

浮体式洋上風力発電施設技術基準 安全ガイドライン

令和5年3月

国土交通省海事局

目次

はじめに

第1編 総則

- 1. 適用 …………… 1
- 2. 定義 …………… 3
- 3. 特殊な構造及び設備等 …… 9
- 4. 浮体式洋上風力発電施設の安全のための措置 …………… 9

第2編 技術基準

第1章 外部条件

- 1. 一般的事項 …………… 10
- 2. 風条件 …………… 11
- 3. 海象条件 …………… 18
- 4. その他の環境条件 …………… 38

第2章 構造に関する規則

第1節 材料

- 1. 使用材料 …………… 68

第2節 荷重

- 1. 一般的事項 …………… 71
- 2. 荷重 …………… 76
- 3. 設計条件及び荷重ケース …… 82
- 4. 荷重計算 …………… 102

第3節 構造設計

- 1. 一般的事項 …………… 104
- 2. 構造配置 …………… 108
- 3. 全体強度解析 …………… 110
- 4. 構造部材の寸法 …………… 120
- 5. 疲労強度 …………… 125
- 6. 防しよく措置及び腐食予備厚 132

第3章 位置保持システム

- 1. 一般的事項 …………… 137
- 2. 係留システム …………… 138
- 3. 係留解析 …………… 141
- 4. 係留ライン等の設計 …… 155
- 5. 係留機器 …………… 159

第4章 設備に関する規則

- 1. 艀装等 …………… 162
- 2. 機関に関する設備 …… 163
- 3. 電気に関する設備 …… 163
- 4. 防火措置及び消防設備 …… 163
- 5. 昇降設備 …………… 164
- 6. 回転翼航空機着船設備 …… 165
- 7. その他 …………… 165

第5章 復原性

- 1. 一般的事項 …………… 166
- 2. 風による傾斜モーメント …… 168
- 3. 非損傷時復原性 …… 172
- 4. 損傷時復原性 …… 176

附則

付録

- 付録1 地震・津波の浮体への影響評価法
 - 付録2 連成一体挙動を求める標準試験法及び計測結果例
 - 付録3 損傷時復原性要件のための水槽試験
 - 付録4 VIM 評価法
 - 付録5 周辺を航行する船舶の衝突による構造全損の確率の評価方法
 - 付録6 浮体施設の漂流挙動の推定手法
(浮体式洋上風力発電施設技術基準外の検討)
 - 付録7 浮体施設の連鎖衝突の確率評価法
(浮体式洋上風力発電施設技術基準外の検討)
 - 付録8 荷重・応力モニタリング手法
 - 付録A 設計等に当たって参考となる情報
- 略語一覧

はじめに

風力発電は、世界的にその普及が拡大しており、我が国においても有力な再生可能エネルギーと考えられている。一方、我が国は風力発電の設置に適した陸地面積が限られており、かつ周辺に浅海域が少ないため、その普及拡大のためには、浮体式洋上風力発電が不可欠である。

浮体式洋上風力発電施設は海上に浮遊する海洋構造物であり、陸上または海底に基礎のある風力発電施設とはその特性が大きく異なるため、その実用化のためには技術的課題の解決が必要とされている。

これらを踏まえ、国土交通省ではこれら浮体式洋上風力発電施設の普及の円滑な推進に資するため、船舶安全法の下、平成24年4月23日に浮体式洋上風力発電施設技術基準（国海安第194号）を制定するとともに、安全ガイドラインを策定することとした。

ここで、安全ガイドラインとは、浮体式洋上風力発電施設の支持構造物である浮体施設及びタワーを対象に、それらの合理的かつ効率的な安全設計を促進するため、実設計者が実務的に適用できる技術的解決策を体系的に提供するものである。また、これを開けば、浮体式洋上風力発電施設技術基準及び設計等のガイダンスの両方がわかるようにするため、編集的には逐条解説の形を取っている。

国土交通省は、平成23～25年度事業として、3か年度にわたる検討を経て、ここに安全ガイドラインをとりまとめた。

また、平成30年度事業として、商用化に向けたコスト低減を視野に、安全性を確保しつつ浮体を簡素化する要件の検討を行い、それらを基に安全ガイドラインを改正することとなった。

内容について審議して頂いた「浮体式洋上風力発電施設の安全性検討委員会（主査：東京大学・鈴木英之教授）」の委員およびオブザーバ各位には、この場を借りて感謝を申し上げます。

このガイドラインが、浮体式洋上風力発電施設の健全な普及に寄与することを願うものである。

第1編 総則

1. 適用

この基準は、浮体式洋上風力発電施設のうち、支持構造物である浮体施設及びタワーに適用する。

浮体式洋上風力発電施設について、施設すべき事項等及びその標準に関する事項は、別に特段の定めのない限り本基準の定めるところによる。

本基準は最大搭載人員を有しない浮体式洋上風力発電施設であることを前提としており、最大搭載人員を有する場合においては、意見及び資料を添えて、国土交通省海事局検査測度課長に伺い出るものとする。また、本基準は浅海影響を受けない水深の海域に施設される浮体式洋上風力発電施設を想定しており、浅海影響を無視することができない水深の海域に施設する浮体式洋上風力発電施設においては、浅海影響について考慮しなければならない。

【解説】

風車方式には、一般的に水平軸型および垂直軸型がある。また、浮体方式の代表例は、セミサブ型、バージ型、スパー型およびテンションレグプラットフォーム（TLP）型である。本技術基準においては、それら以外の方式を含めてあらゆる方式を排除していない。

本ガイドライン【解説】においても、基本的な記述は共通的な事項としているが、一部の例示や挿絵で特定方式の事例が示されている。これらの事例と異なる方式に対しても、同等性の下で、これを適宜解釈して差し支えない。

本技術基準の第1編3. 特殊な構造及び設備等に定める通り、「構造及び設備等について、この基準により難い特別な事由がある場合には、意見及び資料を添えて、国土交通省海事局検査測度課長に伺い出る」ことで対応可能である。

船舶安全法には最大搭載人員の規定がある。最大搭載人員とは、船舶の安全性を確保するために搭載を許される最大限度の人員をいい、漁船以外の船舶にあつては、旅客、船員、その他の乗船者の別に、船舶設備規程等関係法令の定めるところにより決定される。

一般に浮体式海洋構造物の浅海影響とは、水深が浅くなった場合における波の変形による浮体が受ける流体力への水深影響である。水深が浅くなると、波によって浮体に定常的に働く漂流力が及ぼす係留系への影響が深海域と比較して異なるので、この影響を考慮する必要がある。浅海影響を示す指数の例として、水深・沖合い波長比に対して浅水係数を表した権・合田の式¹⁾を示す。なお、浅海とは、一般的には50m以浅の水深を想定している。

$$K_{st} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh}\right) \tanh kh}}$$

ここで、 K_{st} は浅水係数、 k は波数（ $2\pi/L$ ）、 L は波長、 h は水深である。

$$K_s = K_{st} + 0.0015 \left(\frac{h}{L_0} \right)^{-2.87} \left(\frac{H'_0}{L_0} \right)^{1.27}$$

$$H = K_s H'_0$$

H'_0 は沖合い波高、 L_0 は沖合い波長で、 H が水深 h における波高である。

例えば、沖合いの波長が200m(波周期11.32sec)、波高が3mとすると、水深50mの場所における浅海係数は1.152となり、波高が沖合いと比較して約15%増加する。

なお、浮体式洋上風力発電施設のうち発電設備については、電気事業法（昭和39年法律第170号）によること。

【第1編 2. 定義】

- (1) 浮体式洋上風力発電施設とは、風力発電設備を有する浮体式海洋構造物をいい、具体的には、セミサブ型、バージ型、スパー型又はテンションレグプラットフォーム（TLP）型等の浮力体にタワー及びロータ（ナセル・アセンブリ）等が搭載されたものを指す。

【解説】

浮体式洋上風力発電施設の定義は、「風力発電設備を有する浮体式海洋構造物」としているが、補助的な目的で小規模な風力発電設備を搭載した浮体式海洋構造物については、本基準の対象としないことができる。以上は、管海官庁が認めるところによる。

下図に参考として、浮力体にタワー、ロータ等の搭載例（水平軸型の例）を示す。



図 2-1 浮体式洋上風力発電施設の例

【第1編 2. 定義】

- (2) セミサブ型とは、甲板、コラム、フーティング又はローハル及びブレイシング等から構成され、所定の喫水まで沈めて半潜水状態となる型式のものをいう。

【解説】

セミサブ型の海洋構造物は、大きく分けて甲板、コラム、フーティング及びブレイシングで構成されるコラムフーティング型と甲板、コラム、ブレイシング及びローハルで構成されるローハル型の2種類である。これらの浮遊姿勢は、浮力を主に受ける浮体部分が没水して半潜水状態となる。

下図に参考として、コラムフーティング型及びローハル型の例を示す。

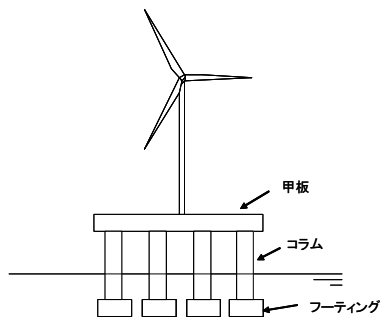


図2-2 コラムフーティング型の例

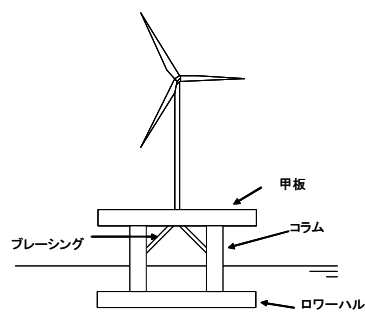


図2-3 ローハル型の例

(3) バージ型とは、排水量型の型式のものをいう。

【解説】

下図に参考として、バージ型プラットフォームの例を示す。

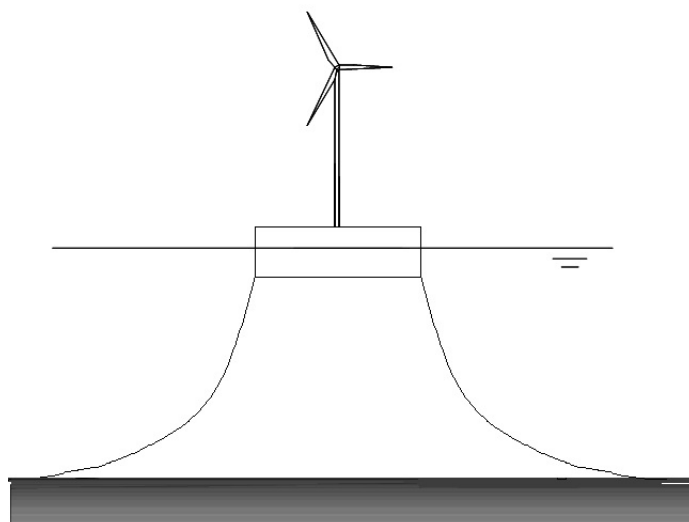


図2-4 バージ型プラットフォームの例

(4) スパー型とは、浮力体を垂直方向に延長することによって浮力体の大部分を水没させる型式のものをいう。

【解説】

スパーとは、大水深を有する大規模な円筒ブイ型プラットフォームである。

下図に参考として、スパー型プラットフォームの例を示す。

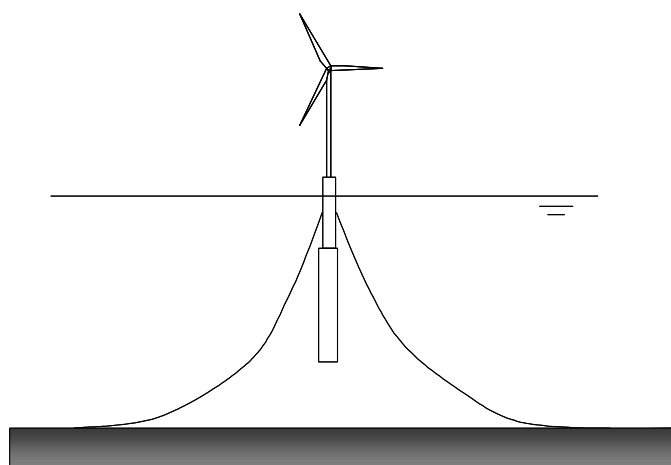


図2-5 スパー型プラットフォームの例

【第1編 2. 定義】

- (5) テンションレグプラットフォーム(TLP)型とは、強制的に半潜水させた浮力体と海底を緊張係留ラインで結び、強制浮力によって生じる緊張力を利用して係留される型式のものをいう。

【解説】

下図に参考として、テンションレグプラットフォーム (TLP) 型の例を示す。

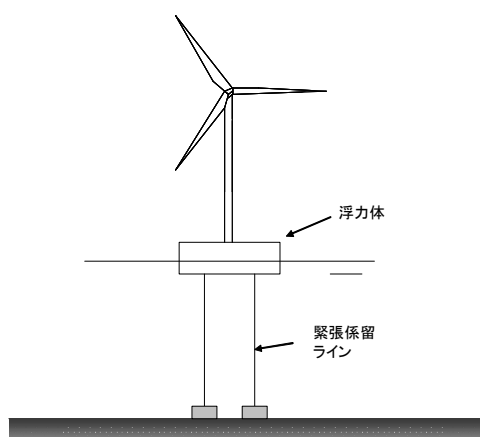


図2-6 テンションレグプラットフォーム (TLP) 型の例

【第1編 2. 定義】

- (6) 浮体式洋上風力発電施設の長さ、幅及び深さについては、その型式等の別により管海官庁が指示するものとする。

【解説】

浮体施設、プラットフォームの型式及び形状等の別によって、長さ、幅及び深さは一様に定義できないので施設毎に管海官庁の指示を受けること。

【第1編 2. 定義】

- (7) サイトとは、単独又はウインドファーム内における個々の浮体式洋上風力発電施設が施設された位置又は計画された位置をいう。

【解説】

ウインドファームとは、多数の風力発電機を同じ海域に集中させて建設コストダウンを図り、発電総量を平均化し、安定的な発電量を確保することを目的とする風力発電施設群をいう。

【第1編 2. 定義】

- (8) 係留ラインとは、浮体施設の位置を保持するためのチェーン、ワイヤロープ、合成繊維ロープ又はこれらが複合したロープ等、シャックル等の連結具及び中間ブイ又は中間シンカー等からなるものをいい、パイル、シンカー等の海底にある係留施設は除く。

【解説】

下図に参考として、係留ラインの例を示す。

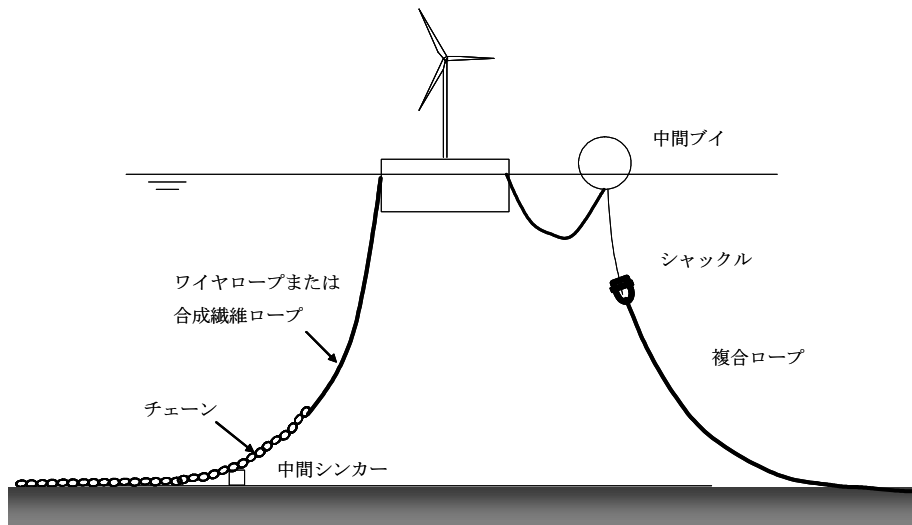


図2-7 係留ラインの例

【第1編 2. 定義】

- (9) 緊張係留ラインとは、鋼管、チェーン、ワイヤロープ、合成繊維ロープ又はこれらが複合したロープ等から成る係留ラインであって、高い張力状態で直線形状に配置され、主にその弾性伸びによる大きな張力を利用するものをいう。

【解説】

下図に参考として緊張係留ラインの例を示す。

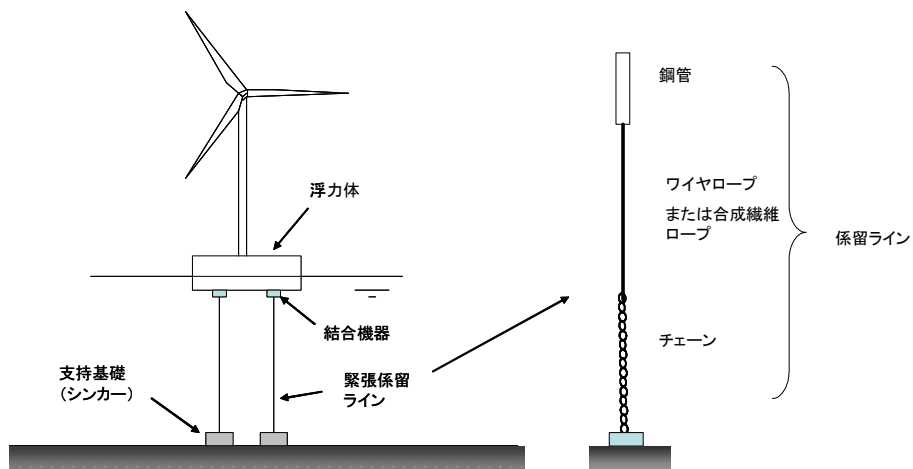


図2-8 緊張係留ラインの例

【第1編 2. 定義】

(10) 多点係留システムとは、海底のパイル、シンカー等に固縛された複数の係留ラインにより構成されるシステムであって、係留ラインの端部が個々に浮体施設のウィンチ又はストップパに連結されているものをいう。

【解説】

下図に参考として、多点係留システムの例を示す。

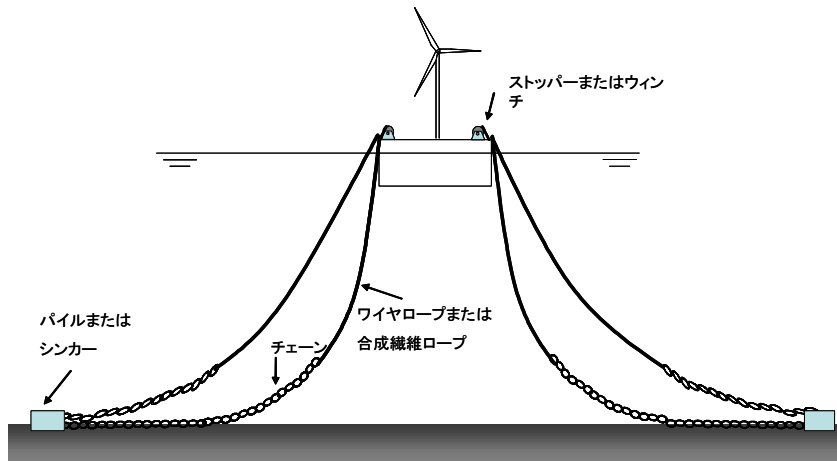


図2-9 多点係留システムの例

【第1編 2. 定義】

(11) カテナリ係留とは、主に懸垂線形状の係留ラインの自重（中間ブイ又は中間シンカーを有するものにあつては、係留ラインの自重に加え中間ブイの浮力又は中間シンカーの自重）によって係留力を得るものをいう。

【解説】

下図に参考として、カテナリ係留の例を示す。

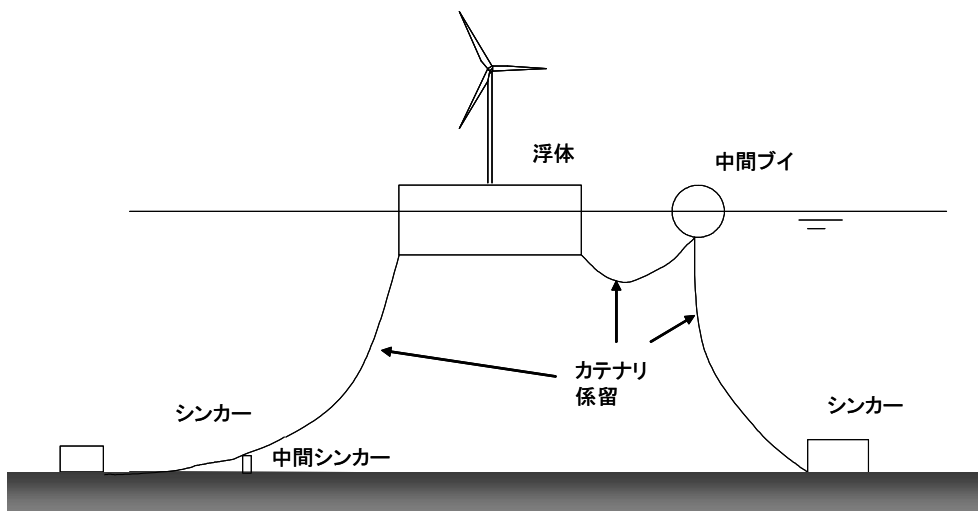


図2-10 カテナリ係留の例

【第1編 2. 定義】

(12) トート係留とは、初期張力を調整して緊張状態にある係留ラインの伸びによって係留力を得るものをいう。

【解説】

下図に参考として、トート (Taut) 係留の例を示す。

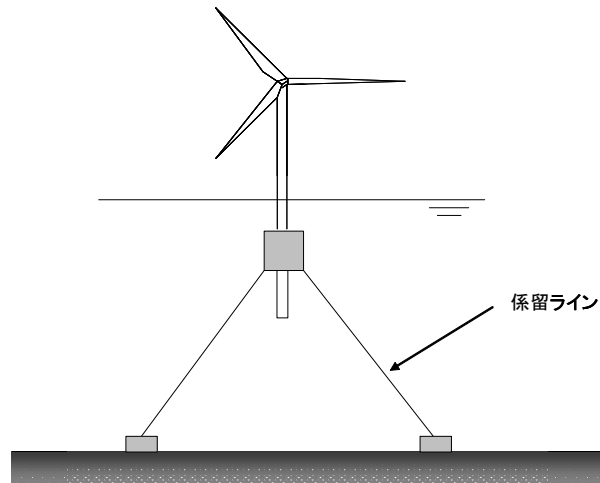


図2-11 トート係留の例

【第1編 2. 定義】

(13) 緊張係留とは、海底に設置された杭又はシンカー等の支持基礎、鉛直方向に配置された複数の緊張係留ライン及び浮体施設に緊張係留ラインを取付けるための結合機器によって構成され、緊張係留ラインにより浮体施設を下方に引き込むことによって生じる浮力の増加及び係留ラインの張力によって浮体施設の上下揺、たて揺及びよこ揺を堅く保持しようとするものをいう。

【解説】

緊張係留は、(9)に概説した緊張係留ラインと浮体施設を結合したものである。

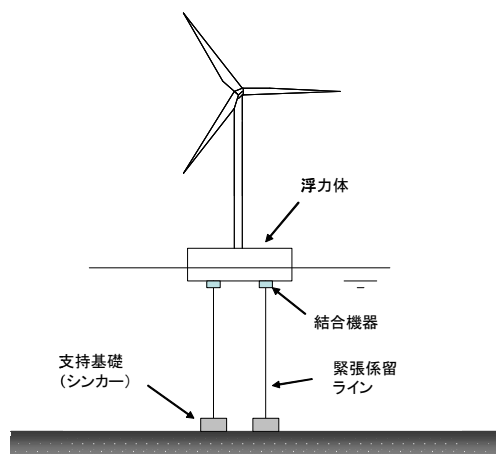


図2-12 緊張係留の例

【第1編 2. 定義】

(14) その他、本項に定義されていない用語等については、IEC 61400-3-1及びIEC TS 61400-3-2の規格類を参照すること。

【第1編 総則】

3. 特殊な構造及び設備等

構造及び設備等について、この基準により難い特別な事由がある場合には、意見及び資料を添えて、国土交通省海事局検査測度課長に伺い出るものとする。

【第1編 総則】

4. 浮体式洋上風力発電施設の安全のための措置

初めて定期検査を行った場合、管海官庁は船舶所有者に対し次に掲げる事項を記載した要領書を作成させ、承認のうえ返却し、これを浮体式洋上風力発電施設の責任者に供与させること。また、当該要領書に変更を生じた場合は、当該事項に関する要領書を作成させ、同様の措置をとること。

- (1) 一般配置図
- (2) メンテナンスマニュアル
- (3) 危機管理マニュアル
- (4) その他発電を適確に行うために必要な資料

【解説】

船舶所有者は、要領書の変更を行った場合には、管海官庁に変更点について報告を行うこと。ただし、軽微な変更（人事異動に伴う体制の変更等）については、再承認を受ける必要はなく、報告を行う必要もない。

(4) 「その他発電を適確に行うために必要な資料」は、当該施設の設計条件等を基に作成するものとし、例えば、以下の事項を含めることとする。

1. 発電を適確に行うために必要な設計条件
 - ・環境特性等（気象、海象条件）
2. 発電設備の制御システムの概要

参考文献

- 1) 合田良實、「耐波工学」、鹿島出版会
- 2) IEC 61400-3-1:2019 Wind energy generation systems – Part 3-1: Design requirements for fixed offshore wind turbines
- 3) IEC TS 61400-3-2:2019 Wind energy generation systems – Part 3-2: Design requirements for floating offshore wind turbines

第 2 編 技術基準

1. 一般的事項

ここでは、浮体式洋上風力発電施設を設計するにあたって考慮しなければならない外部条件について規定する。

- (1) 浮体施設及びタワーの荷重及び耐久性運転は、環境条件等の影響を受けるため、環境及び土壌のパラメータを考慮して設計しなければならない。
- (2) 外部条件における通常外部条件とは、一般に再現性のある構造荷重条件に関するものをいい、極値外部条件は、まれな外部設計条件を表す。
- (3) 海底変形、洗掘、その他海底の不安定による地質の時間的変化がサイトの地質に対して問題となる場合については、その影響について考慮しなければならない。

【解説】

(1)

環境条件等の影響

浮体式洋上風車は、設計基準によって採用された海象条件に安全に耐えるように設計されなければならない。この節に記載する海象条件には、波、海流、水位、海氷、海洋付着生物、洗掘、海底変形などが含まれる。

(2)

通常外部条件と極値外部条件

外部条件は、洋上風車の通常の運転状態で1年に1回よりも頻繁に発生する通常条件と、再現期間が1年又は50年と定義される極値条件とに分けられる。

(3)

浮体式洋上風力発電施設は海底面に係留されるために海底変形、洗掘等は係留に関する安全性に大きく影響する。係留設備を設計する際に候補海域の底質状況を把握する必要がある。近傍地の自治体の過去の港湾工事用データや設計基準が利用できる場合は参考とし、利用できるデータがない場合は、候補海域の海底地形、海底土質調査等を実施することが必要である。

2. 風条件

- (1) 浮体施設及びタワーは、設計基準として採用した風条件に安全に耐え得るように設計すること。荷重及び安全を考慮するための風の種類は、1年に1回よりも頻繁に発生する通常条件と、再現期間が1年又は50年と定義される極値条件とに区分される。
- (2) 浮体施設及びタワーの設計は、サイトを代表する風条件に基づいて設計すること。

【解説】

(1)

通常条件

JIS C 1400-1:2017 の「6.3.2 通常風条件」では、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が、風車単体の性能との関係から、その基準となる風速と乱流強度等は風車階級によって定められている。本技術基準においては、サイトの風条件に基づいてこれらの値を設定する必要がある。

技術基準の表 2-1 に示されている設計荷重ケース (DLC) 内の以下については、上記 6.3.1 の定めるところによる。

NWP (通常ウィンドプロファイルモデル : Normal wind profile model)

NTM (通常乱流モデル : Normal turbulence model)

極値条件

上記 JIS の「6.3.3 極値風条件」では、暴風による極大風速、風速及び風向の急激な変化などのほか、ウィンドシアの定め方が記述されている。技術基準の表 2-1 に示されている設計荷重ケース (DLC) 内の以下については、上記 6.3.2 の定めるところによる。

EWM (極値風モデル : Extreme wind speed model)

EOG (運転中の極値突風 : Extreme operating gust)

ETM (極値乱流モデル : Extreme turbulence model)

EDC (極値風向変化 : Extreme direction change)

ECD (風向変化を伴う極値コヒーレントガスト
: Extreme coherent gust with direction change)

EWS (極値ウィンドシア : Extreme wind share)

(2)

サイトを代表する風条件

風条件はサイトにおける長期実測値から設定することが望ましいが、そのような観測データは一般に存在しない。そこで以下の手法／データを用いることが考えられる。これら

のうち、(a)と(b)は初期検討や参考値として用いることができるが、より精度の高い評価には(c)と(d)を用いるべきである。(e)は、本来陸上風車を想定したものであることを考慮する必要がある。最終的には設計者が総合的に判断して決定する。

- (a) 気象官署データ
- (b) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構が策定した風況マップ
- (c) 気象データベースに基づく推定
- (d) 台風シミュレーションによる基本風速の設定
- (e) 建築基準法

(a) 近傍地の気象官署データに基づく推定

サイトの近傍に気象官署がある場合には、長期風況データとして当該気象官署の年別の気象データを参考データとする。観測期間に応じて、年平均風速、年最大風速（10 分間平均値）について解析する。年最大風速データをワイブル分布等に当てはめて、50 年再現確率風速を求める。

極値解析の具体的手法については参考 1-1 を参照のこと。また、検討に用いることができる気象官署データベースの例を参考表 1-1 に示す。なお、陸上にある気象官署と洋上にあるサイトとの相関については、地形影響を考慮して、適切な方法で評価することが必要である。

(b) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構の風況マップに基づく推定

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の局所的風況マップ及び極値風速データベースは、気象庁から収集した「風況データ」と、全国を対象に 500m メッシュで解析した地上高 30・50・70m の年平均風速、風向や風速の出現頻度を示した風配図から構成されている。当該局所的風況マップ及び極値風速データベースを用いて年平均風速及び極値風速を推定する。ただし、主に陸上風車を対象にしているため、洋上については参考値として用いるべきである。

- ・局所的風況マップ : <http://app8.infoc.nedo.go.jp/nedo/index.html>
- ・極値風速データベース : <http://www.nedo.go.jp/content/100107254.pdf>

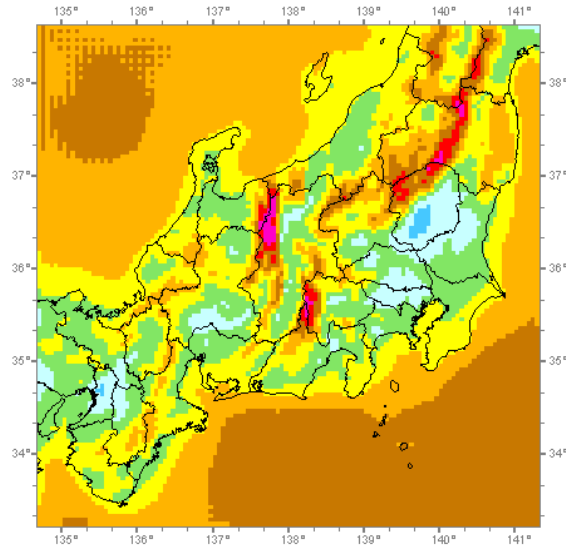


図 1-2-1 NEDO 局所的風況マップの例

(c) 気象データベースに基づく推定

海上風データとして、大気再解析データセット（米国国立環境予測センター、米国大気研究センターの提供している再解析データ NCEP/CAR 等、参考表 1-2「推算データベース」を参照）を用いて海上風の極値を評価する。再解析データを用いた極値風速の算出手順の例を以下に示す。

- 1) 気象再解析値から対象地点付近のデータを抽出
- 2) 年最大風速の抽出と標本資料の作成
- 3) 極値統計解析の実施
- 4) 確率風速の算定
- 5) グリッド値に対するモデル解像度の補正
- 6) グリッド値から時間平均風速への変換

ここでサイト近傍のみではなく、隣接格子点も検討する必要がある。隣接格子点を考慮するのは、最大風速に対する不確実性、特に台風影響を考慮するためである。これらのデータをもとに、極値解析を実施して年最大風速の極値分布を求める。

大気再解析データは GCM（Global Climate Model：全球気候予測モデル）を用いた気象の推算値であり、物理過程の再現性の精度による誤差と空間解像度に依存する誤差の 2 種類を持つ。特に、台風のような局所的な気象現象については後者の影響を考慮する必要がある。そこで必要に応じ、次に述べる台風シミュレーションを実施することが望ましい。

検討に用いることができる気象データベースの例を参考表 1-2(3)に示す。

(d) 台風シミュレーションによる基本風速の設定

北海道や東北地方を除く日本のほとんどの地点で、年最大風速は台風によってもたらされる。しかし、観測記録から極値解析によって再現期待風速を求めようとする、観測記録の長短で台風の影響度が異なり、その推定精度が問題となる。

このような問題点を解決する方法として、過去に日本に上陸、接近した台風、あるいは発生した全ての台風のデータから台風特性（年発生数、中心気圧低下量、進行速度、最大旋衡風速半径など）の確率モデルを構築し、モンテカルロ・シミュレーションによって、長期間にわたる台風の発生、進行を模擬する台風シミュレーション手法を用いることができる。シミュレーションの結果、着目サイトでの台風毎の風速、風向などが得られ、これを1年毎に整理すれば年最大風速が得られ、シミュレーション期間での極値解析を行うことで再現期待風速が求められる。

この方法によれば、十分に長い期間でのシミュレーションを行うことで、極値解析で問題となる確率分布の裾部の特性が安定して再現できる利点がある。さらに、実測データからでは統計期間などの問題で困難とされる、風向毎の再現期待値の算定も行うことができ、風速の風向特性も検討することができる。ただし、この方法で得られる風速は、台風の気圧場を基にしているため地表地形の影響を受けない上空風速（傾度風速）であり、これを地表風速に変換する際の精度に注意が必要である。

台風シミュレーションには、大別して地域限定型モデル（Region Specific Model）とサイト限定型モデル（Site Specific Model）の2つの方法がある。このうち、地域限定形モデルは、モデル台風を日本の南海上で発生させ、その後の進行・盛衰を確率的にシミュレートするものである。一方、サイト限定形モデルは、対象地点を含む一定の地域を通過した台風統計から台風の確率モデルを作成し、対象地点での風速特性をシミュレートしようとするものである。これら検討に用いることができる台風シミュレーションの例を参考表 1-3(2)、1-4 と 1-10 に示す。

なお、日本周辺が熱帯低気圧と温帯低気圧の両方が強風の要因となる混合気候であることから、年最大風速の確率分布を評価するために両者を考慮する必要も指摘されている。参考文献 1-1)では、極値風速を評価する MCP (Measure-Correlate-Predict) 法 (JIS C 1400-1:2017 の附属書 E を参照) を温帯低気圧に適用するとともに、熱帯低気圧にモンテカルロ・シミュレーションを適用して、50年再現期待値に対してその有効性を示している。

(e) 建築基準法

陸上の風車では、建築基準法による設計式を用いることが多い。洋上風車に同様の考え方を当てはめると、建築基準法における陸上の平坦な地形に該当する。具体的な方法は参考 1-2 に示す。

変動風速のスペクトルモデル

IEC61400-1 においては、慣性小領域の高周波側では式(1-2-2)に漸近し、スペクトルの

各成分が式(1-2-3)の関係を満たすよう規定されている。

$$S_1(f) = 0.05\sigma_1^2(A_1/U_h)^{-2/3}f^{-5/3} \quad (1-2-2)$$

$$S_2(f) = S_3(f) = \frac{4}{3}S_1(f) \quad (1-2-3)$$

これらの関係を満たすスペクトルモデルとして、IEC61400-1 AnnexC、JIS C 1400-1:2017 附属書 B においては Mann のスペクトルモデルと Kaimal のスペクトルモデルが挙げられている。以下にこれらのスペクトルモデルの定義を示す。

(a) Mann のスペクトルモデル

3次元の速度スペクトルテンソルで表現される。テンソル成分は

$$\left. \begin{aligned} \Phi_{11}(k_1, k_2, k_3) &= \frac{E(k_0)}{4\pi k_0^4} \{k_0^2 - k_1^2 - 2k_1[k_3 + \beta(k)k_1]\zeta_1 + (k_1^2 + k_2^2)\zeta_1^2\} \\ \Phi_{22}(k_1, k_2, k_3) &= \frac{E(k_0)}{4\pi k_0^4} \{k_0^2 - k_2^2 - 2k_2[k_3 + \beta(k)k_1]\zeta_2 + (k_1^2 + k_2^2)\zeta_2^2\} \\ \Phi_{33}(k_1, k_2, k_3) &= \frac{E(k_0)}{4\pi k_0^4} (k_1^2 + k_2^2) \\ \Phi_{12}(k_1, k_2, k_3) &= \frac{E(k_0)}{4\pi k_0^4} \{-k_1k_2 - k_1[k_3 + \beta(k)k_1]\zeta_2 - k_2[k_3 + \beta(k)k_1]\zeta_1 \\ &\quad + (k_1^2 + k_2^2)\zeta_1\zeta_2\} \\ \Phi_{13}(k_1, k_2, k_3) &= \frac{E(k_0)}{4\pi k_0^4} \{-k_1[k_3 + \beta(k)k_1] + (k_1^2 + k_2^2)\zeta_1\} \\ \Phi_{23}(k_1, k_2, k_3) &= \frac{E(k_0)}{4\pi k_0^4} \{-k_2[k_3 + \beta(k)k_1] + (k_1^2 + k_2^2)\zeta_2\} \end{aligned} \right\} (1-2-4)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \Phi_{ij}(k_1, k_2, k_3) &= \Phi_{ij}^*(k_1, k_2, k_3) \\ &= \frac{1}{8\pi^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} R_{ii}(\delta_1 \cdot \delta_2 \cdot \delta_3) e^{-\tau k_1 \delta_1} e^{-\tau k_2 \delta_2} e^{-\tau k_3 \delta_3} d\delta_1 d\delta_2 d\delta_3 \end{aligned}$$

の関係があり、

$$R_{ii}(\delta_1 \cdot \delta_2 \cdot \delta_3) = \frac{1}{\sigma_{iso}^2} E(u_i(x_1, x_2, x_3) u_j(x_1 + l\delta_1, x_2 + l\delta_2, x_3 + l\delta_3))$$

となる無次元テンソルである。

ここで、 u_i は速度成分、

δ_i は無次元の空間距離ベクトル成分、

k_i は無次元の空間波数である。添え字 i は 1 : 主方向、2 : 横方向、3 : 鉛直方向を示す。

スペクトルテンソル成分を積分して得られる無次元の片側スペクトルは、式(1-2-5)で与えられる。

$$\frac{fS_i(f)}{\sigma_1^2} = \frac{\sigma_{iso}^2}{\sigma_1^2} \left(\frac{4\pi lf}{V_{hub}} \right) \Psi_{ii} \left(\frac{2\pi lf}{V_{hub}} \right) \quad (1-2-5)$$

ここで、 f は周波数(Hz)、

l は尺度定数であり、

σ_{iso}^2 は速度成分の非せん断等方性の分散、

また、

$$\Psi_{ii}(k_1) = \sigma_{iso}^2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_{ij}(k_1, k_2, k_3) dk_2 dk_3$$

は $i = j$ については 1 次元の波数の自己スペクトル、 $i \neq j$ については 1 次元の波数のクロススペクトルであり、

$$\sigma_1^2 = \sigma_{iso}^2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_{ii}(k_1, k_2, k_3) dk_1 dk_2 dk_3$$

はそれぞれの要素の分散である。

ここで、 k_1, k_2, k_3 は主方向、直交方向、鉛直方向における無次元化された波数である。

(b) Kaimal のスペクトルモデル

$$\frac{fS_k(f)}{\sigma_k^2} = \frac{4fL_k/V_{hub}}{\left(1 + 6fL_k/V_{hub}\right)^{5/3}} \quad (1-2-6)$$

ここで、 f は周波数(Hz)、
 S_k は風速の主方向成分の片側スペクトル、
 σ_k は速度成分の標準偏差、
 L_k は速度成分の積分尺度定数であり、

$$\sigma_k^2 = \int_0^{\infty} S_k(f)df$$

の関係がある。

3. 海象条件

- (1) 浮体施設及びタワーは、設計基準によって採用された海象条件に安全に耐え得るように設計すること。荷重及び安全を考慮するための海象条件は、1年に1回よりも頻繁に発生する通常海象条件と、再現期間が1年又は50年と定義される極値海象条件とに区分される。ただし、水位の通常範囲については再現期間の1年の水面の変化と定義する。
- (2) 浮体施設及びタワーの設計は、サイトを代表する海象条件に基づいて設計すること。

【解説】

(1)

設計に用いる海象条件、水位の詳細については、次節以降に説明する。

(2)

サイトを代表する海象条件

設計に用いる海象条件はサイトにおける長期実測値から設定することが望ましいが、そのような観測データは一般に存在しない。そこで以下の手法／データを用いることが考えられる。最終的には設計者が総合的に判断して決定する。

- (a) 近傍の実測データ
- (b) 波浪推算

(a) 近傍の実測データに基づく推定

サイトの近傍海域において観測値が得られている場合は、これを用いることができる。ただし、観測期間は既往の波の算定法との整合性を考え、港湾基準¹⁻⁵⁾に基づき30年以上が望ましい。極値統計解析によって観測記録に最も適合する分布関数を設定し再現期間50年の有義波高を求める。50年確率波高に対応する有義波周期は波高と周期の散布図より求める。

極値解析の具体的手法については参考1-1を参照のこと。また、検討に用いることができるデータベースの例を参考表1-1及び1-2に示す。

なお、観測海域と風車設置サイトとの相関については、地形影響を考慮して、適切な方法で評価することが必要である。

(b) 波浪推算に基づく方法

波浪推算は、風によって発達する波の諸元を推定する手法である。観測データに基づく風資料か、気象モデルによる風速計算値を入力として、たとえば第3世代スペクトル型波浪モデル(WAMモデル等)によって波浪を計算する。計算手法の概要をNOTEに、シミ

ュレーション・モデルの例を参考表 1-6 に、それぞれ示す。また、利用できる波浪推算データベースを参考表 1-2 に示す。50 年再現波高を算出する手法は上記と同様である。

-----NOTE : 波浪推算による波浪の算出方法-----

波浪推算は、風データを元にして風によって発達する波の諸元を推定する手法であり、有義波高法とスペクトル法に大別される。有義波高法による場合、風域が移動しない場合に適用される SMB 法 (Sverdrup-Munk-Bretschneider 法)、台風等の風域が移動する場合に適用されるウィルソン法、波の発達に対する水深の影響を考慮したブレットシュナイダー法等がある。

沿岸や港湾構造物の設計では SMB 法に改良を加えたウィルソン法が広く用いられている。以下にウィルソンによる推算式を示す。

$$H_{1/3} = \frac{0.30U_{10}^2}{g} \left[1 - \left\{ 1 + 0.004 \left(gF / U_{10}^2 \right)^{1/2} \right\}^{-2} \right] \quad (N1)$$

$$T_{1/3} = \frac{8.617U_{10}}{g} \left[1 - \left\{ 1 + 0.008 \left(gF / U_{10}^2 \right)^{1/3} \right\}^{-5} \right] \quad (N2)$$

$H_{1/3}$: 有義波高(m)

$T_{1/3}$: 有義波周期(sec)

U_{10} : 海面上 10m における 10 分間平均風速(m/s)の 50 年再現期待値

F : 吹走距離(m)

g : 重力加速度(m/s²)

波高をより精度良く求めるためには、エネルギー平衡方程式を基礎方程式として、波浪スペクトルの時・空間変動を数値的に求めるスペクトル法が推奨される。詳細については、参考文献 1-2)、1-3)等を参考とすることができる。

上記に示した方法は、高度な判断が必要となるために計算は慎重に行い、必要に応じて専門機関に依頼し、出力結果の妥当性を比較検討により十分に検証した上で用いることが望ましい。

3-1. 波

- (1) 波は形状が不規則であり、波高、波長及び伝ば速度も変化する。また、一方向又は複数の方向から同時に浮体式洋上風力発電施設に対して打ち寄せることもある。実際の海の特徴は、確率論的な波浪モデルで海況を表現することで最もよく映し出すことができる。確率論的な波浪モデルは、個々の小さな周波数成分を多数重ね合わせたものとして海況を表現する。周波数成分の一つ一つは、固有の振幅、周波数及び伝ば方向をもつ周期的な波であり、互いの位相は不規則である。設計海況は、波のスペクトル S とともに有義波高 H_s 、ピークスペクトル周期 T_p 及び平均波向 θ_{wm} を用いて表す。適切な場合には、波のスペクトルに方向関数を補足してもよい。波の標準的なスペクトルの式については、IEC 61400-3-1 の規格を参照すること。
- (2) 用途によっては実際の海を表す概念として周期的又は規則的な波を設計に用いる場合もある。決定論的な設計波については、その波高、周期及び波向によって決定すること。
- (3) 浮体式洋上風力発電施設の設計では、風と波条件との相関関係を考慮に入れなければならない。この相関関係は、下記のパラメータの長期的な結合確率分布について考慮する。
- 平均風速 V
有義波高 H_s
波スペクトルのピーク周期 T_p
- これらのパラメータの結合確率分布は、吹送距離、水深、海底地形などのサイトにおける各条件に影響される。したがって、結合確率分布は適切な長期測定データに適宜、数値的な波の追算を補足して求めるものとする。なお、本件については、IEC 61400-3-1 の規格を参照すること。
- (4) 通常風条件と波との相関関係には平均風向及び平均波向の考慮が含まれる。風向及び波向の分布（多方向）は、浮体施設及びタワーに作用する荷重に重要な影響をもたらすことがある。この影響の重要度は、風及び波の方向性並びに浮体施設及びタワーの軸対称性の度合いによって異なる。風及び波の方向が同一方向でこれらを単一の方法から作用させることが最大ケースになるという仮定は保守的となるので、そのように仮定して差し支えないか否かについて、設計の際には場合に応じて適切な解析によって実証する必要がある。また、風向及び波向に関する仮定は原則として第2章第2節に規定する設計荷重ケースごとに考慮しなければならない。
- (5) 風及び波の方向を不一致とする場合における考慮事項については、IEC 61400-3-1 の規格を参照すること。

【解説】

(1)

有義波高 H_s 、ピークスペクトル周期 T_p

上記において、 H_s は正確にはスペクトル有義波高であって、スペクトルの面積 m_0 または波面の上下変位の標準偏差 σ_η を用いて、次式によって求められる。

$$H_s = 4\sqrt{m_0} = 4\sigma_\eta \quad (1-3-1)$$

一方、目視観測に近い値を与えるものとして、我が国では統計的有義波高 $H_{1/3}$ がよく用いられる。これは、ゼロアップクロス法で求めた個々の波の波高の内、大きい方から 1/3 の平均をとったものである。両者の間には以下の関係がある。

$$H_{1/3} \approx 0.95H_s \quad (1-3-2)$$

また、 T_p は波スペクトルのピーク周期であるが、我が国では有義波周期 $T_{1/3}$ も用いられる。有義波周期は、有義波高 $H_{1/3}$ が対象とする波の周期の平均値である。両者の間の関係は波スペクトルの形状によって異なるが、一般的には以下の関係がある。

$$T_p \approx 1.1T_{1/3} \quad (1-3-3)$$

波の標準スペクトル等

ISO19901-1 に記述されている波の標準スペクトルは、以下の(a)と(b)である。この他に参考として(c)をあげておく。海域の特性に応じて、最もよくあてはまるものを選択する。また、波の方向分布関数を(d)に示す。

- (a) ピアソン・モスコビッツスペクトル
- (b) JONSWAP スペクトル
- (c) 修正ブレットシュナイダー・光易型スペクトル
- (d) 方向分布関数

