- ・初回公開版からの修正箇所を変更履歴の形で明示しております。（該当ページのみ）
- ・今回公開の英語版は、これらの修正が適用された内容となっております。

ClassNK

一般財団法人 日本海事協会
NIPPON KAIJI KYOKAI

ウィンドファーム認証

陸上風力発電所 編

改訂履歴

I. 2021年7月31日付 新規発行（文書番号：NKRE-GL-WFC01, Edition: July 2021）

※2021年10月1日付で誤記修正及び軽微な修正を適用（文書番号に変更なし）

附則

1. 本ガイドラインは、2021年8月1日から有効とする。
2. 次のいずれかに該当する発電所以外の発電所で、かつ個別の審査において認められる場合には、なお従前の例によることができる。
 - (1) 2022年1月1日以降にウィンドファーム認証に係る審査申込書が受理された発電所
 - (2) ウィンドファーム認証に係る認証文書の初回発行が2022年5月1日以降となる発電所

修正箇所明示版

1章 一般

1.1 一般

1.1.1 適用

1. 本ガイドラインは、ウィンドファーム認証の対象となる陸上に建設される風力発電所に対する要求事項を規定する。
- ~~2.~~ 本ガイドラインに規定する要求事項は、風車の形式がプロペラ式水平軸で翼の枚数が3枚であり、鋼製かつ円筒形のモノポール式のタワーで支持される場合を対象とする。
- ~~3.~~ 電気事業法に基づく工事計画審査に係る要求事項に変更があった場合は、本ガイドラインの規定よりも当該要求事項の方が優先されることに留意すること。

1.1.2 新しい概念による風力発電設備

1. 本ガイドラインに定めるところと異なる形式又は設備を有する風力発電所にあつては、本ガイドラインの規定の原則的な考え方に準拠して個々に要求事項を定め、評価を行う場合がある。

1.1.3 設計寿命及び供用期間

1. 本ガイドラインにおける設計寿命及び供用期間はいずれも20年とする。
2. 前-1.とは異なる設計寿命及び供用期間とする場合には、本ガイドラインの規定の原則的な考え方に準拠して個々に要求事項を定め、評価を行う。

1.2 引用規格

1.2.1 一般

1. 次に掲げる規格は、公益財団法人日本適合性認定協会が定める「認定の基準」についての分野別指針—風力発電システム：ウィンドファーム、プロジェクト（JAB PD366:2017）によって指定されているウィンドファーム認証の引用規格のうち、洋上及び小形風車に係るものを除いたものである。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。

[J-01] JIS C 1400-1:2017 : 風力発電システム—第1部：設計要件

[J-02] IEC 61400-1:2019 : Wind energy generation system - Part 1: Design requirements

[J-03] 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：平成二九年三月三十一日経済産業省令第三二号）

[J-04] 発電用風力設備の技術基準の解釈について（経済産業省、20140328 商局第1号平成26年4月1日）

[J-05] 風力発電設備支持物構造設計指針・同解説 [2010年版]（土木学会）

[J-06] Germanischer Lloyd (GL) Guideline for the Certification of Wind Turbines 2010

2. 前-1.に掲げた規格の要求事項を満足するため、次に掲げる規格は本ガイドラインに引用されることにより、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。

[R-01] NKRE-SP-0003 ウィンドファーム認証要領, Edition February 2021

[R-02] 発電用風力設備に関する技術基準を定める省令及びその解釈に関する逐条解説（経済産業省、令和3年6月21日改正）

- [R-03] 風力発電所の設置又は変更の工事計画の審査に関する実施要領（経済産業省，20210518 保局第1号，令和3年5月24日）
- [R-04] 建築基礎構造設計指針（日本建築学会，2019年）
- [R-05] 高力ボルト接合設計施工ガイドブック（日本建築学会，2003年）
- [R-06] 煙突構造設計指針（日本建築学会，2007年）
- [R-07] JIS C 1400-12-1:2010 : 風車—第12-1部：発電用風車の性能試験方法
- [R-08] JIS C 1400-24:2014 : 風車—第24部：雷保護
- [R-09] IEC 61400-6:2020 : Wind energy generation systems - Part 6: Tower and foundation design requirements
- [R-10] IEC 61400-13:2015 : Wind turbines - Part 13: Measurement of mechanical loads
- [R-11] ISO 273:1979 : Fasteners - Clearance holes for bolts and screws
- [R-12] ISO 4354:2009 : Wind actions on structures
- [R-13] EN 1993-1-9:2005 : Design of steel structures – Part 1-9: Fatigue
- [R-14] fib Model Code for Concrete Structures 2010（CEB-FIP Model Code 2010）
- [R-15] CEB-FIP Model Code 1990
- [R-16] DNVGL-ST-0126 Support structures for wind turbines, Edition April 2016
- [R-17] Measnet Evaluation of Site-Specific Wind Conditions, Version 2, April 2016
- [R-18] [IEC 61400-12-1:2017](#) : [Wind energy generation system - Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines](#)

1.3 定義と略語

1.3.1 用語の定義

1. 本ガイドラインで使用する主な用語の定義を表 1-1 に定める。

表 1-1 用語の定義

用語	定義
依頼者	ウィンドファーム認証に係る審査申込書を提出する者をいう。
NK-PASS	本会ウェブサイト上で利用可能な文書提出・管理システムをいう。
環境条件	風車の挙動に影響を与える可能性がある風，高度，温度，湿度，気圧などの特性。
外部条件	環境条件，地盤・地質条件及び電力系統の条件を包含する風車の運転に影響を与える因子。
年平均	十分な期間にわたって集めた十分な量の測定データセットを平均した値であって，測定対象の期待値を推定できるもの。平均を計算する期間は，季節差などの非定常効果をならすため，1年単位の整数倍とすることが望ましい。
平均風速	数秒から数年を変数とする所定期間内で平均化した風速の瞬時値の統計的平均。
年平均風速	年平均の定義に従って平均した風速。
ハブ高さ	風車ロータの受風面中心（ロータが1回転中に描く平面を，風向に対して垂直に投影した面の中心）の地上からの高さ。
カットイン風速	乱流がない定常風の場合に，風車が動力を発生し始めるハブ高さにおける最小の風速。
カットアウト風速	乱流がない定常風の場合に，風車が動力を発生するように設計されたハブ高さにおける最大の風速。
定格出力	通常，製造業者によって指定される構成部品，装置及び設備を仕様条件下で運転した場合に得られる出力の値。風車の場合，通常の運転条件及び外部条件下で供給するように設計されている（風車の）最大連続出力をいう。

