

# 浮体式洋上風力発電技術ガイドブック

平成 30 年 3 月

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構



## はじめに

わが国は世界でも第6位の排他的経済水域を持つ世界屈指の海洋大国である<sup>1</sup>。浮体式洋上風力発電の設置可能な水深の海域は、着床式洋上風力発電施設の適地とされる50m以浅<sup>2</sup>の海域の賦存量を大きく上回り、将来的にわが国の再生可能エネルギーの有望な産出地となりうるものである。

わが国では、環境省、経済産業省・資源エネルギー庁による浮体式洋上風力発電施設の実証研究および事業化が進められてきた。発電出力2MWクラス以上の浮体式洋上風力発電プロジェクトのうち、2018年3月現在、運転中および建設中のものを含めると半数以上は日本の海域で実施されており、わが国の浮体式洋上風力発電に関する技術は、世界をリードしている状況ともいえる。

一方、浮体式洋上風力発電施設は洋上に浮かぶ構造物であり、風が風車に与える荷重に加え、波・流れが浮体に与える荷重が加わる。また、浮体の上に風車を設置することから、動揺する浮体を制御する技術も求められる。さらに、浮体に由来する復原力を基礎とすることから、浮体式洋上風力発電施設の実用化に向けては、様々な技術的課題を解決しなければならない。

わが国では、浮体式洋上風力発電施設の普及・促進に向け、浮体式洋上風力発電施設技術基準(2012)<sup>3</sup>、浮体式洋上風力発電設備に関するガイドライン(2012)<sup>4</sup>、JIS C 1400-1(2010)<sup>5</sup>やJIS C 1400-3(2014)<sup>6</sup>が公開されている。これらには、合理的かつ効率的な安全設計を促進するための要求事項が記載されており、これらの技術基準や設計要件をベースに、設計者が実務的に参照できる技術的解決策を体系的に提供するものが求められている。

「浮体式洋上風力発電技術ガイドブック」(以下「本技術ガイドブック」という。)は、次世代浮体式洋上風力発電システム実証研究の成果に基づき、国内外の最新の知見も参考としながら、設計者が浮体式洋上風力発電施設の設計を進めるうえで、推奨される技術的アプローチを紹介する資料として取りまとめたものである。なお、本技術ガイドブックは基本的に着床式洋上風力発電導入ガイドブックの考え方を踏襲している。

経済産業省において取りまとめられる「浮体式洋上風力発電導入マニュアル(以下「浮体式導入マニュアル」という。)」と本技術ガイドブックの関係を次表に示す。本技術ガイドブックは、浮体式導入マニュアルの「4. 実施設計パート>(1) 構造設計」に相当する。

今後、浮体式洋上風力発電施設の普及促進を目指すと同時に、国内の浮体式洋上風力発電関連技術の国際競争力強化につながるための一助となれば幸いである。

浮体式導入マニュアルと本技術ガイドブックの関係

浮体式導入マニュアル (経済産業省)	本技術ガイドブック
1. 立地環境調査	—
2. 海域・気象・海象調査	—
3. 基本設計	—
4. 実施設計 (1) 設備設計 (2) 工事設計 (3) 工事計画	第Ⅱ編 浮体式洋上風力発電施設の評価 <ul style="list-style-type: none"> <li>1. 設計の概要</li> <li>2. 環境条件の評価</li> <li>3. 復原性の評価</li> <li>4. 荷重評価</li> <li>5. 構造評価</li> </ul>
5. 建設工事	—
6. 運転保守	—
7. 撤去・解体	—
8. 環境影響評価	—

※本技術ガイドブックの第Ⅰ編は導入部であること、第Ⅲ編は評価事例であることから、浮体式導入マニュアルとの直接的な関係性は考慮していない。

本技術ガイドブックの作成・検討にあたり、各種専門分野の委員（下表）から構成されるガイドブックワーキングを設立し、指導・助言を得て取りまとめた。委員長をはじめ、各委員の方々には深謝申し上げる。

ガイドブックワーキング委員

委員	所属／役職
宇都宮 智昭 (委員長)	九州大学大学院 工学研究院 海洋システム工学部門／教授
石田 茂資	佐賀大学 海洋エネルギー研究センター／教授
岩下 智也	一般財団法人 日本海事協会 再生可能エネルギー部／主管
吉田 茂雄	九州大学 応用力学研究所 自然エネルギー統合利用センター／教授
石原 孟 (プロジェクトリーダー)	東京大学大学院 工学系研究科 社会基盤学専攻／教授

(委員長、プロジェクトリーダーを除き 50 音順、敬称略)

※本技術ガイドブックの参考文献は巻末に記載するものとする。

# 目次

第 I 編 総則	1
1. 概説	1
2. 技術ガイドブックの適用範囲	4
3. 浮体式洋上風力発電施設の基礎知識	5
3.1 浮体式洋上風力発電施設の定義	5
3.2 浮体式洋上風力発電施設の形式	5
3.3 浮体式洋上風力発電施設に対する法規制	15
4. 浮体式洋上風力発電施設の構造	16
5. 用語・略語の定義	17
第 II 編 浮体式洋上風力発電施設の評価	20
1. 設計の概要	20
2. 環境条件の評価	21
2.1 風条件の設定	21
2.2 海象条件の設定	34
2.3 その他の環境条件の設定	43
3. 復原性の評価	51
3.1 主要寸法および区画配置の設定	53
3.2 非損傷時の復原性の評価	53
3.3 損傷時の復原性の評価	56
4. 荷重評価	57
4.1 設計荷重ケース (DLC) 設定	57
4.2 モデルの設定	62
4.3 連成解析の実施	68
4.4 連成解析の検証	72
5. 構造評価	75
5.1 概要	75
5.2 風車の構造評価	76
5.3 浮体施設の構造評価	77
5.4 係留施設の構造評価	86
第 III 編 評価事例	98
1. 評価事例の概要	98
2. 環境条件の評価事例	99
2.1 風条件の設定	99
2.2 海象条件の設定	107
2.3 その他環境条件	124
2.4 気象海象調査結果まとめ	125

3. 復原性の評価事例 .....	126
3.1 主要寸法および区画配置 .....	126
3.2 評価方法の概要 .....	127
3.3 非損傷時の復原性の評価 .....	129
3.4 損傷時の復原性の評価 .....	130
4. 荷重評価事例 .....	131
4.1 設計荷重ケース（DLC）の設定 .....	131
4.2 モデルの設定 .....	132
4.3 連成解析の実施 .....	135
4.4 連成解析の検証 .....	143
5. 構造評価事例 .....	151
5.1 浮体施設の構造評価 .....	151
5.2 係留施設の構造評価 .....	160
参考文献	

## 第 I 編 総則

### 1. 概説

---

本技術ガイドブックは、国内外の最新の知見（風力発電設備支持物構造設計指針・同解説[2010年度版]（2010）<sup>7</sup>、浮体式洋上風力発電施設技術基準（2012）<sup>3</sup>、JIS C 1400-1（2010）<sup>5</sup>および JIS C 1400-3（2014）<sup>6</sup>）等を参考としながら、設計者が浮体式洋上風力発電施設の設計を進める上で推奨される技術的アプローチを紹介する資料として位置づけられている。言いかえるならば、最新の知見等を踏まえたリコメンデド・プラクティス（推奨方法）であり、安全かつ経済性の観点から最適な設計を行う際の一助となるものを目指してまとめている。

本技術ガイドブックは、本編と付属資料編の2部編成となっている。

本編の第 I 編は、本技術ガイドブックの位置づけ（適用、定義）を明らかにし、第 II 編の導入部としている。

第 II 編は、海域設定後の施設設計に必要な検討内容を明らかにするものである。この検討過程は、浮体式洋上風力発電施設を日本領海内に設置する場合、船舶安全法が適用されることから、船級認証を得るプロセスで必要となる検討事項を念頭においている。第 1 章で設計に要求される内容について概説したのちに、第 2 章は風や海象等の環境条件を設定し、第 3 章は浮体式洋上風力発電設備に関するガイドライン<sup>4</sup>に規定される浮体の復原性の評価に必要な条件と検討例を示し、第 4 章と第 5 章では環境条件に基づいた各部位の荷重や構造上の強度が安全側となる施設の基本仕様を決定するための方法を紹介する。

第 III 編は、浮体式洋上風力発電施設設計について、環境条件の評価から構造評価にいたる各段階における評価事例を参照できるようにした。なお、本ガイドブックに示した評価事例は、次世代浮体式洋上風力発電システム実証研究の FS 調査報告書を基にしている。

付属資料編は気象・海象の予測、連成解析・構造解析および国内外の浮体式洋上風力発電プロジェクト事例を紹介している。

本技術ガイドブックにおける設計の流れを図 1-1 に示す。

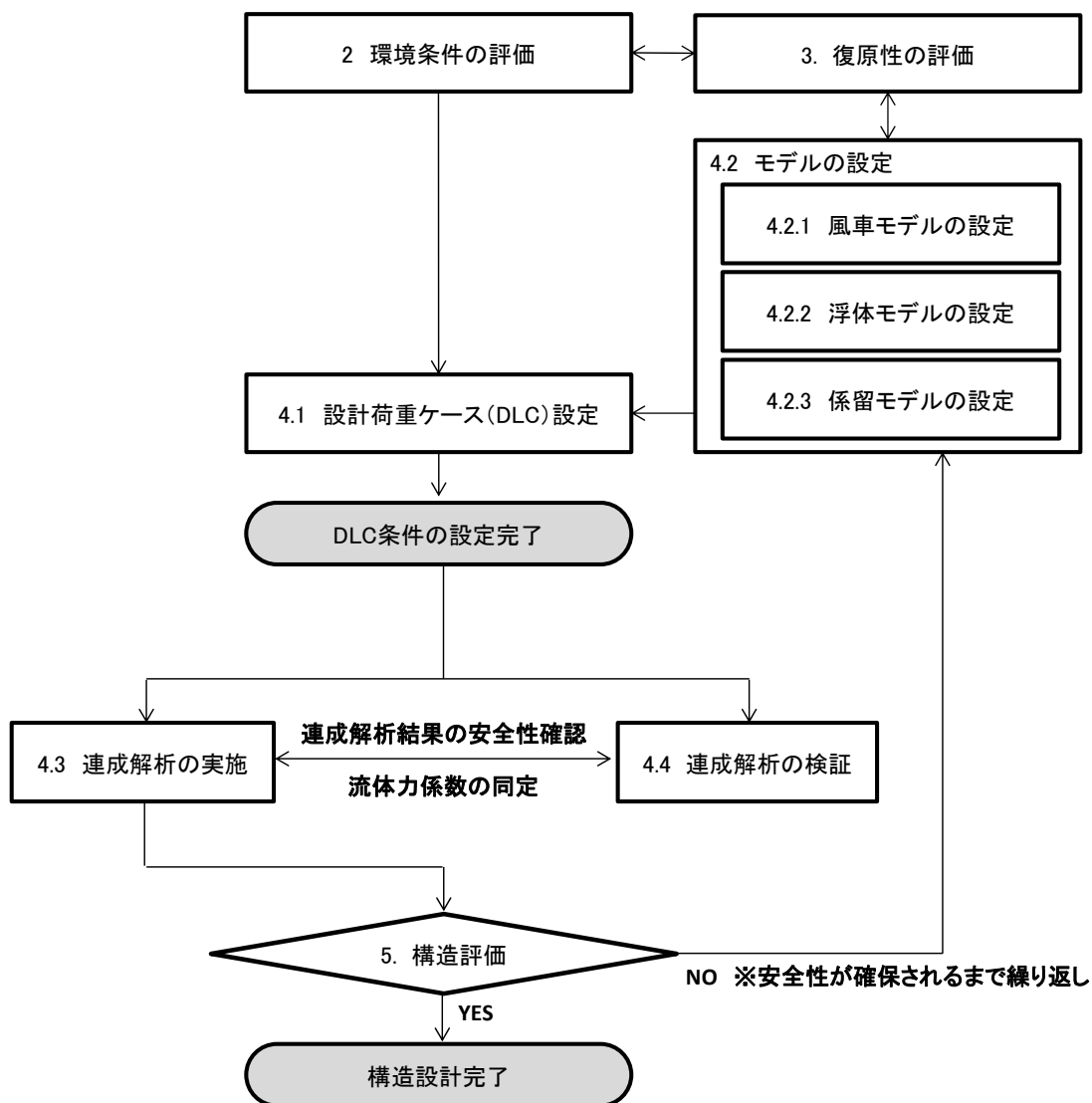


図 1-1 本技術ガイドブックにおける設計の流れ

※各項目に付している番号は、第II編の項目番号である。



本ガイドブックを作成するにあたり、参照した主な基準類を表 1-1 に示す。

表 1-1 参照した主な基準類

No.	リスト名	刊行年	備考
1	IEC 61400-1:2005 Wind turbines - Part 1: Design requirements	2005	風車-第 1 部：設計要件
2	API RP2SK (R2015) Design and Analysis of Stationkeeping Systems for Floating Structures, Third Edition (Includes 2008 Addendum)	2005	浮体構造物の位置保持システムの設計および解析、3 版 (2008 補遺を含む)
3	IEC 61400-3:2009 Wind turbines - Part 3: Design requirements for offshore wind turbines	2009	風車-第 3 部：洋上風車の設計要件
4	ISO 19901-7:2013 Petroleum and natural gas industries -- Specific requirements for offshore structures -- Part 7: Stationkeeping systems for floating offshore structures and mobile offshore units	2013	石油および天然ガス工業-海洋構造物に関する特定要求事項-第 7 部：浮動海洋構造物および可動海洋ユニットの位置保持システム
5	DNV-OS-J103 Design of Floating Wind Turbine Structures JUNE 2013	2013	浮体式風車構造物の設計
6	DNV-OS-J101 Design of Offshore Wind Turbine Structures MAY 2014	2014	DNVGL-ST0437 および DNVGL-ST0126 に置換。洋上風車構造物の設計
7	ABS Guide for Building and Classing Bottom Founded Offshore Wind Turbine Installations OCTOBER 2015	2015	着床式洋上風車の設備
8	ABS Guide for Building and Classing Floating Offshore Wind Turbine Installations OCTOBER 2015	2015	浮体式洋上風車の設備
9	DNVGL-ST0437 Edition November 2016 Loads and site conditions for wind turbines	2016	風車の荷重および立地条件
10	DNVGL-ST0126 Edition April 2016 Support structures for wind turbines	2016	風車の支持構造物
11	JIS C 1400-1:2010 風車-第 1 部：設計要件	2010	IEC 61400-1 を基に、技術的内容および構成を変更することなく作成されている。
12	風力発電設備支持物構造設計指針・同解説[2010 年度版] (土木学会)	2011	—
13	浮体式洋上風力発電施設技術基準 (国土交通省海事局)	2012	—
14	浮体式洋上風力発電設備に関するガイドライン (日本海事協会)	2012	—
15	JIS C 1400-3:2014 風車-第 3 部：洋上風車の設計要件	2014	IEC 61400-3 を基に、技術的内容および構成を変更することなく作成されている。
16	鋼船規則・同検査要領 P 編 (海洋構造物) (日本海事協会)	2017	—

## 2. 技術ガイドブックの適用範囲

本技術ガイドブックは、2 枚翼または 3 枚翼を持つ水平軸風車の支持物であるタワー、基礎である浮体構造物、チェーン・アンカー、およびタワーと浮体との定着部を対象として、各部位・部材の荷重評価、構造評価を行う場合に適用するものとする。

本技術ガイドブックに適用される風車・浮体形式は、表 2-1 に示すものとする。

なお、1 つの浮体の上に複数の風車を搭載する形式およびリブレースは、本技術ガイドブックでは適用範囲外とする。

また、本技術ガイドブックに定めるところと異なる形式にあたっては、本技術ガイドブックの規定の原則的な考え方に準拠して個々に構造等の評価すると良い。

表 2-1 本技術ガイドブックの適用範囲

風車形式	浮体形式
水平軸風車	<ul style="list-style-type: none"><li>・ ポンツーン形式（バージ形式）</li><li>・ セミサブ形式</li><li>・ スパー形式</li><li>・ テンションレグプラットフォーム形式（以下「TLP 形式」という。）</li></ul>

※1 つの浮体の上に複数の風車を搭載する形式およびリブレースは、本技術ガイドブックでは適用範囲外とする。

### 3. 浮体式洋上風力発電施設の基礎知識

#### 3.1 浮体式洋上風力発電施設の定義

本技術ガイドブックでは、国土交通省海事局と国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下「NEDO」という。）の定義を踏まえ、浮体式洋上風力発電施設を以下のように定義するものとする。

浮体式洋上風力発電施設とは、流体力荷重、構造物の浮力による垂直保持力および波・流れ・風等に誘発される水平力を受け、位置保持設備で支持され風力発電設備を有する浮体式海洋構造物（船舶）を指す。

#### 3.2 浮体式洋上風力発電施設の形式

陸上風力発電施設や着床式洋上風力発電施設と異なり、浮体式洋上風力発電施設の構造を特徴付けるものは、基礎構造である浮体形式と位置保持方法である。本節では、3.2.2 で述べる浮体の基本 3 形式と位置保持方法（係留形式）を概説した後に、浮体式洋上風力発電施設の例について述べるものとする。

##### 3.2.1 浮体式洋上風力発電施設に作用する外力

浮体式洋上風力発電施設には、3.1 節でも述べたように、流体力荷重、構造物の浮力による垂直保持力および波・流れ・風等に誘発される水平力等、様々な外力が作用する。浮体式洋上風力発電施設に作用する外力模式図を図 3.2-1 に示す。

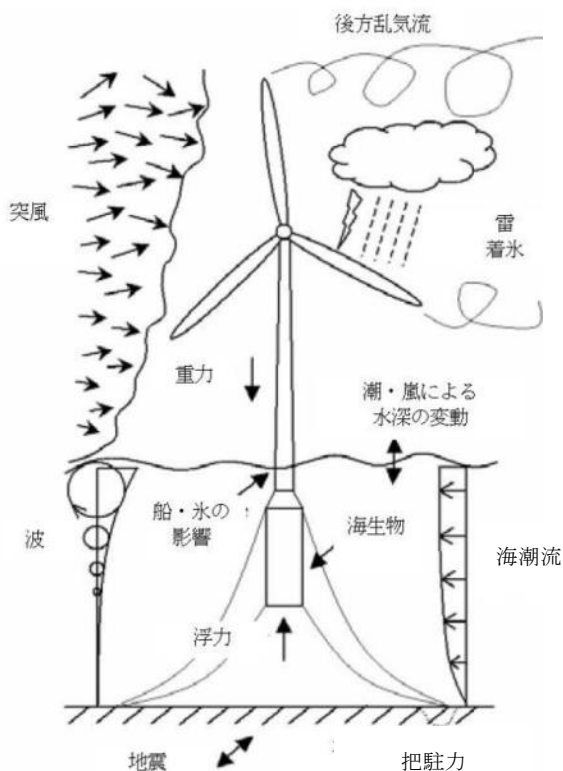


図 3.2-1 浮体式洋上風力発電施設に作用する外力模式図<sup>8</sup>

### 3.2.2 浮体形式と位置保持方法

#### 1) 浮体形式

浮体形式は、浮体が受ける外力に抵抗して姿勢を保つ際に生ずる復原力の発生メカニズムにより、図 3.2-2 に示す基本 3 形式に分類できる。

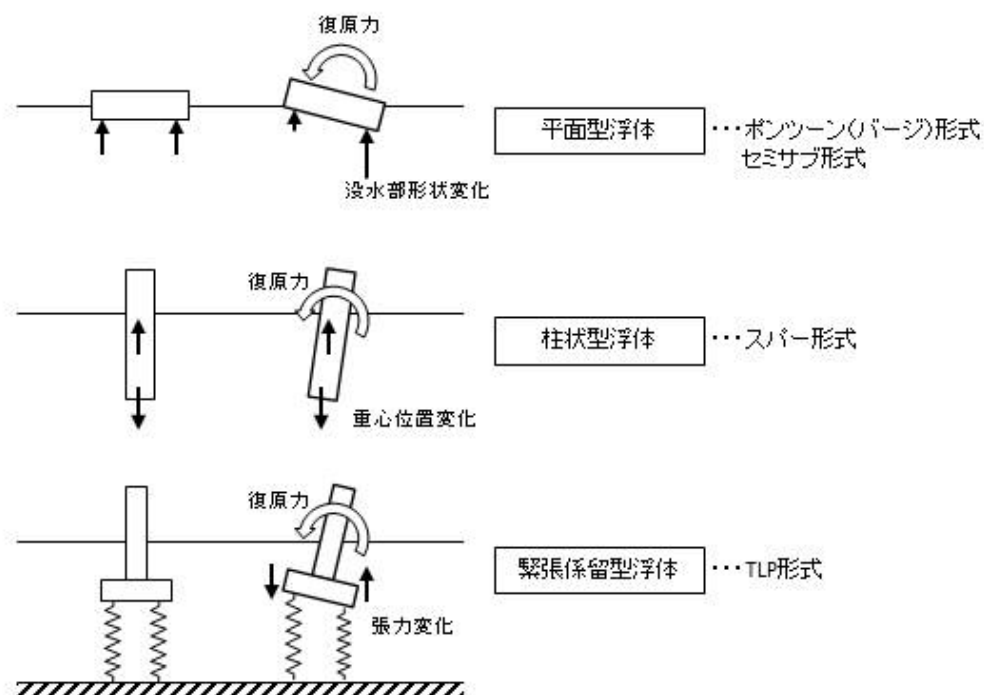
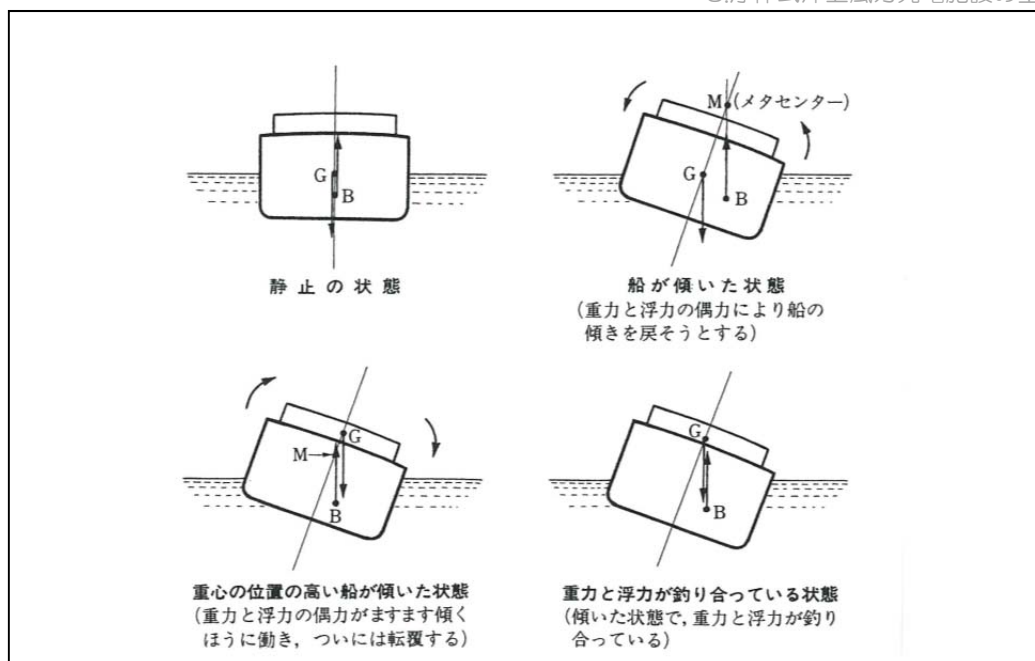


図 3.2-2 復原力の発生メカニズムに対応した浮体形式<sup>9</sup>

#### ① 平面型浮体

ポンツーン（バージ）形式、格子形式と呼ばれる浮体形式である。浮力の仮想作用点であるメタセンター（M）を高く持つていくことにより安定性を確保する形式ある。本形式は、風荷重による浮体傾斜に対しては、船舶等と同様に浮力による復原力によって傾斜を抑える。比較的揺れやすい形式である。この形式の欠点を解消したものが、浮体の大部分を没水させ波の影響を受けにくくした半潜水式（セミサブ形式）浮体である。

図 3.2-3 に示すように、船をその直立状態から小角度傾けると、新しい浮心（B）を通る浮力の作用線と、直立時の浮心を通る鉛直線との交点はほぼ一定点となり、この点をメタセンターという<sup>10</sup>。メタセンター（M）が船体の重心（G）の上方にあり GM の距離が大きいほど復原力は大きくなる。そのためには重心位置を低く保つことが重要である。

図 3.2-3 復原力<sup>11)</sup>

## ② 柱状型浮体

スパー形式と呼ばれる浮体形式である。浮体幅が狭いため、傾斜時に左右の没水量の変化による復原力はほとんど期待できない形式で、重心を下げることで必要な復原力を発生させるものである。水面貫通部分が小さいため、波浪に対する応答が小さい。

## ③ 緊張係留型浮体

TLP形式と呼ばれる浮体形式である。海底と浮体を細長な弾性部材で結び、その軸剛性で復原力を発生させる形式である。比較的容易に低コストで海底に基礎を作成することが可能な場合に有効な形式である。

## 2) 位置保持方法

浮体構造物の位置保持方法は、多点係留システムと一点係留システムに大別される。本ガイドブックでは事例が比較的豊富な多点係留システムについて説明する。一点係留システムについては、浮体式洋上風力発電設備に関するガイドライン<sup>4</sup>を参照されたい。

ここで、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、ワイヤーロープ、またはこれらが複合したロープ、シャックル等の連結具および中間ブイまたは中間シンカー等からなるものをいう。

多点係留システムとは、海底のパイル、シンカー等の支持基礎により構成されるシステムであり、係留ラインの端部が個々に浮体施設のウィンチまたはストッパに連結されているものをいう。代表的な係留方式のイメージを図 3.2-4 示す。

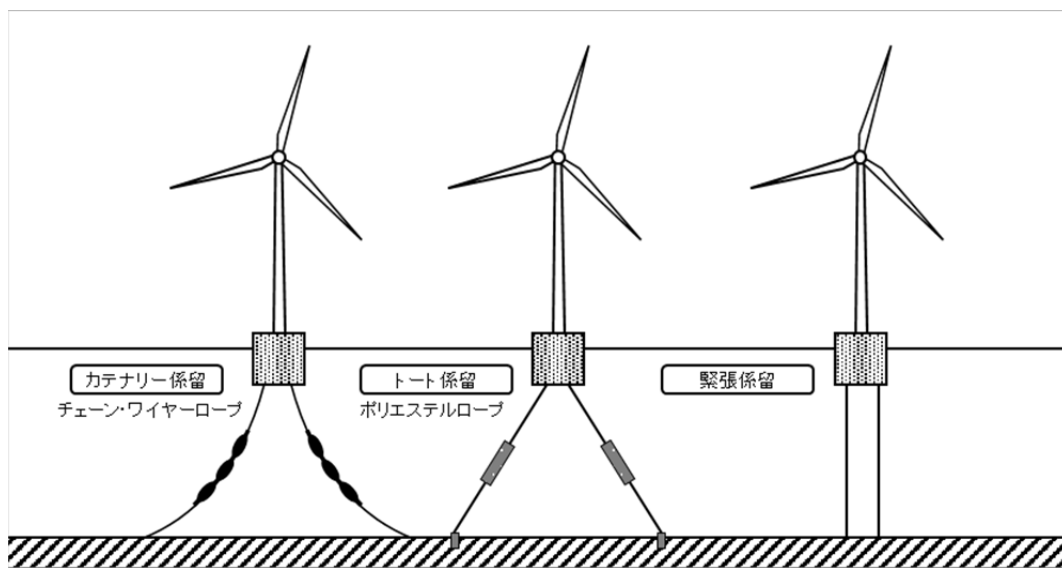


図 3.2-4 代表的な係留方式のイメージ

### a) カテナリー係留

海底に展開したチェーンの一端を吊り上げたときに形成されるカテナリー（懸垂線）形状の係留ラインの自重（中間ブイまたは中間シンカーを有するものにあつては、これらの浮力または自重）によって係留力を得るものをいう。

### b) トート係留

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。

### c) 緊張係留

海底に設置されたパイルまた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およ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る。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を堅く保持し、係留ラインの張力によって、浮体施設の上下揺、縦揺れおよび横揺れを堅く保持しようとするものをいう。

### 3.2.3 浮体式洋上風力発電施設の主な形式

ここでは、浮体と係留方式を組み合わせた浮体式洋上風力発電施設の主な形式について、イメージ図と概ねの構造が分かる図をもって紹介する。

なお、国内外での事例を付属資料編「7. 国内外の浮体式洋上風力発電プロジェクト事例」に詳しく記載している。

#### 1) ポンツーン（バージ）形式【Pontoon (Barge)】

ポンツーン（バージ）形式は、主に底面が平らな箱舟（ポンツーン、バージと呼ばれる）に風車を設置したものである。この形式は通常、カテナリー（懸垂線）係留されており、水面との接触面が増すことで安定度を高める構造である。ポンツーン形式の例を図 3.2-5 に示す。

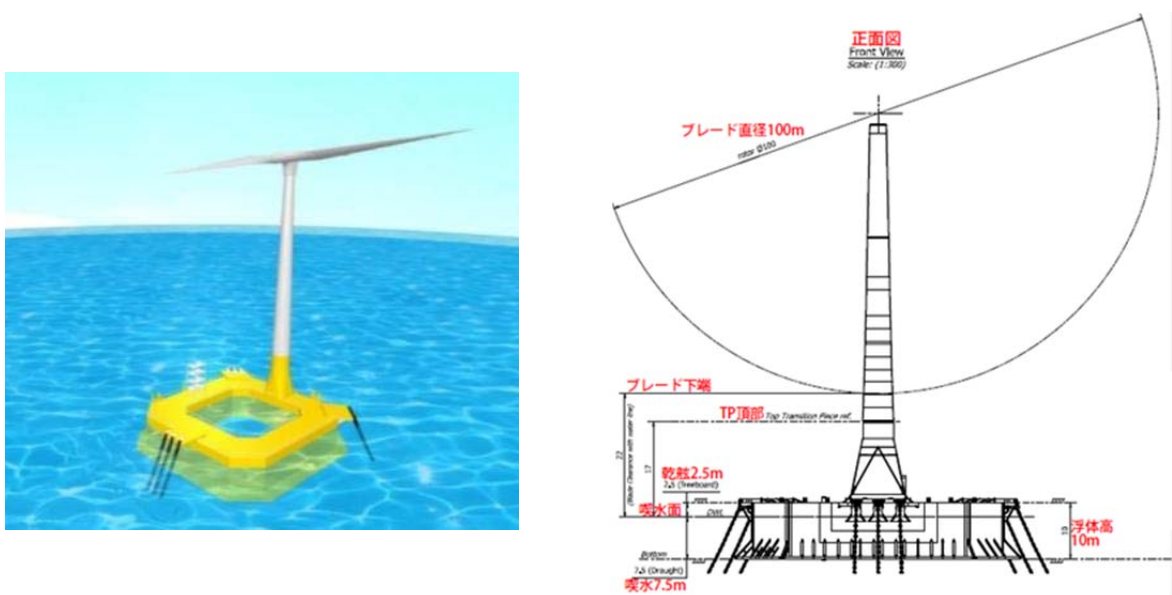


図 3.2-5 ポンツーン形式の例<sup>12</sup>

#### 2) セミサブ形式【Semi-submersible】

セミサブ形式は、ポンツーン形式の改良形で、浮体を所定の喫水まで沈めて半潜水状態となる形式のものをいう。波の影響を避けるように水中に沈めた浮力部とカラム（Column）部から構成される浮体において、各々に作用する波力の位相差を利用して鉛直動揺の低減を図るものである。

本形式は、風車を搭載する上部構造（デッキ）と下部構造（脚部）で構成され、下部構造によってフーティング型（Footing）とローハル型（Lower hull）に分類される。

フーティング型は、3～4本のカラムと呼ばれる支柱と、これを補強するブレース（Brace）で構成される。

一方、ローハル型はカラムの下部にローハルと呼ばれるバラストタンクを接続し、バラストタンクに注水して半潜水させることで波の影響を受けにくくさせるものである。セミサブ形式（フーティング型）の例を図 3.2-6 に示す。

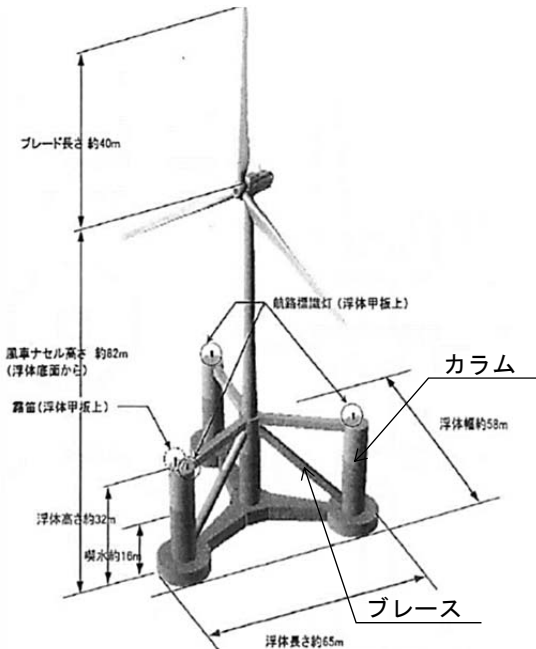


図 3.2-6 セミサブ形式（フーティング型）の例<sup>13</sup>

### 3) スパー形式【Spar】

スパー形式は、円筒ブイ型の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没水させる形式である。喫水を確保することで浮力を見込んでいるので、重心を下げることによって浮体を安定させる仕組みとなっている。スパー形式の例を図 3.2-7 に示す。

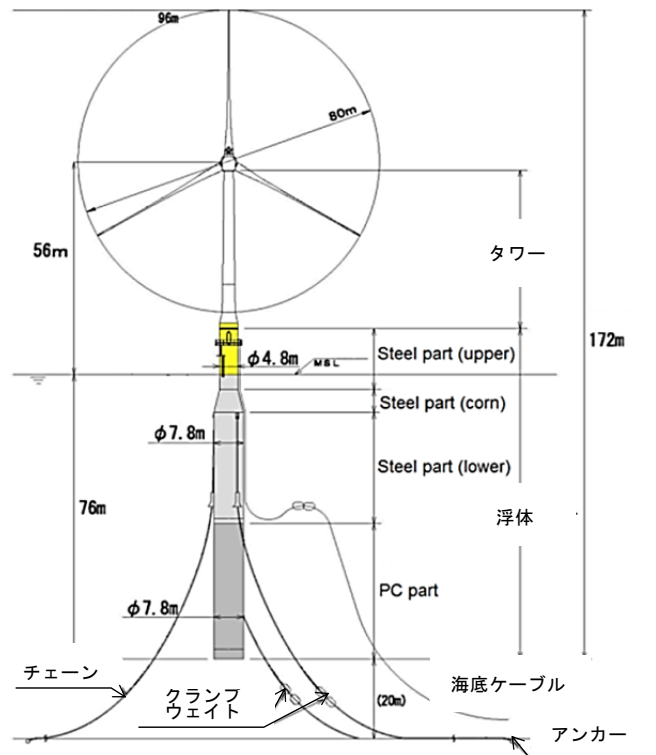


図 3.2-7 スパー形式の例<sup>14</sup>



スパー形式の発展形として、アドバンストスパー形式（Advanced Spar）がある。これは従来のスパー形式では100m程度の喫水が必要であったのに対し、稼働喫水を50m程度に抑え、比較的浅い水深での設置が可能な形式である。アドバンストスパー形式の例を図3.2-8に示す。

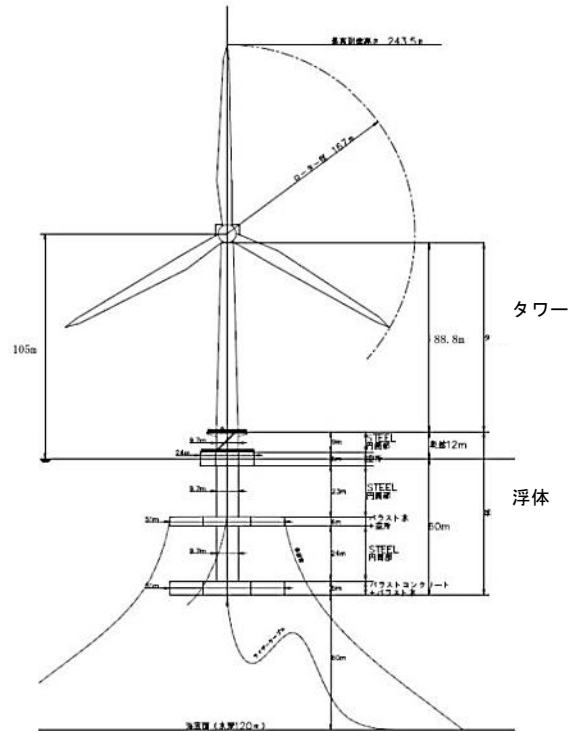


図 3.2-8 アドバンストスパー形式の例<sup>15)</sup>

## 4) TLP 形式【Tension Leg Platform】

TLP 形式は、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形式である。浮体のヒープ方向の動揺、ロール・ピッチ方向の動揺を抑制する仕組みである。TLP 形式の例を図 3.2-9 に示す。

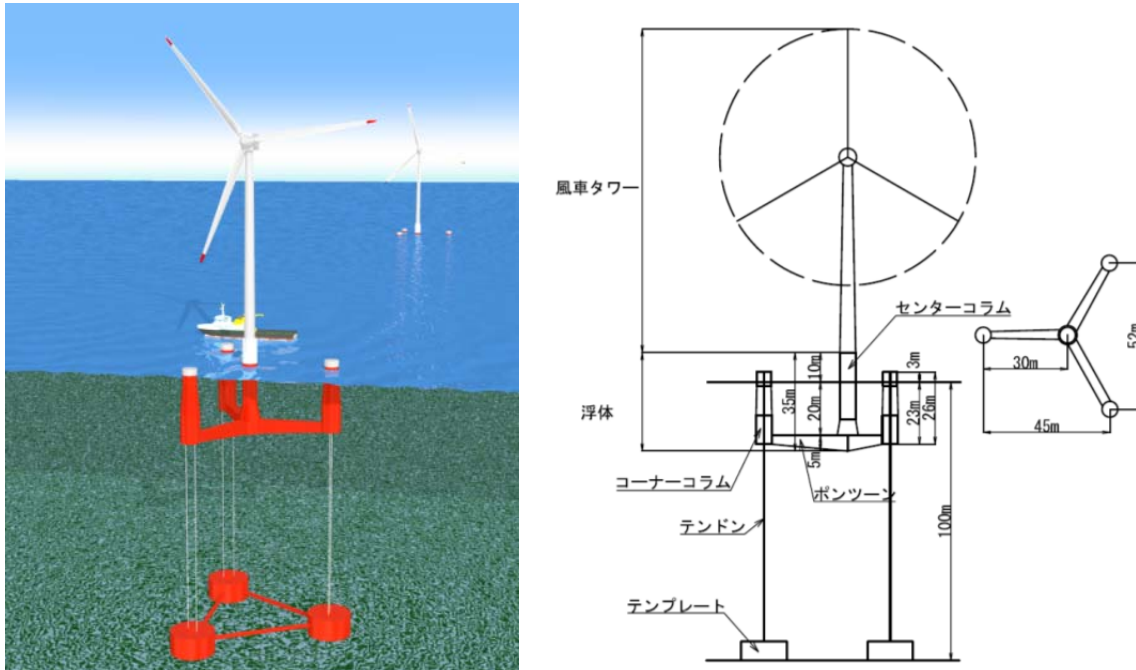


図 3.2-9 TLP 形式の例<sup>16</sup>

## 3.2.4 浮体形式ごとの浮体・係留性能等

## 1) 浮体形式ごとの浮体・係留性能と適用海域

浮体形式として概ね技術が確立されているものとしては、ポンツーン形式（バージ形式）、セミサブ形式、スパー形式が挙げられる。なお、机上検討段階であるが TLP 形式がある。

浮体形式ごとの性能および適用海域について表 3.2-1 に示す。

表 3.2-1 浮体形式ごとの性能および適用海域

浮体形式	性能		適用海域
	浮体	係留	
ポンツーン (バージ)	水線面二次モーメントが大きいとため、固有周期が波の主要周期に重なるため、応答が大きい。	カタナリー係留によるため、相対的に係留力は小さい。	比較的揺れやすい形式であり、静穏な海域に設置するのに適する。
セミサブ	ポンツーンの改良形式であり、全自由度の固有周期が波の主要周期に重ならないため、安定である。	カタナリー係留によるため、相対的に係留力は小さい。	浮体の大部分を没水させ波の影響を受けにくくしているため、沖合に設置するのに適する。
スパー	全自由度の固有周期が波の主要周期に重ならないため、安定である。	カタナリー係留によるため、相対的に係留力は小さい。	水面貫通部分が小さいため、波浪条件の激しい沖合に設置するのに適する。
TLP	緊張係留により、ヒープ、ピッチ方向の動揺がほぼ無い。	緊張係留により係留・アンカーに大きな荷重が作用する。係留力の変動が大きい。	(現時点では実用段階でないため、適用海域については言及しない。)

2) 浮体の適用水深

浮体式洋上風力発電施設の基礎構造は、設置海域の水深により大きな影響を受ける。モノパイル式・重力式・ジャケット式等の着床式洋上風力発電施設の適用水深が概ね 50m 以浅であるのに対し、浮体式洋上風力発電施設の適用水深は一般に概ね 50m 以深とされる（着床式が浮体式に対して経済的に有利な境界水深は 50m 程度とされる）。洋上風力発電施設の適用水深を図 3.2-10 に示す。

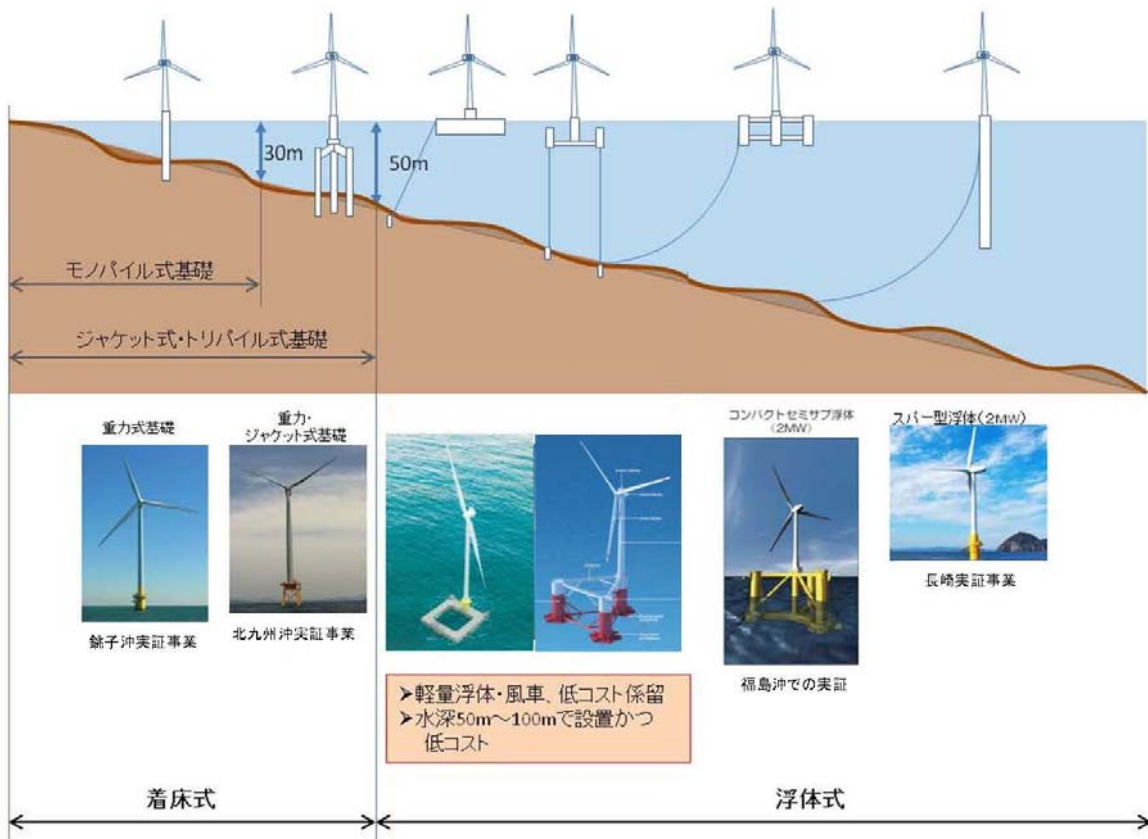


図 3.2-10 洋上風力発電施設の適用水深

## 3.3 浮体式洋上風力発電施設に対する法規制

風力発電施設の 2018 年 3 月時点の法令適用関係を図 3.3-1 に示す。

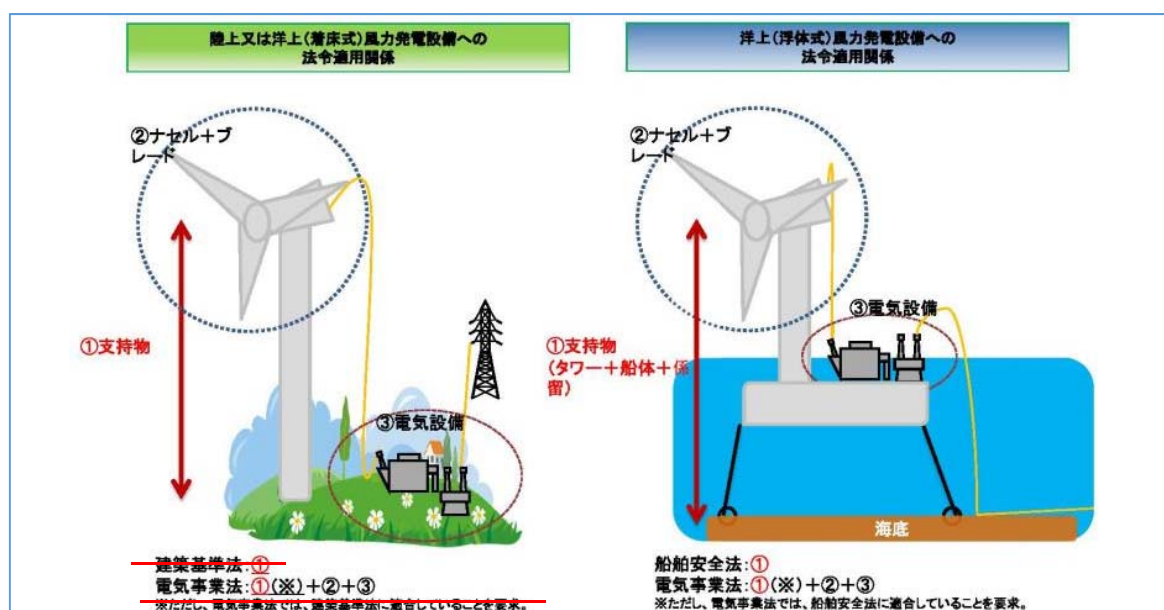


図 3.3-1 風力発電施設への法令適用関係<sup>17</sup>

発電用風力設備のうち、高さが 15m を超える風車を支持する工作物については、建築基準法（昭和 25 年法律第 201 号）および電気事業法（昭和 39 年法律第 170 号）のそれぞれにおいて安全規制が課されていたが、平成 24 年 4 月 3 日付けで閣議決定された「エネルギー分野における規制・制度改革に係る方針」を踏まえ、平成 26 年 4 月 1 日付けで、建築基準法令と同等の規制が課されることを前提に、建築基準法の規制対象から除外し、電気事業法での安全規制に一本化された。

改正前は、陸上および洋上風車について、支持物（基礎・タワー）には建築基準法が適用され、風車（ロータ・ナセル・アセンブリ）と電気設備には電気事業法が適用される形での法規制となっていた。

改正後は、風力発電設備全体（風車+支持物+電気設備）に対して電気事業法が適用され、設備全体を経済産業省が審査を行う形となった。

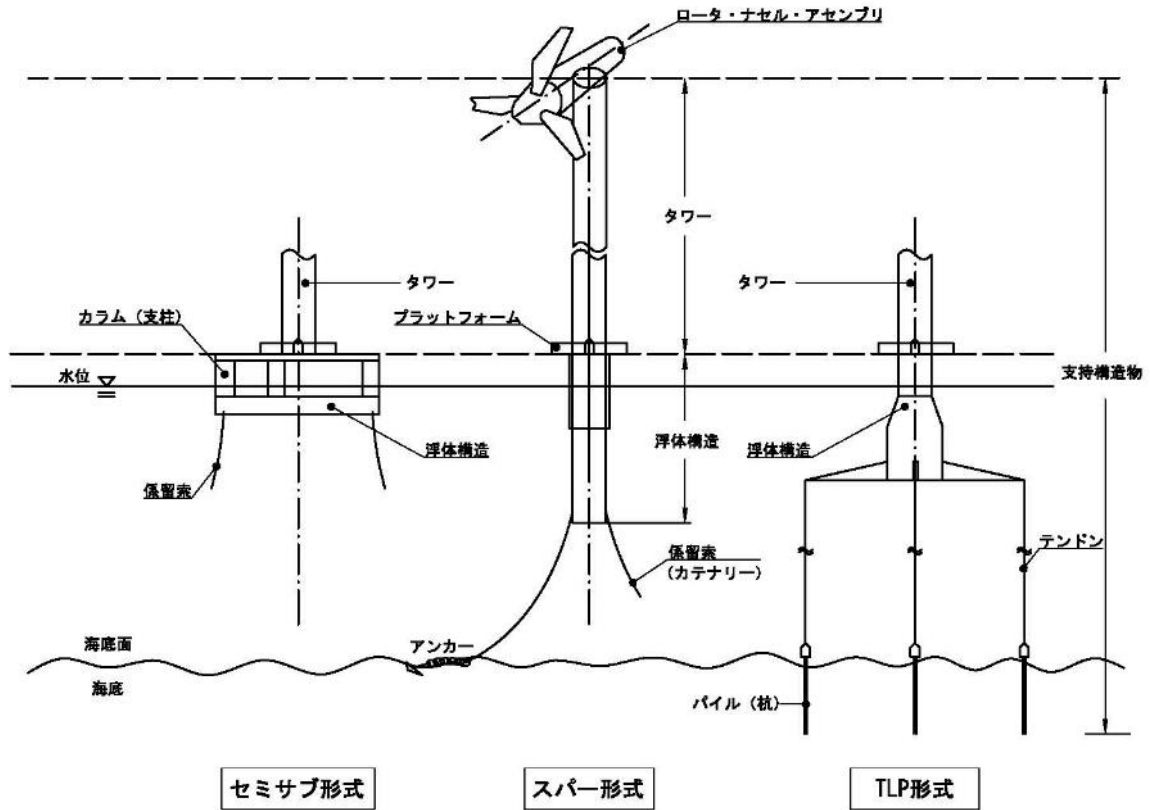
また、浮体式洋上風力発電施設の支持物（タワー+浮体+係留）については、平成 24 年 7 月 31 日付けで建築基準法の規制対象から除外し、船舶安全法（昭和 8 年法律第 11 号）での安全規制に一本化されたため、国土交通省（海事局）が船舶としての審査を行うこととなっている。

風力発電設備のうち、浮体式洋上風力発電設備の扱いについては、発電用風力設備に関する技術基準を定める省令およびその解釈に関する逐条解説（平成 29 年 3 月 31 日改正）の解釈第 16 条第 2 項に「風車を支持する工作物（船舶安全法第 2 条第 1 項の規定の適用を受けるものに限る。）は、同項の規定に適合するものであること。」と定められている。

