

# いすみ市沖洋上風力プロジェクト

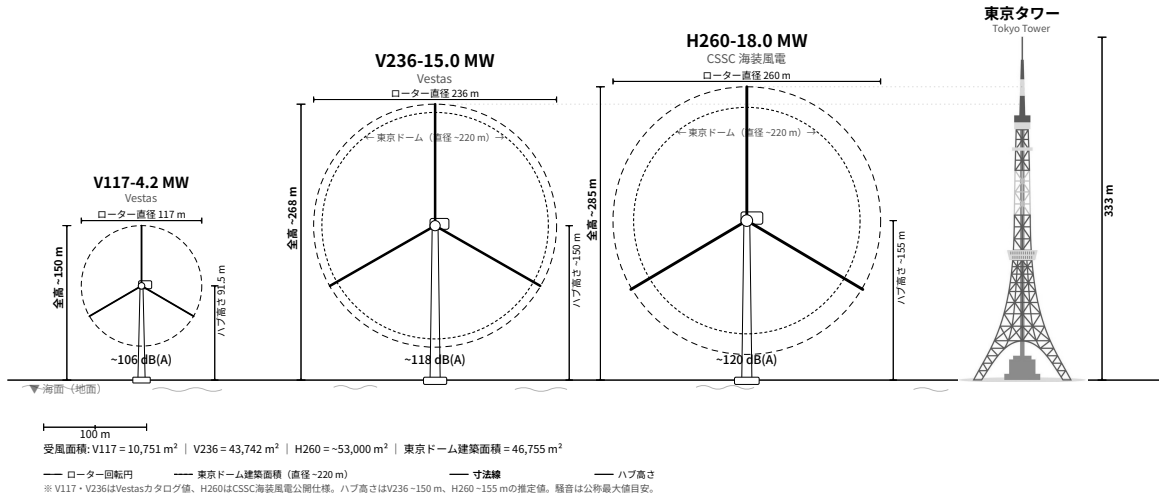
## 騒音影響評価

バナ・ゲルゲイ博士 (Gergeri Bana Ph.D.)

2026年5月11日

### 洋上風力風車サイズ比較図

ローター正面視——東京ドーム・東京タワーとの比較 (同一縮尺)



## Contents

<b>1 はじめに</b>	<b>9</b>
1.1 計画の概要	9
1.2 洋上風力発電の意義：再生可能エネルギーがもたらす便益	9
1.3 本書の目的と筆者の立場	10
1.4 規制の不備と住民の権利：日弁連の警告	11
1.5 騒音の測定指標：本書で用いる4種類の「ものさし」	12
1.6 本書の動機：3 km という距離	12
1.7 北海道「有望な区域」における洋上風力発電の健康リスク：先行研究の警告	14
1.8 本書の構成	14
1.9 環境影響評価制度の変革に関する注記	15
1.10 生成 AI の活用と検証について	16
<b>第1部 国内外の事例・法制度・事業者予測の検証</b>	<b>17</b>
<b>2 世界的設置基準との乖離：前例の見られない「3 km 圏内」への巨大風車設置</b>	<b>17</b>
2.1 先行研究：離岸距離の国際比較	17
2.2 国際比較における課題：欧州・中国との比較	18
2.3 欧州の近岸事例：非都市部における 200 MW 超の洋上風力発電所	18
2.4 ロンドン周辺の実例	20
2.5 アバディーン湾洋上風力発電所 (EOWDC)：距離が近いが苦情がない事例	20
2.6 日本と酷似する地形「ノルウェー」の教訓：なぜ 140 km も離すのか？	21
2.6.1 実現可能な未来：ノルウェーの「30 GW 構想」	22
2.7 中国の最新事例：中国においても「18 km」	22
2.8 国内事例との比較	22
2.8.1 北九州響灘の着床式事例：国内最大の洋上風力発電所	22
2.8.2 五島列島の浮体式事例：日本初の商用浮体式洋上風力発電所	23
2.8.3 北九州響灘沖の浮体式事例：国内初のバージ型商用浮体	23
2.9 浮体式技術の成熟：海外の大規模商用実績と国内の現状	23
2.10 浮体式洋上風力の発電コスト：現状と将来予測	24
<b>3 国内外の風力発電所周辺における騒音苦情の記録</b>	<b>27</b>
3.1 疫学調査に基づく騒音苦情の用量反応関係	27
3.2 低周波騒音に関する国際的規制基準：dB(C) および dB(G) による評価	30
3.2.1 dB(C) に基づく規制・評価基準	30
3.2.2 dB(G) に基づく規制・評価基準	31
3.2.3 周波数帯域別の評価	31
3.2.4 日本の現状：dB(C)・dB(G) 基準の不在	31
3.3 大型風車の近距離運用事例：スコットランド・ハンターストン	32
3.3.1 施設の概要	32
3.3.2 住民からの苦情	32
3.3.3 公的機関の見解	33

3.3.4	専門家からの異議	33
3.3.5	施設の経過と結末	33
3.3.6	いすみ市沖計画との比較	34
3.3.7	参考文献・リンク集	34
3.4	本章の要約：第12章の照合に用いる主要基準	35
<b>4</b>	<b>騒音規制の現状：日弁連意見書に基づく検討</b>	<b>36</b>
4.1	【2025年意見書】A特性評価の不適切性と規制の欠如	36
4.1.1	A特性評価への批判	37
4.1.2	環境省の指針と手引書の内部矛盾	37
4.1.3	法的規制の不在	38
4.1.4	洋上風力発電の近距離設置への批判	38
4.1.5	沿岸住民の手続的排除	39
4.2	【2022年意見書】乱開発防止と地域共生のための法改正要求	39
4.3	【2013年意見書】低周波音被害に関する12年間の不作為	40
4.4	結論：「基準内」が安全を意味するとは限らない	40
<b>5</b>	<b>日本の風力発電騒音規制と予測制度：基準の構造的弱点と事業者の裁量</b>	<b>42</b>
5.1	日本における風力発電騒音の規制基準	42
5.1.1	環境基本法に基づく環境基準（1998年告示、2012年改正）	42
5.1.2	2017年環境省指針：「風力発電施設から発生する騒音に関する指針」	42
5.1.3	環境省「低周波音問題対応の手引書」（2004年）および参照値通知（2017年）	42
5.1.4	規制基準の構造的特徴	43
5.2	規制の枠組みと事業者の裁量	43
5.2.1	予測モデル選択の自由度	43
5.2.2	2017年環境省指針による評価基準	43
5.3	利用される予測モデルとその技術的境界	43
5.3.1	NEDO式（2006年）	43
5.3.2	ISO 9613-2	44
5.4	洋上環境における音響伝搬の物理的特性	44
5.4.1	海面反射	44
5.4.2	風速の鉛直分布と下方屈折、そしてダクト効果	45
5.4.3	背景騒音の低下とマスキング効果の喪失	45
5.5	ISO 9613-2の限界を超える高度な音響伝搬モデル	45
5.5.1	Nord2000（北歐共同開発モデル）	45
5.5.2	放物型方程式法（Parabolic Equation, PE法）	46
5.5.3	Harmonoiseモデル	46
5.5.4	SoundSim 360（ Upsara 大学、3次元有限差分法）	46
5.5.5	CNOSSOS-EU および NMPB-2008	46
5.6	国際比較：欧州における規制の動向	47
5.6.1	デンマーク：ダクト現象を契機とした規制改正	47
5.6.2	オランダ：年間統計指標の採用	47
5.6.3	スウェーデン：Nord2000の採用と最新研究が示す限界	47

5.6.4	欧州における情報開示の特徴	48
5.7	「縦覧期間」制度と第三者検証の制約	49
5.7.1	限定的な公開期間	49
5.7.2	事後検証への影響	49
5.8	小括	49
<b>6</b>	<b>提示資料に基づく予測値の再現可能性の検証</b>	<b>50</b>
6.1	計算方法と前提条件	51
6.2	なぜ「単一の dB(A) 値」では正確な計算ができないのか	53
6.3	再現計算の式	53
6.4	計算結果	54
6.5	この検証が意味すること	55
<b>第 2 部</b>	<b>音響工学に基づく騒音伝搬の分析</b>	<b>56</b>
<b>7</b>	<b>風力発電騒音評価に必要な物理的要素の整理</b>	<b>56</b>
7.1	音とは何か — 周波数とデシベルの基礎	56
7.2	屋外音伝搬を支配する物理現象	59
7.3	音源側で考慮すべき要因	64
<b>8</b>	<b>音の「重み付け」：周波数特性の物理的意味と大型風車スペクトルへの適用</b>	<b>66</b>
8.1	「重み付け」の必要性	67
8.2	A 特性 dB(A)：日常騒音の標準指標	67
8.3	C 特性 dB(C)：低い音もきちんと拾うフィルタ	68
8.4	Z 特性 dB(Z)：重み付けなし、ありのままの音	69
8.5	G 特性 dB(G)：超低周波音（インフラサウンド）専用フィルタ	69
8.6	規制における重み付けの国際比較	70
8.7	小括	70
<b>9</b>	<b>いすみ市沖の気象条件：風・気温・湿度は音の届き方をどう変えるか</b>	<b>71</b>
9.1	気象データの出どころ：勝浦観測所を使う理由と限界	71
9.1.1	高さの違い：地上 10m と風車の高さ 150m	71
9.1.2	海上と陸上の違い：海が気温・湿度を安定させる	71
9.1.3	音が届く先（沿岸の住宅・内陸の住宅）の条件	72
9.1.4	結論：勝浦の観測データで十分か	72
9.2	季節ごとの気温・湿度	72
9.2.1	季節ごとに空気が音をどれだけ吸収するか	72
9.3	風の向き：いつ、どれくらいの頻度で音が陸に向かうか	73
9.3.1	地理的な前提	73
9.3.2	千葉県の季節ごとの風の傾向	73
9.3.3	季節ごとに「音が陸に向かう風」はどれくらい吹くか	74
9.3.4	高さ 150m では地上と風向が少しずれる	74
9.4	風の強さの推定	74

9.4.1	NEDO NeoWins によるいすみ市沖の風速データ	74
9.4.2	高さが変わると風速がどう変わるか：べき乗則による推定	75
9.4.3	勝浦の地上観測との整合性	75
9.4.4	季節ごとの風速の推定	75
9.5	風速・風向・気象条件が重なるとどうなるか	76
9.6	参考データソース	76
<b>10</b>	<b>音源の分析：大型風車はどれほどの音を出すのか</b>	<b>77</b>
10.1	巨大風車の音響エネルギー：3つの発生源	77
10.2	本章で用いる基準スペクトル：Vestas V236-15MW のデータ	78
10.3	風車の大きさと騒音の関係：15MW 機のデータから 18MW 機の音を推定する	79
10.4	風が弱い日の騒音レベル：年間平均風速（8 m/s）ではどうなるか	82
10.4.1	最大騒音の条件はどれくらいの強さの風か	83
10.4.2	いすみ市沖の平均風速条件	83
10.4.3	可変速領域における騒音スケールリング：風速が下がると騒音はどれだけ小さくなるか	83
10.4.4	他機種データとの整合性	84
10.4.5	年間平均風速時の音源レベル：まとめ	84
<b>11</b>	<b>騒音伝搬の計算手法</b>	<b>85</b>
11.1	ISO 9613-2 に基づくベースライン計算	85
11.1.1	計算結果の総括	86
11.2	ISO 9613-2 を超える伝搬増幅要因：風と気温がもたらす「音の増幅」	87
11.2.1	4つの伝搬シナリオの定義	87
11.2.2	有効拡散指数：文献に基づく帯域別の値	88
11.2.3	屈折集音効果：ダクトに入る前のエネルギー増幅	90
11.2.4	海面反射の帯域による違い	91
11.2.5	海岸線から内陸への伝搬	91
11.2.6	帯域別補正の適用手順	92
11.2.7	この手法の位置づけと限界	93
11.3	理論上限値の検証：完全円筒拡散	94
<b>12</b>	<b>計算結果と国際基準との照合</b>	<b>94</b>
12.1	分析対象の配置と受音点	95
12.1.1	配置の想定	95
12.2	全配置・全受音点における ISO 9613-2 計算結果と国際基準との照合	96
12.2.1	計算条件	96
12.2.2	計算結果の総括	97
12.2.3	低周波帯域の受音レベル：環境省「手引書」参照値との照合	97
12.2.4	日本の規制基準との照合	98
12.2.5	疫学データとの照合：不快感の定量的推定	98
12.2.6	本節の結果の位置づけ：もっとも保守的な下限推定	99
12.3	伝搬補正モデルによるシミュレーション結果	99

12.3.1	総合レベルの比較	100
12.3.2	国際的基準との照合	100
12.3.3	A 特性による評価：不快感の用量反応関係	101
12.3.4	C 特性による評価：低周波騒音問題の診断	102
12.3.5	日本の規制枠組みの構造的問題	102
12.3.6	低周波帯域の詳細：環境省「手引書」参照値との照合	103
12.4	理論上限値の検証：完全円筒拡散の結果	103
12.5	振幅変調（AM）効果：時間平均値に隠された脈動の影響	104
12.5.1	いすみ市沖計画への含意	105
12.6	日常的な体感との比較：大型トラックのアイドリング騒音	105
12.7	総合評価	106
<b>結論と提言</b>		<b>108</b>
<b>13</b>	<b>総括</b>	<b>108</b>
13.1	世界に前例のない近距離配置	108
13.2	風車騒音に対する住民の不快感：国内外の疫学知見	108
13.3	日本の規制制度の構造的問題	108
13.4	4社コンソーシアムの騒音予測値の検証	109
13.5	音源レベルと本書の計算結果	109
13.6	日常的な体感との比較	111
13.7	結論	111
<b>14</b>	<b>提言</b>	<b>111</b>
14.1	事業者から独立した専門的騒音予測の実施	111
14.2	浮体式技術による離岸距離の確保	112
14.3	着床式を維持する場合の次善策：単機出力の制限と離岸距離の最大化	112
<b>付録</b>		<b>114</b>
<b>A</b>	<b>1/3 オクターブバンド受音レベルの詳細データ</b>	<b>114</b>
<b>B</b>	<b>全配置・全受音点における 1/3 オクターブバンド受音レベルの詳細データ</b>	<b>114</b>
<b>C</b>	<b>補正後受音レベルの帯域別詳細</b>	<b>120</b>

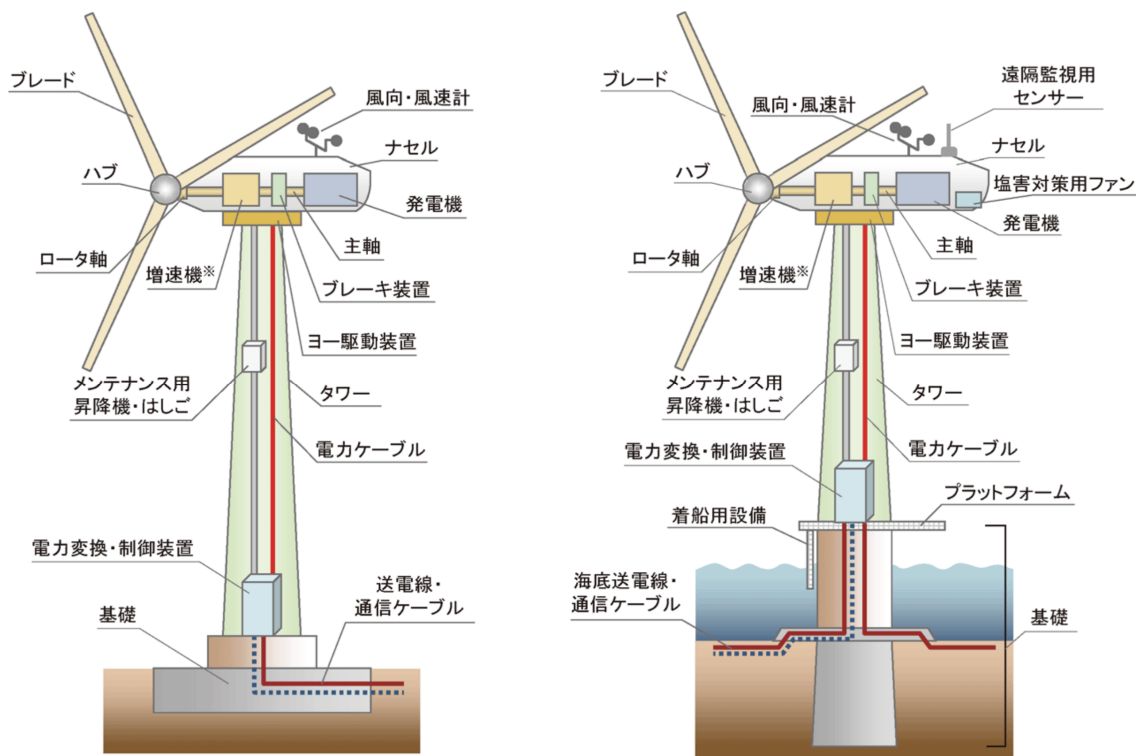
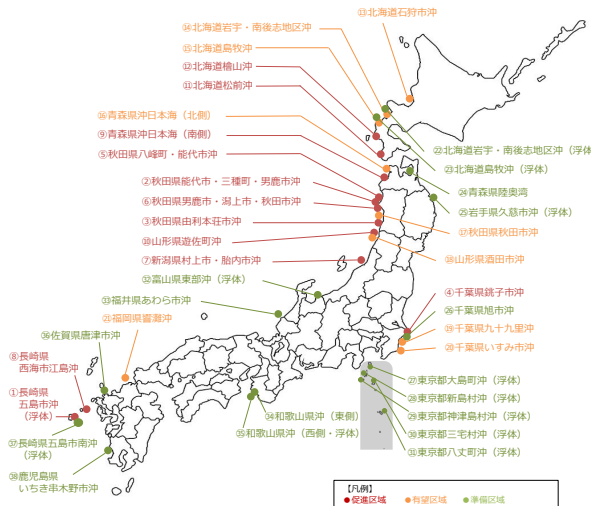


図 1: 風力発電機の主要な構成要素 (左：陸上風力 右：洋上風力) 出典：NEDO 再生可能エネルギー技術白書第 2 版

促進区域・有望区域等の指定・整理状況(令和7年10月3日時点)



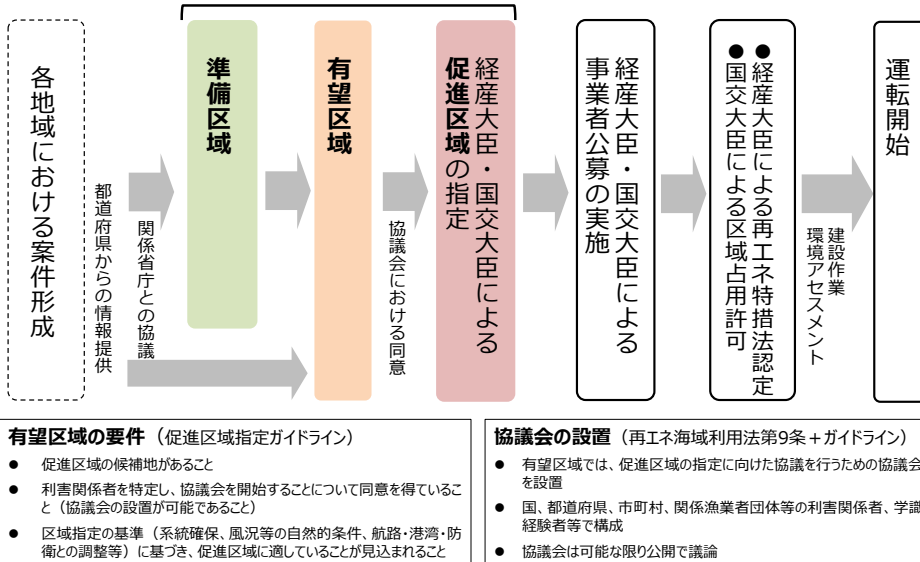
区域名	万kW※
①長崎県五島市沖 (浮体)	1.7
②秋田県能代市・三種町・男鹿市沖	41.5
③秋田県由利本荘市沖	73.0
④千葉県鎌ヶ谷市沖	37.0
⑤秋田県八峰町・能代市沖	37.5
⑥秋田県男鹿市・潟上市・秋田市沖	31.5
⑦新潟県村上市・船内市沖	68.4
⑧長崎県西海市江島沖	42.0
⑨青森県沖日本海 (南側)	61.5
⑩山形県遊佐町沖	45.0
⑪北海道松前沖	25~32
⑫北海道檜山沖	91~114
⑬北海道石狩市沖	91~114
⑭北海道若手・南後志地区沖	56~71
⑮北海道島牧沖	44~56
⑯青森県沖日本海 (北側)	30
⑰秋田県秋田市沖	37
⑱山形県酒田沖	50
⑲千葉県九十九里沖	40
⑳千葉県いすみ市沖	41
㉑福岡県嘉穂沖	48
㉒北海道若手・南後志地区沖 (浮体)	
㉓北海道島牧沖 (浮体)	
㉔北海道東部沖 (浮体)	
㉕青森県陸奥沖	
㉖若手久慈市沖 (浮体)	
㉗千葉県旭市沖	
㉘千葉県九十九里沖	
㉙千葉県いすみ市沖	
㉚千葉県いすみ市沖	
㉛東京都八丈町沖 (浮体)	
㉜東京都新島村沖 (浮体)	
㉝東京都神津島村沖 (浮体)	
㉞東京都三宅村沖 (浮体)	
㉟東京都八丈町沖 (浮体)	
㊱東京都八丈町沖 (浮体)	
㊲東京都新島村沖 (浮体)	
㊳東京都神津島村沖 (浮体)	
㊴東京都三宅村沖 (浮体)	
㊵東京都三宅村沖 (浮体)	

※容量の記載について、事業者選定済の案件は選定事業者の計画に基づく発電設備出力量、それ以外では、事業者が確保している系統接続の最大発電出力、または系統接続スキームで算定した当該区域において想定する最大出力規模であり、区域の調整状況に応じて変動しうるもの。

(a) 促進区域・有望区域等の指定・整理状況

再エネ海域利用法に基づく区域指定・事業者公募の流れ

毎年度、区域を指定・整理し、公表



(b) 海洋再エネ整備法に基づく領海及び内水の区域指定・事業者公募の流れ

図 2: 促進区域・有望区域等の指定・整理状況および区域指定・事業者公募の流れ  
 出典) 資源エネルギー庁「再エネ海域利用法に基づく区域指定・事業者公募の流れ及び案件形成状況」  
<https://www.meti.go.jp/press/2025/10/20251003001/20251003001-1.pdf>

## 1. はじめに

日本政府は、2050年カーボンニュートラルの実現に向けて、洋上風力発電を再生可能エネルギー拡大の柱と位置づけている。2019年4月に施行された「海洋再生可能エネルギー発電設備の整備に係る海域の利用の促進に関する法律」（再エネ海域利用法）により、洋上風力発電のための海域利用に関する統一的なルールが整備され、事業者の公募・選定手続きが制度化された。2020年12月には官民協議会が「洋上風力産業ビジョン」を策定し、2030年までに10GW、2040年までに30~45GWという大規模な導入目標を設定した。

この目標の実現に向けて、経済産業省と国土交通省は全国の沿岸海域を対象に「促進区域」の指定を進めている。制度上、都道府県からの情報提供に基づき、「準備区域」「有望区域」を経て「促進区域」に指定されると、最大30年間の海域占用許可のもとで事業者の公募が行われる。2025年現在、秋田県沖（能代市・三種町・男鹿市沖、八峰町・能代市沖、男鹿市・潟上市・秋田市沖）、千葉県銚子市沖、長崎県西海市江島沖、新潟県村上市・胎内市沖、山形県遊佐町沖、青森県沖日本海（南側）、北海道松前沖、北海道檜山沖などが促進区域に指定されており、さらに千葉県九十九里沖やいすみ市沖を含む多数の海域が有望区域または準備区域として手続きが進行中である。いすみ市沖はこうした全国的な洋上風力発電推進政策の一環として計画されたものである。（図2）

### 1.1 計画の概要

千葉県いすみ市沖の海洋再生可能エネルギー発電設備整備促進区域において、複数の事業者が大規模な洋上風力発電所の建設を計画している。各事業者は12~20MWクラスの大型風車を数十基規模で設置することを検討しており、代表的な構成案として15MW級35基、12MW級42基、18MW級25基といった規模が想定されている（総出力はいずれも450~525MW程度）。設置想定海域は、いすみ市の海岸線から約3kmの沖合である。

このうち、三井物産、RWE Renewables Japan、大阪ガス、K&O エナジーグループの4社からなるコンソーシアム（以下、4社コンソーシアム）が千葉県に提出した計画段階環境配慮書は、筆者が入手できた唯一の公開資料であり、本書の分析の重要な出発点となっている。いすみ市沖では2022年~2023年の間に8事業者が計画段階環境配慮書を提出したが、日本の環境影響評価制度では、これらの文書の公開は法定の「縦覧期間」（通常30~45日程度）に限られており、期間終了後は事業者がウェブサイトから削除できる。このため、2026年現在、4社コンソーシアム以外の配慮書はインターネット上で参照できなくなっている（この制度上の問題については第5章で詳述する）。同配慮書に記載された騒音予測値の再現検証については第6章で行う。

### 1.2 洋上風力発電の意義：再生可能エネルギーがもたらす便益

本書は騒音影響の分析に焦点を当てるものであるが、その前提として、洋上風力発電が日本社会にもたらしうる便益を明確にしておきたい。筆者は再生可能エネルギーの推進そのものに反対する立場ではなく、むしろその実現を支持する。

第一に、エネルギー安全保障の観点である。日本は一次エネルギーの約87%を海外からの輸入に依存しており（化石燃料が約83%、残りは原子力用ウラン等）、この脆弱性は地政学的リスクや資源価格の変動に直結する。洋上風力発電の普及は、火力発電への依存を低減し、エネルギー供給源の多様化に貢献する。また、原子力発電に対する社会的不安が根強い中、洋上風力は原子力への依存度を引き下げる現実的な選択肢でもある。

第二に、経済効果である。洋上風力発電は建設・運用・保守の各段階で投資と雇用を生み出す。欧州の実績では、大規模洋上風力発電所1か所あたり数千人規模の雇用が建設期間中に創出され、運用開始後も長期にわたって保守・点検要員が必要とされる。ただし、こうした経済効果が地域に実際に還元されるかどうかは、事業の進め方に大きく依存する。いすみ市は人口減少が続く一方で、東京圏からの移住者や別荘利用者が増加しており、豊かな自然環境とサーフィン等の海洋レジャーが移住先としての魅力の核となっている。洋上風力発電所の建設が海岸環境や景観に与える影響が、こうした移住・定住の流れを損なう可能性については十分な検討が必要である。経済効果は事業が地域環境と両立する形で実施されてはじめて実現するものであり、環境の劣化による人口流出の加速という逆効果のリスクも考慮されなければならない。

第三に、CO<sub>2</sub>排出削減への貢献である。洋上風力は発電時にCO<sub>2</sub>を排出しないため、火力発電の一部を代替することで排出量の低減に寄与する。ただし、風力発電は風況に依存する変動電源であるため、系統全体の安定化にはバックアップ電源や蓄電設備との組み合わせが必要であり、電力コストへの影響は単純ではない点にも留意すべきである。

以上の便益を認めたとうえで、本計画には見過ごすことのできないリスクがある。いすみ市沖計画をめぐっては景観への影響や漁業との共存について議論が行われているが、騒音（とりわけ人間の耳には聞こえにくい体が影響を及ぼしうる低周波音）のリスクについては、十分な注意が払われていないように見受けられる。

欧州の経験は、このリスクが現実のものであることを示している。デンマークは世界で最も長い洋上風力発電の歴史を持つ国であるが、風車の大型化に伴って住民からの騒音苦情が増加し、2012年に低周波音に対する新たな規制基準を導入せざるを得なかった。すなわち、風力先進国であっても、実際に大型風車を運用してはじめて低周波音の問題が認識され、事後的に規制が強化されたのである。日本にはこうした経験の蓄積がなく、低周波音に対する規制基準も存在しない。

本書は、こうした状況を踏まえ、いすみ市沖の計画が沿岸住民の生活環境にもたらしうる騒音影響を、国内外の事例・日本の法制度・音響工学の3つの観点から検討するものである。

### 1.3 本書の目的と筆者の立場

筆者はいすみ市に居住する一住民として、本計画の規模（海岸からわずか3kmの距離に12~18MW級の巨大風車を数十基配置するという計画）が、地域社会への騒音影響の観点から十分に検討されているかどうかに関心を持っている。

この懸念を出発点として、筆者は公開されている科学文献、国際的な実測データ、および標準的な音響工学の手法を用いて、可能な限り客観的な騒音影響評価を試みることにした。

いすみ市沖で使用される風車のメーカーは現時点で公表されていないが、中国メーカーは騒音データを公表しておらず、欧州メーカーの多くも非公開としている。そこで本書では、大型風車として唯一、周波数帯域別の詳細な騒音データが公開されているデンマーク Vestas 社の 15MW 機 (V236-15MW) の実測値を基準として用いる。このデータはエストニア沖の洋上風力計画の環境影響評価で公開されたものであり、低い音から高い音まで 31 の帯域に分けた騒音出力が記録されているため、精度の高い伝搬計算が可能となる。

騒音の伝わり方については、国際標準の計算規格（ISO 9613-2）に基づく基本計算に加え、風の強さや気温の変化がもたらす「音の増幅効果」を4段階に分けて計算する。この増幅効果の推定には、デンマークやスウェーデンなど北欧諸国で風力発電所の実測データに基づいて開発・検証されたより高精度な伝搬モデル（Nord2000等）の知見を活用している。穏やかな気象条件（音が増幅されにくい場合）から、夜間に海上で音が遠くまで届きやすくなる最悪条件まで、幅を持たせて結果を示す。分析対象は3つの風車配置案（A案：15MW×35基、B案：12MW×42基、C案：18MW×25基）であり、騒音の到達レベルは海岸線・内陸3km・内陸5kmの3地点で評価する。

なお、筆者の専門は数学およびコンピューターサイエンスであり、音響工学ではないことを明記しておく。本書は専門家による鑑定評価ではなく、筆者自身が騒音の実測を行ったものでもない。すべての分析は公開されている科学文献、メーカー公表データ、および標準的な音響計算手法に基づいている。また、本書で「最悪条件」として提示したものは、あくまで保守的な仮定の範囲内であり、物理的にありうる最悪の条件を意味するものではない。本書の目的は、専門的な結論を下すことではなく、いすみ市の地域住民が直面しうる問題を公の議論の俎上に載せ、一住民として感じている懸念を客観的なデータに基づいて提示することにある。

#### 1.4 規制の不備と住民の権利：日弁連の警告

洋上風力発電の急速な拡大が進む一方で、日本における騒音規制の枠組みは、この新たな環境リスクに十分に対応できていない。日本弁護士連合会（日弁連）は2025年に意見書を公表し、風力発電に関する環境アセスメント（環境影響評価）が実質的に機能していないと指摘した。同意見書は、現行の制度が事業者の自主的な評価に過度に依存しており、住民の健康と生活環境を守るための独立した検証の仕組みが欠如していることを問題視している。さらに日弁連は、2013年にも低周波音（人間の耳には聞こえにくいだが体に影響を及ぼしうる低い音）に関する意見書を発表しており、風車騒音の低い音の成分が既存の評価基準では適切に捉えられていないことを早くから警告していた。

こうした規制の不備は、地域住民にとって、事業者が提示する「基準内」という説明を額面通りに受け取ることができない状況を生み出している。日弁連が指摘するように、現行の基準そのものが住民の健康保護に十分であるかどうか疑問視されている以上、住民自身が入手可能な科学的データに基づいて影響を評価し、理解することの重要性はいっそう高まっている。

この規制の空白は、日本における大規模エネルギー事業の経緯と無関係ではない。大規模事業は雇用や税収などの経済効果をもたらす一方で、環境や生活環境に対するコストの一部は地域住民が負担することになる。過去の事例では、こうしたコストが事前に十分に評価されなかったケースがある。

原子力発電においては、国会事故調査委員会が2011年の福島第一原子力発電所事故に関する報告書で、規制当局と事業者の間に「規制する立場とされる立場の『逆転関係』」が生じていたと指摘している。メガソーラー（大規模太陽光発電所）においては、2012年の固定価格買取制度（FIT）導入以降、開発が全国で急速に進んだが、森林伐採に伴う土砂災害リスクの増大や景観破壊など、環境への影響が各地で認識されるようになった。こうした問題を受けて、全国300を超える市町村が独自の規制条例を制定するに至っている。

陸上での大規模再エネ開発に対する住民の反発が強まるなか、政府の再エネ拡大政策の重心は洋

上風力発電に移りつつある。洋上風力は海上に設置されるため土砂災害や森林破壊といった問題は生じないが、沿岸住民に対する騒音・低周波音の影響という別の問題がある。しかし、前述のとおり、風力発電の騒音に関しては国の規制基準も地方自治体の条例も極めて不十分な状態にある。騒音被害は土砂崩れのように目に見える形では現れないため、問題が顕在化するまでに時間を要する可能性がある。

### 1.5 騒音の測定指標：本書で用いる 4 種類の「ものさし」

本書の議論を読み進めるにあたり、騒音の測定に用いる基本的な指標を予め理解しておくことが有用である。騒音の大きさを表す単位は「デシベル (dB)」であるが、同じ音でも測定に用いる「ものさし」(重み付け)によって数値が大きく異なる。純粋なデシベル (dB(Z)) は物理的なエネルギーの大きさをそのまま表すのに対し、人間の知覚に合わせて特定の周波数帯域を強調または減衰させ、「実際に人がどの程度うるさく感じるか」を数値で表すことを「重み付け」という。各重み付けの物理的意味および定量的な違いについては第 8 章で詳述するが、本書で繰り返し登場する 4 種類の指標について以下に簡潔に説明する。

**Z 特性 dB(Z)** 重み付けを一切行わず、物理的な音のエネルギーの大きさをそのまま表す指標。

**A 特性 dB(A)** 人間の聴覚が最も敏感な中高周波数帯域 (1~5 kHz) を重視し、低周波数を大幅に差し引くフィルタ。日常的な騒音評価に広く用いられるが、低い音が主体の環境では実際のエネルギーを系統的に過小評価する。

**C 特性 dB(C)** 低周波数をほとんど差し引かないフィルタ。低周波騒音の評価には A 特性よりはるかに適しており、dB(C) と dB(A) の差が 15~20 dB 以上になると「低周波騒音の問題が存在する」と判断する国際的基準が複数存在する (ドイツ DIN 45680、カナダ・アルバータ州指令 038 など)。

**G 特性 dB(G)** 20 Hz 以下の超低周波音 (インフラサウンド) に焦点を合わせた専用フィルタ。エストニアやデンマークなど一部の国が規制に採用している。

A 特性に基づく騒音レベル評価は、風車騒音研究の標準的な指標となっている。しかし、A 特性で測定すると、大型風車が回転時に主に発生させる低周波エネルギーの大部分が数値に反映されないため、A 特性の値だけでは影響の全体像を捉えることができない。このため本書では、A 特性に加えて C 特性、G 特性および Z 特性を用いた評価を並行して行う。この点は本書の分析を通じて繰り返し現れる重要な論点である。

### 1.6 本書の動機：3 km という距離

10~20 MW クラスの洋上風車は全高が 260~300 m を超える構造物であり、本来、沿岸部への影響を回避するために沖合に設置されることを前提に設計されている。実際、欧州および中国の大規模洋上風力発電所は海岸線から 10 km 以上離れた海域に建設されるのが通例である。筆者が調査した限り、10 MW を超える大型風車を海岸から 10 km 未満に商業規模で設置した事例は、計画段階のものを含めて日本以外には確認できなかった (第 2 章で詳述する)。ただし、本書の調査は公開情報に基づく限定的なものであり、すべての計画・事例を網羅している保証はない。

この離岸距離の短さは、いすみ市の海域が急深であり浮体式の採用がコスト面で困難であるとい

う事情に起因する。しかし同様に急深な海域を持つノルウェーでは浮体式技術を採用して海岸から 100 km 以上離れた海域で大規模発電を実現しており、近距離配置は技術的必然ではなく、現時点でのコスト選択である。

海岸から 3 km と聞くと十分に遠いように感じられるかもしれないが、これらの風車が発する騒音の規模は一般的な想像をはるかに超える。デシベルという単位は日常生活では馴染みが薄いため、ここでは騒音の規模を直感的に把握できるように、身近な音との比較を用いる。厳密な音響計算は第 11 章以降で行う。風車メーカーの公表データによれば、15~18 MW 級の大型風車 1 基の騒音出力は約 115~118 dB である。これは、現在広く使われている 4 MW 級風車（それ自体がローター直径 117 m、全高 150 m の大型構造物である）と比べ、音のエネルギーで約 16 倍に相当する。いすみ市沖に計画されている 25~35 基の風車群の合計騒音出力は約 130~133 dB に達し、これは小規模なスタジアムでのロックコンサート（約 135 dB）に匹敵する水準である。穏やかな夜にロックコンサートの音は何キロメートルも先まで届くことは多くの人が経験的に知っている。コンサート会場の場合はスタジアムの壁や周囲の建物が音の拡散をある程度遮るが、いすみ市沖の場合、音は遮蔽物のない海上を伝搬し、水面による反射で増幅される。もちろん、3 km の距離を伝搬する間に音は減衰するが、問題はこの巨大な音源が 24 時間 365 日、風が吹く限り稼働し続けることにある。

以上の背景から、本書では、12~18 MW 級風車が海岸線から約 3 km に設置された場合に、いすみ市の海岸線および内陸部に到達する騒音を推定する。

本書の分析結果を先取りすれば、海岸線に到達する騒音レベルは、気象条件によって約 36~54 dB(A) の幅を持つ。この数値だけでは実感しにくいのが、経済産業省の資料によれば日本の大型トラックのアイドリング時の音響パワーレベルは約 87 dB(A) であり、これを距離に換算すると、海岸線での風車騒音は以下のような体感に相当する。

- 穏やかな気象条件（約 40 dB(A)）：大型トラックが約 60 m 先でアイドリングしている程度
- 典型的な条件（約 45 dB(A)）：大型トラックが約 35 m 先でアイドリングしている程度
- 最悪の気象条件（約 50 dB(A) 以上）：大型トラックが約 20 m 先（道路を挟んだ向かい側）でアイドリングしている程度

ただし、トラックはやがて立ち去るが、風車の音は風が吹いている限り一晩中続く。しかも、3 km の伝搬によって高い音は空気に吸収されて消え、残るのは低い音ばかりとなるため、窓を閉めても遮断しにくい音となる。

なお、海岸線付近では波の音や風の音が風車騒音を部分的にかき消す（マスキングする）可能性がある。欧州の近岸風力発電所（第 2 章参照）では、別荘地や砂州など海岸に面した立地が選定されており、この自然のマスキング効果が住民影響の軽減に寄与していると考えられる。しかし、内陸に進むにつれて波の音は急速に聞こえなくなる一方、低い音を主体とする風車騒音は空気中で吸収されにくいいため遠くまで減衰しにくい。いすみ市の場合、海岸線から数百メートル以上内陸に入ると波浪音はほとんど聞こえなくなるが、風車からの低周波騒音は依然として到達しうる。すなわち、内陸部の住民にとっては静寂な環境に風車騒音のみが侵入する状況が生じ、海岸線で

の評価よりも体感的な影響がより深刻となる可能性がある。

## 1.7 北海道「有望な区域」における洋上風力発電の健康リスク：先行研究の警告

本書の分析に先立って、北海道大学の田鎖順太助教が、日本の洋上風力発電計画に関わる健康リスクの予備的評価を公表している<sup>1</sup>。2023年、経済産業省は北海道日本海側の5区域を洋上風力発電の「有望な区域」に指定したが、風車騒音による住民への健康影響は指定に際して一切考慮されなかった。田鎖はこの5区域に15MW級風車が設置された場合の騒音影響を、音の物理的な伝搬計算と国勢調査の人口データを重ね合わせることでシミュレーションした<sup>2</sup>。

田鎖の分析で特に重要なのは、2つの異なる指標で健康影響を評価した点である。第一の指標であるA特性(dB(A))では、不眠症リスクが増大する閾値(40.5dB(A))を超える地域に約24,700人が居住すると推定された。第二の指標として、80Hz帯の低周波音レベル(Z特性)が環境省「手引書」の参照値(41dB)を超える地域を評価したところ、影響を受ける住民は約28,200人に上り、A特性のみの評価よりも広い範囲に影響が及ぶことが示された。低周波帯域の中でも80Hzが最も広い影響範囲を生じたのは、この周波数帯の音は空気中で吸収されにくく遠くまで届く一方、環境省の参照値が比較的厳しい水準に設定されているためである。

この結果は、日本の騒音規制で標準的に用いられているA特性のみでは、大型風車の低周波音による健康影響の全体像を捉えられないことを意味する。田鎖はこの結果に基づき、「有望な区域」の指定は住民の健康保護の観点から「非合理的」と結論づけている。北海道の「有望な区域」は、区域の境界が海岸線に直接接しており離岸距離の下限が制度上設定されていない。実際の事業計画では風車は海岸から2~6km程度に配置される見込みであり、いすみ市沖計画の3kmと同程度の距離条件にある。

## 1.8 本書の構成

本書は以下の構成をとる。内容は大きく2部に分かれる。第1部「国内外の事例・法制度・事業者予測の検証」(第2章~第6章)では、国際的な離岸距離の比較、国内外の浮体式技術の現状、住民健康調査の知見、日本の法制度の構造的不備、および事業者の騒音予測の検証を扱う。第2部「音響工学に基づく騒音伝搬の分析」(第7章~第12章)では、騒音の物理的基礎から出発し、いすみ市沖の具体的な気象・地形条件のもとでの騒音伝搬計算を独自に行い、住民への影響を定量的に評価する。第13章では両部の分析を統合した結論と提言を述べる。以下に各章の内容を概説する。

第2章では、欧州・中国・日本国内の洋上風力発電所の離岸距離・規模・立地条件を比較し、15~18MW級の巨大風車を海岸から3kmに商業規模で設置する計画が世界的に前例のないものであることを示す。あわせて、浮体式技術の商用実績と発電コストの動向を踏まえ、近距離配置が技術的必然ではなくコスト上の選択であることを論じる。

第3章では、7か国で実施された住民健康調査に基づき、風車騒音に対する住民の不快感が生じる騒音レベルの目安を整理する。また、低周波音に関する海外の規制基準を概観するとともに、大

<sup>1</sup>田鎖順太「北海道沿岸の『有望な区域』における洋上風力発電の騒音による周辺住民への健康影響に関する検討」『北海道自然エネルギー研究』No.18, pp.13-19, 2024年。

<sup>2</sup>計算手法の詳細は田鎖順太、鍛冶光岐、磯嶋咲良「洋上風車による騒音・健康リスク評価ソフトウェア『H-RISK』の開発」『騒音制御』46(4), pp.176-182, 2022年を参照。本書の第11章で用いる計算と基本的に同じ物理的枠組みに基づくが、風や気温による音の屈折効果は含まれておらず、田鎖自身が「過小評価のおそれがある」と述べている。

型風車を居住地近くで稼働させた数少ない実例として、スコットランド・ハンターストン試験施設における住民健康被害の経過を報告する。

第4章では、日本弁護士連合会が2013年・2022年・2025年に公表した3つの意見書に基づき、日本の風力発電騒音規制の構造的不備を整理する。第5章では、日本の騒音規制基準と予測制度を技術的観点から分析し、騒音の測り方の問題、予測モデル選択の自由度、住民が意見を述べるための期間の制約といった弱点を指摘するとともに、欧州諸国の規制と比較する。

第6章では、4社コンソーシアムが千葉県に提出した環境配慮書に記載された騒音予測値を、公開されている風車配置情報と国際標準の計算手法を用いて独立に再計算し、その整合性を検証する。

第7章～第10章は、本書の騒音計算に必要な物理的な基礎知識をまとめた4つの章である。第7章では、デシベル（騒音の単位）の意味から、音が屋外で伝わる際に関わる8つの物理現象（距離による減衰、空気による吸収、地面での反射、障害物の回り込み、気温の変化による音の屈折、風による音の屈折、音が地表付近に閉じ込められる現象、大気の乱れによる散乱まで）を体系的に整理する。第8章では、騒音の測り方にはいくつかの種類があり、測り方によって同じ音でも数値が大きく変わることを説明する。日本の規制で用いられているA特性という測り方は、人間の耳が敏感な中～高周波の音を重視する一方、大型風車が主に発する低い音のエネルギーの大部分（約96%）を数値から除外してしまうことを示す。第9章では、気象庁やNEDO（国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）の風況データに基づき、いすみ市沖の季節ごとの気温・湿度・風向・風速を整理し、騒音が増幅されやすい気象条件がどの程度の頻度で発生するかを分析する。第10章では、Vestas社の15MW機の実測騒音データを基準として、いすみ市沖で想定される12～18MW級風車の騒音レベルを推定する。

第11章では、3種類の計算手法（国際標準規格に基づく基本計算、風や気温の影響を4段階に分けて加味した伝搬計算、および音が地表に閉じ込められた場合の理論上限）を構築する。第12章では、3つの風車配置案と3つの地点（海岸線・内陸3km・内陸5km）の全組み合わせについて計算結果を提示し、第3章の海外の住民健康調査データや環境省の参照値と照合する。

第13章では結論を、第14章では提言を述べる。本書の分析結果を踏まえ、浮体式洋上風力技術の採用による離岸距離の大幅な拡大を建設的な解決策として提案する。

## 1.9 環境影響評価制度の変革に関する注記

本書で分析した環境影響評価（環境アセスメント）の制度的枠組み（第4章・第5章）は、執筆時点（2026年2月）の制度に基づいているが、この制度はまさに変革の途上にある。

2025年6月、再エネ海域利用法と環境影響評価法（環境アセス法）の2つの法律が改正され、これまで「事業者別」に行われていたサイト調査や系統確保、環境影響評価等を国が主導して行う「セントラル方式」の仕組みが創設された。これにより、複数の事業者による重複した手続きが排除され、プロセスが合理化されるだけでなく、事業者任せになっていた自然環境調査を環境省が自ら実施することになることも期待されている。

これらの改革により、環境影響評価が事業者の裁量に全面的に委ねられるという本書が指摘した構造的な問題（第13.3節）は、今後改善される可能性がある。ただし、現時点では新制度の詳細（騒

音予測に用いるモデルの指定、低周波音の評価義務、A 特性以外の評価基準の導入等)は未確定であり、本書が指摘した技術的課題(すなわち、ISO 9613-2 の限界、A 特性による低周波音の過小評価、風下屈折・ダクト効果の無視)が新制度のもとで解消されるかどうかは不明である。また、新制度に沿岸住民への騒音影響評価の改善がどの程度含まれるかも明らかでない。

本書の分析は、制度の枠組みにかかわらず成り立つ物理的・音響工学的な知見に基づいている。制度がどのように変わろうとも、大型風車が発する低周波音の物理的性質、海上伝搬の特性、および3 km という距離での受音レベルは変わらない。

### 1.10 生成 AI の活用と検証について

本書の執筆および校正にあたり、大規模言語モデル(Claude, Gemini, Grok)を補助的に活用した。特に音響計算(騒音伝搬シミュレーション)においては、これら複数のモデルを用いて計算結果のクロス検証(相互検証)を行い、数値の整合性と妥当性を確認している。

# 第1部

## 国内外の事例・法制度・事業者予測の検証

### 2. 世界的設置基準との乖離：前例の見られない「3 km 圏内」への巨大風車設置

本章では、12~18MW クラスの大型洋上風車を導入している欧州および中国の主要プロジェクトを調査し、離岸距離といすみ市沖計画との比較を行う。

なお、本章の議論に関連して、2024年6月4日の第213回国会・参議院環境委員会において、川田龍平議員の質問に対し、環境省は、単機出力10MW以上の洋上風力発電用風車が海岸から10km以内の距離で稼働している事例は、日本国内外を通じて確認されていない旨を答弁している<sup>3</sup>。この答弁は、10MW以上の大型タービンの近岸配置に関する国際的前例の不在について、政府も同様の認識を有していることを示すものである。

