

# 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)について

岡田 理\*・大村 厚夫\*\*・山本 修司\*\*\*

\* (一財) 沿岸技術研究センター 調査部 主任研究員

\*\* (一財) 沿岸技術研究センター 調査部 調査役

\*\*\* (一財) 沿岸技術研究センター 参与

港湾区域に設置される洋上風力発電設備等は、国土交通省の港湾法及び経済産業省の電気事業法に基づく審査が必要とされている。この審査については、事業者の負担軽減や審査手続きの合理化のため、統一的な考え方のもとで実施されることが望ましい。国土交通省は経済産業省と連携し、洋上風力発電設備が適合すべき基準について、各法に基づいた統一的考え方を解説した「洋上風力発電設備に関する技術基準の統一的解説」<sup>1)</sup>を策定し、平成 30 年 3 月に公表した。本稿は、この本基準解説の概要について示したものである。

キーワード：再生可能エネルギー、洋上風力発電設備、技術基準

## 1. はじめに

我が国において、再生可能エネルギーは国産エネルギー資源の拡大、低炭素社会の実現、関連産業の創出等の観点から導入の拡大が期待されている。

洋上風力発電は、陸上よりも良好な風況であることや設置にあたって風車の大きさに関する制約が少ないことから、欧州でも多数導入されている。

洋上風力発電の導入適地として、港湾が有望視される中、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<sup>2)</sup>が創設された。

洋上風力発電設備を港湾区域に導入する場合、港湾法に基づく公募対象施設等の技術基準と港湾の施設の技術上の基準・同解説<sup>3)</sup>及び電気事業法に基づく発電用風力設備の技術基準に適合する必要がある。

洋上風力発電事業者は、港湾管理者による公募占用計画の審査及び経済産業省産業保安監督部等による工事計画の審査を受ける必要がある。

港湾法と電気事業法に基づく審査が必要とされる中、事業者の負担軽減や審査手続きの合理化のため、各法の統一的な考え方に基づいた技術基準が必要である。

上記の状況を踏まえ、国土交通省は経済産業省と連携し、「洋上風力発電設備に関する技術基準の統一的解説」(以降、「本基準解説」とする。)を策定し、平成 30 年 3 月に両省の HP にて公表した。本基準解説は、港湾における洋上風力発電施設検討委員会及び設計技術ワーキンググループを開催した上で、取り纏められたものである。

本稿は、この本基準解説の概要について示す。

## 2. 本基準解説の構成

本基準解説は、関連法令、総則、洋上風力発電設備等の要求性能、洋上風力発電設備等に作用する自然条件等、洋上風力発電設備等の設計、付属書の 6 つの項目で構成されている。

関連法令では、港湾法及び電気事業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示している。

総則では、港湾法及び電気事業法に基づいて行われる審査内での本基準解説の位置づけや本基準解説の対象となる設備及び支持構造物の構造形式、本基準解説内で用いる用語と記号の定義、国内外の関連規格・関連法規について示した。

洋上風力発電設備等の要求性能では、①外力に対してタワーや基礎等の支持構造物が保有すべき要求性能、②電気事業法に基づく風車本体の機械に対する要求性能、③港湾法に基づく風車の配置等に対する要求性能について示した。

洋上風力発電設備等に作用する自然条件等では、①風荷重、波浪荷重、地震荷重等の荷重条件、②地盤の調査項目、調査方法、洗掘、液状化・沈下等の地盤に関する条件、③材料の選定、取扱、腐食作用等の材料に関する条件について示した。

洋上風力発電設備等の設計では、①洋上風力発電設備(風車・タワー・下部工・基礎)の構造解析モデル、②照査方法である荷重抵抗係数法と許容応力度設計法の説明、③タワー、モノパイル構造、ジャケット構造、重力式基礎、接合部の各構造の設計上の留意点、④係留施設等の付帯設備の設計上の留意点、⑤防食設計について示した。

### 3. 総則

#### 3.1 適用範囲

本基準解説の対象設備は、洋上風力発電設備、洋上変電設備、観測塔、海底送電線、通信ケーブルとする。また、対象とする支持構造物は、タワー、モノパイル構造、ジャケット構造、重力式基礎とし、その他の基礎構造の構造設計の妥当性については、有識者の意見を踏まえ、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。

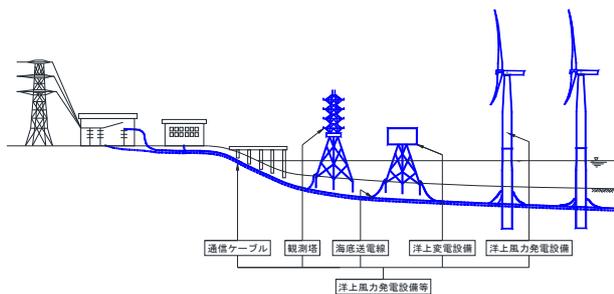


図-1 対象とする設備 (青線)

