

洋上風力発電技術に関する 現状と動向調査（その2）

土木学会 エネルギー委員会
環境技術小委員会 洋上風力分科会

2026年2月

目次

1.	はじめに	1-1
2.	これまでの建設事例と課題	2-1
2.1	洋上風力発電の意義と現状	2-1
2.2	響灘実証機 -風況観測を中心として- (電源開発)	2-3
2.2.1	洋上風力における風況観測について	2-3
2.2.2	響灘実証機の概要	2-5
2.2.3	観測等建設に於ける課題・建設コスト	2-6
2.2.4	デュアルスキャニングライダーの活用	2-7
2.3	五島市沖洋上風力発電 -波浪観測を中心として- (戸田建設、五洋建設)	2-9
2.3.1	洋上風力における波浪観測について	2-9
2.3.2	波浪観測機器の特徴	2-10
2.4	銚子沖洋上風力発電所 -環境アセスメントを中心として- (東京電力)	2-14
2.4.1	環境影響評価法の改正とその概要	2-14
2.4.2	銚子沖実証事業の配慮書事例	2-15
2.4.3	風力発電所の環境アセスメントの円滑な実施に向けた取り組み	2-19
2.5	まとめ	2-26
3.	国内の洋上風力建設にかかわる現状 -建設技術を中心として-	3-1
3.1	日本特有の設計手法 -地震・台風- (鹿島建設)	3-1
3.1.1	概要	3-1
3.1.2	調査項目	3-2
3.1.3	調査文献の要点 波浪、津波、地盤(工学的基盤)、地盤(調査)、液状化、耐震設計	3-6
3.1.4	まとめ	3-44

3.2	着床式:SEP 船の規格・基準の整備、施工方法 (大林組)	3-45
3.2.1	各社 SEP 船仕様	3-45
3.2.2	風車大型化に伴う施工時の課題	3-45
3.3	浮体式:海底ケーブル・係留索の施工方法 (清水建設)	3-49
3.3.1	アンカーの種類	3-49
3.3.2	係留方法の種類、係留索の種類	3-50
3.3.3	浮体式洋上風力の施工フロー	3-52
3.3.4	国内の施工実績	3-53
3.3.5	ダイナミックケーブルの施工手順	3-54
3.3.6	国内プロジェクト	3-55
3.3.7	海外プロジェクト	3-56
3.3.8	日本の海底地盤への適用	3-57
3.3.9	GI 基金事業	3-58
3.4	浮体式:コンクリート製浮体式基礎(バージ式、セミサブ式)の課題と解決の方向性について (大成建設)	3-59
3.4.1	設計 コンクリート材料特性としての疲労耐久性、コンクリートの水密性・化学的作用に対する抵抗性、鉄筋等鋼材の腐食およびコンクリートの塩害、船級取得の基準	3-59
3.4.2	施工 労働力の確保、施工方法の合理化、品質管理の合理化、大型化・大規模化に向けた課題、解体技術	3-62
3.4.3	その他 サプライチェーン、コスト削減、コンクリート製浮体の実証、カーボンフットプリント	3-65
3.5	風車の大型化・大規模化(ウインドファーム) -効率的な施工方法、コスト削減方法- (五洋建設)	3-71
3.5.1	洋上風力発電に関する国内動向	3-71
3.5.2	国内動向に伴う施工時の問題	3-72
3.5.3	問題解決のための方法	3-74
4.	国内での設置計画、運用にかかわる現状と課題	4-1
4.1	セントラル方式による推進項目の整理、系統確保の制度明確化 (北海道電力、中国電力)	4-1
4.1.1	概要	4-1

4.1.2	文献リストと要点 日本版セントラル方式の制度設計、海外の海域指定に係る政策と系統整備の状況、各自治体・地元協議会他における共同調査等	4-2
4.1.3	まとめ	4-51
4.2	気象・海象・地質情報の DB 構築例の調査 (北陸電力、電力中央研究所)	4-56
4.2.1	概要	4-56
4.2.2	文献リストと要点 DB 構築に求められる情報、構築されている DB	4-57
4.2.3	まとめ	4-96
4.3	コーン試験併用による認証に関する調査 (九州電力、電力中央研究所)	4-97
4.3.1	概要	4-97
4.3.2	文献リストと要点	4-98
4.3.3	まとめ	4-132
4.4	設計・認証基準の実態調査 (関西電力、四国電力)	4-133
4.4.1	概要	4-133
4.4.2	文献リストと要点	4-136
4.4.2.1	地震荷重に対する設計	4-136
4.4.2.2	疲労荷重に対する設計	4-147
4.4.2.3	洗掘防止に関する設計	4-156
4.4.3	まとめ	4-163
4.5	遠隔監視による O&M 省力化、法令改定の調査 (東北電力 中部電力)	4-164
4.5.1	概要	4-164
4.5.2	文献リストと要点 風車機器の異常検知技術、風車設備の損傷点検技術、落雷検出技術、NEDO 成果報告書に関する文献調査	4-165
4.5.3	まとめ	4-203
5.	おわりに	5-1

4. 国内での設置計画、運用にかかわる現状と課題

4.1 セントラル方式による推進項目の整理、系統確保の制度明確化

4.1.1 概要

「洋上風力産業ビジョン（第1次）概要」（第2回 洋上風力の産業競争力強化に向けた官民協議会（2020年12月15日））では、2030年までに1,000万kW、2040年までに3,000～4,500万kWの洋上風力発電の案件形成が政府目標として明示されている。この導入目標の実現に向けて、継続的な案件形成が不可欠であるが、現状では複数の事業者が同一海域で類似した現地調査を実施しており、非効率な状況が生じている。

案件形成を加速化させるため、案件形成の初期段階から政府が主導的に関与し、より迅速・効率的に風況等の調査、適時に系統確保等を行う仕組みである「日本版セントラル方式」の確立に向けた制度設計が進められている。

(1)日本版セントラル方式の制度設計に関する調査

a.会議資料（文献 No. 1～8）

日本版セントラル方式、系統確保に関する検討・議論がなされている関係省庁の委員会、協議会等の会議資料（説明資料、議事録 等）により、その状況を調査した。

b.「洋上風力発電の地域一体的開発に向けた調査研究事業（NEDO）」（文献 No. 9～10）

日本版セントラル方式の制度設計に向け、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の公募事業により、洋上風力発電事業の基本設計に必要な調査を行い、その結果を取りまとめている。

NEDO の Web サイト等から、その最新状況を調査した。

c.その他（文献 No. 11、12）

上記以外の機関・団体等による関連情報を調査した。

(2)海外の海域指定に係る政策と系統整備の状況に関する調査（文献 No. 13～22）

海外の洋上風力先進国の海域指定に係る政策と系統整備の状況についての情報収集を行い、セントラル方式を採用しているオランダ、ドイツ、デンマーク等を含む、各国の海域指定の状況と法的枠組み、サイトデータの提供状況等について調査した。

(3)各自治体・地元協議会他における共同調査等に関する調査（文献 No. 23～25）

久慈沖、遊佐沖、岩宇・南後志沖で行われている希望する事業者による共同調査等の実施状況、自治体、地域協議会の対応状況等について、ホームページに掲載されている情報を調査した。

4.1.2 文献リストと要点

(1) 文献リスト

調査を行った文献を表 4.1.2-1 に示す。

表 4.1.2-1 調査文献リスト

No.	タイトル	著者	発行年月
1	系統形成の在り方について	第 4 回 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 脱炭素化社会に向けた電力レジリエンス小委員会	2019 年 6 月
2	洋上風力産業ビジョン（第 1 次）概要	第 2 回洋上風力の産業競争力強化に向けた官民協議会	2020 年 12 月
3	洋上風力発電の導入拡大に向けた規制・制度の在り方に関する提言（構成員 提出資料）	第 16 回再生可能エネルギー規制総点検タスクフォース	2021 年 9 月
4	「日本版セントラル方式」の検討に向けた論点について（経済産業省資源エネルギー庁・国土交通省港湾局）	総合資源エネルギー調査会省エネルギー・新エネルギー分科会再生可能エネルギー大量導入・次世代電力ネットワーク小委員会洋上風力促進ワーキンググループ 交通政策審議会港湾分科会環境部会洋上風力促進小委員会 合同会議 合同会議（第 10 回）	2022 年 1 月
5	洋上風力の主力電源化に向けて（日本風力発電協会提出資料）	第 20 回再生可能エネルギー規制総点検タスクフォース	2022 年 3 月
6	洋上風力発電の促進に向けた入札制度を含む制度改革全般に係る提言（構成員 提出資料）	第 20 回再生可能エネルギー規制総点検タスクフォース	2022 年 3 月

7	洋上風力発電の促進に向けた取組について（経済産業省・国土交通省 提出資料）	第 20 回再生可能エネルギー規制総点検タスクフォース	2022 年 3 月
8	「日本版セントラル方式」における調査対象区域の選定の考え方	総合資源エネルギー調査会省エネルギー・新エネルギー分科会再生可能エネルギー大量導入・次世代電力ネットワーク小委員会洋上風力促進ワーキンググループ 交通政策審議会港湾分科会環境部会洋上風力促進小委員会 合同会議 合同会議（第 15 回）	2022 年 9 月
9	「洋上風力発電の地域一体的開発に向けた調査研究事業」（公募事業）	新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）	2021 年 3 月 （公募時期）
10	洋上風力発電の地域一体的開発に向けた調査研究事業各調査項目における調査手法・仕様的一般化に向けた中間とりまとめ	新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）	2022 年 6 月
11	日本における洋上風力拡大加速に向けた提言 ～公正で透明な競争環境作りのために～	自然エネルギー財団	2022 年 6 月
12	風力発電所の環境影響評価について	福岡県 北九州市環境局	2021 年 1 月 21 日
13	洋上風力が日本のエネルギーを支える 大量導入に向けた制度・インフラ・産業	工藤美香、市村将太、 斉藤哲夫、木村啓二、 大林ミカ	2020 年 12 月
14	着床式洋上ウインドファーム開発支援事業 （一般海域での洋上風力発電導入評価手法の調査）	新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）	2018 年 10 月

15	洋上風力発電開発の促進策： 海域指定による開発リスク低減の動向	日本エネルギー経済研究所	2018年10月
16	欧州から世界に拡大する洋上 風力発電事業	平野 学	2022年9月14日
17	Hollandse Kust (noord) Wind Farm Zone, Project and Site Description,”	オランダ企業局 (RVO)	2019年10月
18	Danish Experiences from Offshore Wind Development	デンマークエネルギー庁 (ENS)	2017年3月
19	ドイツ連邦海事水路庁 (BSH) ホームページ	ドイツ連邦海事水路庁 (BSH)	2021年1月21日
20	Comparative Analysis of International Offshore Wind Energy Development RE WIND OFFSHORE	Rhodri James, Guy Henley, Stefanie Hintze, Andrew Conway, Jérôme Guillet	2017年3月
21	Offshore Wind Worldwide Regulatory Framework in Selected Countries 2 nd Edition	Dr Christian Knütel	2022年4月
22	Offshore Wind in Germany: new auction designs confirmed	Alexander Koch Malte Neumann	2022年7月20日
23	久慈市 再生可能エネルギー	久慈市 港湾エネルギー推進課	
24	遊佐沿岸域検討部会	環境エネルギー部 エネルギー政策推進課 再エネ事業推進担当	
25	「岩宇・南後志地区沖」洋上 風力発電導入に向けた共同調 査に係る参画事業者の募集開 始について	岩宇・南後志地区洋上風力発 電導入推進組合事務局 (寿都町公営企業 企業管理 課 風力発電事業係)	

(2) 調査文献の要点

今回調査した個々の文献の要点を表 4.1.2-2 に示す。

表 4.1.2-2 調査文献の要点

No.	タイトル	著者	発行年月
1	系統形成の在り方について	第 4 回 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 脱炭素化社会に向けた電力レジリエンス小委員会	2019 年 6 月
出典	経済産業省ホームページ 第 4 回 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 脱炭素化社会に向けた電力レジリエンス小委員会 資料 2 https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/datsu_tansoka/004.html (参照 2025/12/12)		
要点	<p>今後、系統形成を受け身ではなく、プッシュ型へと転換していくため、広域機関において検討が進められている「一括検討プロセス」の導入に向けた検討を取り上げつつ、洋上風力等の個別電源の特性を踏まえた円滑な導入に向けた方策について議論がなされた。</p> <p>洋上風力を円滑に導入するため、</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 今後「再エネ海域利用法」に基づき、国が促進区域の指定を行うに際して、事業者等による系統確保に依拠することなく、協議会の意見を踏まえ、国が地域の風況・海象等を考慮して、望ましい容量を決定し、当該容量をプッシュ型であらかじめ確保することで効率的な洋上風力の導入を促す仕組みが必要ではないか。 ・ その際に系統増強が必要であれば、必要に応じて円滑に系統増強プロセスへ移行する仕組みを検討してはどうか。 <p>との提言あり。</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div style="text-align: center;"> <p><現在のスキームイメージ></p> <div style="border: 1px solid gray; background-color: #f0f0f0; padding: 5px; width: 150px; margin: 0 auto;">個別の洋上事業者が 容量を確保</div> <div style="font-size: 2em; margin: 10px 0;">↓</div> <div style="border: 1px solid gray; background-color: #f0f0f0; padding: 5px; width: 150px; margin: 0 auto;">占用公募により実施主体決定</div> </div> <div style="text-align: center;"> <p><今後のスキームイメージ></p> <div style="border: 1px solid gray; background-color: #f0f0f0; padding: 5px; width: 150px; margin: 0 auto;">協議会の意見を踏まえ あらかじめ一定容量を確保</div> <div style="display: flex; justify-content: center; gap: 20px; margin: 5px 0;"> <div style="text-align: center;"> <div style="font-size: 0.8em;">系統増強不要</div> <div style="font-size: 2em;">↓</div> </div> <div style="text-align: center;"> <div style="font-size: 0.8em;">系統増強必要</div> <div style="font-size: 2em;">↓</div> </div> </div> <div style="border: 1px solid gray; background-color: #f0f0f0; padding: 5px; width: 100px; margin: 0 auto;">一括検討プロセス 開始</div> <div style="font-size: 2em; margin: 5px 0;">↓</div> <div style="border: 1px solid gray; background-color: #f0f0f0; padding: 5px; width: 150px; margin: 0 auto;">占用公募等により実施主体決定</div> </div> </div>		

No.	タイトル	著者	発行年月
2	洋上風力産業ビジョン（第1次）概要	第2回洋上風力の産業競争力強化に向けた官民協議会	2020年12月
出典	経済産業省ホームページ 第2回 洋上風力の産業競争力強化に向けた官民協議会 資料 2-1 https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/yojo_furyoku/002.html (参照 2025/12/12)		
要点	洋上風力産業ビジョン（第1次）概要について、事務局より説明があった。その中で、政府主導のプッシュ型案件形成スキーム（日本版セントラル方式）の確立に向けた実証事業の立ち上げについて説明があった。		
	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div style="text-align: center;"> <p>案件形成の流れ</p> <p>・事業者が基礎調査（風況・地質等）、系統を確保、漁業者との地元調整等を行う。 →事業者の重複実施による非効率等の指摘あり</p> <p>一定の熟度のものについて自治体が国に情報提供</p> <p>有望な区域</p> <p>国による風況・地質調査の実施</p> <p>地元調整のための協議会の設置</p> <p>促進区域</p> <p>公募による事業者選定 再エネ特措法認定、30年間の占用許可</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>新しい方策</p> <p>実証事業を通じて、政府主導の案件形成スキームを確立 <small>※欧州（デンマーク、ドイツ、英国等）の多様な事例を踏まえ、「日本版セントラル方式」の在り方を検討。</small></p> <p>調査開始タイミングの前倒し</p> <p>再エネ海域利用法について、必要な運用改善により案件形成を加速化（系統の仮確保スキーム等）</p> </div> </div>		
	(事務局の説明) 欧州各国でもセントラル方式について様々なアプローチがある。日本で具体的にどう進めるのかについては、来年、実証事業をいくつかの海域で実施しながら、官と民の役割分担について実証事業の中で確立をしていきたい。そうした事業を通じて日本らしいやり方で、効率のいい方法を確立して、今後の案件形成の迅速化に繋げていければと考える。		

No.	タイトル	著者	発行年月
3	洋上風力発電の導入拡大に向けた規制・制度の在り方に関する提言（構成員 提出資料）	第16回再生可能エネルギー規制総点検タスクフォース	2021年9月
出典	内閣府ホームページ 第16回 再生可能エネルギー等に関する規制等の総点検タスクフォース会議資料資料 5-1 https://www8.cao.go.jp/kisei-kaikaku/kisei/conference/energy/20210921/agenda.html （参照 2025/12/12）		
要点	<p>第16回 再生可能エネルギー等に関する規制等の総点検タスクフォース（2021年9月21日開催）の構成員から現状制度の問題点および日本版セントラル方式の制度整備に向け必要な措置について、以下の提言があった。</p> <p>（現状制度（再エネ海域利用法）の問題点）</p> <ul style="list-style-type: none"> ・複数の事業者が環境影響評価を重複して行う。 ・国が公表する風況・地質調査のデータが十分ではないので結果として区域内で複数の事業者が風況・地質調査を行う。 ・事業者がそれぞれ送電系統の容量を確保する。 ・既設送電系統の連系点までの送電設備等の整備費用を事業者が負担する。 <p>（日本版セントラル方式の制度整備に向けた課題に対する提言）</p> <p>1) 促進区域の指定・事業者選定のスケジュールの明確化・透明化の必要性（必要な措置）</p> <ul style="list-style-type: none"> ・経済産業省および国土交通省は、「一定の準備段階に進んでいる区域」の選定条件を明示する。 ・系統の確保や利害関係者との調整について、国の関与を進め、促進区域指定のスケジュールを明確化し、促進区域の指定時には、事業者選定手続のスケジュールを選定手続の結果公表時期も含めて明らかにする。 <p>2) 「協議会」運営の透明性の確保と、事業化につながる利害関係者調整の実現（必要な措置）</p> <ul style="list-style-type: none"> ・協議会の前段階でも、国やその地方機関が中心となって、都道府県及び市町村とともに利害関係者の特定を行うべきである。 ・今後の大量導入に向け、早急に、出捐金の考え方の原則および水準の考え方を、ガイドラインとして取りまとめ公表する。 <p>3) 風況・海底などサイト調査や環境影響評価の効率化・迅速化</p> <ul style="list-style-type: none"> ・経産省・国交省・環境省は、「一定の準備段階に進んでいる区域」として整理 		

	<p>するなどの比較的早い段階で、国（または国が指定する機関）が、サイト調査や環境影響評価手続きを実施する仕組みを創設する。</p> <ul style="list-style-type: none">・ 風況データについては、1年だけではなく、そのまま継続して収集できる仕組みを確立する。 <p>4) 系統問題の改善</p> <ul style="list-style-type: none">・ 洋上風力送電線の陸揚げ地点近傍に、一般送配電事業者によるハブ変電所および／またはハブ開閉所を建設し、発電事業者はハブまでの電源線のみを建設するシャロー方式への転換を早期に実現する。・ 9地域に分かれる電力市場・グリッド制度から、既存系統を統合し一体化して運営を行う、あるいは、送電事業者の統合についても、タブーなく視野に入れて検討されるべきである。
--	---

No.	タイトル	著者	発行年月
4	「日本版セントラル方式」の検討に向けた論点について（経済産業省資源エネルギー庁・国土交通省港湾局）	総合資源エネルギー調査会省エネルギー・新エネルギー分科会再生可能エネルギー大量導入・次世代電力ネットワーク小委員会洋上風力促進ワーキンググループ 交通政策審議会港湾分科会環境部会洋上風力促進小委員会 合同会議（第10回）	2022年1月
出典	<p>経済産業省ホームページ 総合資源エネルギー調査会省エネルギー・新エネルギー分科会再生可能エネルギー大量導入・次世代電力ネットワーク小委員会洋上風力促進ワーキンググループ 交通政策審議会港湾分科会環境部会洋上風力促進小委員会 合同会議（第10回） 資料2 https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/saisei_kano/yojo_furyoku/010.html (参照 2025/12/12)</p>		
要点	<p>初期段階の調査と案件形成の関係についてのイメージは以下のとおり。 初期段階で重複して実施される調査については、政府・政府に準ずる特定の主体（石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC））が一部を担う。</p> <p>2. 今後の初期段階の調査と案件形成との関係（イメージ）</p> <p>The diagram illustrates the timeline of investigation and case formation from year N to N+3. Key stages include: <ul style="list-style-type: none"> N (Year): 'Advance preparation areas' (一定の準備段階に進んでいる区域) starting in summer. 'Information provision from prefectures' (都道府県の情報提供) occurs within 1-3 months. 'Investigation starts from preparation areas' (準備区域の段階から調査開始) begins. A note states that initial investigations are performed by government-aligned entities, involving local stakeholders and covering wind, seabed, environmental impact, and system integration. N+1 (Year): 'Promoted areas' (有望な区域) identified in summer. 'Association convening' (協議会の開催) takes place. N+2 (Year): 'Promoted area designation' (促進区域指定) occurs in order after consultation. 'Public subscription period' (公募期間) begins, involving 'Public subscription plan review and evaluation' (公募占用計画の審査・評価) and 'Public subscription plan drafting' (公募占用指針の策定手続き). N+3 (Year): 'Business selection' (事業者の選定) is completed. 'Detailed design and necessary investigations' (詳細設計に必要な調査等) are conducted. A separate path for 'Business' (事業者) shows 'Public subscription plan review and drafting' (公募占用計画の検討・作成) leading to 'Detailed design and necessary investigations'.</p>		

今後検討すべき論点として以下を例示。

1. 日本版セントラル方式の適用対象とする区域の考え方
 - ・ 日本版セントラル方式を適用する調査対象区域について、どのような考え方に基づいて整理すべきか。
 - ・ 例えば、「一定の準備段階に進んでいる区域」については、どのような要件を満たす区域を調査対象として加えるべきか。
2. 日本版セントラル方式として実施する調査の手法・仕様
 - ・ 現在、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）において日本版セントラル方式の確立に向けた実証事業を実施中である。風況・海底地盤等の洋上風力発電の基本設計に必要な項目のほか、環境影響評価のうち初期段階（配慮書・方法書）で事業者が共通して行う項目等について、産業界や学識経験者の意見も踏まえ、調査手法や仕様の整理を行っている。
 - ・ 一方、発電事業者側の意見も加味していくことが重要であると考えられるところ、対象区域の地域特性も踏まえつつ、調査仕様をどのように決定していくべきか。
3. 日本版セントラル方式による調査の費用負担の在り方
 - ・ 国の予算を活用して実施した調査事業の成果については、原則、国や独法に帰属する。
 - ・ その成果を活用し発電事業を実施する民間事業者からの費用回収については、供給価格低減といった国民負担軽減も考慮しつつ如何にあるべきか。

（NEDO で実施中の調査事業の内容）



No.	タイトル	著者	発行年月																					
5	洋上風力の主力電源化に向けて (日本風力発電協会提出資料)	第 20 回再生可能エネルギー規 制総点検タスクフォース	2022 年 3 月																					
出典	内閣府ホームページ 第 20 回 再生可能エネルギー等に関する規制等の総点検タスクフォース会議資料 資料 7-1 https://www8.cao.go.jp/kisei-kaikaku/kisei/conference/energy/20220331/agenda.html (参照 2025/12/12)																							
要点	<p>第 20 回 再生可能エネルギー等に関する規制等の総点検タスクフォース (2022 年 3 月 31 日開催) の中で、日本風力発電協会より、「洋上風力発電の導入目標達成に向け、事業開発プロセス全体の合理化と事業リスク低減を実現するセントラル方式の早期導入が不可欠。」との説明があった。</p> <p>これまで事業者主体で実施してきたサイト選定、地域合意形成、サイト調査、環境アセス、系統連系および許認可について、以下のイメージのような政府主導のセントラル方式の導入を要望。</p> <div style="display: flex; align-items: flex-start;"> <table border="1" style="margin-right: 20px;"> <thead> <tr> <th></th> <th>現状</th> <th>セントラル方式のイメージ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>サイト選定</td> <td> </td> <td> <ul style="list-style-type: none"> 都道府県等からの情報収集に加えて、国が海洋空間計画を策定し、開発可能性のあるエリアを特定 </td> </tr> <tr> <td>地域合意形成</td> <td> </td> <td> <ul style="list-style-type: none"> 国が主導してステークホルダーの特定、利害調整の考え方を整理 洋上風力を「電源立地地域対策交付金」の対象電源に追加し地域に還元 </td> </tr> <tr> <td>サイト調査</td> <td> </td> <td> <ul style="list-style-type: none"> 風況・海底地盤等のサイト調査を国が実施し、事業者に共有 複数事業者による共同調査等の先行的取組みに関する公募時の取扱い・ルール等を明確化 </td> </tr> <tr> <td>環境アセス</td> <td> </td> <td> <ul style="list-style-type: none"> 公募の公平性を担保し、非効率性や地域の負担増を回避するため、環境アセスに関する共通的な調査を国が実施し事業者に共有 </td> </tr> <tr> <td>系統連系</td> <td> </td> <td> <ul style="list-style-type: none"> 案件形成の見通しを踏まえた、望ましい系統整備計画を策定し、当該容量をプッシュ型であらかじめ確保 </td> </tr> <tr> <td>許認可</td> <td> </td> <td> <ul style="list-style-type: none"> 許認可手続きの合理化・迅速化を推進 国が許認可手続きのワンストップ窓口を設置 </td> </tr> </tbody> </table> </div>				現状	セントラル方式のイメージ	サイト選定		<ul style="list-style-type: none"> 都道府県等からの情報収集に加えて、国が海洋空間計画を策定し、開発可能性のあるエリアを特定 	地域合意形成		<ul style="list-style-type: none"> 国が主導してステークホルダーの特定、利害調整の考え方を整理 洋上風力を「電源立地地域対策交付金」の対象電源に追加し地域に還元 	サイト調査		<ul style="list-style-type: none"> 風況・海底地盤等のサイト調査を国が実施し、事業者に共有 複数事業者による共同調査等の先行的取組みに関する公募時の取扱い・ルール等を明確化 	環境アセス		<ul style="list-style-type: none"> 公募の公平性を担保し、非効率性や地域の負担増を回避するため、環境アセスに関する共通的な調査を国が実施し事業者に共有 	系統連系		<ul style="list-style-type: none"> 案件形成の見通しを踏まえた、望ましい系統整備計画を策定し、当該容量をプッシュ型であらかじめ確保 	許認可		<ul style="list-style-type: none"> 許認可手続きの合理化・迅速化を推進 国が許認可手続きのワンストップ窓口を設置
	現状	セントラル方式のイメージ																						
サイト選定		<ul style="list-style-type: none"> 都道府県等からの情報収集に加えて、国が海洋空間計画を策定し、開発可能性のあるエリアを特定 																						
地域合意形成		<ul style="list-style-type: none"> 国が主導してステークホルダーの特定、利害調整の考え方を整理 洋上風力を「電源立地地域対策交付金」の対象電源に追加し地域に還元 																						
サイト調査		<ul style="list-style-type: none"> 風況・海底地盤等のサイト調査を国が実施し、事業者に共有 複数事業者による共同調査等の先行的取組みに関する公募時の取扱い・ルール等を明確化 																						
環境アセス		<ul style="list-style-type: none"> 公募の公平性を担保し、非効率性や地域の負担増を回避するため、環境アセスに関する共通的な調査を国が実施し事業者に共有 																						
系統連系		<ul style="list-style-type: none"> 案件形成の見通しを踏まえた、望ましい系統整備計画を策定し、当該容量をプッシュ型であらかじめ確保 																						
許認可		<ul style="list-style-type: none"> 許認可手続きの合理化・迅速化を推進 国が許認可手続きのワンストップ窓口を設置 																						

No.	タイトル	著者	発行年月
6	洋上風力発電の促進に向けた入札制度を含む制度改革全般に係る提言（構成員 提出資料）	第 20 回再生可能エネルギー規制総点検タスクフォース	2022 年 3 月
出典	<p>内閣府ホームページ 第 20 回 再生可能エネルギー等に関する規制等の総点検タスクフォース会議資料資料 8-1 https://www8.cao.go.jp/kisei-kaikaku/kisei/conference/energy/20220331/agenda.html （参照 2025/12/12）</p>		
要点	<p>第 20 回 再生可能エネルギー等に関する規制等の総点検タスクフォース（2022 年 3 月 31 日開催）で、構成員からセントラル方式および系統確保に関して、以下の提言があった。</p> <p>（「日本版」セントラル方式について）</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 「日本版」セントラル方式の適用についてできる限り迅速に実施すること。 ・ 「日本版」セントラル方式の適用場所は、一定の準備段階に進んでいる区域に適用するなど、事業者との意見交換も行いつつ定めること。 ・ 地域指定の過程における国と都道府県自治体、基礎自治体の役割について明確にし、事業者の負担を低減すること。 ・ 「日本版」セントラル方式に系統要件を含め、一般負担について明記すること。 ・ 利害関係者（とくに漁業者）との調整については、国が議論を行い、進むべき方向性を示すべき。 <p>（系統確保について）</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 経済産業省・国土交通省は、電力広域的運営推進機関（OCCTO）や一般送配電事業者と協働して、早期に事業者には系統確保に関する情報を提供すること。 ・ 一般送配電事業者によるプッシュ型の地内系統整備を推進し、陸揚げ地点近傍に建設するハブ発電所及び／又はハブ開閉所までを一般負担で整備することを明確化する。 ・ 一般送配電事業者の早期施行着手を促す仕組みを導入する。 ・ 将来に向けては、9 地域に分かれる電力市場・グリッド制度から、既存系統を統合し一体化して運営を行う、あるいは、送電事業者の統合についても、タブーなく視野に入れて検討されるべきである。 <p>（気象・海象、地盤、環境基礎調査、漁業基礎調査）</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 国等が提供する風況・海底地盤等のデータは、日本海事協会（NK）やビューローベリタスジャパン等の認証機関が設計に使用可能である（ウィンドファ 		

	<p>ーム認証が得られるレベルである) ことを担保したものとすること。</p> <ul style="list-style-type: none">・ 環境影響評価は、配慮書、方法書、準備書の作成のための調査を行うこと。・ 漁業者との調整の基盤となる漁業基礎調査を国が行うこと。・ 調査結果については、一定の準備段階に進んでいる区域に適用すること。・ 「洋上風力発電の導入促進に向けた環境保全手法の最適化実証事業（環境省）」において、環境影響評価の準備書作成に必要な情報収集（動物の生息状況、植物の生育状況）などが2022年度から実施されるが、環境影響評価手続きに要する期間短縮のために、速やかに制度化されることが望まれる。・ 調査の結果等については、基本的には情報を公開し、無償で利用できることとする。
--	--

No.	タイトル	著者	発行年月
7	洋上風力発電の促進に向けた取組について（経済産業省・国土交通省 提出資料）	第 20 回再生可能エネルギー規制総点検タスクフォース	2022 年 3 月
出典	<p>内閣府ホームページ 第 20 回 再生可能エネルギー等に関する規制等の総点検タスクフォース会議資料資料 9-1 https://www8.cao.go.jp/kisei-kaikaku/kisei/conference/energy/20220331/agenda.html (参照 2025/12/12)</p>		
要点	<p>2022 年 3 月 31 日に開催された第 20 回再生可能エネルギー等に関する規制等の総点検タスクフォースでは、日本版セントラル方式の検討状況についての説明後に、以下の質疑応答があった。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 初期段階で実施される調査については、政府ないし政府に準ずる特定の主体が実施し、データを管理すべきと考えており、石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC）が一部を担うことを念頭に、法の改正手続きを進めている（経済産業省）。 ・ セントラル方式の確立に向けた実証事業については現在実施中であり、次の公募には間に合わない。2023 年度からセントラル方式の公募に向けた調査は実施可能かもしれないが、調査で 2 年近くデータを取るようになるため、入札時期については、2025 年以降になるものと思われる。 		

