酒田の未来を考えるーカーボンニュートラルの実現に向けてー」質問 5 回答で、

“洋上風力発電について、酒田市の特性からバードストライクを予防するという観点からも垂直軸型マグナム式風力発電を導入するのはいかがでしょうか。騒音低減、強風耐性の向上にも繋がり、また日本の技術／製造という意味でも市民の納得や信頼も得られやすいのではと考えます。供給の安定という意味で自然エネルギーは発展途上なのだと思いますが、海側の土地だからこそ得られる半永久的なエネルギーをうまく活用し、環境負荷や資源消費を軽減していけるよう、今後の発展を期待しております”

と書いています。

論文の中で風車騒音に関して書くならば、

酒田市の市民の常識程度の知識を持っているべきです。

平野氏が示しているように、気圧計と騒音計の併用は意味があり、きちんとした比較がなされれば、騒音計の数値を補正して、0.5Hz 以下の部分についてのより正確な数値が得られます。

しかし、気圧計での計測値と騒音計での計測値を比較するには、次のことが必要になる。

圧力の変動を計測する時のサンプリングレートを 48 k Hz 以上にすること。

微小な変動検知する能力。

検知した圧力を符号付整数にする時のビット数を 16 ビットか 24 ビットにするか。

1 ビットが表す量。

FFT での計算の時に周波数分解能を十分高くしておく。

マイクの性能に対応した補正の可能性を検討する。

気圧計での計測値と精密騒音計での計測値の変換を含めた、解析ソフトの開発をする。

現状は G 特性音圧レベル、1Hz 以上での 1/3 オクターブ解析の数値を計算するがその数値が風車音では役に立たない。

サンプリングレートを高くする理由

波形が分らないと、風車の音はパルス状だとの説が出てくる。

風切り音について、ある方から次のように教えていただきました。

宇山靖政様

ご質問のメールをありがとうございます。

風車風切り音は、翼の回転数 R (1 分間に何回転 : R -rpm)、翼の枚数 N とすれば、風車からの基本周波数 f は、 $f = N \times R / 60$ で示されます。この式は、支柱で支えられただけで覆いの無い扇風機の回転数と翼の枚数とそこで発生する基本周波数 f になります。

1500 k W 級の風車が山の尾根に並んだ東伊豆では、風が強く吹く時に 1 分間に 20 回転しますが、北海道石狩市の茨戸からの水を流す石狩放水路沿いに立っていた 3 基の風車の内の真ん中の風車もほぼ同様の規格のものでした。

3 枚翼で 20 r p m なので、1 分間に 60 回支柱の傍を通り、1 秒間では 1 回翼が通ることになり、 $f = 3 \times 20 / 60 = 1 \text{ Hz}$ となります。

翼が回転する時に、支柱との間で空気の流れ(風)を引きちぎる時に、時間巾を持った大きなパルス状の音圧変動を起こします。

この状態は、測定器で測って周波数分析(FFT 分析)すると、1 Hz とその倍音から成ることが判ります。

風車からの音は、ナセル内に入っている加速ギア系(数十倍の電源周波数に変えるために動く)の音、風向に合わせて方向を変えるためのモーター音、翼の角度を変えるモーター音、ナセル内の冷却のためのファン音等、色々の音源が重なって風車音となります。

それでも、一番大きいのは、風のエネルギーを電力に変える翼の回転音となります。

実際に風車音を数十メートルほどの距離で測ると、翼が振り下ろされた時に音が聞こえてきます。

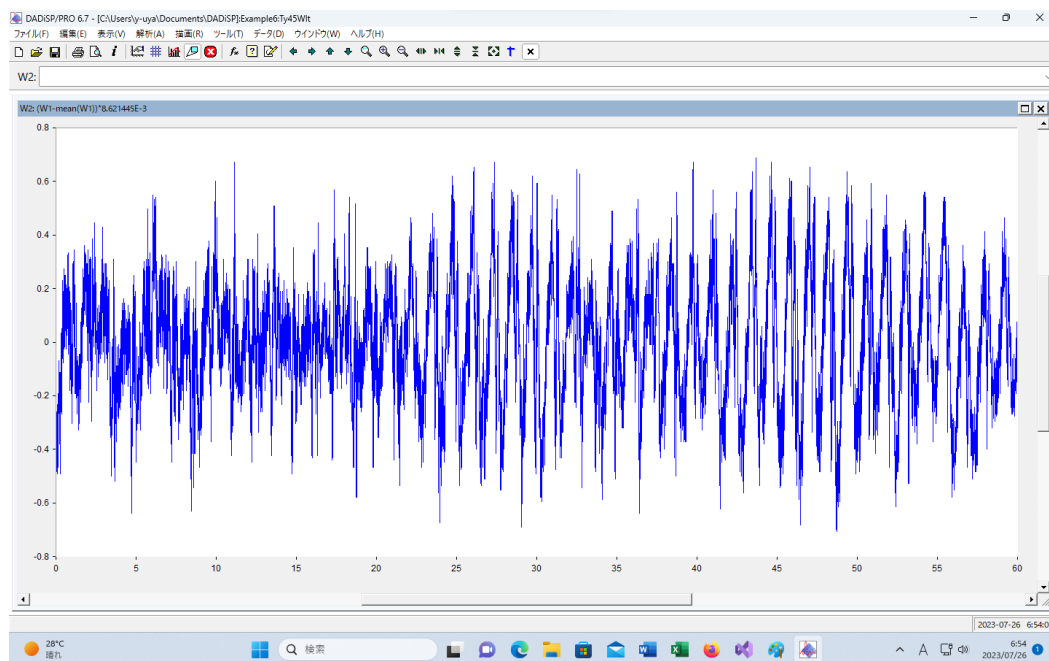
柱時計の 1 秒毎のチクタク音も 1 秒毎に鳴っているのですが、その測定器での分析では、基本の音が現れていません。

チクタク音のパルス状の音の幅が少ないことに拠るものと思われます。

これは、矩形波の信号で、ON と OFF の時間の長さが変わって来ると、基本音とその奇数倍の倍音で構成されていたものが、その構成の大きさが変わって来ることから判ります。

あまり参考になりませんが、日本音響学会編音響工学講座 5：騒音・振動(下)の 24 ページに、送風機からの翼通過周波数として、上記の式が書かれています。

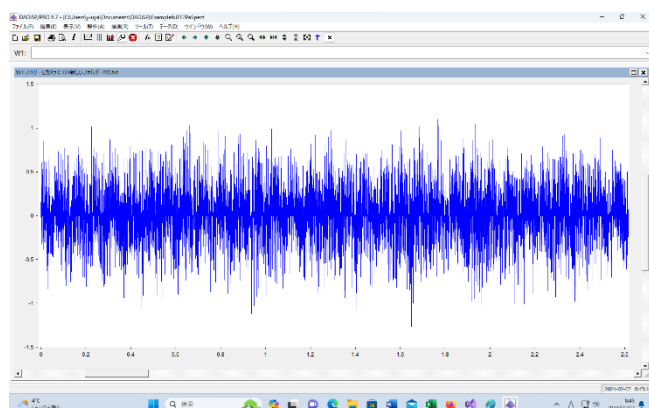
グラフがパルス状になっているか否かは、サンプリングレートを上げて計測すれば分かります。



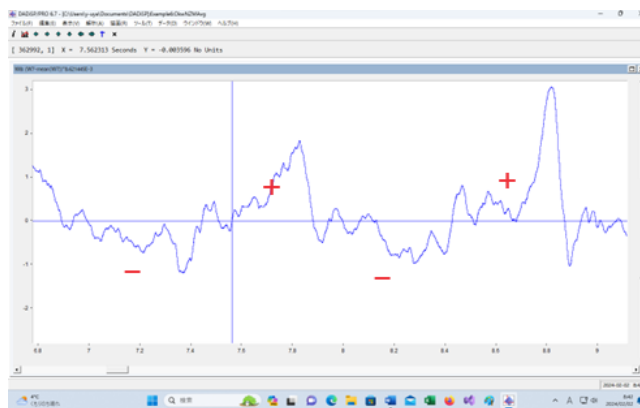
上のグラフを拡大してみれば、次の右側のグラフになります。

この形を、パルス状とは言えません。

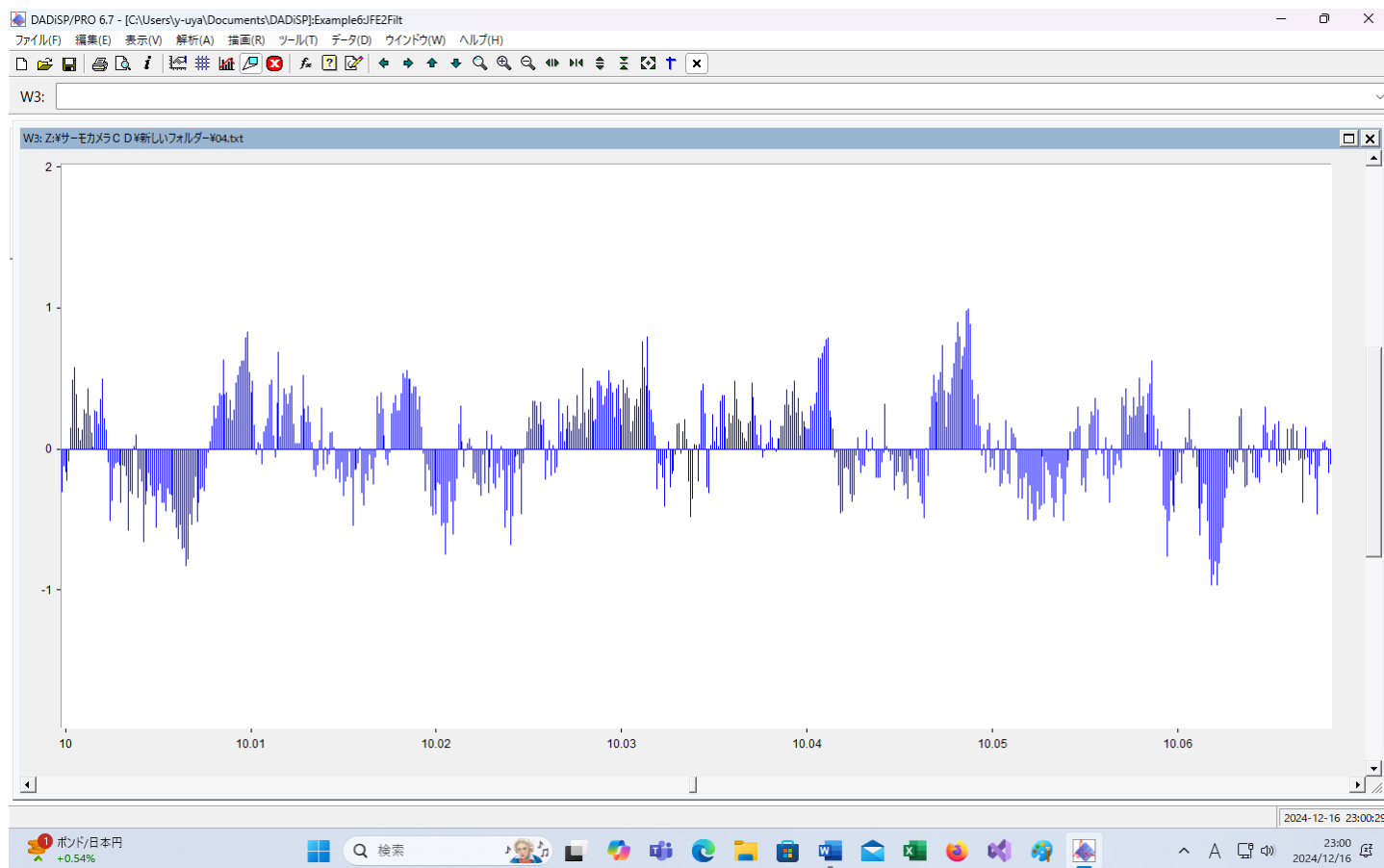
工場騒音の、2.6 秒間の波形



風車音の 2.2 秒間の波形



これは、超低周波音によって。圧縮と膨張がゆっくり繰り返されることを意味しています。右側のグラフは、パルス状ではない。



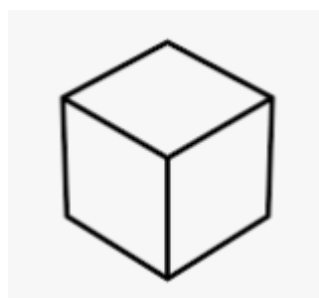
10 秒から 10.07 秒の間の波形です。

$340 \times 0.07 = 23.8\text{m}$ 。7 回の山と 7 回の谷がある。谷の幅は $23.8/14 = 1.7\text{m}$ 。 $0.07/14 = 0.005$ 秒です。

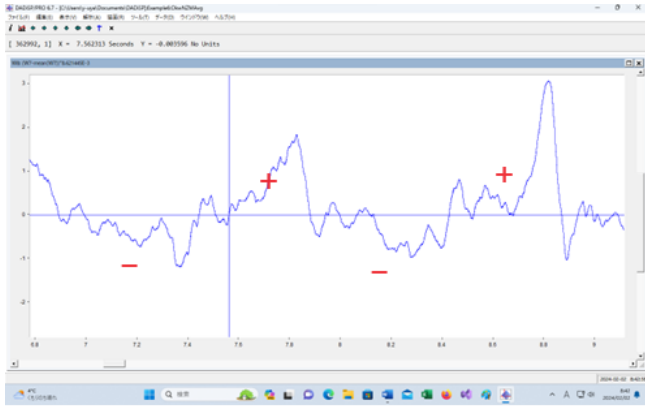
Pascal. 圧力を表す SI 単位で、表記は Pa。1Pa は 1N/m^2 に等しい。ここで、1N（ニュートン）は質量 1kg の物体に 1m/s^2 の加速度を与える力の大きさである。

加速度が α の時、変位は $(1/2) \alpha t^2$ です。 $t = 0.005$ の時は、 $0.5 * \alpha * 0.005 * 0.005 = \alpha * 0.0000125$

1 辺の長さが 1m の直方体を考える。



面の質量を 1kg とする。1Pa の力で 0.005 秒間、外側から押されて、圧縮されるとする。 $\alpha = 1$ として、各面の変位は、 0.0000125m 。辺がこの 2 倍だけ短くなった時は、1 辺の長さは、 $1 - 0.0000125 * 2 = 0.999975$ 体積は、 0.999925002m^3



押される時間が、0.5 秒ならば、変位は $0.5 \times 1 \times 0.5 \times 0.5 = 0.125$ 辺の長さは、 $1 - 0.125 \times 2 = 0.75$ 、体積は 0.421875 となる。
変な計算だが、波形が、圧縮と膨張に関して大きな要因となることが分る。

強風時の風車音は、ゆっくりとした圧縮と膨張で、音響キャビテーションを引き起こす。

収録する時のビット数に関しては、コンピュータでの扱いやすさと他の計測結果との兼ね合いがある。
メモリーの量や計算速度を考えると、現状では 16 ビットが無難だと考える。
気圧計は、16 ビットでは足りないかも？ 16 ビットだと 1 の違いで、表現する気圧が大きく変化する。
24 ビットならばなんとかなるが、他の問題も出てくる。

FFT の計算では、120 秒程度のデータでの計算が適当だと考える。

あまり長いデータだと、メモリーが足りない。

計測した時間が数時間に及べば、その間の風速の変化が大きいのので、結果として被害状況が把握できなくなる。

また、Wavelet 解析も必要だが、データ量が多いと PC での計算が大変です。

マイクの性能の補正も、気圧計のデータが、高いサンプリングレートで取れるならば、比較してプログラムを書けばよい。

これまでに得られた知見④ 風車騒音の人への影響

- これまでに国内外で得られた科学的知見を踏まえると、風車騒音が人の健康に直接的に影響を及ぼす可能性は低いと考えられる。ただし、風車騒音に含まれる振幅変調音や純音性成分等は、わずらわしさ(アノイアンス)を増加させる傾向がある。静かな環境では、風車騒音が35～40dBを超過すると、わずらわしさ(アノイアンス)の程度が上がり、睡眠への影響のリスクを増加させる可能性があることが示唆されている
- 風力発電施設から発生する超低周波音・低周波音と健康影響については、明らかな関連を示す知見は確認できなかった
- 景観のような視覚的な要素や経済的利益に関する事項等も、わずらわしさ(アノイアンス)の度合いを左右する

6

環境省水・大気環境局長

風力発電施設から発生する騒音に関する指針について

“これまでに国内外で得られた研究結果を踏まえると、風力発電施設から発生する騒音が人の健康に直接的に影響を及ぼす可能性は低いと考えられる。また、風力発電施設から発生する超低周波音・低周波音と健康影響については、明らかな関連を示す知見は確認できない。ただし、風力発電施設から発生する騒音に含まれる振幅変調音や純音性成分等は、わずらわしさ(アノイアンス)を増加させる傾向がある。静かな環境では、風力発電施設から発生する騒音が35～40dBを超過すると、わずらわしさ(アノイアンス)の程度が上がり、睡眠への影響のリスクを増加させる可能性があることが示唆されている。また、超低周波数領域の成分の音も含めた実験の結果、周波数重み付け特性としてA特性音圧レベルが音の大きさ(ラウドネス)の評価に適している。”

とあるが、

ラウドネスの評価にはA特性音圧レベルが適していても、アノイアンス(不快感)の評価には適していません。圧迫感による不快感に注目すれば、アノイアンス(不快感)に関連が深いのは、最大音圧だと考えら

れます。

これは、[電力中央研究所報告](#)にある、

“音圧レベルとアノイアンス(※12)（不快さ）について調べた Møller の実験[2-18]によると、周波数が低い方が音圧レベルの上昇に対してアノイアンスが増加する割合が大きくなっている。

なお、Møller の実験では 18 人の正常な聴覚を持った被験者に対して行っている。各被験者は周波数・音圧レベルの異なるいくつかの純音を聞いたとき、不快さの割合を示す棒線上（両端に「全く不快に感じない（not at all annoying）」、「非常に不快（very annoying）」と記載されている）に印をつけることで主観的な不快さを回答している。

さらに、Subedi らの実験結果[2-19]によると、低周波音における音圧レベルと不快さの関係は音の周波数が固定した条件において、ほぼ比例関係を示すが、その比例定数は音の周波数によって変わっており、周波数が低いほど不快さは音圧レベルに対しても強く現れることが示されている。また、Subedi らは不快さと A 特性音圧レベルとの相関についても調べており、彼らの実験範囲において、不快さと A 特性音圧レベルは周波数に依存せず、ほぼ一定の相関を持つことが示されている。“

や、

風力発電施設から発生する騒音等への対応について

平成 28 年 11 月

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
にあるグラフ

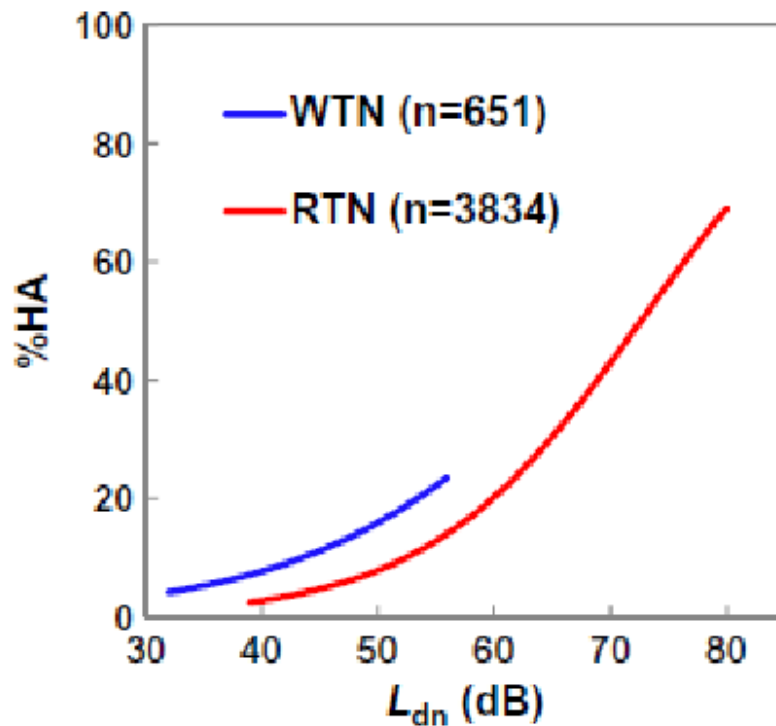


図 7 風車騒音 (WTN) と道路交通騒音 (RTN) の昼夜時間帯補正等価騒音レベル (L_{dn}) ※と非常に不快と感じた者のパーセンテージ (%HA)

※ 風車騒音については、終日定常的に運転されていると仮定し、 L_{Aeq} に 6dB を加算して L_{dn} を推計している。

や、

課題名 S2-11 風力発電等による低周波音の人への影響評価に関する研究

課題代表者名 橘秀樹 (千葉工業大学附属総合研究所教授)

研究実施期間 平成 22～24 年度

にある、



試作・2次Wind Screen
(DH -160)

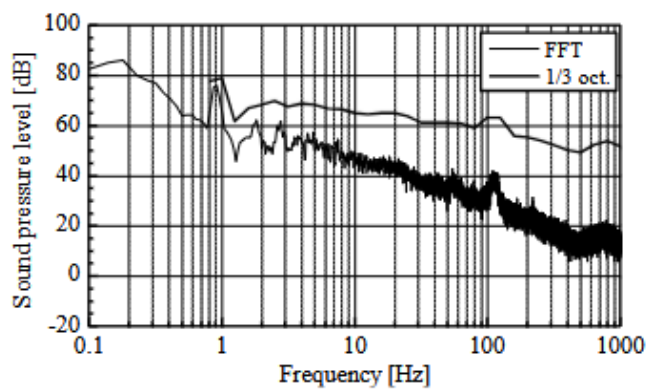
20cmφ全天候型Wind Screen
(RION WS-03)

計測用1/2 in.マイクロホン

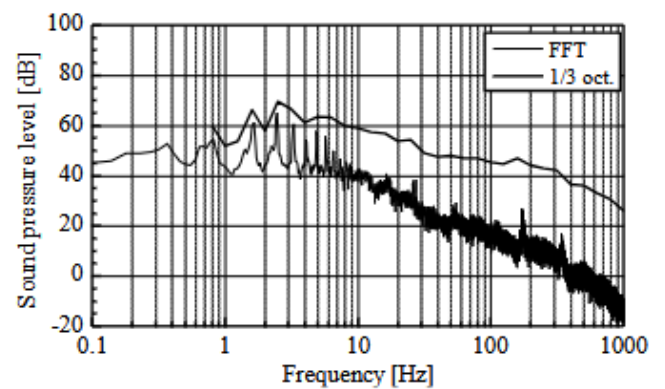
写真(1)-1 本研究で試作した二次防風スクリーン

や、グラフ

図(2)-10 2,500 kW風車7機の施設から561m離れた点における音圧とその自己相関関数



図(2)-11 図(2)-9の音圧のスペクトル



図(2)-12 図(2)-10の音圧のスペクトル

についても考慮する必要がある。

続きは、後で書き足します。

被害の予測と指針値、環境基準値

指針値は、残留騒音+5 d B となっている。到達する風車音の騒音レベルを計算すれば次の様になる。

特別な地域は、残留騒音が30 d B ならば、指針値が35 d B になるが、

普通の地域では、残留騒音が30 d B ならば、指針値は40 d B になる。

残留騒音が35 d B ならば、指針値は35+5=40 d B になる。

残留騒音が40 d B ならば、指針値は40+5=45 d B になる。

残留騒音に対して、どの程度の風車騒音が到達したら指針値になるかを確認したものが次の表です。

表の“風車音”の数値が、到達した風車騒音の騒音レベルです。

残留騒音dB	(Pa*Pa)	Pa→	風車音	指針値dB	(Pa*Pa)	Pa→	Δ (Pa*Pa)	Δ (Pa)
30	0.0000004	0.000632	33.3	35	1.2649E-06	0.001125	0.00000086	0.000492
30	0.0000004	0.000632	39.5	40	0.000004	0.002000	0.00000360	0.001368
35	1.265E-06	0.001125	38.3	40	0.000004	0.002000	0.00000274	0.000875
40	0.000004	0.002000	43.3	45	1.2649E-05	0.003557	0.00000865	0.001557
45	1.265E-05	0.003557	48.3	50	0.00004	0.006325	0.00002735	0.002768
50	0.00004	0.006325	53.3	55	0.00012649	0.011247	0.00008649	0.004922
55	0.0001265	0.011247	58.3	60	0.0004	0.020000	0.00027351	0.008753
60	0.0004	0.020000	63.3	65	0.00126491	0.035566	0.00086491	0.015566

30 d B と 39.5 d B の合成した音圧レベルの計算は、 $10 \cdot \text{LOG}(10^{(30/10)} + 10^{(39.5/10)}) = 39.96$ (= 40) です。

計測した数値が指針値の大きさだったら、普通の地域での風車騒音の騒音レベルは、38.5 d B ～ 53.3 d B です。 残留騒音が大きな地域ほど風車音の影響が大きくても許される事になります。

三重県での残留騒音の具体的な数値は

表 10.1.3-21(2) 施設の稼働に伴う騒音の予測結果（指針値との比較）
（累積的影響：調査期間中の空気吸収による減衰量が最小時）

【春季】

単位：dB

予測地点	時間 区分	騒音レベル						指針値
		現況値 a	風力発電施設寄与値			将来予測値 累積 e=a+b+c+d	増加分 e-a	
			本事業 b	既存 c	計画中 d			
騒音－①	昼間	34	29	28	18	36	2	40
	夜間	36				37	1	41
騒音－②	昼間	43	30	17	18	43	0	48
	夜間	43				43	0	48
騒音－③	昼間	40	31	34	27	42	2	45
	夜間	39				41	2	44

【冬季】		騒音レベル						単位：dB
予測地点	時間区分	現況値 a	風力発電施設寄与値			将来予測値 累積 e=a+b+c+d	増加分 e-a	指針値
			本事業 b	既存 c	計画中 d			
騒音－①	昼間	33	29	28	18	35	2	40
	夜間	35				37	2	40
騒音－②	昼間	40	30	17	18	40	0	45
	夜間	40				40	0	45
騒音－③	昼間	38	31	34	27	40	2	43
	夜間	37				40	3	42

注1：時間区分は、「騒音に係る環境基準について」（平成10年環境庁告示第64号）に基づく区分（昼間：6～22時、夜間：22時～6時）

注2：現況値は、現地調査における測定値より算出した残留騒音（ $L_{A90}+2\text{dB}$ ）とした。

注3：指針値は、残留騒音+5dBとした。なお、「残留騒音+5dB」が40dB未満の場合は40dBとした。

33 d B～43 d Bです。

残留騒音43 d B、指針値48 d Bの場合では、風車騒音と残留騒音の合成が指針値になっていた場合は、風車騒音の騒音レベルは、46.3 d Bになります。この数値は、“35～40 d B”の値を大きく越えています。

風車騒音の人への影響

- これまでに国内外で得られた科学的知見を踏まえると、風車騒音が人の健康に直接的に影響を及ぼす可能性は低いと考えられる。ただし、風車騒音に含まれる振幅変調音や純音成分等は、わずらわしさ（アノイアンス）を増加させる傾向がある。静かな環境では、風車騒音が35～40dBを超過すると、わずらわしさ（アノイアンス）の程度が上がり、睡眠への影響のリスクを増加させる可能性があることが示唆されている

従って、“風車騒音が35～40 d Bを超過する”ので、指針値を目安にする限り、“わずらわしさ（アノイアンス）の程度が上がり、睡眠への影響のリスクを増加させる”のです。

- また、風車音と他の騒音源からの同等レベルの騒音を比較した場合、不快に感じる人の割合は風車音の方が高い。

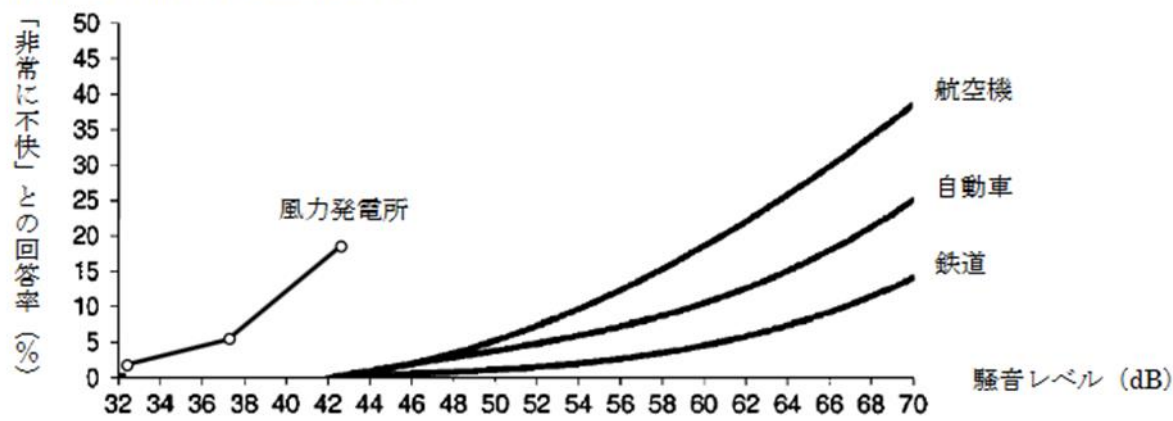


図 8. 「非常に不快」との回答率と各種の騒音源からの騒音レベルの関係
 (脚注 3 及び 5 の文献より環境省作成)

グラフを参考にして、

到達風車音	50.0	49.7	49.3	48.0	47.7	46.7	45.5	43.8	43.7	43.3	42.0	40.8	36.7	36.1
非常に不快（％）	40	39	37	35	32	30	25	22	22	20	16	14	5	5

と言う表を作りました。

指針値での被害				
夜間残留騒音dB	到達風車音 d B	指針値dB	区分	非常に不快（％）
30.0	33.349	35.0	AA	2.5
30.0	39.542	40.0	A又はB	12.0
32.5	39.150	40.0	A又はB	11.0
35.0	38.349	40.0	A又はB	9.0
37.5	40.849	42.5	A又はB	14.0
40.0	43.349	45.0	A又はB	20.0
42.5	45.849	47.5	A又はB	26.0
45.0	48.349	50.0	A又はB	36.0
47.5	50.849	52.5	C	41.0
50.0	53.349	55.0	C	50.0

- 騒音については、感じ方に個人差があること、地域によって風力発電施設の立地環境や生活様式、住居環境等が異なることから、指針値を超えない場合であっても、地域の音環境の保全に配慮し、可能な限り風車騒音の影響が少なくなるように、事業者は対策を講ずるよう努めることが必要

三重県では、残留騒音が 40 d B 程度の場所が多いので、指針値を超えない場合でも、20%程度の人が、夜間“非常に不快”と感じるだろうと推定できます。

到達する風車音の騒音レベルを考えれば、“指針値を超えない場合であっても”風車音の影響で、アノイアンス（不快感）の増加による安眠妨害が、20%程度の人に起きることが分ります。

環境基準値を使う場合では、到達する風車音の騒音レベルは次の値になります。

環境基準値は、次の数値です。A 及び B の所が、普通の住宅街です。

地域の類型	基準値	
	昼間	夜間
AA	50デシベル以下	40デシベル以下
A及びB	55デシベル以下	45デシベル以下
C	60デシベル以下	50デシベル以下

こちらの場合は、特に残留騒音が小さな地域の於いて、アノイアンス（不快感）による安眠妨害が起きる可能性が高くなります。

基準値での被害				
夜間残留騒音dB	到達風車音 dB	夜間基準値	区分	非常に不快 (%)
30.0	39.542	40.00	AA	13.0
30.0	44.860	45.00	A又はB	25.0
32.5	44.749	45.00	A又はB	25.0
35.0	44.542	45.00	A又はB	23.0
37.5	44.150	45.00	A又はB	23.0
40.0	43.349	45.00	A又はB	20.0
42.5	41.411	45.00	A又はB	15.0
44.0	38.132	45.00	A又はB	9.0
47.5	46.411	50.00	C	30.0
49.0	43.132	50.00	C	20.0

この場合は、残留騒音が低い地域では、23%～25%程度の人が、“非常に不快”としてのアノイアンスで、安眠を妨害されることが分ります。

建設後の結果は

[風力発電サイトにおける事後調査報告](#)

- 騒音・低周波音・電磁波 -

第9回風力エネルギー利用総合セミナー 2009年6月19日 クリーンエネルギーファクトリー株式会社
によれば、

3-4) 事前調査結果(騒音)

：

調査地点 (風車までの 距離)	時間 区分	風車設置前の調査結果 (平成17年)		環境基準 (B類型)
		通常時	強風時	
T1 (350m)	昼間	50dB	55dB	55dB
	夜間	42dB	<u>※59dB</u>	45dB
H1 (400m)	昼間	42dB	<u>※56dB</u>	55dB
	夜間	42dB	<u>※55dB</u>	45dB
M2 (470m)	昼間	39dB	52dB	55dB
	夜間	36dB	<u>※59dB</u>	45dB
N1 (680m)	昼間	45dB	<u>※59dB</u>	55dB
	夜間	42dB	<u>※53dB</u>	45dB

(※)を付した箇所は環境基準を超過。風雑音や波音の影響あり。

3-5) ① 事後調査結果(騒音:アセス地点)

∴

調査地点 (風車までの 距離)	時間 区分	調査結果			環境 基準 (B類型)	直近風車における 平均風速		
		1日目	2日目	3日目		1日目	2日目	3日目
T 1 (350m)	昼間	53dB	52dB	50dB	55dB	6.4m/s	1.2m/s	3.6m/s
	夜間	45dB	39dB	43dB	45dB	7.4m/s	1.2m/s	7.5m/s
H 1 (400m)	昼間	49dB	50dB	—	55dB	4.9m/s	3.8m/s	—
	夜間	※46dB	41dB	—	45dB	5.5m/s	5.3m/s	—
M 2 (470m)	昼間	45dB	41dB	43dB	55dB	6.2m/s	1.2m/s	3.5m/s
	夜間	※46dB	36dB	44dB	45dB	7.7m/s	0.6m/s	5.2m/s
N 1 (680m)	昼間	43dB	51dB	45dB	55dB	4.0m/s	4.3m/s	3.4m/s
	夜間	※48dB	41dB	34dB	45dB	6.2m/s	7.7m/s	5.3m/s

- ・調査員を配置して、音源識別を実施
- ・(※)を付した箇所は環境基準を超過。
風雑音、波音、犬の鳴き声等の影響あり。

となっています。

建設前の通常値と建設後の観測値を比較すれば、次の様になります。

建設前後の比較		建設前	建設後の観測値			基準値
		通常	1日目	2日目	3日目	B類型
T1	昼間	50	53	52	50	55
350m	夜間	42	45	39	43	45
H1	昼間	42	49	50		55
400m	夜間	42	46	41		45
M2	昼間	39	45	41	43	55
470m	夜間	36	46	36	44	45
N1	昼間	45	43	51	45	55
680m	夜間	42	48	41	34	45

増加分を、到達風車音による騒音と考えて計算します。

到達風車騒音		前	建設後の到達風車音			基準値
		通常	1日目	2日目	3日目	B類型
T1	昼間	50	50.0	47.7		55
350m	夜間	42	42.0		36.1	45
H1	昼間	42	48.0	49.3		55
400m	夜間	42	43.8			45
M2	昼間	39	43.7	36.7	40.8	55
470m	夜間	36	45.5		43.3	45
N1	昼間	45		49.7		55
680m	夜間	42	46.7			45

- また、風車音と他の騒音源からの同等レベルの騒音を比較した場合、不快に感じる人の割合は風車音の方が高い。

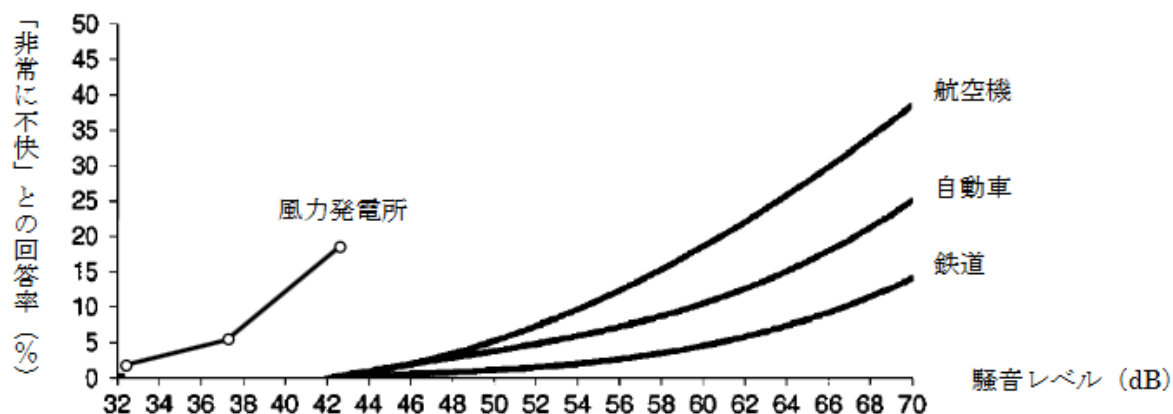


図8. 「非常に不快」との回答率と各種の騒音源からの騒音レベルの関係
(脚注3及び5の文献より環境省作成)

到達風車音から、被害を推定します。

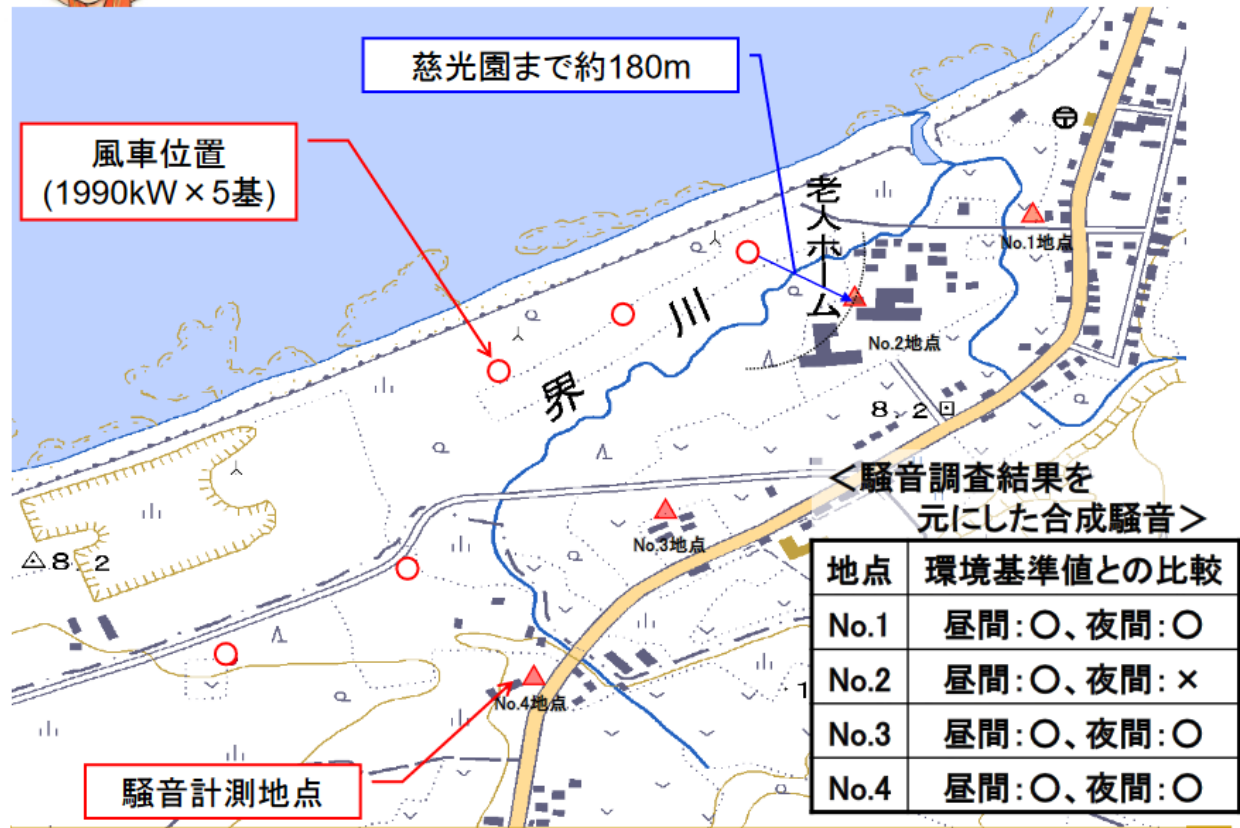
到達風車騒音		前	被害予測 (%)			基準値
		通常	1日目	2日目	3日目	B類型
T1	昼間	50	40.0	32.0		55
350m	夜間	42	16.0		5.0	45
H1	昼間	42	35.0	37.0		55
400m	夜間	42	22.0			45
M2	昼間	39	22.0	5.0	14.0	55
470m	夜間	36	25.0		20.0	45
N1	昼間	45		39.0		55
680m	夜間	42	30.0			45

1日目では、20～30%程度の人が“非常に不快”と感じていると推定できます。もちろん、強風時の音圧レベルから、風車音の部分を取り出す工夫が必要になりますが、何とかできるでしょう。

寿都町における風力発電への取組み

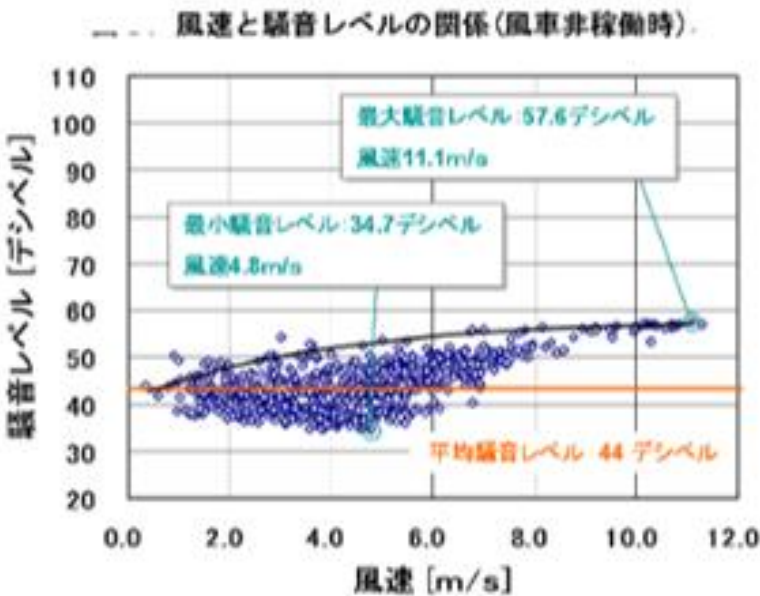


騒音事前調査

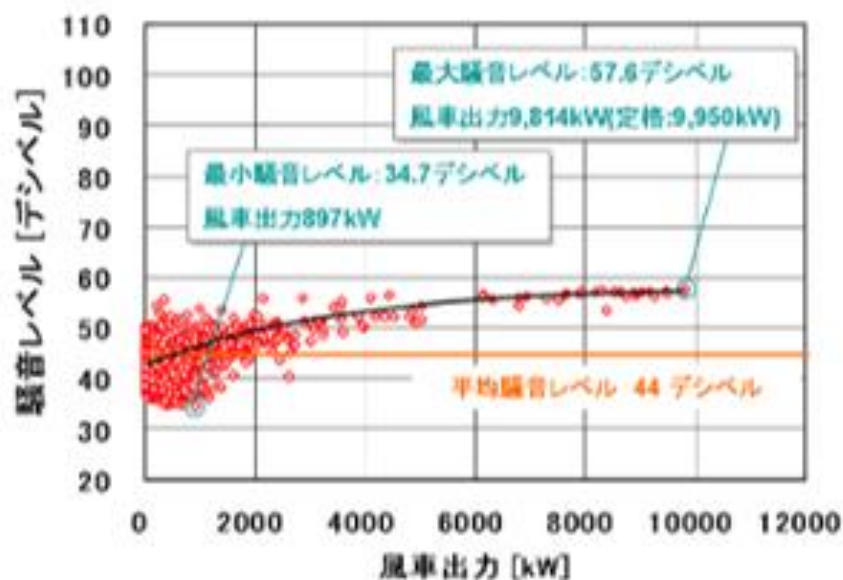


20101209

北海道寿都町



風速と騒音レベルの関係(風車稼働時)



風車出力と騒音レベルの関係

風速が 8m/s 以上で風車が 6000 kW 以上の出力で動いているときは、騒音レベルは 55 dB ～ 57 dB 程度になっています。

仮に、残留騒音が 40 dB ～ 45 dB だとして、到達風車音との合計が、55 ～ 57 dB だとすると到達風車音と“非常に不快”と感じる人の割合は、

寿都町				
夜間残留騒音dB	到達風車音 dB	計測騒音	区分	非常に不快 (%)
40.0	54.860	55.00	AA	50.0
40.0	55.890	56.00	A又はB	60.0
40.0	56.912	57.00	A又はB	70.0

寿都町				
夜間残留騒音dB	到達風車音 dB	計測騒音	区分	非常に不快 (%)
45.0	54.542	55.00	AA	50.0
45.0	55.641	56.00	A又はB	60.0
45.0	56.717	57.00	A又はB	70.0

となります。

町は次の様に言っています。

風車状態	平均騒音	最大/最小
停止	45dB	40.3－48.6dB
運転	44dB	34.7－57.6dB

騒音レベルは最大でも58dB程度であり、『静かな住宅地の昼』に相当する環境であることが確認された。

ラウドネス（うるささ）の観点からは静かな住宅街の昼だと言えても、アノイアンス（不快感）被害の程度で考えれば全く異なります。

- また、風車音と他の騒音源からの同等レベルの騒音を比較した場合、不快に感じる人の割合は風車音の方が高い⁵。

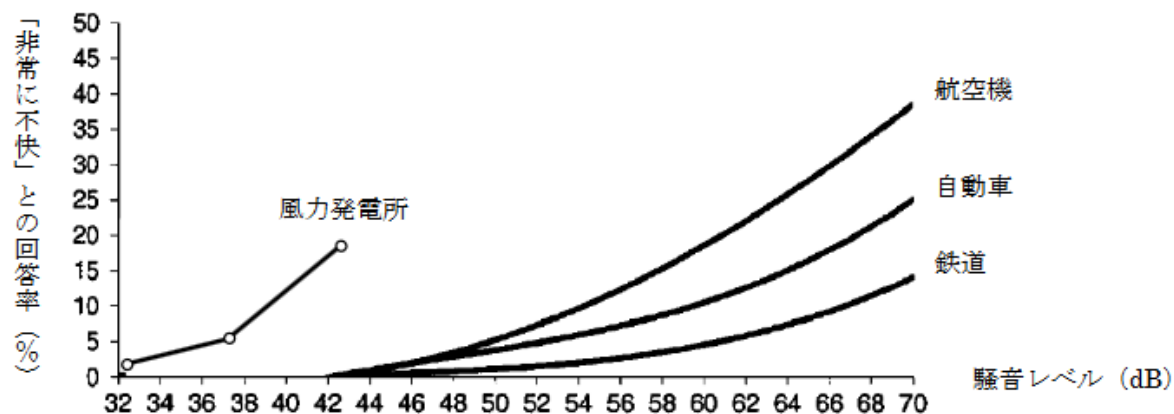


図8. 「非常に不快」との回答率と各種の騒音源からの騒音レベルの関係
(脚注3及び5の文献より環境省作成)

これでは、天国に一番近い老人ホームとしか言えません。

7. 4 指針値マジック

東北電力の白石越河風力発電事業について には、

騒音(秋季) ▶ 環境省の風車騒音の指針値を下回る

(デシベル)

項目 予測地点	時間 区分	騒音レベル			指針値	評価
		現況の騒音 (残留騒音)	予測値	増加分		
騒音1	昼間	38	38	0(0)	43	○
	夜間	38	38	0(0)	43	○
騒音2	昼間	37	38	1(1)	42	○
	夜間	37	38	1(1)	42	○
騒音3	昼間	38	39	1(1)	43	○
	夜間	36	37	1(1)	41	○
騒音4	昼間	41	41	0(0)	46	○
	夜間	40	40	0(0)	45	○
騒音5	昼間	42	43	1(1)	47	○
	夜間	40	41	1(1)	45	○
騒音6	昼間	39	41	2(2)	44	○
	夜間	38	41	3(2)	43	○
騒音7	昼間	39	39	0(0)	44	○
	夜間	38	38	0(0)	43	○

と書いてはある。確かに、環境省の指針値を下回っている。

残念ながら、“指針値を下回れば安全である”との保障は全くない。

計測方法は、

- 測定は、年間の状況を正確に把握するため、風力発電施設が稼働する代表的な気象条件毎(原則四季毎、ただし気象条件の変動が小さい場合等は、調査回数を減らすことができる)に、稼働する風が安定して吹いている状況で行う

となっていて、強風時の計測値は除外されます。

風車からの距離ですが、

騒音④と風車の最短距離は 1.2 k m

騒音⑤と風車の最短距離は 1.1 k m

騒音⑥と風車の最短距離は 1.1 k mだが、1.3 k mの所にもう一つある。

この表だけを見れば、問題が無いようにも見えるが、それほど簡単ではない。

平成 28 年 11 月 25 日に検討会報告書「[風力発電施設から発生する騒音に関する指針について](#)」には、[概要資料](#)が付いている。ここでは[概要資料](#)について検討します。

[風力発電施設から発生する騒音等への対応について（概要資料）](#)は、次の記述がある。

経緯

- 再生可能エネルギーである風力発電の導入加速化は我が国の重要なエネルギー政策
- 風力発電施設から発生する音は、通常著しく大きいものではないが、もともと静穏な地域に建設されることが多いため、比較的小さな騒音レベル(A特性音圧レベル)であっても苦情等の発生事例あり
- 環境省では、平成25年から、主として商業用に用いられる一定規模以上の風力発電施設を対象とし、現時点までの知見及び風車騒音の評価方法について検討を実施

騒音レベル（A 特性音圧レベル）の数値が小さくても、苦情（被害）が発生することがあるのです。その目安ですが、

これまでに得られた知見④ 風車騒音の人への影響

- これまでに国内外で得られた科学的知見を踏まえると、風車騒音が人の健康に直接的に影響を及ぼす可能性は低いと考えられる。ただし、風車騒音に含まれる振幅変調音や純音性成分等は、わずらわしさ(アノイアンス)を増加させる傾向がある。静かな環境では、風車騒音が35～40dBを超過すると、わずらわしさ(アノイアンス)の程度が上がり、睡眠への影響のリスクを増加させる可能性があることが示唆されている
- 風力発電施設から発生する超低周波音・低周波音と健康影響については、明らかな関連を示す知見は確認できなかった
- 景観のような視覚的な要素や経済的利益に関する事項等も、わずらわしさ(アノイアンス)の度合いを左右する

6

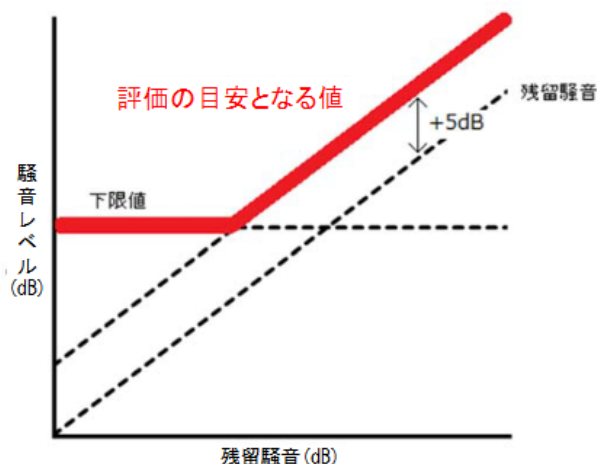
風車騒音の部分が 35～40 d B を超過すれば、アノイアンス（不快感）の程度が上がり、睡眠を妨害するのです。

“風車騒音が 35～40 d B を超過”することと、“指針値を超えない”事との関係を調べる必要があります。

風力発電施設騒音の評価の考え方②

評価の目安となる値：残留騒音＋5dB

※ただし、残留騒音が著しく低く（30dBを下回る場合）特に静穏を要する地域や、地域において保存すべき音環境がある場合においては35dB、それ以外の地域においては40dBを下限値として設定する。



残留騒音+5 dB となる場合の風車騒音は何デシベルなのでしょうか？

計算方法については、

環境省の平成22年度 移動発生源の低周波音等に関する検討調査等業務報告書の付録に、次のように書かれている。

（解説）パワーレベル

風力発電機のパワーレベルの提示方法は、国際規格である IEC 61400-11 により規定されている。タワーの高さとローター径により定められる所定の距離で現地測定されたデータから、強制的に運転を停止させて得られる暗騒音の影響を差し引いて求められる。

（解説）予測計算式

すべての風力発電機が同時に稼働するものとし、(3.1)式に示す騒音のエネルギー伝搬予測方法にしたがって計算した（出典：「風力発電導入ガイドブック」、新エネルギー・産業技術総合開発機構，平成17年5月）。

$$Ln = Lw - 10 \log(r^2 + h^2) - 8 - \Delta L_{AIR} \quad (3.1)$$

ここで、

L_n : n 番目の風力発電機から水平距離 r (m) 離れた地点での騒音レベル(dB)

L_w : 風力発電機のパワーレベル(dB)

r : 風力発電機から騒音予測地点までの水平距離(m)

h : 風力発電機のブレード中心までの高さ(m)

ΔL_{AIR} : 空気減衰(dB)

$$\Delta L_{AIR} = \alpha(r^2 + h^2)^{1/2} \quad (3.2)$$

α : 定数 (=0.005 dB/m)

予測地点における騒音レベルは、それぞれの風力発電機から発生する騒音レベルを(3.1)式によって計算し、これらを(3.3)式によって重合することで求められる。

$$L_p = 10 \log(10^{L_1/10} + 10^{L_2/10} + \dots + 10^{L_n/10}) \quad (3.3)$$

ここで、

L_p : 予測地点における騒音レベル(dB)

L_n : n 番目の風力発電機による騒音レベル(dB)

(3.3) 式を使うことにすれば、計算で使用する数値は観測地点での残留騒音と風車から到達した風車騒音の2つです。

予測値 L_p は、常用対数を使って次の様に計算します。

$$L_p(\text{予測値}) = 10 \log \left(10^{\frac{\text{残留騒音}}{10}} + 10^{\frac{\text{風車騒音}}{10}} \right)$$

