

ウィンドファーム認証に係る技術資料

Ver. 20171212

改訂履歴

No.	日付	区分	改訂内容
1	2017 年 12 月 12 日	新規	新規発行

はじめに

本会のウィンドファーム認証については、国際規格である IEC61400-22 で規定されるプロジェクト認証のうち、設計に係る部分のみを抽出し、電気事業法による風力発電所の工事計画届の審査に資する認証として 2016 年に開始し、現在まで様々な風力発電所に対する認証を発行してきた。

これまでの認証に係る審査によって蓄積された知見等を踏まえて、風力発電事業者、風車メーカー及び支持構造物設計者に対するウィンドファーム認証に係る情報提供を目的としてこの技術資料をまとめるものである。

本技術資料は、あくまでも関係者に対する情報提供を目的としたものであり、実際のウィンドファーム認証に関わる審査は、本技術資料の記載内容に縛られるものではないが、今後ウィンドファーム認証の取得を検討されている皆様にとっては参考になるのではないかと考えている。

繰り返しになるが、本技術資料はあくまでも標準的な事例を想定した参考資料との扱いであり、内容については予告なく変更される可能性があること、実際の審査においては個々の事例を勘案して記載内容とは異なる取扱いとなる可能性があることに注意されたい。

本技術資料が、本会のウィンドファーム認証を理解する上で一助となることを期待する。

目 次

1 章 一般

1.1	ウィンドファーム認証	4
1.2	引用規格	4
1.3	提出文書	5

2 章 サイト条件評価

2.1	一般	6
2.2	風条件	6
2.2.1	観測データの評価	6
2.2.2	地形的複雑さの評価	6
2.2.3	風車位置の風条件の評価	7
2.2.4	風速出現頻度分布の算定	7
2.2.5	乱流強度の算定	7
2.2.6	ウィンドシアの算定	8
2.2.7	気流傾斜角の算定	8
2.2.8	極値風速の算定	8
2.2.9	大気密度の算定	9
2.3	地盤及び地震条件	9
2.4	海象条件	9
2.4.1	一般	9
2.4.2	波条件	9
2.4.3	水流条件	10
2.4.4	水位条件	10
2.4.5	その他の海象条件	10
2.5	雷条件	11
2.6	その他の環境条件	11

3 章 設計基準評価

3.1	一般	12
3.2	設計基準の要求事項	12

4 章 全体荷重解析評価

4.1	一般	13
4.2	RNA 評価に係る荷重解析の要求事項	13
4.2.1	一般	13
4.2.2	隣接風車の後流影響評価	13
4.2.3	終局荷重解析	14
4.2.4	疲労荷重解析	14
4.2.5	ナセルカバーに対する荷重	14
4.3	支持構造物設計に係る荷重解析の要求事項	15

5 章 風車（RNA）設計評価

5.1 一般	16
5.2 RNA 設計評価	16
5.2.1 荷重比較による検証	16
5.2.2 サイト固有の荷重条件による強度検証	16
5.2.3 その他の項目に係る評価	16
5.3 系統電力喪失時の評価	17
5.3.1 一般	17
5.3.2 バックアップ電源	17
5.4 雷保護対策の評価	18
5.4.1 雷撃からの保護	18

6 章 支持構造物設計評価

6.1 一般	19
--------	----

Annex A 観測データの評価方法	20
Annex B 気流解析条件及び妥当性確認方法	21
Annex C 風条件の評価方法	23
Annex D 海象条件の評価方法（参考）	29

1 章 一般

1.1 ウィンドファーム認証

- 1. ウィンドファーム認証とは、支持構造物を含む 1 基又は複数の特定の風車が特定サイトに関する要求事項に適合していることを本会が書面を発行して証明する手続きのこと。本会が発行する「風車及びウィンドファームの認証に関するガイドライン」で規定されるプロジェクト認証のうち設計評価に係る要求事項のみを対象とする。
- 2. ウィンドファーム認証は、日本国内において電気事業法の適用を受ける 1 基又は複数の風車を設置するプロジェクトを対象とする。認証の対象範囲は、風車又は／及びその基礎を含む支持構造物とする。日本国外のプロジェクトを対象とする場合の扱いについては、別途本会が適当と認めるところによる。
- 3. ウィンドファーム認証の目的は、型式認証された風車及び認証対象となる支持構造物及び基礎の設計が、外部条件及び電気事業法に基づく要求事項に適合しているかどうかを評価することにある。
- 4. 型式認証書を取得していない風車でウィンドファーム認証を行う場合は、型式認証に準じた評価が必要となる。
- 5. 型式認証された風車に関わるウィンドファーム認証は、次のモジュールで構成される。
 - (1) サイト条件評価
 - (2) 設計基準評価
 - (3) 全体荷重解析
 - (4) サイト固有の風車（RNA）設計評価
 - (5) 支持構造物設計評価

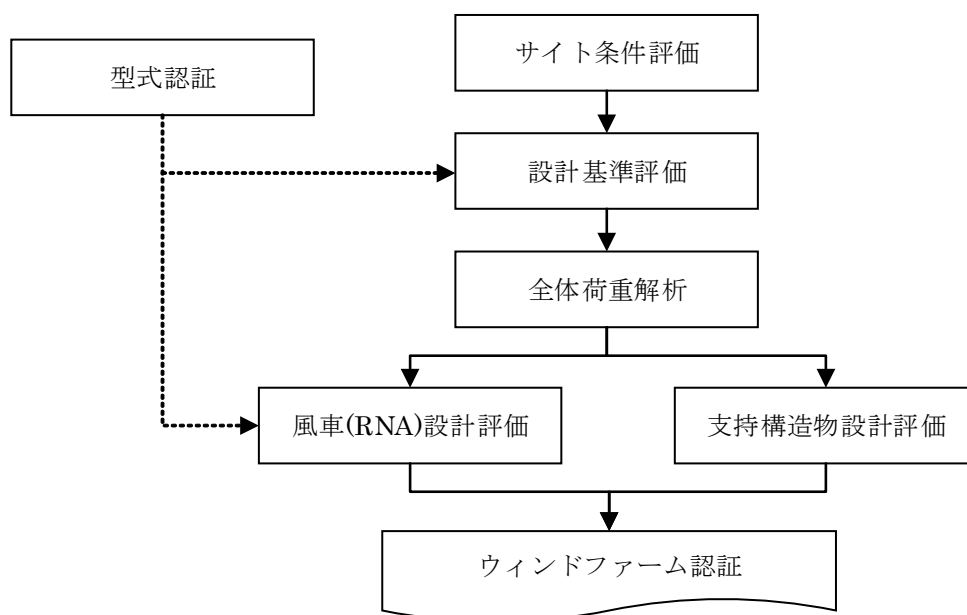


図1 ウィンドファーム認証のモジュール

1.2 引用規格

- 1. 次に掲げる規格は、本技術資料に引用されることにより、本技術資料の規定の一部を構成する。これらの引用規格のうちで、西暦年を付記してあるものは、記載の年の版を適用し、その後の改正版（追補を含む。）は適用しない。西暦年の付記がない引用規格は、その最新版（追補を含む。）を適用する。

(1) JIS C 1400-1:2017 : 風力発電システムー第1部：設計要件

- (2) JIS C 1400-3:2014 : 風力発電システムー第 3 部: 洋上風車の設計要件
- (3) JIS C 1400-12-1:2010 : 風車ー第 12-1 部: 発電用風車の性能試験方法
- (4) JIS C 1400-24:2014 : 風車ー第 24 部: 雷保護
- (5) 風力発電設備支持物構造設計指針・同解説 [2010 年版]
- (6) 浮体式洋上風力発電設備に関するガイドライン (日本海事協会 2012 年)

1.3 提出文書

-1. ウィンドファーム認証の申請者は, 評価対象項目に応じて次に掲げる文書を本会に提出しなければならない。

- (1) 型式認証書及び最終評価レポート
- (2) 設計基準評価適合証明書及びその評価レポート
- (3) 設計評価適合証明書及びその評価レポート
- (4) 型式試験適合証明書及びその評価レポート
- (5) 製造評価適合証明書及びその評価レポート
- (6) 前(1)から(5)の評価レポートに記載されている風車製造者より認証機関へ提出した図面及び計算書
- (7) 計画サイトの基本情報
- (8) サイト条件評価に係る文書
- (9) 設計基準評価に係る文書
- (10) 全体荷重解析に係る文書
- (11) 風車設計評価に係る文書
- (12) 支持構造物設計評価に係る文書

2 章 サイト条件評価

2.1 一般

- 1. 適切なレベルの安全性と信頼性を確保するために、設計に関連するサイト固有の外部条件とパラメータを考慮しなければならない。
- 2. 外部条件は、適切な確率レベルを考慮して構造に最も厳しくなるような条件で指定されなければならない。
- 3. サイト条件の評価は、サイト固有の観測値に基づいて行ってもよい。一般に、サイト固有の観測値は、近隣地点における長期観測データと、相関関係进行评估しなければならない。サイト固有の観測値の取得期間は、信頼できるデータを得るために十分な期間に亘ったものでなければならない。

2.2 風条件

2.2.1 観測データの評価

- 1. 外部条件の評価は、計画ウィンドファームを代表する一つ又は複数の地点に設置した風況観測塔を用いて取得したデータにより行わなければならない。観測期間は、季節的な影響が入るように少なくとも 1 年以上とし、信頼できるデータを得るのに十分な期間としなければならない。
- 2. 観測地点は、計画ウィンドファームのサイト固有条件（地形、標高、地表面粗度、年平均風速、乱流強度等）を代表する地点を選定する。代表する地点を選定するにあたっては、気流解析を用いるのが望ましい。気流解析を用いる場合は、2.2.3 を参照する。
- 3. 観測高度は、原則として計画ハブ高度の 2/3 以上としなければならない。観測地点と風車建設地点の距離は、表 2.1 に示す地形の複雑度に応じた代表半径以内にするのが望ましい。
- 4. 風速計は、観測マスト及びブームからの影響が最小となるように配置しなければならない。なお、風況観測塔及び観測機器の設置方法は Annex A に従ってもよい。
- 5. 観測機器の故障等で観測データが欠けている期間や異常なデータとなっている期間がある場合、適切な方法によりデータを補完しなければならない。なお、データ補完処理後の有効データ率は 95%以上としなければならない。
- 6. 風速計及び風向計、あるいは IEC61400-12-1 に準拠して設置したバックアップセンサーのフィルター処理後のデータの充足率は 90%以下としなければならない。また、サイト内で計測した別の観測データまたは近隣気象観測所のデータを使用して、MCP 法（Measure-Correlate-Predict Method, 計測-相関-推測法）等により補完しなければならない。なお、MCP 法による補完を実施する場合、相関係数は 0.8 以上が望ましい。
- 7. 観測されたデータについては、サイトの近隣気象観測所の長期観測データを用いて平年値との比較を行い、平年値を下回っている場合には、適切に補正しなければならない。
- 8. 観測データの解析結果については、適切な形でレポートにまとめて提出しなければならない。

表 2.1 観測高さ及び代表半径(MEASNET)