#### 2.1 先行研究：離岸距離の国際比較

洋上風力発電施設の離岸距離に関する体系的な国際比較研究として、名古屋大学の宮脇勝准教授による査読付き論文がある<sup>4</sup>。同論文は洋上風力発電量の上位18か国を対象に、GISおよび航空写真で離岸距離を計測し、土地利用の特性とあわせて分類した調査であり、主に景観（シースケープ）保護の観点から分析を行っている。

宮脇の重要な指摘は、欧米諸国の離岸距離が単一の「最低距離法」ではなく、海洋空間計画・戦略的環境アセスメント・自然保護区指定・海域リース制度など、複数の制度的枠組みの組み合わせによって実現されているという点である。同論文中の表現では「欧米の政府は、海洋計画等を用いて、12海里的離岸距離を制限基準に用いている」とされている。各国の状況は以下のとおりである。

- **ドイツ**：沿岸12海里（約22.2km）以内は州の開発制限と野鳥保護区により風車立地が事実上阻止され、その外側のEEZでは連邦洋上部門計画（2017年）が風車配置を管理。
- **オランダ**：2015年の洋上風力エネルギー法に基づく海洋計画により12海里以上を確保。
- **ベルギー**：離岸距離16.5km以下の複数の計画が地元反対で却下された後、2004年に洋上風車ゾーンを12海里以上に定義、2019年の海洋空間計画で制度化。

<sup>3</sup>第213回国会 参議院環境委員会 第11号（2024年6月4日）川田龍平議員質問に対する政府答弁。国会会議録検索システム <https://kokkai.ndl.go.jp/> より閲覧可能。

<sup>4</sup>宮脇勝「洋上風力発電施設の景観に関わる『海洋計画』と『離岸距離』に関する国際比較—洋上景観保護のための風車ゾーニングと最小離岸距離に関する調査」『都市計画論文集』Vol.57, No.3, pp.546-553, 2022年10月。

- **英国**：Round 1（2001年）は距離制限なく景観紛争を招いたが、Round 2（2003年）でSEAにより8~13kmに誘導、Round 3（2009年）以降は12海里を基準。
- **デンマーク**：2011年に10kmおよび12.5kmのバッファゾーンを提案。
- **米国**：海洋エネルギー監督局（BOEM）が商業風車リースを12海里のEEZ内に限定。
- **中国**：2016年に国家エネルギー局と国家海洋局が「洋上風力発電開発・建設管理措置」第7条で離岸距離10km以上を統一基準として規定。各国の中で最も明示的な規制値である。

同論文はさらに、離岸距離が短い事例はいずれの国でも初期の実証実験・港湾区域・工業地域・人工干拓地に限定されること、また日本には洋上風車のための海洋空間計画が存在せず、こうした距離を実現するための制度的枠組みそのものが欠けていることを指摘している。

ただし、12海里は近年の大規模商業プロジェクトに適用される基準であり、既存の発電所がすべてこの距離を満たしているわけではない。第2.3節で詳述するように、欧州には離岸距離5.5~17kmで運転中の発電所が複数存在する。しかし、これらの近岸事例で使用されているタービンは2.3~8.4MWの小型~中型機にとどまり、10MWを超える大型タービンを住宅地近傍（離岸距離10km未満）に商業規模で配置した事例は確認されていない。

同論文は景観の観点からの分析であるが、離岸距離の確保は騒音影響の観点からも重要である。本章では以下、騒音影響の観点から独自に事例調査を行い、いすみ市沖計画の離岸距離3kmの国際的位置づけを検証する。

## 2.2 国際比較における課題：欧州・中国との比較

現在、12~18MWクラスの洋上風車が導入されつつある主要プロジェクトの離岸距離を以下に比較する。

比較項目	【本計画】いすみ市沖	【欧州】He Dreiht (ドイツ・建設中)	【中国】華潤連江 (China Resources Lianjiang)
採用風車	18MW クラス (想定)	15MW クラス (Vestas V236)	18MW クラス (MingYang MySE 18.X)
全高 (高さ)	約 280~300 m	約 260 m	約 280~300 m
岸からの 距離	約 3 km	約 90~110 km	約 18~25 km
設置環境	沿岸居住地域の近傍	水平線の彼方 (視認不可・無音)	沖合の島嶼部周辺 (生活圈から離隔)
リスク 評価	要検証 (未検証)	皆無 (距離による減衰)	限定的 (18kmのバッファ)

## 2.3 欧州の近岸事例：非都市部における 200 MW 超の洋上風力発電所

欧州には、総出力200MW超の洋上風力発電所を海岸線から6~17km程度の近距離に建設した事例が複数存在する。これらの発電所はいずれも農村部・自然保護区・漁村など非都市部の沿岸に

位置しており、周辺環境はいすみ市の海岸線と類似する点がある。以下の表に主要な事例を示す。

発電所名	国	総出力	1基あたり	基数	離岸距離	沿岸環境
Anholt	DK	400 MW	3.6 MW	111	15 km	砂丘・草原
Fryslân	NL	383 MW	4.3 MW	89	~6 km	湖堤・農村沿岸
Sheringham Shoal	UK	317 MW	3.6 MW	88	17 km	自然保護沿岸 (AONB)
Lincs	UK	270 MW	3.6 MW	75	8 km	平坦農地・海水浴場
Humber Gateway	UK	219 MW	3.0 MW	73	8~10 km	農地海崖
Rødsand 2	DK	207 MW	2.3 MW	90	9 km	農村島嶼
Vesterhav Syd & Nord	DK	344 MW	8.4 MW	41	5.5~10 km	別荘地・漁村(砂崎)

表 2: 欧州の非都市部の近岸事例 (DK: デンマーク、NL: オランダ、UK: 英国)

上記の事例のうち、特に注目すべきはデンマークの Vesterhav Syd & Nord (2024 年運転開始) である。同発電所は Siemens Gamesa SG 8.0-167 DD (8.4 MW) を合計 41 基使用し、総出力 344 MW を達成しており、本節で取り上げた欧州近岸事例の中で 1 基あたりの出力が最も大きい。離岸距離は 5.5~10 km であり、風車先端高は 193 m に達する。沿岸環境の面でも特徴的である。Vesterhav Syd はユトランド半島西岸のホルムスランド・クリット沖に位置するが、この海岸は北海とリンクピング・フィヨルドに挟まれた幅わずか数百メートルの細長い砂州であり、沿岸の居住施設はほぼすべてが別荘・貸別荘である。Søndervig、Klegod、Houvig 等の集落は常住人口が極めて少なく、夏季の観光客が主な利用者である。Vesterhav Nord はハルボーレ・タンゲ沖に位置し、最寄りの集落は Harboøre (人口約 1,300 人) および Thyborøn (人口約 1,700 人) の小規模漁村である。いずれの地点も、海岸背後に内陸集落がほとんど存在せず、北海の波浪音が風車騒音を遮蔽しうる立地条件にある。Vattenfall は視覚的影響の軽減策として、風車を 1 列配置とし、許可区域内で可能な限り沖合に配置したほか、航空機検知レーダーによる夜間灯火の制御や、翼の同期回転による騒音低減措置を導入している。

公正を期すために、欧州においても大型タービンの近岸配置を志向する計画が存在することに触れておく必要がある。エストニア北西沖洋上風力発電計画 (Enefit Green 社、Hiiumaa 島沖) は、15 MW 級タービン約 55 基による総出力 1 GW 超の大規模開発を検討しており、最寄りのタービンから海岸までの距離は約 12 km である<sup>5</sup>。これは本節で取り上げた近岸事例のいずれよりもタービン出力が大きく、欧州においても離岸距離の限界を押し広げようとする動きがあることを示している。しかし、この事例においても以下の 2 点は重要である。第一に、離岸距離 12 km はいすみ市沖計画の 4 倍であり、前節で述べた宮協論文の 12 か国が確保する距離水準の範囲内にある。第二に、開発者は低周波騒音・超低周波音の専門調査を Ramboll 社に委託しており、屋外における特定の周波数帯で低周波音が可聴となりうることが報告されている。すなわち、欧州において 15 MW 級タービンの比較的近岸への配置が検討される場合であっても、12 km の離岸距離の確保と詳細な低周波音評価が前提条件とされている。なお、本書の音響分析で使用する Vestas V236-15MW

<sup>5</sup>Ramboll (2022) “North West Estonia Offshore Wind Farm, Estonia: Low Frequency Noise and Infrasound Survey,” Ref. 1510055015-001, 8 December 2022.

の1/3 オクターブバンド音響スペクトルは、このエストニア計画の環境評価資料から取得したものである（第10章参照）。

上記のとおり、欧州においても総出力200MW超の洋上風力発電所が海岸から5.5~17km圏内の非都市部沿岸に建設されている。さらに、計画段階のエストニア北西沖では15MW級タービンが離岸距離約12kmで検討されている。Vesterhav Syd & Nordの8.4MW機は本節で確認された運転中の事例における最大の単機出力であるが、それでもいすみ市沖計画で想定されている18MW級風車の半分以下に過ぎない。すなわち、欧州の近岸事例は「大規模発電所を非都市部沿岸の近距離に配置すること自体」は前例があるものの、運転中・計画中を問わず、15MW以上の超大型風車を離岸距離10km未満で用いた事例は存在しない。さらに、Vesterhav等の欧州近岸事例では別荘地や砂州など常住人口が極めて少ない沿岸が選定されており、波浪による自然遮蔽が期待できる立地が選ばれている点も重要である。いすみ市沖計画の特異性は、離岸距離の短さだけでなく、風車1基あたりの巨大さ（全高260~300m超）と3kmという距離の組み合わせにある。

## 2.4 ロンドン周辺の事例

**ロンドン周辺の全データ一覧** 以下は、ロンドンへの電力供給を担うテムズ川河口域（Thames Estuary）にある主要な洋上風力発電所のスペック一覧である。

発電所名	1基あたりの出力	総基数	総出力	陸からの距離
London Array	3.6 MW	175 基	630 MW	約 20 km
Greater Gabbard	3.6 MW	140 基	504 MW	約 23 km
Thanet	3.0 MW	100 基	300 MW	約 12 km
Gunfleet Sands	3.6 MW / 4.0 MW	48 基	173 MW	約 7 km
Kentish Flats	3.0 MW / 3.95 MW	45 基	139.5 MW	約 10 km
いすみ市沖【本計画】	12~18 MW	25~42 基	約 450~525 MW	約 3 km

**顕著な「規模」と「距離」の乖離** ロンドン周辺の風車はすべて3~4MWクラスの「第1世代~第2世代」小型機であり、いすみ市沖で計画されている18MWクラスの「最新巨大機」とは単機出力で5~6倍の差がある。騒音エネルギーや風車の圧迫感において、これらは全く別の種類の建造物と言える。しかも、上表で最も陸に近いGunfleet Sandsですら海岸から7km離れており、そこで使われているのはいすみ市沖計画の5分の1以下の出力しかない3.6MW機である。ロンドン周辺では、小型の風車であっても住環境への配慮から7~20kmの距離を確保しているのが現実である。

## 2.5 アバディーン湾洋上風力発電所（EOWDC）：距離が近いが苦情がない事例

離岸距離の観点でいすみ市計画に最も近い欧州の事例は、スコットランド・アバディーン湾の欧州洋上風力実証センター（EOWDC）である。主要諸元は以下のとおり：総出力93.2MW、Vestas V164-8.4MW/8.8MW × 11基、離岸距離約2.4~5km、翼端高191m、ローター直径164m、2018

年運開、開発者 Vattenfall。立地はアバディーン市（人口約 23 万人）沖合の都市型立地であり、前節の農村・別荘地とは対照的である。

EOWDC では運開以降、住民からの騒音苦情はほとんど報告されていない。しかし、この事実をそのままいすみ市に当てはめることはできない。苦情が生じていない背景には、いすみ市とは根本的に異なる 4 つの条件がある。(1) 風車規模：EOWDC の 8.4 MW はいすみ市計画の 18 MW の半分以下であり、音響エネルギーは大幅に小さい。(2) 卓越風向：スコットランドの卓越風は西～南西であり、風は通常、陸からタービンに向かって吹く。住民がタービンの風下に入る頻度が極めて低く、いすみ市の海風卓越条件と正反対である。(3) 海霧による減衰：東風（海からの風）が吹く稀な場合でも、スコットランド東岸特有の「ハール」(haar) と呼ばれる濃い海霧が音の伝搬を減衰させる。(4) 都市騒音によるマスキング：最寄りのブラックドッグ・ブリッジ・オブ・ドン地区は幹線道路 A90 (AWPR) の終点付近に位置し、都市部の高い背景騒音が風車騒音を遮蔽する。いすみ市の静かな農村環境では、このマスキング効果は期待できない。

## 2.6 日本と酷似する地形「ノルウェー」の教訓：なぜ 140 km も離すのか？

日本と同様に海岸線からすぐに水深が深くなる地形（急深）を持つノルウェーの事例は、近距離配置が唯一の選択肢ではないことを示す参考事例である。ノルウェーは洋上風力の先進国であるが、彼らは「水深が深いから岸の近くに建てる」のではなく、「水深が深いからこそ、浮体式技術を使って、誰もいない遙か沖合に建てる」という道を選んでいる。

**地形は似ていても、設計思想が違う** ノルウェーの海岸線はフィヨルドなど複雑で急深な地形であり、遠浅の海が広がるドイツやイギリスとは条件が異なる。これは日本の太平洋側の地形と極めて類似している。しかし、ノルウェー政府と事業者は、景観破壊や漁業権、そして沿岸住民への騒音被害を回避するため、あえてコストのかかる「浮体式」を採用し、陸地から完全に見えない距離まで離す政策をとっている。

**世界最大級の浮体式ファーム「ハイウィンド・タンペン」** その象徴的な事例が、現在稼働している世界最大級の浮体式洋上風力発電所「ハイウィンド・タンペン (Hywind Tampen)」である。

- 設置場所: ノルウェー沖 北海
- 総出力: 94.6 MW (Siemens Gamesa SG 8.0-167 DD × 11 基、後に 8.6 MW に出力向上)
- 岸からの距離: 約 140 km
- 採用技術: 浮体式
- 目的: 沖合の石油・ガスプラットフォームへの電力供給（住民居住区ではない）
- 送電先プラットフォームまでの距離: Gullfaks A まで約 16 km、Snorre A まで約 13 km（いずれも水深 260~300 m の海底ケーブルによる送電）

**顕著な距離の格差** ノルウェーは、技術的な困難を乗り越えてでも「140 km」という距離を確保している。それに対し、いすみ市沖の計画は検討の余地がある。

比較項目	【本計画】いすみ市沖	【ノルウェー】ハイウィンド・タンペン
岸からの距離	約 3km	約 140 km
距離の倍率	基準	いすみ市沖計画の 約 46 倍 の距離
設置思想	コスト重視 (近い浅瀬に安く作る)	環境・共生配慮型 (技術で沖合へ出る)
視覚・騒音	巨大な圧迫感・騒音	完全に見えない・聞こえない

**結論：地形条件は決定的制約とならない** いすみ市の海域が急深であり着床式が浅い海域にしか設置できないことは、近距離配置の技術的背景として挙げられている。しかし、同じ地形条件を持つノルウェーは、「ならば浮体式で沖に出る」という解決策を実践している。ノルウェーの事例は、浮体式技術を採用すれば海岸から 100 km 以上離れた海域での大規模発電が技術的に実現可能であることを示している。近距離配置は急深海域における唯一の選択肢ではなく、コストと技術のトレードオフの結果である。

### 2.6.1 実現可能な未来：ノルウェーの「30 GW 構想」

前節で示したハイウィンド・タンペンの成功に加えて、ノルウェー政府は 2040 年までに洋上風力発電の容量を 30 GW（原子力発電所およそ 30 基分）まで拡大する国家目標を掲げている。重要なのは、この 30 GW を主に浮体式技術により沖合で実現しようとしている点である。ノルウェーは沿岸環境の保護コストを「不可能な出費」ではなく「必要な投資」として位置づけている。この 30 GW 構想を支える発電コストの現状と将来見通しについては、第 2.10 節で詳しく検討する。

## 2.7 中国の最新事例：中国においても「18 km」

世界で最も積極的に洋上風力を推進している中国においても、18 MW 級タービンは沿岸から相当の距離を置いて配置されている。

2024 年 8 月に着工した世界初の 18 MW 級バッチプロジェクト「華潤連江外海洋上風力発電所」は、陸地から約 18~25 km の距離を確保している。この距離が騒音、景観、漁業、海底地形のいずれを主因として決定されたかは公開情報からは特定できないが、結果として、同等クラスのタービンを用いるいすみ市沖計画（離岸距離約 3 km）の 6 倍以上の離岸距離が確保されている事実は留意に値する。

## 2.8 国内事例との比較

### 2.8.1 北九州響灘の着床式事例：国内最大の洋上風力発電所

2026 年 3 月、福岡県北九州市若松区沖の響灘において、国内最大の洋上風力発電所「北九州響灘洋上ウインドファーム」（総出力 220 MW、Vestas 9.6 MW × 25 基、着床式、全高約 200 m）が商業運転を開始した。立地上の最大の特徴は、港湾区域内の工業地帯沖合に位置し、最寄りの陸域が製鉄所等の立地する響灘臨海工業団地であることである。いすみ市沖のように住宅地が直接海岸線に面する状況とは根本的に異なる。

タービン規模については、9.6 MW 機はいすみ市沖に計画されている 12~18 MW 級の約半分から 3 分の 2 の出力であり、全高も約 200 m 対約 270~335 m と開きがある。騒音出力については、第 10.3 節に示す通り、同じ Vestas 社の V164-9.5 MW（響灘の 9.6 MW 機に最も近い機種）の A 特

性音響パワーレベルは約 113 dB(A) であり、いすみ市沖で想定される V236-15 MW の 118 dB(A) と比較して約 5 dB（音響エネルギーで約 3 倍）低い。さらに立地条件（工業地帯沖合対住宅地前面 3 km）の違いを考慮すると、響灘の騒音状況をいすみ市沖計画に直接適用することはできない。ただし、比較対象として挙げられることのある秋田県の能代港・秋田港の洋上風車（4.2 MW、約 106 dB(A)）に比べれば規模はいすみ市沖計画により近く、9.6 MW 級風車 25 基による大規模ファームの国内運用実績として参照しうる。

### 2.8.2 五島列島の浮体式事例：日本初の商用浮体式洋上風力発電所

2026 年 1 月、長崎県五島市沖において日本初の商用浮体式洋上風力発電所（総出力 16.8 MW、Hitachi 2.1 MW × 8 基、ハイブリッド・スパー型浮体、離岸距離約 7~11 km、水深約 130~140 m）が商業運転を開始した。戸田建設が 2013 年から環境省実証事業として椛島沖で運転した単機 2 MW の経験を基盤とし、単機実証から複数基の商用ファームへ段階的に技術を成熟させたプロジェクトである。

いすみ市沖との比較においては、五島の 2.1 MW（ローター直径約 80 m）は計画中の 12~18 MW 級（ローター直径約 220~260 m）と出力で 6~9 倍、ローター受風面積で 8~11 倍の開きがあり、騒音影響の直接的な比較対象にはならない。しかし、日本の海域において浮体式洋上風力が商業的に運転可能であることを実証した意義は大きい。浮体式の発電コストについては第 2.10 節で検討する。

### 2.8.3 北九州響灘沖の浮体式事例：国内初のバージ型商用浮体

2025 年 5 月、北九州市響灘沖において、国内 2 例目かつバージ型としては初の商用浮体式洋上風力発電所（総出力 3 MW、エアロダイナ社製 2 枚ブレード風車 × 1 基、BW イデオール設計のバージ型浮体、離岸距離約 15 km、水深約 54~56 m）が商業運転を開始した。NEDO の実証研究（2019 年~）として運転されていた設備を、2024 年 3 月の実証終了後に参画企業が引き継いで商用化したものである。

五島のスパー型（水深 130~140 m）と本プロジェクトのバージ型（水深 54~56 m）は異なる浮体技術であり、日本国内で複数の浮体方式が商業運転に至っている。また離岸距離 15 km は、いすみ市沖計画の 3 km の 5 倍であり、浮体式技術が沖合配置を可能にすることを具体的に示す事例である。

## 2.9 浮体式技術の成熟：海外の大規模商用実績と国内の現状

前節で示した国内の商用実績に加え、海外では大規模な浮体式洋上風力がすでに稼働している。以下では、これらの実績と国内の実証研究の経緯を整理する。

**海外の大規模商用実績：荒海での運転実証** 第 2.6 節で詳述したノルウェーのハイウィンド・タンペンは、総出力 94.6 MW（8.6 MW × 11 基）で海岸から 140 km の北海沖合に位置し、2023 年から商業運転を行っている。同ファームは、北海特有のハリケーン級の暴風、高波、深海という過酷な海象条件に耐えるよう設計されており、太平洋の台風条件に匹敵しうる荒海での浮体式大規模運転が技術的に確立されていることを示している。さらにノルウェー政府は 30 GW の洋上風力を主に浮体式で沖合展開する国家目標を掲げている（第 2.6.1 節参照）。

**国内の商用実績：2 つの浮体方式が稼働中** 日本国内においても、第 2.8.2 節および第 2.8.3 節で述べた通り、2026 年 3 月現在、2 基の浮体式洋上風力発電所が商業運転中である。五島市沖（ス

パー型、16.8MW、水深130~140m、離岸距離7~11km）と北九州響灘沖（バージ型、3MW、水深54~56m、離岸距離15km）であり、異なる浮体技術がそれぞれ商業的に成立している。これらは規模としてはまだ小さいが、日本の海域・気象・産業条件のもとで浮体式風力が商業運転可能であることを実証した意義は大きい。

**歴史的経緯：福島実証の教訓** 日本の浮体式洋上風力の歴史は、2011年に開始された「福島浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業」に遡る。同プロジェクトは最大7MW級の風車を太平洋上に浮体式で設置し、日本特有の急峻な海底地形と台風を含む厳しい海象条件のもとで浮体式風車が構造的に成立するという技術的事実を実証した。しかし、総事業費約600億円に対して稼働率が4~36%にとどまり、コスト超過と採算性の問題から全3基が2021年までに撤去された。福島の教訓は、浮体式の構造的実現可能性（太平洋の台風条件を含む）を確認した一方で、技術的野心と商業的現実のバランスの重要性を示したものであった。その後の五島・響灘の成功は、この教訓を踏まえた段階的な技術成熟の成果といえる。

この福島での実証と、第2.6節で述べたノルウェーでの商用化の成功、そして第2.8.2節で述べた五島市沖での日本初の商用浮体式発電所の稼働を合わせると、浮体式技術はすでに実証段階を超えて商用段階に入っている。

**結論：技術ではなくコストの問題** 以上を総合すると、浮体式洋上風力は海外では荒海条件下での大規模商業運転（ハイウィンド・タンペン）が実現し、日本国内でも2つの異なる浮体方式による商業運転が行われている。現在では12~18MWクラスの浮体式プラットフォームも設計段階にある。それにもかかわらずいすみ市沖で着床式・近距離が選択される理由は、端的に言えばコストである。着床式は建設費が安く、海底ケーブルも短くて済むため、事業の採算性が高い。一方、浮体式は建設費が高く、より長い送電ケーブルが必要となる。しかし、この選択は建設コストの削減と住民の生活環境保全のトレードオフを内包している。浮体式技術が利用可能である以上、コスト要因のみで離岸距離3kmを選択することの妥当性は、住民への影響を踏まえて慎重に検討される必要がある。

## 2.10 浮体式洋上風力の発電コスト：現状と将来予測

前節では、近距離配置の理由がコストにあることを確認した。しかし、「浮体式はコストが高すぎる」という議論に対しては、第2.6.1節で述べたノルウェーの30GW構想が重要な参照事例となる。ノルウェーは浮体式がすでに採算が取れるから投資しているのではなく、採算が取れるようになることを見越して、大規模な政府補助により技術成熟を促している。ハイウィンド・タンペンは総工費の約40%をENOVA（政府系機関）が補助して初めて成立しており、今回の浮体式入札向けには最大35億USドルの補助枠が設定されている。ノルウェーのエネルギー相は「技術がまだ未成熟で高価なため政府支援が必要」と明言している。すなわち、「急深海域を持つ国が沿岸住民への影響を避けるために、今から大規模に投資する」という政策判断である。日本においても同様の政策的検討が求められる。

以下では、この点をより具体的に検証するため、浮体式の発電コストの現状と将来見通しを整理する。

発電コストの比較に用いられる標準的な指標は「均等化発電原価（LCOE）」である。これは発電所の建設から廃止までのすべてのコストを生涯発電量で割った値で、1kWhあたりの発電コスト

を示す。

**現在のコスト水準** 浮体式洋上風力はまだ商用段階の初期にあり、着床式と比較してコストは高い。業界平均の LCOE は現時点で約 320 USD/MWh とされる。ハイウィンド・タンペン（ノルウェー）の LCOE は約 120 USD/MWh と報告されているが、これは前述の通り総工費の約 40% を政府が補助した後の値であり、補助なしのコストはこれを大幅に上回る。ただし、ハイウィンド・タンペンは卸売市場への売電ではなく油田プラットフォームへの直接送電という特殊な用途であり、LCOE の代表値としての扱いには留意が必要である。一方、Hywind Scotland（2017 年）との比較では、わずか 6 年で設置容量あたりの投資額は約 35% 低下しており、コスト低減が急速に進んでいることは確かである。

日本国内のデータとしては、第 2.8.2 節で述べた五島市沖浮体式洋上風力発電所の固定価格買取制度（FIT）による売電価格が 36 円/kWh（約 238 USD/MWh、2024 年平均レート基準）である。参考として、2021 年の洋上風力公募（第 1 ラウンド）で三菱商事系コンソーシアムが落札した着床式プロジェクト（秋田県能代市・三種町・男鹿市沖等）の落札価格は 11.99~16.49 円/kWh（約 79~109 USD/MWh）であったが、この価格は競合他社の入札額を大幅に下回る水準であり、その後の資材高騰・円安等により事業が成立しなくなったことから、三菱商事は 2025 年 8 月に 3 海域すべてから撤退を表明した<sup>6</sup>。したがって、この価格は着床式洋上風力の実現可能なコスト水準を反映したものとは言えない。ただし、五島は総出力 16.8 MW（2.1 MW × 8 基）と極めて小規模であり、大型タービンによるスケールメリットが得られていない点には留意が必要である。ハイウィンド・タンペン（94.6 MW、8.6 MW × 11 基）と比較しても規模で約 5 分の 1 であり、五島のコストは浮体式技術の初期段階における小規模プロジェクトの値として位置づけるべきである。

**将来のコスト低減予測** 浮体式洋上風力のコストは今後さらに低下すると複数の独立した機関が予測している。DNV（Det Norske Veritas、ノルウェーに本部を置く独立系エネルギー認証・リスク評価機関）のエネルギー転換見通し（2022 年）は 2035 年までに約 61 USD/MWh、2040 年までに約 56 USD/MWh への低減を予測している。米国エネルギー省の FORCE モデルも 2035 年までに約 64 USD/MWh を推計している。DNV が 2023 年に実施した世界 244 名の業界専門家調査では、回答者の 60% が「2035 年までに補助なしで商業的に成立する」と回答している。ただし、これらはいずれも楽観的なシナリオに基づく予測であり、固定式との比較では依然として浮体式のコストが高い状態が続くとされている。また将来コストは世界全体の累積導入量に大きく依存するため、各国が今から投資して技術成熟を促すことが不可欠である。

**比較の見通し** 以下に主要な数値を比較する（USD/MWh 換算）。日本の電力料金は円建てであるため、為替レートによって大きく変動する。以下では 2024 年の平均為替レート（1 USD ≈ 151 JPY）を基準とし、各料金の出典を注記する。

**総括** 以上のデータから、浮体式洋上風力の発電コストについて以下の点が明らかになる。

第一に、現在の浮体式 LCOE の位置づけは、比較する電力価格によって大きく異なる。ハイウィンド・タンペンの約 120 USD/MWh は日本の家庭用電力料金（約 190~270 USD/MWh）を大幅に下回り、大口産業用電力料金（約 115 USD/MWh）ともほぼ同等である。一方、卸売市場価格

<sup>6</sup>三菱商事株式会社「国内洋上風力発電事業に係る事業性再評価の結果について」2025 年 8 月 27 日。

表 5: 浮体式洋上風力の発電コスト比較 (USD/MWh)

区分	項目	コスト (USD/MWh)
<b>現在の浮体式 LCOE</b>		
	ハイウィンド・タンペン (政府補助後)	約 120
	五島市沖 (FIT 価格) <sup>d</sup>	約 238
	業界平均	約 320
<b>比較対象：日本の着床式洋上風力 (2021 年公募)</b>		
	秋田県沖等 (落札価格、撤退済) <sup>e</sup>	約 79~109
<b>将来予測</b>		
	DNV 予測 (2035 年)	約 61
	DNV 予測 (2040 年)	約 56
	米国エネルギー省 FORCE モデル (2035 年)	約 64
<b>比較対象：電力料金</b>		
	日本・家庭用 <sup>a</sup>	約 190~270
	日本・産業用 (大口) <sup>b</sup>	約 115~190
	日本・卸売市場 (JEPX) <sup>c</sup>	約 55~100
	ノルウェー・家庭用	約 130
	ノルウェー・卸売市場	約 55

<sup>a</sup> 家庭用：政府補助適用時の約 29 円/kWh (≈190 USD/MWh) から、補助なし・高消費帯の約 41 円/kWh (≈270 USD/MWh) までの幅がある (GlobalPetrolPrices 2025 年 6 月、Intratec 2025 年 5 月)。

<sup>b</sup> 産業用：大口需要家向け約 17.5 円/kWh (≈115 USD/MWh、Intratec 2025 年 5 月) から、中小企業向け約 30 円/kWh (≈190 USD/MWh、GlobalPetrolPrices 2025 年 6 月) までの幅がある。

<sup>c</sup> 卸売市場：JEPX 日前市場のスポット価格は年度・季節により大きく変動し、近年の月平均は約 8~15 円/kWh (≈55~100 USD/MWh) の範囲にある。

<sup>d</sup> 五島市沖：再エネ海域利用法に基づく洋上風力公募における FIT 価格 36 円/kWh。競争入札ではなく固定価格。総出力 16.8 MW (2.1 MW × 8 基) の小規模浮体式プロジェクト。

<sup>e</sup> 着床式：2021 年公募 (第 1 ラウンド) における三菱商事系コンソーシアムの落札価格。能代市・三種町・男鹿市沖 11.99 円/kWh、由利本荘市沖 11.99 円/kWh、銚子市沖 16.49 円/kWh。ただし、資材高騰等により 2025 年 8 月に 3 海域とも撤退が表明されており、この価格での事業は実現していない。

(日本 JEPX 約 55~100 USD/MWh、ノルウェー約 55 USD/MWh) との比較では、現時点の浮体式 LCOE はまだ高い。ただし、ハイウィンド・タンペンは卸売市場とは無関係に油田プラットフォームに直接送電しており、また業界平均の 320 USD/MWh は初期プロジェクトのコストを反映した値であるため、LCOE の代表値には幅がある点に留意が必要である。五島市沖の約 238 USD/MWh (FIT 価格 36 円/kWh) はハイウィンド・タンペンの約 2 倍であるが、総出力で約 5 分の 1 (16.8 MW 対 94.6 MW)、タービン単機出力で約 4 分の 1 (2.1 MW 対 8.6 MW) と規模が大幅に小さく、スケールメリットが得られていない。なお、前述のとおり 2021 年公募の着床式落札価格 (約 79~109 USD/MWh) は事業者の撤退により実現しておらず、日本における着床式洋上風力の実際のコスト水準はこれより相当高い可能性がある。なお、日本の電力料金は為替レートの変動 (2024 年は 1 USD ≈ 140~162 JPY の範囲で推移) および政府補助金の有無によって大きく変動するため、上記の比較はあくまで 2024 年平均レートに基づく目安である。

以上を総合すると、浮体式洋上風力は現時点では補助なしに着床式と競争できる水準にはなく、ノルウェーを含む各国が大規模な政府補助によって技術成熟を促している段階にある。しかし複数の独立した予測は、2035 年前後には補助なしでも産業用・家庭用電力料金と競合しうる水準に達する可能性を示している。急深海域を持つ日本にとって、この技術成熟の過程に早期から参加し、浮体式を将来の選択肢として真剣に検討することは、エネルギー政策と住民保護の両立という観点から合理的な方向性である。「現時点でコストが高い」という事実は、近距離・着床式を唯一の選択肢とする根拠にはならない。

### 3. 国内外の風力発電所周辺における騒音苦情の記録

本章では、風力発電所の騒音が周辺住民に与える影響について、国内外の疫学調査および政府機関の調査結果を整理する。第 3.1 節では、主要国で実施された用量反応 (dose-response) 研究の知見を概観し、どの程度の騒音レベル (dB(A)) で住民の苦情・不快感が生じるかを明らかにする。第 3.3 節では、洋上用大型風車を居住地近傍で稼働させた数少ない実例として、スコットランド・ハンターストン試験施設の経過を報告する。

騒音の測定に用いる重み付け (A 特性、C 特性、G 特性、Z 特性) の基本的な定義については第 1.5 節で説明した。各重み付けの物理的意味および定量的な違いについては第 8 章で詳述する。

本章で概観する疫学研究の大部分は A 特性 (dB(A)) に基づいて騒音レベルを評価しており、これが風車騒音研究の標準的な指標となっている。しかし、C 特性や G 特性を用いた評価基準・研究知見も一部存在する。以下では、まず dB(A) に基づく主要な用量反応研究を整理したうえで、dB(C) および dB(G) に関する知見を補足し、いすみ市沖計画に対する含意を検討する。

#### 3.1 疫学調査に基づく騒音苦情の用量反応関係

風力発電所の騒音と住民の不快感 (annoyance) の関係は、2000 年代以降、スウェーデン、オランダ、カナダ、米国、英国、ノルウェー、ポーランドなどで体系的に調査されてきた。これらの研究はいずれも、A 特性音圧レベル (dB(A)) と住民の自己申告による不快感の間に統計的に有意な用量反応関係が存在することを確認している。以下に主要な研究の知見を整理する。なお、これらの研究で対象となった風車は主に 0.5~3 MW 級の陸上風車であり、住民との距離は数百メートルから数キロメートル程度である。

- **スウェーデン**：Göteborg 大学の Pedersen らは、スウェーデン南部で 500 kW 以上の陸上風車周辺の住民を対象に 2 回の横断的調査を実施した (2000 年：n=351、回答率 68.4%；2005 年：n=754)。結果、35~40 dB(A) で約 5%の住民が不快感を報告し、40~45 dB(A) では約 18% に上昇した。風車騒音は、同等の dB(A) レベルの交通騒音と比較して、より高い不快感を引き起こすことが確認された。不快感は「スウィッシュ音」「脈動音」といった風車特有の音質と強く相関していた。農村部では都市近郊よりも不快感の発生率が高く、地形の影響も認められた (Pedersen & Persson Waye, “Perception and annoyance due to wind turbine noise – a dose-response relationship,” *J. Acoust. Soc. Am.* 116(6), 2004; Pedersen & Persson Waye, “Wind turbine noise, annoyance and self-reported health and well-being in different living environments,” *Occup. Environ. Med.* 64(7), 2007)。
- **オランダ**：2007 年にオランダで実施された調査 (n=725、回答率 37%) では、500 kW 以上の風車から 2.5 km 以内に居住する住民を対象とし、スウェーデンの研究と同様の用量反応関係が確認された。特筆すべきは、風車騒音が同等のレベルの交通騒音や産業騒音よりも高い不快感を引き起こすという知見であり、これは音の「スウィッシュ」特性、時間的変動、および夜間に減衰しないという特徴に起因すると考察されている (Pedersen et al., “Response to noise from modern wind farms in The Netherlands,” *J. Acoust. Soc. Am.* 126(2), 2009)。
- **カナダ**：カナダ保健省は 2013 年にオンタリオ州およびプリンスエドワード島で大規模な横断疫学調査 (Community Noise and Health Study) を実施した (n=1,238、回答率 78.9%、

風車からの距離 0.25~11.22 km、最大騒音レベル 46 dB(A))。結果、35 dB(A) を超えると不快感の統計的に有意な増加が確認された。高度の不快感 (highly annoyed) を報告した住民の割合は、30~35 dB(A) で 1.0%、35~40 dB(A) で約 10% と、10 倍に急増した。40 dB(A) 以上では最大 16.5% (オンタリオ州) に達した。不快感は夏季、屋外、および夕方・夜間に統計的に高かった。この研究は、35 dB(A) 付近に重要な閾値が存在することを示唆している (Michaud et al., “Exposure to wind turbine noise: Perceptual responses and reported health effects,” *J. Acoust. Soc. Am.* 139(3), 2016; Health Canada, “Wind Turbine Noise and Health Study: Summary of Results,” 2014)。

- **米国**：米国エネルギー省の支援により実施された全国規模の調査 (n=1,043) では、40 dB(A) 未満では半数以上の住民が風車音を聴取できないと回答し、不快感を報告したのは 20% 未満であった。しかし、45 dB(A) 以上では約半数が不快感を報告した。経済的な利益を受けていない住民に限定すると、47.5 dB(A) 以上で全員が風車音を聴取したと回答した (Haac et al., “Wind turbine audibility and noise annoyance in a national U.S. survey,” *J. Acoust. Soc. Am.* 146(2), 2019)。
- **ノルウェー**：ノルウェー南部の 31 基の風車からなる Lista 風力発電所周辺の住民調査 (n=90、全住居が風車から 2 km 以内) では、 $L_{den}$  37 dB(A) で、道路交通騒音 55 dB(A) に相当する不快感レベルに達した。すなわち、風車騒音は同等の不快感を生じるのに道路交通騒音より 18 dB 低いレベルで足りるという結果であった。この値は、ノルウェーの現行規制値 (45 dB(A)) より 8 dB 低い (“Windmill Noise Annoyance, Visual Aesthetics, and Attitudes towards Renewable Energy Sources,” *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2016)。
- **英国**：英国の 3 つの郊外型風力発電所周辺で実施された調査 (n=359) では、30 dB(A) 未満で 5%、40 dB(A) 以上で 30% の住民が不快感を報告した。郊外 (背景騒音が高い環境) では農村部よりも不快感の発生率は低いが、それでも有意な用量反応関係が確認された (“Perceptions of Wind Turbine Noise and Self-Reported Health in Suburban Residential Areas,” *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2021)。
- **ポーランド**：517 名の住民を対象とした調査 (回答率 78%) では、35~53 dB  $L_{den}$  の範囲で高度不快感の割合が有意に増加した (Pawlaczyk-Łuszczynska et al., 2014)。

上記はいずれも海外の研究であるが、日本国内においても大規模な疫学調査が 1 件実施されている。大分県立看護科学大学の影山隆之教授らは、日本全国の風力発電所周辺住民 1,079 名を対象とした社会音響調査を行い、屋外の騒音レベル 40.5 dB(A) を閾値として、不眠症の有病リスクが統計的に有意に増大することを報告した<sup>7</sup>。具体的には、高騒音曝露地域 (41~45 dB(A)) における不眠症の有病率は低騒音地域と比較して約 5 倍であった。この研究は日本における風車騒音の健康影響に関する唯一の大規模疫学調査であり、海外の知見とも整合する重要な成果である。

しかし、この研究の知見は日本の規制に反映されていない。環境省が 2017 年に公表した「風力発電施設から発生する騒音に関する指針」は、「人の健康に直接的に影響を及ぼす可能性は低い」と

<sup>7</sup>Kageyama, T., Yano, T., Kuwano, S., et al., “Exposure-response relationship of wind turbine noise with self-reported symptoms of sleep and health problems: A nationwide socioacoustic survey in Japan,” *Noise and Health*, 18(81), 53–61, 2016. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/articles/26960782/>

結論づけているが、影山らの調査結果を指針策定の根拠として採用していない。田鎖（2023）はこの点を「風車騒音と無関係の科学的知見に基づき指針値を定めている」問題として指摘しており<sup>8</sup>、国内で実施された疫学的エビデンスが政策に活用されていない構造的問題が存在する。

以上の知見を総合すると、風車騒音に対する住民の不快感は概ね以下のように段階的に増加する：30 dB(A) 未満ではごく少数（1～2%）、30～35 dB(A) で数パーセント、35～40 dB(A) で5～10%（急増の閾値）、40～45 dB(A) で10～18%、45 dB(A) 以上で約50%。WHO（世界保健機関）の2018年環境騒音ガイドラインでは、風車騒音に対して条件付きで  $L_{den}$  45 dB(A) の推奨値が設定されているが、上記の研究群はそれよりも低い35 dB(A) 付近から有意な影響が生じることを示している。また、風車騒音は同等レベルの交通騒音と比較して17～18 dB 分、より強い不快感を引き起こすことが複数の研究で確認されている。

風車騒音が同じ dB(A) 値の交通騒音よりも強い不快感を引き起こす主な要因の一つが、「振幅変調（amplitude modulation, AM）」である。風車のブレード（羽根）がタワー（支柱）の前を通過するたびに、空気が急激に圧縮・開放され、音圧が周期的に強くなったり弱くなったりする脈動が生じる。3枚ブレードの大型風車の場合、この脈動は約1～2秒に1回の頻度で繰り返される。風車の近くでは「シュッ……シュッ……」という高周波のスイッチュ音として聞こえるが、数キロメートル離れると高い音は空気に吸収されて消え、低い音の脈動だけが残る。この低周波の律動的脈動は、一定の音よりも人間の知覚を強く刺激し、特に就寝時には睡眠の妨げとなりやすい（Van den Berg, “The beat is getting stronger: the effect of atmospheric stability on low frequency modulated sound of wind turbines,” *J. Low Freq. Noise Vib.*, 24(1), 2005）。

上記の疫学研究においてスウェーデンの調査が「スイッチュ音」「脈動音」との強い相関を報告しているのは、まさにこの振幅変調の影響を捉えたものである。しかも、この脈動は夜間の安定大気（上空で強風が吹き、地上付近は穏やかな条件）でもっとも強まることが実測で確認されている。この振幅変調がいすみ市沖計画においてどの程度の定量的影響をもたらすかは、第12.5節で詳しく分析する。

各国の現行規制値は、夜間で35～60 dB(A) と大きなばらつきがある。多くの国は夜間40～45 dB(A) を採用しているが、上記の疫学的知見に基づけば、この水準でも10～18%の住民が高度の不快感を報告する可能性がある。バーモント州の公衆衛生報告書（2017年）は、不快感を最小化するために年間平均35 dB(A) の制限を推奨している。

重要な留意点として、上記の研究はすべてA特性（dB(A)）に基づいて騒音レベルを評価している。A特性は人間の聴覚特性に合わせて低周波成分を減衰させるフィルタであり、音源近傍での広帯域騒音の評価には適しているが、長距離伝搬後に低周波が支配的となった音場では、実際のエネルギーを系統的に過小評価する。上記の研究で対象となった風車は0.5～3 MW 級であり、住民との距離は概ね数百メートルから数キロメートル程度であった。いすみ市沖の計画（18 MW 級、離岸3 km）では、風車の出力規模が桁違いに大きく、かつ伝搬距離が長いため、到達する音のスペクトルは上記の研究で観測されたものよりも低周波に偏る。したがって、同じ dB(A) 値であっても、いすみ市のケースでは低周波エネルギーの寄与がはるかに大きく、住民への影響はこれらの研究が示す水準を上回る可能性がある。

<sup>8</sup>田鎖順太「我が国における風車騒音の評価における問題点および適切な健康リスク評価方法の提案」『北海道自然エネルギー研究』17, pp.13-20, 2023年。

この問題を定量的に評価するため、本書では A 特性 (dB(A)) に加えて C 特性 (dB(C)) による騒音レベルも算出する。C 特性は低周波成分を A 特性ほど減衰させないフィルタであり、低周波が支配的な音場をより正確に反映する。A 特性と C 特性の詳細な物理的説明および両者の差が距離とともに拡大するメカニズムについては、第 8 章で詳述する。

### 3.2 低周波騒音に関する国際的規制基準：dB(C) および dB(G) による評価

前節で概観した疫学研究はいずれも A 特性 (dB(A)) に基づいているが、A 特性が低周波騒音を過小評価する問題は国際的に認識されており、一部の国や地域では C 特性 (dB(C)) や G 特性 (dB(G)) を用いた補完的な評価基準を導入している。また、国際規格や専門家の提言においても、dB(C) と dB(A) の差を低周波騒音問題の診断指標として用いる手法が確立されている。本節では、第 12 章で計算結果を照合する際に用いる数値基準（各国が定める閾値・上限値）を整理する。これらの基準が各国の規制制度の中でどのように運用されているか（使用する予測モデルの指定、情報開示の要件など）については、第 5.6 節で別途検討する。

#### 3.2.1 dB(C) に基づく規制・評価基準

- **ドイツ — DIN 45680:1997**：C 特性と A 特性の差（等価または最大音圧レベル）が 20 dB 以上の場合、低周波騒音が存在すると判定し、10~80 Hz の 1/3 オクターブバンドにおける詳細な周波数分析を義務づける。この基準は風車に限定されたものではないが、風車を含むあらゆる環境騒音源に適用される（DIN 45680:1997; Pawlaczyk-Łuszczynska et al., Int. J. Environ. Res. Public Health, 2025）。
- **カナダ・アルバータ州 — エネルギー・公益事業委員会指令 038**：C 特性と A 特性の差が 20 dB を超える場合に低周波騒音問題の存在を認定する。また、静穏な農村環境では 65 dBC を上限とする基準を設けている（Alberta Energy and Utilities Board, Noise Control Directive 038, 2007）。
- **スウェーデン**（Lindkvist & Almgren, 2010）：屋外での C 特性と A 特性の差が 15 dB を超える場合に、低周波騒音問題の可能性があると追加調査を推奨している（Bolin et al., Environ. Res. Lett. 6, 035103, 2011 に引用）。
- **オーストラリア・ニューサウスウェールズ州 — 産業騒音政策 (INP)**：測定または予測された A 特性音圧レベルに対し、C 特性と A 特性の差が 15 dB を超える場合に 5 dB の修正係数を加算することを推奨する。すなわち、低周波成分が卓越する騒音は A 特性の値だけでは不十分であり、実質的には A 特性よりも厳しい基準が適用される（NSW Industrial Noise Policy, 2000）。
- **Broner 基準 (2011 年)**：オーストラリアの音響学者 Norm Broner は、多数の低周波騒音苦情事例と文献のレビューに基づき、住宅地における屋外 dB(C) の上限基準を提案した。静穏な農村・郊外環境（残留騒音  $L_{90} < 40$  dB(A)）では夜間 60 dB(C) ( $L_{eq}$ )、通常の郊外・都市環境では 65 dB(C) を上限とする。騒音が  $\pm 5$  dB(C) 以上変動する場合は、これらの値をさらに 5 dB(C) 差し引く（すなわち 55~60 dB(C)）。また、Hessler & Hessler (2011) は風車を対象に 65 dB(C) を推奨し、規制上限として 70 dBC を提案したが、風のある環境では C 特性の正確な測定が極めて困難であると注意を付している（Broner, “A Simple Outdoor Criterion for Assessment of Low Frequency Noise Emission,” Acoustics Australia 39(1), 2011）。

- **カナダ保健省 — 風車騒音・健康調査（2014年）**：1,238世帯を対象にA特性とC特性の双方で騒音レベルを評価した数少ない大規模疫学調査である。屋外dB(C)は24~63dBCの範囲であり、3%の世帯が60dBCを超えた。報告書はBroner基準（60~65dBC）を引用し、「音源が著しい低周波成分を含む場合、A特性フィルタでは音の侵入性や影響を十分に反映できない可能性がある。そのような場合にはC特性フィルタの使用がより適切である」と明記している。ただし、同調査ではdB(A)とdB(C)の相関が極めて高かった（ $r = 0.94$ ）。これは対象となった風車が0.5~3MW級の陸上機であり、低周波偏移がまだ小さかったためと考えられる。15MW以上の洋上風車が3kmの海上伝搬を経て到達するスペクトルでは、A特性とC特性の乖離が格段に大きくなる（本書第11章で定量的に示す）（Health Canada, “Wind Turbine Noise and Health Study: Summary of Results,” 2014）。