用語	定義
定格風速	乱流がない定常風の場合に、風車の定格出力に到達するハブ高さにおける最小の風速。
基準風速 (V_{ref})	JIS C 1400-1:2017 [J-01] において風車クラスを定義するために用いるハブ高さにおける風速で、再現期間 50 年の 10 分間平均風速として設定される。
基準風速 (V_0)	建築基準法により、その地方の過去の台風等の記録に基づく風害の程度その他の風の性状に応じて 30m/s から 46m/s までの範囲において国土交通大臣が定める高さ 10m における再現期間 50 年の 10 分間平均風速。
極値風速	再現期間 50 年に対応する平均風速のこと。
発電時	カットイン風速からカットアウト風速の間で風車が発電のための運転をしている状態のこと。
暴風待機時	カットアウト風速を超え、風車が発電を停止し待機している状態。
複雑地形	地形が変化に富み又は障害物が存在し、それらによって気流がゆがめられやすい周辺地形。
粗度	地表の凹凸、樹木、建物等境界面の粗さや滑らかさ。
粗度長	鉛直方向の風速プロファイルが、高さに対して対数的に変化すると仮定した場合、平均風速が 0 となる外挿高さ。
地表面粗度区分	地表面の滑らかな状態から粗い状態までを段階的に区分したもの。
乱流強度	平均風速に対する風速の標準偏差の比で、変動風速の標準偏差を平均風速で除した値のこと。
乱流標準偏差	ハブ高さにおける乱流風速度の主方向成分の標準偏差。
風況観測データ	風速、風速の標準偏差、風向の 10 分間平均値に係る連続 1 年以上の時系列データのこと。
有効データ率	風況観測データについて、異常値などを除去するフィルター処理後のデータ充足率、もしくはデータ補完後のデータ充足率のこと。
データ充足率	該当する観測期間において、「フィルター処理後の利用可能な 10 分間平均値の個数」を「観測期間に対応する 10 分間平均値の総個数」で除した値のこと。
相関係数	2 つのデータ又は確率変数の間にある線形な関係の強弱を測る指標のこと。
決定係数	独立変数が従属変数にどれくらい寄与しているかを表す値であり、標本値から求めた回帰方程式のあてはまりのよさの尺度となる。
気流解析	空気の流れを計算する数値解析のこと。
気流解析モデル	気流解析に適用する方程式及びその解法のこと。(欧州のような広範囲にわたる平坦地形の場合は線形モデルが適用されるが、日本国内のような地形の傾斜勾配が大きい場合は非線形モデルが適している。)
周囲乱流標準偏差	観測データを用いた気流解析の結果により予測・算定された、風車位置ハブ高さでの風速の主方向成分の標準偏差のこと。(通常、風速ビンごとに算定する。)
周囲乱流強度	周囲乱流標準偏差を風速で除した値。
風車の後流影響	風車のロータ面を通過した風(後流)によって近隣風車が擾乱を受けること。
有効乱流強度	周囲乱流強度に風車の後流影響による乱流強度を加味した値。
ウィンドシア	地上高さに対する風速の変化に対して仮定される数学表現のこと。
ウィンドシアのべき指数	ウィンドシアの指数則の指数のこと。
気流傾斜角	ハブ高さでのロータ面に対する流入風の傾斜角のこと。
バックアップ電源	系統電力喪失時に風車の制御システムを稼働させるための電力を供給する電源システムのこと。
ヨー制御	風車のナセル方位角(ロータ軸の角度)を風向の変化に追従させる制御のこと。

用語	定義
ヨーミスアライメント	風車のナセル方位角（ロータ軸の角度）と風向の誤差で、一般的に 10 分間平均値で示す。
風力係数	構造物に作用する空気力を速度圧と代表面積の積で割った値。なお、平均風力係数は時間平均を意味している。

1.3.2 略語の定義

- 1. 本ガイドラインで使用する主な略語の定義を表 1-2 に定める。

表 1-2 略語の定義

略語	定義
RNA	Rotor Nacelle Assembly
DLC	Design Load Case
MCP	Measure-Correlate-Predict

1.3.3 記号の意味及び単位

- 1. 本ガイドラインで使用する主な記号の意味及び単位を表 1-3 に定める。

表 1-3 記号の定義

記号	意味	単位
C_{CT}	乱流構造強度パラメータ（JIS C 1400-1:2017 ^[J-01] 11.2 参照）	
D	ロータ直径	
I_{ref}	<ul style="list-style-type: none"> ・ 10 分平均風速 15 m/s でのハブ高さにおける乱流強度の期待値^[J-01] ・ 10 分平均風速 15 m/s での 70%分位値に対応する乱流強度の基準値^[J-02] 	
I_{rep}	周囲乱流強度の 90%分位値	
I_{eff}	有効乱流強度	
V_{hub}	ハブ高さにおける風速	[m/s]
V_{ave}	年平均風速	[m/s]
V_{in}	カットイン風速	[m/s]
V_{out}	カットアウト風速	[m/s]
V_r	定格風速	[m/s]
V_{ref}	基準風速（JIS C 1400-1:2017 ^[J-01] ）	[m/s]
V_0	基準風速（建築基準法）	[m/s]
$\hat{\sigma}$	周囲乱流標準偏差	[m/s]
$\hat{\sigma}_\sigma$	周囲乱流標準偏差 $\hat{\sigma}$ の標準偏差	[m/s]
$\hat{\sigma}_1$	風車位置・ハブ高さにおける風速の主方向成分の標準偏差	[m/s]
$\hat{\sigma}_2$	風車位置・ハブ高さにおける風速の横方向成分の標準偏差	[m/s]
$\hat{\sigma}_3$	風車位置・ハブ高さにおける風速の鉛直方向成分の標準偏差	[m/s]
U_h	風車位置・ハブ高さにおける 50 年再現期間の 10 分間平均風速	[m/s]
U_{e50}	風車位置・ハブ高さにおける 50 年再現期間の 3 秒間平均風速	[m/s]
I_{h1}	風車位置・ハブ高さにおける再現期間 50 年の 10 分間平均風速に対する乱流強度	

1.5.3 サイト風条件評価（風条件）に係る資料

-1. サイト風条件評価（風条件）に係る審査用資料として、以下に掲げる文書及びデータを本会に提出しなければならない。なお、以下に示す項目を組み合わせた形の文書としても差し支えない。

(1) 計画サイトの基本情報に係るレポート

※ 以下の情報を含むものとする。

- サイトの所在地
- 採用する風車の型式及びその基数
- 風車レイアウト
- 風車座標（世界測地系：WGS 84 及び UTM）
- サイトにおける風車運転の計画（カットイン／カットアウト風速、定格出力、定格風速、パワーカーブなど）

(2) 現地観測に係るレポート（附属書 A.45 に示す項目を含むこと）

(3) 発電時の風条件に係るレポート（附属書 B.3.1 及び C.4.1 に示す項目を含むこと）

(4) 暴風待機時の風条件に係るレポート（附属書 B.3.2 及び C.4.2 に示す項目を含むこと）

(5) 暴風継続時間に係るレポート（5.4.2 に規定するバックアップ電源を設ける場合のみ）

-2. サイト条件評価（風条件）に係る審査において本会が必要と認める場合、以下に掲げるデータを本会に提出しなければならない。

(1) 現地観測データ（気流解析に適用した観測期間に該当する 10 分間平均値の時系列データ）

(2) 気流解析として実施した CFD 解析結果のデータ

1.5.4 風車（RNA）設計評価に係る資料

-1. 風車（RNA）設計評価に係る審査用資料として、以下に掲げる文書を本会に提出しなければならない。なお、以下に示す項目を組み合わせた形の文書としても差し支えない。

(1) 設計基準に係るレポート（3.2.2 に記載の内容）

(2) 型式認証時に設定した設計荷重（認証設計荷重）と全体荷重解析から得られたサイト固有の荷重（サイト荷重）の値、及びそれらの比較に係るレポート

(3) サイト荷重が認証設計荷重を超過した場合の、関連する RNA を構成する部品の強度計算に係るレポート

(4) 型式認証条件からの振動モード／固有振動数の変化のレポート

(5) 型式認証では完全に包含されていない、サイト向けに新たに変更された、又は強化された RNA を構成する部品およびシステムがある場合は当該部品／システムに関するレポート