なお、国土交通省においても、「浮体式洋上風力発電技術基準（平成 24 年 4 月 23 日制定）」により、船舶安全法による法規制に係る要求事項を定めている。

## 4. 浮体式洋上風力発電施設の構造

浮体式洋上風力発電施設の代表的な構造を図 4-1 に示す。



※平面型浮体の代表として、セミサブ形式を図示している。

図 4-1 浮体式洋上風力発電施設

## 5. 用語・略語の定義

本技術ガイドブックにおける用語の定義・意味を表 5-1 に示す。また、本技術ガイドブックで用いる略語の内容を表 5-2 に示す。

表 5-1 用語の定義・意味

No.	用語	定義・意味
1	ウィンドプロファイル・ウィンドシア法則	平均海面からの高さ方向の風速変化を与える数学的表現 ウィンドプロファイルは次式で定義される。 $V_z = V_h \times \left(\frac{z}{h}\right)^{\alpha} \text{ (m/s)}$ V <sub>z</sub> : 高さ z の風速、V <sub>h</sub> : 高さ h の風速、z: 平均海面からの高さ、h: 風車ハブ高さ、α: 指数法則の指数
2	海況	統計的に定常的な海の状態
3	海底	海底面の下で、支持構造物を埋め込む所
4	海底変形	自然の地質作用による海底の移動
5	海底面	海と海底の境界面
6	海洋条件	海洋環境の特性（波、海流、水位、海氷、海洋付着生物、海底変形、洗掘等）であって、風車の挙動に影響を与える可能性があるもの
7	海洋付着生物	構造部品（部材を含む）の表面を被覆する植物、動物および微生物
8	荷重効果	単独荷重または組合せ荷重の構造部品またはシステムに対する影響。内力、応力、ひずみ、運動等
9	環境条件	環境の特性（風、波、海流、水面、海氷、海洋付着生物、洗掘、全体的な海底変形等）であって、洋上風車の挙動に影響を与える可能性があるもの
10	極値波高	年間超過確率 1/N（「再現期間」：N 年）の個々の最高波高（一般にゼロアップクロス法による波の波高）の期待値
11	係留ライン	浮体施設の位置を保持するためのチェーン、ワイヤーロープ、合成繊維ロープまたはこれらが複合したロープ等、シャックル等の連結具および中間ブイまたは中間シンカー等からなるもの
12	係留施設	浮体施設の係留用装置に連結される施設をいい、チェーン係留ブイの方式である CALM（Catenary Anchor Leg Mooring）における大型ブイや SALM（Single Anchor Leg Mooring）における係留用構造物、ドルフィン、ジャケット等の固定構造物ならびに海底に敷設されたシンカー、パイルから構成される浮体施設から独立した構造物
13	係留設備	浮体施設を長期間あるいは恒久的に設置海域の定められた位置に保持するための設備
14	水深	海底面と静水面との鉛直距離
15	水流	通常、固定した場所を通過する流れの速度および方向で示される水の流れ
16	静水面	波による変化は除外して、潮汐および高潮の影響を考慮して計算した概念上の水面
17	設計波	浮体施設およびタワーの設計に用いられる、波高、周期および波向が定義された決定論的な波。設計波は、特定の周期波理論の仕様に関する必要条件が付随する場合がある。
18	洗掘	水流および波による、または海底面より上の自然流況を妨げる構造要素による海底土の除去作用
19	高潮	風および大気圧の変化によってもたらされる不規則な海の動き
20	タワー	浮体施設とロータ・ナセル・アセンブリの間の構造

No.	用語	定義・意味
21	着氷	洋上風車の一部が氷または霜で覆われ、それが堆積したもので、荷重の増加や特性変化につながる可能性があるもの
22	津波	海底面の急激な鉛直運動によって起きる長周期の海の波
23	定着氷盤	固く連続的に覆われた動かない氷
24	波のスペクトル	ある海況における海面高さの周波数領域表現
25	ナセル	水平軸風車において、タワーの上部に配置され、動力伝達装置、発電機、制御装置等を格納するもの
26	氷丘氷	大きな氷盤が互いにぶつかったときや浮体施設等の固い障害物にぶつかったときに、氷片や氷盤が起伏上に積み重なったもの
27	氷盤	大きさが数メートルから数キロメートルの板状の氷で、海岸にしっかりと凍り付いているのではなく、静止または移動しているもの
28	浮体施設	風力発電設備およびタワーを搭載する浮体構造物のことをいい、係留施設を含む。
29	(浮体施設およびタワーの) 外部条件	洋上風車に影響を与える要素であって、環境条件、その他の気象要素(温度、雪、氷等)を含む。
30	ロータ	ブレード、ハブから構成され、風から動力を発生させる回転体
31	ロータ・ナセル・アセンブリ (RNA)	ロータとナセルの複合体
32	有義波高	ある海況における波の高さの統計的指標で、波全体の波高値の大きい方から 1/3 の平均波高、または $\sigma\eta$ を海面上昇の標準偏差とした場合に $4\sigma\eta$ に等しい高さとして定義される。区別が必要な場合、前者の高さは統計的有義波高と呼び、後者的高さはスペクトル有義波高と呼ぶ。注記：通常、前者の高さは $H_{1/3}$ で表し、後者は $H_S$ または $H_{m0}$ で表す。深海では、波スペクトルの形にかかわらず、平均で $H_{1/3}=0.95H_S$ となる。
33	ネガティブダンピング	浮体式洋上風車において、回転数制御と浮体のピッチ方向(流入風に対するロータ面の前後方向)の動揺が連成することで発生し得る、浮体の不安定動揺を指す。



表 5-2 略語の内容

No.	略語	内容
1	COD	同一方向 (Co-directional)
2	DLC	設計荷重ケース (Design load case)
3	ECD	方向変化を伴う極値コヒーレントガスト (Extreme coherent gust with direction change)
4	ECM	極値流モデル (Extreme current model)
5	EDC	極値方向変化 (Extreme direction change)
6	EOG	運転時の極値突風 (Extreme operating gust)
7	ESS	極値海況 (Extreme sea state)
8	ETM	極値乱流モデル (Extreme turbulence model)
9	EWLR	極値水位範囲 (Extreme water level range)
10	EWM	極値風速モデル (Extreme wind speed model)
11	EWS	極値ウィンドシア (Extreme wind shear)
12	MIC	微生物腐食 (Microbiologically influenced corrosion)
13	MIS	方向の偏差 (Misaligned)
14	MSL	平均海水位 (Mean sea level)
15	MUL	多方向 (Multi-directional)
16	NCM	通常水流モデル (Normal current model)
17	NSS	通常海況 (Normal sea state)
18	NTM	通常乱流モデル (Normal turbulence model)
19	NWH	通常波高 (Normal wave height)
20	NWLR	通常水位範囲 (Normal water level range)
21	NWP	通常ウィンドプロファイルモデル (Normal wind profile model)
22	SSS	高波浪時海況 (Severe sea state)
23	SWL	静水位 (Still water level)
24	UNI	単一方向 (Uni-directional)
25	MBL	最小破断荷重 (Minimum Breaking Load)

## 第II編 浮体式洋上風力発電施設の評価

### 1. 設計の概要

---

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

## 2. 環境条件の評価

---

### 2.1 風条件の設定

#### 2.1.1 はじめに

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

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

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

風条件：

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

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

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

## 2.1.2 極値風況の評価方法

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

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

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

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

表 2.1-1 極値風速の評価方法

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

## 1) 設計に用いる 50 年再現期待値の算出

### (1) 建築基準法に基づく方法

ハブ高さにおける設計風速  $U_h$  は、基準風速  $V_0$  に地形による平均風速の割増係数  $E_{tv}$  と高度補正係数  $E_{pv}$  を乗じたものとし、式 2.1-1 により定める<sup>7</sup>。なお、式 2.1-1 の詳細は、風力発電設備支持物構造設計指針・同解説<sup>7</sup>の該当部分を確認する。

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

ここで、

$U_h$  : 設計風速 (m/s)

$E_{tv}$  : 割増係数

$E_{pv}$  : 高度補正係数

$V_0$  : 基準風速 (m/s)

基準風速  $V_0$  は、平坦で地表面粗度区分Ⅱの地上高さ 10m における再現期間 50 年の 10 分間平均風速とし、平成 12 年建設省告示第 1454 号第 2 に示す市町村別の基準風速を用いる。

風車設置地点における地表面粗度区分は、建築基準法または風力発電設備支持物の周辺の地表面の状況に応じて表 2.1-2 により定める。表 2.1-2 を用いる場合には、風車設置点を中心とし、半径がハブ高さ  $H_h$  の 40 倍と 3km のうちの小さい方の円形の領域内において、最も滑らかな地表面粗度区分を風車設置地点の地表面粗度区分として用いてもよい。

表 2.1-2 地表面粗度区分の分類<sup>7</sup>

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

平坦地形上のハブ高さでの平均風速の高度補正係数  $E_{pv}$  は地表面粗度区分に応じ、式 2.1-2 により算定する。

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

ここで、

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

$Z_b$ 、 $Z_G$ および $\alpha$ は、地表面粗度区分に応じ、表 2.1-3 により定める。なお、高さ  $Z$  での平均風速の高度補正係数は  $H_h$  の代わりに  $Z$  を式 2.1-2 に代入して求める。

表 2.1-3 平均風速の高度補正係数を定めるためのパラメータ<sup>7</sup>

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

地形による平均風速の割増係数  $E_{tv}$  と照査対象風向  $\theta_d$  は、①、②のいずれかの方法により求める。

#### ① 風向特性を考慮しない手法

地形による平均風速の割増係数  $E_{tv}$  は、実地形上と平坦地形上の風向別の気流解析の結果に基づき、式 2.1-3 により定める。

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

ここで、

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

照査対象風向  $\theta_d$  は、風向別平均風速の割増係数が最大となる風向とする。

## ② 風向特性を考慮する手法

地形による平均風速の割増係数 $E_{tV}$ は、風車設置地点を対象とした台風シミュレーションの結果に基づき、式 2.1-4により定める。

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

ここで、

- $E_{tV}$  : 地形による平均風速の割増係数
- $U_{50}(x, y, H_h)$  : 台風シミュレーションの結果から統計解析により求めた風車設置地点のハブ高さ $H_h$ での年最大風速の50年再現期待値 (m/s)
- $U_{50}^P(x, y, H_h)$  : 地表面粗度区分 $P$ の平坦地形上のハブ高さにおける年最大風速の50年再現期待値 (m/s)
- $H_h$  : ハブ高さ (m)
- $P$  : 地表面粗度区分

照査対象風向 $\theta_d$ は $U_{50}(x, y, H_h)$ に対応する風向とする。なお、台風シミュレーションによる極値風速の評価方法は、石原・山口 (2012)<sup>19</sup>を参照してもよい。

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

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

ここで、

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

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

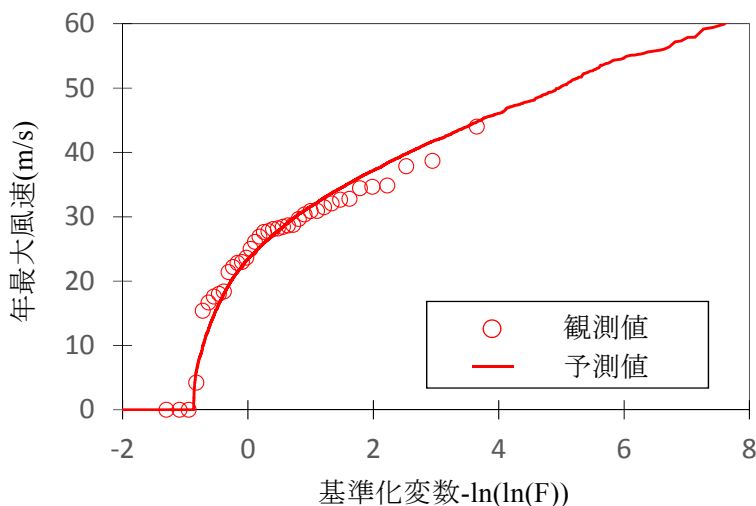
## (2) 台風シミュレーションに基づく方法

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

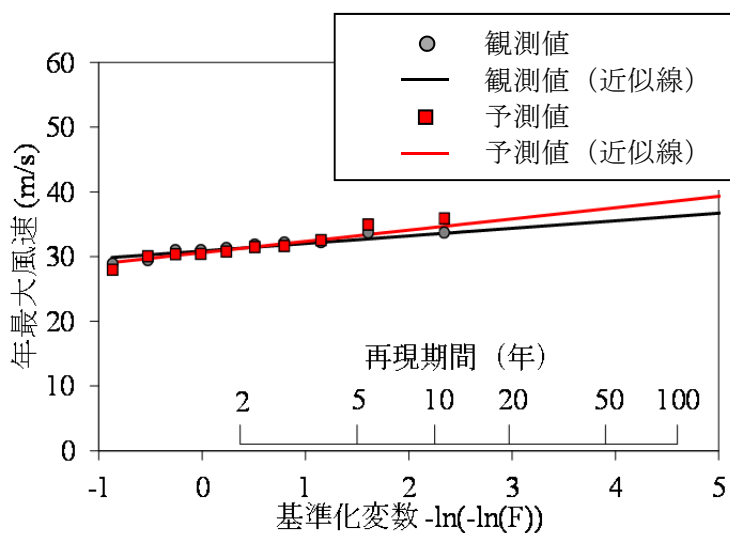
風シミュレーションによって評価した極値風速が観測値をよく再現することが示されている (図 2.1-1 (a))。

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

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



(a) 台風シミュレーションによる台風要因の極値風速の評価 (銚子沖)<sup>20</sup>



(b) 気象シミュレーションによる非台風要因の極値風速の評価 (銚子沖)<sup>7</sup>

図 2.1-1 シミュレーションによる気象条件の予測値と観測値との比較



## 2) 乱流強度の評価方法

ハブ高さにおける評価風速における乱流強度の主風向成分  $I_{h1}$  は、平坦地形上の乱流強度  $I_P$  に地形による乱流強度の補正係数  $E_{tl}$  を乗じたものとし、式 2.1-6 により求める。

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

ここで、

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

ハブ高さでの平坦地形における乱流強度  $I_P$  は地表面粗度区分に応じ、式 2.1-7 により算定する。

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

ここで、

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

$Z_b$ 、 $Z_G$  および  $\alpha$  は風速の鉛直分布を示すパラメータであり、地表面粗度区分に応じ、表 2.1-3 により定める。なお、高さ  $Z$  での乱流強度は  $H_h$  の代わりに  $Z$  を式 2.1-7 に代入して求める。

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

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

ここで、

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

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

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

ここで、

- $E_{ts}$  : 地形による変動風速の補正係数
- $\sigma_u(x, y, H_h, \theta_d)$  : 実地形上の照査対象風向  $\theta_d$  におけるハブ高さ  $H_h$  での主風向変動風速の標準偏差
- $\sigma_u^p(x, y, H_h)$  : 地表面粗度区分  $P$  を持つ平坦地形上のハブ高さ  $H_h$  における主風向変動風速の標準偏差
- $H_h$  : ハブ高さ (m)
- $\theta_d$  : 照査対象風向 (°)

$\sigma_u^p(x, y, H_h)$  は気流解析により求める。気流解析により主風向変動風速の標準偏差  $\sigma_u$  を求めるには、 $k$ - $\varepsilon$  モデル等の乱流エネルギー  $k$  より、地形や地表面粗度に起因する主風向変動風速の標準偏差  $\sigma_u^{surf}$  を式 2.1-10 で計算し、式 2.1-11 を用いて算定することもできる。

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

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

ここで、

- $\sigma_u^{surf}$  : 地形や地表面粗度に起因する主風向変動風速の標準偏差
- $k$  :  $k$ - $\varepsilon$  モデル等の乱流エネルギー
- $\sigma_u$  : 主風向変動風速の標準偏差
- $U$  : 平均風速 (m/s)
- $I_a$  : バックグラウンドの乱流強度

バックグラウンドの乱流強度  $I_a$  は 0.1 とする。主風向の乱流標準偏差  $\sigma_1$  は非超過確率 90% に相当するものを用い、式 2.1-12 により定める。

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

ここで、

- $\sigma_1$  : 主風向の乱流標準偏差
- $I_{ref}$  : 風速 15m/s 時の乱流強度の期待値
- $V_{hub}$  : ハブ高さにおける 10 分間平均風速 (m/s)
- $b$  : 5.6 (m/s)

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

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

ここで、

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

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

### 3) 50年再現期待値を用いた1年再現期待値の極値風速の算出

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

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

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

ここで、

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

### 2.1.3 通常風況の評価方法

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

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

#### 1) 設計に用いる通常風況の算出

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

#### 2) 風配図および風速階級別頻度分布図による分析

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

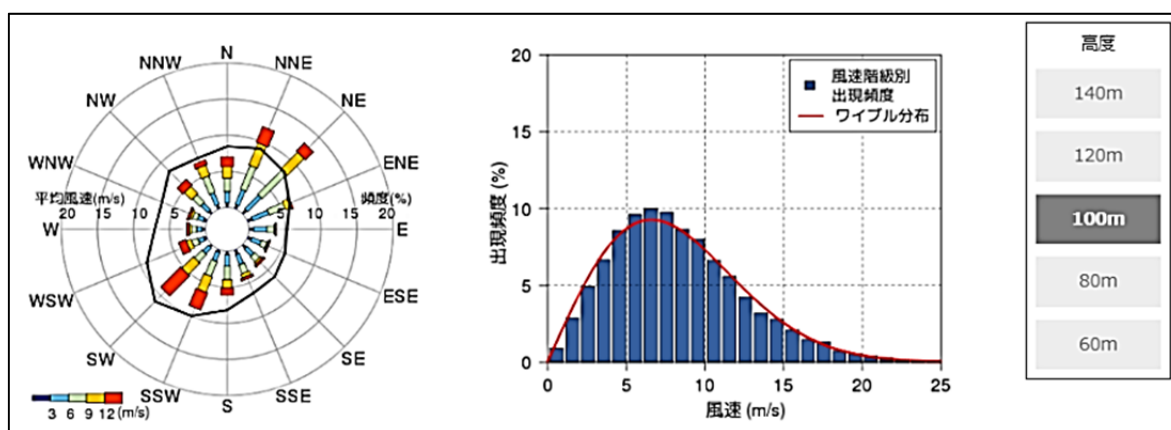


図 2.1-2 風配図（左）および風速階級別頻度分布図（右）のイメージ<sup>21</sup>

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

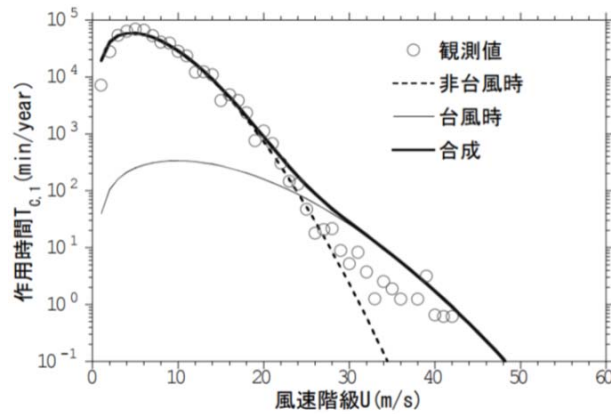


図 2.1-3 風速階級別作用時間の例<sup>22</sup>

表 2.1-4 風速階級別作用時間の評価方法

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

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

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

ここで、

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

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

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

ここで、

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

$k$  : 形状パラメータ  
 $V$  : 平均風速 (m/s)

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

### 3) 乱流強度

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

表 2.1-5 風車カテゴリの基本パラメータ <sup>5</sup>

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

ここで、

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

この表の値は、ハブ高さにおいて適用する。

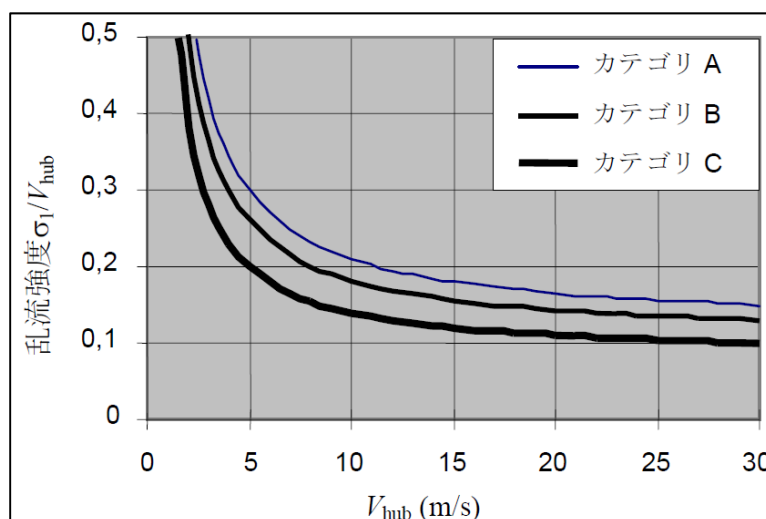


図 2.1-4 標準風車カテゴリ別の乱流強度 <sup>5</sup>

### 2.1.4 風条件の算定例

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

表 2.1-6 風条件の算定例<sup>12</sup>

(a) 極値気象条件

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

(b) 通常気象条件

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

## 2.2 海象条件の設定

### 2.2.1 はじめに

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

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

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

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

波条件：

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

海潮流条件：

- 再現期間50年の極値水流
- 再現期間1年の極値水流

水位条件：

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

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



## 2.2.2 極値波浪の評価方法

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

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

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

表 2.2-1 極値波浪の評価方法

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

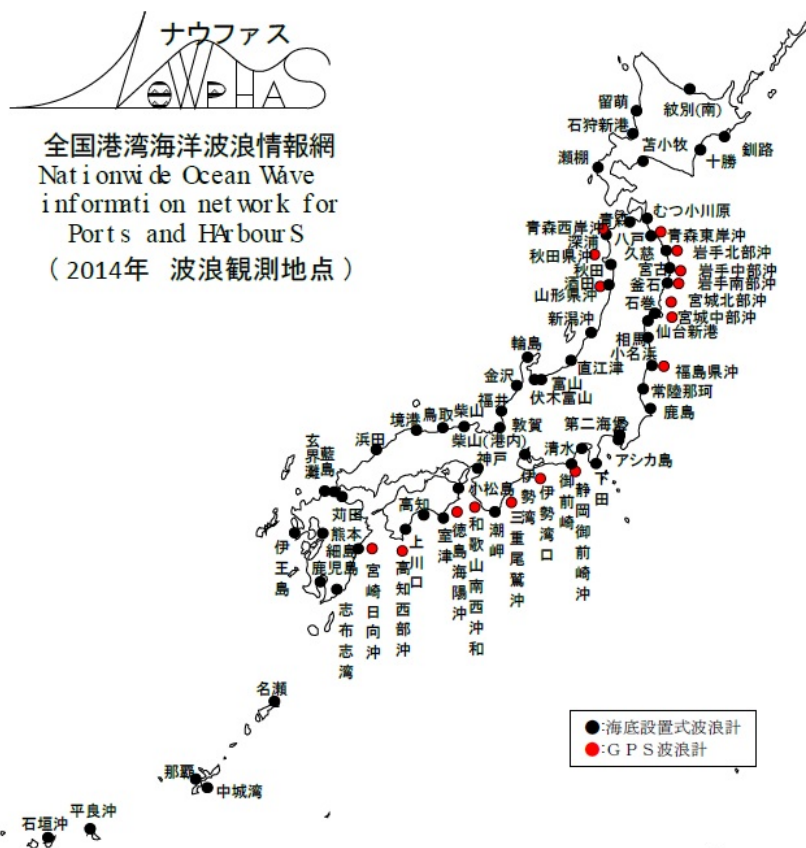


図 2.2-1 ナウファスの観測地点<sup>24</sup>

### 2.2.3 通常波浪の評価方法

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

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

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

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

表 2.2-2 通常波浪の評価に用いるデータの例

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

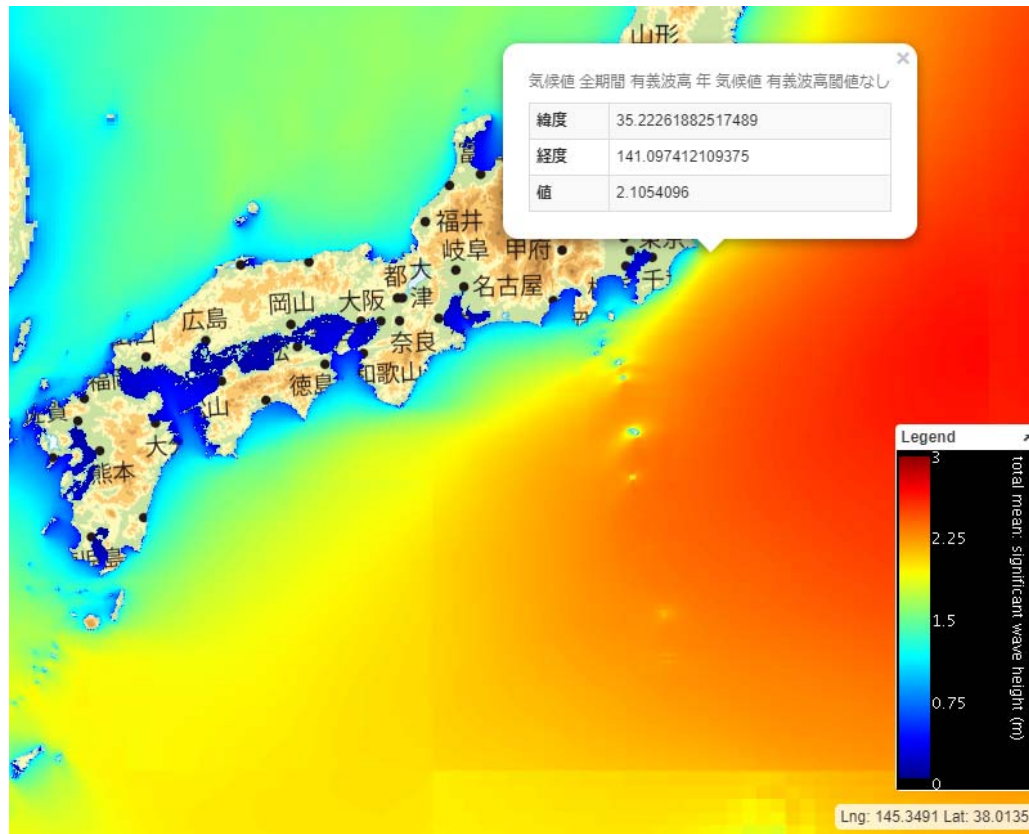


図 2.2-2 海洋エネルギーポータルサイトの表示例<sup>25</sup>

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

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

ここで、

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

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

### 2.2.4 風と波の結合確率分布の評価方法

浮体式洋上風力発電施設の設計にあたっては、JIS C 1400-3<sup>6</sup> では、疲労荷重の照査のための気象海象条件を、風速、波高および波周期の結合確率分布を用いて評価することが求められている。

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

表 2.2-3 風と波の結合確率分布の評価方法

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

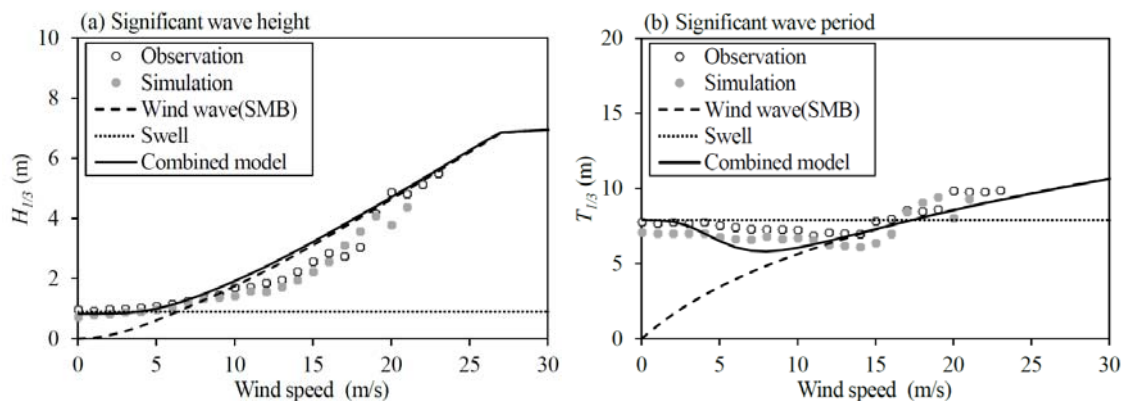


図 2.2-3 風波とうねりの混合モデルによる推算値と観測値との比較<sup>18</sup>

### 2.2.5 海潮流条件の評価方法

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

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

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

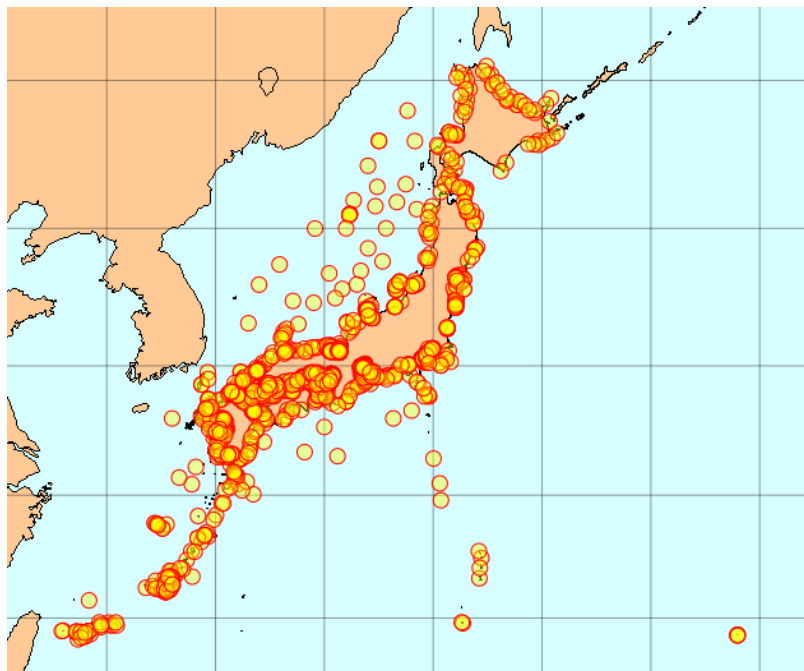


図 2.2-4 流速計データの位置 (日本海洋データセンターHP)<sup>26</sup>

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

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

るが、同時性を確保する必要がある。これに代わり、標準的な鉛直分布を用いて評価することができる。IEC 61400-3<sup>37</sup>では、流れを表層の吹送流とそれ以外の水中流に分け、それぞれ流速の鉛直分布を式 2.2-2～式 2.2-6 のように仮定し、合成したものを良いとされている。吹送流速は海面上 10m の風速の 1 時間平均値  $V_{1-hour}$  から、水中流速は、たとえば海面下 20m の流速  $U(-20)$  から求めることができる。ただし、吹送流の方向は風向と同一であり、水中流とは一般に異なるため、ベクトルとして合成しなければならない。吹送流と水中流の鉛直分布を図 2.2-5 に示す。

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

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

水中流

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

吹送流

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

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

ここで、

$U(z)$  :  $SWL$  からの高さ  $z$  の海潮流 (m/s)

$U_W$  : 吹送流 (m/s)

$U_{ss}$  : 水中流 (m/s)

$U_{ss}(z)$  :  $SWL$  からの高さ  $Z$  の水中流 (m/s)

$U_{ss}(0)$  : 海面流速 (m/s)

$z$  :  $SWL$  からの高さ (m)

$d$  : 水深 (m)

$U_W(z)$  :  $SWL$  からの高さ  $Z$  の吹送流 (m/s)

$U_W(0)$  : 風による海面流速 (m/s)

$V_{1-hour}$  : 風速の 1 時間平均値 (m/s)

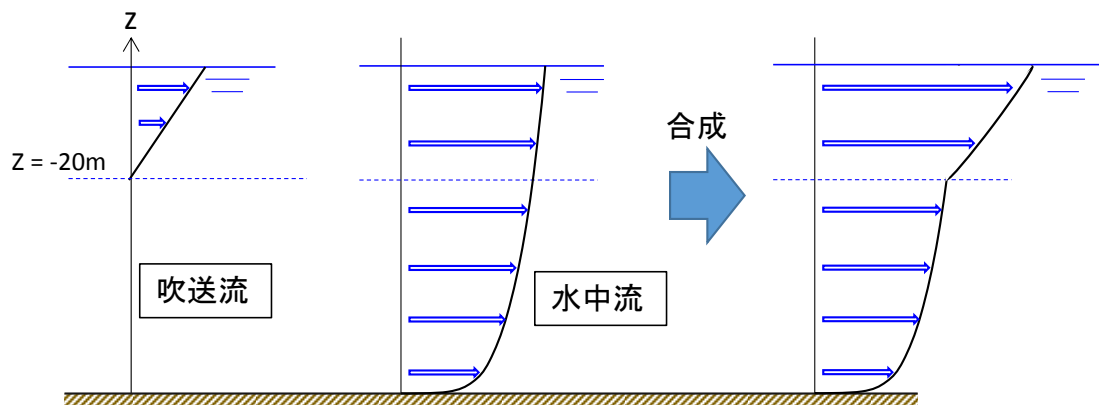


図 2.2-5 吹送流と水中流の鉛直分析

※図は同一方向の場合を示している。

表 2.2-4 海潮流の評価方法

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

## 2.2.6 水位変化の評価方法

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

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

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

ここで、

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

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

### 2.2.7 海象条件の算定例

海象条件の算定例を表 2.2-5 に示す。

表 2.2-5 海象条件の算定例<sup>12</sup>

(a) 極値海象条件

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

(b) 通常海象条件

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

※「津波」の評価は、2.3.4 で示す。



## 2.3 その他の環境条件の設定

### 2.3.1 海氷

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

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

### 2.3.2 海洋付着生物

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

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

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

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

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

超臨界レイノルズ数の滑面および海洋付着生物に覆われた粗な円柱に対する抗力係数は、定常抗力係数  $C_{DS}$  (式 2.3-1) と、振動流れの非定常性による抗力の増幅係数  $\Psi$  (式 2.3-2、式 2.3-3) より、式 2.3-4 のように表される。なお、 $C_{DS}$  は DNV-OS-J101<sup>30</sup> および DNV-RP-C205<sup>31</sup> も参考にできる。

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

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

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

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

ここで、

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

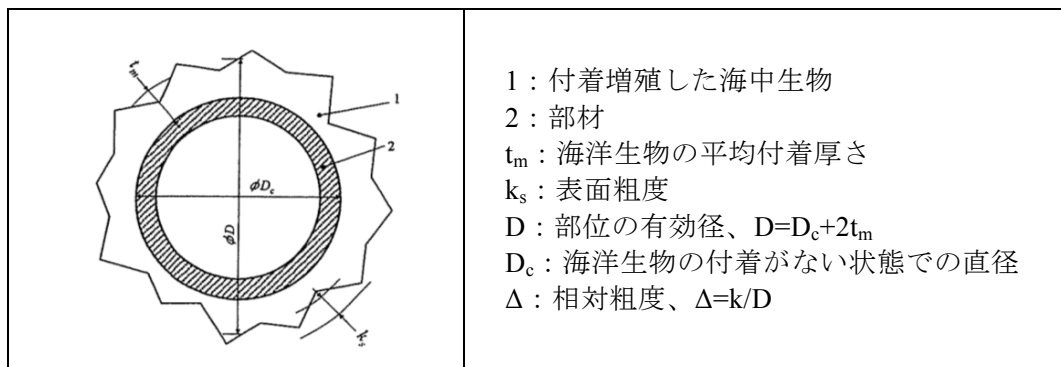


図 2.3-1 表面粗度および厚さの定義<sup>32</sup>

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

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

### 2.3.3 地震

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

#### 1) 過去発生した最大レベルの地震

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

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

#### 2) 地震の浮体への影響評価法

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

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

##### (1) 水平地震動

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

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

##### (2) 鉛直地震動

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

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

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

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

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

ここで、

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

### 2.3.4 津波

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

#### 1) シミュレーションを用いない方法

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

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

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

ここで、

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

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

## 2) シミュレーションを用いる方法

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

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

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

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

ここで、

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

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

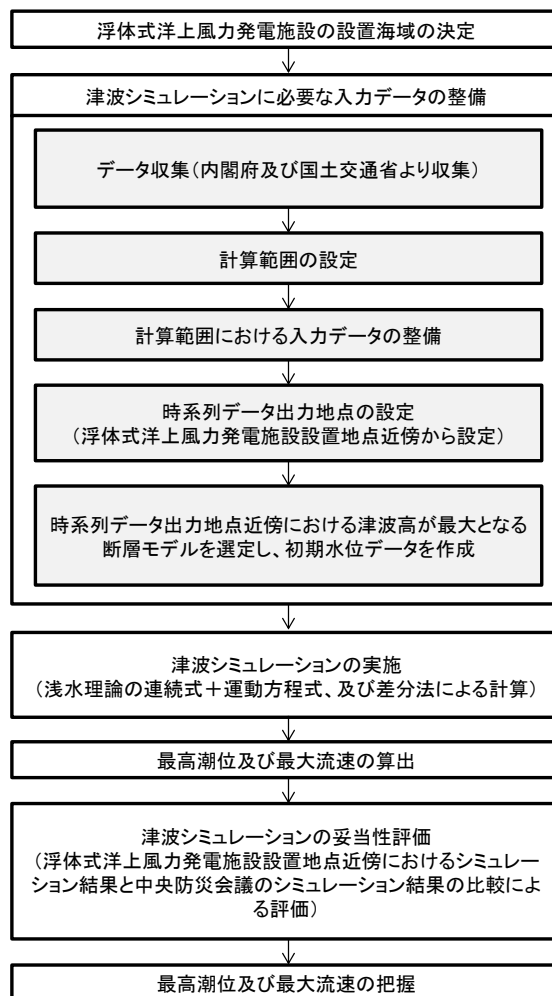


図 2.3-2 津波の評価手順

### 2.3.5 液状化

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

### 2.3.6 海底変形および洗掘

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

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

DNV-OS-J101<sup>30</sup>によると、着床式洋上風力発電施設における洗掘防止の部材は、その内面および外面の安定性を保つように設計しなければならない。つまり、洗掘保護部材の過度な表面浸食に対する保護および海底の土粒子の移動に対する保護のことである。また、定常的な海流および波浪、または海流と波浪の組合せは、洗掘の分析において考慮しなければならない項目である。浮体式洋上風力発電施設におけるアンカー設置後の洗掘の検討については、これを参照しても良い。

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

### 2.3.7 積雪および着氷に関する荷重

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

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

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

具体的な設計手法は、風力発電設備支持物構造設計指針・同解説[2010 年版]（2010）にはナセル上面に作用する積雪荷重の評価について示されている。この中では、積雪の単位荷重は、積雪量 1cm ごとに 1m<sup>2</sup>につき 20N 以上としなければならない。ただし、特定行政庁がこれと異なる値を定めている場合にはその値を用いる。積雪荷重は式 2.3-10 により算定される。

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

ここで、

- $S$  : 積雪荷重（屋根の水平投影面積 1m<sup>2</sup>あたり N）
- $d$  : 垂直積雪厚さ（cm）

$\rho$  : 積雪の単位荷重 >20 (N/m<sup>2</sup>/cm)

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

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

ここで、

$\mu_b$  : 形状係数  
 $\beta$  : ナセル上面の勾配 (°)

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

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

洋上風車の回転しない部分において、天候にさらされた表面については、全面に 30mm の厚さの氷の形成を想定する。氷の密度は 900kg/m<sup>3</sup> とする。ロータが停止しているかアイドル状態である運転条件の場合、ブレードはすべての面でこの程度の氷の形成についても確認する。

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

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

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

ここで、

$\mu_E$  : ロータ半径の半分でブレードの最先端の質量分布 (kg/m)  
 $\rho_E$  : 氷の密度 (900kg/m<sup>3</sup>)  
 $k$  :  $0.00675 + 0.3 \exp(-0.32R/R_1)$   
 $R$  : ロータ半径 (m)  
 $R_1$  : 1 (m)  
 $c_{max}$  : 最大コード長 (m)  
 $c_{min}$  : ブレードの輪郭から直線的に外挿されたブレード先端のコード長 (m)



### 3. 復原性の評価

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

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

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

表 3-1 状態・形式別の評価方法

状態	形式	復原力曲線図による評価方法
非損傷 (運転時および暴風時)	セミサブ形式	面積(A + B) ≥ 1.3 × 面積 (B + C) ただし、傾斜角は $\theta_2$ までとする。
	ポンツーン形式 (バージ形式)	面積(A + B) ≥ 1.4 × 面積 (B + C) ただし、傾斜角は $\theta_2$ または $\theta_3$ の内小さい方の角度までとする。
	スパー形式	セミサブ形式またはポンツーン形式 (バージ形式) と同等以上の復原性を有する。
損傷時 (1区画浸水時)	全て	計画された喫水の上方 5.0m から下方 3.0m までの範囲に設けられる区画における 1 区画への浸水に対しても、あらゆる水平方向からの風による傾斜モーメント及び船舶の波による動揺に対して、十分な復原性を有していなければならない。

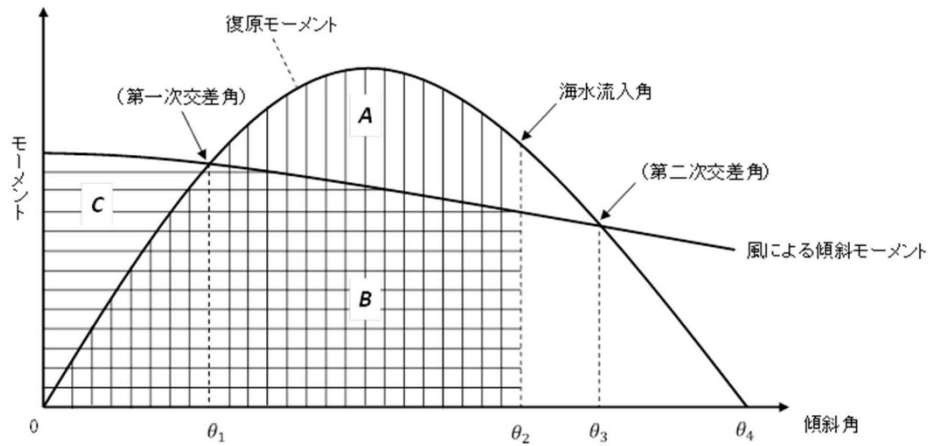


図 3-1 復原力曲線図<sup>12</sup>

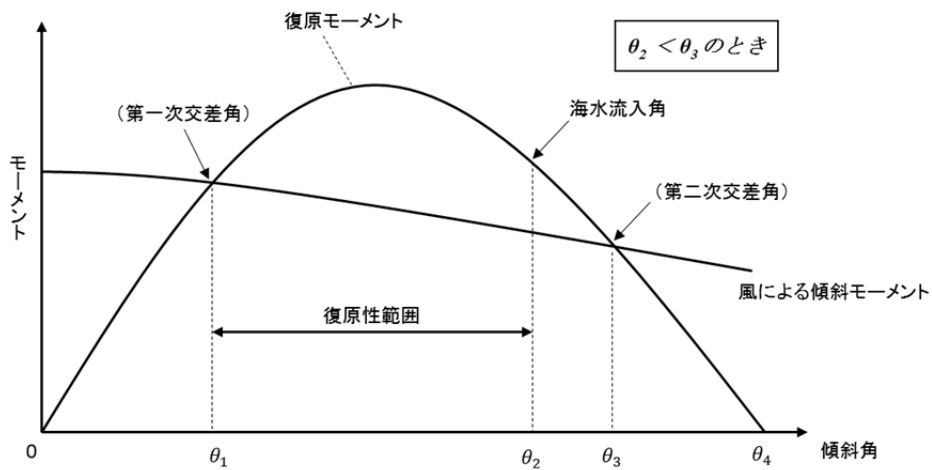


図 3-2 復原性範囲 ( $\theta_2 < \theta_3$ )<sup>12</sup>

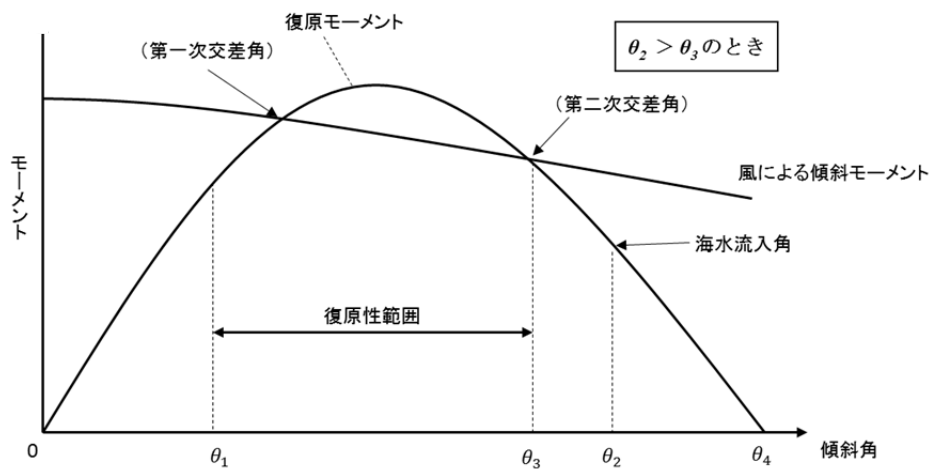


図 3-3 復原性範囲 ( $\theta_2 > \theta_3$ )<sup>12</sup>

### 3.1 主要寸法および区画配置の設定

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

表 3.1-1 必要な諸元の例（バージ形式の場合）<sup>12</sup>

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

### 3.2 非損傷時の復原性の評価

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

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

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

表 3.2-1 復原性の評価に用いる風速の例<sup>12</sup>

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

表 3.2-2 非損傷時の形式別評価方法<sup>4</sup>

状態	形式	復原力曲線図による評価方法
非損傷時 （運転時および暴風時）	セミサブ形式	面積(A+B) ≥ 1.3 × 面積 (B+C) ただし、傾斜角は $\theta_2$ までとする。
	バージ形式	面積(A+B) ≥ 1.4 × 面積 (B+C) ただし、傾斜角は $\theta_2$ または $\theta_3$ の内小さい方の角度までとする。
	スパー形式	セミサブ形式またはバージ形式と同等以上の復原性を有する。

次に、解析に用いる浮体、タワー、RNA に作用する風荷重を算出する。

タワー、浮体に作用する風圧は次式で求める。

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

ここで、

- $P$  : 風圧 (N/m<sup>2</sup>)
- $V$  : 風速 (m/s)
- $C_h$  : 高度係数
- $C_s$  : 形状係数

$C_h$ : 高度係数、 $C_s$ : 形状係数の例を表 3.2-3 に示す。

表 3.2-3 高度係数および形状係数

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

タワー・浮体設備それぞれの風荷重 $F$  (N) は次式で求める。

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

ここで、

- $F$  : 風荷重 (N)
- $P$  : 風圧 (N/m<sup>2</sup>)
- $A$  : 風向に対する垂直面での各構造物の投影面積 (m<sup>2</sup>)

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

表 3.2-4 作用する風荷重の例 (RNA の状態)<sup>12</sup>

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

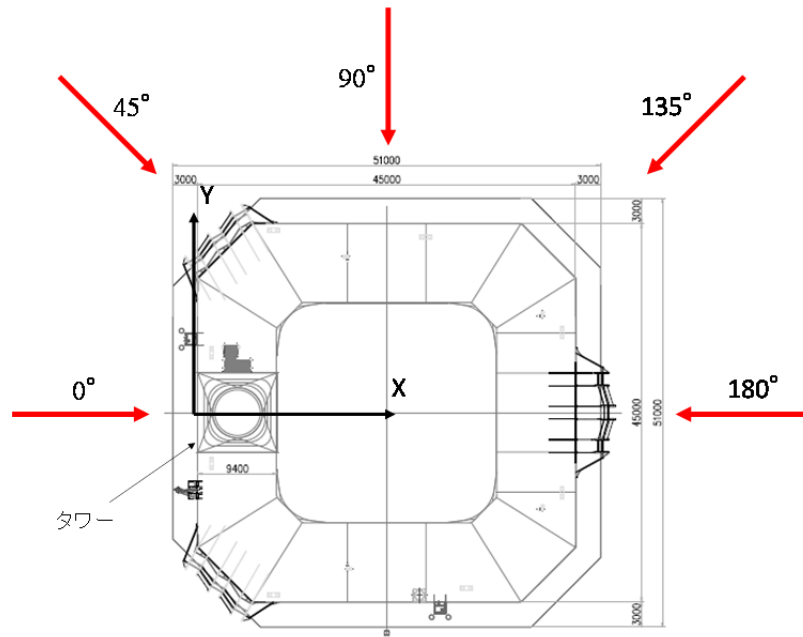


図 3.2-1 数値解析における複数の流入風のイメージ<sup>12</sup>

復原力曲線の例を図 3.2-2 に、評価例を表 3.2-5 に示す。

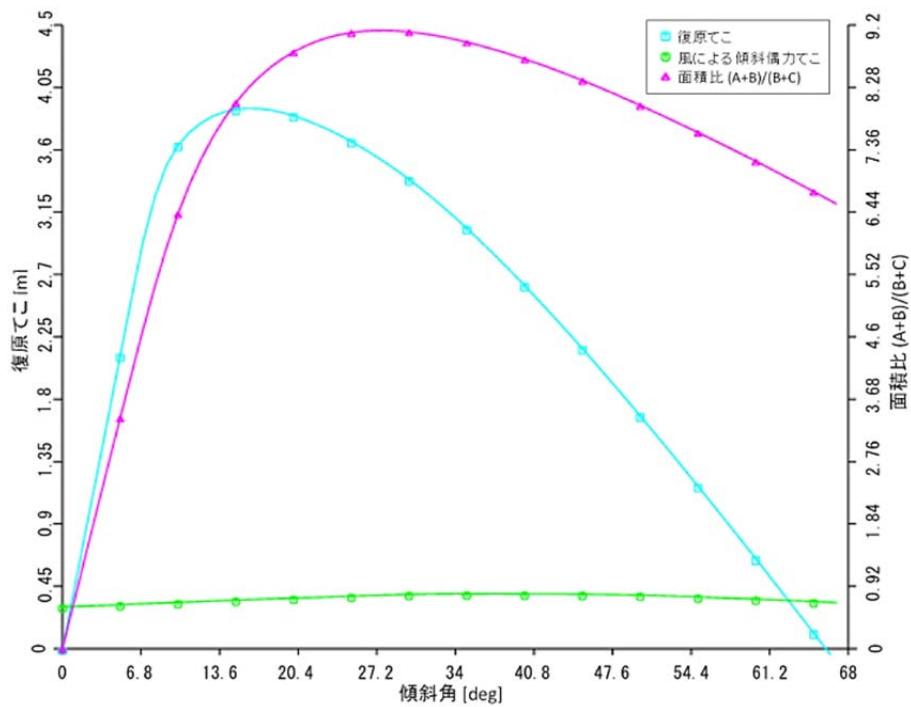


図 3.2-2 非損傷時の復原力曲線の例<sup>12</sup>

表 3.2-5 非損傷時の評価例<sup>12</sup>

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

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

### 3.3 損傷時の復原性の評価

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

表 3.3-1 損傷時の評価方法

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

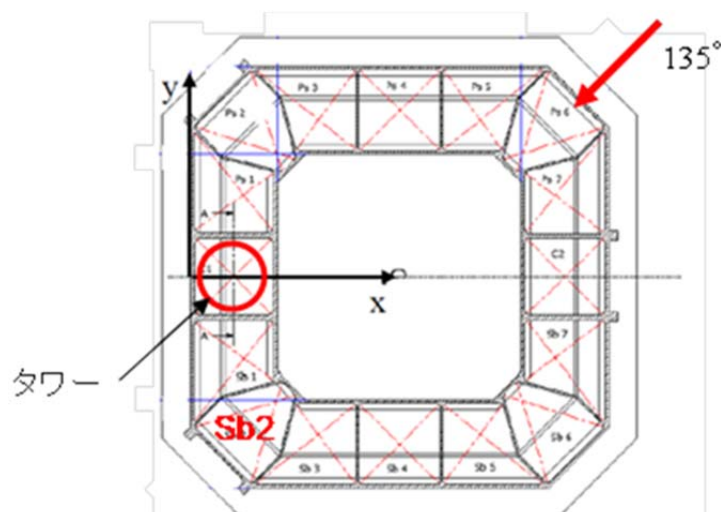


図 3.3-1 1区画浸水の例 (135°流入風に対して Sb2 区画を浸水) <sup>12</sup>

表 3.3-2 損傷時の評価例 <sup>12</sup>

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

## 4. 荷重評価

### 4.1 設計荷重ケース（DLC）設定

#### 4.1.1 概要

船舶安全法に対する適合性は、同法の下に策定された浮体式洋上風力発電施設技術基準（2012）<sup>3</sup>に基づき確認が行われ、より具体的には浮体式洋上風力発電設備に関するガイドライン（2012）<sup>4</sup>が設計に適用される。

気象・海象調査結果から導かれた設計条件より、上記ガイドラインに従い設定される種々のDLCで連成解析および水槽試験を実施する。連成解析はDLCの全ケースで行う。水槽試験については、連成解析を行った結果を用いて最も厳しいケースについて実験・検証を行う。

安全性確認・評価にはシミュレーションを用いるのが一般的であり、風車・浮体・係留ラインが一体となった連成解析による荷重評価を行うことが望ましい。

DLCは、設計条件（設計想定の状態）ごとに詳細に設定されており、風、波、海潮流、水位、その他条件との組み合わせによる解析を必要とする。DLCおよびその特記事項の詳細は、浮体式洋上風力発電施設技術基準（2012）<sup>3</sup>を参照されたい。荷重についての評価フローを図4.1-1に示す。