### 3.2.2 dB(G)に基づく規制・評価基準

- **デンマーク — 環境保護庁ガイドライン（Jakobsen, 2001）および法令1284号（2011年）**：超低周波音（インフラサウンド）についてはG特性で $L_{pG} \leq 85$  dBGの屋内基準が設けられている。Aalborg大学のMøller教授は、デンマーク環境保護庁の遮音計算に誤りがあり、最も遮音性能の低い住宅では屋内で25~30dB(A)に達し得ると批判している。同教授によれば、25~30dB(A)の屋内低周波騒音は「家の外にトラックがアイドリングしているような感覚」を与える（Jakobsen, J. Low Freq. Noise Vib. 20(3), 2001; Jakobsen, J. Low Freq. Noise Vib. 31(4), 2012; Politiken紙, 2012）。
- **エストニア — 洋上風力発電の環境影響評価**：エストニアは洋上風力発電の環境影響評価においてG特性基準を導入しており、屋内で $L_{pG,eq} \leq 85$  dB(G)の上限を設けている。
- **ポーランド — 超低周波音の屋外許容レベルの提案（2025年）**：Pawlaczyk-Łuszczynskaらは、G特性を用いた屋外の超低周波音（インフラサウンド）許容レベルを提案した。その根拠として、超低周波音の聴覚閾値が平均 $L_{pG} = 96$  dB（標準偏差5dB）に相当するとし、90dB(G)では人口の約11.5%が聴取可能（不快感を生じ得る）、85dB(G)では約1.5%が聴取可能と推定した。評価指標として $L_{DEN}(G)$ （G特性による昼夕夜加重等価音圧レベル）の枠組みを採用しており、通常的环境騒音評価と同様のアプローチでインフラサウンドを規制する先駆的な試みである（Pawlaczyk-Łuszczynska et al., “Should limit values be set for infrasound caused by wind turbines?” Int. J. Environ. Res. Public Health, 2025）。

### 3.2.3 周波数帯域別の評価

- **デンマーク —  $L_{pA,LF}$  基準**：デンマークは2012年から屋内 $L_{pA,LF} \leq 20$  dBを風車騒音に対して義務化している。これは10~160Hzの1/3オクターブバンドをA特性で合計した指標であり、C特性やG特性とは異なるが、低周波帯域に特化した評価を行う点でA特性の全帯域合計（通常のdB(A)）よりもはるかに低周波の実態を反映する。この規制は世界で最も先進的な風車低周波騒音基準として広く参照されている。この基準が導入された経緯（洋上風力発電所の稼働後にISO 9613-2の過小評価が判明し、規制が抜本的に改正された過程）については、第5.6.1節で詳述する。

### 3.2.4 日本の現状：dB(C)・dB(G)基準の不在

上記の国際的規制と対照的に、日本の環境省は風力発電の環境影響評価においてC特性（dB(C)）の基準もG特性（dB(G)）の基準も設けていない。2017年の環境省ガイドラインでは「現時点では風力発電設備から発生する超低周波音・低周波音と健康影響との明らかな関連を示す知見は確

認できない」として、超低周波音を評価対象から除外し、A 特性 (dB(A)) のみで騒音を評価している。

ドイツ、カナダ、オーストラリアが「C 特性と A 特性の差が 15~20 dB 以上であれば低周波騒音問題が存在する」と定めている国際基準に照らすと、この姿勢は重大な評価上の空白を生む。

### 3.3 大型風車の近距離運用事例：スコットランド・ハンターストン

前節では、主に 0.5~3 MW 級の陸上風車に関する疫学調査の知見を整理した。本節では、より大型の洋上用風車 (6~7 MW 級) を居住地から約 2.5 km の距離で稼働させた数少ない実例として、スコットランド・ハンターストン洋上風力タービン試験施設の経過を報告する。

#### 3.3.1 施設の概要

英国・スコットランド (ノース・エアシャー州) に位置するハンターストン試験施設は、SSE Renewables (スコットランドの電力事業者) が運営する、洋上風力用プロトタイプ・タービンの陸上試験場として 2012 年に設置許可を受けた。英国初の洋上風車陸上試験施設であり、当初 5 年間の試験期間が計画された。

**施設名称** 国立ハンターストン洋上風力タービン試験施設 (National Offshore Wind Turbine Test Facility at Hunterston)

**設置機種** Siemens 製 6 MW 機 (全高 177 m) および Mitsubishi SeaAngel 7 MW 機 (全高 193.5 m) の 2 基。いずれも洋上用のプロトタイプであるが、試験のため海岸線上 (オンショア) に設置された。

**周辺環境** 対岸のフェアリー村 (Fairlie) までの距離は約 2.5 km (約 1.5 マイル)。カンブレイ島 (Isle of Cumbrae) およびラーグス (Largs、約 8 km 地点) も施設の周辺に位置する。

#### 3.3.2 住民からの苦情

施設の稼働開始後、フェアリー村を中心とする周辺住民から騒音および体調不良に関する苦情が寄せられた。最終的に、フェアリーおよびカンブレイ島の計 17 名の住民 (うち 2 名は子供) が公式に苦情を提出した (Largs and Millport News, 2017)。

フェアリー地域協議会議長の Rita Holmes 氏 (タービンから約 2.5 km 居住、自身は風力発電の原則的支持者) は、調査報道メディア The Ferret の取材に対し次のように証言している：「単に少しめまいがする程度の話ではない...平衡感覚が失われ、まともに歩けなくなる状態だ。家にいると発話が困難になり、頭が破裂しそうな感覚に襲われる。」Holmes 氏は少なくとも 13 名が影響を受けたと主張している。

フェアリー村の別の住民で化学者の Jackie Pearson 博士は同じ取材に対し、「最悪な気分だ、漠然とした吐き気のような、倦怠感のような...まるで巨大な低音用スピーカーが設置されたディスコにいるようで、聞こえるというより感じるんだ」と述べている。

カンブレイ島 (ミルポート) の Karen Brodie 氏は、めまい、耳鳴りの増悪、「地面に引きずり倒されるような感覚」を訴え、原因を特定するために GP (一般医) および Crosshouse 病院の ENT (耳鼻咽喉科) 専門医を 1 年以上受診し続けたが、診断に至っていないと報告している。Brodie 氏

によれば、島内で少なくとも5名が同様の症状を訴えている。

特筆すべきは事業者の対応である。複数の報道（The Ferret, 2017; Shetland News, 2025）によれば、SSEは風車を稼働させる前にフェアリー村の住民に電話で事前通知を行い、住民は稼働期間中、自宅から離れた場所に避難していた。この事前通知の慣行は、SSE自身が住民への何らかの影響を認識していたことを示唆するものとして、後のViking風力発電所訴訟においても言及されている。

### 3.3.3 公的機関の見解

住民の訴えに対し、公的機関は以下の見解を示した。

**NHS Ayrshire and Arran（英国国民保健サービス）** 2009年から2016年のGP（一般医）データを分析した結果、「ハンターストンのタービン設置後、フェアリーおよび周辺地域でめまいの報告件数が増加した証拠はない」とし、「報告された症状がハンターストン風車に起因するという確証的な証拠はない」と結論づけた。ただし、2017年8月の再声明において、タービンが健康影響を引き起こしている可能性を「完全に排除することはできない」とも付記している。

**スコットランド政府（エネルギー・気候変動局）** 「超低周波音または低周波騒音による健康影響の証拠はない」との立場を示した。この見解は、音響学会（IoA）のBulletin（2009年）を含む既存の調査研究に基づくものとされている。

**ノース・エアシャー議会（環境衛生部門）** SSEのタービンは許可条件で定められた騒音制限値の範囲内で稼働しており、SSEが実施した低周波モニタリングも現行ガイダンスに適合していると評価した。

### 3.3.4 専門家からの異議

上記の公的見解に対し、一部の専門家は異なる立場を表明している。2017年9月のグラスゴー騒音セミナーにおいて、Yelland博士およびAlves-Pereira教授は、現行の低周波音モニタリング機器は被害の原因として疑われる超低周波領域を記録するよう設計されておらず、「現行のモニタリングは目的に適合していない」と証言した。

すなわち、公的機関の「証拠がない」という結論と、専門家の「測定手法が証拠を捉えられない」という指摘は、必ずしも矛盾しない。「測定機器で検出されなかった」ことが「影響が存在しない」ことを意味するかどうかは、現時点で科学的に決着していない問題である。

### 3.3.5 施設の経過と結末

2017年1月、SSEはノース・エアシャー議会に対し施設の2年間延長を申請した。住民からの異議が提出され、議会が期限内に決定を下さなかったため、SSEはスコットランド政府の計画・環境不服審査局（DPEA）に控訴した。最終的に施設は延長されず、Mitsubishi SeaAngel（7MW）は2018年に、Siemens（6MW）は2019年に解体され、試験施設は閉鎖された。SSE Renewablesは、ハンターストンでの試験データがモーレイ湾沖のベアトリス洋上風力発電所（588MW、84基）の建設に貢献したとしている。

### 3.3.6 いすみ市沖計画との比較

ハンターストンの事例は、健康影響の因果関係について結論が出ていないものの、洋上用大型風車を居住地近傍で稼働させた際に住民紛争が生じた数少ない実例として参考に値する。いすみ市沖の計画との主要な相違点を以下に示す。

- 風車出力：ハンターストン 6~7MW / いすみ市 12~18MW (約 2.5 倍)
- 設置数：ハンターストン 2 基 / いすみ市 数十基 (アレイ配置)
- 稼働状態：ハンターストン 試験運転 (常時フルパワーではない) / いすみ市 商業運転 (フルパワー稼働を含む)
- 距離：ハンターストン 約 2.5 km / いすみ市 約 3.0 km
- 伝搬経路：ハンターストン 陸上・沿岸 / いすみ市 海上 (高周波の減衰が大きく、低周波の伝搬が効率的)

ハンターストンではわずか 2 基の試験運転で住民紛争に至り、公的機関と住民・専門家の間で見解の対立が解消されないまま施設が閉鎖された。いすみ市沖の計画はこれより大幅に大規模であり、かつ海上伝搬により低周波成分が効率的に到達する条件にある。因果関係の科学的評価が確定していない段階であっても、予防原則の観点から、住民への影響について慎重な事前評価が不可欠であることを、ハンターストンの経験は示唆している。

### 3.3.7 参考文献・リンク集

本章の記述は、以下の報道および公開資料に基づいている。

- The Ferret (調査報道): “Giant wind turbines are causing health problems, claim villagers” — 住民の訴えおよび NHS・議会の対応を報道：  
<https://www.theferret.scot/giant-wind-turbines-health-problems/>
- Shetland News: “Impacted by turbine acoustic pollution” — ハンターストンの事例を Viking 風力発電所訴訟と関連付けて報じた記事：  
<https://www.shetnews.co.uk/2025/04/04/impacted-by-turbine-acoustic-pollution/>
- Wind Turbine Noise Seminar Review (2017) — Yelland 博士および Alves-Pereira 教授の証言記録：  
<https://www.wind-watch.org/news/2017/09/29/wind-turbine-noise-seminar-review-and-update/>
- DPEA (Scotland) Planning Appeal Papers — 計画延長申請に関する控訴文書：  
<http://www.dpea.scotland.gov.uk/CaseDetails.aspx?id=118142>
- Scottish Government FOI Response (2024) — 住民苦情に対するスコットランド政府の対応記録：  
<https://www.gov.scot/publications/foi-202400433416/>

- Offshore Wind (2019): “Hunterston Is No More” — 施設の解体・閉鎖を報じた記事：  
<https://www.offshorewind.biz/2019/09/26/hunterston-is-no-more/>

### 3.4 本章の要約：第 12 章の照合に用いる主要基準

本章で整理した国際的知見は、第 12 章で計算結果を評価する際の基準となる。読者の便宜のため、以下に繰り返し参照する主要な数値をまとめる。

**A 特性による不快感の用量反応関係（第 3.1 節）** スウェーデン、オランダ、カナダ、米国、ノルウェー等の大規模疫学調査から、風車騒音と住民の不快感には以下の段階的な関係が確認されている。

A 特性レベル	高度の不快感を報告する住民の割合
30 dB(A) 未満	1~2%
30~35 dB(A)	数%（カナダの調査で約 1%）
35~40 dB(A)	5~10%（急増の閾値）
40~45 dB(A)	10~18%
45 dB(A) 以上	約 50%

WHO の 2018 年ガイドラインは  $L_{den}$  45 dB(A) を推奨しているが、複数の研究はそれより低い 35 dB(A) 付近から有意な影響が生じることを示している。また、風車騒音は同等レベルの交通騒音と比較して約 17 dB 分、より強い不快感を引き起こす。

重要な留意点として、これらの疫学調査は主に 0.5~3 MW 級の陸上風車を対象としている。12~18 MW 級の洋上風車は低周波成分がさらに強いため、同じ dB(A) 値でもより大きな不快感を引き起こす可能性が高い。上記の不快感率は過小評価と考えるべきである。

**日本国内の疫学調査（第 3.1 節）** 影山ら（2016）による日本全国の風力発電所周辺住民 1,079 名を対象とした調査は、屋外騒音レベル 40.5 dB(A) を閾値として不眠症の有病リスクが有意に増大し、41~45 dB(A) の曝露群では有病率が約 5 倍に上昇することを報告している。この知見は上記の海外研究と整合するが、環境省の 2017 年指針には反映されていない。

**C-A 差による低周波騒音の診断基準（第 3.2 節）** C 特性と A 特性の差 (C-A) は、A 特性が見落としている低周波エネルギーの指標として国際的に確立されている。主要な診断基準は以下の通りである。

国・基準	C-A 閾値	判定
スウェーデン	> 15 dB	追加調査を推奨
ドイツ DIN 45680	> 20 dB	低周波騒音が存在すると判定
カナダ・アルバータ州	> 20 dB	低周波騒音問題の存在を認定
オーストラリア NSW	> 15 dB	A 特性値に 5 dB の修正を適用

また、Broner（2011）は静穏な環境で夜間 60 dB(C)、Hessler & Hessler（2011）は 65 dB(C) を住宅地の上限として提案している。日本には C 特性に基づく評価基準が存在しない

**G 特性によるインフラサウンドの規制基準（第 3.2 節）** 超低周波音（インフラサウンド）については、デンマークとエストニアが屋内  $L_{pG} \leq 85$  dB(G) の基準を設けている。ポーランドの最新の

研究は、85 dB(G) で人口の約 1.5% が聴取可能、90 dB(G) で約 11.5% が聴取可能と推定している。日本には G 特性に基づく評価基準が存在しない。

**大型風車の近距離運用事例（第 3.3 節）** スコットランド・ハンターストンでは、6~7MW 級の洋上用プロトタイプ風車わずか 2 基を海岸線上で試験運転したところ、約 2.5 km 離れた村から 17 名の住民が公式に苦情を提出した。報告された症状にはめまい、平衡感覚の喪失、吐き気、耳鳴りの増悪が含まれる。事業者は稼働前に住民に電話で通知を行い、住民は稼働中に自宅から避難していた。施設は延長されず閉鎖された。いすみ市沖の計画は、ハンターストンより出力が 2.5 倍大きい風車を数十基、同等の距離に設置するものであり、かつ海上伝搬により低周波成分がより効率的に到達する条件にある。

## 4. 騒音規制の現状：日弁連意見書に基づく検討

本章は技術的な音響分析ではなく、日本の騒音規制の法的枠組みに関する検討である。日本弁護士連合会（日弁連）が公表した意見書の原文を長めに引用するが、これは日弁連自身の言葉でその問題意識の深刻さを正確に伝えるためである。技術的な分析については第 5 章以降で行う。

事業者は環境影響評価において国の基準やガイドラインの遵守を前提としている。しかし、その基準自体の妥当性については、法律の専門家から深刻な疑問が呈されている。

日本弁護士連合会（日弁連）は、2013 年、2022 年、2025 年の 3 回にわたる意見書において、現行の騒音規制基準の不備を指摘し、法改正を求めてきた。特に注目すべきは、日弁連が単に制度運用の改善を求めているのではなく、評価基準そのもの（A 特性の使用）、離岸距離の基準、および法的枠組みの根本的な見直しを求めている点である。さらに、2024 年 10 月 4 日の日弁連人権擁護大会決議においても、風力発電・太陽光発電事業を住民への影響が最小限となる地域に立地すべきとの提言がなされており<sup>9</sup>、この問題に対する日弁連の認識は意見書の枠を超え、正式な組織決議のレベルにまで引き上げられている。

本章では、日弁連が公表した 3 つの重要な意見書（2025 年、2022 年および 2013 年）に基づき、現行の規制枠組みにおける課題を整理する。以下、日弁連の主張を原文の引用とともに示す。

### 4.1 【2025 年意見書】 A 特性評価の不適切性と規制の欠如

2025 年 8 月 21 日、日弁連は「メガソーラー及び大規模風力発電所の建設に伴う、災害の発生、自然環境・景観の破壊及び生活環境への被害を防止するために、更なる法改正等による対応を求める意見書」を公表した。この意見書は、風力発電の騒音評価において最も重要な問題である A 特性の限界を正面から批判した点で、本書の分析と直接的に関連する。

なお、2025 年意見書は、政府が環境影響評価制度の規制緩和を推進しつつある状況下で発出されたものである。日弁連は、各地で被害が拡大しているにもかかわらず「環境影響評価の迅速化」が優先される現状に対し、「環境破壊を抑制するために不可欠」な制度強化こそが急務であると警告している<sup>10</sup>。

<sup>9</sup>日弁連 2025 年意見書 1 頁。人権擁護大会決議の提言理由では「住民の生活圏に極めて近い位置に大量の風力発電機を設置する計画は、地域住民の健康被害や漁業への影響が懸念される」と指摘されている。

<sup>10</sup>日弁連 2025 年意見書 第 2・5 項。

#### 4.1.1 A 特性評価への批判

日弁連は、環境省が騒音評価に用いる A 特性の問題を以下のように明確に指摘している。

「風力発電所の騒音に対する環境省の上記指針は、騒音の評価尺度を A 特性とするとしているが、A 特性は、人の耳の感覚に近づけるべく、低い周波数帯の音には感度を低く考慮するなどの補正を行った評価尺度であり、低い周波数のレベルが大きく下がってしまうなど、低周波音の影響を正確に考慮できない。『低周波音問題対応の手引書』では、評価尺度を、1 / 3 オクターブバンド音圧レベル、G 特性音圧レベルとしている点からも、同指針を低周波音の評価指針と考えるのは適切ではない。」<sup>11</sup>

—日弁連 2025 年意見書 第 2・6(2) 項

この指摘は、本書第 12 章で詳細に分析した C 特性と A 特性の乖離（受音点で 21~32 dB に達する）と完全に一致する。日弁連は法律の立場から、筆者が示す結論と同じ問題を指摘しているのである。

#### 4.1.2 環境省の指針と手引書の内部矛盾

さらに日弁連は、環境省の指針自体の科学的根拠の不十分さに加え、環境省内部の文書間に存在する重大な矛盾を指摘している。この論点は極めて重要である。

環境省は 2017 年の「風力発電施設から発生する騒音に関する指針」において、「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」、「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」との見解を示した<sup>12</sup>。この指針は、事業者や自治体が住民への説明の際に繰り返し援用するものである。

しかし日弁連は、同じ環境省が別の文脈で公表した文書がこの指針と矛盾することを指摘している。すなわち、環境省は 2004 年 6 月に「低周波音問題対応の手引書」を公表し、低周波音による心身に係る苦情への対応のための評価指針として「参照値」を示している<sup>13</sup>。さらに 2017 年 12 月 27 日には、「低周波音問題対応の手引書における参照値の取扱いについて」において、以下の通知を発出している。

「低周波音に関する感覚については個人差が大きく、参照値以下であっても、低周波音を許容できないレベルである可能性が 10%程度ではあるが残されているため、個人差があることも考慮し判断することが極めて重要である。」<sup>14</sup>

—環境省 参照値通知（2017 年 12 月 27 日）

日弁連はこの矛盾を以下のように総括している。

「このように、風力発電所から発生する低周波音について健康影響がないかのような印象を与える環境省の指針は、健康影響があることを前提としている『低周波問題対

<sup>11</sup>環境省「低周波音問題対応の手引書」。

<https://www.env.go.jp/air/teishuha/tebiki/index.html>

<sup>12</sup>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」2 頁。

[https://www.env.go.jp/air/noise/wpg/shishin\\_H2905.pdf](https://www.env.go.jp/air/noise/wpg/shishin_H2905.pdf)

<sup>13</sup>環境省環境管理局大気生活環境室「低周波音問題対応の手引書」。

<https://www.env.go.jp/air/teishuha/tebiki/index.html>

<sup>14</sup>環境省水・大気環境局長「低周波音問題対応の手引書における参照値の取扱いについて」。

<https://www.env.go.jp/air/teishuha/tebiki/attach/H291227jimurenaku.pdf>

応の手引書』や『低周波音問題対応の手引書における参照値の取扱いについて』の通知書と矛盾している。」

—日弁連 2025 年意見書 第 2・6(2) 項

つまり、環境省は一方では「風車騒音の健康影響は確認できない」と述べながら、他方では「参照値以下でも 10%の人が許容できない可能性がある」と認めている。事業者が環境アセスメントで前者のみを引用し「健康への影響はない」と説明することは、環境省自身の通知にすら反している。

さらに日弁連は、環境省の指針自体の科学的根拠について以下のように断じている。

「以上のような環境省の指針は、国内外の新たな科学的知見に基づいて十分に検討されたものではないため、現時点での根拠とはなり得ない。また、指針値や評価の仕方などが確定していないため、リスクが不確実でも、特に健康被害については、**重大な影響を回避することを原則として行動すべきである**との指摘がある。現状では風力発電所に対する騒音の上限値がないことも問題である。」

—日弁連 2025 年意見書 第 2・6(2) 項

#### 4.1.3 法的規制の不在

日弁連は、現行の環境省基準が法的拘束力を持たないことを繰り返し問題視しており、ガイドラインではなく遵守義務のある「法的規制」への格上げが不可欠であると主張している。2025 年意見書の「意見の趣旨」第 7 項では明確に次の措置を求めている。

「風力発電による騒音・低周波音被害の実態把握を行うとともに、被害拡大を防ぐため、実態調査の結果を踏まえた騒音レベルの上限規制及び住家からの離隔距離規制等の規制措置を設けるべきである。」

—日弁連 2025 年意見書 意見の趣旨第 7 項

にもかかわらず、環境省の取り組みは極めて消極的である。日弁連は、環境省が近年実施したのは 2019 年度と 2023 年度の文献調査のみであり、「騒音・低周波音の問題について本腰を入れて取り組む姿勢は見られない」と厳しく批判している<sup>15</sup>。

#### 4.1.4 洋上風力発電の近距離設置への批判

2025 年意見書は、日本の洋上風力発電計画における離岸距離の問題を国際比較の観点から厳しく批判している。

「日本の洋上風力発電の大きな特徴は、**海外と比べて海岸からの距離である離岸距離が極めて近い**ことである。例えば、山形県の遊佐町沖では、海岸から 1 海里 (= 1 8 5 2 メートル) 離れた場所で、1 基 1 0 メガワットの風車を約 5 0 基設置する計画がある。これに対し、欧州や中国の洋上風力発電所の離岸距離は、**1 0 から 2 0 キロメートル以上とすることが標準的**となっている。」<sup>16</sup>

—日弁連 2025 年意見書 第 2・6(3) 項

<sup>15</sup>日弁連 2025 年意見書 第 2・6(4) 項。

<sup>16</sup>一般社団法人電力中央研究所「再エネ海域利用法を考慮した洋上風力発電の利用対象海域に関する考察」(2019 年 11 月)。

<https://criepi.denken.or.jp/jp/serc/research/files/46/pdf/Y19502.pdf>

#### 4.1.5 沿岸住民の手続的排除

さらに2025年意見書は、離岸距離の問題に加えて、沿岸住民が意思決定プロセスから制度的に排除されている問題を指摘している。再エネ海域利用法に基づく大規模洋上風力計画では、協議会を経て事業計画地が決定されるが、日弁連は以下のように述べている。

「沿岸部に居住する住民が利害関係者として協議会に参加することは想定されていない。住民が低周波音被害を受けないように、離岸距離について意見を述べられる手続の確保が不可欠である。」

—日弁連 2025年意見書 第2・6(3)項

そして日弁連は、以下の強い表現で警告を発している。

「騒音・低周波音被害の実態を把握しないまま、離岸距離2キロメートル程度のところに巨大な風車が建設されれば、大きな公害問題になるおそれがある。『公害の防止』を任務とする（環境省設置法第3条）環境省が、この問題に真剣に取り組まないことは、省の存在意義を失わせる行為と言わざるを得ない。」

—日弁連 2025年意見書 第2・6(4)項

#### 4.2 【2022年意見書】乱開発防止と地域共生のための法改正要求

2022年11月16日、日弁連は「メガソーラー及び大規模風力発電所の建設に伴う、災害の発生、自然環境と景観破壊及び生活環境への被害を防止するために、法改正等と条例による対応を求める意見書」を公表した。この意見書は、2025年意見書の直接的な前身であり、全国で深刻化する再エネ開発と地域住民の対立を受けて、森林法・環境影響評価法等の改正を具体的に提言した。

「現在、全国各地において、1メガワット以上の出力を持つ大規模太陽光発電所（中略）及び大規模風力発電所の建設に伴い、山林の崩落等の災害、自然環境と景観の破壊及び地域住民の生活環境の侵害等の著しい被害が発生し、あるいは今後発生する懸念のある事例が多数見られる状況にある。」

—日弁連 2022年意見書 前文

2022年意見書が公表された後も、国の法改正による対応は不十分なまま推移した。その結果、2025年意見書が公表される時点で、独自の規制条例を制定した市町村は300を超えるという異例の事態に至っている<sup>17</sup>。国の制度がその本来の機能を果たしていれば、これほど多くの自治体が独自に条例を設ける必要はない。この事実自体が、規制の不備を端的に示している。

ただし、これら300を超える条例の大半はメガソーラー（大規模太陽光発電所）を対象としたものであり、風力発電を明示的に規制対象とする条例はきわめて少ない。地方自治研究機構の調査（2025年12月時点）によれば、太陽光のみを対象とする条例が196件、風力等を含む再エネ全般を対象とする条例が140件であるが、風力発電に特化した条例は全国でわずか5自治体（稚内市、美浜町、大間町、にかほ市、吉賀町）にとどまる。このうち稚内市・美浜町・大間町の3件は小型風力を対象としたものであり、大型風力発電所の騒音や離隔距離を規制する条例はにかほ市と吉賀町の2件のみである。にかほ市の条例（令和5年4月施行）はゾーニングマップに基づく設置

<sup>17</sup>日弁連 2025年意見書 4頁。全国300を超える市町村が条例を制定したということは、国の法規制が住民保護に不十分であることを、基礎自治体が個別に補完せざるを得ない状況を意味する。

区域の指定と事前届出を定めたものであり、騒音の数値基準や住居からの最低離隔距離を定めたものではない。すなわち、太陽光については地方自治体が独自に規制の穴を埋めようとしているのに対し、風力発電（とりわけ今後急拡大が見込まれる大型洋上風力発電）については、国にも地方にも実効的な騒音規制が存在しないという空白状態にある。

#### 4.3 【2013年意見書】低周波音被害に関する12年間の不作為

2013年12月20日に公表された「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」は、全25頁にわたり、風力発電施設から発生する低周波音による健康被害の問題を日弁連として初めて正面から包括的に取り上げた文書である。

この意見書は、2000年代から全国の風車建設地で住民が不眠、頭痛、耳鳴りなどの被害を訴えてきた実態を踏まえ、以下を国に対して求めた。

「当連合会は、2013年12月20日付けで『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』を公表し、**被害者の実態を踏まえた調査や健康被害の防止に足りる規制基準の作成等を求めた。**」

—日弁連 2025年意見書 第2・6(1)項

具体的には、2013年意見書は以下の根本的な問題を指摘していた。政府はA特性（人間の耳に聞こえやすい周波数帯に重み付けした評価尺度）による騒音レベルのみを評価基準としているが、風車から発生するのは、耳には聞こえにくい身体に振動として伝わる超低周波音（20 Hz以下）や低周波音である。日弁連は、既存の「騒音規制法」の枠組みでは、この被害を適切に評価できないと指摘し、医学的・疫学的な調査の実施と、低周波音を含む規制基準の新設を要求した。

最も深刻な問題は、この2013年意見書で要求された措置が、12年以上を経た現時点でもなお実施されていないことである。2025年意見書自体がこの点を明記している。すなわち、日弁連は12年前に「被害者の実態を踏まえた調査」と「健康被害の防止に足りる規制基準の作成」を求めたにもかかわらず、政府は騒音・低周波音の上限規制も住家からの離隔距離規制も導入していない。この間にも風力発電の大型化と建設の加速は進み、住民の懸念と被害の訴えは増大している。

予防原則の観点からは、科学的証明が完了する前であっても、被害の合理的な懸念がある場合には予防的措置を講じることが国際的な環境法の基本的考え方とされている。日弁連が12年にわたって繰り返し要求してきた規制措置が放置されたまま、さらに大規模な洋上風力発電計画が推進されている現状は、この予防原則に真っ向から反するものである。

#### 4.4 結論：「基準内」が安全を意味するとは限らない

日弁連の3つの意見書（2013年、2022年、2025年）および2024年人権擁護大会決議を総括すると、以下の構造的問題が浮かび上がる。

事業者が環境アセスメントで用いる説明は「国の指針（ガイドライン）を守っているから安全です」というものである。しかし法的な現実には、「その指針自体が不十分であり、健康被害を防げないから法改正せよ」と、法律の専門家集団（日弁連）が国に対して12年以上にわたり繰り返し警告しているのである。

具体的には以下の4点が深刻である。

(1) **評価手法の問題**：A 特性は低周波音を構造的に過小評価する評価尺度であり、日弁連は「低周波音の影響を正確に考慮できない」と明言している。本書の音響分析が示す C-A 差 (21~32 dB) はこの指摘を定量的に裏付ける。

(2) **環境省内部の矛盾**：環境省は 2017 年の指針で「健康影響の可能性は低い」としながら、同年の参照値通知では「参照値以下でも許容できない可能性が 10%残る」と認めている。日弁連はこの矛盾を「健康影響があることを前提としている手引書と矛盾している」と指摘しており、事業者が前者のみを引用して「安全」を主張することは、環境省自身の通知にすら反する。

(3) **離岸距離の問題**：欧州・中国では 10~20 km 以上が標準であるのに対し、日本では 2~3 km の近距離設置が計画されている。日弁連は「離岸距離 2 キロメートル程度のところに巨大な風車が建設されれば、大きな公害問題になるおそれがある」と警告している。さらに、再エネ海域利用法の下では沿岸住民が協議会に利害関係者として参加することすら想定されておらず、最も影響を受ける住民が離岸距離の決定に関与できないという制度的欠陥がある。

(4) **法的枠組みの問題**：ガイドラインに過ぎない指針には法的拘束力がなく、遵守義務がない。300 を超える市町村が独自の規制条例を制定せざるを得なかった事実が、国の制度の不備を端的に示している。そして国は、このような状況下においてなお、環境影響評価制度の強化ではなく規制緩和の方向に進もうとしている。

つまり、いすみ市沖の計画において環境アセスメントで提示されうる「環境基準の遵守」は、「不十分な基準への適合」に過ぎず、住民の健康を守る保証にはなり得ない。

## 参考文献・リンク

本章の記述は、日本弁護士連合会 (JFBA) の以下の公式見解に基づいている。

- 2025 年意見書: 「メガソーラー及び大規模風力発電所の建設に伴う... 更なる法改正等による対応を求める意見書」(2025 年 8 月 21 日)  
[https://www.nichibenren.or.jp/document/opinion/year/2025/250821\\_2.html](https://www.nichibenren.or.jp/document/opinion/year/2025/250821_2.html)
- 2024 年人権擁護大会決議: 「人権保護として再生可能エネルギーを選択し、地球環境の保全と地域社会の持続的発展を目指す決議」(2024 年 10 月 4 日)  
[https://www.nichibenren.or.jp/document/civil\\_liberties/year/2024/2024\\_3.html](https://www.nichibenren.or.jp/document/civil_liberties/year/2024/2024_3.html)
- 2022 年意見書: 「メガソーラー及び大規模風力発電所の建設に伴う... 法改正等と条例による対応を求める意見書」(2022 年 11 月 16 日)  
[https://www.nichibenren.or.jp/document/opinion/year/2022/221116\\_3.html](https://www.nichibenren.or.jp/document/opinion/year/2022/221116_3.html)
- 2013 年意見書: 「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 12 月 20 日)  
[https://www.nichibenren.or.jp/document/opinion/year/2013/131220\\_3.html](https://www.nichibenren.or.jp/document/opinion/year/2013/131220_3.html)

## 5. 日本の風力発電騒音規制と予測制度：基準の構造的弱点と事業者の裁量

本章ではまず、日本における風力発電騒音の規制基準を整理する（第 5.1 節）。その上で、事業者がこの基準への適合をどのように予測するかについて、モデル選択の裁量と技術的限界を検討する。

### 5.1 日本における風力発電騒音の規制基準

日本には風力発電騒音に特化した法的拘束力のある数値基準は存在しない。以下に、事業者が環境影響評価において参照する主な基準・指針を整理する。

#### 5.1.1 環境基本法に基づく環境基準（1998 年告示、2012 年改正）

環境省が告示する一般環境騒音の基準であり、風力発電に特化したものではない。A 特性の等価騒音レベル ( $L_{Aeq}$ ) で規定される。住居専用地域では昼間 55 dB(A)、夜間（22 時～6 時）45 dB(A) が上限とされている。この基準は法的拘束力のある「環境基準」ではあるが、達成義務を伴う「規制基準」ではなく、「維持されることが望ましい基準」と位置づけられている。

#### 5.1.2 2017 年環境省指針：「風力発電施設から発生する騒音に関する指針」

風力発電騒音に対する唯一の専門的指針であるが、法的拘束力はない。評価量は A 特性の等価騒音レベル ( $L_{Aeq}$ ) のみであり、C 特性・G 特性・帯域別評価は求められていない。

目標値は「残留騒音 +5 dB」を基本とし、残留騒音が低い場合の下限として地域類型に応じて 35 dB(A) または 40 dB(A) が設定されている。いすみ市沿岸のような住居地域では、夜間の目標値は概ね 40～45 dB(A) の範囲に収まる。

評価に用いる騒音レベルの算出方法も重要である。環境省の測定マニュアルによれば、毎正時に 10 分間の  $L_{Aeq}$  を測定し、これを基準時間帯（昼間：6 時～22 時、夜間：22 時～翌 6 時）にわたってエネルギー平均する。さらに、この基準時間帯ごとの値を複数の測定日（最低 3 日間）にわたってエネルギー平均した値が最終的な評価値となる。すなわち、夜間の評価値は、最大 8 時間 × 複数夜にわたる平均である。ある特定の時間帯（たとえば夏季深夜の安定大気条件下）に騒音が著しく高くなっても、同じ夜の他の時間帯や他の夜の静かな時間帯と平均化されるため、評価値に十分に反映されない構造になっている。

重要な特徴として、超低周波音（20 Hz 以下、インフラサウンド）については「健康影響との明確な因果関係は認められない」として評価対象から除外されている。低周波音（20～200 Hz）についても A 特性の合計値のみで評価されるため、帯域別の影響は制度上捉えられない。

#### 5.1.3 環境省「低周波音問題対応の手引書」（2004 年）および参照値通知（2017 年）

環境省が低周波音苦情への対応のために策定した文書であり、1/3 オクターブバンド別の「参照値」を示している。心身に係る苦情に関する参照値は 10～80 Hz を対象とし、たとえば 50 Hz で 52 dB、63 Hz で 47 dB、80 Hz で 41 dB である（Z 特性）。しかし、風力発電の環境影響評価においてこの参照値との照合は義務付けられていない。日弁連はこの点を「環境省内部の矛盾」として批判している（第 4 章参照）。

さらに環境省自身が 2017 年の通知で「参照値以下であっても、低周波音を許容できないレベルである可能性が 10%程度残されている」と認めている。

#### 5.1.4 規制基準の構造的特徴

以上を総合すると、日本の風力発電騒音規制には以下の構造的特徴がある。(1) A特性のみで評価するため、低周波エネルギーの大部分が数値に反映されない。(2) 等価騒音レベル ( $L_{Aeq}$ ) を8時間×複数夜にわたって平均するため、特定の時間帯の深刻な騒音がピークも脈動も平均化されて見えなくなる。(3) 低周波音の帯域別参照値が存在するにもかかわらず、風力発電の評価では制度上適用されない。(4) C特性やG特性による補完的評価が求められていない。これらの特徴が、第12章で示す計算結果の解釈において重要な意味を持つ。

### 5.2 規制の枠組みと事業者の裁量

#### 5.2.1 予測モデル選択の自由度

環境影響評価法のもとで、事業者は特定の音響伝搬モデルに従う法的義務を負っていない。「一般的に認知された」手法であれば、どのモデルを使うかは事業者が自由に選択できる制度となっている。

欧州では、風車の大型化に合わせて予測手法の要件を更新し、洋上特有の物理現象を扱える高度なモデルの使用を義務付ける方向に進んでいる。これに対して日本の制度は、使えるモデルの種類を限定していないため、計算手法の選択が事業者の判断に委ねられており、モデルによって予測結果が異なりうる構造になっている。

#### 5.2.2 2017年環境省指針による評価基準

第5.1節で整理した通り、2017年環境省指針はA特性の等価騒音レベルのみで風力発電騒音を評価する。この指針のもとで事業者が達成すべき目標値は「残留騒音 +5 dB」(下限 35~40 dB(A))であり、低周波帯域の個別評価は求められていない。

### 5.3 利用される予測モデルとその技術的境界

洋上風力の騒音予測にあたって、日本の事業者は主に「NEDO式」か「ISO 9613-2」のいずれかを選んでいる。どちらも洋上の大型風車を想定して設計されたモデルではない。

#### 5.3.1 NEDO式 (2006年)

「NEDO式」は、2006年に国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) が策定した「風力発電のための環境影響評価マニュアル (第2版)」に基づく手法である。当時主流だった出力1~2MW程度の陸上小型風車を想定して構築された簡略化モデルであり、現在も適法な予測手法として利用されている。

NEDO式には、現在の大型洋上風車への適用において、いくつかの技術的な制約がある。

第一に、ローター直径が250mを超えるような巨大な洋上風車であっても、空間に浮かぶ「大きさのない一つの点 (点音源)」として扱う。実際の風車は、長さ100mを超えるブレードが上下に回転しながら広い範囲から音を発しているが、NEDO式ではその空間的な広がりが完全に無視される。

第二に、周波数帯域ごとの分析を求めない。風車メーカーが提供する「単一のA特性音響パワーレベル (dB(A))」(つまり、すでにA特性フィルタで低い音が差し引かれた後の一つの数値)だけを計算の出発点とする。これでは、低い音にどれだけのエネルギーがあるかを知る手がかりが最初から失われている。

第三に、音が空気中を伝わる際の吸収（大気吸収）を単一の一定係数で計算する。実際には、高い音は空気に強く吸収されて遠くまで届かず、低い音はほとんど吸収されずに何キロメートルも先まで届く。この周波数による大きな違いが、一つの固定値で丸められてしまう。

こうした簡略化の結果、NEDO 式の枠組みでは、低周波の音がどれだけ遠くまで届くかを把握するために必要な周波数スペクトル分析が、制度上求められていない。

### 5.3.2 ISO 9613-2

NEDO 式より精度の高い選択肢として、国際標準化機構が定める屋外音響伝搬モデル（ISO 9613-2）がある。オクターブバンド分析（周波数帯域ごとの計算）を行う国際的に認知された手法であり、NEDO 式に比べれば物理的にずっと精密である。しかし、洋上風力に使う場合にはいくつかの重要な限界がある。

第一に、ISO 9613-2 はもともと陸上での音の伝わり方を計算するために作られたモデルであり、海のように音をほぼ完全に反射する硬い表面を想定していない。事業者は海面に対する地表面係数（ $G$ ）を自分で設定する裁量を持っている。この値の選び方だけで予測値は数 dB 変わる。物理的には海面は  $G = 0$ （硬い反射面）が妥当であるが、 $G = 0.5$ （混合地面）を選べば予測値はその分低くなる。第 6 章の検証で示すとおり、この設定の違いが予測結果に具体的にどう影響するかは無視できない。

第二に、ISO 9613-2 は「適度な順風条件」（moderate downwind conditions）を前提としており、洋上で頻繁に起きる強い風速勾配（高度 150 m のハブ付近で強風、海面付近で弱風）による音波の下方屈折の増幅を考慮する仕組みがない。

第三に、このモデルには「音源の条件」と「伝搬の条件」の間に本質的な矛盾がある。風車が最も大きな騒音を出すのは定格出力に達する強風時（風速 8~10 m/s 以上）であり、事業者はこの最大騒音を計算の出発点に使う。ところが ISO 9613-2 の伝搬計算は、風速 1~5 m/s の穏やかな気象条件を前提に構築されている。つまり、「猛烈な風で発生した最大の騒音」が「穏やかな微風の中を伝わる」という、実際の気象条件とは必ずしも対応しない組み合わせで計算が行われることになる。

第四に、日本の指針が A 特性での最終評価を求めているため、たとえ ISO 9613-2 で帯域ごとに精密な計算を行っても、最終報告では A 特性補正後の単一値に集約されてしまう。せっかく周波数ごとに見えていた低周波の影響が、最終段階でフィルタにかけられて数値から消えるのである。

なお、ISO 9613-2 の枠組み内ですら、提出資料の予測値が標準的な条件で再現できるかどうかについては、第 6 章で定量的に検証する。結果として、地面効果の無視や年間平均を上回る高温高湿条件の仮定など、複数の有利な仮定を重ねなければ提示値に近づかないことが示される。

## 5.4 洋上環境における音響伝搬の物理的特性

洋上での音の伝わり方は、陸上とは根本的に異なる。NEDO 式や ISO 9613-2 が考慮していない主な現象を以下に整理する。

### 5.4.1 海面反射

陸上には森林や草原など、音を吸収する表面がある。しかし海面にはそうした吸音効果がなく、音波は水面で鏡のように反射する。ISO 9613-2 で地面係数  $G = 0$ （硬い地面）を設定すれば近似的

に反映できるが、前述のとおり事業者がこの値を採用する義務はない。

#### 5.4.2 風速の鉛直分布と下方屈折、そしてダクト効果

洋上では、高度 150 m のハブ付近でタービンが定格稼働するほどの強風が吹いている一方、海面付近では風が弱く穏やかであるという、大きな風速差（鉛直シア）が頻繁に発生する。音波は風速の速い場所から遅い場所に向かって曲がる性質があるため、上空のブレードで発生した音は、風速の遅い海面方向に下向きに屈折する。

これに加えて、冷たい海面の上に暖かい空気が流れ込むことで「気温逆転層」がしばしば形成される。音は暖かい空気中では速く、冷たい空気中では遅く進むため、上空の暖かい層は音波をさらに下向きに曲げる。

この2つの効果が重なると、音波は海面と逆転層の間に閉じ込められ、あたかもトンネルの中を進むように海面上を伝搬する。これが「ダクト効果」と呼ばれる現象である。ダクトに閉じ込められた音は、通常の球面拡散（距離が倍になるときに 6 dB ずつ弱まる）よりもはるかにゆっくり減衰し、円柱拡散に近い伝搬（距離が倍になっても 3 dB しか弱まらない）へと移行する。特に低い音はこのダクト内を非常に効率よく伝わるため、予測をはるかに超える距離まで到達しうる。

ISO 9613-2 や NEDO 式には、このダクト効果を計算に取り入れる仕組みがない。本書の第 11 章のシミュレーションでは、この効果を含めた計算を行う。

#### 5.4.3 背景騒音の低下とマスキング効果の喪失

ダクト効果が起きやすい条件（海面付近の風が弱い条件）では、波もおだやかになり、周囲の背景騒音が下がる。ふだんなら波の音が風車騒音をある程度かき消してくれる（マスキング効果）のだが、海が静かになるとその効果が失われる。

つまり、上空の強風で風車が最大の騒音を出し、その音が海面近くの弱風と気温逆転によってダクトに閉じ込められて効率よく伝わり、到達先では波の音という「遮蔽役」が消えて静寂の中に風車の低い音だけが響くという洋上特有の条件が同時に成立する。

### 5.5 ISO 9613-2 の限界を超える高度な音響伝搬モデル

前節で述べた海面反射、風速勾配による下方屈折、ダクト効果はいずれも、ISO 9613-2 や NEDO 式では扱えない。欧州では、これらの現象を物理的に取り扱うモデルが開発され、洋上風力の騒音予測に実際に使われている。主なモデルを以下に紹介する。

#### 5.5.1 Nord2000（北欧共同開発モデル）

Nord2000 は、北欧 5 カ国（デンマーク、スウェーデン、ノルウェー、フィンランド、アイスランド）が共同で開発した屋外音響伝搬モデルで、DELTA（現 FORCE Technology）が開発の中心を担った。光線追跡法と呼ばれる手法に基づき、以下の物理的要素を計算に取り込む。

- 高度ごとの風速と気温の分布から音速の変化を計算し、音がどの方向に曲がるか（屈折）を求める。
- 地面の種類（アスファルト、草地、水面など）に応じた反射・吸収の効果を、周波数ごとに計算する。

- 大気の安定度（風が強く混合されているか、穏やかで層状になっているか）に応じて伝搬条件を変える。
- 1/3 オクターブバンドでの精密な減衰計算を行う。

Nord2000 は風車騒音への適用で大規模な検証が行われており、風下方向において ISO 9613-2 より有意に高い精度が確認されている。特に、音源の高さが大きい場合（風車のハブ高さ 80~150 m）において、ISO 9613-2 が系統的に過小評価する傾向がデータにより示されている。デンマークの現行規制（BEK 135）では、Nord2000 を基礎とした手法が法定の計算方法として採用されている。

### 5.5.2 放物型方程式法（Parabolic Equation, PE 法）

放物型方程式法は、風速・気温の空間分布をそのまま入力として音場を数値的に解く手法である。Nord2000 が音速プロファイルをある程度近似的に扱うのに対し、PE 法はどのような大気条件にも対応できるため、複雑な気温逆転層やダクト構造の影響をより忠実に再現できる。計算コストは Nord2000 より高いが、気温逆転が強い洋上環境や、3 km を超える長距離伝搬でのダクト効果を評価するには PE 法がより適切な精度を提供する場合がある。

### 5.5.3 Harmonoise モデル

Harmonoise は EU 共同研究プロジェクトとして開発された伝搬モデルであり、地面効果、大気屈折、大気安定度の影響を物理的に取り扱う。フランスにおける風車騒音の疫学調査（RIBEOIH プロジェクト）では、ISO 9613-2 や NMPB-2008 よりも予測精度が高いとして、このモデルが選択された実績がある。

### 5.5.4 SoundSim 360（ウプサラ大学、3次元有限差分法）

SoundSim 360 は、スウェーデン・ウプサラ大学の Mattsson らが開発した高精度音響シミュレーションツールである。3次元空間における波動方程式を直接数値的に解くという、上記のモデルとは根本的に異なるアプローチを採る。Nord2000 の光線追跡法や PE 法の近似とは違い、現実の3次元地形データと大気構造をそのまま計算に取り込むことができる。

このツールをスウェーデン国内の風力発電所の実測データと照合した結果、Nord2000 を含む既存のモデルが、特に低周波帯域や超低周波音（インフラサウンド）において実際の音圧レベルを系統的に過小評価していることが示された。この知見の詳細と規制上の意味については第 5.6.3 節で述べる。

### 5.5.5 CNOSSOS-EU および NMPB-2008

CNOSSOS-EU（Common Noise Assessment Methods in Europe）は、EU 指令に基づき 2019 年以降の EU 加盟国における騒音マッピングの共通手法として義務付けられた計算方法である。気象条件を「均一条件」と「伝搬有利条件」の 2 段階に分けて長期平均を算出する。フランスの国内手法 NMPB-2008 も同様のアプローチを採る。ISO 9613-2 より気象の影響を体系的に扱うが、Nord2000 や PE 法ほど物理的に詳細ではない。

以上のように、ISO 9613-2 の限界は欧州の研究・規制コミュニティで十分に認識されており、それを補う複数のモデルが開発・検証・実用化されている。次節では、これらのモデルが各国の規制にどう反映されているかを整理する。