(6) バックアップ電源を設ける場合に、5.4 に規定する要求事項を満足していることが確認できるレポート

(7) 5.5.1 に規定する風車を安全に停止させるための対策及びその対策に伴う強度評価の結果をまとめた資料

(8) 5.5.2 に規定する雷撃からの保護についての対策をまとめた資料

1.5.5 支持構造物設計評価（タワー）に係る資料

-1. 支持構造物設計評価（タワー）に係る審査用資料として、以下に掲げる文書を本会に提出しなければならない。なお、以下に示す項目を組み合わせた形の文書としても差し支えない。

(1) 設計基準に係るレポート（3.2.3-1.に記載の内容を含み、風車設計評価と共通としても差し支えない）

(2) 型式認証書に記載のタワーを採用する場合、型式認証時に設定した設計荷重（認証設計荷重）と全体荷重解析から得られたサイト固有の荷重（サイト荷重）の値、及びそれらの比較に係るレポート

(3) 前 (2) でサイト荷重が認証設計荷重を超過する場合、もしくは型式認証書に記載のないタワーを採用する場合、サイト荷重を適用したタワーの構造設計の強度計算に係るレポート

(4) 採用するタワーが風力発電設備支持物構造設計指針・同解説^[J-05]の要求事項を満足していることを示すレポート

- (5) 6.2に規定する項目に対する検討結果を含むレポート
 - (6) 型式認証条件からの振動モード／固有振動数の変化のレポート
- 2. 支持構造物設計評価（基礎）の審査申込を行わない場合は、1.5.6-1.に規定する審査用資料のうち以下に掲げる文書を本会に提出しなければならない。
- (1) 電気事業法に基づく工事計画届に添付する支持物の強度計算書一式のうち以下の内容に該当するレポート
 - 地盤調査
 - 地震応答解析
 - 施工計画
 - 特殊な材料
 - タワー定着部周りの基礎の図面

1.5.6 支持構造物設計評価（基礎）に係る資料

- 1. 支持構造物設計評価（基礎）に係る審査用資料として、以下に掲げる文書を本会に提出しなければならない。
- (1) 電気事業法に基づく工事計画届に添付する支持物の強度計算書一式
 - (2) 支持構造物設計の概要説明資料（1.4.9-4.に規定する支持構造物認証分科会 基礎・地盤部会を開催する場合）

値を比較した結果を示さなければならない。

-5. 風況観測データについては、気象モデルによる再解析データやサイトの近隣気象観測所の長期観測データなど適切な参照データを用いて平年値との比較を行い、適切に補正しなければならない。

-6. 風況観測データにおいて、隣接する高度の風向が大きく異なる場合や、一部の風向のウィンドシアのベキ指数が他と大きく異なる場合などの特異な傾向が認められる場合、その原因について考察しなければならない。

-7. リモートセンシング機器による観測データは、以下に掲げる条件に応じて表 2-2 に従い同時観測を行った風況観測マストによる観測データとの相関を確認することで、観測データとして適切であることが確認されなければならない。なお、いずれの場合も風況観測マストの最も高い位置での観測データを用いることを原則とする。

- (1) 観測マストとリモートセンシング機器による観測データを組み合わせることにより、ハブ高さでの観測データとして扱い、気流解析の入力データとする場合
- (2) 観測マストの観測データを気流解析の入力データとし、その気流解析の妥当性の検証用にのみリモートセンシング機器による観測データを用いる場合

-8. リモートセンシング機器による観測データの有効データ率は、前-2.による。ただし、マストの観測データを気流解析の入力データとし、その気流解析の妥当性の検証用にのみリモートセンシング機器による観測データを用いる場合、季節性の影響が十分に得られていることが定量的に示されている場合に限り、その有効データ率は前-2.の規定によらなくてもよい。

表 2-2 観測マストとリモートセンシング機器による観測データの相関

条件	風速に係る要求事項	風向に係る要求事項
(1)	<ul style="list-style-type: none"> ・決定係数 R^2 : > 0.98 ・回帰直線の傾斜 : 0.98 – 1.02 	<ul style="list-style-type: none"> ・決定係数 R^2 : > 0.957 ・回帰直線の傾斜 : 0.957 – 1.053 ・回帰直線の切片 : < 5°
(2)	<ul style="list-style-type: none"> ・決定係数 R^2 : > 0.97 ・回帰直線の傾斜 : 0.97 – 1.03 <p>※ これらの要求事項を満足できない場合、気流解析等の結果を用いてその理由を定量的に示さなければならない。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・決定係数 R^2 : > 0.975 ・回帰直線の傾斜 : 0.95 – 1.05 ・回帰直線の切片 : < 10° <p>※ これらの要求事項を満足できない場合、気流解析等の結果を用いてその理由を定量的に示さなければならない。</p>

2.2.3 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、乱流構造補正パラメータ（以下、 C_{CT} ）を観測マスト位置及び風車位置に対して算定することで、地形の複雑さをそれぞれ判定しなければならない。具体的な判定手法については、以下のいずれかに従わなければならない。

- (1) JIS C 1400-1:2017 ^[J-01], 11.2 項 (IEC 61400-1 Ed.3.1, 11.2)
- (2) IEC 61400-1:2019 ^[J-02], 11.2

-2. 計画サイトにおいて、 $C_{CT} \geq 1.05$ となる観測マストもしくは風車が1つでもある場合、当該サイトは複雑地形に該当するものとして扱わなければならない。

2.2.4 気流解析

-1. 風車位置の風条件を予測するため、気流解析を適切に実施しなければならない。なお、気流解析に適用するモデル及び考慮する風向セクター数については表 2.3 による。

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. 気流解析については、計画サイトの地形及び周囲の状況に応じた適切な地形モデルを選定し、その解析領域を十分に確保しなければならない。気流解析の詳細については、附属書 B.1 に従わなければならない。
- 3. 気流解析の妥当性を十分に確認しなければならない。気流解析により、風況観測マスト位置の風条件を算定し、平均風速・乱流強度・ウィンドシアについて方位別に観測データとの比較による検証を行わなければならない。この気流解析の妥当性の確認について、その詳細は附属書 B.2 に従わなければならない。

2.2.5 風速出現頻度分布の算定

- 1. サイトの風況観測データ及び気流解析の結果を用いて、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. 方位別の出現頻度に加えて、方位別のエネルギー密度も算定しなければならない。
- 3. ワイブルパラメータの算定については、附属書 C.2.1 に従ってもよい。

2.2.6 乱流強度の算定

- 1. サイトの風況観測データ及び気流解析の結果を用いて、風車位置のハブ高さにおける方位別の乱流強度について、JIS C 1400-1:2017^[4-01] で規定される通常乱流モデル (NTM) 及び極値乱流モデル (ETM) に対応する乱流強度をそれぞれ算定しなければならない。また、風車の運転について、セクターマネジメントを設定する場合には、その影響を適切に考慮しなければならない。
- 2. 通常乱流モデル (NTM) に対応する乱流強度である I_{rep} を算定するため、 $V_{in} \sim V_{out}$ の間の V_{hub} における周囲乱流標準偏差 σ 及び σ の標準偏差 $\hat{\sigma}_\sigma$ を算定しなければならない。
- 3. 極値乱流モデル (ETM) に対応する乱流強度については、 $V_{in} \sim V_{out}$ の間の V_{hub} における周囲乱流標準偏差 σ の最大値を用いた乱流強度とすることができる。
- 4. なお、乱流標準偏差については、主方向成分 $\hat{\sigma}_1$ だけではなく主方向に対する横方向成分 $\hat{\sigma}_2$ 及び鉛直方向成分 $\hat{\sigma}_3$ についても算定する必要があることに留意すること (4.2.2-3 参照)。
- 4.5. 乱流強度の具体的な算定方法は附属書 C.2.2 に従ってもよい。