(a) ピアソン・モスコビッツスペクトル

十分に発達した風波に対して用いられる。しかし、短い吹送距離で強風によって急に発達させられた風波の場合にはこれより鋭く尖ったピークを持つことが多い。

$$S_{PM}(f) = 0.3125H_s^2 f_p^4 f^{-5} \exp\left[-1.25\left(\frac{f_p}{f}\right)^4\right] \quad (1-3-4)$$

ここで、 f_p : スペクトルのピーク周波数(Hz)

(b) JONSWAP スペクトル

北海における嵐を想定したスペクトルである。

$$S_{JS}(f) = C(\gamma)S_{PM}(f)\gamma^\alpha \quad (1-3-5)$$

ここで、

γ はピーク先の鋭度を表すパラメータ

$C(\gamma)$ は正規化係数で、 $C(\gamma) = 1 - 0.287 \ln \gamma$

$$\alpha = \exp\left(-\frac{(f - f_p)^2}{2\sigma^2 f_p^2}\right)$$

$$\sigma = 0.07 \quad f \leq f_p$$

$$\sigma = 0.09 \quad f > f_p$$

$$\gamma = \begin{cases} 5 & \text{for } \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \leq 3.6 \\ \exp\left(5.75 - 1.15 \frac{T_p}{\sqrt{H_s}}\right) & \text{for } 3.6 < \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \leq 5 \\ 1 & \text{for } \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} > 5 \end{cases}$$

$\gamma = 1$ のとき、JONSWAP スペクトルはピアソン・モスコビッツスペクトルに一致し、 γ が増大するにつれてスペクトルのピークが鋭くなる。

(c) 修正ブレットシュナイダー・光易型スペクトル

日本近海の台風を想定し、十分発達した風波を考慮している。

$$S_{BM}(f) = 0.205 H_{1/3}^2 T_{1/3}^{-4} f^{-5} \exp\left[-0.75(T_{1/3} f)^{-4}\right] \quad (1-3-6)$$

(d) 波の方向分布関数

一般に、波の方向スペクトル $S(f, \theta)$ は、単一方向の波スペクトルと方向分布関数の積として以下のように表現される。

$$S(f, \theta) = S(f)D(f, \theta) \cong S(f)D(\theta) \quad (1-3-7)$$

ここで、 θ は要素波の進行方向であり、 $D(\theta; f)$ 及び $D(\theta)$ は波の方向分布関数である。また、方向分布関数は、全方位に渡って積分すると 1 になるように定義されている。

$$\int_{-\pi}^{\pi} D(\theta) d\theta = 1 \quad (1-3-8)$$

代表的な方向分布関数として、 $\cos\theta$ の 2 乗の関数が多い。
また、野外観測データによって実証されてきた次式も用いられる。

$$D(f, \theta) = D_0 \cos^{2s} \left(\frac{\theta - \theta_0}{2} \right) \quad (1-3-9)$$

ここで D_0 は(1-3-8)式を満足するための係数、 θ_0 は主方向である。

s は分散度パラメータで、周波数によって次式のように変化する。

$$s = \left(\frac{f}{f_p} \right)^5 s_{\max}, \quad f \leq f_p \text{ の場合}$$

$$s = \left(\frac{f}{f_p} \right)^{-2.5} s_{\max}, \quad f \geq f_p \text{ の場合}$$

ここで、 s_{\max} は分散度パラメータのピーク値で、十分に成長した風浪の代表値は約 10 とされている。

(3)

風と波の結合確率分布

風と波の結合確率分布は、設置サイトにおける長期測定データによって求めることが望ましい。これが困難な場合には、「2. 風条件(2)」及び「3. 海象条件(2)」に述べたように、近傍の測定データを用い、必要に応じて適切に修正するとともに、波浪の追算を補足して求めるものとする。

なお、IEC 61400-3-1 では”6.4.4 Assessment of marine conditions”において、 V 、 H_s 、 T_p を時間平均して求める際の留意点等に関する記述がある。

(4)

風及び波の方向

風力発電施設に用いられる浮体は多様な形状が考えられ、また係留方式・配置も様々である。従って、風と波が同一方向から来襲する状態が安全上最も重要になると仮定することは適当でなく、適切な解析によって十分な検討を行う必要がある。

(5)

風及び波の方向を不一致とする場合における考慮

IEC 61400-3-1 では、風と波の方向の不一致 (misalignment) について複数の記述があり、最も荷重の大きくなる風と波の方向の組み合わせ等について注意喚起されている。

3-1-1. 通常海況(NSS)

- (1) 各通常海況に対して、有義波高、ピークスペクトル周期及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。選定においては、サイトにおける気象海象パラメータの長期的な結合確率分布を基準とすること。
- (2) 疲労荷重計算においては、設計の際に考慮する通常海況における（データの）数及び分解能が十分に長い期間における気象海象パラメータの分布から得られている必要がある。
- (3) 終極荷重計算においては、通常海況は基本的に平均風速を条件とする有義波高 H_s の期待値で表現した海況とすること。設計の際にはそれぞれの有義波高に該当するピークスペクトル周期 T_p の範囲を考慮しなければならない。この際における設計計算は浮体式洋上風力発電施設に作用する荷重が最大となるピークスペクトル周期値に基づくものとする。

【解説】

本条件は、設計荷重ケースの発電時（DLC1.1～1.5）、発電中の故障発生時（DLC2.1～2.5）、起動時（DLC3.1～3.3）、通常停止時（DLC4.1・4.2）、緊急停止時（DLC5.1）、待機中（DLC6.4）、待機中の故障発生時（DLC7.2）、曳航、設置及び保守時（DLC8.3）に適用される。

当該項目は、IEC 61400-3-1 6.External conditions 6.3.3 Marine conditions に記載。

3-1-2. 高波浪時海況 (SSS)

- (1) 浮体式洋上風力発電施設における発電中の終極荷重の計算では、高波浪時海況の確率論的モデルを通常風条件と組み合わせて考慮しなければならない。高波浪時海況モデルは、発電に該当する風速範囲のそれぞれの風速に対して一つの高波浪時海況を関連付けるものであり、それぞれの高波浪時海況の $H_{s,SSS}(V)$ は、一般に、サイト固有の気象海象データに外挿法を適用して求める。このとき、有義波高と風速との組合せの再現期間は 50 年とすること。すべての風速に対して、風条件に関係がない再現期間 50 年の H_{s50} を $H_{s,SSS}(V)$ の保守的な値として用いてよいこととする。
- (2) 気象海象データの外挿は、逆一次信頼性解析法を用いて行うことが望ましい。(IEC 61400-3-1 の規格を参照。)
- (3) 設計時においては、それぞれの有義波高に該当するピークスペクトル周期 T_p の範囲を考慮しなければならない。この範囲内での設計計算は、浮体式洋上風力発電施設に作用する荷重が最大となるようなピークスペクトル周期の値に基づくものとする。

【解説】

本条件は、設計荷重ケースの発電時 (DLC1.6)、発電中の故障発生時 (DLC2.6)、通常停止時 (DLC4.3) に適用される。

当該項目は、IEC 61400-3-1 6.External conditions 6.3.3 Marine conditions に記載。

(1)

風条件に関係がない再現期間 50 年の極値有義波高 H_{s50} を $H_{s,SSS}(V)$ の保守的な値

対象となるサイトにおいて、再現期間 50 年にあたる有義波高と風速との結合確率分布を求めるために必要なデータが得られない場合が多い。この場合は、風と波に相関がないと仮定し、波浪に関しては再現期間 50 年の極値有義波高を用いることで安全側の設計を実施する。

(2)

逆一次信頼性解析法

すべての環境外部条件の組合せに対して、いくつもの応答解析を行い、統計的外挿によって短期確率分布を求めるには膨大な計算量が必要である。仮に構造パラメータを 1 つ変更した場合、すべての計算を再度実施する必要がある、設計実務の観点からは便利な手法ではない。そこで、あらかじめ環境荷重効果の目標の分位値 (超過確率) に対応した環境外部条件の組を求めておき、それらに対して、応答解析により荷重効果を求め、その中の最大値をもって、目標の分位値に対応した設計荷重効果とするというものである。なお、

目標の分位値に対応した環境外部条件の組を求めるには IEC61400-3-1 Annex F に記載されている逆一次信頼性解析法 (IFORM) を用いることで実用的に評価できる。

(3)

荷重が最大となるピークスペクトルの周期値

設計時に適用する有義波高に該当するピークスペクトル周期 T_p の範囲内で荷重が最大となるケースを検討する。

【第2編 第1章 3. 3-1. 波】

3-1-3. 極値海況 (ESS)

- (1) 確率論的な極値海況モデルは、再現期間 50 年の極値有義波高 H_{s50} 及び再現期間 1 年の極値有義波高 H_{s1} の両方について考慮すること。
- (2) H_{s50} 及び H_{s1} の値は、サイトにおける測定値や波の追算データの解析から求めること。
- (3) 設計の際には、 H_{s50} 及び H_{s1} に該当するピークスペクトル周期 T_p の範囲をそれぞれ考慮しなければならない。
- (4) 設計計算は、浮体式洋上風力発電施設に作用する荷重が最大となるようなピークスペクトル周期値を基準とすること。

【解説】

本条件は、設計荷重ケースの待機中 (DLC6.1, 6.2, 6.3)、待機中の故障発生時 (DLC7.1)、曳航、設置及び保守時 (DLC8.2) に適用される。

当該項目は、IEC61400-3-1 6.External conditions 6.3.3 Marine conditions に記載。

3-2. 海流

- (1) 海流は、原則として空間的及び時間的な変化があるものの、一般には速度及び方向が一定で深さの関数としてだけ変化する水平方向に均一な流れとみなされる。海流の速度については次の成分を考慮すること。
- ・ 潮汐、高潮、大気圧の変化などによって生じる水中流
 - ・ 風によって生じる海面付近流
- (2) 全体的な流速はこれらの成分のベクトル和であり、波によって引き起こされる水粒子速度及び流速をベクトル的に加算しなければならない。なお、海流が波長と波の周期との関係に及ぼす影響は一般に小さいため無視してよい。
- (3) 海流が浮体施設及びタワーの流体学的疲労荷重に及ぼす影響は、波による波頂の水粒子速度に比べて、全体的な流速が遅い場合及び渦の離脱や移動氷盤による振動が発生しにくい場合には問題にならないとみられる。よって、設計の際には、サイト固有のデータを適切に評価し、疲労荷重の計算で海流を無視してよいかどうかを判断すること。

【解説】

(1)

海流における変動成分

海流は速度及び方向が一定として扱うことが一般的であるが、潮汐、高潮等によって生じる水中流、風によって生じる海面付近流は変動成分になる。水力荷重を検討する場合に海流とこれらの変動成分を加えた流速で評価する必要があるために変動成分の影響も考慮することが必要である。

(2)

流れは大きさと方向を持つベクトル量であるから、その和を取る場合には、合成ベクトルを計算しなければならない。

(3)

疲労には荷重の繰り返し数の影響が大きいことから、波による水力荷重がまず問題となる。しかし、波による波頂の水粒子速度に比べて有意な海流が重畳すれば荷重レベルが変化して疲労に影響を与える。また、渦の離脱や移動氷盤による振動が発生すれば、新たな疲労要因になる。従って、海流を無視してよいかどうかは適切に判断する必要がある。

3-2-1. 水中流

- (1) 水中流プロファイルは、流速 $U_{ss}(z)$ を SWL からの高さ z の関数と定義したとき水深 d に対する単純な指数法則によってその特性を表すことができる。

$$U_{ss}(z) = U_{ss}(0) [(z+d)/d]^{1/7}$$

海面流速 $U_{ss}(0)$ の 1 年再現値及び 50 年再現値は、サイトにおける測定値を解析して求めることができる。

- (2) 一般に水中流の方向は波向と同じと仮定して差し支えない。

【解説】

SWL は静水面の位置 ($z=0$) である。

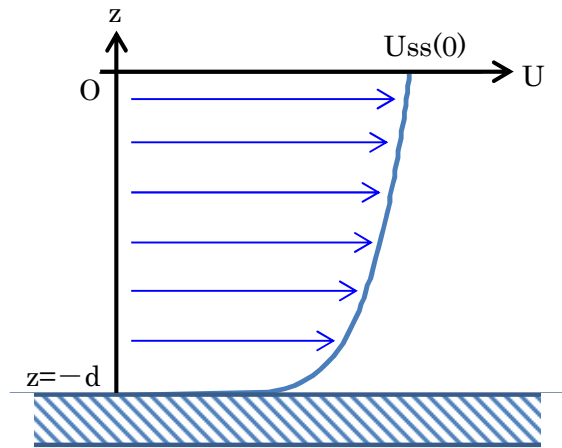


図 1-3-1 海流の流速プロファイルの概念図

3-2-2. 風による海面付近流（吹送流）

- (1) 風によって生じる水流は、水面流速 $U_w(0)$ から SWL 下 20m の深さでゼロとなる速度 $U_w(z)$ の線形分布としてその特性を表すことができる。

$$U_w(z) = U_w(0)(1 + z/20)$$

- (2) 風による海面流速は、方向が風向と一致しているとみなすことができ、以下から推算することができる。

$$U_w(0) = 0.01V_{1-hour}(z=10\text{ m})$$

ここに、

$V_{1-hour}(z=10\text{ m})$: SWL から 10 m の高さにおける風速の 1 時間平均値

$V_{1-hour}(z=10\text{ m})$ の 1 年再現値及び 50 年再現値をサイトにおける測定値を解析して求めることができる。これらの風速を上式に代入することで、風による海面流速の 1 年再現値及び 50 年再現値を推定することができる

【解説】

(1)

風によって生じる水流は、静止水面（SWL）における流速が $U_w(0)$ 、SWL 下 20m の深さでゼロとなるよう、深さに比例して減少するものとする。SWL 下 20m 以深は全てゼロとする。

3-2-3. 通常水流モデル（NCM）

- (1) 通常水流モデルは、通常波条件に関連した風によって生じる水流として定義される。通常、水流モデルには、潮汐及び高潮によって生じる水中流は含まれない。
- (2) 通常水流モデルは、通常及び高波浪時波条件(NSS 及び SSS)を含む終極荷重ケースにおいて仮定することで、それぞれの荷重ケースで風による水流の速度は対応する平均風速から推定することができる。

【解説】

本条件は、設計荷重ケースの発電時（DLC1.2 を除く）、発電中の故障発生時（DLC2.4 を除く）、起動時（DLC3.2, 3.3）、通常停止時（DLC4.1 を除く）、緊急停止時（DLC5.1）に適用される。

当該項目は、IEC61400-3-1 6.External conditions 6.3.3 Marine conditions に記載。

3-2-4. 極値水流モデル(ECM)

- (1) 極値水流モデルは、再現期間1年及び50年の水中流及び風によって生じる水流のサイト固有の組合せとして定義される。
- (2) 極値水流モデルは、極値波浪状態又は低減波浪状態(ESS)を含む終極荷重ケースにおいて仮定し、波と同じ再現期間の海流については、これらの荷重ケースについて仮定しなければならない。

【解説】

本条件は、設計荷重ケースの待機中（DLC6.4を除く）、待機中の故障発生時（DLC7.1）、曳航、設置及び保守時（DLC8.2）に適用される。

当該項目は、IEC61400-3-1 6.External conditions 6.3.3 Marine conditions に記載。

3-3. 水位

浮体施設の水力学的荷重の計算では、サイトにおける水位の変化（意味がある場合）を考慮しなければならない。ただし、通常波浪状態(NSS)を伴う終極荷重ケースでは例外を除き、平均海水面(MSL)に等しい一定水位を想定してよい。水位の定義については下図による。

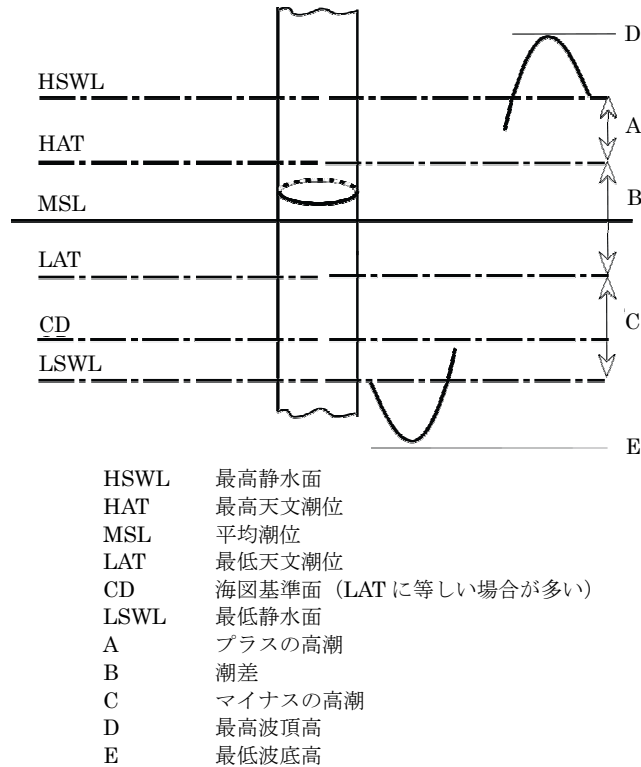


図 1-1 水位の定義

【解説】

浮体施設に対して、水位の変化は係留策の張力や係留策取り付け部の荷重に影響を与える他、喫水も変化させる可能性があるため、風車支持物に対して最も危険となる潮位を設計水位とする必要がある。ただし、水位変化の影響が軽微なことが明らかになった場合には、これを無視しても差し支えない。

水位の定義

本技術基準における上記の水位の定義は IEC 61400-3-1 に準拠したものである。一方、我が国では、港湾基準¹⁴⁾によるものが一般的に用いられている。両者の関係を図 1-3-2 に示す。ここで、既往最高潮位と HSWL、既往最低潮位と LSWL はほぼ同レベルと考えられる。一方、朔望平均満潮面は HAT より低く、朔望平均干潮面は LAT より高いものと考えられる。

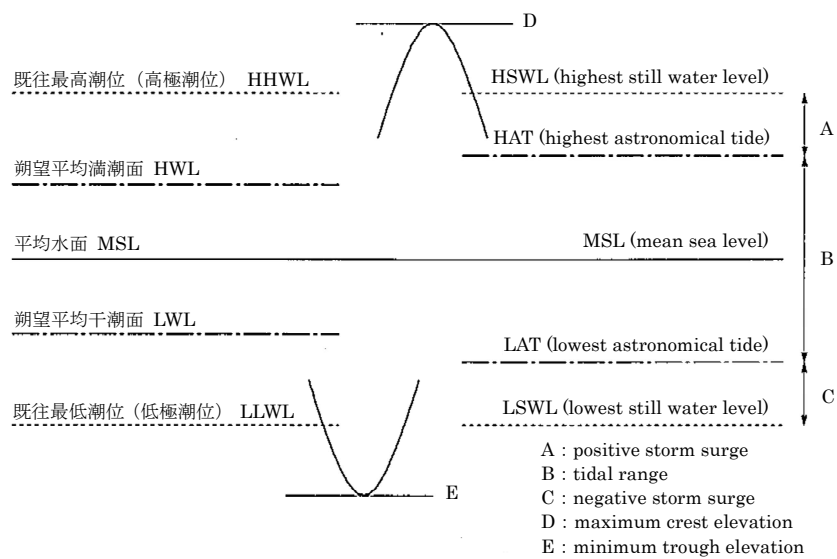


図 1-3-2 水位の定義¹⁻⁵⁾ (左: 港湾基準¹⁻⁴⁾、右: IEC 61400-3-1)

*** 天文最高高潮面 HAT**

1 年以上の潮汐観測データに基づいて算出された調和定数を使って、月の昇交点周期 18.6 年以上の計算で求めた最高水面。

*** 朔望平均満潮位 HWL、朔望平均干潮位 LWL**

朔 (新月) および望 (満月) の日から 5 日以内に観測された、各月の最高満潮面および最低干潮面を 1 年以上にわたって平均した高さの水位をそれぞれ、朔望平均満潮位および朔望平均干潮位。

3-3-1. 通常水位変動域 (NWLR)

- (1) 通常水位変動域は、再現期間1年の水面の変化に等しいと仮定する。水面の長期確率分布を表すサイト固有のデータが存在しない場合、通常水位変動域は最高天文潮位から最低天文潮位までの差に等しいと仮定することができる。
- (2) NWLR は、海況及び風速の結合確率分布に基づく通常海況モデル(NSS)の疲労荷重ケース及び終極荷重ケースにおいて仮定する。また、次の条件の終極荷重ケースでもこの NWLR 範囲を仮定する。
 - ・高波浪時海況(SSS)モデル
 - ・再現期間1年の波条件
- (3) 終極荷重の計算は、荷重が最大となる NWLR 範囲内の水位に基づくか、又は、NWLR 範囲内の水位の確率分布を適切に考慮して実施する。
- (4) 水力学的疲労荷重の計算では、水位の変化が疲労荷重に及ぼす影響は無視できる程度のものであるか、又は、平均海水面以上の一定水位を想定することでその影響を保守的に見積もることができることを、設計の際には必要に応じて適切な解析により実証すればよい。

【解説】

(1)

最高天文潮位、最低天文潮位

最高天文潮位及び最低天文潮位は、天文学的条件と平均的な気象条件とのあらゆる組み合わせについて発生が予測できる静水面の最高水位及び最低水位である。

(2)

海況及び風速の結合確率分布に基づく通常海況モデル(NSS)への仮定

通常海況モデル(NSS)では、有義波高、ピークスペクトル周期及び関連する平均風速と合わせて選定しなければならない。水深など水位変動のパラメータが結合確率に影響するために基準となる水位変動を選定する必要がある。また同様に高波浪時海況(SSS)モデル及び再現期間1年の波条件にも影響するために上記水位変動を適用する。

(3)

荷重が最大なる水位

安全性を考慮する上で終局荷重計算を実施するが、荷重が最大になるケースをもとに評価する必要がある。そこで、設計者は荷重が最大となる NWLR の範囲内の水位か NWLR 範囲内の確率分布をもとに50年再現の変動のどちらか最大になるケースを検討する必要がある。

(4)

水力的荷重計算の計算における水位の変化が及ぼす影響

水力的疲労荷重の計算において、水位の変化が疲労荷重に及ぼす影響を無視するには、水位変化の影響の程度を実証する必要がある、研究データや適切な解析によって検証することが必要である。

【第2編 第1章 3. 3-3. 水位】

3-3-2. 極値水位変動域 (EWLR)

- (1) 極値水位変動域は、再現期間 50 年の波条件に対応する終極荷重ケースにおいて仮定する。荷重計算は、浮体施設に作用する荷重が最大になるような水位を基準として行なうこと。
- (2) 浮体施設の水力的荷重、氷荷重及び浮力の計算用として、対応する設計変動水位を求めること。
- (3) 水位を含む気象海象パラメータの長期結合確率分布データが存在しない場合、設計の際には少なくとも次の水面に基づいて計算を実施しなければならない。
 - ・再現期間 50 年の最高静水位(最高天文潮位とプラスの高潮との適切な組合せに基づく)
 - ・再現期間 50 年の最低静水位(最低天文潮位とマイナスの高潮との適切な組合せに基づく)

【解説】

(1), (2)

極値水位変動域は、再現期間 50 年の波条件に対応するものであり、長期結合確率分布データから求められる。当該データが存在しない場合には、次の(3)による。

(3)

最高静水位、最低静水位

最高天文潮位及び最低天文潮位は、天文学的条件と平均的な気象条件とのあらゆる組み合わせについて発生が予測できる静水面の最高水位及び最低水位である。しかし、潮位の変化には気象学的に発生した基本的に不規則である高潮が重なるため、全体的な静水面が最高天文潮位を越えることもある。そこで、設計に用いる最高静水位、最低静水位には、高潮の影響を考慮するようにする。

3-4. 海氷

- (1) サイトによっては海氷による荷重がクリティカル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や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もあるほか、移動する氷盤が長期間にわたって浮体施設に衝撃を与えた結果、著しい疲労荷重を引き起こすこともあることに留意すること。
- (2) 氷荷重の計算に関する指針について IEC 61400-3-1 の規格を参照すること。

【解説】

(1)

氷の静的荷重、動的荷重

浮体施設に作用する海氷荷重は、静的荷重及び動的荷重の両方が存在する。海岸線に近い湖や海では氷は移動せず、定着氷として取り扱われる。そのため、定着氷板は本技術基準の対象外となる。定着氷板においては結氷板の温度変動か水位変化のいずれかによって静的荷重が生じるが、以上の理由から浮体式風力発電施設においては考慮する必要はない。

動的荷重は、風及び潮流によって引き起こされる氷盤の動きによって、また氷盤及びその破片が浮体施設と接触することによって生じる。

(2)

氷荷重の計算に関する指針

我が国においては、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差し支えない。

海氷荷重の算出においては、浮体式風力発電施設を海水域へ設置する場合、温度変化に由来する定着氷板による静的荷重を考慮する必要はない。同様に水位変動及びアーチ効果による静的荷重を考慮する必要はない。

荷重の計算方法については、IEC61400-3-1 の Annex D または ISO 19906 を参照すること。

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。次のパラメータは、統計データの例である。

- ・ 氷厚さ (IEC では 50 年再現、ISO では 100 年再現としている)
- ・ 流氷塊を含んだ風及び流れによるリスク
- ・ 変動する水位によって生じる力のリスク
- ・ 氷の密集の頻度.

3-5. 海洋付着生物

- (1) 海洋付着生物は、浮体施設の重量、形状及び表面状態に影響し、その結果、海洋付着生物が浮体施設の水力学的荷重、動的応答、アクセス性及び腐食度に影響を及ぼす場合がある。
- (2) 場所によっては、海洋付着生物が顕著になることがあり、浮体施設的设计時にあつては考慮しなければならない。
- (3) 海洋付着生物は大きく、硬質（一般に貝類やフジツボ）及び軟質（一般に海苔やコンブ類）に分けられる。硬質の付着物は一般に軟質の付着物より厚さは薄い粗度が大きい。一般に、構造物を設置するとまもなく海洋生物がコロニーを形成するが、数年後には成長率が鈍る。
- (4) 海洋付着生物の性質及び厚さは、構造部材の海面に対する位置、卓越流に対する向き、年月及び保守の方針によって異なるが、塩分、酸素濃度、pH 値、水流、温度などの他のサイト条件にも左右される。
- (5) 腐食環境は、通常、浮体施設の上部浸水部分及び飛まつ帯の下部に付着した海洋付着生物による影響を受ける。付着生物の種類、その他の局部条件によって、実質的な影響は腐食性を進行させる場合もあれば遅らせる場合もある。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、海洋付着生物の付着は、コーティング、ライニング、電気防食などの腐食防止のシステムに影響を及ぼすこともある。

【解説】

抗力及び慣性力を求める際に海洋生物の付着効果を考慮しなければならない。これは粗度の増加による抗力係数の増加及び直径または断面積の増加として生じる。風車支持構造物の有効直径 D は、 D_c を付着がない状態での外形、 t_m を海洋生物の平均付着厚さとして、 $D = D_c + 2t_m$ 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 $\Delta = k_s / D$ 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。

海洋生物の成長厚さは建設地点に依存するので、現地測定に基づいて海洋生物の成長厚さ及びその水面深さ依存性を調べるのが望ましい。参考までに参考文献 1-6) に示されている目安の例を表 1-3-2 に示す。ちなみに我が国周辺海域では参考文献 1-7) に 38mm～50mm が目安となるとされている。

以上は参考文献 1-5) からの引用。

表 1-3-2 海洋生物の平均付着厚さの例¹⁻⁶⁾

海域	海洋生物の平均付着厚さ t (mm)	
ノルウェー海 (北緯 59°~72°)	60 (平均水面からの深さが-2~40m)	30 (平均水面からの深さ>40m)
北海中央部、北部 (北緯 56°~59°)	100 (平均水面からの深さが-2~40m)	50 (平均水面からの深さ>40m)
北海南部	150 (海面~LAT-10m)	
中央及び南部カルフォルニア	200	
メキシコ湾	38 (LAT+3~50m 深さ)	
西部アフリカの洋上	300 (LAT より上のスプラッシュ ゾーン)	100 (LAT+3~50m 深さ)

LAT(Lowest Astronomical Tide) : 天文最低潮位

4. その他の環境条件

その他の環境条件として下記について考慮すること。また、この章に規定されない環境条件であって、管海官庁が必要と認めた場合においては、その条件についても考慮の上、設計すること。

【解説】

浮体式洋上風車を設計する場合、設置海域の風、波の条件を考慮することは当然であるが、安全性を考慮する上で非常時である地震、津波等の環境荷重も検討しておくことが重要である。

【第2編 第1章 4. その他の環境条件】

4-1. 地震

- (1) 地震の影響について適切に考慮すること。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。
- (2) 津波の影響について適切に考慮すること。津波は、設置海域周辺において過去発生した最大津波を考慮しなければならない。ただし、水深が十分深い場合は、津波による影響は、潮位変動及び海流として差し支えない。
- (3) 地震及び津波を考慮する際の風、波等の環境荷重は通常状態のものとして差し支えない。
- (4) 地震が生じた場合の地盤の液状化について考慮しなければならない。

【解説】

(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などが利用できる。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例等をもと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)に地域別に定めることとされている。

地震の影響の評価法

付録1を参照のこと。

(2)

過去発生した最大レベルの津波

過去発生した津波について、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、各自体で策定されている防災計画や防災アセスメント調査などが利用できる。また、設置海域が想定されれば、周辺の断層やプレートの状況から想定される最大震度をもとに、参考表 1-3(2)、1-9 に示す津波データベース及び津波シミュレーションで計算している例もある。これらのデータや数値シミュレーションをもと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。

津波の影響の評価法

付録 1 を参照のこと。

(3)

地震及び津波を考慮する際の風、波等の環境荷重

風、波等の環境荷重は、地震また連動して発生する津波は台風等の災害と相関はないので通常状態として取り扱う。

(4)

地盤の液状化

地震が発生すると陸上では液状化が発生するケースが見られる。同様に海底でも液状化が発生する可能性があるために、当該施設において液状化して係留アンカーが抜けることがリスクとして考えられる。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する際に注意してサンプリングし、調査データをもとに係留アンカーの設置位置などを検討することが望ましい。

4-2. 海底変形及び洗掘

浮体施設の係留システムに対して、海底変形及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。

【解説】

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。本技術基準では、水深の深い海域を想定しているため、波浪に起因するものは考えにくいですが、流速を調査しておく必要がある。海流・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できる。

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。

4-3. 積雪荷重

浮体施設及びタワーに対する積雪の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。

【解説】

積雪荷重については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、ブレードや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。

屋根の単位面積当たりの積雪荷重 S は、以下の式で計算される。

$$S = \rho d \quad (1-4-1)$$

ここで d は垂直積雪量、 ρ は積雪の単位荷重である。

建築基準法では、ナセル上の積雪荷重に関する形状係数は一般の建築物屋根に対する屋根形状係数と同じ取り扱いである。ただし、特定行政庁が雪の性状等を考慮してこれと異なる数値を規則で定めた場合は、ナセルについてもその数値を用いるものとする。なお、ナセル上面の形状が、一般の屋根でいう雪止めのように積雪の滑落を妨ぐ構造である場合には適用外となる。

以上は参考文献 1-5)からの引用。

参 考 文 献

- 1-1) 石原孟、山口敦：モンテカルロシミュレーションと MCP 法を用いた混合気候における極値風速の予測、日本風工学会論文集、第 37 巻第 4 号(通号第 133 号)、2012
- 1-2) 土木学会海岸工学委員会研究現況レビュー小委員会：新しい波浪算定法とこれからの海域施設の設計法、2001
- 1-3) 磯崎一郎、鈴木靖：波浪の解析と予報、東海大学出版会、1999
- 1-4) (社) 日本港湾協会、港湾の施設の技術上の基準・同解説、2007
- 1-5) (社) 土木学会、風力発電設備支持物構造設計指針・同解説 [2010 年度版]
- 1-6) Det Norske Veritas, DNV-OS-J101 : Design of Offshore Wind Turbine Structures, 2007
- 1-7) 沿岸開発技術研究センター：ジャケット工法技術マニュアル、2000
- 1-8) IEC 61400-3-1:2019 Wind energy generation systems – Part 3-1: Design requirements for fixed offshore wind turbines
- 1-9) ISO 19906:2019 Petroleum and natural gas industries – Arctic offshore structures

極値統計解析法

本項では、再現期間 50 年の有義波高の算出方法を例として、極値統計解析法の概要を示す。詳しくは参考文献 参 1-1-1), 参 1-1-2)を参照されたい。

極値統計解析の元となるデータは、サイトにおける観測値が望ましいが、それが得られない場合には推算値を用いることとなる。データ期間は既往の波の算定法との整合性を考え、港湾基準に基づき 30 年以上が望ましい。

極値統計解析に用いるのは、年最大値のように期間を定めた期間最大値資料か、たとえば波高 6m 以上のように条件を定めた極大値資料である。これら資料に最も適合する極値分布関数を設定することによって、再現期間 50 年の有義波高を求める。50 年確率波高に対応する有義波周期は波高と周期の散布図より求める。以下に、具体的手順を示す。

当てはめ対象の極値分布関数としては、表 1 に示す極値 I 型分布（グンベル分布）、極値 II 型分布（フレッシュェ分布）及び極値 III 型分布（ワイブル分布）を候補とする。

ここで、極値 II 型と III 型はパラメータが 3 個（A、B、k）となって解析が煩雑になるため、形状母数 k として、たとえば極値 II 型は 2.5、3.33、5.0、10.0 の 4 種類に、極値 III 型は 0.75、1.0、1.4、2.0 の 4 種類に固定することで、計 9 種類の 2 母数型分布関数を当てはめ対象とする。

表 1 極値分布関数

	非超過確率	確率密度関数
極値 I 型 (グンベル分布)	$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x-B}{A}\right)\right] \quad : -\infty \leq x < \infty$	$f(x) = \frac{1}{A} \exp\left[-\frac{x-B}{A} - \exp\left(-\frac{x-B}{A}\right)\right]$
極値 II 型分布 (フレッシュェ分布)	$F(x) = 1 - \exp\left[1 - \left(\frac{x-B}{kA}\right)^k\right] \quad : B - kA \leq x < \infty$	$f(x) = \frac{1}{A} \left(1 + \frac{x-B}{kA}\right)^{-(1+k)} \exp\left[-\left(1 + \frac{x-B}{kA}\right)^k\right]$
極値 III 型分布 (ワイブル分布)	$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x-B}{kA}\right)^k\right] \quad : B \leq x < \infty$	$f(x) = \frac{k}{A} \left(\frac{x-B}{kA}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{x-B}{kA}\right)^k\right]$

以下では、極値 III 型（ワイブル分布）への当てはめについて示す。

1)与えられたデータを大きい順に並び替えて順序統計量 $x(m)$ ($m=1, 2, \dots, N$, N :標本数)とする。

2)式(1)、表 1 及び表 2 により、 $N_T=N$ として $x(m)$ に対する非超過確率 F_m を求める。

$$F_m = 1 - \frac{m - \alpha}{N_T + \beta} \quad (m=1, 2, \dots, N: \text{標本数}) \quad (1)$$

表2 プロットイング・ポジション公式の係数

	α	β
極値Ⅰ型 (グンベル分布)	0.44	0.12
極値Ⅱ型分布 (フレッシュェ分布)	$0.44 + 0.52/k$	$0.12 - 0.11/k$
極値Ⅲ型分布 (ワイブル分布)	$0.20 + 0.27/\sqrt{k}$	$0.20 + 0.23/\sqrt{k}$

3)それぞれの F_m に対して基準化変量 $y(m)$ を計算する。例えば、グンベル分布、ワイブル分布では以下のように表される。

$$y(m) = -\ln\{-\ln F_m\} \quad \text{グンベル分布} \quad (2)$$

$$y(m) = [-\ln\{1 - F_m\}]^{1/k} \quad \text{ワイブル分布}$$

4)順序統計量 $x(m)$ が基準化変量 $y(m)$ の直線回帰式で表されるとして最小自乗法により、尺度影響母数 \hat{A} と位置母数 \hat{B} を推定する。併せて、直線回帰による相関係数を評価しておく。この際、波高が高い部分と低い部分で傾向が異なる場合には、高い部分のみを用いることが推奨される。

$$x(m) = \hat{A}y(m) + \hat{B} \quad (3)$$

5)以下の3種類の基準に基づき、9種類の中から最適な分布関数を決定する。

REC 基準：予め分布関数毎に相関係数の残差の95%非超過確率を求めておき、極値データをその分布関数に当てはめた時の相関係数の残差がこの限界値を超えた時は不適合としてその関数を棄却する基準

DOL 基準：データの中の最大値を全体の平均値と標準偏差を用いて無次元化し、この値が当てはめる分布関数における5%値以下、あるいは95%値以上であれば不適合としてその関数を棄却する基準

MIR 基準：相関係数の1に対する残差の平均値が分布関数によって異なることを考慮し、標本の相関係数の残差と当てはめた分布における残差平均値との比率が最小のものを最適と判断する基準

6)所定の再現期間 $R(50 \text{ 年})$ に対する再現確率統計量 x_R を計算する。

$$x_R = \hat{A}y_R + \hat{B} \quad (4)$$

一例として、ワイブル分布に対する基準化変量 y_R は、単位期間当たりの平均発生率 $\lambda(=N^T/K)$ 、(K は年数、年最大値資料では $\lambda=1$) を用いて次式で示される。

$$y_R = [\ln(\lambda R)]^{1/k} \quad (5)$$

参考文献

参 1-1-1) 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

参 1-1-2) (社)日本港湾協会（国土交通省港湾局監修）：港湾の施設の技術上の基準・同解説（上巻）、2007

（部分改訂の内容が次に記載：

http://www.mlit.go.jp/kowan/kowan_tk5_000017.html)

建築基準法による風の算出方法

本項では、再現期間 50 年の平均風速、極値風速、乱流強度等の算出方法の概要を示す。詳しくは参考文献参 1-2-1), 参 1-2-2)を参照されたい。

平均風速の 50 年再現期待値

陸上の風車では、建築基準法による設計式を用いることが多い。洋上風車に同様の考え方を当てはめると、建築基準法における陸上の平坦な地形に該当する。10 分間平均風速の 50 年再現期待値は以下の式 1)を用いている。

$$V_{hub,50yr} = E_{tV} E_r V_0 \quad (1)$$

ここで、

V_0 : 基準風速。地表面の粗度区分 II の地上 10m における再現期間が概ね 50 年である暴風の 10 分間平均風速に相当する値

E_r : 平均風速の高さ方向の分布を表す係数。表 1 に掲げる式によって算出する

E_{tV} : 地形による平均風速の割増係数。以下の a)、b)に掲げる方法式によって算出する

表 1 E_r を定める式

H が Z_b 以下の場合	$E_r = 1.7 \left(\frac{Z_b}{Z_G} \right)^\alpha$
H が Z_b を越える場合	$E_r = 1.7 \left(\frac{H}{Z_G} \right)^\alpha$

上表において、 Z_b 、 Z_G 及び α は地表面粗度区分に応じて表 2 に掲げる数値

表 2 平均風速の高度補正係数を定めるためのパラメータ (洋上)

地表面粗度区分		Z_b (単位 m)	Z_G (単位 m)	α
I	都市計画以外にあって、極めて平坦で障害物がないものとして特定行政庁が規制で定める区域	5	250	0.10

※海面は、粗度区分 I に該当する

地形による平均流速の割増係数 E_{iv} と検査対象風向 θ_d は以下のいずれかの方法により求める。

a) 風向特性を考慮しない方法

地形による平均風速の割増係数 E_{iv} は、実地形上と平坦地形上の風向別の気流解析に基づき、式 (2) により定める。

$$E_{iv} = \max(E'_{iv}, 1) \quad , \quad E'_{iv} = \left(\frac{U(x, y, H_h, \theta)}{U^P(x, y, H_h)} \right) \quad (2)$$

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設置サイトのハブ高さ H_h における θ 風向の平均風速、 $U^P(x, y, H_h)$ 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サイトのハブ高さ H_h における平均風速である。また、検査対象風向 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。

b) 風向特性を考慮する方法

割増係数 E_{iv} は、風車設置サイトを対象とした台風シミュレーションの結果に基づき、式 (3) により定める。

$$E_{iv} = \max(E'_{iv}, 1) \quad , \quad E'_{iv} = \left(\frac{U_{50}(x, y, H_h)}{U_{50}^P(x, y, H_h)} \right) \quad (3)$$

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設置サイトのハブ高さ 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 P の平坦地形上のハブ高さ H_h における年最大風速の 50 年再現期待値である。また、検査対象風向 θ_d は、 $U_{50}(x, y, H_h)$ に対応する風向とする。

極値風速

安全性を評価する場合は極値風速も必要となる。極値風速は 3 秒間時間平均値とし、再現期間 50 年の極値風速 V_{e50} 及び再現期間 1 年の極値風速 V_{e1} を高さ z の関数で定義すると、以下のようなになる。

$$V_{e50}(z) = 1.4V_{ref} \left(\frac{z}{z_{hub}} \right)^{0.11} \quad (4)$$

$$V_{e1}(z) = 0.8V_{e50}(z)$$

定常極値風モデルでは、 $\pm 15^\circ$ の範囲で一定のヨー・ミスアライメント（風向と風車方向の差）を仮定することによって、短時間の平均風向からの偏向を設定する。

乱流極値風モデルでは、10 分間平均風速は z の関数として 50 年及び 1 年の再現期間で以下の式になる。

$$V_{50} = V_{ref} \left(\frac{z}{z_{hub}} \right)^{0.11} \quad (5)$$

$$V_1 = 0.8V_{50}(z) \quad (6)$$

主流方向乱流の標準偏差は以下のとおり。

$$\sigma_1 = 0.11V_{hub} \quad (7)$$

暴風時（50 年再現期待値）の乱流強度評価

ハブ高さにおける設計風速時の乱流強度の風方向成分 I_{h1} は、平坦地形上の乱流強度 I_p に地形による補正係数 E_{tl} を乗じたものとし、式(8)により定める。

$$I_{h1} = E_{tl} I_p \quad (8)$$

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

ただし、 H_h はハブ高さ(m)、 Z_b 、 Z_G 、 α は風速の鉛直成分を表すパラメータであり、地表面粗度区分に応じて定める。なお、高さ Z での乱流強度は H_h の代わりに Z を上式に代入して求める。

地形による乱流強度の補正係数 E_{tl} は、次式により定める。

$$E_{tl} = \max(E_{tS}/E_{tV}, 1) \quad (9)$$

ここで、 E_{tV} は上述の地形による平均流速の割増係数の項により求める。また、地形による変動風速の補正係数 E_{tS} は式 (10) により定める。

$$E_{tS} = \frac{\sigma_u(x, y, H_h, \theta_d)}{\sigma_u^P(x, y, H_h)} \quad (10)$$

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 での風方向変動風

速の標準偏差であり、 $\sigma_u^P(x,y,H_h)$ は地表面粗度区分 P の平坦地形上のハブ高さ H_h における風方向の変動風速の標準偏差である。

疲労荷重評価のための平均風速出現頻度

疲労荷重を求める際に必要となるハブ高さでの風速の年間出現頻度 $f(U)$ は、式(11)に示すワイブル分布により表す。

$$f(U) = \frac{k}{c} \left(\frac{U}{c} \right)^{k-1} \exp \left\{ - \left(\frac{U}{c} \right)^k \right\} \quad (11)$$

ここで、 c と k はそれぞれワイブル分布の尺度係数と形状係数であり、観測から求めた年間平均 \bar{U} と標準偏差 σ_U から式 (12) と式 (13) により求める。

$$\int_0^{\infty} \frac{k}{c} \left(\frac{U}{c} \right)^{k-1} \exp \left[- \left(\frac{U}{c} \right)^k \right] U dU = \bar{U} \quad (12)$$

$$\int_0^{\infty} \frac{k}{c} \left(\frac{U}{c} \right)^{k-1} \exp \left[- \left(\frac{U}{c} \right)^k \right] (U - \bar{U})^2 dU = \sigma_U^2 \quad (13)$$

$\kappa = 2$ の場合は、レイリー分布と呼ばれ、次式により表される。

$$f(U) = \frac{\pi}{2} \frac{U}{\bar{U}^2} \exp \left\{ - \frac{\pi}{4} \left(\frac{U}{\bar{U}} \right)^2 \right\} \quad (14)$$

ワイブル分布は尺度係数と形状係数によって表される 2 パラメータモデルであるが、レイリー分布は年平均風速のみをパラメータとするモデルであり、扱いが簡単なために良く用いられる。IEC61400-1 は、風速の出現分布としてレイリー分布を用いている。また、風車のクラス毎の平均風速は表 3 に示す値で定められている。

表 3 年平均風速

風車クラス	年平均風速 \bar{U} (m/s)
I	10
II	8.5
III	7.5

風速別乱流強度

疲労荷重及び発電時の最大風荷重を求める際に用いる風方向の乱流強度 I_l は非超過確率 90%に相当するものを用い、次式により定める。

$$I_1 = \frac{I_{ref}(0.75U + b)}{U} \quad (15)$$

ここで、 b は 5.6m/s であり、 I_{ref} は風速 15m/s 時の乱流強度の期待値である。 I_{ref} は観測値から直接求めるか、設計風速 U_h に対応する乱流強度 I_{hl} から次式により算出する。

$$I_{ref} = I_{hl} \frac{U_h}{0.75U_h + b} \quad (16)$$

ここで、 b は 3.75m/s である。

なお、ウィンドファーム内における乱流強度を評価する際には、近傍風車及びその制御の影響を適切に考慮する必要がある。その場合、たとえば IEC61400-1 Annex E “Wake and wind farm turbulence” に示されているモデルを用いることが考えられる。

表 4 風速 15m/s 時の乱流強度の期待値 I_{ref}

カテゴリ	$I_{ref}(-)$
A	0.16
B	0.14
C	0.12

参考文献

- 参 1-2-1) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説、2004
 参 1-2-2) 土木学会：風力発電設備支持物構造設計指針・同解説、2010

参考表 1-1(1) 観測データベース (その1)