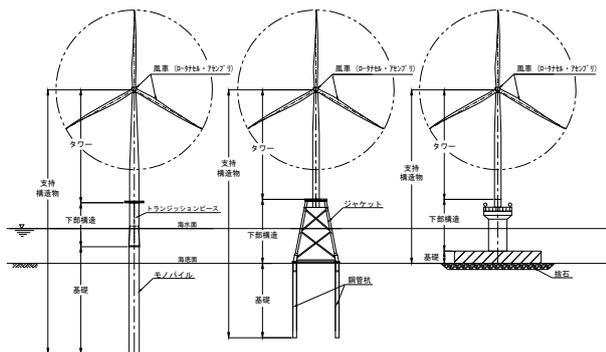


図-2 対象とする支持構造物  
(モノパイル構造、ジャケット構造、重力式基礎)

#### 3.2 関連規格・法規

国内における法規・基準・指針類については、国土交通省が定める「港湾の施設の技術上の基準・同解説」や「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>4)</sup>等、経済産業省が定める「発電用風力設備に関する技術基準を定める省令」<sup>5)</sup>や「発電用風力設備の技術基準の解釈」<sup>6)</sup>等を挙げた。

国際規格・基準類については、風車全般の設計要件である IEC61400-1<sup>7)</sup>と洋上風車の設計要件である IEC61400-3<sup>8)</sup>及び ISO 規格類等を挙げた。IEC に対応する国内規格として JIS1400-1<sup>9)</sup>、1400-3<sup>10)</sup>を挙げた。

認証規格については、欧州の洋上構造物での使用実績の多い DNVGL 基準類を挙げた。

その他については、国内の陸上風車の支持構造物の設計に用いられる「風力発電設備支持物構造設計 指針・同解説」<sup>11)</sup>等を挙げた。

### 4. 洋上風力発電設備等の要求性能

#### 4.1 外力に対する支持構造物の要求性能

##### (1) 構造設計の基本方針

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。ここで、安全性は部材応力度や疲労損傷度等の照査にて、安定性は基礎の支持力、滑動、転倒等の照査にて確認するものとする。

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」とする)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。

上記の要求性能について、本基準解説において想定した荷重組み合わせにおける照査対象毎の適用基準、要求性能、照査項目の組み合わせの例を表-1に示す。なお、荷重組み合わせの詳細については(2)に示す。

表-1 荷重組み合わせ、適用基準、要求性能、照査項目  
(短期荷重及び疲労荷重)

荷重組み合わせ	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 ・発電中の故障 ・発電開始時 ・通常発電停止 ・緊急停止 ・停止時 ・休止時(故障) ・輸送・設置・メンテナンス・修理時 ・海水作用時	タワー	JISC 1400-1 (風車全般の国際規格)	損傷せず、発電施設としての機能を満足する	構造の安全性 1) 部材応力度 2) 疲労損傷度				
					下部構造	JISC 1400-3 (洋上風車の国際規格) (信頼性における国際・国内基準)	損傷せず、発電施設としての機能を満足する	構造の安定性 1) 支持力 2) 滑動 3) 転倒
	DLC 1.1~1.6	JISC 1400-3 (洋上風車の国際規格) (信頼性における国際・国内基準)	損傷せず、発電施設としての機能を満足する	構造の安定性 1) 支持力 2) 滑動 3) 転倒				
	DLC 2.1~2.5							
	DLC 3.1~3.3							
DLC 4.1~4.2								
DLC 5.1								
DLC 6.1~6.4								
DLC 7.1~7.2	JISC 1400-3 (洋上風車の国際規格) (信頼性における国際・国内基準)	損傷せず、発電施設としての機能を満足する	構造の安定性 1) 支持力 2) 滑動 3) 転倒					
DLC 8.1~8.4								
DLC D.1~D.8								

##### (2) 荷重の組み合わせ

洋上風力発電設備等の設計に用いる荷重は、風荷重、波浪荷重、地震荷重等を適切に組み合わせる。

短期荷重、疲労荷重、海水荷重に関する荷重組み合わせは IEC61400-3 を元に設定した。長期荷重、地震荷

重、津波荷重に関する荷重組み合わせは「風力発電設備支持物構造設計指針・同解説」及び「港湾の施設の技術上の基準・同解説」を参考に設定した。表-2~4に荷重組み合わせを示す。