単純に考えれば、下の表の①②③になりますが、これらの数値は四捨五入の結果なのですから。⑥⑦⑧のようにして計算する必要があります。

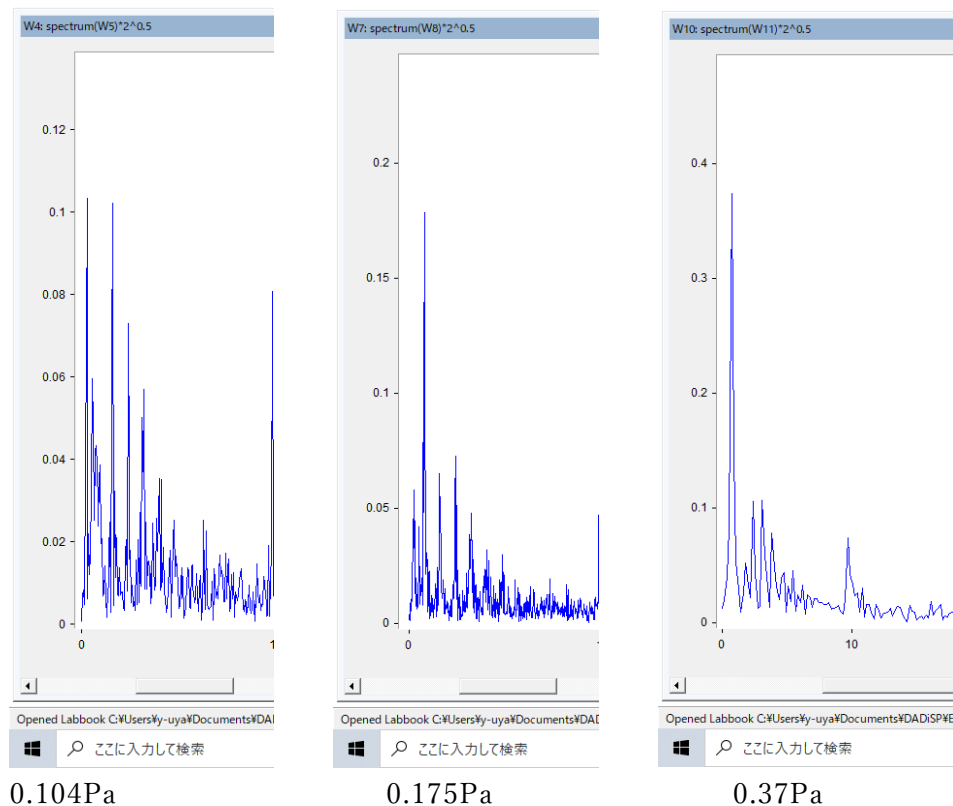
指針値マジック		単位は dB							
①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
残留騒音	予測値	増減	到達風車音	指針値dB	残留騒音-0.5	予測値+0.49	増減	到達風車音	到達風車音+6
38	38	0	#NUM!	43	37.50	38.49	0.99	31.6	37.6
37	38	1	31.1	42	36.50	38.49	1.99	34.1	40.1
38	39	1	32.1	43	37.50	39.49	1.99	35.1	41.1
36	37	1	30.1	41	35.50	37.49	1.99	33.1	39.1
41	41	0	#NUM!	46	40.50	41.49	0.99	34.6	40.6
40	40	0	#NUM!	45	39.50	40.49	0.99	33.6	39.6
42	43	1	36.1	47	41.50	43.49	1.99	39.1	45.1
40	41	1	34.1	45	39.50	41.49	1.99	37.1	43.1
39	41	2	36.7	44	38.50	41.49	2.99	38.5	44.5
38	41	3	38.0	43	37.50	41.49	3.99	39.3	45.3
39	39	0	#NUM!	44	38.50	39.49	0.99	32.6	38.6

残留騒音と予測値から計算される風車騒音は、③と⑨です。

⑨での数値で、35dB を越えているのは、5つです。40dB を越えているものはありません。

しかし、風車音は風速の変化で音圧レベルが変化します。風速は1時間に1回程度ですが、かなり大きくなるので、1時間に1回程度の割合で、大きな音圧が観測されます。

さて、館山で計測した風車音の、音圧の変化は次の様になっています。



周波数スペクトルでの、0.8Hz 成分の音圧は平均すると 0.175Pa、弱いときは 0.104Pa、強いときは 0.37 Pa です。強いときは、平均の 2 倍程度の音圧になっています。

平均して、0.175Pa の音圧で、A 特性音圧レベル（20Hz～）が評価されていて、指針値での限界にかなり近い場合において、1 時間に 1 回くらい、平均値の 2 倍以上の音圧になる状態が起きるのです。

0.104Pa は 74.32 d B、0.175Pa は 78.84 d B、0.37Pa は 85.34 d B

音圧が 2 倍になるとエネルギーは 4 倍になり、音圧レベルは 6 d B 増加します。

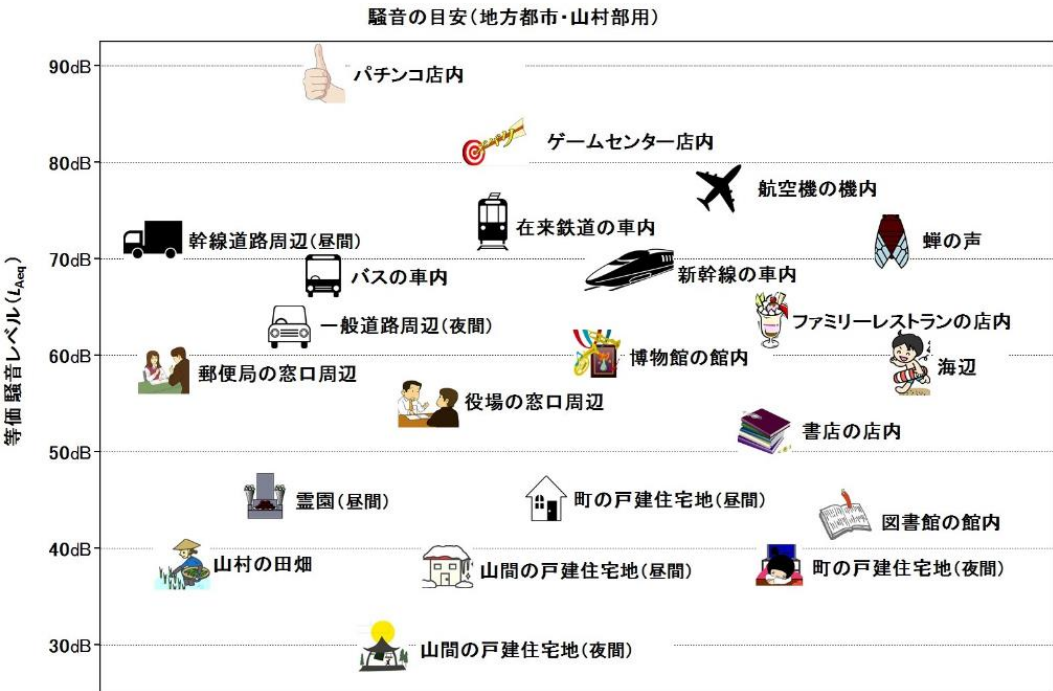
⑩の値は、ほとんどが 35～40dB を越えています。

これは、1 時間ごとに目覚まし時計が鳴るような状態に置かれると言う事です。いくら目覚まし時計が鳴っても、起きない人もいますが、普通の人目は覚めます。

さらに、
現況調査結果 37～42 デシベル
予測結果 37～43 デシベル
として、
[全国環境研究協議会 騒音小委員会](#)



全国環境研協議会 騒音調査小委員会



全国環境研協議会 騒音調査小委員会

の図を使って、問題が無いと主張します。

環境省が昔作ったグラフですが、

- また、風車音と他の騒音源からの同等レベルの騒音を比較した場合、不快に感じる人の割合は風車音の方が高い⁵。

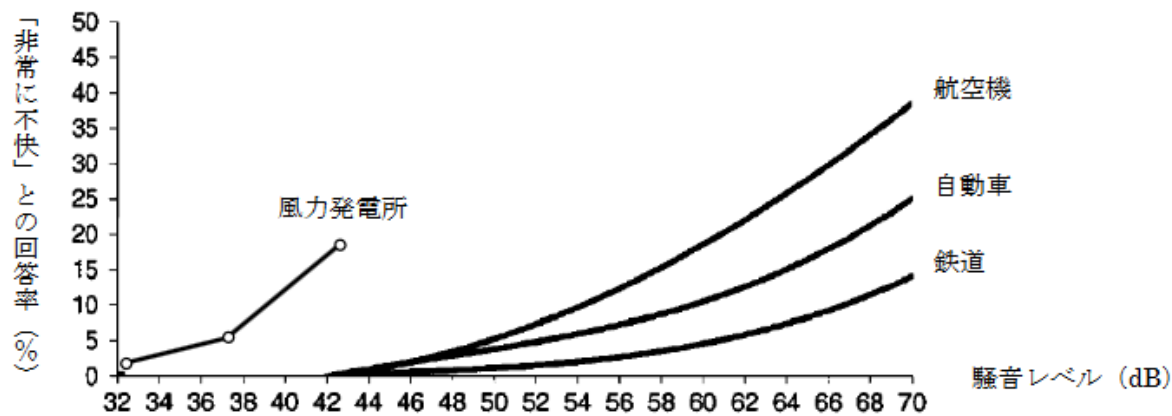


図 8. 「非常に不快」との回答率と各種の騒音源からの騒音レベルの関係
(脚注 3 及び 5 の文献より環境省作成)

交通騒音では、42 d B の時に “非常に不快” と訴える人は 0% ですが、風車音では騒音レベル（A 特性音圧レベル）が 42 d B の時には、20% 程度の人が “非常に不快” と訴えています。

同じ騒音レベルでも、風車音と他の環境騒音では被害状況が全く異なるのです。ですから、[全国環境研究協議会 騒音小委員会](#)の資料を、風車音を含む状態の音の評価に使ってはいけません。

それを承知して使っているならば、“安心安全詐欺” としか言えません。

⑨	⑩
到達風車音	到達風車音+6
31.6	37.6
34.1	40.1
35.1	41.1
33.1	39.1
34.6	40.6
33.6	39.6
39.1	45.1
37.1	43.1
38.5	44.5
39.3	45.3
32.6	38.6

の数値を使って、被害の程度を確認する必要があります。

次の資料もあります。

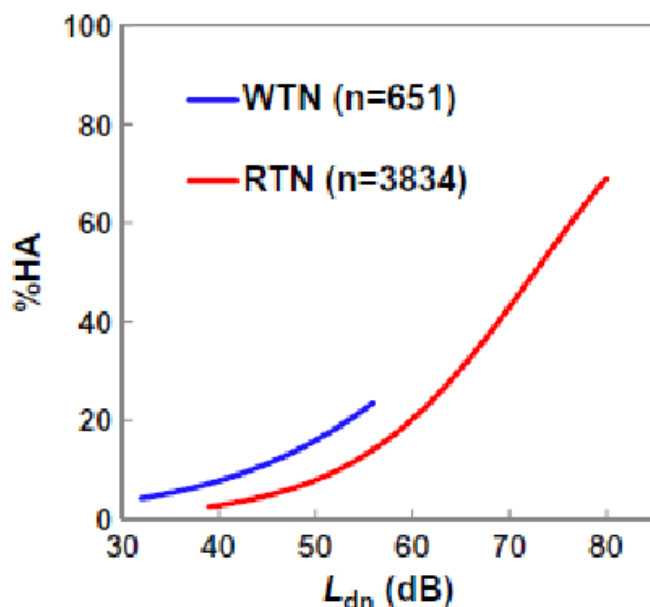


図 7 風車騒音 (WTN) と道路交通騒音 (RTN) の昼夜時間帯補正等価騒音レベル (L_{dn}) ※と非常に不快と感じた者のパーセンテージ (%HA)

※ 風車騒音については、終日定常的に運転されていると仮定し、 L_{Aeq} に 6dB を加算して L_{dn} を推計している。

なお、McCunney らは、多くの研究成果より、風車騒音と関連付けられるわずらわしさ (アノイアンス) との間は線形の関係が見られる傾向にあるが、わずらわしさ (アノイアンス) に関連する要因としては風車騒音は 9% から 13% の範囲の寄与にとどまり、景観への影響等、他の要因の寄与が大きいと考えられると報告している。”

被害範囲については、

- 風力発電施設周辺の住宅等、風車騒音が人の生活環境に影響を与えるおそれがある地域を対象とする

※発電所アセス省令では事業実施区域から1kmを環境影響を受ける範囲としている

という立場をとる企業がほとんどである。

発電所アセス省令に書かれていることは、少し違う。(これについてはここでは省略)

この記述が正しいならば、1 km を越えたら、環境影響が生じないことを証明する必要がある。

例えば、1 km の壁があつて、風車音は風車から 1 km よりも遠方まで到達することが無い。ことを物理的に証明する必要がある。

あるいは 999m の場所と、1001m の場所で、前者で被害が起きても、後者では起きないことを証明する必要がある。書いてあるという事は、正しいということを意味する訳ではない。

先ほどの計算では、風車から 1 km 以上離れているにもかかわらず、ある地区では 30% 程度の人が“非常に不快”を感じる状態になります。

1.1 km も離れているのに、風車騒音の影響で騒音レベルが 3 dB も上がるのはなぜなのでしょう？

騒音レベルの 3 dB の上昇は、その場所での音のエネルギーが、20Hz 以上の可聴域に限定して計測した

場合に、2倍になっていることを意味しています。この数値には、到達する超低周波音エネルギーの部分は入っていません。

風車は、昼も夜も回り続けるのですから、その状態が、昼夜問わず、20年間継続することになる。経済的に余裕がある人はその地域から逃げ出します。

事業用地としては農協や森林組合や認可地縁団体の所有地の使用を予定しているようです。

企業の主体は、合同会社です。★合同会社白石越河風力

合同会社は、責任が限定的で、被害の責任を追及されても出資金以上の支払いを追及されることは無い。簡単に言えば、少しの損害はあるがつぶれてしまえばそれで終わりという事です。

農協の幹部や、建設に賛成した人々は、建設後にはどのような思いを抱くのでしょうか？

風車の高さについて、

準備書では 4200 k W で高さ 142.5m を 10 基

だったが、

評価書（最終的なもの）では 4200 k W で高さ 158.5m を 8 基

に変更している。

地図を見る限り、10 基から 8 基に減らしたときに、残った 8 基の位置は同じです。

単純に考えれば予測値が減ると思えるが、増えている理由は風車の高さが変化して、風車に当たる風が強くなっているからでしょう。

環境省の見解の変遷と弁護士、学者の見解

平成 7 年（1995 年）

ISO7196-1995

(3) G 特性

0-315Hz の超低周波音に対して A 特性での重みづけを真似た周波数補正特性で、重みについては ISO7196-1995 で 0.25～315Hz の範囲に対して規定されている。

Table 2 — Nominal frequency response		
Nominal one-third-octave frequency Hz	Relative response dB	
0,25	— 88,0	4,0
0,315	— 80,0	5,0
0,4	— 72,1	6,3
0,5	— 64,3	8,0
0,63	— 56,6	10,0
0,8	— 49,5	12,5
1,00	— 43,0	16,0
1,25	— 37,5	20,0
1,6	— 32,6	25,0
2,0	— 28,3	31,5
2,5	— 24,1	40
3,15	— 20,0	50
		63
		80
		100
		125
		160
		200
		250
		315

平成 8 年（1996 年）

ISO-389-7（1996 年、初判）

平成 12 年（2000 年）

低周波音の測定方法に関するマニュアル 平成 12 年 10 月 環境庁大気保全局

(1) 超低周波音

一般に人が聴くことができる音の周波数範囲は 20Hz-20kHz とされており、周波数 20Hz 以下の音波を超低周波音という。ここで取り扱う範囲は 1/3 オクターブバンド中心周波数 1-20Hz（またはオクターブバンド中心周波数 2-16Hz）の音波である。

(3) G 特性

1-20Hz の超低周波音の人体感覚を評価するための周波数補正特性で、ISO-7196 で規定された。

(4) 風の影響

低周波音の測定では、風の影響を強く受ける。対象とする低周波音の音圧レベルが小さいほど、周波数が低いほど風の影響を受けやすい。風の強さは季節や、時刻によっても異なる。季節別では、冬型の気象配置のときなどは季節風が強く吹いて測定が難しい。一日のうちでは、早朝や夕方風のときは比較的風が穏やか

で測定がやりやすい。

風雑音によるレベルの上昇は不規則かつ不安定で、風の強い場合には人が測定器にはりついて風雑音と対象音とを逐次仕分けしてやらないと、何を測っているかわからないことになる。大きな音圧レベルが発生したのは実は風によるものだったというようなことになりかねないので特に注意が必要である。風が強いときは低周波音の測定をしないほうが無難である。

平成16年（2004年）

「低周波音問題対応の手引書」の公表にあたって（参照値）

2004年6月22日 環境省環境管理局大気生活環境室

○手引策定の背景

近年、低レベルの低周波音に関する苦情が見受けられる。これらの苦情の多くは暗騒音が小さい静かな地域の家屋内において発生しており、すでに公表している「低周波音の測定方法に関するマニュアル」や「低周波音対策事例集」に記されている方法では対応できないケースも多くなっています。主な発生源は工場、作業場、店舗、近隣の家屋などに設置された設備機器等で、家屋内で観測される低周波音・騒音は20～200Hz程度の周波数域に主要周波数成分を持つものが多くみられます。

環境省は、このような苦情を的確に対応するため、（社）日本騒音制御工学会に委託し、同学会において平成14年8月学識経験者等からなる低周波音対策検討調査委員会が設置され、その対応について検討してきました。このたび、その結果が別途のように、固定発生源の低周波音問題対応のための「手引」、「評価指針」、「評価指針の解説」としてまとめられました。このなかで、従来の手法では対応の難しかった低レベルの低周波音に関する苦情に対処するための参照値が提案されました。

3.3 測定量

低周波音の測定量は、参照値の基礎となる実験結果が周波数別に示されていることから、1/3 オクターブバンド音圧レベルを測定する。なお、20Hz以下の超低周波音についてはISO-7196に評価加重特性が規定されていることから、超低周波音による心身への不快感に関する評価にあたっては、G特性音圧レベルとする。

3.4 測定周波数範囲

測定を行う周波数範囲は、原則として、「低周波音の測定方法に関するマニュアル」で規定された1/3 オクターブバンド中心周波数1Hz～80Hzとした。

3.4 現場測定における注意事項

(1) 風の影響

低周波音の測定では、風の影響を強く受ける。レベル変動の少ない低周波音や衝撃性・間欠的な低周波音では、風の吹いていない合間をぬって測定を行う。

風で対象とする低周波音の存在がはっきりしない場合や、大幅かつ不規則に変動する低周波音では、原則として、風が強いときは低周波音の測定は中止する。

(2) 暗騒音の影響

測定時、暗騒音には十分注意を払う。

(3) 現場状況の把握

調査員は周辺の状況を詳細に観察する。家屋内では定在波発生の有無も確認する。

(4) 発生源側と受音側の対応および苦情者の反応と物理量の対応

測定にあたっては、発生源側と受音側の対応（音圧レベル変化、周波数特性等）や苦情者の反応と物理量の対応関係に十分注意を払う。

ISO-389-7 (2005 年、第 2 判)

平成 22～24 年度 (2010～2012 年)

S2-11 風力発電等による低周波音の人への影響評価に関する研究 平成 22～24 年度

平成 28 年 1 1 月 (2016 年)

風力発電施設から発生する騒音等への対応について (報告の全部) (指針値)

平成 28 年 1 1 月 風力発電施設から発生する騒音等の評価手法に関する検討会

平成 28 年 1 1 月 (2016 年)

風力発電施設から発生する騒音等への対応について (報告の概要) (指針値)

(平成 28 年 1 1 月 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 報告書概要)

環境省は、平成 29 年 5 月 (2017 年)

[風力発電施設から発生する騒音等測定マニュアル](#)、

2.3.2 風車騒音

風力発電施設が稼働しているときの騒音を風車騒音と呼ぶ。本マニュアルにおける風車騒音は、地域の残留騒音に風力発電施設から発生する騒音が加わったものである。なお、周辺地域における風車騒音の騒音レベルはそれほど大きくないため、測定に際しては、間欠的な騒音や衝撃的な騒音等の一過性の騒音を除外する必要がある。

2.3.3 振幅変調音

音の大きさが周期性をもって時間的に変動する騒音。風車騒音では、風車のブレードが回転面内の 1 点を通過する周期に応じた振幅変調音 (スウィッシュ音) が生じる。

2.3.4 純音性騒音

風車によっては、騒音に純音またはそれに近い狭帯域の周波数成分 (純音性成分) が含まれていることがあり、これを純音性騒音と呼ぶ。

2.3.5 風雑音

風がマイクロホンにあたることにより発生する雑音。測定においてはウインドスクリーン (防風スクリーン) を装着することにより風雑音を低減する必要がある (3.1(2)参照)。

風により発生する葉擦れ音や風音は自然音であり風雑音ではない。

“風雑音

風がマイクロホンにあたることにより発生する雑音。測定においてはウインドスクリーン (防風スクリーン) を装着することにより風雑音を低減する必要がある (3.1(2)参照)。

風により発生する葉擦れ音や風音は自然音であり風雑音ではない。”

“3.2 騒音の測定機器

(2) ウインドスクリーン (防風スクリーン)

風車の有効風速範囲の風況下で騒音を測定する際には、一般的に用いられる直径 10 cm 以下のウインドスクリーンでは、風雑音を十分に低減することはできない。風雑音の影響を低減するためには、より大型の、全天候型のウインドスクリーンを使用する必要がある。

風の影響が大きい場合には二重のウインドスクリーン等の、より性能の良いウインドスクリーンを使用する。

（注） 二重ウインドスクリーン等を使用しても風雑音を十分に除外できない場合には除外音処理を行い、風雑音の影響範囲を除外する等の対応が必要である。“

と言っています。

3.2 騒音の測定機器

（１） 騒音計（サウンドレベルメータ）

本マニュアルにおける風車騒音の測定には、計量法第 71 条の条件を満たし、JIS C 1509-1 の仕様に適合する騒音計（サウンドレベルメータ）で、以下の機能を備えているものを使用する。

6.8 風車騒音の測定および得られたデータの処理

6.8.1 風車騒音の測定

「3. 測定機器」の測定機器を用いて、風車騒音とハブ高さ付近の風況との対応関係が把握できるよう測定する。

（1）測定機器の設定

騒音計の周波数重み付け特性を A に、時間重み付け特性を F に設定する。騒音計の測定レベルレンジを適切に設定し、アンダーレンジ指示にならないように注意する。

マイクロホンは、必ずウインドスクリーンを装着して使用する。

[ISO-389-7（2019年、第3判）](#)

日弁連の意見書（p 11）

（7）風力発電施設の騒音・低周波音に関する環境省の見解

① 平成２３年度報告書とその問題点

環境省に提出された平成２３年度報告書は、米国オレゴン州健康局環境公衆衛生事務所や米国マサチューセッツ環境保護省、カナダ・アメリカ風力エネルギー協会などの外国の見解を紹介し、環境省によるアンケート結果を踏まえ、カナダ・アメリカ風力エネルギー協会報告書、オーストリア国立保健医療研究評議会報告書、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書などの最新の文献の結論をとりまとめている。

平成２３年度報告書で紹介されたカナダ・アメリカ風力エネルギー協会報告書では、「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、人の健康リスクではない」「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しれないが、アノイアンスは病理学的なものではない」と結論付けている。

しかし、米国オレゴン州健康局環境公衆衛生事務所の報告（同書４～５頁）では、「①暗騒音より１０デシベル以上、あるいは屋外で３５～４０デシベル以上になると住民の健康と福祉に影響を与える、②風力発電施設からの音によって深刻なアノイアンス、睡眠妨害、生活の質の低下が考えられ、慢性的なストレスや睡眠妨害は、心臓血管系疾患など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、夜間の風力施設からの音による睡眠妨害による、又は悪化させられる」との記載がある。

② 平成２４年度報告書とその問題点

環境省に提出された平成２４年度報告書は、平成２２年度の「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」の成果から「一般的な風車騒音では可聴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」を指摘して、「基準又は目標となり得る『値』について、…風力発電施設を設置する場合に適切と考える騒音・低周波音の目標値について、Ａ特性音圧レベルで３５ｄＢを提案している。

しかし、風力発電施設（風車）の低周波音のピークは１０ヘルツ以下であること、したがってＡ特性であっても３５デシベルを超えるような騒音は存在せず十分に規制できない、これは問題の争点ずらしではないのかとの批判がある。

アテネ不眠尺度 (AIS) 不眠症の自己評価

過去1カ月間に、少なくとも週3回以上経験したものを選んでください。

1	夜床についてから実際に寝るまで、時間がかかりましたか？	0	いつもより寝つきは良い
		1	いつもより少し時間がかかった
		2	いつもよりかなり時間がかかった
		3	いつもより非常に時間がかかった、あるいは全く眠れなかった
2	夜間、睡眠の途中で目が覚めましたか？	0	問題になるほどのことはなかった
		1	少し目覚めることがある
		2	かなり目覚めている
		3	深刻な状態、あるいは全く眠れなかった
3	希望する起床時間より早く目覚めて、それ以降、眠れないことはありましたか？	0	そのようなことはなかった
		1	少し早かった
		2	かなり早かった
		3	非常に早かった、あるいは全く眠れなかった
4	夜の眠りや昼寝も含めて、睡眠時間は足りていましたか？	0	十分である
		1	少し足りない
		2	かなり足りない
		3	全く足りない、あるいは全く眠れなかった
5	全体的な睡眠の質について、どう感じていますか？	0	満足している
		1	少し不満である
		2	かなり不満である
		3	非常に不満である、あるいは全く眠れなかった
6	日中の気分はいかがでしたか？	0	いつもどおり
		1	少し減入った
		2	かなり減入った
		3	非常に減入った
7	日中の身体的および精神的な活動の状態は、いかがでしたか？	0	いつもどおり
		1	少し低下した
		2	かなり低下した
		3	非常に低下した
8	日中の眠気はありましたか？	0	全くなかった
		1	少しあった
		2	かなりあった
		3	重かった
		合計	[1-3点]・・・睡眠がとれています [4-5点]・・・不眠症の疑いが少しあります [6点以上]・・・不眠症の可能性が高いです

アテネ不眠尺度(AIS)不眠症の自己評価

過去一ヶ月間に、少なくとも週3回以上経験したものを選んでください。

1	寝床についてから実際に寝るまで、時間がかかりましたか？	0	いつもより寝つきは良い				
		1	いつもより少し時間がかかった				
		2	いつもよりかなり時間がかかった				
		3	いつもより非常に時間がかかった、あるいはまったく眠れなかった				
2	夜間、睡眠の途中で目が覚めましたか？	0	問題になるほどのことはなかった				
		1	少し困ることがある				
		2	かなり困っている				
		3	深刻な状態、あるいは全く眠れなかった				
3	希望する起床時間より早く目覚めて、それ以降、眠れないことはありませんでしたか？	0	そのようなことはなかった				
		1	少し早かった				
		2	かなり早かった				
		3	非常に早かった、あるいは全く眠れなかった				
4	夜の眠りや昼寝も合わせて、睡眠時間は足りていましたか？	0	十分である				
		1	少し足りない				
		2	かなり足りない				
		3	全く足りない、あるいは全く眠れなかった				
5	全体的な睡眠の質について、どう感じていますか？	0	満足している				
		1	少し不満である				
		2	かなり不満である				
		3	非常に不満である、あるいは全く眠れなかった				
6	日中の気分はいかがでしたか？	0	いつもどおり				
		1	少し減入った				
		2	かなり減入った				
		3	非常に減入った				
7	日中の身体的および精神的な活動の状態はいかがでしたか？	0	いつもどおり				
		1	少し低下した				
		2	かなり低下した				
		3	非常に低下した				
8	日中の眠気はありましたか？	0	全くなかった				
		1	少しあった				
		2	かなりあった				
		3	激しかった				
9	胸や腹への圧迫感はありませんでしたか？	0	全くなかった				
		1	少しあった				
		2	かなりあった				
		3	激しかった				
10	頭痛はありましたか？	0	全くなかった				
		1	少しあった				
		2	かなりあった				
		3	激しかった				
風車との距離	1から8の 合計			[1～3点]・・・睡眠がとれています			
			[4～5点]・・・不眠症の疑いが少しあります				
m			[6点以上]・・・不眠症の可能性が高いです				
計測希望 有 ・ 無	9の点数			屋外	ピーク値；	Hz	Pa
希望者氏名					A特性音圧レベル；		dB
					G特性音圧レベル；		dB
	10の点数			屋内	ピーク値；	Hz	Pa
					A特性音圧レベル；		dB
					G特性音圧レベル；		dB

が出されているが、風車音の測定には使えないので、なぜ風車音の測定や解析には使えないのかを示し、どのように変更すれば、風車音の測定と解析が可能となるかを示します。

風車の超低周波音の測定方法に関するマニュアル 宇山靖政

となる様に、変更します。

本マニュアルの使い方

本マニュアルは、風車からの超低周波音の測定を行う場合に、どのように測定したらよいか、測定に際してどのようなことに注意したらよいか等についてとりまとめたものである。

その構成は、超低周波音の被害があった場合の対処方法、超低周波音の測定方法、録音データの解析方法の本編 6 章と参考資料によりなっている。

本マニュアルは地方公共団体の環境担当部局の担当で、風車音に関する知識を必要とする人を対象にして作成しているが、一般の方々にも役立つものである。

今後、本マニュアルを使って統一的な方法で測定を行っていただき、精度の高いデータの集積が図られるようにしたいと考えている。

なお、風車からの超低周波音の測定をする目的に応じて、本マニュアルを利用しやすいように、各々のケースごとに必要な項目の案内を以下に示しているので参考にしていきたい。

- [低周波音苦情の解決手順を知りたい]
- 低周波音の苦情が寄せられた場合に、
どのように調査を進めたらよいか知りたい方…… 4. 1 低周波音問題の診断手順
- [問題となるような低周波音が発生しているか推定したい]
- 窓口で苦情の相談があったとき、低周波音が
発生しているかどうか状況判断したい方…… 4. 2 発生状況の把握
- 現場で低周波音が発生しているかどうか
状況判断したい方…… 4. 3 予備調査
- [測定計画、現場測定方法について知りたい]
- いつ、どこで、どんな測定器で測定したら
よいか知りたい方…… 5. 1 測定計画
- 現場測定方法が知りたい方…… 5. 2 現場測定方法
5. 3 測定時の注意事項等
- 測定値の読取り方を知りたい方…… 5. 4 音圧レベル指示値の読み取り方法
- 測定データの解析方法を知りたい方…… 5. 4 音圧レベル指示値の読み取り方法
6. 録音データの解析方法
- [低周波音についての知識を深めたい]
- 低周波音がどのようなものか知りたい方…… 2. 低周波音の発生源と苦情
(参考資料) 低周波音の基礎知識
- a. 低周波音とは
- b. 低周波音と超低周波音の周波数範囲
- 低周波音の実態、苦情について知りたい方…… (参考資料) 低周波音の基礎知識
- c. 低周波音の苦情と実態
- 低周波音の評価方法について知りたい方…… (参考資料) 低周波音の基礎知識
- d. 低周波音の影響
- 低周波音の音圧レベルや周波数特性
について知りたい方…… (参考資料) 低周波音の基礎知識
- e. 低周波音の事例

1. 本マニュアルに用いる用語

(1) 超低周波音

一般に人が聴くことができる音の周波数範囲は 20Hz-20kHz とされており、周波数 20Hz 以下の音波を超低周波音という。ここで取り扱う範囲は 1/3 オクターブバンドでは、ISO7196 に従って、中心周波数 0.25-315Hz とするが、周波数スペクトルでは周波数分解能が最小周波数となる。これを超低周波音（0～20Hz）と書くことにする。

(2) 低周波音

1～80Hz、1～100Hz、1～200Hz とすることが多いが、環境省では 20～100Hz を低周波音として扱う場合があり、誤解を生む要因になっている。必要に応じて、低周波音（20～100Hz）のように周波数を指定した表現を使う。

このマニュアルでは、超低周波音を 0～20Hz とし、低周波音は、低周波音（20～100Hz）と低周波音（0～100Hz）の 2 つを使う。

(3) G 特性

0-20Hz の超低周波音に対して A 特性での重みづけを真似た周波数補正特性で、重みについては ISO-7196 で 0.25～315Hz の範囲に対して規定されている。この結果、風車の超低周波音の影響は G 特性音圧レベルの数値からは判断が困難になっている。0.25Hz では－88 d B、10Hz では 0dB、315Hz では－84 d B の重みを付けている。1-20Hz は 12dB/oct.の傾斜を持ち、評価範囲外である 1Hz 以下および 20Hz 以上は 24dB/oct.の急激な傾斜を持つ（図-1.1、表-1.1 参照）。

1-20Hz の傾斜は超低周波音領域における聴覚閾値に関する、イヤホンでの実験 2.5Hz～10Hz、スピーカでの実験 10Hz～20Hz での実験結果に基づいている。

と修正する。

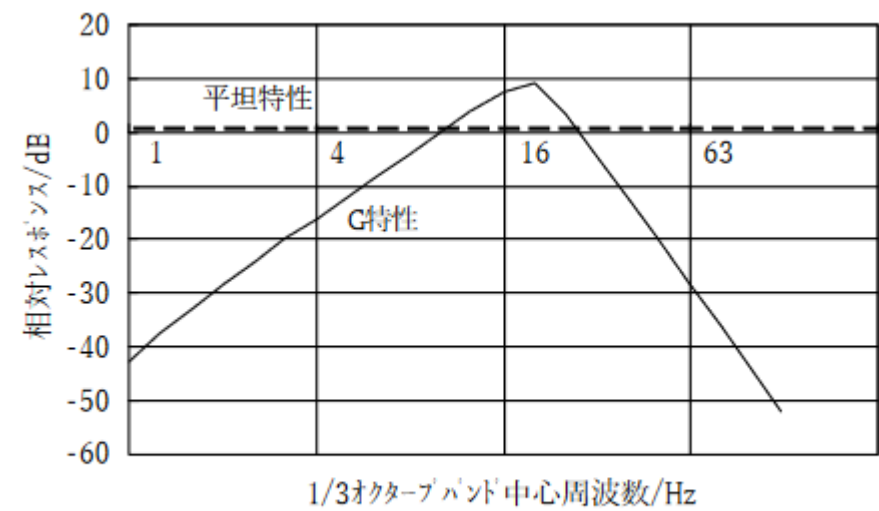


図-1.1 低周波音の周波数補正特性

表-1.1 基準周波数レスポンス及び許容差

中心周波数/Hz	平坦特性		G特性	
	基準レスポンス/dB	許容差/dB	基準レスポンス/dB	許容差/dB
1	0	±3	-43	±3
1.25	0	±3	-37.5	±3
1.6	0	±3	-32.6	±3
2	0	±2	-28.3	±2
2.5	0	±2	-24.1	±2
3.15	0	±1.5	-20	±1.5
4	0	±1	-16	±1
5	0	±1	-12	±1
6.3	0	±1	-8	±1
8	0	±1	-4	±1
10	0	±1	0	±1
12.5	0	±1	4	±1
16	0	±1	7.7	±1
20	0	±1	9	±1
25	0	±1	3.7	±1
31.5	0	±1	-4	±1
40	0	±1	-12	±1
50	0	±1	-20	±1
63	0	±1	-28	±1
80	0	±1.5	-36	±1.5

0.25～315Hz における重みづけの詳細については、

(3) G 特性

0-315Hz の超低周波音に対して A 特性での重みづけを真似た周波数補正特性で、重みについては [ISO7196-1995](#) で 0.25～315Hz の範囲に対して規定されている。

Table 2 — Nominal frequency response

Nominal one-third-octave frequency Hz	Relative response dB
0,25	− 88,0
0,315	− 80,0
0,4	− 72,1
0,5	− 64,3
0,63	− 56,6
0,8	− 49,5
1,00	− 43,0
1,25	− 37,5
1,6	− 32,6
2,0	− 28,3
2,5	− 24,1
3,15	− 20,0

4,0	− 16,0
5,0	− 12,0
6,3	− 8,0
8,0	− 4,0
10,0	0,0
12,5	4,0
16,0	7,7
20,0	9,0
25,0	3,7
31,5	− 4,0
40	− 12,0
50	− 20,0
63	− 28,0
80	− 36,0
100	− 44,0
125	− 52,0
160	− 60,0
200	− 68,0
250	− 76,0
315	− 84,0

4) 音圧レベル

音圧の実効値 p の二乗を基準音圧 $p_0=2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ の二乗で除した値の常用対数の 10 倍である。単位はデシベル，単位記号は dB。低周波音の場合は，低周波音領域の平坦特性の周波数レスポンスを用いた音圧レベルであり，一般に低周波音圧レベルという。超低周波音の場合は，0-20Hz 平坦特性の周波数レスポンスを用いた音圧レベルであり，一般に超低周波音圧レベルという。

低周波音測定の場合，1/3 オクターブバンド音圧レベルが測定される。

そのときの測定量は，中心周波数ごとの 1/3 オクターブバンド音圧レベルとなる。

$$L_p = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{p^2}{p_0^2} \right) \quad (\text{式 1})$$

L_p : 音圧レベル (dB)

p : 音圧の実効値 (Pa)

p_0 : 基準音圧 $2 \times 10^{-5} \text{ (Pa)}$

(5) G 特性音圧レベル

ISO-7196 に定められた周波数補正特性 G 特性 (0.25~315Hz) で重み付けられた音圧レベル。

基準音圧は $2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$, 単位はデシベル, 単位記号は dB。

$$L_G = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{p_G^2}{p_0^2} \right) \quad (\text{式 2})$$

L_G : G 特性音圧レベル (dB)

p_G : G 特性音圧の実効値 (Pa)

p_0 : 基準音圧 2×10^{-5} (Pa)

2. 超低周波音・低周波音の発生源と被害

2. 1 超低周波音・低周波音の発生源と発生機構

可聴域の低周波音 (20~100Hz) は、機械や構造物が通常の稼動状態で発生する。一方、概ね 20Hz 以下の超低周波音は、多くの場合、機械・構造物が正常な状態では発生せず、送風機の旋回失速の共振等特異な稼動状態において発生する。

風車からの超低周波音については、回転軸が水平で、円柱の塔の上に設置されている風車では、正常な運転が行われている時に超低周波音が発生する。

超低周波音・低周波音の発生機構と発生機構別の発生源を以下に示す。

1) 平板の振動によるもの：板や膜の振動を伴うものなど

例えば大型の振動ふるい、道路橋、溢水ダムの水流等

2) 気流の脈動によるもの：気体の容積変動を伴うものなど

例えば空気圧縮機、真空ポンプ等の圧縮膨張による容積変動

3) 気体の非定常励振によるもの：

例えば大型送風機の翼の旋回失速やシステムのサージング、振動燃焼等

4) 空気の急激な圧縮、開放によるもの：

例えば発破、鉄道トンネルの高速での列車突入等

低周波音の問題が発生する可能性のある主なものを以下に示す。

送風機 (送風機を用いる集塵機、乾燥機、空調機冷却塔等)

往復式圧縮機

ディーゼル機関 (ディーゼル機関を用いる船舶、非常用発電装置、バス、トラック等)

真空ポンプ (ロータリーブロワ、脱水ポンプ)

振動ふるい (類似の振動コンベア、スパイラルコンベア、破碎機等)

燃焼装置 (ボイラー、加熱炉、熱風炉、転炉、焼結炉、焼成炉、電気炉、ロータリーキルン、キューポラ等)

ジェットエンジン (ジェットエンジンを用いる航空機、非常用発電装置等)

ヘリコプター

機械プレス

橋梁

鉄道トンネル

治水施設 (ダム、堰堤等)

発破

ガスエンジン

変圧器

5) 風車の超低周波音 (0~20Hz)

上空の風と地上近くの風の速度の違いから、揚力ベクトルによる風車の塔に対する回転モーメントが変化し、塔の中央部分が楕円形に変形する。楕円の扁平率が周期的に変化し、塔の側面が周期的に強制振動をする。その結果として粗密波が発生する。この粗密波は楕円の変形が原因で十字架型の指向性を持っている。

2. 2 超低周波音・低周波音の被害

低周波音による被害は物的被害と心理的被害、生理的被害に大別される。被害の内容を以下に示す。

(1) 物的被害

物的被害は、音を感じないのに戸や窓がガタガタする、置物が移動するといった被害である

物的被害が発生する場合は、超低周波音・低周波音では、20Hz 以下に卓越周波数成分をもつ超低周波音による可能性が高い。なお、物的被害は低周波音だけでなく地面振動によっても発生する場合があるので、超低周波音・低周波音と地面振動の両方の可能性を考えておく必要がある。

(2) 心理的被害、生理的被害

心理的被害は、超低周波音・低周波音の影響が知覚されてよく眠れない、気分がいらいらする、胸や腹を圧迫されるような感じがするといった被害である。生理的被害は、頭痛・耳鳴りがする、吐き気がするといった被害である。

心理的被害、生理的被害は、超低周波音・低周波音が原因である場合と超低周波音・低周波音以外の原因による場合が考えられる。超低周波音・低周波音が原因であるか否かは、被害者の反応と物理量の対応関係により判定する。

超低周波音・低周波音が原因である場合は、20Hz 以下の超低周波音による可能性と、20Hz 以上の可聴域の低周波音による可能性が考えられる。このうち、超低周波音によって心理的被害、生理的被害が発生している場合には物的被害も併発していることが多く、建具等の振動によって二次的に発生する騒音や振動そのものに悩まされている場合もある。可聴域の低周波音の場合は非常に低い音が聞こえる（感じられる）ことによって上記のような被害が発生することが多い。

2. 3 超低周波音・低周波音の卓越周波数と被害内容

これまでの研究結果によれば、揺れやすい建具の場合、20Hz 以下では人が感ずるよりも低い音圧レベルでがたつくことがわかっている。実際の被害についても同様な傾向があるかどうかを調べるため、既存の文献に掲載された事例の中から、被害内容と超低周波音・低周波音の周波数特性が記載されているものについて、超低周波音・低周波音の卓越周波数と苦情内容を整理した（表-2.1 参照）

文献にとりあげられた超低周波音・低周波音の被害は物的被害が多数を占めている。被害発生時の超低周波音・低周波音の卓越周波数はおよそ 3~50Hz の範囲に分布している。被害内容別にみると、物的被害のほとんどは「建具のがたつき」によるものである。物的被害は、20Hz 以上の可聴域でがたつきが発生している例もみられるが、ほとんどの場合可聴域以下の周波数域で発生している。心理的・生理的被害はアノイアンス（不快感）に関するもの「気分が悪い」とラウドネル（うるささ）に関するもの「発生音がうるさい」があるが、被害発生時の超低周波音・低周波音は、風車音以外では、可聴域の低周波音成分が卓越しているが、風車音では、超低周波音の領域の音圧とエネルギーが卓越しています。

音の強さ

音場内の 1 点において、単位面積を単位時間に通過する音響エネルギーを音の強さ（I または J と書く）と言います。単位は、(W/m²)

$$J = (p \cdot p) / (\rho \cdot c) \quad (W/m^2)$$

に注意して、音がマイクを通過するときの音の強さ (W/m2) を計算したものが次の表です。

JFE の製鉄所内では 10^{-4} 程度

W16: EngDistributionWm2(w1,0,20,200,5000)				
	1: No Units	2: No Units	3: No Units	4: No Units
1:	0.000051	0.000150	0.000232	0.000433
2:				

0～20Hz 0.000051 (W/m2)

20～200Hz 0.000150 (W/m2)

200～5000Hz 0.000232 (W/m2)

0～5000Hz 4.3E-4 (W/m2)

リオン社前での交通騒音では 10^{-5} 程度

W15: EngDistributionWm2(w6,0,20,200,24000)				
	1: No Units	2: No Units	3: No Units	4: No Units
1:	1.757791E-007	8.079829E-008	1.805011E-005	1.830650E-005
2:				

0～20Hz 1.757791E-007 (W/m2)

20～200Hz 8.079829E-008 (W/m2)

200～24000Hz 1.805011E-005 (W/m2)

0～24000Hz 1.8E-005 (W/m2)

風が弱いときの風車の近くでは、 10^{-4} 程度

W15: EngDistributionWm2(w2,0,20,200,24000)				
	1: No Units	2: No Units	3: No Units	4: No Units
1:	2.432890E-004	2.138726E-005	1.627290E-007	2.648317E-004
2:				

0～20Hz 2.432890E-004 (W/m2)

20～200Hz 2.138726E-005 (W/m2)

200～24000Hz 1.627290E-007 (W/m2)

0～24000Hz 2.6E-004 (W/m2)

風が強いときの風車の近くでは、 10^{-3} 程度

W9: EngDistributionWm2(w8,0,20,200,24000)				
	1: No Units	2: No Units	3: No Units	4: No Units
1:	1.492656E-003	2.285370E-005	6.942087E-008	1.515570E-003
2:				

0～20Hz	1.492656E-003 (W/m2)
20～200Hz	2.285370E-005 (W/m2)
200～24000Hz	6.942087E-008 (W/m2)
0～24000Hz	1.5E-003 (W/m2)

図 1．交通騒音（リオン社前） 0 ～5000Hz
最大音圧 0.0025[Pa] (379.4[Hz])

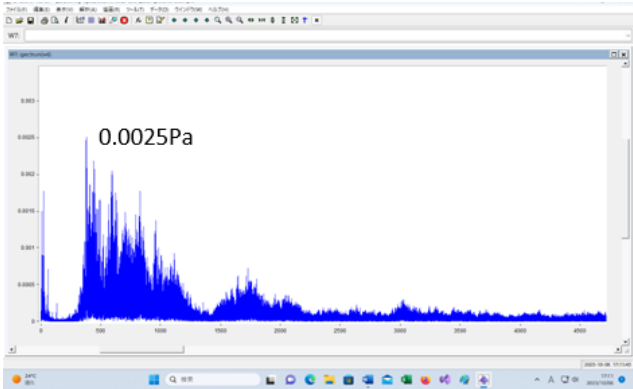


図 2．工場騒音（製鉄所内の音） 0 ～5000Hz
最大音圧 0.12[Pa] (12Hz)

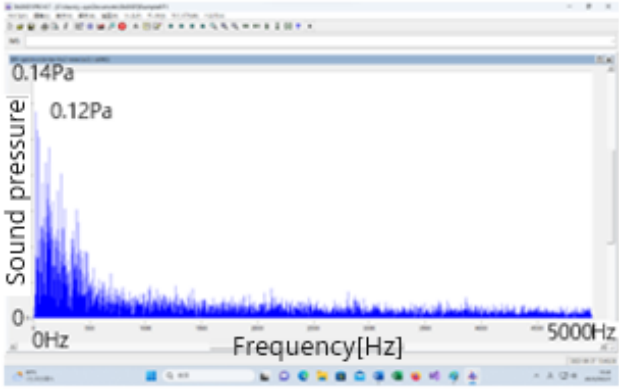


図 3．風車音（館山風の丘） 0 ～5000Hz
最大音圧 0.14[Pa] (0.8Hz)

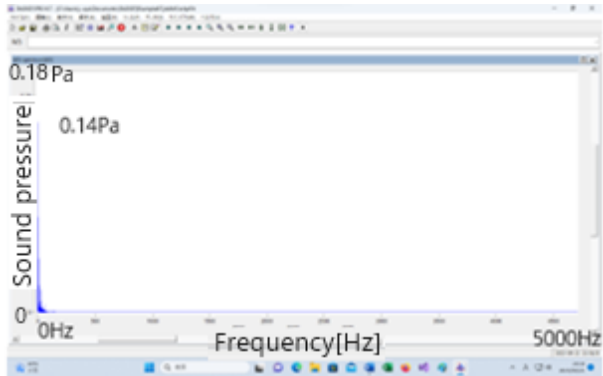


表 2．エネルギーの分布

エネルギー分布	0 ～20 H z	20 H z 以上
風車音	93%	7%
工場音	12%	88%
交通音	1%	99%

0～20Hz でのエネルギーの分布

Energy distribution	0～1Hz	1～20Hz	0～20Hz
Wind turbine	61.3%	38.7%	100.0%
Iron mill	0.04%	99.96%	100.0%

周波数の倍音構造

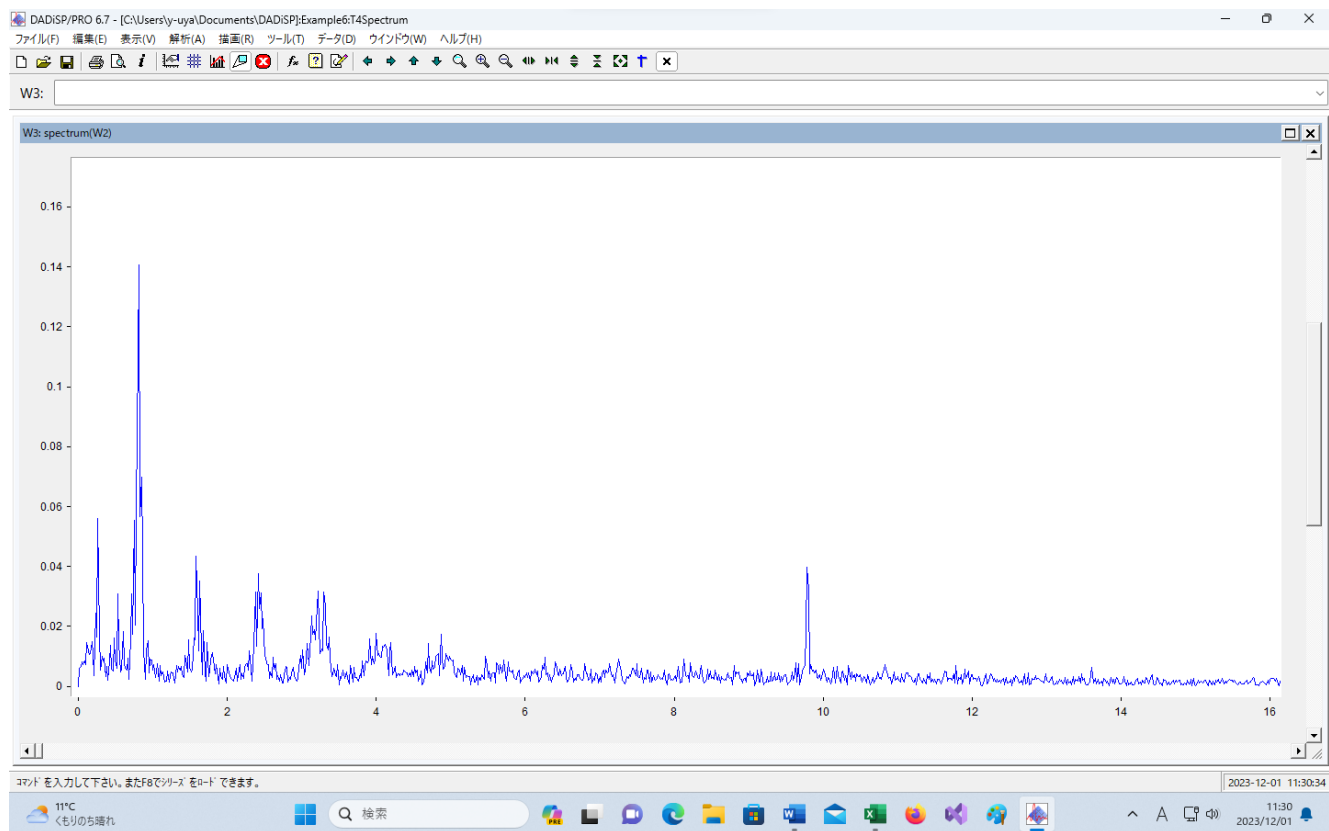


図.3 Wind turbine noise (0～25Hz)

音圧がピーク値となるときの周波数に、次のような規則性がある。

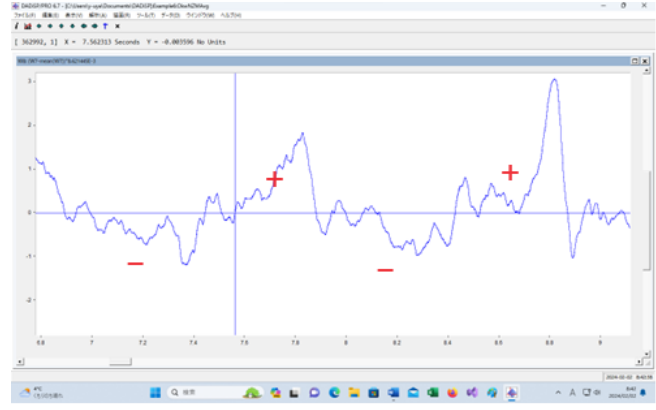
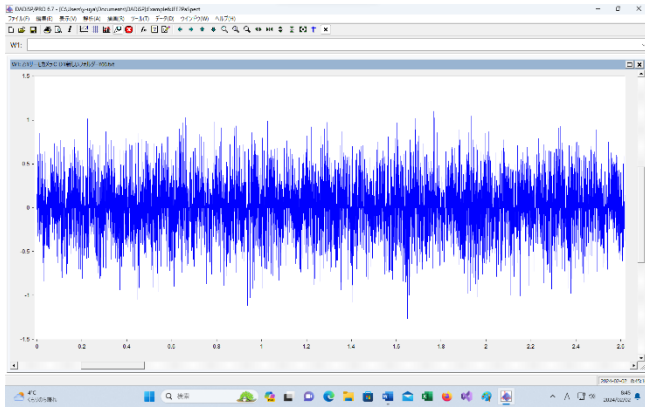
周波数	周波数/0.8167	音圧[Pa]
0.2667	0.3266	0.0560
0.5333	0.6530	0.0309
0.8167	1.0000	0.1405
1.5833	1.9387	0.0436
2.4167	2.9591	0.0377
3.2167	3.9387	0.0317
4.0000	4.8978	0.0177
4.8667	5.9590	0.0173
5.4667	6.6936	0.0101
6.2667	7.6732	0.0098

ピーク値の、離散的な性質によって、強風時には特殊な波形となる。

これは、揚力ベクトルで回転する水平軸型の風車の特性であり、風車の塔の部分に関する曲げモーメントを計算する時の式を、マクローリン展開すれば、必然的に、規則的で離散的なスペクトルになることが判明します。

工場騒音の、2.6 秒間の波形

風車音の 2.2 秒間の波形



左の工場での音とは異なり、風車音の場合は音圧の符号がゆっくりと変化し、0.5 秒間は人体を圧縮し、次の 0.5 秒間は人体を膨張させる。 $f=RZ/60$ Hz の周波数成分が、全体の音圧の符号を決定している。

この状況は、音響キャビテーションでの気泡の成長条件を満たしている。

1 1．音場中の気泡の成長

圧力一定のもとでは、不凝縮ガスが過飽和でない限り、気泡は消滅する。これに対して、音響場の中に置かれた気泡では不足飽和状態でも、不凝縮ガスの析出による気泡の成長が見られる。この現象が音響キャビテーション発生の原因となり、また、液体中の溶存ガス除去促進にも利用される。

気泡への不凝縮ガス析出量は式(5.5.55)

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{4}{3} \pi R^3 \rho_g \right) = 4 \pi R^2 D_{gL} \frac{\partial \rho_{gL}}{\partial r} \Big|_r \quad (2.5.55)$$

による。

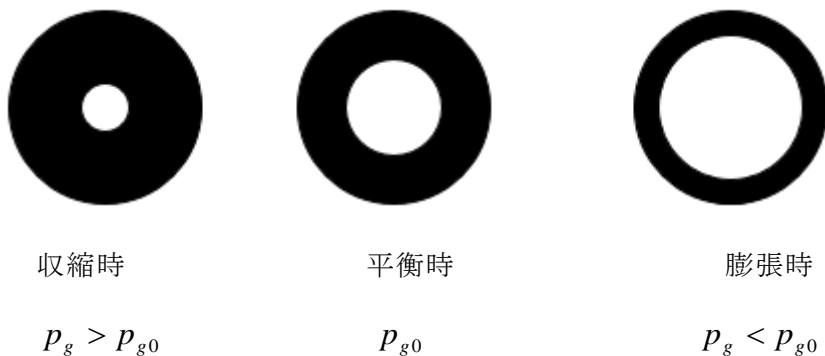
液体中の濃度境界層厚さを δ_D とすれば、単位時期あたりのガス析出・溶解量は

$$\dot{m}_g \propto R^2 \times (\rho_{gi0} - \rho_{giw}) / \delta_D \quad (2.5.61)$$