No.	タイトル	著者	発行年月
8	「日本版セントラル方式」における調査対象区域の選定の考え方	総合資源エネルギー調査会 省エネルギー・新エネルギー分科会 再生可能エネルギー大量導入・次世代電力ネットワーク小委員会 洋上風力促進ワーキンググループ 交通政策審議会港湾分科会 環境部会洋上風力促進小委員会合同会議(第15回)	2022年9月
出典	<p>経済産業省ホームページ 総合資源エネルギー調査会省エネルギー・新エネルギー分科会 再生可能エネルギー大量導入・次世代電力ネットワーク小委員会 洋上風力促進ワーキンググループ交通政策審議会港湾分科会 環境部会洋上風力促進小委員会 合同会議(第15回) 資料3 https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/saisei_kano/yojo_furyoku/015.html (参照 2025/12/12)</p>		
要点	<p>日本版セントラル方式における案件形成プロセスのイメージについては以下のとおり。</p> <p>「日本版セントラル方式」における案件形成プロセスのイメージ</p> <p>調査対象区域の決定の手順は以下のとおり。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 有望な区域の整理に向けた対応と同様に、あらかじめ、有識者を含めた中立的な第三者委員会に意見を聴取する。 ・ 必須事項及び考慮事項とともに、第三者委員会の意見を踏まえ、経済産業省・国土交通省において調査対象区域を選定する。 ・ エネルギー・金属鉱物資源機構（JOGMEC）は中期目標・中期計画等に基づき、国の政策方針と連動した取組を進めていくこととし、国が選定した区域 		

において調査仕様等を作成し、調査を実施する。

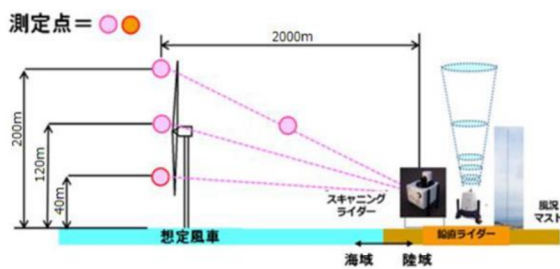
令和5年度から、「日本版セントラル方式」の一環として、JOGMECが発電事業の採算性分析に必要となる情報を得るための調査を実施する。令和5年度から毎年度3箇所程度の区域で調査を実施し、令和22年(2040年)に3,000~4,500万kWの洋上風力発電の案件形成を目指す。令和5年度の概算要求額は45.0億円。

洋上風力発電事業の実施可能性が見込まれる(決定を受けた調査対象)海域を対象として、発電設備の基本設計に必要となる風況・海底地盤に関する調査データを取得するために、各種の観測機器を用いたサイト調査を実施する。

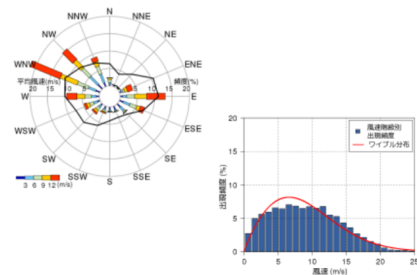
調査で得られたデータについては、調査対象海域で洋上風力発電事業を計画する事業者を提供することで、事業者による発電事業計画の策定を支援する。

(調査の例)

<風況調査>



風況観測作業のイメージ



風況データの出力例

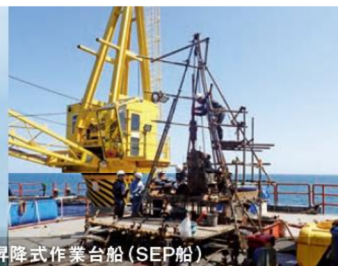
<海底地盤調査>



鋼製杭



自己昇降式作業台船 (SEP船)



掘削・貫入試験で使用する機材例



音波探査の様子



海底微動アレイ

物理探査で使用する機材例

No.	タイトル	著者	発行年月
9	「洋上風力発電の地域一体的開発に向けた調査研究事業」 (公募事業)	新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)	2021年3月 (公募時期)
出典	<p>新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) ホームページ (公募情報) https://www.nedo.go.jp/koubo/FF2_100308.html (参照 2025/12/12) (公募結果) https://www.nedo.go.jp/koubo/FF3_100308.html (参照 2025/12/12) 経済産業省ホームページ (調査海域選定結果) https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11713225/www.meti.go.jp/press/2021/07/20210730004/20210730004.html (参照 2025/12/12)</p>		
要点	<p>再エネ海域利用法における促進地域や要望区域等にあたらぬ海域であって、洋上風力発電設備の導入ポテンシャルが見込まれる未開発海域（「未開発海域」）において、風況等の実海域調査を行うとともに、これらを取りまとめ、地域と一体となった海域の開拓に向けた方向性等について検討することを目的に、NEDOの公募事業が実施されている。</p> <p>1. 公募概要</p> <p>(1) 事業名 風力発電等導入支援事業／着床式洋上ウィンドファーム開発支援事業／洋上風力発電の地域一体的開発に向けた調査研究事業</p> <p>(2) 調査研究項目 以下の調査海域で、各調査項目の内容を実施する。 (調査海域)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・北海道岩宇及び南後志地区沖（着床式） ・山形県酒田市沖（着床式） ・岩手県洋野町沖（浮体式） <p>※経済産業省資源エネルギー庁新エネルギー課と国土交通省港湾局海洋・環境課が連名で、2021年5月10日から24日のまで都道府県及び事業者から情報提供の受付を行い、中立的な学識経験者等で構成する第三者委員会の意見を踏まえて上記3海域を選定（情報提供海域数：都道府県9海域、事業者19海域）</p> <p>○ 調査研究項目（A） 風況等の実海域調査および環境影響評価等に必要実海域調査</p> <ul style="list-style-type: none"> ・風況等の実海域調査 ・環境影響評価等に必要実海域調査 		

	<ul style="list-style-type: none">・ 漁業実態調査・ 洋上風力発電設備の導入ポテンシャルの試算 <p>○ 調査研究項目 (B)</p> <p>地域と一体となった海域の開拓に向けた方向性等の調査</p> <p>(3) 調研究査期間</p> <p>2021年6月2日(採択日) ~ 2022年2月28日</p> <p>(4) 受託者</p> <p>○ 調査研究項目 (A)</p> <ul style="list-style-type: none">・ 基礎地盤コンサルタンツ株式会社、深田サルベージ建設株式会社パシフィックコンサルタンツ株式会社、株式会社長大、株式会社P C E R・ 日本気象協会、応用地質株式会社・ 株式会社KANSOテクノス、日本気象株式会社 <p>○ 調査研究項目 (B)</p> <ul style="list-style-type: none">・ 日本気象協会
--	---

No.	タイトル	著者	発行年月
10	洋上風力発電の地域一体的開発に向けた調査研究事業各調査項目における調査手法・仕様の一般化に向けた中間とりまとめ	新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)	2022年6月
出典	新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) ホームページ 洋上風力発電の地域一体的開発に向けた調査研究事業各調査項目における調査手法・仕様の一般化に向けた中間とりまとめ https://www.nedo.go.jp/library/fuuryoku_cyosa.html (参照 2025/12/12)		
要点	<p>新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) は、「洋上風力発電の地域一体的開発に向けた調査研究事業」を実施し、事業者の重複調査が見込まれる海域において、より効率的に案件形成を行う手法を確立するため、促進区域等の区域指定が行われる前段階にある海域において、洋上風力発電事業の基本設計に必要な調査を行うとともに、風況・海底地盤等の洋上風力発電の基本設計に必要な項目のほか、環境影響評価のうち初期段階（配慮書・方法書）で事業者が共通して行う項目等について、産業界や学識経験者の意見も踏まえ、調査手法や仕様の整理を行っている。</p> <p>この度、NEDO が中間とりまとめを行った各調査項目の調査手法・仕様に対して意見収集が行われている。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 風況調査 <ol style="list-style-type: none"> (1) 風速・風向 (2) 乱流強度 (3) 極値風速 (4) 風況シミュレーション (5) 風況の長期変動 2. 海底地盤調査 <ol style="list-style-type: none"> (1) 沿岸の各種情報 (2) 海底地形 (3) 海底面状況 (4) 音波探査 (5) 地盤物性値（着床式） (6) 地盤物性値（浮体式） (7) 調査結果のとりまとめ 3. 気象海象調査 <ol style="list-style-type: none"> (1) 海域における気象 		

	<ul style="list-style-type: none">(2) 近隣における気象(3) 気象長期変動・気象概況(4) (大気安定度) 大気の鉛直構造(5) 水位(6) 波浪(7) 水流(8) 海氷・海洋付着生物・洗堀等 <p>4. 環境影響評価に関する環境調査</p> <ul style="list-style-type: none">(1) 大気環境 (騒音)(2) 水環境 (水質・底質)(3) 動物 (鳥類)(4) 動物 (魚類・海棲哺乳類・底生生物)(5) 植物(6) 景観 <p>5. 漁業実態調査</p> <ul style="list-style-type: none">(1) 水産生物 (主な漁獲対象種の生息域、産卵・生育場、生態、生活史等)(2) 操業実態(3) 海底振動(4) 環境 DNA 調査 <p>6. 洋上風力発電設備の導入ポテンシャルの試算</p> <ul style="list-style-type: none">(1) 洋上風力発電設備の導入ポテンシャルの試算
--	--

No.	タイトル	著者	発行年月
11	日本における洋上風力拡大加速に向けた提言 ～公正で透明な競争環境作りのために～	自然エネルギー財団	2022年6月
出典	自然エネルギー財団ホームページ https://www.renewable-ei.org/activities/reports/20220615.php (参照 2025/12/12)		
要点	<p>自然エネルギー財団が、「日本における洋上風力拡大加速に向けた提言」と題して、同財団のホームページ上で公開したもの。</p> <p>さまざまな立場の洋上風力開発事業者との意見交換を基本に、黎明期にある日本の洋上風力産業を加速するために必要な、公正な競争と安定的で透明な事業環境作りを念頭に、今求められる施策をとりまとめたものである。</p> <p>この提言の中で、セントラル方式に対して、以下を提言している。</p> <p>I. 国際的に遜色のない「セントラル方式」の導入</p> <p>(1) 国が系統確保・地域調整・基礎情報調査を主導・実施し、その実施時期を明確化する。</p> <p>(2) 基礎情報調査（風況、気象・海象、海底地盤、環境影響、漁業）の早期実施</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 国による基礎情報調査を、調査の同意を得た全海域で早期に開始する。 ・ 基礎情報調査のデータは、事業者が追加の情報収集なく計画策定に利用可能な質を確保する。 ・ 基礎情報調査のデータは、無償で共有・公開する。 ・ 国による基礎情報調査を 2023 年度（2023 年 4 月）から実施することを明確にする。 ・ 対象海域で事業者が先行して調査を実施していた場合には、調査結果を国に提供するなど一定の条件の下で、事業者に対し調査費用を補償する制度を導入する。 <p>(3) 国主導で効率的かつ確実な系統形成</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 国による系統確保スキームの活用を直ちに開始する。 ・ 一般送配電事業者による早期の系統整備を、レベニューキャップ制度における評価項目に明確に位置づける。 ・ プッシュ型による増強の一環として、陸揚げ地点近傍にハブ変電所・開閉所を設ける。 ・ 選定事業者が承継した系統計画の効率化を認める。 ・ 発電事業者が建設した陸上長距離送電線を一般送配電事業者に移管する制度を創設する。 <p>(4) 地域・漁業との共生に向けた議論と調査の早期開始</p>		

- ・ 国は、地域・漁業との共生に関する課題を洗い出し、国と地方自治体の役割を明確化する議論を早急に開始する。
 - ・ 事業者・漁業者・国・地方自治体の取り組み方や課題解決に向けたガイドラインやガイダンスを策定する。
 - ・ 電源立地地域対策交付金の対象地域に洋上風力の立地地域を含める。
 - ・ 国は、漁業基礎調査に直ちに着手し、データを蓄積・公表する。
- (5) 国のイニシアティブをさらに強化
- ・ 国の役割をインフラの整備・利用の調整（系統・港湾）等にも広げる。
 - ・ 多くの省庁にまたがる手続の窓口を一本化し、かつ体制を強化する。
 - ・ 洋上風力に関する正確な情報提供を充実させる。

II. 公正な競争と安定した事業が可能な環境作り－事業者選定手続の改善

- (1) 国は、事業者の計画策定に十分な基礎情報調査を行い、データを公開する。
- (2) 評価結果の詳細を公表する。
- (3) ラウンド2以降の入札では、運転開始時期を国が明示する。
- (4) 新制度（「“日本版”セントラル方式」）では事前資格審査制度（Pre-qualification、PQ）を導入する。

No.	タイトル	著者	発行年月
12	風力発電所の環境影響評価について	北九州市環境局	2021年1月21日
出典	第1回 再生可能エネルギーの適正な導入に向けた環境影響評価のあり方に関する検討会 資料 3-6 https://assess.env.go.jp/files/0_db/contents/0020_09/shiryou_03_6.pdf (参照 2025/12/12)		
要点	<p>北九州市は、洋上風力の環境影響評価手続きについて、再エネ海域利用法に基づく促進区域の指定後、公募により決定した事業者が占用許可後にアセスを行うこととなり、促進区域で重大な環境影響を生じると予測されれば、事業実施が困難になる懸念があることを示し、その解決方法として、促進区域の決定権者が事業者になり、ゾーニングの結果を踏まえアセスを行う、セントラル方式的な方法でアセスを実施することを提案した。</p> <p><セントラル方式でアセスを実施するメリット></p> <ul style="list-style-type: none"> ・促進区域の指定手続にゾーニング及びアセス結果を活用することで、事業実施後の重大な環境影響の回避につながる。 ・同一海域での複数事業者による重複した環境アセスや前倒環境調査実施時の調査のやり直しのリスクが避けられる。 ・セントラル方式により、国が主導して、ゾーニング及び漁業者等利害関係者とのコミュニケーションを図る制度が確立でき、円滑な洋上風力発電の導入につながる。 		

No.	タイトル	著者	発行年月
13	洋上風力が日本のエネルギーを支える 大量導入に向けた制度・インフラ・産業	工藤美香、市村将太、斉藤哲夫、木村啓二、大林ミカ	2020年12月
出典	自然エネルギー財団 報告書 https://www.renewable-ei.org/activities/reports/20201208.php (参照 2025/12/12)		
要点	<p>セントラル方式を採用しているドイツ、オランダ、デンマークの風力導入政策および公募プロセスと、洋上風力先進国（地域）の系統整備状況について</p> <p>(1) 洋上風力先進国（地域）の風力導入政策および公募プロセス</p> <p>a. ドイツ</p> <ul style="list-style-type: none"> ・2020年以前の入札では、国のゾーニングに基づき発電事業者が海域を選んで開発を実施していた。2021年以降の入札が実施される海域は連邦海事水路庁（BSH）が海域開発計画を定める。 ・2021年から2025年に入札が実施されるプロジェクト（2026年～2030年 運転開始）は、セントラル方式の採用により、政府が区域を決めるだけでなく、国が環境影響評価や系統接続等に必要な許認可の取得、漁業関係者との調整を済ませ、発電事業者は発電所の建設及び運用についてのみ考慮した売電価格で入札を行っている。 <p>b. オランダ</p> <ul style="list-style-type: none"> ・オランダでは、セントラル方式を採用し、海域指定から環境影響評価、利害関係者との調整等を国が行い、指定された海域ごとに入札を行って事業者を選定する。 ・オランダ企業局（RVO）が洋上風力開発手続を統括している。RVOは海域指定のための調査（地質、風況、海象等）を実施し、他の関係政府機関や専門家からの情報提供も受けて海域を定める。 ・RVOは、風車の大きさや数、配置などを複数想定した上で、自然環境や景観、観光、文化遺産、そして石油・ガス採掘や漁業など他の分野の利用に対する影響を評価する環境影響評価を実施し、入札手続の中で公表している。 <p>c. デンマーク</p> <ul style="list-style-type: none"> ・海域の指定は、デンマークエネルギー庁（DEA）が主催する洋上計画委員会が行う。 ・事業性を判断するために必要な風況や環境影響に関する情報は、送電事業者（Energinet.dk）が、陸上の系統増強および洋上風力発電所について、環境影響評価を一定程度実施し、価格競争入札が行われるまでの間に広く共有される。 ・洋上風力発電所部分の環境影響評価に要する費用は、後日落札者が負担するこ 		

ととなっており、その金額も入札手続前に明らかにされる。

- ・国が選定した海域は、入札による開発以外認められないが、それ以外の海域での開発も可能。(オープンドア制度)。その場合は、DEA の許可の下で、環境アセスメントを含む事前調査を事業者主導で実施し、その結果を基に事業許可を得る必要がある。

d.イギリス

- ・イギリスでは、海域占用する事業者の決定手続と、洋上風力発電導入のための経済的支援制度の事業者選定手続が分かれている。
- ・海域の占用については、クラウン・エステートが入札を実施し、発電事業者が応募して海域占用権を得る。
- ・クラウン・エステートは、水深や海象情報のほか、航路等の存在や防衛上の理由、鳥類への影響など環境影響に関する情報等を考慮して、入札を実施する海域を選定する。選定された海域の情報は、クラウン・エステートが実施した評価とともに公開されている。
- ・洋上風力発電導入のための経済的支援制度は、差額決済契約 (Contract for Difference、CfD) と呼ばれ、発電事業者と政府の間の取り決めにより、発電事業者が市場価格の変動にかかわらず一定の収入を確保できる制度となっている。

e.アメリカ

- ・内務省連邦海洋エネルギー管理局 (BOEM) は、関係する連邦機関や州・地方政府との調整を行い、またさまざまな情報の収集や利害関係者との対話を進めてリースの対象とする海域を定める。
- ・航路情報や生息生物、文化遺産などの海域の情報は、沿岸の複数の州と連邦の関連機関等で構成される地域の海洋審議会が広く公開している。
- ・発電事業者は、BOEM が行う競争入札に参加してリース権を取得する。

f.台湾

- ・一定の風況や海域の事前調査に基づき、政府によりポテンシャル海域の指定が行われる。
- ・当該海域は、海底調査や風況の実際、環境影響評価手続の実施や沿岸地域の地方自治体の許認可の取得、地域の関係者との調整などは行われておらず、事業者が自ら別途実施し、事業性を見ながら開発を進めることとなる。

(2) 洋上風力先進国 (地域) の系統整備状況

a.イギリス

- ・風車から洋上変電所までの区間および洋上変電所から陸上変電所までの区間の電力系統は、発電事業者が建設する。このうち後者の区間は、後日入札を通じ

て別の事業者売却され、売却先の事業者によって所有・運営される

b. ドイツ

- ・ドイツでは、各風車から洋上変電所までは発電事業者が、洋上変電所から陸上の変電所までは送電事業者が建設・所有・運用を担当する。

c. オランダ

- ・陸上部分の系統整備のみではなく、洋上についても、海域ゾーン内の接続点までは送電事業者（TenneT）が用意する。
- ・洋上風力発電の入札資料には、図や座標情報と共に系統接続点が明示されている。

d. デンマーク

- ・陸上の系統増強は送電事業者（Energinet.dk）が行う。系統増強計画（ルートや完成時期）は、入札手続の中で具体的に明らかにされる。
- ・2018年に入札された海域では、洋上風車から陸上変電所までの送電施設の建設・運用・管理を発電事業者が実施、陸上変電所から先を Energinet.dk が整備することとなっている。

e. アメリカ

- ・自然エネルギー導入促進政策は州によって異なる。ニューヨーク州の場合、ニューヨーク州エネルギー開発局（NYSERDA）が定める変電所までは、発電事業者がルートを選定し接続する。陸上の増強費用については New York ISO が託送料金により回収する。

f. 台湾

- ・洋上風力発電所から陸揚げ地点までの洋上送電施設は、発電事業者が建設・運用するが、陸上系統の増強は、送電事業者（台湾電力公司）が行う。陸上系統の増強スケジュールは入札の際に示され、事業の予見可能性を確保している。

No.	タイトル	著者	発行年月
14	着床式洋上ウィンドファーム 開発支援事業 (一般海域での洋上風力発電 導入評価手法の調査)	新エネルギー・産業技術総合 開発機構	2018年10月
出典	新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 平成 30 年度成果報告書		
要点	<p>オランダおよびドイツにおける海域指定プロセスと国によるサイト調査の内容</p> <p>(1) 海域指定プロセス</p> <p>a. オランダ</p> <p>①政府による Wind Farm Zone の指定</p> <p>②政府による環境影響評価の実施</p> <p>③政府による現地調査 (風況、地盤、海象、考古学等) の実施</p> <p>④政府による発電所の建設条件・運転条件の決定</p> <p>⑤調査結果の公開・入札の実施</p> <p>⑥ライセンスの申請、補助金申請・審査</p> <p>※申請の提出書類：</p> <p>風力発電所の設計、建設および運営スケジュール、コストおよび収益の見積、社会的費用の見積、リスク一覧表と分析、費用対効果を確保するための措置の説明、風力発電所の建設と運営に係る関係者のリスト、関係者の知識と経験に関する説明等</p> <p>⑦ライセンスの付与</p> <p>⑧送電事業者との接続契約締結</p> <p>b. ドイツ</p> <p>①連邦海事水路庁 (BSH) による開発計画の策定</p> <p>②BSH による事前調査の実施</p> <p>③BSH によるサイトの適性評価</p> <p>④入札の実施</p> <p>入札時に、設備容量の詳細、サイトの説明、事前調査結果、スケジュール等が示される。入札者は、資金調達レベルを示す必要がある。</p> <p>⑤事業者 (落札者) による計画承認申請</p> <p>※申請の提出書類：</p> <p>環境影響評価、設計書、基礎設計ドラフト、船舶/風車の衝突確率に関する技術的リスク分析、基礎構造維持に関する予測等</p> <p>⑥BSH による計画承認</p>		

(2) サイト調査概要

a. オランダ

オランダ政府は、開発者の基本設計、競争入札のため、サイトの地質、気象、海象条件等を調査し、そのデータを公開する。サイトデータには以下が含まれる。

- ・地質学的、形態力学および地形学的データ
- ・考古学的分析および不発弾に関する分析
- ・海洋データ
- ・風力資源評価
- ・地球物理学的データおよび地質工学的データ
- ・風況データ

b. ドイツ

BSH は、洋上ウィンドファームの地域開発計画で指定されたエリアについて、海洋環境、土壌、海洋学的条件、その地域の交通適性等を調べ、当該エリアが洋上ウィンドファームの建設に適していると判断された場合、調査結果を連邦ネットワーク庁に転送し、連邦ネットワーク庁 (BnerzA) は、入札プロセスの一環として結果を洋上風力開発者に提供している。

No.	タイトル	著者	発行年月
15	洋上風力発電開発の促進策： 海域指定による開発リスク低 減の動向	(一財) 日本エネルギー経済 研究所	2018年10月
出典	日本エネルギー経済研究所 定期レポート https://eneken.ieej.or.jp/report_detail.php?article_info_id=8131 (参照 2025/12/12)		
要点	<p>ドイツ、オランダ、デンマーク、フランス、アメリカ、台湾の洋上風力発電の法・規則整備の状況について</p> <p>(1) ドイツ</p> <ul style="list-style-type: none"> ・連邦ネットワーク庁 (BnerzA) は 2017 年 1 月洋上風力発電の入札、計画、許認可手続きを定めた洋上風力法を施行。 ・連邦海事・水路庁 (BSH) が、BnerzA と協力して洋上風力発電のエリア開発計画を立案。 ・BSH が、送電線の敷設ルート、変電所の設置場所などを決定。 ・BSH が、サイト予定地に対する予備調査を行い、潜在的な入札参加者に当該海域に関する情報を提供。 ・政府の予備調査では、環境調査、地下探査、海域の風況調査、海洋学的条件に関する調査等を実施。政府の予備調査だけでは不十分なため、更なる調査は落札者が自力で実施。 <p>(2) オランダ</p> <ul style="list-style-type: none"> ・オランダ洋上風力エネルギー法 (2015 年 7 月施行) に基づき、政府がプロジェクトのロケーションの選定、環境影響評価の実施に責任を負う。 ・系統接続とその設備は送電系統運用者が供給する。 ・各入札の規模が定められ、個々のプロジェクトの条件が類似しているため、標準化が容易である。 <p>(3) デンマーク</p> <ul style="list-style-type: none"> ・再生可能エネルギー促進法 (2008 年 12 月制定) により、領海および EEZ 内の海洋・風力エネルギーを開発する権利は国にあると規定。 ・エネルギーに関する基本方針 (2012 年 3 月) に基づき、政府がプロジェクトを開発し、事業者の入札を実施。 ・ワンストップ・ショップ方式により、エネルギー庁が洋上ウィンドファームに必要な許認可を一括して管理し交付。 ・予備調査や環境影響調査は、送電系統運用者が実施。 <p>(4) フランス</p> <ul style="list-style-type: none"> ・2018 年 7 月洋上風力発電の導入を加速するための新たな法案を可決。 		

- ・入札で選定された事業者に対して国が公的海洋海域を占有するための許可を付与。
- ・国が予備的な環境影響評価を実施するとともに、大陸棚・排他的経済水域での活動に関連した許認可を入札前に取得し、事業者に公開。
- ・事業者による契約取得後のプロジェクトの変更が可能。
- ・入札開始前に国が公的な討論の場を設けることを義務化。

(5) アメリカ

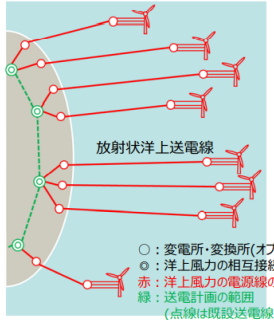
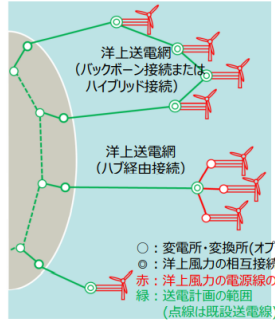
- ・内務省管轄下の海洋エネルギー管理局に沿岸域における洋上ウィンドファームの建設を一括して計画・管理運営する権限を賦与
- ・海洋エネルギー管理局は指定海域の区間（ゾーン）を主に入札を通じて「リース」という形で事業者に販売。リースの期間は 25 年間。
- ・環境影響評価等の調査は、事業者がリースの前に自力で行う

(6) 台湾

- ・洋上風力発電に特化した法律はなく、電力法、再生エネルギー開発法他多数の関連法規に基づき、台湾能源局が、2015 年 7 月に将来の商用洋上風力プロジェクトの潜在開発区域として 36 のゾーンを指定。
- ・これらのゾーンにおける予備的環境影響評価の認定を受けた事業者が、ゾーンの利用を申請できる。

No.	タイトル	著者	発行年月
16	欧州から世界に拡大する洋上風力発電事業	平野 学	2022年9月14日
出典	海外電力調査会 JEPIC セミナー資料		
要点	<p>オランダにおけるセントラル方式の概要とコストダウン（落札額）の状況および送電方式について</p> <p>(1) セントラル方式のプロセス</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 海洋計画で洋上風力用海域を指定。 ・ 長期の入札計画を策定。 ・ 事業計画に必要なデータ（風況、海域、地質など）を政府が調査して、デベロッパーに公開。 ・ 電力系統への送電線計画を送電事業者（TenneT）が策定し、送電線を建設。 ・ 洋上風力発電事業の入札を実施。 ・ 許認可手続きを経て洋上風力発電所の建設開始。 <div data-bbox="587 1061 1114 1742" data-label="Figure"> <p>The infographic 'Offshore Wind Energy Roadmap' illustrates the growth of offshore wind power in the Netherlands. It features a map of the North Sea coast with numbered callouts (1-8) pointing to specific wind farm projects. Each callout includes the project name, capacity, and key milestones. A legend at the bottom right categorizes wind farms by status: Operational (2.3 GW), Under construction (2.3 GW), In development (2.2 GW), and Planned (16 GW), totaling 13.1 GW as of November 2022. A timeline at the bottom shows the progression from 2010 to 2025.</p> </div> <p>図 洋上風力のロードマップ</p> <p>（出典：オランダ政府資料，https://open.overheid.nl/documenten/ronl-451475b2f0986b6f24fbc75ea95adc669663fd/pdf）（参照 2025/12/12）</p>		

表 1 送電線方式の比較

	電源線方式	送電計画方式
洋上送電線の扱い	洋上風力の電源線	送電計画の一部
開発主体	洋上風力発電事業者	送電系統運用者(欧州)他
採用国	米国、英国※	ドイツ、オランダ等
	放射状洋上送電線	放射洋上状送電線、洋上送電網
設備構成の例 (イメージ)	 <p>○: 変電所・変換所(オプション) ●: 洋上風力の相互接続点 赤: 洋上風力の電源線の範囲 緑: 送電計画の範囲 (点線は既設送電線)</p>	 <p>○: 変電所・変換所(オプション) ●: 洋上風力の相互接続点 赤: 洋上風力の電源線の範囲 緑: 送電計画の範囲 (点線は既設送電線)</p>
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・発電事業者のニーズが反映された洋上送電線の設計 ・洋上送電線の工事遅延による運開遅延リスクの軽減 ・競争入札による洋上送電線のコスト低減 (OFTO) 	<ul style="list-style-type: none"> ・洋上送電網の構築が容易 ・複数の洋上送電設備の標準化によるコスト低減 ・陸上側と洋上側で協調した送電線の一体開発

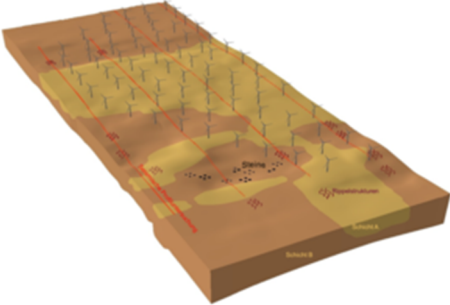
出典: 正木雄太(2022)「米国東海岸における洋上風力開発に向けた送電網整備の動向～ニュージャージー州とニューヨーク州を中心に～」『海外電力』2022年5月号

No.	タイトル	著者	発行年月
17	Hollandse Kust (noord) Wind Farm Zone, Project and Site Description,”	オランダ企業局 (RVO)	2019年10月
出典	オランダ企業局ホームページ https://offshorewind.rvo.nl/file/download/55040284 (参照 2025/12/12)		
要点	<p>オランダのホランドクスト (ノール) ウインドファームサイト (HKNWFS) の入札に係わるサイト説明書に、事業者提供される情報として以下の情報が記載されている。(なお、以下に関する利用可能なすべてのデータは、offshorewind.rvo.nl に公開されている。)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. サイトのレイアウト (メンテナンスゾーン等) および座標 2. 既存のインフラの設置状況 3. 送電事業者との接続点および接続プラットフォーム、接続契約内容 4. サイト調査結果 <ul style="list-style-type: none"> ・考古学的机上調査 ・不発弾 (UXO) リスクアセスメント調査 ・地質学的机上調査 ・地球物理学的調査 ・地球物理学的調査の考古学的評価 ・地盤工学的調査 (ボーリング、原位置試験、サンプリング、室内試験他) ・海底地形・海底地質に係る机上調査 (解析等) ・海象調査 ・風資源評価 ・気象および海象に関する机上調査 (解析等) <p>また、本書の付録 B には国が用地取得のために実施した環境影響評価書が添付され、合わせて事業者提供されている。</p>		