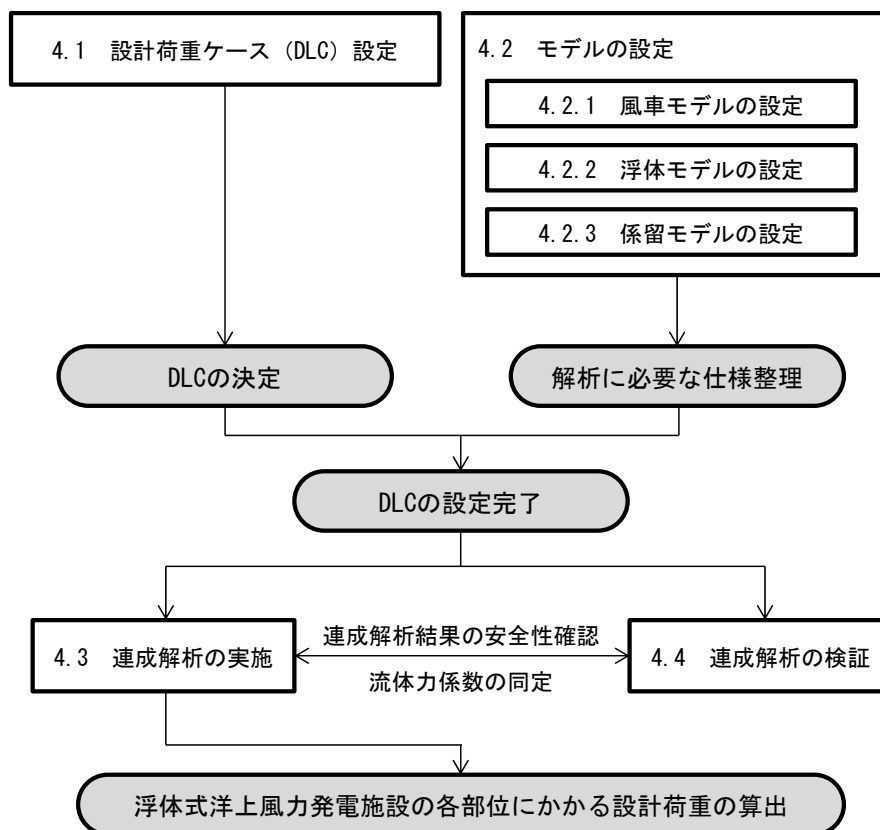


図 4.1-1 評価フロー

※海水の影響がある場合、海水設計荷重ケース E1～E7 を追加で設定（IEC 61400-3 の付属書 E を参照）

#### 4.1.2 設計荷重ケース（DLC）の設定方法

解析のタイプは、疲労強度の評価に用いる疲労荷重の解析を意味する「F」タイプと、材料強度および構造安定性に関係した終局荷重の解析を意味する「U」タイプの2つに分けられる。「U」で示される設計荷重ケースは、「通常状態（N）」、「異常状態（A）」または「輸送および建造状態（T）」に分類される。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 4.1-1 に示す設計荷重ケースを考慮する必要がある。さらに、海氷が発生すると予測される海域に設置する洋上風力発電施設では示す荷重ケースに加えて、表 4.1-2 の荷重ケースも考慮する必要がある。海氷設計荷重ケース E1～E7 については JIS C 1400-3（2014）<sup>6</sup>の附属書 E を参照する必要がある。

なお、DLC による連成解析結果は水槽試験結果と比較して各部位にかかる荷重を算出するだけでなく、流体力係数を同定することも行う。



表 4.1-1 設計荷重ケース<sup>4</sup>

設計条件	DLC	風条件	波	風および波の方向性	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 および 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 $H_s$ 、 $T_p$ および $V_{hub}$ の結合確率分布	COD および MUL	水流無し	NWLR または MSL 以上		F	—
	1.3	ETM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	NSS $H_s = E[H_s   V_{hub}]$	COD および UNI	NCM	MSL		U	N
	1.4	ECD $V_{hub} = V_r - 2 \text{ m/s}$ 、 $V_r$ および $V_r + 2 \text{ m/s}$	NSS (または NWH) $H_s = E[H_s   V_{hub}]$	MIS および風向変化	NCM	MSL		U	N
	1.5	EWS $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	NSS (または NWH) $H_s = E[H_s   V_{hub}]$	COD および UNI	NCM	MSL		U	N
	1.6	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	SSS $H_s = H_s SSS$	COD および 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 および UNI	NCM	MSL	制御装置の故障またはネットワークロス	U	N
	2.2	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	NSS $H_s = E[H_s   V_{hub}]$	COD および UNI	NCM	MSL	保護装置または先行する内部の電気故障	U	A
	2.3	— EOG — $V_{hub} = V_r \pm 2 \text{ m/s}$ および $V_{out}$	NSS (または NWH) $H_s = E[H_s   V_{hub}]$	COD および UNI	NCM	MSL	外部または内部の電気故障 (ネットワークロスを含む)	U	A
	2.4	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	NSS $H_s = E[H_s   V_{hub}]$	COD および UNI	水流無し	NWLR または MSL 以上	制御、保護または電気装置の故障 (ネットワークロスを含む)	F	—
3) 起動	3.1	NWP $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	NSS (または NWH) $H_s = E[H_s   V_{hub}]$	COD および UNI	水流無し	NWLR または MSL 以上		F	—
	3.2	— EOG — $V_{hub} = V_{in}$ 、 $V_r \pm 2 \text{ m/s}$ — および $V_{out}$	NSS (または NWH) $H_s = E[H_s   V_{hub}]$	COD および UNI	NCM	MSL		U	N
	3.3	EDC <sub>1</sub> $V_{hub} = V_{in}$ 、 $V_r \pm 2 \text{ m/s}$ および $V_{out}$	NSS (または NWH)	MIS および風向変化	NCM	MSL		U	
4) 通常停止	4.1	NWP $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	NSS (または NWH) $H_s = E[H_s   V_{hub}]$	COD および UNI	水流無し	NWLR または MSL 以上		F	—
	4.2	— EOG — $V_{hub} = V_r \pm 2 \text{ m/s}$ および $V_{out}$	NSS (または NWH) $H_s = E[H_s   V_{hub}]$	COD および UNI	NCM	MSL		U	N
5) 緊急停止	5.1	NTM $V_{hub} = V_r \pm 2 \text{ m/s}$ および $V_{out}$	NSS $H_s = E[H_s   V_{hub}]$	COD および UNI	NCM	MSL		U	N
6) 待機中 (静止またはアイドリ)	6.1	EWM 乱流モデル $V_{hub} = k_1 V_{ref}$	ESS $H_s = k_2 H_{s50}$	MIS および MUL	ECM	EWLR		U	N
	6.2	EWM 乱流モデル	ESS	MIS および MUL	ECM	EWLR	ネットワークロス	U	A

設計条件	DLC	風条件	波	風および波の方向性	海流	水位	その他の条件	解析のタイプ	部分安全率
ング)		$V_{hub}=k_1 V_{ref}$	$H_s=k_2 H_{s50}$						
	6.3	EWM 乱流モデル $V_{hub}=k_1 V_1$	ESS $H_s=k_2 H_{s1}$	MIS および MUL	ECM	NWLR	極値ヨー誤差	U	N
	6.4	NTM $V_{hub}<0.7V_{ref}$	NSS $H_s, T_p$ および $V_{hub}$ の結合確率分布	COD および MUL	水流無し	NWLR または MSL 以上		F	-
7) 待機中に故障の発生	7.1	EWM 乱流モデル $V_{hub}=k_1 V_1$	EWM 乱流モデル $V_{hub}=k_1 V_1$	ESS $H_s=k_2 H_{s1}$				U	A
	7.2	NTM $V_{hub}<0.7V_{ref}$	NSS $H_s, T_p$ および $V_{hub}$ の結合確率分布	COD および MUL	水流無し	NWLR または MSL 以上		F	-
8) 曳航,設置および保守	8.1	製造業者が規定						U	T

表 4.1-2 海水の設計荷重ケース<sup>4</sup>

設計条件	DLC	海水条件	風条件	水位	解析のタイプ	部分安全率
発電	E1	温度変動による水平荷重	NTM $V_{hub}=V_r\pm 2\text{m/s}$ および $V_{out}$ 最大スラストとなる風速	NWLR	U	N
	E2	温度変動またはアーチ効果による水平荷重	NTM $V_{hub}=V_r\pm 2\text{m/s}$ および $V_{out}$ 最大スラストとなる風速	NWLR	U	N
	E3 極値事象 の外挿	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 $V_{hub}=V_r\pm 2\text{m/s}$ および $V_{out}$ 最大スラストとなる風速	NWLR	U	N
	E4	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)	$V_{in}<V_{hub}<V_{out}$	NWLR	F	-
	E5	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	E6	氷丘氷および氷陵からの圧力	EWM 乱流風モデル $V_{hub}=V_1$	NWLR	U	N
	E7	該当速度の移動氷盤からの水平荷重 $H=h_{50}$ in open sea (外洋) $H=h_m$ for land-locked waters (湖)	NTM $V_{hub}<0.7_{ref}$	NWLR	F	-

COD 同一方向  
 ECD 方向変化を伴う極値コヒーレントガスト (JIS C 1400-1)  
 EDC 極値方向変化 (JIS C 1400-1)  
 ESS 極値海況  
 EWM 極値風速モデル (JIS C 1400-1)  
 MIS 方向の不ぞろい  
 MUL 多方向  
 NTM 通常乱流モデル (JIS C 1400-1)  
 NWLR 通常水面範囲  
 NSS 通常海況  
 SSS 厳しい海況  
 UNI 単一方向  
 F 疲労  
 N 通常

DLC 設計荷重ケース  
 ECM 極値水流モデル  
 EOG 運転時の極値突風 (JIS C 1400-1)  
 ETM 極値乱流モデル  
 EWLR 極値水面範囲  
 EWS 極値ウィンドシア (JIS C 1400-1)  
 MSL 平均海水面  
 NCM 通常水流モデル  
 NWH 通常波高  
 NWP 通常ウィンドプロファイルモデル (JIS C 1400-1)  
 $V_r\pm 2 \text{ m/s}$  この範囲内のすべての風速に対する感度を解析しなければならない。  
 U 終局荷重  
 A 異常  
 T 輸送および建設

## 4.2 モデルの設定

ここでは、浮体式洋上風力発電施設の各部位のモデル（風車・浮体・係留ライン）の設定方法について示す。

### 4.2.1 風車モデルの設定

#### 1) 概要

風車モデルは、主にプロペラ式水平軸風車が提案されており、その特徴を踏まえてモデルを設定する必要がある。

ここで示す風車モデルは、RNA、タワーに該当する部分である。連成解析を実施するために必要な風車モデル仕様を設定する。

#### 2) 風車モデルの設定方法

設置海域において生じる荷重に対して風車モデルの各部位・部材を評価し、風車モデルを決定する。モデルの決定に際しては、各部位・部材の性能の違いを考慮する必要がある。

風車モデルの設定例を表 4.2-1 に示す。

表 4.2-1 風車モデルの設定例<sup>12</sup>

メーカー	Aerodyn Engineering GmbH
型式	SCD3MW-NEDO
定格出力	3MW
ロータ直径	100m
ハブ高さ	72m (above sea level)
ブレード枚数	2blades
ロータ位置	Upwind
ティルト角	3degree
コーニング角	5degree
出力制御	Variable speed, Individual pitch control
ブレーキ	ピッチブレーキ（運転中）、高速段ブレーキ、ロータロック（パーキング状態）
ヨー制御	Active yaw E-motor
定格回転数	17.1rpm
増速比	24.01
発電機種別	Permanent magnet synchronous generator
PCS方式	Full converter (IGBT)
変圧器定格電圧	22kV/0.62kV
カットイン風速	3m/s
カットアウト風速	25m/s
風速クラス	クラス S

### 3) ブレードピッチ制御に伴うスラスト荷重

風車は、発電量を安定させるためにブレードピッチ制御を行うため、この制御に伴うスラスト荷重の変化も重要な要素である。特に、制御の与え方によっては、ネガティブダンピングと呼ばれる浮体の応答が増幅される現象が生じることが知られており、十分に注意する必要がある。

国内では、古典制御の一種であるPI制御を用いて、ロータ回転数の安定化と浮体動揺の抑制の2つの目的に対して制御プログラムを作成し、その効果を確認した上で、2つを組み合わせることでロータ回転数の安定化と浮体動揺の抑制の両立を目指す検討が行われた。

## 4.2.2 浮体モデルの設定

### 1) 概要

浮体モデルは、主にセミサブ形式、ポンツーン形式（バージ形式）、スパー形式、TLP形式が提案されており、各形式の特徴を踏まえてモデルを設定する必要がある。

ここで示す浮体モデルも風車モデル同様、連成解析を実施するために必要なモデル仕様を設定する。

### 2) 浮体モデルの設定方法

浮体モデルの設定にあたっては、浮体モデルの動揺がRNA、タワーに悪影響を及ぼさないよう、適切に浮体モデルの動揺を抑制しなければならない。ここでは、NEDOの次世代浮体式洋上風力発電システム実証研究として採択された、セミサブ形式とバージ形式の浮体モデルの設定方法について概要を示す。

#### (1) セミサブ形式

浮体モデルに必要な項目の例を表4.2-2に、浮体モデルの設定例を表4.2-3に示す。また、浮体の形状例を図4.2-1に、風車モデルを含む浮体式洋上風力発電施設の外寸法の例を図4.2-2に示す。

表 4.2-2 浮体モデルに必要な項目の例（セミサブ形式）<sup>12</sup>

大項目	中項目	小項目
浮体	形状	サイドカラム（円柱）間隔（平面3角形辺長）
		サイドカラム（円柱）直径
		ヒーププレート（扁平円柱）直径
		ポンツーン（底部スポーク）材の幅
		ブレース（斜材）直径
	重量	浮体重量
		バラスト水重量
	その他	喫水

表 4.2-3 浮体モデルの設定例（セミサブ形式）<sup>12</sup>

項目	2MW	5MW
サイドカラム（円柱）間隔（平面3角形辺長）	50.2m	50.2m
サイドカラム（円柱）直径	7.5m	12.0m
ヒーププレート（扁平円柱）直径	14m	24m
ポンツーン（底部スポーク）材の幅/せい	3~6m/4 m	3~6m/4 m
ブレース（斜材）直径	2.25m	2.25m
浮体重量	2500t	3850t
バラスト水重量	2214t	8232t
喫水	16.0m	21.3m

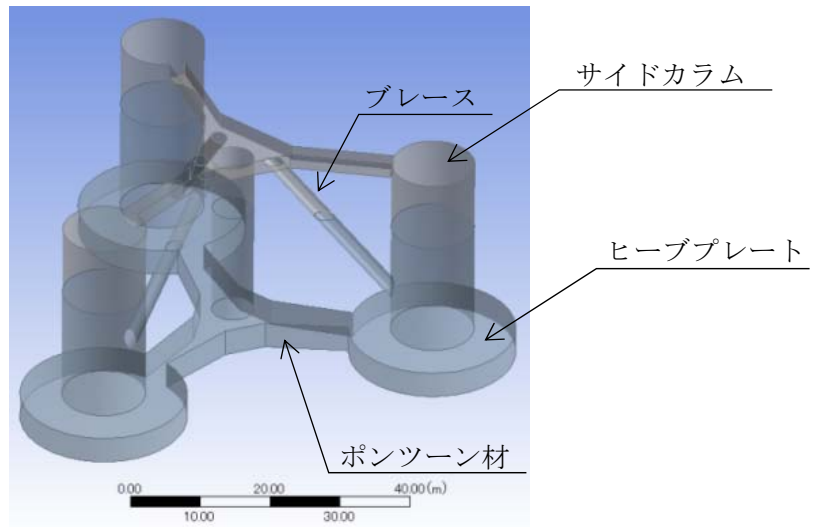


図 4.2-1 浮体の形状例 (セミサブ形式)

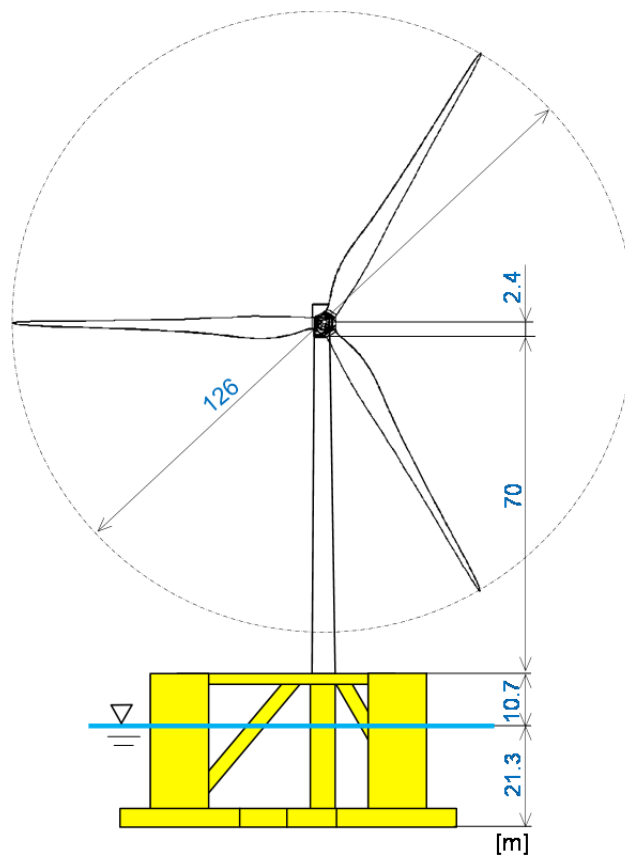


図 4.2-2 浮体式洋上風力発電施設の外寸法の例

(2) バージ形式

浮体の形状例を図 4.2-3 に示す。また、浮体モデルの設定例を表 4.2-4 に示す。

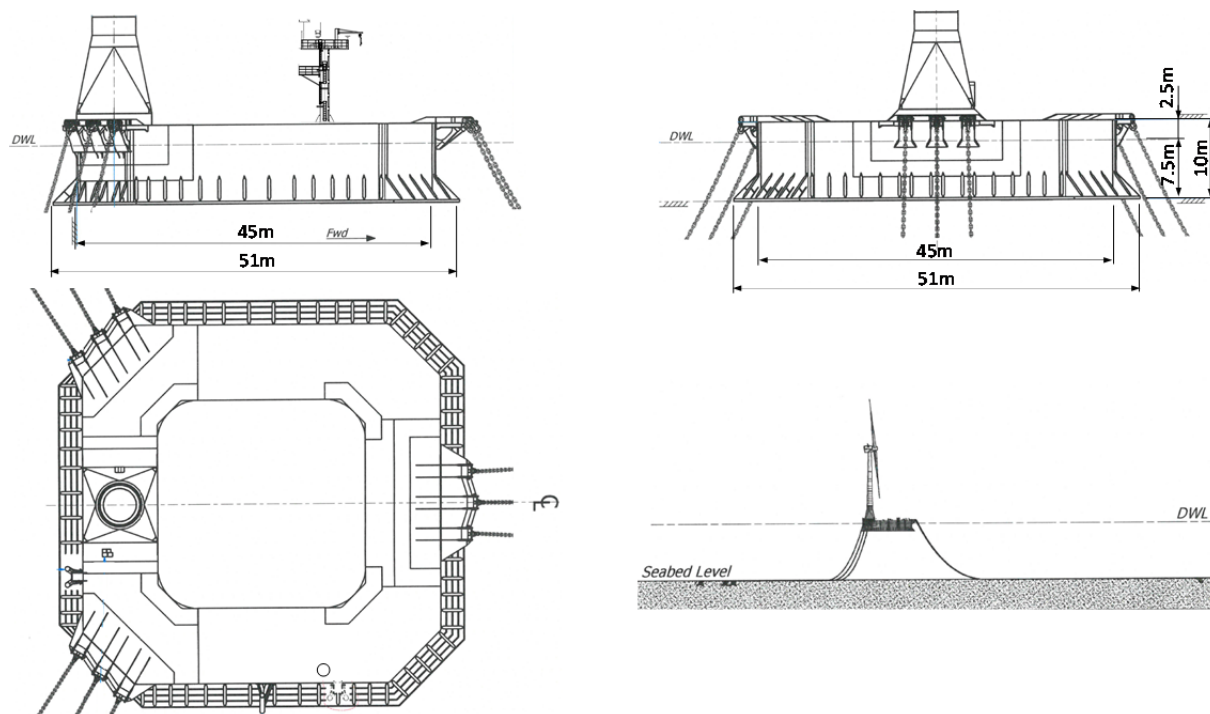


図 4.2-3 浮体の形状例（概要図）<sup>12</sup>

表 4.2-4 浮体モデルの設定例（バージ形式）<sup>12</sup>

構造形式	バージ形式（鋼製）
寸法	長さ 45.0m×幅 45.0m×高さ 10.0m（スカート幅 3.0m）
喫水	7.5m
排水量	9858.0t
搭載風車	3,000kW 風車/2 枚翼/アップウインド型
ハブ高さ	72.0m
スカートの長さ	3m（後部の角を除いて）
開口部の幅	26.2m
外殻の深さ	10.0m
重心座標（Xg;Yg;Zg）	（22.5m;0.0m;7.275m）



### 4.2.3 係留モデルの設定

#### 1) 概要

係留モデルは、主にカテナリー係留、トート係留、TLP 係留等が提案されている。さらに、アンカー部分は、ストックレス、打ちこみ杭、吸引管、重力アンカーが提案されている。このような各形式の特徴を踏まえてモデルを設定する必要がある。

ここで示すモデルは、浮体モデルの下側に連結しているチェーンおよびアンカーに該当する部分である。連成解析を実施するために必要な係留モデル仕様を設定する。

#### 2) 係留モデルの設定方法

係留モデルは、浮体式海洋構造物および移動式海洋構造物の位置保持装置の規格である ISO19901-7 (2013) <sup>34</sup>を満たすと良い。係留モデルの設定例を表 4.2-5 に、また、チェーンの許容張力の例を表 4.2-6 に示す。

表 4.2-5 係留モデルの設定例 <sup>12</sup>

係留形式	All チェーン+ドラッグアンカー
係留本数	9本 (3点×3条)
チェーン仕様	R4 スタッドレス
径	132mm
Net 径 (腐食磨耗考慮)	124mm
気中重量	348.5kg/m
剛性	1,400MN
破断荷重	15,965kN
Net 径の破断荷重	14,358kN
初期張力 (浮体係留点)	353kN
係留角度 (浮体係留点)	32°

表 4.2-6 チェーンの許容張力の例 <sup>12</sup>

状態	安全率	許容張力 (kN)
非損傷時	1.67	8598
単一索破断状態 (再現期間 1 年)	1.25	11486
単一索破断時の過渡状態 (再現期間 50 年)	1.05	13675

※安全率は浮体式洋上風力発電設備に関するガイドライン<sup>4</sup>による。

## 4.3 連成解析の実施

### 4.3.1 概要

浮体式洋上風力発電施設には、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、加えて波・潮流等の外力によって浮体動揺が発生する。浮体動揺によって風車への相対風速が変化する他、浮体構造物周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する必要がある。

これらの荷重は、連成させた評価が必要である。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、一体として評価する必要がある。

一般的に、浮体式洋上風力発電システムにおける浮体の運動方程式は式 4.3-1 のように表される。

$$M\{\ddot{x}\} + C\{\dot{x}\} + K\{x\} = \{F_G\} + \{F_B\} + \{F_H\} + \{F_M\} + \{F_R\} \quad \text{式 4.3-1}$$

ここで、

- $x$  : 浮体の変位
- $M$  : 慣性力マトリクス
- $C$  : 減衰マトリクス
- $K$  : 剛性マトリクス
- $F_G$  : 重力
- $F_b$  : 浮力
- $F_H$  : 流体力
- $F_M$  : 係留力
- $F_R$  : 復原力

流体力は、波強制力（フルードクリロフ力、ディフラクション力）、ラディエーション流体力（造波付加質量、造波減衰力）、非線形減衰力の3つに分類される。細部材では、波の変形によるディフラクション力が無視でき、粘性影響による非線形抗力が支配的であり、モリソン式が適用される。一方、大部材では、部材による波の変形・回折の影響が大きく、浮体の運動による造波減衰力と反射波による波強制力が支配的であり、ポテンシャル理論が適用される。

なお、流体解析については付属資料編「5. 流体解析モデル」に詳しく記載している。

### 4.3.2 連成解析の流れ

連成解析のフローを図 4.3-1 に示す。連成解析では、風車、浮体、係留を別々に解析し、時間ステップ毎の計算結果をそれぞれの境界面のデータとして、他の解析に受け渡して計算する弱連成が一般に行われる。具体的には、浮体の動揺を解析し、その結果を風車、係留の解析条件として強制変位として作用させる等して解析を行う。

評価に用いるツールは付属資料編「4.2 主要な連成解析モデル」に詳しく記載している。

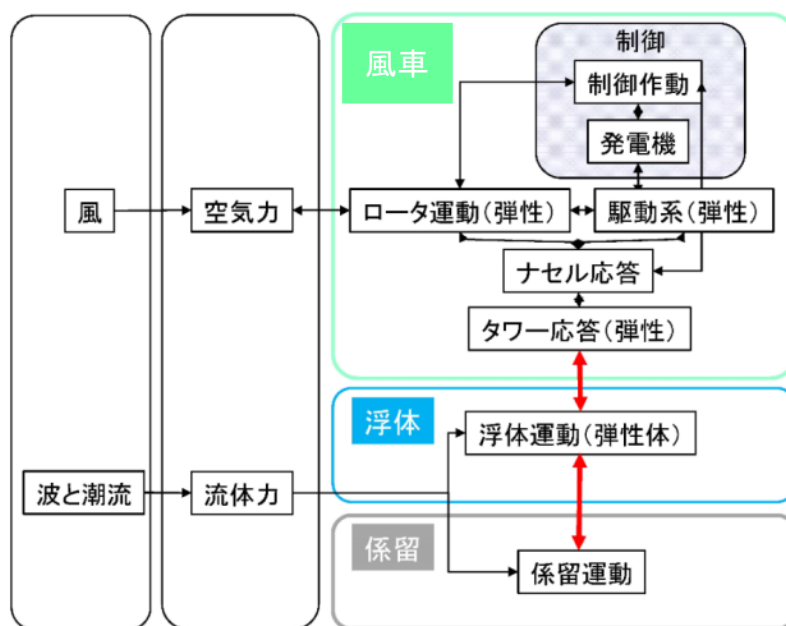


図 4.3-1 連成解析のフロー

### 4.3.3 動解析手法

連成解析に用いる動解析手法は、水槽試験を実施し高い精度で計算が行える事を確認したものを利用する。なお、確認が取れていない新たな手法を用いる場合においては、水槽試験を通じて精度を確認する必要がある。

解析手法は、風車制御を考慮した動的、非線形、時刻歴解析が望ましい。連成解析の計算結果として導出する必要のある項目は、表 4.3-1 に示す通りである。

表 4.3-1 連成解析の計算結果として導出する必要のある項目

対象	項目
風車・タワー部	RNA 加速度、タワー断面力、ブレード荷重
浮体・係留ライン	タワー基礎断面力、浮体各部断面力、浮体変位、係留力

#### 1) 浮体動揺の動解析手法

現在、一般的に用いられている浮体動揺の動解析手法を表 4.3-2 に示す。

手法①：浮体を剛体と仮定して一慣性体で表し、マルチボディダイナミクス解析を実施する。流体力の評価は、ポテンシャル理論を解いて、6自由度のマトリクスとして評価する。浮体を剛体と仮定するため、全ての浮体形式に適用できる一方で共振現象を評価することができない。

手法②：浮体を弾性体と仮定し有限要素法を用いて解析を実施する。流体力の評価は、部材の各断面に働く流体力を評価することが可能なモリソン式を用いて評価する。部材に働く応力分布を評価することができ、部材の共振現象を評価することができる。しかし、モリソン式は波の反射が無視できる細い部材にのみ適用可能なため、細い部材で構成された浮体（セミサブ形式やスパー形式）にしか適用できない。

現状は、提案されている多くの浮体が十分に剛体であるため、手法①が用いられることが多い。浮体が弾性体である場合は、部材の共振現象を評価する必要がある、解析方法に注意が必要である。また、浮体が弾性体の場合に手法①を用いた場合、風車の固有振動数が実際よりも過小評価されるため、風車モデルの剛性を調整する必要がある。

また、それぞれの手法ともに、非線形粘性項の流体力係数を評価する必要がある。水槽試験を実施し、規則波試験における浮体動揺の周波数応答関数（RAO）が一致するように同定する方法が最も一般的である。

表 4.3-2 浮体動揺の動解析手法

	手法①	手法②
風車	弾性体	弾性体
浮体	剛体	弾性体
流体力評価	ポテンシャル理論により 浮体全体に働く流体力を評価	モリソン式により 部材に働く流体力の分布を評価
長所	全ての浮体形式に 適用することができる。	部材の共振現象を評価できる
短所	部材の共振現象を 評価することができない	細かい部材で構成された浮体のみ にしか適用できない
適用可能な 浮体形式	セミサブ形式 スパー形式 ポンツーン形式	セミサブ形式 スパー形式

## 2) 係留力の解析手法

係留索の解析手法には表 4.3-3 に示す解析解を求める方法、有限要素法で解く方法がある。下記に示す理由から、両手法の浮体動揺の予測精度は変わらないことが NREL 等より報告されている。予測精度の比較として、不規則波中サージ方向動揺例を図 4.3-2 に示す。

- 浮体式海洋構造物では浮体の排水量に比べて係留索が軽量で、弛緩状態で使用されるため、係留索に働く流体力を考慮しても浮体の運動にほとんど差が生じない。
- 浮体が長周期運動を行う場合でも係留索の運動速度、運動加速度は極めて小さく、カタナリーの変形から生ずる静的復原力で十分とされている。

表 4.3-3 係留力の解析手法

ツール	手法①	手法②
係留	解析解を求める方法	有限要素法

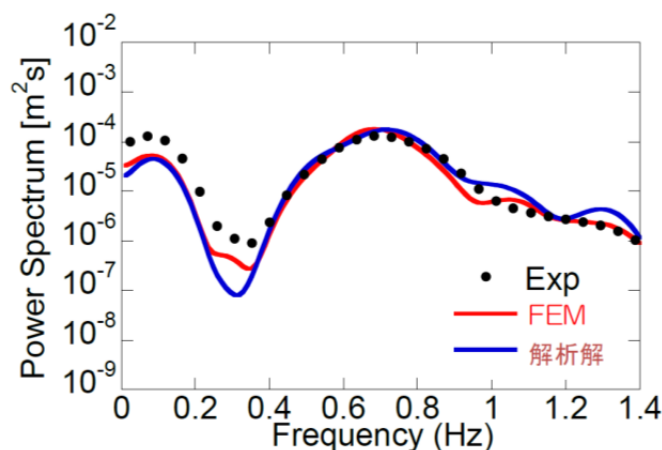


図 4.3-2 不規則波中サージ方向動揺例<sup>35</sup>

また、係留索と浮体の解析手法を表 4.3-4 に示す。実際の設計では計算コストを下げるため、①の手法を採用することが多いが、②との整合性を検証する必要がある。

表 4.3-4 浮体と係留の解析手法

解析方法	説明
① One way	浮体の動揺を強制変位として、係留ラインの動揺を解く方法
② Coupling	浮体と係留の連成解析を、反復計算を実施して解く方法
③ Decoupling	浮体と係留の連成解析を、反復計算を実施しないで解く方法

### 3) 波漂流力の解析手法

水面付近の体積が大きい浮体では、波漂流力が大きくなり係留システムに影響を与える。波漂流力は、流体力学的には2次の力であり、波高の自乗に比例する量として整理される。波周期に比較して変動周期が長いため、係留設計では定常力として扱われることも多い。水槽試験または理論計算によって求める。

## 4.4 連成解析の検証

### 4.4.1 概要

連成解析の検証は水槽試験によって行い、連成解析結果が安全側の数値を与えることを確認する。また、複雑な形状の浮体については、流体力係数の同定を行い、その結果を連成解析に反映することも行われる。

浮体部分については、一般的な浮体構造物と同様にフルード則によってスケールダウンする。一方、風車部分は、実機と模型でレイノルズ数が大きく異なる等の問題があり、発電時の相似性を確保することが難しい。従って、風車運転時の DLC については、模型風車の特性を十分に考慮して水槽試験結果を利用することが必要である。

なお、浮体式洋上風力発電施設技術基準（2012）<sup>3</sup>では、時間領域での連成解析を求めるとともに、模型試験によって荷重を算定しても差し支えないとしていることから、水槽試験結果からそのまま使用できるデータも提示することが望ましい。

水槽試験のイメージを図 4.4-1 に示す。

なお、わが国の水槽試験施設、水槽試験に係る実状と留意点等について付属資料編「3. 水槽試験」に詳しく記載している。

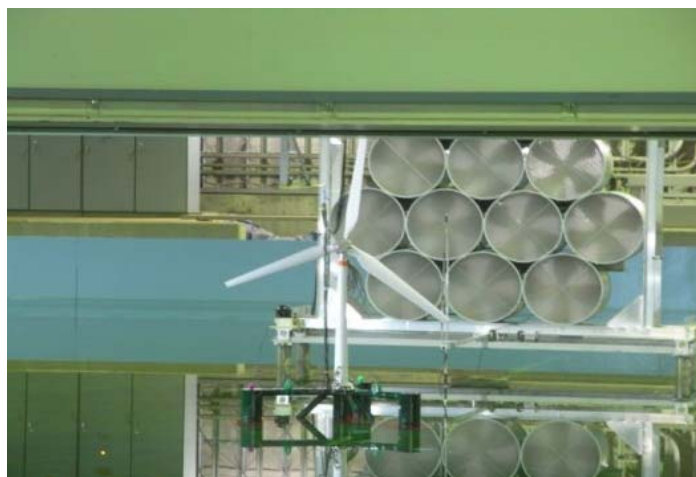


図 4.4-1 水槽試験のイメージ

### 4.4.2 模型

水槽試験に用いる縮尺模型の設計・製作におけるモデル化の範囲は、浮体部分、風車部分、係留部分に大別される。

浮体部分については、形状、重量、喫水に加え、KG（ベースラインから重心までの距離）、GM（メタセンター高さ）、慣性モーメント等を十分正確に模擬することが必要である。また、浮体に働く風速や潮流速度についてはフルード則が適用されることが多い。

係留は、カテナリー係留を用いることが多い。カテナリー係留では、ライン本数、ライン形状、アンカー位置、重量分布、抗力係数を実機に一致させることが望ましいが、水槽の寸法が制約条件になることが多く、水深と係留展開面積の点で、実機を正確に模擬できないことがある。このような場合には、水平方向の係留反力を模擬することが第一に重要である。トート係留では、水平方向とともに鉛直方向の係留反力を模擬することが必要である。

風車部分は、停止時を対象とするのであれば、実機の形状を模擬しフルード則に従って風速を設定することで、概ね風荷重を再現することができる。発電時については、浮体が動揺すれば風車への流入風速が変化し、それによって回転速度が変わり、また定格風速以上であればブレード・ピッチ制御やトルク制御が行われ、結果としてスラスト荷重が変動する。この変動荷重を正確に模擬するモデルは困難なため、後述するような工夫が必要である。平均的な風荷重を模擬する方法として、風圧を受ける円盤や小型送風機を風車位置に設置する等の方法が取られることもある。

#### 4.4.3 環境外力

水槽試験における代表的な環境外力として風、波、流れがある。風、流れの流向と波向は、最も厳しい組合せで試験をすることが望ましいが、困難な場合は、予め連成解析を行って水槽で再現できる最も厳しい組合せで試験する必要がある。波と流れについては、一般的な浮体構造物と同様であり、フルード則によりスケールダウンする方法が用いられる。以下では、浮体式洋上風力発電施設にとって重要となる風荷重の考え方の概要を示す。

##### 1) 送風装置

風水洞設備における実験を除き、水槽設備内の送風装置を用いて流場を模擬する。常設送風装置には、送風装置が水槽台車に据付けられている形式や水槽外に据付けた送風装置とフレキシブルダクトから構成される形式がある。一方、仮設送風装置の多くは一般的なファン複数機と整流のためのハニカム樹脂から構成され、これを水槽曳航台車に設置する形式および水槽底を移動可能な架台上に設置する形式がある。

特に仮設送風装置を用いる場合は、水槽試験に先立って風速分布を計測し、一様性等を確認する必要がある。

##### 2) 送風方法

浮体運動論の観点から相似的にフルード則を用いるため、モデルのレイノルズ数は実機に比べて著しく低下する。その結果、風車の発電状態における空力特性（出力係数、スラスト係数等）は実機とモデルで大きく乖離してしまう。そこで、風車に作用するスラストが相似になるよう、風速、ブレードの回転速度、ブレードのピッチ角を調整等の工夫がなされることが多い。

##### 3) 留意点

風車の空力特性はブレード先端近傍の風速が最も重要であることに留意し、また、浮体が動揺する量を予測して、送風装置の送風面は十分な広さとする必要がある。また、浮体構造部にも風荷重が作用することに留意する必要がある。

#### 4.4.4 計測項目と計測方法

浮体式洋上風力発電施設は、一般的な海洋構造物の試験と同様に浮体動揺や係留力の把握が必要であるが、風車部のデータとしてタワー基部の曲げモーメントが重要である。また、ナセル加速度を問題にする場合には、タワーの剛性・固有振動数を適切に選ぶ必要がある。回転機構のある風車では、風車の回転速度やブレード・ピッチ角を計測しておくことが必要である。

#### 4.4.5 水槽試験の留意事項

浮体式洋上風力発電施設では、水力現象、空力現象、ブレード・ピッチ制御等が複雑に連成することから、ネガティブダンピング、ジャイロ・モーメント等特有の現象が発生する。相似則ではフルード数やレイノルズ数等、同時に満足しがたい。そのため、浮体運動から発電性能までを一度に総合的に評価する実験は困難である。

浮体運動については、風荷重を模擬する方法が種々試みられており、これを適用することである程度評価可能と思われる。一方、発電性能については、レイノルズ数が2桁程度違う他、ブレード・ピッチ制御やジャイロ・モーメントによるヨー角の変化等、現象の複雑さが影響するため、直接的な評価は容易ではないと考えられる。

機器の点では、特に風車回転時の現象やブレード・ピッチ制御を模擬する場合、ナセル回りの機構が複雑になり、寸法と重量が縮尺比よりも大きくなる傾向があるため、小型軽量の機器の開発とともに、これを適切に考慮することが必要になる。



## 5. 構造評価

### 5.1 概要

構造評価においては、部分安全率法を用いて荷重および材料の不確かさ、ばらつき等を考慮しても十分な耐力を持つことが求められる。

具体的には、RNA、タワー、浮体設備、浮体設備とタワー基部の結合部、係留ラインについて浮体式洋上風力発電施設技術基準（2012）<sup>3</sup>を満たすように部材等の設定・評価を実施する。ただし、RNA とタワーについては、JIS C 1400-1（2010）<sup>5</sup>に規定した要求事項を満たす必要がある。

浮体設備の材料および溶接については、浮体式洋上風力発電設備に関するガイドライン（2012）<sup>4</sup>に規定した要求事項を満たす必要がある。

本技術ガイドブックでは、DLC に沿って浮体設備、浮体設備とタワー基部の結合部、係留ラインの構造評価に主眼を置き記述する。

以下に、基本事項を示す。

なお、構造解析モデルについては付属資料編「6. 構造解析モデル」に詳しく記載している。

#### 1) 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（2010）<sup>5</sup>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、浮体施設の設計寿命は最低でも20年とする。

#### 2) 安全性

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。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) 強度検証

強度の検証においては、終局限界状態および疲労限界状態に対して検証を行う。構造部材の強度については、計算および試験また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する。

#### 4) 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。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とする。

#### 5) 疲労強度

疲労強度に注意する必要がある。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とする。

## 6) 応力集中

構造的な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。

## 7) 開口部

浮体施設およびタワーにおいて、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、鋼船規則 PS 編<sup>36</sup>等を適宜参照する。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（2010）<sup>7</sup>に記載の手法を準用しても良い。

## 5.2 風車の構造評価

風車の構造的な健全性は、原則として連成解析によって得られる風車に対する荷重と、風車の型式認証で用いられた設計荷重と比較することによって示す必要がある。サイト固有の環境条件に基づく設計条件が、風車の型式認証で認められた設計条件の範囲に収まる場合であっても、連成解析結果に基づく構造評価を実施しなければならない。

連成解析によって得られる風車に対する荷重と、風車の型式認証で用いられた設計荷重を上回らない場合、サイトの環境条件に対する風車の構造的な健全性は担保されることになる。連成解析によって得られる風車に対する荷重が風車の型式認証で用いられた設計荷重を上回る場合、その影響を受ける部品の健全性を検証しなければならない。

また、風車の型式認証書には記載されていない新規の部品、改良もしくは補強された部品がある場合、または制御を変更する等の変更を加える場合、該当する部品および制御システムは風車の型式認証に対する要求事項にも適合しなければならないことに留意する必要がある。

いずれにしても、浮体式洋上風力発電設備に搭載される風車は、現状の電気事業法による法規制における取扱いにより、サイト環境条件への適合性について認証機関による評価を受ける必要がある。

なお、この認証機関による評価については、風車メーカーと認証機関の間での直接のやり取りによって実施されることが一般的な流れである。

### 5.3 浮体施設の構造評価

#### 5.3.1 終局強度の検討

##### 1) モデル化

FEM（Finite Element Method（有限要素法））解析では、解析で得られた水圧分布を作用させながら、照査対象範囲において断面力も精度よく再現できるようモデル化する。浮体各部のモデル化の例を図 5.3-1 に、部分モデルのイメージの例を図 5.3-2 に示す。

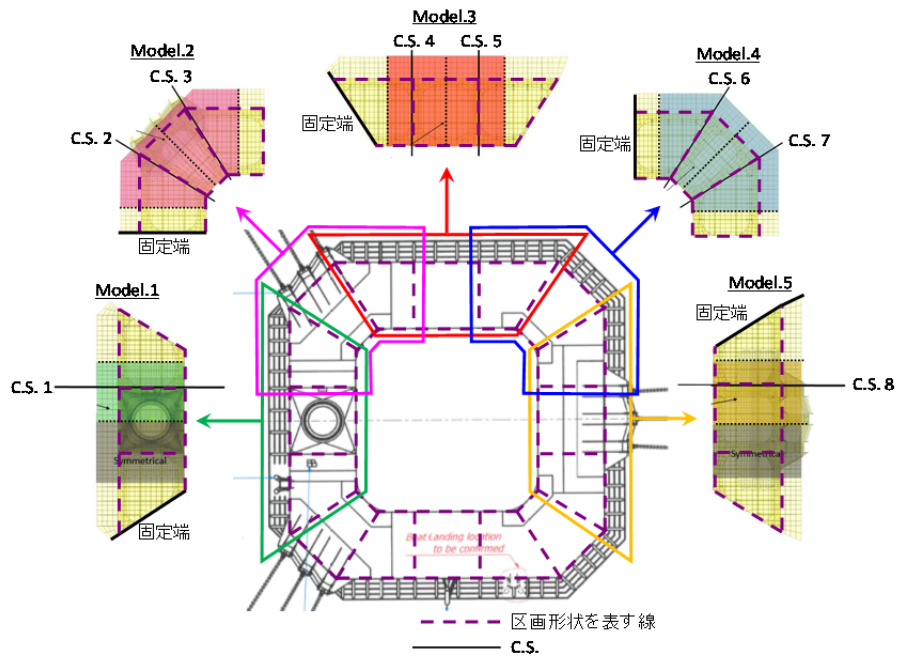


図 5.3-1 浮体各部のモデル化の例<sup>12</sup>

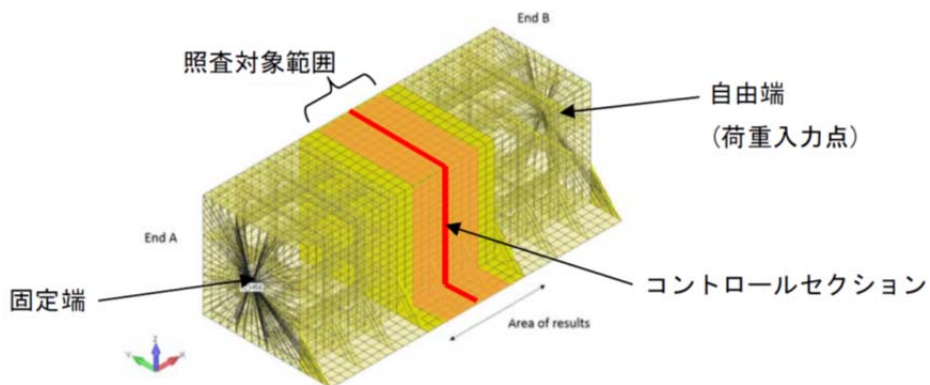


図 5.3-2 部分モデルのイメージの例<sup>12</sup>

## 2) 検討方法

荷重ケースを設定し、FEM 解析により強度照査を行う。FEM 解析を行う荷重ケースの設定例を表 5.3-1 に示す。

表 5.3-1 FEM 解析を行う荷重ケースの設定例<sup>12</sup>

荷重ケース	断面力			圧力分布
断面力 最大 ケース	L-max Fx	縦方向せん断力 Fx 最大	+ 同時刻のその他断面力成分	Fx 最大時刻の圧力分布
	L-min Fx	縦方向せん断力 Fx 最小	+ "	Fx 最小 "
	L-max Fy	横方向せん断力最大 Fy	+ "	Fy 最大 "
	L-min Fy	横方向せん断力 Fy 最小	+ "	Fy 最小 "
	L-max Fxy	合成せん断力 Fxy 最大	+ "	Fxy 最大 "
	L-max Fz	軸力 Fz 最大	+ "	Fz 最大 "
	L-min Fz	軸力 Fz 最小	+ "	Fz 最小 "
	L-max Mx	横曲げモーメント Mx 最大	+ "	Mx 最大 "
	L-min Mx	横曲げモーメント Mx 最小	+ "	Mx 最小 "
	L-max My	縦曲げモーメント My 最大	+ "	My 最大 "
	L-min My	縦曲げモーメント My 最小	+ "	My 最小 "
	L-max Mxy	合成曲げモーメント Mxy 最大	+ "	Mxy 最大 "
	L-max Mz	トルク Mz 最大	+ "	Mz 最大 "
L-min Mz	トルク Mz 最小	+ "	Mz 最小 "	
圧力 最大 ケース	P-max side	外側板圧力最大時刻の断面力		外側板で最大圧力発生時刻の圧力分布
	P-max bottom	底板圧力最大時刻の断面力		底板で最大圧力発生時刻の圧力分布
	P-max inside	内側板圧力最大時刻の断面力		内側板で最大圧力発生時刻の圧力分布

## 3) 構造解析結果の評価

FEM 解析で得られた応力の最大値  $\sigma_{max}$  と許容応力  $\sigma_{vm,a}$  の比 ( $\sigma_{max}/\sigma_{vm,a}$ ) が 1 以下となることを確認する。応力の照査結果の例を図 5.3-3 に示す。

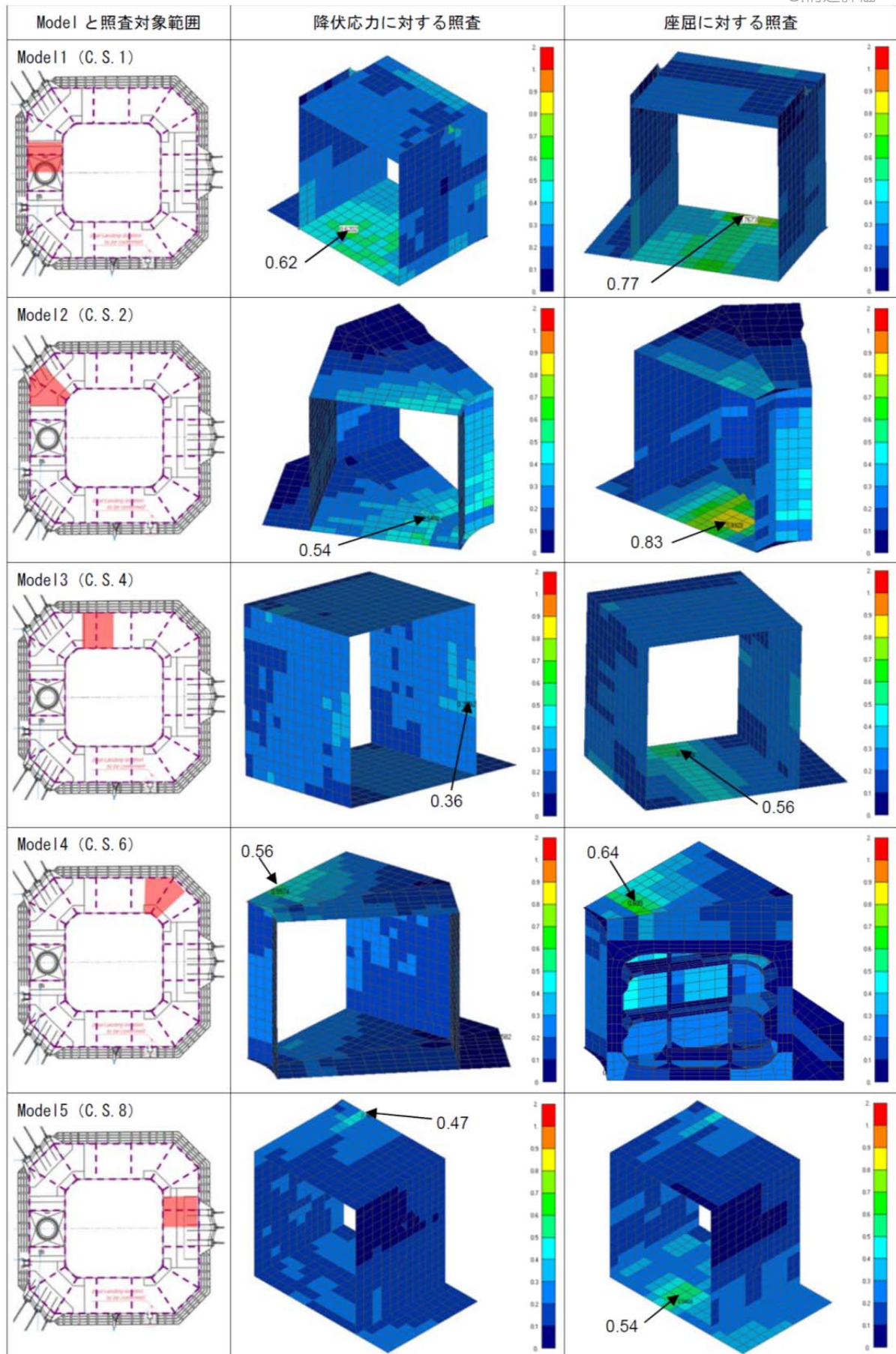


図 5.3-3 応力の照査結果 ( $\sigma_{vm,max}/\sigma_{vm,a}$ ) の例<sup>12</sup>

### 5.3.2 疲労強度の検討

#### 1) 検討手順

疲労検討の手順の例を図 5.3-4 に示す。疲労検討では、照査対象を応力集中部に限定し、時刻歴解析手法により応力の時刻歴を求めて、レインフロー法により応力振幅をカウントする。

