

第II編 浮体式洋上風力発電施設の評価

1. 設計の概要

ここでは、浮体式洋上風力発電施設を主に構成する風車・浮体・係留について、設置海域の環境条件や施設の荷重を考慮した設計方法について紹介する。

2. 環境条件の評価

2.1 風条件の設定

2.1.1 はじめに

浮体施設およびタワーは、設計基準において規定される風条件に対して、十分な安全性を持つように設計しなければならない。

風条件は、再現期間が1年または50年と定義される極値条件と、1年に1回よりも頻繁に発生する通常条件に分けられ、極値風況と通常風況の2つを設定する必要がある。

設計に必要な外部条件としての風条件は、少なくとも次のパラメータについて評価する必要がある¹⁸。

風条件：

- 再現期間50年の風車ハブ高における10分間および3秒間平均最大風速
- 風速の出現確率密度分布（ワイブル分布等）
- 風速と乱流強度の関係およびハブ高風速における乱流強度の期待値
- 風向の傾き（水平面に対して8°を下回ることを確認する。ただし、RNAの設計基準として用いる場合は、水平面に対して傾斜はゼロと仮定してよい。）
- ウィンドシア
- 大気密度（観測値を用いてよい。ただし、極値風況の算定においては 1.25kg/m^3 を用いてもよい。）
- 隣接風車の後流の影響（検討が必要な場合は、発電に関係した全ての周囲風速および風向に対して考慮するとよい。JIS C 1400-1（2010）⁵の11.4、および附属書Dを参照してもよい。）

上記の風条件の設定において重要な極値風況、通常風況および乱流強度の評価について2.1.2項および2.1.3項に述べる。

なお、観測方法、予測モデルについては付属資料編「1. 気象海象の観測」、「2. 気象海象の予測モデル」に詳しく記載している。

2.1.2 極値風況の評価方法

設計においては極値風速を評価する必要がある。日本は熱帯低気圧および温帯低気圧の両方が強風・乱流の支配要因となるため、台風要因および非台風要因に分けた成因別の評価が必要である。極値風速の評価方法を表 2.1-1 にまとめる。

極値風速の評価の一つである 50 年再現期待値の算出にあたっては建築基準法に基づく方法、台風シミュレーションに基づく方法、気象庁 GPV データを用いる方法で検討し、これらの中から最も安全側となる風速を採用すべきである。

建築基準法に基づく推定は実績のある方法であり、また評価式を用いることで計算が容易である。ただし、陸上の情報に基づいているため、離岸距離が大きくなるほど洋上への適用性が低下する。

一方、台風シミュレーションや気象シミュレーションは、専用のソフトウェアを用いる必要があるが、理論的に合理性のある手法と言える。近隣の観測値がある場合には、適切な気流解析によって設置サイトにおける値を推定することも可能である。

表 2.1-1 極値風速の評価方法

成因	評価方法	プロジェクト海域
台風要因 + 非台風要因	建築基準法に基づく推定	椋島沖（浮体式） 北九州市沖（着床式）
台風要因	台風シミュレーションにより同定した非超過確率分布	銚子沖（着床式） 福島沖（浮体式）
非台風要因	観測値より同定した非超過確率分布	椋島沖（浮体式） 福島沖（浮体式） 銚子沖（着床式） 北九州市沖（着床式）
	解像度 2km の気象シミュレーションによる 10 年間の年最大風速により同定した非超過確率分布	—

1) 設計に用いる 50 年再現期待値の算出

(1) 建築基準法に基づく方法

ハブ高さにおける設計風速 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 2.1-1 により定める⁷⁾。なお、式 2.1-1 の詳細は、風力発電設備支持物構造設計指針・同解説⁷⁾の該当部分を確認する。

$$U_h = E_{tv}E_{pv}V_0 \quad \text{式 2.1-1}$$

ここで、

U_h : 設計風速 (m/s)

E_{tv} : 割増係数

E_{pv} : 高度補正係数

V_0 : 基準風速 (m/s)

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。

風車設置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 2.1-2 により定める。表 2.1-2 を用いる場合には、風車設置点を中心とし、半径がハブ高さ H_h の 40 倍と 3km 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設置地点の地表面粗度区分として用いてもよい。

表 2.1-2 地表面粗度区分の分類⁷⁾

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

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 2.1-2 により算定する。

$$E_{pv} = \begin{cases} 1.7 \left(\frac{H_h}{Z_G}\right)^\alpha & Z_b < H_h \leq Z_G \\ 1.7 \left(\frac{Z_b}{Z_G}\right)^\alpha & H_h \leq Z_b \end{cases} \quad \text{式 2.1-2}$$

ここで、

- E_{pv} : 高度補正係数
- H_h : ハブ高さ (m)
- Z_b : 風速の鉛直分布を示すパラメータ
- Z_G : 風速の鉛直分布を示すパラメータ
- α : 風速の鉛直分布を示すパラメータ

Z_b 、 Z_G および α は、地表面粗度区分に応じ、表 2.1-3 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 2.1-2 に代入して求める。

表 2.1-3 平均風速の高度補正係数を定めるためのパラメータ⁷

地表面粗度区分	I	II	III	IV
Z_b (m)	5	5	10	20
Z_G (m)	250	350	450	550
α (—)	0.1	0.15	0.2	0.27

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、①、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 2.1-3 により定める。

$$E_{tv} = \max(E'_{tv}, 1), E'_{tv} = \max_{\theta} \left[\frac{U(x, y, H_h, \theta)}{U^P(x, y, H_h)} \right] \quad \text{式 2.1-3}$$

ここで、

- E_{tv} : 地形による平均風速の割増係数
- $U(x, y, H_h, \theta)$: 気流解析により求めた実地形上の風車設置地点のハブ高さ H_h における風向 θ の平均風速 (m/s)
- $U^P(x, y, H_h)$: 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設置地点のハブ高さ H_h における平均風速 (m/s)
- θ : 風向 (°)
- H_h : ハブ高さ (m)
- P : 地表面粗度区分

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。

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、風車設置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 2.1-4により定める。

$$E_{tV} = \max(E'_{tV}, 1), E'_{tV} = \frac{U_{50}(x, y, H_h)}{U_{50}^P(x, y, H_h)} \quad \text{式 2.1-4}$$

ここで、

- E_{tV} : 地形による平均風速の割増係数
- $U_{50}(x, y, H_h)$: 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設置地点のハブ高さ H_h での年最大風速の50年再現期待値 (m/s)
- $U_{50}^P(x, y, H_h)$: 地表面粗度区分 P 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 (m/s)
- H_h : ハブ高さ (m)
- P : 地表面粗度区分

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による極値風速の評価方法は、石原・山口 (2012)¹⁹を参照してもよい。

さらに、再現期間50年のハブ高さにおける3秒平均の極値風速 V_{e50} は式 2.1-1で算定した U_h を用いて、式 2.1-5により算定する。

$$V_{e50} = (1 + 3.5I_{h1})U_h \quad \text{式 2.1-5}$$

ここで、

- V_{e50} : 再現期間50年のハブ高さにおける3秒平均の極値風速 (m/s)
- I_{h1} : ハブ高さにおける評価風速における乱流強度の主風向成分
- U_h : 設計風速 (m/s)

I_{h1} は式 2.1-6を用いて算定する。なお、IECでは、式 2.1-5に $I_{h1}=0.11$ を代入して得られる $V_{e50} = 1.4U_h$ の関係を用いている。

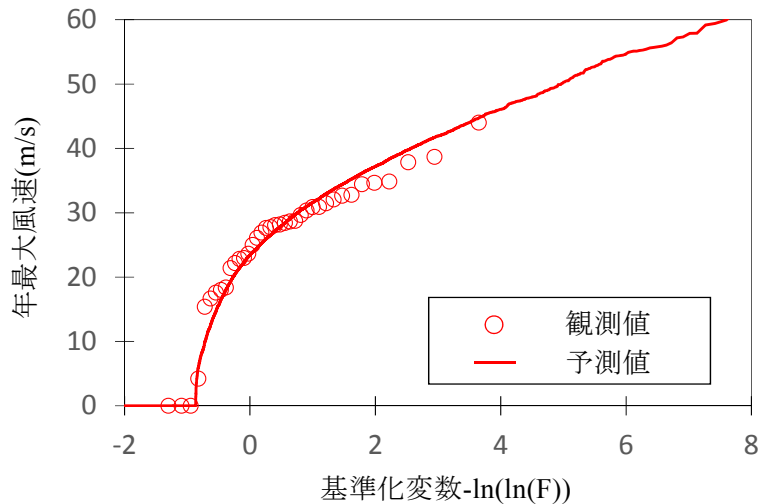
(2) 台風シミュレーションに基づく方法

台風要因の極値風速については、台風シミュレーションを用いると良い。手順としては、まず台風を数個の台風パラメータでモデル化し、過去の台風経路・強度等から対象地点における台風パラメータの出現確率をモデル化する。次にモデル化した出現確率に従って、対象地点近傍において長期間（例えば1万年）の台風を人為的に発生させる。最後に、発生させたそれぞれの台風に対して、対象地点における風速の時系列データを推定する。この結果、対象地点における長期間の台風時の風速の時系列を得ることができる²⁰。この手法は、銚子沖において台

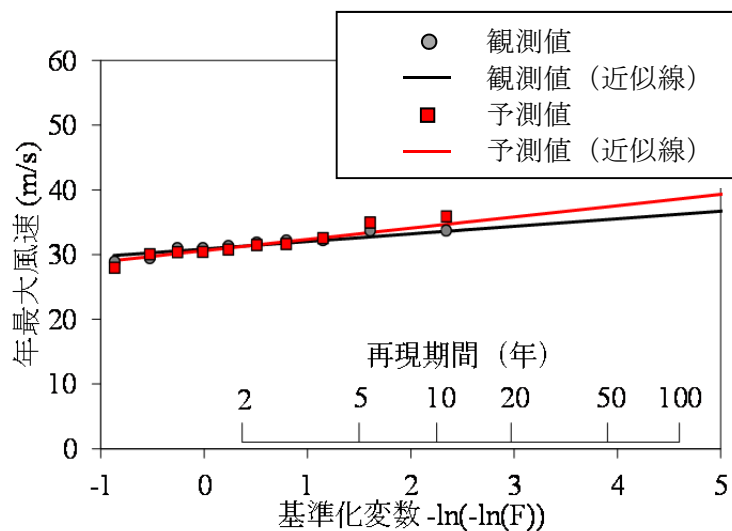
風シミュレーションによって評価した極値風速が観測値をよく再現することが示されている (図 2.1-1 (a))。

非台風要因の極値風速については、陸上では観測値による非超過確率分布を用いると良いが、洋上では観測値が存在しないことが多い。

また、わが国は温帯低気圧と、熱帯低気圧による台風が頻繁に襲来する混合気候であるため、気象解析と台風シミュレーションにより温帯低気圧と台風を考慮して、再現期間別最大風速を推定する方法が提案されている⁷ (図 2.1-1 (b))。



