

環境省 九州地方環境事務所 環境対策課 主催



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.ihico.jp/03-3360-3227

項目

I. 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の解説

(環境省 平成28年11月発行)

II. 風力発電施設から発生する騒音等測定マニュアルの解説

(環境省 平成29年5月発行)

III. 洋上風力発電所等に係る環境影響評価の基本的な考え方に関する検討会報告書などの概要

(環境省 平成28年3月発行など)

IV. 風車音の発生メカニズムと低減策について

(NEDO 平成20-21年度、環境省 平成23-26年度受託業務の一部紹介)

V. 風車発生音の測定方法（発生源側）について

(JIS C 1400-11:2017(IEC61400-11:2012)の一部紹介)

I. 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の解説

1. 風車の種類
2. 音の発生
3. 風車特有の騒音（振幅変調音／純音性騒音）
4. 風力発電施設の騒音問題
5. 他の環境騒音レベルとの比較
6. 風車騒音の周波数特性／風車騒音と他の環境騒音の比較
7. 水平距離と風車騒音の関係
8. 評価尺度としてのA特性音圧レベル
9. 風車騒音の人への影響
10. 風車騒音に関する諸外国の基準等
11. 評価値策定の主旨
12. 評価値、その根拠と考え方
13. 環境基準との関係
など

風車の種類



プロペラ型



セイルウイング型



ダリウス型



サボニウス型



多翼型



オランダ型



ジャイロミル型



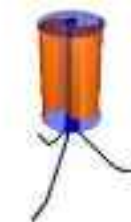
パドル型



ループウイング型



クロスフロー型



S型ロータ型

注釈. ロータ軸が水平軸か垂直軸かで大別される.

発電用風車



左から3枚翼風車（MHI）、2枚翼風車（IHI）
1枚翼風車（輸入）



翼の反対側にカウンター
ウエイトが付いている.

エッフェル塔に風車



垂直軸風車が2機設置



斜め下から見上げる



エッフェル塔
(324m)

注釈. 地上127メートルの塔2階に高さ7m、幅3mの風力発電機が2機設置された。年間発電量は1万Kwhで、1階のギフトショップの電力需要に十分対応。

出典. Web:<http://www.afpbb.com/articles/-/3041369> (2018.2.9)

典型的な発電用風車

現在の発電用風車は

- ・ 3枚翼
- ・ アップウインド型
- ・ 発電出力2MWクラスが主流

最大出力量産風車機

- ・ 発電出力 8MW
- ・ タワー高さ 140m
- ・ ロータ径 164m
- ・ 全高 222m
- ・ 受風面積 21,113 m^2
- ・ 製造：MHI VESTAS

注釈. 池袋サンシャイン60ビル
の高度は240m

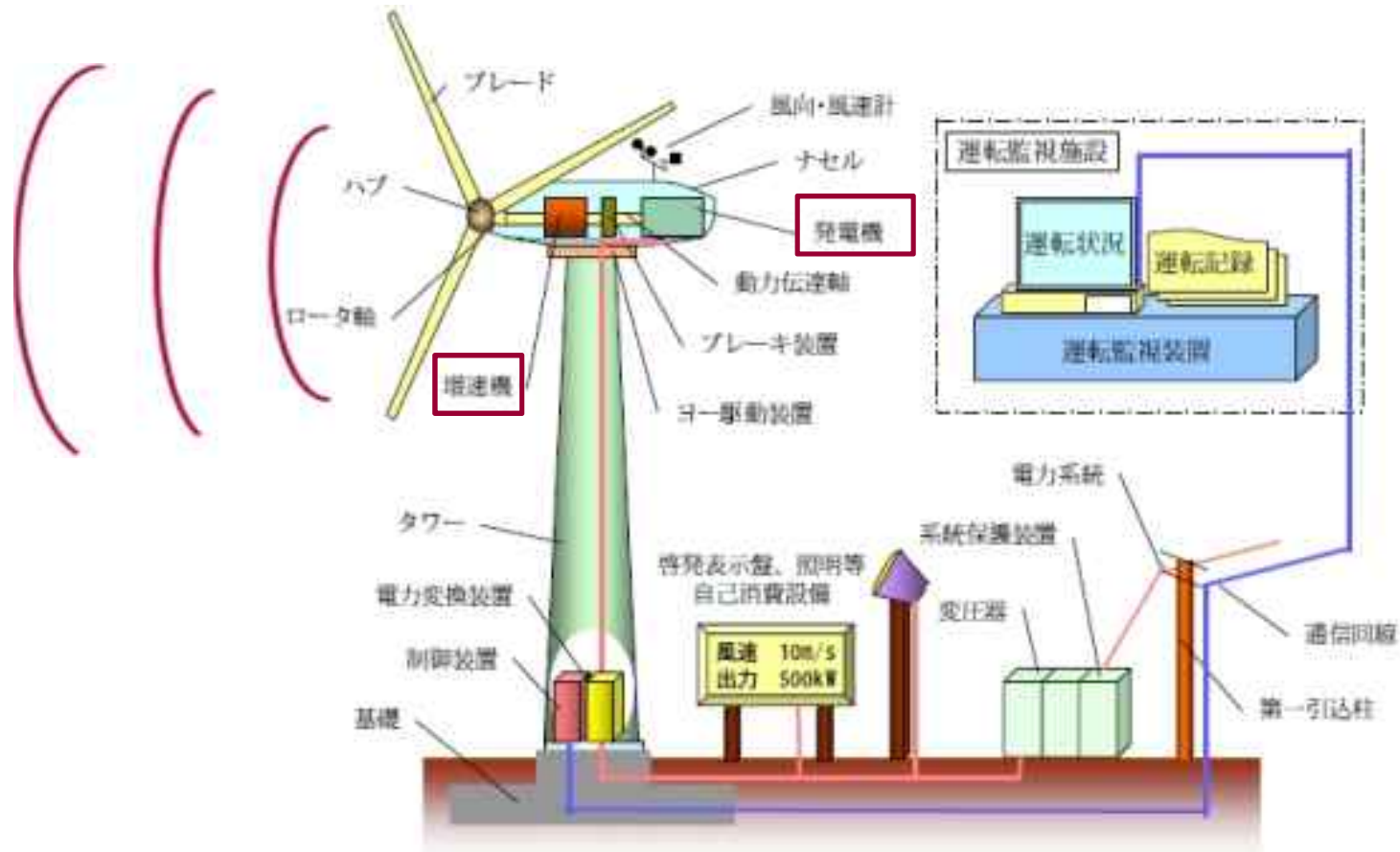


W20M05.wav



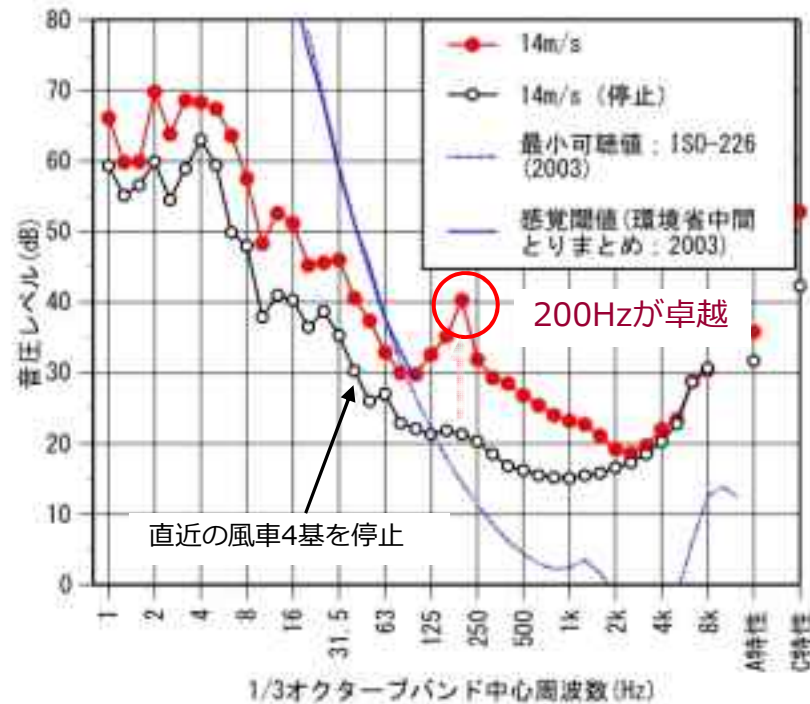
W20M05_n.wav

風力発電施設（風車）の構造と騒音

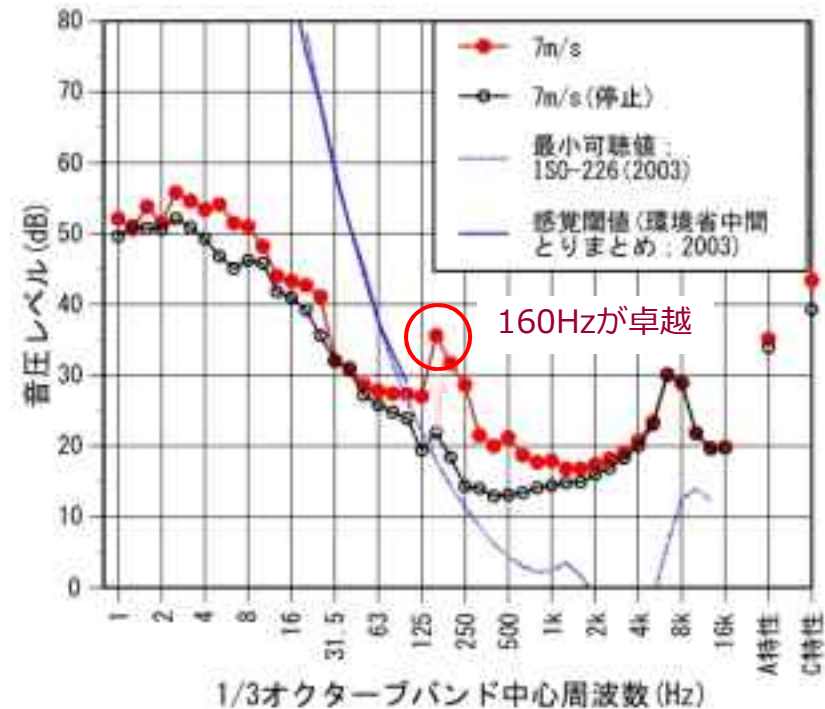


風車から発生する騒音はブレード（翼）が風を切ることによる空力音（支配的）と、増速機・発電機等に起因する機械音（換気扇等のナセル発生音と増速機等の振動伝搬に起因するタワーからの個体伝搬音、これは純音性の音で、わずらわしさにつながる）である。

純音性成分が含まれる風車騒音



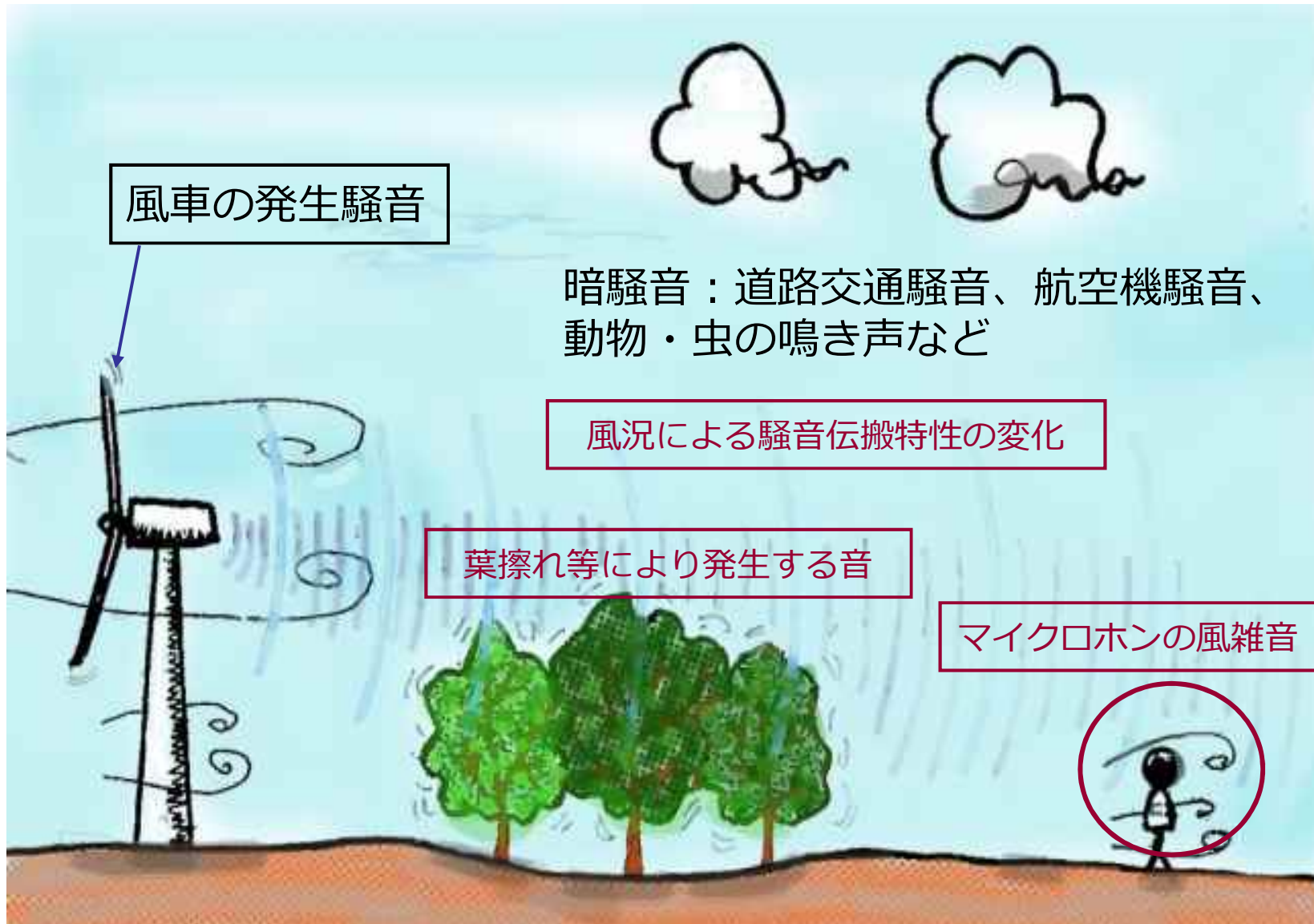
左；風車より240m、木造家屋-屋内



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。

風車騒音の特徴



風車音の発生源探査（音響カメラ）



- ・風車音（発生源側）の測定は、風雑音を低減するため地表面（反射板上）にマイクロホンを設置、ウインドスクリーンを用いる（JISc1400-11/IEC61400-11）。
- ・見かけの音響パワーレベルは基準点（タワー風下側、風車の最頂部の高さの距離）で計測、求める。

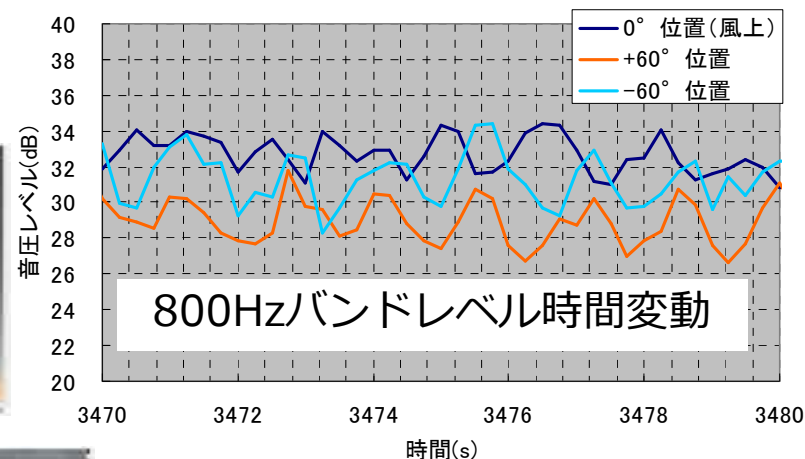
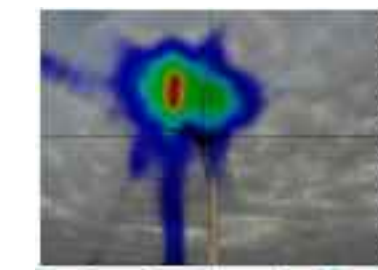
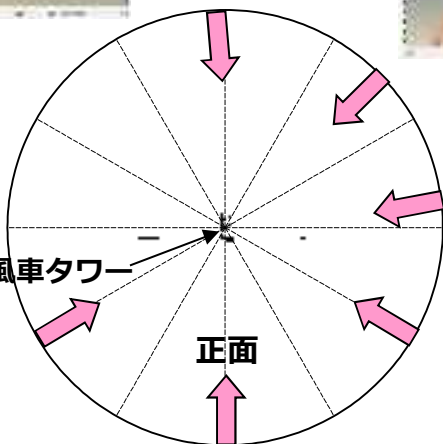
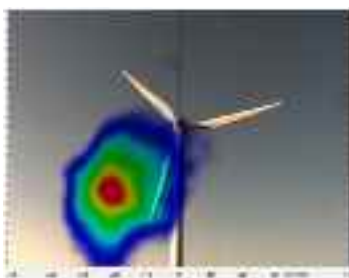
- ・音響カメラは音響ビームフォーミング法という手法を用いている。
- ・これは騒音発生源から十分に離れた位置から音の発生源を可視化するものである。
- ・多数のマイクロホン（カメラは48個）を用いて鋭い指向性（方向性）を持たせることにより、どの方向のどの部位からどのくらいの大きさの音が発生しているかを可視化することができる。

- ・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

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）

空力音の放射部位と指向性

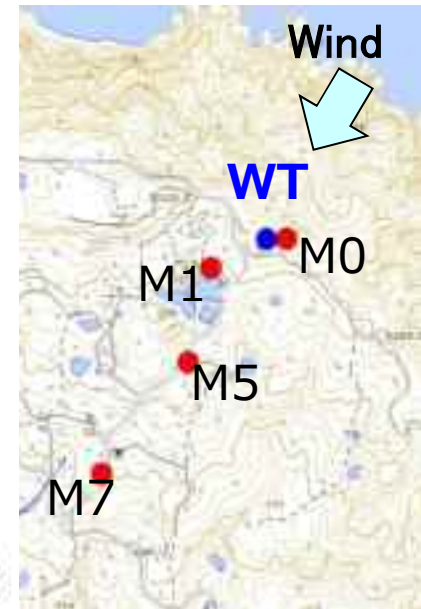
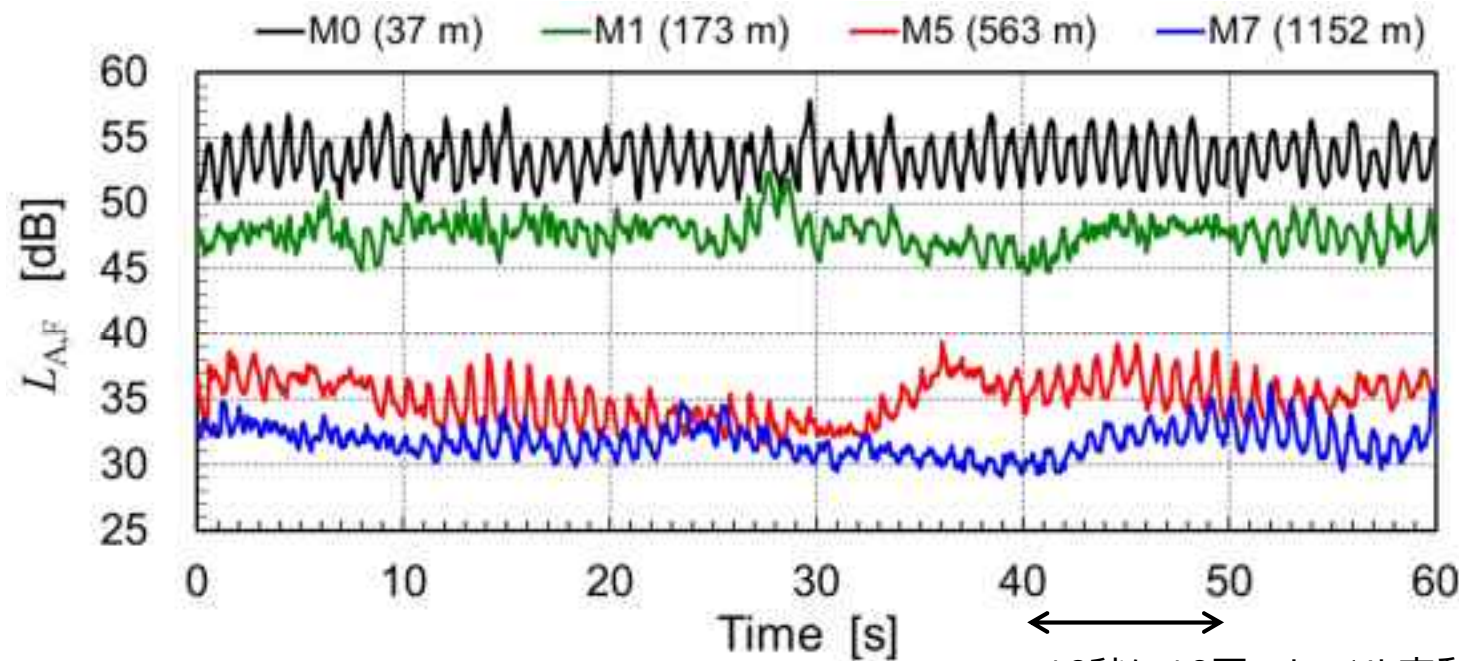


空力音指向性のため、観察角度（位置）によりレベル、発生部位に違いが見られる。

翼通過による騒音（数百～数kHzの可聴音）の時間的変動（swish音）。変動周期は約1秒（20rpm、3枚翼）

注釈1. 翼が近づいてくる時に大きく聞こえる（指向性とドップラー効果）。
注釈2. 翼先端部20%くらいが主な発生源になっている。

振幅変調音（騒音レベル $L_{A,F}$ （A特性、Fast）の測定例）

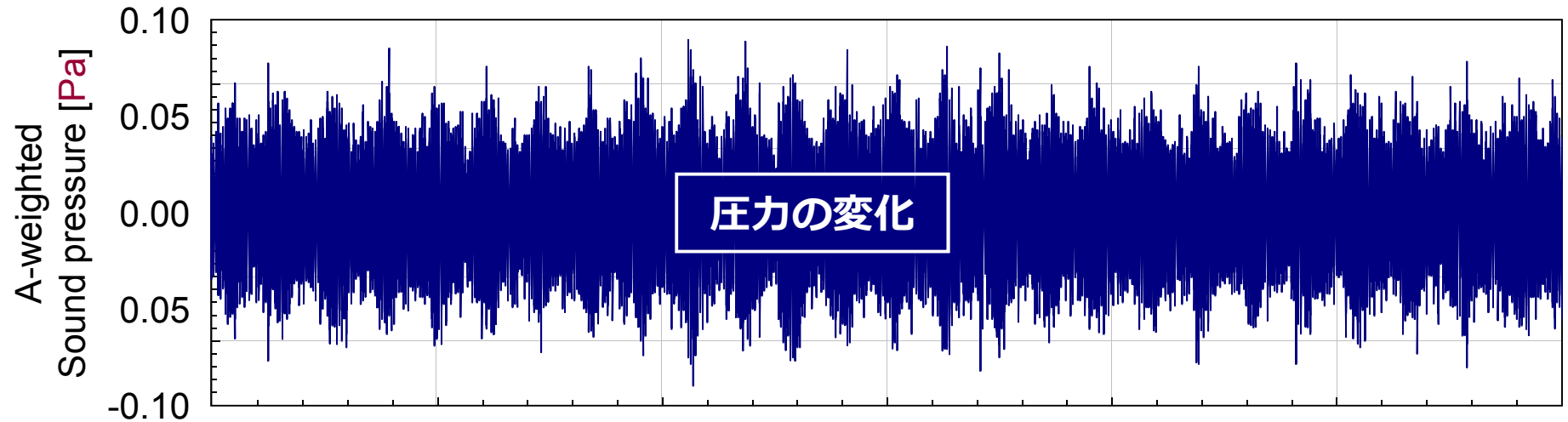


* 10秒に10回のレベル変動が現れている。

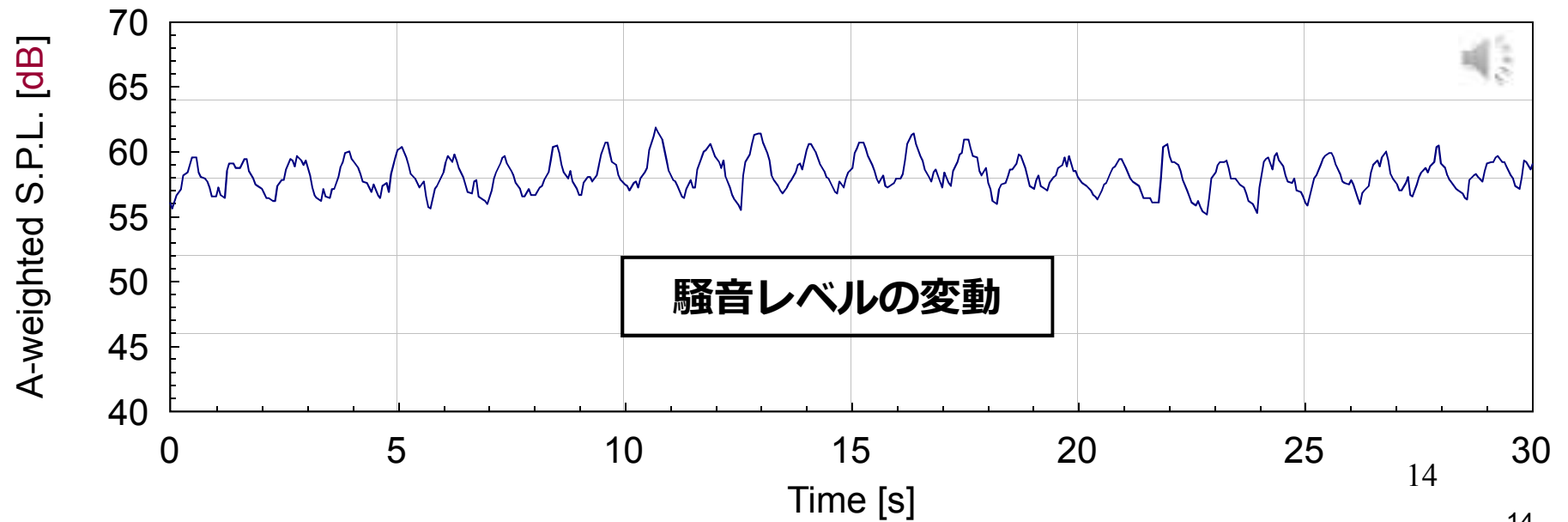
定格出力：1,950 kW, 単基

注釈. 風車の回転数（推定20RPM）×翼枚数（3枚）の周期（約1Hz）でレベル変動が現れている。
風車から距離が離れると伝搬の影響と推定されるゆっくりとしたレベルの変化が見られる。

振幅変調音 (AM変調音、swish音ともいう)



注釈. swish音は騒音の規則的なレベル変動である.



風力発電導入の課題

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**
- 風況が良く風力発電に適した地点は、渡り鳥のルートや希少な鳥類の生息地と重なることがあり、鳥類が風力発電設備の翼（ブレード）に衝突する事故（いわゆる「バードストライク」）事例あり
- 自然度の高い地域に立地することで、土地の改変に伴う動植物の生息・生育環境や水環境に対する影響が懸念される
- 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

出典. 「風力発電施設に係る環境影響評価の基本的考え方に関する検討会報告書」平成23年6月環境省総合政策局

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.

