

2025.10.5 第3回勉強会

低周波音と風車音について

講演者：落合博明（一般財団法人 小林理学研究所）

本日お話する項目

ー低周波音、風車音とは何か、低周波音の影響を正しく理解するー

- 音について
- 低周波音について
低周波音とは?、低周波音の測定例、
影響、誤解、苦情
- 風力発電施設から発生する音について
風車音の発生源と特性、影響、苦情、
設置にあたっての注意事項

音について

音って何？

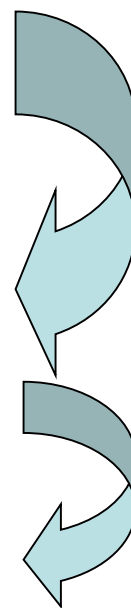


- ・音は微小な空気の変動
- ・その変動が耳の中の鼓膜を振動させることにより、人は音として感じる

微小な圧力変動とは？

- 大気圧は、1気圧=1013 hPa(ヘクトパスカル)
- 1013 hPa=101300 Pa= 1.013×10^5 Pa(パスカル)
- 音は微小な空気の変動
- ガード下の騒音程度の大きさ; 94 dB (デシベル)
でも、たったの 1 Pa
- 人が聞こえる最小の大きさ
 $0 \text{ dB (デシベル)} = 2 \times 10^{-5} \text{ Pa} = \underline{0.00002 \text{ Pa}}$
さらに、ガード下の1/5万
- 最大でも 20 Pa (120 dB)程度

⇒ 聞こえる範囲が広すぎて取り扱いに不便



人の聞き取れる音の大きさ（音の強さ）

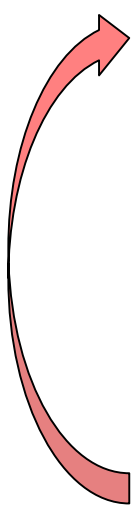
- ・ 音を聞き取れる範囲が広すぎて取扱いに不便
- ・ 人の感覚は対数に対応していると言われる（ p.7参照）
- ・ 音の強さと音圧の関係：音の強さは音圧の2乗に比例する
- ・ 音の強さを直接測定するのは難しい → 音圧を測定
→ 対数を取るにより、全体を圧縮して表示
→ 得られた音圧と基準の音圧との比をとって対数化して2乗し、10倍した値；「音圧レベル」で音の大きさを表す

$$L_p = 10 \log_{10} (p^2 / p_0^2)$$

L_p ：	音圧レベル	[dB]	⇒ 単位：デシベル
p ：	音圧の実効値	[Pa]	
p_0 ：	基準音圧	0.00002 [Pa]	

音の強さ、音圧、音圧レベルの関係

人は音の強さ(音のエネルギー)で1兆倍、音圧で100万倍の範囲の音を聞き取ることができる

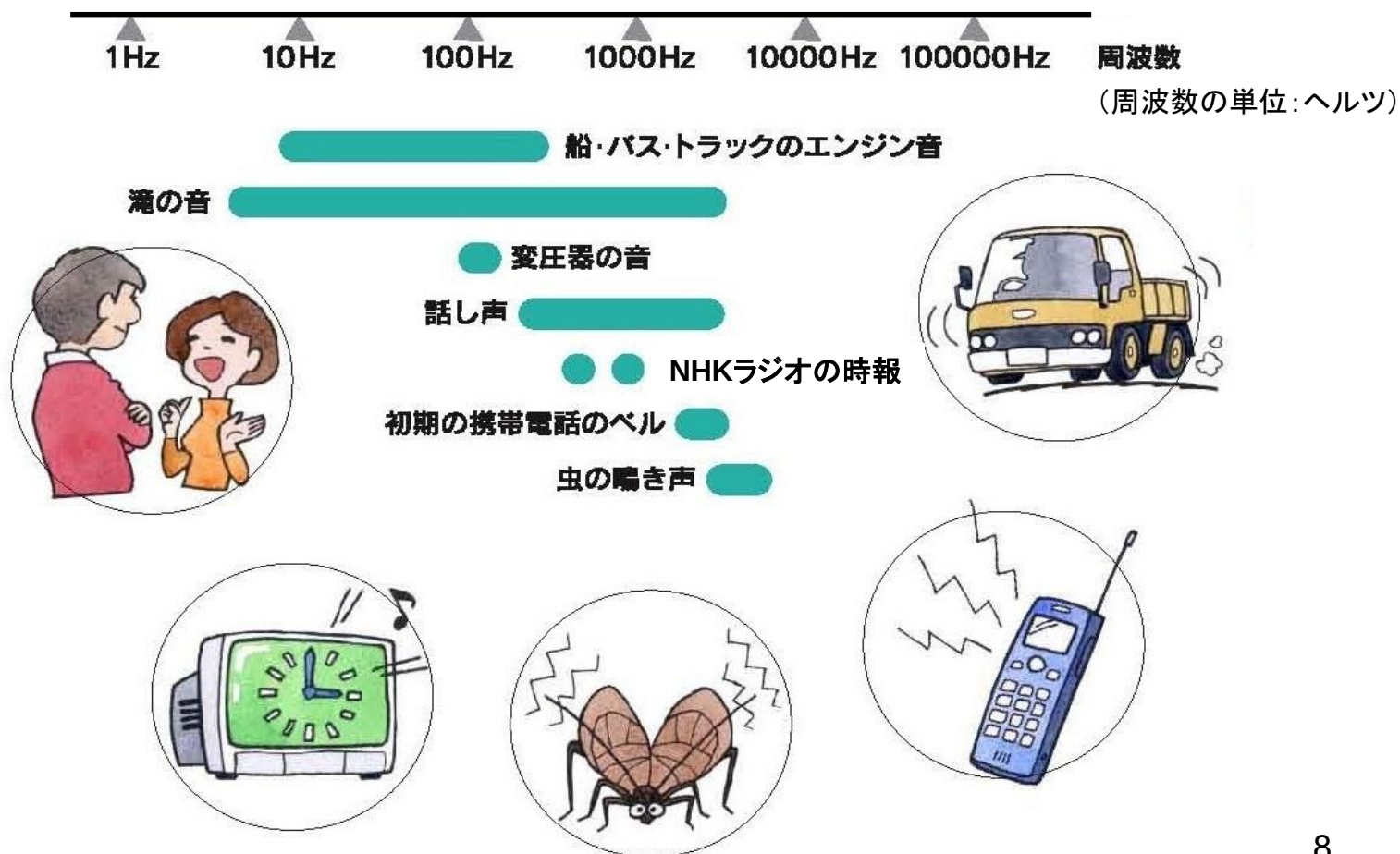


エネルギー比	音の強さ	音圧	音圧比	音圧レベル
	W/m^2	Pa		dB
10^{12}	1	20	10^6	120
10^{10}	10^{-2}	2	10^5	100
10^8	10^{-4}	0.2	10^4	80
10^6	10^{-6}	0.02	10^3	60
10^4	10^{-8}	0.002	10^2	40
10^2	10^{-10}	0.0002	10^1	20
1	10^{-12}	0.00002	1	0

- ・音圧レベルが10 dB大きくなると、概略2倍大きくなったと感じる。
- ・人は刺激に対して対数的に感覚量が生じる。
(心理学上の法則, ウェーバー・フェヒナーの法則)

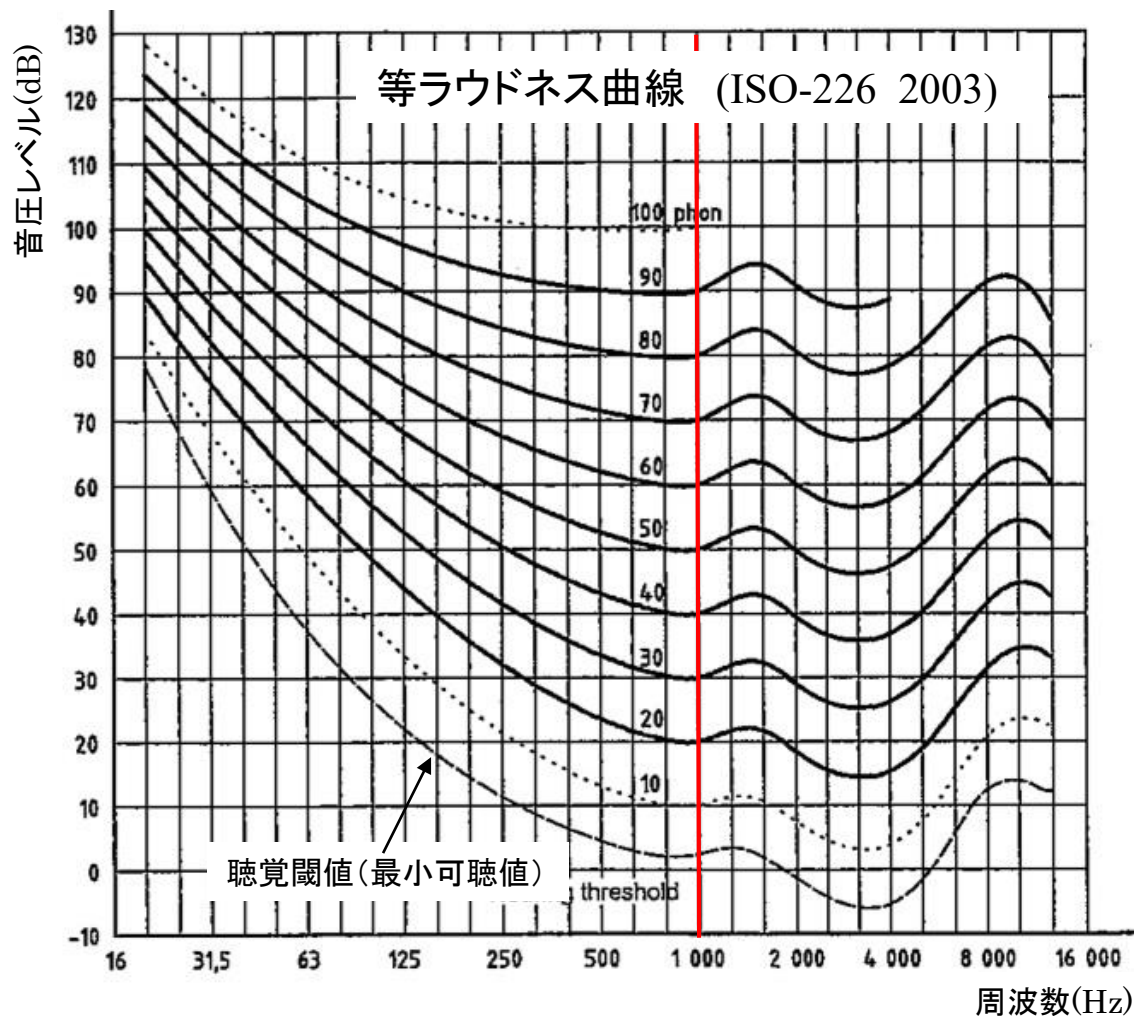
音の周波数(高さ)、身の回りの音と周波数

音の周波数: 1秒間に空気が振動する回数。振動の回数が多ければ高い音、少なければ低い音として聞こえる。



周波数による人の音感度の違い

人は、音の周波数が低くなるほど、音に対する感度が急激に悪化する



測定；騒音計と周波数重み付け特性



騒音計（サウンドレベルメータ）

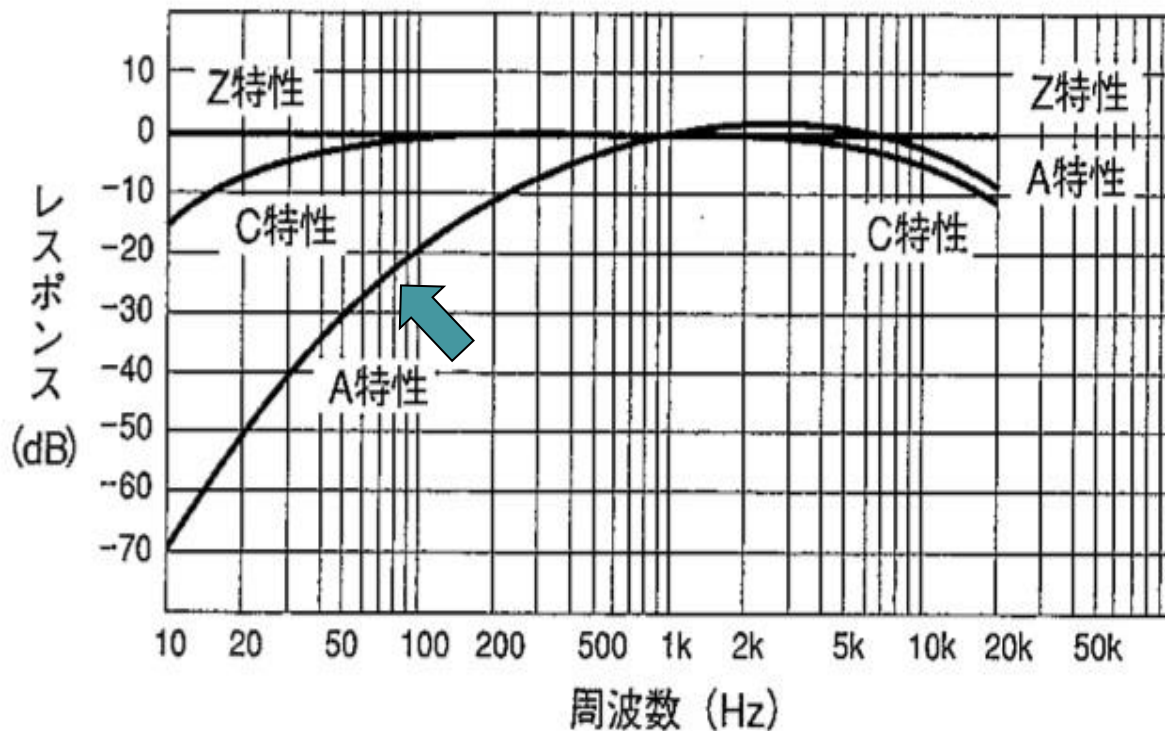
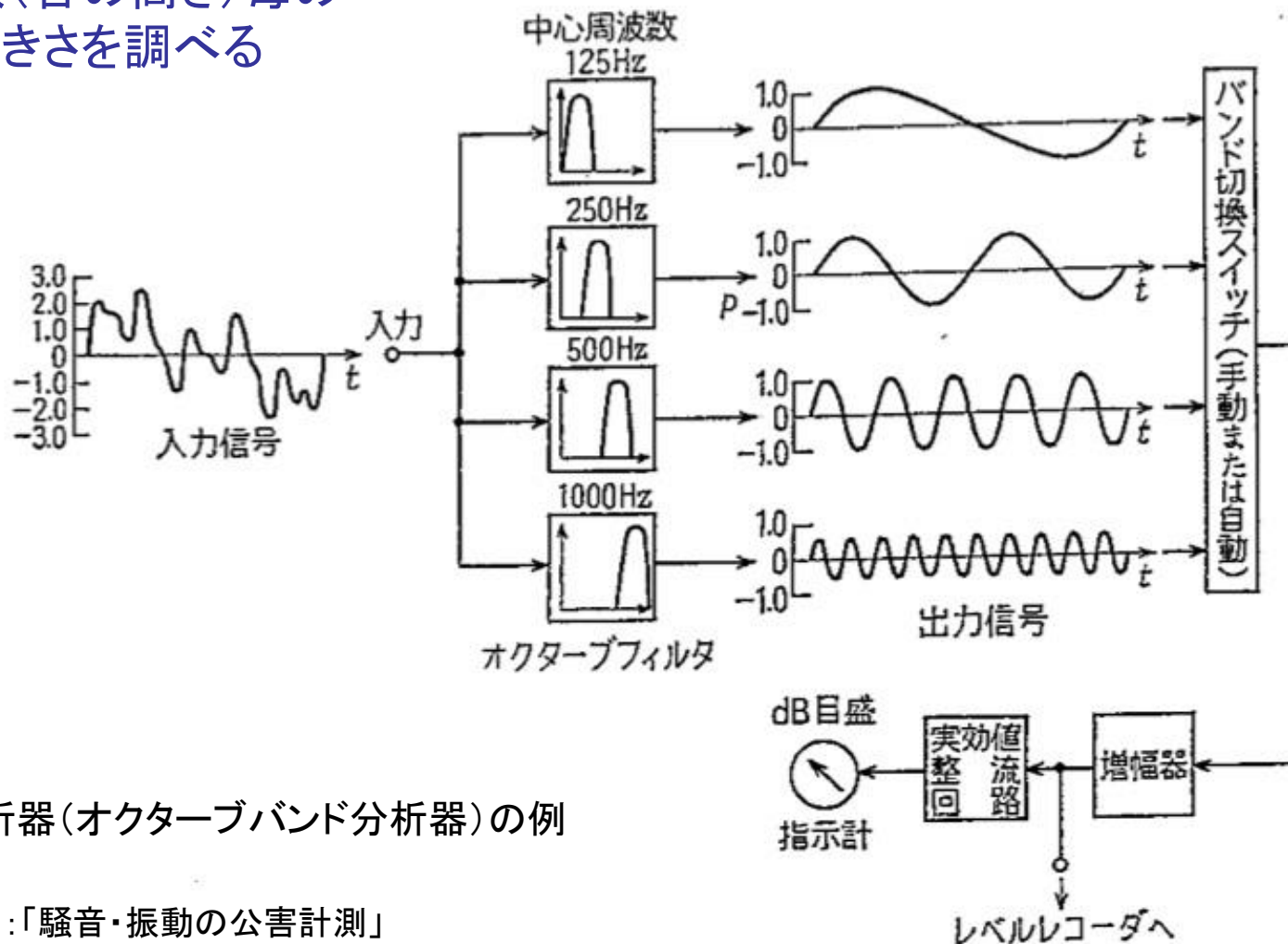