分類	機関	観測要素	観測地点 (データ範囲)、 観測期間	備考
波	国土交通省港湾局 (独立行政法人港湾空港技術研究所)	波浪 (波高・周期・波向)	観測地点: 国土交通省港湾局管轄の全国港湾沖 観測期間: (拠点観測による集中処理) 1970年～ (注) 観測点により観測期間は異なります。	【観測データの入手方法①】 独立行政法人港湾空港技術研究所の海洋情報研究領域海象情報研究チームの「全国港湾海洋波浪情報網(ナウファス)」のHPから2001年以降の観測データを無料ダウンロードすることが可能。 http://www.pari.go.jp/unit/kaisy/nawphas/ 【観測データの入手方法②】 一般財団法人沿岸技術研究センターのHPの「各出版物のご紹介」から、「全国港湾海洋波浪観測資料(NOWPHAS)」を選択すると、1991年から2003年の観測データを購入(¥40,000-)することが可能。 http://www.cdit.or.jp/ 【統計資料】 「全国港湾海洋波浪観測30か年統計(NOWPHAS 1970-1999)」(港湾空港技術研究所資料1035、2002年12月)
風 波 潮位	国土交通省河川局 (国土技術政策総合研究所 河川部海岸室)	風向・風速 波浪 (波高・周期・波向) 潮位	観測地点: 国土交通省河川局管轄の全国海岸 観測期間: 1956年～ (注) 観測点により観測期間は異なります。	【観測データ】 平成7年からは毎正時の時系列データを収録した「CD-ROM版 海象年表」を刊行。 【統計資料】 「海象年表25か年統計」(国土技術政策総合研究所資料第274号、2005年11月)
波	独立行政法人 水産総合研究センター 水産工学研究所	波浪	観測地点: 全国各地の漁港 (28港) 観測期間: 1969年～ (注) 観測点により観測期間は異なります。	【観測データ】 独立行政法人水産総合研究センター水産工学研究所の「漁港波浪データベース」 http://database.nriffe.affrc.go.jp/wavedb/ 独立行政法人水産総合研究センターでは水産庁から水産基盤整備調査委託事業を受け、漁港で観測された波浪データをデータベース化してインターネット上での公開を行うことになりました。漁港波浪データベースは、各観測機関からご提供して頂いた一次処理データを、関係機関のご了解を得て、そのまま公開しています。
潮位	国土地理院	潮位 (30秒潮位、毎時潮位、日平均潮位、月平均潮位、年平均潮位、満干潮位)	観測地点: 国土地理院管轄の全国25箇所の験潮場 観測期間: 1894年～ (注) 観測点により観測期間は異なります。	【観測データ】 2006年以降のデータは、HPからダウンロード可能。 http://tide.gsi.go.jp/index.html
潮位	海岸昇降検知センター	潮位年表 (月平均潮位) 年平均潮位	国土地理院、気象庁、海上保安庁、その他の機関が観測した潮位データ。	海岸昇降検知センターは、国や地方自治体、民間の機関がそれぞれの目的で設置している潮位観測施設の観測記録から地殻活動を検出し、地震予知研究に役立てるため、これらの資料を統一した方法で迅速に取りまとめて公表することを目的に、昭和40年に設置されたもので、その事務は国土地理院が担当しています。 http://cais.gsi.go.jp/emdc/centerindex.html
気象 海象 全般	気象庁	地上気象観測データ 台風データ 波浪観測データ 船舶海上気象データ 海水観測 (統計) データ 潮汐観測データ 等々	全国の気象官署・アメダス等の地上気象観測所、船舶海上気象等の海洋観測、等々気象・海象観測を実施している。	【観測データ】 気象庁HPからダウンロード可能。 過去の気象データ検索 http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php 海洋のデータバンク http://www.data.kishou.go.jp/kaiyou/db/index.html 【販売しているデータ】 気象庁の観測データは、一般財団法人気象業務支援センターからCD等で販売されている。 http://www.jmbc.or.jp/hp/offline/cdoff1.html
海象 全般	海上保安庁海洋情報部 日本海洋データセンター (JODC)	各層データ (水温、塩分、等)、 海流データ、 潮汐データ、 海洋生物、 沿岸海上気象、 定置水温、 流速計	観測要素によって、観測地点や観測期間が異なりますので、JODCのHPで確認してください。 http://www.jodc.go.jp/index_j.html	JODCは、海上保安庁、気象庁、水産庁、および防衛省、地方政府機関、大学、企業を含む他の組織によって観測されたデータを受領しています。同様に国際海洋データ・情報交換システム(IODE)によって外国のデータも取得しています。 国内外の海洋調査機関、各国海洋データセンターとのデータ交換により収集した定常的な海洋観測データ、国際共同プロジェクトおよび二国間協定による米国、カナダとのデータ交換により収集した水温、塩分、海流、潮汐、潮流、地磁気、重力、水深等の海洋データを分類・評価・整理して、項目毎にファイルを作成して保管しています。 データ交換、個々の提供依頼に対しては保有ファイルから所要データを抽出し、磁気テープ、フロッピーディスク、CD-ROM、印字出力等の形で提供しています。 http://www.jodc.go.jp/index_j.html

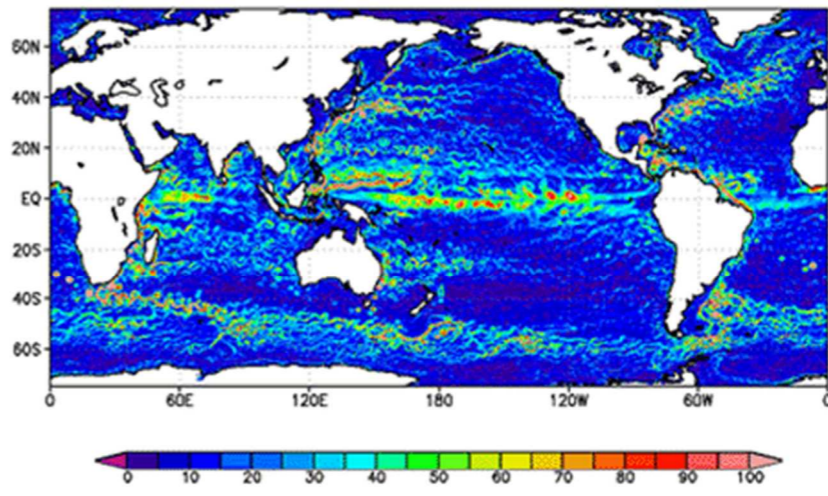
参考表 1-1(2) 観測データベース (その2)

機関	データ要素	データ範囲 データ格納期間	備考	
NOAA NODC (NOAA National Oceanographic Data Center)	Joint Archive for Shipboard ADCP	要素 : 流向流速 解像度 : 水深 10m 間隔 時間 5 分間隔 水平距離 2km 間隔	範囲 : 全球 期間 : 1980 年代後半～現在 航行中の船舶上にて音響流向流速計 (ADCP) により観測されたデータ。 http://www.nodc.noaa.gov/General/adcp.html データ入手先 JASADCP HP http://ilikai.soest.hawaii.edu/sadep/main_inv.html	
	GTSPSP ; The Global Temperature and Salinity Profile Program	要素 : 塩分、音速、海面温度、等	範囲 : 全球 期間 : 1990 年～現在 高品質な全球の海水度塩分を維持する世界気象機関 (WMO) および政府間海洋学委員会 (IOC) による国際共同プログラムで管理されているデータ。データは、豪州、カナダ、フランス、ドイツ、日本、アメリカによりデータ提供がされている。 http://www.nodc.noaa.gov/GTSPSP/overview/aboutGTSPSP.html データ入手先 ユーザー定義データセット http://www.nodc.noaa.gov/cgi-bin/gtspp/gtsppform01.cgi リアルタイムデータセット http://www.nodc.noaa.gov/GTSPSP/access_data/gtspp-rt.html 最良コピーデータセット http://www.nodc.noaa.gov/GTSPSP/access_data/gtspp-bc.html	
	Global Argo Data Repository	要素 : 水温、塩分データ 観測層 : 水深 2000～0m 観測点 : 561 点(2012 年 7 月時点)	範囲 : 2012 年 7 月時点の観測地点(下図)  期間 : 2000 年～現在	地球全体の海洋変動をリアルタイムに捉えることを目指した国際プロジェクト Argo において、収集されたデータ。海洋上層 2000m の水温、塩分を Argo フロートによりリアルタイムに観測する。Argo 計画に参加している国は、20 カ国以上に上る。 http://www.argo.ucsd.edu/ データ入手先 http://www.nodc.noaa.gov/argo/accessData.htm
	WOD (World Ocean Database)	要素 : 海底深度、海水色、波向、波高、海面状態、風力、波周期、風向、風速、気圧、乾球温度、湿球温度、気象条件、雲形、雲量、水平視程、海面温度、大気湿度、海面塩分	範囲 : 全球  期間 : 1962 年～現在	世界の様々な観測機による海洋観測データより構成される海洋データベース ftp://ftp.nodc.noaa.gov/pub/WOD09/DOC/wod09_intro.pdf ftp://ftp.nodc.noaa.gov/pub/WOD09/DOC/wod09readme.pdf データ入手先 http://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOD/pr_wod.html
	WOA09 (World Ocean Atlas Series)	要素 : 温度、塩分、溶存酸素、AOU、酸素飽和度、リン酸塩、ケイ酸塩、硝酸塩など データ : 年平均、季節平均、月平均 解像度 : 1°グリッド、5°グリッド		1°グリッドの客観的に解析された年平均、季節平均、月平均の気候値。また、1°グリッド、5°グリッドの標準的な深さレベルに補間された統計データも含む。 ftp://ftp.nodc.noaa.gov/pub/WOA09/DOC/woa09documentation.pdf データ入手先 http://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOA09/pr_woa09.html (全データセットの DVD をオンライン・ストアでも注文できる)

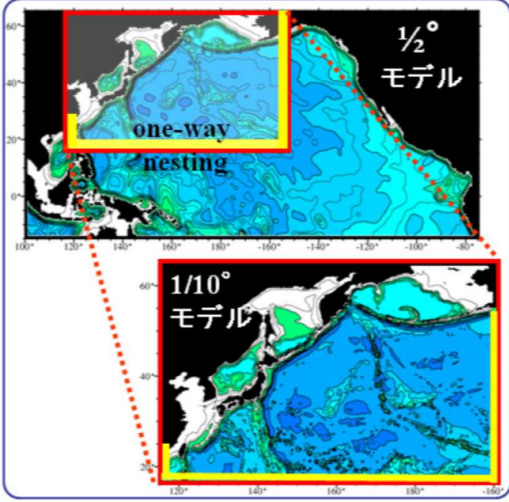
参考表 1-1(3) 観測データベース (その3)

機関	データ	データ要素	データ範囲 データ格納期間	備考
NOAA NODC	International Ocean Atlas Series Volumes 1-12	要素 : 水温、塩分、溶存酸素		このアトラスは 1950～2003 年の 54 年の観測期間における気候システムおよび対象海域の傾向を定量的に述べるものである。 データソースは WDC : 世界資料センター (主にロシア/オプニンスクと米国/シルバースプリング) である。 ftp://ftp.nodc.noaa.gov/pub/data.nodc/woa/PACIFIC09/DOC/english.pdf データ入手先 http://www.nodc.noaa.gov/OC5/PACIFIC2009/
NOAA NCDC (National Climatic Data Center)	NOAA NCDC (NOAA National Climatic Data Center)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 全球過去日毎気候データ (GHCN-D) ・ 公開気候データ ・ 荒天データ/データベース ・ 時間毎公開降水データ ・ DSI3505 全球時間毎地 ・ 表合成データ ・ 歴史的な重要事象画像 	期間 : 1800 年頃～現在	世界最大の気候データアーカイブを保持し、データの提供を行っている。データは陸上ステーション以外に船舶やブイ、気象観測気球、レーダー、衛星、そして洗練された気象や気候モデルから得られる。 データ入手先 http://www.ncdc.noaa.gov/world-data-centers
NOAA NESDIS (National Environmental Satellite, Data, and Information Service)	AVHRR - Advanced Very High Resolution Radiometer	衛星画像	期間 : 1983 年～現在	極軌道環境衛星による画像データ。 代表的な使用方法として、日中の雲・地表、陸面と水面の協会、雪面と雲面の検出、夜間の雲と海表面温度、海表面温度がある。 http://noaasis.noaa.gov/NOAASIS/ml/avhrr.html データ入手先 http://webpanda.iis.u-tokyo.ac.jp/index_j.php

参考表 1-2(1) 推算データベース (その1)

機関	データ	データ要素	データ範囲 データ格納期間	備考																																										
気象庁 & 電中研	JRA-25 長期再解析	anl_p25 : 気圧面解析値 海面更正気圧、ジオポテンシャル高 度、気温、露点温度、東西風、南北 風、比湿、雲水量 fest_phy2m25 : 2次元物理量モニター	領域 : 全球 空間解像度 : 等緯度経度 2.5 度 期間 : 1979~2004 年 時間解像度 : 6 時間間隔	気象庁は電力中央研究所と共同で長期再解析 : JRA-25 を実施し、季節予報モデルの高度化や気候研究のための高精度の気候データセットを作成しました。 JRA-25と従来の再解析との比較 <table border="1"> <thead> <tr> <th>再解析名称</th> <th>実施機関</th> <th>期間</th> <th>モデルの解像度</th> <th>データ同化手法</th> <th>備考</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>JRA-25</td> <td>JMA/CRIEPI</td> <td>1979-2004</td> <td>T106L40</td> <td>3DVAR</td> <td>2005年からJCDASを運用中</td> </tr> <tr> <td>ERA-15</td> <td>ECMWF</td> <td>1979-1998</td> <td>T106 L31</td> <td>最適内挿法</td> <td>完了、1996年計算終了</td> </tr> <tr> <td>ERA-40</td> <td>ECMWF</td> <td>1957.9-2002.8</td> <td>TL159 L60</td> <td>3DVAR</td> <td>完了、2003年計算終了</td> </tr> <tr> <td>NCEP-NCAR 再解析</td> <td>NCEP-NCAR</td> <td>1948-現在</td> <td>T62 L28</td> <td>3DVAR</td> <td>CDASを運用中</td> </tr> <tr> <td>NCEP-DOE AMIP-II再解析</td> <td>NCEP-DOE</td> <td>1979-現在</td> <td>T62 L28</td> <td>3DVAR</td> <td>CDASを運用中</td> </tr> <tr> <td>GEOS1</td> <td>NASA/DAO</td> <td>1980-1996</td> <td>2x2.5 L20</td> <td>最適内挿法 + IAU</td> <td>1996年分まで計算終了</td> </tr> </tbody> </table> モデル解像度のT、TLは切断波数、Lは鉛直の層の数 T106、TL159は格子間隔約110km相当、T62は格子間隔約180km相当	再解析名称	実施機関	期間	モデルの解像度	データ同化手法	備考	JRA-25	JMA/CRIEPI	1979-2004	T106L40	3DVAR	2005年からJCDASを運用中	ERA-15	ECMWF	1979-1998	T106 L31	最適内挿法	完了、1996年計算終了	ERA-40	ECMWF	1957.9-2002.8	TL159 L60	3DVAR	完了、2003年計算終了	NCEP-NCAR 再解析	NCEP-NCAR	1948-現在	T62 L28	3DVAR	CDASを運用中	NCEP-DOE AMIP-II再解析	NCEP-DOE	1979-現在	T62 L28	3DVAR	CDASを運用中	GEOS1	NASA/DAO	1980-1996	2x2.5 L20	最適内挿法 + IAU	1996年分まで計算終了
再解析名称	実施機関	期間	モデルの解像度	データ同化手法	備考																																									
JRA-25	JMA/CRIEPI	1979-2004	T106L40	3DVAR	2005年からJCDASを運用中																																									
ERA-15	ECMWF	1979-1998	T106 L31	最適内挿法	完了、1996年計算終了																																									
ERA-40	ECMWF	1957.9-2002.8	TL159 L60	3DVAR	完了、2003年計算終了																																									
NCEP-NCAR 再解析	NCEP-NCAR	1948-現在	T62 L28	3DVAR	CDASを運用中																																									
NCEP-DOE AMIP-II再解析	NCEP-DOE	1979-現在	T62 L28	3DVAR	CDASを運用中																																									
GEOS1	NASA/DAO	1980-1996	2x2.5 L20	最適内挿法 + IAU	1996年分まで計算終了																																									
JAMSTEC (地球シミュレータセンター、地球フロンティア研究センター)	準全球渦解像 海洋シミュレーション (OFES : OGCM for the Earth Simulation)	領域 : 75S~75N 解像度 : 水平 0.1°x0.1° 鉛直 54 層 (層厚は 5~330m) 要素 : ポテンシャル温度 (°C)、塩分濃 度 (Smodel*1000+35(psu))、東向き流速 (cm/s)、 北向き流速 (cm/s)、鉛直上向き流速 (cm/s) 海面高度 (cm)、熱フラックス (cal/cm2/s)、塩分フラックス (g/cm2/s)、東向き風応力 dyn/cm2)、北 向き風応力 (dyn/cm2)	領域 : 75S~75N 期間 : (架空の)50 年間	米国海洋大気庁地球流体研究所で開発された海洋シミュレーションプログラム MOM3 をベースに、地球シミュレータで効率よく実行できるように並列化、最適化された海洋大循環モデルを用い、計算されたデータ。  海面流速のスナップショット [cm/sec] (46年目3月5日) (モデル) 初期条件 : 温度、塩分は WOQ98 の年平均値、静止状態 外力 : NCEP/NCAR 再解析データの月平均気候値 海面塩分は月平均値気候値 (WOA98) に緩和 (入手) データは、地球シミュレータセンター (ESC : The Earth Simulation Center) HP 上に公開されており、3次元月平均データ (水平解像度 0.5°の間引きデータ)、3次元月平均データ (水平解像度 0.1°)、2次元月平均データ、2次元モニターデータ (スナップショット)、海底地形から選択し、計算された架空の50年の内10年間分(41 th ~50 th)のデータをダウンロードできる。 データ入手先 http://www.jamstec.go.jp/esc/ofes/jp/ 研究概要、成果一覧 http://www.jamstec.go.jp/esc/research/AtmOcn/ofes/index.en.html																																										

参考表 1-2(2) 推算データベース (その2)

機関	データ	データ要素	データ範囲 データ格納期間	備考
<p style="writing-mode: vertical-rl; text-orientation: upright;">JAMSTEC (独立行政法人海洋研究開発機構 地球環境変動機構短期気候変動応用予測研究プ ログラム ダウンスケール沿海変動予測研究チーム)</p>	<p style="text-align: center;">JCOPE2 日本近海の 海洋変動予測システム (Japan Coastal Ocean Predictability Experiment)</p>	<p>水位、東西流速、南北流速、 ポテンシャル水温、塩分</p>	<p>空間範囲： 108-180E、10.5-62N、0-6500m 深さ</p> <p>期間：1993/01/01-現在</p>	<p>2001年12月から海中の天気を予測する実験を始めました。その前に、1997年12月に「日本沿海予測可能性実験:JCOPE」が、当時「地球フロンティア研究システム」と呼ばれ、宇宙開発事業団と海洋科学技術センターによって共同運営されていた地球変動予測研究計画のもとで始められていました。海中天気予測はJCOPEの成果のひとつとなっています。現在、JCOPE海中天気予報システムは、入手できる限りのすべての水温、塩分海洋観測データと、衛星の海面水温や高度データをもとに定期的に予測を行なっています。もともと、JCOPEは、「大気の場合は、天気予報があつてその延長のうえで気候の予測が行われている。海洋も、日々の予報とその観測による検証によって改良される、海中の天気予報の営みがあつて、それとの連携のもとに気候の予測を行うようにすれば、気候の予測精度向上に貢献するに違いない」という、山形俊男・気候変動予測研究領域長(当時)の強い意思のもとに始められました(山形、2001)。予測実験を積み重ねていくうちに、海中天気予報そのものに様々な応用の可能性があることが見えてきました。例えば、水産総合研究センター(FRA)との共同研究では、JCOPEの初期の予報システムを漁海況予報に適用する試みを行いました(FRA-JCOPE; 宮澤他、2008)。現在では、海洋研究開発機構の中期計画のもとで、さらに改良した予報システム JCOPE2(Miyazawa et al., 2009)を運用しながら研究を進めています。</p> <p>http://www.jamstec.go.jp/frcgc/jcope/</p>
<p style="writing-mode: vertical-rl; text-orientation: upright;">FRA 水産総合研究センター 独立行政法人</p>	<p style="text-align: center;">FRA-ROMS 海況予測システム</p>	<p>水温、塩分、流動、海面高度</p>		<p>水産生物の資源管理の推進と資源変動要因の解明のための基盤情報として、我が国周辺太平洋域における海洋の現況図と2ヶ月先までの予測図を提供します。水産関係試験研究機関(都道府県水産試験研究機関や水産総合研究センター等の研究者には、別途利用者申請手続きにより研究情報を提供致します。</p> <p>http://fm.dc.affrc.go.jp/fra-roms/index.html</p>

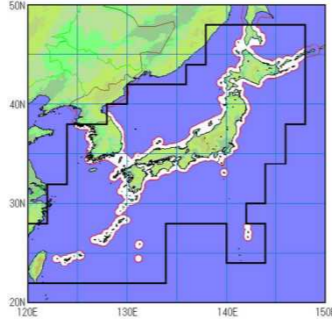
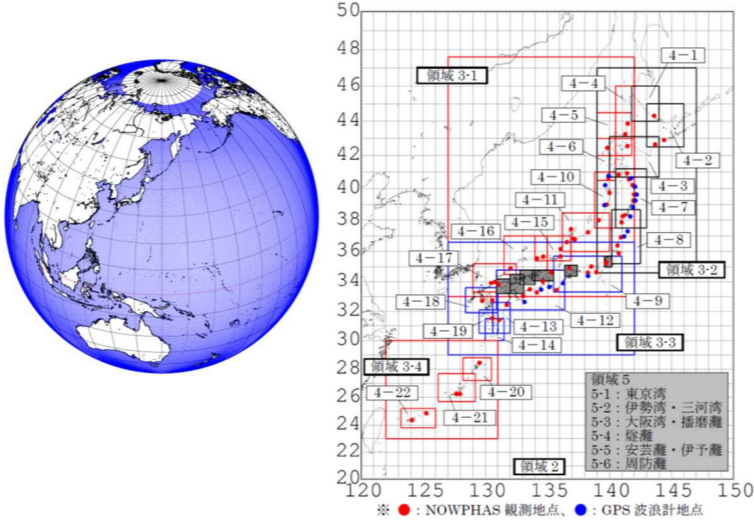
参考表 1-2(3) 推算データベース (その3)

機関	データ	データ要素	データ範囲 データ格納期間	備考
ECMWF (European Centre for Medium- Range Weather Forecasts)	ERA-15	要素 : 気温、ジオポテンシャル速度 u、 ジオポテンシャル速度 v、垂直速度、 Divergence、相対湿度、比湿、ポテンシャル 渦度、相対渦度、オゾン量混合比、地表 面、波浪 解像度 : 2.5°×2.5° 鉛直層 : 17 層(1000~ 10 hPa)	範囲 : 全球 期間 : 1978 年 12 月 ~1994 年 2 月	ECMWF (ヨーロッパ中期気象予報センター) が提供している再解析データ 波浪データは、解析データが含まれており、全球波浪解析、地中海波浪解析の 2 項目 がある。 データ入手先 http://www.ecmwf.int/products/data/archive/descriptions/er/index.html
	ERA-40	要素 : 気温、ジオポテンシャル速度 u、 ジオポテンシャル速度 v、垂直速度、 Divergence、相対湿度、比湿、ポテンシャル 渦度、相対渦度、オゾン量混合比、地表 面、波浪 4 回/日、月毎データ 解像度 : 1.5°×1.5° 鉛直層 : 23 層(1000~ 1 hPa)	範囲 : 全球 期間 : 1957 年 9 月 1 日 ~2002 年 8 月 31 日	ECMWF (ヨーロッパ中期気象予報センター) が提供している再解析データ 波浪データは同化データを含み、ERA-40 の 1.5 グリッドデータセットを用い予測し たデータも含まれる。全球波浪解析、全球波浪予測の 2 項目である。 データ入手先 ECMWF ホームページ http://www.ecmwf.int/products/data/archive/descriptions/e4/era40_lto2.html 京大大学生存研究所 ホームページ http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/era40/
NCEP/ NCAR	NCEP/NCAR 再解析データ	要素 : 圧力レベル、海面、海面フラック ス、その他フラックス、対流境界面、派生 データ、スペクトル係数 データ : データ : 4 回/日、日毎、月毎値 解像度 : 緯度経度 2.5°間隔 格子点 : 東西 144×南北 73	範囲 : 全球 期間 : 1948 年~現在	米国国立環境予測センター、米国大気研究センターの提供している再解析データ データ入手先 http://www.esrl.noaa.gov/psd/psd1/
NCEP/ DOE	NCEP/DOE AMIP-II 再解析データ	期間 : 1979 年~2010 年 12 月 鉛直層 : 17 層 (1000~10m) データ : 4 回/日、日毎、月毎値	期間 : 1979 年~2010 年 12 月	NCEP/NCAR に基づく再解析データ データ入手先 http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis2.html
NCEP/ CFSR	NCEP/CFSR 再解析データ	時間解像度 : 1H、6H 水平解像度 : 0.5°、1/3°	期間 : 1979 年~現在	データ入手先 http://cfs.ncep.noaa.gov/cfsr/
NCEP	NCEP GODAS (Global Ocean Data Association System)	要素 : 水面下流熱フラックス、塩フラッ クス、ジオイド高、幾何学的水深、モーメ ントフラックス uv 成分、塩分、電流 uv 成 分、垂直速度、ポテンシャル温度 データ : 月別値 解像度 : 緯度 1/3°×経度 1.0°の グローバルグリッド (418×360) 鉛直層 : 40 層 (5~4478 m)	範囲 : 74.5S-64.5N,0.5E-359.5E 74.0S-65.0N,1.0E-360.0E 期間 : 1980 年 1 月~現在	NCEP を基にした高解像度マルチレベル海洋解析データ。観測データを基に同化を 行っている。 http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/GODAS/pl/introduction_godas_web.pdf データ入手先 http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.godas.html
NASA	MERRA (Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications)	要素 : 海面気圧、海面塩ポテンシャル、 ジオポテンシャル高度、湿度、気温、風速 成分 u、風速成分 v、ポテンシャル渦度、 鉛直速度圧 時間解像度 : 3H 水平解像度 1.25°×1.25° 鉛直レベル : 42	範囲 : 全球 期間 : 1979 年~現在	MERRA は、データ同化システム GEOS-5(Goddard Earth Observing System Data Assimilation System Version 5)を使った、NASA 再解析データである。 入力する観測データとして、NOAA/NCEP 等から得たデータや、NOAA/NESDIS 等 の衛星放射輝度データ等を用いている。 https://gmao.gsfc.nasa.gov/products/documents/MERRA_File_Specification.pdf データ入手先 http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/daac-bin/FTPSubset.pl

参考表 1-2(4) 推算データベース (その4)

分類	機関	DB 要素	DB データ範囲、DB データ格納期間	備考 (特徴等)
非公開	愛媛大学	波浪	【データ範囲】北緯 20~43 度、東経 120~152 度 【格子間隔】5km (沿岸部は 1km) 【入力データ】NCEP/NCAR 再解析値 (1948~1998 年) 【入力データ】ECMWF (1979~1998 年) 【波浪モデル】1 点浅海モデル	【特徴】 ・ 波候の長期変動を研究するため、独自に開発してきた波浪モデルを用いて、長期間の波浪推算結果データベースを構築した。 ・ 1958 年以前の NCEP/NCAR 再解析値には、統計的に有意な変動が見られ、気候ジャンプの可能性あるいは NCEP/NCAR 再解析値の品質問題が指摘された。 【引用文献】 ●山口正隆, 畑田佳男, 松木太郎: ECMWF 風を用いた長期波浪推算システムの適用性の検討, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp.241-245, 1997. ●山口正隆, 畑田佳男, 大福学, 李敏杰, 野中浩一, 野間敬: わが国沿岸海域任意地点における波浪の 51 年推算システム, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp.276-280, 2000.
非公開	独立行政法人 港湾空港技術研究所	波浪	【データ範囲】北緯 20~45 度、東経 130~155 度 【格子間隔】0.5 度 【入力データ】ECMWF (1992~1999 年) 【入力データ】ECMWF Operational data (1991~2003 年) 【入力データ】ECMWF ERA15 (1979~1993 年) 【入力データ】ECMWF ERA40 (1957~2002 年) 【波浪モデル】WAM モデル	【特徴】 ・ 波浪が地形の影響を大きく受けると想定される地点を対象とする場合の計算格子の分解能の問題やうねり性の波浪の再現性にやや問題があるという WAM モデル自体が持つ特性について再検討の必要がある。 ・ ECMWF Operational data を用いた波浪計算結果が最も精度がよく、ECMWF ERA40 を用いた波浪計算結果は低めに計算される傾向がある。 【引用文献】 ●川口浩二, 橋本典明, 鈴山勝之: 波浪推算値に基づく日本沿岸波浪の出現特性について, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp.216-220, 2002. ●橋本典明, 鈴山勝之, 永井紀彦: ECMWF 風 (Operational data, ERA15, ERA40) による長期波浪推算精度の検討, 海岸工学論文集, 第 51 巻, pp.201-205, 2004.
非公開 日々の 予報は 公開	岐阜大学	1 時間値 ・ 有義波高 ・ 平均周期 ・ 主波向 ・ うねり成分波高 ・ 風速 ・ 風向	【データ範囲】北緯 20~50 度、東経 120~150 度 【格子間隔】0.5 度 【入力データ】ECMWF ERA40 (1957~2002 年) 【局地気象モデル】MM5 【波浪モデル】SWAN モデル	【特徴】 ・ ECMWF ERA40 の日本付近の空間解像度を上げるため、局地気象モデル MM5 を用いて日本付近の風を計算している。 ・ 波浪モデル SWAN の使用に当たっては、気象庁提供の海上風データを用いた試行計算を通してパラメータを調整している。 【日々の予測】 岐阜大学が気象予報業務許可を取得し、東海地方の気象及び波浪予報を行なっている。 http://net.cive.gifu-u.ac.jp/ 【引用文献】 ●小林智尚, 佐々木博一, 吉野純, 安田孝志: ERA40 にもとづく日本列島周辺長期波浪データベースの構築, 海岸工学論文集, 第 54 巻, pp.141-145, 2007.
非公開	京都大学	波浪	【データ範囲】北緯 0~65 度、東経 120~西経 110 度 【格子間隔】0.5 度 【入力データ】NCEP/NCAR 再解析値 (1948~2001 年) 【波浪モデル】WAM モデル	【特徴】 ・ 科学研究費補助金基盤研究(B)「浮体式洋上風力発電施設の動的応答と成立性評価に関する研究」(代表: 宇都宮智昭) の研究の一部である。 ・ 株式会社サーフレンジョと京都大学が共同開発した「Wave Hunter」を用いて、日々の波浪予測の実施及び計算結果の販売を行なっているが、データベースの販売に関しての詳細は不明。 「Wave Hunter」 http://wavehunter.biz/ 【引用文献】 ●間瀬肇・森信人・安田誠宏・作中淳一郎・宇都宮智昭: 北太平洋波浪解析値を用いた沿岸海域における設計波浪の算定システム, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.B2-65, No.1, pp.146-150, 2009. ●森信人・安田誠宏・間瀬肇: NCEP/NCAR 再解析値を用いた北太平洋波候の解析, 京都大学防災研究所年報, 第 52 号 B, pp.501-507, 2009. ○間瀬肇・木村雄一郎・Tracey H. Tom・小川和幸: GFS-WRF-SWAN 援用波浪推算システムの構築と検証, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp.181-185.

参考表 1-2(5) 推算データベース (その5)

分類	機関	DB 要素	DB データ範囲、DB データ格納期間	備考 (特徴等)
公開	独立行政法人 海上技術安全研究所	統計解析値 ・ 有義波高 ・ 有義波周期 ・ 卓越波向 ・ 平均風速 ・ 平均風向	10年間の統計解析 (1994年2月～2004年1月) 	【特徴】 「気象・海象 DB (日本近海)」 日本近海の波と風データベースは、日本気象協会が1日2回、緯度経度2分格子間隔で波浪推算を行った10年分(1994年2月～2004年1月)の結果を用いて、有義波高、有義波周期、卓越波向、平均風速、平均風向について海上技術安全研究所が統計解析したものです。 【公開 URL】 http://www.nmri.go.jp/wwjapan/namikaze_main.html 【引用文献】 ●辻本勝・石田茂資：日本近海の波と風の統計的性質，日本船舶海洋工学会論文集，第2号，pp.19-27，2005.
販売	一般財団法人 日本気象協会	1時間値 ・ 有義波高 ・ 有義波周期 ・ 波向 ・ 風向 ・ 風速	< 全球域 > 【データ範囲】 75度以上の極域を除く全球 【格子間隔】 0.5度 【入力データ】 NCEP/NCAR 再解析値 【入力データ】 気象庁 GPV (GSM) 【波浪モデル】 改良 WAM モデル 【データ期間】 1951年～2010年 < 日本域 > 【データ範囲】 北緯 20～50度、東経 120～150度 【格子間隔】 1/30度 (2分) 【入力データ】 気象庁 GPV (GSM 全球域) 【入力データ】 気象庁 GPV (GSM 日本域) 【入力データ】 気象庁 GPV (MSM) 【入力データ】 気象庁 GPV (毎時大気解析値) 【波浪モデル】 改良 WAM モデル 【データ期間】 2001年～2010年 	【特徴】 ・ 日々の波浪予報 (1日4回) を行い、その予報結果を蓄積している。 ・ 風の再解析値を用いた波浪の再計算を実施し、データベースを構築している。 ・ 波浪モデルは WAM モデルを使用しているが、日本近海用にチューニング (改良) されている。 ・ 最近数年分の日本近海では、「気象庁 GPV (毎時大気解析値)」を使用しているため、地形の影響や台風等の局地的な風が考慮されている。 ・ NOWPHAS 等の過去の波浪観測データをデータ同化することも可能。 【引用文献】 ●松浦邦明、鈴木史朗、本橋昌志、橋本典明：波浪のリアルタイム実況推定値および客観解析値データベース作成システムの構築，海洋開発論文集，Vol22，pp.171-176. (2006) ●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，No.2，pp.I_977-I_982，2012.

参考表 1-3(1) その他のデータベース (その1)

分類	機関	出典	備考 (特徴等)																																																																																																																																																																																																																																																											
全国	国土技術政策総合研究所 (横須賀)	<p>「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 第 88 号、2003 年 6 月)</p> <p>上記資料の PDF ファイルは、国土技術政策総合研究所 HP の「研究活動」の「研究成果資料」からダウンロード可能。 http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryoku/index.htm</p>	<p>本資料は、各港湾建設局 (現地方整備局) において推算されたデータを収集整理し、全国レベルの概略値を算出することを目的としている。また、本資料は、沿岸区域毎に、各沖波地点における 50 年確率波を整理しているが、データが存在するものについては、10 年、30 年、100 年確率波についても整理している。</p> <p>以下のような表が 32 ページに渡って掲載されている。</p> <p>50 年確率波をまとめ直した資料を資料 5 に掲載する。</p> <p style="text-align: center;">表-C.1(2) 沖波表</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>区分</th> <th>地点</th> <th>統計方法</th> <th>再現期間</th> <th></th> <th>NNE</th> <th>NE</th> <th>ENE</th> <th>E</th> <th>ESE</th> <th>SE</th> <th>SSE</th> <th>S</th> <th>SSW</th> <th>SW</th> <th>WSW</th> <th>W</th> <th>WNW</th> <th>NW</th> <th>NNW</th> <th>N</th> <th>ALL</th> <th>管轄</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="4">4</td> <td rowspan="4">襟裳港</td> <td rowspan="2">極大値</td> <td>10年</td> <td>波高</td> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>5.60</td><td>6.50</td><td>6.70</td><td>6.10</td><td>4.90</td><td>6.20</td><td>6.50</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>北海道</td> </tr> <tr> <td>30年</td> <td>波高</td> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>6.20</td><td>7.50</td><td>7.80</td><td>7.30</td><td>5.80</td><td>7.00</td><td>7.30</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>北海道</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">極大値</td> <td>50年</td> <td>波高</td> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>6.50</td><td>8.00</td><td>8.30</td><td>7.80</td><td>6.20</td><td>7.30</td><td>7.60</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>北海道</td> </tr> <tr> <td>100年</td> <td>波高</td> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>6.80</td><td>8.60</td><td>8.90</td><td>8.50</td><td>6.60</td><td>7.70</td><td>8.00</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>北海道</td> </tr> <tr> <td rowspan="4">4</td> <td rowspan="4">浦河港</td> <td rowspan="2">極大値</td> <td>10年</td> <td>波高</td> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>6.00</td><td>6.60</td><td>6.70</td><td>5.80</td><td>4.70</td><td>5.90</td><td>6.20</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>北海道</td> </tr> <tr> <td>30年</td> <td>波高</td> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>6.60</td><td>7.50</td><td>7.80</td><td>7.10</td><td>5.50</td><td>6.70</td><td>6.90</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>北海道</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">極大値</td> <td>50年</td> <td>波高</td> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>6.90</td><td>7.90</td><td>8.30</td><td>7.60</td><td>5.90</td><td>7.00</td><td>7.20</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>北海道</td> </tr> <tr> <td>100年</td> <td>波高</td> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>7.20</td><td>8.40</td><td>9.00</td><td>8.30</td><td>6.30</td><td>7.40</td><td>7.50</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>北海道</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">4</td> <td rowspan="2">苫小牧港</td> <td rowspan="2">極大値</td> <td>10年</td> <td>波高</td> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>7.20</td><td>7.70</td><td>7.90</td><td>5.80</td><td>4.40</td><td>3.00</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>巻註→</td><td>7.40</td><td>北海道</td> </tr> <tr> <td>50年</td> <td>波高</td> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>7.60</td><td>8.70</td><td>9.00</td><td>6.50</td><td>5.00</td><td>3.50</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>巻註→</td><td>8.50</td><td>北海道</td> </tr> </tbody> </table>	区分	地点	統計方法	再現期間		NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N	ALL	管轄	4	襟裳港	極大値	10年	波高						5.60	6.50	6.70	6.10	4.90	6.20	6.50							北海道	30年	波高							6.20	7.50	7.80	7.30	5.80	7.00	7.30							北海道	極大値	50年	波高							6.50	8.00	8.30	7.80	6.20	7.30	7.60							北海道	100年	波高							6.80	8.60	8.90	8.50	6.60	7.70	8.00							北海道	4	浦河港	極大値	10年	波高						6.00	6.60	6.70	5.80	4.70	5.90	6.20							北海道	30年	波高							6.60	7.50	7.80	7.10	5.50	6.70	6.90							北海道	極大値	50年	波高							6.90	7.90	8.30	7.60	5.90	7.00	7.20							北海道	100年	波高							7.20	8.40	9.00	8.30	6.30	7.40	7.50							北海道	4	苫小牧港	極大値	10年	波高						7.20	7.70	7.90	5.80	4.40	3.00						巻註→	7.40	北海道	50年	波高							7.60	8.70	9.00	6.50	5.00	3.50						巻註→	8.50	北海道
区分	地点	統計方法	再現期間		NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N	ALL	管轄																																																																																																																																																																																																																																								
4	襟裳港	極大値	10年	波高						5.60	6.50	6.70	6.10	4.90	6.20	6.50							北海道																																																																																																																																																																																																																																							
			30年	波高							6.20	7.50	7.80	7.30	5.80	7.00	7.30							北海道																																																																																																																																																																																																																																						
		極大値	50年	波高							6.50	8.00	8.30	7.80	6.20	7.30	7.60							北海道																																																																																																																																																																																																																																						
			100年	波高							6.80	8.60	8.90	8.50	6.60	7.70	8.00							北海道																																																																																																																																																																																																																																						
4	浦河港	極大値	10年	波高						6.00	6.60	6.70	5.80	4.70	5.90	6.20							北海道																																																																																																																																																																																																																																							
			30年	波高							6.60	7.50	7.80	7.10	5.50	6.70	6.90							北海道																																																																																																																																																																																																																																						
		極大値	50年	波高							6.90	7.90	8.30	7.60	5.90	7.00	7.20							北海道																																																																																																																																																																																																																																						
			100年	波高							7.20	8.40	9.00	8.30	6.30	7.40	7.50							北海道																																																																																																																																																																																																																																						
4	苫小牧港	極大値	10年	波高						7.20	7.70	7.90	5.80	4.40	3.00						巻註→	7.40	北海道																																																																																																																																																																																																																																							
			50年	波高							7.60	8.70	9.00	6.50	5.00	3.50						巻註→	8.50	北海道																																																																																																																																																																																																																																						
札幌	環境省	平成 22 年度浮体式洋上風力発電実証事業委託業務成果報告書 (平成 23 年 3 月、国立大学法人京都大学)	<p>五島列島札幌島沖の実証試験予定地点 (京都大学のデータベースを使用し、確率統計処理を実施。)</p> <p>50 年確率波：有義波高 7.7m、有義波周期 10.9sec 100 年確率波：有義波高 8.2m、有義波周期 12.4sec</p>																																																																																																																																																																																																																																																											
響灘	NEDO	平成 20 年度洋上風力発電実証研究 F/S 調査 成果報告書 (平成 21 年 3 月、電源開発株式会社)	<p>響灘の実証試験予定地点 (国土交通省九州地方整備局下関港湾空港技術調査事務所の「確率波高計算処理システム」を使用)</p> <p>50 年確率波から推定した沖波：有義波高 8.0m、有義波周期 12.0sec、波向 W~NW~N</p>																																																																																																																																																																																																																																																											
銚子沖	NEDO	平成 20 年度洋上風力発電実証研究 F/S 調査 報告書 (平成 21 年 3 月、東京電力株式会社・国立大学法人東京大学・鹿島建設株式会社)	<p>銚子沖の実証試験予定地点 (千葉東沿岸海岸保全基本計画に掲載された値を使用)</p> <p>沖波波高 12.24m、沖波周期 14.5sec、波向 SSE</p>																																																																																																																																																																																																																																																											
千葉県	千葉県	千葉東沿岸海岸保全基本計画【計画編】(変更)平成 24 年 5 月	<p>昭和 26 年~平成 12 年 (50 年間) の気象資料をもとに波浪推算法 (スペクトル法) により決定各ゾーンの沖波波高 (波向別の最小値~最大値)、周期及び最小~最大波高時の波向を以下に示す。</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 銚子漁港~名洗港：8.76m~11.62m、12.3sec~14.2sec、NNE~SE ○ 名洗港~太東漁港：1.73m~12.24m、7.8sec~14.5sec、NE~SSE ○ 太東漁港~洲崎：8.98m~11.88m、12.6sec~14.6sec、NE~SSE 																																																																																																																																																																																																																																																											
福島県	福島県	土木設計マニュアル〔港湾・漁港編〕平成 20 年 4 月	<p>沖波は、特に資料の無い場合には以下の値を参考としてよい。</p> <p><小名浜管内> 50 年確率波高：NE 7.6m、ENE 8.1m、E 8.4m、ESE 8.4m、SE 8.4m、SSE 8.2m、S 7.7m 周期：13sec</p> <p><相馬管内> 50 年確率波高：NE 6.5m、ENE 6.4m、E 6.5m、ESE 6.9m、SE 7.9m、SSE 8.1m、S 7.9m 周期：11sec~14sec</p>																																																																																																																																																																																																																																																											

参考表 1-3(2) その他のデータベース (その2)

分類	機関	DB 要素	DB データ範囲、DB データ格納期間	備考 (特徴等)
台風	気象庁 台風センター	台風ベストトラック	1951 年以降の台風のベストトラック http://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/rsmc-hp-pub-eg/RSMC_HP.htm	【特徴】 ベストトラックとは、観測した台風(熱帯低気圧)の中心位置、中心気圧、最大風速等を、後日再解析した最終的な台風情報。
台風	国立情報学研究所 北本研究室	気象衛星画像 北半球ベストトラック 南半球ベストトラック	「デジタル台風：台風画像と台風情報」 http://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon/ 【プロジェクト概要】 気象学的現象を情報学的アプローチで捉える「メテオインフォマティクス」を、大規模な実世界問題で検証するための例題として、「デジタル台風」プロジェクトを進めている。このプロジェクトでは、(1)メテオインフォマティクスの基盤となる巨大科学データベースを台風画像コレクションを対象に構築すること、(2)膨大なデータの中から台風解析や予測に有用となる情報や知識を発見するためのアルゴリズムやデータベースモデルを確立すること、の2点が主な挑戦課題となる。	【特徴】 気象庁や他機関のデータを集めたサイトであるが、検索システムが優れている。 また、リンク集も便利である。
地震	政府(文部科学省) 地震調査研究推進本部	地震に関する評価 調査研究の成果 地震波形・地震観測網 報告書・会議資料	【ホームページ】 http://www.jishin.go.jp/main/index.html 【設立経緯】 阪神・淡路大震災(平成7年1月)を契機として、我が国の地震調査研究を一元的に推進するため、地震防災対策特別措置法に基づき、政府の特別な機関として、地震調査研究推進本部が設置されました(平成7年7月)。	【特徴】 調査研究の成果として、自身に関する調査研究の報告書、震源・震度に関する情報、文献データベース等が閲覧できます。 また、地震に関する評価や委員会等の報告書や会議資料も閲覧できます。
地震	東京大学地震研究所	強震観測データベース等	【ホームページ】 http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/	【特徴】
地震 津波	内閣府	各種防災情報	「内閣府 防災情報のページ」 http://www.bousai.go.jp/	【特徴】 中央防災会議の資料、地震・津波対策、各種協議会の資料が閲覧できます。
津波	東北大学	津波痕跡	【津波痕跡データベースシステム】 http://tsunami3.civil.tohoku.ac.jp/ 【東北大学災害科学国際研究所 災害リスク研究部門 津波工学研究室】 http://www.tsunami.civil.tohoku.ac.jp/hokusai3/J/index.html	【特徴】 東北大学工学研究科および原子力安全基盤機構では、「津波痕跡データ(津波の到達した痕跡地点のデータ)」を原子力発電所等の安全性評価に活用するために、津波専門家との協働で「津波痕跡データベース(以後、本データベースと呼ぶ)」を整備しました。本データベースに登録された約2万件の津波痕跡データは、津波専門家による精査によって痕跡の信頼度が付与されるとともに、データベースシステムは、Web-GISを基盤とした管理システムで、ユーザーが目的に応じて高い信頼度の痕跡データを検索し抽出できるものとなっています。これらの成果を、原子力安全分野や津波研究分野だけでなく、自治体での津波防災や沿岸住民の皆様にも活用していただくために、平成22年10月より段階的に公開することと致しました。
津波	群馬大学	津波デジタルライブラリ	【ホームページ】 http://tsunami.dbms.cs.gunma-u.ac.jp/	【特徴】
津波	気象庁	量的津波予報	震源：約4,000点、 想定津波：震源×マグニチュード×震源の深さ=約10万通り 	【特徴】 気象庁は、従来からマグニチュードや震源位置等を基にした経験的な津波予報を行ってきたが、1999年4月1日より津波の数値計算法を利用した量的津波予報[3]を開始した。 量的津波予報は数値計算結果を基に発表されているが、これはリアルタイムの計算ではなく、データベース方式が採用されている。すなわち、地震発生後に津波の数値計算を実施するのではなく、予め数値計算結果をデータベース化しておき、発生した地震に最も近いケースをデータベースから抽出している。具体的には、日本周辺の海域に約4000点の震源を想定して、その海域で発生する標準的な断層モデルを設定している。さらにそれぞれの断層モデルにおいてマグニチュードと震源の深さを変化させたモデルも設定しているため、約10万通りの津波を想定している。そして、これらを初期条件として津波の伝播計算を実施して、沿岸に襲撃する津波の高さと予想到達時間をデータベース化している。