(a) 台風シミュレーションによる台風要因の極値風速の評価 (銚子沖)²⁰



(b) 気象シミュレーションによる非台風要因の極値風速の評価 (銚子沖)⁷

図 2.1-1 シミュレーションによる気象条件の予測値と観測値との比較

2) 乱流強度の評価方法

ハブ高さにおける評価風速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_{tl} を乗じたものとし、式 2.1-6 により求める。

$$I_{h1} = E_{tl} I_P \quad \text{式 2.1-6}$$

ここで、

- I_{h1} : ハブ高さにおける評価風速における乱流強度の主風向成分
- E_{tl} : 地形による乱流強度の補正係数
- I_P : 平坦地形上の乱流強度

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 2.1-7 により算定する。

$$I_P = \begin{cases} 0.1 \left(\frac{H_h}{Z_G} \right)^{-\alpha-0.05} & Z_b < H_h \leq Z_G \\ 0.1 \left(\frac{Z_b}{Z_G} \right)^{-\alpha-0.05} & H_h \leq Z_b \end{cases} \quad \text{式 2.1-7}$$

ここで、

- I_P : 平坦地形上の乱流強度
- H_h : ハブ高さ (m)
- Z_b : 風速の鉛直分布を示すパラメータ
- Z_G : 風速の鉛直分布を示すパラメータ
- α : 風速の鉛直分布を示すパラメータ

Z_b 、 Z_G および 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 2.1-3 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 2.1-7 に代入して求める。

地形による乱流強度の補正係数 E_{tl} は、式 2.1-8 により定める。

$$E_{tl} = \max(E_{ts}/E'_{tv}, 1) \quad \text{式 2.1-8}$$

ここで、

- E_{tl} : 地形による乱流強度の補正係数
- E_{ts} : 地形による変動風速の補正係数

E'_{tv} は、式 2.1-3 または式 2.1-4 により求める。また、地形による変動風速の補正係数 E_{ts} は、式 2.1-9 により定める。

$$E_{ts} = \frac{\sigma_u(x, y, H_h, \theta_d)}{\sigma_u^p(x, y, H_h)} \quad \text{式 2.1-9}$$

ここで、

- E_{ts} : 地形による変動風速の補正係数
- $\sigma_u(x, y, H_h, \theta_d)$: 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
- $\sigma_u^p(x, y, H_h)$: 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
- H_h : ハブ高さ (m)
- θ_d : 照査対象風向 (°)

$\sigma_u^p(x, y, H_h)$ は気流解析により求める。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 2.1-10 で計算し、式 2.1-11 を用いて算定することもできる。

$$\sigma_u^{surf} = \sqrt{1.2k} \quad \text{式 2.1-10}$$

$$\sigma_u = U \times \sqrt{\left(\frac{\sigma_u^{surf}}{U}\right)^2 + I_a^2} \quad \text{式 2.1-11}$$

ここで、

- σ_u^{surf} : 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
- k : k - ε モデル等の乱流エネルギー
- σ_u : 主風向変動風速の標準偏差
- U : 平均風速 (m/s)
- I_a : バックグラウンドの乱流強度

バックグラウンドの乱流強度 I_a は 0.1 とする。主風向の乱流標準偏差 σ_1 は非超過確率 90% に相当するものを用い、式 2.1-12 により定める。

$$\sigma_1 = I_{ref}(0.75V_{hub} + b) \quad \text{式 2.1-12}$$

ここで、

- σ_1 : 主風向の乱流標準偏差
- I_{ref} : 風速 15m/s 時の乱流強度の期待値
- V_{hub} : ハブ高さにおける 10 分間平均風速 (m/s)
- b : 5.6 (m/s)

I_{ref} は観測値から直接求めるか、式 2.1-1 で定める設計風速 U_h に対応する式 2.1-6 の乱流強度 I_{h1} から式 2.1-13 により算定する。

$$I_{ref} = I_{h1} \frac{U_h}{0.75U_h + b} \quad \text{式 2.1-13}$$

ここで、

- I_{ref} : 風速 15m/s 時の乱流強度の期待値
- I_{h1} : 設計風速 U_h に対応する乱流強度
- U_h : 設計風速 (m/s)
- b : 3.75 (m/s)

また、観測で得られた風向風速の時系列データを風車ハブ高に変換したデータを求め、そのデータにより乱流標準偏差 σ_{hw} を算定してよい。観測高から風車ハブ高への変換は、気流解析により得られた風速比を用いる。評価風速 U_h およびそれに対応する風向別乱流強度 I_{h1} から式 2.1-13 により風向別の I_{ref} を求め、式 2.1-12 に対応する乱流標準偏差 σ_{hw} を求める。なお、 V_{hub} は風車ハブ高における風速の時系列データを用いる。

3) 50年再現期待値を用いた1年再現期待値の極値風速の算出

式 2.1-14 で挙げる $V_{50}(Z)$ は、浮体式洋上風力発電施設技術基準の第2編第1章2.風条件によれば、3秒間平均の極値風速(Ve_{50} 及び Ve_1)の発生と極値波高(H_{50} 及び H_1)の発生とは相関関係がないと仮定し、その二つの同時発生を想定するのは保守的である、として低減極値風速(RWM)を極値波高と組み合わせて用いるものである。1年再現期待値の極致風速は、1) (2)で述べた手法と同様に、日最大風速の時系列データを統計処理して求めることができる他、式 2.1-15 により算出してもよい。

$$V_{50}(z) = 1.1 \times V_0 \left(\frac{z}{z_{hub}} \right)^{0.11} \quad \text{式 2.1-14}$$

$$V_1(z) = 0.8 \times V_{50}(z) \quad \text{式 2.1-15}$$

ここで、

- $V_1(z)$: 極値風速 (1年再現期待値) (m/s)
- $V_{50}(z)$: 極値風速 (50年再現期待値) (m/s)

2.1.3 通常風況の評価方法

通常風況（1年に1回よりも頻繁に発生する通常条件の風況）は、浮体式洋上風力発電施設の風車部分および浮体部分の設計時の疲労強度に関して考慮する必要がある項目である。

JIS C 1400-1（2010）⁵の「6.3.1 通常風条件」において条件（10分間平均風速の出現頻度分布、鉛直方向分布、乱流の標準偏差式）が定められている。風車選定にあたっては、基準となる風速と乱流強度等から設定される風車階級によるものとする。

1) 設計に用いる通常風況の算出

気象庁 GPV データ、局所風況マップデータ、設置海域付近における観測データ等を取得し、その比較を行い、安全側の数値を抽出する。

2) 風配図および風速階級別頻度分布図による分析

1)のデータの風向および風速階級別頻度分布を作成し、強度設計に用いる風速の分析を行う。風配図および風速階級別頻度分布図のイメージを図 2.1-2 に示す。

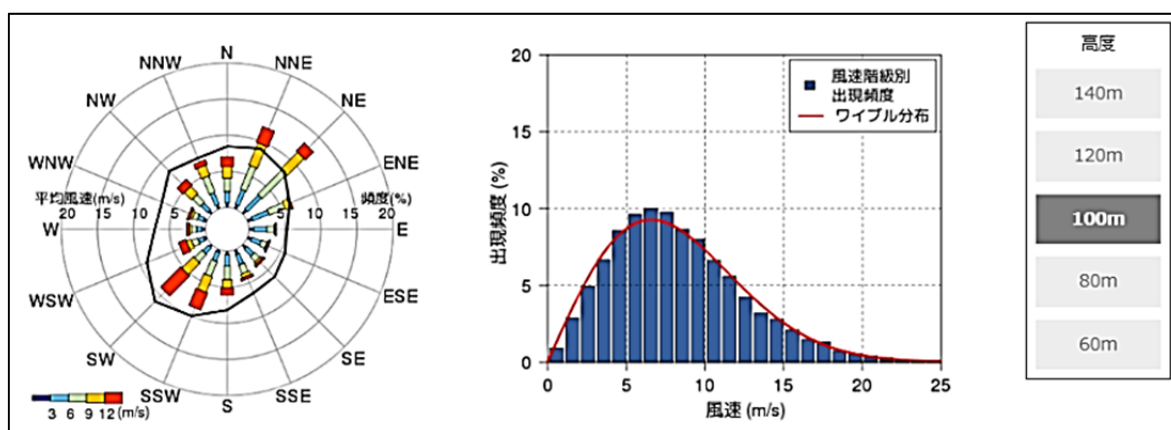


図 2.1-2 風配図（左）および風速階級別頻度分布図（右）のイメージ²¹

また、耐用年限の強度を確認するために、風速階級別頻度分布から使用期間の風速階級別作用時間を求めると良い（図 2.1-3）。表 2.1-4 は風速階級別作用時間の評価手法を成因別にまとめたものであり、台風要因の場合は台風シミュレーションにより評価する。非台風要因の場合は、気象台の観測データを設置サイトの風況に変換または気象シミュレーションによる時系列データを算出して求める。

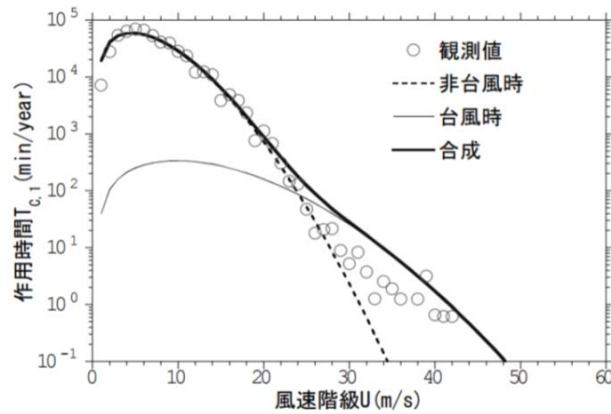


図 2.1-3 風速階級別作用時間の例²²

表 2.1-4 風速階級別作用時間の評価方法

成因	評価方法	プロジェクト海域
台風要因	台風シミュレーションにより評価した時系列データより同定したワイブルパラメータより評価	椋島沖 福島沖 銚子沖 北九州市沖
非台風要因	気象台の観測値を洋上に変換した時系列データより同定したワイブルパラメータより評価	椋島沖 銚子沖 北九州市沖
	気象シミュレーションによる10年間の風の時系列データより同定したワイブルパラメータより評価	福島沖 (ただし2年間分)

風速の出現率分布は、式 2.1-16 に示すワイブル分布で近似できることが知られており、この近似式における尺度パラメータおよび形状パラメータを合わせてワイブルパラメータと呼ぶ。

$$f(V) = \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \cdot \exp\left\{-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right\} \quad \text{式 2.1-16}$$

ここで、

- $f(V)$: 平均風速 V の出現率
- c : 尺度パラメータ
- k : 形状パラメータ

また、風速が V_x 以下となる風速 V の確率密度 $F(F \leq V_x)$ は、式 2.1-17 に示す通りとなる。

$$F(V \leq V_x) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{V_x}{c}\right)^k\right\} \quad \text{式 2.1-17}$$

