

参考資料(洋上風力統一の解説)

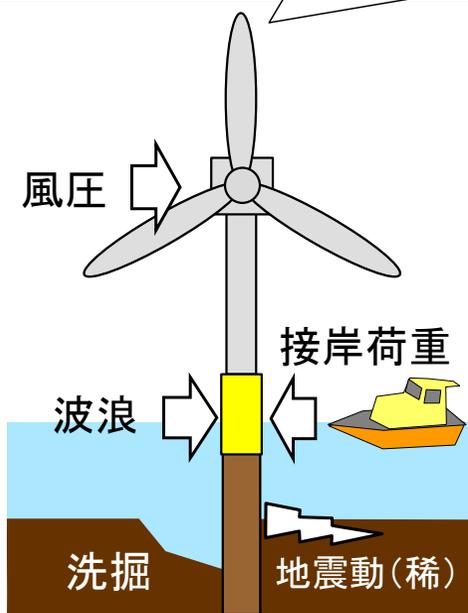
平成30年3月12日

経済産業省 産業保安グループ
電力安全課

2.1 外力に対して安全な構造

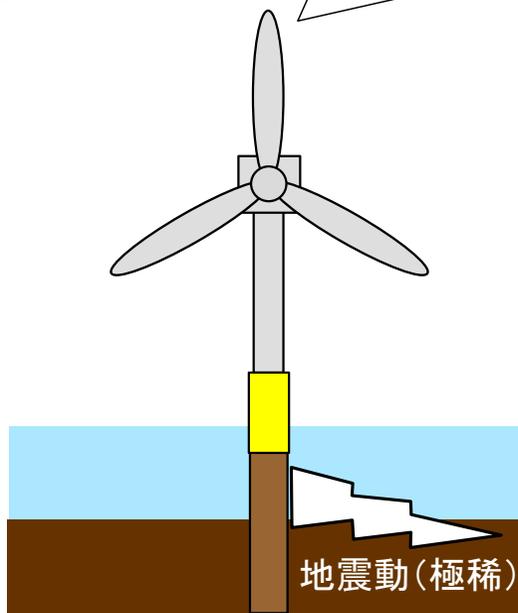
- 洋上風力発電設備は、自重、積載荷重、風圧、水圧、積雪、氷圧、変動波浪、稀に発生する地震動、港湾施設の設計に用いるレベル1地震動等の作用により損傷せず、発電設備としての機能を満足するものとする。
- 極めて稀に発生する地震動等の作用により、倒壊、崩壊しないものとする。
- 上記に加え、被災により、港湾に存する耐震強化施設の利用等に支障を及ぼすおそれのある洋上風力発電設備については、港湾の耐震強化施設の設計に用いるレベル2地震動（以下、港湾L2地震動とする。）の作用によっても倒壊、崩壊しないことを確認するものとする。

発電設備としての機能を満足

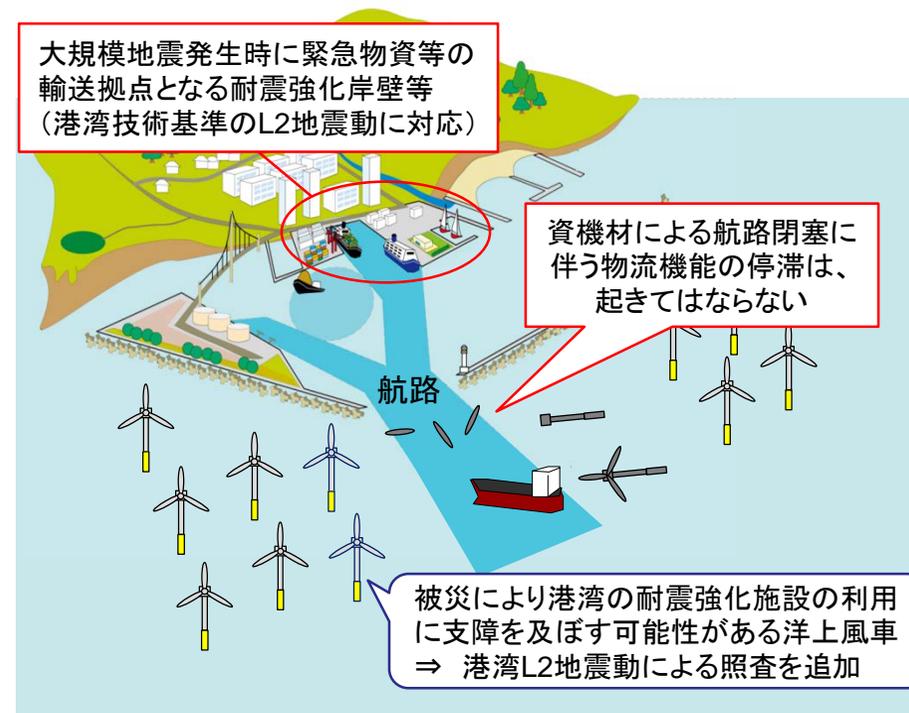


↑ 洋上風力発電設備に作用する外力の例

倒壊・崩壊しない



大規模地震発生時に緊急物資等の輸送拠点となる耐震強化岸壁等（港湾技術基準のL2地震動に対応）



↑ 耐震強化岸壁の利用に支障を及ぼす恐れのある風車 1

2.2 風車の構造

- 風圧及び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。
- 運転中に風車に損傷を与える振動がないこと。