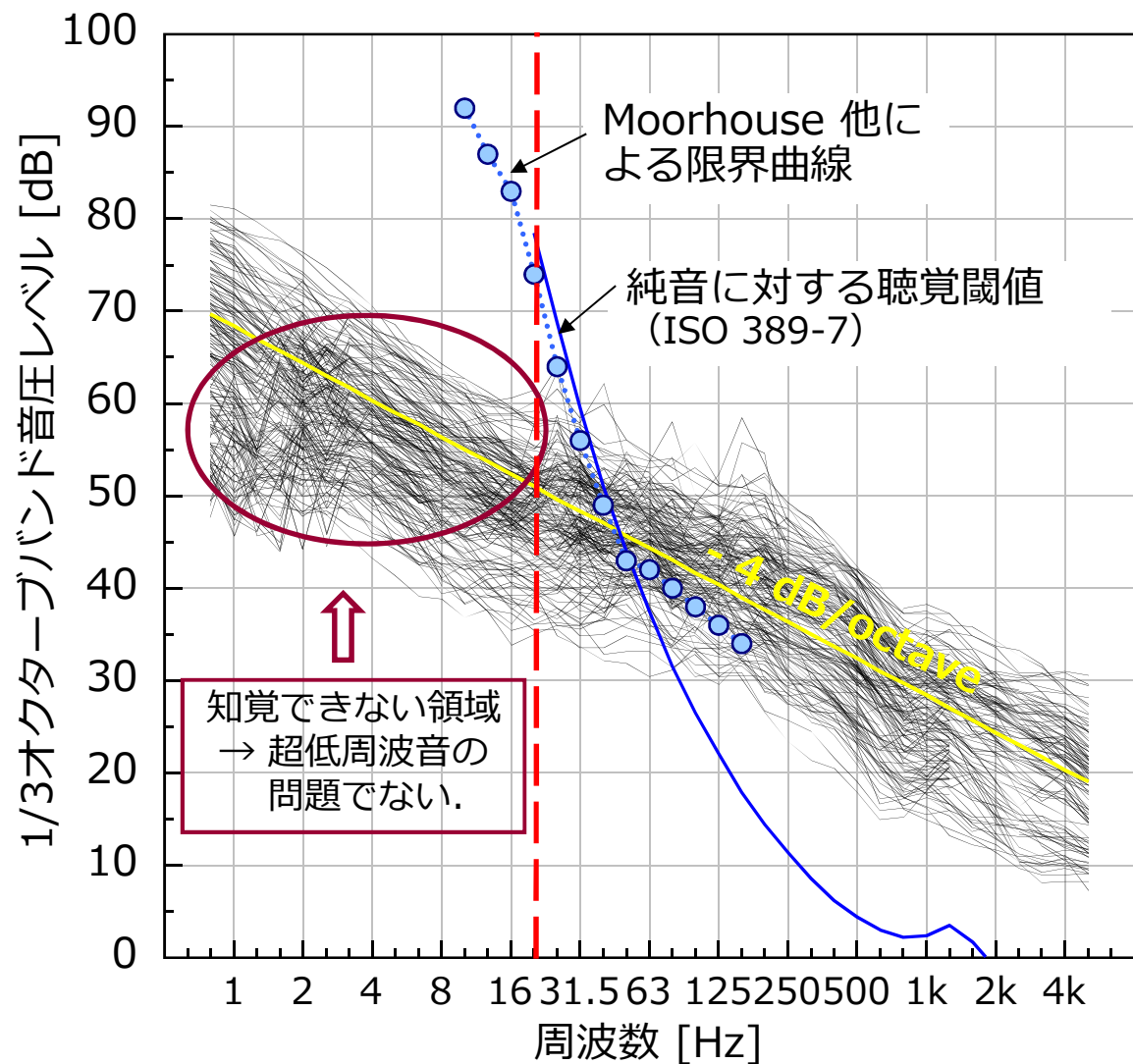
他の環境騒音のレベルとの比較



騒音の目安

出典 全国環境研協議会 騒音小委員会

風車騒音の周波数特性



29風力発電施設周辺 合計
164地点における測定結果

出典.

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

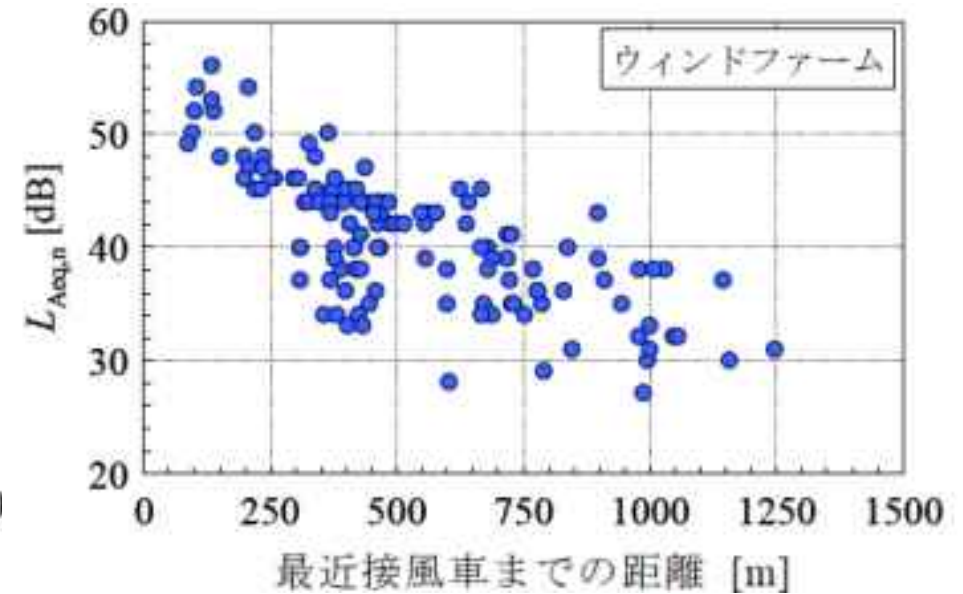
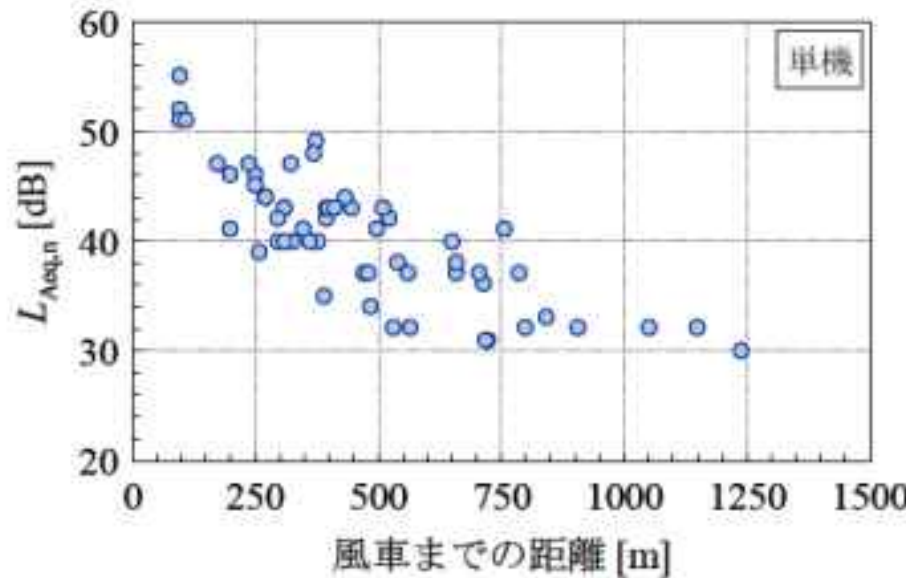
出典.

A procedure for the assessment of low frequency noise complaints
Andy T. Moorhouse, David C. Waddington, b and Mags D. Adams
Acoustics Research Centre, University of Salford, Salford M5 4WT, United Kingdom
J. Acoust. Soc. Am., Vol. 126, No. 3, September 2009

注釈1. 限界曲線は苦情発生の可能性を評価する指標、超低周波音の感覚閾値に近い値.

風車の運転音は、超低周波音ではなく、可聴周波数範囲の騒音.

測定点までの水平距離と風車騒音の関係

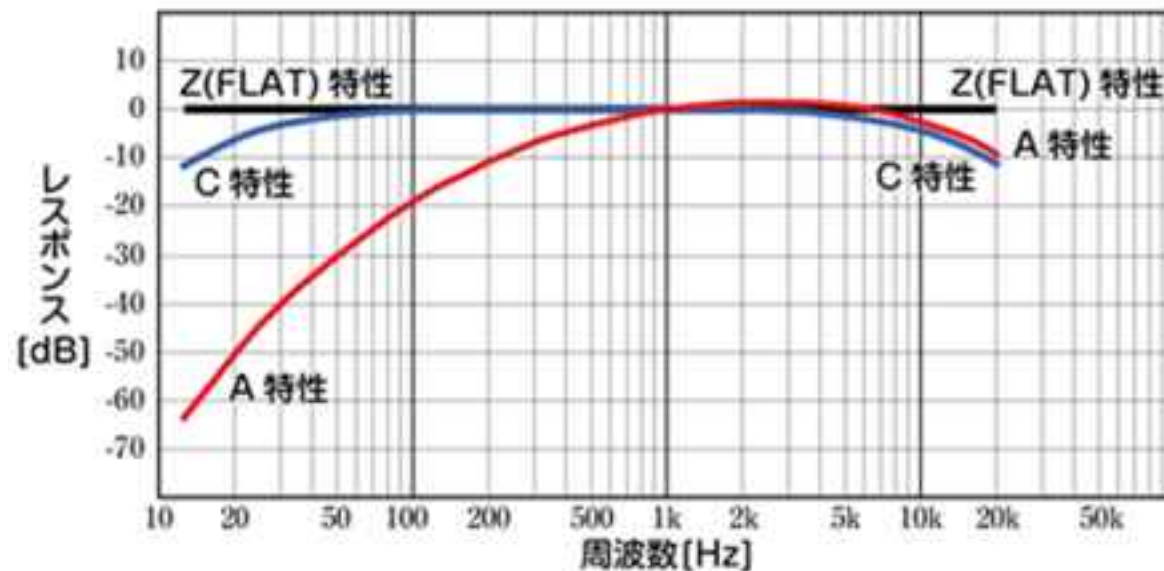


- ・ 風車騒音の距離による減衰は、**水平距離が遠くなるほどレベルが低下**。
- ・ 風車の機種、地形・植生、気象条件などによって、発生する音やその伝搬が異なることから、**距離と等価騒音レベルとの関係にはばらつきが生じる**。

周波数重み付け特性

騒音計に用いられている周波数補正特性のこと。騒音では人の音の大きさの感覚に基づいた**A特性**が用いられる。

- 図のようにA特性の他、C特性、Z(FLAT)特性がある。
- A特性：人は低い周波数の音は良く聞こえないため、周波数の重み付けをしている。A特性は、旧等ラウドネス曲線の40 phonに近似している（新等ラウドネス曲線の60phon）。
- C特性やZ特性は、比較的平坦で、物理的な測定に用い、詳細な解析を行う場合にしばしば用いられる。



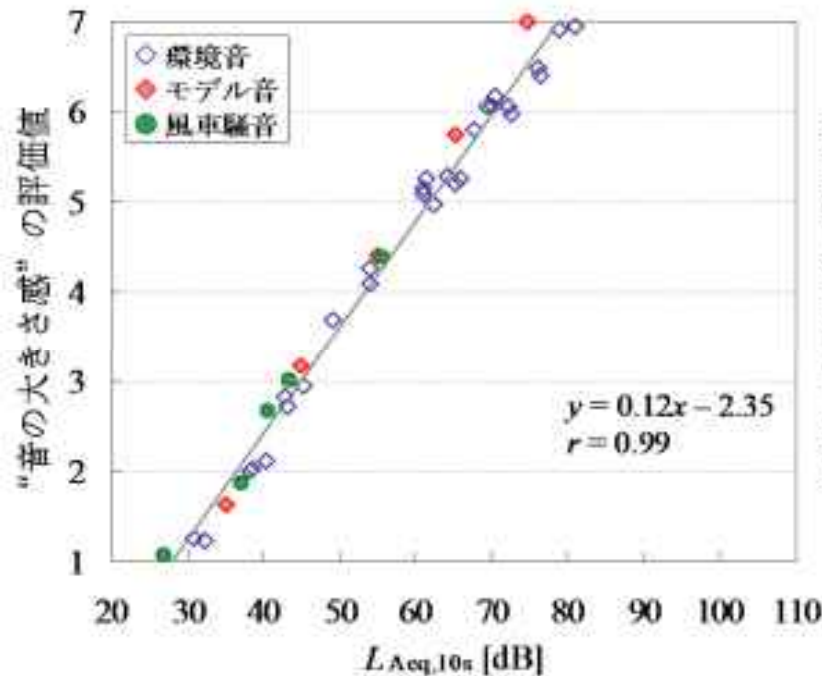
周波数重み付け特性

注釈1. 指示の応答速度を決める動特性のうち速い動特性（FAST、時間重み特性Fともいう。125msec）は短い継続時間の音に対する感覚特性から決められている。→ 環境騒音など。

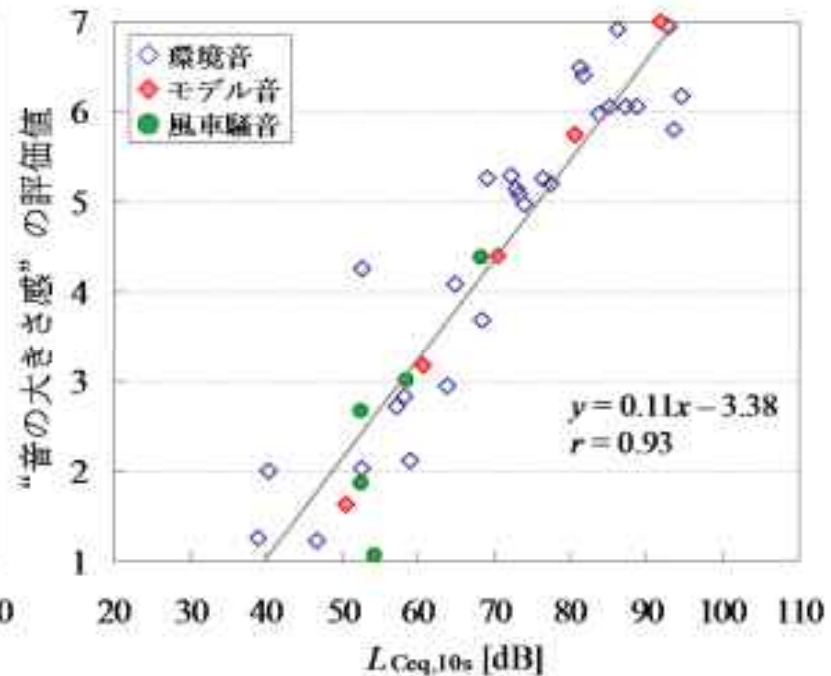
注釈2. 遅い動特性（SLOW、時間重み特性Sともいう。1s）は、変動する騒音の場合にメータの指針の読みを容易にするために考えられたものである。→ 新幹線騒音など。

評価尺度としてのA特性音圧レベル

超低周波数領域の成分を含んだ各種の環境騒音を試験音としてラウドネス（人が感じる主観的な大きさ）実験を実施。



(a) A特性音圧レベルとの対応



(b) C特性音圧レベルとの対応

風車騒音の評価は、一般環境騒音と同様にA特性音圧レベル（騒音レベル）を用いるのが適切（A特性と音の大きさ感の相関が良い）。

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**。

風車騒音に関する諸外国の基準等

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

評価指針策定の趣旨

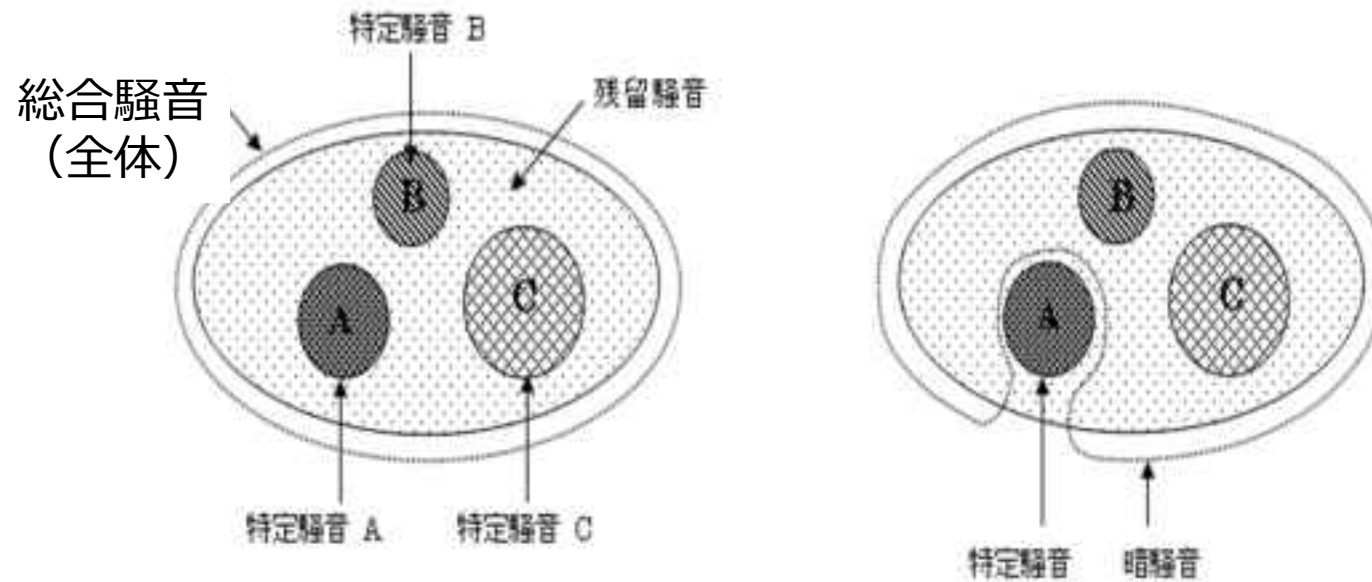
- 風力発電施設から発生する騒音による**生活環境への影響を未然に防止するためのもの。**
- 風力発電施設の設置事業者及び運用事業者等による具体的な対策実施等に活用していただくとともに、地方公共団体による関係する事業者や住民等への対応の際の参考とするもの。

<対象施設>

- 新設又は新設を伴う変更
- 主に商業用に用いられる一定規模以上の風力発電施設

暗騒音と残留騒音

- 一般の騒音評価においては、評価すべき音以外の全ての騒音である「**暗騒音**」を基に比較等を行う。
- 風車音においては、静穏な地域に設置されることが多く、まれに通過する自動車等の一過性の騒音により、暗騒音のレベルが大きく変化することから、評価にあたっては、これらの一過性の特定できる騒音全てを除いた「**残留騒音**」を基に評価を行う。



残留騒音 (特定騒音を全て除いた残り)

暗騒音 (対象騒音A以外の全て)

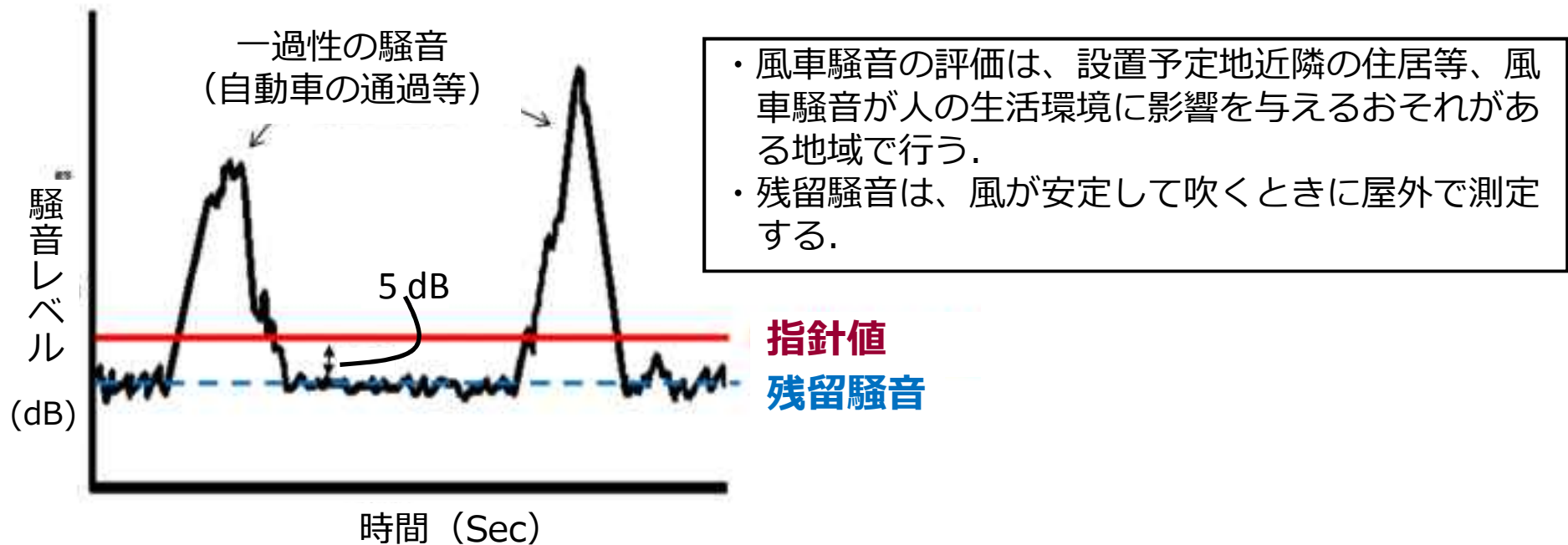
評価値の根拠

- 日常の平均的な騒音レベルよりも平均して4～5 dB騒音レベルが高くなると人はわずらわしさ（アノイアンス）を訴えるとする知見.
- 諸外国の風車騒音の評価において複数の国で+5 dBが用いられていること.
- 検討会では、技術的、専門的な観点からの知見に基づく考え方をとりまとめ、風力発電施設の設置等に当たり、騒音問題を未然に防止するために対策を講じ、生活環境保全をする上での参考となるように設定したものの。

評価の目安となる値：残留騒音 + 5 dB

指針値の考え方

- ・ 屋内の生活環境保全を考慮し、屋外で昼夜毎に評価。
- ・ 「**残留騒音**」（一過性の特定できる騒音を除いた騒音）からの増加量が **5 dB** に収まるように設定（日常の平均的な騒音レベルよりも4~5dB、騒音レベルが大きくなると、わずらわしさを訴えるという知見等による）。

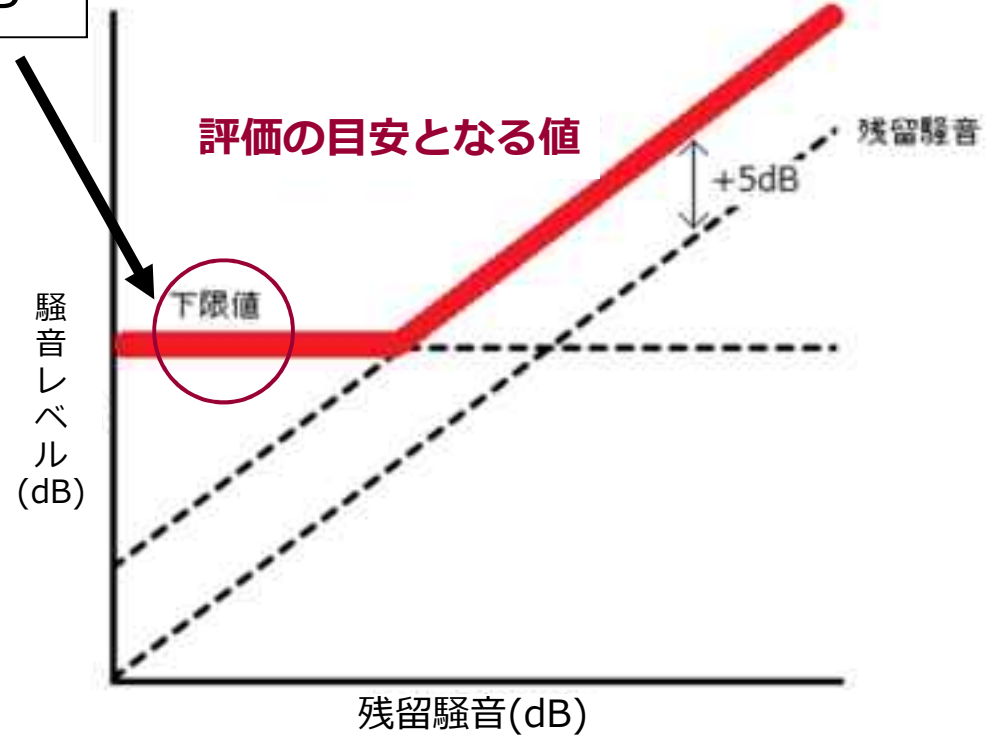


注釈. 風車が設置される地域は静かな環境のところが多いことから、静けさに応じて指針値を定めている。

評価の目安となる値

35 dBまたは40 dB

		「評価の目安となる値」		
		残留騒音		
		~29 dB	30~35dB	36dB~
保存すべき音環境	あり	35dB	残留騒音 + 5dB	残留騒音 + 5dB
	なし	35dB	40dB	残留騒音 + 5dB



注釈1. 下限値の設定

- ・ 残留騒音が30dBを下回る場合、学校・病院等があり特に静穏を要する 場合、地域において保存すべき音環境がある場合（環境省の「残したい日本の音風景100選」など特に静穏を要する地域）は、**35dBを下限値**として設定.
- ・ それ以外の地域においては**40dBを下限値**として設定.

注釈2. 指針値の考え方

- ・ 日常の平均的な騒音レベルよりも平均して4~5 dB騒音レベルが高くなると人はわずらわしさ（アノイアンス）を訴えるとする知見.
- ・ 諸外国の風車騒音の評価において複数の国で+5 dBが用いられていること.
- ・ 風力発電施設の設置等に当たり、騒音問題を未然に防止するために対策を講じ、生活環境保全をする上での参考となるように設定.