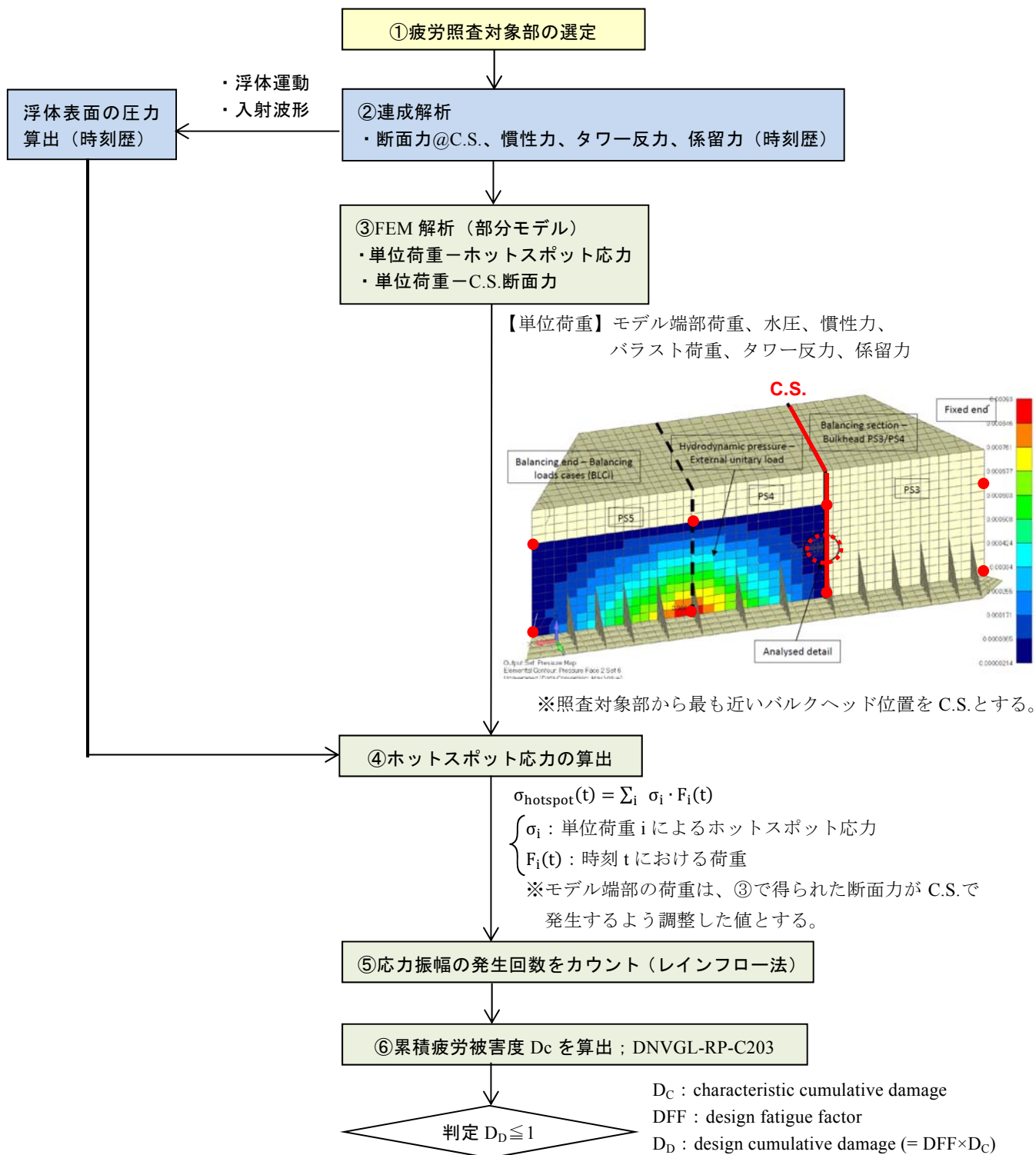


図 5.3-4 疲労検討フローの例<sup>12</sup>

## 2) 疲労照査対象部の選定 (図 5.3-4 のフロー①)

疲労照査対象部の例を図 5.3-5 に示す。FEM 解析では部分モデルを使用し、各照査対象部周辺のメッシュサイズを細かくした詳細モデルを作成する。

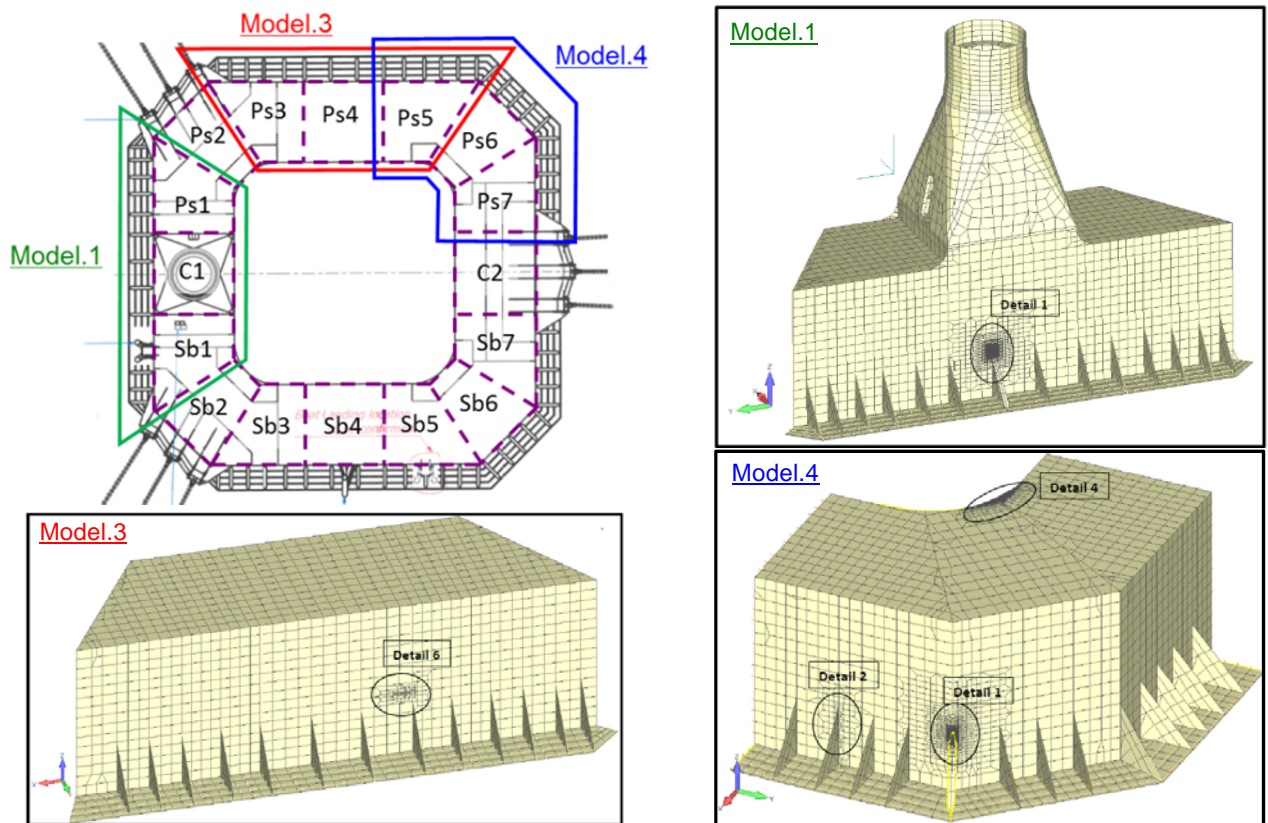


図 5.3-5 疲労照査対象部の例<sup>12)</sup>

## 3) 連成解析 (図 5.3-4 のフロー②)

荷重ケースを設定し、連成解析を実施する。荷重ケースの設定例を以下に示す。

### 【荷重ケースの例】

- ・ 波浪条件：波浪推算で得られた発生頻度分布  
12 方位に分割 (IEC 61400-3<sup>37)</sup>) ⇒ 波浪発生頻度が 1%以上の 6 方位について計算 (図 5.3-6)
- ・ 風条件：最大スラスト風速  $V_{hub}=12.8\text{m/s}$  (全ケース一律)、12 方位 (風、波向きの変差考慮)
- ・ 解析時間：600s/1 ケース  
⇒ 合計 1,334 ケース

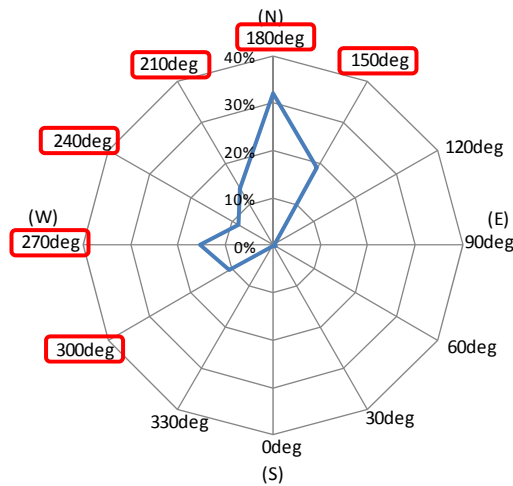


図 5.3-6 方位別の波浪発生頻度の例<sup>12</sup>

#### 4) FEM 解析 (図 5.3-4 のフロー③)

部分モデルに単位荷重を作用させ、単位荷重とホットスポット応力、単位荷重と C.S.における断面力の関係を求める。

##### 【単位荷重の例】

- ・ 6 自由度の断面力 (自由端から入力)
- ・ 水圧 (図 5.3-7)
- ・ 慣性力 (バラスト含む)
- ・ タワー反力

単位水圧の作用イメージの例を図 5.3-7 に示す。この例の場合、各モデルの側板上 8 点 (図 5.3-7 の赤点部) に単位水圧を作用させる。底板、内側板についても同様に 8 点の作用点を設け、それぞれの単位水圧に対するホットスポット応力を求める。

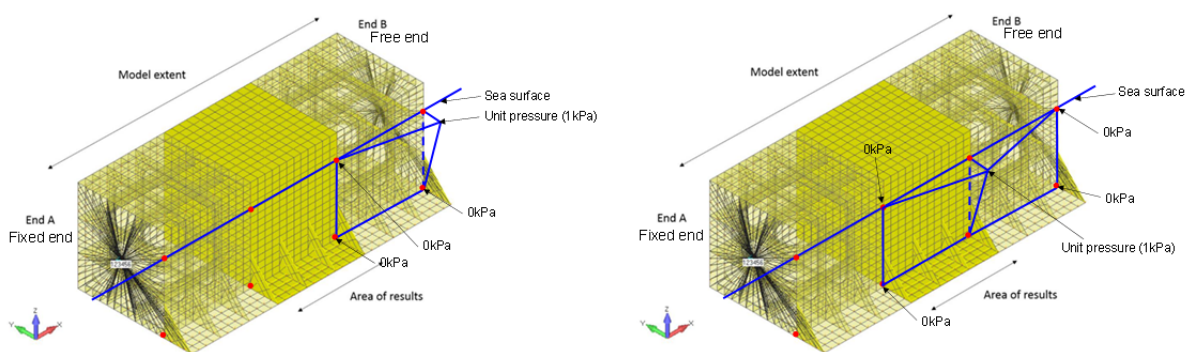


図 5.3-7 単位水圧作用イメージの例<sup>12</sup>



### 5) ホットスポット応力の算出 (図 5.3-4 のフロー④)

断面力、浮体の運動(加速度)、局部水圧、タワー反力の時刻歴と、それぞれの単位荷重一応力の関係から、荷重ケース毎にホットスポット応力の時刻歴 $\sigma_{hotspot}(t)$ へ変換する。具体的には次式による。

$$\sigma_{hotspot}(t) = \sum_i \sigma_i \cdot F_i(t) \quad \text{式 5.3-1}$$

ここで、

- $\sigma_{hotspot}(t)$  : ホットスポット応力の時刻歴 (t)
- $i$  : 単位荷重の種類
- $\sigma_i$  : 単位荷重*i*によるホットスポットの応力 (Mpa)
- $F_i(t)$  : 時間ステップ*t*における荷重(断面力はモデルの自由端での値) (Mpa)

### 6) 疲労照査結果 (図 5.3-4 のフロー⑤⑥)

レインフロー法により応力振幅の発生回数をカウントし、DNVGL-RP- C203<sup>38</sup>のSN曲線に従い累積疲労被害度  $D_C$  を次式により算出する。

$$D_C = \sum \frac{n_i}{N_i} \quad \text{式 5.3-2}$$

ここで、

- $D_C$  : 累積疲労被害度
- $n_i$  : 応力振幅 $\Delta\sigma_i$ の発生回数
- $N_i$  : 応力振幅 $\Delta\sigma_i$ により疲労破壊に至るまでの $\Delta\sigma_i$ の発生回数で DNVGL-RP- C203<sup>38</sup>による

$D_C$ より DFF を用いて  $D_D$  を算出し  $D_D \leq 1$  であることを照査する。疲労照査結果の例を表 5.3-2 に示す。

表 5.3-2 疲労照査結果の例<sup>12</sup>

Model	Detail	区画	部位	疲労曲線	D <sub>C</sub>	DFF	D <sub>D</sub> (≦1)
1	1	C1	スカート補強部	D	1.89E-03	3	5.68E-03
3	2	Ps3	浮体内部 骨部材の交差部	D	5.31E-02	2	1.06E-01
	3	Ps3/4	浮体内部 隔壁、骨部材取り合い部	D	2.87E-02	2	5.74E-02
	5	Ps4	浮体内部 骨部材の交差部	B2	2.36E-01	2	4.71E-01
	6	Ps4/5	浮体内部 隔壁、骨部材取り合い部	B2	4.06E-03	2	8.12E-03
	7	Ps4	浮体内部 骨部材の交差部	B2	1.58E-02	2	3.16E-02
	8	Ps3/4	浮体内部 隔壁、骨部材取り合い部	D	6.82E-02	2	1.36E-01
4	1	Ps6/7	スカート補強部	D	1.92E-02	3	5.77E-02
	2	Ps7	浮体内部 骨部材の交差部	D	4.50E-02	2	8.99E-02
	3	Sb6/7	浮体内部 隔壁、骨部材取り合い部	D	1.29E-03	2	2.58E-03
	4	Sb5/6	隅角 R 部	B2	7.16E-02	2	1.43E-01

DFF(Design fatigue factor) : 海水中は 3、浮体内部 (バラスト水あり) は 2

D<sub>D</sub>(Design cumulative damage) : =DFF×D<sub>C</sub> ≦ 1.0

極値波浪条件が累積疲労被害度に与える影響を考慮するため、ワイブル分布を用いて応力振幅の発生頻度および疲労被害度を評価する<sup>38</sup>。

$$Q(\Delta\sigma) = \exp\left[-\left(\frac{\Delta\sigma}{q}\right)^h\right] \quad \text{式 5.3-3}$$

ここで、

$Q(\Delta\sigma)$  : 応力振幅 $\Delta\sigma$ の超過確率

$h$  : ワイブル形状パラメータ

$q$  : ワイブル尺度パラメータで、式 5.3-4 で与えられる。

$$q = \frac{\Delta\sigma_0}{(\ln n_0)^{1/h}} \quad \text{式 5.3-4}$$

ここで、

$q$  : ワイブル尺度パラメータ

$\Delta\sigma_0$  :  $n_0$ 回に 1 回の割合で発生する最大応力振幅

$n_0$  : 応力振幅 $\Delta\sigma_0$ の発生回数

$h$  : ワイブル形状パラメータ

累積疲労被害度が最も厳しいケースを対象に、長期分布から得られた応力振幅の発生頻度と終局強度解析時の最大応力 (50 年に 1 回) を考慮し、式 5.3-3 の形状パラメータ  $h$  および尺度パラメータ  $q$  を設定し、応力振幅の発生頻度を再評価する。

- ・終局強度解析の最大応力の倍を 50 年最大の応力振幅として、これが 50 年に 1 回 (20 年に 0.4 回) 発生するとして尺度パラメータを設定
- ・長期分布から得られた応力振幅を下回らないよう形状パラメータを設定

ワイブル分布により算定した累積疲労被害度が、許容値 ( $D_D \leq 1.0$ ) を下回ることを確認する。

【ワイブル分布による疲労被害度の評価結果の例】 (図 5.3-8)

$$D_D = D_C \times DFF = 0.278 \times 2 = 0.556 \quad (\text{長期分布のみの場合 } D_D = 0.471)$$

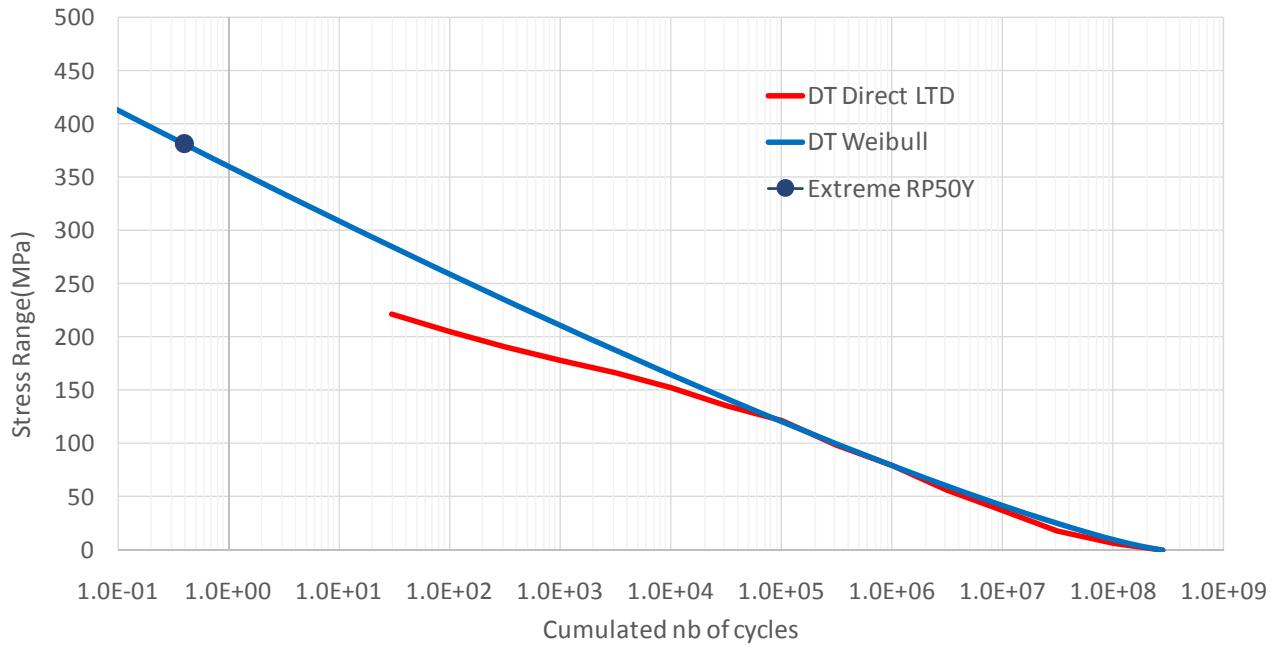


図 5.3-8 ワイブル分布による応力振幅の発生頻度の評価の例<sup>12</sup>

## 5.4 係留施設の構造評価

係留施設は、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、かつ安全なものでなければならない。

低温、凍結、着氷等が想定される海域に設置される浮体の係留施設にあたっては、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。

係留施設の設計においては、表 5.4-1 に示す係留状態を係留解析により検討する。

表 5.4-1 係留解析で考慮すべき状態<sup>4</sup>

番号	状態	内容
①	非損傷状態	浮体施設および係留施設のすべての構成要素が正常である状態
②	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をいう。非損傷状態において最大張力が発生する索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、リード索破断、あるいは隣接する索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
③	単一係留ライン破断時の過渡状態	係留ラインの1つが破断（原則リード索とする）し、浮体施設が過渡的な運動（オーバーシュートを含む）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

### 5.4.1 終局強度の検討

#### 1) 係留ラインの仕様設定

係留索配置の例を図 5.4-1 に、係留索仕様の例を表 5.4-2 に示す。係留チェーンの許容張力は、NK ガイドライン<sup>4</sup>の腐食摩耗量の最大値 0.4mm/年（8mm/20 年）を考慮した Net 径の破断荷重から設定する。チェーン許容張力の例を表 5.4-3 に示す。

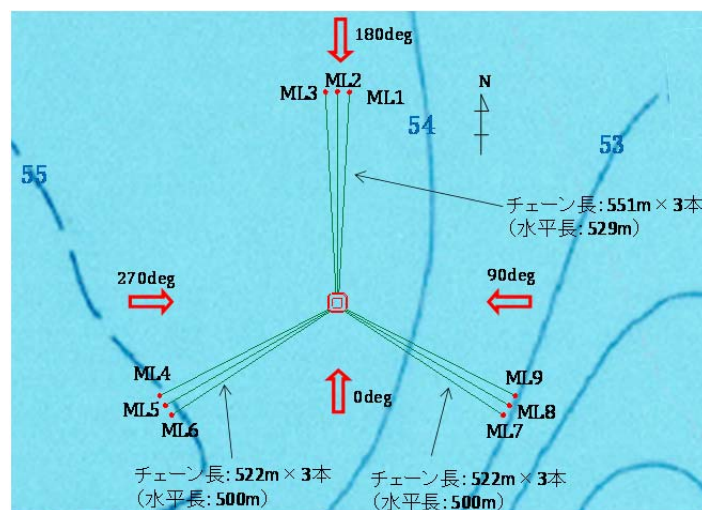


図 5.4-1 係留配置図の例<sup>12</sup>

表 5.4-2 係留チェーン仕様の例<sup>12</sup>

チェーン仕様	R4 スタッドレス
径	132mm
Net 径 (腐食摩耗考慮)	124mm
気中重量	348.5kg/m
剛性	1,400MN
破断荷重	15,965kN
Net 径の破断荷重	14,358kN
初期張力 (浮体係留点)	353kN
係留角度 (浮体係留点)	32°

表 5.4-3 チェーン許容張力の例（安全率はNK ガイドラインによる）<sup>12</sup>

状態	安全率	許容張力 (kN)
非損傷時	1.67	8,598
単一索破断状態（再現期間 1 年）	1.25	11,486
単一索破断時の過渡状態（再現期間 50 年）	1.05	13,675

## 2) 検討方法

DLC について、連成解析を用いて係留の動的応答、外力の方向性を考慮した詳細解析を実施し、係留索の安全性を評価する。解析時間は全て 3,600s で、6 シードの解析を実施する。

Step1~4 の手順で検討を行う。IEC では基本的に波と風のみスアライメントの考慮を要求されている。ここでは、Step1 で波、風同一方向の解析を行い、クリティカルな外力方向を特定した上で、Step2 以降で、クリティカルな方向をベースにミスアライメントを考慮した検討を実施する。連成解析のモデル図の例を図 5.4-2 に示す。

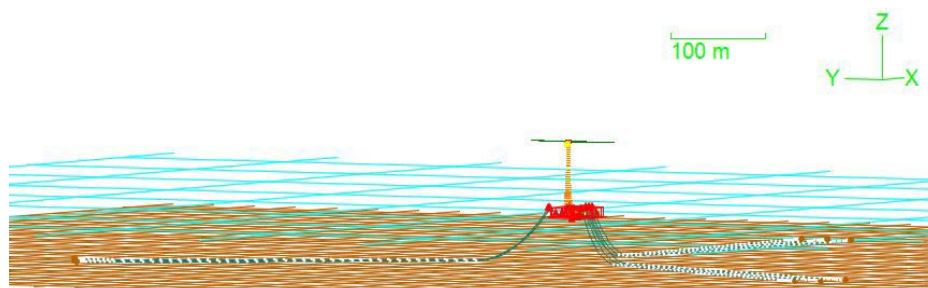


図 5.4-2 連成解析のモデル図の例<sup>12</sup>

### (1) Step1 : 非損傷時（波、風同一方向）

外力方向を 30deg 毎に変えて検討を行う。荷重ケースの例を表 5.4-4、考慮する外力方向の例を図 5.4-3 に示す。また、周囲を陸地に囲まれ、波については顕著な方向性がみられる海域では方位別に波浪条件を変えて解析を実施する。

表 5.4-4 Step1 の荷重ケースの例<sup>12</sup>

DLC	風速 (at Z <sub>hub</sub> )	Hs	T <sub>1/3</sub>	海面流速	方向
1.6 (運転時)	12.8m/s (最大スラスト)	5.42m	7.9s,9.0s,10.2s	0.10 m/s	図 5.4-3 の通り
	25.0m/s (カットアウト)			0.19 m/s	
6.1 (停止時)	48.5m/s	図 5.4-4 の通り		1.04 m/s	

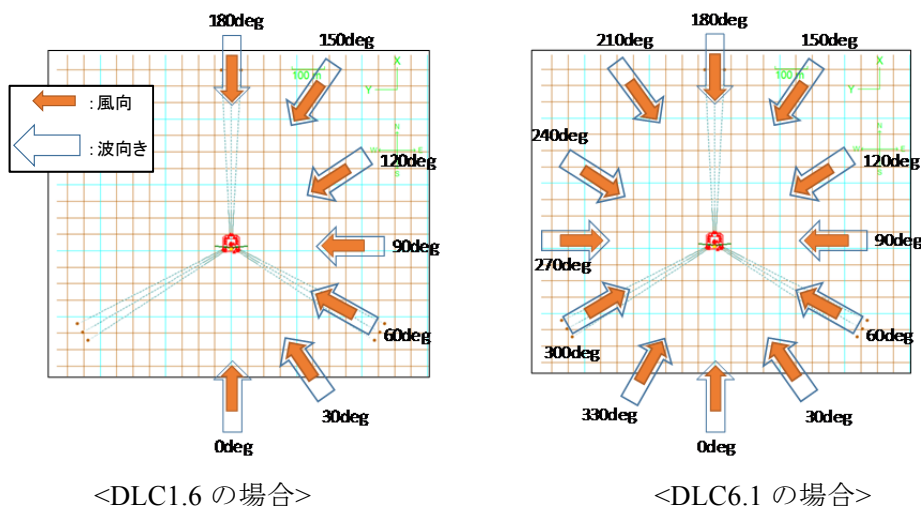


図 5.4-3 Step1 で考慮する外力方向組合せの例<sup>12</sup>

波浪推算データから求めた方位別の50年再現期待値、国土技術政策総合研究所資料<sup>23</sup>の方位別の50年再現波高を比較し、最も安全側の波高を抽出する (図 5.4-4)。採用した波高が、1年再現期待値 $H_{s1-1hour}$ を下回る場合、その方位の設計波高は $H_{s1-1hour}$ とする。波周期はNKガイドライン<sup>4</sup>の式 5.4-1に従い範囲を求め、最小、中間、最大値について解析を実施する。

$$11.1\sqrt{H_s/g} \leq T \leq 14.3\sqrt{H_s/g} \tag{式 5.4-1}$$

ここで、

- $H_s$  : 有義波高 (m)
- $g$  : 重力加速度 (m/s<sup>2</sup>)
- $T$  : 周期 (s)

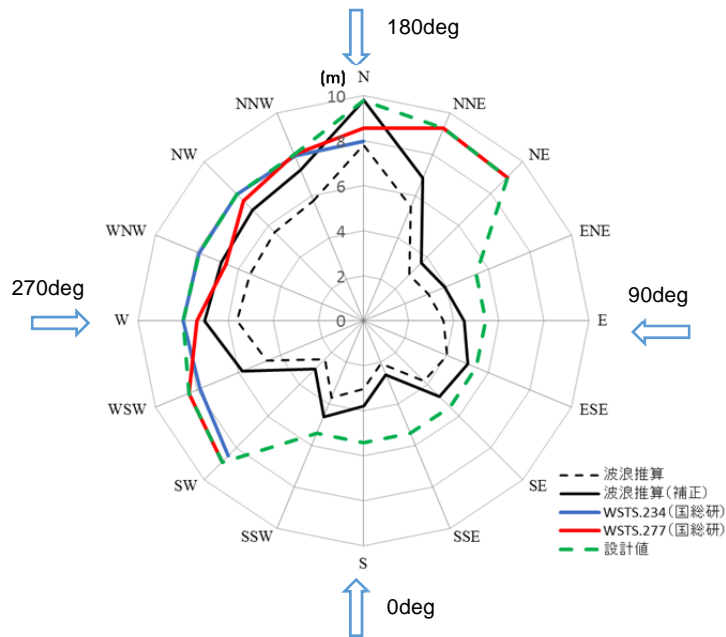


図 5.4-4 方位別の 50 年再現期待値波高の例<sup>12</sup>

(2) Step2 : 非損傷時 (波、風ミスアライメント)

Step1 で係留張力が大きくなった 2 方向について、 $\pm 30\text{deg}$ ( $10\text{deg}$  毎)の風向と波向のミスアライメントを考慮した計算を行う (図 5.4-5)。流れについては、吹送流は風向と、水中流は波向とそれぞれ同一とする。

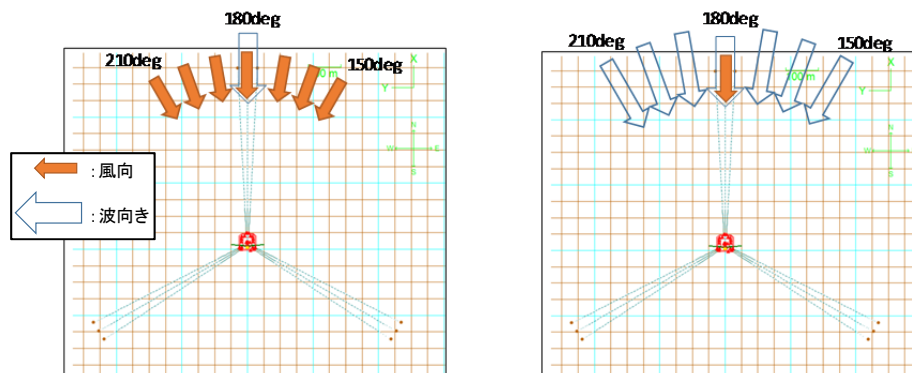


図 5.4-5 Step2 で考慮する外力方向の例 (180deg 方向をベースにしたケース)<sup>12</sup>

(3) Step3 : 単一索破断時 (破断後の平衡状態)

Step1 で係留張力が大きくなった 2 方向について、張力が最も大きいラインおよび 2 番目に大きいラインの破断を想定した解析を行う。解析で考慮する外力方向は Step2 と同じとする。環境荷重の再現期間 1 年 (NK ガイドライン<sup>4</sup>で規定) および 50 年 (参考扱い) の両ケースについて検討する。

#### (4) Step4：単一索破断時の過渡状態

非損傷時の検討（Step1、2）のうち最も張力が大きくなったケースについて、2番目に張力が大きいラインが途中で破断した状態を想定し、解析を行う。破断ラインの張力が最大になる時刻で破断すると仮定する。



### 3) 解析結果

#### (1) Step 1 : 非損傷時 (波、風同一方向)

最大張力の解析結果の例を表 5.4-5 に示す。UF (最大張力/許容張力)  $\leq 1$  であることを確認する。

表 5.4-5 Step 1 の最大張力の例<sup>12</sup>

ライン No.	浮体係留点		アンカー点		荷重ケース
	最大張力 (kN)	UF	最大張力 (kN)	UF	
ML1	7,500	0.87	7,019	0.82	DLC6.1_D150deg_V48.5_Hs9.28_T10.3
ML2	7,464	0.87	6,973	0.81	DLC6.1_D180deg_V48.5_Hs9.8_T10.6
ML3	7,455	0.87	6,958	0.81	DLC6.1_D180deg_V48.5_Hs9.8_T10.6
ML4	6,338	0.74	5,785	0.67	DLC6.1_D300deg_V48.5_Hs8.88_T11.6
ML5	6,015	0.70	5,415	0.63	DLC6.1_D300deg_V48.5_Hs8.88_T11.6
ML6	5,742	0.67	5,275	0.61	DLC6.1_D330deg_V48.5_Hs8.88_T10.1
ML7	2,781	0.32	2,052	0.24	DLC6.1_D120deg_V48.5_Hs9.02_T10.2
ML8	3,596	0.42	2,932	0.34	DLC6.1_D120deg_V48.5_Hs9.02_T10.2
ML9	4,709	0.55	4,155	0.48	DLC6.1_D120deg_V48.5_Hs9.02_T10.2

#### (2) Step 2 : 非損傷時 (波、風ミスアライメント)

最大張力の解析結果の例を表 5.4-6 に示す。UF (最大張力/許容張力)  $\leq 1$  であることを確認する。

表 5.4-6 Step 2 の最大張力の例<sup>12</sup>

ライン No.	浮体係留点		アンカー点		荷重ケース
	最大張力 (kN)	UF	最大張力 (kN)	UF	
ML1	8,244	0.96	7,810	0.91	DLC6.1_Dwind150_Dwave160_V48.5_Hs9.8_T10.6
ML2	7,464	0.87	6,973	0.81	DLC6.1_Dwind180_Dwave180_V48.5_Hs9.8_T10.6
ML3	8,117	0.94	7,650	0.89	DLC6.1_Dwind180_Dwave200_V48.5_Hs9.8_T10.6
ML4	1,234	0.14	678	0.08	DLC6.1_Dwind180_Dwave210_V48.5_Hs8.0_T9.6
ML5	1,081	0.13	668	0.08	DLC6.1_Dwind180_Dwave210_V48.5_Hs8.0_T9.6
ML6	959	0.11	700	0.08	DLC6.1_Dwind180_Dwave210_V48.5_Hs8.0_T9.6
ML7	2,562	0.30	1,830	0.21	DLC6.1_Dwind150_Dwave120_V48.5_Hs9.02_T10.2
ML8	3,343	0.39	2,652	0.31	DLC6.1_Dwind150_Dwave120_V48.5_Hs9.02_T10.2
ML9	4,341	0.50	3,756	0.44	DLC6.1_Dwind150_Dwave120_V48.5_Hs9.02_T10.2

(3) Step 3：単一索破断時（破断後の平衡状態）

最大張力の解析結果の例を表 5.4-7、表 5.4-8 に示す。UF（最大張力／許容張力） $\leq 1$  であること、最大張力が破断荷重を下回ることを確認する。

表 5.4-7 Step 3（単一索破断時：再現期間 1 年）の最大張力の例<sup>12</sup>

ライン No.	破断索	浮体係留点		アンカー点		荷重ケース
		最大張力 (kN)	UF	最大張力 (kN)	UF	
ML1	ML2	3,635	0.32	2,986	0.26	Dwind150 Dwave160 V38.8 Hs5.42 T7.9
ML2	ML1	3,415	0.30	2,703	0.24	Dwind170 Dwave180 V38.8 Hs5.42 T7.9

表 5.4-8 Step 3（単一索破断時：再現期間 50 年）の最大張力の例<sup>12</sup>

ライン No.	破断索	浮体係留点		アンカー点		荷重ケース
		最大張力 (kN)	破断荷重 (kN)	最大張力 (kN)	破断荷重 (kN)	
ML1	ML2	11,820	14,358	11,536	14,358	Dwind150 Dwave160 V48.5 Hs9.8 T10.6
ML3	ML2	11,610	14,358	11,314	14,358	Dwind180 Dwave200 V48.5 Hs9.8 T10.6

(4) Step 4：単一索破断時の過渡状態

最大張力の解析結果の例を表 5.4-9 に示す。UF（最大張力／許容張力） $\leq 1$  であることを確認する。

表 5.4-9 Step 4（単一索破断時の過渡状態：再現期間 50 年）の最大張力の例<sup>12</sup>

荷重ケース	最大張力 (kN)								
	ML1	ML2	ML3	ML4	ML5	ML6	ML7	ML8	ML9
Dwind150_Dwave160_V48.5 Hs9.8 T10.6	10,282	破断	7,653	676	715	747	1,021	1,135	1,295
UF	0.75	—	0.56	0.05	0.05	0.05	0.07	0.08	0.09

4) 終局強度の評価

(1) チェーンの評価

最大張力の計算結果の例を表 5.4-10 に示す。UF（最大張力／許容張力） $\leq 1$  であることを確認する。

表 5.4-10 最大張力の計算結果の例<sup>12</sup>

状態	最大張力 (kN)	許容張力 (kN)	UF
非損傷時	8,244	8,598	0.96
単一索破断状態（再現期間 1 年）	3,635	11,486	0.32
単一索破断時の過渡状態（再現期間 50 年）	10,282	13,675	0.75

(2) アンカーの評価

① 水平保持力

アンカー点最大荷重に表 5.4-11、表 5.4-12 に示す安全率を考慮した必要保持力がアンカー保持力を下回ることを確認する。アンカー点最大荷重と水平保持力の例を表 5.4-13 に示す。

表 5.4-11 カテナリ係留およびトート係留の海底係留点の水平保持力に関する安全率<sup>4</sup>

非損傷時	1.50
単一索破断時極限状態	1.00

表 5.4-12 トート係留の海底係留点の鉛直保持力に関する安全率<sup>4</sup>

非損傷時	1.20
単一索破断時極限状態	1.00

表 5.4-13 アンカー点最大荷重と水平保持力の例<sup>12</sup>

状態	アンカー点最大荷重 (t)	安全率	必要水平保持力 (t)	アンカー水平保持力 (t)
非損傷時	796.4	1.5	1194.6	1,200
単一索破断時 (再現期間 1 年)	304.5	1.0	304.5	1,200

② アップリフト

地鎖余長はアンカー点張力を浮体係留点に水平荷重として与えてカテナリー計算により求める。全てのラインで地鎖余長が残っており、アップリフトが発生しないことを確認する。非損傷時および単一索破断時のアンカー点での最大張力および地鎖余長の例を表 5.4-14 に示す。

表 5.4-14 アンカー最大荷重と地鎖余長の例<sup>12</sup>

ライン No.	アンカー点最大張力 (kN)	地鎖余長 (m)
ML1	7,810	3
ML2	6,973	32
ML3	7,650	8
ML4	5,785	74
ML5	5,415	90
ML6	5,275	95
ML7	2,052	268
ML8	2,932	215
ML9	4,155	153

## 5.4.2 疲労強度の検討

### 1) 解析条件および荷重ケース

解析条件および荷重ケースを設定する。設定例を以下に示す。

【解析条件および荷重ケースの設定例】

- ・使用モデル：連成解析モデル（浮体：剛体モデル、係留：動的応答）
- ・波浪条件：波浪推算で得られた発生頻度分布
- ・風条件：最大スラスト風速  $V_{hub}=12.8\text{m/s}$ （全ケース一律の風速、波と同一方向と仮定）
- ・流速：50年最大流速  $1.04\text{m/s}$ （全ケース一律の流速、波と同一方向と仮定）
- ・解析時間：600s/1 ケース

### 2) 検討方法

検討方法を以下に示す。

- ①各荷重ケースに対して連成解析により時刻歴解析を行い、係留チェーン張力振幅 $\Delta T$ を算出
- ②レインフロー法により各ケースの張力振幅の発生回数をカウント
- ③チェーンの応力振幅 $\Delta\sigma_j$  は、NK ガイドライン<sup>4</sup>の腐食摩耗量の最大値  $0.4\text{mm/年}$  ( $8\text{mm/20年}$ ) を考慮した Net 径  $d=124\text{mm}$  から算出（全ケースに適用）

$$\Delta\sigma = \frac{\Delta T}{(2\pi d^2/4)} \quad \text{式 5.4-2}$$

ここで、

- $\Delta\sigma$  : チェーンの応力振幅
- $\Delta T$  : 係留チェーン張力振幅
- $d$  : Net 径 (mm)

- ④累積疲労被害度を DNVGL-OS-E301<sup>39</sup>の S-N 線図（図 5.4-6）を用い、マイナー則に基づき算出

$$D = \sum_{i=1}^n N_i \cdot d_i \quad \text{式 5.4-3}$$

$$d_i = \sum_{j=1}^p d_{i,j} \quad \left[ d_{i,j} = \frac{n_{i,j}}{N_{c,j}} = \frac{n_{i,j}}{a_D \cdot (\Delta\sigma_j)^{-m}} \right] \quad \text{式 5.4-4}$$

ここで、

- $D$  : 累積疲労被害度
- $N_i$  : 海象ケース  $i$  の 20 年間の発生回数
- $d_i$  : 海象ケース  $i$  による疲労被害度
- $d_{i,j}$  : 海象ケース  $i$  における  $j$  番目の応力振幅ブロックによる疲労被害度
- $n_{i,j}$  : 海象ケース  $i$  における  $j$  番目の応力振幅ブロック  $\Delta\sigma_j$  の発生回数

- $N_{C,j}$  : 応力振幅 $\Delta\sigma_j$ により疲労破壊に至るまでの応力振幅 $\Delta\sigma_j$ の発生回数
- $a_D$  :  $6.0 \times 10^{10}$  (スタッドレスチェーンの場合)
- $m$  : 3.0 (スタッドレスチェーンの場合)

NK ガイドライン<sup>4</sup>に従い安全率 3 を考慮 ;  $3 \times D$ の値が 1 を超えないことを確認する。

⑤疲労強度の判定

安全率 3 を考慮し、疲労に対する安全性を評価する。(  $3 \times D$ の値が 1 を超えないことを確認する。)

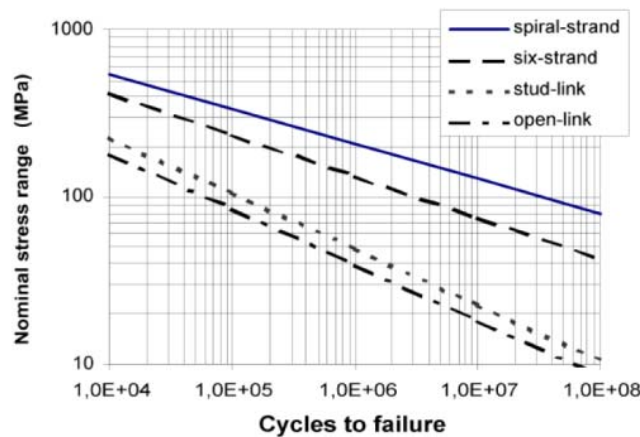


図 5.4-6 S-N 曲線 (DNV-GL OS E301)<sup>39</sup>

3) 解析結果

係留ラインの累積疲労被害度および疲労寿命算定結果の例を図 5.4-7 および表 5.4-15 に示す。疲労寿命が 20 年以上となることを確認する。

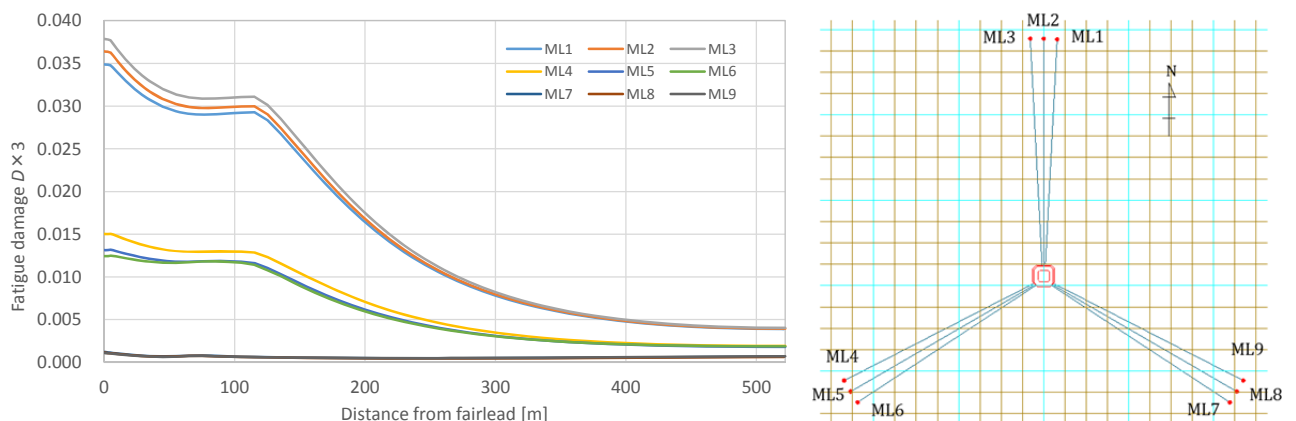


図 5.4-7 各ラインの疲労被害度  $D \times 3$  の例<sup>12</sup>

表 5.4-15 累積疲労被害度および疲労寿命の算定結果の例<sup>12</sup>

	ML1	ML2	ML3	ML4	ML5	ML6	ML7	ML8	ML9
累積疲労被害度 3×D(≦1)	0.0349	0.0364	0.0379	0.0150	0.0132	0.0125	0.0012	0.0011	0.0011
疲労寿命 (≧20年)	573	549	528	1,329	1,518	1,600	16,429	17,480	18,059

※表中の累積疲労被害度および疲労寿命はNKガイドラインの安全率3を考慮した値

浅海域係留の場合には、極値波浪条件において大きな張力変動が生じ、それが累積疲労被害度に大きな影響を及ぼすことが考えられる。そこで、疲労被害度が大きい係留ラインについて、再現期間1年、10年、30年、50年最大波における張力振幅を算出し、極値波浪条件が累積疲労被害度に与える影響を評価する。

DNVGL-RP-C203<sup>38</sup>にワイブル分布を用いて疲労被害度を評価する手法が示されている。

$$Q(\Delta\sigma) = \exp\left[-\left(\frac{\Delta\sigma}{q}\right)^h\right] \quad \text{式 5.4-5}$$

$$q = \frac{\Delta\sigma_0}{(\ln n_0)^{1/h}} \quad \text{式 5.4-6}$$

ここで、

- $Q(\Delta\sigma)$  : 応力振幅 $\Delta\sigma$ の超過確率
- $h$  : ワイブル形状パラメータ
- $q$  : ワイブル尺度パラメータ
- $\Delta\sigma_0$  :  $n_0$ 回に1回の割合で発生する最大応力振幅
- $n_0$  : 応力振幅 $\Delta\sigma_0$ の発生回数
- $h$  : ワイブル形状パラメータ

式 5.4-5 を、長期分布から得られた応力振幅の発生頻度および極値波浪時の最大応力振幅に当てはめ、累積疲労被害度を再検討する。具体的には、

- ・50年最大の応力振幅が50年に1回(20年間に20/50=0.4回)発生するとして尺度パラメータを設定
- ・長期分布から求められた応力振幅-発生頻度曲線(図 5.3-8の赤線)、1年、10年、30年の最大応力振幅を下回らないよう形状パラメータを設定

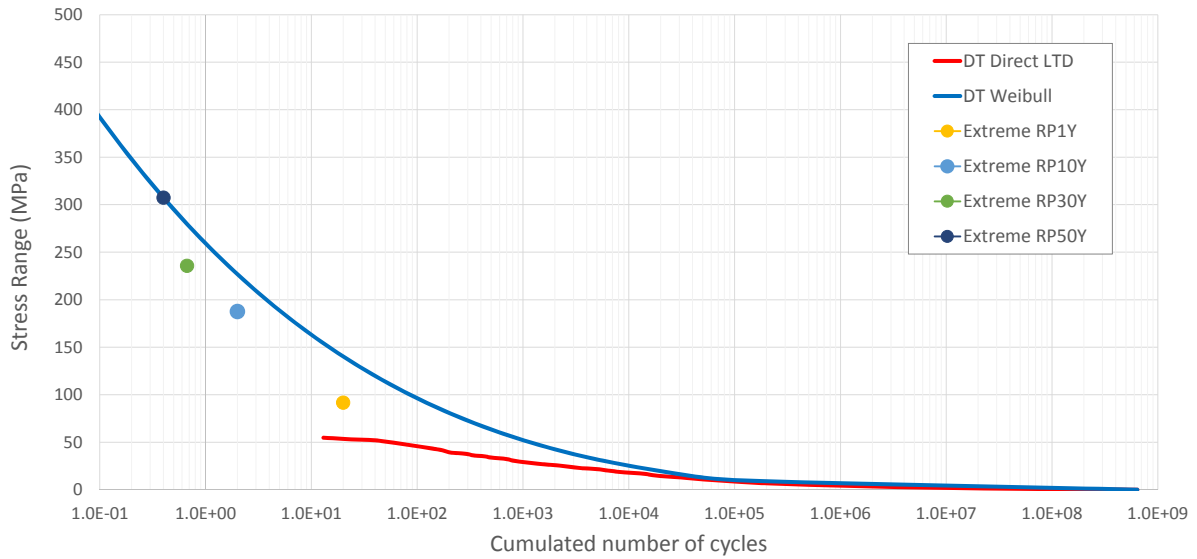


図 5.4-8 ワイブル分布によるチェーン応力振幅の発生頻度の評価の例<sup>12</sup>

ワイブル分布により算定した累積疲労被害度および疲労寿命の例を表 5.4-16 に示す。疲労寿命が 20 年以上となることを確認する。

表 5.4-16 極値波浪条件を考慮したチェーンの疲労被害度および疲労寿命の例<sup>12</sup>

	応力振幅総数	50 年最大応力振幅 [M Pa]	形状パラ メータ h	累積疲労被害度 $D_r \times 3 (\leq 1)$	疲労寿命(年) ( $\geq 20$ 年)
ML1	6.297E+08	307.1	0.26	0.0708	282
ML2	6.412E+08	308.2	0.26	0.0722	277
ML3	6.399E+08	307.3	0.26	0.0715	280

※表中の累積疲労被害度および疲労寿命は NK ガイドラインの安全率 3 を考慮した値

## 第Ⅲ編 評価事例

### 1. 評価事例の概要

---

第Ⅱ編の実施設計の評価事例として、北九州市響灘沖合の水深 50m 程度の浅海域に浮体式洋上風力発電施設を設置して稼働させる実証研究に関するフェージビリティスタディの成果である「次世代浮体式洋上風力発電システム実証研究（バージ型）FS 報告書」<sup>12</sup>の設計事例を以降に示す。なお、第Ⅱ編の実施設計の評価方法以外についても必要に応じて検討を加えているため、併せて紹介する。



## 2. 環境条件の評価事例

### 2.1 風条件の設定

#### 2.1.1 極値風況の評価

極値風況の評価は、第Ⅱ編 2.1.2 項に基づいて行う。

##### 1) 設計に用いる 50 年再現期待値の算出

###### (1) 建築基準法に基づく方法

ハブ高さにおける再現期間 50 年の 10 分間平均風速を建築基準法に基づき、式 2.1-1 で算出する。

$$V_{ref} = V_0 \times 1.7 \times (Z_{hub}/Z_G)^\alpha \quad \text{式 2.1-1}$$

ここで、

$V_{ref}$  : ハブ高さにおける再現期間 50 年の 10 分間平均風速 (m/s)

$V_0$  : 地域ごとに設定される基準風速 (北九州市の場合 34m/s)

$Z_{hub}$  : ハブ高さ (=72m) ; 土木学会指針では、 $H_h$  (m)

$Z_G, \alpha$  : 地表面粗度区分に応じた係数 (ここでは、粗度区分 I 「極めて平坦で障害物がな  
いものとして特定行政庁が規則で定める区域」(第Ⅱ編の表 2.1-2~表 2.1-3 参照)  
を採用し  $Z_G=250\text{m}$ 、 $\alpha=0.1$  とする。)

従って、ハブ高さにおける再現期間 50 年の 10 分間平均風速は次のようになる。

$$V_{ref}=V_0 \times 1.7 \times (Z_{hub}/Z_G)^\alpha = 34.0 \times 1.7 \times (72/250)^{0.1} = 51.0 \text{ (m/s)}$$

###### (2) 台風シミュレーションに基づく方法

台風シミュレーションにより台風と季節風の合成気候における風速の発生頻度、極値風速(50年再現期待値)を求めた。また、季節風、台風および合成の年最大風速の非超過確率分布と 50年確率風速を図 2.1-1 に示す。合成気候における風速の 50 年再現期待値は次の通りである。

$$V_{ref}=47.0 \text{ (m/s)} \quad (Z_{hub}=72\text{m}; \text{ 照査対象風向 } 249\text{deg})$$

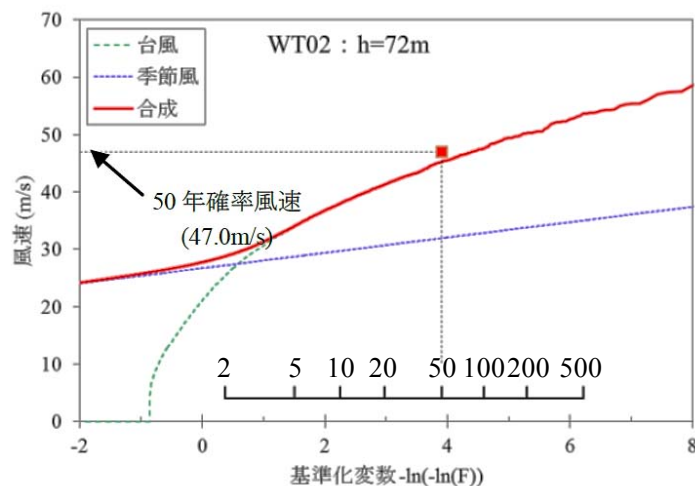


図 2.1-1 年最大風速の非超過確率分布および 50 年再現期待値

### (3) 気象庁 GPV データ

気象庁提供の GPV データを用いて各種統計値を求める。なお、GPV データは高度 10m での風速を表しており、上空での風速に換算するには各種観測値等から適したべき指数等を用いた補正が必要であり、付近の観測データ等より類推する。

風速の再現期待値を表 2.1-1 に示す。ここでは、べき指数 0.10 を用いて求めたハブ高さ 72m の風速も併せて示す。

表 2.1-1 気象庁 GPV データから得られた再現期待値 (m/s)

再現期間	高度 10m	高度 72m
50 年	29.0	35.3
5 年	23.1	28.6
1 年	18.6	20.5

### (4) 設計に用いる 50 年再現期待値の選定

「気象庁 GPV データ」、「建築基準法」および「台風シミュレーション」によるハブ高さにおける 10 分間平均風速の 50 年再現期待値を表 2.1-2 に整理する。設計には最も安全側となる「建築基準法」による風速を採用するものとする。

表 2.1-2 風速の 50 年再現期待値の比較

	Zhub = 72m
建築基準法	51.0 m/s (採用)
台風シミュレーション	47.0 m/s
気象庁 GPV データ	35.3 m/s

## 2) 乱流強度

台風シミュレーションによる風向 247.5deg の乱流強度、JIS C 1400-1<sup>5</sup>に示されている乱流強度を表 2.1-3 に示す。その結果、台風シミュレーションで求めた乱流強度のほうが大きくなっている。設計に用いる乱流強度は余裕を加えて  $I_{h1}=0.125$  とする。また、乱流強度の 1 時間値は、浮体式洋上風力発電設備に関するガイドライン (2012)<sup>4</sup>に従い、式 2.1-2 で求める。

$$I_{h1,1-hour} = I_{h1} + 0.2/V_{hub} \quad \text{式 2.1-2}$$

ここで、

- $I_{h1,1-hour}$  : 乱流強度の 1 時間値
- $I_{h1}$  : ハブ高さでの乱流強度
- $V_{hub}$  : ハブ高さにおける 10 分間平均風速

表 2.1-3 乱流強度

台風シミュレーション (風向247.5deg)	JIS C 1400-1
0.121	0.11

## 3) 設計に用いる 1 年再現期待値の算出

10 分間平均風速の 1 年再現期待値は、JIS C 1400-1<sup>5</sup>に従い式 2.1-3 で算出する。

$$V_1(z) = 0.8V_{50}(z) \quad \text{式 2.1-3}$$

ここで、

- $V_1(z)$  : 10 分間平均風速の 1 年再現期待値 (m/s)
- $V_{50}(z)$  : 極値風速 (50 年再現期待値) (m/s)