参考表 1-4 気象/診断モデル・局地気象モデル

風モデル (海上風)	作成元	特徴	適用範囲	入手方法	利用方法	操作手順	参考文献
気圧傾度に基づく 診断モデル	Caldone (1969)	気圧傾度に基づく診断的なモデルを用い、地上天気図の気圧配置から自由大気では傾度風として、エクマン層内での風向・風速変化、地表層内の風速変化を考慮して海上風を推算する。	陸上を含む場合には MASCON モデル等による地形の影響を考慮する必要がある。	モデル式が公開されており、論文、教科書等から式を参照して作成可能である。	地上天気図（および海面水温）データから気圧のグリッドデータを作成し、自由大気では傾度風として、エクマン層内での風向・風速変化、地表層内の風速変化を考慮して海上風を出力する。	—	Caldone, V. J., W. J. Pierson and E. G. Ward (1969): Hindcasting the directional spectra of hurricane generated waves, 7th Offshore Technology Conference May 5-8, pp.871-878.
2次元台風モデル	藤田の式 (1952)、 Myers の式 (1954)	台風域内の風の分布は、台風スケールに対して観測空間が粗いため気圧傾度に基づく診断的なモデルでは表現できない。台風の構造を単純化した2次元台風モデルによって、台風域内の風の分布を求める。この際、台風中心気圧と最大風速半径、台風の移動速度・針路のパラメータによって風速分布が決定する。	台風による強風域が海上であること。陸上を含む場合には MASCON モデル等による地形の影響を考慮する必要がある。	モデル式が公開されており、論文、教科書等から式を参照して作成可能である。	台風位置、台風中心気圧と最大風速半径データから、台風周辺の風速分布を求めることができる。	—	Myers, V. A. (1954): Characteristics of U.S. hurricanes pertinent to levee design for Lake Okeechobee, Fla., Hydro-meteorol. Rep. No. 32, Weather Bureau, U.S. Dept. Commerce, 106p. Fujita, T. (1952): Pressure distribution in typhoon, Geophys. Mag., Vol. 23, pp437-451.
ARPS	オクラホマ大学	数 km～数千 km の現象を対象とするメソ気象モデルで、圧縮性の非静力学モデルで、雲物理過程、放射過程、境界層過程、地表面過程を含んでいる。 LES とデータ同化システムの実績が豊富。	文献では 2-3km の解像度で storm 解析を実施している。	モデルは無償で公開されている。 最新版は Ver.5 で、 http://www.caps.ou.edu/ARPS/arpsdown.html	地形データ、海面水温、気象場の初期条件、境界条件ファイルを準備する。	http://www.caps.ou.edu/ARPS/arpsdoc.html で、User's Guide を選択	http://www.caps.ou.edu/ARPS/arpsdoc.html で、publications を選択
MM5	ペンシルバニア 州立大学と米国 大気研究センター	数 km～数千 km の現象を対象とするメソ気象モデルで、圧縮性の非静力学モデルで、雲物理過程、放射過程、境界層過程、地表面過程を含んでいる。 世界最大級のユーザーコミュニティを持っていたが、開発は終了している。	数 km～数千 km。解像度の限界として約 300m との検討結果がある（橋本ら、2005）	モデルは無償で公開されている。 最新版は ver.3 で、 http://www.mmm.ucar.edu/mm5/mm5v3.html からダウンロード。	地形データ、海面水温、気象場の初期条件、境界条件ファイルを準備する。	http://www.mmm.ucar.edu/mm5/On-Line-Tutorial/teachyourself.html	http://www.mmm.ucar.edu/mm5/Publications/mm5-papers.html
WRF	米国大気研究センター、米国環境 予測センター、米 国海洋大気庁、米 国空軍気象局	数 km～数千 km の現象を対象とするメソ気象モデルで、圧縮性の非静力学モデルで、雲物理過程、放射過程、境界層過程、地表面過程を含んでいる。WRF は MM5 に比べてスムージングの効果が小さく、全般的に良い結果を出力する。MM5 の後継モデルである。	MM5 に準ずると考えられる。	モデルは無償で公開されている。 最新版は Ver3.4 で、 http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/download/get_sources.html からダウンロード。	地形データ、海面水温、気象場の初期条件、境界条件ファイルを準備する。	http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3/contents.html	http://www.wrf-model.org/wrfadmin/publications.php

参考表 1-5 気象／詳細モデル・工学モデル

海上風モデル (詳細モデル・ 工学モデル)	作成元	特徴	適用範囲	入手方法	利用方法	操作手順	参考文献
LAWEPS 工学モデル	局所風況予測モデル開発チーム (名古屋工大・東京大・東北大・大林組・日本気象協会等)	複雑地形が大半を占めるわが国の実情をふまえ、勾配 5%以上の地形を含む場合でも精度良く風況を推定することを目的に、NEDO 委託業務において開発された。 海岸部の崖などの急峻な地形への適用や、植生影響の考慮にとくに留意してある。 また、野外観測や風洞実験により推定精度の検証を行っている。	水平格子間隔 100m 程度の 4 次領域モデルと、同 10m 程度の 5 次領域モデルが用意され、目的により一方または両者のネスティングにより計算できる。	NEDO 事業成果のため、実費相当で開発チーム事務局の日本気象協会から入手可能である。 http://www.jwa.or.jp/node/61/node_193/node_194/laweps_16_1/node_1579/	計算済み気象データベースを入力値とする標準的な使用方法のほか、現地における実測値を活用した利用方法などがある。 また、本モデルの出力を入力値として、地形・風車スベックを与えて発電量を推定するツール (LAWEPS-planner) などが整備されている。 http://www.jwa.or.jp/content/view/full/1250/	NEDO の下記サイトから概要や詳細説明書のダウンロードが可能。 http://app8.infoc.nedo.go.jp/nedo/top/laweps_info1.html	村上周三・持田灯・加藤信介・木村敦子 (2003) : 局所風況予測システム LAWEPS の開発と検証 日本流体力学会誌, 第 22 巻, pp375-386 林宏典(2004) : NEDO 技術開発機構研究開発成果局所的風況予測モデル(LAWEPS) の技術的特長, 日本風力エネルギー協会誌, 風力エネルギー第 28 巻, pp74-76
MASCOT	東京大学	WASP 等の線形モデルでは精度が低下する急傾斜地形での有用性を得るため開発された非線形モデル。計算の安定性や高速化にとくに配慮している。	標準の入力データは標高 50m 格子または 1km 格子、地表面粗度は 100m 格子または 1km 格子。	(株) 水域ネットワークより有償で購入可能。 http://aquanet21.ddo.jp/mascot/	Basic, Energy, Engineering の 3 モジュールから構成される。 気流計算は Basic で行い、その結果をもとに発電量や設計風速等の算定が可能。 さらに関連製品として、台風関係のデータを搭載した MASCOT-Typhoon がある。	http://aquanet21.ddo.jp/mascot/Updates/3_0/MB_Manual.pdf	石原孟(2003) : 非線形風況予測モデル MASCOT の開発とその実用化, 日本流体力学会誌, 第 22 巻, pp.387-396.
RIAM -COMPACT	九州大学 応用力学研究所	非定常・非線形の CFD モデルであり、LES 乱流モデルを用いている点も上記 2 者と異なる。 非定常モデルのため瞬間的な強風発生再現も可能。 GIS との連携や 3 次元アニメーションなど可視化にも注力してある。	標準の標高データは国土地理院の 50m 格子のほか、10m 格子、数 m 格子にも対応。 水平・鉛直格子幅の編集も可能。	(株) リアムコンパクトより有償で購入可能。 http://riam-compact.com/	風況ソルバーが本体。格子作成や風車線図作成、可視化、発電量算定などの関連ソフトウェア群が整備されている。	—	内田孝紀・大屋裕二・諏訪部哲也・李貫行 (2006) : 非定常・非線形風況シミュレータ RIAM-COMPACT によるウィンドファーム風況診断の提案, 日本風力エネルギー協会誌, 風力エネルギー第 30 巻, pp101-108 http://www.riam.kyushu-u.ac.jp/windeng/img/aboutus_detail_image/JWEA_2011_Atsumi.pdf

参考表 1-6 波浪シミュレーションモデル

波浪モデル	作成元	特徴	適用範囲	入手方法	利用方法	操作手順	参考文献
WillsonIV式	Wilson,B.(1965)	有義波法 (SMB 法) のうち、比較的新しい信頼度のあるデータをもとに作成された式である。	制限はない。	モデル式が公開されており、論文、教科書等から式を参照 (エクセル等でも計算可能)。	海上風、吹送距離、吹送時間を入力として、波高・周期を算出する有義波法である。	—	Wilson, B.(1965) : Numerical prediction of ocean waves in the North Atlantic for December 1959. Deut. Hydrogra. Zeit., 18, pp.114-130. 磯崎一郎・鈴木靖 (1999) : 波浪の解析と予報, pp.110.
WAM	WAMDI グループ	初代の第 3 世代波浪モデル。エネルギーソース項として、風から波へのエネルギー入力、白波砕波、成分波間の 4 波共鳴、海底摩擦が考慮できる。浅水変形、流れ、地形による屈折変形を考慮できる。	全球～浅海域 (空間解像度は数分 (数 km) 間隔迄) (時間ステップの分解能が分単位のため CFL 条件より距離も概ね数分間隔となる)。また、地形性砕波、3 波共鳴を考慮する必要がある極浅海域では適用できない。	モデルは無償で公開されている。公開されている最新版は Cycle4 で、Hasselmann 教授へ提供依頼の手紙を送り、入手していた。ただし、現在では、SWAN、Wave Watch 3 をダウンロードして WAM と同じ条件で計算が可能である。	水深、海流格子データ、一定時間毎の海上風格子データを入力とする。出力データは、各格子の時刻毎の波浪スペクトルを出力する。モデル中で、スペクトルから波浪諸元を計算。	ソースと一緒に提供されるマニュアルを参照。または、 http://ja.scribd.com/doc/28895552/Wam-Cycle4-Manual (有償) を参照。	WAMDI group: S. Hasselmann, K. Hsselmann, E. Bauer, P.A.E.M. Janssen, G.J. Komen, L. Bertotti, P. Lionello, A.Guillaume, V.C. Cardone, J.A. Greenwood, M. Reistad, L.Zambresky and J.A. Ewing, 1988. The WAM model – a third generation ocean wave prediction model. J. Phys. Oceanogr. 18, 1775-1810.
SWAN	デルフト工科大学	エネルギーソース項として、風から波へのエネルギー入力、白波砕波、成分波間の 3 波共鳴、4 波共鳴、海底摩擦、水深による砕波、植生による砕波、が考慮できる。浅水変形、流れ、地形による屈折変形を考慮できる。沿岸域で発生する波による水位上昇 (Wave-setup) を考慮できる。構造物の透過、反射、回折を考慮できる。	全球から極浅海域、実験室スケールまで計算可能。	モデルは無償で公開されている。最新版は、40.91 で、 http://swanmodel.sourceforge.net/ からダウンロード。	水深格子データ、一定時間毎の海流、海上風格子データを入力とする。出力データは、各格子の時刻毎の波浪スペクトルを出力する。また、ラディーションストレス、Wave-setup を出力可能である。モデル中で、スペクトルから波浪諸元を計算。	http://swanmodel.sourceforge.net/online_doc/swanus/swanuse.html	http://swanmodel.sourceforge.net/references/references.htm
WW3	米国海洋大気庁	エネルギーソース項として、風から波へのエネルギー入力、白波砕波、成分波間の 4 波共鳴、海底摩擦、水深による砕波、海底勾配による部分反射が考慮できる。浅水変形、流れ、地形による屈折変形を考慮できる。	全球から浅海まで対応可能。	モデルは無償で公開されている。最新版は、Ver.3.14 で、 NCEP.List.Wavewatch@noaa.gov にメールしてライセンス登録後、 http://polar.ncep.noaa.gov/waves/wavewatch/distribution からダウンロード	水深格子データ、一定時間毎の海流、海上風格子データを入力とする。出力データは、各格子の時刻毎の波浪スペクトルを出力する。モデル中で、スペクトルから波浪諸元を計算。	http://polar.ncep.noaa.gov/mmab/papers/tn254/MMA_B_254.pdf	http://polar.ncep.noaa.gov/waves/wavewatch/

参考表 1-7 潮汐・潮流シミュレーションモデル

潮汐・潮流モデル	作成元	特徴	適用範囲	入手方法	利用方法	操作手順	参考文献
NAO99b (J)	国立天文台	潮汐モデルを TOPEX/PEIDON の高度計を用いてデータ同化し、主要 16 分潮、長周期潮 7 成分の振幅と位相のデータベースを作成。これを用いて、時刻、位置を入力して、潮位、潮流を求めるもの。	全球モデル nao99b の空間解像度は 0.5 度、日本周辺モデル nao99bJ の空間解像度は 5 分。非線形成分がないため、浅海域では潮位の振幅がやや過小評価となる。	モデルは無償で公開されている。 http://www.miz.nao.ac.jp/staffs/nao99/index.html よりプログラムとデータをダウンロード	時刻 (年月日時)、位置 (緯度経度) を入力すると、潮位 (潮流) が出力される。	http://www.miz.nao.ac.jp/staffs/nao99/README_NAOTIDE.html#install http://www.miz.nao.ac.jp/staffs/nao99/README_GOTIC2.html#install	Matsumoto, K., T. Takanezawa, and M. Ooe, Ocean Tide Models Developed by Assimilating TOPEX/POSEIDON Altimeter Data into Hydrodynamical Model: A Global Model and a Regional Model Around Japan, Journal of Oceanography, 56, 567-581, 2000.
OTPS	オレゴン州立大学	潮汐モデルを TOPEX/PEIDON の高度計を用いてデータ同化し、基本 8 分潮、長周期潮 2 成分、非線形 3 成分の振幅と位相のデータベースを作成。これを用いて、時刻、位置を入力して、潮位、潮流を求めるもの。	全球モデルの解像度は 0.5 度, 1km~5 分の高解像度領域のデータセットもある。	モデルは無償で公開されている。 http://volkov.oce.orst.edu/tides/ よりプログラムとデータをダウンロード	時刻 (年月日時)、位置 (緯度経度)、予測に用いるデータを入力すると、潮位 (流量) が出力される。流量から流速に変換するには水深データを用いる。	ダウンロードされた OTPS.tar.gz 中の readme を参照	Gary D. Egbert, Svetlana Y. Erofeeva : Efficient Inverse Modeling of Barotropic Ocean Tides, 2002, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology

参考表 1-8 海流シミュレーションモデル

海洋モデル	作成元	特徴	適用範囲	入手方法	利用方法	操作手順	参考文献
POM	プリンストン大学	静力学モデルで、海面から海底までの深さを水深に関係なく 0 から-1 までの数値として規格化した σ 座標系で計算を行う。そのため、太平洋などの深さ数 1000m の深海から水深 10m 以下の浅い海の流れを効率よく計算できる。	深海から干潟まで適用可能。 σ 座標系の欠点として、急峻な海底地形をもつ領域における圧力の水平勾配の表現に問題があるため、アスペクト比（縦横比）に注意する必要がある。	モデルは無償で公開されている。 http://www.ccpo.odu.edu/~tezer/POMDB/adduser.htm で登録を行って、 http://www.aos.princeton.edu/WWWPUBLIC/htdocs.pom/FTPbackup/ または、 http://www.aos.princeton.edu/WWWPUBLIC/PROFS/waddownload.html からダウンロード。	日射や風、気圧等の海洋気象条件を入力し、気象場によって生じる海洋の流れ、海水面の変化を解析することができる。	http://www.aos.princeton.edu/WWWPUBLIC/htdocs.pom/publications.htm	http://www.ccpo.odu.edu/~tezer/POMDB/references.php
MOM・GOLD	海洋大気庁地球流体力学研究所	静力学モデルで、Z座標（等水深面）座標系で計算を行う世界標準的な海洋モデルである。	GOLD モデルは、全球から油流出、氾濫まで対応	モデルは無償で公開されている。 https://fms.gfdl.noaa.gov/gf/accout/?action=UserAdd で登録を行って、 http://www.gfdl.noaa.gov/mom-ocean-model では最新版は MOM5 となっているが、download site では、MOM4.1 が最新版。Z*、 σ 、 ρ 座標系を利用できる GOLD モデルもダウンロード可能である。 https://fms.gfdl.noaa.gov/extra/request-project-access.cgi からダウンロード	日射や風、気圧等の海洋気象条件を入力し、気象場によって生じる海洋の流れ、海水面の変化を解析することができる。	http://data1.gfdl.noaa.gov/~arl/pubrel/r/mom4p1/src/mom4p1/doc/guide4p0.pdf	http://www.gfdl.noaa.gov/publications
FVCOM	マサチューセッツ大学海洋科学技術学部	非構造格子、有限体積、自由表面、3次元の沿岸海洋循環モデルである。静力学モデル、非静力モデルの両方がある。	沿岸域、エスチャリー	モデルは無償（非商用の範囲で）公開されている。 http://fvcom.smast.umassd.edu/FVCOM/Source/code.htm から登録するとソースコードが送られる。	日射や風、気圧等の海洋気象条件、潮汐、河川流入、地下水流入を入力し、これらによって生じる海洋の流れ、海水面の変化を解析することができる。	http://fvcom.smast.umassd.edu/FVCOM/index.html	http://fvcom.smast.umassd.edu/Extra/publication.html

参考表 1-9 津波シミュレーションモデル

津波モデル	作成元	特徴	適用範囲	入手方法	利用方法	操作手順	参考文献
東北大学モデル	東北大学津波工学研究室	非線形長波近似方程式で、日本国内で最も用いられている。	近地津波、遠地津波それぞれに対応したモデルがある。 ブシネスクモデル（非線形項と分散項がある）もある。 地形の影響を表現するため 10m 程度の分解能まで計算可。	非公開	地形条件、断層条件を入力して、津波伝搬、陸上遡上を計算する。	—	http://tsunami.dbms.cs.gunma-u.ac.jp/xml_tsunami/xmlindex.php?info=110_reportmetatab_reportsectab など
DELFT SWASH	デルフト工科大学	非線形非静力モデルで、津波伝搬・陸上遡上計算を扱える。 http://swash.sourceforge.net/ を参照。	球面座標、直交座標の両方が利用できるため、遠地津波、近地津波とも扱える。 ブシネスクモデルではない（分散項がない）のでソリトン分裂等は表現できない。 地形の影響を表現するため 10m 程度の分解能まで計算可。	モデルは無償で公開されている。最新版は ver.1.10 で、 http://swash.sourceforge.net/ からダウンロードできる。	地形条件、断層条件を入力して、津波伝搬、陸上遡上を計算する。	http://swash.sourceforge.net/ の Online documentation をクリックして参照。	http://swash.sourceforge.net/ の SWASH related publications をクリックして参照。

参考表 1-10 台風影響を考慮したシミュレーションモデル

台風影響	作成元	特徴	適用範囲	入手方法	利用方法	操作手順	参考文献
2次元台風モデル	藤田の式(1952)、Myersの式(1954)	台風域内の風の分布は、台風スケールに対して観測空間が粗いため気圧傾度に基づく診断的なモデルでは表現できない。台風の構造を単純化した2次元台風モデルによって、台風域内の風の分布を求める。この際、台風中心気圧と最大風速半径、台風の移動速度・針路のパラメータによって風速分布が決定する。	台風による強風域が海上であること。陸上を含む場合にはMASCANモデル等による地形の影響を考慮する必要がある。	モデル式が公開されており、論文、教科書等から式を参照して作成可能である。	台風位置、台風中心気圧と最大風速半径データから、台風周辺の風速分布を求めることができる。	—	Myers,V.A.(1954): Characteristics of U.S. hurricanes pertinent to levee design for Lake Okeechobee, Fla. ,Hydro-meteorol. Rep. No. 32, Weather Bureau, U.S. Dept. Commerce, 106p. Fujita, T. (1952): Pressure distribution in typhoon, Geophys. Mag., Vol. 23, pp437-451.
MM5,WRF Bogus	ペンシルバニア州立大学と米国大気研究センター (The Pennsylvania State University and NCAR)	中心位置、最大風速、最大風速半径を入力する。中心気圧が観測値(台風ベストトラック等)と合うように、試行錯誤で、最大風速を設定しなければならない。WRFの場合は3DVARで台風中心気圧を同化できるため、MM5よりもやや使いやすい。	熱帯低気圧	無償	メソ気象モデルの初期値、データ同化のための準観測値として利用する。	MM5,WRFのマニュアルを参照	MM5,WRFの参考文献を参照
気象庁 ANL Bogus	気象庁	台風ベストトラックデータを基に中心位置、中心気圧、最大風速、最大風速半径、15m/s 風速半径を入力すればよい。	熱帯低気圧	モデルは気象庁から公開されていないが、日本気象協会では文献を基にこのボーガスを導入している。	メソ気象モデルの初期値、データ同化のための準観測値として利用する。	—	大澤輝夫(2007): 台風時における沿岸海上風の推定手法, 日本風工学会誌, pp.369-378. 財団法人日本気象協会編: 台風時の内湾海上風推算の研究(その1), 日本財団助成研究報告書, 2004. 財団法人日本気象協会編: 台風時の内湾海上風推算の研究(その2), 日本財団助成研究報告書, 2005. 中野俊夫(2012): 沿岸防災を目的とした海上風追算手法の開発とその利用に関する研究, 九州大学博士学位論文.
渦位ボーガス	吉野ら	気象モデル、台風ベストトラックデータをそれぞれ渦位場に変換して結合し、その後、渦位場から気象場に逆変換する。台風周辺場との不連続がないため、計算初期の台風減衰がない。風の分布を求める。この際、台風中心気圧と最大風速半径、台風の移動速度・針路のパラメータによって風速分布が決定する。	熱帯低気圧	モデルは公開されていない。	メソ気象モデルの初期値、データ同化のための準観測値として利用する。	—	吉野純・児島弘展・安田孝志(2008): 台風予測精度向上のための渦位に基づく新しい台風ボーガス手法の構築, 海岸工学論文集, 第55巻, pp.436-440.

第1節 材料

1. 使用材料

- (1) 浮体式洋上風力発電施設の主要構造部及び排水設備等に使用する材料については、船舶構造規則(平成10年運輸省令第16号)に規定する材料を使用しなければならない。
- (2) (1)において定められる以外の材料を使用する場合には、国土交通省海事局検査測度課長まで必要な資料を添えて伺い出ること。

【解説】

(1)

使用材料

本項目では、主要構造部及び排水設備等に使用される材料として、主に圧延鋼材及び排水管等の材料について述べる。本項において記載されている船舶構造規則(平成10年運輸省令第16号)を一部抜粋する(下記破線内)。

第二章 船体及び排水設備の材料及び溶接

(船体及び排水設備の材料)

第四条 船体及び排水設備には、材質の区分ごとに告示で定める要件に適合する材料を使用しなければならない。ただし、Lが二十五未満の船舶の船体には、管海官庁が適当と認める材料を使用することができる。

圧延鋼材に関して、告示で定める要件に適合する材料とは、表2-1-1-1に示す材料であり、告示で定める要件とは、使用箇所に応じて、軟鋼を使用する場合には告示別表第四に示す軟鋼を、高張力鋼を使用する場合には、告示別表第五に示す高張力鋼を使用するということである。詳細は、船舶構造規則を参照のこと。

なお、NK鋼船規則P編(海洋構造物及び作業船等)による場合には、NK鋼船規則P編2章を適用することになる。この場合、船体構造及び船体艙装等に使用される圧延鋼材は、NK鋼船規則K編(材料)の規定に適合するものとなる。NK鋼船規則K編2章では、船体用圧延鋼材について、表2-1-1-2に示すように軟鋼、高張力鋼及び調質高張力鋼の種類が挙げられている。詳細は、NK鋼船規則K編を参照のこと。

(圧延鋼材)

表2-1-1-1 船体に使用する圧延鋼材の分類(船舶構造規則より引用)

軟鋼	高張力鋼
MA 鋼	HA32 鋼
MB 鋼	HD32 鋼
MD 鋼	HE32 鋼
ME 鋼	HA36 鋼
	HD36 鋼
	HE36 鋼

表 2-1-1-2 船体用圧延鋼材の種類（NK 鋼船規則 K 編より引用）

使用材料	K 編で規定される記号
軟鋼	KA KB KD KE
高張力鋼	KA32, KA36, KA40 KD32, KD36, KD40 KE32, KE36, KE40 KF32, KF36, KF40
構造用調質 高張力圧延鋼材	KA420, KA460, KA500 KA550, KA620, KA690 KD420, KD460, KD500 KD550, KD620, KD690 KE420, KE460, KE500 KE550, KE620, KE690 KF420, KF460, KF500 KF550, KF620, KF690

（排水管等の材料）

告示第六条に排水管、排出管、ビルジ管、バラスト管、空気管及び測深管に使用する材料について、その種類に応じて要件を定めている。（表 2-1-1-3）

表 2-1-1-3 排水管等の材料の使用区分（船舶構造規則より引用）

管の種類		材料
排水管及び排出管	上甲板より下方の船側外板を貫通するもの	鋼
	その他の排水管	鋼、銅、銅合金又は鋳鉄
ビルジ管		鋼
バラスト管		鋼
空気管	タンク内に配置されるもの	鋼、銅、又は銅合金
	その他の空気管	鋼
測深管	測深されるタンク以外の場所にある部分	鋼
	測深されるタンク内の部分	鋼、銅、銅合金又は鋳鉄

(溶接)

浮体施設及びタワーの溶接については、NK 鋼船規則 M 編 (溶接) あるいはその他の適切な基準に従うこと。

(2)

(1)以外の材料を使用する場合

ここでは、鋼以外の材料として、浮体式洋上風力発電設備において適用される可能性が高いコンクリートについて記載する。

(コンクリート)

コンクリート材料 (セメントなどの結合材、砕石骨材、砂、スラグ骨材、鉄筋等を含む) は、使用する目的と使用される場所に適したものでなければならない。

コンクリートは、混合される素材の構成により、セメントコンクリート、アスファルトコンクリート、レジンコンクリートに分類される。

また、鋼材との複合材料としては、鉄筋コンクリート、プレストレストコンクリート、その他に分類される。

浮体式洋上風力発電施設においては、浮体施設の固定バラスト、鋼材との複合材料として浮体施設、タワー及び海底部の係留装置の固定のための基礎等への適用が考えられる。

浮体施設、タワー等の構造強度部材として使用する場合には、適切な強度評価を行い、十分な安全性を有していることを確認する必要がある。コンクリートの材料特性から、特に、曲げモーメントや引張り荷重が作用する部材として使用する場合には、注意が必要である。

詳細は「(別冊) コンクリート製浮体式洋上風力発電施設的设计施工ガイドライン」を参照すること。

第2節 荷重

1. 一般的事項

- (1) 設計計算では、2. に規定する荷重を考慮するとともに、風力発電設備から浮体施設及びタワーに働く荷重を考慮しなければならない。
- (2) 浮体施設及びタワーに対しては、時間領域での連成解析を行わなければならない。解析の際には、荷重を正確に把握するために十分なシミュレーション時間を確保しなければならない。なお、管海官庁が適当と認めた場合においては、模型試験によって荷重を算定しても差し支えない。
- (3) 風力発電設備の制御により浮体施設及びタワーの動揺が励起される場合、励起された動揺による荷重を考慮しなければならない。

【解説】

(2)

連成解析

浮体式洋上風力発電施設には、第2編第1章で述べた気象・海象が作用する。それによって、風車の発電時・停止時等の状況に応じた風荷重が発生し、また、それに加えて波・潮流等の外力によって浮体動揺が発生する。浮体動揺が発生することによって、浮体構造物回りに流体力が発生し、浮体構造物につながる係留系や送電ケーブルからの荷重も発生する。また、風車は、ブレードのピッチ角制御を行うので、それによる荷重変動も考慮に入れる必要がある。

これらの荷重は、独立して解析することは出来ず、連成一体解析で同時に解析される。ここで、連成一体解析とは、発電機特性やブレードのピッチ角制御を含めた風車の稼働状態および暴風状態等をモデル化し、風車に働く風荷重、浮体構造物に働く波・流れ等の外力、係留系の影響等を同時に考慮し、一体として運動方程式を解くことを意味する。主に時系列解析が行われ、その一定時間内に発生した最大値等の統計的指標で安全性の評価が行われる。

連成一体解析が可能なプログラムとしては、研究機関、認証機関、大学等が開発しているいくつかの解析プログラムが市販あるいは公開されている。これらのソフトウェアは風車のスラスト、ロータ回転数、タワー基部に働く荷重やモーメント等を算出可能であり、中には認証に用いることが可能なものもある。

一体連成解析を実施する場合は十分に検証されたプログラムを使用するか、解析結果を模型試験結果と比較しその精度を検証しなければならない。とくに解析対象のモデル化については十分注意しなければならない。

解析では、時系列解析による連成解析を標準とするが、一部に周波数領域解析も用いられる場合がある。周波数領域解析とは、多くの周波数成分が合わさった現象において、個別周波数に分解して、運動方程式を解くための諸係数を求め、それらの係数

を使用して調和振動を仮定した運動方程式を解くことを指す。

個別周波数の運動方程式を解いた結果の入力周波数ごとの応答関数（または RAO）を求め、スペクトル法によって不規則外力中の応答を求める場合、応答のエネルギー密度関数 S 及び分散 σ^2 は下記で与えられる。

$$S(\omega, \alpha) d\omega d\alpha = [RAO(\omega, \alpha)]^2 \cdot f(\omega, \alpha) d\omega d\alpha \quad (2-2-1-1)$$

$$\sigma^2 = \iint S(\omega, \alpha) d\omega d\alpha \quad (2-2-1-2)$$

ここで、 $f(\omega, \alpha)$ は外力のスペクトル、
 ω は入射外力の角周波数、
 α は入射外力の入射角である。

また、船体応答 x の極値 X が、ある値 x_1 を超える確率 q は、狭帯域定常ランダム過程の場合、レイリー分布を仮定して下記で与えられる。

$$q(X > x_1) = e^{-x_1^2/2\sigma^2} \quad (2-2-1-3)$$

一般的に、短期海面における極値の確率として、1/1,000 が用いられる。

上記のスペクトル法的前提は、波浪について線形性が成り立ち、外力と応答が線形関係にあり、かつ、分解された各周波数に対する応答が線形独立関係にある事である。全ての事象が厳密にこの仮定に合致する訳ではないので、この仮定が合理的では無い場合にスペクトル法を用いる場合には、基礎となる規則応答の設定を適切に設定する必要がある。

周波数領域法は、浮体運動に関して風車待機時における応答については適用できる可能性があるが、発電時における解析については適用が困難である。ただし、風車待機時においても連成一体解析（時間領域解析）や模型試験結果との比較等を含めて、解析結果の妥当性について十分に証明する必要がある。また、係留系については非線形性が強いいため、風車の状態にかかわらず時間領域解析が推奨される。

なお、通常は微小振幅を仮定（原点まわりで線形化）した解析を行うが、それが非安全側になる場合（大振幅時に、例えば衝撃荷重等の別の物理モデルによる現象が付加されることにより応答が大きくなる場合）、あるいは、合理設計上で過大な評価になる場合（大振幅時に、例えば非線形的に増大する減衰力等によって応答が抑制される場合）には、線形化を適切に行う必要がある。

模型試験

模型試験によって設計荷重等の設計用数値の取得に当たっては、待機時を対象とする場合には、基本的には従来の海洋構造物の試験法が準用できる。発電時を対象とする場合には、従来の海洋構造物の試験法に加えて、風車について適切な模型を使用す

ることが重要である。風車については、必要に応じて、ブレードピッチ制御についても模擬する必要がある。

フルード数、レイノルズ数などによる相似則について適切に配慮する必要がある。相似則を合わせる事が困難な場合、設定した模型の寸法効果が、実機に比して、設計上安全側になっていることが必要である。

一般的に模型サイズの場合、レイノルズ数が実機より小さくなる場合が多いが、風車の空力荷重に関しては、レイノルズ数が小さい場合、一般的には、翼型の失速角は小さく、抗力係数は大きいので、基本的には設計上安全側になる場合が多い。

標準的な模型試験方法として、「付録2 連成一体挙動を求める標準試験法および計測結果例」を参照すること。

(3)

制御および制御励起動揺

通常、風車は自動運転されており、風速がカットイン風速に達すると運転を開始しカットアウト風速で運転を停止するように自動制御されている。風速に応じて最適な発電出力を得られるように制御されており、発電機トルク制御、ブレードピッチ角制御が行われる。また、風向変化に追従するために、ロータ回転面が風向に正対するようナセルのヨー角の制御も併せて行われる。本項でいう制御とはブレードピッチ角制御を指す。また、「風力発電設備の制御により浮体施設及びタワーの動揺が励起される」とは波浪による浮体の動揺中に定格風速以上の風速に対し、陸上風車と同様のブレードピッチ角制御を行ったことに起因して発生する可能性のある、浮体の動揺現象（以下、制御励起動揺と呼ぶ）を指す。制御励起振動の影響については一体連成解析プログラムまたは水槽模型試験によりその大きさと傾向を把握し、浮体・風車・係留系の安全性に問題がないことを確認しておかなければならない。

風車は定格風速付近からカットアウト風速までの風速範囲において、ブレードのピッチ角制御を行い、風速の変化に対しロータ回転数が一定になるよう制御している。

ロータの回転に起因する力にはスラスト力があるが、水平軸風車は長大なタワーの頂部にナセルがあるためモーメントのレバーが大きくなり、スラスト力は主に浮体のピッチング運動の要因となる。

波浪により浮体がピッチング運動していると仮定し、定常風により発電状態にあるとする。ロータ回転数一定制御を行っている状況において、浮体運動は相対風速を変化させる。浮体および風車が風方向に傾斜すると相対風速は増大し、逆の方向に傾斜すると相対風速は減少する。相対風速が増えるとロータ回転数が増大するため、ブレードピッチ角を変化させ、ロータ回転数を減少させる、すなわちスラスト力を減少させるための制御を行う。一方、相対風速が減少するとロータ回転数が減少するため、ブレードピッチ角を変化させ、ロータ回転数を増加させる、すなわちスラスト力を増

加させるための制御を行う。ここで、スラスト力の変化は図 2-2-1-1 の範囲では図 2-2-1-2 に示すようにピッチング運動を増幅させるように働く。

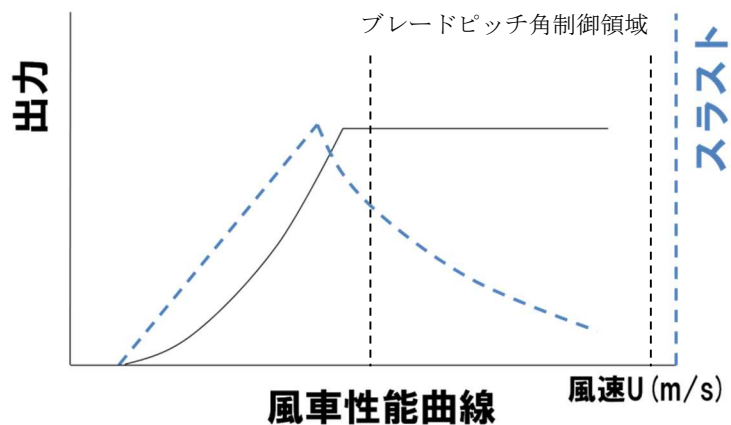


図 2-2-1-1 風車性能曲線のイメージ

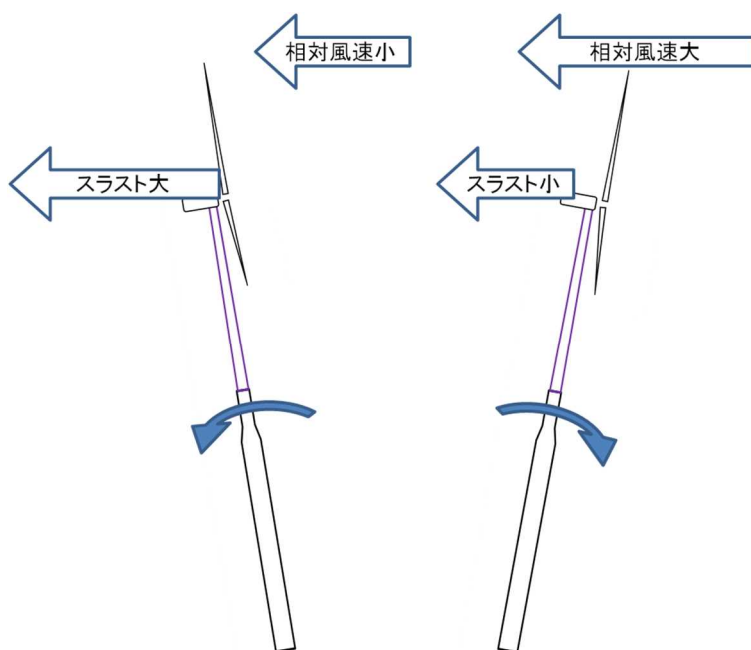


図 2-2-1-2 制御励起動揺のイメージ

以上について運動方程式をまとめると以下のように表現できる。浮体のピッチングの運動方程式を以下のように定義する。なお、ここでピッチング運動は、ロータの回転軸が前後する方向である。

$$(I_{Mass} + A_{Radiation})\ddot{\xi} + (B_{Radiation} + B_{Viscous})\dot{\xi} + (C_{Hydrostatic} + C_{Lines})\xi = L_{HH}T \quad (2-2-1-4)$$

ただし ξ :	ピッチング運動の変位
I_{Mass} :	慣性モーメント
$A_{Radiation}$:	付加慣性モーメント
$B_{Radiation}, B_{Viscous}$:	波減衰力および粘性減衰力
$C_{Hydrostatic}, C_{Lines}$:	浮体および係留ラインの復原力
T :	スラスト力
L_{HH} :	ハブ高さ

ハブの前後方向の変位 x は、線形化して考えると以下の式で表せる。

$$x = L_{HH}\xi \quad (2-2-1-5)$$

ハブの前後方向の動揺速度 \dot{x} が微小と仮定してロータのスラストをテーラー展開し1次の項で表現すると、相対風速を V として、

$$T = T_0 - \frac{\partial T}{\partial V}\dot{x} \quad (2-2-1-6)$$

(2-2-1-4)式に(2-2-1-5)式、(2-2-1-6)式を代入すると以下の式になる。

$$\frac{(I_{Mass} + A_{Radiation})}{L_{HH}^2}\ddot{x} + \left(\frac{(B_{Radiation} + B_{Viscous})}{L_{HH}^2} + \frac{\partial T}{\partial V} \right)\dot{x} + \frac{(C_{Hydrostatic} + C_{Lines})}{L_{HH}^2}x = T_0 \quad (2-2-1-7)$$

となる。ここで、 $\partial T/\partial V$ が負になる場合この項をネガティブダンピングと呼ぶ。ネガティブダンピングの影響により浮体動揺が大きくなる現象が見られる場合があり、この動揺増大現象を、ここでは制御励起動揺と称した。制御励起動揺の影響については一体連成解析プログラムまたは水槽模型試験によりその大きさと傾向を把握し、浮体・風車・係留系の安全性に問題がないことを確認しておかなければならない。

【第2編 第2章 第2節 荷重】

2. 荷重

2-1. 重力荷重及び慣性荷重

重力荷重及び慣性荷重とは、重力、浮体施設の動揺、振動及び地震によって生じる静的及び動的荷重のことをいう。

【第2編 第2章 第2節 2. 荷重】

2-2. 空力荷重

- (1) 空力荷重とは、空気流並びに空気流と浮体式洋上風力発電施設における静止部及び可動部との相互作用によって生じる静的及び動的荷重のことをいう。
- (2) 空気の流れは、風力発電設備におけるロータ面を通過する平均風速、乱れ、ロータの回転速度、空気密度及び風力発電設備の構成部品の空力形状並びに空力弾性効果を含むそれらの部品の相互作用効果に依存する。

【解説】

(1)

可動部

ここでの可動部とは、風車構造のうちナセルおよびロータを指す。

(2)

相互作用効果

ここでの相互作用とは、ナセルのヨー角の変化に伴う風荷重の変化、ブレードピッチ角及びロータ回転数の変化に伴うスラスト荷重の変化、波および風による浮体動揺に伴う相対風速の変化に伴う風荷重の変化等を指す。これらの荷重は連成一体解析あるいは水槽模型試験により求め、浮体・風車・係留系の安全性に問題がないことを確認しておかなければならない。

なお、風力発電設備支持物構造設計指針・同解説（土木学会）を準用して差し支えない。

【第2編 第2章 第2節 2. 荷重】

2-3. 運転荷重

運転荷重とは、風力発電設備の運転及び制御によって生じる。

2-4. 水力荷重

- (1) 水力荷重とは、水の流れと浮体施設との相互作用によって生じる動的荷重のことをいう。
- (2) 水力荷重は、水の流れの運動、水の密度、水深、浮体施設の形状及びそれらの水力弾性効果を含む相互作用効果に依存する。
- (3) 浮体施設のうち水力荷重を受けるものとして設計されていない部分は、再現期間 50 年の最高波頂高の期待値に最小間隔を加えた高さに位置していなければならない。このとき、最高天文潮位、高潮、極値波の波頂高及び浮体施設の動きを考慮しなければならない。最小間隔はエアギャップと呼ばれるが、これは $0.2 \cdot H_{s50}$ と定義される。ただし、最小値は 1 m とする。また、浮体施設の附属物の設計においては、波の打上げによって生じる水力荷重を考慮すべきである。

【解説】

(1)

水力荷重

水力荷重は浮体の動揺に伴うラディエーション力、フルード・クリロフ力とディフラクション力の和で表される波強制力、粘性流体力と解釈して差し支えない。潮流力は主として係留系の安全性の検討に用いられる。

(2)

水力弾性効果

水力弾性効果は、浮体が大規模あるいは弾性構造である場合、すなわち浮体の弾性応答が問題となる場合に考慮しなければならない。

(3)

波浪衝撃圧

浮体施設の附属物とは、例えば洋上作業用のデッキや垂直梯子を指す。波の打上げによって生じる水力荷重として、波浪変動圧とともに波浪衝撃圧を考慮しなければならない。ただし、波浪衝撃圧および波浪変動圧は全体強度解析には考慮しなくても差し支えない。

エアギャップ

浮体施設の乾舷及びエアギャップは、しばしば混同して用いられることがあるが、「甲板上面の浸水（狭義の乾舷）」及び「甲板下面またはロータ下端の接水（狭義のエアギャップ）」の視点から考慮するものとする。

甲板上面の浸水に関しては、甲板上の交通性の障害、開口部からの海水流入による

復原力の喪失、青波の荷重による甲板または甲板上構造物の破損などの防止に留意する必要がある。

甲板下面の接水に関しては、波浪衝撃荷重による構造損傷の防止に留意する他、海水透過性（網状など）の甲板にあっては甲板上の交通性の阻害の防止にも留意する必要がある。

上記に関する特段の配慮をしない構造もしくは設備は、50年の再現期間における最高波頂から上下方向距離を50年再現期間の波高の0.2倍以上に設定しなければならない。ただし、最小値は1.5m以上を取ることを強く推奨するものとする。最高波頂を設定する際には、必要な全ての浮体運動、非線形的な波の挙動等を考慮するものとする。

2-5. 海水荷重

- (1) 浮体施設に作用する海水荷重は、静的荷重及び動的荷重の両方が存在する。静的荷重は、結氷板の温度変動か水面変化のいずれかによって生じる。動的荷重は、風及び潮流によって引き起こされる氷盤の動きによって、また、氷盤及びその破片が浮体施設と接触することによって生じる。
- (2) 氷荷重の設計との関連性は、サイトにおける特性によることとなる。指針として、IEC 61400-3-1 の規格を参照すること。

【解説】

我が国においては、海水の存在する海域はオホーツク海沿岸のみであるため、海水荷重の評価は浮体式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差し支えない。

海水荷重の算出においては、浮体式風力発電施設を海水域へ設置する場合、温度変化に由来する定着氷板による静的荷重を考慮する必要はない。同様に水位変動及びアーチ効果による静的荷重を考慮する必要はない。

移動氷による動的荷重については式(2-2-5-1)を用いて評価してよい。ただし、支持構造は鉛直の円柱構造の場合である。

$$F_d = k_1 k_2 k_3 h D \sigma_c \quad (2-2-5-1)$$

ここで、 k_1 は氷衝突面における支持構造物形状に関する形状係数、

k_2 は支持構造と氷が接触する場合の接触係数、

k_3 氷厚と支持構造直径の比率の係数

D は水線面における支持構造直径

σ_c は氷の破砕強度である。

また、風や水流により氷に作用する荷重は式(2-2-5-2)を用いて評価してよい。ただし、氷の破砕強度を上限とする。

$$F_f = C_d \rho \frac{U^2}{2} A \quad (2-2-5-2)$$

ここで、 C_d は 0.004 (風の場合) または 0.006 (水流の場合)、

ρ は 1.3[kg/m³] (風の場合) または 1,000[kg/m³] (水流の場合)、

U は氷表面 10m 情報の風速または氷底面 1m 下方の流速

A は氷板面積である。

荷重評価の際は、氷厚は観測データ等を利用して求めること。なお、海洋構造物への海水荷重の算定について、ISO 19906 を参照しても差し支えない。

2-6. その他の荷重

- (1) 風力発電設備後流荷重、衝撃荷重、氷荷重などが発生する可能性がある場合については適宜考慮しなければならない。
- (2) 内圧並びに外圧及びそれからにより生じる浮力によって浮体施設に作用する静水圧荷重についても適宜、考慮しなければならない。
- (3) 渦抵抗により浮体施設の部材に振動が発生する場合は、渦抵抗についても考慮すること。
- (4) 揚力が無視できない場合については、揚力を考慮しなければならない。
- (5) 流れによる摩擦力が無視できない場合は、流れによる摩擦力を適切に算定しなければならない。

【解説】

(1)

後流荷重

後流荷重とは、浮体を多数配置したウィンドファームにおいて、波、風、流れの後方において、前方の浮体に起因して発生する波浪荷重、風荷重、潮流荷重の増加または減少を指す。通常は、風車の発電効率等を考慮して風速の主方向に10D程度の間隔が取られるので、浮体の配置間隔が通常の風車間隔程度保持されている場合には波、潮流については後流影響を考慮しなくて差し支えない。風の後流影響については海外の知見等も十分に参照すること。

衝撃荷重

衝撃荷重とは、主に作業船の接触による荷重、風車からの落下物による荷重を指すが、局部強度の評価にのみ考慮して差し支えない。

作業船の接触による衝撃荷重については、作業船の寸法等が与えられる場合、本技術基準に基づき作業船の運動エネルギーを求める。この運動エネルギーは全てフェンダーで吸収されると仮定して最大荷重を求める。

「動的増幅の考慮」とは、構造の振動による歪みの増大を指すが、浮体構造の局部振動周期は作業船荷重の変化速度より遥かに短いので、通常はこの効果は考える必要が無い。

(3)

渦励振

渦励振（VIV: Vortex Induced Vibration）とは、流れの中に置かれた物体の後方にカルマン渦が交互に発生することによって流れと直交する方向に発生する振動である。渦励振は一般的にブレース等の細長部材の疲労被害度を大きくするため、その大きさ

と周期を適切に評価しなければならない。

渦励起動揺

渦励起動揺（VIM: Vortex Induced Motion）とは、流れの中に置かれた物体の後方にカルマン渦が交互に発生することによって流れと直交する方向に発生する動揺である。渦励起動揺は一般的に係留索の疲労被害度を大きくするため、その大きさと周期を適切に評価しなければならない。

(4)

揚力

ここで揚力とは海面上の構造が風により、あるいは没水部が波により上方へ持ちあげられる力を指す。浮体の復原性及び係留の安全性において適切に評価しなければならない。

(5)

摩擦

ここで摩擦とは浮体没水部の表面が回流及び潮流から受ける力の一部を指す。係留の安全性において適切に評価しなければならない。

3. 設計条件及び荷重ケース

3-1. 一般的事項

- (1) 設計においては、浮体施設及びタワーの寿命は、経験すると思われる最も重大な状態を網羅した設計条件によって代表させることができる。
- (2) 荷重ケースは、運転モード又はその他の設計条件、例えば、特定の組立、建造又は保守の条件と外部条件との組合せによって決定する。妥当な発生確率のあらゆる関連荷重ケースを制御システム及び保護システムの挙動と合わせて考慮しなければならない。浮体施設及びタワーの構造的健全性の検証に用いる設計荷重ケースは、次の組み合わせから計算する。

- ・ 通常設計条件及び適切な通常又は極値外部条件
- ・ 故障設計条件及び適切な外部条件
- ・ 輸送、据付及び保守の設計条件並びに適切な外部条件

極値外部条件と故障条件との間に相関関係がある場合は、両者の現実的な組合せを設計荷重ケースとして考慮しなければならない。

- (3) 各々の設計条件において数種類の設計荷重ケースを考慮しなければならない、原則として、表 2-1 に示す設計荷重ケースを考慮しなければならない。この表では、設計荷重ケースは、各々の設計条件について風条件、海洋条件、電気条件、その他の外部条件によって規定されている。それに加えて、浮体式洋上風力発電施設が海氷の発生が予想されるサイトに施設される場合においては、表 2-2 に示される設計荷重ケースを考慮する必要がある。
- (4) 各設計荷重ケースに対して、適切な解析タイプを表 2-1 に F 及び U で示す。F は、疲労強度の評価に用いる疲労荷重の解析を意味する。U は、材料強度及び構造安定性に関係した終局荷重の解析を意味する。
- (5) U で示される設計荷重ケースは、通常状態(N)及び異常状態(A)に分類される。通常設計荷重ケースは、浮体施設及びタワーの設計寿命期間を通じて頻繁に発生するものである。風力発電設備は通常な状態か、場合によっては、軽度の故障又は異常状態にある。異常設計条件は、発生頻度が低いものであり、これは、通常、保護システムの作動に至る重大な不具合を伴った設計条件に相当する。設計条件 N 及び A によって、終局荷重に適用される部分安全率 γ_f は異なる。この安全率については、表 2-3 によること。

