

洋上風力発電設備に関する  
技術基準の統一的解説  
(平成30年3月版)

港湾における洋上風力発電施設検討委員会

はじめに

我が国においては、国産エネルギー資源の拡大、低炭素社会の実現、関連産業創出などの観点から再生可能エネルギーの導入を推進している。特に、長期エネルギー需給見通し（平成 27 年 7 月経済産業省）において、2030 年の電源構成のうち再生可能エネルギーの割合が 22～24%と見込まれる中、関係府省庁が一丸となって導入に向けた取り組みを進めている。このうち洋上風力発電については、海洋基本計画（平成 25 年 4 月閣議決定）やエネルギー基本計画（平成 26 年 4 月閣議決定）において、その導入拡大が位置づけられている。洋上は、陸上に比べて風況が良好であり高効率な発電が可能であるとともに、風車の大きさに関する制約が少ないことから陸上よりも大型の風車の設置が可能とされている。

我が国において発電設備を設置する際には、電気事業法（昭和三十九年法律第七十号）に基づく技術基準等の法令要求事項を満たす必要があり、経済産業大臣（各産業保安監督部長又は那覇産業保安監督事務所長）に対して工事計画届を提出し、一定期間を経過した後に工事に着手することとなる。（ただし、法令要求事項を満たしていない場合は、計画の変更・廃止が命じられる事がある。）

一方、洋上風力発電の導入適地として港湾が有望視されるなか、平成 28 年 7 月に改正港湾法が施行され、港湾区域等の占用予定者を公募により決定する占用公募制度が創設された。当該制度を活用して洋上風力発電設備を導入する場合、港湾管理者による港湾法に基づく公募対象施設等の基準への適合性の審査を経て、水域占用許可が与えられる。また、洋上風力発電設備等の支持構造物は、維持管理用の船舶が着岸する係留施設であるため、港湾法に基づく港湾の施設の技術上の基準にも適合する必要がある。

このように、電気事業法と港湾法の各法に基づく審査が必要とされているなかで、事業者の負担軽減や審査手続きの合理化を図るためには、各法に基づく審査が統一的な考え方のもとで実施されることが望ましい。「洋上風力発電設備に関する技術基準の統一的解説（平成 30 年 3 月版）」（以下、本基準解説とする。）は、電気事業法及び港湾法に基づき、洋上風力発電設備等が適合すべき基準について、各法の統一的な考え方を解説するものである。

本基準解説は、平成 30 年 3 月時点での関係法令や国内外関連規格、設計技術等を踏まえて策定したものである。今後の関係法令や国内外関連規格の動向や設計技術の進展等を鑑み、本基準解説を必要に応じて改訂していくものとする。なお、本基準解説は、経済産業省各産業保安監督部等への工事計画届出の提出又は港湾管理者への水域占用の申請を、平成 30 年 4 月以降に行う案件について対象とする。

### 【港湾における洋上風力発電施設検討委員会 委員名簿】

- ◎牛山 泉 足利工業大学 理事長  
清宮 理 早稲田大学 創造理工学部 社会環境工学科 教授  
石原 孟 東京大学大学院 工学系研究科 社会基盤学専攻 教授  
白神 孝一 経済産業省 商務情報政策局 産業保安グループ 電力安全課長  
山崎 琢矢 経済産業省 資源エネルギー庁 省エネルギー・新エネルギー部 新エネルギー課長  
稲田 雅裕 国土交通省 港湾局 技術企画課長  
中崎 剛 国土交通省 港湾局 海洋・環境課長

### 【港湾における洋上風力発電施設検討委員会 設計技術ワーキンググループ 委員名簿】

- ◎清宮 理 早稲田大学 創造理工学部 社会環境工学科 教授  
菊池 喜昭 東京理科大学 理工学部 土木工学科 教授  
白石 悟 北海道科学大学 工学部都市環境学科 教授  
善 功企 九州大学大学院 特任教授  
関田 欣治 (一財)沿岸技術研究センター 顧問  
高橋 重雄 (一財)沿岸技術研究センター 理事長  
山本 修司 (一財)沿岸技術研究センター 参与・洋上風力研究室長  
下迫健一郎 (国研)海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 海洋インフラ・洋上風力技術センター長  
宮田 正史 国土交通省 国土技術政策総合研究所 港湾施設研究室長  
\*吉岡 健 電源開発(株) 土木建築部 土木技術室 統括マネジャー  
\*福本 幸成 東京電力ホールディングス(株) 経営技術戦略研究所 技術開発部 洋上風力発電プロジェクトマネジャー

### 【港湾における洋上風力発電施設検討委員会・同設計技術ワーキンググループ 事務局】

経済産業省 商務情報政策局 産業保安グループ 電力安全課  
国土交通省 港湾局 海洋・環境課  
(一財)沿岸技術研究センター 洋上風力研究室  
(一社)寒地港湾技術研究センター

※ ◎は委員長、\*はオブザーバーを表す。

# 目次

関係法令	1
○発電用風力設備に関する技術基準を定める省令（平成九年通商産業省令第五十三号）	
○港湾法施行規則（昭和二十六年運輸省令第九十八号）（抄）	
○公募対象施設等又はその維持管理の方法の基準に関し必要な事項を定める告示（平成二十八年国土交通省告示第八百五十八号）	
第1章 総則	5
1.1 適用範囲	5
1.2 定義	8
1.3 関連規格・関連法規	18
第2章 洋上風力発電設備等の要求性能	20
2.1 外力に対して安全な構造	22
2.2 風車の構造	41
2.3 風車の安全な状態の確保	43
2.4 取扱者以外の者の接近の防止	46
2.5 圧油装置及び圧縮空気装置の危険の防止	47
2.6 公害等の防止	48
2.7 港湾機能及び周辺海域の利用等に影響を与えない洋上風力発電設備等の設置	50
2.8 航行船舶からの視認性の向上	57
2.9 船舶等との接触の防止	59
2.10 腐食・洗掘等の防止	61
2.11 施工及び維持管理への対応	62
2.12 送電線等の敷設	63
第3章 洋上風力発電設備等に作用する自然条件等	64
3.1 風荷重	64
3.2 潮位	73
3.3 波浪荷重	75
3.4 津波荷重	84
3.5 水の流れによる荷重	85
3.6 洗掘	86
3.7 地盤	87
3.8 地震荷重	91
3.9 地盤の液状化・沈下	94

3.10	接岸荷重	96
3.11	固定荷重	97
3.12	その他の荷重	98
3.13	腐食作用	100
3.14	材料	102
第4章	洋上風力発電設備等の設計	103
4.1	構造解析	103
4.2	荷重抵抗係数設計法による設計	108
4.3	許容応力度設計法による設計	114
4.4	タワーの設計	116
4.5	モノパイル構造の設計	118
4.6	ジャケット構造の設計	123
4.7	重力式基礎の設計	128
4.8	接合部の設計	133
4.9	運転や維持管理に必要な設備の設計	137
4.10	防食設計	140
付属書		
付属書1	電気システム	付-1
付属書2	発電時における終局強度解析のための気象海象パラメータの統計的外挿	付-4
付属書3	コーン貫入試験（CPT）による地盤評価	付-8
付属書4	洗掘の検討	付-22
付属書5	氷荷重に対する洋上風力発電設備等の支持構造物の設計	付-25
付属書6	抵抗係数の設定例（短期荷重及び疲労荷重）	付-28
付属書7	安全性照査に関する許容応力度の設定例（長期荷重、地震荷重、津波荷重）	付-34
付属書8	安定性照査に関する許容支持力及び安全率の設定例（長期荷重、地震荷重、津波荷重）	付-49
付属書9	疲労設計	付-68

## 関係法令

電気事業法及び港湾法に基づく洋上風力発電設備の技術基準に関する法令を、以下に示す。

### ○発電用風力設備に関する技術基準を定める省令（平成九年通商産業省令第五十三号）

（適用範囲）

第一条 この省令は、風力を原動力として電気を発生するために施設する電気工作物について適用する。

2 前項の電気工作物とは、一般用電気工作物及び事業用電気工作物をいう。

（定義）

第二条 この省令において使用する用語は、電気事業法施行規則（平成七年通商産業省令第七十七号）において使用する用語の例による。

（取扱者以外の者に対する危険防止措置）

第三条 風力発電所を施設するに当たっては、取扱者以外の者に見やすい箇所に風車が危険である旨を表示するとともに、当該者が容易に接近するおそれがないように適切な措置を講じなければならない。

2 発電用風力設備が一般用電気工作物である場合には、前項の規定は、同項中「風力発電所」とあるのは「発電用風力設備」と、「当該者が容易に」とあるのは「当該者が容易に風車に」と読み替えて適用するものとする。

（風車）

第四条 風車は、次の各号により施設しなければならない。

- 一 負荷を遮断したときの最大速度に対し、構造上安全であること。
- 二 風圧に対して構造上安全であること。
- 三 運転中に風車に損傷を与えるような振動がないように施設すること。
- 四 通常想定される最大風速においても取扱者の意図に反して風車が起動することのないように施設すること。
- 五 運転中に他の工作物、植物等に接触しないように施設すること。

（風車の安全な状態の確保）

第五条 風車は、次の各号の場合に安全かつ自動的に停止するような措置を講じなければならない。

- 一 回転速度が著しく上昇した場合
  - 二 風車の制御装置の機能が著しく低下した場合
- 2 発電用風力設備が一般用電気工作物である場合には、前項の規定は、同項中「安全かつ自動的に停止するような措置」とあるのは「安全な状態を確保するような措置」と読み替えて適用するものとする。
- 3 最高部の地表からの高さが二十メートルを超える発電用風力設備には、雷撃から風車を保護するような措置を講じなければならない。ただし、周囲の状況によって雷撃が風車を損傷するおそれがない場合においては、この限りでない。

（圧油装置及び圧縮空気装置の危険の防止）

第六条 発電用風力設備として使用する圧油装置及び圧縮空気装置は、次の各号により施設しなければならない。

- 一 圧油タンク及び空気タンクの材料及び構造は、最高使用圧力に対して十分に耐え、かつ、安全なものであること。
- 二 圧油タンク及び空気タンクは、耐食性を有するものであること。
- 三 圧力が上昇する場合において、当該圧力が最高使用圧力に到達する以前に当該圧力を低下させる機能を有すること。
- 四 圧油タンクの油圧又は空気タンクの空気圧が低下した場合に圧力を自動的に回復させる機能を有すること。
- 五 異常な圧力を早期に検知できる機能を有すること。

(風車を支持する工作物)

第七条 風車を支持する工作物は、自重、積載荷重、積雪及び風圧並びに地震その他の振動及び衝撃に対して構造上安全でなければならない。

2 発電用風力設備が一般用電気工作物である場合には、風車を支持する工作物に取扱者以外の者が容易に登ることができないように適切な措置を講じること。

(公害等の防止)

第八条 電気設備に関する技術基準を定める省令(平成九年通商産業省令第五十二号)第十九条第十一项及び第十三項の規定は、風力発電所に設置する発電用風力設備について準用する。

2 発電用風力設備が一般用電気工作物である場合には、前項の規定は、同項中「第十九条第十一项及び第十三項」とあるのは「第十九条第十三項」と、「風力発電所に設置する発電用風力設備」とあるのは「発電用風力設備」と読み替えて適用するものとする。

### ○港湾法施行規則(昭和二十六年運輸省令第九十八号)(抄)

(公募対象施設等及びその維持管理の方法の基準)

第三条の九 法第三十七条の五第一項第三号の国土交通省令で定める公募対象施設等の基準は、次に掲げるものとする。

一 自然状況その他の条件を勘案して、自重、水圧、波力、土圧及び風圧並びに地震、漂流物等による振動及び衝撃に対して安全な構造であること。

二 船舶からの視認性を向上させるための措置その他の船舶の航行に支障を及ぼさないための措置を講じたものであること。

2 法第三十七条の五第一項第三号の国土交通省令で定める公募対象施設等の維持管理の方法の基準は、次に掲げるものとする。

一 自然状況その他の条件を勘案して、定期及び臨時に当該公募対象施設等を点検し、その損傷、劣化その他の変状についての診断を行い、その結果に応じて必要な措置を講じること。

二 前号の結果その他の当該公募対象施設等の維持管理に必要な事項の記録及び保存を行うこと。

3 前二項に規定するもののほか、公募対象施設等又はその維持管理の方法の基準に関し必要な事項は、国土交通大臣が告示で定める。

### ○公募対象施設等又はその維持管理の方法の基準に関し必要な事項を定める告示(平成二十八年国土交通省告示第八百五十八号)(抄)

(公募対象施設等の設計)

第三条 公募対象施設等は、自然状況、利用状況その他の公募対象施設等が置かれる諸条件を勘案して、公募対象施設等の要求性能(公募対象施設等に必要とされる性能をいう。以下同じ。)を満足し、かつ、施工時に公募対象施設等の構造の安定が損なわれないよう、適切に設計されるものとする。

2 公募対象施設等の設計に当たっては、公募対象施設等の設計供用期間(公募対象施設等の設計に当たって、公募対象施設等の要求性能を満足し続けるものとして設定される期間をいう。以下同じ。)を適切に定めるものとする。

3 公募対象施設等の設計に当たっては、施工及び維持を適切に行えるよう、必要な措置を講ずるものとする。

(公募対象施設等の要求性能)

第四条 公募対象施設等の要求性能は、次の各号に定めるものとする。

一 施工時及び供用時に公募対象施設等が置かれる諸条件に照らし、風圧、自重、土圧、水圧、変動波浪(公募対象施設等を設置する地点において発生するものと想定される波浪のうち、公募対象施設等の設計供用期間中に発生する可能性の高いものをいう。)、水の流れ、公募対象施設等の設計供用期間中に発生する可能性の高い地震動、漂流物の衝突等の作用による損傷等が、公募対象施設等の機能を損なわず継続して使用することに影響を及ぼさないこと。

- 二 設計津波（公募対象施設等を設置する地点において発生するものと想定される津波のうち、公募対象施設等の設計供用期間中に発生する可能性が低く、かつ、公募対象施設等に大きな影響を及ぼすものをいう。）、公募対象施設等を設置する地点において発生するものと想定される最大規模の強さを有する地震動等の作用による損傷等が、公募対象施設等の機能が損なわれた場合であっても、公募対象施設等の構造の安定に重大な影響を及ぼさないこと。
  - 三 海水、風雨等による腐食を防止する措置が講じられていること。
  - 四 洗掘及び吸出しによる公募対象施設等を構成する部材の健全性への影響が公募対象施設等の安定性を損なうおそれがある場合にあつては、適切な措置が講じられていること。
  - 五 公募対象施設等が倒壊した場合であっても、次のイからニまでに掲げる区域に影響を及ぼさない規模であること。
    - イ 開発保全航路の区域
    - ロ 緊急確保航路の区域
    - ハ 規則第三条の六第一号、第二号及び第四号から第六号までに定める区域
    - ニ 耐震強化施設（港湾の施設の技術上の基準を定める省令（平成十九年国土交通省令第十五号）第一条第七号に規定する耐震強化施設をいう。以下この条において同じ。）の区域及び当該耐震強化施設と一体となって機能を発揮する必要がある港湾施設の区域
- 2 前項に規定するもののほか、公募対象施設等の被災に伴い、耐震強化施設の機能を確保するための航路及び泊地における船舶の交通に著しい支障を及ぼすおそれのある公募対象施設等の要求性能にあつては、レベル二地震動（港湾の施設の技術上の基準を定める省令第一条第六項に規定するレベル二地震動をいう。）等の作用による損傷等が、公募対象施設等の機能が損なわれた場合であっても、公募対象施設等の構造の安定に重大な影響を及ぼさないこととする。

（公募対象施設等の性能照査の基本）

- 第五条 公募対象施設等の性能照査は、作用、供用に必要な要件及び公募対象施設等の保有する性能の不確定性を考慮できる方法又はその他の方法であつて信頼性の高い方法によつて行われなければならない。
- 2 公募対象施設等の性能照査に当たっては、設計供用期間中に公募対象施設等が置かれる状況を考慮して、次の事項を行うことを基本とするものとする。
- 一 公募対象施設等が置かれる自然状況等を考慮して、作用を適切に設定すること。
  - 二 二以上の作用が同時に生じる可能性を考慮して、作用の組合せを適切に設定すること。
  - 三 材料の特性、環境作用の影響等を考慮して、材料を選定するとともに、その物性値を適切に設定すること。

（自然状況等の設定）

- 第六条 規則第三条の九第一項第一号の自然状況その他の条件は、次の各号に定める方法により定めるものとする。
- 一 波浪及び高潮の推算に用いる洋上における風については、気象の長期間の実測値又は推算値をもとに、風速、風向等を適切に設定するものとする。
  - 二 風圧力の算定に用いる風については、風の長期間の実測値又は推算値をもとに、統計的解析等により再現期間に対応した風速及び風向を適切に設定するものとする。
  - 三 潮位については、実測値又は推算値をもとに、天文潮及び気象潮、波浪による水位上昇並びに津波等による異常潮位を考慮して、統計的解析等により港湾の施設の技術上の基準の細目を定める告示（平成十九年国土交通省告示第三百九十五号）第一条第十三号に定める港湾管理用基準面からの水位を適切に設定するものとする。
  - 四 公募対象施設等の安定性、構造部材の断面の破壊（疲労によるものを除く。）等の照査に用いる波浪については、長期間の実測値又は推算値をもとに、統計的解析等により再現期間に対応した波浪の波高、周期及び波向を適切に設定するものとする。
  - 五 構造部材に関する疲労による断面の破壊の照査に用いる風及び波浪については、長期間の実測値又は推算値をもとに、統計的解析により設計供用期間中に発生する風速、風向、波浪の波高、周期及び波向の相関頻度分布を適切に設定するものとする。
  - 六 津波については、津波の記録又は数値解析をもとに、津波の高さ等を適切に設定するものとする。



- 七 海水等の流動については、実測値又は推算値をもとに、流速及び流向を適切に設定するものとする。
- 八 河口水理の影響については、実測値又は推算値をもとに、河川流を考慮して、適切な手法により評価するものとする。
- 九 漂砂の影響については、実測値又は推算値をもとに、適切な手法により評価するものとする。
- 十 地盤条件については、地盤調査及び土質試験の結果をもとに、土の物理的性質、力学的特性を適切に設定するものとする。
- 十一 地盤の沈下の影響については、地盤条件をもとに、公募対象施設等の構造、載荷重及び公募対象施設等の周辺の状況を考慮して、適切な手法により評価するものとする。
- 十二 地震動については、地震動の実測値又は推算値をもとに、時刻歴波形を適切に設定するものとする。
- 十三 地盤の液化化については、地盤条件をもとに、地震動による作用を考慮して、適切な手法により評価するものとする。
- 十四 船舶の接岸による作用については、対象船舶（公募対象施設等の性能照査において、条件として用いる船舶をいう。）の諸元、公募対象施設等の構造、接岸方法、接岸速度等を考慮して、適切な手法により設定するものとする。
- 十五 環境作用の影響については、公募対象施設等の設計供用期間、材料特性、自然状況、維持管理の方法その他の公募対象施設等が置かれる諸条件を考慮して、適切な手法により評価するものとする。
- 十六 自重については、材料の単位体積重量をもとに、適切に設定するものとする。
- 十七 載荷重については、想定される公募対象施設等の利用状況等を考慮して、適切に設定するものとする。

（洋上風力発電設備等の要求性能）

- 第七条 洋上風力発電設備及びその附属設備（この条及び第八条において「洋上風力発電設備等」という。）の要求性能は、次の各号に定めるものとする。
- 一 発電用風力設備に関する技術基準を定める省令（平成九年通商産業省令第五十三号）で定める基準に適合すること。
  - 二 洋上風力発電設備等の周辺の水域を航行する船舶から視認できるよう、洋上風力発電設備等の一部を着色したものであること。
  - 三 回転翼は洋上風力発電設備等の周辺の水域を航行する船舶に接触しないように施設すること。
  - 四 洋上風力発電設備等の風下で発生する乱流が水域施設における船舶の航行に支障を及ぼすものでないこと。

第1章 総則

1.1 適用範囲

本基準解説は、洋上風力発電設備等に対する電気事業法及び港湾法の各法に基づく構造等の審査に適用する。

【解説】

(1) 本基準解説の目的

電気事業法第三十九条においては、事業用電気工作物を設置する者は、事業用電気工作物を主務省令で定める技術基準に適合するように維持しなければならないこととされている。同法第四十条において、主務大臣は、主務省令で定める技術基準に適合していないと認めるときは、事業用電気工作物を設置する者に対し、その技術基準に適合するように事業用電気工作物を修理し、改造し、若しくは移転し、若しくはその使用を一時停止すべきことを命じ、又はその使用を制限することができることとされている。風力発電設備の技術基準は、発電用風力設備に関する技術基準を定める省令（平成九年通商産業省令第五十三号）において、定められている。

また、港湾法第三十七条の五においては、港湾管理者は、港湾区域内水域等を占用しようとする者から公募占用計画が提出されたときは、公募対象施設等が国土交通省令で定める基準に適合しているかを審査しなければならないこととされている。公募対象施設等の基準は、港湾法施行規則（昭和二十六年運輸省令第九十八号）第三条の九及び公募対象施設等又はその維持管理の方法の基準に関し必要な事項を定める告示（平成二十八年国土交通省告示第八百五十八号）において、定められている。係留施設の技術基準は、港湾の施設の技術上の基準を定める省令（平成19年国土交通省令第十五号）及び港湾の施設の技術上の基準の細目を定める告示（平成19年国土交通省告示第395号）において定められている。

本基準解説は、前述した電気事業法及び港湾法に基づいて設置される洋上風力発電設備等が適合すべき基準について、各法の統一的な考え方を解説するものである。図-解 1.1.1 に、本基準解説の位置づけと審査の流れを示す。

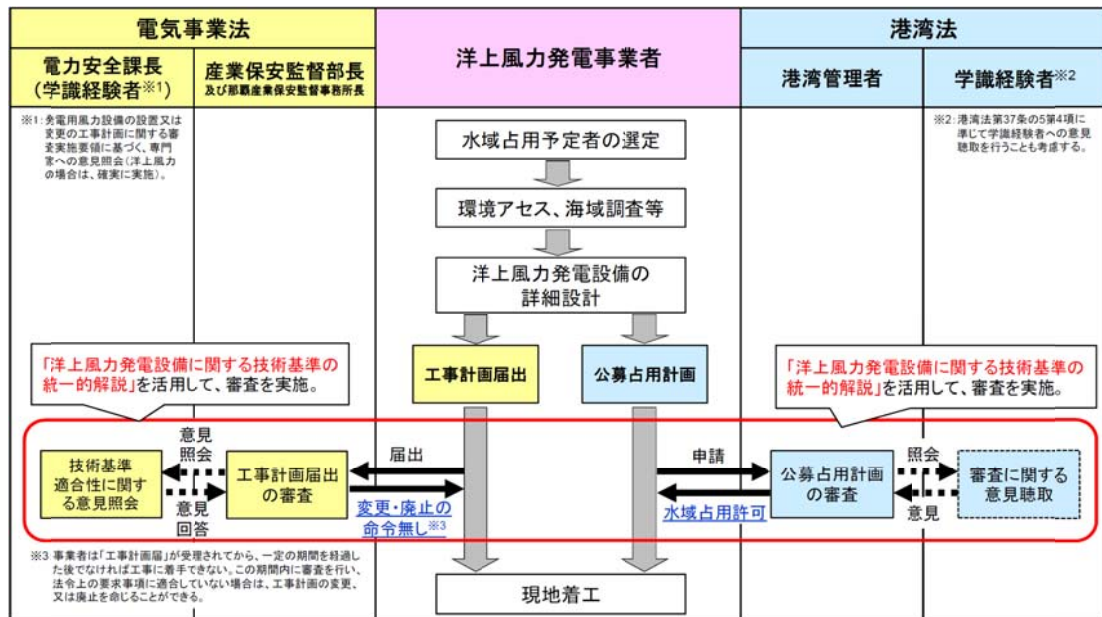


図-解 1.1.1 本基準解説の位置づけと審査の流れ

(2) 本基準解説の適用範囲

本基準解説は、図-解 1.1.2 に示すように、洋上風力発電設備、洋上変電設備、海底送電線、観測塔及び通信ケーブルを対象としている。ここで、洋上風力発電設備とは、ロータナセル・アセンブリ (RNA)、タワー、下部構造、基礎の各部からなる構造物を総称するものである。洋上風力発電設備等とは、洋上風力発電設備、洋上変電設備、海底送電線、観測塔及び通信ケーブルを総称するものである。なお、電気事業者による再生可能エネルギー電気の調達に関する特別措置法 (平成二十三年法律第百八号) (以下「FIT 法」という。) において、「再生可能エネルギー発電設備」は、再生可能エネルギー源を電気に変換する設備及びその附属設備と定義されている。このため、電気事業法又は港湾法における「洋上風力発電設備等」が、FIT 法における「再生可能エネルギー発電設備」に該当することに、注意が必要である。ただし、洋上風力発電設備等の内部に設置された電気設備に関しては、電気設備に関する技術上の基準を定める省令に適合するものとし、本基準解説では解説を省略する。

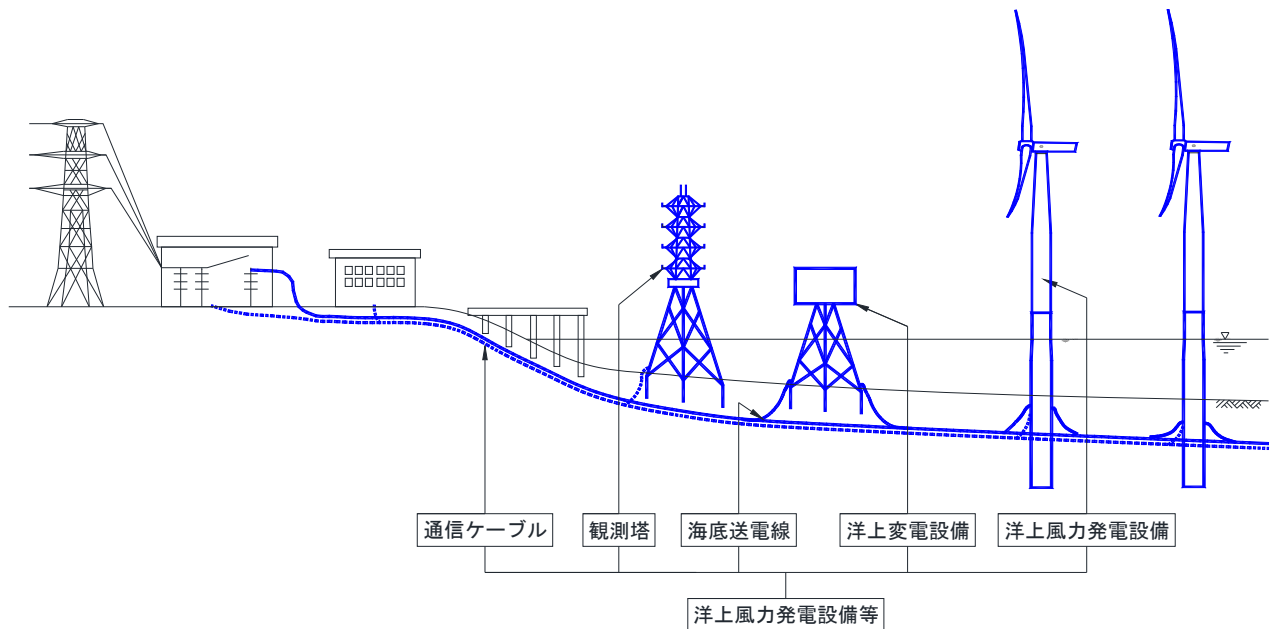


図-解 1.1.2 本基準解説の対象となる設備

本基準解説では、洋上風力発電設備の支持構造物の構造形式として、図-解 1.1.3 に示すように、鋼製タワー、モノパイル構造やジャケット構造を用いた杭式基礎、重力式基礎を対象としている。ここで、タワー、下部構造、基礎を総称して支持構造物という。これらの他にもコンクリート製タワーやトライポット型下部構造、サクシオン式基礎などを採用する場合は、要求性能や外力の設定については本基準解説に準拠し、構造設計の妥当性については学識経験者による意見等を踏まえ、本基準解説と同等の安全性が確保されていることを判断する必要がある。

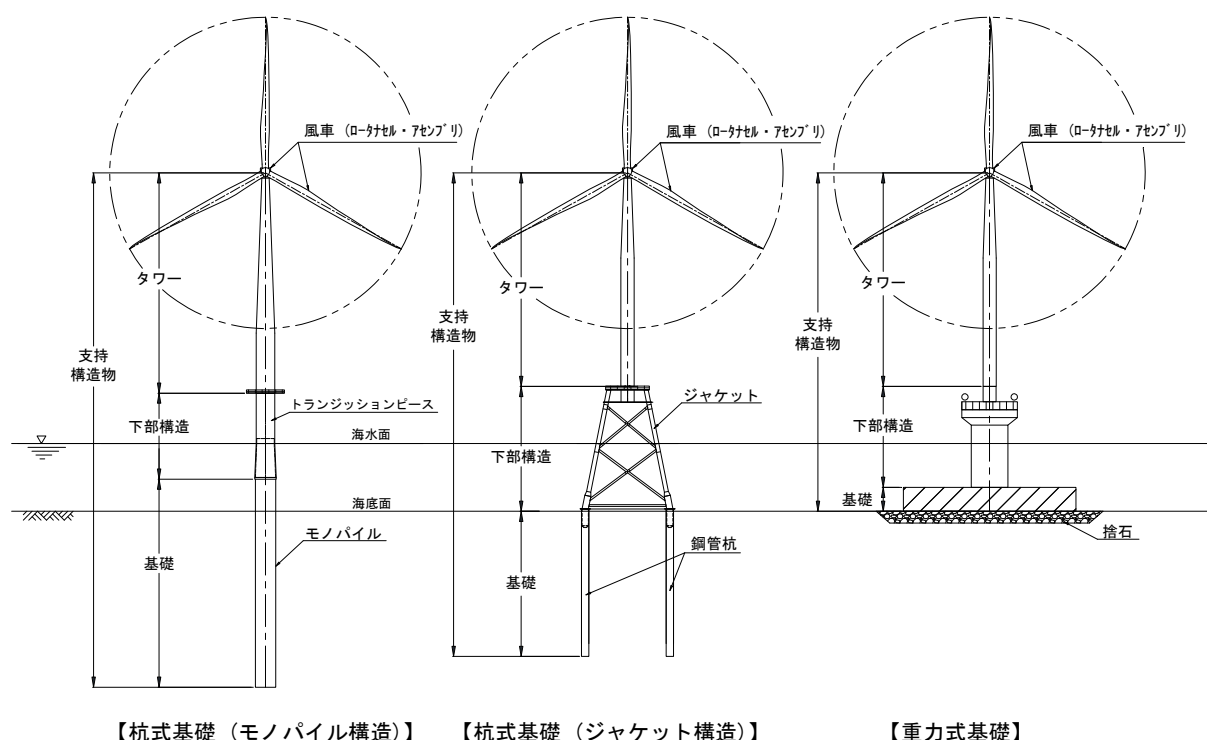


図-解 1.1.3 洋上風力発電設備の各部名称並びに形式

本基準解説は、洋上風力発電設備等のうち洋上風力発電設備の支持構造物を主たる対象としている。本文中で「支持構造物」と記述がある場合は、洋上風力発電設備の支持構造物を示すこととなるが、洋上風力発電設備を洋上変電設備や観測塔と読み替えて、それぞれに適用することもできる。また、海底送電線及び通信ケーブルの設計では、本基準解説で対象とする支持構造物の設計方法がそのまま適用できないことも考えられる。その場合は、本基準解説で示す事項に加えて国際・国内規格や認証規格を参考にすることができる。

浮体式の洋上風力発電設備については、風技解釈第 16 条第 2 項において船舶安全法（昭和八年法律第十一号）の技術基準（平成 24 年 4 月 23 日国海安第 194 号「浮体式洋上風力発電施設技術基準」）への適合が要求されているほか、港湾区域に設置する場合には公募対象施設等の基準にも適合する必要があることから、一般化が見込まれる段階でこれらの基準の統一的な解説について検討していくこととしたい。

なお、電気事業法及び港湾法の各省令に定める技術的要件を満たすことを証明する方法は、本基準解説に限定されるものではなく、各省令に照らして十分な保安水準の確保が達成できる技術的根拠があれば本基準解説で示す方法に替えて採用することができる。

## 1.2 定義

本基準解説において使用する用語は、電気事業法、港湾法並びにこれらに関連する法令等において使用する用語の例による。

### 【解説】

本基準解説において使用する用語は、以下の法令等において使用する用語の例による。

- ・発電用風力設備に関する技術基準を定める省令（平成九年通商産業省令第五三号）
- ・港湾の施設の技術上の基準を定める省令（平成十九年国土交通省令十五号）
- ・港湾の施設の技術上の基準の細目を定める告示（平成十九年国土交通省告示第三百九十五号）
- ・港湾法施行規則（昭和二十六年運輸省令第九十八号）
- ・公募対象施設等又はその維持管理の方法の基準に関し必要な事項を定める告示（平成二八年国土交通省告示第八五八号）

### （1）用語の定義

#### ○サイト

洋上風力発電設備等の計画された位置をいう。

#### ○洋上風力発電設備

風車（ロータナセル・アセンブリ）、タワー、下部構造、基礎の各部からなる構造物を総称するものである。

#### ○洋上風力発電設備等

洋上風力発電設備、洋上変電設備、海底送電線、観測塔及び通信ケーブルを総称するものである。

#### ○ウィンドファーム

海上に配置された複数基の洋上風力発電設備をいう。

#### ○風車（ロータナセル・アセンブリ）

支持構造物によって支えられる洋上風力発電設備の一部であり、ロータ部とナセル部で構成される。ロータ部はブレード（翼）、ロータ軸、ハブなどで構成される。発電機部は発電機軸、発電機、制御機器、増速機などで構成され、ナセルと呼ばれる躯体に収納される。これらの部材により風の運動エネルギーが回転エネルギーに変換される。ロータナセル・アセンブリはRNAと表現する場合もある。

#### ○ロータ（回転翼）

洋上風力発電設備における風車（ロータナセル・アセンブリ）の回転翼のことで、ロータ軸先端のハブのまわりにブレード（羽部材）を取り付けた回転体全体をいう。

#### ○制御システム

風車及び周囲の状態の情報に基づいて、風車をその動作限界内に保つように調整する機械をいう。

○支持構造物

風車（ロータナセル・アセンブリ）を支持する構造物の総称であり、タワー、下部構造及び基礎で構成される。

○タワー

洋上風力発電設備の支持構造物のうち、下部構造と風車（ロータナセル・アセンブリ）との間にある部分をいう。

○下部構造

洋上風力発電設備の支持構造物のうち、海底より上方に突き出し、かつ、基礎をタワーに接続する部分をいう。

○基礎

洋上風力発電設備の支持構造物のうち、風車（ロータナセル・アセンブリ）、タワー、下部構造に作用する荷重を海底地盤に伝える部分をいう。

○海岸保全基本計画

防護・環境・利用の調和した海岸の保全に関する基本的な方針を明らかにするとともに、地域の意向等を反映させるため、都道府県知事が策定するものであり、総合的な海岸保全に関する計画をいう。

（出典： <http://www.mlit.go.jp/river/kaigan/main/coastplan/index.html>）

○港湾BCP

大地震等の自然災害等が発生しても、当該港湾の重要機能が最低限維持できるよう、自然災害等の発生後に行う具体的な対応（対応計画）と、平時に行うマネジメント活動（マネジメント計画）等を示した文書のことをいう。港湾BCPは港湾管理者及び関係者から構成される協議会等が、関係者の合意に基づいて策定する。（出典： <http://www.mlit.go.jp/common/001084473.pdf>）

○離隔距離

洋上風力発電設備等を設置しようとする場合において、港湾施設の適切な管理のために確保する必要がある、航路等の水域施設、防波堤や護岸等の外郭施設、海岸保全施設等の施設から洋上風力発電設備等までの距離をいう。

○再生可能エネルギー源を利活用する区域

港湾管理者が、洋上風力発電設備等が設置されても安全な船舶の航行や荷役等、現在及び将来の港湾の整備や運営に支障が生じないことを前提として、洋上風力発電設備の設置可能な範囲を適地として設定し、事前に水域利用者等との調整を図ったうえで港湾計画に位置付け、「港湾の管理運営と洋上風力発電設備の共生可能な範囲」として明確化させた区域をいう。

○再現期間

ある値以上の現象が一度起きて、次に起きるまでの確率的な平均期間をいう。

○荷重効果

単独荷重又は組合せ荷重が風車又は支持構造物に与える影響であり、内力、応力、ひずみ、運動などをいう。

○照査

構造物の設計時に、作用力と抵抗力、あるいは作用応力と許容応力を比較し、安全性を判定することをいう。

○共振

周期的な外力による強制振動において、外力の振動数と振動系の固有振動数とが近づくと、振幅が非常に大きくなる現象をいう。

○津波

海底地震や海底火山の爆発などによって生じる長周期の波をいう。

○洗掘

流れが底質や基盤を掘り下げる作用及びその掘り跡をいう。

○液状化

飽和した砂等が、地震等による激しい繰返しせん断応力を受けることによって粒子の噛み合わせが外れ、間隙水圧が上昇して有効応力が減少し、せん断強さを失う現象をいう。

○（海洋）付着生物

水中の固体に付着して生息している生物をいう。

○氷丘氷

大きな氷盤が互いにぶつかったとき、又は大きな氷盤が洋上風力発電設備等にぶつかって氷片及び氷盤が起伏状に積み重なったものをいう、また、氷丘氷の角を氷りょう（稜）という。

○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、静止又は移動しているものをいう。

○ハブ高さ

洋上風力発電設備におけるロータの受風面積の中心の平均水面からの高さをいう。

○ヨー制御

風車回転面を風向に追尾させる制御をいう。風車の保護や出力制御のために方位を制御することもある。

○基準風速

風車クラスを定義するために用いられる風速の基本パラメータをいう。

○ウインドシア

風向に対して垂直な面上の風速の変化をいう。

○粗度

地表の凹凸、樹木、建物等境界面の粗さや滑らかさをいう。

○乱流強度

変動風速の標準偏差を平均風速で割った値をいう。

○空力弾性モデル

風車、航空機等における流体力、弾性力、慣性力が組み合わさって発生する現象等を事前に予測するため、それらの相互影響を評価するモデルをいう。

○時刻歴応答解析

時間的な変動に対する構造物の動的応答（変位、ひずみ、応力、反力等）の解析をいう。

○幾何学的非線形

変位とひずみの関係が比例範囲内にないことをいう。

○砕波

波が波形の安定性を失って砕けていく現象をいう。

○平均水面

現実の起伏に富んだ海面に対して、潮汐や波浪も海流もない静水面があるとしたときにできる仮想の海面をいう。

○海況

統計的に定常的な海の状態をいう。

○沖波

水深が波長の  $1/2$  以上である水域の波をいう



○換算沖波

屈折や回折の影響を受けた波の変形やその作用を計算するために使う波をいう。換算沖波波高は、沖波波高に屈折係数と回折係数を掛けて算出する。

○設計波

洋上風力発電設備等の設計で対象とする波をいう。

○有義波

実際の海などに見られる不規則な波群を便宜的に単一の周期、波高で代表させた波をいう。有義波の波高を有義波高といい、周期を有義波周期という。

○最高波

波群の中で波高の一番大きな波をいう。その波の波高を最高波高という。

○波高

波の峰の高さと谷の高さの差をいう。

○波頂高

波形の平均位置から測った峰の位置の高さをいう。微小振幅波の場合は振幅に等しい。

○波向

波が寄せてくる方向をいう。

○波の周期

波形の時間的な繰返しの間隔をいう。規則波の水面変動を固定した 1 点で測定すると、同じ波形が繰返し現れる。この繰返しの時間間隔を周期という。不規則波の場合は波形の時間記録におけるゼロアップ（ダウン）クロス点の間隔を指す。

○波の周波数スペクトル

ある海域における波のエネルギー分布を周波数領域で表現したものをいう。

○波形勾配

波長に対する波高の比をいう。

○ゼロアップクロス法

不規則な波が連なった形をした波浪の水位の時間記録を、一定の基準にしたがって分割し、個々の波の波高と周期を取り出して統計的に処理する方法である。不規則な波浪の時間記録から、個々の波を定義する方法のうち、水位が上昇しながら平均水面を切る時刻から、次に同じように水面を切る時刻の間

を 1 波する方法をゼロアップクロス法という。逆に水位が下降しながら平均水面を切る時刻から、次に同じように水面を切る時刻の間を 1 波とする方法をゼロクロスダウン法という。

○抗力

流体中の物体が流れから受ける力で、流れ方向の成分をいう。

○気象海象

気象及び海象を合わせた略語をいう。

○波浪推算

気象資料に基づいて発生波の諸元を推算すること。

○評価時間

風速、海面高さ、応答など、与えられた統計的過程に対して定常性が仮定できる期間をいう。

○屈折

波が波速の変わる部分で進行方向を曲げる現象をいう。

○回折

波が障害物の背後へ回り込む現象をいう。

○水深

海底面と静水位との鉛直距離をいう。静水位には幾つかの場合があるため、水深の値も一つとは限らない点に注意する必要がある。

○うねり

その波を発生させた風から離れて進行している波で、周期が長く波峰が延び、風浪よりも規則的なものをいう。

○高潮

強風や気圧の変化などのために潮位が不規則に上昇する現象をいう。

○潮流

潮汐の干満に伴って生ずる海水の水平運動をいう。

○潮汐

海面の規則的な昇降をいう。

○PS 検層

ボーリング孔を利用して弾性波（P 波・S 波）を測定し、深さ方向の速度分布を求めることで地質状況を調べる調査手法をいう。

○応答スペクトル

地震動に対する振動系の応答の最大値を、減衰定数をパラメータとして、系の固有周期の関数として表示したものをいう。

○地震荷重

地震時に構造物に作用する荷重をいう。

○座屈

構造物の部材等が圧縮力を受け、圧縮力がある値を超えると力を受ける方向と直交する方向に急激に変形を起こす現象をいう。

○根入れ長

海底面から杭下端までの鉛直距離をいう。

○滑動

物体がその支持面上を水平に移動する現象をいう。

○エアギャップ

洋上風力発電設備の支持構造物に附属する構造物と最大波頂高の間の鉛直クリアランスをいう。

○飛沫帯

支持構造物に、波が衝突したり、打ち上がったときに発生するしぶきの飛び散る領域をいう。

## (2) 記号の説明

本基準解説で使用する記号を以下に示す。

$B_q$	間隙水圧比
$C_2$	粒径の影響を考慮した補正係数
$c_u$	非排水せん断強さ
$D$	ロータ径あるいは $v$
$D_r$	相対密度
$F_c$	細粒分含有率
$F_d$	設計荷重
$F_k$	荷重の特性値
$F_R$	基準化摩擦比
$G$	固定荷重によって生じる力
$H_0$	沖波波高
$H_0'$	換算沖波波高
$H_{1/3}$	ゼロアップクロス法から求められる有義波高
$H_{all}$	基礎マウンドの上面からロータ最高到達点までの高さ
$H_f$	倒壊影響距離
$H_s$	波浪スペクトルから求められる有義波高
$H_{sN}$	再現期間 $N$ 年の有義波高
$h$	水深
$I_c$	土質性状指数
$I_{ref}$	風速が 15m/s のときの乱流強度の期待値
$K$	稀に発生する地震荷重あるいは港湾基準に規定されるレベル 1 地震荷重（港湾レベル 1 地震動）によって生じる力
$K_t$	津波によって生じる力
$K_W$	地震時の動水圧によって生じる力
$K'$	極めて稀に発生する地震荷重あるいは港湾の耐震強化施設の設計に用いるレベル 2 地震動（港湾レベル 2 地震動）によって生じる力
$k$	波数
$M$	地震のマグニチュード
$N_{kt}$	コーン係数
$P$	積載荷重によって生じる力
$P_a$	大気圧
$q_t$	先端抵抗
$R$	ヨー旋回範囲の半径（あるいはコーン半径）
$R_d$	設計耐力
$R_k$	部材耐力の特性値

$S$	海底勾配あるいは滑動距離
$S_{a0}$	工学基盤面での基準化加速度応答スペクトル
$S_d$	設計荷重効果
$S_k$	特性荷重効果
$T_{50}$	過剰間隙水圧 50%消散時の理論時間ファクター
$T_s$	波浪スペクトルから求められる有義波周期
$T_{sN}$	再現期間 $N$ 年の有義波高に対応する有義波周期
$t$	時間
$t_{50}$	過剰間隙水圧 50%消散時の経過時間
$u_0$	静水圧
$V_1$	再現期間 1 年の極値風速
$V_{ave}$	年平均風速
$V_{hub}$	ハブ高さ風速
$V_{in}$	カットイン風速
$V_{out}$	カットアウト風速
$V_r$	定格風速
$V_S$	せん断波速度あるいは $S$ 波速度
$z$	深さ
$a_0$	工学基盤面での基本最大加速度
$a_{max}$	地表面最大加速度
$\beta$	杭の特性値
$\gamma$	単位体積重量
$\gamma_f$	荷重係数
$\gamma_m$	抵抗係数
$\gamma_n$	損傷結果に対する部分安全係数
$\Delta\sigma_i$	有効応力の増分
$\sigma_{vo}$	鉛直全応力あるいは上載圧
$\sigma'_{vo}$	鉛直有効応力
$\tau$	等価せん断応力振幅
$\varphi_{tc}$	三軸圧縮試験による内部摩擦角
$\varphi'$	内部摩擦角