2.3 風車の安全な状態の確保

- 異常事態に、安全かつ自動的に停止するような措置を講ずること。
- 雷撃から風車を保護するような措置を講ずること。

2.2 風車の構造

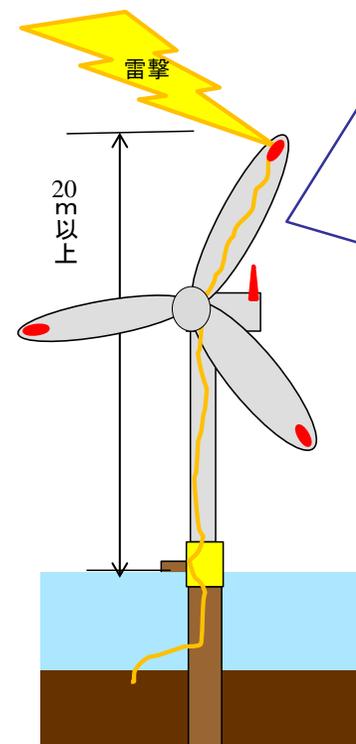
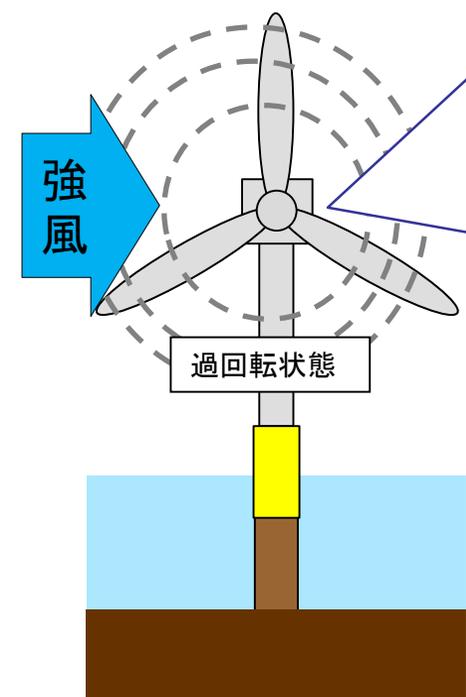
- 台風等の強風・突風に際し、風車の回転面の制御が不能になった場合にも、風車への受風面積が最大の方向から受ける風圧に耐えうる構造とする。
- 風速や風向の時間的变化による累積疲労に耐えうる構造にする。
- 地震等、風車の運転中に風車に影響を及ぼすような揺れが生じた場合に、風車の回転部を自動停止させる機能を施設する。

2.3 風車の安全な状態の確保

- 速度制御や風向制御を行い、内部故障に備えて非常用発電機を搭載する等、常に安全な状態を維持する。

2.3 風車の安全な状態の確保

- 海水面からの高さが20m以上の部分について、レセプタや避雷針等を設置する等の雷撃対策を行う。
- 設置海域に応じて風車への雷撃電荷量を想定して設計。
- なお、日本海側等の落雷頻発地域は600クーロン以上を想定して設計する必要がある。



2.4 取扱者以外の者の接近の防止

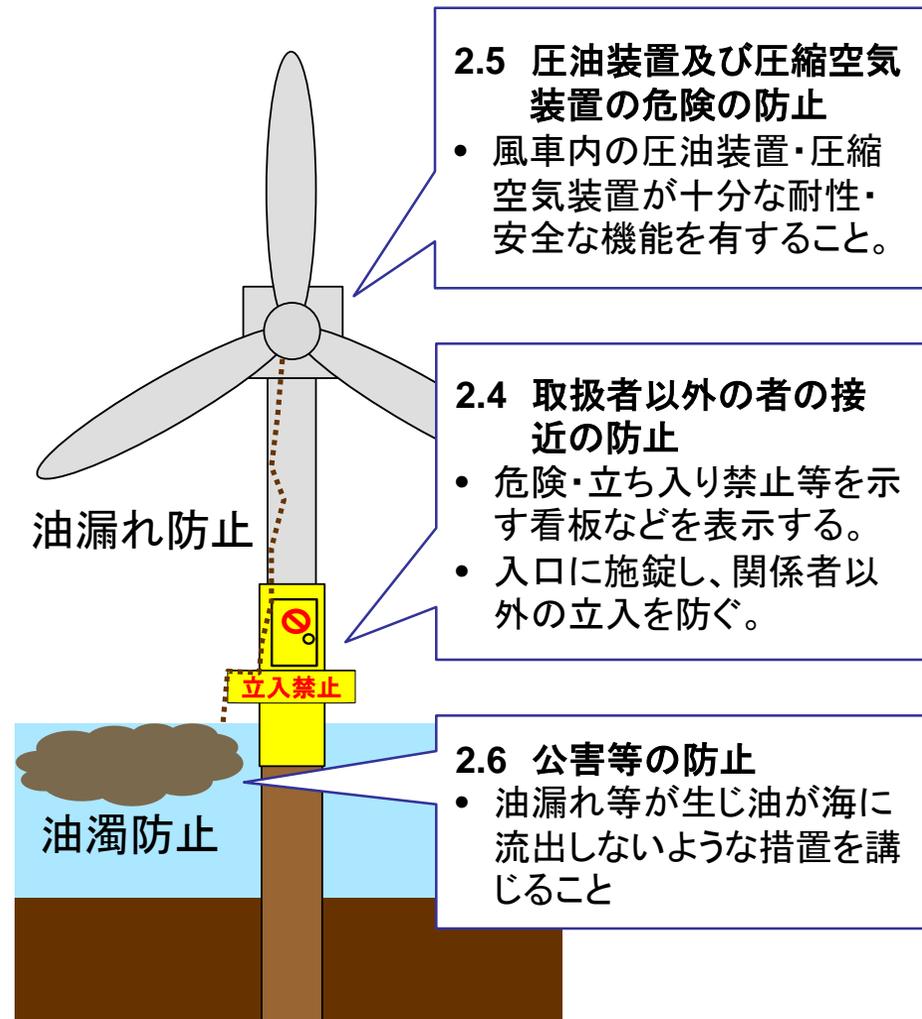
- 見えやすい箇所に当該設備が危険である旨を表示すること。
- 取扱者以外の者が容易に接近するおそれがないように適切な措置を講じること。

