

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）⁷、浮体式洋上風力発電施設技術基準（2012）³、JIS C 1400-1（2010）⁵およびJIS C 1400-3（2014）⁶）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⁴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。

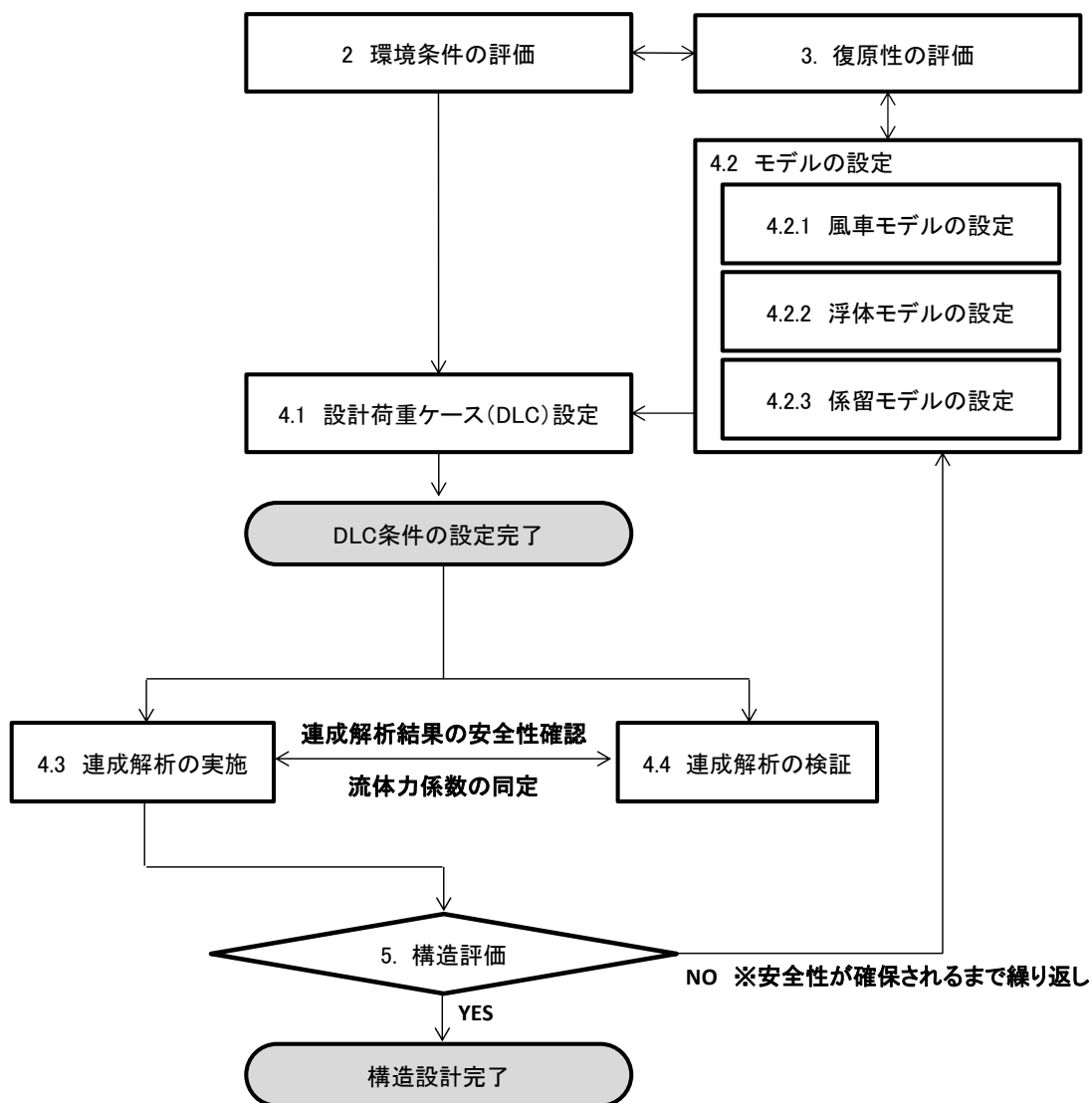


図 1-1 本技術ガイドブックにおける設計の流れ

※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">・ポンツーン形式（バージ形式）・セミサブ形式・スパー形式・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。）