2.2.7 隣接風車の後流影響評価

- 1. 2.2.6 で求めた風車位置のハブ高さにおける周囲乱流強度を用いて、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。また、風車の運転について、セクターマネジメントを設定する場合には、その影響を適切に考慮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。なお、後流影響を評価する際には、検討対象の風車からの距離が 10D の範囲に位置する全ての風車を考慮しなければならない。この場合の D は隣接する風車のロータ径とする。
- 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 (以下、 I_{eff}) を用いることとして差し支えない。この I_{eff} については、以下のいずれかに示されるモデルによって算定しなければならない。
 - (1) JIS C 1400-1:2017^[4-01], 附属書 D (IEC 61400-1 Ed.3.1, 附属書 D)
 - (2) IEC 61400-1:2019^[4-02], Annex E
- 4. 大規模ウィンドファームの場合、 I_{eff} は、JIS C 1400-1:2017^[4-01] 附属書 D に基づく、Frandsen モデルを適用した

場合と大規模ウィンドファーム効果に係る規定を使用した場合との比較を行い、その妥当性を検証した上でどちらを用いて算定するか判断しなければならない。

-5. 後流の影響を含む極値乱流は、最も厳しい方向における後流の中心における最大乱流としてよい。

2.2.8 ウィンドシアのべき指数の算定

-1. サイトの風況観測データ及び気流解析の結果を用いて、風車位置のロータ受風面の高さ方向の方位別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. 前-1.で求めた方位別のウィンドシアのべき指数をエネルギー密度に基づき加重平均した値が 0.2 を下回る場合は、その値を 0.2 としなければならない。

-3. ウィンドシアのべき指数の具体的な算定方法は附属書 C.2.3 に従ってもよい。

2.2.9 気流傾斜角の算定

-1. サイトの風況観測データ及び気流解析の結果を用いて、風車位置のハブ高さにおける方位別の気流傾斜角を算定しなければならない。

-2. 全方位を考慮した気流傾斜角の代表値を算定する場合は、前-1.で求めた方位別の気流傾斜角をエネルギー密度に基づいて加重平均してもよい。

~~-3.~~ 気流傾斜角の具体的な算定方法は附属書 C.2.4 に従ってもよい。

2.2.10 大気密度の算定

-1. 現地観測データ等によりサイトの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附属書 C.2.5 に従ってもよい。

2.3 暴風待機時の風条件

2.3.1 極値風速及び乱流強度の算定

-1. 風車位置のハブ高さにおける再現期間 50 年の 10 分間平均風速 U_h 及び U_h に対する乱流強度 I_{h1} 及び 3 秒間平均風速 U_{e50} を算定しなければならない。なお、これらの算定方法は、風力発電設備支持物構造設計指針・同解説^[4-05]に準拠している附属書 C.3.1 及び C.3.2 に従わなければならない。

-2. 前-1.の算定に用いる気流解析については、その妥当性を十分に確認しなければならない。気流解析により、風況観測マスト位置の風条件を算定し、平均風速・乱流強度・ウィンドシアについて方位別に観測データとの比較による検証を行わなければならない。この気流解析の妥当性の確認については、附属書 B.2 に従って行わなければならない。

-3. U_{e50} については、附属書 C.3.3 に従って 2.2.2 に示す事項を満足する適切な観測データに基づいて I_{h1} を算定することにより求めてもよい。

-4. 再現期間 1 年の 10 分間平均風速 U_1 については、JIS C 1400-1:2017^[4-01] に従い、再現期間 50 年の 10 分間平均風速 U_h の 0.8 倍とする。なお、これによらず長期観測データ等に基づく算定値とすることができる。ただし、その場合は観測データ自体の妥当性、解析手法の妥当性などを十分に示さなければならない。

-5. 再現期間 50 年及び 1 年の極値風速に対するウィンドシアのべき指数は、以下の項目のうち最も大きい値を採用しなければならない。

(1) 附属書 C 表 C.1 に定める地表面粗度区分に応じたウィンドシアのべき指数

(2) JIS C 1400-1:2017^[4-01] 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) 附属書 C.3.2.3 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

~~-6. 極値風速の算定に用いる気流解析の妥当性を十分に確認しなければならない。気流解析により、風況観測マスト位置の風条件を算定し、ウィンドシアについて方位別に観測データとの比較による検証を行わなければならない。こ~~

~~の気流解析の妥当性の確認について、その詳細は附属書 B.3 に従わなければならない。~~

2.3.2 大気密度の算定

- 1. サイトにおける極値風速に対応する大気密度は、 1.22kg/m^3 以上としなければならない。

2.4 地盤及び地震条件

2.4.1 一般

- 1. 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^[J-03]
 - (2) 風力発電設備支持物構造設計指針・同解説^[J-05]
- 2. 前-1.に従って条件を算定する際には以下の点に留意しなければならない。
 - (1) 過去の地震、それに伴う液状化、津波による被災状況について調査し、その結果を参考にしなければならない。
 - (2) 工学的基盤を設定する場合、せん断波速度が 400m/s 以上、層厚が 5m 以上、傾斜が 5 度以下（一次元波動論の適用条件）であることを確認しなければならない。
 - (3) 津波の影響について検討しなければならない。またその影響をハザードマップにより調査している場合、そのハザードマップの根拠を明確にしなければならない。
 - (4) 変形係数の推定のために孔内水平載荷試験を実施している場合、その結果を適切にまとめて示さなければならない。
 - (5) せん断波速度を推定する際に太田・後藤の式を用いる場合、地盤調査結果に基づきその推定の妥当性を検証し、かつ推定値のばらつきの影響を評価しなければならない。
- 3. 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り扱いは、本会が適当と認めるところによる。

2.5 雷条件

2.5.1 一般

- 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. 地域ごとの被雷頻度は、図 2.1 に示す実線で囲まれた区域、破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。

-4. サイト荷重に基づく強度評価をまとめるレポートには、検討対象となる部品ごとにサイト荷重の認証設計荷重に対する超過率と前-2.に示す強度評価結果による裕度を対応させた表をサマリーとして記載しなければならない。また、その表に記載の数値の根拠については、詳細な計算書をレポートに添付するか、別冊を引用するなど適切な方法で明確に示さなければならない。

5.3 ナセルカバーの強度評価

5.3.1 一般

-1. サイト条件に基づいて設定される風荷重に対してナセルカバーは十分な強度を有するものでなければならない。

5.3.2 ナセルカバーに対する風荷重

-1. ナセルカバーの風荷重係数は式 (5.1) によって算定しなければならない。

$$P_e = \frac{1}{2} \rho U_h^2 \hat{C}_p \quad (5.1)$$

ここで、

ρ : 空気密度で、1.22 [kg/m³]とする

U_h : 2.3.1 で規定する再現期間 50 年の 10 分間平均風速 [m/s]