環境基準との関係 i

【評価の目安となる値】

風車騒音は他の環境騒音と比べ特徴的な音であることを勘案し、風力発電施設の設置等に当たり、風力発電施設から発生する騒音による生活環境への影響を**未然に防止**するためのもの。

【騒音に係る環境基準値】

行政の政策上の目標として一般的な騒音を対象とし、生活環境を保全し、人の健康を保護する上で**維持されることが望ましい**もの。

両者では性格や位置づけが異なる。

環境基準との関係 ii

騒音に係る環境基準の類型指定がなされており、風力発電施設が設置されている地域においては、

一般的な騒音に対しては引き続き当該環境基準に基づき生活環境を保全し、人の健康を保護するための施策を講じるとともに、

風力発電施設から発生する騒音については、本指針に基づき、未然防止の観点から、当該地域の状況に応じた具体的な対策等が講じられるように努められたい。

注記． 諸外国においても、環境騒音に関する評価値とは別に、風車騒音に関する評価値を定めている事例が多数存在する。

留意点

- 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、評価の目安になる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小さくなるように、事業者は対策を講ずるよう努めることが大切。
- 本指針は、風力発電施設から発生する騒音等に関する検討を踏まえて設定したものであるため、その他の騒音の評価指標として使用することはできない。
- 本指針は、必要に応じて改定する。

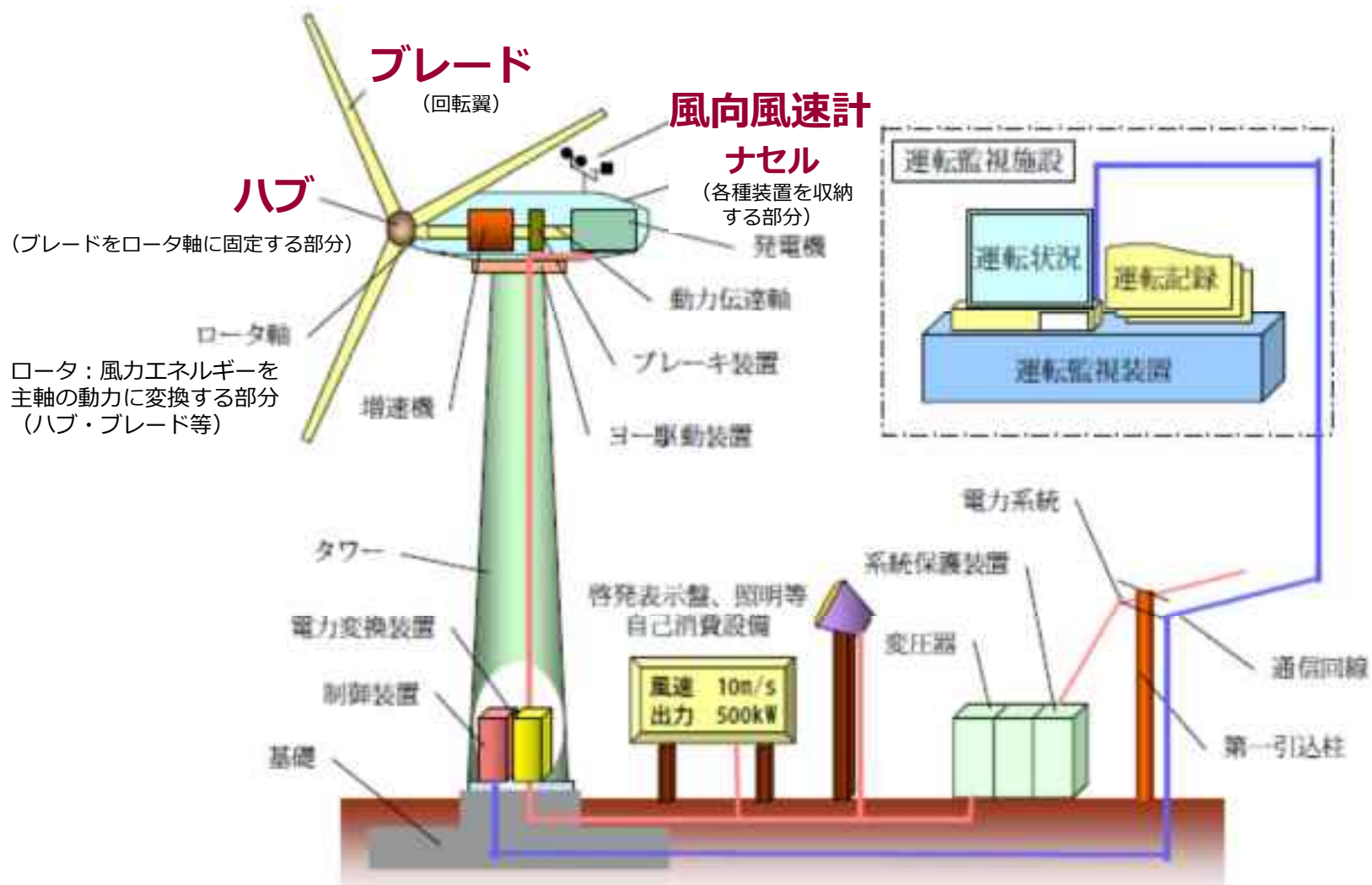
Ⅱ. 風力発電施設から発生する騒音等測定マニュアルの解説

1. 目的
 2. 用語の意味（マニュアルで用いられている重要な用語を中心に）
 3. 測定機器
 4. 騒音および風況の測定に必要な事項
 5. 風況の測定
 6. 残留騒音および風車騒音の測定
 7. 測定結果のとりまとめ
- 【附録】 関連する事項の説明

概要

本マニュアルは、風力発電施設の設置事業者・製造事業者、行政（国、地方公共団体）、地域住民等の関係者等が、風力発電施設から発生する騒音に関する測定を行う場合の標準的な方法を示すものであり、風車騒音、残留騒音の測定方法の他、測定手順や留意点等も併せて記載したものである。

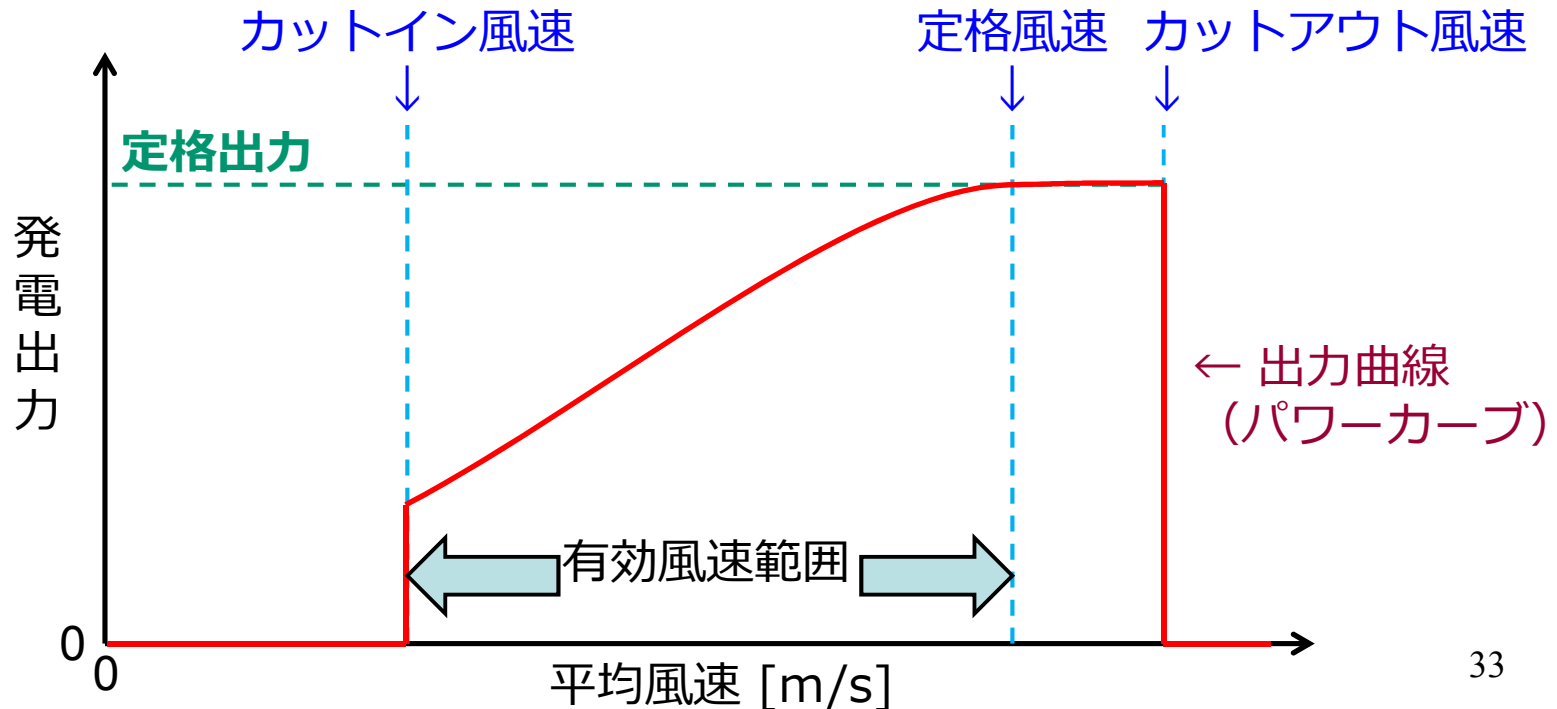
風力発電に係る用語



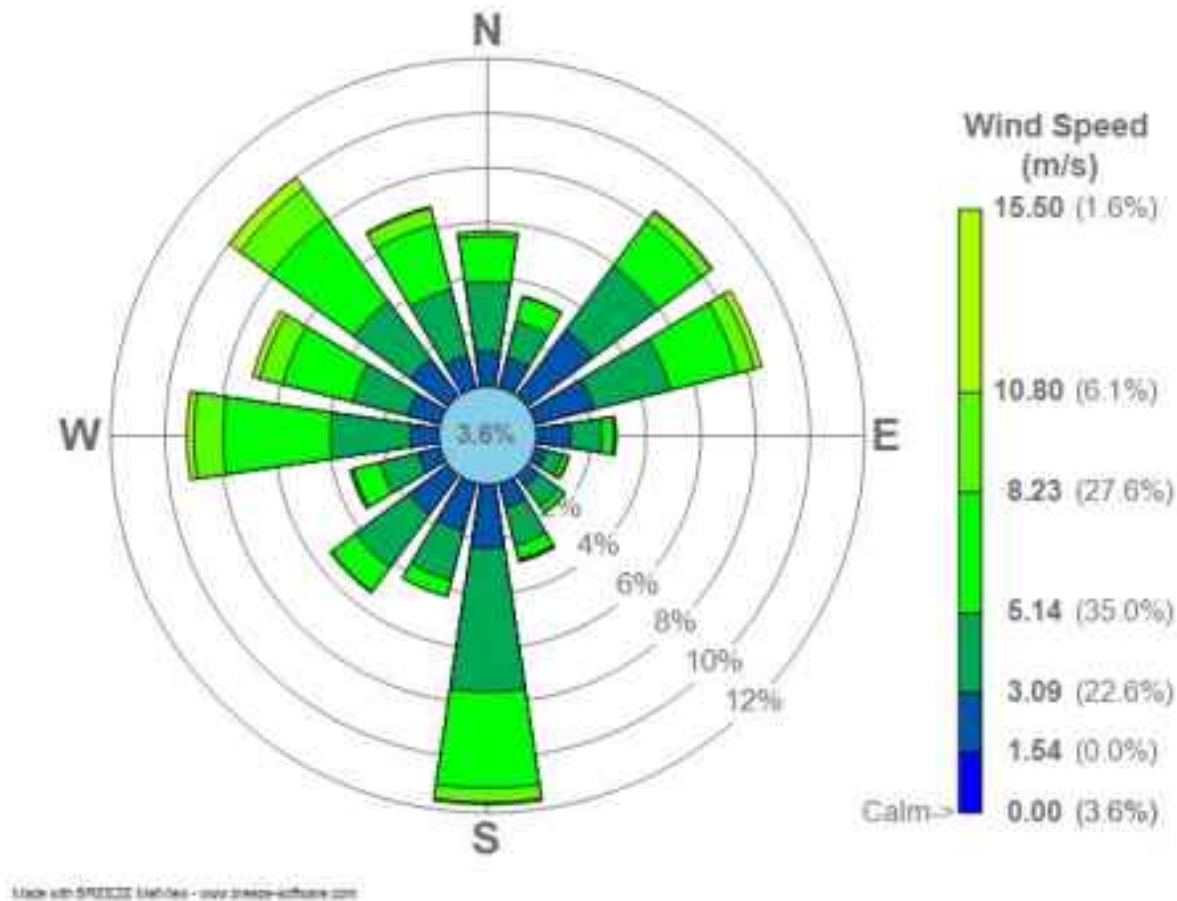
追記. 風車：風力を利用して発電するための装置. 大型風力発電に用いられているのは水平軸3枚翼プロペラ型発電機がほとんどである. 風力発電施設：ひとつ又は複数の風車を有する施設.
「JIS C 1400-0風力発電システム - 第0部 風力発電用語」を参照.

風況に係る用語

- ① 平均風速 : ハブ高さでの10分間の瞬時風速の算術平均値[m/s]
- ② カットイン風速 : 発電を開始するハブ高さにおける風速[m/s]
- ③ カットアウト風速 : 発電を停止するハブ高さにおける風速[m/s]
- ④ 定格風速 : 定格出力に達するときの風速[m/s]
- ⑤ 有効風速範囲 : 平均風速がカットイン風速以上、定格風速未満の範囲.
本マニュアルでの騒音データ処理で扱う風速範囲[m/s]
- ⑥ 出力曲線 (パワーカーブ) : ハブ高さにおける風速と発電出力の関係を示す曲線.



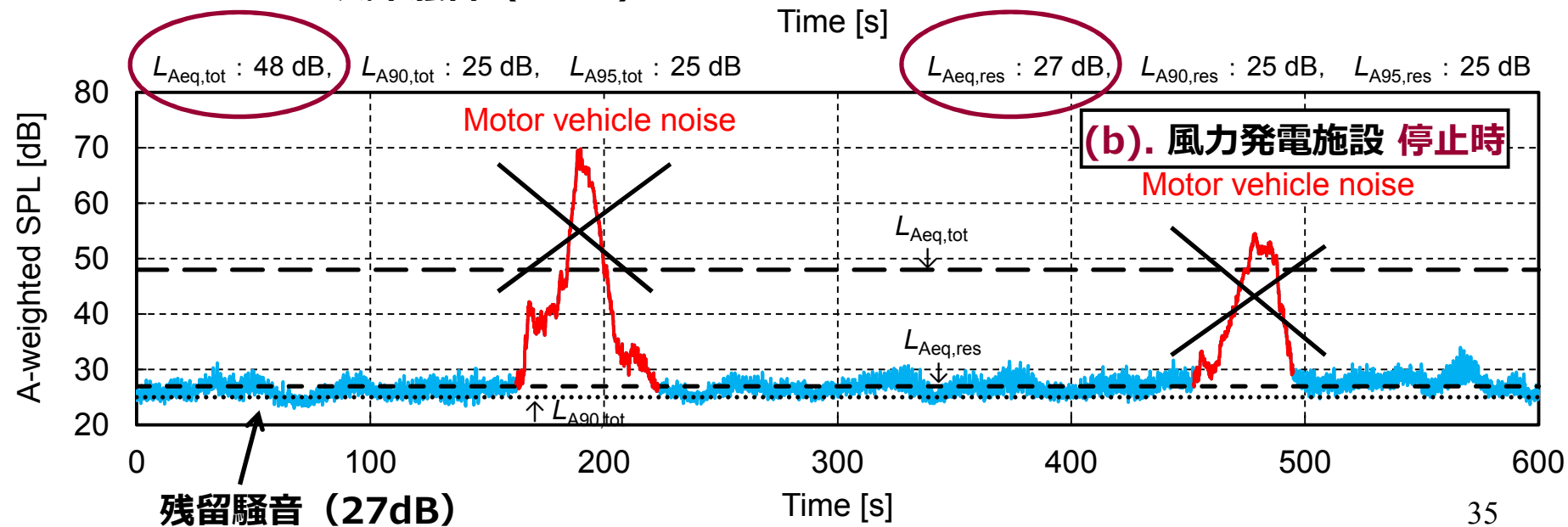
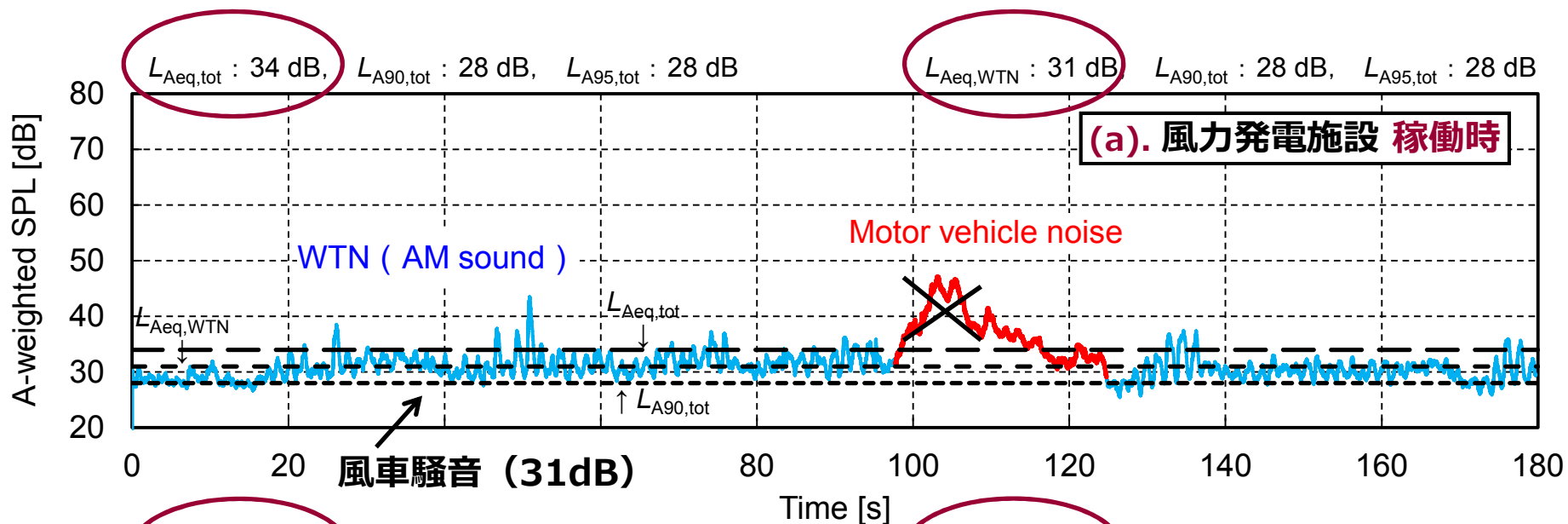
風配図 (Wind rose)



風配図：ある地点のある期間における各方位別の風向・風速の出現頻度を放射状のグラフで表したもの。

注釈. 本図は米国 LaGuardia Airportの風配図を示す.

環境騒音の測定例（暗騒音(自動車)の影響）



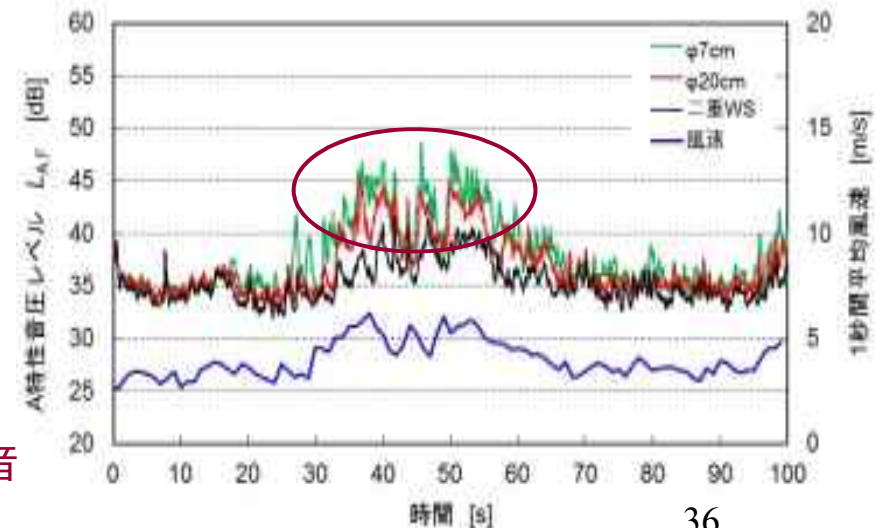
騒音に係る用語

- ① **風車騒音** : 風力発電施設が稼働しているときの騒音。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**が合成された騒音である。一過性の暗騒音は除外する。
- ② **振幅変調音** : **音の大きさが周期性をもって時間変動する騒音**。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発生する。
- ③ **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る。
- ④ **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を装着し風雑音を低減する。



風雑音の測定風景
(左) と結果 (右)

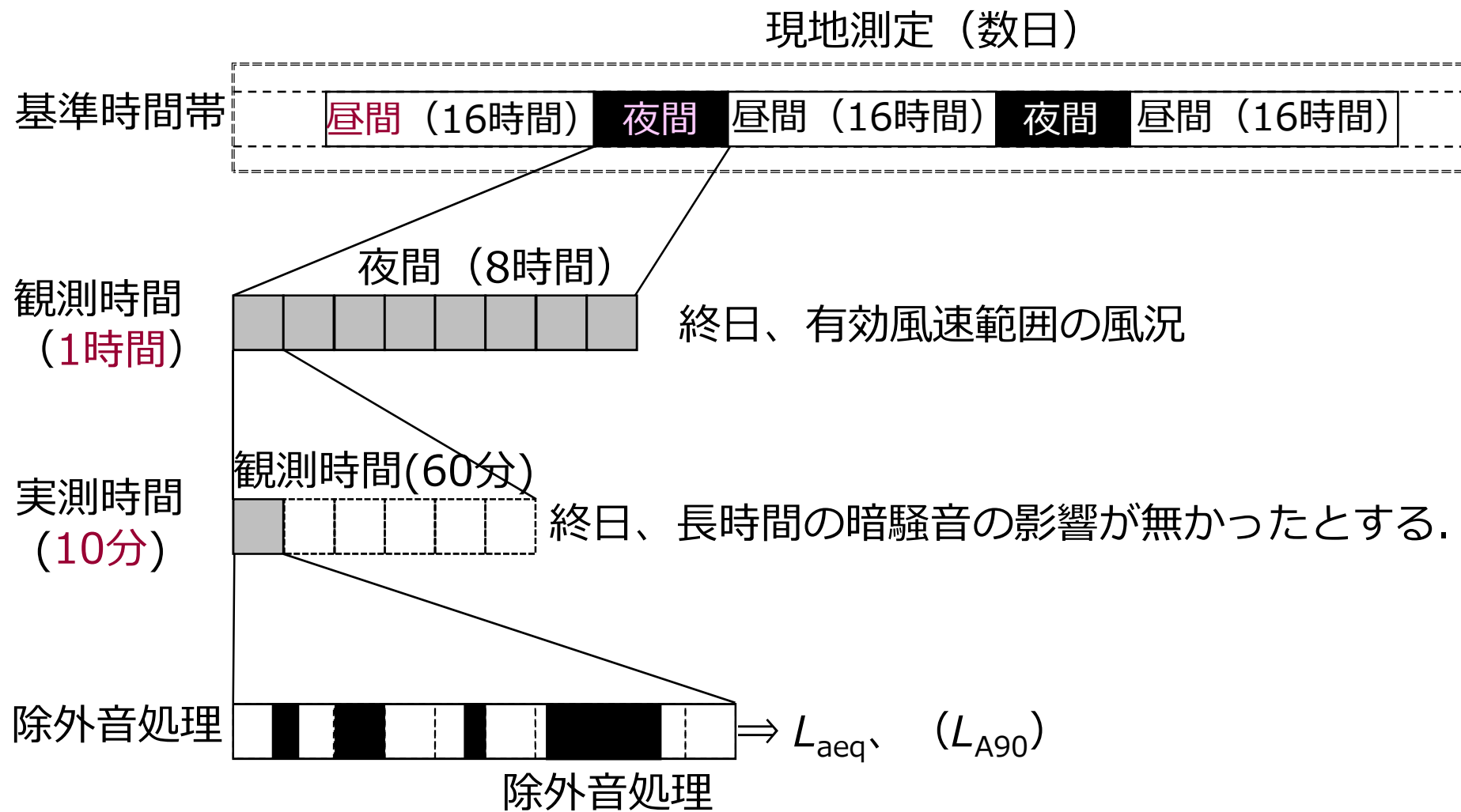
注釈。風速が早くなると風雑音は大きくなる。
スクリーンを大きくあるいは2重にすると風雑音は低減される。



時間帯に係る用語

- ① **基準時間帯** : 一つの等価騒音レベルの値を代表値として適用する時間帯。本マニュアルでは、**昼間**（午前6時から午後10時まで）と**夜間**（午後10時から翌日の午前6時まで）を基準時間帯としている。
→ 基準時間帯毎に地域に一つの評価値（目安になる値）を求める。
- ② **観測時間** : 騒音レベルを測定する際に**対象とする時間**であり、騒音の状態がほぼ一定とみなせる時間をいう。本マニュアルでは**1時間**とする。
- ③ **実測時間** : 観測時間のうち**実際に騒音を測定（分析）する時間**をいう。本マニュアルでは実測時間は**10分間**とする。実測時間の開始時刻は原則として毎正時とするが、長時間にわたり暗騒音の影響を受けたり、風が弱く風車が停まっているようなときは**10分単位で開始時刻をずらす**。
→ 例えば、13:16から条件が良くなっても、13:20から測定（分析）する。

時間帯に係る用語（補足）



出典．福島、藤本、吉久、岩瀬：風車騒音の分析における暗騒音の影響の除去と分析対象時間の設定方法について、騒音制御工学会研究発表会予稿集（2011.9）

騒音の評価量に係る用語

- 音圧 (sound pressure) p : 媒質の中の音波によって生じる媒質内圧力の静圧からの変化分. 通常、実効値で表す. 記号は p (実効値は p_e). 単位はパスカル [Pa]
(日本音響学会編「音響用語事典」より)
- A特性音圧 (A-weighted sound pressure) p_A : 周波数重み付け特性A (JIS C 1509-1参照) をかけて測定される音圧実効値. 単位はパスカル [Pa]
- 音圧レベル (sound pressure level) L_p : 音圧実効値の2乗を基準の音圧の2乗で除した値の常用対数の10倍で、次式で与えられる. 単位はデシベル [dB]

$$L_p = 10 \log_{10} \frac{p^2}{p_0^2}$$

ここに、 $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$ (基準の音圧)

騒音の評価量に係る用語

- 騒音レベル (A-weighted sound pressure level) L_{pA} : A特性音圧の2乗を基準の音圧の2乗で除した値の常用対数の10倍で、次式で与えられる。単位はデシベル [dB]。A特性音圧レベルともいう。本マニュアルでは騒音レベルの記号を L_A で表す。

$$L_A = 10 \log_{10} \frac{p_A^2}{p_0^2}$$

ここに、 $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$ (基準の音圧)

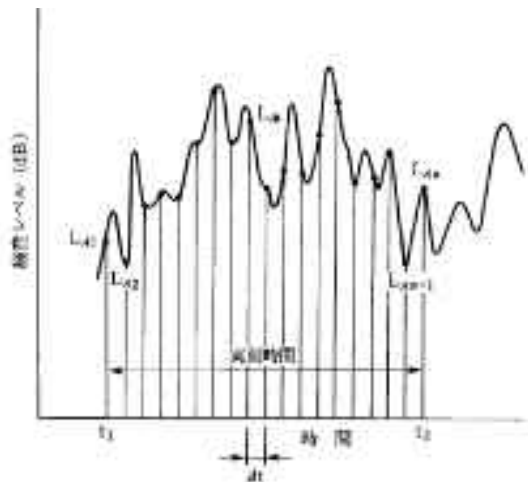
注釈. 風車騒音や残留騒音の測定では時間重み付け特性はF (Fast) : 時定数 0.125秒 (人の体感反応時間に近い) とする。

騒音の評価量に係る用語

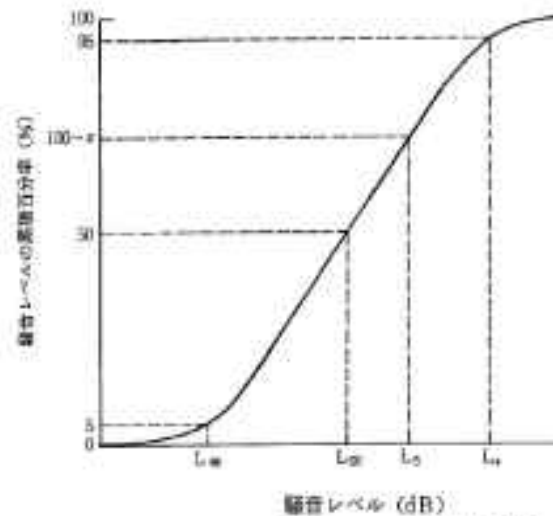
- 時間率騒音レベル (percentile level) $L_{AN,T}$:**
 測定した騒音レベルが、対象とする時間 T の N %の時間にわたってあるレベル値を超えている場合、そのレベルを N %時間率騒音レベルという。単位はデシベル [dB]

注釈1.

風車騒音、残留騒音、総合騒音を区別する場合、時間率騒音レベルの評価量を表す記号にそれぞれ'WTN (wind turbine noise) '、'resid (residual noise) '、'total (total noise) 'の添え字を付して、 $L_{AN,WTN}$ 、 $L_{AN,resid}$ 、 $L_{AN,total}$ と表す。



変動騒音のサンプリング



騒音レベルの累積度数分布

注釈2 (左図) .

L_{AX} とは一定時間間隔で測定した騒音レベルの累積度数曲線を描き、これが $(100 - X)$ %を切る点の値である。

*ざっくりいえば、100個データを等時間間隔でサンプルすれば、大きい方から5番目の値が、90%レンジの上端値 L_5 になる (騒音規制法 規制基準値) .

L_{A90} は大きい方から90番目 (小さい方から10番目) の値 (残留騒音の推定) .

対数の公式

変数 a 、 x 、 y の間に $y=a^x$ という指数表現の関係があるとき、これを $X=\log_a y$ と書き替えることができ、これを対数表現という。ここで a を底といい、底が 10 の場合を**常用対数**とよぶ。騒音や公害振動では常用対数を用いるので、一般に**10は省略**する。

$$\text{Log } (x \times y) = \log x + \log y$$

$$\text{Log } x/y = \log x - \log y$$

$$\text{Log } x^n = n \log x$$

エネルギー（パワー）和 d Bの和

L_1 dB $\cdots L_n$ dBの和 L dBは下式となる.

$$L = 10 \log \left(10^{\frac{L_1}{10}} + \cdots + 10^{\frac{L_n}{10}} \right)$$

注釈.

- 50 dBと50 dBのエネルギー和は53 dB.
→ 同じ機械が2台あると騒音レベルは3dB大きくなる.
- 50 dBと60 dBのエネルギー和は60 dB (60.4 dB) .
→対象騒音と暗騒音の差が10dB以上あると暗騒音補正は不要.
- $\text{Log}2=0.3$ は覚えておくと便利.