※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。

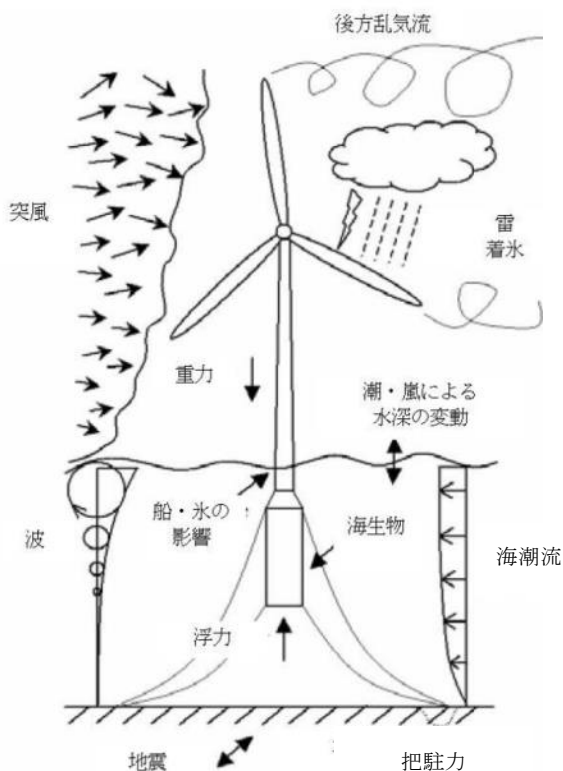


図 3.2-1 浮体式洋上風力発電施設に作用する外力模式図⁸

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。

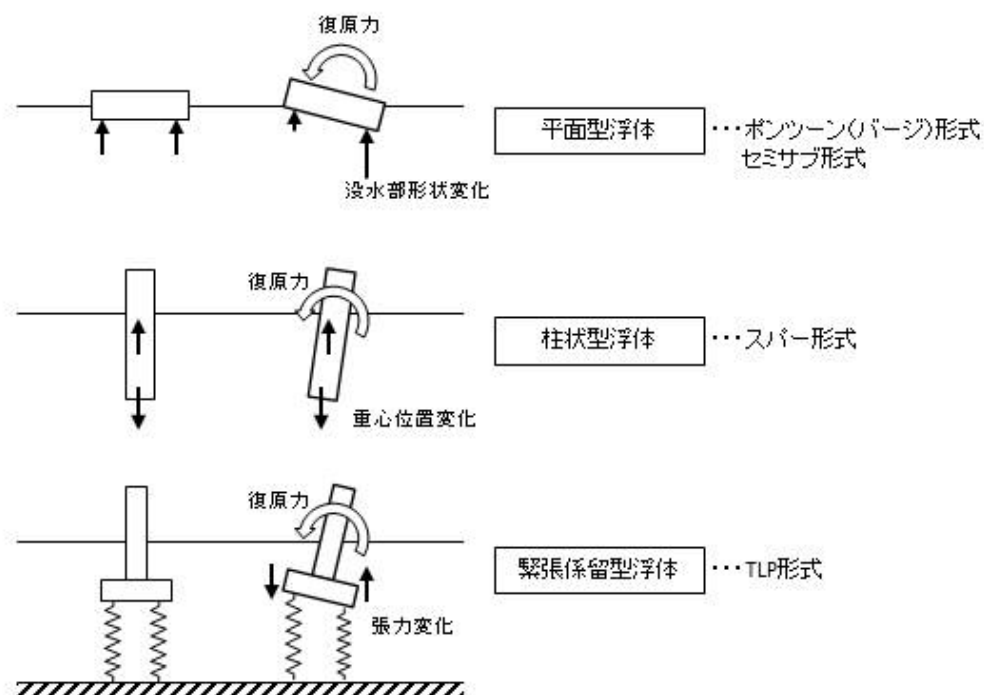
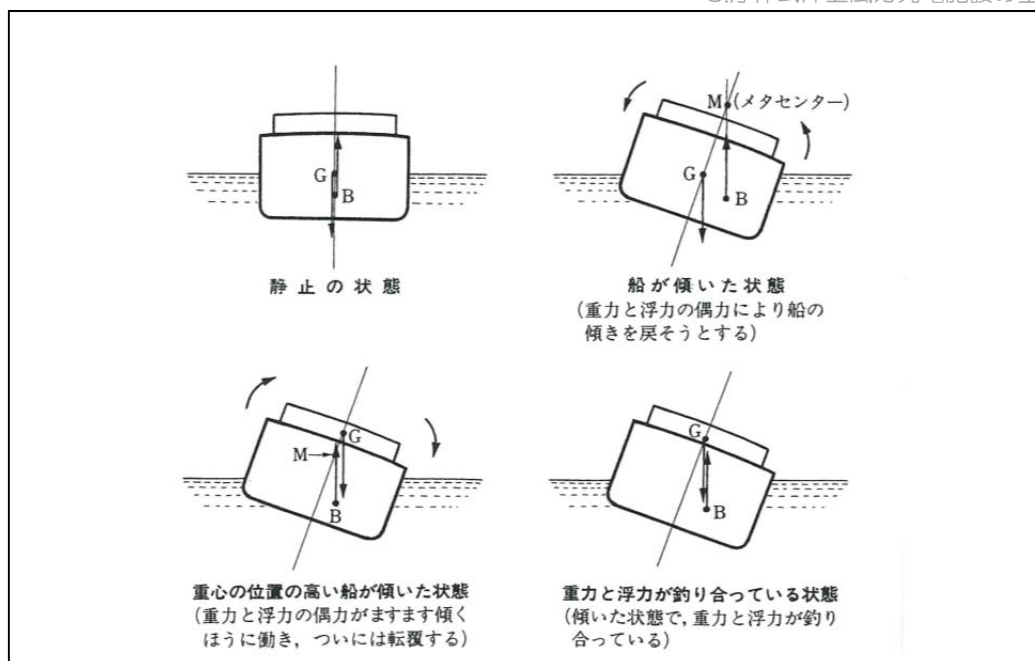


図 3.2-2 復原力の発生メカニズムに対応した浮体形式⁹

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¹⁰。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¹¹⁾

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⁴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。