ここで、

- $F(V \leq V_x)$: 風速が V_x 以下となる平均風速 V の確率密度
- c : 尺度パラメータ

- k : 形状パラメータ
 V : 平均風速 (m/s)

cとkの求め方は、実測に基づく風速毎の累積出現確率を式 2.1-17 に代入し、最小二乗法によって求めると良い。

3) 乱流強度

観測結果から、風速と乱流強度の関係を示した上で、その90%分位値を導出する。導出した結果と JIS C 1400-1 (2010)⁵ に紹介されている標準風車カテゴリ A、B、C に対する90%分位値 (図 2.1-4) を比較し、設計に用いる基準乱流強度がどの標準風車カテゴリとなるかを決定する。

表 2.1-5 風車カテゴリの基本パラメータ⁵

風車カテゴリ	□	□	□	S
V_{ref} (m/s)	50	42.5	37.5	設計者が規定する数値
A I_{ref} (-)	0.16			
B I_{ref} (-)	0.14			
C I_{ref} (-)	0.12			

ここで、

- V_{ref} : 10分平均基準風速 (m/s)
A : 高乱流カテゴリの場合に選定
B : 中乱流カテゴリの場合に選定
C : 低乱流カテゴリの場合に選定
 I_{ref} : 風速が 15m/s のときの乱流強度の期待値

この表の値は、ハブ高さにおいて適用する。

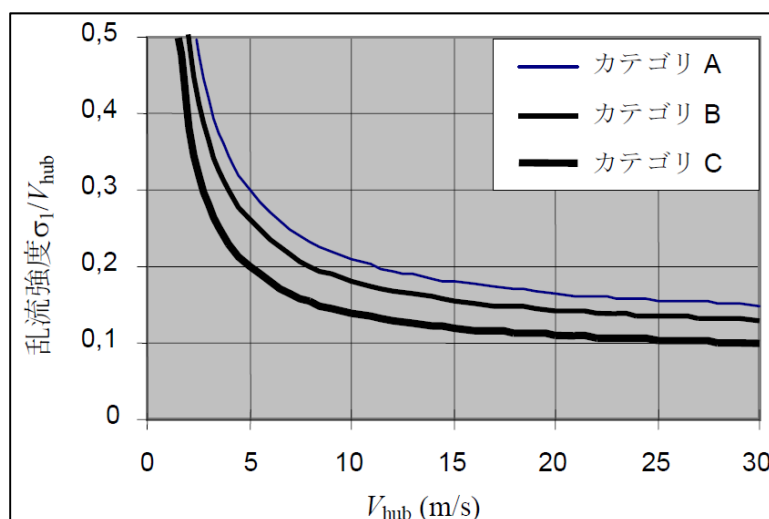


図 2.1-4 標準風車カテゴリ別の乱流強度⁵

2.1.4 風条件の算定例

表 2.1-6 に風条件の算定例を示す。なお、利用データや算定プロセス等については第Ⅲ編を参照されたい。

表 2.1-6 風条件の算定例¹²

(a) 極値気象条件

10 分間平均風速	50 年再現期待値 ($Z_{hub}=72m$)	51.0m/s	建築基準法
	1 年再現期待値 ($Z_{hub}=72m$)	40.8m/s	JIS C 1400-3 ($V_1=0.8V_{50}$)
乱流強度	50%分位値 (10 分間)	0.125	台風シミュレーション
	90%分位値 (1 時間)	$0.125+0.2/V_{hub}$	JIS C 1400-3

(b) 通常気象条件

平均風速	年平均風速 ($Z=10m$)	6.71m/s	気象庁 GPV データ (高度 10m) を $\alpha=0.14$ より高度補正
	年平均風速 ($Z_{hub}=72m$)	8.85m/s	
ワイブルパラメータ	形状パラメータ k ($Z_{hub}=72m$)	2.02	
	尺度パラメータ c ($Z_{hub}=72m$)	10.01m/s	
乱流強度	基準乱流強度 I_{ref}	0.12	NEDO 北九州市沖観測
	90%分位値	$I_{ref} (0.75V_{hub}+5.6) / V_{hub}$	

2.2 海象条件の設定

2.2.1 はじめに

浮体施設およびタワーは、設計基準において規定される海象条件に安全に耐え得るように設計しなければならない。

荷重および安全を考慮するための海象条件は、再現期間が1年または50年と定義される極値条件と、1年に1回よりも頻繁に発生する通常条件に分けられ、極値海象条件と通常海象条件の2つを設定する必要がある。ただし、水位の通常範囲については再現期間1年の水面の変化と定義するものとする。

浮体式洋上風力発電施設の設計にあたって、IEC 61400-3では、疲労荷重の照査のための気象海象条件を、風速、波高および波周期の結合確率分布を用いて評価することが求められている。

設計に必要な外部条件としての海象条件は、少なくとも次のパラメータについて評価する必要がある⁴。

波条件：

- 再現期間50年の有義波高の極値とその時の有義波周期
- 再現期間1年の有義波高の極値とその時の有義波周期
- パワースペクトル（ピアソン・モスコビッツ型等）
- 風速階級別の平均有義波高と平均有義波周期
- 風速、有義波高および有義波周期の結合確率密度

海潮流条件：

- 再現期間50年の極値水流
- 再現期間1年の極値水流

水位条件：

- 通常水位変動域
- 再現期間50年の極値水位
- 再現期間1年の極値水位

なお、観測方法、予測モデルについては付属資料編「1. 気象海象の観測」、「2. 気象海象の予測モデル」に詳しく記載している。

2.2.2 極値波浪の評価方法

極値波浪の評価方法を表 2.2-1 にまとめる。現状では、港湾工事等で実績のあるものとして、国土技術政策総合研究所の資料²³や地方自治体の港湾建設資料等（沖波表）に記載されている再現期間 50 年の波高極値および対応する波周期を用いることが多い。ただし、陸側からの波浪は記載されていない。係留設計等で陸側からの波浪が必要な場合には、各方位における吹送距離（離岸距離）と再現期間 50 年の風速を用いて、有義波法（SMB 法）から評価することも行われる。有義波法は遠方からのうねりを考慮できないため、特に太平洋側では、陸側からの波浪に限定する必要がある。この評価方法による事例として、種本ら¹⁸は、メソスケールモデル、台風モデル、合成風速場の 3 種類の風速場を用いた 20 年間分の波浪推算による極値波浪の予測について検討を行っており、その結果として、台風モデルと合成風速場を用いた波浪推算で予測ができることを示している。

設置海域近傍の観測値や波浪推算値を用いることもできるが、再現期間 50 年では年最大値を、再現期間 1 年では日最大値を極値統計解析する（または年最大値の最頻値として求める）必要がある。その場合には、信頼できる推定値を得るために十分な期間と精度を持ったデータが必要である。計測の時間間隔や波浪推算のモデル・計算パラメータ等によって極値が小さく出る可能性もあるため、複数のデータソースや沖波表とのクロスチェックを行うことが望ましい。

観測データとしては、国土交通省港湾局等が運営するナウファス（全国港湾海洋波浪情報網）²⁴が代表的なものである。ナウファスでは、2016 年 4 月現在 78 観測地点において波浪の定常観測が実施されている（図 2.2-1）。基本的に沿岸部での計測であるが、近年では GPS 波浪計測が 17 地点に設置され、比較的期間は短いですが、沖合の波浪も計測されている。データはホームページ上で公開されている。

表 2.2-1 極値波浪の評価方法

評価方法	プロジェクト海域等
国・県等の沖波表（国総研等）	銚子沖、北九州市沖、福島沖、五島市栴島沖
メソスケールモデル、台風モデル、合成風速場の 3 種類の風速場を用いた 20 年間分の波浪推算による極値波浪の予測 ¹⁸	銚子沖
ナウファス （観測期間が短い地点は検証用に使用）	港湾設計等

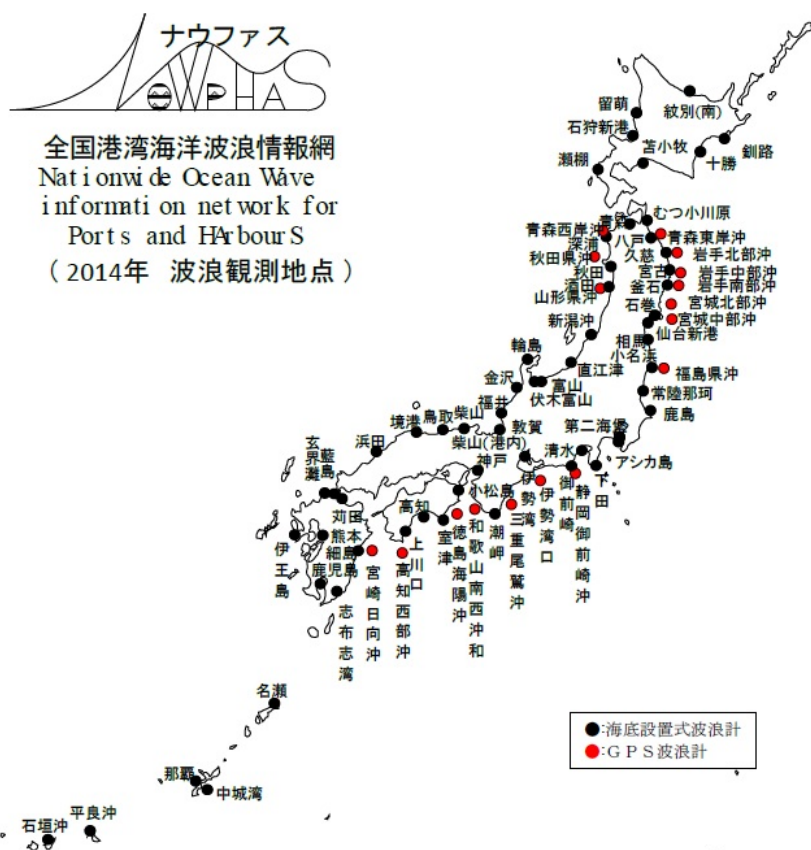


図 2.2-1 ナウファスの観測地点²⁴

2.2.3 通常波浪の評価方法

通常風条件と通常波条件により規定される各通常海況に対して、有義波高、有義波周期および波向を関連する平均風速と合わせて選定しなければならない。

通常波浪の評価に使用できるデータを表 2.2-2 にまとめる。通常波浪については、実測値によるほか、2.2.2 項に挙げたナウファス観測値や波浪推算値、またデータベース化されたものを利用できる。

データベース化されたものは、波高一波周期、波高一風速の発現頻度表等、ある程度整理されたものがあり、評価に使いやすいためよく使われて来た。ただし、元となるデータの性質（データ期間等）に留意して適切に利用する必要がある。

一方、2017年には「海洋エネルギーポータルサイト」²⁵が開設され、初期検討とフィージビリティスタディ用として、波浪と海流について、平均値や極値等の各種情報がホームページ上で表示可能となっている（図 2.2-2）。ただし、元となっているデータをダウンロードする機能は備えていない。