表 2-1 設計荷重ケース (DLC)

設計条件	DLC	風条件	波	風及び波の方向性	海流	水位	その他の条件	解析のタイプ	部分安全率
1) 発電	1.1	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	NSS $H_s = E[H_s V_{hub}]$	COD 及び UNI	NCM	MSL	RNA に対する極値荷重の外挿時	U	N (1.25)
	1.2	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	NSS H_s 、 T_p 及び V_{hub} の結合確率分布	MIS 及び MUL	水流なし	NWLR 又は MSL 以上		F	—
	1.3	ETM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	NSS $H_s = E[H_s V_{hub}]$	COD 及び UNI	NCM	MSL		U	N
	1.4	ECD $V_{hub} = V_r - 2 \text{ m/s}$ 、 V_r 及び $V_r + 2 \text{ m/s}$	NSS $H_s = E[H_s V_{hub}]$	MIS 及び 風向変化	NCM	MSL		U	N
	1.5	EWS $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	NSS $H_s = E[H_s V_{hub}]$	COD 及び UNI	NCM	MSL		U	N
	1.6	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	SSS $H_s = H_{s,SSS}$	COD 及び UNI	NCM	NWLR		U	N
2) 発電中の故障発生	2.1	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	NSS $H_s = E[H_s V_{hub}]$	COD 及び UNI	NCM	MSL	制御システムの通常故障、電力系統接続の喪失又は第 1 階層の制御機	U	N

							能の故障		
	2.2	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	NSS $H_s = E[H_s V_{hub}]$	COD 及び UNI	NCM	MSL	制御システムの異常な故障又は第2階層の制御機能の故障	U	A
	2.3	EOG $V_{hub} = V_r \pm 2 \text{ m/s}$ 及び V_{out}	NSS $H_s = E[H_s V_{hub}]$	COD 及び UNI	NCM	MSL	外部又は内部の電気故障(電力系統接続の喪失を含む)	U	A
	2.4	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	NSS $H_s = E[H_s V_{hub}]$	COD 及び UNI	水流なし	NWLR 又は MSL 以上	制御システム、電気装置の故障又は電力系統接続の喪失	F	—
	2.5	NWP $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	NSS $H_s = E[H_s V_{hub}]$	COD 及び UNI	NCM	MSL	電力系統故障のライドスルー	U	N
	2.6	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	SSS	MIS 及び MUL	NCM	NWLR	海象状態極限防御システムの故障	U	A
3) 起動	3.1	NWP $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	NSS $H_s = E[H_s V_{hub}]$	COD 及び UNI	水流なし	NWLR 又は MSL 以上		F	—

	3.2	EOG $V_{hub} = V_{in}$ 、 $V_r \pm 2 \text{ m/s}$ — 及 び V_{out}	NSS $H_s = E[H_s V_{hub}]$	COD 及び UNI	NCM	MSL		U	N
	3.3	EDC ₁ $V_{hub} = V_{in}$ 、 $V_r \pm 2 \text{ m/s}$ 及び V_{out}	NSS $H_s = E[H_s V_{hub}]$	MIS 及び 風向変化	NCM	MSL		U	N
4) 通常停止	4.1	NWP $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	NSS $H_s = E[H_s V_{hub}]$	COD 及び UNI	水流なし	NWLR 又は MSL 以上		F	—
	4.2	EOG $V_{hub} = V_r \pm 2 \text{ m/s}$ 及び V_{out}	NSS $H_s = E[H_s V_{hub}]$	COD 及び UNI	NCM	MSL		U	N
	4.3	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	SSS 又は制御若しくは保護 システムの安全上の閾値と なる最も厳しい条件	MIS 及び MUL	NCM	MSL	最大運用海象 条件 (限界値)	U	N
5) 緊急停止	5.1	NTM $V_{hub} = V_r \pm 2 \text{ m/s}$ 及び V_{out}	NSS $H_s = E[H_s V_{hub}]$	COD 及び UNI	NCM	MSL		U	N
6) 待機中 (静止又	6.1	EWM 乱流モデル $V_{hub} = V_{ref}$	ESS $H_s = H_{s50}$	MIS 及び MUL	ECM $U = U_{50}$	EWLR		U	N
	6.2	EWM 乱流モデル $V_{hub} = V_{ref}$	ESS $H_s = H_{s50}$	MIS 及び MUL	ECM $U = U_{50}$	EWLR	電力系統接続 の喪失	U	A
	6.3	EWM 乱流モデル $V_{hub} = V_1$	ESS $H_s = H_{s1}$	MIS 及び MUL	ECM $U = U_{50}$	NWLR	極値ヨーミス アライメント	U	N

	6.4	NTM $V_{hub} < 0.7V_{ref}$	NSS H_s 、 T_p 及び V_{hub} の結合確率分布	COD 及び MUL	水流なし	NWLR 又は MSL 以上		F	—
7)待機中に故障の発生	7.1	EWM $V_{hub} = V_1$	ESS $H_s = H_{s1}$	MIS 及び MUL	ECM $U = U_I$	NWLR		U	A
	7.2	NTM $V_{hub} < 0.7V_{ref}$	NSS H_s 、 T_p 及び V_{hub} の結合確率分布	COD 及び MUL	水流なし	NWLR 又は MSL 以上		F	—
8)曳航、設置及び保守	8.1	製造業者が規定						U	N
	8.2	EWM $V_{hub} = V_1$	ESS $H_s = H_{s1}$	COD 及び UNI	ECM $U = U_I$	NWLR		U	A
	8.3	NTM $V_{hub} < 0.7V_{ref}$	NSS H_s 、 T_p 及び V_{hub} の結合確率分布	COD 及び MUL	水流なし	NWLR 又は MSL 以上	据付け期間中に電力系統接続なし	F	—
	8.4	製造業者が規定						F	—

(備考)

表 2-1 では、次の略語を用いている。

COD 同一方向 (第 2 編第 1 章 3-1. を参照)

DLC 設計荷重ケース

ECD 方向変化を伴う極値コヒーレントガスト (JIS C 1400-1 を参照)

ECM 極値水流モデル (第 2 編第 1 章 3-2-4. を参照)

EDC 極値方向変化 (JIS C 1400-1 を参照)

EOG 運転時の極値突風 (JIS C 1400-1 を参照)

ESS 極値海況 (第 2 編第 1 章 3-1-5. を参照)

ETM 極値乱流モデル

EWLR 極値水面範囲 (第2編第1章 3-3-2. を参照)
EWS 極値ウィンドシア (JIS C 1400-1 を参照)
MSL 平均海水面 (第2編第1章 3-3. を参照)
NCM 通常水流モデル (第2編第1章 3-2-3. を参照)
NWLRL 通常水面範囲 (第2編第1章 3-3-1. を参照)
NSS 通常海況 (第2編第1章 3-1-1. を参照)
UNI 単一方向 (第2編第1章 3-1. を参照)

$V_r \pm 2 \text{ m/s}$ この範囲内のすべての風速に対する感度を解析すること。

F 疲労
N 通常

EWM 極値風速モデル (JIS C 1400-1 を参照)
MIS 方向の不ぞろい (第2編第1章 3-1. を参照)
MUL 多方向 (第2編第1章 3-1. を参照)
NTM 通常乱流モデル (JIS C 1400-1 を参照)
NWP 通常ウィンドプロファイルモデル (JIS C 1400-1 を参照)
SSS 高波浪時海況 (第2編第1章 3-1-3. を参照)

U 終局荷重
A 異常

- (1) 表 2-1 に一つの風速範囲が示されている場合、浮体施設及びタワーの設計に対して最も厳しい条件になる風速を考慮しなければならない。風速範囲は、離散値の数列で表してもよい。この場合、分解能は計算精度を確保する十分なものでなければならない (一般に分解能は 2m/s で十分とみなされる。)。設計荷重ケースの定義においては、第2編第1章で定義した風条件及び海洋条件を参照しなければならない。
- (2) 一般に、平均風向の過渡的変化を伴う設計荷重ケース (DLC1.4 及び DLC 3.3) 及び待機中 (静止又はアイドリング) 設計条件の風力発電設備に対する設計荷重ケースを除くすべての設計荷重ケースにおいて、浮体施設及びタワーに作用する荷重の計算では、風及び波の方向は同一と仮定してよい。
- (3) 幾つかのケースにおいては、多方向からの風及び波は、浮体施設及びタワーに作用する荷重に重要な影響を及ぼすことがある。これは主に、浮体施設及びタワーがどの程度非軸対称であるかによって左右される。表 2-1 に示す設計荷重ケースの中には、風及び波が最悪のケースの一つの方向 (単一方向) から作用すると仮定して荷重計算を実施してよいものもある。ただし、この場合、算出した最悪のケース

の荷重を浮体施設及びタワーの該当方向に適用することによって、構造的健全性を実証しなければならない。

- (4) それぞれの設計荷重ケースについて考慮すべき平均又は極値ヨーミスアライメントは、JIS C 1400-1 の規格によるものとする。ヨーミスアライメントは、風力発電設備における主軸の風向に対する水平方向の偏差と定義される。

【解説】

表 2-1 は IEC 61400-3-1 及び IEC TS 61400-3-2 に基づいている。ただし、IEC TS 61400-3-2 に含まれる発電時及び待機時における係留破断及び区画浸水に関する DLC9.1～9.3 及び DLC10.1～10.3 については、技術成熟度やリスクを考慮の上、必要に応じて検討対象とすることを推奨するものとし、表 2-1 には含めていない。

浮体式洋上風力発電の終局強度設計については DLC1.3 及び 1.6 並びに DLC6.1 及び DLC6.3 が、疲労強度設計については DLC1.2 及び DLC6.4 が重要となる。

DLC9.1～9.3 及び DLC10.1～10.3 に係る条件の組合せは、表 2-2 に示す。

これは健全状態から異常状態（係留 1 本破断及び浸水）への過渡状態及び当該異常状態について取り扱うものである。

係留 1 本破断の異常状態に関しては、DLC9.1 及び DLC10.1 で過渡状態を考慮し、DLC9.2 及び DLC10.2 で定常状態を考慮する。ただし、これらは、係留システムが非冗長システムの場合には考慮しなくてよい。

係留 1 本破断の異常状態に係る DLC9.1 及び 9.2 については、風力発電設備の制御システム及び保護システムの機能等を考慮して適切と認められる場合には、その一部又は全部を考慮しなくてもよい。

浸水の異常状態については第 5 章 4. 損傷時復原性に規定する区画への浸水を考慮するものとし、DLC9.1 及び DLC10.1 で過渡状態を、DLC9.3 及び DLC10.3 で定常状態を考慮する。ただし、第 5 章 4. (1)ただし書及び(2)において管海官庁が適当と認める場合には、それぞれ対応する浸水について考慮しなくてよい。

表 2-2 追加の設計荷重ケース(DLC) (必要に応じて実施することを推奨)

設計条件	DLC	風条件	波	風及び波の方向性	海流	水位	その他の条件	解析のタイプ	部分安全率
9) 発電中の異常発生	9.1	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	NSS	MIS 及び MUL	NCM	MSL	健全状態から冗長性確認条件(DLC9.2 及び 9.3)に至る過渡状態	U	A
	9.2	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	NSS	MIS 及び MUL	NCM	MSL	係留 1 本破断 (冗長システムの場合)	U	A
	9.3	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	NSS	MIS 及び MUL	NCM	MSL	浸水 (損傷時復原性)	U	A
10) 待機中	10.1	EWM $V_{hub} = V_{ref}$	ESS	MIS 及び MUL	ECM	EWLR	健全状態から冗長性確認条件(DLC10.2 及	U	A

の異常発生							び 10.3)に至る過渡状態		
	10.2	EWM $V_{hub} = V_{ref}$	ESS	MIS 及び MUL	ECM	EWLR	係留 1 本破断 (冗長システムの場合)	U	A
	10.3	EWM $V_{hub} = V_{ref}$	ESS	MIS 及び MUL	ECM	EWLR	浸水 (損傷時復原性)	U	A

異常が発生した場合 (DLC9.1 ~ 9.3、DLC10.1 ~ 10.3)

- (1) 異常状態として、係留 1 本破断 (第 3 章 2. (3)(b)の単一係留ライン破断状態) 及び浸水 (第 5 章 4. 損傷時復原性に規定する区画への浸水) を検討の対象としなければならない。
- (2) 係留 1 本破断に係る DLC9.1 及び 9.2 については、風力発電施設の制御システム及び保護システムにより運転が停止される場合などを考慮して想定しなくてもよいと認められるケースについては、検討を省略することができる。
- (3) 浸水の異常状態に係る DLC9.1 及び DLC10.1 の過渡状態については、付録 3 を参考とすることができる。
- (4) DLC9.3 及び DLC10.3 では、損傷区画室の排水、バラスト調整、他の区画への漲水又は係留力を考慮することによる傾斜角の減少を考慮してはならない。
- (5) DLC10.1~10.3 における ESS については、 $H_{S,50}$ のみを考慮すればよい。

【第2編 第2章 第2節 3. 設計条件及び荷重ケース】

3-2. 発電(DLC1.1~DLC1.6)

- (1) この設計条件では、浮体式洋上風力発電施設は運転中であり電気負荷に接続されている。想定する風力発電設備の形状にはロータの不平衡を考慮しなければならない。また、ロータの製造上に規定されている質量及び空力不平衡（例えば、ブレードピッチ及びねじれの偏差）の最大値を設計計算に用いなければならない。
- (2) ヨーミスアライメント、制御装置のトラッキング誤差などの理論的な最適運転条件からの偏差も運転荷重の解析で考慮しなければならない。
- (3) DLC1.1 及び DLC1.2 は、浮体式洋上風力発電施設の設計寿命期間を通じて通常運転条件で発生する大気の流れ(NTM)及び確率論的な海況(NSS)から生じる荷重の要求事項を具体化したものである。
- (4) DLC1.2 では、各平均風速に対して該当する一つの有義波高値を考慮すればよい。ただし、設計の際には考慮する通常海況の個数及び分解能が気象海象パラメータの長期分布に関連した疲労荷重の計算に十分なものとしなければならない。それぞれの通常海況に対する有義波高、ピークスペクトル周期、波向及び水位を気象海象パラメータの長期結合確率分布をもとに、関連する平均風速とともに考慮しなければならない。
- (5) DLC1.2 では、通常海況条件(NSS)を想定する。それぞれの通常海況に対して有義波高、ピークスペクトル周期及び方向を設置サイトに該当する気象海象パラメータの長期の結合確率分布をもとに、関連する平均風速とともに選定しなければならない。設計の際は、考慮する通常海況の個数及び分解能が気象海洋パラメータの完全長期分布に関連した疲労荷重の計算に十分なものとしなければならない。
- (6) DLC1.3 は、極値乱流条件において生じる終局荷重の要求事項を具体化したものである。この設計荷重ケースに対しては通常海況条件(NSS)を想定し、それぞれの個別海況に対する有義波高は、該当する平均風速を条件とする有義波高の期待値としなければならない。
- (7) DLC1.4 及び DLC1.5 は、風力発電設備の耐用期間中に発生し得る重大危機的な事象となり得る過渡的なケースを規定している。これらの荷重ケースでは、通常海況条件(NSS)を想定し、それぞれの個別海況に対する有義波高は、該当する平均風速を条件とする有義波高の期待値としなければならない。
- (8) DLC1.4 では、過渡的な風向変化の前は、風及び波は同一方向であると仮定してよい。
- (9) DLC1.6 は、通常乱流(NTM)及び高波浪時海況条件(SSS)において生じる終局荷重の要求事項を具体化したものである。それぞれの個別海況に対する有義波高は、第1章 3-1-2. に規定するとおり、該当する平均風速の有義波高の条件付き分布から計算しなければならない。

【解説】

(1)

DLC1.1～1.6 は発電状態を対象とする。ここで、ロータの不均衡とは、製造上生じる誤差を意味する。

(2)

ヨー誤差およびトラッキング誤差

ヨー誤差とは、例えばヨー制御装置の故障により生ずる風向と実際のナセルヨー角とのずれを意味する。トラッキング誤差とは、制御装置の動作速度と風向変化速度の差により生ずる風向と実際のナセルヨー角とのずれを意味する。

(3)

DLC1.1

IEC 61400-3-1 には RNA（風車本体）を対象とする記述があり、浮体及びタワーには適用しなくても差し支えない。

(4)

DLC1.6

風力発電設備の制御システム又は保護システムにより一定の運用限界が定められている場合において、その適切性が確認された場合には、当該制御システム又は保護システムの安全上の閾値（運用限界）となる最も厳しい条件を検討に用いてもよい。

【第2編 第2章 第2節 3. 設計条件及び荷重ケース】

3-3. 発電中の故障発生（電力系統接続の喪失を含む。）(DLC2.1～DLC2.6)

- (1) この設計条件は、風力発電設備の発電中に故障又は電力系統接続の喪失が発生した場合に引き起こされる過渡的な事象を扱うものである。風力発電設備の荷重に大きく影響する制御保護システムの故障又は電気システムの内部故障（例えば、発電機の短絡）を考慮しなければならない。
- (2) DLC2.1 では、制御機能関連の故障や電力系統接続の喪失の発生は通常事象として考慮しなければならない。また、独立した2階層からなる制御機能を有している場合は、第1階層の制御機能の故障及び電力系統接続の喪失の発生を通常事象として考慮する。第1階層の制御機能の故障には、一般的には、ロータ速度、ヨー角度、ブレードピッチに関するものが含まれる。
- (3) DLC2.2 では、保護機能、内部電気システムに関連した故障などのまれな事象を異常事象として考慮しなければならない。独立した2階層からなる制御機能を有している場合は、第2階層の制御機能の故障を異常事象として考慮する。第2階層の制御機能の故障には、一般的には、制動システムの不稼働、ピッチ制御システムの障害などが含まれる。
- (4) DLC2.3 では、重大な風事象である EOG を内部又は外部電気システム故障（電力系統接続の消失を含む）と組み合わせ、異常事象として考慮する。DLC2.3 では、最も厳しい荷重条件となるようにこれら二つの事象が発生するタイミングを選定しなければならない。故障又は電力系統接続の喪失がただちに風力発電施設の停止には至らず、それによる荷重が顕著な疲労損傷につながる可能性がある場合には、当該状態が継続すると考えられる時間及び通常乱流条件(NTM)における疲労損傷を DLC2.4 にて評価しなければならない。
- (5) DLC2.5 では、電力系統故障のライドスルーに関する設計条件を考慮する。
- (6) DLC2.1～DLC2.4 では、通常海況条件(NSS)を想定し、それぞれの個別海況に対する有義波高は、該当する平均風速を条件とする有義波高の期待値としなければならない。
- (7) 極値条件における風力発電施設の稼働停止の要因となり得る制御又は保護システムの故障については、DLC2.6 において異常事象として考慮する。

【第2編 第2章 第2節 3. 設計条件及び荷重ケース】

3-4. 起動(DLC3.1~DLC3.3)

- (1) この設計条件は、静止状態又はアイドルリング状態から発電に至る過渡時に洋上風力発電設備に作用する荷重の要因となるすべての事象を含む。発生回数は、制御システムの挙動に基づいて推算しなければならない。
- (2) DLC3.1~DLC3.3では、通常海況条件(NSS)を想定し、それぞれの個別海況に対する有義波高は、該当する平均風速を条件とする有義波高の期待値としなければならない。
- (3) DLC3.3では、過渡的な風向変化の前の状態では、風及び波は同一方向であると仮定してよい。

【解説】

本DLCは静止状態またはアイドルリング状態から風車が起動することにより生じるスラスト力、モーメント等の変動が風車、タワーおよび浮体に及ぼす影響を解析するものである。その大きさが浮体の強度設計に影響しないことが明らかであれば、実施しなくても差し支えない。

【第2編 第2章 第2節 3. 設計条件及び荷重ケース】

3-5. 通常停止(DLC4.1・DLC4.2)

- (1) この設計条件は、発電状態から静止状態又はアイドルリング状態に至る通常の過渡状態において、洋上風力発電設備に作用する荷重の要因となるすべての事象を含む。発生回数は、制御システムの挙動に基づいて推算しなければならない。
- (2) DLC4.1及びDLC4.2では、通常海況条件(NSS)を想定し、それぞれの個別海況に対する有義波高は、該当する平均風速を条件とする有義波高の期待値としなければならない。
- (3) DLC4.3では、極値条件に対する制御又は保護システムの閾値を超えた際の風力発電設備の停止を通常事象として考慮する。

【解説】

本DLCは発電状態から静止状態またはアイドルリング状態に通常通り移行することにより生じるスラスト力、モーメント等の変動が風車、タワーおよび浮体に及ぼす影響を解析するものである。その大きさが浮体の強度設計に影響しないことが明らかであれば、実施しなくても差し支えない。

【第2編 第2章 第2節 3. 設計条件及び荷重ケース】

3-6. 緊急停止(DLC5.1)

- (1) 緊急停止によって生じる荷重を考慮しなければならない。
- (2) DLC5.1 では、通常海況条件(NSS)を想定し、それぞれの個別海況に対する有義波高は、該当する平均風速を条件とする有義波高の期待値としなければならない。

【解説】

本 DLC は、何らかの要因により緊急停止して発電状態から静止状態に移行することにより生じるスラスト力、モーメント等の変動が風車、タワーおよび浮体に及ぼす影響を解析するものである。その大きさが浮体の強度設計に影響しないことが明らかであれば、実施しなくても差し支えない。

【第2編 第2章 第2節 3. 設計条件及び荷重ケース】

3-7. 待機状態(静止又はアイドリング)(DLC6.1~DLC6.4)

- (1) この設計条件では、待機状態の風力発電設備のロータは静止状態又はアイドリング状態のいずれかである。DLC6.1~DLC6.3 の解析によってこの条件の終局荷重を求めなければならない。また、DLC6.4 は疲労荷重に関するものである。
- (2) DLC6.1 及び DLC6.2 では、極値風条件と極値波条件との組合せは、全体的な極値環境が再現期間 50 年となるようなものでなければならない。極値風条件及び極値波条件の長期結合確率分布を求めるデータがない場合、再現期間 50 年の極値海況において再現期間 50 年の 10 分間平均極値風速が発生すると仮定する。DLC6.3 では、再現期間 1 年の極値海況及び 10 分間平均極値風速の組合せについて同じ仮定を適用する。
- (3) DLC6.1~DLC6.3 は、乱流流入風及び確率論的な海況のシミュレーション又は定常風モデルを決定論的な設計波と組み合わせて処理することで解析することができる。これらの 2 種類のアプローチに基づく、DLC6.1~DLC6.3 の補助的な荷重ケースは、表 2-1 に定義する。風条件が EWM によって定義される設計荷重ケースでは、定常極値風モデル又は乱流極値風モデルのいずれかを表 2-1 のとおり用いなければならない。定常極値風モデルを用いる場合は、IEC 61400-3-1 の規格に示されるように、これを決定論的な設計波と組み合わせ、動的応答に対する適切な補正を行って準定常解析から応答を推算しなければならない。
- (4) DLC6.1~DLC6.3 では、風向及び波向の角度偏差を考慮して浮体施設及びタワーに作用する荷重を計算しなければならない。風向及び波向についてサイト固有の適切な測定値が利用できる場合は、これを用いてこれらの設計荷重ケースの極値風条件と極値波条件との組合せについて方向の角度偏差の範囲を導き出さなければならない。荷重計算は、この範囲内で浮体施設及びタワーに作用する荷重が最大となるような角度偏差を基準としなければならない。サイト固有の適切な風向及び波向のデータがない場合は、浮体に作用する荷重が最大となる角度偏差を考慮しなければならない。この

角度偏差が 30° を超える場合、それを発生させた風向変化に関連した期間は海況の厳しさが減衰するため、極値波高を低下させることができる。極値波高の低下分は、吹走距離、その他の該当するサイト固有の条件を考慮して計算しなければならない。

- (5) 前(4)に関し、極値風条件及び極値波条件は、最初は同一方向と仮定してよい。風力発電設備サイトに暴風が吹き付けると、風向が変化して波向との角度偏差が生じる可能性がある。この間は、風向変化の大きさを考えた場合、波の状態の厳しさは緩和される。
- (6) 特性荷重の発生時に、風力発電設備のヨーシステムにすべりが発生する可能性がある場合、平均ヨーミスアライメントに対して考えられる最も好ましくないすべりを加味しなければならない。極値風条件でヨー運動が予測される（例えば、フリーヨー、パッシブヨー及び準フリーヨー）ヨーシステムをもつ場合には、乱流風モデルを用いなければならない。このとき、ヨーミスアライメントは、乱流風向変化及び風力発電設備の動的ヨー応答に依存する。また、通常運転から極値条件まで風速が増大するときに、風力発電設備が大きなヨー運動又は平衡状態の変化にさらされる場合は、この挙動を解析に含めなければならない。
- (7) DLC6.1 において、アクティブなヨー制御を行う洋上風力発電設備の場合、定常極値風モデルにおいては $\pm 15^\circ$ 又は乱流極値風モデルにおいては $\pm 8^\circ$ の平均ヨーミスアライメントを想定しなければならない。ただし、ヨー装置のすべりが無いことを保証できることが前提である。
- (8) DLC6.1 では、乱流極値風モデルを極値海況条件(ESS)と合わせて採用しなければならない。応答計算には、極値風速と極値海況との各組合せに対して、少なくとも（実時間 1 時間 \times 6 回）の完全動的シミュレーションを用いなければならない。この場合、ハブ高さの平均風速、乱流標準偏差及び有義波高をそれぞれ 1 時間シミュレーション時間に対する 50 年再現値としなければならない。50 年再現平均風速の 1 時間値は、6 回の 10 分間平均から求めることができる。
- (9) DLC6.2 では、極値風条件を含む暴風の初期段階における電力系統喪失を想定しなければならない。制御・ヨー装置用として風力発電設備を 6 時間運転できる電力バックアップが備わっていない限り、最大 $\pm 180^\circ$ の風向変化の影響を解析しなければならない。
- (10) DLC6.2 では、乱流極値風モデルを極値海況条件(ESS)と合わせて採用し、ハブ高さ平均風速及び有義波高は 50 年再現値とする。極値応答の推算には、上記の DLC6.1 と同じ方法を用いる。
- (11) DLC6.3 では、再現期間 1 年の極値風を極値ヨー誤差と組み合わせる。定常極値風モデルにおいてはヨー誤差 $\pm 30^\circ$ 、又は乱流極値風モデルにおいては平均ヨー誤差 $\pm 20^\circ$ を仮定する。
- (12) DLC6.3 では、乱流極値風モデルを極値海況条件(ESS)と合わせて採用する。この

場合、ハブ高さ平均風速及び有義波高は1年再現値とする。極値応答の推算には、上記の DLC6.1 と同じ方法を用いる。

- (13) DLC6.4 では、任意の部材に対して大きな疲労荷重が発生する可能性がある場合（アイドリング状態のブレードの質量などによる）、各風速に対する変動荷重時の非発電時間の予測時間を考慮しなければならない。特に、波の励振及び静止状態又はアイドリング状態のロータからの空力減衰の影響を受けた浮体施設及びタワーの共振荷重を考慮に入れなければならない。海の状態は、通常海況条件(NSS)を想定しなければならない。各通常海況に対する有義波高、ピークスペクトル周期及び波向を関連する平均風速と合わせて選定する。選定は、設置予定のサイトに該当する気象海洋パラメータの長期結合確率分布を基準とする。設計者は、考慮する通常海況の数及び分解能を十分なものとする事で、気象海洋パラメータの最大限の長期分布による疲労損傷を明らかにしなければならない。

【第2編 第2章 第2節 3. 設計条件及び荷重ケース】

3-8. 待機中に故障が発生した場合(DLC7.1・DLC7.2)

- (1) 待機中の風力発電設備の挙動が電力系統又は風力発電設備の故障によって通常挙動から逸脱することについて、解析が必要である。電力系統喪失時以外の故障によって待機状態の風力発電設備の通常挙動から逸脱した場合は、起こり得る事態を特に解析の対象としなければならない。
- (2) ヨー装置の故障の場合は、ヨーミスアライメント $\pm 180^\circ$ を考慮しなければならない。それ以外の故障に対しては、ヨーミスアライメントは DLC6.1 に一致していなければならない。
- (3) DLC7.1 では、故障条件と極値風条件及び極値波条件との組合せは、全体的な極値環境が再現期間1年とならなければならない。極値風条件及び極値波条件の長期結合確率分布を求めるデータが存在しない場合は、再現期間1年の極値海況において再現期間1年の10分間平均極値風速が発生すると仮定する
- (4) DLC7.1 は、乱流流入風及び確率論的な海況のシミュレーションによって又は定常風モデルを決定論的な設計波と組み合わせて処理することで解析することができる。これらの2種類の方法に基づく、DLC7.1の補助的な荷重ケースは、表2-1に定義される。風条件が EWM によって定義される設計荷重ケースでは、定常極値風モデル又は乱流極値風モデルのいずれかを表2-1のとおり用いなければならない。定常極値風モデルを用いる場合は、IEC 61400-3-1の規格を参照し、これを決定論的設計波と組み合わせ、動的応答に対する適切な補正を行って準定常解析から応答を推算しなければならない。
- (5) DLC7.1 では、風向と波向との角度偏差を考慮して浮体施設及びタワーに作用する荷重を計算しなければならない。風向及び波向のサイト固有の適切な測定値が利用で

きる場合は、これを用いてこれらの設計荷重ケースの極値風向と極値波向との組合せについて方向の角度偏差範囲を導出しなければならない。荷重計算は、この範囲内で浮体施設及びタワーに作用する荷重が最大となるような角度偏差の値を基準としなければならない。サイト固有の適切な風向及び波向のデータが存在しない場合は、浮体施設及びタワーに作用する荷重が最大となる角度偏差を考慮しなければならない。この角度偏差が 30° を超える場合、偏差を発生させた風向変化に関連した期間は海況の厳しさが減衰するため、極値波高を低減させることができる。極値波高の低減分は、水深、吹走距離、その他の該当するサイト固有の条件を考慮して計算しなければならない。

- (6) **DLC7.1** にみられる特性荷重においてヨー装置にすべりが発生する可能性がある場合は、考えられる最も好ましくないすべりを考慮しなければならない。
- (7) **DLC7.1** では、乱流極値風モデルを極値海況条件(**ESS**)と合わせて採用する。極値応答の推算は、上記の **DLC6.1** と同じ方法で行わなければならない。
- (8) **DLC7.2** では、任意の部材に対して重大な疲労荷重が発生する可能性がある場合、各風速及び海況に対して電力系統又は風力発電設備の故障による非発電時間の予測時間を考慮しなければならない。特に、波により励振され、及び静止状態又はアイドリング状態のロータからの空力減衰の影響を受けた浮体施設及びタワーの共振荷重を考慮に入れなければならない。海の状態は、通常海況条件(**NSS**)を想定しなければならない。各通常海況に対する有義波高、ピークスペクトル周期及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。選定は、設置予定のサイトに該当する気象海洋パラメータの長期結合確率分布を基準とする。設計者は、考慮する通常海況の数及び分解能を十分なものとするこで、気象海洋パラメータの最大限の長期分布による疲労損傷を明らかにしなければならない。

【第2編 第2章 第2節 3. 設計条件及び荷重ケース】

3-9. 曳航、設置、保守及び修理(DLC8.1~DLC8.4)

- (1) DLC8.1~DLC8.4では、浮体式洋上風力発電施設の曳航、設置、アクセス、保守及び修理で想定されるすべての風条件、海洋条件及び設計条件を考慮しなければならない。考慮すべき最大限の風条件及び海洋条件が風力発電設備に対する重大な荷重を発生させ得る場合は、これらの条件を設計において考慮しなければならない。製造業者は、記載した条件と設計で考慮する風条件及び海洋条件との間には十分なマージンを与え、許容し得る安全レベルを確保しなければならない。
- (2) 洋上風力発電設備の曳航、設置、アクセス、保守及び修理時に発生する荷重は、次のものを考慮に入れなければならない。
- ・工具及び移動型機器の重量
 - ・クレーン操作による荷重
 - ・作業船による係留荷重及び防舷荷重
 - ・必要に応じ、ヘリコプタ作業に関連した荷重
 - ・必要に応じ、渦励振など曳航中に生じる荷重
- (3) 浮体施設の接舷箇所は、作業船の接舷による衝撃を考慮しなければならない。
- (4) 設計条件、作業船の最大寸法及び作業船が浮体施設に接舷する場合の限界外部条件を設計の際考慮しなければならない。また、浮体施設に接触する作業船に0.5m/sの速度で接触する以上の衝撃を考慮しなければならない。このとき付加質量係数は、作業船が横向きに衝突する場合は1.4、船首又は船尾で衝突する場合は1.1とする。この場合、衝撃に関連した全運動エネルギーがフェンダー等の防舷設備によって吸収されるものと仮定する。作業船の接岸が可能な最大風条件及び最大海洋条件による荷重を作業船の衝撃による荷重と組み合わせなければならない。
- (5) 浮体施設が吸収するエネルギーは、作業船の衝撃を与える部分の剛性と比較して浮体施設の剛性がどの程度であるかに依存する。作業船による衝撃の次に重要となるのは、衝撃荷重によって浮体施設になんらかの損傷が発生しないかどうかを調べることである。そのうえで、浮体施設の所定の耐荷力を維持するために修理が必要な場合、その内容を特定しなければならない。
- (6) 設計の際に作業船に関する情報がない場合、衝撃荷重は、5MNの水平荷重を適用して求めることができる。この荷重は、動的増幅を含めて考慮しなければならない。衝突部分の垂直範囲は、作業船の喫水、作業船の接岸が可能な最大波高及び最大潮汐を考慮して評価しなければならない。局部圧力の計算では、垂直方向は2mの範囲を想定すればよい。
- (7) ヘリコプタ作業による浮体式洋上風力発電施設の荷重は、該当時だけ考慮する。設計条件、ヘリコプタの最大寸法及びヘリコプタが浮体式洋上風力発電施設に接岸できる限界外部条件を荷重計算にて考慮しなければならない。

【第2編 第2章 第2節 3. 設計条件及び荷重ケース】

3-10. 海氷設計荷重ケース

海氷が発生すると予測されるサイトに設置する洋上風力発電設備では、浮体施設の設計において表 2-1 の荷重ケースとともに表 2-2 に示す荷重ケースも考慮しなければならない。海氷設計荷重ケース D1 から D8 については、IEC 61400-3-1 の規格を参照すること。

表 2-2 海氷の設計荷重ケース

設計条件	DLC	海氷条件	風条件	水位	解析のタイプ	部分安全率
発電	D1	温度変動による水平荷重	NTM $V_{hub} = V_r \pm 2 \text{ m/s}$ 及び V_{out} 最大スラストとなる風速	NWLR	U	N
	D2	温度変動又はアーチ効果による水平荷重	NTM $V_{hub} = V_r \pm 2 \text{ m/s}$ 及び V_{out} 最大スラストとなる風速	NWLR	U	N
	D3	該当速度の移動氷盤による水平荷重 極値事象の外挿 $h = h_{50}$ 又は移動氷盤よりも大きな値	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	NWLR	U	N
	D4	該当速度の移動氷盤による水平荷重 $h = h_{50}$ in open sea (外洋) $h = h_m$ for land-locked waters (湖)	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	NWLR	F	—
	D5	水位変動による結氷板の垂直荷重	風荷重は適用しない	NWLR	U	N
待機状態	D6	氷丘氷及び氷稜による圧力	EWM 乱流風モデル $V_{hub} = V_1$	NWLR	U	N
	D7	該当速度の移動氷盤による水平荷重 $h = h_{50}$ in open sea (外洋) $h = h_m$ for land-locked waters (湖)	NTM $V_{hub} < 0.7 V_{ref}$	NWLR	F	—
	D8	該当速度の移動氷盤による水平荷重	EWM	NWLR	U	N

	重 $h=h_{50}$ 又は移動氷盤よりも大きな値	乱流風モデル $V_{hub}=V_1$			
--	-------------------------------	-------------------------	--	--	--

(備考)

表 2-2 では、次の略語を用いている。

- DLC 設計荷重ケース
- EWM 極値風速モデル(JIS C 1400-1 を参照)
- NTM 通常乱流モデル(JIS C 1400-1 を参照)
- NWLR 通常水面範囲 (第 2 編第 1 章 3.3.1. を参照)
- F 疲労
- U 終局強度
- N 通常

【解説】

我が国においては、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差し支えない。

海氷荷重の算出においては、浮体式風力発電施設を海水域へ設置する場合、温度変化に由来する定着氷板による静的荷重を考慮する必要はない。同様に水位変動及びアーチ効果による静的荷重を考慮する必要はない。

4. 荷重計算

- (1) 荷重計算は該当する外部条件の組み合わせ適切に考慮した方法により実施すること。
- (2) 2. において規定する荷重をそれぞれの設計荷重ケースで考慮に入れなければならない。また、該当する場合は、次の内容も合わせて考慮に入れなければならない。
- ・構造力学及び振動モードのカップリング
 - ・海洋付着生物の重量が浮体施設の固有振動数及び動的荷重に及ぼす影響
 - ・風車の空力荷重と流体学的（動水圧）荷重との組合せに対する動的応答
- (3) 空力荷重、水力荷重及び海氷荷重の計算においては、適切な方法を用いて実施すること。なお、管海官庁が適当と認める場合においては、模型試験によって設計荷重を算定しても差し支えない。
- (4) 疲労荷重計算用の荷重ケースを定義するのに用いる気象海洋パラメータ（有義波高、ピークスペクトル周期及び平均風速）の分解能は、気象海洋パラメータの最大限の長期分布と関連した疲労損傷を明らかにするのに十分なものとしなければならない。

【解説】

(1)

外部条件の組み合わせ

外部条件の組み合わせは、本節で示された設計荷重ケース（DLC）によるものとする。また、各外部条件の作用について、相互干渉は適切に考慮し、必要なものについては個別に算出された値の合算ではなく、計算モデルの中で同時に扱うものとする。

(2)

構造力学および振動モードのカップリング

構造剛性の考慮については、着目する外力の周波数 (f_m) と構造振動の固有周波数 (f_n) の関係で、下記を考慮する必要がある。

i. $f_m \ll f_n$

構造応答は剛体を仮定したものとして差し支えない

NOTE：波に対する浮体構造物の応答は、一般的には、この領域であるが、浮体が大型化した場合などで注意が必要である

ii. $f_m \doteq f_n$

共振の可能性があるので、構造剛性を正確に扱う必要がある

iii. $f_m \gg f_n$

いわゆる柔構造であり、全体の構造応答挙動に対する剛性の影響が大きいので、構造剛性を正確に扱う必要がある

海洋付着生物の重量が浮体施設の固有振動数及び動的荷重に及ぼす影響

海洋付着生物の重量に加えて周辺海水の付加質量も適切に考慮するものとする。

風車の空力荷重と流体学的（動水圧）荷重との組合せに対する動的応答

浮体式洋上風力発電施設の場合、波浪による浮体動揺とそれによって発生する空力荷重が相互に干渉する力学系であるので、これらを一体に解析することを標準とする。特に、発電時にはこの相互干渉が顕著であり留意する必要がある。一方、待機時には、浮体運動への影響としては、空力荷重を定常荷重と線形減衰として近似できる場合もある。

(3)

空力荷重、水力荷重及び海氷荷重の計算

空力荷重は、風車の荷重計算で一般的に用いられている方法によるものとする。また、水力荷重及び海氷荷重は、船舶・海洋構造物の荷重計算で一般的に用いられている方法によるものとする。

(4)

疲労荷重計算用の気象海象パラメータの分解能

下記の分解能が推奨される。

風速：2m/s 以下

風向：45 度以下

波高：2m 以下

波周期：2s 以下

波向き：45 度以下

第3節 構造設計

1. 一般的事項

- (1) 浮体施設及びタワーの設計寿命は、搭載する風力発電設備の設計仕様上の年数又は20年のいずれか大きい方の値とすること。
- (2) 浮体施設及びタワーの荷重を受ける部材が健全であることを検証し、許容水準の安全性を確認すること。
- (3) 構造部材の強度については、計算及び試験又はそのいずれかによって検証し、適切な安全水準の構造的健全性を立証しなければならない。なお、強度検証試験の荷重レベルについては、本節で規定する特性荷重に適した安全率に対応しなければならない。
- (4) 設計方法として、設計計算の代わりにモデル試験及び試作機試験によって構造設計を行っても差し支えない。この場合、それらについて詳しく記した資料を添えて管海官庁に提出すること。
- (5) 構造部材は、その部材の形状、寸法、周囲条件等を考慮して、座屈に対し十分な強度を有するものでなければならない。
- (6) 繰り返し応力を受ける部材は、繰り返し応力の大きさ、繰り返し数、部材の形状等を考慮し、疲労に対し十分な強度を有するものでなければならない。
- (7) 部材に存在する切欠部又は構造の不連続部に対しては応力集中についても適切に考慮すること。
- (8) 氷水域に設置する浮体施設にあつては、管海官庁の指示によること。
- (9) ムーンプールやターレット係留装置等の大きな開口を設ける場合は、必要に応じて補強し、強度の連続性について留意しなければならない。
- (10) 地震及び津波に対して、浮体式洋上風力発電施設が崩壊及び漂流に至らないようにしなければならない。

【解説】

本技術基準においては、構造設計法のひとつである限界状態設計法を用いている。限界状態設計法とは、構造物が安全性・使用性を確保するにあたって、いくつかの限界状態を設定し、個々の限界状態に応じて安全性を検討する設計方法である。また、限界状態とは、構造物または構造部材が要求される性能を満足することができなくなる状態のことである。

本項では、浮体式洋上風力発電施設の供用期間中において設定される各限界状態に対して、浮体施設及びタワーが構造及び構造強度を確保することを目的とする。なお、本技術基準で想定している限界状態は、「終局限界状態」及び「疲労限界状態」である。本技術基準において検討対象とするこれらの限界状態と、想定される事象を表2-3-1-1に示す（限界状態の設定については、「NOTE：その他規則における限界状態の定義について」も参照のこと）。

また、本技術基準においては限界状態に対する基本的な構造設計法として、部分安全率法が用いられているが、本ガイドラインにおいては、部分安全率法に加えて許容応力法につい

でも記載する（許容応力法を用いる場合は、「NOTE：許容応力法を用いた全体強度評価」を参照のこと）。これらの手法の概要を表 2-3-1-2 に示す。

表 2-3-1-1 本技術基準で検討対象とする限界状態

限界状態	各限界状態において想定している事象
終局限界	最大荷重負荷による構造部材の降伏や座屈に起因する耐荷重性能損失
	地震または津波による浮体式洋上風力発電施設の崩壊及び漂流
疲労限界	繰り返し荷重負荷による構造部材の疲労破壊に起因する耐荷重性能損失

表 2-3-1-2 限界状態に対する一般的な構造設計法の例

設計法	各設計法の概要
部分安全率法	<p>構造物に作用する荷重と構造物（または構造部材、材料）の強度の両者に対して、それぞれがもつ不確実性やばらつき等を考慮するため、それぞれに安全係数を与える設計法。限界状態設計法においては、設定した限界状態に応じた安全率が与えられる。</p> <p>本技術基準においては、強度評価を実施する際に、この手法が用いられている。</p>
許容応力法	<p>設計荷重によって生じる部材の最大応力が、使用する材料ごとに定められる許容応力以下であることを照査し、安全性を検討する設計法。</p>

(1)

浮体施設及びタワーの設計寿命

構造物の寿命は、使用環境、使用する材料、保守・点検方法に依存する。洋上風力発電施設の寿命は、JIS C 1400-1 において風力発電機の疲労寿命が 20 年以上と定められており、本技術基準においても、浮体施設及びタワーの設計寿命は最低でも 20 年としている。ただし、施設の運用方法によっては、搭載された風力発電設備のみを交換し、浮体施設及びタワーは継続して使用されるという方法も考えられるため、施設全体の運用計画を考慮した設計寿命の設定が必要である。

(2)

浮体施設及びタワーの安全性

部材が健全であるとは、設計される条件下において十分な耐久性能、耐荷重性能を有するということである。

(3)

構造部材の強度検証

強度の検証においては、上述の終局限界状態及び疲労限界状態に対して検証を行うこととする。また、本文中の「特性荷重」については、本節「3. 全体強度解析」に後述する。

(4)

試験による構造設計

モデル試験及び試作機試験によって構造設計を行う場合には、少なくとも下記の内容について記載した資料を提出すること。

- 試験条件（荷重、支持条件、モデル縮尺、試験設備等）の設定方法
- 実施した試験条件
- 製作したモデルまたは試作機の寸法、材料、製作時のデータ等
- 試験における測定結果（力、ひずみ、変位、加速度等）
- 試験における測定結果を用いた強度評価結果

(5)

構造部材の座屈強度

圧縮荷重が作用する部材の設計においては、座屈強度に注意する必要がある。強度評価の方法及び部材寸法の決定方法については、本節「**3. 全体強度解析**」及び「**4. 構造部材の寸法**」に後述する。

(6)

構造部材の疲労強度

繰り返し荷重が作用する部材の設計においては、疲労強度に注意する必要がある。強度評価の方法については、本節「**5. 疲労強度**」に後述する。

(7)

応力集中

構造的不連続部や溶接止端部等による応力集中の存在は、部材の疲労強度を大きく低下させる原因となるため、疲労強度評価の際には応力集中を適切に考慮する必要がある。

(8)

氷水域への設置

我が国においては、オホーツク海沿岸に設置される際に、移動氷に起因する荷重について考慮する場合がある。このとき、必要に応じて前節「**2-5. 海水荷重**」において検討される荷重を考慮した強度評価を行うこと。

(9)

開口部の取り扱い

浮体施設及びタワーにおいて、大きな開口を有する構造とする場合には、開口による剛性の低下、応力集中の発生に留意する必要がある。なお、ムーンプールの取り扱いについては、NK 鋼船規則 PS 編等を適宜参照すること。また、基部等に開口を有するタワーの強度評価

においては、「風力発電設備構造設計指針・同解説」（土木学会）に記載の手法を準用して差し支えない。

(10)

地震及び津波への対応

地震の浮体施設への作用は、海水の圧力波として直接伝わるものと、係留への作用に分けられる。前者は海震と呼ばれ、浮体の外板への圧力荷重として作用するが、海震荷重を求めることは困難である。ただし、船舶における従来の知見によると、浮体が受ける加速度として体感されてはいるが、構造損傷に関する有意な報告は無い様である。後者（係留への作用）においては、係留索が損傷しないこと、係留荷重によって浮体構造が損傷しないこと、及び係留荷重に誘起される浮体動揺（加速度）が構造等に悪影響を及ぼさないことが必要である。これらの現象の推定法の例を付録1に示すが、付録1で示したカテナリ係留の場合の試解析例では浮体に対する有意な影響は無い。ただし、TLPの場合には、地震荷重について慎重に検討する必要がある。

また、津波に対しては、水深が十分大きい海域では水位の上下変動及び水平方向の流れとして考えて差し支えない。津波の評価に係る関連事項は付録1を参照のこと。

-----NOTE：その他規則における限界状態の定義について-----

本技術基準においては、限界状態を上述の通り終局限界状態と疲労限界状態の2つに分けているが、限界状態の設定方法は各規則等によって異なる。ここでは、2つの例において、それぞれで設定される限界状態を表2-3-1-3に示す。

表 2-3-1-3 他の規則等で想定される限界状態の例

規則等の名称	定義されている限界状態	備考（本技術基準との相違等）
JISC1400-1 風車－第1部：設計要件	<ul style="list-style-type: none"> ● 終局限界状態解析として下記を実施。 <ul style="list-style-type: none"> ➢ 終局強度解析 ➢ 疲労破壊解析 ➢ 安定性解析 ➢ 臨界変形解析 	<p>左記中の安定性解析では、座屈を考慮。</p> <p>左記中の臨界変形解析では、変形による機械的な干渉（例えばブレードとタワー間）を考慮。</p>
ISO19904-1 Petroleum and natural gas industries –Floating offshore structures – Part1：Monohulls, semi-submersibles and spars	<ul style="list-style-type: none"> ● 終局限界状態 ● 使用限界状態 ● 疲労限界状態 ● 事故限界状態 	<p>本技術基準内には「事故限界状態」については限界状態として設定されていないが、終局限界状態における荷重の安全率を変更することで対応している。</p>