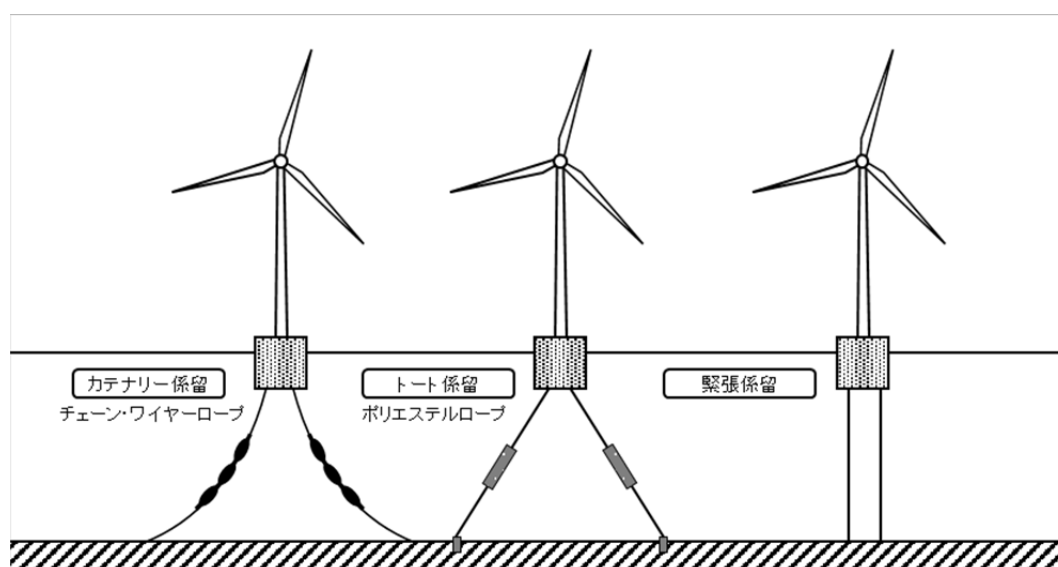


図 3.2-4 代表的な係留方式のイメージ

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。

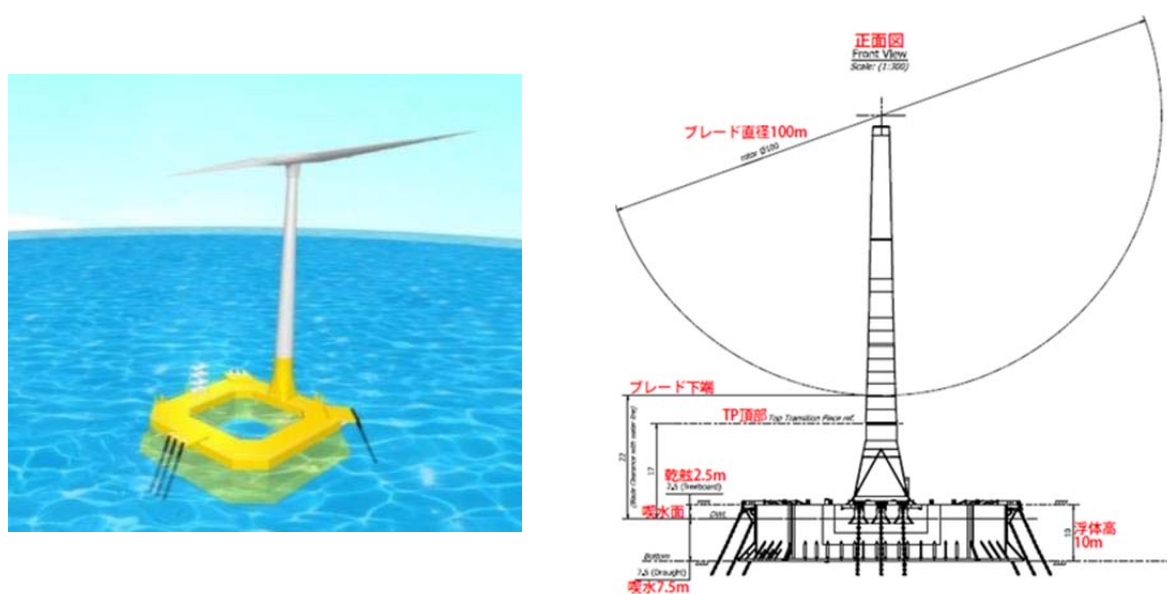


図 3.2-5 ポンツーン形式の例¹²

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。