$\hat{C}_p$: ピーク風力係数で式 (5.2) により求める。

$$\hat{C}_p = \hat{C}_{pe} - C_{pi} \quad (5.2)$$

ここで、

$\hat{C}_{pe}$: ピーク外圧係数

C_{pi} : 内圧係数で表 5-1 による

表 5-1 内圧係数

	負圧側	正圧側
風上側の面に開口がない場合	0	-0.5
風上側の面に開口がある場合	0.5	0

-2. ピーク外圧係数は式 (5.3) によって算定しなければならない。

$$\hat{C}_{pe} = \hat{C}_{em}(1 + 7I_{h1}) \quad (5.3)$$

ここで、

$\hat{C}_{em}$: 等価風圧係数で、附属書 D に参考例を示す

I_{h1} : 2.3.1 に示す再現期間 50 年の 10 分間平均風速に対する乱流強度

-3. ピーク外圧係数については、前-2.に示す規定に代えて、風洞試験の結果に基づいて設定してもよい。なお、風洞試験の実施については、附属書 E を参考にすることができる。

5.3.3 荷重ケース

-1. ナセルカバーに作用する風荷重については、表 5-2 に示す荷重ケースを全て考慮して算定しなければならない。なお、表 5-2 に示す荷重ケースは、JIS C 1400-1:2017^[D-01] で規定される設計荷重ケースのうち、DLC6.1 及び DLC6.2 で考慮すべき風速・風向・乱流強度と対応しており、そのうち風向については $\hat{C}_{em}$ 算定の際に考慮すべきものであることに留意すること。

- 2. それぞれの荷重ケースの風荷重は式 (5.1) を用いて算定し、かつ表 5-2 に示す部分安全係数を乗じなければならない。

表 5-2 ナセルカバーの荷重算定に適用する荷重ケース

No.	$\hat{C}_{em}$	$\hat{C}_{em}$ 算定の際に考慮する風向	風速	乱流強度	風荷重に対する部分安全係数
NC.1-1	正值	-15° ~ +15° *1	U_h	I_{h1}	1.35
NC.1-2	負値				
NC.2-1	正值	全風向 *2	U_h	I_{h1}	1.10
NC.2-2	負値				

*1 : JIS C 1400-1:2017^[J-01] で規定される DLC6.1 で考慮すべき風向に対応

*2 : JIS C 1400-1:2017^[J-01] で規定される DLC6.2 で考慮すべき風向に対応

5.3.4 強度評価

- 1. サイト条件に基づき、5.3.3 に従って算定した風荷重に対するナセルカバーの強度評価については、原則として型式認証時に適用した強度評価手法(以下、原設計の手法)と同じ手法とし、許容値等の設定も当該手法に従うことで差し支えない。
- 2. 前-1.にかかわらず、ナセルカバーに複合材料を用いる場合については、材質・製造・長期劣化等に係る部分安全係数を適切に考慮することとし、その積は2.0を下回ってはならない。

5.4 系統電力喪失時の評価

5.4.1 一般

- 1. 風車は、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^[J-01] 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、5.4.2 に示す要求事項を全て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。

5.4.2 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)~(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ヨーミスアライメントを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、設計値として採用する当該ヨーミスアライメント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ヨーミスアライメントの設計値と±8°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うち、JIS C 1400:2017^[J-01] で規定される 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. ユーミスアライメントの設計値の設定にあたっては、サイト固有の極値風速状況下において、次の (1)~(8) 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

5.5.2 雷撃からの保護

- 1. 本項の規定は、発電用風力設備に関する技術基準を定める省令及びその解釈に関する逐条解説^[R-02]に基づいており、その要求事項に変更はない。
 - 2. 最高部の地表からの高さが20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ような措置を講じなければならない。ただし、周囲の状況によって雷撃が風車を損傷するおそれがない場合においては、この限りでない。【省令、第五条 第3項】
 - 3. 「雷撃から風車を保護するような措置」とは、発電用風力設備を設置する場所の落雷条件を考慮し、次に掲げる地域の区分に応じて定める要件の全てを満たすものをいう。【解釈、第七条 第6項 一】
 - (1) 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。
 - (2) 図2.1の点線破線で囲まれた地域
 - (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。
 - (3) 図2.1の実線又は破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) (1)の(ロ)及び(ハ)の要件を満たすこと。
- 4. 風車を支持する工作物(船舶安全法(昭和八年法律第十一号)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。【解釈、第七条 第6項 二】
 - (1) 風車を支持する工作物に被害を及ぼすことなく、雷撃によって生ずる電流を安全に地中に流すことができる雷保護は、JIS C 1400-24:2014^[R-08]に適合するものであること。
 - (2) 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。
- 5. 前-2.に規定する「周囲の状況によって雷撃が風車を損傷するおそれがない場合」とは、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を含むものをいう。【解釈、第七条 第7項】

附属書 C. 風条件の評価方法【参考／一部規定】

C.1 一般

- 1. C.2 に示される発電時の風条件の算定方法は参考として示すものであり、これらの規定によらない方法を否定するものではない。
- 2. C.3.1 及び C.3.2 に示される暴風待機時の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 [J-05] に準拠しており、この規定によらないことは認められない。

C.2 発電時の風条件

C.2.1 風速出現頻度分布及び平均風速

- 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。

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

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、観測から求めた平均風速 V_{ave} と平均風速の標準偏差 σ_V から式 (C.2) 及び式 (C.3) により求める。

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

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

- 2. 風車位置・ハブ高さでの平均風速の時系列データ $U_R(x, y, H_h, \theta, t)$ は、式 (C.4) により求める。

$$U_R(x, y, H_h, \theta, t) = U_M(h, \theta, t) \cdot C_V(x, y, H_h, \theta) \quad (C.4)$$

ここで、

- $U_M(h, \theta, t)$: 観測マスト位置・観測高さにおける観測データから得られる風速の時系列データ
 $C_V(x, y, H_h, \theta)$: 気流解析による風車位置・ハブ高さにおける風向 θ の風速 $u_T(x, y, H_h, \theta)$ と同じく気流解析による観測マスト位置・観測高さにおける風向 θ の風速 $u_M(x, y, h, \theta)$ を用いて下式によって求められる風速比 [= $u_T(x, y, H_h, \theta) / u_M(x, y, h, \theta)$]

- 3. 風車位置・ハブ高さでの方位別の平均風速 $V_{ave}(x, y, H_h, \theta)$ は、式 (C.5) により求める。

$$V_{ave}(x, y, H_h, \theta) = \frac{\sum_{i=1}^N U_R(x, y, H_h, \theta, t)}{N} \quad (C.5)$$

ここで、

- N : 当該方位に含まれる観測データ数 (時系列データの個数)

C.2.2 乱流強度の算定方法

- 1. 風車位置・ハブ高さの周囲乱流標準偏差の時系列データ $\sigma_R(x, y, H_h, \theta, t)$ は、式 (C.6) により求める。

$$\sigma_R(x, y, H_h, \theta, t) = \sigma_M(h, \theta, t) \cdot C_S(x, y, H_h, \theta) \quad (C.6)$$

ここで、

- $\sigma_M(h, \theta, t)$: 観測マスト位置・観測高さにおける観測データから得られる周囲乱流標準偏差の時系列データ
- $C_S(x, y, H_h, \theta)$: 気流解析による風車位置・ハブ高さにおける風向 θ の周囲乱流標準偏差
 $\sigma_T(x, y, H_h, \theta)$ と同じく気流解析による観測マスト位置・観測高さにおける風向 θ の周囲乱流標準偏差 $\sigma_M(x, y, h, \theta)$ を用いて下式によって求められる風速比 [= $\sigma_T(x, y, H_h, \theta) / \sigma_M(x, y, h, \theta)$]