2.5 圧油装置及び圧縮空気装置の危険の防止

- 圧油装置及び圧縮空気装置の材料及び構造が、最高使用圧力に対して十分に耐え、かつ、安全なもの。圧油タンク及び空気タンクは、耐食性を有すること。
- 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こと。

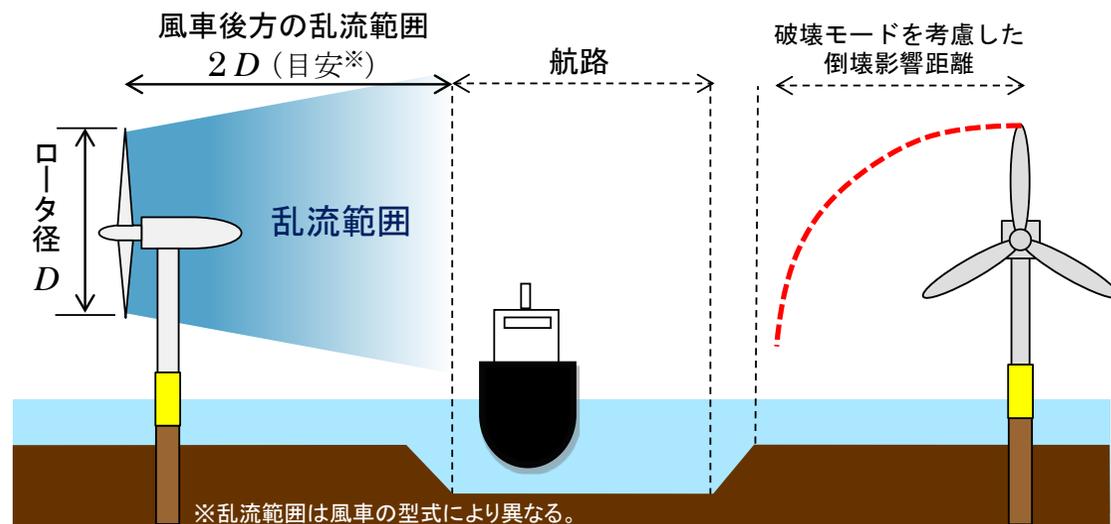
2.6 公害等の防止

- 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水質汚濁による被害を生ずるおそれがないよう、適切な措置を講じること。

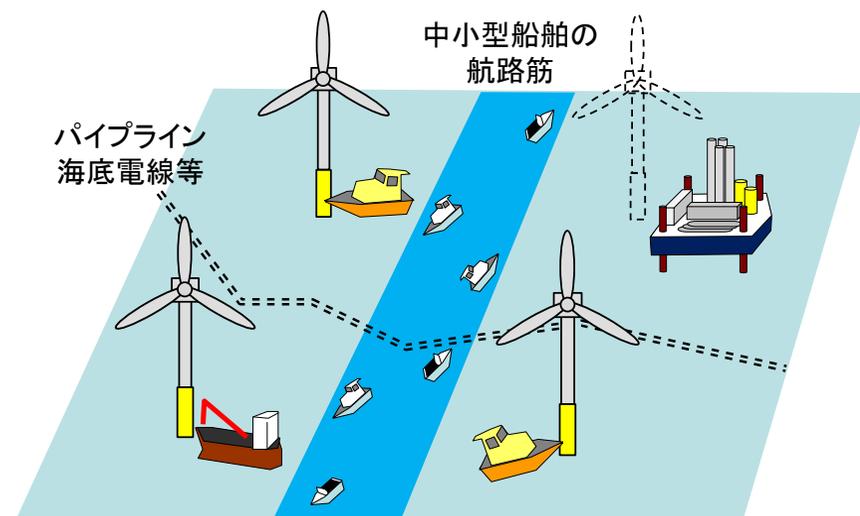


2.7 港湾機能及び周辺海域の利用等に影響を与えない洋上風力発電設備の設置

- 洋上風力発電設備の配置に当たっては、風車後方の乱流や、想定を大幅に上回る作用による洋上風力発電設備の倒壊・崩壊によって、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。
- 同設備の設置により、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。



↑ 港湾施設との離隔距離の確保の例

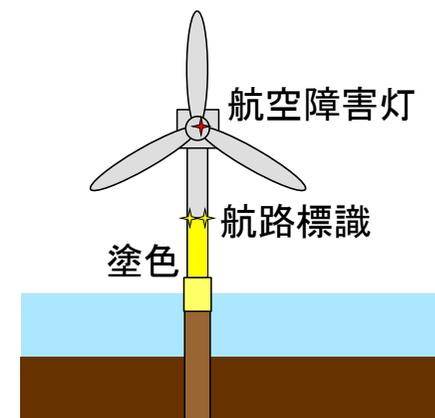


↑ 周辺海域の利用に支障のない設置のイメージ

2.8 航行船舶からの視認性の向上

- 洋上風力発電設備は、昼夜や気象などの環境条件に関わらず、捕捉・識別性を確保するものとする。
- 船舶操船時において他の船舶、地形、航行援助施設等の捕捉・識別性を阻害しないこと。