エネルギー（パワー）差 dBの差

L_1 dBと L_2 dBの差 L dBは下式となる。

$$L = 10 \log \left(10^{\frac{L_1}{10}} - 10^{\frac{L_2}{10}} \right)$$

エネルギー（パワー）平均 dBの平均

L_1 dB $\cdots L_n$ dBの平均 \bar{L} dBは下式となる.

$$\bar{L} = 10 \log \left(10^{\frac{L_1}{10}} + \cdots + 10^{\frac{L_n}{10}} \right) - 10 \log n$$

注釈.

エネルギー平均はdB和から $10 \log$ 個数を差し引く.

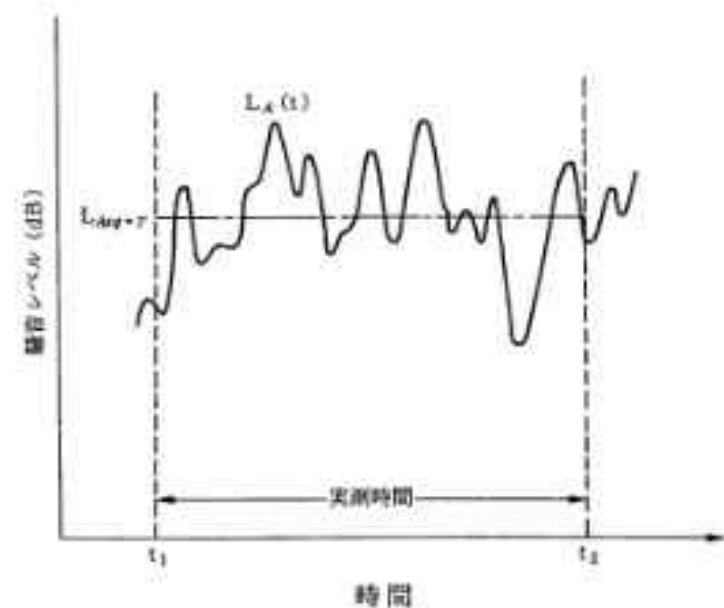
→ 等価騒音レベルは等時間間隔でサンプルした値のエネルギー平均値.

等価騒音レベル L_{Aeq} (10min) (dB)

equivalent continuous A-weighted sound pressure level

- ・騒音レベルが時間とともに変化する場合、測定時間内でこれと等しい平均二乗音圧を与える連続定常音の騒音レベル（変動騒音と等しいエネルギーを持つ同じ長さの定常音で表す）。
- ・騒音測定時間全体にわたり、一定時間間隔ごとに騒音レベルを測定、下式から求める。

$$L_{Aeq} = 10 \log_{10} \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} 10^{\frac{L(t)}{10}} dt \right]$$



注釈1. 等価騒音レベルはサンプル値のエネルギー平均値 (dBの平均)。

注釈2. サンプリングの時間間隔は、騒音計の動特性 F A S T (時定数: 0.125秒) を用いる場合、0.25秒以下、S L O W (時定数: 1秒) の場合、2秒以下が望ましい (JIS Z 8731より)。
現在、市販騒音計の大部分は0.1秒以下の時間間隔でサンプリングしている。

騒音の評価量に係る用語

- 等価騒音レベル (equivalent continuous A-weighted sound pressure level) $L_{Aeq,T}$: ある時間 T について、変動する騒音の騒音レベルを**エネルギー的な平均値**として表した量で、次式で与えられる。単位はデシベル [dB]。時間平均騒音レベルともいう。

$$L_{Aeq,T} = 10 \log_{10} \left[\frac{\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} p_A^2(t) dt}{p_0^2} \right]$$

ここに、 t_1 および t_2 は開始時刻および終了時刻で $T = t_2 - t_1$ [s]、 $p_A(t)$ は対象とする騒音の時間 t の瞬時A特性音圧 [Pa]、 p_0 は基準の音圧 ($20 \mu Pa$)

注釈1. 時間間隔 T ($t_1 \sim t_2$) [s] の騒音レベルのサンプル値 $L_{A,i}$ (サンプル数 N) から、等価騒音レベル $L_{Aeq,T}$ を求める場合には、次式による。

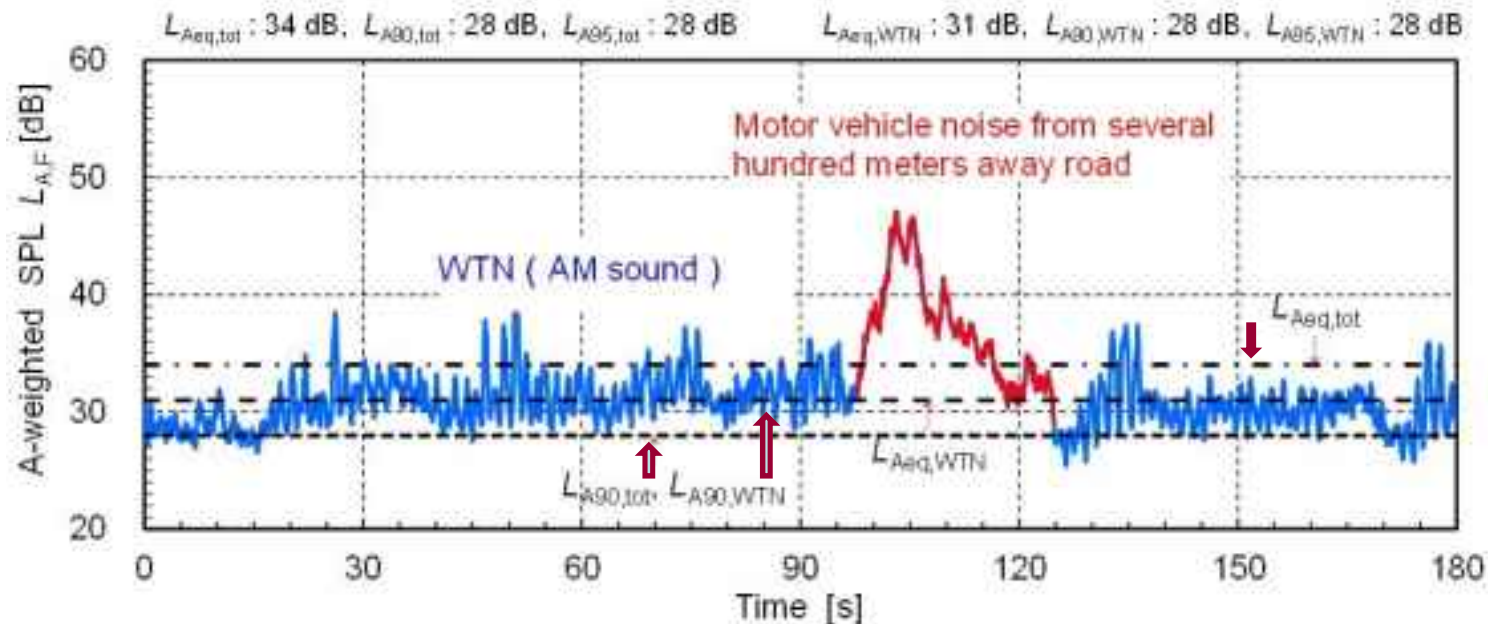
$$L_{Aeq,T} = 10 \log_{10} \left(\frac{\Delta t}{T} \sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_{A,i}}{10}} \right) = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_{A,i}}{10}} \right)$$

ここに、 i は騒音レベルの i 番目の瞬時値を表す添え字、 Δt はサンプリング間隔 [s]、 N はサンプル数。

注釈2. 風車騒音 (wind turbine noise)、残留騒音 (residual noise)、総合騒音 (total noise) を区別する必要がある場合は、等価騒音レベルの評価量を表す記号にそれぞれ WTN, resid, total の添え字を付して $L_{Aeq,WTN}$ 、 $L_{Aeq,resid}$ 、 $L_{Aeq,total}$ のように表す。 47

騒音の評価量に係る用語（まとめ）

- ① 音圧 p
- ② A特性音圧 p_A
- ③ 音圧レベル L_p
- ④ 騒音レベル（A特性音圧レベル） L_A
- ⑤ 時間率騒音レベル L_{AN} : L_{Aeq} を推計する場合に用いる.
- ⑥ 等価騒音レベル L_{Aeq} : 風車騒音の評価量



風況の測定機器、騒音の測定機器 (p.6-7)

① 風況の測定機器

風向・風速計、

LIDAR (Light Detection And Ranging)

SODAR (Sonic Detection And Ranging)



風向風速計



ドップラーライダー

② 騒音の測定機器

騒音計 : 計量法第71条の条件、JIS C 1509-1の仕様

ウインドスクリーン (防風スクリーン) :

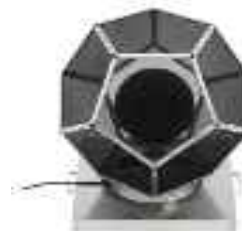
全天候型のウインドスクリーン (直径20 cm)

二重ウインドスクリーン

音響校正器、周波数分析器、レベルレコーダ



騒音計



ウインドスクリーン

音響校正



94dB at 1000Hz
(スピーカ方式)



114dB at 250Hz
(ピストンホン)

注釈1. マイクロホンを音響校正器に挿入し、校正する。

注釈2. 音響校正器の方式には、スピーカ方式とピストンホン方式がある。

レベルレコーダ

記録方式：自動平衡方式 JIS C 1512

設定レベル：10、25、50 dB

周波数範囲：1～100 000 Hz

記録ペン動特性：FAST、SLOW、VL、FF
(立上がり・立下がりとも10 ms)

記録紙：レベル記録用 RP-01D

紙送り速度：0.01、0.03、0.1、0.3、1、3、10、30 mm/s

電源：単一形乾電池 6本、ACアダプタ、外部電源入力端子

大きさ：重さ 約122 (H)×250 (W)×325 (D) mm、約3.6 kg (電池含む)



注釈. データ採取時の状況記録用 (モニタ) として用いられることが多い.

データ記録装置

- CCLD 2 mA、4 mA（ファクトリオプション）搭載（定電流駆動電源）
- DC～20 kHz（対応周波数範囲）
- 軽量1.2 kg（電池含まず）
- 収録時間約180分（4ch、20 kHz×2.4） /4 GBメモリカード使用の場合



注釈. 大量のデータ採取、再生し、繰り返し分析できるため、詳細分析に用いることが多い.

周波数分析器

- 音・振動の周波数分析は実時間分析器（**定比幅**）、あるいはFFT分析器（**定幅**）が目的により使い分けられる。
- 実時間分析器は**定比幅**のバンドパスフィルタ（1/1、1/3、1/Nオクターブバンド）を使用し、主に**感覚量評価**を主とした周波数分析に使用される。
- FFT分析器は演算（高速フーリエ変換）で**定幅**分析される。主に**物理的評価**（対策検討など）を中心とした周波数分析に使用される。

定比型フィルタと定幅型フィルタ

周波数分析器を構成するフィルタには定比型と定幅型がある。フィルタの通過帯域幅による分け方で定比型では**中心周波数に比例してフィルタ幅が変動**し、定幅型では常に**一定の幅**を持っている。周波数軸を対数にすると定比型フィルタではどのバンドも同じ幅となり、定幅型フィルタは周波数が高くなるにつれて狭く表示される。

注釈1. F F T : Fast Fourier Transform

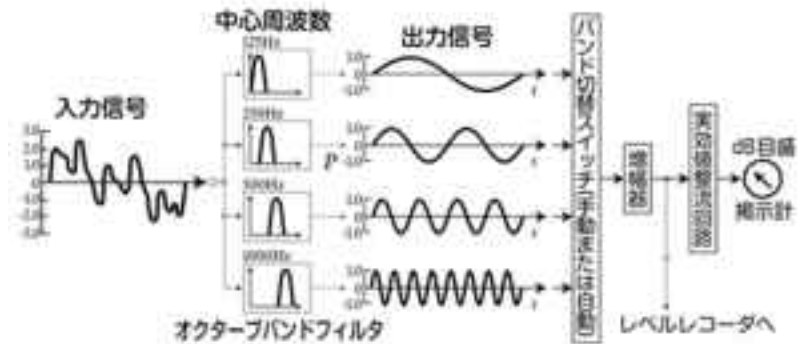
注釈2. 1/3オクターブバンドフィルタ（定比幅）の場合、中心周波数は、20Hz、25Hz、31.5Hz、40Hz・・・とそれぞれ、 $2^{1/3}$ 倍の関係に並んでいる。バンド幅（通過帯域）は、20Hz : 18~22.4Hz、25Hz : 22.4~28Hz、31.5Hz : 28~35.5Hz・・・と、中心周波数が大きくなるにつれ帯域幅も広まっている。

F F T分析器（定幅）の場合、1Hz、2Hz、3Hz・・・と周波数によらず帯域幅（任意）は同じ。 53

周波数分析

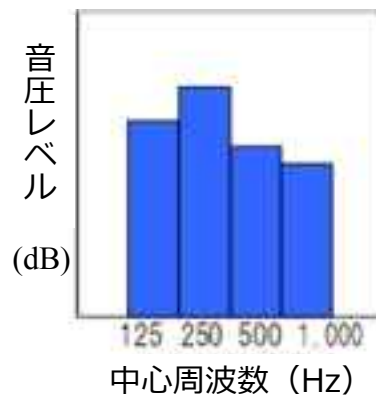
1/1オクターブバンドフィルタの通過帯域

中心周波数(Hz)	通過帯域(Hz)
125	90 ~ 180
250	180 ~ 355
500	355 ~ 710
1000	710 ~ 1400



周波数分析グラフの見方

周波数分析結果の例では、250Hz帯域に含まれる音圧レベルが最も大きいことが判る。



1/1Oct.B.周波数分析結果

注釈1. フィルタには定比型（実時間分析器－感覚量評価）と定幅型（FFT（Fast Fourier Transformer）分析器－物理的評価）がある。定比型は中心周波数に比例してフィルタ幅が変動し、定幅型では常に一定の幅を持っている。

注釈2. 中心周波数125Hzだと通過帯域は90Hz、1000Hzだと通過帯域は690Hz、定比型は中心周波数が大きくなるに比例して通過帯域が広くなる。

LIDAR (Light Detection And Ranging) SODAR (Sonic Detection And Ranging)

原理：ソーダーは音波を、ライダーはレーザー光を使用し、大気条件を計算し、ドップラー周波数シフトから風速を観測する方法。



SODAR

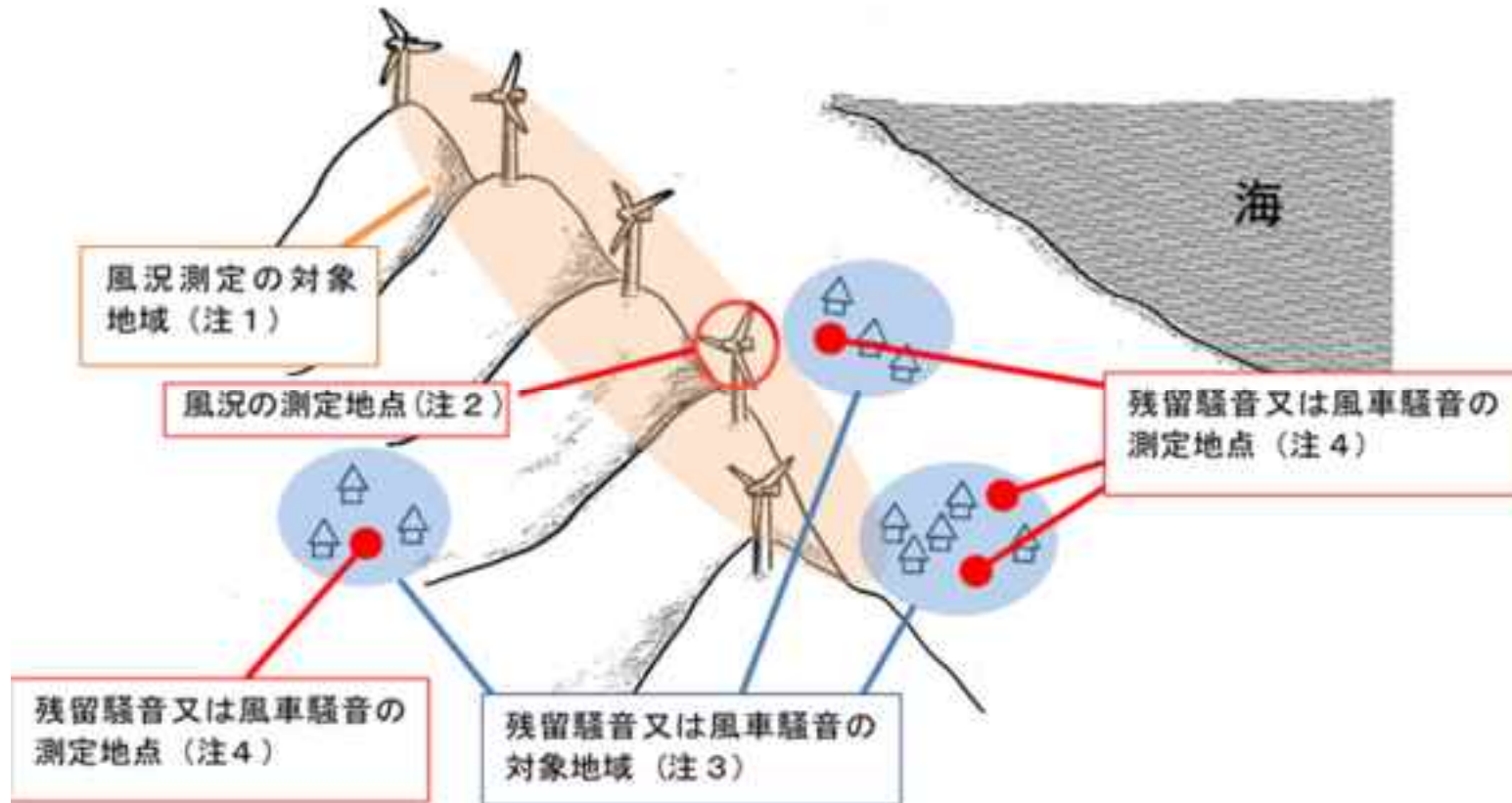


LIDAR

LIDARは、レーザー光を空間に発射し、大気中のエアロゾル※からの散乱光を受信して、信号周波数成分を解析する。移動する測定対象からの信号は、その移動速度に応じたドップラ速度成分を持つ。ここから、大気によって運ばれるエアロゾルの移動速度、すなわち上空の風速を計測する。

同時に、レーザー光を繰返しパルス送信しながら、レーザービームをスキャン（走査）することで、測定対象までの距離と方位を測定する。※大気塵、目に見えない大きさ1/10～数ミクロンの浮遊粒子

騒音測定地点の配置



注釈1. 風力発電施設が設置予定、あるいは設置されている地域

注釈2. 風況の対象地域でハブ高さ付近の風況を把握することができる地点

注釈3. 風車騒音が人の生活環境に影響を及ぼすおそれのある地域

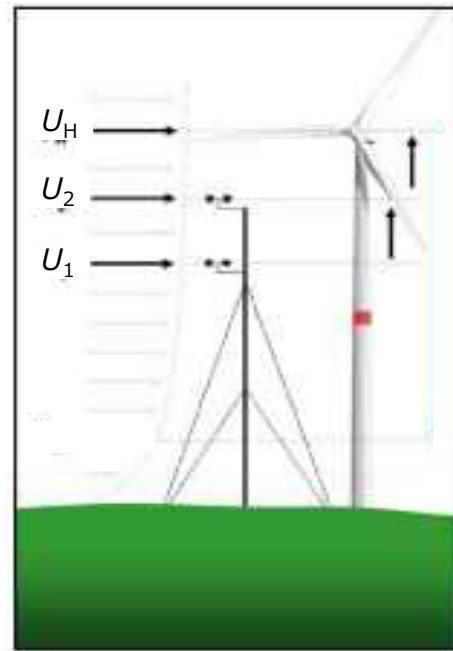
注釈4. 残留騒音又は風車騒音の対象地域（複数の対象地域を設定する場合は対象地域毎）
における残留騒音又は風車騒音を把握することのできる地点

風況の測定（地域・地点・時期・期間の選定）

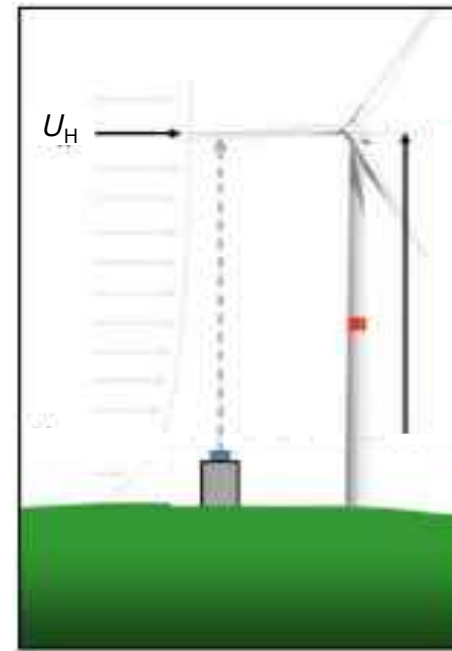
- ① 対象地域：風力発電施設の設置が予定されている、あるいは風力発電施設が設置されている地域。
- ② 測定地点（計画時）：設置予定の風車のハブ高さ付近における対象地域を代表する風況が把握できる地点。稼働時は風車のハブ高さ
- ③ 測定時期：騒音の測定と同時期
※ 騒音の測定時期：風車が稼働する代表的な風況の時期で、原則として四季の測定が望ましい（季節による風況変化が少ない場合：年間の代表的な風況の時期）。
- ④ 測定期間・時間帯：騒音の測定と同じ。実測時間は10分間毎。
※ 騒音の測定期間：有効風速範囲における騒音の測定として有効な日数が昼夜間ともに3日間以上確保できる期間。

風速の測定方法 (p.9-11)

- ① 間接測定法 (2点の風速から推定)
- ② 直接測定法 (LIDAR、SODAR)
- ③ 出力曲線を用いる方法 : 風車稼働時
- ④ 風車 (ナセル) 設置の風向・風速計 : 風車稼働時



(a). 間接測定法



(b). 直接測定法

残留騒音の測定時におけるハブ高さ相当位置での風速の測定

高さが異なる2点での風速の測定値から推定する方法 (p. 10-11) 参考

ハブ高さよりも低い気象観測用マストに、高さが異なる2点に風向・風速計を設置し、それらの高さにおける10分間平均風速の測定値から指数プロファイルを仮定してハブ高さにおける風速を計算する。その場合、風向・風速計は周辺の樹木等の影響を受けない高さに設置することとし、また高い側の風向・風速計は低い側よりも10～15 m高い位置に設置する（間接測定法参照）。

高さの異なる2点で同時測定した風速 U_1 および U_2 [m/s]から次式によりハブ高さの風速を算出する。

$$U_H = U_1 \left[\frac{H_H}{H_1} \right]^{\frac{1}{n}}$$
$$n = \frac{\log_{10} \frac{H_2}{H_1}}{\log_{10} \frac{U_2}{U_1}}$$

ここに、 H_1 および H_2 は風速を測定した2点の高さ[m]で $H_1 < H_2$ 、 U_1 および U_2 は高さ H_1 および H_2 における10分間平均風速[m/s]、 H_H はハブ高さ[m]、 U_H はハブ高さにおける10分間平均風速[m/s]、 n はべき指数とよばれる風速の高さ勾配を表わす係数。一般には測定点が高いほど風速は大きい、下側の測定点の風速の方が上側よりも大きい場合は $1/n = 0$ とし、 $U_H = U_1$ とする。また、原則として風速は実測時間の10分間毎の平均値を算出する。

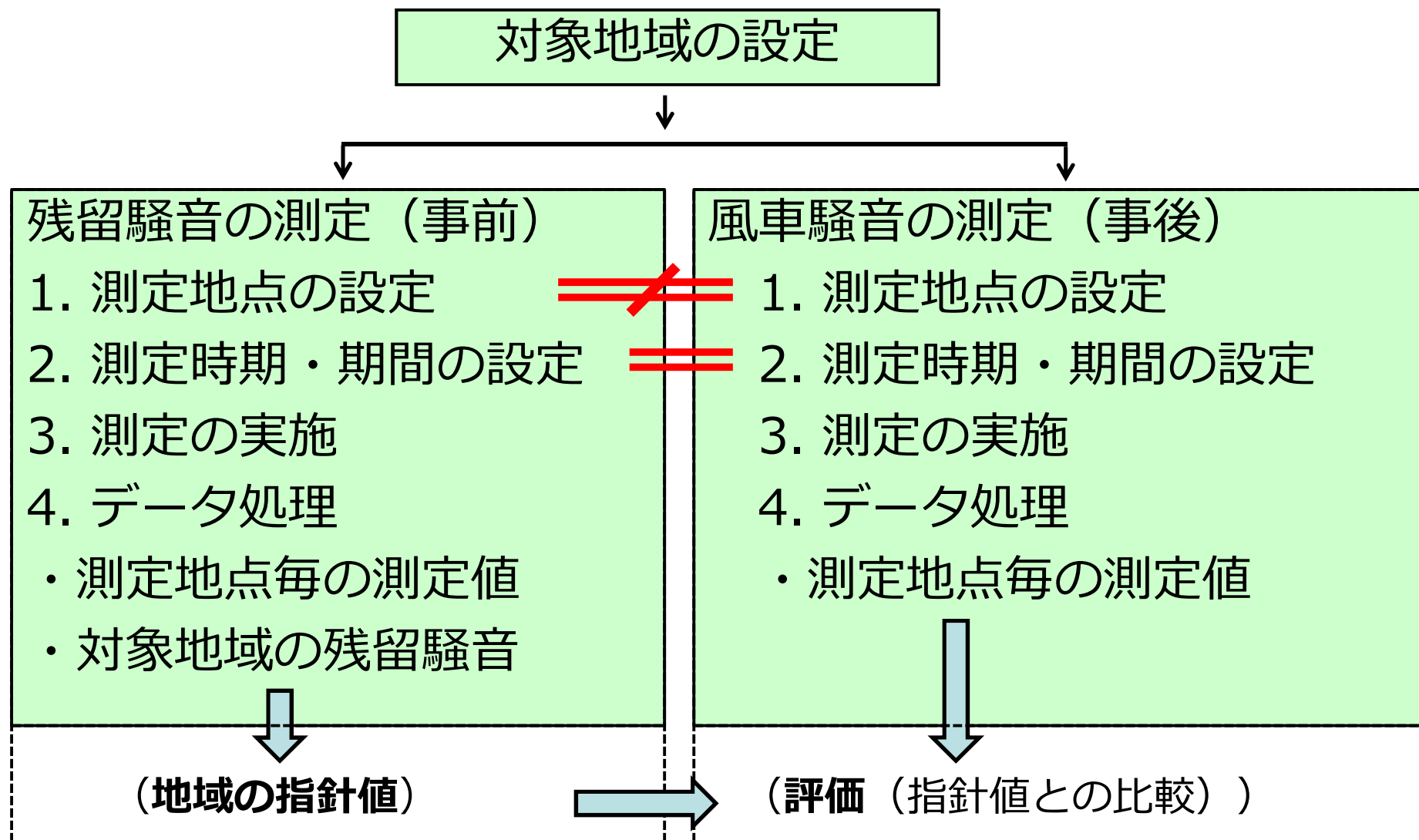
風向は、 H_2 における風向を使用する。原則として風向は実測時間の10分間毎に最も頻度の大きかった風向（16方位）を算出する。

注釈1. ある時刻の10分間平均風速は、通常はその時刻から10分前までの瞬時風速の算術平均値である。

一方、騒音の測定値 $L_{Aeq,10 \text{ min}}$ や $L_{AN,10 \text{ min}}$ は、実測時間の開始時刻から10分間のエネルギー平均値や統計量であり、風速とは10分間の表示上のずれがあることがあるので注意する。