2. 構造配置

- (1) 浮体施設については、十分な乾舷を有す構造であるとともに、水密甲板又は隔壁等により区画割りされなければならない。
- (2) 船体外部及び内部の開口については、その箇所に応じ管海官庁が適当と認める閉鎖装置を備え付けなければならない。
- (3) タンクの大きさは、タンク内液体が浮体施設の縦揺れ又は横揺れに同調して動揺することのないようなものとするか、タンク内に制水隔壁を設けなければならない。ただし、タンク内液体の動揺による荷重に対し、タンク内構造部材が十分な強度を有する場合はこの限りでない。

【解説】

(1)

浮体施設の乾舷及び区画割り

乾舷（エアギャップ）を検討する場合には、前節「2-4. 水力荷重」に記載の内容を参照すること。また、区画割りの取り扱いについては、NK 鋼船規則 C 編または CS 編等を適宜参照すること。

(2)

閉鎖装置の設置

閉鎖装置の設置については、NK 鋼船規則 C 編または CS 編等を適宜参照すること。

(3)

タンク寸法の検討及び制水隔壁の設置

タンク内液体が満載されていないときは、液体の動揺に留意する必要がある。なお、液体の固有周期は自由表面の寸法と液高によって計算される。自由表面が長方形の場合には、この液体の固有周期はそれぞれの動揺方向に対して、以下の式で与えられる。

$$T_L = 2 \sqrt{\frac{\pi L}{g} \coth\left(\frac{\pi D}{L}\right)} \quad (2-3-2-1)$$

$$T_B = 2 \sqrt{\frac{\pi B}{g} \coth\left(\frac{\pi D}{B}\right)} \quad (2-3-2-2)$$

ただし、

T_L ：固有周期（長さ方向動揺時）

T_B ：固有周期（幅方向動揺時）

L ：自由表面寸法（長さ方向）

B ：自由表面寸法（幅方向）

D ：液高

浮体の動揺周期が T_L あるいは T_B に近い時は、液体が同調して動揺し、液面がタンク内側壁、天井に激しく衝突し、衝撃圧力が生じる（スロッシング現象）。したがって、船舶等においては、浮体の動揺と液体の同調周期を異なるように、タンク寸法を決定するか、タンク内に制水隔壁を設ける（自由表面の寸法を制限する）のが一般的である。

3. 全体強度解析

(1) 以下に規定する部分安全率を用いて荷重及び材料の不確かさとばらつき、解析方法の不確かさ及び破壊が発生した場合の構造部材の重要性を考慮すること。

(a) 部分安全率の形式

構造物又は構造部材の安全性は、設計荷重効果 S_d が設計耐力 R_d を超えない場合に満足なレベルであるとみなされる。

$$S_d \leq R_d$$

これは設計基準であり設計不等式とも言われる。対応する等式 $S_d = R_d$ は、設計等式である。

(i) 設計荷重効果

設計荷重効果の設定は、次の何れかの方法によること。

(イ) 設計荷重効果 S_{di} は、特性荷重効果 S_{ki} に所定の荷重係数 γ_f を乗じて求める。

$$S_{di} = \gamma_f S_{ki}$$

ここで、

S_{ki} : 特性荷重効果

(ロ) 設計荷重効果 S_{di} は、設計荷重 F_{di} の構造解析から求める。このとき、設計荷重 F_{di} は、特性荷重 F_{ki} に所定の荷重係数 γ_f を乗じて求める。

$$F_{di} = \gamma_f F_{ki}$$

ここで、

F_{ki} : 特性荷重

動的応答を正しく表現することが最大の関心であるとき、一般には方法1を用いて設計荷重効果を求める。一方、方法2は材料の非線形挙動、形状の非線形性又はその両方を正しく表現することが最大の関心である場合に用いられる。

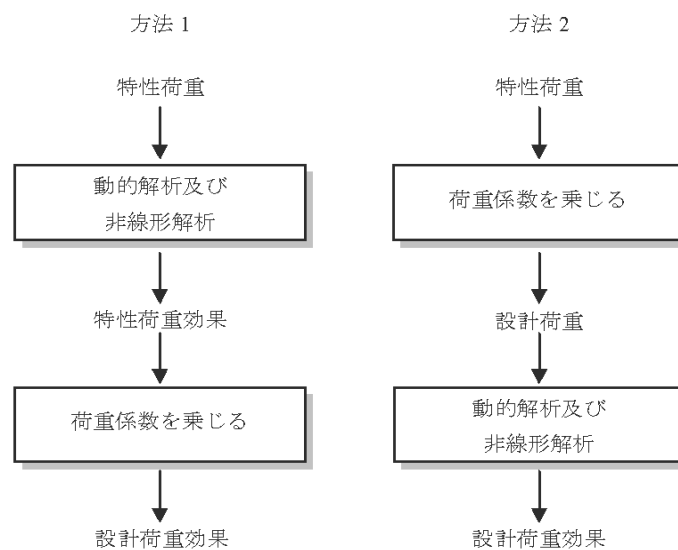


図 2-1 設計荷重効果の2種類の計算方法

(ii) 設計耐力

特定の構造部材の設計耐力 R_d は、次の何れかの方法によること。

(イ) 特性材料強度から設計耐力を求める。

$$R_d = R \left(\frac{1}{\gamma_m} f_k \right)$$

ここで、

γ_m : 材料強度に対する部分安全率

f_k : 材料強度の特性値

(ロ) 特定の構造部品の特性耐力から設計耐力を求める。

$$R_d = \frac{1}{\gamma_m} R_k$$

ここで、

γ_m : 材料強度に対する部分安全率

R_k : 部品耐力の特性値

(2) 全体強度

全体強度においては、終極荷重ケース及び関連の荷重安全率を浮体施設及びタワーの設計に用いなければならない。また、原則として、表 2-1 及び表 2-2 において規定する荷重ケースごとに、設計基準を検証すること。

(a) 荷重に対する部分安全率については、少なくとも以下に規定された値であること。

表 2-3 荷重に対する部分安全率 γ_f

好ましくない荷重 ^{a)}		好ましい ^{b)} 荷重
設計条件のタイプ (前節において規定する設計荷重を参照)		すべての設計条件
通常(N)	異常(A)	
1.35	1.1	0.9

注^{a)} 重力荷重が好ましくない荷重とみなされる場合、重力荷重の部分安全率は 1.0 とする。

注^{b)} 全体的な荷重応答を大幅に軽減する初期張力及び重力荷重は好ましい荷重とみなされる。

ただし、曳航、設置、保守及び修理の荷重ケースにおいて、DLC8.1～8.4 に代えて製造業者が輸送及び建造を一括して規定する場合には、設計荷重に対する部分安全率は 1.5 とする。

(b) 耐力及び材料に対する部分安全率

浮体施設及びタワーの設計耐力は、ISO の海洋構造物設計基準又はその他の一般に認められた海洋設計基準に従って求めなければならない。また、浮体施設及びタワーの材料強度の特性値には、材料の規格降伏強度を用いること。なお、タワーの設計耐力については、JIS C 1400-1 の規格によっても差し支えない。

(3) 特殊部分安全率

荷重の大きさが測定又は結果が通常レベルの信頼性より高いことが測定によって裏付けられた解析によってあらかじめ設定されている場合には、荷重に対して低めの部分安全率を用いることができる。

【解説】

浮体式構造物においては、一般的に荷重は浮体の外板に作用する水圧及び構造重量・貨物重量に作用する慣性力として構造に負荷され、これが各構造部材に流れて全体として内力のバランスに至る。本項に記載されている全体強度解析とは、一般的には浮体施設としてのスパー本体、セミサブにおけるコラム・ブレース及びタワー等をそれぞれ1本ずつの梁と見た場合の全体構造挙動を算出するものである。海洋構造物は、船舶と同様に全体を梁構造に近似できる場合が多く、たとえばスパー型は円柱、セミサブ型は円柱や箱型浮体のような構造要素の組合せと捉えることができる。

● 全体強度解析の目的

全体強度解析においては、浮体施設及びタワーの強度を評価するために、適切な構造解析手法により構造部材に生じる内力を求め、全体強度に寄与する部材の強度評価を実施することが主な目的である。なお、ここで得られた内力は、適切な手法に基づき、局部強度評価の際にも用いられる（表 2-3-3-1 参照）。

表 2-3-3-1 全体強度解析の目的

全体強度解析の目的	概要
全体強度評価	終局限界状態についての全体強度評価を実施する。すなわち、浮体施設及びタワーを構成する部材のうち、全体強度に寄与する部材を対象として、各断面の降伏・座屈強度を評価する。
局部強度評価のための内力算定	全体強度解析において、局部構造をモデル化しない場合は、そのまま構造部材寸法の決定には至らない。その場合は、別途局部強度評価を実施する必要がある。この局部強度評価の際に必要な局部構造評価部位の選定及び局部強度評価時に必要な内力の算定を、全体強度解析によって実施する。

● 全体強度解析の具体的手法

全体強度解析においては、各設計条件及び評価内容に応じて前節における連成一体解析で得られた荷重を使用することができる。全体強度解析のフローを図 2-3-3-1 に示す。

一般に、終局限界状態における強度解析時には、連成一体解析によって得られた最大値を用いて、最大荷重作用時の全体強度評価及び内力分布の取得を実施する。

疲労限界状態における強度評価時には評価部位の局所応力が必要となる場合があるため、適切なモデルによる詳細な応力評価を通じて、連成一体解析によって得られる荷重から、評価部位に生じる応力を算出して評価を行う。

全体強度評価の手法としては、いくつかの方法が考えられるが、ここでは梁理論を用い

た簡易的な手法と有限要素法等を用いることによる数値計算による手法を紹介する（表 2-3-3-2 参照）。有限要素法等による数値解析を実施する場合は、作成するモデルによっては（たとえば強度評価が必要な構造部材をすべてモデル化している場合等）、出力として得られる応力・ひずみ等を用いて、各部材の寸法を直接決定することも可能である。

表 2-3-3-2 全体強度評価手法の例

手法の例	概要
梁理論を用いた手法	構成要素を梁として置き換え、梁理論によって設計荷重を作用させた場合のモデルに生じる内力（軸力、せん断力及び曲げモーメント等）を得る。得られた内力分布に対して、各断面において強度上十分な断面性能を有しているかどうかを評価する。
有限要素法を用いた手法	<p>ビーム要素またはシェル要素等によるモデル化を行う。モデル化においては、得たい結果に応じて（たとえば、特定の箇所の断面力が得たい場合、時間領域解析による内力変動が得たい場合等）要素の選択並びに分割を実施する（図 2-3-3-2 参照）。このとき、モデルに対する境界条件として設計荷重を作用させることで、各部材に生じる応力を得ることができる。</p> <p>また、疲労強度評価を実施する際には、ホットスポット応力等の局部応力が必要となるため、シェル要素等を用いた疲労強度評価対象近傍のファインメッシュモデルの作成を行い、別途応力解析を実施する。</p>

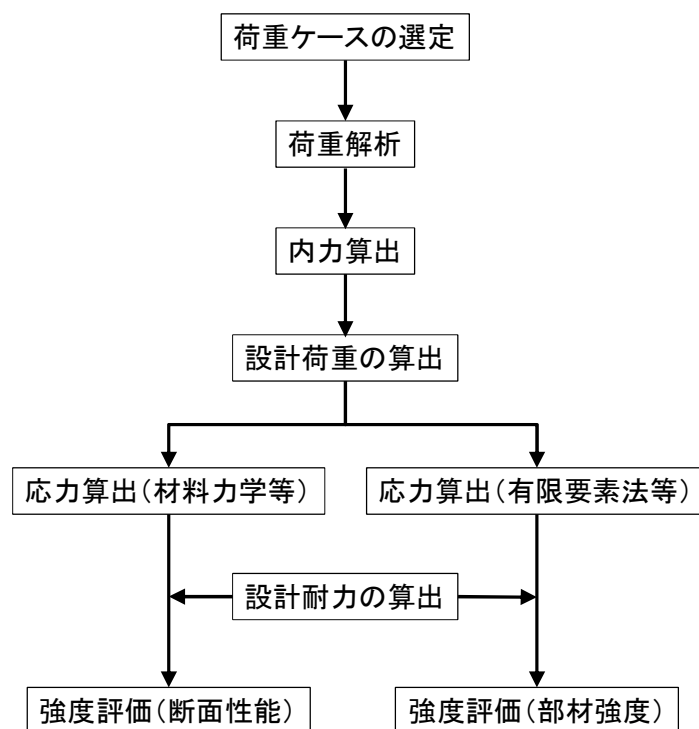


図 2-3-3-1 部分安全率法による全体強度解析フローの例

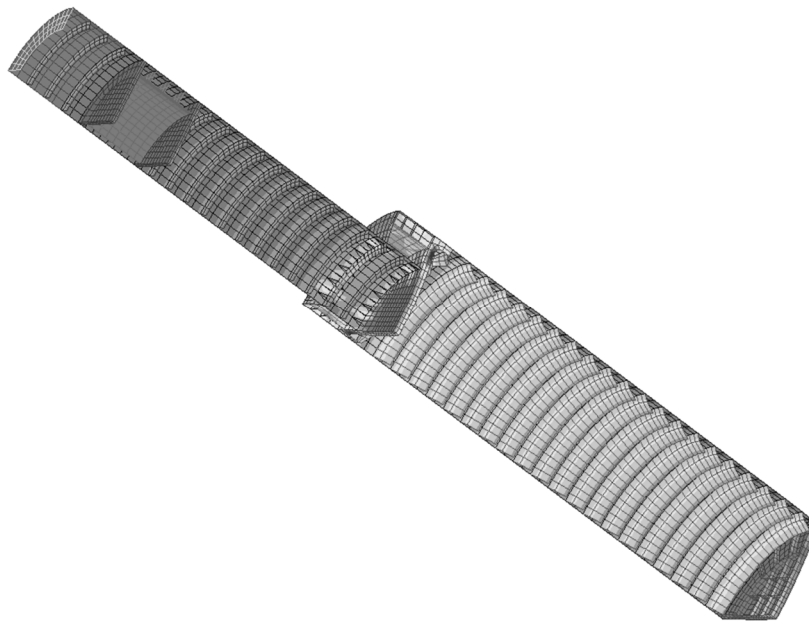


図 2-3-3-2 有限要素モデルの例（スパー型浮体施設の 1/4 対象モデル）

(1), (2)

全体強度解析及び評価における部分安全率

本項の手法を用いて設計する際には、部分安全率として、荷重係数 γ_f 及び材料強度に対する部分安全率 γ_m を使用して各設計値を計算し、本技術基準の文中(a)に記載の算式によって強度評価を実施する。

荷重係数については、原則として本技術基準の本文中の値を使用するものとする（そのほかの例としては、「NOTE : ISO 19904-1 における荷重係数」も参照のこと）。なお、本技術基準の本文中表 2-3 における荷重係数は、「好ましくない荷重」「好ましい荷重」の 2 つに分類されている。すなわち、ある荷重が、全体の荷重を大幅に低減させる方向に作用する場合、表 2-3 の「好ましい荷重」とみなされ、当該荷重の部分安全係数を 0.9 とする必要がある。逆に、ある荷重によって全体の荷重を増す場合は、当該荷重の部分安全係数は 1.0 としなければならない。なお、「好ましい荷重」は、一般的には静的荷重の範囲で考えて差支えない。例えば、重力荷重によって静的引張応力が生じているような部材については、圧縮荷重負荷による破壊モードを評価する場合「好ましい荷重」となるが、引張荷重負荷による破壊モードの場合には「好ましくない荷重」となる。

材料強度に対する部分安全率については、表 2-3-3-3 に示す ISO 19904-1 に記載の値を用いて差支えない。設計耐力の計算においては、一般には、降伏強度を評価する場合は材料の規格降伏強度を用い、座屈強度評価の場合は座屈応力を用いた設計耐力の計算が実施される。

また、材料係数は使用する材料強度の特性値または部品耐力の特性値に関する検証データ等から適切に決定することも可能とする。ただし、材料係数を低減させる場合は、1.0 を

下回らないものとする。

なお、本技術基準の本文中に記載されている S_d 及び R_d は、実施する評価に適したものとする必要がある。このとき、 S_d として用いられる値としては、構造に作用する荷重、断面に作用する内力、応力または変形等が考えられ、 R_d としては材料の降伏応力や許容変形量等が考えられる。

表 2-3-3-3 終局限界に対する材料強度に係る部分安全率 (表では材料係数)
(ISO 19904-1 9.7.3.3 より引用)

評価部位	材料係数
鋼構造	≥ 1.15
上記のうち、ボルト固着部、隅肉溶接部、部分溶け込み溶接部	≥ 1.30

備考：ISO 19904-1 が定める使用限界状態、事故限界状態における材料係数は 1.0 である。

なお、タワーの設計耐力については、JIS C 1400-1 の規格によっても差し支えない。この JIS C 1400-1 においては、材料強度に対する部分安全率のほかに、損傷結果に対する部分安全率が与えられており、これらの値を用いて下式によって強度評価が実施される (表 2-3-3-4 参照)。

$$\gamma_f \times F_k \leq \frac{f_k}{\gamma_m \times \gamma_n} \quad (2-3-3-1)$$

ただし、

γ_f ：荷重の部分安全率

γ_m ：材料の部分安全率

γ_n ：損傷結果に対する部分安全率

表 2-3-3-4 材料及び損傷結果に対する部分安全率 (JIS C 1400-1 より引用)

	材料の部分安全率： γ_m	損傷結果に対する安全率： γ_n
終極強度	<p>(延性挙動をもつ部品) 延性材料の降伏や十分な数のボルトによるボルト結合が一つのボルトの欠陥によって強度が$1/\gamma_m$になりボルト破断する場合：$\gamma_m \geq 1.1$</p> <p>(脆性挙動の非フェイルセーフ機械/構造部品) 湾曲した殻の全体的な座屈：$\gamma_m \geq 1.2$ 引張または圧縮強度を超える破壊：$\gamma_m \geq 1.3$</p>	<p>部品クラス 1：$\gamma_n=0.9$ 部品クラス 2：$\gamma_n=1.0$ 部品クラス 3：$\gamma_n=1.3$</p>
疲労強度	<p>(溶接鋼構造) 97.7%の生存確率が S-N 曲線のベースとして用いられる場合：$\gamma_m \geq 1.1$ ただし、適切な手法により、き裂進展の検出が可能な場合には、$\gamma_m > 0.9$ まで低減できる。</p> <p>(FRP や強化コンクリート等の複合物) 疲労強度の変動係数が例えば 15%~20%と大きい部品の場合：$\gamma_m \geq 1.7$ ただし、材料の強度分布が実際の材料の試験データから確定され、95%信頼レベルで 95%の生存確率が S-N 曲線のベースとして用いられる場合には$\gamma_m \geq 1.2$ まで低減できる。</p>	<p>部品クラス 1：$\gamma_n=1.0$ 部品クラス 2：$\gamma_n=1.15$ 部品クラス 3：$\gamma_n=1.3$</p>

備考：

部位クラスは JIS C 1400-1 の 7.6.1.2 において下記のように定義されている。

- 部品クラス 1：監視付きの交換可能軸受など、故障しても風車の重要部分の不具合には結び付かない、「フェイルセーフ」の構造部品に用いられるもの。
- 部品クラス 2：故障すると、風車の重要部分の不具合につながる可能性がある「非フェイルセーフ」の構造部品に用いられるもの。
- 部品クラス 3：風車の非冗長性保護機能の実行のため、アクチュエータ及びブレーキを主たる構造部品に結び付ける「非フェイルセーフ」の機械部品に用いられるもの。風車の保護機能については、JIS C 1400-1 の 8.3 を参照のこと。

-----NOTE：許容応力法を用いた全体強度評価-----

従来の浮体施設の設計においては、構造設計は許容応力法によるのが主流であり、NK 鋼船規則 P 編を始めとして、主要船級協会の規定も許容応力法に依っている。

一方、風力発電施設の IEC 標準では、部分安全係数法によることとなっており、両者の技術を接合した浮体式洋上風力発電施設において、従来の両技術との整合性を図る必要がある。

そこで、線形性の高い構造応答を前提とする溶接鋼構造設計に対しては、従来の I E C 標準が定める部分安全率法による方法の他、従来の浮体設計に係る船級協会規則が定める許

容応力法による全体強度評価を行っても差支えない。

但し、新規性が高い施設であることに鑑み、船級協会規則が定める許容応力法に対して適切な修正措置を講ずることとする。これにより、結果として、IECの部分安全率法による設計と同等以上の安全度が確保される形となる。

(a) 許容応力 (NK 鋼船規則 P 編の内容を記載)

許容応力は、表 2-3-3-5 に示す値以下とする (静荷重状態及び組合せ荷重状態の定義については、本節「4. 構造部材の寸法」を参照すること)。

なお、板構造において下式に示す等価応力を用いる場合には、静荷重状態及び組合せ荷重状態に対して、各々材料の降伏応力の 0.7 倍及び 0.9 倍以下としなければならない。

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2} \quad (2-3-3-2)$$

ただし、

σ_e : 等価応力 (N/mm²)

σ_x 及び σ_y : 各々 x 軸及び y 軸方向の板厚中央部の応力 (N/mm²)

τ_{xy} : x-y 平面内のせん断応力 (N/mm²)

表 2-3-3-5 静荷重状態及び組合せ荷重状態に対する許容応力
(NK 鋼船規則 P 編 表 P7.1 より引用)

荷重の種類	荷重状態	
	静荷重状態	組合せ荷重状態
引張	0.6 × σ_Y	0.8 × σ_Y
曲げ	0.6 × (σ_Y または σ_{cr} のうち小さい方)	0.8 × (σ_Y または σ_{cr} のうち小さい方)
せん断	0.4 × σ_Y または 0.6 × τ_{cr} のうち小さい方	0.53 × σ_Y または 0.8 × τ_{cr} のうち小さい方
圧縮	0.6 × (σ_Y または σ_{cr} のうち小さい方)	0.8 × (σ_Y または σ_{cr} のうち小さい方)

備考 :

σ_Y : 材料の規格降伏応力 (N/mm²)

σ_{cr} : 圧縮座屈応力 (N/mm²)

τ_{cr} : せん断座屈応力 (N/mm²)

また、圧縮応力が軸力及び曲げ荷重との組合せにより生じる場合は、その圧縮応力は次の算式を満足しなければならない。

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{f_b}{F_b} \leq 1.0 \quad (2-3-3-3)$$

ただし、

f_a : 軸圧縮応力計算値 (N/mm²)

f_b : 曲げ荷重による圧縮応力計算値 (N/mm²)

F_a : 許容軸圧縮応力 (N/mm²) で、次の算式による。ただし、 F_b の値を超えてはならない

$$\lambda < \lambda_0 \text{ の場合 : } F_a = \eta \times \sigma_{cr,i} \times (1 - 0.13\lambda/\lambda_0)$$

$$\lambda \geq \lambda_0 \text{ の場合 : } F_a = \eta \times \sigma_{cr,e} \times 0.87$$

F_b : 表 2-3-3-5 に規定する曲げ荷重に対する許容圧縮応力 (N/mm²)

λ : 部材の細長比

$$\lambda_0 = 2017/\sqrt{\sigma_Y}$$

σ_Y : 材料の規格降伏応力 (N/mm²)

$\sigma_{cr,i}$: 塑性座屈応力 (N/mm²)

$\sigma_{cr,e}$: 弾性座屈応力 (N/mm²)

$\eta = 0.6$ (静荷重状態の場合)

$\eta = 0.8$ (組合せ荷重状態の場合)

(b) 荷重に係る修正係数

設計対象の状況に応じて、推定された荷重に対して下記の値を乗じたものを設計荷重として使用する。

- 当面の運用・・・1.2
- 十分に精度の高い計測等により、推定荷重が安全側であることが確認されているもの
・・・1.2 より減じて良いが 1.0 を下回らないこと。

なお、新しく設計・建造される浮体式洋上風力発電施設は、当分の間は「当面の運用」に該当するものとする。

ただし、本技術基準の表 2-3 内の設計条件のタイプ「異常 (A)」に相当する条件下での設計を行う場合は、さらに下記に示す通り許容応力の修正を行うこと。

- 異常 (A)・・・通常状態に対して許容応力を 20%増す

-----NOTE : ISO 19904-1 における荷重係数-----

ISO 19904-1 では終局限界状態の荷重の部分安全率として、表 2-3-3-6 の値が与えられている (ただし、引用の際に表中「Limit State」から「SLS」「Pre-ALS」「Post-ALS」を除いている)。なお、本節「1. 一般的事項」に記載した通り、ISO 19904-1 の限界状態の設定は、本技術基準で想定している限界状態と異なる点に注意すること。

表 2-3-3-6 終局限界状態における荷重係数 (ISO 19904-1 9.7.3.2 Table4 より引用)

Limit State	Partial action factor γ_f				
	Permanent (G)	Variable (Q)	Environmental (E)	Repetitive (R)	Accidental (A)
ULS-a	1.3	1.3	0.7	—	—
ULS-b	1.0	1.0	1.3	—	—

In the ULS-a condition, an action factor of 1.0 shall be used for the permanent action, the variable action, or both, where this gives amore unfavourable combined action effect than 1.3.

The action factor for permanent actions in ULS-a may be reduced from 1.3 to 1.2 if the action and action effects are determined with great accuracy (for example, external hydrostatic fluid pressures acting on a rigid body).

備考 :

ULS-a : gravitational action-dominated conditions

ULS-b : environmental action-dominated conditions

4. 構造部材の寸法

浮体施設及びタワーの主要構造部材で全体強度に寄与するものは、3.の規定によって部材寸法を決定しなければならないが、以下の規定によっても差し支えない。なお、局部荷重のみを受ける主要部材について、管海官庁が認めた場合においては、別の方法等により適宜緩和できるものとする。

(1) 浮体施設の構造板厚

浮体施設の外板等全体強度に寄与する主要構造のパネルで分布荷重を受ける板の厚さは、次の2つの算式による値のうち、大きい方のもの以上とする。

$$75.2S\sqrt{h_s/K_e} + C \quad (mm)$$

$$60.8S\sqrt{h_e/K_p} + C \quad (mm)$$

S : 横又は縦肋骨の心距 (m)

h_s : 静荷重状態における水頭 (m)

h_e : 組合せ荷重状態における水頭 (m)。なお、組合せ荷重状態とは、静荷重及び風荷重、波荷重、運転荷重等の全体強度に影響を及ぼす動的荷重並びにこれらの荷重により生じる浮体施設の運動加速度及び傾斜により生じる荷重との組合せ荷重を受けている状態をいう。

K_e : 次の2つの算式による値のうち小さい方

$$K_e = (235 - K\sigma_{s1}) / K$$

$$K_e = 1.45(235 - K\sigma_{s2}) / K$$

K_p : 次による。

- ・ $\sigma_{c1}\sigma_{c2} > 0$ の場合、次の2つの算式による値のうち小さい方


$$K_p = (55225 - K^2\sigma_{c1}^2) / (235K)$$

$$K_p = 2(235 - K|\sigma_{c2}|) / K$$

- ・ $\sigma_{c1}\sigma_{c2} < 0$ の場合、次の2つの算式による値のうち小さい方

$$K_p = (55225 - K^2\sigma_{c1}^2) / (235K)$$

$$K_p = 2(235 - K|\sigma_{c1}| - K|\sigma_{c2}|) / K$$

$\sigma_{s1}\sigma_{s2}$: 静荷重状態でパネルに働く軸応力 (N/mm^2) で、 2-2 による。

$\sigma_{c1}\sigma_{c2}$: 組合せ荷重状態でパネルに働く軸応力 (N/mm^2) で、図 2-2 による。

K : 材料による係数で、管海官庁が指定するもの。

C : 5. の規定による腐食予備厚 (mm)

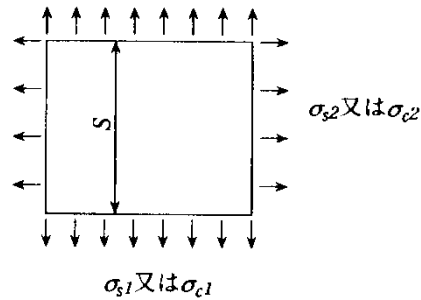


図 2-2 軸応力 σ_{s1} , σ_{s2} , σ_{c1} , 及び σ_{c2}

(2) 浮体施設の横肋骨又は縦肋骨の断面係数

(1)において規定するパネルを支持する横肋骨又は縦肋骨の断面係数は、次の算式による。

$$\frac{1079CKSh_c \ell^2}{235 - K\sigma_{c0}} \quad (cm^3)$$

C : 端部の支持係数で、両端固定の場合 1.0、両端支持の場合 1.5 とする。

ℓ : 肋骨の支点間距離 (m)

σ_{c0} : 組合せ荷重状態における軸力 (N/mm^2)

S , h_c 及び K は、5. の規定による。

(3) 浮体施設の円筒型外殻部材の局部座屈

軸圧縮力又は曲げによる圧縮力を受けているタワー部の船殻部材であって、防撓されていないか又は円周方向にのみ防撓されており、次式を満足していない場合は、局部座屈についても考慮しなければならない。

$$t > 0.044D\sigma_Y \quad (mm)$$

t : 板厚 (mm)

D : 円筒型船殻部材の直径 (m)

σ_Y : 材料の規格降伏応力 (N/mm^2)

【解説】

本項は、浮体施設及びタワーの部材寸法を算式で与えるものである。全体強度に寄与するものは、前項の規定によって部材寸法を決定しなければならないが、本項の規定によっても差支えない。

式中に与えられる組合せ荷重状態における軸力等については、前項の手法により算出された内力に荷重係数を乗じた値を用いて差支えない。また、局部荷重のみを受ける場合においては、NK 鋼船規則 C 編及び CS 編等に記載の算式を参照して差支えない。

なお、本項において記載されている静荷重状態、組合せ荷重状態については、表 2-3-4-1 のように分類される。

表 2-3-4-1 静荷重状態と組合せ荷重状態

浮体施設の状態	各状態の概要
静荷重状態	静水中で浮体施設が浮上または着底状態にあり、稼働時に積み込まれる荷重及び浮体施設の自重等で全体強度に影響を及ぼす静荷重のみを受けている状態のこと（「NOTE：静荷重状態の解析」参照）。
組合せ荷重状態	静荷重及び風荷重、波荷重等の全体強度に影響を及ぼす動的荷重ならびにこれらの荷重により生じる浮体式洋上風力発電施設の運動加速度及び傾斜により生じる荷重との組合せ荷重を受けている状態のこと（図 2-3-4-1 参照）。 前節に記載の各 DLC に対する連成一体解析においては、この組合せ荷重状態について解析を行っている。

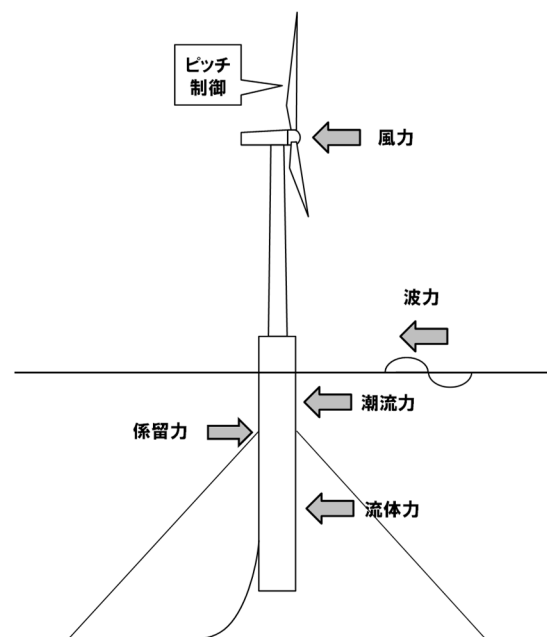


図 2-3-4-1 洋上風力発電設備において考慮すべき主な外力

(1)

浮体施設の構造板厚

一様圧力が作用するパネルの塑性崩壊荷重 P_{limit} は、以下の式で表される。

$$P_{limit} = 4\sigma_Y \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (2-3-4-1)$$

ただし、

σ_Y : 降伏応力 (N/mm²)

b : スパン長

t : 板厚

この式を、水頭 h を用いて変形し、単位を合わせると、塑性崩壊荷重に対する要求板厚 t は、次式のようになる。

$$t > 49.5S \sqrt{\frac{h}{\sigma_Y}} \quad (2-3-4-2)$$

ここで本技術基準の安全レベルを確認するため、簡単に、軟鋼($K=1.0$, $\sigma_Y=235$ (N/mm²)) で、軸応力が作用しないと仮定すると、 $K_p=K_e=\sigma_Y$ となり、本技術基準(1)中の算式

$$75.2S\sqrt{h_s/K_e} + C$$
$$60.8S\sqrt{h_c/K_p} + C$$

は、(2-3-4-2)式と同様の形となる。

このとき、腐食予備厚をみこまないとして、静荷重状態で $75.2/49.5=1.52$ 、組合せ荷重状態で、 $60.8/49.5=1.23$ の板厚の安全余裕をそれぞれ有することになる。板厚の余裕分を安全率に換算するには 2 乗をとればよい。これにより、本技術基準の計算式では、パネルの崩壊に対し、静荷重状態で 2.31、組合せ荷重状態で 1.51 の安全率をそれぞれ考慮していることになる。

一方、一様圧力が作用するパネルに塑性関節が生じる際の荷重 P_Y は、以下の式で表される。

$$P_Y = 3\sigma_Y \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (2-3-4-3)$$

すなわち、 P_Y に達するまでは、パネルは弾性的であるとする。この式を先ほどと同様に変形すると、下式のようになる。

$$t > 57.2S \sqrt{\frac{h}{\sigma_Y}} \quad (2-3-4-4)$$

このとき、腐食予備厚を見込まないとして、静荷重状態で $75.2/57.2=1.31$ 、組合せ荷重状態で $60.8/57.2=1.06$ の板厚の安全余裕をそれぞれ有することになる。これにより、本技術基準の計算式ではパネルの塑性関節発生に対し、静荷重状態で 1.72、組合せ荷重状態で 1.12 の安全率をそれぞれ考慮していることになる。

(2)

横肋骨または縦肋骨の断面係数

パネルを支持する横肋骨、縦肋骨の最大曲げ応力は、

$$\sigma = \frac{CpSl^2}{12Z} \quad (2-3-4-5)$$

で与えられる。荷重 p において、降伏しない要求断面係数は、

$$Z > \frac{CpSl^2}{12\sigma_y} \quad (2-3-4-6)$$

軟鋼($K=1.0$, $\sigma_y=235(N/mm^2)$)を仮定した場合、変形して単位を合わせると、

$$Z > \frac{816.7CSl^2}{235} \quad (cm^3) \quad (2-3-4-7)$$

となる。本技術基準(2)中の算式

$$\frac{1079CKSh_c l^2}{235 - K\sigma_{c0}} \quad (cm^3)$$

は、(2-3-4-7)式と同様の形となる。

これらを比較すると、軸力がないと仮定した場合、防撓材の降伏（弾性設計）に対し、組合せ荷重で 1.32 の安全率を考慮していることになる。

(3)

浮体施設の円筒形外殻部材の局部座屈

局部座屈について考慮する場合は、有限要素法等の適切な手法により評価すること。

-----NOTE：静荷重状態の解析 -----

本技術基準においては、静荷重状態の解析は特段求められてはいない。しかしながら、本項の部材寸法の決定において本技術基準の本文記載の算式を使用する場合には、式中において静荷重状態と組合せ荷重状態のそれぞれで計算した結果を使用するように求められているため、別途静荷重状態の計算を実施する必要がある。

5. 疲労強度

(1) 一般的事項

- (a) 繰り返し応力を受ける部材は、繰り返し応力の大きさ、繰り返し数、平均応力、部材の形状等を考慮し、疲労に対し十分な強度を有するものでなければならない。
- (b) 疲労強度解析は浮体施設及びタワーの設計において考慮される設置海域に基づいて行わなければならない。
- (c) 疲労設計寿命は、浮体施設及びタワーの設計寿命又は 20 年のいずれか大きい方の値以上としなければならない。
- (d) 疲労強度解析が要求される表 2-1 及び表 2-2 の荷重ケースごとに、設計基準を検証しなければならない。

(2) 疲労強度評価

- (a) 有害な疲労き裂の発生のおそれのある応力集中部、係留装置からの反力を受ける箇所のほか、管海官庁が必要と認める板部材同士の結合部について、疲労強度を評価しなければならない。
- (b) 疲労強度を検討する際は、あらゆる種類の繰り返し荷重を考慮することを原則とする。
- (c) 疲労強度を検討する際は、検査のために個々の構造部材に近づきやすいかどうかも考慮すること。
- (d) 疲労強度評価は、線形被害則に基づく累積疲労被害度により評価すること
- (e) タワーの設計耐力については、JIS C 1400-1 の規格によっても差し支えない。

(3) 疲労強度改善に関わる措置

- (a) 腐食環境下にある疲労強度上問題となる部分に対しては、電気防食等により腐食の防止のための措置を講ずること。

【解説】

(1)

一般的事項

疲労強度評価を実施する必要がある荷重ケースについては、前節を参照すること。本技術基準で規定されている時間領域での連成解析を実施する場合は、疲労強度評価のための設計荷重は時系列データとして算出されるため、本項においても時間領域解析を用いた評価手法について述べる。しかしながら、構造物の疲労設計手法としては、より簡便な周波数領域解析を実施する場合も多く、船舶も同様である。そのため、本ガイドラインにおいては、時間領域解析に加え、今後の幅広い手法の適用に関する検討に供する目的で、船舶の場合を例にした周波数領域解析についても記載する。ただし、周波数領域解析に基づいて評価を行う場合には、線形化の妥当性を示す必要がある（「NOTE：周波数領域解析による疲労強度評価（参考）」を参照のこと）。

(2)

疲労強度評価

図 2-3-5-1 に疲労強度評価のフローの例を示す。

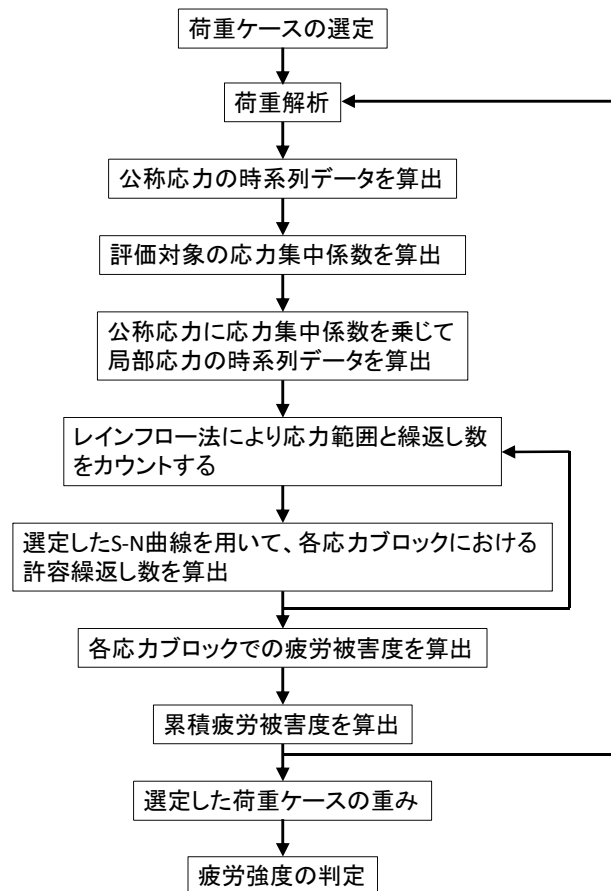


図 2-3-5-1 疲労強度評価フローの例

図 2-3-5-1 のフローに基づき、フロー内のポイントを以下に記載する。

A) 荷重解析

前節を参照のこと。なお、疲労強度評価において使用する荷重係数は 1.0 である。

B) 公称応力の時系列データ算出

内力の時系列データは、前項における全体強度解析によって算出される。このとき、構造全体において高応力が発生する部位を検出し、評価対象部位を選定する。公称応力は、評価対象の形状を考慮し、梁理論やコースメッシュモデルの有限要素解析等の適切な手法により算出する。

C) 応力集中係数の算出

疲労強度を評価する際には、疲労き裂が発生する箇所の局部応力（ホットスポット応力等）が必要になる。ホットスポット応力は、コースメッシュモデルの有限要素解析等で求

まる公称応力に継手の構造形状による応力集中係数を乗じることで得られる。より厳密な疲労解析を行うには、ホットスポット応力に溶接余盛の存在を考慮したノッチ応力が必要になるが、ノッチ応力を求めるのは、計算が煩雑であること及び溶接止端形状を設計時に把握するのが困難であることから、通常は溶接余盛の存在は S-N 曲線で考慮し、一般には構造形状によるホットスポット応力を疲労強度評価の際の参照値としている。

NK のタンカー疲労強度ガイドラインでは、応力集中係数をファインメッシュモデル（板厚程度の要素サイズ）の有限要素解析によって求めるほか、典型的な構造の応力集中係数を規定している。NK 鋼船規則 CSR-T 編では、対象部材によっては公称応力での評価も認めており、構造形状による応力上昇分は S-N 曲線の等級でカバーしている。

D) 局部応力の時系列データ算出

得られた公称応力と評価対象部位の応力集中係数を掛けあわせることで、評価対象部位に生じる局部応力の時系列データが算出できる。

E) 波形カウント

浮体式洋上風力発電施設は、風や波、潮流など周期が大きく異なる荷重が同時に作用するため、得られた応力の時系列データに対して適切な波形カウント法を用いる。一般的な波形カウントの方法としては、ピーク法、レンジ法、レインフロー法等があるが、本ガイドラインにおいては図 2-3-5-1 中に示すように、レインフロー法を用いることを標準とする。

F) S-N 曲線の選定

疲労強度評価に用いられる S-N 曲線は、適用するルールやガイドラインの評価法（公称応力評価法、ホットスポット評価法等）に応じ、局部構造の形式や、溶接の有無と表面仕上げ、環境条件等を考慮して、適切な S-N 曲線を選定する必要がある。

例えば、NK 鋼船規則 CSR-T 編の公称応力手法では、対象部位に応じて等級を適切に選択する必要があり、構造形式による影響が少ないハルガーダ部材については、突き合わせ溶接部の溶接線に沿ったき裂を想定して D 級を適用することが多く、また、ソフトトウや後部ブラケットの典型的な構造詳細については、F 級か F2 級が原則適用される。また、NK 鋼船規則 CSR-T 編のホットスポット応力手法（有限要素法ベース）では、溶接詳細部に対して D 級が適用される。

G) 累積疲労被害度の算出

累積疲労被害度の算出においては、累積疲労被害則としてマイナー則が用いられるのが一般的である。

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i} \quad (2-3-5-1)$$

ただし、

D：累積疲労被害度

n_i ：各応力範囲の繰り返し数

N_i ：各応力範囲での許容繰り返し数

なお、累積疲労被害度では $D \geq 1$ のときに疲労破壊が起こると考える。また、必要に応じて平均応力補正を行うこともあり、疲労強度は、引張の平均応力が存在すると減少し、圧縮の平均応力が存在すると増大する。平均応力補正の手法としては、Goodman 線図、修正 Goodman 線図、Gerber 補正等の疲労限度線図を用いる方法が一般的である。

H) 疲労強度の判定

得られた累積疲労被害度に安全率を乗じ、疲労強度の判定を実施する。一般的には、疲労強度の安全率は、部材の重要度及び検査・修理に関する難易度が考慮される。

なお、溶接鋼構造を対象とした疲労強度評価を行う場合には、後述する「NOTE：浮体式洋上風力発電施設の溶接鋼構造に対する疲労強度評価」に記載の手法によって差支えない。

(3)

疲労強度改善に関わる措置

防食措置については、次項を参照すること。そのほか、疲労強度上重要な部分に対しては、工作の際に溶接欠陥等に特に注意を払うものとする。なお、完全溶け込み溶接の採用やグラインダ等による溶接止端部への適切な二次加工処理を実施することにより、疲労強度を改善することも可能である。

-----NOTE：浮体式洋上風力発電施設の溶接鋼構造に対する疲労強度評価-----

溶接鋼構造を対象として疲労強度評価を行う場合には、下記に示す S-N 曲線と安全率を組み合わせた評価を実施して差支えない。

(a) S-N 曲線

- 設計 S-N 線図は「UK-HSE・D 級・in air」を用いる（図 2-5-3-2 参照）。ただし、使用する応力はホットスポット応力とする。
- 飛沫帯においては通常「UK-HSE・D 級・free corrosion」を用いることとし、塗膜の有効期間を設定可能な場合においては、設定した期間に応じて「UK-HSE・D 級・in air」と「UK-HSE・D 級・free corrosion」を組み合わせた評価を行ってもよいものとする。

(b) 疲労強度評価時の安全率

- 安全率は、表 2-3-5-1 に示す ISO19904-1 の Non-substantial に設定された値を用いる。
- アクセス性による浮体構造部材の分類については、表 2-3-5-2 に代表的な例を示す。

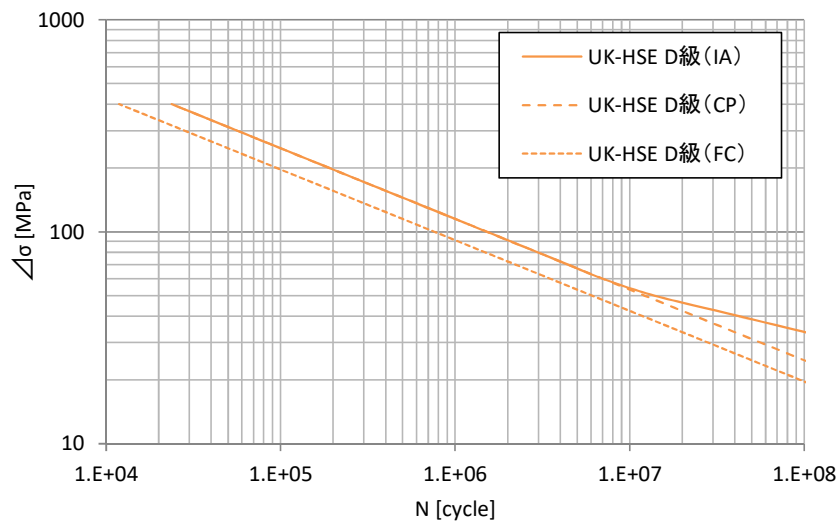


図 2-3-5-2 各環境条件における S-N 線図 (UK-HSE D 級)

表 2-3-5-1 疲労強度評価時の安全率 (ISO19904-1 より抜粋)

Consequence of failure	Fatigue damage design safety factor		
	Degree of accessibility for inspection and repair		
	Not accessible	Under water access	Dry access
Substantial	10.0	5.0	2.0
Non-substantial	5.0	2.0	1.0

表 2-3-5-2 アクセス性による浮体構造部材の分類

アクセス性	構造部材	構造部材の例
Dry access	<ul style="list-style-type: none"> ● アクセス可能かつ<u>水中部材に直接溶接されない</u>内部構造部材 	<ul style="list-style-type: none"> ● バラストタンクや<u>喫水下</u>の外板に直接溶接されていない内部構造部材
	<ul style="list-style-type: none"> ● 没水していないかつ適切な状態での検査修繕が可能な外部構造部材 	<ul style="list-style-type: none"> ● 喫水上の外部構造部材
Underwater access	<ul style="list-style-type: none"> ● アクセス可能かつ<u>水中部材に直接溶接された</u>内部構造部材 	<ul style="list-style-type: none"> ● バラストタンク内部材 ● バラストタンクや喫水下の外板に直接溶接された内部構造部材
	<ul style="list-style-type: none"> ● 没水していないかつ適切な状態での検査修繕が不可能な外部構造部材 	<ul style="list-style-type: none"> ● 喫水下の外部構造部材（飛沫帯含む）
Not accessible	<ul style="list-style-type: none"> ● アクセス不可能な部材 ● 作業中に検査修繕のためのアクセスを計画していない部材 ● 固定バラスト部 	