従って、各ハブ高さでの 10 分間平均風速の 1 年再現期待値は次のようになる。

$$V_1 (Z_{hub}=72m) = 0.8 \times 51.0m/s = 40.8m/s$$

#### 4) べき指数

台風シミュレーションの結果を用いて風速分布のべき指数を定める。図 2.1-2 に、台風シミュレーションの風向 247.5deg の風速分布および  $\alpha=0.10$  より求めた風速分布を示す。台風シミュレーションと  $\alpha=0.10$  で求めた風速分布はよく一致しており、浮体式洋上風力発電設備に関するガイドライン（2012）<sup>4</sup>に記載の  $\alpha=0.11$  と近い値になっている。よって、 $\alpha=0.10$  とし、以下のように、建築基準法による上空風速に対して高度補正を行い、高度 10m における風速の再現期待値を算出する。

$$V_{50} (Z=10m) = 51.0 \times (10/72)^{0.10} = 41.9m/s$$

$$V_1 (Z=10m) = 40.8 \times (10/72)^{0.10} = 33.5m/s$$

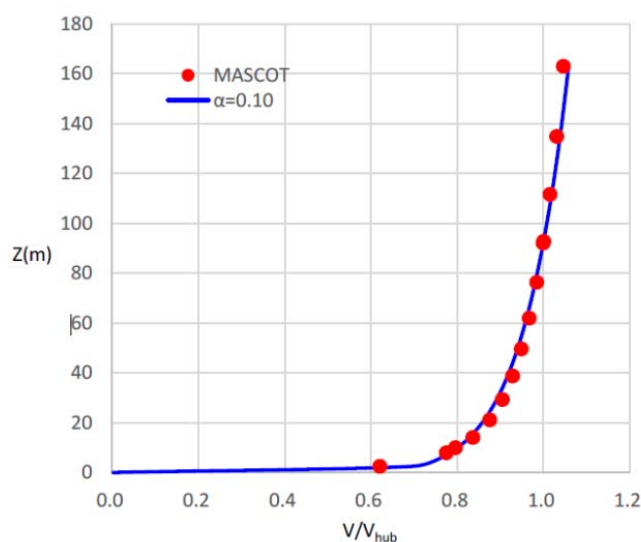


図 2.1-2 風速分布比較

### 2.1.2 通常風況の評価

通常風況の評価は、第Ⅱ編 2.1.3 項に基づいて行う。

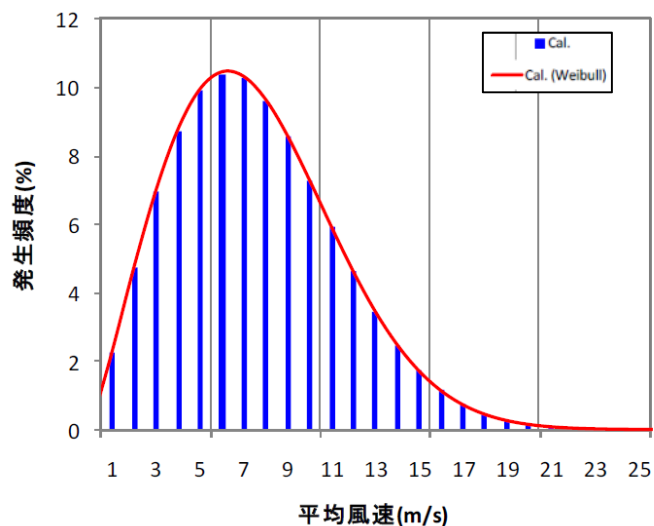
#### 1) 設計に用いる通常風況の算出

##### (1) 風況解析

MASCOT offshore より得られた各ハブ高さの 20 年間の風速階級別作用時間から風速階級別頻度分布図を作成した（図 2.1-3）。図 2.1-3 にはワイブル分布関数（赤の曲線）も併せて表示している。風速階級別頻度分布より、階級値と頻度を用いて平均風速を算出した結果を以下に示す。高度 10m についても風速階級別作用時間が得られており、ハブ高さと同様の方法で平均風速を算出した。

【年平均風速】  $V_{ave} (Z=10m) = 6.46m/s$ 、 $V_{ave} (Z_{hub}=72m) = 7.58m/s$

また、20 年間の風速階級別作用時間を図 2.1-4 に示す。



(ワイブル係数 ;  $C=8.50\text{m/s}$ 、 $k=2.11$ )

図 2.1-3 MASCOT offshore より求めた風速階級別頻度分布

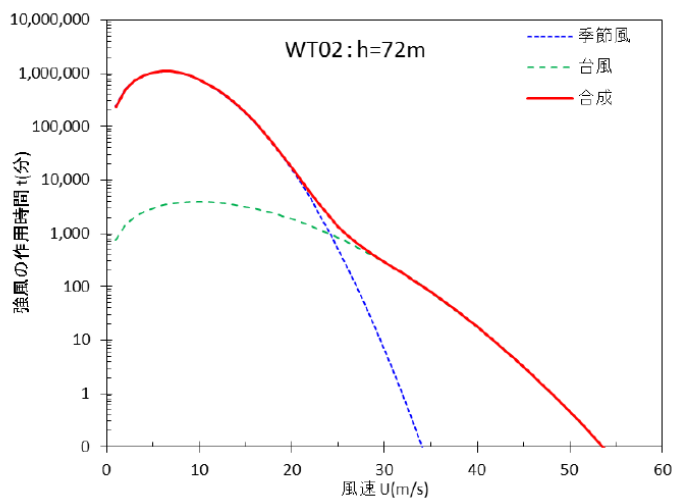


図 2.1-4 風速階級別作用時間

## (2) 気象庁 GPV データ

GPV データの地上風（高度 10m）を用いて、風速の発生頻度分布を求めた。期間 2007～2014 年度の 1 時間毎の平均風速（高度 10m）の時系列データについてべき指数を用いて高度補正を行い、ハブ高さにおける平均風速の時系列データを作成した。

平成 26 年度洋上風況観測システム実証研究進捗報告<sup>40</sup>では、当該海域で観測塔による風況観測の報告が行われている。風況観測報告の対象期間は 2012 年 10 月～2014 年 6 月で、観測された風速から得られたべき指数の情報が示されている。図 2.1-5 のように風向が海からの風と、陸からの風に分けてべき指数が求められており、海からの風  $\alpha=0.073$ 、陸からの風  $\alpha=0.136$ 、全体  $\alpha=0.101$  となっている。

観測塔設置位置は陸から 1.4km で陸からの地形影響を受けると考えられるが、本実証試験の設置海域は沖合い 17km で陸からの影響は小さく、海からの風の観測値より  $\alpha=0.08$  程度が実際の風況に近いと考えられる。ただし、構造設計においては、浮体式洋上風力発電設備に関するガイドラインに従い、安全側となる通常風条件における標準値 0.14 を採用することとする。

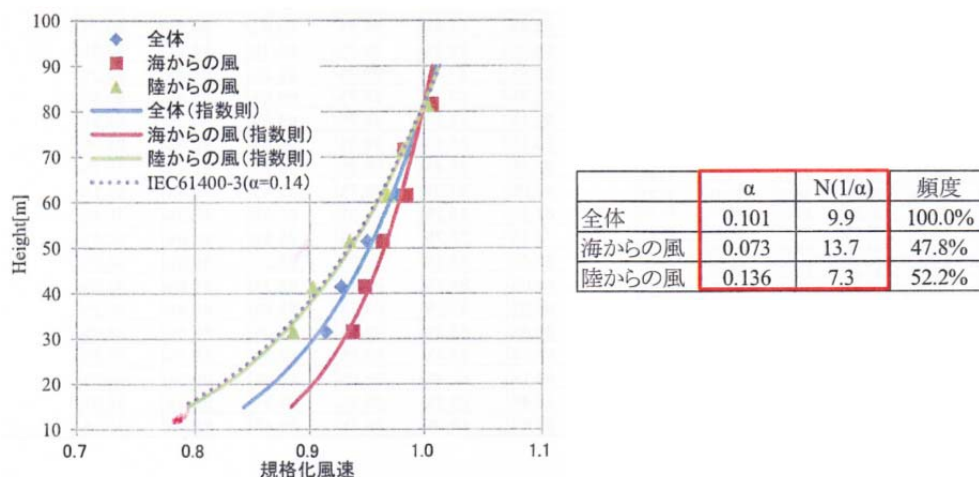
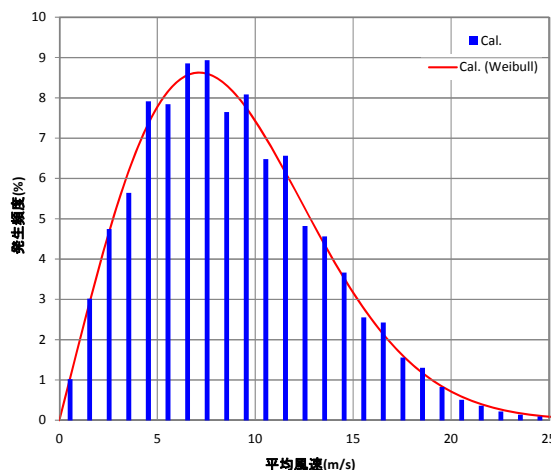


図 2.1-5 風速の鉛直方向分布<sup>40</sup>

時系列データから求めたハブ高さの風速階級別頻度分布およびワイブル係数を図 2.1-6 に示す。また、高度 10m およびハブ高さの風速時系列データの平均値を以下に示す。

【年平均風速】  $V_{ave} (Z=10m) = 6.71m/s$ 、 $V_{ave} (Z_{hub}=72m) = 8.85m/s$



(ワイブル係数 ; C=10.01m/s、k=2.02)

図 2.1-6 気象庁 GPV データより求めた風速階級別頻度分布

### (3) 強度設計に用いる風速データ

「MASCOT offshore」および「気象庁 GPV データ」により求めた年平均風速を表 2.1-4 に示す。風速を比較すると、GPV データによる風速の方がやや大きめの値になっているが、両者の高さ方向の風速比はほぼ等しい。設計には安全側となる「気象庁 GPV データ」による風速階級別頻度分布を採用する。

表 2.1-4 年平均風速の比較 (括弧内は $V_z=10m$  との風速比)

対象としたデータ	Z=10m	Z <sub>hub</sub> =72m
気象庁GPV データ	<u>6.71 m/s</u> (1.00)	<u>8.85 m/s</u> (1.32)
MASCOT offshore	6.46 m/s (1.00)	7.58 m/s (1.17)

## 2) 乱流強度

平成 26 年度洋上風況観測システム実証研究進捗報告<sup>40</sup>には、高度 81.6m に設置されている風速計の観測結果から得られた乱れの情報が示されている。観測された風速と乱流強度の関係は図 2.1-7 の通りで、併せて各風速階級の乱流強度の 90%分位値が示されている。また、JIS C 1400-1<sup>5</sup>には、標準風車カテゴリに対する乱流強度の 90%分位値を与える式 2.1-4 が示されており、図 2.1-7 には式 2.1-4 で得られる風車カテゴリ A、B、C の乱流強度の 90%分位値も表示されている。

$$I_{90\%} = I_{ref}(0.75V_{hub} + b)/V_{hub}, b = 5.6m/s \quad \text{式 2.1-4}$$

ここで、

$I_{90\%}$  : 乱流強度の 90%分位値

$I_{ref}$  : 基準乱流強度 (風車カテゴリ A、B、C でそれぞれ 0.16、0.14、0.12)

$V_{hub}$  : ハブ高さの風速 (m/s)

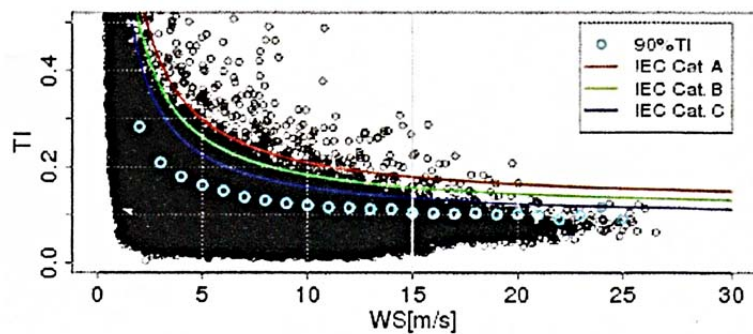


図 2.1-7 風速と乱流強度の関係<sup>40</sup>

図 2.1-7 より、観測された乱流強度の 90%分位値は、全風速階級において、式 2.1-4 で得られる風車カテゴリ C の乱流強度の 90%分位値を下回っていることが分かる。よって、設計に用いる基準乱流強度は風車カテゴリ C の  $I_{ref}=0.12$  とし、乱流強度の 90%分位値は式 2.1-4 で与えるものとする。



## 2.2 海象条件の設定

### 2.2.1 極値波浪の評価

極値波浪の評価は、第Ⅱ編 2.2.2 項に基づいて行う。

#### 1) 波浪推算による評価

今回入手した波浪推算データは以下の通りである。

- ・推算期間 2001年1月~2014年12月
- ・推算地点 (図 2.2-1)
  - i) 設置海域：北緯 34 度 6 分、東経 130 度 40 分
  - ii) 沿岸—設置海域中間点付近：北緯 34 度 0 分、東経 130 度 36 分
  - iii) ナウファス玄界灘観測点近傍：北緯 33 度 56 分、東経 130 度 28 分

推算手法の概要を以下に示す。

第3世代波浪モデル WAM (Cycle4) を用いて計算した「日本沿岸局地波浪推算データベース」を日本気象協会が保有しており、これから対象海域の波浪等のデータを抽出し入手した。推算は、表 2.2-1、図 2.2-1 に示す通り、広領域から狭領域までの境界データ (図 2.2-1 の青枠部分) を引き継ぐ形で、ネスティング計算により、当該海域の海象を推定している。これにより、毎時の有義波高、有義波周期、波向が提供される。

波浪推算データの計算メッシュと今回の推算点を図 2.2-2 に示す。

表 2.2-1 日本沿岸局地波浪推算データベース概要

領域	第1領域	第2領域	第3領域	第4領域
計算領域	N11.0~58.4 E117.0~261.0	N22.4~47.6 E120.0~150.0	4領域	22領域
空間間隔	36' (約60km)	12' (約20km)	6' (約10km)	2' (約3.7km)
出力要素 時間間隔	有義波高、有義波周期、波向 (平均波向) 風向、風速 (海面上10m高度, 10分平均値)			
入力風データ	NCEP	気象庁 GPV (毎時大気解析値、MSM、RMS)		
海上風 空間間隔	2.5°	東西 0.0625°、南北 0.05°		
海上風 時間間隔	6時間	毎時		

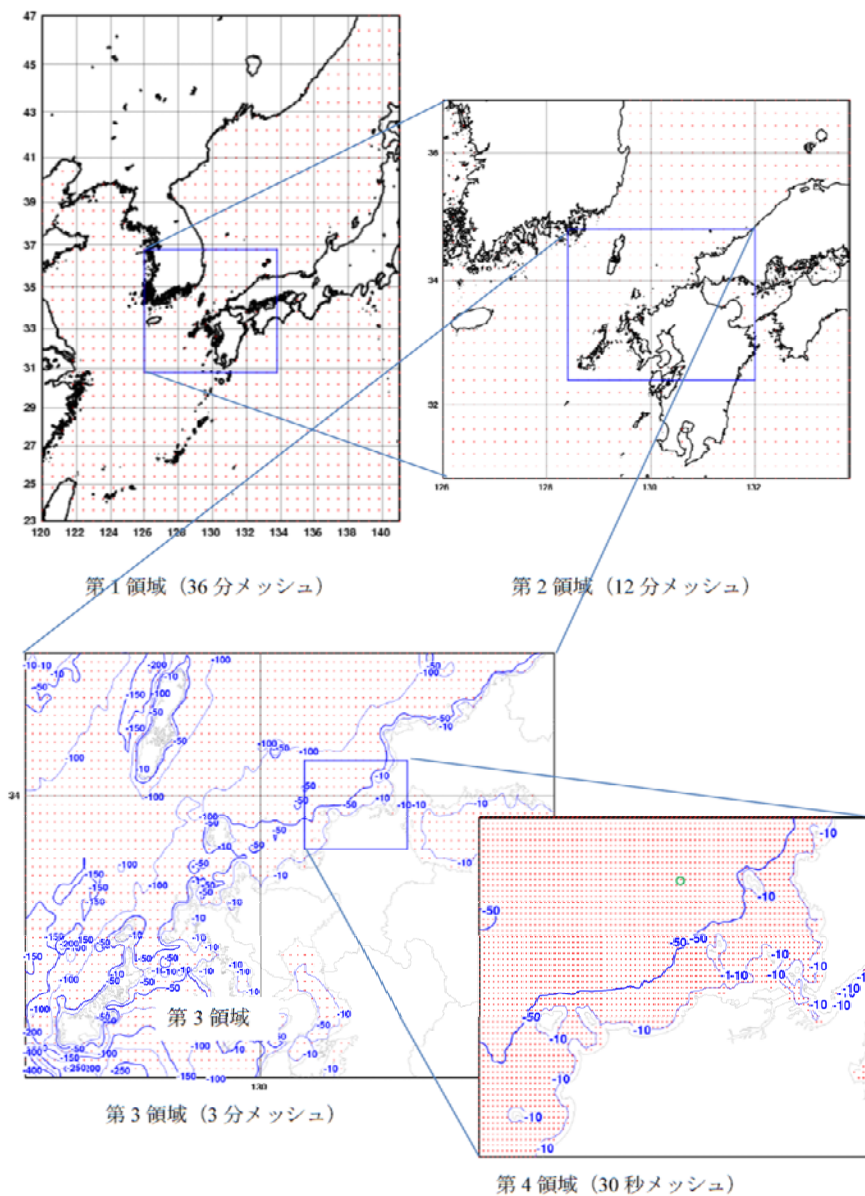


図 2.2-1 波浪解析における波浪推算領域とネスティング（図中の青線は等水深線）

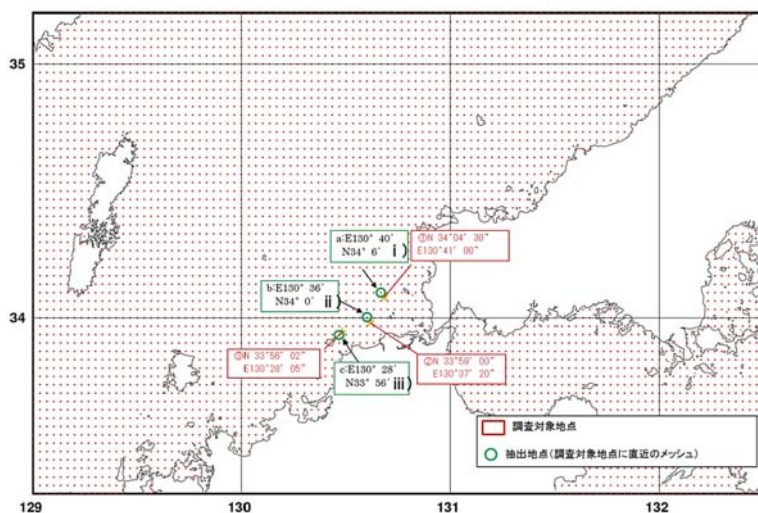


図 2.2-2 波浪推算データの計算メッシュと今回の推算点

推算結果確認のため、国土交通省港湾局配信のナウファス玄界灘観測値との比較を行った。図 2.2-3 に比較図の例を示す。推算値は、玄界灘至近にある第4領域の当該位置（北緯 33 度 56 分、東経 130 度 28 分）のデータを使用している。高波浪時の一例であるが良い一致を示し推算精度の高いことが分かる。

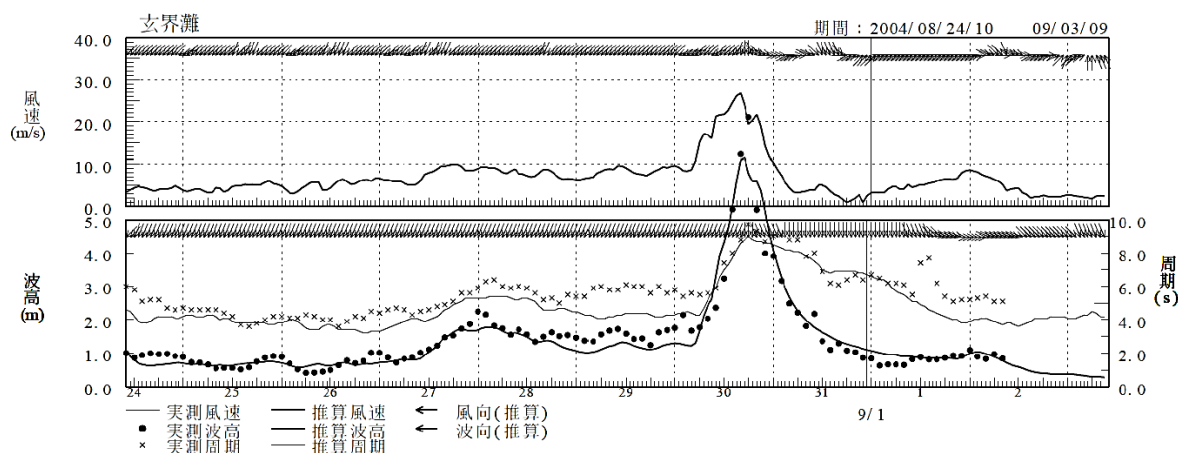


図 2.2-3 高波浪時の波浪解析による推算値と実測値（玄界灘）の経時変化図

観測および波浪推算により得られた長期統計値を基に再現期間毎の最大期待値を算出した。その結果を表 2.2-2 に示す。なお、推算結果においてナウファス既往最大波高生起時を比較した結果、推算値が下回る場合がある事が分かり、この部分は観測値を用いて補完した。

波高に関して沿岸からの距離の変化をみると、推算値間では若干沖合が高くなっているものの、観測値とほぼ同等の値を示している。また、周期に関しては推算値が観測値より低い値を示す傾向にある。推算はスペクトルの履歴を用いるが、直前のスペクトルの残差が影響する場合があります、それらが影響したものと考えられる。これらの差については、図 2.2-4 に示す周辺の観測データ、推算データを参照して設計条件に反映する事とした。

表 2.2-2 波浪推算値から求めた再現期待値

再現期間	i) 設置海域		ii) 中間地点		iii) 玄界灘推算値		iv) 玄界灘観測値	
	波高 m	周期 s	波高 m	周期 s	波高 m	周期 s	波高 m	周期 s
50 年	8.74	10.8	8.80	10.7	8.45	10.9	8.73	12.4
5 年	6.35	9.2	6.37	9.1	6.48	9.2	6.61	10.6
1 年	4.50	7.7	4.48	7.6	4.74	7.8	4.87	9.1



図 2.2-4 今回の波浪推算位置と拡大した周辺エリアの観測、推算データ地点<sup>41</sup>

## 2) 周辺エリアに拡大した観測データの調査

上述の波浪推算は想定海域に特定して波浪条件を詳細に調査したものであるが、より安全を期するため周辺海域に拡大して各種データを収集し、比較することとした。

設置海域付近の他の観測データとして、iv) ナウファス玄海灘観測点、v) ナウファス藍島観測点、vi) 白島石油備蓄基地観測点がある(図 2.2-4)。各地点での波浪観測の状況を以下に、再現期待値、観測最大値等を表 2.2-3 に示す。

iv) ナウファス玄界灘の波浪観測データは、1985 年～2012 年の 28 年間について年最大有義波高、対応周期等の値が公開されている。このデータを用いて、有義波高の期間再現期待値と対応周期を求めた。

v) ナウファス藍島の波浪観測データは、1980 年～2012 年の 33 年間について年最大有義波高、対応周期等の値が公開されている。このデータを用いて、有義波高の期間再現期待値と対応周期を求めた。

vi) 白島石油備蓄基地付近で 1989 年から 1993 年までの 5 年間、毎隔正時 20 分間の波浪観測が行われている。観測最大有義波高は 1991 年 9 月に観測された 5.96m、1 年再現期待値は 4.73m、20 年再現期待値は 6.10m である<sup>42</sup>。

表 2.2-3 観測データから求めた再現期待値、観測最大値

地点	50年再現期待値		1年再現期待値		観測最大値	
	有義波高	有義波周期	有義波高	有義波周期	有義波高	有義波周期
iv) ナウファス玄界灘	8.73m	12.4s	4.87m	9.1s	8.03m	9.7s
v) ナウファス藍島	5.46m	11.3s	3.12m	7.9s	5.61m	12.1s
vi) 白鳥石油備蓄基地	6.10m	11.5s	4.73m	10.6s	5.96m	11.1s

※白鳥石油備蓄基地のデータは50年再現期待値ではなく20年再現期待値を示している

### 3) 国土交通省九州地方整備局による推算値

国土交通省九州地方整備局により確率波高計算処理システムとして、1時間毎の波浪推算データに基づき、16方位毎に設計波高がまとめられている<sup>23</sup>。設置予定位置付近では、有義波高の50年再現期待値（16方位のうち最大値）として表2.2-4の値が示されている。

表 2.2-4 国土交通省九州地方整備局による設計波高

地点	50年再現期待値	
	有義波高	有義波周期
vii) WSTS.188	9.72m	13.6s
viii) WSTS.234	8.49m	12.9s
ix) WSTS.216	7.98m	12.0s
x) WSTS.277	9.28m	12.9s

### 4) 設計波高の設定

1)～3)の調査結果をまとめたものを表2.2-5に示す。有義波高の50年再現期待値について、国土交通省による設計波高vii)が最も高く9.72mである。よって、設計に用いる有義波高の50年再現期待値は9.8mとする。

浮体式洋上風力発電設備に関するガイドライン(2012)<sup>4</sup>において、DLC6.1のシミュレーション時間が1時間となっていることから、3時間有義波高から1時間有義波高に変換する係数(k2=1.09)が規定されている。

一方、表2.2-5の波浪推算および国土交通省の設計波は1時間毎の連続データから算出されたものであることから、50年再現期待値は9.8mを係数(k2=1.09)による変換後の1時間有義波高として扱うものとする。よって3時間有義波高の50年再現期待値は、1時間有義波高9.8mとk2より9.8m/1.09=8.99mと設定する。

有義波高の1年再現期待値について、値が得られているi)～iv)、vi)のうち最大はiv)ナウファス玄海灘の4.87mである。一方、50年再現期待値は、i)～iv)、vi)の最大値8.80mより大きな値9.8mを採用していることから、1年再現期待値についても50年再現期待値と同等の安全性を確保するよう値を割り増すものとする。1時間有義波高の1年再現期待値は、4.87m×9.8m/8.80m=5.42mとし、3時間有義波高の1年再現期待値を、5.42m/1.09=4.97mと設定する。

これらの検討結果から、設計に用いる極値有義波高は以下の通りとする。

【再現期間50年】3時間有義波高：8.99m

【再現期間1年】3時間有義波高：4.97m

表 2.2-5 各地点における有義波高の再現期待値の比較

地点		50年再現期待値		1年再現期待値		備考
		有義波高	有義波周期	有義波高	有義波周期	
波浪推算	i) 設置地点	8.74m	10.8s	4.50m	7.7s	2001～2014年の1時間毎連続データより算出 iv) ナウファス玄界灘観測地を用いて補正
	ii) 中間地点	8.80m	10.7s	4.48m	7.6s	
	iii) 玄界灘観測点	8.45m	10.9s	4.74m	7.8s	
観測値	iv) ナウファス玄界灘	8.73m	12.4s	4.87m	9.1s	1985～2012年の28年間のデータより算出
	v) ナウファス藍島	5.46m	11.3s	3.12m	7.9s	1980～2012年の33年間のデータより算出
	vi) 白鳥石油備蓄基地	6.10m <sup>※</sup>	11.5s	4.73m	10.6s	1989～1993年の5年間のデータより算出
国交省設計波	vii) WSTS.188	9.72m	13.6s	—	—	1958～1998年の1時間連続データより算出
	viii) WSTS.234	8.49m	12.9s	—	—	
	ix) WSTS.216	7.98m	12.0s	—	—	
	x) WSTS.277	9.28m	12.9s	—	—	

※白鳥石油備蓄基地のデータは50年再現期待値ではなく20年再現期待値を示している。

### 5) 有義波周期の設定

JIS C 1400-3 (2014) <sup>6</sup>では波高と併せて用いる波周期の範囲として式 2.2-1 が示されており、設計に用いる有義波周期は式 2.2-1 で得られる範囲を考慮する。

$$11.1\sqrt{H_s/g} \leq T \leq 14.3\sqrt{H_s/g} \quad \text{式 2.2-1}$$

ここで、

- $H_s$  : 有義波高 (m)
- $g$  : 重力加速度 ( $m/s^2$ )
- $T$  : 有義波周期 (s)

式 2.2-1 に従うと、考慮すべき有義波周期の範囲は以下のようになる。

- ・有義波高 8.99m (50年再現期待値)  $\Rightarrow T_{1/3}=10.6\sim 13.7s$
- ・有義波高 4.97m (1年再現期待値)  $\Rightarrow T_{1/3}=7.9\sim 10.2s$

## 2.2.2 通常波浪の評価

通常波浪の評価は、第Ⅱ編 2.2.3 項に基づいて行う。

### 1) 月別、季別、通年波浪発生頻度

設置海域を対象に、第3世代波浪モデルを用いた日本気象協会による波浪推算（期間 2001 年～2014 年）より得た季節毎および通年の波浪頻度分布を表 2.2-6～表 2.2-10 に、月別波高出現率を図 2.2-5 に示す。波高・周期別出現頻度は、累積疲労被害度の評価を行う際に考慮している。なお、波浪推算の手法は 2.2.1 項で示した通りである。有義波高、有義波周期の年平均値は以下の通りである。

【年平均有義波高】 0.95m 【年平均有義波周期】 5.5s

表 2.2-6 波高・周期別出現頻度分布（春季；3月～5月）

Hs(cm)	T(s)	0_3	3_4	4_5	5_6	6_7	7_8	8_9	9_10	10_11	11_12	12_13	13_14	14_15	15_	Sum.
701 - 800		0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
651 - 700		0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
601 - 650		0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
551 - 600		0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%
501 - 550		0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%
451 - 500		0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.04%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.05%
401 - 450		0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.01%	0.03%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.05%
351 - 400		0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.06%	0.14%	0.05%	0.02%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.28%
301 - 350		0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.21%	0.39%	0.07%	0.05%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.72%
251 - 300		0.00%	0.00%	0.00%	0.14%	0.81%	0.42%	0.11%	0.05%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	1.52%
201 - 250		0.00%	0.00%	0.02%	1.33%	1.72%	0.51%	0.21%	0.03%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	3.82%
176 - 200		0.00%	0.00%	0.13%	1.68%	1.15%	0.26%	0.20%	0.05%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	3.47%
151 - 175		0.00%	0.01%	0.61%	2.36%	1.37%	0.34%	0.11%	0.06%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	4.86%
126 - 150		0.00%	0.05%	1.45%	3.19%	1.79%	0.60%	0.16%	0.05%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	7.28%
101 - 125		0.00%	0.18%	3.07%	3.94%	1.88%	0.72%	0.19%	0.05%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	10.04%
76 - 100		0.00%	0.74%	5.81%	5.25%	2.53%	0.69%	0.31%	0.05%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	15.38%
51 - 75		0.11%	2.36%	8.27%	5.69%	1.77%	0.42%	0.11%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	18.73%
26 - 50		0.25%	5.29%	8.40%	4.11%	1.23%	0.22%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	19.51%
0 - 25		1.00%	5.81%	5.28%	1.88%	0.26%	0.05%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	14.28%
Sum.		1.36%	14.45%	33.04%	29.57%	14.80%	4.77%	1.59%	0.41%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%

表 2.2-7 波高・周期別出現頻度分布（夏季；6月～8月）

Hs(cm)	T(s)	0_3	3_4	4_5	5_6	6_7	7_8	8_9	9_10	10_11	11_12	12_13	13_14	14_15	15_	Sum.
701	- 800	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
651	- 700	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
601	- 650	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
551	- 600	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
501	- 550	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%
451	- 500	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.04%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.04%
401	- 450	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.03%	0.03%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.05%
351	- 400	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.03%	0.03%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.06%
301	- 350	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.03%	0.02%	0.01%	0.00%	0.02%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.09%
251	- 300	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.12%	0.05%	0.02%	0.01%	0.02%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.23%
201	- 250	0.00%	0.00%	0.00%	0.06%	0.21%	0.15%	0.09%	0.00%	0.03%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.55%
176	- 200	0.00%	0.00%	0.03%	0.28%	0.20%	0.15%	0.07%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.74%
151	- 175	0.00%	0.00%	0.09%	0.68%	0.32%	0.10%	0.11%	0.02%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	1.31%
126	- 150	0.00%	0.04%	0.49%	1.28%	0.52%	0.16%	0.11%	0.02%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	2.63%
101	- 125	0.00%	0.07%	1.82%	2.51%	0.85%	0.36%	0.19%	0.02%	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	5.83%
76	- 100	0.00%	0.40%	4.71%	3.84%	1.30%	0.43%	0.19%	0.01%	0.00%	0.01%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	10.90%
51	- 75	0.16%	2.12%	9.18%	5.70%	2.31%	0.39%	0.15%	0.01%	0.07%	0.03%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	20.14%
26	- 50	0.34%	6.85%	12.68%	9.14%	2.62%	0.67%	0.43%	0.12%	0.03%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	32.89%
0	- 25	0.82%	6.75%	11.46%	4.77%	0.64%	0.09%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	24.52%
Sum.		1.32%	16.25%	40.46%	28.27%	9.13%	2.61%	1.47%	0.23%	0.18%	0.05%	0.02%	0.00%	0.01%	0.00%	100.00%

表 2.2-8 波高・周期別出現頻度分布（秋季；9月～11月）

Hs(cm)	T(s)	0_3	3_4	4_5	5_6	6_7	7_8	8_9	9_10	10_11	11_12	12_13	13_14	14_15	15_	Sum.
701	- 800	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
651	- 700	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
601	- 650	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%
551	- 600	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.03%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.03%
501	- 550	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.04%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.06%
451	- 500	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.02%	0.04%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.08%
401	- 450	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.13%	0.07%	0.07%	0.06%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.33%
351	- 400	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.05%	0.22%	0.07%	0.04%	0.05%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.42%
301	- 350	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.36%	0.34%	0.09%	0.05%	0.03%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.87%
251	- 300	0.00%	0.00%	0.00%	0.13%	0.88%	0.59%	0.22%	0.05%	0.07%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	1.93%
201	- 250	0.00%	0.00%	0.03%	1.00%	1.66%	1.20%	0.34%	0.10%	0.04%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	4.37%
176	- 200	0.00%	0.00%	0.06%	1.34%	1.37%	0.72%	0.12%	0.09%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	3.70%
151	- 175	0.00%	0.00%	0.29%	2.01%	1.88%	0.86%	0.26%	0.08%	0.07%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	5.46%
126	- 150	0.00%	0.01%	0.86%	3.01%	2.30%	1.10%	0.38%	0.05%	0.05%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	7.75%
101	- 125	0.00%	0.09%	2.28%	4.23%	2.46%	1.32%	0.33%	0.01%	0.02%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	10.74%
76	- 100	0.00%	0.57%	4.95%	5.58%	3.41%	0.88%	0.21%	0.03%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	15.63%
51	- 75	0.03%	2.02%	6.77%	7.01%	3.07%	0.64%	0.17%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	19.73%
26	- 50	0.21%	3.58%	7.40%	5.99%	1.24%	0.62%	0.17%	0.02%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	19.23%
0	- 25	0.48%	2.88%	4.05%	1.61%	0.54%	0.09%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	9.64%
Sum.		0.72%	9.16%	26.69%	31.90%	19.21%	8.74%	2.54%	0.63%	0.39%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%



表 2.2-9 波高・周期別出現頻度分布（冬季；12月～2月）

Hs(cm)	T(s)	0_3	3_4	4_5	5_6	6_7	7_8	8_9	9_10	10_11	11_12	12_13	13_14	14_15	15_	Sum.
701	- 800	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
651	- 700	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
601	- 650	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
551	- 600	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%
501	- 550	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.02%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.02%
451	- 500	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.04%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.06%
401	- 450	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.18%	0.20%	0.03%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.41%
351	- 400	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.10%	0.67%	0.22%	0.05%	0.02%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	1.07%
301	- 350	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.83%	1.37%	0.26%	0.04%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	2.50%
251	- 300	0.00%	0.00%	0.00%	0.31%	3.18%	2.18%	0.37%	0.09%	0.03%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	6.16%
201	- 250	0.00%	0.00%	0.02%	2.26%	5.41%	2.40%	0.68%	0.21%	0.06%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	11.05%
176	- 200	0.00%	0.00%	0.17%	2.51%	3.19%	1.37%	0.57%	0.18%	0.04%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	8.03%
151	- 175	0.00%	0.01%	0.67%	3.67%	3.34%	1.54%	0.72%	0.12%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	10.08%
126	- 150	0.00%	0.02%	1.58%	4.46%	3.68%	2.13%	0.69%	0.04%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	12.59%
101	- 125	0.00%	0.08%	2.39%	5.44%	4.20%	1.87%	0.27%	0.02%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	14.26%
76	- 100	0.00%	0.25%	3.31%	5.91%	4.45%	1.14%	0.03%	0.02%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	15.11%
51	- 75	0.01%	0.56%	2.98%	5.00%	2.41%	0.41%	0.01%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	11.38%
26	- 50	0.01%	0.58%	1.97%	2.69%	0.64%	0.06%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	5.95%
0	- 25	0.06%	0.33%	0.52%	0.35%	0.85%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	1.30%
Sum.		0.07%	1.81%	13.62%	32.61%	31.50%	15.33%	4.07%	0.82%	0.16%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%

表 2.2-10 波高・周期別出現頻度表（通年）

Hs(cm)	T(s)	0_3	3_4	4_5	5_6	6_7	7_8	8_9	9_10	10_11	11_12	12_13	13_14	14_15	15_	Sum.
701	- 800	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
651	- 700	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
601	- 650	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
551	- 600	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%
501	- 550	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.02%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.03%
451	- 500	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.04%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.06%
401	- 450	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.08%	0.08%	0.02%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.21%
351	- 400	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.05%	0.27%	0.09%	0.03%	0.02%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.46%
301	- 350	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.36%	0.54%	0.11%	0.04%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	1.05%
251	- 300	0.00%	0.00%	0.00%	0.15%	1.25%	0.82%	0.18%	0.05%	0.03%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	2.48%
201	- 250	0.00%	0.00%	0.02%	1.18%	2.28%	1.07%	0.33%	0.09%	0.03%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	5.00%
176	- 200	0.00%	0.00%	0.10%	1.47%	1.49%	0.63%	0.24%	0.08%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	4.02%
151	- 175	0.00%	0.01%	0.42%	2.20%	1.74%	0.71%	0.30%	0.07%	0.02%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	5.47%
126	- 150	0.00%	0.03%	1.10%	3.00%	2.09%	1.00%	0.34%	0.04%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	7.61%
101	- 125	0.00%	0.11%	2.40%	4.05%	2.36%	1.07%	0.24%	0.02%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	10.27%
76	- 100	0.00%	0.49%	4.69%	5.16%	2.94%	0.79%	0.18%	0.03%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	14.28%
51	- 75	0.08%	1.76%	6.78%	5.84%	2.39%	0.46%	0.11%	0.01%	0.02%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	17.46%
26	- 50	0.20%	4.05%	7.57%	5.45%	1.43%	0.39%	0.15%	0.03%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	19.26%
0	- 25	0.58%	3.91%	5.28%	2.13%	0.37%	0.06%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	12.34%
Sum.		0.86%	10.34%	28.36%	30.63%	18.76%	7.89%	2.42%	0.52%	0.18%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%

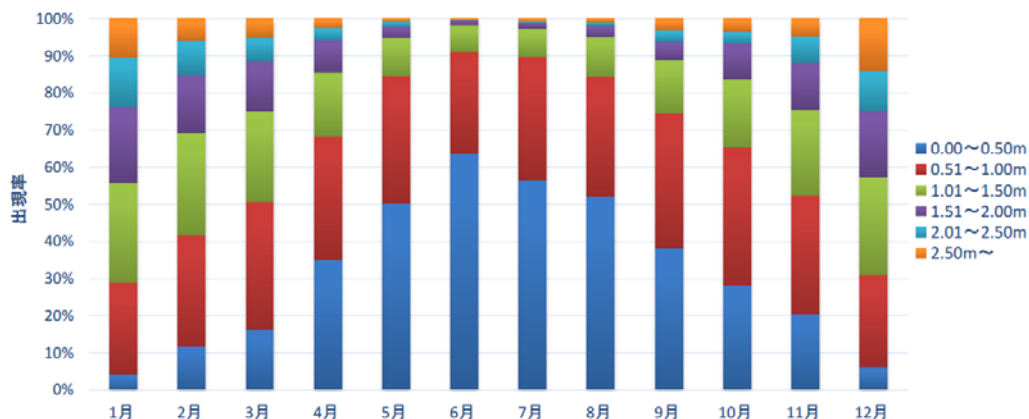


図 2.2-5 月別波高出現率

### 2.2.3 風と波の結合確率分布の評価

風と波の結合確率分布の評価は、第Ⅱ編 2.2.4 項に基づいて行う。

#### 1) 波高・波向き別発生頻度

波浪推算（期間 2001 年～2014 年）より得られた、波高・波向き別発生頻度を図 2.2-6 に示す。北から西よりの波浪が卓越していることが分かる。

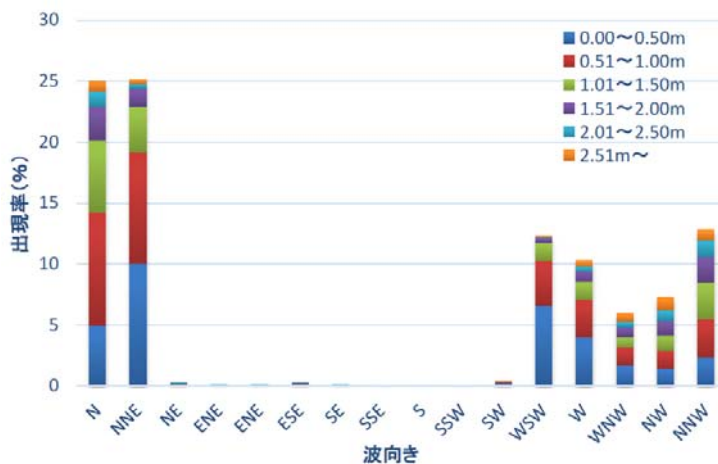


図 2.2-6 波高・波向き別発生頻度

#### 2) 風速と波高・波周期の関係

設置海域における気象庁 GPV データの海上風（高度 10m）と、波浪推算で得られた有義波の時系列データについて、両者の相関を調査した。2010～2014 年度の各月最大有義波高と同時刻の風速との関係を図 2.2-7 に示す。図 2.2-7 には SMB 法で得られる平均風速と有義波高の関係を併せて表示している。式 2.2-2 において、各月のデータと SMB 法による曲線との残差二乗和が最小となるよう吹送距離（F=200,000m）を設定している。

$$H_{1/3} = 0.3V^2/g \left[ 1 - \left\{ 1 + 0.004(200000g/V^2)^{1/2} \right\}^{-2} \right] \quad \text{式 2.2-2}$$

ここで、

- $H_{1/3}$  : 有義波高 (m)
- $V$  : 平均風速 (m/s)
- $g$  : 重力加速度 ( $m/s^2$ )

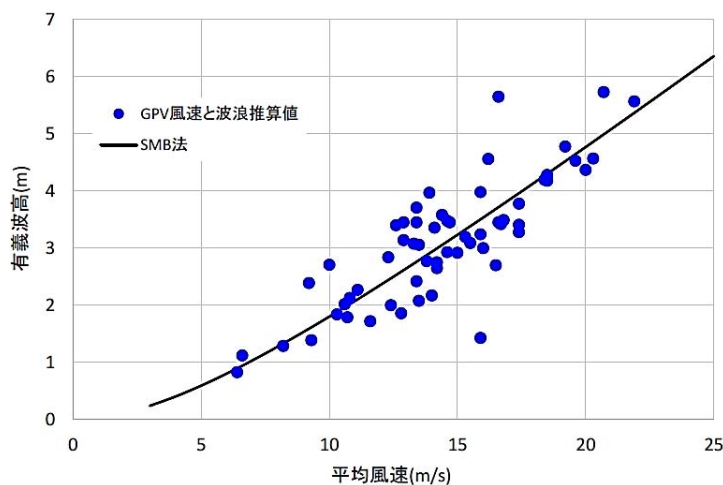


図 2.2-7 平均風速と有義波高の相関

次いで、平均風速と有義波周期の時系列データについて相関を調査した。2010～2014年度の各月の最大有義波高発生時の平均風速と有義波周期との相関を図 2.2-8 に示す。図 2.2-8 には SMB 法で得られる平均風速と有義波周期の関係式 2.2-3 を併せて表示している。各月のデータと SMB 法による曲線との残差二乗和が最小となる吹送距離は  $F=200,000m$  で、式 2.2-2 で与えた吹送距離と同じ値を用いている。

$$T_{1/3} = 1.37 \cdot 2\pi V/g \left[ 1 - \left\{ 1 + 0.008(200000g/V^2)^{1/3} \right\}^{-5} \right] \quad \text{式 2.2-3}$$

ここで、

- $T_{1/3}$  : 有義波周期 (s)
- $V$  : 平均風速 (m/s)
- $g$  : 重力加速度 ( $m/s^2$ )

通常風況に対応する有義波高と有義波周期は、SMB 法より求めるものとする。

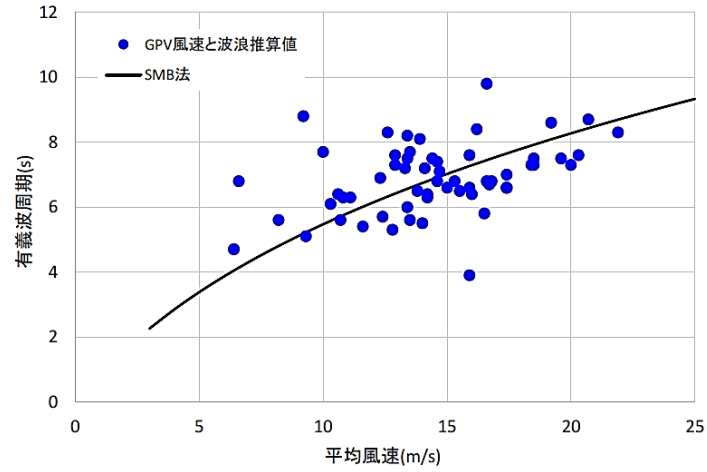


図 2.2-8 平均風速と有義波周期の相関

図 2.2-7、図 2.2-8 の相関図および近似式は疲労設計等に適用できるものであるが、使用に際してはデータのばらつきを十分考慮する必要がある。

## 2.2.4 海潮流条件の評価

海潮流条件の評価は、第Ⅱ編 2.2.5 項に基づいて行う。

### 1) 極値水流の設定

#### (1) JCOPE データによる海面流速の再現期待値

再現期待値の算出に、JCOPE-T データ（2011年1月1日～2014年12月31日の1時間毎の流向・流速の瞬時値）を用いた。JCOPE-T は、海流、潮汐流、吹送流の全てを含んだ流速データとなっている。月最大流速を用いて再現期待値の算出を行った。その結果を図 2.2-9 および表 2.2-11 に示す。

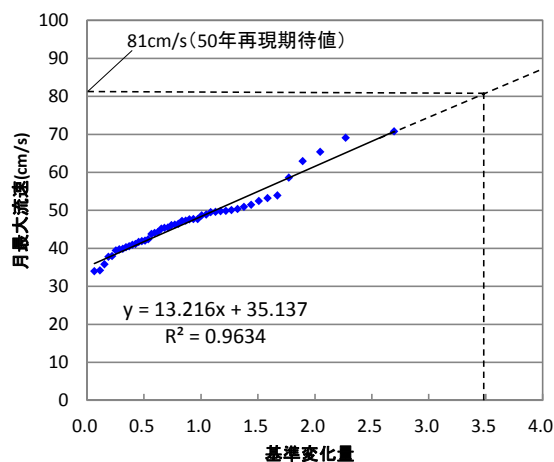


図 2.2-9 水流の極値統計解析結果（ワイブル;k=1.5）

表 2.2-11 JCOPE-T による水流の再現期待値（m/s）

使用データ	月最大値
50年再現期待値	0.81
5年再現期待値	0.69
2年再現期待値	0.64
1年再現期待値	0.59

#### (2) 各深度における流速および水中流の再現期待値の算出

浮体式洋上風力発電設備に関するガイドライン<sup>4</sup>に示されている、水中流、吹送流の鉛直プロファイルを用いて、高さ  $z$  の流速  $U(z)$  を式 2.2-4 のように与える。

$$U(z) = U_{ss}(0)[(z+d)/d]^{1/7} + U_w(0)(1+z/20) \quad \text{式 2.2-4}$$

ここで、

- $U(z)$  : 高さ  $z$  の流速 (m/s)
- $U_{ss}(0)$  : 水中流の海面流速 (m/s)
- $d$  : 水深 (m)
- $U_w(0)$  : 吹送流の海面流速 (m/s)

式 2.2-4 右辺第二項の吹送流は、流速が海面下 20m の深さでゼロとなる線形分布として表され、海面下 20m 以深は式 2.2-4 右辺第一項の水中流成分のみとなる。

JCOPE-T では、流速の鉛直方向の分布が求められている。そこで、海面下 20m における月最大流速データから流速の 50 年および 1 年再現期待値を算出した。これらを水中流のみの再現期待値とみなし、海面から海底までの水中流の分布を求めた（図 2.2-10 の点線）。この場合、海面における水中流  $U_{ss}(0)$  の 50 年再現期待値は 64cm/s、1 年再現期待値は 54cm/s である。

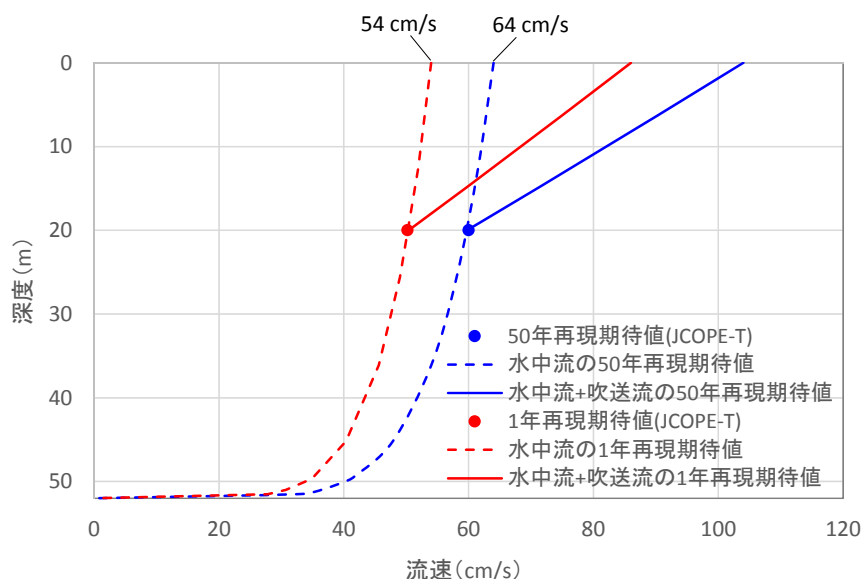


図 2.2-10 水流の極値統計解析結果

### (3) 設計に用いる極値水流の設定

水中流の再現期待値 ( $Z=0m$ ) は(2)で求めた、50 年再現期待値：64cm/s、1 年再現期待値：54cm/s を用いる。吹送流速 ( $Z=0m$ ) については、浮体式洋上風力発電設備に関するガイドラインに従い、高度 10m における風速から式 2.2-5 を用いて求める。

$$U_W(0) = 0.01 \times V_{1hour}(z = 10m) = 0.01 \times (0.95 \times V_{10min}(z = 10m)) \quad \text{式 2.2-5}$$

ここで、

$U_W(0)$  : 水中流の再現期待値 ( $Z=0m$ ) (m/s)

$V_{1hour}(z = 10m)$  : 高度 10m の 1 時間平均風速 (m/s)

$V_{10min}(z = 10m)$  : 高度 10m の 10 分間平均風速 (m/s)

設計に用いる極値水流 ( $Z=0m$ ) は、水中流と式 2.2-5 で求めた吹送流速の合計として以下のように設定し、鉛直プロファイルは式 2.2-4 に従い求めるものとする。

【再現期間 50 年 (Z=0m)】 0.64m/s (水中流) +0.40m/s (吹送流) =1.04m/s

【再現期間 1 年 (Z=0m)】 0.54m/s (水中流) +0.32m/s (吹送流) =0.86m/s

## 2) 年平均水流

2011 年 1 月 1 日～2014 年 12 月 31 日までの JCOPE-T (1 時間毎の流速の瞬時値) データを用いて、表層流速 (絶対値) の平均値および発生頻度分布を求めた。年平均流速は 0.17m/s で、流速の発生頻度分布は図 2.2-11 の通りである。

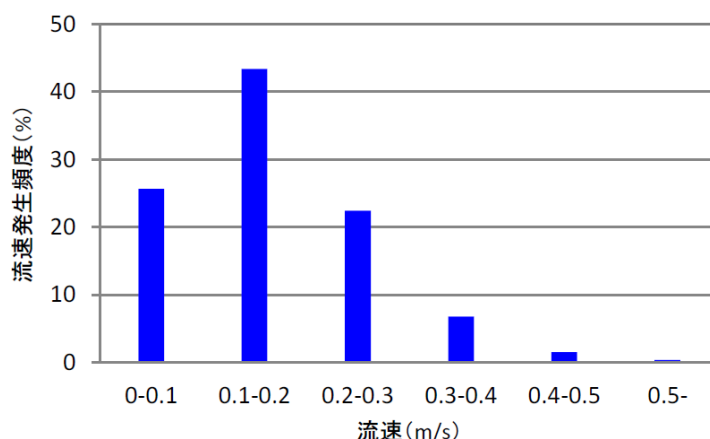


図 2.2-11 流速の発生頻度分布

## 3) 設計に用いる極値水流

以上の検討結果より、50 年再現期待値には JCOPE-T の月最大値から得られた 0.81m/s を、1 年再現期待値には関門港 (響航路) 潮流観測報告による観測最大値を用いるものとする。