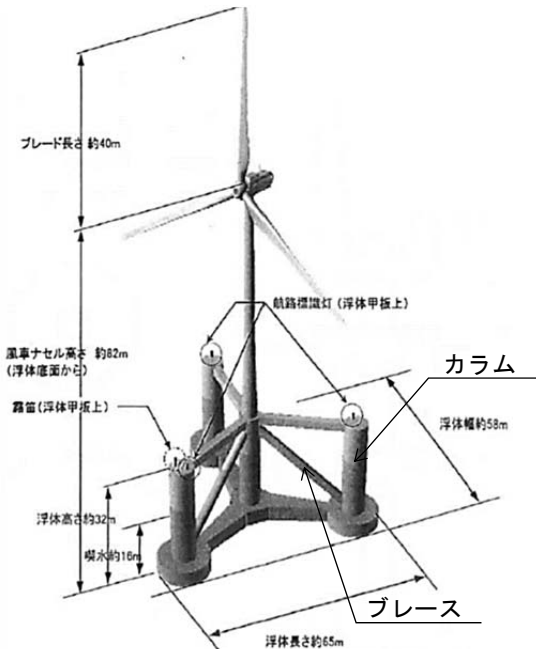


図 3.2-6 セミサブ形式（フーティング型）の例¹³

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。

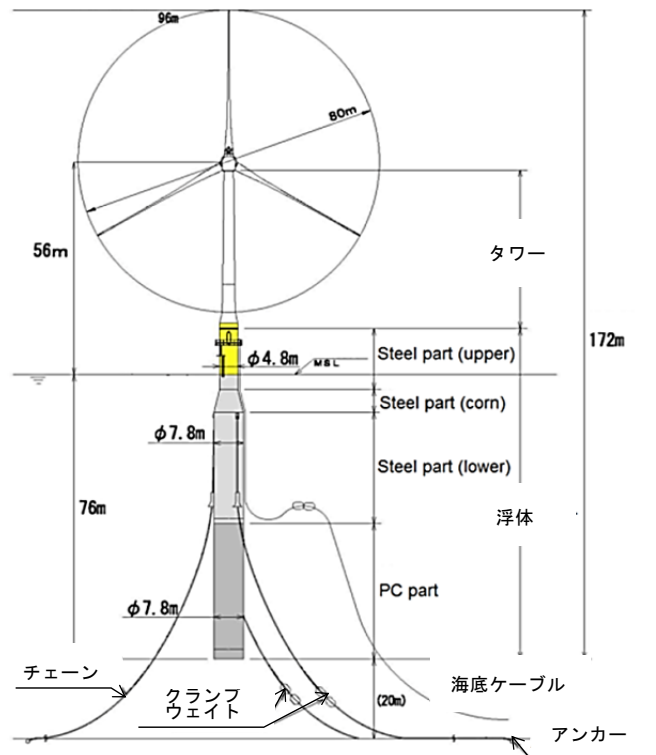


図 3.2-7 スパー形式の例¹⁴

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。

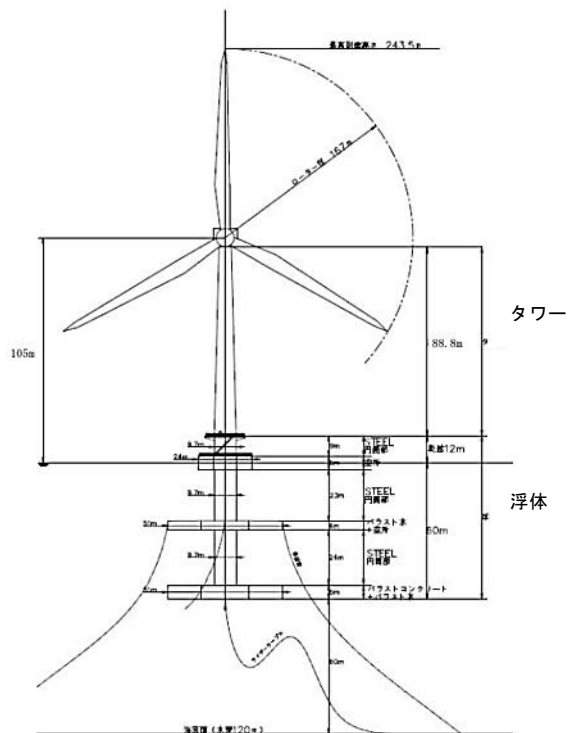