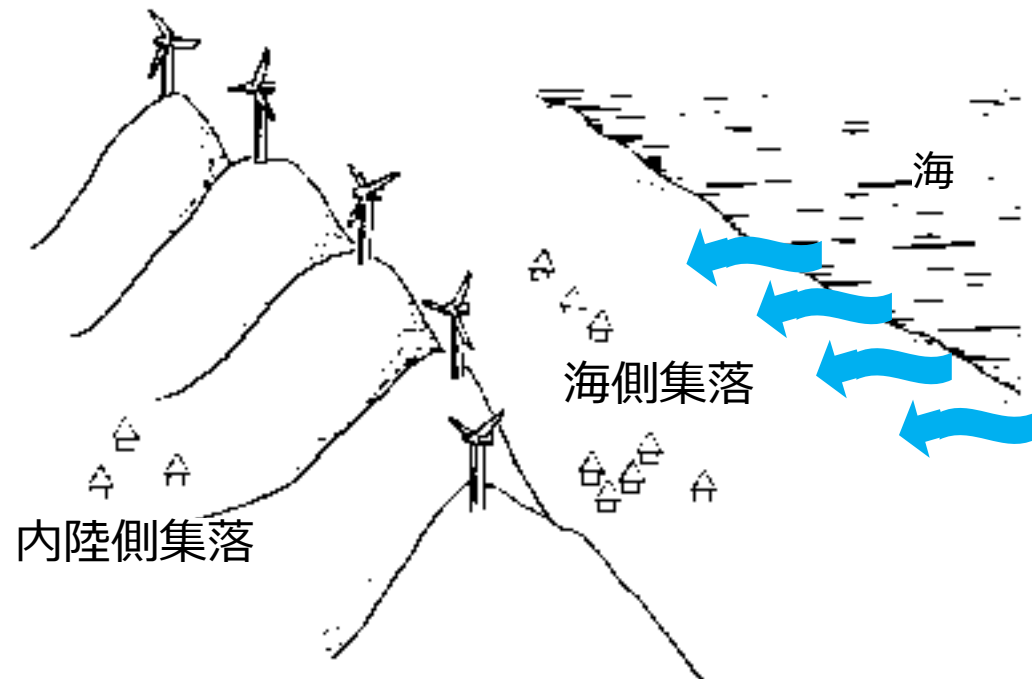
注釈2. JISC1400-11:2017風力発電システム-第11部:騒音測定方法では、ある高さの風速と粗度長から任意の高さにおける風速を求める方法も記載されている。

残留騒音、風車騒音の測定から評価の一般的な流れ



対象地域の選定

- ・風車騒音により人の生活環境に影響を与えるおそれがある地域。
- ・原則として風力発電施設周辺の地域全体をひとつの対象地域とする。
- ・ただし、現地の状況によっては、対象地域を複数設定することもある。



対象地域を分割する必要性が考えられる例
【海側集落：波音】 > 【内陸側集落：山影】

注釈. 風車が設置された場所の海側では波音の影響を受けやすいが、内陸側では波の影響は受けにくいいため、地域の音環境はそれぞれ異なる。このような場合は、それぞれの地域を対象地域として選定する。

測定地点の選定

測定地点：

対象地域を代表する残留騒音又は風車騒音が把握できる地点、風力発電施設との位置関係も考慮する¹⁾。

避けるべき地点：

風力発電施設以外の特定音源からの局所的な影響を受ける地点²⁾。

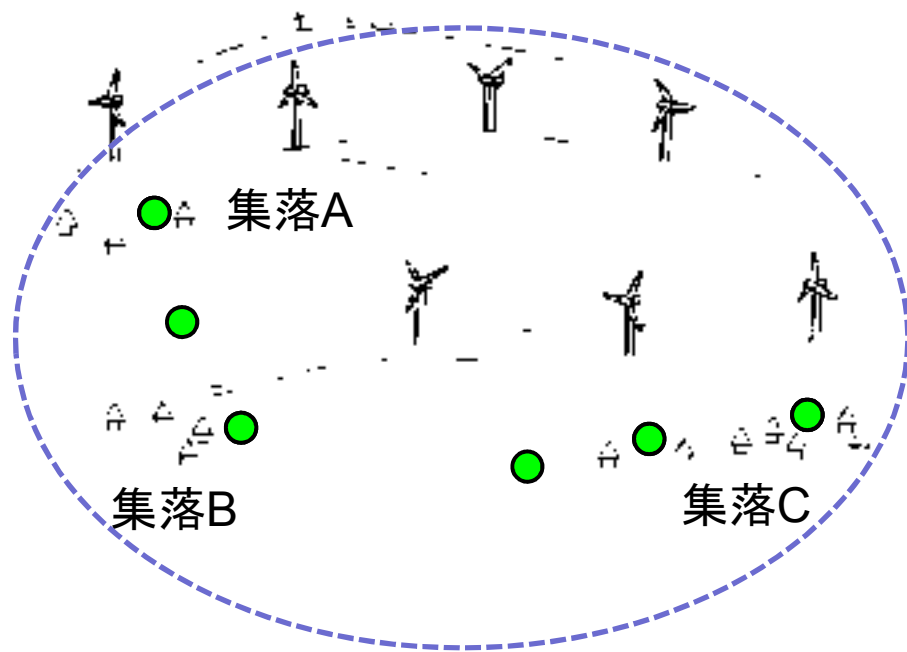
- ・ 交通量が多い主要道路や鉄道沿線
- ・ 臨海部で波音が大きく聞こえる地点
- ・ 樹木の葉擦れ音や防風林の松籟が大きく聞こえる地点
- ・ 河川に近接し水流音がよく聞こえる地点
- ・ エアコン室外機や浄化槽のポンプなどの設備機器の近く
- ・ 風力発電施設が建物等で遮蔽されるような地点

注釈1. 対象地域を複数設定した場合は、各地域について把握できるように測定地点を選定する。

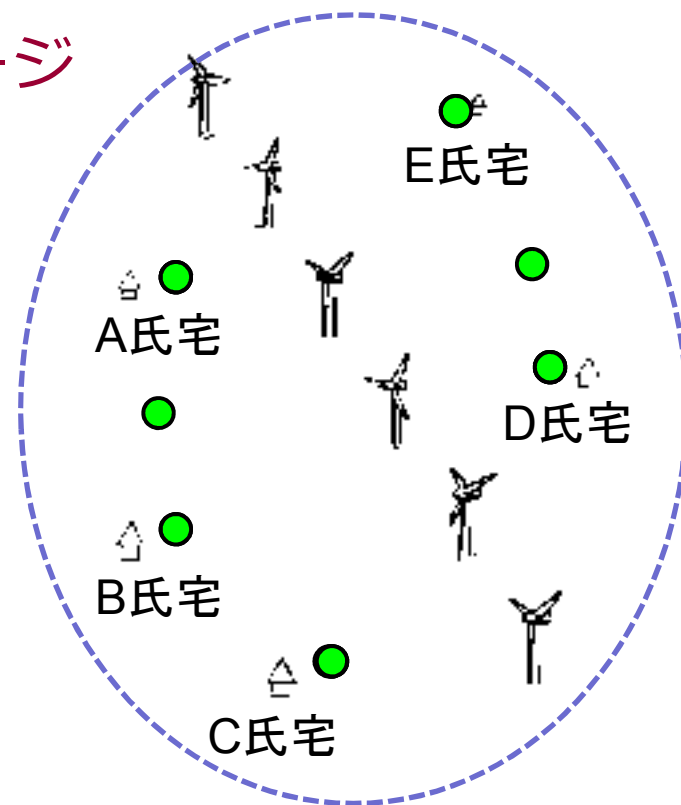
注釈2. これらの音源からの影響は季節により変化する可能性がある。

測定地点の選定

残留騒音の測定地点のイメージ





(a). いくつかの集落で構成される場合



(b). 個別の家屋が散在する場合

対象地域内の測定地点の配置例

-  : 対象地域
-  : 測定地点

測定時期・期間の選定

① **測定時期**：風車が稼働する**代表的な風況**の時期で、原則として**四季**の測定が望ましい。ただし、季節による風況変化が少ない場合には、年間の代表的な風況の時期。

② **測定期間**：有効風速範囲¹⁾における騒音の測定として有効な日数²⁾が昼夜間ともに**3日間**以上確保できる期間（連続3日でなくて良い）。

注釈1. 有効風速範囲：ハブ高さの平均風速がカットイン風速以上で定格風速未満

注釈2. 騒音の測定として有効な日：基準時間帯の観測時間数の**半数以上で測定**できた場合に有効（昼間8時間以上、夜間4時間以上）

③ **基準時間帯**：昼間（6:00～22:00）、夜間（22:00～6:00）

④ **観測時間**：1時間（実測時間は10分間）

注釈3. 降雨時、セミやカエル等の生物の鳴き声が顕著な時期は避けることが望ましい。

注釈4. 有効風速範囲外または除外音が半分以上の場合は、次の10分間データを採用する（継ぎ足しは行わない）。

注釈5. 実測時間のほとんどを占める除外すべき騒音には、測定点近くでの自動車のアイドリング音、人の話し声、農作業の作業音等が考えられる。

騒音測定（残留騒音、風車騒音）

① 騒音計の設定

周波数重み付け特性：A / 時間重み付け特性：F

0.1 s以下の時間間隔で連続してサンプリング

アンダーレンジにならないように注意

ウインドスクリーン（直径20 cm程度）を装着

② 騒音計（マイクロホン）の設置位置

地上0.2 m～1.2 mの高さで、反射物から3.5 m以上離す。

注釈1. JIS Z-8731では、地上1.2 m～1.5 mの高さであるが、風車騒音の場合は、風雑音の影響を避けるため、測定点の高さを低くしている。

③ 騒音の録音

分析時に音源の判別（実音モニタ）

周波数分析（周波数特性、純音性騒音の純音性可聴度）

注釈2. 音響校正器を用いて騒音計が表示した値が騒音計の取扱説明書に記載されている値と差が±0.7dB以上の場合は、その騒音計は測定に使用しない。

注釈3. マイクロホンは上向きに設置する。

残留騒音の測定（留意点）

注釈1.

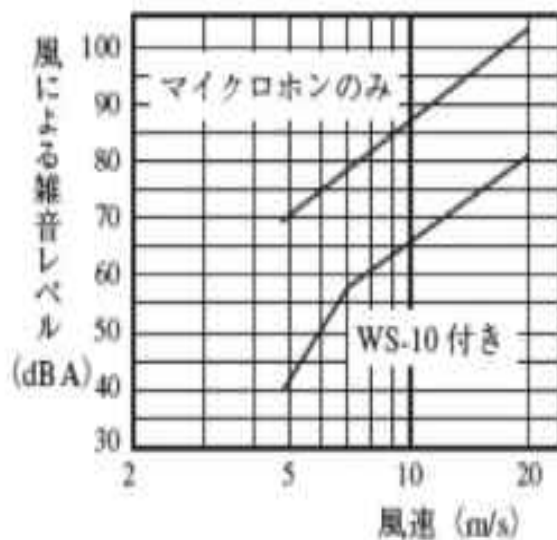
実測時間の10分間にわたり継続的に特定騒音が含まれ、実測時間をずらすことによりその影響を回避できる場合には、実測開始時間をずらす。測定地点近傍でのアイドリング音、エアコンの室外機や浄化槽のポンプ等の屋外設置機器、一時的な雨音等が特定騒音に相当する。

注釈2.

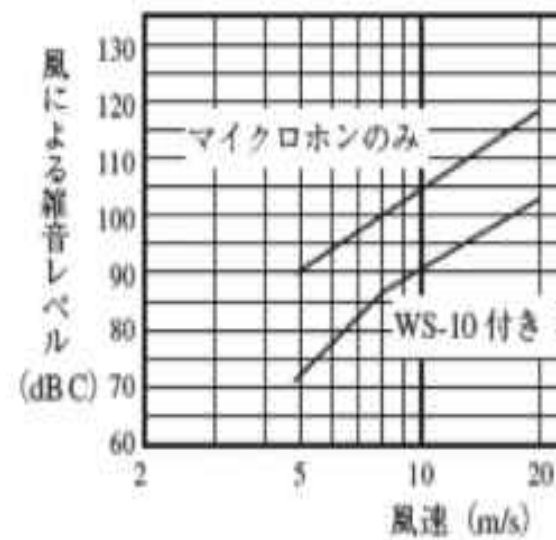
観測時間にわたってハブ高さの風速が有効風速範囲以外の場合、あるいは観測時間にわたって定常的な暗騒音の影響で残留騒音が測定できない場合は、その観測時間は「有効データ無し」とする。有効データ無しの観測時間数が基準時間帯に含まれる観測時間数の半分を超える場合は、その基準時間帯の測定結果は無効とする。

一般に使用されている防風スクリーンの風雑音

(防風スクリーンの直径は7cmφ)



A特性



C特性

防風スクリーンの直径が2倍になると、風雑音は6 ~ 7 dB程度低減¹⁾

出典1). Strasberg: "Dimensional Analysis of Windscreen Noise.", Journal of Acoustic Society of America, 86(2), pp.544-548 (1988).

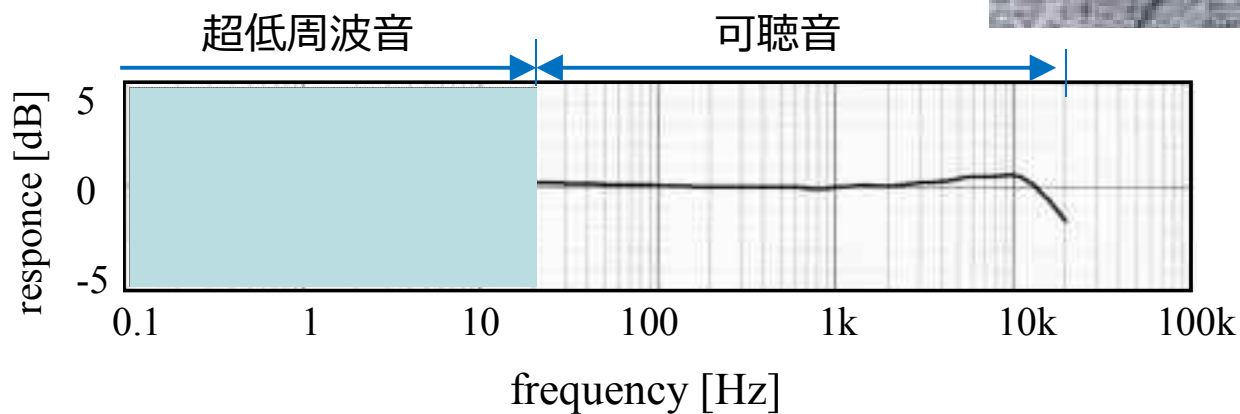
環境省戦略指定研究における騒音測定機器

◆ 騒音計（録音機能付き）

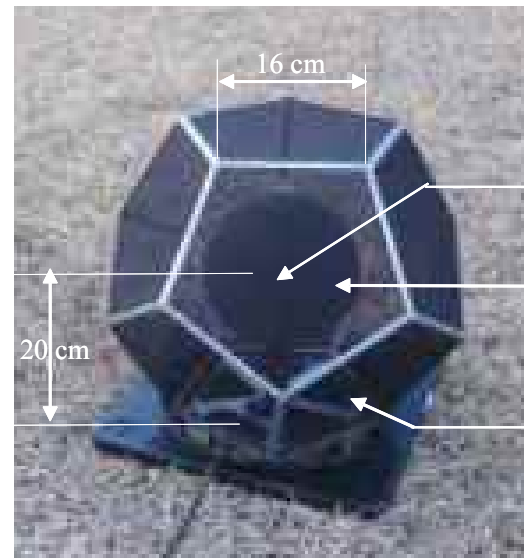


- 測定周波数帯域：1 Hz ~ 20 kHz
- 録音機能：WAVE-format

◆ 騒音計の周波数応答特性



◆ 二重防風スクリーン



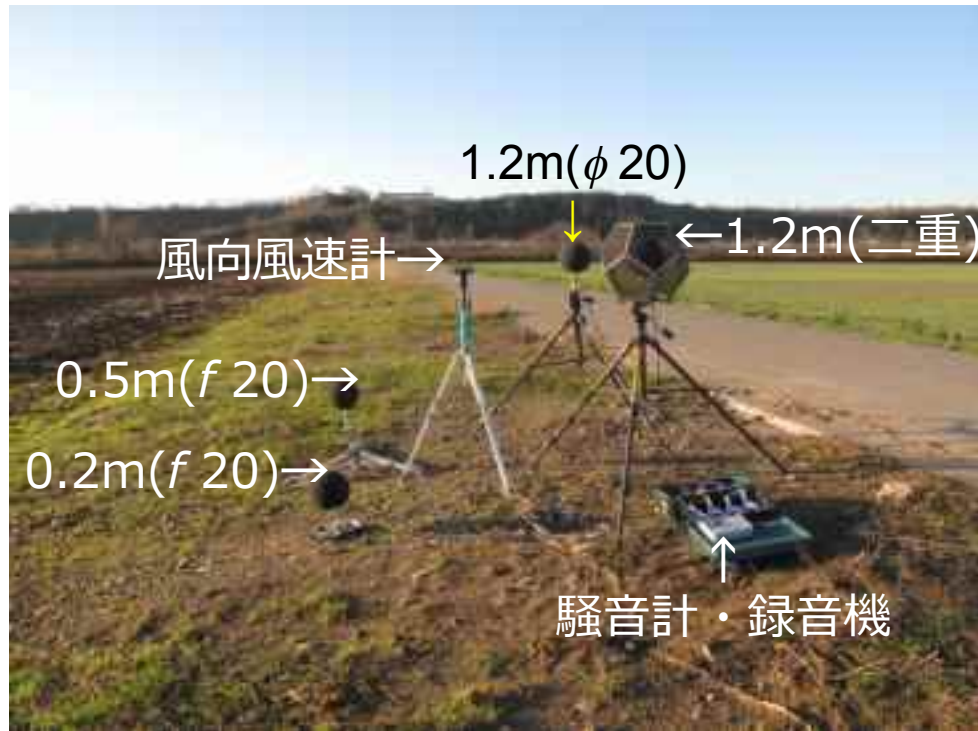
1/2 inch
Condenser Microphone

Primary Wind-screen
20 cm, urethaneform

Second Wind-screen
(DH 160)

出典. 矢野、太田、橘：風車騒音のimmission測定に用いる計測システムの開発，騒音制御工学会研究発表会（2011.9）

現地測定での測定機器設置の例

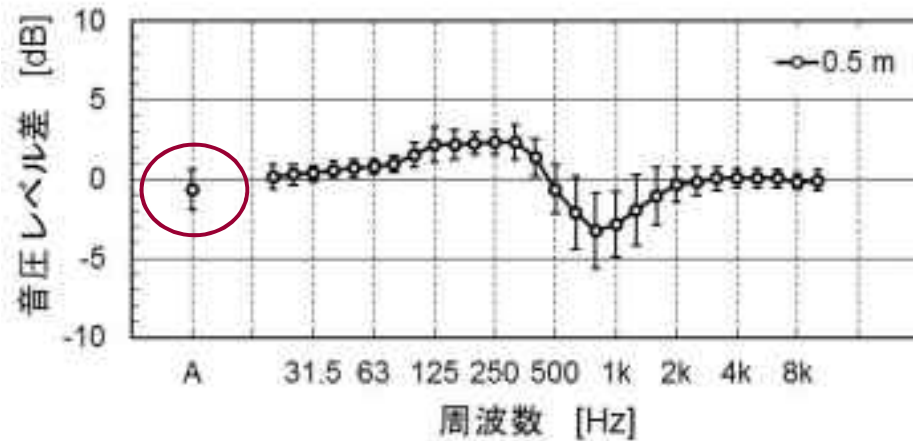


各種条件での騒音測定の場合

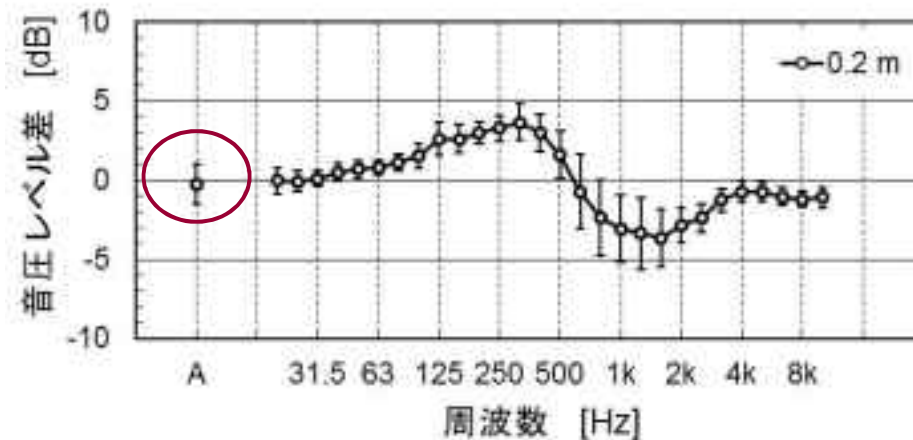


騒音計 (録音機能付き)

測定点高さによる騒音測定値



(a). [高さ0.5m] - [高さ1.2m]



(b). [高さ0.2m] - [高さ1.2m]

高さ1.2 mとの音圧レベル差

注釈. 周波数毎には地表からの反射音の影響が現れているが、
オーバーオール値に**大差は見られない。**



騒音測定の実例

採用する騒音データ、分析データの選定

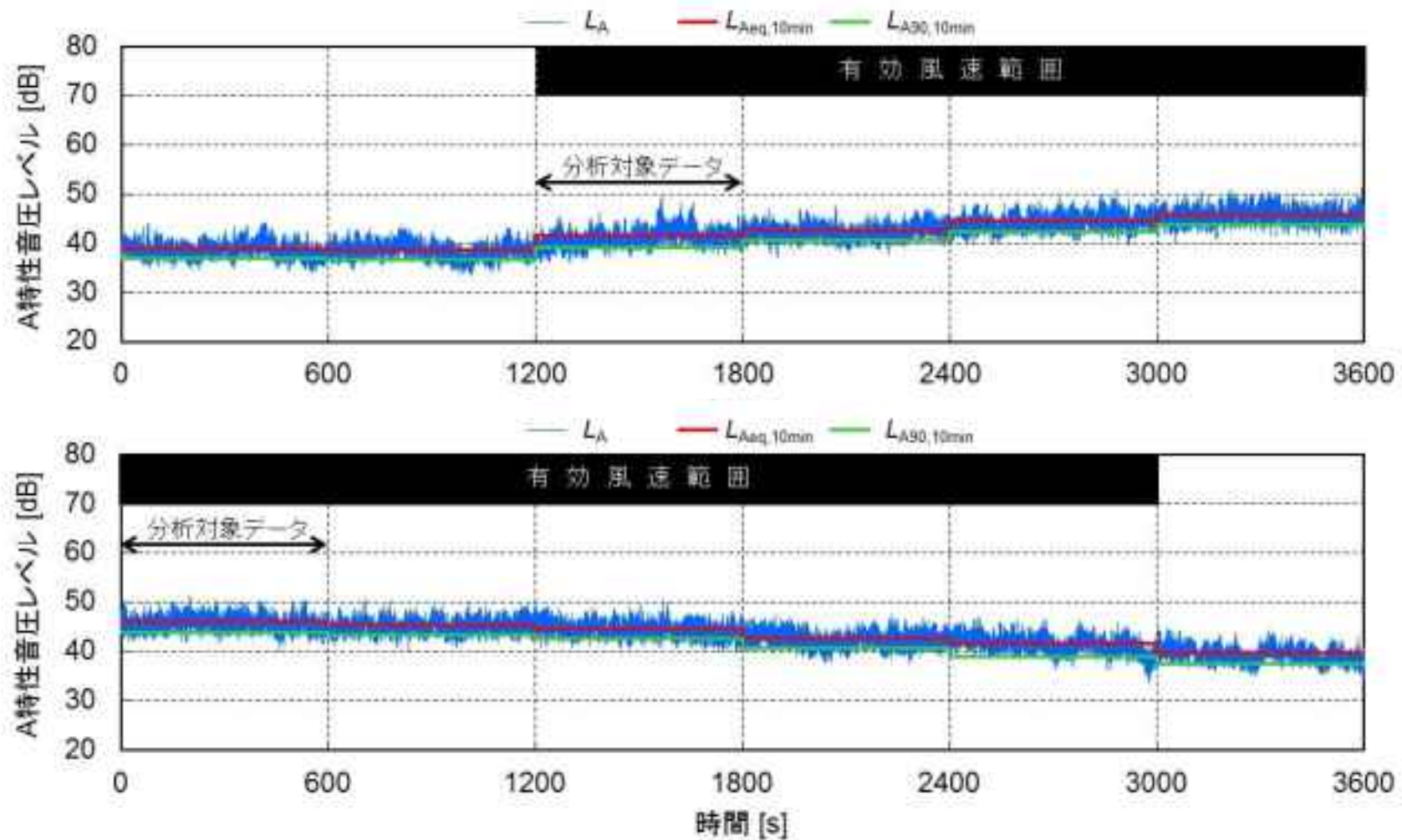
測定開始時刻	基準時間帯にわたり風速が有効風速範囲		基準時間帯の前半のみ有効風速範囲		基準時間帯の後半のみ有効風速範囲		基準時間帯の途中で風が吹いた場合		基準時間帯の途中で風が止んだ場合		基準時間帯で風速が複雑に変化した場合		基準時間帯で風の吹く時間が少なかった場合	
	風速	騒音	風速	騒音	風速	騒音	風速	騒音	風速	騒音	風速	騒音	風速	騒音
22 : 00	有効	分析	有効	分析	無効	--	無効	--	有効	分析	有効	分析	無効	--
	有効	--	有効	--	無効	--	無効	--	有効	--	有効	--	無効	--
	有効	--	有効	--	無効	--	無効	--	有効	--	有効	--	無効	--
	有効	--	有効	--	無効	--	無効	--	有効	--	有効	--	無効	--
	有効	--	有効	--	無効	--	無効	--	有効	--	有効	--	無効	--
	有効	--	有効	--	無効	--	無効	--	有効	--	有効	--	無効	--
23 : 00	有効	分析	有効	分析	無効：10分間平均風速が有効風速範囲内でない場合									
	有効	--	有効	--										
	有効	--	有効	--										
	有効	--	有効	--	無効	--	無効	--	有効	--	有効	--	有効	--
	有効	--	有効	--	無効	--	無効	--	有効	--	有効	--	有効	--
	有効	--	有効	--	無効	--	無効	--	有効	--	無効	--	無効	--
0 : 00	有効	分析	有効	分析	無効	--	無効	--	有効	分析	無効	--	無効	--
	有効	--	有効	--	無効	--	無効	--	有効	--	無効	--	無効	--
	有効	--	有効	--	無効	--	有効	分析	無効	--	有効	分析	無効	--
	有効	--	有効	--	無効	--	有効	--	無効	--	有効	--	無効	--
	有効	--	有効	--	無効	--	有効	--	無効	--	無効	--	無効	--
	有効	--	有効	--	無効	--	有効	--	無効	--	無効	--	無効	--
1 : 00	有効	分析	有効	分析	無効	--	有効	分析	無効	--	無効	--	無効	--
	有効	--	有効	--	無効	--	有効	--	無効	--	無効	--	無効	--
	有効	--	有効	--	無効	分析	無効	--	無効	--	無効	--	無効	--
	有効	--	有効	--	有効	--	有効	--	無効	--	無効	--	無効	--
	有効	--	有効	--	有効	--	有効	--	無効	--	無効	--	無効	--
	有効	--	有効	--	有効	--	有効	--	無効	--	無効	--	無効	--
2 : 00	有効	分析	有効	分析	有効	分析	有効	分析	無効	--	無効	--	無効	--
	有効	--	有効	--	有効	--	有効	--	無効	--	無効	--	無効	--
	有効	--	無効	--	有効	--	有効	--	無効	--	有効	分析	有効	分析
	有効	--	無効	--	有効	--	有効	--	無効	--	有効	--	有効	--
	有効	--	無効	--	有効	--	有効	--	無効	--	有効	--	有効	--
	有効	--	無効	--	有効	--	有効	--	無効	--	無効	--	無効	--
3 : 00	有効	分析	無効	--	有効	分析	有効	分析	無効	--	無効	--	無効	--
	有効	--	無効	--	有効	--	有効	--	有効	分析	有効	分析	無効	--
	有効	--	無効	--	有効	--	有効	--	有効	--	有効	--	無効	--
	有効	--	無効	--	有効	--	有効	--	有効	--	有効	--	無効	--
	有効	--	無効	--	有効	--	有効	--	有効	--	有効	--	無効	--
	有効	--	無効	--	有効	--	有効	--	有効	--	有効	--	無効	--
4 : 00	有効	分析	無効	--	有効	分析	無効	--	有効	分析	無効	--	無効	--
	有効	--	無効	--	有効	--	無効	--	有効	--	有効	分析	有効	分析
	有効	--	無効	--	有効	--	無効	--	有効	--	有効	--	有効	--
	有効	--	無効	--	有効	--	無効	--	有効	--	有効	--	有効	--
	有効	--	無効	--	有効	--	無効	--	有効	--	有効	--	有効	--
	有効	--	無効	--	有効	--	無効	--	有効	--	無効	--	有効	--
5 : 00	有効	分析	無効	--	有効	分析	無効	--	有効	分析	無効	--	有効	--
	有効	--	無効	--	有効	--	無効	--	有効	--	無効	--	有効	--
	有効	--	無効	--	有効	--	無効	--	有効	--	無効	--	有効	--