## 5.6 国際比較：欧州における規制の動向

欧州の洋上風力先進国では、「どのモデルを使って計算するか」は規制当局が決める事項であり、事業者が自由に選ぶことはできない。この点は、「一般的に認知された手法」であれば事業者の裁量で選べる日本の制度と根本的に異なる。

たとえばデンマークでは、法定規則（BEK 135）が計算方法の具体的な中身（Nord2000 に基づく手法、洋上伝搬に対する 3 dB の地面補正、ISO 9613-1 に基づく  $10^{\circ}\text{C} \cdot 80\%$  の大気吸収係数）を明示的に指定しており、事業者がこれと異なるモデルや前提条件を使う余地はない。オランダでは年間の気象データを統計的に反映した計算が求められ、EU 加盟国全体では CNOSSOS-EU 手法の使用が指令で義務付けられている。

すなわち欧州では、事業者は規定された方法に従って計算し、その結果を報告する。日本では、モデル選択から前提条件の設定まで事業者に委ねられているため、同じプロジェクトでも事業者によって予測値が大きく異なりうる構造になっている。

### 5.6.1 デンマーク：ダクト現象を契機とした規制改正

デンマークにおける初期の洋上風力プロジェクトでは、まさに現在の日本で使われている ISO 9613-2 に準拠した標準的なモデルで騒音予測が行われていた。しかし風車が動き始めると、気温逆転層と海面反射の連続（多重反射）によるダクト現象が原因で、沿岸住民から想定を大きく超える低周波騒音の苦情が相次いだ。詳しい音響調査の結果、ISO 9613-2 が洋上の伝搬を過小評価していたことが確認された。

この経験を受け、デンマーク環境保護庁（Miljøstyrelsen）は規制を抜本的に改めた。現在の法定規則（BEK 135）では、洋上風力の騒音計算において海面上の多重反射と気象条件による屈折効果を考慮することが義務付けられ、Nord2000 に基づく手法が事実上の標準となっている。さらに 2012 年には、低周波音（10~160 Hz の 1/3 オクターブバンド）に対して、室内の A 特性音圧レベル 20 dB 以下という厳格な法定上限値が新設された。これは風速 6 m/s と 8 m/s の双方に適用される。

日本の気象条件との関連で注目すべきは、夏季において太平洋の比較的冷たい海水温の上を高温多湿な空気が覆うため、北海やバルト海と同等かそれ以上に強い気温逆転層が形成されうるという点である。デンマークで事後的に判明した問題が、いすみ市沖でも同様に生じる可能性は物理的に否定できない。

### 5.6.2 オランダ：年間統計指標の採用

オランダでは 2011 年以降、風車騒音の評価に  $L_{den}$ （昼・夕・夜の時間帯別重み付けを含む年間平均等価騒音レベル）と  $L_{night}$ （夜間年間平均）が採用されている。法定上限値は  $L_{den}$  47 dB、 $L_{night}$  41 dB であり、単一の気象条件ではなく年間を通じた変動を統計的に反映した指標を使う点で、日本のアプローチとは本質的に異なる。

### 5.6.3 スウェーデン：Nord2000 の採用と最新研究が示す限界

スウェーデンでは、自然保護庁（Naturvårdsverket）の指針により風車騒音の上限値は住居地点で 40 dB(A)（風速 8 m/s 時、静穏地域では 35 dB(A)）と定められ、予測計算には Nord2000 の使用が推奨されている。

しかしながら、ウプサラ大学の Mattsson らが開発した SoundSim 360 を用いた最新研究 (Mattsson, Eriksson, Persson, Chilo & Tatar, “Efficient finite difference modeling of infrasound propagation in realistic 3D domains: Validation with wind turbine measurements,” *Applied Acoustics*, 2025) は、その Nord2000 ですら、特に低周波帯域と超低周波音 (20 Hz 以下) において実際の音圧レベルを過小評価していることを示した。

スウェーデン国内の2つの大型風力発電所における実測データとの照合から、以下の知見が得られている。

- 現代の大型風車 (定格出力数 MW 級) が発する超低周波音 (インフラサウンド) のレベルは、従来の小型風車に基づいて報告されてきた値を大幅に上回る。
- Nord2000 を含む既存の工学的モデルは、特に超低周波音 (インフラサウンド) 帯域で実測値を系統的に過小評価する。
- メーカー公表の音響パワーレベルは理想的な測定条件に基づいており、実際の稼働条件下では 20 dB 以上の変動が生じうる。

この研究成果は、2025 年 9 月に欧州議会請願委員会において報告され、EU の騒音・産業指令の見直しに関する議論のきっかけとなった。

スウェーデンの事例がデンマークと異なる点で重要なのは、「より高度なモデルに切り替えれば問題は解決する」という単純な話ではないことを示している点である。デンマークでは ISO 9613-2 の限界が認識されて Nord2000 に移行したが、スウェーデンの最新研究は、その Nord2000 でも風車の大型化に伴う超低周波音 (インフラサウンド) の増大を十分に捕捉できていない可能性を明らかにした。予測モデルの精度向上は終わりのない課題であり、「特定のモデルを採用すれば大丈夫」という固定的な制度設計では対応しきれない。

日本の現行制度は、その Nord2000 よりもさらに簡略化された NEDO 式や ISO 9613-2 の使用を許容し、かつ超低周波音 (インフラサウンド) を評価対象から明示的に除外している (第 5.2.2 節参照)。スウェーデンで指摘されている過小評価の問題は、日本ではさらに深刻な形で生じうると考えるのが自然である。

#### 5.6.4 欧州における情報開示の特徴

欧州の先進的な規制 (特にデンマーク) では、騒音は風の強さや気象条件によって大きく変わるという物理的現実を踏まえ、予測結果を多面的に報告することが求められている。日本のように「特定の一条件での単一の数値」ではなく、さまざまな条件下での影響を一覧できる「データのマトリックス (多次元的な範囲)」としての開示が義務付けられている。

具体的には以下のような要素が含まれる。

- **風速ごとの段階的評価**：単一のワーストケースだけでなく、風速 (たとえば 4 m/s から定格出力となる 10 m/s 以上まで) ごとに、受音点での騒音レベルがどう変わるかを一覧表やグラフで示す。これにより、穏やかな日と強風の日それぞれの影響が把握できる。

- **低周波音の分離評価**：広帯域の全体騒音とは完全に分けて、低周波音（10~160 Hz の 1/3 オクターブバンド）だけの予測を個別に行う。一般的な建材は高い音は遮るが低い音は通しやすいため、屋外ではなく「室内」での低周波レベルが基準（たとえば 20 dB 以下）を満たすかどうかの評価される。
- **気象条件の統計的処理**：過去 1 年以上の局地的な気象データ（風向・風速、気温逆転の頻度、大気安定度など）を伝搬モデルに組み込み、年間を通じた騒音レベルの変動を統計的な指標（Lden など）として算出する。「普通の日」から「音が異常に遠くまで届く特殊な気象条件の日」まで、確率的に網羅される。

このように条件を細かく分けて、それぞれの結果を開示するアプローチにより、事業者が都合のよい単一のシナリオの背後に影響を隠すことが構造的に防がれている。日本では、最終的な予測結果が特定の前提条件に基づく単一の dB(A) 値として提示されるのが一般的であり、前提条件を変えれば結果が大きく変わりうるものが外部からは見えにくい。

## 5.7 「縦覧期間」制度と第三者検証の制約

日本の環境アセスメント制度には、予測の妥当性を外部から確認することを難しくする構造的な問題がもう一つある。環境影響評価図書の公開期間が限られていることである。

### 5.7.1 限定的な公開期間

環境影響評価の各段階（配慮書、方法書、準備書、評価書）で、事業者は数百ページに及ぶ詳細な評価書をウェブサイト等で公開する。しかし、環境影響評価法のもとでは、この公開は法定の「縦覧期間」（通常 30~45 日程度）に限られている。

縦覧期間が過ぎると、事業者は文書をウェブサイトから削除できる。これにより、どの予測モデルが使われたか、風車の音響パワーレベルの入力値がいくつだったか、海面の反射係数（ $G$ ）がどう設定されていたか、大気吸収の前提条件は何だったかといった計算の中身が、インターネット上からは参照できなくなる。

### 5.7.2 事後検証への影響

縦覧期間が終わった後に残るのは、「予測値は 40 dB(A) を下回る」といった簡略化された要約や結論だけであることが多い。風車が動き始めてから騒音の問題が生じた場合でも、事前の予測でどのような前提が置かれていたのかを外部の専門家や自治体が後から検証することは、実務上極めて困難である。

## 5.8 小括

本章で整理した制度的特徴をまとめると、以下のようになる。

1. 日本では事業者が予測手法を広い裁量のもとで選べる。欧州では規制当局が計算方法を指定し、事業者はそれに従う義務がある。
2. 日本で使われている NEDO 式と ISO 9613-2 は、海面反射、風速勾配による下方屈折、気温逆転によるダクト効果といった洋上特有の現象を計算に組み込む仕組みを持っていない。欧州では、これらの現象を物理的に扱う高度なモデル（Nord2000、PE 法、Harmonoise など）がデンマークやスウェーデンをはじめとする国々で法定または推奨の手法に採用されて

いる。

3. さらに、スウェーデンの最新研究（SoundSim 360 による 3 次元シミュレーション）は、Nord2000 ですら大型風車の超低周波音を過小評価していることを示した。日本は Nord2000 よりさらに簡略化されたモデルを許容し、かつ超低周波音（インフラサウンド）を評価対象から除外しているため、この問題はより深刻な形で生じうる。
4. 最終評価が A 特性の単一値に集約されるため、低周波帯域の影響が数値に表れにくい。デンマークでは 10~160 Hz の低周波音に対して室内 20 dB 以下という独立した法定基準がある。
5. 欧州では、風速条件ごとの段階的評価や年間気象統計に基づく Lden/Lnight 算出など、多面的な情報開示が求められる。日本では、特定の前提条件に基づく単一の dB(A) 値による評価が一般的であり、この単一値は多様な気象条件下での変動を反映しておらず、最悪条件を代表するものでもない。第 6 章の検証が示すとおり、提出資料の予測値は年間平均条件でも再現できず、年平均より大気吸収が大きくなる高温高湿条件を仮定しなければ接近できない。つまり、提示される数値は平均的な状況ではなく、伝搬が抑えられる好条件を反映したものとなりうる。
6. 日本の縦覧期間制度により、予測の前提条件に対する第三者検証が実務上困難である。

なお、以上の制度的枠組みが実際の予測結果にどう影響するかは、第 6 章で ISO 9613-2 の枠組み内での定量的検証を行う。同章では、提出資料に記載された予測値（A 案 32.0 dB(A)、B 案 32.6 dB(A)）の再現を試みた結果、複数の有利な仮定を重ねなければ提示値に近づかないことが示される。さらに第 11 章では、ISO 9613-2 では考慮できない風下屈折・ダクト効果等を組み込んだシミュレーションを行い、実際の受音レベルが標準モデルの予測をどの程度上回りうるかを定量的に示す。

## 6. 提示資料に基づく予測値の再現可能性の検証

いすみ市沖における洋上風力発電事業には、令和 4（2022）年～令和 5（2023）年の間に 8 事業者が「計画段階環境配慮書」を提出したが、前章でも述べたように各事業者の環境配慮書は縦覧期間が限定されているため、現在（2026 年 2 月時点）インターネット上で参照することはできなくなっている。

その中で、筆者は唯一、三井物産株式会社、RWE Renewables Japan 合同会社、大阪ガス株式会社、K&O エナジーグループ株式会社の 4 社からなるコンソーシアム（以下、4 社コンソーシアム）が作成した「（仮称）いすみ市沖洋上風力発電事業 計画段階環境配慮書」の「事業者説明資料（資料 4 - 2）」をインターネット上で発見した（千葉県ホームページ <https://www.pref.chiba.lg.jp/kansei/eikyohyouka/iinkai/documents/r040916-shiryoku4-2.pdf>）。

同資料は、配慮書の概要を簡略にまとめたものではあるが、騒音に関する予測条件と結果が記載されていたため、本章では、同資料に記載されている騒音予測値（海岸線（3 km 地点）で A 案 32.0 dB(A)、B 案 32.6 dB(A)）を、国際標準の計算モデルを使って再計算し、その再現性を検証する（図 3 参照）。

なお、ここで検証する配置や数値が最終確定案であるかどうかは明らかではない。本章の目的は、

提出資料に書かれた条件をそのまま出発点として、物理的に筋の通った透明な計算で同じ数値にたどり着けるかを確認することにある。

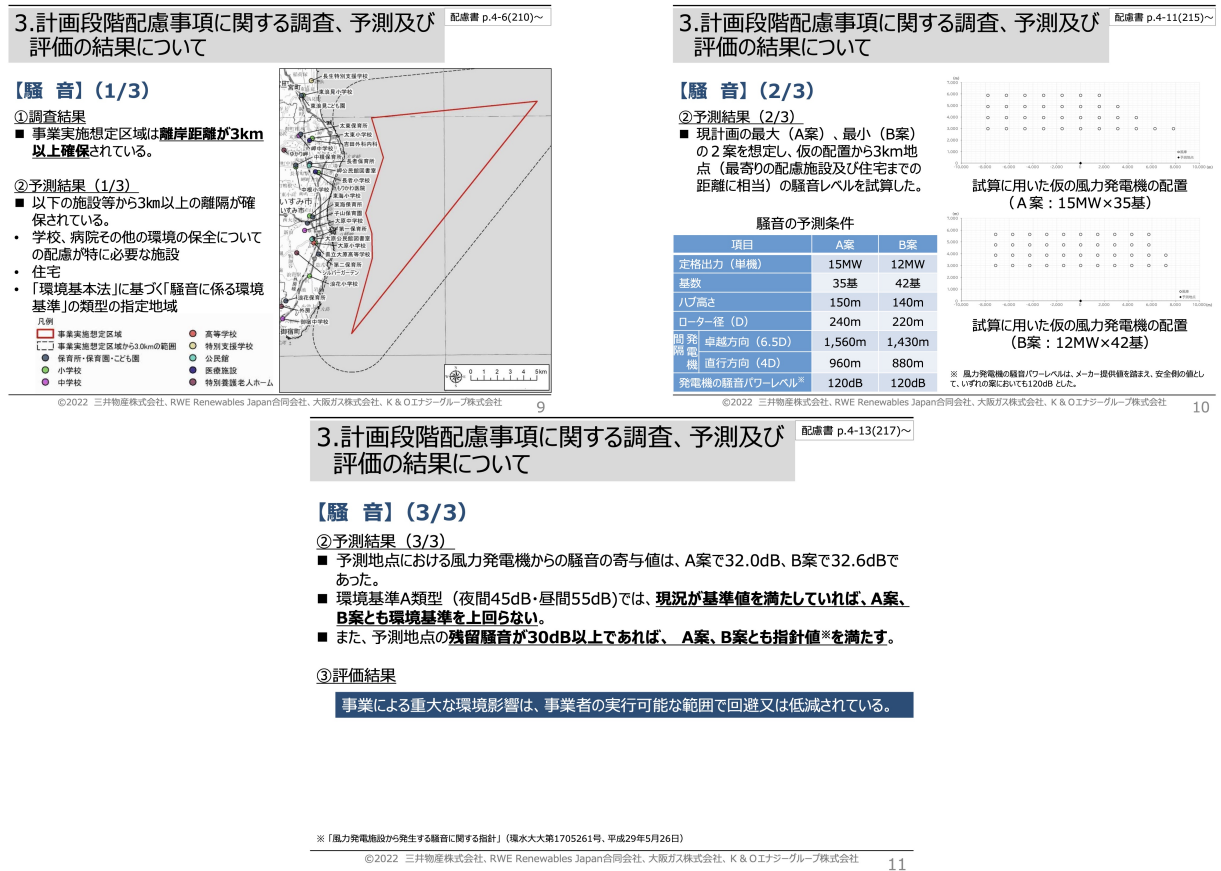


図 3: 4社コンソーシアムの「(仮称) いすみ市沖洋上風力発電事業 計画段階環境配慮書 事業者説明資料」より抜粋

### 6.1 計算方法と前提条件

本検証では、国際的に広く使われている音響伝搬モデル ISO 9613-2 を用いて計算を行った。NEDO 式 (2006 年版マニュアル) は詳細な計算式や補正係数が公開資料から十分に確認できないため、だれでも検証可能という透明性の観点から ISO 9613-2 を選んだ。

計算は、ISO 9613-2 が想定する「適度な順風条件」の範囲内で行い、それを超える特殊な気象による増幅効果 (ダクト効果や夜間の強い屈折など) は一切含めていない。

さらに重要な点として、本検証では意図的に事業者によりな (予測値が低く出やすい) 仮定を採用した。提出資料の数値に可能な限り近づけることで、「どこまで有利な仮定を重ねれば提示値が出るのか」を確認するためである。具体的には以下のとおりである。

- **音源スペクトルの簡略化**：各風車の音響出力を単一の  $L_{wA} = 120 \text{ dB(A)}$  として扱い、実際の周波数別スペクトルは使わなかった。ただし、単一の dB(A) 値だけでは周波数ごとに異なる大気吸収を計算できないため、63 Hz-8 kHz の各オクターブバンドに音響エネルギーを均等に配分し (各バンド 113.0 dB)、それを A 特性で合成すると  $L_{wA} = 120.0 \text{ dB(A)}$  になるよう調整した。この「均等配分」の仮定は、実際の大型風車のスペクトル (低い音にエネルギーが集中) よりも中高周波の成分を多く含むため、長距離伝搬で空気に吸収される量を

実際より大きく見積もることになる。つまり、受信点での予測値が低めに出る方向のバイアスである。

- **風車配置**：提出資料に記載された2案をそのまま再現した。

	A 案	B 案
定格出力 (単機)	15 MW	12 MW
基数	35 基	42 基
ハブ高さ $h_s$	150 m	140 m
列内間隔 $\Delta x$ (6.5D)	1560 m	1430 m
列間間隔 $\Delta y$ (4D)	960 m	880 m
各列の基数 (沖合方向)	11, 9, 8, 7	11, 11, 10, 10

受信点は、第1列の左端から6番目の風車の正面 (沖合方向 3000 m)、高さ  $h_r = 1.5$  m に設定した。各風車から受信点までの3次元距離  $r_k$  は

$$r_k = \sqrt{(x_k - x_r)^2 + (y_k - y_r)^2 + (h_s - h_r)^2} \quad (1)$$

で計算した。

- **気象条件**：以下の2パターンで計算した。

1. 16°C、相対湿度 75%：いすみ市の年間平均に近い条件
2. 20°C、相対湿度 80%：年平均よりやや高温高湿で、空気による音の吸収が大きくなる (つまり予測値が低く出やすい) 方向の条件

- **地面条件**：以下の3水準で比較した。

1. 地面効果無視 ( $A_{gr} = 0$ )：地面による反射も吸収も考慮しない。
2.  $G = 0.5$  (混合地面)：ISO 9613-2 の中間的な設定。
3.  $G = 0$  (硬い地面/水面)：海面のように音を反射する面に対応。 $G = 0$  では全帯域で  $A_{gr} = -3$  dB の増幅 (音が海面で鏡のように反射してエネルギーが倍増する効果) が生じる。洋上伝搬では物理的にこの設定が最も妥当である。

- 風下屈折、気温逆転層、海上ダクトなど、長距離で音を増幅させる気象効果は一切考慮しなかった。
- 夜間の安定した大気による増幅も考慮していない。
- ISO 9613-2 が対象とする周波数範囲 (63 Hz 以上) のみを計算し、それ未満の低周波成分は含めていない。

以上のすべてが、実際に起こりうる音の増幅要因を除外し、予測値を低い方向に押し下げる仮定である。

## 6.2 なぜ「単一の dB(A) 値」では正確な計算ができないのか

ISO 9613-2 の計算は、本来、周波数帯域  $i$  ごとに

$$L_{p,i} = L_{w,i} + D_c - (A_{\text{div}} + A_{\text{atm},i} + A_{\text{gr},i} + A_{\text{bar},i} + A_{\text{misc},i}) \quad (2)$$

と受音レベルを求め、最後に A 特性の重み  $A_i$  を加えてエネルギーの合計を取る：

$$L_{pA} = 10 \log_{10} \left( \sum_i 10^{(L_{p,i} + A_i)/10} \right). \quad (3)$$

つまり、音源がどの周波数帯にどれだけのエネルギーを持っているか（周波数別の  $L_{w,i}$ ）がわからなければ、大気吸収や地面効果を正しく計算できない。高い音は空気に強く吸収され、低い音はほとんど吸収されないため、周波数ごとの内訳が結果を大きく左右する。

しかし提出資料では、周波数別の  $L_{w,i}$  は示されておらず、A 特性で合算済みの単一の dB(A) 値だけが記載されている。これでは、距離が長くなるにつれて重要になる周波数ごとの大気吸収や地面効果を厳密に検証することができない。

欧州では、風車騒音の評価にあたって周波数別の音響出力や気象条件別の予測値をマトリックスとして提示するのが一般的である。日本では「平均的条件」を仮定した単一の dB(A) 値に集約することが制度上認められており、この点は第三者による検証の容易さという面で大きな差となっている。

## 6.3 再現計算の式

計算に用いた物理式を以下に示す。各要素の物理的な意味は第 7 章で詳しく解説する。

(a) **球面拡散（距離による減衰）** 音源を点とみなした場合、距離  $r$  での減衰量は（ISO 9613-2 の表記に従い）

$$A_{\text{div}}(r) = 20 \log_{10}(r) + 11 \quad (4)$$

で与えられる（ $r$  は m 単位）。

(b) **大気吸収** 空気による音の吸収は周波数によって大きく異なる。ISO 9613-1 に基づき、帯域  $i$  の吸収係数  $\alpha_i$  (dB/m) を用いて

$$A_{\text{atm},i}(r) = \alpha_i(T, \text{RH}, p) r \quad (5)$$

と計算した。吸収係数  $\alpha_i$  は、ISO 9613-1 の解析式により、気温・相対湿度・大気圧から各オクターブバンドの中心周波数ごとに算出した。

(c) **地面効果** ISO 9613-2 が規定する 3 領域モデル（音源域・中間域・受音域）に基づき、地面係数  $G$  に応じて各オクターブバンドの地面効果  $A_{\text{gr},i}$  を計算した。風車のように音源の高さが非

常に大きい場合 ( $h_s = 140 \sim 150 \text{ m}$ )、音源域の補正パラメータ  $q_s = 1 - 30h_s/d$  はほぼ 0 になり、地面効果は受音点側の地面の性質でほぼ決まる。 $G = 0$  (硬い地面) では全帯域で  $A_{gr} = -3 \text{ dB}$  (海面での鏡像反射によるエネルギー倍増) となる。

(d) **1 基あたりの受音レベル** 風車  $k$  の各オクターブバンドにおける受音レベルは

$$L_{p,i,k} = L_{w,i} - A_{\text{div}}(r_k) - A_{\text{atm},i}(r_k) - A_{\text{gr},i}(r_k) \quad (6)$$

で求める。

(e) **全風車のエネルギー合成** すべての風車の寄与をオクターブバンドごとにエネルギーとして足し合わせ、最後に A 特性の重みをかける：

$$L_{pA,\text{tot}} = 10 \log_{10} \left( \sum_i \sum_{k=1}^N 10^{(L_{p,i,k} + A_i)/10} \right). \quad (7)$$

## 6.4 計算結果

各条件での 3km 地点における計算結果を、表 6 (A 案) と表 7 (B 案) に示す。

表 6: A 案 (15 MW × 35 基) の再計算結果 (3km 地点, dB(A))。提示値は 32.0 dB(A)。

条件	地面無視	$G = 0.5$	$G = 0$ (水面)
16 °C, 75%	33.4	34.7	36.4
20 °C, 80%	32.9	33.9	35.9

表 7: B 案 (12 MW × 42 基) の再計算結果 (3km 地点, dB(A))。提示値は 32.6 dB(A)。

条件	地面無視	$G = 0.5$	$G = 0$ (水面)
16 °C, 75%	34.1	35.3	37.1
20 °C, 80%	33.5	34.5	36.5

本計算の結果から、以下のことがわかる。

**提示値に最も近づく条件** 提示値 (A 案 32.0 dB(A)、B 案 32.6 dB(A)) に最も近い数値が出たのは、年平均よりやや高温高湿な条件 (20 °C、80%) で、かつ地面効果を完全に無視した場合である。それでも A 案は 32.9 dB(A) (提示値より 0.9 dB 高い)、B 案は 33.5 dB(A) (同 0.9 dB 高い) となった。年間平均に近い条件 (16 °C、75%) では、地面効果を無視しても A 案 33.4 dB(A) (1.4 dB)、B 案 34.1 dB(A) (1.5 dB) と、差はさらに広がる。

**物理的に妥当な地面条件での結果** 海上の音の伝わり方として最も現実的な  $G = 0$  (水面反射) を採用すると、年間平均条件で A 案 36.4 dB(A)、B 案 37.1 dB(A) となり、提示値を 4~5 dB 上回る。高温高湿条件でも A 案 35.9 dB(A)、B 案 36.5 dB(A) であり、依然として 3~4 dB の差が残る。

$G = 0.5$ （混合地面）の場合  $G = 0.5$  は  $G = 0$  と地面効果無視の中間に位置し、年間平均条件で A 案 34.7 dB(A)、B 案 35.3 dB(A) となった。提示値より約 2.7 dB 高い。

## 6.5 この検証が意味すること

以上の結果は、提出資料の予測値が、物理的に筋の通った標準的な計算モデルでは容易に再現できないことを示している。

提示値に近い数値を出すためには、以下の条件をすべて同時に満たす必要がある。

- ISO 9613-2 の計算枠組みの中で、もっとも有利な（値が低く出る）設定を選ぶ。
- 実際の風車スペクトル（低周波に偏っている）ではなく、高い音の成分を多めに含むフラットスペクトルを仮定する。これにより大気吸収が大きめに計算され、予測値が下がる。
- 地面効果を完全に無視する ( $A_{gr} = 0$ )、海面が音を反射するという物理的事実を無視する仮定。
- さらに、年間平均より高温高湿な気象条件 (20°C、80%) を仮定して大気吸収を大きくする。

これらすべてを重ねてもなお、再計算値は提示値を約 1 dB 上回っている。ただし、この約 1 dB の残差については公平を期して付記する。1 dB 程度の差は、帯域レベルの整数丸め（本計算では 1/3 オクターブバンドの値を整数 dB で処理している）、音源スペクトルの実際の形状と本計算で仮定した均等配分との違い、あるいは ISO 9613-2 の各減衰項の実装上の微小な差異の範囲内に収まりうる。したがって、この 1 dB の差をもって事業者の計算に誤りがあると断定することはできない。

しかし、重要なのは、この 1 dB の残差ではなく、そこに到達するために必要とされた仮定の積み重ね（地面効果の無視、フラットスペクトルの仮定、年平均を上回る高温高湿条件）のほうである。一方、海上の伝搬に物理的にもっとも妥当な  $G = 0$  を採用した場合、年間平均条件では提示値との差は 4~5 dB に達する。4 dB~5 dB の差は、音響エネルギーにして約 3 倍の過小評価に相当する。

以上から、提出資料の予測値について次のように結論づけられる。

この数値は、平均的な条件下で安定的に得られるものではなく、地面効果の無視・年平均を上回る高温高湿条件の仮定など、複数の「予測値を低く出す方向の仮定」を重ね合わせた場合にのみ、ようやく近似的に成り立つ値である。

しかも、本検証は ISO 9613-2 の枠組み内（つまり「適度な順風条件」の範囲内）で行ったものであり、実際の夜間に起こりうる風下屈折、気温逆転層、海上ダクトといった音を増幅させる効果は一切含んでいない。これらを考慮すれば、実際に海岸線に届く音のレベルは、本検証の値をさらに上回る可能性がある。

## 第 2 部

# 音響工学に基づく騒音伝搬の分析

### 7. 風力発電騒音評価に必要な物理的要素の整理

本章では、具体的な計算規格に入る前に、屋外における音の伝搬を支配する物理現象を体系的に整理する。ここでは各現象の物理的意味および基本的な関係式を示し、後続の数値計算との対応関係を明確にする。

※本章は、音響工学の専門的な背景を持たないが物理的な仕組みを理解したいと考える読者（筆者自身もその一人である）に向けた、音響物理学の基礎解説である。騒音の計算結果のみに関心があり物理的背景の詳細を必要としない読者は、第 8 章に進んでもよい。

#### 7.1 音とは何か — 周波数とデシベルの基礎

風力発電騒音の議論に入る前に、音そのものの物理的性質と、デシベル表示の意味を整理する。

(1) 音は空気の圧力振動である 音とは、空気中の圧力の微小な時間的変動である。音源（たとえば風車のブレード）によって空気が振動すると、空気分子は平衡位置の周囲で前後に振動し、圧縮と膨張が交互に生じる。この圧力変動が波として空間を伝搬する。

瞬間的な音圧を  $p(t)$  とすると、これは静的な大気圧  $p_0$  の周囲で数 Pa 以下の微小な変動を示す量である。通常の会話音はおおよそ 0.02~0.2Pa 程度、風力発電機から数 km 離れた地点ではそれよりさらに小さい変動となる。

(2) 周波数とは何か 音の周波数  $f$  [Hz] は、1 秒間に何回振動するかを表す量であり、振動の周期  $T$  の逆数である。

$$f = \frac{1}{T}$$

たとえば 100Hz の音は 1 秒間に 100 回、1000Hz の音は 1 秒間に 1000 回振動する。周波数が低いほど「低い音」、高いほど「高い音」と感じられる。風力発電騒音は主に 50~500Hz の低~中周波成分が支配的であり、遠距離では特に低周波成分が残りやすい。

(3) 音波の伝搬と音速 音は空気中を伝わる縦波（疎密波）である。空気分子そのものが音源から受音点まで移動するのではなく、分子の振動が隣接分子へと連鎖的に伝達されることで、波としてエネルギーが伝搬する。音の伝搬速度を音速  $c$  と呼ぶ。理想気体近似のもとでは、

$$c = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$$

で表される。ここで  $\gamma$  は比熱比（空気では約 1.4）、 $R$  は普遍気体定数（ $\approx 8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ）、 $T$  は絶対温度、 $M$  は平均分子量（空気では約  $0.029 \text{ kg}/\text{mol}$ ）である。常温付近では、音速は実用上

$$c \approx 331 + 0.6 T_C$$

（ $T_C$  は摂氏温度、単位  $\text{m}/\text{s}$ ）で近似できる。たとえば  $0^\circ\text{C}$  では約  $331 \text{ m}/\text{s}$ 、 $20^\circ\text{C}$  では約  $343 \text{ m}/\text{s}$ 、 $30^\circ\text{C}$  では約  $349 \text{ m}/\text{s}$  である。すなわち、暖かい空気の中では音はわずかに速く進む。この温度依存性は一見些細に思えるが、数  $\text{km}$  の距離を伝わるうちに音の経路を大きく曲げる原因となる（段落 (5) で後述）。

音の伝搬経路は、単純な直線とは限らない。音波は光と同様に、「伝搬に要する時間が最小となる経路」を選ぶ。これは最小時間の原理（フェルマーの原理）として知られており、光学におけるスネルの屈折法則と数学的に等価である。ある媒質中で音速が場所によって異なる場合、音波は常に音速の小さい側へ屈折する。たとえば、上空の空気が地表付近より暖かい場合、上空では音速が速くなり、音は地面に向かって曲がる。後述する温度逆転や風速勾配による遠距離伝搬の強化は、まさにこの屈折効果によって生じる。

**(4) 音のエネルギーと音の強さ** 音波はエネルギーを運ぶ。単位面積あたりのエネルギー流束を音の強さ  $I [\text{W}/\text{m}^2]$  と呼ぶ。音圧  $p$  と音の強さの間には、

$$I = \frac{p^2}{\rho c}$$

の関係がある（ $\rho$  は空気密度、 $c$  は音速）。すなわち、音のエネルギーは音圧の二乗に比例する。音圧が 2 倍になればエネルギーは 4 倍になるという、この「二乗比例」が後述するデシベル表示の重要な背景となる。

**(5) デシベルとは何か — 人間の聴覚と対数表示** 音の物理量（音響パワーや音の強さ）はエネルギー量であるが、人間の聴覚はこれに対して線形には応答しない。心理物理学的研究によれば、知覚される音の大きさ（ラウドネス）は物理的な音の強さ  $I$  に対しておおよそべき乗則

$$\text{Loudness} \propto I^x$$

で近似される（Stevens のべき法則）。指数  $x$  は 1 より小さい値をとる。つまり、物理的な強さが数倍に増加しても、知覚上はより緩やかな増加として感じられるので、「2 倍のエネルギー」が「2 倍の大きさ」に感じられるわけではない。

このように、知覚量が物理量のべき乗に比例する場合、対数をとることで関係は線形化される（ $\log(I^x) = x \log(I)$ ）。広いダイナミックレンジを扱い、かつ人間の知覚特性と整合的な尺度を得るために、音の大きさは対数スケールで表される。

**(a) 音響パワーレベルの定義** 音源が単位時間あたりに放射する音エネルギーを音響パワー  $W [\text{Watt}]$  と呼ぶ。音響パワーレベル  $L_W$  は、

$$L_W = 10 \log_{10} \left( \frac{W}{W_0} \right)$$

で定義される。ここで  $W_0$  は基準音響パワーであり、 $W_0 = 10^{-12}$  Watt と定められている。この値は、空気中における可聴下限に対応する基準強さ  $I_0 = 10^{-12}$  W/m<sup>2</sup> と整合するように国際的に定義されたものである。係数 10 は単位定義上の選択であり、強さが 10 倍になると 10 dB 増加するという扱いやすい性質を与える。

たとえば  $L_W = 120$  dB の場合、

$$120 = 10 \log_{10} \left( \frac{W}{10^{-12}} \right)$$

より  $W = 1$  Watt となる。すなわち、120 dB の音響パワーレベルは約 1 ワットの音響出力に相当する。いすみ市沖の風車 1 基はまさにこの水準であり、電気出力 15 MW に比べれば微小だが、このエネルギーが空気の圧力振動として数 km 先まで届く。

**(b) 音の強さとそのレベル** 音響パワーが空間中に拡散すると、単位面積あたりのエネルギー流束（音の強さ） $I$  [Watt/m<sup>2</sup>] が定義される。音の強さレベル  $L_I$  は

$$L_I = 10 \log_{10} \left( \frac{I}{I_0} \right)$$

で定義される。基準強さは  $I_0 = 10^{-12}$  Watt/m<sup>2</sup> である。

**(c) 音圧レベルの導出** 音の強さと音圧には  $I = p^2/(\rho c)$  の関係がある（ $\rho$  は空気密度、 $c$  は音速）。すなわち、音の強さは音圧の二乗に比例する。この関係を強さレベルの式に代入すると、

$$L_I = 10 \log_{10} \left( \frac{p^2}{p_0^2} \right)$$

となる。対数の性質  $\log(a^2) = 2 \log(a)$  を用いると、

$$L_p = 20 \log_{10} \left( \frac{p}{p_0} \right)$$

が得られる。これが音圧レベルの定義である。したがって、音圧レベルにおける「20」という係数は、強さが音圧の二乗に比例することから自然に導かれるものである。ここで基準音圧  $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$  は、空気中における可聴下限に対応する国際的な定義値であり、温度や湿度によって変化するものではない。対応する基準強さ  $I_0 = 10^{-12}$  Watt/m<sup>2</sup> は、標準大気条件下で  $I_0 = p_0^2/(\rho c)$  に一致するよう定義されている。

**(d) デシベルの意味** デシベルは物理量そのものではなく、基準値に対する比の対数表示である。

- 強さが 2 倍 →  $10 \log_{10}(2I/I_0) = 10 \log_{10}(I/I_0) + 10 \log_{10}(2) \approx 10 \log_{10}(I/I_0) + 3$  dB
- 強さが 10 倍 → +10 dB
- 音圧が 2 倍 → 約+6 dB

この対数特性により、非常に広い物理量の範囲を扱いやすい数値に圧縮して表現することができる。

この性質は、複数の音源が存在する場合に特に重要である。同じ音響パワーレベルを持つ音源が2台ある場合、エネルギーは2倍になるため、 $10\log_{10}(2) \approx 3$  となり、総合レベルは+3dB増加する。さらに4台の場合はエネルギーが4倍となるため、 $10\log_{10}(4) = 10\log_{10}(2 \times 2) = 3 + 3 = 6$  で+6dBの増加となる。したがって、同一仕様の風力発電機が複数存在する場合、単純にdB値を足し合わせるのではなく、エネルギーとして合成し、対数変換を行う必要がある。

**(6) デシベルの非線形性と周波数別合成** 前節で定義したように、 $L = 10\log_{10}(I/I_0)$  であるから、 $10^{L/10} = I/I_0$  となる。すなわち、 $10^{L/10}$  はその周波数帯における基準強さ  $I_0$  に対する強さの比そのものである。

デシベルは対数表示であるため、単純な足し算はできない。たとえば同じレベル  $L$  の音源が2つある場合、合成レベルは

$$L_{\text{total}} = 10\log_{10}\left(2 \times 10^{L/10}\right) = L + 3$$

となる。すなわち、同じ音源が倍になると音圧レベルは3dB増加する。4倍なら+6dB、10倍なら+10dBである。この対数特性を理解しないと、複数風車の合成音や音源レベルの変化を正しく評価できない。

音は単一周波数ではなく、多数の周波数成分を含む。各周波数帯の音は物理的には独立したエネルギー成分であり、強さはエネルギーとして加算される。したがって、総合強さは  $I_{\text{total}} = \sum_f I(f)$  となる。これをレベル表示に戻すと、

$$L_{\text{total}} = 10\log_{10}\left(\sum_f 10^{L(f)/10}\right)$$

が得られる。ここでやっている操作は、(1) 各周波数帯のdB値を強さに戻す、(2) 強さを物理的に加算する、(3) 再び対数表示に戻す、という三段階の変換である。したがって、dB値をそのまま足し合わせることは物理的に誤りであり、必ず強さに戻してから合成する必要がある。この操作は、複数風車の合成や、A特性・C特性の算出においても同様に適用される。

## 7.2 屋外音伝搬を支配する物理現象

**(1) 幾何学的拡散（距離減衰）** 理想的な点音源が自由空間中で放射する音エネルギーは、球面状に拡散する。半径  $r$  の球面の表面積は  $A = 4\pi r^2$  である。音源が放射する音響パワー  $W$  が一定である場合、単位面積あたりのエネルギー密度（音の強さ） $I$  は

$$I(r) = \frac{W}{4\pi r^2}$$

となり、距離の二乗に反比例して減少する。これを逆二乗則という。距離が遠くなるほど、同じエネルギーがより大きな球面に分散するため、音が薄まっていくイメージである。音の強さレベルに換算すると、

$$L_I(r) = 10\log_{10}\left(\frac{I(r)}{I_0}\right) = 10\log_{10}\left(\frac{W}{4\pi r^2 I_0}\right)$$

となる。ここで音響パワーレベルの定義  $L_W = 10 \log_{10}(W/W_0)$  を用いると、

$$L_I(r) = L_W - 10 \log_{10}(4\pi r^2) + 10 \log_{10} \left( \frac{W_0}{I_0} \right)$$

となる。標準条件では  $W_0 = 10^{-12} \text{ W}$ 、 $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$  であるため、 $10 \log_{10}(W_0/I_0) = 0$  となり、さらに  $10 \log_{10}(4\pi r^2) = 10 \log_{10}(4\pi) + 20 \log_{10}(r)$  であるから、 $10 \log_{10}(4\pi) \approx 11 \text{ dB}$  より、

$$L_I(r) \approx L_W - 20 \log_{10}(r) - 11$$

と近似できる。この式は、点音源が自由空間で放射する場合の基本的な距離減衰式である。距離が2倍になると  $20 \log_{10}(2) \approx 6 \text{ dB}$  の減衰が生じる。距離減衰は周波数に依存せず、音源の種類に関わらず常に作用する最も基本的な減衰機構である。数 km スケールの伝搬では、この幾何減衰がまず支配的であり、他の要因はその上に重畳される形で作用する。

**(2) 大気吸収** 音波は空気分子の振動を伴う波動であり、その一部のエネルギーは分子間の内部緩和過程を通じて熱エネルギーに変換される。これが大気吸収である。吸収係数を  $\alpha(f)$  [dB/m] とすると、距離  $r$  における吸収減衰は

$$A_{\text{atm}} = \alpha(f) r$$

で表される。 $\alpha(f)$  は周波数依存性が強い。また温度  $T$  と相対湿度  $RH$  に依存する。典型的には 1 kHz 以上で顕著な影響が現れるが、100 Hz 以下では極めて小さい。

$\alpha(f)$  は周波数が高いほど大きくなる。典型的な海岸付近の気象条件（約 15–20 °C、相対湿度 70–80 %）では、おおよそ次のような値となる：

周波数	吸収係数 $\alpha$ [dB/km]
63 Hz	約 0.05
125 Hz	約 0.1
250 Hz	約 0.3
500 Hz	約 1
1 kHz	約 4
2 kHz	約 10
4 kHz	約 25

例えば 5 km 伝搬した場合、

- 63 Hz：約 0.25 dB の減衰
- 125 Hz：約 0.5 dB の減衰
- 500 Hz：約 5 dB の減衰
- 1 kHz：約 20 dB の減衰

- 2 kHz：約 50 dB の減衰

となる。すなわち、高周波成分は数 km の距離で大きく減衰する一方、低周波成分はほとんど減衰しない。このため、遠距離では高い音は消えやすく、低周波が相対的に支配的となる。風力発電騒音はもともと低～中周波成分が卓越しているため、数 km スケールでは温度や湿度の変化による大気吸収の影響は総合レベルに対して比較的小さい場合が多い。

なお、大気吸収の物理的機構は主として酸素 (O<sub>2</sub>) および窒素 (N<sub>2</sub>) 分子の振動緩和過程に起因する。この緩和過程の時定数は温度および湿度に依存するため、湿度の変化は吸収係数のピーク周波数を移動させる効果を持つ。高湿度条件では中周波域 (数百 Hz～数 kHz) の吸収が変化し得るが、風力発電騒音において支配的な低周波域 (63～250 Hz) での吸収は湿度に対する感度が小さい。したがって、本検討の対象周波数範囲では、湿度変動による吸収係数の変化は結果に対して副次的な影響にとどまると判断される。

**(3) 地面効果と干渉** 音波は地面または海面で反射し、受音点では直接音と反射音が重ね合わされる。受音点での総音圧は

$$p_{\text{total}} = p_{\text{direct}} + p_{\text{reflected}}$$

で表される。両者は波として重ね合わされるため、位相差が重要となる。直接経路と反射経路の長さの差を  $\Delta r$  とすると、位相差は

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta r$$

で与えられる ( $\lambda$  は波長)。

- $\Delta r = n\lambda$  のとき、強め合い (増幅)
- $\Delta r = (n + \frac{1}{2})\lambda$  のとき、弱め合い (減衰)

が生じる。したがって、受音点の位置および周波数に応じて、ある周波数では音圧が強まり、別の周波数では抑制される。波長は

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

であるため、高周波ほど干渉パターンは細くなり、低周波ではより広い距離スケールで干渉が生じる。海面は音響的にはほぼ硬質境界とみなされ、反射係数が高い。そのため洋上では干渉効果が比較的強く現れる。一方、柔らかい地面では一部が吸収され、干渉は弱まる。このような地面効果は、周波数依存の増減を生じさせるため、伝搬計算において考慮すべき重要な要素である。

**(4) 回折** 音波は障害物の縁で回折し、幾何学的な遮蔽域にもエネルギーが回り込む。回折の程度は波長と障害物の寸法の比に依存し、波長が障害物の寸法に対して大きいほど回折は顕著となる。風力発電騒音の低周波成分 (63～250 Hz) は波長が約 1.4～5.4 m であり、住宅、防音壁、丘陵などの一般的な障害物に対して効率的に回折する。したがって、交通騒音 (主に中～高周波) に対しては有効な遮蔽効果を持つ防音壁や地形的障害物であっても、風力発電騒音の低周波成分に対しては遮蔽効果が大幅に低下する。この特性は、内陸部における風力発電騒音の評価において特に重要であり、建物や地形による「自然の防音効果」を過大に見積もるべきではないことを意味する。

(5) **温度逆転と安定成層** 前節で述べたように、音は「伝搬時間が最小となる経路」を選ぶ。音速は温度に依存し、

$$c \approx 331 + 0.6 T_C$$

で近似されるため、空気の温度が鉛直方向に変化すると、音速も高さによって変化する。音速が高さ  $z$  の関数  $c(z)$  となる場合、音波は音速の小さい側へ連続的に屈折する。これは光の屈折と同様の原理であり、音線は音速勾配に従って曲線を描く。

通常、日中の陸上では地表付近が暖められ、上空ほど温度が低下する。このとき音速は地表付近で速く、上空で遅くなる。その結果、音波は上方へ屈折しやすく、地表付近では減衰が促進される。これを不安定成層という。一方、地表付近が冷たく、上空が相対的に暖かい場合、すなわち温度が高度とともに増加する場合を温度逆転という。このとき音速は上空で速くなり、音波は地表側へ屈折する。すなわち、二点間の最短時間経路は、一旦上空の高音速領域へ向かい、その後再び地表へ戻るような曲線となる。その結果、音は地表付近に集中しやすくなり、遠距離まで減衰せずに到達する。

この屈折現象の原理は、夏季に路面が揺らめいて見える蜃気楼と本質的に同じである。蜃気楼では、高温のアスファルト路面によって加熱された空気が路面直上に層をなし、光速（屈折率）の鉛直勾配を形成する。この場合、高温（高速）の層が**地表側**にあるため、光は地表から**上方**へ屈折し、空の像が路面に映り込んで見える。音の温度逆転は、温度勾配の向きが蜃気楼と**上下逆**の状況である。温度逆転では高温（高音速）の層が**上空**に位置するため、音波は**下方（地表方向）**へ屈折する。物理法則は同一（波は伝搬速度の遅い側へ曲がる）であるが、温度勾配の向きが逆であるため、屈折の方向も逆になる。蜃気楼が路面の幻像を遠方まで見せるように、温度逆転は音を遠方まで地表に沿って届かせるのである。

日本の太平洋沿岸では、特に夏季においてこの効果が顕著となり得る。陸域は強い日射により高温となる一方、黒潮の影響を受ける太平洋の海水は相対的に冷たく保たれる。その結果、海上では下層が冷却され、上層が相対的に暖かい安定成層が形成されやすい。夜間および早朝には、海面付近の冷却が進み、逆転層がさらに強化される可能性がある。このような安定した海洋境界層では、音波は持続的に地表方向へ屈折し、数 km 以上の距離でも減衰が抑制される。したがって、夏季の太平洋沿岸環境では、自由空間減衰のみを仮定した場合よりも高い音圧が観測され得る。

(6) **風速勾配による屈折** 空気が静止している場合、音速は温度によって決まる。しかし実際の大气中では風が存在するため、音波の地面に対する見かけの伝搬速度は音速  $c$  と風速の合成として表される。音の伝搬方向と同じ向きの風速成分を  $u(z)$  とすると、高さ  $z$  における有効音速は

$$c_{\text{eff}}(z) = c(z) + u(z)$$

で与えられる。ここで重要なのは、風速のうち音の進行方向に平行な成分のみが有効音速に寄与するという点である。風速の大きさを  $V(z)$ 、風向と音の伝搬方向のなす角を  $\theta$  とすると、 $u(z) = V(z) \cos \theta$  であり、追い風 ( $\theta = 0$ ) で最大、横風 ( $\theta = 90^\circ$ ) でゼロとなる。

通常、大気境界層では地表付近では風速が小さく、高度とともに風速が増加する。すなわち、

$$\frac{du}{dz} > 0$$

である。このとき、風下方向（音の進行方向と風向が一致する場合）では、上空ほど  $c_{\text{eff}}$  が大きくなる。音波は最小時間経路を選ぶため、有効音速の小さい側、すなわち地表側へ屈折する。その結果、音線は緩やかに地面方向へ曲がり、地表付近にエネルギーが集中する。これにより、自由空間減衰のみを仮定した場合よりも遠距離での音圧が高くなることがある。