地形クラス	最小観測高さ	観測マストの代表半径
平坦地形	ハブ高さの 2/3	10km
複雑地形	ハブ高さの 2/3	2km

2.2.2 地形的複雑さの評価

- 1. 気流解析のモデルの選定及び評価風向セクター数の評価のため、表 2.2 に示す判定指標により地形の複雑さを判定しなければならない。

- 2. 計画サイトが、表 2.2 に示す判定指標を満たさず地形が複雑と判定された場合は、気流解析において非線形モデルを選定しなくてはならない。なお、この場合は評価に用いる地形データの解像度は z_{hub} 以下としなければならない。
- 3. 前-1.の規定に寄り難い場合については、RIX (Ruggedness Index) による判定を適用しても差し支えない。

表 2.2 地形の複雑さの判定指標

風車からの距離範囲	方位区分幅	近似平面の最大傾斜	最大地形変化*
< 5 z _{hub}	360°	< 10°	< 0.3 z _{hub}
< 10 z _{hub}	30°		< 0.6 z _{hub}
< 20 z _{hub}	30°		< 1.2 z _{hub}
z _{hub} は風車ハブ高さ			
注* 指標を満たさない部分の合計面積が 5 z _{hub} ² 未満の場合、指標は満たされたもの（平坦地形）とみなす。			

2.2.3 風車位置の風条件の評価

- 1. 風車位置の風条件を予測するため、気流解析を実施しなければならない。なお、気流解析にあたっては、以下の項目を適切に実施しなければならない。
- (1) 気流解析モデル及び風向セクター数は、2.2.2 に示す地形の複雑度判定に基づき、表 2.3 により選定する。
 - (2) 気流解析の解析条件は、Annex B に従って適切に設定する。
 - (3) 気流解析の結果の妥当性確認は、風速・乱流強度・ウィンドシアなどサイトの風況観測データとの比較によって示す。

表 2.3 気流解析モデル及び風向セクター数の要求事項

地形の複雑度	気流解析モデル	風向セクター数
平坦地形	線形モデル／非線形モデル	12 以上
複雑地形	非線形モデル	16 以上

- 2. 気流解析の妥当性を示すため、以下の項目について、設定条件及びその妥当性を明確に示さなければならない。また、計算領域および計算格子の図（図中に観測地点、風車設置地点を表示）を示さなければならない。
- (1) 入力地形データ
 - (2) 地表面粗度データ
 - (3) 計算領域
 - (4) 計算解像度
 - (5) 境界条件
 - (6) 方位分割

2.2.4 風速出現頻度分布の算定

- 1. サイトの風況観測データを用いて、風車位置のハブ高さにおける方位別の出現頻度及び方位別のワイブルパラメータを算定しなければならない。
- 2. ワイブルパラメータの算定については、Annex C の式 (C.1) に従ってもよい。

2.2.5 乱流強度の算定

- 1. サイトの風況観測データを用いて、風車位置のハブ高さにおける乱流強度を算定しなければならない。
- 2. 乱流強度を算定するため、周囲乱流標準偏差 $\hat{\sigma}$ [主風向成分の標準偏差の風速ビン平均値（乱流の主方向成分は、

水平成分によって近似してもよい]と $V_{in} \sim V_{out}$ の間の V_{hub} における $\hat{\sigma}$ 及び $\hat{\sigma}$ の標準偏差 $\hat{\sigma}_o$ と再現期間 50 年の極値風速としての 10 分間平均風速 V_{ref} と等しい V_{hub} における $\hat{\sigma}_o$ を算定しなければならない。

- 3. 乱流標準偏差については、主風向成分 $\hat{\sigma}_1$ だけではなくその横方向 $\hat{\sigma}_2$ および上方向成分 $\hat{\sigma}_3$ についても適切に評価しなければならない。
- 4. 乱流成分に関するサイトのデータがなく、かつ、地形が複雑な場合には、主流方向成分に対する横方向及び上方向の乱流標準偏差の比率は、それぞれ 1.0 及び 0.7 と仮定しなければならない。
- 5. 乱流強度の具体的な算定方法は Annex C に従ってもよい。

2.2.6 ウィンドシアの算定

- 1. サイトの風況観測データを用いて、風車位置のロータ受風面の高さ方向のウィンドシアのべき指数を算定しなければならない。
- 2. 発電時の風条件に対応するウィンドシアのべき指数については、サイトの風況観測データから予測される風車位置での方位別の値を 2.2.4 で求めた出現頻度で加重平均した値を用いなければならない。
- 3. -2.で求めた値が 0.2 を下回る場合は、0.2 以上としなければならない。ただし、洋上の場合は、0.14 以上とすることで差し支えない。
- 4. 極値風速に対応するウィンドシアのべき指数は、2.2.9-4 に従って算定しなければならない。

2.2.7 気流傾斜角の算定

- 1. 風車位置のハブ高さにおける方位別の気流傾斜角を求め、方位別の出現頻度で加重平均した気流傾斜角を算定しなければならない。
- 2. 気流傾斜角の具体的な算定方法は Annex C に従ってもよい。

2.2.8 隣接風車の後流影響評価

- 1. 発電中の隣接風車の後流影響を適切に評価しなければならない。
- 2. 風上に位置する風車からの単一又は複数の後流を考慮した乱流特性を、風車間の距離の影響を含めて、発電に係る全ての周囲風速及び風向に対して考慮しなければならない。
- 3. 周囲乱流及び離散し乱れた後流の影響の考慮については、有効乱流強度 (I_{eff}) を用いることとして差し支えない。
- 4. 疲労計算に関する有効乱流強度は、JIS C 1400-1:2017 附属書 D など、適切なモデルに基づいて算定しなければならない。

2.2.9 極値風速の算定

- 1. 風車位置のハブ高さにおける再現期間 50 年の極値風速として 10 分間平均風速 V_{ref} 及び 3 秒間平均風速 V_{e50} を算定しなければならない。
- 2. 極値風速の算定方法は、風力発電設備支持物構造設計指針・同解説 [2010 年版] に準拠している Annex C2.5 に従わなければならない。
- 3. 再現期間 50 年の極値風速のうち、3 秒間平均風速 V_{e50} については、信頼に足る乱流強度の観測データがある場合に限り、Annex C2.5 に代えて Annex C2.6 に従ってもよい。
- 4. 再現期間 50 年の極値風速のうち、10 分間平均風速 V_{ref} に対応するウィンドシアのべき指数は、以下の項目のうち最も安全側の数値を採用しなければならない。

- (1) Annex C に定める地表面粗度区分に応じたべき指数
- (2) JIS C1400-1:2017 で規定される再現期間 50 年の 10 分間平均風速に対応するウィンドシアのべき指数
- (3) Annex C2.5-6. で規定される再現期間 50 年の 10 分間平均風速に対応するべき指数

2.2.10 大気密度の算定

- 1. 現地観測データにより大気密度を算定しなければならない。
- 2. 大気密度の具体的な算定方法は Annex C に従ってもよい。

2.3 地盤及び地震条件

- 1. サイトが陸上の場合、以下に示す省令及び指針の要求事項に対応した地盤及び地震条件を設定しなければならない。
 - (1) 発電用風力設備に関する技術基準を定める省令（経済産業省 平成九年三月二十七日通商産業省令第五十三号，最終改正：平成二十一年一月一八日経済産業省令第六九号）
 - (2) 風力発電設備支持物構造設計指針・同解説〔2010 年版〕
- 2. サイトが洋上で、かつ支持構造物が着床式の場合は、前-1.の要求事項に加え、本会が適当と認める規格または設計指針等に従い、地盤及び地震条件を設定しなければならない。
- 3. サイトが洋上で、かつ支持構造物が浮体式の場合は、前-1.で示す省令に加え、浮体式洋上風力発電設備に関するガイドライン及びその他本会が適当と認める規格または設計指針に従い、地盤及び地震条件を設定しなければならない。
- 4. 建設予定地点について、陸上／洋上の区別が明確でない場合についての取扱い、本会が適当と認めるところによる。

2.4 海象条件

2.4.1 一般

- 1. 計画サイトの外部環境条件としての海象条件は、少なくとも次の項目について算定しなければならない。
 - (1) 波条件：
 - 再現期間 50 年及び 1 年の有義波高及びそれに関連する有義波周期の範囲
 - 風速，有義波高及び有義波周期の結合確率密度分布
 - (2) 水流条件：
 - 再現期間 50 年及び 1 年の極値水流
 - 風速階級別の平均水流
 - (3) 水位条件：
 - 再現期間 50 年及び 1 年の極値水位
 - 平均水位
 - (4) その他の海象条件：
 - 津波
 - 海底変形及び洗掘
 - 海氷
 - 海洋付着生物
- 2. 海象条件の算定には、サイト近傍での観測データに基づく推算値を用いてもよい。この場合、推算値の妥当性について十分な根拠を示さなければならない。

2.4.2 波条件

- 1. 再現期間 50 年及び 1 年の有義波高及びそれに関連する有義波周期の範囲を算定しなければならない。再現期間

50 年及び 1 年の沖波の値は、公的な機関が発行している資料の値を用いても差し支えない。

-2. 水深が波長の 1/2 未満となる浅海域においては、屈折、回折、浅水変形及び砕波など波の変形を考慮しなければならない。波の変形を考慮する場合には、それぞれの再現期間の波高と同時に発生する潮位を考慮しなければならない。ただし、浅海域の波の変形を考慮しないことで安全側となる場合は、この限りではない。

-3. ハブ高さにおける風速、有義波高及び有義波周期の結合確率分布を求めなければならない。結合確率分布の分解能は、風速のビン間隔が 2m/s 以下、有義波高のビン間隔が 0.5m 以下及び有義波周期のビン間隔が 0.5s 以下であるような値でなければならない。方位別データがある場合、風向及び波向に関する結合確率分布はビン間隔 30° 以上で算出することを基本とする。

-4. 結合確率分布を外挿する場合は、Annex D に示す方法により算定してもよい。

2.4.3 水流条件

-1. 再現期間 50 年及び 1 年の極値流速を算定しなければならない。極値流速には水中流、吹送流及び風車位置周辺で砕波が予想される場合には海浜流を考慮しなければならない。観測値から極値水流を算定する場合は、観測値にはこれらの値が含まれているものとして扱ってよい。

-2. ハブ高さを基準とする風速階級別の平均水流を算定しなければならない。風速階級別の水流には水中流、吹送流及び風車位置周辺で砕波が予想される場合には海浜流を考慮しなければならない。観測値から風速階級別の平均水流を算定する場合は、観測値にはこれらの値が含まれているものとして扱ってよい。

-3. 極値流速及び風速階級別の平均水流については、Annex D に示す方法により算定してもよい。

2.4.4 水位条件

-1. 再現期間 50 年及び 1 年の極値水位変動幅を算定しなければならない。サイトにおいて高潮が想定される場合は、高潮による水位上昇を適切に考慮する必要がある。Annex D に示す手法により算定しても良い。

-2. 1 年再現期間の極値水位について、天文潮位による推算値を用いて算出する場合には、最高及び最低天文潮位としなければならない。

-3. 1 年以上の期間にわたる水位を平均して得られる平均水位を求めなければならない。サイトにおける観測または推算値が得られない場合は、周辺の港湾や検潮所における観測値を用いてもよい。

-4. 再現期間 50 年及び 1 年の極値水位変動幅については、Annex D に示す方法により算定してもよい。

2.4.5 その他の海象条件

-1. 以下の (a) から (d) に示す海象条件についても、サイトの状況に応じて適切に設定しなければならない。

(a) 津波

- 風車設置海域周辺の港湾等で推定されている値を考慮して算定しなければならない。ただし、水深が十分深い場合は、津波による影響を潮位変動及び海流として取り扱っても良い。