-2. 風車位置・ハブ高さでの方位 θ 及び i 番目の風速ビンを代表する乱流強度 $I_{rep}(x, y, H_h, \theta, V_i)$ は、周囲乱流標準偏差の90%分位値とし、式 (C.7) により求める。

$$I_{rep}(x, y, H_h, \theta, V_i) = \frac{\sigma(x, y, H_h, \theta, V_i) + 1.28\sigma_\sigma(x, y, H_h, \theta, V_i)}{V_i(x, y, H_h, \theta)} \quad (C.7)$$

ここで、

- $\sigma(x, y, H_h, \theta, V_i)$: 方位 θ 及び i 番目の風速ビンにおける周囲乱流標準偏差
- $\sigma_\sigma(x, y, H_h, \theta, V_i)$: 方位 θ 及び i 番目の風速ビンにおける周囲乱流標準偏差の標準偏差
- $V_i(x, y, H_h, \theta)$: 方位 θ における i 番目の風速ビンを代表する風速

-3. 全方位を代表する i 番目の風速ビンを代表する乱流強度 $\overline{I_{rep,i}}$ については、方位別の風速出現頻度 またはエネルギー密度 によって加重平均し、式 (C.8) により求める。

$$\overline{I_{rep,i}} = \sum_{\theta} (I_{rep}(x, y, H_h, \theta, V_i) F(\theta)) \quad (C.8)$$

ここで、

- $F(\theta)$: 方位 θ における風速出現頻度 またはエネルギー密度

C.2.3 ウィンドシアのべき指数の算定方法

-1. 風車位置・ハブ高さにおける方位別のウィンドシアのべき指数 $\alpha(x, y, H_h, \theta)$ は、ロータ面上端、ハブ高さ及びロータ面下端におけるそれぞれの方位 θ の平均風速により、最小二乗法を用いて求めなければならない。なお、式 (C.9) により求めることもできるが、これは参考値として扱うことが望ましい。

$$\alpha(x, y, H_h, \theta) = \frac{\ln\left(\frac{V_U(x, y, H_U, \theta)}{V_L(x, y, H_L, \theta)}\right)}{\ln\left(\frac{H_U - d}{H_L - d}\right)} \quad (C.9)$$

ここで、

- $V_U(x, y, H_U, \theta)$: 方位 θ における風車位置・ロータ面上端での平均風速
- $V_L(x, y, H_L, \theta)$: 方位 θ における風車位置・ロータ面下端での平均風速
- H_U : ロータ面上端の高さ
- H_L : ロータ面下端の高さ
- d : ゼロ面変位 (displacement height)

-2. 全方位を代表するウィンドシアのべき指数 $\bar{\alpha}$ については、方位別の風速出現頻度 またはエネルギー密度 によって加重平均し、式 (C.10) により求める。

$$\bar{\alpha} = \sum_{\theta} (\alpha(x, y, H_h, \theta) F(\theta)) \quad (\text{C.10})$$

ここで、

$F(\theta)$: 方位 θ における風速出現頻度 またはエネルギー密度

C.2.4 気流傾斜角の算定方法

- 1. 風車位置・ハブ高さにおける方位別の気流傾斜角 $\varphi(x, y, H_h, \theta)$ は、式 (C.11) により求める。

$$\varphi(x, y, H_h, \theta) = \tan^{-1} \left(\frac{u_{T3}(x, y, H_h, \theta)}{\sqrt{(u_{T1}(x, y, H_h, \theta))^2 + (u_{T2}(x, y, H_h, \theta))^2}} \right) \quad (\text{C.11})$$

ここで、

$u_{T1}(x, y, H_h, \theta)$: 気流解析による風車位置・ハブ高さにおける風向 θ の風速の主流方向成分

$u_{T2}(x, y, H_h, \theta)$: 気流解析による風車位置・ハブ高さにおける風向 θ の風速の横方向成分

$u_{T3}(x, y, H_h, \theta)$: 気流解析による風車位置・ハブ高さにおける風向 θ の風速の鉛直方向成分

- 2. 全方位を代表する気流傾斜角 $\bar{\varphi}$ については、方位別の風速出現頻度 またはエネルギー密度 によって加重平均し、式 (C.12) により求める。

$$\bar{\varphi} = \sum_{\theta} (\varphi(x, y, H_h, \theta) F(\theta)) \quad (\text{C.12})$$

ここで、

$F(\theta)$: 方位 θ における風速出現頻度 またはエネルギー密度

C.2.5 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.13) を用いて算出する。

$$\rho = \frac{B}{T \times R_0} \quad (\text{C.13})$$

ここで、

B : 大気圧

T : 大気温度

R_0 : 気体定数 (287.05 [J/kgK])

- 2. 大気密度に関して現地の観測データがない場合、標高に関する高度補正を行うことで近隣気象観測所の長期観測データを適用できる場合がある。ただし、この場合は当該データが適用できることの根拠を明確に示さなければならない。

C.3 暴風待機時の風条件

C.3.1 極値風速（50年再現・10分間平均風速）の算定方法

-1. 風車位置のハブ高さにおける再現期間50年の10分間平均風速 U_h は、基準風速 V_0 に地形による平均風速の割増係数 E_{tV} と高度補正係数 E_{pV} を乗じたものとし、式 (C.14) 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 10m における再現期間 50 年の 10 分間平均風速とし、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。

$$U_h = E_{tV} E_{pV} V_0 \tag{C.14}$$

-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 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. 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.15) により算定する。ただし、 H_h はハブ高さ (m)、 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.15) に代入して求める。

$$E_{pV} = \begin{cases} 1.7 \left(\frac{H_h}{Z_G}\right)^\alpha & Z_b < H_h \leq Z_G \\ 1.7 \left(\frac{Z_b}{Z_G}\right)^\alpha & H_h \leq Z_b \end{cases} \tag{C.15}$$

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

地表面粗度区分	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.16) 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位置・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。

$$E_{tV} = \max(E'_{tV}, 1), \quad E'_{tV} = \max_{\theta} \left(\frac{U(x, y, H_h, \theta)}{U^P(x, y, H_h)} \right) \quad (C.16)$$

(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.17) 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。なお、台風シミュレーションを適用しても問題ないことについては、観測値との比較を行うなど、そのシミュレーションの妥当性と併せて十分に確認しなければならない。

$$E_{tV} = \max(E'_{tV}, 1), \quad E'_{tV} = \frac{U_{50}(x, y, H_h)}{U_{50}^P(x, y, H_h)} \quad (C.17)$$

C.3.2 極値風速（3 秒間平均風速）の算定方法

C.3.2.1 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_{tI} を乗じたものとし、式 (C.18) により求める。

$$I_{h1} = E_{tI} I_P \quad (C.18)$$

-2. 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.179) により算定する。ただし、 H_h はハブ高さ (m)、 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.19)に代入して求める。

$$I_P = \begin{cases} 0.1 \left(\frac{H_h}{Z_G} \right)^{-\alpha-0.05} & Z_b < H_h \leq Z_G \\ 0.1 \left(\frac{Z_b}{Z_G} \right)^{-\alpha-0.05} & H_h \leq Z_b \end{cases} \quad (C.19)$$