一方、風上方向（音の進行方向と風向が逆の場合）では、

$$c_{\text{eff}}(z) = c(z) - u(z)$$

となり、上空ほど有効音速は小さくなる。この場合、音波は上方へ屈折し、地表から離れていく。結果として、地上での音圧レベルは急速に低下する。

例えば、地表での風速が 2 m/s、高度 150 m で 8 m/s の場合、上空では有効音速が 6 m/s 程度大きくなる。音速自体は約 340 m/s であるため、相対変化は数 % に過ぎないが、数 km の伝搬距離にわたって積算されることで、顕著な屈折効果を生じる。

この風速勾配による屈折は、温度勾配による屈折と同様に連続的な現象であり、音波が鏡で反射されるのではなく、連続的に曲げられることによって生じる。洋上では地表面粗度が小さいため、風速勾配が安定して形成されやすく、特に風下方向では数 km の距離で音の到達性が大きく変化する可能性がある。

**(7) 音響ダクトと有効伝搬次元の変化** 前節で述べた温度逆転および風速勾配による屈折が十分に強い場合、音波は上方へ進もうとしても連続的に地表方向へ曲げられ、上層へ逃げるができなくなる場合がある。このとき、上空の高音速層は鏡のように反射しているわけではないが、屈折の累積効果により、音が下層に閉じ込められたような状態が形成される。これを音響ダクト (acoustic duct) と呼ぶ。

通常自由空間では、音響パワー  $W$  は球面状に拡散し、距離  $r$  における強さは

$$I(r) = \frac{W}{4\pi r^2}$$

となる。すなわち、三次元空間への拡散により  $1/r^2$  の減衰が生じ、距離が 2 倍になると約 6 dB 減衰する。しかし、音響ダクトが形成されると、音波は鉛直方向への拡散が制限され、主として水平方向へ伝搬する。この場合、エネルギーは実質的に円筒状に広がると近似でき、

$$I(r) \propto \frac{1}{r}$$

に近づく。すなわち、有効的な伝搬次元が三次元から二次元へと低下したかのような挙動を示す。

この場合、距離が 2 倍になると

$$10 \log_{10} \left( \frac{1}{2} \right) \approx -3 \text{ dB}$$

の減衰となり、自由空間の場合の  $-6 \text{ dB}$  に比べて減衰が大幅に小さくなる。実際の大气中では完全な二次元伝搬が無限距離にわたって持続するわけではないが、数 km から十数 km の範囲で自由空間減衰よりも著しく小さい減衰率が観測されることがある。

日本の太平洋沿岸では、夏季においてこの条件が形成されやすい。陸域は日射により高温となる一方、黒潮の影響を受ける海面は相対的に低温である。その結果、海面付近に冷たい層が形成され、上層が相対的に暖かい安定成層が発達する。さらに、洋上では地表面粗度が小さいため、風速勾配が明瞭に維持されやすい。温度逆転と風速勾配が同時に存在すると、下向き屈折は強化され、音響ダクトが形成されやすくなる。したがって、日本沿岸の夏季において、音波が地表付近に捕捉され、自由空間減衰よりも小さな減衰率で長距離伝搬する状況は、決して稀な現象ではない。

**(8) 大気乱流による散乱** 大気中には様々な空間スケールの乱流渦が存在する。音波がこれらの乱流渦と相互作用すると、音のエネルギーの一部が本来の伝搬方向から散乱される。この散乱効果は二つの相反する作用を持つ。第一に、風上方向の音影域 (shadow zone) にエネルギーの一部を回り込ませ、屈折理論のみでは到達しないはずの領域にも音を部分的に届かせる効果がある。第二に、ダクト内に捕捉された音のエネルギーの一部をダクト外へ散逸させ、ダクト伝搬の効率を低下させる効果がある。

洋上環境では、海面の空力粗度が陸上に比べて極めて小さいため、大気乱流の強度は陸上環境と比較して著しく弱い。このことは、洋上ではダクトからのエネルギー散逸が小さく、ダクト伝搬がより効率的に持続することを意味する。同時に、洋上では地形遮蔽がほとんど存在しないため、音波は障害物による減衰を受けず、長距離伝搬しやすい条件が整っている。

以上のように、幾何減衰、大気吸収、地面効果、回折、風速勾配、温度勾配、安定成層、大気乱流散乱、および海上特有の境界層特性が、受音点での音圧レベルを総合的に決定する。

### 7.3 音源側で考慮すべき要因

屋外音伝搬を正しく評価するためには、伝搬側の物理現象だけでなく、音源そのものの物理的特性を精密に理解する必要がある。音源の設定が不適切であれば、その後の伝搬計算がいかにも精密であっても結果は信頼できない。

**(1) 音響パワーと音圧の違い** 音源の強さは音響パワー  $W$  で定義される。音響パワーレベル  $L_W$  は

$$L_W = 10 \log_{10} \left( \frac{W}{W_0} \right)$$

で定義される ( $W_0 = 10^{-12} \text{ W}$ )。重要なのは、音響パワーは音源固有の量であり、距離に依存しないという点である。受音点での音圧は、この音響パワーが空間中で減衰した結果である。したがって、伝搬計算の出発点は正確な音響パワーの設定である。

(2) **単一の dB(A) 値では不十分な理由** 風力発電機の騒音はしばしば単一の A 特性音響パワーレベル（例： $L_{WA} = 118$  dB）で示される。しかし、音の伝搬は周波数依存性を持ち、大気吸収および地面効果も周波数ごとに異なる。総合レベルは

$$L_{\text{total}} = 10 \log_{10} \left( \sum_f 10^{L(f)/10} \right)$$

で定義されるため、同じ総合 dB 値であっても、周波数分布が異なれば伝搬後の音圧分布は大きく変化し得る。したがって、物理的に整合的な予測には 1/3 オクターブバンド等の周波数別音響パワースペクトルが必要である。

(3) **空力騒音の発生機構** 大型風力発電機における主要な騒音源は機械騒音ではなく、ブレード周りの流れに起因する空力騒音である。主な発生機構としては、後縁乱流騒音 (trailing edge noise)、境界層の剥離に伴う乱流圧力変動、およびブレード先端に形成される先端渦などが挙げられる。

空力騒音は双極子型音源として近似されることが多く、その音響パワー  $W$  はブレード周りの代表流速  $U$  の高次関数に比例するとされる。一般に、

$$W \propto U^n$$

と表され、指数  $n$  は概ね 4~6 の範囲にあると報告されている。ここで  $U$  は地上基準風速そのものではなく、ブレードに対する相対流速（回転速度による周速と自由流風速の合成速度）を意味する。したがって、風速の増加および回転数の上昇に伴い、音響パワーは非線形的に増大する。このような性質により、風力発電機の音響出力は風速条件に強く依存し、最大出力付近では音響パワーが急激に増加する。一方で、定格風速を超える領域では出力制御（ピッチ制御等）により音響出力の増加は抑制される傾向にある。

(4) **出力と風速の関係** 風力発電機の発電出力は、定格風速未満の領域（いわゆる Region II）では、ハブ高さにおける自由流風速  $U$  のおおよそ三乗に比例することが知られている。すなわち、

$$P \propto U^3$$

と近似される。

定格風速を  $U_r$ 、定格出力を  $P_r$  とすれば、定格未満の風速域では

$$P(U) \approx P_r \left( \frac{U}{U_r} \right)^3$$

と表すことができる。

この関係は、風車が空気流から取り出す運動エネルギーが風速の三乗に比例することに由来する。そのため、年間平均風速が定格風速より有意に低い場合には、年間平均出力は定格出力の数％程度にとどまることが一般的である。

一方、定格風速を超える領域（Region III）では、出力は制御によりほぼ一定に保たれるため、上式は適用されない。

**(5) 公表スペクトルの風速条件と補正の必要性** 利用可能な風車の周波数別音響パワーデータは、多くの場合、最大出力または定格風速付近での運転条件に対応している。これは、メーカーが保証値や設計最大騒音値を提示する際に、最も保守的な運転状態を基準とするためである。しかしながら、実際の年間風況においては、風車が常時定格付近で運転しているわけではない。特に年間平均風速は定格風速より低いことが一般的であり、音響出力もそれに応じて変動する。空力騒音の音響パワーは、各周波数帯  $f$  において

$$W(f, U) = C(f) U^n$$

と近似できると仮定する。ここで  $C(f)$  は周波数依存係数、 $U$  はブレードに対する代表流速、 $n$  は速度依存指数（概ね 4~6 の範囲）である。風速が  $U_1$  から  $U_2$  に変化した場合、音響パワー比は

$$\frac{W(f, U_2)}{W(f, U_1)} = \frac{C(f) U_2^n}{C(f) U_1^n} = \left( \frac{U_2}{U_1} \right)^n$$

となる。このとき周波数依存係数  $C(f)$  は相殺され、変化率は周波数に依存しない。音響パワーレベルは  $L_W = 10 \log_{10} W$  で定義されるため、レベル差は

$$\Delta L_W = 10n \log_{10} \left( \frac{U_2}{U_1} \right)$$

と表される。したがって、指数  $n$  が周波数に対して大きく変化しない限り、各周波数帯の音響パワーレベルは同一量  $\Delta L_W$  だけ増減し、

$$L'_W(f) = L_W(f) + \Delta L_W$$

と近似できる。伝搬計算は周波数帯ごとに線形に作用するため、各帯域の音圧レベルも同一量だけ変化し、総合レベルも

$$L'_{\text{total}} = L_{\text{total}} + \Delta L_W$$

となる。

以上より、主要騒音源が空力起源の広帯域騒音であり、速度依存指数  $n$  が周波数帯間で大きく変動しない範囲においては、運転風速の違いを近似する方法としてスペクトル全体を一定量シフトすることは物理的および数学的に整合的な近似である。

## 8. 音の「重み付け」：周波数特性の物理的意味と大型風車スペクトルへの適用

ここまでの章では、dB(A) や dB(C) といった騒音の測定方法が登場してきた。これらは同じ音を異なる「ものさし」で測ったものであり、ものさしの選び方次第で数値が大きく変わる。本章では、4種類のものさし—A特性 (dB(A))、C特性 (dB(C))、Z特性 (dB(Z))、G特性 (dB(G))—がそれぞれ何を測り、何を見落とすのかをわかりやすく説明する。なお、各ものさしが Vestas

V236-15MW の実際の騒音データに適用された場合にどのような数値の違いを生むかは、第 10 章で具体的に示す。

## 8.1 「重み付け」の必要性

ある周波数の音のデシベル (dB) 値は、その音を持つエネルギーの大きさを表す。これはマイクロフォンで客観的に測定できる物理量であり、人間の感じ方とは無関係に決まる。

ところが、私たちの耳は同じエネルギーの音をすべて同じ「大きさ」に聴くわけではない。特に、さまざまな高さ（周波数）の音が混じり合っているとき、耳は周波数によって感度が大きく異なる。たとえば、20 Hz 以下の超低周波音は、よほど強くない限り「聴こえない」。しかし非常に強ければ、耳には聴こえなくても胸や腹部に圧迫感として感じることもある。また、100 Hz の音と 1000 Hz の音がどちらも 100 dB（同じエネルギー）で鳴っていても、100 Hz の方はずっと小さく聴こえる。

こうした耳の特性を補正して、物理的なエネルギーの大きさではなく「実際に人がどの程度うるさく感じるか」を数値で表すために、測定値に対して周波数ごとにデシベルを差し引いたり上乘せしたりする。これが「重み付け (weighting)」である。

さらに、同じ人間の耳でも、音の種類や大きさによって周波数の感じ方が変わる。日常的な音量でさまざまな周波数が混じった音（たとえばエアコンの音や話し声）を聴いているときと、爆発のような巨大な音に晒されたとき、あるいは低い音だけが響いている環境にいるときでは、耳の応答特性が異なる。ひとつの重み付けですべてをカバーすることはできないため、目的に応じた複数の重み付けが国際規格で定義されている。

- **A 特性**：日常的な音量で、高い音から低い音までが混じった「ふつうの騒音」を聴くときの感じ方に合わせた補正。世界のほとんどの騒音規制で標準として使われている。
- **C 特性**：非常に大きな音（爆発音など）や、低い音が主体の環境で、耳がより平坦に音を感じるようになる状態に対応した補正。低周波をあまり差し引かない。
- **Z 特性**：補正をいっさい行わず、すべての周波数のエネルギーをそのまま示す。音の物理的な実態（実際にどれだけのエネルギーが存在するか）を見るために使う。
- **G 特性**：20 Hz 以下の超低周波音（インフラサウンド）に焦点を合わせた補正。この領域の音は耳には聴こえにくいですが、身体に圧力として作用し、健康への影響が指摘されている。

国際電気標準会議 (IEC) の規格 IEC 61672-1 が A 特性・C 特性・Z 特性の 3 種を定義し、G 特性は国際標準化機構 (ISO) の ISO 7196 で定められている。

以下では、この 4 つの重み付けがそれぞれ何を目的とし、どこに強みと限界があるのかを順に見ていく。

## 8.2 A 特性 dB(A)：日常騒音の標準指標

A 特性は、上記のうち「日常的な音量で、さまざまな周波数が混じった音を聴くとき」の耳の感じ方を再現するフィルタである（技術的には、約 40 phon の等ラウドネス曲線に基づく）。具体的

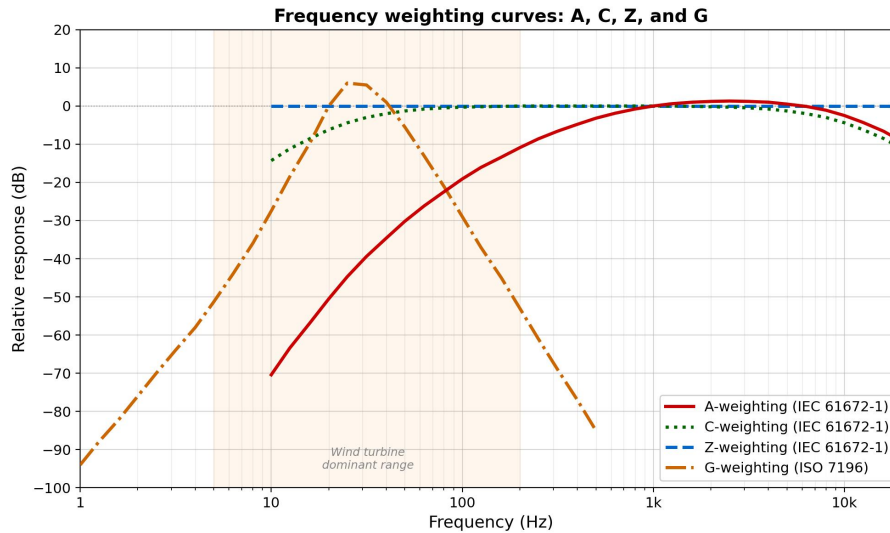


図 4: 周波数重み付け曲線 (A 特性・C 特性・Z 特性・G 特性)

には、低い音を大幅に差し引く。たとえば 63 Hz の音は約  $-26$  dB、125 Hz で約  $-16$  dB、250 Hz で約  $-9$  dB カットする。一方、1000~6000 Hz あたりの中高域はほぼそのまま通すか、わずかに上乗せする (最大 1.3 dB、2500 Hz 付近)。

世界中のほとんどの騒音規制が A 特性を標準として採用している理由ははっきりしている。自動車やエアコン、話し声、掃除機の音など、ふだんの生活で耳にする音の大半は、高い音から低い音まで広い周波数帯域にエネルギーが散らばっている。こうした音に対しては、A 特性は「人にどれくらいうるさく感じられるか」をひとつの数値でうまく表す。

しかし、A 特性は万能ではない。次の 2 つの場合に、音のエネルギーを実態より小さく見積もってしまう。

(1) 非常に大きな音の環境：音が約 100 dB を超えると、人間の耳の仕組みが変わり、低い音にも敏感になる。ところが A 特性フィルタは音量に関係なく一律に低周波を差し引き続けるので、大音量の環境では実際の「うるささ」を過小評価する。

(2) 低い音ばかりの環境：音のエネルギーがほとんど低周波だけで構成されている場合、A 特性はその大部分をフィルタで取り除いてしまう。洋上風力発電の騒音は、数キロメートル伝わる間に高い音が大气に吸収されて消え、低い音だけが残る。A 特性で測ると、実際に届いているエネルギーのごく一部しか数値に現れない。

### 8.3 C 特性 dB(C)：低い音もきちんと拾うフィルタ

C 特性は、A 特性と同じく IEC 61672-1 で定められたフィルタだが、31.5~8000 Hz の広い範囲でほぼ平坦に音を通す点が大きく異なる。低い音をほとんど差し引かないのが最大の特長である。たとえば 63 Hz では A 特性が  $-26.2$  dB も差し引くのに対し、C 特性はわずか  $-0.8$  dB。31.5 Hz では A 特性が  $-39.4$  dB なのに対し、C 特性は  $-3.0$  dB にとどまる。

このため、C 特性は次のような場面で広く使われている。

- 爆発音や衝撃音など瞬間的に大きな音の測定
- 工場や職場での聴覚保護の判定
- 低い音が主体の騒音（大型機械のうなり、空調のブーン音など）の評価

ただしC特性にも弱点がある。10 Hzでは-14.3 dBの差し引きが生じるため、いわゆる「超低周波音（インフラサウンド）」の領域ではまだかなりの部分が切り落とされる。低周波騒音の評価にはA特性よりずっと適しているものの、インフラサウンドを正確に把握するにはそれだけでは足りない。

#### 8.4 Z特性 dB(Z)：重み付けなし、ありのままの音

Z特性は、IEC 61672-1:2013 で定められた「重み付けなし」（フィルタをかけない）測定モードである。約10~20 000 Hzの範囲ですべての周波数のエネルギーをそのまま測る。「Z」はzero weighting（ゼロ重み付け）の頭文字である。

Z特性の数値は、マイクロフォンに届いた音圧の物理的な大きさそのものを示す。人間の耳の癖による偏りが入らないので、「実際にどれだけのエネルギーがそこに存在するか」を最も正直に表す。音の伝搬を計算するときも、まずZ特性（各周波数帯域の物理的な音圧）で計算し、最後に必要な重み付けを適用するのが物理学的に正しい手順である。

Z特性を見ると、A特性やC特性が「何を隠しているか」が一目瞭然になる。第10章で示すように、Vestas V236-15MWの10 Hz帯域では、Z特性の値がA特性の値を約70 dBも上回る。70 dBの差はエネルギーにして1000万倍以上の開きであり、A特性フィルタが物理的に存在するエネルギーの99.9999%以上を数値から除外していることを意味する。

#### 8.5 G特性 dB(G)：超低周波音（インフラサウンド）専用フィルタ

G特性は、ISO 7196 で定められた超低周波音（インフラサウンド）専用のフィルタである。10~25 Hzあたり（人間が「音」としてはほとんど聴こえないが、身体が圧力変動として感じ取りうる領域）に感度のピークを持つ。20 Hzを基準（0 dB）として、25 Hzで6.0 dB、31.5 Hzで5.5 dBと超低周波帯域を強調する一方、20 Hzより上の周波数は急速に差し引かれる（63 Hzで-13 dB、100 Hzで-29 dB）。

A特性やC特性が超低周波の帯域をほぼ切り捨てるのに対し、G特性はまさにその帯域だけを取り出して評価する。超低周波音（インフラサウンド）が問題となる場面（たとえば大型風車からの低い振動的な音）を把握するために設計されたものさしである。

実際にG特性を規制に組み込んでいる国もある。エストニアでは、洋上風力発電の環境影響評価において、屋内でのG特性レベルに $L_{pG,eq} \leq 85$  dBという上限が設けられている。エストニア湾のVestas V236-15MW計画では、10 km以上の離岸距離でも屋内で53~65 dB(G)が予測された。この値は上限を下回っているが、注目すべきはA特性では全く検出できない超低周波のエネルギーが住宅の中にまで届いているという事実である。

これに対し、日本の環境省は風力発電の環境影響評価にG特性の基準を設けていない。2017年のガイドラインでは「現時点では風力発電設備から発生する超低周波音・低周波音と健康影響との明

らかな関連を示す知見は確認できない」として、超低周波音（インフラサウンド）を評価対象から外している。エストニアが具体的な数値基準を設けている点と比べると、対照的な姿勢といえる。

### 8.6 規制における重み付けの国際比較

各国がどのものさしを使って風力発電の騒音を規制しているかを並べると、日本の位置づけがはっきりする。

表 8: 風力発電騒音に関する各国規制の重み付け比較

国・機関	採用する重み付け	備考
デンマーク	A 特性+低周波帯域別	屋内 20 dB (10~160 Hz、1/3 オクターブ帯域別)
エストニア	A 特性+ G 特性+帯域別	G 特性屋内 85 dB、帯域別低周波制限あり
日本	A 特性のみ	C/G/Z 要件なし。超低周波音は評価対象外
WHO	A 特性 (Lden 45 dB)	A 特性の限界を認識しつつも A 特性のみ

デンマークやエストニアのように先進的な規制を持つ国々は、A 特性に加えて低周波帯域や超低周波音（インフラサウンド）を独立に評価する仕組みを持っている。日本は A 特性だけで評価を行い、低い音や超低周波音（インフラサウンド）に対する数値基準を一切設けていない。

これは第 4 章で取り上げた日本弁護士連合会の指摘「環境アセスメントが低周波音問題に対して機能していない」と直結する構造的問題である。A 特性だけで評価すると、物理的に存在する低周波・超低周波のエネルギーが測定値から消えてしまい、「数値が基準以下だから問題ない」という結論に至りやすい。ものさしが低い音を測れないのだから、低い音の問題が見えなくなるのは当然のことである。

### 8.7 小括

本章で説明した 4 種類のものさしの違いがどれほど大きいかを数字で確認しておく。以下の数値は、第 10 章で Vestas V236-15MW の実際のスペクトルデータに基づいて算出した結果である。

この風車が発するエネルギーの全体量は、ものさしによって次のように異なる数値になる。Z 特性（ありのまま）で 134 dB、G 特性（超低周波重視）で 132 dB、C 特性（低周波をほぼ含む）で 130 dB、A 特性（日常騒音用）ではわずか 120 dB である。Z 特性と A 特性の差 14 dB は、エネルギーにして約 25 倍に相当する。つまり A 特性は、この風車の全音響エネルギーの約 96% を数値から除外していることになる。

低周波帯域（10 Hz-100 Hz）に注目すると、Z 特性では 120~125 dB という高いエネルギーが存在しているにもかかわらず、A 特性ではこれらが 54~101 dB にまで差し引かれる。この差し引きは、音が距離を伝わって高い音が消えていくにつれてさらに拡大する。

C 特性は低い音の評価には A 特性よりはるかに適しているが、20 Hz 以下の超低周波ではまだかなりの減衰が残る。超低周波音（インフラサウンド）まで含めた評価には、G 特性か、あるいは周波数帯域ごとに Z 特性で分析する方法が必要である。

以上から、洋上風力発電の騒音を評価するにあたって A 特性だけを使うのは科学的に不十分であり、少なくとも C 特性を併用することが不可欠といえる。さらに、超低周波音（インフラサウンド）の影響を見落とさないためには、エストニアのように G 特性基準を導入するか、周波数帯域

ごとのZ特性分析を行う必要がある。

## 9. いすみ市沖の気象条件：風・気温・湿度は音の届き方をどう変えるか

風車の騒音が沿岸の住宅にどの程度届くかは、風車そのものの音の大きさだけでは決まらない。音が3kmの海上を渡ってくる間に、風の向きや強さ、気温、湿度といった気象条件が音の伝わり方に大きく影響する。本章では、後続の騒音シミュレーション（第11章）に必要な気象データを整理し、いすみ市沖の季節ごとの条件が音の伝わり方にどう関わるかを見ていく。

ここで特に重要なのは、気温と湿度が「空気による音の吸収」を左右するという点である。暑くて湿度の高い夏は、高い音が空気に吸収されやすい。逆に冬の寒くて乾いた空気では、高い音が吸収されにくく、やや遠くまで届く。ただし、これはあくまで高い音（高周波）の話であり、風車騒音の主役である低い音（低周波）は、気温や湿度がどう変わってもほとんど吸収されない。つまり、低い音は季節を問わず、3km先の住宅にほぼそのまま届く。この点は本章で具体的な数値を示しながら確認する。

### 9.1 気象データの出どころ：勝浦観測所を使う理由と限界

本章で使う気象データは、いすみ市に最も近い気象庁の観測所である勝浦特別地域気象観測所（千葉県勝浦市、いすみ市中心部から約12km）の平年値（1991–2020年の30年平均）に基づいている。勝浦観測所はいすみ市と同じ外房海岸に面しており、似た海洋性の気候であるため、いすみ市沖の気象条件を推定するうえで最も適した観測点といえる。

ただし、勝浦観測所は海岸近くの市街地に設置された地上の観測所（高さ約10m）であり、「海上3kmにある高さ150mの風車から、沿岸の住宅まで音が伝わる経路」の気象条件とは、いくつかの点で異なりうる。以下にそれぞれの違いと、その違いが音の計算にどの程度影響するかを整理する。

#### 9.1.1 高さの違い：地上10mと風車の高さ150m

風速は高い場所ほど速くなる。地上10mと150mでは風速に大きな差が生じるため、この点は後述の風速推定（第9.4節）で詳しく扱う。一方、気温は高度が上がるにつれて下がるが、150m程度ではその差は約1°Cにすぎず、湿度への影響も小さい。

#### 9.1.2 海上と陸上の違い：海が気温・湿度を安定させる

洋上の風車から住宅までの3kmのうち、音の通り道の大部分は海の上である。海上の気温・湿度は陸上とは少し異なるパターンを示す。

気温：海は膨大な熱を蓄えているため、海上の気温は陸上に比べて一日のなかでの変動（日較差）も一年を通じた変動（年較差）も小さい。いすみ市沖の海面水温は黒潮の影響を受け、冬でも15~17°Cある（勝浦の冬の平均気温7.8°Cよりかなり暖かい）。夏は24~27°Cで陸上とはほぼ同じか少し低い程度である。したがって海上3km地点の気温は、冬は勝浦の観測値より数°C高く、夏はほぼ同じと考えられる。

湿度：海上の空気は海面からの蒸発で湿度が高くなりやすい。特に冬は違いが大きく、勝浦観測所の冬の湿度は61%だが、海上3km地点では70–80%程度あると考えられる。夏は勝浦観測所がすでに85–88%と高いため、海上との差はわずかである。

### 9.1.3 音が届く先（沿岸の住宅・内陸の住宅）の条件

海岸沿いの住宅の気象条件は、勝浦観測所の値にもっとも近い。海岸線から3~5 km 内陸の住宅になると、海の影響が薄れ、夏の日中はより暑く、冬の夜間はより寒くなる。ただし、内陸に行くほど風車からの距離も遠くなって音が弱まるため、音の影響が最も大きくなるのは海岸線のすぐそばの住宅である。

#### 9.1.4 結論：勝浦の観測データで十分か

以上の違いが、音の計算にどの程度影響するかが重要な問題である。結論を先に述べると、影響はごくわずかである。

その理由は、低い音（125 Hz 以下）の空気による吸収が、気温・湿度の変化にほとんど左右されないことにある（後述の表 11 で具体的な数値を示す）。63 Hz 以下の帯域では、気温が5 °C から 30 °C に変わっても、湿度が50%から90%に変わっても、1 km あたりの吸収はわずか0.1 dB の範囲に収まる。3 km を伝わっても吸収は0.3 dB 程度であり、風車の音の大きさ自体の測定誤差（±2 dB 以上）と比べれば無視できるほど小さい。

一方、高い音（1 kHz 以上）の吸収は気象条件に大きく左右される。しかし、これらの高い音は3 km も伝わると 10 dB 以上（4 kHz では 60 dB 以上）も吸収されて事実上消えてしまう。消えてしまう音については、吸収の大小を細かく議論する意味が薄い。

つまり、勝浦観測所と実際の海上との気温・湿度の多少の違いは、沿岸住宅に届く音の大きさの推定にほとんど影響しない。本書では勝浦観測所の地上平年値を代表的な気象条件として採用する。低い音の評価を主目的とする本書にとって、この選択は十分な精度をもっている。

## 9.2 季節ごとの気温・湿度

表 9 に、勝浦観測所の平年値をもとに季節ごとの気温・湿度・風速をまとめた。

表 9: 勝浦観測所における季節別気温・湿度の平年値（1991-2020 年）。気象庁平年値データに基づく。

季節（月）	平均気温 （°C）	日最高 （°C）	日最低 （°C）	相対湿度 （%）	平均風速 （m/s）
冬（12-2月）	7.8	12.0	3.8	61	4.0
春（3-5月）	14.1	17.6	10.5	74	3.7
夏（6-9月）	23.5	26.6	21.1	85	3.1
秋（10-11月）	16.5	20.2	13.2	74	3.7
年間	16.0	19.6	12.8	75	3.6

表 10 に月ごとの詳細な値を示す。

### 9.2.1 季節ごとに空気が音をどれだけ吸収するか

前節で「低い音は季節を問わずほとんど吸収されない」と述べたが、ここでは具体的な数字を示す。表 11 は、勝浦観測所の季節別平年値を ISO 9613-1 の計算式に当てはめて求めた、1 km あたりの吸収量（dB/km）である。

この表の読み方を確認しておく。左の2列（63 Hz と 125 Hz）は低い音の帯域であり、どの季節でも 0.1~0.4 dB/km にとどまっている。3 km を伝わっても吸収はせいぜい 1.3 dB 程度であり、前

表 10: 勝浦観測所における月別気温・湿度・風速の平年値（1991–2020 年）。気象庁データに基づく。

月	平均気温 (°C)	最高 (°C)	最低 (°C)	湿度 (%)	風速 (m/s)	最多風向
1月	6.8	11.1	2.9	59	4.1	北北西
2月	7.2	11.4	3.1	62	4.0	北北西
3月	10.0	13.9	6.1	68	3.8	北
4月	14.2	17.7	10.5	74	3.9	南南西
5月	18.0	21.2	14.9	80	3.5	南南西
6月	20.8	23.8	18.4	86	2.8	南南西
7月	23.9	26.7	21.7	88	2.7	南南西
8月	25.9	29.0	23.5	85	3.3	南南西
9月	23.5	26.7	20.9	82	3.4	北北東
10月	18.8	22.3	15.8	77	3.7	北
11月	14.2	18.1	10.6	71	3.7	北
12月	9.3	13.5	5.5	63	3.8	北北西
年間	16.0	19.6	12.8	75	3.6	北北東

表 11: 季節別の大気吸収係数（ISO 9613-1 に基づく計算値、dB/km）

季節（気温/湿度）	63 Hz	125 Hz	250 Hz	1 kHz	4 kHz
冬（8°C/61%）	0.1	0.4	1.0	3.9	42
春・秋（15°C/74%）	0.1	0.4	1.1	4.1	25
夏（24°C/85%）	0.1	0.3	0.9	6.2	21

注：標準大気圧（101.325 kPa）を仮定。63 Hz 以下の帯域では大気吸収はすべての季節で 0.1 dB/km 以下であり、3 km の伝搬距離でも 0.4 dB 未満にとどまる。一方、4 kHz 帯域の季節変動は極めて大きく、冬季（42 dB/km）は夏季（21 dB/km）の約 2 倍に達する。

章で示した Vestas V236-15MW の低周波帯域のエネルギー（119~125 dB(Z)）がほぼそのまま沿岸の住宅に届くことを意味する。

右の 2 列（1 kHz と 4 kHz）は高い音の帯域であり、季節による違いがはっきり表れる。特に 4 kHz では、冬（42 dB/km）が夏（21 dB/km）の約 2 倍もの吸収を受ける。しかし、どの季節であっても 3 km 伝わったあとの 4 kHz の音は 60 dB 以上吸収されて事実上消えてしまう。つまり、沿岸の住宅で聴こえる風車の音を決めるのは、どの季節でも低い音なのである。

### 9.3 風の向き：いつ、どれくらいの頻度で音が陸に向かうか

#### 9.3.1 地理的な前提

風車の音が住宅に届くかどうかは、風の向きに大きく左右される。音は風下に向かって伝わりやすくなるため、「海から陸に向かう風」が吹いているとき、騒音は最も効率よく住宅に届く。

いすみ市の海岸はおおむね東～南東に面している。したがって、東（E）、南東（SE）、南（S）方向から吹く風（つまり海から陸に向かう風）が、騒音を住宅に運ぶ風ということになる。

#### 9.3.2 千葉県の子節ごとの風の傾向

千葉県の風は季節によってはっきりしたパターンがある。冬はシベリア方面の高気圧から冷たい北西風が吹きやすい。夏は太平洋高気圧から蒸し暑い南寄りの風が吹く。春と秋は高気圧や低気圧が交互に通過するため、風向が定まりにくい。近隣の勝浦のデータでは、7月と8月は南南西の風が多く、海からの風の影響を受けやすいことが確認されている。

### 9.3.3 季節ごとに「音が陸に向かう風」はどれくらい吹くか

いすみ市の海岸が東～南東を向いていることを踏まえ、「海から陸に向かう風」（東、東南東、南東、南南東、南の成分）がどの程度の頻度で吹くかを季節ごとに推定したのが表 12 である。

表 12: いすみ市沖における季節別風向パターンの推定

季節	多い風向	陸向き頻度	備考
冬（12-2月）	北西	10-15%	主に陸→海方向。低気圧通過時に東～南東
春（3-5月）	変動的	25-35%	南寄りが徐々に増加。海風が発達
夏（6-9月）	南～南西	40-55%	太平洋高気圧+日中の海風。夜間も南寄り多い
秋（10-11月）	変動的→北寄り	20-30%	南寄りから北西へ移行。北～北東風の頻度が増加
年間通算の概算		25-35%	

### 9.3.4 高さ 150 m では地上と風向が少しずれる

上の推定にはいくつか補足が必要である。

まず、高さ 150 m では地上と風の向きが少し異なる。高いところでは地面の摩擦の影響が弱まるため、風は地上よりも時計回りに 10-20° ほど向きがずれ、やや南西寄りになる傾向がある。

次に注目すべきは、騒音が最も遠くまで届きやすいのは夜間であるという点である。夜間は上空の空気が地表付近よりも暖くなること（気温逆転）が起こりやすく、この状態では音波が上に逃げずに下向きに曲がり、海面で反射しながらまるで「トンネル」を通るように遠くまで伝わる（「ダクト伝搬」と呼ばれる現象）。夏の夜は南～南東の風が持続しやすく、まさにこのダクト伝搬が起こりやすい条件と重なる。

勝浦観測所の風向データによれば、夏季（6～9月）の陸向き風（南～南東）の頻度は昼夜通算で 40～55% に達する。夜間においても太平洋高気圧からの地衡風が持続しやすいため、この頻度は夜間も同程度とみられる。さらに、北欧沿岸の洋上風力プロジェクトでの実測研究が示すように、温帯沿岸の夏季夜間において安定大気条件（ダクト形成に必要な気温逆転）が成立する時間は夜間のおおむね 20～40% に及ぶ。いすみ市沖では夏季に太平洋の冷たい海水面の上を高温多湿な南寄りの空気が覆う構造が、北欧よりも強い逆転層を形成しやすいとみられる。両条件（陸向き風 × 安定大気）が同時に成立する時間は、夏季夜間の概ね 15～30% に達すると推定される。この時間帯は住民の就寝時間と重なるため、騒音影響として最も問題となる。

## 9.4 風の強さの推定

### 9.4.1 NEDO NeoWins によるいすみ市沖の風速データ

いすみ市沖 3 km 付近の風速については、NEDO（国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）が公開している NeoWins という風況データベース（1995-2014 年の 20 年平均、500 m メッシュ）が複数の高さのデータを提供している。これによると、いすみ市沖 3 km 地点の年間平均風速は以下のとおりである。

表 13: NEDO NeoWins によるいすみ市沖 3 km 付近の年間平均風速

高度	年間平均風速
60 m	約 7.0~7.5 m/s
140 m	約 8.0~8.5 m/s

### 9.4.2 高さが変わると風速がどう変わるか：べき乗則による推定

風は高い場所ほど速い。これは、地上付近では地面や建物との摩擦で風が減速されるためである。この「高さ」と風速の関係は、「べき乗則」と呼ばれるシンプルな式で近似できる。

$$\frac{V(z_2)}{V(z_1)} = \left(\frac{z_2}{z_1}\right)^\alpha$$

ここで  $V$  は風速、 $z$  は高さ、 $\alpha$  は地面の滑らかさに応じて変わる指数である。 $\alpha$  が小さいほど地面が滑らか（海面など）で、高さによる風速の変化が小さい。 $\alpha$  が大きいほど地面が粗く（市街地など）、高さによる変化が大きい。

NEDO のデータの代表値（60 m で 7.25 m/s、140 m で 8.25 m/s）をこの式に当てはめると、指数  $\alpha$  を求めることができる。

$$\alpha = \frac{\ln(8.25/7.25)}{\ln(140/60)} = \frac{\ln(1.138)}{\ln(2.333)} \approx \frac{0.129}{0.847} \approx 0.15$$

この  $\alpha \approx 0.15$  という値は、海上の環境として妥当な範囲にある。参考として、障害物のない外洋では  $\alpha \approx 0.10\text{--}0.12$ 、沿岸域では  $\alpha \approx 0.14\text{--}0.16$  が一般的である。いすみ市沖 3 km は岸にやや近い位置であり、得られた値はこうした物理的な条件と合っている。

このべき乗則を使えば、任意の高さの風速を推定できる。後続の騒音計算（第 11 章）では、国際規格 IEC 61400-11 が基準とする「地上 10 m の風速」と、風車のハブがある高さ 150 m の風速との対応関係を導くためにこの式を使う。

### 9.4.3 勝浦の地上観測との整合性

勝浦観測所の地上（約 10 m）年間平均風速は 3.6 m/s だが、これは市街地の中での値であり、海上の風速とは直接比較できない。試みに、上で求めた海上のべき乗則から地上 10 m の風速を逆算してみると、 $V(10\text{ m}) = 8.25 \times (10/140)^{0.15} \approx 8.25 \times 0.66 \approx 5.4\text{ m/s}$  となる。海上は建物や木がなく風が遮られにくいため、市街地の勝浦（3.6 m/s）より高い値が出るのは自然なことである。

### 9.4.4 季節ごとの風速の推定

勝浦観測所の季節別平均風速（表 10）の変動パターンをもとに、NEDO の年間平均値からスケールリングして、海上 140 m における季節ごとの風速を推定した。

表 14: 季節別の推定平均風速（海上 3 km、高度 140 m）

季節	140 m 推定風速	備考
冬（12-2月）	9~11 m/s	北西の季節風。強いが主に陸→海の方
春（3-5月）	7~9 m/s	変動が大きい。低気圧通過時に強風
夏（6-9月）	6~7 m/s	南寄り。風は弱めだがタービンは十分稼働。 陸向きの頻度が最も高い。台風は主に8-9月
秋（10-11月）	7~9 m/s	北東風への移行期。10月は台風の接近もある

## 9.5 風速・風向・気象条件が重なるとどうなるか

以上で整理した風速・風向・気温・湿度の情報を組み合わせると、騒音がいつ、どのような条件で住宅に届きやすいかが見えてくる。

まず、風車が最も大きな音を出すのは「定格風速」と呼ばれる約 11~14 m/s の風が吹いているときである。騒音は、年間平均風速ではなく、風の強い時間帯にどれだけ回るかに直結する。いすみ市沖では、年間を通じてかなりの時間帯で風速が 10 m/s を超えると推定される。こうした強風時に風車はフルパワーに近い状態で動き、最も大きな音を出す。

季節ごとに見ると、以下のような特徴がある。

夏は平均風速こそ弱め (6~7 m/s) だが、10 m/s 以上に達する時間帯もあり、そのとき南寄りの風に乗って音は陸に向かう。さらに、夏の蒸し暑い夜は上空が暖かく地表が冷えることで「気温逆転」が起こりやすく、音が下向きに曲がって海面で反射しながら遠くまで届く「ダクト伝搬」が最も発生しやすい。つまり、夏の夜間は「海から陸への風」「音が遠くまで届きやすい大気の状態」「住民が眠っている時間帯」という 3 つの条件が同時に揃う、騒音の影響が最も深刻になりうる時期である。

ただし、騒音の問題は夏季夜間だけに限定されるわけではない。日中であっても風が強い日には、風速勾配そのものが音の下方屈折を引き起こし、温度逆転がなくても通常の ISO 9613-2 の予測を上回る伝搬増幅が生じる (第 11.2 節で定量的に示す)。すなわち、年間を通じて風の強い日は騒音リスクが存在する。

冬は風が最も強い (140 m で 9~11 m/s) が、風は主に北西から吹くため、音はおおむね海に向かって飛んでいく。ただし、低気圧が通過するときには風向が東~南東に変わり、音が陸に向かうこともある。

重要なのは、高い音は 3 km の間にどの季節でも消えてしまうという点である。表 11 で見たとおり、冬と夏で吸収量に大きな差があるのは高い音だけであり、低い音の吸収は季節にほぼ関係しない。したがって、どの季節であっても、沿岸の住宅に届く音の正体は低い音 (低周波) である。

後続の騒音シミュレーション (第 11 章) では、以上の気象分析を踏まえ、大気伝搬の増幅を決定する 2 つの独立した要因 (風速勾配の強さ ( $\alpha$ ) と温度逆転の強さ ( $\Delta T$ )) を軸とした 4 つの伝搬シナリオを設定して計算を行う。これにより、もっとも穏やかな条件 (弱い風、弱い逆転) から、もっとも厳しい条件 (強い風、強い逆転) まで、年間を通じて起こりうる伝搬条件の範囲を系統的に評価する。大気吸収については、冬夏の差が低周波帯域では無視できるほど小さいことを踏まえ、代表的な中間条件 (10 °C、70%) を用いる。

## 9.6 参考データソース

- 気象庁 勝浦特別地域気象観測所 平年値 (1991–2020 年、30 年統計)  
[https://www.data.jma.go.jp/stats/etrn/view/nml\\_sfc\\_ym.php?prec\\_no=45&block\\_no=47674](https://www.data.jma.go.jp/stats/etrn/view/nml_sfc_ym.php?prec_no=45&block_no=47674)
- NEDO NeoWins (沿岸 30 km 以内、500 m 解像度、複数高度、1995–2014 年 20 年平均)

[https://appwdc1.infoc.nedo.go.jp/Nedo\\_Webgis/index.html](https://appwdc1.infoc.nedo.go.jp/Nedo_Webgis/index.html)

- Global Wind Atlas (様々な高度の風配図・風速マップ、ERA5 ベース)  
<https://globalwindatlas.info/>
- 環境省 風況変動データベース (地上高 80 m、500 m メッシュ、1991–2010 年)  
<https://www.env.go.jp/earth/ondanka/windmap/>
- 銚子地方気象台 千葉県の気象特性  
<https://www.data.jma.go.jp/choshi/shosai/bousai/kishoutokusei.html>

## 10. 音源の分析：大型風車はどれほどの音を出すのか

後続の騒音シミュレーション (第 11 章) で「海岸に届く音の大きさ」を計算するには、まず出発点として「風車そのものがどれだけの音を出すか」(すなわち音源レベル)を把握しなければならない。本章では、実際のメーカー公表データと国際的な環境影響評価報告書に基づいて、いすみ市沖に設置が想定されている大型風車 (12~18 MW 級) の音源レベルを導出する。

### 10.1 巨大風車の音響エネルギー：3つの発生源

18MW クラスの超大型風車が発する騒音は、単純な「風切り音」ではない。全長 260 m を超える巨大構造物が回転することで、以下の 3 つの異なる物理現象が重なり合い、1 基あたり約 120 dB (推定値) という、ジェットエンジンに匹敵する音響エネルギーが放出される。いすみ市沖計画では 12~18 MW 級の複数機種が想定されているが、音が発生するメカニズムはいずれも共通であり、出力規模が大きいほど音も大きくなる。

#### 1. ブレード先端の空力騒音 (Aerodynamic Noise) — 風を切る音

- 発生源: ブレード (羽根) の先端部分
- メカニズム:  
全長 100m を超えるブレードの先端は、時速 300km 以上 (新幹線の最高速度に匹敵) で空気を切り裂く。この超高速移動が空気と激しく摩擦し、高周波の「シュッシュュッ」という切削音 (乱気流音) を連続的に発生させる。
- 特徴:  
これは 3 つの音源の中で最もエネルギーが大きく、風車騒音全体を支配する主要因である。

#### 2. タワー通過時の圧縮音 (Tower Interaction / Thumping) — 「ドォン」という衝撃音

- 発生源: ブレードがタワー (支柱) の正面を通過する瞬間
- メカニズム:  
巨大なブレードがタワーの前を横切る際、タワー表面の空気が急激に圧縮され、その後一気に開放される。これにより「ドォン!」という衝撃波に近い圧力変動が生じる。

- 特徴:  
これが「振幅変調（AM音）」の正体である。心臓の鼓動のように規則的に繰り返す低周波パルスであり、空気に吸収されにくく、遠くまで到達する最大の要因となる。いすみ市沖のように数十基が並ぶ計画では、各風車の回転速度がわずかに異なる（風速や制御応答の微小な差による）ため、各基からのパルスが不規則に重なり合い、間欠的に強め合う「うなり」のような現象が生じる。この不規則な脈動は、単一基の規則的なリズムよりも人にとって不快に感じられやすい。聴取者がリズムに慣れる（順応する）ことができないためである。

### 3. ナセル内部の機械音（Mechanical Noise）－発電機のうなり

- 発生源: プロペラ中心部のナセル（発電機・増速機が収められた箱）
- メカニズム:  
内部の巨大な発電機やギアが回転する際の「ウィーン」「ゴゴゴ」という機械的な唸り音である。12~18 MW という膨大な電力を生み出すため、その振動エネルギーは非常に大きい。

※風力発電機の主要な構成要素の名称については、図1を参照。

## 10.2 本章で用いる基準スペクトル：Vestas V236-15MW のデータ

風車がどの周波数でどれだけの音を出しているかを分析するには、周波数帯域ごとの音響パワーレベル（スペクトル）が必要である。本検討では、エストニア沖合風力発電計画に関する Ramboll の低周波音評価報告書において参照されている Vestas Wind Systems A/S 公表の技術文書「V236-15 MW Third octave noise emission (DMS 0105-2594\_00, 2021-04-14)」に記載された1/3オクターブ帯域別音響パワーレベルを基準スペクトルとして用いた（図5参照）。

当該データはメーカー公表値に基づくものであり、最大出力条件（地上10m基準風速約11m/s）に対応するスペクトルである。同報告書では、メーカー公表値に2dBの安全側補正を加えた値（すなわち $L_{WA} = 120$  dB(A)）を予測計算に使用している。本検討でも、この安全側補正を含む $L_{WA} = 120$  dB(A)のスペクトルを基準として採用した。

Vestas社のカタログ公表値は以下の通りである：

- 音響パワーレベル ( $L_{WA}$ ): 118 dB(A)（定格出力時、地上10m基準風速11m/s）
- 測定条件: IEC 61400-11 規格準拠

Ramboll社「Hiiumaa offshore Wind Farm Noise Modeling Report」(エストニア気候省、2022年):  
[https://kliimaministerium.ee/sites/default/files/documents/2023-07/1510055015-001\\_Hiiumaa\\_offshore\\_Wind\\_Farm\\_Noise\\_Modeling\\_Report\\_2022.pdf](https://kliimaministerium.ee/sites/default/files/documents/2023-07/1510055015-001_Hiiumaa_offshore_Wind_Farm_Noise_Modeling_Report_2022.pdf)

英語カタログ：[Vestas V236-15.0 MW Offshore Brochure](#)

日本語カタログ：[Vestas V236-15.0 MW 日本語カタログ](#)