### (3) 略語の説明

本基準解説で使用する略語の説明を以下に示す。

COD	同一方向 (Co-Directional)
CPT	コーン貫入試験 (Cone Penetration Test)
DFP	疲労安全率 (Damage Fatigue Factor)
DLC	設計荷重組み合わせ (Design Load Case)
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)
ECM	極値流速モデル (Extreme Current Model)
EDC	極値方向変化 (Extreme Direction Change)
EOG	運転時の極値突風 (Extreme Operating Gust)
ESS	極値海況 (Extreme Sea State)
ETM	極値乱流モデル (Extreme Turbulence Model)
EWM	極値風速モデル (Extreme Wind speed Model)
EWS	極値ウインドシア (Extreme Wind Shear)
FEM	有限要素法 (Finite Element Model)
HAT	最高天文潮位 (Highest Astronomical Tide)
H. H. W. L.	既往最高潮位 (Highest High Water Level)
H. W. L.	朔望平均満潮位 (Highest Water Level)
LAT	最低天文潮位 (Lowest Astronomical Tide)
L. W. L.	朔望平均干潮面 (Lowest Water Level)
MIS	方向の不ぞろい (Misaligned)
M. L. W. L.	平均干潮面 (Mean Low Water Level)
M. S. L.	平均水面 (Mean Sea Level)
MUL	多方向 (Multi-directional)
NCM	通常流速モデル (Normal Current Model)
NSS	通常海況 (Normal Sea State)
NTM	通常乱流モデル (Normal Turbulence Model)
NWP	通常ウインドプロファイルモデル (Normal Wind Profile model)
RNA	ロータナセル・アセンブリ (Rotor-Nacelle Assembly)
SSS	高波浪時海況 (Severe Sea State)
UNI	単一方向 (Uni-directional)

### 1.3 関連規格・関連法規

洋上風力発電設備等を設置するための計画・調査・設計等にあたっては、電気事業法及び港湾法に従うものとする。

#### 【解説】

##### (1) 関連法規

港湾区域において洋上風力発電設備等を導入する場合に関係する主な法規・基準・指針等は、電気事業法及び港湾法のほか以下のものが挙げられる。それらの利用にあたっては、それぞれの基準・規格等の最新版を参照する必要がある。

##### 1) 国内における法規・基準・指針

- ・ 港則法
- ・ 水路業務法
- ・ 海洋汚染等及び海上災害の防止に関する法律
- ・ 航路標識法
- ・ 海岸法
- ・ 環境影響評価法
- ・ 航空法
- ・ 発電用風力設備に関する技術基準を定める省令
- ・ 発電用風力設備の技術基準の解釈
- ・ 発電用風力設備に関する技術基準を定める省令及びその解釈に関する逐条解説
- ・ 電気設備の技術基準を定める省令
- ・ 電気設備の技術基準の解釈・同解説
- ・ 港湾の施設の技術上の基準・同解説
- ・ 港湾における洋上風力発電施設等の技術ガイドライン
- ・ 港湾における風力発電について - 港湾の管理運営との共生のためのマニュアル
- ・ 防波堤の耐津波設計ガイドライン

##### 2) 国際規格・基準

- ・ IEC 61400-1 : Wind turbines-Part1: Design requirements
- ・ IEC 61400-3 : Wind turbines-Part3: Design requirements for offshore wind turbines
- ・ IEC 61400-12 : Wind energy generation systems-Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines
- ・ ISO 2394 : General principles on reliability for structures
- ・ ISO 12944 : Paints and varnishes - Corrosion protection of steel structures by protective paint systems -
- ・ ISO 19900 : Petroleum and natural gas industries-General requirements for offshore structures
- ・ ISO 19901 : Petroleum and natural gas industries-Specific requirements for offshore

structures

- ISO 19902 : Petroleum and natural gas industries-Fixed steel offshore structures
- ISO 19903 : Petroleum and natural gas industries-Fixed concrete offshore structures
- API RP2A-WSD : Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platforms-Working Stress Design
- API RP 2GEO : Geotechnical and Foundation Design Considerations

### 3) 対応 JIS 規格

- JIS C1400-1 : 風車-第1部:設計要件
- JIS C1400-3 : 風車-第3部:洋上風車の設計要件
- JIS C1400-24 : 風車-第24部:雷保護

### 4) 認証規格

- DNVGL-ST-0126 : Support structures for wind turbines
- DNVGL-ST-0437 : Loads and site conditions for wind turbines
- DNVGL-RP-C203 : Fatigue design of offshore steel structures
- DNVGL-ST-0359 : Subsea power cables for wind power plants
- DNVGL-RP-0360 : Subsea power cables in shallow water
- DNV-OS-J101 : Design of Offshore Wind Turbine Structures
- DNV-OS-C502 : Offshore Concrete Structures
- Rules and guidelines IV Industrial Services Guideline for the certificate of offshore wind turbines, 2012

### 5) その他

- 国際航路標識協会 (IALA: International Association of Lighthouse Authorities) の勧告
- Marine Guidance Note, Maritime and Coastguard Agency, 英国
- 風力発電設備支持物構造設計 指針・同解説 (土木学会)
- 地方自治体のガイドライン等
- MEASNET Procedure : Evaluation of site-specific wind conditions
- 埋立地の液状化対策ハンドブック (沿岸技術研究センター)
- 氷海域における海岸・海洋構造物設計マニュアル (寒地港湾技術研究センター)
- ジャケット工法技術マニュアル (沿岸技術研究センター)
- 港湾鋼構造物防食・補修マニュアル (沿岸技術研究センター)
- 道路橋示方書・同解説 (日本道路協会)
- 鉄道構造物等設計標準・同解説 (鉄道総合技術研究所)
- 鋼構造設計規準 (日本建築学会)
- 鋼管トラス構造設計施工指針・同解説 (日本建築学会)
- 洋上風力発電の技術マニュアル:基礎工法に重点をおいて (沿岸技術研究センター)



## 第2章 洋上風力発電設備等の要求性能

洋上風力発電設備等は、2.1～2.12節に示す要求性能を満足するものとする。

### 【解説】

洋上風力発電設備等における要求性能は2.1～2.12節に示す12の項目に分類される。この要求性能は、電気事業法に基づく発電用風力設備に関する技術基準並びに港湾法に基づく公募対象施設の基準及び港湾の施設の技術基準について、国際規格(IEC 61400-1<sup>1)</sup>、IEC 61400-3<sup>2)</sup>など)、日本工業規格(JIS C 1400-1<sup>3)</sup>、JIS C 1400-3<sup>4)</sup>など)、DNVGL基準(DNVGL-ST-0126<sup>5)</sup>など)、API基準(API-RP2A-WSD<sup>6)</sup>など)、国内の関連基準(港湾の施設の技術上の基準・同解説<sup>7)</sup>、風力発電設備支持物構造設計指針・同解説<sup>8)</sup>)を参考に取りまとめたものである。現在作成中の国際規格 IEC 61400-6(予定)<sup>9)</sup>が発行された場合には、その内容を参考にすることもできる。2.1～2.12節に示す要求性能が対象とする構造物は、表-解 2.1 に示す通りである。

表-解 2.1 洋上風力発電設備等を構成する各種構造物と要求性能の関係

	洋上風力発電設備等				
	洋上風力 発電設備	変電 設備	海底 ケーブル	観測塔	通信 ケーブル
2.1 外力に対して安全な構造	○	○	○	○	○
2.2 風車の構造	○				
2.3 風車の安全な状態の確保	○				
2.4 取扱者以外の者の接近の防止	○	○		○	
2.5 圧油装置及び圧縮空気装置の危険の防止	○	○		○	
2.6 公害等の防止	○	○		○	
2.7 港湾機能及び周辺海域の利用等に影響を与えない洋上風力発電設備の設置	○	○		○	
2.8 航行船舶からの視認性の向上	○	○		○	
2.9 船舶等との接触の防止	○				
2.10 腐食の防止	○	○		○	
2.11 施工及び維持管理への対応	○	○	○	○	○
2.12 送電線等の敷設			○		○

### 参考文献

- 1) International Electrotechnical Commission (2005), IEC 61400-1: Wind turbines Part 1: Design requirements
- 2) International Electrotechnical Commission (2009), IEC 61400-3: Wind turbines Part 3: Design requirements for offshore wind turbines
- 3) 日本規格協会 (2017)、JIS C1400-1: 風車—第1部: 設計要件

- 4) 日本規格協会 (2014)、JIS C1400-3: 風車—第3部: 洋上風車の設計要件
- 5) DNV GL (2016)、DNVGL-ST-0126
- 6) American Petroleum Institute (2014), API-RP2A-WSD 22nd Edition
- 7) 日本港湾協会 (平成19年7月)、港湾の施設の技術上の基準・同解説
- 8) 土木学会 (2010)、風力発電設備支持物構造設計指針・同解説
- 9) International Electrotechnical Commission (発行予定), IEC 61400-6: Wind turbines Part 6: Tower and Foundation Design requirements

## 2.1 外力に対して安全な構造

### 2.1.1 構造設計の基本方針

(1) 洋上風力発電設備等が適切な水準の安全性及び安定性を確保するよう、使用する風力発電機の特性を考慮すると共に、自然環境条件や地盤条件などの設計条件を適切に設定するものとする。

(2) 洋上風力発電設備等の設計供用期間を適切に定めるものとする。

(3) 洋上風力発電設備等の設計供用期間中に発生する荷重や外力の作用に対して、以下に示す要求性能を満足するものとする。

1) 洋上風力発電設備等は、風、波、水の流れ、積雪、稀に発生する地震動、港湾基準に規定されるレベル1地震動（以下、「港湾レベル1地震動」と称す）等の作用により損傷せず、発電設備としての機能を満足するものとする。

2) 洋上風力発電設備等は、極めて稀に発生する地震動の作用により、倒壊・崩壊しないものとする。また、設計津波の作用によっても、倒壊・崩壊しないものとする。

3) 洋上風力発電設備等が損傷して、港湾に存する耐震強化施設の利用等に支障を及ぼすおそれのある場合には、港湾の耐震強化施設の設計に用いるレベル2地震動（以下、「港湾レベル2地震動」と称す）の作用によっても倒壊・崩壊しないことを確認するものとする。

(4) 洋上風力発電設備等に作用する荷重は、以下の通り設定する。

1) 風、波、水の流れ、積雪は、再現期間を考慮して適切に定めるものとする。

2) 地震動の荷重レベルは、稀に発生する地震動、極めて稀に発生する地震動、港湾レベル1地震動、港湾レベル2地震動とする。

3) 津波は、海岸保全施設の設計津波を踏まえて荷重レベルを設定する。

4) 上記に示す荷重のほか、風車及び支持構造物の固定荷重、積載荷重も考慮する。

5) 洋上風力発電設備等の構造設計で考慮する荷重の組み合わせは、2.1.2項の規定にしたがうものとする。

(5) 材料

洋上風力発電設備等に使用する材料は、作用、劣化、設計供用期間、形状、施工性、経済性、環境に及ぼす影響等を考慮して、適切な材料を選定する。

(6) 設計の流れ

洋上風力発電設備等の自然環境条件や地盤条件は、第3章に基づいて設定する。安全性、安定性の照査は、第4章に基づいて実施する。

## 【解説】

### (1) 洋上風力発電設備等の構造設計の基本方針

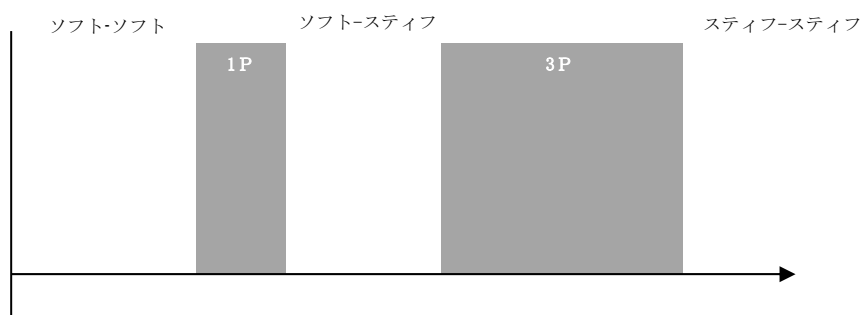
#### 1) 使用する風車の特性

洋上風力発電設備は、風車及びそれを支える支持構造物によって構成されるため、支持構造物の設計にあたっては、風車の特性を考慮する必要がある。以下に風車の主な特性を示す<sup>1)</sup>。

- ① 洋上風力発電設備は一般に風況のよい地点に設置され、暴風時には周辺地域より強い風が吹くことが多い。過去に、設置地点での設計風速の過小評価による陸上風力設備の被害例が見られたことから、設置地点の自然環境条件を設定する際は十分に注意する必要がある。
- ② 風車はヨー制御やピッチ制御と呼ばれる制御方式が採用されており、制御によって暴風時の風車の姿勢や作用する風荷重が異なる。また台風時の停電により制御用電源が喪失した場合、風車に作用する風荷重は制御が可能な場合に比べ大きく増大する可能性がある。風車の制御トラブルが倒壊の直接原因になった事象事例もあり、制御が不可能な場合を想定した設計を行う必要がある。
- ③ 地震や積雪の発生時においても洋上風力発電設備が発電している確率が高いため、地震時や積雪時の構造設計を行う際には、発電時の風荷重を考慮する必要がある。

風車メーカーが構造全体系の許容振動数帯を指定する場合は、これを満足するよう支持構造物の設計を行う必要がある。以下に、3枚翼ロータの風車を用いる場合の振動数の検討例を示す。風車において最も顕著な加振源はロータであり、ロータ速度の1Pと3Pにピークが現れる。これら2つの周波数を図-解2.1.1.1に示す。横軸は周波数(Hz)であり、縦軸の値は任意である。支持構造物は、その1次モード固有振動数が1Pや3Pに共振しないよう、以下の3つの周波数領域となるように設計する必要がある<sup>2)</sup>。

- ・ソフト-ソフト領域 : 1次モード固有振動数が1Pよりも小さい、剛性が低い支持構造物
- ・ソフト-スティフ領域 : 1次モード固有振動数が1Pと3Pの間にある支持構造物
- ・スティフ-スティフ領域 : 1次モード固有振動数が3Pよりも大きい、剛性が高い支持構造物



ただし、支持構造物の1次モード固有振動数が1Pや3Pの共振範囲に入ってしまう際に、風車メーカーが共振を回避する制御技術等を適用する場合、この限りではない。

支持構造物は風力発電設備の機能を損なわないよう、支持構造物の傾き・滑動・転倒・沈下などの変形にも十分注意して設計する必要がある。風車メーカーが完成時(無負荷時)の許容傾斜角を指定する場合は、これを満足するように設計する必要がある。

2) 自然環境条件や地盤条件などの設計条件

自然環境条件は、風の条件、海洋環境条件（波、水の流れ、潮位、海水、海洋付着生物）、地震の条件などに分けられる。これらの条件は建設地点の観測結果に基づいて適切に設定する必要がある。また、地盤条件は地層構成や土質の工学的性質などを含むものであり、海底地盤変形、洗掘及びその他の海底地盤の不安定性要素による地盤の時間的変化も考慮する必要がある。自然環境条件及び地盤条件の設定方法は3章で述べる。

(2) 洋上風力発電設備等の設計供用期間

JIS C 1400-1<sup>3)</sup>で設定される風車クラスは、その設計寿命を20年以上と定めている。これに伴って洋上風力発電設備等の設計供用期間は20年以上とする。

(3) 洋上風力発電設備等の要求性能

本基準解説で規定する要求性能は、洋上風力発電設備等を設計する際に考慮しなければならない必要最小限の要求性能であり、かつ構造設計に関する要求性能に限定したものである。実際に支持構造物の設計を行う場合は、景観、自然環境に与える影響、経済性、撤去の容易性等にも配慮して要求性能を定める必要がある。

本文中の1)～3)で示す要求性能は、発電用風力設備に関する技術基準を定める省令、JIS C 1400-1<sup>3)</sup>、JIS C 1400-3<sup>4)</sup>、港湾の施設の技術上の基準・同解説<sup>5)</sup>など複数の関連規格・基準に基づいて取りまとめたものである。図-解 2.1.1.2 に関連規格・基準と本基準解説の関係を示す。

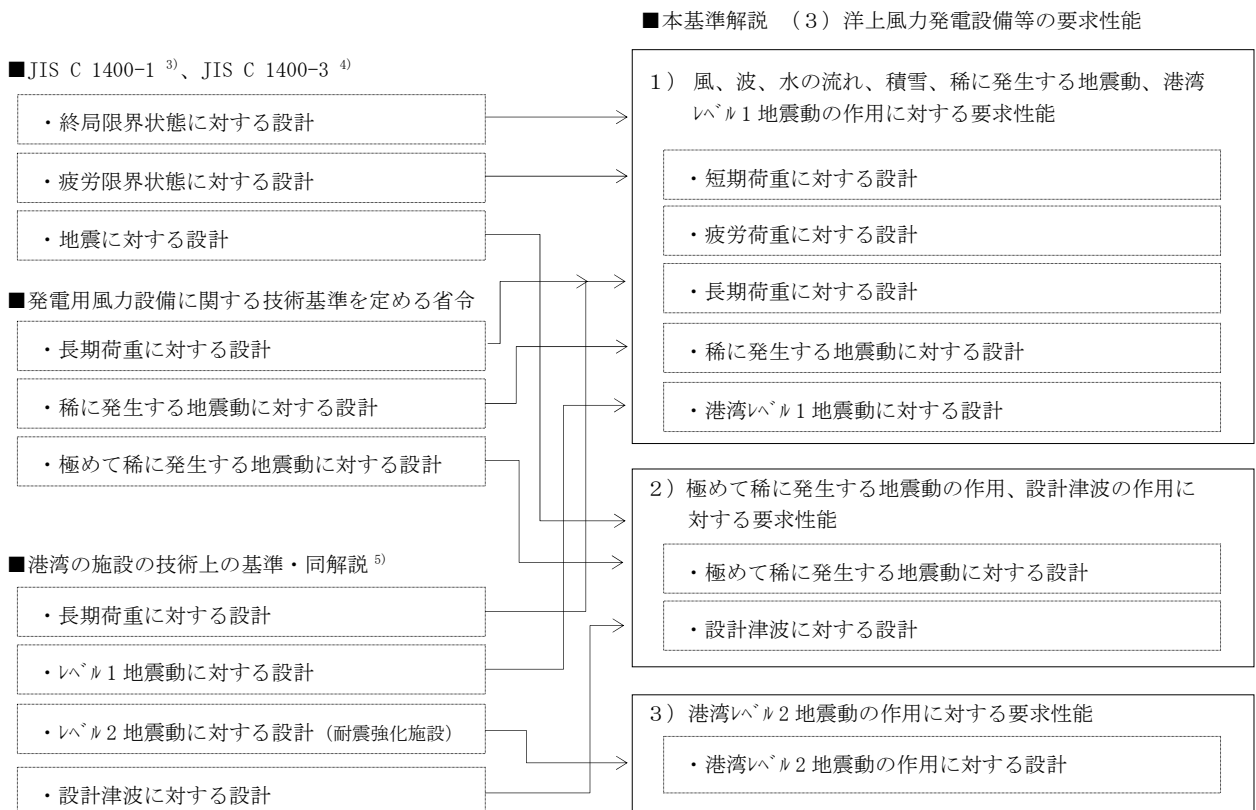


図-解 2.1.1.2 関連規格・基準と本基準解説の関係

1) 風、波、水の流れ、積雪、稀に発生する地震動、港湾レベル1地震動等の作用に対する設計

風、波、水の流れ、積雪の作用に対する設計は、長期荷重、短期荷重、疲労荷重の3種類に分けて行うこととした。長期荷重は、頻繁に発生する風、波、水の流れ、積雪の作用に対する設計を実施するためのものである。短期荷重は、稀に発生する風、波、水の流れ、積雪の作用に対する設計を実施するためのものである。また、疲労荷重は、風、波の繰返し作用によって生じる疲労損傷に対する設計を実施するためのものである。

表-解 2.1.1.1 に、短期荷重及び疲労荷重の設計で用いる荷重組み合わせ、適用基準、要求性能及び照査項目を示す。荷重組み合わせは、JIS C 1400-3<sup>4)</sup> に準じて設定した。JIS C 1400-3<sup>4)</sup> では、構造設計は JIS C 1400-1<sup>3)</sup> や一般に認知された洋上風力発電設備の設計規格・ガイドラインを参考にすることができることとしていることから、これらを適用基準とした。要求性能は、発電用風力設備に関する技術基準を定める省令に準じて、洋上風力発電設備等が損傷せず、発電施設としての機能を満足することとした。照査項目は安全性及び安定性の2種類とし、前者は部材の応力度や疲労損傷度の照査を行うものとした。後者は基礎の支持力、滑動、転倒の照査を行うものとした。

表-解 2.1.1.1 荷重組み合わせ、適用基準、要求性能、照査項目の組み合わせ  
(短期荷重及び疲労荷重)

荷重組み合わせ (JIS C 1400-3 <sup>4)</sup> に準拠)	照査対象	適用基準	要求性能	照査項目
短期荷重及び疲労荷重 ・発電時 DLC 1.1~1.6 ・発電中の故障 DLC 2.1~2.5 ・発電開始時 DLC 3.1~3.3 ・通常発電停止 DLC 4.1~4.2 ・緊急停止 DLC 5.1 ・停止時 DLC 6.1~6.4 ・休止時(故障) DLC 7.1~7.2 ・輸送、設置、メンテナンス、修理時 DLC 8.1~8.4 ・海氷作用時 DLC D.1~D.8	タワー	JIS C 1400-1 <sup>3)</sup>	損傷せず、発電施設としての機能を満足する <sup>注2</sup>	構造の安全性 1) 部材応力度 2) 疲労損傷度
	下部構造	JIS C 1400-3 <sup>4)</sup> (信頼のおける 国際・国内基準 <sup>注1</sup> )	損傷せず、発電施設としての機能を満足する <sup>注2</sup>	構造の安全性 1) 部材応力度 2) 疲労損傷度
	基礎			構造の安定性 1) 支持力 2) 滑動 3) 転倒

注1: DNGL-ST-0126<sup>6)</sup>、API-RP2A-WSD<sup>7)</sup>の海洋構造物設計規格、港湾の施設の技術上の基準・同解説<sup>5)</sup>、風力発電設備支持物構造設計指針・同解説<sup>1)</sup>など

注2: 損傷せず、発電施設としての機能を満足するための具体例を以下に示す。これらの内容は「発電用風力設備の技術基準の解釈について」に基づいて定めた。

- 1) 構造上主要な部分は、支持構造物に作用する水平力に耐えるように配置すること。
- 2) 構造上主要な部分は、支持構造物に作用する外力に対して座屈を生じないこと。
- 3) 構造上主要な部分には、使用上の支障となる変形又は振動が生じないような剛性をもたせること。また、ぜい性破壊が生じないような靱性をもたせること。
- 4) 下部構造及び基礎が、タワーに作用する荷重及び外力を安全に地盤に伝え、かつ、地盤の沈下又は変形に対して構造上安全なものであること。
- 5) タワー頂部のフランジ、タワーに設ける開口部及び構造上主要な部分の高力ボルトについて、支持構造物に作用する外力により生じる応力が当該部材の許容応力度を超えないこと。
- 6) 支持構造物の溶接部及びボルト接合部が、疲労損傷に対して安全なものであること。
- 7) 構造上主要な部分で特に腐食又は摩損のおそれのあるものには、腐食若しくは摩損しにくい材料又は有効なさび止め若しくは摩損防止のための措置をした材料を使用すること。

表-解 2.1.1.2 に、長期荷重の設計で用いる荷重組み合わせ、適用基準、要求性能及び照査項目を示す。荷重組み合わせは、風力発電設備支持物構造設計指針・同解説<sup>1)</sup>や港湾の施設の技術上の基準・同解説<sup>5)</sup>を参考に本基準解説で独自に設定した。タワーの適用基準は風力発電設備支持物構造設計指針・同解説<sup>1)</sup>を用いることとし、下部構造並びに基礎の適用基準は風力発電設備支持物構造設計指針・同解説<sup>1)</sup>または港湾の施設の技術上の基準・同解説<sup>5)</sup>を用いることとした。要求性能及び照査項目は、短期荷重と同じとした。

表-解 2.1.1.2 荷重組み合わせ、適用基準、要求性能、照査項目の組み合わせ（長期荷重）

荷重組み合わせ (本基準解説で独自に設定)	照査対象	適用基準	要求性能	照査項目
長期荷重	タワー	風力発電設備 支持物構造設計 指針・同解説 <sup>1)</sup>	損傷せず、発電 施設としての機 能を満足する <sup>注1)</sup>	構造の安全性 1) 部材応力度
	下部構造	風力発電設備 支持物構造設計 指針・同解説 <sup>1)</sup>		構造の安全性 1) 部材応力度
	基礎	または 港湾の施設の技術上 の基準・同解説 <sup>5)</sup>		構造の安定性 1) 支持力 2) 滑動 3) 転倒

注1：表-解 2.1.1.1 の注 2 を参照のこと

表-解 2.1.1.3 に、稀に発生する地震動の設計で用いる荷重組み合わせ、適用基準、要求性能及び照査項目を示す。荷重組み合わせは、風力発電設備支持物構造設計指針・同解説<sup>1)</sup>を参考に本基準解説で独自に設定した。適用基準は風力発電設備支持物構造設計指針・同解説<sup>1)</sup>を用いることとした。要求性能及び照査項目は、短期荷重と同じとした。

表-解 2.1.1.4 に、港湾レベル1地震動の設計で用いる荷重組み合わせ、適用基準、要求性能及び照査項目を示す。荷重組み合わせは、港湾の施設の技術上の基準・同解説<sup>5)</sup>を参考に本基準解説で独自に設定した。適用基準は港湾の施設の技術上の基準・同解説<sup>5)</sup>を用いることとした。要求性能及び照査項目は、短期荷重と同じとした。

表-解 2.1.1.3 荷重組み合わせ、適用基準、要求性能、照査項目の組み合わせ  
(稀に発生する地震動)

荷重組み合わせ (本基準解説で独自に設定)	照査対象	適用基準	要求性能	照査項目
稀に発生する地震動	タワー	風力発電設備 支持物構造設計 指針・同解説 <sup>1)</sup>	損傷せず、発電 施設としての機 能を満足する <sup>注1)</sup>	構造の安全性 1) 部材応力度 構造の安定性 <sup>注2)</sup> 1) 支持力 2) 滑動 3) 転倒
	下部構造			
	基礎			

注1：表-解 2.1.1.1 の 注2 を参照のこと。

注2：構造の安定性照査は、下部構造並びに基礎を対象とする。

表-解 2.1.1.4 荷重組み合わせ、適用基準、要求性能、照査項目の組み合わせ  
(港湾レベル1地震動)

荷重組み合わせ (本基準解説で独自に設定)	照査対象	適用基準	要求性能	照査項目
港湾レベル1地震動	タワー	港湾の施設の技術上 の基準・同解説 <sup>5)</sup>	損傷せず、発電 施設としての機 能を満足する <sup>注1)</sup>	構造の安全性 1) 部材応力度 構造の安定性 <sup>注2)</sup> 1) 支持力 2) 滑動 3) 転倒
	下部構造			
	基礎			

注1：表-解 2.1.1.1 の 注2 を参照のこと。

注2：構造の安定性照査は、下部構造並びに基礎を対象とする。



2) 極めて稀に発生する地震動及び設計津波の作用に対する設計

表-解 2.1.1.5 に、極めて稀に発生する地震動の設計で用いる荷重組み合わせ、適用基準、要求性能及び照査項目を示す。荷重組み合わせは、風力発電設備支持物構造設計指針・同解説<sup>1)</sup>を参考に本基準解説で独自に設定した。適用基準は風力発電設備支持物構造設計指針・同解説<sup>1)</sup>を用いることとした。要求性能は発電用風力設備に関する技術基準を定める省令に基づき、洋上風力発電設備等が倒壊崩壊しないものとし、地盤と支持構造物の性能照査を実施するものとした。

表-解 2.1.1.6 に、設計津波の設計で用いる荷重組み合わせ、適用基準、要求性能及び照査項目を示す。荷重組み合わせは、港湾の施設の技術上の基準・同解説<sup>5)</sup>を参考に本基準解説で独自に設定したものである。適用基準は港湾の施設の技術上の基準・同解説<sup>5)</sup>を用いることとした。要求性能及び照査項目は稀に発生する地震動の設計と同じとした。

表-解 2.1.1.5 荷重組み合わせ、適用基準、要求性能、照査項目の組み合わせ  
(極めて稀に発生する地震動)

荷重組み合わせ (本基準解説で独自に設定)	照査対象	適用基準	要求性能	照査項目	
極めて稀に発生する地震動	タワー	風力発電設備 支持物構造設計 指針・同解説 <sup>1)</sup>	倒壊崩壊 しない	構造の安全性 1) 部材応力度      または      タワーの 性能照査	
	下部構造			構造の安全性 1) 部材応力度	下部構造と 基礎の 性能照査
	基礎			構造の安定性 1) 支持力 2) 滑動 3) 転倒      または	

表-解 2.1.1.6 荷重組み合わせ、適用基準、要求性能、照査項目の組み合わせ  
(設計津波)

荷重組み合わせ (本基準解説で独自に設定)	照査対象	適用基準	要求性能	照査項目	
設計津波	タワー	港湾の施設の 技術上の基準 ・同解説 <sup>5)</sup>	倒壊崩壊 しない	構造の安全性 1) 部材応力度	地盤と 支持構造物の 性能照査
	下部構造			構造の安定性 <sup>注1)</sup> 1) 支持力 2) 滑動 3) 転倒      または	
	基礎				

注1：構造の安定性照査は、下部構造並びに基礎を対象とする。

### 3) 港湾レベル2地震動の作用に対する設計

表-解 2.1.1.7 に、港湾レベル2地震動の設計で用いる荷重組み合わせ、適用基準、要求性能及び照査項目を示す。荷重組み合わせは、港湾の施設の技術上の基準・同解説<sup>5)</sup>を参考に本基準解説で独自に設定したものである。適用基準は港湾の施設の技術上の基準・同解説<sup>5)</sup>を用いることとした。要求性能は洋上風力発電設備等が倒壊崩壊しないものとし、地盤と支持構造物の性能照査を実施するものとした。

表-解 2.1.1.7 荷重組み合わせ、適用基準、要求性能、照査項目の組み合わせ  
(港湾レベル2地震動)

荷重組み合わせ (本基準解説で独自に設定)	照査対象	適用基準	要求性能	照査項目
港湾レベル2地震動	タワー	港湾の施設の技術上の基準・同解説 <sup>5)</sup>	倒壊崩壊しない	地盤と支持構造物の性能照査
	下部構造			
	基礎			

#### (4) 支持構造物に作用する荷重及び荷重の組み合わせ

本基準解説では、洋上風力発電設備等の支持構造物の適切な水準の安全性及び安定性を確保するために必要最低限の荷重を示している。建設地点の自然環境条件や外部条件、地盤条件などを考慮し、本基準解説で規定する内容以外の荷重を考慮する場合は、別途適切な手法により荷重を設定する必要がある。

洋上風力発電設備等の支持構造物の設計においては、風車及び支持構造物の動的応答を適切に考慮する必要がある。時刻歴応答解析により算出した荷重効果を用いて構造設計を行う必要がある。本基準解説で規定する荷重のうち、風荷重、波浪荷重、地震荷重は時刻歴応答解析により荷重効果を求める方法を示すこととした。

#### 1) 風、波、水の流れ、積雪

JIS C 1400-1<sup>3)</sup>及び JIS C 1400-3<sup>4)</sup>では、稀に発生する風、波、水の流れ、積雪の荷重レベルを50年あるいは1年に1度の割合で発生する荷重レベルとしており、これに準拠して荷重レベルを設定する必要がある。

#### 2) 地震

本基準解説では、洋上風力発電設備等が陸上風車と同等以上の耐震性を確保することを目的として、「発電用風力設備に関する技術基準を定める省令及びその解釈に関する逐条解説」で規定される地震動を用いて照査を行うものとした。この地震動は、稀に発生するものと極めて稀に発生するものの2種類があり、それぞれ再現期間50年を考慮した地震動と再現期間500年を考慮した地震動である。

また、洋上風力発電設備等が港湾施設としての耐震性を確保することを目的として、港湾の施設の技術上の基準・同解説<sup>5)</sup>で規定されるレベル1地震動及びレベル2地震動を用いて照査を行うものとした。このレベル1地震動は、対象施設を設置する地点において発生すると想定される地震動のうち、地震動の再現期間と当該施設の設計供用期間との関係から当該施設の設計供用期間中に発生する可能性の高いものである。レベル2地震動は、対象施設を設置する地点において発生すると想定される地震動のうち、最大規模の強さを有するものである。

港湾計画において、再生可能エネルギー源を利活用する区域は、航路などの港湾施設から一定程度の離隔距離を確保して設定される。しかし、大規模地震の発生時において、洋上風力発電設備等の倒壊等に伴う部材の飛散、地震後の津波との同時被災による資機材の浮遊などにより、緊急物資等の輸送船の航行や航路啓開作業に対して支障し、緊急物資や避難者の輸送拠点としての港湾本来の機能に支障を来すおそれがある。したがって、航路や周辺海域における船舶の航行状況あるいは港湾BCPを踏まえ、被災により港湾における耐震強化施設の利用等に支障を及ぼす可能性のあるものと港湾管理者が判断する地点に設置する洋上風力発電設備等は、港湾レベル2地震動を用いた照査を行う必要がある。耐震強化施設が設置（計画を含む）されていない港湾の場合は、港湾レベル2地震動による照査を省略することができる。

### 3) 津波

本基準解説では、洋上風力発電設備等が周辺の港湾施設と同等以上の津波に対する安全性を確保することを目的として、各地方自治体の海岸保全基本計画等で定められた津波を設計荷重として設定した。

### 4) その他の荷重

洋上風力発電設備等の設計では、1)～3)に示す荷重のほか、風車及び支持構造物の固定荷重、積載荷重についても適切に考慮する必要がある。

### 5) 荷重組み合わせ

洋上風力発電設備等の支持構造物には、風、波、水の流れ、潮位、地震荷重など複数の荷重が同時に作用することが考えられるため、1)～4)で示される荷重を適切に組み合わせて、支持構造物の設計荷重効果を求めることとした。荷重組み合わせの詳細な内容は、2.1.2項で述べる。

### (5) 洋上風力発電設備等に使用する材料

洋上風力発電設備等に使用する材料は、その材料の特性や品質が確かなものである必要があるため、材料に関して配慮すべき事項を港湾の施設の技術上の基準・同解説<sup>5)</sup>に基づいて定めることとした。材料の選定方法や物性値の設定方法は、3.14節「材料」で述べる。

(6) 支持構造物の設計の流れ

図-解 2.1.1.3 に、洋上風力発電設備等の支持構造物の設計手順を示す。

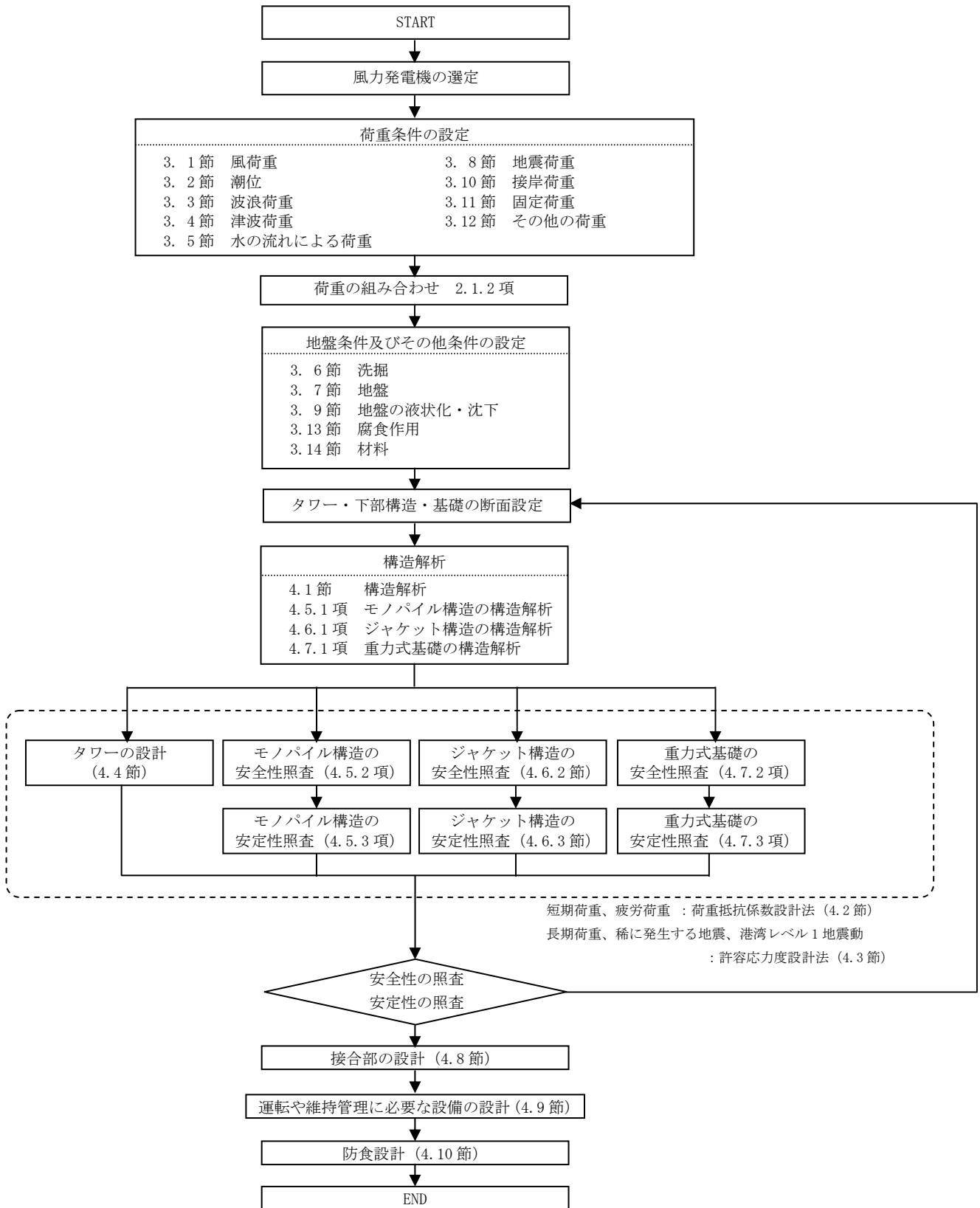


図-解 2.1.1.3 洋上風力発電設備等の支持構造物の設計手順

洋上風力発電設備等の支持構造物の構造設計を実施するにあたっては、本基準解説に示す事項の他、下記に示す事項にも配慮する必要がある。

### 1) 洋上風力発電設備等の支持構造物の耐荷機構

洋上風力発電設備等の支持構造物のタワー、下部構造及び基礎等の各部材は、作用する荷重によって生じる応力に対して、その強度面で安全性を確保する必要がある。また、風車、タワー、下部構造及び基礎に作用する荷重を確実に支持地盤に伝達するよう、力学的に安定している必要がある。タワー、下部構造並びに基礎の抵抗機構は、その形式、大きさ、深さ、基礎と地盤の相対剛性等によって異なるため、その安全性及び安定性の照査を行う際は、耐荷機構を十分考慮する必要がある。

### 2) 設計法

表-解 2.1.1.8 及び表-解 2.1.1.9 に、本基準解説における支持構造物の安全性と安定性の照査に用いる設計法を示す。許容応力度設計法は部材の応力度を照査することが一般的であるが、本基準解説では、例えば杭基礎の支持力照査のような安全率を用いて設計する方法も許容応力度設計法と表現することとした。

- ・短期荷重及び疲労荷重に対する設計では、荷重抵抗係数設計法を用いる。
- ・長期荷重、稀に発生する地震動及び港湾レベル 1 地震動の作用に対する設計では、許容応力度設計法を用いる。
- ・極めて稀に発生する地震動及び設計津波の作用に対する設計では、許容応力度設計法あるいは実構造の倒壊崩壊に至る挙動を適切に評価できる解析による性能照査を行う。
- ・港湾レベル 2 地震動の作用に対する設計では、実構造の挙動を適切に評価できる解析による性能照査を行う。

表-解 2.1.1.8 安全性の照査方法

荷重組み合わせ		荷重抵抗係数設計法	許容応力度設計法	実構造の倒壊崩壊に至る挙動を適切に評価できる解析による性能照査
JIS C 1400-3 <sup>4)</sup> に準拠	短期荷重	○		
	疲労荷重	○		
風力発電設備支持物構造設計指針・同解説 <sup>1)</sup> に準拠	長期荷重 <sup>注1</sup>		○	
	稀に発生する地震動		○	
	極めて稀に発生する地震動 <sup>注2</sup>		○	または ○
本基準解説で独自に設定	港湾レベル1 地震動		○	
	港湾レベル2 地震動			○
	設計津波		○	または ○

注1：長期荷重に対する詳細方法は、港湾の施設の技術上の基準・同解説<sup>5)</sup>にある許容応力度設計法も参考にできる。

注2：タワーの安全性照査は、許容応力度設計法のみで行うものとする。

表-解 2.1.1.9 安定性の照査方法

荷重組み合わせ		荷重抵抗 係数設計法	許容応力度 設計法	実構造の倒壊崩 壊に至る挙動を 適切に評価でき る解析による 性能照査
JIS C 1400-3 <sup>4)</sup> に準拠	短期荷重	○		
風力発電設備 支持物構造設計 指針・同解説 <sup>1)</sup> に準拠	長期荷重 <sup>注1</sup>		○	
	稀に発生する地震動		○	
	極めて稀に発生する地震動 <sup>注2</sup>		○	または ○
本基準解説で 独自に設定	港湾レベル1地震動		○	
	港湾レベル2地震動			○
	設計津波		○	または ○

注1：長期荷重に対する詳細方法は、港湾の施設の技術上の基準・同解説<sup>5)</sup>にある許容応力度設計法も参考にできる。  
注2：タワーの安全性照査は、許容応力度設計法のみで行うものとする。

本基準解説で示す設計法以外の方法を採用する場合は、一般に認知された洋上風力発電設備の設計規格やガイドラインを参考にすることが望ましい。ただし、設計に用いる照査式と部分係数、許容応力度、安全率などはセットで使用することを基本とし、複数の基準にまたがって照査式と部分係数、許容応力度、安全率を用いてはならない。なお、本基準解説における荷重抵抗係数設計法は4.2節「荷重抵抗係数設計法による設計」で、許容応力度設計法は4.3節「許容応力度設計法による設計」で述べる。

### 3) その他

荷重効果、構造耐力並びに材料劣化の評価方法は、構造物を用いた実験を行うことでそれらを実証することもできる。

#### 参考文献

- 1) 土木学会 (2010)、風力発電設備支持物構造設計指針・同解説
- 2) 日本風力エネルギー学会 (2011)、洋上風力発電
- 3) 日本規格協会 (2017)、JIS C1400-1: 風車-第1部: 設計要件
- 4) 日本規格協会 (2014)、JIS C1400-3: 風車-第3部: 洋上風車の設計要件
- 5) 日本港湾協会 (平成19年7月)、港湾の施設の技術上の基準・同解説
- 6) DNV GL (2016), DNVGL-ST-0126
- 7) American Petroleum Institute (2014), API-RP2A-WSD 22nd Edition

2.1.2 荷重の組み合わせ

洋上風力発電設備等の安全性及び安定性の照査は、風荷重、波浪荷重、地震荷重などを適切に組み合わせるものとする。表-2.1.2.1に短期荷重及び疲労荷重に関する荷重組み合わせを、表-2.1.2.2に海水荷重に関する荷重組み合わせを、表-2.1.2.3に長期荷重、地震荷重、津波荷重に関する荷重組み合わせを示す。

表-2.1.2.1 短期荷重及び疲労荷重に関する荷重組み合わせ

状態	DLC	風	波浪	風と波浪の方向	水の流れ	潮位	解析の種類	荷重係数
発電中	1.1	NTM (RNA) $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	NSS $H_s = H_{s, NSS/V_{hub}}$	COD及びUNI	NCM	H.W.L.	U	1.25 (N)
	1.2	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	NSS $H_s, T_{ss, NSS}, V_{hub}$ の結合確率考慮	MIS及びMUL	考慮しない	H.W.L.	F	1.00 (F)
	1.3	ETM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	NSS $H_s = H_{s, NSS/V_{hub}}$	COD及びUNI	NCM	H.W.L.	U	1.35 (N)
	1.4	ECD $V_{hub} = V_r \pm 2m/s, V_r$	NSS $H_s = H_{s, NSS/V_{hub}}$	MIS及び風向変化	NCM	H.W.L.	U	1.35 (N)
	1.5	EWS $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	NSS $H_s = H_{s, NSS/V_{hub}}$	COD及びUNI	NCM	H.W.L.	U	1.35 (N)
	1.6	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	SSS $H_s = H_{ss}$	COD及びUNI	NCM	H.W.L.又はH.H.W.L.	U	1.35 (N)
発電中の故障	2.1	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	NSS $H_s = H_{s, NSS/V_{hub}}$	COD及びUNI	NCM	H.W.L.	U	1.35 (N)
	2.2	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	NSS $H_s = H_{s, NSS/V_{hub}}$	COD及びUNI	NCM	H.W.L.	U	1.10 (A)
	2.3	EOG $V_{hub} = V_r \pm 2m/s, V_{out}$	NSS $H_s = H_{s, NSS/V_{hub}}$	COD及びUNI	NCM	H.W.L.	U	1.10 (A)
	2.4	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	NSS $H_s = H_{s, NSS/V_{hub}}$	COD及びUNI	考慮しない	H.W.L.	F	1.00 (F)
	2.5	NWP $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	NSS $H_s = H_{s, NSS/V_{hub}}$	COD及びUNI	NCM	H.W.L.	U	1.35 (N)
発電開始時	3.1	NWP $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	NSS $H_s = H_{s, NSS/V_{hub}}$	COD及びUNI	考慮しない	H.W.L.	F	1.00 (F)
	3.2	EOG $V_{hub} = V_{in}, V_r \pm 2m/s, V_{out}$	NSS $H_s = H_{s, NSS/V_{hub}}$	COD及びUNI	NCM	H.W.L.	U	1.35 (N)
	3.3	EDC $V_{hub} = V_{in}, V_r \pm 2m/s, V_{out}$	NSS $H_s = H_{s, NSS/V_{hub}}$	MIS及び風向変化	NCM	H.W.L.	U	1.35 (N)
通常発電停止	4.1	NWP $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	NSS $H_s = H_{s, NSS/V_{hub}}$	COD及びUNI	考慮しない	H.W.L.	F	1.00 (F)
	4.2	EOG $V_{hub} = V_r \pm 2m/s, V_{out}$	NSS $H_s = H_{s, NSS/V_{hub}}$	COD及びUNI	NCM	H.W.L.	U	1.35 (N)
緊急停止	5.1	NTM $V_{hub} = V_r \pm 2m/s, V_{out}$	NSS $H_s = H_{s, NSS/V_{hub}}$	COD及びUNI	NCM	H.W.L.	U	1.35 (N)
停止時	6.1	EWM $V_{hub} = V_{ref}$	ESS $H_s = H_{s0}$	MIS及びMUL	ECM ( $U = U_{50}$ )	H.W.L.又はH.H.W.L.	U	1.35 (N)
	6.2	EWM $V_{hub} = V_{ref}$	ESS $H_s = H_{s0}$	MIS及びMUL	ECM ( $U = U_{50}$ )	H.W.L.又はH.H.W.L.	U	1.10 (A)
	6.3	EWM $V_{hub} = V_1$	ESS $H_s = H_{s1}$	MIS及びMUL	ECM ( $U = U_1$ )	H.W.L.又はH.H.W.L.	U	1.35 (N)
	6.4	NTM $V_{out} < V_{hub} < 0.7V_{ref}$	NSS $H_s, T_{ss, NSS}, V_{hub}$ の結合確率考慮	COD及びMUL	考慮しない	H.W.L.	F	1.00 (F)
停止時+故障	7.1	EWM $V_{hub} = V_1$	ESS $H_s = H_{s1}$	MIS及びMUL	ECM ( $U = U_1$ )	H.W.L.又はH.H.W.L.	U	1.10 (A)
	7.2	NTM $V_{hub} < V_{out}$	NSS $H_s, T_{ss, NSS}, V_{hub}$ の結合確率考慮	COD及びMUL	考慮しない	H.W.L.	F	1.00 (F)
輸送設置 メンテナンス 修理時	8.1	洋上風車の輸送、組立、アクセス、保守及び修理時に想定される荷重をもとに設計条件を設定するものとする。					U	1.35 (N)
	8.2	EWM $V_{hub} = V_1$	ESS $H_s = H_{s1}$	COD及びUNI	ECM ( $U = U_1$ )	H.W.L.又はH.H.W.L.	U	1.10 (A)
	8.3	NTM $V_{hub} < 0.7V_{ref}$	NSS $H_s, T_{ss, NSS}, V_{hub}$ の結合確率考慮	COD及びMUL	考慮しない	H.W.L.	F	1.00 (F)
	8.4	洋上風車の輸送、組立、アクセス、保守及び修理時に想定される荷重をもとに設計条件を設定するものとする。					F	1.00 (F)