(b) 海底変形及び洗掘

- サイトの海底地形及び地盤構成から、斜面の崩壊、地滑り、陥没及び浸食現象が発生する可能性を検討しなければならない。なお、具体的な検討内容については、JIS C 1400-3:2014 または本会が適当と認める設計基準に従うこと。

(c) 海氷

- 風車設置海域が海氷の発生が予想される海域である場合は、海氷による影響を考慮しなければならない。なお、具体的な検討内容については、JIS C 1400-3:2014 または本会が適当と認める設計基準に従うこと。

(d) 海洋付着生物

- 海洋付着生物による影響を考慮しなければならない。具体的な検討内容については、JIS C 1400-3:2014 また

は本会が適当と認める設計基準に従うこと。

2.5 雷条件

- 1. 風車及びウィンドファームの計画設置地点における雷条件は、落雷頻度、落雷日数分布等により地域特性を評価しなければならない。
- 2. 地域毎の被雷頻度は、図 2.1 に示す実線で囲まれた区域、点線で囲まれた区域及びその他の区域の 3 つに区別される。

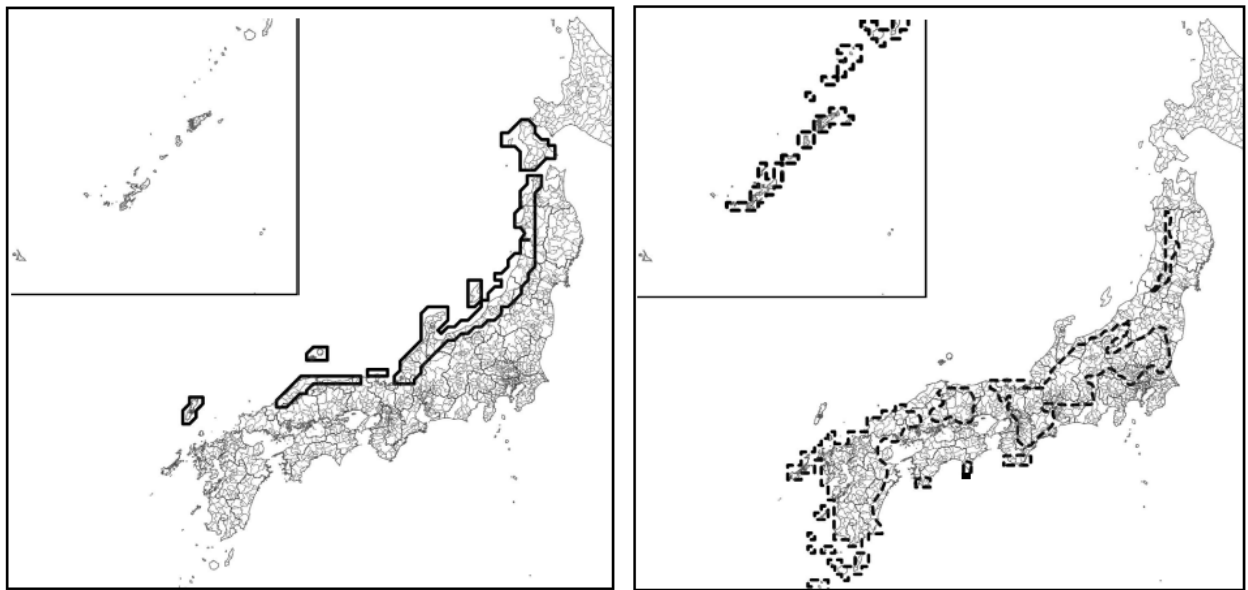


図 2.1 被雷リスクマップ

2.6 その他の環境条件

- 1. サイトの特性に応じて以下に示す環境条件による影響の可能性の有無を検討しなければならない。
 - (1) 通常気温及び極値気温
 - (2) 設計垂直積雪量
 - (3) 湿度
 - (4) 塩分
 - (5) 海水密度
 - (6) 水温

3 章 設計基準評価

3.1 一般

- 1. 設計基準評価の目的は、設計基準が正しく文書化され、安全な設計及びプロジェクト遂行のために十分なものとなっているかどうかを審査することにある。
- 2. サイトが洋上で、かつ支持構造物が着床式の場合は、本章の規定に加え、本会が適当と認める規格または設計指針等に従い、設計基準を設定しなければならない。
- 3. サイトが洋上で、かつ支持構造物が浮体式の場合は、本章の規定に加え、浮体式洋上風力発電設備に関するガイドラインに従い、設計基準を設定しなければならない。

3.2 設計基準の要求事項

- 1. 設計基準には、次の事項が含まれる。
 - (1) サイト条件
 - (2) 設計手法及び原理
 - (3) 適用基準及び規格
 - (4) 風車の型式、主要仕様書又は型式認証書で標準的な仕様からの変更点が明示されたもの
 - (5) 支持構造物の仕様
- 2. 設計基準には、関連するすべての総合的な設計事項、並びにサイト条件、荷重、設計荷重ケース、荷重及び材料に適用される部分安全率、形状の許容公差、許容される腐食しろの進行度合いなどに関する計算に適用されるパラメータを含めなければならない。
- 3. 風車の設計基準を示す文書には、次の事項についてどのように定めたのかを含めて記載しなければならない。
 - (1) 基準及び規格
 - (2) サイト条件
 - (3) 風車の仕様、及び型式認証時の仕様からの変更がある場合はその変更前後の仕様の比較
 - (4) 荷重解析手法、及び当該手法を適用することの妥当性
 - (5) それぞれの荷重に対する部分安全係数及び荷重低減係数、及び当該係数を適用することの妥当性
 - (6) 終局及び疲労強度に関する評価手法、及び当該手法を適用することの妥当性
- 4. 支持構造物の設計基準を示す文書には、次の事項についてどのように定めたのかを含めて記載しなければならない。
 - (1) 基準及び規格
 - (2) サイト条件
 - (3) 支持構造物の仕様
 - (4) 設計方針（要求性能と照査項目、使用材料と材料定数、形状の許容公差及び腐食予備厚など）
 - (5) 荷重解析手法、及び当該手法を適用することの妥当性
 - (6) それぞれの荷重に対する部分安全係数及び荷重低減係数、及び当該係数を適用することの妥当性
 - (7) 終局及び疲労強度に関する評価手法、及び当該手法を適用することの妥当性

4 章 全体荷重解析評価

4.1 一般

-1. 全体荷重解析の目的は、ロータ・ナセル・アセンブリ（RNA）に加え、支持構造物及び支持地盤を含む風車構造全体へのサイト固有の荷重及び荷重の影響が、設計基準に適合するように算定されているかどうかを評価することにある。

4.2 RNA 評価に係る荷重解析の要求事項

4.2.1 一般

-1. サイトが陸上の場合、荷重及び荷重の影響に関する設計基準の条件及び要求事項がその型式の風車に対する型式認証で設定されている内容を下回っており、風車の制御を含む特性が同じであることが本会によって確認された場合、2章で定めるサイト条件に基づく荷重解析は要求されない。

-2. 前-1.の確認にあたっては、JIS C 1400:2017 11.9 に従い、2章で定めるサイト条件に基づき、4.2.2 に示す発電中の隣接風車による後流影響を考慮したサイト固有の設計条件と型式認証で設定された設計値との比較を行わなければならない。

-3. 前-1.の場合以外で、次の項目に合致する場合には、2章で定めるサイト条件に基づき、4.2.2 で定める隣接風車の後流影響を考慮したサイト固有の設計条件に従い、4.2.3 及び 4.2.4 で定める荷重解析を行わなければならない。

- (1) サイトが洋上の場合
- (2) 荷重及び荷重の影響に関する設計基準の条件及び要求事項が、その型式の風車及び支持構造物に対する型式認証で設定されている内容を超過する場合
- (3) 風車の制御を含む特性が、型式認証で設定されている内容と異なる場合

-4. 荷重解析の結果を示す文書については、少なくとも次の項目を記載しなければならない。

- (1) 荷重解析に適用する隣接風車の後流影響を考慮したサイト固有の設計条件
- (2) セクターマネジメントの設定値（設定する場合のみ）
- (3) (1)で示すサイト固有の設計条件と設計荷重ケースの組合せ
- (4) それぞれの設計荷重ケースに対する部分安全係数
- (5) シミュレーション手順、シミュレーションのケース数、及び風と波浪との組合せなどの計算方法
- (6) サイト条件並びに風車運転及び安全システムの動作により定まる、風車の設計における支配的条件となる設計荷重ケース
- (7) サイト固有の条件による荷重と型式認証で想定された荷重との差異

4.2.2 隣接風車の後流影響評価

-1. 発電中の隣接風車の後流影響を適切に評価しなければならない。

-2. 風上に位置する風車からの単一又は複数の後流を考慮した乱流特性を、風車間の距離の影響を含めて、発電に係る全ての周囲風速及び風向に対して考慮しなければならない。

-3. 周囲乱流及び離散し乱れた後流の影響の考慮については、有効乱流強度 (I_{eff}) を用いることとして差し支えない。

-4. 疲労計算に関する有効乱流強度は、JIS C 1400-1:2017 附属書 D など、適切なモデルに基づいて算定しなければならない。

4.2.3 終局荷重解析

- 1. サイトが陸上の場合の終局荷重解析は、4.2.1 で定めるサイト固有の設計条件及び以下に示す設計荷重ケースに基づき実施しなければならない。
 - (1) 発電時の風況条件が超過する場合は、少なくとも DLC 1.1 又は DLC 1.3, 及び DLC 1.5 を評価することとし、風車後流の影響を受ける場合は適切にそれを考慮しなければならない。
 - (2) 極値風速が超過する場合は、少なくとも DLC 6.1, DLC 6.2, 及び DLC 7.1 を評価する。
- 2. 前-1.に加え、風車の型式認証時の想定及びサイトの風況条件に応じて適切に設計荷重ケースを追加しなければならない。
- 3. サイトが洋上で、かつ支持構造物が着床式の場合は、JIS C 1400-3:2014 に従い終局荷重解析を実施しなければならない。
- 4. サイトが洋上で、かつ支持構造物が浮体式の場合は、浮体式洋上風力発電設備に関するガイドライン及び本会が適当と認める指針・基準に従い終局荷重解析を実施しなければならない。
- 5. 連系する系統電力が喪失した場合の対策としてバックアップ電源を設ける風車の場合は、5.3 に従って評価を行ない、終局荷重解析において適用する設計荷重ケースを決定しなければならない。
- 6. サイトの極値風速が風車の型式認証時の設計風速を大きく超える場合については、極値風速状態に適用する荷重シミュレーション手法の妥当性を十分に検証しなければならない。
- 7. 待機状態において、パッシブヨー制御（フリーヨーなど）を行う風車の場合、設計荷重ケースの設定は別途本会が適当と認めるところによる。

4.2.4 疲労荷重解析

- 1. サイトが陸上の場合の疲労荷重解析は、4.2.1 で定めるサイト固有の設計条件及び型式認証における設計荷重算定に用いた設計荷重ケースに基づき実施しなければならない。
- 3. サイトが洋上で、かつ支持構造物が着床式の場合は、JIS C 1400-3:2014 に従い疲労荷重解析を実施しなければならない。
- 4. サイトが洋上で、かつ支持構造物が浮体式の場合は、浮体式洋上風力発電設備に関するガイドライン及び本会が適当と認める指針・基準に従い疲労荷重解析を実施しなければならない。
- 5. 疲労荷重解析では、2.2.5 で定める乱流強度の3方向の成分を適切に考慮しなければならない。
- 6. 風車後流の影響について JIS C 1400-1:2017 附属書 D で定義される有効乱流強度 I_{eff} を用いて考慮する場合、 I_{eff} は評価対象の構成部品の材料の Wöhler 曲線指数 m に依存するため、異なる材料の特性をもつ構造部品にかかる荷重は、材料に適する m の値を用いて個別に計算しなければならない。