図 騒音計の周波数重み特性

- ・人への影響を評価する測定では、人の音感度を考慮した **A特性** を用いる
- ・対策など、物理的な測定ではZ特性（平坦）やC特性を用いることが多い

詳細な分析：周波数分析

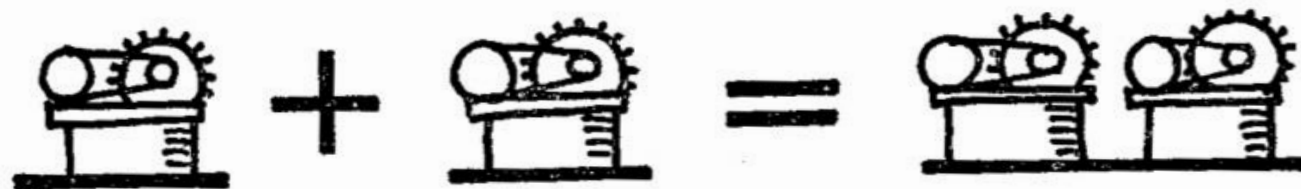
- ・ 周波数(音の高さ)毎の音の大きさを調べる



周波数分析器(オクターブバンド分析器)の例

デシベルの足し算

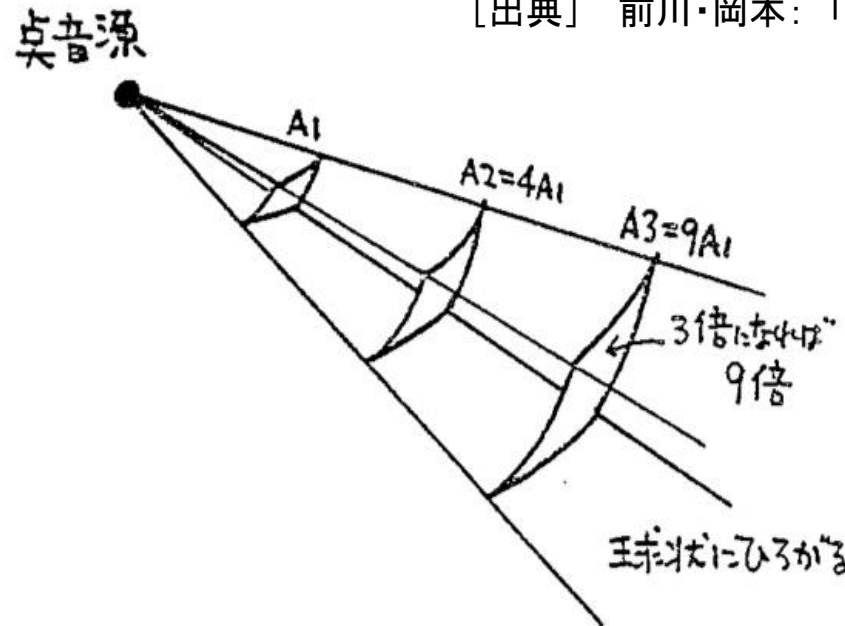
- ・騒音の大きさが80 dBの機械が2台になった場合、騒音の大きさは160 dBにはならない。
- ・音の大きさは、2倍で3 dB、3倍で5 dB、4倍で6 dB、10倍で10 dB増加する。


$$80 + 80 = 83$$

~~160~~

音(点音源)の距離による減衰

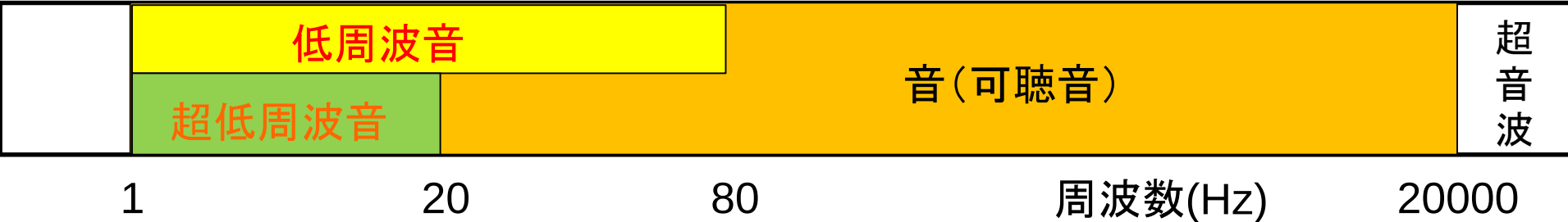
[出典] 前川・岡本:「誰にもわかる騒音防止ガイドブック」



- 音源から観測点までの距離が音源の大きさに比べて離れている場合や発生源が局所的な場合(点音源)には、音は距離が倍になるごとに6 dB、10倍になるごとに20 dBの割合で減衰する(距離減衰)
- この他、距離減衰に加えて、空気吸収、地表面吸収、壁等による遮蔽、気象の影響(風向等)により減衰する

低周波音について

低周波音とは？



- ・人は広い範囲の周波数の音が聞き取れる
- ・普通の音圧で人が聞き取れるとされる音の周波数: 20 ~ 20000 Hz

- ・ 1 ~ 20 Hzの音: 超低周波音*
- ・ 1 ~ 80 Hzの音: 低周波音**
- ・ 20000 Hz以上の音: 超音波

*国際規格 ISO 7196(1995)で決められている

**低周波音の周波数範囲は国によって異なる

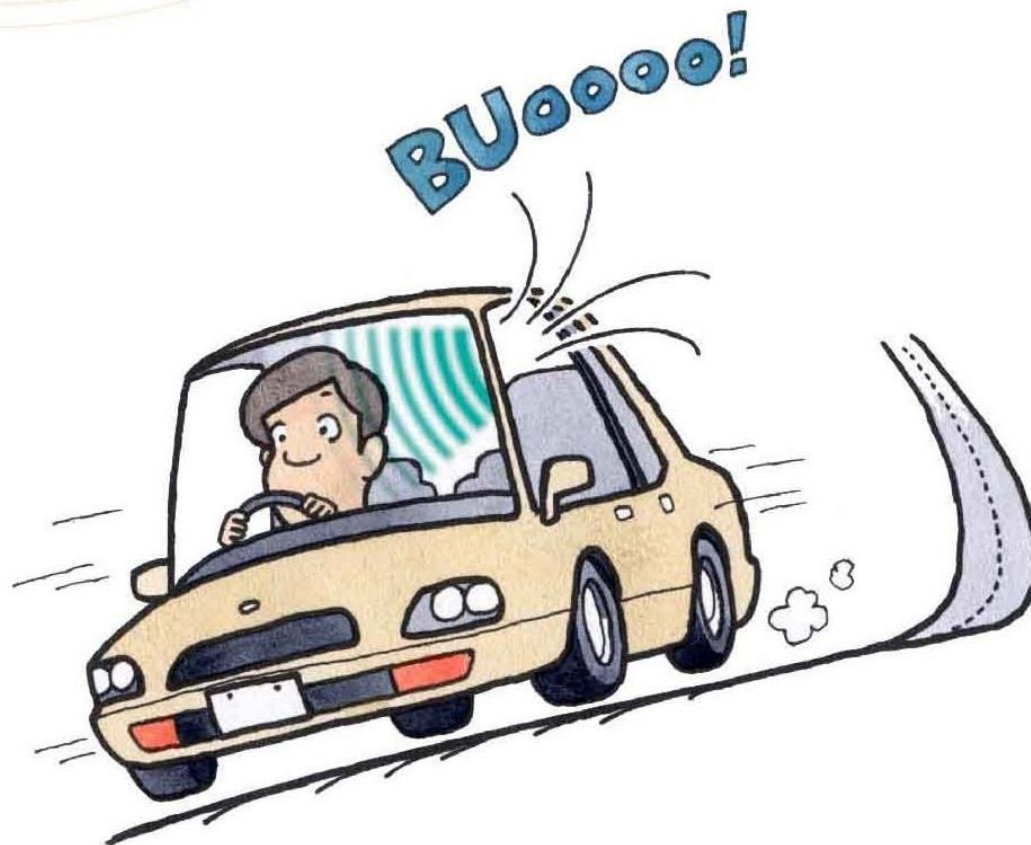
国名	周波数範囲(Hz)	備考
スウェーデン	31.5~200	
ドイツ	8~125	DIN45680
デンマーク	1~20	G特性音圧レベル
	10~160	
ポーランド	10~250	ポーランド建築研究所の基準
米国	16~63	
オランダ	20~100	NSG(The Dutch Foundation against Annoyance by Noise)の基準
イギリス	10~160	
台湾	20~200	
日本	1~20	超低周波音
	1~80	低周波音

超低周波音の発生源と発生機構

平板の振動によるもの	板や膜の振動を伴うもの等	大型の振動ふるい、道路橋、溢水ダムの水流等
気流の脈動によるもの	気体の容積変動を伴うもの等	空気圧縮機、真空ポンプ等の圧縮膨張による容積変動
気体の非定常励振によるもの		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
空気の急激な圧縮、開放によるもの		発破、鉄道トンネルの高速での列車突入等