【再現期間 50 年】 0.81m/s

【再現期間 1 年】 0.67m/s

【年平均流速】 0.17m/s

また、各深度における流速は、安全側となるように各深度の再現期待値流速が同時に同一方向に作用すると仮定し、②の検討結果より浮体式洋上風力発電設備に関するガイドライン (2012)<sup>4</sup> の指数法則 (1/7 乗則) を用いて流速を算出する。この流速には、水中流、吹送風の両方が含まれているものとする。

### 2.2.5 水位変化の評価

水位変化の評価は、第Ⅱ編 2.2.6 項に基づいて行う。

#### 1) 響灘験潮所の観測結果

響灘験潮所における潮位観測結果<sup>43</sup>として、下記数値が報告されている。設置予定位置と響灘験潮所の位置関係は、図 2.2-12 の通りである。

既往最高潮位 : +1.97m (S47.8.16)

朔望平均満潮位 (H.W.L) : +1.60m

平均潮位	: +0.80m
朔望平均干潮位 (L.W.L)	: +0.09m
既往最低潮位	: -0.61m (S59.2.18)



図 2.2-12 設置予定位置と響灘験潮所の位置関係<sup>41</sup>

## 2) 港湾基準による台風時高潮

港湾の施設の技術上の基準・同解説<sup>28</sup>に従い、台風時の潮位偏差の50年再現期待値を式 2.2-6 で求める。

$$\zeta = a(p_0 - p) + bV^2 \cos \theta + c \quad \text{式 2.2-6}$$

ここで、

- $\zeta$  : 潮位偏差
- $p_0$  : 基準気圧 (=1,010hPa)
- $p$  : 最低気圧 (hPa)
- $V$  : 10 分間平均風速 (m/s)
- $\theta$  : 主方向と最大風速  $V$  のなす角 (°)
- $a$  : 各地点の既往の観測結果から得られた定数
- $b$  : 各地点の既往の観測結果から得られた定数
- $c$  : 各地点の既往の観測結果から得られた定数

気圧低下量 ( $p_0 - p$ ) の50年再現期待値を、気象庁の観測結果<sup>44</sup>から算出する。設置海域に近い福岡、飯塚、下関の3点における1999年～2014年の年最低気圧データより、それぞれの地点における気圧低下量の50年再現期待値を算出した。その結果を表 2.2-12 に示す。



表 2.2-12 気圧低下量の50年再現期待値

地点	福岡	飯塚	下関
50年再現期待値 (hPa)	67.0	<u>68.2</u>	65.1

飯塚での気圧低下量が最も大きいことから、この値(68.2hPa)を用い、Vには高度10mにおける50年再現風速41.9m/s、a、b、cには設置海域から最も近い地点(下関)の値を用い、θは潮位偏差が最も大きくなるθ=0°を考慮すると、式 2.2-6で求められる高潮の50年再現期待値は次のようになる。

$$\zeta = a(p_0 - p) + bV^2 \cos\theta + c = 1.231 \times 68.2 + 0.033 \times 41.9^2 \times 1 + 0 = +142 \text{ (cm)}$$

### 3) 潮位偏差の再現期待値

気象庁の下関における潮位偏差(天文潮位と観測潮位の偏差)の観測結果<sup>44</sup>から再現期待値を算出した。使用したデータは2002年～2011年の潮位偏差の年最大値で、プラス側、マイナス側それぞれの50年再現期待値の算出結果は図 2.2-13の通りである。プラス側潮位偏差(高潮)の50年再現期待値は、2)の高潮計算で求めた値よりやや小さくなっている。

【再現期間 50 年】プラス側潮位偏差(高潮) : +125cm、マイナス側潮位偏差 : -40cm

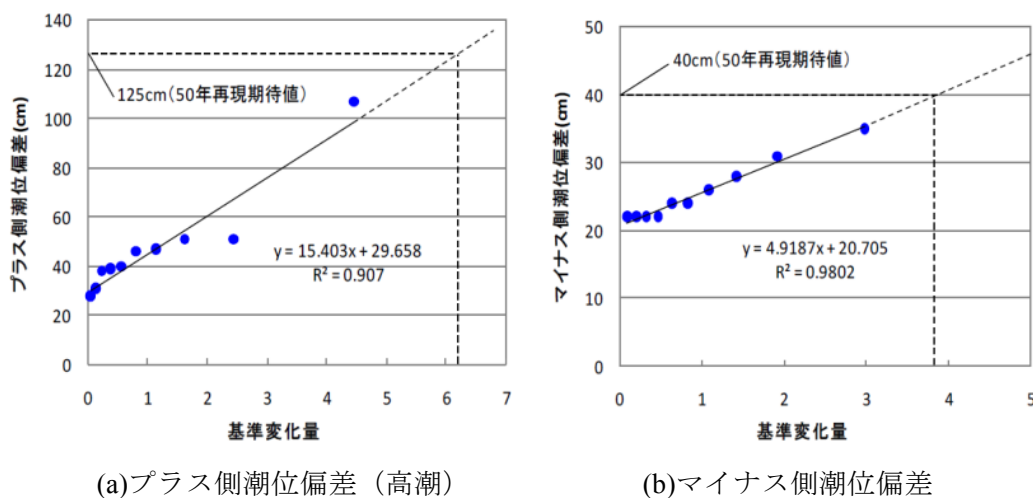


図 2.2-13 潮位偏差の極値統計解析結果

### 4) 設計で考慮する水位変動

1)～3)の検討結果より、設計に用いる水位変動を表 2.2-13の通りとする。再現期間50年のプラス側水位は響灘験潮所でのH.W.L(+1.60m)に、SMB法で得られた高潮を加えた水位とする。この値は響灘験潮所での既往最高潮位(+1.97m)を上回っている。再現期間50年のマイナス側水位は響灘験潮所での既往最低潮位(-0.61m)とする。この値は、L.W.L(+0.09m)にマイナス側潮位偏差の50年再現期待値(-0.40m)を加えた水位よりさらに低い値となっている。

表 2.2-13 設計に用いる水位

項目	設計値	備考
【再現期間50年】 プラス側水位	+3.02m	H.WL (+1.60m) +高潮 (+1.42m)
【再現期間50年】 マイナス側水位	-0.61m	響灘験潮所の既往最低値 < L.WL (+0.09m) +マイナス側潮位偏差 (-0.40m) =-0.31m
発電時の水位	+0.80m	響灘験潮所の平均値

## 2.3 その他環境条件

### 2.3.1 津波

津波の評価は、第Ⅱ編 2.3.4 項に基づいて行う。

津波による潮位偏差と最大流速は、日本海における大規模地震に関する調査検討会報告書<sup>45</sup>で記載されている。報告書では、日本海における最大クラスの津波断層モデルによる津波高さの想定結果がまとめられており、これによると北九州市では海岸での津波高が最大で2.6mになるとされている。実証試験機の設置予定水深は52mと沖合であることから、津波高はこれより小さくなると考えられるが、設計では安全側として津波による潮位偏差±2.6mを想定する。

また、津波の流速は港湾の施設の技術上の基準・同解説<sup>28</sup>に従い式 2.3-1 のように求める。

$$u = \eta\sqrt{g/h} = 2.6\sqrt{g/52} = 1.13 \text{ (m/s)} \quad \text{式 2.3-1}$$

ここで、

- $u$  : 津波の流速 (m/s)
- $\eta$  : 津波による潮位偏差 (m)
- $g$  : 重力加速度 (m/s<sup>2</sup>)
- $h$  : 水深 (m)

## 2.4 気象海象調査結果まとめ

以上の調査に基づき、設計に用いる値を表 2.4-1、表 2.4-2 の通り設定する。

表 2.4-1 外部条件に基づく設計値【暴風時】

10 分間 平均風速	50 年再現期待値 ( $Z_{hub}=72m$ )	51.0m/s	建築基準法
	1 年再現期待値 ( $Z_{hub}=72m$ )	40.8m/s	NK ガイドライン ( $V_1=0.8V_{50}$ )
べき指数		0.10	台風シミュレーション
乱流強度	50%分位値 (10 分間)	0.125	台風シミュレーション
	90%分位値 (1 時間)	$0.125+0.2/V_{hub}$	NK ガイドライン

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

表 2.4-2 外部条件に基づく設計値【発電時】

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

波高	年平均有義波高 (津波検討用)	0.95m	波浪推算
波周期	年平均有義波周期 (津波検討用)	5.5s	
水流	年平均水流 (津波検討用)	0.17m/s	JCOPE-T による推算値
潮位	年平均潮位	0.80m	響灘験潮所
風速と波高の関係	$H_{1/3}=0.3V^2/g[1-\{1+0.004(200000g/V^2)^{1/2}\}^{-2}]$		波浪推算値と気象庁 GPV 風速データの比較
波高と波周期の関係	$T_{1/3}=1.37 \cdot 2\pi V/g[1-\{1+0.008(200000g/V^2)^{1/2}\}^{-5}]$		
津波	潮位偏差	$\pm 2.6m/s$	国交省報告書
	最大流速	1.13m/s	港湾基準

### 3. 復原性の評価事例

#### 3.1 主要寸法および区画配置

浮体本体は水密隔壁により 16 区画に分割する構造となっている。復原性の検討に用いた主要諸元を表 3.1-1、主要寸法と区画配置を図 3.1-1 に示す。

表 3.1-1 主要諸元

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

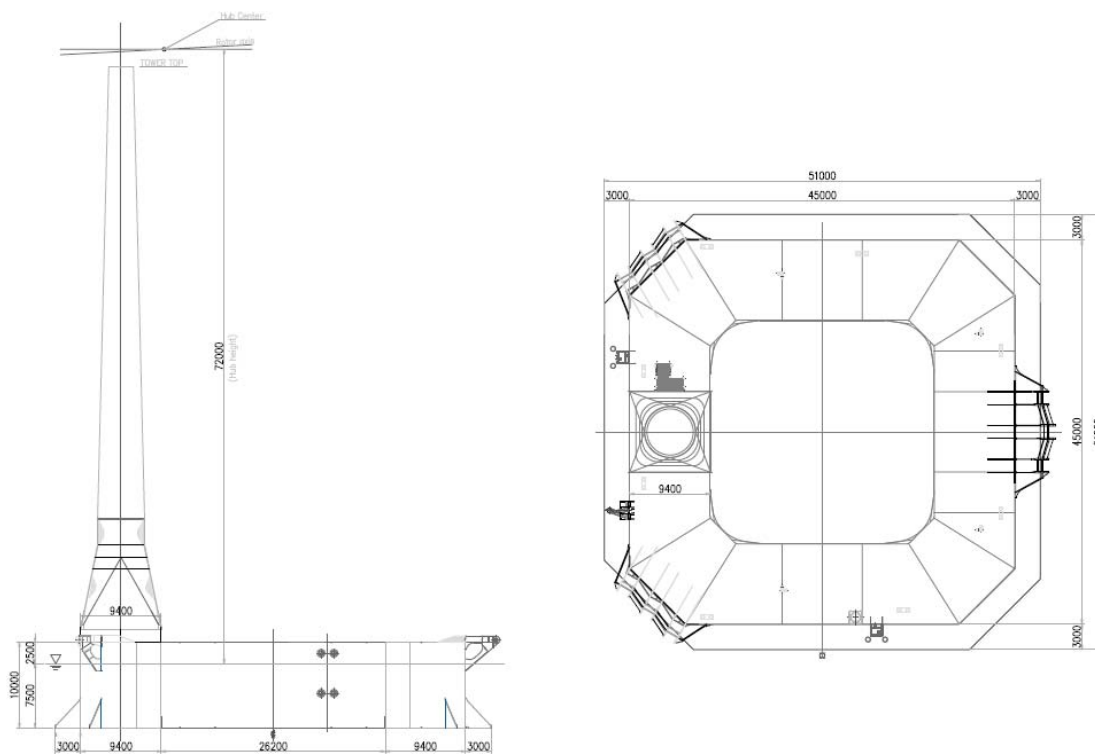


図 3.1-1 主要寸法と区画配置

### 3.2 評価方法の概要

汎用ソフト MOSES を用いて復原性の検討を行う。浮体、タワー、RNA に風荷重を作用させ、風による傾斜モーメント曲線を計算する。ここで、浮体部各区画の浮力のみを考慮し、タワーの浮力は考慮しないものとする。MOSES による復原性検討モデルを図 3.2-1 に示す。

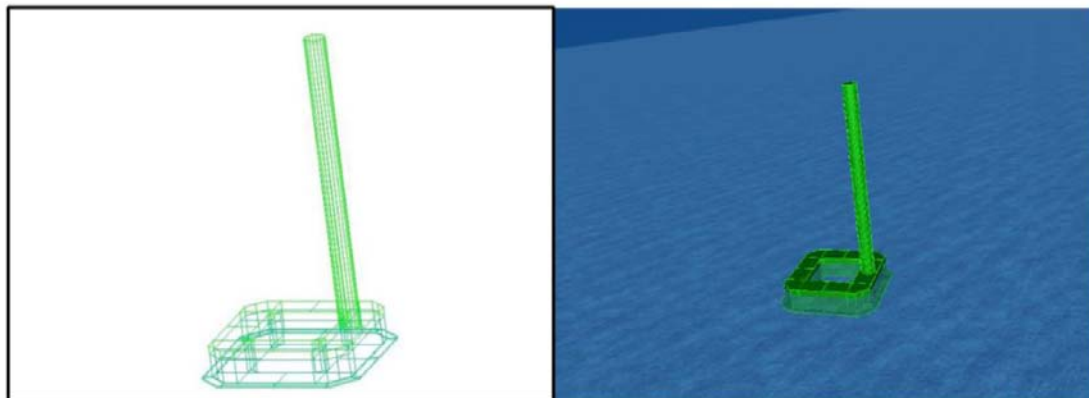


図 3.2-1 MOSES による復原性検討モデル

復原性の評価には浮体、タワー、RNA に作用する風荷重を考慮する。風速は浮体式洋上風力発電設備に関するガイドライン（2012）<sup>4</sup>および鋼船規則 P 編に従い設定する。

復原性の評価に用いる風速を表 3.2-1 に示す。

表 3.2-1 復原性の評価に用いる風速

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

次に、動解析に用いる浮体、タワー、RNA に作用する風荷重を算出する。

浮体、タワーに作用する風圧  $P$  ( $\text{N}/\text{m}^2$ ) は式 3.2-1 で求める<sup>46</sup>。

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

ここで、

$P$  : 風圧  $P$  ( $\text{N}/\text{m}^2$ )

$V$  : 風速 ( $\text{m}/\text{s}$ )

$C_h$  : 高度係数

$C_s$  : 形状係数

高度係数、形状係数は表 3.2-2 による。

表 3.2-2 高度係数および形状係数

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

浮体設備・タワーそれぞれの風荷重  $F$  (N) は式 3.2-2 で求める。

$$F = P \cdot A$$

式 3.2-2

ここで、

$F$  : 風荷重 (N)

$P$  : 風圧 ( $N/m^2$ )

$A$  : 風向に対する垂直面での各構造物の投影面積 ( $m^2$ )

RNA に作用する荷重は表 3.2-3 の通りとする。

表 3.2-3 RNA に作用する風荷重

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

浮体の構造は  $x$  軸に対して対称であるため、図 3.2-2 のように 5 つの風向 ( $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $135^\circ$ 、 $180^\circ$ ) に対して検討を行うものとする。

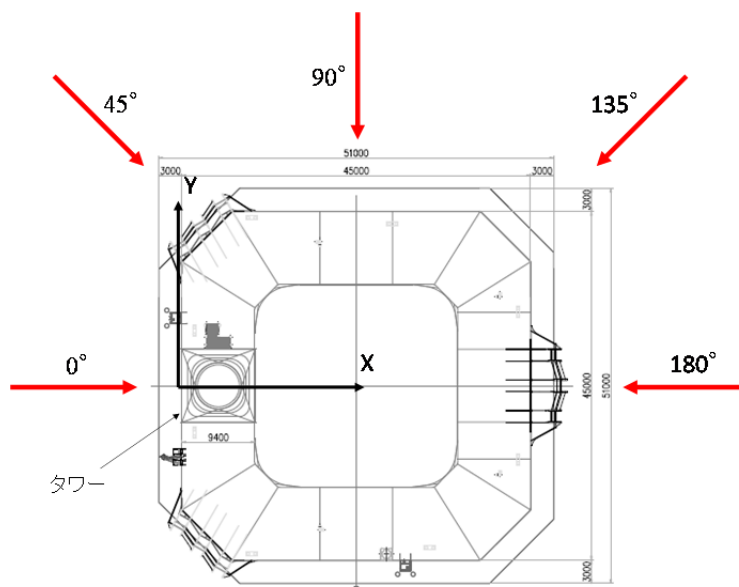


図 3.2-2 検討を行う風向

### 3.3 非損傷時の復原性の評価

非損傷時の復原性の評価は、第Ⅱ編 3.2 節に基づいて行う。

非損傷時の復原性については、浮体式洋上風力発電設備に関するガイドライン (2012) <sup>4</sup> に従い、最も厳しいケースにおいて、図 3.3-1 における面積比  $(A+B) / (B+C)$  が 1.4 以上を満足するか否かで評価する。検討の結果、最も厳しいケースは暴風時におけるケースとなる。非損傷時の復原力曲線図を図 3.3-2 に示す。

非損傷時の評価結果を表 3.3-1 に示す。面積比が最も小さいのは 4.42 となり、面積比 1.4 以上を満足している。

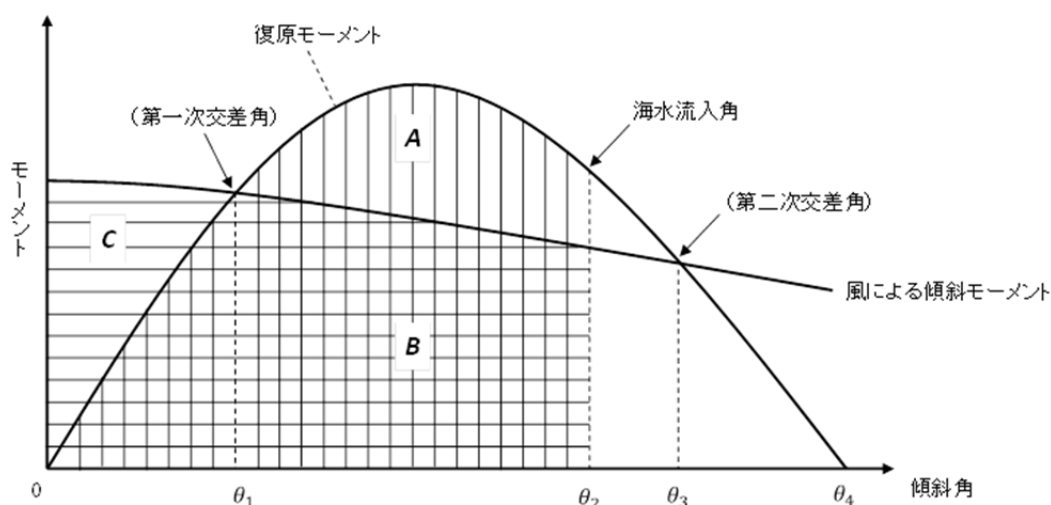


図 3.3-1 復原力曲線図

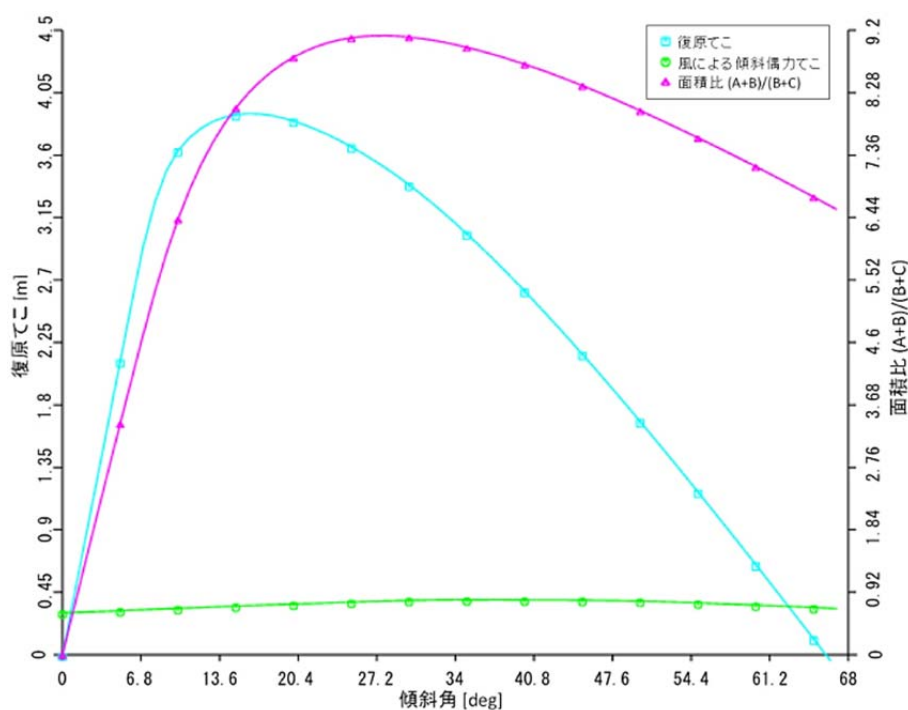


図 3.3-2 非損傷時の復原力曲線図

表 3.3-1 非損傷時の評価結果

計算条件	暴風時
風速 [海面上 10m] (m/s)	51.5
風向 (deg)	0
最大復原てこ (m)	3.90[17deg]
風による最大傾斜偶力てこ (m)	0.40
第二次交差角 (deg)	64
面積比 (A+B) / (B+C)	$4.42 \geq 1.4$

### 3.4 損傷時の復原性の評価

損傷時の復原性の評価は、第Ⅱ編 3.3 節に基づいて行う。

損傷時の復原性については、図 3.4-1 に示す第一次交差角と第二次交差角からなる復原性範囲を計算することで、風によるモーメントおよび浮体の波による動揺に対して復原性を有していることを確認する。損傷時の検討で最も厳しいケース（復原性の最小範囲；図 3.4-1 参照）は、図 3.4-1 の区画 Sb4 浸水時の風向 135deg のケースである。その結果を表 3.4-1 に示す。復原性範囲は 20deg で、全ての DLC における浮体の最大傾斜角目標値 (15deg 以内) より大きく、風によるモーメントおよび浮体の波による動揺に対して復原性を有している。

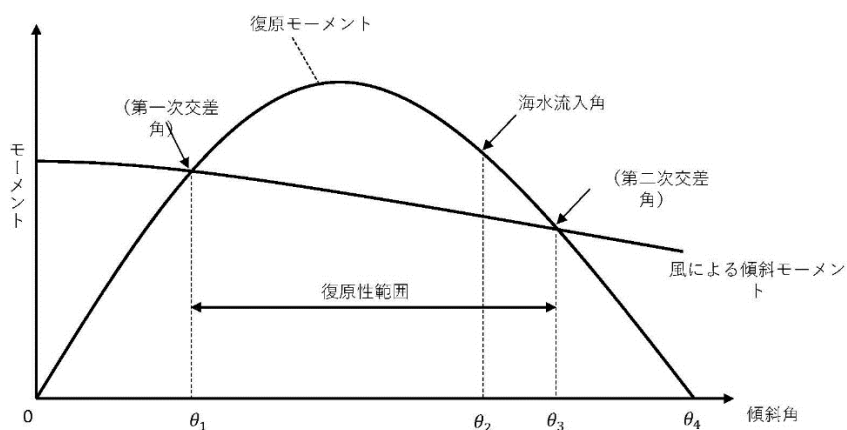


図 3.4-1 復原性範囲の例

表 3.4-1 損傷時の評価結果

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



## 4. 荷重評価事例

---

### 4.1 設計荷重ケース (DLC) の設定

風車、タワー（タワー基部含む）は、風車制御を含んだ、空力弾性解析が可能な **Bladed** による全 DLC の解析結果を用いて設計を実施する。一方、浮体本体および係留ラインの設計には、浮体の弾性、波漂流力、係留ラインの動的影響が考慮可能な **OrcaFlex** を用いて、これらにクリティカルとなる DLC1.6、DLC6.1 の解析結果を用いる。

ここでは、まず、**OrcaFlex**（風車部は簡易モデル）を用い上記の DLC1.6、6.1 について解析を行い、浮体本体、係留ラインの設計を行った。さらに、風車・浮体連成解析ソフト **Bladed** を用いて DLC6.1 の解析を行い、解析の妥当性を確認した。

## 4.2 モデルの設定

### 4.2.1 風車モデルの設定

3MW 風車（2枚翼）の設備仕様を表 4.2-1 に示す。

表 4.2-1 3MW 風車（2枚翼、Upwind×1基）の設備仕様

メーカー	Aerodyn Engineering GmbH
型式	SCD3MW-NEDO
定格出力	3MW
ロータ直径	100m
ハブ高さ	72m (above sea level)
ブレード枚数	2blades
ロータ位置	Upwind
ティルト角	3degree
コーニング角	5degree
出力制御	Variable speed, Individual pitch control
ブレーキ	ピッチブレーキ（運転中）、高速段ブレーキ、ロータロック（パーキング状態）
ヨー制御	Active yaw E-motor
定格回転数	17.1rpm
増速比	24.01
発電機種別	Permanent magnet synchronous generator
PCS方式	Full converter (IGBT)
変圧器定格電圧	22kV/0.62kV
カットイン風速	3m/s
カットアウト風速	25m/s
風速クラス	クラス S

### 4.2.2 浮体モデルの設定

浮体の概要図を図 4.2-1 に、浮体の仕様を表 4.2-2 に示す。

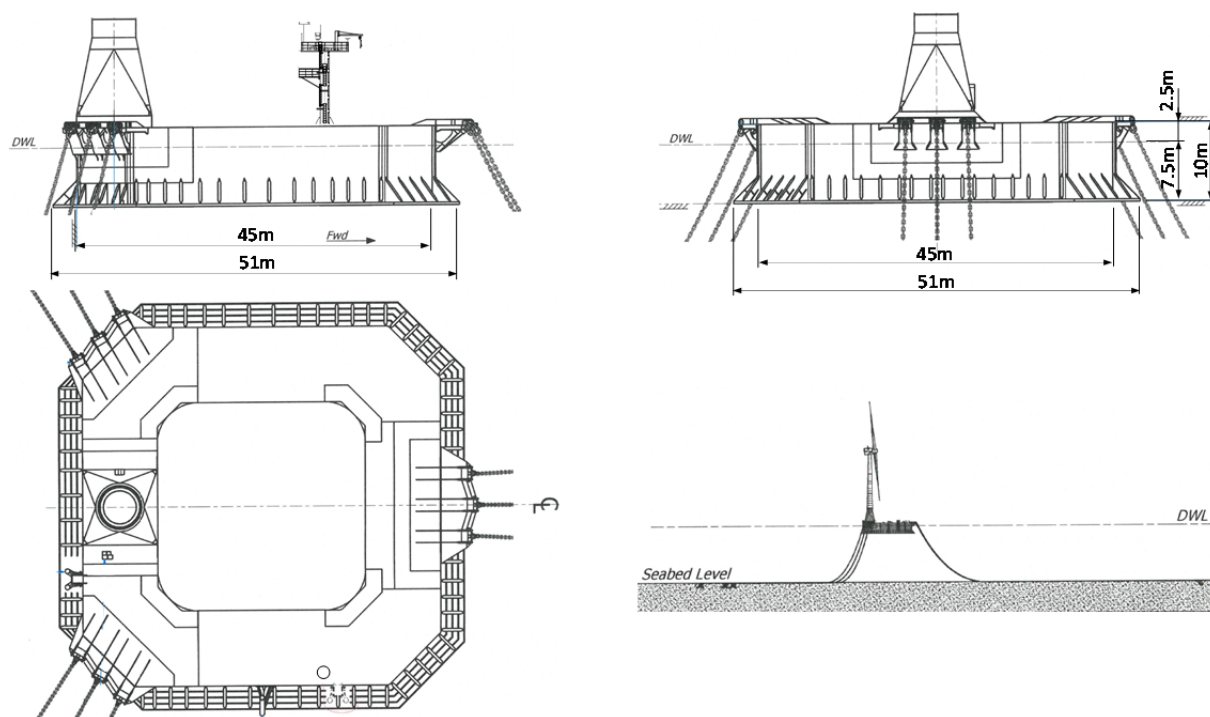


図 4.2-1 浮体の概要図

表 4.2-2 浮体の仕様

構造形式	バージ形式（鋼製）
寸法	長さ 45.0m×幅 45.0m×高さ 10.0m（スカート幅 3.0m）
喫水	7.5m
排水量	9858.0t
搭載風車	3,000kW 風車／2 枚翼／アップウインド型
ハブ高さ	72.0m
スカートの長さ	3m（後部の角を除いて）
開口部の幅	26.2m
外殻の深さ	10.0m
重心座標（Xg;Yg;Zg）	（22.5m;0.0m;7.275m）

### 4.2.3 係留モデルの設定

係留の概要図を図 4.2-2 に、係留ラインの仕様、チェーン許容張力を表 4.2-3、表 4.2-4 に示す。

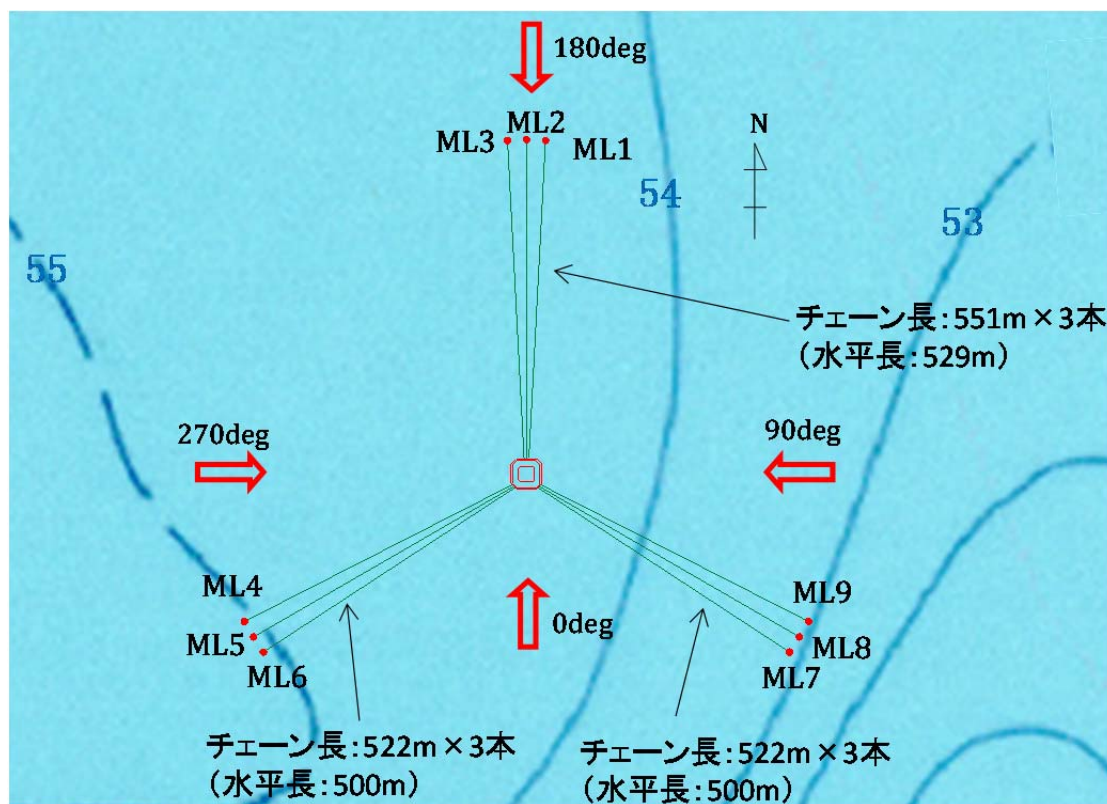


図 4.2-2 係留の概要図

表 4.2-3 係留ラインの仕様

係留形式	All チェーン+ドラッグアンカー
係留本数	9本 (3点×3条)
チェーン仕様	R4 スタッドレス
径	132mm
Net 径 (腐食磨耗考慮)	124mm
気中重量	348.5kg/m
剛性	1,400MN
破断荷重	15,965kN
Net 径の破断荷重	14,358kN
初期張力 (浮体係留点)	353kN
係留角度 (浮体係留点)	32°

表 4.2-4 チェーン許容張力

状態	安全率	許容張力 (kN)
非損傷時	1.67	8,598
単一索破断状態 (再現期間 1 年)	1.25	11,486
単一索破断時の過渡状態 (再現期間 50 年)	1.05	13,675

※安全率は浮体式洋上風力発電設備に関するガイドライン<sup>4</sup>による。

### 4.3 連成解析の実施

連成解析は、第Ⅱ編 4.3 節に基づいて行う。

#### 4.3.1 風車に働く荷重

Bladed による連成解析（終局強度解析）により得られた風車翼根元、タワー基部（トランジションピース上端部）における断面力の最大値を表 4.3-1～表 4.3-2 に示す。

また、風車翼根元、タワーの座標系を図 4.3-1 に示す。

表 4.3-1 風車翼根元における断面力の最大値

			Mx	My	Mxy	Mz	Fx	Fy	Fxy	Fz	Safety factor
Load case			kNm	kNm	kNm	kNm	kN	kN	kN	kN	-
Mx	Max	dlc6.1c_tl-06	10402	-2817	10776	-79	-128	-471	488	-59	1.35
Mx	Min	dlc6.2ab_tl-06	-8589	1865	8789	21	114	384	400	-12	1.1
My	Max	dlc2.1ba_2+12	3702	13592	14087	-60	505	-223	552	1309	1.35
My	Min	dlc1.4ccc_2.4.1	-1616	-7166	7346	11	-230	55	237	217	1.35
Mxy	Max	dlc2.1ca_3+05	4418	13067	13793	-55	501	-245	558	1326	1.35
Mxy	Min	dlc4.2ca_3.4.2	0	0	0	-4	1	8	8	-184	1.35
Mz	Max	dlc8.2ae_th-05	1726	47	1726	104	0	-122	122	-9	1.1
Mz	Min	dlc7.1c_tl-00-01	4958	7338	8856	-162	310	-266	409	1	1.1
Fx	Max	dlc1.6cb_th-04	909	12900	12932	30	529	7	529	950	1.35
Fx	Min	dlc1.4ccc_2.4.2	-1757	-7135	7348	14	-234	63	243	194	1.35
Fy	Max	dlc6.1c_tl-02	-8281	-1342	8389	-16	-52	438	441	78	1.35
Fy	Min	dlc6.1c_tl-05	9556	-2233	9814	-58	-118	-466	481	-63	1.35
Fxy	Max	dlc2.1ba_3+04	3717	13268	13779	-54	506	-215	550	1185	1.35
Fxy	Min	dlc1.4abb_2.4.1	-136	-537	554	-61	0	0	0	563	1.35
Fz	Max	dlc2.1ea_2+11	-2107	-403	2145	-70	79	86	116	1770	1.35
Fz	Min	dlc8.1bb_07-3	-735	-1181	1391	9	-66	21	69	-233	1.5

表 4.3-2 タワー基部における断面力の最大値

			Mx	My	Mz	Myz	Fx	Fy	Fz	Fyz	Safety factor
Load case			kNm	kNm	kNm	kNm	kN	kN	kN	kN	-
Mx	Max	dlc1.5ea_4.1.1	9488	6522	-43797	44279	-5563	-1007	-139	1017	1.35
Mx	Min	dlc1.6ec_tl-02	-10938	-5815	21351	22128	-4445	602	145	619	1.35
My	Max	dlc6.1f_tl-05	-2305	63865	88499	109137	-4664	2163	-1649	2720	1.35
My	Min	dlc6.1c_tl-06	-1948	-70530	-116908	136535	-6036	-2706	1843	3274	1.35
Mz	Max	dlc6.1e_tl-02	-627	-2248	123045	123065	-4550	3046	-57	3047	1.35
Mz	Min	dlc6.1c_tl-01	-4257	-64343	-112739	129808	-6050	-2681	1751	3202	1.35
Myz	Max	dlc6.1c_tl-01	-3007	-67675	-111116	130102	-6051	-2664	1791	3210	1.35
Myz	Min	dlc2.3bb_3.3.2	15	-3	4	5	-3778	112	-1	112	1.1
Fx	Max	dlc6.2bb_tl-05	1284	-5594	57175	57448	-2309	1494	127	1500	1.1
Fx	Min	dlc6.1c_tl-05	-2161	-60864	-120179	134712	-6127	-2772	1730	3268	1.35
Fy	Max	dlc6.1e_tl-04	-1919	2010	114437	114455	-4590	2831	-53	2832	1.35
Fy	Min	dlc6.1e_tl-01	95	9052	-109138	109513	-4348	-3001	-202	3008	1.35
Fz	Max	dlc6.1c_tl-06	-2725	-69781	-110975	131091	-6016	-2538	1855	3144	1.35
Fz	Min	dlc6.2ia_tl-02	-200	58694	-81238	100222	-4793	-2195	-1700	2776	1.1
Fyz	Max	dlc6.1c_tl-03	-2145	-66300	-106228	125220	-5805	-2693	1815	3247	1.35
Fyz	Min	dlc4.2ab_2.3.2	-3	-46	-6349	6349	-4702	0	0	0	1.35

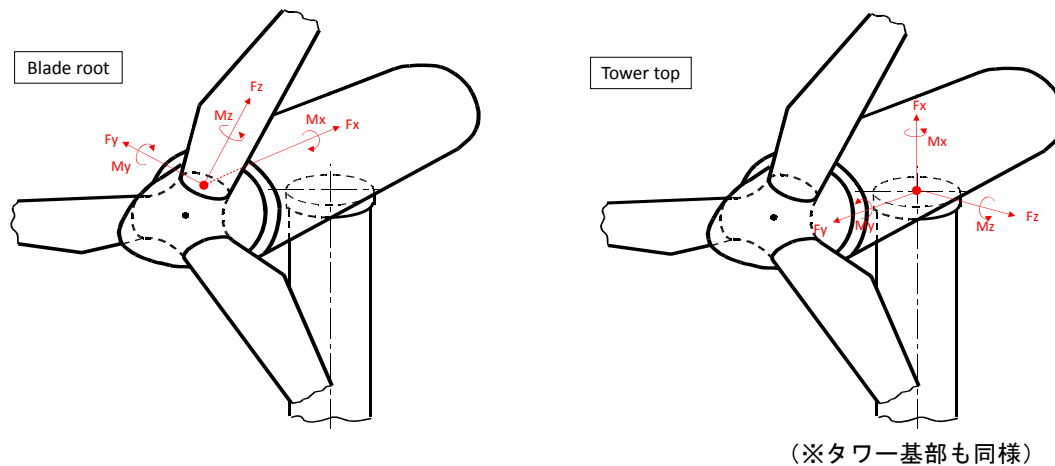


図 4.3-1 風車翼根元、タワーの座標系

### 4.3.2 浮体に働く荷重

#### 1) 解析条件

表 4.3-3 の荷重ケースに対して不規則波中の解析を行い、浮体の各部に生じる断面力を算出する。

表 4.3-3 不規則波中解析の荷重ケース（解析時間 3,600s）

	風速 (at $Z_{hub}$ )	有義波高	有義波周期	波・風向き
DLC1.6	12.8m/s(最大スラスト)	9.8m <sup>※1</sup>	10.6s、 12.2s、13.7s	同一方向：0~180°を22.5°刻み
	25.0m/s(カットアウト)			
DLC6.1	48.5m/s	9.8m	10.6s、 12.2s、13.7s	波向き：0~180°を22.5°刻み 波・風向き組合せは図 4.3-2 の通り

※1、DLC1.6について、安全側の検討とするため有義波高は50年再現期待値を用いた。

※2、事前の剛体モデルによる6シードの解析から、タワー基部曲げモーメント、タワートップ加速度、Pitchの3指標が6シードの平均以上となるシードを選定し、弾性体モデルの計算に採用した。(3指標により選定されたシードによる浮体各部の断面力は、6シード平均値と同等以上になるという検討結果に基づく)

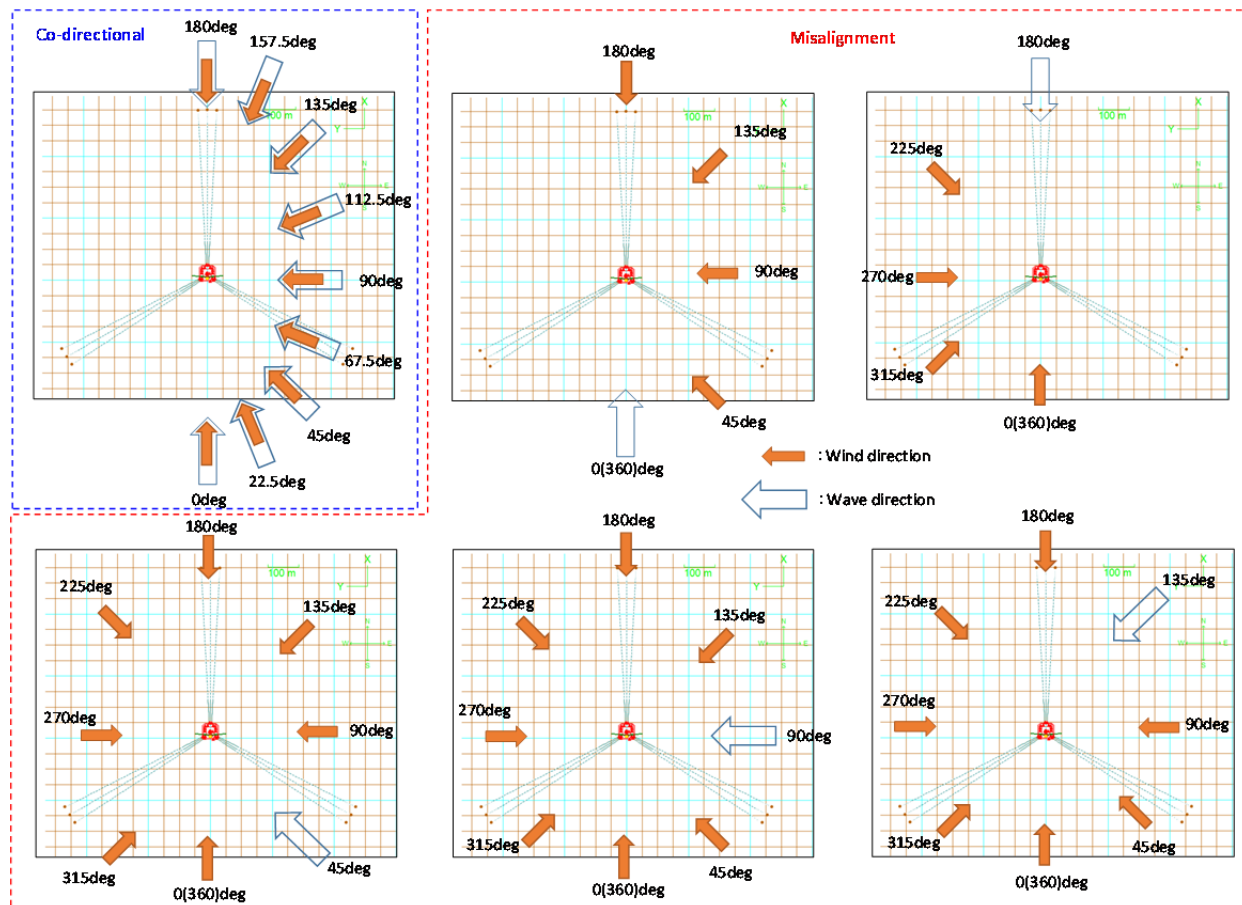


図 4.3-2 波・風向きの組合せ

## 2) 解析結果

解析で得られた浮体各部の最大断面力を図 4.3-3 に示す。区配置と座標の定義は図 4.3-4 の通りである。

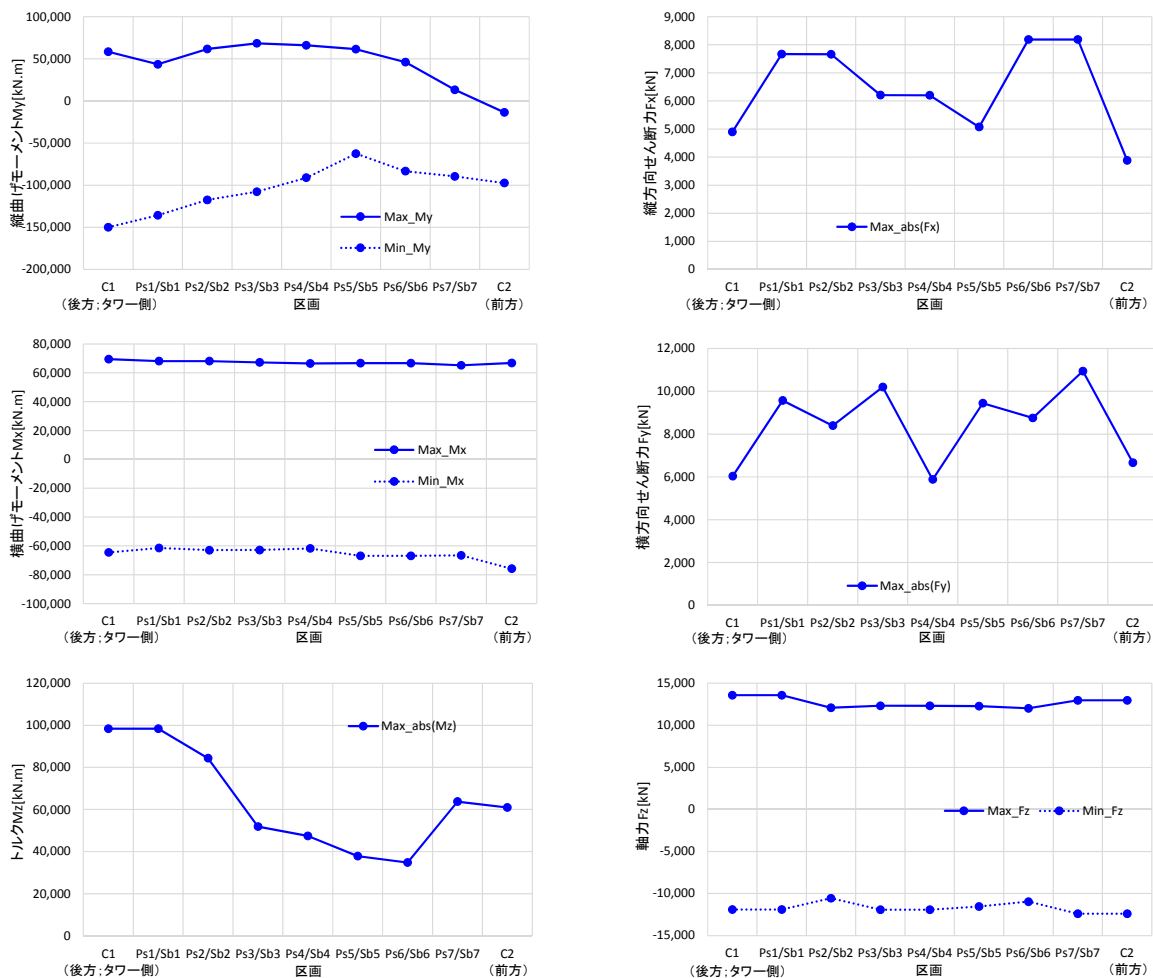


図 4.3-3 各区画での断面力の最大値

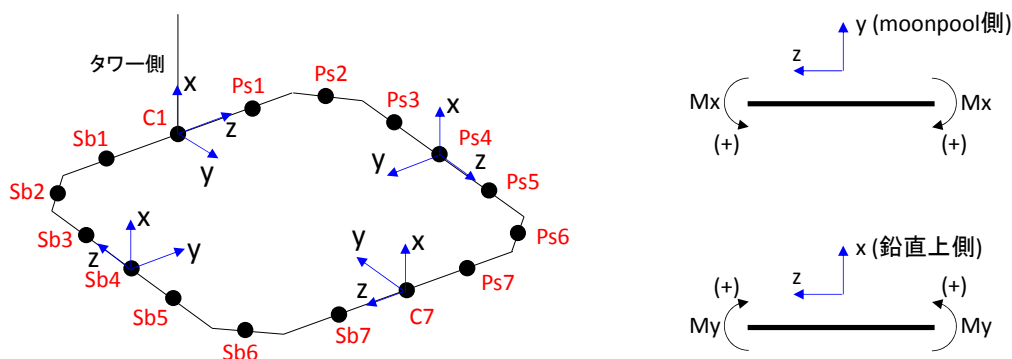


図 4.3-4 区画配置と座標の定義

### 4.3.3 係留に働く荷重

#### 1) 検討方法

DLC1.6、6.1 について、OrcaFlex を用いて係留の動的応答、外力の方向性を考慮した詳細解析を実施し、係留索の安全性を評価する。解析時間は全て 3,600s で、6 シードの解析を実施する。OrcaFlex モデル図を図 4.3-5 に示す。

Step1～4 の手順で検討を行う。IEC では基本的に波と風のみスアライメントの考慮を要求されている。ここでは、Step1 で波、風同一方向の解析を行い、クリティカルな外力方向を特定した上で、Step2 以降で、クリティカルな方向をベースにミスアライメントを考慮した検討を実施する。

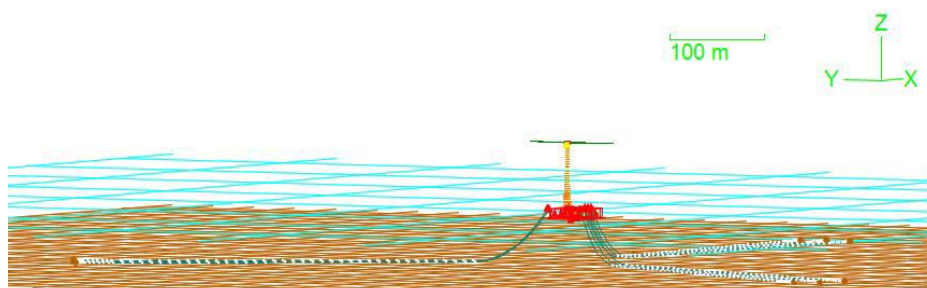


図 4.3-5 OrcaFlex モデル図

#### (1) Step1 : 非損傷時（波、風同一方向）

外力方向を 30deg 毎に変えて検討を行う。荷重ケースを表 4.3-4、考慮する外力方向を図 4.3-6 に示す。また、本設置海域は周囲を陸地に囲まれ、波については顕著な方向性がみられる海域であるため、DLC6.1 では方位別に波浪条件を変えて解析を実施する。

表 4.3-4 Step1 の荷重ケース

DLC	風速 (at $Z_{hub}$ )	Hs	$T_{1/3}$	海面流速	方向
1.6 (運転時)	12.8m/s (最大スラスト)	5.42m	7.9s, 9.0s, 10.2s	0.10m/s	図 4.3-6 の通り
	25.0m/s (カットアウト)			0.19m/s	
6.1 (停止時)	48.5m/s	図 4.3-7 の通り		1.04m/s	



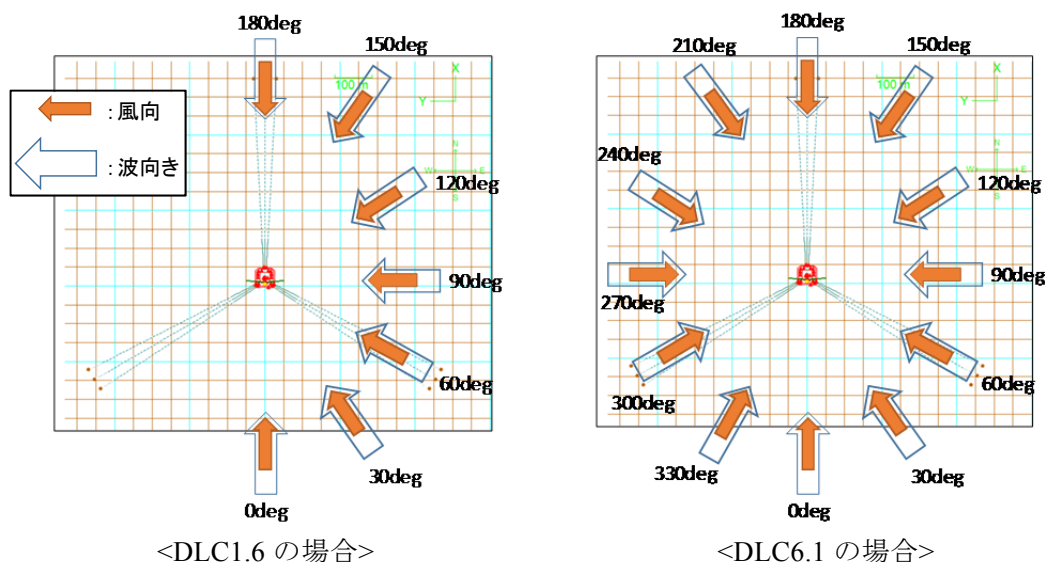


図 4.3-6 Step1 で考慮する外力方向組合せ

波浪推算データから求めた方位別の50年再現期待値<sup>(※)</sup>、国土技術政策総合研究所資料<sup>23</sup>の方位別の50年再現波高 (WSTS.234、WSTS.277) を比較し、最も安全側の波高を抽出する (図 4.3-7)。採用した波高が、1年再現期待値 $H_{s1-1hour}=5.42m$ を下回る場合、その方位の設計波高は5.42mとする。波周期はNKガイドライン<sup>4</sup>の式 4.3-1に従い範囲を求め、最小、中間、最大値について解析を実施する。

$$11.1\sqrt{H_s/g} \leq T \leq 14.3\sqrt{H_s/g} \quad \text{式 4.3-1}$$

ここで、

- $H_s$  : 有義波高 (m)
- $g$  : 重力加速度 ( $m/s^2$ )
- $T$  : 有義波周期 (s)