表-2 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) $V_b < V_{hub} < V_{cut}$	NSS $H_s = H_{1,0SShub}$	COD及びUNI	NCM	H.W.L.	U	1.25 (N)	
	1.2	NTM $V_b < V_{hub} < V_{cut}$	NSS $H_s = H_{1,0SS}$ , $T_{R,0SS}$ , $V_{hub}$ の値を標準考慮	MIS及びMUL	考慮しない	H.W.L.	F	1.00 (F)	
	1.3	ETM $V_b < V_{hub} < V_{cut}$	NSS $H_s = H_{1,0SShub}$	COD及びUNI	NCM	H.W.L.	U	1.35 (N)	
	1.4	ECD $V_{hub} = V_b \pm 2m/s, V_c$	NSS $H_s = H_{1,0SShub}$	MIS及び風向変化	NCM	H.W.L.	U	1.35 (N)	
	1.5	EWS $V_b < V_{hub} < V_{cut}$	NSS $H_s = H_{1,0SShub}$	COD及びUNI	NCM	H.W.L.	U	1.35 (N)	
	1.6	NTM $V_b < V_{hub} < V_{cut}$	SSS $H_s = H_{1,0SS}$	COD及びUNI	NCM	H.W.L., x12, H.H.W.L.	U	1.35 (N)	
発電中の故障	2.1	NTM $V_b < V_{hub} < V_{cut}$	NSS $H_s = H_{1,0SShub}$	COD及びUNI	NCM	H.W.L.	U	1.35 (A)	
	2.2	NTM $V_b < V_{hub} < V_{cut}$	NSS $H_s = H_{1,0SShub}$	COD及びUNI	NCM	H.W.L.	U	1.10 (A)	
	2.3	EOG $V_{hub} = V_b \pm 2m/s, V_{cut}$	NSS $H_s = H_{1,0SShub}$	COD及びUNI	NCM	H.W.L.	U	1.10 (A)	
	2.4	NTM $V_b < V_{hub} < V_{cut}$	NSS $H_s = H_{1,0SShub}$	COD及びUNI	考慮しない	H.W.L.	F	1.00 (F)	
	2.5	NWP $V_b < V_{hub} < V_{cut}$	NSS $H_s = H_{1,0SShub}$	COD及びUNI	NCM	H.W.L.	U	1.35 (N)	
発電開始時	3.1	NWP $V_b < V_{hub} < V_{cut}$	NSS $H_s = H_{1,0SShub}$	COD及びUNI	考慮しない	H.W.L.	F	1.00 (F)	
	3.2	EOG $V_{hub} = V_b \pm 2m/s, V_c$	NSS $H_s = H_{1,0SShub}$	COD及びUNI	NCM	H.W.L.	U	1.35 (N)	
	3.3	EDC $V_{hub} = V_b, V_c \pm 2m/s, V_{cut}$	NSS $H_s = H_{1,0SShub}$	MIS及び風向変化	NCM	H.W.L.	U	1.35 (N)	
	3.4	NWP $V_b < V_{hub} < V_{cut}$	NSS $H_s = H_{1,0SShub}$	COD及びUNI	考慮しない	H.W.L.	F	1.00 (F)	
通常発電停止	4.1	NWP $V_b < V_{hub} < V_{cut}$	NSS $H_s = H_{1,0SShub}$	COD及びUNI	考慮しない	H.W.L.	F	1.00 (F)	
	4.2	EOG $V_{hub} = V_b \pm 2m/s, V_{cut}$	NSS $H_s = H_{1,0SShub}$	COD及びUNI	NCM	H.W.L.	U	1.35 (N)	
緊急停止	5.1	NTM $V_b = V_c \pm 2m/s, V_{cut}$	NSS $H_s = H_{1,0SShub}$	COD及びUNI	NCM	H.W.L.	U	1.35 (N)	
	6.1	EWM $V_{hub} = V_{cut}$	ESS $H_s = H_{1,0SS}$	MIS及びMUL	ECM ( $U = U_b$ )	H.W.L., x12, H.H.W.L.	U	1.35 (N)	
停止時	6.2	EWM $V_{hub} = V_{cut}$	ESS $H_s = H_{1,0SS}$	MIS及びMUL	ECM ( $U = U_b$ )	H.W.L., x12, H.H.W.L.	U	1.10 (A)	
	6.3	EWM $V_{hub} = V_c$	ESS $H_s = H_{1,0SS}$	MIS及びMUL	ECM ( $U = U_c$ )	H.W.L., x12, H.H.W.L.	U	1.35 (N)	
	6.4	NTM $V_b < V_{hub} < 0.7V_{cut}$	NSS $H_s = H_{1,0SS}$	COD及びMUL	考慮しない	H.W.L.	F	1.00 (F)	
	7.1	EWM $V_{hub} = V_c$	ESS $H_s = H_{1,0SS}$	MIS及びMUL	ECM ( $U = U_c$ )	H.W.L., x12, H.H.W.L.	U	1.10 (A)	
停止時+故障	7.2	NTM $V_b < V_{hub} < V_{cut}$	NSS $H_s = H_{1,0SS}$	COD及びMUL	考慮しない	H.W.L.	F	1.00 (F)	
	8.1	洋上風車の輸送、組立、アッセス、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)
輸送設備メンテナンス修理時	8.2	EWM $V_{hub} = V_c$	ESS $H_s = H_{1,0SS}$	COD及びUNI	ECM ( $U = U_c$ )	H.W.L., x12, H.H.W.L.	U	1.10 (A)	
	8.3	NTM $V_{hub} < 0.7V_{cut}$	NSS $H_s = H_{1,0SS}$	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、アッセス、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-3 海氷荷重に関する荷重組み合わせ