表-2.1.2.2 海氷荷重に関する荷重組み合わせ

状態	DLC	海氷	風	潮位	解析の種類	荷重係数
発電中	D.1	温度変動による水平荷重	NTM (最大スラストとなる風速) $V_{hub} = V_r \pm 2m/s, V_{out}$	H.W.L.	U	1.35 (N)
	D.2	温度変動又はアーチ効果による水平荷重	NTM (最大スラストとなる風速) $V_{hub} = V_r \pm 2m/s, V_{out}$	H.W.L.	U	1.35 (N)
	D.3	移動氷盤による水平荷重	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	H.W.L.	U	1.35 (N)
	D.4	移動氷盤による水平荷重	$V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	H.W.L.	F	1.00 (F)
	D.5	水位変動による氷結板からの垂直荷重	考慮しない	H.W.L.	U	1.35 (N)
待機状態	D.6	氷丘及び氷壁からの圧力	EWM (乱気流モデル) $V_{hub} = V_1$	H.W.L.	U	1.35 (N)
	D.7	移動氷盤による水平荷重	NTM $V_{hub} < 0.7V_{ref}$	H.W.L.	F	1.00 (F)
	D.8	移動氷盤による水平荷重	EWM (乱気流モデル) $V_{hub} = V_1$	H.W.L.	U	1.35 (N)

表-2.1.2.3 長期荷重、地震荷重、津波荷重に関する荷重組み合わせ

状態	風	波浪	風と波浪の方向	水の流れ	潮位	その他の荷重					
						G	P	K	K'	K <sub>w</sub>	K <sub>t</sub>
長期荷重	NTM $V_{hub} = V_r$	NSS $H_s = H_{sk, NSS/V_{hub}}$	COD及びUNI	NCM	H.W.L.	○	○				
稀に発生する地震	NTM $V_{hub} = V_{i1, NSS}$	NSS $H_s = H_{s1, NSS}$	COD及びUNI	NCM	H.W.L.	○	○	○		○	
極めて稀に発生する地震	NTM $V_{hub} = V_{i1, NSS}$	NSS $H_s = H_{s1, NSS}$	COD及びUNI	NCM	H.W.L.	○	○		○	○	
港湾レベル1地震動	NTM $V_{hub} = V_{i1, NSS}$	NSS $H_s = H_{s1, NSS}$	COD及びUNI	NCM	H.W.L.	○	○	○		○	
港湾レベル2地震動	NTM $V_{hub} = V_{i1, NSS}$	NSS $H_s = H_{s1, NSS}$	COD及びUNI	NCM	H.W.L.	○	○		○	○	
設計津波	NTM $V_{hub} = V_{i1, NSS}$	NSS $H_s = H_{s1, NSS}$	COD及びUNI	NCM	H.W.L.又はL.W.L.	○	○				○

ここで、

- G : 固定荷重によって生じる力 (3.11 節「固定荷重」参照)
- P : 積載荷重によって生じる力 (3.12 節「その他の荷重」参照)
- K : 稀に発生する地震荷重あるいは港湾レベル 1 地震によって生じる力 (3.8 節「地震荷重」参照)
- K' : 極めて稀に発生する地震荷重あるいは港湾レベル 2 地震によって生じる力 (3.8 節「地震荷重」参照)
- K<sub>w</sub> : 地震時の動水圧によって生じる力 (3.12 節「その他の荷重」参照)
- K<sub>t</sub> : 設計津波によって生じる力 (3.4 節「津波荷重」参照)
- U : 短期荷重に対する安全性及び安定性を照査するための荷重組み合わせ
- F : 疲労荷重による疲労照査を行うための荷重組み合わせ



## 【解説】

### (1) 荷重組み合わせの基本的な考え方

本基準解説の荷重組み合わせは、JIS C 1400-1<sup>1)</sup>、JIS C 1400-3<sup>2)</sup>、風力発電設備支持物構造設計指針・同解説<sup>3)</sup>及び港湾の施設の技術上の基準・同解説<sup>4)</sup>を参考に、風車の運転モード（発電時、発電中の故障、起動、通常停止、緊急停止、待機中）と支持構造物に作用する荷重の組み合わせによって構成するものとした。なお、荷重組み合わせ表にある略語については、1.2 節「定義」を参照するものとする。

(2) 荷重組み合わせの概要

表-解 2.1.2.4 及び表-解 2.1.2.5 に、これらの荷重組み合わせの概要を示す。表-解 2.1.2.4 に示す内容は JIS C 1400-1<sup>1)</sup>及び JIS C 1400-3<sup>2)</sup>に基づいており、詳細な内容はそれを参照することができる。

表-解 2.1.2.4 短期荷重及び疲労荷重に関する荷重組み合わせの概要 (1)

荷重組み合わせ (JIS C 1400-3 <sup>2)</sup> に準拠)	概要
発電中	<p>この荷重組み合わせは、洋上風力発電設備が運転中であり電力系統に接続されている状況を想定したものである。洋上風力発電設備で電力系統に障害は生じておらず、かつ制御システムが正常に機能している状況を想定している。</p> <p>DLC 1.1 : 発電時における通常の大気の乱れが生じた状況            DLC 1.2 : 発電時における通常の大気の乱れが生じた状況 (疲労損傷度の評価)            DLC 1.3 : 発電時の暴風による極値乱流条件を考慮するためのもの            DLC 1.4 : 発電時の暴風による急激な風向変化が生じた状況            DLC 1.5 : 発電時の暴風による急激な風速変化が生じた状況            DLC 1.6 : 発電時に生じる可能性がある高波浪が発生した状況</p>
発電中の故障	<p>この荷重組み合わせは、発電中に発生すると想定される故障によって引き起こされる事象を想定したものである。ここでは3種類の故障を想定しており、それぞれの故障は同時に発生しないものとしている。</p> <p>DLC 2.1 : 制御装置の故障が生じた状況            DLC 2.2 : 安全システム又は内部電気システムの故障が生じた状況            DLC 2.3 : 外部障害及び電力系統の障害が生じた状況            DLC 2.4 : DLC 2.1~DLC 2.3の故障が生じた場合の疲労損傷度を評価するためのもの            DLC 2.5 : 電力系統の電圧が低下しても、できるだけ解列せずに出力を継続する状態</p>
発電開始時	<p>この荷重組み合わせは、洋上風力発電設備が停止 (あるいはアイドリング) している状況から、発電している状況へ移行することを想定したものである。</p> <p>DLC 3.1 : 洋上風力発電設備の起動に伴って生じる疲労損傷度を評価するためのもの            DLC 3.2 : 洋上風力発電設備の起動時に突風が作用した状況            DLC 3.3 : 洋上風力発電設備の起動時に風向変化が生じた状況</p>
通常発電停止	<p>この荷重組み合わせは、洋上風力発電設備が発電している状況から、停止 (あるいはアイドリング) している状況へ移行することを想定したものである。</p> <p>DLC 4.1 : 洋上風力発電設備の通常停止に伴って生じる疲労損傷度を評価するためのもの            DLC 4.2 : 洋上風力発電設備の通常停止時に突風が作用する場合の評価を行うためのもの</p>
緊急停止	<p>この荷重組み合わせ (DLC 5.1) は、洋上風力発電設備が発電している状況から、手動操作などによって緊急停止する状況へ移行することを想定したものである。</p>

表-解 2.1.2.4 短期荷重及び疲労荷重に関する荷重組み合わせの概要 (2)

荷重組み合わせ (JIS C 1400-3 <sup>2)</sup> に準拠)	概要
停止時	<p>この荷重組み合わせは、洋上風力発電設備のロータが静止又は遊転している状況を想定したものである。</p> <p>DLC 6.1 : 再現期間 50 年の極値風速及び極値波浪が作用し、かつヨーシステムが正常に機能している状況</p> <p>DLC 6.2 : 再現期間 50 年の極値風速及び極値波浪が作用し、かつ電力系統の喪失によりヨーシステムが機能していない状況</p> <p>DLC 6.3 : ヨーミスアライメントの極値が生じた状況</p> <p>DLC 6.4 : 待機中の疲労損傷度を評価するためのもの</p>
停止時+故障	<p>この荷重組み合わせは、待機中の暴風によって、洋上風力発電設備あるいは電力系統に故障が生じた場合を想定したものである。</p> <p>DLC 7.1 : これらの故障時に再現期間 1 年の極値風速及び極値波浪が生じる状況</p> <p>DLC 7.2 : 待機中の故障時の疲労損傷度を評価するためのもの</p>
輸送・設置 ・メンテナンス・修理時	<p>この荷重組み合わせは、洋上風力発電設備の輸送・設置・メンテナンス・修理の間に発生する状況を想定したものである。</p> <p>DLC 8.1 : 洋上風力発電設備の製作・施工段階において考慮すべき設計条件を規定したものであり、製作・施工計画を踏まえて設計者が適宜設定する必要がある。</p> <p>DLC 8.2 : 輸送・設置・メンテナンス・修理時における極値風速、極値海況を考慮するためのもの</p> <p>DLC 8.3 : 洋上風力発電設備の建設期間中において、電力系統に接続されるまでの期間に生じる疲労損傷を評価するためのもの</p> <p>DLC 8.4 : DLC 8.1 の状況における疲労損傷を評価するためのもの</p>
海水発生時	<p>この荷重組み合わせは、海水が発生されると予想される建設地点に洋上風力発電設備が建設される場合に用いられるものである。</p> <p>DLC D.1 : 温度変動によって発生する氷圧力が支持構造物に作用することを想定したもの</p> <p>DLC D.2 : 洋上風力発電設備の支持構造物間、あるいは支持構造物と岸の間でアーチ効果による水平圧力が支持構造物に作用することを想定したもの</p> <p>DLC D.3 : 移動氷盤による水平荷重が支持構造物に作用することを想定したもの</p> <p>DLC D.4 : 洋上風力発電設備が待機中で、かつ、移動氷によって支持構造物に疲労荷重が生じる状況を想定したもの</p> <p>DLC D.5 : 水位変動による結氷板の垂直荷重が支持構造物に作用することを想定したもの</p> <p>DLC D.6 : 氷丘氷・氷りょう (稜) からの圧力を評価するためのもの</p> <p>DLC D.7 : 移動氷盤による水平荷重を受ける場合の最大荷重を評価するためのもの</p> <p>DLC D.8 : 移動氷盤による水平荷重を受ける場合の疲労荷重を評価するためのもの</p>

表-解 2.1.2.5 長期荷重、地震荷重、津波荷重の作用時の荷重組み合わせの概要

荷重組み合わせ (本基準解説で 独自に設定)	概要
長期荷重	この荷重組み合わせは、長期荷重に対する支持構造物の安全性及び安定性を照査することを目的としたものであり、洋上風力発電設備が発電している状況を想定している。風荷重は定格風速、波浪荷重は DLC 1.2 などを用いられる通常海況の中から定格風速に対応する波高を用いる。
稀に発生する 地震動の作用時	この荷重組み合わせは、稀に発生する地震動が作用する状況を想定している。洋上風力発電設備がこれらの地震荷重を受ける際には、洋上風力発電設備が発電している可能性もあるため、地震荷重に加えて、風荷重・波浪荷重も考慮するものとする。ここで、風荷重は DLC 1.1 などを用いられる通常乱流の中から年平均風速 ( $V_{ave}$ ) とする。また、波浪荷重は DLC 1.1 などを用いられる通常海況の中から年平均有義波 ( $H_{s11,NSS}$ ) とする。
極めて稀に発生する 地震動の作用時	この荷重組み合わせは、極めて稀に発生する地震動が作用する状況を想定している。風荷重・波浪荷重の考え方は、稀に発生する地震動の作用時に倣うものとする。
港湾レベル 1 地震動の作用時	この荷重組み合わせは、港湾基準に規定されるレベル 1 動地震が作用する状況を想定している。風荷重・波浪荷重の考え方は、稀に発生する地震動の作用時に倣うものとする。
港湾レベル 2 地震動の作用時	この荷重組み合わせは、港湾の耐震強化施設の設計に用いるレベル 2 地震動が作用する状況を想定している。風荷重・波浪荷重の考え方は、稀に発生する地震動の作用時に倣うものとする。ただし、港湾の耐震強化施設の設計に用いるレベル 2 地震動は、被災により、港湾に存在する耐震強化施設の利用等に支障を及ぼすおそれのある洋上風力発電設備を設計する際にのみ用いるものとする。
設計津波作用時	この荷重組み合わせは、設計津波が作用する状況を想定している。風荷重・波浪荷重の考え方は、稀に発生する地震動の作用時に倣うものとする。

### (3) 荷重組み合わせを設定する際の注意点

荷重組み合わせは、以下に示す1)～3)にも注意して設定する必要がある。

#### 1) 気温の変化や後流（ウェイク）の影響

2.1.2の荷重組み合わせの他に、気温の変化を評価する必要がある場合、あるいはウィンドファーム効果により後流（ウェイク）の影響を受ける場合は、表2.1.2.1で示す荷重組み合わせに加えて、別途荷重組み合わせを設定する必要がある。その場合の荷重組み合わせは、DNVGL-ST-0437<sup>5)</sup>等を参考に設定することができる。

#### 2) 風向とロータ面の関係について

ロータ面に風が正対する場合は、ロータの空力減衰が付加されるため変動応答が低下するが、ロータ面と風が正対しない場合は、ロータ自体の空力減衰が小さく、変動応答が大きくなる可能性があるため、風荷重を考える際には風向とロータ面向きの関係を考慮する必要がある。

#### 3) 荷重組み合わせの省略について

本基準解説で示す荷重組み合わせは、洋上風力発電設備の風車を対象としたものであり、支持構造物にとって重要でないケースも含まれている。これらのケースが支持構造物の安全性及び安定性の照査に影響を与えないことを説明できる場合は、荷重組み合わせから省略することができる。

### 参考文献

- 1) 日本規格協会（2017）、JIS C1400-1：風車－第1部：設計要件
- 2) 日本規格協会（2014）、JIS C1400-3：風車－第3部：洋上風車の設計要件
- 3) 土木学会（2010）、風力発電設備支持物構造設計指針・同解説
- 4) 日本港湾協会（平成19年7月）、港湾の施設の技術上の基準・同解説
- 5) DNV GL（2016）、DNVGL-ST-0437

## 2.2 風車の構造

風車は風圧及び負荷を遮断したときの最大速度に対して構造上安全であり、また、運転中に損傷を与えるような振動がないように設置するものとする。

### 【解説】

本節は、洋上風力発電設備のうち風車が外力を受ける際に確保すべき要求性能を示すものである。本節で示す内容は、発電用風力設備に関する技術基準を定める省令に基づいて定めることとした。

#### (1) 風圧に対する安全性の確保

風車は、突風や台風等の強風による荷重や風の変動荷重に対して構造上安全であることを確認する必要がある。強風による荷重に対しては、固定翼か可動翼かに関わらず、通常想定される台風等の暴風時において、故障や常用・非常用電源の喪失によりヨー制御が不能になる等、風車の回転面の制御ができない際に、風車の受風面積が最大の方向から受ける風圧にも耐え得る構造とする必要がある。また、変動荷重に対して特にボルト接合部や溶接部に疲労が生じやすいため、その累積疲労にも耐えうる構造とする必要がある。

ここで、「風圧」とは、洋上風力発電設備を設置する場所のハブ高さにおける現地風条件（極値風及び三方向（主方向、横方向、上方向）の乱流を含む）による風圧が考慮されたものであって、表-解 2.2.1 に掲げるものを含むものをいう。

表-解 2.2.1 風圧に関して考慮すべき事項

項目	内容
風車の受風面の垂直投影面積が最大の状態における最大風圧	突風及び台風等の強風による風圧荷重のうち最大のもの (本基準解説では短期荷重として取り扱う)
風速及び風向の時間的変化による風圧	洋上風力発電設備が風速及び風向の時間的変化により生ずる荷重変動 (本基準解説では疲労荷重として取り扱う)

#### (2) 負荷を遮断したときの最大速度に対する安全性の確保

「負荷を遮断したときの最大速度」とは、非常调速装置が作動した時点より風車がさらに昇速した場合の回転速度を含むものをいう。なお、非常调速装置とは、風車の運転中に定格の回転速度を著しく超えた過回転その他の異常（発電機の内部故障等）による危害の発生を防止するため、その異常が発生した場合に風車に作用する風力エネルギーを自動的に抑制し、風車を停止するための装置をいう。風車の回転部と、回転及び停止の影響を受ける装置は、最大回転速度とその場合に生じる遠心力に対しても安全な構造とする必要がある。

#### (3) 振動への対策

2.1 節の(1) 1) で述べたように、洋上風力発電設備の支持構造物は、風車との共振を回避するように設計することとしているが、風車と支持構造物が共振した場合に備えて、風車の回転部を自動的に停止

する装置を設置することとした。

#### (4) 風車クラス

一般に風車は認証機関による型式認証を取得したものが建設地点に設置されることから、当該型式認証の条件と建設地点の条件を比較することにより建設地点への適合性を確認する必要がある。表-解 2.2.2 に、JIS C 1400-1<sup>1)</sup>で規定される風車クラスの考え方を示す。JIS C 1400-1<sup>1)</sup>では、この風車クラスに関して「この分類の目的は、大多数の建設地点をカバーすることである。風速及び乱流パラメータの値は多くの異なる建設地点を代表するために定めており、個々の建設地点の固有条件を正確に表現するものではない」としており、設計条件を設定するには十分注意する必要がある。

風車クラスの選定に際して、風車クラス I、II及びIIIで定義される風条件から逸脱する条件では、風車クラス S が採用される。また、洋上風力発電設備の建設地点が、熱帯性低気圧襲来地域で、風条件が上記に規定する風車クラス I、II及びIIIを逸脱する場合には、風車クラス T が採用される。これらの風車クラスの詳細な考え方は、JIS C 1400-1<sup>1)</sup>を参考にすることができる。

表-解 2.2.2 風車クラス<sup>1)</sup>

風車クラス	I	II	III	S
$V_{ave}$ (m/s)	10.0	8.5	7.5	設計者が規定する数値
$V_{ref}$ (m/s)	50.0	42.5	37.5	
$V_{ref,T}$ (m/s)	57.0	57.0	57.0	
A <sup>+</sup> (極高乱流カテゴリ)における $I_{ref}$	0.18			
A (高乱流カテゴリ)における $I_{ref}$	0.16			
B (中乱流カテゴリ)における $I_{ref}$	0.14			
C (低乱流カテゴリ)における $I_{ref}$	0.12			
<p>本表の値は、ハブ高さにおいて適用する。</p> <p><math>V_{ref}</math> : 10分平均基準風速</p> <p><math>V_{ref,T}</math> : 熱帯性低気圧襲来地域に適用する10分平均基準風速 熱帯性低気圧襲来地域の風車クラスを定義するために用いる風速の基本パラメータ</p> <p>A<sup>+</sup> : 極高乱流カテゴリの場合に選定</p> <p>A : 高乱流カテゴリの場合に選定</p> <p>B : 中乱流カテゴリの場合に選定</p> <p>C : 低乱流カテゴリの場合に選定</p> <p><math>I_{ref}</math> : 風速が15m/sのときの乱流強度の期待値</p>				

#### 参考文献

- 1) 日本規格協会 (2017)、JIS C1400-1: 風車—第1部: 設計要件

### 2.3 風車の安全な状態の確保

- (1) 風車の回転速度が著しく上昇した場合、又は風車の制御装置機能が著しく低下した場合に、安全かつ自動的に停止するような措置を講じるものとする。
- (2) 最高部の海水面からの高さが20メートルを超える洋上風力発電設備には、雷撃から風車を保護するような措置を講じるものとする。ただし、周囲の状況によって雷撃が風車を損傷するおそれがない場合においては、この限りでない。

**【解説】**

本節は、洋上風力発電設備における風車の運転中の安全性に関する要求性能を示したものである。ここで示す内容は発電用風力設備に関する技術基準を定める省令に基づいて定めることとした。

(1) 発電中の安全対策

1) 故障時に確保すべき状態

表-解 2.3.1 に、風車の回転速度が著しく上昇又は風車の制御装置機能が著しく低下した場合の対策として配慮すべき事項を示す。

表-解 2.3.1 故障時に確保すべき状態

項目	内容
単一故障	単一故障が発生した場合においても、風車を制御することが可能な状態を確保する。この場合は従属要因による多重故障を含む。
常用電源の停電	常用電源が停電した場合においても、非常用電源の保持等により、風車を制御可能な状態を確保する。
調速装置及び非常調速装置の作動	調速装置及び非常調速装置が繰返し作動した場合においても、耐久性を有する適切な材料を調速装置及び非常調速装置に使用することにより、風車を制御することが可能な状態を確保する。

2) 故障時に安全な状態を確保するための措置

故障時に安全な状態を確保するような措置を講じる際は、機械的及び電気的な保護機能の双方又は一方を用いて風車を安全な状態に維持するものとする。

(2) 落雷対策

1) 地域区分

図-解 2.3.1 に、落雷に関する地域区分を示す。洋上風力発電設備等における落雷対策は、この地域区分に応じて、表-解 2.3.2 に示す定める要件を満たす必要がある。いずれの地域においても雷撃から風車を保護する効果が高く、かつ、容易に脱落しない適切なレセプターを風車へ取り付けるものとする。また、雷撃によって生ずる電流を風車に損傷を与えることなく安全に地中に流すことができる引



下げ導体等を設置するものとする。なお、本対策は最高部の高さが海水面から 20 メートルを超える洋上風力発電設備等を対象としている。

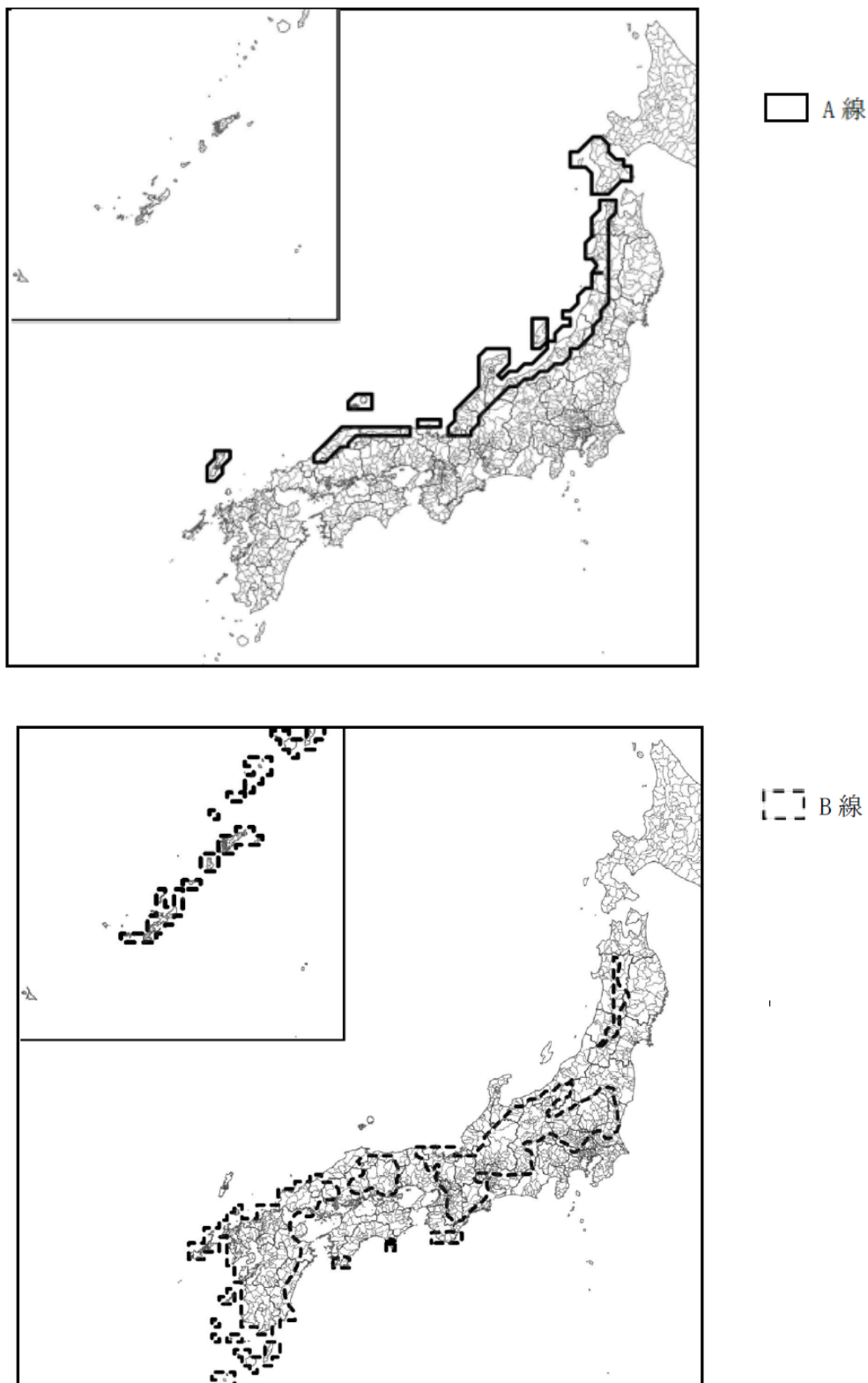


図-解 2.3.1 洋上風力発電設備等を設置する場所の落雷条件

表-解 2.3.2 地域区分ごとの落雷対策

地域	雷撃の電荷量	備考
A 線の内側	600 クーロン以上	風車への雷撃があった場合は、直ちに風車を停止することができるように、非常停止装置等を設置する。
B 線の内側	300 クーロン以上	-
上記以外	150 クーロン以上	-

## 2) 避雷設備

避雷設備は雷撃によって生ずる電流が洋上風力発電設備に被害を及ぼすことなく安全に地中に流すことができる構造とする必要がある。風車を対象とした雷対策については、JIS C 1400-24<sup>1)</sup>に適合するものとする。なお、避雷設備が雨水等により腐食のおそれのある部分は、腐食防止のための措置を講じる必要がある。

## 参考文献

- 1) 日本規格協会 (2014)、JIS C 1400-24：風車—第 24 部：雷保護

## 2.4 取扱者以外の者の接近の防止

洋上風力発電設備等を設置する場所には、見えやすい箇所に当該設備が危険である旨を表示し、取扱者以外の者が容易に接近するおそれがないように適切な措置を講じるものとする。

### 【解説】

本節は、取扱者以外の者に対する危険を防止する上で配慮すべき事項を取りまとめたものである。ここで示す内容は発電用風力設備に関する技術基準を定める省令に基づいて定めることとした。

洋上風力発電設備等を設置する場所には、取扱者以外の者に対して風車が危険である旨や洋上風力発電設備等の出入口に立入りを禁止する旨を表示するとともに、施錠装置その他適当な装置を設置する必要がある。

## 2.5 圧油装置及び圧縮空気装置の危険の防止

- (1) 洋上風力発電設備等において使用する圧油装置及び圧縮空気装置の材料及び構造は、最高使用圧力に対して十分に耐え、かつ、安全なものとする。
- (2) 圧油タンク及び空気タンクは、耐食性を有するものとする。
- (3) 油圧又は空気圧が低下した場合は、圧力を自動的に回復させるとともに、圧力が上昇した場合は、最高使用圧力に到達する前に低下させる機能、また異常な圧力を早期に検知できる機能を有するものとする。

### 【解説】

本節は、洋上風力発電設備等の圧油装置及び圧縮空気装置に係る機械的強度の試験、材料の種類及び許容応力並びに圧力上昇の抑制、規定圧力の確保のための措置及び圧力計を設置する上で配慮すべき事項を取りまとめたものであり、発電用風力設備に関する技術基準を定める省令に基づいて定めることとした。

一般の高圧ガスについては、高圧ガス保安法（昭和26年法律第204号）及び労働安全衛生法（昭和47年法律第57号）に基づくボイラー及び圧力容器安全規則（昭和47年労働省令第33号）により規制を受けるが、電気事業法（昭和39年法律第170号）に規定する電気工作物内の高圧ガスは、高圧ガス保安法第3条第1項第6号及び同施行令の規定により、電気工作物のうち「発電、変電又は送電のために設置する電気工作物並びに電気の使用のために設置する変圧器、リアクトル、開閉器及び自動遮断器であつて、ガスを圧縮、液化その他の方法で処理するもの」は適用除外され、ボイラー及び圧力容器安全規則においては、同規則第125条第1号に基づく電気事業法の適用を受けるボイラー及び圧力容器は、同規則の認可、検査及び報告を要しないこととされている。ただし、電気事業法に基づく規制の対象であることに留意するものとする。

なお、遵守すべき記述基準の詳細については、電気設備の技術基準の解釈（平成25年3月14日20130215商局第4号）第40条第2項（第2号口の規定を除く。）及び第3項の規定を参照することとする。

## 2.6 公害等の防止

- (1) 洋上風力発電設備等において、水質汚染防止法第二条第五項による貯油施設等を設置する場合、貯油施設等の破損その他の事故により、油を含む水が海域に排出、又は海底への浸透により被害を生ずるおそれがないよう、適切な措置を講じるものとする。
- (2) 170kV を超える中性点直接接地式電路に接続する変圧器を設置する場合は、変圧器の破損その他の事故により、油を含む水が海域に排出、又は海底への浸透により被害を生ずるおそれがないよう、適切な措置を講じるものとする。

### 【解説】

本節は、洋上風力発電設備等から油等の流出により周辺海域への被害が生じないよう配慮すべき事項を示すものである。ここで示す内容は、水質汚濁防止法及び電気設備に関する技術基準を定める省令に基づいて設定した。

水質汚濁防止法は、平成8年6月の改正により油の流出事故による水質汚濁を防止するため、貯油施設等（同法第2条第5項）の事故時の措置（同法第14条の2第3項）規定が追加された。電気工作物である貯油施設等は同法第23条第2項で事故時の措置の規定が適用除外され、電気事業法の相当規定の定めるところによるとしているため、これを電気設備に関する技術基準を定める省令で規定している。なお、水質汚濁防止法（第2条第5項）において、貯油施設等の対象となる油とは、原油、重油、潤滑油、軽油、灯油、揮発油、動植物油であり、貯油施設等はこれらの油を貯蔵する貯油施設及びこれらの油を含む水を処理する油水分離施設である。

### (1) 貯油施設等の破損その他の事故への対策

発電所又は変電所、開閉所もしくはこれらに準ずる場所で潤滑油槽など、油を貯蔵する貯油施設を設置している場合には、例えば油水分離槽、排水ピットの設置などにより、油槽などの破損その他の事故が発生した場合でも油が公共用水域に排出されないように措置を講じる必要がある。なお、ここでいう貯油施設等にはドラム缶等の容器や車両等で移動可能なものは含まれない。また、油水分離槽は油を事故等により当該設置場所から排出させないための油流出防止設備であり、油を含む水を処理するものではないことから水質汚濁防止法施行令でいう油水分離施設には該当しない。

ロータナセル・アセンブリにおいては、一般的にブレードの取付角（ピッチ角）を変化させる目的で油圧シリンダーが組み込まれている。その油圧シリンダーを駆動させる制御装置やロータの回転数を高速なものに変換する増速機においては、それらの装置が有する歯車を潤滑する目的の油が循環しているため、その油を外部へ飛散させないように措置を講じる必要がある。

### (2) 変圧器の破損その他の事故への対策

170kVを超える中性点直接接地式電路に連結するような大型変圧器の絶縁油が、内部事故あるいはブッシング事故等により漏油し、構外流出にまで発展した場合、その影響は大きいものであるため、絶縁油の流出防止設備を設ける必要がある。ここで、中性点直接接地式電路に接続する変圧器を対象としたのは、その地絡電流が非接地式あるいは抵抗（リアクトル）接地式に比較して著しく大きいためである。非接地式あるいは抵抗接地式を用いると、地絡事故等のアークエネルギーによって、タンク破損から大量の漏油事故に発展するケースが考えられるため、これらを用いないこととした。

なお、油流出防止装置の具体的な設計・施工方法は、変電所等における防火対策指針<sup>1)</sup>を参照すること。

#### 参考文献

- 1) 日本電気技術規格委員会（2002）、JESC E0012：変電所等における防火対策指針

## 2.7 港湾機能及び周辺海域の利用等に影響を与えない洋上風力発電設備等の設置

- (1) 洋上風力発電設備等の配置にあたっては、洋上風力発電設備等が倒壊、崩壊した場合であっても、港湾機能に支障が及ばないように、港湾施設等との離隔距離を確保するものとする。
- (2) 洋上風力発電設備等の設置により、港湾の開発・利用・保全や周辺海域の利用等に支障が及ばないことを確認するものとする。

### 【解説】

本節は、洋上風力発電設備等の配置計画を行う際に、港湾機能及び周辺海域の利用等に影響を与えないよう配慮すべき事項を示すものである。

#### (1) 港湾施設等との離隔距離の確保

洋上風力発電設備等は、外力に対して安全な構造を必須とされているものの、想定を大幅に上回る外力の作用によって当該施設が被災した場合に、これに起因する港湾機能の停滞を防止するため、港湾施設等と十分に離隔をとって設置する必要がある。ここで、想定を大幅に上回る外力の作用とは、本基準解説で規定する荷重を上回る荷重を意味している。このため、公募占用計画を作成する際は、安全な船舶の航行や荷役等、現在及び将来の港湾の整備や管理運営に支障が生じないように、港湾利用者、有識者及び関係機関の助言を踏まえ、洋上風力発電設備等の配置を計画する必要がある。

洋上風力発電設備等と水域施設等との離隔距離は、洋上風力発電設備等の破壊モードを考慮した倒壊影響距離を確保するものとする。ここで、洋上風力発電設備の破壊モードを考慮した倒壊影響距離  $H_f$  に関して、洋上風力発電設備の基礎形式が杭式基礎の場合は、想定した破壊モードの破壊箇所から洋上風力発電設備の最上端（洋上風力発電設備にあつては、ロータの最高到達点）までの高さと同じ距離とする（図-解 2.7.1 参照）。重力式基礎の場合は、基礎マウンド上面から洋上風力発電設備の最上端までの高さ  $H_{all}$  に滑動距離  $S$  を加えたものとする（図-解 2.7.2 参照）。

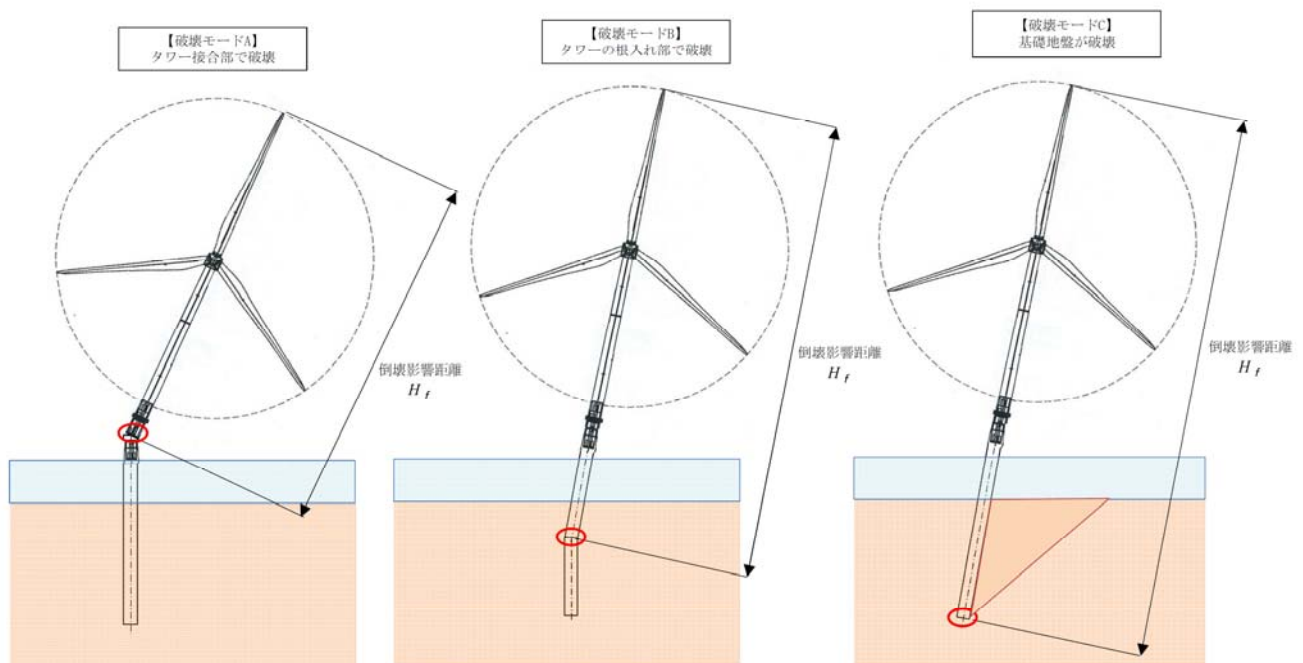


図-解 2.7.1 杭式基礎の破壊モードの参考例<sup>1)</sup>

【破壊モード】  
滑動後に転倒の可能性

倒壊影響距離  $H_f$  = 基礎マウンドの上面からロータ最高到達点までの高さ  $H_{all}$  + 滑動距離  $S$

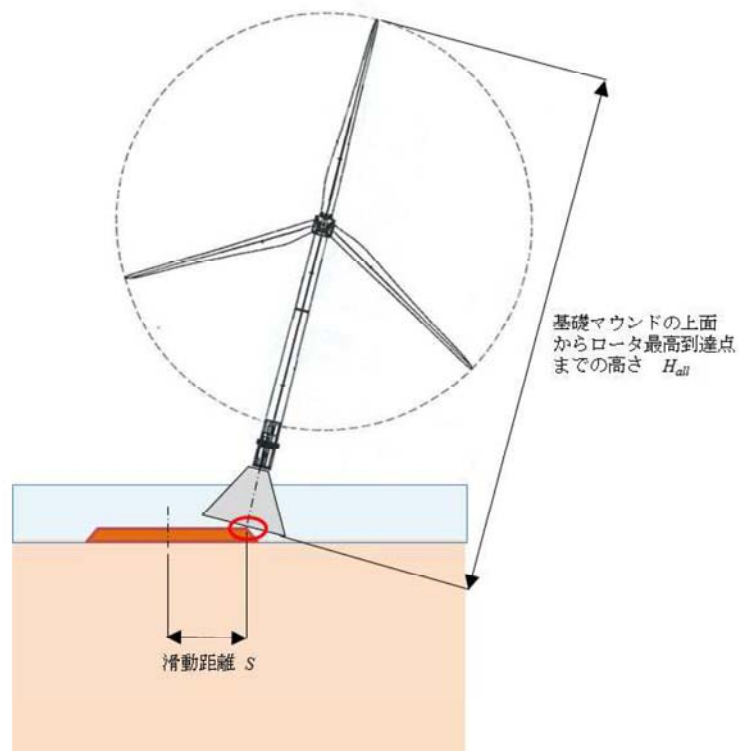


図-解 2.7.2 重力式基礎の破壊モードの参考例<sup>1)</sup>

### 1) 洋上風力発電設備等と水域施設等との離隔距離

洋上風力発電設備等と水域施設等との離隔距離は、風車後方の乱流範囲（図-解 2.7.3 参照）又は洋上風力発電設備等の破壊モードを考慮した倒壊影響距離（図-解 2.7.4 及び図-解 2.7.5 参照）のうち、より大きい距離を設定することを基本とする。なお、以下に示す図は一般的な洋上風力発電設備を想定した離隔距離等の例であり、設置する風車の型式により適切な離隔距離を設定する必要がある。



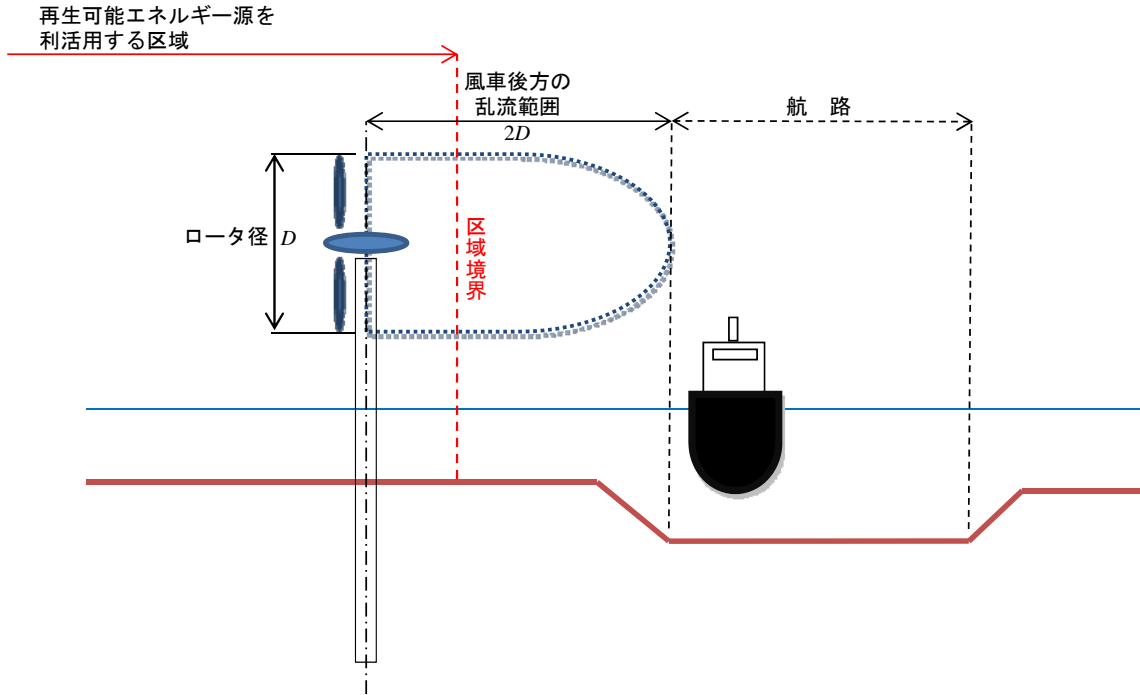


図-解 2.7.3 船舶への風車後方の乱流範囲の例 <sup>1)</sup>

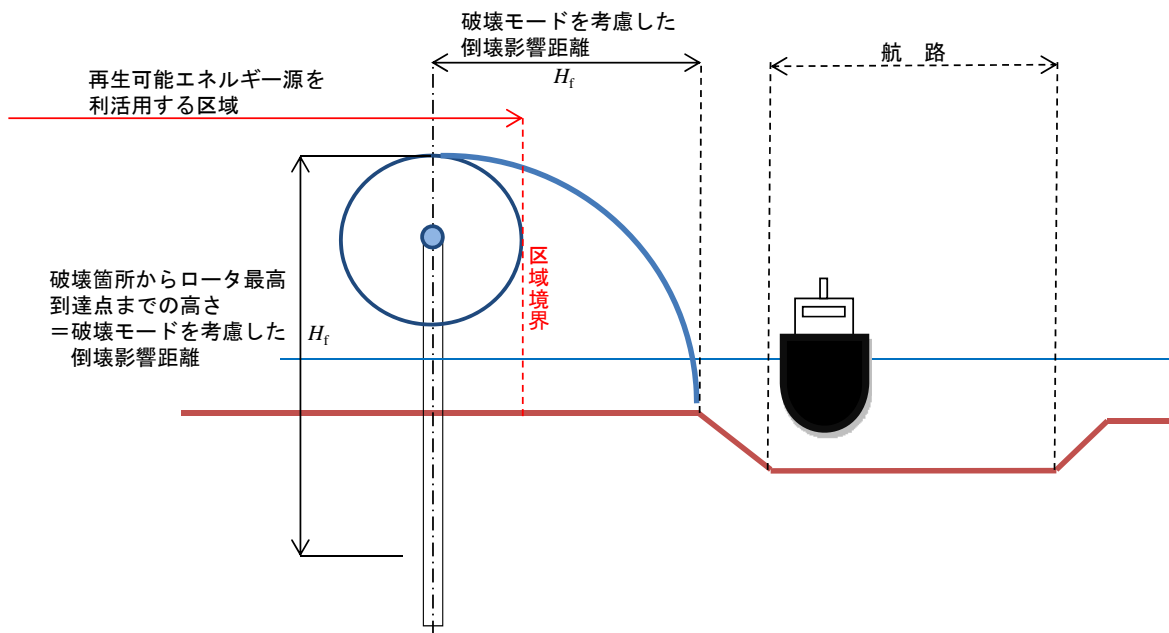


図-解 2.7.4 水域施設等との離隔の例 (杭式基礎の場合) <sup>1)</sup>

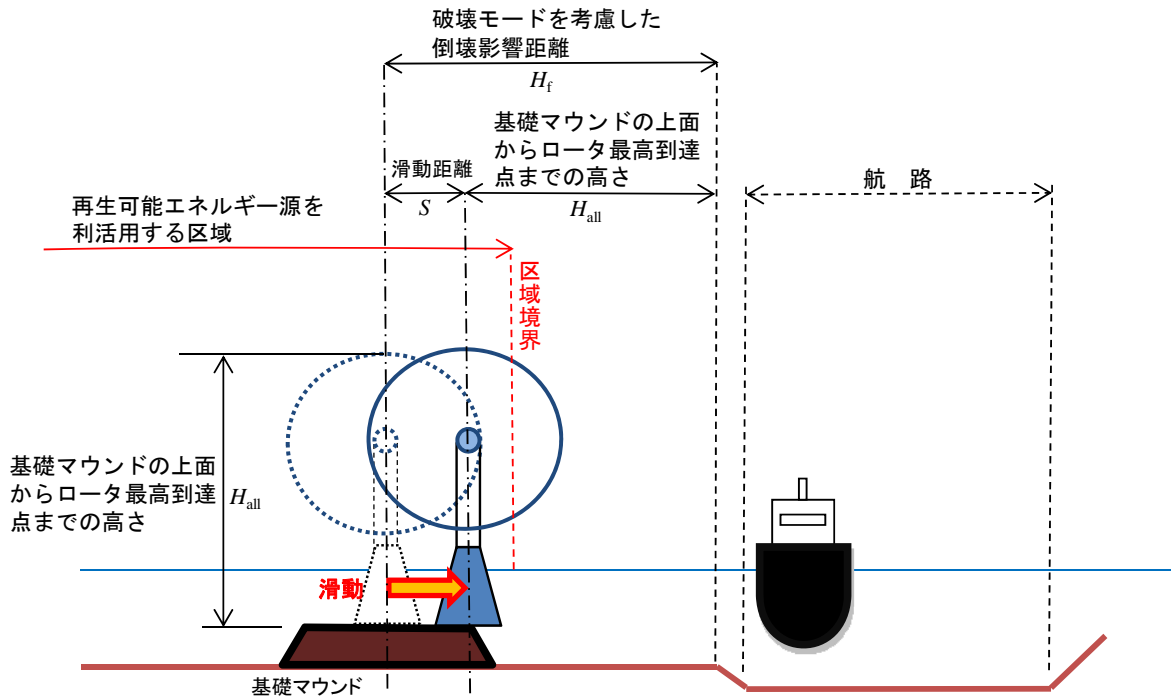


図-解 2.7.5 水域施設等との離隔の例（重力式基礎の場合）<sup>1)</sup>

2) 洋上風力発電設備等と航路、管制水路、指定錨地及び検疫法上の検疫錨地との離隔距離

洋上風力発電設備等と港則法上の航路、管制水路、指定錨地及び検疫法上の検疫錨地の離隔距離にも、本規定を適用する。特に、泊地、指定錨地及び検疫錨地は、荒天時に錨泊中の船舶が把駐力を増加させるため、錨鎖を伸出することにより泊地等の境界を越えることがあるので、その伸出量を考慮する必要がある（図-解 2.7.6 参照）。この場合は、風車の後方の乱流範囲は考慮しないものとする。なお、荒天時の錨鎖の伸出量は、港湾の施設の技術上の基準・同解説<sup>2)</sup>を適宜参考とすることができる。