〔※波浪推算より得られた50年再現波高の最大値はN方向の7.82mと、方位を考慮しない50年再現波高 $H_{s50-1hour}=9.8m$ から、方位別の50年再現波高を補正した(9.8/7.82倍)〕

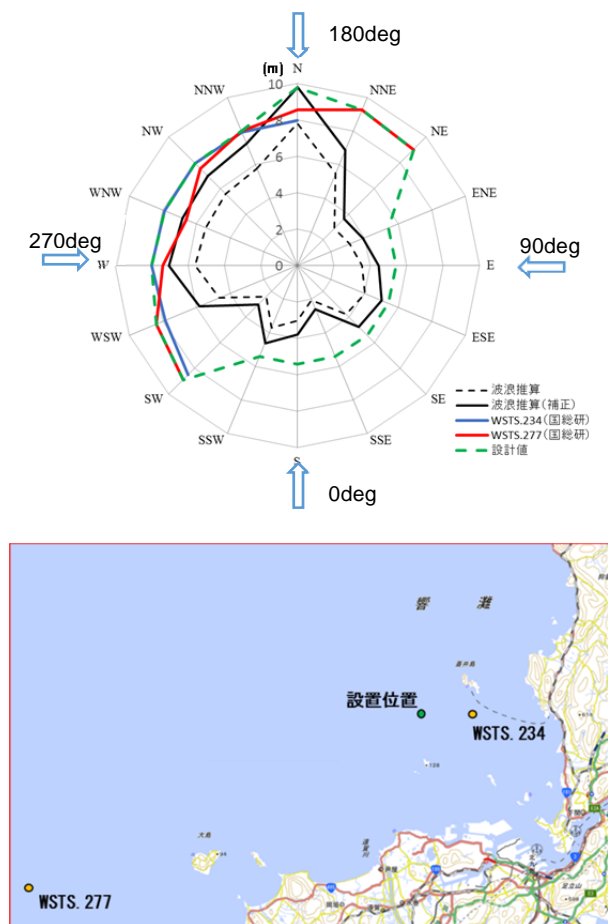


図 4.3-7 方位別の 50 年再現期待値波高<sup>41</sup>

(2) Step2 : 非損傷時 (波、風ミスアライメント)

Step1 の DLC6.1 で係留張力が大きくなった 2 方向 (150deg、180deg) について、 $\pm 30\text{deg}$  (10deg 毎) の風向と波向のミスアライメントを考慮した計算を行う (図 4.3-8)。流れについては、吹送流は風向と、水中流は波向とそれぞれ同一とする。

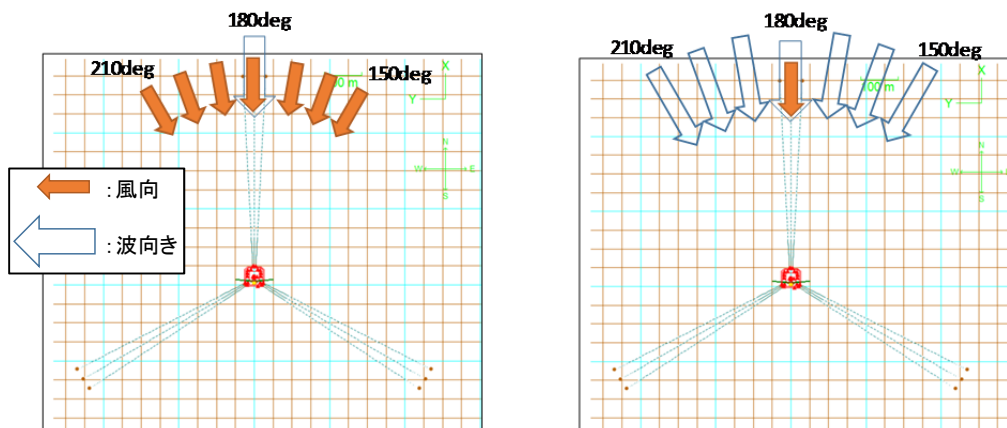


図 4.3-8 Step2 で考慮する外力方向 (180deg 方向をベースにしたケース)

(3) Step3：単一索破断時（破断後の平衡状態）

Step1 で係留張力が大きくなった 2 方向（150deg、180deg）について、張力が最も大きいラインおよび 2 番目に大きいラインの破断を想定した解析を行う。解析で考慮する外力方向は Step2 と同じとする。環境荷重の再現期間 1 年（NK ガイドライン<sup>4</sup>で規定）および 50 年（参考扱い）の両ケースについて検討する。

(4) Step4：単一索破断時の過渡状態

非損傷時の検討（Step1、2）のうち最も張力が大きくなったケースについて、2 番目に張力が大きいラインが途中で破断した状態を想定し、解析を行う。破断ラインの張力が最大になる時刻で破断すると仮定する。

2) 解析結果

(1) Step 1：非損傷時（波、風同一方向）

最大張力の解析結果を表 4.3-5 に示す。結果は全て 6 シードの平均値である。張力が最も大きくなったのは、ML1、ML2（着色部）の浮体係留点の 7,500kN で、UF（最大張力／許容張力）は 0.87 である。

表 4.3-5 Step 1 の最大張力

ライン No.	浮体係留点		アンカー点		荷重ケース
	最大張力 [kN]	UF	最大張力 [kN]	UF	
ML1	7,500	0.87	7,019	0.82	DLC6.1 D150deg V48.5 Hs9.28 T10.3
ML2	7,464	0.87	6,973	0.81	DLC6.1 D180deg V48.5 Hs9.8 T10.6
ML3	7,455	0.87	6,958	0.81	DLC6.1 D180deg V48.5 Hs9.8 T10.6
ML4	6,338	0.74	5,785	0.67	DLC6.1 D300deg V48.5 Hs8.88 T11.6
ML5	6,015	0.70	5,415	0.63	DLC6.1 D300deg V48.5 Hs8.88 T11.6
ML6	5,742	0.67	5,275	0.61	DLC6.1 D330deg V48.5 Hs8.88 T10.1
ML7	2,781	0.32	2,052	0.24	DLC6.1 D120deg V48.5 Hs9.02 T10.2
ML8	3,596	0.42	2,932	0.34	DLC6.1 D120deg V48.5 Hs9.02 T10.2
ML9	4,709	0.55	4,155	0.48	DLC6.1 D120deg V48.5 Hs9.02 T10.2

(2) Step 2：非損傷時（波、風ミスアライメント）

最大張力の結果を表 4.3-6 に示す。張力が最も大きくなったのは、ML1（着色部）の浮体係留点の 8,244kN で、UF（最大張力／許容張力）は 0.96 である。

表 4.3-6 Step 2 の最大張力

ライン No.	浮体係留点		アンカー点		荷重ケース
	最大張力 [kN]	UF	最大張力 [kN]	UF	
ML1	8,244	0.96	7,810	0.91	DLC6.1 Dwind150 Dwave160 V48.5 Hs9.8 T10.6
ML2	7,464	0.87	6,973	0.81	DLC6.1 Dwind180 Dwave180 V48.5 Hs9.8 T10.6
ML3	8,117	0.94	7,650	0.89	DLC6.1 Dwind180 Dwave200 V48.5 Hs9.8 T10.6
ML4	1,234	0.14	678	0.08	DLC6.1 Dwind180 Dwave210 V48.5 Hs8.0 T9.6
ML5	1,081	0.13	668	0.08	DLC6.1 Dwind180 Dwave210 V48.5 Hs8.0 T9.6
ML6	959	0.11	700	0.08	DLC6.1 Dwind180 Dwave210 V48.5 Hs8.0 T9.6
ML7	2,562	0.30	1,830	0.21	DLC6.1 Dwind150 Dwave120 V48.5 Hs9.02 T10.2
ML8	3,343	0.39	2,652	0.31	DLC6.1 Dwind150 Dwave120 V48.5 Hs9.02 T10.2
ML9	4,341	0.50	3,756	0.44	DLC6.1 Dwind150 Dwave120 V48.5 Hs9.02 T10.2

(3) 単一索破断時（破断後の平衡状態）

最大張力の結果を表 4.3-7、表 4.3-8 に示す。再現期間 1 年のケースでは、最大張力は 3,635kN、UF（最大張力／許容張力）は 0.32 と十分に余裕がある結果が得られた。また、再現期間 50 年のケースについても、最大張力は 11,820kN で破断荷重 14,358kN を下回ることを確認した。

表 4.3-7 Step 3（単一索破断時：再現期間 1 年）の最大張力

ライン No.	破断索	浮体係留点		アンカー点		荷重ケース
		最大張力 (kN)	UF	最大張力 (kN)	UF	
ML1	ML2	3,635	0.32	2,986	0.26	Dwind150 Dwave160 V38.8 Hs5.42 T7.9
ML2	ML1	3,415	0.30	2,703	0.24	Dwind170 Dwave180 V38.8 Hs5.42 T7.9

表 4.3-8 Step 3（単一索破断時：再現期間 50 年）の最大張力

ライン No.	破断 索	浮体係留点		アンカー点		荷重ケース
		最大 張力 (kN)	破断 荷重 (kN)	最大 張力 (kN)	破断 荷重 (kN)	
ML1	ML2	11,820	14,358	11,536	14,358	Dwind150 Dwave160 V48.5 Hs9.8 T10.6
ML3	ML2	11,610	14,358	11,314	14,358	Dwind180 Dwave200 V48.5 Hs9.8 T10.6

(4) Step 4：単一索破断時の過渡状態

最大張力の結果を表 4.3-9 に示す。張力が最も大きくなったのは、ML1 の 10,282kN で、UF（最大張力／許容張力）は 0.75 である。

表 4.3-9 Step 4（単一索破断時の過渡状態：再現期間 50 年）の最大張力

荷重ケース	最大張力 (kN)								
	ML1	ML2	ML3	ML4	ML5	ML6	ML7	ML8	ML9
Dwind150_Dwave160_V48.5 Hs9.8 T10.6	10,282	破断	7,653	676	715	747	1,021	1,135	1,295
UF	0.75	—	0.56	0.05	0.05	0.05	0.07	0.08	0.09

### 3) まとめ

最大張力の計算結果を表 4.3-10 に示す。

表 4.3-10 最大張力の計算結果

状態	最大張力 (kN)	許容張力 (kN)	UF
非損傷時	8,244	8,598	0.96
単一索破断状態 (再現期間 1 年)	3,635	11,486	0.32
単一索破断時の過渡状態 (再現期間 50 年)	10,282	13,675	0.75

## 4.4 連成解析の検証

連成解析の検証は、第 II 編 4.4 節に基づいて行う。

### 4.4.1 水槽試験概要

数値解析手法の検証に用いる水槽試験の概要を以下に示す。また、実験の様子を図 4.4-1 に、係留配置と波向きの例を図 4.4-2 に、計測波形の例を図 4.4-3 に示す。

#### 1) 使用水槽

水産工学研究所海洋工学総合実験棟の平面水槽 (寸法: 長さ 60m、幅 25m)

#### 2) 浮体、係留模型

縮尺: 1/50 (フルード相似則適用)

水深 (実機換算値): 160m (1 期試験)、58m (2 期試験: 実海域と同等の水深を再現)

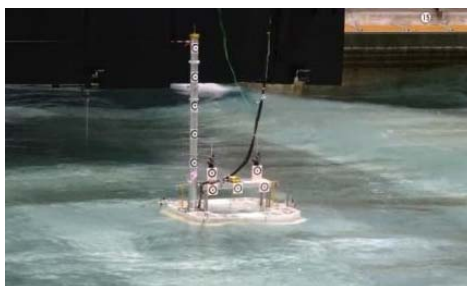


図 4.4-1 実験の様子

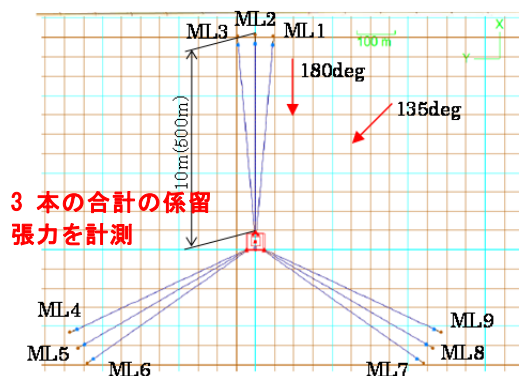
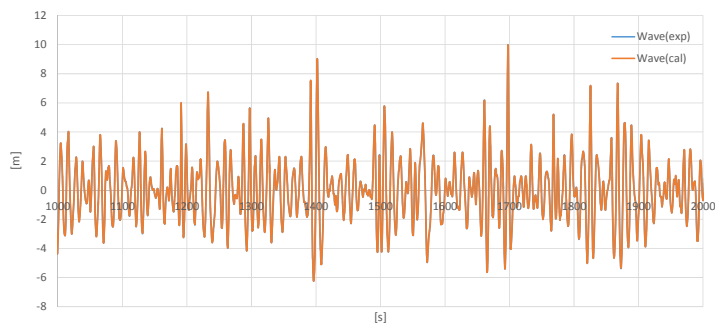


図 4.4-2 係留配置と波向き



(大波高時に波の谷より峰が大きく、波形に水深の影響が現れている)

図 4.4-3 計測波形の例 (水深 58m の場合)

### 3) 試験方法

- ・ 波浪：規則波、不規則波（正面波、斜波）
- ・ 風、流れ荷重：風下、流れ下側から荷重相当の力で引くことにより再現（波と同一方向）

(図 4.4-4)

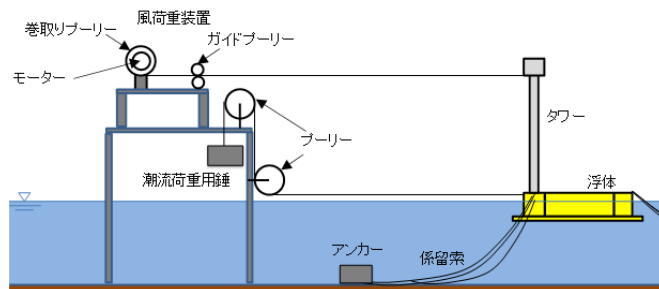


図 4.4-4 風、潮流荷重の模擬方法

## 4.4.2 解析手法 (OrcaFlex)

### 1) 骨組モデルの作成

OrcaFlex で 16 区画を質点でモデル化 (図 4.4-5) し、バラスト等を含む質量、慣性モーメントを各質点に与える。質点間は軸方向、曲げ、ねじり剛性を考慮した梁要素で結ぶ。

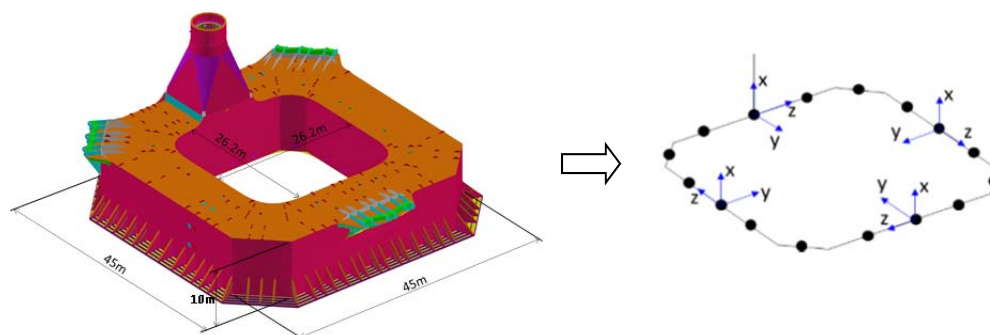


図 4.4-5 全体骨組解析モデル

## 2) 流体力モデル

「AQWA」を用いて浮体の区画毎の流体力係数を求めておき、Orcaflex による解析で各区画の節点に集中荷重として作用させる。加えて水槽試験結果よりキャリブレーションした非線形減衰力も各区画の節点に与える。AQWA のモデル図を図 4.4-6 に示す。

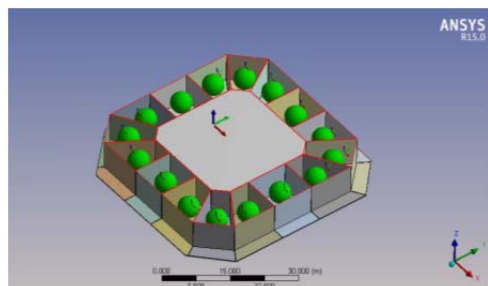


図 4.4-6 AQWA のモデル図

- 付加質量、付加慣性モーメント係数
- 造波減衰係数
- 復原力係数
- 波強制力係数

波漂流力については以下のようにモデル化する。

水槽試験では、規則波中の水槽試験結果より波漂流力係数 (Quadratic Transfer Function ; QTF) を求めた (図 4.4-7)。漂流力係数 QTF は式 4.4-1 で定義されるものである。

$$QTF = F_x / A^2 \quad \text{式 4.4-1}$$

ここで、

- $QTF$  : 漂流力係数
- $F_x$  : 波漂流力 (N)
- $A$  : 入射波振幅 (m)

図 4.4-7 には AQWA により得られた QTF、設計で考慮する QTF も併せて示しており、設計に用いる値は水槽試験結果、AQWA より安全側となるよう設定している。OrcaFlex による数値解析では Newman 近似を用いて不規則波中の変動漂流力を求める。

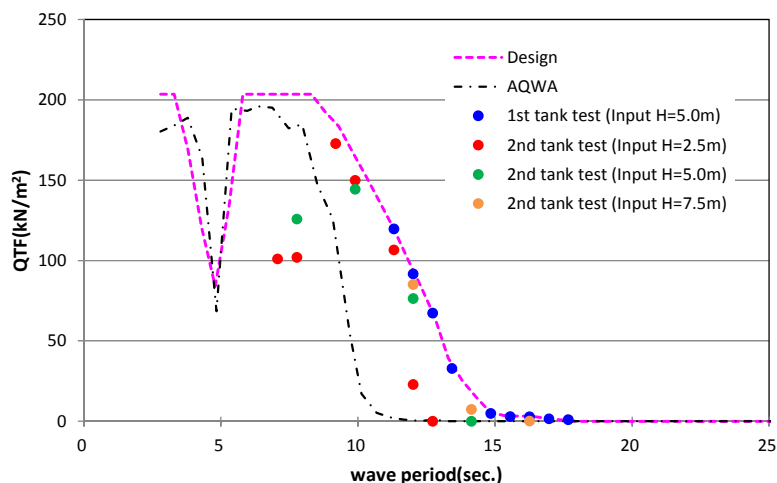


図 4.4-7 漂流力係数 QTF

#### 4.4.3 解析手法の検証（水槽試験と OrcaFlex による数値解析結果の比較）

##### 1) 浮体の動揺

不規則波中の数値解析を行い、浮体の動揺（Pitch、鉛直方向加速度）について水槽試験と解析結果の比較を行った。結果を図 4.4-8 に示す。数値解析では、水槽試験で計測された波形を入力波として与えた。比較ケースは以下の通りである。

- Case1 :  $H_{1/3}=8.5\text{m}$ 、 $T_{1/3}=10.3\text{s}$ 、正面波、風・流れ荷重なし、水深 160m
- Case2 :  $H_{1/3}=9.65\text{m}$ 、 $T_{1/3}=11.2\text{s}$ 、正面波、風・流れ荷重有り、水深 58m

図 4.4-8 より、浮体動揺に関して、水槽試験と数値解析結果がよく一致することを確認した。

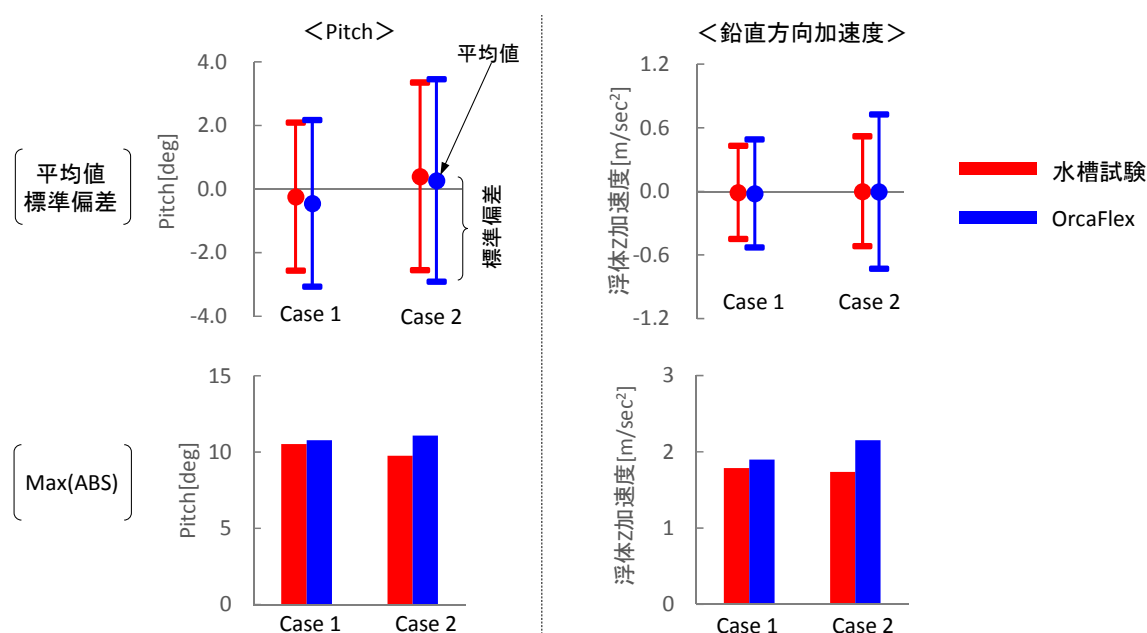


図 4.4-8 体の動揺に関する水槽試験と解析結果の比較

##### 2) 係留力

係留力について水槽試験と解析結果の比較を行った。係留力の統計値の比較を図 4.4-9 に、係留力の時刻歴を図 4.4-10 に（浮体の動揺が安定してきた時刻を 0s としている）に示す。比較ケースは以下の通りである。

- Case2 :  $H_{1/3}=9.65\text{m}$ 、 $T_{1/3}=11.2\text{s}$ 、正面波、風・流れ荷重有り、水深 58m
- Case3 :  $H_{1/3}=9.65\text{m}$ 、 $T_{1/3}=11.2\text{s}$ 、斜波、風・流れ荷重有り、水深 58m

比較結果の概要は以下の通りで、本数値解析モデルは設計ツールとして妥当であるといえる。

- Exp.と Orcaflex(dynamic)の平均値、標準偏差、最小値はよく一致
- Orcaflex(dynamic)の最大値は Exp.よりやや大きい。
- 係留力の時刻歴について、Exp.と解析で係留力が大きくなる時間帯はよく一致





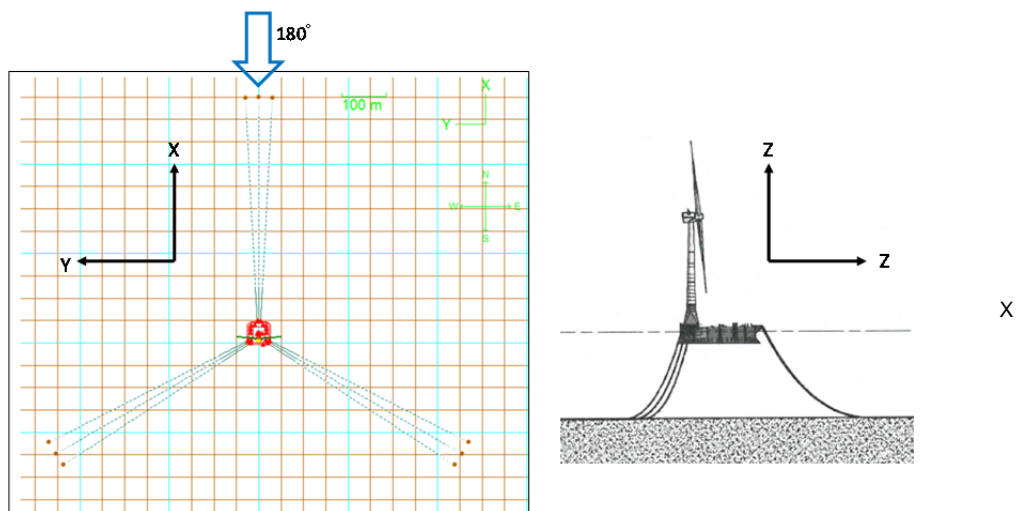


図 4.4-11 外力方向および座標系

No.①～③について、Surge、Heave、Pitch の比較を図 4.4-12、図 4.4-13 に、タワー基部での断面力 ( $F_x$  : X 方向せん断力 (kN)、 $F_z$  : Z 方向軸力 (kN)、 $M_y$  : Y 軸回りの曲げモーメント (kNm)) の比較を図 4.4-14、図 4.4-15 に示す。

浮体の動揺について、Surge の応答に若干のズレが生じるが、Heave、Pitch については、良く一致する結果が得られた。断面力については、両者の解析結果は概ね一致することが確認できた。

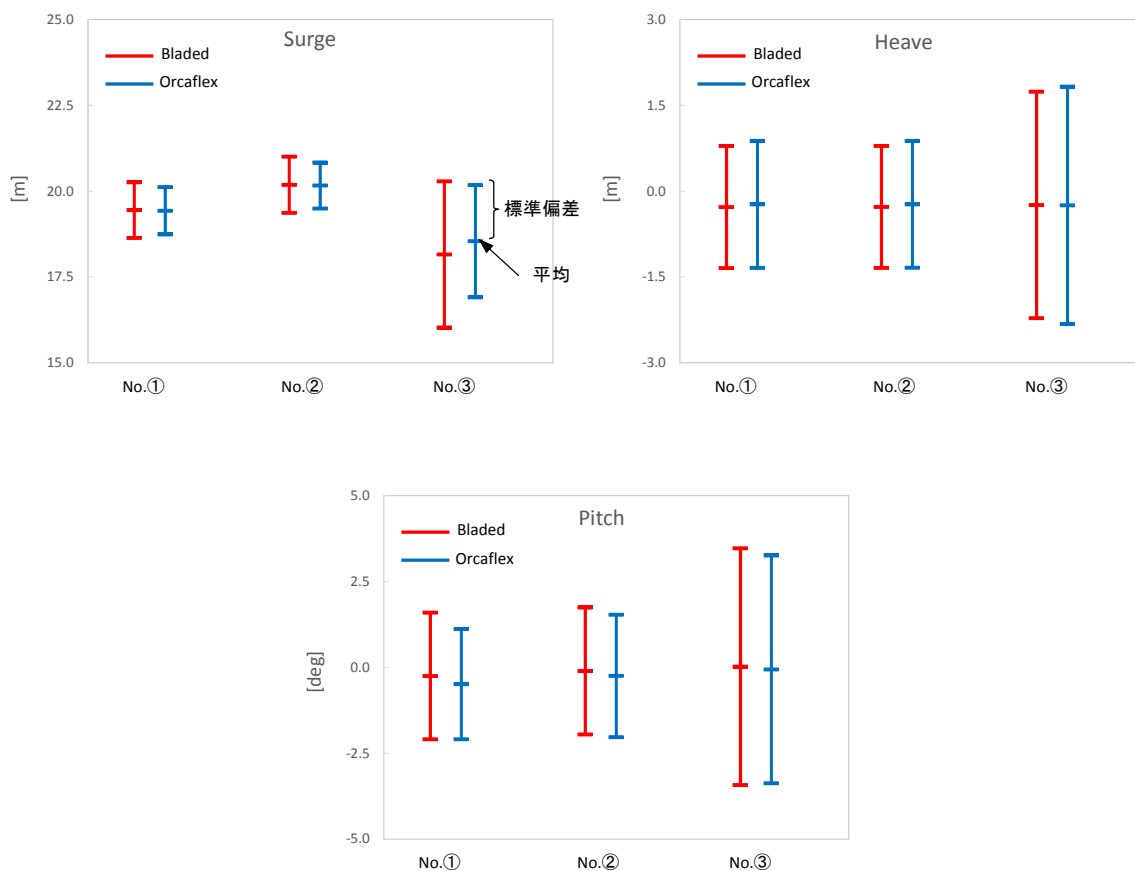


図 4.4-12 Surge、Heave、Pitch の平均値・標準偏差の比較

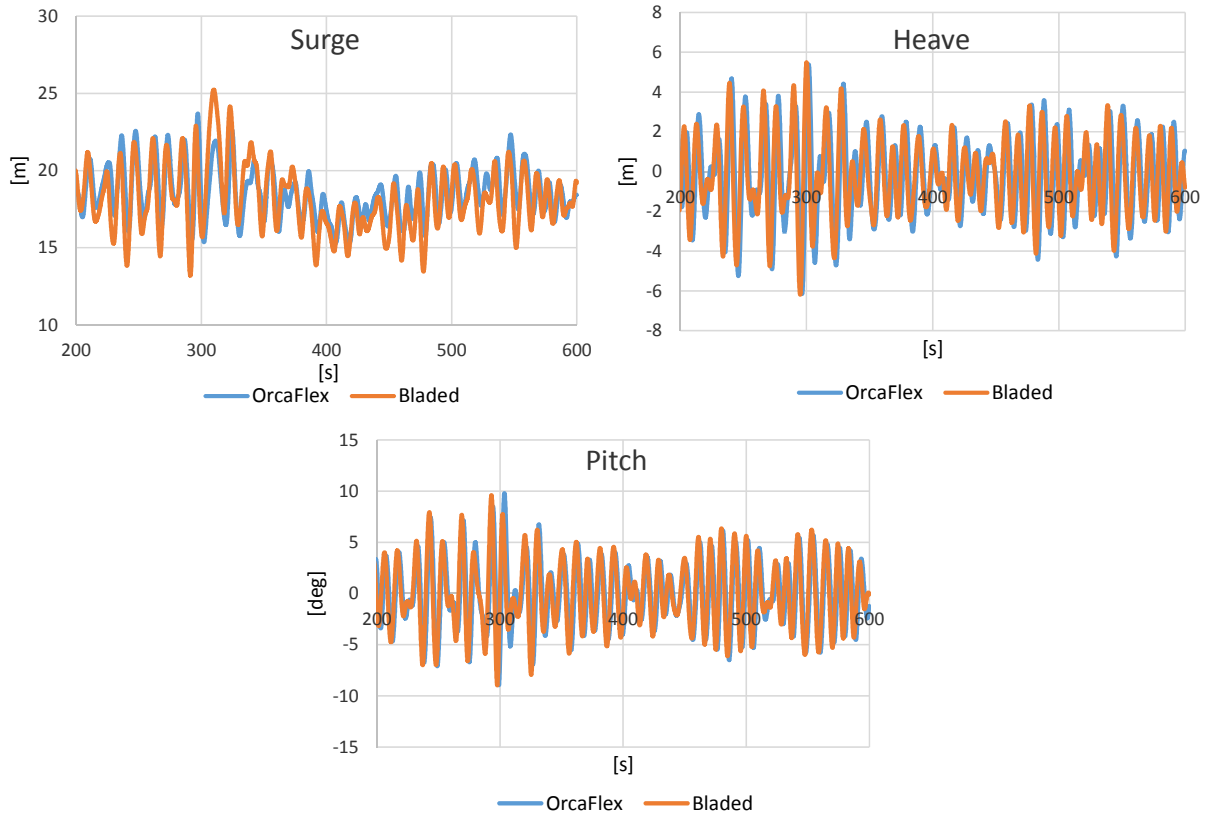


図 4.4-13 Surge、Heave、Pitch の時刻歴の比較 (ケース No.③)

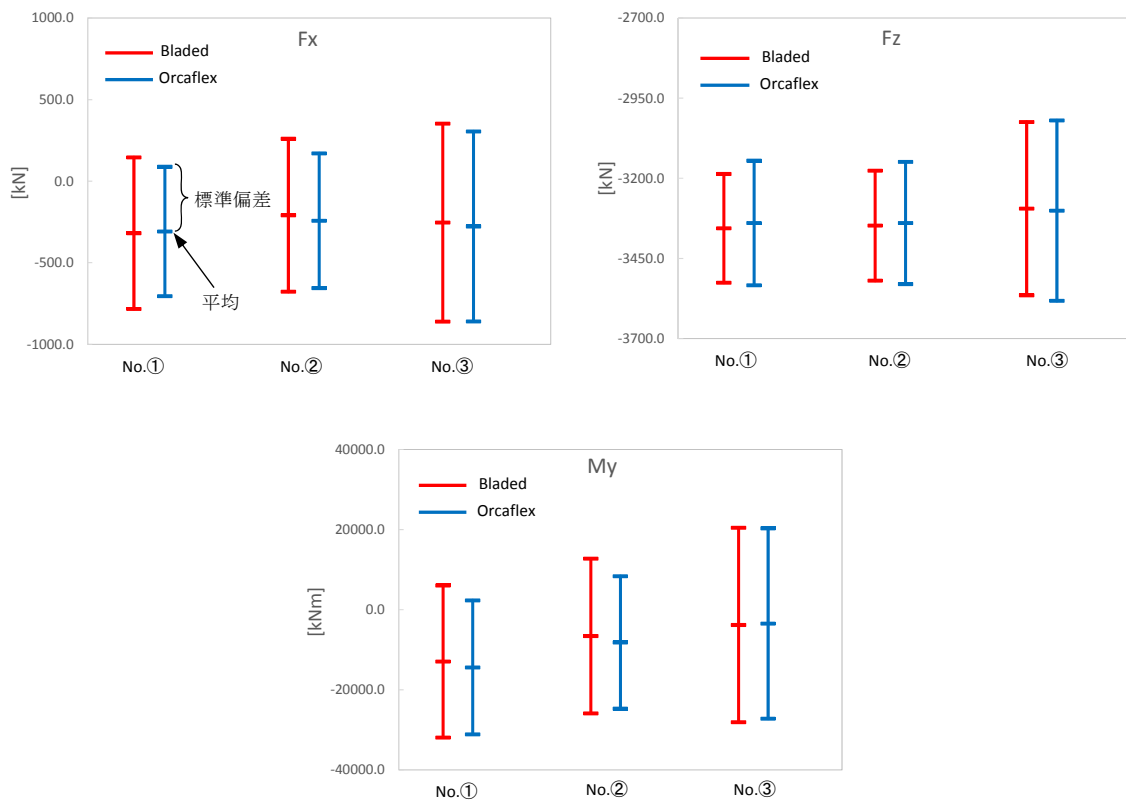


図 4.4-14 タワー基部断面力の平均値・標準偏差の比較

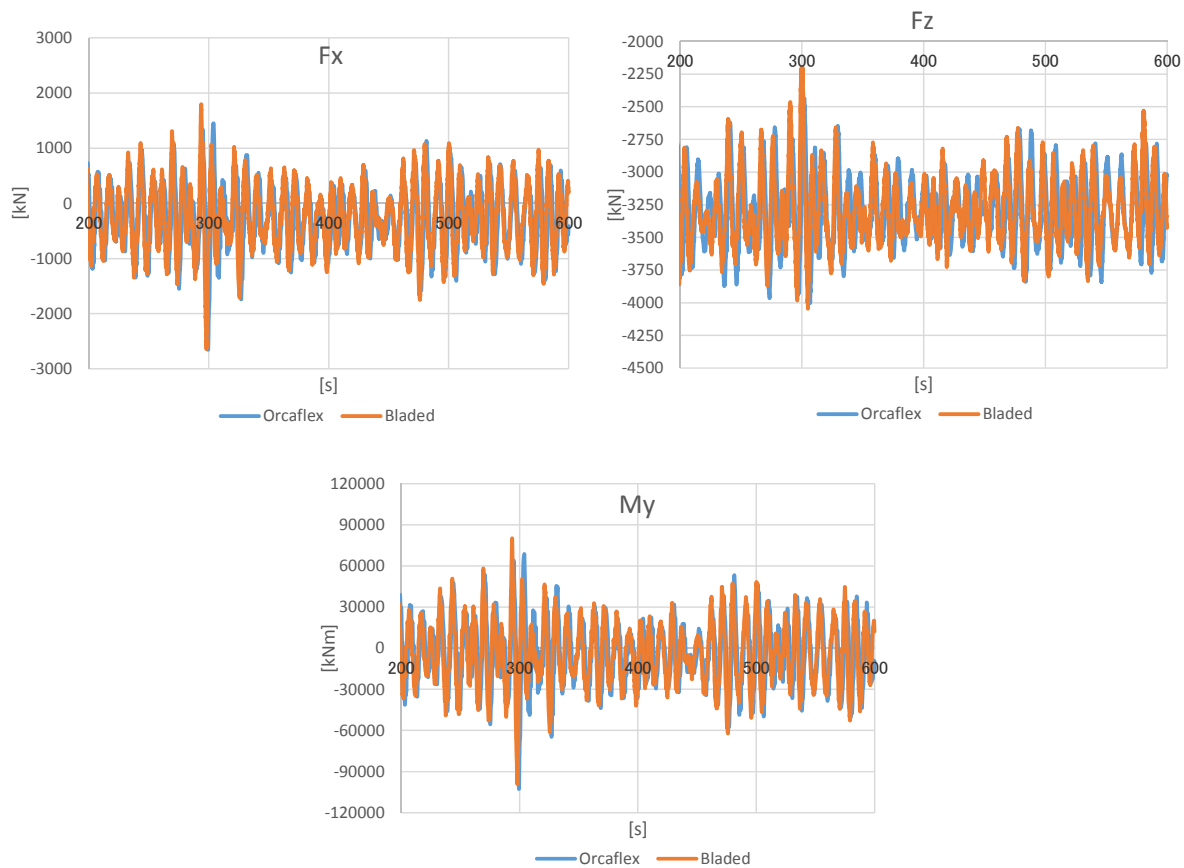


図 4.4-15 タワー基部断面力の時刻歴の比較 (No.③)

## 5. 構造評価事例

### 5.1 浮体施設の構造評価

浮体施設の構造評価は、第Ⅱ編 5.3 節に基づいて行う。

#### 5.1.1 終局強度の検討

##### 1) モデル化および方法

FEM 解析では、解析で得られた水圧分布を作用させながら、照査対象範囲において断面力も精度よく再現できるように、以下のようにモデル化する。

- ・ 3 区画分を抜き出した部分モデルを作成 (図 5.1-1、図 5.1-2)
- ・ 一端を固定、他端を自由とした片持ち梁とする。
- ・ 解析で求めた水圧分布、その他荷重をモデルに作用
- ・ コントロールセクション (以下 C.S. と表示) において全体骨組解析で得られた断面力が発生するよう自由端から入力する 6 自由度の荷重を調整

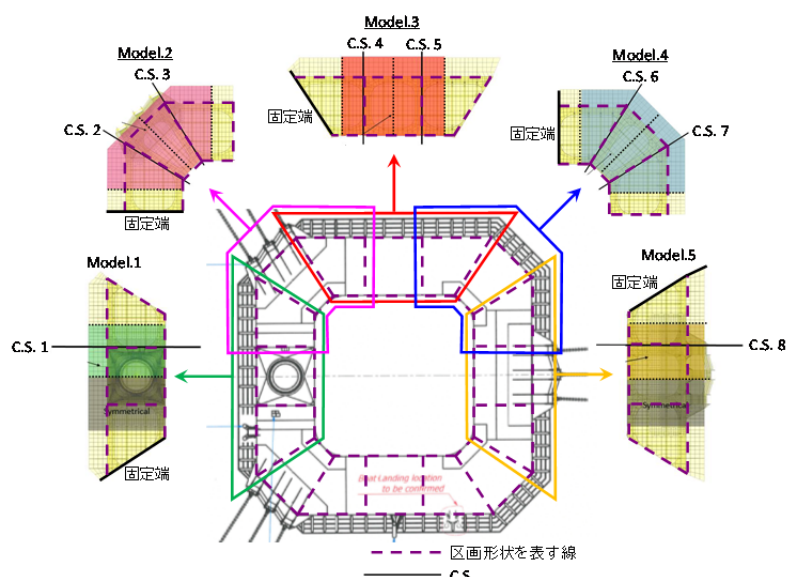


図 5.1-1 浮体各部のモデル化

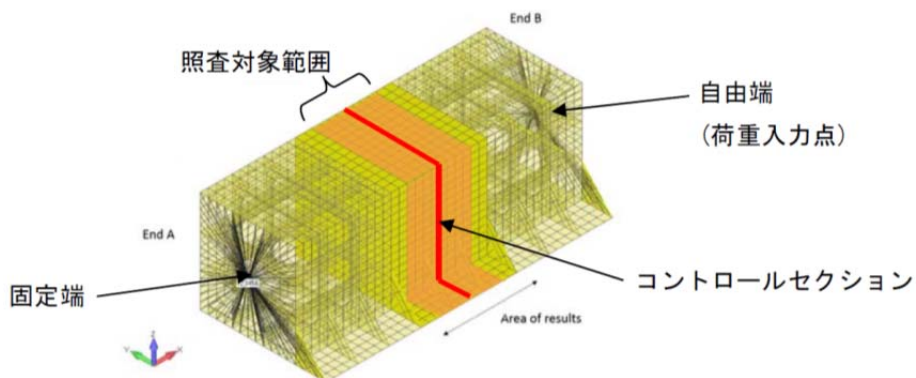


図 5.1-2 部分モデルのイメージ

【モデルへの作用荷重】

- ・ 6 自由度の断面力（自由端から入力）
- ・ 静水圧および波浪変動圧力
- ・ 重力成分（バラスト含む）
- ・ 係留ライン反力（Model.2、Model.5 のみ）
- ・ 風車／タワー反力（Model.1 のみ）

※波浪変動圧力はポテンシャル理論をベースに算出しており、FEM では静水面より上側では圧力は与えない。静水面上の構造は規則計算による確認に加え、以下により構造強度を確保する。

- ・ 側板は「静水圧+波浪変動圧力」が最も大きい下端から上端まで同一の板厚および骨配置とする。
- ・ 甲板の板厚および骨部材配置を底板と同一とする。

C.S.は図 5.1-1 に示す 8 箇所、それぞれの C.S.に対して表 5.1-1 に示す荷重ケースについて解析を実施する。応力の評価範囲（照査対象範囲）は隣の C.S.の中間地点までとし、C.S.（照査対象範囲）毎に強度照査を行う。

表 5.1-1 FEM 解析を行う荷重ケース

荷重ケース	断面力			圧力分布
断面力 最大 ケース	L-max Fx	縦方向せん断力 Fx 最大	+ 同時刻のその他断面力成分	Fx 最大時刻の圧力分布
	L-min Fx	縦方向せん断力 Fx 最小	+ "	Fx 最小 "
	L-max Fy	横方向せん断力最大 Fy	+ "	Fy 最大 "
	L-min Fy	横方向せん断力 Fy 最小	+ "	Fy 最小 "
	L-max Fxy	合成せん断力 Fxy 最大	+ "	Fxy 最大 "
	L-max Fz	軸力 Fz 最大	+ "	Fz 最大 "
	L-min Fz	軸力 Fz 最小	+ "	Fz 最小 "
	L-max Mx	横曲げモーメント Mx 最大	+ "	Mx 最大 "
	L-min Mx	横曲げモーメント Mx 最小	+ "	Mx 最小 "
	L-max My	縦曲げモーメント My 最大	+ "	My 最大 "
	L-min My	縦曲げモーメント My 最小	+ "	My 最小 "
	L-max Mxy	合成曲げモーメント Mxy 最大	+ "	Mxy 最大 "
	L-max Mz	トルク Mz 最大	+ "	Mz 最大 "
L-min Mz	トルク Mz 最小	+ "	Mz 最小 "	
圧力 最大 ケース	P-max side	外側板圧力最大時刻の断面力		外側板で最大圧力発生時刻の圧力分布
	P-max bottom	底板圧力最大時刻の断面力		底板で最大圧力発生時刻の圧力分布
	P-max inside	内側板圧力最大時刻の断面力		内側板で最大圧力発生時刻の圧力分布

2) 構造解析結果（降伏応力に対する照査）

- 使用材料：KA36～KF36
- 降伏点： $\sigma_{yield}=355\text{MPa}$
- 腐食予備厚：1.0mm（片面）、FEM ではこれを除外して計算
- 荷重に対する部分安全率<sup>4</sup>：環境荷重  $\gamma_{env}=1.35$ 、静荷重  $\gamma_{env}=1.00$
- 材料に対する部分安全率<sup>47</sup>： $\gamma_m=1.15$
- 許容値： $\sigma_{vm,a}=\sigma_{yield}/\gamma_m=308\text{MPa}$ （降伏応力に対する照査）

※座屈の許容応力は DNV-RP-C201<sup>48</sup>に基づき設定

FEM 解析で得られた応力の最大値  $\sigma_{max}$  と許容応力  $\sigma_{vm,a}$  の比 ( $\sigma_{max}/\sigma_{vm,a}$ ) の分布を図 5.1-3 に示す。全ての箇所  $\sigma_{max}/\sigma_{vm,a}$  は 1 以下となることを確認した。

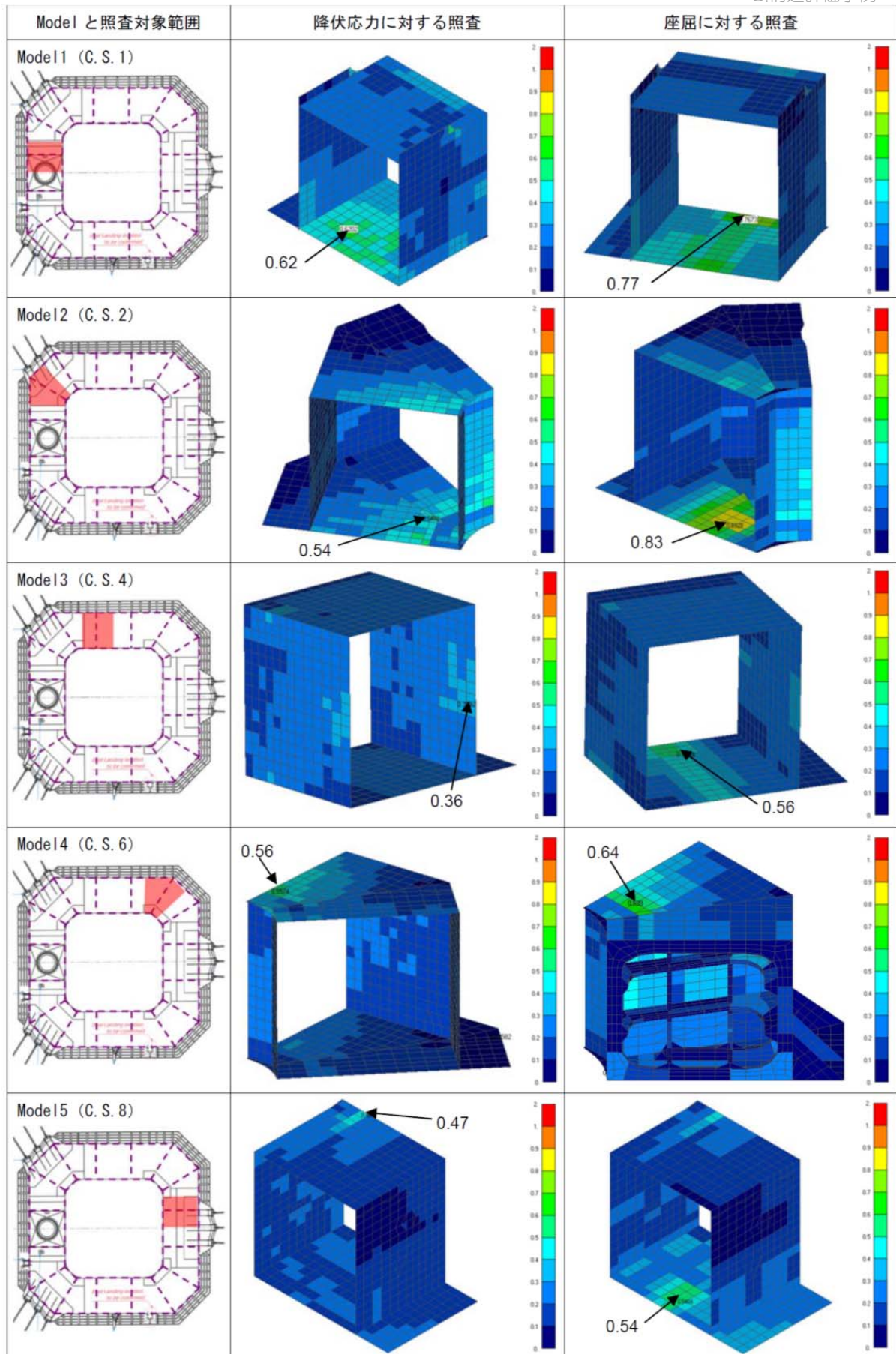


図 5.1-3 応力の照査結果 ( $\sigma_{vm,max}/\sigma_{vm,a}$ )

### 5.1.2 疲労強度の検討

#### 1) 検討手順

疲労検討の手順を図 5.1-4 に示す。疲労検討では、照査対象を応力集中部に限定し、時刻歴解析手法により応力の時刻歴を求めて、レインフロー法により応力振幅をカウントする。