となる。

これに踏まえて、図 2.5.6 に示す現象のメカニズムを説明する。

図 2.5.6



$$R < R_0$$

$$\delta_D > \delta_{D0}$$

$$R_0$$

$$\delta_{D0}$$

$$R > R_0$$

$$\delta_D < \delta_{D0}$$

まず、気泡表面液体の不凝縮ガス濃度 ρ_{gLW} はヘンリーの法則

$$\rho_{gLW} = \alpha p_g \quad (2.5.58)$$

にしたがって、収縮・膨張する圧力変動とともに、上昇・低下する。濃度が上昇する凝縮時には気泡内の不凝縮ガスが液体に溶解し、濃度が低下する膨張時にはガスは気泡へ析出する。

この際、気泡表面積は膨張時のほうが大きいため、**膨張・収縮の1サイクルで見るとわずかながら析出量が勝ると考えられる。**

音波の振動数が大きな場合には、液体内に溶けているガスの拡散が起こらないので、気泡の成長は鈍る。

振動数が小さい場合は、膨張したときは、液体内のガスが気泡内に析出し、気泡の周囲のガスの濃度が減少する。収縮が始まる前に液体内に溶け込んでいるガスの拡散によって濃度が元に戻る。

収縮によって、気泡内のガスが周囲の溶液に溶け込む。周囲の液体内に溶けているガスの濃度があまり下がっていないので溶け込む量は少なくなる。

この過程を繰り返して、**低周波の場合のほうが気泡は成長する**と考えられる。

次に、表面近傍液体中の不凝縮ガス濃度境界層は、膨張時には薄く、収縮時には厚くなる。境界層の厚さが薄くなるにつれて、拡散による物質輸送が顕著になることを考えると、やはり、膨張による析出量が収縮による溶解量を上回ることになる。

(9) 石井俣夫編集,泡のエンジニアリング,テクノシステム, 初版, 2005 より。)

となっています。

大型風車では、風車の回転数 R が小さくなって、**0.5Hz 辺りでの音圧が最大**となります。微小な気泡による頭痛や圧迫感などによる体調不良が増加する原因の一つです。

と、修正します。

3. 測定の目的

測定に当たっては、目的によって測定点、測定時期、測定方法等が異なるので、目的を明確にする必要がある。超低周波音・低周波音の影響、評価、対策を行うために測定を行うのであるが、測定の目的として主として以下の場合が考えられる。

(1) 被害対応

超低周波音・低周波音によると思われる被害が発生した場合。

なお、振動によると思われる被害（主に建具等の振動の苦情）の中にも風車が原因である場合もあるので、注意が必要である。

(2) 現況把握

環境影響評価にあたり、当該地域の超低周波音・低周波音の現況を把握する場合。また、超低周波音・低周波音の環境調査、実態調査等を行う場合もある。

(3) 対策および発生原因の解明

発生メカニズムの解明や音源探査などの詳細な測定が行われる場合もある。

(4) 対策効果の確認

対策の前後に測定を行い、対策の効果を確認する。

と修正する。

4. 超低周波音・低周波音の被害があった場合の対処方法

4. 1 超低周波音・低周波音問題の診断手順

測定計画からレポート作成までの流れを図-4.1 に示す。

超低周波音・低周波音の苦情が寄せられた場合、問題解決のためにどのような考え方で進めるかの流れを頭に入れる必要がある。その苦情が実際に超低周波音・低周波音によるものなのかを的確に判断することが重要である。

まずはじめに、窓口、電話等で苦情の発生状況を聞く。そこで、騒音か、振動か、超低周波音・低周波音か、そのいずれでもないかの見当をつける。ここに「そのいずれでもないか」という項目が入っているのは、「騒音でも振動でもない場合は全て超低周波音・低周波音によるものではないか」と誤解している人がいるためである。超低周波音・低周波音による影響があるのはどのような場合であるかをあらかじめ理解し、この条件にあてはまらない場合には、騒音、振動、超低周波音・低周波音以外の他の要因によることも考えられる。

しかし、実際には電話や窓口での対応ではなかなか状況の把握が難しい。そこで、このような場合には、調査員自ら現地に赴いて精密騒音計と振動レベル計で 10 分間程度計測し、計測結果は WAV ファイルとして保管する。WAV ファイルを解析し、発生状況を把握する。現場調査が必要な場合にも周辺 5 k m 以内の施設を含めた予備調査を行い、調査の結果に基づいて本調査の計画を立てる。

専門的な知識を必要とする場合には、専門家に調査を依頼するのも一つの方法である。

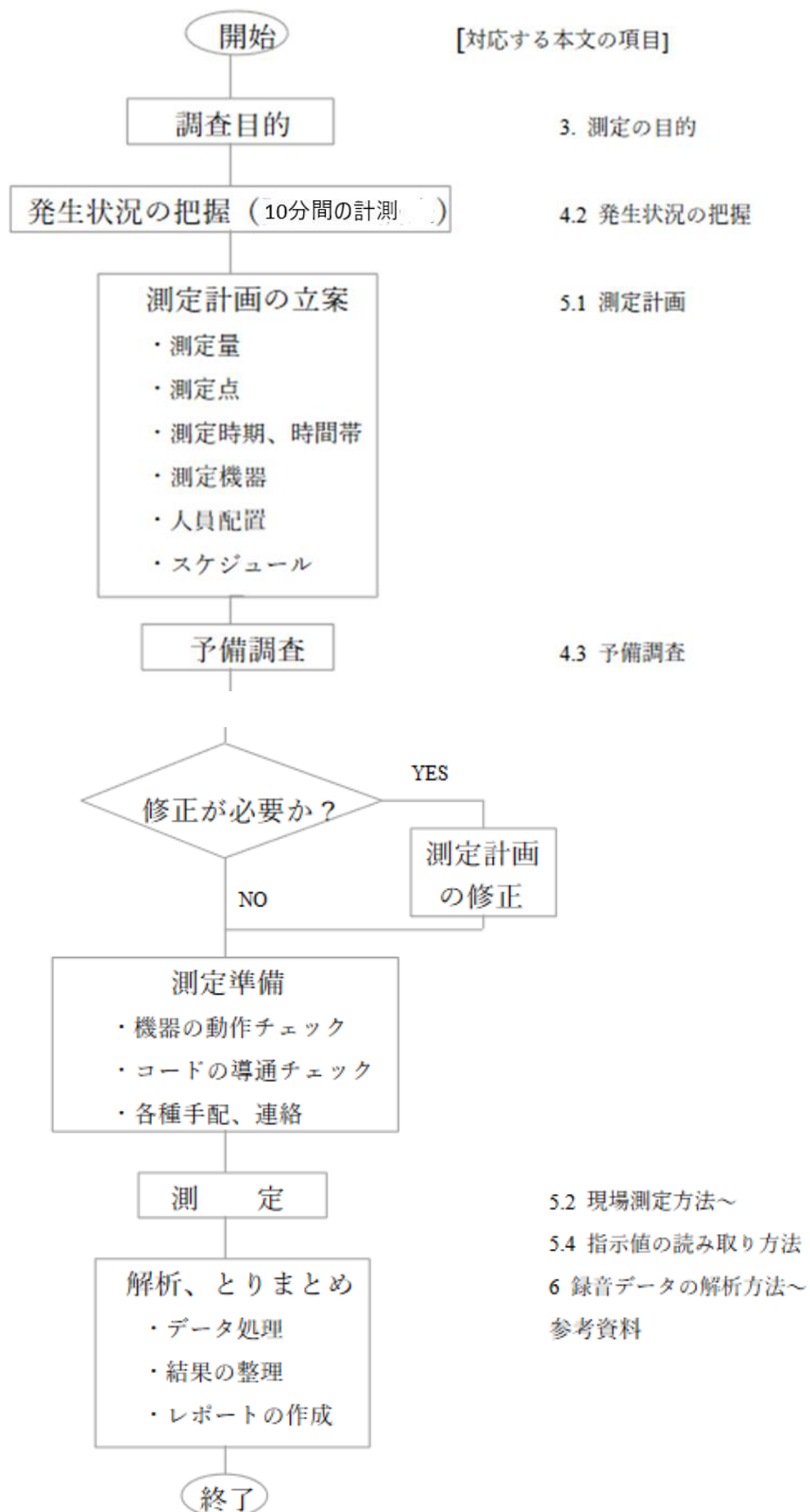


図-4.1 測定計画からレポート作成までの流れ

4. 2 発生状況の把握（状況調査）

窓口、電話等で苦情の内容、発生状況について聞き取りを行い、超低周波音・低周波音によるものかどうか、超低周波音・低周波音の場合は 20Hz 以下の超低周波音によるものか、20Hz 以上の可聴域の低周波音によるものかを 10 分程度の予備計測で判断する。

計測は、精密騒音計と振動レベル計で同時に行い、サンプリングレートを 48 k Hz にして、120 秒以上の WAV ファイルとして収録する。

過去のデータとの比較のために、屋外での計測を以前の形式で行う。

屋外で計測するものは G 特性音圧レベルの値、(0.25Hz～315Hz での) 1/3 オクターブ解析、及び、サンプリングレートを 48 k Hz にして、120 秒以上の WAV ファイルとして収録したもの。

計測データは公開を原則とする。

夜中に何度も目が覚める等の訴えがある場合などは、必要に応じて長時間の計測を行う。

4.2.1 苦情の内容

超低周波音・低周波音による苦情は物的被害と心理的被害、生理的被害に大別される。物的被害は、音を感じないのに振動を感じる、戸や窓がガタガタする、置物が移動するといった被害である。心理的被害は、低い音が気になる、気分がいらいらする、胸や腹を圧迫されるような感じがするといった被害で、生理的被害は、頭痛・耳なりがする、吐き気がするといった被害である。

被害者とのやりとりから、被害内容がこのいずれかにあてはまるか、それ以外かに分類する。物的被害か心理的被害、生理的被害の場合、以下のような場合が推測される。

(1) 物的被害

物的被害が発生する場合は、超低周波音・低周波音では、20Hz 以下に卓越周波数成分をもつ超低周波音による可能性が高い。なお、物的被害は超低周波音・低周波音だけでなく風車振動の地中伝搬によっても地面振動が発生する場合があるので、超低周波音・低周波音と地面振動の両方の可能性を考えておく必要がある。

(2) 心理的被害、生理的被害

心理的被害、生理的被害の場合は、20Hz 以下の超低周波音による可能性と、20Hz 以上の可聴域の低周波音による可能性が考えられる。このうち、超低周波音の場合は物的被害も併発していることが多く、振動そのものや、建具等の振動によって二次的に発生する騒音に悩まされている場合もある。可聴域の低周波音の場合は非常に低い音によって上記のような被害が発生していることが多い。

超低周波音・低周波音の知覚と超低周波音・低周波音による建具応答の領域区分を図-4.2 に示す。超低周波音・低周波音による影響は音の周波数特性によりそれぞれ異なるので、この図を参考にして、どのような超低周波音・低周波音が発生している可能性があるかの目安を立てることができる。(なお、この図の閾値は平均的なものであるので注意を要する。

聴覚閾値の標準偏差は 5dB 程度あり、平均値からみると 10dB 程度の違いがみられる可能性がある。建具のがたつき閾値は、このレベル以上でがたつきの可能性を示しており、常にがたつくわけではない。)

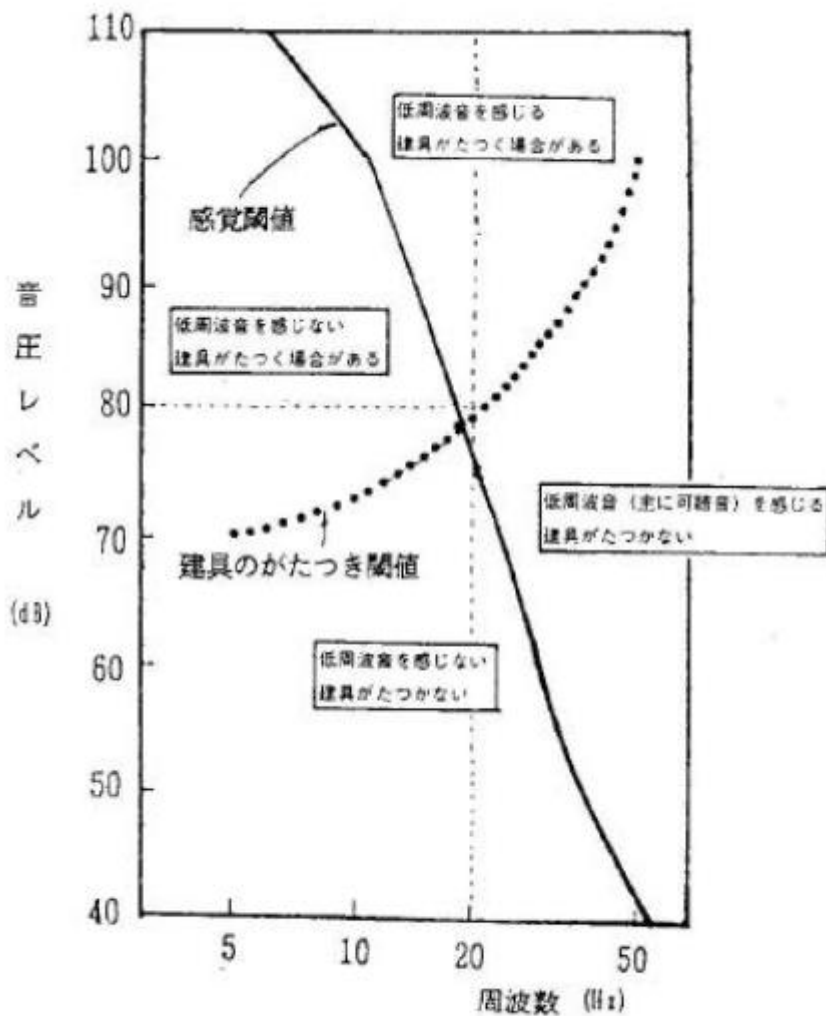


図-4.2 低周波音の知覚と低周波音による建具応答の領域区分

表 1 低周波音による物的苦情に関する参照値

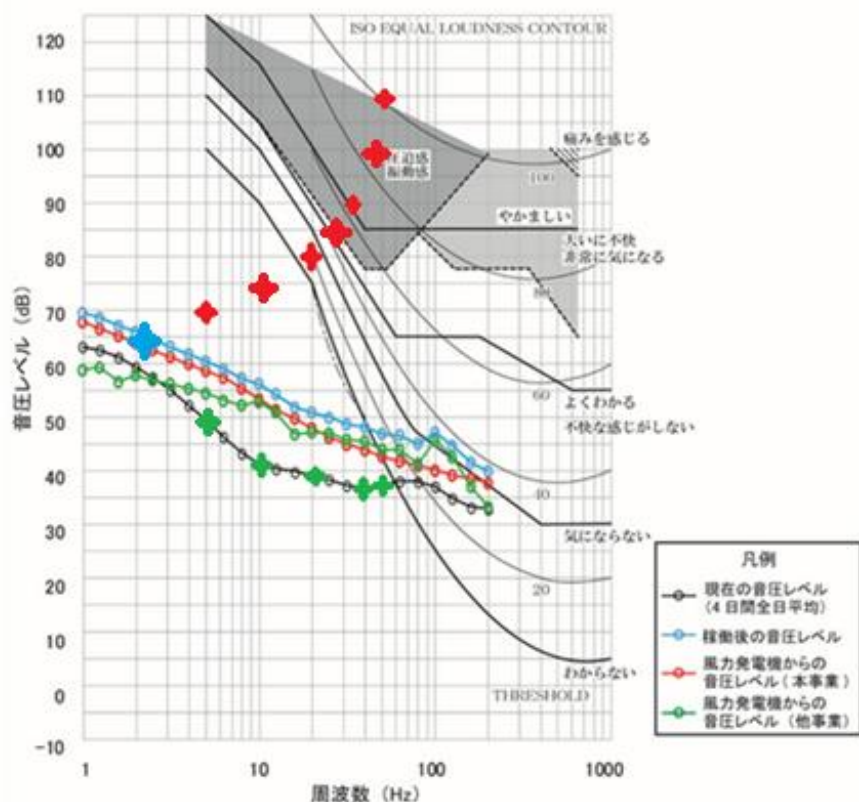
1/3 オクターブバンド 中心周波数 (Hz)	5	6.3	8	10	12.5	16	20	25	31.5	40	50
1/3 オクターブバンド 音圧レベル (dB)	70	71	72	73	75	77	80	83	87	93	99

上の表では、周波数が下がればガタツキ閾値も小さくなります。

館山の風車騒音の解析では、1/3 オクターブ解析を、ISO7196 に従って調べると次の表になります。

W15: transpose(w12)							
	1: No Units	2: No Units	3: No Units	4: No Units	5: No Units	6: No Units	7: No Units
1:	54.727250	62.381626	54.976763	56.733648	58.610999	77.287140	64.371465
2:	0.250000	0.315000	0.400000	0.500000	0.630000	0.800000	1.000000
3:							

風車音の音圧レベルとガタツキ閾値の対応関係を拡大すれば下のグラフになります。



出典：「文部省科学研究費『環境科学』特別研究：超低周波音の生理・心理的影響と評価に関する研究班
『昭和 55 年度報告書 1 低周波音に対する感覚と評価に関する基礎研究』」より作成

図 10.1.4-8(1) 圧迫感・振動感を感じる音圧レベルとの比較結果

(環境-①：春季全日平均)

日本家屋の固有振動数が 1Hz～2Hz である事と、上の図から、2Hz で 65 d B 程度で、ガタツキが起きると考えられます。

よって、2Hz での風車音の影響に関する知覚閾値は 65 d B 以下となる。

図を、上のように修正する

4.2.2 発生状況

(1) 現象を感じる場所

物的被害の場合、屋内でがたつきが知覚され問題が発生することが多い。超低周波音・低周波音の卓越周波数と部屋を含めた建具の共振周波数が一致した場合に、低い音圧レベルで建具の微振動が発生しやすい。強制振動の場合もある。建具の共振特性は建具の取付け状況や室内の他の建具の開閉状況によっても異なるので、どういう条件のときに建具が振動しやすいかも尋ねておくといよい。

心理的、生理的被害では、窓の開け閉めによって室内での感じ方が変わる場合がある。例えば、発生源が屋外にある場合、騒音であれば窓を閉めたほうが窓の遮音効果によって音を小さく感じるが、超低周波音・低周波音の場合、窓を閉めると高い周波数の音が遮蔽されて、窓を開けていたときには気付かなかった低い周波数の音の存在を知覚することがある。心理的被害や生理的被害の風車音の場合は、アノイアンス（不快

感) に関しては、可聴域の低周波音による寄与は 9~13%程度であり、エネルギーでの補正を考えると、超低周波音による寄与が大きいと考えられる。可聴域の低周波音では室内で定在波が生じて、局所的に音が大きい場所、小さい場所が存在することがあるので、特に問題となる場所があるかどうかとも尋ねておくとい。

と修正する。

(2) 現象の発生性状（持続的か間欠的か）

発生源がはっきりとつかめない場合など、超低周波音・低周波音（あるいは現象）の発生性状が持続的か間欠的か等によって、発生源を推定できる場合がある。例えば建具のがたつき等は発生源の性状の影響を受けやすい。持続的に発生する低周波音の場合は建具のがたつきも持続的に発生し、超低周波音・低周波音が間欠的に発生する場合にはがたつきも間欠的に発生する。

風車音の場合は、120 秒間のデータから計算した最大音圧が 0.175Pa の時に、風が弱まれば 0.1Pa、風が強まれば 0.37Pa になることがある。風が弱い時間や風が強い時間は 20 秒程度継続する。

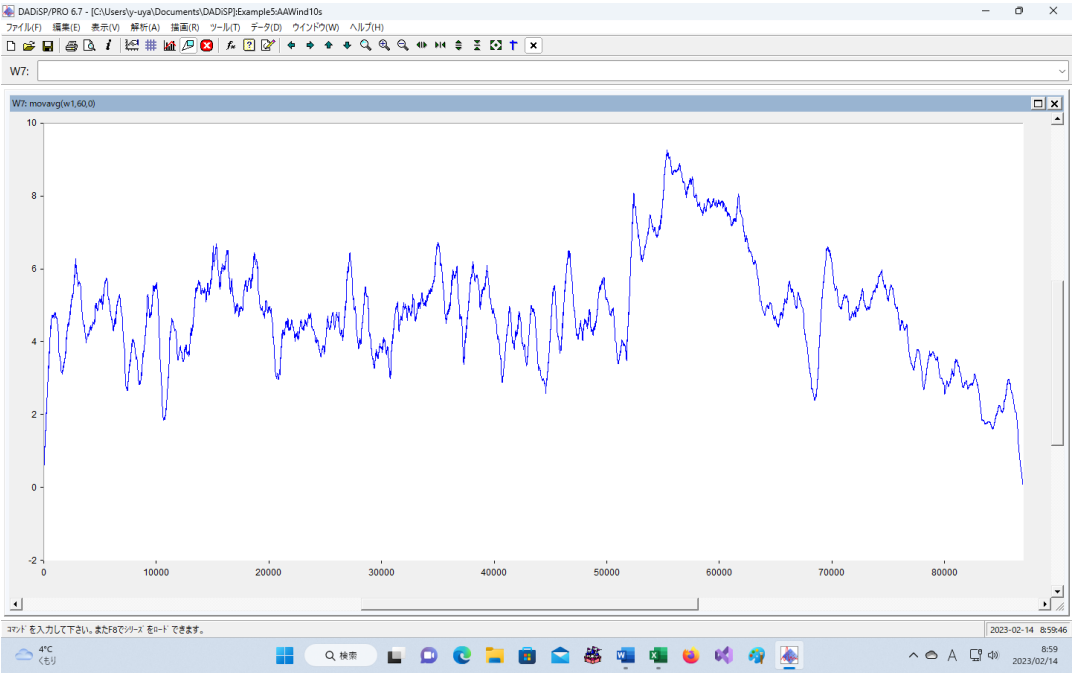
気象業務支援センターから入手した風況データを見れば、

年	月	日	時	分	秒	前10秒間最大瞬間風速	前10秒間最小瞬間風速	前10秒間風程
						0.1m/s	0.1m/s	
2019	2	2	0	12	40	147	124	132
2019	2	2	0	12	50	146	107	131
2019	2	2	0	13	0	122	82	102
2019	2	2	0	13	10	105	65	83
2019	2	2	0	13	20	112	71	82

(前 10 秒間風程は、10 秒間に風が進む行程を意味します。132 は秒速 13.2m の風速です。)

風速も風向も不安定なのです。

風速の移動平均をとると、



となります。

ピーク値は、2820, 5640, 6780, 10070, 15030, 16310, 18720、、、秒の辺りです。

秒	分	経過（分）
2820	47	
5640	94	47
6780	113	19
10070	168	55
15030	251	83
16310	272	21
18720	312	40

上の表を見れば、1時間に1回くらい風車に強い風が当たることが分かります。

強い風が当たれば、揚力ベクトルが大きくなり、風車の振動も大きくなります。その結果風車から発生する音も大きくなります。

揚力ベクトルの大きさは、風速の2乗に比例します。風速が2倍になれば、揚力ベクトルの大きさは4倍になります。

塔の側面の振幅も大きくなるので、風車音の音圧も大きくなるのです。

周波数は 0.7Hz～0.9Hz の辺りで、かなり安定しているのですが、音圧はかなり変化します。

（3）発生時期、時刻

現象の発生性状の場合と同様に、超低周波音・低周波音の発生源を推定する際の手がかりになる。例えば、超低周波音・低周波音の発生時間と機械の稼働時間あるいは稼働状況と対応させることにより、発生源を推定できる場合がある。また、風向きなど、気象条件の違いによって影響の異なる場合も考えられる。

（4）耳で聞こえるか

問題となっているのが、超低周波音なのか可聴域の低周波音なのかを推定する材料になる。非常に低い音が耳で聞こえれば、可聴域の低周波音が存在することになる。風車音では、必ず超低周波音も放出されている。

（5）胸や腹を圧迫されるような感じがするか

超低周波音・低周波音に特有な感覚として圧迫感・振動感がある。大きな音圧レベルの超低周波音が発生している場合や可聴域の低周波音が発生している場合には、胸や腹を圧迫されるような感じがすることがある。

（6）建具等が振動するか

建具等が振動するかしないか、建具がどの程度振動しているか（かすかに振動しているか、激しく振動しているか）を尋ねる。窓の種類（木製の建具か、金属製の建具か）や施錠の有無によっても、超低周波音・低周波音によるがたつきの発生状況が異なる。超低周波音・低周波音が発生している場合には、どの程度の音圧レベルが発生しているかのおおまかな推測をする材料となる。建具のがたつき閾値を参考に推定する。

（7）苦情者の分布

大型の発生源により超低周波音・低周波音問題が発生した場合、影響範囲は広いことが予想される。家庭用ボイラーなどのあまり大きくない発生源により超低周波音・低周波音問題が発生した場合には、影響範囲は限定されることが多い。

同じような苦情を寄せる者がその周辺にどの程度分布しているかも、発生源を推定する手がかりになる。

（8）周辺の状況

問題となる低周波音が発生するためには、発生源はある程度の大きさがなければならない。苦情者の周辺に、大きな音圧レベルの超低周波音・低周波音が発生する可能性がある発生源がないかどうかについても尋ねてみるとよい。

と修正する。

4. 3 予備調査

4.3.1 予備調査の目的

予備調査を行う目的として、以下の 2 つがあげられる。

(1) 調査員自身による発生状況の把握

(2) 現場実測調査のための概略的な状況把握

(1) については、被害が寄せられた場合、電話や窓口で問題が解決しないとき、現場の状況が把握できないとき、現地調査が必要なとき等が考えられる。

調査員が現地に赴いて調査員自ら体感し、発生状況を把握するとともに、精密騒音計と振動レベル計での 10 分間程度の計測を行い、WAV ファイルとして記録する。現地調査を行う場合には、予備調査結果に基づいて測定点、測定時期、使用機器等を決定する。

(2) については、現況把握、発生メカニズムの解明、対策効果の確認を行う場合が考えられる。これらの測定点、測定時期の選定も含め、測定計画を立てるにあたっては、事前に現場の状況を把握することが不可欠である。

と変更する。

4.3.2 調査内容

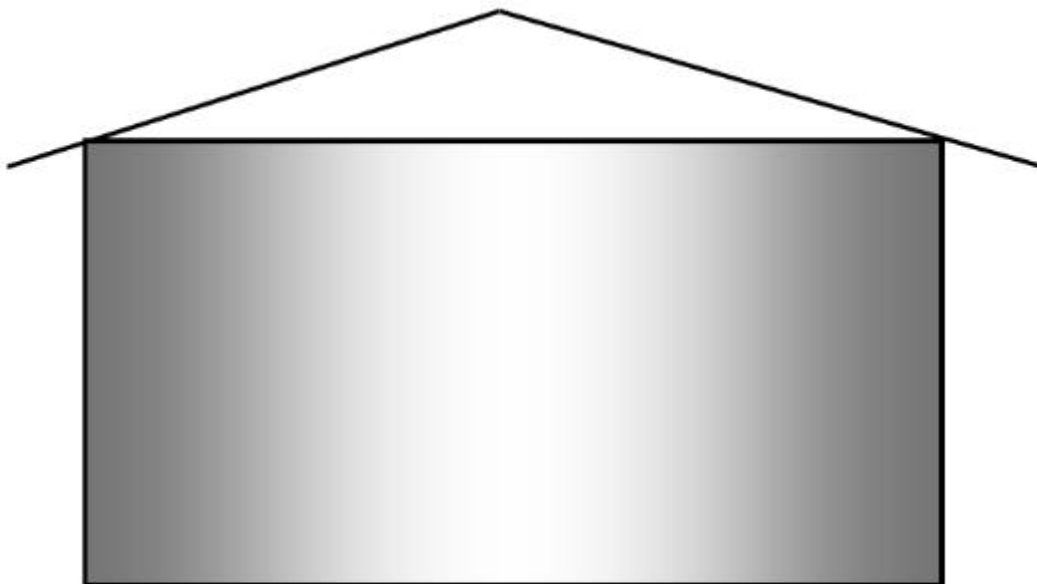
ここでは、主に被害が寄せられた場合の予備調査を中心に、調査のポイントについて述べる。調査項目は、基本的には窓口、電話等における状況調査とほとんど同様である。

(1) 現象を感じる場所

建具のがたつきが発生する場合、室内のどの家具ががたつくか、その時の室内の各建具の開閉状況はどうであるかを確認する。超低周波音・低周波音は波長が長いので、がたつきが発生している方向に必ずしも発生源があるとは限らないので注意する。

心理的、生理的被害がある場合は、屋外と屋内で超低周波音・低周波音が感じられるか、聞こえるかを確認する。室内では窓を開閉してみるとよい。可聴域の低周波音では、図-4.3 に示すように室内で定在波が生じて、局所的に音が大きい場所、小さい場所があるかどうかとも確かめるとよい。図では左右方向で強さが異なっているが、高さによってレベルが異なることもある。

精密騒音計と振動レベル計での測定を室内での場所を変えながら、10 分間の計測を 5 回程度行う必要がある。



可聴域の低周波音では、室内の場所によって音の大小が存在する場合がある

図-4.3 室内で定在波が生じた場合の音圧分布

(2) 現象の発生性状（持続的か間欠的か）

可聴域の低周波音であれば、低周波音（あるいは現象）の発生性状が持続的か間欠的かは耳で確認できる。大きな音圧レベルの超低周波音が発生している場合には、低周波音圧レベル計のメーターの動きで性状をある程度把握できるが、G 特性音圧レベルでの重みづけがあるので、確認するには、WAV ファイルのコンピュータによる解析が必要になる。

(3) 耳で聞こえるか

可聴域の低周波音は、苦情が発生するくらいの音圧レベルの低周波音が発生していれば耳で聴いてわかる（知覚される）。ただし、超低周波音・低周波音の感覚閾値は個人差が大きいので、調査員による確認よりは、計測データの解析結果を持って判断することが望ましい。特に機械等が稼働したり停止したりする場合はわか

りやすい。超低周波音の場合はかなり大きな音圧レベルが発生している場合でないと、なかなかその存在に気づかない。屋外の場合は、周囲の騒音によりマスクされてわかりづらいことが多い。判断では、超低周波音の領域での、ピーク値の周波数の関連性を、 $f/3$ 、 $2f/3$ 、 f 、 $2f$ 、 $3f$ 、 Hz に於いて確認する必要がある。

(4) 建具等が振動するかしらないか

特に揺れやすい建具の場合、超低周波音で建具が微振動することにより二次的な騒音が発生することがある。一般に金属製の建具は木製建具より揺れにくい。特にアルミサッシなどでクレセントをしてある（施錠してある）場合には、音圧レベルが大きくてもがたつかないことが多い。

建物の外側から、建具の微振動を励起させるような超低周波音が発生しているかどうかの見当をつけるには、建物の外部に面した建具を見るとよい。窓等が揺れているかどうかは、窓面の動き（窓に写り込んだ景色の動き）でわかることが多い。工場・倉庫などのシャッターや、トタンや鉄板などでできた簡易の塀や面積の大きい看板等を手で軽く触ってみるとよい。この方法は、高い音圧レベルの超低周波音が発生している場合には有効である。

測定の正確さを保つために、振動レベル計での計測も必要である。

(5) 被害との対応

被害者宅を訪れる場合には、調査員の体感よりも物理量（精密騒音計での最大音圧の値の変化、振動レベル計での計測結果の解析）と被害者の反応が対応するかどうか注目する。被害者の反応と物理量が対応していれば、超低周波音・低周波音がその要因の一つである可能性が考えられる。

(6) 周辺の状況

被害対応では、被害者の周辺（10 km 以内）に大きな音圧レベルの超低周波音・低周波音の発生源があるかどうか調査する。

超低周波音・低周波音の発生源がはっきりしている場合の実態調査、発生メカニズムの解明、対策効果の測定等を行う場合には、対象とする超低周波音・低周波音以外の発生源がないか、ある場合には稼働状況等を確認しておく必要がある。

できればカメラ、ビデオ等で現場の状況を記録しておく、後で役に立つことがある。

風車音の場合は、超低周波音の発生メカニズムに関して諸説があるが、それらが、風車音の周波数特性や風車音の指向性を説明できるものか否かを確認する必要がある。

なお、人体への影響に関しては、強風時の波形の詳細な計測と、音響キャビテーションによる気泡発生の条件とを比較すれば、頭痛が風車音による直接的な健康被害であることが判明する。

(7) 測定点候補地の選定

被害対応、発生メカニズムの解明、対策効果の確認のための現場測定を行う場合には、あらかじめ測定に適した場所を選定する。測定点の選定条件については次の章で述べる。

と変更する。

5. 超低周波音・低周波音の測定方法

5.1 測定計画

5.1.1 測定量

(1) 超低周波音・低周波音の感覚及び睡眠への影響に関する評価に用いる測定量超低周波音の感覚及び睡眠への影響に関しては、G 特性音圧レベルの他に、 $f=RZ/60$ (Hz) での音圧を測定する。

G 特性を持たない低周波音圧レベル計を用いる場合には、実時間周波数分析器等を用いて 1/3 オクターブバンドで周波数分析を行い、周波数分析結果に G 特性補正值（表-1.1 参照）を加えた後、エネルギー加算して G 特性音圧レベルを計算で求めてもよい。なお、超低周波音の場合は、オクターブバンド音圧レベルから G 特性音圧レベルを求めるのが望ましい。

風車音の特性を考えれば、1/3 オクターブ解析での中心周波数は ISO7196 に従って、0.25～315Hz とする必要がある。G 特性音圧レベルの計算例を表-5.1 に示す。

また、必ず超低周波音・低周波音の周波数分析を行い、中心周波数 0.25～315Hz での、1/3 オクターブバンド音圧レベル（衝撃性の超低周波音の場合は、オクターブバンド音圧レベル）を測定する。

（2）超低周波音・低周波音の建具等のがたつきに関する評価に用いる測定量

超低周波音・低周波音の建具等のがたつきに関する評価に関連する測定は、周波数分析器等を用いて超低周波音・低周波音の周波数分析を行い、1/3 オクターブバンド中心周波数 0.25～315Hz の 1/3 オクターブバンド音圧レベルを測定する。

（3）超低周波音・低周波音の圧迫感・振動感に関する評価に用いる測定量

超低周波音・低周波音の圧迫感・振動感に関する評価に関連する測定は、周波数分析器等を用いて、1/3 オクターブバンド中心周波数 0.25～315Hz の 1/3 オクターブバンド音圧レベルを測定する。

（訂正；p.20 表-5.1 を以下の表に差し替えてください。）

表-5.1 G特性音圧レベルの計算例

No.	1	2	3=1+2	4	5	6=4+5
発生源	例)安全弁, 対策前			例)安全弁, 対策後		
	音圧レベル (平坦特性)	G特性補正	音圧レベル (G特性)	音圧レベル (平坦特性)	G特性補正	音圧レベル (G特性)
O.A./dB	104	-	103	85	-	84
f/Hz						
1		-43			-43	
1.25		-37.5			-37.5	
1.6		-32.6			-32.6	
2		-28.3			-28.3	
2.5	65	-24.1	40.9	65	-24.1	40.9
3.15	65	-20	45	75	-20	55
4	65	-16	49	62	-16	46
5	68	-12	56	68	-12	56
6.3	78	-8	70	75	-8	67
8	95	-4	91	78	-4	74
10	103	0	103	81	0	81
12.5	80	4	84	72	4	76
16	71	7.7	78.7	65	7.7	72.7
20	70	9	79	60	9	69
25	69	3.7	72.7		3.7	
31.5	67	-4	63		-4	
40	65	-12	53		-12	
50	65	-20	45		-20	
63	64	-28	36		-28	
80	63	-36	27		-36	
備考		ISO7196			ISO7196	

ISO7196 での重みづけを必ず確認して、0.25Hz～315Hzを対象として計算して下さい。←

と修正する。

5.1.2 超低周波音・低周波音の測定系列

(1) G 特性音圧レベルの測定

G 特性音圧レベルの測定を行うには、以下の測定系列が考えられる。

a. G 特性音圧レベルを測定できる低周波音圧レベル計を用いる場合

G 特性音圧レベルの変動が小さい場合には、低周波音圧レベル計の指示値を直接読み取ってもよい。G 特性音圧波形の出力をもつ低周波音圧レベル計を用いる場合には、低周波音圧レベル計の出力をレベルレコーダの入力に接続して測定を行う。低周波音では風の影響を受けやすいので、できるだけレベルレコーダも合せて用いて風雑音による影響をこまめにチェックすることが望ましい。

間欠的、衝撃的な低周波音においても、風がなく背景的な低周波音とのレベル差が十分大きい場合には、低周波音圧レベル計の指示値を直接読み取ってもよい。通常は、変動の大きい超低周波音・低周波音や間欠的、衝撃的な超低周波音・低周波音を測定する場合などには、レベルレコーダでレベル波形をモニターしながらデータレコーダ等に録音し、持ち帰って解析したほうが失敗が少ない。測定系列の例を図-5.1.1 に示す。

G 特性音圧レベルの計算を、ISO7196 に従って中心周波数を 0.25~315Hz とした 1/3 オクターブ解析に対しての重みづけを行ってから行なっている可能性が有るのは、SA-A1 のみである。

他は、1Hz~80Hz の中心周波と重みづけを使って計算していると思われる。結果として得られる数値には大きな差は無いが、この事は、G 特性音圧レベルの数値が風車音の評価の指標としては不適當であることを意味している。

b. G 特性を持たない低周波音圧レベル計を用いる場合

G 特性を持たない低周波音圧レベル計を用いる場合には、実時間周波数分析器等を用いて現場で周波数分析を行うか、平坦特性で低周波音を録音し、持ち帰って再生し、実時間周波数分析器等を用いて周波数分析を行う。測定系列については、(2) の低周波音の周波数分析を参照のこと。

ISO7196 での中心周波数 0.25~315Hz に合わせての、実時間周波数分析器の具体的な機種が有るか否かが不明です。

平坦特性で超低周波音・低周波音を録音するときは、使用するマイクの特性の確認が必要です。多くのマイクでは 20Hz 以上では平坦な特性を持っているが、1Hz 以上範囲で平坦な特性を持っているマイクを使用することが必要です。

マイクに掛かる音圧変動を WAV ファイルとして記録したものを再生するときには、記録した音の超低周波音の成分はスピーカからの音としては再生されない事に注意することが必要です。再生音に対しての実時間周波数分析器の使用は、超低周波音の部分が抜け落ちるために、風車音の場合は不適切です。

WAV ファイルを波形解析ソフト(私は DADISP を使っています)に読み込んで、周波数スペクトルの計算、1/3 オクターブ解析の計算、ISO7196 での重みづけ、G 特性音圧レベルの数値の計算という手順になります。

(2) 超低周波音・低周波音の周波数分析

可聴域の低周波音である、20Hz 以上の音を対象とする場合は、

低周波音圧レベル計の出力を分岐し、一方は実時間周波数分析器の入力に、他方はレベルレコーダの入力に接続して低周波音のレベル波形をモニターしながら、周波数分析を行う。低周波音圧レベル計の周波数補正特性は平坦特性とする。したがって、使用する低周波音圧レベル計は、G 特性の付いた低周波音圧レベル計でも G 特性を持たない低周波音圧レベル計でもよい。

風が吹いている場合には、レベルレコーダや実時間周波数分析器を用いて風雑音による影響をこまめにチェックすることが望ましい。

変動の小さい低周波音の場合は、現場での分析も可能であるが、変動する低周波音や間欠的、衝撃的な低周波音の場合などは、(3)に示す低周波音の録音を行い、持ち帰って周波数分析をすることが望ましい。測定系列の例を図-5.1.2に示す。

超低周波音（0～20Hz）を含めて解析する場合は、

NL-62、NL-63では、サンプリングレート 48kHz、SA-A1では、サンプリングレート 51.2kHzで、マイクに掛かる音圧変動計測して、WAVファイルとして保存する。

WAVファイルを波形解析ソフトに読み込んで、マイクに掛かる音圧変動を表す符号付整数を音圧（パスカル値）に変換する。120秒以上の音圧変動を表すデータに対してFFTの計算を行う。

これから周波数スペクトルを求める。

(3) 超低周波音・低周波音の録音

多点同時測定を行う場合や、詳細な解析を行う場合、騒音・振動・超低周波音・低周波音を同時に測定する場合などには、NL-62、NL-63、SA-A1での録音を行う。また、(1)、(2)でも述べたように、変動の大きい低周波音や間欠的、衝撃的な低周波音の場合などには、超低周波音・低周波音の録音を行い、持ち帰って周波数分析をするか、その場で解析ソフトをインストールしてあるノートパソコンにデータを移して解析する。可聴域の低周波音である、20Hz以上の音を対象とする場合は、

低周波音圧レベル計の出力を分岐し、一方は録音器（データレコーダ、DAT等）の入力に、他方はレベルレコーダの入力に接続して低周波音のレベル波形をモニターしながら録音を行う。その際、低周波音圧レベル計の周波数補正特性は、G特性音圧レベルを録音する場合にはG特性に、持ち帰って周波数分析を行う場合には平坦特性にする。使用する低周波音圧レベル計は、G特性音圧レベルを録音する場合以外は、G特性の付いた低周波音圧レベル計でもG特性を持たない低周波音圧レベル計でもよい。

風が吹いている場合には、録音に際して、レベルレコーダや実時間周波数分析器を見ながら風雑音による影響をこまめにアナウンスすることが望ましい。

測定系列の例を図-5.1.3に示す。

超低周波音（0～20Hz）を含めて解析する場合は、

NL-62、NL-63、SA-A1に、波形収録ソフトをインストールして、音圧変動を記録する。のだが、

風が吹いている場合には、機材を3台用意して、二重防風スクリーンを付けて屋外で計測するもの、標準的な防風スクリーンを付けて屋外で計測するもの、標準的な防風スクリーンを付けて室内（または、車内）で計測するもの、に分けて、近くで同時に計測し、風の影響を、 $f=RZ/60$ (Hz) の値に注目して比較する。

周波数分解能を十分上げておく必要がある。

風車の近くでの計測では、風雑音は、計算誤差の程度であるが、それを確認する必要がある。



図-5.1.1 レベルレコーダによるG特性音圧レベルの測定系列の例



図-5.1.2 低周波音の周波数分析を行う場合の測定系列の例

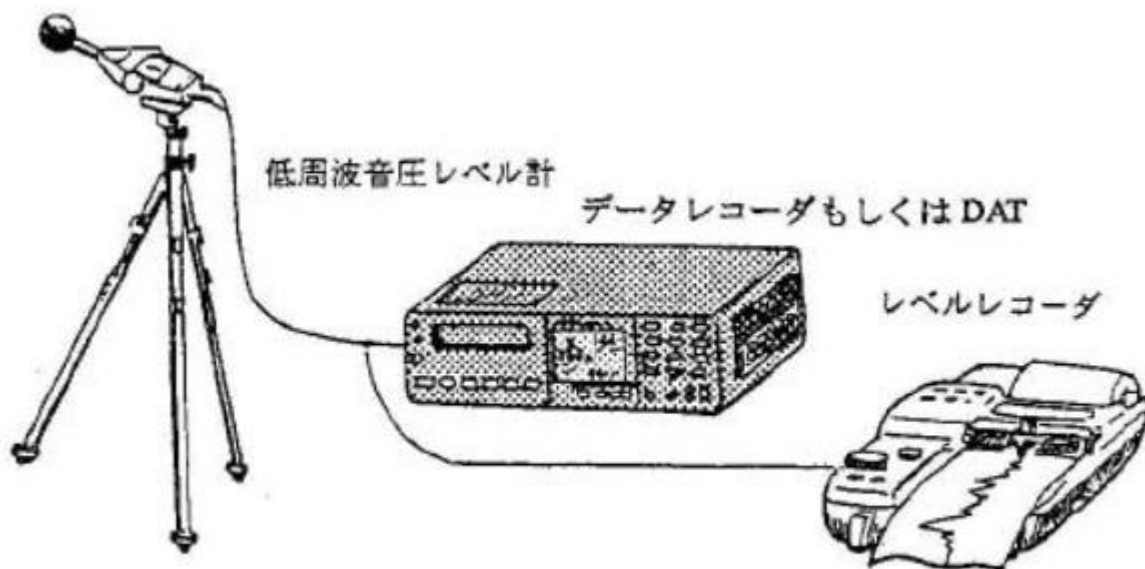


図-5.1.3 低周波音の録音を行う場合の測定系列の例

5.1.3 超低周波音・低周波音の測定機器

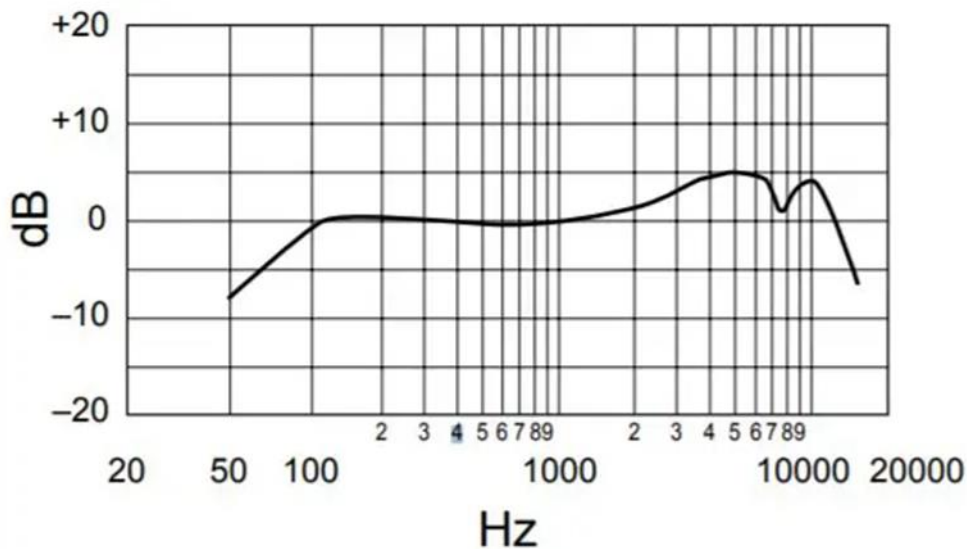
(1) マイクロホン

超低周波音・低周波音を測定するために、現在ではセラミックマイクロホン（圧電形マイクロホン）及びコンデンサマイクロホンが用いられている。

セラミックマイクロホンの性能は比較的安定しており、低周波数領域において良好な特性が得られる。セラミックマイクロホンは、振動膜と圧電素子からなり、通常は前置増幅器を内蔵していて、その感度はそれらのマイクロホンが接続される低周波音圧レベル計や振動レベル計の感度に対応するものとなっている。

3. 1. 1 マイクロホンの性能

ボーカルマイクロホンの世界標準。URE SM58-LCE の周波数特性は、次のグラフです。



100Hz～1000Hz までは周波数特性の値が 0 d B であり、実際に与えられた音圧レベルとマイクが捉えた音圧レベルの間には差が無い事を示しています。

50Hz では、-8 d B の減衰となっていて、50Hz の音を与えられた場合には、実際に与えられた音圧レベルよりも、マイクが把握する音圧レベルは、8 d B ほど低くなっている事を意味している。

風車音の特徴を詳細に調べるには録音する必要があります。困ったことに、普通のマイクは低周波音に強いと言っても、対応する周波数が、20Hz～20kHz 程度のものがほとんどです。

スマートフォンのマイク感度は20Hz～

低周波音の計測系は一般に「音をとらえるマイク部」と「捉えた音を補正し解析するためのソフトウェア部（アプリ）」に別れます。低周波音を計測できるかはまず第一にマイク仕様の問題があります。発生している音に対してマイクの感度が対応していなければそもそも音を計測することができません。マイクがどの周波数域に対応したものを示す仕様に「周波数特性」があります。スマホに内蔵されているマイクの仕様や感度はあまり公開されていませんが、一般的なダイナミックマイクの場合周波数特性は40Hz～16kHz、コンデンサーマイクの場合は周波数特性は20Hz～20kHzとなっています。いずれも人間の可聴域（耳で聞こえる音の範囲）に対応した仕様となっています。

一般的なマイクでは低周波音は適切にとらえられない

一方で低周波音とは一般的に「100Hz以下」の音とされており、環境省が定める参照値のうち「物的苦情に関する参照値」は5～50Hzの範囲で定められています（> [低周波音の基準についてはこちらから](#)）（> [さらに周波数の低い超低周波音についてはこちらから](#)）。マイクの周波数特性にこの範囲が含まれていない場合適切に発生している低周波音をとらえ、評価することができません。言い換えると測定結果の値が大きかったとしても、小さかったとしても、それをもって大きな低周波音が発生している（していない）と判断することはできません。つまり一般的なマイクでは低周波音を適切にとらえることはできないのです。

もちろん、特別なマイクもあります。リオン社の UC-59L です。



図1 本製品外観
マイクロホンUC-59L とプリアンプXN-3C



周波数範囲	DC～20 kHzまたは0.25 Hz～20 kHz
-------	----------------------------

このマイクと右にある SA-A1 を組み合わせると、0.25Hz からの計測が可能となります。周波数特性は下のグラフの青い線になるようです。

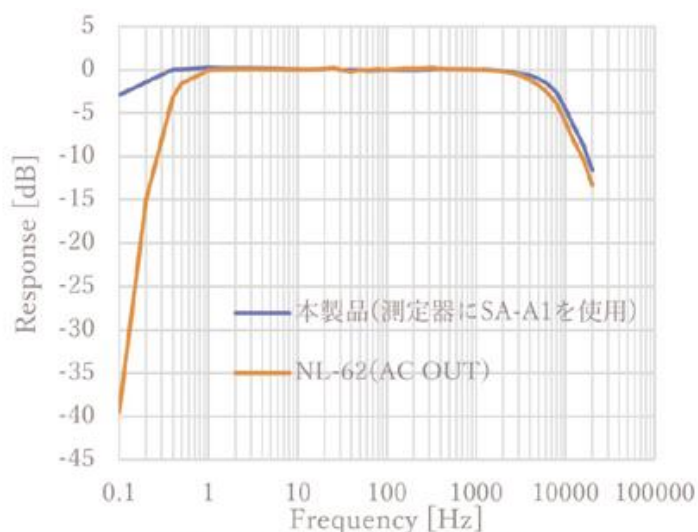
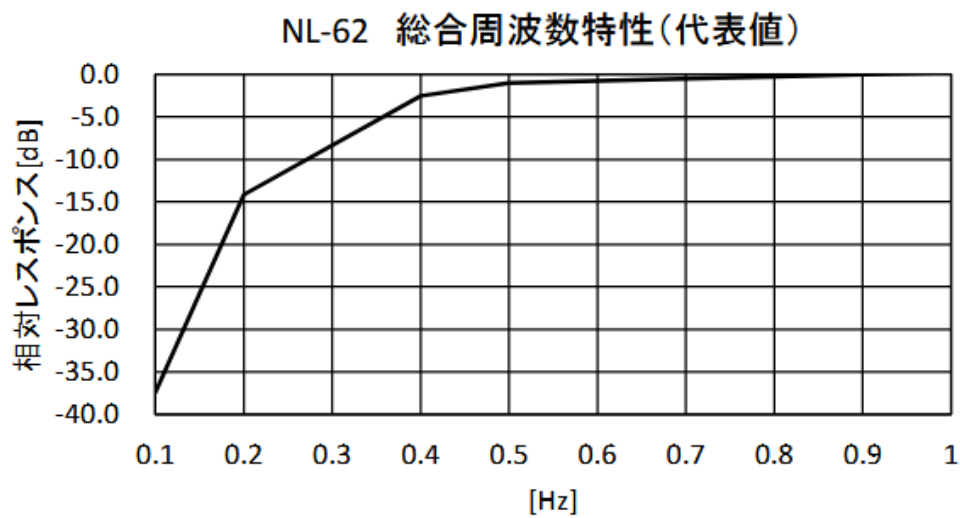


図2 本製品とNL-62の周波数特性

このグラフでは、NL-62 の 0.1Hz での応答が、-38dB となっていますが、リオン社から参考としていただいた資料では、次のようになっていました。

frequency[Hz]	NL-62_responce[dB]	備考
0.1	-37.4	
0.2	-14.1	
0.4	-2.5	
0.5	-1.0	
1	0.3	
31.5	0	基準

NL-62 総合周波数特性(代表値)



※上記に提示する周波数特性は測定範囲外の周波数帯かつ代表値であり、NL-62の性能として保証するものではありません。

0.1Hz でのレスポンス(dB)は、上のグラフでは、-37.4dB となっています。

かなりの誤差があるとの前提ですが、計算では、0.1Hz で-37.4dB となっている資料の値を使う事にします。

この数値が意味するところは、0.1Hz の音の、音圧レベルを測るときに、計測された音圧レベルの数値は、実際に存在する 0.1Hz の音の音圧レベルよりも、-37.4dB 程度低い音圧レベルになっている。 と言う事です。

リオン社への質問と回答は、

質問 2. NL-62 で使用しているマイクロホンの形式は？ このマイクロホンで測定できる周波数範囲は何 Hz ですか。

回答 2. マイクロホンは UC-59L で、周波数特性（測定可能な周波数範囲）は 1 Hz～20000 Hz です。 となっています。

音圧を正確に把握できるのは、1Hz～20kHz であり、0.5Hz や 0.8Hz に関しては範囲外であり、その値は保証されないが、数値が、実際の音圧よりも高い値を取ることは無い。 とも言えると思います。

グラフを見ると、0.4Hz 辺りまでの計測値は、ある程度の判断基準にはなる。と考えます。
超低周波音用の特別なマイクは、1Hz あるいは 0.5Hz 辺りまでは、正確に測定できる。後で音圧補正を知れば、NL-62 でも、0.8Hz 辺りまでは計測できます。(下の右のグラフ)

SM58周波数特性

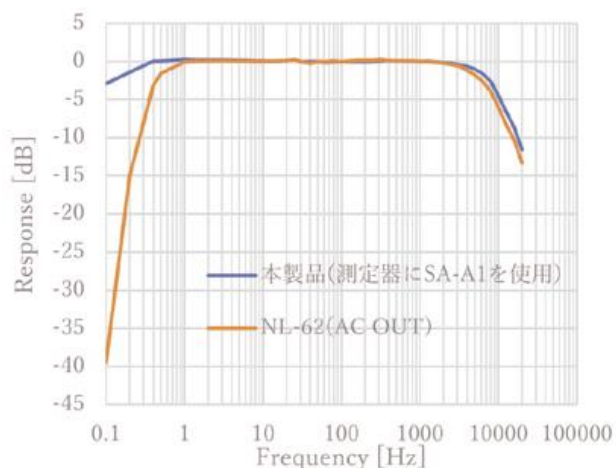
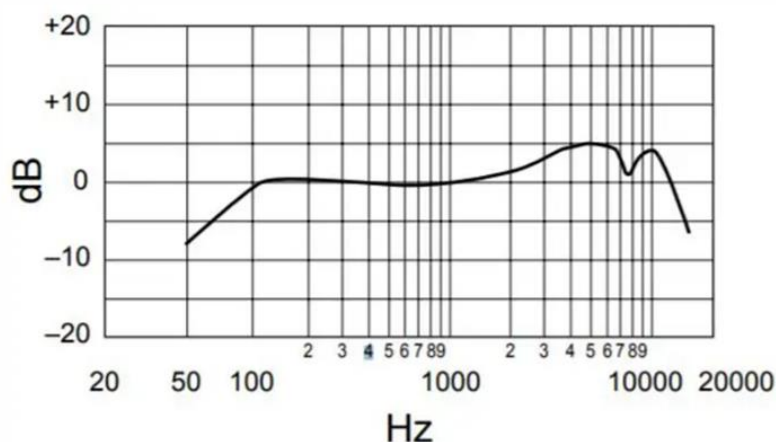