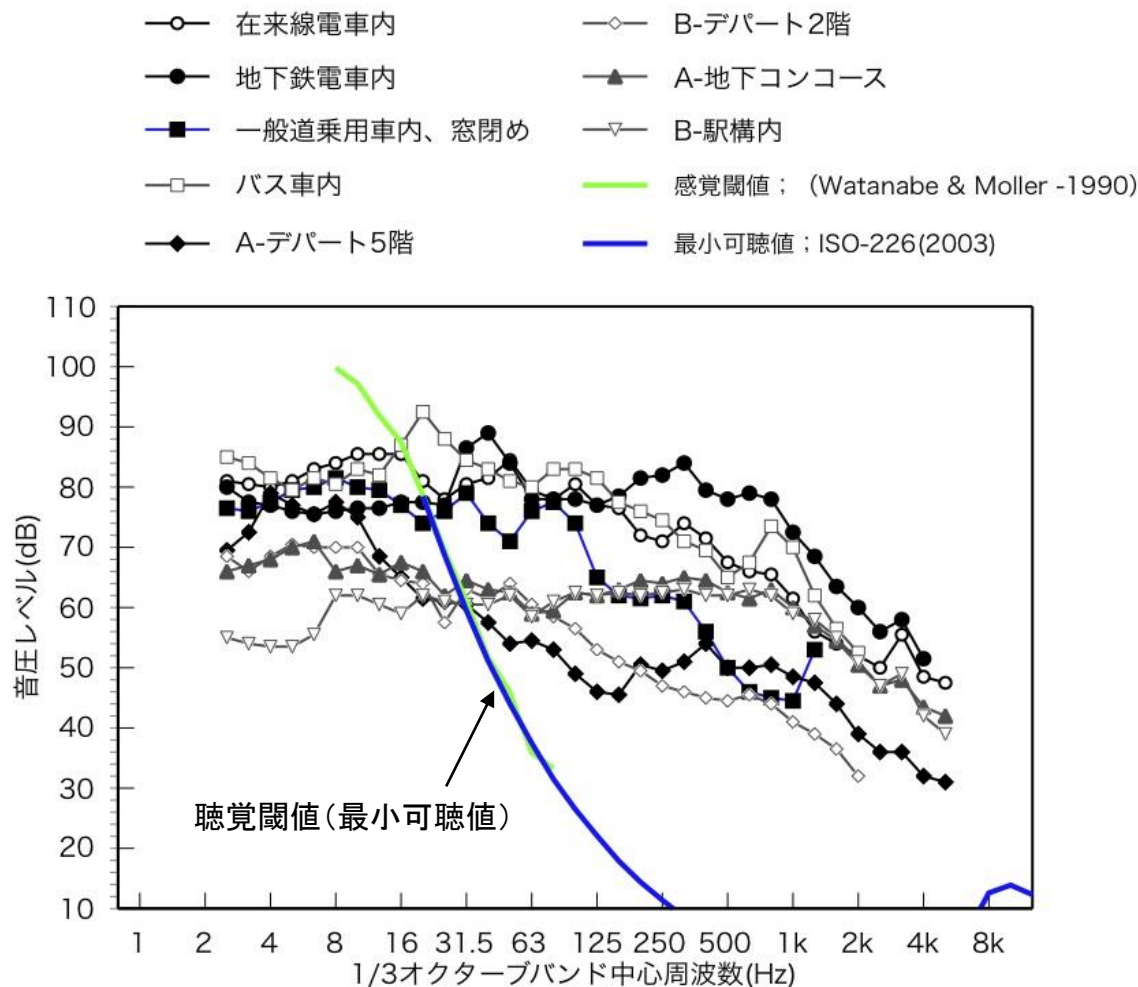
⇒低周波音は音の波長が長いので、大きなものからしか発生しない

低周波音を簡単に体験するには



車の窓を数センチ開けて高速道路を走行すると、周波数10～20Hz程度で110dB程度の低周波音が体験できる。

一般住環境における騒音・低周波音の例

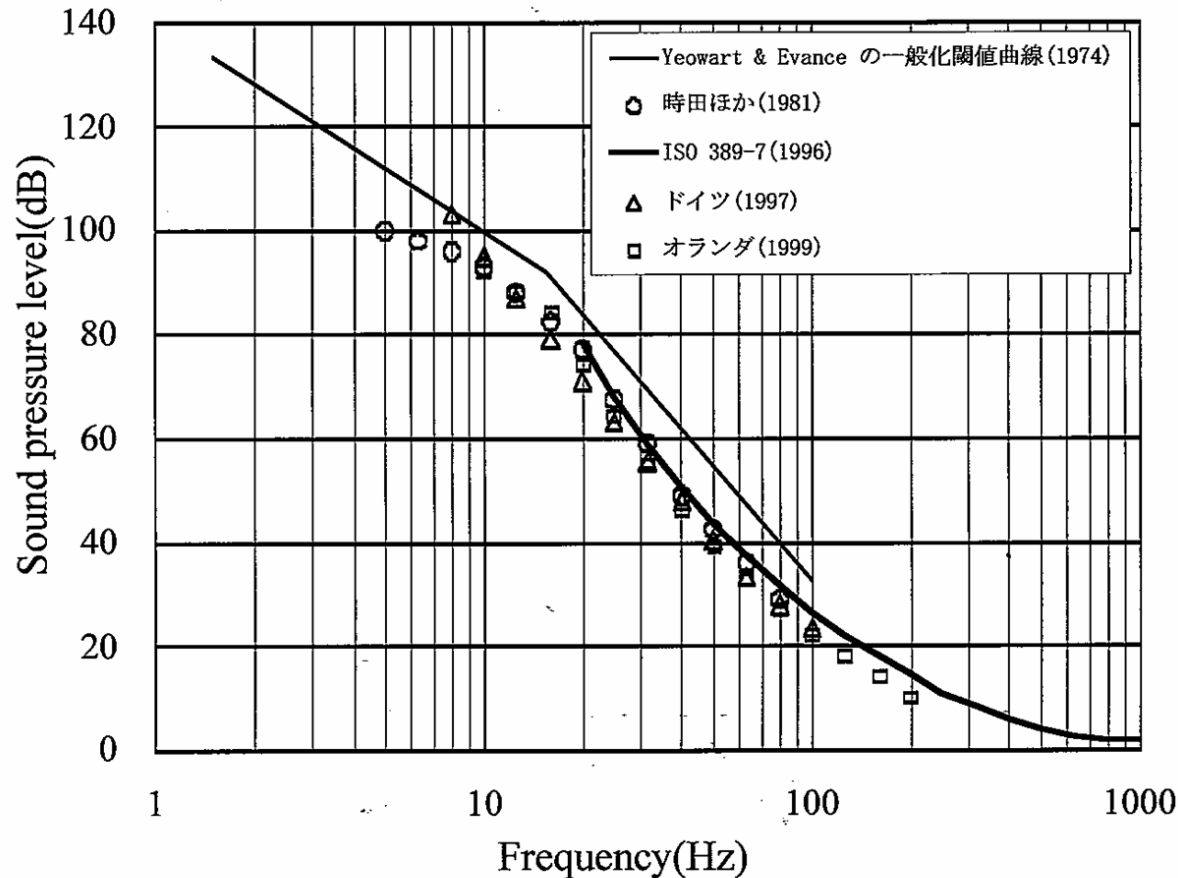


〔出典〕 落合；風車音の実測調査結果について—一般住環境における騒音・低周波音の測定結果

低周波音の影響

低周波音の閾値

- 1000 Hzの閾値は2 dB、100 Hzの閾値は27 dB、10 Hzの閾値は93～97 dB

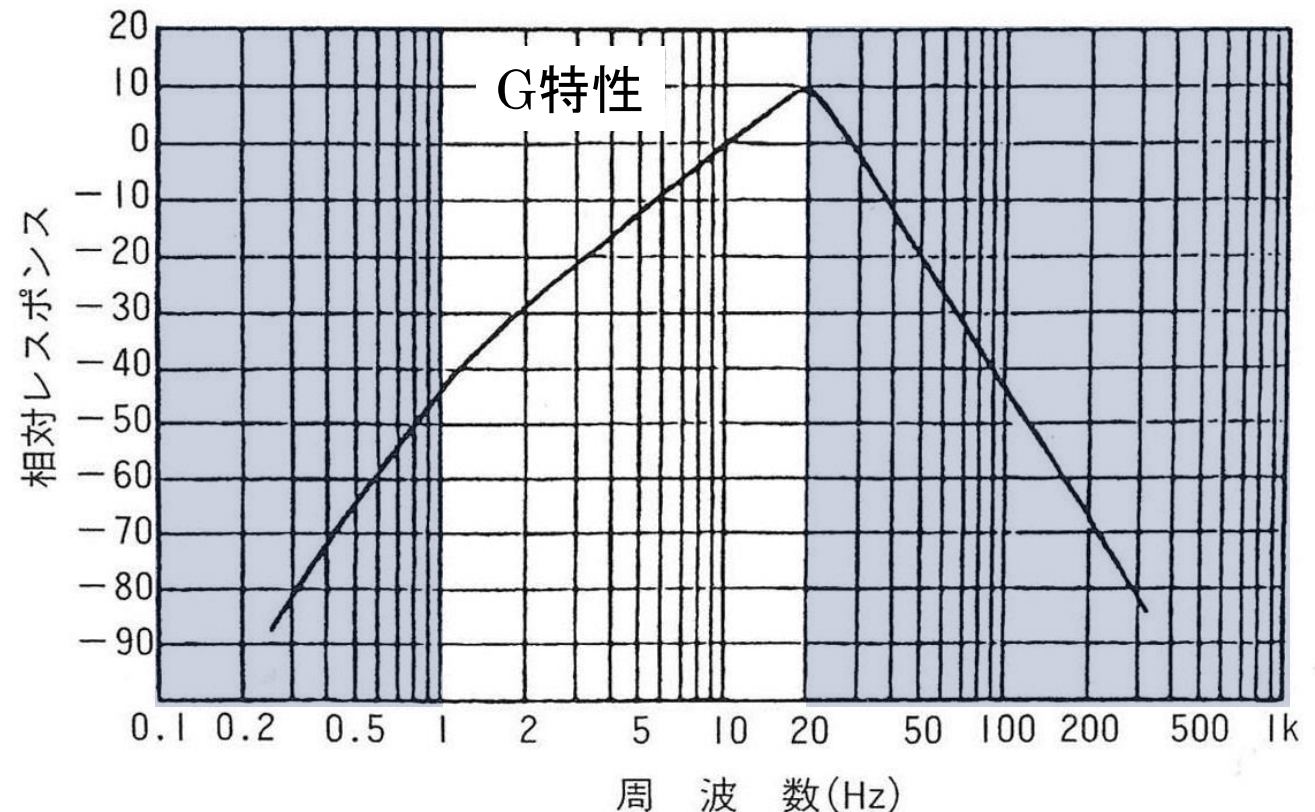


⇒ 音の周波数が低くなると、人の音に対する感度は極端に悪くなる

超低周波音の周波数重み付け特性



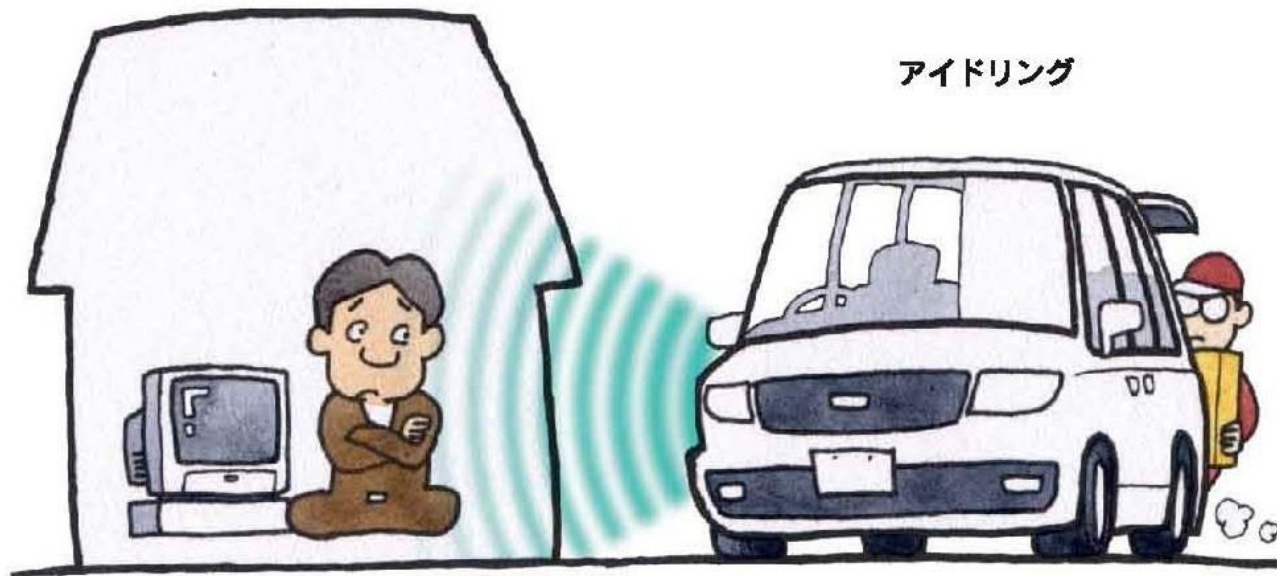
騒音計（サウンドレベルメータ）



超低周波音の周波数重み特性；G特性

・騒音のA特性に相当、1～20Hzの範囲

低周波音ってどんな影響があるの？



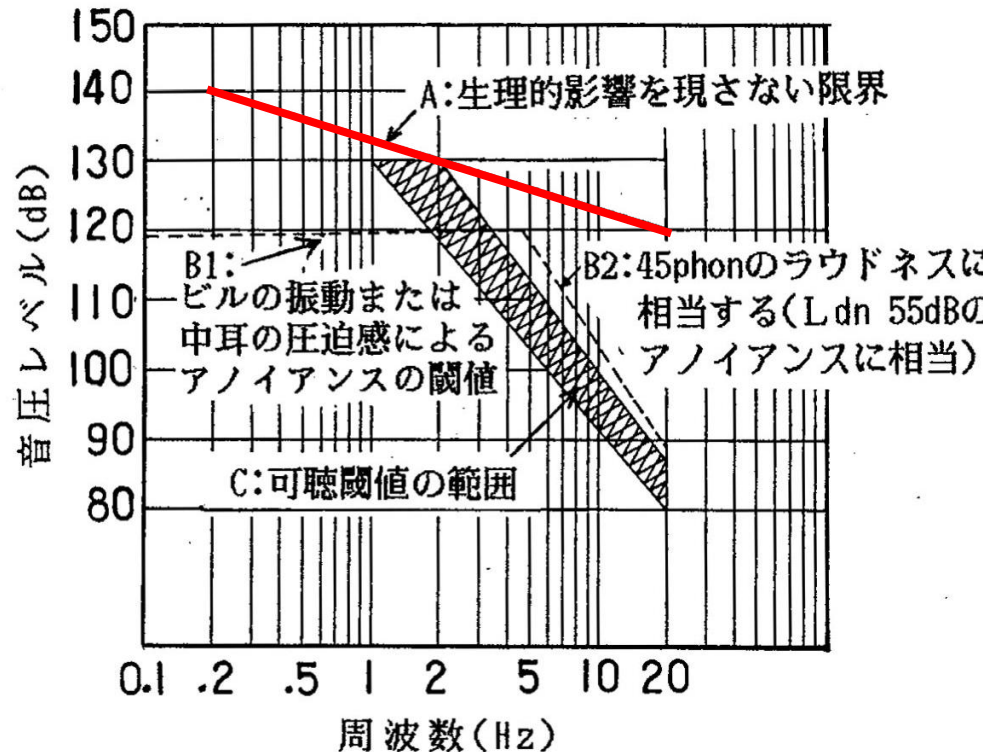
- ・ 低周波音による影響には、「不快感」や「圧迫感」などの人への影響と、「窓や戸の揺れやがたつき」などの物的影響がある
- ・ いずれも、低周波音がある大きさ以上にならないと発生しない
- ・ 不快感や建具のがたつきを引き起こすような大きさの低周波音は稀にしか存在しない

低周波音の人への影響は？



- これまでの研究によると、私たちが生活している
環境の中で発生している程度の大きさの低周波音では、例えば聴力障害
のような直接的な生理影響を生じることは少ないと考えられている
- 睡眠に対する影響については、低周波音の大きさが10 Hzで100 dB以上
になると眠りが浅い場合には目が醒めるという実験結果が得られている

超低周波音による直接的な 生理影響を現さない限界値

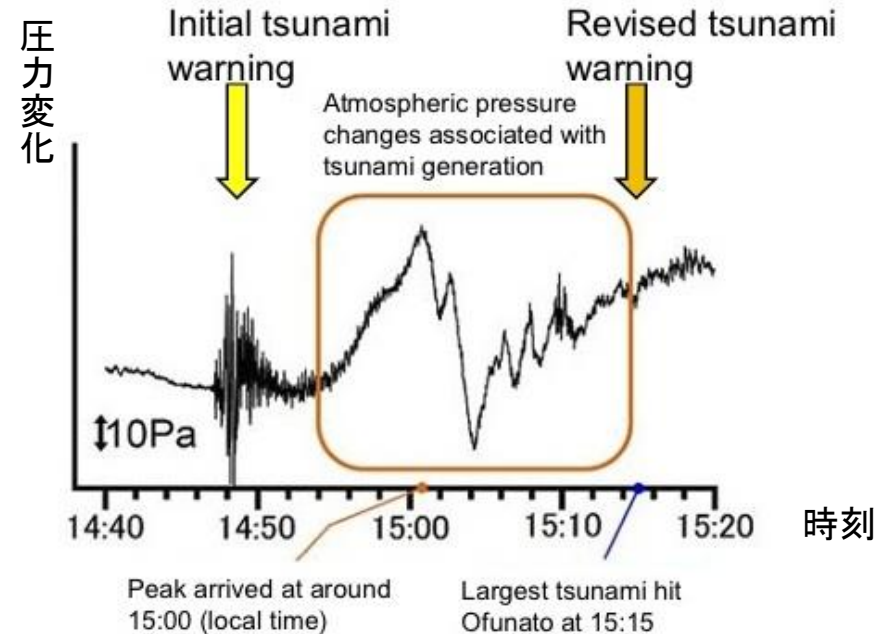


- ・ 超低周波音に関しては、住空間に存在する程度の音圧レベル (120 dB以下) では、聴力障害等の直接的な生理影響は生じない

津波による大音圧の音波の発生



(a) Locations of the Mizusawa barograph station and Ofunato city. Source area and the epicenter of the 2011 Tohoku earthquake are also shown in the figure.