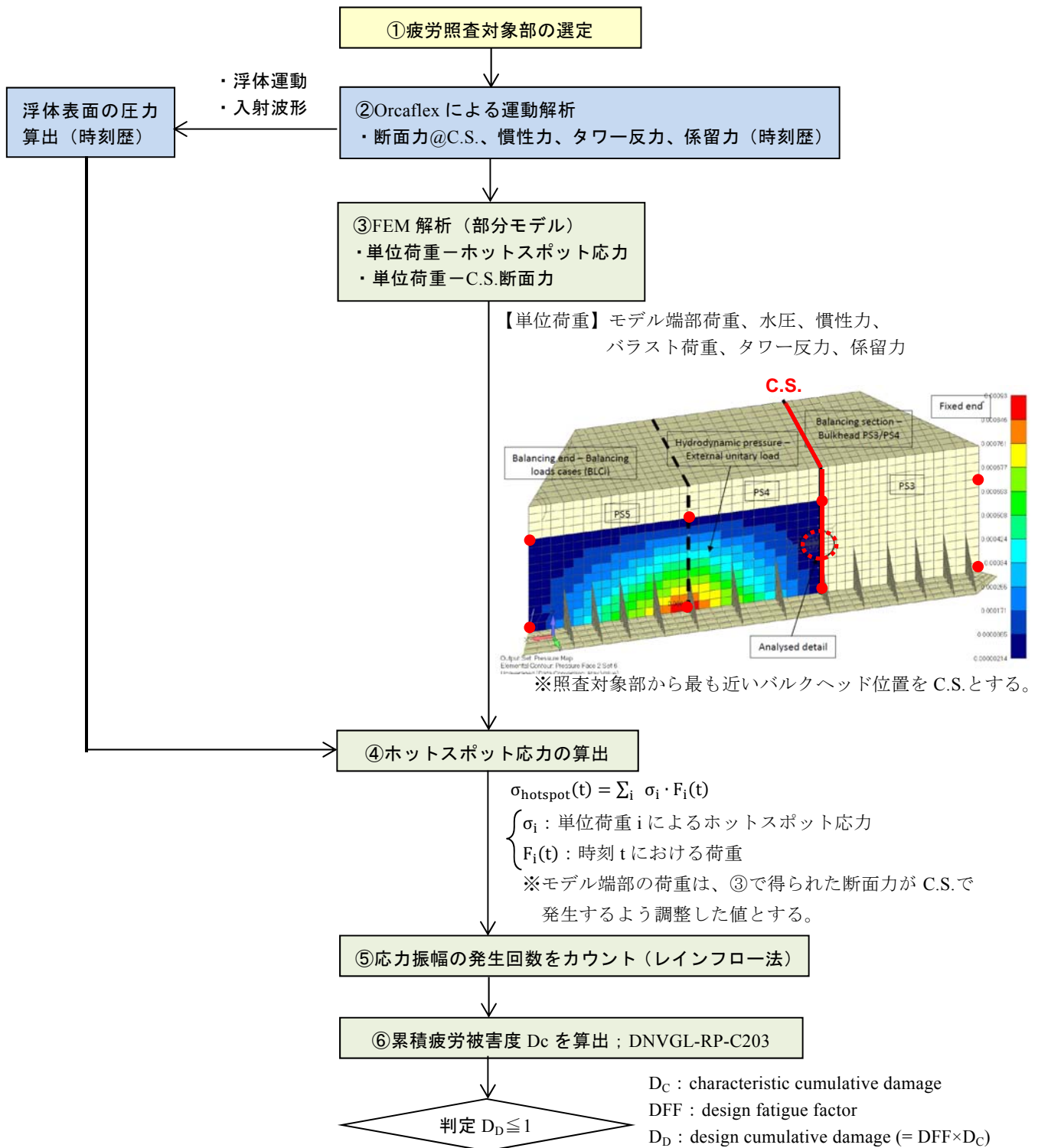


図 5.1-4 疲労検討フロー



## 2) 疲労照査対象部の選定 (図 5.1-4 のフロー①)

疲労照査対象部の一例を図 5.1-5 に示す。FEM 解析では部分モデルを使用し、各照査対象部周辺のメッシュサイズを細かくした詳細モデルを作成した。

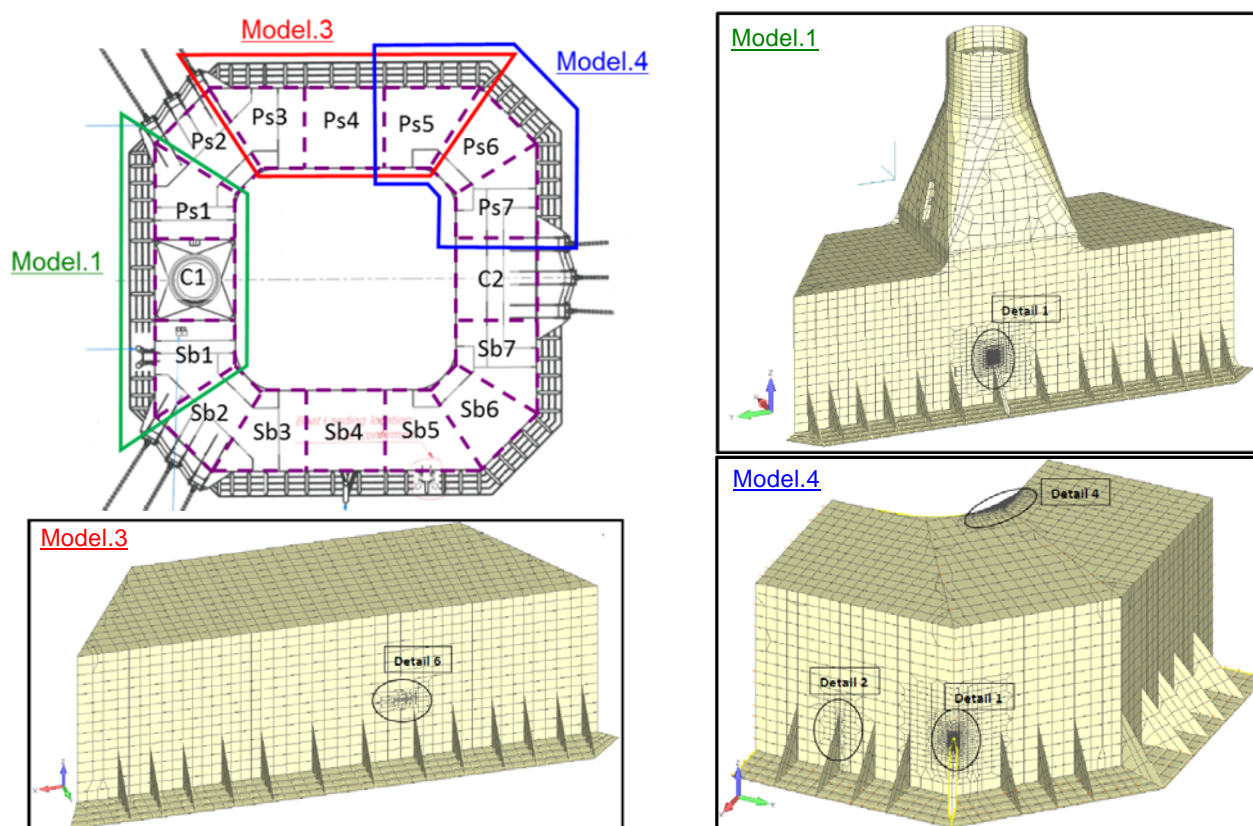


図 5.1-5 疲労照査対象部

## 3) OrcaFlex による解析 (図 5.1-4 のフロー②)

下記荷重ケースに対して、Orcaflex による解析を実施する。

- ・ 波浪条件：波浪推算で得られた発生頻度分布  
12 方位に分割 (IEC 61400-3<sup>37</sup>) ⇒ 波浪発生頻度が 1%以上の 6 方位について計算 (図 5.1-6)
- ・ 風条件：最大スラスト風速  $V_{hub}=12.8\text{m/s}$  (全ケース一律)、12 方位 (風、波向きの変差考慮)
- ・ 解析時間：600s/1 ケース  
⇒合計 1,334 ケース

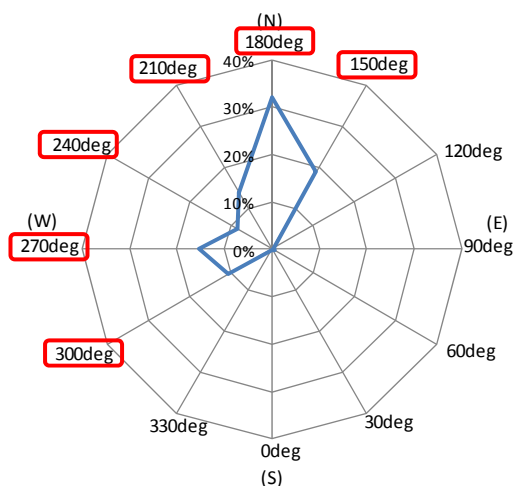


図 5.1-6 方位別の波浪発生頻度

#### 4) FEM 解析 (図 5.1-4 のフロー③)

部分モデル (Model.1、3、4) に下記単位荷重を作用させ、単位荷重とホットスポット応力、単位荷重と C.S.における断面力の関係を求める。

**【単位荷重】**

- ・ 6 自由度の断面力 (自由端から入力)
- ・ 水圧 (図 5.1-7)
- ・ 慣性力 (バラスト含む)
- ・ タワー反力 (Model.1)

単位水圧の作用イメージは図 5.1-7 の通りで、各モデルの側板上 8 点 (図 5.1-7 の赤点部) に単位水圧を作用させる。底板、内側板についても同様に 8 点の作用点を設け、それぞれの単位水圧に対するホットスポット応力を求める。

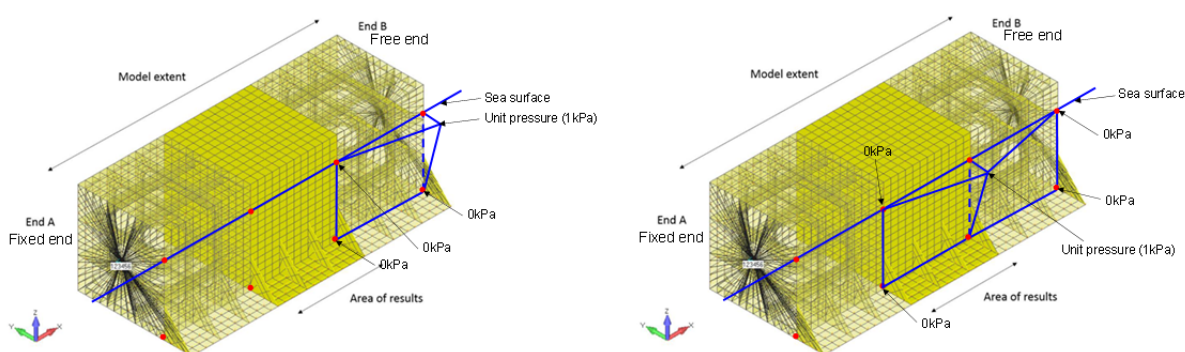


図 5.1-7 単位水圧作用イメージ

### 5) ホットスポット応力の算出 (図 5.1-4 のフロー④)

断面力、浮体の運動（加速度）、局部水圧、タワー反力の時刻歴と、それぞれの単位荷重一応力の関係から、荷重ケース毎にホットスポット応力の時刻歴 $\sigma_{hotspot}(t)$ へ変換する。具体的には次式による。

$$\sigma_{hotspot}(t) = \sum_i \sigma_i \cdot F_i(t) \quad \text{式 5.1-1}$$

ここで、

- $\sigma_{hotspot}(t)$  : ホットスポット応力の時刻歴 (t)
- $i$  : 単位荷重の種類
- $\sigma_i$  : 単位荷重*i*によるホットスポットの応力 (MPa)
- $F_i(t)$  : 時間ステップ*t*における荷重（断面力はモデルの自由端での値）(MPa)

### 6) 疲労照査結果 (図 5.1-4 のフロー⑤⑥)

レインフロー法により応力振幅の発生回数をカウントし、DNVGL-RP- C203<sup>38</sup>のSN曲線に従い累積疲労被害度  $D_c$  を次式により算出した。

$$D_c = \sum \frac{n_i}{N_i} \quad \text{式 5.1-2}$$

ここで、

- $D_c$  : 累積疲労被害度
- $n_i$  : 応力振幅 $\Delta\sigma_i$ の発生回数
- $N_i$  : 応力振幅 $\Delta\sigma_i$ により疲労破壊に至るまでの $\Delta\sigma_i$ の発生回数で DNVGL-RP- C203<sup>38</sup>による

照査結果一覧を表 5.1-2 に示す。最も疲労被害度が大きくなったのは、着色して示している Model.3 の Detail.5（浮体内部の骨部材の交差部）で  $D_D=0.471$  である。

表 5.1-2 疲労照査結果一覧

Model	Detail	区画	部位	疲労曲線	D <sub>C</sub>	DFE	D <sub>D</sub> (≦1)
1	1	C1	スカート補強部	D	1.89E-03	3	5.68E-03
3	2	Ps3	浮体内部 骨部材の交差部	D	5.31E-02	2	1.06E-01
	3	Ps3/4	浮体内部 隔壁、骨部材取り合い部	D	2.87E-02	2	5.74E-02
	5	Ps4	浮体内部 骨部材の交差部	B2	2.36E-01	2	4.71E-01
	6	Ps4/5	浮体内部 隔壁、骨部材取り合い部	B2	4.06E-03	2	8.12E-03
	7	Ps4	浮体内部 骨部材の交差部	B2	1.58E-02	2	3.16E-02
	8	Ps3/4	浮体内部 隔壁、骨部材取り合い部	D	6.82E-02	2	1.36E-01
4	1	Ps6/7	スカート補強部	D	1.92E-02	3	5.77E-02
	2	Ps7	浮体内部 骨部材の交差部	D	4.50E-02	2	8.99E-02
	3	Sb6/7	浮体内部 隔壁、骨部材取り合い部	D	1.29E-03	2	2.58E-03
	4	Sb5/6	隅角 R 部	B2	7.16E-02	2	1.43E-01

※DFE(Design fatigue factor) : 海中は3、浮体内部 (バラスト水あり) は2

D<sub>D</sub>(Design cumulative damage) : =DFE×D<sub>C</sub> ≦ 1.0

極値波浪条件が累積疲労被害度に与える影響を考慮するため、ワイブル分布を用いて応力振幅の発生頻度および疲労被害度を評価する<sup>38</sup>。

$$Q(\Delta\sigma) = \exp\left[-\left(\frac{\Delta\sigma}{q}\right)^h\right] \quad \text{式 5.1-3}$$

$$q = \frac{\Delta\sigma_0}{(\ln n_0)^{1/h}} \quad \text{式 5.1-4}$$

ここで、

- Q(Δσ) : 応力振幅Δσの超過確率
- h : ワイブル形状パラメータ
- q : ワイブル尺度パラメータ
- Δσ<sub>0</sub> : n<sub>0</sub>回に1回の割合で発生する最大応力振幅
- n<sub>0</sub> : 応力振幅Δσ<sub>0</sub>の発生回数
- h : ワイブル形状パラメータ

累積疲労被害度が最も厳しい Model.3 の Detail5 を対象に、長期分布から得られた応力振幅の発生頻度と終局強度解析時の最大応力 (50 年に 1 回) を考慮し、式 5.1-3 の形状パラメータ h および尺度パラメータ q を設定し、応力振幅の発生頻度を再評価した。

- ・終局強度解析の最大応力×2 を 50 年最大の応力振幅として、これが 50 年に 1 回 (20 年に 0.4 回) 発生するとして尺度パラメータを設定
- ・長期分布から得られた応力振幅を下回らないよう形状パラメータを設定 (h=0.82)

ワイブル分布により算定した累積疲労被害度は以下の通りで、長期分布のみから得られた累積疲労被害度よりやや増加したが、許容値 (D<sub>D</sub>≦1.0) を下回る結果となった。

【ワイブル分布による疲労被害度の評価結果】(図 5.1-8)

$D_D = D_C \times DFF = 0.278 \times 2 = 0.556$  (長期分布のみの場合  $D_D = 0.471$ )

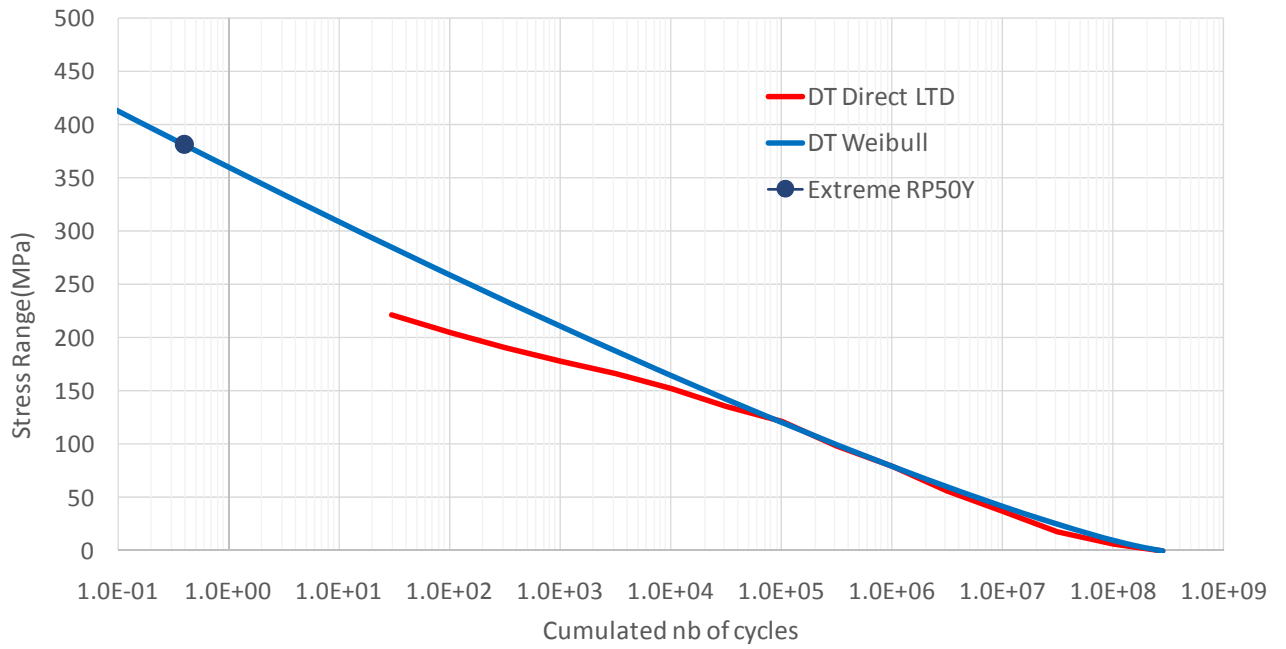


図 5.1-8 ワイブル分布による応力振幅の発生頻度の評価 (Model.3、Detail5)

## 5.2 係留施設の構造評価

係留施設の構造評価は、第Ⅱ編 5.4 節に基づいて行う。

### 5.2.1 終局強度の検討

#### 1) 係留ラインの仕様設定

係留索配置を図 5.2-1 に、係留索仕様を表 5.2-1 に示す。係留チェーンの許容張力は、NK ガイドライン<sup>4</sup>の腐食摩耗量の最大値 0.4mm/年（8mm/20 年）を考慮した Net 径 124mm の破断荷重から設定する（表 5.2-2）。

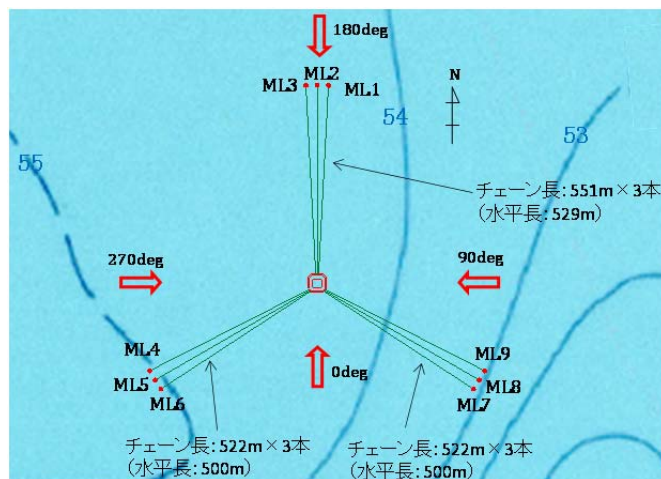


図 5.2-1 係留配置図

表 5.2-1 係留チェーン仕様

チェーン仕様	R4 スタッドレス
径	132mm
Net 径 (腐食摩耗考慮)	124mm
気中重量	348.5kg/m
剛性	1,400MN
破断荷重	15,965kN
Net 径の破断荷重	14,358kN
初期張力 (浮体係留点)	353kN
係留角度 (浮体係留点)	32°

表 5.2-2 チェーン許容張力（安全率は NK ガイドラインによる）

状態	安全率	許容張力 (kN)
非損傷時	1.67	8,598
単一索破断状態（再現期間 1 年）	1.25	11,486
単一索破断時の過渡状態（再現期間 50 年）	1.05	13,675

## 2) 検討方法

DLC1.6、6.1 について、OrcaFlex を用いて係留の動的応答、外力の方向性を考慮した詳細解析を実施し、係留索の安全性を評価する。解析時間は全て 3,600s で、6 シードの解析を実施する。OrcaFlex モデル図を図 5.2-2 に示す。

Step1~4 の手順で検討を行う。IEC では基本的に波と風のみスアライメントの考慮を要求されている。ここでは、Step1 で波、風同一方向の解析を行い、クリティカルな外力方向を特定した上で、Step2 以降でクリティカルな方向をベースにミスアライメントを考慮した検討を実施する。

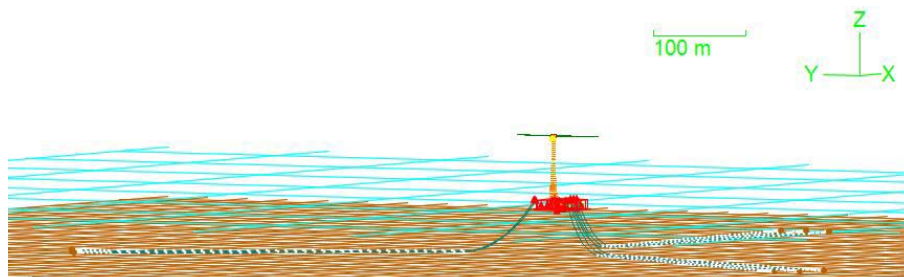


図 5.2-2 OrcaFlex モデル図

### (1) Step1 : 非損傷時 (波、風同一方向)

外力方向を 30deg 毎に変えて検討を行う。荷重ケースを表 5.2-3、考慮する外力方向を図 5.2-3 に示す。また、本設置海域は周囲を陸地に囲まれ、波については顕著な方向性がみられる海域であるため、DLC6.1 では方位別に波浪条件を変えて解析を実施する。

表 5.2-3 Step1 の荷重ケース

DLC	風速 (at $Z_{hub}$ )	Hs	$T_{1/3}$	海面流速	方向
1.6 (運転時)	12.8m/s (最大スラスト)	5.42m	7.9s, 9.0s, 10.2s	0.10 m/s	図 5.2-3 の通り
	25.0m/s (カットアウト)			0.19 m/s	
6.1 (停止時)	48.5m/s	図 5.2-4 の通り		1.04 m/s	

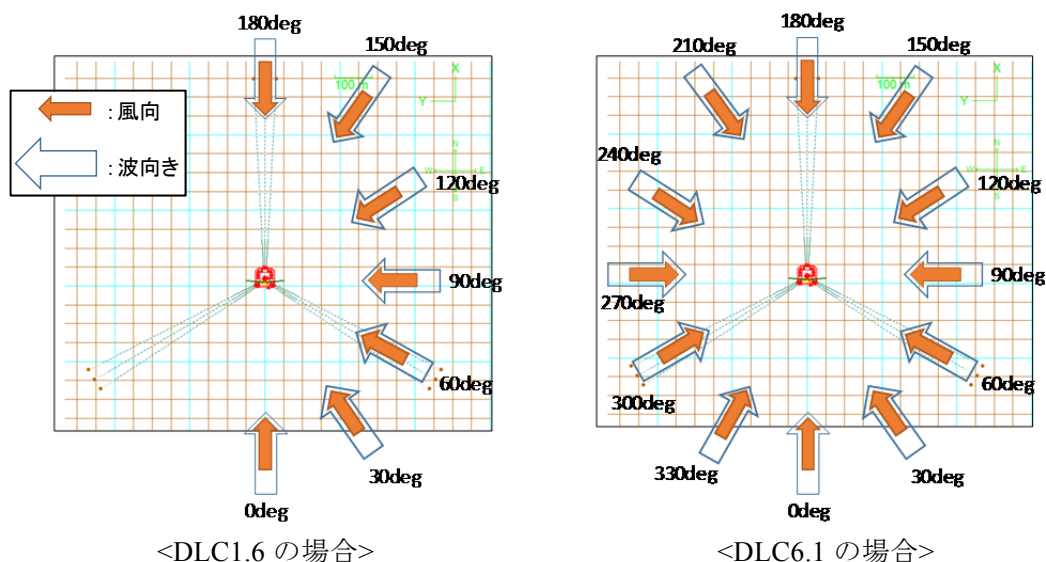


図 5.2-3 Step1 で考慮する外力方向組合せ

波浪推算データから求めた方位別の50年再現期待値<sup>(※)</sup>、国土技術政策総合研究所資料<sup>23</sup>の方位別の50年再現波高 (WSTS.234、WSTS.277) を比較し、最も安全側の波高を抽出する (図 5.2-4)。採用した波高が、1年再現期待値 $H_{s1-1hour}=5.42m$ を下回る場合、その方位の設計波高は5.42mとする。波周期は次式<sup>4</sup>に従い範囲を求め、最小、中間、最大値について解析を実施する。

$$11.1\sqrt{H_s/g} \leq T \leq 14.3\sqrt{H_s/g} \quad \text{式 5.2-1}$$

ここで、

- $H_s$  : 有義波高 (m)
- $g$  : 重力加速度 ( $m/s^2$ )
- $T$  : 有義波周期 (s)

〔※波浪推算より得られた 50 年再現波高の最大値は N 方向の 7.82m と、方位を考慮しない 50 年再現波高  $H_{s50-1hour}=9.8m$  から、方位別の 50 年再現波高を補正した (9.8/7.82 倍) 〕



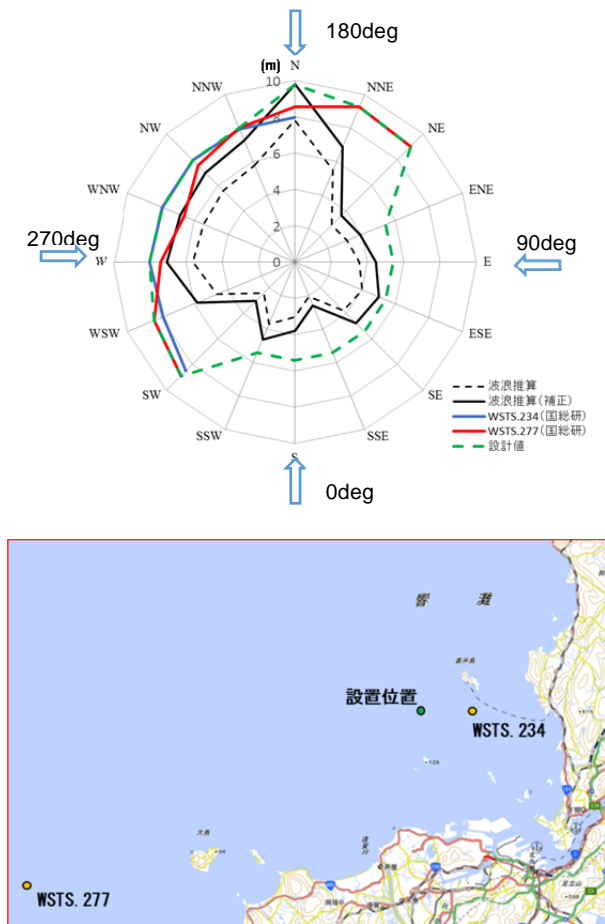


図 5.2-4 方位別の 50 年再現期待値波高<sup>41</sup>

(2) Step2 : 非損傷時 (波、風ミスアライメント)

Step1 の DLC6.1 で係留張力が大きくなった 2 方向 (150deg、180deg) について、 $\pm 30\text{deg}$ (10deg 毎)の風向と波向のミスアライメントを考慮した計算を行う (図 5.2-5)。流れについては、吹送流は風向と、水中流は波向とそれぞれ同一とする。

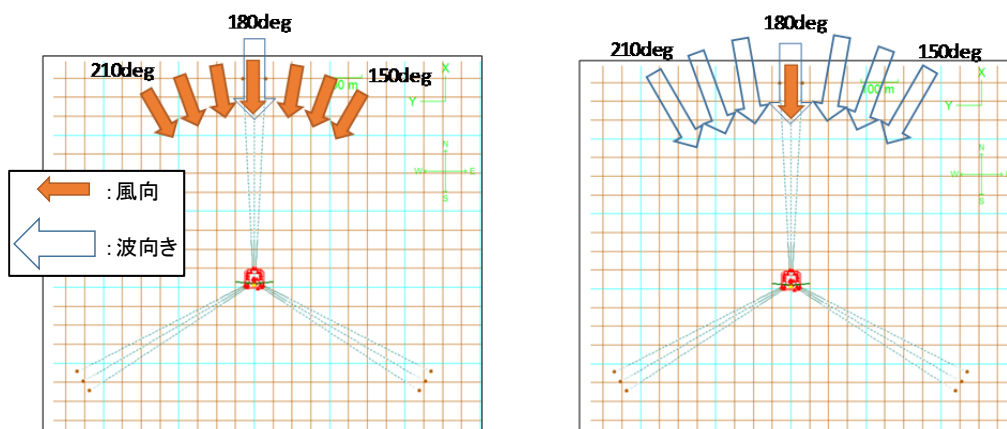


図 5.2-5 Step2 で考慮する外力方向 (180deg 方向をベースにしたケース)

(3) Step3：単一索破断時（破断後の平衡状態）

Step1 で係留張力が大きくなった 2 方向（150deg、180deg）について、張力が最も大きいラインおよび 2 番目に大きいラインの破断を想定した解析を行う。解析で考慮する外力方向は Step2 と同じとする。環境荷重の再現期間 1 年（NK ガイドライン<sup>4</sup>で規定）および 50 年（参考扱い）の両ケースについて検討する。

(4) Step4：単一索破断時の過渡状態

非損傷時の検討（Step1、2）のうち最も張力が大きくなったケースについて、2 番目に張力が大きいラインが途中で破断した状態を想定し、解析を行う。破断ラインの張力が最大になる時刻で破断すると仮定する。

3) 解析結果

(1) Step 1：非損傷時（波、風同一方向）

最大張力の解析結果を表 5.2-4 に示す。結果は全て 6 シードの平均値である。張力が最も大きくなったのは、ML1（着色部）の浮体係留点の 7,500kN で、UF（最大張力／許容張力）は 0.87 である。

表 5.2-4 Step 1 の最大張力

ライン No.	浮体係留点		アンカー点		荷重ケース
	最大張力 (kN)	UF	最大張力 (kN)	UF	
ML1	7,500	0.87	7,019	0.82	DLC6.1 D150deg V48.5 Hs9.28 T10.3
ML2	7,464	0.87	6,973	0.81	DLC6.1 D180deg V48.5 Hs9.8 T10.6
ML3	7,455	0.87	6,958	0.81	DLC6.1 D180deg V48.5 Hs9.8 T10.6
ML4	6,338	0.74	5,785	0.67	DLC6.1 D300deg V48.5 Hs8.88 T11.6
ML5	6,015	0.70	5,415	0.63	DLC6.1 D300deg V48.5 Hs8.88 T11.6
ML6	5,742	0.67	5,275	0.61	DLC6.1 D330deg V48.5 Hs8.88 T10.1
ML7	2,781	0.32	2,052	0.24	DLC6.1 D120deg V48.5 Hs9.02 T10.2
ML8	3,596	0.42	2,932	0.34	DLC6.1 D120deg V48.5 Hs9.02 T10.2
ML9	4,709	0.55	4,155	0.48	DLC6.1 D120deg V48.5 Hs9.02 T10.2

(2) Step 2：非損傷時（波、風ミスアライメント）

最大張力の結果を表 5.2-5 に示す。張力が最も大きくなったのは、ML1（着色部）の浮体係留点の 8,244kN で、UF（最大張力／許容張力）は 0.96 である。

表 5.2-5 Step 2 の最大張力

ライン No.	浮体係留点		アンカー点		荷重ケース
	最大張力 (kN)	UF	最大張力 (kN)	UF	
ML1	8,244	0.96	7,810	0.91	DLC6.1 Dwind150 Dwave160 V48.5 Hs9.8 T10.6
ML2	7,464	0.87	6,973	0.81	DLC6.1 Dwind180 Dwave180 V48.5 Hs9.8 T10.6
ML3	8,117	0.94	7,650	0.89	DLC6.1 Dwind180 Dwave200 V48.5 Hs9.8 T10.6
ML4	1,234	0.14	678	0.08	DLC6.1 Dwind180 Dwave210 V48.5 Hs8.0 T9.6

ML5	1,081	0.13	668	0.08	DLC6.1 Dwind180 Dwave210 V48.5 Hs8.0 T9.6
ML6	959	0.11	700	0.08	DLC6.1 Dwind180 Dwave210 V48.5 Hs8.0 T9.6
ML7	2,562	0.30	1,830	0.21	DLC6.1 Dwind150 Dwave120 V48.5 Hs9.02 T10.2
ML8	3,343	0.39	2,652	0.31	DLC6.1 Dwind150 Dwave120 V48.5 Hs9.02 T10.2
ML9	4,341	0.50	3,756	0.44	DLC6.1 Dwind150 Dwave120 V48.5 Hs9.02 T10.2

(3) Step 3 : 単一索破断時 (破断後の平衡状態)

最大張力の結果を表 5.2-6、表 5.2-7 に示す。再現期間 1 年のケースでは、最大張力は 3,635kN、UF (最大張力/許容張力) は 0.32 と十分に余裕がある結果が得られた。また、再現期間 50 年のケースについても、最大張力は 11,820kN で破断荷重 14,358kN を下回ることを確認した。

表 5.2-6 Step 3 (単一索破断時：再現期間 1 年) の最大張力

ライン No.	破断索	浮体係留点		アンカー点		荷重ケース
		最大張力 (kN)	UF	最大張力 (kN)	UF	
ML1	ML2	3,635	0.32	2,986	0.26	Dwind150 Dwave160 V38.8 Hs5.42 T7.9
ML2	ML1	3,415	0.30	2,703	0.24	Dwind170 Dwave180 V38.8 Hs5.42 T7.9

表 5.2-7 Step 3 (単一索破断時：再現期間 50 年) の最大張力

ライン No.	破断索	浮体係留点		アンカー点		荷重ケース
		最大張力 (kN)	破断荷重 (kN)	最大張力 (kN)	破断荷重 (kN)	
ML1	ML2	11,820	14,358	11,536	14,358	Dwind150 Dwave160 V48.5 Hs9.8 T10.6
ML3	ML2	11,610	14,358	11,314	14,358	Dwind180 Dwave200 V48.5 Hs9.8 T10.6

(4) Step 4 : 単一索破断時の過渡状態

最大張力の結果を表 5.2-8 に示す。張力が最も大きくなったのは、ML1 の 10,282kN で、UF (最大張力/許容張力) は 0.75 である。

表 5.2-8 Step 4 (単一索破断時の過渡状態：再現期間 50 年) の最大張力

荷重ケース	最大張力 (kN)								
	ML1	ML2	ML3	ML4	ML5	ML6	ML7	ML8	ML9
Dwind150_Dwave160_V48.5 Hs9.8 T10.6	10,282	破断	7,653	676	715	747	1,021	1,135	1,295
UF	0.75	—	0.56	0.05	0.05	0.05	0.07	0.08	0.09

#### 4) まとめ

最大張力の計算結果を表 5.2-9 に、水平保持力とアンカー一点最大荷重の関係を表 5.2-10 に示す。また、非損傷時および単一索破断時のアンカー一点での最大張力および地鎖余長を表 5.2-11 に示す。

地鎖余長はアンカー一点張力を浮体係留点に水平荷重として与えてカタナリー計算により求めたものである。全てのラインで地鎖余長が残っており、アップリフトは発生しないことを確認した。

表 5.2-9 最大張力の計算結果

状態	最大張力 (kN)	許容張力 (kN)	UF
非損傷時	8,244	8,598	0.96
単一索破断状態 (再現期間 1 年)	3,635	11,486	0.32
単一索破断時の過渡状態 (再現期間 50 年)	10,282	13,675	0.75

表 5.2-10 アンカー一点最大荷重と水平保持力

状態	アンカー一点 最大荷重 (t)	安全率	必要水平 保持力 (t)	アンカー 水平保持力 (t)
非損傷時	796.4	1.5	1194.6	1,200
単一索破断時 (再現期間 1 年)	304.5	1.0	304.5	1,200

表 5.2-11 アンカー最大荷重と地鎖余長

ライン No.	アンカー一点 最大張力 (kN)	地鎖余長 (m)
ML1	7,810	3
ML2	6,973	32
ML3	7,650	8
ML4	5,785	74
ML5	5,415	90
ML6	5,275	95
ML7	2,052	268
ML8	2,932	215
ML9	4,155	153

## 5.2.2 疲労強度の検討

### 1) 解析条件および荷重ケース

解析条件および荷重ケースを以下に示す。

- ・使用モデル：OrcaFlex（浮体：剛体モデル、係留：動的応答）
- ・波浪条件：波浪推算で得られた発生頻度分布
- ・風条件：最大スラスト風速  $V_{hub}=12.8\text{m/s}$ （全ケース一律の風速、波と同一方向と仮定）
- ・流速：50年最大流速  $1.04\text{m/s}$ （全ケース一律の流速、波と同一方向と仮定）
- ・解析時間：600s/1ケース

### 2) 検討方法

- ①各荷重ケースに対して OrcaFlex により時刻歴解析を行い、係留チェーン張力振幅  $\Delta T$  を算出
- ②レインフロー法により各ケースの張力振幅の発生回数をカウント
- ③チェーンの応力振幅  $\Delta\sigma_j$  は、NK ガイドライン<sup>4</sup>の腐食摩耗量の最大値  $0.4\text{mm/年}$  ( $8\text{mm/20年}$ ) を考慮した Net 径  $d=124\text{mm}$  から算出（全ケースに適用）

$$\Delta\sigma = \frac{\Delta T}{(2\pi d^2/4)} \quad \text{式 5.2-2}$$

ここで、

- $\Delta\sigma$  : チェーンの応力振幅
- $\Delta T$  : 係留チェーン張力振幅
- $d$  : Net 径 (mm)

- ④累積疲労被害度を DNVGL-OS-E301<sup>39</sup> の S-N 線図 (図 5.2-6) を用いマイナー則に基づき算出

$$D = \sum_{i=1}^n N_i \cdot d_i \quad \text{式 5.2-3}$$

$$d_i = \sum_{j=1}^p d_{i,j} \quad \left[ d_{i,j} = \frac{n_{i,j}}{N_{c,j}} = \frac{n_{i,j}}{a_D \cdot (\Delta\sigma_j)^{-m}} \right] \quad \text{式 5.2-4}$$

ここで、

- $D$  : 累積疲労被害度
- $N_i$  : 海象ケース  $i$  の 20 年間の発生回数
- $d_i$  : 海象ケース  $i$  による疲労被害度
- $d_{i,j}$  : 海象ケース  $i$  における  $j$  番目の応力振幅ブロックによる疲労被害度
- $n_{i,j}$  : 海象ケース  $i$  における  $j$  番目の応力振幅ブロック  $\Delta\sigma_j$  の発生回数
- $N_{c,j}$  : 応力振幅  $\Delta\sigma_j$  により疲労破壊に至るまでの応力振幅  $\Delta\sigma_j$  の発生回数
- $a_D$  :  $6.0 \times 10^{10}$  (スタッドレスチェーンの場合)
- $m$  : 3.0 (スタッドレスチェーンの場合)

NK ガイドライン<sup>4</sup>に従い安全率 3 を考慮； $3 \times D$ の値が 1 を超えないことを確認する。

⑤疲労強度の判定

安全率 3 を考慮し、疲労に対する安全性を評価する。（ $3 \times D$ の値が 1 を超えないことを確認する。）

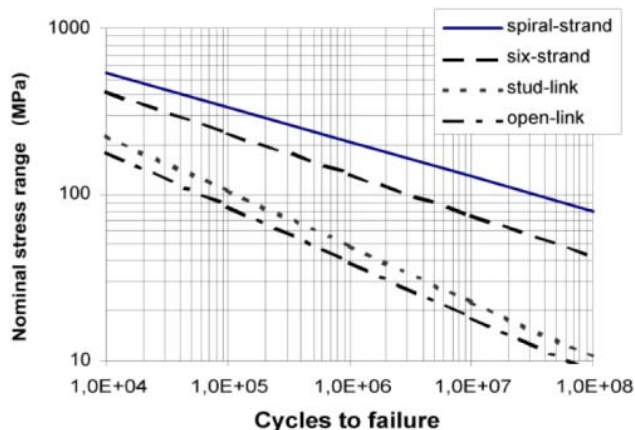


図 5.2-6 S-N 曲線 (DNV-GL OS E301)

3) 解析結果

各係留ラインの累積疲労被害度および疲労寿命算定結果を図 5.2-7 および表 5.2-12 に示す。最も厳しい結果となったクラスタは ML1~ML3 であり、これは N 方向周辺からの外力分布の影響による。各係留ライン上 67 カ所で疲労被害度をチェックしたが、いずれにおいてもチェーンの浮体側接続部付近の疲労被害度が最も大きくなった。

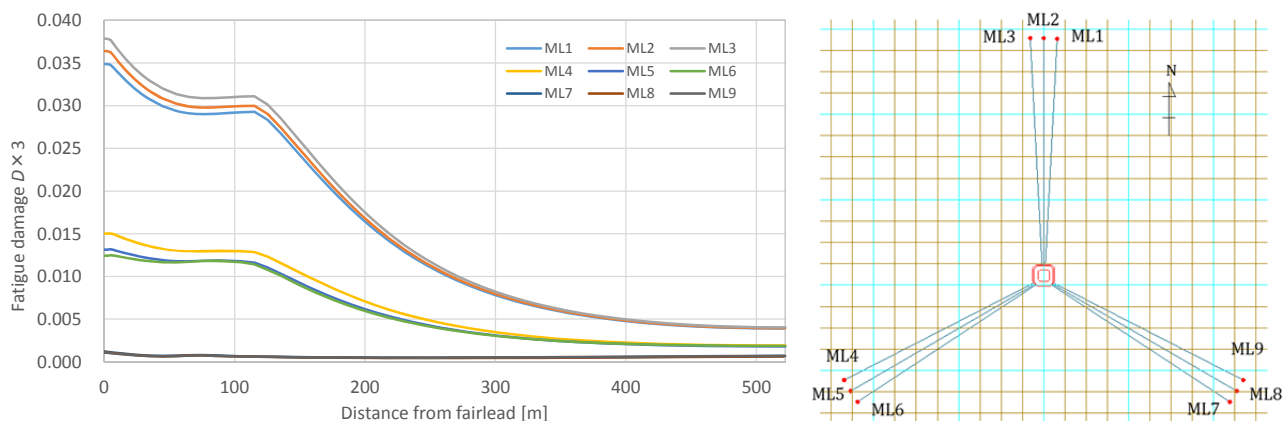


図 5.2-7 各ラインの疲労被害度  $D \times 3$

表 5.2-12 累積疲労被害度および疲労寿命の算定結果

	ML1	ML2	ML3	ML4	ML5	ML6	ML7	ML8	ML9
累積疲労被害度 $D \times 3 (\leq 1)$	0.0349	0.0364	0.0379	0.0150	0.0132	0.0125	0.0012	0.0011	0.0011
疲労寿命 ( $\geq 20$ 年)	573	549	528	1,329	1,518	1,600	16,429	17,480	18,059

※表中の累積疲労被害度および疲労寿命は NK ガイドラインの安全率 3 を考慮した値

本設備のような浅海域係留の場合には、極値波浪条件において大きな張力変動が生じ、それが累積疲労被害度に大きな影響を及ぼすことが考えられる。そこで、疲労被害度が大きい ML1～3 について、再現期間 1 年、10 年、30 年、50 年最大波における張力振幅を算出し、極値波浪条件が累積疲労被害度に与える影響を評価することとした。具体的な方法は以下の通りである。DNVGL-RP-C203<sup>38</sup> にワイブル分布を用いて疲労被害度を評価する手法が示されている。

$$Q(\Delta\sigma) = \exp\left[-\left(\frac{\Delta\sigma}{q}\right)^h\right] \quad \text{式 5.2-5}$$

$$q = \frac{\Delta\sigma_0}{(\ln n_0)^{1/h}} \quad \text{式 5.2-6}$$

ここで、

- $Q(\Delta\sigma)$  : 応力振幅 $\Delta\sigma$ の超過確率
- $h$  : ワイブル形状パラメータ
- $q$  : ワイブル尺度パラメータ
- $\Delta\sigma_0$  :  $n_0$ 回に 1 回の割合で発生する最大応力振幅
- $n_0$  : 応力振幅 $\Delta\sigma_0$ の発生回数
- $h$  : ワイブル形状パラメータ

式 5.2-5 を、長期分布から得られた応力振幅の発生頻度および極値波浪時の最大応力振幅に当てはめ、累積疲労被害度を再検討する。具体的には、

- ・50 年最大の応力振幅が 50 年に 1 回（20 年間に  $20/50=0.4$  回）発生するとして尺度パラメータを設定
- ・長期分布から求められた応力振幅－発生頻度曲線（図 5.2-8 の赤線）、1 年、10 年、30 年の最大応力振幅を下回らないよう形状パラメータを設定（ $h = 0.26$ ）

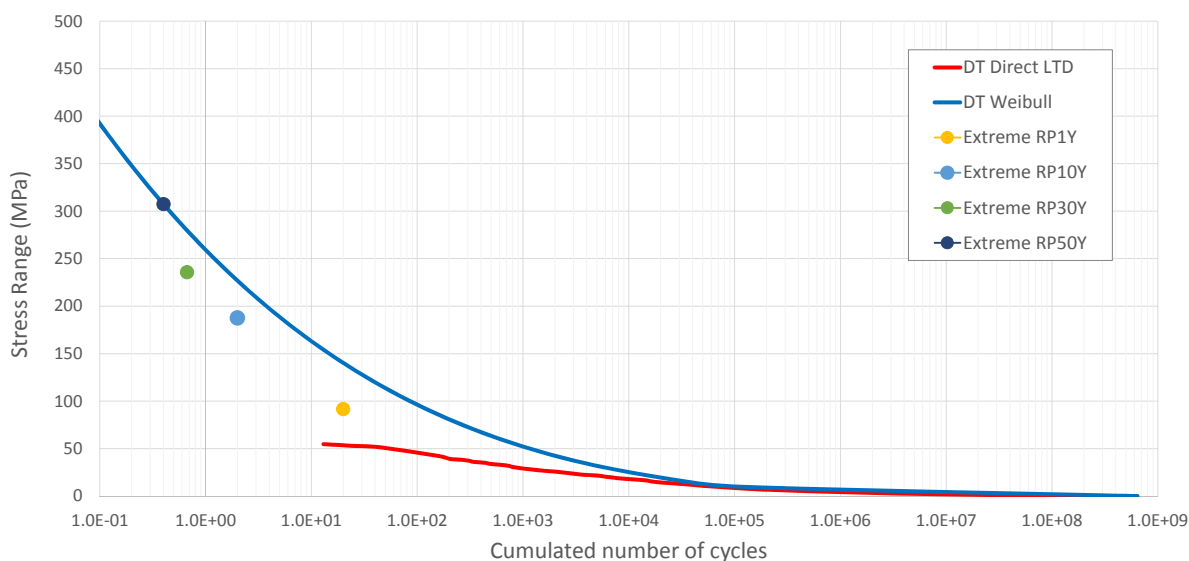


図 5.2-8 ワイブル分布によるチェーン応力振幅の発生頻度の評価（ML3 の場合）

ワイブル分布により算定した累積疲労被害度および疲労寿命を表 5.2-13 に示す。疲労寿命は ML2 の 277 年が最小で、表 5.2-12 の結果に対して半減するが、耐用年数 20 年に対しては、十分余裕があることが分かる。

表 5.2-13 極値波浪条件を考慮したチェーンの疲労被害度および疲労寿命

	応力振幅総数	50 年最大応力振幅 (M Pa)	形状パラ メータ h	累積疲労被害度 $D_r \times 3 (\leq 1)$	疲労寿命(年) ( $\geq 20$ 年)
ML1	6.297E+08	307.1	0.26	0.0708	282
ML2	6.412E+08	308.2	0.26	0.0722	277
ML3	6.399E+08	307.3	0.26	0.0715	280

※表中の累積疲労被害度および疲労寿命は NK ガイドラインの安全率 3 を考慮した値



## 参考文献

- <sup>1</sup> 公益財団法人 笹川平和財団 海洋政策研究所, 海洋白書, 2015.
- <sup>2</sup> 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 着床式洋上風力発電導入ガイドブック (第一版), 2015.
- <sup>3</sup> 国土交通省海事局安全基準課, 浮体式洋上風力発電施設技術基準, 2012.
- <sup>4</sup> 一般財団法人 日本海事協会, 浮体式洋上風力発電設備に関するガイドライン, 2012.
- <sup>5</sup> 一般財団法人 日本規格協会, JIS C 1400-1 風車-第1部:設計要件 (IEC 61400-1:2005), 2010.
- <sup>6</sup> 一般財団法人 日本規格協会, JIS C 1400-3 風車-第3部:洋上風車の設計要件 (IEC 61400-3:2009), 2014.
- <sup>7</sup> 土木学会, 風力発電設備支持物構造設計指針・同解説 [2010年版], 2010.
- <sup>8</sup> 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 洋上風力 (浮体式) の基本・設計課題・研究実証動向 (欧米), NEDO 海外レポート, No 1032, pp16-30, 2008.
- <sup>9</sup> 鈴木英之, 洋上風力発電:浮体式, 日本風工学会誌, 第31巻第1号 (通号第106号), 2006 を一部改変
- <sup>10</sup> 和英・英和船舶用語辞典、東京商船大学船舶用語辞典編集委員会編、成山堂書店、2001、p.226
- <sup>11</sup> 船のはなし、滝沢宗人、技報堂出版、1991、p.55-64
- <sup>12</sup> 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 他, 平成27年度成果報告書 洋上風力発電等技術研究開発/次世代浮体式洋上風力発電システム実証研究 (バージ型), 2016.
- <sup>13</sup> 経済産業省資源エネルギー庁, 浮体式洋上超大型風力発電機設置実証事業環境影響評価書, 2014.
- <sup>14</sup> Utsunomiya T., S.Yoshida, H.Ookubo, Sato I., and Ishida S., Dynamic Analysis of a Floating Offshore Wind Turbine under Extreme Environmental Conditions. Proc.ASME 31st.Int.Conf.Ocean.Offshore & Arctic Eng., OMAE.2012-83985, 2012.
- <sup>15</sup> 福島洋上風力コンソーシアム HP <http://www.fukushima-forward.jp/>
- <sup>16</sup> 鈴木宏始, 山口弘志, 赤瀬雅之, 中田諭志, 今北明彦, 洋上風力発電用 TLP 型浮体の開発, 三井造船技報 No.198, pp19-26, 2009.
- <sup>17</sup> 経済産業省, 風力発電設備構造強度 WG 報告書概要版, pp2, 2013.3.
- <sup>18</sup> 種本純, 石原孟, 波浪推算モデルと合成風速場を用いた風波とうねりの数値予測, 風力エネルギー学会論文集, 8, No.4, pp.124-131, 2014.
- <sup>19</sup> 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, pp195-221, 日本風工学会論文集 Vol.37, 2012.
- <sup>20</sup> 山口敦, 石原孟, 台風シミュレーションと気象解析を利用した設計風速評価手法の提案, 第31回風力エネルギー利用シンポジウム, pp173-176
- <sup>21</sup> NeoWins:洋上風況マップ ([http://app10.infoc.nedo.go.jp/Nedo\\_Webgis/top.html](http://app10.infoc.nedo.go.jp/Nedo_Webgis/top.html))
- <sup>22</sup> 石原孟ら, モノパイル式洋上ウインドファームのフィージビリティスタディ (その1 気象・海象条件の評価), 2012.
- <sup>23</sup> 高田悦子ら, 我が国沿岸の波浪外力の分布 (海象外力検討調査), 国土交通省国土技術政策総合研究所資料, No88, 2003.
- <sup>24</sup> リアルタイムナウファスホームページ (<http://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/>)
- <sup>25</sup> 海洋エネルギーポータルサイト ([http://www.todaiww3.k.u-tokyo.ac.jp/nedo\\_p/jp/](http://www.todaiww3.k.u-tokyo.ac.jp/nedo_p/jp/))
- <sup>26</sup> 日本海洋データセンターホームページ ([http://www.jodc.go.jp/jodcweb/index\\_j.html](http://www.jodc.go.jp/jodcweb/index_j.html))
- <sup>27</sup> 石原孟ら, 福島沖における通常流況と極値流速の予測に関する研究, 風力エネルギー学会論文集, Vol.40, No, 3, pp.35-42, 2016.
- <sup>28</sup> 社団法人 日本港湾協会, 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 2007.7.
- <sup>29</sup> International Organization for Standardization, ISO 19906:2010 Petroleum and natural gas industries -Arctic offshore structures-, 2010.
- <sup>30</sup> DNV-OS-J101, Design of Offshore Wind Turbine Structures, 2014.5
- <sup>31</sup> Recommended Practice, Det Norske Veritas, DNV-RP-C205:Environmental Conditions and Environmental Loads, 2007.

- 
- <sup>32</sup> 合田良実, 海中構造物の設計波力について, 土木学会誌, Vol 50, pp57-61, 1965.
- <sup>33</sup> 後藤智明, 小川由信, Leap-frog 法を用いた津波の数値計算法, 東北大学工学部土木工学科河川研究室資料, 1982.7.
- <sup>34</sup> International Organization for Standardization, ISO 19901-7:2013 Petroleum and natural gas industries –Specific requirements for offshore structures –Part 7:Stationkeeping systems for floating offshore structures and mobile offshore units
- <sup>35</sup> 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 風力発電等技術研究開発 洋上風力発電等技術研究開発 次世代浮体式洋上風力発電システム実証研究 (共通基盤調査) 報告書, 2016.
- <sup>36</sup> 一般財団法人 日本海事協会, 鋼船規則・同検査要領 PS 編 (浮体式海洋石油・ガス生産、貯蔵、積出し設備), 2017.
- <sup>37</sup> IEC 61400-3, Wind turbines - Part 3 : Design requirements for offshore wind turbines, 2009.2
- <sup>38</sup> DNV-GL : RECOMMENDED PRACTICE, DNVGL-RP-C203, Fatigue design of offshore steel structures, 2016.4
- <sup>39</sup> DNV-GL : OFFSHORE STANDARD, DNVGL-OS-E301, Position mooring, 2015.7
- <sup>40</sup> 洋上風力発電システム実証研究/洋上風況観測システム実証研究 福岡県北九州市沖 進捗報告
- <sup>41</sup> 地理院タイル (<https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html>)
- <sup>42</sup> 財団法人日本造船技術センター, 石油貯蔵船の最浅喫水における係留系の安全性の検討, 1995.
- <sup>43</sup> 北九州市, 北九州港港湾計画資料 (その 1) -改訂-, 2011.
- <sup>44</sup> 気象庁 HP (<http://www.jma.go.jp/jma/menu/menureport.html>)
- <sup>45</sup> 日本海における大規模地震に関する調査検討委員会 (事務局: 国土交通省、内閣府、文部科学省), 日本海における大規模地震に関する調査検討会報告書, 2014.
- <sup>46</sup> 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 洋上風力発電技術開発平成 20 年度洋上風力発電実証研究 F/S, 2009.
- <sup>47</sup> DNV-GL : OFFSHORE STANDARDS, DNVGL-OS-C101, Design of offshore steel structures, general - LRFD method, 2016.4
- <sup>48</sup> DNV : Buckling strength of plated structures, DNV-RP-C201, 2010.10