図2 本製品とNL-62の周波数特性

UC-59L と SA-A1 (120 万円程度) では、

周波数範囲	DC～20 kHzまたは0.25 Hz～20 kHz
-------	----------------------------

他は、

番号	種類	測定範囲
NL-62A	精密騒音計	1Hz～20000Hz
NL-52A	精密騒音計	10Hz～20000Hz
NL-42A	普通騒音計	20Hz～8000Hz
NL-27	普通騒音計	20Hz～8000Hz
NA-28	精密騒音計	12.5Hz～20000Hz

測定範囲ですが、一番低いものは SA-A1 で 0.25Hz からです。

NL-62、NL-62A、NL-63 と SA-A1 は同じマイクを使っています。しかし測定範囲に差があります。
ただし、計算に使用する音圧の数値は同じです。

リオン社に確認したところ、NL-62 に音圧の変化を記録するためのソフトを組み込んで、サンプリング周波数 48 k Hz で、計測し、16 ビットの符号付整数として作成した WAV ファイルにある数値は、SA-A1 での数値と同じだと教えていただきました。

これは、パソコンで計算すれば、最低でも 0.25 Hz までは計算できることを意味します。計測誤差の問題は残りますが、120 秒間のデータを使って計算すれば必要な周波数分解能が得られます。

マイクの感度はそれらのマイクロホンが接続される低周波音圧レベル計や振動レベル計の感度に対応するので、10 Hz ～ 20 k Hz に対応する NL-52A は、風車音の録音には不適です。

(2) 低周波音圧レベル計

これまで国内で市販されていた低周波音圧レベル計は、低周波音に特有の感覚である圧迫感・振動感を考慮

した LSL 特性注) 等日本独自の機能を備えていた。

また、ISO 規格 7196 の規定に対応した G 特性の入ったものとして市販されている機器の多くは、ISO7196 の規格である中心周波数 0.25~315Hz には対応していません。ほとんどが 1Hz~になっています。0.5Hz が計測範囲外になるので、大型風車の音の解析には使えません。

低周波音圧レベル計に使用されているマイクロホンは、圧電形マイクロホンが多い。測定音圧レベル 50~140dB 程度が測定できる。下限の音圧レベルは 50dB 程度、また大きな爆発現象以外では 140dB 以上の音圧は通常発生しないことから上限の音圧レベルは 140 dB 程度であればよいと考えられている。

指示計は騒音計と同じような性能を有しているが、動特性は SLOW 特性(時定数は 1 秒)が用いられる。1Hz 程度の低い周波数の信号に対して正しい実効値を指示するには時定数を 10 秒程度に大きくとらなければならない。SLOW 特性では 1 Hz の信号の測定にはやや時定数が不足しているが、2Hz ではほぼ問題がないこと及び新たな時定数を設けると騒音計との関連が複雑になることから SLOW 特性が用いられている。また、大きな時定数にすると低周波音の小さなレベル変動をとらえることが通常困難である。

注) LSL 特性; 50Hz をピークに低域では 12dB/oct.、高域では-18dB/oct.で減衰する特性。圧迫感・振動感との対応が良いとされる。

低周波音圧レベル計は、対象とする周波数帯が、風車の超低周波音の最大音圧の周波数(0.5~0.8Hz)の部分を含まないの、風車音の測定には使えません。

と修正します。

低周波音圧レベル計の概略を図-5.1.4 に、低周波音圧レベル計の周波数レスポンスを図-1.1 に示す。

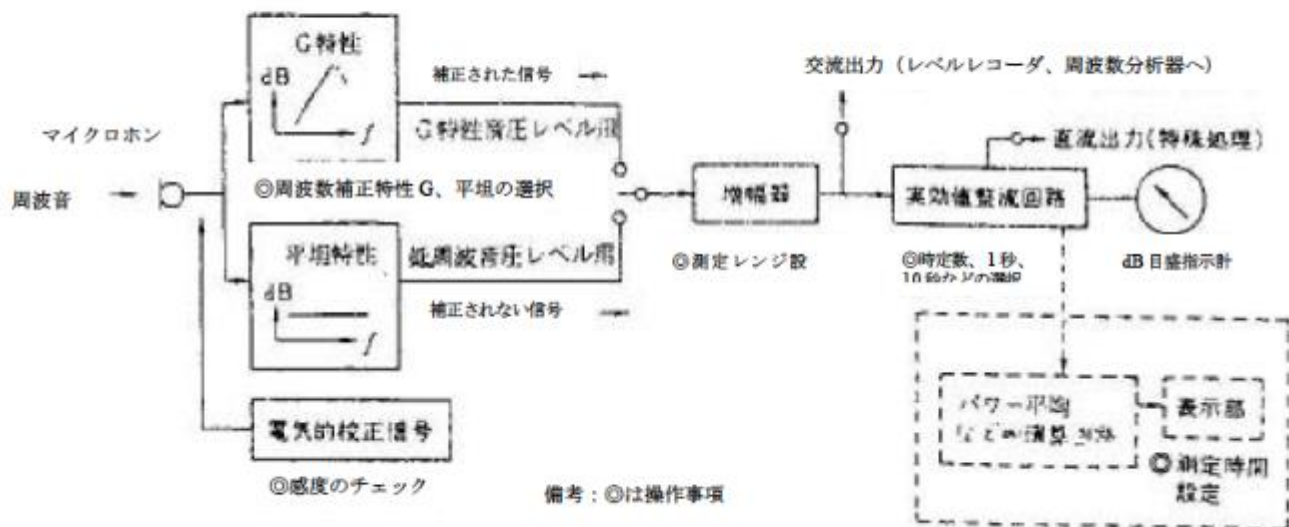


図-5.1.4 低周波音圧レベル計の動作原理と基本操作

低周波音圧レベル計が開発される以前は、低周波音マイクロホンと振動レベル計の組合せで低周波音の測

定を行っていた。マイクロホン感度が加速度型（圧電形）ピックアップの感度と相対的に同じであるように調整された低周波音用セラミックマイクロホン（前置増幅器内臓）を地面震度測定用の振動レベル計（JIS C 1510）に接続して、振動レベル計の平坦特性を 1～90Hz の低周波増幅器として用いて、低周波音の音圧レベルを測定しようというものである。この測定系では、マイクロホン感度が振動ピックアップの感度と同じ関係になるように調整されているので、振動レベル計の加速度の d B 目盛りをそのまま音圧レベルの d B 目盛として読むことができる。但し、振動レベル計のメーターの時定数 1 秒（動特性 SLOW）で記録させるか、録音して解析する必要がある。

なお、発破などによる単発衝撃性低周波音の測定では、特殊な測定系を考えなければならない場合がある。そのような測定では、まず測定系の下限周波数や最大音圧レベルが問題であり、一般の低周波音の測定に用いられるような低周波音圧レベル計では不十分である場合がある。次に測定系の指示部の動特性であるが、普通の実効値指示方式のものでは単発衝撃性低周波音に対して正しい測定値は得られない。通常は、爆発現象などは音圧波形記録が行われ、その場合の圧力センサーは圧電形、半導体形などが用いられる。音圧波形の記録は、測定系の入力インピーダンスや位相特性の影響を受けるので、それらについては測定器製造者から情報を得るか、実際の現象について機種による違い、測定点による違いなどの比較測定を行って確認することが必要である。

（3）レベルレコーダ

低周波音の測定では音圧レベルの変化の特徴をつかんで対象の音を判別または影響との関連を調べる人が多い。また低周波音の測定では風の影響を受けやすいので、通常レベルレコーダによる音圧レベルの記録は欠くことができない。レベルレコーダの JIS 規格としては JIS C 1512「騒音レベル・振動レベル記録用レベルレコーダ」があり、この規格の振動レベル記録用の 1～90Hz を含む周波数範囲の特性を用いる。レベル記録の際の動特性には SLOW（時定数 1 秒）を用いる

（4）周波数分析器

低周波音の周波数分析には、一般には 1/3 オクターブバンド分析器が用いられる。衝撃性の成分を含む超低周波音や変動の大きい超低周波音の周波数分析にあたっては、ごく低い周波数領域ではオクターブバンド分析器を用いることが望ましい。

実時間周波数分析器を用いればいくつもの帯域を同時に分析することが可能である。

超低周波音を含む、風車音の周波数分析には、1/3 オクターブ解析は使えない。風車音の解析では、0.5～1Hz 辺りの音圧を詳細に調べる必要がある。その周波数特性や風車音の持つ指向性などと風車音が発生する仕組みとの整合性が問題になる。

1/3 オクターブ解析では、詳細な周波数が不明となり、風車音の発生する仕組みを解明できない。更に、強風時の波形の特徴を知るには、音圧変動を記録するときのサンプリングレートを 48kHz 以上にする必要がある。

風車音の周波数分析では、1/3 オクターブバンド分析器は使えないし、精密騒音計の CPU の能力やメモリーの量から、実時間周波数分析器で、ISO 7196 に従って、中心周波数 0.25～315Hz での帯域を同時に分析できるものは見つからない。

周波数分析器の JIS 規格として JIS C 1513「オクターブ及び 1/3 オクターブバンド分析器」があり、1/3 オクターブバンドフィルタの周波数レスポンスの許容範囲によって II 形（一般測定用）と III 形（精密分析用）がある。ただし、JIS C1513 は近く改正され、そこではクラス 1 が精密法、クラス 2 が実用法に対

応する。

残念だが、J I S 規格では、風車音の特徴を把握できない。

(5) データレコーダ等

超低周波音・低周波音の録音にあたっては、オーディオ範囲の録音装置は適さない。超低周波音・低周波という特殊な周波数の録音になるので、対象とする 20Hz 以下の信号を歪みなく正確に録音することができなければならない。

残念ながら、録音したものの正確に再生するには、100m*10mの大きさのスピーカが必要である。

図 9 は NL-62 で記録した 60 秒間の風車音。図 10 は FFT を使って音を分割し、青を 0~20Hz、緑を 20~200Hz、赤を 200~24k Hz の成分として表したものの。図 11 は図 9 の音を PC のスピーカで再生し、再度 NL-62 で収録した音を図 10 と同様に分割したものである。

スピーカからの再生音には、10Hz 以下の部分が含まれないのです。にもかかわらず、風車の近くで聞いた音とスピーカからの音の違いを聴覚では判別できなかった。

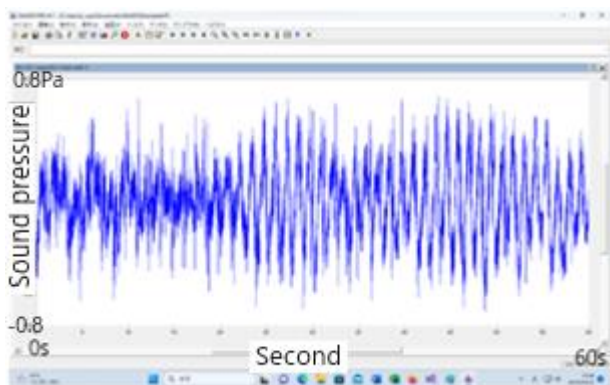


Fig.9 Wind turbine noise

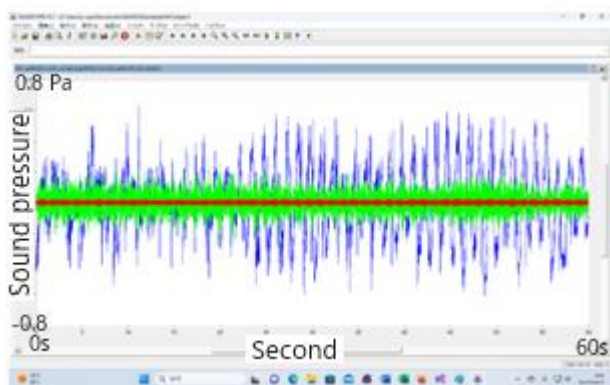


Fig.10 Separated Wind turbine noise

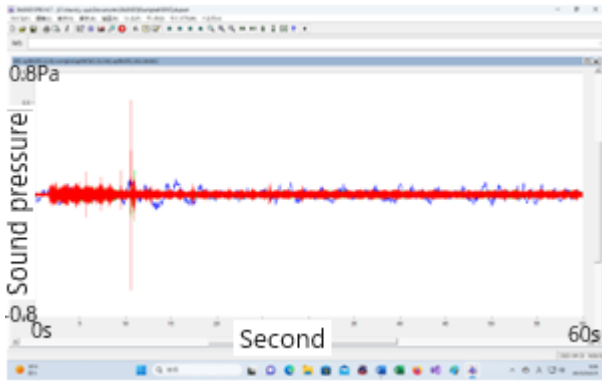


Fig.11 Separated sound from speaker

図 11 からスピーカ音には超低周波音が含まれない事が分る。大型のスピーカでも 10Hz 以下の音の再生は出来ない。これが風車音と実験室の再生音では圧迫感に差がでる原因である。聴覚では判別できないので、実験では、正確な測定と周波数計算が必要となる。

測定する超低周波音・周波数範囲や測定可能な音圧レベル幅（ダイナミックレンジ）を十分に確認した上で機種を選定する。超低周波音・低周波音の録音には計測用の録音装置（NL-62、NL-63、SA-A1 に波形収録プログラムをセットしたもの）を使用する。特に、変動の大きい超低周波音・低周波音や衝撃性の低周波音を測定する場合には、ダイナミックレンジが十分な録音装置を使用する。

と修正する。

5.1.4 測定時期

（1）被害対応の場合

被害対応の場合には、被害が起こるような条件の超低周波音・低周波音が発生する時間、季節等に測定を行う。稼働条件や運転状況等の違いによって超低周波音・低周波音の周波数や音圧レベルが逐次変化する場合には、条件毎に測定を行う。

稼働条件や運転状況によって、被害者に超低周波音・低周波音による影響がない場合があれば（超低周波音・低周波音が原因でないかもしれないが）、その条件についても、測定を行うことが望ましい。

一日のうちで超低周波音・低周波音がいつ発生するかわからない場合には、精密騒音計と振動レベル計を連続して動かして測定するのもひとつの方法である。

（2）現況把握の場合

環境調査等で、超低周波音・低周波音の現況把握を行う場合には、その地域の超低周波音・低周波音の状況を代表する時期、時間帯、あるいは超低周波音・低周波音の問題を生じやすい時期、時間帯に行く。例えば前者の場合には、各時間区分で代表的な時間帯に測定するのもひとつの方法である。

（3）暗騒音の影響

測定対象とする低周波音の発生源がわかっている場合、超低周波音・低周波音の測定は、測定する周波数特性や音圧レベルが対象以外の低周波音の影響を受けない時期、時間帯に行く。

対象以外の超低周波音・低周波音が対象の音とレベル差が少ない場合、対象以外の音が定常であれば、周波

数スペクトルの検証や、Wavelet 解析での検証なども活用し、騒音レベル測定における暗騒音の補正方法に従って補正が可能である。対象以外の超低周波音・低周波音が変動するとき又はうなりを生じているときには、それらの影響を補正することは困難であるが、周波数分解能を上げて観察することで、音源を分離して、音圧レベルを補正できる可能性がある。

(4) 風の影響

“風雑音：風がマイクロホンにあたることにより発生する雑音。”

とありますが、

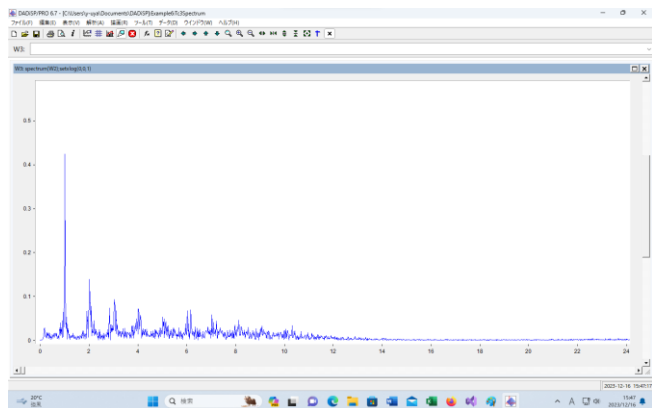
風車の近くでは、マイクに風が当たらなくても音圧の高い超低周波音が計測される。

風車の近くでの計測で、

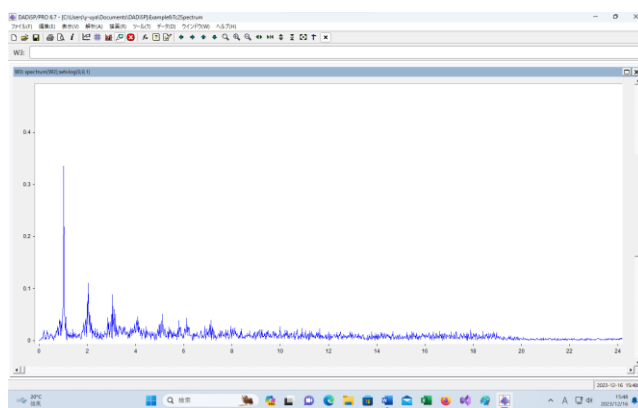
騒音計をビニール袋に入れて、それを段ボール箱に入れて、ビニールをかぶせて、



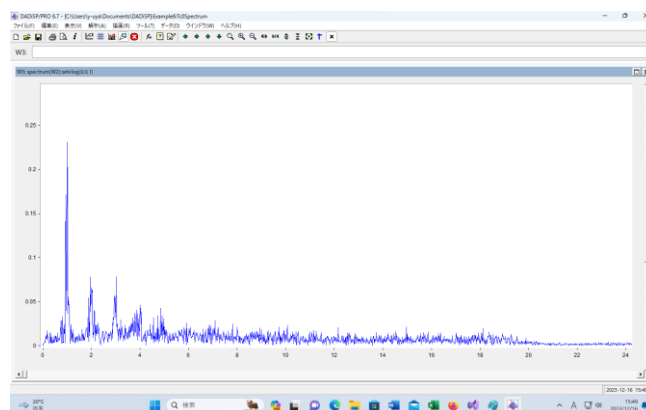
袋と箱に入れ、ドアを閉めた場合は、Max. 0.42Pa



袋と箱に入れ、ドアを開けた場合は Max. 0.33Pa



袋から出して、箱の上においた結果は Max. 0.23Pa



マイクに、風が当たらないので、これは風雑音ではありません。

風車による、超低周波音が計測されたのです。

風車が近くにあれば、マイクに風が当たらないときの結果と、マイクに風を当てたときの結果を比べると、音圧が高く、規則的な周波数を持った超低周波音は、どちらでも観測されます。

音圧が高く、規則的な周波数を持っている部分は、風が当たっても当たらなくてもよく似ています。これは、風がマイクに当たる事による、雑音部分の音圧が小さいことを意味しています。

風車が無ければ、マイクに風を当てても、音圧が高く規則的な周波数を持つ超低周波音は計測されない。

風車が無い場所で、マイクに風を当てて計測すれば、音圧が低くて、周波数に規則性が無い、超低周波音が計測されます。風車がある場所では、音圧が高く、規則的な周波数を持っている超低周波音が計測されます。

左が風車の近くの音、右は風車がない場所でマイクに風を当てて収録した音の超低周波音の部分です。

図 5．風車音（館山風の丘） 0～25Hz

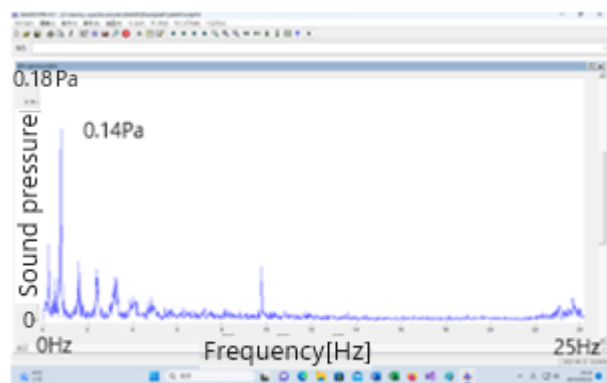
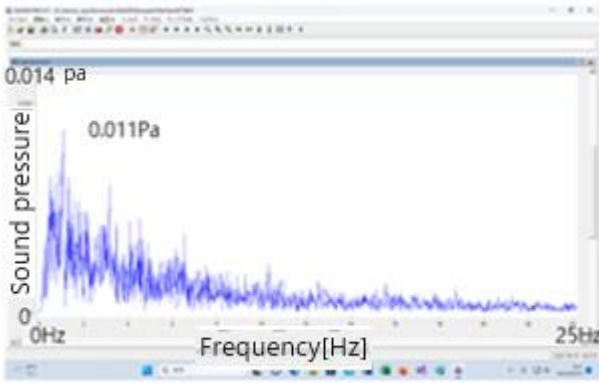


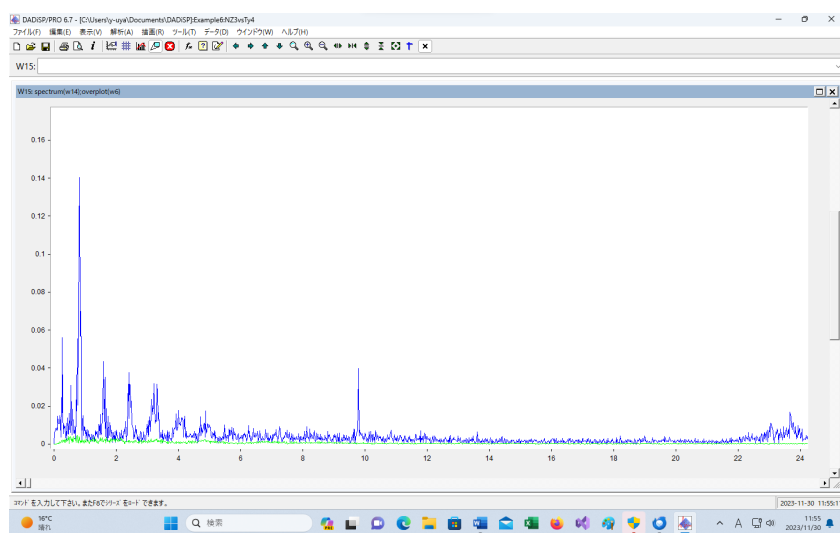
図 6．長尾神社の音 0～25Hz



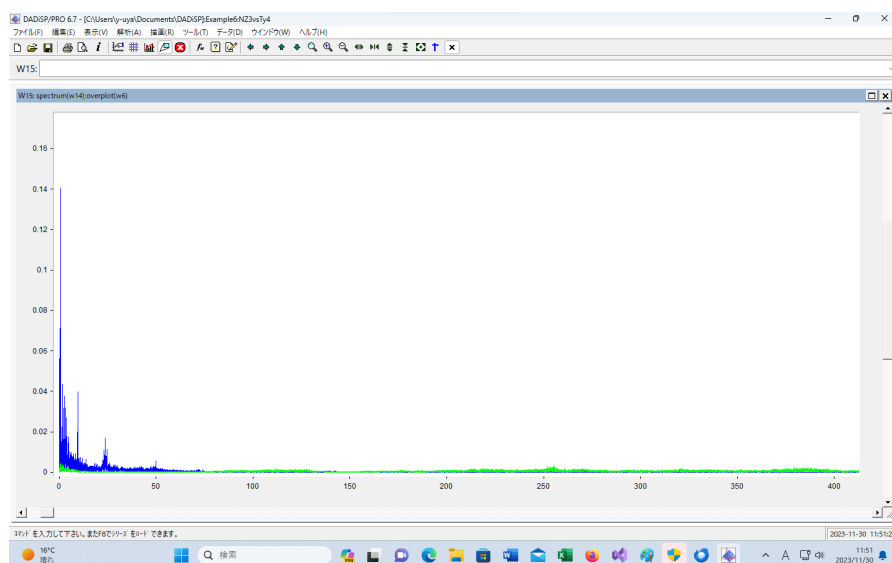
風車の近くでは 0.14Pa、風車が無い場所では 0.01Pa の音圧を持っている超低周波音が存在します。だから、風車の近くでは音圧が 10 倍です。音圧は、風速で変化します。風車の近くで 0.37Pa、風車が無い所で 0.003Pa の時もあります。これだと音圧は 100 倍です。

次のグラフは、青い線が風車の近くの超低周波音、緑の線が風車が無い場所での超低周波音です。

0～24Hz までの拡大図、風車音（青）と神社の音（緑）の周波数スペクトル



0～400Hz までの拡大図、風車音（青）と神社での音（緑）の周波数スペクトル



緑の線が、風をマイクに当てて、風車の無い所で計測した風雑音です。風がマイクに当たって計測される音は周波数に関係なくほぼ一定で、音圧も低いのです。

特に、超低周波音の領域では、風車の超低周波音に比べてみれば、無視しても問題ない大きさです。

風車の近くの超低周波音の周波数には、明らかな規則性がありますが、緑のグラフには、規則性は見られない。

風車音の音圧がピーク値となるのは、風車の回転数を毎分 R 回、羽の枚数を Z として、 $f=RZ/60[\text{Hz}]$ と置いたとき、 $f/3$ 、 $2f/3$ 、 f 、 $2f$ 、 $3f$ 、 $4f$ 、 \dots Hz の所で音圧がピークとなることが分ります。

この原因が、風がマイクに当たったことによる“風雑音”だとすれば、風雑音には、風車の近くでの音圧が高く規則的な周波数を持つものと、風車の無い場所での音圧が低く周波数に規則性が無いものがあるという事になります。この2種類の“風雑音”の区別することが必要になります。

もちろん、この周波数でピーク値となる理由を考えて、風車音が発生する仕組みを理解すれば、これは“風雑音”ではなく、風車からの超低周波音であることが分ります。

風車音以外での低周波音の音圧はそれほど高くないので、測定では風の影響を強く受ける。対象とする低周

波音の音圧レベルが小さいほど、周波数が低いほど風の影響を受けやすい。風の強さは季節や、時刻によっても異なる。季節別では、冬型の気象配置のときなどは季節風が強く吹いて測定が難しい。一日のうちでは、早朝や夕方の風のときは比較的風が穏やかで測定がやりやすい。

風雑音によるレベルの上昇は不規則かつ不安定で、風の強い場合には人が測定器にはりついて風雑音と対象音とを逐次仕分けしてやらないと、何を測っているかわからないことになる。大きな音圧レベルが発生したのは実は風によるものだったというようなことになりかねないので特に注意が必要である。風が強いときは低周波音の測定をしないほうが無難である。

とはいえ、風車音の被害は風が強い時に起きる。

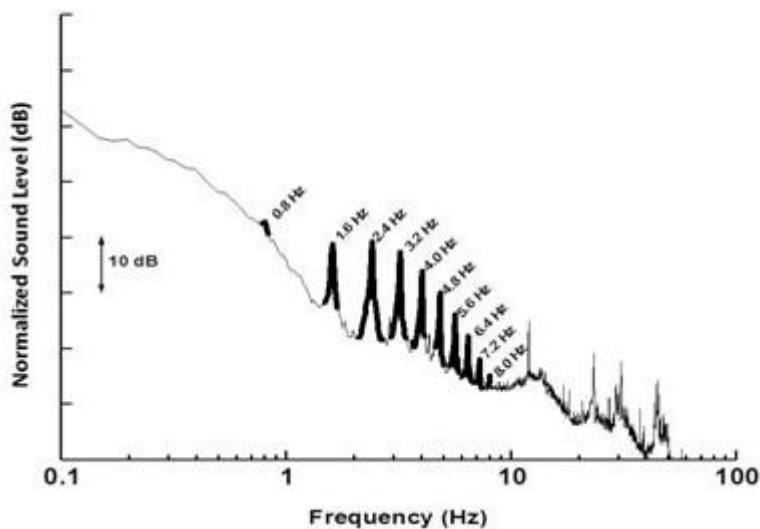
幸い、風車音と他の環境騒音を区別する方法がある。それは、超低周波音の領域での離散的な周波数特性である。

上の風車音の周波数スペクトルのグラフから、風車からの超低周波音は離散的であり、 $f=RZ/60=1\text{ Hz}$ の成分が卓越した音圧を持っていることが分ります。

また、カナダ政府の HP にある、[A Primer on Noise](#) では、

“音源の回転周波数は、音を発している音源を特定するために使用できます。たとえば、毎分 16 回転(RPM)で回転する 3 枚のブレードを備えた風力タービンの基本周波数は、0.8 Hz(つまり、(3 ブレード X 16 RPM)を 60 秒で割った値)に対応します。したがって、この例では、特定の距離で測定された音において、風力タービンによる騒音レベルが、基本周波数と基本周波数の倍数で周波数ピークを示すのに十分なほど高い場合、風力タービン音をバックグラウンドノイズから分離することができます。これらの倍数は高調波と呼ばれ、基本周波数が 0.8Hz のソースの場合、1.6Hz、2.4Hz、3.2Hz、4.0Hz、4.8Hz などになります。”

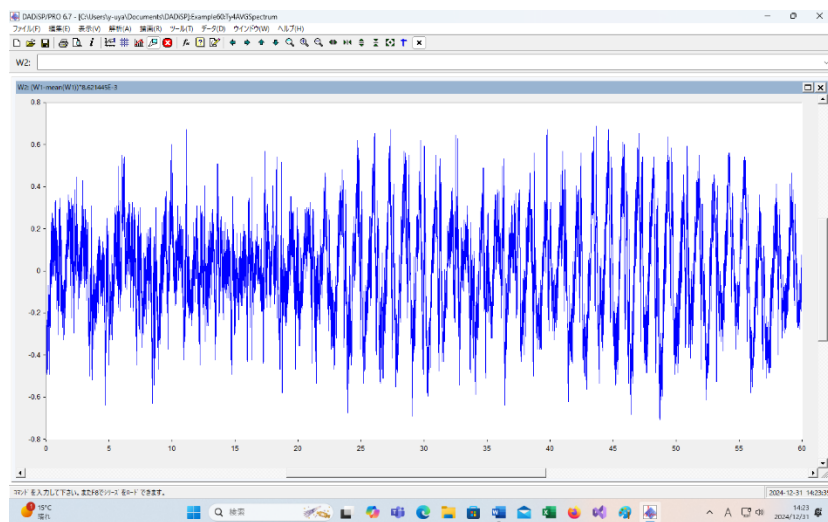
図2風力タービンの超低周波音測定 ←



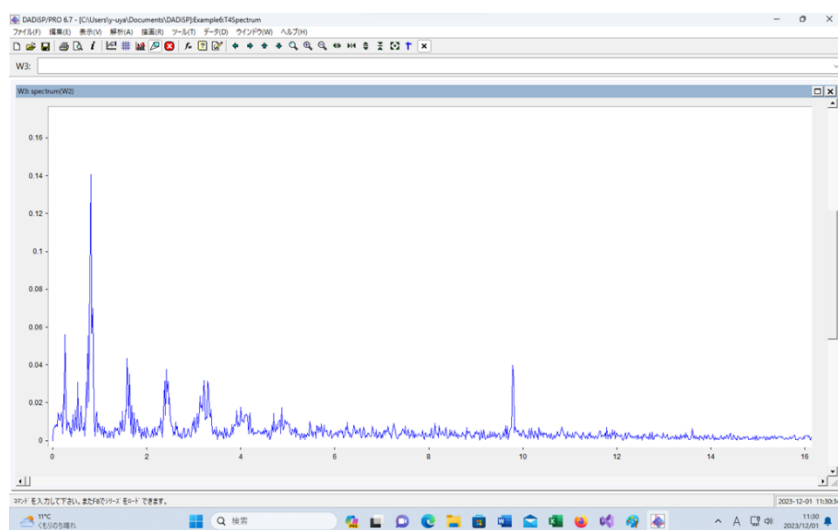
とあり、むかし、環境省が風車からの超低周波音の周波数を、 $f=RZ/60[\text{Hz}]$ としていた頃の記述と似ています。この部分を見つければ、風車音であると言えます。風車音による影響も計算可能です。

ただし、このグラフには問題があります。

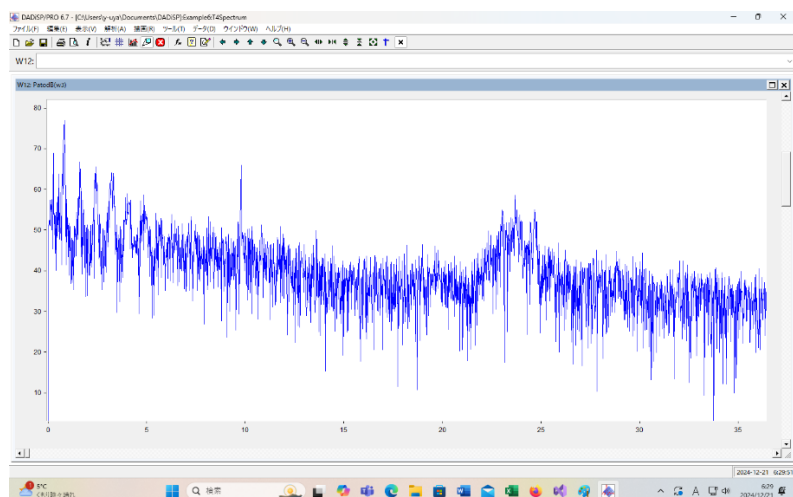
風車音の波形



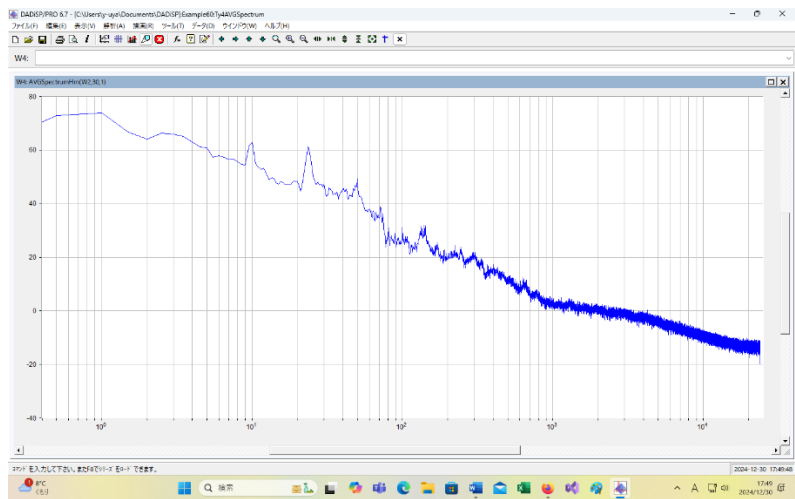
周波数スペクトル



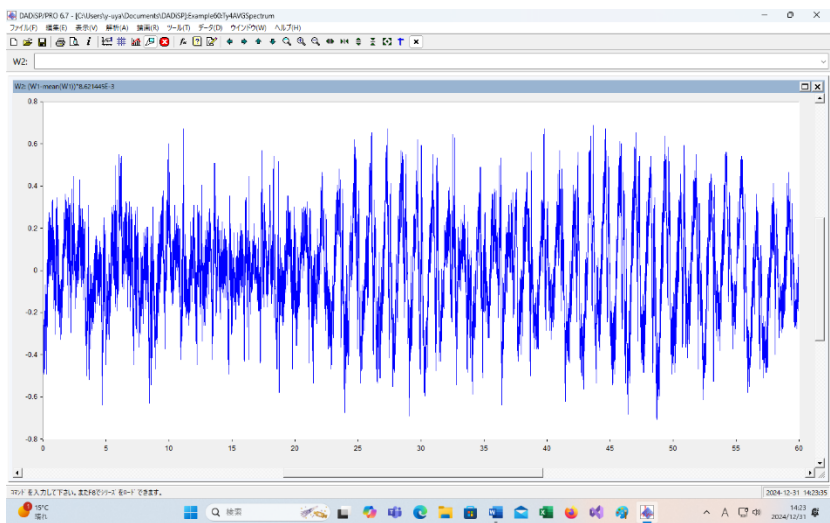
上のグラフを、単純に dB 表示に変えると、次のぎざぎざのあるグラフになるのです。



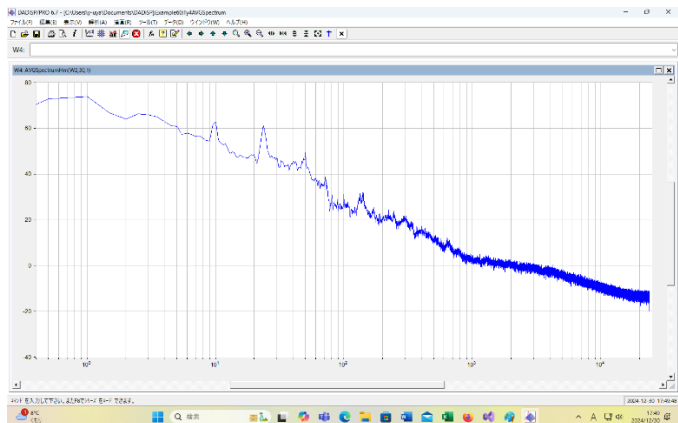
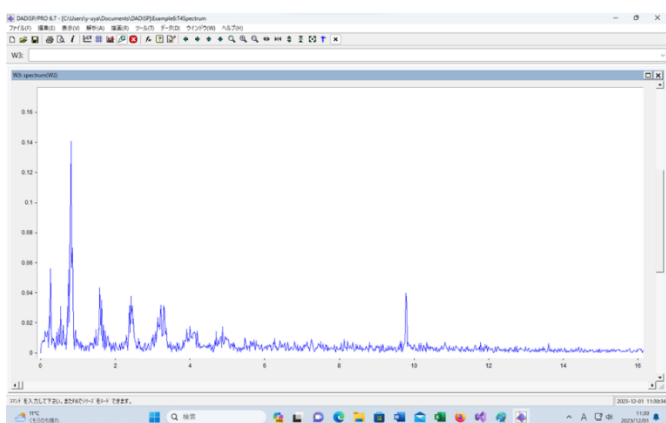
周波数スペクトルを 30 回計算して、その平均値を取ってから、同様の処理をすると次のグラフになります。



風車音の特徴が消えてしまっています。
このグラフでは、風車音が発生する仕組みを解明出来ません。



からの処理で、2つのグラフが得られます。



左を選べば、風車音が発生する仕組みや頭痛が起きる理由を解明できるが、右のグラフを選べば風車音被害の原因は究明できなくなります。

どちらを選択するかは、被害を実際に起きていると考えるか、被害の可能性が有ると考えるかの違いです。超低周波音の解析技術は色々です。掲げる課題と方針によってその技術の価値が決まって来るのです。

左の最大音圧レベルは 0.81Hz で 76.9 dB ですが、右の最大音圧レベルは 73.8 dB です。
平均を取った結果、音のエネルギーが半分の数値になっています。

音圧レベルが 1dB の場合、

$$1 = 10 \log(p_1^2 / p_0^2)$$

$$p_1^2 = 10^{(1/10)} \times p_0^2$$

$$= 10^{(1/10)} \times 4 \times 10^{-10}$$

$$= 5.036 \times 10^{-10}$$

ここで音のエネルギーが 2 倍（同じ音量を出している音源の個数が 1 個から 2 個になった場合）の音圧レベルは、

$$L = 10 \log(2 \times p_1^2 / p_0^2)$$

$$= 10 \log(10.072 / 4)$$

$$= 10 \times 0.4$$

$$= 4 \text{ dB}$$

となります。1dB の音と 1dB の音を合わせると 4dB になるという事です。

上記の式は次のように変形できます。

$$L = 10 \log(2 \times p_1^2 / p_0^2)$$

$$= 10 \log(2) + 10 \log(p_1^2 / p_0^2)$$

$$= 10 \times 0.3 + 1$$

$$= 3 + 1$$

$$= 4 \text{ dB}$$

$$\ast 4\text{dB} \text{ (2 個の場合)} - 1\text{dB} \text{ (1 個の場合)} = 3\text{dB}$$

つまり、エネルギーが 2 倍になると 3dB 増加するという事です。

また、風の影響を評価するには、3 台の精密騒音計を用意して、二重防風スクリーンを付けたものと、標準的な防風スクリーンを付けたものを並べて屋外で計測する。3 台目は室内または車内に置いて計測する。

計測は、3 台同時に動かす。風の弱い時と、風が強い時に、風車の近くで計測する。風車から 20 km 以上離れた地点でも同様の計測を行う。

これらのデータを比較して、風の影響を前もって評価しておく、精密騒音計が 1 台しかなくても、その計測を使って、影響を評価できる。

発生源から数 km 程度の範囲について超低周波音・低周波音の伝搬を測定する発破や風車音などの場合には、風向や風速の違いによっても音圧レベルが大きく変化する。このような場合、測定にあたっては風向の異なる季節の代表的な時期に測定を行い、年間を通しての超低周波音・低周波音の発生状況を把握することが望まれる。

と、修正します。

5.1.5 測定場所および測定点の選定

測定点は、原則として問題となる場所の屋外とするが、可能な限り屋内での測定も行う。

(1) 屋外における測定

屋外の測定点の選定にあたっては、暗騒音レベルが高くて対象となる低周波音が精度良く測定できない場所や、建物や地形による音の反射、遮蔽、回折によりごく局所的に音圧レベルが変化する場所は避ける。一般の環境低周波音を測定する場合、騒音測定の場合（騒音では建物より 3.5m以上離れることになっている）よりも広い範囲の地形や建物の影響を受けるので、これらによる反射の影響がないかどうかを十分確認の上測定点を定める。マイクロホンの高さは地上 1.2～1.5mの高さとするが、風の影響がある場合は、地上に置いてもよい。

機械、工場建物内外などの測定は、騒音の測定（例えば、騒音レベルの測定）に準じて測定点を決める。遮蔽物、反射物の有無による音の伝わり方の違いを図-5.1.5 に示す。

(2) 建物の周囲における測定

超低周波音・低周波音の影響を受けている住宅などにおいて測定を行うとき、マイクロホンは音源方向に面した所、例えば実用的には窓の外側で窓から 1～2m離れた場所で建物の問題となる階の床上 1.2～1.5mに相当する高さに設置する。

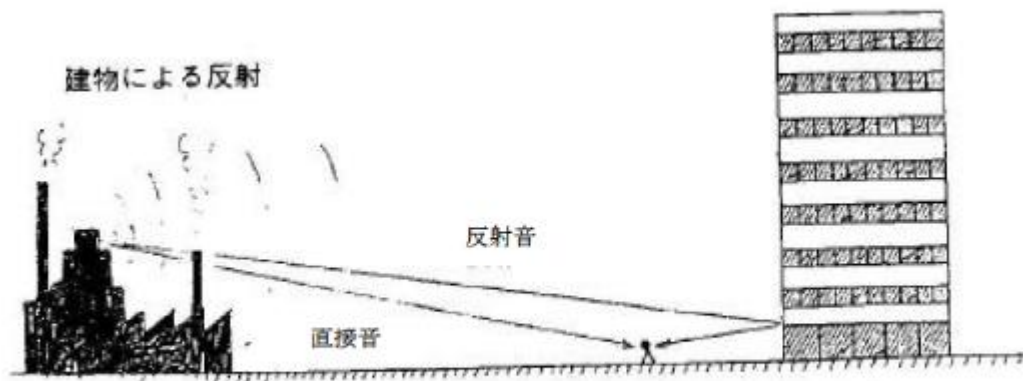
超低周波音・低周波音は騒音に比べて波長が長いので、建物から数m離れても反射、遮蔽、回折等により局所的に音圧レベルが変化する場合がある。ある点の音圧レベルを決めるとき、その周囲数点で測定し、大きな差がでるかどうかを確認する程度のことは常に心がけるとよい。

超低周波音・低周波音の発生源がはっきりしている場合には、超低周波音・低周波音の影響を受けている住宅の近傍に加えて発生源近傍（例えば、敷地境界など）にも測定点を設け、同時に測定することが望ましい。

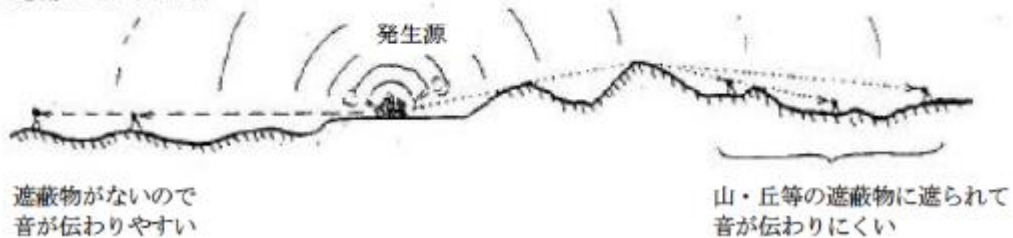
(3) 室内での測定

プライバシーの問題もあるので、住民とよく相談する。屋外での計測時間内に於いて、10 分間の計測を行う。機材は、精密騒音計と振動レベル計を併用する。

と修正する。



地形による遮蔽



空中伝搬と地表面伝搬



図-5.1.5 遮蔽物、反射物の有無による音の伝わり方の違い

そのままとする。

(3) 距離減衰の測定

超低周波音・低周波音は地表面での吸収や空気吸収がほとんどないので、騒音に比べて遠方まで伝搬する。したがって超低周波音・低周波音の距離減衰を調べる場合、発生源から数 km といった遠距離まで測定することもある。

最初に問題となる方向について地図上で測定点を定める。一般的には、例えば機械から 1, 10, 20, …50, 100, 200 m などのように概略二倍ずつ離れた点を測定点にとる。これは測定結果を図示するときに、片対数グラフ用紙の横軸（対数目盛）を距離、縦軸（等間隔目盛）を音圧レベルにとると、6dB/倍距離あるいは 3dB/倍距離の直線と比較して低周波音の減衰性状を検討しやすいためである。

発生源から数 km 程度の範囲について超低周波音・低周波音の伝搬を測定する場合には、風向の違いによる影響を考慮して、測定点を配置する。

距離減衰の測定点のとり方の一例を図-5.1.6 に示す。

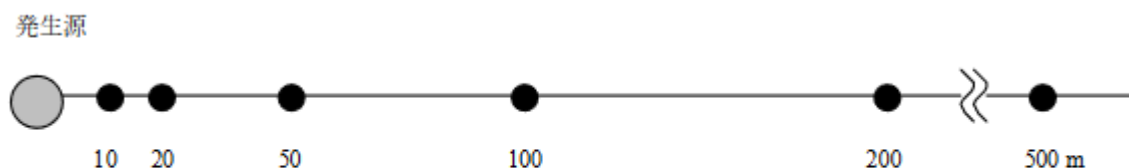


図-5.1.6 距離減衰の測定点の取り方の例

(4) 指向性の測定

超低周波音・低周波音がどの方向に強く発生しているかを調べる場合には、発生源の周りに測定点をとる。発生源の周りに建物などの遮蔽物や反射物がない場合には、同一円周上に測定点を配置する。例えば、正面方向から 30°、あるいは 45° ごとに測定点をとる。発生源の周りに建物などがある場合には、建物による反射、遮蔽、回折の影響の少ない場所に測定点をとる。

指向性の測定点のとり方の一例を図-5.1.7 に示す。

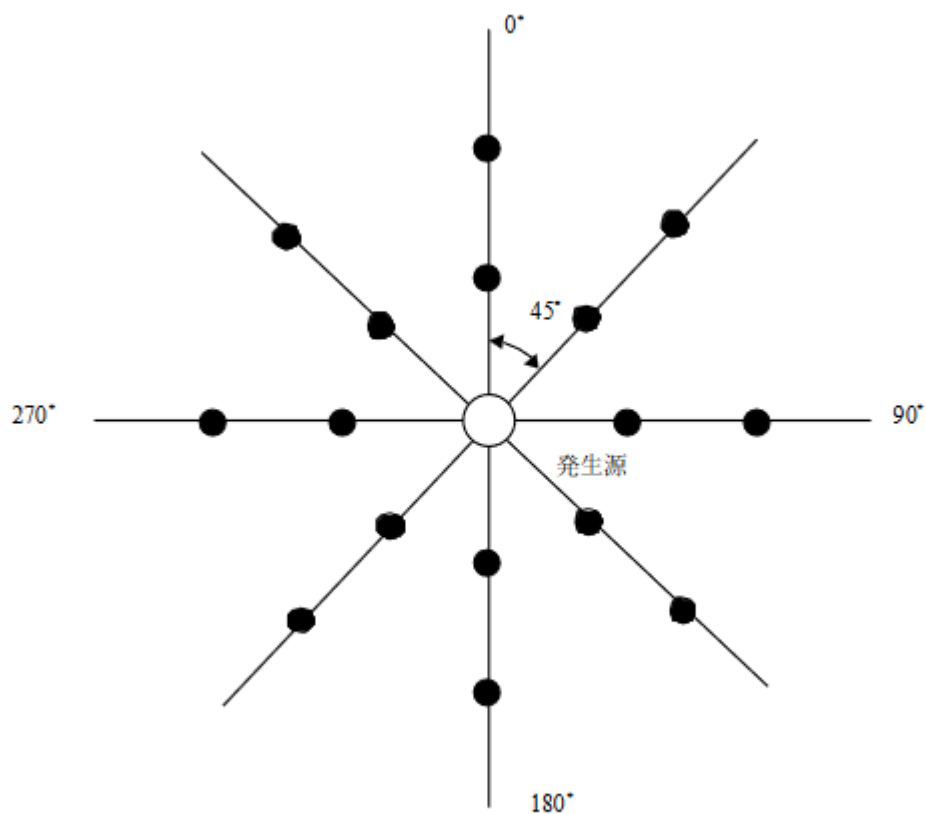


図-5.1.7 指向性の測定点のとり方の例

なお、風車音の指向性に関しては、

2) 菊島義弘,長島久敏,橋本品太,鯨岡政斗,濱田幸雄,川端浩和,小垣哲也,風速が風車騒音指向性に及ぼす影響について,風力エネルギー利用シンポジウム Vol.38 p. 69-72, 2016

において、詳細な調査結果が公表されている。

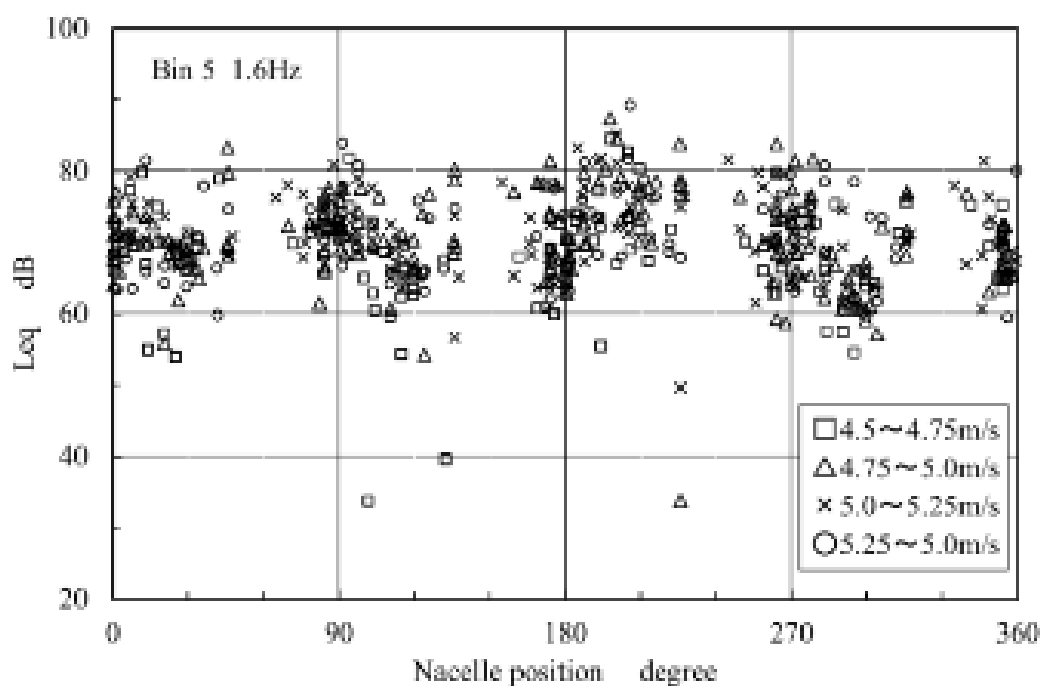
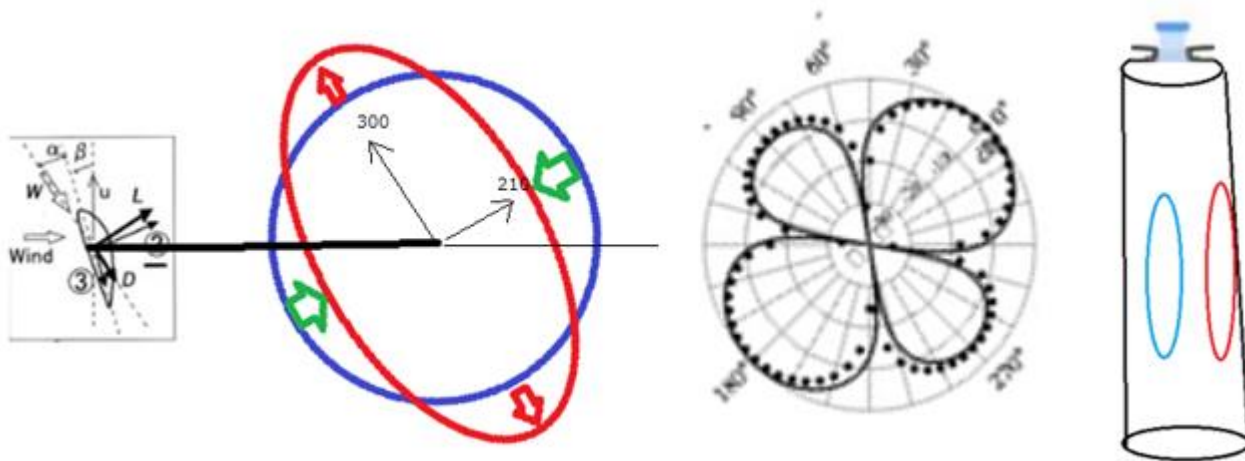


図 6 Bin 5 中心周波数 1.6Hz の指向性分布

さらに、



ブレードに掛かる揚力ベクトルの方向を軸にした十字架型の指向性を持っています。

と修正する

(5) 発生源周辺の音圧レベル分布の測定

発生源周辺の音圧レベルコンターを求めたい場合には、発生源周辺に多数の測定点を配置して測定を行うことがある。測定点のとりかたは、目的によって異なる。

・水平面上の音圧レベル分布

機械や設備等では、発生源を中心として指向性と距離減衰の両方を考慮して測定点を配置する。道路や鉄道等のように音源がある長さを持っている場合、発生源の両側または片側の水平面上にメッシュ状に測定点を配置する。このうち、距離方向の測定点は距離減衰の測定点のとり方に準ずるものとする。