状態	DLC	海水	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) $V_{hub} = V_c \pm 2m/s, V_{cut}$	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) $V_{hub} = V_c \pm 2m/s, V_{cut}$	H.W.L.	U	1.35 (N)
	D.3	移動氷盤による水平荷重	NTM $V_b < V_{hub} < V_{cut}$	H.W.L.	U	1.35 (N)
	D.4	移動氷盤による水平荷重	$V_b < V_{hub} < V_{cut}$	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	米丘及び氷壁からの圧力	EWM (乱気流モデル) $V_{hub} = V_c$	H.W.L.	U	1.35 (N)
	D.7	移動氷盤による水平荷重	NTM $V_{hub} < 0.7V_{cut}$	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) $V_{hub} = V_c$	H.W.L.	U	1.35 (N)

表-4 長期荷重、地震、津波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
長期荷重	NTM $V_{hub} = V_c$	NSS $H_s = H_{1,0SS}$	COD及びUNI	NCM	H.W.L.
稀に発生する地震	NTM $V_{hub} = V_{H1, NSS}$	NSS $H_s = H_{41, NSS}$	COD及びUNI	NCM	H.W.L.
極めて稀に発生する地震	NTM $V_{hub} = V_{H1, NSS}$	NSS $H_s = H_{41, NSS}$	COD及びUNI	NCM	H.W.L.
港湾基準に規定されるレベル1地震動	NTM $V_{hub} = V_{H1, NSS}$	NSS $H_s = H_{41, NSS}$	COD及びUNI	NCM	H.W.L.
港湾の耐震強化施設の設計に用いるレベル2地震動	NTM $V_{hub} = V_{H1, NSS}$	NSS $H_s = H_{41, NSS}$	COD及びUNI	NCM	H.W.L.
設計津波	NTM $V_{hub} = V_{H1, NSS}$	NSS $H_s = H_{41, NSS}$	COD及びUNI	NCM	H.W.L.又はL.W.L.

## 4.2 風車本体に対する要求性能

風車本体に対する要求性能は、「発電用風力設備に関

する技術基準を定める省令」に基づいて定めた。

具体的には、風車の構造（風車クラス等）、風車の安全な状態の確保（発電中の安全対策、落雷対策）、取扱者以外の者の接近の防止、圧油装置及び圧縮空気装置の危険の防止（最高圧力に対する安全性、耐食性等）、公害等の防止（油の流出防止、等）が要求性能である。

## 4.3 風車の配置等に対する要求性能

風車の配置等に対する要求性能は「港湾における洋上風力発電施設等の技術ガイドライン（案）」等に基づいて定めた。

具体的には、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（離隔距離）、航行船舶からの視認性の向上（塗色、灯火等）、船舶等との接触の防止（ロータとの接触防止等）、腐食・洗掘の防止、施工及び維持管理への対応（施工法、維持管理法を踏まえた構造設計）、送電線等の敷設（ケーブルの埋設等による防護）が要求性能である。

## 5. 洋上風力発電設備等に作用する自然条件

### 5.1 風荷重

荷重解析に必要な風況条件は、風車運用中の通常条件と風車停止時の極値条件があるが、ここでは極値条件について述べる。

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等により、台風・季節風の襲来頻度・強度と局地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、平成12年建設省告示で定められている基準風速を基に局地的な地形の効果、粗度区分等を考慮して評価することも可能とする（方法②）。