-----NOTE：周波数領域解析による疲労強度評価（参考）-----

ここでは、船舶の疲労強度評価手法を例に、周波数領域解析による疲労強度評価について記載する。

船舶の周波数領域解析は、大別して、長期スペクトルによる方法と、短期スペクトルの足し合わせによる方法があり、それらのフローを図 2-3-5-3 に示す。

波浪以外の風や流れの荷重を考慮する場合は、短期スペクトル法で短期海象を数ケース抽出して、短期の疲労被害度にそれらの影響を考慮するのが現実的と考えられる。

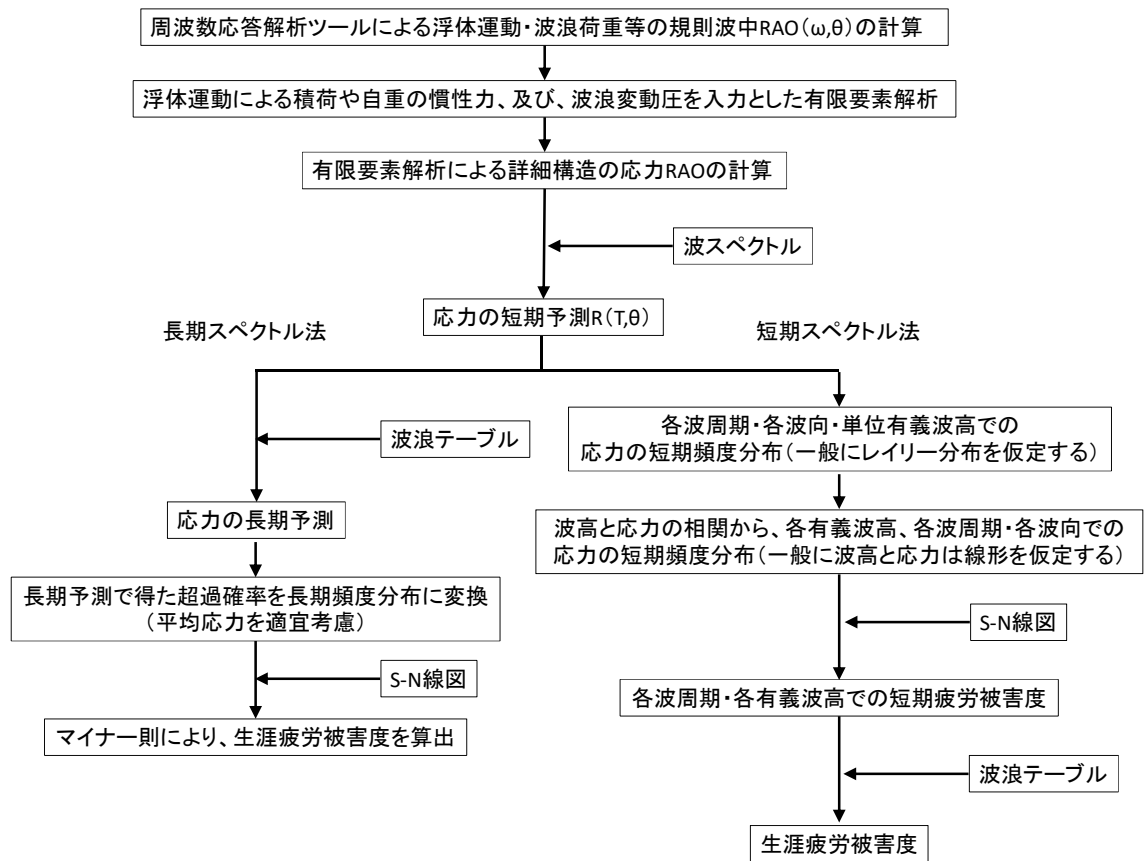


図 2-3-5-3 周波数領域解析による疲労強度評価フローの例

6. 防しよく措置及び腐食予備厚

- (1) 浮体施設及びタワーの防食措置については、船舶構造規則に規定する防しよくに関する措置を講ずるとともに、浮体施設及びタワーの想定供用期間、保守方法、腐食環境等を考慮した適切な腐食対策を講じなければならない。
- (2) 構造部材が曝される腐食環境に応じた適切な腐食予備厚を有すること。

【解説】

(1)

浮体施設及びタワーの防しよく措置

防しよく措置は、浮体施設及びタワーの構造部材が曝される腐食環境に応じた措置が講じられる。なお、本技術基準で想定される供用期間は最低でも20年であるが、運用計画を考慮した腐食対策を講じることが求められる。

A) 腐食環境

浮体式洋上発電施設は、海上に設置されることから、没水部、飛沫帯部等、同一の浮体施設内でも部位により異なる腐食環境に曝されることになる。防しよく措置の検討に当たっては各腐食環境を考慮し、適切な防しよく措置を取ることが求められる。

腐食環境についての考え方の事例を以下に示す。

腐食環境

外部構造部材

飛沫帯より上部

飛沫帯より上部で、主に浮体構造の上部と暴露装置がこの部位に存在する。腐食要因としては直射日光、降雨や降雪の気象因子に加えて海塩粒子や大気汚染など腐食性物質も影響因子となる。特に、直射日光に対しては環境保全の見地から塗膜の剥落やチョーキングなどを生じない防食措置が望まれる。

飛沫帯

喫水線近傍に位置する海水飛沫が付着する部位で、腐食速度が最も大きくなる区画である。再現期間1年の最高静水面に再現期間1年の有義波高に等しい波高の波の波頂高を加えたレベルを上限とする。一般には喫水上5m、喫水下4mの範囲とされる。腐食要因としては気象因子も存在するが、それよりも乾湿交番の効果が著しく腐食に影響する。従って、防食措置としては防食性と耐候性に加えて、波浪など外力対しても付着性の優れる塗装仕様の適用が望まれる。

没水部

喫水線より下の常に海水と接触している部位で、海水が腐食の促進要因となる部位である。この部位は電気防食も有効なので、塗装と電気防食を併用した防食措置の適用が望まれる。

内部区画

内部区画（バラストタンク以外）

解放区画、密閉区画として分類される。これらの区画の腐食環境は温湿度および結露の有無のみを影響因子とするものである。従って、比較的軽微な防食塗装、或は除湿機の適用も防食措置として期待できる。

バラストタンク

海水環境で高耐久性を示す防食措置が望まれる。

係留金物

係留鎖をはじめこれら部材には摩擦など外力の影響も腐食要因になるので、一般に塗装や電気防食などの防食措置を適用するのが困難である。従って、腐食しろ、耐食金属、或は没水部であれば電気防食との併用など、部材の使用環境に合わせて適切な防食措置が個別に検討される。

B) 防しよく措置

防しよく措置の検討に際しては、A)に記した腐食環境や供用年数、運用計画等に応じ、各防しよく措置の特徴等を考慮し、防しよく設計を行うことが求められる。防しよく措置としては、塗装、電気防食、耐食材料の使用等が考えられる。各種防しよく措置の特徴等に関する事例を以下に示す。

以下に示す事例のほかに、適切な規格等、例えば、塗装に関しては、ISO 12944 シリーズ、ISO 20340、NORSK M501 等の規格を、電気防食を適用する際の電防電流量や犠牲陽極量の算出等に関しては、港湾の施設の技術上の基準・同解説等の規格を参照してもよい。

防食措置

塗装

プライマー

鋼材に塗装する第1層目の塗装で一般に膜厚がさほど厚くない塗装である。溶接・溶断の加工前に鋼板に塗装するショッププライマーはその代表である。その他、ジンクエポキシ（ZEP）や厚膜型無機ジンク（IZS）のプライマーも使われるが何れも塗料組成として亜鉛末を含んでいて、犠牲陽極の効果が期待される。

エポキシ塗装

防食塗装としては最も一般的な塗装で、用途により、エポキシ中塗り、MC（ミストコート）、BC（バインダーコート）等に分類される場合もある。また、エポキシ含有量を抑えた廉価のエポキシ塗料として変性エポキシ塗料（MEP）も多用される。

マスチック塗覆装

比較的厚い膜厚を1回塗で仕上げることができる塗装をマスチック塗覆装と呼ぶ。現在は1回塗りで膜厚5mmを越えて施工できるエポキシ系およびウレタン系のマスチック塗覆装が開発されている。

耐候性塗装

直射日光による変色など塗料の変質が生じ難い塗料としてウレタン (PU)、シリコン或いはフッ素系の塗料が耐候性塗料として使用される。一般に、防錆性に優れたエポキシ塗料或いはマスチック塗料の上塗りとして使用される。

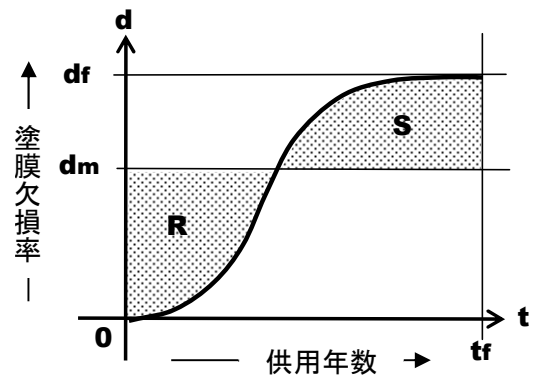
電気防食

流電陽極：鋼材より卑な自然電位を持つ金属を犠牲陽極として使う。一般に船体外板など外部区画にはアルミ陽極が、バラストタンクなど内部区画には亜鉛陽極が使われる。海水環境の鋼材の防食には一般に塗覆装と電気防食が併用される。

外部電源防食：白金やフェライトなど不溶性の陽極と被防食体である鋼材の間に直流電圧を印加し、被防食体を強制的に卑電位にして防食する。

塗装と電気防食の併用

海水中の鋼材の防食対策には、一般に塗装と電気防食が併用される。右図のように塗装の欠損率 d は当初ゼロであるが供用年数 t_f までの間に d_f (最終欠損率) に達する場合、電気防食の設計は平均欠損率 d_m に対して所要防食電流 (通常は $100\text{mA}/\text{m}^2$) を適用する。即ち、劣化曲線の時間積分の時間平均から防食電流密度を計画する。因みに、右図に示す面積 R と面積 S は常に等しくなる。



----- NOTE : 塗膜劣化曲線について -----

塗装と電気防食の併用において考慮すべき塗膜劣化曲線の考え方としては、S字曲線を用いるメガフロート技術研究組合が開発した手法³⁾と直線を用いる DNV-RP-B401 の手法の2手法がある。

その他 (特殊例)

モルタルライニング

日本コンクリート工学協会の海洋コンクリート構造物の防食指針(案)1990によれば、コンクリートかぶり 12.5cm の場合、下地の鉄は半永久的耐久性とされるので、モルタルライニングは海洋環境に於ける有効な防食措置である。

金属ライニング

チタン、モネル、耐海水ステンレスなど耐食金属を鋼表面にライニングするもので、何れも 100 年程度、即ち、半永久的な耐久性が期待される防食措置である。

除湿対策

船室内の相対湿度を低下させて結露を回避すれば腐食は発生しないので、除湿機を導入して塗装を省略することは最も経済的な防食仕様である。

耐食材料

主要構造部材に該当しない部材、例えば、付帯構造物である外壁、支持部材、留具等の部材に関しては、耐候性鋼、ステンレス、アルミ合金等の材質とすることができる。

C) 防しよく仕様

防しよく仕様の検討においては、A)に記載された腐食環境および B)に記載された各種防しよく措置の特徴を考慮し、対象浮体施設の設置環境等をも併せて勘案したうえで対策を講じることが求められる。

NK の定める防食措置に関するガイドラインや適切な規格（IEC 61400-3-1 の Annex G や ISO 20340、NORSK M501 等）を参照しても差し支えない。また、対象浮体施設と類似の環境で十分な実績を持つ防しよく仕様の使用については、防しよく実績を示す必要がある。

また、実際の塗装作業にあたっては、必要な検査項目など塗料メーカーの施工要領書等を参照しつつ、適切な施工管理を行う必要がある。

(2)

腐食予備厚

腐食予備厚は、浮体施設及びタワーの構造部材が曝される腐食環境に応じて設定される。前項の防食措置と同様、本技術基準で想定される供用期間は最低でも 20 年であるが、運用計画を考慮した腐食予備厚を設定することが求められる。

ここでは、NK 浮体式洋上風力発電設備に関するガイドラインを例に、腐食環境に応じた腐食予備厚の値を表 2-3-6-2 に示す。

ただし、腐食環境が著しく厳しい場合には、次表に規定する腐食予備厚より大きな値又は追加の防食措置が必要となる。一方、適切な防食措置の追加が認められた場合は、腐食予備厚を低減可能とする。

表 2-3-6-1 構造部材の片面の腐食予備厚

(NK 浮体式洋上風力発電設備に関するガイドライン 表 5.3 より引用)

腐食環境		片面の腐食予備厚 (mm)	
		想定供用期間 (20年)	想定供用期間 (30年)
バラストタンク内環境	桁部材の Face	1.0	1.3
	上記以外	0.8	1.0
大気暴露環境 (飛まつ帯より上部)		1.0	1.1
飛まつ帯		1.0	1.1
海水暴露環境 (飛まつ帯より下部)		0.5	0.6
上記以外		0.5	0.6

備考：

想定供用期間が、表中の中間の場合は、線形補間により求め、小数点第 2 位を切り上げた値とする。また、想定供用期間が 30 年を超える場合は、20 年と 30 年の値から線形補外により求め、小数点第 2 位を切り上げた値とする。

参考文献

- 2-1) 土木学会：コンクリート標準示方書[設計編] 2012 年制定
- 2-2) 土木学会：鋼・剛性構造標準示方書 総則編・構造計画編・設計編 2007 年制定
- 2-3) 山田通政：メガフロートの防食とメンテナンス, 溶接学会誌 第 69 巻(2000) 第 4 号, p63-67
- 2-4) IEC 61400-3-1:2019 Wind energy generation systems – Part 3-1: Design requirements for fixed offshore wind turbines

第3章 位置保持システム**1. 一般的事項**

浮体施設には、本章に定める事項又は ISO 19901-7 の規格を満足する位置保持システムを備えなければならない。

【解説】

ISO19901-7:2013 Petroleum and natural gas industries - Specific requirements for offshore structures - Part 7: Stationkeeping systems for floating offshore structures and mobile offshore units は石油・天然ガス開発のための浮体施設の位置保持システムの要件を定めたものである。洋上風力発電施設が石油・天然ガス開発用の浮体施設と大きく違う点は、発電・待機等の運転条件によって環境外力が大きく変化することであると考えられる。このため、本技術基準は、IEC で定められた「設計荷重ケース (DLC)」の概念と浮体施設の位置保持システムの規格として先進的な「ISO 19901-7」に定められた解析手法を融合させたものとなっている。

なお、本技術基準では、洋上風力発電施設の位置保持システムにスラストが用いられる可能性は低いため、スラストに関する事項は案件毎に検討することとし、係留システムのみについて記述している。

一般的に、係留システムには、冗長システムと非冗長システムとがあり、両方とも認められている。本技術基準は基本的に冗長システムを想定して記述されているので、非冗長システムを採用する場合には、本技術基準に記載された内容以外の考慮が必要となる。非冗長システムの設計にあたっては、安全率を上げること等、冗長システムと同等の安全性を確保できるように別途の考慮をするものとする。

2. 係留システム

- (1) 係留システムは、計画されたすべての運転条件に対して浮体施設を所定の位置に保持するために十分な能力を有し、かつ、海底の設備に対して安全なものでなければならない。
- (2) 低温、凍結、着氷などが想定される海域に設置される浮体施設の係留システムにあつては、それらの影響を考慮したものとするか、適切な保護対策を施さなければならない。
- (3) 係留システムの設計においては、下記に掲げる状態を含み、想定されるあらゆる係留状態を検討すること。
 - (a) 非損傷状態
浮体施設及び係留システムのすべての構成要素が正常である状態。
 - (b) 単一係留ライン破断状態
浮体施設は非損傷状態で、係留ラインの1本が破断したと仮定したときに係留ラインの張力が最大となる状態。非損傷状態において最大張力が発生するラインの破断を仮定することが必ずしも最も過酷な状態になるとは限らないため、リードライン破断、あるいは隣接するラインの破断等様々なケースに対して解析を行い、最も過酷な状態について特定された状態を示す。
 - (c) 単一係留ライン破断時の過渡状態
係留ラインの1本が破断（原則リードラインとする）し、浮体施設が過渡的な運動の後、残った係留ラインにより浮体施設が定常な状態に達するまでの状態。
 - (d) 浮体施設の損傷状態
浮体施設が第5章4. 損傷時復原性に規定する損傷を仮定した状態で、係留システムのすべての構成要素が正常である状態。
- (4) 単一ライン破断時の過渡状態の解析にあつては、浮体施設のオーバーシュート等により係留ラインの張力増加等の影響について検討すること。また、浮体施設周辺の施設との間隔についても評価すること。
- (5) Single Anchor Leg Mooring(SALM)に対しては単一係留ライン破断に代えてSALMの単一区画損傷による浮力損失に対して解析を行うこと。
- (6) 係留システムにスラストによる支援を含む場合の係留解析については管海官庁の適当と認めるところによる。

【解説】

(1)

本項は、洋上風力発電施設の係留システムが満たすべき要件を規定している。係留システムが満たす要件とは、「計画されたすべての運転条件に対して浮体施設を所定の位置に保持するために十分な能力」を持ち、「海底の設備に対して安全」であることとし、そのため

の具体的要求項目が(2)以下に示されている。

(3)

「ISO 19901-7」では、下記の4つの「限界状態 (Limit states)」を設定し、ULS と FLS について環境条件の設定法 (Design Situation) を定め、ULS 中の解析条件として、健全状態 (Intact condition)、冗長性確認状態 (Redundancy check condition) 及び過渡状態 (Transient condition) の3状態を指定している。

- 1) 終局限界状態 (Ultimate Limit State : ULS)
環境条件の異常値 (100年再現波) に対する係留システムの終局強度等を評価する
- 2) 稼働限界状態 (Serviceability Limit State : SLS)
浮体施設のオーナーが定める
- 3) 疲労限界状態 (Fatigue Limit States : FLS)
疲労強度を評価する
- 4) 故障限界状態 (Accidental Limit State : ALS)
離脱装置の故障と環境条件の異常値の同時発生を評価する：洋上風力発電施設では適用外と思われる

「ISO 19901-7」で要求されている評価項目を、表 3-2-1 に示す。

表 3-2-1 「ISO19901-7」における評価要求項目

終局強度評価	健全状態
	冗長性確認状態
	過渡状態
疲労強度評価	健全状態

船級協会によっては、「冗長性確認状態」を「損傷状態 (Damaged)」と呼ぶこともある。以後、本技術基準の用法に合わせて「非損傷状態」「破断状態」「過渡状態」と呼ぶことにする。

2. (3) (d)「浮体施設の損傷状態」は浮体の一区画損傷状態を指す。このため、「ISO19901-7」の要求項目に対して区画損傷状態を加えた5項目が本技術基準の要求項目である。

表 3-2-2 本技術基準における評価要求項目

終局強度評価	非損傷状態
	破断状態
	過渡状態
浮体損傷時評価	非損傷状態
疲労強度評価	非損傷状態

(4)

Single Anchor Leg Mooring (SALM) は、一点係留ブイまたはタワーに対して浮体施設をつなぎ止める係留方式、Catenary Anchor Leg Mooring (CALM : 後述) は複数のラインで係留されたブイに浮体施設をつなぎ止める係留方式である。共に船型の浮体を係留する場合に、風見鶏のように外力の少ない方向に自動的に船首方向を向ける利点を有するもので、洋上風力発電施設の係留システムとして用いられる可能性は低いと考えられる。

3. 係留解析

- (1) 係留解析は第1章に規定する外部条件に基づいて行うこと。解析にはこの外部条件から生じる漂流力及び浮体施設の応答、並びにそれらに対応するラインの張力を評価することを含むものでなければならない。
- (2) 係留システムは想定されるすべての係留状態に対して管海官庁が適当と認める係留解析を行わなければならない。この場合、浮体施設の喫水変化の影響についても考慮すること。また、浮体施設から独立した別個の CALM ブイ等の係留施設に係留する場合はこれらの係留施設も含めた全体系として係留解析を実施すること。
- (3) 係留ラインを用いる係留システムにあっては、フェアリーダ等浮体施設に取付けられる係留機器と係留ラインが接触する箇所において、係留ラインに過大な曲げが生じないような構造及び配置であることを前提に、係留解析を実施する。
- (4) 浮体施設の係留システム及び係留施設の海底固定点（アンカー、シンカー、パイル等）は、想定される係留ラインからの張力等によって滑り、持ち上がり、及び転倒しないものでなければならない。洗掘による影響が無視できない場合は海底固定点の埋設度を調整するか、又は海底固定点付近の流れを制御する等の措置を講じる必要がある。
- (5) 係留解析を行う際には、係留システムを構成する機器類に対して、風力、潮力、及び波漂流力の定常成分並びに風及び波による動的荷重が作用するものとして実施すること。この場合、荷重は全方向から来るものと仮定し、係留システムを構成する機器類に作用する荷重が最大となる状態について解析しなければならない。ただし、浮体施設が設置される海域のデータ等に基づき方向性が特定できる場合であって、当該海域に固有の方向性に基づく検討を行った場合については、荷重の方向の特定については認める場合がある。
- (6) 解析の対象に応じて準静的解析又は管海官庁が適当と認める動的解析を行い、浮体施設の最大変位量及び最大ライン張力を計算すること。
- (7) 環境における平均荷重等
 - (a) 風及び潮流による定常的な力の計算は第1章及び第2章第2節の定めるところによる。ただし、風速の算出にあっては、1分間平均の風速を用いること。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分間の風速を換算すること。
 - (b) 定常波漂流力及び変動波漂流力は模型試験あるいは模型試験結果等により実証済みの流体力学的な数値計算プログラムを用いて決定すること。なお、定常波漂流力については、管海官庁が適当と認める規格により決定しても差し支えない。

【解説】

(1)

本項では、係留解析として実施が要求されている事項、前提条件、浮体応答解析手法が規定されている。

係留解析は、与えられた外部条件に対して、係留システムの安全性（想定される全ての係留状態すなわち表 3-2-2 に示す 5 状態の安全率）を評価するものである。評価項目としては以下のものが考えられる。

- 1) 係留ラインの安全率
- 2) アンカー把駐力の安全率
- 3) システム機器類（シャックル等）の安全率
- 4) 浮体の最大変位（送電ケーブルの可動範囲や隣接構造物とのクリアランス）

外部条件について、「ISO 19901-7」では短い耐用年数の場合等を除いて ULS の環境条件は 100 年再現期間とされているが、本技術基準では「外部条件」として 50 年再現期間及び 1 年再現期間が規定されている。（第 2 編第 1 章「外部条件」参照）これは、一般に風力発電施設の耐用年数が 20 年以下であることから設定されたもので、「ISO 19901-7 6.4.2.2.2」にも 20 年以下の施設に対する環境条件の規定が設けられている。

従って、「ISO 19901-7」を適用する場合にあっては、「ISO 19901-7」が環境条件の再現期間を 100 年と定めている箇所を「50 年」と読み替えて差し支えない。

浮体に作用する外力（荷重）は発電施設の運転状態によって変化するため評価する運転状態に関する基準を設けることが望ましい。運転状態の基準としては IEC 61400-3-1 で「設計荷重ケース（DLC）」の検討がなされ、本技術基準の表 2-1 及び解説中の表 2-2 に示されている。本技術基準では係留に関する DLC の適用範囲は明確に定められていないが、参考として表 3-3-1 を示す。

表 3-3-1 重要な設計荷重ケース（例）

終局強度評価	非損傷状態	DLC1.3, DLC1.6, DLC6.1, DLC6.3
	破断状態	DLC9.2, DLC10.2
	過渡状態	DLC9.1, DLC10.1
浮体損傷時評価	損傷状態	DLC9.2, DLC10.2
	過渡状態	DLC9.1, DLC10.1
疲労強度評価	非損傷状態	DLC1.2, DLC6.4

ここで、DLC1.3 及び適切な場合における DLC1.6 は、稼働条件以下の風速とすることができる。

また、浮体損傷時評価については、第5章4.(1)ただし書及び(2)において管海官庁が適当と認める場合には、それぞれ対応する浸水について考慮しなくてよい。さらに、浸水の異常状態に係る DLC9.1 及び DLC10.1 の過渡状態については、付録3を踏まえ、標準的なセミサブ型又はスパー型の浮体施設について、過渡状態の検討を省略することができる。

加えて、DLC9.1 及び 9.2 については、風力発電施設の制御システム及び保護システムにより運転が停止される場合などを考慮して想定しなくてもよいと認められるケースについては、検討を省略することができる。

係留解析において考慮する荷重（「ISO 19901-7」ではActionという）は以下のものがあり、浮体施設形式及び設置する海域に応じて取捨選択する。第2編第2章第2節の分類と異なっている事に注意。水力荷重を水流力と波力に分け、潮位を加えた。

1) 浮体に作用する荷重

- ① 風 力：定常成分、変動成分、ブレード制御に伴う変動成分
- ② 水流力：定常成分、渦放出に伴う変動成分と定常成分の変化量
- ③ 波 力：波強制力、定常波漂流力、変動波漂流力
- ④ 潮 位：潮位変化に伴う水深の変化（係留ラインの初期張力に関連する）
- ⑤ 氷荷重：低温・凍結・着氷、または流れてきた氷が衝突したときの荷重

2) 係留ラインに作用する荷重

- ① 水流力：定常成分、渦放出に伴う定常成分の変化量
- ② 氷荷重：低温・凍結・着氷、または流れてきた氷が衝突したときの荷重

「ISO 19901-7」では氷が散在している海域（ice-prone areas）における係留システムに対する氷荷重の推定法は「ISO 19906」に従うとしているが、これは浮体施設に対する氷荷重を対象としたものではない。第2編第2章第2節の表2-2に「海氷の設計荷重ケース」が示されているが、着定式施設のDLCを参考にしたものであり、解釈に注意が必要である。

(5), (6), (7)

本技術基準には規定されていないが、係留解析は係留系、浮体、風車の一体解析をおこなうことが望ましいが、現状では一体解析技術は確立されているとは言えない状態であるため、ここでは「ISO 19901-7」に示されている従来の海洋構造物に用いられる手法について解説する。

係留解析は以下の手順で行う事が一般的である。

- 1) 浮体平均変位解析 (Mean offset of floating structure)
- 2) 浮体応答解析 (Floating structure response)
- 3) 係留ライン応答解析 (Mooring line response)

- 4) 終局強度解析 (Extreme value statistics)
- 5) 疲労強度解析 (Fatigue analysis)

浮体平均変位解析

浮体の平均変位は荷重の定常成分と係留反力及び送電ケーブル反力の釣合から求まる。風力及び水流力の定常成分は通常次式により与えられる。

$$F = \frac{1}{2} C_d \rho U^2 S \quad (3-3-1)$$

ここで、 ρ は流体密度、 U は平均速度、 S は投影面積、 C_d は抗力係数である。抗力係数は通常模型試験によって求められる。発電状態の風力の抗力係数はブレードを風車状に回転させながら計測することが望ましい。渦励起運動 (VIM: Vortex Induced Motion) が生じると考えられる場合、水流力の抗力係数はこれを考慮する必要がある。VIMについての取り扱い付録4に記述した。係留ラインに作用する水流力についても、渦励起振動 (VIV) Vortex Induced Vibration) が生じると考えられる場合はこれを考慮することが望ましい。

風力の取り扱いについて、「ISO 19901-7」では変動荷重として取り扱うこととしている。ただし、終局強度評価においては1分平均風速による定常荷重が安全側の評価をもたらす場合には定常荷重として取り扱うことによりとしている。本技術基準では風速として1分平均値を用いる事としていることから、定常力として扱うことを想定していると考えられる。

風力を変動荷重として考慮する場合、係留解析においては構造解析と異なり、長周期成分 (波周期よりも長い変動成分) が重要な成分である。

浮体応答解析には以下の3種類の手法が存在する。それぞれに長所・短所がある。

1) 周波数領域法

本手法は、浮体応答の運動方程式を線形化 (特に係留反力特性) し、入射波に対する周波数応答関数を求める手法である。応答関数と波スペクトル及び変動波漂流力のスペクトルとの重畳積分により長周期及び波周期の浮体応答の標準偏差が求められる。本手法には線形化に伴う誤差が伴うが計算量が少ないという利点を有する。

2) 時間領域法 (本技術基準では「時刻歴応答解析」と表記している)

本手法は、浮体の長周期及び波周期の応答を時間領域で解く手法である。一般に、係留ライン応答と連成させて解析を行うため、係留ライン特性などの非線形性が考慮されている。解析により得られた浮体応答及び係留ライン応答の時系列を統計処理することで、応答の標準偏差が求められる。本手法では統計的不確実性存在するため、がシミュレーション時間は十分長くなければならない。

Note : DNV GLでは、1回のシミュレーション時間を3時間、乱数を変えて20~30回のシミュレーションを行うことが推奨されている。

3) 時間領域一周波数領域複合法

時間領域シミュレーションの複雑さや計算労力を低減するため、時間一周波数領域複合法がしばしば使用される。一般的に、定常と長周期応答(浮体変位、係留ライン張力、アンカー力等)が、時間領域で解析され、波周波数応答が周波数領域で別に解かれる。波周波数応答の周波数領域解は、統計的のピーク値あるいは時系列のいずれかを求めるために実施され、定常成分と長周期応答に重ね合わされる。

「ISO 19901-7」では、係留ライン応答の解析法として係留状態毎に以下の解析法を推奨している。これは、推奨であって要求ではない。また、ABSのように合成繊維ロープを用いた係留システムでは動的解析以外は認めないという船級協会もある。

本技術基準では、準静的解析を基本としつつ、対象となる浮体施設によって管海官庁が判断する。

表 3-3-2 「ISO19901-7」における推奨解析法

係留タイプ	限界状態	解析すべき状態	解析法
永久係留	終局	非損傷/破断	動的
		過渡 ^a	準静的又は動的
	疲労	非損傷	動的
テンポラリー係留	終局	非損傷/破断	準静的又は動的
		過渡 ^{a,b}	準静的又は動的
	疲労	—	—

a: 他の施設が係留系近傍にある場合
b: 過度の過渡応答が、送電ケーブル等の損傷に影響がある場合.

永久係留とは損傷が無い限り取り換えることがない係留システムであり、テンポラリー係留とは施工等一時的に仮係留するための係留システムである。

準静的解析とは、時々刻々に係留ラインの上端点とアンカー点(海底固定点)が与えられた時に定常力(重力・浮力・水流力・ライン張力・アンカー荷重等)の釣り合いからライン応答を計算する解析法である。

Note: カテナリ係留の場合、100m 以深では動的解析が推奨される(DNV GL)。

動的解析とは、準静的解析に係留ラインに作用する(ライン自身の質量及び付加質量による)慣性力・減衰力を考慮した解析法であり一般に準静的解析法よりも高い係留ライン張力が算出される。

係留ライン挙動に重大な影響を及ぼす4つの主要な非線形性がある:

- ① ラインの非線形伸び特性：ラインの歪又は接線方向の伸びは、張力の関数である。非線形伸び挙動は、一般にポリエステルのような合成繊維材で生じる。チェーン及びワイヤロープは線形と見なせる。一般にこの非線形性は無視され、代表接線剛性を用い線形性が仮定される。
- ② 形状変化：幾何形状非線形性は、係留ラインの大きな形状変化に関連する。
- ③ 流体力：モリソン式が、係留ラインに働く流体力を表すために使用される。ラインに働く抗力は、相対速度（流体とライン間）の自乗に比例するので、非線形である。
- ④ 海底面影響：係留設計において、ラインの考慮すべき部分は、海底面と接触する部分である。ラインと海底面間の干渉として、一般に、摩擦力が考慮される。これは、非線形である。なお、海底面摩擦力と形状が非線形であるがゆえ海底を這うライン長は常に変化する。

フェアリーダに取付けられる係留機器と係留ラインが接触する箇所において、係留ラインに面外曲げが発生する場合がある。「係留ラインに過大な曲げが生じないような構造及び配置であることを前提」にすることは曲げを無視してよいということではなく、設計上配慮が必要であることを意味する。面外曲げを防止するため5ポケットフェアリーダよりも7ポケット以上のフェアリーダの使用を推奨する。

当該部分は、定期的に検査する必要がある。また、チェーンの特定部位に一定曲げがかからないように、定期的にシフトするオペレーションが推奨される。

「ISO 19901-7」では、当該部分の疲労強度解析においてはFEM解析による応力集中係数を評価することを要求している。

(8) 最大変位量

(a) 最大変位量とは、風、潮流及び波による外力のうち定常成分による変位量（定常変位）並びに波による外力のうち変動成分（長周期成分及び短周期成分）による運動変位を加えたものとする。

(b) 最大変位量は、管海官庁が適当と認める模型試験又は解析手法により算定された定常変位と最大変位の有義振幅あるいは最大振幅を使用して以下の算式により算定すること。ただし、時刻歴運動解析により算出する方法を用いても差し支えない。

$$S_{max} = S_{mean} + S_{lf(max)} + S_{wf(sig)} \text{ 又は } S_{max} = S_{mean} + S_{lf(sig)} + S_{wf(max)} \text{ の大なる方。}$$

ここで、

S_{mean} ：風、潮流及び定常漂流力による浮体施設の定常変位量

$S_{lf(sig)}$ ：長周期動揺による変位の有義振幅

$S_{wf(sig)}$ ：有意な波周期と同じ周期の動揺による変位の有義振幅

なお、長周期動揺の最大振幅 $S_{lf(max)}$ 及び波周期と同じ周期の動揺の最大振幅 $S_{wf(max)}$ は、それぞれに対応する有義振幅に係数 C を乗じて計算しても差し支えない。

この場合、係数 C は次による。

$$C = 1/2 \cdot \sqrt{2 \ln N}$$

$$N = \frac{T}{T_a}$$

T ：荒天状態として想定される持続時間（秒）とし、10,800 秒（3時間）を最小とする。ただし、台風の来襲する海域等にあつては T を大きく取る必要がある。

T_a ：ゼロアップクロス周期の平均値（秒）

長周期成分に対しては、 T_a は係留システムを有する浮体施設の固有周期 T_n として差し支えない。 T_n は浮体施設の質量 m （付加質量等を含む）、及び浮体施設の水平面内の動揺（左右揺れ、前後揺れ、回転揺れ）に対する係留システムの剛性 k により次のように計算することができる。

$$T_n = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

この場合、係留システムの剛性、減衰力等、長周期動揺の最大振幅に関するパラメータを参考資料として管海官庁に提出しなければならない。

【解説】

(8)

最大変位量

浮体の最大変位量は次式で定義される。浮体の最大変位は、係留ラインの終局強度解析及び浮体の可動範囲の確認に用いられる。

$$\begin{aligned}
S_{max} &= S_{mean} + S_{lf(max)} \\
&+ S_{wf(sig)} \qquad \qquad \qquad \text{の大きい方} \qquad (3-3-2) \\
S_{max} &= S_{mean} + S_{lf(sig)} \\
&+ S_{wf(max)}
\end{aligned}$$

ここで S_{max} ：最大変位、 S_{mean} ：平均変位、 $S_{lf(max)}$ ：長周期応答の最大振幅、 $S_{lf(sig)}$ ：長周期応答の有義振幅、 $S_{wf(max)}$ ：波周期応答の最大振幅、 $S_{wf(sig)}$ ：波周期応答の有義振幅である。添え字のlfは低周波数（長周期）、wfは波周波数を意味する。

異なる自由度の変位の組み合わせ（例えば、SurgeとSway等）は、オフセット個々の成分のベクトル和として定義する。

有義振幅と最大振幅は浮体応答の標準偏差を用いて次式で定義される。狭帯域ガウス過程で表される応答のピーク値は、レイリー分布に従うことから、浮体の長周期応答・波周期応答が狭帯域ガウス過程であることを仮定している。浮体応答の標準偏差は浮体応答解析によって求められる。

$$\begin{aligned}
S_{sig} &= 2\sigma \\
S_{max} &= \sigma\sqrt{2(\ln(N))} \qquad \qquad \qquad (3-3-3)
\end{aligned}$$

ここで、 T ：指定されるストーム持続時間 (sec)、 T_a ：応答のゼロアップクロス周期の平均値(sec)である。

係留ライン1本破断後、新たな平衡位置に移るまで、係留浮体には過渡応答が生じる。過渡応答時の最大変位及び最大張力をチェックするため過渡解析が行われる。風、波、水流荷重下の浮体の過渡解析は、時間領域解析を必要とする。解析を容易にするため、時間領域（過渡運動）と周波数領域（浮体動揺）の組み合わせ法も使用できる。

時間領域-周波数領域組み合わせ解析では、まず、過渡運動の最大が、時間領域法を用いて求められ、それに周波数領域法で求められる長周期及び波周波数動揺が重ねあわされる。推奨手順は以下の通りである。

- ① 健全な係留系に対し、定常荷重下の平衡位置を計算する。
- ② 係留ライン1本破断し、定常荷重と係留反力・ケーブル反力を考慮した時間領域法により最大過渡応答（オーバーシュート）を計算する。一般に、3自由度(Surge、Sway、Yaw)モデルが必要。定常荷重は浮体の方位角 (Yaw) の変化に伴い時々刻々変化させることが望ましい。
- ③ 長周期応答・波周期応答の有義振幅を破断時の係留剛性を用いて周波数領域法で求める。

④ 次式にて最大変位を求める。

$$S_{max} = S_{mean} + S_{lf(sig)} + S_{wf(sig)} + S_t \quad (3-3-4)$$

ここで、 S_{max} ：最大変位、 S_{mean} ：平均変位、 $S_{lf(sig)}$ ：長周期応答の有義振幅、 $S_{wf(sig)}$ ：波周期応答の有義振幅、 S_t ：最大過渡応答である。

長周期動揺の減衰の考慮

浮体長周期応答の周波数帯は、浮体の固有周波数近傍での応答であるので、狭帯域である。動揺振幅は、係留系の剛性と減衰力に大きく依存する。これらは、長周期動揺推定において不確定である。長周期減衰力の源は以下の4つが考えられる。

- 粘性減衰
- 波漂流減衰 (wave drift damping)
- 係留ラインによる減衰
- 送電ケーブルによる減衰

粘性減衰は長周期動揺計算では一般に考慮されているが、波漂流減衰、係留ラインによる減衰、ケーブルによる減衰は複雑であり、原因・予測に関する理解が不十分なため無視されている。最近の研究によると、係留ラインの減衰は、ハルの粘性減衰よりも大きく、これらを見捨てることは長周期応答を過大予測することになるとの報告もある。しかしながら、洋上風力発電施設においては、ライン長はさほど大きくなく、安全側の評価を行うことから無視することで問題ないと考えられる。

長周期応答の減衰係数は一般に臨界減衰係数に対する割合（減衰率）を用いて次式で表される。臨界減衰係数とは、1自由度のステップ応答においてオーバーシュートが無くなる減衰係数である。

$$N_i = 2\zeta_i \sqrt{m_i k_i} \quad (3-3-5)$$

ここで、 N_i は応答モードiの減衰係数、 m_i は応答モードiの付加質量を含む見かけ質量、 k_i は平均変位での応答モードiの係留剛性である。

Note：DNV GLでは減衰率として以下の値を推奨している（粘性並びに wave drift damping を含む）。

表 3-3-3 減衰率の例

	150m 水深域にライン 12 本で係留された船型浮体（ライザー無）に対する減衰力 (critical damping の%)	450m 水深域にライン 8 本で係留されたセミサブ浮体（ライザー無）に対する減衰力 (critical damping の%)
Surge	5 ~ 0	10
Sway	15 ~ 20	15

(9) 張力計算等

- (a) 係留ラインの最大張力の計算にあたっては、各係留ラインにとって風、波及び潮流の最も厳しい組合せ（一般にすべてが同一の方向）を考慮し、十分な数の入射角の組合せを考慮する必要がある。特定の海域においては、より高い張力を引き起こすおそれのある互いに異なる方向の風、波及び潮流の組合せを必要に応じて考慮すること。
- (b) 係留ラインの張力の計算には、少なくとも以下掲げる項目を考慮しなければならない。この解析手法を準静的解析といい、係留ラインに働く張力の計算方法はこの準静的解析手法を標準とする。準静的解析手法により計算された係留ラインの最大張力は、係留ラインの規格切断荷重に対して表 3-1 に掲げる安全率を有することを原則とする。
- (i) 係留ラインの自重及び浮力による係留ラインの静的張力
 - (ii) 風、波及び潮流による浮体施設の定常的な水平方向の変位による係留ラインの定常的な張力
 - (iii) 波による浮体施設の運動による係留ラインの準静的な変動張力

表 3-1 係留ラインの安全率

状態	安全率	
	チェーン及びワイヤロープ	合成繊維ロープ
非損傷時		
動的解析を行う場合	1.67	2.50
準静的解析を行う場合	2.00	3.00
単一索破断状態（破断後の平衡状態）		
動的解析を行う場合	1.25	1.88
準静的解析を行う場合	1.43	2.15
単一索破断時の過渡状態		
動的解析を行う場合	1.05	1.58
準静的解析を行う場合	1.18	1.77

- (c) 係留ラインの最大張力 T_{max} は、次式により算出すること。ただし、時刻歴運動解析により算出する方法を用いても差し支えない。ただし、時刻歴運動解析により算出する方法を用いても差し支えない。なお、時刻歴運動解析により算出しても差し支えない。

$$T_{max} = T_{mean} + T_{lf(max)} + T_{wf(sig)} \text{ 又は } T_{max} = T_{mean} + T_{lf(sig)} + T_{wf(max)} \text{ の大なる方。}$$

T_{mean} : 風、潮流及び波漂流力の定常成分による係留ラインの定常張力

$T_{lf(sig)}$: 長周期変動成分の張力の有義振幅

$T_{wf(sig)}$: 波の周期と同じ周期の変動成分の張力の有義振幅

長周期変動成分の最大張力 $T_{lf(max)}$ 及び波の周期と同じ周期の変動成分の最大張力 $T_{wf(max)}$ は、(8)に示す長周期運動及び波周期運動を算定する際の手法と同じ手法で算定する。

- (d) 単一ライン破断状態において、残された係留ラインは連鎖的に破断を引き起こさないものでなければならない。残された係留ラインの張力は、準静的手法により計算され、計算された張力がそれぞれの係留ラインの破断荷重に対して、表 3-1 に掲げる安全率以上であることを原則とする。ただし、風、波等の環境荷重の再現期間は1年として差し支えない。
- (e) 前(d)における単一ライン破断状態の解析について、当該浮体施設に近接して他の構造物が設置される場合、当該浮体施設の係留ラインのうち近接構造物の反対側に施設されるものにあつては安全率を表 3-1 に掲げる値の 1.5 倍としなければならない。
- (f) 前(b)に加えて下記の事項を考慮に含める場合は準静的解析手法において要求される係留ラインの安全率について斟酌することができる。
 - (i) 一般に水深の深い場所で使用される場合における係留ラインに働く減衰力及び慣性力による係留ラインの動的張力。
 - (ii) 係留ラインが十分弛緩した状態で使用される場合（一般に浮体施設の水平面内の動揺の固有周期が通常の波の周期より十分に長い場合）、不規則波中における浮体施設の長周期運動による係留ラインの準静的な長周期変動張力。
- (g) トート係留システムの場合にあつては(a)から(e)までの事項に加え、次の事項についても適合すること。
 - (i) いずれの係留ラインにあつても張力変動によって緩みが生じないように設計されていること。
 - (ii) 干満時を含む潮位差による係留ラインの張力の変動を考慮していること。
 - (iii) 積載物の重量変化及び移動が係留ラインの張力に及ぼす影響に留意すること。
 - (iv) 係留ラインの非線形挙動の張力に及ぼす影響が無視できない場合は、非線形挙動による張力についても考慮されていること。

【解説】

(9)

張力計算等

各係留ラインにとって最も厳しい風・波・水流の方向の組み合わせについては、設置海域の状況のみならず、浮体形状や係留方式によっても非同一入射角（Non-Collinear）が厳しい場合がある。特に細長い浮体形状の場合注意が必要である。

前述のように、本技術基準では、係留ライン応答解析は準静的解析法を標準とするが、「ISO 19901-7」では動的解析を推奨する。

非損傷状態及び破断状態での最大張力の定義は最大変位の定義と同じく次式で表される。

$$T_{max} = T_{mean} + T_{lf(max)} + T_{wf(sig)} \quad \text{の大きい方} \quad (3-3-6)$$

$$T_{max} = T_{mean} + T_{lf(sig)} + T_{wf(max)}$$

ここで、 T_{max} ：最大張力、 T_{mean} ：平均張力、 $T_{lf(max)}$ ：長周期張力の最大値、 $T_{lf(sig)}$ ：長周期張力の有義値、 $T_{wf(max)}$ ：波周波数張力の最大値、 $T_{wf(sig)}$ ：波周波数張力の有義値

浮体応答解析手法として時間領域法を用いる場合、張力の時系列が直接求められるので、その統計処理結果を上のに当てはめることができる。周波数領域法または複合法を用いる場合、準静的解析と動的解析では扱いが異なる。準静的解析では S_{max} における張力を T_{max} として問題ないと考えられる。動的解析では、平均変位と長周期応答振幅で表される変位における静的張力と平均変位における浮体の波周期応答に伴う動的張力の振幅の和を最大張力とする方法が「ISO 19901-7」で推奨されている。

浮体損傷時評価の係留ラインの非損傷状態に対する要求安全率は終局強度評価の非損傷状態に対する要求安全率と同じと考えるべきである。

「ISO 19901-7」では合成繊維ロープとその他のラインの間に安全率の差を設けていない。ラインの安全率は最大張力と係留要素の最少破断強度（MBS）の比で表される。MBSは、係留素材メーカーで保証する破断強度とする。チェーンのMBSは、破断試験荷重（BTL）にとっても良い。最小破断強度は最小破断荷重（MBL）と表現されることもある。

「単一ライン破断状態」における環境荷重の設定は、一律に再現期間1年とするのではなく、第2編第2章第2節3.1の解説に記載したDLC9.1、DLC9.2、DLC10.1およびDLC10.2によることが望ましい。

トートレグ係留において緩みが生じている状態とは、ライン上端張力が、ラインの自重と浮力で決まる張力以下になった状態と考えることができる。

ラインの非線形性挙動が無視できない場合とは、TLPにおけるリンギングやスプリンギングが生じる場合が考えられる。

(10) 疲労強度

- (a) 変動張力範囲 T_i 及びその繰り返し数 n_i を考慮して係留ラインの疲労寿命を検討しなければならない。係留ラインの疲労寿命の評価は、変動張力範囲とラインが破断に損傷に至る繰り返し数に関する線図 (T-N 線図) を適用し、マイナー則に基づき算定された疲労被害度 D_i による。

$$D_i = \frac{n_i}{N_i}$$

n_i : 与えられた海象状態 i における張力の間隔範囲 i 中の繰り返し数 i ブロックにおける変動張力範囲の繰り返し数

N_i : 変動張力範囲 T_i が作用した場合に対応する、ラインが損傷に至る繰り返し数全ての想定される海象状態 NN (波浪分布表に示されるもの) に対する累積疲労被害度 D は次式により算定される。

$$D = \sum_{i=1}^{NN} D_i$$

D に 3.0 を乗じた値は 1 を超えてはならない。

- (b) 個々の係留ラインについては疲労寿命を検討すること。複合ラインの場合の T-N 曲線は疲労試験データ及び回帰解析に基づくものでなければならない。
- (c) 係留ラインと浮体施設との結合部及び係留ラインと海底係留点との結合部の疲労強度については特に留意する必要がある。
- (d) 管海官庁が必要と認める場合においては、渦抵抗による振動の影響について考慮すること。

【解説】

(10)

疲労強度

「ISO 19901-7」では T-N 曲線 (本技術基準では T-N 線図) は次式で与えられている。

$$NT^m = K \quad (3-3-7)$$

ここで、 T は張力レンジ (両振幅) と MBS の比、 N はレンジ T の繰り返し張力をかけたときの破断までの繰り返し数であり、 m 、 K は次表により与えられる。