表 2.2-2 通常波浪の評価に用いるデータの例

データ	プロジェクト海域
日本近海の風と波のデータベース	銚子沖、北九州市沖、福島沖
ナウファス	-
海洋エネルギーポータルサイト	-

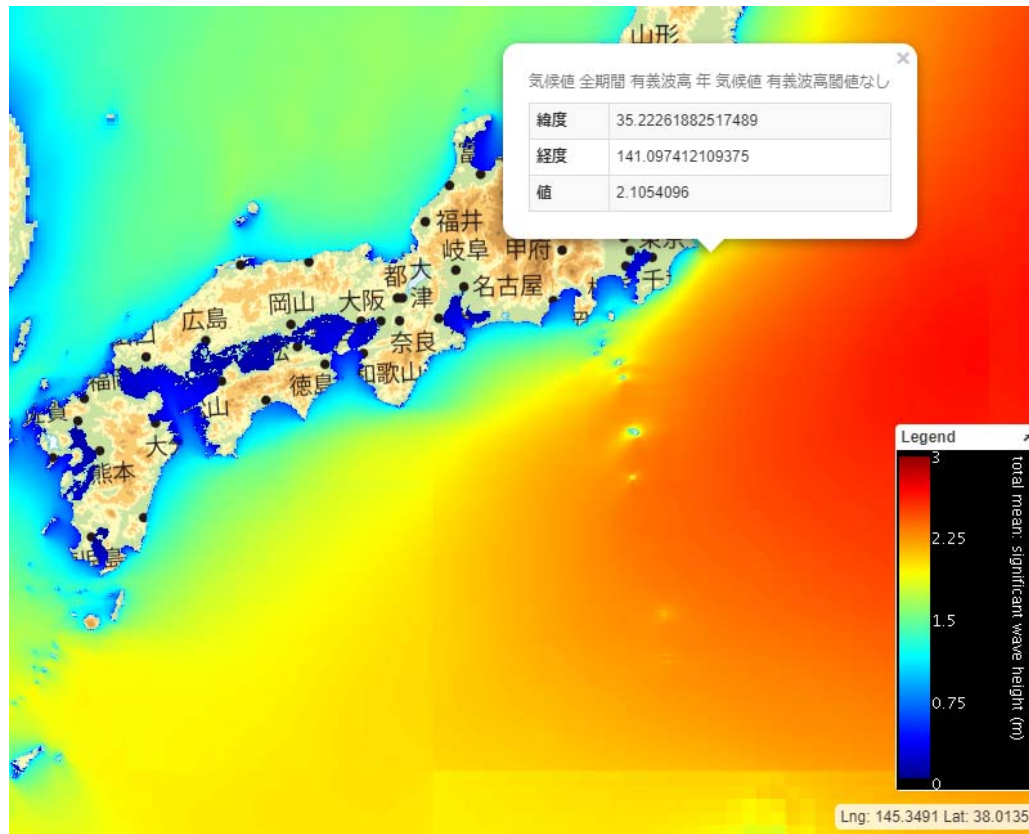


図 2.2-2 海洋エネルギーポータルサイトの表示例²⁵

なお、日本近海の波スペクトルは、ピアソン・モスコビッツ型（式 2.2-1）が一般的である。

$$S(f) = Af^{-5} \exp(-Bf^{-4}) \quad \text{式 2.2-1}$$

ここで、

- $S(f)$: 周波数スペクトル密度関数
- f : 波周波数 (Hz)

A、B は正の定数で、海域の波高と波周期との関係によって、ISSC 型スペクトル、ブレッドシュナイダー光易型スペクトル等がある。

2.2.4 風と波の結合確率分布の評価方法

浮体式洋上風力発電施設の設計にあたっては、JIS C 1400-3⁶ では、疲労荷重の照査のための気象海象条件を、風速、波高および波周期の結合確率分布を用いて評価することが求められている。

風と波の結合確率分布の評価方法を表 2.2-3 にまとめる。波浪推算は、風から波へのエネルギー移動をベースとして推算するものであるため、長期の波浪推算結果を整理することで、結合確率分布を求めることができる。その際には、開放水域である太平洋側で大きなうねりが伴うことを考慮して、適切な手法を用いる必要がある。また、波浪推算は海面上 10m の風速・風向を利用するため、風車高度の風が必要な場合には適切な手法で換算するか、上空風況を含んだデータを用いる必要がある。

表 2.2-3 風と波の結合確率分布の評価方法

評価方法	プロジェクト海域
日本近海の風と波のデータベース	銚子沖、北九州市沖、福島沖
10 年間分の波浪推算による予測値を分析し、風速の関数として有義波高と有義波周期の平均、標準偏差、出現頻度および有義波高と有義波周期の相関をモデル化することにより、風速、波高、および波周期の結合確率分布モデルを提案（図 2.2-3） ¹⁸	-

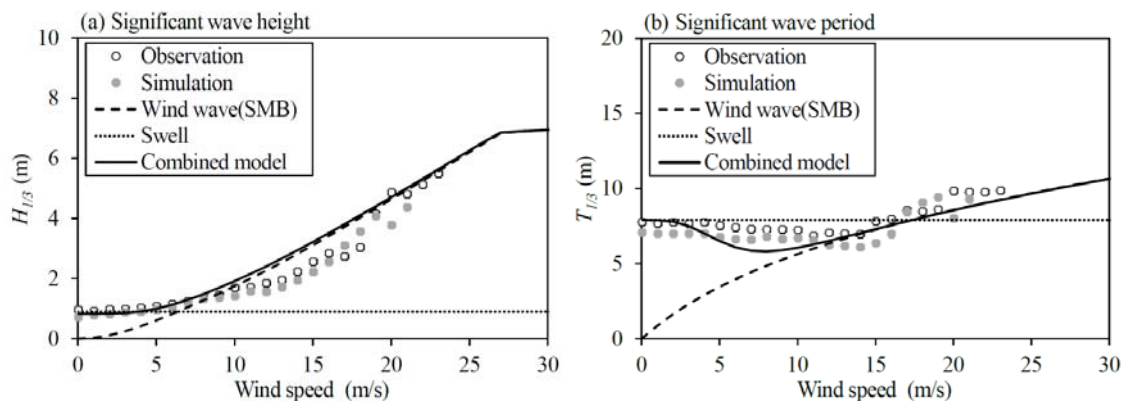


図 2.2-3 風波とうねりの混合モデルによる推算値と観測値との比較¹⁸

2.2.5 海潮流条件の評価方法

海潮流は観測データが限られているため、シミュレーション結果を用いることが一般的である。

観測データでは、日本海洋データセンター²⁶がホームページ上で公開しているものがある(図2.2-4)。その内の統計データは、1ヶ月毎、経緯度1度単位の表面海流データ(1953~1994年)であり、特定サイトのデータとしては不十分であるが、計画の段階で参考にすることは可能と考えられる。

また、同センターは、統計処理される前のデータとして、国内外の機関が独立して行った観測結果をまとめている。そのひとつは船舶および漂流ブイの観測値、もうひとつは定点の流速計データである。観測機器、期間、計測水深等がそれぞれ異なっているが、風力発電施設の設置海域が近い場合には、参考値として、またシミュレーションの検証用として利用することも可能である。

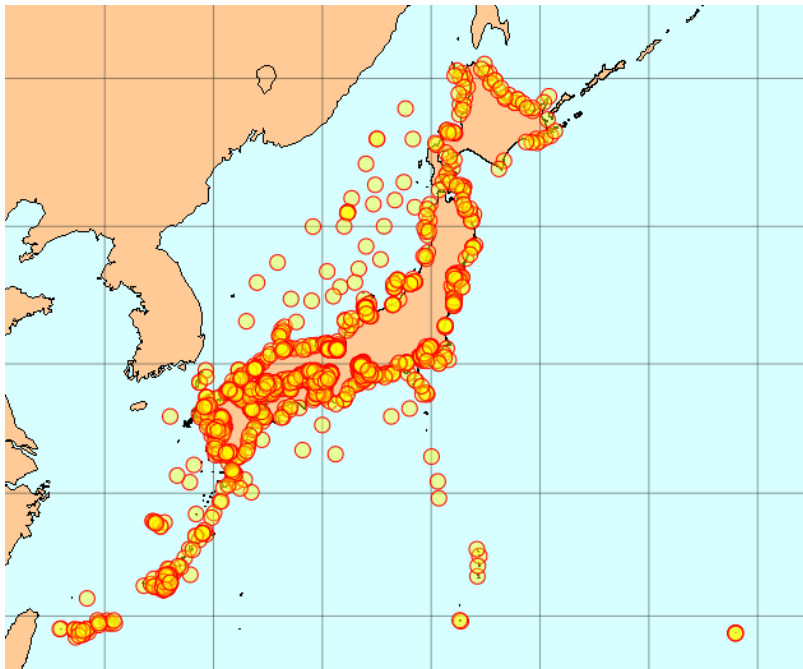


図 2.2-4 流速計データの位置 (日本海洋データセンターHP)²⁶

2018年3月現在、シミュレーションデータには、低解像度のもの(たとえばJCOPE2:緯度経度1/12度格子、日平均値)と高解像度のもの(たとえばJCOPE-T:緯度経度1/36度格子、1時間間隔)がある。低解像度のものは極値が低い傾向にあり、高解像度のものは長期間の計算が高コストである。そこで、長期の低解像度データを高解像度データによって補正することで長期の極値データを作成し、極値統計解析を実施することが行われている²⁷。その他、参考値として前記の海洋エネルギーポータルサイトでは、水深1m、5m、100m等の情報が参照可能である。

流れによって風車の支持浮体に作用する力を評価するためには、流速の鉛直分布も重要である。シミュレーションでは鉛直分布も計算されるため、水深毎に極値を求めることも可能である。

るが、同時性を確保する必要がある。これに代わり、標準的な鉛直分布を用いて評価することができる。IEC 61400-3³⁷では、流れを表層の吹送流とそれ以外の水中流に分け、それぞれ流速の鉛直分布を式 2.2-2～式 2.2-6 のように仮定し、合成したものをを用いて良いとされている。吹送流速は海面上 10m の風速の 1 時間平均値 V_{1-hour} から、水中流速は、たとえば海面下 20m の流速 $U(-20)$ から求めることができる。ただし、吹送流の方向は風向と同一であり、水中流とは一般に異なるため、ベクトルとして合成しなければならない。吹送流と水中流の鉛直分布を図 2.2-5 に示す。

$$U(z) = U_W + U_{ss} \quad z > -20m \quad \text{式 2.2-2}$$

$$U(z) = U_{ss} \quad z \leq -20m \quad \text{式 2.2-3}$$

水中流

$$U_{ss}(z) = U_{ss}(0)[(z + d)/d]^{1/7} \quad \text{式 2.2-4}$$

吹送流

$$U_W(z) = U_W(0)[1 + z/20] \quad \text{式 2.2-5}$$

$$U_W(0) = 0.01V_{1-hour} \quad \text{式 2.2-6}$$

ここで、

$U(z)$: SWL からの高さ z の海潮流 (m/s)