方法①を用いた設計風速の評価フローを図-3~5に、方法②を用いた設計風速の評価フローを図-6に示す。

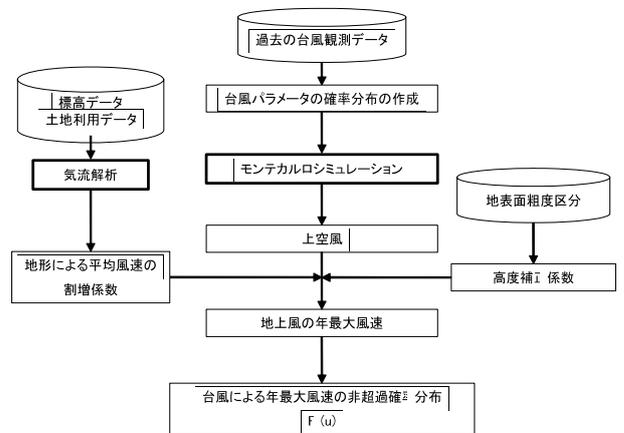


図-3 台風による年最大風速の非超過確率分布に関する評価フロー

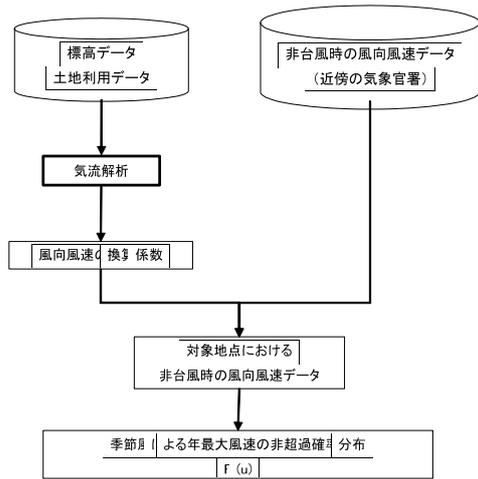


図-4 季節風による年最大風速の非超過確率分布に関する評価フロー

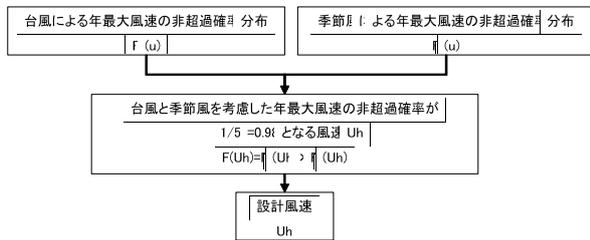


図-5 方法①による設計風速の評価フロー

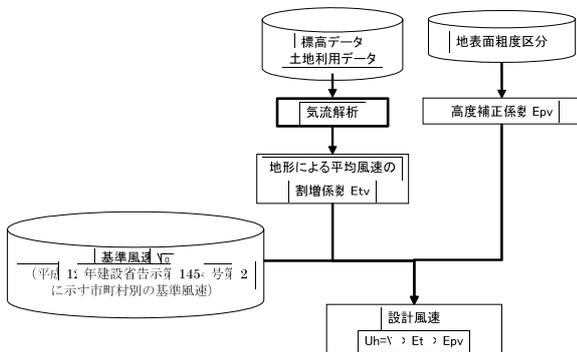


図-6 方法②による設計風速の評価フロー

## 5.2 波浪荷重

波浪荷重の算定においては、従来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基に設定する。

### (1) 海況状況の設定

海況条件は、極値海況 (ESS)、高波浪時海況 (SSS)、通常海況 (NSS) の3種類を設定する。

ESS は、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を表す。

SSS は、発電中に発生し得る高波浪時の有義波高、有義波周期で表現した海況を表す。

NSS は、与えられた風速階級の有義波高、有義波周期及びその出現頻度で表現した海況を表す。

### (2) 波浪荷重の評価の流れ

ESS 及び SSS における波浪荷重の評価フローを図-7 に示す。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じである。

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図-8 に示す。疲労照査に必要となる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。

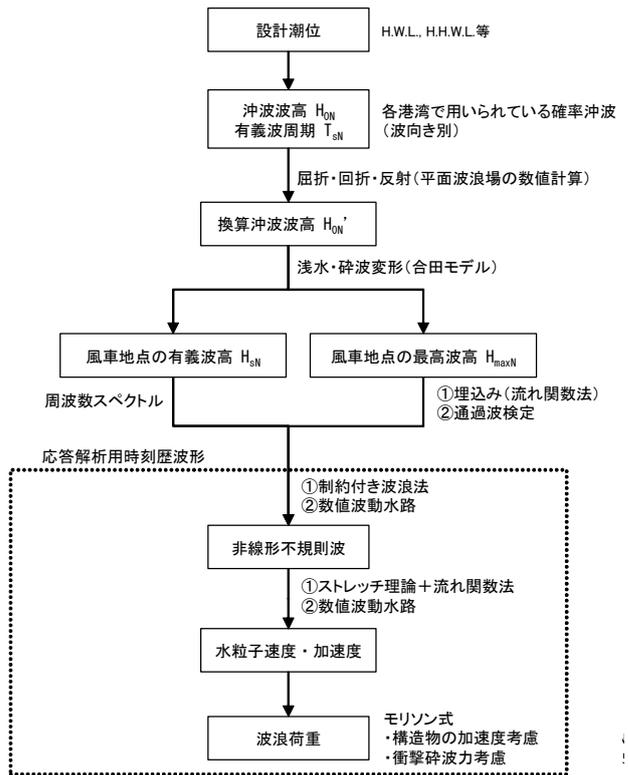


図-7 ESS 及び SSS における波浪荷重の評価フロー

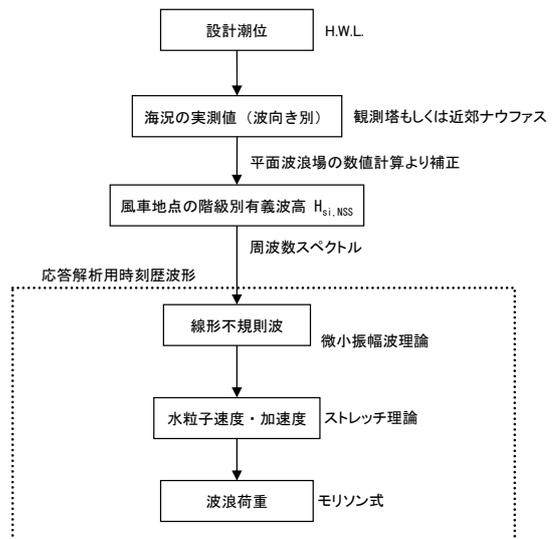


図-8 NSS における波浪荷重の評価フロー (波の非線形性を無視し得る場合)

(3) 極値海況の不規則波の時刻歴波形

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。JIS C1400-3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おり、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、最高波高を有する非線形波を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。図-9に例を示す。