・高さ方向の音圧レベル分布

音源が高い位置にある場合には、高さ方向と発生源からの距離方向で構成される地面に垂直な断面上に測定点を配置する。高さ方向の測定点は現場の状況によって選定する。図-5.1.12 の高架道路の例では、高さ 1.2 m、3.5m、7.0m、10.0mに測定点をとっている。距離方向の測定点は距離減衰の測定点のとり方に準ずる。風車の場合、高さが 100m程度なので、高さ方向の音圧レベルの分布の測定は困難である。

と修正する

(6) 特定の音源が対象でない場合の音圧レベル分布測定

特定の音源が対象でない、広い地域の環境低周波音の実態を測定する場合には、ほぼ等間隔にメッシュを引きその交点付近に測定点をとるか、各地域を代表する場所に測定点をとる。しかし、いずれの場合にも、建物や地形による音の反射や遮蔽、回折で局所的に音圧レベルが変化する場所は避けねばならない。

(7) 建物の内部における測定

建物内部における測定で特に問題が生じていない場合には、壁や窓から 1m以上離れ、マイクロホンの高さは床上 1.2～1.5mの高さとする。問題が生じている場合には、問題となる場所で測定する。測定時の建物の内部の建具等の開閉条件は、問題が生じていない場合には建具を閉めた条件で、問題が生じている場合には

問題となる条件とする。

室内で超低周波音・低周波音による定在波が生じて、場所によって音圧レベルが大きく変化する場合には、音圧レベルが最も大きい場所または問題となる場所で測定を行う。対策効果をみる場合など、室内の音圧分布を測定するときには、等間隔になるように室内に測定点を設ける。例えば 6 畳～8 畳程度の部屋であれば縦横高さそれぞれ 50cm メッシュに測定点をとる場合がある。

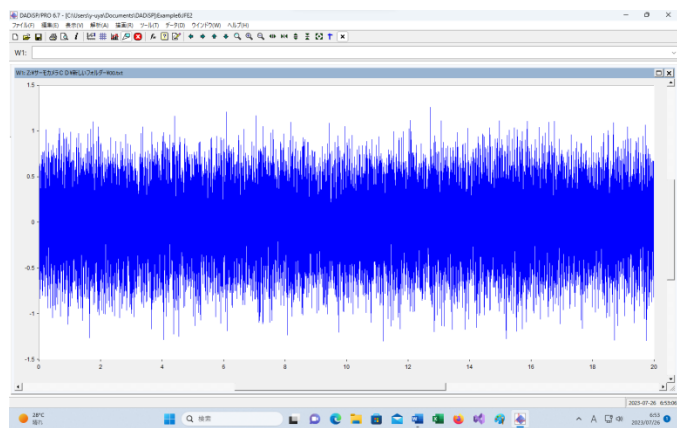
(8) 作業環境における測定

工場、事務所などの作業環境における超低周波音・低周波音を測定する場合には、測定点は作業員の耳の位置とする。作業者の位置が特定できない場合は、作業者の動線上のいくつかの位置で、床上 1.2～1.5m の高さとする。問題が生じている場合には、問題となる場所で測定する。

室内で超低周波音・低周波音による定在波が生じて、場所によって音圧レベルが大きく変化する場合には、音圧レベルが最も大きい場所または問題となる場所で測定を行う。

(9) 建物内の音源を特定するための測定と解析方法

JFE の工場内の音



は、下のワークシートの一部です。

次のグラフは、**JFE** の工場内の音です。

一番上の段は、収録された音の波形です。

二番目の段は、周波数スペクトルです。

3 番目の段は、Wavelet 解析の結果です。

4 番目の段が、カオス理論を使って解析した結果です。

FFT や **Wavelet** では見えなかった特徴が明確になります。

左から、子供のヒトコブラクダ、フタコブラクダ、大人のヒトコブラクダに見えます。その意味を理解できれば、室内での音場の性質をとらえることが出来ます。



これを見ると、故障している機械の形が分ります。

ヒトコブラクダは棒状のもの、フタコブラクダは四角形のものを意味します。

この様に、室内の音場の解析に関しては、カオス理論を使えば、展望は開けるのです。

と、修正します

測定点の実例を図-5.1.8 から図-5.1.12 に示す。

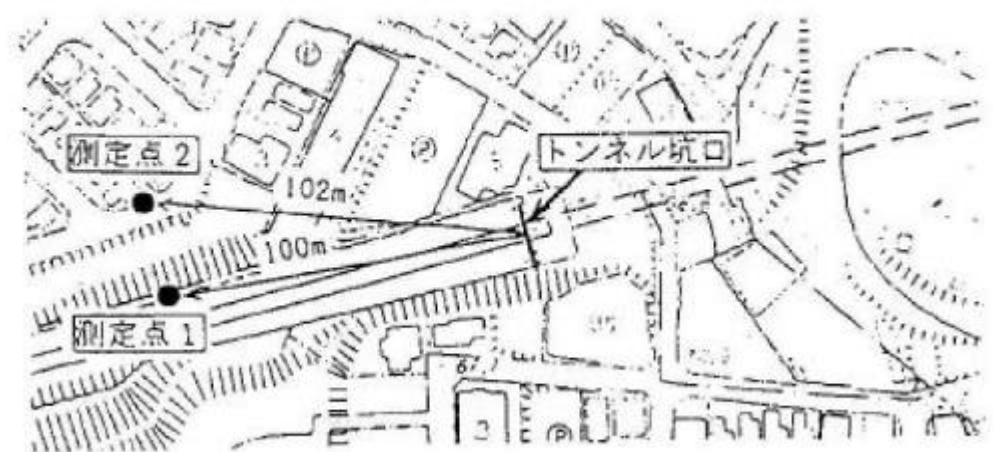


図-5.1.8 測定点のとり方の例（新幹線トンネル）

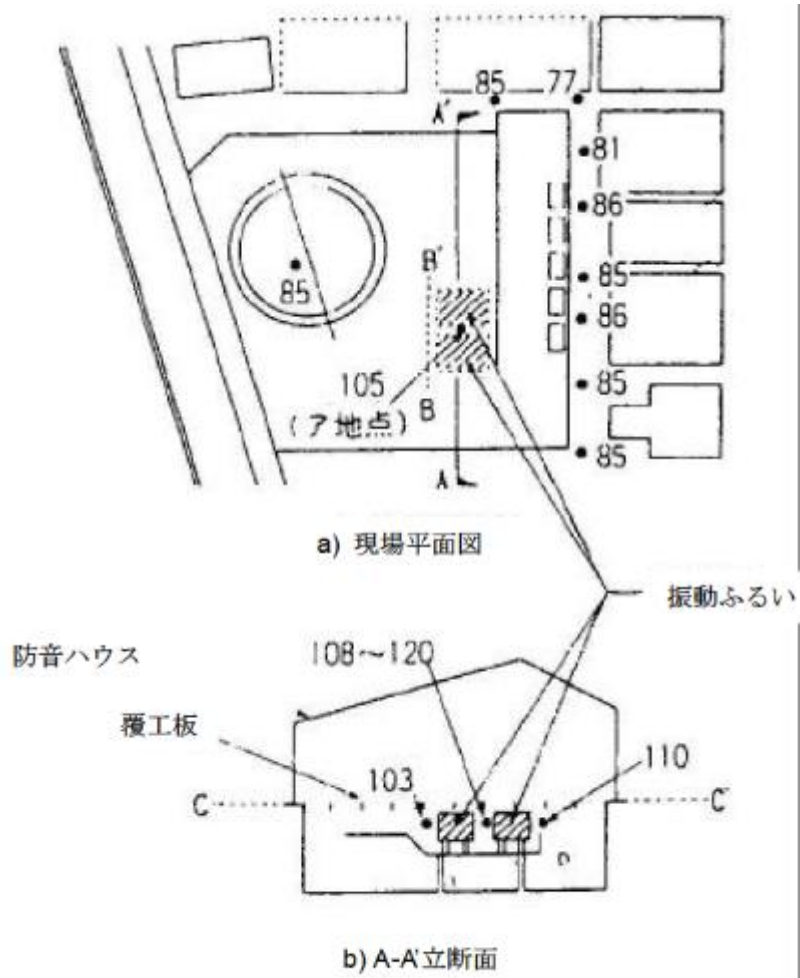


図-5.1.9 発生源周辺の音圧分布測定例（振動ふるい）

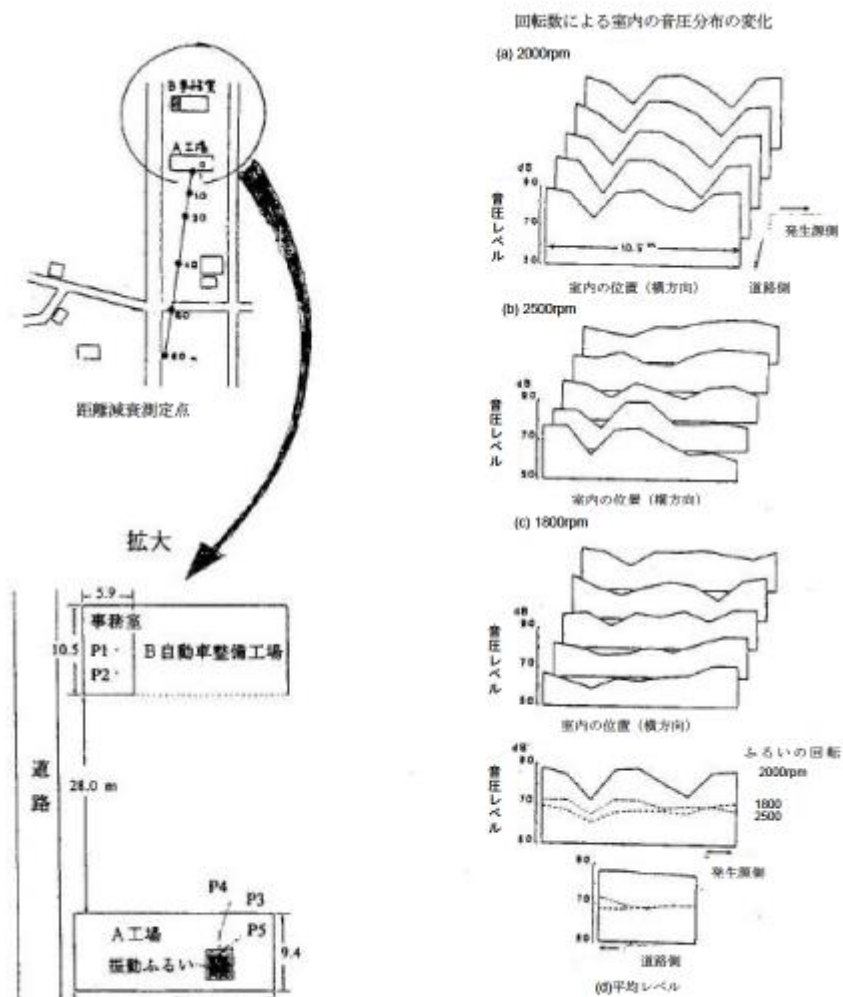


図-5.1.10 室内の音圧分布測定例 (振動ふるい)

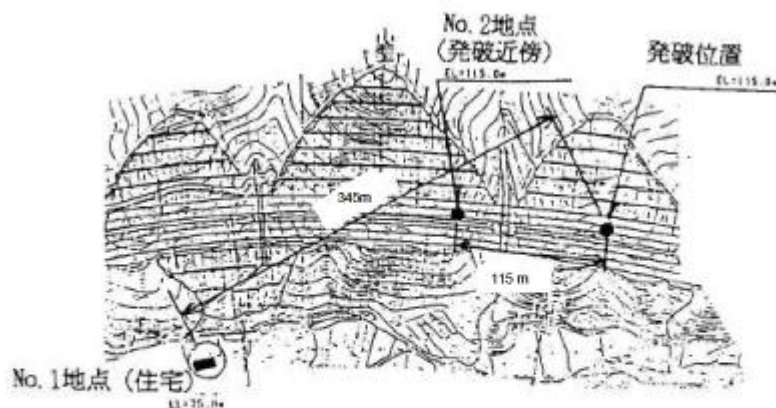


図-5.1.11 測定点のとり方の例（トンネル発破）

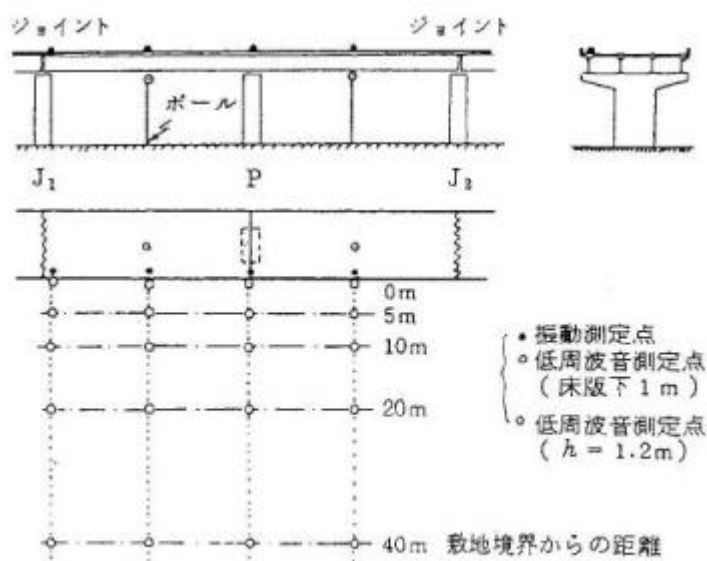


図-5.1.12 平面音圧分布測定点のとり方の例（高架橋）

5.1.6 人員配置

（1）測定要員

2 点以上測定する場合、機械等の稼働条件が一定で変化しない場合には移動しての測定が可能であるが、それ以外は同時測定を行うことが望ましい。多点同時測定を行う場合には、各々の測定点に一人ないしは二人ずつ測定員を配置するか、あるいは低周波音圧レベル計の出力を延長コードで延長して、一ヶ所に集結し、一人ないしは数人（測定するチャンネル数や使用する録音器の数により異なる）を配置する方法もある。多点同時測定で、測定器の数や人数が足りない場合には、発生源近傍に基準点を 1 点設定し、他の測定点は数点ずつ移動しながら測定する。基準点と移動点は同時に測定を行い、基準点の測定値を基にして他の測定点の値を相対的な関係から求める方法もある。その場合には基準点と移動点の分だけ測定員が必要になる。

（2）発生源の状況を把握するための要員

発生源の状況を把握することが必要であれば、そのための人員が必要である。例えば、道路の交通量や車速、大型車通過時のアナウンス、列車接近のアナウンスや通過速度、形式、車両数等のチェック等には、1～3 名

程度の測定員が必要である。また可能であれば時刻合わせを行ったビデオカメラで撮影しておくことが望ましい。

(3) その他の要員

このほか、連絡のための要員や、測定全体を統括する要員、広い範囲での測定などでは、測定点を巡回して測定器のトラブルに対応する巡回要員が必要な場合がある。

人員配置の例を図-5.1.13 及び図-5.1.14 に示す。



図-5.1.13 苦情対応の場合の測定例

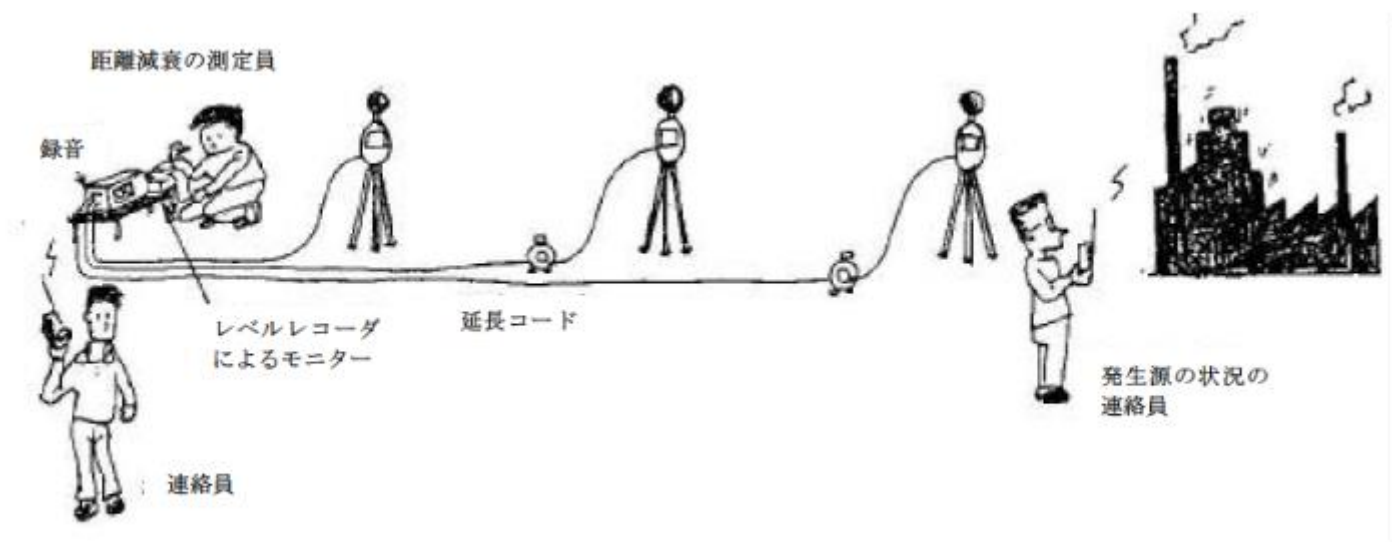


図-5.1.14 距離減衰測定の場合の例

5. 2 現場測定方法

風車音以外の低周波音の測定では、風による影響が大きい。通常の測定では、風の影響をとりのぞくことが

難しい。風が吹いている場合には、レベルレコーダによる音圧レベルのモニターを行い、風雑音の影響をチェックしなければならない。

風が強い時には、多くの場合、正確な低周波音のデータを得ることはできない。風がおさまるまで低周波音の測定を中止したほうが無難である。

風車音の場合は、超低周波音の領域では、風車音の音圧が圧倒的に高く、風による影響は計算誤差の程度になる。風車音ではもともと 20Hz 以上の成分は弱く、200Hz 以上では風車音よりも他の環境騒音の音圧が高い。

帯域のエネルギー (W/m²) を比べても、

リオン社前での交通騒音では全体で 10⁽⁻⁵⁾ 程度、200～24000Hz は、10⁽⁻⁵⁾程度

W15: EngDistributionWm2(w6,0,20,200,24000)				
	1: No Units	2: No Units	3: No Units	4: No Units
1:	1.757791E-007	8.079829E-008	1.805011E-005	1.830650E-005
2:				

0～20Hz 1.757791E-007 (W/m²)

20～200Hz 8.079829E-008 (W/m²)

200～24000Hz 1.805011E-005 (W/m²)

0～24000Hz 1.8E-005 (W/m²)

風が弱いときの風車の近くでは全体で 10⁽⁻⁴⁾程度、200～24000Hz は、10⁽⁻⁷⁾程度

W15: EngDistributionWm2(w2,0,20,200,24000)				
	1: No Units	2: No Units	3: No Units	4: No Units
1:	2.432890E-004	2.138726E-005	1.627290E-007	2.648317E-004
2:				

0～20Hz 2.432890E-004 (W/m²)

20～200Hz 2.138726E-005 (W/m²)

200～24000Hz 1.627290E-007 (W/m²)

0～24000Hz 2.6E-004 (W/m²)

風が強いときの風車の近くでは全体で 10⁽⁻³⁾ 程度、200～24000Hz は、10⁽⁻⁸⁾程度

W9: EngDistributionWm2(w8,0,20,200,24000)				
	1: No Units	2: No Units	3: No Units	4: No Units
1:	1.492656E-003	2.285370E-005	6.942087E-008	1.515570E-003
2:				

0～20Hz 1.492656E-003 (W/m²)

20～200Hz 2.285370E-005 (W/m²)

200～24000Hz	6.942087E-008 (W/m ²)
0～24000Hz	1.5E-003 (W/m ²)

これと同様に、200Hz 以上では、風による影響が大きいと言える。計測する目的によって影響を評価する必要がある。

5.2.1 精密騒音計（低周波音圧レベル計）の設定

(1) 精密騒音計（低周波音圧レベル計）の設置

超低周波音・低周波音を測定する場合には、精密騒音計（低周波音圧レベル計）を三脚等に設置し、マイクロホン高さを地上 1.2～1.5m の高さになるようにして固定する。マイクロホンには、標準的なウインドスクリーンを装着する。

測定時に風雑音によって見かけ上の音圧レベルが不規則に変動する場合には、精密騒音計（低周波音圧レベル計）を地上に置いて測定すれば、風雑音の影響をいくらか軽減できる。風による影響の項で詳しく述べるが、地表面に近いほど風速が小さい。

風がある場合のマイクロホン設置方法の概略図を図-5.2.1 に示す。



図-5.2.1 風がある場合のマイクロホン設置方法の概略図

と、修正しておく

(2) 精密騒音計（低周波音圧レベル計）の周波数補正特性

G 特性の周波数補正特性が内蔵されている精密騒音計（低周波音圧レベル計）で G 特性音圧レベルを測定する場合、または G 特性音圧レベルを録音する場合には、周波数補正特性を G 特性にする。それ以外の低周波音圧レベル計で周波数分析により G 特性音圧レベルを測定する場合には、周波数補正特性を平坦特性にする。

周波数分析を行う場合や、録音をして持ち帰ってから分析を行う場合には、精密騒音計（低周波音圧レベル計）の周波数補正特性を平坦特性にする。

G 特性での重みづけ（周波数補正特性）に関しては、ISO7196 では、中心周波数の範囲 0.25～315Hz に対応する重みが決まっている。これを使って計算すべきではあるが、結果の数値は 1～80Hz として計算したものと、それほどの違いは無い。

(3) 衝撃性低周波音の測定

精密騒音計（低周波音圧レベル計）のメーターの時定数は 1 秒(SLOW)であるため、衝撃性の低周波音を測定する場合、精密騒音計（低周波音圧レベル計）のメーター上ではレベルがオーバーしていなくても、波形ではオーバーしていることがあるので、十分なマージンをとって測定レンジを設定する。発破音などの発生回数が少ない衝撃性低周波音を測定する場合、レンジの設定が難しい。精密騒音計（低周波音圧レベル計）の台数に余裕があれば、20dB 程度レンジを変えて低周波音圧レベル計を設置して測定するのも、失敗を少なくする一つの方法である。

精密騒音計（低周波音圧レベル計）での計算を諦めて、精密騒音計（低周波音圧レベル計）を単なる録音装置と考えて、サンプリングレートを最大にして、マイクに掛かる音圧の変動を記録した WAV ファイルを作って、コンピュータでの解析をすれば、より詳しい解析が可能となる。

と修正する

5.2.2 レベルレコーダによる記録

(1) レベルレコーダ記録を始める前に

レベルレコーダ記録を始める前に、測定年月日、開始時刻、測定点番号、測定機器の番号、測定者名等を記録紙の初めに記入する。

(2) 測定系列の校正

ピストンホンを騒音計のマイクロホンに装着してスイッチを入れる。ピストンホンによってマイクロホンに与えられた音圧レベルがあらかじめ示された校正信号の音圧レベル値（114dB または 124dB）を示すように基準レベルを調節する。その状態でレベルレコーダを作動させて、フルスケールを 50dB としてレベルレコーダ記録紙の下から 34dB（または 44 dB）の位置に校正信号を記録させる。すなわち下から 30dB（または 40 dB）の位置が低周波音圧レベル計の基準レベルとなる。

事前に測定系列が校正されている場合は、低周波音圧レベル計の内部校正信号により、同様に校正を行う。

(3) レベルレコーダ記録紙への記入事項

測定系列の校正が終了したら、測定に入る。

はじめに、低周波音圧レベル計のレンジ、周波数補正特性を記入する。

測定中に気付いたことは何でも記録紙に記録する。

- ・途中で測定レンジを変更した場合にも、必ずアナウンスし記録する。
- ・対象となる低周波音が観測された場合には、発生時刻、発生源の種類をレベルレコーダの記録紙に直接記入する。
- ・低周波音が対象とする低周波音以外の音と重なった場合にはその旨を記載する。
- ・低周波音以外で目立った音が記録されたときには、その種類を記入する。
- ・強い風が吹くとレベルレコーダのペンが大きく振れることがある。風によるものとわかった場合にはその旨を記録する。

記録紙上に記録がないと、あとで記録紙を見てもどれが対象とする低周波音なのか、あるいは風なのか判別できない。現場にいた人しか、現場の状況はわからないので、現場での記録は非常に重要である。

このままとする

(4) G 特性音圧レベルの測定

G 特性音圧波形の出力をもつ精密騒音計（低周波音圧レベル計）を用いて G 特性音圧レベル波形を記録させる場合には、精密騒音計（低周波音圧レベル計）の出力をレベルレコーダの入力に接続して測定を行う。精密騒音計（低周波音圧レベル計）の周波数補正特性を G 特性にして、レベルレコーダの動特性 SLOW（時定数は 1 秒）でレベル波形を記録させる。

超低周波音・低周波音の発生時期のはっきりしない場合には、連続してレベルレコーダを稼働させて測定を行う。

と修正し、さらに追加する。

G 特性と ISO7196

[低周波音被害について医学的な調査・研究と十分な規制基準を求める意見書](#)

（2013 年（平成 25 年）12 月 20 日 日本弁護士連合会）

の（p8）には、

(2) 低周波音の生理的な影響に関する調査

低周波音による生理的影響の有無について、環境省（2001 年 1 月まで環境庁）は昭和 51 年度から調査を始めたが、昭和 50 年代には低周波音の生理的・心理的影響について明確な結論を得ることができなかった。

その後、低周波音を評価するための G 特性が ISO7196 で定められたこと、低周波音を測定する機器が開発されたこと、新幹線のぞみの低周波音問題などで社会的な関心が高まったことなどから、平成 12 年度には自治体向けの低周波音の測定マニュアルを配布し、地方自治体を通じて新しい知識や技術に基づいて再調査を行っている（「低周波音防止対策事例集」環境省・2002 年 3 月）。

こうした成果を踏まえ、平成 14 年度には、

とあるが、

これを“成果”とは言えません。騙されてはいけません。

ISO7196 の内容を確認したのでしょうか？そこでの中心周波数や重みづけを確認したのでしょうか？確認して、少し計算すれば、安全安心と言って住民を騙す手段であることが明確になります。

ISO7196 での中心周波数は 0.25～315Hz です。ほとんどの資料が、ISO7196 と言いながら、1Hz からになっています。大型風車では、0.5Hz 辺りで最大音圧になります。ISO7196 と言って、この範囲まで扱っているようなふりをして、実際は 1Hz からでは、0.5Hz の問題を胡麻化している事になります。これは詐欺です。

G 特性音圧レベルの計算にも大きな問題があります。

ある企業が、住民説明会で次の資料を配りました。

G 特性音圧レベルの予測値です。

予測地点	現況値	予測値	建設の影響による増分	参考値
一般①	68	68	0	100
一般②	60	61	1	100
一般③	58	64	6	100
一般④	54	63	9	100

モデルを作ってみました。

				一般①	一般②	一般③	一般④
	0.5Hz成分	1 Hz成分	1 Hz帯域騒音レベル d B	20Hz音源音圧Pa	20Hz音源音圧Pa	20Hz音源音圧Pa	20Hz音源音圧Pa
フィルタ前音圧Pa	0.4	0.5		0.015	0.006	0.0048	0.003
フィルタ前騒音レベル d B	86.02059991	87.9588		57.50122527	49.54242509	47.60422483	43.52182518
フィルタ後音圧Pa				0.015	0.006	0.0048	0.003
フィルタ後騒音レベル d B	86.02059991	87.9588		57.50122527	49.54242509	47.60422483	43.52182518
G特性重み付け	-64.3	-43		10	10	10	10
G特性重み付け後	21.72059991	44.9588	44.97935605	67.50122527	59.54242509	57.60422483	53.52182518
全体騒音レベル	LA=10*log10(10^(L1/10)+10^(L20/10))			67.52545704	59.69170185	57.83526848	54.09041341

四捨五入して現況値になる様にしてあります。

20Hz の音圧を変化させて、予測値になる様にしました。

	0.5Hz成分	1 Hz成分	1 Hz帯域騒音レベル d B	20Hz音源音圧Pa	20Hz音源音圧Pa	20Hz音源音圧Pa	20Hz音源音圧Pa
フィルタ前音圧Pa	0.4	0.5		0.0168	0.0074	0.0105	0.0093
フィルタ前騒音レベル d B	86.02059991	87.9588		58.48558572	51.36403448	54.40318607	53.34905906
フィルタ後音圧Pa				0.0168	0.0074	0.0105	0.0093
フィルタ後騒音レベル d B	86.02059991	87.9588		58.48558572	51.36403448	54.40318607	53.34905906
G特性重み付け	-64.3	-43		10	10	10	10
G特性重み付け後	21.72059991	44.9588	44.97935605	68.48558572	61.36403448	64.40318607	63.34905906
全体騒音レベル	LA=10*log10(10^(L1/10)+10^(L20/10))			68.50491406	61.46274683	64.4524959	63.41181752

20Hz の成分は、ほんの少し増加すると、予測値になってします。

1Hz の成分を変化させてみます。

	0.5Hz成分	1 Hz成分	1 Hz帯域騒音レベル d B	20Hz音源音圧Pa	20Hz音源音圧Pa	20Hz音源音圧Pa	20Hz音源音圧Pa
フィルタ前音圧Pa	0.4	3.4		0.015	0.006	0.0048	0.003
フィルタ前騒音レベル d B	86.02059991	104.609		57.50122527	49.54242509	47.60422483	43.52182518
フィルタ後音圧Pa				0.015	0.006	0.0048	0.003
フィルタ後騒音レベル d B	86.02059991	104.609		57.50122527	49.54242509	47.60422483	43.52182518
G特性重み付け	-64.3	-43		10	10	10	10
G特性重み付け後	21.72059991	61.60898	61.60942401	67.50122527	59.54242509	57.60422483	53.52182518
全体騒音レベル	LA=10*log10(10^(L1/10)+10^(L20/10))			68.49639252	63.70805306	63.06334882	62.23646404

0.5Pa から 3.4Pa に変化させると、ほぼ予測値の中に納まります。

0.5Hz 成分を変化させます。

	0.5Hz成分	1 Hz成分	1 Hz帯域騒音レベル d B	20Hz音源音圧Pa	20Hz音源音圧Pa	20Hz音源音圧Pa	20Hz音源音圧Pa
フィルタ前音圧Pa	39	0.5		0.015	0.006	0.0048	0.003
フィルタ前騒音レベル d B	125.8006922	87.9588		57.50122527	49.54242509	47.60422483	43.52182518
フィルタ後音圧Pa				0.015	0.006	0.0048	0.003
フィルタ後騒音レベル d B	125.8006922	87.9588		57.50122527	49.54242509	47.60422483	43.52182518
G特性重み付け	-64.3	-43		10	10	10	10
G特性重み付け後	61.50069223	44.9588	61.59593332	67.50122527	59.54242509	57.60422483	53.52182518
全体騒音レベル	LA=10*log10(10^(L1/10)+10^(L20/10))			68.49363321	63.6997371	63.05370055	62.22478951

0.4Pa から 39Pa まで変化させても、予測の範囲内です。

これは、G 特性での重みづけが、0.5Hz では-64.3 d B、1Hz では-43 d B、20Hz では+10 d B となっているからです。

1Hz 以下の成分がかなり大きくなっても予測値に納まります。G 特性音圧レベルの数値からは、頭痛や圧迫感の原因となる、最大音圧の部分は把握できないのです。計算の途中で、ほぼ 0 として扱われるのです。

頭痛や圧迫感との関連性は認められなくなるのです。それを、“こうした成果を踏まえ”と言ってしまえば、勝負には勝てないのです。

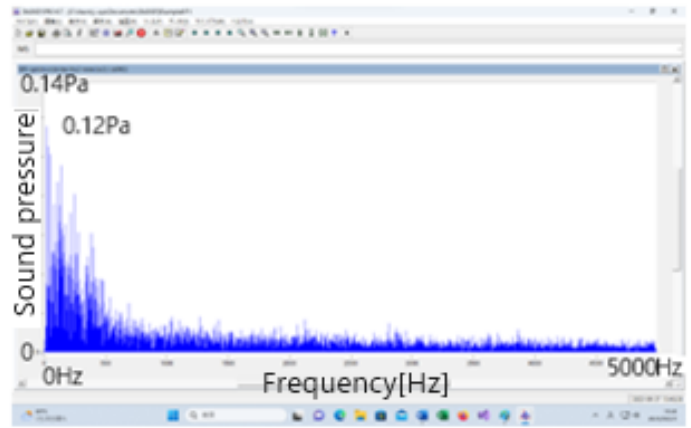
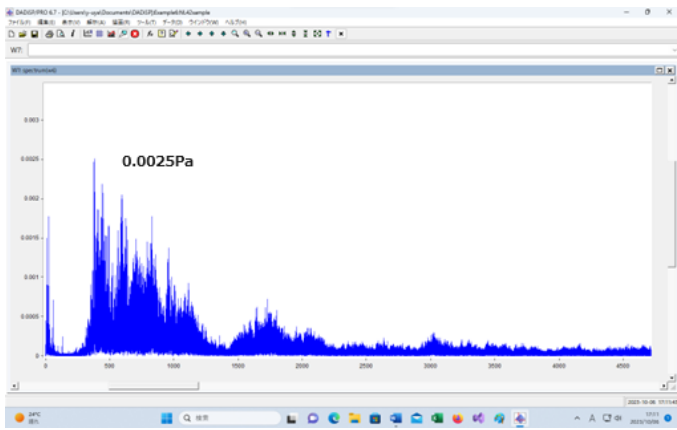
大型化する風車では、0.5Hz での音圧が特に高くなるのですが、計算上は、音圧が $39/0.4=97.5$ 倍になっても、G 特性音圧レベルの値は変化しないのです。被害の原因を隠蔽してしまうのです。

館山で計測した風車の場合、風が弱い時には 0.8Hz で 0.15Pa、風が強い時には 1Hz で 0.42Pa でした。少し圧迫感を覚えました。

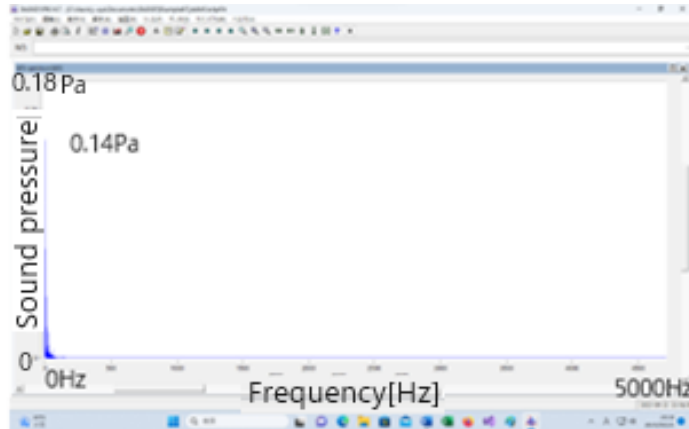
なお、周波数スペクトルを確認すれば、

交通騒音（0～5000Hz）

工場騒音（0～5000Hz）



風車騒音（0～5000Hz）（風が弱い日）



エネルギーの分布は次の様になっています。

表 2. エネルギーの分布

エネルギー分布	0～20Hz	20Hz以上
風車音	93%	7%
工場音	12%	88%
交通音	1%	99%

0～20Hz でのエネルギーの分布

Energy distribution	0～1Hz	1～20Hz	0～20Hz
Wind turbine	61.3%	38.7%	100.0%
Iron mill	0.04%	99.96%	100.0%

さて、 $93 \times 0.613 = 57\%$ ですから、風車音全体のエネルギーの 57% は 1Hz よりも周波数が低い部分に含まれています。風車音のエネルギー分布は 1 点集中型である、と言えます。

1Hz 以下を計算から実質的に除外すれば、風車音のエネルギーの 61.3% 以上を無視して評価することになるのです。

圧迫感、頭痛の原因となる部分か計算から除外されるので、被害の根拠が消えてしまいます。原因不目という事になるのですが、この計算を見れば、原因が分っているから、しれが不明になる様に計算方法を決めたのが、G 特性音圧レベルの計算方法だと言えます。

G 特性に関して、低周波音の測定方法に関するマニュアル 平成 12 年 10 月 環境庁大気保全局の資料には、

1～20 Hz の傾斜は、超低周波音領域における感覚閾値の実験結果に基づいている。

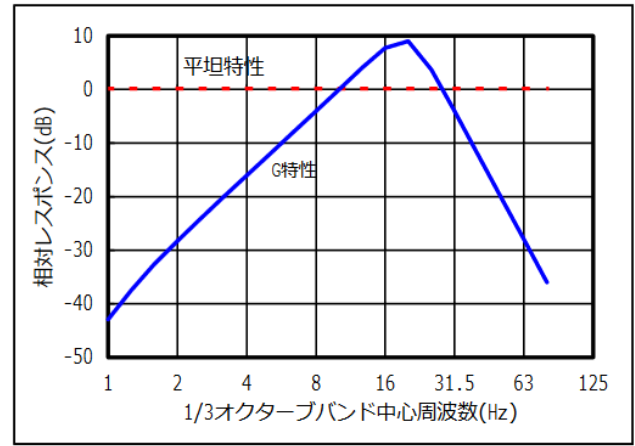
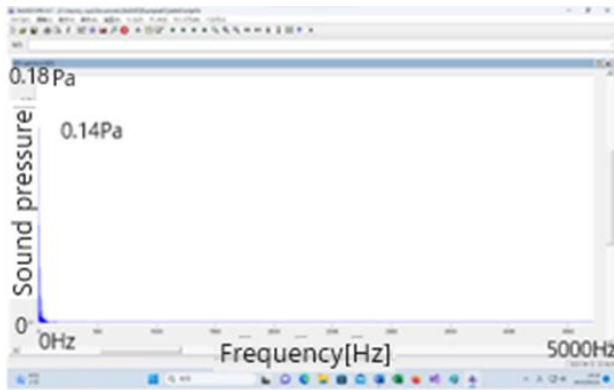


図-1.1 低周波音の周波数補正特性

ここには、1Hz 以上の重みづけしかありません。ISO7196 では、中心周波数 0.25Hz からの重みづけがのっています。

0.5Hz での重みは、-64.3 dB です。0.5Hz の音圧は、普通は 0.4Pa 程度ですが、大型化する風車では、0.5Hz での音圧が特に高くなるのですが、計算上は、音圧が $39/0.4=97.5$ 倍になっても、G 特性音圧レベルの値は変化しないのです。G 特性音圧レベルの数値は被害の原因を隠蔽してしまうのです。

ですから、G 特性を“成果”とは言えないのです。“先手を取られた”と判断すべきだったのです。

G 特性による補正の問題点

“20Hz 以下の超低周波音については ISO-7196 に評価加重特性が規定されていることから、超低周波音による心身への不快感に関する評価にあたっては、G 特性音圧レベルとする。”

との考え方もありますが、簡単ではありません。

“超低周波音のレベル”は、G 特性音圧レベルとして計算されます。対象を 1Hz～として計算した結果と、0.25Hz～として計算結果の数値は、ほぼ同じです。その原因を、モデルを作って調べてみました。

(仮称) ウインドパーク布引北風力発電事業
の要約書 10 ページに次の記載があります

予測地点	現況値	予測値	建設の影響 による増分	参考値
一般①	68	68	0	100
一般②	60	61	1	100
一般③	58	64	6	100
一般④	54	63	9	100

注：1 現況値は、バックグラウンド低周波音（現況の超低周波音から、既設の風力発電所から発生する超低周波音を除いたもの）です。

- 2 予測値は、将来の超低周波音（G特性音圧レベル）です。
- 3 参考値は、ISO 7196 に示されている「超低周波音の知覚の閾値」を示します。

表の数値を参考にして、G 特性音圧レベルが 56 d B だったとして、次のようなモデルを考えました。

G特性音圧レベルの試算			ISO7196の重み付け					
	基準音圧 (Pa)	0.00002						
	周波数 (Hz)	0.25	0.5	1	2	10	20	50
	音圧 (Pa)	0.00024	0.0002	0.0001	0.0005	0.0066	0.0041	0.0000007
①	騒音レベル (d B) (平坦特性)	21.5836249	20	13.9794001	27.9588002	50.3702788	46.2350772	-29.118639
②	G特性の重み付け	-88	-64.3	-43	-28.3	0	9	-20
①+②	G特性重み付け後	-66.416375	-44.3	-29.0206	-0.3411998	50.3702788	55.2350772	-49.118639
	G特性音圧レベル (d B)	56.46126558						

周波数成分は、0.25、0.5、1、2、10、20、50Hz の成分が上の表の音圧の時は、G 特性音圧レベルは 56.5 d B 程度です。

各成分の音圧を 1 つだけ変化させて、全体の G 特性音圧レベルが 61 d B になる様にしてみました。

20Hz の成分が、0.0041Pa から 0.008Pa になれば、61 d B になります。

2H z の成分が、0.0005 P a から 0.5 P a になれば、61 d B になります。

0.5Hz の成分が、0.0002Pa から 31.5Pa になれば、61 d B になります。

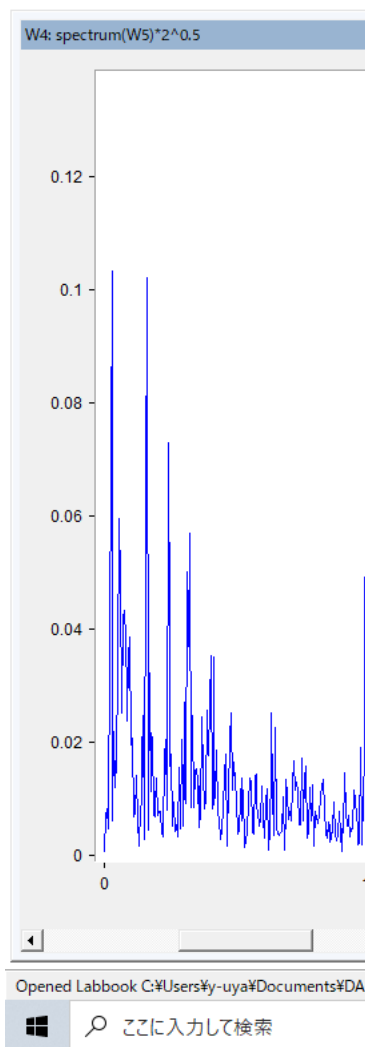
0.25H z の成分が、0.00024 P a から 482 P a になれば、61 d B になります。

それぞれの場合の最大音圧（P a）は、0.008, 0.5、31.5、482 [P a]です。最大音圧レベル（d B）は、52, 88, 124, 147 [d B]です。どの場合も G 特性音圧レベルは 61 d B なのです。

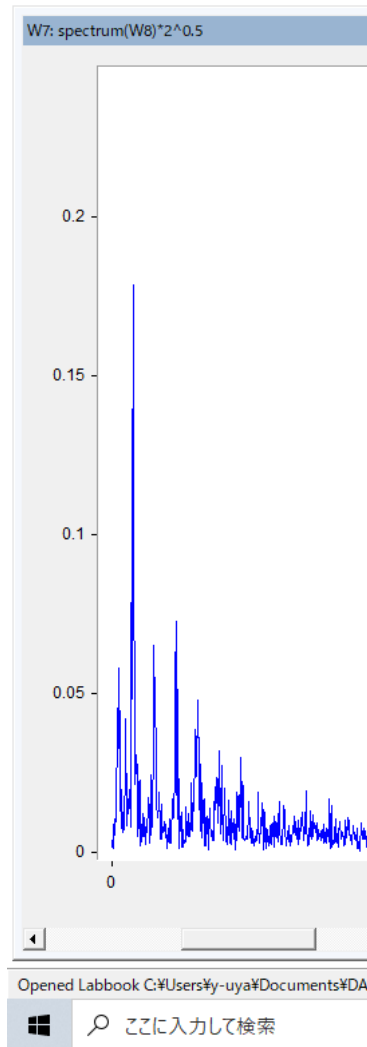
	周波数 (Hz)	0.25	0.5	1	2	10	20	50
	音圧 (Pa)	0.00024	0.0002	0.0001	0.0005	0.0066	0.008	0.0000007
①	騒音レベル (d B) (平坦特性)	21.5836249	20	13.9794001	27.9588002	50.3702788	52.0411998	-29.118639
②	G特性の重み付け	-88	-64.3	-43	-28.3	0	9	-20
①+②	G特性重み付け後	-66.416375	-44.3	-29.0206	-0.3411998	50.3702788	61.0411998	-49.118639
	G特性音圧レベル (d B)	61.39824356						
	周波数 (Hz)	0.25	0.5	1	2	10	20	50
	音圧 (Pa)	0.00024	0.0002	0.0001	0.5	0.0066	0.0041	0.0000007
①	騒音レベル (d B) (平坦特性)	21.5836249	20	13.9794001	87.9588002	50.3702788	46.2350772	-29.118639
②	G特性の重み付け	-88	-64.3	-43	-28.3	0	9	-20
①+②	G特性重み付け後	-66.416375	-44.3	-29.0206	59.6588002	50.3702788	55.2350772	-49.118639
	G特性音圧レベル (d B)	61.35819084						
	周波数 (Hz)	0.25	0.5	1	2	10	20	50
	音圧 (Pa)	0.00024	31.5	0.0001	0.0005	0.0066	0.0041	0.0000007
①	騒音レベル (d B) (平坦特性)	21.5836249	123.945611	13.9794001	27.9588002	50.3702788	46.2350772	-29.118639
②	G特性の重み付け	-88	-64.3	-43	-28.3	0	9	-20
①+②	G特性重み付け後	-66.416375	59.6456112	-29.0206	-0.3411998	50.3702788	55.2350772	-49.118639
	G特性音圧レベル (d B)	61.34928006						
	周波数 (Hz)	0.25	0.5	1	2	10	20	50
	音圧 (Pa)	482	0.0002	0.0001	0.0005	0.0066	0.0041	0.0000007
①	騒音レベル (d B) (平坦特性)	147.640341	20	13.9794001	27.9588002	50.3702788	46.2350772	-29.118639
②	G特性の重み付け	-88	-64.3	-43	-28.3	0	9	-20
①+②	G特性重み付け後	59.6403409	-44.3	-29.0206	-0.3411998	50.3702788	55.2350772	-49.118639
	G特性音圧レベル (d B)	61.3457206						

館山で計測した風車音では、風が強く吹くときの音圧が、0.37Pa 程度でした。

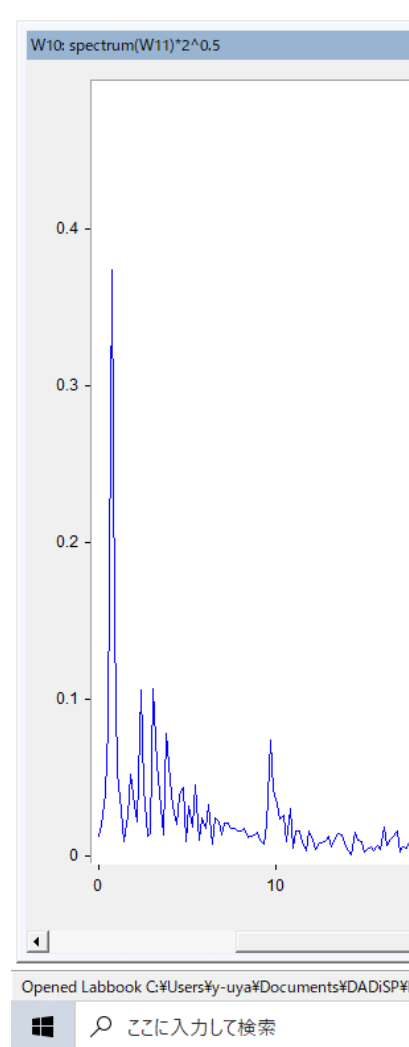
風速の変化に伴う音圧の変化は、次のグラフです。



0.104Pa



0.175Pa



0.37Pa

この時の音を受けた感覚は、ヘリコプターが着陸するのかもしれないような音でした。

これを、315PPa と比べれば、音圧としては、851 倍であり、エネルギーとしては、724799 倍です。これだけの違いがあっても、G 特性音圧レベルは同じ値になるのです。

G 特性音圧レベルが同じでも、人が受ける圧力には大きな違いがあります。

この計算では、ISO7196 に従って、0.25Hz からの計算にしてあるが、1Hz 以上の成分だけで計算する人が多いです。計測する場合も、SAA1 以外は、普通に測れば 1Hz 以上が計測範囲になります。その場合は、G 特性音圧レベルの計算に、0.5Hz の成分は含まれませんので、この音圧がどれだけ高くなっても G 特性音圧レベルの数値は変わりません。

大型風車は、0.5Hz 辺りの音圧が極端に高いのですが、他はそれほどでもありません。したがって、人が受ける圧迫感の原因が 0.5Hz 成分にあるのですが、これを除外して計算した G 特性音圧レベルの数値を、圧迫感などの不快感と比較しても関連性は見つからないのです。

圧迫感と関連させるべき数値は、風車音の超低周波成分の中にある最大音圧の値（パスカル値）なのです。この計算は周波数分解能を上げないと出来ません。最も重要なのは超低周波音を計測できるマイクです。

また、交通騒音との違いを判断するには、周波数帯でのエネルギー分布を考慮する必要があります。

精密騒音計は 0.25Hz ～20kHz の間で平坦な音響特性を持っていないわけではありません。20kHz まで扱うにはサンプリングレートを 48kHz まで上げておく必要があります。

S A - A 1 と N L - 6 2, N L - 6 3 のマイクは同じであり、平坦特性で計測して W A V ファイルに収録した数値は、S A - A 1、N L - 6 2、N L - 6 3 を使えば同じ値になるので、P C と解析ソフトがあれば N L - 6 2, N L - 6 3 での計測も可能です。

エネルギーが等質空間に拡散すると考えれば、距離による減衰は当然の結果である。重要なのは、回転軸の方向からの角度によって決まる、音圧の変化です。風車からの超低周波音は指向性を持っているのです。この、指向性による影響も重要な考慮事項です。

G 特性音圧レベル計算では、多くの場合、中心周波数が、1Hz から 80Hz となっています。

ISO7196:1995 では、中心周波数として 0.25 から 315Hz までは採用されています。

0.8Hz からのものもありますが、

これらの範囲と、重みづけによって、

A 特性音圧レベルでは、風車音のエネルギーの 93% を無視した数値が得られる。

G 特性音圧レベルでは、風車音のエネルギーの 80% 程度を無視した数値が得られる。

のです。どちらも、最大音圧の部分を除いた数値になっているのです

1 パスカルは 1 m^2 の面積に対して 1 N の圧力を加えるような気圧であるので、 0.003 パスカルでは、 1 m^2 に対して 0.003 N の力が加わる。地球上では質量 1 kg の物質に対して 9.8 N の力（引力）が働くのだから、 $0.003/9.8=0.000306$ となり、水平な面の 1 m^2 あたりに 0.3 g の重しを乗せることに相当する。掌サイズ ($10 \text{ cm} * 10 \text{ cm}$) で考えれば、掌に 0.003 g の重しを乗せることに相当します。

1 パスカルは 1 m^2 の面積に対して 1 N の圧力を加えるような気圧であるので、 1 m^2 に対して 10000 N の力が加わる。地球上では質量 1 kg の物質に対して 9.8 N の力（引力）が働くのだから、 $10000/9.8=1020$ となり、水平な面の 1 m^2 あたりに 1020 kg の重しを追加して乗せることに相当する。掌サイズ ($10 \text{ cm} * 10 \text{ cm}$) で考えれば、掌に 10 kg の重しを乗せることに相当します。

このような違いは、G 特性による計算ではほとんど無視されてしまいます。

音圧 0.003 Pa と 10000 Pa では私たちが受ける気圧変動としては桁違いですので物理的な影響は極めて大きいと考えます。にもかかわらず、G 特性で表現した数値の変化は、本当に小さな変化です。この場合は、四捨五入で同じ 68 デシベルになってしまいます。

G 特性で騒音を評価しても超低周波音の影響を正しく評価することはできません。1 Hz 以下の超低周波音を G 特性では正しく評価できないことは上記の計算モデルからも明らかです。

もちろん、簡単なモデルでの計算なので、予測値やその影響をより正確に理解するには、実在する風車群についての計測や、風車建設前の騒音状態を 1 Hz 以下の超低周波音の強さが明確になる方法で計測する必要があります。

私（宇山靖政）が実際に計測した結果では、風車の近くには風車が無い地域に比べて、100 倍くらいの強さの 1 Hz 以下の超低周波音が存在しました。

館山の風車騒音を計測した結果では、0.2Hz、0.4Hz、0.8Hz、等の超低周波成分は確かに存在する。
質問状で引用した多くの論文の資料でも、このような周波数の超低周波数成分が存在することは明らかです。

風車な無い場所でも、1 Hz 以下の超低周波成分は確かに存在するが、それは 0.002 から 0.004 パスカル程度の強さだと分かります。

風車の近くでは、0.1～0.3 パスカル程度になることもありました。100倍程度の強さです。

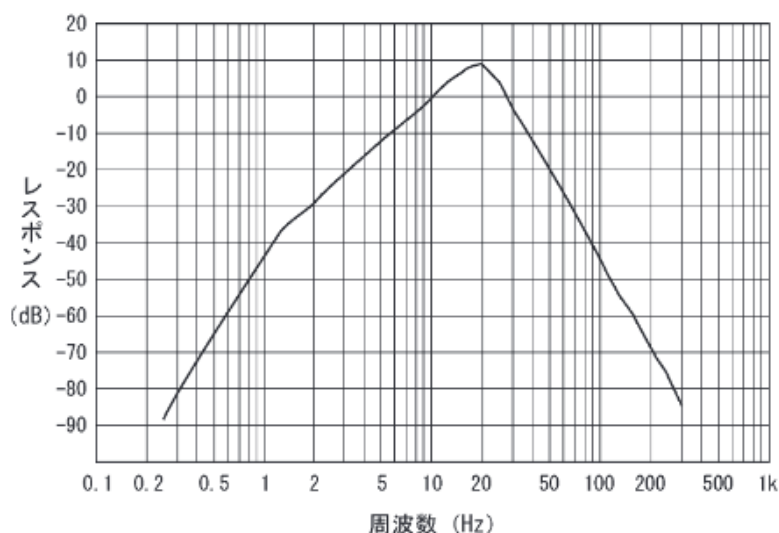
このような困った状況を生み出した背景を考えてみます。

まず、ISO 7196 ですが、国立環境研究所の HP にある資料

資料-6. ISO 7196 に規定された G 特性低周波音圧レベル

ISO 7196 では、1～20Hz の低周波範囲において、平均的な被験者が知覚できる低周波音を G 特性加重音圧レベルで概ね 100dB としている。

G 特性の周波数レスポンスは、図 6-1 に示すとおりである。



資料：「ISO 7196 : Acoustics-Frequency weighting characteristic for infrasound measurements, 1995」