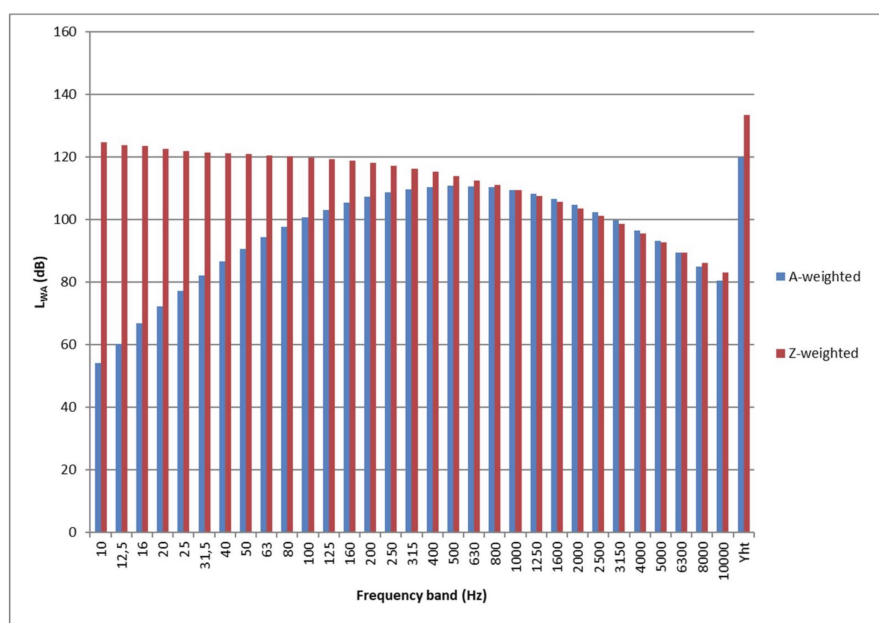


図 5: Vestas V236-15MW 1/3 オクターブバンド音響パワーレベル (安全マージン 2 dB 含む)

なお、この「2 dB 安全マージン」の採用自体が注目に値する。エストニアの規制当局はメーカー公表値をそのまま採用するのではなく、不確実性を考慮した保守的な値を計算に使用している。これは日本の環境アセスメントにおける実務（メーカー公表値をそのまま使用）とは対照的であり、規制の慎重さにおいて差がある。

表 15 に、上記報告書から抽出した 1/3 オクターブバンド音響パワーレベルを示す。Z 特性（重み付けなし）および A 特性の値はエストニア報告書の公表値であり、安全マージン 2 dB を含む。このスペクトルデータが、以降の全ての伝搬計算の出発点となる。

表 15 の Z 特性スペクトルに、第 8 章で説明した各周波数重み付けの標準補正を適用すると、同じ風車の音源レベルが「ものさし」によって大きく異なる値を示すことがわかる。Z 特性の合計が 134 dB(Z) であるのに対し、A 特性の合計は 120 dB(A) で、差は 14 dB あり、A 特性はこの風車の全音響エネルギーの約 96% を計算から除外している。C 特性（第 8.3 節）で評価すると約 130 dB(C)、G 特性（第 8.4 節）で評価すると約 132 dB(G) となり、いずれも A 特性よりも 10 dB 以上高い。この差は、大型風車の音が低い周波数に強く偏っていることの直接的な反映である。

重要なのは、この重み付け間の差は音が遠くまで伝わるほどさらに広がるという点である。高い周波数の音は空気に吸収されやすいため、数キロメートルの伝搬後にはほとんど消えてしまう一方、低い周波数の音はほぼ減衰せずに到達する。その結果、受音点に届く音はさらに低周波に偏り、A 特性が「見落とす」エネルギーの割合はいっそう大きくなる。この効果の定量的な評価は第 12 章で示す。

### 10.3 風車の大きさと騒音の関係：15MW 機のデータから 18MW 機の音を推定する

いすみ市沖計画では 12 MW 級から 18 MW 級まで複数の機種が想定されているが、現時点で周波数別スペクトルおよび保証値が十分に公開されている機種は限定的である。そこで本節では、15MW

表 15: Vestas V236-15MW 1/3 オクターブバンド音響パワーレベル ( $L_W$ , dB)。Z 特性および A 特性の値はエストニア報告書の公表値 (安全マージン 2 dB 含む)。

周波数 (Hz)	$L_{WZ}$ dB(Z)	$L_{WA}$ dB(A)
10	125	54
12.5	124	60
16	124	67
20	123	72
25	122	77
31.5	121	82
40	121	87
50	121	91
63	121	94
80	120	98
100	120	101
125	119	103
160	118	105
200	118	107
250	117	109
315	116	110
400	115	110
500	114	111
630	112	110
800	111	110
1000	109	109
1250	108	108
1600	106	107
2000	104	105
2500	101	102
3150	99	100
4000	96	97
5000	93	93
6300	89	89
8000	86	85
10000	83	80
<b>合計</b>	<b>134</b>	<b>120</b>

注：帯域レベルは整数値で公表されているため、整数丸めに起因して合計値の算出結果と公表合計値の間に最大 1 dB 程度の差異が生じうる。

機のデータをもとに、ローター径が大きくなると騒音がどれだけ増えるかを理論とメーカー実測データの両面から検証する。

風車の騒音は、おおまかに言えば「ローター（プロペラ）の大きさ」と「先端の速さ」で決まる。ローターが大きくなるほど、また先端が速く回るほど、騒音は増える。

空力騒音の音響パワー（風が原因で発生する音のエネルギー）は、一般に以下の式で近似される。

$$W \propto D^m U_{rel}^n$$

ここで  $D$  はローター径（プロペラの直径）、 $U_{rel}$  はブレードに対する代表相対流速（先端が空気と出会う速さ）、 $m$  と  $n$  はそれぞれの要素がどの程度効くかを表す指数である。

理論的には、後縁乱流騒音（ブレード後端の空気の乱れによる音）に関する Ffowcs Williams–Hall の理論（Ffowcs Williams & Hall, 1970）は、ブレード 1 枚あたりの音響パワーが翼幅（ブレードの長さ）に比例し、かつ流速の 5 乗に比例すること、すなわち

$$W_{blade} \propto R \cdot U_{tip}^5$$

を導く（ $R$  はブレード長さ、 $U_{tip}$  は先端周速）。この理論のもとでは、一定の先端周速比（先端の回転速度と風速の比率）で運転する場合、ローター径のみによるスケール指数は  $m = 1$  程度にとどまる。

しかし、実際の風車タービン設計においては、ローターが大きくなるにつれて先端の回転速度（先端周速）も上がる傾向がある。例えば V117-4.2MW の先端周速は約 65 m/s であるのに対し、V236-15.0MW では約 85 m/s に達する。直径が大きくなるだけでなく先端も速くなるため、上の 5 乗則の寄与が加わり、この先端周速の共変動を含めた実効的なローター径指数は、純粋に直径だけで見た指数よりも大きくなる。

Vestas 社の公式カタログ（V236-15.0MW 技術資料、2021 年）は、同一メーカー・同一測定基準のもとで複数機種最大の音響パワーレベルを公表しており、以下の実測データが得られる：

機種	ローター径	定格出力	$L_{WA}$ (最大値)
V117-4.2MW	117 m	4.2 MW	106 dB(A)
V164-9.5MW	164 m	9.5 MW	112.9 dB(A)
V174-9.5MW	174 m	9.5 MW	112.9 dB(A)
V236-15.0MW	236 m	15.0 MW	118 dB(A)

これらのデータから、各機種間の実効的な径指数  $m$  を

$$m = \frac{\Delta L_{WA}}{10 \log_{10}(D_2/D_1)}$$

として算出すると、以下の結果が得られる：

比較ペア	$\Delta L_{WA}$	$\log_{10}(D_2/D_1)$	実効 $m$
V117 → V164	6.9 dB	0.147	4.70
V117 → V174	6.9 dB	0.172	4.00
V117 → V236	12.0 dB	0.305	3.94
V164 → V236	5.1 dB	0.158	3.23
V174 → V236	5.1 dB	0.132	3.85

なお、V164-9.5MW と V174-9.5MW は同一の定格出力（9.5 MW）でありながら音響パワーレベルが同一（112.9 dB(A)）であり、径の増大がそのまま騒音増加に反映されていない。これは V174 が低騒音設計の最適化を施されている可能性を示唆しており、通常のスケーリングとは異なる特殊なケースと考えられる。

この特殊なペアを除くと、Vestas の公式データから得られる実効指数は  $m \approx 3.2 \sim 4.7$  の範囲にあり、中央的な値はおおよそ  $m \approx 3.5 \sim 4.0$  である。これは教科書的なスケーリング指数 ( $m = 2 \sim 3$ ) よりも有意に大きい。その主な理由は、風車が大型化するにつれて先端周速も上がるため、Ffowes Williams–Hall 理論における「速さの 5 乗」の寄与が実効的な径指数に上乘せされるためと解釈される。

では、18 MW 級（ローター径約 260 m）の場合はどうなるか。V236-15.0MW ( $D = 236$  m、 $L_{WA} = 118$  dB(A)) を基準に計算すると：

$$\Delta L_{\text{size}} = 10 m \log_{10} \left( \frac{260}{236} \right)$$

指数 $m$	$\Delta L_{\text{size}}$	推定 $L_{WA}$ (18 MW 級)
2 (教科書下限)	0.8 dB	118.8 dB(A)
3	1.3 dB	119.3 dB(A)
3.5 (Vestas 実効中央値)	1.5 dB	119.5 dB(A)
4 (Vestas 実効上限付近)	1.7 dB	119.7 dB(A)

どの指数を用いても、18 MW 級の推定音響パワーレベルは 118.8~119.7 dB(A) の範囲に収まる。本検討で採用した代表値  $L_{WA} = 120$  dB(A) は、この推定範囲の上端をわずかに超える程度であり、Ramboll のエストニア沖評価報告書で採用された安全側補正（メーカー公表値 2 dB）とも整合する。すなわち、本検討で用いる  $L_{WA} = 120$  dB(A) は、スケーリング理論とメーカーの公式データの双方から裏付けられた、十分に慎重かつ妥当な代表値である。

なお、仮に将来さらに大きな 290 m 級の超大径ローターが採用された場合には、 $m = 3.5 \sim 4.0$  の範囲で 3.1~3.5 dB 程度の増加が見込まれ、 $L_{WA} = 121 \sim 122$  dB(A) に達し得る。将来的に対象機種の詳細データが公表された場合には、本前提は更新する必要がある。

#### 10.4 風が弱い日の騒音レベル：年間平均風速（8 m/s）ではどうなるか

これまでに確立した音源レベル ( $L_{WA} = 120$  dB(A)、安全マージン含む) は、IEC 61400-11 に基づく最大騒音条件（すなわち地上 10 m 基準風速 11 m/s の強風時）に対応する。しかし、いすみ市沖では年間を通じて常にこの強風が吹いているわけではない。本節では、第 9 章の風況データに基づき、年間平均風速条件（風がもう少し穏やかなとき）における騒音レベルがどれだけ下が

るかを推定する。

#### 10.4.1 最大騒音の条件はどれくらいの強さの風か

エストニアの報告書に記載された「11 m/s (地上 10 m 基準)」は、IEC 61400-11 の規定に基づき、地上 10 m の風速計で実測された値である。V236-15MW のハブ（ローターの中心）は高さ 146 m にあるため、べき乗則プロファイル

$$V(z_2) = V(z_1) \left( \frac{z_2}{z_1} \right)^\alpha$$

を用いてハブ高さ風速に換算できる。ただし、IEC 測定サイトの風速指数  $\alpha$  は不明であるため、開放平坦地の典型値 ( $\alpha = 0.10 \sim 0.14$ ) の範囲で推定する。

測定サイトの $\alpha$	ハブ高さ風速の推定値
0.10	14.4 m/s
0.12	15.2 m/s
0.14	16.0 m/s

いずれの場合も、ハブ高さ風速は V236-15MW の定格風速（約 10.5 m/s、ハブ高さ基準）を大きく上回る。定格風速以上ではピッチ制御により出力が制限され、騒音レベルはほぼ一定（最大値）に保たれる。したがって、エストニア報告書の 118 dB(A)（安全マージン加算後 120 dB(A)）は、定格風速付近の最大騒音を代表する値と解釈できる。

#### 10.4.2 いすみ市沖の平均風速条件

第 9 章で示したとおり、NEDO NeoWins のデータに基づくいすみ市沖 3 km における年平均風速は以下の通りである。

- 高度 140 m：約 8.0~8.5 m/s（代表値 8.25 m/s）

この平均風速は V236-15MW の定格風速（約 10.5 m/s、ハブ高さ基準）を下回る。つまり年間平均風速条件において風車は全力運転ではなく、風速に応じて回転数を変える、定格以下の「可変速運転」をしている。回転が遅くなれば先端の速度も下がるため、騒音も小さくなる。

#### 10.4.3 可変速領域における騒音スケーリング：風速が下がると騒音はどれだけ小さくなるか

定格風速以下では、風車は「最適先端速度比 (TSR)」を保つように制御される。TSR とは「先端周速 ÷ 風速」の比率のことで、V236-15MW の場合は  $TSR \approx 8.1$  で一定に保たれる。TSR が一定であれば、風速が下がると先端の速さもそれに比例して下がる。V236-15MW の場合、定格時の先端周速は約 85 m/s だが、風速 8.25 m/s では約 67 m/s に低下する。

空力騒音の音響パワーは先端周速の  $n$  乗に比例するため（第 7.3 節段落 (5) 参照）、風速変化に伴う音響パワーレベルの変化量は

$$\Delta L_W = 10 n \log_{10} \left( \frac{V_{\text{avg}}}{V_{\text{rated}}} \right)$$

と表される。ここで  $V_{\text{avg}}$  は年平均風速（ハブ高さ）、 $V_{\text{rated}}$  は定格風速（ハブ高さ）である。可変速運転域では TSR が一定に保たれるため、先端周速比は風速比に等しく、上式はそのまま適用できる。

$V_{avg} = 8.25 \text{ m/s}$ 、 $V_{rated} = 10.5 \text{ m/s}$  として、速度依存指数  $n = 4 \sim 6$  (Ffowcs Williams–Hall 理論による後縁乱流騒音では  $n = 5$  が典型値) の範囲で計算すると、

速度依存指数 $n$	$\Delta L_W$	$L_{WA}$ (年平均風速時)
4	-4.2 dB	115.8 dB(A)
5 (典型値)	-5.2 dB	114.8 dB(A)
6	-6.3 dB	113.7 dB(A)

なお、空力騒音のスケーリング指数  $n$  が周波数帯に対して大きく変化しない限り、各帯域の音響パワーレベルは同一量  $\Delta L_W$  だけ低下し、スペクトル形状は保存される (第 7.3 節段落 (5) の導出を参照)。したがって、年平均風速条件のスペクトルは、定格条件のスペクトルを全帯域にわたり 4~6 dB だけ下にスライドしたものとして近似できる。

#### 10.4.4 他機種データとの整合性

エストニア報告書には Siemens Gamesa SG 7.0-167 DD (ハブ高さ 110 m) の騒音データも記載されており、同機種では「地上 10 m 基準で風速 8 m/s のとき 111.2 dB(A)、10 m/s 以上で 115.0 dB(A)」と報告されている。この 2 条件の差は 3.8 dB である。

ただし、この 3.8 dB は地上 10 m 基準で 8 m/s から 10 m/s への変化に対応する。いすみ市沖の年平均風速 (ハブ高さ 140 m で約 8 m/s) を地上 10 m に換算すると約 5.5 m/s ( $\alpha = 0.15$ ) であり、SG の最低報告風速 (10 m 基準で 8 m/s) よりもさらに低い。したがって、SG のデータで直接的に検証することはできないが、本検討で推定した 4~6 dB の低減量が SG のより狭い風速範囲における 3.8 dB を上回ることは、より広い風速範囲をカバーしていることを考慮すれば自然な結果である。

#### 10.4.5 年間平均風速時の音源レベル：まとめ

以上の分析から、年間平均的な風速 (ハブ高さ 8 m/s 付近) のときの大型風車の音源レベルは、定格 (最大出力) 時から約 4~6 dB 低下すると推定される。

条件	$L_{WA}$	$L_{WZ}$ (推定)
定格出力時 (強風時・最大騒音)	120 dB(A)	134 dB(Z)
年平均風速時 (平均的な日)	114~116 dB(A)	128~130 dB(Z)

上記の値は、いすみ市沖計画で想定される 12~18 MW 級 (ローター径約 222~260 m) の全機種に統一的に適用する。前節のスケーリング分析が示すように、この径の範囲における騒音レベルの差は 2 dB 以内であり、いずれも Vestas V236-15MW のカタログ値 118 dB(A) に安全マージン 2 dB を加えた 120 dB(A) で代表できる。将来、より大きなローター (290 m 級等) が採用される場合には、 $L_{WA} = 121 \sim 122 \text{ dB(A)}$  への上方修正が必要となる可能性がある。

この結果は、後続のシミュレーション (第 11 章) において、定格出力時 (フル出力条件) および年平均風速時の音源レベルの根拠となる。

定格条件と平均風速条件の差は 4~6 dB (エネルギー比で約 2.5~4 倍) であり、「風が弱い日は静かになる」という期待を完全に否定するものではないが、その効果は限定的である。114~116 dB(A) は依然として航空機エンジンに匹敵する音源レベルであり、年間の大半の時間帯にわたりこの水準の音響エネルギーが沖合から放出され続けることに変わりはない。

## 11. 騒音伝搬の計算手法

本章では、前章までの分析（音源スペクトル、気象条件、周波数重み付け）を踏まえ、いすみ市沿岸への騒音伝搬を計算するための3つの手法を説明する。第1の手法（第11.1節）はISO 9613-2に基づく標準的な計算であり、風下屈折やダクト効果を含まないもっとも保守的なベースラインを与える。第2の手法（第11.2節）は、ISO 9613-2のベースラインに風速勾配・温度逆転による伝搬増幅を帯域別に上乘せするもので、現実の気象条件下での受音レベルをより正確に推定する。第3の手法（第11.3節）は、完全な円筒拡散を仮定した理論上限値であり、第2の手法の推定が物理的に妥当な範囲にあることを検証するために用いる。計算結果の提示と国際基準との照合は次章（第12章）で行う。

### 11.1 ISO 9613-2に基づくベースライン計算

第6章では、提出資料に記載された予測値の再現検証を行った。その計算では、音源レベルとしてA特性の単一値  $L_{WA} = 120$  dB(A) を用い、それをオクターブバンドに均等に分配する「擬似スペクトル」を仮定していた。しかし第10章で見たように、実際の風車の音は低い周波数に大きく偏っている。本節では、Vestas V236-15MWの実測1/3オクターブバンドスペクトル（エストニア沖環境影響評価報告書の公表値、安全マージン2dB含む、表15）を用いて、4社コンソーシアム配置（A案・B案）について海岸線での再計算を行う。

計算モデルはISO 9613-2の標準的な枠組みに従い、以下の3つの減衰要因を31本の1/3オクターブバンドそれぞれに適用する。各要因の物理的な意味は第7章で詳しく説明した。

- **距離による拡散**：音は球面状に広がるため、距離が遠くなるほどエネルギーが薄まる。距離  $r$ （メートル）での減衰は  $A_{div}(r) = 20 \log_{10}(r) + 11$  [dB] で計算される。
- **大気吸収**：空気中を音が進む間に、空気分子がエネルギーの一部を吸収する。この吸収は高い音ほど強く、低い音にはほとんど効かない。吸収の大きさは気温と湿度によって変わるため、ISO 9613-1の式を用いて周波数帯域ごとに個別に計算する。
- **海面反射**：海面は硬い反射面として作用し、直接届く音に加えて海面で跳ね返った音が重なるため、音圧が増大する。本計算では地面係数  $G = 0$ （硬い地面）を採用し、全帯域で3dBの増幅を適用した。

海面反射の3dBは、直接波と反射波のエネルギーを個別に足し合わせた場合の値（非干渉加算）であり、ISO 9613-2の標準的な取り扱いである。しかし、これは保守的（控えめ）な仮定である。2つの波が同じタイミングで到着する（同位相で干渉的に加算される）場合、増幅量は6dBに達する。低周波音は波長が長い（50Hzで約7m）ため、音源高さ150m・受音点高さ1.5m・距離3kmの条件では直接波と反射波がほぼ同時に到着し、本計算の主要帯域（50~200Hz）では実際の増幅は3dBより6dBに近い可能性が高い。3dBの採用は全体として保守的である。

気温・湿度の条件は、ISO 9613-2が大気吸収の基準として規定する10°C・相対湿度70%を採用した。この条件は中周波帯域（500Hz付近）の大気吸収が最も小さくなる、つまり受音レベルが最も高くなる保守的な条件であり、英国音響学会のGood Practice Guideでも標準計算条件として指定されている。比較のため、夏季に近い条件（20°C・相対湿度80%）での計算も実施した。

なお、ISO 9613-2 が正式に対象としているのは 63 Hz 以上の帯域であり、それより低い周波数は規格の範囲外である。本計算では 10 Hz から 10 kHz まで全帯域について計算を行ったが、63 Hz 未満の結果にはこの点を留意されたい。ただし、63 Hz 未満の帯域では大気吸収は極めて小さく (0.1 dB/km 以下)、3 km 伝搬しても 0.3 dB 未満しか減らない。つまり、これらの帯域では距離による拡散だけで十分な精度が得られるため、実用上の問題はない。

風車配置は第 6 章と同じ 4 社コンソーシアムが提示した A 案 (15 MW × 35 基) および B 案 (12 MW × 42 基) を使用し、受音点は海岸線上 (離岸 3 km、高さ 1.5 m) に設定した。

### 11.1.1 計算結果の総括

表 16 に、各条件における受音点での総合レベルをまとめる。

表 16: 実測スペクトルに基づく ISO 9613-2 計算結果の総括 (受音点：海岸線 3 km、 $G = 0$ )

配置	気象条件	$L_p(Z)$ dB	$L_p(A)$ dB(A)	$L_p(C)$ dB(C)
A 案 (15 MW × 35 基)	冬季 10°C/70%	65.9	45.0	61.9
A 案	夏季 20°C/80%	66.0	44.4	62.0
B 案 (12 MW × 42 基)	冬季 10°C/70%	66.5	45.7	62.5
B 案	夏季 20°C/80%	66.6	45.0	62.7

これらの結果から、3 つの重要なことがわかる。

第一に、実測スペクトルを使うと A 特性の値が大きく変わる。A 特性での受音レベルは 44.4~45.7 dB(A) であり、第 6 章の擬似スペクトル (音を均等に分配した仮定) による結果 ( $G = 0$  で 35.9~36.4 dB(A)) を約 9 dB 上回る。この差は大きい。理由は単純で、実際の風車の音は低い周波数に偏っており、低い音は空気にほとんど吸収されないため、均等分配を仮定した場合よりも遠くまで届くからである。実測スペクトルを使うと、A 特性ですら提出資料の予測値 (A 案 32.0 dB(A)、B 案 32.6 dB(A)) を 13 dB 上回る。これはエネルギーにして約 20 倍の差である。

第二に、Z 特性 (重み付けなし) で見ると、A 特性よりも約 21 dB 高い。音源の段階では Z-A 差は 14 dB であったが (第 10 章、表 15)、3 km 伝搬した後には 21 dB に拡大している。これは、空気が高い音を優先的に吸収した結果、受音点に届く音がさらに低周波寄りになったためである。A 特性はもともと低い音を軽く扱うフィルタであるため、伝搬後の音場ではますます多くのエネルギーを「見落とす」ことになる。

第三に、冬と夏で結果がほとんど変わらない。Z 特性と C 特性の総合レベルは季節を問わずほぼ同じ (差 0.1 dB 以内) であり、A 特性でも差は 0.7 dB 以下である。なぜかという、受音レベルを支配しているのは 10 Hz-200 Hz の低周波帯域であり、この帯域の大気吸収は気温や湿度にほとんど左右されないためである。このため、以降の計算では ISO 9613-2 の基準条件 (10°C・70%) を代表値として使用する。

以上は ISO 9613-2 の枠組み内 (すなわち風下屈折もダクト効果も一切考慮していない) での結果である。ISO 9613-2 は風速勾配や温度逆転に伴う音波の屈折を扱えないため、実際の伝搬条件では上記の値を下限とするさらに高い受音レベルが生じうる。次節では、この限界を補うための伝搬補正手法を説明する。

## 11.2 ISO 9613-2 を超える伝搬増幅要因：風と気温がもたらす「音の増幅」

前節の ISO 9613-2 計算は、「適度な順風条件」(moderate downwind conditions) を前提としている。しかし、ISO 9613-2 は風速勾配や温度勾配の強さを陽に扱わず、距離に対する減衰は常に球面拡散 ( $20 \log_{10} r$ ) で計算される。第 7.2 節で詳述した通り、現実の大気では風速勾配と温度逆転が音波の経路を系統的に下向きに曲げ、音響ダクトを形成して球面拡散よりも小さな減衰をもたらす。本節では、この効果を帯域別に定量化し、ISO 9613-2 ベースラインに上乘せする補正を導出する。

### 11.2.1 4つの伝搬シナリオの定義

第 7.2 節の段落 (5)–(7) で述べた通り、音の下方屈折は風速勾配と温度逆転の 2つの要因によって生じ、両者は加算的に作用する。本計算では、この 2つの要因をそれぞれ 2段階 (弱・強) に設定し、その組み合わせにより 4つの伝搬シナリオを定義する。

**風速勾配の 2つのレジーム** 第 9.4.2 節で述べた通り、風速の高さ依存性はべき乗則  $V(z) = V_{\text{ref}}(z/z_{\text{ref}})^{\alpha}$  で近似され、 $\alpha$  が大きいほど上空と地表の風速差が大きい。

- **混合大気** ( $\alpha \approx 0.15$ )：第 9.4.2 節で NEDO データから求めた値であり、日中の対流混合時に対応する。
- **安定大気** ( $\alpha \approx 0.40$ )：Van den Berg (2004) がオランダの陸上風車で実測した安定成層時の値であり、夜間の放射冷却時や、夕方以降の海上安定成層で典型的に発生する。

Van den Berg (2004) は、安定大気条件下では夜間の受音レベルが昼間の予測値を最大 15 dB 上回ることを実測した。その原因は、地表では風が弱まり「穏やかな夜」に感じられる一方で、ハブ高さでは強風が維持されるため、風車が最大騒音を放射し (約 +8 dB)、同時に強い風速勾配が伝搬増幅をもたらす (約 +7 dB) という「二重の悪条件」が成立するためである。

ここで注目すべき矛盾がある。風車の騒音を測定する国際規格 (IEC 61400-11) は、地上 10 m で 11 m/s の風速を基準としている。この基準は暗黙に混合大気 ( $\alpha \approx 0.15$ ) を前提としており、地上 10 m で 11 m/s ならハブ高さでは約 16.5 m/s (定格風速をはるかに超える) に相当する。しかし安定大気 ( $\alpha = 0.40$ ) では状況が逆転する。ハブ高さの風速が定格風速 (約 10.5 m/s) に達し風車が最大騒音を出していても、地上 10 m ではわずか 3.6 m/s にすぎない。つまり、**住民がもっとも強い騒音に曝される条件は、IEC の基準では「風が弱すぎて測定対象外」とされる**。Van den Berg (2004) が指摘したこの矛盾が、いすみ市沖でも同様に当てはまる。

### 温度逆転の 2つのレジーム

- **弱い逆転** ( $\Delta T \approx +1^{\circ}\text{C} - 2^{\circ}\text{C}$ )：年間を通じて海面上で形成される穏やかな逆転。
- **強い逆転** ( $\Delta T \approx +3^{\circ}\text{C} - 5^{\circ}\text{C}$ )：夏季夜間に冷たい親潮系海水上に暖かい南寄りの空気が流入したとき等に形成。

**4つのシナリオ** 以上の 2つの要因の組み合わせにより、4つの伝搬シナリオが定義される。これらは純粋に**伝搬条件** (音がどれだけ増幅されるか) を記述するものであり、音源レベル (風車が

どれだけ強い音を出すか)とは独立である。

	弱い逆転 (+1°C-2°C)	強い逆転 (+3°C-5°C)
混合大気 ( $\alpha \approx 0.15$ )	ケース1：日中の穏やかな海風。大気は混合されており、温度逆転もほぼない。ISO 9613-2 に最も近い条件。	ケース3：温度逆転が発達した穏やかな夜。冷たい海面上に暖かい空気が流入するが、大気は比較的よく混合されている。
安定大気 ( $\alpha \approx 0.40$ )	ケース2：安定成層下の強い風速勾配。上空で風が強いが温度逆転は弱い。	ケース4：最強伝搬条件。安定成層下で強い風速勾配と強い温度逆転が同時に作用する。

音源レベルは伝搬条件とは独立したパラメータである。風車の音響パワーはハブ高さの風速で決まり、定格風速(約 10.5 m/s)以上ではフル出力 ( $L_{WA} = 120$  dB(A))、年間平均風速(約 8 m/s)では約 -5 dB 低い(第 10.4 節参照)。伝搬計算において、すべての補正(ダクト効果、屈折集音、海面反射)は音源レベルに依存しない加算項であるため、音源レベルの変化はすべての重み付け合計値(dB(Z)、dB(A)、dB(C)、dB(G))に等しく反映される。したがって、以下ではフル出力条件で計算を行い、年間平均風速条件の結果は各合計値から約 5 dB を差し引くことで得られる。

各シナリオの出現頻度の厳密な推定にはいすみ市沖の実測データが必要であるが、第 9 章の気象分析および一般的な温帯沿岸の気候学的知見から、以下のように定性的に特徴づけられる。

- ・ ケース1 (混合大気・弱い逆転)：もっとも頻繁に生じる穏やかな昼間条件。
- ・ ケース2 (安定大気・弱い逆転)：夕方以降や冬季の放射冷却時に日常的に発生する条件。
- ・ ケース3 (混合大気・強い逆転)：4つのシナリオのうちもっとも出現頻度が低いとみられる条件。
- ・ ケース4 (安定大気・強い逆転)：夏季夜間に発生しやすい条件。第 9 章で示した通り、住民の就寝時間帯と一致しやすい。

### 11.2.2 有効拡散指数：文献に基づく帯域別の値

第 7.2 節の段落(7)では、音響ダクトの2つの極限を紹介した。ダクトがない自由空間では、音は球面状に広がり、距離  $r$  での音圧レベルは  $20 \log_{10} r$  に従って減衰する(距離が2倍になるときに 6 dB 減衰)。一方、完全なダクト内では音は円筒状にしか広がれず、減衰は  $10 \log_{10} r$  (距離2倍で 3 dB 減衰)にとどまる。現実の大気はこの2つの極限の間にある。ダクトの閉じ込めが部分的であったり、乱流によりエネルギーの一部がダクト外に漏れ出したりするため、実際の減衰は  $10n \log_{10} r$  の形をとり、 $n$  は 1 (完全円筒拡散) から 2 (完全球面拡散) の間の連続的な値をとる。この  $n$  を「有効拡散指数」と呼ぶ。 $n$  が 2 に近いほど ISO 9613-2 の想定に近く、1 に近いほどダクトによる閉じ込めが強い。

$n$  は周波数帯域によっても異なる。低い音ほど効率的にダクト内に閉じ込められ、高い音は一部がダクト外に漏れ出す。ダクトの厚さ(逆転層の高さ、典型的には 50~300 m)に対して波長が同程度かそれ以下の音が効率的に閉じ込められるため、200 Hz 以下の低周波音は高い閉じ込め効率(低い  $n$ )を示す。

$n_i$  の導出方法  $n$  の値を第一原理から計算するには、Nord2000 や PE 法のような高度な数値モデルが必要であり、本計算の範囲を超える。そこで本計算では、洋上音響伝搬に関する 4 つの独立した文献から得られた実測値・計算値に基づいて、4 つのシナリオの  $n_i$  を以下のように設定した。

- **ケース 4** (安定大気・強い逆転) の値は、Konishi et al. (*Acoust. Sci. & Tech.*, 37(3), 2016) が東京湾・相模湾で夏季安定成層下に実測した  $n = 1.5\text{--}1.8$  を直接の基礎とした。いすみ市沖と同じ日本近海の温帯沿岸環境における実測値である。
- **ケース 2** (安定大気・弱い逆転) の値は、Makarewicz & Golebiewski (*J. Acoust. Soc. Am.*, 139(4), 2016) の理論解析に基づく。同論文は低層ジェットによる風下屈折を解析し、強い風速勾配 ( $\alpha = 0.40$ ) 下では遷移距離 (数百メートル~1 km) 以遠で球面拡散から円筒拡散への移行が生じることを定量化した。ケース 2 はケース 4 より温度逆転の寄与が小さいため、 $n$  はケース 4 より 2.00 に近い値をとる。
- **ケース 3** (混合大気・強い逆転) の値は、ケース 4 と同じく Konishi et al. の実測範囲を基礎とするが、風速勾配の寄与が小さい ( $\alpha = 0.15$ ) ため、 $n$  はケース 4 より 2.00 に近い値に設定した。
- **ケース 1** (混合大気・弱い逆転) の値は、2.00 (ISO 9613-2 の球面拡散) にもっとも近い値に設定した。風速勾配も温度逆転もいずれも弱く、ダクト形成条件をほとんど満たさないためである。

帯域依存性 (低い音ほど小さい  $n_i$ ) は、上述の導波管理論から物理的に必然であり、Barlas et al. (*J. Acoust. Soc. Am.*, 142(5), 2017) の PE 法による数値計算でも確認されている。また、Søndergaard & Plovsing (Danish EPA Project No. 1016, 2005) は Nord2000 を用いた洋上風車騒音伝搬の計算により、ISO 9613-2 の球面拡散を大幅に下回る減衰率が海上で生じることを確認しており、デンマーク環境保護庁が BEK 135 規則を策定した直接の根拠となっている。

以上の根拠に基づく帯域別の有効拡散指数  $n_i$  (海上区間) を表 17 にまとめる。

表 17: 海上区間の帯域別有効拡散指数  $n_i$  (4 シナリオ)

帯域	ケース 1	ケース 2	ケース 3	ケース 4
	$\alpha=0.15$ /弱逆転	$\alpha=0.40$ /弱逆転	$\alpha=0.15$ /強逆転	$\alpha=0.40$ /強逆転
10 Hz–50 Hz (インフラサウンド)	1.92	1.75	1.72	1.52
63 Hz–200 Hz (低周波)	1.93	1.78	1.75	1.58
250 Hz–500 Hz (中周波)	1.95	1.83	1.82	1.68
630 Hz 以上 (高周波)	1.97	1.88	1.88	1.78

$n_i = 2.00$  (ISO 9613-2 の想定) からの偏差が大きいほど、その帯域で ISO 9613-2 が過小評価する度合いが大きい。もっとも大きな偏差はケース 4 の 10~50 Hz 帯域 ( $n = 1.52$ 、球面拡散と円筒拡散のほぼ中間) であり、もっとも小さな偏差はケース 1 の 630 Hz 以上 ( $n = 1.97$ 、ほぼ球面拡散) である。

帯域ごとのダクトによる増幅量は、以下の式で計算される。

$$\Delta L_{\text{duct},i}(r) = (2 - n_i) \times 10 \log_{10} \left( \frac{r}{r_0} \right)$$

ここで  $r$  は伝搬距離、 $r_0 = 1 \text{ km}$  はダクトが有効に形成される基準距離である。 $r < r_0$  ではダクトは未形成であり、増幅はゼロとする。

参考として、ケース 4（最強伝搬条件）における 10~50 Hz 帯域の増幅量は、前列風車（3 km）で +2.3 dB、後列風車（6 km）で +3.7 dB となる。なお、これらの増幅量は上述の Konishi et al. (2016) の実測範囲 ( $n = 1.5\text{--}1.8$ ) および Makarewicz & Golebiewski (2016) の理論解析と定量的に整合する。

### 11.2.3 屈折集音効果：ダクトに入る前のエネルギー増幅

前項の有効拡散指数は、音がダクト内でどのように減衰するかを記述するものであり、ダクトが有効に形成される距離 ( $r_0 = 1 \text{ km}$ ) 以遠で作用する。しかし、伝搬増幅にはもう一つの要因がある。

ISO 9613-2 の球面拡散モデルでは、音源から放射された音は全方位に等しく広がると仮定する。しかし現実には、 $c_{\text{eff}}$  の鉛直勾配が存在すると、上方に向かうはずの音エネルギーが下方に屈折され、地面方向に集中する。これは懐中電灯で例えれば、全方向に拡散する裸電球（球面拡散）と、反射板で前方に集光した懐中電灯（屈折集音）の違いに相当する。光の総量は同じでも、前方の明るさはまったく異なる。

この「屈折集音効果」 $\Delta L_{\text{refrac},i}$  は、ダクト内の拡散指数変化とは独立した増幅であり、風速勾配と温度逆転の強さおよび周波数帯域に依存する。風速勾配 ( $\alpha$ ) が大きいほど上方への逸散が抑えられ、地上への集音が強まる。

4つのシナリオにおける帯域別の屈折集音効果  $\Delta L_{\text{refrac},i}$  を以下の表 18 にまとめる。表中の帯域別の値は、3つの根拠から導出した。第一に、Søndergaard & Plovsing (2005) の Nord2000 計算において、洋上風車からの風下伝搬で ISO 9613-2 の球面拡散仮定を超える音圧増加が帯域別に報告されており、63~200 Hz 帯域でもっとも大きな超過が確認されている。第二に、Barlas et al. (2017) は PE 法を用いた数値計算により、安定大気条件下で下方屈折が音のエネルギーを地表方向に集中させる効果を帯域別に定量化しており、低~中周波帯域で +3 ~ 6 dB の集音効果を報告している。第三に、Van den Berg (2004) は実測により夜間安定大気条件下での合計伝搬増幅（音源レベル増加分を差し引いた伝搬効果のみ）が約 +7 dB に達することを確認しており、本計算のケース 4 における屈折集音とダクト増幅の合計値 (+5.0 dB + 2.0 dB = +7.0 dB) はこの実測値と一致する。63~200 Hz 帯域でもっとも強い集音効果を示すのは、この帯域の波長（約 1.7~5.4 m）が大気境界層の鉛直構造（逆転層の厚さ 50~300 m、風速勾配のスケール高さ）ともっとも強く相互作用するためである。不確実性は各値  $\pm 1.5 \text{ dB}$  と推定する。

表 18: 屈折集音効果  $\Delta L_{\text{refrac},i}$  (中央推定値、不確実性  $\pm 1.5 \text{ dB}$ )

帯域	ケース 1	ケース 2	ケース 3	ケース 4
10 Hz–50 Hz	+1.0 dB	+2.5 dB	+2.0 dB	+3.5 dB
63 Hz–200 Hz	+1.5 dB	+4.0 dB	+2.5 dB	+5.0 dB
250 Hz–500 Hz	+1.0 dB	+3.0 dB	+2.0 dB	+4.0 dB
630 Hz 以上	+0.5 dB	+1.5 dB	+1.0 dB	+2.0 dB

ケース 2（強風速勾配条件）でも、63~200 Hz 帯域で +4.0 dB の屈折集音と +1.0 dB のダクト拡散変化を合わせて +5.0 dB の増幅となる。これは「特殊な夏季夜間条件」ではなく、年間を通じて風の強い日に生じる日常的な増幅である。

#### 11.2.4 海面反射の帯域による違い

前節の ISO 9613-2 計算では、海面反射として全帯域一律に 3 dB（エネルギーの倍増）を適用した。この仮定は鏡のように滑らかな海面を前提としており、波浪が小さい条件（ケース 3・4：逆転が強い＝風に近い海面）ではおおむね妥当である。

しかし、波浪がある条件（ケース 1・2：弱い逆転＝風浪あり）では、波浪の高さが音の波長と同程度になる中高周波帯域で散乱が生じ、反射効率が低下する。

- **低い音（200 Hz 以下、波長 1.7 m 以上）**：海面の波浪（典型的には 0.5~2 m）は波長より小さいか同程度であり、いずれの条件でも反射増幅は +3 dB に近い。補正不要。
- **中くらいの音（250~500 Hz）**：波浪条件（ケース 1・2）では散乱により -1 dB の補正を適用する。風条件（ケース 3・4）では補正不要。
- **高い音（630 Hz 以上）**：波浪条件（ケース 1・2）では -2 dB の補正。風条件（ケース 3・4）では -0.5 dB の補正。

これらの補正  $\Delta L_{\text{sea},i}$  は、ISO 9613-2 ベースラインにすでに含まれている +3 dB からの差分として適用する。

#### 11.2.5 海岸線から内陸への伝搬

後続のシミュレーションでは、海岸線上だけでなく内陸 3 km および内陸 5 km の受音点でも計算を行う。海岸線に到達した音が内陸へさらに進むとき、海上とはいくつかの条件が変わる。

**ダクト効果の変化** 厳密な意味での海上音響ダクト（冷たい海面上の温度逆転層と海面反射の繰り返しによる閉じ込め）は、海岸線で終わる。ダクトの「床」である冷たい海面がなくなるためである。

しかし、内陸でのダクト効果が完全にゼロになるわけではない。2つの理由がある。

第一に、海風前線（sea breeze front）は海岸線を越えて内陸 10~30 km まで進入する。海風前線の背後には、冷たい海洋性空気が大陸上の暖かい空気の下に潜り込む楔状の構造が形成される。これは海上のダクトほど緊密ではないが、音を下方に屈折させる鉛直勾配を内陸でも維持する。

第二に、夏季の夜間には、海風とは独立して、陸上で**放射冷却**による温度逆転が形成される。晴天で風が弱い夜には、地表面からの赤外放射により地面が急速に冷却され、地上 50~200 m の範囲に独自の逆転層が発達する。この陸上の夜間逆転は、海上のダクトとは異なるメカニズムで形成されるが、音響的には類似した効果（下方屈折による伝搬増幅）を生じさせる。

以上の2つの効果を反映し、内陸区間の有効拡散指数  $n_i$  を以下の通り設定する。

弱い逆転の場合（ケース 1・2）、陸上はほぼ球面拡散（ $n \approx 2.00$ ）であり、ダクト効果は実質的に無視できる。強い逆転の場合（ケース 3・4）、海風浸透と放射冷却により  $n$  は海上ほどではないが 2.00 を下回る。特にインフラサウンド帯域（ $n = 1.85$ ）では、内陸 5 km まで無視できない増幅が残る。

表 19: 陸上区間の帯域別有効拡散指数  $n_i$ 

帯域	弱い逆転 (ケース 1・2)	強い逆転 (ケース 3・4)
10 Hz–50 Hz	1.97	1.85
63 Hz–200 Hz	1.98	1.88
250 Hz–500 Hz	1.99	1.93
630 Hz 以上	2.00	1.96

**地面の吸音効果** 内陸の地面（芝地、農地、土壌）は海面と異なり音を部分的に吸収する。低周波音（200 Hz 以下）は波長が長く地面の吸音特性に鈍感であるため、海上から陸上への変化は、もともと問題となる低周波成分にはほとんど影響しない。中高周波帯域では地面による吸音が増大するが、これらの帯域は大気吸収によりすでに大幅に減衰しているため、地面効果の寄与は副次的である。具体的な地面効果の適用方法は第 12.2.1 節で述べる。

**地形による遮蔽の限界** いすみ市の内陸部は比較的平坦な低い丘陵地であるが、第 7.2 節の段落 (4) で述べたように、波長が数メートル以上の低周波音は丘陵や建物の背後に容易に回り込む（回折する）。風車騒音の低周波成分に対しては、通常の地形的な障害物はほぼ透明であり、遮音効果は期待できない。

#### 11.2.6 帯域別補正の適用手順

以上の帯域別補正を、前節の ISO 9613-2 計算に上乘せする手順をまとめる。各 1/3 オクターブバンド  $i$  について、付録の ISO 9613-2 受音レベル  $L_{p,i}^{\text{ISO}}$ （フル出力条件）を出発点とする。

**ステップ 1：屈折集音効果** 表 18 の帯域別屈折集音効果  $\Delta L_{\text{refrac},i}$  を加算する。

**ステップ 2：ダクト増幅** 各風車について、海上区間の距離  $r_{\text{sea}}$  と陸上区間の距離  $r_{\text{land}}$  を算出する。ダクト増幅は、海上区間と陸上区間のそれぞれで有効拡散指数  $n_i$  を適用して計算する。

$$\Delta L_{\text{duct},i} = (2 - n_{i,\text{sea}}) \times 10 \log_{10} \left( \frac{r_{\text{sea}}}{r_0} \right) + (2 - n_{i,\text{land}}) \times 10 \log_{10} \left( \frac{r_{\text{sea}} + r_{\text{land}}}{r_{\text{sea}}} \right)$$

ただし  $r_{\text{sea}} > r_0$  の場合のみ。海岸線受音点では  $r_{\text{land}} = 0$  であり、第 2 項は消える。

**ステップ 3：海面反射補正** ISO 9613-2 ベースラインに含まれる全帯域一律 +3 dB の海面反射に対する差分  $\Delta L_{\text{sea},i}$  を適用する（前項参照）。

**ステップ 4：補正後受音レベル**

$$L_{p,i}^{\text{corr}} = L_{p,i}^{\text{ISO}} + \Delta L_{\text{refrac},i} + \Delta L_{\text{duct},i} + \Delta L_{\text{sea},i}$$

すべての補正項は音源レベルに依存しない加算項であるため、上式はフル出力条件の  $L_{p,i}^{\text{ISO}}$  に直接適用する。年間平均風速条件の結果は、最終的な重み付け合計値から約 5 dB を差し引くことで得られる（第 10.4 節参照）。

**ステップ5：エネルギー加算と重み付け** 全帯域の補正後レベルをエネルギー的に加算し、各重み付け（Z、A、C、G）の総合レベルを求める。

$$L_p^{(W)} = 10 \log_{10} \left( \sum_i 10^{(L_{p,i}^{\text{corr}} + W_i)/10} \right)$$

ここで  $W_i$  は各重み付け関数（A 特性、C 特性、G 特性、Z 特性（ $W_i = 0$ ））の帯域  $i$  における補正值である。

この手順により、ISO 9613-2 が扱える範囲（距離減衰・大気吸収・地面効果）と、ISO 9613-2 が扱えない範囲（風速勾配と温度逆転の複合効果）を、同一の 1/3 オクターブバンド計算のなかで統合的に評価できる。

### 11.2.7 この手法の位置づけと限界

本節で述べた手法は、ISO 9613-2 の結果に文献で確立された有効拡散指数を事後的に上乘せるものであり、Nord2000 や PE 法のように大気温度・風速プロファイルから音場を直接計算するものではない。したがって、以下の限界がある。

- 有効拡散指数は帯域グループごとの代表値であり、個々の 1/3 オクターブバンドの微細な周波数依存性は捕捉していない。
- 逆転層の厚さや風速の鉛直分布は文献の典型値に基づいており、いすみ市沖の実測データに基づくものではない。
- 内陸のダクト効果は海風浸透と放射冷却に基づく物理的推論であり、直接的な実測検証はない。

しかし、この手法には十分な根拠がある。第一に、各シナリオの有効拡散指数は、Konishi et al. (2016) の日本近海における実測値（ $n = 1.5\text{--}1.8$ ）、Makarewicz & Golebiewski (2016) の低層ジェットに関する理論解析、および Søndergaard & Plovsing (2005) の Nord2000 による洋上伝搬計算の結果から導出しており、ケース 4 の値（ $n = 1.52\text{--}1.78$ ）は Konishi らの実測範囲に含まれる。屈折集音効果については、Barlas et al. (2017) の PE 法計算および Van den Berg (2004) の実測データ（夜間の伝搬増幅約 +7dB）を根拠としている。第二に、「低い音ほど大きな増幅を受ける」という帯域依存性の方向は、導波管理論から物理的に必然であり、定性的に間違えることはない。第三に、いすみ市沖の気象条件（第 9 章）は、夏季に強い温度逆転と海風を形成しうることを示しており、ケース 4 は物理的に十分ありうるシナリオである。

もっとも重要なのは、これらの増幅を「ゼロ」と仮定すること（つまり ISO 9613-2 だけで評価を完結させること）のほうが、物理的に不合理だという点である。大気に風速勾配と温度勾配が存在する以上、屈折とダクト形成は避けられない物理現象であり、その影響を無視することは系統的な過小評価を意味する。デンマークがかつて ISO 9613-2 で洋上風力の騒音を予測し、稼働後に想定を大きく超える苦情を受けて Nord2000 への移行を義務付けた経緯（第 5.6.1 節参照）は、まさにこの認識に基づくものである。そして 4 つのシナリオの意義は、ケース 4（最強伝搬条件）の数値だけにあるのではない。ケース 2（強風速勾配条件）は年間を通じて頻繁に発生する普通の気象条件であり、それだけで ISO 9613-2 の予測を有意に上回る伝搬増幅を生じさせる。夏季夜間の