数値波動水路は、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。図-10に例を示す。

なお、波浪荷重は、モリソン式、合田の波圧公式、JIS C1400-3等を参考にして求める。

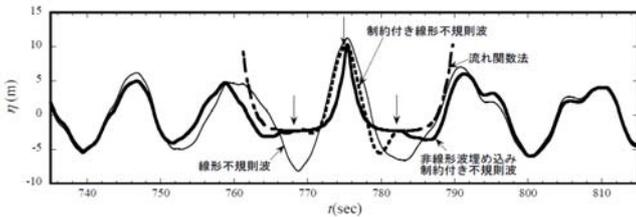


図-9 制約付き波浪法による検討例<sup>12)</sup>

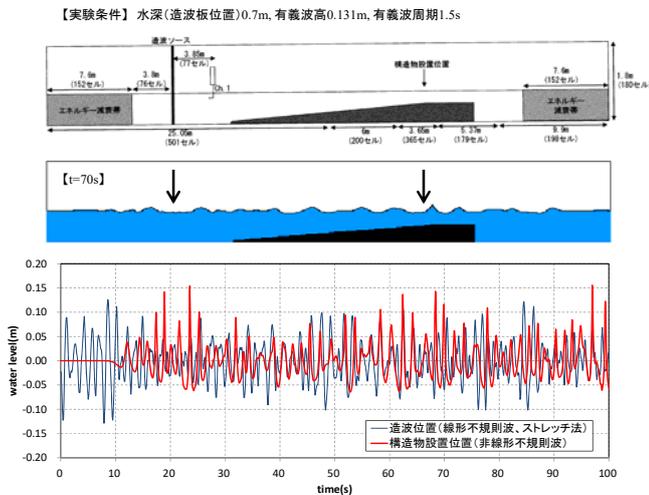


図-10 数値波動水路による通過波検定例<sup>13)</sup>

5.3 地震荷重

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、サイト波の3種類とする。

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。工学的基礎面での基本最大加速度は、稀に発生する地震動では64gal、極めて稀に発生する地震動では320galである。また、水平地震動に加えて、鉛直

地震動も考慮する必要がある。

サイト波のうち、港湾レベル1地震動は「港湾の施設の技術上の基準・同解説」に規定される地震動、または、国土技術政策総合研究所のHP<sup>14)</sup>で公開されている地震動とする。港湾レベル2地震動は、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に用いる。この地震動の設定については、過去に大きな被害をもたらした地震等を想定し、地震調査研究推進本部等の調査結果等から総合的に判断して選定する。

5.4 地盤

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できる地盤調査を行う。また、地盤調査及び土質試験の結果を元に、地盤の物理的特性、力学的特性等を設定する。

(1) 調査項目と方法

地盤調査項目は、予備調査、海底地形調査、物理探査、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である。

予備調査は、過去に実施された地盤調査等の既存資料から近隣の地盤に関する基本情報を取得する。

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。

物理探査は、海底地盤面下の地質構造、堆積状態や地下水位を連続的に広範囲に把握するために行う。

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、調査地点の地盤の構成、地盤物性(物理的特性及び力学的的特性等)を把握するために実施する。なお、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。

調査方法は、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方法を選択するのがよい。

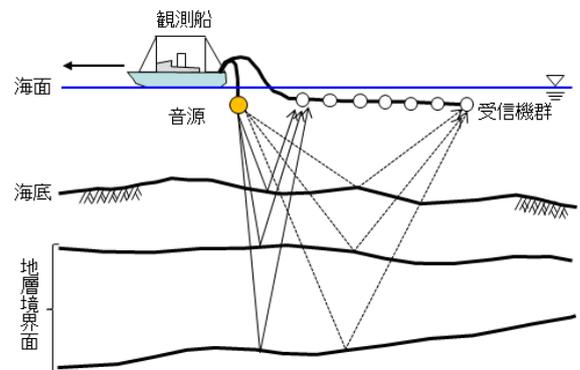


図-11 音波探査による海底地盤面下の地層探査イメージ

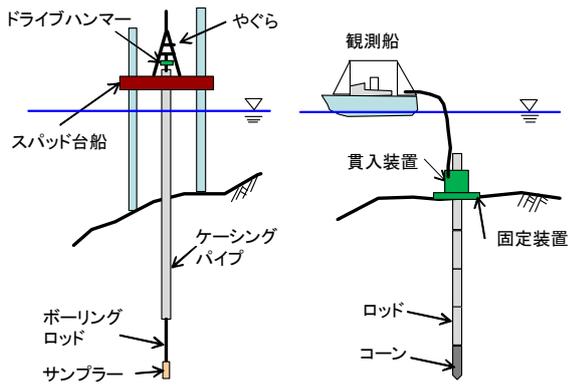


図-12 地盤ボーリング及び原位置試験のイメージ (標準貫入試験, コーン貫入試験のイメージ)

(2) 調査位置, 間隔

調査位置は, 洋上風力発電設備等の設置位置での実施を原則とする. 予備調査及び物理探査の結果等から, 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. 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ことがよい.

標準貫入試験とコーン貫入試験等, 複数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.

(3) 調査深度

調査深度は, 支持層が確認できる深さまで設定することを原則とする. 支持層の判断は, 目安として, 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としている.