分析データ数が基準時間帯の実測時間帯数の半数未満の場合は再測定

注釈. 毎正時から10分間のデータに着目、その時間の平均風速が**有効風速範囲**（カットイン風速以上定格風速未満）であれば、騒音データを分析対象にする。有効風速範囲になければ、次の10分間のデータに着目する。データ数が基準時間帯の実測時間帯数（夜間8、昼間16）の**半数未満の場合は再測定**とする。71

採用する騒音データ、分析データの選定

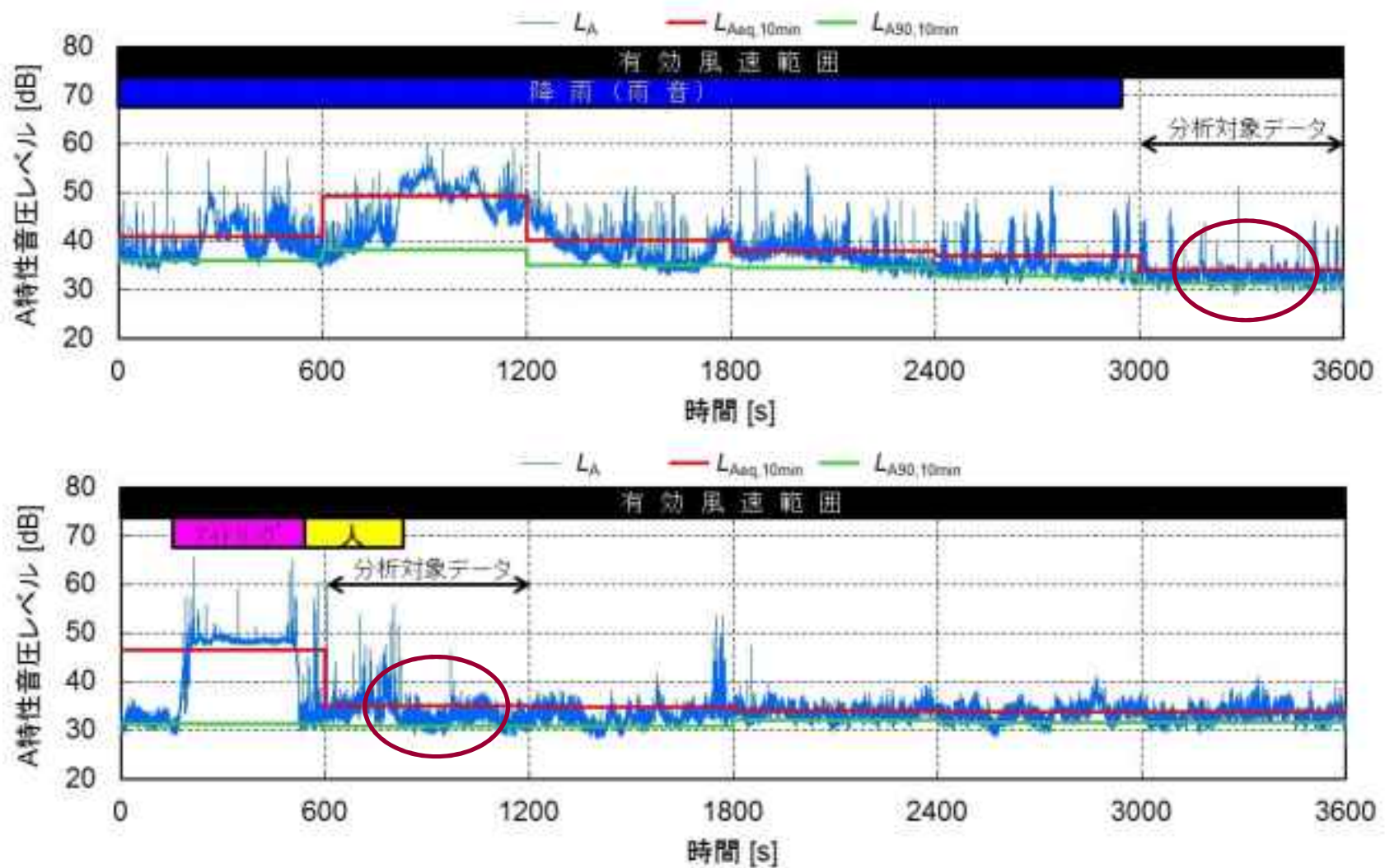
1. 風況が変化した場合



注釈. 有効風速範囲で特定騒音の影響を受けていない（半分以下）最初の10分間を分析対象範囲とする（10分きざみ）.

採用する騒音データ、分析データの選定

2. 暗騒音の状況が変化した場合



注釈. 実測時間の半分以上、対象外騒音（除外音処理）の影響がある場合は、次の10分間を対象にする。

データ処理の流れ（（残留騒音、風車騒音）

採用する実測時間データの選定（風速が有効風速範囲か？）

除外音処理をする方法

- 暗騒音の確認
- 対象外騒音の除外音処理（実音モニタ、レベル波形）
- 対象騒音の L_{Aeq} の算出

L_{A90} から L_{Aeq} を推計する方法

- ベースとなる騒音源の確認（実音モニタ、レベル波形）
- 総合騒音の $L_{A90,total}$ の算出
- 対象騒音の L_{Aeq} の推計
推計方法： $L_{Aeq} = L_{A90,total} + 2$

上記の作業を、測定期間内のすべての観測時間について実施。

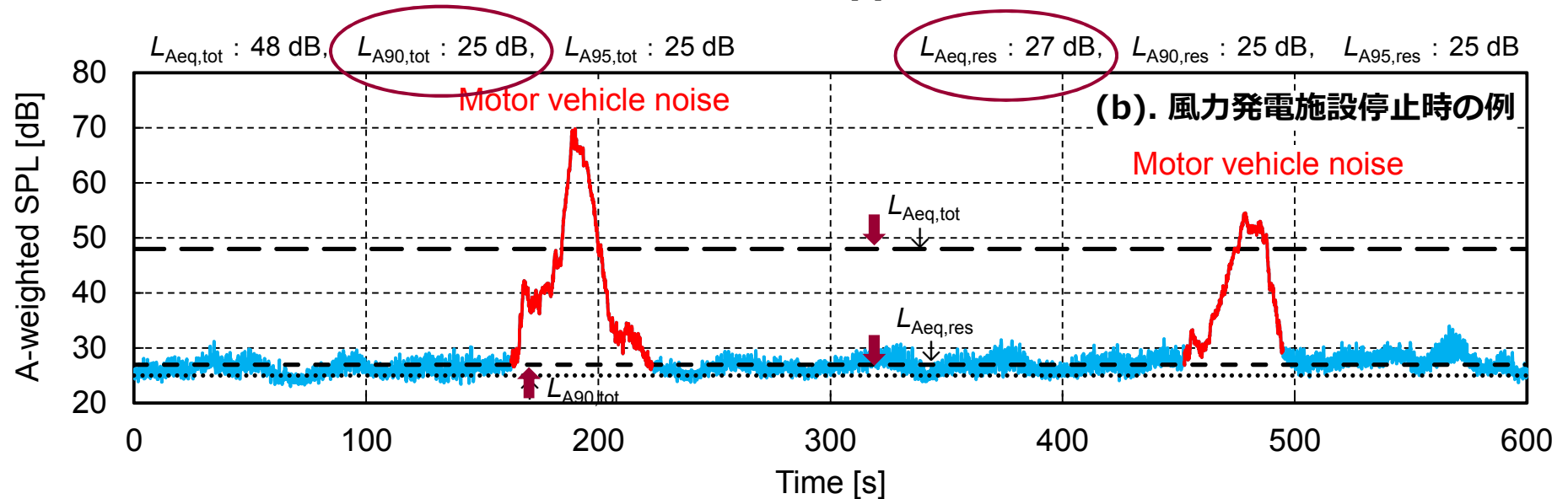
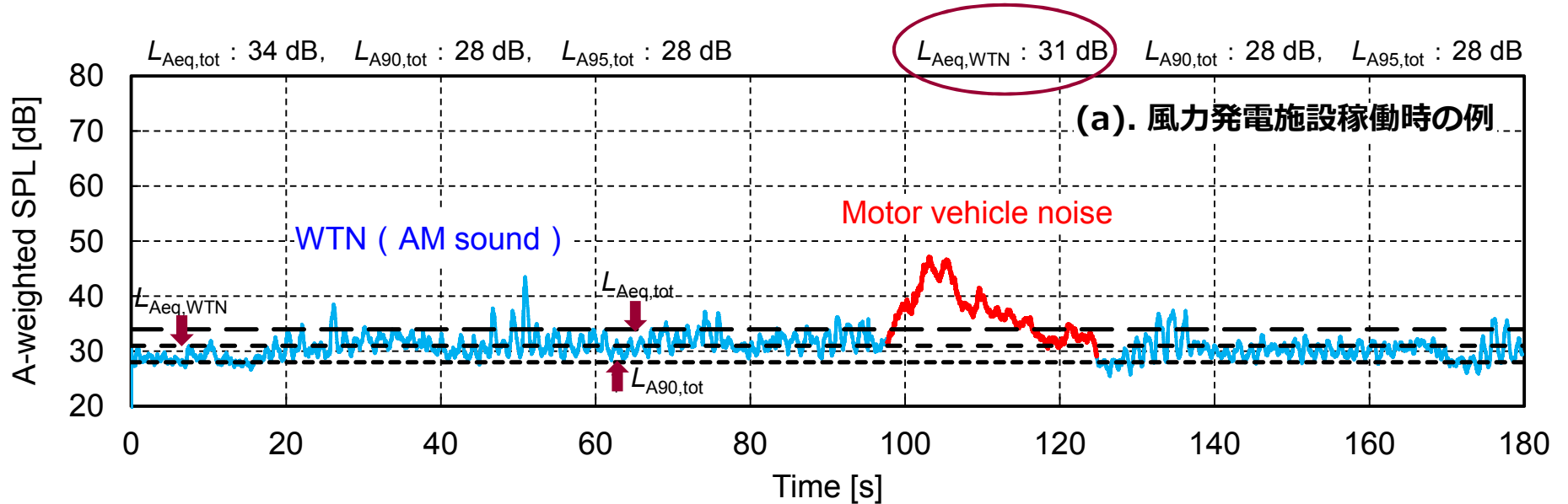
測定期間中の基準時間帯（昼、夜）毎の騒音の評価値を算出する。

除外音処理の対象となる騒音

騒音の種類	風車騒音マニュアル	環境騒音マニュアル
道路交通騒音（近傍）	除外	対象
道路交通騒音（遠方）	対象（ベース）	対象
航空機騒音	除外	除外
新幹線鉄道騒音	除外	除外
在来線鉄道騒音	除外	除外
建設作業騒音	除外	除外
工場・事業所騒音（定常）	対象（ベース）	（記載なし）
工場・事業所騒音（一過性）	除外	（記載なし）
自然音（波音，川音，葉擦れ音等）	対象（一過性は除外）	対象（記載なし）
自然音（風雨，鳥，虫，蛙，雷等）	除外	除外
通常は発生しない人工音（緊急車両，暴走族，放送等）	除外	除外
測定による付加的な音	除外	除外
評価の対象としている音（基本）	ベースとなる騒音	平常時の総合騒音

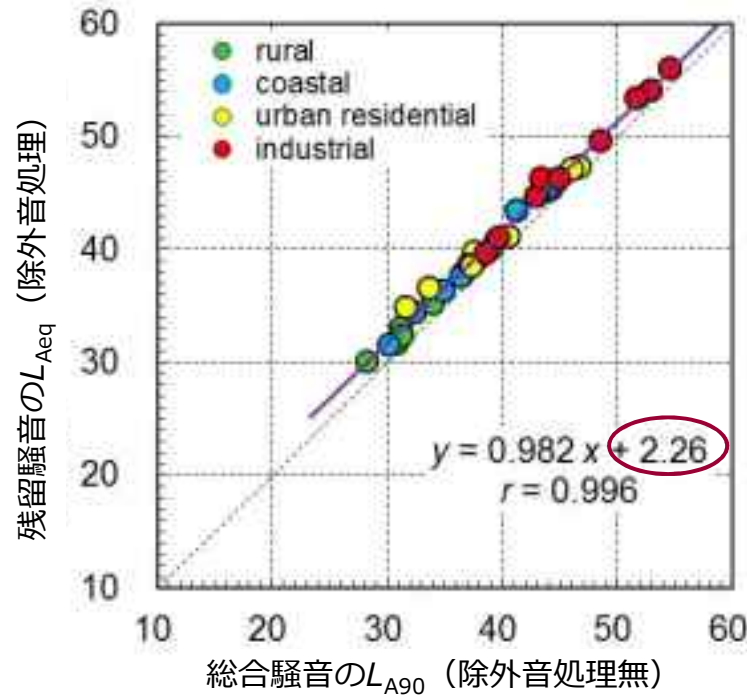
注釈. 除外音処理の対象となるサンプルの総和が実測時間のサンプル数の1/2未満でなければなら
ない. 1/2以上であれば、その実測時間のデータは採用せずに、次の10分間を対象とする.

除外音（妨害音）の影響の例

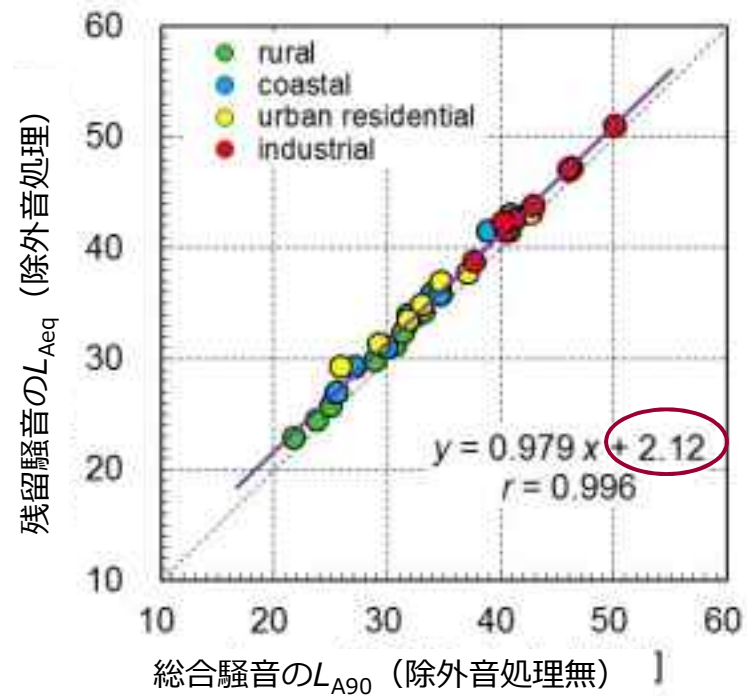


注釈. 総合騒音の90%時間率騒音レベルに**2dB加算**した値が残留騒音の L_{Aeq} になっている. 76

残留騒音の $L_{Aeq,res}$ と総合騒音の $L_{A90,tot}$



(a). 昼間 (06-22)



(b). 夜間 (22-06)

残留騒音の $L_{Aeq,res}$ と総合騒音の $L_{A90,tot}$ の相関 ($N=36$)

注釈. 除外音処理無の総合騒音 $L_{A90,tot}$ と除外音処理の残留騒音 $L_{Aeq,res}$ の相関は良い.
 → 除外音処理は手間が掛かる. → $L_{A90,tot} + 2dB$ で残留騒音を推定.

評価値算出の流れ（残留騒音）、風車騒音）

実測時間（10分間）の L_{Aeq} （測定点毎）
（除外音処理をして算出 あるいは L_{A90} から推計）
（実測時間の**半分以上**で測定できている）

↓ エネルギー平均，小数1位

基準時間帯（昼間16・夜間8）の L_{Aeq} （測定点毎，測定日毎）
（基準時間帯の観測時間数の**半数以上**で測定できている）

↓ エネルギー平均，小数1位

測定時期の L_{Aeq} （基準時間帯毎，測定点毎）
（**3日以上**で基準時間帯の L_{Aeq} が測定できている）

↓ 算術平均，整数値

対象地域の残留騒音の算出
（指針値設定の基本となる値）

↓ 整数値

風車騒音の評価

注釈. 測定時期（春夏秋冬）毎の
残留騒音、風車騒音が得られる。

基準時間帯の L_{Aeq} の算出（残留騒音、風車騒音）

測定日毎の基準時間帯の L_{Aeq} を次式にしたがいエネルギー平均し、小数点第1位の値で算出する。

時間毎の実測値を基準時間帯（昼間、夜間）の区分で平均。

基準時間帯	残留騒音	風車騒音
昼間	$L_{Aeq, resid, day} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{N_{day}} \sum_i 10^{\frac{L_{Aeq, resid, day, i}}{10}} \right)$	$L_{Aeq, WTN, day} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{N_{day}} \sum_i 10^{\frac{L_{Aeq, WTN, day, i}}{10}} \right)$
夜間	$L_{Aeq, resid, night} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{N_{night}} \sum_i 10^{\frac{L_{Aeq, resid, night, i}}{10}} \right)$	$L_{Aeq, WTN, night} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{N_{night}} \sum_i 10^{\frac{L_{Aeq, WTN, night, i}}{10}} \right)$

N_{day} および N_{night} は昼間および夜間の有効な観測時間の数（すべての観測時間が有効であれば $N_{day} = 16$, $N_{night} = 8$ ）

$L_{Aeq, resid(WTN), day, i}$ および $L_{Aeq, resid(WTN), night, i}$ は、昼間および夜間の i 番目の実測時間の残留騒音（風車騒音）の等価騒音レベル[dB]

測定時期の L_{Aeq} の算出（残留騒音、風車騒音）

測定時期の基準時間帯の L_{Aeq} は、次式にしたがいエネルギー平均し、残留騒音については小数点第1位の値で、風車騒音については整数値で算出する。日々の基準時間帯の値を平均し測定時期（春夏秋冬）の値を求める。

基準時間帯	残留騒音	風車騒音
昼間	$\bar{L}_{Aeq, resid, day} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{D_{day}} \sum_j 10^{\frac{L_{Aeq, resid, day, j}}{10}} \right)$	$\bar{L}_{Aeq, WTN, day} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{D_{day}} \sum_j 10^{\frac{L_{Aeq, WTN, day, j}}{10}} \right)$
夜間	$\bar{L}_{Aeq, resid, night} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{D_{night}} \sum_j 10^{\frac{L_{Aeq, resid, night, j}}{10}} \right)$	$\bar{L}_{Aeq, WTN, night} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{D_{day}} \sum_j 10^{\frac{L_{Aeq, WTN, night, j}}{10}} \right)$

D_{day} および D_{night} は残留騒音が測定できた日数 ($D_{day}, D_{night} \geq 3$)

$L_{Aeq, resid(WTN), day, j}$ および $L_{Aeq, resid(WTN), night, j}$ は残留騒音（風車騒音）が測定できた j 番目の測定日の昼間および夜間の基準時間帯の L_{Aeq}

対象地域の残留騒音の算出

対象地域内の複数地点で残留騒音の測定を行った場合、対象地域の残留騒音は、次式に示すように対象地域内の測定地点における基準時間帯の値を算術平均し、整数値で算出する。この値を対象地域の残留騒音（昼夜夫々一つの値）とする。→ 風車騒音の指針値を求める。

昼間	夜間
$L_{\text{Aeq,resid,day,area}} = \frac{\sum \bar{L}_{\text{Aeq,resid,day},k}}{N_{\text{area}}}$	$L_{\text{Aeq,resid,night,area}} = \frac{\sum \bar{L}_{\text{Aeq,resid,night},k}}{N_{\text{area}}}$

$\bar{L}_{\text{Aeq,resid,day},k}$ および $\bar{L}_{\text{Aeq,resid,night},k}$ は昼間および夜間の対象地域の k 番目の測定地点における測定期間の残留騒音の等価騒音レベル[dB].

N_{area} は対象地域の測定地点数.

Ⅲ. 洋上風力発電施設に係る水中音の影響評価の状況

1. 洋上風車から発生する水中音の基本的考え方¹⁾
2. 水中音の発生
3. 水中音の伝搬予測
4. 水中音・海底振動の測定
5. 水中音の海洋生物への影響

概要

現状、発生源データ、伝搬予測手法、海洋生物に及ぼす影響評価など、十分な知見が揃っていない状況にある。

データの蓄積、伝搬予測手法の開発、影響評価方法などについて研究、開発が進められている。

出典1)：洋上風力発電所等に関わる環境影響評価の基本的な考え方に関する検討会報告書（環境省 2016.03）

はじめに

音圧レベル

空気中の基準音圧値：20 μ Paに対して、水中の音圧基準値：**1 μ Pa**で、同じ圧力変動の場合、音圧レベルで水中の方が26dB大きくなる。

音速

空気中の音速は、気温15 $^{\circ}$ Cで約340m/sに対し、水中は1500m/s程度で、**約4.4倍速い**。

用語

洋上風力関係には、海中音、水中音、水中音響、水中騒音等の用語が使用されている。
ここでは**水中音**を用いる。

洋上風車から発生する水中音の基本的考え方

1. 水中音の評価項目

洋上風力発電所（着床式／浮体式）を、陸域から一定の距離を目安に、**沖合**洋上風力発電所と**沿岸**洋上風力発電所に区分し、工事の実施（**建設機械の稼働**）及び土地又は工作物の存在及び供用（**施設の稼働**）では水中音の影響を勘案して選定することになっている。

2. 水中音の環境影響評価

海域に生息する**動物**（海生哺乳類、海生爬虫類(ウミガメ類)、魚等の遊泳動物）、海域に生息する**植物**が対象になっている。環境要因は、建設機械の稼働、地形改変及び施設の稼働がある。特に、基礎における杭工事から発生する水中音が海洋哺乳類、魚類等に影響があるとされている。

3. 海外の状況

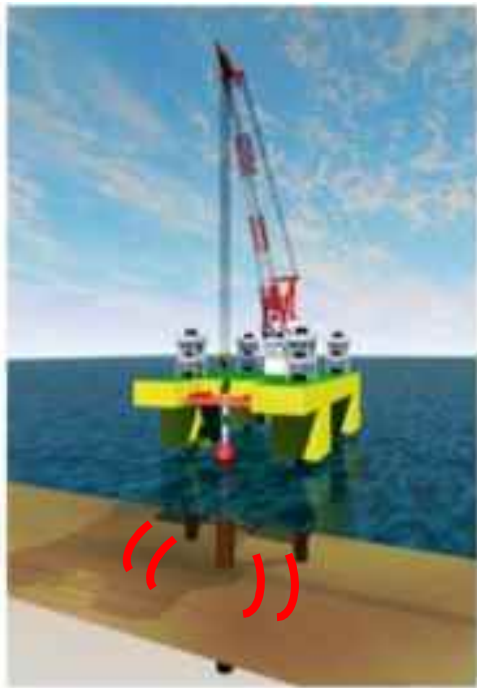
英国、ドイツ、デンマーク、オランダ、ベルギーなどは洋上風力発電が盛んである（ウインドヨ-ロッパ2017：洋上風力総出力15.8GW）。オランダでは2015年に「洋上風力エネルギー法」が施行されている。伝搬予測手法についてもオランダ方式には水中音の要因が含まれているようである。水中音の予測ソフトウェアは他にも幾つかあり利用されている様子である。

建設段階の杭工事や建設用船舶の往来による水中音が、海洋哺乳類（イルカ、アザラシ等）、魚類の逃避や繁殖サイトへの影響があるとされている（影響は限定的）。

水中音の発生

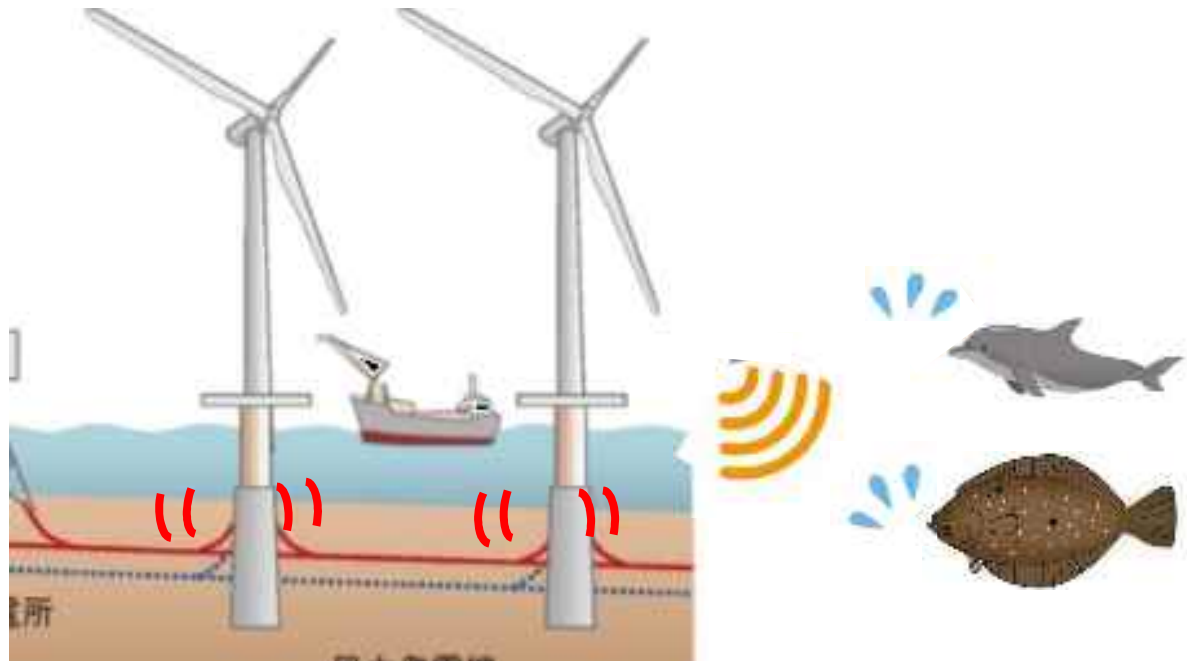
建設時及び稼働時（運転時）にタワー等の構造物、地盤等から振動に起因する
個体伝搬音の発生が考えられる。