U_W : 吹送流 (m/s)

U_{ss} : 水中流 (m/s)

$U_{ss}(z)$: SWL からの高さ Z の水中流 (m/s)

$U_{ss}(0)$: 海面流速 (m/s)

z : SWL からの高さ (m)

d : 水深 (m)

$U_W(z)$: SWL からの高さ Z の吹送流 (m/s)

$U_W(0)$: 風による海面流速 (m/s)

V_{1-hour} : 風速の 1 時間平均値 (m/s)

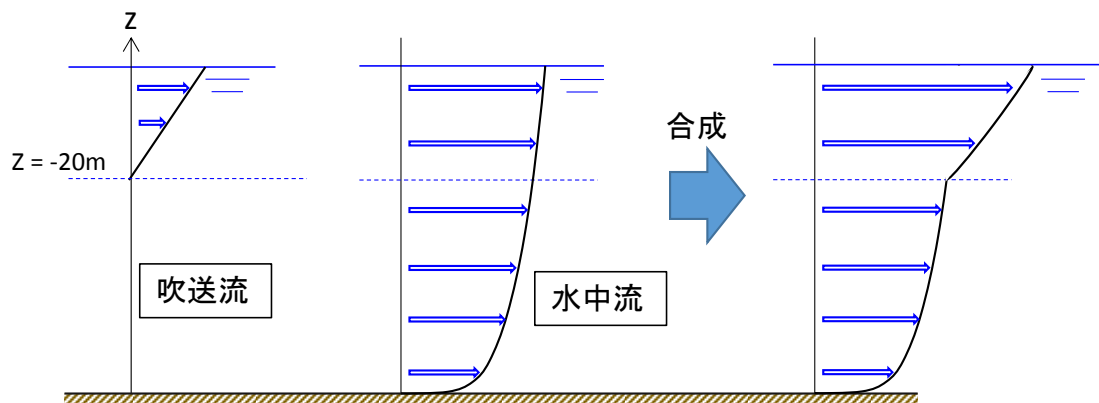


図 2.2-5 吹送流と水中流の鉛直分析

※図は同一方向の場合を示している。

表 2.2-4 海潮流の評価方法

評価方法	プロジェクト海域
日本海洋データセンター 統計プロダクト：1度メッシュ海流統計	銚子沖、北九州市沖、福島沖
日本海洋データセンター 海洋観測データ：海流データ、流速計データ	—
同位置・同期間の JCOPE-T 等の結果を用いて JCOPE2再解析値を補正することにより20年間 分の年最大流速を求め、ガンベル分布により50 年再現期間の極値流速を求める。	福島沖

2.2.6 水位変化の評価方法

係留システムを含む浮体施設の水力学的荷重に影響する可能性がある場合には、水位の変化を考慮しなければならない。水位には、天文潮（月や太陽の起潮力によって生じる海面の昇降現象）と気象潮（高潮等気象の影響による潮汐）があり、その組合せを適切に考慮する必要がある。

天文潮は、気象庁のホームページで公開されている潮位表等を用いることができる。気象潮については、港湾の施設の技術上の基準・同解説²⁸に従い、台風等の低気圧発生時の潮位偏差の再現期待値を式 2.2-7 で求めることができる。

$$\zeta = a(p_0 - p) + bV^2 \cos \theta + c \quad \text{式 2.2-7}$$

ここで、

- ζ : 潮位偏差 (m)
- p_0 : 基準気圧 (=1010hPa)
- p : 最低気圧 (hPa)
- V : 10 分間平均風速 (m/s)
- θ : 主方向と最大風速 V のなす角 (°)
- a : 各地点の既往の観測結果から得られる定数
- b : 各地点の既往の観測結果から得られる定数
- c : 各地点の既往の観測結果から得られる定数

得られた水位変化は、気象庁や日本海洋データセンターが公表している観測値や近隣港湾の潮位図等を用いて確認する。

2.2.7 海象条件の算定例

海象条件の算定例を表 2.2-5 に示す。

表 2.2-5 海象条件の算定例¹²

(a) 極値海象条件

波高	50年再現期待値(3時間有義波高)	8.99m	波浪推算、観測データ、 国交省の設計値を比較し設定
	1年再現期待値(3時間有義波高)	4.97m	
有義波周期	50年再現期待値(3時間有義波周期)	10.6~13.7s	NKガイドライン
	1年再現期待値(3時間有義波周期)	7.9~10.2s	
波スペクトルモデル		ピアソン・モスコビッツ型	
水流	50年再現期待値(水中流+吹送流)	1.04m/s	JCOPE-Tによる推算値
	1年再現期待値(水中流+吹送流)	0.86m/s	関門港潮流観測報告
水位	50年再現水位変動域	-0.61~+3.02m	響灘験潮所、高潮潮位偏差

(b) 通常海象条件

波高	年平均有義波高(津波検討用として利用)	0.95m	波浪推算
波周期	年平均有義波周期(津波検討用として利用)	5.5s	
水流	年平均水流(津波検討用として利用)	0.17m/s	JCOPE-Tによる推算値
水位	年平均潮位	0.80m	響灘験潮所
風速と波高の関係	表 2.1-6 の風速を以下の式に当てはめて有義波高を算出 $H_{1/3}=0.3V^2/g[1-\{1+0.004(200000g/V^2)^{1/2}\}^{-2}]$		波浪推算値と気象庁 GPV風速データの比較
風速と波周期の関係	表 2.1-6 の風速を以下の式に当てはめて有義波周期を算出 $T_{1/3}=1.37 \cdot 2\pi V/g[1-\{1+0.008(200000g/V^2)^{1/2}\}^{-5}]$		
津波※	潮位偏差	±2.6m	国交省報告書
	最大流速	1.13m/s	港湾基準

※「津波」の評価は、2.3.4 で示す。

2.3 その他の環境条件の設定

2.3.1 海氷

設置海域によっては、海氷による荷重が最大の荷重となる場合があることに留意する必要がある。また、氷の荷重は、定着氷盤による静的荷重に関係している場合と、風や水流によって引き起こされる氷盤の動きによる動的荷重に関係している場合がある。しかし、浮体施設に作用する海氷の静的荷重については、海岸線に近い湖や海では移動せず定着氷として取り扱われるため、定着氷盤は考慮する必要はない。動的荷重は、風および潮流によって引き起こされる氷盤の動きによって、氷盤およびその破片が浮体施設と接触することによって生じる。なお、わが国においては、海氷の存在する海域はオホーツク海沿岸のみであるため、海氷荷重の評価は浮体式洋上風力発電施設をオホーツク海へ導入する場合に限定しても良い。

荷重の計算方法については、JIS C 1400-3 (2014) ⁶の附属書 E または ISO 19906 (2010) ²⁹を参照すると良い。また、設置海域の過去に発生した氷盤の情報について詳細に集める必要がある。設計者は想定される氷特性について設計書等の中で記載し明らかにすることが望ましい。

2.3.2 海洋付着生物

海洋付着生物により、浮体施設の水力学的荷重、動的応答、アクセス性および腐食度に影響を及ぼす場合がある。そのため、抗力および慣性力を求める際に海洋生物の付着効果を考慮する。

海洋付着生物は硬質（一般に貝類やフジツボ）および軟質（海苔やコンブ類）に大分される。海洋付着生物の付着によって腐食プロセスが進行する場合、一般に、微生物腐食（MIC : Microbiologically influenced corrosion）と呼ばれる。さらに、海洋生物の付着は、コーティング、ライニング、電気防食等の腐食防止のシステムに影響を及ぼすこともある。

ここで、海洋生物の成長厚さは設置地点に依存するため、現地測定に基づいて海洋生物の成長厚さおよびその水面深さの依存性を調べることを望ましい。

また、付着効果は、粗度の増加による抗力係数の増加および直径または断面積の増加として生じる。表面粗度および厚さの定義を図 2.3-1 に示す。

風車支持構造物の有効直径 D は、付着がない状態での直径 D_c 、海洋生物の平均付着厚さ t_m として、 $D=D_c+2t_m$ で表される。円形断面の抗力係数に与える付加的なパラメータは相対粗度 $\Delta=ks/D$ であり、表面粗度 k_s は硬く成長した海洋生物の谷からピークまでの平均高さである。

超臨界レイノルズ数の滑面および海洋付着生物に覆われた粗な円柱に対する抗力係数は、定常抗力係数 C_{DS} (式 2.3-1) と、振動流れの非定常性による抗力の増幅係数 Ψ (式 2.3-2、式 2.3-3) より、式 2.3-4 のように表される。なお、 C_{DS} は DNV-OS-J101³⁰ および DNV-RP-C205³¹ も参考にできる。

$$C_{DS} = \begin{cases} 0.65 & (\Delta < 10^{-4} \text{ (滑面)}) \\ \frac{29 + 4 \cdot \log_{10} (\Delta)}{20} & (10^{-4} < \Delta < 10^{-2}) \\ 1.05 & (\Delta > 10^{-2} \text{ (粗面)}) \end{cases} \quad \text{式 2.3-1}$$

$$\Psi = \begin{cases} C_{\pi} - 1 - 2(Kc - 0.75) & (Kc \leq 0.75) \\ C_{\pi} - 1 & (0.75 < Kc \leq 2) \\ C_{\pi} + 0.1(Kc - 12) & (2 < Kc \leq 12) \\ 3.1222 - 0.62638 \log \frac{Kc}{C_{DS}} & (12 < Kc \text{ かつ } \frac{Kc}{C_{DS}} \leq 60) \end{cases} \quad \text{式 2.3-2}$$

$$C_{\pi} = 1.5 - 0.024 \cdot \left(\frac{12}{C_{DS}} - 10 \right) \quad \text{式 2.3-3}$$

$$C_D = C_{DS} \cdot \Psi \quad \text{式 2.3-4}$$

ここで、

- C_{DS} : 定常抗力係数
- Δ : 相対粗度
- Ψ : 振動流れの非定常性による抗力の増幅係数
- Kc : クーリガン・カーペンター数 ($=uT_D/D$)
- T_D : 波周期 ($=T_{1/3}$) (s)
- $T_{1/3}$: 沖波の有義波周期 (s)
- D : 風車支持構造物の有効直径 (m)
- C_d : 抗力係数