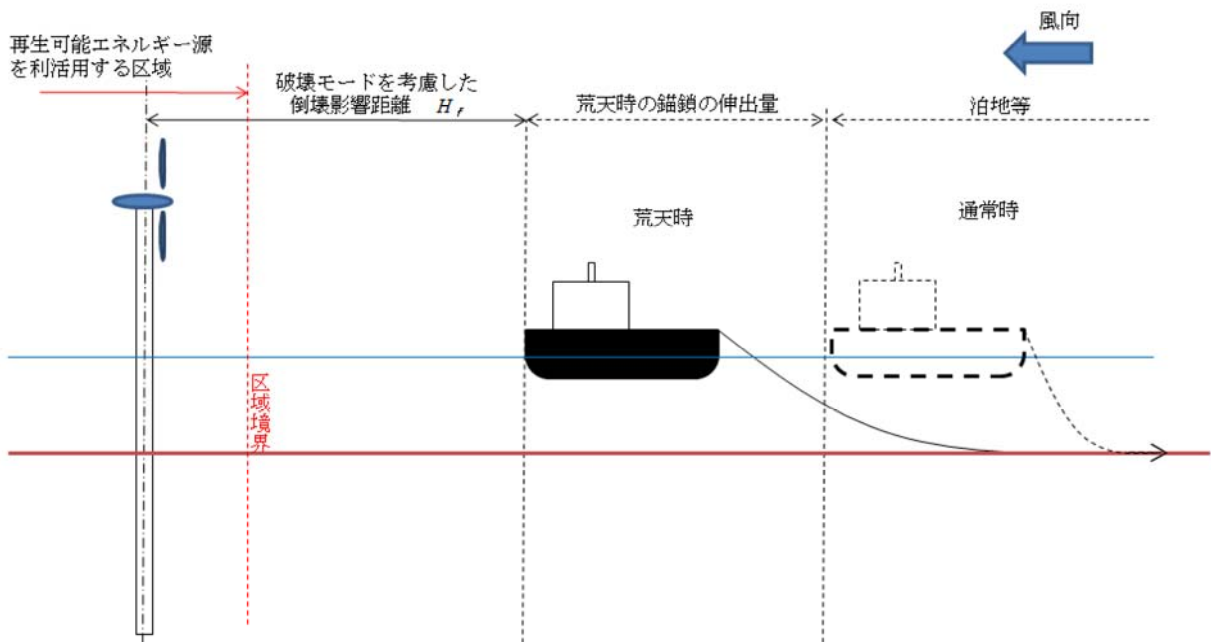


図-解 2.7.6 泊地等との離隔の例<sup>1)</sup>

### 3) 洋上風力発電設備等と外郭施設との離隔距離

洋上風力発電設備等と外郭施設との離隔距離は、基礎マウンドを含む構造に影響が及ばないよう、洋上風力発電設備等の倒壊影響距離（図-解 2.7.7 及び図-解 2.7.8 参照）以上を確保することを標準とする。ただし、施設管理者及び施設所有者との協議により、離隔距離は倒壊影響距離  $H_f$  より短くすることができる。なお、この離隔距離をとっていることは、船舶との海上衝突事故等の回避を保証するものではなく、別途 1) 2) に示す事項を確認する必要がある。

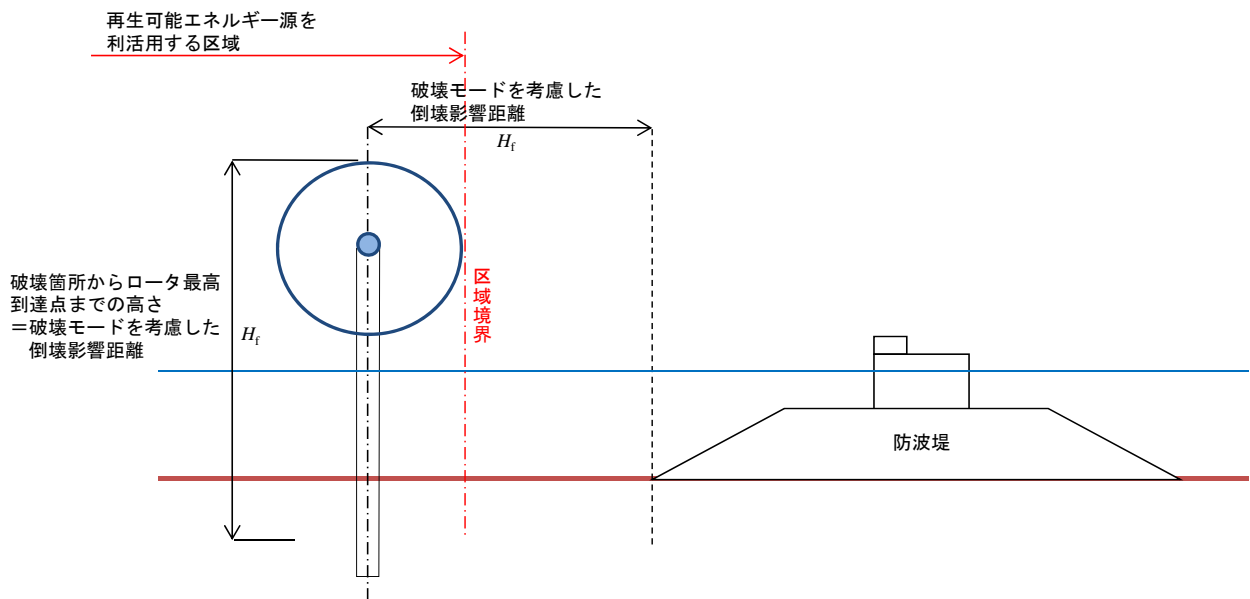


図-解 2.7.7 外郭施設等との離隔の例（杭式基礎の場合）<sup>1)</sup>

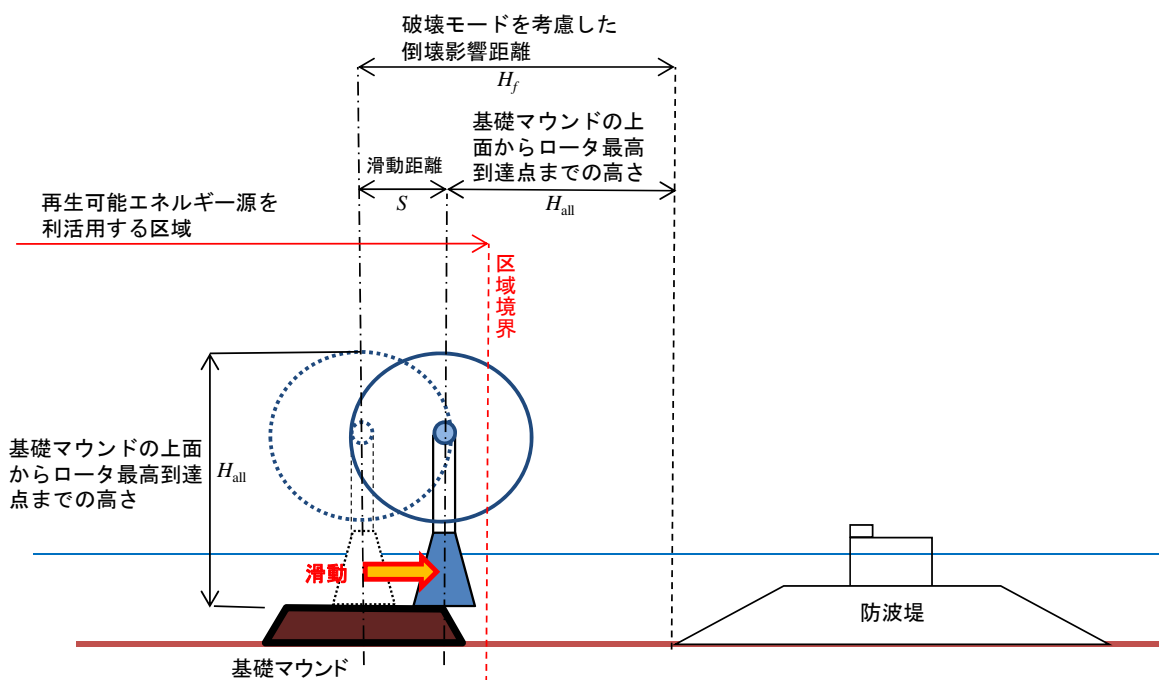


図-解 2.7.8 外郭施設等との離隔の例（重力式基礎の場合）<sup>1)</sup>

## (2) 港湾の開発・利用・保全及び周辺海域の利用等の確保

洋上風力発電設備等の導入エリアである「再生可能エネルギー源を利活用する区域」は、船舶の航行、停留、錨泊その他の運行に支障を与えないように留意して設定されるものであるが、洋上風力発電設備等の配置によっては、当該海域を航行する中小型船舶などの交通に、著しい影響を及ぼす可能性がある。

このため、洋上風力発電設備等の具体的な配置計画の策定にあたっては、あらかじめ港湾の関係者への説明及び意見聴取を行い、下記に示す1)～3)に関して、その影響の度合いを慎重に検討し、配置や構造の見直しなど当該影響を除去する措置を講じるものとする。

### 1) 船舶交通に関する配慮事項

洋上風力発電設備等の設置及び運用が船舶航行実態に関する調査により把握された船舶交通に及ぼす影響の検討を実施する場合には、以下のA～E)に示す事項に留意するものとする。

- A) 洋上風力発電設備等の諸元、配置、設置場所、設置間隔、識別表示及び遠隔監視・制御を含む運転方針、運用体制
- B) 主たる船舶交通が発生する場所と洋上風力発電設備等の設置場所との距離
- C) 洋上風力発電設備等が操船者の視覚に及ぼす影響
- D) 洋上風力発電設備等がレーダーその他の電子航行機器に及ぼす影響
- E) 船舶による荒天避泊の可能性

なお、影響の検討に際しては、専門家の助言や港湾関係者の意見を踏まえるほか、必要に応じて追加の詳細調査の実施やシミュレーション手法の利用なども考慮するのがよい。

### 2) 周辺海域に関する配慮事項

洋上風力発電設備等の配置計画の配置及び規模については、当該海域の自然条件、港湾及びその周辺海域の社会的条件、港湾施設の利用状況、港湾及び港湾に隣接する地域の保全等を考慮して、港湾の開発・利用・保全との一体性を鑑み、総合的に判断する必要がある。特に、船舶の航路筋あるいは既設の海底ケーブルやパイプライン等の敷設状況等も踏まえつつ、洋上風力発電設備等の設置位置の周辺海域の利用を阻害することの無いよう、港湾管理者が洋上風力発電設備の配置や規模を適切に判断するものとする。なお、洋上風力発電設備の下部構造や基礎には、魚礁効果など周辺の海域利用と調和できる可能性もあることから、可能な限りこれらを考慮した構造とすることが望ましい。

### 3) 後流の影響に関する配慮事項

洋上風力発電設備の風下に形成される風況の乱れた領域（ウェイク領域）に洋上風力発電設備を設置する場合、洋上風力発電設備同士が相互干渉して風を奪い合うことでエネルギー取得量が大きく減少し、本来の発電量が得られなくなる。このため、複数列の洋上風力発電設備を設置する場合はできるだけウェイク領域同士が互いに干渉しないようにするため、風況シミュレーションの実施により、洋上風力発電設備の最適配置を最終決定することが多い。なお、後流の影響を考慮する場合は、JIS C 1400-1<sup>3)</sup>を参考にすることができる。

## 参考文献

- 1) 国土交通省港湾局(平成 27 年 3 月)、港湾における洋上風力発電施設等の技術ガイドライン(案)
- 2) 日本港湾協会(平成 19 年 7 月)、港湾の施設の技術上の基準・同解説
- 3) 日本規格協会(2017)、JIS C1400-1: 風車-第 1 部: 設計要件

## 2.8 航行船舶からの視認性の向上

- (1) 洋上風力発電設備等は、船舶航行の十分な安全を確保するため、昼夜や気象などの環境条件に関わらず、捕捉・識別性を確保・維持するものとする。
- (2) 当該設備が船舶操船時において他の船舶、地形、航行援助施設、その他の物漂等の捕捉・識別を阻害することのないように、当該設備を設置するものとする。

### 【解説】

本節は、航行船舶からの視認性を確保するために配慮すべき事項を示すものである。洋上風力発電設備等に接近する移動体がこれら設備を常に十分遠方から捕捉・識別できることは、その航行の安全において最も重要な要素となる。昼夜や気象などの環境条件に関わらず、洋上風力発電設備等を常に捕捉・識別性を維持するため、以下の措置をとることが望ましい。

- 1) 設備の視認性を高めるための塗色の採用
- 2) 夜間や視界制限状態における視認のための灯火の設置
- 3) 洋上風力発電設備を多数配置する場合、個別の設備を特定できる標識板の設置

上記の措置の検討に際しては、Recommendation 0-139 on The Marking of Man-Made Offshore Structures<sup>1)</sup>などを参考に、洋上風力発電設備等の塗色、灯火並びに標識板を決定するものとする。

なお、具体的な措置の設定に際しては、航路標識法等の関係法令の規定に従うほか、関係機関（海上保安部署や地方航空局等）の指導に従うものとする。特に、航空障害灯については、航空法（第51条）の規定に従い設置するものとし、採用する標示パターンについては、港湾管理者と協議して決定するものとする。図-解 2.8.1 及び図-解 2.8.2 に、洋上風力発電設備等の塗色及び灯火の例を示す。

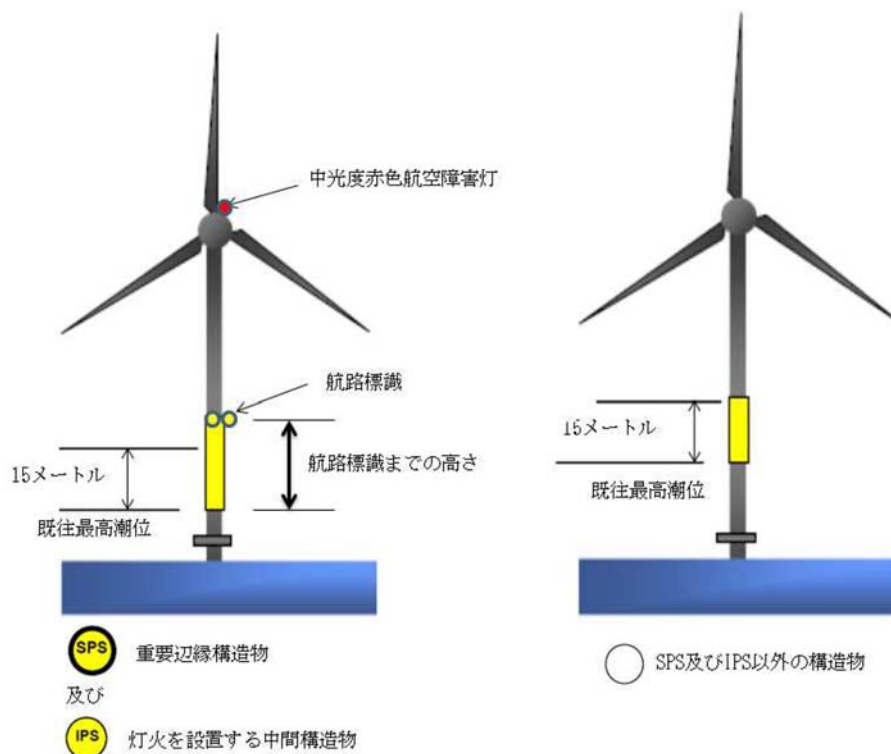
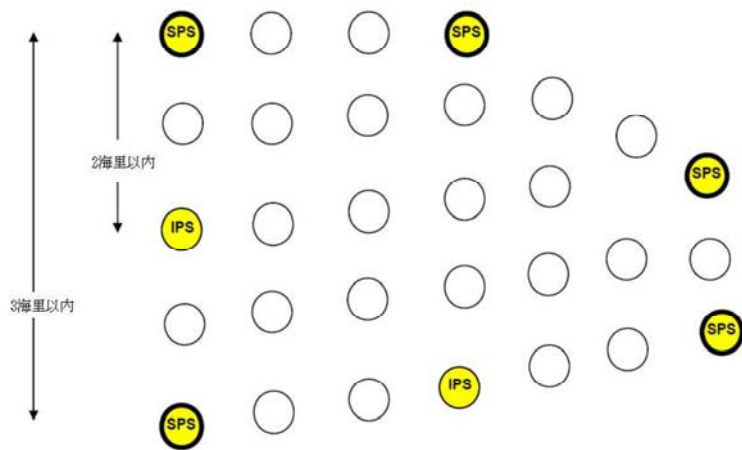


図-解 2.8.1 洋上風力発電設備等の塗色及び灯火の例<sup>1)</sup>






-  SPS—全周にわたる水平面から視認できる灯火。これらの灯火は IALA の「特殊標識」の灯質である黄色閃光を表示する同期点滅で、5 海里以上の光達距離を有するものとする。(1 海里=1,852m)
-  IPS ウインドファームの辺縁部における SPS 以外の選択された中間構造物—全周にわたる水平面から海員が視認できる黄色閃光の灯火。これらの灯火は SPS と明確に異なる灯質で、2 海里以上の 光達距離を有するものとする。
-  SPS 及び IPS 以外の構造物

図-解 2.8.2 洋上風力発電設備等の標識灯の平面配置例<sup>1)</sup>

参考文献

- 1) IALA (2013), IALA Recommendation 0-139 on The Marking of Man-Made Offshore Structures Edition 2

## 2.9 船舶等との接触の防止

洋上風力発電設備の回転翼が、航行する船舶等に接触することのないよう、洋上風力発電設備の設置位置及びロータ最下端の高さを適切に設定するものとする。

### 【解説】

本節は、洋上風力発電設備の配置を検討する上で、航行する船舶との接触を回避するために配慮すべき事項を示すものである。

#### (1) 洋上風力発電設備の平面配置の設定

洋上風力発電設備のロータは風向に合わせてその向きを変えるため、ロータの向きが変わっても稼働中の洋上風力発電設備の範囲が「再生可能エネルギー源を利活用する区域」の外側に突出することがないように洋上風力発電設備の設置位置を決定する必要がある。洋上風力発電設備のロータ及びナセルのヨー旋回（首振り運動のこと）の範囲を考慮すると、そのヨー旋回範囲の最外縁部は概ねタワーの中心から  $R$ （ヨー旋回範囲の半径）の位置と考えてよい。したがって、洋上風力発電設備を配置する場合、区域境界からタワー中心までの距離  $R$  以上を離して計画するものとする（図-解 2.9.1 参照）。

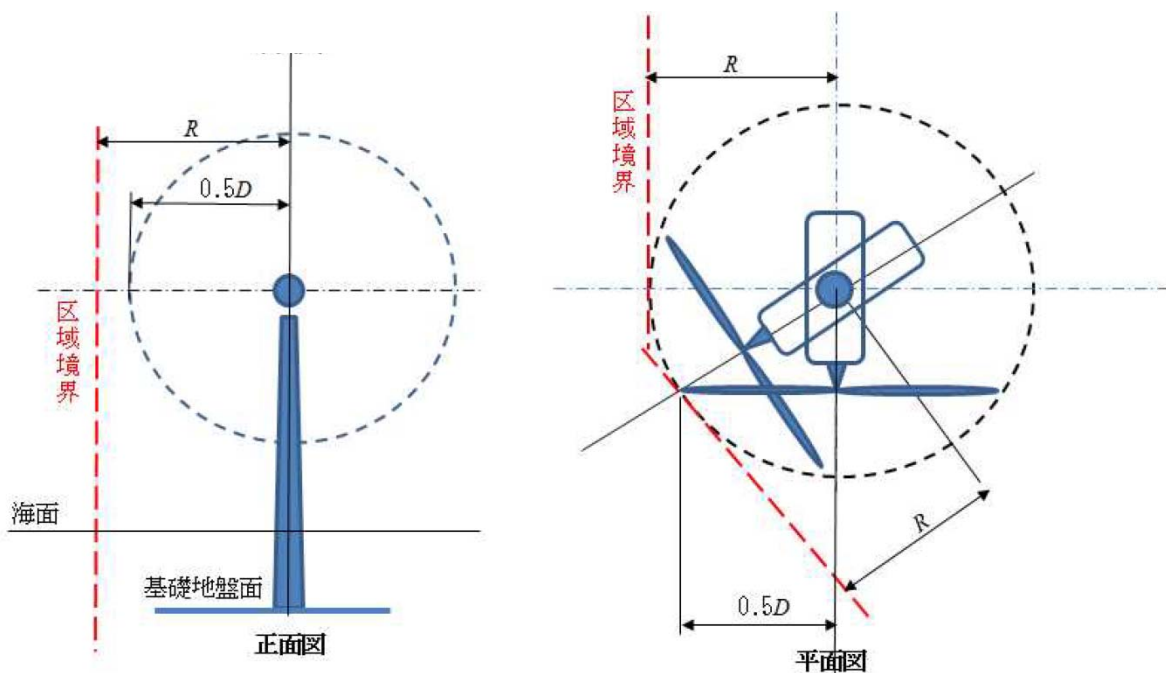


図-解 2.9.1 「再生可能エネルギー源を利活用する区域」の境界と洋上風力発電設備の位置関係<sup>1)</sup>

#### (2) ロータ最下端高さの設定

洋上風力発電設備のロータ最下端の高さの設定において、発電効率（風の乱れの影響）や荒天時における波浪の高さ（荒天時でも波浪が当たらないロータの高さ）を考慮し、さらに、港湾の関係者の意見も踏まえて設定するものとする。このロータ高さの情報は、水路業務法に基づき管区海上保安本部等を通じて航海用海図などの水路図誌類に記載する等、十分な周知を図る必要がある。

なお、ロータ最下端と海面のクリアランスとしては、MGN (Marine Guidance Note, Maritime and



Coastguard Agency) <sup>2)</sup>によれば、ロータ最下端高さから海面までの距離は最低でも 22 メートルを確保するものとされており、これを参考にすることができる。海面位置として、年間で最も高い位置となる春季満潮位面が当てられることもあるが、安全側の設定となるよう既往最高潮位 H. H. W. L. を使用するのがよい。

#### 参考文献

- 1) 国土交通省港湾局(平成 27 年 3 月)、港湾における洋上風力発電施設等の技術ガイドライン(案)
- 2) Maritime and Coastguard Agency (2016), MGN 543(M+F) Safety of Navigation: Offshore Renewable Energy Installations (OREIs) - Guidance on UK Navigational Practice, Safety and Emergency Response

## 2.10 腐食・洗掘等の防止

洋上風力発電設備等は、海水や雨水による金属の腐食や漂砂の移動等による構造表面の摩耗等を防止するため、適切な措置を講じるものとする。また、洗掘等の影響を受ける可能性がある場合には適切な対策を講じるものとする。

### 【解説】

本節は、洋上風力発電設備等の耐久性を確保する上で配慮すべき事項を示すものである。

海底面近傍の下部構造・基礎は、厳しい腐食環境下にあるため、金属の腐食を防止する必要がある。また、海底面近傍では波浪の流れに伴う海底砂の移動によって部材表面の摩耗（サンドエロージョン・コロージョン）が生じることがあるため、この影響を考慮する必要がある。鋼材の腐食速度や部材表面の摩耗の評価方法は、3.13 節「腐食作用」に示す通りとする。また、防食工法の選定や各防食工法の配慮事項は、4.10 節「防食設計」に示す通りとする。

支持構造物周辺の洗掘に伴い、構造物が影響を受ける可能性がある場合には、下記のうちから適切な方法で対処するものとする。

- ① 支持構造物の施工後、周辺の地盤面に洗掘防止工を設置する。
- ② 洗掘防止工を設置しない場合、予想される洗掘深に対して構造物が安全側になるよう風車含め設計する。

## 2.11 施工及び維持管理への対応

- (1) 洋上風力発電設備等の適切な施工及び維持管理のため、施工法や維持管理の方法を踏まえた構造設計を行うものとする。
- (2) 洋上風力発電設備等の支持構造物は、船舶による当該設備への人員及び資機材の輸送等を確保するため、港湾の施設の技術基準における係留施設としての要求性能を満足しなければならない。

### 【解説】

#### (1) 施工及び維持管理のために構造設計で配慮すべき事項

洋上風力発電設備等は、その施工時あるいは供用期間中において、発電設備としての機能に支障がないよう、また港湾機能に支障を来たすことが無いよう適切に施工し、維持管理を行う必要がある。洋上風力発電設備等の設計では、これらの施工計画及び維持管理計画を踏まえて、適切に構造設計の検討を行うものとする。なお、洋上風力発電設備等の施工や維持管理の方法は、別途定める予定の洋上風力発電設備等の施工に関する審査指針や洋上風力発電設備等の維持管理の方法の審査基準を参考にすることができる。なお、公募占用計画に従った洋上風力発電設備等の設計、施工及び維持管理が行われない場合、港湾管理者は港湾法（第三十七条の十）に基づき、計画の認定を取り消すことができる。

#### (2) 係留施設としての要求性能

洋上風力発電設備等の支持構造物には、作業員、補給物資、交換部品などの輸送のために活用されるアクセス船等の船舶の着岸に対応した係留施設としての機能が必要となる。港湾の施設の技術上の基準を定める省令には、係留施設の構造型式に応じた要求性能が定められており、洋上風力発電設備等の支持構造物のうち、重力式基礎は重力式係船岸、モノパイル構造又はジャケット構造は栈橋、浮体式は浮栈橋の要求性能を満足しなければならない。

係留施設としての要求性能や性能照査に用いる外力の種類等については、港湾の施設の技術上の基準・同解説<sup>1)</sup>を参照されたい。

#### (3) 泊地機能を有する水域の設定

港湾管理者は洋上風力発電設備等の建設や維持管理に必要となる区域を勘案し、港湾法第三十七条の八に基づき、占用予定者以外の者が占用の許可を申請することができない区域を設定することができる。当該区域の設定にあたっては、占用予定者の意見を踏まえるとともに、建設や維持管理に使用する予定の船舶の種類、船型及び隻数、係留施設の利用状況等を考慮して、洋上風力発電設備等の周辺海域の泊地や航路としての機能が十分に確保され、かつ船舶が安全かつ円滑に利用することができるように定めるものとする。また、前述の区域以外の海域においても、洋上風力発電設備等の維持管理に必要とされる船舶の航行に支障を来すことのないよう、洋上風力発電設備等の周辺の海域の占用許可等に留意する必要がある。

### 参考文献

- 1) 日本港湾協会、港湾の施設の技術上の基準・同解説

## 2.12 送電線等の敷設

海底送電線及び通信ケーブルの敷設は、埋設を原則とし、港湾の利用もしくは保全に支障を与え、港湾計画の遂行を阻害し、その他港湾の開発や発展に支障を与えるものであってはならない。

### 【解説】

本節は、洋上風力発電設備等に係る海底送電線及び通信ケーブルに関する要求事項を示すものである。海底送電線及び通信ケーブルは、投走錨、底引き網漁業、海況による振動等によって損傷をうけることを避けるために、埋設することを原則とする。海底送電線及び通信ケーブルを埋設する際、その埋設深さは、海底送電線及び通信ケーブルの水中重量、土質、潮流・波浪等の条件を考慮して設定するものとする。底質が固い岩盤等で海底送電線及び通信ケーブルの埋設が不可能な場合には、防護管を取付ける方法、捨石被覆工法、グラウト袋やコンクリートマットレスを設置する方法等によって海底送電線及び通信ケーブルを保護するものとする。

なお、海底送電線及び通信ケーブルについては電気設備の技術基準の解釈第 127 条を満たすこととする。また、その詳細な設計方法は、DNVGL-ST-0359<sup>1)</sup>、DNVGL-RP-0360<sup>2)</sup>等を参考にすることができる。

### 参考文献

- 1) DNV GL (2016), DNVGL-ST-0359
- 2) DNV GL (2016), DNVGL-RP-0360

## 第3章 洋上風力発電設備等に作用する自然条件等

### 3.1 風荷重

現地実測データ又は気象の推算値をもとに、適切に風況条件を定め、洋上風力発電設備に作用する風荷重を設定するものとする。

#### 【解説】

荷重の組み合わせに応じ、洋上風力発電設備に作用する風荷重を設定する。風荷重は、以下に示す通常条件及び極値条件となる風況条件を定めた後、各荷重ケースに対して時刻歴応答解析を実施し算定することとする。

#### (1) 風況観測

風況条件を設定するために、現地での風況観測を実施してデータを取得する必要がある。計測項目は、風速、風向、風速標準偏差（乱れ）等が挙げられ、風車サイトの風況を代表可能な位置で計測する必要がある。計測項目や計測位置、計測方法については、MEASNET Evaluation of site-specific wind conditions (2009)<sup>1)</sup>の6章～7章を参照することが望ましい。なお、MEASNETは風力エネルギー関連の計測方法を統一するために創設された計測研究機関のネットワークで、構成メンバーは風力エネルギー関連の計測・評価を活発に行っている計測機関等からなる。同文書は、MEASNETにおいて定められた計測の手順書である。また、IEC61400-12-1<sup>2)</sup>も参照することができる。

#### (2) 風況条件の設定

荷重解析に必要な風況条件は、風車の運用中に頻繁に発生する通常条件と、再現期間50年で定義される極値条件に分類される。

通常条件である平均風速の出現頻度分布及び乱流強度等は、現地観測データを評価した結果に基づき定めるものとする。現地観測データの評価方法については、MEASNET Evaluation of site-specific wind conditions (2009)<sup>1)</sup>の8章～9章を参照することが望ましい。

極値条件である再現期間50年の設計風速及び乱流強度は、モンテカルロシミュレーション及びMCP法（Measure-Correlate-Predict法）により、台風・季節風の襲来頻度・強度と、局所的な地形の効果を考慮して定めることを基本とする（方法①）。ただし、簡便的に、法令により地方の区分ごとに定められている基準風速を基に、局所的な地形の効果、粗度区分、地表面からの高さ等を考慮して評価することも可能とする（方法②）。

なお、現地における風況観測データからガンベル分布等の確率分布を仮定した極値解析などの外挿によって算出することも可能であるが、その場合は選択した確率分布の妥当性を示すとともに結果の不確かさを評価しなければならない。この評価方法はMEASNET Evaluation of site-specific wind conditions (2009)<sup>1)</sup>の8.3章、8.5章を参照することができる。

#### 方法①

モンテカルロシミュレーション及びMCP法を用いて極値風速を評価する方法はJIS C 1400-1 (2017)<sup>3)</sup> 付属書JAを参照することができる。日本のような混合気候では熱帯低気圧（台風）及び季節風が強風の成因となり得るため、両者を考慮して設計風速を評価する必要がある。台風及び季節風を独立の事象

として捉え、前者はモンテカルロシミュレーションにより、台風による年最大風速の非超過確率分布を算出し、後者はMCP法（Measure-Correlate-Predict法：気象官署の観測データを用いて対象地点の風速を予測する方法）又は気象シミュレーションを用いて、季節風による年最大風速の非超過確率分布を算出する。続いて、両者の確率分布を乗じることで、台風と季節風を考慮した年最大風速の非超過確率分布、すなわち混合非超過確率分布を算出する。再現期間50年の設計風速は、この非超過確率が $1-1/50=0.98$ となる風速に対応する。

台風による年最大風速の非超過確率に関する評価フローを図-解 3.1.1、イメージを図-解 3.1.2 に示す。台風を想定したモンテカルロシミュレーションでは、過去の台風観測データにより、気圧場を表すパラメータ及び台風の年発生数の確率分布を求め、それらの確率分布に従いランダムに台風の気圧場を発生させる。そして発生させた台風の気圧場から上空風を算出し、地表面の粗度を考慮した高度補正係数、地形による平均風速の割増係数を考慮して地上風を算出し、年最大風速を求める。地形による平均風速の割増係数は、平坦地形での気流解析により得られた風速と実地形での気流解析により得られた風速の比から算出する。最後に年最大風速を昇順に並べ、年最大風速の非超過確率分布を導出する。

季節風による年最大風速の非超過確率に関する評価フローを図-解 3.1.3 に示す。MCP法では、近傍の気象官署において観測された非台風時の風速風向データ（10分間平均風速及び平均風向）を、対象地点の風速・風向に変換する。その後、対象地点の風速から年最大風速を抽出し、季節風による年最大風速の非超過確率分布を導出する。気象官署から対象地点への風速の変換には、気流解析の結果得られる換算係数を用いる。換算係数は、気流解析結果における両地点の風速比・風向のずれから算出する。

なお、気流解析実施にあたっては、周辺の地形の影響を考慮し、流入風条件を風上側の地表面粗度区分に応じたものに設定する。

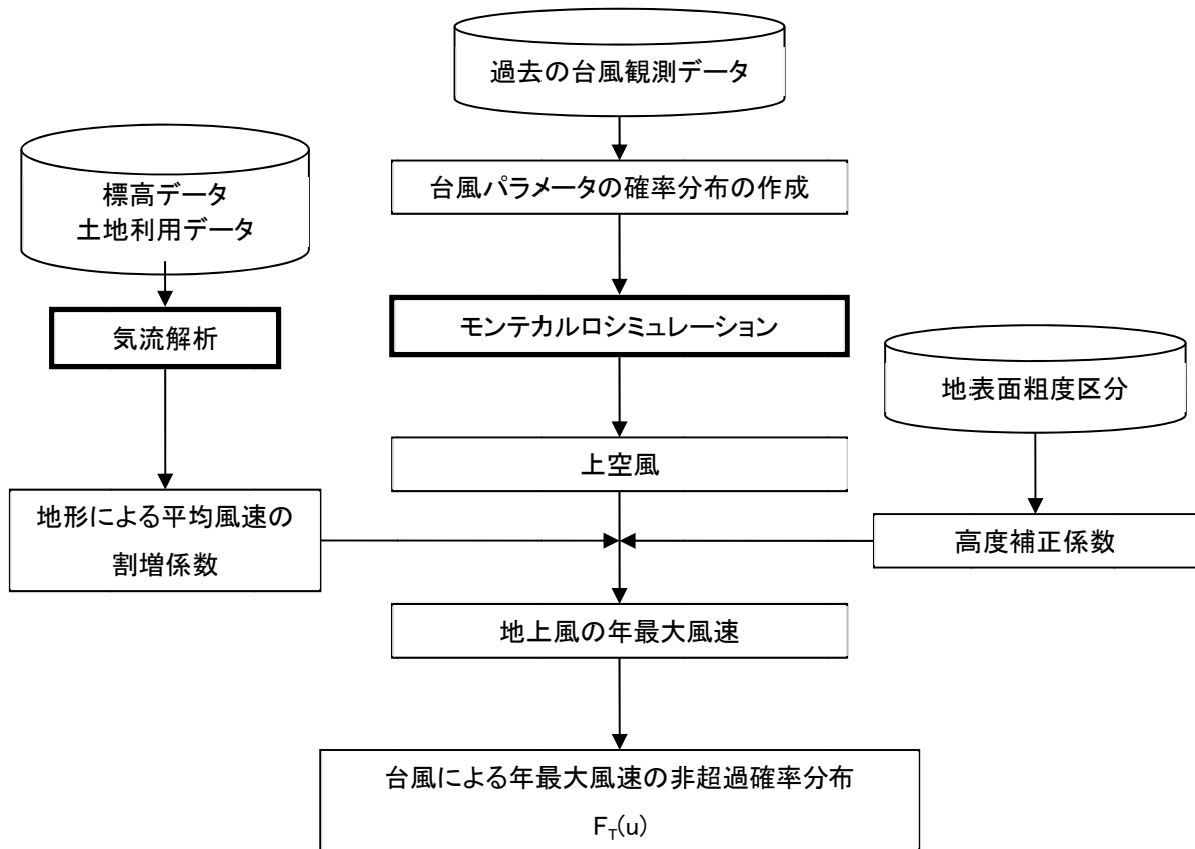


図-解 3.1.1 台風による年最大風速の非超過確率分布に関する評価フロー

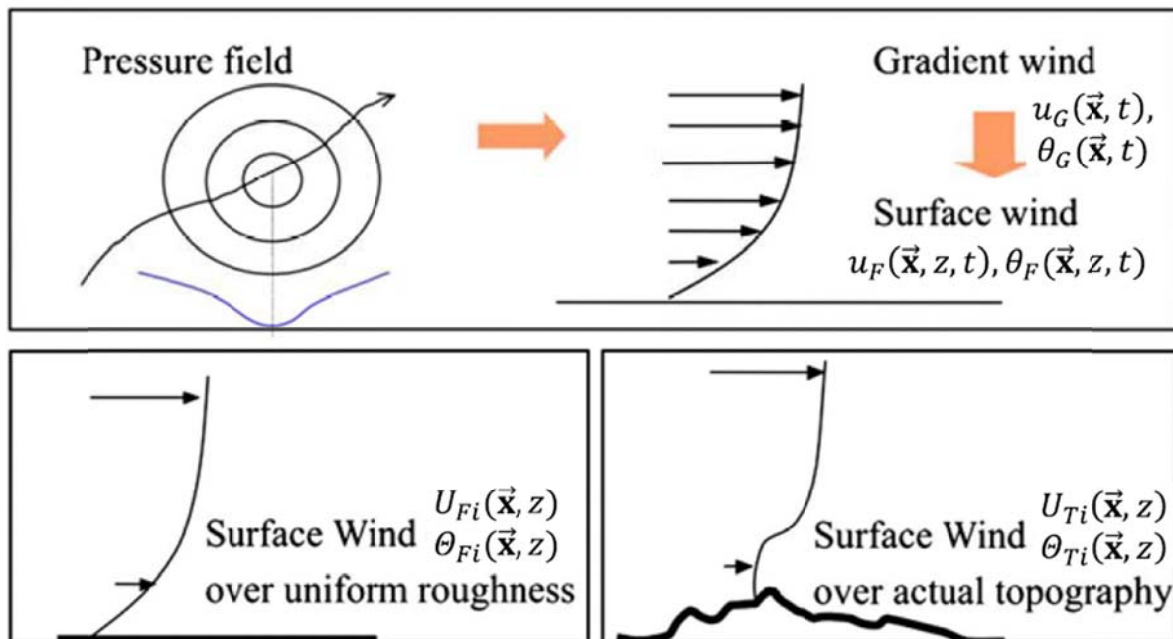


図-解 3.1.2 台風を想定したシミュレーションの結果を元に地上風を推定するイメージ<sup>4)</sup>

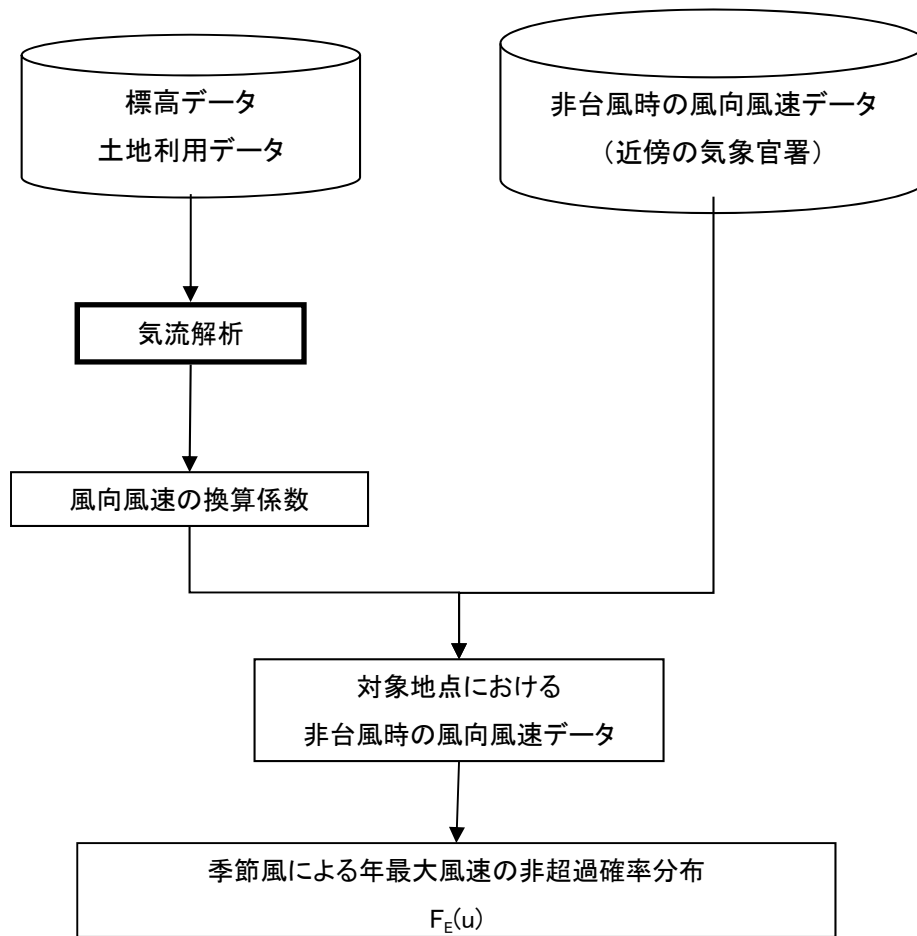


図-解 3.1.3 季節風による年最大風速の非超過確率に関する評価フロー

これらの評価フローに従い算出した非超過確率分布を用い、設計風速を評価するフローを図-解 3.1.4 に示す。例えば、非超過確率分布がガンベル分布に従うと仮定した場合、年最大風速  $u$  に対応する非超過確率（年最大風速が  $u$  を超えない確率）は以下の式で表される。

$$F(u) = \exp\left[-\exp\left\{-\left(\frac{u-a}{b}\right)\right\}\right] \quad (3.1.1)$$

ここで、 $a$  と  $b$  は確率分布形状から決まる係数であり、シミュレーションの結果得られた年最大風速を昇順に並べフィッティングすることにより同定する。また、このガンベル分布は両辺の自然対数を 2 回取ると 1 次式で表現され、このときの左辺を基準化変数と呼ぶ。

$$-\ln[-\ln\{F(u)\}] = \frac{u-a}{b} \quad (3.1.2)$$

台風による年最大風速の非超過確率分布を  $F_T(u)$ 、季節風による年最大風速の非超過確率分布を  $F_E(u)$  とすると、台風及び季節風の両者を考慮した年最大風速  $u$  の混合非超過確率分布  $F_C(u)$  は、台風起因においても季節風起因においても年最大風速が  $u$  を超えない確率であるため、次式で表される。

$$F_C(u) = F_T(u) \times F_E(u) \quad (3.1.3)$$

再現期間 50 年に相当する年最大風速  $U_h$  は、年最大風速が平均的に 50 年に 1 度超過する、すなわち非超過確率が  $1-1/50$  になる風速に相当するため、図-解 3.1.5 に示すように基準化変数