-3. 地形による乱流強度の補正係数 E_{tI} は、式 (C.20) 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.21) 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。

$$E_{tI} = \max(E_{tS}/E'_{tV}, 1) \quad (C.20)$$

$$E'_{tV} = \max_{\theta} \left(\frac{U(x, y, H_h, \theta)}{U^P(x, y, H_h)} \right) \quad (C.21)$$

-4. 地形による変動風速の補正係数 E_{tS} は、式 (C.22) 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。

$$E_{tS} = \frac{\sigma_u(x, y, H_h, \theta_d)}{\sigma_u^P(x, y, H_h)} \quad (\text{C.22})$$

-5. 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.23) で計算し, 式 (C.24) 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。

$$\sigma_u^{surf} = \sqrt{1.2k} \quad (\text{C.23})$$

$$\sigma_u = U \times \sqrt{\left(\frac{\sigma_u^{surf}}{U}\right)^2 + I_a^2} \quad (\text{C.24})$$

C.3.2.2 3 秒間平均風速の算定方法

-1. 再現期間 50 年のハブ高さにおける極値 3 秒平均風速 U_{e50} は式 (C.124) で算定した U_h を用いて, 式 (C.25) により算定する。

$$U_{e50} = G_f U_h \quad (\text{C.25})$$

ここで,

$$G_f = 1 + 3.5I_{h1}$$

※ 参考: IEC61400-1: 2019^[02] では, $I_{h1} = 0.11$ とし, $G_f \cong 1.4$ を用いている。

C.3.2.3 極値風速に対するウィンドシアの算定方法

-1. 風車位置のハブ高さにおける再現期間 50 年の 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 $\alpha(x, y, H_h, \theta_d)$ については, 気流解析より得られる風車位置・ハブ高さの照査対象風向 θ_d における以下に掲げる 3 高度の主流方向成分 U_1 と主流方向直角成分 U_2 を考慮した水平風速を用いて最小二乗法によって求める。

$$(1) \text{ ロータ面上端での水平風速} \quad : U_U(x, y, H_U, \theta_d) = \sqrt{(U_1(x, y, H_U, \theta_d))^2 + (U_2(x, y, H_U, \theta_d))^2}$$

$$(2) \text{ ハブ高さでの水平風速} \quad : U_h(x, y, H_h, \theta_d) = \sqrt{(U_1(x, y, H_h, \theta_d))^2 + (U_2(x, y, H_h, \theta_d))^2}$$

$$(3) \text{ ロータ面下端での水平風速} \quad : U_L(x, y, H_L, \theta_d) = \sqrt{(U_1(x, y, H_L, \theta_d))^2 + (U_2(x, y, H_L, \theta_d))^2}$$

C.3.3 風況観測データを用いた U_{e50} の算定方法【参考】

-1. 観測データを用いて暴風時の乱流強度 I_{h1} を算出し, U_{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) 2.2.1 の規定を満足する観測データ (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) 再現期間 50 年のハブ高さにおける 10 分間平均風速 (U_h) の算定にあたり, C.3.1-4. (1) 風向特性を考慮しない

手法を採用している場合は全風向を考慮した風速階級別乱流強度を算出する。C.3.1-4. (2) 風向特性を考慮する手法を採用している場合は風向別の風速階級別乱流強度を算出する。

- (4) (3) で作成した風速階級別乱流強度について、風速階級別に 50%分位値（非超過確率 50%）に対応する乱流強度を算定し、当該サイトにおける V_0 の半分の風速以上の範囲で 50%分位値（非超過確率 50%）に対応する乱流強度の値から $I_{h1,meas}$ を算定する。
- $I_{h1,meas}$ の算定にあたっては、 V_0 の半分の風速以上の範囲で 50%分位値（非超過確率 50%）に対応する乱流強度の値の平均値とするか、その最大値を採用するかなど、具体的な算定方法については観測データの傾向に応じて安全側となるように選択すること。
 - U_h の算定にあたり、C.3.1-4. (2) 風向特性を考慮する手法を採用している場合は、照査対象風向 θ_d における風速階級別乱流強度を用いて $I_{h1,meas}$ を算定する必要がある、当該風向の観測データ数が高風速域も含めて十分でなければならないことに留意すること。
- (5) (4) で得られた $I_{h1,meas}$ と地表面粗度区分に応じた平坦地形上の乱流強度 I_p のうち大きい方を I_{h1} とし、式 (C.245) を用いて U_{e50} を算定する。

-2. 観測データを用いて算定した暴風時の乱流強度 I_{h1} 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、風速階級別乱流強度の 50%分位値（非超過確率 50%）を示すプロット、 I_p の値を示す線及び $I_{h1,meas}$ 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.4 風条件に係るレポート

C.4.1 発電時の風条件に係るレポート

-1. 発電時の風条件に係るレポートには、全ての風車位置・ハブ高さに対して少なくとも以下の項目が含まれていなければならない。

- (1) 平均風速（以下の内容を含む）：
 - a. 方位ごとのワイブル形状・尺度係数、及び風向出現分布（風向セクター幅は 30°以下とし、最初のセクターは真北を中心とする）を、風車位置ごと（ハブ高さ）に表形式で規定する。
 - b. あるいは、詳細の出現率分布（ビンの方法による；風速ビン幅 1m/s、風向セクター幅は 30°以下とし、最初のセクターは真北を中心とする）を、風車ハブ高さの位置ごとに表形式で記載する。
- (2) 乱流強度（以下の内容を含む）：
 - a. 風車位置ハブ高さにおける乱流強度を、風速ビン（ビン幅 1m/s、あるいはそれ以下）、風向ビン（ビン幅 30°、あるいはそれ以下）ごとに表形式で記載する。また、計画風車の型式認証で指定されている設計に適用した乱流強度の特性値／代表値を併せて記載する。
- (3) ウィンドシアのべき指数（以下の内容を含む）：
 - a. 風車位置におけるウィンドシアべき指数の平均値、最小値、最大値を、風向セクター幅 30°以下の表形式で記載する。
- (4) 気流傾斜角（以下の内容を含む）：
 - a. 風車位置、ハブ高さにおける平均気流傾斜角の推定値の平均値、最小値、最大値を、風向セクター幅 30°以下の表形式で記載する。

C.4.2 暴風待機時の風条件に係るレポート

-1. 暴風待機時の風条件の算定に適用する気流解析及びその妥当性検証に係るレポートには、全ての風車位置・ハブ高さに対して少なくとも以下の項目が含まれていなければならない。

- (1) 10 分間平均風速： U_h
- (2) 乱流強度： I_{h1}
- (3) 3 秒間平均風速： U_{e50}

附属書 F. タワー構造に係る設計手法【規定】

F.1 一般

- 1. 本附属書では風力発電所の設置又は変更の工事計画の審査に関する実施要領^[R-03]で規定されている一般設備等の要件 2. (3) ② に該当する手法をまとめている。