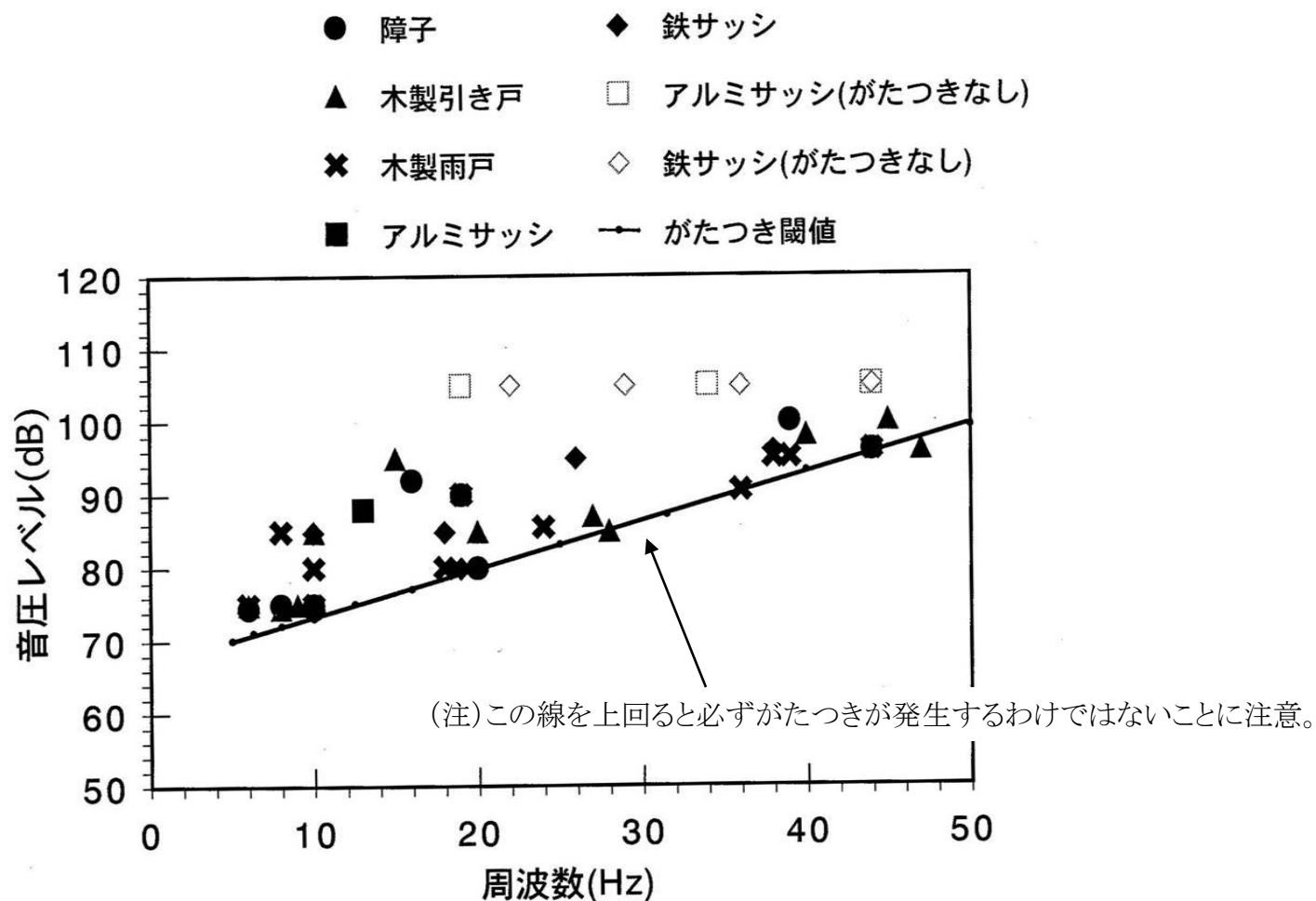


(b) Timings of issuance of Tsunami Warnings by JMA and microbarogram observed at Mizusawa. Time is in JST.

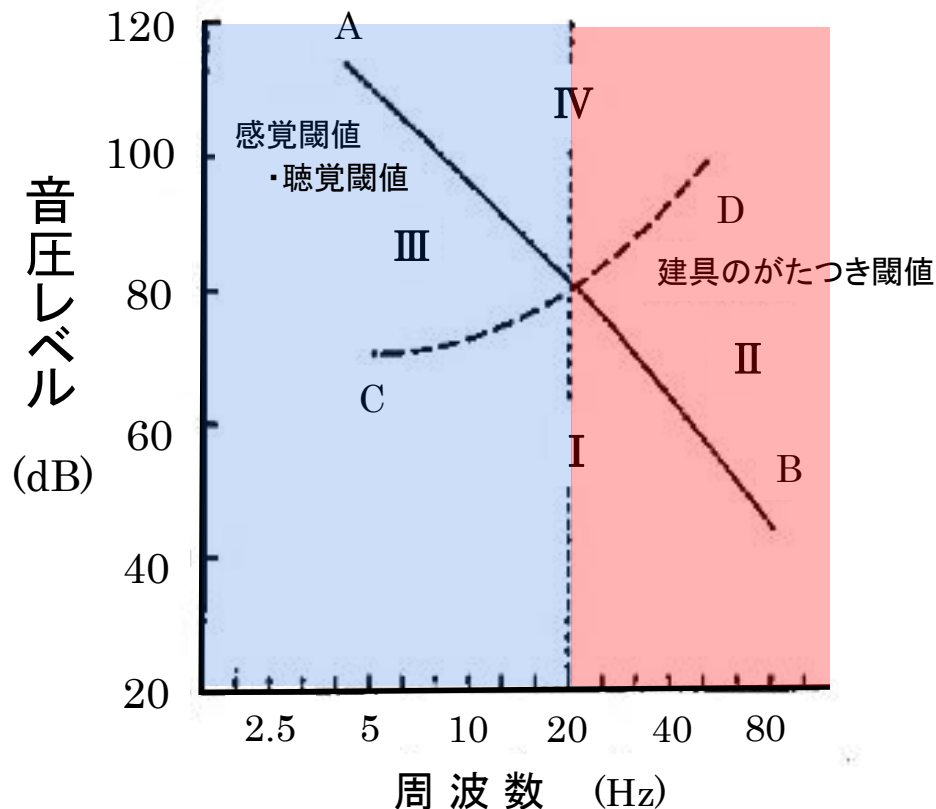
Fig. 5 Comparison between the barogram observed at Mizusawa and timings of issuance of Tsunami Warnings by JMA

⇒津波により大音圧のインフラサウンドが発生

低周波音による建具のがたつき実験結果



人と建具の反応領域の違い



領域		
I	音の感知	×
	建具のがたつき	×
II	音の感知	○
	建具のがたつき	×
III	音の感知	×
	建具のがたつき	○
IV	音の感知	○
	建具のがたつき	○

- ・ 20 Hz以下の超低周波音：
 - 人に影響がある程度の音圧レベルであれば建具のがたつきが発生している可能性あり
- ・ 20 Hz以上の可聴域の低周波音：
 - 人が不快感等を訴えるのは主にこの領域あるいは100Hz以上の騒音の可能性あり

低周波音に関する誤解

低周波音に関する誤解を与える報道の例

「幽霊マンション騒動」；原因は低周波音？

ある新聞の記事：

→ 建物内を振動で伝わる固体音が原因

- ・ 集合住宅の最上階の住宅の天井から、人が階段を駆け上がる音が聞こえたり、食器棚から茶碗が飛び出したなど、一部テレビや週刊誌で大騒ぎとなった
- ・ 一部の専門家からは「低周波音が原因」との声も上がっている

→ 低周波音なら他の家屋でも被害発生

低周波音に関する誤解を与える報道の例

超低周波音による身体的被害はある？

ある新聞の記事：

→ 聞こえないと言いつつ、全て聞こえる音

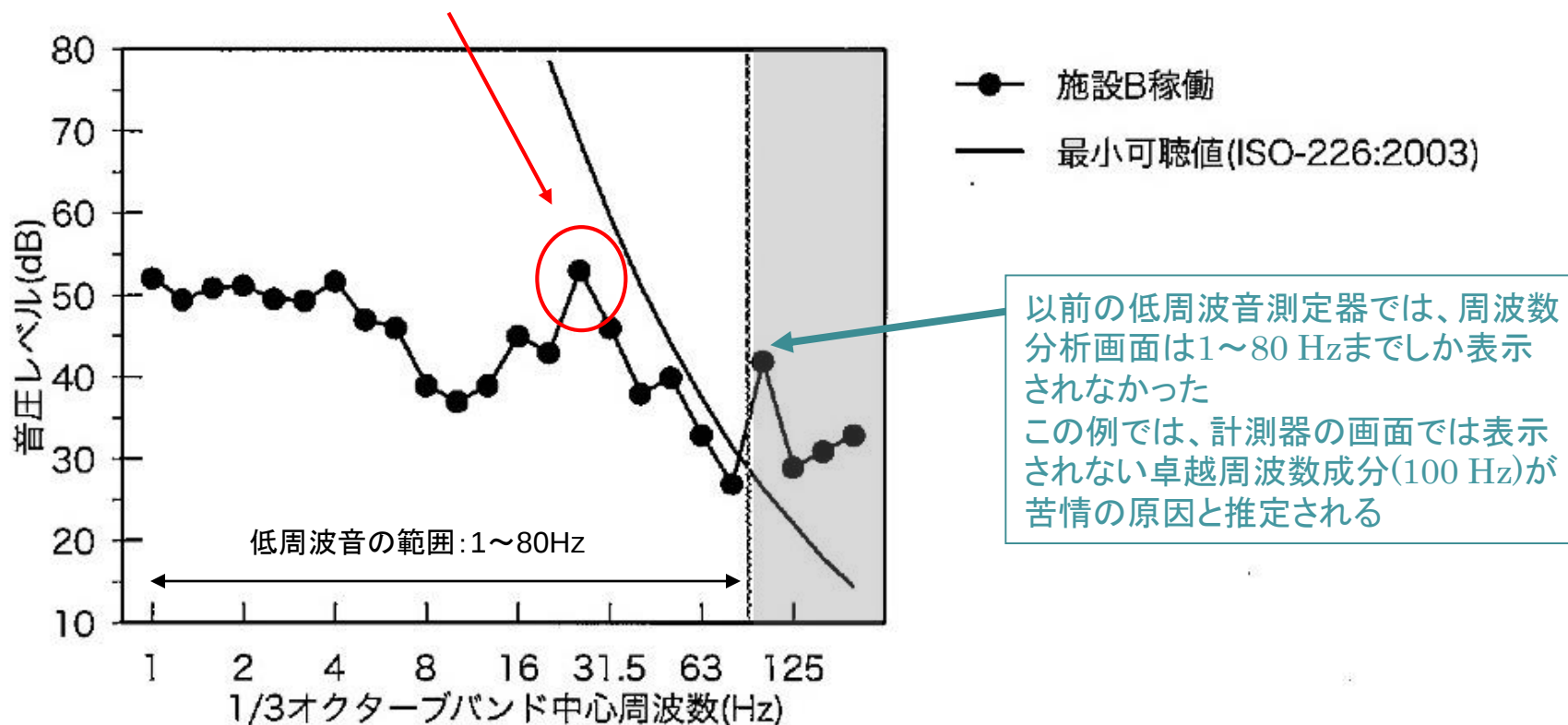
- ・ 人の耳にほとんど聞こえない低周波音の被害を訴える人が増えている
頭痛や不眠など様々な症状が現れるが、発症の仕組みは未解明
- ・ 「鐘の中にいるような音」，「奇妙な音」，「うなるような音」，「ブーンという音」
- ・ インターネットで調べたところ、低周波音の仕業とわかった