$-\ln(-\ln(1-1/50))=3.9$  における風速に対応する。

再現期間 50 年に対応する乱流強度は、平坦地形上の乱流強度に、気流解析の結果得られた地形による乱流強度の補正係数を乗じて風向ごとに算出し、再現期間 50 年の年最大風速が発生する風向の値を用いる。

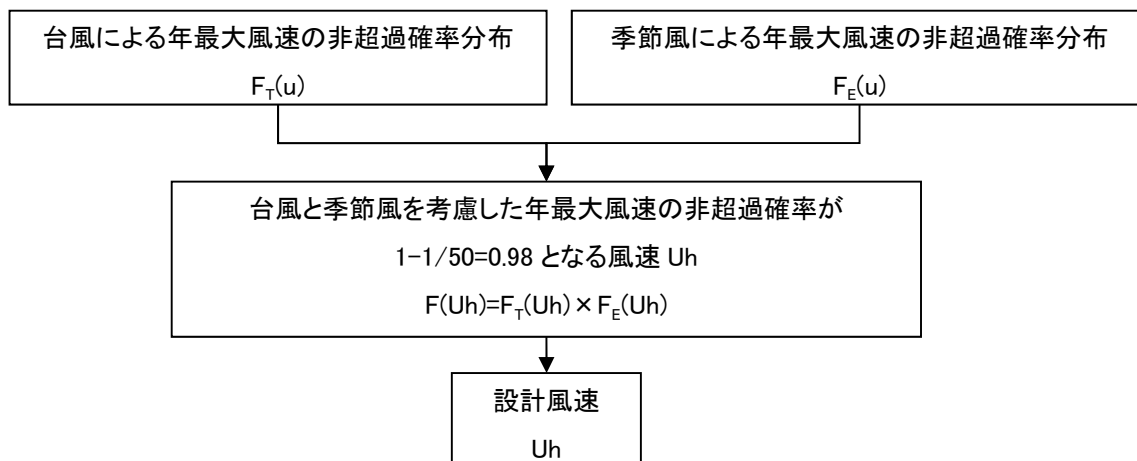


図-解 3.1.4 方法①による設計風速の評価フロー

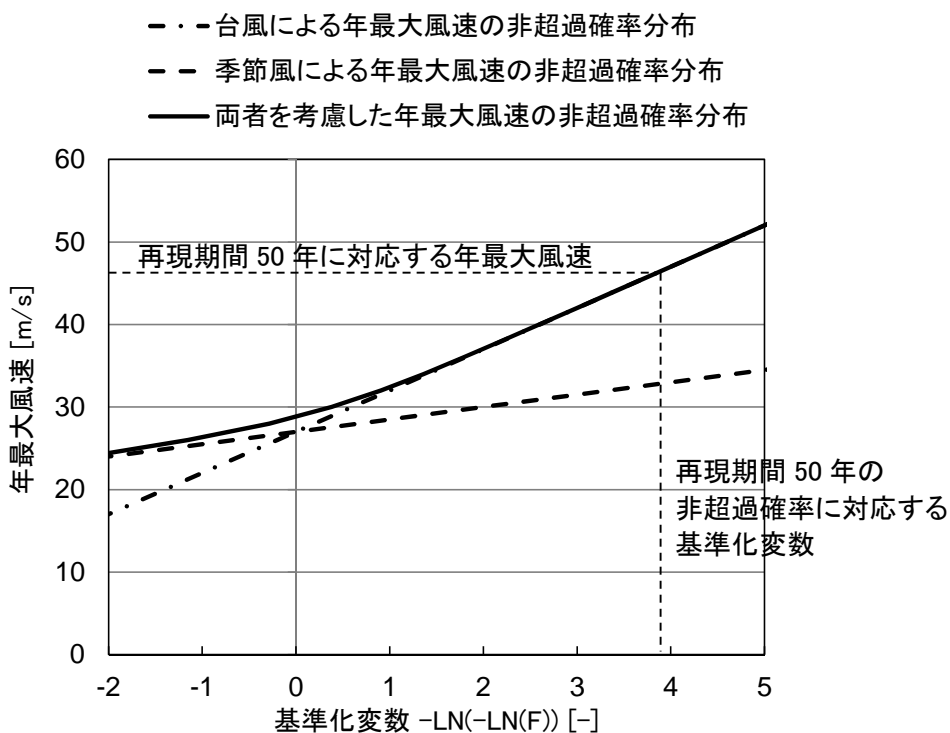


図-解 3.1.5 混合非超過確率分布の例

## 方法②

法令により地方の区分ごとに定められている基準風速を基に、局地的な地形の効果、粗度区分、地表面からの高さ等を考慮して設計風速を評価する方法は、風力発電設備支持物構造設計指針・同解説<sup>5)</sup>の3.2節を参照することができる。再現期間50年に対応する設計風速の評価フローを図-解3.1.6に示す。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。地形による平均風速の割増係数 $E_{tv}$ は図-解3.1.7に示すように実地形上と平坦地形上の気流解析の結果に基づき、両者のハブ高さ風速の比( $U_{real} \div U_{flat}$ )で定める。高度補正係数 $E_{pv}$ は、図-解3.1.8に示すように地表面区分に応じて定める。高度補正係数を用いて地表面粗度区分の変更が可能であり、港湾地域では基本的に地表面粗度区分Ⅰとする。

再現期間50年に対応する乱流強度は、平坦地形上の乱流強度に、気流解析の結果得られた地形による乱流強度の補正係数を乗じて風向ごとに算出し、地形による平均風速の割増係数が最大となる風向の値を用いる。なお、気流解析実施にあたっては、周辺の地形の影響を考慮し、流入風条件を風上側の地表面粗度区分に応じたものに設定する。

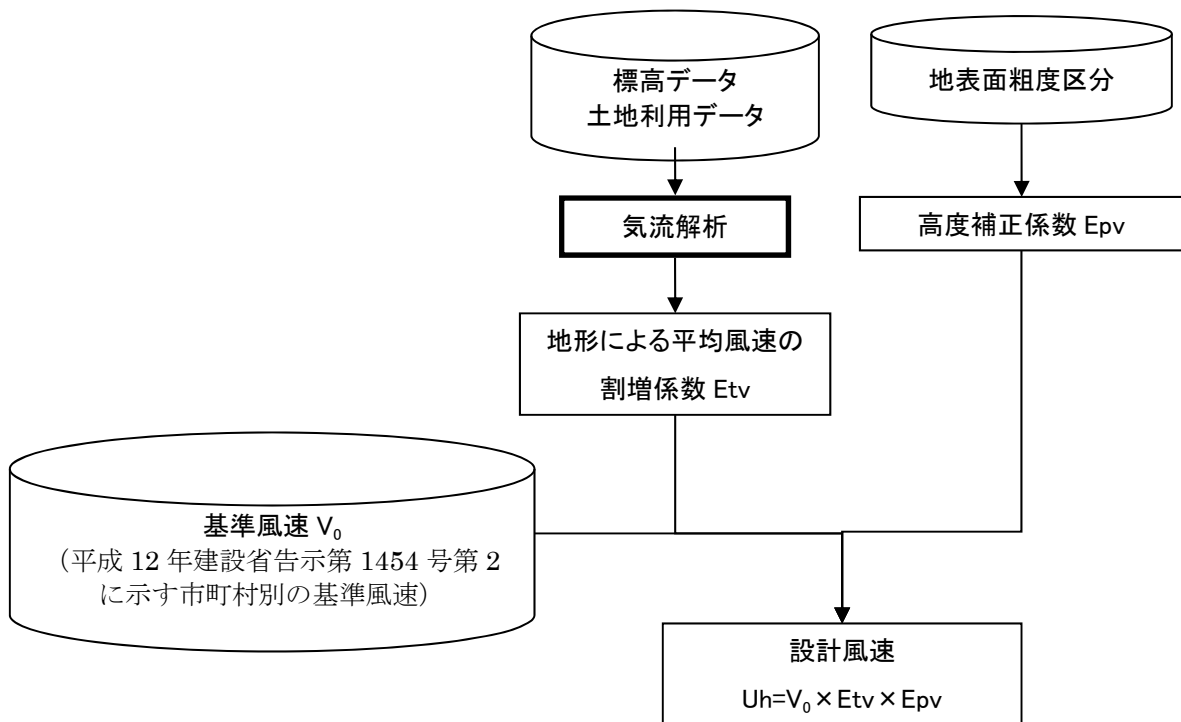


図-解 3.1.6 方法②による設計風速の評価フロー

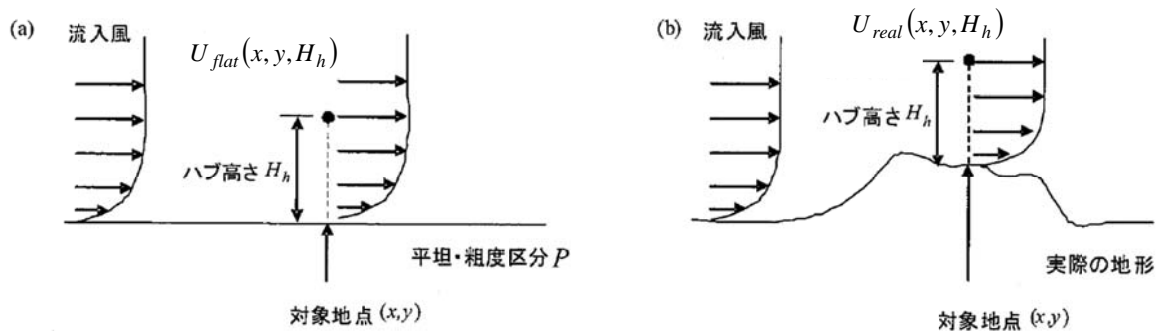


図-解 3.1.7 地形による平均風速の割増係数を求める気流解析のイメージ<sup>5)</sup>

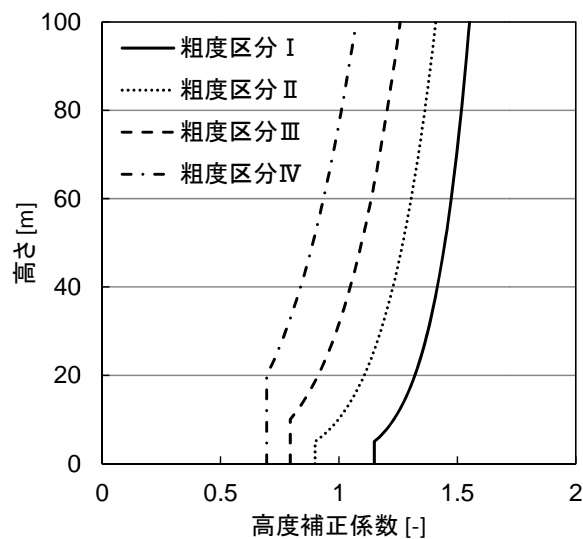


図-解 3.1.8 高度補正係数<sup>5)</sup>

### (3) 時刻歴応答解析の風モデル

時刻歴応答解析を実施する際には、上記で定めた平均風速や乱流強度、再現期間 50 年の設計風速や乱流強度等の統計値を用いて、以下のようなモデルを仮定し、風速の時系列データを入力とする。これらのモデルは想定する風車の運転状態によって適切に選択するものとする。

#### ・通常条件

NWP (Normal Wind Profile Model) : 通常風速プロファイルモデル

平均風速のプロファイル (鉛直分布) を平均風速と高さの関数で表現したものである。

NTM (Normal Turbulence Model) : 通常乱流モデル

乱流強度を平均風速の関数として表現したものである。

#### ・極値条件

EWM (Extreme Wind Speed Model) : 極値風モデル

極値風モデル (乱流極値風モデル) は、再現期間 50 年又は 1 年の平均風速を高さの関数として表現したものであり、主風向の乱流強度は一定値を仮定する。

EOG (Extreme Operating Gust) : 運転中の極値ガスト

運転中の極値ガストの変動を時間と高さの関数で表現したものである。

ETM (Extreme Turbulence Model) : 極値乱流モデル

極値条件下での乱流強度を年平均風速と平均風速の関数で表現したものである。

EDC (Extreme Direction Change) : 極値風向変化

極値条件下での風向変化を時間の関数で表現したものである。

ECD (Extreme Coherent Gust with Direction Change) : 方向変化を伴う極値コヒーレントガスト

極値条件下での風速・風向の同時変化を時間の関数で表現したものである。

EWS (Extreme Wind Shear) : 極値ウィンドシア

極値条件下での風速鉛直分布形状を時間の関数で表現したものである。

また、上述の統計値に加えて、発電時や停止時、地震時の風荷重評価に関する荷重ケース表では以下の値が定義されている。

$V_{ref}$  : 風車クラスを定義するために用いる風速の基本パラメータ

ハブ高さにおける再現期間 50 年の 10 分平均極値風速である。

$V_{in}$  : カットイン風速

風車が発電を開始するハブ高さにおける最小の風速のことで、風車の特性で決まる値である。

$V_r$  : 定格風速

風車の出力が定格出力に達するハブ高さにおける最小の風速のことで、風車の特性で決まる値である。

$V_{out}$  : カットアウト風速

風車が発電可能なハブ高さにおける最大の風速のことで、風車の特性で決まる値である。

$V_{II,NSS}$  : 年平均風速

3.3 節「波浪荷重」で規定される通常海象 NSS のうち、年平均に相当する階級 II1 に対応したものであって、観測データ等によって適切に定める値である。

#### (4) 風車後流の影響

当該風車が、上流に位置する風車の後流域に含まれる場合、当該風車に作用する荷重が増加する恐れがある。そのため、風上に位置する単一又は複数の風車からの後流による荷重への影響を評価するものとする。荷重への影響は、一般的に疲労計算時の乱流強度の増加として考慮される。その評価手法については、JIS C 1400-1 (2017) <sup>3)</sup>の付属書 D に記載されている Frandsen モデル、あるいは IEC TC88 MT1 : IEC 61400-1 Wind Turbines Part 1 Design requirements Committee Draft for Voting, 2016 の付属書 E に記載されている Dynamic Wake Meandering モデルを参照するものとする。

#### 参考文献

- 1) MEASNET (2009.11), MEASNET Procedure : Evaluation of site specific wind conditions Version 1
- 2) International Electrotechnical Commission (2017), IEC 61400 12-1: Wind energy generation

systems - Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines

- 3) 日本規格協会 (2017)、JIS C1400-1: 風車-第1部: 設計要件
- 4) Takeshi Ishihara and Atsushi Yamaguchi (2014), Prediction of the extreme wind speed in the mixed climate region by using Monte Carlo simulation and measure-correlate-predict method, Wind Energy, 2014
- 5) 土木学会 (2010)、風力発電設備支持物構造設計指針・同解説

### 3.2 潮位

港湾の施設の潮位の設定方法等に準拠して、設計に用いる潮位を設定するものとする。

#### 【解説】

港湾の施設の潮位の設定方法等に準拠して、設計に用いる潮位を設定することとする。JIS C1400-3<sup>1)</sup>では、H.S.W.L、H.A.T、M.S.L、L.A.Tなど、港湾の施設の技術上の基準・同解説<sup>2)</sup>とは異なる定義をしている。風力発電設備支持物構造設計指針・同解説<sup>3)</sup>に比較図が明示されているので参考にされたい。

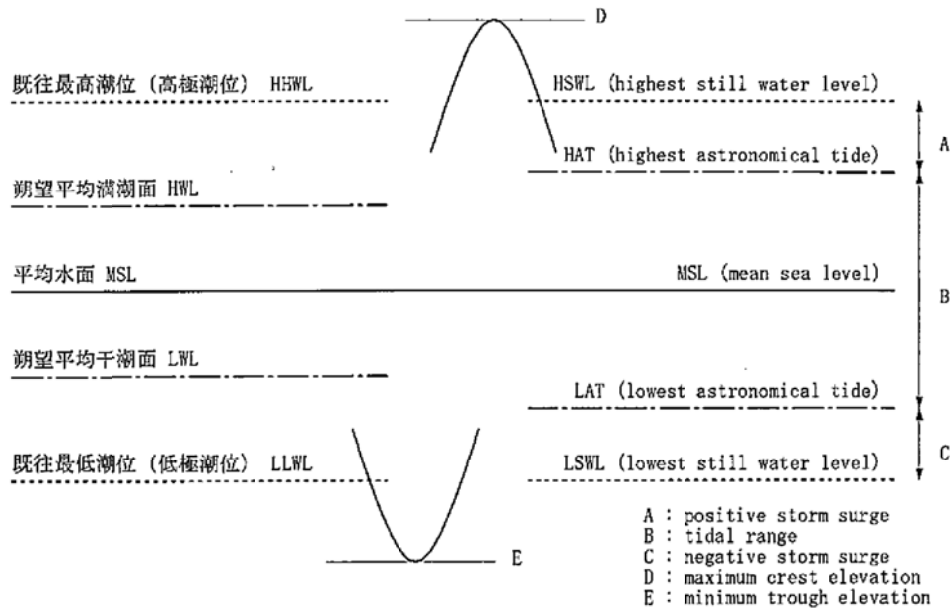


図-解 3.2.1 潮位の定義 (左側：港湾基準、右側：JIS C1400-3)<sup>3)</sup>

本基準解説では港湾区域を対象としているため、風力発電設備支持物構造設計指針・同解説に倣い、港湾の施設の技術上の基準・同解説に従うこととする。荷重の組み合わせ（波浪条件）に応じた設計潮位の設定は以下の通りとする。

通常海況 (NSS) : H. W. L.

高波浪時海況 (SSS) : H. W. L. 又は H. H. W. L. (砕波領域では低潮位時も考慮)

極値海況 (ESS) : H. W. L. 又は H. H. W. L. (砕波領域では低潮位時も考慮)

地震時 : H. W. L.

津波時 : H. W. L. 及び L. W. L. のうち、津波荷重が最大となる潮位

JIS C1400-3<sup>1)</sup>においては、通常海況 (NSS) に対応する潮位は平均海水面など平均的な値を採用することが多いが、通常海況のような常時の波浪を対象とした場合、概ね非砕波領域であると考えられるため、ここでは安全側に H. W. L. で設定する。一方、高波浪時海況 (SSS) や極値海況 (ESS) では、H. W. L. 又は H. H. W. L. で設定することを基本とするが、砕波の影響で低潮位時の波荷重が最大となる可能性もあるため、砕波領域においては衝撃砕波力を含めた波圧合力が最大となるよう潮位を設定するのが望ましい。地震時では、動水圧が最大となるよう H. W. L. で設定する。津波時では、津波荷重が厳しくなる条件として、H. W. L. 又は L. W. L. のいずれかを設定する。津波流速は水深が浅くなると速くなる傾向にあるが、潮位が高くなると波圧合力が大きくなるため、どちらが支配的になるか比較検討が必要である。

## 参考文献

- 1) 日本規格協会（2014）、JIS C1400-3：風車－第3部：洋上風車の設計要件
- 2) 日本港湾協会（平成19年7月）、港湾の施設の技術上の基準・同解説
- 3) 土木学会（2010）、風力発電設備支持物構造設計指針・同解説

### 3.3 波浪荷重

3.2 節にて設定した設計潮位を踏まえ、海象の実測値又は推算値をもとに、海況条件に応じた沖波の波浪諸元を求め、浅海域における波浪変形を考慮し、洋上風力発電設備に作用する波浪荷重を設定するものとする。

#### 【解説】

波浪荷重の算定においては、従来のがわが国の港湾施設及び海岸保全施設における設計波の算定手法等に準拠し、既存の波浪観測や波浪推算情報等をもとに設定する。

#### (1) 海況条件の設定

各設計荷重組み合わせに応じた波浪荷重の算定に当たり、以下の海況条件を設定する。

- ・極値海況 (ESS) : 再現期間 50 年及び 1 年の有義波高、有義波周期で表現した海況 :  $H_{s50}, T_{s50}, H_{s1}, T_{s1}$
- ・高波浪時海況 (SSS) : 発電中に発生し得る高波浪時 (再現期間 R 年) の有義波高、有義波周期で表現した海況 :  $H_{sR}, T_{sR}$
- ・通常海況 (NSS) <sup>注1, 注2, 注3</sup> : 与えられた風速階級別の有義波高、有義波周期及びその出現頻度で表現した海況 :  $H_{si,NSS}, T_{si,NSS}$  ( $i$  : 階級数、表-解 3.3.1 参照)

注 1) NSS のうち、地震時及び津波時の照査に用いる海況は以下とする。

年平均有義波に相当する階級 I1 の海況 :  $H_{sI1,NSS}, T_{sI1,NSS}$

注 2) NSS のうち、コンクリート部材の耐久性照査に用いる海況は以下とする。

個別波としてそれ以上の波高の波が来襲する回数が、耐用期間中に一万回オーダーとなる波高に等価な階級 I2 の海況 :  $H_{sI2,NSS}, T_{sI2,NSS}$

注 3) NSS のうち、長期荷重作用時の照査に用いる海況は以下とする。

定格風速  $V_r$  に相当する階級 I3 の海況 :  $H_{sI3,NSS}, T_{sI3,NSS}$

ここで、表-解 3.3.1 の様式例備考欄に示す通り、地震時及び津波時の照査、コンクリート部材の耐久性照査、長期荷重作用時照査では、DLC1.2 (表-2.1.2.1 参照) での時刻歴応答解析結果のうち、それぞれ対応する階級の応答値を用いることとする。

表-解 3.3.1 NSS における風速階級別有義波高、有義波周期出現頻度表の様式例

階級 $i$	風速 (m/s)	有義波高 (m)	有義波周期 (s)	頻度 $n$	波向き別頻度 $n_\theta$			備考
					$\theta=0^\circ$	$30^\circ$	...	
1	$V_{1,NSS} = V_{in}$	$H_{s1,NSS}$	$T_{s1,NSS}$					カットイン風速
2	$V_{2,NSS}$	$H_{s2,NSS}$	$T_{s2,NSS}$					
⋮								
I1	$V_{I1,NSS} = V_{ave}$	$H_{sI1,NSS}$	$T_{sI1,NSS}$					年平均風速、波高 (地震時・津波時照査用)
⋮								
I2	$V_{I2,NSS}$	$H_{sI2,NSS}$	$T_{sI2,NSS}$					一万回オーダー波に等価な階級 (コンクリート部材の耐久性照査用)
⋮								
I3	$V_{I3,NSS} = V_r$	$H_{sI3,NSS}$	$T_{sI3,NSS}$					定格風速 (長期荷重作業時照査用)
⋮								
imax	$V_{imax,NSS} = V_{out}$	$H_{simax,NSS}$	$T_{simax,NSS}$					カットアウト風速



## (2) 風況条件との組合せ

極値海況 (ESS) について、極値風条件と極値波浪条件ともに再現期間 50 年 (表-2.1.2.1 の DLC6.3、DLC 7.1、DLC 8.2 については 1 年) とすることを標準とする。JIS C1400-3<sup>1)</sup> の待機状態を表す設計荷重組み合わせ (表-2.1.2.1 の DLC6.1 及び DLC6.2) では、「極値風条件と極値波浪条件との組合せは、全体的な極値環境が再現期間 50 年となるようなものでなければならない。極値風条件及び極値波浪条件の長期結合確率分布を求めるデータがない場合、再現期間 50 年の極値海況において、再現期間 50 年の 10 分間平均極値風速が発生すると仮定しなければならない」とされている。しかしながら、実観測によって両極値事象の精度検証を十分に行い、長期的な結合確率分布を定義する情報を得ることは多大な労力を要する (例えば、吉岡ら<sup>2)</sup> を参照)。また、本来は両作用による支持構造物への応答すなわち荷重効果を検証した上で、組合せを決定すべきである。よって、本基準解説では安全側の設定として、両作用とも再現期間 50 年とすることを標準とした。

高波浪時海況 (SSS) について、JIS C1400-3<sup>1)</sup> では「高波浪時海況モデルは、発電に対応する風速範囲のそれぞれの風速に対して一つの高波浪時海況を関連付けるものである。それぞれの高波浪時海況の有義波高  $H_{SR}$  は、一般にサイト固有の気象海象データに外挿法を適用して決定する。このとき、有義波高と風速との組合せの再現期間は 50 年とする」とされている。具体的な評価方法を付属書 2 に示すが、安全側の設定として、再現期間 50 年の極値波浪条件を用いてもよい。

通常海況 (NSS) のうち疲労照査を実施する DLC1.2、DLC6.4 (表-2.1.2.1 参照) については、実測値に基づき、風と波の方向の不ぞろい (MIS) と多方向性 (MUL) を考慮することに加え、有義波高、有義波周期 (又はピークスペクトル周期) 及び 10 分平均風速の長期結合確率分布を評価して、荷重条件を設定する必要がある。具体的な検討方法が種本・石原<sup>3)</sup> に示されているので参照することができる。評価に用いる実測期間は 1 年以上とするが、実測データがない場合には、「沿岸波浪数値予報モデル GPV (CWM)」 (気象業務支援センター) 等の推算値を用いてもよいこととする。

## (3) 波浪荷重の評価の流れ

図-解 3.3.1 に ESS 及び SSS における波浪荷重の評価フローを示す。沖波の設定から風車地点の波 (有義波高、最高波高) の評価までは、従来の港湾施設の評価手法と同様である。洋上風力発電設備の場合は時刻歴応答解析が必要であるため、波の周波数スペクトルから不規則波の時刻歴波形を作成する。このとき、港湾区域は浅海域に位置するため、極値海況に対して波の有限振幅性を考慮した非線形不規則波とする。また、洋上風車の下部構造はいずれの形式でも円柱形の孤立構造物であることから、波の水粒子速度及び加速度を評価した上で、モリソン式によって波浪荷重を算定する。波浪荷重の算定に関する留意事項は (9) に示す。

図-解 3.3.2 に、波の非線形性を無視し得る場合の NSS における波浪荷重の評価の流れを示す。疲労照査に必要な各風車地点の階級別有義波は、海況の実測値に基づき平面波浪場の数値計算より補正して評価することができる。

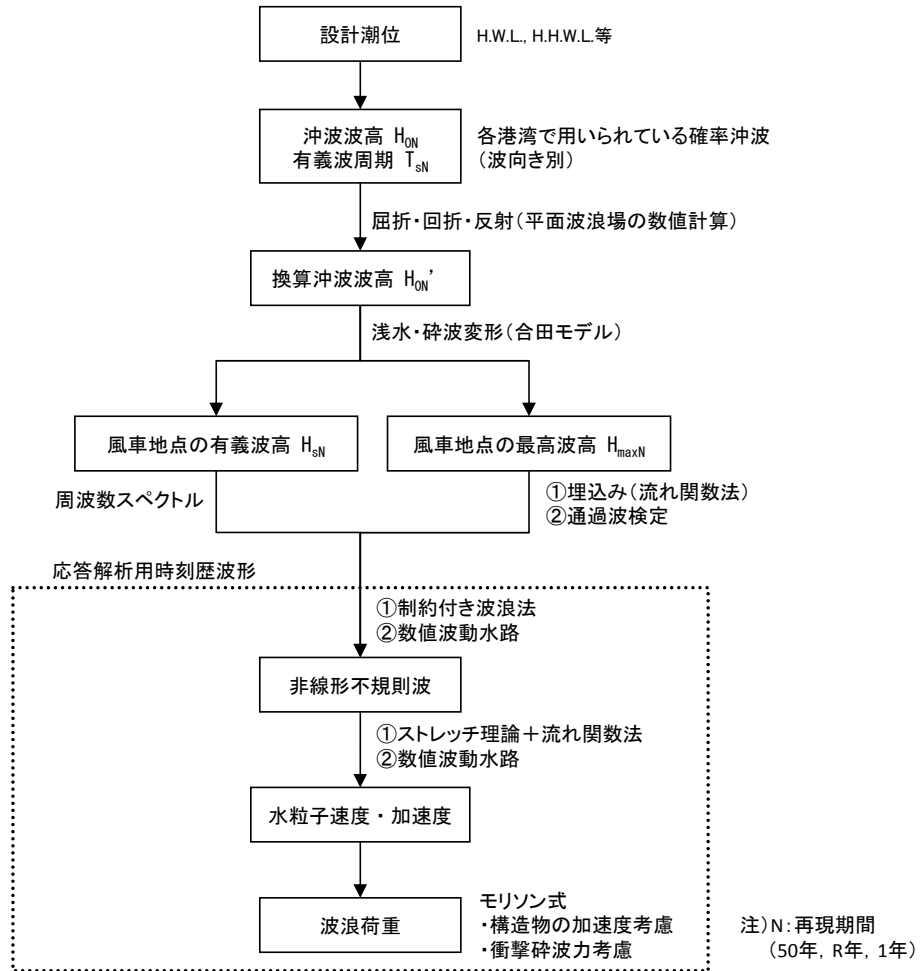


図-解 3.3.1 ESS 及び SSS における波浪荷重の評価フロー

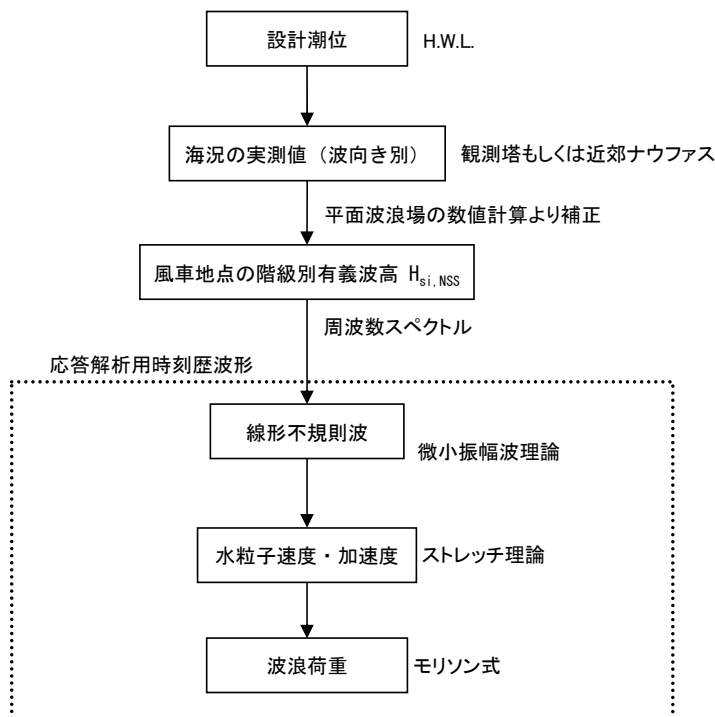


図-解 3.3.2 NSS における波浪荷重の評価フロー (波の非線形性を無視し得る場合)

#### (4) 有義波高及び最高波高の定義

有義波高の評価時間について、JIS C1400-3<sup>1)</sup>に従い3時間を標準とする。しかしながら、我が国の港湾分野では、波浪の定常性及び有義波高算出のための個別波の数を考慮して一般に評価時間20分が用いられており、次の通り安全側の値になることからこれを用いてよいこととする。山口・石原<sup>4)</sup>や吉岡ら<sup>2)</sup>はそれぞれ、銚子沖、北九州沖の観測データを用いて両者を比較し、評価時間3時間の有義波高 $H_{s,3hour}$ よりも、同時間帯の評価時間20分の有義波高 $H_{s,20min}$ の最大値の方が6%~10%程度大きくなることを示している。これは波浪場の非定常性に起因するものであり、有義波高を算出する際に波高の大きい個別波が含まれる割合は、評価時間を短くした方が相対的に大きくなるためである。また、波浪推算モデルに基づくスペクトル有義波高 $H_s$ と観測記録に基づくゼロアップクロス有義波高 $H_{1/3}$ は、平均的に $H_{1/3}=0.956H_s$ という近似関係が成り立つ。ただし、レイリー分布を仮定すれば両者は等しいこと、修正ブレットシュナイダー・光易型の周波数スペクトルではこの近似関係が考慮されていることから(JIS C1400-3<sup>1)</sup> 附属書 JA 参照)、両者を区別せず有義波高 $H_s$ と称する。

また、碎波の影響を無視した場合の最高波高 $H_{max}$ についても、JIS C1400-3<sup>1)</sup>に従い1/1000最頻値( $1.86H_s$ )を標準とする。港湾の施設の技術上の基準・同解説<sup>6)</sup>では1/250最大波( $1.80H_s$ )と定義されているため、 $1.86/1.80=1.033$ 倍の差が生じる。しかし、重力式防波堤のような剛構造物と、洋上風車のような柔構造物とでは破壊に至るまでの靱性が異なることを踏まえ、安全側の設定として、JIS C1400-3<sup>1)</sup>の定義を用いることとした。

なお、洋上風力発電設備の場合は時刻歴応答解析が基本となることから、最高波高を直接用いて波浪荷重を評価するのではないことに注意を要する。最高波高は図-解 3.3.1 に示す通り、風車地点における非線形不規則波の時刻歴波形を生成する際の目標値として用いられるものであり、具体的な生成方法を(8)に示す。

#### (5) 沖波

沖波は、各港湾にて定められている最新の確率沖波を用いることとする。国土交通省 国土技術政策総合研究所資料第88号<sup>5)</sup>には、平成12年に収集した各港湾建設局(現国土交通省地方整備局)における波浪推算及び極値統計解析データに基づき、全国各地の沖波が整理されており、これを用いてもよい。沖波算定地点が風車建設地点近傍に複数存在する場合は、次項に示す平面波浪場の数値計算において、卓越する波向きを考慮し、入射側の開境界位置に近い地点を選択する。

ここで、有義波高で定義される沖波についても、前述の通り評価時間3時間を標準とするが、各港湾で用いられている確率沖波は、毎偶正時の20分観測記録や、20分毎の連続観測記録との検証がなされたものである。毎偶正時の20分観測記録の場合は評価時間3時間の有義波高と同等であることが確認されていること(山口・石原<sup>4)</sup>)、20分毎の連続観測記録の場合は前述の通り安全側の値になることから、各港湾での確率沖波を用いてよいこととした。

また、設計者が波浪推算を実施して確率沖波を評価する場合には、スペクトル法のうち十分な適用性検証がなされた第3世代モデルを用いるのがよい。併せて、建設地点近傍にナウファス(全国港湾海洋波浪情報網)等の30年以上の長期波浪観測データがある場合には、これを用いて極値統計解析により再現期待値を算定し、上記推算値の妥当性を検証する必要がある。長期観測データがない場合には、設計者が波浪観測を実施し、波浪推算モデルの精度検証を実施する必要がある。波浪推算や極値統計解析の

方法は、港湾の施設の技術上の基準・同解説<sup>6)</sup>及び風力発電設備支持物構造設計指針・同解説<sup>7)</sup>を参照できる。

#### (6) 換算沖波

換算沖波の算定に用いる建設地点での沿岸係数（屈折係数、回折係数）は、平面波浪場の数値解析によって評価することを原則とする。評価にあたり、海底地形や島嶼の影響を考慮して適切な数値解析モデルを選択する。風車建設エリアが広く、沿岸係数を複数設定する必要がある場合には、適切にグルーピングを行い、安全側の数値で設定してもよい。

また、風車建設地点において、隣接する港湾施設からの反射波の影響を受ける可能性がある場合には、適切にその影響を考慮する必要がある。反射波の算定方法や入射波との合成方法は港湾の施設の技術上の基準・同解説<sup>6)</sup>を参照することができる。

#### (7) 風車地点の波

上記の換算沖波を用い、一様勾配斜面における不規則波の浅水・砕波変形計算にて風車地点の有義波高及び最高波高を算定する。計算には合田<sup>8)</sup>の略算式を用いることとする。ただし、最高波高の評価においては、前述の港湾の施設の技術上の基準・同解説<sup>6)</sup>との定義の違いから、略算係数 $\beta_0^*$ 、 $\beta_{\max}^*$ を下式の通り 1.86/1.80=1.033 倍に補正する。なお略算係数 $\beta_1^*$ は、砕波帯内の水深によって波高が頭打ちになる部分であるため補正しない。

$$H_{\max} \equiv H_{0.1\%} = \begin{cases} 1.86K_s H_0' & : h/L_0 \geq 0.2 \\ \min \left\{ \left( \beta_0^* H_0' + \beta_1^* h \right), \beta_{\max}^* H_0', 1.86K_s H_0' \right\} & : h/L_0 < 0.2 \end{cases} \quad (3.3.1)$$

$$\begin{aligned} \beta_0^* &= 0.054 \left( H_0' / L_0 \right)^{-0.38} \exp \left[ 20 \tan^{1.5} \theta \right] \\ \beta_1^* &= 0.63 \exp \left[ 3.8 \tan \theta \right] \\ \beta_{\max}^* &= \max \left\{ 1.70, 0.55 \left( H_0' / L_0 \right)^{-0.29} \exp \left[ 2.4 \tan \theta \right] \right\} \end{aligned} \quad (3.3.2)$$

ここに、 $H_0'$ ：換算沖波波高  
 $K_s$ ：浅水係数  
 $h$ ：水深  
 $L_0$ ：沖波波長  
 $\beta_0^*$ 、 $\beta_1^*$ 、 $\beta_{\max}^*$ ：略算係数  
 $\tan \theta$ ：海底勾配

#### (8) 波の運動

上記の最高波高を目標として、波の周波数スペクトルに基づく不規則波の時刻歴波形を作成する。作成にあたり、波の周波数スペクトルの定式化は重要な要素であり、修正ブレットシュナイダー・光易型、JONSWAP 型等の中から、実測値に最も適合する式及びパラメータを選定する必要がある。太平洋側のように、風波とうねりが混在し二山型のスペクトル形状を示す海域では、例えば種本ら<sup>9)</sup>を参照することがで

きる。また JIS C1400-3<sup>1)</sup>では、極値海況に対して非線形性を考慮した波の運動を用いることが要求されている。その具体的な方法として、①制約付き波浪法、②数値波動水路がある。

制約付き波浪法は、上記の最高波高を有する非線形波をバググラウンドの線形不規則波に埋め込むことにより、便宜的に非線形性を考慮する手法である。非線形波としては最も制約が少ない流れ関数法を用いることが一般的である。併せて、モリソン式による波力評価で必要となる水粒子速度、加速度についても、制約付き線形不規則波と非線形規則波の水粒子運動の重み付き平均によって算定する。手法の詳細が嶋田<sup>10)</sup>に示されているので参照することができる(図-解 3.3.3)。

数値波動水路(CADMAS-SURF、沿岸技術研究センター<sup>11)</sup>)は、水路の沖側境界にて線形不規則波を入射し、風車地点における浅水・砕波変形を数値計算にて評価する方法である。上記の最高波高は通過波検定に用いられ、検定作業に手間がかかるものの、不規則な個別波の全てに非線形性を考慮できる利点がある。また、海底から波頂面までの水粒子速度分布の時刻歴を出力することができる(図-解 3.3.4)。ただし、極値海況(ESS)のような高波を計算する場合、沖側境界を十分に深く設定する必要があるため計算負荷がかかる。平山・中村<sup>13)</sup>は、数値波動水路の計算負荷軽減のため、弱非線形性な平面波浪場の計算モデルであるNOWT-PARI(平山<sup>14)</sup>)との接続計算法を提案しており、参照することができる。

波の非線形性を無視し得る場合は、微小振幅波理論(線形波理論)により波の運動を評価してもよい。同理論により評価される水粒子速度・加速度は静水面までであることから、座標値を鉛直方向に伸縮するウェーラのストレッチ法を適用する(図-解 3.3.5)。算定方法は風力発電設備支持物構造設計指針・同解説<sup>7)</sup>を参照することができる。

JIS C1400-3<sup>1)</sup>の設計荷重ケース DLC1.6、DLC6.1、DLC6.2、DLC6.3 及び DLC7.1 では、時刻歴応答解析で考慮する風況と海況の時刻歴を1時間とし、これを6個以上必要とされている。さらに、評価時間10分の平均風速、評価時間3時間の有義波高を1時間値に変換するための係数が示されている。前述した評価時間20分の有義波高を用いる場合は、山口・石原<sup>4)</sup>を参照して変換係数を適切に評価するか、安全側の設定として変換係数を1.00としてよい。また、ジャケット構造のような多柱部材に対しては、各部材の空間位相を考慮する必要がある。

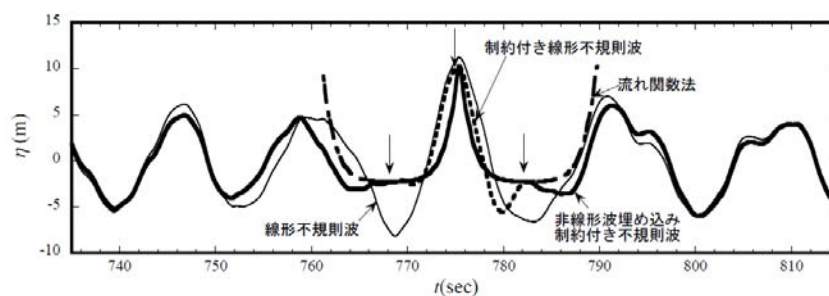


図-解 3.3.3 制約付き波浪法による検討例(嶋田<sup>10)</sup>)

【実験条件】水深(造波板位置)0.7m,有義波高0.131m,有義波周期1.5s

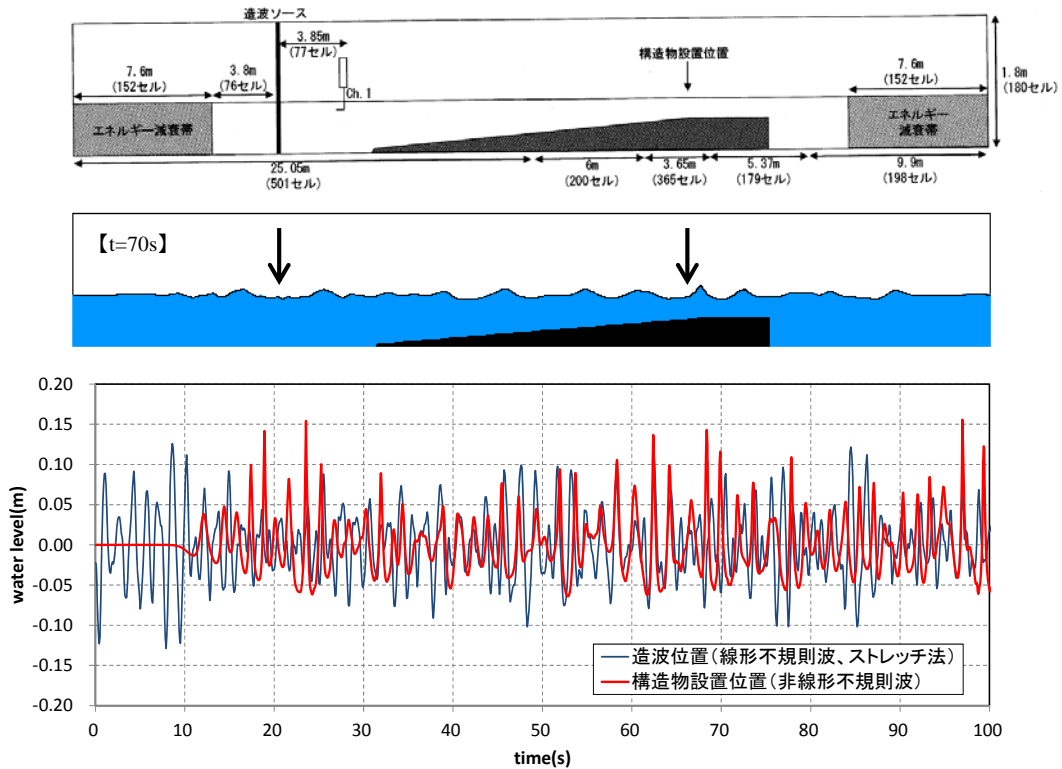


図-解 3.3.4 数値波動水路による通過波検定例 (沿岸技術研究センター<sup>12)</sup>)

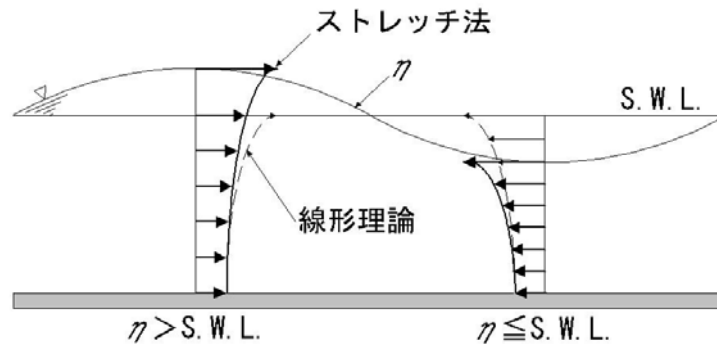


図-解 3.3.5 ストレッチ法

### (9) 波浪荷重

円柱構造物に作用する波力をモリソン式によって算定する場合、抗力係数、慣性力係数及び海中生物の平均付着厚さ (3.12 節参照) を適切に評価する。評価方法については、港湾の施設の技術上の基準・同解説<sup>6)</sup> や風力発電設備支持物構造設計指針・同解説<sup>7)</sup> を参照することができる。部材が顕著に運動する場合、構造物加速度に比例する水の付加質量を、砕波が発生する場合には、衝撃砕波力を考慮する。衝撃砕波力の算定方法は JIS C1400-3<sup>1)</sup> 又は合田<sup>15)</sup> を参照することができる。特に係留設備やケーブル保護管、昇降用梯子等の静水面付近に設置される付帯設備については、衝撃砕波力による損傷を受けやすいため、十分な注意が必要である。また、下部構造が三角フラスコ形の重力式構造である場合、その波

圧評価には福山ら<sup>16)</sup>を参照することができる。

### (10) 風と波の方向

風と波の方向について、表-2.1.2.1~2.1.2.3に示される多くの荷重組み合わせは同一方向(COD)かつ単一方向(UNI)としているが、卓越する方向が明確でない場合には、支持構造物にとって厳しくなる方向に作用させなければならない。極値海況(ESS)及び通常海況(NSS)のうちDLC1.2、DLC1.4及びDLC3.3については、風と波の方向の不ぞろい(MIS)を考慮しなければならない。さらに、通常海況(NSS)のうちDLC1.2、DLC6.4、DLC7.2、DLC8.3及び極値海況(ESS)については、風と波の多方向性(MUL)を考慮しなければならない(図-解 3.3.6)。方向の不ぞろいの範囲や多方向の分割数は、実測値に基づき適切に設定する。特に沖波から風車地点における波向き別の有義波高を評価する際、波の方向分散性を考慮して平面波浪場の数値計算を実施する必要がある。