表 3-3-4 T-N 曲線の係数

係留部材	m	K
スタッドチェーン	3.00	1,000
スタッドレスチェーン	3.00	316
接続リンク (Baltd, Kenter)	3.00	178
6 ストランドワイヤロープ (防食加工)	4.09	231
スパイラルストランドワイヤロープ (防食加工)	5.05	166

ここで与えられた T-N 曲線は、一般的な係留ラインにおける平均張力まわりでの張力レンジを基に得られた曲線である。このことは、本 T-N 曲線を用いる場合、係留ラインに過大な平均張力（通常は定常荷重を受けた浮体の平均変位での張力）がかかるような設計をしてはならないことを意味する。また、フェアリーダ近傍において大きな曲げがかからないことも前提としており、設計に注意する必要がある。

張力レンジの算出法については「ISO 19901-7」9.3.3 に詳しく記されているのでそちらを参照されたい。

【第 2 編 第 3 章 3. 係留解析】

(11) 腐食及び摩耗

(a) チェーンについては、腐食及び磨耗に対して、設置海域の塩分濃度等を考慮してリンク径を適切に増やさなければならない。なお、腐食及び磨耗に対するリンク径の予備分は以下を標準とする。

飛まつ帯及び硬質地盤の海底との接触部 : 年間 0.2mm~0.4mm
 その他 : 年間 0.1mm~0.2mm

【解説】

(11)

腐食及び摩耗

強度解析に対しては、チェーン径に腐食・摩耗代を含めてはならない。

疲労解析に対し、腐食率が予測できる場合、供用期間中異なる期間毎にチェーン径が設定される。この場合、ある期間のチェーン径は、公称径－その期間までの期待腐食・摩耗代とする。腐食率は、鋼の種類と海水環境に依存し、供用期間の最初の数年でかなり加速する。腐食率が不確定であれば、チェーン径を増やす等保守的な方法を採用すべきである。

ソケットに接続するワイヤロープの場合、ワイヤの亜鉛メッキがソケットの陽極として作用するため、ワイヤロープの腐食は加速する。永久係留に対し、ワイヤを電氣的にソケットから孤立させるか又はソケットを隣接ワイヤから孤立させるかのいずれかにすべきである。また、犠牲陽極を付加することでこうした腐食を保護できる。

4. 係留ライン等の設計

(1) 係留ラインの構成要素及び海底係留点

(a) 係留システムの各構成要素は、それぞれ最も厳しい荷重条件を確認できる設計手法を用いて設計すること。係留ラインと浮体施設及び海底係留点との連結箇所に用いられる連結用シャックル、リンク等の強度は、係留ラインの破断張力又は当該構造の最終強度に対し次表 3-2 に示す安全率を有することを原則とする。

表 3-2 安全率

安全率	
非損傷時	2.50
単一索破断状態	1.43

(b) カテナリ係留システムの場合、係留ラインは十分長いものとし、想定している設計条件に対し海底係留点において揚力がかからないようにしなければならない。ただし、底質が軟粘土質である場合における単一ライン破断状態の検討においてはラインと海底面との間の微小角度を認めることがある。

【解説】

(1) (a)

係留ラインの構成要素及び海底係留点

連結用シャックル等はチェーンリンクよりも高い安全率が課せられる。

(1) (b)

ドラッグアンカーが使用される場合、一般に、アンカー揚力を防ぐため、浮体外の係留ライン長は十分長くすべきである。アンカー貫入が浅くなる砂及び硬土質海底地盤のアンカーにとって、本要件は特に重要である。アンカーが土質条件に対し十分な鉛直耐力を有していれば、ドラッグアンカーの揚力を許容しても良い。

軟粘土底面とラインの最大角度は、健全時並びに損傷時の設計条件に対し 20°以下にしなければならない。さらに、把駐力は、係数 R をかけて減じなければならない。係数 R は、軟粘土底面でのライン角度の関数であり、埋設ライン長が短くなることで摩擦力が減少する分を考慮している。例えば、高把駐力アンカーに対し、以下のような係数が推奨されている。

表 3-4-1

軟粘土底面とラインの角度(°)	0	5	10	15	20
R	1.0	0.98	0.95	0.89	0.81

把駐力に係数 R をかけた値を新たな把駐力とし、アンカーの安全性を評価しなければな

らない。

パイプアンカー、サクションアンカー又はプレートアンカー (VLA: Vertically Loaded Anchor) のように鉛直引抜力に抗するように設計された他のアンカーシステムに対しては、より短い係留ライン長を使用できる。

【第2編 第3章 4. 係留ライン等の設計】

- (c) 海底面との水平摩擦力に依存する海底係留点の場合で、係留ラインの海中での単位長さあたりの重量が一定の場合、海底係留点に働く最大荷重 F_{anchor} は次により計算して差し支えない。

$$F_{\text{anchor}} = P_{\text{line}} - W_{\text{sub}}WD - F_{\text{friction}}$$

$$F_{\text{friction}} = f_{\text{sl}}L_{\text{bed}}W_{\text{sub}}$$

P_{line} : 係留ラインの最大張力

WD : 水深

f_{sl} : 滑っている状態での係留ラインの海底との摩擦係数で、海底土質と係留ラインの種類等を考慮して適切に定めた値とする。なお、軟土質、砂、粘土質の場合の f_{sl} 及び滑り始めの摩擦係数 f_{st} については表 3-3 の値によっても差し支えない。

L_{bed} : 設計上の荒天状態における海底の係留ライン長さであって係留ライン全長の 20% を超えないもの

W_{sub} : 係留ラインの海中での単位長さ当たりの重量

なお、海中部にある係留ラインが単一でない場合や、中間シンカー又はブイを用いる場合については、その影響を考慮して上式を適用する。

- (d) カテナリ係留システム及びトート係留システムにおける海底係留点の水平保持力に関する設計上の安全率は表 3-4 を原則とする。必要とする保持力の最大値を係留ラインの動的挙動を考慮に入れた動的解析に基づき決定する場合はこの限りではない。
- (e) トート係留システムにおける海底係留点の鉛直保持力に関する設計上の安全率は表 3-5 を原則とする。なお、緊張係留システムについては、管海官庁が適当と認めるところによる。

表 3-3 摩擦係数 f

	滑り始め (f_{st})	滑っている状態 (f_{sl})
チェーン	1.00	0.70
ワイヤロープ	0.60	0.25

表 3-4 カテナリ係留システム及びトート係留システムの
海底係留点の水平保持力に関する安全率

安全率	
非損傷時	1.50
単一索破断時極限状態	1.00

表 3-5 トート係留システムの海底係留点の鉛直保持力に関する安全率

安全率	
非損傷時	1.20
単一索破断時極限状態	1.00

【解説】

(1)(c), (d), (e)

海底面と係留ラインとの摩擦係数 f は、海底面と係留ラインの種類に依存する。表 3-3 は、チェーンとワイヤロープの一般的な値を示している。滑りはじめの摩擦係数は、係留ラインによる把駐力を計算するために使用し、滑っている状態の摩擦係数は、ライン展張時の摩擦力を計算するために使用する。使用できる海底面のデータが無ければ、この係数は、軟泥、砂及び粘土海底面に適用できる。

ドラッグアンカーの安全率

特定の土質条件におけるドラッグアンカーの把駐力特性は、アンカーが抵抗することによる最大水平定常引っ張り力を表す。「ISO 19901-7」が要求するドラッグアンカーの安全率（アンカー把駐力/最大アンカー荷重）を表 3-4-2 に示す。

アンカー把駐力は、たとえば API RP 2SK Appendix D を参照されたい。

表 3-4-2 ドラッグアンカーの安全率「ISO 19901-7」

		準静的解析	動的解析
永久係留	健全	—	1.50
	損傷	—	1.00
テンポラリー係留	健全	1.00	0.80
	損傷	要求なし	要求なし

サクション、パイル、重力式アンカーとプレートアンカーの安全率

アンカーの安全率は、アンカー把駐力/動的解析による最大アンカー荷重として定義され

る。「ISO 19901-7」が要求するサクション、パイル、重力式アンカー並びにプレートアンカーの安全率（アンカー把駐力/最大アンカー荷重）を表 3-4-3 に示す。

詳細については、たとえば API RP 2SK Appendix E を参照されたい。

表 3-4-3 重力式アンカー等の安全率「ISO19901-7」

	サクション、パイル及び重力式アンカー				プレートアンカー	
	永久係留		テンポラリー係留		永久係留	テンポラリー係留
解析条件	軸(鉛直)力	横(水平)力	軸(鉛直)力	横(水平)力		
健全条件	2.00	1.60	1.50	1.20	2.00	1.50
損傷条件	1.50	1.20	1.20	1.00	1.50	1.20

5. 係留機器

(1) 一般的事項

- (a) 位置保持システムは十分な冗長性を有すること。
- (b) 機器の1つが作動不良になっても、位置保持システムの通常運転が維持又は復帰できるような措置を講じること。特に駆動装置については機能が喪失しないように考慮を払う必要がある。
- (c) 位置保持システムに使用される機器は下記に示す動的状態で作動するものであること。ただし、浮体施設の形式、大きさ及び運転条件を考慮して管海官庁が認める場合にあつてはこの限りではない。
 - (i) セミサブ型の浮体施設においては任意方向に 22.5° の動的傾斜
- (d) 緊張係留システムに用いられる係留機器等については、以下に掲げる事項に適合すること。
 - (i) 緊張係留ラインの敷設に際しては、全てのラインの初期張力がほぼ均一となるように調整すること。また、必要に応じて係留ラインの張力を調整できる動力装置を備えなければならない。
 - (ii) 各々の緊張係留ラインに対してラインの張力を監視できる装置を備え付けること
 - (iii) 海底支持基礎がいかなる設計荷重状態にあつても持ち上がらないように設計されたものであることを確認すること。

(2) チェーン、ワイヤ等

- (a) 係留システムに使用するチェーン、ワイヤ又は合成繊維ロープ、中間シンカー、中間ブイ、海底係留点となるアンカー、シンカー、パイル等は管海官庁が適当と認めたものでなければならない。

(3) チェーンストッパ等

- (a) 係留システムに使用されるチェーンストッパは、係留ラインの最大張力に対して管海官庁が適当と認める十分な強度を有するものでなければならない。
- (b) トート係留ラインの敷設に際しては、全てのラインの初期張力がほぼ均一となるように調整すること。必要に応じ、係留ラインの張力を調整できる動力装置を備えなければならない。また、各々のラインの張力を監視できる装置を備えなければならない。

(4) フェアリーダ

- (a) 係留ラインにチェーンを用いる場合、フェアリーダとチェーンが接触する箇所の長さはチェーンの長径の7倍以上とすることを標準とする。
- (b) 係留ラインにワイヤ又は合成繊維ロープを用いる場合、フェアリーダとワイヤが接触する箇所の長さはワイヤの呼び径の14倍以上とすることを標準とする。

【解説】

(1)

一般的事項

ここで言う冗長性とは、係留ラインのみならず、巻き取り機等の駆動装置を含むものである。また、運転状態についてはセミサブに限らず満足する必要がある。

緊張係留システム

- ・ 緊張係留ラインシステム施工に関し、全てのラインの初期張力を均一にするため、ウィンチ等を使用し、係留ラインの張力を調整しなければならない。可能であれば、ウィンチ等を装備すること。
- ・ 各々の緊張係留ラインに対しラインの張力を監視するための装置を備え付けること。ただし、監視用張力計は、係留ラインの安全率よりも高い安全率を確保しなければならない。
- ・ 監視用張力計の仕様としては、各ラインの張力を連続モニタリングでき、少なくとも 24 時間分(サンプリング時間 1 秒)を記録しなければならない。

(2)

チェーン、ワイヤ等

- ・ 係留システムに使用するチェーン、ワイヤ又は合成繊維ロープ、中間シンカー、中間ブイ、海底係留点となるアンカー、シンカー、パイル等は、国際規格に準拠しているとともに管海官庁が承認したものでなければならない。

(3)

チェーンストッパ等

- (a) 係留システムに使用されるチェーンストッパは、国際規格に準拠しているとともに管海官庁が承認したものでなければならない。
- (b) トート係留ラインシステム施工に関し、全てのラインの初期張力を均一にするため、ウィンチ等を使用し、係留ラインの張力を調整しなければならない。可能であれば、ウィンチ等を装備すること。また、各々のラインの張力を監視できる張力計を備えなければならない。ただし、監視用張力計は、ラインの安全率よりも高い安全率を確保しなければならない。

(4)

フェアリーダ

- (a) 係留ラインにチェーンを用いる場合、フェアリーダとチェーンが接触する箇所の長さはチェーンの長径の 7 倍以上とすること。7 ポケット以上のフェアリーダとすること。

Note : DNV-OS-E301 では 7 ポケット以下であってはならず、9 ポケットのフェアリーダが推奨されている。

- (b) 係留ラインにワイヤ又は合成繊維ロープを用いる場合、フェアリーダやベンディングシューとワイヤが接触する箇所の長さはワイヤの呼び径の14倍以上とすること。

Note : DNV-OS-E301によると16倍未満であってはならず、16倍以上が推奨されている。これはウィンチ等とライン接触部に対しても適用される。

【第2編 第4章 設備に関する規則】

1. 艀装等

- (1) 浮体施設及びタワーに設けられた点検等の際に使用するための通路、プラットフォーム及びはしご等については、通常海況において海水を被る高さよりも上方に配置されていること。
- (2) 通路の備え付け位置については、回転中のブレード先端部との垂直距離が考慮されていること。
- (3) 作業船など他の船舶が浮体施設に接舷することを考慮している場合においては、浮体施設の接舷箇所に防舷材等を設けなければならない。
- (4) 浮体施設における区画内部を安全に点検するための適当な措置を講ずること。

【解説】

(1)

浮体式洋上風力発電施設の風車設備本体の点検等のために、通路、プラットフォーム及びはしご等が設けられる。通常海況において、安全に点検等の作業が可能なようにその設置高さを確保することが必要である。通常海況とは、3-1-1で定義する海象を指し、有義波高、ピークスペクトル周期及び波向を関連する平均風速と合わせて選定する。

(2)

通路の備え付け部分の最高位置とブレード先端部との垂直距離は、人的影響を避け安全のために十分な距離をとること。

(3)

防舷材とは、作業船など他の船舶が接舷するときに、船体及び浮体施設の損傷を防ぎ、接舷力を減少させるために取り付ける緩衝材のことであり、ゴム製が多い。

(4)

浮体施設の内部の点検については、区画が狭小な場合が多く、安全に点検するため、はしご、ステップ、手すり、すべり止め、その他官海官庁が適当と認める措置を講ずること。

【第2編 第4章 設備に関する規則】

2. 機関に関する設備

機関に関する設備については、船舶機関規則（昭和59年運輸省令第28号）に定める規定によること。ただし、本規定により難い事項又は管海官庁が本規定によることが適当でないと認めたものについてはこの限りでない。

【解説】

船舶安全法による機関に関する設備とは、原動機、動力伝達装置、軸系、ボイラ、圧力容器、補機等をいう。

ただし書以降の規定に関し、例えば第3章原動機第1節通則の第18条における原動機に関する規定を参考として以下に記述する。

○船舶機関規則（昭和59年運輸省令第28号）

（特殊な原動機）

第18条 次節から第四節までに規定していない原動機については、管海官庁が当該原動機を備え付ける船舶の堪航性及び人命の安全の保持に支障があるかどうかを審査して、その使用を承認するものとする。

【第2編 第4章 設備に関する規則】

3. 電気に関する設備

電気に関する設備については、船舶設備規程（昭和9年逓信省令第6号）第6編に定める規定によること。ただし、風力発電設備に係る電気設備等、管海官庁が本規定によることが適当でないと認めたものについてはこの限りでない。

【解説】

電気に関する設備は、船舶設備規定第6編に定める規定によるものとするが、基本的には一般の船舶を対象とした規定のために、必ずしもすべてがそのまま適用できるとは限らない。したがって、個々の設備について、その安全性に関して管海官庁の指示を受けること。

【第2編 第4章 設備に関する規則】

4. 防火設備及び消防設備

「火災の発生の危険が多い場所」として管海官庁が必要と認める箇所には、必要に応じて防火措置及び消防設備を備え付けること。

【解説】

風力発電設備に関する火災の発生の危険が多い場所としては、施設内の機関や電気に関する設備等が設置された場所が該当する。当該場所には、難燃性の材料による施設や構造物の保護、自動消火設備等必要に応じた適切な防火措置及び消防設備を備え付けること。

【第2編 第4章 設備に関する規則】

5. 昇降設備

昇降設備を有する場合においては、船舶設備規程（昭和9年逡信省令第6号）第7編第1章に定める規定によること。ただし、本規定により難い事項又は管海官庁が本規定によることが適当でないと認めたものについてはこの限りでない。

【解説】

浮体式洋上風力発電施設の場合、設置海域等によって浮体施設の動揺が極めて小さい場合には、係留船に対する緩和規定と同様に、本規程については管海官庁の指示により斟酌される場合がある。

また、一般の船舶に比し、洋上風力発電施設内部は通気性が十分でなく、高温の環境下にあることが想定される。このため、設置後の保守、管理にも十分な注意が払われるべきである。

船舶設備規程第7編特殊設備第1章昇降設備の浮体施設の動揺による昇降設備の傾斜に関する規定を参考として下記に記述する。

○船舶設備規程（昭和9年逡信省令第6号）

（材料、構造及び性能）

第304条（略）

2（略）

3 昇降設備は、船舶が縦に10度又は横に15度傾斜している状態においてもその性能に支障が生じないものでなければならない。ただし、係留船にあつては、管海官庁が当該係留船の係留場所の風、波、潮流等による影響を考慮して差し支えないと認める場合は、この項の規定の適用を緩和することができる。

4（略）

【第2編 第4章 設備に関する規則】

6. 回転翼航空機着船設備

回転翼航空機着船設備を有する場合においては、船舶検査心得3-1附属書[9]に定める規定によること。ただし、本規定により難しい事項又は管海官庁が本規定によることが適当でないと認めたものについてはこの限りでない。

【解説】

船舶検査心得3-1附属書[9]による回転翼航空機が着船するための空間は、救助を目的とするものである。

同附属書[9]で想定する回転翼航空機の諸元は、表4-6-1のとおりである。これは、平成9年7月時点における海上保安庁保有艦載型ヘリコプターの最大のものとはほぼ同じである。

表4-6-1 回転翼航空機の諸元

全長(L)	ローター径(R)	高さ(h)	自重(W ₀)	全重量(W)
20m	16m	5m	6ton	9ton

参考文献

船舶安全法関係規則解釈集—船舶検査心得準拠（船舶安全法安全規則研究会）

【第2編 第4章 設備に関する規則】

7. その他

石綿を含む材料を使用してはならない。

【解説】

石綿(アスベスト)は、天然に産する繊維状けい酸塩鉱物で、その繊維が極めて細いため、研磨機、切断機などの施設での使用や飛散しやすい吹付け石綿などの除去等において所要の措置を行わないと石綿が飛散して人が吸入してしまうおそれがある。以前はビル等の建築工事において、保温断熱の目的で石綿を吹き付ける作業が行われていたが、昭和50年に原則禁止されている。

1. 一般的事項

- (1) 浮体施設はすべての状態において本章で規定する復原性基準を満足すること。
- (2) 浮体施設の動揺がタワー及び風力発電設備に悪影響を及ぼさないよう、適切に浮体施設の動揺を抑制しなければならない。
- (3) 復原性の計算は、係留設備からの影響がない状態及び係留設備からの影響がある状態の両方について検討し、厳しい方の状態に基づかなければならない。
- (4) 復原性の計算を行う際には、タンク内の液体による自由表面の影響についても考慮すること。
- (5) 復原性の計算を行う際には、必要に応じてサイトのデータに基づく積雪及び着氷による荷重の影響についても考慮すること。

【解説】

(1)

浮体施設は設置海域への曳航時、設置時、試運転時、運転時において第5章に定める復原性基準を満たすこと。なお、復原性を照査するための外部条件は、第2編2章第2節3. の設計荷重ケースに従うこと。ただし、設計荷重ケースにおいて解析タイプUに分類されるケースの中で、浮体施設の傾斜角が大きくなる条件を用いること。

-----NOTE：復原性の照査法について-----

本ガイドラインでは、復原性の照査法について準静的な復原性照査法（古典的な浮体式海洋構造物の手法）および動的な復原性照査法（直接的に浮体運動を解析する手法）の両方を認めている。最大傾斜角の求め方は、それぞれ下記のとおりである。

- ・準静的な復原性照査法：従来の復原力曲線図と風による傾斜モーメント曲線図を用いて、浮体施設を傾斜させるために必要な仕事量と風による傾斜モーメントの仕事量とを比較して最大傾斜角を求める手法。
- ・動的な復原性照査法：第2編2章2節4. 荷重計算の手法で求められる浮体運動から最大傾斜角を求める手法。

また、従来の復原性照査では、対象とする事象は海水流入、転覆およびブレードの水面接触であるが、本ガイドラインのとおり設計荷重ケースのもとで照査を行うとすると、構造強度も含めて全ての構造健全性との観点で統合されることとなる。特に、損傷時の最大傾斜角に対してタワー基部等の構造強度を確保する点が、従来に無い照査項目となる。これは、タワーの倒壊等によって浮体施設の重心位置が大きく変化することが転覆を促進する可能性があることにも配慮したものである。

(3)

係留設備からの影響がない自由浮遊状態では、浮体施設は風荷重によって漂流を開始し、水面下浮体施設の動圧中心に風荷重と釣り合う流体力が作用する。風による傾斜モーメントは、風荷重に水線下浮体施設の動的圧力中心から風による圧力中心までの垂直距離を掛け合わせた値となる。一方、係留設備からの影響を考慮する場合は、係留点高さに風荷重と釣り合う係留反力が作用する。風による傾斜モーメントは、係留点高さから風による圧力中心までの垂直距離を掛け合わせた値となる。

復原性の計算は、係留設備からの影響がない状態及び係留設備からの影響がある状態を検討し、より厳しい状態に基づかななくてはならない。

(4)

タンク内の自由水は、初期復原力を減少させ、見掛け上重心の上昇と同じ効果を示す。復原性の計算を行う際には、自由表面影響も考慮すること。

(5)

設置海域において、着雪、着氷が想定される場合は、着雪、着氷による傾斜モーメントも考慮して復原性の計算を行うこと。

2. 風による傾斜モーメント

- (1) 風荷重については、第1章及び第2章第2節の規定によること。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。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。
- (2) 損傷時復原性の検討にあたっては、風速 25.8 m/s（海面上 10m）の風を受けるものとするができる。
- (3) 風による傾斜モーメントを算定するための、てこの長さは、水線下浮体施設の横方向の抵抗中心又はできれば動的圧力中心から風による圧力中心までの垂直距離とすること。
- (4) 風による傾斜モーメントは、浮体施設の各状態における適当な傾斜角毎に対して計算を行うこと。
- (5) 風洞試験により、風による傾斜モーメントを決定しても差し支えない。この場合、モーメントの決定にあつては各傾斜角における抗力効果及び揚力効果を含むものとする。

【解説】

(1)

風荷重とは、第2編第1章2. 風条件に基づいて得られた、第2編第2章第2節2-2. 空力荷重を指す。本ガイドライン第5章では風荷重を準静的な荷重として差し支えない。

準静的な復原性照査を行う場合、発電時の風力発電設備に発生する推力は(5-2-1)式を用いて求めること。ここで、 ρ_a は空気密度[kg/m³]、 C_T はロータのスラスト係数、運転状態、制御装置の特性、傾斜角度を考慮した風力発電設備のスラスト係数、 A_{thrust} は受風面積[m²]、 V_{hub} [m/s]はハブ高さでの1分間平均風速である。また、待機時に水面上浮体構造物、タワー、ナセル等に働く風荷重は(5-2-2)式を用いて求めこと。ここで、 C_s は表 5-2-1 に示す形状係数であり 2009 IMO MODU CODE を参考に浮体式洋上風力発電施設の風荷重評価に必要な項目を整理した。 A_{wind} は風に対する垂直方向投影面積[m²]、 V_{wind} [m/s]は1分間平均風速である。

$$F_{thrust} = \frac{\rho_a}{2} C_T A_{thrust} V_{hub}^2 \quad (5-2-1)$$

$$F_{wind} = \frac{\rho_a}{2} C_s A_{wind} V_{wind}^2 \quad (5-2-2)$$

表 5-2-1 形状係数

形状	Cs
球殻構造	0.4
円筒形構造	0.5
浮体施設の平面構造、浮体施設全体投影面	1.0
独立した構造部分（クレーン、形鋼、梁等）	1.5
甲板下の部分（平滑面）	1.0
甲板下の部分（暴露した梁、桁等）	1.3
作業用やぐら、トラス構造部分（各面）	1.25

設置海域において1分間平均風速データが与えられていない場合は、第2編第1章 2. 風条件(3)に記載されている変動風速のスペクトルモデルを用いて算出すること。

-----NOTE：平均風速の換算-----

ISO 19901-1 では暴風時における風速の鉛直分布として、(N5-2-1)式を与えている。(N5-2-1)式より、 z_r [m]（平均海水面から高度 10m）での1時間平均風速 U_{w0} [m/s]を用いて、高度 z [m]での T 秒間平均風速を求めることが出来る。

$$U_{w,T}(z) = U_{w0} \left\{ 1 + C \ln(z/z_r) \right\} \left\{ 1 - 0.41 I_u(z) \ln(T/T_0) \right\} \quad (\text{N5-2-1})$$

ここで、

$$C = 0.0573(1 + 0.15U_{w0})^{1/2}$$

$$I_u(z) = 0.06 \left[1 + 0.043U_{w0} \right] \left(z/z_r \right)^{-0.22}$$

$U_{w,T}(z)$: 高度 z [m]での T 秒平均風速 ($T < 3,600$ sec)

U_{w0} : 平均海水面から高度 10m での 1 時間平均風速

z_r : 10m (平均海水面から)

T_0 : 3,600 sec

また、DNV-RP-C205 では暴風時における風速の鉛直分布として ISO 19901-1 に加えて、(N5-2-2)式も適応できるとしている。(N5-2-2)式は、高度 10m での 10 分間平均風速 U_{10} [m/s]を用いて、高度 z [m]での T 秒間平均風速を求めることが出来る。

$$U(T, z) = U_{10} \left\{ 1 + 0.137 \ln(z/H) - 0.047 \ln(T/T_{10}) \right\} \quad (\text{N5-2-2})$$

ここで、

$$H = 10\text{m} \quad T_{10} = 600 \text{ sec}$$

(2)

風速 25.8 m/s (≒50 knots) の設定は、従来の海洋構造物において、衝突事故の原因となる作業船等が浮体施設に接近し得る最大条件として想定されてきた。しかしながら、浮体施設に損傷が生じる原因として、作業船等との衝突以外にも係留ライン等の反力に起因する破損も想定する必要があるので、当該 DLC に相当する風速とすることが望ましい。

(3)

自由浮遊状態の浮体施設は水面上施設に風荷重が働くことによって漂流を開始し、水面下浮体施設には漂流速度に応じた流体力が作用する。この流体力の作用点を動的圧力中心とする。また、水面上浮体施設及び風車発電設備に働く風荷重の圧力中心は発電時、待機時の両方について検討を行うこと。風荷重による傾斜モーメントを算定するための、てこの長さも発電時及び待機時の両方について検討を行うこと。

-----NOTE : 風荷重の圧力中心について-----

表 5-2-2 は実機出力 2MW の風車発電設備の 1/50 模型を用いて、風洞試験より求めたタワー基部から風荷重の圧力中心までの垂直距離をタワー高さで無次元化したものである。なお、風力発電設備は直立状態である。表 5-2-2 より、風車発電設備の運転状態により風荷重の圧力中心は異なるので、運転状態毎に風荷重、圧力中心を考慮する必要がある。

表 5-2-2 風荷重の圧力中心 (直立時)

発電時	待機時 (正面風)	待機時 (側面風)
0.909	0.638	0.815

(4)

風による傾斜モーメントは全ての運転状態において適当な傾斜角毎に計算を行うこと。また、発電時の風による傾斜モーメントを算出する際には風力発電設備の仕様、運転モード、風力発電設備の制御装置の特性も考慮すること。なお、風力発電設備、及び浮体施設に積雪、着氷、その他の傾斜モーメントを増大させる荷重が作用することが想定される設置海域では、それらの荷重による傾斜モーメントも考慮すること。

(5)

風洞試験によって、風荷重及び風荷重の圧力中心を算出することが出来る。傾斜時の風による傾斜モーメントを求める際には、風と平行な抗力によって生じる成分、及び甲板等の上下面圧力差に起因する揚力によって生じる成分を考慮する必要がある。

-----NOTE：発電時の風による傾斜モーメント-----

風洞試験による風による傾斜モーメントの計測結果の一例として、水平軸方式の風力発電設備を対象とした計測結果を記載する。

図 5-2-1 及び図 5-2-2 は実機出力 2MW の風車発電設備の 1/50 模型を用いて、発電時(定格運転時) に静的傾斜角を与えた条件の傾斜モーメント計測結果である。なお、実験の風条件は一様風であり、模型のブレードピッチ角制御は行っていない。図 5-2-1 は風力発電設備がアップウィンド方式での結果、図 5-2-2 は風力発電設備がダウンウィンド方式での結果である。なお、模型はブレードピッチ角制御を行っていない。図 5-2-1 及び図 5-2-2 より、アップウィンド方式、ダウンウィンド方式ともロータ面が風に垂直となる傾斜角で傾斜モーメントが最大値となる。

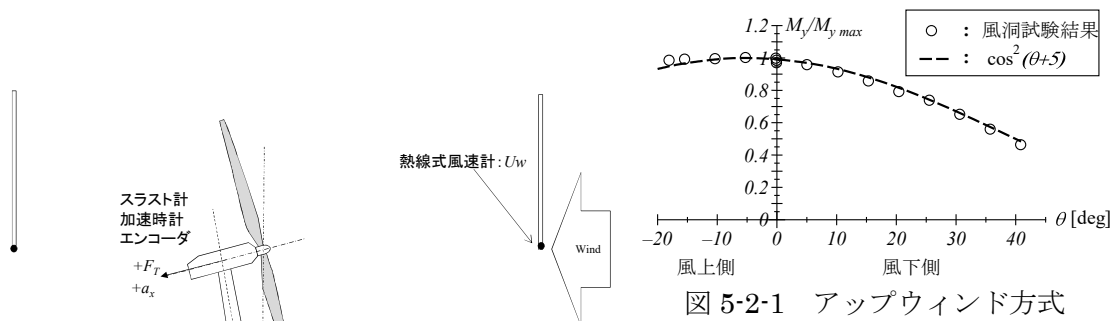


図 5-2-1 アップウィンド方式

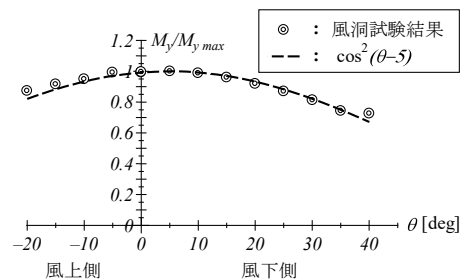


図 5-2-2 ダウンウィンド方式

3. 非損傷時復原性

(1) 一般的事項

- (a) 浮体施設は静水中の初期平衡状態において正の復原力を有していなければならない。
- (b) 浮体施設はあらゆる水平方向からの風による傾斜モーメント及び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。
- (c) 復原力曲線及び風による傾斜モーメント曲線については、図 5-1 に規定しておりとする。
- (d) 復原力曲線及び風による傾斜モーメント曲線は、最も影響の大きい軸方向に関し、浮上中の十分な数の状態について考慮しなければならない。
- (e) 浮体施設は、直立時から図 5-1 に示される θ_3 の傾斜角まで正の復原力を有していなければならない。また、傾斜角は、風力発電設備のブレードが水面に接触しない角度までとしなければならない。

(2) セミサブ型の浮体施設

セミサブ型の浮体施設にあつては、図 5-1 において以下の条件を満足しなければならない。

$$\text{面積}(A+B) \geq 1.3 \times \text{面積}(B+C)$$

ただし、傾斜角は θ_2 までとする。

(3) バージ型の浮体施設

バージ型の浮体施設にあつては、図 5-1 において以下の条件を満足しなければならない。

$$\text{面積}(A+B) \geq 1.4 \times \text{面積}(B+C)$$

ただし、傾斜角は θ_2 又は θ_3 のうち小さい方の角度までとする。

(4) スパー型の浮体施設

スパー型の浮体施設は、セミサブ型と同等以上の復原性を有しなければならない。

(5) TLP 型の浮体施設

TLP 型の浮体施設は、管海官庁が適当と認める方法において適切な復原性を有していることを確認しなければならない。

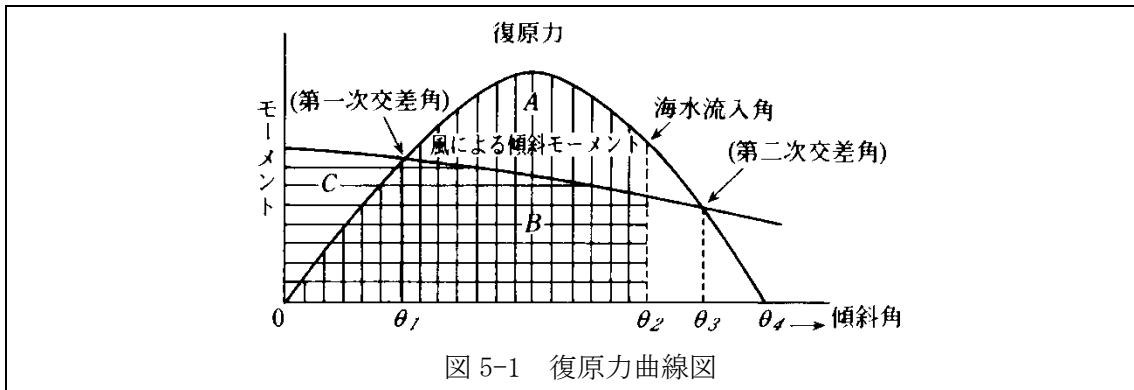


図 5-1 復原力曲線図

【解説】

(1)

(a)

セミサブ型及びスパー型の浮体施設は、静水中の初期平衡状態において $\overline{GM} > 0$ を満足すること。なお、TLP 型の浮体施設については(5)に従うこと。

(b)

第 5 章第 2 節(4)より求められる水平方向からの風による傾斜モーメント、及び第 2 編第 1 章 3-1. 基づく波浪に対して、十分な復原性を有すること。

(c)

復原力曲線は、浮体の傾斜角に対する静水圧によって生じる復原モーメントの変化を表した曲線であり、(5-3-1) 式のように求める。なお、復原力曲線を求める際には傾斜時の浮体施設の姿勢変化も考慮する。

$$(\text{復原モーメント}) = W \times \overline{GZ}(\theta) \quad (5-3-1)$$

浮体に風荷重が作用し始めた瞬間と最終的な平衡姿勢に達した瞬間は運動エネルギーがゼロとなるので、傾斜中の運動によるエネルギーの増減を無視すれば、浮体の姿勢によって決まる保存力のみ作用すると考えて最大傾斜角を求めることができる。復原力曲線図を用いると、浮体を直立状態から θ_2 まで復原モーメントに反して傾ける時に必要なエネルギーは、復原力曲線と θ_2 で囲まれる面積(A+B)で表される。一方、風による傾斜モーメントが船体を直立状態から θ_2 まで傾けるエネルギーは、風による傾斜モーメント曲線と θ_2 で囲まれる面積(B+C)で表される。

(d)

水面下の形状が複雑な浮体施設では傾斜が発生する軸方向により復原力曲線が異なる。また、風による傾斜モーメント曲線も風力発電設備の発電時及び待機時で異なる。復原力曲線及び風による傾斜モーメント曲線は、最も復原性に不利な軸方向に対して、発電時、及び待機時の両方について検討すること。

-----NOTE：セミサブ型の船舶の復原力曲線例-----

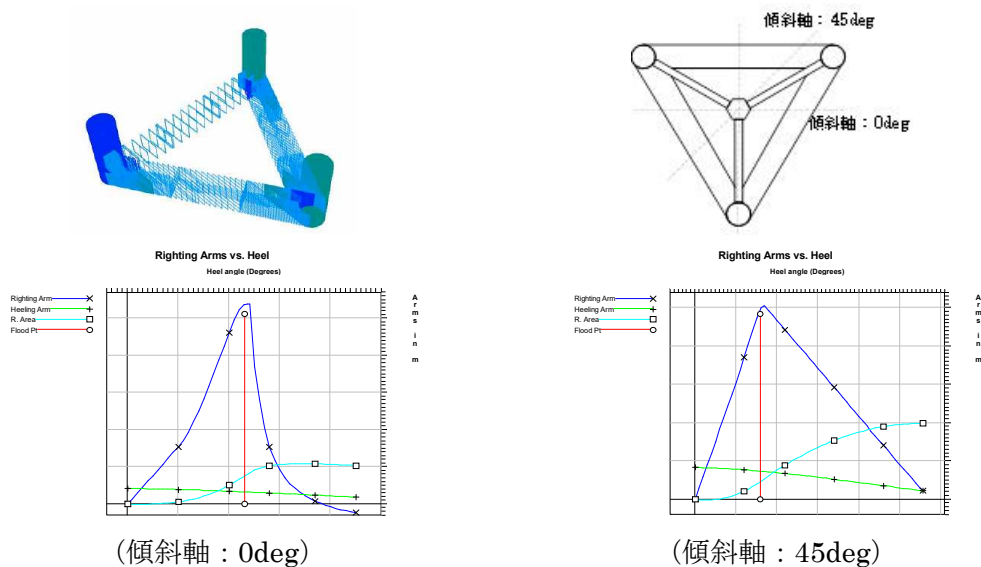


図 5-3-1 セミサブ型船舶の復原力曲線例

(e)

セミサブ型及びスパー型の浮体施設は、直立状態から、本技術基準の図 5-1 に示される θ_3 の傾斜角まで $\overline{GM} > 0$ を満足すること。また、傾斜時に風力発電設備のブレードが水面に接してはならない。ただし、TLP 型の浮体施設については(5)に従うこと。

(2)

準静的な復原性照査を行う場合、非損傷状態については本技術基準の図 5-1 に示す復原力曲線の囲む面積で表される復原モーメントのなす仕事量(A+B)と、風による傾斜モーメントのなす仕事量(B+C)が、(5-3-2) 式の関係を満たす必要がある。なお、(5-3-2) 式の右辺の定数 1.3 は不確定的な傾斜エネルギーに対する安全率である。

$$\text{面積}(A+B) \geq 1.3 \times \text{面積}(B+C) \quad (5-3-2)$$

動的な復原性照査を行う場合、浮体運動解析によって出現する全ての状態において、正の復原力を有し、水密を確保できない開口部は水面下に没してはならず、ブレードが水面に接触してはならない。

(4)

(2)と同様。

(5)

TLP型の浮体施設では、傾斜時の浮体施設水面下形状変化に起因する復原力よりも、緊張係留ライン初期張力及び緊張係留ライン剛性による復原力が支配的になる。浮体施設はあらゆる水平方向からの風による傾斜モーメント及び波による動揺に対して、緊張係留ラインが健全であり、かつ緊張係留ライン張力が負となってはならない。

4. 損傷時復原性

- (1) 浮体施設は、計画された喫水の上方5.0メートルから下方3.0メートル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。ただし、当該浮体施設の設置海域における船舶の航行状況等を考慮して管海官庁が適当と認める場合にあっては、この限りではない。
- (2) 浮体施設における海底ケーブルの引き込み箇所や係留ラインからの反力を受ける箇所等、浸水の恐れがあるとして管海官庁が指示する区画については、当該区画における浸水を防止するための措置等を考慮して管海官庁が適当と認める場合を除き、当該区画への浸水時に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。
- (3) 損傷時復原性の計算においては、損傷区画室の排水、バラスト調整、他の区画への漲水又は係留力を考慮することによる傾斜角の減少を考慮してはならない。
- (4) TLP型の浮体施設にあっては、(1)から(3)までの規定に関わらず、管海官庁が適当と認める方法において適切な損傷時復原性を有していることを確認すること。

【解説】

(1)

浮体施設は、喫水線上方5.0m、下方3.0mの範囲に破口が生じ、この範囲内に設けられる1区画に浸水が生じることを想定する。

準静的な復原性照査を行う場合、損傷時は第5章第2節(2)に定めた風による傾斜モーメントを想定し、傾斜が発生するあらゆる軸方向に対して傾斜モーメントを求め復原性評価を行うこと。なお、損傷後の最終水線は、浮体施設の動揺も考慮して、水密が確保できない開口部を超えてはならない。

タワー基部モーメントは風による傾斜モーメント、静的傾斜成分、動的慣性力成分の和として算出して差し支えない。ここで、最大傾斜角 θ_a は図5-4-1に示す損傷時復原力曲線の囲む面積で表される復原モーメントのなす仕事量(A+B)と風による傾斜モーメントのなす仕事量(B+C)が等しくなる角度とする。

この場合の浮体施設の動揺加速度(α_a)は(5-4-1)式で与えて差し支えない。なお、 θ_1 は第一次交差角、 L は重心からの鉛直距離、 $T_{1/3}$ はDLCに相当する有義波周期、 a は動揺加速度が最も大きくなる波周期が不確定であることに対応する安全率であり、本ガイドラインでは0.7を推奨する。

また、タワー基部に生じる最大応力は第2編第2章第3節3.全体強度解析に示した許容応力を超えてはならない。

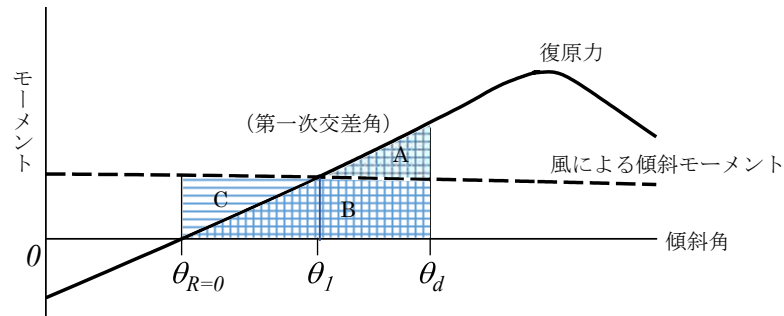


図 5-4-1 損傷時復原力曲線

$$\alpha_d = (\theta_d - \theta_1) L \left(\frac{2\pi}{aT_{1/3}} \right)^2 \quad (5-4-1)$$

動的な復原性照査を行う場合、浮体運動解析によって出現する全ての状態において、正の復原力を有し、水密を確保できない開口部は水面下に没してはならない。また、タワー基部に生じる最大応力は第2編第2章第3節 3. 全体強度解析に示した許容応力を超えてはならない。

ただし書については、IEC TS 61400-3-2:2019 の 15.4 項の考え方を踏まえた人命の安全等に係るリスク及び復原性の喪失による構造全損の確率に関し、計画された喫水の上方 5.0 メートルから下方 3.0 メートルまでの範囲に設けられる区画（外板を含むものに限る。）における 1 区画への浸水については、製造時の品質管理及び周辺を航行する船舶の衝突による影響が支配的であることから、次の 2 点を満足した場合に適用することができるものとする。

- ・ 浮体の製造に関して、（船舶検査に加えて）ISO 9001 等に基づく組織的な品質管理を実施すること。
- ・ 周辺を航行する船舶の衝突に起因する復原性喪失による構造全損の一年当たりの確率が、 1×10^{-4} 以下であることを確認すること（確率の算出の方法については付録 5 参照）。

ここで、隣接する他の施設（他の洋上風力発電施設、洋上変電所その他海洋施設）との離隔距離がロータ径の 3 倍未満である場合、特殊な形式の風力発電設備の搭載等により作動油や燃料油などを多量に使用する場合及び回転翼航空機着船設備（救助を目的とするものを除く）を有する場合には、それぞれの場合に応じ、隣接する他の施設への影響や環境への影響、構造全損の確率について、追加で検討を行い、管海官庁の確認を受けること。

ウィンドファームにおいても、当該ウィンドファームを構成する各々の浮体施設について構造全損の一年当たりの確率の評価を行うことを原則とするが、既に計算されたある浮体施設に係る確率及び周辺を航行する船舶の航路その他の航行の態様に鑑みて、他の浮体施設に係る確率が 1×10^{-4} 以下を下回る事が明らかであると管海官庁が認めた場合には、当該他の浮体施設に係る確率の算定を省略することができる。

(2)

海底ケーブルの引き込みを行う区画、フェアリーダー等の係留ラインの反力を受ける箇所隣接する区画等、浸水の恐れがあるとして管海官庁が指示する区画は、損傷を受け、浸水することを想定する。

準静的な復原性照査を行う場合、損傷時は5章2節(2)に定めた風による傾斜モーメントを想定し、傾斜が発生するあらゆる軸方向に対して傾斜モーメントを算出する。

損傷後の最終水線は、浮体施設の動揺も考慮して、水密が確保できない開口部を超えてはならない。

また、タワー基部の構造強度照査は(1)と同様に行う。

動的な復原性照査を行う場合、照査は(1)と同様に行う。

ただし書については、浮体構造物の強度向上やウィークリンクの設置等により浮体構造物の係留取付部の強度が係留索の強度よりも高くなることを担保するなどの浸水を防止するための措置が適切に講じられていることが確認された場合に適用することとする。具体的な確認方法については、例えば、(設計値ではなく)実際に選定された係留索の破断強度を入力とする解析(係留系の安全率を考慮した係留索の破断荷重を解析に用いる。)を行い、浮体構造物の係留取付部に働く応力により当該箇所が破口に至らないことを確認すること等による。

ここで、(1)と同様に、隣接する他の施設(他の洋上風力発電施設、洋上変電所その他海洋施設)との離隔距離がロータ径の3倍未満である場合、特殊な形式の風力発電設備の搭載等により作動油や燃料油などを多量に使用する場合及び回転翼航空機着船設備(救助を目的とするものを除く)を有する場合には、それぞれの場合に応じ、隣接する他の施設への影響や環境への影響、構造全損の確率について、追加で検討を行い、管海官庁の確認を受けること。

(3)

傾斜角を減少させる損傷区画の排水、バラスト調整、他の区画への漲水又は係留力を考慮してはならない。また、バラスト水量を常に制御し、傾斜を抑制させる機能を有する船舶については、損傷時に当該機能の効果を考慮してはならない。

附則（令和2年3月3日）

（適用期日）

本改正は、令和2年3月3日から適用する。

（経過措置）

(a) 令和2年3月3日前に建造され、又は建造に着手されたものについては、改正後の規定にかかわらず、なお従前の例によることができる。

(b) 第2編第2節3. の設計条件及び荷重ケースについては、改正後の規定にかかわらず、当分の間、なお従前の例によることができる。

【解説】

本附則 (b) による経過措置において「当分の間」とは、施行日より2年～3年間程度を想定している。IEC 61400-3-1 の国内取り入れ状況や IEC TS 61400-3-2 の国際標準 (IS: International Standard) 化に向けた IEC (国際電気標準会議) における議論の進展などを踏まえて具体的な期日の検討を行うが (注)、当該期日以前に建造され、又は建造に着手されたものが経過措置の対象となる。

また、本附則 (上記の解説を含む。) の適用に当たっては、電気事業法 (昭和39年法律第170号) 第48条に基づく工事計画の届出がなされたことをもって「建造され、又は建造に着手された」とみなすことができるものとする。

(注)

IEC61400-3-1 の国内取り入れ状況や IEC TS 61400-3-2 の国際標準化に向けた IEC における議論の状況から、「当分の間」について、現時点で具体的な期日を設定できる状況にないことから、改めて適切な時期 (JIS C 1400-3 の改正される時期や IEC TS 61400-3-2 が IS (International Standard) として定められる時期について見通しが立った際) に解説部分の見直しを行うこととする。