Test Type	Test Quantity
Index tests	
Density of solid particles (small pycnometer)	235
Particle size analysis (sieving and pipette)	570
Minimum and maximum index dry unit weight	123
Atterberg limits	95
Carbonate content	192
Organic content (dichromate oxidation)	198
Organic content (mass loss on ignition)	61
Pore water salinity	27
Triaxial tests	
Unconsolidated undrained triaxial compression - undisturbed	3
Unconsolidated undrained triaxial compression - remoulded	2
(An)isotropically consolidated undrained triaxial in compression	9
(An)isotropically consolidated undrained triaxial in compression with bender element testing	5
Isotropically consolidated drained triaxial in compression	63
Isotropically consolidated drained triaxial in compression with bender element testing	40
Ring Shear Tests	
Ring shear (soil-soil interface)	57
Ring shear (soil-steel interface)	105
Compressibility Tests	
Incremental loading	4
Constant rate of strain	17
Other Tests	
Permeability tests	69
Thermal conductivity	28
Electrical resistivity	27
Transient plane heat source	22
Microscopic photography	109
Geological dating analyses (suite of tests)	115
Biogeochemical analyses for microbially induced corrosion (MIC) risk assessment	22
Test Type	
Test Quantity	
Index tests	
Particle size analysis (sieving and pipette)	9
Strength (Static)	
Isotropically consolidated undrained triaxial in compression	9
Isotropically consolidated drained triaxial in compression	9
Direct simple shear - constant volume	10
Direct simple shear - constant vertical stress	9
Strength (Cyclic)	
Stress-controlled (an)isotropically consolidated undrained cyclic triaxial	32
Stress-controlled isotropically consolidated drained cyclic triaxial	20
Stress-controlled cyclic direct simple shear - constant volume	56
Stress-controlled cyclic direct simple shear - constant vertical stress	18
Dynamic	
Resonant column - multi-stage	10
Resonant column - drained/undrained	2
Other	
Microscopic photography	9

図 HKNWFS で実施された地盤工学的調査の一覧

No.	タイトル	著者	発行年月
18	Danish Experiences from Offshore Wind Development	デンマークエネルギー庁 (ENS)	2017年3月
出典	デンマークエネルギー庁ホームページ https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Globalcooperation/offshore_wind_development_0.pdf (参照 2025/12/12)		
要点	<p>デンマークの洋上風力の建設プロセス（セントラル方式およびオープンドア方式）について。</p> <p>（１）セントラル方式</p> <ul style="list-style-type: none"> ・政府が国土計画により承認した海域が入札の対象となる。 ・送電事業者が、環境影響評価の責任者であり、環境影響評価の他、地質調査、地球物理学的調査、海洋の考古学的調査、風況に関する調査、海象調査等の予備調査を行い、その結果を入札前に公開する。 ・予備調査費用は入札前に提示され、落札した事業者がその費用を負担する。 ・落札した発電事業者は、落札後に詳細な各種調査（地質調査、地球物理学的調査等）を実施する許可を得る。 ・発電事業者は、最も近い陸上変電所までの系統連系費用を負担する。（※落札者が決定するまで、洋上風力の規模、建設位置が確定しないため。） <p>（２）オープンドア方式</p> <ul style="list-style-type: none"> ・政府が指定した地域以外で、事業者が主導してプロジェクト開発を行う方式。 ・プロジェクト開発者は、予備調査を行うための申請を行い、デンマークエネルギー庁の承認を得る必要がある。 ・承認を得た後、事業者は、予備調査、環境影響評価等を行う。 ・事業者は、その後、ウィンドファーム設立申請書を提出する。申請書には、プロジェクトの範囲、位置、規模、送電網接続計画、ケーブルトレース、予備調査の結果などが含まれ、環境影響評価と合わせて提出する。 ・デンマークエネルギー庁は申請の審査（パブコメ含む）を行い、問題が無ければ建設を許可する。 		

No.	タイトル	著者	発行年月
19	ドイツ連邦海事水路庁 (BSH) ホームページ	ドイツ連邦海事水路庁 (BSH)	2021 年 1 月 21 日
出典	ドイツ連邦海事水路庁ホームページ https://www.bsh.de/EN/TOPICS/Offshore/offshore_node.html (参照 2025/12/12)		
要点	<p>【BSH で実施する調査等について】</p> <p>連邦海事水路庁(BSH)は、連邦ネットワーク庁(BNetzA)による入札手続きと風力発電所の建設のために、サイト開発計画で指定された地域について、海洋環境（戦略的環境アセスメント）、下層土、風、海洋条件、および地域の交通適合性を調査し、レポートに纏め、地点の適合性評価を行う。適合性が認められると、調査の結果は入札手続きのために BNetzA に送信され、入札の 6 カ月前までに Web 上に公開される（図 2）。</p> <p>調査結果は、入札手続で契約を締結した事業者にも、BSH で実行される後続の計画承認手続の基礎資料として用いられ、入札した事業者は、これに基づき追加調査や環境影響調査を行う。</p> <p>なお、調査は 3~4 年程度実施され、調査は入札の 1 年前までには終了することとなっている。</p> <p>（1）地質調査・地形調査</p> <p>①海底地形調査</p> <ul style="list-style-type: none"> ・マルチビーム測深調査、サイドスキャンソナー調査等 <p>②地下の地球物理学的調査</p> <ul style="list-style-type: none"> ・海上音波探査（シングルチャンネル/マルチチャンネル）、サブボトムプロファイラー調査等 <p>③地盤調査</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ボーリング、サンプリング、室内試験等 <p>④地質報告書と地下モデルの作成</p> <ul style="list-style-type: none"> ・①~③を踏まえた 3 次元地盤モデルの作成 		
			
	<p>図 1 風力発電所地下部の 3 次元地盤モデル</p> <p>出典：ドイツ連邦海事水路庁 HP</p>		

⑤環境資産としての土壌評価（戦略的環境アセスメントの一部として実施）

- ・ サイドスキャンソナーとビデオ調査、および堆積物サンプリングに基づいて、海底の堆積物組成と表面構造に関する情報を整理し、環境影響の評価を実施
- (2) 海洋環境に関する調査（戦略的環境アセスメントの一部として実施）
- ・ 底生生物、魚類、海洋哺乳類、渡り鳥および休息鳥などの調査
- (3) 風況レポート・海洋条件レポートの作成
- ・ 気象観測、海象観測
- ・ 気象モデル（解析）評価、海洋モデル（解析）評価
- (4) 海上交通への影響調査、地質遺跡調査等

Selected Data Packages: /35 35 Sorting: Default ▾




































 Final Reports of the Geological Site Investigation (3 files)	Subsoil	Revision	>
 Investigation Reports of the Geological Site Investigation (3 files)	Subsoil		>
 Geodata of the Geological Site Investigation (4 files)	Subsoil		>
 Geological Model (3 files)	Subsoil		>
 Database of the Geotechnical Surveys (2 files)	Subsoil		>
 Sound Velocity Profiles (2 files)	Subsoil		>
 Multibeam Echosounder Data (2 files)	Subsoil		>
 Side Scan Sonar Data (2 files)	Subsoil		>
 Magnetometer Data (2 files)	Subsoil		>
 Sediment Samples (2 files)	Subsoil		>
 ROV Investigation (1 file)	Subsoil		>
 Subbottom Profiler Data (6 files)	Subsoil		>
 Single-channel Seismic Data (4 files)	Subsoil		>
 Multi-channel Seismic Data (6 files)	Subsoil		>
 Borehole Sampling (2 files)	Subsoil		>
 Cone Penetration Tests (CPT) (2 files)	Subsoil		>
 Borehole Geophysics (PS Logging) (1 file)	Subsoil		>
 Laboratory Testing (2 files)	Subsoil		>
 Interim Reports Marine Environment (4 files)	Marine Environment		>
 Final Reports Marine Environment (8 files)	Marine Environment		>
 BSH-Data Tables & Tour Reports Marine Mammals, Resting Birds and Migratory Birds (Ship) (3 files)	Marine Environment		>
 BSH-Data Tables & Tour Reports Resting Birds and Marine Mammals (Flight) (4 files)	Marine Environment		>
 BSH-Data Tables & Tour Reports Benthos, Fish and Biotopes (4 files)	Marine Environment		>
 Raw Data Marine Mammals, Resting Birds and Migratory Birds (Ship) (3 files)	Marine Environment		>
 Raw Data Resting Birds and Marine Mammals (Flight) (2 files)	Marine Environment		>
 Oceanographic Report (1 file)	Oceanography		>
 In Situ Data (4 files)	Oceanography	Revision	>
 Model Data (4 files)	Oceanography	Revision	>
 Meteorological Reports (3 files)	Wind		>
 Meteorological Measured Data (11 files)	Wind		>
 Meteorological Model Data (3 files)	Wind		>
 Navigational Risk Assessment (2 files)	Navigation		>
 Determination of Suitability (2 files)	Procedure		>
 Suitability Examination (2 files)	Procedure		>
 Environmental Report (2 files)	Procedure		>

図 2 公開データ一覧 (Site N7-2)

出典：<https://pinta.bsh.de/N-7.2?lang=en&tab=daten> (参照 2026/01/07)

No.	タイトル	著者	発行年月
20	Comparative Analysis of International Offshore Wind Energy Development RE WIND OFFSHORE	Rhodri James, Guy Henley, Stefanie Hintze, Andrew Conway, Jérôme Guillet	2017年3月
出典	The International Energy Agency's Renewable Energy Technology Deployment Technology Collaboration Programme (IEA RETD TCP)		
要点	<p>サイト開発手法の違いと洋上風力発電用地選定のアプローチについて</p> <p>(1) 洋上風力発電の用地開発 用地開発の典型的なモデルとして①Centralised model、②Decentralised model、③Hybrid model を示し、代表的な国のモデルについて説明している。</p> <p>①Centralised model</p> <ul style="list-style-type: none"> ・政府が先行投資リスクの大部分を負担し、入札に先立ち、サイトの特定、調査、同意、系統許可を行うモデル。 ・開発事業者は建設前の段階で、特定のプロジェクトの入札に参加するのみであるため、開発事業者にとってはリスク回避の観点から魅力的であるが、競争優位性を発揮できる範囲が限定される可能性がある。 ・オランダ、デンマーク等で採用。 <p>②Decentralised model</p> <ul style="list-style-type: none"> ・開発事業者が主導して用地調査、送電網の許可と同意の取得を行うモデル。 ・政府にとってリスクと初期費用が少ないが、契約締結後の取引価格の上昇に反映される。開発事業者にとっては、コントロールの度合いや競争優位性を発揮する機会という点で好ましいが、入札による場合、開発事業者にかなり高い初期リスクが発生する可能性がある。 ・イギリス、日本、中国等で採用。 <p>③Hybrid model</p> <ul style="list-style-type: none"> ・政府が用地開発プロセスの一部を管理するモデル。 ・例えば、政府は用地特定、初期用地測量、グリッド許認可等を行うが、開発者は、一部の許認可や追加調査を行う必要がある。 ・ドイツ等で採用。 <p>それぞれのモデルには利点があり、政府がどのようなアプローチを取るかは、地域の状況や国の目標、政府がリスクを共有する意思に大きく依存するが、近年、特に競争入札制度への移行に伴い、Decentralised model から Centralised model への移行が進んでいる。</p>		

※1 ドイツの用地開発

- i. 全国的に調整された海洋空間計画およびオフショアグリッド計画に従って、入札スケジュールとともに、サイトが事前に選定される。
- ii. 入札の 6 ヶ月前に、用地調査が行われ、その結果は開発事業者に渡される
- iii. 開発事業者は入札により、用地を落札する。落札者は、補助金契約、系統接続に係る許可、および発電所建設の保証を得る。
- iv. 補助金契約と系統接続に係る許可が下りると、開発事業者は同意取得のための法的手続きを開始し、12 ヶ月以内にすべての書類を提出する。
- v. 許可後、開発事業者は風力発電所の建設を開始する。

※2 オランダの用地開発

- i. 政府は、特定のプロジェクト用地の選定を行い、必要な現地調査を行い、完全な同意と系統接続に係る許可を得る。
- ii. 開発事業者は、入札を通じて用地を競り落とす。落札者は、補助金契約 (SDE+) と風力発電所建設に必要なすべての許可を獲得する。

※3 デンマークの用地開発

政府が建設前の段階まで用地を開発した後、開発希望者に入札を行う。

	Zone identification	Site selection	Site investigation	Consenting/ permitting	Grid application	Grid design & construction	Government risk/control	Developer risk/control
	Crown Estate	Developer	Developer	Developer via PINs	Developer / National Grid	Developer/ OFTO	Low	High
	Government	Developer	Developer	Developer via BSH	TSO	TSO	High	High
	Government	Government	Government	Developer via BSH	TSO	TSO	High	High
	Government	Government	Government	Government	Government / TSO	TSO	High	Low

Note: Green indicates government/TSO responsibility; orange indicates developer's responsibility. The sequence of steps can vary by country (see below).

図 洋上風力発電の用地開発に係る役割分担

(出典：The International Energy Agency's Renewable Energy Technology Deployment Technology Collaboration Programme)

(2) 洋上風力発電用地選定のアプローチ

洋上風力開発のための用地または区域を特定するための様々なアプローチとして、①オープンドア方式、②ゾーニング方式、③サイトスペシフィック方式がある。

導入量の増加に伴い業界が成熟するにつれ、オープンドア方式は一般的に廃止され、ゾーニング方式やサイトスペシフィック方式が採用されるようになってい

るが、業界の成熟度や導入レベルが低い新興市場では、オープンドアやゾーニング方式が好まれる傾向が続いている。

①オープンドア方式

- ・開発者が主導して適切な場所を特定し、関係当局と賃貸契約を締結する。
- ・洋上風力が未成熟なエネルギー技術であった当時、政府にとっては低コストのアプローチであり、また、業界の形成期において最も魅力的な場所を選択しようとする事業者にとっては、より柔軟なアプローチであったが、オープンドア・アプローチの成功はまちまちで、比較的早く同意を得ることに成功したサイトもあれば、同意の問題から大きな後退を余儀なくされたサイトもある。

②ゾーニング方式

- ・管理当局が大規模な洋上風力開発ゾーンを指定し、開発希望者が競争プロセスを通じて、海域の占有権を取得できるようにする方式。占有権が得られると、開発者は、その中からプロジェクトに最も適した場所を選択することができる。
- ・この方法は、潜在的な制約がすでに評価され、リスクが軽減されているという確信のもと、最も魅力的と思われる用地をより柔軟に選ぶことができるため、多くの開発事業者に支持されている。

③サイトスペシフィック方式

- ・政府機関が用地調査や関連許認可の取得など用地開発の大部分を請け負い、建設前の段階で開発業者に入札を実施する方式。
- ・入札前に用地状況を把握することで、競争入札における落札価格の引き下げにつながり、このアプローチの有効性は、最近オランダとデンマークで落札された低い落札価格からも明らかである。
- ・一連のプロジェクトを通じて競争上の優位性を得る機会が制限される可能性があるため、必ずしも開発事業者には有利とはいえない。

No	タイトル	著者	発行年月
21	Offshore Wind Worldwide Regulatory Framework in Selected Countries 2 nd Edition	Dr Christian Knütel	2022 年 4 月
出典	Hogan Lovells International LLP https://www.hoganlovells.com/~media/germany_folder-for-german-team/broschueren/broschuere_hogan_lovell_offshorewindworldwide_2021.pdf?la=ja-jp (参照 2025/12/12)		
要点	<p>ドイツ、オランダ、デンマーク、フランスの洋上風力発電の規制の枠組み、系統接続等について</p> <p>(1) ドイツ</p> <p>a.洋上風力発電の規制の枠組みおよび許認可</p> <ul style="list-style-type: none"> ・連邦政府レベルでは、連邦経済エネルギー省の所管となる。 ・洋上風力発電に係る主な法律は、洋上風力エネルギー法(セクター計画、事前調査、入札手続、建設および運用認可等)、再生可能エネルギー法(再エネ開発、固定買取制度、系統接続等)、エネルギー産業法(系統システムの構築・運用等)等 ・洋上風力発電法に基づき実施される入札で特定のサイトを落札した事業者は、洋上風力発電所の建設・運営に必要な許可の一種である計画認可の手続きを行う独占的権利を有する。そのため、落札者のみが特定サイトでの事業を実現することができる。 ・セントラル方式では、以下に示す段階的な計画と入札プロセスが行われる。 <p>①連邦海事水路庁(BSH)が「用地開発計画」を策定。開発計画では、洋上風力発電のためのゾーン(Gebiete)、ゾーン内の特定のサイト(Flächen)、の入札順序、特定のサイトにおける洋上風力発電の目標設置年、変電所の場所など、主に洋上風力発電と系統連系システムに関するゾーニングの規制を決定する。</p> <p>②連邦ネットワーク庁(BNerzA)から委任を受けたBSHがサイトの事前調査を行い、事前に入札者に必要な情報を提供する。</p> <p>③入札は、BNerzAで実施する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ドイツEEZ内に設置される場合、洋上風力発電法の許可制度の対象となる。 ・洋上風力発電に必要な許認可は、原則的に計画認可(Planfeststellungsbeschluss)に集約され、賦与される。計画認可は、BSHの管轄となる。 ・領海内の洋上風力発電等およびその他の施設(ケーブル等)の建設・運用は、各州の建築法およびその他の法律が適用される。 <p>b.系統連系</p>		

- ・落札事業者は、入札の受理により、洋上風力エネルギー法（24条）に基づき、系統アクセス権および接続容量を得る。
- ・各送電事業者は系統接続の完了予定日を公表しなければならない。
- ・エネルギー産業法に従って決定される系統接続の拘束的完了期限までに、送電事業者は系統連系システムを準備し、発電事業者は洋上風力発電を陸上送電網に接続しなければならない。
- ・系統連系システムの建設および完成が遅れた場合、発電事業者はその補償を受け取ることができる。

（2）オランダ

a. 洋上風力発電推進の枠組みおよび許認可

- ・オランダにおける洋上風力発電の空間計画は、洋上風力エネルギー法（Wet Windenergie op zee）および水法（Waterwet）に従う。
- ・国家水計画（National Waterplan）において、経済・気候政策大臣は、洋上風力発電に適していると思われる指定地域を指定することができる。
- ・オランダ企業局（RVO）は、洋上風力発電の補助金および許可証の入札を実施する。
- ・入札の前段階として、RVOは、風力発電サイトに関連した様々な調査を委託実施し、入札への参加を希望する事業者のために、サイトの概要や特徴、環境など Project and Site Description（PSD）が発行される。
- ・入札には補助金あり入札、補助金なし入札があり、補助金なし入札では、次の項目が考慮される。①関係者の知識および経験、②風力発電所の設計の質、③風力発電所の能力、④社会的コスト、⑤リスクの分析、⑥コスト効率を保証するための方策等。
- ・オランダ領海またはオランダの排他的経済水域で OWF を建設または運用するために必要な許認可は、政府によって発行される。許可証付与のための基準は、洋上風力エネルギー法に定められている。これらの基準に従って、事業者は、洋上風力発電の建設と操業が財政的、経済的、技術的に可能である場合にのみ、許可を得ることができる。
- ・入札後、落札事業者（許可証保有者）は、洋上風力発電の建設計画を詳述したプロジェクト計画を提出する。許可証保有者は、許可が確定となった日から4年以内に建設、運転を開始しなければならない。

b. 系統連系

- ・オランダ政府は、電気事業法に基づき TenneT 社を陸上・海上の送電事業者に任命。TenneT は、発電事業者との間で、「Realisation Agreement」および「Connection and Transmission Agreement」を締結する。「Realisation Agreement」では、洋上変電所への接続を実現するための条件が規定される。

- ・工事の遅延等により陸上送電網および海上送電網の利用が出来ない場合には、発電事業者は、送電事業者より補償を受ける権利がある。

(3) デンマーク

a. 洋上風力発電推進の枠組みおよび許認可

- ・領海および EEZ の風力の利用権が国に所属しているため 洋上風力発電を行うには、デンマーク気候エネルギー公益事業省 (the Danish Ministry of Climate, Energy and Utilities.) が発行する国からのライセンスが必要である。
- ・ライセンスは、オープンドア手続きまたは入札手続きによって取得する。
- ・オープンドア手続では、プロジェクト開発者は、予備調査を実施するためのライセンス申請書を提出し許可されると、空間計画で指定されていない地域に洋上風力発電を建設するためのイニシアティブをとることができる。
- ・入札手続は、国による事前調査、審査により、スクリーニングされた地域を対象としている。スクリーニングは 2020 年に実施され、洋上風力発電の建設用に確保された 2 つの地域では、オープンドア手続による洋上風力発電のライセンス申請はできない。
- ・入札は、① デンマーク・エネルギー庁 (DEA) による入札の呼びかけ、② 入札仕様書とコンセッション契約書の提出、③ 入札者との交渉、④ 最終的な入札の呼びかけ、⑤ 入札、⑥ コンセッション契約の締結の手順で行われる。
- ・デンマーク海域で洋上風力発電所を建設・運営するためには、デンマークの再生可能エネルギー法に基づく以下の 4 つのライセンスが必要である。
 - ① 予備調査実施許可
 - ② 建設許可
 - ③ エネルギー利用許可
 - ④ 発電許可 (25 MW を超える容量の施設の場合)
- ・ライセンスは、DEA よりワンストップサービスで発行される。
- ・予備調査では、開発者は予備調査報告書を DEA に送らなければならない。この報告書には、プロジェクトが環境に与える影響の評価も含まれる。入札手続による開発の場合は、デンマークの電力会社 (Energinet) が、入札実施前に予備調査 (戦略的環境アセスメント、追加の環境調査、陸上設備の環境アセスメント含む。) が実施される。事業者は、プロジェクト固有の海上 EIA を実施する。

b. 系統連系

- ・Energinet は、陸上変電所から送電網全体までの GCS の建設と運用を担当する。
- ・洋上変電所と海底ケーブルは入札の範囲内となる。
- ・事業者は、陸上の系統連系システムの建設に関する Energinet の費用を負担しなければならない。
- ・Energinet が期限を守らず、系統接続の条件を満たされなかった場合、Energinet

は開発者が被る損害および派生的な損失について責任を負う。

(4) フランス

a. 洋上風力発電推進の枠組みおよび許認可

- ・ 洋上風力発電の開発プロセスは以下の通り。
事前調査（国が主導）⇒入札⇒公有地使用（占有）許可、環境認可⇒系統連系契約⇒商業契約
- ・ 入札時は①求める最大電力と地点概要、②技術的特徴を含む設備の説明、スケジュール、PPA または追加報酬の財務方式、③入札の募集方法と規則、等を定めた仕様書が提示される。
- ・ 事業者は、発電所の運転に関する許認可、海域の利用許可、環境認可の3つの許認可が必要である。
- ・ 海域の利用許可には、公開討論と環境アセスメントが必要でこれらは国主導で行われる。
- ・ 環境許可は複数の異なる法律や規制に関するライセンスや認可を1つの認可にまとめたものである。
- ・ 2018年の最新法では、調査の全部または一部を国で実施することができるとしている。
- ・ 上記3つの認可は、風力タービンの数、サイズ、設置容量、占有エリアでの構成に関して、当該プロジェクトに柔軟性/可変性を持たせることができるとし、プロジェクトは、上記認可後でも変更することが可能としている。このため、プロジェクトは、新たな認可を申請することなく、認可の交付後に変更することができる。

b. 系統連系

- ・ 系統接続は、送電事業者（RTE）が実施、運営する。
- ・ RTE は、発電所の接続と海底ケーブルのエンジニアリングを担当し、RTE は、エネルギー規制委員会（CRE）が承認したテンプレートに基づき、発電事業者との間で、発電所の運転開始前に接続契約を締結する。この契約では、接続ポイント、設備の機能と性能、選択された技術的ソリューションが定義される。
- ・ 現在、RTE は、一般競争入札で実施されたすべての OWF プロジェクトの系統連系費用を負担しており、その費用は、一般料金体系を通じて調達される。
- ・ RTE は系統接続の完了の遅れによって生じた事業者の損失に対する補償も支払うこととなっている。但し、その遅れが不可抗力または事業者に起因し接続工事に影響を及ぼす事象によって生じたものではないことが条件とされる。

No	タイトル	著者	発行年月
22	Offshore Wind in Germany: new auction designs confirmed	Alexander Koch Malte Neumann	2022 年 7 月 20 日
出典	Hogan Lovells HP https://www.engage.hoganlovells.com/knowledgeservices/news/offshore-wind-in-germany-new-auction-designs-confirmed (参照 2025/12/12)		
要点	<p>洋上風力エネルギー法 (Windenergie-auf-See-Gesetz) の改正 (2022 年 7 月採決) の内容について</p> <ul style="list-style-type: none"> ・洋上風力エネルギー法の改正では、入札に関して、事前調査区域と非事前調査区域という 2 種類の区域別に、新たな入札制度が設定される。 ・政府による事前調査が行われる区域では、洋上風力発電設備の製造におけるグリーン電力・グリーン水素の使用、電力購入契約 (PPA) の締結、自然保護や種の保護の遵守、熟練労働者の育成・確保等の、4 つの定性基準に基づく入札を実施する。この入札は、2023 年 6 月と 8 月に開催される入札に適用される。 ・事前調査が行われる区域では、新しい洋上風力発電所の計画と承認手続きを合理化するため、計画承認手順 (Planfeststellungsverfahren) は、より迅速な計画許可手順 (Plangenehmigungsverfahren) に変更となった。 ・一方、事業者向けに公開された中央政府による事前調査がない区域では、もし入札額が 0 セント (プレミアムなし) の入札者が複数いた場合には、連邦ネットワーク庁はこのエリアに対して別の入札ラウンドを実施し、最も支払い意思が高い入札者が選ばれる。 		

No	タイトル	著者	発行年月
23	久慈市 再生可能エネルギー	久慈市 港湾エネルギー推進課	
出典	<p>久慈市ホームページ https://www.city.kuji.lg.jp/material/files/group/30/zo_houkokusyo.pdf https://www.city.kuji.lg.jp/material/files/group/30/05_youjouhatsuden_iinkai_3rd_shiryou4.pdf (参照 2026/1/22)</p>		
要点	<p>(1) 洋上風力発電ゾーニング協議会 平成 30 年度から令和 2 年度まで、「風力発電に係るゾーニング実証事業」(環境省委託業務) を実施。洋上風力発電ゾーニング協議会において、洋上風力発電導入に向けた区域ごとの課題整理に加え、漁業者を対象としたワークショップや一般市民向けのポスター展示・アンケート調査の実施等、地元関係者の理解醸成を図るとともに、ゾーニング対象範囲の自然的状況、社会的状況に関する調査、魚類調査、鳥類調査、海象調査、陸域における風況調査等を実施し、これらの結果等を取り纏め、海域のゾーニングを行った。</p> <p>(2) 久慈市沖浮体式洋上風力発電検討委員会 令和 2 年度から「浮体式洋上風力発電による地域の脱炭素化ビジネス促進事業委託業務(地域調査業務)」(環境省委託業務) を実施、浮体式洋上風力発電の早期普及に向けた情報整理や各種調査(基礎調査(鳥類調査、魚類調査)、海底調査(海底地層調査(音波調査)、海底底質調査(底質分析)、海底地形調査(深淺測量))、海象調査(流況・波浪調査))を行った。</p> <p>また、令和 3 年 11 月に開催された第 2 回久慈市沖浮体式洋上風力発電検討委員会では、久慈市が作成した「(仮称)岩手県久慈市等沖洋上風力発電事業計画段階配慮書(案)」が示され、配慮書相当の図書(原稿)を作成することで事業者の負担軽減を図る試みについて議論が行われた。</p> <p>(3) 事業者向け調査データ提供 「令和 3 年度浮体式洋上風力発電による地域の脱炭素化ビジネス促進事業」により得られたデータのうち次のものについて、事業者が申請することで久慈市から提供を受けることができる</p> <ul style="list-style-type: none"> ・基礎調査(鳥類調査、魚類調査) ・海底調査(海底地層調査(音波調査)、海底底質調査(底質分析)、海底地形調査(深淺測量)) ・海象調査(流況・波浪調査) <p>(4) 共同調査について</p> <ul style="list-style-type: none"> ・浮体式の洋上風力発電事業を検討するための洋上及び陸上の風況調査につい 		

て、発電事業者一同で行う共同調査を企画。2022年度より実施中。

(調査の概要)

①洋上風況調査

調査方法：浮体式観測機による風況観測

地点数：1地点

調査期間：12ヶ月間(R4.9～R5.10)

②陸上風況調査

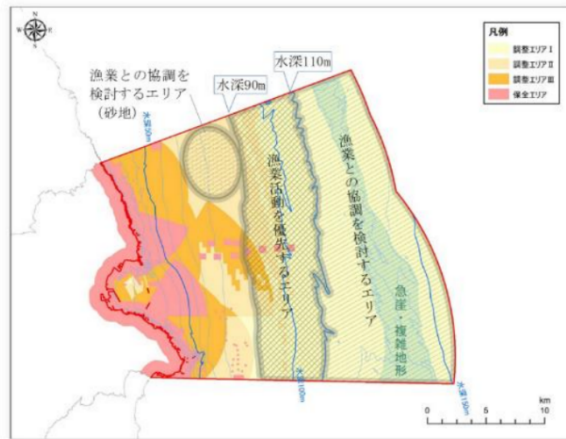
調査方法：マスト型風況観測、ドップラーライダー風況観測

地点数：1地点

調査期間：12ヶ月間(R4.9～R5.10)

③風況解析

上記調査結果を用いた解析



- ▶ 水深110m以深のほか水深70～90m付近の砂地のエリアを「漁業との協調を検討するエリア」とする。
- ▶ 水深100m付近の平坦な海域は操業が多いため、「漁業活動を優先するエリア」とする。
- ▶ 今後風況や海底地形・底質に関する詳細な情報を収集し、引き続き風力発電事業の導入可能性について意見交換を図っていく。

図1 ゾーニングマップ (出典：久慈市 HP)

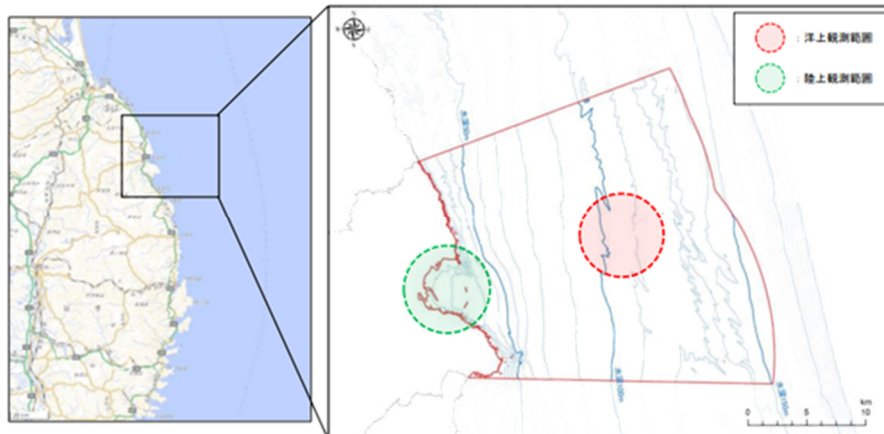


図2 共同調査地点範囲 (出典：久慈市 HP)

No.	タイトル	著者	発行年月
24	遊佐沿岸域検討部会	山形県 環境エネルギー部 エネルギー政策推進課 再エネ事業推進担当	
出典	山形県ホームページ https://www.pref.yamagata.jp/050016/kurashi/kankyo/energy/kenkyuu/copy2.html (参照 2025/12/12)		
要点	<p>山形県では、遊佐町沖で洋上風力発電を導入する場合の地域に与える影響や課題について、地域住民等も含めて具体的な議論を行うため、平成 30 年度に山形県地域協調型洋上風力発電研究・検討会議 遊佐沿岸域検討部会を設立。</p> <p>(1) 令和 2 年度第 1 回遊佐沿岸域検討部会 (2020 年 9 月 11 日開催)</p> <p>a. 共同調査 (風況調査・海域調査) の実施について</p> <p>遊佐町沖では多数の事業者から調査実施の意向が示されていたものの、漁協や地域の混乱を避けるため、自粛を要請してきた。2019 年 12 月に洋上風力発電を進めていくことについて地元合意が整ったことから、調査の実施を認めることとした。但し、多数の事業者がそれぞれ調査を行うと混乱を来すため、調査実施にあたっては共同で実施するよう部会から要請し、事業者間の調整の結果 30 社による共同調査を実施することとなった。</p> <p>(a) 風況調査</p> <ul style="list-style-type: none"> ・風況観測塔およびドップラーライダーによる測定 2 箇所 ・期間：2020 年 9 月～2022 年 8 月 <p>(b) 海域調査</p> <ul style="list-style-type: none"> ・音波探査、ボーリング調査 (6 箇所)、海底微動アレイ調査 (10 箇所) <p>b. 環境アセスメントの実施について</p> <p>環境アセスメントは、事業者ごとに事業計画が異なるため共同で実施することはできず、それぞれの事業者で行うこととなる。多数の事業者がそれぞれ手続きを進めると煩雑になるため、配慮書については、1 回の審査は 3 事業者を上限とし、県環境評価審査会に諮ることとした。</p> <p>(2) 令和 2 年度第 2 回遊佐沿岸域検討部会 (2021 年 1 月 29 日開催)</p> <p>共同調査 (風況調査・海域調査) および環境アセスメントの実施状況についての中間報告が行われた。</p> <p>(3) 令和 3 年度第 2 回遊佐沿岸域検討部会 (2022 年 1 月 14 日開催)</p> <p>共同調査 (風況調査・海域調査) および環境アセスメントの実施状況についての中間報告が行われた。</p> <p>共同調査は、風況調査が 2 地点追加、測定期間も延長 (2023 年 5 月まで) とな</p>		