視認性を向上した洋上風力発電設備の例 →



2.9 船舶等との接触の防止

- 回転翼が、航行する船舶に接触しないよう、設置位置やロータ最下点の高さを設定するものとする。

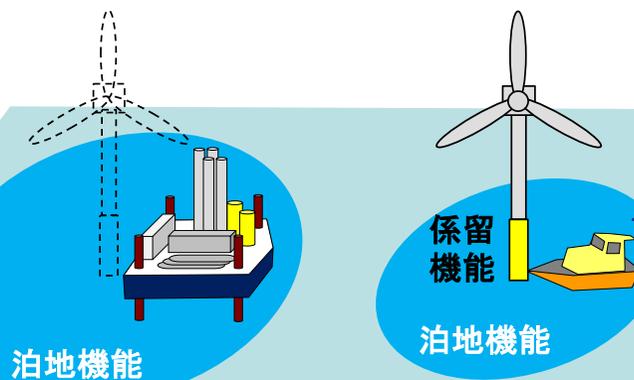
2.10 腐食・洗掘等の防止

- 海水や雨水による金属の腐食を防止する措置を講じるとともに、漂砂による摩耗作用の影響を考慮する。

2.11 施工及び維持管理等への対応

- 適切な設置及び維持管理のため、工事実施や維持管理等の方法を踏まえた構造設計を行うものとする。
- また、船舶による当該設備への人員及び資機材の輸送等に支障が無いことを確認するものとする。

- 当該海域において施工可能な洋上風力発電設備の構造設計
- 建設で活用するSEP船の泊地機能等を勘案し、港湾管理者が水域を設定



- 維持管理用の船舶の着岸に対応した係留機能を有する洋上風力発電設備
- 維持管理用の船舶が停泊する泊地機能等を勘案し、港湾管理者が水域を設定

↑ 施工・維持管理への対応の例

2.12 送電線等の敷設

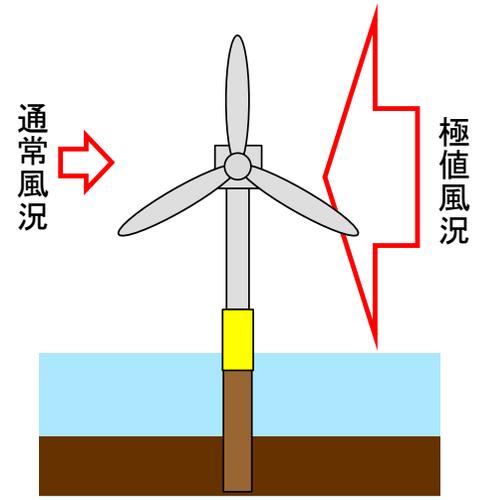
- 海底送電線及び通信ケーブルの敷設は、埋設を原則とし、港湾の利用もしくは保全に支障を与え、港湾計画の遂行を阻害し、その他港湾の開発発展に支障を与えるものであってはならない。

3.1 風荷重

○ 現地実測データまたは気象の推算値により、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。

【解説】

風況条件	解説	設定法
通常条件 ・ 通常乱流モデル ・ 通常風速プロファイルモデル 等	風車の運用中に頻繁に発生する風況条件	現地観測データを評価した結果に基づき、平均風速の出現頻度分布及び乱流強度を定める。
極値条件 ・ 極値風モデル ・ 極値乱流モデル 等	50年再現期間で定義される風況条件	台風・季節風の来襲頻度・強度と、局地的な地形の効果を考慮して50年再現期間の設計風速及び乱流強度を定める。 等



↑ 風荷重のイメージ

3.2 潮位

○ 港湾の施設の設計に用いる潮位の設定方法等に準拠して、洋上風力発電設備の設計に用いる潮位を設定する。

3.3 波浪荷重

- 海象の実測値または推算値をもとに、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。

【解説】

- 風車の運転状況や風況に対応して、海況条件を設定する。

海況条件	解説	波形の標準的な設定法
極値海況 (ESS: Extreme Sea State)	再現期間50年等の海況 (有義波高、周期)	水深や碎波の影響を考慮した非線形不規則波の時刻歴波形
高波浪時海況 (SSS: Severe Sea State)	発電中の風況に対して発生し得る極値海況	
通常海況 (NSS: Normal Sea State)	通常風況に対応した海況	線形不規則波の時刻歴波形

- 港湾基準に準拠して、有義波高 H_s を設定。最高波高は、安全側の設定としてJIS C 1400-3に準拠し、 $H_{max}=1.86H_s$ とする。
- 風と波の方向のばらつきを考慮して、荷重の組合せを設定する。

3.4 津波荷重

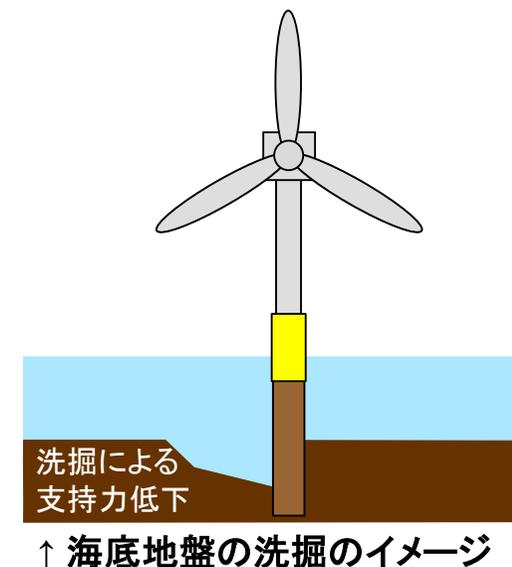
- 洋上風力発電設備を、津波の影響を大きく受ける場所に設置する場合には津波荷重を適切に設定する