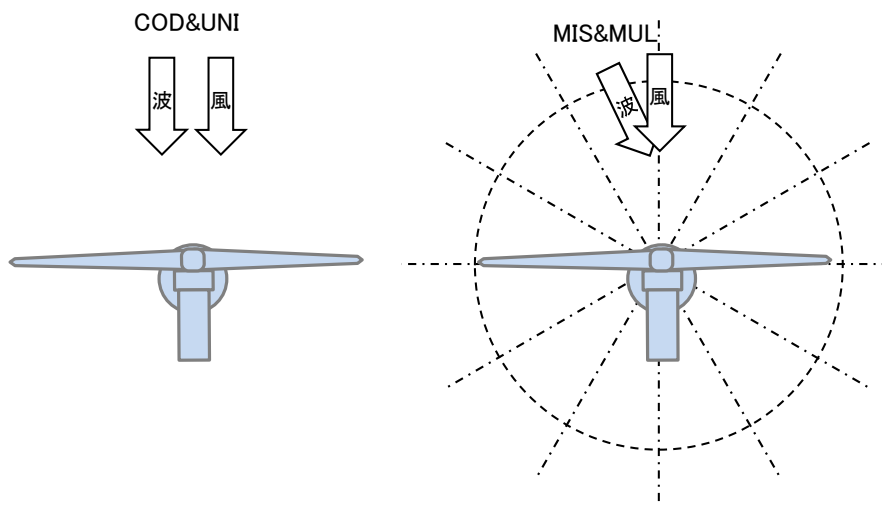


図-解 3.3.6 風と波の方向模式図

## 参考文献

- 1) 日本規格協会 (2014)、JIS C1400-3: 風車—第3部: 洋上風車の設計要件
- 2) 吉岡 健・志水 伸二・川口 浩二・永井 紀彦・仲井 圭二(2017)、北九州市沖洋上風車の極値波浪・極値風条件に関する研究、土木学会論文集 B3 (海洋開発)、第 73 巻、土木学会
- 3) 種本 純・石原 孟(2014)、風と波の結合確率分布モデルの提案、第 36 回風力エネルギーシンポジウム、日本風力エネルギー学会
- 4) 山口 敦・石原 孟(2012)、洋上風力発電設備設計のための有義波高の評価時間に関する研究、第 34 回風力エネルギーシンポジウム、日本風力エネルギー学会
- 5) 高田 悦子・諸星 一信・平石 哲也・永井 紀彦・竹村慎治(2003)、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、No. 88
- 6) 日本港湾協会 (平成 19 年 7 月)、港湾の施設の技術上の基準・同解説
- 7) 土木学会 (2010)、風力発電設備支持物構造設計指針・同解説
- 8) 合田 良実(1975)、浅海域における波浪の砕波変形、港湾技術研究所報告、第 14 巻、第 3 号.
- 9) 種本 純・石原 孟・山口 敦(2016)、風波とうねりの混合波浪のスペクトルモデルに関する研究、第 38 回風力エネルギーシンポジウム、日本風力エネルギー学会
- 10) 嶋田 健司(2014)、制約付き波浪法による洋上風車下部構造のための水粒子運動の評価について、土木学会平成 26 年度全国大会研究討論会、土木学会
- 11) (財)沿岸技術研究センター(2001)、数値波動水路の研究・開発
- 12) (財)沿岸技術研究センター(2008)、CADMAS-SURF 実務計算事例集
- 13) 平山 克也・中村 隆志(2015)、NOWT-PARI と CADMAS-SURF/2D とのリアルタイム片方向接続計算法に関する検討、港湾空港技術研究所報告、第 54 巻、第 2 号
- 14) 平山 克也(2002)、非線形不規則波浪を用いた数値計算の港湾設計への活用に関する研究、港湾空港技術研究所資料、No. 1036
- 15) 合田 良実(1966)、直柱に働く衝撃砕波力の研究、港湾技術研究所報告、第 5 巻、第 6 号
- 16) 福山 貴子・池谷 毅・福本 幸成(2014)、洋上風力発電設備基礎に作用する現地波圧特性と確率的評価法、土木学会論文集 B3 (海洋開発)、第 70 巻、土木学会



### 3.4 津波荷重

各港湾で設定されている設計津波をもとに、津波荷重を設定するものとする。

#### 【解説】

設計津波の津波高は、各地方自治体の海岸保全基本計画等で定められた津波をもとに設定する。海岸保全基本計画等で示される津波高は海岸部であることが多いため、グリーンの法則等の適切な方法にて風車設置位置での津波高を推定するものとする。津波荷重の算定については、港湾の施設の技術上の基準・同解説<sup>1)</sup>、港湾の施設の技術上の基準・同解説の部分改訂<sup>2)</sup>及び防波堤の耐津波設計ガイドライン<sup>3)</sup>において津波波力の算定式が提示されているが、これらは延長の長い防波堤を対象としている。支持構造物に作用する津波荷重については、波荷重と同様に、津波流速に対するモリソン波力（抗力成分のみ）により津波荷重を設定してもよい。津波流速の算定については、港湾の施設の技術上の基準・同解説<sup>1)</sup>を参照することができる。潮位の設定については、津波荷重が厳しくなる条件として、H. W. L. 又は L. W. L. のいずれかを設定する。津波流速は水深が浅くなると速くなる傾向にあるが、潮位が高くなると波圧合力が大きくなるため、どちらが支配的になるか比較検討が必要である。

なお、沖合において津波高が小さく、明らかに外力が小さいと想定される場合には、津波の検討は省略してもよい。

#### 参考文献

- 1) 日本港湾協会（平成 19 年 7 月）、港湾の施設の技術上の基準・同解説
- 2) 日本港湾協会（平成 26 年 3 月）、港湾の施設の技術上の基準・同解説の部分改訂
- 3) 国土交通省港湾局（平成 25 年 9 月）、防波堤の耐津波設計ガイドライン

### 3.5 水の流れによる荷重

潮流や吹送流などの影響を踏まえ、水の流れによる荷重を設定するものとする。

#### 【解説】

#### (1) 洋上風力発電施設に作用する水の流れ

海の流れは時空間的に変化するものの、一般的には速度及び方向が一定の水面内で一様な流れであり、定常流として取り扱ってもよい。流れについては主に以下の成分が考えられる。

- ・潮流 : 潮汐によって生じる流れ
- ・吹送流 : 風によって生じる海面付近の流れ
- ・海浜流 : 砕波帯近傍における、砕波などの波浪変形によって生じる流れ

流れの評価は、これらの成分のベクトル和として評価することを基本とするが、各成分が波荷重と同一方向に作用することとしてもよい。それぞれの成分については、現地海域での観測データ又は数値解析により評価する。潮流の観測データとしては、海上保安庁日本海洋データセンターの流速値を参照することができる。参照可能なデータがない場合には、現地サイトにて15日間の潮流観測を行うこととする。吹送流及び海浜流については、JIS C1400-3<sup>1)</sup>を参照することができる。吹送流は、荷重の組み合わせごとに風速の1年再現値(表-2.1.2.1のDLC6.3、7.1、8.2)もしくは50年再現値(表-2.1.2.1のDLC6.1、6.2)を評価するものとする。また、流速の鉛直分布はJIS C1400-3<sup>1)</sup>を参照して算定してもよい。その他の流れとして海流が考えられるが、陸地に近い港湾区域においては影響が小さいため考慮しなくてもよい。

なお、観測データが全ての成分を含む場合には、個別に分離して評価せずにそのまま用いてもよい。

#### (2) 流速モデル

流速モデルは荷重の組み合わせに応じ、以下のように設定することを基本とする。

通常流速モデル(NCM) : 潮流

極値流速モデル(ECM) : 潮流、吹送流(1年再現値もしくは50年再現値)、海浜流(必要な場合)  
海況と流速モデルの関係は以下の通りである。

通常海況(NSS)の場合 : (短期荷重時) NCM、(疲労荷重時) 考慮しない

高波浪時海況(SSS)の場合 : NCM

極値海況(ESS)の場合 : ECM

また、河川や高潮の影響を強く受ける場合には、これらの影響を適切に考慮する必要がある。

#### 参考文献

- 1) 日本規格協会(2014)、JIS C1400-3: 風車—第3部: 洋上風車の設計要件

### 3.6 洗掘

設計地盤面の設定にあたっては、波、流れによる支持構造物周辺地盤の洗掘を適切に考慮するものとする。

#### 【解説】

##### (1) 洗掘現象について

下記に示すような洗掘現象に対して海底地盤の安定性の評価をおこない、適切な対策をとる必要がある。

- 1) 杭などの構造要素周辺が水流の影響で急峻に掘り込まれる局所洗掘(local scour)。
- 2) 構造物の周りが浅く洗掘される広域洗掘(global scour)。構造物全体の影響、複数の構造物の相互作用、又は波と地盤と構造物の相互作用に起因する可能性がある。

洗掘が発生すると、基礎に対する鉛直方向及び水平方向の支持が失われて、基礎に沈下、傾斜及び変位が発生したり、過大な応力が作用することがある。また、風車構造の固有周期及び動的特性を変化させることがある。

##### (2) 洗掘の対処方法について

支持構造物の施工後、周辺の地盤面に洗掘防止工を設置する場合は、予想される洗掘深から洗掘範囲を求め、それを防護する範囲に洗掘防止工を設置する。杭式構造物の波や流れによる局所洗掘深及び洗掘範囲についてはDNVGL-ST-0126<sup>1)</sup>又は港湾における洋上風力発電施設等の技術ガイドライン<sup>2)</sup>を参考に推定してもよい。また、津波に対する局所洗掘深は、DNVGL-ST-0126<sup>1)</sup>を参考に津波流速を用いて評価してもよい。重力式構造物の局所洗掘についてはSumer(1992)<sup>3)</sup>の文献等を参考にできる。ただし、実海域における洗掘現象は複雑であるため、上記の方法で洗掘量を設定した場合は、設定値の妥当性を模型実験等で確認することが望ましい。洗掘防止工は供用中の高波浪で飛散、損傷するおそれがあるので、定期的にモニタリングを行い、維持管理に努めなければならない。なお、重力式構造物における洗掘防止工の設計法については福山ら<sup>4)</sup>などを参考にできる。

洗掘防止工を設置しない場合、予想される洗掘深に対して構造物が安全側になるよう風車含め設計する場合は、あらかじめ洗掘深及び洗掘範囲を考慮して設計地盤面を設定する必要がある。

設計地盤面の設定にあたっては、洗掘に加えて周辺構造物の影響や季節による海底地形の変動を考慮する必要がある。

#### 参考文献

- 1) DNV GL (2016), DNVGL-ST-0126
- 2) 国土交通省港湾局(平成27年3月)、港湾における洋上風力発電施設等の技術ガイドライン(案)
- 3) B. Mutlu, Sumer and Jørgen Fredsøe (2002), THE MECHANICS OF SCOUR IN THE MARINE ENVIRONMENT, Advanced Series on Ocean Engineering-Volume17, World Scientific
- 4) 福山ら (2014年)、銚子沖洋上風力発電実証研究海域における海底地盤の耐洗掘性評価、土木学会論文集、土木学会論文集B2(海岸工学)、Vol. 70(2014) No. 2

### 3.7 地盤

地盤条件を設定するために、事前に地盤を十分に調査し、地形や地質を把握する必要がある。調査にあたっては、洋上風力発電設備等の構造や規模に応じて、当該設備を設置する地点の地盤の性状を適切に評価ものとする。また、地盤調査及び土質試験の結果をもとに、地盤の物理的特性、力学的特性等を設定するものとする。

#### 【解説】

##### (1) 調査項目

一般に、地盤調査には、次の各項目を含めるのがよい。

- 1) 予備調査
- 2) 海底地形調査（深淺測量、サイドスキャンソナー探査など）
- 3) 物理探査（海底地盤面下の地層探査）
- 4) 地盤ボーリング及びサンプリング
- 5) 原位置試験（標準貫入試験、コーン貫入試験ほか）及び室内試験

予備調査は、2)～5)で実施する調査に先立って実施されるものであり、過去に実施された深淺測量や地盤調査などの既存資料から調査エリア近隣の地盤に関する基本情報を取得するために実施するものである。海底地形調査は、風力発電設備等の設置地点の水深及び海底面の起伏を把握するために実施するものである。また、海底面にある巨石（ボルダー）、サンドウェーブ、海底障害物などの有無も同時に確認するとよい。基礎地盤の表面が砂地盤あるいは柔らかい粘性土層の場合は、流れや波浪の作用によって底質が移動し、海底面の標高が変動する可能性があるため、海底土の粒度組成等の調査に加えて流況調査等を実施することが望ましい。物理探査は調査エリア全体における海底地盤の堆積状態を連続的に捉えるために実施するものである。地盤ボーリング及びサンプリング、原位置試験及び室内試験は、地盤の構成や構造、地盤物性（物理的特性及び力学的特性等）を把握するために実施するものである。

##### (2) 調査方法

物理探査は、海底地盤面下の地質構造や地下水位を広範囲に把握するために行われるものであり、海底及び海底地盤面下の地層境界で反射した反射波を解析することで地質構造を把握する音波探査などがある。物理探査に用いる機材の選定は、調査エリアの水深と探査する海底地盤面下の深度により決定するとよい。物理探査で得られた結果は、ボーリングやサウンディングによる地盤調査結果（地層構成）と突合せを行う必要がある。

地盤調査は、基礎構造の構造形式、地盤特性などを考慮して調査目的に適した調査方法を選択するのがよい。港湾の施設の技術上の基準・同解説<sup>1)</sup>では、地盤調査に関する調査方法として、地盤の構成や構造、地盤物性（物理的特性及び力学的特性等）など調査目的別の調査方法が紹介されており、これを参考にすることができる。

地盤調査では、原位置試験を実施するため、また室内試験に必要な土質サンプルを採取するため、地盤ボーリングを必ず実施する必要がある。その場合は、サウンディング（標準貫入試験やコーン貫入試験（CPT））を併用してもよい。なお、付属書3では、コーン貫入試験による測定結果の評価事例を示しており、これを参考にすることができる。

### (3) 調査位置、間隔

調査は、原則として洋上風力発電設備の設置位置で実施するものとする。予備調査及び物理探査の結果から、地盤の構造や土質性状が類似すると判断される場合は、グルーピングによる評価を行ってもよい。その場合、グルーピングの規模に応じて調査数量を決定するのがよい。地盤条件が不均質であるか、あるいは非常に複雑な場合は、近接するいくつかの洋上風力発電設備でグルーピングすることが望ましい。なお、グルーピングを行う場合は、各グループで1か所以上の原位置試験及び室内試験を実施するのがよい。

多種類のサウンディング方法を併用するときは、それぞれの手法によって得られる情報のすり合わせができるように調査する。例えば、標準貫入試験とコーン貫入試験を併用する場合は、標準貫入試験を実施する箇所の近傍でもコーン貫入試験を実施して、標準貫入試験とコーン貫入試験のデータの突合せを行うのがよい。この時、例えば標準貫入試験から得られたN値とコーン貫入試験から得られた土質データを用いて算定したN値の間でばらつきが生じることが予想されるので、複数の位置でデータの突合せを行うことが望ましい。なお、Guidance Notes for The Planning and Execution of Geophysical and Geotechnical Ground Investigations for Offshore Renewable Energy Developments<sup>2)</sup>ではコーン貫入試験を実施した箇所の少なくとも10%以上の箇所で標準貫入試験とのデータの突合せを実施するのが望ましいとしている。

### (4) 調査深度

調査深度は、建設地点の地層及び構造物の形状に応じて設定する必要がある。以下では埋立地の液状化対策ハンドブック<sup>3)</sup>の考え方を紹介する。一般に、調査深度は、原則として支持層が確認できる深さまでに設定する。支持層の判断は、一概に決めることはできないが、N値から支持層が判断されることが多い。この場合、洋上風力発電設備等の支持構造物が杭基礎でない場合は、N値30以上、杭などにより支持層に期待する場合には、N値50以上を一応の支持層の目安としている。また、岩盤層に到達した場合は、少なくとも1mのコアを採取して、岩質を確認した上で調査を終了することが望ましい。

耐震検討を行う際の調査深度は、支持層に着目した調査深度とは一般に異なるので次の点を考慮して決定する。すなわち、支持力の検討を行う土層は比較的浅いところにあるのに対して、地震応答解析を行う場合、普通はそれよりもずっと深い層まで考慮する必要がある。工学的基盤の深度及び液状化検討層の深度の決め方は以下のとおりである。

#### 1) 工学的基盤の深度

せん断波速度 ( $S$  波速度:  $V_s$ ) が得られている場合は、400m/s以上の層を工学的基盤とする。ただし、その層以深で400m/s以下の層が現れないことを確認する必要がある。

液状化の検討では、地震による動的荷重に対する地盤の応答特性、せん断応力などが必要であり、そのため地震応答解析が行われる。この場合、地震波を入力するための工学的基盤層を確認しなければならないが、ここでの工学的基盤層とは、せん断波速度が400m/s以上の土層をいう。工学的基盤層に関して、港湾の施設の技術上の基準・同解説<sup>1)</sup>では工学的基盤層  $V_s=300\text{m/s}$  以上、発電用風力設備の技術基準の解釈では  $V_s=400\text{m/s}$  以上とされており、両者でその定義が異なるが、本基準解説では  $V_s=400\text{m/s}$  以上となる地層を工学的基盤層とすることにした。なお、せん断波速度が得られない場合、

岩盤層を工学的基盤層とすることもできるが、その場合は岩盤の性質などを踏まえて慎重に検討する必要がある。

## 2) 液状化検討層の深度

既往の地震による液状化事例の調査<sup>4)</sup>によると、地表面より深さ 20m 以深では地盤が液状化した事例はないと報告されているものの、地表面より深さ 20m 以深において液状化が発生しないという理論的かつ定量的根拠は現在までのところまだ明確になっていない。しかし、地表面より深さ 20m 以深では、有効上載圧が大きくなり、地震により発生する繰返しせん断応力が浅層部と同じであれば、液状化強度は有効上載圧に比例して大きくなる。また、このような圧力を受けている在来砂層が緩い堆積状態のまま現在に至っている可能性は小さいと推測されることから、液状化の予測・判定のための調査深度は地表面又は海底面より 20m の深さまでとすることが標準的である。ただし、20m 以浅において明らかに液状化しないと考えられる層があり、しかも、その層以深の土層も明らかに液状化しないと考えられる場合には、調査深度は 20m 以浅としてもよい。

## (5) 地形の変化特性に関する調査

洋上風力発電設備等の支持構造物の設計地盤標高を設定する際は、海底地盤面の標高の継続的な変動を把握する必要がある。その変動を把握する手法としては、定期的な横断測量の重ね書きや差分を使用する土量変化解析法が用いられる。なお、構造物の設置によって周囲の流況が変化することが予想される場合は、構造物設置後、継続的に海底地盤面の標高の継続的な変動を追跡調査することが望ましい。

## (6) 取得データ

地盤調査では、洋上風力発電設備等の支持構造物における設計の根拠として次のデータを取得するのがよい。

- ・地盤の構成や構造 : 基盤深度、層序、層厚
- ・物理的特性 : 単位体積重量、含水比、土粒子の密度、粒度、コンシステンシー
- ・力学的特性 : 強度パラメータ（一軸圧縮強さ、せん断強さ、せん断抵抗角）  
変形特性（変形係数）  
圧密特性（圧縮曲線、圧縮指数、圧縮曲線、圧密係数、体積圧縮係数、  
透水係数、過圧密比）
- ・動的変形特性 : せん断弾性係数、減衰定数、液状化特性、せん断波速度

## (7) 地盤条件の設定方法

地盤条件の設定にあたっては、適切な方法により行われた地盤調査及び土質試験の結果をもとに、その信頼性を適切に考慮する必要がある。各種地盤定数の取得方法や設計条件の設定においては、取得データのばらつきなどを適切に評価して設計値とするものとする。強度に関する地盤パラメータは、港湾の施設の技術上の基準・同解説<sup>1)</sup>等を参考に特性値を設定するのがよい。

## 参考文献

- 1) 日本港湾協会（平成 19 年 7 月）、港湾の施設の技術上の基準・同解説
- 2) Society for underwater technology (2014)、Guidance Notes for The Planning and Execution of Geophysical and Geotechnical Ground Investigations for Offshore Renewable Energy Developments
- 3) 運輸省港湾局監修 治岸開発技術研究センター（平成 9 年）、埋立地の液状化対策ハンドブック（改訂版）
- 4) Florin; V.A. and Ivanov (1961)、Liquefaction of saturated sandy soils, proc. of the 5th International Conference on soil Mechanics and Foundation Engineering

### 3.8 地震荷重

- (1) 洋上風力発電設備等の支持構造物に作用する地震荷重の評価に用いる地震波は、スペクトル適合波、観測波、サイト波とする。
- (2) スペクトル適合波、観測波は、「発電用風力設備に関する技術基準を定める省令の解釈について」に規定される稀に発生する地震動及び極めて稀に発生する地震動とする。
- (3) サイト波は、港湾の施設の技術上の基準・同解説に規定される港湾レベル1地震動とする。また、港湾における耐震強化施設の利用等に支障を及ぼす可能性のある地点に洋上風力発電設備等を設置する場合は、洋上風力発電設備等の支持構造物に作用する地震力は、港湾レベル2地震動を用いるものとする。

#### 【解説】

##### (1) 地震荷重の基本的な考え方

本基準解説で用いる地震波のうち、スペクトル適合波は「発電用風力設備の技術基準の解釈について」に基づいて設定することとした。観測波は風力発電設備支持物構造設計指針・同解説<sup>1)</sup>に基づいて設定することとした。サイト波は港湾の施設の技術上の基準・同解説<sup>2)</sup>に基づいて設定することとした。

##### (2) スペクトル適合波及び観測波

スペクトル適合波及び観測波は、以下に示す水平地震動及び鉛直地震動を用いるものとする。支持構造物の時刻歴解析を実施する際には、スペクトル適合波と観測波のそれぞれについて、少なくとも3波以上の地震波を用いる必要がある。

##### 1) スペクトル適合波

###### i) 水平地震動

工学的基盤面における水平地震動の基準化加速度応答スペクトルは、式(3.8.1)により求める。本基準解説では、「発電用風力設備に関する技術基準を定める省令の解釈について」に基づいて、稀に発生する地震動の基本最大加速度を64gal、極めて稀に発生する地震動の基本最大加速度を320galとすることとした。また、式(3.8.1)により求まる基準化加速度応答スペクトルでは、地震地域係数を乗じることとしている。地震地域係数は建築基準法第88条第1項で提示された値を用いるものとする。

$$S_{a0}(T, 0.05) = \begin{cases} a_0(1 + 9.375T) & (T \leq 0.16) \\ 2.5a_0 & (0.16 < T \leq 0.64) \\ 1.6a_0 / T & (0.64 \leq T) \end{cases} \quad (3.8.1)$$

ここで、

- $S_{a0}(T, 0.05)$  : 工学的基盤面での基準化加速度応答スペクトル (m/s<sup>2</sup>)、減衰比5%
- $a_0$  : 工学的基盤面での基本最大加速度
  - ・ 稀に発生する地震動 : 64gal (0.64m/s<sup>2</sup>)
  - ・ 極めて稀に発生する地震動 : 320gal (3.20m/s<sup>2</sup>)
- $T$  : 周期 (s)



## ii) 鉛直地震動

工学的基盤面における鉛直地震動の基準化加速度応答スペクトルは式(3.8.2)により求める。また、風力発電設備支持物構造設計指針・同解説<sup>1)</sup>に示される工学的基盤面における水平動に対する鉛直動スペクトルの比率を水平動の基準化加速度応答スペクトルに乗じて鉛直地震動の基準化加速度応答スペクトルを求めることもできる。

$$S_{a0}(T, 0.05) = \begin{cases} a_0(1 + 9.375T) \times 20 / 31 & (T \leq 0.1) \\ 2.5a_0 \times 1 / 2 & (0.1 < T \leq 0.64) \\ 1.6a_0 / T \times 1 / 2 & (0.64 \leq T) \end{cases} \quad (3.8.2)$$

ここで、

$S_{av}(T, 0.05)$  : 工学的基盤面での上下の基準化加速度応答スペクトル ( $m/s^2$ )、減衰比 5%

$a_0$  : 工学的基盤面での基本最大加速度

・ 稀に発生する地震動 : 64gal ( $0.64m/s^2$ )

・ 極めて稀に発生する地震動 : 320gal ( $3.20m/s^2$ )

$T$  : 周期 (s)

## 2) 観測波

観測波は、過去における代表的な観測地震波を用いるものとし、その最大速度振幅は、稀に発生する地震動で 0.25m/s、極めて稀に発生する地震動で 0.50m/s とする。また、スペクトル適合波と同様に、地震地域係数を考慮するものとする。観測波の詳細な設定方法は、風力発電設備支持物構造設計指針・同解説<sup>1)</sup>を参考にすることができる。なお、観測波を用いる場合は、地盤応答の影響を考慮せず海底面に直接地震波を入力するものとする。

## (3) サイト波

### 1) 港湾レベル 1 地震動

港湾レベル 1 地震動は、地震動の実測値をもとに、震源特性、伝播経路特性及びサイト特性を考慮して、確率論的時刻歴波形を適切に設定する。確率論的時刻歴波形とは、地震の発生確率を考慮した確率論的地震危険度解析により設定される地震動の時刻歴波形のことである。その設定にあたっては、地震動の周波数特性を適切に考慮するために、いずれの周波数成分においても再現期間が同一となる一様ハザードフーリエスペクトルに基づくことを標準とする。ここで、一様ハザードフーリエスペクトルの再現期間は 75 年とすることを標準とする。なお、地震動の詳細な設定方法については、港湾の施設の技術上の基準・同解説<sup>2)</sup>を参考にすることができる。また、国土交通省 国土技術政策総合研究所 港湾研究部 港湾施設研究室のホームページ (図-解 3.8.1) では、重要港湾及び地方港湾でのレベル 1 地震動を公開しており、これを参考にすることもできる。



図-解 3.8.1 港湾施設研究室ホームページ

(<http://www.ysk.nilim.go.jp/kakubu/kouwan/sisetu/sisetu.html>)

## 2) 港湾レベル 2 地震動

港湾レベル 2 地震動は、地震動の実測値、想定される地震の震源パラメータ等をもとに、震源特性、伝播経路特性及びサイト特性を考慮して、時刻歴波形を適切に設定する。

この地震動の設定にあたっては、次の A) から F) に掲げる想定地震の中から、それらの想定地震によりもたらされる地震動の最大振幅、周期、継続時間、構造物に与える影響の大きさ等を考慮して選定する。想定地震の選定にあたっては、中央防災会議や地震調査研究推進本部等の国の機関における調査の結果、又は地域防災計画等を踏まえて総合的に判断する必要がある。なお、港湾レベル 2 地震動は、鉛直方向の地震動を考慮しないものとする。

- A) 過去に大きな被害をもたらした地震の再来
- B) 活断層の活動による地震
- C) 地震学的あるいは地質学的観点から発生が懸念されるその他の地震
- D) 中央防災会議や地震調査研究推進本部など国の機関の想定地震
- E) 地域防災計画の想定地震
- F) M6.5 の直下地震

## 参考文献

- 1) 土木学会 (2010)、風力発電設備支持物構造設計指針・同解説
- 2) 日本港湾協会 (平成 19 年 7 月)、港湾の施設の技術上の基準・同解説

### 3.9 地盤の液状化・沈下

地震による地盤の液状化又は圧密沈下が想定される場合、あらかじめそれらに対する対応を検討するものとする。

#### 【解説】

#### (1) 地盤の液状化

##### 1) 液状化の対策

稀に発生する地震、極めて稀に発生する地震、港湾レベル1地震、港湾レベル2地震動などの地震によって生じる地盤の液状化は、地盤の剛性を低下させるほか、支持力を失うなど基礎に甚大な影響を及ぼすことが考えられる。液状化が生じることが判明した場合は、地盤の液状化が生じないように地盤改良などの液状化防止対策を施すか、液状化防止対策を施さない場合は地盤の液状化が生じても洋上風力発電設備等の安全性及び安定性が確保できる構造とする必要がある。なお、液状化対策を施さない場合は、液状化が生じる場合と生じない場合の両方について、安全性及び安定性を検証する必要がある。

##### 2) 液状化の予測

液状化の予測・判定法には、粒度とN値による方法や繰返し三軸試験結果を用いる方法などがある。粒度とN値による方法は簡易な方法であり、一般に、液状化の予測・判定法にあつては、これを使用することができる。粒度とN値による方法により予測・判定が困難な場合は、乱さない試料の繰返し三軸試験を実施するとともに地盤の地震応答計算を実施して、液状化の予測・判定を行うのがよい。液状化の判定方法は、埋立地の液状化対策ハンドブック<sup>1)</sup>や港湾の施設の技術上の基準・同解説の部分改訂<sup>2)</sup>を参考にすることができる。

##### 3) 地盤応答解析

地震時の地盤応答解析を実施する際は、実際の地盤内の現象を表すよう、地中の応力状態や地震動による作用の不規則性などを適切に考慮する必要がある。地震時の地中の応力状態を考慮する方法として、例えば、FLIP (Finite element analysis of liquefaction Program) のような地盤の非線形性を考慮した有効応力解析がある。これを用いる場合は、地盤データの感度分析や専門家へのヒアリング等を通じて、解析結果の妥当性を検証しておく必要がある。

##### 4) その他

波によって地盤の液状化が発生する可能性もあるため、必要に応じて適切な検討を行うものとする。

#### (2) 地盤の沈下

地盤の沈下は、粘性土地盤の上に荷重が作用することによって生じる現象である。地盤調査により、基礎地盤が粘性土であることが確認された場合には、沈下量を把握し、必要に応じて適切な対策を講じるものとする。地盤の沈下に関する検討方法については、港湾の施設の技術上の基準・同解説<sup>3)</sup>を参考にすることができる。

## 参考文献

- 1) 沿岸開発技術研究センター（平成9年）、埋立地の液状化対策ハンドブック
- 2) 日本港湾協会（平成24年8月）、港湾の施設の技術上の基準・同解説の部分改訂
- 3) 日本港湾協会（平成19年7月）、港湾の施設の技術上の基準・同解説

### 3.10 接岸荷重

船舶の接岸荷重は、対象船舶の諸元、洋上風力発電設備等の構造、接岸方法、接岸速度等を考慮して、適切に定めるものとする。

#### 【解説】

船舶の接岸荷重を考慮する際は、作業船などの船舶がボートランディングなどの付属設備に接岸する状態を考慮する。

#### (1) 作業船

接岸荷重を考慮する際は、洋上風力発電設備等への接岸を前提とした作業船などの船舶を対象とし、洋上風力発電設備等の施工時に用いる自己昇降式作業台船などの大型作業船及び設備への接岸を前提としない船舶は対象外とする。

#### (2) 接岸荷重の評価

接岸荷重は、対象船舶の諸元、当該施設の構造、接岸方法、接岸速度等をもとに、船舶の運動エネルギーを適切な手法により算出する必要がある。船舶の接岸に関連した運動エネルギーは、フェンダー、接岸設備、支持構造物、作業船の変形によって吸収されるものと仮定する。接岸荷重は、構造計算により荷重と変形の関係から吸収エネルギーを求め、運動エネルギーと等価な吸収エネルギーになる変形量に対応する荷重として求める。これらの荷重の詳細な算定方法については、港湾の施設の技術上の基準・同解説<sup>1)</sup>を参考にすることができる。なお、JIS C 1400-3<sup>2)</sup>では、作業船に関する情報が事前に入手できない場合の接岸荷重の考え方が示されており、これを参考に接岸荷重を設定してもよい。

#### 参考文献

- 1) 日本港湾協会（平成 19 年 7 月）、港湾の施設の技術上の基準・同解説
- 2) 日本規格協会（2014）、JIS C1400-3：風車－第 3 部：洋上風車の設計要件

### 3.11 固定荷重

ブレード、ナセル、タワー、下部構造、基礎等の構造物の自重による荷重を設定するものとする。

#### 【解説】

固定荷重は、ブレード、ナセル、タワー、下部構造、基礎等の構造物自体の重量や構造物上に常時固定されている装備品（ケーブル、梯子）の重量による荷重をいう。固定荷重は、実状に応じて正確に設定することを原則とし、実測値や風車メーカーから提供されている数値を用いるのがよい。

### 3.12 その他の荷重

(1) 積載荷重、(2) 積雪荷重、(3) 海水・着氷荷重、(4) 水圧、(5) 海中生物付着、(6) 温度変化による荷重、(7) 輸送時・施工時荷重の影響を考慮するものとする。

#### 【解説】

#### (1) 積載荷重

積載荷重は、洋上風力発電設備等のメンテナンス作業員やメンテナンス時に必要となる設備・機器類による荷重を総称したものである。積載荷重は、維持管理計画等を踏まえて、実際の作業で想定される値を設定することが望ましい。

#### (2) 積雪荷重

積雪荷重は、建築基準法施行令第86条に準拠して考慮するものとする。具体的には、一般の建築構造物の屋根に相当すると見なされるナセル上面への積雪を積雪荷重とし、積雪の単位荷重にナセルの水平投影面積及びその地方における垂直積雪量を乗じて求めるものとする。積雪荷重の単位体積重量については、原則として積雪量1cmごとに20 N/m<sup>2</sup>以上とする。

設計垂直積雪量は、特定行政庁が建設省告示第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て定められる数値とすることができる。また、当該区域又はその近傍の区域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、その値を設計垂直積雪量として定めることができる。なお、ナセル側面、ブレードやロータあるいはタワー、その他の部分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。

#### (3) 海水・着氷荷重

海水・着氷が発生すると予測されるサイトに設置する洋上風力発電設備等では、支持構造物の設計において海水・着氷荷重を考慮しなければならない。海水・着氷荷重の算定にあたっては、海水・着氷の性質を適切に評価するものとする。考慮すべき主な海水・着氷荷重には、移動氷から受ける荷重のほかに、水位変動を受ける着氷板からの荷重などが挙げられる。これらの荷重の算定にあたっては、氷厚や氷の破壊強度などのパラメータ設定、さらには支持構造物の形状(鉛直柱状断面や円錐傾斜断面)などを適切に考慮することが必要となる。なお、荷重の算定方法は、氷海域における海岸・海洋構造物設計マニュアル<sup>1)</sup>、JIS C 1400-3<sup>2)</sup>を参考にすることができる。また、荷重に関する荷重組み合わせは、2.1.2項「荷重の組み合わせ」表-2.1.2.2に従うものとする。

#### (4) 水圧

水圧は、洋上風力発電設備等の構造、周囲の地盤条件、潮位等を考慮して適切に設定するものとする。なお、水圧の詳細な設定方法については、港湾の施設の技術上の基準・同解説<sup>3)</sup>を参考にすることができる。地震時に洋上風力発電設備等の支持構造物に作用する動水圧は、支持構造物の構造型式を考慮して適切に設定する必要がある。動水圧の影響を考慮する方法としては、付加質量により動水圧の影響を考慮する方法を用いることができる。この付加質量は、地震時動水圧の影響を考慮するために下部構造躯体に付加する仮想の質量のことであり、この付加質量の運動によって生じる慣性力によって地震時動水

圧の影響を簡便にモデル化することができる。なお、API-RP2A-WSD<sup>4)</sup>では付加質量を計算する際に用いられる付加質量係数を1.0と設定しており、これを参考に付加質量を計算してもよい。

#### (5) 海中生物付着

一般に、海中部の部材には貝などの海中生物が付着する。この海中生物付着はマリングロスとも呼ばれる。海中生物付着により部材が波力を受ける面積、体積が見掛け上大きくなるため、沖合構造物など波力が支配的荷重と考えられる場合には、波力を算出する際の部材寸法に生物付着の厚みを考慮することが望ましい。海中生物付着の評価方法は、ISO19902<sup>5)</sup>及びジャケットマニュアル<sup>6)</sup>を参考にすることができる。設計に用いる海中生物付着の厚さ並びに付着面積当たりの重量は、洋上風力発電設備等の設置位置付近の構造物の生物付着厚を計測して決定すべきであるが、計測値がない場合には、通常38mm～50mm、80N/m<sup>2</sup>が目安となる。また、固定荷重を算出する際にも海中生物付着の重量を考慮することが望ましい。

#### (6) 温度変化による荷重

洋上風力発電設備等における気温変化の範囲は、建設地域の環境条件を考慮して設定することが望ましい。特に指定がない場合は、JIS C 1400-3<sup>2)</sup>で規定されている気温変化の範囲-20～+50℃を参考にすることができる。

#### (7) 輸送時・施工時荷重

洋上風力発電設備等の輸送、施工、アクセス、保守及びメンテナンス時に発生する荷重は、以下の項目を参考に実状を踏まえて設定することが望ましい。

- ・ 施工機材の重量
- ・ クレーン操作時の荷重
- ・ 作業船の係留荷重、接岸荷重

#### 参考文献

- 1) 寒地港湾技術研究センター（平成8年）、氷海域における海岸・海洋構造物設計マニュアル
- 2) 日本規格協会（2014）、JIS C1400-3：風車—第3部：洋上風車の設計要件
- 3) 日本港湾協会（平成19年7月）、港湾の施設の技術上の基準・同解説
- 4) American Petroleum Institute（2014）、API-RP2A-WSD 22nd Edition
- 5) International Organization for Standardization（2007）、ISO19902
- 6) 沿岸開発技術研究センター（平成12年）、ジャケット工法技術マニュアル



### 3.13 腐食作用

- (1) 自然状況等の諸条件に応じて、金属の腐食並びに腐食速度を適切に考慮するものとする。
- (2) 海底砂の移動による構造表面の摩耗作用（サンドエロージョン・コロージョン）等を考慮するものとする。

**【解説】**

(1) 鋼材の腐食

鋼材の平均干潮面直下部では激しい局部腐食が発生する可能性があるため、適切な方法により防食対策を施す必要がある。鋼材の防食対策では、平均干潮面以下の部分は電気防食工法、朔望平均干潮面以下1mの面より上の部分は被覆防食工法によるのが望ましい。鋼材の腐食速度は、腐食環境条件によって異なるので、当該施設の存する環境条件を考慮し、また、その付近の過去の事例や類似の条件下での調査結果を参考にして適切に決定する必要がある。港湾の施設の技術上の基準・同解説<sup>1)</sup>では、鋼材の腐食速度分布及び腐食速度の標準値を図-解 3.13.1 及び表-解 3.13.1 のように設定しており、これらを参考に設定することができる。

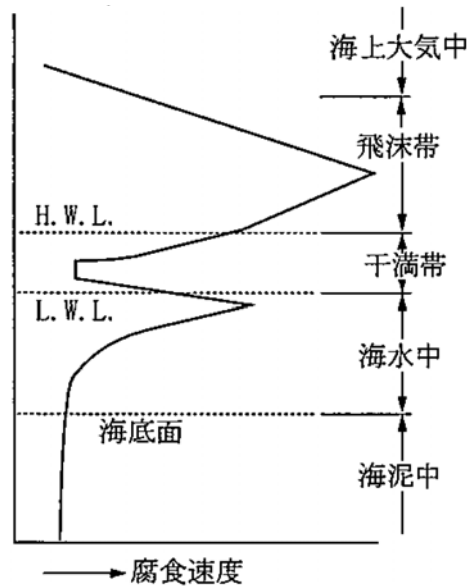


図-解 3.13.1 鋼材の腐食速度分布<sup>1)</sup>

表-解 3.13.1 鋼材の腐食速度の標準値<sup>1)</sup>

腐食環境		腐食速度 (mm/年)
海側	H.W.L.以上	0.3
	H.W.L.～L.W.L.-1mまで	0.1～0.3
	L.W.L.-1m～海底部まで	0.1～0.2
	海底泥層中	0.03
陸側	陸上大気中	0.1
	土中 (残留水位以上)	0.03
	土中 (残留水位以下)	0.02

## (2) 構造表面の摩耗作用 (サンドエロージョン・コロージョン)

海底面近傍の基礎部分が砕波帯内に設置される場合、波浪の流れに伴う海底砂の移動によって生ずる部材表面の摩耗作用 (サンドエロージョン・コロージョン) を受けるため、対策を行う必要がある。この摩耗速度は、表-解 3.13.1 に示される鋼材の腐食速度よりも大きくなることがあるので、この影響を適切に考慮する必要がある。例えば、防砂堤に鋼矢板を使用した場合、サンドエロージョンによって砂面直上部の平均腐食速度が 1.25~2.39mm/年となった例<sup>2)</sup>もある。なお、砂面の上下変動が少ないときには、砂面直上部に磨耗箇所が限定されるため、平均腐食速度はこの値より大きくなると言われている。一方で、サンドエロージョン・コロージョンによる腐食速度は 1mm/年という報告<sup>3)</sup>や、電気防食がサンドエロージョン・コロージョンに対して防食効果のあることが認められるという報告<sup>1)、4)、5)、6)</sup>もあるため、洋上風力発電設備等の設置位置の実状にあわせて適切に平均腐食速度を設定するのがよい。

## 参考文献

- 1) 日本港湾協会 (平成 19 年 7 月)、港湾の施設の技術上の基準・同解説
- 2) C.W.Ross (1949), Deterioration of steel sheet pile groins at Palm Beach, Florida, Corrosion, Vol.5 No.10, pp.339-342
- 3) Culbertson W.Ross (May. 1944), Experimental steel pile, Palm Beach, Florida/ Corps of Engineers Washington, D. C.
- 4) 阿部正美他 (Dec. 1998)、波浪海域に位置する鋼構造物の電気防食法に関する現地試験、港湾技術資料 No. 921
- 5) 山路徹他 (2016 年 6 月)、長期海洋暴露試験に基づく鋼管杭の防食工法の耐久性評価に関する研究 (30 年経過時の報告)、港湾空港技術研究所 資料 No.1324
- 6) 沿岸技術研究センター (2009 年)、港湾鋼構造物防食・補修マニュアル

### 3.14 材料

支持構造物に使用する材料は、作用、劣化、設計供用期間、形状、施工性、経済性、環境に及ぼす影響等を考慮して、適切な材料を選定する。

#### 【解説】

##### (1) 材料の選定

適切な材料の選定に当たっては、JIS規格、電気事業法、港湾法、その他の関連規定等に準拠することを基本とし、その品質及び耐久性を適切に考慮する必要がある。主な材料としては鋼材、コンクリート、石材等が挙げられるが、港湾工事共通仕様書および港湾の施設の技術上の基準・同解説に規定する材料、発電用風力設備支持物に用いるものとして2014年以前に国土交通大臣認定を取得した材料、あるいは平成12年建設省告示第1446号に適合する材料については、安全性を確保するために必要な品質を有するものとみなすことができる。

##### (2) 特殊な材料の取扱

海洋構造物に使用される鋼材の内、一般的な鋼材とは異なる特別な仕様（超高強度、極厚、高靱性など）が求められる材料、鋼部材の接合部で使用する高強度グラウト材等の特殊な材料については、第三者機関によりJIS規格と同等又はそれ以上の安全性を有していることが承認されるか、あるいは電気事業法及び港湾法の各法に基づく技術基準への適合性を確認する性能評価を受けなければならない。

電気事業法及び港湾法の各法に基づく技術基準への適合性を確認する性能評価においては、化学成分、機械的性質、さらに製造プロセスにおける品質管理体制等、必要なデータを揃えなければならない。

##### (3) 材料の物性値

材料の物性値とは、強度、単位体積重量、摩擦係数等のことである。ここで、材料の物性値の設定に当たっては、JIS規格による規格値又はその他の信頼性の高い品質データをもとに、その物性値を適切に設定しなければならない。さらに、材料の物性値及び断面諸元の設定に当たっては、環境作用による材料の劣化等を適切に考慮しなければならない。また、施設の部材の照査に当たっては、これらの物性値を適切に設定しなければならない。

## 第4章 洋上風力発電設備等の設計

### 4.1 構造解析

#### 4.1.1 風及び波を考慮するモデル

- (1) 基礎、下部構造、タワー及び風車(ロータナセル・アセンブリ)からなる洋上風力発電設備について、荷重及び荷重効果の計算を実施することを基本とする。
- (2) 荷重及び荷重効果の計算は、該当する外部条件の組合せに対して洋上風力発電設備の構造の動的応答を適切に考慮した方法を用いて行わなければならない。

#### 【解説】

##### (1) 解析モデル

支持構造物の動的特性及び海洋環境条件が風車(ロータナセル・アセンブリ)の構造的健全性に影響をおよぼす可能性があるため、基礎、下部構造、タワー及び風車(ロータナセル・アセンブリ)からなる構造をモデル化することを基本とする。下部構造、基礎、タワーは3次元ないしは2次元骨組みモデル・ソリッドモデル等とし、環境条件作用時の振動モードを適切に評価できる構造モデルとし、例えば、暴風時の解析においては、風と波を同時に作用させた解析を実施することが基本となる。

風車全体構造モデル及び解析モデルの詳細は以下のとおりである。

- 1) 風車全体構造モデルのうち、風車は空力弾性モデルとする。空力弾性モデルの設定に際して、風車の諸元、構造モデル、空力モデル、ロータ不均衡、パワートレイン及び制御モデルは、風車メーカーが提示するものを用いる等、適切に設定するものとする。
- 2) 風車全体構造モデルと環境条件(風、波、地盤等)を定義し解析モデルを構築する。図-解 4.1.1 に示すとおり、風車全体構造と環境条件を一体の解析モデルとして解くことが基本である。なお、解析手法として、風車・タワーと下部構造・基礎を分けてモデル化する手法もあるが、風・波に対する応答は一体の解析モデルで解く場合とほぼ等価とする必要がある。図-解 4.1.2 にはモデルを分離した際の風や波に対する効果の取扱いや両モデル間での情報のやり取りを示す。下部構造・基礎の取扱いについては、下部構造・基礎を等価な特性行列(図-解 4.1.2 の中で示されている例)に置き換える場合と等価な代替構造(図-解 4.1.3)に置き換える場合がある。なお、下部構造・基礎が十分に剛である場合、風車・タワーと下部構造・基礎の連成影響が無視できる程度に小さくなることもあり、その場合は両者を完全に分離して解く場合もある。
- 3) 構造解析を実施するにあたっては、サイトの地盤の特性も適切に考慮する必要がある。地盤については、海底変形、洗掘及びそのほかの海底の時間的变化も含めて考慮する。なお地盤の剛性低下は風車全体系の固有振動数に影響を与えるため、設計において注意が必要である。重力式基礎はSRモデルにより地盤剛性を考慮することができる。