った。環境アセスメントについては、多数の事業者がそれぞれ手続きを行うと地元が混乱を来し、住民の負担も増加することから、配慮書手続の集約化の協力を県と町から依頼し、事業者間の調整(共同実施等)が図られた。

(4) 遊佐町沖における洋上風力発電に関する住民説明会

環境省で実施する「洋上風力発電に係る環境影響評価のための環境調査（山形県遊佐町沖）委託業務」に関する説明会を実施した。

No.	タイトル	著者	発行年月
25	「岩宇・南後志地区沖」洋上風力発電導入に向けた共同調査に係る参画事業者の募集開始について	岩宇・南後志地区洋上風力発電導入推進組合事務局 (寿都町公営企業 企業管理課 風力発電事業係)	
出典	寿都町ホームページ http://www.town.suttu.lg.jp/info/detail.php?id=276 (参照 2025/12/12)		
要点	<p>「岩宇・南後志地区沖」洋上風力発電導入に向けた共同調査【セミ・セントラル方式】に係る参画事業者の募集について</p> <p>岩宇・南後志地区洋上風力発電導入推進組合（以下、推進組合）では、岩宇・南後志沖で事業実施を希望する事業者が各々、事業計画を立案するために必要な風況調査、海域調査等を実施すると各事業者で調査が輻輳することにより、当海域で操業する漁業関係者への支障となることが予測されること等から、本来事業者が実施すべき、環境影響評価手続き及び系統連系枠の確保に向けた協議等について、推進組合が参画を希望する事業者と共同で調査を実施することとし、今年度の参画希望者を募集している。</p> <p>調査内容は、① 風況調査 ② 海底地盤調査 ③ 環境影響調査 ④ 漁業実態調査 ⑤ 環境影響評価手続き ⑥ 系統連系協議（※但し、NEDO で実施している「洋上風力発電の地域一体的開発に向けた調査研究事業」により実施される調査内容を除く）とし、調査内容の詳細は、当該調査に参画した事業者の代表及び推進組合との協議により決定する。</p> <p>調査実施にあたって必要な費用については、参画した事業者数により按分し、負担する。また、調査参画に係る事業者の募集期間終了後にも参画可能であるが、参画する場合については、当初より参画している事業者が既に支払っている負担金を事業参画表明時に支払うこととしている。</p>		

4.1.3 まとめ

(1)日本版セントラル方式の制度設計に関する調査

本文献調査については、2022年12月末現在で取り纏めたものである。2023年1月30日開催の「総合資源エネルギー調査会省エネルギー・新エネルギー分科会再生可能エネルギー大量導入・次世代電力ネットワーク小委員会洋上風力促進ワーキンググループ 交通政策審議会港湾分科会環境部会洋上風力促進小委員会 合同会議（第18回）」において、これまでの議論結果が「洋上風力発電に係るセントラル方式の運用方針〔骨子〕（案）」として取り纏められているが、依然として、以下の課題が残っている。

（課題）

国の役割がデータの収集や提供にとどまっている。

事業者にとってハードルの高い以下の項目について、依然として課題が残っていると考えられる。

- ① 開発初期段階の地域調整での国の関与の必要性
- ② 地域・漁業との共生についての国の役割の必要性
- ③ 系統確保についての国の役割が不明確（検討中）

(2)海外の海域指定に係る政策と系統整備の状況に関する調査

a.海外の海域指定に係る政策

海外の海域指定に係る政策に関して、以下の4か国について調査を行った。以下に各国の概要を示す。

(a) ドイツ

- ・2020年以前の入札では、国のゾーニングに基づき発電事業者が海域を選んで開発を実施。2021年以降の入札が実施される海域は連邦海事水路庁が海域開発計画を策定する。
- ・2021年から2025年に入札が実施されるプロジェクト（2026年～2030年運転開始）は、セントラル方式の採用により、政府が区域を決めるだけでなく、国が戦略的環境アセスメント、予備調査、系統接続等に必要な許認可の取得、漁業関係者との調整等を済ませている。但し、設計にあたり、予備調査で情報が不足する場合は、発電事業者が落札後自ら調査を行う。
- ・発電事業者は、落札後、環境影響評価等を実施する。
- ・なお、2022年7月に洋上エネルギー法が改正され、事前調査区域と非事前調査区域という2種類の区域別に、新たな入札制度が設けられた。

(b) オランダ

- ・セントラル方式を採用し、国が開発のリスクと開発コストの削減を目標に、政府主導でエリア区分及びサイト認定を実施。発電事業者は政府によって概説された仕様（Project and Site Description, PSD）に従った競争入札を行う。

- ・オランダ企業局（RVO）が洋上風力開発手続を統括している。RVO は、海域指定のための調査（地質、風況、海象等）を実施し、他の関係政府機関や専門家からの情報提供も受けて海域を定める。
- ・RVO は、風車の大きさや数、配置などを複数想定した上で、自然環境や景観、観光、文化遺産、そして石油 ガス採掘や漁業など他の分野の利用に対する影響を評価する環境影響評価を実施し、入札手続の中で公表している。

(c) デンマーク

- ・海域の指定は、デンマークエネルギー庁が主催する洋上計画委員会が行う。
- ・ワンストップ・ショップ方式により、エネルギー庁が洋上ウィンドファームに必要な許認可を一括して管理し交付する。
- ・事業性を判断するために必要な風況や環境影響に関する情報は、送電事業者（Energinet.dk）が、陸上の系統増強および洋上風力発電所について、環境影響評価を一定程度実施し、価格競争入札が行われるまでの間に広く共有される。
- ・洋上風力発電所部分の 環境影響評価に要する費用は、後日落札者が負担することになっており、その金額も入札手続前に明らかにされる。
- ・国が選定した海域は、入札による開発以外認められないが、それ以外の海域での開発も可能である（オープンドア制度）。その場合は、デンマークエネルギー庁の許可の下で、環境アセスメントを含む事前調査を事業者主導で実施し、その結果を基に事業許可を得る必要がある。

(d) フランス

- ・2018年7月洋上風力発電の導入を加速するための新たな法案を可決した。
- ・入札で選定された事業者に対して国が公的な海域を占有するための許可を付与する。
- ・国が予備的な環境影響評価を実施するとともに、大陸棚・排他的経済水域での活動に関連した許認可を入札前に取得し、事業者に公開する。
- ・事業者による契約取得後のプロジェクトの変更が可能である。
- ・入札開始前に国が公的な討論の場を設けることを義務化している。

b. 系統の整備に関する調査

海域の指定に伴う系統の整備に関して、以下の7か国について調査を行った。以下に各国の概要を示す。

(a) ドイツ

- ・各風車から洋上変電所までは発電事業者が、洋上変電所から陸上の変電所までは送電事業者が建設・所有・運用を担当する。
- ・洋上風力発電の落札事業者は、入札の受理により、洋上風力エネルギー法に基づき、系統アクセス権および接続容量を得る。
- ・各送電事業者は系統接続の完了予定日を公表しなければならない。
- ・エネルギー産業法に従って決定される系統接続の拘束的完了期限までに、送電事業者

は系統連系システムを準備し、発電事業者は洋上風力発電を陸上送電網に接続しなければならない。

- ・系統連系システムの建設および完成が遅れた場合、発電事業者はその補償を受け取ることができる。

(b) オランダ

- ・陸上部分の系統整備のみではなく、洋上についても、海域ゾーン内の接続点までは送電事業者である TenneT が用意する。
- ・洋上風力発電の入札資料には、図や座標情報と共に系統接続点が明示されている。
- ・TenneT は、発電事業者との間で、「Realisation Agreement」および「Connection and Transmission Agreement」を締結する。「Realisation Agreement」では、洋上変電所への接続を実現するための条件が規定される。
- ・工事の遅延等により陸上送電網および海上送電網の利用が不可能な場合には、発電事業者は、TenneT より補償を受ける権利がある。

(c) デンマーク

- ・陸上の系統増強は送電事業者 (Energinet.dk) が行う。系統増強計画 (ルートや完成時期) は、入札手続の中で具体的に明らかにされる。
- ・2018 年に入札された海域では、洋上風車から陸上変電所までの送電施設の建設・運用・管理を発電事業者が実施、陸上変電所から先を Energinet.dk が整備することとなっている。
- ・洋上変電所と海底ケーブルは入札の範囲内 (発電事業者側での実施) となる。
- ・発電事業者は、陸上の系統連系システムの建設に関する Energinet の費用を負担しなければならない。
- ・Energinet.dk が期限を守らず、系統接続の条件を満たされなかった場合、Energinet.dk は発電事業者が被る損害および派生的な損失について責任を負う。

(d) フランス

- ・系統接続は、送電事業者 (RTE) が実施、運営する。
- ・RTE は、発電所の接続と海底ケーブルのエンジニアリングを担当し、RTE は、エネルギー規制委員会 (CRE) が承認したテンプレートに基づき、発電事業者との間で、発電所の運転開始前に接続契約を締結する。
- ・現在、RTE は、一般競争入札で実施されたすべての OWF プロジェクトの系統連系費用を負担しており、その費用は、最終ユーザーも支払うことになる電力網の用に関する一般料金体系を通じて調達される。
- ・RTE は系統接続の完了の遅れによって生じた事業者の損失に対する補償も支払うこととなっている。

(e) イギリス

- ・風車から洋上変電所までの区間および洋上変電所から陸上変電所までの区間の電力

系統は、発電事業者が建設する。このうち後者の区間は、後日入札を通じて別の事業者売却され、売却先の事業者によって所有・運営される。

(f) アメリカ

- ・ 自然エネルギー導入促進政策は州によって異なるが、ニューヨーク州の場合、NYSERDA が定める変電所までは、発電事業者がルートを選定し接続する。陸上の増強費用については New York ISO が託送料金により回収する。

(g) 台湾

- ・ 洋上風力発電所から陸揚げ地点までの洋上送電施設は、発電事業者が建設・運用するが、陸上系統の増強は、送電事業者（台湾電力公司）が行う。陸上系統の増強スケジュールは入札の際に示され、事業の予見可能性を確保している。

(3) 各自治体・地元協議会他における共同調査等に関する調査

以下の自治体などの取組について調査を行った。

a. 久慈市

- ・ 平成 30 年度から令和 2 年度まで、「風力発電に係るゾーニング実証事業」（環境省委託業務）を実施。洋上風力発電導入に向けた区域ごとの課題整理に加え、地元関係者の理解醸成、ゾーニング対象範囲の自然状況、社会状況に関する各種調査等を行い、海域のゾーニングを実施。
- ・ 令和 2 年度から「浮体式洋上風力発電による地域の脱炭素化ビジネス促進事業委託業務（地域調査業務）」（環境省委託業務）を実施。本委託で実施した各種調査結果（基礎調査(鳥類調査、魚類調査)、海底調査(音波探査)、底質調査、海底地形調査)、海象調査）は、事業者が申請することで久慈市から提供を受けることができる。
- ・ 久慈市沖浮体式洋上風力発電検討委員会で、久慈市が作成した「(仮称) 岩手県久慈市等沖洋上風力発電事業計画段階配慮書（案）」が示され、配慮書相当の図書を作成することで事業者の負担軽減を図る試みについて議論が行われている。
- ・ 浮体式の洋上風力発電事業を検討するための洋上及び陸上の風況調査について、発電事業者一同で行う共同調査を企画。2022 年度より実施している。

b. 山形県

- ・ 山形県地域協調型洋上風力発電研究・検討会議 遊佐沿岸域検討部会が、調査の実施による地元の混乱を避けるため、事業者に共同調査を要請。調整の結果事業者 30 社による共同調査（風況調査、海域調査）を 2020 年度から実施した。
- ・ 環境アセスメントについても、多数の事業者がそれぞれ手続きを行うと地元が混乱を来し、住民の負担も増加することから、配慮書手続の集約化の協力を県と町から事業者に依頼。事業者間の調整(共同実施等)が図られた。

c. 岩宇・南後志地区洋上風力発電導入推進組合

- ・ 岩宇・南後志沖で事業実施を希望する事業者が各々、事業計画を立案するために必要な調査を実施すると、各事業者で調査が輻輳し、当海域で操業する漁業関係者への支

障となることが予測されること等から、環境影響評価手続き及び系統連系枠の確保に向けた協議等について、推進組合が参画を希望する事業者と共同で調査を実施することとし、2022年6月より参画事業者の募集を開始した。

4.2 気象・海象・地質情報の DB 構築例の調査

4.2.1 概要

洋上風力発電事業において、適地の選定や施設の設計に必要な気象・海象・地質等の調査では、データベース（以降 DB）が活用されることも多い。本項目では以下の（１）（２）を調査した。

（１） DB 構築に求められる情報の調査（文献 No. 1～No.19）

（２） 構築されている DB の調査（文献 No. 20～31）

調査に先立って、本項目で調査対象とする DB の定義と役割を明確化しておく。一般的に DB は決まった形で整理されたデータの集まりを指し、ここでは「洋上風力発電事業の適地選定（事業性評価）に資するデータや情報（単発的なものではなく集約・整理されたもの）」と定義した。また、DB の役割として、事業者が事業を検討する際の事前検討の段階における収益・コスト・リスクの概略把握や施設の設計など詳細な検討の段階における情報の補強に資するものとした。

（１） DB 構築に求められる情報の調査（文献 No. 1～No.19）

電気事業法、港湾法および再エネ海域利用法の各法令に基づき、洋上風力発電設備等が適合すべき基準について、各法令の統一的な考え方を解説している「洋上風力発電設備に関する技術基準の統一的解説（令和 2 年 3 月版）」および本書が参照している文献について調査した。

調査対象文献を表 4.2.2-1、各調査文献の要点を表 4.2.2-2 に示す。

（２） 構築されている DB の調査（文献 No. 20～31）

ここでは、「洋上風力発電事業の適地選定（事業性評価）に資するデータや情報（単発的なものではなく集約・整理されたもの）」を DB と称することとし、国内外の各種 DB について、作成の経緯、特徴、得られる情報、データ作成方法などを調査した。

調査対象文献を表 4.2.2-3、各調査文献の要点を表 4.2.2-4 に示す。

4.2.2 文献リストと要点

表 4.2.2-1 調査文献リスト (DB に求められる情報の調査)

No.	タイトル	著者	発行年
1	洋上風力発電設備に関する技術基準の統一 的解説 (令和 2 年 3 月版)	洋上風力発電施設検 討委員会	2020 年
2	JIS C 1400-1 風力発電システム-第 1 部: 設計要件	日本規格協会	2017 年
3	JIS C 1400-3 風車-第 3 部: 洋上風車の 設計要件	日本規格協会	2014 年
4	IEC61400-3-2 Wind energy generation systems - Part 3-2: Design requirements for floating offshore wind turbines	International Electrotechnical Commission	2019 年 (Ed.1.0)
5	JIS C 1400-12-1 風車-第 1 2 - 1 部: 発 電用風車の性能試験方法	日本規格協会	2010 年
6	JIS C 1400-24 風車-第 24 部: 雷保護	日本規格協会	2014 年
7	DNV-ST-0126 Support structures for wind turbines	DNV	2021 年
8	MEASNET Procedure Evaluation of Site- specific Wind Conditions (サイト風条件の評 価)	MEASNET	2009 年
9	風力発電設備指示構造物設計指針・同解説	土木学会	2010 年
10	浮体式洋上風力発電施設技術基準 浮体式洋上風力発電施設技術基準安全ガイ ドライン	国土交通省 海事局安 全政策課	2020 年 2023 年
11	Prediction of the extreme wind speed in the mixed climate region by using Monte Carlo simulation and measure-correlate-predict method, Wind Energy	Takeshi Ishihara・ Atsushi Yamaguchi	2014 年
12	北九州市洋上風車の極値波浪・極値風条件 に関する研究	吉岡健・志水伸二・ 川口浩二・永井紀 彦・仲井佳二	2017 年
13	風と波の結合確率分布モデルの提案	種本純・石原孟	2014 年
14	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	山口敦・石原孟	2012 年

15	我が国沿岸の波浪外力の分布（海象外力検討調査）	高田悦子・諸星一信・平石哲也・永井紀彦・竹村慎治	2003 年
16	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	種本純・石原孟・山口敦	2016 年
17	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堀性評価	福山貴子・岩前伸幸・林田宏二・池谷毅・助川博之・福本幸成	2014 年
18	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）	山路徹・与那嶺一秀・審良善和・阿部正美・原田典佳・田中隆太・角野隆・香田一哉・金杉賢・後藤宏明・松田英樹・江口宏幸・松井良典・岸慶一郎・久保田一男・永尾直也・星野雅彦・川瀬義行・小泉文人・小林裕・増田和広・吉川幸雄・中村聡志	2016 年
19	風車タワーに作用する発電時最大風荷重の予測	石原孟・石井秀和	2010 年

表 4.2.2-2 調査文献の要点 (DB に求められる情報の調査)

No.	タイトル	著者	発行年
1	洋上風力発電設備に関する技術基準の統一的解説 (令和2年3月版)	洋上風力発電施設検討委員会	2020年
出典	国土交通省 HP : 「洋上風力発電設備に関する技術基準の統一的解説 (改定版) 等を策定しました」 (https://www.mlit.go.jp/kowan/kowan_tk6_000054.html) (参照 2025/12/12)		
要点	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 電気事業法、港湾法及び再エネ海域利用法に基づき、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 ➤ 令和2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 ➤ 以下の4つの章及び付属書より構成 <ul style="list-style-type: none"> ・第1章 総則 <ul style="list-style-type: none"> 1.1 適用範囲 1.2 定義 1.3 関連規格・関連法規 ・第2章 洋上風力発電設備等の要求性能 <ul style="list-style-type: none"> 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 (発電中の安全対策、落雷対策) 2.4 取扱者以外の者の接近の防止 2.5 圧油装置及び空気圧縮装置の危険の防止 2.6 公害等の防止 2.7 電気システムの設置 2.8 送電線等の敷設 2.9 腐食・洗堀等の防止 2.10 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 2.11 航行船舶からの視認性の向上 2.12 船舶等との接触の防止 2.13 施工及び維持管理への対応 ・第3章 洋上風力発電設備等に作用する自然条件等 <ul style="list-style-type: none"> 3.1 風荷重 3.2 潮位 3.3 波浪荷重 3.4 津波荷重 3.5 水の流れによる荷重 		

	<ul style="list-style-type: none">3.6 洗堀3.7 地盤3.8 地震荷重3.9 地盤の液状化・沈下3.10 接岸荷重3.11 固定荷重3.12 その他の荷重3.13 腐食作用3.14 材料・ 第4章 洋上風力発電設備等の設計<ul style="list-style-type: none">4.1 構造解析4.2 荷重抵抗係数設計法による設計4.3 許容応力度設計法による設計4.4 タワーの設計4.5 モノパイル構造の設計4.6 ジャケット構造の設計4.7 重力式基礎の設計4.8 浮体構造の設計4.9 接合部の設計4.10 運転や維持管理に必要な設備の設計4.11 防食設計・ また、付属書1～9に以下が掲載されている。<ul style="list-style-type: none">付属書1 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属書2 コーン貫入試験 (CPT) による地盤解析付属書3 洗堀の検討付属書4 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属書5 抵抗係数の設定例 (短期荷重及び疲労荷重)付属書6 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)付属書7 安全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)付属書8 疲労設計付属書9 熱帯性低気圧地域での安全レベルの調整・ 上記の項目のうち、DBに求められる要件として重要と考えられる付属書9「熱帯性低気圧地域での安全レベルの調整」の概要を述べる。ここでは、IEC 61400-
--	---

3-1 Annex I で推奨されている一つのアプローチとして、熱帯性暴風雨に関連した海象条件（海上風も含まれると推察される）に関し、場所ごとに異なる熱帯性低気圧の条件に対する支持構造物の設計規則の調整の仕方が述べられている。具体的には、熱帯性低気圧が影響する地域の追加荷重ケースを推奨しており、そこでは再現確率 500 年（またはそれに相当する確率）の風速や波浪の条件が用いられる。

表：IEC 61400-3-1 Annex I で推奨される熱帯性低気圧地域における追加荷重ケース。I.1 は 500 年再現確率、I.2 は設計者が選択する N 年再現確率。

表-10.1 (I.1) 熱帯性低気圧が影響する地域の追加荷重ケース

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
停止時	I.1	EWM Turbulent wind model $V_{50} = V_{500,500}$	ESS $H_s = H_{500}$	MIS及びMUL	ECM	H.W.L.又は H.H.W.L.	U	1.00
	I.2	EWM Turbulent wind model $V_{50} = V_{500,N}$	ESS $H_s = H_{500}$	MIS及びMUL	ECM	H.W.L.又は H.H.W.L.	U	1.00

No.	タイトル	著者	発行年
2	JIS C 1400-1 風力発電システム—第1部：設計要件	日本規格協会	2017年
出典	日本産業標準調査会 (JISC) : JIS 検索 (閲覧のみ可) https://www.jisc.go.jp/app/jis/general/GnrJISSearch.html (参照 2025/12/12)		
要点	<ul style="list-style-type: none"> ・国際規格 IEC 61400-1 (Design requirements : 設計要件) の Ed.3 (2005年) 及び Amendment1 (追補) (2010年) を基とした日本工業規格 (現、日本産業規格)。 ・風力タービンの構造的安全性を確保するために不可欠な設計要件を取りまとめたものであり、制御及び保護機能、電気系統、機械システム、支持構造等について整理されている。 ・この規格は、風車に関する最小限の設計要件を概説するものであり、完全な設計仕様書または指示マニュアルとして用いることを意図したものではない。 ・風力発電システムの安全性が損なわれないことを適切に実証できる場合、この規格のどの部分を変更してもよい。 ・本規格で新たに追加された風車クラス「台風クラス」が IEC 61400-1 の Ed.4 (2019年) に記述された。 ・洋上風力を対象としたものではないため、海象 (波浪・水流など) に関する記載がないが、風車クラスを定義するための変数や設計のための外力条件となる風況やその他の気象条件が記載されている。これらは気象 DB に求められる要件となる。 		

No.	タイトル	著者	発行年
3	JIS C 1400-3 風車—第3部： 洋上風車の設計要件	日本規格協会	2014年
出典	日本産業標準調査会 (JISC) : JIS 検索 (閲覧のみ可) https://www.jisc.go.jp/app/jis/general/GnrJISSearch.html (参照 2025/12/12)		
要点	<ul style="list-style-type: none"> ・国際規格 IEC 61400-3 (Design requirements for fixed offshore wind turbines : 着床式洋上風力タービンの設計要求事項) の Ed.1 (2009年) を基とした日本工業規格 (現、日本産業規格)。 ・この規格は、洋上風車に関する最小限の設計要件を概説するものであり、完全な設計仕様書または指示マニュアルとして用いることを意図したものではない。 ・JIS C 1400-1 の要求事項に加え、洋上風車サイトの外部条件の評価に関する追加要求事項を規定するとともに、洋上風車の工学的健全性を達成するための基本的な設計要求事項について規定している。 ・12章「洋上風車サイトにおける外部条件の評価」には、風況・波・水流などに関して推定する必要があるパラメータ、地盤条件の評価に必要な情報が記載されており、上記に加えて、気象海象 DB についての記載もあり、DB に含まれる必要がある項目として以下が挙げられている。 <ul style="list-style-type: none"> ・風速及び風向 ・有義波高, 波の周期及び波向 ・風の統計値と波の統計値との相関 ・水流の速度及び方向 ・水位 ・海氷の発生及びその特性 ・着氷の発生 ・気温, 水温, 空気密度, 海水密度, 海水塩分濃度, サイトの海底地形, 海洋付着生物など, 該当するその他の気象海象パラメータ 併せて、近隣の測定データや数値シミュレーションの併用において留意すべき点なども記載されている。 		

No.	タイトル	著者	発行年月
4	IEC TS 61400-3-2 Wind energy generation systems - Part 3-2: Design requirements for floating offshore wind turbines	International Electrotechnical Commission (国際電気標準会議)	2019年 (Ed.1.0)
出典	なし (参考: IEC のホームページ: https://iec.ch/homepage) (参照 2025/12/12)		
要点	<ul style="list-style-type: none"> ・着床式を対象とした IEC61400-3-1 をもとにしたもので、浮体式を対象としている。IEC61400-3-1 は国際規格 (IS) であるが、IEC TS 61400-3-2 は現時点で技術仕様書 (TS) (技術開発途上等の理由により IS として合意されていない段階) であり、国際規格化が進められている。 ・IEC61400-3-1 に対して浮体式に求められる設計荷重ケースが追加されているため、浮体式を対象とする場合の DB の要件としてこれらに必要な設計外力条件などを確認する必要がある。 		

No.	タイトル	著者	発行年
5	JIS C 1400-12-1 風車—第1 2—1部：発電用風車の性能 試験方法	日本規格協会	2010年
出典	日本産業標準調査会 (JISC) : JIS 検索 (閲覧のみ可) https://www.jisc.go.jp/app/jis/general/GnrJISSearch.html (参照 2025/12/12)		
要点	<ul style="list-style-type: none"> ・国際規格 IEC 61400-12-1 (Power performance measurements of electricity producing wind turbines : 発電用風車の性能試験方法) を基とした日本工業規格 (現、日本産業規格)。「単一の風車の出力性能特性を計測する手順を規定し、かつ、電力系統に接続されるすべての形式及び規模の風車の試験に適用する」もので、気象観測マストの設置方法 (障害物や地形の考慮など)、使用する試験装置、取得・除外する計測データ、データの整理方法、報告形式等が記載されている。 ・DB に含まれる観測データ (数値モデル等の検証用データも含む) が本規格に則したものであることに留意する必要がある。 		

No.	タイトル	著者	発行年
6	JIS C 1400-24 風車-第 24 部: 雷保護	日本規格協会	2014 年
出典	日本産業標準調査会 (JISC) : JIS 検索 (閲覧のみ可) https://www.jisc.go.jp/app/jis/general/GnrJISSearch.html (参照 2025/12/12)		
要点	<ul style="list-style-type: none"> ・国際規格 IEC 61400-24 (Lightning protection : 雷保護) を基とした日本工業規格 (現、日本産業規格)。風力発電装置及び風力発電システムの雷保護について規定したもの。 ・我が国の設置環境を考慮して国際規格から変更されている技術的内容として、雷電荷量の大きな雷 (冬季雷) を定義し、冬季雷地域で推奨する雷パラメータ (最大電荷量 600C) を設定し、JIS C 1400-24 Ed.1.0 (2014 年) の附属書に記載している点が挙げられる。その後、この冬季雷現象が国際的にも認知され、最大電荷量 600C が IEC 61400-24 Ed.2.0 (2019 年) に記述された。 ・日本国内は、上述した冬季雷の発生地域であることから、これらの情報に関する DB の必要性は高いと考えられる。 		

No.	タイトル	著者	発行年
7	DNV-ST-0126 Support structures for wind turbines	DNV	2021 年
出典	発行元は欧州船級協会 (DNV) https://www.dnv.com/energy/standards-guidelines/dnv-st-0126-support-structures-for-wind-turbines/ (参照 2025/12/12)		
要点	<p>・本規格の発行元である欧州船級協会 DNV-GL は、ノルウェーの DNV (Det Norske Veritas) とドイツの GL (Germanischer Lloyd) の合併による第三者認証機関等を含むサービスプロバイダーであり、2021 年 3 月以降は DNV へと社名を変更している。</p> <p>・DNV-ST-0126 は風力タービン支持構造の構造設計に関する一般原則とガイドラインを指定している。IEC, ISO, JIS などとともに設備の要求性能の基準に用いられる。技術基準の統一的解説においては、波・流れ・津波による洗堀や局所洗堀の評価や、風車基礎のグラウト接合部の設計方法に本規格が参照されている。</p> <p>・本規格の目的は次のとおり。</p> <ul style="list-style-type: none"> • 構造および構造コンポーネントの最小要件を定義することにより、国際的に許容されるレベルの安全性を提供する (参照規格、推奨プラクティス、ガイドラインなどと組み合わせる)。 • 設計、建設、設置、稼働中の検査に関連するサプライヤーと購入者間の契約参照文書として機能する。 • 設計者、サプライヤー、購入者、規制当局のガイドラインとして機能する。 • DNV 認証の対象となるサポート構造の手順と要件を指定する。 • DNV が検証と認証を実行するために契約されている風力タービン支持構造の検証の基礎として機能する。 		

No.	タイトル	著者	発行年
8	MEASNET Procedures: Evaluation of Site-specific Wind Conditions(サイト風条件の評 価)	MEASNET	2009年(英語版は 2022年(Ver.3)が 最新)
出典	MEASNET HP : https://www.measnet.com/documents/ (参照 2025/12/12) 日本風力発電協会 HP : MEASNET 「サイト風条件の評価 (日本語版)」 https://www.measnet.com/wp-content/uploads/2016/02/Evaluation-of-site-specific-wind-conditions-in-Japanese-version_final.pdf (参照 2025/12/12)		
要点	<ul style="list-style-type: none"> ・ 風力エネルギーに係る計測基準の統一を目的とした研究機関のネットワーク (MEASNET) が作成したもの。国際規格 (IEC-61400 シリーズ、ISO など) に基づいて風況観測に必要とされる要件が整理されている。 ・ 観測に基づいた気象 DB の必要要件のほか、8 章では観測データの外挿による補完や長期評価に必要な要件が述べられており、これらの基準が満たされるような数値モデル等に基づいた気象 DB (時空間解像度、作成方法、検証方法など) が求められる。 		

No.	タイトル	著者	発行年
9	風力発電設備支持物構造設計 指針・同解説	土木学会	2010年
出典	土木学会絶版図書のオンデマンド販売のみ（閲覧不可） https://www.jsce.or.jp/publication/ondemand.asp （参照 2025/12/12）		
要点	<ul style="list-style-type: none"> ・2007年6月20日に建築基準法が改正され、風力発電設備支持構造物の確認申請の手続きが変更となり、高さが60mを超える風力発電設備は支持構造の安全性を確認するために指定性能評価機関による評価および大臣認定を受けることが必要となったことから、国内外における風力発電設備支持物構造設計の最新研究成果ならびに建築基準法改正後における性能評価手法が含まれた風力発電設備支持物構造設計における指針となっている。 ・2007年に発行された前版も含めて、国内における着床式・浮体式の洋上風力に係るガイドブックや技術資料に広く引用されている。 		

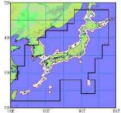
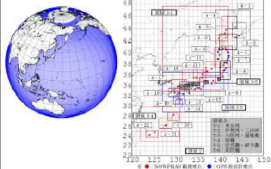
No.	タイトル	著者	発行年
10	浮体式洋上風力発電施設技術基準 浮体式洋上風力発電施設技術基準安全ガイドライン	国土交通省 海事局安全政策課	2020年 (技術基準) 2023年 (安全ガイドライン) (最新版の発行年)