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。

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考慮するものとし、洗掘の影響を受ける場合には、適切な対策をとるものとする。



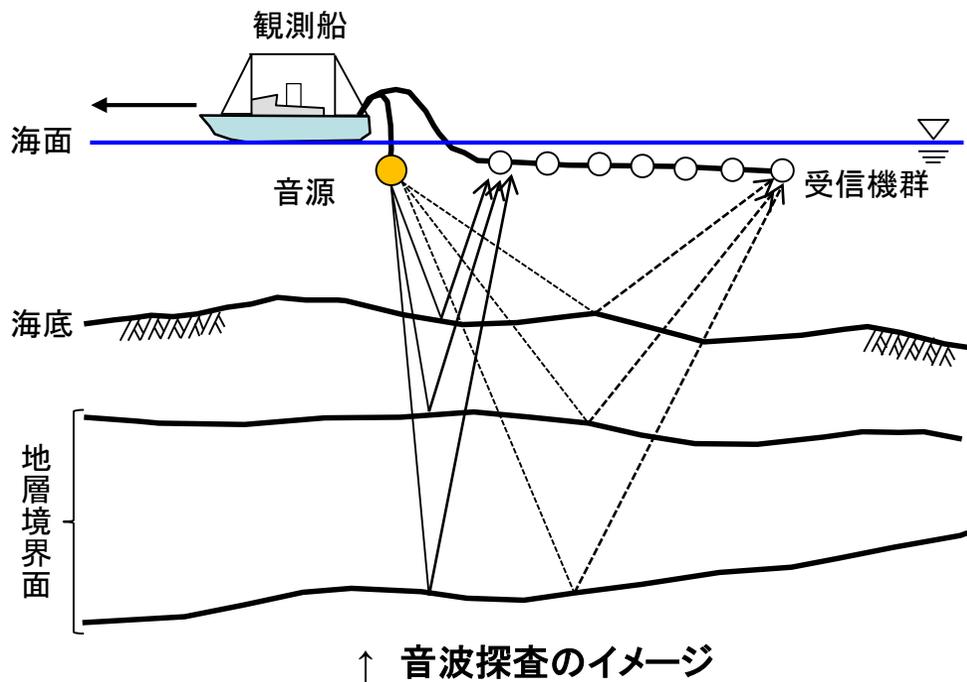
3.7 地盤

- 地盤調査に当たっては、洋上風力発電設備の構造や規模に応じて、当該設備を設置する地点周辺の地盤の性状を適切に評価、地盤の物理的性質、力学的特性、工学的基盤面等を設定する。

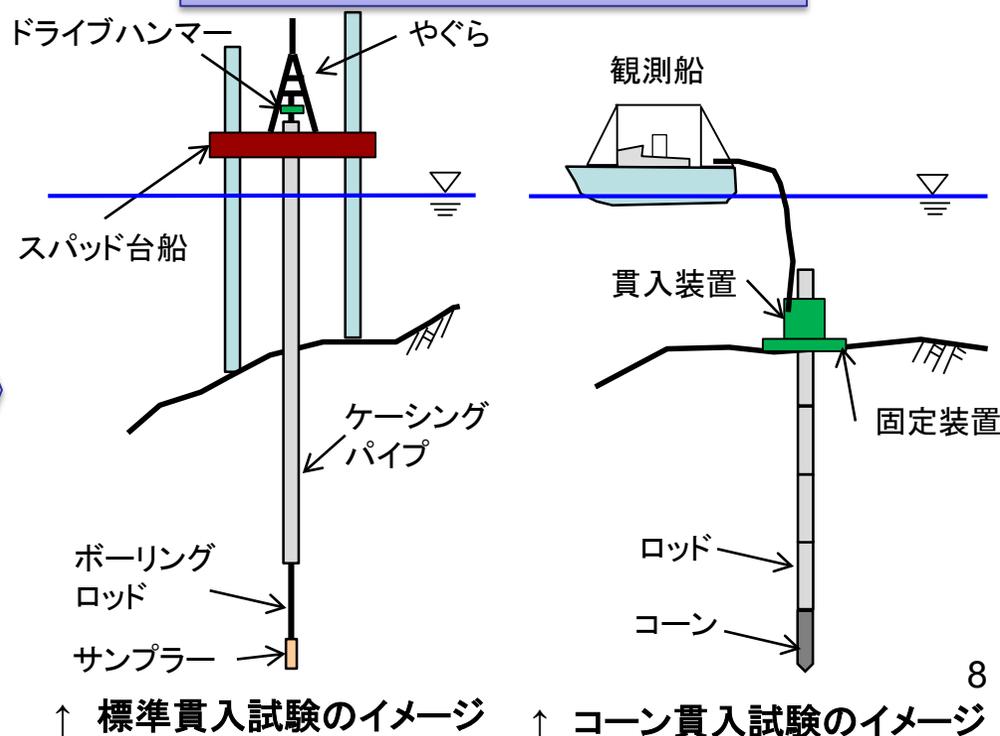
【解説】

- 原位置試験や室内試験を実施するために地盤ボーリングを実施する必要があり、調査位置や間隔について、予備調査や音波探査結果等を踏まえ、地層の均一性・一様性を考慮して決定することが望ましい。
- 原位置試験については、洋上風車設置位置ごとに行うこととし、標準貫入試験(SPT)及びコーン貫入試験(CPT)を併用してもよいが、CPTを用いる場合、SPTによるデータとの突き合わせを実施することが望ましい。
- また、CPTにより地盤の物理的性質、力学的特性を設定する際には、サンプリングによる室内試験の結果と突き合わせを実施することが望ましい。