建設時の水中音



杭打ちなど

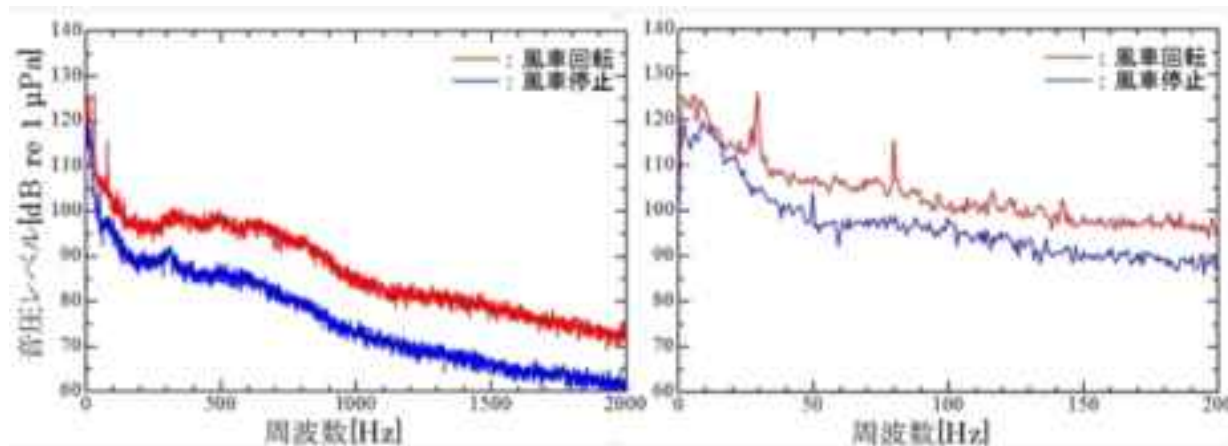
施設稼働時の水中音



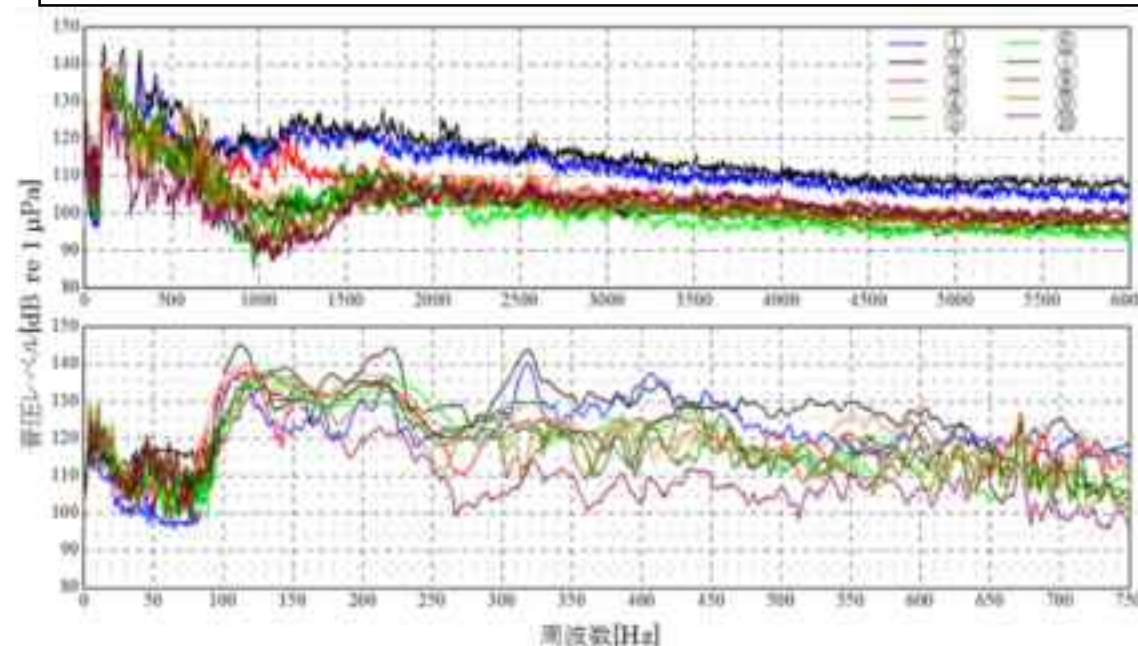
稼働時の個体伝搬音

海洋生物への影響

注釈. ブレードの回転により発生する空力音については、空気と水の固有音響抵抗（ ρC ）が大きく異なるため、ほとんど水面で反射され、水中への透過伝搬（水中音）は十分小さい。



風車回転中および停止中の水中放射音（周波数特性）

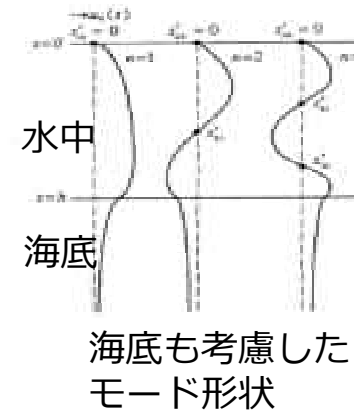
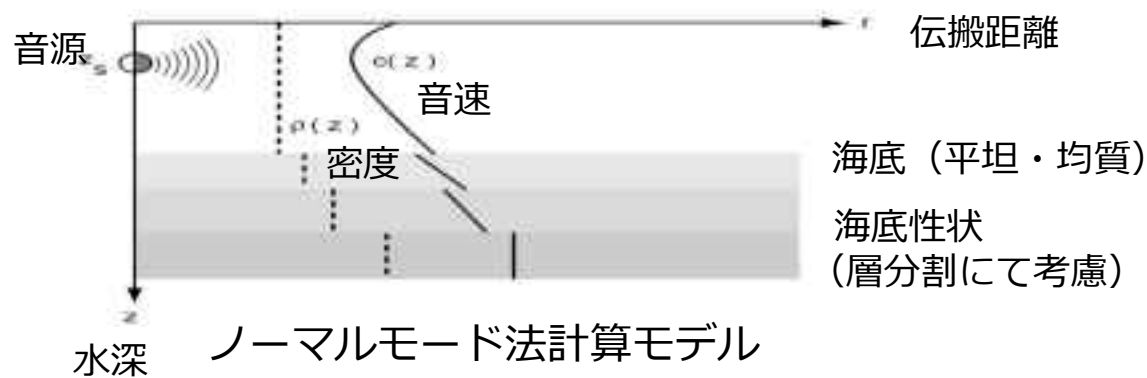
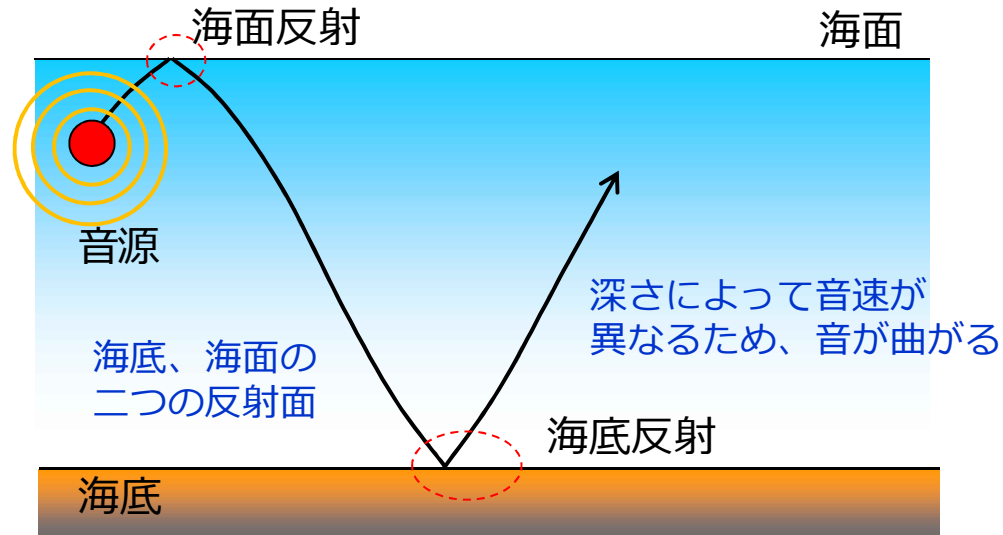


モノパイル打設中の水中音（周波数特性）
 (①～⑩は打設地点から距離の異なる観測地点)

出典. 海上技術安全研究所
 報告第15巻1号(2015年07月)

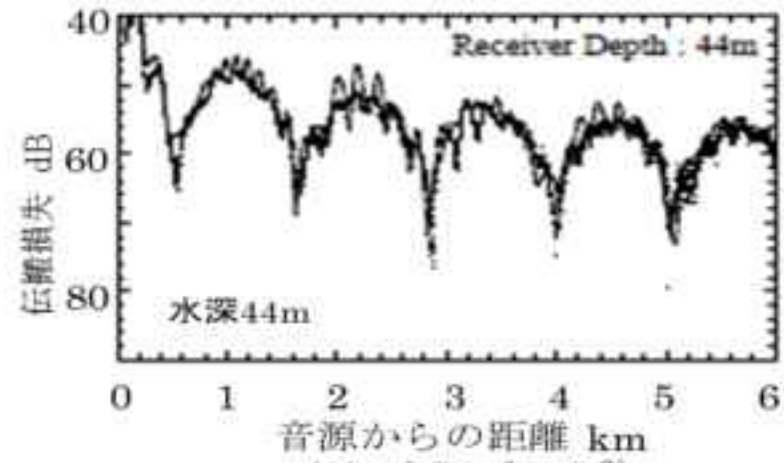
水中音の伝搬

水中音は、空気中の一般的な騒音と異なり、(1) 海底、海面の2つの反射面がある、(2) 水深により音速が異なる、(3) 海底に伝搬する音波がある等の特徴があり音波の波動性が強く影響した複雑な伝搬性状を示す。

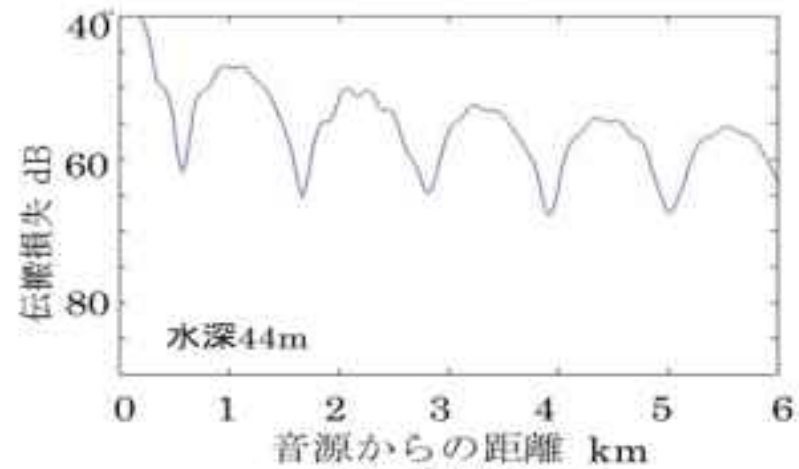


水中音の伝搬予測手法

予測手法	特徴
音線法	境界条件設定が比較的容易であるが、波動性が考慮不可のため低い周波数で精度が低い。
FDTD法	厳密な計算結果が得られるが、計算時間が長くなる。
ノーマルモード法	波動性の考慮が可能で計算時間が短いですが、境界条件が限定される。
PE法	波動性の考慮可能だが、プログラム化が比較的難しい。



(a) 実測データ²⁾

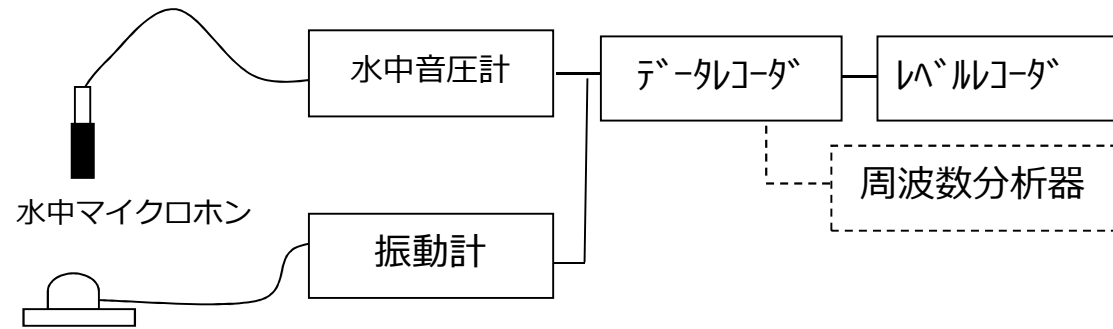


(b) 予測データ

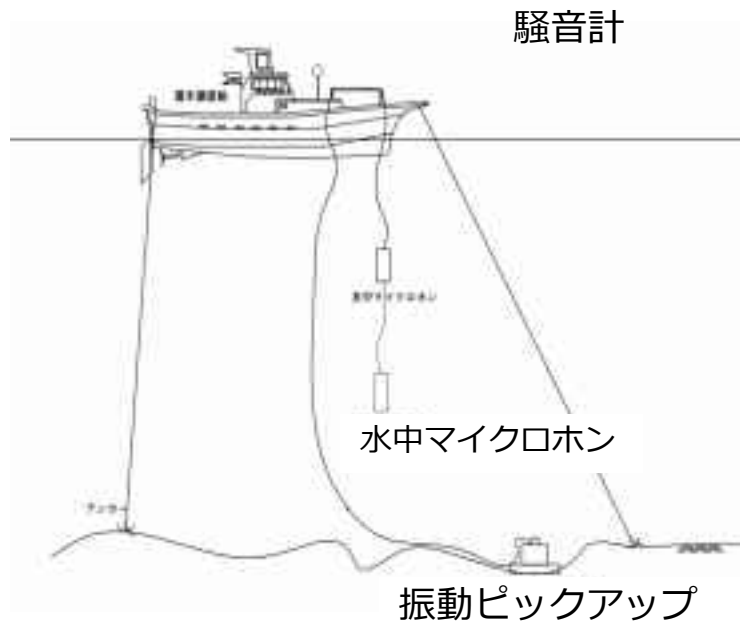
ノーマルモード法による予測値と実測値

出典. 山下,今井,宮崎,井上,太田: 水中音伝搬予測手法の実用開発, 日本騒音制御工学会講演論文集 (2018-10)

水中音・海底振動の測定



振動ピックアップ



マイクロホン設置状態



ピックアップ設置状態

水中音圧計

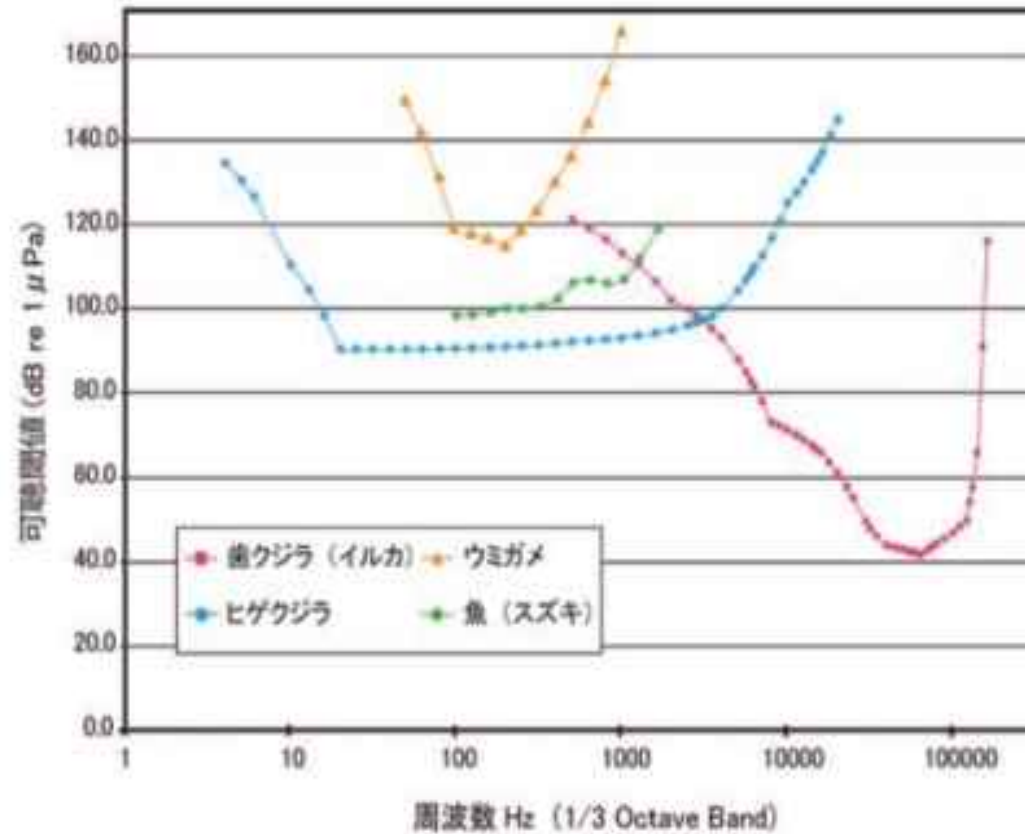


センサ部



- 周波数範囲：10～100kHz
- 音圧測定範囲：100～180dB (0dB=1 μ Pa)

水中音の海洋生物への影響



【水中生物可聴閾値の例】

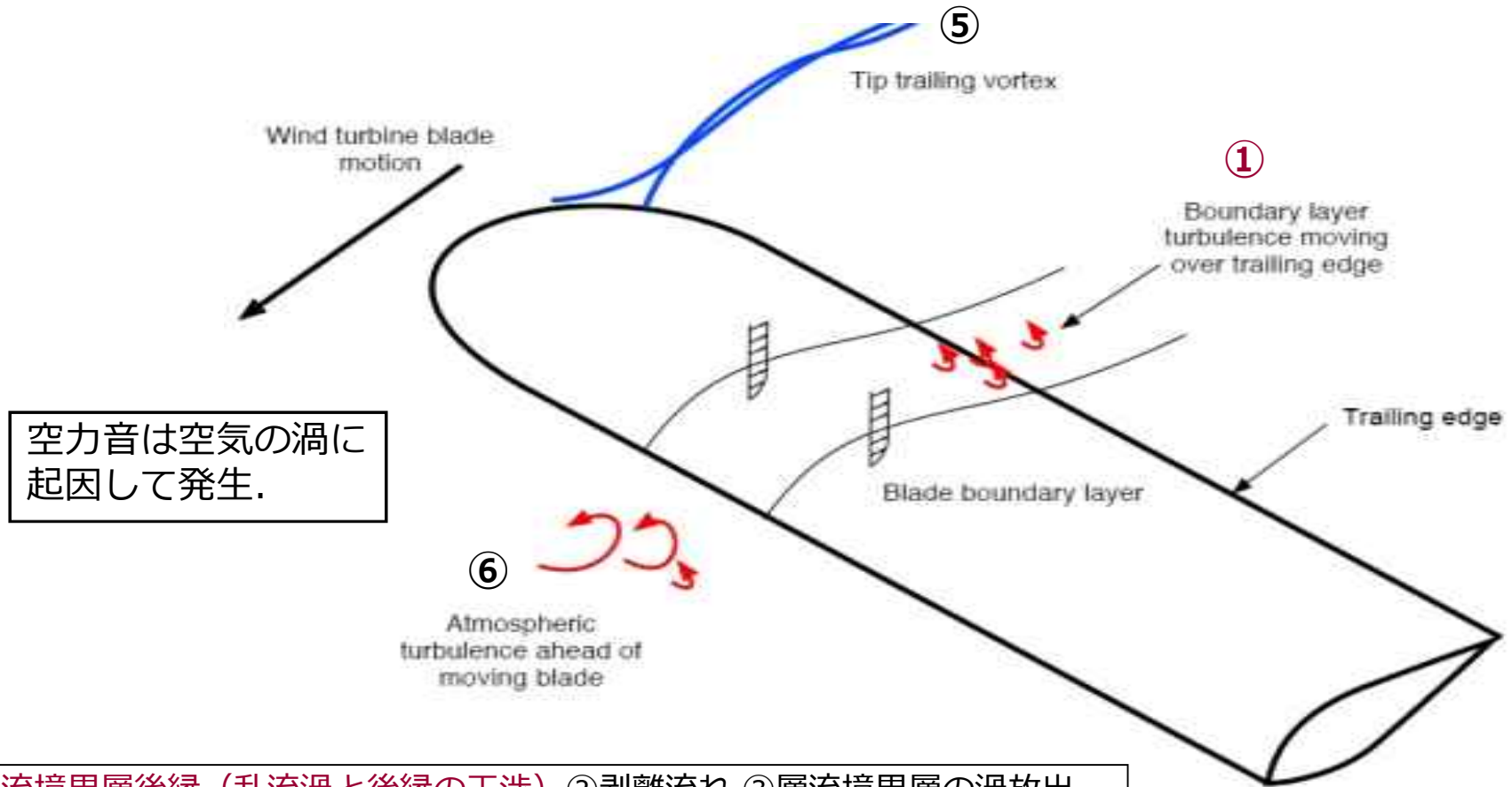
出典. 公益社団法人海洋生物環境研究所ニュース No.115 (2012.7)

Ⅱ．風車音の発生メカニズムと低減策

1. 空力騒音
2. 機械音（増速機、発電機、換気ファンなど）
3. 固体伝搬音
4. 低減策

（NEDO 平成20-21年度、環境省 平成23-26年度受託業務の一部紹介）

風車ロータ翼周りの主な空力音源



空力音は空気の渦に起因して発生.

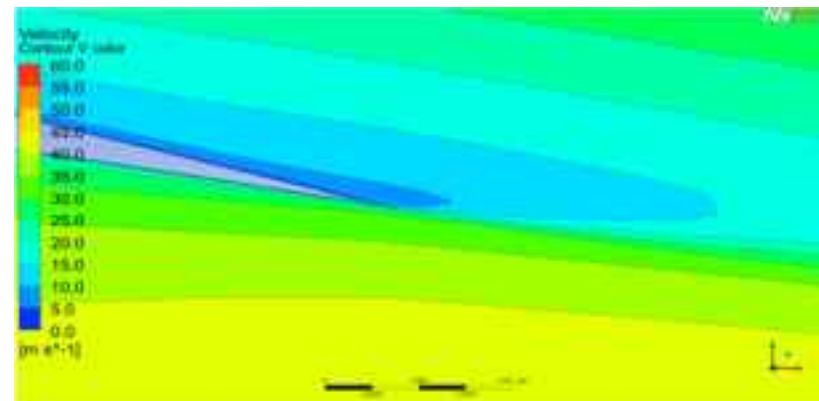
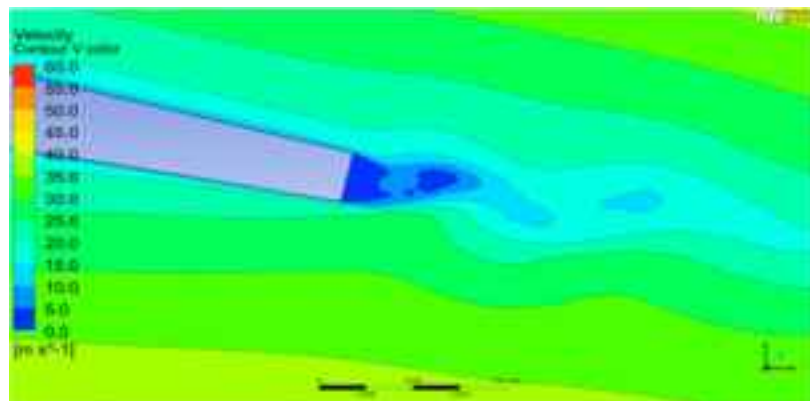
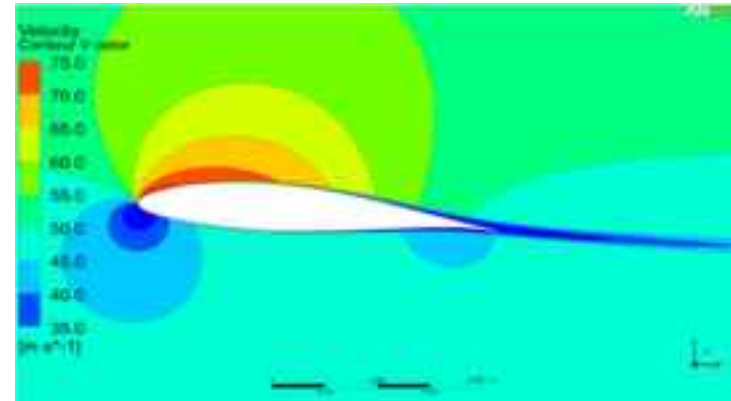
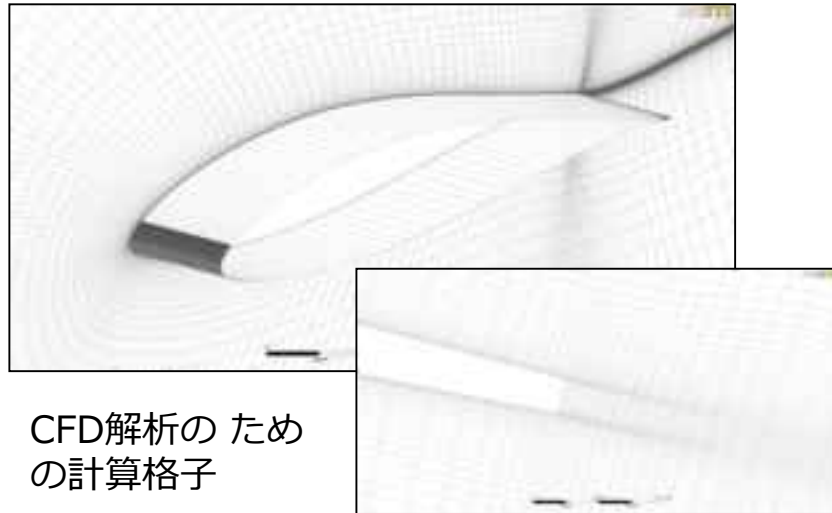
- ①乱流境界層後縁（乱流渦と後縁の干渉） ②剥離流れ ③層流境界層の渦放出
 ④後縁厚み渦放出 ⑤翼端渦 ⑥乱流流入風（乱流渦と前縁・翼全体の干渉）

注釈. 空力音の低減はC F D（流体解析）と風洞模型試験で見当をつけ、実機実証試験で低減効果を確認した.

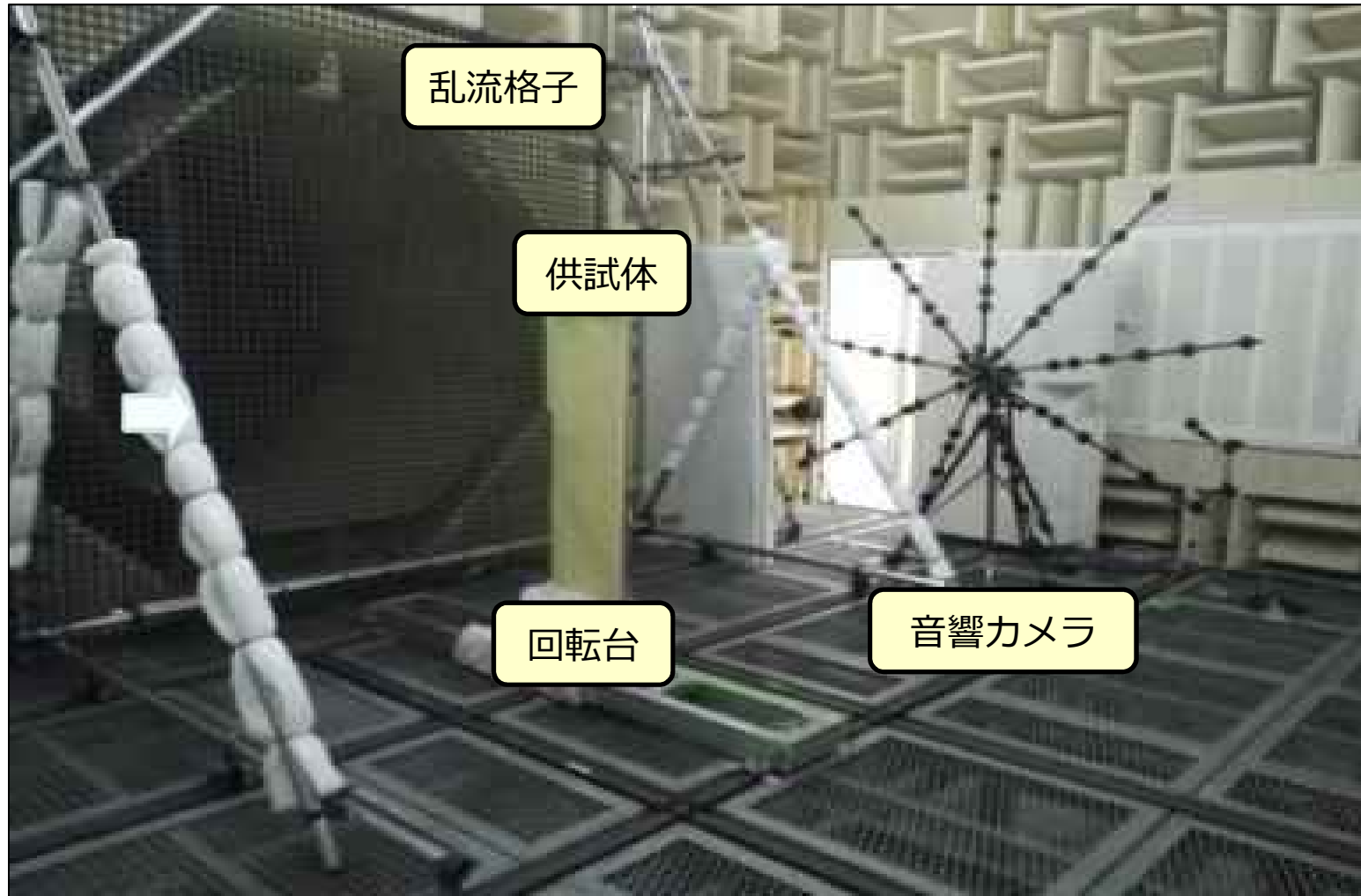
出典. P. Moriarty and P. Migliore, Semi-Empirical Aeroacoustic Noise Prediction Code for Wind Turbines, NREL/TP-500-34478, 2003.

C F D (Computational Fluid Dynamics) 解析によるブレード周りの空気流れの検討

注釈. 後縁厚さの程度によるブレード周り流れの違いを、C F D解析によって調べた.