→ インターネットは誤りも多い

低周波音に関する誤解の例

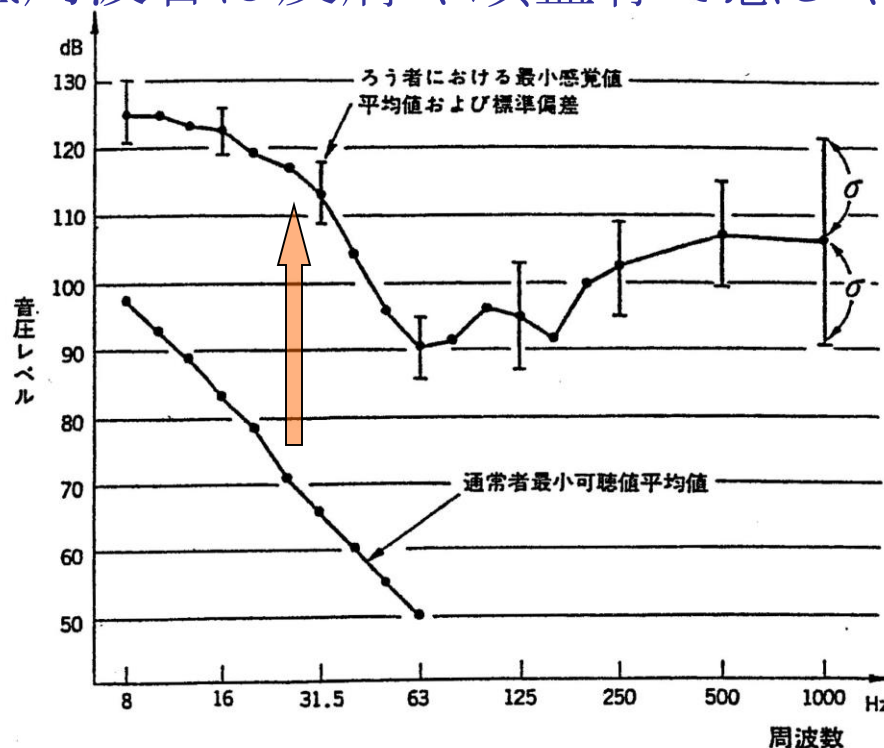
「低周波音は閾値以下でも聞こえる??」

⇒この卓越成分は音圧レベルが閾値より15 dB程度低いので聞き取れない可能性が高い



低周波音に関する誤解の例

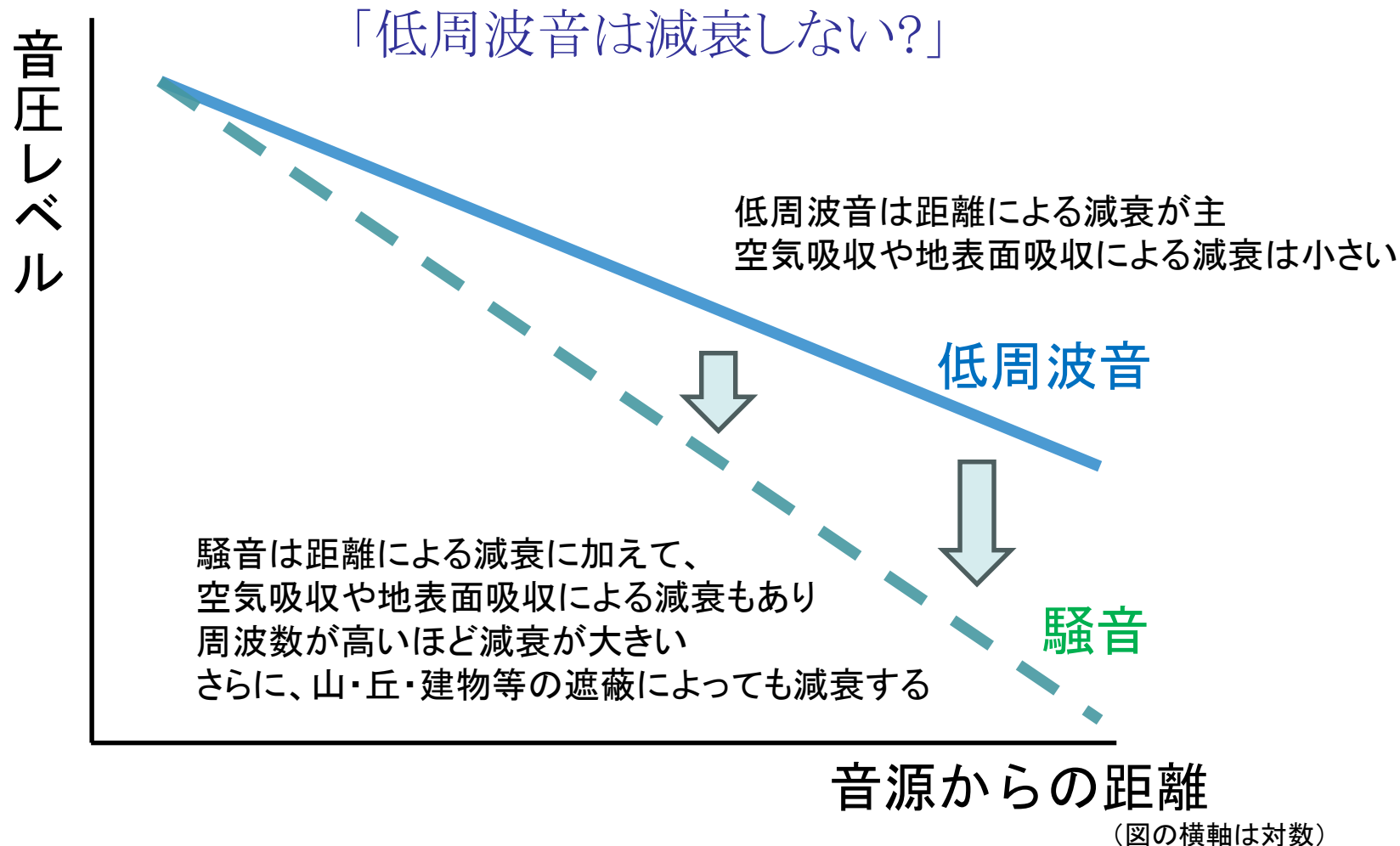
「低周波音は皮膚や頭蓋骨で感じやすい??」



- 聾者における超低周波音の閾値は健聴者の閾値より 20～30 dB高い
- 音圧レベルが非常に高くないと低周波音を体(振動)では感じない

⇒ 感度は悪いが、超低周波音も聴覚で感じている

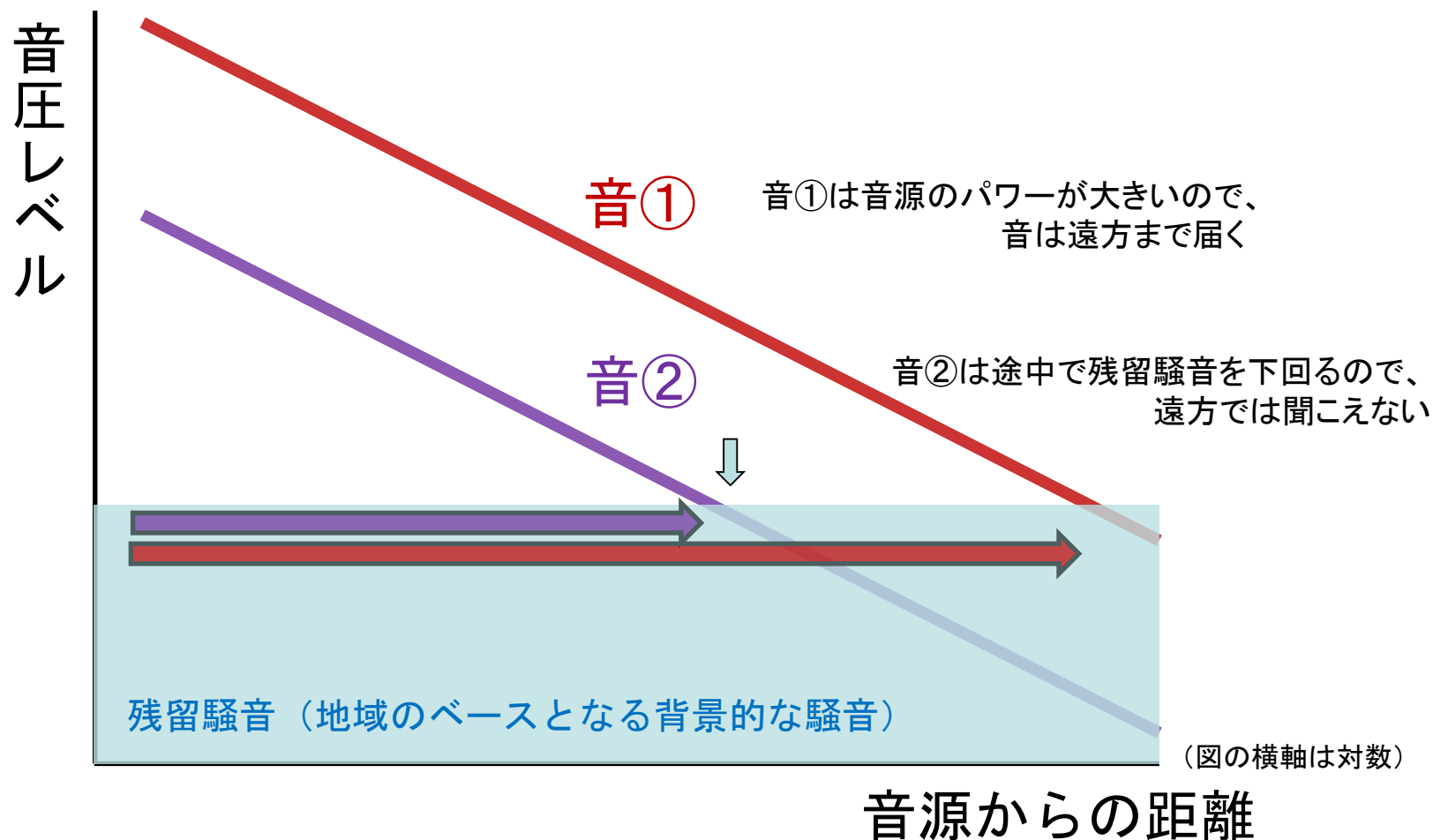
騒音と低周波音の距離減衰の傾向



- 低周波音も点音源では- 6 dB/倍距離で減衰する
- 騒音はこれに加えてさらに減衰する

音の距離減衰と影響範囲

「低周波音は遠くまで届く？」



⇒ 発生源のパワーが大きければ、遠くまで届く

低周波音苦情の傾向と事例

近年における低周波音苦情の傾向

家屋の遮音性能向上に伴い、低レベルの低周波音苦情が増加

- 中高周波数域成分の音圧レベル低下



- 低周波数域が目立つようになる

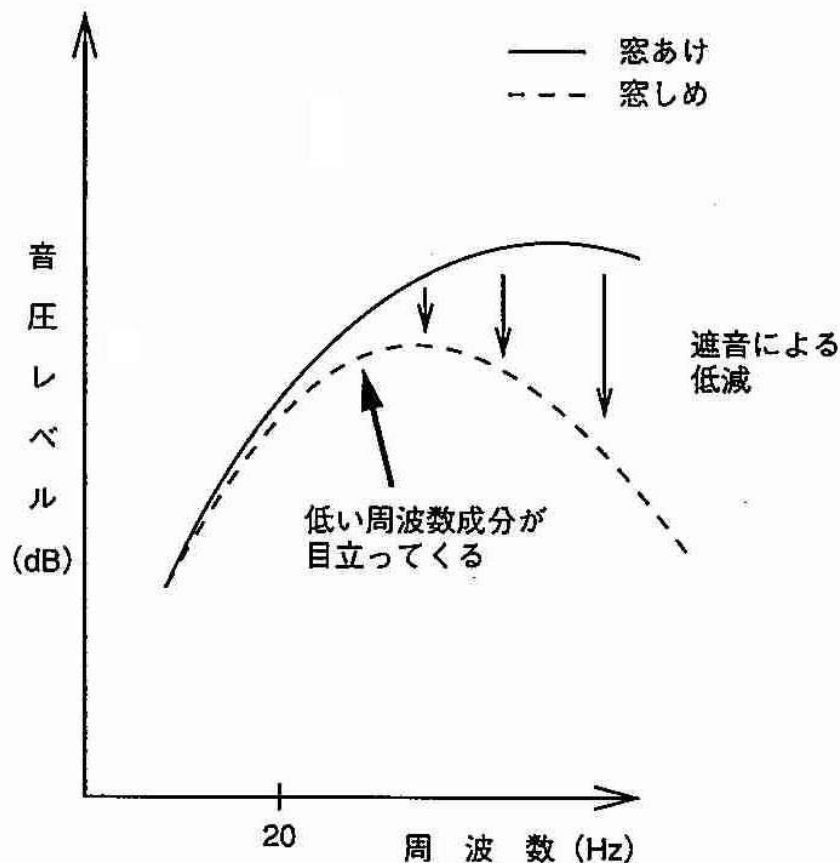


- 室内の暗騒音レベル低下に伴い、小さい音、低い音が耳につく、気になる、不快といった苦情が増加



- 音の大小でなく、音質や時間変動が問題との声も

- この他、誤解に基づく苦情や自身の問題が原因と思われる苦情も増加



低周波音の苦情（がたつきの事例）



港近くの民家から、襖や人形ケースがカタカタ揺れて気持ち悪いとの苦情が寄せられた。このような現象は早朝の決まった時間帯に発生する。

測定の結果、12.5 Hzに大きな音圧レベルを持つ低周波音が観測された。発生時間帯と周波数的な特徴から、フェリーボートのディーゼルエンジンが原因と判明した。

低周波音の苦情（不快感の事例）

老人医療施設屋上に設置された大型室外機等から発生する騒音・低周波音による不快感・睡眠妨害に関する苦情が周辺の数軒の住民から寄せられた。
測定の結果、施設の稼働と苦情に対応があり、室外機から発生する50 Hzと100 Hzの音が苦情の原因と考えられた。



低周波音の苦情

(苦情者自身の問題による事例)



一人暮らしのお年寄りから
低周波音が一日中聞こえる

測定の結果、申したてのような低周波音は観測されなかった。

調査員がこの方に「他市へ行ってもその音が聞こえるか」尋ねたところ、
聞こえるとのことであったので、健康チェックを勧めたところ納得して解決した。

「ボン、ボン」という
との苦情が寄せられた。

低周波音に関するまとめ

- 低周波音はどこにでも存在する
- 周波数が低くなるほど、人の音に対する感度は悪い
- 聴覚閾値（最小可聴値）以下では心身影響は生じない
- 音による振動感覚の閾値は、聴覚閾値より約20～30 dB 以上高い（感度が悪い）
- 20 Hz以下では、人が音を感じるよりも低い音圧レベルで窓や戸が振動する可能性がある
- 低周波音も騒音と同様に、点音源では－6 dB/倍距離で減衰する
- 「低周波音の心身苦情」の原因として、低周波音以外に、100 Hz以上の騒音、思い違い、耳鳴り等の苦情者自身の問題なども含まれる

風力発電施設から発生する音について

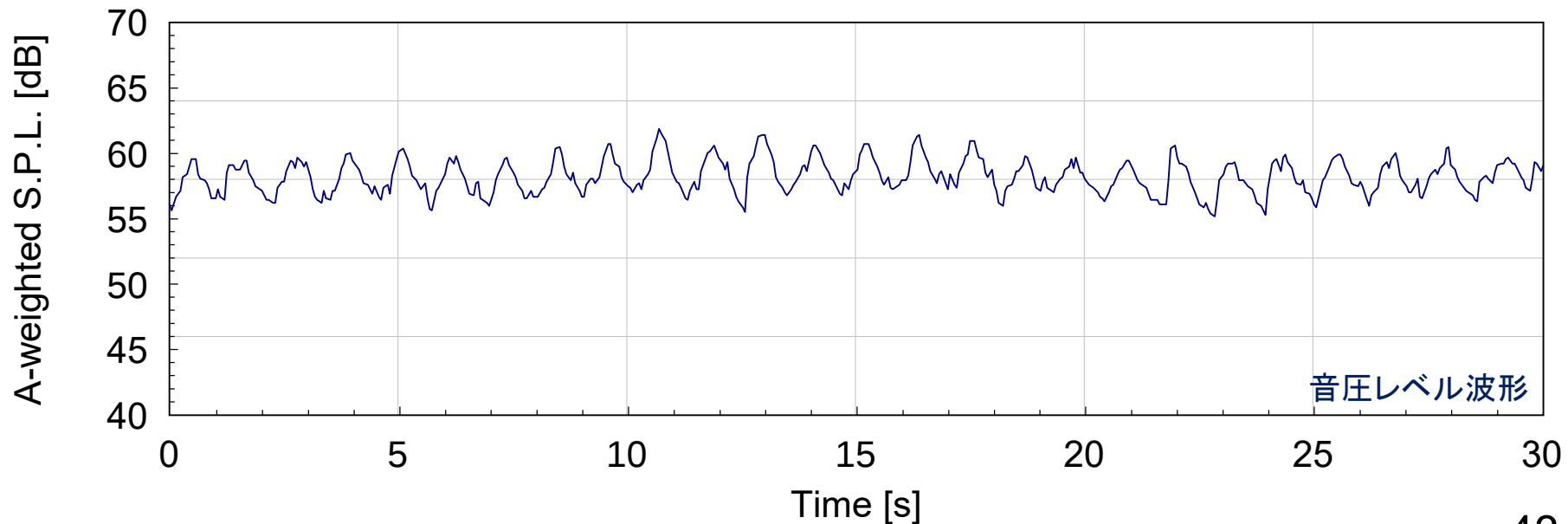
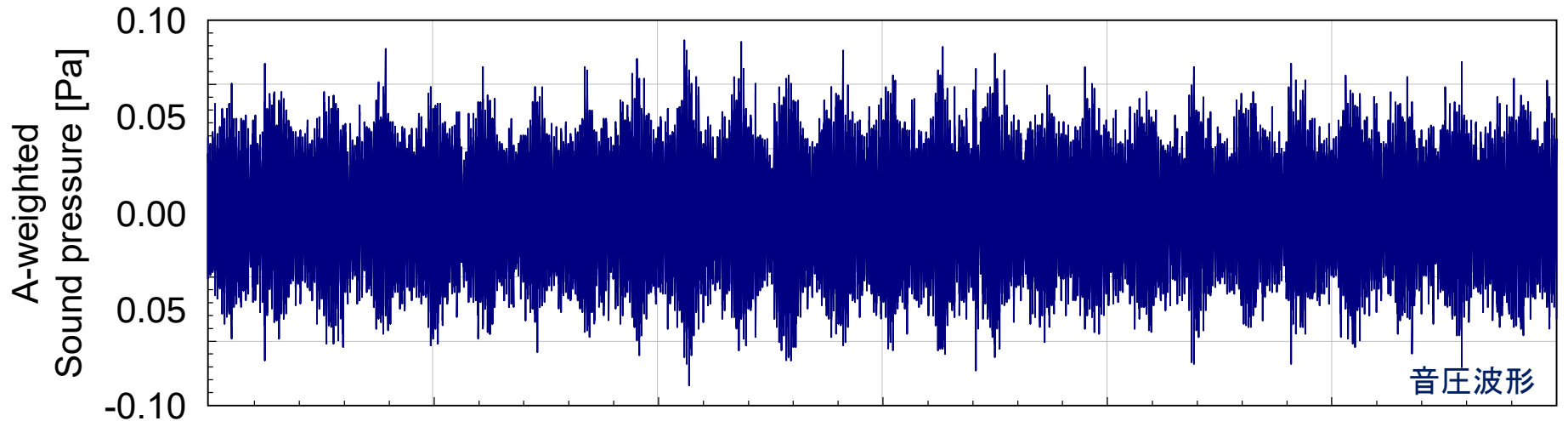
風車音の発生源と特性