4.2.5 ナセルカバーに対する荷重

- 1. ナセルカバーの風荷重係数は次の算式によって設定しなければならない。

$$C_p = C_{pe} - C_{pi}$$

ここで、

C_p : 風荷重係数

C_{pe} : 外圧係数

C_{pi} : 内圧係数で、表 4.1 の通りとする。

表 4.1 内圧係数

	負圧側	正圧側
風上側の面に開口がない場合	0	-0.4
風上側の面に開口がある場合	0.8	0

- 2. 風荷重係数の設定に必要な外圧係数については、風力発電設備支持物構造設計指針・同解説〔2010年版〕の規定に準拠するか、風洞試験もしくは風洞試験によってその妥当性が示された数値解析の結果など十分な根拠を以って設定しなければならない。
- 3. 前-1. による風荷重係数を用いてナセルカバーに対する荷重を算出する場合には、部分安全係数を適切に考慮しなければならない。

4.3 支持構造物評価に係る荷重解析の要求事項

- 1. サイトが陸上の場合、以下に示す省令及び指針の要求事項に応じて支持構造物評価に係る荷重解析を実施しなければならない。
 - (1) 発電用風力設備に関する技術基準を定める省令（経済産業省 平成九年三月二十七日通商産業省令第五十三号，最終改正：平成二十一年一月一八日経済産業省令第六九号）
 - (2) 風力発電設備支持物構造設計指針・同解説〔2010年版〕
- 2. サイトが洋上で、かつ支持構造物が着床式の場合は、前-1.の要求事項に加え、本会が適当と認める規格または設計指針等に従い、支持構造物評価に係る荷重解析条件を設定しなければならない。
- 3. サイトが洋上で、かつ支持構造物が浮体式の場合は、前-1.で示す省令に加え、浮体式洋上風力発電設備に関するガイドラインに従い、支持構造物評価に係る荷重解析条件を設定しなければならない。

5 章 風車（RNA）設計評価

5.1 一般

- 1. サイト条件に対する風車の構造的な健全性は、全体荷重解析によるサイト固有の荷重を、型式認証で用いられた設計荷重と比較することにより示されなければならない。
- 2. 風車の型式認証書には記載されていない、新規の部品、改良された又は補強された部品、及び新規又は改良されたシステムがある場合、該当する部品及びシステムは型式認証に対する要求事項にも適合しなければならない。
- 3. 型式認証を取得していない風車の場合は、本会が適当と認めるところによる。

5.2 RNA 設計評価

5.2.1 荷重比較による検証

- 1. 全体荷重解析によるサイト固有の荷重が、型式認証で用いられた設計荷重（以下、許容設計荷重）を上回らない場合、サイト条件に対する風車の構造的な健全性は担保されるものとする。
- 2. 前-1. の内容を示すためにサイト固有の荷重と許容設計荷重を比較する評価対象箇所については、少なくとも以下の項目を考慮しなければならない。なお、RNA の仕様・構造に応じて適切に以下の項目以外にも評価対象箇所を設定しなければならない。
 - (1) タワートップ
 - (2) 翼根部及び翼根部以外で最大荷重となる部位を含む 3 箇所以上の断面位置
 - (3) ハブ（固定時）及び ハブ（運転時・遊転時）

5.2.2 サイト固有の荷重による強度検証

- 1. 全体荷重解析によるサイト固有の荷重が、許容設計荷重を上回る場合、その影響を受ける部品についてサイト固有の荷重に対する健全性を検証しなければならない。
- 2. 前-1. の検証については、型式認証で用いられた強度評価方法に基づき、サイト固有の荷重による応答を求め、その部品固有の耐力に対する裕度を示さなければならない。
- 3. ナセルカバーについては、全体荷重解析によって求められる荷重に対して十分な耐力を有する構造仕様としなければならない。

5.2.3 その他の項目に係る評価

- 1. 次の項目について、適切な措置を講じなければならない。
 - (1) 負荷を遮断したときに到達することが想定される最大回転速度に対しても、十分な耐力を有すること。
 - (2) 運転中に構造強度に影響を与えるような共振を発生させないこと。
 - (3) カットアウト風速を超えた状態での起動を発生させないこと。
- 2. 次の場合においても、安全かつ自動的に停止させる機能を有し、かつ停止後の安全な状態を維持しなければならない。
 - (1) 回転速度が著しく上昇した場合
 - (2) 風車の制御装置の機能が著しく低下した場合

5.3 系統電力喪失時の評価

5.3.1 一般

-1. 風車は、連系する系統電力が喪失した場合においても、次の項目について風車の安全性を確保しなければならない。

- (1) 系統電力の喪失時に自動的に停止させるための措置
- (2) 系統が復帰するまで安全を確保した状態の維持

-2. 前-1.(2)については、全体荷重解析に適用する設計荷重ケースとして、JIS C 1400:2017 で規定される DLC6.2 を考慮することによって担保されるものとする。

-3. 前-1.の要求事項を満足するために、系統電力喪失時にバックアップ電源を用いて風車の制御を継続する場合には、5.3.2 を満足することによって全体荷重解析に適用する設計荷重ケースから DLC6.2 を省略しても差し支えない。

5.3.2 バックアップ電源

-1. 系統電力喪失時にバックアップ電源を用いて風車の制御を継続する場合には、次の(1)から(4)の項目を満足しなければならない。

- (1) 最大風圧が発生する状態として風向とヨー角度の関係について設計上明確にすることに加えて、信頼に足る期間・回数の実測データによってその設計の確からしさが検証されていること。
- (2) 前(1)の結果から得られる最大ヨー誤差と $\pm 8^\circ$ のうち大きい方を4章で規定される全体荷重解析に用いる設計荷重ケースの DLC6.1 におけるヨー誤差のパラメータとして採用すること。
- (3) バックアップ電源の容量が、サイト固有の条件に基づいて適切に設定されていること。
- (4) バックアップ電源に関するシステムの信頼性が確保されており、バックアップ電源の供給に係るパラメータが適切に設定されていること。

-2. 最大ヨー誤差の設定に当たっては、サイト固有の極値風速状態に対して、次の(1)から(9)に示す項目を評価・確認しなければならない。また、これらの項目の評価・確認においては、実測データによりその妥当性が示されなければならない。

- (1) ヨー制御で必要とされる風速・風向計の精度が担保され、かつ取付部を含む風速・風向計が十分な強度を有していること。
- (2) ヨーの風向追従ロジックが適切であること。
- (3) ヨー制御に係る機器の制御ロジックが適切であること。
- (4) ヨー制御の制御ロジックに対してヨードライブの仕様が適切であり、かつ十分な強度を有していること。
- (5) ヨー制御の制御ロジックに対してヨーブレーキの仕様が適切であること。
- (6) ブレードフェザー状態の維持に必要なピッチ制御機構を備えており、かつ十分な強度を有していること。
- (7) 極値風速状態を再現できるシミュレーション手法によって荷重計算を行っていること。
- (8) 風力トルク、ヨードライブトルク及びヨーブレーキ等、ヨー制御に必要な駆動力（風力トルクがヨー旋回方向と逆に作用する場合）または制動力（風力トルクがヨー旋回方向に作用する場合）の設定が適切であること。
- (9) 個々の風車に応じ、その他本会が必要と認める項目

-3. バックアップ電源の容量は、想定暴風継続時間及び当該時間における風向偏差に基づいて必要電力量を算出し、決定されなければならない。必要電力量は、次の(1)及び(2)のうち大きい方を採用しなければならない。

- (1) サイト固有の条件を用いた台風シミュレーションによって暴風の最大継続時間と風向の最大偏差をそれぞれ求め、これらが同時に発生すると条件の下でのヨー制御及び関連する制御に必要な電力量を算出する。なお、この場合の暴風の定義は、制御及び設計方針によって異なることから、個別に設定しなければならない。
- (2) サイトの基準風速 V_0 を用い、「 V_0-24 」により求められる値を暴風の最大継続時間と定義する。その時間内に風向偏差が 180° 発生すると仮定し、この条件の下でのヨー制御及び関連する制御に必要な電力量を算出する。

-4. アップウインド風車が暴風待機時にダウンウインド制御を行う場合については、前-1.から-3.に加えて、別途本会

が適当と認める要求事項を満足しなければならない。

5.4 雷保護対策の評価

5.4.1 雷撃からの保護

-1 高さが二十メートルを超える発電用風力設備には、雷撃から風車を保護するため、以下の措置を講じなければならない。ただし、当該風車を保護するように避雷塔、避雷針その他の避雷設備が施設されている場合であって、雷撃が風車を損傷するおそれがない場合はこの限りでない。

一 2.5-2 項の図 2.1 の実線で囲まれた地域

- (イ) 風車への雷撃の電荷量を 600 クーロン以上と想定して設計すること。
- (ロ) 雷撃から風車を保護する効果が高く、かつ、容易に脱落しない適切なレセプターを風車へ取付けること。
- (ハ) 雷撃によって生ずる電流を風車に損傷を与えることなく安全に地中に流すことができる引下げ導体等を施設すること。
- (ニ) 風車への雷撃があった場合に直ちに風車を停止することができるように、非常停止装置等を施設すること。

二 2.5-2 項の図 2.1 の点線で囲まれた地域

- (イ) 風車への雷撃の電荷量を 300 クーロン以上と想定して設計すること。
- (ロ) イ(ロ) 及び(ハ) の要件を満たすこと。

三 2.5-2 項の図 2.1 の A 線又は B 線で囲まれた地域以外の地域

- (イ) 風車への雷撃の電荷量を 150 クーロン以上と想定して設計すること。
- (ロ) イ(ロ) 及び(ハ) の要件を満たすこと。

-2 風車を支持する工作物（船舶安全法（昭和 8 年法律第 11 号）第 2 条第 1 項の規定の適用を受けるものを除く。）の高さが 20 メートルを超える部分を雷撃から保護するように、次に掲げる要件の全てを満たす避雷設備を設けること。

一 雷撃によって生ずる電流を風車を支持する工作物に被害を及ぼすことなく安全に地中に流すことができる避雷設備として、日本工業規格 C1400-24（風車の雷保護）—2010 に規定する外部雷保護システムに適合する構造であること。

二 避雷設備の雨水等により腐食のおそれのある部分にあつては、腐食しにくい材料を用いるか、又は有効な腐食防止のための措置を講じたものであること。

6 章 支持構造物設計評価

6.1 一般

- 1. 陸上における特性サイト向け支持構造物（タワー及び基礎）の設計は、以下に示す省令及び指針に適合したものでなければならない。
 - 発電用風力設備に関する技術基準を定める省令（経済産業省 平成九年三月二十七日通商産業省令第五十三号，最終改正：平成二一年一二月一八日経済産業省令第六九号）
 - 風力発電設備支持物構造設計指針・同解説〔2010 年版〕
- 2. 洋上（着床式）における特性サイト向け支持構造物（タワー及び基礎）の設計は、前-1.の要求事項に加え、本会が適当と認める設計基準に従わなければならない。
- 3. 洋上（浮体式）における特性サイト向け支持構造物（タワー及び浮体・係留）の設計は、前-1.で示す省令に加え、浮体式洋上風力発電設備に関するガイドライン及びその他本会が適当と認める設計基準に従わなければならない。