風洞試験の状況（低騒音実験風洞）



後縁ノコギリエッジによる空力音低減



デバイス設置完了



デバイスの取付

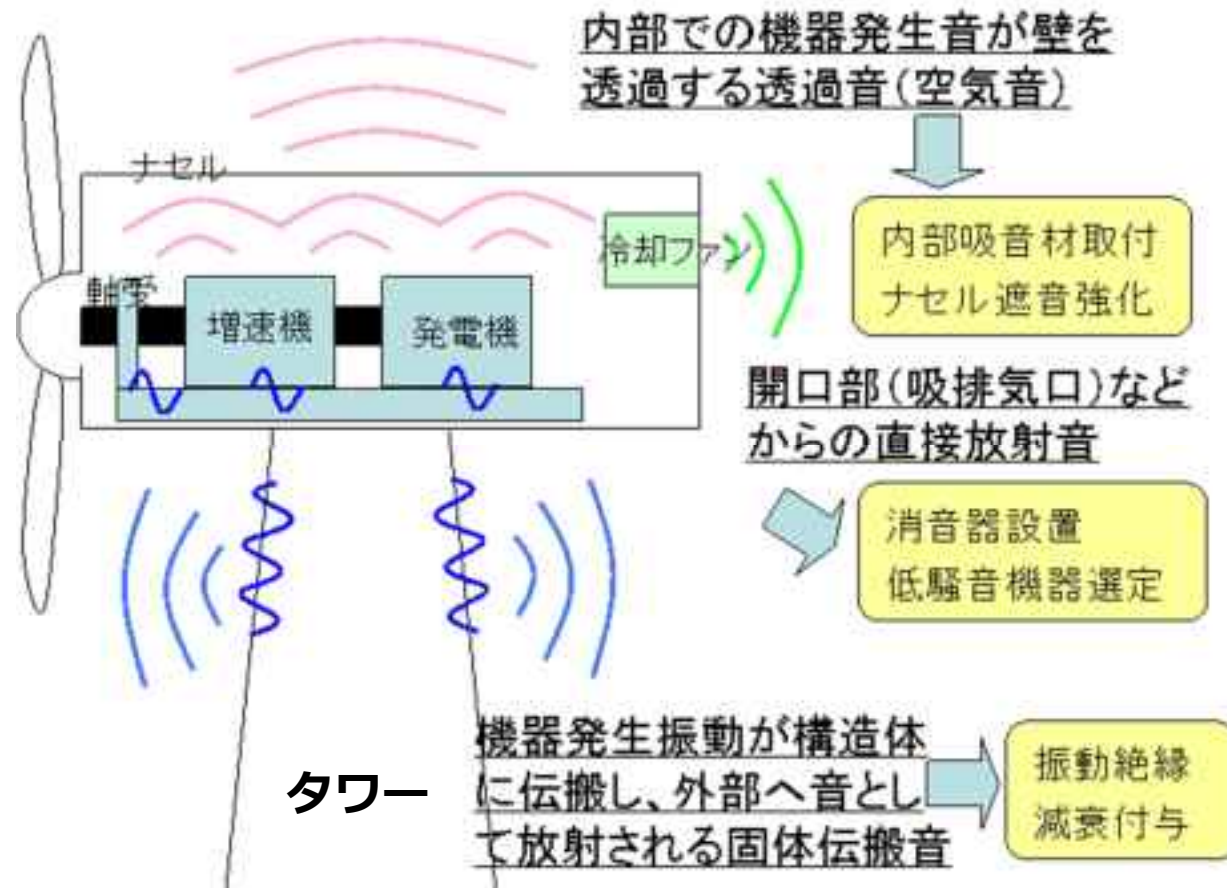


取付の準備

翼先端20%の範囲に後縁ノコギリエッジを設置することにより、約3dBの騒音低減を確認。

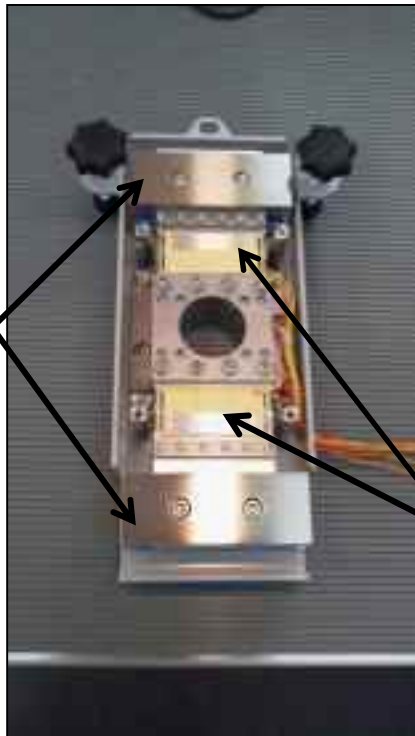
機械音の発生メカニズム

- 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.



動吸振器の実証機開発および実機実証試験

実証機的设计・製作



質量
各1kg

板バネ+
ピエゾ素子

タワー内壁設置状況



制振ユニット：総重量5.6kg/台
(永久磁石+接着剤による固定)

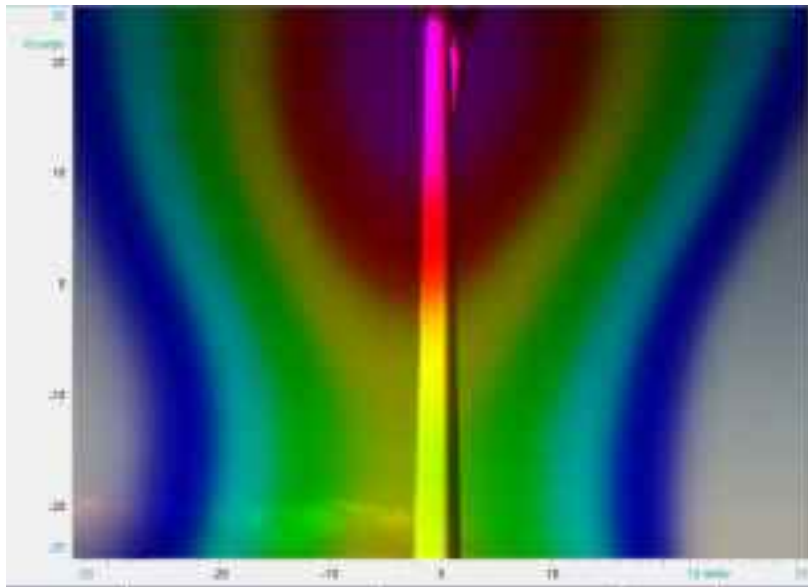
コントローラ

ドライバユニット

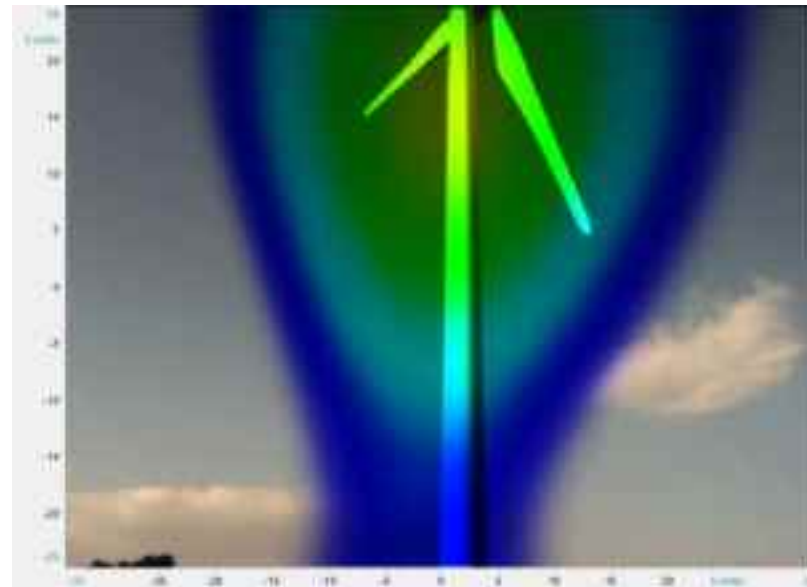
注釈1. 動吸振機は薄型（錘+板ばね）、板ばねにピエゾ素子を貼付け、周波数可変にしている。
実機実証試験用に改良した。

動吸振器の騒音低減効果（実機実証試験）

音響カメラ計測結果（200Hz付近ピーク）



定格運転時／制振装置OFF



定格運転時／制振装置ON

音圧大

音圧小

風車タワーからの放射音低減を確認

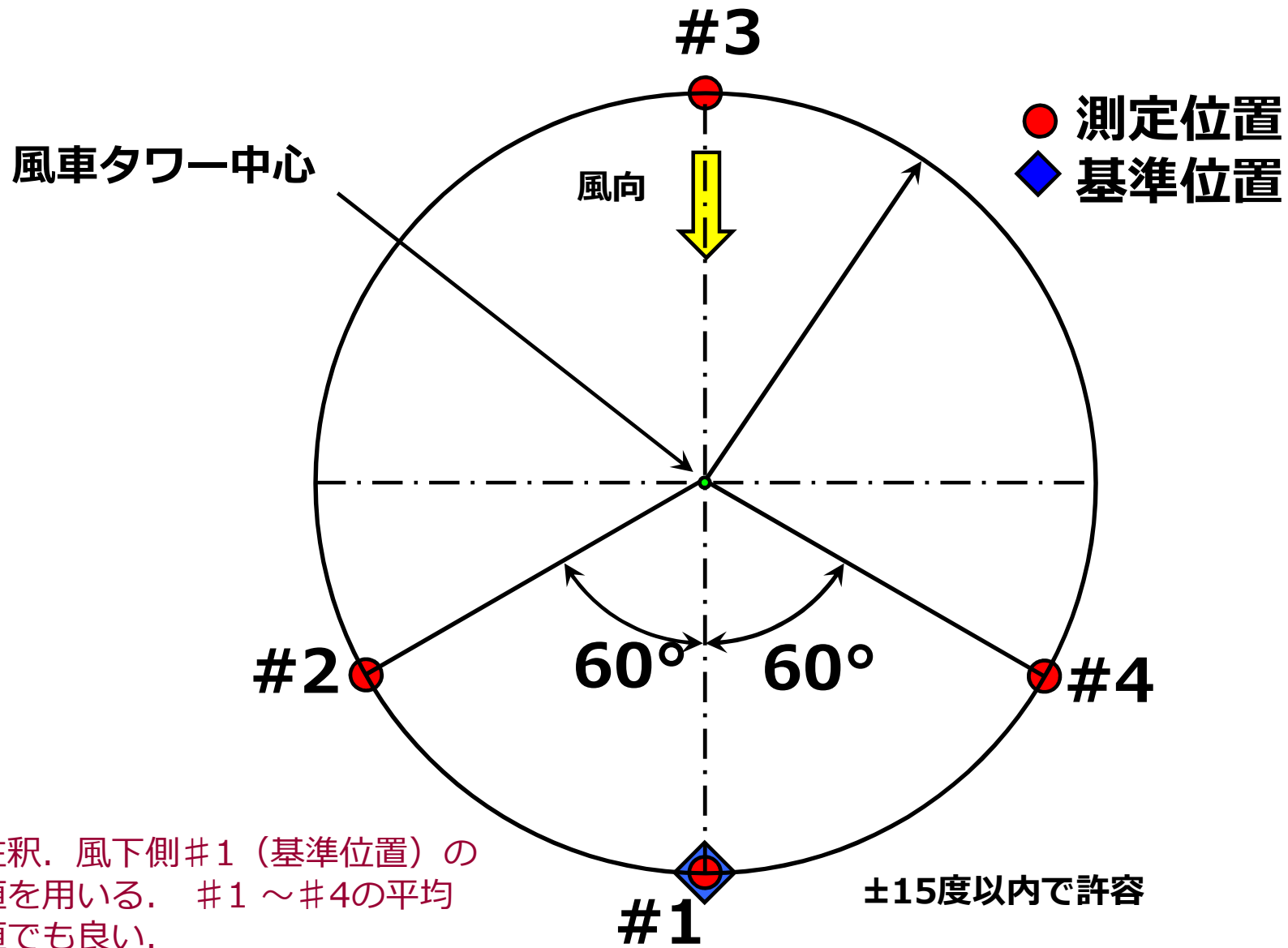
V. 風車発生音の測定

(JIS C 1400-11:2017(IEC61400-11:2012)の一部紹介)

風力発電システム－第11部：騒音測定法

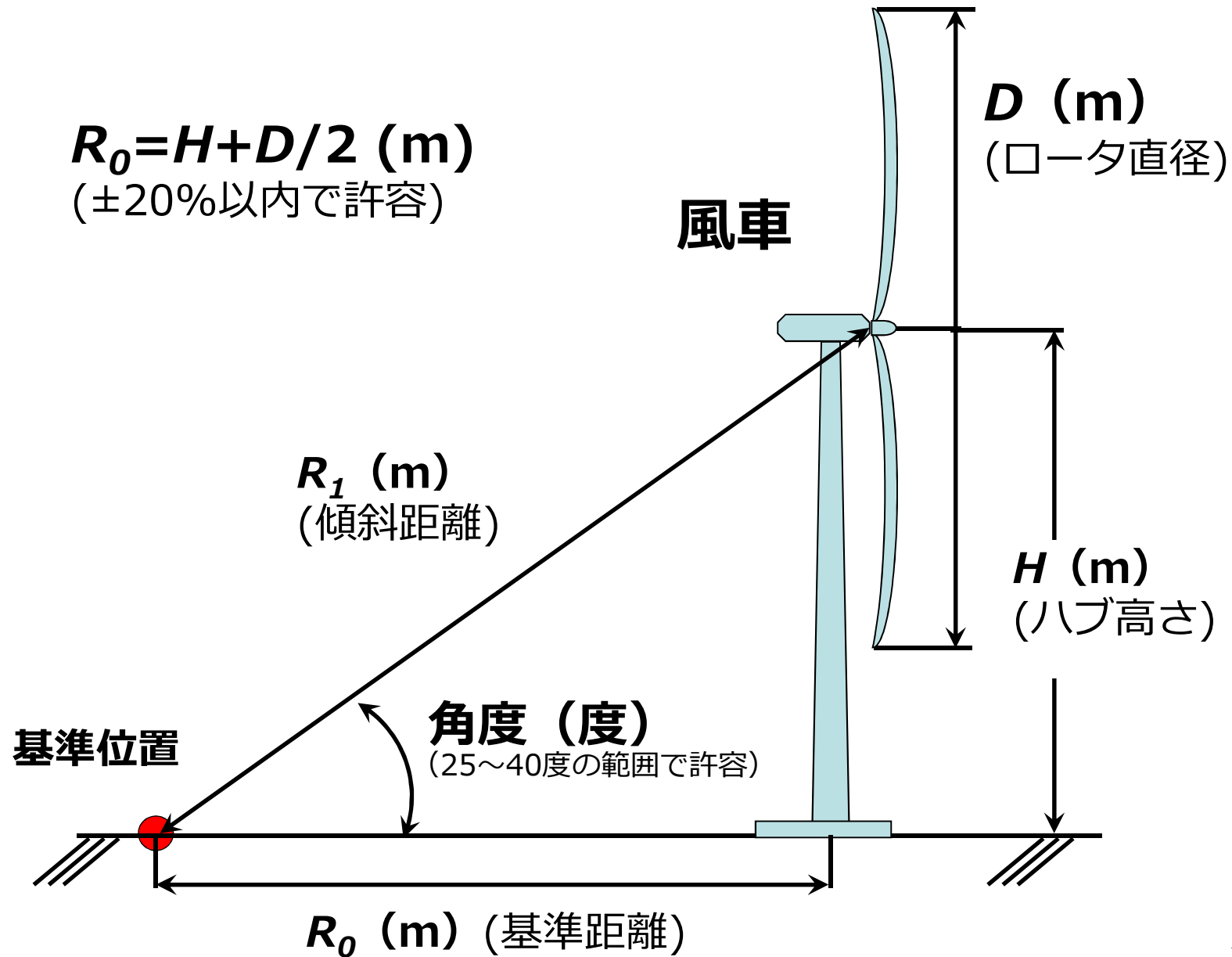
JIS C 1400-11:2017 (IEC61400-11:2012対応 J I S)

1. 風車騒音を測定・評価する方法について規定.
 - ・ 見かけの音響パワーレベル
 - ・ オクターブまたは1/3オクターブバンドレベル
 - ・ 純音性
 - ・ 風速依存性
 - ・ 指向性など
2. 特徴はマイクロホンの風雑音を小さくする工夫.



注釈. 風下側#1 (基準位置) の値を用いる. #1 ~ #4の平均値でも良い.

マイクロホンの配置(平面図)



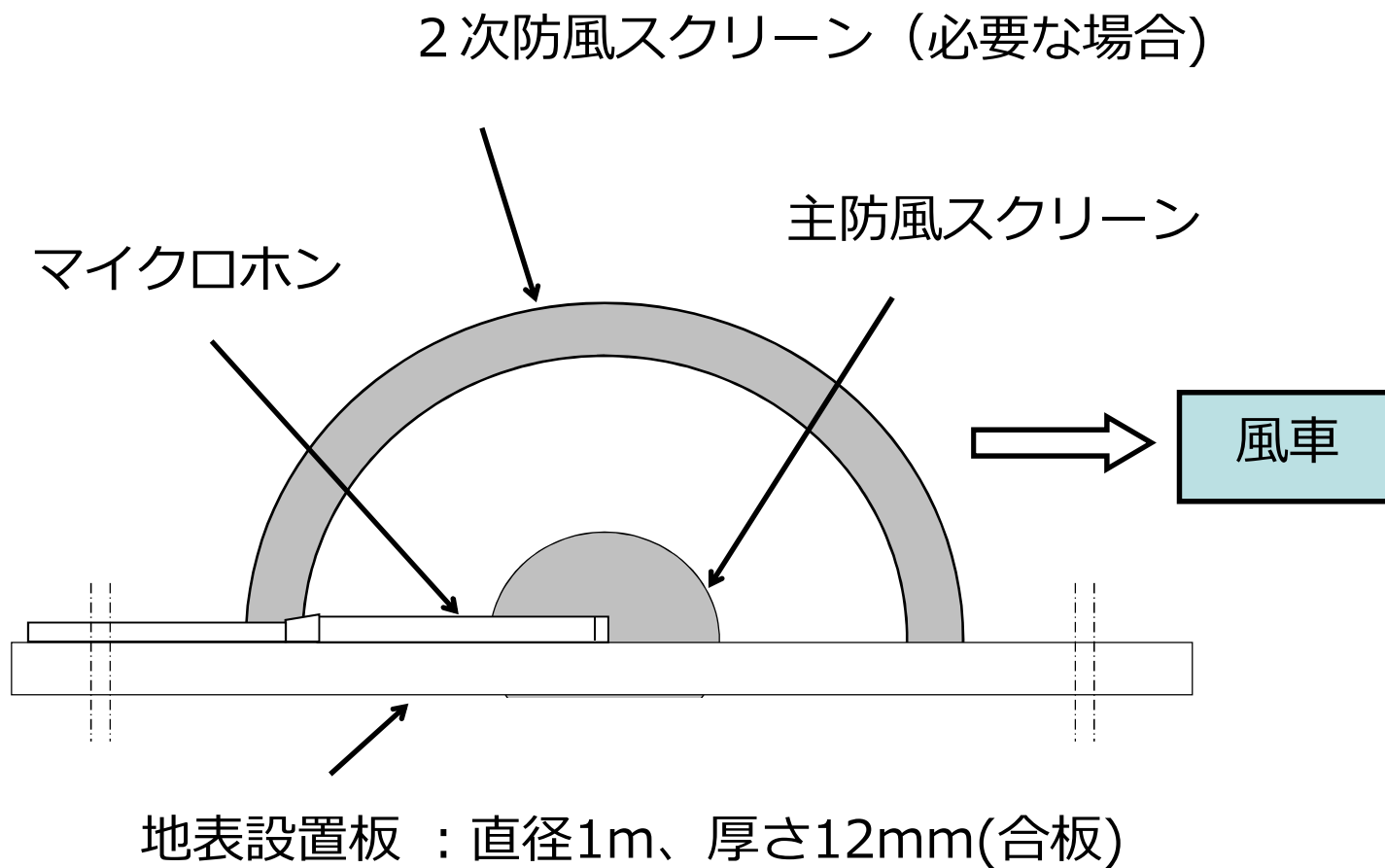
音響パワーレベル L_{WA} (dB)

$$L_{WA} = L_{Aeq} - 6 + 10 \log(4\pi R_1^2 / S_0)$$

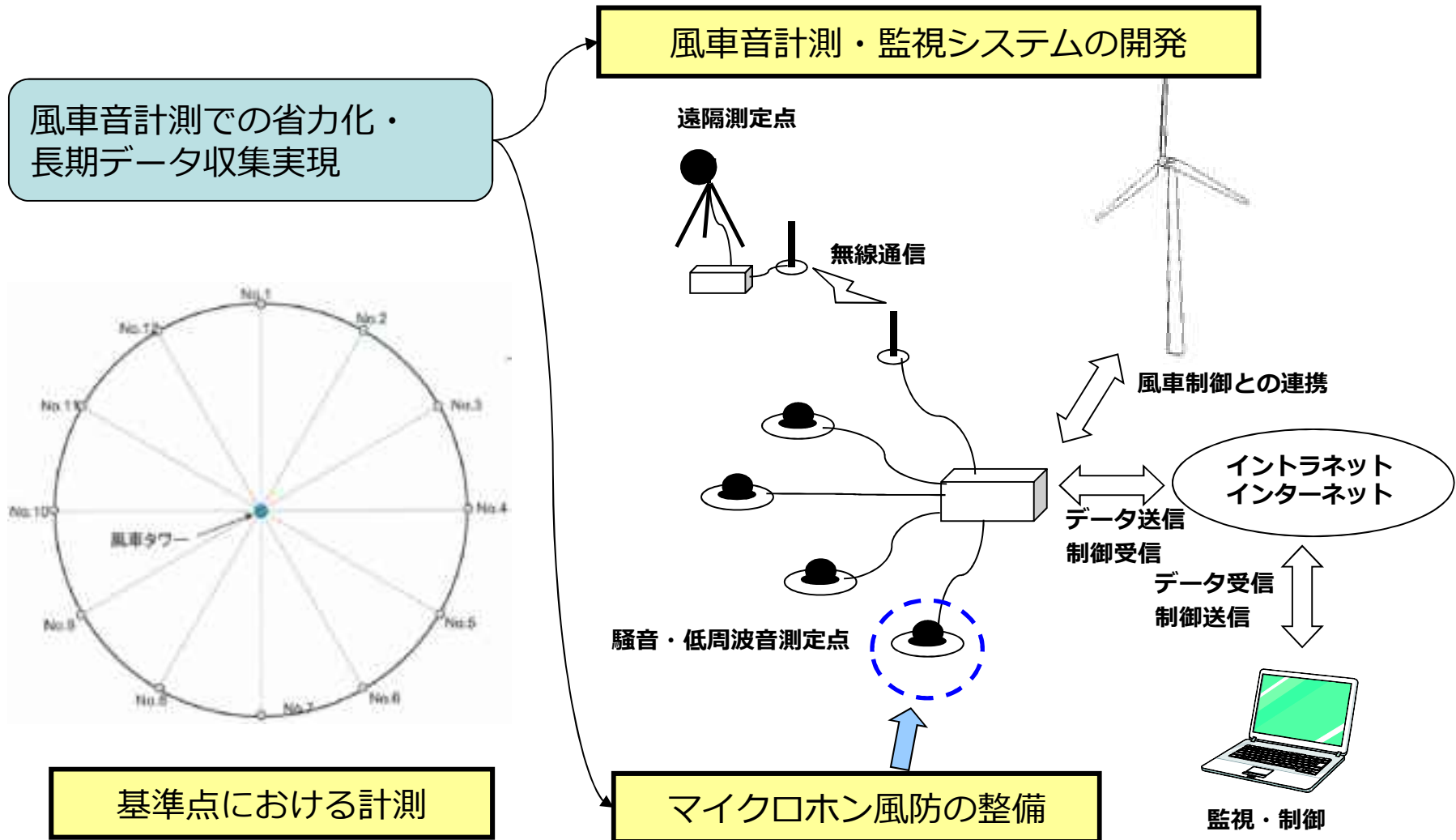
ここに L_{Aeq} : 基準位置の等価騒音レベル (dB)
 R_1 : 傾斜距離 (= R_1 m)
 S_0 : 基準面積 (= 1m^2)

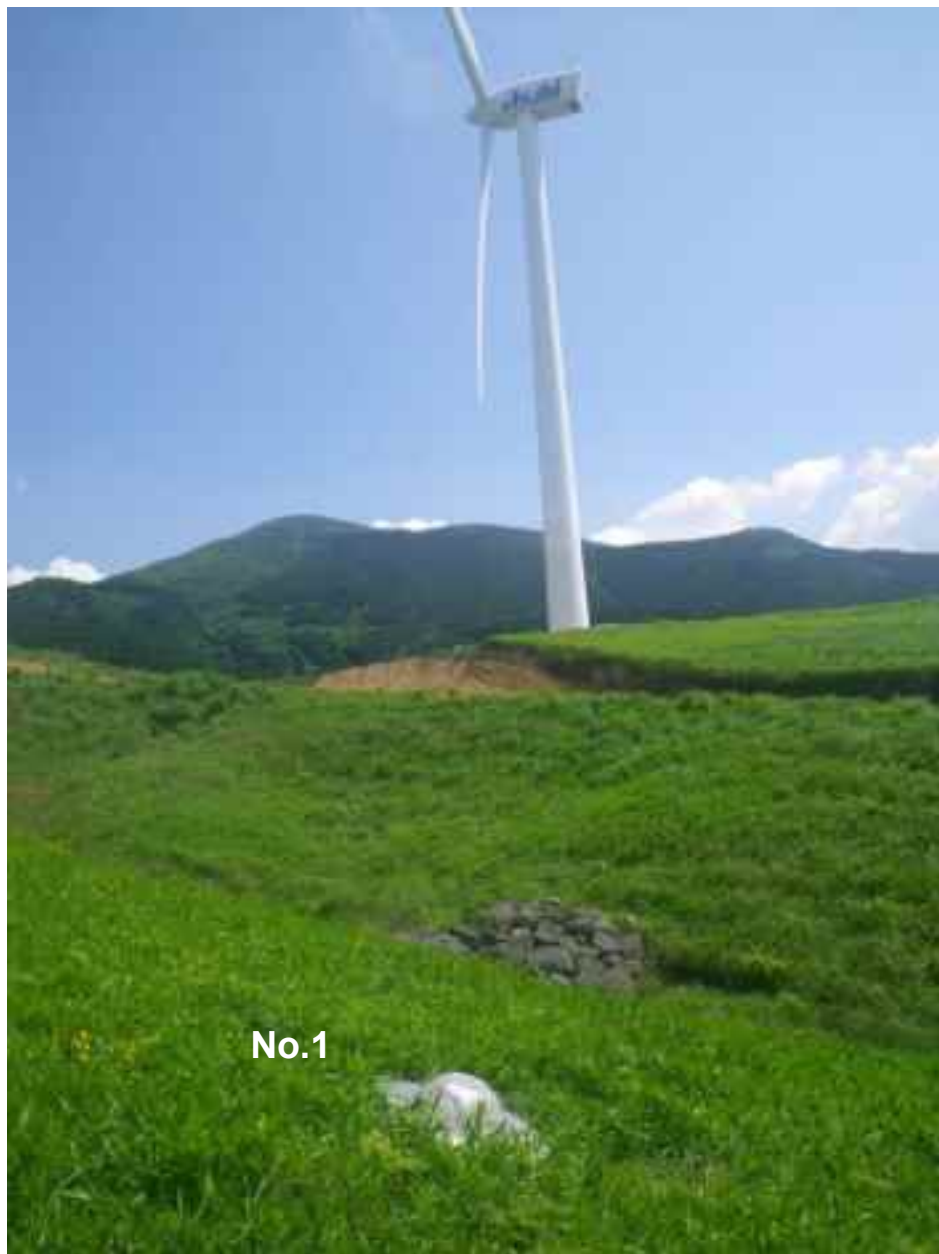
注釈. 反射板による完全、同位相反射の考えにより - 6 d B 補正.

マイクロホンの取付け（断面図）



風車音計測方法の高度化





風車音の計測（風雑音低減の工夫）

ご清聴ありがとうございました

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