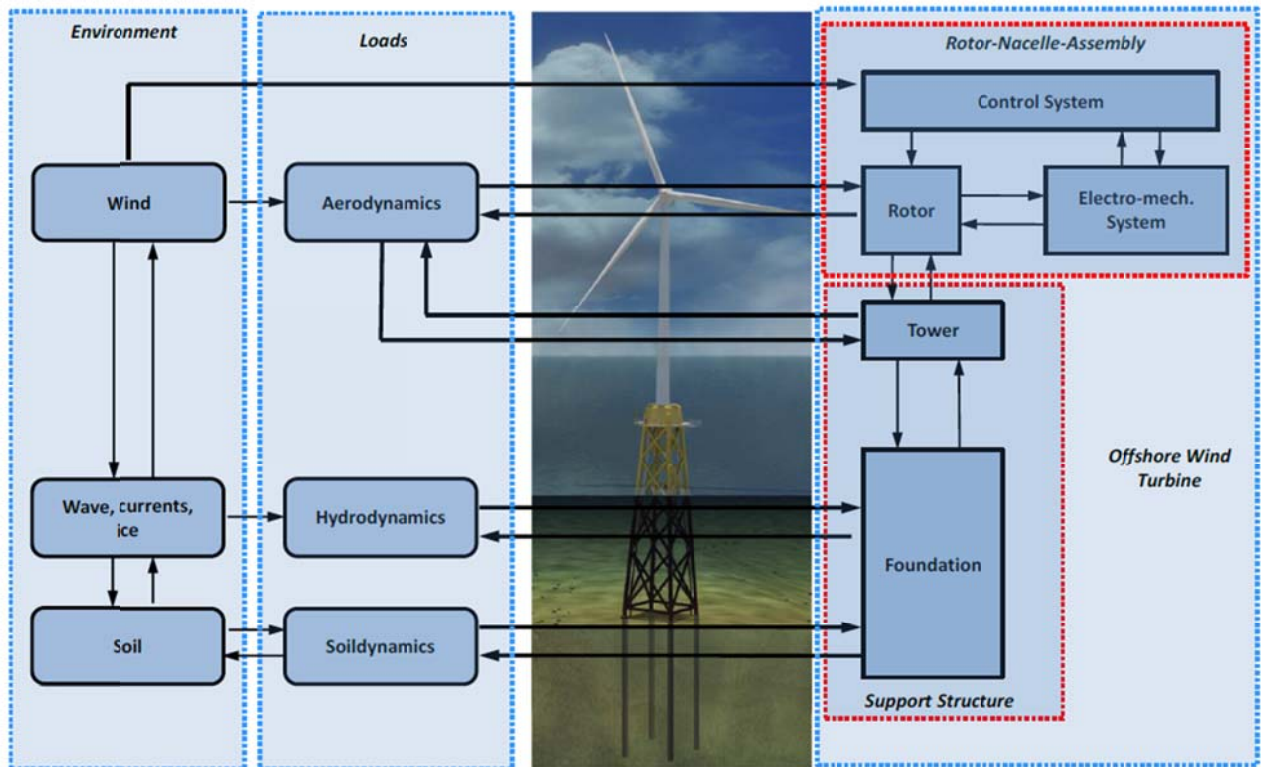


図-解 4. 1. 1 一体モデルの例

(出典) Offshore Wind Turbine Foundation Design, Passon, Patrik; Branner, Kim; Larsen, Søren Ejling; Hvenekær Rasmussen, Jørgen

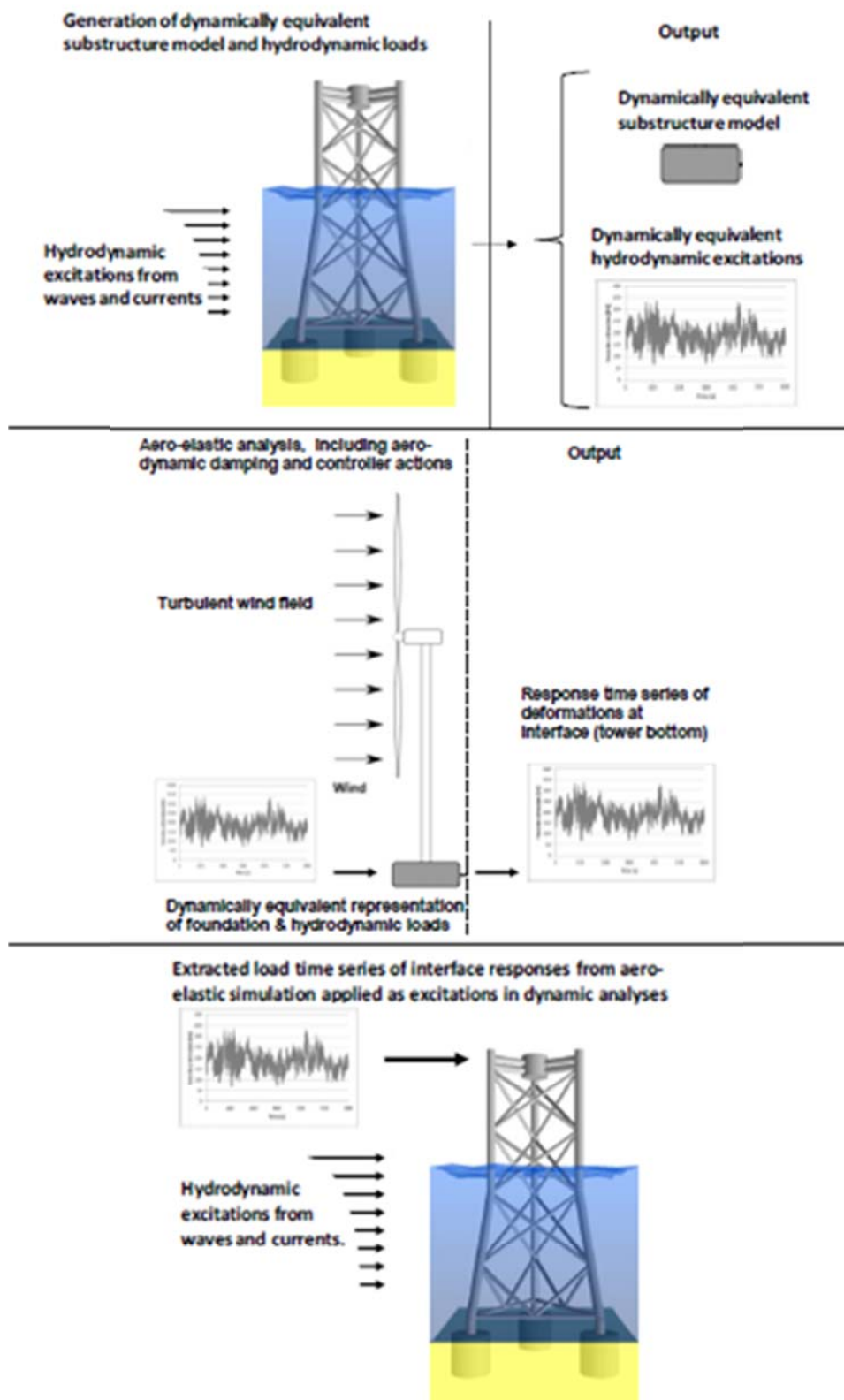


図-解 4.1.2 等価分離解法によるステップ(下部構造側を等価な特性行列で置き換える場合)  
 (出典) Offshore Wind Turbine Foundation Design, Passon, Patrik; Branner, Kim; Larsen, Søren  
 Ejling; Hvenekær Rasmussen, Jørgen

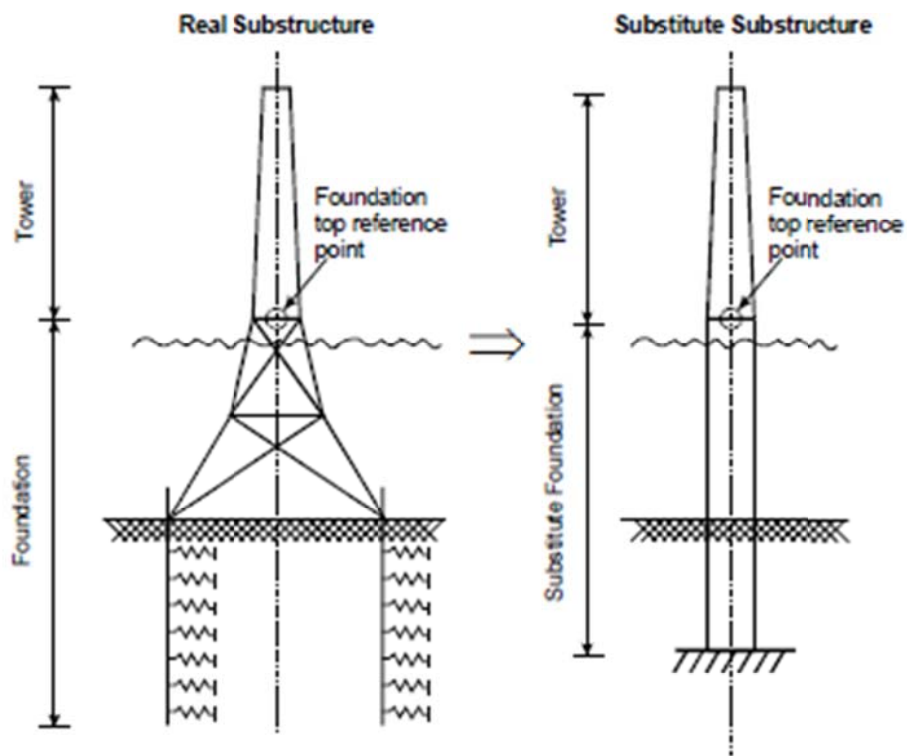


Fig. 3: Creation of the substitute model

図-解 4.1.3 下部構造以下を等価な代替構造に置き換える例

(出典) Design and load calculations for offshore foundations of a 5MW turbine; Marc Seidel他

#### 4.1.2 地震時の荷重評価

2.1 節に定める設計荷重組み合わせにしたいが、地震時の荷重評価では、時刻歴応答解析の荷重効果に、年平均の波・風の荷重効果をたし合わせる解法により求める。

##### 【解説】

2.1 節「外力に対して安全な構造」に定める地震時の荷重組み合わせは、地震時の効果を適切に評価できるモデル・手法にて算出した荷重効果に、別途、風や波の効果を適切に評価できるモデル・手法にて算出した荷重効果を線形にたし合せて求めてよい。具体的には以下のとおりである。

- 1) 地震時の荷重効果は、地震波を対象とした時刻歴応答解析により求める。
- 2) 地震時に組合せる波・風の荷重効果は、1)の時刻歴応答解析とは別に、時刻歴応答解析を実施して求める。
- 3) 上記 1)、2)それぞれの解析で求めた荷重効果の最大値をたし合せて地震時の設計荷重効果とする。

なお、1)の地震時の荷重効果は、3.8 節「地震荷重」や港湾の施設の技術上の基準・同解説<sup>1)</sup>や風力発電設備支持物構造設計指針・同解説<sup>2)</sup>により求めることができる。

#### 参考文献

- 1) 日本港湾協会（平成 19 年 7 月）、港湾の施設の技術上の基準・同解説
- 2) 土木学会（2010）、風力発電設備支持物構造設計指針・同解説



## 4.2 荷重抵抗係数設計法による設計

### 4.2.1 照査手法

荷重抵抗係数設計法により、支持構造物の安全性や安定性を照査する場合は、設計荷重効果  $S_d$  が設計耐力  $R_d$  に対して、式(4.2.1.1)を満たす方法により行うものとする。

$$S_d \leq R_d \cdots \cdots (4.2.1.1)$$

ここで、設計荷重効果  $S_d$  は特性荷重効果  $S_k$  に所定の荷重係数  $\gamma_f$  を乗じることで求まり、設計耐力  $R_d$  は部材耐力の特性値  $R_k$  に抵抗係数  $\gamma_m$  を考慮することで求まる。これにより、式(4.2.1.1)は式(4.2.1.2)のように展開することができる。

$$\gamma_f \times S_k \leq \frac{1}{\gamma_m} \times R_k \cdots \cdots (4.2.1.2)$$

ここに、

$\gamma_f$  : 荷重係数 (4.2.2 項参照)

$S_k$  : 特性荷重効果

$\gamma_m$  : 抵抗係数 (4.2.3 項参照)

$R_k$  : 部材耐力の特性値

【解説】

(1) 設計荷重効果の算出方法

設計荷重効果  $S_d$  の求め方について、JIS C1400-3<sup>1)</sup> では方法 1 と方法 2 の 2 つの方法が示されている。方法 1 は、特定の荷重  $F$  に対する荷重の特性値  $F_k$  を構造解析に入力し、そこから求まる解析結果（ここでは、特性荷重効果  $S_k$  とする）に荷重係数  $\gamma_f$  を乗ずることで設計荷重効果  $S_d$  を求める方法である。図-解 4.2.1 に方法 1 の計算の流れを示す。

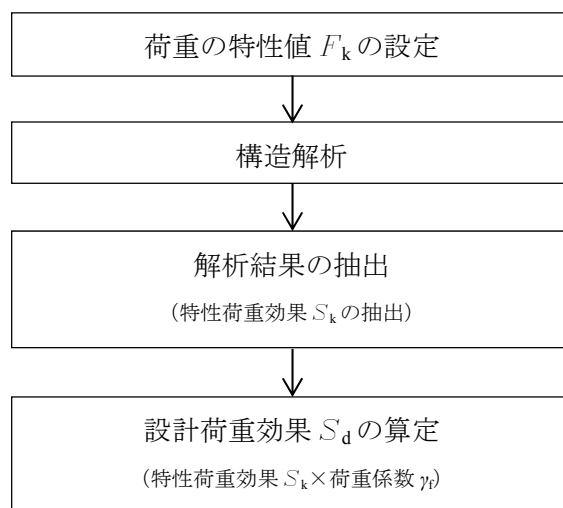


図-解 4.2.1 設計荷重効果  $S_d$  の計算方法 (方法 1)

方法 2 は、特定の荷重  $F$  に対する荷重の特性値  $F_k$  に荷重係数  $\gamma_f$  を乗じて設計荷重  $F_d$  を求め、それを構造解析に入力することで、設計荷重効果  $S_d$  を求める方法である。図-解 4.2.2 に方法 2 の計算の流れを示す。

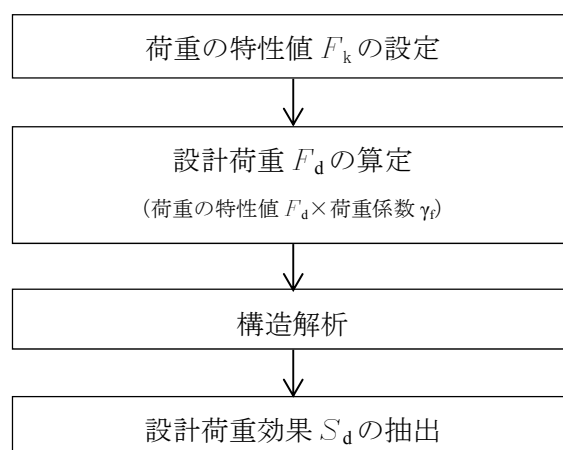


図-解 4.2.2 設計荷重効果  $S_d$  の計算方法 (方法 2)

(2) 方法 1 と方法 2 の使い分け

以下に方法 1 と方法 2 の使い分けに関する基本的な考え方<sup>1)</sup>を示す。

- 1) 動的応答を適切に求める必要がある場合は、方法 1 を用いて設計荷重効果を求めるものとする。
- 2) 部材や地盤の非線形性、幾何学的非線形性、その両方を適切に求める必要がある場合は、方法 2 を用いて設計荷重効果を求めるものとする。
- 3) 一般に、方法 1 は、RNA、タワー、下部構造、基礎からなる全体構造解析モデルを用いて、風車に作用する荷重から支持構造物の設計荷重効果を計算する場合に適用する (図-解 4. 2. 3)。
- 4) 一般に、方法 2 は、下部構造、基礎からなる部分構造解析モデルを用いて、タワー基部の荷重効果を境界条件として、支持構造物の設計荷重効果を計算する場合に適用する (図-解 4. 2. 4)。

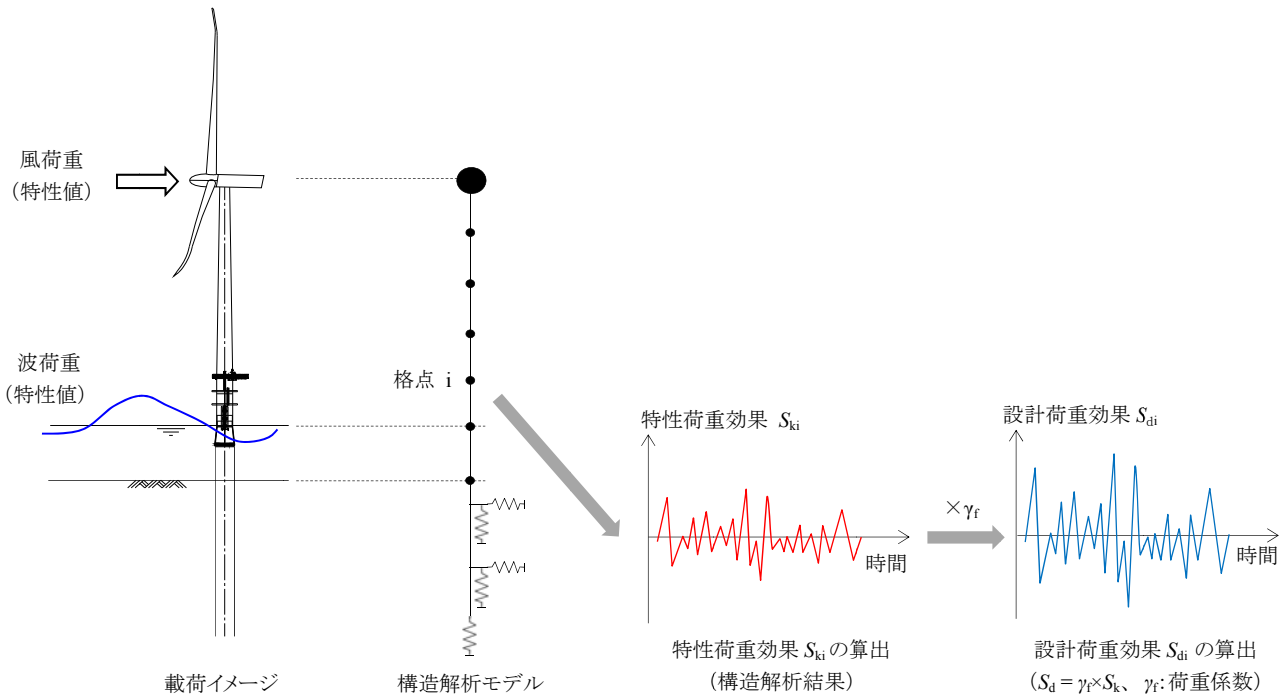


図-解 4. 2. 3 全体構造解析モデルを用いる場合の設計荷重効果の算出例 (方法 1)

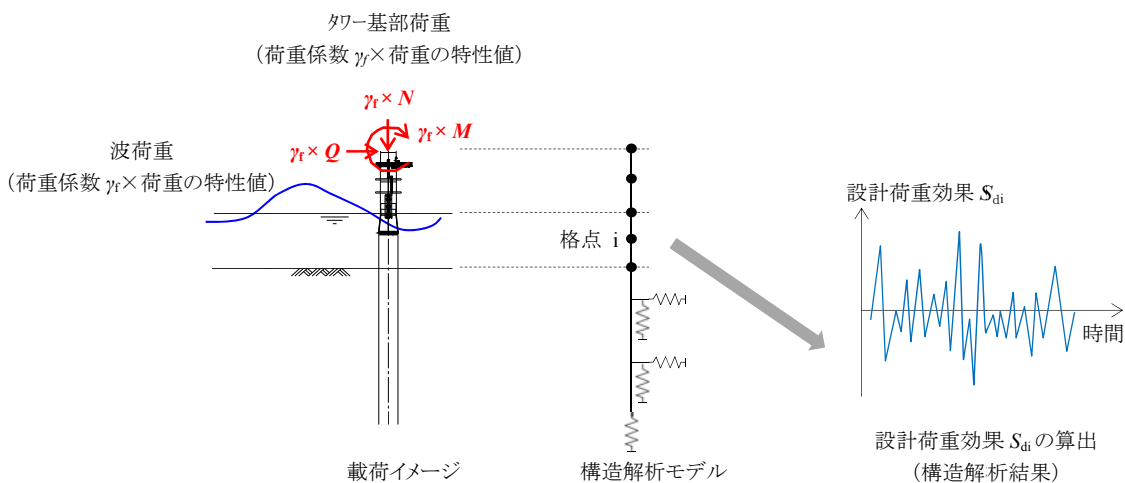


図-解 4. 2. 4 部分構造解析モデルを用いる場合の設計荷重効果の算出例 (方法 2)

参考文献

- 1) 日本規格協会 (2014)、JIS C1400-3: 風車—第3部: 洋上風車の設計要件

#### 4.2.2 荷重係数 $\gamma_f$

洋上風力発電設備等の支持構造物の安全性・安定性の照査に用いる荷重係数  $\gamma_f$  は、荷重に関する様々な不確実性の要因を考慮して適切に設定する。

##### 【解説】

##### (1) 荷重係数の基本的な考え方

荷重係数は、次の内容を考慮して設定するものとする。

- ・荷重の特性値の不確かさ
- ・荷重モデルの不確かさ

##### (2) 荷重係数の設定

表-解 4.2.1 に、短期荷重及び疲労荷重の照査に用いる荷重係数を示す。これらの荷重係数は、JIS C1400-3<sup>1)</sup>に基づいて設定した。表中に示すN、Aは、JIS C1400-3<sup>1)</sup>に規定される通常状態、異常状態に対応するものであり、2.1.2項に示す荷重組み合わせにしたがって使い分ける必要がある。なお、本基準解説で独自に設定する荷重組み合わせ（表-2.1.2.3 参照）については、荷重係数は設定しないものとする。

表-解 4.2.1 荷重係数  $\gamma_f$

	短期荷重	疲労荷重
タワー	通常 (N) : 1.35 <sup>注1</sup> 異常 (A) : 1.10	1.00
下部構造		
基礎		

注1：DLC1.1における荷重係数は、1.25とする。

##### 参考文献

- 1) 日本規格協会 (2014)、JIS C1400-3: 風車—第3部：洋上風車の設計要件

#### 4.2.3 抵抗係数 $\gamma_m$

洋上風力発電設備等の支持構造物の安全性・安定性の照査に用いる抵抗係数  $\gamma_m$  は、材料に関する様々な不確実性の要因を考慮して適切に設定する。

##### 【解説】

抵抗係数は、下記に示す要因を考慮して適切に設定するものとする。

- ・材料強度の特性値の不確かさ
- ・部材耐力の不確かさ
- ・幾何学的パラメータにおける不確かさ
- ・構造物の材料物性と試験で測定した材料物性との間の関係の不確かさ

抵抗係数は、JIS C1400-1<sup>1)</sup>やISOの海洋構造物設計規格、その他の一般に認知された海洋設計規格にしたがって設定することが基本となるが、その抵抗係数を用いる照査式の適用範囲や対象とする支持構造物の構造形式などを踏まえて適切に設定する必要がある。なお、上記の規格を参考に抵抗係数を設定する場合は、照査に用いる材料強度や耐力の特性値を評価する公式も、同じ規格のものを使用しなければならない。付属書-6は、JIS C1400-1<sup>1)</sup>やISOの海洋構造物設計規格、その他の一般に認知された海洋設計規格に基づく抵抗係数の設定例を示したものであるが、設計に用いる際には前述の通り適切に設定する必要がある。

##### 参考文献

- 1) 日本規格協会 (2017)、JIS C1400-1: 風車-第1部: 設計要件

### 4.3 許容応力度設計法による設計

#### 4.3.1 照査手法

(1) 許容応力度設計法により支持構造物の安定性・安全性を照査する場合は、発生応力度  $\sigma$  が許容応力度  $\sigma_a$  に対して、式(4.3.1.1)を満たす方法により行うものとする。

$$\sigma \leq \sigma_a \quad \dots \dots \dots (4.3.1.1)$$

(2) (1) の代わりに、設計荷重効果  $S_d$  が部材耐力の特性値  $R_k$  を安全率  $f_s$  で除した値に対して、式(4.3.1.2)を満たす方法により行うものとしてもよい。

$$S_d \leq R_k / f_s \quad \dots \dots \dots (4.3.1.2)$$

ここに、

- $\sigma$  : 設計荷重効果から算出される部材応力度
- $\sigma_a$  : 許容応力度
- $S_d$  : 設計荷重効果
- $R_k$  : 部材耐力の特性値
- $f_s$  : 安全率

#### 【解説】

本基準解説において、長期荷重、稀に発生する地震、港湾レベル 1 地震動の設計は、風力発電設備支持物構造設計指針・同解説<sup>1)</sup> や港湾の施設の技術上の基準・同解説(平成 11 年版)<sup>2)</sup> に基づき安全性及び安定性の照査を実施することとしている。これらの基準では許容値が示されている場合と安全率が示されている場合が混在していることから、式(4.3.1.1)と式(4.3.1.2)を併記して、照査項目に応じて適宜使い分けるものとした。

#### 4.3.2 許容応力度及び安全率の設定

洋上風力発電設備等の支持構造物の安全性及び安定性の照査に用いる許容応力度及び安全率は、荷重や材料に関する様々な不確実性の要因を考慮して適切に設定する。

##### 【解説】

許容応力度及び安全率は、下記に示す要因を考慮して適切に設定するものとする。

- ・荷重の特性値の不確かさ
- ・荷重モデルの不確かさ
- ・材料強度の特性値の不確かさ
- ・部材耐力の不確かさ
- ・幾何学的パラメータにおける不確かさ
- ・構造物の材料物性と試験で測定した材料物性との間の関係の不確かさ

許容応力度及び安全率は、風力発電設備支持物構造設計指針・同解説<sup>1)</sup>や港湾の施設の技術上の基準・同解説（平成11年版）<sup>2)</sup>にしたがって設定することが基本となるが、その許容応力度及び安全率を用いる照査式の適用範囲や対象とする支持構造物の構造形式などを踏まえて適切に設定する必要がある。なお、上記の基準・指針を参考に抵抗係数を設定する場合は、照査に用いる材料強度や耐力の特性値を評価する公式も、同じ基準・指針のものを使用しなければならない。付属書-7、8は、風力発電設備支持物構造設計指針・同解説<sup>1)</sup>や港湾の施設の技術上の基準・同解説（平成11年版）<sup>2)</sup>に基づく許容応力度及び安全率の設定例を示したものであるが、設計に用いる際には前述の通り適切に設定する必要がある。

##### 参考文献

- 1) 土木学会（2010）、風力発電設備支持物構造設計指針・同解説
- 2) 日本港湾協会（平成11年）、港湾の施設の技術上の基準・同解説



#### 4.4 タワーの設計

- (1) 基準解説では鋼製円筒形モノポール支持式を対象とする。
- (2) タワーの安全性の照査は、(3)～(6)にしたがって行うものとする。
- (3) 短期荷重の作用によりタワーに発生する断面力や応力度が4.2節の規定を満足すること。
- (4) 稀に発生する地震動、港湾レベル1地震動の作用によりタワー構造の部材に発生する応力度が、4.3節の規定を満足すること。
- (5) 極めて稀に発生する地震動、港湾レベル2地震動及び設計津波の作用により支持構造物が倒壊、崩壊しないこと。
- (6) 風、波荷重などの繰返し作用による疲労の影響を考慮すること。

##### 【解説】

##### (1) 適用範囲

本基準解説は、タワー形式として鋼製円筒形モノポール支持式を対象としており、トラス支持式や支線支持式は対象外としている。タワーの構造部材は、主にタワー筒身、筒身フランジ継手部、開口部及びベースプレート(アンカーボルト方式の接合部の場合でT型フランジの場合)からなる。

##### (3) 短期荷重が作用する場合の照査

短期荷重が作用する場合のタワーの安全性は、タワーに生じる断面力あるいは応力度を照査することにより確認するものとする。断面力あるいは部材応力度の照査は、4.2節「荷重抵抗係数設計法による設計」にしたがう必要がある。

##### (4) 稀に発生する地震動、港湾レベル1地震動が作用する場合の照査

稀に発生する地震動、極めて稀に発生する地震動、港湾レベル1地震動が作用する場合のタワーの安全性は、タワー構造を構成する部材の断面力あるいは応力度を照査することにより確認するものとする。断面力あるいは部材応力度の照査は、4.3節「許容応力度設計法による設計」にしたがう必要がある。

##### (5) 極めて稀に発生する地震動、港湾レベル2地震動、設計津波の作用時の安全性の照査

極めて稀に発生する地震動、港湾レベル2地震動、設計津波の作用時の安全性の照査はタワーが倒壊・崩壊しないことを確認するものとする。極めて稀に発生する地震動の作用時に対する安全性の照査は、表-解 2.1.1.8 に示すように許容応力度設計法とする。設計津波の作用時に対する安全性の照査は、表-解 2.1.1.8 に示すように許容応力度設計法あるいは性能照査のいずれかとする。許容応力度設計法とする場合の照査は、4.3節「許容応力度設計法による設計」にしたがう必要がある。性能照査を行う場合、材料非線形性及び大変形を考慮した解析によって実構造の挙動を適切に評価する必要がある。ただし、タワーは静定のカンチレバー構造であり、塑性エネルギーが他の部材に流れないため、応力や変形の評価は適切に行う必要がある。なお、港湾レベル2地震動の作用時に対する安全性の照査は、性能照査とする。

##### (6) 疲労照査

疲労損傷について、支持構造物のシステム及び部品の設計耐力は、ISOの海洋構造物設計規格又はその

ほかの一般に認知された海洋構造物設計規格を基本として、適切に設定する必要がある。疲労設計耐力、それに関連した材料強度及び／又は耐力の特性値、並びにそれらに関連した材料及び／又は耐力の安全率を評価する照査式は、上記と同じ規格のものを用いなければならない。なお、JIS C1400-3<sup>1)</sup>に記載されている一般に認知された洋上風車設計基準・ガイドラインは以下のとおりとなっている。

a) ジャーマンロイド風力エネルギー社、規則及び指針：IV－工業サービス、Part 2－洋上風車の認証に関する指針<sup>2)</sup>

b) DNV 洋上標準、DNV-OS-J101 洋上風車構造の設計<sup>3)</sup>

また、タワーの設計耐力は、JIS C1400-1<sup>4)</sup>の7.6.3によって求めることができる。

疲労照査は、4.2節「荷重抵抗係数設計法による設計」にしたがう必要があり、照査対象となる溶接部の疲労等級、環境条件に応じて適切な疲労曲線を選定するものとする。疲労照査方法の事例として、関連規格における疲労曲線や疲労安全率の考え方を、付属書9に示す。

#### 参考文献

- 1) 日本規格協会 (2014)、JIS C1400-3：風車－第3部：洋上風車の設計要件
- 2) Germanischer Lloyd (2010), GL Guideline for the certification of wind turbines
- 3) DNV GL (2016), DNVGL-ST-0126
- 4) 日本規格協会 (2017)、JIS C1400-1：風車－第1部：設計要件

## 4.5 モノパイル構造の設計

### 4.5.1 構造解析の基本

モノパイル構造の構造解析は、海底面以深の杭及び地盤の作用を考慮した骨組解析や FEM 解析等により適切に実施する。

#### 【解説】

##### (1) 構造形式

モノパイル構造は、図-解 4.5.1に示すように地盤の水平方向の支持機構により風や波などの荷重に抵抗する構造であり、単一部材による支持機構のため、杭と地盤の相互作用が全体の挙動に大きく影響する。したがって、海底面以深の杭を含めた骨組解析やFEM解析等により構造解析を行う必要がある。

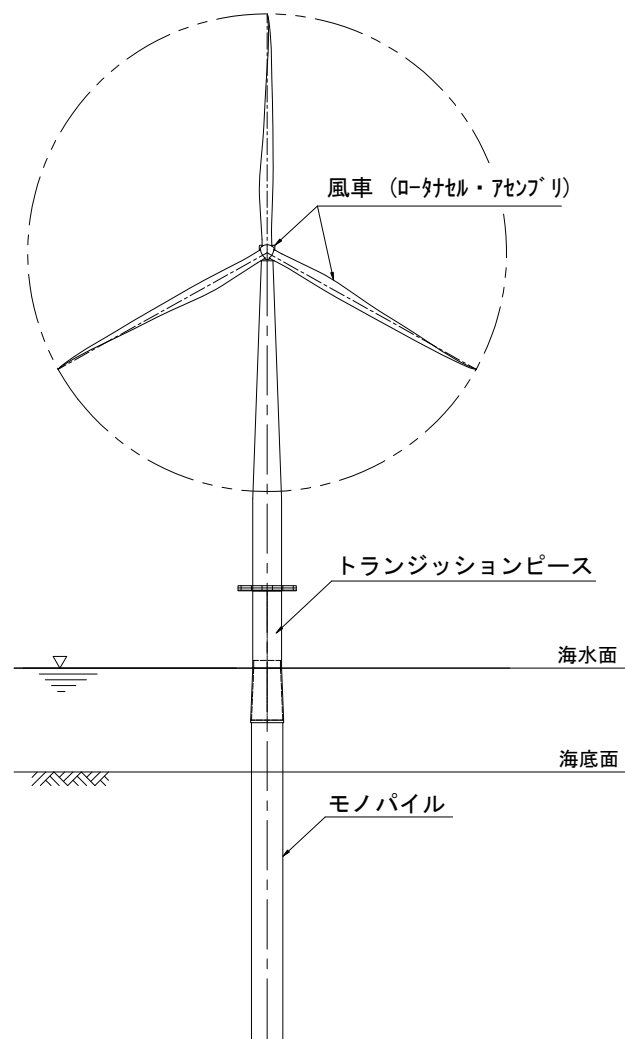


図-解 4.5.1 モノパイル構造

## (2) 構造解析モデル

モノパイル構造の構造解析モデルは、風や波の作用方向を考慮することができるよう3次元モデルを用いるのが望ましいが、2次元モデルとする場合は、安全側の評価となるような風や波の組み合わせを考慮する必要がある。図-解 4.5.2に、構造解析モデルの例を示す。

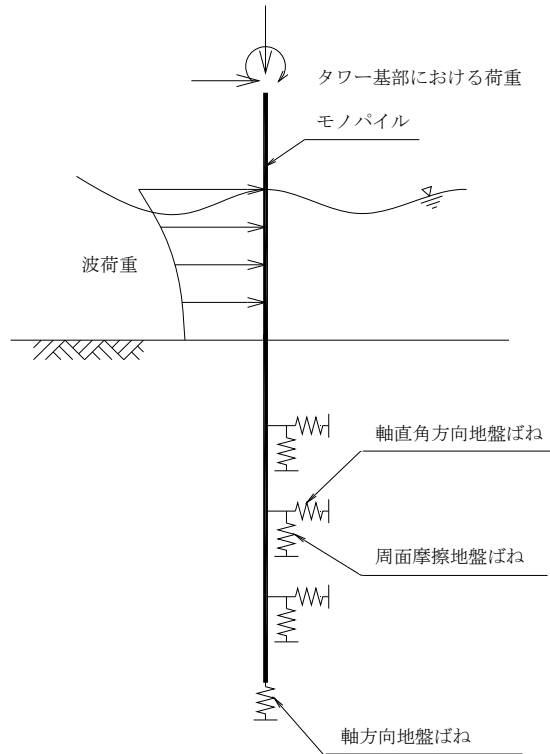


図-解 4.5.2 モノパイル構造の構造解析モデルの例

## (3) 地盤ばね

杭周辺の地盤ばねのモデル化にあたっては、地盤調査結果から得られた地層構成を考慮し、杭軸方向に杭体及び地盤を分割するとともに、各要素における地盤反力と変位量の間を関係を設定することで、杭-地盤間の相互作用を表現するのがよい。

この地盤反力と変位量の間については数多くの提案がなされているが、構造物の特性に応じて適切なモデル化を行う必要がある。非線形域まで変位を許容する場合には、地盤反力と変位量の間を関係の非線形性を考慮できるモデルを選定するのがよい。例えば、杭軸直角方向地盤ばねは、API RP2A WSD<sup>1)</sup>や港研方式<sup>2)</sup>に、その設定方法が紹介されている。また、杭軸方向の先端ばね、周面ばねの算定は、API RP2A WSD<sup>1)</sup>や鉄道構造物等設計標準・同解説（基礎構造物）<sup>3)</sup>等に、その設定方法が紹介されている。また、地盤ばねを設定する際は、必要に応じて風荷重や波荷重などの水平荷重による繰返し载荷に伴う地盤の剛性低下を適切に評価する必要がある。API RP2A GEO<sup>4)</sup>、港湾の施設の技術上の基準・同解説<sup>5)</sup>および菊池の研究<sup>6)</sup>に、その評価方法が紹介されている。ただし、これらの事例を用いて設計を行う場合は、その適用性を踏まえて、適切に設定する必要がある。なお、波浪・潮流による洗掘の可能性があり、海底地盤面に洗掘対策を行わない場合は、3.6節「洗掘」に示す方法により洗掘深さを適切に評価し、その部分の地盤抵抗を無視した構造解析を実施する必要がある。

#### 4.5.2 安全性の照査

- (1) 短期荷重の作用によりモノパイル構造に発生する断面力や応力度が、4.2節の規定を満足するものとする。
- (2) 長期荷重、稀に発生する地震動、港湾レベル1地震動の作用によりモノパイル構造に発生する断面力や応力度が、4.3節の規定を満足するものとする。
- (3) 極めて稀に発生する地震動、設計津波、港湾レベル2地震動の作用によりモノパイル構造は倒壊・崩壊しないものとする。
- (4) モノパイル構造を構成する部材に対して、風、波などの繰返し作用による疲労の影響を考慮するものとする。

##### 【解説】

##### (1) 短期荷重

短期荷重が作用する場合のモノパイル構造の安全性は、モノパイル構造に発生する断面力や応力度を照査することにより確認する。断面力あるいは部材応力度の照査は、4.2節「荷重抵抗係数設計法による設計」にしたがう必要がある。

##### (2) 長期荷重、稀に発生する地震動、港湾レベル1地震動

長期荷重、稀に発生する地震動、港湾レベル1地震動が作用する場合のモノパイル構造の安全性は、モノパイル構造の断面力や応力度を照査することにより確認する。断面力あるいは部材応力度の照査は、4.3節「許容応力度設計法による設計」にしたがう必要がある。

##### (3) 極めて稀に発生する地震動、設計津波、港湾レベル2地震動

極めて稀に発生する地震動、設計津波、港湾レベル2地震動の作用時の安全性の照査は、モノパイル構造が倒壊・崩壊しないことを確認するものとする。極めて稀に発生する地震動、設計津波の作用時に対する安全性の照査は、表-解 2.1.1.8に示すように許容応力度設計法あるいは性能照査のいずれかとする。許容応力度設計法とする場合の照査に用いる適用基準や許容応力は、4.3節「許容応力度設計法による設計」にしたがう必要がある。性能照査を行う場合、材料非線形性及び大変形を考慮した解析によって実構造の挙動を適切に評価する必要がある。ただし、モノパイル構造は塑性エネルギーが他の部材に流れにくい構造であるため、応力や変形の評価は適切に行う必要がある。なお、港湾レベル2地震動の作用時に対する安全性の照査は、性能照査とする。

##### (4) 疲労の影響

疲労荷重に対する疲労照査は、照査対象となる部位の疲労等級、環境条件に応じて適切な疲労曲線を選定するものとする。疲労照査方法の事例として、関連規格における疲労曲線や疲労安全率の考え方を付属書9に示す。また、接合部等で高強度グラウト材料を用いる場合は、その疲労照査を行う必要がある。

#### 4.5.3 安定性の照査

- (1) 短期荷重、長期荷重、稀に発生する地震動、港湾レベル 1 地震動の作用に対して、十分な安定性を有するようモノパイル構造の海底地盤への根入れ長を適切に設定する。
- (2) 極めて稀に発生する地震動、設計津波、港湾レベル 2 地震動の作用によりモノパイル構造は倒壊・崩壊しないものとする。

##### 【解説】

#### (1) 短期荷重、長期荷重、稀に発生する地震動、港湾レベル 1 地震動

モノパイル構造は杭周面の水平地盤抵抗により、風荷重や波荷重などの水平荷重に抵抗する構造である。モノパイル構造は柔な構造であることから比較的大きな変形が生じる可能性があり、それに伴って杭周辺の地盤に塑性化が生じると脆性的な倒壊に至る可能性がある。

通常の杭基礎の設計では、杭体が半無限長とみなせる深さまで地盤に杭を根入れさせることにより、先端付近の水平変位及び発生断面力はほぼゼロとなり、安定した構造となる。杭体が半無限長とみなせる深さについて、例えば港湾の施設の技術上の基準・同解説<sup>5)</sup>では  $3/\beta$  ( $\beta$ : 杭の特性値) が目安とされている。短期荷重、長期荷重、稀に発生する地震動、港湾レベル 1 地震動が作用する場合のモノパイル構造の安定性は、これと同等の根入れ長を確保するのが望ましい。

モノパイル構造の根入れ長について、欧州では杭径  $D$  に対し  $4\sim 8D$  程度が採用<sup>7)</sup>されており、経済性の観点から、いわゆる短杭として設計されることが多い。岡田<sup>7)</sup>によって GL-Guideline<sup>8)</sup>や API-RP2A-WSD<sup>1)</sup>など欧州における短杭としての根入れ長の設定方法が紹介されているが、我が国ではモノパイル構造の洋上風力の設置事例が殆ど無いため、上記方法を用いる場合は適切に根入れ長を設定する必要がある。また、特別に詳細な検討をしない限り、根入れ長が  $2/\beta$  若しくは長杭の場合の  $lm_1$  を下回ることは好ましくない<sup>5)</sup>。なお、根入れ長の照査は、2.1.2 項で規定する荷重組み合わせに、荷重係数を考慮して実施する必要がある。

#### (2) 極めて稀に発生する地震動、設計津波、港湾レベル 2 地震動

極めて稀に発生する地震動、設計津波、港湾レベル 2 地震動が作用する場合のモノパイル構造の安定性の照査は、モノパイル構造が倒壊・崩壊しないことを確認するものとする。極めて稀に発生する地震動、設計津波の作用時に対する安全性の照査は、表-解 2.1.1.9 に示すように許容応力度設計法あるいは性能照査のいずれかとする。許容応力度設計法とする場合の照査に用いる適用基準は、4.3 節「許容応力度設計法による設計」にしたがう必要がある。性能照査を行う場合、材料非線形及び大変形を考慮した解析によって実構造の挙動を適切に評価する必要がある。ただし、モノパイル構造は塑性エネルギーが他の部材に流れにくい構造であるため、応力や変形の評価は適切に行う必要がある。なお、港湾レベル 2 地震動の作用時に対する安全性の照査は、性能照査とする。

#### 4.5.4 構造詳細

モノパイル構造を適用する場合は、トランジションピースやモノパイルの構造詳細を適切に設定して設計・製作・施工を行うものとする。

##### 【解説】

モノパイル構造では、トランジションピースやモノパイルの間にグラウト接合が適用される。グラウト接合部には、円筒構造や円錐構造などの構造形式があり、そのグラウト厚さや拡径部の構造などの構造詳細を適切に設定する必要がある。

#### 参考文献

- 1) American Petroleum Institute (2014), API-RP2A-WSD 22<sup>nd</sup> Edition
- 2) 久保浩一 (1964)、杭の横抵抗の新しい計算法、港湾空港技術研究所報告、第14巻、第3号
- 3) 鉄道総合技術研究所 (2012年1月)、鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物
- 4) American Petroleum Institute (2011), API-RP-2GEO 1st Edition
- 5) 日本港湾協会 (平成19年7月)、港湾の施設の技術上の基準・同解説
- 6) 菊池喜昭 (2003)、軟弱粘性土地盤着底式くし形構造物の横抵抗特性に関する研究、港湾空港技術研究所資料、No.1039
- 7) 岡田直仁 (2014)、着床式洋上風力発電所の杭基礎の構造設計、土木学会 平成26年度全国大会 研究討論会、研-25 資料
- 8) Germanischer Lloyd (2010), GL Guideline for the certification of wind turbines

## 4.6 ジャケット構造の設計

### 4.6.1 構造解析の基本

ジャケット構造の構造解析は、海底面以深の杭及び地盤の作用を考慮した3次元の骨組解析やFEM解析等により適切に実施する。また、構造解析を実施する際は、ジャケットのトラス構造を考慮し、部材に作用する荷重を適切に設定するものとする。

#### 【解説】

##### (1) 構造形式

ジャケット構造は、図-解4.6.1に示すように地盤に設置した杭に工場製作したトラス構造（ジャケット）を設置する形式が一般的である。また、図-解4.6.2に示すようにフーチングの上にジャケット構造を設置した事例<sup>1)</sup>もある。本節では、一般的なジャケット構造の照査方法を述べる。フーチングの上にジャケット構造を設置する構造の場合、その基礎の照査方法は4.7節「重力式基礎の設計」にしたがう必要がある。