Annex A 観測データの評価方法

A.1 風速

- 1. 風速計測は、カップ形風速計によって行う。風速は、瞬間的な風速ベクトルの水平方向成分の絶対値の平均として定義される。
- 2. カップ形風速計は、計測期間の前に校正し、その校正値を風条件評価に用いる。カップ形風速計の校正は、JIS C1400-12-1 附属書 F の手順に従って実施されたものとする。校正結果を報告書に添付すること。
- 3. カップ形風速計は、地表面からハブ高さの 2/3 以上の位置に取付ける。それが難しい場合は、可能な限り高い位置に取付ける。計画サイトのウィンドシアを評価するため、最上部風速計から十分に低い位置（少なくとも 20m）に風速計を 1 個以上追加する。また、バックアップのために、最上部風速計から十分に近い位置（<10m, >1.5m）に風速計を 1 個以上追加する。
- 4. 観測マストへの風速計の取付けは、風速計がマスト及びブームからの影響を最小にするように設置する。観測マストへの風速計の取付けは、JIS C1400-12-1 附属書 G に従って実施するのが望ましい。ブームの取付けは、円筒マストの場合は主風向から 45° 方向、トラス構造の場合には 90° の方向とするのが望ましい。避雷針を設ける場合は、風速計に影響を及ぼさない位置に設置する。
- 5. 風速は 10 分間の平均値及び標準偏差を計測する。サンプリング周波数は 1Hz、あるいはそれ以上とするのが望ましい。風速計による計測結果をもとにしてそれ以上の高さの値及び／または気流の傾斜角を推定するため、追加のリモートセンシング機器及び／または超音波風速計を利用することができる。この場合、計測手法に応じた不確かさを考慮する必要がある。さらに、校正、設置方法、機器構成及び試験方法に関する推奨（MEASNET 参照）を考慮して差し支えない。
- 6. 計画サイトが寒冷地の場合は、風速計の規定の応答特性を維持するように、風速計にヒーターを設置するのが望ましい。

A.2 風向

- 1. 風向計測は、矢羽根形風向計によって行う。バックアップのため、風向計を 1 個以上追加するのが望ましい。観測マストへの風向計の取付けは、風向計がマスト及びブームからの影響を最小にするように設置する。観測マストへの風向計の取付けは、JIS C1400-12-1 附属書 G に従って実施するのが望ましい。
- 2. 風向計は 10 分平均値を計測する。サンプリング周波数は 1Hz、あるいはそれ以上とするのが望ましい。

A.3 補完方法

- 1. 観測機器の故障および凍結等で観測データが欠けている期間や異常な期間がある場合、サイト内で計測した別の計測データ（他の高度または他の観測塔）または近隣気象観測所のデータを使用して、MCP 法（Measure-Correlate-Predict Method、計測-相関-推測法）等により補完する。
- 2. 補完方法の妥当性の確認は、欠測していない期間に対して適用した値と実測値を比較することによって行う。

A.4 参考文献

- [A1] MEASNET, JWSA 訳, サイト風条件の評価（日本語版）（原題：Evaluation of Site Specific Wind Conditions. Version 1), 2016.

Annex B 気流解析条件及び妥当性確認方法

B.1 気流解析条件

B.1.1 地形データ及び地表面粗度データ

- 1. 気流解析の入力データとして、計画サイト周辺の地形データ（数値標高データ）及び地表面粗度データを用いる。周辺地形はできる限り広い範囲を精度よく再現することが望ましい。
- 2. 地形データは 50m 以下の高解像度としなければならない。複雑な地形の場合は、より精度の高いデータを使うことが望ましい。
- 3. 地表面粗度データは 100m 以下の高解像度としなければならない。地表面粗度の分布の変化が大きい場合は、より精度の高いデータを使うことが望ましい。地形データ及び地表面粗度データは、国土地理院の国土数値情報及び基盤地図情報などが利用できる。

B.1.2 計算領域

- 1. 計算領域は、計画サイトの範囲、すなわち、観測塔とすべての風車を含めた範囲を設定し、観測塔及びすべての風車から計算領域境界（流入面、流出面、側面）までの距離は、ハブ高さの 20 倍以上としなければならない。これに加えて、流れがスムーズに流入及び流出する（側面含む）ための付加領域を設定するのが望ましい。流れがスムーズに流入及び流出するように設定できない場合は、更に十分長い距離をとる必要がある。
- 2. 流入境界までの距離は、上述のハブ高さの 20 倍以上に加えて、計画サイト周辺の全方位の地形（標高）の変化を評価し、風上側の地形の影響を考慮したものとしなければならない。計算領域の例を図 B.1 に示す。
- 3. 上空領域は、閉塞効果によって地形上の風速が過大評価されることを避けるため、再現した地形の断面積が側方範囲と鉛直範囲により定まる解析領域の断面積の 5% 以下となるように閉塞率を決定しなければならない。または、最大標高差の 20 倍の高さを鉛直方向に確保しなければならない。それによりがたい場合は根拠を示さなければならない。

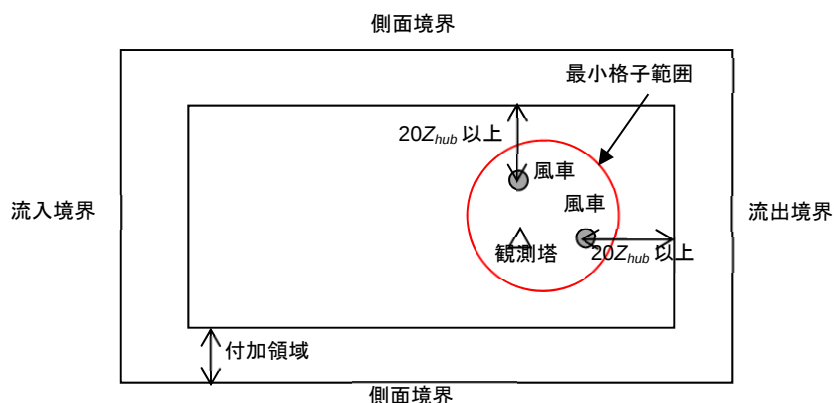


図 B.1 計算領域（水平方向）の例

B.1.3 計算格子及び解像度

- 1. 観測塔と風車を含む範囲の水平方向の計算格子解像度は、30m 以下とすることが望ましい。また、複雑な地形の場合は、より高い解像度にすることが望ましい。水平方向の計算格子解像度は、観測塔と風車を含む範囲から遠方になるにつれて、徐々に粗くしてもよい。その場合、計算格子幅の伸長率は、1.2 以下にしなければならない。
- 2. 鉛直方向の計算格子解像度は、 $k-\epsilon$ モデルの場合、地表面における第一計算格子点を平均風速分布が対数法則またはべき法則で近似できる領域、すなわち、粗度長程度にとり、上空になるにつれて、徐々に粗くしてもよい。その場合、計算格子幅の伸長率は、1.2 以下にしなければならない。LES モデルの場合、採用する壁面境界モデルに応じて、

適切に地表面における第一計算格子点をとらなければならない。採用する壁面モデルについて報告し、地表面における第一格子点の設定の根拠について示さなければならない。

B.1.4 境界条件

- 1. 流入境界条件は、流入地点の地表面粗度に基づいて、平均速度及び乱流統計量の鉛直分布を設定する。流出境界条件は、流出境界面からの不自然な流れの発生を避けるため、自由流出条件または対流流出条件を用いる。側面境界条件及び上空境界条件はすべり条件とする。
- 2. 地表面境界条件は、 $k-\varepsilon$ モデルの場合、地表面粗度のパラメータを用いた壁関数を用いる。LES モデルの場合、樹木等の影響を再現するキャノピーモデルを用い、適切に抵抗係数及び高さを設定しなければならない。それによりがたい場合は根拠を示さなければならない。

B.1.5 方位分割

- 1. 方位分割は、地形の複雑度によって適切に設定しなければならない。
- 2. 平坦地形の場合は 12 方位以上、複雑地形の場合は 16 方位以上としなければならない。それによりがたい場合はその根拠を適切に示さなければならない。

B.2 観測データによる妥当性確認

- 1. 気流解析条件の妥当性は、観測データを用いて確認しなければならない。計画サイトの観測データを用いて、方位別の風速の鉛直プロファイル（高度方向分布）を算出し、気流解析によって得られた結果と比較をする。少なくとも主風向の鉛直プロファイルの推定値と観測値を比較して、誤差 5% 以下としなければならない。
- 2. 風速の鉛直プロファイルの推定値の誤差の算出は、風速を最上部の観測高の値で無次元化し、低い観測高において以下の式に基づいて評価する。

$$e(\theta) = \frac{u_{num} - u_{mes}}{u_{mes}} \times 100 \dots\dots\dots (B.1)$$

ここで、 $e(\theta)$ は風向 θ における風速の誤差、 u_{num} は気流解析により求められた風速、 u_{mes} は観測値である。

Annex C 風条件の評価方法

C.1 一般

- 1. 風条件は、全てサイト固有の条件として算定しなければならない。
- 2. 本附属書に示される風条件の算定方法は、風力発電設備支持物構造設計 指針・同解説（2010 年版）に準拠している。

C.2 評価に必要な風条件

C.2.1 風速出現頻度分布

- 1. 風速出現頻度分布関数 $p(V_{hub})$ は、式(C.1)で表されるワイブル分布で近似するものとする。

$$p(V_{hub}) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{V_{hub}}{\eta} \right)^{m-1} \exp \left\{ - \left(\frac{V_{hub}}{\eta} \right)^m \right\} \cdots \cdots \cdots (C.1)$$

ここで、 η と m はそれぞれワイブル分布の尺度係数と形状係数であり、観測から求めた年平均風速 V_{ave} と平均風速の標準偏差 σ_V から式(C.2)および式(C.3)により求める。

$$\int_0^{\infty} \frac{m}{\eta} \left(\frac{V_{hub}}{\eta} \right)^{m-1} \exp \left\{ - \left(\frac{V_{hub}}{\eta} \right)^m \right\} V_{hub} dV_{hub} = V_{ave} \cdots \cdots \cdots (C.2)$$

$$\int_0^{\infty} \frac{m}{\eta} \left(\frac{V_{hub}}{\eta} \right)^{m-1} \exp \left\{ - \left(\frac{V_{hub}}{\eta} \right)^m \right\} (V_{hub} - V_{ave}) dV_{hub} = \sigma_V^2 \cdots \cdots \cdots (C.3)$$

C.2.2 乱流強度の算定方法

C.2.2.2 暴風時の乱流強度の算定方法

- 1. 風車位置の暴風時における乱流強度の主風向成分 I_{h1} は、平坦地形上の乱流強度 I_P に地形による乱流強度の補正係数 E_d を乗じたものとし、式(C.4)により求める。

$$I_{h1} = E_d I_P \cdots \cdots \cdots (C.4)$$

- 2. 風車位置における地表面粗度区分は、建築基準法または風力発電設備支持物の周辺の地表面の状況に応じて表 C.1 により定める。表 C.1 を用いる場合には風車建設点を中心とし、半径がハブ高さ H_h の 40 倍と 3 km のうちの小さい方の円形の領域内において、最も滑らかな地表面粗度区分を風車建設点の地表面粗度区分として用いてもよい。