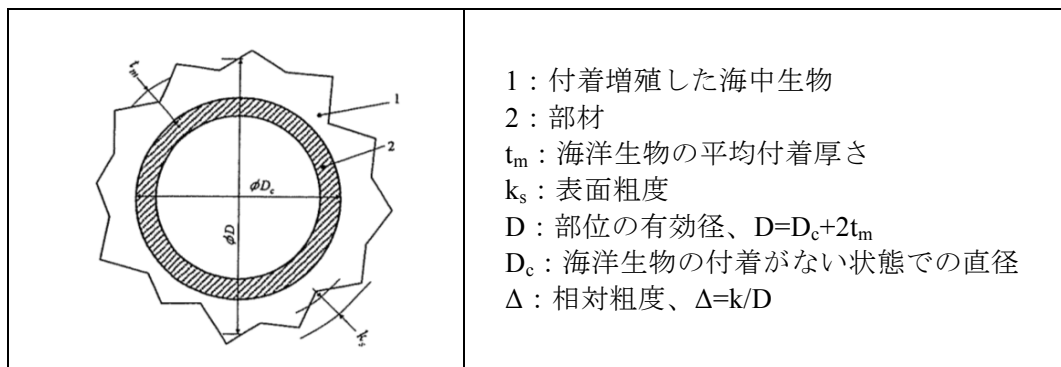


図 2.3-1 表面粗度および厚さの定義³²

暴風時には C_{DS} は表面粗度に依存する。 Ψ はこれに加えてクーリガン-カーペンター数 Kc に依存する。 Kc 数は振動流れの非定常性に関する指標で、半波サイクル中の乱されていない流体粒子の移動距離を部材径で基準化した量に比例する。

海洋付着生物の構造物への自然繁茂増殖は一般に相対粗度で $\Delta > 10^{-3}$ である。したがって、所望の表面粗度に対するよい情報および特定の場所におけるその水深に対する変化がない場合、高潮位以下の全ての部材には C_{DS} は 1.00 から 1.10 の範囲に仮定すると良い。 D を見積もるためにも最終的に累積する海中生物の繁茂増殖の厚さを推定しなければならない。高潮位より上の部材については、 $k_s = 0.05 \text{ mm}$ がよい見積もりとなり、代表的な直径に対して C_{DS} は 0.6 から 0.7 の範囲となる⁷。

2.3.3 地震

地震は、設置海域周辺において過去発生した最大レベルのものを考慮しなければならない。

1) 過去発生した最大レベルの地震

過去発生した地震について、設置海域を管轄している官署においてデータを調査し、最大の事例を把握する必要がある。また、内閣府中央防災会議、各自治体で策定されている防災計画や防災アセスメント調査等が利用できる。これらのデータや既存の研究で実施された数値シミュレーション結果等を基に安全を考慮して、最大になるケースを適用することが望ましい。

既存の国内のルールとしては建築基準法があり、設計地震動は基本最大加速度に地震地形係数を乗じて求めることとしている。基本最大加速度は50年と500年再現期待値に相当する160galと320galを用い、地震地形係数(0.7~1.0)は地域別に定めることとされている。ここで160galと320galは、平成12年建設省告示第1461号第四項イに定められた「稀に発生する地震動」、「極めて稀に発生する地震動」に対応している。

2) 地震の浮体への影響評価法

地震動は海底面に設置されたアンカー点から係留ラインを經由して浮体に伝達され、浮体式洋上風力発電施設に振動を与える。水平方向地震動と鉛直方向地震動について評価する必要がある。

ここでは、水平地震動および鉛直地震動の評価方法について以下に示す。なお、詳しい評価方法については、風力発電設備支持物構造設計指針・同解説[2010年版](2010)⁷を参考とする。

(1) 水平地震動

水平地震動は、地盤→アンカー→係留ライン(チェーン)を介して浮体施設にほとんど伝達されないため、風力発電設備の各機器に対する影響は省略して良く、係留ラインの張力変動の観点から評価する。評価手順を以下に述べる。

- ・係留ライン、浮体施設、風力発電設備をバネ・質点系でモデル化する。ここで係留ラインは、地震波入力の間隔に対して適切な質点間隔とする。
- ・地震波の加速度を数値積分して速度と変位を求めて入力し、係留ラインの最大係留張力を計算する。
- ・最大係留張力で最小破断荷重(MBL)を割って安全率を求める。

(2) 鉛直地震動

鉛直地震動は、地盤→アンカー→係留ライン(チェーン)を介して浮体施設に伝達される。

浮体施設への影響の観点では、トート係留方式やTLP係留方式等の緊張型係留方式の場合、鉛直地震動が浮体構造に伝達されて支配荷重になる場合があり、水平地震動と同様にバネ・質点系でモデル化して適切に評価する必要がある。一方、カタナリー係留方式等の緩係留では、鉛直地震動の影響は省略できる。

シンカーへの影響の観点では、地震時においてシンカーの滑動が生じないかを確認する必要がある。シンカーは、鉛直下向きの自重 W 、浮力 B が作用した状態で加速度 α の鉛直地震動を

受けた場合、上向きに慣性力としての付加質量力を受け、さらに運用時の係留力を水平方向に受ける。この状態での滑動に関する式 2.3-5 の照査式を満足すれば、滑動はしない。

$$\mu\{W - B - \alpha_v(1 + C_a) \times W\} > S_f \times F_0 \quad \text{式 2.3-5}$$

ここで、

- μ : 摩擦係数
- W : 気中重量 (N)
- B : 浮力 (N)
- α_v : 鉛直加速度 (m/s^2)
- C_a : 付加質量係数
- S_f : 安全率
- F_0 : シンカー一点での張力 (N)

2.3.4 津波

設置海域周辺において最大規模の津波を考慮する必要がある。ただし、水深が十分に深い場合は、津波による影響を潮位偏差および流れとして取り扱っても良い。日本沿岸を震源とする地震等によって生じる津波（近地津波）の周期は5分～数十分程度であり、遠方を震源とする地震等によって生じる津波（遠地津波）の周期は数時間～20数時間程度であると言われている。以下に津波の評価をする際に、シミュレーションを用いない方法と用いる方法を示す。

1) シミュレーションを用いない方法

津波シミュレーションを用いない方法としては、近隣沿岸の津波予測値を用いる方法がある。津波の高さは水深が浅くなるほど大きくなることから、安全側の値として沿岸の津波予測値を洋上のサイトに適用することができる。ここで、近隣沿岸の津波予測値としては、内閣府および国土交通省（太平洋側：中央防災会議専門調査会（内閣府）、関東から南：南海トラフの巨大地震モデル検討会・首都直下地震モデル検討会（内閣府）、日本海側：日本海における大規模地震に関する調査検討会（国土交通省））から、海岸における津波の高さ、津波到達時間および平地フラグのデータを入手することができる。

またその際の流速は、港湾の施設の技術上の基準・同解説²⁸より浅水波を仮定した式 2.3-6 を用いることができる。

$$u = \eta \sqrt{\frac{g}{h}} \quad \text{式 2.3-6}$$

ここで、

- u : 水平流速 (m/s)
- η : SWLからの水位の上昇量 (m)
- g : 重力加速度 (m/s^2)
- h : 水深 (m)

ただし、地形が複雑な場合には、設置サイトに津波のエネルギーが集中することも考えられるため、津波シミュレーションが必要になる。

2) シミュレーションを用いる方法

シミュレーションを用いる場合の津波の評価手順を図 2.3-2 に示す。浮体式洋上風力発電施設の設置海域を決定した後、津波シミュレーションに必要な入力データを整備する。データは1)と同様に、内閣府および国土交通省から、地形データ（標高値を与えるデータ）、粗度データ（粗度係数を表すデータ）、を収集すると良い。そして、設定した計算範囲のデータを整備する。その後、津波浸水の時系列データを出力する地点を浮体式洋上風力発電施設設置地点近傍から設定し、さらにその地点から平均的な海岸線の方向に沿った測線上にも複数の地点を設定する。そして、その地点における津波高が最大となる断層モデルを選定し、初期水位データを作成することとする（初期水位データも上述の収集先にて公表されているのでそれを利用することも可能である）。そして上述のデータを用いて、津波シミュレーションを実施するのだが、最大規模の津波（最高潮位、最大流速）を求めるために、式 2.3-7 に示す連続式、および式 2.3-8～式 2.3-9 に示す運動方程式を用いることを基本とする。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad \text{式 2.3-7}$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \quad \text{式 2.3-8}$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \quad \text{式 2.3-9}$$

ここで、

- η : SWL からの水位の上昇量 (m)
- D : 水底から水面までの全水深 (m)
- g : 重力加速度 (m/s^2)
- n : マニングの粗度係数
- M, N : x, y 方向の全流量フラックスで水底から水面 η まで水平流速を積分したもの

このとき、水平流速は鉛直方向に一様分布していると仮定している。解析コードは東北大学で開発されたものを用いた津波シミュレーションが用いられている例が多い³³。また、差分法については、leap-frog 法（かえる跳び法）を用いた平面 2 次元の計算方法が現在最も広く用いられている。こうして求められた最高潮位および最大流速は、浮体式洋上風力発電施設設置地点近傍の沿岸におけるシミュレーション結果と、内閣府および国土交通省から公表されているシミュレーション結果の比較を行い、その妥当性が評価される。

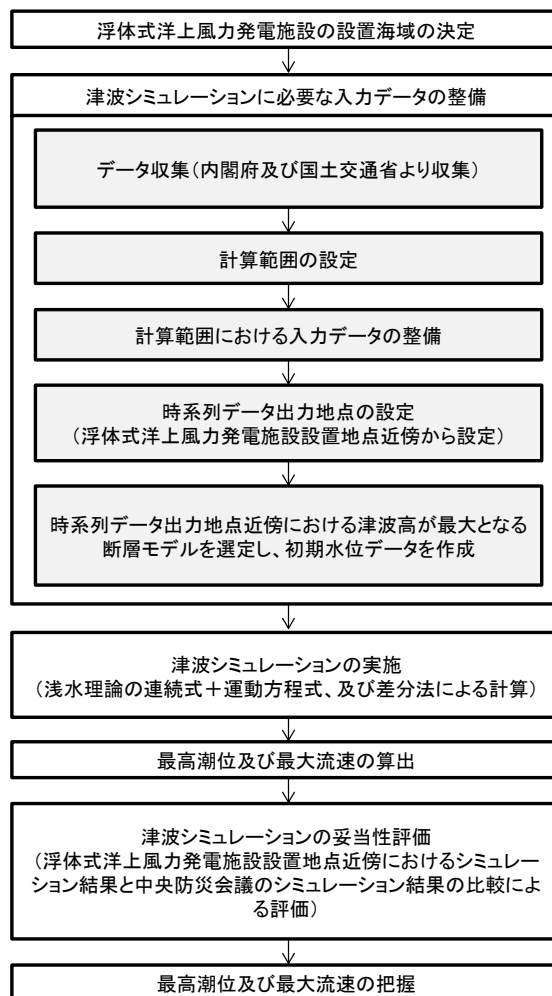


図 2.3-2 津波の評価手順

2.3.5 液状化

洋上風力発電施設の設置位置における液状化によって、係留アンカー（特にパイルアンカーやサクションアンカー）が抜けるリスクが考えられる。そこで、液状化が発生するかどうかを含めて、設置海域の土質調査を実施し、調査データを基に係留アンカーの設置位置等を検討することが望ましい。

2.3.6 海底変形および洗掘

浮体施設の係留システムに対して、海底変形および洗掘の影響が無視できない場合、適切に考慮しなければならない。

洗掘とは、波浪・海流・潮流等によって生じる海洋構造物周辺の海底地形の変化（底質の流失）である。浮体式では、直径が大きなアンカーの場合は検討が必要であると考えられるため、流速を調査しておく必要がある。海潮流等の流れにより発生する洗掘は、河川における橋脚周辺の洗掘現象と類似しており、これらに関する資料を参考にしても良い。