図 6-1 ISO 7196 に規定された G 特性低周波音圧レベル

の下のほうをよく見ると、

「frequency weighting characteristic for infrasound measurements, 1995」

ISO 7196 に規定された G 特性低周波音圧レベル

となっていて、1995 年に発表されたものだと分かります。

風車の大きさは 1995 年以降、急激に大きくなっています。

三菱重工業株式会社 勝呂 幸男の論文にある図

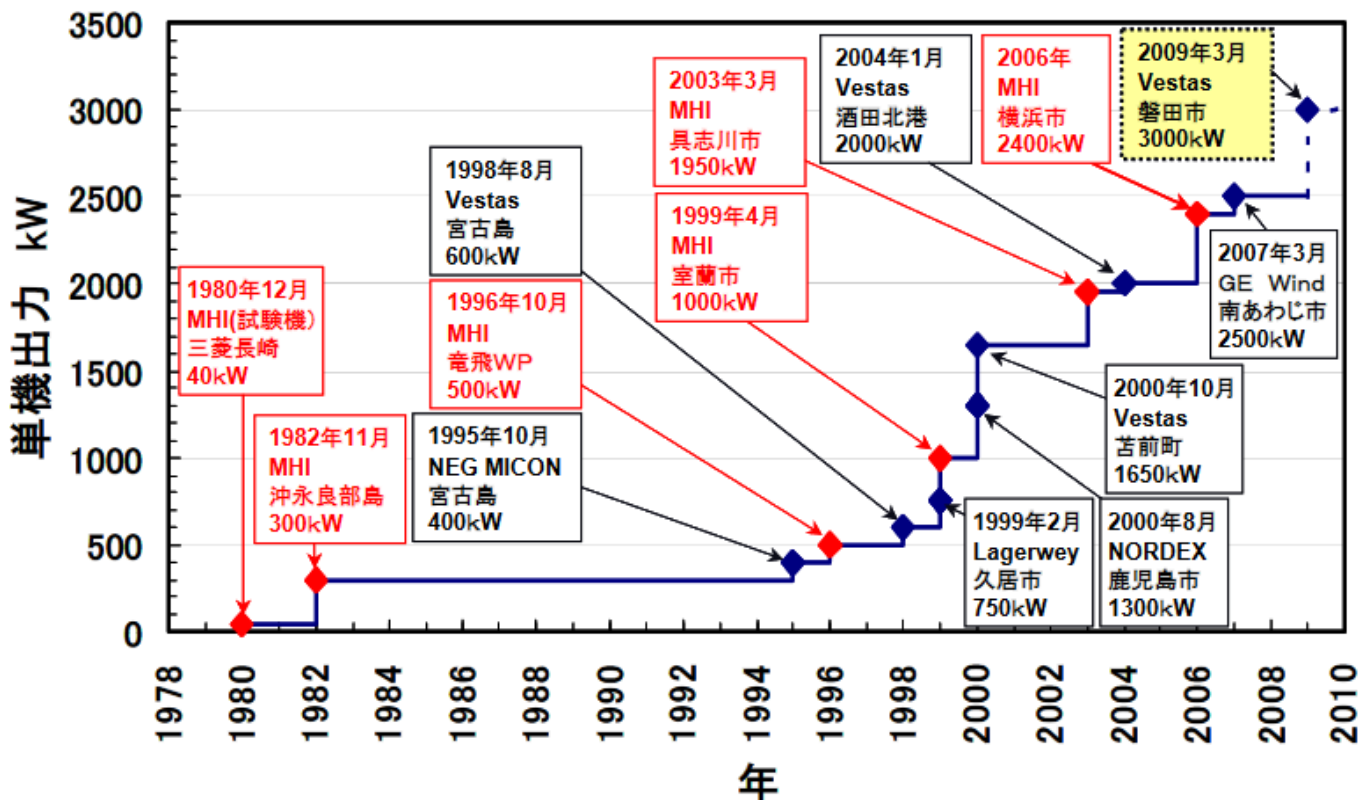


図 1 わが国の風車導入実績

によれば、風車の発電量は 1995 年以降急激に増加しています。

- 1995年10月宮古島 400 kW
 - 2000年3月鹿児島市 1300 kW
 - 2000年10月苫前町 1650 kW
 - 2009年3月磐田市 3000 kW
- となっています。

千葉県の「館山市環境センター」近くの風車は、出力 1500KW、タワー高さ 65m、ブレード直径 70.5m、ナセル重量 52トン です。

出力から考えると、2000年3月鹿児島市 1300 kW、2000年10月苫前町 1650 kW、に近いものです。1 Hz 以下の超低周波音がかなりの強さで出ていることは計測結果からみて取れます。

布引北でのシーテックの計画は、出力 2300 kW、タワーの高さ 78.3m、ブレード直径 82m。

千葉県館山の風車よりも、より低い音が、より強烈に出ることが予想されます。1 Hz よりも低い周波数の強さを計測して正しく評価なくてはなりません。風車が大きくなれば、風車から出る 1 Hz よりも低い超低周波音の影響も強大になります。

残念ながら、日本では、G 特性音圧レベルの値を中心に議論しています。この議論では 1 Hz 以下の超低周波音の影響を正しく評価できないことは、今まで見てきた通りです。

巨大化する風車から出る 1 Hz 以下の超低周波音を無視するような G 特性での騒音評価は時代遅れの評価方法です。

以上の部分を追加します。

(5) レベルレコーダによるレベル波形のモニター

風車音以外の低周波音の周波数分析や録音を行う際に、低周波音の発生状況や風による影響を把握するためにレベル波形をモニターする場合には、精密騒音計（低周波音圧レベル計）の周波数補正特性を平坦特性にして、レベルレコーダの動特性 SLOW（時定数は 1 秒）でレベル波形を記録させる。

その他の動特性を用いる場合は下限測定周波数に注意し、使用した動特性は測定結果に明記する。

レベルレコーダの紙送り速度は、1mm/s または 3mm/s とする。

備考：オクターブバンド中心周波数 2Hz の低周波音の音圧実効値を求めるには、検波回路の平均化時定数が 10 秒でなければならないが、実際の低周波音はオクターブバンド中心周波数 4Hz 以上に主成分がある場合が多く、またレベルが変動する場合には 10 秒の時定数ではそれらの変化が観測できない場合が多いからである。ただし、時定数 1 秒の場合には、約 4Hz からは正確な実効値が得られる。

ISO7196 に厳密に従って、中心周波数 0.25Hz の超低周波音の実効値を求めるには、これらの機材は役に立たない。

と修正する

(6) 衝撃性低周波音のレベルレコーダ記録

衝撃性の低周波音をレベルレコーダに記録させる場合には、校正信号は記録用紙の下から 34dB の位置とし、最大値が記録紙の下から 25 dB 以内に収まる様に、低周波音圧レベル計のレンジを設定する。衝撃性の低周波音では、25 dB 以上になるとレベルレコーダのペンが追いつかず、正確な値が測定できない可能性がある。

このままとする

5.2.3 レベル処理器による測定

精密騒音計（低周波音圧レベル計）の出力をレベル処理器の入力に接続して、一定時間毎の統計値を算出する。測定では、あらかじめ定めた時間内の最大値あるいはパワー平均値を測定する。レベル処理器の動特性は SLOW（時定数は 1 秒）に設定する。長期間のモニタリング測定では、例えば、10 分間の間隔でパワー平均値を繰り返し測定する。

風車音以外の低周波音の測定では風の影響を強く受けるため、屋外でモニタリングを行う場合には、対象とする低周波音の音圧レベルが風雑音の最大値に比べて常時 10dB 以上大きい、あるいは風雑音の低減対策を完璧にする必要がある。風雑音により音圧レベルが大きく変動する場合には測定を見合わせる。

現状では、屋内における作業環境としての低周波音のモニタリング等にはこのレベル処理機による測定が利用できると考えられる。但し、屋内の扉がスライド式でない扉の場合には、扉の開閉による室内の圧力変動により、音圧レベルが大きく変動するので、このような建物は低周波音の自動測定に適さない（図-5.3.9 参照）。

風の影響を評価する為には、風車が無い場所（20 km 以上離れた場所）で、標準的な防風スクリーンを付けたマイクに風を当てて計測を行い、記録された風の影響の大きさを確認しておく必要がある。

と修正する

5.2.4 実時間周波数分析器による測定

(1) 現場における超低周波音・低周波音の周波数分析

風車音以外の場合には、低周波音のレベル波形をレベルレコーダでモニターしながら精密騒音計（低周波音圧レベル計）の出力を実時間周波数分析器等の入力に接続して周波数分析を行う。測定に先立ち、ピストンホンまたは低周波音圧レベル計の内部校正信号を用いて測定系の校正を行う。

精密騒音計（低周波音圧レベル計）の周波数補正特性は平坦特性とし、実時間周波数分析器の動特性 SLOW（時定数は 1 秒）として 1/3 オクターブバンド分析を行う。

変動の小さい低周波音の場合は現場での周波数分析も可能であるが、変動の大きい低周波音や間欠的、衝撃的な低周波音の場合には、低周波音の録音を行い、持ち帰って変動の状況をよく確かめながら、周波数分析することが望ましい。

風車音の場合は、精密騒音計（低周波音圧レベル計）では、十分な周波数分解能を持った周波数スペクトルが得られないので、精密騒音計（低周波音圧レベル計）を単なる波形収録装置として扱って、記録した WAV ファイルの解析は、その場でノートパソコンに入れて解析をするか、持ち帰って解析をするかの 2 通りだが、長時間の計測データの解析では、高性能のコンピュータが必要となる。

と修正する

(2) 衝撃性低周波音の周波数分析

衝撃性の低周波音を周波数分析する場合には、波形でオーバーしないように、十分なマージンをとって測定レンジを決める。

変動の大きい低周波音や衝撃性の低周波音で、5Hz 以下の周波数帯域に成分がある場合には、オクターブバンドで周波数分析を行う。1/3 オクターブバンド分析の場合、5Hz 以下では正確な値が測定できない。

風車音では、0.5～1Hz の音を解析する必要があるが、1/3 オクターブ解析の使用は、詳細な周波数と音圧の調査には適さない。

また（１）と同様に録音しておくことが望ましい。

備考 1：備考 2 及び備考 3 に示すように、ここで対象とする低周波音の周波数分析は、フィルタの周波数帯域幅、分析時間、指示回路の時定数の関係から、信号の継続時間 2 秒程度は一定であることが必要である。ここでは、実用的な方法として、（1）連続の定常的な低周波音の場合は、オクターブ分析と 1/3 オクターブ分析のいずれの方法をとっても測定精度の問題はなく、（2）音圧レベルが変動する場合や衝撃的な低周波音の場合は、オクターブ分析を原則とし、1/3 オクターブ分析は中心周波数 5Hz 以上の分析値を有効とする。

風車音の場合は、波形収録プログラムで作成した WAV ファイルをコンピュータを使って解析する。解析には、精密騒音計の機能をより高性能にした解析が行えるプログラムが必要である。

風車音の場合は、ISO7196 に従った、中心周波数 0.25Hz からの 1/3 オクターブ解析ならばある程度の有効性はあるが、超低周波音の領域における離散的な周波数特性を表現できないので、FFT を使った詳細な周波

数スペクトルが必要になる。

備考 2：周波数分析を行う場合には、分析時間に関する一つのルールがある。それは、分析時間 $T(s)$ は少なくともフィルタのバンド幅 $\Delta f(Hz)$ の逆数でなければならないという条件である。すなわち、次式及び次表の制限がある。

$$T \geq 1 / \Delta f$$

フィルタ	中心周波数(Hz)	バンド幅(Hz)	分析時間(s)
オクターブバンド	2	1.4	0.71
	4	2.8	0.36
1/3 オクターブバンド	1.6	0.4	2.5
	5	1.1	0.91

備考 3：この測定に用いる精密騒音計（低周波音圧レベル計）の指示回路の平均時定数は、1 秒である。この場合、トーンバースト信号を加えたときの最大指示値が同振幅の定常正弦波信号の指示値と同じになるには、バースト信号の継続時間を約 2 秒にしなければならない。つまり、定常値に達するのに約 2 秒を要するので、最大値を読み取る方法では、継続時間 2 秒以下の信号の指示値は、常に小さい。例えば、継続時間 1 秒のトーンバースト信号の最大指示値は、定常値に対して -4dB となる。

衝撃的な低周波音について、備考 2 の条件及びこの時定数の問題、さらに 5.2.2(5)の備考に示す実効値の精度の問題を厳密に解決するには、測定系を複雑にし、現場の測定が容易でなくなる。ここでは、一定の条件に基いてデータの収集を行い、簡易的な評価値を得ることを考慮している。

と修正する

(3) 超低周波音・低周波音の発生状況のモニター

風車音以外の低周波音の録音を行う際に、実時間周波数分析器をモニターとして使用することにより、低周波音の発生状況や風による影響を把握することができる。

例えば、対象とする低周波音で特定の周波数が卓越している場合、対象とする低周波音が発生しているかどうかを現場でチェックできる。

風車音の場合は、周波数分解能を上げるために、FFT の計算対象となるデータは、サンプリングレート 48 kHz で 120 秒間以上計測したものとなる。

また、ビデオでの風車の回転も記録する必要があり、回転数から最大音圧となる周波数が決まるので、こちらは、計測データを Wavelet 解析して観察する必要がある。

録音は可能だが、リアルタイムの解析は、かなり困難である。

と修正する

5.2.5 超低周波音・低周波音の録音

(1) 録音を始める前に

多点同時測定を行う場合や詳細な解析を行う場合、騒音・振動・超低周波音・低周波音を同時に測定する場

合には録音（NL-62、SA-A1 に波形収録ソフト NX-42WR、SX-A1WR を組み込めばマイクに掛かる音圧の変動を符号付整数の形で WAV ファイルとして記録することが出来る。）を行う。また、大きく変動する低周波音や間欠的、衝撃的な低周波音の場合には、超低周波音・低周波音の録音を行い、WAV ファイルをコンピュータに読み込んで周波数分析をする。

録音を始める時に、測定年月日、開始時刻、測定点番号、測定機器の番号、測定者名等をアナウンスして、WAV ファイルの冒頭に入れておく。10 分間のデータが欲しい時は冒頭部分を含めると 11 分間のデータになる、

と修正する

（2）校正信号の録音

ピストンホンまたは精密騒音計（低周波音圧レベル計）の内部校正信号を録音する。校正信号は各チャンネル 1 分程度録音してあると、分析の際便利である。

（3）超低周波音・低周波音の録音

G 特性音圧レベルを記録する場合には精密騒音計（低周波音圧レベル計）の周波数補正特性は G 特性にしてレベル出力を記録する。周波数分析を行う場合には精密騒音計（低周波音圧レベル計）の周波数補正特性を平坦特性とする。

超低周波音・低周波音の録音（NL-62、SA-A1 に波形収録ソフト NX-42WR、SX-A1WR を組み込めばマイクに掛かる音圧の変動を符号付整数の形で WAV ファイルとして記録することが出来る。）にあたっては、入力信号がオーバーしないように精密騒音計（低周波音圧レベル計）のレンジを設定する。特に、衝撃性の低周波音の場合には、精密騒音計（低周波音圧レベル計）のメーターやレベルレコーダ記録紙上でオーバーしてなくても、波形でオーバーしている場合があるので特に注意が必要である。

と修正する

（4）録音時のアナウンス

はじめに精密騒音計（低周波音圧レベル計）のレンジ、周波数補正特性をアナウンスする。

録音が始まったら、対象とする超低周波音・低周波音の状況（発生時刻、発生源の種類や稼働状況等）、低周波音以外の暗騒音の発生状況、風の状況等を逐次アナウンスする。途中で測定レンジを変更した場合にも、必ずアナウンスする。超低周波音・低周波音の測定では大きな声でなければ、測定値に影響はほとんどない。アナウンスがないと、あとで録音を聞いても対象とする低周波音なのかあるいは風なのか判定できない。現場にいた人しか、現場の状況はわからないので、録音時のアナウンスは非常に重要である。

と修正する

5.3.1 気象条件、地形等による影響

音が屋外を伝搬する際には、地形や建物の配置などによる遮蔽・反射・回折、地表面による吸収や気象の影響を受ける。

特に発生源から数 km 以上離れた地点までの、超低周波音・低周波音の伝搬を測定する場合には、気温と風向風速の勾配の影響が大きい。発生源から距離が離れた場所では、風向きや風速の違いで 20～30dB も音圧レベルが異なる場合がある。特に風車音の場合は、強い指向性が有るので風車の向きの影響が大きい。

風による影響については、若干の順風（発生源から測定点の方へ風が吹く）条件で音が伝わりやすく、気温についても中立（高さによらず温度が一定）か、若干の逆転（地表より上空の温度が高い）の条件で音が伝わりやすい。そのため朝晩や夜間、日中でも曇天の場合にしばしば大きな音が観測される。例えば飛行場周辺では季節や時間帯によって逆噴射の音（リバース音）が聞こえたり聞こえなかったりすることがある。

したがって、超低周波音・低周波音の測定時の条件として、天気などとともに測定点近傍での温度などの気象条件、測定点周辺の地形や建物の配置などをできるだけ明確に記録しておくのが望ましい。可能であれば、測定時の気象情報を入手するとよい。

気温の分布による音の屈折の概要を図-5.3.1 に、風速の分布による音の屈折の概要を図-5.3.2 に示す。

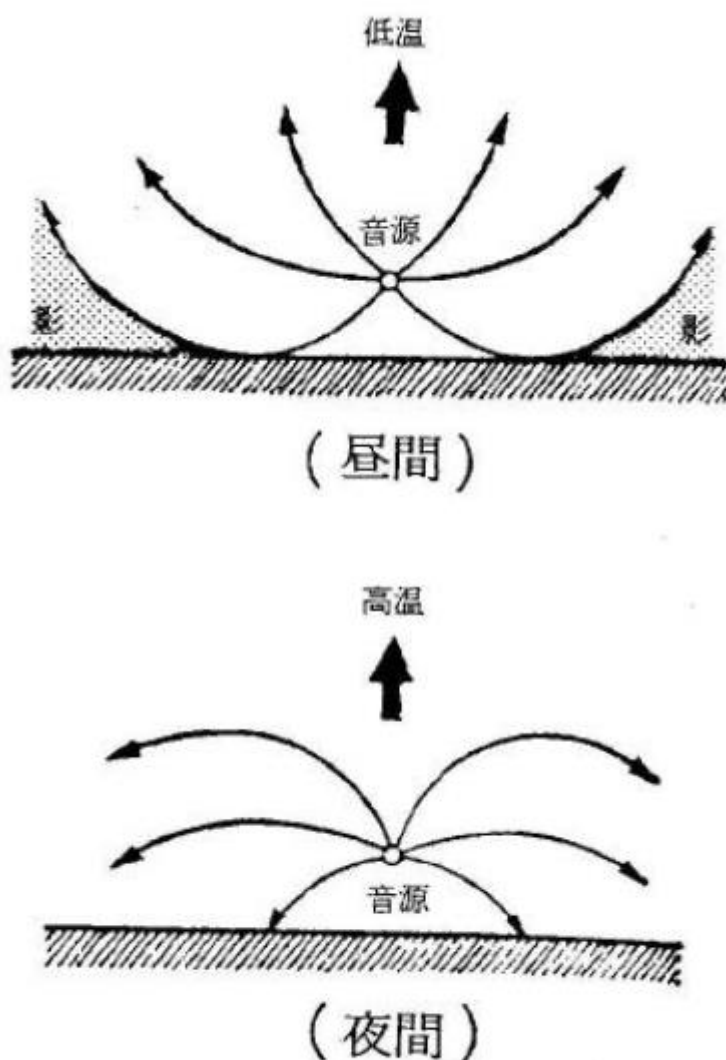


図-5.3.1 高さ方向の気温の分布による音の屈折

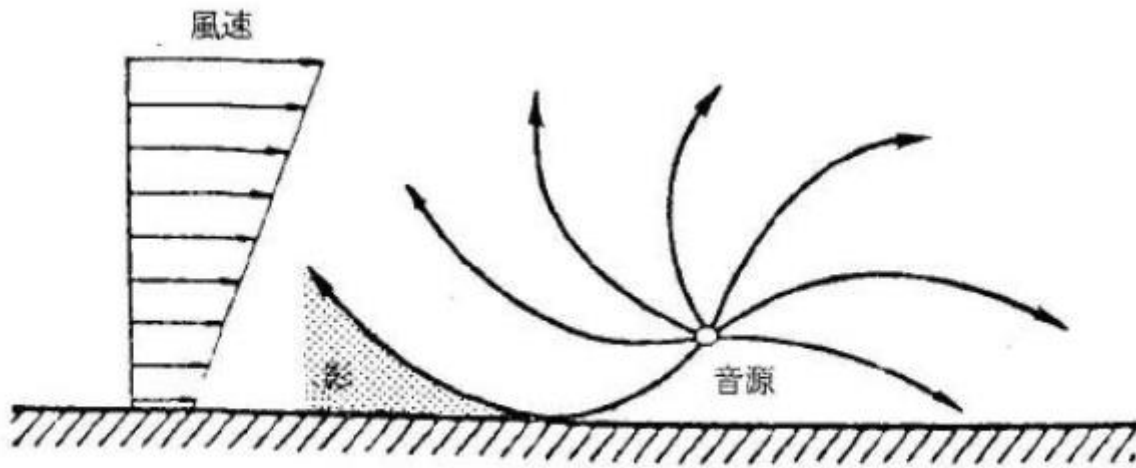


図-5.3.2 風による音の屈折

5.3.2 暗騒音の影響

超低周波音・低周波音を対象とした場合、通常は暗騒音の補正は行わない。それは、風の超低周波音・低周波成分を除くと超低周波音・低周波領域の暗騒音は一般には低いので無視する。風による超低周波音・低周波数領域の雑音はレベルが大幅に変動するので補正できない。

風車音では、超低周波音の領域では、風車音の音圧が卓越しているので、風の影響は計算誤差の範囲に入るが、200Hz以上では、風車音よりも風による影響の方が強い。

超低周波音・低周波音の測定においても、騒音レベルの測定において行う暗騒音の補正が適用できる場合もある。

一般の騒音の影響を受けることは少ないが、対象とする超低周波音・低周波音以外の低周波音（暗騒音）があるとき、暗騒音の補正を行い対象の音の音圧レベルを推定することができる。ただし、対象とする超低周波音・低周波音とそれ以外の超低周波音・低周波音が純音性でかつ周波数が接近している場合（例えば、機械の回転数に対応する主成分が強く発生していて、かつ同じ機械が複数台運転されているときの一台の低周波音を推定する場合）、うなり(beat)が現れ、その程度は位相によって異なり、単純なデシベルの和または差の計算が成り立たないので、騒音レベルの暗騒音補正の方法では補正できない。

と修正する

5.3.3 風雑音の影響

(1) 超低周波音・低周波音測定における風の影響

超低周波音・低周波音の測定において最も注意すべきは、風による影響である。

精密騒音計（低周波音圧レベル計）のマイクロホンに風が当たると、その部分で雑音（風雑音）が発生し、測定が困難になることがある。対象とする超低周波音・低周波音の音圧レベルが小さいと風雑音の影響で測定ができなくなる。風車音の超低周波音は音圧が極めて高いので、0～20Hz の範囲では風車音から見た、風による雑音は計算誤差の範囲となる。200Hz を越えると風による影響の方が風車音よりも大きくなる。

図-5.3.3 に風のある日とない日のほぼ同じ時刻に測定された、超低周波音・低周波音のレベルレコーダ記録例を示す。この例では特に低周波音の発生源はないが、風のある日の測定例では、風による雑音によって見かけの音圧レベルが大きく変動している。

音圧レベルは 100Hz 以上の成分の影響が大きいので、風による影響が大きく出るが、風車の超低周波音を調査する場合は、周波数スペクトルを使って解析すれば良いので、この部分に関しては、風があっても問題はない。

超低周波音・低周波音の測定時にはマイクロホンに騒音計用の防風スクリーン（通常、直径 9cm）を付けるが、あまり大きな効果は期待できない。風によってマイクロホンから発生する雑音による見かけ上の音圧レベルは、風の吹き方、マイクロホンの位置などによって変化する。また、風自体にも低周波音に相当する変動圧力を多く含んでいることも注意すべきであろう。

風の強さは煙突の煙や草木・木の葉のゆれで見当をつけることができる。低周波音の音圧レベルが 80dB 程度で草木や木の葉がゆれているときは、測定は難しい。風が強く感じられる場合には、マイクロホンを地上に寝かせても風の影響は十分には除けない。

強風が吹いている場合や、風雑音により対象とする超低周波音・低周波音が確認できない場合には、測定を中止し、時間や日を改めて測定を行う。風の強い日に無理に測定しても、データが使いものにならない。

風車音の場合は、強風の日に被害が大きくなる。風が気になるならば、室内で計測すればよい。また、車内の環境は室内と似ているので、車内で計測すれば風の影響は受けない。

目的が、風車音被害の原因追及ならば、室内、車内での計測を重視すべきである。

計測では、3 台の精密騒音計を使って、二重防風スクリーンのものと標準的な防風スクリーンのものを並べて屋外に置き、標準的な防風スクリーンを付けたものを、近くに止めた車の中に置いて、計測し、結果を比較すれば、風の影響が判明する。

さらに、同様の計測を風車から 20 km 離れた場所で風の強い日に行う必要もある。これによって風の影響はより鮮明となる。

音の強さ

音場内の 1 点において、単位面積を単位時間に通過する音響エネルギーを音の強さ（I または J と書く）と言います。単位は、(W/m²)

$$J = (p \cdot p) / (\rho \cdot c) \quad (W/m^2)$$

に注意して、音がマイクを通過するときの音の強さ (W/m²) を計算したものが次の表です。

JFE の製鉄所内では、全体のエネルギーは 10⁻⁴ (W/m²) 程度

W16: EngDistributionWm2(w1,0,20,200,5000)				
	1: No Units	2: No Units	3: No Units	4: No Units
1:	0.000051	0.000150	0.000232	0.000433
2:				

0～20Hz 0.000051 (W/m2)

20～200Hz 0.000150 (W/m2)

200～5000Hz 0.000232 (W/m2)

0～5000Hz 4.3E-004 (W/m2)

リオン社前での交通騒音では 全体のエネルギーは 10^{-5} (W/m2) 程度

W15: EngDistributionWm2(w6,0,20,200,24000)				
	1: No Units	2: No Units	3: No Units	4: No Units
1:	1.757791E-007	8.079829E-008	1.805011E-005	1.830650E-005
2:				

0～20Hz 1.757791E-007 (W/m2)

20～200Hz 8.079829E-008 (W/m2)

200～24000Hz 1.805011E-005 (W/m2)

0～24000Hz 1.8E-005 (W/m2)

風が弱いときの風車の近くでは、全体のエネルギーは 10^{-4} (W/m2) 程度

W15: EngDistributionWm2(w2,0,20,200,24000)				
	1: No Units	2: No Units	3: No Units	4: No Units
1:	2.432890E-004	2.138726E-005	1.627290E-007	2.648317E-004
2:				

0～20Hz 2.432890E-004 (W/m2)

20～200Hz 2.138726E-005 (W/m2)

200～24000Hz 1.627290E-007 (W/m2)

0～24000Hz 2.6E-004 (W/m2)

風が強いときの風車の近くでは、全体のエネルギーは 10^{-3} (W/m2) 程度

W9: EngDistributionWm2(w8,0,20,200,24000)				
	1: No Units	2: No Units	3: No Units	4: No Units
1:	1.492656E-003	2.285370E-005	6.942087E-008	1.515570E-003
2:				

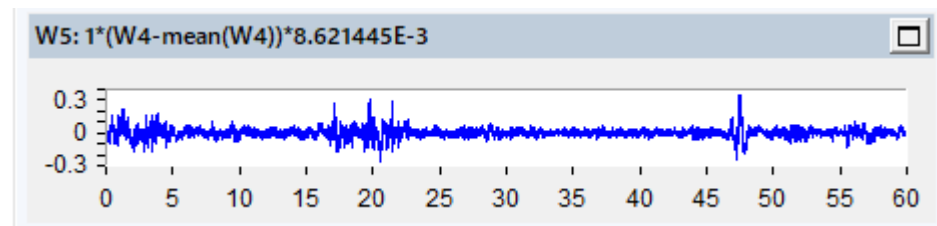
0～20Hz 1.492656E-003 (W/m2)

20～200Hz 2.285370E-005 (W/m2)

200～24000Hz 6.942087E-008 (W/m2)

0～24000Hz 1.5E-003 (W/m2)

近くの神社でマイクに風を当てて測った音



でも計算してみた。

W6: EngDistributionWm2(w5,0,20,200,24000)				
	1: No Units	2: No Units	3: No Units	4: No Units
1:	8.227718E-006	3.912201E-007	2.117793E-007	8.829495E-006
2:				

0～20Hz 8.227718E-006 (W/m2)

20～200Hz 3.912201E-007 (W/m2)

200～24000Hz 2.117793E-007 (W/m2)

0～24000Hz 8.8E-006 (W/m2)

となりました。

風が弱いときの風車の近くでは、 0～20Hz 2.432890E-004 (W/m2)

風が強いときの風車の近くでは、 0～20Hz 1.492656E-003 (W/m2)

近くの神社でマイクに風を当てて測った音 0～20Hz 8.227718E-006 (W/m2)

エネルギーの観点から、超低周波音の分析では、風による雑音があっても、問題は無い事が分ります。

G 特性音圧レベルと低周波音問題対応の手引書 (H16.6)

[低周波音問題対応の手引書 \(H16.6\)](#) では、

3. 測定

3.1 測定方法

「低周波音の測定方法に関するマニュアル (平成 12 年 10 月)」及び低周波音問題対応のための「手引」が定められており、低周波音の測定は、原則的にはこの方法を用いることとした。

3.2 測定場所

(1) 物的苦情に関する測定場所

低周波音による建具のがたつきに関する実験結果が建具へ入射する音圧レベルにより整理されていることから、測定場所は屋外とした。屋外の測定点は、一般環境中の低周波音を測定する場合には周囲の建物による反射等の影響を考慮して建物より 3.5m以上離れた場所に定めるのが望ましいが、物的苦情が発生している場合には、低周波音の測定場所は問題となる住居等の建物から 1～2m 程度離れた位置とした。

(2) 心身に係る苦情に関する測定場所

苦情者が低周波音や不快感などを最も感じる部屋の最も感じる位置で測定を行い、苦情者が訴える低周波音の特徴を把握する。最も感じる位置としたのは、部屋の中で特定の周波数で定在波が発生し、場所によって音の大きいところや小さいところが生じる場合があることを考慮したためである。

また、苦情者が低周波音や不快感などを感じない部屋の感じない位置でも測定を行い、両者の違いを比較することが有効な場合もある。

3.3 測定量

低周波音の測定量は、参照値の基礎となる実験結果が周波数別に示されていることから、1/3 オクターブバンド音圧レベルを測定する。なお、20Hz 以下の超低周波音については ISO-7196 に評価加重特性が規定されていることから、超低周波音による心身への不快感に関する評価にあたっては、G 特性音圧レベルとする。

3.4 測定周波数範囲

測定を行う周波数範囲は、原則として、「低周波音の測定方法に関するマニュアル」で規定された 1/3 オクターブバンド中心周波数 1Hz～80Hz とした。

3.5 測定結果の算出方法

本指針で適用対象とする低周波音は発生源近傍では音圧レベルの変動幅が小さいものであるが、発生源では音圧レベルの変動は少なくとも、伝搬の過程の種々の要因により変動幅が大きくなることも予想されることから、低周波音の音圧レベルが変動する場合についても結果の算出方法を示した。

また、風により低周波音の音圧レベルが変動する場合については、風による影響の少ない個所、すなわち音圧レベルの変動の少ない個所を測定し、それらのパワー平均を算出する。

なお、音圧レベルの変動幅は低周波音レベル計のメーター又はレベルレコーダの指示値により判定する。その際、低周波音レベル計の聴感補正特性は周波数分析の場合は平坦特性に、G 特性音圧レベルを求める場合は G 特性（G 特性の付いていない低周波音レベル計では平坦特性も可）とする。

とある。

困ることが沢山あります。

“低周波音による建具のがたつきに関する実験結果が建具へ入射する音圧レベルにより整理されていることから、測定場所は屋外とした。”

とあるが、

建具は室内にある。防犯の問題もあり、冬の寒さの問題もあるので、窓を開けて眠る人は少ない。

屋内にある建具に当たる音は、壁や窓での遮蔽機能の影響を受けた音です。室内の建具に当たる音と、屋外での音は別のものです。

建具に当たる音を調べるには、建具の近くで音を計測する必要がある。さらに、建具の振動を調べる必要や、床の振動を計測する必要がある。

必要なのは、室内での騒音レベル計による計測と、振動レベル計による振動の直接的な計測です。風車音の成分で高い音圧を持つのは 0.5Hz～2Hz 辺りの成分であり、日本家屋の固有振動が 1Hz～2Hz の程度なので、実際の振動を調査する意義がある。

“参照値の基礎となる実験結果が周波数別に示されていることから、1/3 オクターブバンド音圧レベルを測定する。なお、20Hz 以下の超低周波音については ISO-7196 に評価加重特性が規定されていることから、

超低周波音による心身への不快感に関する評価にあたっては、G 特性音圧レベルとする。”

とあるが、

参照値は、

環境省は、“参照値”として、低周波音の被害の目安となる数値も示していた。

表 1 低周波音による物的苦情に関する参照値

1/3 オクターブバンド 中心周波数 (Hz)	5	6.3	8	10	12.5	16	20	25	31.5	40	50
1/3 オクターブバンド 音圧レベル (dB)	70	71	72	73	75	77	80	83	87	93	99

表 2-3 低周波音による心身に係る苦情に関する参照値^[1-6]

1/3 オクターブバンド 中心周波数(Hz)	10	12.5	16	20	25	31.5	40	50	63	80	オーバーオール値 92dB(G)
1/3 オクターブバンド 音圧レベル(dB)	92	88	83	76	70	64	57	52	47	41	

上の 2 つの表の数値です。

明電舎の HP、[10.1.4 超低周波音](#)には、次の表があります。

表 10.1.4-3 (1) 1/3 オクターブバンド分析結果 (L_{Geq})

(単位：デシベル)

調査地点	調査日	時間区分	1/3オクターブバンド中心周波数											
			1	1.25	1.6	2	2.5	3.15	4	5	6.3	8	10	12.5
N1	1日目	昼間	61	59	57	55	54	52	50	49	47	46	47	48
		夜間	62	61	59	58	57	56	54	52	50	48	47	47
		全日	61	60	58	56	55	54	52	50	49	47	47	48
	2日目	昼間	81	79	77	76	74	72	70	68	65	63	61	59
		夜間	74	73	71	69	67	65	64	61	59	57	55	54
		全日	80	78	76	74	73	71	69	66	64	62	60	58
	3日目	昼間	68	67	65	63	61	60	57	55	53	51	49	49
		夜間	67	66	64	62	60	58	56	54	52	50	48	48
		全日	68	67	65	63	61	59	57	55	53	50	49	49

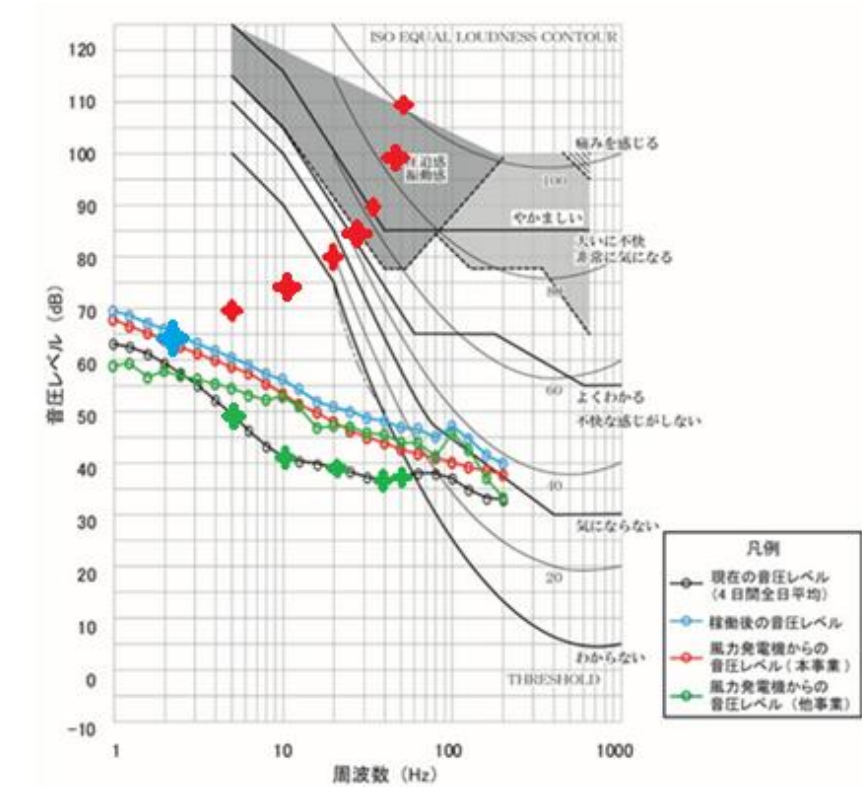
この数値は、

千葉県館山市にある風車の音を、ISO7196 に従って、1/3 オクターブ解析にかけて、各周波数帯の音圧レベルを平坦特性で示せば、次のようになります。下の段が中心周波数、上の段が音圧レベルです。

W15: transpose(w12)							
	1: No Units	2: No Units	3: No Units	4: No Units	5: No Units	6: No Units	7: No Units
1:	54.727250	62.381626	54.976763	56.733648	58.610999	77.287140	64.371465
2:	0.250000	0.315000	0.400000	0.500000	0.630000	0.800000	1.000000
3:							

さて、0.8Hz では、77.287 d B です。

赤い印は、がたつき閾値に対応します。



上の参照値と比較したいのですが、上の表には 5Hz までしかありません。
日本家屋の固有振動数が 1Hz 程度ですから、2Hz のときは 65 d B 程度でガタツキが起きる可能性が高いと言えます。
大型風車では、0.5Hz～1Hz 辺りで最大音圧になるので、ガタツキ閾値の表では風車の大型に対応できません。

“測定を行う周波数範囲は、原則として、「低周波音の測定方法に関するマニュアル」で規定された 1/3 オクターブバンド中心周波数 1Hz～80Hz とした。”
ですが、
最近の大型風車は、最大音圧となる部分が、0.5H z 程度であり、中心周波数を 1Hz～80Hz としたのでは、0.5H z の部分が計算対象外となってしまいます。これでは、風車音のエネルギーの半分以上が計算対象外になってしまうのです。
風車音でのエネルギー分布は、表 1、表 2 のようになっています。

Energy distribution	0～20Hz	20～5kHz
Wind turbine	93%	7%
Iron mill	12%	88%

Table 1 Energy distribution (0～5000Hz)

Energy distribution	0～1Hz	1～20Hz	0～20Hz
Wind turbine	61.3%	38.7%	100.0%
Iron mill	0.04%	99.96%	100.0%

Table 2 Energy distribution (0～20Hz)

表 1 より、風車音を騒音（周波数 20Hz 以上）として考えると、音のエネルギーの 93%を無視することに

なる。その結果、圧迫感などの不快感の原因となる部分を除外した数値と不快感を訴える人の割合を比較することになり、交通騒音の場合に比べると大きな誤差が出る。

また、1Hz～80Hzとしたのでは、 $93 \times 0.613 = 57\%$ となるので、風車音のエネルギーの 57%を無視した計算になってしまいます。

さらに、

“20Hz 以下の超低周波音については ISO-7196 に評価加重特性が規定されていることから、超低周波音による心身への不快感に関する評価にあたっては、G 特性音圧レベルとする。”
の部分も問題です。

“超低周波音のレベル”は、G 特性音圧レベルとして計算されます。対象を 1Hz～として計算した結果と、0.25Hz～として計算結果の数値は、ほぼ同じです。その原因を、モデルを作って調べてみました。
(仮称) ウインドパーク布引北風力発電事業
の要約書 10 ページに次の記載があります

予測地点	現況値	予測値	建設の影響 による増分	参考値
一般①	68	68	0	100
一般②	60	61	1	100
一般③	58	64	6	100
一般④	54	63	9	100

- 注： 1 現況値は、バックグラウンド低周波音（現況の超低周波音から、既設の風力発電所から発生する超低周波音を除いたもの）です。
- 2 予測値は、将来の超低周波音（G特性音圧レベル）です。
- 3 参考値は、ISO 7196 に示されている「超低周波音の知覚の閾値」を示します。

表の数値を参考にして、G 特性音圧レベルが 56 d B だったとして、次のようなモデルを考えました。

G特性音圧レベルの試算		ISO7196の重み付け						
	基準音圧 (Pa)	0.00002						
	周波数 (Hz)	0.25	0.5	1	2	10	20	50
	音圧 (Pa)	0.00024	0.0002	0.0001	0.0005	0.0066	0.0041	0.0000007
①	騒音レベル (d B) (平坦特性)	21.5836249	20	13.9794001	27.9588002	50.3702788	46.2350772	-29.118639
②	G特性の重み付け	-88	-64.3	-43	-28.3	0	9	-20
①+②	G特性重み付け後	-66.416375	-44.3	-29.0206	-0.3411998	50.3702788	55.2350772	-49.118639
	G特性音圧レベル (d B)	56.46126558						

周波数成分は、0.25、0.5、1、2、10、20、50Hz の成分が上の表の音圧の時は、G 特性音圧レベルは 56.5 d B 程度です。

各成分の音圧を 1 つだけ変化させて、全体の G 特性音圧レベルが 61 d B になる様にしてみました。

20Hz の成分が、0.0041Pa から 0.008Pa になれば、61 d B になります。

2H z の成分が、0.0005 P a から 0.5 P a になれば、61 d B になります。

0.5Hz の成分が、0.0002Pa から 31.5Pa になれば、61 d B になります。

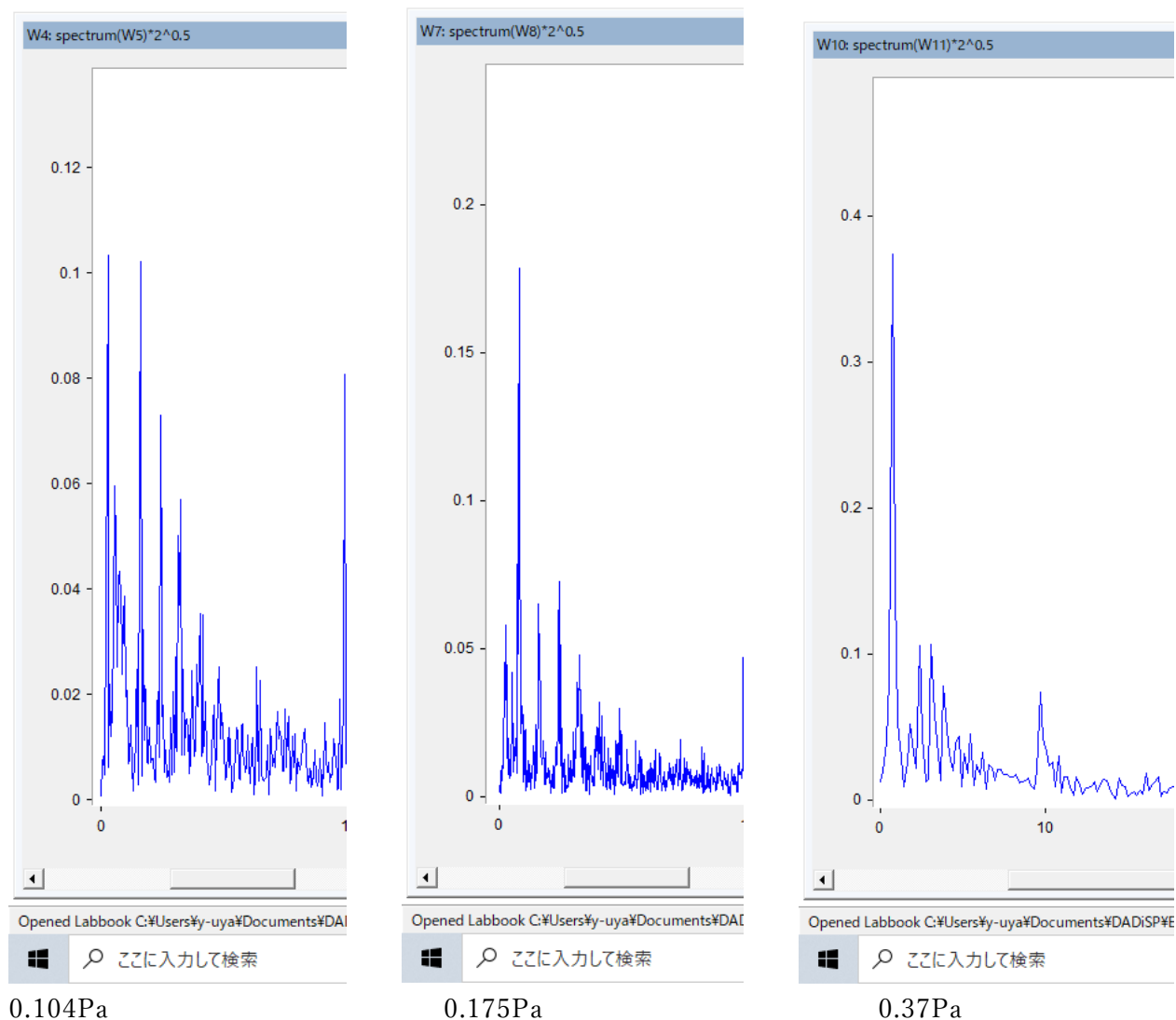
0.25H z の成分が、0.00024 P a から 482 P a になれば、61 d B になります。

それぞれの場合の最大音圧 (P a) は、0.008, 0.5、31.5、482 [P a]です。最大音圧レベル (d B) は、52, 88, 124, 147 [d B]です。どの場合も G 特性音圧レベルは 61 d B なのです。

	周波数 (Hz)	0.25	0.5	1	2	10	20	50
	音圧 (Pa)	0.00024	0.0002	0.0001	0.0005	0.0066	0.008	0.0000007
①	騒音レベル (d B) (平坦特性)	21.5836249	20	13.9794001	27.9588002	50.3702788	52.0411998	-29.118639
②	G特性の重み付け	-88	-64.3	-43	-28.3	0	9	-20
①+②	G特性重み付け後	-66.416375	-44.3	-29.0206	-0.3411998	50.3702788	61.0411998	-49.118639
	G特性音圧レベル (d B)	61.39824356						
	周波数 (Hz)	0.25	0.5	1	2	10	20	50
	音圧 (Pa)	0.00024	0.0002	0.0001	0.5	0.0066	0.0041	0.0000007
①	騒音レベル (d B) (平坦特性)	21.5836249	20	13.9794001	87.9588002	50.3702788	46.2350772	-29.118639
②	G特性の重み付け	-88	-64.3	-43	-28.3	0	9	-20
①+②	G特性重み付け後	-66.416375	-44.3	-29.0206	59.6588002	50.3702788	55.2350772	-49.118639
	G特性音圧レベル (d B)	61.35819084						
	周波数 (Hz)	0.25	0.5	1	2	10	20	50
	音圧 (Pa)	0.00024	31.5	0.0001	0.0005	0.0066	0.0041	0.0000007
①	騒音レベル (d B) (平坦特性)	21.5836249	123.945611	13.9794001	27.9588002	50.3702788	46.2350772	-29.118639
②	G特性の重み付け	-88	-64.3	-43	-28.3	0	9	-20
①+②	G特性重み付け後	-66.416375	59.6456112	-29.0206	-0.3411998	50.3702788	55.2350772	-49.118639
	G特性音圧レベル (d B)	61.34928006						
	周波数 (Hz)	0.25	0.5	1	2	10	20	50
	音圧 (Pa)	482	0.0002	0.0001	0.0005	0.0066	0.0041	0.0000007
①	騒音レベル (d B) (平坦特性)	147.640341	20	13.9794001	27.9588002	50.3702788	46.2350772	-29.118639
②	G特性の重み付け	-88	-64.3	-43	-28.3	0	9	-20
①+②	G特性重み付け後	59.6403409	-44.3	-29.0206	-0.3411998	50.3702788	55.2350772	-49.118639
	G特性音圧レベル (d B)	61.3457206						

館山で計測した風車音では、風が強く吹くときの音圧が、0.37Pa 程度でした。

風速の変化に伴う音圧の変化は、次のグラフです。



この時の音を受けた感覚は、ヘリコプターが着陸するのかとおもえるような音でした。

これを、315PPa と比べれば、音圧としては、851 倍であり、エネルギーとしては、724799 倍です。これだけの違いがあっても、G 特性音圧レベルは同じ値になるのです。

G 特性音圧レベルが同じでも、人が受ける圧力には大きな違いがあります。

この計算では、ISO7196 に従って、0.25Hz からの計算にしてあるが、1Hz 以上の成分だけで計算する場合があります。計測する場合も、SAA1 以外は、普通に測れば 1Hz 以上が計測範囲になります。その場合は、G 特性音圧レベルの計算に、0.5Hz の成分は含まれませんので、この音圧がどれだけ高くなっても G 特性音圧レベルの数値は変わりません。

大型風車は、0.5Hz 辺りの音圧が極端に高いのですが、他はそれほどでもありません。したがって、人が受ける圧迫感の原因が 0.5Hz 成分にあるのですが、これを除外して計算した G 特性音圧レベルの数値を、圧迫感などの不快感と比較しても関連性は見つからないのです。

圧迫感と関連させるべき数値は、風車音の超低周波成分の中にある最大音圧の値（パスカル値）なのです。この計算は周波数分解能を上げないと出来ません。最も重要なのは超低周波音を計測できるマイクです。

また、交通騒音との違いを判断するには、周波数帯でのエネルギー分布を考慮する必要があります。

精密騒音計は 0.25 Hz ～ 20 kHz の間で平坦な音響特性を持っていないわけではありません。20 kHz まで扱うにはサンプリングレートを 48 kHz まで上げておく必要があります。

SA-A1 と NL-62, NL-63 のマイクは同じであり、平坦特性で計測して WAV ファイルに収録した数値は、SA-A1、NL-62、NL-63 を使えば同じ値になるので、PC と解析ソフトがあれば NL-62、NL-63 での計測も可能です。

エネルギーが等質空間に拡散すると考えれば、距離による減衰は当然の結果である。重要なのは、回転軸の方向からの角度によって決まる、音圧の変化です。風車からの超低周波音は指向性を持っているのです。この、指向性による影響も重要な考慮事項です。

これらのことから、

A 特性音圧レベルでは、風車音のエネルギーの 93% を無視した数値が得られる。

G 特性音圧レベルでは、風車音のエネルギーの 80% 程度を無視した数値が得られる。

のです。

どちらも、最大音圧の部分を除外した数値になっているのです

環境省水・大気環境局長 からのお知らせ、「[風力発電施設から発生する騒音に関する指針について](#)」、の（別紙）、風力発電施設から発生する騒音に関する指針、には、

“環境省では、平成 25 年度から水・大気環境局長委嘱による「風力発電施設から発生する騒音等の評価手法に関する検討会」を設置し、風力発電施設から発生する騒音等を適切に評価するための考え方について検討を進め、平成 28 年 11 月 25 日に検討会報告書「風力発電施設から発生する騒音等への対応について」を取りまとめました。今般、同報告書を踏まえ、風力発電施設から発生する騒音等について、当面の指針を別紙のとおり定めたので通知します。貴職におかれては、下記に示した本指針策定の趣旨等及び別紙の指針、並びに風力発電施設から発生する騒音等の測定方法について別途通知する「**風力発電施設から発生する騒音等測定マニュアル**」を、騒音問題を未然に防止するために対策を講じ生活環境を保全する上での参考としていただくとともに、関係の事業者等へ周知いただくなど格段の御配慮をお願いいたします。”

と書かれている。

環境省は、

[風力発電施設から発生する騒音等測定マニュアル](#)、（3 ページの説明）に於いて、

“風雑音

風がマイクロホンにあたることにより発生する雑音。測定においてはウインドスクリーン（防風スクリーン）を装着することにより風雑音を低減する必要がある（3.1(2)参照）。

風により発生する葉擦れ音や風音は自然音であり風雑音ではない。”

“3.2 騒音の測定機器

(2) ウインドスクリーン（防風スクリーン）

風車の有効風速範囲の風況下で騒音を測定する際には、一般的に用いられる直径 10 cm 以下のウインドスクリーンでは、風雑音を十分に低減することはできない。風雑音の影響を低減するためには、より大型の、全天候型のウインドスクリーンを使用する必要がある。

風の影響が大きい場合には二重のウインドスクリーン等の、より性能の良いウインドスクリーンを使用する。

（注）二重ウインドスクリーン等を使用しても風雑音を十分に除外できない場合には除外音処理を行い、風雑音の影響範囲を除外する等の対応が必要である。“

と言っています。

ここで、

“風雑音

風がマイクロホンにあたることにより発生する雑音。“

とありますが、

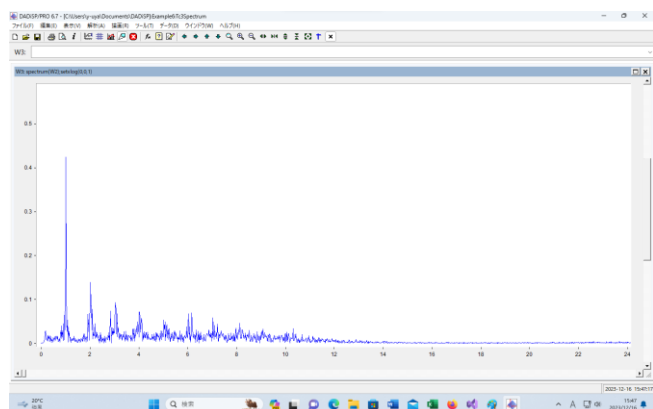
風車の近くでは、マイクに風が当たらなくても音圧の高い超低周波音が計測される。

風車の近くでの計測で、

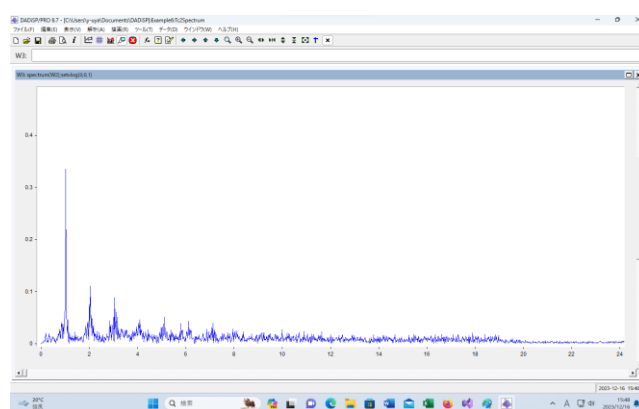
騒音計をビニール袋に入れて、それを段ボール箱に入れて、ビニールをかぶせて、



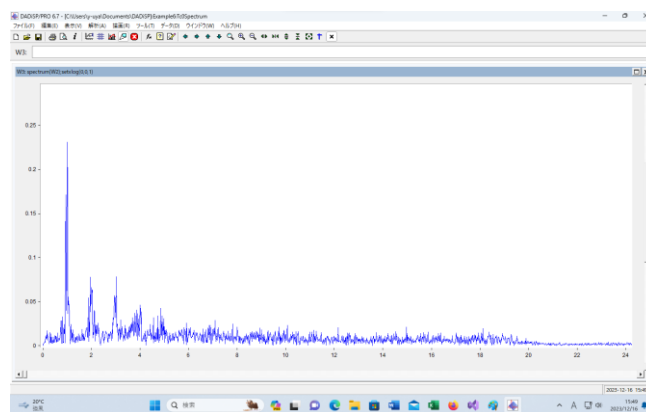
袋と箱に入れ、ドアを閉めた場合は、Max. 0.42Pa



袋と箱に入れ、ドアを開けた場合は Max. 0.33Pa



袋から出して、箱の上においた結果は Max. 0.23Pa



マイクに、風が当たらないので、これは風雑音ではありません。
風車による、超低周波音が計測されたのです。

風車が近くにあれば、マイクに風が当たらないときの結果と、マイクに風を当てたときの結果を比べると、音圧が高く、規則的な周波数を持った超低周波音は、どちらでも観測されます。