出典 浮体式洋上風力発電施設の普及促進について - 安全確保のための技術基準の制定等 -
https://www.mlit.go.jp/maritime/maritime_fr6_000006.html (参照 2025/12/12)

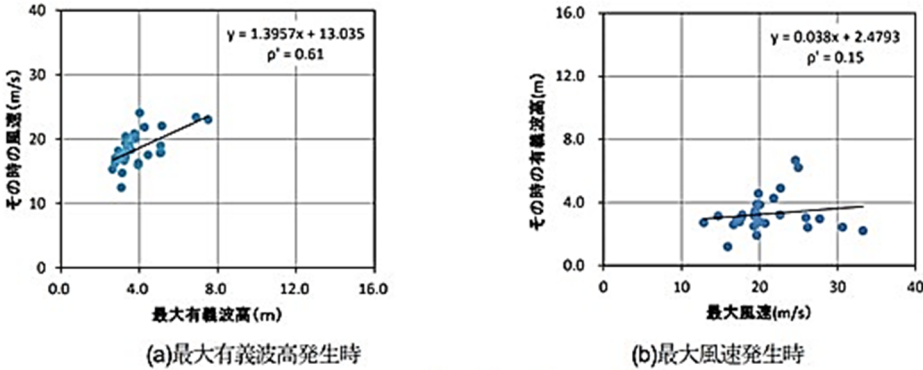
要点

- ・「技術基準」は「浮体式洋上風力発電施設の建造・設置等のコスト低減を通じてその導入拡大に資するため、浮体式洋上風力発電施設の安全性を確保するための設計要件等を規定」するもの。「安全ガイドライン」は「実設計者が実務的に適用できる技術的解決策を体系的に提供する」もの。
- ・本技術基準の初版が2012年に策定されている(安全ガイドラインの初版は2014年)。この初版に対して、浮体式洋上風力発電施設の安全のための措置の追加や損傷時の復原性の要件の追加がなされるとともに、国際規格 IEC の改正が反映された内容となっている。
- ・安全ガイドラインには外力条件となる風況・波浪に関して、必要な変量を推定するための方法として DB や風況マップ等の活用が挙げられており、国内の事業に活用可能な DB が「観測」「推算」「その他」別に表形式で整理され掲載されている。

表：掲載されている DB のリストの一部

分類	機関	DB要素	DBデータ範囲、DBデータ格納期間	備考(特徴等)
公開	独立行政法人 海上技術安全研究所	統計解析値 ・ 有義波高 ・ 有義波周期 ・ 卓越波向 ・ 平均風速 ・ 平均風向	10年間の統計解析 (1994年2月~2004年1月) 	【特徴】 「気象・海象 DB (日本近海)」 日本近海の波と風データベースは、日本気象協会が1日2回、緯度経度2分格子間隔で波況推算を行った10年分 (1994年2月~2004年1月) の結果を用いて、有義波高、有義波周期、卓越波向、平均風速、平均風向について海上技術安全研究所が統計解析したものです。 【公開URL】 http://www.nmri.go.jp/wjapan/hamikaze_main.html 【引用文献】 ● 庄本勝・石田茂資：日本近海の波と風の統計的性質、日本船舶海洋工学会論文集、第2号、pp.19~27, 2005.
販売	一般財団法人 日本気象協会	1時間値 ・ 有義波高 ・ 有義波周期 ・ 波向 ・ 風向 ・ 風速	< 全世界 > 【データ範囲】 75度以上の極域を除く全球 【格子間隔】 0.5度 【入力データ】 NCEP/NCAR 再解析値 【入力データ】 気象庁 GPV (GSM) 【波況モデル】 改良 WAM モデル 【データ期間】 1951年~2010年 < 日本域 > 【データ範囲】 北緯 20~50 度、東経 120~150 度 【格子間隔】 1/30 度 (2 分) 【入力データ】 気象庁 GPV (GSM 全世界) 【入力データ】 気象庁 GPV (GSM 日本域) 【入力データ】 気象庁 GPV (MSM) 【入力データ】 気象庁 GPV (毎時大気解析値) 【波況モデル】 改良 WAM モデル 【データ期間】 2001年~2010年 	【特徴】 ・ 日々の波況予報 (1日4回) を行い、その予報結果を蓄積している。 ・ 風の再解析を用いた波況の再計算を実施し、データベースを構築している。 ・ 波況モデルは WAM モデルを使用しているが、日本近海用にチューニング (改良) されている。 ・ 最近数年分の日本近海では、「気象庁 GPV (毎時大気解析値)」を使用しているため、地形の影響や台風等の局地的な風が考慮されている。 ・ NOWPHAS 等の過去の波況観測データをデータ同化することも可能。 【引用文献】 ● 松浦理明、鈴木史朗、本橋昌志、橋本典明：波況のリアルタイム実況推定値および客観解析値データベース作成システムの構築、海洋開発論文集、Vol.22, pp.171-176, (2006) ● 宇都宮好博、松浦理明、菅田隆一郎、松浦理明、菅田和成、内田洋平、相中隼彦、三嶋宣明：波況推定データベースの再構築及び活用について、土木学会論文集 B3 (海洋開発)、Vol.68, No.2, pp.1,977-1,982, 2012.

No.	タイトル	著者	発行年
11	Prediction of the extreme wind speed in the mixed climate region by useing Monte Carlo simulation and measure-correlate-predict method, Wind Energy	Takeshi Ishihara ・ Atsushi Yamaguchi	2014 年
出典	Wind Energy, 2014, Volume18 http://windeng.t.u-tokyo.ac.jp/ishihara/paper/2015-3.pdf (参照 2025/12/12)		
要点	<ul style="list-style-type: none"> • 日本のような混合気候では、測定相関予測 (MCP) 法とモンテカルロシミュレーション (MCS) で得られた複合確率分布から推定された極端な風速は、MCP 法のみで得られた複合確率分布と比較して、観測データとよく一致している。 • 風速と気圧の観測期間が限られていることによる極端な風速の不確実性は、ガンベル理論とモンテカルロシミュレーションによって評価した結果、混合気候において、MCS 法で得られる 50 年再発風速の不確実性は MCP 法で得られるものよりもかなり小さい。 • モンテカルロシミュレーション (MCS) で極値風速を評価するためには、風況の基本的な DB (例えば、時系列データや統計量のマップ情報など) とは別に過去の台風情報に関する DB が必要であり、精度や信頼度が高い MCS を実施するための情報の整備が重要と考えられる。 <div style="text-align: center;"> <pre> graph TD A[/Tropical cyclone database/] --> B[Evaluation of tropical cyclone parameters] C[/Speed-up ratio and deviation of wind direction/] --> D[Generation of synthetic tropical cyclones] B --> D D --> E[Prediction of surface wind speed and direction] E --> F{Simulation period} F -- No --> D F -- Yes --> G[Extreme wind probability distribution for tropical cyclones] </pre> </div>		
	<p>Figure 7. Flowchart of the Monte Carlo simulation of tropical cyclones.</p> <p>図：台風のモンテカルロシミュレーションのフロー図</p>		

No.	タイトル	著者	発行年
12	北九州市洋上風車の極値波浪・極値風条件に関する研究	吉岡健・志水伸二・川口浩二・永井紀彦・仲井佳二	2017年
出典	土木学会, 土木学会論文集, 2017, 73 巻, 2 号, pp.I_761-I_I766 https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejoe/73/2/73_I_761/pdf/-char/ja (参照 2025/12/12)		
要点	<ul style="list-style-type: none"> ・北九州市沖海域で実施した洋上風力発電設備及び観測システムの共同実証研究では、洋上風車支持構造物の耐波・耐風設計に重要となる極値波浪及び極値風条件について、国際規格や我が国の港湾基準との整合を図りつつ、合理的な設定方法を検討した。 ・特に、既往擾乱を対象とした気象・波浪シミュレーションにより、両作用の同時生起性を評価した結果、相関係数は高くなく、設計作用として 50 年再現期待値どうしを組合せることは十分保守側であることがわかった。 ・上記の結論は対象海域の地理的特性（風向別の吹送距離や砕波の有無）にも依存する。風況と波浪の極値の相関は設計における重要な情報であり、適切な手法を用いた数値計算等により国内各地の情報が得られれば有用と考えられる。 <div style="text-align: center;">  <p>(a)最大有義波高発生時</p> <p>(b)最大風速発生時</p> <p>図-8 30 擾乱の暴風と高波の相関</p> </div> <p>図：最大有義波高発生時（左）と最大風速発生時の波高と風速との関係。右図の相関が特に低いのは、低気圧の通過経路によっては吹送距離が十分でなく、波浪が十分に発達しないためである。</p>		

No.	タイトル	著者	発行年
13	風と波の結合確率分布モデルの提案	種本純・石原孟	2014年
出典	日本風力エネルギー学会, 第36回風力エネルギー利用シンポジウム2014, 36巻, pp.301-304 https://www.jstage.jst.go.jp/article/jweasympo/36/0/36_301/pdf-char/ja (参照 2025/12/12)		
要点	<ul style="list-style-type: none"> ・ 洋上風力発電設備の設計においては、風速・波高・波周期の結合確率分布の情報が重要であるが、参照する観測期間が短く強風及び高波高の観測がほとんど得られない場合や、欠損によりデータ数が少ない場合がある。このため、風速・波高・波周期の関係を簡単なパラメータでモデル化する方法が有効である。 ・ 風と波の同時観測が行われている銚子沖洋上風力発電設備における1年間の風速、有義波高及び有義波周期の観測値を分析し、風速の関数として有義波高と有義波周期の平均、標準偏差、出現頻度及び有義波高と有義波周期の相関をモデル化することにより、風速、波高及び波周期の結合確率分布モデルを提案している。 ・ モンテカルロシミュレーションにより風速・波高・波周期の散布図を作成する際に、観測値から得られる波高と波周期の相関係数と風速との関係（例えば、風波が卓越する高風速時に相関係数が大きい）を考慮した計算を行っている。これによって、観測値に近い形状かつ観測データ由来のような欠損のない散布図が作成される。観測データを補うDBとしてこのような情報も有用と考えられる。 		
	<p>Fig. 5 Joint distributions of wave heights and periods obtained from observations and monte-carlo simulations (MCS).</p>		
	<p>図：有義波高（縦軸）と有義波周期（横軸）の出現頻度分布。左図が観測。両者の相関係数（風速別）を考慮したモンテカルロシミュレーション（右図）は考慮しない場合（中図）と比べて高波高時（風波が発達し相関係数が高い）の観測値の分布の再現性が高くなっている。</p>		

No.	タイトル	著者	発行年
14	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	山口敦・石原孟	2012 年
出典	日本風力エネルギー学会, 第 34 回エネルギー利用シンポジウム, 2012, 34 巻, pp.215-218 https://www.jstage.jst.go.jp/article/jweasympto/34/0/34_215/pdf (参照 2025/12/12)		
要点	<ul style="list-style-type: none"> ・洋上風力発電設備の設計に際し、波浪シミュレーションにより設計波浪を推定するハインドキャスト手法が提案されているが、気象シミュレーション等により求める境界条件としての風速場は 1 時間から 3 時間平均相当の風速であるため、求められた波浪場も 1 時間から 3 時間相当の評価時間を持つと考えられる。 ・一方、我が国における過去の波浪観測は毎偶正時の評価時間 20 分の有義波高として行われており、波浪シミュレーションの検証のためには、これらの評価時間およびサンプリング時間の違いを変換する必要がある。 ・そこで、日本近海における観測データを用いて評価時間 20 分の最大有義波高と、より長い評価時間の最大有義波高との関係を明らかにするとともに、両者の間の変換手法を提案している。 ・銚子沖を対象とした本研究で算定された評価時間 1 時間と 3 時間の最大有義波高の比は、IEC61400-3 に規定されている値よりも小さく、その原因として当該海域が浅海域であり砕波の影響を受けていることが推察されている。このことから、評価時間と有義波高との間の関係式は海域毎に異なると考えられ、波浪の DB 情報として考慮すべき要因の一つであると考えられる。 		

No.	タイトル	著者	発行年
15	我が国沿岸の波浪外力の分布 (海象外力検討調査)	高田悦子・諸星一信・平石哲也・永井紀彦・竹村慎治	2003 年
出典	国土技術政策総合研究所資料, 第 88 巻 (閲覧、ダウンロード可) http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/tnn/tnn0088.htm (参照 2025/12/12)		
要点	<p>・我が国沿岸における海洋構造物の設計において用いられる設計波浪は、その築造年代や地区等によって様々な手法で計算され、様々な数値が用いられている。</p> <p>・本調査では、全国にわたって統一した手法で設計外力を計算して、日本全国各地域における概略値を示し、今後の政策策定のための参考資料とすることを目的としている。</p> <p>・本調査は、設計に関する波浪外力として、1) 設計波 2) 高潮偏差 3) 津波高 を採り上げ、データの収集、計算等を行った上、それらのデータを資料として収録している。具体的には、国内各地で推定・算定された沖波データをもとにした「設計波高最大値」、高潮計算 (9 地域は詳細計算) による「高潮偏差最大値」、3 段階、全 23 領域の津波シミュレーションによる「津波高最高値」の分布図を作成している。</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-end;"> <div data-bbox="336 1093 635 1413"> <p>図-4.3 高潮計算 (全国) 計算領域図</p> </div> <div data-bbox="679 1115 954 1413"> <p>図-4.5 詳細計算湾</p> </div> <div data-bbox="1007 1115 1305 1413"> <p>図-4.10 高潮偏差最大値分布図</p> </div> </div> <p>図：高潮偏差最大値の全国計算領域 (左)、詳細計算湾 (中)、分布図 (右)</p>		

No.	タイトル	著者	発行年
16	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	種本純・石原孟・山口敦	2016年
出典	日本風力エネルギー学会, 第38回風力エネルギー利用シンポジウム, 2016, 38巻, pp.81-84 https://www.jstage.jst.go.jp/article/jweasympo/38/0/38_81/pdf/-char/ja (参照 2025/12/12)		
要点	<ul style="list-style-type: none"> ・風と波の結合確率分布の平均値の関係を用いて、風波とうねりを考慮した混合スペクトルモデルを考案している。 ・また、福島沖浮体式洋上風力発電実証研究サイトにおける風速、有義波高、有義波周期の観測値と考案したモデルを用いて混合スペクトルを再現し、直接観測された波浪スペクトルと比較することで、考案したモデルを評価。 ・さらに、考案した混合スペクトルモデルと従来の設計で用いられてきたJONSWAPモデルを用いて1年分の波浪スペクトルを発生させ、風速ビン別に整理したスペクトルの平均値を直接観測により得られるスペクトルの平均値と比較検証している。 ・太平洋側など、風波とうねりの混在を考慮することが重要となる海域において、二山のピークを持つ波浪スペクトルの特性を考慮した波浪変量がDBの情報として重要と考えられる。 <div style="text-align: center;"> </div> <p>Fig. 3 Comparison of measured and reproduced spectra by using JONSWAP and combined model (at 5:40 on Dec. 2015.).</p> <p>図：二山型スペクトルが観測された一例。丸が観測。点線の既存モデル（JONSWAPモデル）と比べて、実線の考案モデル（混合スペクトルモデル）では二山のピークを再現できている。</p>		

No.	タイトル	著者	発行年
17	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	福山貴子・岩前伸幸・林田宏 二・池谷毅・助川博之・福本幸 成	2014 年
出典	土木学会, 土木学会論文集 B2 (海岸工学) , 2014, 70 巻, 2 号, I.1046-I.1050 https://www.jstage.jst.go.jp/article/kaigan/70/2/70_I_1046/_pdf (参照 2025/12/12)		
要点	<ul style="list-style-type: none"> ・銚子沖で実施されていた洋上風力発電の実証研究において、この地域の海底は軟岩で構成されており、軟岩の洗掘耐性は明らかにされていないが、現場から採取したコアを用いて洗掘試験を実施し、海底の耐洗掘性を明らかにしている。 ・洗掘保護の仕様は、実験結果を用いて決定し、洗掘防止工設置後、設計波高に近い最大波高が観測されたが、測深調査のデータにより洗掘保護の安定性が確認されている。 ・本論文では、洗掘の影響を評価するために海底地盤の N 値や流速を把握することの重要性が述べられている。本論文で対象とした海域では波浪によって生じる流速の影響が大きいとしているが、海域によっては海流や潮流による流速を考慮する必要があるため、これらによって生じる流速の DB も重要である。 		

No.	タイトル	著者	発行年
18	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)	山路徹・与那嶺一秀・審良善和・阿部正美・原田典佳・田中隆太・角野隆・香田一哉・金杉賢・後藤宏明・松田英樹・江口宏幸・松井良典・岸慶一郎・久保田一男・永尾直也・星野雅彦・川瀬義行・小泉文人・小林裕・増田和広・吉川幸雄・中村聡志	2016年
出典	海上・港湾・航空技術研究所, 港湾空港技術研究所資料 No.1324 https://www.pari.go.jp/report_search/No1324.pdf (参照 2025/12/12)		
要点	<p>・海洋環境に位置する鋼構造物の防食方法として、海水中および海底土中部に対しては電気防食工法、干満帯より上部の環境には被覆防食工法が適用されている。この両工法に対して、①設計時に性能を照査する方法、②維持管理時に現状の防食性能を評価する方法および将来の性能低下を予測する方法の確立が求められている。電気防食工法については、概ね確立されているが、被覆防食工法については、いずれも未確立である。</p> <p>・一方、波崎海洋研究施設砕波帯総合観測用栈橋の鋼管杭には、流電陽極方式電気防食工法および各種の被覆防食工法が適用されている。1984年から開始された長期海洋環境暴露試験は、2014年度に30年が経過したため、20年以上が経過した各種防食工法を主対象として、海洋環境下における各種防食工法の耐久性評価および性能評価手法の確立を目的として、30年経過時に各種調査を行った。主な研究成果を以下にまとめる。</p> <p>(1) 主な被覆防食工法における、20年経過時(2004年度)からの変化の概要を以下にまとめる。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・塗装: 耐候性に優れる上塗りを行っていない場合、塗膜表層部に劣化進行が確認された。ただし、厚膜形の種類については、塗膜下の鋼材腐食は開始していなかった。 ・水中硬化形被覆(パテタイプ): 一部の種類の場合に軽微な鋼材腐食が開始していた。 ・ポリエチレン被覆: 20年からの変化は見られず、被覆材、鋼材いずれも健全であった。 ・ペトロラタム被覆: 各種のカバー材において、外観上は20年からの変化は見られなかったが、内部鋼材においては、一部の工法の場合に部分的に軽微な腐食が開始していた。 		

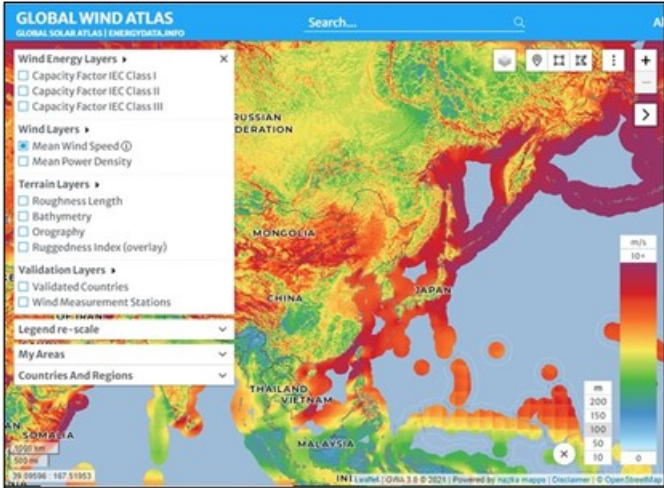
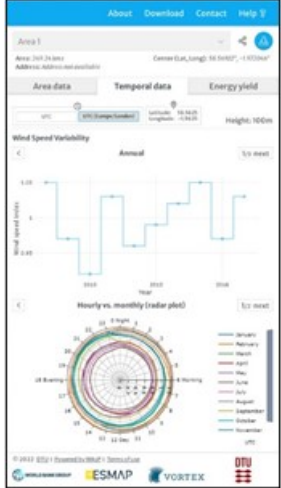
	<ul style="list-style-type: none">・コンクリート被覆：外観上は 20 年からの変化は見られなかった。(2) 塗装、有機被覆（水中硬化形被覆、ポリエチレン被覆、）において、被覆材の電気化学特性（インピーダンス、絶縁抵抗、体積固有抵抗）が性能評価の指標となる可能性が示された。(3) ペトラタム被覆、コンクリート被覆において、防食性能を定量的に評価可能な指標の確立における課題が抽出できた。 <p>・長期間供用する洋上風力施設において、設計時や維持管理時に部材の長期耐用性を評価することは重要である。海洋環境下における各種防食工法の耐久性・性能評価手法の確立を目的とした本事例では、気温、水温、風向・風速、波の波高・周期、波の砕波状況、海浜流、海底断面地形の長期観測データを上記の評価に活用しており、長期間にわたって取得された各種データが上記のような目的にも有用であることが示唆される。</p>
--	--

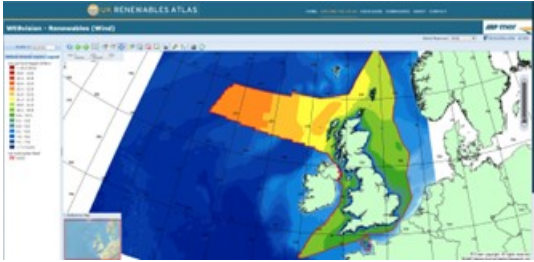
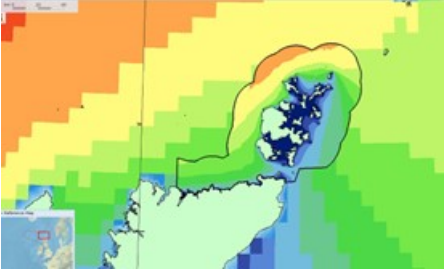
No.	タイトル	著者	発行年
19	風車タワーに作用する発電時 最大風荷重の予測	石原孟・石井秀和	2010 年
出典	<p>日本風工学会, 第 21 回風工学シンポジウム論文集, 2010, pp.1-6, 2010 https://www.jstage.jst.go.jp/article/kazekosymp/21/0/21_0_375/article/-char/ja (参照 2025/12/12)</p>		
要点	<ul style="list-style-type: none"> ・ 風車発電時の最大風荷重を評価する際には風車の制御を考慮する必要がある。 本論文では、出力 2MW、PI 制御（ピッチ制御の一つ）の標準風車モデル（土木学会）を用いた時刻応答解析により以下を実施している。 <ul style="list-style-type: none"> ✓ 風車発電時の最大風荷重の評価式の導出とその精度検証 ✓ 発電時の最大風荷重の 50 年再現期待値を算定するための統計的外挿係数の評価式の提案 ・ 発電時の最大風荷重の 50 年再現期待値を推定するために提案された評価式に含まれる統計的外挿係数は「年平均風速」と「乱流強度」の関数であり、関連する DB も活用しながらこれらの変数を適切に算定する必要がある。 		

表 4.2.2-3 調査文献リスト (構築されている DB の調査)

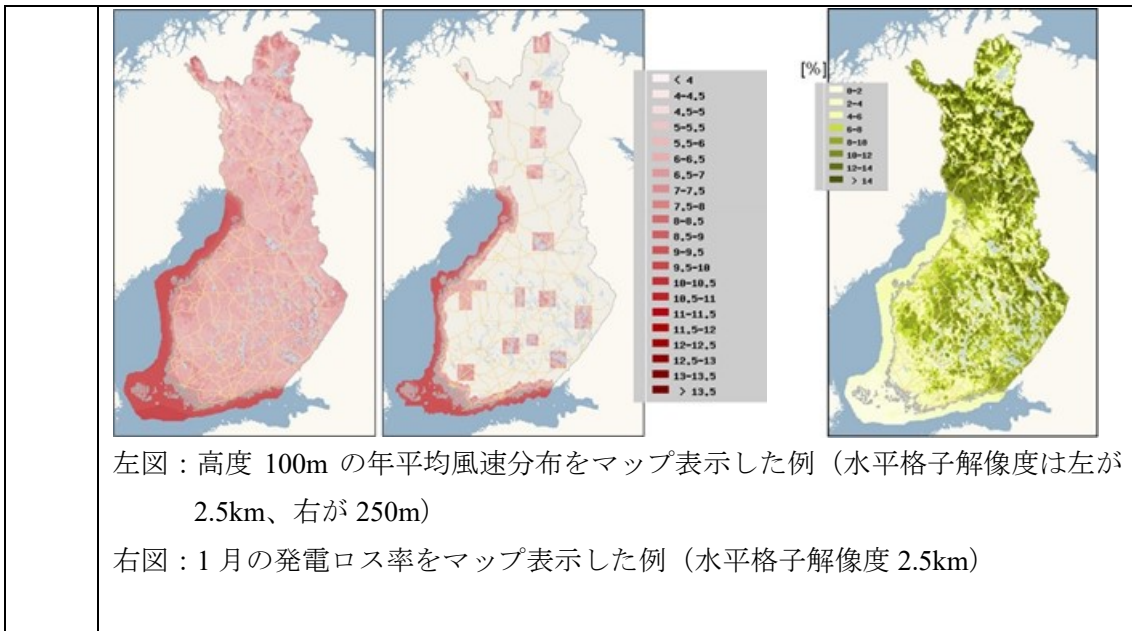
No.	タイトル	著者	発行年月
20	Global Wind Atlas	World Bank Group (世界銀行、国際金融機関)	2015 年 10 月
21	UK Renewables Atlas	AMPmer (英国の海洋コンサルタントおよび調査を行う会社)	2007 年 (月不明)
22	Wind Atlas - wind energy resources on the map of Finland	Finnish Meteorological Institute (フィンランド気象研究所(政府機関))	2009 年 (月不明)
23	Geospatial Data Science / Wind Resource Data, Tools, and Maps	United States Department of Energy (DOE); The National Renewable Energy Laboratory (NREL)(米国エネルギー省 国立再生可能エネルギー研究所)	不明
24	Canadian Wind Atlas	Canadian Meteorological Centre (カナダ気象センター(カナダ環境省のカナダ気象局の支部))	2004 年 10 月
25	Marine Data Exchange	Offshore Wind Evidence and Change Programme (OWEC) (英国 Crown Estate が主導しているプログラム)	2013 年 (月不明)
26	European MSP (Maritime Spatial Planning) Platform	European Union (EU)	2016 年頃 (詳細不明)
27	Vattenfall's Hollandse Kust (Zuid) Wind Farm	Netherlands Enterprise Agency (NEA) (オランダ経済省)	不明
28	In the service of maritime navigation and the seas	Federal Maritime and Hydrographic Agency of Germany (BSH) (ドイツ連邦海事水路庁)	2019 年頃 (詳細不明)
29	NeoWins (洋上風況マップ)	NEDO	2017 年 3 月
30	EADAS (環境アセスメントデータベース)	環境省	2014 年 (月不明)
31	海洋状況表示システム (愛称: 海しる)	海上保安庁	2019 年 4 月

表-4.2.2-4 調査文献の要点 (既存 DB の調査)

No.	タイトル	著者	発行年月
20	Global Wind Atlas	World Bank Group (世界銀行、国際金融機関)	2015年10月
出典	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 概要 (https://globalwindatlas.info/en/about/introduction) ✓ マップ表示 (https://globalwindatlas.info/) ✓ 気象場の計算方法 (https://globalwindatlas.info/en/about/method) <p style="text-align: right;">(参照 2025/12/12)</p>		
要点	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 全世界を対象とした地図 DB。同機関からは他にも、太陽光発電に係る Global Solar Atlas などが公開されている。 ➤ 2015年10月に GWA 1.0 がリリースされ、最新版 (2024/5/28 時点) は 2023 年 6 月に GWA 3.3 がリリースされた。 ➤ 風力発電に関しては、陸上と洋上 (海岸線から 200km まで) における高度 10, 50, 100, 150, 200m の風速・風力エネルギー密度・風車クラス (I, II, III) 別の設備利用率 (0~1) が、水平格子解像度 250m でマップ表示される。 <ul style="list-style-type: none"> ※ (補足) 気象場の計算は、2008~2017年の気象再解析データ ERA5 (水平格子解像度約 30km) をベースとして、領域気象モデル WRF (5km)、デンマーク工科大学 (DTU) のマイクロスケールモデル (250m) による力学的ダウンスケージングで実施。 ➤ 地図上から、任意の地点や多角形エリアを抽出し、エリア内における風力発電に係る統計量として、風速・風向の出現頻度、年別 (過去 10 年)、月別、一日の時間帯別の風速、風力発電量 (風車の条件設定が必要) が表示される。 		
	<div style="display: flex; justify-content: space-around;">   </div>		
	<p>左図：高度 100m の風速分布をマップ表示した例</p> <p>右図：指定したエリア内の年別・月別・時刻別の平均風速を表示した例</p>		

No.	タイトル	著者	発行年月
21	UK Renewables Atlas	AMPmer (英国の海洋コンサルタントおよび調査を行う会社)	2007年 (月不明)
出典	<ul style="list-style-type: none"> ✓ トップページ (https://www.renewables-atlas.info/) ✓ 概要 (https://www.renewables-atlas.info/about/) ✓ マップ表示 (https://www.renewables-atlas.info/explore-the-atlas/) <p>マップに表示される情報一覧 (※「What's inside?」タブ) (https://www.renewables-atlas.info/user-guide/)</p> <p style="text-align: right;">(参照 2025/12/12)</p>		
要点	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 英国の周辺海域を対象とした海洋地図 DB。 ➤ 2004年9月に英国の貿易産業省 (DTI) の資金で海洋エネルギーの戦略的環境アセスメントを目的とした再生可能エネルギー資源の地図が発刊され、これらのうち主要かつ信頼度の高い情報を web-GIS で自由に利用できるようにしたもの。民間会社が作成しているが、データの著作権は英国王室。 ➤ 高度 100m 風速・波高 (春・夏・秋・冬・通年)、潮流速 (大潮・小潮・通年) がマップ表示される。 ➤ 大規模な海洋エネルギー発電の計画地域となっているペントランド海峡付近では波力と潮流の高解像度データがある。 <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">   </div> <p>左図：高度 100m の風速分布をマップ表示した例 右図： ペントランド海峡付近の波力を高い水平格子解像度でマップ表示した例</p>		

No.	タイトル	著者	発行年月
22	Wind Atlas - wind energy resources on the map of Finland	Finnish Meteorological Institute (フィンランド気象研究所 (政府機関))	2009 年 (月不明)
出典	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 概要 (https://en.ilmatieteenlaitos.fi/wind-atlas) ✓ マップ表示 (http://tuuliatlas.fmi.fi/en/) ✓ マップの作成方法 : Tammelin, B. et al.: Production of the Finnish Wind Atlas, Wind Energy, Volume 16, Issue 1, pp.19-35, 2011. <p style="text-align: right;">(参照 2025/12/12)</p>		
要点	<ul style="list-style-type: none"> ➤ フィンランドの陸上と洋上を対象とした地図 DB。 ➤ フィンランドの経済・雇用省により Wind Atlas プロジェクトが開始され、2009 年に Wind Atlas が公開された。政府機関であるフィンランド気象研究所が作成しており、デンマーク工科大の持続可能エネルギー研究所 (Risoe DTU) がサポートしている。 ➤ 水平格子解像度 2.5km で、風速・風力発電量・アクティブアイシングの時間 (着氷速度が大きかった時間)、パッシブアイシングの時間 (着氷量が多かった時間)、発電ロス率が高度別 (50, 100, 200m)・月別にマップ表示される。また、湾岸付近の洋上を含む一部の地域では、水平格子解像度 250m で風速・風力発電量が高度別 (50, 100m)・月別にマップ表示される。 <p>※ (補足 1) 気象場の計算は、1989~2007 年の期間のうち、統計データや再解析データ (ERA40、ERA-Interim) をもとに 50 年平均値の代表値が得られるような 72 カ月を選んで計算。2.5km 計算はフランス気象局の領域気象モデル AROME で、250m 計算はデンマーク工科大学 (DTU) の風況解析ソフト WAsP で実施。</p> <p>※ (補足 2) フィンランドは IEA Wind の Task19 (Wind Energy in Cold Climates) の参加国であり、最近のレポートによれば参加国の中でも主導的な役割を果たしているようである。</p>		