DNV-OS-J101³⁰によると、着床式洋上風力発電施設における洗掘防止の部材は、その内面および外面の安定性を保つように設計しなければならない。つまり、洗掘保護部材の過度な表面浸食に対する保護および海底の土粒子の移動に対する保護のことである。また、定常的な海流および波浪、または海流と波浪の組合せは、洗掘の分析において考慮しなければならない項目である。浮体式洋上風力発電施設におけるアンカー設置後の洗掘の検討については、これを参照しても良い。

海底の地形変形は係留アンカーの把駐力に影響する。海底の地形変形が予想される場合は、アンカーの把駐力に及ぼす影響を調査し、想定される設計荷重ケース（DLC）で係留アンカーが外れないように形状、設置方法を検討する必要がある。

2.3.7 積雪および着氷に関する荷重

浮体施設およびタワーへの積雪影響が無視できない場合は、適切に考慮しなければならない。

建築基準法施行令第 86 条に記載されており、一般の建築構造物の屋根に相当するナセル上面への積雪に対して考慮する必要がある。ただし、ナセル側面や風力発電設備のその他の部分、ロータあるいは鋼製タワー等への着氷や着雪等が著しいと予想される場合には、別途適切に考慮する必要がある。

設計垂直積雪量は、国土交通大臣が定める基準に基づいて特定行政庁が規則で定める数値とされる（建築基準法施行令第 86 条第 3 項参照）。特定行政庁が規則で定める数値とは、建設省告示第 1455 号に示される式によって積雪量を求め、局所的地形要因による影響等を考慮したものである。また、当該区域またはその近傍の気象観測地点における地上積雪深の観測資料に基づき統計処理を行う等の手法によって、年超過確率が 2%に相当する積雪量の値（50 年再現期待値）を求めることができる場合には、特定行政庁がその値を定めることができる。

具体的な設計手法は、風力発電設備支持物構造設計指針・同解説[2010 年版]（2010）にはナセル上面に作用する積雪荷重の評価について示されている。この中では、積雪の単位荷重は、積雪量 1cm ごとに 1m²につき 20N 以上としなければならない。ただし、特定行政庁がこれと異なる値を定めている場合にはその値を用いる。積雪荷重は式 2.3-10 により算定される。

$$S = d \cdot \rho \quad \text{式 2.3-10}$$

ここで、

- S : 積雪荷重（屋根の水平投影面積 1m²あたり N）
- d : 垂直積雪厚さ（cm）

ρ : 積雪の単位荷重 >20 (N/m²/cm)

ナセル上の積雪荷重は、その勾配が 60 度以下の場合においては、積雪荷重によって計算した式 2.3-11 に示す形状係数 μ_b を乗じた数値とし、その勾配が 60 度を超える場合においては、考慮しない。

$$\mu_b = \sqrt{\cos (1.5\beta)} \quad \text{式 2.3-11}$$

ここで、

μ_b : 形状係数
 β : ナセル上面の勾配 (°)

発電機本体の機能として、ナセルへの積雪を防止することが可能である場合には、その性能に応じて積雪量および積雪荷重を設定することができる。

一方で、ロータへの着氷に関するガイドラインとしては、GL (Germanischer Lloyd) の Guideline for the Certification of Offshore Wind Turbines Edition 2005 が該当する。当該 GL ガイドラインの 4.2.4.4 氷の形成において、着氷に関する記述は以下の通りとなっている。

洋上風車の回転しない部分において、天候にさらされた表面については、全面に 30mm の厚さの氷の形成を想定する。氷の密度は 900kg/m³ とする。ロータが停止しているかアイドル状態である運転条件の場合、ブレードはすべての面でこの程度の氷の形成についても確認する。

氷の覆いが主に海水の飛まつによるものである場合、それに応じて氷の厚さを調整する。データがなければ、海面において 100mm の厚さを想定する。氷の厚さは、最も高い波の高さに対応するレベルからそのレベルの 60m 上まで 30mm まで直線的に減少するように取られても良い。

ロータが回転している状態では、「すべてのブレード上の氷が形成された場合」および「1カ所を除くすべてのブレード上の氷が形成された場合」を調査する。質量分布はブレードの先端を想定する。これは、ロータ軸のゼロから半径の半分値 μ_E まで直線的に増加し、その後、最外半径まで一定のままである。値 μ_E は以下のように計算される。

$$\mu_E = \rho_E \cdot k \cdot c_{min}(c_{max} + c_{min}) \quad \text{式 2.3-12}$$

ここで、

μ_E : ロータ半径の半分でブレードの最先端の質量分布 (kg/m)
 ρ_E : 氷の密度 (900kg/m³)
 k : $0.00675 + 0.3 \exp(-0.32R/R_1)$
 R : ロータ半径 (m)
 R_1 : 1 (m)
 c_{max} : 最大コード長 (m)
 c_{min} : ブレードの輪郭から直線的に外挿されたブレード先端のコード長 (m)

3. 復原性の評価

浮体施設は、全ての状態に対して復原性基準を満足しなければならない。このとき、係留施設からの影響がない状態、および係留施設からの影響がある状態について検討し、最も厳しい状態において基準を満足させる必要がある。

復原性の評価は、浮体式洋上風力発電設備に関するガイドライン（2012）⁴に規定される要求事項を満たすため、水密区画の損傷状況と浮体形式によって、以下の内容で復原力曲線図を用いて実施する。

状態・形式別の復原性の評価方法を表 3-1 に、復原力曲線図を図 3-1 に、復原性範囲を図 3-2～図 3-3 に示す。

表 3-1 状態・形式別の評価方法

状態	形式	復原力曲線図による評価方法
非損傷 (運転時および暴風時)	セミサブ形式	面積(A + B) ≥ 1.3 × 面積 (B + C) ただし、傾斜角は θ_2 までとする。
	ポンツーン形式 (バージ形式)	面積(A + B) ≥ 1.4 × 面積 (B + C) ただし、傾斜角は θ_2 または θ_3 の内小さい方の角度までとする。
	スパー形式	セミサブ形式またはポンツーン形式 (バージ形式) と同等以上の復原性を有する。
損傷時 (1 区画浸水時)	全て	計画された喫水の上方 5.0m から下方 3.0m までの範囲に設けられる区画における 1 区画への浸水に対しても、あらゆる水平方向からの風による傾斜モーメント及び船舶の波による動揺に対して、十分な復原性を有していなければならない。

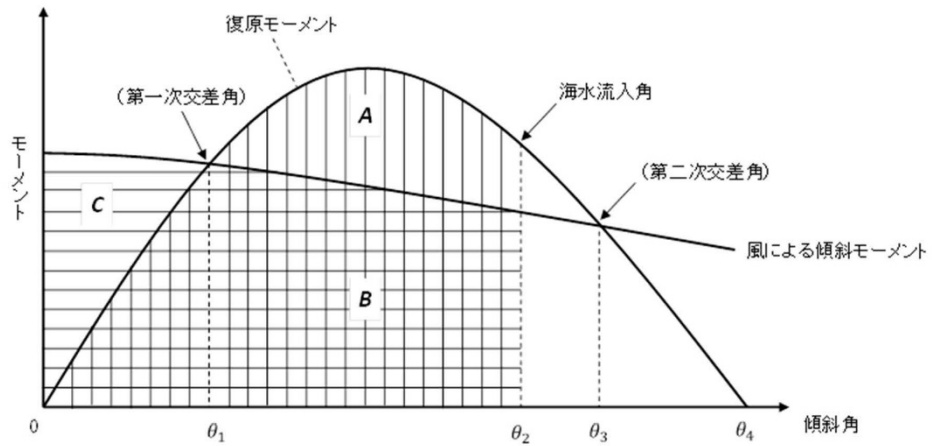


図 3-1 復原力曲線図¹²

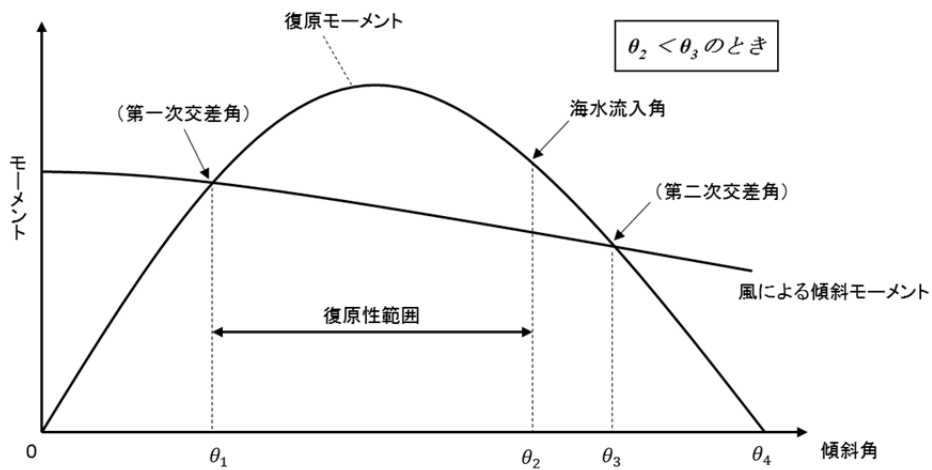


図 3-2 復原性範囲 ($\theta_2 < \theta_3$)¹²

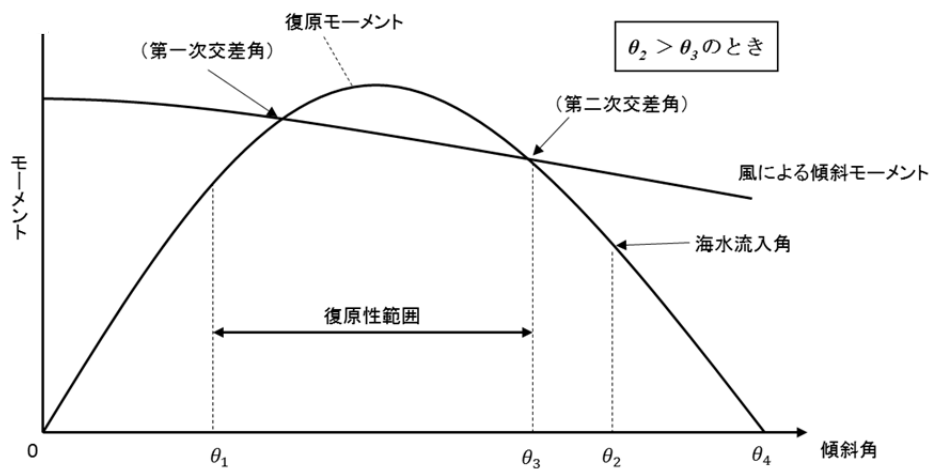


図 3-3 復原性範囲 ($\theta_2 > \theta_3$)¹²

3.1 主要寸法および区画配置の設定

復原性の評価に必要な諸元を設定する必要がある。必要な諸元の例を表 3.1-1 に示す。

表 3.1-1 必要な諸元の例（バージ形式の場合）¹²

長さ×幅×深さ×喫水	45.0m×45.0m×10.0m×7.5m（スカート含まず）
ムーンプール（長さ×幅）	26.2m×26.2m
排水量	9,858t
重心高さ	7.27m
横メタセンター高さ	24.1m
縦メタセンター高さ	24.1m
風車寸法	ロータ径：100m、ハブ高さ：72m