音圧が高くて規則的な周波数を持っている部分は、風が当たっても当たらなくてもよく似ています。
これは、風がマイクに当たる事による、雑音部分の音圧が小さいことを意味しています。

風車が無ければ、マイクに風を当てても、音圧が高く規則的な周波数を持つ超低周波音は計測されない。
風車が無い場所で、マイクに風を当てて計測すれば、音圧が低くて、周波数に規則性が無い、超低周波音が計測されます。風車がある場所では、音圧が高くて、規則的な周波数を持っている超低周波音が計測されます。

左が風車の近くの音、右は風車がない場所でマイクに風を当てて収録した音の超低周波音の部分です。

図 5．風車音（館山風の丘） 0～25Hz

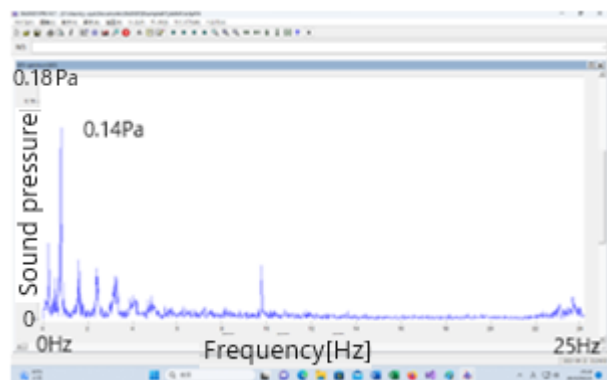
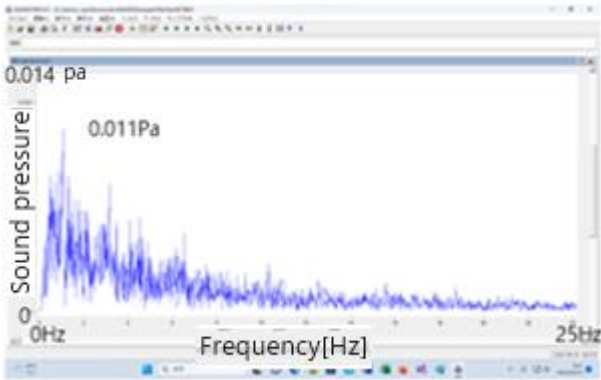


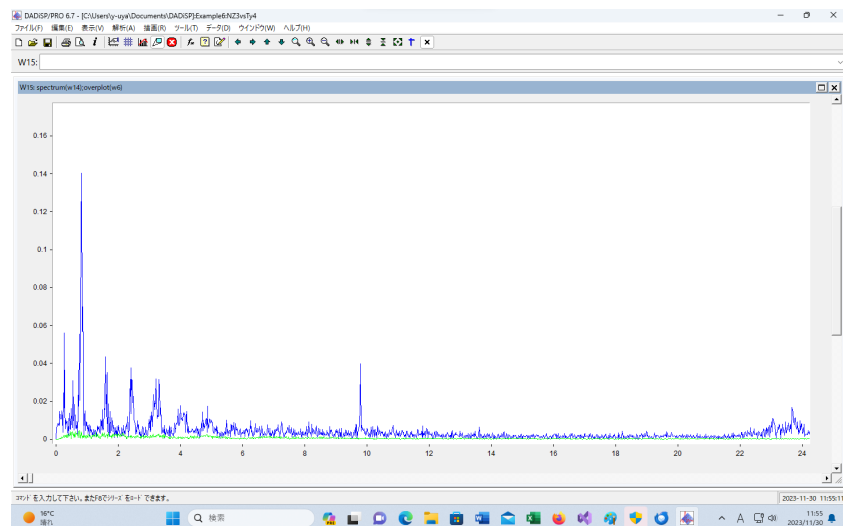
図 6．長尾神社の音 0～25Hz



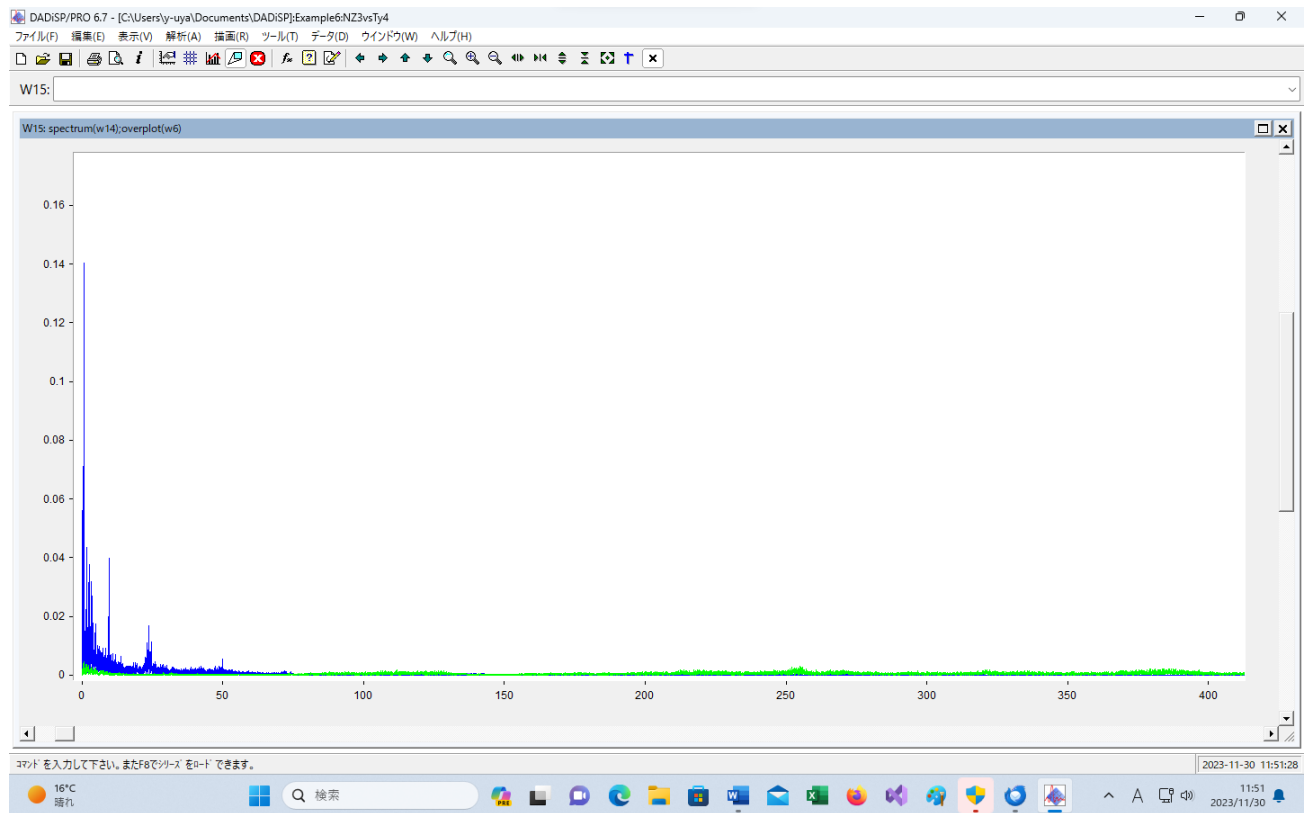
風車の近くでは 0.14Pa、風車が無い場所では 0.01Pa の音圧を持っている超低周波音が存在します。だから、風車の近くでは音圧が 10 倍です。音圧は、風速で変化します。風車の近くで 0.37Pa、風車が無い所で 0.003Pa の時もあります。これだと音圧は 100 倍です。

次のグラフは、青い線が風車の近くの超低周波音、緑の線が風車が無い場所での超低周波音です。

0～24Hz までの拡大図、風車音（青）と神社の音（緑）の周波数スペクトル



0～400Hz までの拡大図、風車音（青）と神社での音（緑）の周波数スペクトル



緑の線が、風をマイクに当てて、風車の無い所で計測した風雑音です。風がマイクに当たって計測される音は周波数に関係なくほぼ一定で、音圧も低いのです。

特に、超低周波音の領域では、風車の超低周波音に比べてみれば、無視しても問題ない大きさです。

風車の近くの超低周波音の周波数には、明らかな規則性がありますが、緑のグラフには、規則性は見られない。

風車音の音圧がピーク値となるのは、風車の回転数を毎分 R 回、羽の枚数を Z として、 $f=RZ/60[\text{Hz}]$ と置いたとき、 $f/3$ 、 $2f/3$ 、 f 、 $2f$ 、 $3f$ 、 $4f$ 、 $\cdots \text{Hz}$ の所で音圧がピークとなることが分ります。

この原因が、風がマイクに当たったことによる“風雑音”だとすれば、風雑音には、風車の近くでの音圧が高く規則的な周波数を持つものと、風車の無い場所での音圧が低く周波数に規則性が無いものがあるという事になります。この2種類の“風雑音”の区別することが必要になります。

もちろん、この周波数でピーク値となる理由を考えて、風車音が発生する仕組みを理解すれば、これは“風雑音”ではなく、風車からの超低周波音であることが分ります。

“風雑音 風がマイクロホンにあたることにより発生する雑音。”として超低周波音を除外する方法は。下手すぎる嘘でした。

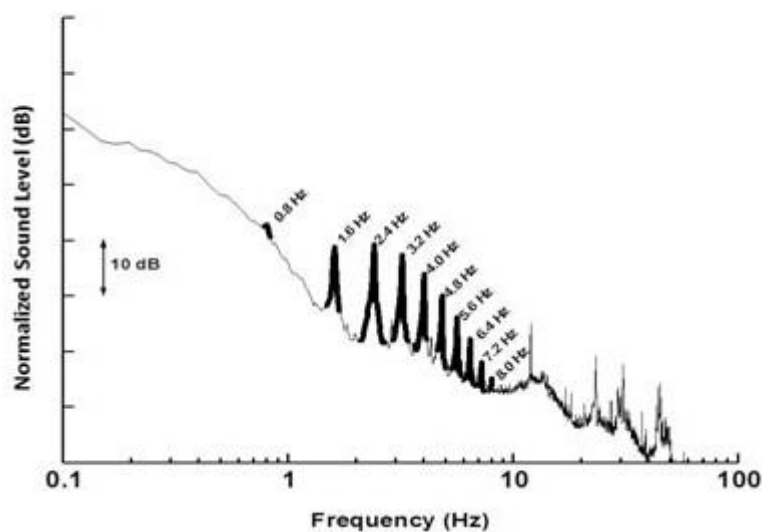
疑似音

カナダ政府はもう少し賢い嘘をつきます。

カナダの文献 A Primer on Noise では、

“音源の回転周波数は、音を発している音源を特定するために使用できます。たとえば、毎分 16 回転(RPM)で回転する 3 枚のブレードを備えた風力タービンの基本周波数は、0.8 Hz(つまり、(3 ブレード X 16 RPM)を 60 秒で割った値)に対応します。したがって、この例では、特定の距離で測定された音において、風力タービンによる騒音レベルが、基本周波数と基本周波数の倍数で周波数ピークを示すのに十分なほど高い場合、風力タービン音をバックグラウンドノイズから分離することができます。これらの倍数は**高調波**と呼ばれ、基本周波数が 0.8Hz のソースの場合、1.6Hz、2.4Hz、3.2Hz、4.0Hz、4.8Hz などになります。”

図2風力タービンの超低周波音測定 ←



とあり、むかし、環境省が風車からの超低周波音の周波数を、 $f=RZ/60[\text{Hz}]$ としていた頃の記述と似ています。

上のグラフでの測定は、計測範囲が極端に狭く、風車音の特徴を把握できません。SA-A1、NL-62、NL-63 のどれかで計測される値が必要です。

その後、次の論文の影響を受けて、カナダ政府は方針を変えたようです。

Journal of Occupational and Environmental Medicine（産業環境医学ジャーナル）の論文
Wind Turbines and Health

A Critical Review of the Scientific Literature

McCunney, Robert J. MD, MPH; Mundt, Kenneth A. PhD; Colby, W. David MD; Dobie, Robert MD; Kaliski, Kenneth BE, PE; Blais, Mark PsyD

Author Information

From the Department of Biological Engineering (Dr McCunney), Massachusetts Institute of Technology, Cambridge; Department of Epidemiology (Dr Mundt), Environ International, Amherst, Mass; Travel Immunization Clinic (Dr Colby), Middlesex-London Health Unit, London, Ontario,

Canada; Dobie Associates (Dr Dobie), San Antonio, Tex; Environment, Energy and Acoustics (Mr Kaliski), Resource Systems Group, White River Junction, Vt; and Psychological Evaluation and Research Laboratory (Dr Blais), Massachusetts General Hospital, Boston.

Address correspondence to: Robert J. McCunney, MD, MPH, Department of Biological Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 77 Massachusetts Ave, 16-771, Cambridge, MA 02139 (mccunney@mit.edu).

The Canadian Wind Energy Association (CanWEA) funded this project through a grant to the Department of Biological Engineering of the Massachusetts Institute of Technology (MIT). In accordance with MIT guidelines, members of the CanWEA did not take part in editorial decisions or reviews of the manuscript. Drs McCunney, Mundt, Colby, and Dobie and Mr Kaliski have provided testimony in environmental tribunal hearings in Canada and the USA. The Massachusetts Institute of Technology conducted an independent review of the final manuscript to ensure academic independence of the commentary and to eliminate any bias in the interpretation of the literature. All six coauthors also reviewed the entire manuscript and provided commentary to the lead author for inclusion in the final version.

では、

The main problem with measuring low-frequency sound and infrasound in environmental conditions is wind-caused pseudosound due to air pressure fluctuation, because air flows over the microphone. With conventional sound-level monitoring, this effect is minimized with a wind screen and/or elimination of data measured during windy periods (less than 5 m/s [11 mph] at a 2-m [6.5 feet] height).³⁶ In the case of wind turbines, where maximum sound levels may be coincident with ground wind speeds greater than 5 m/s (11 mph), this is not the best solution. With infrasound in particular, wind-caused pseudosound can influence measurements, even at wind speeds down to 1 m/s.¹² In fact, many sound-level meters do not measure infrasonic frequencies.

“環境条件下での低周波音と超低周波音の測定における主な問題は、マイクロホンの上を空気が流れるため、気圧の変動による風による疑似音です。従来の騒音レベルモニタリングでは、風の強い期間(2m(6.5 フィート)の高さで 5m/s(11mph)未満)に測定されたデータを排除することで、この影響を最小限に抑えます。³⁶ 風力タービンの場合、最大騒音レベルが 5 m / s(11 mph)を超える地上風速と一致する可能性があるため、これは最善の解決策ではありません。特に超低周波音では、風速が 1m/s 以下の場合でも、風による疑似音が測定に影響を与える可能性があります。¹² 実際、多くの騒音計は超低周波周波数を測定していません。”

と書いてあります。

精密騒音計を使って普通に測定すれば、[A Primer on Noise](#)にある様に、低周波音や超低周波音は記録されます。

この結果について、日本の環境省は、風がマイクロホンに当たったことが原因の風雑音だと言っているの

ですが、風をマイクに当てなくても、超低周波音が計測されるので、風雑音以外の超低周波音が、すべての風車の周辺では計測されることが分ってしまいます。

この結果は、風がマイクに当たっていないので、風雑音ではないのです。したがって、低減する必要も無いし、除去する必要も無ことになります。

もちろん、風のない室内で、測定すれば、より強烈な超低周波音が計測されます。音の反射が影響していて、高い音圧が計測されます。津波で反射波が合成されて大きな波が来るのと同じです。

被害の原因が明確になるので、室内での防風スクリーンを外しての計測が禁止されるのです。環境省は、屋外で、防風スクリーンを付けて計測しなさいと言うのです。

Wind Turbines and Health

A Critical Review of the Scientific Literature

では

風がマイクに当たって発生する風雑音とは違って、上空で発生した気圧変動が原因で、その影響が騒音計に記録された。と主張しているとも理解できます。

Over を“表面”と訳せば、疑似音は、日本の風雑音に近い意味になるが、これについては、風がマイクの表面を流れなくても、超低周波音が計測されることは示したので、

“多くの騒音計は超低周波周波数を測定していません。”

は誤りで、

“多くの騒音計は超低周波周波数を正しく測定しています。”

と書き直さなくてはなりません。

Over を“上空”と訳せば、風がマイクに当たらない状態で超低周波音が計測されたとしても、特に困りません。超低周波音として記録される、疑似音が上空で発生しているのだと言い張れます。

これで、超低周波音の責任から風車を開放し、矛盾や追及を回避できたように見えますが、それほど簡単ではありません。

上空を流れる空気による気圧変動が疑似音を発生させる原因ならば、風車のある所と、風車の無い所での疑似音に大きな違いがあるのは何故か。

日本の調査結果では、調査した 164 か所すべてで、超低周波音が記録されている、カナダ流に言えば、風車が存在する 164 か所全てで、疑似音がマイクの上空で発生している。そして、風車が有る場所での疑似音は、音圧が高く、規則的な周波数を持っている。

風が時々刻々変化するが、風車の近くで計測される疑似音の周波数は音圧に比べてかなり安定しているが、風車の無い所で計測される疑似音の音圧はとても低くて、周波数に規則性が無い。これから考えると、疑似音は風車が存在する場所でのみ観測される。と言える。

観測されるのだから、マイクの周辺での周期的な気圧変動が起きているのです。

風車音の指向性を考えれば、風車の周辺では、風車を中心とした指向性を持った音場が形成されている。と考えられる。

物理的な振動をいったん置いておくことにしても、風車が有って、稼働すれば、その周辺には、音圧が高く、規則的な周波数を持った、超低周波音の音場が出来ます。これは、風車を中心として、超低周波音が

放出されていることを意味しています。

さらに、考えてみましょう。

では、疑似音の元になる気圧変動が発生する場所は上空のどの位置なののでしょうか？

また、記録された疑似音は規則的な周波数を持っています。これは、気圧変動が規則的な周期性を持っているのが原因です。

気圧変動が発生した元の場所から、騒音計までは、周期的な変動は、何を使って、どのように伝達されたのでしょうか？2つの間には空気が存在します。気体は横波を伝達しません。気体は縦波を伝達します。その縦波は普通は粗密波として、空気中を伝わります。大気の状態は、場所による密度の差はそれほどないので、等質空間と考えられます。

振動源が小さければ、同心球上の粗密波として、周囲の空間に伝わってゆきます。

疑似音の元になる、気圧の変動の領域はどこにあるのでしょうか？

私は、次の理由で、疑似音の発生場所は風車の場所だと考えます。

- ④ 風車が無ければ、音圧が高く、規則的な周波数を持つ疑似音が計測されることは無い。
- ⑤ 風車があれば、音圧が高い疑似音が計測される。(計測した 164 か所の全てで計測されている。)
- ⑥ 計測された疑似音は、風車を中心とした十字架型の指向性を持っている。

まず、③の性質から、気圧変動の最初の場所は、風車を含む直線の上にあることが分ります。

風車から離れた上空での風の様子は、風車が無い場所での風の様子と同じです。この場所では、騒音計に記録される、音圧が高く規則的な周波数を持つ変動の原因となるような気体の運動は起きりません。

もし、起きるならば、風車の無い場所でも同様の現象が起きるはずですが、そのような現象は起きません。したがって、気圧変動の最初の発生場所は、ブレードや塔のある位置に限定されるのです。

塔やブレードがあれば、空気の流れは妨げられて、気流に変化が起こります。もちろん、ブレードは回転し、塔も揺れます。

あとは、特別な振動数になる理由を、気流の変化で説明するか、塔の揺れから説明するかのどちらかです。気流の変化から説明できれば、疑似音とも言えますが、風車が無ければ気流の変化が起こらないのですから、この疑似音は、風車の存在が根本原因だと言えます。

塔の運動が原因ならば、風車から発生する超低周波音だと言えます。

では、風車が無い場所での、空気の流れによる気圧変動と、風車がある場所での気圧変動には、どのような違いがあるのでしょうか？

風車が存在しない場所（風車から 5 km 以上離れた場所）でも風は吹いています。地上付近にマイク置けば、マイクの上空を空気が流れます。気圧の変動も起きると思います。

結果として騒音計にデータが記録されます。超低周波音の領域（20 Hz 以下の領域）に属する成分も計測されますが、音圧が低くて、周波数に規則性はありません。

風車がある場所では、空気が流れて、気圧変動が生じるのですが、気圧変動が騒音計に規則されたときに

は、音圧が高く、規則的な周波数を持つ気圧変動として記録されます。しかも、指向性を持っている気圧変動なのです。

空気が流れるのは、風車が有っても無くても同じです。違いは風車の存在です。

問題点を確認してゆきます。

記録された気圧変動は特別な周期を持っているのだが、なぜ風車の近くでは規則的な周期を持っているのでしょうか？この周期は、風の速度や方向によって決まるのでしょうか？

風の速度が同じでも、風車の回転数が違えば、気圧変動の周期が変化します。 $f = RZ / 60$ の周波数になる様に、音圧変動の周期が決まります。これは、風の音圧変動が風車の回転によって支配されることになります。

上空で発生した気圧変動の場所と、騒音計は離れています。気圧変動は空気によって伝えられます。この伝わり方は、粗密波として伝わるのでしょうか？それとも別の形式で伝わるのでしょうか？もし、粗密波として伝わるならば、音の性質と同じです。

上空の風による気圧変動は、風車が無くても発生するのか、風車が無ければ発生しないのか。の答えは出ています。

なぜ、風車が有れば、必ず、音圧の高い超低周波音が計測されるのに、上空で風が吹いていても、風車が無い場所では、音圧の高い超低周波音が計測されないのでしょうか？

“疑似音”は、風車が存在する 164 か所すべてで音圧が高く、規則的な周波数と指向性を持つ超低周波音として計測されています。風車が無ければ、音圧が低くて、乱雑な周波数の超低周波音が記録されます。

これまでの調査結果から、“音圧が高く、規則的な周波数と指向性を持つ超低周波音”は、回転軸が水平の風車が有れば、必ず計測され、無ければ計測されないのです。上空を吹く風は同じですから、風車の存在と風車の運動がこの超低周音の発生原因だと考えるべきです。

6. 超低周波音の解析と発生の仕組み

で解明している通り、回転軸が水平の風車は、物理的に見て、超低周波音の発生装置そのものなのです。

地表から離れて、高く上がると風速が大きくなります。風が吹くとブレードに揚力が発生して、風車が回転します。この時、高さによる風速の差で、揚力が原因である、風車の塔に掛かる回転モーメントが回転によって変化します。

振動の周波数と振幅は、マクローリン展開に係数に従ったものになります。

そして、風車全体が振動するときに、風車の地上 40 m から 50 m の高さの辺りでは、風車音の指向性に合致した、側面の振動が起こります。そして、高い音圧で、規則的な周波数と指向性を持った超低周波音が発生することになります。

まさに、[A Primer on Noise](#)

How is sound created?

When an object vibrates back and forth it causes small increases and decreases in air pressure that

travel, or propagate, through the air as sound waves.

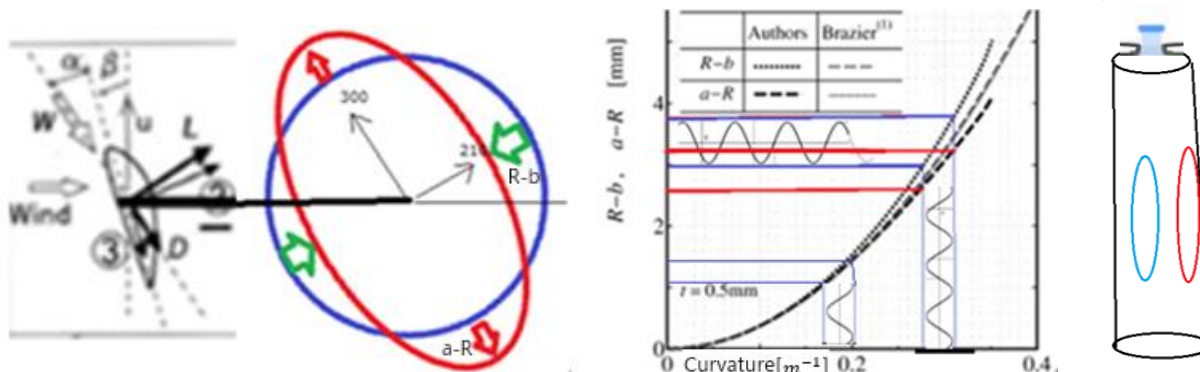
にある通り、

“音はどうやって作られるのか？

物体が前後に振動すると、空気圧がわずかに増減し、音波として空気中を伝搬します。”

と書かれている通りなのです。

指向性と規則的な周波数と高い音圧を持った超低周波音を、塔の中央の大きな面積を持った部分が前後に動くことによって、発生させているのです。



上空の風だけでは、このような超低周波音は発生しません。

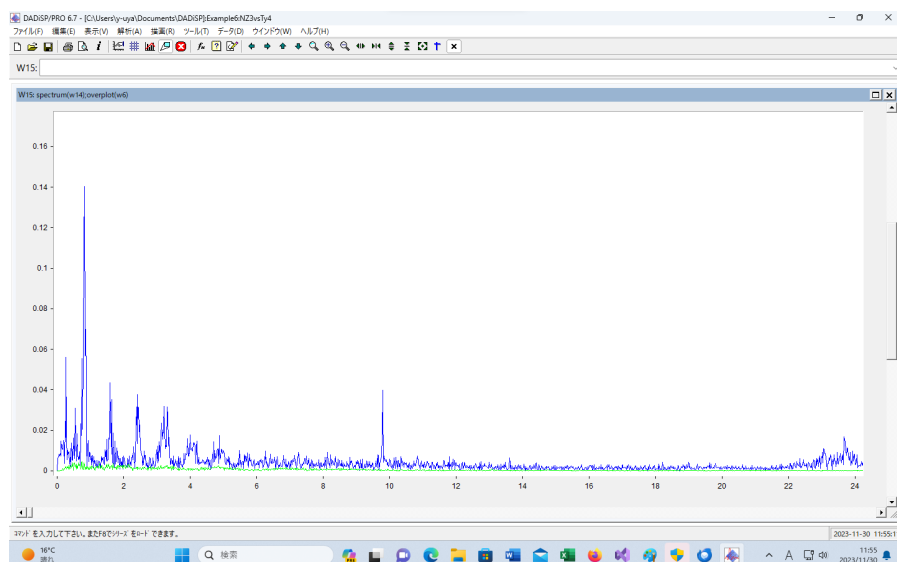
そこに、

風車が有れば、音圧が高く、規則的な周波数で、指向性を持った超低周波音が計測されるのです。

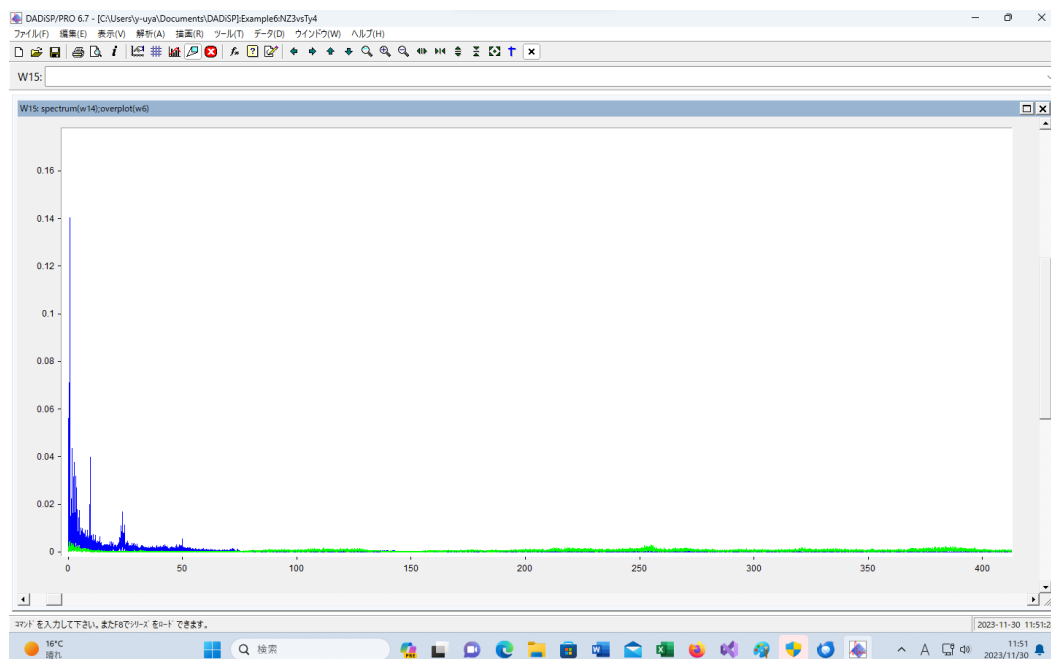
風車がなければ、音圧が低く、乱雑な周波数の超低周波音が計測されるのです。

次のグラフは、青い線が風車の近くの超低周波音、緑の線が風車が無い場所での超低周波音です。

0～24Hz までの拡大図、風車音（青）と、神社（風車が無い場所）での音（緑）の周波数スペクトル



0～400Hz までの拡大図、風車音（青）と神社（風車が無い場所）での音（緑）の周波数スペクトル



次のグラフは、「風力発電施設から発生する騒音等への対応について」にあるものです。

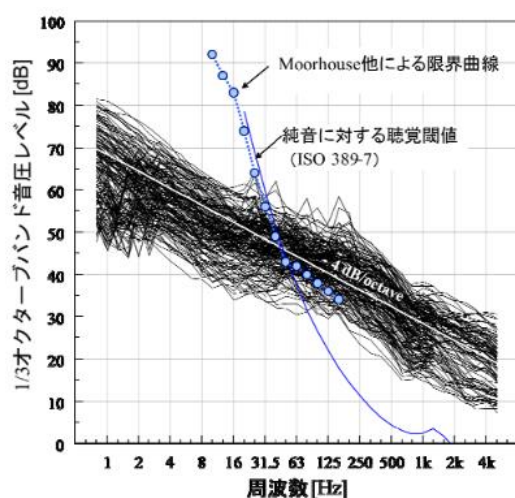


図 3 全国 29 の風力発電施設周辺 164 地点における風車騒音の周波数特性の分析結果

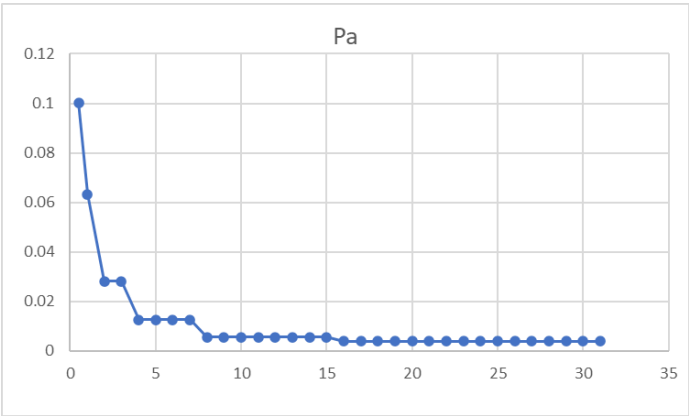
164 地点での周波数分析結果は、どの地点でも、1Hz の超低周波音成分が、50～80 d B の範囲の強さで存在することを示している。風車の近くでは、必ず超低周波音が計測される。もちろん、風車が存在しない場所でも超低周波音は計測されるが、音圧は極めて低いのです。

上のグラフを見れば、20Hz 以下の部分の音圧が極めて高いことが見て取れます。これは、超低周波音が高い音圧で存在することを意味しています。

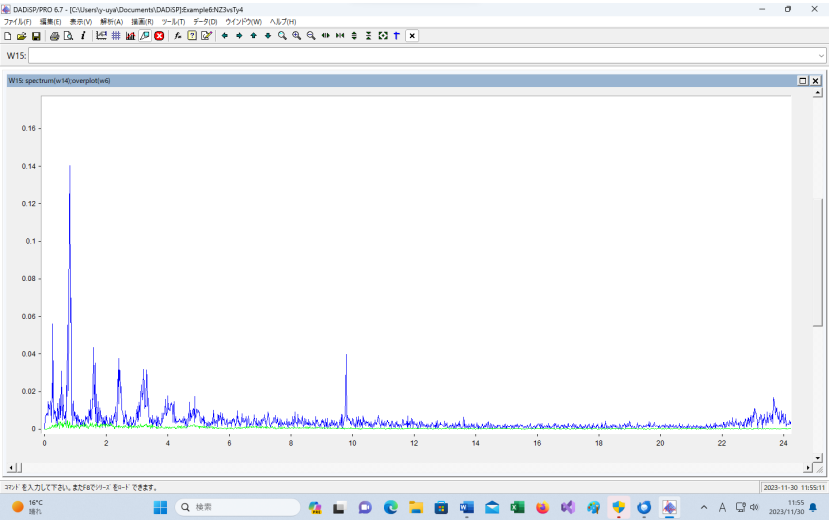
グラフを、よく見ると、-4dB/octave と書いてある。これは、「ある音を基準として、周波数比が 2 倍になる音」を「1 オクターブ上の音」と呼んでいます。周波数が 2 倍になると 1 オクターブ増える。1 オクターブ増えると音圧レベルが 4 d B 減る。という事ですので、

図 3 のグラフの横軸を線形座標、縦軸をパスカル値に変換すればグラフは次のようになります。

Hz	dB	Pa*Pa	Pa*Pa	Hz	Pa
0.5	74	0.010048	0.010047546	0.5	0.100237
1	70	0.004	0.004	1	0.063246
2	66	0.001592	0.000796214	2	0.028217
3			0.000796214	3	0.028217
4	62	0.000634	0.000158489	4	0.012589
5			0.000158489	5	0.012589
6			0.000158489	6	0.012589
7			0.000158489	7	0.012589
8	58	0.000252	3.15479E-05	8	0.005617
9			3.15479E-05	9	0.005617
10			3.15479E-05	10	0.005617
11			3.15479E-05	11	0.005617
12			3.15479E-05	12	0.005617
13			3.15479E-05	13	0.005617
14			3.15479E-05	14	0.005617
15			3.15479E-05	15	0.005617
16	58	0.000252	1.57739E-05	16	0.003972
17			1.57739E-05	17	0.003972



右側のグラフは、下のグラフの青い線とよく似た形です。



これは、風車音の計測結果ですから、似ていて当然です。

また、100Hz から 4 k Hz の間では、

Hz	dB	Σ (Pa*Pa)	Pa*Pa	Hz	Pa
128	46	1.592E-05	1.24408E-07	128	0.000353
256	42	6.34E-06	2.4764E-08	256	0.000157
512	38	2.524E-06	4.92935E-09	512	7.02E-05
1024	34	1.005E-06	9.81206E-10	1024	3.13E-05
2048	30	0.0000004	1.95313E-10	2048	1.4E-05
4096	26	1.592E-07	3.88777E-11	4096	6.24E-06

Hz	dB	$\Sigma (Pa*Pa)$	$Pa*Pa$	Hz	Pa
1024	38	2.524E-06	2.46468E-09	1024	4.96E-05
1024	34	1.005E-06	9.81206E-10	1024	3.13E-05
1024	15	1.265E-08	1.23526E-11	1024	3.51E-06
2048	35	1.265E-06	6.17632E-10	2048	2.49E-05
2048	30	0.0000004	1.95313E-10	2048	1.4E-05
2048	12	6.34E-09	3.09549E-12	2048	1.76E-06

これと、窓による遮音効果を考えれば、

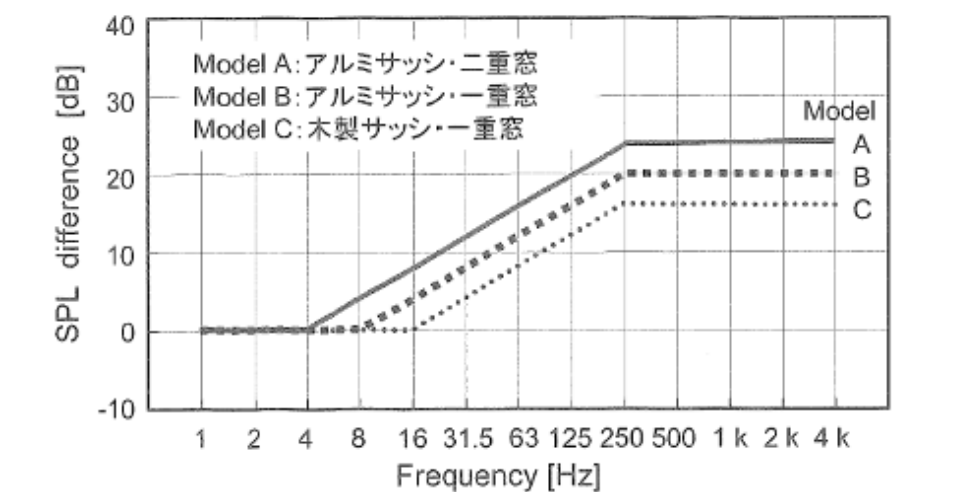
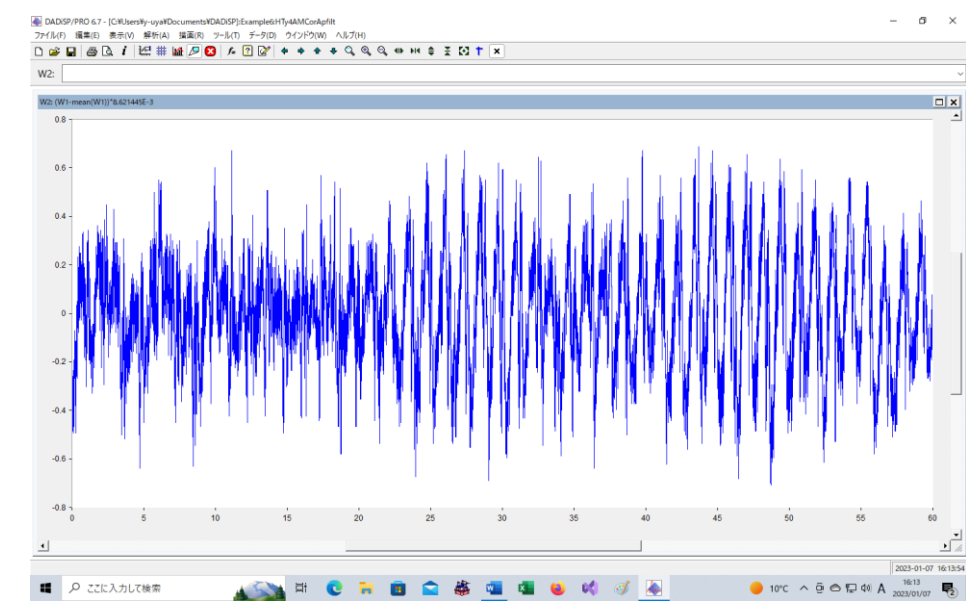


図 4 開口部構造別のハウスフィルター・モデルの案

室内では、1 k Hz の音は、18 d B 以下、2 k Hz の音は 15 d B 以下だと考えられます。

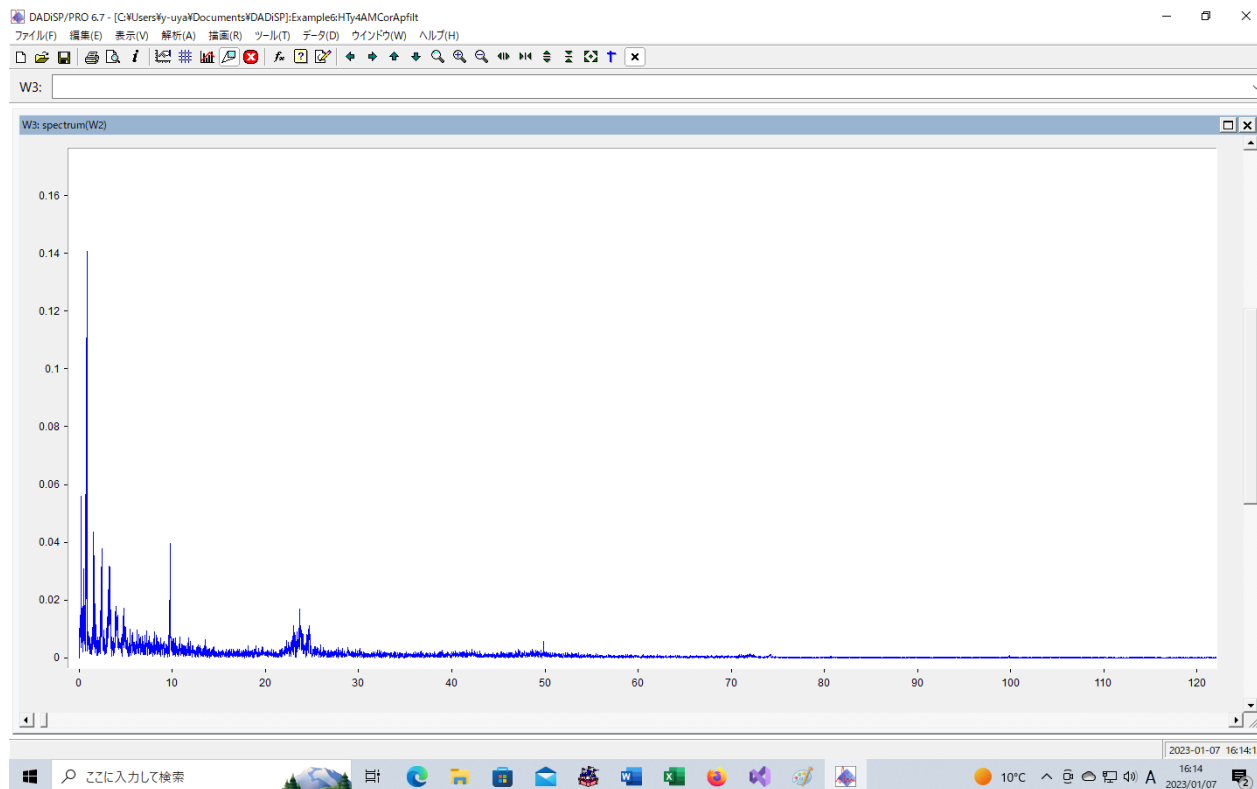
周波数が高い部分の音圧は極めて低いことが分ります。この成分の振幅変調はありますが、元々小さく、防音効果が効くので問題ではありません。

風車音を60秒計測したデータを表すグラフは次のものです。(これが風車音そのものです。)

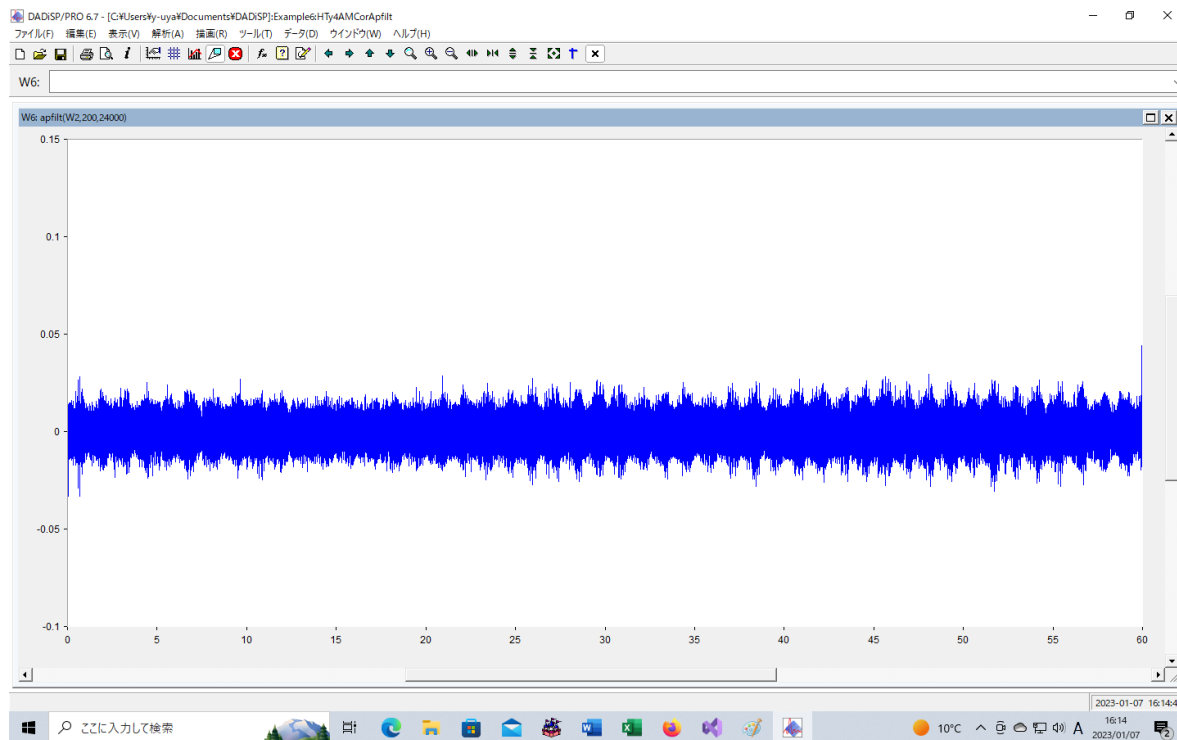


上のグラフは、スカスカです。これは、高周波成分が極めて弱いことを意味しています。

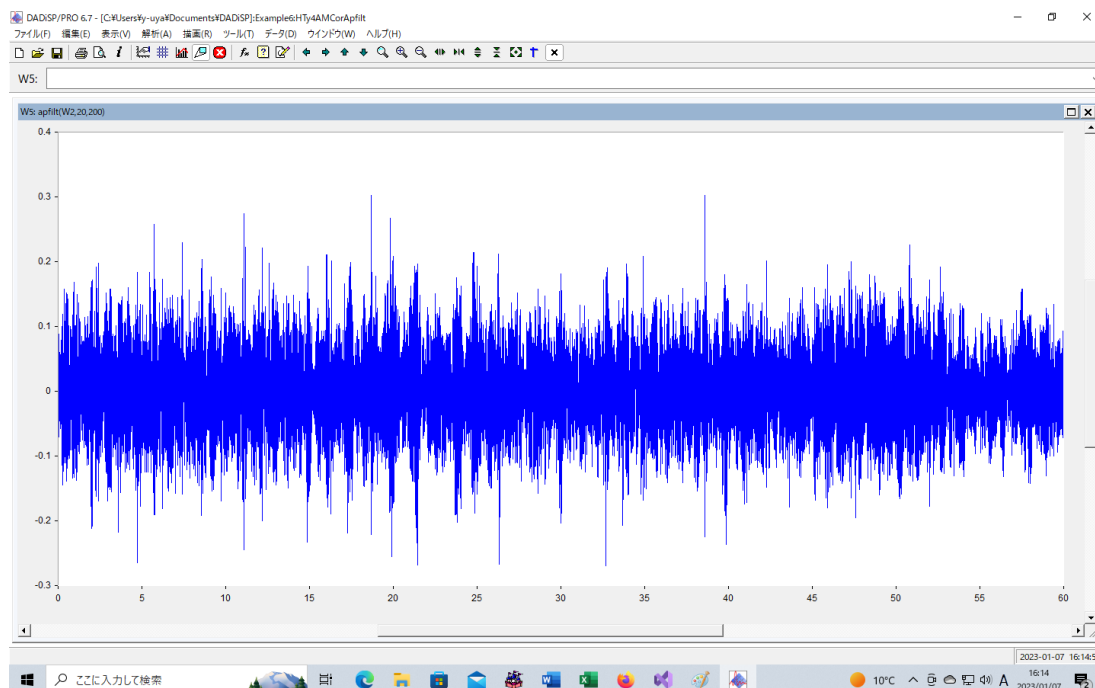
低周波部分を拡大した、周波数スペクトルは次のグラフです。50Hz 以下の成分が大半を占めています。このグラフからも、200Hz 以上の成分は、微弱なものであることが分かります。



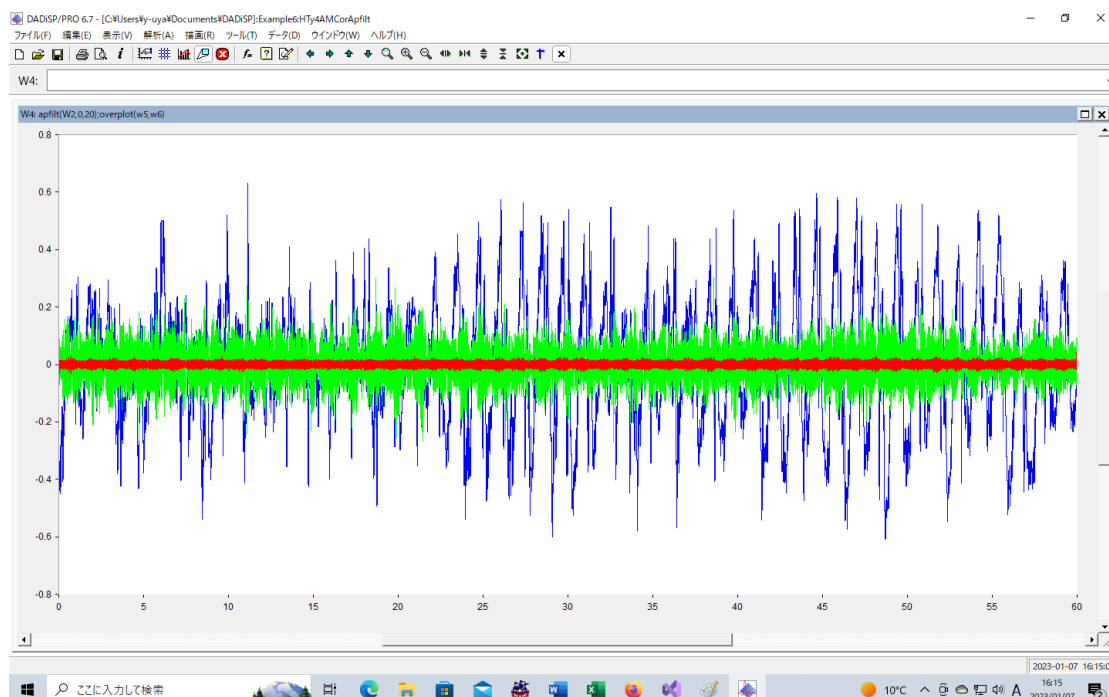
FFT は逆変換が出来るので、元の波形から、200Hz～24000Hz の成分を取り出しました。確かに、振幅が変動しています。



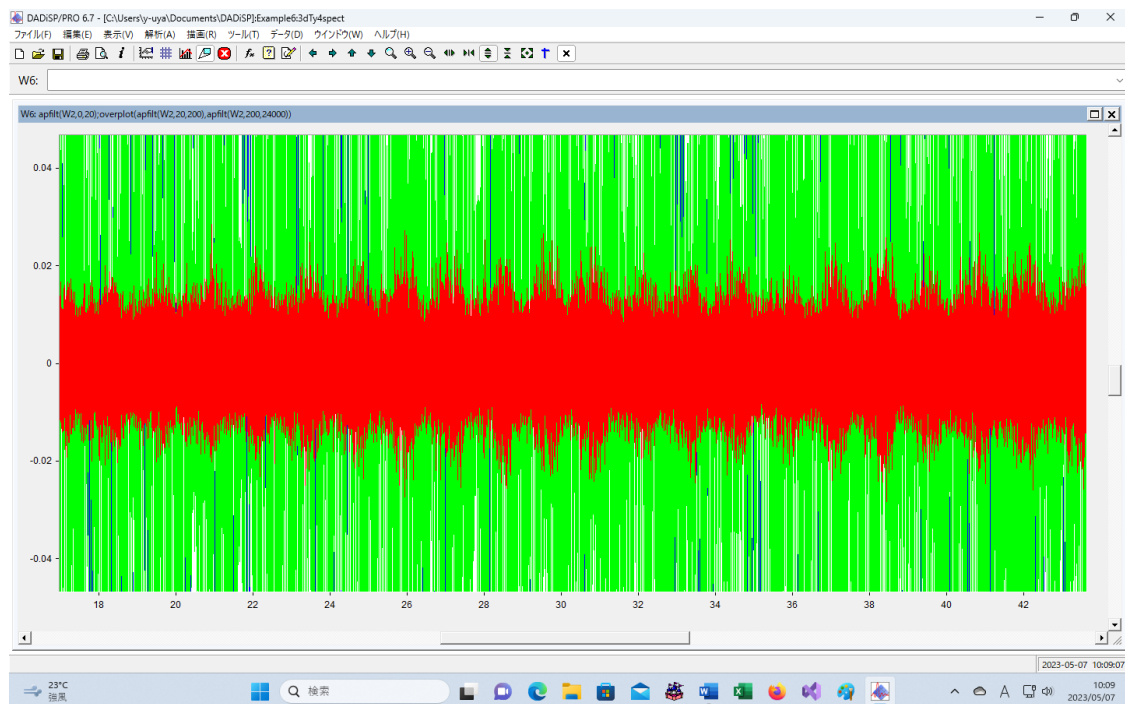
同様に、20Hz～200Hzの成分を取り出しました。



同様に取り出した、0Hz～20Hzの超低周波音成分を青で、20Hz～200Hzの成分を緑で、200Hz～24000Hzの成分を赤で、重ね書きしてみました。高い音圧を持っているのは、超低周波音の成分であることが分かります。赤い部分の200Hz以上の成分は、他の成分に比べて、極めて弱い音であることが見て取れます。



赤い部分を拡大すれば、振幅変調も見て取れますが、周波数が高いので、防音窓で防げると考えます。事論、屋外と屋内で精密騒音計を使って、0.01Hz刻みの周波数で調べて、比較して見る必要があります。さらに、A特性音圧レベル(20Hz～)が同程度の交通騒音が存在する場所でも、同じ計測をして、比較して見ることも必要です。



赤の部分は、微弱で周波数が高いのですから、部屋の中で窓を閉めて、24dB 程度の減衰があることを考えれば、室内での被害の原因とはなりません。超低周波音 (0Hz～20Hz) の部分は、エネルギー透過率が高いので窓を閉めても、7dB 程度の減衰しか期待できませんので、室内での被害に関しては、この影響は無視できません。

日本家屋は、固有振動数が 1Hz 程度であり、大型化する風車から出てくる音の音圧が最大となるのは、1Hz よりも低い周波数となっているのです。しかも、風車音のエネルギーの 93% 以上を超低周波音が持っているのです。

“風雑音” には、風車の近くでの音圧が高く規則的な周波数を持つものと、風車の無い場所での音圧が低く周波数に規則性が無いものがあり、この 2 種類の“風雑音” の区別することが必要になります。

周波数に明確な規則性がある音を“風雑音” の一言で片づけてはいけません。規則性を持つ理由を明確にしなくてはなりません。風車から、このような規則性を持つ音が発生する理由を調べれば、“風雑音” という用語が不適切であることが明確になります。発生する仕組みが明確になれば、この音は“風車からの超低周波音” というべきであることが分ります。