音波探査による海底地盤面下の地層探査



地盤ボーリング、原位置試験の実施



3.8 地震荷重

- 地震荷重の評価に用いる地震波は、スペクトル適合波、観測地震波、サイト波を用いるものとする。
- スペクトル適合波及び観測地震波については、「風技解釈」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を用いるものとする。また、サイト波については、港湾の施設の技術基準に規定されるレベル1地震動（以下、港湾L1地震動）及びレベル2地震動（以下、港湾L2地震動）を用いるものとする。

【解説】

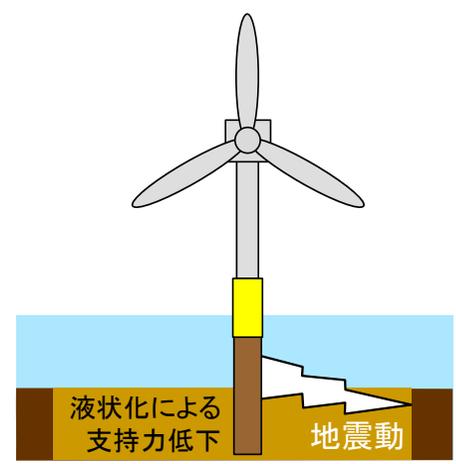
地震波の種類		特徴
スペクトル適合波	稀に発生する地震動	工学的基盤面での基本最大加速度を 64cm/s^2 (64gal) として波形を算定
	極めて稀に発生する地震動	工学的基盤面での基本最大加速度を 320cm/s^2 (320gal) として波形を算定
サイト波	港湾L1地震動	国土技術政策総合研究所 港湾施設研究室のホームページに波形を公開
	港湾L2地震動	中央防災会議等による調査結果、地域防災計画を踏まえて総合的に判断

3.9 地盤の液状化・沈下

- 地震による基礎地盤の液状化、基礎地盤の変状が予想される場合、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】

- 地震により液状化が生じることが判明した場合、液状化防止対策を施すか、液状化が生じても支持構造物の安全性・安定性を確保できる構造とする。



↑ 海底地盤の液状化のイメージ

3.10 接岸荷重

- 船舶の接岸による作用については、対象船舶の諸元、当該設備の構造、接岸方法、接岸速度等を考慮して、定めるものとする。

3.11 固定荷重

- ブレード、ナセル、タワー等の積載する荷重を設定するものとする。

3.12 その他荷重

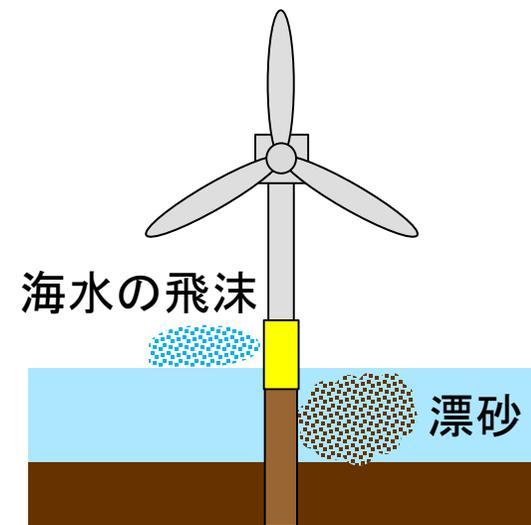
- 前述した荷重の他に、必要に応じて、(1)積雪荷重、(2)海氷・着氷荷重、(3)水圧、(4)海中生物付着、(5)温度変化による荷重、(6)輸送時・施工時荷重の影響を考慮するものとする。

3.13 腐食作用

- 自然状況等の諸条件に応じて、金属の腐食ならびに腐食速度を適切に考慮するものとする。
- また、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。

3.14 材料

- 支持構造物に使用する材料は、作用、劣化、耐用期間、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。