3.2 非損傷時の復原性の評価

3.1 節で設定した諸元を用いて、解析を実施する。解析時に設定する風速は、浮体式洋上風力発電設備に関するガイドライン（2012）⁴に従い設定する。

なお、風荷重については、第Ⅱ編 2.環境条件の評価、4.荷重評価の規定によることとする。ただし、風荷重の算定を行う場合については1分間平均の風速値を使用することとする。風速のデータが1分間の平均風速で与えられていない場合は、データから適当なスペクトルを求め、統計的手法を用いて1分間の風速に換算することとする。

復原性の検討に用いる風速の例を表 3.2-1 に示す。非損傷時の復原性については、表 3.2-1 の例で示しているように、浮体の状態に対して流入風向が最も厳しいケースについて検討する。なお、損傷時復原性の検討は、浮体式洋上風力発電設備に関するガイドライン（2012）⁴に従い、25.8m/s（海面上10m）を用いることとする。結果として表 3.2-2 における条件を満足することで風によるモーメントおよび浮体の動揺に対して復原性を有していることを評価する。

表 3.2-1 復原性の評価に用いる風速の例¹²

浮体の状態	条件	風速（海面上10m）
非損傷時	最大スラスト風速	9.7m/s
	カットアウト風速	19.0m/s
	暴風時	51.5m/s
損傷時	1区画浸水時	25.8m/s

表 3.2-2 非損傷時の形式別評価方法⁴

状態	形式	復原力曲線図による評価方法
非損傷時 （運転時および暴風時）	セミサブ形式	面積(A+B) ≥ 1.3 × 面積 (B+C) ただし、傾斜角は θ_2 までとする。
	バージ形式	面積(A+B) ≥ 1.4 × 面積 (B+C) ただし、傾斜角は θ_2 または θ_3 の内小さい方の角度までとする。
	スパー形式	セミサブ形式またはバージ形式と同等以上の復原性を有する。

次に、解析に用いる浮体、タワー、RNA に作用する風荷重を算出する。

タワー、浮体に作用する風圧は次式で求める。

$$P = 0.611C_h C_s V^2 \quad \text{式 3.2-1}$$

ここで、

- P : 風圧 (N/m²)
- V : 風速 (m/s)
- C_h : 高度係数
- C_s : 形状係数

C_h : 高度係数、 C_s : 形状係数の例を表 3.2-3 に示す。

表 3.2-3 高度係数および形状係数

	高度係数 C_h	形状係数 C_s
タワー	1.2	0.5
浮体	1.0	1.0

タワー・浮体設備それぞれの風荷重 F (N) は次式で求める。

$$F = P \cdot A \quad \text{式 3.2-2}$$

ここで、

- F : 風荷重 (N)
- P : 風圧 (N/m²)
- A : 風向に対する垂直面での各構造物の投影面積 (m²)

復原性の評価にあたっては、風荷重を考慮した上で浮体設備に対して、複数の流入風による復原性の評価を実施し、最も厳しいケースにおいて復原性が保たれているか評価する。作用する風荷重の例を表 3.2-4 に、数値解析における複数の流入風のイメージを図 3.2-1 に示す。

表 3.2-4 作用する風荷重の例 (RNA の状態)¹²

RNA の状態	条件	風荷重 (kN)	浮体の状態
運転時	最大スラスト風速	391.0	非損傷時
	カットアウト風速	172.0	
停止時	暴風時	115.7	
	1 区画浸水時	28.8	損傷時

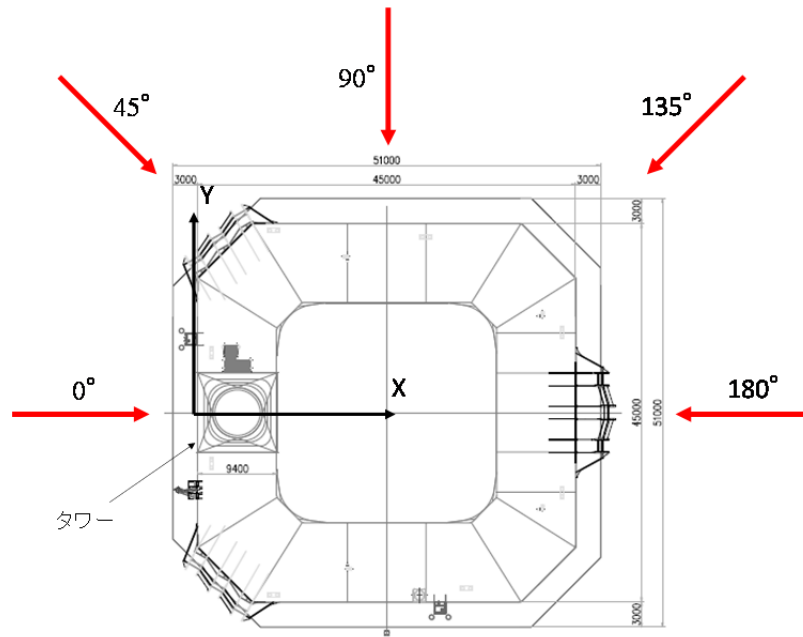


図 3.2-1 数値解析における複数の流入風のイメージ¹²

復原力曲線の例を図 3.2-2 に、評価例を表 3.2-5 に示す。

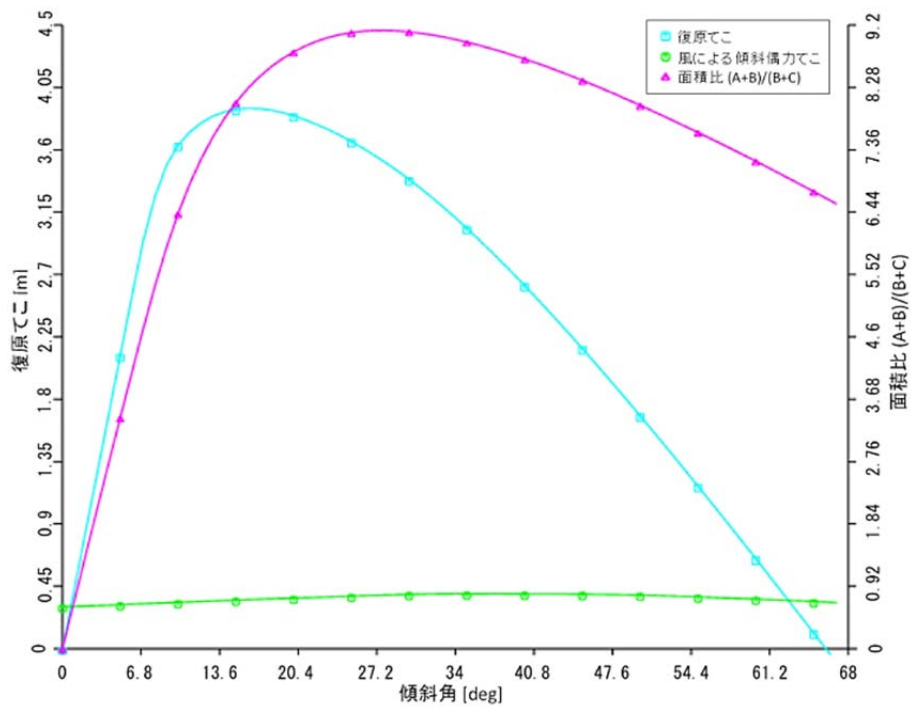


図 3.2-2 非損傷時の復原力曲線の例¹²

表 3.2-5 非損傷時の評価例¹²

計算条件	暴風時
風速 [海面上 10m] (m/s)	51.5
風向 (deg)	0
最大復原てこ (m)	3.90 (17deg)

風による最大傾斜偶力でこ (m)	0.40
第二次交差角 (deg)	64
面積比 (A+B) / (B+C)	$4.42 \geq 1.4$

3.3 損傷時の復原性の評価

損傷時の復原性については、いずれの1区画への浸水に対しても浮力と復原性を確保するものである。表 3.3-1 における条件を満足することで、風によるモーメントおよび浮体の動揺に対して復原性を有していることを評価する。浸水する1区画は、非損傷時で第二次交差角が最も厳しい条件となる風向において、より厳しい条件となる区画を選択する。1区画浸水の例を図 3.3-1 に、評価例を表 3.3-2 に示す。

表 3.3-1 損傷時の評価方法

状態	形式	復原力曲線図による評価方法
損傷時 (1区画浸水時)	全て	第一次交差角と第二次交差角からなる復原性範囲(図 3.3-1)を計算し、復原性範囲が、全ての設計荷重ケース(DLC)における浮体の最大傾斜角目標値(15deg 以内)より大きい。

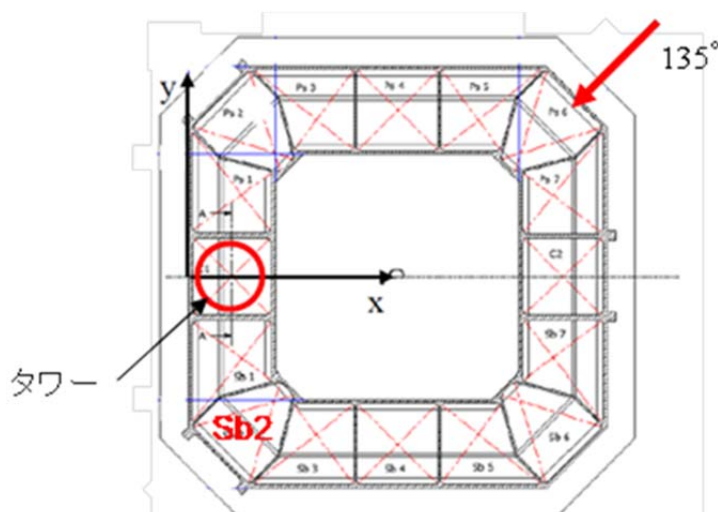


図 3.3-1 1区画浸水の例 (135°流入風に対して Sb2 区画を浸水) ¹²

表 3.3-2 損傷時の評価例 ¹²

区画浸水箇所	C2 浸水時
風速 [海面上 10m] (m/s)	25.8
初期ヒール-風方向傾斜角 (deg)	0
初期トリム-風直角方向傾斜角 (deg)	3.48
風向 (deg)	90
横メタセンター高さ (m)	20.1
縦メタセンター高さ (m)	22.5
25.8m/s 風速下ヒール (deg)	0.35
25.8m/s 風速下トリム (deg)	3.48
復原性範囲 (deg)	$23 \geq 15$