“風車の近くでの風雑音” は、その周波数が特別な構造を持っていて、風車の回転と深くかかわっています。

もし、風雑音というならば、風車の近くと風車の無い場所での風雑音の性質が違う理由を説明しなくてはなりません。10Hz 以下を風雑音だとするのは無理があります。

風車の近くで計測される超低周波音は、決して除去できないのです。風の影響ではなくて、それが風車からの超低周波音なのです。

風の影響を避けるだけならば、計測機材を車の中に置いて、風下の窓を開けて測れば、風の影響は除去できます。もちろん、“風雑音” という名の超低周波音は、きちんと記録されます。

“除外音処理” をしなさいと言っています。

計算から除外する方法は沢山あります。でも超低周波音を除外する方法は無いのです。

不思議な“風雑音”の性質についてさらに考えます。

風車音の被害者は、自分の家から見て、風車が特定の方向を向いているときに大きな被害が出ると訴えています。これは、風車音に指向性があるからです。

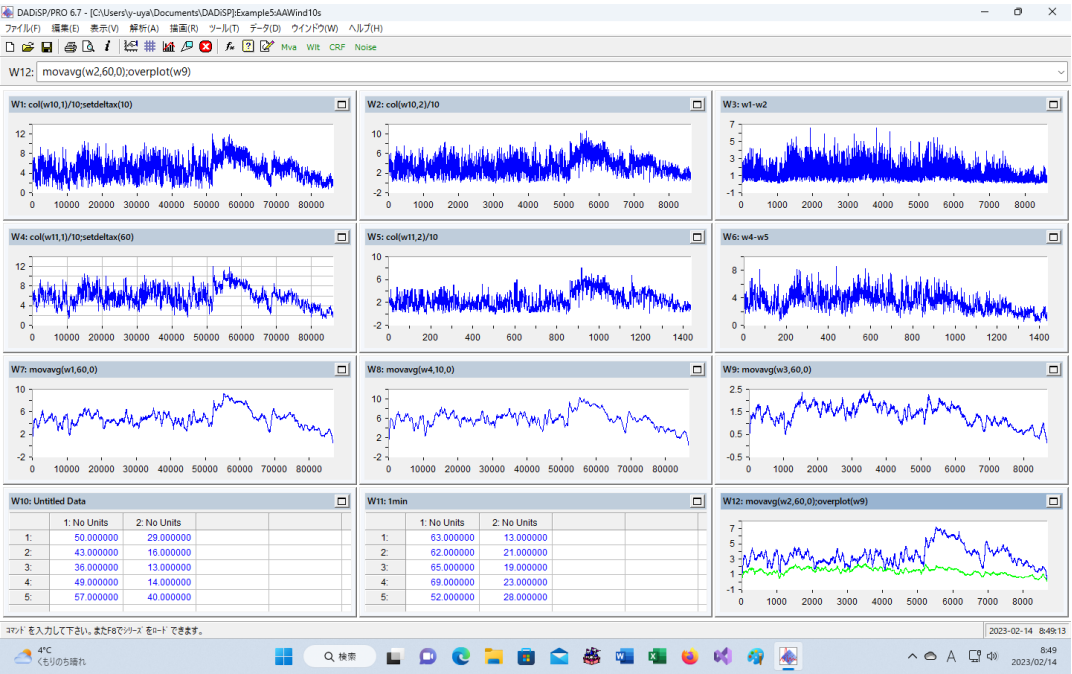
風車音の指向性については、風速が風車騒音指向性に及ぼす影響について、に書かれています。これは、風車を中心にして、“風雑音”が特定の方向で強くなるという事です。すなわち、マイクに当たる風は、特定の方向に関して同時に強くなったり弱くなったりしなくてはならないのです。

次の表は、気象庁が計測したデータを、気象業務支援センターから入手したものです。

年	月	日	時	分	秒	前10秒間最大瞬間風速	前10秒間最小瞬間風速	前10秒間風程
						0.1m/s	0.1m/s	
2019	2	2	0	12	40	147	124	132
2019	2	2	0	12	50	146	107	131
2019	2	2	0	13	0	122	82	102
2019	2	2	0	13	10	105	65	83
2019	2	2	0	13	20	112	71	82

(前 10 秒間風程は、10 秒間に風が進む行程を意味します。132 は秒速 13.2m の風速です。) 風速も風向も不安定なのです。

風の強さの変動：

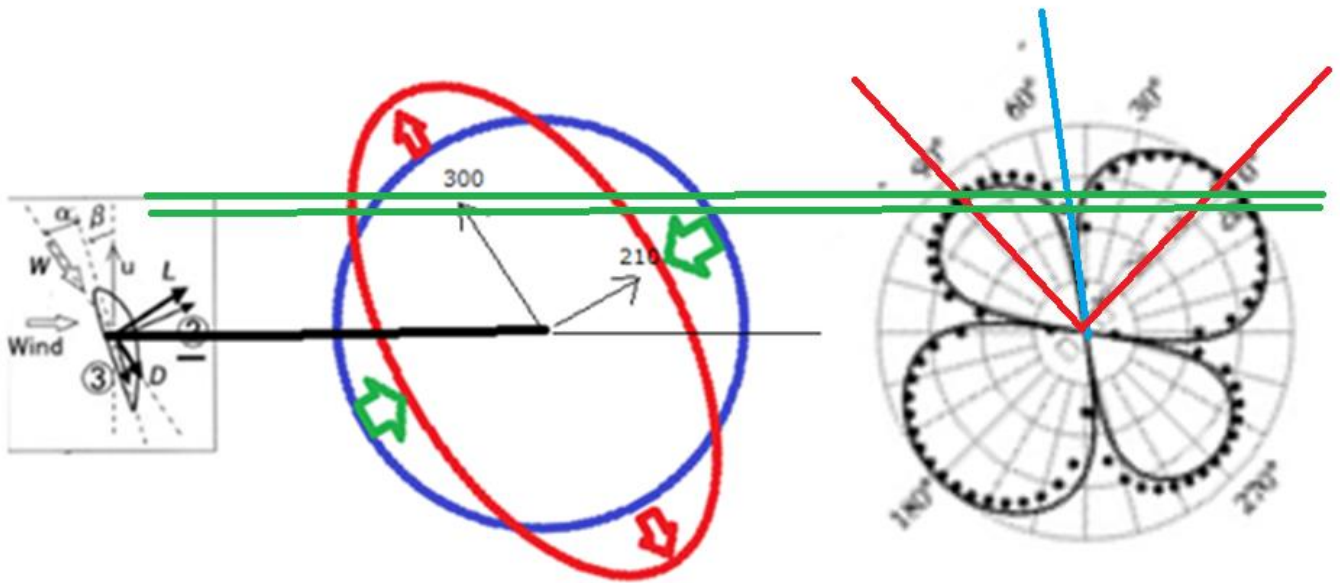


(上のグラフは、2019 年1月1日の24時間分の記録です。)

W1 (上段左) は、前 10 秒間最大瞬間風速の値 (10 秒ごと)、
w2 (上段中央) は、前 10 秒間最小瞬間風速の値 (10 秒ごと)、
w4 (2段目左) は、最大瞬間風速 (3秒間移動平均) の値 (1分ごと)、

w5(2段目中央)は、最小瞬間風速(3 秒間移動平均) の値(1分ごと)、です。

このように、不安定な風が、マイクに当たるときには、



上の図のような指向性を実現するように動く必要があるのです。

風が強ければ、風雑音が大きいと仮定すると、水平に引いた緑の線が風の向きです。風が緑の線に沿って左から右に流れるとします。

最初に赤い線に当たるときは、音圧が高いので風速も大きい。次に青い線に当たるときは、音圧が低いので風速は小さい。再度赤い線に当たるときは、音圧が高いので風速が大きい。となります。

風速は、赤い線の所では早く、青い線の所では遅いのです。風が、赤い線と青い線を認識して自ら風速を調整してくれなければ、このようなことは起きません。これが起きなければ風車音は指向性を持ってないのです。

離れた場所の風が、同じような動きをしなくてはなりません。 空気の粒子は、これほど統制された動きをするのでしょうか？

さらに、風がどのようにマイクに当たれば、1Hzで70dBとなるような数値が、精密騒音計に記録されるのでしょうか？

マイクの振動版の運動を考えると、風ではなく、空気密度の変動が必要なことが分ります。風は、どのようにして、空気密度の変動を引き起こすのでしょうか？

風車音が、指向性を持っていることは、次の論文に書かれています。

風速が風車騒音指向性に及ぼす影響について

(菊島 義弘,長島久敏,橋本 晶太,鯨岡 政斗,濱田幸雄,川端 浩和,小垣 哲也)
によれば、

RION 製 NL62 を風力発電システム周りに 4 台、JIS4) 音響パワー計測用として 1 台使用している。風力発電システム周りを計測する騒音計マイクロホンは、卓越風向(北を 0 度とした 300 度方向)から 90 度ごととし、配置場所は図 1 に示すように 300 度、30 度、120 度および 210 度、タワー中心から

22m の位置に配置している。4 台の騒音計マイクロホンは固定とし、他の角度はナセルが回転することで角度が変化することを利用している。

オーバーオール値は客観的に約 200 度の位置のレベルが高くなっている。この位置はキャンセレーションメカニズムが働きレベルが低下する位置であり指向性の予測とは逆の現象が現れている。

予測と反する結果を調べるため 1/3 オクターブバンド分析結果を調査した。図 6 にはブレード数×回転数 (Bin 5 の場合 1.6Hz) の分布図を示す。図中の凡例は風速差を表している。ブレードの回転騒音が主音源である 1.6Hz では、オーバーオール値と同じような傾向を示しており、約 200 度の位置で L_{eq} が最大となっている。回転騒音はブレードが振り下ろされる位置が最大値となっており、マイクロホンに対し旋回流からの騒音、回転方向に流れる騒音が重畳され、 L_{eq} が増大しているものとする。逆に降り上る方向の L_{eq} は最小となっている。

5. 結 言

風速の影響による指向性特性調査を行い、1/3 オクターブバンド分析することで以下の知見を得た。

1) 低周波数では旋回流の影響と思われる騒音によりブレード振り下ろし面の騒音が増大することを示した。

2) 中型風力発電システムではブレードのキャンセレーションメカニズムは 1kHz 周辺にだけに発生していることが確認でき、正面、側面のレベル差は約 20dB、音響パワーとして 1/100 まで減少していることを示した。

3) 指向性特性は、風速の影響を受け、ブレード前方の L_{eq} よりもブレード後方の L_{eq} レベルが下がることを示した。上述の結果から風力発電システムの音響放射特性は全方向に対して一様ではないことが分かった。

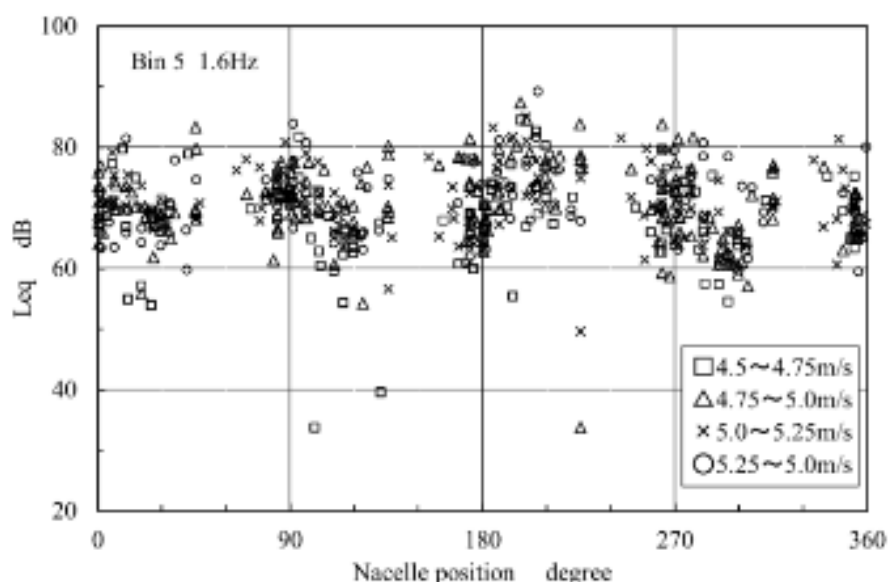


図 6 Bin 5 中心周波数 1.6Hz の指向性分布

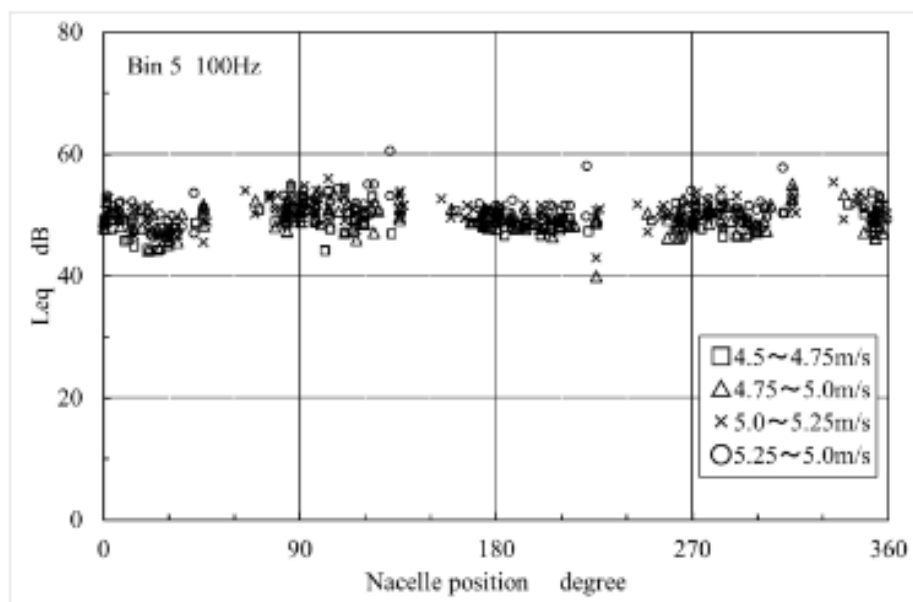


図 7 Bin 5 中心周波数 100Hz の指向性分布

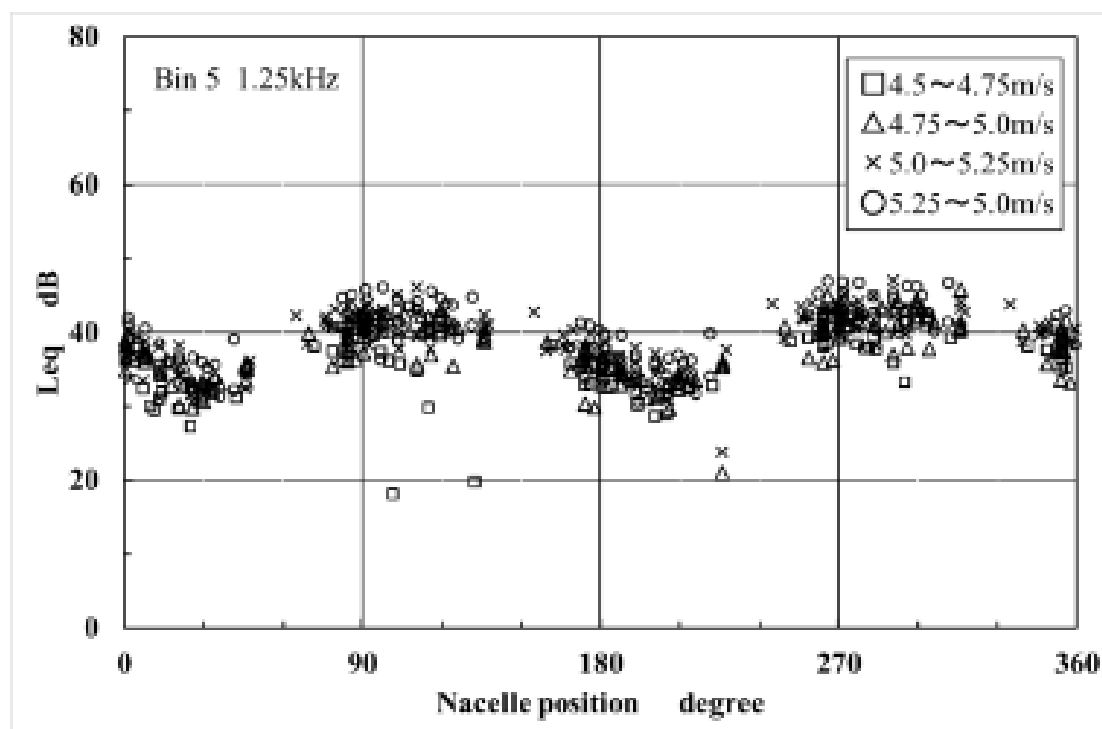


図 8 Bin 5 中心周波数 1.25kHz の指向性分布

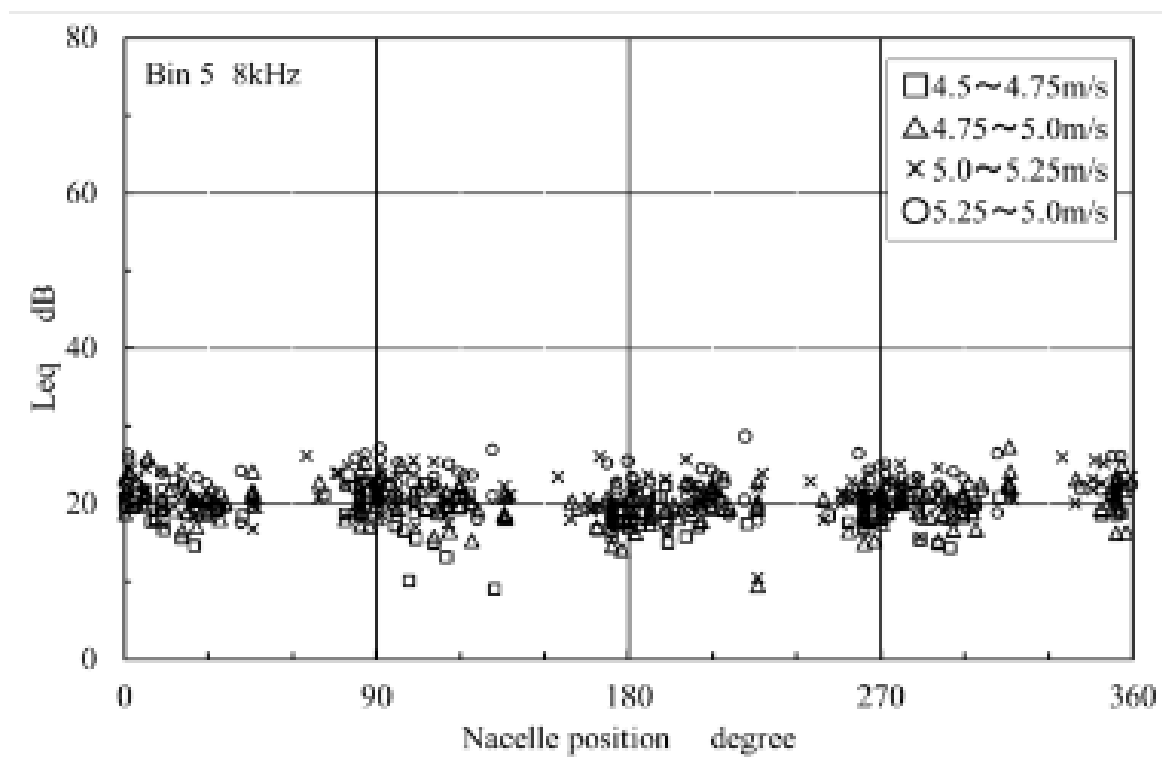


図 9 Bin 5 中心周波数 8kHz の指向性分布

図 3 のグラフ

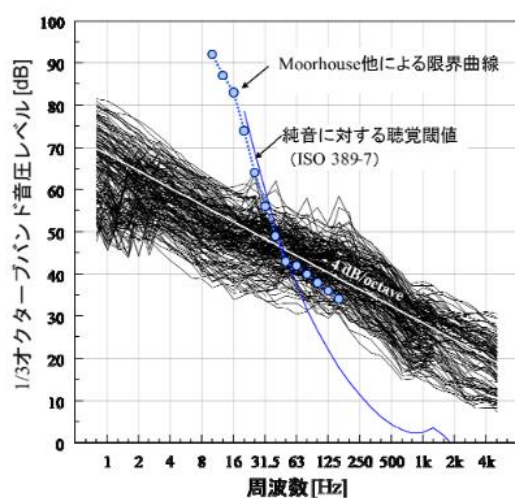


図 3 全国 29 の風力発電施設周辺 164 地点における風車騒音の周波数特性の分析結果

を見れば、20Hz 以下の部分の音圧が極めて高いことが見て取れます。これは、超低周波音が高い音圧で存在することを意味しています。

そこで、考え出されたのが、“風雑音”です。グラフの 5Hz 以下、あるいは 10Hz 以下の部分を、風車音から分離して、“マイクに風が当たったことによる風雑音”だと主張するのです。

上のグラフをよく見れば、10Hz 以下の“風雑音”は、10Hz 以上の“風車音”の性質をしっかりと継承しています。

それぞれの線は、ほぼ直線状に繋がっています。これは、“風雑音”は建っている風車の音の性質と引き継

ぐと言うことになります。

風雑音は、マイクに風が当たることによって発生すると言うのですから、マイクにどのような風がどのように当たるかは、建っている風車によって決まることになります。

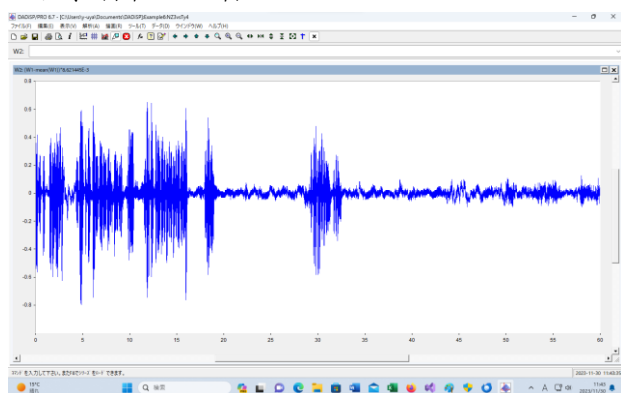
風車が無い場所では、風はこのような制限は受けなくて、風速も風向も激しく変化します。風車は、風の風速や風向を制御する力があると考えられるべきなのではないでしょうか？

164 か所の全ての地点で、風車が建ったことによって、極端に高い音圧を持っている“風雑音”で、周波数が 20Hz 以下のものが発生するのです。しかも“風雑音”の周波数成分のうちで最大音圧となるとき周波数は $f=RZ/60$ (Hz) になるのです。しかも、この周波数は、風車の回転速度によって変化するのです。

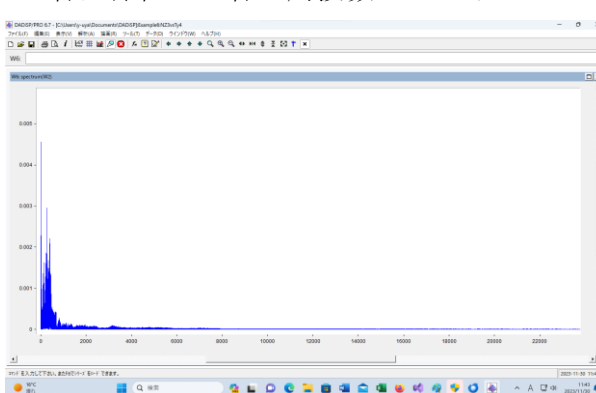
“風雑音”が“風がマイクに当たることで発生する”ならば、このような周波数になる理由の説明が困難です。さらに、風車の無い場所でマイクに風を当てて測った風雑音は、音圧が低くて、周波数がランダムです。

風車音の超低周波音成分は、風がマイクに当たって発生する雑音ではありません。マイクは、風車からの超低周波音を捉えているのです。

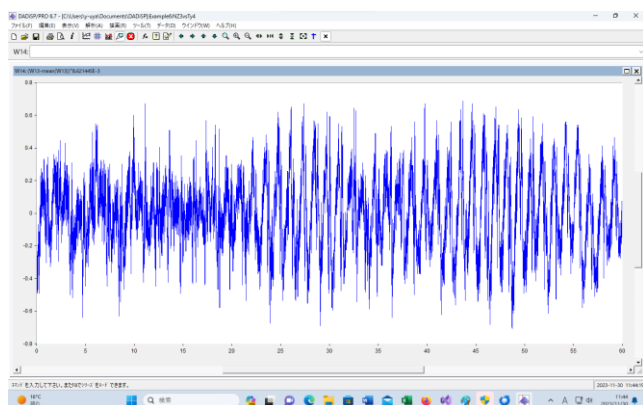
左は、神社での音



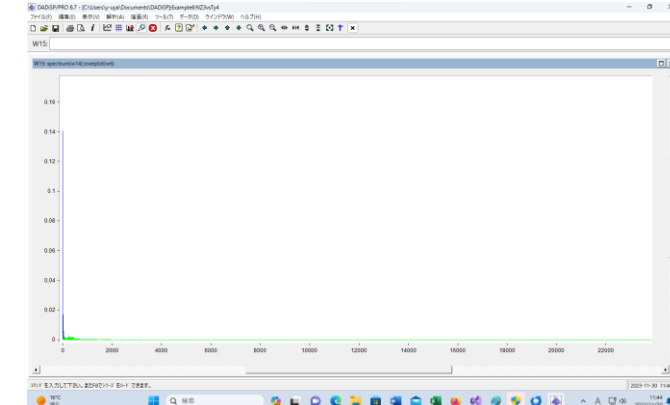
右は神社での音の周波数スペクトル



左は、風車音



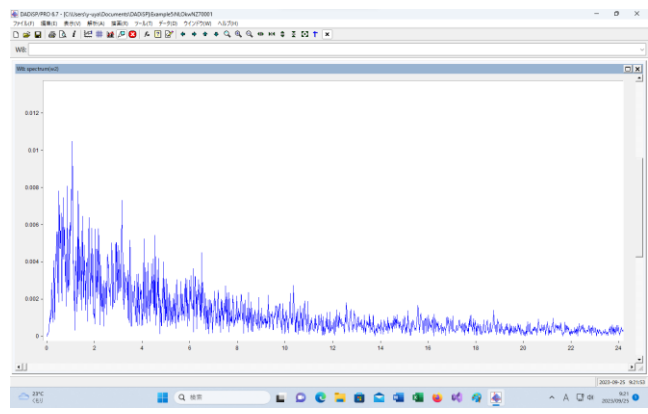
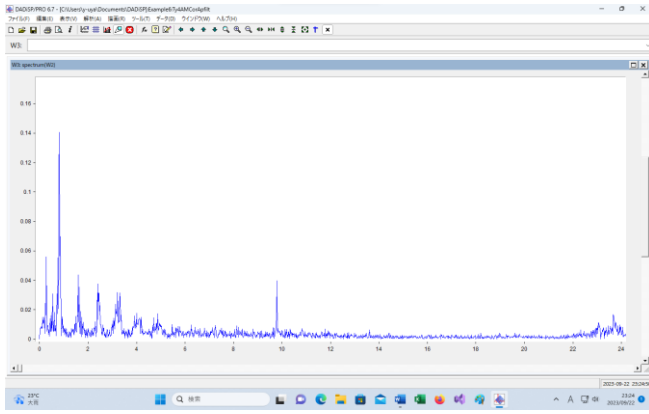
右は風車音（青）と神社で音（緑）の周波数スペクトル



次のグラフで、0～25Hz の範囲で、風車音と近所の長尾神社の境内での音を比較します。

風車の近くの音 (0～25Hz) 最大 0.14[Pa] (0.8Hz)

長尾神社 (0～25Hz) 最大 0.0105[Pa] (1.1Hz)



0～25Hz 範囲での、風車の近くで車内に機材を置き風下の窓を開けて計測した音、最大音圧 0.14[Pa] (0.8Hz)と、マイクを神社の階段に置き、風が当たる状態で計測した音、最大音圧 0.0105[Pa] (1.1Hz)との比較です。

環境省は、風力発電施設から発生する騒音等測定マニュアル、（3 ページの説明）に於いて、

“風雑音

風がマイクロホンにあたることにより発生する雑音。測定においてはウインドスクリーン（防風スクリーン）を装着することにより風雑音を低減する必要がある（3.1(2)参照）。

風により発生する葉擦れ音や風音は自然音であり風雑音ではない。“

“3.2 騒音の測定機器

（7 ページの説明）

(2) ウインドスクリーン（防風スクリーン）

風車の有効風速範囲の風況下で騒音を測定する際には、一般的に用いられる直径 10 cm 以下のウインドスクリーンでは、風雑音を十分に低減することはできない。風雑音の影響を低減するためには、より大型の、全天候型のウインドスクリーンを使用する必要がある。

風の影響が大きい場合には二重のウインドスクリーン等の、より性能の良いウインドスクリーンを使用する。

（注） 二重ウインドスクリーン等を使用しても風雑音を十分に除外できない場合には除外音処理を行い、風雑音の影響範囲を除外する等の対応が必要である。“

と言っています。

“除外音処理”をなさいと言っています。

計算から除外する方法は沢山あります。でも風車から放出される超低周波音を除外する方法は無いのです。

と修正する

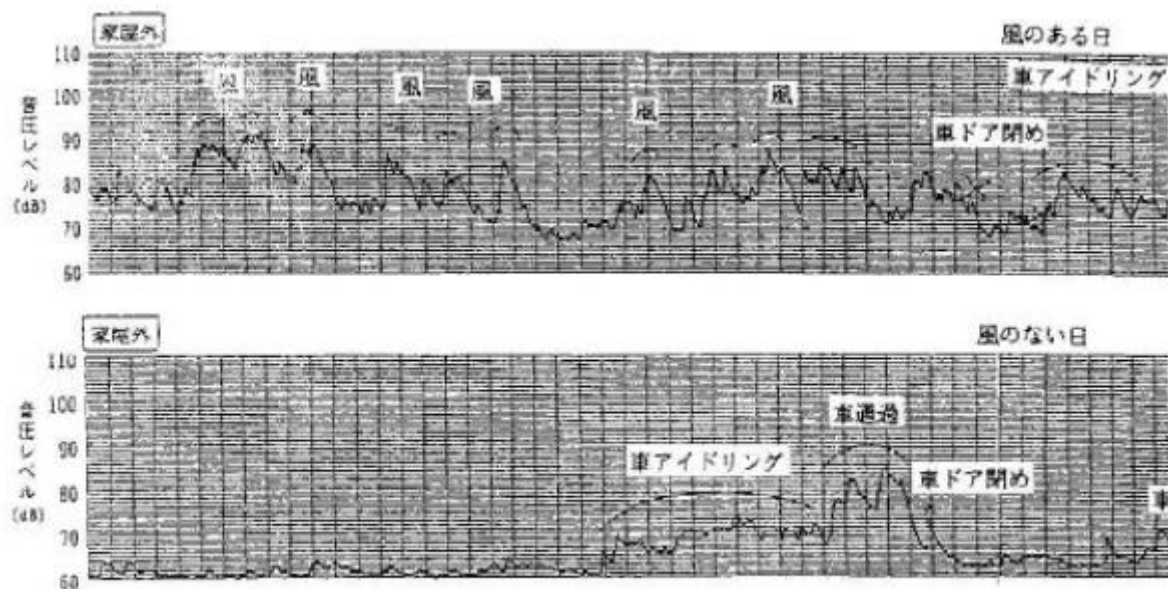


図-5.3.3 風のある日とない日における屋外の低周波音測定例

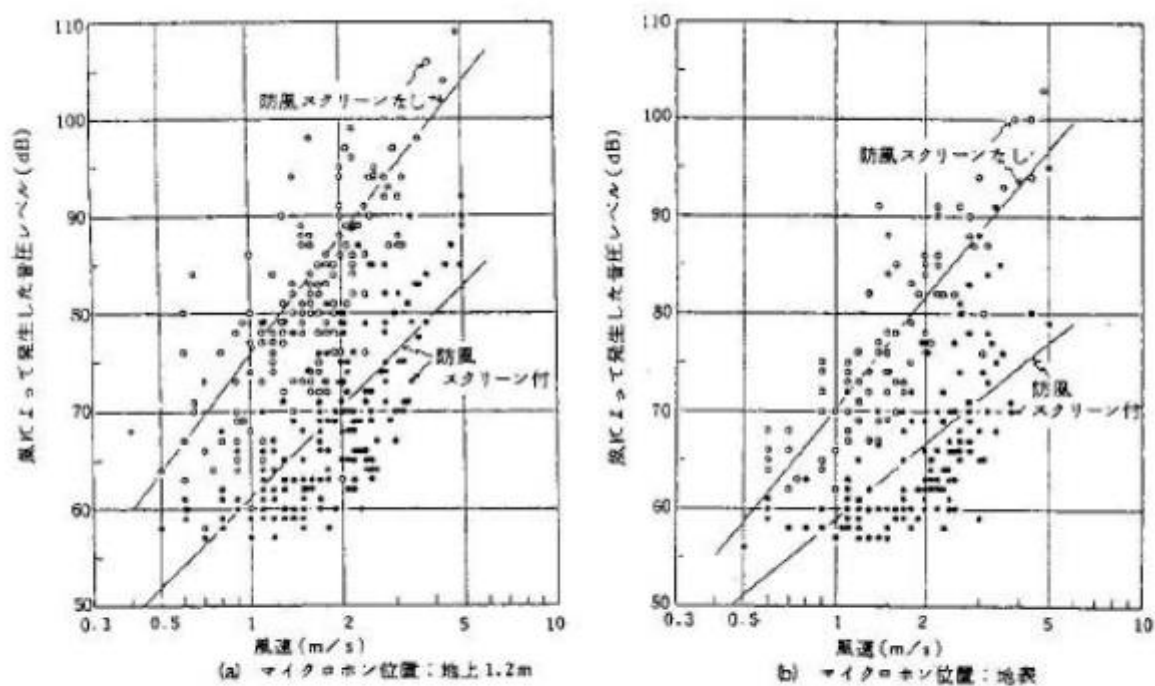


図-5.3.4 低周波域における風の影響

(防風スクリーンの効果とマイクロホン位置による違い)

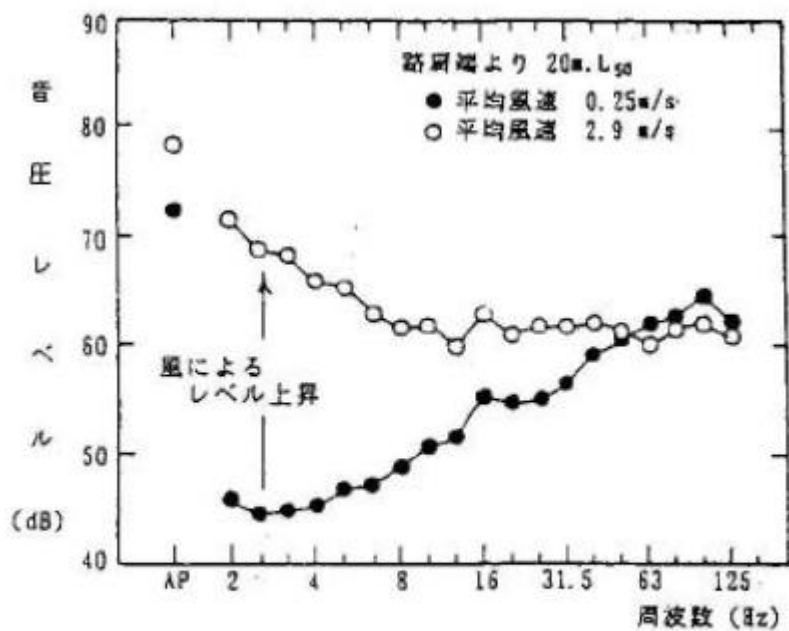


図-5.3.5 風速の違いによる周波数特性の変化
(切り土構造道路における測定例)

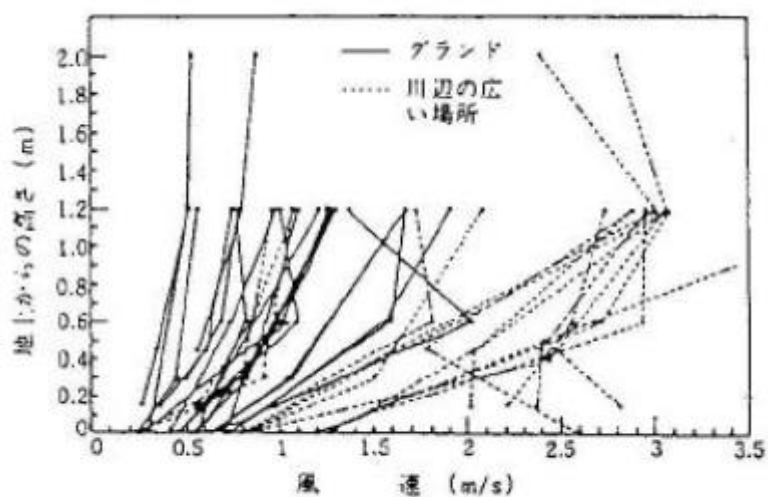


図-5.3.6 風速の垂直分布

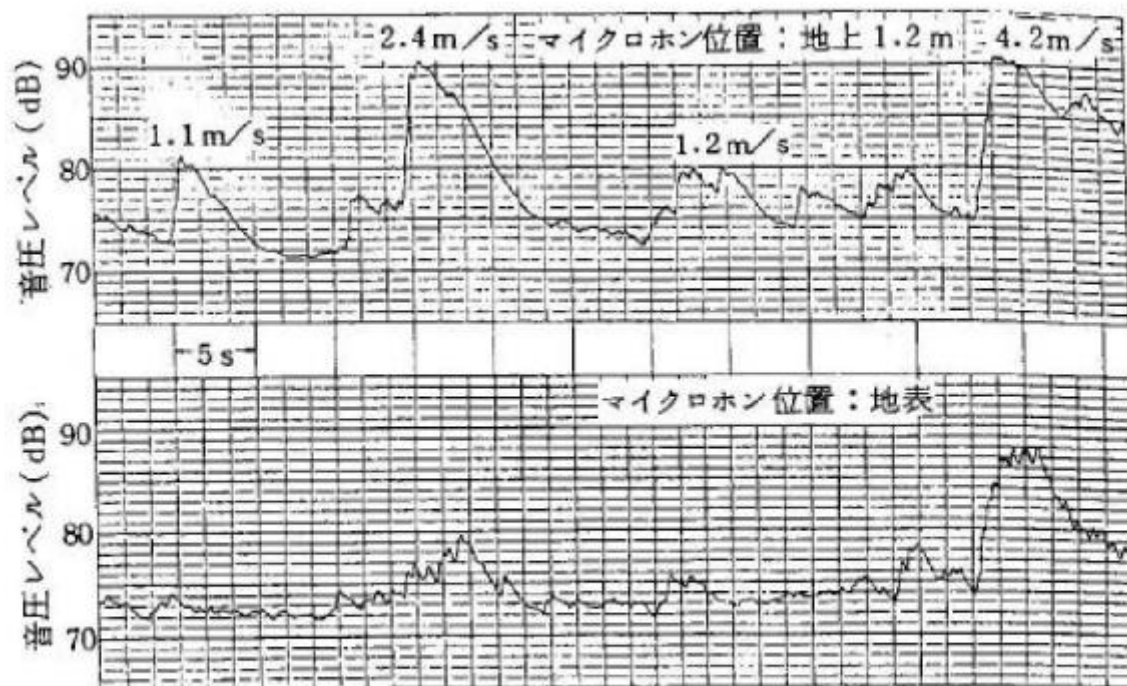


図-5.3.7 低周波音域に与える風の影響
(73dB のバンドノイズがある場合)

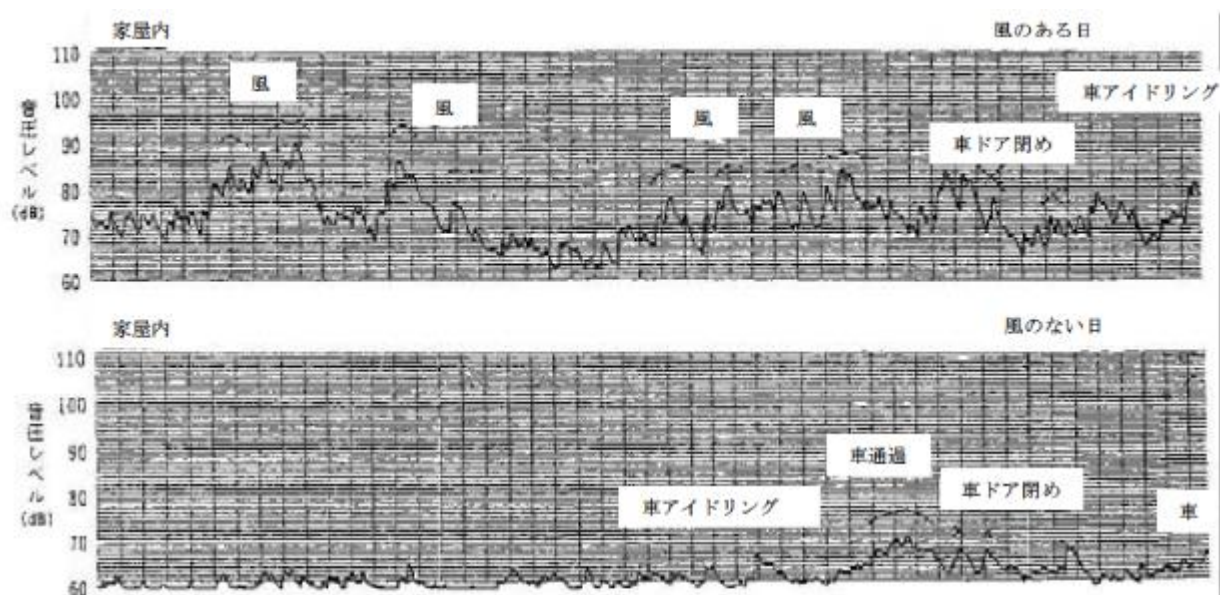


図-5.3.8 風のある日とない日における家屋内の低周波音測定例

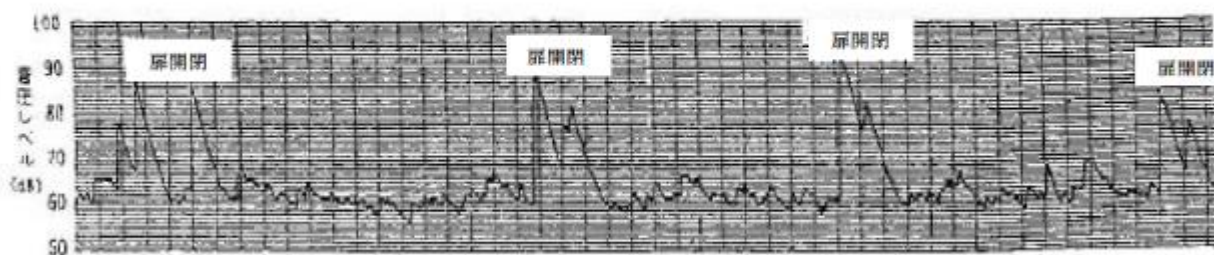


図-5.3.9 扉の開閉によるレベル変動の例

図はこのまま

5.3.4 その他の注意事項

機械類の近傍で測定を行う場合、電界、磁界、振動、温度、気流などの影響を受けることがある。それらの影響が及ばないように適当な遮蔽、防振などの考慮、並びに測定点の選定に注意する必要がある。

このままとする

5.3.5 発生源の状況の記録

超低周波音・低周波音の発生状況を把握するためにも、発生源の種類・発生状況などをわかる範囲で記録しておく。音圧レベルの変化や周波数特性の変化と対応づけることにより、超低周波音・低周波音を発生しやすい条件や発生源の種類などを把握できる場合がある。

発生状況を記録する項目の一例を以下に示す。

- ・機械、設備の諸元ならびに稼働状況
- ・大型車の通過時刻、車速、交通量、車線（高架橋等）
- ・列車の種類、通過時刻、車速、両数、上下線の別（列車等）
- ・ダムの放流量、堰の越流水深等（ダム、堰等）
- ・風車の諸元ならびに稼働状況や風車の位置と風車の数

と修正する

5. 4 音圧レベル指示値の読み取り方法

5.4.1 G 特性音圧レベル

（1）変動の少ない低周波音

音圧レベルの変動が小さくほぼ一定とみなされる場合は、低周波音圧レベル計の指示値又はレベルレコーダによる記録値の平均値を読み取る。

測定時に風が吹いている場合には、風の影響がない測定時間における平均値を読み取る。

（2）変動する低周波音

（a）対象の低周波音による指示値が大きくなるときに注目し、そのときの最大値を適当な回数について読み取る。

（b）特定の測定時間内（例えば 10 分間）の最大値及びパワー平均値をレベル処理器等で求める。

但し、測定時に風が吹いている場合で風雑音により低周波音圧レベル計の指示値又はレベルレコーダによる記録値が変動する場合には、原則として指示値又は記録値の読み取りはできない。

(3) 単発的又は間欠的に発生する低周波音

単発的に発生する低周波音を測定する場合は、発生時の最大値を読み取る。

間欠的に発生する場合は、発生ごとの最大値を読み取る。

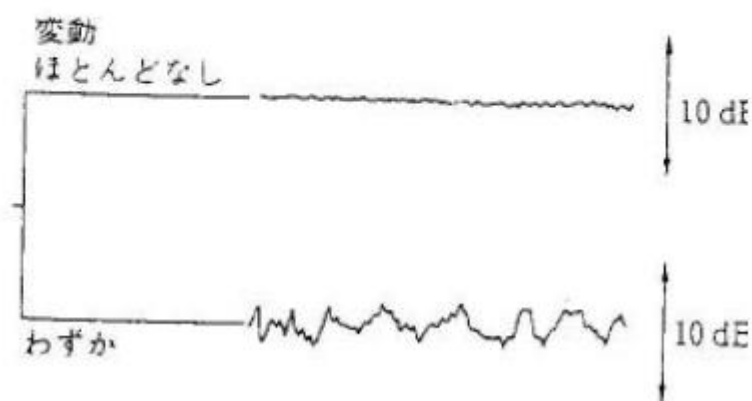
測定時に風が吹いている場合には、風の影響がない測定時間における発生音の最大値を読み取る。

低周波音の音圧レベルの時間変動の例を図-5.4 に示す。

風車音では風向、風速によって数値が変化することに注意する。風車音の影響でアノイアンス（不快感）の一つである圧迫感を感じて睡眠を妨害される場合については、風速の移動平均や Wavelet 解析によって、強い音圧が発生する頻度とその強さを確認することが大切である。

と修正する

(1) 変動の少ない低周波音



(2) 変動する低周波音



(3) 間欠的単発的に発生する低周波音

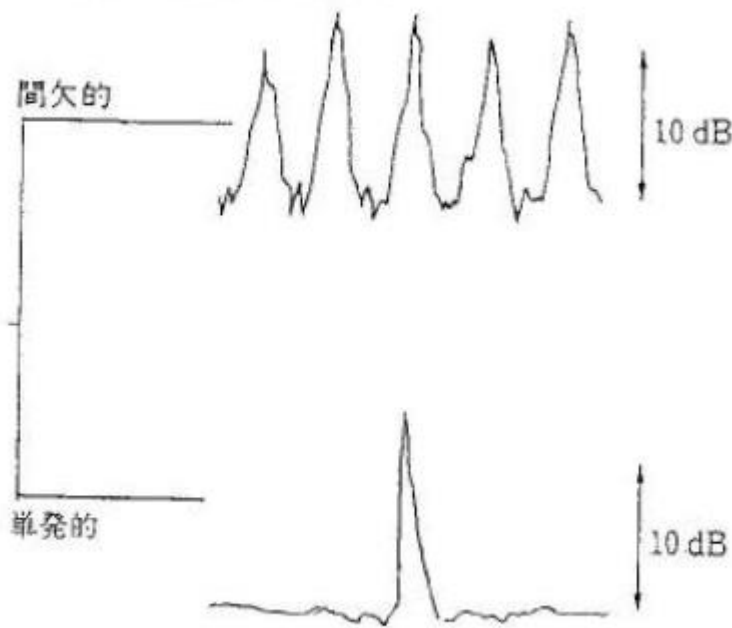


図-5.4 低周波音の音圧レベルの時間変動の種類

5.4.2 1/3 オクターブバンド音圧レベル

(1) 変動の少ない低周波音

音圧レベルの変動が小さくほぼ一定とみなされる場合は、平均値を実時間周波数分析器等によって求める。測定時に風が吹いている場合には、風の影響がない特定の測定時間内（例えば 1 分間）のパワー平均値を実時間周波数分析器によって求めてもよい。

(2) 変動する低周波音

(a) 対象の低周波音による指示値が大きくなるときに注目し、そのときの最大値を適当な回数について読み取る。実時間周波数分析器では、ある測定時間内の最大値を求めることができる。あらかじめレベルレコーダ等で最大値の発生時刻を確認しておき、最大値の前後で音圧レベルが最大値より 5～10dB 程度小さい測定時間内の最大値を実時間周波数分析器によって求める。

(b) 特定の時間内の最大値及びパワー平均値を実時間周波数分析器によって求める。特定の測定時間内（例えば 10 分間）の最大値及びパワー平均値をレベル処理器等で求める。

但し、測定時に風が吹いている場合で風雑音により対象とする低周波音の周波数特性に影響がある場合には、原則として指示値又は記録値の読み取りはできない。

(3) 単発的又は間欠的に発生する低周波音

単発的に発生する低周波音を測定する場合は、発生時の最大値を読み取る。

間欠的に発生する場合は、発生ごとの最大値を読み取る。

測定時に風が吹いている場合には、風の影響がない測定時間における発生音の最大値を読み取る。

(4) 風車の超低周波音

風車音の特徴は、超低周波音領域での音圧の高さ、離散的で規則的な周波数特性にある。微細な構造を見分

ける必要があるのですが、風車音自体の調査には 1/3 オクターブ解析は使えないが、他の環境騒音との比較に使うことは出来るが、その場合でも、ISO7196 に厳密に従って、中心周波数を 0.25Hz～315Hz として計算する必要がある。

1/3 オクターブ解析で、リオン社前の道路の音、JFE の製鉄所内の音、千葉県館山市の風車音（強風時）、マイクに風を当てて測った神社での音、石狩湾近くの数か所で、風車群の音から計算した平坦特性での音圧レベルを比べてみると次の様になります。

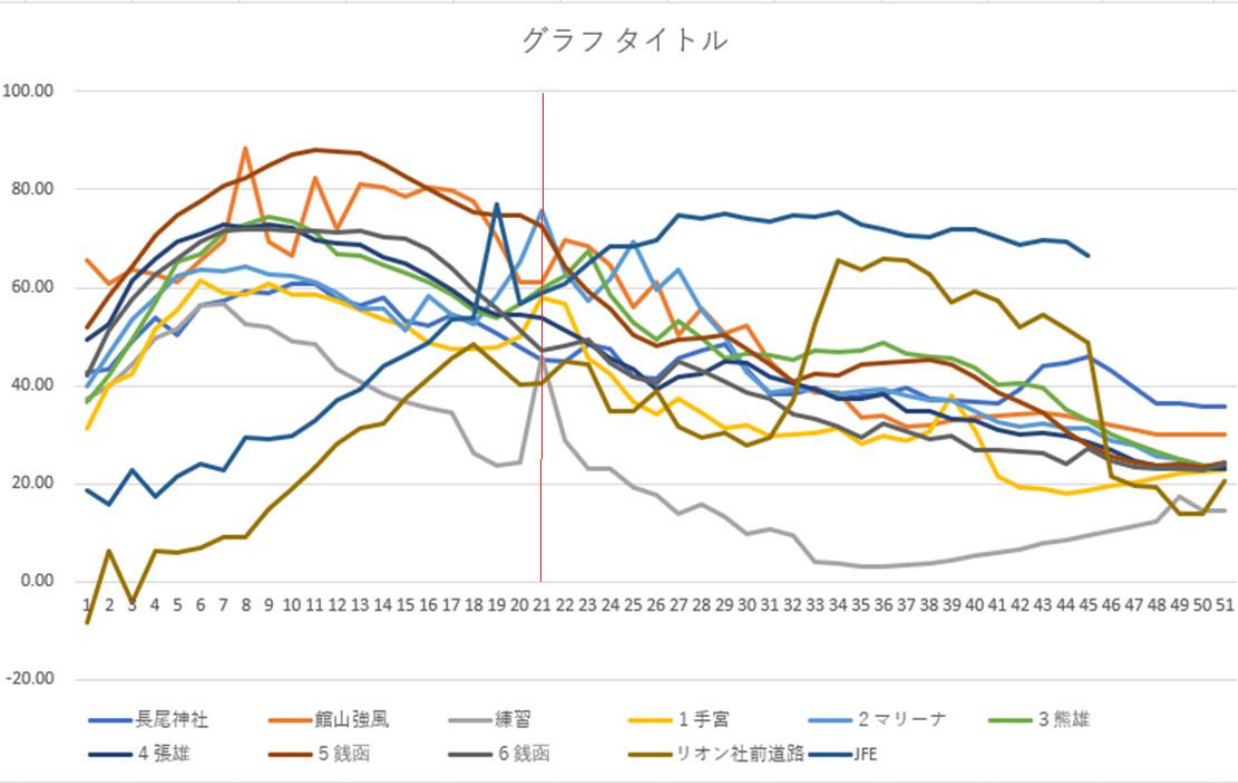
なお、番号と中心周波数（0.19Hz～20000Hz）の関係は次の表です。

番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
中心周波数	0.19	0.25	0.32	0.40	0.50	0.63	0.80	1.00	1.25	1.60	2.00	2.50	3.15	4.00	5.00	6.30	8.00

番号	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
中心周波数	10.00	12.50	16.00	20.00	25.00	31.50	40.00	50.00	63.00	80.00	100.00	125.00	160.00	200.00	250.00	315.00	400.00

番号	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51
中心周波数	500.00	630.00	800.00	1000.00	1250.00	1600.00	2000.00	2500.00	3150.00	4000.00	5000.00	6300.00	8000.00	10000.00	12500.00	16000.00	20000.00

20Hz は、21 番のところです。（1/3 オクターブ解析での平坦特性音圧レベルのグラフです。）



グラフの中央部分（8 番～33 番、1H z ～315H z）の辺りでは、風車音は、全体として周波数が大きくなると音圧レベルが減少するが、交通騒音などは周波数が高くなると音圧レベルが上昇する。

8 番（1Hz）から 15 番（5H z）辺りでの違いが大きい。これを風車からの超低周波音だと認めたくない人はこの部分を“風雑音”というのですが、風車音が発生する仕組みを考えて、詳細な周波数を確認すれば、離散的な特徴から風車の超低周波音だと分かるのです。

と修正する

5. 5 測定結果に付記すべき事項

測定結果に付記すべき事項は騒音測定の場合と同様である。必要に応じて次の事項を付記する。

- (1) 測定者
- (2) 測定日時
- (3) 気象条件（天気、温度など）
- (4) 測定場所（測定位置、測定高さ、室内外、窓の開閉など）
- (5) 周囲の状況（地図、概略図など）
- (6) 測定器（種類、型式、製造業者名など）
- (7) 測定者の低周波音に対する所感・印象、その他気付いたこと

このままとする