## 6. 洋上風力発電設備等の設計

### 6.1 構造解析

(1) 風及び波を考慮するモデル

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する.

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, 構造モデル等は, 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.

(2) 地震時の荷重評価

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.

### 6.2 荷重抵抗係数設計法による設計

(1) 照査手法

短期荷重, 疲労荷重に対する設計は荷重抵抗係数設計法により支持構造物の安定性・安全性を照査する.

荷重抵抗係数設計法は, 設計荷重効果  $S_d$  が設計耐力  $R_d$  に対して, 式(1)を満たす方法により行う.

$$S_d \leq R_d \dots (1)$$

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  $\gamma_f$  を乗じることで求められ, 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. よって, 式(1)は式(2)のように展開することができる.

$$\gamma_f \times S_k \leq 1 / \gamma_m \times R_k \dots (2)$$

設計荷重効果  $S_d$  の求め方について, JIS C1400-3 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  $R_k$  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.

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.

動的応答を適切に求める必要がある場合は, この方法を用いて設計荷重効果を求める.

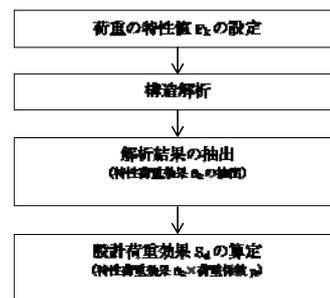


図-13 設計荷重効果  $S_d$  の計算方法 (方法1)

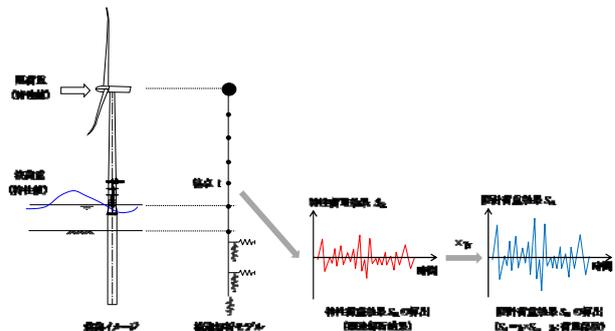


図-14 全体構造解析モデルを用いる場合の設計荷重効果の算出例 (方法1)

方法2は、特定の荷重  $F$  に対する荷重の特性値  $R_k$  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し、設計荷重効果  $S_d$  を求める方法である。

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。

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、この方法を用いて設計荷重効果を求めるものとする。

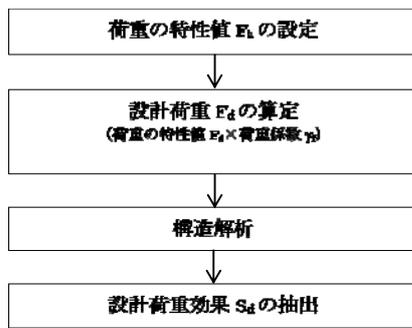


図-15 設計荷重効果  $S_d$  の計算方法 (方法2)

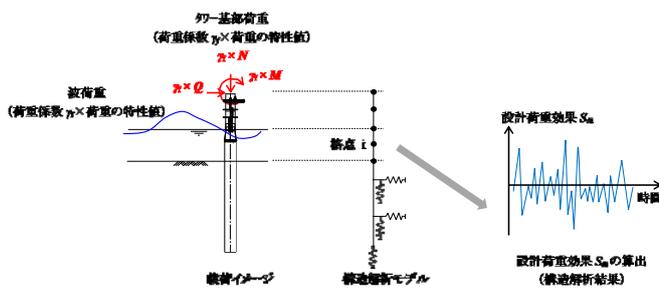


図-16 部分構造解析モデルを用いる場合の設計荷重効果の算出例 (方法2)

(2) 荷重係数  $\gamma_f$  と抵抗係数  $\gamma_m$

荷重係数は、JIS C1400-3 に基づいて設定した。短期荷重の通常時は 1.35、異常時は 1.10、疲労荷重は 1.00 とした。長期荷重、地震荷重、津波荷重については、荷重係数は設定しない。

抵抗係数は、JIS C1400-1、ISO の海洋構造物設計規格や一般に認知された海洋設計規格等に従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。

### 6.3 許容応力度設計法による設計

(1) 照査手法

主に、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。

設計では、設計荷重効果から算出される発生応力度  $\sigma$  が許容応力度  $\sigma_a$  に対して、式(3)を満たす方法により行うものとする。

$$\sigma \leq \sigma_a \dots (3)$$

式(3)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)を満たす方法により行うものとしてもよい。

$$S_d \leq R_k / f_s \dots (4)$$

(2) 許容応力度  $\sigma_f$  と安全率  $f_s$

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」や「港湾の施設の技術上の基準・同解説」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は、上記基準・指針の照査式の適用範囲や対象とする支持構造物の構造形式等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。