No.	タイトル	著者	発行年月
23	Geospatial Data Science / Wind Resource Data, Tools, and Maps	United States Department of Energy (DOE); The National Renewable Energy Laboratory (NREL) (米国エネルギー省 国立再生可能エネルギー研究所)	不明

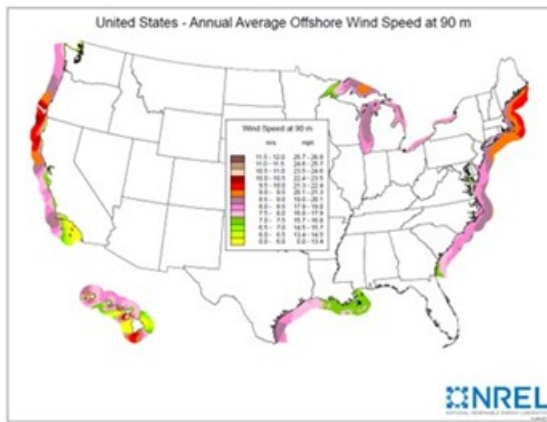
出典

- ✓ トップページ (<https://www.nrel.gov/gis/wind.html>)
- ✓ 風力の概要 (<https://www.nrel.gov/wind/index.html>)
- ✓ マップとデータ (<https://windexchange.energy.gov/maps-data?category=offshore>)

(参照 2025/12/12)

要点

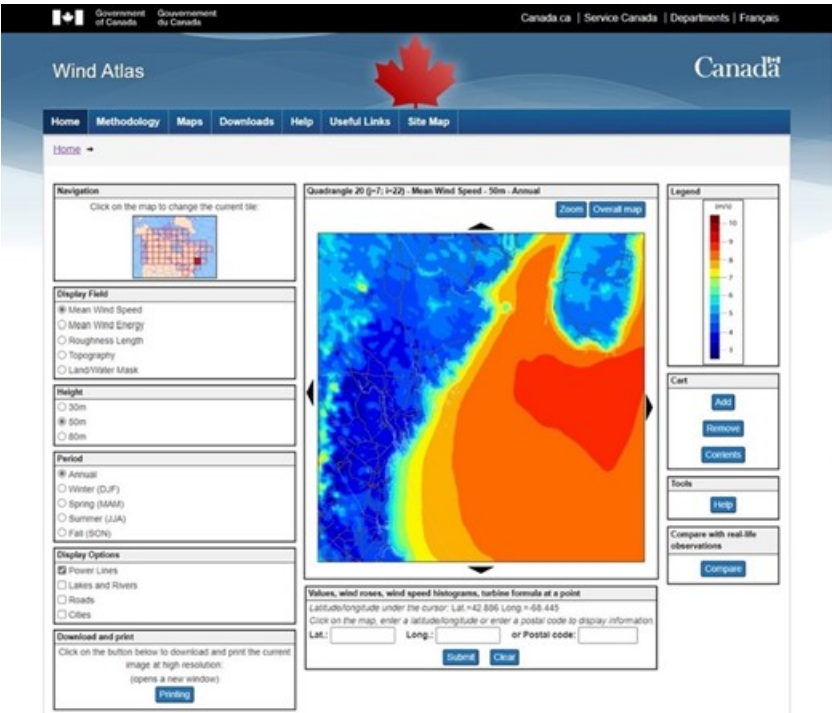
- 米国の陸上と洋上を対象とした地図 DB やデータ。
- 洋上に関しては、高度 90m と 100m における全米や州ごとの風速や発電ポテンシャルの分布マップが閲覧可能。また、各州の風速階級 (0.5m/s 刻み)、および水深区分 (0-30m, 30-60m, 60m 以上) × 離岸距離 (0-3, 3-12, 12-50 海里) 別の海域面積と発電量のデータが公開されている。


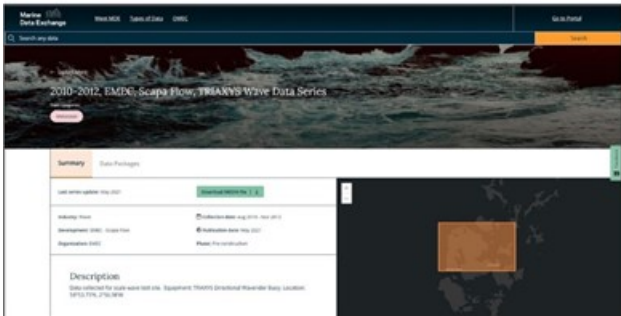


Offshore wind resource area by state with potential by wind speed interval, water depth, distance from shore

state	Wind Speed at 90m m/s	Distance from Shoreline									Total
		0 - 3 nm ¹			3 - 12 nm			12 - 50 nm			
		Depth Category (m)			Depth Category (m)			Depth Category (m)			
		0 - 30	30 - 60	> 60	0 - 30	30 - 60	> 60	0 - 30	30 - 60	> 60	
Area (km ²) (MW)	Area (km ²) (MW)	Area (km ²) (MW)	Area (km ²) (MW)	Area (km ²) (MW)	Area (km ²) (MW)	Area (km ²) (MW)	Area (km ²) (MW)	Area (km ²) (MW)	Area (km ²) (MW)		
California	7.0-7.5	266.2 (1,331)	236.2 (1,181)	257.4 (1,287)	100.9 (504)	456.8 (2,284)	4,554.0 (22,770)	7.7 (38)	22.9 (115)	5,536.6 (27,684)	11,438.9 (57,195)
	7.5-8.0	239.1 (1,196)	256.9 (1,285)	189.6 (949)	78.5 (394)	595.7 (2,978)	3,854.6 (19,273)	0.0 (0)	32.9 (165)	19,616.1 (98,090)	24,863.7 (124,318)
	8.0-8.5	125.2 (626)	178.2 (891)	281.8 (1,409)	7.1 (36)	105.8 (529)	4,539.1 (22,695)	0.0 (0)	0.0 (0)	17,822.2 (89,111)	23,059.3 (115,296)
	8.5-9.0	43.2 (216)	141.7 (708)	176.4 (882)	0.8 (3)	38.0 (190)	4,559.8 (22,799)	0.0 (0)	0.0 (0)	17,892.0 (89,460)	22,851.6 (114,258)
	9.0-9.5	2.1 (10)	18.8 (94)	14.9 (74)	0.0 (0)	0.9 (4)	888.0 (4,940)	0.0 (0)	0.0 (0)	12,160.2 (60,807)	13,184.8 (65,924)
	9.5-10.0	0.0 (0)	6.0 (30)	13.9 (69)	0.0 (0)	0.0 (0)	656.1 (3,280)	0.0 (0)	0.0 (0)	14,554.8 (72,774)	15,250.7 (76,153)
>10.0	0.0 (0)	0.0 (0)	0.0 (0)	0.0 (0)	0.0 (0)	288.1 (1,441)	0.0 (0)	0.0 (0)	6,637.6 (33,188)	6,925.8 (34,629)	
Connecticut	7.0-7.5	500.1 (2,501)	30.2 (151)	0.0 (0)	0.0 (0)	0.0 (0)	0.0 (0)	0.0 (0)	0.0 (0)	0.0 (0)	530.4 (2,652)
	7.5-8.0	617.3	83.0	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	701.6

図：米国沿岸域の洋上の風速分布および州ごと（ミシガン・オハイオなど五大湖沿いの州も含む）の海域面積や発電量（高度 90m の情報）

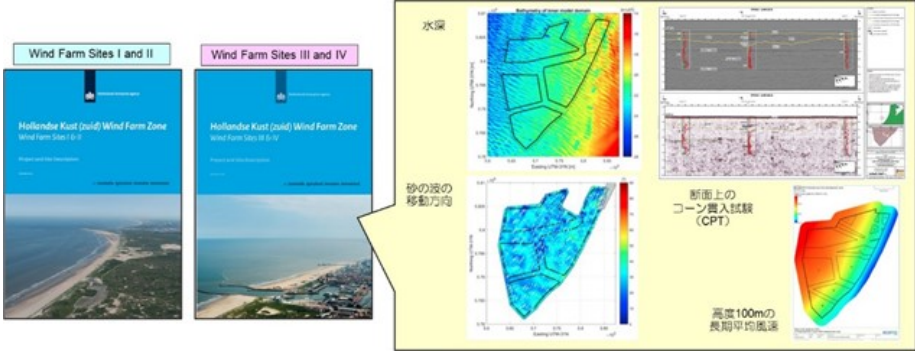
No.	タイトル	著者	発行年月
24	Canadian Wind Atlas	Canadian Meteorological Centre (カナダ気象センター (カナダ環境省のカナダ気象局の支部))	2004年10月
出典	✓ トップページ (https://windatlas.ca/index-en.php) ✓ マップ表示 (https://windatlas.ca/maps-en.php) ✓ 気象場の計算方法 (https://windatlas.ca/methodology-en.php) (参照 2025/12/12)		
要点	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 沿岸域の洋上を含むカナダ全域を対象とした地図 DB。 ➤ カナダの環境・気候変動省によって 2000 年に開始された風力エネルギーの資源と予測に関する EOLE Wind Energy Project の成果物として 2004 年 10 月に公開された (それ以前にも公開されているが ” The New Canadian Wind Energy Atlas” として公開)。最終更新は 2018 年 7 月 (確認日 2023/1/26)。 ➤ 国全体を 65 のタイルに分割し、それぞれ高度 30, 50, 80m の風速と風力エネルギー (季節別) をマップ表示。水平格子解像度は 5km。 <ul style="list-style-type: none"> ※ (補足) 気象場の計算は、1958～2000 年の NCEP 全球再解析データ (水平格子解像度 2.5°、6 時間間隔) をベースとして、気候場の分類、領域モデル MC2 による計算 (水平格子解像度 5km)、統計的な処理、マイクロスケールモデルによる計算を実施。 ➤ 地図上への送電線 (power lines) の表示も可能。 		
			
	図：風速・風力エネルギー等をマップ化した画面。地図上には送電線も表示。		

No.	タイトル	著者	発行年月						
25	Marine Data Exchange	Offshore Wind Evidence and Change Programme (OWEC)	2013 年月不明						
出典	✓ トップページ (https://www.marinedataexchange.co.uk/) ✓ 概要など (https://www.marinedataexchange.co.uk/content/info/what-is-the-marine-data-exchange) (参照 2025/12/12)								
要点	▶ 英国内の 50 以上の再エネルギー等の海洋プロジェクトに関する調査データ (データセットやレポート) (200TB) が分類され整理されている。 ▶ 英国の洋上風力発電の事業者が、洋上風力産業の発展のために一連のプロジェクトで得られた情報を共有することに合意し、2013 年に作成されたもの。 ▶ 情報の 82%が風 (気象、海象、生物、騒音、地球物理学など) に関するもの。他は、波 (海象、海浜変形、海獣、航行など)・潮汐流 (気象、海象、航行、海浜変形、陸域など)・海底土砂 (堆積学、海底生体・魚、考古学など)・上記全般に係る研究。								
			<table border="1"> <tr> <td>内容</td> <td>ライダー (Windcube) による観測データ</td> </tr> <tr> <td>場所</td> <td>Celtic Array (英国の第3ラウンド洋上風力発電所の海域)の第9ゾーン</td> </tr> <tr> <td>時期</td> <td>2012~2014年</td> </tr> </table>	内容	ライダー (Windcube) による観測データ	場所	Celtic Array (英国の第3ラウンド洋上風力発電所の海域)の第9ゾーン	時期	2012~2014年
内容	ライダー (Windcube) による観測データ								
場所	Celtic Array (英国の第3ラウンド洋上風力発電所の海域)の第9ゾーン								
時期	2012~2014年								
			<table border="1"> <tr> <td>内容</td> <td>波浪ライダーブイ (TRIAXYS) による波浪データ</td> </tr> <tr> <td>場所</td> <td>Scapa Flow (スコットランドのオークニー諸島の入り江)</td> </tr> <tr> <td>時期</td> <td>2010~2012年</td> </tr> </table>	内容	波浪ライダーブイ (TRIAXYS) による波浪データ	場所	Scapa Flow (スコットランドのオークニー諸島の入り江)	時期	2010~2012年
内容	波浪ライダーブイ (TRIAXYS) による波浪データ								
場所	Scapa Flow (スコットランドのオークニー諸島の入り江)								
時期	2010~2012年								
	図：データセットの例								

No.	タイトル	著者	発行年月
26	European MSP (Maritime Spatial Planning) Platform	European Union (EU)	2016 年頃 (詳細不明)
出典	<ul style="list-style-type: none"> ✓ トップページ (https://maritime-spatial-planning.ec.europa.eu/) ✓ 概要 (https://maritime-spatial-planning.ec.europa.eu/about-contact/about-us) ✓ 国別情報 (https://maritime-spatial-planning.ec.europa.eu/msp-practice/countries) <p style="text-align: right;">(参照 2025/12/12)</p>		
要点	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 欧州の海洋空間計画プラットフォーム。EU 加盟国 27 カ国のうちの 22 カ国 + 英国の 23 カ国の国別の情報があり、内容は基本情報（地理的条件など）、政策、関連プロジェクト。 ➤ 2014 年の海洋空間に関する EU 法の採択により、海岸を有する EU の全ての国が 2021 年までに横断的な海洋空間計画を作成することになった。こうした背景の下、海事・水産に係る EU 総局（EU Directorate General for Maritime Affairs and Fisheries）の資金により、本プラットフォームが作られた（おそらく 2016 年頃）。 ➤ 6 つの海域（バルト海・北海・大西洋・地中海東部・地中海西部・黒海）別に、プロジェクトや計画・ビジョンの情報がある。 ➤ 全体の情報として、海洋空間計画一覧（プロジェクト数 280、確認日 2023/1/6）、ガイドブック・文献・ツール等の知見、イベント等の情報、年 3～4 階のニュースレター。 ➤ 国・海域別の情報は概ね 1 年以内に更新されている（ただし、英国のみ 2 年以上更新されていない、確認日 2023/1/26）。 		


The image displays a web interface for 'MSP in the EU'. On the left, a grid of small maps and text boxes provides an overview for various countries including Belgium, Bulgaria, Cyprus, Denmark, Estonia, Finland, France, and Germany. On the right, two larger panels provide detailed information for Denmark and France. Each detailed panel includes a map of the country's maritime area, a section titled 'Which maritime spatial plans exist?', and 'Basic facts on Marine Waters' such as total area, marine internal waters, and EEZ. A 'Download documents' button is also present in each panel.







図：国別の情報の例

No.	タイトル	著者	発行年月
27	Vattenfall's Hollandse Kust (Zuid) Wind Farm	Netherlands Enterprise Agency (NEA) (オランダ経済省)	不明 (下記はサイトレポートの発行年月) 2017年10月 (I, II) 2018年10月 (III, IV)
出典	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 洋上風力全般の情報 (https://english.rvo.nl/information/offshore-wind-energy) ✓ Hollandse Kust (zuid) - General Information : https://offshorewind.rvo.nl/page/view/6b2a4987-b90d-43c4-ab13-72c8b83e70ce/general-information-hollandse-kust-zuid ✓ サイト I, II の情報 (Hollandse Kust (zuid) Wind Farm Zone, Wind Farm Sites I & II, Project and Site Description : https://offshorewind.rvo.nl/file/download/7b0daa13-af81-4ac5-b738-0a52726f31d0/150962916420171026%20rvo%20hkz%20psd%20hoofddocument%20web.pdf) ✓ サイト III, IV の情報 (Hollandse Kust (zuid) Wind Farm Zone, Wind Farm Sites III & IV, Project and Site Description : 1540220273rvo hkz iii and iv maindocument_october_2018_lowres_web.pdf) ※ Vattenfall : スウェーデンの大手電力会社 ※ Hollandse Kust (Zuid) : Hollandse 海岸 (南) <p style="text-align: right;">(参照 2025/12/12)</p>		
要点	<ul style="list-style-type: none"> ➤ セントラル方式を採用しているオランダでは、政府機関が海域情報をレポートとして取りまとめている。 ➤ Hollandse Kust Zuid (Hollandse 海岸 (南)) の2つのウィンドファームサイト群 (site I, II と site III, IV) ごとに情報がまとめられている。例えば、水深・風速・砂の移動方向のマップや断面上のコーン貫入試験結果など。 <div style="text-align: center;">  </div> <p>図 : まとめた資料や掲載されている情報の例。</p>		

No.	タイトル	著者	発行年月
28	In the service of maritime navigation and the seas	Federal Maritime and Hydrographic Agency of Germany (BSH) (ドイツ連邦海事水路庁)	洋上風力は 2019年頃 (詳細不明)
出典	<ul style="list-style-type: none"> ✓ トップページ (https://www.bsh.de/EN/Home/home_node.html) ✓ Site Development Plan 2019 for the German North Sea and Baltic Sea - unofficial translation -, 2019/6/28 ✓ Environmental Report for the Site Development Plan 2019 for the German North Sea - unofficial translation -, 2019/6/28 ✓ Environmental Report for the Site Development Plan 2019 for the German Baltic Sea - unofficial translation -, 2019/6/28 ✓ 海洋関連データ (https://www.bsh.de/EN/DATA/data_node.html) <p style="text-align: right;">(参照 2025/12/12)</p>		
要点	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 上のオランダと同様、セントラル方式を採用しているドイツでは、政府機関が海域情報をレポートとして取りまとめている。 ➤ バルト海およびドイツ領北海の 2 つの海域の情報がレポートにまとめられている。 ➤ レポート以外の情報として、地理・環境・社会条件のマップ表示、観測地点分布の表示 (洋上観測・波浪ブイ・湾岸観測)、数十年間以上にわたる日別の気象パターンが HP に掲載されている。 <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start; margin-top: 10px;"> <div style="text-align: center;">  <p>表層堆積物の分布 (※ 海域の一部)</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>月平均表面温度 (1990~1996年)</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>季節別のharbour porpoises (ネズミイルカ)の個体数 (/km²) の分布 (2002~2006年)</p> </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start; margin-top: 10px;"> <div style="text-align: center;">  <p>海氷の発生率 (1961~2010年)</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>船舶航行ルート</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>国防地域</p> </div> </div> <p>図：バルト海のレポートに掲載されている情報の例</p>		

No.	タイトル	著者	発行年月
29	NeoWins (洋上風況マップ)	NEDO	2017年3月
出典	<ul style="list-style-type: none"> ✓ マップ表示 (https://appwdc1.infoc.nedo.go.jp/Nedo_Webgis/index.html) ✓ マップ情報の説明 (https://appwdc1.infoc.nedo.go.jp/Nedo_Webgis/content.html) ✓ 風況の計算方法 (https://appwdc1.infoc.nedo.go.jp/Nedo_Webgis/winddata.html) <p style="text-align: right;">(参照 2025/12/26)</p>		
要点	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 洋上風力開発の適地選定に必要な情報を一元化した洋上風況マップを構築することを目的として作成されたものであり、適地選定等の検討に必要な項目が多く含まれている。 ➤ 風況に関しては高い水平格子解像度(離岸距離 30km 以内は 500m)、多層(60, 80, 100, 120, 140m の 5 高度) のマップや地点別の統計データが表示される。 ※(補足) 離岸距離 30km 以内の風況は 1995~2014 年の 20 年間(10km 解像度)、2009, 2012, 2014 年(500m 解像度) について気象モデル WRF で計算。それ以遠の外洋はマイクロ波散乱計 ASCAT による海上風速の観測値を使用。 		
	<p>図：風速分布表示(左上)と地点情報の表示</p>		

No.	タイトル	著者	発行年月
30	EADAS (環境アセスメントデータベース)	環境省	2014年 (月不明)
出典	✓ マップ表示 (https://eadas.env.go.jp/eiadb/webgis/index.html) ✓ 収録情報 (https://eadas.env.go.jp/eiadb/ebidbs/contents/EADAS_list.pdf) (参照 2025/12/26)		
要点	▶ 再生可能エネルギーを含め環境アセスメントにおいて地域特性を把握するために必要となる自然環境や社会環境に関する情報を整備したもの。 ▶ 自然・社会・観測・再エネ設備など多岐にわたる項目がDB化されており、特に環境・生物に係る項目が充実している。		
			
	図：画面表示例 (海生哺乳類や爬虫類の分布)		

No.	タイトル	著者	発行年月			
31	海洋状況表示システム (愛称: 海しる)	海上保安庁	2019年4月			
出典	✓ マップ情報 (https://www.msil.go.jp/msil/htm/main.html?Lang=0) ✓ 表示テーマ一覧 (https://www.msil.go.jp/msil/Htm/TopWindow.html) (参照 2025/12/26)					
要点	▶ 海洋関係機関が収集・保有している海洋情報を集約し、衛星情報や海上気象の情報などを地図上で重ね合わせて表示できる情報サービス。 ▶ 総合海洋政策本部決定(2016年7月)および第3期海洋基本計画(2018年5月閣議決定)に基づき、我が国の海洋状況把握(Maritime Domain Awareness, MDA)の能力強化に向けた取組の一環として運用を開始。 ▶ 過去の統計情報のほか、半日から1日程度先の予測(風況・波浪)、リアルタイムの情報(雷・雨)が得られる。 ▶ 海象関連の表示項目数が多い。特徴的なものとして津波シミュレーションの情報がある。					
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 33%; vertical-align: top;"> 水温 ◆海面水温(実況) [気象庁] ◆海面水温(予想) [気象庁] ◆海面水温(年平均) [気象庁] ◆海面水温(全球) [NOAA] ◆海面水温(全球) [JAXA] ◆表層水温(実況) 50m深 ◆表層水温(実況) 100m深 ◆表層水温(実況) 200m深 ◆表層水温(実況) 400m深 ◆表層水温(予想) 100m深 ◆水温 [リンク] ◆水温 (統計) - 等値線 ◆水温 (統計) ◆海面水温 (全球、SGLI、昇交軌道) ◆海面水温 (全球、SGLI、降交軌道) ◆海面水温 (ひまわり) ◆海面水温 (日本周辺、SGLI、昇交軌道) ◆海面水温 (日本周辺、SGLI、降交軌道) </td> <td style="width: 33%; vertical-align: top;"> 潮流 ◆潮流推算(東京湾) ◆潮流推算(伊勢湾) ◆潮流推算(瀬戸内海) ◆潮流シミュレーション(慶良間諸島) ◆潮流推算 [リンク] 潮汐 ◆潮汐推算 [リンク] ◆潮汐 [リンク] 波 ◆有義波高(実況・予想) ◆有義波高 (統計) ◆波浪 (統計) ◆周期波向 塩分 ◆塩分 (統計) - 等値線 ◆塩分 (統計) 海水 ◆海水密度 (北極域) 気象・海象観測情報 [AOV] </td> <td style="width: 33%; vertical-align: top;">   </td> </tr> </table>			水温 ◆海面水温(実況) [気象庁] ◆海面水温(予想) [気象庁] ◆海面水温(年平均) [気象庁] ◆海面水温(全球) [NOAA] ◆海面水温(全球) [JAXA] ◆表層水温(実況) 50m深 ◆表層水温(実況) 100m深 ◆表層水温(実況) 200m深 ◆表層水温(実況) 400m深 ◆表層水温(予想) 100m深 ◆水温 [リンク] ◆水温 (統計) - 等値線 ◆水温 (統計) ◆海面水温 (全球、SGLI、昇交軌道) ◆海面水温 (全球、SGLI、降交軌道) ◆海面水温 (ひまわり) ◆海面水温 (日本周辺、SGLI、昇交軌道) ◆海面水温 (日本周辺、SGLI、降交軌道)	潮流 ◆潮流推算(東京湾) ◆潮流推算(伊勢湾) ◆潮流推算(瀬戸内海) ◆潮流シミュレーション(慶良間諸島) ◆潮流推算 [リンク] 潮汐 ◆潮汐推算 [リンク] ◆潮汐 [リンク] 波 ◆有義波高(実況・予想) ◆有義波高 (統計) ◆波浪 (統計) ◆周期波向 塩分 ◆塩分 (統計) - 等値線 ◆塩分 (統計) 海水 ◆海水密度 (北極域) 気象・海象観測情報 [AOV]	 
水温 ◆海面水温(実況) [気象庁] ◆海面水温(予想) [気象庁] ◆海面水温(年平均) [気象庁] ◆海面水温(全球) [NOAA] ◆海面水温(全球) [JAXA] ◆表層水温(実況) 50m深 ◆表層水温(実況) 100m深 ◆表層水温(実況) 200m深 ◆表層水温(実況) 400m深 ◆表層水温(予想) 100m深 ◆水温 [リンク] ◆水温 (統計) - 等値線 ◆水温 (統計) ◆海面水温 (全球、SGLI、昇交軌道) ◆海面水温 (全球、SGLI、降交軌道) ◆海面水温 (ひまわり) ◆海面水温 (日本周辺、SGLI、昇交軌道) ◆海面水温 (日本周辺、SGLI、降交軌道)	潮流 ◆潮流推算(東京湾) ◆潮流推算(伊勢湾) ◆潮流推算(瀬戸内海) ◆潮流シミュレーション(慶良間諸島) ◆潮流推算 [リンク] 潮汐 ◆潮汐推算 [リンク] ◆潮汐 [リンク] 波 ◆有義波高(実況・予想) ◆有義波高 (統計) ◆波浪 (統計) ◆周期波向 塩分 ◆塩分 (統計) - 等値線 ◆塩分 (統計) 海水 ◆海水密度 (北極域) 気象・海象観測情報 [AOV]	 				
	左表：海象に関する表示情報 右図：マップ表示の例 (上：リアルタイムの落雷情報、下：四国沖～紀伊半島沖の津波シミュレーションの結果)					

4.2.3 まとめ

項目（1）について

- 「洋上風力発電設備に関する技術基準の統一的解説」で引用されている文献を対象として、主に DB 構築に関連がある文献・資料を調査した。調査対象となる文献・資料は、「規格や基準類」、「マニュアルやガイドライン・技術基準」、「学术论文や研究資料」に大別される。
- 規格や基準類に関する例としては、DB に含まれている観測データに関して、JIS C 1400-12-1 (No.5) や MEASNET (No.8) への適合性に関する情報が実務での DB の活用において重要と考えられる。
- マニュアルやガイドライン・技術基準に関する例としては、浮体式洋上風力発電施設技術基準安全ガイドライン (No.10) に国内外の既存の DB の情報が整理されて記述されている。
- 学术论文や研究資料に関する例としては、DB における重要な情報である風（風速や風向）と波（波高や波周期）との関連性に着目した研究が行われており、より質の高い風や波の DB 構築に資する研究成果が得られている。

項目（2）について

- 今回調査した DB の中には日本国内が対象範囲に含まれるものが 4 種類あった (NeoWins (No.29)、EADAS (No.30)、海洋状況表示システム (No.31)、Global Wind Atlas (No.20))。これらの DB は力点を置いている表示情報がそれぞれ異なるため、各 DB の情報を相互補完的に得ながら実務に活用することが有用と考えられる。特に風況の情報に関しては、DB 毎に作成方法や時空間解像度・高度が異なることに加えて、統計期間も DB 毎に異なるため (例えば風速の計算対象期間は NeoWins が 1995~2014 年、Global Wind Atlas が 2008~2017 年)、各データの諸元や特徴を把握した上で情報を活用することが有用と考えられる。
- 国外の DB では、以下のような特徴的な情報が提供されており、これらの情報は、今後の国内の DB 構築への参考になる可能性がある。
 - Global Wind Atlas (No.20) : 風車クラス (I, II, III) 別の設備利用率 (0~1) の分布
 - Wind Atlas - wind energy resources on the map of Finland (No.22) : 着氷を考慮した月別の発電ロス率の分布
 - Geospatial Data Science (No.23) : ケーブル上陸地点から系統接続地点までの距離の分布
 - Vattenfall's Hollandse Kust (Zuid) Wind Farm (No.27) : 海底の砂の移動方向

4.3 コーン貫入試験併用による認証に関する調査

4.3.1 概要

地盤物性値の調査では、国内のこれまでの構造物・耐震設計基準の観点から、ボーリングコアによる室内試験が基本となっている。不攪乱試料の採取が困難な場合には標準貫入試験（SPT）が行われ、SPTによってN値を得るサウンディング調査は古くから行われており、膨大なデータと実績がある。

コーン貫入試験（CPT）は、試験方法によっては適用可能な地盤の種類や深さが制限されるが、試料を採取しないため、貫入体の上げ下げが不要であり、標準貫入試験よりも簡便な試験方法である。また、深度方向に連続的に調査が可能であり、標準貫入試験では得られない周面摩擦抵抗や間隙水圧などの情報も得られる。これらの情報を活用し、地盤材料や地盤特性の推定が試みられている。

設計に必要となる地盤強度の評価では「内部摩擦角 ϕ や非排水せん断強さ C_u 」を知ることが基本であるが、試料の採取が困難な場合には「標準貫入試験によって得られたN値」から ϕ や C_u を推定している。CPTでは主にコーン貫入先端抵抗 q_t からN値を推定しており、そのN値から ϕ や C_u を推定することになるため、原理的に精度の高い ϕ や C_u の推定が困難であるが、精度向上の試みが行われている。

そこで、CPTを活用して地盤調査や地盤定数の評価を行うにあたり参照すべき基準や文献等について調査を行うとともに、実務上の課題について、整理を行った。

4.3.2 文献リストと要点

(1) 文献リスト

調査を行った文献を表 4.3.2-1 に示す。

表 4.3.2-1 調査文献リスト

No.	タイトル	著者	発行年月
1	洋上風力発電設備に関する技術基準の統一的解説（令和2年3月版）	洋上風力発電施設検討委員会	2020年3月
2	洋上風力発電設備に関する技術基準の統一的解説 付属書2 コーン貫入試験（CPT）による地盤評価（令和2年3月版）	洋上風力発電施設検討委員会	2020年3月
3	コーン貫入試験結果と標準貫入試験結果から得られた地盤特性との関係	鈴木ほか	2003年4月
4	Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test	P. K. Robertson and C. Wride	1998年6月
5	コーン貫入試験（地盤試験所）	株式会社地盤試験所	
6	Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering	P. K. Robertson and K. L. Cabal	2012年11月
7	Manual on estimating soil properties for foundation design	F. H. Kulhawy and P. W. Mayne	1990年8月
8	Cone Penetration Testing State-of-Practice	P. W. Mayne	2007年2月
9	地盤調査の方法と解説（地盤工学会）	地盤工学会	2013年3月
10	コーン貫入試験結果の解釈－土質分類及び圧密沈下予測について	大和ほか	2008年7月
11	洋上風力発電の地域一体的開発に向けた調査研究事業各調査項目における調査手法・仕様の一般化に向けた中間とりまとめ	新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)	2022年6月
12	DNVGL-ST-0126: Support structures for wind turbines	Det Norske Veritas (DNV)（当時は DNV GL）	2018年7月
13	DNVGL-RP-C212:Offshore soil mechanics and geotechnical engineering	Det Norske Veritas (DNV)（当時は DNV GL）	2019年9月

14	ABS : Design Guideline for Station keeping Systems of Floating Offshore Wind Turbines	American Bureau of Shipping (ABS)	2013年6月
15	SUT : Guidance Notes for the Planning and Execution of Geophysical and Geotechnical Ground Investigations for Offshore Renewable Energy Developments	Society for Underwater Technology (SUT)	2014年5月
16	IEC 61400-3-1 (洋上風車の設計要件) Wind energy generation systems –Part 3-1: Design requirements for fixed offshore wind turbines	国際電気標準会議 (IEC)	2020年4月
17	ANSI/API RECOMMENDED PRACTICE 2GEO	American Petroleum Institute (米国石油協会)	2021年1月

(2) 調査文献の要点

① 文献調査の結果

国内基準のうち、「洋上風力発電設備に関する技術基準の統一的解説（改定版）」においては、地盤調査では、原位置試験の実施や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こととされており、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））の併用可とされている。