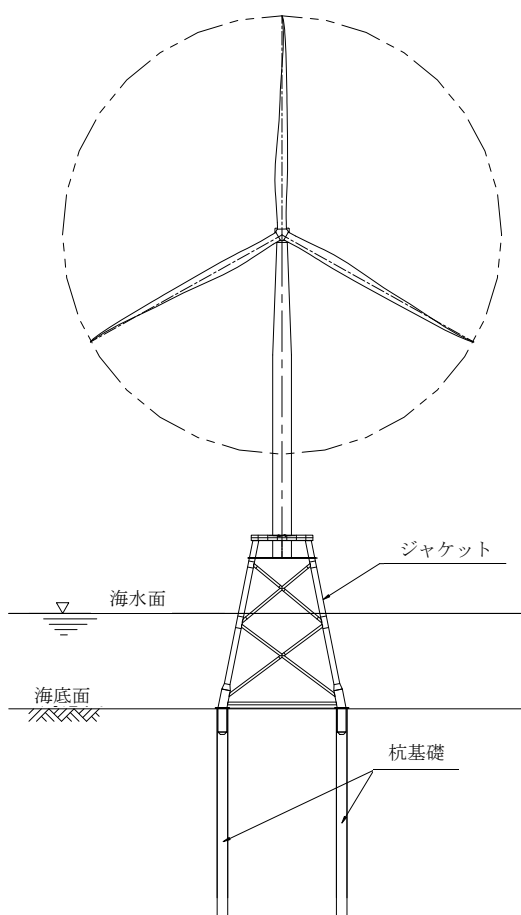


図-解 4.6.1 一般的なジャケット構造

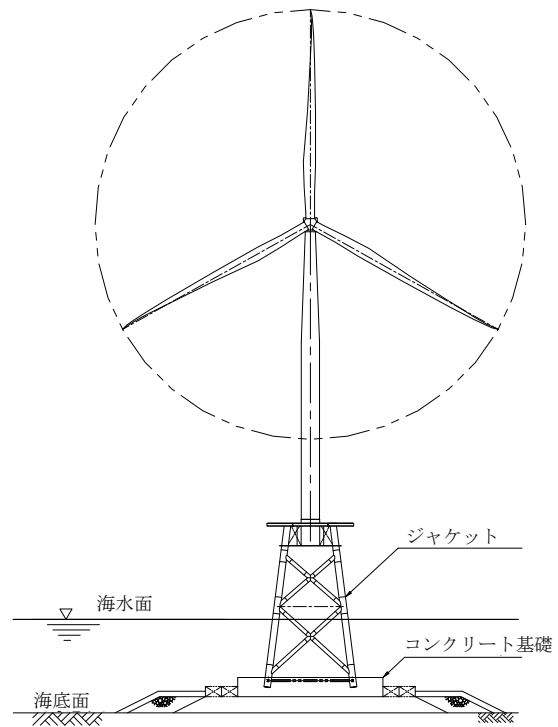


図-解 4.6.2 コンクリート基礎に設置したジャケット構造<sup>1)</sup>



## (2) 構造解析モデル

ジャケット構造の構造解析を実施するにあたって、ジャケット構造の脚（レグ）及び杭の配置と荷重が作用する方向を考慮して、最も不利となる方向に荷重を作用させる必要があるため、ジャケット構造の構造解析では、3次元モデルを用いることを基本とした。図-解 4.6.3に構造解析モデルの例を示す。

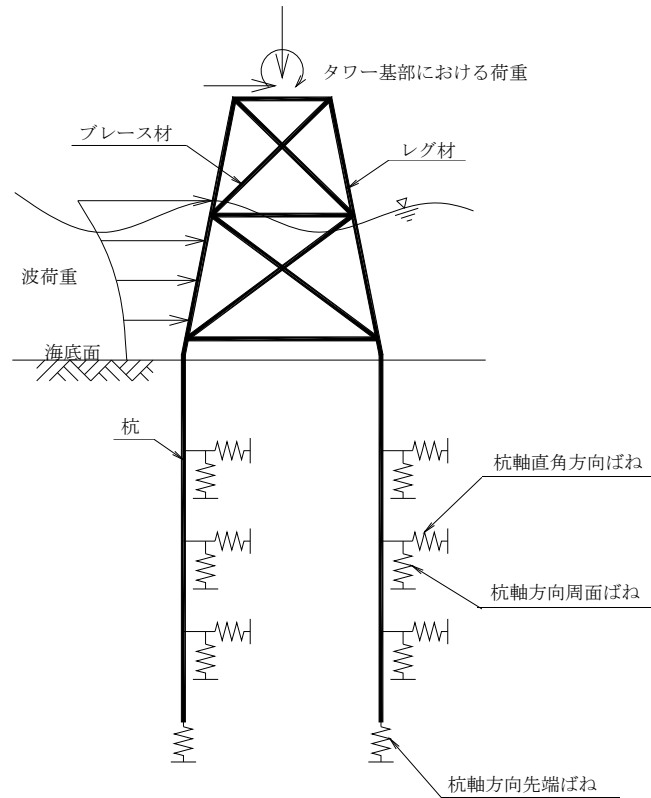


図-解 4.6.3 ジャケット構造の構造解析モデルの例

## (3) 地盤ばね

杭周辺の地盤ばねのモデル化の考え方は、4.5節「モノパイル構造の設計」に示す通りとする。

## (4) 部材に作用する荷重

ジャケット構造は、複数のレグ材、ブレース材で構成されたトラス構造である。進行波による波力は波の位相ごとにその大きさが異なるため、個々の部材に作用する最大波力だけでなく、構造物全体に作用する波力が最大となる場合についても検討する必要がある。

#### 4.6.2 安全性の照査

- (1) 短期荷重の作用によりジャケット構造に発生する断面力や応力度が、4.2節の規定を満足するものとする。
- (2) 長期荷重、稀に発生する地震動、港湾レベル1地震動の作用によりジャケット構造に発生する断面力や応力度が、4.3節の規定を満足するものとする。
- (3) 極めて稀に発生する地震動、設計津波、港湾レベル2地震動の作用によりジャケット構造は倒壊・崩壊しないものとする。
- (4) ジャケット構造を構成する部材に対して、風、波などの繰返し作用による疲労の影響を考慮するものとする。

##### 【解説】

##### (1) 短期荷重

短期荷重が作用する場合のジャケット構造の安全性は、ジャケット構造に発生する断面力や応力度を照査することにより確認する。断面力あるいは部材応力度の照査は、4.2節「荷重抵抗係数設計法による設計」にしたがう必要がある。

##### (2) 長期荷重、稀に発生する地震動、港湾レベル1地震動

長期荷重、稀に発生する地震動、港湾レベル1地震動が作用する場合のジャケット構造の安全性は、ジャケット構造の断面力や応力度を照査することにより確認する。断面力あるいは部材応力度の照査は、4.3節「許容応力度設計法による設計」にしたがう必要がある。

##### (3) 極めて稀に発生する地震動、港湾レベル2地震動、設計津波

極めて稀に発生する地震動、港湾レベル2地震動、設計津波の作用時の安全性の照査はジャケット構造が倒壊・崩壊しないことを確認するものとする。極めて稀に発生する地震動、設計津波の作用時に対する安全性の照査は、表-解 2.1.1.8に示すように許容応力度設計法あるいは性能照査のいずれかとする。許容応力度設計法とする場合の照査は、4.3節「許容応力度設計法による設計」にしたがう必要がある。性能照査を行う場合、材料非線形性及び大変形を考慮した解析によって実構造の挙動を適切に評価する必要がある。なお、港湾レベル2地震動の作用時に対する安全性の照査は、性能照査とする。

##### (4) 疲労の影響

疲労荷重に対する疲労照査は、照査対象となる部位の疲労等級、環境条件に応じて適切な疲労曲線を選定するものとする。疲労照査方法の事例として、関連規格における疲労曲線や疲労安全率の考え方を、付属書9に示す。また、接合部等で高強度グラウト材料を用いる場合は、その疲労照査を行う必要がある。

#### 4.6.3 安定性の照査

- (1) 短期荷重の作用により杭に生じる押し込み力、引き抜き力は、4.2節の規定を満足するものとする。
- (2) 長期荷重、稀に発生する地震動、港湾レベル1地震動の作用により杭に生じる押し込み力、引き抜き力は、4.3節の規定を満足するものとする。
- (3) 極めて稀に発生する地震動、設計津波、港湾レベル2地震動の作用によりジャケット構造は倒壊・崩壊しないものとする。

#### 【解説】

##### (1) 短期荷重

短期荷重が作用する場合のジャケット構造の安定性は、杭支持力の照査により確認するものとする。支持力の照査は、4.2節「荷重抵抗係数設計法による設計」にしたがう必要がある。

##### (2) 長期荷重、稀に発生する地震動、港湾レベル1地震動

長期荷重、稀に発生する地震動、港湾レベル1地震動が作用する場合のジャケット構造の安定性は、杭支持力の照査により確認するものとする。支持力の照査は、4.3節「許容応力度設計法による設計」にしたがう必要がある。

##### (3) 極めて稀に発生する地震動、設計津波、港湾レベル2地震動

極めて稀に発生する地震動、設計津波、港湾レベル2地震動が作用する場合のジャケット構造の安定性の照査は、ジャケット構造が倒壊・崩壊しないことを確認するものとする。極めて稀に発生する地震動、設計津波の作用時に対する安全性の照査は、表-解 2.1.1.9 に示すように許容応力度設計法あるいは性能照査のいずれかとする。許容応力度設計法とする場合の照査は、4.3節「許容応力度設計法による設計」にしたがう必要がある。性能照査を行う場合、材料非線形及び大変形を考慮した解析によって実構造の挙動を適切に評価する必要がある。なお、港湾レベル2地震動の作用時に対する安全性の照査は、性能照査とする。この照査は、港湾の施設の技術上の基準・同解説<sup>2)</sup>における直杭式横棧橋（耐震強化施設）に準じて行うのが良い。

#### 4.6.4 構造詳細

ジャケット構造を適用する場合は、ジャケット構造を構成する部材の構造詳細を適切に設定して設計・製作・施工を行うものとする。

##### 【解説】

例えば、ジャケット構造の鋼管格点部は、主管と支管の溶接継手形状を考慮して適切に設計する必要がある。

##### 参考文献

- 1) 北九州市沖着床式洋上風力発電の実証研究（平成 26 年度全国大会 研究討論会）
- 2) 日本港湾協会（平成 11 年）、港湾の施設の技術上の基準・同解説

## 4.7 重力式基礎の設計

### 4.7.1 構造解析の基本

重力式基礎の構造計算は、下部構造及び基礎を含めた 3 次元の骨組み解析や FEM 解析により適切に実施する。また、重力式基礎の下部構造及び基礎の形状を考慮し、部材に作用する荷重を適切に設定する。

#### 【解説】

##### (1) 構造形式

重力式基礎は、図-解 4.7.1 に示すように海底地盤が比較的良好な場所に基礎構造を直接設置する構造である。基礎と地盤の相互作用が全体の挙動に大きく影響するため、これらの挙動を考慮できる骨組解析により構造計算を行う必要がある。

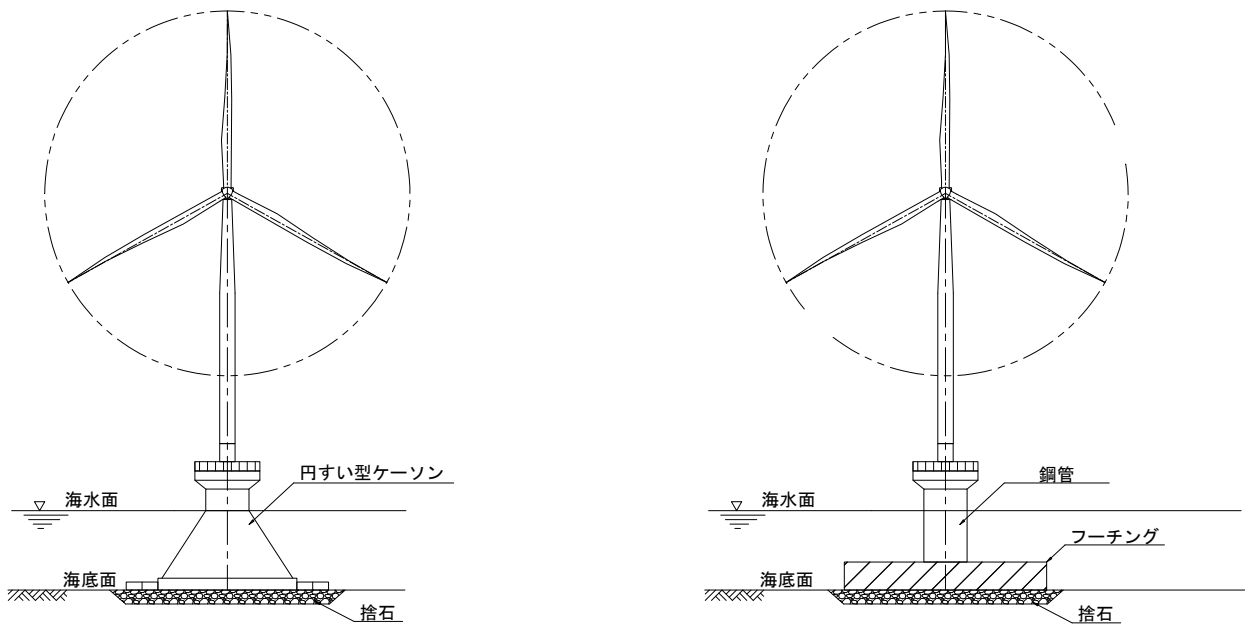


図-解 4.7.1 重力式基礎(例)

##### (2) 構造解析モデル

重力式基礎の構造解析モデルは、風や波の作用方向を考慮することができるよう 3 次元モデルを用いるのが望ましいが、2 次元モデルとする場合は、安全側の評価となるような風や波の組み合わせを考慮する必要がある。図-解 4.7.2 に、構造解析モデルの例を示す。

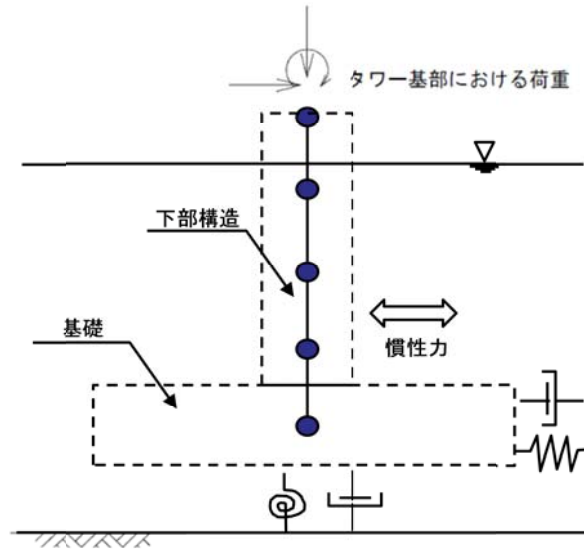


図-解 4.7.2 重力式基礎の構造解析モデルの例（SRモデル、地震時の場合）

### （3）地盤ばね

重力式基礎の構造解析モデルにおける地盤ばねは、基礎と地盤との相互作用を水平・回転・鉛直ばね及び減衰係数によって考慮できるSRモデル（スウェイ・ロッキングモデル）などを適切に設定する必要がある。

### （4）部材に作用する荷重

重力式基礎は、鋼部材とコンクリート部材を組み合わせる構成形式を採用する場合もある。進行波による波力は波の位相ごとにその大きさが異なるため、個々の部材に作用する最大波力だけでなく、構造物全体としての波力が最大となる場合について検討する必要がある。

#### 4.7.2 安全性の照査

- (1) 短期荷重の作用により生じる断面力や応力度が 4.2 節の規定を満足すること。
- (2) 長期荷重、稀に発生する地震動、港湾レベル 1 地震動の作用により重力式基礎に発生する応力度が、4.3 節の規定を満足すること。
- (3) 極めて稀に発生する地震動、設計津波、港湾レベル 2 地震動の作用により倒壊・崩壊しないものとする。
- (4) 鋼部材及びコンクリート部材に対しては、風、波などの繰返し作用による疲労の影響を考慮すること。
- (5) コンクリート部材に対しては、塩害等による経年変化に対する耐久性を考慮すること。

##### 【解説】

##### (1) 短期荷重

短期荷重が作用する場合の重力式基礎の安全性は、重力式基礎を構成する部材の断面力あるいは応力度を照査することにより確認するものとする。断面力あるいは部材応力度の照査は、4.2 節「荷重抵抗係数設計法による設計」にしたがう必要がある。

##### (2) 長期荷重、稀に発生する地震動、港湾レベル 1 地震動

長期荷重、稀に発生する地震動、港湾レベル 1 地震動が作用する場合の重力式基礎の安全性は、重力式基礎を構成する部材の断面力あるいは応力度を照査することにより確認するものとする。断面力あるいは部材応力度の照査は、4.3 節「許容応力度設計法による設計」にしたがう必要がある。

##### (3) 極めて稀に発生する地震動、設計津波、港湾レベル 2 地震動

極めて稀に発生する地震動、設計津波、港湾レベル 2 地震動の作用時の安全性の照査は、重力式基礎が倒壊・崩壊しないことを確認するものとする。極めて稀に発生する地震動、設計津波の作用時に対する安全性の照査は、表-解 2.1.1.8 に示すように許容応力度設計法あるいは性能照査のいずれかとする。許容応力度設計法とする場合の照査は、4.3 節「許容応力度設計法による設計」にしたがう必要がある。性能照査を行う場合、材料非線形性及び大変形を考慮した解析によって実構造の挙動を適切に評価する。なお、港湾レベル 2 地震動の作用時に対する安全性の照査は、性能照査とする。

##### (4) 鋼部材及びコンクリート部材の疲労照査

重力式基礎に鋼部材を配置する場合、疲労荷重に対する疲労照査は、照査対象となる溶接部の疲労等級、環境条件に応じて適切な疲労曲線を選定するものとする。疲労照査方法の事例として、関連規格における疲労曲線や疲労安全率の考え方を、付属書 9 に示す。また、コンクリート部材は照査対象部材の疲労強度を適切に設定して疲労照査を行うものとする。

##### (5) コンクリート部材の耐久性照査

コンクリート部材は、ひび割れや塩化物イオンの侵入による鉄筋腐食等、経年変化に対する耐久性の検討を実施する必要がある。耐久性照査は、港湾の施設の技術上の基準・同解説<sup>1)</sup>にしたがうこととし、3.3 節の表-解 3.3.1 に示す階級での風荷重及び波荷重を用いるものとする。

#### 4.7.3 安定性の照査

- (1) 短期荷重の作用時の安定照査が、4.2節の規定を満足すること。
- (2) 長期荷重、稀に発生する地震動、港湾レベル1地震動の作用時の安定照査が、4.3節の規定を満足すること。
- (3) 極めて稀に発生する地震動、設計津波、港湾レベル2地震動の作用時に重力式基礎が倒壊・崩壊しないこと。
- (4) 洗掘や地盤沈下に対する安全性を考慮すること。

#### 【解説】

##### (1) 短期荷重

短期荷重が作用する場合の重力式基礎の安定性の照査では、次の3項目を実施する。

- ・基礎底面地盤の支持力
- ・基礎の転倒
- ・基礎の滑動

これらの照査は4.2節「荷重抵抗係数設計法による設計」にしたがう必要がある。

##### (2) 長期荷重、稀に発生する地震動、港湾レベル1地震動

長期荷重、稀に発生する地震動、港湾レベル1地震動が作用する場合の重力式基礎は、次の3項目を実施するものとする。

- ・基礎底面地盤の支持力
- ・基礎の転倒
- ・基礎の滑動

これらの照査は4.3節「許容応力度設計法による設計」にしたがう必要がある。

##### (3) 極めて稀に発生する地震動、設計津波、港湾レベル2地震動

極めて稀に発生する地震動、設計津波、港湾レベル2地震動が作用する場合の安定性の照査は、重力式基礎が倒壊・崩壊しないことを確認するものとする。極めて稀に発生する地震動、設計津波の作用時に対する安全性の照査は、表-解 2.1.1.9 に示すように許容応力度設計法あるいは性能照査のいずれかとする。許容応力度設計法とする場合の照査は、4.3節「許容応力度設計法による設計」にしたがう必要がある。性能照査を行う場合、地震動に対する地盤の液状化や構造物の非線形性挙動を評価できる時刻歴解析により評価することが望ましい。なお、港湾レベル2地震動の作用時に対する安全性の照査は、性能照査とする。

##### (4) 洗掘や地盤沈下に対する検討

海底への設置という特性上、基礎マウンドの全体すべりや洗掘、圧密沈下なども必要に応じて評価することが望ましい。



#### 4.7.4 構造詳細

重力式構造を適用する場合には、下部構造及び基礎の構造詳細を適切に考慮して設計・製作・施工を行うものとする。

##### 【解説】

下部構造及び基礎が、鋼構造の場合は4.5節「モノパイル構造の設計」や4.6節「ジャケット構造の設計」の構造詳細に準ずるものとする。

#### 参考文献

- 1) 日本港湾協会（平成19年7月）、港湾の施設の技術上の基準・同解説

#### 4.8 接合部の設計

接合部を構成する部材（鋼材、コンクリート、ずれ止め、グラウトなど）は、いかなる荷重の組み合わせにおいても、部材に生じる断面力が設計耐力を上回らないように設計することを基本とする。

##### 【解説】

(1) 洋上風力発電設備等の支持構造物における接合部の事例

表-解 4.8.1 に、各構造形式における接合部の例を示す。過去に実績のない接合構造を採用する場合は、その構造の耐荷力や耐久性などの力学的特性を解析あるいは実験により確認することが望ましい。

表-解 4.8.1 各構造形式における接合部の例

構造形式	鋼製タワーと下部構造間	下部構造と基礎構造間
モノパイル構造	・鋼製タワーとトランジッションピースのボルト接合部	・トランジッションピースと鋼管杭のグラウト接合部（図-解 4.8.1）
ジャケット構造	・鋼製タワーとジャケット構造の鋼構造接合部（図-解 4.8.2）	・ジャケット構造と鋼管杭のグラウト接合部
重力式構造	・鋼製タワーとコンクリート基礎のアンカー接合部（図-解 4.8.3）	・モノパイル構造あるいはジャケット構造とコンクリート基礎の埋め込み接合部（図-解 4.8.4）

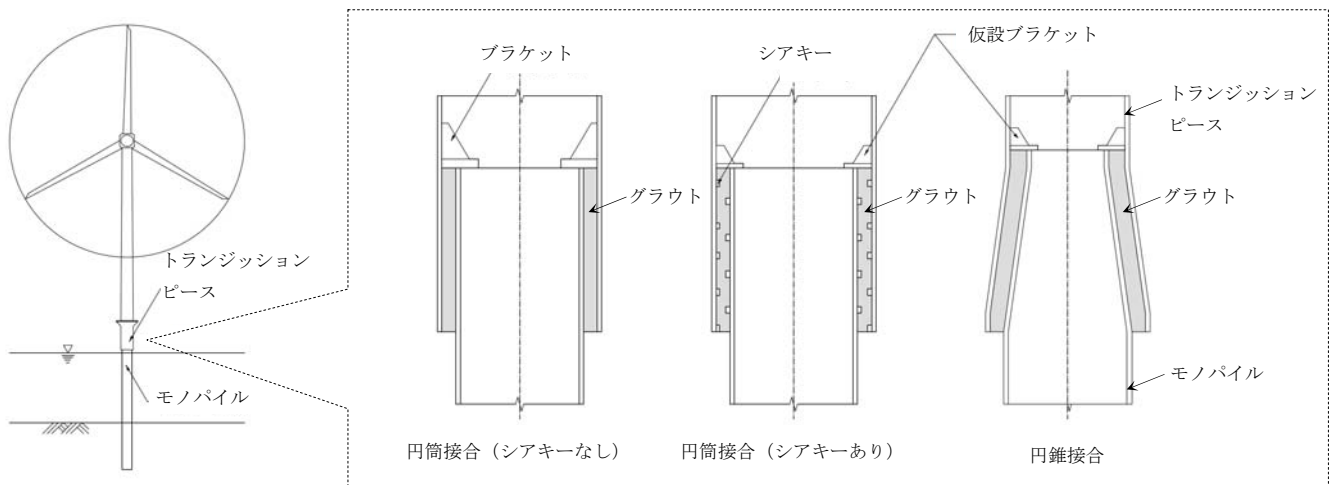
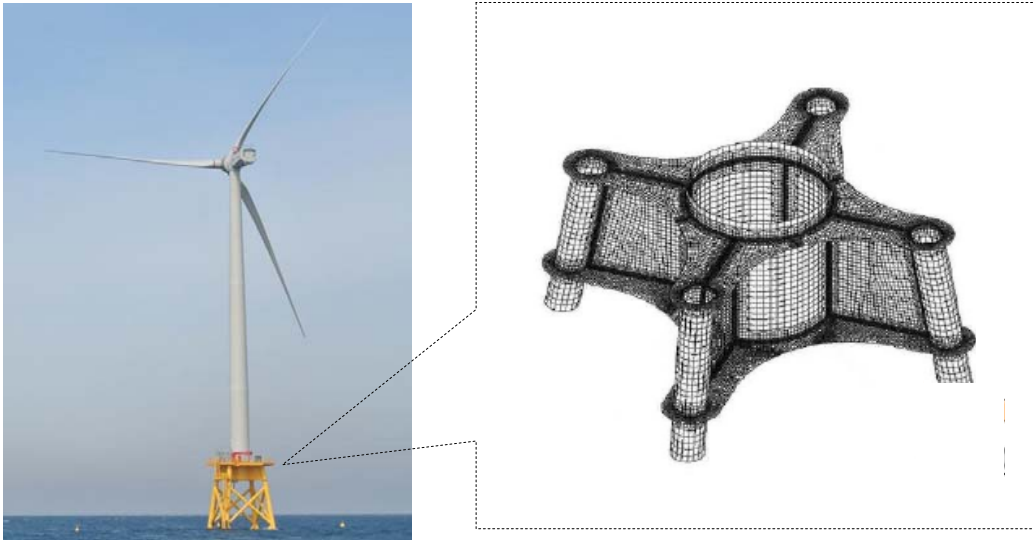


図-解 4.8.1 モノパイル構造におけるグラウト接合部の例<sup>1)</sup>



出典：新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 「国内初！沖合における洋上風力発電への挑戦～プロジェクト現場レポート～」

図-解 4.8.2 ジャケット構造における鋼構造接合部の例<sup>2)、3)</sup>

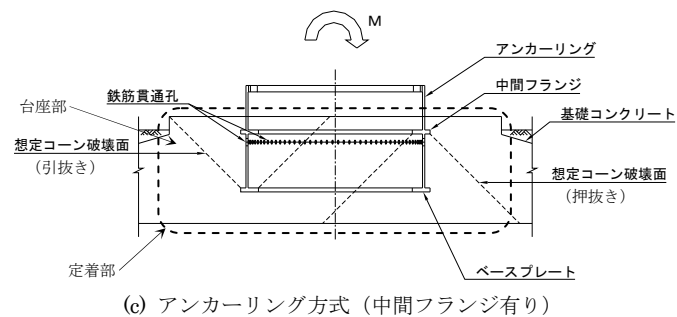
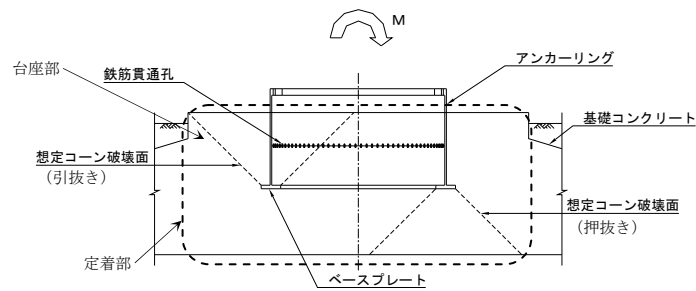
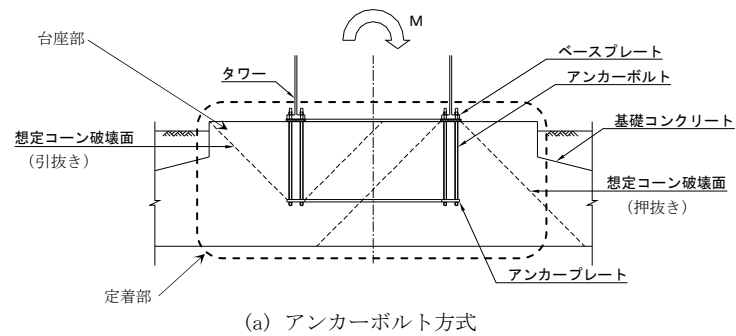


図-解 4.8.3 重力式構造におけるアンカー接合部の例<sup>4)</sup>

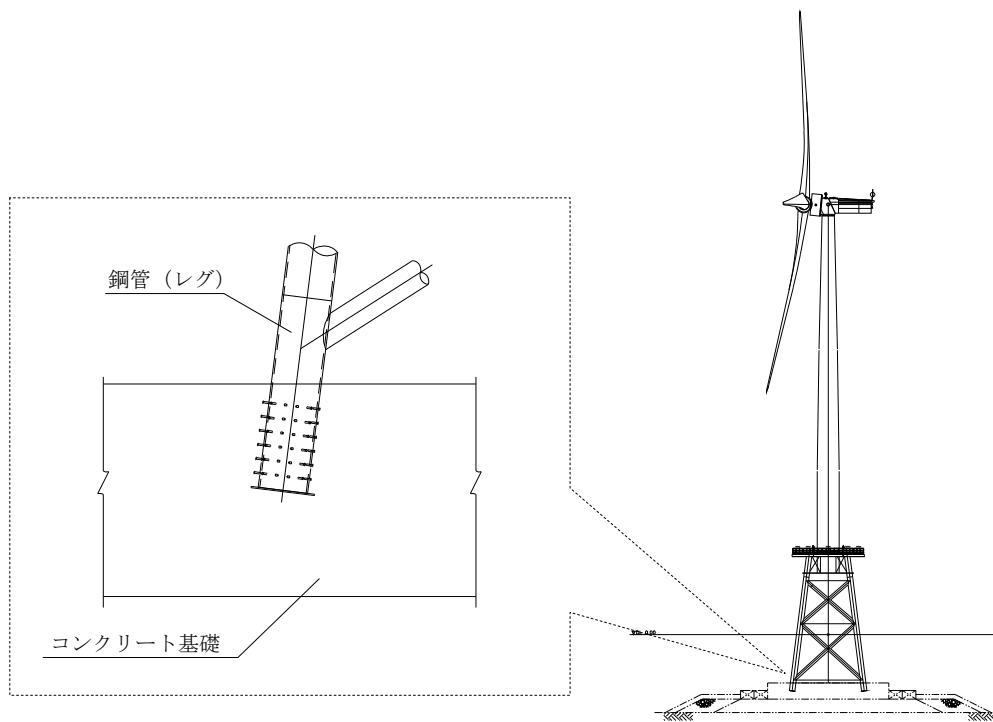


図-解 4.8.4 ジャケット構造とフーチング間の埋め込み接合の例

## (2) 接合部の設計方法

洋上風力発電設備等の支持構造物の接合部は、接合部に発生する断面力を確実に下部構造及び基礎に伝達できる構造とする必要がある。接合部は異種材料を用いた構造になることが多く、その耐荷機構が明らかでない場合もあることから、いかなる設計状況においても塑性的なねばりを確保するような考え方にはよらず、設計耐力を確保する設計を基本とした。以下に、それぞれの構造形式における設計上の注意点を示す。なお、接合部は部材の設置精度を確保するため、下部構造及び基礎の施工時の設置精度を吸収できる構造とするのがよい。

### 1) モノパイル構造及びジャケット構造におけるグラウト接合部

モノパイル構造及びジャケット構造におけるグラウト接合部に関して、DNVGL-ST-0126<sup>5)</sup>による設計方法や石井らの研究事例<sup>1)</sup>などがある。なお、欧州ではグラウト材の引張強度に関する照査を満足するために高強度グラウト材が用いられるケースがあり、国内で一般的に使用されるグラウト材とは異なるので、注意が必要である。

### 2) ジャケット構造における鋼構造接合部

ジャケット構造における鋼構造接合部の設計方法は、鋼構造設計規準<sup>6)</sup>や鋼管トラス構造設計施工指針同解説<sup>7)</sup>などで類似例が紹介されているが、これらの規準や指針と実際の鋼構造接合部では、対象とする部材サイズや構造詳細の違いにより、応力集中や座屈の影響が異なる可能性があるため、FEM解析などの評価方法を用いて構造安全性を適切に評価する必要がある。

### 3) 重力式構造におけるアンカー接合部

重力式構造におけるアンカー接合部の設計方法は、風力発電設備支持物構造設計指針・同解説<sup>4)</sup>で詳しく述べられている。ジャケット構造あるいはモノパイル構造の埋め込み接合部の設計方法は、建築基礎構造設計指針<sup>8)</sup>や杭基礎設計便覧<sup>9)</sup>で類似例が紹介されているが、その照査式の適用範囲や構造形式に注意して適切に検討する必要がある。

#### 参考文献

- 1) 石井大吾 (2014)、モノパイルのグラウト接合部の構造設計、土木学会 平成 26 年度全国大会 研究討論会
- 2) 北九州市・NEDO 洋上風力発電 ～プロジェクト現場レポート～  
[http://www.nedo.go.jp/fuusha/kitakyushuSymp201306\\_report.html](http://www.nedo.go.jp/fuusha/kitakyushuSymp201306_report.html)
- 3) 北九州市冲着床式洋上風力発電の実証研究 (土木学会 平成 26 年度全国大会 研究討論会)
- 4) 土木学会 (2010)、風力発電設備支持物構造設計指針・同解説
- 5) DNV GL (2016), DNVGL-ST-0126
- 6) 日本建築学会 (2005)、鋼構造設計規準
- 7) 日本建築学会 (2002)、鋼管トラス構造設計施工指針同解説
- 8) 日本建築学会 (2001)、建築基礎構造設計指針
- 9) 日本道路協会 (2007)、杭基礎設計便覧 平成 18 年度改定版

#### 4.9 運転や維持管理に必要な設備の設計

洋上風力発電設備等の運転や維持管理に必要な設備は、自重、積載荷重、風圧、水圧、積雪、氷圧、変動波浪、稀に発生する地震動、港湾レベル1地震動、船舶の接岸荷重等の作用により損傷せず、発電設備としての機能を満足するものとする。

##### 【解説】

##### (1) 運転や維持管理に必要な設備の設計において配慮すべき事項

洋上風力発電設備等には、図-解 4.9.1 に示すような付属設備が設置される。これらの設備は定期的な維持管理が必要とされるため洋上という厳しい自然条件に設置されることを前提に、使用性や安全性に配慮して設計する必要がある。以下に付属設備の設計を行う際に、配慮すべき事項の例を示す。

- 1) 自重、積載荷重、風圧、水圧、積雪、氷圧、変動波浪、稀に発生する地震動、港湾レベル1地震動、船舶の接岸荷重等に対する耐力を確保すること
- 2) 風・波による疲労耐久性を確保すること
- 3) 組立・溶接などの製作性に配慮した構造とすること
- 4) ハンドレールなどの細長い部材は、風との共振が生じないような部材サイズ、支持間隔とすること

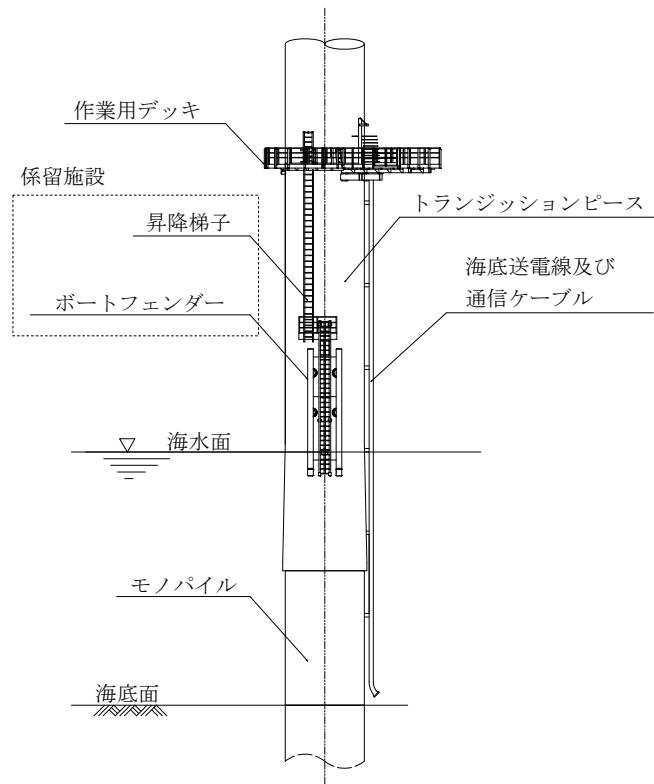


図-解 4.9.1 洋上風力発電設備等の運転や維持管理に必要な設備

## (2) 係留施設の附帯設備

係留施設の附帯設備として設置されるボートランディングは、作業船が接舷したときの安定性と船からのアクセス性を考慮して、防舷材や昇降用梯子の配置を検討するのがよい。また、昇降梯子は昇降時の安全性に配慮し、背カゴや踊り場を設置するのがよい。

## (3) 作業用デッキ

作業用デッキは、タービン内機器を交換するために必要な作業スペースと、非常時にナセル上部脱出口から退避するためのスペースを確保するように配置を決定する必要がある。作業用デッキ上には荷揚げ用のホイストクレーン、航路標識灯などが配置されるため、作業用デッキの支持部材はこれらの構造の取り合いや荷重を考慮して設計しなければならない。作業用デッキが波力に抵抗するように設計しない場合は、設計水位と設計波の波頂高さに基づいて十分なエアギャップを確保するように設置高さを決定する必要がある。エアギャップ量の詳細な設定方法は、JIS C1400-3<sup>1)</sup>で紹介されており、これにしたがうことが望ましい。また、メンテナンス作業時の安全性を確保する観点から、作業用デッキとブレードのクリアランスも確保する必要がある。

## (4) 海底送電線及び通信ケーブル用の配管

下部構造又は基礎に接続される海底送電線及び通信ケーブル用の配管構造について、DNVGL-RP-0360<sup>2)</sup>では、図-解 4.9.2 に示すような配置例が示されている。構造の選定に際しては、海底送電線及び通信ケーブルの施工法を踏まえて適切に検討する必要がある。

- (a) 固定-外付型 J 字配管 : 下部構造又は基礎に外付けされた固定式の J 字配管
- (b) 可動-外付型 J 字配管 : 下部構造又は基礎に外付けされた稼働式の J 字配管  
(高さ方向や角度調整が可能)
- (c) 固定-外付型 I 字配管 : 下部構造又は基礎に外付けされた固定式の I 字配管  
(海底送電線及び通信ケーブルの懸垂曲線が自由に調整可能)
- (d) 固定-内蔵型 J 字配管 : 下部構造又は基礎の内部に取り付けられた固定式の J 字配管
- (e) 配管無し : 配管無しで、下部構造又は基礎を配管として利用する型式

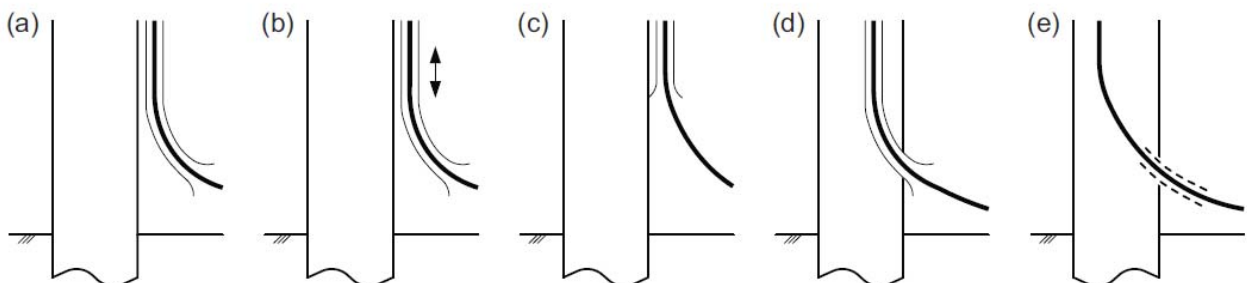
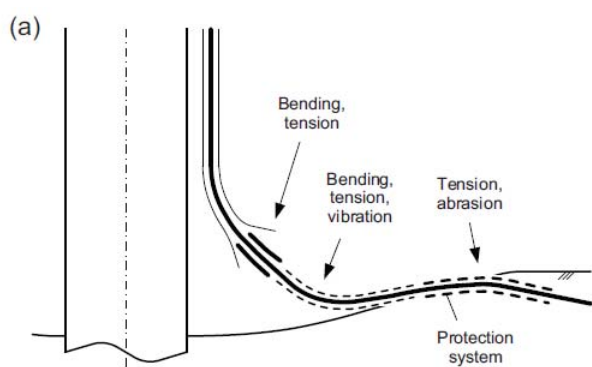


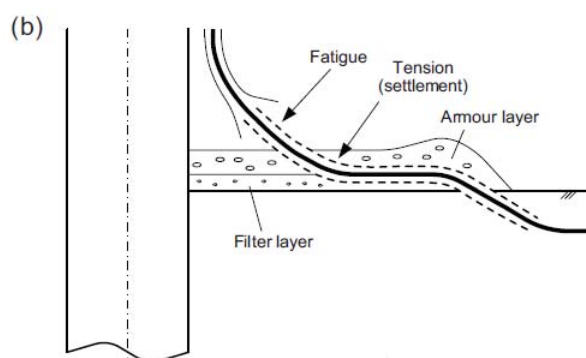
図-解 4.9.2 下部構造又は基礎に接続される海底送電線及び通信ケーブル用配管の配置例<sup>2)</sup>

また、海底送電線及び通信ケーブルの洗掘防止工について、DNVGL-RP-0360<sup>2)</sup>では、図-解 4.9.3 に示

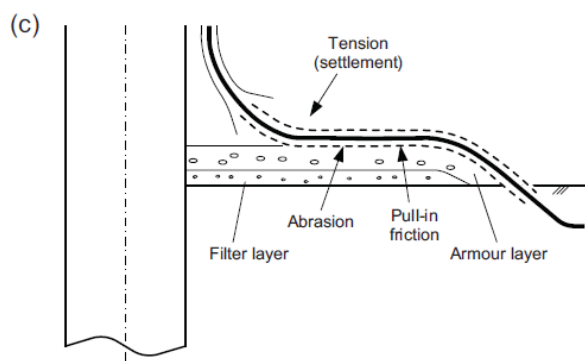
す 4 つの設計例が紹介されている。構造の選定に際しては、海底送電線及び通信ケーブル及び洗掘対策工の施工法を踏まえて適切に検討する必要がある。



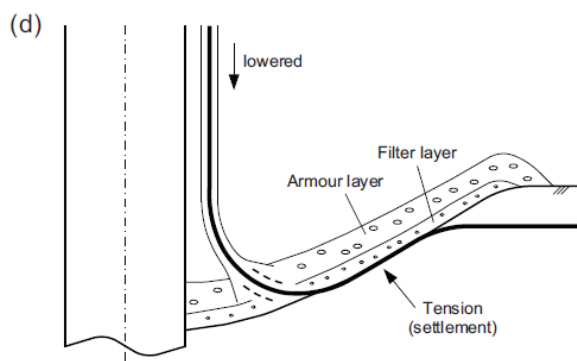
(a) 洗掘対策工無しの場合



(b) 海底送電線及び通信ケーブル  
敷設前後に洗掘対策工を施す場合



(c) 洗掘対策工の上に海底ケーブル海底送電線  
及び通信ケーブルを敷設する場合



(d) 海底ケーブル海底送電線及び通信ケーブル  
敷設後に洗掘対策工を施す場合

図-解 4.9.3 海底送電線及び通信ケーブルと洗掘対策工の設計例<sup>2)</sup>

参考文献

- 1) 日本規格協会 (2014)、JIS C1400-3: 風車-第3部: 洋上風車の設計要件
- 2) DNV GL (2016), DNVGL-RP-0360



#### 4.10 防食設計

防食工法の選定にあたっては、環境条件、耐用年数、経済性、施工性等を考慮して、適切な工法を選定するものとする。

##### 【解説】

##### (1) 防食工法の選定に関する基本的な考え方

防食工法は、構造物の設置環境、期待寿命、必要とされる防食性能、耐久性及び経済性、施工性の他に維持管理のし易さ、外観といった要素について十分考慮して決定することが望ましい。

防食工法は、電気防食工法と被覆防食工法に大別される。前者は、流電陽極方式と外部電源方式の2つの方式があり、後者は、塗装、有機被覆（超厚膜形被覆・水中硬化形被覆・重防食被覆）、ペトロラタム被覆、無機被覆（モルタル被覆・鉄筋コンクリート被覆）、金属被覆などがある。これらの防食工法は、港湾鋼構造物 防食・補修マニュアル<sup>1)</sup>で詳しく述べられている。

一般に、朔望平均干潮面（L.W.L.）以下1m以上に被覆防食工法、平均干潮面（M.L.W.L.）以下の海中部及び海底土中部に電気防食工法を適用する方法が最も実績があり、信頼性も確認されている。飛沫を浴び、酸素の供給も十分な飛沫帯は特に腐食が激しく、なかでも朔望平均満潮位（H.W.L.）直上部で腐食速度は最大となるため、有機被覆に含まれる重防食塗装を用いることが多い。また、供用期間の短い部材には防食工法は適用せず、腐食しろ（鋼材の板厚の増加）によって、腐食対策を図ってもよい。

##### (2) 電気防食工法

電気防食工法を用いる場合、港湾鋼構造物では平均干潮面（M.L.W.L.）以下を対象として電気防食面積を算出することが多い。電気防食の適用範囲内に被覆材で被覆された部分がある場合には、被覆材の損傷率を想定して防食電流密度の値を設定することが望ましい。

##### (3) 被覆防食工法

被覆防食工法を用いる場合、その適用性評価は、港湾鋼構造物 防食・補修マニュアル<sup>1)</sup>で詳しく述べられている。また、ロータナセル・アセンブリの防食は、表-解 4.10.1 に示す JIS C1400-3<sup>2)</sup>の仕様とすることが望ましい。

表-解 4.10.1 JIS C1400-3<sup>2)</sup>に定めるロータナセル・アセンブリの防食仕様

部位	望ましい防食仕様
外部部品、金物、センサー等	ISO 12944-2 <sup>3)</sup> クラス C5M
外部の空気に直接さらされる内部表面	ISO 12944-2 <sup>3)</sup> クラス C4
外気に対して密閉された内部表面	ISO 12944-2 <sup>3)</sup> クラス C3

#### 参考文献

- 1) 沿岸技術研究センター（2009年）、港湾鋼構造物防食・補修マニュアル
- 2) 日本規格協会（2014）、JIS C1400-3：風車—第3部：洋上風車の設計要件
- 3) International Organization for Standardization（2007）、ISO12944