特殊条件を持ち出すまでもなく、日常的な気象条件のもとで ISO 9613-2 は過小評価している。

### 11.3 理論上限値の検証：完全円筒拡散

前節の4つのシナリオは、有効拡散指数  $n$  が 1.52–1.97 の範囲にある現実的な伝搬条件を記述した。本節では、これらの推定値が物理的に妥当な範囲にあることを検証するため、理論的な上限値として  $n = 1$  の完全な円筒拡散を仮定した計算手法を説明する。

完全円筒拡散では、音源からの音響エネルギーはダクトの高さ  $h$  の範囲に閉じ込められ、水平方向にのみ広がる。このとき、距離  $r$  における音圧レベルは

$$L_{p,i}^{\text{cyl}} = L_{W,i} - 10 \log_{10}(2\pi r h) - \alpha_i r + 3 \text{ dB}$$

で与えられる。ここで  $L_{W,i}$  は各帯域の音響パワーレベル（付録の ISO 9613-2 計算から逆算）、 $h$  はダクトの有効高さ、 $\alpha_i$  は帯域  $i$  の大気吸収係数（ISO 9613-1、10°C・70%で算出）である。3 dB は海面反射の増幅である。

通常の球面拡散では音圧は  $L_{W,i} - 10 \log_{10}(4\pi r^2)$  で減衰するため、円筒拡散との差は

$$\Delta L_{\text{cyl}} = 10 \log_{10} \left( \frac{2r}{h} \right)$$

となる。すなわち、距離  $r$  が大きいほど、またダクト高さ  $h$  が小さいほど、円筒拡散の「利得」が大きくなる。いすみ市沖の典型的な逆転層の厚さ  $h = 150 \text{ m}$  を仮定して計算を行い、結果を第 12 章で提示する。なお、15~18 MW 級風車の全高は約 300 m であるため、 $h = 150 \text{ m}$  のダクトは風車の下半分のみを包含する。ダクト高さを風車全高の 300 m に設定すれば音源全体が捕捉されるが、ダクトが厚くなる分だけエネルギーが広い鉛直範囲に分散し、受音レベルは  $10 \log_{10}(300/150) = 3 \text{ dB}$  低下する。逆に、 $h = 150 \text{ m}$  のダクトでは音源の上半分がダクト外に漏れるため、捕捉されるエネルギーは同程度（約 3 dB）減少する。いずれの仮定をとっても結果は約 3 dB の範囲で一致するため、 $h = 150 \text{ m}$  の選択が計算結果に大きな偏りを生じさせることはない。

完全円筒拡散は物理的な上限値であり、現実はこの条件が長時間持続することは考えにくい。しかし、非常に強い温度逆転（+8°C–10°C）と強い風速勾配が同時に作用し、逆転層が薄く（ $h < 100 \text{ m}$ ）、大気乱流が極度に弱い条件では、有効拡散指数は  $n = 1.2$ – $1.3$  まで低下しうる。4つのシナリオの計算結果がこの上限からどの程度のマージンを持つかを確認することで、推定の妥当性を検証する。

## 12. 計算結果と国際基準との照合

本章では、前章で説明した3つの計算手法（ISO 9613-2 ベースライン、4シナリオの伝搬補正モデル、完全円筒拡散の理論上限）を、いすみ市沖に計画されている3つの風車配置に適用し、その結果を国際的な疫学データおよび規制基準と照合する。

なお、本章のシミュレーション結果を解釈するにあたり、波浪によるマスキング効果の限界に留意する必要がある。海岸線付近では波浪音が風車騒音を部分的に遮蔽しうるが、内陸に向かうにつれてこの遮蔽効果は急速に減衰する。一方、18 MW 級風車が発生する騒音は低周波成分が卓越しており、大気吸収が極めて小さいため長距離にわたって減衰しにくい。その結果、海岸線から数百メートル以上内陸に入ると、波浪音はほとんど聞こえなくなる一方で風車騒音は依然として到

達し、静寂な環境に低周波騒音のみが侵入する状況が生じうる。欧州の近岸風力発電所（第2章参照）では、別荘地や砂州など海岸に面し内陸集落の少ない立地が選定されることでこの問題が回避されているが、いすみ市の場合は海岸線の背後に住宅地が広がっており、マスキング効果に依存した騒音影響の軽減は期待できない。以下のシミュレーションでは、海岸線に加えて内陸3 km および内陸5 km 地点での受音レベルも算出し、この問題を定量的に評価する。

## 12.1 分析対象の配置と受音点

本章の分析対象は3つの風車配置案である。A案(15 MW×35基= 525 MW)およびB案(12 MW×42基= 504 MW)は、4社コンソーシアムが計画段階環境配慮書で提示した配置であり、第6章で予測値の再現検証を行った。本節ではこれに加えて、第3の配置案（C案）を導入する。3つの配置案それぞれについて、第11章で説明した3つの計算手法（ISO 9613-2 ベースライン（第11.1節）、4シナリオの伝搬補正モデル（第11.2節）、完全円筒拡散の理論上限（第11.3節））を適用し、結果を順次提示する。

### 12.1.1 配置の想定

正確な配置が不明であるため、いすみ市沖の物理的制約に基づいて合理的な配置を想定した。想定根拠は以下の通りである。

- **海底地形と基礎方式**：いすみ市沖では、離岸距離3 kmで水深約20~25 m、6 kmで約35~45 mである。着床式基礎の技術的制約（水深50 m以下）を考慮すると、風車の設置可能範囲は離岸距離約3~6 kmの帯状の海域に限定される。
- **ローター直径**：18 MW級風車のローター直径は約260 mと想定される（Vestas V236-15MWのローター直径236 mを基準に、出力比のスケールリングを考慮した推定）。
- **配置間隔**：横方向間隔1.25 kmはローター直径の約4.8倍に相当する。これはウェイク損失を許容する密な配置であるが、洋上風力発電プロジェクトとして非現実的な値ではない。列間距離1.5 kmはローター直径の約5.8倍であり、通常推奨される7~10倍より狭いが、水深制約のもとで全風車を浅い海域にとどめるためにはやむを得ない選択である。

以上の制約条件から、以下の3列配置を想定した。

列	離岸距離	基数	横方向間隔	列幅
前列	3 km	8 基	1.25 km	8.75 km
中列	4.5 km	9 基	1.25 km	10.0 km
後列	6 km	8 基	1.25 km	8.75 km
合計	—	25 基	—	(450 MW)

受音点は、海岸線の中央付近（アレイの中心正面）に設定する。これは最も多くの風車からの音が集中する最悪地点に相当する。受音点は海岸線上（0 km）、内陸3 km、および内陸5 kmの3地点とする。なお、いすみ市の内陸部は低い丘陵地であるが、低周波音は回折により容易に丘陵を回り込むため、地形遮蔽の効果はほぼ期待できない。

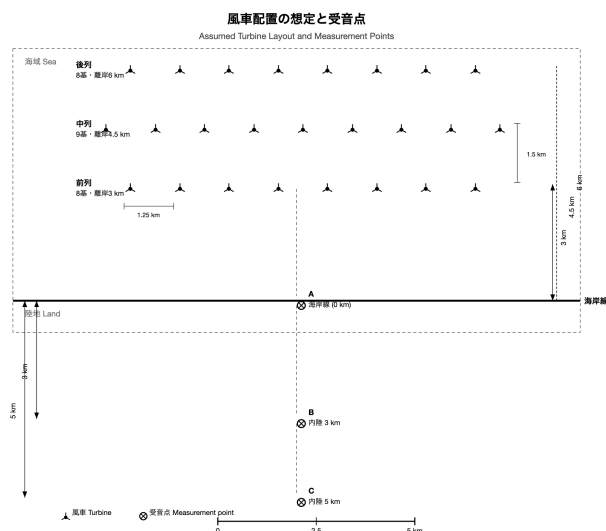


図 6: 18MW 級 25 基配置の想定と受音点。前列（離岸 3 km、8 基）、中列（離岸 4.5 km、9 基）、後列（離岸 6 km、8 基）の 3 列配置を想定した。受音点 A（海岸線）、B（内陸 3 km）、C（内陸 5 km）はアレイ中心の正面に位置し、最も多くの風車からの音が集中する地点に相当する。

## 12.2 全配置・全受音点における ISO 9613-2 計算結果と国際基準との照合

前節で導入した 3 つの配置案（A 案・B 案・C 案）のすべてについて、海岸線・内陸 3 km・内陸 5 km の 3 受音点における ISO 9613-2 計算結果を一覧し、第 3 章の疫学データおよび国際的な低周波音診断基準と照合する。計算手法は第 11.1 節で説明した ISO 9613-2 の標準的な枠組みに基づいており、伝搬補正を加えた結果は第 12.3 節で提示する。

ISO 9613-2 は国際的にもっとも広く使われている屋外騒音の計算モデルであり、音が距離とともにどれだけ弱くなるかを、周波数帯域ごとに 3 つの要素から求める。(1) 距離が 2 倍になると音が 6 dB 下がるという幾何学的な広がり（球面拡散）、(2) 空気が音のエネルギーを吸収する効果（高い音ほど強く吸収される）、(3) 海面や地面からの反射。ただし、このモデルは「適度な順風条件」を前提としており、風の強さの鉛直分布や温度逆転による音の屈折は考慮しない。したがって、以下の結果はもっとも保守的（つまり実際よりも低め）のベースライン推定である。

### 12.2.1 計算条件

気象条件は 10°C・相対湿度 70%のみを使用する。第 11.1.1 節で確認した通り、夏季条件（20°C/80%）との差は A 特性で 0.7 dB 以下であり、結果に実質的な影響を与えないためである。

音源レベルは 3 配置とも同一の Vestas V236-15MW スペクトル ( $L_{WA} = 120 \text{ dB(A)}$ 、安全マージン 2 dB 含む) を使用する。C 案の 18 MW 級風車は 15 MW 機よりも音源レベルが約 2 dB 高い可能性があるが（第 10.3 節参照）、まず 120 dB(A) で統一計算を行う。C 案については、ベース値と +2 dB 補正後の両方を表中に示す（括弧書き、または注記による）。伝搬経路の物理特性は音源レベルに依存しないため、2 dB は受音点のすべての重み付け値に一律に加算される。

内陸受音点では、伝搬経路が海上区間と陸上区間に分かれる。海上区間は前節と同じく  $G = 0$ （硬い反射面）で全帯域 3 dB の反射増幅を適用する（第 11.1 節で述べた通り、低周波帯域では干涉的加算により実際の増幅が 6 dB に近づく可能性があるが、ここでも保守的に 3 dB を維持する）。陸上区間では、地表面が芝地や農地など吸音性の高い材質に変わるため、周波数帯域に応じた地面

効果を適用した。低周波音（200 Hz 以下）は波長が長く地面の吸音特性に鈍感であるため、陸上でもほぼ反射的に振る舞う。中周波帯域（200~1000 Hz）では軟らかい地面による吸音が始まり、高周波帯域（1 kHz 以上）ではさらに吸音が増大する。海上区間と陸上区間の寄与は、経路長に応じた比率で加重平均した。内陸 3 km 受音点では伝搬経路の約 50%が海上・50%が陸上、内陸 5 km では約 38%が海上・62%が陸上となる。

### 12.2.2 計算結果の総括

表 20 に、全 9 組み合わせの計算結果をまとめる。C 案の括弧内の値は、18 MW 機の音源レベル補正（+2 dB）を適用した場合である。

表 20: ISO 9613-2 計算結果の総括：3 配置 × 3 受音点（10 °C/70%、 $L_{WA} = 120 \text{ dB(A)}$ ）

配置	受音点	$L_p(\text{Z})$ dB	$L_p(\text{A})$ dB(A)	$L_p(\text{C})$ dB(C)	$L_p(\text{G})$ dB(G)	Z-A dB	C-A dB
A 案 (15MW×35 基)	海岸線	65.9	45.0	61.9	64.7	20.9	16.9
A 案	内陸 3 km	61.5	37.5	57.1	60.5	24.0	19.6
A 案	内陸 5 km	59.4	34.0	54.9	58.5	25.4	20.9
B 案 (12MW×42 基)	海岸線	66.5	45.7	62.5	65.3	20.8	16.8
B 案	内陸 3 km	62.2	38.2	57.8	61.2	24.0	19.6
B 案	内陸 5 km	60.1	34.7	55.6	59.2	25.4	20.9
C 案 (18MW×25 基)	海岸線	65.1	44.6	61.1	63.9	20.5	16.5
(+2 dB の場合)		(67.1)	(46.6)	(63.1)	(65.9)		
C 案	内陸 3 km	60.3	36.6	56.0	59.3	23.7	19.4
(+2 dB の場合)		(62.3)	(38.6)	(58.0)	(61.3)		
C 案	内陸 5 km	58.2	32.9	53.7	57.2	25.3	20.8
(+2 dB の場合)		(60.2)	(34.9)	(55.7)	(59.2)		

### 12.2.3 低周波帯域の受音レベル：環境省「手引書」参照値との照合

表 20 は総合レベルを示したが、1/3 オクターブバンド別に見ると、低周波帯域の状況はさらに深刻である。以下の表に、各配置・各受音点における 40~80 Hz 帯域の Z 特性受音レベルと、環境省「低周波音問題対応の手引書」（2004 年）の心身に係る苦情に関する参照値（第 5 節）との比較を示す。

表 21: ISO 9613-2 ベースライン：低周波帯域の受音レベルと手引書参照値の比較（Z 特性、dB）。太字は参照値超過。全帯域の詳細データは付録 A および B に掲載。

配置	受音点	40 Hz (参照値 57)	50 Hz (参照値 52)	63 Hz (参照値 47)	80 Hz (参照値 41)
A 案 (15MW×35 基)	海岸線	53.8	<b>53.6 (+1.6)</b>	<b>53.4 (+6.4)</b>	<b>52.1 (+11.1)</b>
A 案	内陸 3 km	49.5	49.3	<b>48.9 (+1.9)</b>	<b>47.4 (+6.4)</b>
A 案	内陸 5 km	47.4	47.2	46.7	<b>45.1 (+4.1)</b>
B 案 (12MW×42 基)	海岸線	54.4	<b>54.3 (+2.3)</b>	<b>54.1 (+7.1)</b>	<b>52.7 (+11.7)</b>
B 案	内陸 3 km	50.2	49.9	<b>49.6 (+2.6)</b>	<b>48.0 (+7.0)</b>
B 案	内陸 5 km	48.0	47.8	47.3	<b>45.7 (+4.7)</b>
C 案 (18MW×25 基)	海岸線	53.0	<b>52.9 (+0.9)</b>	<b>52.7 (+5.7)</b>	<b>51.3 (+10.3)</b>
(+2 dB の場合)		55.0	<b>54.9 (+2.9)</b>	<b>54.7 (+7.7)</b>	<b>53.3 (+12.3)</b>
C 案	内陸 3 km	48.3	48.1	<b>47.8 (+0.8)</b>	<b>46.3 (+5.3)</b>
(+2 dB の場合)		50.3	50.1	<b>49.8 (+2.8)</b>	<b>48.3 (+7.3)</b>
C 案	内陸 5 km	46.2	45.9	45.5	<b>43.8 (+2.8)</b>
(+2 dB の場合)		48.2	47.9	<b>47.5 (+0.5)</b>	<b>45.8 (+4.8)</b>

この表が示す事実は明快である。

海岸線では、50 Hz 以上の全帯域で全配置が参照値を超過する。80 Hz での超過量は 10.3~12.3 dB

(参照値の約4倍のエネルギーに相当する)であり、「境界的」や「わずかな超過」ではなく**大幅かつ系統的な超過**である。

内陸3kmでも、63Hz以上で全配置が参照値を超過する。80Hzでの超過量は6.4~7.3dBであり、依然として参照値の2倍以上のエネルギーである。

内陸5km(風車から8km以上離れた地点ですら、80Hzで**全配置が参照値を超過**する(C案ベースで2.8dB、+2dB補正後で4.8dB)。+2dB補正後のC案では63Hzでも参照値を超過する。

きわめて重要なのは、これらの値は伝搬補正を一切適用していないISO 9613-2のベースライン計算の結果であるという点だ。風下屈折もダクト効果も温度逆転も考慮していない。すなわち、この超過は伝搬モデルの選択や気象条件の仮定に依存しない、音源スペクトル、距離、大気吸収という**基本物理のみ**から導かれる結論である。どのような伝搬モデルを用いても、どのような気象条件を仮定しても、この帯域の参照値超過を解消することはできない。

なお、環境省は2017年12月27日の通知で「参照値以下であっても、低周波音を許容できないレベルである可能性が10%程度残されている」と明記している。本計算では参照値を**大幅に超過**しており、その影響はさらに深刻であることは自明である。

#### 12.2.4 日本の規制基準との照合

表20のA特性受音レベルを日本の規制基準と照合する。環境省の「騒音に係る環境基準」は、住居専用地域の夜間(22時~6時)に45dB(A)を上限としている。

海岸線における各配置の値は、A案45.0dB(A)、B案45.7dB(A)、C案44.6dB(A)(18MW補正後46.6dB(A))であり、**全配置が環境基準の45dB(A)に達するか超過**する。WHOの夜間ガイドライン(40dB(A))に対しては4.6~6.6dBの超過である。

すなわち、ISO 9613-2のベースライン計算だけで、本計画は**日本のA特性環境基準と環境省自身の手引書参照値の双方を同時に超過**する。A特性の超過は海岸線で発生し、参照値の超過は50Hz以上の全帯域で発生する。2つの異なる評価尺度が同時に問題を示しているという事実は、本計画の騒音影響が単一の指標の偏りや計算の不確実性に帰せられるものではなく、基本的な物理条件から必然的に生じるものであることを裏付けている。

#### 12.2.5 疫学データとの照合：不快感の定量的推定

第3.1節で整理した通り、風車騒音に対する住民の不快感は以下のような用量反応関係を示す。スウェーデン(Pedersen & Persson Waye, 2004, 2007)の調査では35~40dB(A)で約5%、40~45dB(A)で約18%が高度の不快感を報告し、45dB(A)を超えると不快感の報告率が急増する。オランダ(Pedersen et al., 2009)やカナダ(Michaud et al., 2016)の調査でも概ね一致する傾向が確認されている。また、日本国内の影山ら(2016)の調査では、屋外騒音レベル40.5dB(A)を閾値として不眠症の有病リスクが有意に増大し、41~45dB(A)の曝露群では有病率が約5倍に上昇することが報告されている。

これらの疫学知見に照らすと、表20の結果は以下のように評価される。

**海岸線**（離岸 3 km）：A 特性受音レベルは 44.6~46.6 dB(A) であり、不快感が急増する 45 dB(A) の閾値に達するかこれを上回る。疫学データに基づけば、18~50%の住民が高度の不快感を報告しうる水準である。また、影山らの報告した不眠症リスク増大の閾値（40.5 dB(A)）を大幅に超過しており、睡眠への影響が懸念される。

**内陸 3 km**（海岸線から 3 km）：A 特性受音レベルは 36.6~38.2 dB(A) であり、住民の約 5%が高度の不快感を報告する 35~40 dB(A) 帯に位置する。影山らの不眠症閾値（40.5 dB(A)）には達しないものの、これに近い水準である。風車から 6 km 以上離れた地点で、ISO 9613-2 の計算だけでこの水準に達する。

**内陸 5 km**（海岸線から 5 km）：A 特性受音レベルは 32.9~34.7 dB(A) であり、なお 1~5%程度の住民に高度の不快感が生じうる範囲にある。

**影響を増減させる要因** 上記の推定に対して、以下の 2 つの要因が影響を及ぼす。

第一に、年間平均風速条件（ハブ高さ約 8 m/s）では、音源レベルが定格出力時から約 4~6 dB 低下する（第 10.4 節）。しかし、この低下を適用しても海岸線で約 39~42 dB(A) であり、WHO ガイドライン 40 dB(A) 前後の水準が維持される。また、手引書参照値に対しては、平均風速条件でも 63 Hz 以上で超過が続く（63 Hz で 0.7~2.7 dB、80 Hz で 5.3~7.3 dB）。すなわち、「平均的な風の日」であっても低周波騒音問題は解消されない。

第二に、第 11.1 節で詳述した通り、本計算で採用した海面反射の 3 dB（非干渉加算）は保守的な仮定である。50~200 Hz の低周波帯域では、直接波と反射波がほぼ同位相で重なるため、実際の反射増幅は 6 dB（干渉加算）に近い。この差 3 dB が実現すると、上記のすべての受音レベルがさらに 3 dB 上昇し、超過幅はさらに拡大する。

第三に、これらの疫学調査は主に 0.5~3 MW 級の陸上風車を対象としたものであり、12~18 MW 級の巨大洋上風車に関する用量反応データは現時点で存在しない。大型風車はより強い低周波成分と振幅変調を伴うため、同じ dB(A) 値であってもより強い不快感を引き起こす可能性が高く、上記の不快感推定は過小評価と考えるべきである。

### 12.2.6 本節の結果の位置づけ：もっとも保守的な下限推定

本節で示した計算結果は、ISO 9613-2 に基づくもっとも保守的な推定であり、風下屈折、温度逆転、海上ダクト効果を一切含まない。すなわち、これらの値は強い風速勾配や温度逆転が発生していない穏やかな気象条件（年間を通じて発生しうるもっとも平穏な伝搬状態）に対応する。実際の気象条件下ではこれらの増幅要因により受音レベルはさらに数 dB~10 dB 以上上昇する（第 11.2 節で詳述）。本節の結果は、その増幅が加わる**前の下限値**として理解すべきである。

全帯域の詳細データは付録 A（A 案・B 案の海岸線）および付録 B（C 案の海岸線、全配置の内陸受音点）に掲載する。

## 12.3 伝搬補正モデルによるシミュレーション結果

第 11.2 節で定義した 4 つの伝搬シナリオ（ケース 1~4）に基づき、3 つの配置案 × 3 つの受音点のすべての組み合わせについて帯域別伝搬計算を実施した。本節ではその結果を提示し、国際的な

疫学データおよび規制基準と照合する。全帯域の詳細は付録（第 C 章）に収録し、ここでは総合レベルと低周波帯域の概要を示す。すべての値は中央推定であり、不確実性は ±1.5 dB 程度である。

前節の ISO 9613-2 ベースラインは、音が均一な大気中をまっすぐ進むことを前提としていた。本節では、第 11.2 節で定義した 4 つの伝搬シナリオ（風速勾配と温度逆転の強弱の組み合わせによる、ケース 1（穏やかな条件）からケース 4（最強伝搬条件）まで）に基づく補正を加えた結果を示す。各シナリオの物理的意味と出現頻度は第 11.2.2 節を参照されたい。

### 12.3.1 総合レベルの比較

表 22: A 案（15MW×35 基）：4 つの伝搬シナリオにおける補正後受音レベル（フル出力条件、年平均風速時は各値から約 5 dB を差し引く）

受音点	シナリオ	$L_p(Z)$ dB	$L_p(A)$ dB(A)	$L_p(C)$ dB(C)	$L_p(G)$ dB(G)	Z-A dB	C-A dB
海岸線	ケース 1	67.4	45.9	63.4	63.6	21.5	17.5
	ケース 2	69.9	48.8	66.2	66.0	21.1	17.4
	ケース 3	69.4	48.2	65.4	65.7	21.2	17.2
	ケース 4	72.1	51.2	68.4	68.2	20.9	17.2
内陸 3km	ケース 1	63.0	38.8	58.8	59.5	24.2	20.0
	ケース 2	65.6	41.9	61.6	61.9	23.7	19.7
	ケース 3	65.4	41.2	61.1	61.9	24.2	19.9
	ケース 4	68.1	44.4	64.0	64.4	23.7	19.6
内陸 5km	ケース 1	61.0	35.5	56.5	57.5	25.5	21.0
	ケース 2	63.5	38.7	59.3	59.9	24.8	20.6
	ケース 3	63.5	38.0	59.1	60.1	25.5	21.1
	ケース 4	66.2	41.2	61.9	62.6	25.0	20.7

表 23: B 案（12MW×42 基）：4 つの伝搬シナリオにおける補正後受音レベル（フル出力条件、年平均風速時は各値から約 5 dB を差し引く）

受音点	シナリオ	$L_p(Z)$ dB	$L_p(A)$ dB(A)	$L_p(C)$ dB(C)	$L_p(G)$ dB(G)	Z-A dB	C-A dB
海岸線	ケース 1	68.0	46.6	64.1	64.2	21.4	17.5
	ケース 2	70.6	49.5	66.9	66.6	21.1	17.4
	ケース 3	70.1	48.8	66.1	66.3	21.3	17.3
	ケース 4	72.9	51.8	69.1	68.9	21.1	17.3
内陸 3km	ケース 1	63.7	39.5	59.5	60.2	24.2	20.0
	ケース 2	66.3	42.6	62.3	62.6	23.7	19.7
	ケース 3	66.1	41.9	61.8	62.6	24.2	19.9
	ケース 4	68.8	45.0	64.7	65.1	23.8	19.7
内陸 5km	ケース 1	61.7	36.2	57.3	58.2	25.5	21.1
	ケース 2	64.3	39.4	60.1	60.6	24.9	20.7
	ケース 3	64.3	38.7	59.8	60.8	25.6	21.1
	ケース 4	66.9	41.9	62.6	63.3	25.0	20.7

### 12.3.2 国際的基準との照合

前項の結果を、第 3 章で整理した国際的な疫学知見および規制基準と照合する。以下では主に C 案（18MW×25 基）を中心に分析するが、A 案・B 案でも同様の傾向が確認される。すべての値はフル出力条件（定格風速以上）の中央推定値であり、不確実性は ±1.5 dB 程度である。年間平均風速条件では各値から約 4~6 dB を差し引く（第 10.4 節参照）。ただし、いすみ市沖では年間のかなりの時間帯で定格風速以上の風が吹くため（第 9 章）、フル出力条件は決して稀な事象ではない。

表 24: C 案 (18MW×25 基)：4つの伝搬シナリオにおける補正後受音レベル（フル出力条件、年平均風速時は各値から約 5 dB を差し引く）。18MW 機の音源レベル補正 (+2 dB) を適用する場合は、各値に一律 2 dB を加算する。

受音点	シナリオ	$L_p(Z)$ dB	$L_p(A)$ dB(A)	$L_p(C)$ dB(C)	$L_p(G)$ dB(G)	Z-A dB	C-A dB
海岸線	ケース 1	66.7	45.5	62.8	62.9	21.2	17.3
	ケース 2	69.5	48.6	65.8	65.5	20.9	17.2
	ケース 3	69.0	48.0	65.0	65.2	21.0	17.0
	ケース 4	72.0	51.2	68.3	68.1	20.8	17.1
内陸 3km	ケース 1	62.0	38.0	57.8	58.4	24.0	19.8
	ケース 2	64.8	41.2	60.7	61.0	23.6	19.5
	ケース 3	64.5	40.5	60.2	60.9	24.0	19.7
	ケース 4	67.5	43.9	63.4	63.7	23.6	19.5
内陸 5km	ケース 1	59.8	34.5	55.4	56.3	25.3	20.9
	ケース 2	62.6	37.8	58.4	58.9	24.8	20.6
	ケース 3	62.5	37.1	58.0	59.0	25.4	20.9
	ケース 4	65.4	40.5	61.2	61.8	24.9	20.7

### 12.3.3 A 特性による評価：不快感の用量反応関係

第 3.1 節で概観した疫学研究群は、風車騒音に対する住民の高度不快感 (highly annoyed) が A 特性の音圧レベルに対して段階的に増加することを示している。この関係を「用量反応関係」と呼ぶ。「騒音レベル (用量) が上がるほど、不快感を訴える住民の割合 (反応) が増える」という関係である。具体的には、30 dB(A) 未満で 1~2%、35~40 dB(A) で 5~10% (この付近で不快感の報告が急増し始める)、40~45 dB(A) で 10~18%、45 dB(A) 以上で約 50%となる。

以下の表に、各受音点での推定不快感率を、フル出力条件のケース 1 (穏やかな条件) とケース 4 (最強伝搬条件) の範囲で示す。

受音点	ケース 1 dB(A)	ケース 4 dB(A)	推定される不快感
海岸線	45.5	51.2	18~50%が高度の不快感
内陸 3km	38.0	43.9	5~18%が高度の不快感
内陸 5km	34.5	40.5	数%~10%が不快感

海岸線では、もっとも穏やかな条件 (ケース 1) ですら WHO 2018 年ガイドライン (45 dB(A)) を超過する。ケース 2 (強風速勾配条件) では 48.6 dB(A)、ケース 4 (最強伝搬条件) では 51.2 dB(A) に達し、住民の就寝時間帯に日本の環境基準夜間値 (45 dB(A)) を 6 dB 以上超過する。

内陸 3 km (風車から約 6 km) でも、ケース 2 で 41.2 dB(A)、ケース 4 で 43.9 dB(A) に達し、10% 以上の住民が高度の不快感を報告する水準にある。これらの値はいずれも影山ら (2016) の不眠症リスク増大閾値 (40.5 dB(A)) を超過している。内陸 5 km (風車から約 8 km) でもケース 4 で 40.5 dB(A) であり、不快感の急増閾値 (35~40 dB(A)) の上端に達する。この値は影山らの閾値と正確に一致し、風車から 8 km 以上離れた地点においてもなお不眠症リスクの増大が示唆される。

年間平均風速条件 (音源レベルが約 -5 dB 低下) でも、影響は解消されない。

受音点	フル出力 dB(A)	平均風速 dB(A) (約 -5)	影響の目安
海岸線	45.5	~40	急増閾値 (5-10%が不快感)
内陸 3 km	38.0	~33	数%が不快感を報告する水準
内陸 5 km	34.5	~30	知覚閾値付近

すなわち、年間平均的な風でもっとも穏やかな伝搬条件でも、海岸線では不快感の急増閾値に達している。いすみ市沖では年間の相当な時間帯でハブ高さ風速が定格風速 (10.5 m/s) を超えるため (第 9 章)、フル出力条件は「最悪ケース」ではなく日常的に発生する条件である。

なお、これらの疫学データは 0.5~3 MW 級の陸上風車を対象に収集されたものであり、12~18 MW 級の風車は低周波成分がはるかに強いため、同じ dB(A) 値でもより大きな不快感を引き起こす可能性が高い。上記の不快感率はなお過小評価と考えるべきである。

#### 12.3.4 C 特性による評価：低周波騒音問題の診断

A 特性は低い音を大幅に差し引くフィルタであるため (第 8 章)、低周波が支配的な大型風車の騒音を A 特性だけで評価すると、音響エネルギーの大部分が見えなくなる。そこで国際的には、C 特性 (低い音をほぼそのまま反映するフィルタ) と A 特性の差 (C-A 差) を「低周波騒音問題が存在するかどうか」の診断指標として用いている。ドイツおよびカナダは 20 dB 以上で低周波騒音問題の存在を認定し、スウェーデンは 15 dB 以上で追加調査を求めている。

C 案の C-A 差は、海岸線で 17.0~17.3 dB、内陸 3 km で 19.5~19.8 dB、内陸 5 km で 20.6~20.9 dB であった (4 シナリオの範囲)。すべてスウェーデン基準 (15 dB) を大幅に超過し、内陸 3 km 以上ではドイツ・カナダ基準 (20 dB) にも達する。国際基準に照らせば、いすみ市沿岸から内陸にかけて「低周波騒音問題が確実に存在する」と判定される。

しかも C-A 差は距離が増すほど拡大する。低い音ほど伝搬中に減衰されにくく、遠距離ほど低周波が支配的になるためである。この特性は、A 特性のみで評価する日本の現行規制がもっとも影響を過小評価するのが、A 特性値が低く「問題なし」と判定される可能性が高い内陸の住宅であることを意味する。

C 特性の絶対値も深刻である。カナダ・アルバータ州は農村環境で 65 dB(C) を上限とし、Broner (2011) は夜間静穏環境で 60 dB(C) を推奨している。C 案海岸線では、ケース 1 でも 62.8 dB(C) で Broner 基準を超過し、ケース 4 では 68.3 dB(C) に達する。内陸 3 km でもケース 4 で 63.4 dB(C) であり、Broner 基準を超過している。

#### 12.3.5 日本の規制枠組みの構造的問題

以上の分析は、第 5.1 節で整理した日本の規制枠組みの構造的弱点が実際にどのような帰結をもたらすかを具体的に示している。

A 特性のみによる評価 (第 5.1.2 節) は、C-A 差が 17~21 dB に達する本計画では音響エネルギーの大部分を数値に反映しない。ISO 9613-2 の無批判な使用は、ケース 2 で 4.4 dB、ケース 4 で 6.9 dB の過小評価をもたらす。そして 3 km という離岸距離は、もっとも穏やかな伝搬条件 (ケース 1) ですら海岸線の A 特性値が WHO 推奨の 45 dB(A) を超過するほど不十分である。

環境省の手引書が 1/3 オクターブバンド音圧レベルによる帯域別評価を求めているにもかかわらず

ず、風力発電の環境影響評価ではこの評価が制度上省略されている（第 5.1.3 節）。本節の分析は、この制度的空白がいかにかに深刻な見落としを生むかを端的に示している。A 特性で「基準適合」と判断されうる条件下で、環境省自身の手引書の参照値が 50 Hz 以上の全帯域で超過するのである。

### 12.3.6 低周波帯域の詳細：環境省「手引書」参照値との照合

前項の議論では、総合レベル（A 特性、C 特性等の合計値）に基づいて国際基準との照合を行った。本項では、帯域別データにより環境省「低周波音問題対応の手引書」（2004 年）の心身に係る苦情に関する参照値（第 5 節）との照合を行う。第 12.2.3 節では ISO 9613-2 ベースラインで同様の照合を行ったが、ここでは伝搬補正を加えた 4 シナリオの結果を用いる。表 25 に、C 案（18MW×25 基）について、もっとも問題となる 40~80 Hz 帯域の Z 特性受音レベルを、ケース 1（穏やかな条件）からケース 4（最強伝搬条件）の範囲で示す。

表 25: 伝搬補正後の低周波受音レベルと手引書参照値の比較：C 案（Z 特性、dB）。各セルはケース 1～ケース 4 の範囲。太字は参照値超過。18MW 機の音源レベル補正（+2 dB）を適用する場合は各値に 2 dB を加算する。全帯域の詳細データは付録第 C 章に収録。

受音点	40 Hz (参照値 57)	50 Hz (参照値 52)	63 Hz (参照値 47)	80 Hz (参照値 41)
海岸線	54.5- <b>59.7</b>	<b>54.4-59.6</b>	<b>54.7-60.5</b>	<b>53.3-59.1</b>
内陸 3 km	49.9- <b>55.2</b>	49.7- <b>55.0</b>	<b>49.8-55.8</b>	<b>48.3-54.3</b>
内陸 5 km	47.8- <b>53.3</b>	47.5- <b>53.0</b>	<b>47.5-53.6</b>	<b>45.8-51.9</b>

ISO 9613-2 ベースライン（第 12.2.3 節）では海岸線の 50 Hz 以上で参照値を超過していたが、伝搬補正を加えると超過はさらに深刻化する。

**海岸線**では、ケース 4 で**全 4 帯域が参照値を超過**する。80 Hz での超過量は最大 18.1 dB と、参照値の約 65 倍のエネルギーに相当する。穏やかな条件（ケース 1）でも 50 Hz 以上の 3 帯域で超過しており、ISO 9613-2 ベースラインと同様の傾向がより顕著に現れている。

**内陸 3 km**では、ケース 4 で 40 Hz を含む**全帯域が参照値を超過**する。80 Hz での超過量は 13.3 dB（参照値の約 21 倍のエネルギー）。穏やかな条件（ケース 1）でも 63 Hz 以上で超過が持続する。

**内陸 5 km**（風車から 8 km 以上）でも、ケース 4 で**全帯域が参照値を超過**する。穏やかな条件（ケース 1）でも 63 Hz と 80 Hz で超過しており、ISO 9613-2 ベースラインでは 80 Hz のみの超過であったのに比べ、超過帯域が拡大している。

A 案および B 案でも同様の傾向が確認される。海岸線の 80 Hz 帯域では、A 案ケース 4 で 59.3 dB（参照値 18.3 dB）、B 案ケース 4 で 59.9 dB（参照値 18.9 dB）であり、C 案と同等またはそれ以上の超過量である。全帯域の詳細データは付録（第 C 章）に収録している。

環境省は「参照値以下であっても、低周波音を許容できないレベルである可能性が 10%程度残されている」と明記している（2017 年通知）。本計算では参照値を大幅に超過しており、その影響は参照値の想定を遙かに超える水準にある。

## 12.4 理論上限値の検証：完全円筒拡散の結果

第 11.3 節で説明した完全円筒拡散（ $n = 1$ ）モデルは、音が大気中のダクトに完全に閉じ込められ水平方向にしか広がらないという、物理的にありうる最大の増幅を与える。この理論上限値と前

節の4シナリオを比較することで、2つの重要な知見が得られる。

表 26 に、C 案海岸線について、ISO 9613-2 ベースライン、4 シナリオの最強伝搬条件（ケース 4）、および完全円筒拡散の受音レベルを並べて示す。

表 26: C 案・海岸線の受音レベル比較：ISO 9613-2、ケース 4、完全円筒拡散（フル出力条件）。18MW 機の音源レベル補正（+2 dB）を適用する場合は各値に 2 dB を加算する。

モデル	$L_p(Z)$ dB	$L_p(A)$ dB(A)	$L_p(C)$ dB(C)	$L_p(G)$ dB(G)	ISO 比 dB
ISO 9613-2	65.1	44.6	61.1	61.4	—
ケース 4	72.0	51.2	68.3	68.1	+6.9
完全円筒拡散	83.1	62.3	79.0	79.3	+18.0

**第一の知見：4 シナリオの推定は極端ではない** ケース 4（もっとも強い伝搬条件）でも、完全円筒拡散に対して約 11 dB のマージンがある。ISO 9613-2（下限）から完全円筒拡散（上限）まで約 18 dB の範囲のうち、4 シナリオのケース 4 は下限から 6.9 dB の位置にあり、ちょうど中間よりやや下である。有効拡散指数（ $n = 1.52-1.78$ ）は Konishi et al.（2016）が日本近海で実測した  $n = 1.5-1.8$  と整合する。すなわち、本計算は物理的上限からかなりのマージンを持った**中庸な推定**であり、過大評価の懸念は小さい。

**第二の知見：インフラサウンドは主要な問題ではない** 表 26 の G 特性の列に注目すると、ケース 4 で 68.1 dB(G)、完全円筒拡散という物理的最悪条件でも 79.3 dB(G) であり、いずれもデンマーク・エストニアの屋内基準（85 dB(G)）を下回る。すなわち、超低周波音（インフラサウンド）そのものは、本計画の主要な問題ではない。

これは重要な結論である。風力発電騒音をめぐる議論では「インフラサウンドが健康を害する」という主張がしばしばなされるが、本計算は、いすみ市沖計画の騒音問題の核心がインフラサウンド（20 Hz 以下）ではなく、40~200 Hz の**低周波音帯域**にあることを示している。この帯域の音は明確に聴取可能であり、前項で示した通り環境省の手引書参照値を大幅に超過する。しかし、A 特性フィルタはこの帯域を大幅に減衰させ、G 特性フィルタはこの帯域に感度を持たない。いずれの単一指標でも問題の実態は捉えられず、1/3 オクターブバンド別の分析のみが問題を正確に評価できる。

### 12.5 振幅変調（AM）効果：時間平均値に隠された脈動の影響

第 12.3 節の計算結果は、いずれも 10 分間の時間平均音圧レベル（ $L_{eq}$ ）として算出されている。しかし、風車の音は一定ではない。第 3.1 節で導入したとおり、ブレードが 1 回転するたびに音が強くなったり弱くなったりする。この周期的な脈動を「振幅変調（AM）」と呼ぶ。18 MW 級風車（3 枚ブレード）の場合、約 3 秒に 1 回の周期で「ドン……ドン……ドン……」という律動的な音圧変動が生じる。本節では、この振幅変調がいすみ市沖計画の受音レベルに与える定量的な影響を評価する。

振幅変調が問題になる理由は、人間の耳が一定の音よりも脈動する音に敏感だからである。同じ平均レベルでも、脈動する音のほうが「うるさい」と感じられ、睡眠妨害も生じやすい。しかも、脈動のピーク値は平均値より 3~6 dB 以上高くなるため、 $L_{eq}$  で「基準以内」と判定された音場で、実際にはピーク時に基準を大幅に超える音圧が周期的に住民に届いている。

風車の近くでは「シュッ……シュッ……」という高周波のスイッチ音として聞こえるが、数キロメートル離れると高周波は大気に吸収されて消え、低周波の脈動だけが残る。いすみ市沖の3kmという距離は、まさにこの遷移が起こる領域であり、住民が経験するのは高周波の「風切り音」ではなく低周波の律動的脈動である。この低周波脈動は、夜間の安定大気（風速勾配が大きく、音が下方に屈折する条件）で最も強くなる。すなわち第11.2節のケース4と同じ条件である。

変調の大きさ（変調深度）は、穏やかな条件で2~4 dB、大気条件が重なった場合には6~12 dBに達することが複数の実測で確認されている。デンマークや英国では、変調深度が3 dB以上の場合には是正措置や3~5 dBの騒音ペナルティを課す規制が導入されている。

### 12.5.1 いすみ市沖計画への含意

第12.3節で算出した受音レベル（C案海岸線でケース1 62.8 dB(C)~ケース4 68.3 dB(C)、A特性で45.5 dB(A)~51.2 dB(A)）は、いずれも10分間の時間平均音圧レベルである。変調深度3~6 dBを考慮すると、脈動のピーク時にはA特性の $L_{eq}$ よりも3~6 dB高い瞬時音圧レベルが生じる。すなわち、海岸線でのA特性脈動ピーク値はケース1でも48~52 dB(A)、ケース4では54~57 dB(A)に達しうる。

さらに、25基の風車がわずかに異なる回転数で稼働するため、複数のBPFが干渉してうなり（beating）を生じ、変調パターンはさらに複雑になる。この非同期脈動は、単一の風車からの規則的な脈動よりも予測困難であり、知覚上の不快感を増大させる要因となる。

加えて、EAMは夜間の安定大気条件下（風速勾配が大きく、失速が生じやすい条件）で最も頻繁に発生する。これは、第11.2節で述べたVan den Berg効果（夜間の強い風速勾配により地上は静穏であるにもかかわらずハブ高さでは強風が維持され、かつ安定大気が音を下方に屈折させる）と完全に一致する。すなわち、最も強い脈動が最も効率的な伝搬条件下で最も長距離まで到達し、かつそれが住民の就寝時間帯に重なるという三重の悪条件が成立する。

以上から、第12.3節の時間平均値は、いすみ市で実際に住民が経験する騒音環境の下限推計として理解すべきであり、脈動効果を含めた実際の影響はこれを有意に上回る。

## 12.6 日常的な体感との比較：大型トラックのアイドリング騒音

本章の計算結果はデシベル値で示されているが、数値だけでは騒音の体感的な大きさを把握しにくい。ここでは、経済産業省「大規模小売店舗から発生する騒音予測の手引き」（第2版、2008年）に掲載されている日本の大型トラックのアイドリング時のA特性音響パワーレベル（約87 dB(A)）<sup>18</sup>を基準として、本章で計算した受音レベルを距離に換算する。

点音源からの自由音場における音圧レベルは $L_p = L_W - 20 \log_{10}(r) - 11$ で近似されるから、大型トラック（ $L_W = 87$  dB(A)）のアイドリング騒音が受音レベル $L_p$ と等しくなる距離 $r$ は以下のよう求められる。

<sup>18</sup>経済産業省商務情報政策局流通政策課「大規模小売店舗から発生する騒音予測の手引き（第2版）」表7。 <https://www.meti.go.jp/policy/economy/distribution/daikibo/downloadfiles/tebiki-main-2.pdf>

受音レベル $L_p$ [dB(A)]	トラックまでの距離	該当する条件の例
50 dB(A)	約 20 m (道路を挟んだ向かい側)	海岸線・フル出力・最強伝搬条件
45 dB(A)	約 35 m	海岸線・フル出力・穏やかな条件
40 dB(A)	約 60 m (田んぼ 1 枚分)	海岸線・年間平均風速・穏やかな条件
35 dB(A)	約 110 m	内陸 5 km・フル出力・穏やかな条件

すなわち、最悪の気象条件下でフル出力で稼働した場合、海岸線の住民が受ける騒音は、約 20 m 先（自宅の前の道路を挟んだ向かい側）で大型トラックがアイドリングしているのと同程度の騒音レベルとなる。穏やかな条件でも約 35 m 先、年間平均風速でも約 60 m 先に相当する。

ただし、この比較には 2 つの重要な相違点がある。第一に、トラックはやがて立ち去るが、風車の音は風が吹く限り一晩中続く。第二に、3 km 以上の海上伝搬を経た風車騒音は高い周波数の成分が大気吸収で失われ、低い音ばかりが残る。低い音は窓や壁を透過しやすいため、窓を閉めても遮断しにくく、トラックのアイドリング騒音よりも屋内での体感的な影響は大きい可能性がある。

## 12.7 総合評価

本章の分析結果を総合する。3 つの配置案（A 案：15MW×35 基、B 案：12MW×42 基、C 案：18MW×25 基）はいずれも総出力 450～525 MW 級であり、計算結果は配置間で 1 dB–2 dB 程度の差に収まった。すなわち、騒音影響はどの配置を選んでもほぼ同等である。以下に、第 12.3.3 節～第 12.3.5 節の分析を踏まえた住民影響の総括を示す。

**海岸線の住民への影響** 海岸線での A 特性レベルは、フル出力時に約 45 dB(A)（穏やかな伝搬条件、ケース 1）から約 51 dB(A)（最強伝搬条件、ケース 4）である。年間平均風速条件（音源レベルが約 -5 dB 低下）では、穏やかな伝搬条件（ケース 1）でも約 40 dB(A) となる。

第 3.4 節でまとめた疫学データに照らすと、フル出力・ケース 1 の 45 dB(A) は用量反応曲線で**住民の約半数**が不快感を報告する水準に相当する（米国全国調査：45 dB(A) 以上で約 50%）。年間平均風速のケース 1 でも約 40 dB(A) であり、**10～18%の住民**が高度の不快感を報告する水準（40～45 dB(A)）に達している。また、影山ら（2016）が報告した日本国内における不眠症リスク増大の閾値（40.5 dB(A)）をフル出力条件では全シナリオで大幅に超過し、年間平均風速条件でもほぼこの閾値に達する。風車騒音は同等レベルの交通騒音より約 17 dB 分強い不快感を引き起こすことが複数の研究で確認されており、道路騒音に換算すれば 40 dB(A) の風車騒音は 57 dB(A) の交通騒音に相当する。

重要なのは、これらの疫学データが 0.5～3 MW 級の陸上風車を対象に収集されたものであるという点である。12～18 MW 級の洋上風車は低周波成分がはるかに強いいため、同じ dB(A) 値でもより大きな不快感を引き起こす可能性が高い。上記の不快感率は過小評価と考えるべきである。

**内陸住民への影響** 内陸 3 km（風車から約 6 km）でも、フル出力のケース 4 で約 44 dB(A) に達し、**10～18%の住民**が高度の不快感を報告する水準にある。この値は影山らの不眠症閾値（40.5 dB(A)）を 3 dB 以上超過している。内陸 5 km（風車から約 8 km）でもケース 4 で約 41 dB(A) であり、なお**5～10%の住民**が不快感を報告する急増閾値（35～40 dB(A)）を超えている。この値も影山らの閾値をわずかに超過しており、風車から 8 km の距離でもなお不眠症リスクの増大が示唆される。

**A 特性が捉えない影響** 上記の A 特性値は問題の一面にすぎない。同じ物理的音場の C 特性値は海岸線で約 63~69 dB(C) であり、A 特性との差 (C-A 差) は約 17 dB に達する。この差は距離とともに拡大し、内陸 5 km では約 21 dB となる。第 3.4 節で整理した国際基準では、C-A 差が 15 dB を超えれば「追加調査が必要」(スウェーデン)、20 dB を超えれば「低周波騒音問題が存在する」(ドイツ・カナダ) と判定される。いすみ市沿岸から内陸にかけて、これらの閾値がすべて超過している。

さらに、環境省「手引書」の心身苦情参照値は、50 Hz 以上の帯域で ISO 9613-2 ベースラインですら超過しており、伝搬補正を加えるとすべての受音点・すべてのシナリオで 63 Hz 以上が参照値を超える。