なお、SPT と CPT を併用する場合においては、複数地点で、両方の試験を行い、データの突合せをすることを求めている。また、CPT の結果に対する評価方法については、既往の研究成果や論文等を付属資料として整理している。

国内においては、標準貫入試験の試験結果（N 値）に関する豊富なデータベースや設計者の経験から、SPT で得た地盤特性値や、ボーリングによるサンプリング試料による各種試験結果を基本とした設計手法が広く用いられており、国内の設計基準（「港湾の施設の技術上の基準・同解説」や「風力発電設備支持物構造設計指針・同解説」）においても、SPT の試験結果（N 値）から設定する設計方法が提案されている。

また、各調査項目における調査手法・仕様の一般化に向けた中間とりまとめ_NEDO（文献 No.11）では、着床式はボーリング及び SPT による調査を基本とし、照査設計段階では、風車設置箇所の全地点において調査を実施するものとしており、その際は CPT の活用、併用も候補となりうるとの記載がある。また、水深が 50m 以上となる浮体式の海域においては、ボーリングが困難であることから、CPT を基本とし、深度方向に連続して計測する旨の記載がある。

国外の基準をみると、IEC61400-3-1（文献 No.16）においては、「コーン貫入試験のデータとエリア代表箇所において実施した標準貫入試験及び室内試験のデータとの突合せを実施することが望ましい」となっており、SPT 併用による確認が必要な旨の記載がある。

API-RP-2GEO（文献 No.17）では、CPT による測定結果を用いた極限支持力の設定や、内部摩擦角や単位体積重量から地盤ばねを設定する手法が提案されており、SUT（文献 No.15）では、「CPT 調査と室内試験結果を組み合わせることで、工学設計の目的で使用することができる」とされている。

また、ABS（文献 No.14）では、浮体式のガイドラインとなっているが、初期のサイト調査として CPT の実施が挙げられている。

基礎設計に用いられる主な地盤定数とその目的（設計用途）、調査試験方法について、表 4.3.2-2 に示す。

表 4.3.2-2

地盤定数	設定根拠となる試験等	基礎設計への反映
N 値 (N_c 値)	<ul style="list-style-type: none"> ・ SPT 試験 ・ (CPT 試験) 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 杭の先端極限支持力 ・ 周面摩擦の設定 ・ 液状化判定 ・ 内部摩擦角 ϕ ・ 変形係数 E の推定
内部摩擦角 ϕ	<ul style="list-style-type: none"> ・ 土の三軸圧縮試験 (CD) から直接設定 ・ CPT 結果から先端抵抗 q_t との関係式より設定、また、間隙水圧 u と先端抵抗 q_t との関係式より設定 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 地盤ばねの設定 (内部摩擦角や単位体積重量から設定する設計手法)
相対密度 D_r	<ul style="list-style-type: none"> ・ 砂の最小密度、最大密度試験により設定 ・ SPT による N 値から算定 ・ CPT 結果から先端抵抗 q_t との関係式より設定 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 液状化判定
液状化抵抗	<ul style="list-style-type: none"> ・ SPT の N 値からの推定 ・ CPT による N_c 値からの推定 	
細粒分含有率 F_c	<ul style="list-style-type: none"> ・ 土の粒度試験結果から算定 ・ CPT による土質性状指数 I_c との関係式 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 砂質土の液状化判定
非排水せん断強さ c_u	<ul style="list-style-type: none"> ・ 三軸圧縮試験 (UU) ・ CPT 結果から先端抵抗 q_t との関係式より設定 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 粘性土地盤の基礎安定計算 ・ 斜面掘削面の安定計算
圧密係数 c_v	<ul style="list-style-type: none"> ・ 圧密試験 ・ CPT 結果から間隙水圧 u の消散試験 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 粘性土層の圧密沈下や不同沈下の検討

② 調査文献の要点

今回、調査した個々の文献の要点を表 4.3.2-3 に示す

表 4.3.2-3 調査文献の要点

No.	タイトル	著者	発行年月
1	洋上風力発電設備に関する技術基準の統一的解説（令和 2 年 3 月版）	洋上風力発電施設検討委員会	2020 年 3 月
出典	国土交通省港湾局 海洋・環境課 海洋利用開発室 https://www.mlit.go.jp/common/001339422.pdf （参照 2025/12/26）		
要点	<p>・地盤調査（ボーリング）では、サウンディング（SPT や CPT）の併用が認められているものの、SPT と CPT のデータ突合せを実施する必要がある。</p> <p>・N 値（SPT）と換算 N 値（CPT）ではデータのばらつきが予想されることから、複数位置でデータの突合せを行うことが望ましい。</p> <p>（2）調査方法</p> <p>物理探査は、海底地盤面下の地質構造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。</p> <p>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¹⁾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。</p> <p>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 2 では、コーン貫入試験による測定結果の評価事例を示し</p> <p>（3）調査位置、間隔</p> <p>調査は、洋上風力発電設備の設置位置で実施することを原則とする。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。</p> <p>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必要がある。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 値の間では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、IEC 61400-3-1⁵⁾にはコーン貫入試験のデータとエリアの代表箇所において実施した標準貫入試験及び室内試験のデータとの突合せを実施することが望ましいとの記載がある。</p>		

No.	タイトル	著者	発行年月
2	付属書 2 コーン貫入試験 (CPT) による地盤評価 (令和2年3月版)	洋上風力発電施設検討委員会	2020年3月
出典	国土交通省港湾局 海洋・環境課 海洋利用開発室 https://www.mlit.go.jp/common/001336262.pdf (参照 2025/12/26)		
要点	<p>・CPTでは貫入抵抗、周面摩擦、間隙水圧を計測し、これらの多様な地盤情報からより信頼性の高い地層構成を得ることができるが、試料採取を行わない場合の土質分類にはデータを解釈する技術者の力量に大きく依存する。</p> <p>・地層構成の評価にはロバートソンの土質分類チャートを参考にできるが、対象としている地盤と同じ性状を示すとは限らない。</p> <p>→調査エリアにおける地盤特性の地域性を十分考慮して結果を解析・修正することが望ましい。</p> <div style="text-align: center;"> </div> <p>1. 鋭敏粘土 2. 有機質土～PEAT 3. 粘土～シルト質粘土 4. 粘土混じりシルト～シルト質粘土 5. シルト混じり砂～砂質シルト 6. シルト質砂～きれいな砂 7. 砂～礫混じり砂 8. 非常に硬質な砂、粘土混じり砂 9. 非常に硬質な細粒土</p> <p>付図-2.1 Robertsonによる土質分類チャート²⁾</p> <p>2. 結果の解釈にあたっての基本的な考え方</p> <p>コーン貫入試験の最大の特徴は、深さ方向に連続した測定値が得られることであり、地盤の不均質な堆積構造を詳細に探知できるという利点を有している。また、コーン貫入試験では、貫入抵抗、周面摩擦、間隙水圧などの多様な地盤情報が得られるため、これに基づいてより信頼性の高い地層構成を得ることができる。ただし、試料採取を行わないため、土質分類に際してはデータを解釈する技術者の力量に大きく依存することにも注意する必要がある。</p> <p>3. 地層構成の評価</p> <p>地層構成の判別方法については、例えば Robertson³⁾により提案された土質分類チャート(付図-2.1参照²⁾)を参考にすることができる。このチャートでは、先端抵抗(q_t)に対する摩擦比(F_r)と間隙水圧比(B_q)との関係に基づいて、9種類の土質を判別することができる。ただし、既存の土質分類評価法を用いる場合、その評価法の基礎となっているデータが特定の地域の土を対象としたものになっていることが多く、必ずしも対象としている地盤と同じ性状を示すとは限らない。したがって、調査エリアにおける地盤特性の地域性を十分考慮して結果を解析し、場合によっては修正を施すことが望ましい。</p>		

4. 地盤定数の評価

(1) コーン貫入試験による測定結果の評価方法に関する研究事例

地盤定数の評価方法は、国内外で多くの研究事例があり、付表-2.1 はそれらの代表事例を示したものである。基礎構造の設計で必要となる地盤情報をコーン貫入試験による測定結果に基づいて設定する場合は、これらの研究事例を参考にすることができるが、研究の前提となっている実験条件や原位置試験と室内試験との比較結果を良く見極め、かつ地盤特性の地域性なども十分考慮した上で、適用可否を慎重に判断する必要がある。

- CPT 調査結果（貫入抵抗、周面摩擦、間隙水圧）をもとに物性値を推定する方法として、以下代表事例を参考にすることができる。
- 研究の実験条件や原位置試験と室内試験の比較結果を見極め、かつ地盤特性の地域性を考慮した上で適用可否を判断することが求められる。

付表-2.1 コーン貫入試験の評価方法に関する主な研究事例

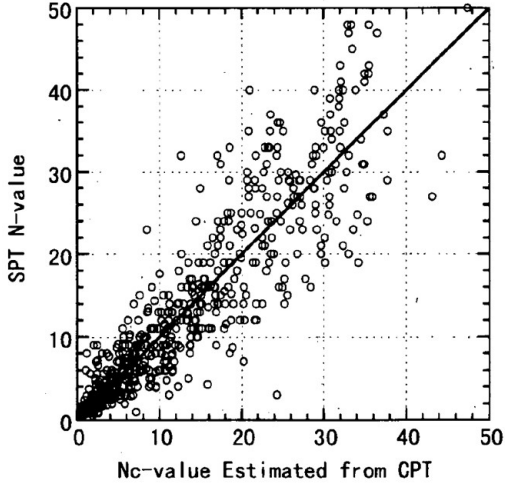
分類	項目	関連文献
砂質土	(2) N 値	<ul style="list-style-type: none"> • コーン貫入試験結果と標準貫入試験結果から得られた地盤特性との関係（鈴木ら）⁴⁾ • Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test (Robertson)⁵⁾ • コーン貫入試験（地盤試験所）⁶⁾ • Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering (Robertson・Cabal)⁷⁾
	(3) 内部摩擦角	<ul style="list-style-type: none"> • Manual on estimating soil properties for foundation design (Kulhawy・Mayne)⁸⁾ • Cone Penetration Testing State-of-Practice (Mayne)⁹⁾
	(4) 相対密度	• 地盤調査の方法と解説（地盤工学会） ²⁾
	(5) 液状化抵抗	• 地盤調査の方法と解説（地盤工学会） ²⁾
	(6) 細粒分含有率	• コーン貫入試験結果と標準貫入試験結果から得られた地盤特性との関係（鈴木ら） ⁴⁾
	粘性土	(7) 非排水せん断強さ
(8) 圧密係数		<ul style="list-style-type: none"> • コーン貫入試験結果の解釈－土質分類及び圧密沈下予測について（大和ら）¹⁰⁾ • コーン貫入試験（地盤試験所）⁶⁾

参考文献

- 2) 地盤工学会, 地盤調査の方法と解説, 2013
- 3) Robertson, Soil classification using the cone penetration test, 1990
- 4) 鈴木 康嗣・時松 孝次・實松 俊明, コーン貫入試験結果と標準貫入試験結果から得られた地盤特性との関係, 日本建築学会構造系論文集, 2003, 第 566 号, pp73-80 付-17
- 5) P.K.Robertson, Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test, 1998
- 6) 地盤試験所, コーン貫入試験, http://www.jibanshikenjo.co.jp/pdf/pamph16_110315.pdf (参照 2026/01/05)
- 7) P.K. Robertson・K.L. Cabal, Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering, 2015, Gregg Drilling & Testing, Inc.
- 8) F.H. Kulhawy・P.H. Mayne, Manual on estimating soil properties for foundation design, 1990, Report EL-6800 Electric Power Research Institute, EPRI
- 9) P.W. Mayne, Cone Penetration Testing State-of-Practice, 2007, NCHRP Project 20-05 Topic 37-14
- 10) 大和真一・西村真二・宮坂亨明・岡信太郎・Efren Cortez・岩本勝大・北條豊・岩崎崇雄, コーン貫入試験結果の解釈－土質分類及び圧密沈下予測について－, 第 43 回地盤工学会研究発表講演集, 2008, C-03, No.74

No.	タイトル	著者	発行年月
3	コーン貫入試験結果と標準貫入試験結果から得られた地盤特性との関係	鈴木ほか	2003年4月
出典	日本建築学会, 日本建築学会構造系論文集, 2003, 第566号, pp.73-80 https://www.jstage.jst.go.jp/article/aijs/68/566/68_KJ00004090775/_pdf/-char/ja (参照 2025/12/26)		
要点	<p>【N値】</p> <ul style="list-style-type: none"> せん断波速度測定を併用したCPTを114地点で実施。調査地点は北海道から鹿児島までを網羅し、調査地盤は粘性土から砂質土までをカバーしている。 ロバートソンが提案した土質分類手法 (Ic の式) を用いることで、N値-qt の関係から Nc 値 (コーン貫入試験から換算した N 値) の算出が可能→実際、Nc 値と実測N値を比較すると良く対応。 <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> $I_c = \{(3.47 - \log Q_t)^2 + (1.22 + \log F_R)^2\}^{0.5}$ $N_c = 0.341 I_c^{1.94} (q_t - 0.2)^{(1.34 - 0.0927 I_c)}$ <p style="text-align: right;">(q_t > 0.2MPa) (q_t ≤ 0.2MPa)</p> <p>qt : CPT から得られた先端抵抗 fs : CPT から得られた周面摩擦力抵抗 σ_{vo} : 上載圧 (MPa) σ_{vo'} : 有効上載圧 (MPa)</p> </div> <div style="width: 45%;"> $Q_t = (q_t - \sigma_{vo}) / \sigma_{vo}'$ $F_R = f_s / (q_t - \sigma_{vo})$ <p style="text-align: center;">図11 Icで分類した先端抵抗とN値の関係</p> </div> </div> <p>・日本におけるコーン貫入試験の実績が少ないことから、今後更にデータを蓄積し、より精度の高い推定式へと修正されることが望まれる。</p> <p>【細粒分含有率】</p> <ul style="list-style-type: none"> CPTをもとに、ロバートソンが提案した土質分類手法によって求めた土質性状指数 (Ic) と細粒分含有率 (Fc) との関係式 (Fc=1.0*Ic^{4.2}) を提唱 (両者の関係にばらつきはあるが、相関関係が認められる)。 <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> $I_c = \{(3.47 - \log Q_t)^2 + (1.22 + \log F_R)^2\}^{0.5}$ $Q_t = (q_t - \sigma_{vo}) / \sigma_{vo}'$ $F_R = f_s / (q_t - \sigma_{vo})$ $F_c = 1.0 I_c^{4.2}$ <p>ここで、 Fc : 細粒分含有率 Ic : 土質性状指数</p> </div> <div style="width: 45%;"> <p>qt : CPT から得られた先端抵抗 fs : CPT から得られた周面摩擦力抵抗</p> <p style="text-align: center;">図5 細粒分含有率とIcの関係</p> </div> </div>		

No.	タイトル	著者	発行年月																					
4	Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test	P. K. Robertson and C. Wride	1998年6月																					
出典	National Research Council Canada, Canadian Geotechnical Journal, 1998, Vol. 35, pp.442-459 (カナダの学術論文誌)																							
要点	<p>【CPTによる土質性状の推定】 本論文では、砂質土壌を対象として土壌粒子の特性を CPT から直接的に推定し、液状化に対する繰り返し荷重の抵抗性評価の一手法として組み込んでいる。具体的には、CPT で得られる2つの変数（標準化先端抵抗（Q、コーン貫入先端抵抗や上載圧による無次元量）と標準化周面摩擦比（F、周面摩擦抵抗とコーン貫入抵抗の比 [%]））をもとに土質性状の判別指標値（I_c）を推定する関係式を提唱している。</p> $[5] \quad I_c = [(3.47 - Q)^2 + (\log F + 1.22)^2]^{0.5}$ <p>その後に行われた検討（文献 No.3）では、この指標値 I_c を用いることによって、より精度の高い N 値の推定が可能となっている。</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Soil behaviour type index, I_c</th> <th>Zone</th> <th>Soil behaviour type (see Fig. 8)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>$I_c < 1.31$</td> <td>7</td> <td>Gravelly sand to dense sand</td> </tr> <tr> <td>$1.31 < I_c < 2.05$</td> <td>6</td> <td>Sands: clean sand to silty sand</td> </tr> <tr> <td>$2.05 < I_c < 2.60$</td> <td>5</td> <td>Sand mixtures: silty sand to sandy silt</td> </tr> <tr> <td>$2.60 < I_c < 2.95$</td> <td>4</td> <td>Silt mixtures: clayey silt to silty clay</td> </tr> <tr> <td>$2.95 < I_c < 3.60$</td> <td>3</td> <td>Clays: silty clay to clay</td> </tr> <tr> <td>$I_c > 3.60$</td> <td>2</td> <td>Organic soils: peats</td> </tr> </tbody> </table> <p>右図の説明：F, Q と土質性状判別指標値 I_c との関係。領域 A は非流動性液状化が起こりうる領域、領域 B は非流動性液状化が起こりそうにない領域、領域 C は流動性・非流動性が起こりうる領域。数字（3～7）は I_c の閾値でゾーン区分された土質性状</p>			Soil behaviour type index, I_c	Zone	Soil behaviour type (see Fig. 8)	$I_c < 1.31$	7	Gravelly sand to dense sand	$1.31 < I_c < 2.05$	6	Sands: clean sand to silty sand	$2.05 < I_c < 2.60$	5	Sand mixtures: silty sand to sandy silt	$2.60 < I_c < 2.95$	4	Silt mixtures: clayey silt to silty clay	$2.95 < I_c < 3.60$	3	Clays: silty clay to clay	$I_c > 3.60$	2	Organic soils: peats
Soil behaviour type index, I_c	Zone	Soil behaviour type (see Fig. 8)																						
$I_c < 1.31$	7	Gravelly sand to dense sand																						
$1.31 < I_c < 2.05$	6	Sands: clean sand to silty sand																						
$2.05 < I_c < 2.60$	5	Sand mixtures: silty sand to sandy silt																						
$2.60 < I_c < 2.95$	4	Silt mixtures: clayey silt to silty clay																						
$2.95 < I_c < 3.60$	3	Clays: silty clay to clay																						
$I_c > 3.60$	2	Organic soils: peats																						

No.	タイトル	著者	発行年月
5	コーン貫入試験 (地盤試験所)	株式会社地盤試験所	
出典	株式会社 地盤試験所ホームページ http://www.jibanshikenjo.co.jp/pdf/pamph16_110315.pdf (参照 2026/01/05)		
要点	<p>【N 値】</p> <ul style="list-style-type: none"> コーン先端抵抗 (qc) とコーン周面摩擦 (fs) の関係から土質分類と、換算 N 値を算出可能。 Jefferies, M. G. and Davies (1993) の提唱式。 $I_c = \sqrt{(3.47 - \log Qt)^2 + (\log Fr + 1.22)^2}$ <p>ただし、$Qt = (qt - \sigma vo) / \sigma vo'$、$Fr = fs / (qt - \sigma vo) \times 100$</p> <p>上式は、Robertson (1998) (文献 No.4) の式と少し異なっている。 この I_c と qt を用いた換算 N 値の推定式が提唱されている。</p> $\text{換算 N 値}(N_{60}) = (qt/pa) / \{8.5 \times (1 - I_c/4.6)\}$ <p>また、鈴木ら (2003) (文献 No.3) は、上の I_c を用いて N_c の関係式を提案し、実測 N 値と比較して両者が良い関係を表しているとした (下図)。</p> $\text{換算 N 値}(N_c) = 0.341 I_c^{1.94} (qt - 0.2)^{(1.34 - 0.0927 I_c)}$ <p>qt : CPT から得られた先端抵抗 fs : CPT から得られた周面摩擦力 σvo : 総土被り圧 $\sigma vo'$: 有効土被り圧 Pa : 大気圧 (=100kPa)</p>  <p>参考文献 Jefferies, M. G. and Davies, M. P.: Use of CPTu to estimate equivalent SPT N60., ASTM Geotechnical Testing Journal, 1993, Vol.16, No.4, pp.458-467, https://insitusoil.com/wp-content/uploads/2021/06/CPTU-for-Ic-SPT-N60-and-fines-content.pdf (参照 2026/01/08)</p>		

【圧密係数】

- ・ 圧密係数は、Baligt、Levadoux の提唱した地論曲線を用いて、過剰間隙水圧が 50%に達した時の時間から推定することが可能。

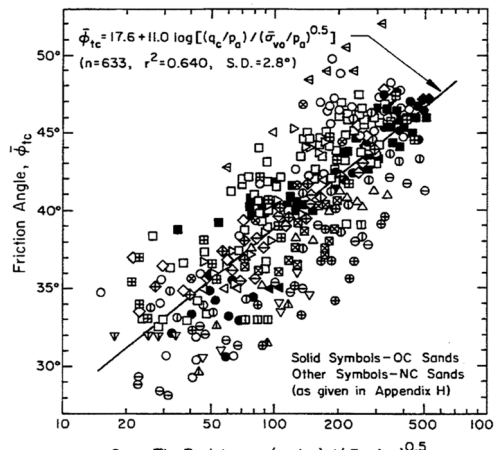
$$c_v = c_h = 8.64 \times 10^4 \frac{T_{50} R^2}{t_{50}} \left(\frac{cm^2}{day} \right)$$

T50 : 過剰間隙水圧 50%消散時の理論時間ファクター (0.196)

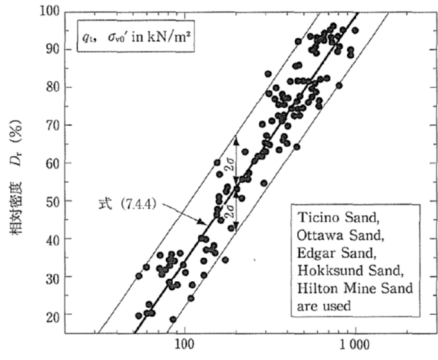
R : コーン半径 (cm)

t50 : 過剰間隙水圧 50%消散時の経過時間

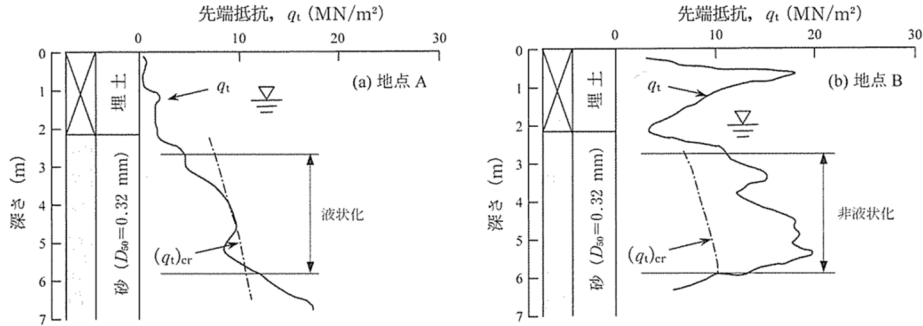
No.	タイトル	著者	発行年月
6	Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering	P. K. Robertson and K. L. Cabal	2012年11月
出典	<p>米国カリフォルニア州の掘削請負会社である Gregg Drilling & Testing, Inc. が刊行したガイド。地質関係の実務にCPTを適用するための基本情報を与えるもので、主に標準電気式コーン試験（頂角 60°、直径 35.7mm または 43.7mm）で得られたデータに基づく。</p> <p>https://www.novotechsoftware.com/downloads/PDF/en/Ref/CPT-Guide-5ed-Nov2012.pdf （参照 2025/12/26）</p>		
要点	<p>【N 値】</p> <ul style="list-style-type: none"> 前頁記載の Jefferies, M. G. and Davies (1993) の I_c を用いた関係式が記載。 中でも粘性土を対象とした換算 N 値の推定として Robertson の関係式を提唱。 <p style="text-align: center;">換算 N 値 = $q_t/P_a \times 10^{(1.1268-0.2817I_c)}$ q_t : 補正先端抵抗 P_a : 大気圧 (=100kPa) I_c : 土質性状指数</p> <p>Jefferies and Davies (1993) suggested the application of the soil behavior type index, I_c to link with the CPT-SPT correlation. The soil behavior type index, I_c, can be combined with the CPT-SPT ratios to give the following simple relationship:</p> $\frac{(q_t/p_a)}{N_{60}} = 8.5 \left(1 - \frac{I_c}{4.6} \right)$ <p>Robertson (2012) suggested an update of the above relationship that provides improved estimates of N_{60} for insensitive clays:</p> $\frac{(q_t/p_a)}{N_{60}} = 10^{(1.1268 - 0.2817I_c)}$		

No.	タイトル	著者	発行年月
7	Manual on estimating soil properties for foundation design	F. H. Kulhawy and P. W. Mayne	1990年8月
出典	米国の非営利団体である電力研究所 EPRI (Electric Power Research Institute) の研究レポート (EPRI Report EL-6800)。現場や実験室からの工学的な土壌変量データを評価するための参照マニュアル。 https://www.epri.com/research/products/el-6800 (参照 2025/12/26)		
要点	<p>【内部摩擦角】</p> <ul style="list-style-type: none"> • CPT より先端抵抗 (q_c) から内部摩擦角 (ϕ) を算出可能。 • CPT より間隙水圧 (u) と先端抵抗 (q_c) から内部摩擦角 (ϕ) の推定が可能。 $\bar{\phi}_{tc} = 17.6 + 11.0 \log[(q_c/p_a)/(\bar{\sigma}_{vo}/p_a)^{0.5}] \quad (\text{付 2.3})$ <p>ここで、</p> <ul style="list-style-type: none"> $\bar{\phi}_{tc}$: 三軸圧縮試験による内部摩擦角 q_c : 先端抵抗 p_a : 大気圧 $\bar{\sigma}_{vo}$: 鉛直全応力あるいは上載圧 $\phi'(\text{degrees}) = 29.5 B_q^{0.121} [0.256 + 0.336 B_q + \log Q] \quad (\text{付 2.4})$ $B_q = (u_z - u_o)/(q_t - \sigma_{vo}) \quad (\text{付 2.5})$ $Q = (q_t - \sigma_{vo})/\sigma_{vo}' \quad (\text{付 2.6})$ <p>ここで、</p> <ul style="list-style-type: none"> ϕ' : 内部摩擦角 (ただし、$20^\circ < \phi' < 45^\circ$) B_q: 正規化した間隙水圧 (ただし、$0.1 < B_q < 1.0$) Q : 正規化した先端抵抗 u_o : 静水圧 u_z : コーン根元で計測された間隙水圧 q_t : 先端抵抗 (ASTM D 5778 により補正) σ_{vo} : 鉛直全応力 σ_{vo}' : 鉛直有効応力  <p style="text-align: center;">Figure 4-17. Trend of $\bar{\phi}_{tc}$ with Normalized q_c</p> <p style="text-align: center;">内部摩擦角 ϕ と先端抵抗の関係</p>		

No.	タイトル	著者	発行年月
8	Cone Penetration Testing State-of-Practice	P. W. Mayne	2007年2月
出典	<p>全米共同道路研究プログラム NCHRP (National Cooperative Highway Research Program) のプロジェクトの最終報告。米国とカナダの運輸局による高速道路のサイト調査への CPT の活用に関する実務のレビュー。</p> <p>https://www.geoengineer.org/storage/publication/24047/publication_file/7871/568ed9f4ea12a-Mayne_2007_NCHRP_Synthesis_on_CPT.pdf (参照 2025/12/26)</p>		
要点	<p>【内部摩擦角】</p> <ul style="list-style-type: none"> 関係式は No.7 と同じものが記載。 		

No.	タイトル	著者	発行年月
9	地盤調査の方法と解説 (地盤工学会)	地盤工学会	2013年3月
出典	地盤工学会, 地盤工学会地盤調査規格・基準委員会		
要点	<p>【相対密度 (砂質土)】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・砂質土は粘性土に比べて乱れの少ない資料の採取が困難であり、電気式コーン貫入試験のような原位置試験が適用できれば非常に有用。 ・砂質土の基本的な物性値と CPT から得られる諸定数との関係を求める研究が精力的に実施されてきた。 ・Lancellotta (ランセロッタ) は、室内土槽を用いて砂の相対密度を変化させた地盤を作成し、拘束圧を作用させた状態でコーン貫入試験を行い、以下の先端抵抗と相対密度の関係を求めた。 ・これらの実験に用いられた砂は細粒分をほとんど含まず、石英分の卓越した所謂クリーンサンドであり、セメンテーションのない若齢材料。 ・このため、過圧密砂地盤や細粒分が多く混じるような砂質土に対する式の適用性については注意が必要。 $D_r = -98 + 66 \log \frac{(q_t/98)}{\sqrt{\sigma_{v0}'/98}}$ <p>ここに、</p> <p>D_r : 相対密度 (%)</p> <p>q_t : 先端抵抗 (kN/m²)</p> <p>σ_{v0}' : 鉛直有効応力 (kN/m²)</p>  <p>【液状化抵抗 (砂質土)】 [Shibata and Teparaksa (柴田とテパラクサ) による推定法]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・過去の地震における液状化被害の状況と地震後に行われた原位置試験 (SPT と CPT) から、液状化強度比と規準化コーン抵抗の関係を求め、液状化・非液状化の境界を限界規準化先端抵抗として以下の式を提案。 ●時松・吉見による液状化強度比 $\frac{\tau}{\sigma_{v0}'} = 0.1(M - 1) \frac{\alpha_{max} \sigma_{v0}'}{g_n \sigma_{v0}'} (1 - 0.015 \cdot z)$ ●規準化コーン抵抗 $q_{t1} = \left(\frac{0.17}{0.07 + \sigma_{v0}'} \right) q_t$ ●限界規準化先端抵抗 $(q_{t1})_{cr} = 0.1C_2 \left[50 + 200 \left\{ \frac{(\tau/\sigma_{v0}') - 0.1}{(\tau/\sigma_{v0}') + 0.1} \right\} \right]$ <p>ここで、</p> <p>τ : 等価せん断応力振幅 (MN/m²)</p> <p>M : 地震のマグニチュード</p> <p>α_{max} : 地表面最大加速度 (m/s²)</p> <p>g_n : 標準重力加速度 (m/s²)</p> <p>z : 深さ (m)</p> <p>C_2 : 粒径の影響を考慮した補正係数</p>		

$D_{50} \geq 0.25\text{mm}$ の砂は $C_2 = 1$
 $D_{50} \leq 0.25\text{mm}$ の細粒土は $C_2 = D_{50}/0.25$



【液状化抵抗 (砂質土)】

[Robertson and Fear (ロバートソンとフィア) による推定法]

- 実験及び現場実測に基づき、液状化強度比は等価先端抵抗を用いて次式で表現できるとした。

- 規準化先端抵抗 q_{t1}

$$q_{t1} = q_t \left(\frac{P_a}{\sigma_{v0}} \right)^{0.5}$$

$$\Delta q_{t1} = 5 \text{ MN/m}^2 \quad F_c \geq 35\%$$

$$\Delta q_{t1} = 0 \quad F_c \leq 5\%$$

$$\Delta q_{t1} = \frac{F_c - 5}{6} \text{ MN/m}^2 \quad 5\% < F_c < 35\%$$

- 等価先端抵抗 $(q_{t1})_{cs}$

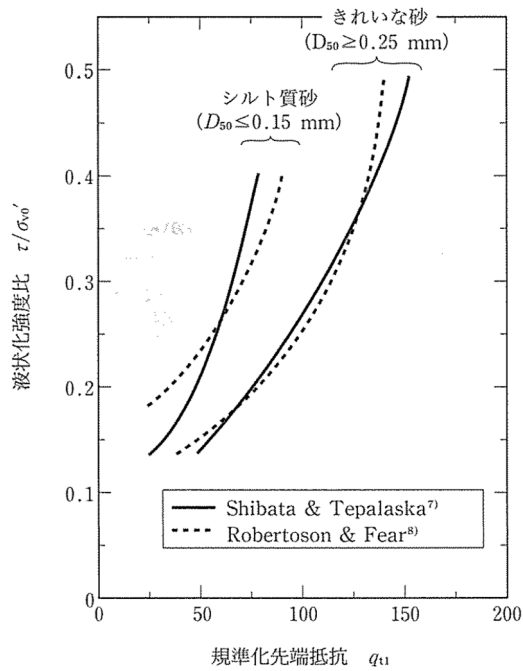
$$(q_{t1})_{cs} = q_{t1} + \Delta q_{t1}$$