民家側で観測される騒音・低周波音



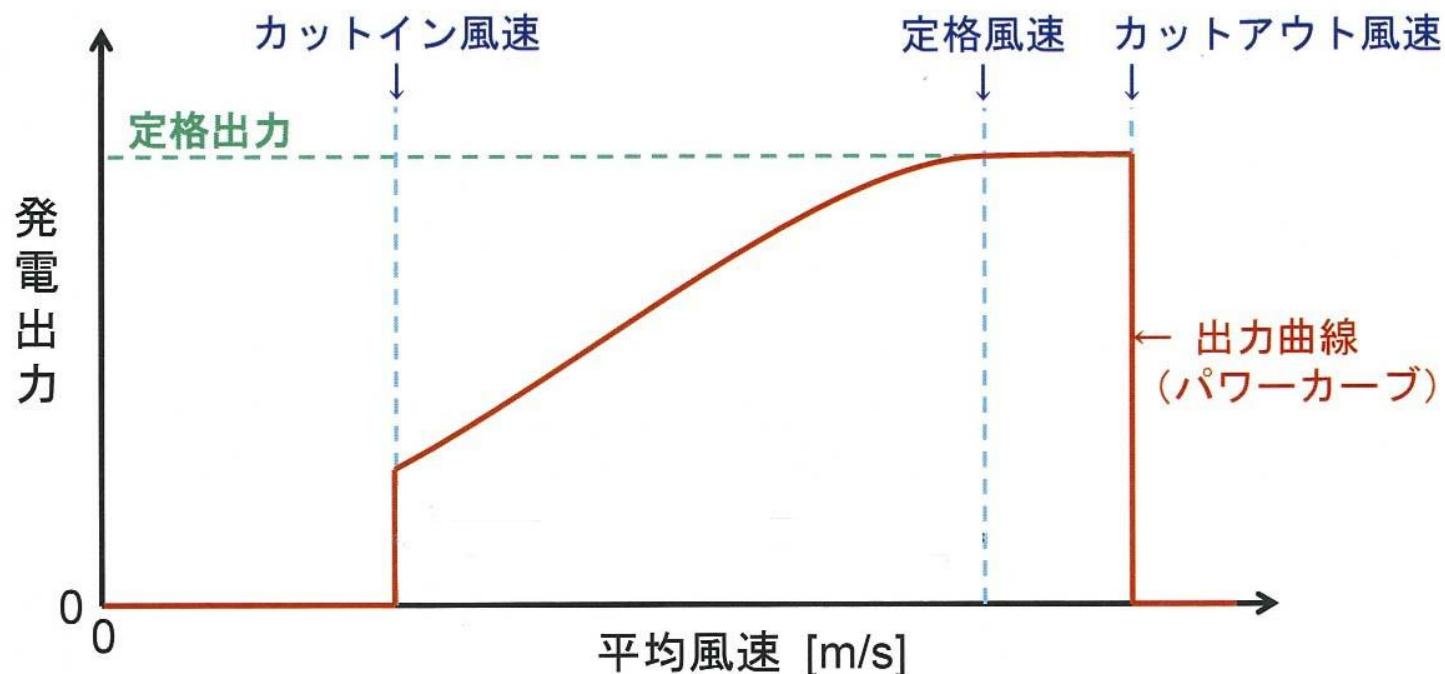
風車の稼働に伴って発生する騒音

振幅変調音 (AM音, スウィッシュ音) の例



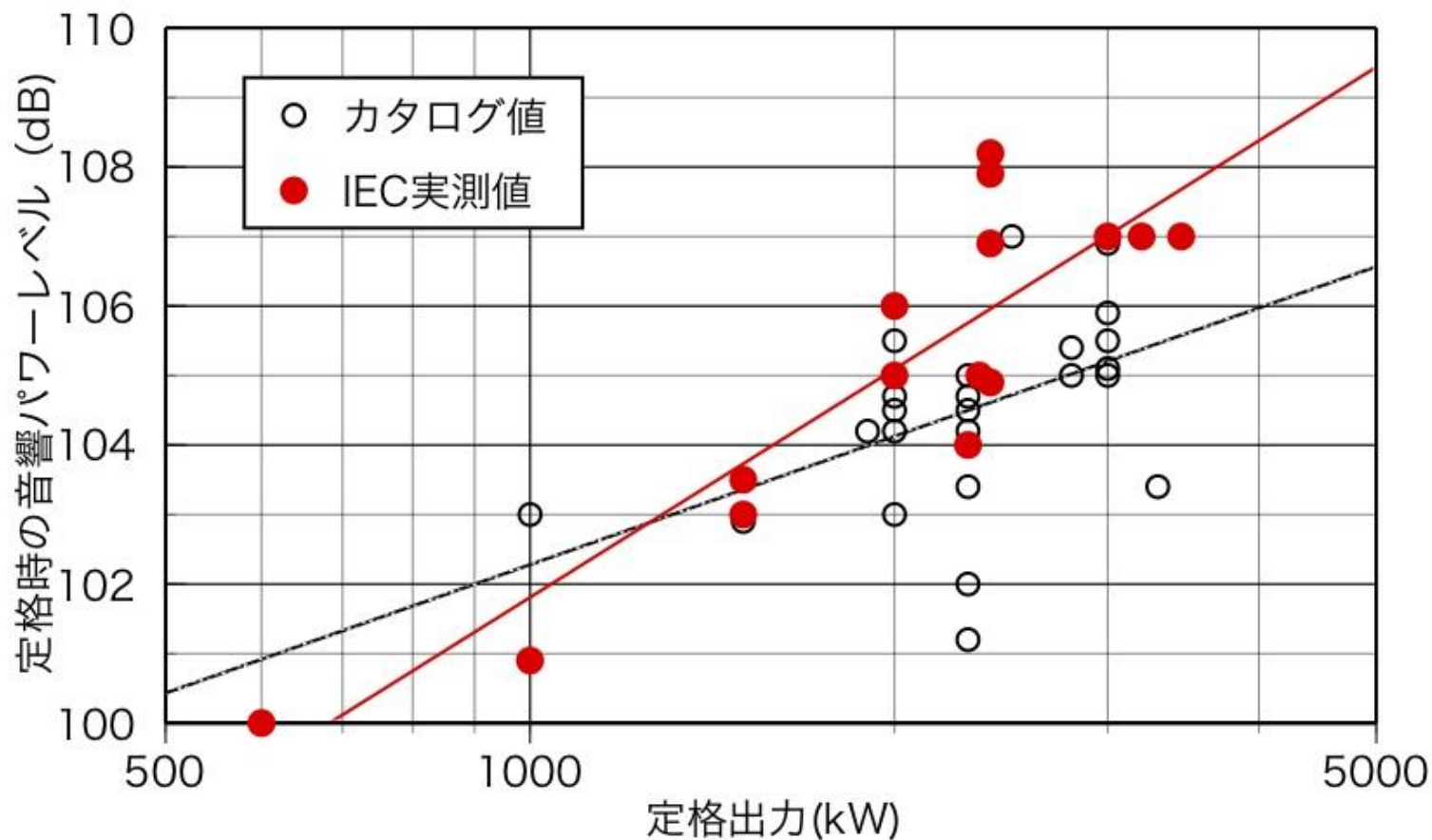
風速と風力発電出力の関係

- ・ カットイン風速； 発電を開始する風速（ハブ高さ）
- ・ カットアウト風速； 発電を停止する風速（ハブ高さ）
- ・ 定格風速； 定格出力に達するときの風速



風車の定格出力とパワーレベル

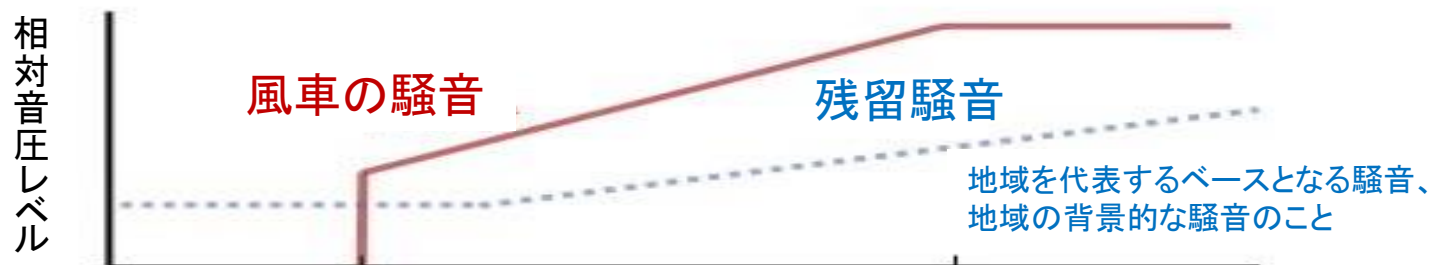
ーカタログ値と実測値の比較ー



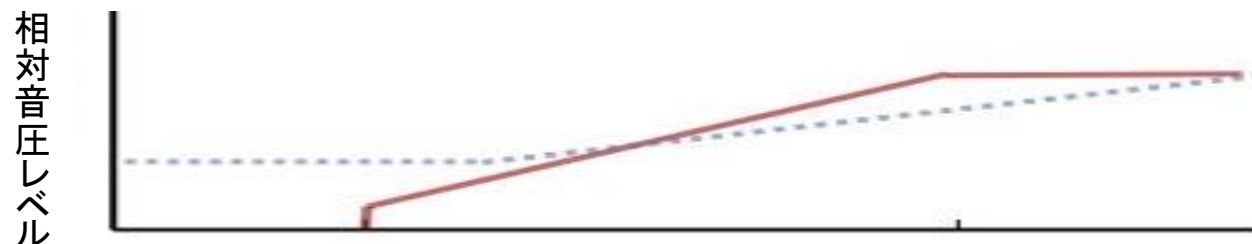
⇒実測値によると、出力が2倍になるとパワーレベルは約 3 dB増加する

風速による騒音変化の例；距離による違い

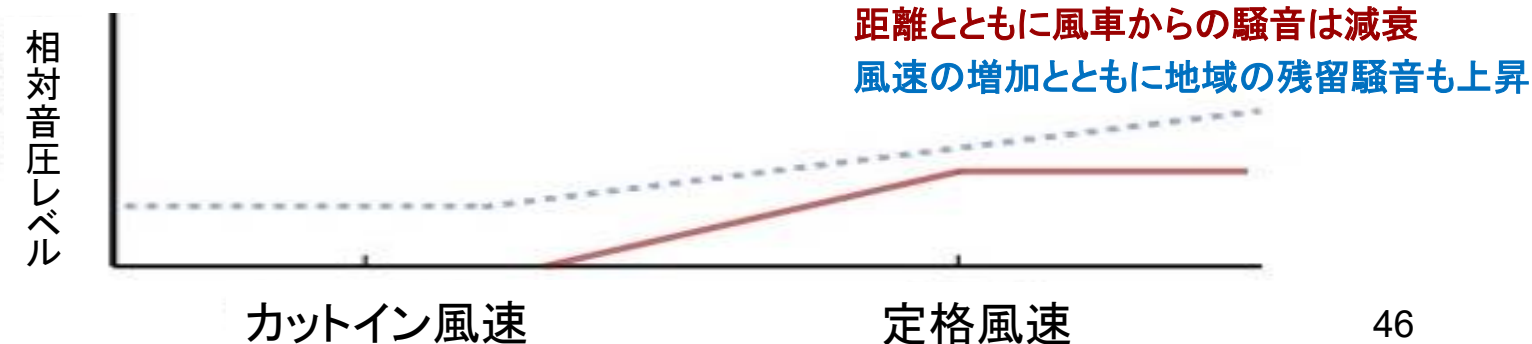
風車近傍地域 ⇒ 風車の騒音が支配的



風車中間地域 ⇒ 風車の騒音と残留騒音が足し合わさったものになる

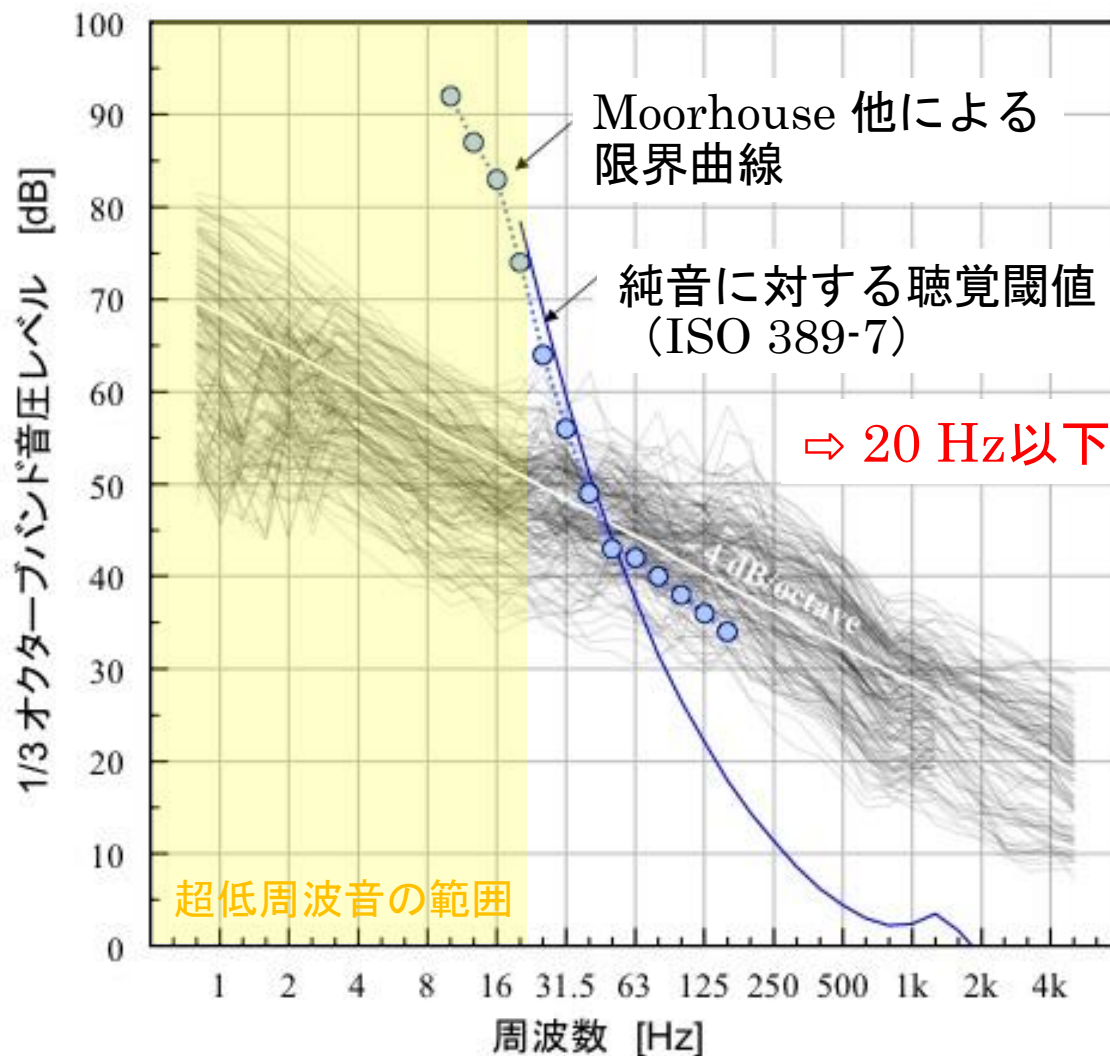


風車遠方地域 ⇒ 残留騒音が支配的



風車音の周波数特性の測定例(屋外)