図 3.2-8 アドバンストスパー形式の例¹⁵⁾

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。

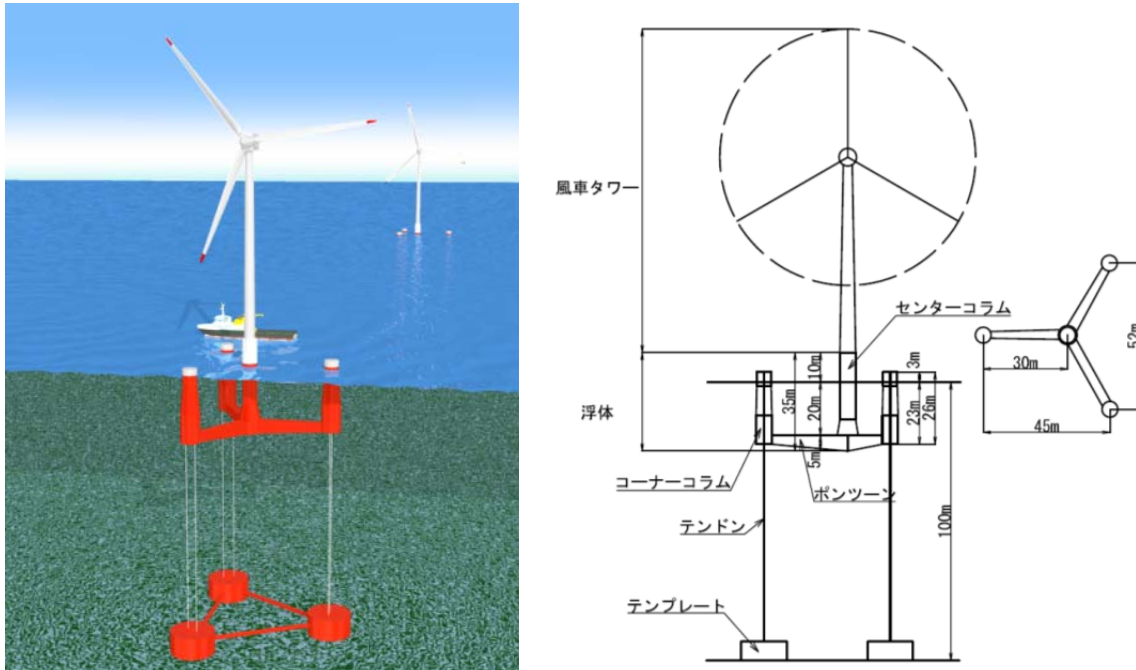


図 3.2-9 TLP 形式の例¹⁶

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。

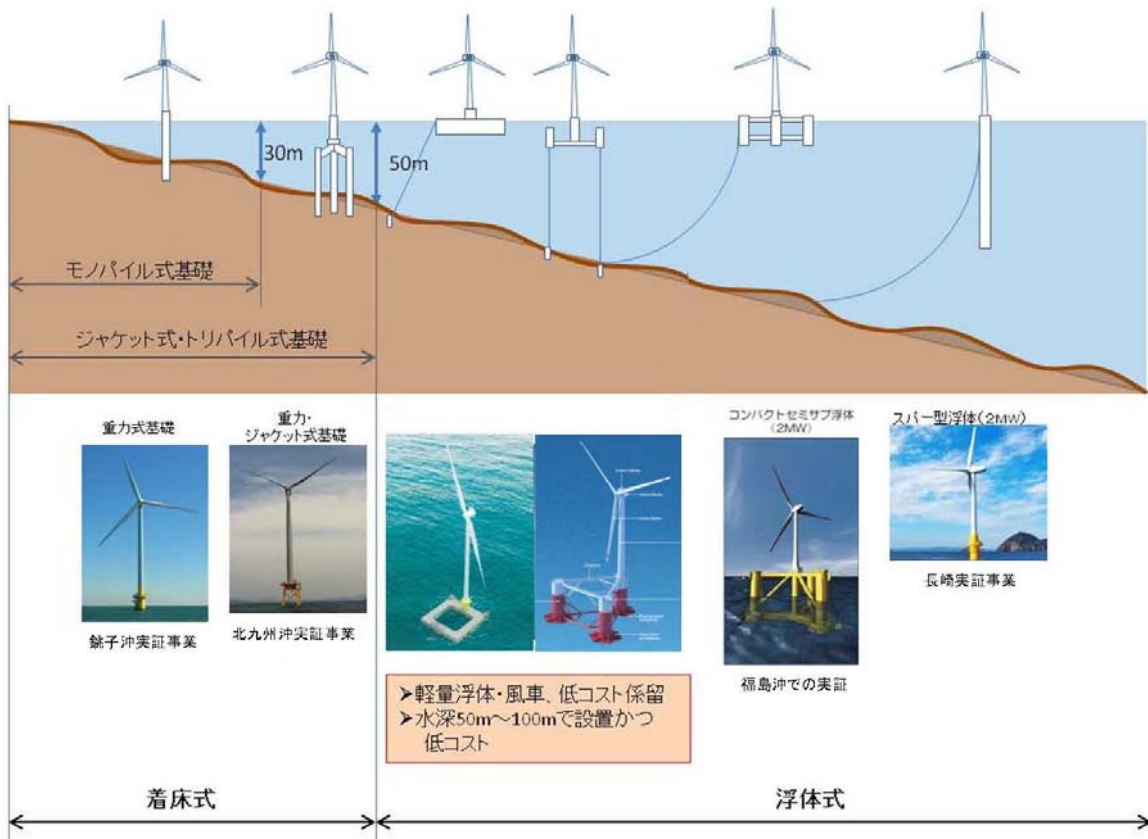