F.2 減衰

- 1. 鋼製円筒構造の 1 次と 2 次モードの構造減衰比は、式 (F.1) と式 (F.2) により求めた値を用いることができる^{[R-09][R-12][F1]}。それ以外の値を用いる場合には、その妥当性を説明する必要がある。また構造減衰と地盤減衰からなるモデル減衰比は参考文献^[F2]に示す方法により評価することができる。さらに SR モデルを用いた時刻歴応答解析では地盤減衰がダッシュポットとして考慮される^[F2]。

$$\zeta_{struc_1}(\%) = \max(2.0e^{-1.3T_1} + 0.15, 0.2) \quad (F.1)$$

$$\zeta_{struc_2}(\%) = \zeta_{struc_1}(\%) \quad (F.2)$$

F.3 アンカーボルトの孔径

- 1. アンカーボルトの孔径がボルトの呼び径 +5mm を超える場合、以下の①及び②を満足することとする。
- ① アンカーボルトの孔径は、ISO273^[R-11]で規定されるボルトの呼び径に基づくクリアランス以下とすること。
 - ② 高力ボルト接合設計施工ガイドブック^[R-05]により、ボルト呼び径が 24mm を超える場合、すべり耐力を低減する（低減係数：0.85）ことを前提に、孔径はボルト径+8mm が許容されている。このため、サイト条件に基づく最も厳しい荷重状態において、タワー基部に作用するせん断力及びねじれモーメントによる水平力と、ベースプレート下面の摩擦力（抵抗摩擦力）に低減係数 0.85 を考慮した値を比較し、「水平力/低減係数を考慮した抵抗摩擦力」が 1.0 未満となることを確認すること。

F.4 アンカーボルトの構造計算において疲労等価設計法を適用する設計

- 1. アンカーボルトの設計ボルト張力及び短期許容引張力については、(1) に示す「疲労耐力設計法」の考え方を適用してもよいこととする。ただし、この場合は (2) に示す疲労強度評価に係る要求事項を満足する必要がある。
- (1) 風力発電設備支持物構造設計指針・同解説^[U-05]7.3.2 項にはタワーフランジボルトに対する規定があり、フランジ継手用高力ボルトに対して疲労耐力設計法を採用する場合の短期許容引張力及び設計ボルト張力は、以下に示す式 (7.2) 及び式 (7.3) のとおりに規定されている。また、この場合の極稀地震時許容引張力を式 (7.a) のとおりに定める。

設計風速までの強風を含めた疲労評価を行い、使用期間中にボルトの疲労損傷が生じないことを確認できた場合に、短期許容引張力はボルトねじ部の有効断面積に降伏強度の 0.8 倍を乗じる値とし、式 (7.2) により定める。

$$T_a = 0.80 \cdot \sigma_y \cdot A_e \quad (7.2)$$

ただし、設計ボルト張力は、ボルトねじ部有効断面積に降伏強度の 0.7 倍を乗じる値とし、式 (7.3) により定める。

$$N_0 = 0.70 \cdot \sigma_y \cdot A_e \quad (7.3)$$

極稀地震時のアンカーボルト 1 本あたりの外力による軸方向作用力 T は、極稀地震時許容引張力 T_{ar} 以下でなければならない。

$$T_{ar} = \max(0.80 \cdot \sigma_y \cdot A_e, A_e \cdot F_{by}) \quad (7.a)$$

ここで、

σ_y : アンカーボルトの降伏強度 [N/mm²]

A_e : アンカーボルトの有効断面積 [mm²]

F_{by} : アンカーボルトの基準強度 [N/mm²]、降伏強度と引張強度の 70%のうち小さい方の値で定める。

(2) 前 (1) で示した疲労耐力設計法を採用してアンカーボルトの設計ボルト軸力を設定するにあたり、疲労強度評価に係る要求事項を以下に示す。

1) 疲労強度評価を行うにあたっての原則

- 風力発電設備支持物構造設計指針・同解説^[J-05] の 7.4.1 項に従い、疲労損傷度は累積疲労損傷則により求めるものとする。

2) 検討対象項目ごとの要求事項は表 F.1 のとおりとする。

表 F.1 疲労強度評価の検討対象項目とその要求事項

検討対象項目	準拠規格・基準	要求事項
アンカーボルト	EN 1993-1-9: 2005 ^[R-13]	<ul style="list-style-type: none"> ・アンカーボルトの軸力のみを考慮し、曲げを考慮しない場合、S-N 線図としては DC36*を適用すること。^{*1} ・サイズ効果低減係数：ks を考慮すること。
グラウト ／コンクリート	MC2010 ^[R-14] (MC1990 ^[R-15] でも可)	<ul style="list-style-type: none"> ・三次元拘束効果の考慮は原則として認めない。^{*2} ・疲労強度検討に適用するコンクリート強度は、サイトで採用するコンクリート強度とすること。また、28 日強度の適用を基本とする。

*1 : EN 1993-1-9: 2005^[R-13] Table 8.1 の DC50 に対する Requirements の欄を参照。

(加えて、DNVGL-ST-0126^[R-12] 4.12.3.6 項の Guidance note も参考にすること。)

*2 : 三次元拘束効果を考慮した疲労設計強度を採用する場合は、疲労実験結果などに基づく定量的な検証結果をもってその妥当性を示すこと。

F.5 フランジ継手のてこ比

-1. フランジ継手のボルトの引張耐力について、てこ比 (e/g) が 1.25 を超える場合については、参考文献^[F3]による提案式に基づき、この文献で示される適用範囲においてその照査を行うことができる。

F.6 フランジ継手の構造計算において疲労等価設計法を適用する設計

-1. フランジ継手の短期許容引張力及び設計ボルト張力については、(1) に示す「疲労耐力設計法」の考え方を適用してもよいこととする。ただし、この場合は (2) に示す疲労強度評価に係る要求事項を満足する必要がある。

(1) 風力発電設備支持物構造設計指針・同解説^[J-05] 7.3.2 項にはタワーフランジボルトに対する規定があり、フランジ継手用高力ボルトに対して疲労耐力設計法を採用する場合の短期許容引張力及び設計ボルト張力は、F.4 で示した式 (7.2) 及び式 (7.3) のとおりに規定されている。

- (2) 前(1)で示した疲労耐力設計法を採用してフランジボルトの設計ボルト軸力を設定するにあたり、疲労強度評価に係る要求事項を以下に示す。
- 1) 疲労強度評価を行うにあたっての原則
 - 風力発電設備支持物構造設計指針・同解説^[J-05]の7.4.1項に従い、疲労損傷度は累積疲労損傷則により求めるものとする。
 - 2) 検討対象項目ごとの要求事項は表 F.2 のとおりとする。

表 F.2 疲労強度評価の検討対象項目とその要求事項

検討対象項目	準拠規格・基準	要求事項
フランジボルト	EN 1993-1-9: 2005 ^[R-13]	<ul style="list-style-type: none"> ・ アンカーボルトの軸力のみを考慮し、曲げを考慮しない場合、S-N 線図としては DC36*を適用すること。*1 ・ サイズ効果低減係数：ks を考慮すること。

*1 : EN 1993-1-9: 2005^[R-1307] Table 8.1 の DC50 に対する Requirements の欄を参照。

(加えて、DNVGL-ST-0126^[R-12] 4.12.3.6 項の Guidance note も参考にすること。)

F.7 参考文献

- [F1] S. Oh, T. Ishihara, Structural parameter identification of a 2.4MW bottom fixed wind turbine by excitation test using an active mass damper, Wind Energy, 21(11):1232-1238, 2018.
- [F2] T. Ishihara, L. Wang, A study of modal damping for offshore wind turbines considering soil properties and foundation types, Wind Energy, 22(12):1760-1778, 2019.
- [F3] 飛永育男, 石原孟: 風車タワーの L 型フランジにおける作用点修正係数の提案, 日本風力学会論文集 第 40 巻 第 2 号, 平成 28 年 8 月