**時間平均値が隠す実態** 第 5.1 節で述べた通り、日本の規制では毎正時に 10 分間の  $L_{Aeq}$  を測定し、夜間 8 時間 (22 時~6 時) にわたってエネルギー平均し、さらにそれを複数夜にわたって平均した値で評価する。この多重平均化の結果、特定の時間帯に騒音が著しく高くても、同じ夜の他の時間帯や他の夜との平均で「薄められる」。

いすみ市沖の風車騒音には 2 種類の時間変動がある。第一に、気象条件による変動である。本章の 4 シナリオが示す通り、穏やかな条件 (ケース 1) と最強伝搬条件 (ケース 4) の差は約 6 dB に及ぶ。夏季夜間に安定大気・強い風下屈折・海上ダクトが形成される数時間には海岸線で 51 dB(A) に達するが、同じ夜の他の時間帯が 45 dB(A) 程度であれば、8 時間の  $L_{Aeq}$  はその中間に落ち着く。さらに、ダクト条件が成立しない夜と平均すれば、評価値はさらに下がる。第二に、各風車はわずかに異なる回転数で稼働するため、25~35 基の脈動は周期的に位相が揃い互いを増幅し合う、いわゆる「うなり」現象が生じる (振幅変調、第 12.5 節)。このピーク値は平均値より 3~6 dB 以上高く、 $L_{Aeq}$  はこの脈動を平均化するため評価値には反映されない。

この結果、多重平均された評価値が規制の目標値以内に収まったとしても、住民は年間の相当な時間帯にわたって目標値を大幅に超える騒音に曝される。疫学調査が示す不快感や睡眠障害は、まさにこのような最悪の時間帯に生じるものであり、平均値が「基準内」であることは住民が影響を受けないことを意味しない。第 12.6 節の比較が示すように、これらの騒音レベルは大型トラックが 20~60 m 先で一晩中アイドリングしている状況に相当し、しかもその音は低周波に偏っているため窓を閉めても遮断しにくい。そして最悪の条件 (夏季夜間の安定大気、強い風下屈折、海上ダクト形成) は、住民が就寝中の時間帯に最大の騒音エネルギーが到達し、かつその音は低周波に著しく偏っているため木造住宅の壁では十分に遮蔽できない条件と一致する。この組み合わせが、いすみ市沖洋上風力発電計画における最大の環境リスクである。

# 結論と提言

## 13. 総括

本書では、いすみ市沖に 12~18 MW 級洋上風車 25~42 基（総出力 450~525 MW）が海岸線から約 3 km に設置された場合の騒音影響を、国内外の事例調査、日本の法制度の分析、および音響工学に基づく伝搬計算の 3 つの観点から検討した。以下に主要な知見を要約する。

### 13.1 世界に前例のない近距離配置

第 2 章の調査により、公開情報に基づく限り、10 MW を超える大型風車を海岸から 10 km 未満に商業規模で設置した事例は、計画段階のものを含めて日本以外には確認できなかった（ただし、本調査がすべての計画を網羅している保証はない）。欧州および中国の大規模洋上風力発電所は海岸線から 10 km 以上（多くは 20~100 km 以上）離れた沖合に建設されるのが通例である。日本と同様に急深な海域を持つノルウェーは、30 GW の洋上風力を浮体式で沖合に展開する国家計画を推進している。いすみ市沖の 3 km という離岸距離は、国際的に見て極めて異例であり、騒音影響の観点から特に慎重な検討を要する。

### 13.2 風車騒音に対する住民の不快感：国内外の疫学知見

第 3 章では、スウェーデン、オランダ、カナダ、米国、英国、ノルウェー、ポーランドの 7 か国で実施された住民健康調査を整理した。これらの調査が一貫して示すのは、風車騒音は比較的低いレベルから住民に不快感を与えるという事実である。

具体的には、35 dB(A) を超えると不快感の発生率が急増し始め、35~40 dB(A) で約 5~10% の住民が高度の不快感を報告する。40~45 dB(A) ではこの割合が 18~50% に上昇し、45 dB(A) 以上では住民の約半数が不快感を報告する。さらに、風車騒音は同等のレベルの交通騒音と比較して著しく高い不快感を引き起こすことが複数の研究で確認されている。これは、風車特有のスイッチ音（ブレードが空気を切る音）や脈動的な音質に起因すると考えられている。

日本国内でも、影山ら（2016）が風力発電所周辺住民 1,079 名を対象とした全国調査を行い、屋外騒音レベル 40.5 dB(A) を閾値として不眠症の有病リスクが有意に増大し、41~45 dB(A) の曝露群では有病率が約 5 倍に上昇することを報告している。

これらの調査は主に 0.5~3 MW 級の陸上風車を対象としたものであり、12~18 MW 級の巨大洋上風車についての疫学データは存在しない。大型風車は低周波成分がはるかに強いため、同じ dB(A) 値でもより大きな不快感を引き起こす可能性が高く、上記の不快感率は過小評価と考えるべきである。

### 13.3 日本の規制制度の構造的問題

第 4 章および第 5 章の分析により、日本の風力発電騒音に関する規制制度には以下の構造的弱点があることが明らかとなった。

第一に、騒音予測に用いる計算モデルの選択が事業者の裁量に委ねられている。本書の分析が示すように、モデルの選択と気象条件の設定は結果に決定的な影響を与え、ISO 9613-2 の標準計算と夜間安定大気を考慮した計算では約 9 dB（エネルギーで約 8 倍）の差が生じる。事業者が最も楽観的なモデルと条件を選択すれば、「基準内」という結果を容易に導くことができる。

第二に、騒音評価が A 特性の単一値のみで行われ、大型風車が主に発する低周波音のエネルギーが評価から除外される。デンマークのように低周波音に対する独立した基準を設けている国とは対照的に、日本には低周波音に基づく騒音規制基準が存在しない。

第三に、日本の制度では騒音を複数夜にわたって平均化して評価する（ $L_{Aeq}$  の 8 時間 × 複数夜平均）ため、特定の夜間に騒音が著しく高くても「薄められる」構造になっている。最悪の条件（夏季夜間の安定大気、強い風下屈折、海上ダクト形成）は住民の就寝時間帯に集中するが、この影響はダクト条件が成立しない夜との平均化により評価値に十分反映されない。

第四に、環境影響評価図書の公開が法定の縦覧期間（30~45 日程度）に限られ、期間終了後は事業者が文書を削除できるため、第三者による事後的な検証が極めて困難である。

#### 13.4 4 社コンソーシアムの騒音予測値の検証

第 6 章では、4 社コンソーシアムが計画段階環境配慮書で提示した騒音予測値（A 案 32.0 dB(A)、B 案 32.6 dB(A)）の再現を試みた。この検証では、事業者にとってもっとも有利な条件（実際の風車の騒音特性（低い音に偏ったスペクトル）ではなく、すべての周波数に音を均等に配分したフラットスペクトルという非現実的な仮定）を用いて ISO 9613-2 に基づく独立計算を行った。それでもなお、物理的にもっとも妥当な条件（海面反射  $G = 0$ 、年間平均気象条件）では 36~37 dB(A) となり、提示値を 4~5 dB 上回った。提示値に近い数値が再現できたのは、年平均よりも高温高湿な条件を仮定し、かつ海面による音の反射を完全に無視した場合のみであった。海上を伝搬する音が海面で反射しないという仮定は物理的に現実的ではなく、提示値の根拠には疑問が残る。なお、次項で述べるように、大型風車の実測スペクトルデータを用いると事業者の予測値との差はさらに大幅に拡大する。

#### 13.5 音源レベルと本書の計算結果

第 10 章のスケーリング解析により、12~18 MW 機 1 基の騒音出力は定格出力時で 118~120 dB(A)、25~35 基の合計で 132~135 dB(A) と推定された。年間平均風速（8 m/s）では約 4~6 dB 低下する。

ISO 9613-2 に実測スペクトルを適用するだけで、海岸線の受音レベルは 44~46 dB(A) となり、事業者の予測値（約 32 dB(A)）を約 13 dB（エネルギーにして約 20 倍）上回る。風速勾配・温度逆転による増幅効果を 4 段階のシナリオで加味した結果（第 11 章・第 12 章）を以下に示す（フル出力条件）。

受音点	重み付け	穏やかな条件	最強伝搬条件（夜間安定大気）
海岸線	dB(A)	約 45	約 51
	80 Hz 帯 dB(Z)	約 53	約 59
内陸 3 km	dB(A)	約 38	約 44
	80 Hz 帯 dB(Z)	約 48	約 54
内陸 5 km	dB(A)	約 35	約 41
	80 Hz 帯 dB(Z)	約 46	約 52

注：80 Hz 帯の環境省「手引書」参照値は 41 dB（Z 特性）。年間平均風速では各値から約 4~6 dB を差し引く。

事業者が提示した約 32 dB(A) から本書の最強伝搬条件での 51 dB(A) まで、約 19 dB（エネルギーで約 80 倍）の開きがある。

A 特性の数値は到達する音響エネルギーの一部しか反映していない。C 特性で測定すると海岸線で 63~68 dB(C) に達し、A 特性との差は 17~21 dB（内陸ほど拡大）である。国際的な基準ではこの差が 15 dB を超えれば「追加調査が必要」（スウェーデン）、20 dB を超えれば「低周波騒音問題が存在する」（ドイツ・カナダ）と判定される。いすみ市沿岸から内陸にかけて、これらの閾値はすべて超過している。

環境省「低周波音問題対応の手引書」の参照値（心身に係る苦情の診断基準、法的拘束力はないが「この値を超えれば苦情が生じる可能性が高い」水準）との照合では、80 Hz 帯域（参照値 41 dB）に対して、ISO 9613-2 ベースライン（伝搬補正なし）の時点で既に海岸線で 10~12 dB の超過、最強伝搬条件では 18 dB の超過（参照値の約 65 倍のエネルギー）となる。内陸 5 km ですら全条件で超過する。この超過は基本物理のみから導かれ、モデル選択や気象仮定では解消できない。第 1.7 節で紹介した田鎖（2024）の北海道「有望な区域」に関する試算においても、低周波帯域の中で 80 Hz が最も広い影響範囲を生じることが独立に確認されており、本書のいすみ市沖に関する計算結果はこの知見と整合する。80 Hz 帯が最も問題となるのは、この周波数帯では大気吸収による減衰が小さい一方、環境省の参照値が相対的に低い（41 dB）ため、到達レベルと参照値の乖離が最大となるためである。なお、環境省は「参照値以下であっても許容できない可能性が 10%程度残されている」と認めている一方、風力発電の環境影響評価においてこの参照値との照合は制度上義務付けられていない（第 4 章参照）。日本には現在、低周波音に基づく騒音規制基準が存在しない。

上記の値はいずれも時間平均値であり、風車騒音に特有の振幅変調（AM）を含んでいない。脈動のピーク値は平均値より 3~6 dB 高く、海岸線の A 特性瞬時ピークは穏やかな条件でも 48~52 dB(A)、最強伝搬条件では 54~57 dB(A) に達しうる。

上記の計算は風下条件（海から陸への風）を前提としている。第 9 章の気象分析によれば、この条件は年間の約 25~35% の時間帯で発生し、夏季夜間に限定すると 50% 以上に達する。風が陸から海に向かう場合でも、受音レベルを支配する低周波成分（10~200 Hz）は波長が長く、風上屈折による音影域の形成が不完全であるため、風下条件と比較した低減量は数 dB 程度にとどまると推定される。すなわち、騒音影響は風下時間帯に限定されるものではない。

## 13.6 日常的な体感との比較

第 12.6 節の比較が示すように、海岸線でのフル出力・最強伝搬条件（約 50 dB(A) 以上）は大型トラックが約 20 m 先（道路を挟んだ向かい側）でアイドリングしている状況に、穏やかな条件（約 45 dB(A)）は約 35 m 先に相当する。ただし、トラックはやがて立ち去るが、風車の音は風が吹く限り一晩中続き、しかも海上伝搬で高い音が失われ低い音ばかりが残るため、窓を閉めても遮断しにくい。

これらの値を第 13.2 節の疫学データと照合すると、海岸線でのフル出力・穏やかな条件（45 dB(A)）ですでに住民の約半数が不快感を報告する水準に相当する。年間平均風速でも約 40 dB(A) であり、10～18%の住民が高度の不快感を報告する水準に達している。この水準は影山ら（2016）が報告した不眠症リスク増大の閾値（40.5 dB(A)）にほぼ一致する。最強伝搬条件での 51 dB(A) は、調査対象のすべての研究において深刻な影響が報告されるレベルである。

## 13.7 結論

本書の分析は、事業者の環境影響評価に先立つ独立した技術的検討として実施したものであり、計画の可否を判断するものではない。しかし、上記の知見を総合すると、いすみ市沿岸の住民に対して相当程度の騒音影響が生じると結論せざるを得ない。とりわけ深刻なのは低周波帯域の状況である。80 Hz 帯域の受音レベルは、ISO 9613-2 ベースライン（伝搬補正なし・風下条件のみ）の時点で既に環境省参照値を 10～12 dB 超過しており、この超過は音源スペクトルと距離という基本物理のみから導かれる。風速勾配や温度逆転を加味すれば超過量は最大 18 dB に拡大し、風向が逆であっても低周波帯域の低減は数 dB にとどまる。すなわち、低周波騒音の参照値超過は、風向・気象条件・伝搬モデルの選択にかかわらず、風車が稼働する限り常態的に生じる。A 特性の評価値が「基準内」に収まる条件であっても、低周波帯域では参照値を大幅に超過し続けるのである。

さらに、日本の規制で用いられる A 特性による評価は、到達する音響エネルギーの大部分を数値から除外するため、「基準内」という評価結果が住民に影響がないことを意味しない。最悪の条件（夏季夜間の安定大気、強い風下屈折、海上ダクト形成）は、住民が就寝中の時間帯に最大の騒音エネルギーが到達し、かつその音は低周波に著しく偏っているため木造住宅の壁では十分に遮蔽できない条件と一致する。この組み合わせが、いすみ市沖洋上風力発電計画における最大の環境リスクである。

## 14. 提言

### 14.1 事業者から独立した専門的騒音予測の実施

本書の分析は、公開データと標準的な計算手法に基づく一住民による独立検証であり、本格的な環境影響評価に代わるものではない。しかし、本書が明らかにしたように、騒音の到達レベルは計算手法と気象条件の設定によって大きく異なる。ISO 9613-2 の標準計算では海岸線で約 45 dB(A) となる条件が、夜間の安定大気と海上ダクトの形成を考慮すると 54 dB(A) に達しうる。この約 9 dB の差は、音のエネルギーで約 8 倍の違いに相当し、「基準内」と「深刻な影響」の分かれ目となる。

現行の環境影響評価制度では、騒音予測は事業者自身が実施し、使用する計算モデルや気象条件の設定も事業者の裁量に委ねられている（第 5 章）。しかし、本書の分析が示すように、モデルの選択と気象シナリオの設定は結果に決定的な影響を与える。したがって、以下を提言する。

第一に、事業者から独立した専門機関による騒音予測を実施すべきである。予測には、ISO 9613-2の範囲を超える高度な音響伝搬モデル（放物型方程式法やPE法など、大気鉛直構造を考慮できる手法）を用いるべきである。

第二に、予測は単一の「代表的な」気象条件ではなく、いすみ市沖の実際の気象データに基づく複数のシナリオで実施すべきである。特に、夏季夜間の安定大気条件（騒音が最も増幅され、かつ住民が就寝中の時間帯）を明示的に含めなければならない。

第三に、予測はA特性の単一値だけでなく、周波数帯域別の分析を含むべきである。本書が示したように、A特性は到達する音響エネルギーの大部分を数値から除外するため、低周波音の影響を評価するにはC特性やZ特性による分析が不可欠である。

## 14.2 浮体式技術による離岸距離の確保

本書の分析により、海岸線から3kmの近距離配置では、最も楽観的な条件を除き沿岸住民に相当程度の騒音影響が生じることが示された。この問題を回避するための建設的な解決策として、浮体式洋上風力技術の採用による離岸距離の大幅な拡大を提言する。

第2章で詳しく検討した通り、日本と同様に急深海域を持つノルウェーは、沿岸住民への影響を回避するため浮体式技術を用いた沖合展開を国家政策として推進しており、ハイウィンド・タンペンは海岸から140kmの沖合ですでに商業運転を行っている。浮体式のコストは現時点では着床式より高いが、第2.10節で整理した通り、DNVや米国エネルギー省など複数の独立した機関が2035年前後には56~64 USD/MWhへの低減を予測しており、日本の大口産業用電力料金（約115~190 USD/MWh）を大幅に下回り、家庭用電力料金（約190~270 USD/MWh）の3分の1以下に達する見通しである（いずれも2024年平均為替レート1 USD ≈ 151 JPYに基づく。詳細は第2.10節の表5を参照）。ノルウェー政府が大規模な補助を投じて技術成熟を促しているのは、まさにこの将来性を見越した政策判断である。

いすみ市沖の海底地形もこの選択肢を裏付けている。海岸から約20kmまで水深200m未満の大陸棚が広がり、浮体式（スパア型、水深120~700m対応）の設置条件を十分に満たす。Hywind Tampenで実証された海底ケーブル送電技術（水深300m、送電距離16km）に照らしても、20~40km沖合からの送電は既存技術で実現可能である。

したがって、いすみ市沿岸の住民の生活環境と健康を保護しつつ洋上風力発電の便益を実現するためには、現行計画の離岸距離3kmを根本的に見直し、浮体式技術により20km以上の離岸距離を確保する方向で事業計画を再検討すべきである。「現時点でコストが高い」という事実は、近距離・着床式を唯一の選択肢とする根拠にはならない。日本政府および事業者に対し、ノルウェーの政策判断を参照しつつ、浮体式技術への投資と政策支援を本格的に検討するよう求める。

## 14.3 着床式を維持する場合の次善策：単機出力の制限と離岸距離の最大化

仮に現時点のコスト制約から浮体式の採用が困難であるとしても、着床式の枠内で騒音影響を低減するために、以下の2つの措置を検討すべきである。

第一に、風車の単機出力の制限である。第1.6節および第10.3節で示したとおり、同じ総出力を達成する場合でも、少数の超大型機より多数の小型機で構成するほうが合計の騒音出力は大幅に低

い。15 MW 機 30 基を 4 MW 機 113 基に置き換えた場合、合計の音響パワーレベルは約 6 dB–7 dB 低下する（エネルギーにして約 4 分の 1～5 分の 1）。基数の増加は占有面積の拡大と設置コストの増大を伴うが、漁業への影響は必ずしも悪化するとは限らない。大型風車は水中騒音も大きく海洋生物の生息環境への影響が懸念される一方、基礎構造物は人工魚礁として機能し魚類生息場を提供することが国際的に報告されており、基数の増加はこの効果を拡大する可能性もある。

第二に、離岸距離の最大化である。現在の計画では促進区域の内縁（海岸線から約 3 km）付近への配置が想定されているが、いすみ市沖では離岸距離 6 km でも水深は約 35～45 m であり着床式の技術的制約内にある。ただし、本書の分析が繰り返し示してきたとおり、洋上での音の減衰は理想的な球面拡散よりも小さく、夜間の安定大気条件下では距離を倍にしても 3 dB–4 dB の低減にとどまる可能性がある。また、小型機への移行で基数が増えた場合、アレイの拡大により離岸距離の実効的な増加は限定的となる。それでも自治体が離岸距離の下限を条件として設定することは検討に値する。

これら 2 つの措置の総合的な効果はアレイ配置の詳細設計に依存するが、現行計画（15 MW–18 MW 級を 3 km に配置）と比較すれば相当程度の改善が見込まれる。浮体式による 20 km 以上の離岸距離確保には及ばないが、着床式の制約のもとでも住民への影響を低減するための現実的な選択肢として検討されるべきである。

# 付録

## A. 1/3 オクターブバンド受音レベルの詳細データ

第 11.1 節の ISO 9613-2 計算で得られた全帯域（10 Hz–10 kHz）の受音レベルを以下に示す。計算条件：Vestas V236-15MW スペクトル（ $L_{WA} = 120$  dB(A)、安全マージン 2 dB 含む）、 $G = 0$ （海面）。2000 Hz 以上の帯域は大気吸収により受音レベルが 0 dB 以下となるため省略した。

表 27: A 案（15 MW × 35 基）：冬季条件（10 °C、70%）

周波数 (Hz)	$L_p(Z)$ (dB)	$L_p(A)$ (dB)	$L_p(C)$ (dB)
10	58.0	-12.4	43.7
12.5	57.0	-6.4	45.8
16	57.0	0.3	48.5
20	56.0	5.5	49.8
25	54.9	10.2	50.5
31.5	53.9	14.5	50.9
40	53.8	19.2	51.8
50	53.6	23.4	52.3
63	53.4	27.2	52.6
80	52.1	29.6	51.6
100	51.6	32.5	51.3
125	50.0	33.9	49.8
160	48.1	34.7	48.0
200	47.1	36.2	47.1
250	45.0	36.4	45.0
315	42.8	36.2	42.8
400	40.5	35.7	40.5
500	38.1	34.9	38.1
630	34.4	32.5	34.4
800	31.1	30.3	31.1
1000	26.1	26.1	26.1
1250	20.8	21.4	20.8
1600	11.7	12.7	11.6
2000	0.0	1.2	-0.2
合計	65.9	45.0	61.9

## B. 全配置・全受音点における 1/3 オクターブバンド受音レベルの詳細データ

第 12.2 節の ISO 9613-2 計算で得られた全帯域（10 Hz–10 kHz）の受音レベルを以下に示す。計算条件：Vestas V236-15MW スペクトル（ $L_{WA} = 120$  dB(A)、安全マージン 2 dB 含む）、気温 10 °C・相対湿度 70%。A 案・B 案の海岸線データは付録 A に掲載済みであるため、ここでは C 案の海岸線および全配置の内陸受音点を掲載する。C 案の 18 MW 機補正（+2 dB）を適用する場合は、各帯域の受音レベルおよび合計値にそれぞれ 2 dB を加算すればよい。2000 Hz 以上の帯域は大気吸収により受音レベルが 0 dB 以下となるため省略した。

表 28: A 案 (15MW × 35 基) : 夏季条件 (20°C、80%)

周波数 (Hz)	$L_p(\text{Z})$ (dB)	$L_p(\text{A})$ (dB)	$L_p(\text{C})$ (dB)
10	58.0	-12.4	43.7
12.5	57.0	-6.4	45.8
16	57.0	0.3	48.5
20	56.0	5.5	49.8
25	55.0	10.3	50.6
31.5	53.9	14.5	50.9
40	53.9	19.3	51.9
50	53.8	23.6	52.5
63	53.6	27.4	52.8
80	52.4	29.9	51.9
100	52.1	33.0	51.8
125	50.5	34.4	50.3
160	48.7	35.3	48.6
200	47.6	36.7	47.6
250	45.0	36.4	45.0
315	42.0	35.4	42.0
400	38.4	33.6	38.4
500	34.6	31.4	34.6
630	29.6	27.7	29.6
800	25.5	24.7	25.5
1000	20.5	20.5	20.5
1250	16.3	16.9	16.3
1600	9.8	10.8	9.7
2000	2.3	3.5	2.1
<b>合計</b>	<b>66.0</b>	<b>44.4</b>	<b>62.0</b>

表 29: B 案 (12MW × 42 基) : 冬季条件 (10°C、70%)

周波数 (Hz)	$L_p(\text{Z})$ (dB)	$L_p(\text{A})$ (dB)	$L_p(\text{C})$ (dB)
10	58.7	-11.7	44.4
12.5	57.7	-5.7	46.5
16	57.6	0.9	49.1
20	56.6	6.1	50.4
25	55.6	10.9	51.2
31.5	54.5	15.1	51.5
40	54.4	19.8	52.4
50	54.3	24.1	53.0
63	54.1	27.9	53.3
80	52.7	30.2	52.2
100	52.3	33.2	52.0
125	50.7	34.6	50.5
160	48.7	35.3	48.6
200	47.8	36.9	47.8
250	45.6	37.0	45.6
315	43.4	36.8	43.4
400	41.1	36.3	41.1
500	38.7	35.5	38.7
630	35.0	33.1	35.0
800	31.7	30.9	31.7
1000	26.6	26.6	26.6
1250	21.3	21.9	21.3
1600	12.2	13.2	12.1
2000	0.5	1.7	0.3
<b>合計</b>	<b>66.5</b>	<b>45.7</b>	<b>62.5</b>

表 30: B 案 (12MW × 42 基) : 夏季条件 (20°C、80%)

周波数 (Hz)	$L_p(Z)$ (dB)	$L_p(A)$ (dB)	$L_p(C)$ (dB)
10	58.7	-11.7	44.4
12.5	57.7	-5.7	46.5
16	57.7	1.0	49.2
20	56.7	6.2	50.5
25	55.6	10.9	51.2
31.5	54.6	15.2	51.6
40	54.5	19.9	52.5
50	54.4	24.2	53.1
63	54.3	28.1	53.5
80	53.1	30.6	52.6
100	52.7	33.6	52.4
125	51.2	35.1	51.0
160	49.3	35.9	49.2
200	48.2	37.3	48.2
250	45.6	37.0	45.6
315	42.6	36.0	42.6
400	38.9	34.1	38.9
500	35.2	32.0	35.2
630	30.2	28.3	30.2
800	26.1	25.3	26.1
1000	21.1	21.1	21.1
1250	16.8	17.4	16.8
1600	10.3	11.3	10.2
2000	2.8	4.0	2.6
<b>合計</b>	<b>66.6</b>	<b>45.0</b>	<b>62.7</b>

表 31: C 案 (18MW×25 基) : 海岸線 (10°C、70%)

周波数 (Hz)	$L_p(Z)$ (dB)	$L_p(A)$ (dB)	$L_p(C)$ (dB)
10	57.2	-13.2	42.9
12.5	56.2	-7.2	45.0
16	56.2	-0.5	47.7
20	55.2	4.7	49.0
25	54.1	9.4	49.7
31.5	53.1	13.7	50.1
40	53.0	18.4	51.0
50	52.9	22.7	51.6
63	52.7	26.5	51.9
80	51.3	28.8	50.8
100	50.9	31.8	50.6
125	49.4	33.3	49.2
160	47.5	34.1	47.4
200	46.6	35.7	46.6
250	44.6	36.0	44.6
315	42.4	35.8	42.4
400	40.1	35.3	40.1
500	37.9	34.7	37.9
630	34.3	32.4	34.3
800	31.1	30.3	31.1
1000	26.2	26.2	26.2
1250	21.0	21.6	21.0
1600	12.1	13.1	12.0
2000	0.7	1.9	0.5
<b>合計</b>	<b>65.1</b>	<b>44.6</b>	<b>61.1</b>

表 32: A 案 (15MW×35 基) : 内陸 3km (10°C、70%)

周波数 (Hz)	$L_p(Z)$ (dB)	$L_p(A)$ (dB)	$L_p(C)$ (dB)
10	53.9	-16.5	39.6
12.5	52.8	-10.6	41.6
16	52.8	-3.9	44.3
20	51.8	1.3	45.6
25	50.7	6.0	46.3
31.5	49.6	10.2	46.6
40	49.5	14.9	47.5
50	49.3	19.1	48.0
63	48.9	22.7	48.1
80	47.4	24.9	46.9
100	46.7	27.6	46.4
125	44.7	28.6	44.5
160	42.2	28.8	42.1
200	40.6	29.7	40.6
250	36.9	28.3	36.9
315	33.8	27.2	33.8
400	30.6	25.8	30.6
500	27.2	24.0	27.2
630	22.3	20.4	22.3
800	17.2	16.4	17.2
1000	9.8	9.8	9.8
1250	0.4	1.0	0.4
<b>合計</b>	<b>61.5</b>	<b>37.5</b>	<b>57.1</b>

表 33: A 案 (15MW×35 基) : 内陸 5km (10°C、70%)

周波数 (Hz)	$L_p(Z)$ (dB)	$L_p(A)$ (dB)	$L_p(C)$ (dB)
10	51.9	-18.5	37.6
12.5	50.9	-12.5	39.7
16	50.9	-5.8	42.4
20	49.8	-0.7	43.6
25	48.7	4.0	44.3
31.5	47.6	8.2	44.6
40	47.4	12.8	45.4
50	47.2	17.0	45.9
63	46.7	20.5	45.9
80	45.1	22.6	44.6
100	44.2	25.1	43.9
125	41.9	25.8	41.7
160	39.1	25.7	39.0
200	37.1	26.2	37.1
250	32.7	24.1	32.7
315	29.1	22.5	29.1
400	25.2	20.4	25.2
500	21.3	18.1	21.3
630	15.5	13.6	15.5
800	9.4	8.6	9.4
1000	0.4	0.4	0.4
<b>合計</b>	<b>59.4</b>	<b>34.0</b>	<b>54.9</b>

表 34: B 案 (12MW×42 基) : 内陸 3km (10°C、70%)

周波数 (Hz)	$L_p(Z)$ (dB)	$L_p(A)$ (dB)	$L_p(C)$ (dB)
10	54.6	-15.8	40.3
12.5	53.5	-9.9	42.3
16	53.5	-3.2	45.0
20	52.5	2.0	46.3
25	51.4	6.7	47.0
31.5	50.3	10.9	47.3
40	50.2	15.6	48.2
50	50.0	19.8	48.7
63	49.6	23.4	48.8
80	48.1	25.6	47.6
100	47.3	28.2	47.0
125	45.3	29.2	45.1
160	42.9	29.5	42.8
200	41.3	30.4	41.3
250	37.5	28.9	37.5
315	34.5	27.9	34.5
400	31.2	26.4	31.2
500	27.8	24.6	27.8
630	22.9	21.0	22.9
800	17.8	17.0	17.8
1000	10.4	10.4	10.4
1250	1.0	1.6	1.0
<b>合計</b>	<b>62.2</b>	<b>38.2</b>	<b>57.8</b>

表 35: B 案 (12MW×42 基) : 内陸 5km (10°C、70%)

周波数 (Hz)	$L_p(Z)$ (dB)	$L_p(A)$ (dB)	$L_p(C)$ (dB)
10	52.6	-17.8	38.3
12.5	51.6	-11.8	40.4
16	51.6	-5.1	43.1
20	50.5	0.0	44.3
25	49.5	4.8	45.1
31.5	48.3	8.9	45.3
40	48.2	13.6	46.2
50	47.9	17.7	46.6
63	47.5	21.3	46.7
80	45.8	23.3	45.3
100	44.9	25.8	44.6
125	42.6	26.5	42.4
160	39.8	26.4	39.7
200	37.8	26.9	37.8
250	33.4	24.8	33.4
315	29.8	23.2	29.8
400	25.9	21.1	25.9
500	21.9	18.7	21.9
630	16.2	14.3	16.2
800	10.0	9.2	10.0
1000	1.0	1.0	1.0
<b>合計</b>	<b>60.1</b>	<b>34.7</b>	<b>55.6</b>

表 36: C 案 (18MW×25 基) : 内陸 3km (10°C、70%)

周波数 (Hz)	$L_p(\text{Z})$ (dB)	$L_p(\text{A})$ (dB)	$L_p(\text{C})$ (dB)
10	52.7	-17.7	38.4
12.5	51.7	-11.7	40.5
16	51.7	-5.0	43.2
20	50.6	0.1	44.4
25	49.6	4.9	45.2
31.5	48.5	9.1	45.5
40	48.3	13.7	46.3
50	48.1	17.9	46.8
63	47.8	21.6	47.0
80	46.3	23.8	45.8
100	45.6	26.5	45.3
125	43.6	27.5	43.4
160	41.2	27.8	41.1
200	39.7	28.8	39.7
250	36.0	27.4	36.0
315	33.0	26.4	33.0
400	29.9	25.1	29.9
500	26.6	23.4	26.6
630	21.8	19.9	21.8
800	16.9	16.1	16.9
1000	9.6	9.6	9.6
1250	0.4	1.0	0.4
<b>合計</b>	<b>60.3</b>	<b>36.6</b>	<b>56.0</b>

表 37: C 案 (18MW×25 基) : 内陸 5km (10°C、70%)

周波数 (Hz)	$L_p(\text{Z})$ (dB)	$L_p(\text{A})$ (dB)	$L_p(\text{C})$ (dB)
10	50.6	-19.8	36.3
12.5	49.6	-13.8	38.4
16	49.6	-7.1	41.1
20	48.5	-2.0	42.3
25	47.5	2.8	43.1
31.5	46.4	7.0	43.4
40	46.2	11.6	44.2
50	45.9	15.7	44.6
63	45.5	19.3	44.7
80	43.8	21.3	43.3
100	43.0	23.9	42.7
125	40.8	24.7	40.6
160	38.0	24.6	37.9
200	36.0	25.1	36.0
250	31.7	23.1	31.7
315	28.2	21.6	28.2
400	24.4	19.6	24.4
500	20.5	17.3	20.5
630	14.9	13.0	14.9
800	8.8	8.0	8.8
1000	0.1	0.1	0.1
<b>合計</b>	<b>58.2</b>	<b>32.9</b>	<b>53.7</b>

### C. 補正後受音レベルの帯域別詳細

本付録は、第 11.2.6 節の手順により算出された全帯域（10 Hz–2000 Hz、1/3 オクターブバンド 24 帯域）の補正後受音レベルを収録する。各表には Z 特性（物理的音圧レベル）を記載する。A 特性および C 特性の総合値は第 12.3 節の総括表を参照のこと。

表 38: A 案（15MW×35 基）・海岸線：補正後受音レベル  $L_p(Z)$  [dB]（全帯域）

Hz	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
10	59.4	61.8	61.5	64.0
12.5	58.4	60.8	60.5	63.0
16	58.4	60.8	60.5	63.0
20	57.4	59.8	59.5	62.0
25	56.3	58.7	58.4	60.9
31.5	55.3	57.7	57.4	59.9
40	55.2	57.6	57.3	59.8
50	55.0	57.4	57.1	59.6
63	55.3	58.5	57.2	60.6
80	54.0	57.2	55.9	59.3
100	53.5	56.7	55.4	58.8
125	51.9	55.1	53.8	57.2
160	50.0	53.2	51.9	55.3
200	49.0	52.2	50.9	54.3
250	45.3	47.9	47.9	50.7
315	43.1	45.7	45.7	48.5
400	40.8	43.4	43.4	46.2
500	38.4	41.0	41.0	43.8
630	33.1	34.5	35.5	37.0
800	29.8	31.2	32.2	33.7
1000	24.8	26.2	27.2	28.7
1250	19.5	20.9	21.9	23.4
1600	10.4	11.8	12.8	14.3
2000	-1.3	0.1	1.1	2.6
<b>合計 Z</b>	<b>67.4</b>	<b>69.9</b>	<b>69.4</b>	<b>72.1</b>
<b>合計 A</b>	<b>45.9</b>	<b>48.8</b>	<b>48.2</b>	<b>51.2</b>
<b>合計 C</b>	<b>63.4</b>	<b>66.2</b>	<b>65.4</b>	<b>68.4</b>
<b>合計 G</b>	<b>63.6</b>	<b>66.0</b>	<b>65.7</b>	<b>68.2</b>

表 39: A 案 (15MW×35 基)・内陸 3km：補正後受音レベル  $L_p(Z)$  [dB] (全帯域)

Hz	ケース 1	ケース 2	ケース 3	ケース 4
10	55.4	57.8	57.8	60.3
12.5	54.3	56.7	56.7	59.2
16	54.3	56.7	56.7	59.2
20	53.3	55.7	55.7	58.2
25	52.2	54.6	54.6	57.1
31.5	51.1	53.5	53.5	56.0
40	51.0	53.4	53.4	55.9
50	50.8	53.2	53.2	55.7
63	50.8	54.1	53.0	56.4
80	49.3	52.6	51.5	54.9
100	48.6	51.9	50.8	54.2
125	46.6	49.9	48.8	52.2
160	44.1	47.4	46.3	49.7
200	42.5	45.8	44.7	48.1
250	37.2	39.8	40.0	42.7
315	34.1	36.7	36.9	39.6
400	30.9	33.5	33.7	36.4
500	27.5	30.1	30.3	33.0
630	20.9	22.4	23.5	25.0
800	15.8	17.3	18.4	19.9
1000	8.4	9.9	11.0	12.5
1250	-1.0	0.5	1.6	3.1
1600	—	—	—	—
2000	—	—	—	—
合計 Z	<b>63.0</b>	<b>65.6</b>	<b>65.4</b>	<b>68.1</b>
合計 A	<b>38.8</b>	<b>41.9</b>	<b>41.2</b>	<b>44.4</b>
合計 C	<b>58.8</b>	<b>61.6</b>	<b>61.1</b>	<b>64.0</b>
合計 G	<b>59.5</b>	<b>61.9</b>	<b>61.9</b>	<b>64.4</b>

表 40: A 案 (15MW×35 基)・内陸 5km：補正後受音レベル  $L_p(Z)$  [dB] (全帯域)

Hz	ケース 1	ケース 2	ケース 3	ケース 4
10	53.4	55.8	56.0	58.5
12.5	52.4	54.8	55.0	57.5
16	52.4	54.8	55.0	57.5
20	51.3	53.7	53.9	56.4
25	50.2	52.6	52.8	55.3
31.5	49.1	51.5	51.7	54.2
40	48.9	51.3	51.5	54.0
50	48.7	51.1	51.3	53.8
63	48.6	51.9	51.0	54.3
80	47.0	50.3	49.4	52.7
100	46.1	49.4	48.5	51.8
125	43.8	47.1	46.2	49.5
160	41.0	44.3	43.4	46.7
200	39.0	42.3	41.4	44.7
250	33.0	35.6	35.9	38.6
315	29.4	32.0	32.3	35.0
400	25.5	28.1	28.4	31.1
500	21.6	24.2	24.5	27.2
630	14.1	15.6	16.8	18.3
800	8.0	9.5	10.7	12.2
1000	-1.0	0.5	1.7	3.2
1250	—	—	—	—
1600	—	—	—	—
2000	—	—	—	—
合計 Z	<b>61.0</b>	<b>63.5</b>	<b>63.5</b>	<b>66.2</b>
合計 A	<b>35.5</b>	<b>38.7</b>	<b>38.0</b>	<b>41.2</b>
合計 C	<b>56.5</b>	<b>59.3</b>	<b>59.1</b>	<b>61.9</b>
合計 G	<b>57.5</b>	<b>59.9</b>	<b>60.1</b>	<b>62.6</b>

表 41: B 案 (12MW×42 基)・海岸線：補正後受音レベル  $L_p(Z)$  [dB] (全帯域)

Hz	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
10	60.1	62.5	62.2	64.8
12.5	59.1	61.5	61.2	63.8
16	59.0	61.4	61.1	63.7
20	58.0	60.4	60.1	62.7
25	57.0	59.4	59.1	61.7
31.5	55.9	58.3	58.0	60.6
40	55.8	58.2	57.9	60.5
50	55.7	58.1	57.8	60.4
63	56.0	59.3	57.9	61.3
80	54.6	57.9	56.5	59.9
100	54.2	57.5	56.1	59.5
125	52.6	55.9	54.5	57.9
160	50.6	53.9	52.5	55.9
200	49.7	53.0	51.6	55.0
250	45.9	48.5	48.5	51.3
315	43.7	46.3	46.3	49.1
400	41.4	44.0	44.0	46.8
500	39.0	41.6	41.6	44.4
630	33.7	35.1	36.1	37.7
800	30.4	31.8	32.8	34.4
1000	25.3	26.7	27.7	29.3
1250	20.0	21.4	22.4	24.0
1600	10.9	12.3	13.3	14.9
2000	-0.8	0.6	1.6	3.2
合計 Z	<b>68.0</b>	<b>70.6</b>	<b>70.1</b>	<b>72.9</b>
合計 A	<b>46.6</b>	<b>49.5</b>	<b>48.8</b>	<b>51.8</b>
合計 C	<b>64.1</b>	<b>66.9</b>	<b>66.1</b>	<b>69.1</b>
合計 G	<b>64.2</b>	<b>66.6</b>	<b>66.3</b>	<b>68.9</b>

表 42: B 案 (12MW×42 基)・内陸 3km：補正後受音レベル  $L_p(Z)$  [dB] (全帯域)

Hz	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
10	56.1	58.5	58.5	61.0
12.5	55.0	57.4	57.4	59.9
16	55.0	57.4	57.4	59.9
20	54.0	56.4	56.4	58.9
25	52.9	55.3	55.3	57.8
31.5	51.8	54.2	54.2	56.7
40	51.7	54.1	54.1	56.6
50	51.5	53.9	53.9	56.4
63	51.5	54.8	53.7	57.1
80	50.0	53.3	52.2	55.6
100	49.2	52.5	51.4	54.8
125	47.2	50.5	49.4	52.8
160	44.8	48.1	47.0	50.4
200	43.2	46.5	45.4	48.8
250	37.8	40.4	40.6	43.3
315	34.8	37.4	37.6	40.3
400	31.5	34.1	34.3	37.0
500	28.1	30.7	30.9	33.6
630	21.6	23.0	24.1	25.6
800	16.5	17.9	19.0	20.5
1000	9.1	10.5	11.6	13.1
1250	-0.3	1.1	2.2	3.7
1600	—	—	—	—
2000	—	—	—	—
合計 Z	<b>63.7</b>	<b>66.3</b>	<b>66.1</b>	<b>68.8</b>
合計 A	<b>39.5</b>	<b>42.6</b>	<b>41.9</b>	<b>45.0</b>
合計 C	<b>59.5</b>	<b>62.3</b>	<b>61.8</b>	<b>64.7</b>
合計 G	<b>60.2</b>	<b>62.6</b>	<b>62.6</b>	<b>65.1</b>

表 43: B 案 (12MW×42 基)・内陸 5km：補正後受音レベル  $L_p(Z)$  [dB] (全帯域)

Hz	ケース 1	ケース 2	ケース 3	ケース 4
10	54.1	56.5	56.7	59.2
12.5	53.1	55.5	55.7	58.2
16	53.1	55.5	55.7	58.2
20	52.0	54.4	54.6	57.1
25	51.0	53.4	53.6	56.1
31.5	49.8	52.2	52.4	54.9
40	49.7	52.1	52.3	54.8
50	49.4	51.8	52.0	54.5
63	49.4	52.7	51.8	55.1
80	47.7	51.0	50.1	53.4
100	46.8	50.1	49.2	52.5
125	44.5	47.8	46.9	50.2
160	41.7	45.0	44.1	47.4
200	39.7	43.0	42.1	45.4
250	33.7	36.3	36.6	39.3
315	30.1	32.7	33.0	35.7
400	26.2	28.8	29.1	31.8
500	22.2	24.8	25.1	27.8
630	14.8	16.3	17.5	19.0
800	8.6	10.1	11.3	12.8
1000	-0.4	1.1	2.3	3.8
1250	—	—	—	—
1600	—	—	—	—
2000	—	—	—	—
合計 Z	<b>61.7</b>	<b>64.3</b>	<b>64.3</b>	<b>66.9</b>
合計 A	<b>36.2</b>	<b>39.4</b>	<b>38.7</b>	<b>41.9</b>
合計 C	<b>57.3</b>	<b>60.1</b>	<b>59.8</b>	<b>62.6</b>
合計 G	<b>58.2</b>	<b>60.6</b>	<b>60.8</b>	<b>63.3</b>

表 44: C 案 (18MW×25 基)・海岸線：補正後受音レベル  $L_p(Z)$  [dB] (全帯域)

Hz	ケース 1	ケース 2	ケース 3	ケース 4
10	58.7	61.3	61.0	63.9
12.5	57.7	60.3	60.0	62.9
16	57.7	60.3	60.0	62.9
20	56.7	59.3	59.0	61.9
25	55.6	58.2	57.9	60.8
31.5	54.6	57.2	56.9	59.8
40	54.5	57.1	56.8	59.7
50	54.4	57.0	56.7	59.6
63	54.7	58.1	56.8	60.5
80	53.3	56.7	55.4	59.1
100	52.9	56.3	55.0	58.7
125	51.4	54.8	53.5	57.2
160	49.5	52.9	51.6	55.3
200	48.6	52.0	50.7	54.4
250	44.9	47.7	47.8	50.7
315	42.7	45.5	45.6	48.5
400	40.4	43.2	43.3	46.2
500	38.2	41.0	41.1	44.0
630	33.0	34.6	35.6	37.2
800	29.8	31.4	32.4	34.0
1000	24.9	26.5	27.5	29.1
1250	19.7	21.3	22.3	23.9
1600	10.8	12.4	13.4	15.0
2000	-0.6	1.0	2.0	3.6
合計 Z	<b>66.7</b>	<b>69.5</b>	<b>69.0</b>	<b>72.0</b>
合計 A	<b>45.5</b>	<b>48.6</b>	<b>48.0</b>	<b>51.2</b>
合計 C	<b>62.8</b>	<b>65.8</b>	<b>65.0</b>	<b>68.3</b>
合計 G	<b>62.9</b>	<b>65.5</b>	<b>65.2</b>	<b>68.1</b>

表 45: C 案 (18MW×25 基)・内陸 3km：補正後受音レベル  $L_p(Z)$  [dB] (全帯域)

Hz	ケース 1	ケース 2	ケース 3	ケース 4
10	54.3	56.9	56.8	59.6
12.5	53.3	55.9	55.8	58.6
16	53.3	55.9	55.8	58.6
20	52.2	54.8	54.7	57.5
25	51.2	53.8	53.7	56.5
31.5	50.1	52.7	52.6	55.4
40	49.9	52.5	52.4	55.2
50	49.7	52.3	52.2	55.0
63	49.8	53.2	52.2	55.8
80	48.3	51.7	50.7	54.3
100	47.6	51.0	50.0	53.6
125	45.6	49.0	48.0	51.6
160	43.2	46.6	45.6	49.2
200	41.7	45.1	44.1	47.7
250	36.3	39.1	39.3	42.2
315	33.3	36.1	36.3	39.2
400	30.2	33.0	33.2	36.1
500	26.9	29.7	29.9	32.8
630	20.5	22.1	23.2	24.8
800	15.6	17.2	18.3	19.9
1000	8.3	9.9	11.0	12.6
1250	-0.9	0.7	1.8	3.4
1600	—	—	—	—
2000	—	—	—	—
合計 Z	<b>62.0</b>	<b>64.8</b>	<b>64.5</b>	<b>67.5</b>
合計 A	<b>38.0</b>	<b>41.2</b>	<b>40.5</b>	<b>43.9</b>
合計 C	<b>57.8</b>	<b>60.7</b>	<b>60.2</b>	<b>63.4</b>
合計 G	<b>58.4</b>	<b>61.0</b>	<b>60.9</b>	<b>63.7</b>

表 46: C 案 (18MW×25 基)・内陸 5km：補正後受音レベル  $L_p(Z)$  [dB] (全帯域)

Hz	ケース 1	ケース 2	ケース 3	ケース 4
10	52.2	54.8	54.9	57.7
12.5	51.2	53.8	53.9	56.7
16	51.2	53.8	53.9	56.7
20	50.1	52.7	52.8	55.6
25	49.1	51.7	51.8	54.6
31.5	48.0	50.6	50.7	53.5
40	47.8	50.4	50.5	53.3
50	47.5	50.1	50.2	53.0
63	47.5	51.0	50.0	53.6
80	45.8	49.3	48.3	51.9
100	45.0	48.5	47.5	51.1
125	42.8	46.3	45.3	48.9
160	40.0	43.5	42.5	46.1
200	38.0	41.5	40.5	44.1
250	32.0	34.8	35.1	38.0
315	28.5	31.3	31.6	34.5
400	24.7	27.5	27.8	30.7
500	20.8	23.6	23.9	26.8
630	13.6	15.2	16.3	17.9
800	7.5	9.1	10.2	11.8
1000	-1.2	0.4	1.5	3.1
1250	—	—	—	—
1600	—	—	—	—
2000	—	—	—	—
合計 Z	<b>59.8</b>	<b>62.6</b>	<b>62.5</b>	<b>65.4</b>
合計 A	<b>34.5</b>	<b>37.8</b>	<b>37.1</b>	<b>40.5</b>
合計 C	<b>55.4</b>	<b>58.4</b>	<b>58.0</b>	<b>61.2</b>
合計 G	<b>56.3</b>	<b>58.9</b>	<b>59.0</b>	<b>61.8</b>