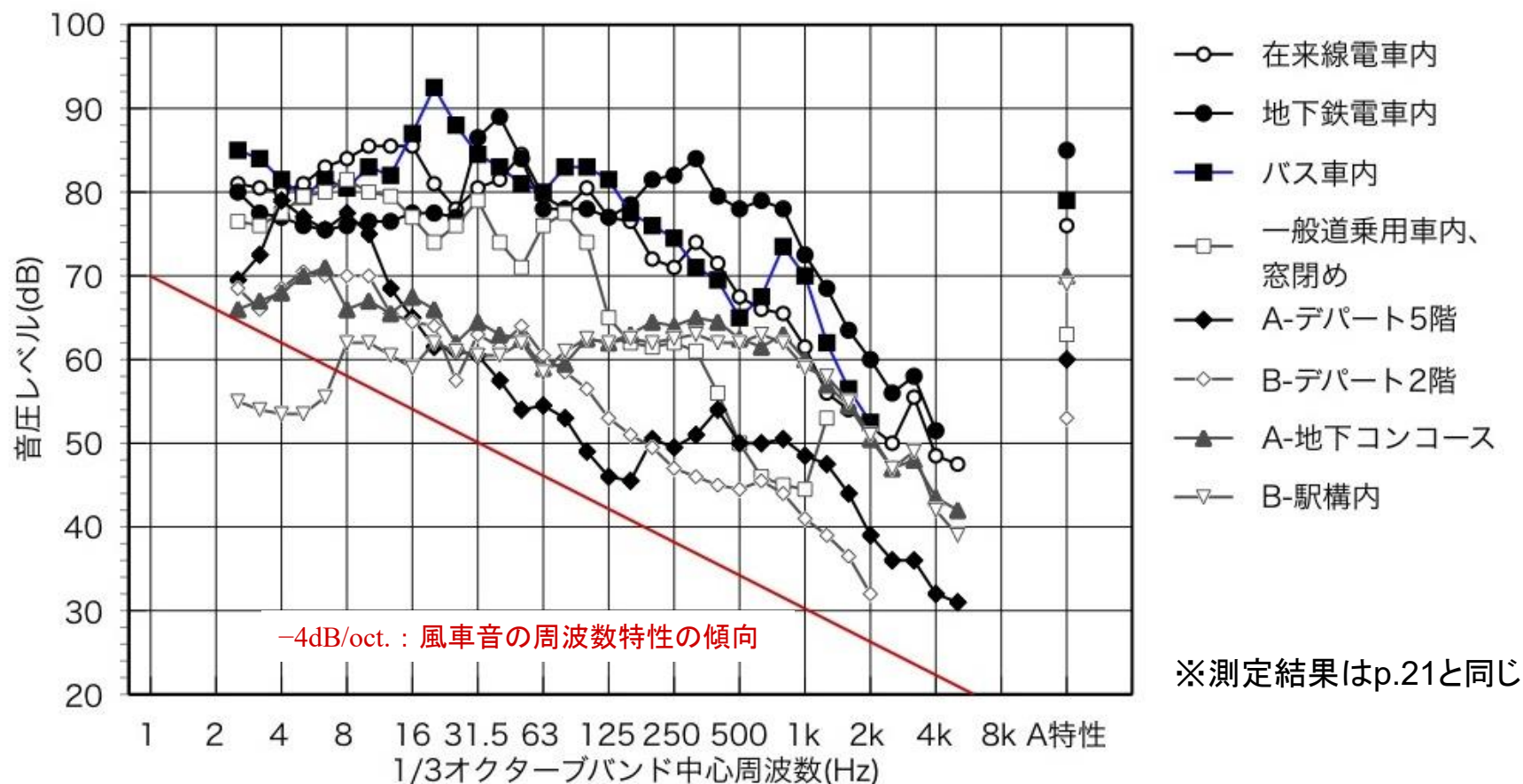
29風力発電施設周辺合計164地点における夜間(22時～6時)の測定結果



⇒ 20 Hz以下は閾値より15 dB以上も低い

[出典] H. Tachibana *et. al.*,
Nationwide field measurements
of wind turbine noise in Japan.
Noise Control Eng. J. 2014:62
(2):99-101.

一般住空間における騒音・低周波音の例



⇒一般住空間で観測された音は風車音よりも遥かに大きい

風車音の発生源と特性のまとめ

- 風車から発生する騒音は、
 - ①羽根(翼)の回転による空力音と
 - ②増速機、発電機等による機械音が支配的である
- 風車音は振幅変調音が特徴的である
- 風車音のうち、20 Hz以下の超低周波音は音圧レベルが低く、感覚閾値を大きく下回る
- 風車音の大きさは、風車の出力が2倍になるとおよそ3 dB増加する
- 風速増加に伴い、残留騒音の音圧レベルも増加する
- 風車からの距離が離れると風車音は低減するので、残留騒音の寄与が増加する

風車音による人への健康影響

風車音の健康影響に関する知見の収集

環境省の戦略指定研究(H22～H24)

- 専門家による医学会誌等に掲載された多くの査読論文の総説論文
- カナダ健康省による大規模調査結果報告
- オーストラリア国立健康医療研究委員会による報告書
- その他各国政府機関による報告書
- 医学、工学、音響学などによる研究査読論文

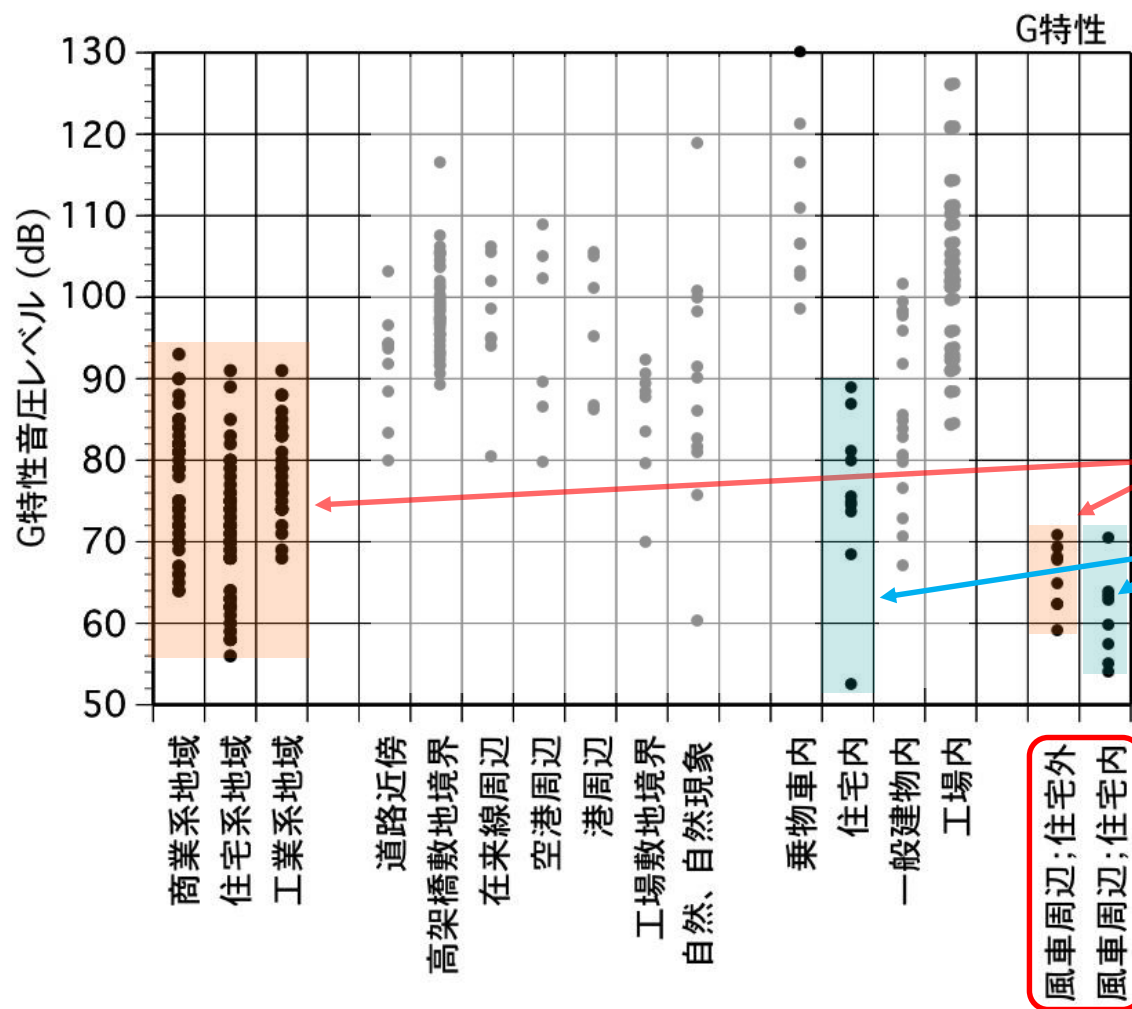
※その後も新たな知見の収集は継続して行われている

風車音の健康影響に関する研究結果概要

- 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、聴力障害等の健康影響を及ぼす可能性は低い
- 聴力影響、頭痛、耳鳴り、糖尿病、高血圧、循環器等の健康影響については、統計的に有意な根拠は認められていない
- 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