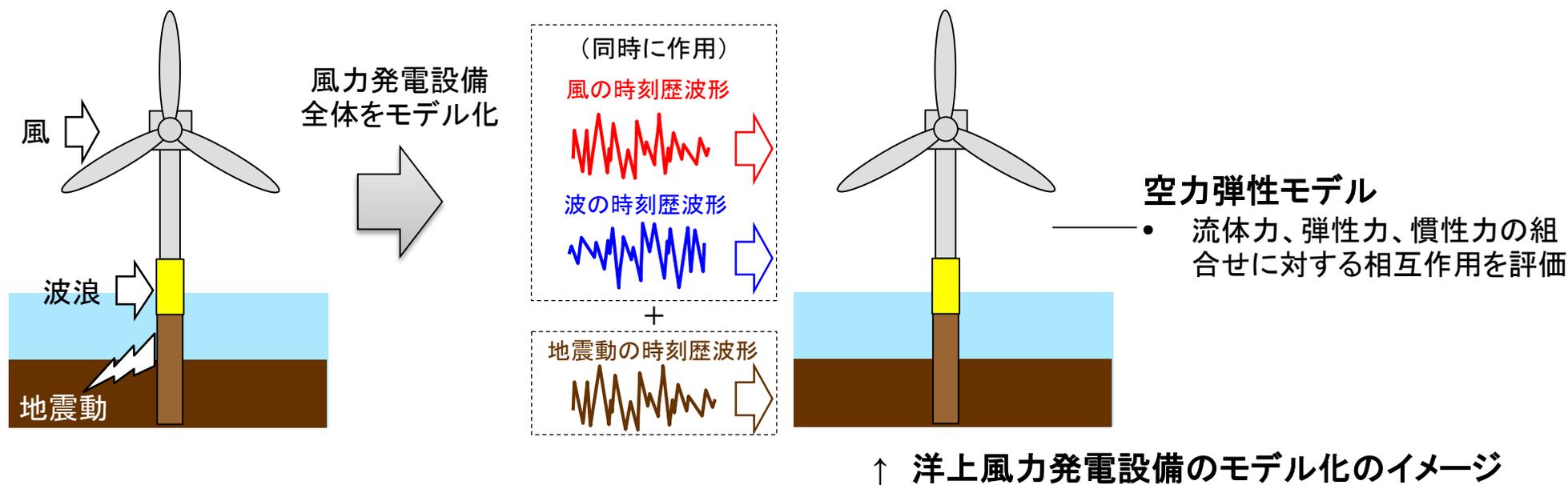


↑ 腐食作用のイメージ

4.1 構造解析

- 洋上風力発電設備全体について、荷重および荷重効果の計算を実施することを基本とする。
- 荷重およ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(動的解析)を用いて行わなければならない。

【解説】



4.2 荷重抵抗係数設計法による設計

- 構造物又は構造部材の安定性・安全性の照査にあたっては、**設計荷重効果 S_d** が **設計耐力 R_d** 以下となることを確認する。

$$\begin{array}{c}
 \text{荷重係数} \\
 \boxed{\gamma_f} \times \begin{array}{c} \text{特性荷重} \\ \text{効果} \\ \boxed{S_k} \end{array} \leq \frac{1}{\boxed{\gamma_n}} \times \frac{1}{\boxed{\gamma_m}} \times \begin{array}{c} \text{部材耐力} \\ \text{の特性値} \\ \boxed{R_k} \end{array} \\
 \text{損傷結果に対する部分安全係数} \qquad \text{材料に関する安全係数}
 \end{array}
 \iff S_d \leq R_d$$

【解説】

係数等	解説
荷重係数 γ_f	○ 荷重に対する様々な不確実性の要因を考慮して設定される係数。
特性荷重効果 S_k	○ 荷重効果のバラツキを考慮して設定される平均値、最大値等の特性値
損傷結果に対する部分安全係数 γ_n	○ 寸法効果、許容誤差、紫外線、湿度などの外部作用による劣化、通常では検知されない欠陥などを考慮して設定される係数。
材料に関する安全係数 γ_m	○ 材料に対する様々な不確実性の要因を考慮して設定される係数。
部材耐力の特性値 R_k	○ 部材耐力のバラツキを考慮して設定される平均値、最小値等の特性値

※ 照査は、荷重抵抗係数法または許容応力度法のいずれかの方法で実施するものとする。

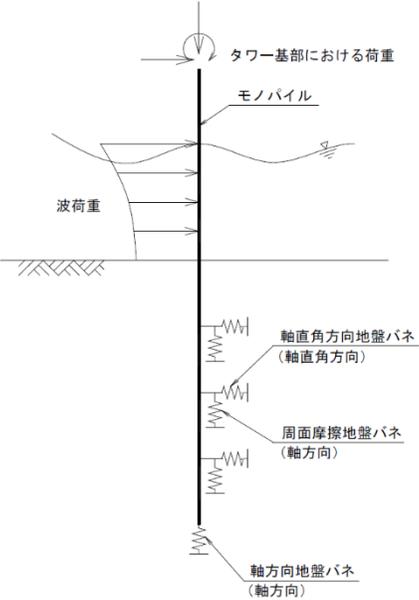
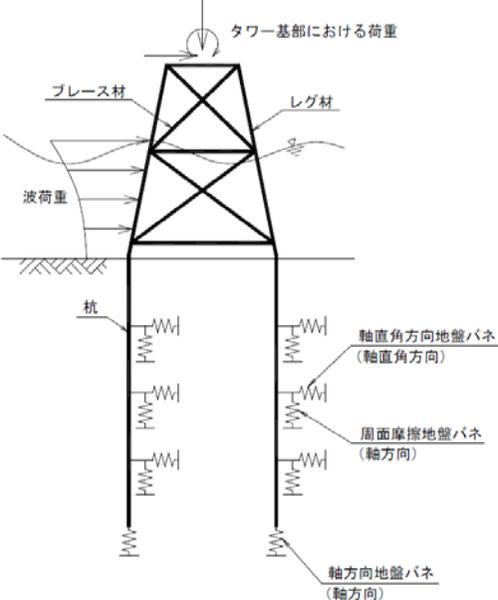
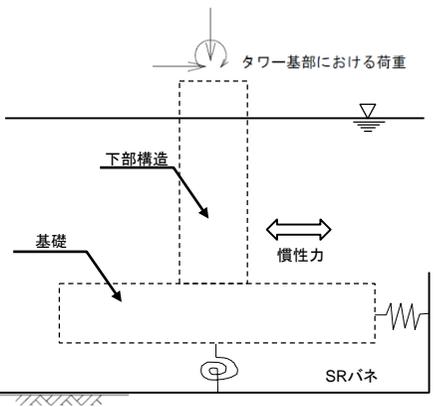
4.3 許容応力度設計法

- 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 σ が許容応力度 σ_a 以下となることを確認する。