### 6.4 支持構造物の設計

タワー、下部構造、基礎の安全性(部材応力度、疲労損傷度、等)の照査は以下に従って行う。

- ① 短期荷重、海水荷重の作用により発生する断面力や応力度が 6.2 荷重抵抗係数法による設計の式(1)または式(2)を満足すること。
- ② 稀に発生する地震動、港湾レベル1地震動の作用により発生する断面力や応力度が 6.3 許容応力度設計法による設計の式(3)または式(4)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、崩壊しないこと。
- ④ 風、波荷重等の繰返し作用による疲労の影響を考慮しても、支持構造が安全であること。

下部構造、基礎の安定性(基礎の支持力、滑動、転倒、等)の照査は以下に従って行う。

- 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こと。
- 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、倒壊・崩壊しないこと。

(1) モノパイル構造の設計

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。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。

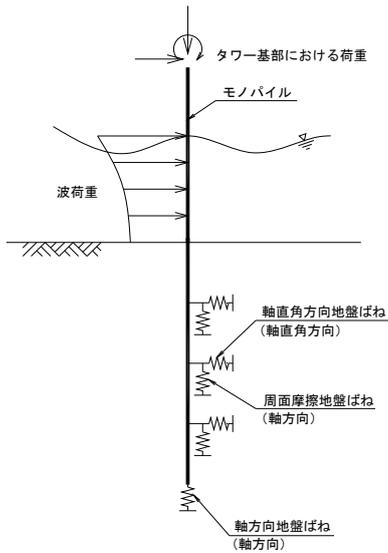


図-17 モノパイル構造の構造解析モデルの例

(2) ジャケット構造の設計

ジャケット構造は、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。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モデルは、3次元モデルを用いることを基本とする。杭周辺の地盤ばねのモデル化の考え方は、モノパイル構造の設計と同等である。

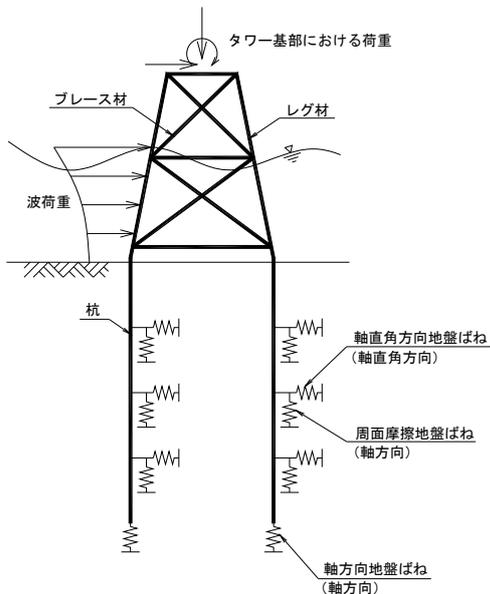


図-18 ジャケット構造の構造解析モデルの例

(3) 重力式基礎の設計

重力式基礎は、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。そのため、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。ただし、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。

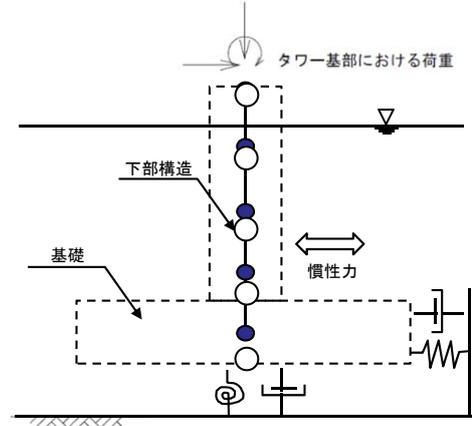


図-19 重力式構造の構造解析モデルの例

参考文献

- 1) 港湾における洋上風力発電施設検討委員会：洋上風力発電設備に関する技術基準の統一解説（平成30年3月版），平成30年3月
- 2) 国土交通省港湾局：港湾における洋上風力発電の占用公募制度の運用指針 Ver. 1，平成28年7月
- 3) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，平成19年7月
- 4) 国土交通省港湾局：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），平成27年3月
- 5) 経済産業省：発電用風力設備に関する技術基準を定める省令，平成29年3月31日
- 6) 経済産業省：発電用風力設備の技術基準の解釈について，平成29年3月31日
- 7) International Electrotechnical Commission：IEC 61400-1 Design requirements, 2010
- 8) International Electrotechnical Commission：IEC 61400-3 Design requirement for offshore wind turbines, 2009
- 9) 日本工業標準調査会 審議（日本規格協会発行）：JIS C 1400-1 風力発電システム—第1部：設計要件，平成29年1月20日
- 10) 日本工業標準調査会 審議（日本規格協会発行）：JIS C 1400-3 風車—第3部：洋上風車の設計要件，平成26年8月20日
- 11) 土木学会：風力発電設備支持物構造設計 指針・同解説，[2010年版]，2010年12月
- 12) 嶋田健司：洋上風力発電所の環境条件の評価—制約付き波浪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，2014年9月10日
- 13) 沿岸技術研究センター：CADMAS-SURF 実務計算事例集 2008年5月
- 14) <http://www.ysk.nilim.go.jp/kakubu/kouwan/sisetu/sisetu.html>