風車音の苦情事例

苦情発生地域で観測された風車音に含まれるの超低周波音の音圧レベル 一般住環境で観測された超低周波音との比較



風車音の苦情発生地域で観測された超低周波音の音圧レベルは屋外・屋内とも、一般住環境と同等もしくは低い

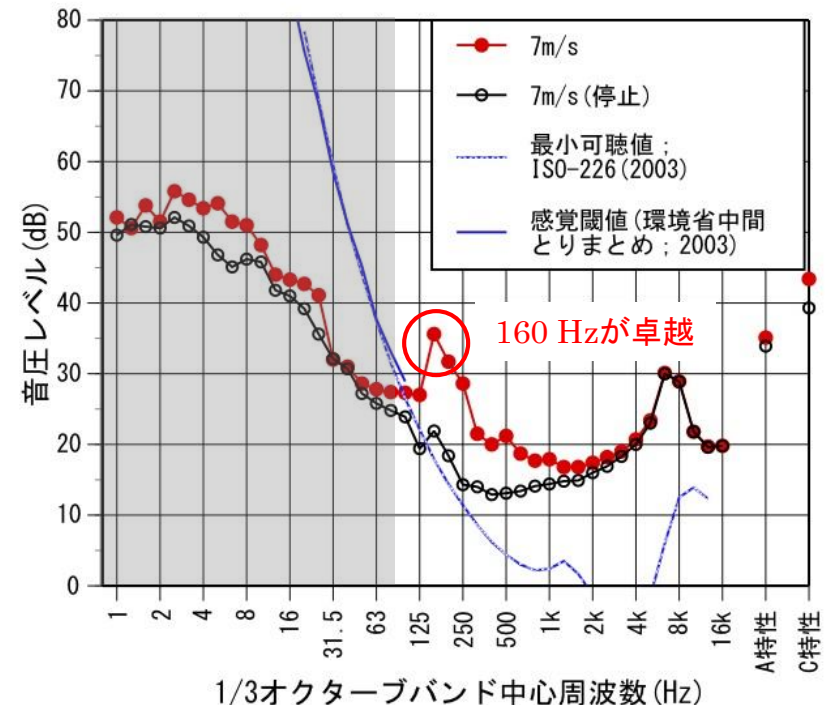
—我が国における苦情発生地域での測定事例—

家屋内で観測された風車音の周波数特性

風車より240 m、木造家屋-屋内

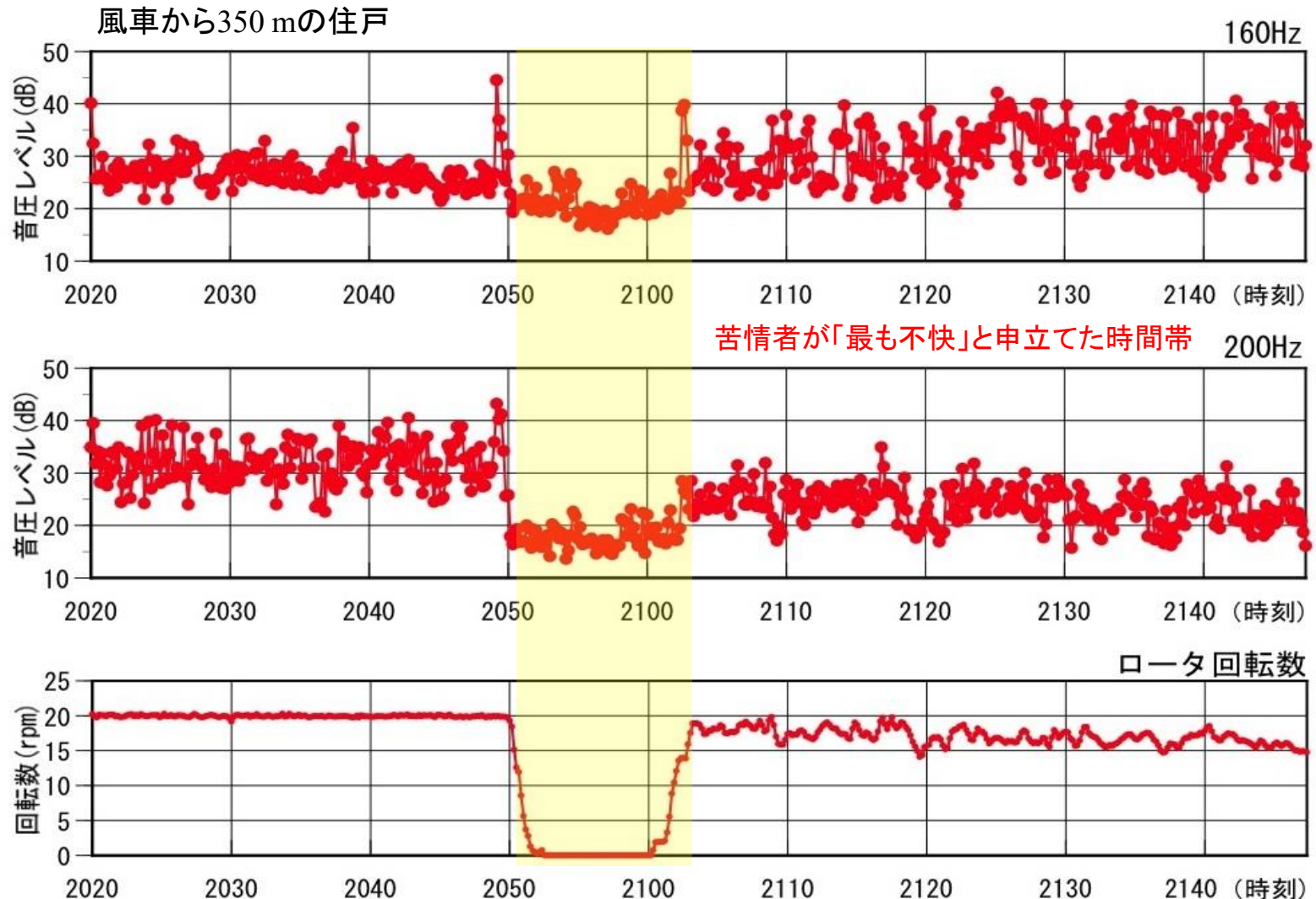


風車より350 m、木造家屋-屋内



- 100 Hz未満では閾値以下、20 Hz以下では閾値よりはるかに低い
⇒ 問題となっている音は100 Hz以上程度の周波数の騒音の可能性を示唆

家屋内で観測された風車音のレベル変動



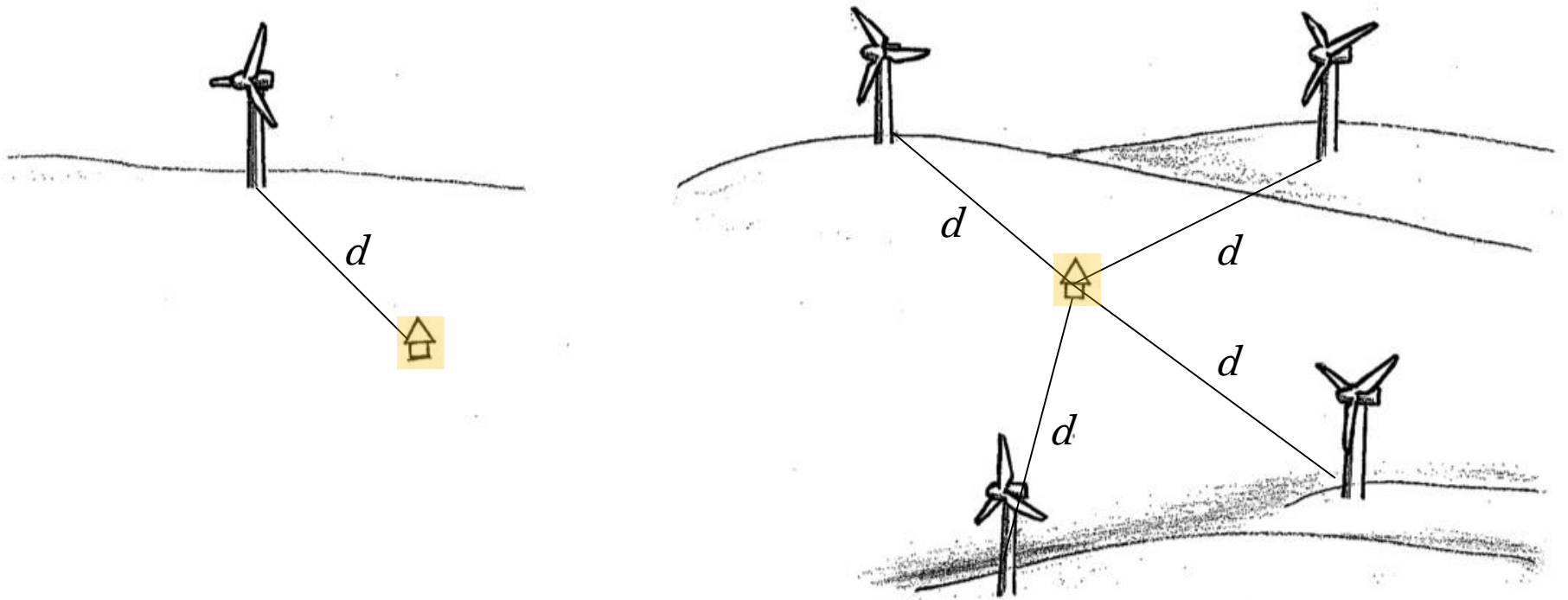
風車音による苦情のまとめ

- 風車音の苦情は、主に、羽根から発生するスィッシュ音と発電機・増速機から発生する機械音である
- 苦情が発生している風車からの騒音は、200 Hz程度の特定の周波数が卓越しているものが多い
- 苦情発生地域で観測された風車音のうち、超低周波音の音圧レベルは閾値を大きく下回る
- 苦情の原因は低周波音ではなく、200 Hz程度の卓越成分(純音性成分)の可能性が考えられる

風車の設置に関する注意事項

風車の基数による違い

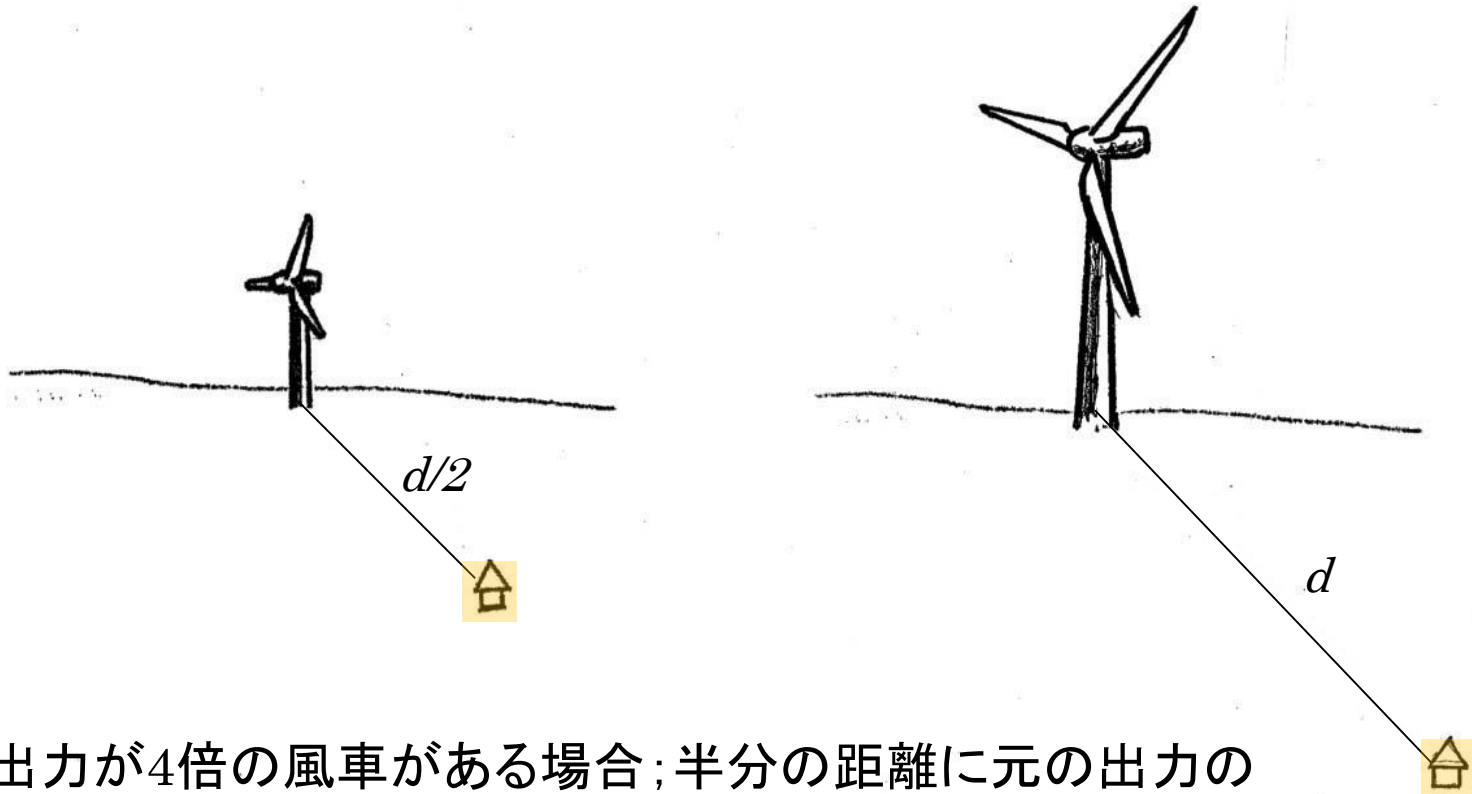
風車の基数が2倍になると、音圧レベルは 3 dB増加する



- ・ 等距離に4基の風車がある場合；
音圧レベルが6 dB増えるので、半分の距離に1基あるのと同じこと
1 kmの距離に風車が4基あれば、500 mの距離に1基あるのと同様

風車の出力による違い

風車の出力が2倍になると、音圧レベルは3 dB増加する

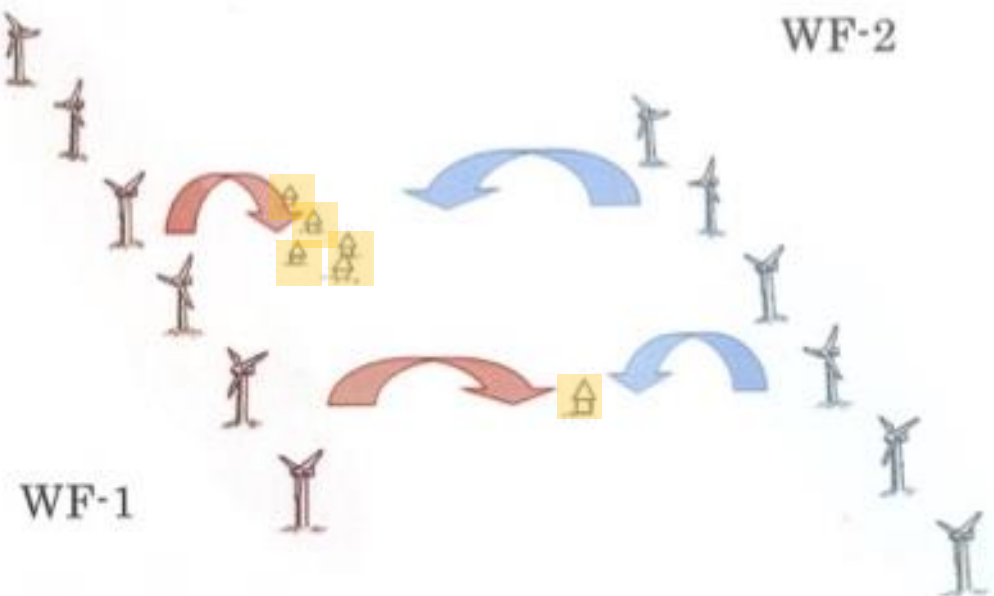
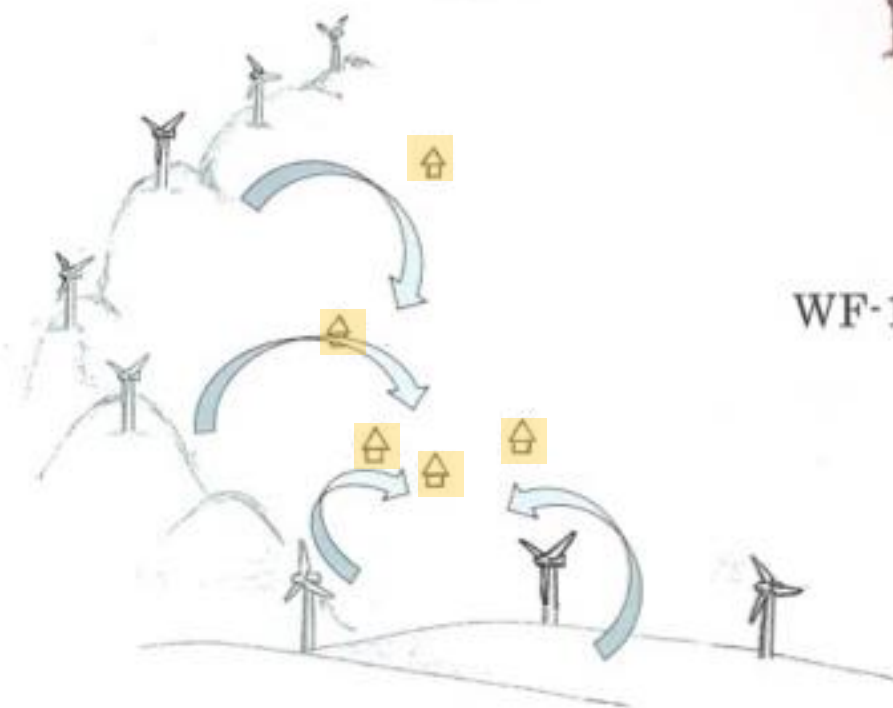


- ・ 出力が4倍の風車がある場合；半分の距離に元の出力の風車が1基あるのと同じこと（音圧レベルが6 dB増える）
1 kmの距離に4倍の出力の風車あれば、500 mの距離に元の出力の風車が1基あるのと同等になる

風車の配置による騒音への影響

複数の風車に囲まれるような配置は、極力避ける

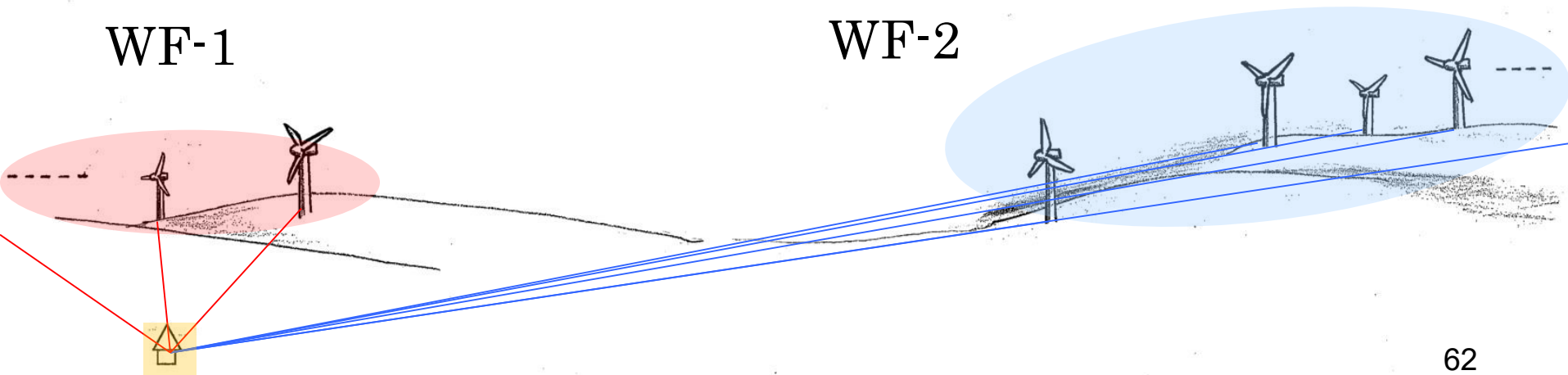
・円弧状に家屋を囲うような配置は
複数の風車からの騒音による影響
が懸念される



・家屋がWFの間にあるような場合は、
複数の風車からの騒音による影響が懸念
される

風車騒音の累積影響

- ・ 風車騒音による影響が考えられる家屋に対して、「WF-2にある全ての風車からの騒音の合計」が「WF-1にある全ての風車からの騒音の合計」よりも **10 dB以上小さければ**、基本的にはWF-2による**累積影響はない**と考えられる
- ・ ただし、季節や風向・風速、音圧レベルの変動等によっても影響は異なるので、十分な注意が必要



風車の設置に関する注意事項のまとめ

- 風車の出力または基数が2倍になると、音圧レベルは 3 dB増加する。
- 住宅の近くへの配置には特に注意を払う
十分な距離の確保、設置基数、出力に配慮する
- 並列配置や囲み配置は要注意
- 住民が気にするのは連続して変動する騒音
- 風車の機種選定にあたっては十分な配慮が必要
純音性成分の大きい機種は苦情の原因となる
- 隣接するウインドファームからの騒音が10 dB以上
小さければ、累積影響はほぼ考えなくてよい
- 既存の研究によると、風車の超低周波音による影響はないと考えられる

ご清聴ありがとうございました

END