表C.1 地表面粗度区分の分類

地表面粗度区分	建設地周辺の地表面の状況
I	海面または湖面のような、ほとんど障害物のない地域
II	田園地帯や草原のような農作物程度の障害がある地域、樹木・低層建築物等が散在している地域
III	樹木・低層建築物が多数存在する地域、あるいは中層建築物（4～9階）が散在している地域
IV	中層建築物が主となる市街地

-3. ハブ高さでの平坦地形における乱流強度 I_p は地表面粗度区分に応じ、式(C.5)により算定する。ただし、 H_h はハブ高さ(m)であり、 Z_b 、 Z_G 及び α は風速の鉛直分布を示すパラメータであり、地表面粗度区分に応じ、表 C.2 により定める。なお、高さ Z での乱流強度は H_h の代わりに Z を式(C.5)に代入して求める。

$$I_p = \begin{cases} 0.1 \left(\frac{H_h}{Z_G} \right)^{-\alpha-0.05} & Z_b < H_h \leq Z_G \\ 0.1 \left(\frac{Z_b}{Z_G} \right)^{-\alpha-0.05} & H_h \leq Z_b \end{cases} \dots\dots\dots (C.5)$$

表C.2 平均風速の高度補正係数を定めるためのパラメータ

地表粗度区分	I	II	III	IV
Z_b	5	5	10	20
Z_G	250	350	450	550
α	0.1	0.15	0.2	0.27

-4. 地形による乱流強度の補正係数 E_{tl} は、式(C.6)により定める。ここで、地形による平均風速の割増し係数 E_{tV} は、実地形上と平坦地形上の風向別の気流解析の結果に基づき、式(C.7)により求める。 $U(x, y, H_h, \theta)$ は気流解析により求めた実地形上の風車建設地点のハブ高さ H_h における風向 θ の平均風速、 $U^P(x, y, H_h)$ は地表面粗度区分 P の平坦地形上の気流解析により求めた風車建設地点のハブ高さ H_h における平均風速である。

$$E_{tl} = \max(E_{tS}/E'_{tV}, 1) \dots\dots\dots (C.6)$$

$$E'_{tV} = \max_{\theta} \left(\frac{U(x, y, H_h, \theta)}{U^P(x, y, H_h)} \right) \dots\dots\dots (C.7)$$

-5. 地形による変動風速の補正係数 E_{tS} は、式(C.8)により定める。ここで、 $\sigma_u(x, y, H_h, \theta_d)$ は実地形上の照査対象風向 θ_d におけるハブ高さ H_h での主風向変動風速の標準偏差、 $\sigma_u^P(x, y, H_h)$ は地表面粗度区分 P を持つ平坦地形上のハブ高さ H_h における主風向変動風速の標準偏差であり、気流解析により求める。

$$E_{tS} = \frac{\sigma_u(x, y, H_h, \theta_d)}{\sigma_u^P(x, y, H_h)} \dots\dots\dots (C.8)$$

-6. 気流解析により主風向変動風速の標準偏差 σ_u を求めるには、 k - ϵ モデル等の乱流エネルギー k より、地形や地表面粗度に起因する主風向変動風速の標準偏差 σ_u^{surf} を式(C.9)で計算し、式(C.10)を用いて算定することもできる。ただし、この場合、バックグラウンドの乱流強度 I_a は 0.1 とする。

$$\sigma_u^{surf} = \sqrt{1.2k} \dots\dots\dots (C.9)$$

$$\sigma_u = U \times \sqrt{\left(\frac{\sigma_u^{surf}}{U}\right)^2 + I_a^2} \dots\dots\dots (C.10)$$

C.2.2.1 疲労荷重評価のための乱流強度の算定方法

- 1. 周囲乱流標準偏差 σ_1 は、 $V_{in} \sim V_{out}$ のすべての V_{hub} における非超過確率 90 %に相当するものを用いる。
- 2. 周囲乱流強度は、最低でも 1 年以上実施された風況観測により取得したデータを用いて評価する。通常、風況観測塔の高さは風車ハブ高さよりも低いことから、ハブ高さへの補正は、適切に評価された鉛直方向の速度分布を用いて補正を行う。
- 3. 風況観測塔位置以外の乱流強度は、気流解析結果等を用いた適切な補正を行うことで算定する。乱流強度の評価において、風況観測塔位置における乱流強度がそのサイトを代表する乱流強度である事が望ましい。
- 4. 風況観測塔で得られた時系列データを風車位置に変換し、乱流標準偏差を評価してもよい。風車位置の乱流標準偏差の時系列データ $\sigma_{hw}(t)$ は、式(C.11)により算出する。ここで、 $c_s(\theta)$ は気流解析で求めた方位 θ における風車位置と観測位置の乱流標準偏差の比、 $\sigma_M(\theta, t)$ は風況観測塔で得られた乱流標準偏差の時系列データである。

$$\sigma_{hw}(t) = c_s(\theta) \cdot \sigma_M(\theta, t) \dots\dots\dots (C.11)$$

同様に、風車位置の風速の時系列データ $U_{hw}(t)$ を式(C.12)により算出し、 V_{hub} における非超過確率 90 %における乱流標準偏差を評価する。ここで、 $c_v(\theta)$ は気流解析で求めた方位 θ における風車位置と観測位置の風速の比、 $U_M(\theta, t)$ は風況観測塔で得られた風速の時系列データである。

$$U_{hw}(t) = c_v(\theta) \cdot U_M(\theta, t) \dots\dots\dots (C.12)$$

-5. 表 2.2 の指標を用いて、複雑地形と判断される場合、乱流強度の横方向及び上方向の成分について次式を用いて算定する。乱流の評価は 3 方向の成分（主方向成分 σ_1 、横方向成分 σ_2 、上方向成分 σ_3 ）について考慮又は言及されたものであることを確認する。乱流の 3 成分に関しては超音波風速計で計測されている場合、そのデータを用いても良い。なお、気流解析で乱流標準偏差 $\sigma_{2,cal}$ と $\sigma_{3,cal}$ が評価されている場合、 σ_2 及び σ_3 は、式(C.13)及び式(C.14)により算定する。

$$\sigma_2 = \max(\sigma_{2,cal}, 1.15 \times 0.8 \times \sigma_1) \dots\dots\dots (C.13)$$

$$\sigma_3 = \max(\sigma_{3,cal}, 1.15 \times 0.5 \times \sigma_1) \dots\dots\dots (C.14)$$

ここで、 σ_1 は主方向成分の観測値、 $\sigma_{2,cal}$ 及び $\sigma_{3,cal}$ は気流解析により求めた値である。

-6. 乱流の 3 成分に関して観測または気流解析により評価したデータがなく、地形が複雑な場合、横方向及び鉛直方向の乱流標準偏差の主方向成分に対する比率は、それぞれ 1.0 及び 0.7 を仮定する。

C.2.3 ウィンドシアの算定方法

- 1. サイトの観測データを用いて、方位別に風車位置のロータ受風面におけるウィンドシアのべき指数を求め、風向頻度を考慮し、年間の平均ウィンドシアのべき指数を算定する。なお、再現期間 50 年の極値風速としての 10 分間平均風速 V_{ref} に対応するウィンドシアのべき指数の算定については、C2.5-6.を参照のこと。
- 2. ロータ受風面におけるウィンドシアは、式(C.15)で表されるべき法則で近似するものとする。ここで、 α はウィンドシアのべき指数、 V_1 は高さ z_1 における風速、 V_2 は高さ z_2 における風速である。ロータ受風面におけるウィンドシアを評価するため、 V_1 及び V_2 としてロータ下端及びロータ上端の風速を用いてもよい。

$$V_2 = V_1 \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^\alpha \dots\dots\dots (C.15)$$

- 3. 気流解析を用いる場合、各風車位置における年間の平均ウィンドシアのべき指数は、各風車位置のウィンドシアのべき指数及び方位別出現頻度の加重平均し、式(C.16)で求められる。ここで、 $F(\theta)$ は方位 θ の出現頻度であり、 $\bar{\alpha}$ は年間平均ウィンドシアべき指数である。

$$\bar{\alpha} = \sum_{\theta} (\alpha(\theta) F(\theta)) \dots\dots\dots (C.16)$$

C.2.4 気流傾斜角の算定方法

- 1. 方位別に気流傾斜角を求め、風向頻度を考慮し平均気流傾斜角及び出現確率分布を算出する。3 成分の超音波風速計による観測により風車位置の風況データが十分に代表できる場合はその値を用いてよい。
- 2. 気流解析を用いる場合、各風車位置における気流傾斜角 $\varphi(\theta)$ は、算出された方位別の風速の 3 成分 $u(\theta)$, $v(\theta)$, $w(\theta)$ を用いて式(C.17)により算出する。

$$\varphi(\theta) = \tan^{-1} \left(\frac{w(\theta)}{\sqrt{u^2(\theta) + v^2(\theta)}} \right) \dots\dots\dots (C.17)$$

- 3. 年間の平均気流傾斜角は、各風車位置の流れ角及び方位別出現頻度の加重平均とする。ここで、 $F(\theta)$ は方位 θ の出現頻度であり、 $\bar{\varphi}$ は平均気流傾斜角である。

$$\bar{\varphi} = \sum_{\theta} (\varphi(\theta) F(\theta)) \dots\dots\dots (C.18)$$

C.2.5 極値風速の算定方法

- 1. ハブ高さにおける評価風速 U_h は、基準風速 V_0 に地形による平均風速の割増係数と高度補正係数を乗じたものとし、式(C.20)により定める。ただし、基準風速 V_0 は、平坦で地表面粗度区分 II の地上高さ 10 m における再現期間 50 年の 10 分平均風速とし、平成 12 年建設省告示第 1454 号第 2 に示す市町村別の基準風速を用いる。

$$U_h = E_{tv} E_{pv} V_0 \dots\dots\dots (C.20)$$

- 2. 風車建設地点における地表面粗度区分は、建築基準法または風力発電設備支持物の周辺の地表面の状況に応じて

表 C.1 により定める。

-3. 平坦地形上のハブ高さでの平均風速の高度補正係数 E_{pV} は地表面粗度区分に応じ、式(C.21)により算定する。ただし、 H_h はハブ高さ(m)であり、 Z_b 、 Z_G 及び α は風速の鉛直分布を示すパラメータであり、地表面粗度区分に応じ、表 C.2 により定める。なお、高さ Z での平均風速の高度補正係数は H_h の代わりに Z を式(C.21)に代入して求める。

$$E_{pV} = \begin{cases} 1.7 \left(\frac{H_h}{Z_G} \right)^\alpha & Z_b < H_h \leq Z_G \\ 1.7 \left(\frac{Z_b}{Z_G} \right)^\alpha & H_h \leq Z_b \end{cases} \dots\dots\dots (C.21)$$

-4. 地形による平均風速の割増係数 E_{tV} と照査対象風向 θ_d は以下に示す(1)か(2)のいずれかの方法により求める。

(1) 風向特性を考慮しない手法

地形による平均風速の割増係数 E_{tV} は、実地形上と平坦地形上の風向別の気流解析の結果に基づき、式(C.22)により定める。ここで、 $U(x, y, H_h, \theta)$ は気流解析により求めた実地形上の風車建設地点のハブ高さ H_h における風向 θ の平均風速、 $U^P(x, y, H_h)$ は地表面粗度区分 P の平坦地形上の気流解析により求めた風車建設地点のハブ高さ H_h における平均風速である。また、照査対象風向 θ_d は、風向別平均風速の割増係数が最大となる風向とする。

$$E_{tV} = \max(E'_{tV}, 1), \quad E'_{tV} = \max_{\theta} \left(\frac{U(x, y, H_h, \theta)}{U^P(x, y, H_h)} \right) \dots\dots\dots (C.22)$$