4.4 タワーの設計

- 技術基準解説においては、鋼製円筒形モノポール支持式を対象とする。
- 2.1 で定める洋上風力発電設備の要求性能を満足する安全性・安定性を有すること。
- 風、波荷重などの繰り返し作用による疲労の影響を考慮すること。

4.5~4.7 各基礎構造の設計

	モノパイル基礎	ジャケット基礎	重力式基礎
構造計算の基本	<ul style="list-style-type: none"> ○ 海底面以深の杭および地盤の作用を考慮した骨組解析により構造計算を実施することを基本とする。 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 海底面以深の杭および地盤の作用を含めた考慮した3次元の骨組解析による構造計算を実施することを基本とする。 ○ 骨組解析による構造計算を実施する際は、ジャケットのトラス構造形状を考慮し、部材に作用する荷重を適切に設定する。 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 重力式基礎の構造計算は、下部構造および基礎を含めた3次元の骨組解析等による構造計算を基本とする。 ○ 重力式基礎の下部構造およ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。
解析モデルのイメージ			<p>(地震時の場合)</p> 

4.5~4.7 各基礎構造の設計

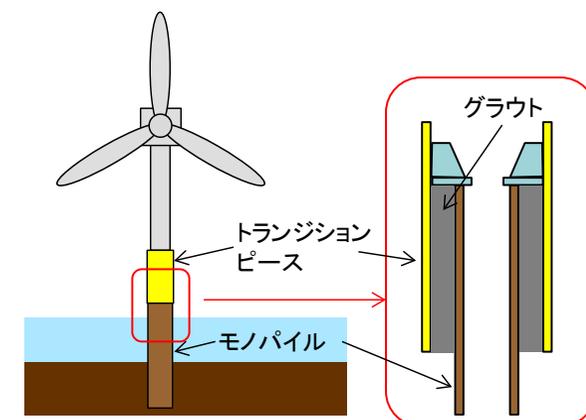
	モノパイル基礎	ジャケット基礎	重力式基礎
安定性の照査 (支持力・滑動・転倒)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 各荷重の組合せにより生じる押し込み力、引き抜き力が設計支持力を上回らないこと。 ○ 海底地盤への根入れ長は、十分な安全性を有するものであること。 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 各荷重の組合せにより鋼管杭に生じる押し込み力、引き抜き力が設計支持力を上回らないこと。 ○ 極めて稀に発生する地震動等の作用により鋼管杭に生じる押し込み力、引き抜き力が設計支持力を上回らないこと。 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 各荷重の組合せの作用に対して安定を確保すること。 ○ 極めて稀に発生する地震等の作用に対して、倒壊・崩壊しないことを確認すること。
安全性の照査 (部材応力度)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 各荷重の組合せの作用により生じる部材断面力が設計耐力を上回らないこと。 ○ 風、波荷重などの繰り返し作用による疲労の影響を考慮すること。 ○ 海洋環境下における、長期間における耐久性を考慮すること。 ○ 極めて稀に発生する地震動等の作用により、倒壊・崩壊しないこと。 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 各荷重の組合せの作用により生じる部材断面力が設計耐力を上回らないこと。 ○ 風、波荷重などの繰り返し作用による疲労の影響を考慮すること。 ○ 海洋環境下における、長期間における耐久性を考慮すること。 ○ 極めて稀に発生する地震動等の作用により、倒壊・崩壊しないこと。 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 各荷重の組合せの作用により生じる部材断面力が終局限界状態での設計耐力を上回らないこと。 ○ 鋼部材に対しては、風、波などの繰り返し作用による疲労の影響を考慮すること。 ○ 海洋環境下における、長期間における耐久性を考慮すること。 ○ 極めて稀に発生する地震等の作用により、倒壊・崩壊しないこと。

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、部材に生じる荷重効果が設計耐力を上回らないように設計する。

各構造形式の接合部の例

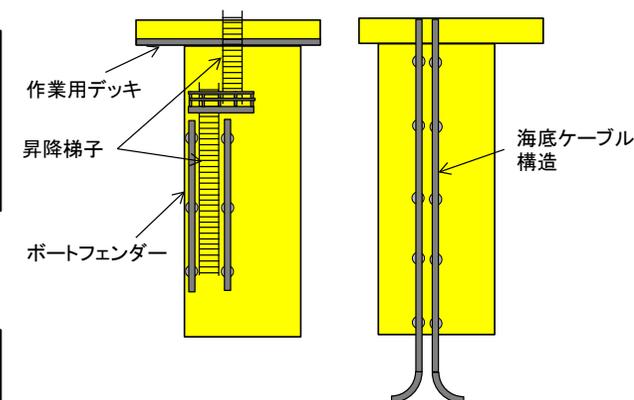
形式	タワーと下部構造の間	下部構造と基礎の間
モノパイル基礎	タワー下端とトランジションピースの間でのボルト接合部	トランジションピースと鋼管杭の間でのグラウト接合部
ジャケット構造	タワー下端とジャケット構造の間での鋼構造接合部	ジャケット構造と鋼管杭の間でのグラウト接合部
重力式構造 (下部構造がコンクリートの場合)	タワー下端とコンクリート躯体の間での接合部	下部構造とフーチング基礎の接合部



↑ トランジションピースと鋼管杭の間でのグラウト接合のイメージ

4.9 運転や維持管理に必要な設備の設計に関する事項

- 洋上風力発電設備の運転や維持管理に必要な設備については自重、稀に発生する地震動、港湾L1地震動、船舶の接岸、載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。



↑ 運転や維持管理に必要な設備の例

4.10 防食設計

- 防食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こととする。