図 3.2-10 洋上風力発電施設の適用水深

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。

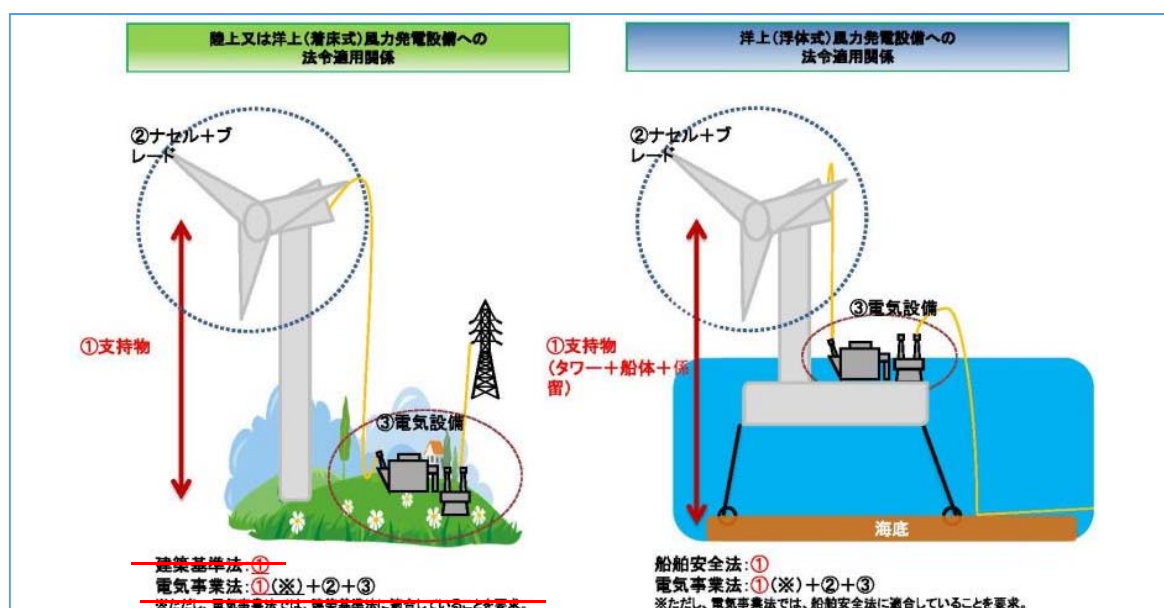


図 3.3-1 風力発電施設への法令適用関係¹⁷

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。

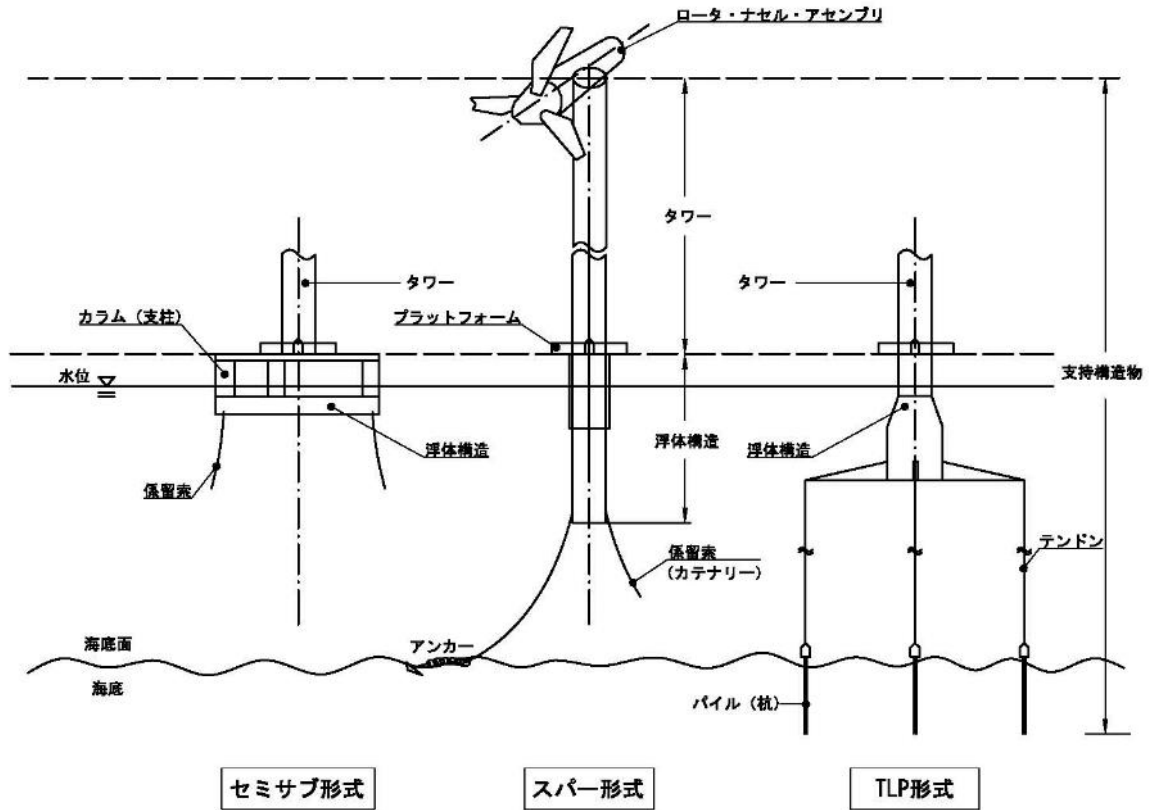
また、浮体式洋上風力発電施設の支持物（タワー+浮体+係留）については、平成 24 年 7 月 31 日付けで建築基準法の規制対象から除外し、船舶安全法（昭和 8 年法律第 11 号）での安全規制に一本化されたため、国土交通省（海事局）が船舶としての審査を行うこととなっている。

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_z : 高さ z の風速、 V_h : 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)