(2) 風向特性を考慮する手法

地形による平均風速の割増係数 E_{tV} は、風車建設地点を対象とした台風シミュレーションの結果に基づき、式(C.23)により定める。ここで、 $U_{50}(x, y, H_h)$ は、台風シミュレーションの結果から統計解析により求めた風車建設地点のハブ高さ H_h での年最大風速の 50 年再現期待値であり、 $U_{50}^P(x, y, H_h)$ は地表面粗度区分の平坦地形上のハブ高さにおける年最大風速の 50 年再現期待値である。また、照査対象風向 θ_d は $U_{50}(x, y, H_h)$ に対応する風向とする。

$$E_{tV} = \max(E'_{tV}, 1), \quad E'_{tV} = \frac{U_{50}(x, y, H_h)}{U_{50}^P(x, y, H_h)} \dots\dots\dots (C.23)$$

-5. 再現期間 50 年のハブ高さにおける極値 3 秒平均風速 V_{e50} は式 (C.20) で算定した U_h を用いて、式 (C.24) により算定する。なお、式 (C.24) の I_{h1} は C.2.2.2 の式 (C.4) を用いて算定する。

$$\begin{aligned} V_{e50} &= G_f U_h \\ G_f &= 1 + 3.5 I_{h1} \end{aligned} \dots\dots\dots (C.24)$$

<参考：IECでは、式 (C.24) に $I_{h1} = 0.11$ を代入して、 $V_{e50} = 1.4 U_h$ の関係を用いている。>

-6. 再現期間 50 年のハブ高さにおける 10 分間平均風速 (U_h) に対応するウィンドシアのべき指数については、気流解析の結果より得られる照査対象風向の実地形における主風向風速成分を用いて算定する。なお、複雑地形の場合は、主流直角方向成分が大きくなる可能性があることから、主風向風速成分に加え主流直角方向速度成分を考慮して水平風速を算出し、それを用いてべき指数を算定することが望ましい。

C.2.6 風況観測データを用いた V_{e50} の算定方法

-1. 観測データを用いて暴風時の乱流強度 I_{hl} を算出し、 V_{e50} を求める方法を以下に示す。

- (1) 気流解析等により観測位置と各風車位置の方位別の風速比及び乱流標準偏差の比を算出する。
- (2) 観測データ（10 分間値の時系列データ）に(1)で求めた比を掛けて、風車位置での風速及び乱流標準偏差の時系列データを作成する。
- (3) 風車位置での風向別風速階級別乱流強度を算出する。
- (4) 照査対象風向について、極値風速（評価風速 U_h ）時の乱流強度 I_{hl} を算出する。極値風速時の乱流強度は非超過確率 50%に対応する。極値風速時の乱流強度の評価に用いる観測データ数が十分であるよう考慮しなければならない。
- (5) (4)で得られた I_{hl} と粗度区分に応じた平坦地形上の乱流強度 I_p のそれぞれを用いて G_f を求め、その大きい方を採用する。

$$G_f = \max(1 + 3.5I_{hl}, 1 + 3.5I_p) \dots\dots\dots (C.25)$$

- (6) 式 (C.25) を用いて、 U_h に G_f を乗じて、 V_{e50} を算出する。

-2. 観測データを用いて算定した暴風時の乱流強度 I_{hl} の妥当性を示すために、算定に用いた乱流強度の値をプロットした図に、乱流強度の非超過確率 50%を示す線、 I_p の値を示す線及び U_h の値を示す線を追記したものを用意しなければならない。

C.2.7 大気密度の算定方法

-1. 大気密度は、現地で観測された大気温度及び大気圧から、式(C.26)を用いて算出する。

$$\rho = \frac{B}{R_0 \times T} \dots\dots\dots (C.26)$$

ここで、 B は大気圧、 T は大気温度、 R_0 は気体定数（287.05J/(kgK)）である。

-2. 大気密度に関して現地の観測データがない場合、近隣気象観測所の長期観測データを用いてもよい。この場合、標高に関する高度補正を行う。

C.3 参考文献

- [C1] 土木学会，風力発電設備支持物構造設計指針・同解説[2010 年版]，2010.
- [C2] Germanischer Lloyd, Guidelines for Design of Wind Turbines Edition 2010, 2010.
- [C3] 日本規格協会，JIS W 0201（標準大気）
- [C4] IEC, IEC 61400-1 Ed.3, Wind Turbines – Part 1: Design requirements, 2005.
- [C5] IEC, IEC 61400-1 Ed.3 Amendment, Wind Turbines – Part 1: Design requirements, 2010.
- [C6] Ishihara, T. and Yamaguchi, A., Prediction of the extreme wind speed in mixed climate region by using Monte Carlo simulation and Measure-Relate-Predict method, Wind Energy, 2014.
- [C7] 日本規格協会，JIS C 1400-1:2010（風車—第 1 部：設計要件）
- [C8] 植田他，CFD を用いた乱流強度評価方法の観測データによる検証，第 37 回風力エネルギー利用シンポジウム予稿集，pp.245-246，2015.

Annex D 海象条件の評価方法（参考）

D.1 一般

-1. 海象条件は、全てサイト固有の条件として算定しなければならない。本附属書では、海象条件の評価方法を参考として示す。

D.2 再現期間 50 年の沖波波高^[D1]

- 1. 再現期間の 50 年の沖波の有義波高及び有義波周期は、以下の(1)または(2)の方法によって定めることが望ましい。
- (1) 自治体によって定められた再現期間 50 年の有義波高及び有義波周期
 - (2) 国土技術政策総合研究所資料第 88 号^[D2]の表-C.1(1)から表 C.1(32)の沖波に定める再現期間 50 年の有義波高及び有義波周期
- 2. これらの値が適用困難である場合には、長期間の観測値及び／または波浪推算結果を用いた極値統計解析により再現期間 50 年の沖波を算定してもよいが、(1)または(2)で沖波が与えられる地点において精度検証を行い、適用する手法により算定される値が安全側となることを確認する必要がある。

D.3 浅海域の波浪変形

-1. 浅海域における波高の算定には、屈折、回折、浅水変形及び碎波の影響を考慮しなければならない。これらの影響を考慮した有義波高及び最高波高は、以下の手順により算定することができる。算定の際には、各再現期間の波高と同時に起こると想定される潮位を考慮すること。

(1) 換算沖波波高

換算沖波波高 H'_0 は、次式により算定する^[D1]。

$$H'_0 = K_r K_d H_0 \cdots \cdots \cdots (D.1)$$

ここに、

H_0 : 沖波波高 [m]

K_r : 屈折係数 [-]

K_d : 回折係数 [-]

屈折係数及び回折係数は、原則として数値解析により算定する。ただし、直線平行等深線海岸においては、屈折係数を以下の式で算定しても良い。

$$K_r = \sqrt{\frac{\cos \alpha_0}{\cos \alpha_r}} \cdots \cdots \cdots (D.2)$$

ただし、

$$\alpha_r = \sin^{-1} \left(\sin \alpha_0 \tanh \frac{2\pi h}{L} \right)$$

$$L = \frac{2\pi h}{\sqrt{P\left(P + \frac{1}{Q}\right)}}$$

$$P = \frac{(2\pi)^2 h}{gT_{1/3}}$$

$$Q = 1 + P\left[0.6522 + P\left\{0.4622 + P^2(0.0864 + 0.0675P)\right\}\right]$$

ここに,

- α_0 : 深海域での波の入射角度 [rad]
- h : 水深 [m]
- α_r : 水深 h における波の屈折角度 [rad]
- L : 水深 h における波長 [m]
- $T_{1/3}$: 有義波周期 [s]
- g : 重力加速度 [m/s^2]

(2) 風車位置における波

- 有義波高^[D1]

1/10～1/75 勾配程度の一様な勾配を有する海浜では、有義波高は次式により算定する。ただし、 $h/H'_0 \leq 0.5$ の場合は、 $h/H'_0 = 0.5$ の地点での波高を用いるものとする。

$$H_{1/3} = \begin{cases} K_S H'_0 & h/L_0 \geq 0.2 \\ \min\left[\beta_0 H'_0 + \beta_1 h, \beta_{\max} H'_0, K_S H'_0\right] & h/L_0 < 0.2 \end{cases} \quad \dots\dots\dots (D.3)$$

ただし,

$$K_S = \frac{1}{\sqrt{[\tanh(kh) + kh\{1 - \tanh^2(kh)\}]}} + 0.0015 \left(\frac{h}{L_0}\right)^{-2.87} \left(\frac{H'_0}{L_0}\right)^{1.27}$$

$$L_0 = \frac{gT_{1/3}^2}{2\pi}$$

$$k = \frac{2\pi}{L}$$

$$\beta_0 = 0.028 \left(H'_0/L_0\right)^{-0.34} \exp(20 \tan^{1.5} \theta)$$

$$\beta_1 = 0.52 \exp(4.2 \tan \theta)$$

$$\beta_{\max} = \max\left[0.92, 0.32 \left(H'_0/L_0\right)^{-0.29} \exp(2.4 \tan \theta)\right]$$

ここに,

- $H_{1/3}$: 砕波の影響を考慮した有義波高 [m]
- K_S : 浅水係数 [-]
- L_0 : 沖波の波長 [m]
- k : 水深 h における波数 [m^{-1}]
- β_0 : 汀線における $H_{1/3}$ と換算沖波波高の比 [-]
- β_1 : 砕波帯内の水深に対する $H_{1/3}$ の比例係数 [-]
- $\beta_{\max}$: 砕波帯内の $H_{1/3}$ の最大値の係数 [-]
- θ : 海底勾配（水深波高比 h/H'_0 が 1.5～2.5 の範囲における海底面が水平面となす角度の平均値）[rad]

- 極値波高^{[D1],[D3]}

1/10～1/75 勾配程度の一様な勾配を有する海浜では、極値波高は次式により算定する。ただし、 $h/H_0 \leq 0.5$ の場合は、 $h/H_0 = 0.5$ の地点での波高を用いるものとする。

$$H_{1/1000} = 1.03H_{\max} \cdots \cdots \cdots (D.4)$$

ただし、

$$H_{\max} = \begin{cases} 1.8K_s H_0' & h/L_0 \geq 0.2 \\ \min[\beta_0^* H_0' + \beta_1^* h, \beta_{\max}^* H_0', 1.8K_s H_0'] & h/L_0 < 0.2 \end{cases}$$

$$\beta_0^* = 0.052(H_0'/L_0)^{-0.38} \exp(20 \tan^{1.5} \theta)$$

$$\beta_1^* = 0.63 \exp(3.8 \tan \theta)$$

$$\beta_{\max}^* = \max[1.65, 0.53(H_0'/L_0)^{-0.29} \exp(2.4 \tan \theta)]$$

ここに、

$H_{1/1000}$: 極値波高（超過確率 1/1000 の波高） [m]

$H_{\max}$: 砕波帯内における最高波高（超過確率 1/250 の波高） [m]

β_0^* : 汀線における $H_{\max}$ と換算沖波波高の比 [-]

β_1^* : 砕波帯内の水深に対する $H_{\max}$ の比例係数 [-]

$\beta_{\max}^*$: 砕波帯内の $H_{\max}$ の最大値の係数 [-]

θ : 海底勾配（水深波高比 h/H_0' が 1.5～2.5 の範囲における海底面が水平面となす角度の平均値） [rad]

- 低減波高^{[D1],[D3]}

低減波高は次式により算定する。

$$H_{\text{red}} = \min[1.3K_s H_0', H_{1/1000}] \cdots \cdots \cdots (D.5)$$

-2. 浅海域における波周期は、深海域における値と同じとして差し支えない。

D.4 再現期間 50 年及び 1 年の波周期の範囲

-1. 再現期間 50 年及び 1 年の波周期の範囲は高波高時の波高と波周期の関係から適切に求める必要がある。これらの関係として、次式^[D4]を用いて波周期の範囲を定めても良い。

$$11.1\sqrt{H_s/g} \leq T \leq 14.3\sqrt{H_s/g} \cdots \cdots \cdots (D.6)$$

ここに、

H_s : スペクトル有義波高 [m]

T : 周期（有義波周期と想定してよい） [s]

g : 重力加速度 [m/s²]

-2. ゼロ・クロス法で定義される有義波高 $H_{1/3}$ とスペクトル有義波高 H_s との関係は、以下の式を用いて求めても良い⁵⁾。

$$H_s = \frac{H_{1/3}}{0.956} \cdots \cdots \cdots (D.7)$$

D.5 風と波の結合確率分布の外挿

- 通常運転時の荷重を評価するための風と波の結合確率分布の算定において、高風速時及び／または高波高時のデータが得られない場合は、表 D.1 に示す、風速階級別の有義波高と有義波周期の統計値をモデル化した式を用いたモンテカルロシミュレーション^[D6]により外挿しても良い。
- 表 D.1 に示す外挿手法を用いる場合、観測値が得られた期間の確率分布と比較して、高波高時の出現頻度が過小評価しないように適切にパラメータを決定し、必要に応じて値を補正する必要がある。
- 波浪推算による表 D.1 の関係のモデル化や、長期間の波浪推算データの出現頻度の算定などの外部環境条件評価のための使用は、本会が適当と認めるところによる。一般入手可能なデータの一例を以下に示す。
 - 局地沿岸波浪データベース（日本気象協会）^[D7]

表D.1 風と波の結合確率分布の外挿式

	有義波高	有義波周期
平均値	$\mu_{H_{1/3}}(V_{hub})=\sqrt{\mu_{H_{1/3,W}}^2+\mu_{H_{1/3,S}}^2}$ ただし、 $\mu_{H_{1/3,W}}(V_{hub})=\frac{0.30V_{hub}^2}{g}\left[1-\left\{1+0.004\left(\frac{gF}{V_{hub}^2}\right)^{1/2}\right\}^{-2}\right]$ $\mu_{H_{1/3,S}}=const.$	$\mu_{T_{1/3}}(V_{hub})=\frac{\mu_{T_{1/3,W}}\mu_{H_{1/3,W}}^2+\mu_{T_{1/3,S}}\mu_{H_{1/3,S}}^2}{\mu_{H_{1/3,W}}^2+\mu_{H_{1/3,S}}^2}$ ただし、 $\mu_{T_{1/3,W}}(V_{hub})=\frac{2.74\pi V_{hub}}{g}\left[1-\left\{1+0.008\left(\frac{gF}{V_{hub}^2}\right)^{1/3}\right\}^{-5}\right]$ $\mu_{T_{1/3,S}}=const.$
標準偏差	$\sigma_{H_{1/3}}(V_{hub})=aV_{hub}+b$	$\sigma_{T_{1/3}}(V_{hub})=cV_{hub}+d$
出現頻度	$f(H_{1/3} V_{hub})=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{H_{1/3}}H_{1/3}}\times\exp\left(-\frac{(\ln H_{1/3}-\mu_{H_{1/3}})^2}{2\sigma^2}\right)$	$f(T_{1/3} V_{hub})=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{T_{1/3}}T_{1/3}}\times\exp\left(-\frac{(\ln T_{1/3}-\mu_{T_{1/3}})^2}{2\sigma_{T_{1/3}}^2}\right)$
有義波高と有義波周期の相関係数	$R_{H_{1/3}-T_{1/3}}(V_{hub})=\tan(\alpha V_{hub}+\beta)$	

ここに、

V_{hub} ：ハブ高平均風速 [m/s]、 $H_{1/3}$ ：有義波高 [m]、 $T_{1/3}$ ：有義波周期 [s]、

g ：重力加速度 [m/s²]、 F ：吹送距離 [m]、

$\mu_{H_{1/3,W}}$ ：有義波高の風波成分 [m]、 $\mu_{H_{1/3,S}}$ ：有義波高のうねり成分 [m]、

$\mu_{T_{1/3,W}}$ ：有義波周期の風波成分 [s]、 $\mu_{T_{1/3,S}}$ ：有義波周期のうねり成分 [s]、

a [s/m]、 b [m/s]、 c [s/m]、 d [m/s]、 α [s/m]、 β [-]：フィッティングパラメータ

D.6 水流条件の算定

- 水流算定には、水中流、風により引き起こされる吹送流、砕波帯において波により引き起こされる海浜流を考慮する必要がある^[D4]。これらの成分から水流を算定する際には、次式を用いる。

$$U(z) = U_{ss} + U_w + U_{bw} \dots\dots\dots (D.7)$$

ここに、

U_{ss} ： 水流の鉛直プロファイルを表す水中流 [m/s]

U_w ： 風により引き起こされる吹送流 [m/s]

U_{bw} : 砕波帯において波により引き起こされる海浜流 [m/s]

-2. 式 (D.7) の各水流成分の算定は、次式^[D4]を用いても良い。

$$U_{ss}(z) = U_{ss}(0) \left[(z+d)/d \right]^{1/7} \dots\dots\dots (D.8)$$

$$U_w(z) = U_w(0) \left[1 + z/20 \right], \quad U_w(0) = 0.01V_{1-hour} \dots\dots\dots (D.9)$$

$$U_{bw} = 2s\sqrt{gH_B} \dots\dots\dots (D.10)$$

ここに、

z : 静水面からの高さ [m]

d : 水深（静水面から海底までの高さ）[m]

V_{1-hour} : 静水面から 10m の高さにおける風速の 1 時間平均値 [m/s]

H_B : 砕波波高 [m]

s : 海底勾配 [-]

g : 重力加速度 [m/s²]

-3. 水中流及び海浜流の向きは波向と、吹送流の向きは風向と同じとして良い^[D4]。ただし、風向、波向が向かってくる方位であるのに対して海流は流れが向かって行く方位であるため、これらの定義の違いには注意すること。

-4. 一般入手可能な海流データの一例を以下に示す。これらデータの外部環境条件評価のための使用は、本会が認めるところによる。

- ・ 日本海洋データセンター^{1°} メッシュ統計値^[D8]
- ・ JCOPE-T 再解析値^[D9]

D.7 水位条件の算定

-1. 50 年再現期間の最高水位は、観測データの既往最高潮位（高極潮位）と朔望平均満潮位に高潮偏差（既往最大潮位偏差もしくは台風潮位偏差）を加えた潮位を比較し、安全側となる値を用いる^[D1]。

-2. 高潮偏差は、次式により計算しても良い^[D1]。

$$\zeta = a(p_0 - p) + bW^2 \cos\theta + c \dots\dots\dots (D.11)$$

ここに、

ζ : 潮位偏差 [cm]

p_0 : 基準気圧 (=1010[hPa])

p : 最低気圧 [hPa]

W : 10 分平均風速の最大値 [m/s]

θ : 主風向と最大風速 W のなす角 [rad]

a, b, c : 定数（サイト固有の値）

-3. 再現期間 1 年の水位変動域は、サイト周辺の港湾や験潮所などにおける現地観測値から求めるのが望ましい。再現期間 1 年の水位変動域を最高及び最低天文潮位により定める^[D3]場合、これらの値は連続した 18.6 年以上の天文潮位の最高及び最低潮位とすること。

-4. 一般公開されている潮位データを以下に示す。なお、天文潮位に基づくデータは、気圧変化など気象現象による潮汐が含まれていないため、使用に際しては注意すること。

- ・ 気象庁潮汐観測資料^[D10]
- ・ 国土地理院検潮所観測値^[D11]
- ・ 気象庁潮位表^[D12]（天文潮位）
- ・ 海上保安庁潮汐推算値^[D13]（天文潮位）
- ・ 海上保安庁，平均水面，最高水面及び最低水面一覧表^[D14]（平均水面の参考となる資料）

D.8 参考文献

- [D1] 土木学会，風力発電設備支持物構造設計指針・同解説 [2010 年版]，2010.
- [D2] 高田悦子，諸星一信，平石哲也，永井紀彦，竹村慎治，我が国沿岸の波浪外力の分布（海象外力検討調査），国土技術政策総合研究所資料，No.88, 132p., 2013.
- [D3] 嶋田健司，石原孟，極値波高算定式の IEC61400-3 への提案，日本風力エネルギー学会論文集，Vol.40, No.4, pp.49-56, 2017.
- [D4] IEC, IEC 61400-3 Ed.1, Wind Turbines – Part 3: Design requirements for offshore wind turbines, 2009.
- [D5] 合田良實，耐波工学 港湾・海岸構造物の耐波設計，鹿島出版会，2008.
- [D6] 種本純，石原孟：風と波の結合確率分布モデルに関する研究，風力エネルギー学会論文集，Vol.39, No. 3, pp.44-51, 2015.
- [D7] 宇都宮好博，松藤絵理子，富田雄一郎，松浦邦明，窪田和彦，内田 洋平，相中健吾，三嶋宣明，波浪推算データベースの再構築及び活用について，土木学会論文集 B3（海洋開発），Vol. 68 (2012) No. 2 pp. I_977-I_982, 2012.
- [D8] 日本海洋データセンターホームページ海流統計，
http://jdoss1.jodc.go.jp/vpage/ocs_j.html，最終確認 2017 年 8 月 7 日．
- [D9] 株式会社フォーキャスト・オーシャン・プラスホームページJCOPE-T について，
<http://www.forecastocean.com/j/research.html#jcopet>，最終確認 2017 年 8 月 7 日．
- [D10] 気象庁ホームページ潮汐観測資料，
<http://www.data.jma.go.jp/kaiyou/db/tide/genbo/index.php>，最終確認 2017 年 8 月 7 日．
- [D11] 国土地理院ホームページ潮位データ提供 国土地理院験潮場一覧，
http://www.gsi.go.jp/kanshi/tide_furnish.html，最終確認 2017 年 8 月 7 日．
- [D12] 気象庁ホームページ潮位表，
<http://www.data.jma.go.jp/kaiyou/db/tide/suisan/>，最終確認 2017 年 8 月 7 日．
- [D13] 海上保安庁ホームページ潮汐推算，
http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KANKYO/TIDE/tide_pred/index.htm，最終確認 2017 年 8 月 7 日．
- [D14] 海上保安庁，平均水面，最高水面及び最低水面一覧表
（https://www1.kaiho.mlit.go.jp/KANKYO/TIDE/enkan/Suijun_hyo/Pub.No741/index.pdf1），51p.，最終確認 2017 年 8 月 7 日．