- 液状化強度比

$$\frac{\tau}{\sigma_{v0}} = 93 \left\{ \frac{(q_{t1})_{cs}}{100} \right\}^3 + 0.08$$

【液状化抵抗 (砂質土)】

- Shibata and Teparaksa や Robertson and Fear による推定法に示すように、電気式コーン貫入試験を砂地盤で実施することで、室内試験を行うことなく細粒分含有率の補正を施した液状化強度比の算定が可能。
- 両推定法における液状化強度比と CPTU の値を比較。
- シルト質砂、きれいな砂いずれの材料に対してもほぼ同じ液状化強度比を与える。
- q_{t1} が大きくなるに従い液状化強度比は急激に増大し、液状化抵抗が非常に大きくなる結果。
- 上記 2 つは代表的な推定法であるが、他にも多くの推定法が提案されている。



【非排水せん断強さ（粘性土）】

- 先端抵抗 q_t と粘性土の非排水せん断強さ c_u は、下式で関連付けられる。

$$c_u = \left(\frac{q_t - \sigma_{v0}}{N_{kt}} \right)$$

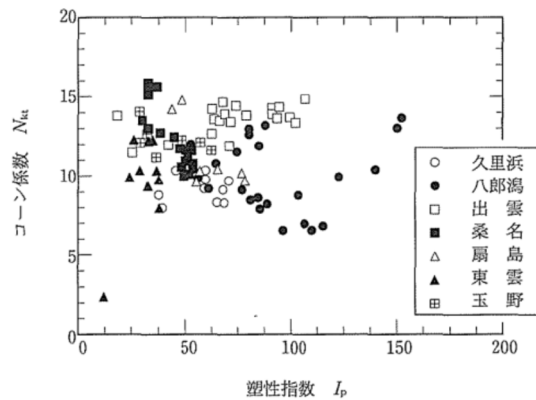
ここで、

N_{kt} : コーン指数

c_u : 非排水せん断強さ (kN/m²)

σ_{v0} : 鉛直全応力 (kN/m²)

- 非排水せん断強さは一軸圧縮強さの半分 ($q_u/2$) として求めるが、資料の乱れの影響を受けやすく、 c_u の算出に当たっては注意が必要。
- c_u は、せん断速度や異方性の影響を強く受けることが知られており、十分な配慮が必要。
- 田中らによって求められた N_{kt} と塑性指数 I_p の関係では、ばらつきはあるが、日本の沖積粘性土のコーン係数は、概ね8~16の値を示す。



付図-2.6 わが国の海成粘土で得られたコーン係数 N_{kt}
(せん断強さを $q_u/2$ で求めた場合)²⁾

参考文献

- 2) 田中洋行・榊原基生・後藤健二・鈴木耕司・深沢健, 港湾技術研究所報告, 1992, 第 31 卷,
No.4, pp.61-96
<https://www.pari.go.jp/PDF/vol031-no04-03.pdf> (参照 2026/01/09)

No.	タイトル	著者	発行年月
10	コーン貫入試験結果の解釈－土質分類及び圧密沈下予測について	大和ほか	2008年7月
出典	地盤工学会, 第43回地盤工学会研究発表講演集, 2008, No.74 https://www.jibanshikenjo.co.jp/paper/560/ (参照 2026/01/05)		
要点	<p>【圧密係数】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・関東平野の現場にてコーン貫入試験を適用した事例。 ・サンプリング、攪乱試料を採集して目視確認、長期沈下観測等を実施。 ・間隙水圧の消散試験から圧密係数 (Cv) を求める。 <p>※消散試験とは、コーン貫入中に過剰間隙水圧が発生している粘土土質地盤においてCPT貫入を一時停止して、過剰間隙水圧が消散する時間を観測する試験。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・標準貫入試験によるN値と、CPTによる換算N値は良い相関性を示す結果。 $c_v = c_h = 8.64 \times 10^4 \frac{T_{50} R^2}{t_{50}} \left(\frac{cm^2}{day} \right)$ <p>T50：過剰間隙水圧50%消散時の理論時間ファクター (0.196) R：コーン半径 (cm) t50：過剰間隙水圧50%消散時の経過時間</p> <p>→No.5の関係式と同じ</p>		

No.	タイトル	著者	発行年月												
11	洋上風力発電の地域一体的開発に向けた調査研究事業 各調査項目における調査手法・仕様 の一般化に向けた中間とりまとめ	新エネルギー・産業技術 総合開発機構 (NEDO)	2022年6月												
出典	新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/saisei_kano/yojo_furyoku/pdf/014_s01_00.pdf (参照 2025/12/26)														
要点	<p>【着床式】</p> <ul style="list-style-type: none"> 調査地点数が数箇所にとられる基本設計段階の調査(*)では、ボーリング及びSPTによる調査を基本とする。 調査地点数は少なくとも2地点以上を基本とし、調査海域の広さ及び形状に応じて設定する。 →地盤の液状化に関する特性と耐震設計に必要となる工学的基盤の状況をより正確に把握するため。 詳細設計段階の調査(*)では、風車設置箇所の全地点において調査を実施するが、その際にはCPTの活用・併用も候補となり得る。 <p>(*)「基本設計段階の調査」および「詳細設計段階の調査」は、それぞれ3.1(2)(a)の「2次調査」、「3次調査」に該当する。</p>														
	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">地盤物性値【着床式】</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>調査目的</td> <td>・いずれの着床式基礎形式が採用されても基本設計ができるよう原位置試験、試料のサンプリング及び室内試験を行って、調査海域の地層構成の把握及び、地盤の工学的特性を把握することを目的とする。</td> </tr> <tr> <td>調査期間</td> <td>—</td> </tr> <tr> <td>調査地点数等</td> <td> <ul style="list-style-type: none"> ・ボーリング及び標準貫入試験 (SPT) : 調査地点数は少なくとも2地点以上を基本としたうえで、調査海域の広さ及び形状に応じて設定する。 - PS検層、密度検層、キャリバー (孔径) 検層 - 孔内載荷試験、乱れの少ない試料採取: 1式 - 室内土質試験: 1式 </td> </tr> <tr> <td>調査手法・仕様</td> <td> <ul style="list-style-type: none"> ・国内のこれまでの構造物・耐震設計基準の観点から、ボーリング及び標準貫入試験による調査を基本とする。 ※基本設計段階での調査地点数は区域の代表点となる数箇所に絞られることを踏まえ、地盤の液状化に関する特性と耐震設計に必要な工学的基盤の状況をなるべく正確に把握するため、ボーリング及び標準貫入試験を第一案として検討する。なお、詳細設計段階での調査では、風車設置箇所の全地点において調査を実施するが、その際にはコーン貫入試験 (CPT) の活用 (併用) も候補となり得る。 ・調査事項は以下による。 ボーリング調査、標準貫入試験 (JIS A 1219)、孔内載荷試験 (JGS 1531、JGS 3531)、サンプリング (シンウォールサンプリング) JGS-1221、ロータリー式二重管サンプリャーによる試料採取 JGS-1222、ロータリー式スリーブ内蔵二重管サンプリャーによる試料採取 JGS-1224、ロータリー式三重管サンプリャーによる試料採取 JGS-1223)、PS検層 (JGS-1122)、密度検層、キャリバー (孔径) 検層、海底微動アレイ探査、室内土質試験、室内岩石試験。 ・ボーリングの最低掘進長は40mを目途とする。掘り止め基準は工学的基盤 ($V_s \geq 400\text{m/s}$) を5m以上確認とする。 ・調査方法は「海洋調査技術マニュアル-海洋地質調査編-、(一社) 海洋調査協会」及び地盤工学会基準に準拠する。 ・標準的な室内土質試験の項目と試験方法は、JIS A1202、JIS A1203、JIS A1204、JIS A1205、JIS A1225、JIS A1217、JIS A1216、JGS 0521、JGS 0522、JGS 0523、JGS 0524、JGS 0541、JGS 0542とする。 ・標準的な室内岩石試験の項目と試験方法はJGS 2132、JGS 2521、JGS 2531、JGS 2532、JGS 2533、JGS 2534、JGS 2563、JGS 2564とする。 </td> </tr> <tr> <td>調査成果</td> <td> <ul style="list-style-type: none"> ・ボーリング調査により地層構成及び、地盤の工学的特性を把握する。 ・標準貫入試験によりN値、孔内載荷試験により変形係数E、室内土質試験により物理特性、力学特性 (粘着力c、せん断抵抗角ϕ)、変形係数E、変形特性、液状化特性を把握する。 ・PS検層 (JGS-1122) により、各層のS波速度 (V_s) Pは速度 (V_p) 及び、海底微動アレイ探査により深度方向のV_s分布及び、工学的基盤 ($V_s \geq 400\text{m/s}$) を把握する。 また密度検層により、各地層の密度分布を把握する。 </td> </tr> </tbody> </table>			地盤物性値【着床式】		調査目的	・いずれの着床式基礎形式が採用されても基本設計ができるよう原位置試験、試料のサンプリング及び室内試験を行って、調査海域の地層構成の把握及び、地盤の工学的特性を把握することを目的とする。	調査期間	—	調査地点数等	<ul style="list-style-type: none"> ・ボーリング及び標準貫入試験 (SPT) : 調査地点数は少なくとも2地点以上を基本としたうえで、調査海域の広さ及び形状に応じて設定する。 - PS検層、密度検層、キャリバー (孔径) 検層 - 孔内載荷試験、乱れの少ない試料採取: 1式 - 室内土質試験: 1式 	調査手法・仕様	<ul style="list-style-type: none"> ・国内のこれまでの構造物・耐震設計基準の観点から、ボーリング及び標準貫入試験による調査を基本とする。 ※基本設計段階での調査地点数は区域の代表点となる数箇所に絞られることを踏まえ、地盤の液状化に関する特性と耐震設計に必要な工学的基盤の状況をなるべく正確に把握するため、ボーリング及び標準貫入試験を第一案として検討する。なお、詳細設計段階での調査では、風車設置箇所の全地点において調査を実施するが、その際にはコーン貫入試験 (CPT) の活用 (併用) も候補となり得る。 ・調査事項は以下による。 ボーリング調査、標準貫入試験 (JIS A 1219)、孔内載荷試験 (JGS 1531、JGS 3531)、サンプリング (シンウォールサンプリング) JGS-1221、ロータリー式二重管サンプリャーによる試料採取 JGS-1222、ロータリー式スリーブ内蔵二重管サンプリャーによる試料採取 JGS-1224、ロータリー式三重管サンプリャーによる試料採取 JGS-1223)、PS検層 (JGS-1122)、密度検層、キャリバー (孔径) 検層、海底微動アレイ探査、室内土質試験、室内岩石試験。 ・ボーリングの最低掘進長は40mを目途とする。掘り止め基準は工学的基盤 ($V_s \geq 400\text{m/s}$) を5m以上確認とする。 ・調査方法は「海洋調査技術マニュアル-海洋地質調査編-、(一社) 海洋調査協会」及び地盤工学会基準に準拠する。 ・標準的な室内土質試験の項目と試験方法は、JIS A1202、JIS A1203、JIS A1204、JIS A1205、JIS A1225、JIS A1217、JIS A1216、JGS 0521、JGS 0522、JGS 0523、JGS 0524、JGS 0541、JGS 0542とする。 ・標準的な室内岩石試験の項目と試験方法はJGS 2132、JGS 2521、JGS 2531、JGS 2532、JGS 2533、JGS 2534、JGS 2563、JGS 2564とする。 	調査成果	<ul style="list-style-type: none"> ・ボーリング調査により地層構成及び、地盤の工学的特性を把握する。 ・標準貫入試験によりN値、孔内載荷試験により変形係数E、室内土質試験により物理特性、力学特性 (粘着力c、せん断抵抗角ϕ)、変形係数E、変形特性、液状化特性を把握する。 ・PS検層 (JGS-1122) により、各層のS波速度 (V_s) Pは速度 (V_p) 及び、海底微動アレイ探査により深度方向のV_s分布及び、工学的基盤 ($V_s \geq 400\text{m/s}$) を把握する。 また密度検層により、各地層の密度分布を把握する。
地盤物性値【着床式】															
調査目的	・いずれの着床式基礎形式が採用されても基本設計ができるよう原位置試験、試料のサンプリング及び室内試験を行って、調査海域の地層構成の把握及び、地盤の工学的特性を把握することを目的とする。														
調査期間	—														
調査地点数等	<ul style="list-style-type: none"> ・ボーリング及び標準貫入試験 (SPT) : 調査地点数は少なくとも2地点以上を基本としたうえで、調査海域の広さ及び形状に応じて設定する。 - PS検層、密度検層、キャリバー (孔径) 検層 - 孔内載荷試験、乱れの少ない試料採取: 1式 - 室内土質試験: 1式 														
調査手法・仕様	<ul style="list-style-type: none"> ・国内のこれまでの構造物・耐震設計基準の観点から、ボーリング及び標準貫入試験による調査を基本とする。 ※基本設計段階での調査地点数は区域の代表点となる数箇所に絞られることを踏まえ、地盤の液状化に関する特性と耐震設計に必要な工学的基盤の状況をなるべく正確に把握するため、ボーリング及び標準貫入試験を第一案として検討する。なお、詳細設計段階での調査では、風車設置箇所の全地点において調査を実施するが、その際にはコーン貫入試験 (CPT) の活用 (併用) も候補となり得る。 ・調査事項は以下による。 ボーリング調査、標準貫入試験 (JIS A 1219)、孔内載荷試験 (JGS 1531、JGS 3531)、サンプリング (シンウォールサンプリング) JGS-1221、ロータリー式二重管サンプリャーによる試料採取 JGS-1222、ロータリー式スリーブ内蔵二重管サンプリャーによる試料採取 JGS-1224、ロータリー式三重管サンプリャーによる試料採取 JGS-1223)、PS検層 (JGS-1122)、密度検層、キャリバー (孔径) 検層、海底微動アレイ探査、室内土質試験、室内岩石試験。 ・ボーリングの最低掘進長は40mを目途とする。掘り止め基準は工学的基盤 ($V_s \geq 400\text{m/s}$) を5m以上確認とする。 ・調査方法は「海洋調査技術マニュアル-海洋地質調査編-、(一社) 海洋調査協会」及び地盤工学会基準に準拠する。 ・標準的な室内土質試験の項目と試験方法は、JIS A1202、JIS A1203、JIS A1204、JIS A1205、JIS A1225、JIS A1217、JIS A1216、JGS 0521、JGS 0522、JGS 0523、JGS 0524、JGS 0541、JGS 0542とする。 ・標準的な室内岩石試験の項目と試験方法はJGS 2132、JGS 2521、JGS 2531、JGS 2532、JGS 2533、JGS 2534、JGS 2563、JGS 2564とする。 														
調査成果	<ul style="list-style-type: none"> ・ボーリング調査により地層構成及び、地盤の工学的特性を把握する。 ・標準貫入試験によりN値、孔内載荷試験により変形係数E、室内土質試験により物理特性、力学特性 (粘着力c、せん断抵抗角ϕ)、変形係数E、変形特性、液状化特性を把握する。 ・PS検層 (JGS-1122) により、各層のS波速度 (V_s) Pは速度 (V_p) 及び、海底微動アレイ探査により深度方向のV_s分布及び、工学的基盤 ($V_s \geq 400\text{m/s}$) を把握する。 また密度検層により、各地層の密度分布を把握する。 														
	<p>【浮体式】</p> <ul style="list-style-type: none"> 水深が50m以上となる浮体式の海域では、ボーリングによる調査が困難であるため、CPTを基本とし、深度方向に連続して計測する。 CPTは少なくとも2地点以上を基本とし、調査海域の広さ及び形状に応じて設定する。 CPTでは貫入時の先端抵抗 (qc)、周面摩擦 (fs)、間隙水圧 (u) を計測し、地層構成及び、地盤の工学的特性を把握する。 														

- CPT の調査手法や仕様は、地盤工学会基準 JGS-1435（電気式コーン貫入試験方法）による。

地盤物性値【浮体式】	
調査目的	・いずれの浮体式が採用されても基本設計ができるよう原位置試験、試料のサンプリング及び室内試験を行って、調査海域の地層構成の把握及び、地盤の工学的特性を把握することを目的とする。
調査期間	—
調査地点数等	<ul style="list-style-type: none"> ・コーン貫入試験（CPT）及び、PS検層：調査地点数は少なくとも2地点以上を基本としたうえで、調査海域の広さ及び形状に応じて設定す ・必要に応じて別孔で乱れの少ない試料採取、PS検層、密度検層、キャリバー（孔径）検層：1式 ・室内土質試験：1式
調査手法・仕様	<ul style="list-style-type: none"> ・水深が50mを超える浮体式の海域では、ボーリングによる調査が困難であるため、CPTを基本とし、深度方向に連続して計測する。 ・CPT(JGS-1435)、PS検層(JGS-1122)、密度検層、キャリバー（孔径）検層、サンプリング、室内土質試験（砂質土などCPTにおいて乱れの少ない試料採取が困難な地層は再構成試料で試験を実施する。試験内容はボーリング調査の内容に同じ。） ・CPTは連続してコーン貫入時の先端抵抗（qc）、周面摩擦（fs）、間隙水圧（u）を計測する。 ・CPTの技術的な基準については、ISSMGE（1999）、ASTM（2012）、ISO（2012）、ISO（2014）、JGS等に準拠する。 ・基礎形式がセミサブ形式、スパー型形式の場合、ドラッグアンカー等による係留が可能であり、深い地盤の調査は不要となるため、海底着座型のCPTにより浅層のみを調査する場合もある。
調査成果	<ul style="list-style-type: none"> ・CPTにより地層構成及び、地盤の工学的特性を把握する。またCPT結果から各種地盤定数を算定する経験式（Robertsonの式等）は、「洋上風力発電設備に関する技術基準の統一解説 令和2年3月版、付属書2 コーン貫入試験（CPT）による地盤評価」などを参考に整理する。 ・室内土質試験により物理特性、力学特性（粘着力c、せん断抵抗角φ）、変形係数E、変形特性、液化化特性を把握する。 ・PS検層(JGS-1122)により、各層のS波速度（Vs）Pは速度（Vp）及び、工学的基盤（Vs≧400m/s）を把握する。また密度検層により、各地層の密度分布を把握する。

No.	タイトル	著者	発行年月
12	DNVGL-ST-0126: Support structures for wind turbines	Det Norske Veritas (DNV) (当時は DNV GL)	2018年7月
出典	ノルウェーに本部を置く自主独立財団であり、国際的な認定機関・独立的な第三者機関・船級協会でもある DNV (Det Norske Veritas) (2021年2月までは DNV GL) による認証規格 (standards)。		
要点	<p>・杭基礎の設計には原位置試験とボーリング調査が必要だが、CPT もまたマッドマット (支持構造物の各脚を地盤上で安定させるためのマット状の構造物) の設計を容易にするために、支持構造物の各脚において推奨されている。</p> <p>・土質調査にて通常実施されるべき項目として、原位置試験 (CPT または SPT) と記載がある。</p> <p>no special reasoning is given by the designer, this should be at least half a pile diameter below the pile tip for pile foundations against lateral loads, and at least 3 pile diameters below pile tip for axial loads.</p> <p>Seabed CPTs are also recommended at each leg of an offshore support structure in order to facilitate e.g. the mud mat design.</p> <p>In seismically active areas, it may be necessary to obtain information about the shear modulus of the soil to depths which may have influence on the design in view of shear wave propagation due to earthquakes.</p> <p>If the soil investigations reveal that the relevant ground layers have insufficient strength or stiffness properties, different soil improvement techniques may be considered.</p> <p>7.3.1.6 Soil investigations should normally comprise the following types of investigation:</p> <ul style="list-style-type: none"> – site geological survey – topography survey of the soil surface, if applicable – in-situ testing, for example by cone penetration tests (CPT) or Down-the-hole SPT, pressiometer tests and dilatometer tests – soil and rock sampling with subsequent static laboratory testing. <p>They may also comprise, if useful in special circumstances or required by local authorities</p> <ul style="list-style-type: none"> – geophysical investigations for correlation with borings and in-situ testing – shear wave velocity measurements for assessment of maximum shear modulus – cyclic laboratory testing. 		

No	タイトル	著者	発行年月
13	DNVGL-RP-C212:Offshore soil mechanics and geotechnical engineering	Det Norske Veritas (DNV) (当時は DNV GL)	2019年9月
出典	ノルウェーに本部を置く自主独立財団であり、国際的な認定機関・独立的な第三者機関・船級協会でもある DNV (Det Norske Veritas) (2021年2月までは DNV GL) による推奨プラクティス (recommended practice)。		
要点	<p>2.2 計画</p> <p>2.2.3 データの種類及び試験の種類</p> <p>2.2.3.5 In-situ tests, such as piezocone penetration tests, T-bar tests and ball penetrometer tests, may provide a more continuous soil profile than sampling with subsequent laboratory tests will provide. It is therefore recommended to include such in-situ tests in any soil investigation programme. In sands, PCPT profiles are necessary in order to obtain reliable estimates of relative density. In clays, PCPT and T-bar tests implicitly provide continuous profiles of undrained shear strength and may reveal any local weak layer that may be missed if only sampling with laboratory testing is performed. Strengths from such in-situ tests</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ピエゾコーン貫入試験、T-bar 試験、ボール貫入試験などの原位置試験は、それに続く室内試験でのサンプリングより、連続的な地盤情報を得ることができるため、調査には上記のような原位置試験を含めることを推奨する。 <p>2.3 基礎形式別の地盤調査</p> <p>2.3.2 重力タイプの基礎</p> <p>2.3.2.1 For a GBS type of structure, the foundation stability is to a large extent governed by the environmental loads and – because of the size of the substructure – then often by the wave loads. Since the moment due to vertical hydrodynamic pressure on the bottom structure counteracts the moment from the horizontal forces, the foundation stability is normally governed by the horizontal force. The critical shear surface in the soil is accordingly most often rather shallow, and the stability may be governed by shallow weak layers. It is therefore essential that sufficient shear strength data are available in the shallow region. In addition to a number of deep borings that would be required to obtain data for calculation of settlements, it is important to collect sufficient shear strength data from the shallow soil by a number of shallow borings and by PCPT tests.</p> <ul style="list-style-type: none"> ・浅い領域で十分なせん断強度データを得ることが不可欠で、沈下計算のためのデータを取得するために必要となるいくつかの深いボーリングに加え、浅いボーリングとピエゾコーン貫入試験 (PCPT 試験) によって、浅い地盤から十分なせん断強度データを収集することが重要。 <p>2.3.2.4 In overconsolidated soils, the most reliable methods for estimation of skirt penetration resistance refer to cone penetration resistance. For this purpose a number of PCPT tests should be performed to a depth below the anticipated skirt penetration depth.</p> <ul style="list-style-type: none"> ・過圧密地盤において、スカート (下部が開いた円筒状の基礎構造物) の貫入抵抗を推定するために最も信頼性の高いのはコーン貫入試験。 ・想定されるスカートの貫入深さよりも低い深さまで幾つかの PCPT 試験が必要。 <p>2.3 基礎形式別の地盤調査</p> <p>2.3.3 杭基礎タイプの基礎</p> <p>2.3.3.1 For pile foundations, a number of deep borings with alternate sampling and PCPT testing to well below the foreseen pile penetration depth should be carried out. For determination of plugged pile tip resistance in overconsolidated soils, strength data should be available to a minimum depth as discussed in [2.3.3.8].</p> <ul style="list-style-type: none"> ・杭基礎においては、想定される貫入深さ以上の十分な深さまで、サンプリン 		

グボーリングと PCPT 試験が必要。

2.3.3.4 For determination of axial pile capacity in sand, the most recent reliable methods are based on empirical correlations to measured cone penetration resistance. Thus in sand layers, emphasis should be given to achieve as continuous PCPT tests as possible. Characterization tests may be performed on soil sampled at the same depths after the PCPT test has been performed. It is essential that the PCPT equipment has sufficient thrust and the cone itself sufficient capacity to measure the high resistances that may be encountered in very dense sands without refusal. A capacity to measure at least 100 MPa tip resistance should be aimed for.

- ・砂層における杭のキャパシティを決定するための信頼できる方法は、測定されたコーン貫入抵抗との相関関係に基づく経験的な方法。
- ・砂層では、可能な限り継続的な PCPT 試験を実施することに重点を置く必要あり。
- ・物理試験は、PCPT 試験が実施された後、同じ深さでサンプリングされた試料で実施される。
- ・PCPT 試験装置には十分な推力があり、コーンは非常に密な砂に対しても貫入できるスペックのものが必要。

2.3.3.8 For design of piles against axial loads, at least one CPT and one nearby boring with soil sampling should be carried out to the anticipated penetration depth of the pile plus a zone of influence. The zone of influence depends on the soil layering and should extend to a depth which excludes the possibility for punch-through failure. Unless more specific punch-through calculations are performed in design, a minimum distance of three pile diameters between pile tip and a potential soft punch-through layer should be considered. In layered soil where a specific layer may potentially be utilized for end bearing, a wider scope may be required to determine lateral variability in the depths to the layer boundaries and in the properties of the specific layer. Likewise, where layers are encountered that might cause driveability problems a wider scope may be required.

- ・軸方向荷重に対する杭の設計では、少なくとも 1 つの CPT と、サンプリングを伴うボーリングの組合せを予想される貫入深さ+貫入の影響が及ぶ深度までの十分な深さまで実施する必要がある

2.3.3.9 A typical site investigation for a piled jacket platform in previously unexplored areas should normally consist of one deep boring at each corner of the jacket, with alternating soil sampling and CPT testing from one boring to the next, and with possible additional borings in case the lateral variability of the soil properties proves to be significant. For jackets to support wind turbines in a wind farm, one deep boring in the centre of the jacket may suffice. Where knowledge from earlier geotechnical borings combined with reliable geophysical data and knowledge of the site geology documents uniform soil conditions with moderate lateral variability, fewer borings may be justified.

- ・未開発地点におけるジャケット基礎の一般的な調査は、各コーナーに深いボーリングを実施し、サンプリングと CPT 試験を実施する。
- ・風力タービンをサポートするジャケット基礎の場合、ジャケットの中央に 1 本の深いボーリングで十分な場合もある。

2.3 基礎形式別の地盤調査

2.3.4 ジャッキアップ基礎

2.3.4.3 If no foreknowledge of the soil conditions exists, it is recommended – in addition to a geophysical survey in the area – to carry out at least one boring with soil sampling and PCPT testing for each leg location. A decision whether further soil borings are required should be based on

- how well the soil profiles from these borings correlate
- to what extent possible variations in shear strength from the measured values could result in critical or undesirable penetrations during preload and operation
- whether no anomalies, such as buried channels, are detected from the geophysical survey.

Performing boreholes at each leg location may be unnecessary for a location with no lateral variability. See ISO 19905-1 Annex D for guidance on the number of boreholes required. The extent and scope of the geotechnical site investigation may be influenced by the findings from the first borehole(s) performed at the site.

If the combination of knowledge from geological deposition, stratification from the geophysical survey and the soil parameters obtained from one boring to the minimum required depth is such that possible adverse or critical performance of the jack-up is precluded, one boring may suffice. Such a conclusion should not rely on specific shear strength profiles from one boring without accounting for significant deviations to be judged from the known geological deposition history.

- ・地盤条件の想定ができない場合は、その地域の物理学調査に加え、各脚位置に対して、少なくとも1回のサンプリングとPCPT試験が推奨される。
- ・必要なボーリング数については、ISO1995-1付録Dを参照。

2.3 基礎形式別の地盤調査

2.3.5 海底基礎

Solutions for subsea foundations may consist of pile foundations, mat foundations with or without skirts, and suction caissons. The area covered by the foundation for a subsea structure is normally much smaller than for fixed platforms. Typically, two to three borings with soil sampling and CPT testing are required at the location for the subsea structure. Depending on the variability of the soil conditions revealed from these borings, or from other nearby borings combined with geophysical data, the required number of borings could be less or more. The decision regarding the necessary number of borings should properly reflect the requirements for a safe design related to foundation stability as well as the requirements for installation capabilities.

- ・海底に設置される基礎形式は杭基礎、スカート有無しのマット基礎、サクシオンケーソン式がある。
- ・通常、海中構造物の場所では、2～3箇所のサンプリングを伴うボーリングとCPT試験が必要。

No.	タイトル	著者	発行年月
14	ABS : Design Guideline for Station keeping Systems of Floating Offshore Wind Turbines	American Bureau of Shipping (ABS)	
出典			
要点	<ul style="list-style-type: none"> ・ 浮体式において、CPT は最低限、初期のサイト調査として、それぞれのアンカー/基礎のサイトで 1 箇所は実施する必要がある。 ・ 加えて、十分な貫入深さまでのボーリング調査が上記サイトの各 1 箇所およびウィンドファームの中央位置で行われるべきである。 <p>5.4.9.3 Site Investigation for Offshore Wind Farm Conditions</p> <p>Site investigation should be in principle performed for each anchoring/foundation location in a wind farm per the requirements given in Section 5.4.9.1 and Section 5.4.9.2. A less extensive site investigation may be acceptable, provided that previous site investigations and experience are available or the type of foundation and the site conditions can justify a reduced scope of site investigation. As a minimum and an initial site investigation for an offshore wind farm, one cone penetration test (CPT) should be performed for each anchoring/foundation site of the FOWTs in the offshore wind farm. In addition, one boring to a sufficient penetration depth should be taken for each anchoring/foundation site of the FOWTs at each corner and in the middle of an offshore wind farm. Additional CPTs or borings may be required depending on the results of the initial site investigation.</p>		

No.	タイトル	著者	発行年月
15	SUT : Guidance Notes for the Planning and Execution of Geophysical and Geotechnical Ground Investigations for Offshore Renewable Energy Developments	Society for Underwater Technology (SUT)	2014年5月
出典	<p>英国に本部を置く海洋科学技術の国際学会である SUT (Society for Underwater Technology) による洋上風力開発における物理学的、地質学的調査の計画と実行のためのガイダンス資料。</p> <p>https://sut.org/books-and-conference-proceedings/guidance-notes-for-the-planning-and-execution-of-geophysical-and-geotechnical-ground-investigations-for-offshore-renewable-energy-developments/ (参照 2025/12/26)</p>		
要点	<ul style="list-style-type: none"> 地盤データの取得は通常、土や岩盤のサンプル採取と CPT 調査を含む。 CPT 調査はサンプルテスト結果と組み合わせることで、工学設計の目的で使用することができる。 経験的な相関関係を通じて特定の土壌特性を提供できる。 <p>⇒CPT 調査+土や岩盤のサンプル試験結果を通じて設計に必要な地盤データを取得できる。</p> <ul style="list-style-type: none"> 基礎形式別の最適な地盤調査作業範囲について示されている。 <div data-bbox="363 987 1318 1341" data-label="Image"> <p>The diagram illustrates six different offshore wind turbine foundation types. From left to right: 1. A fixed-bottom monopile foundation with a single pile. 2. A fixed-bottom jacket foundation with a lattice structure. 3. A floating monopile foundation with a single pile and a floating platform. 4. A fixed-bottom tripod foundation with three piles. 5. A fixed-bottom gravity foundation with a large, heavy base. 6. A floating spar-buoy foundation with a vertical spar and a floating platform.</p> </div> <ul style="list-style-type: none"> ○モノパイル式基礎： <ul style="list-style-type: none"> 先端支持に依存しない杭の場合、連続的な CPT が必要。必要な深度としては、「杭の予想根入れ長」+「杭径の 0.5 倍の長さ」。 CPT の少なくとも 10%は、その近くで室内試験のための十分なサンプルを確保するために選定された高品質なボーリング孔サンプルも採取されるべきだ。 必要なサンプル数はサイトのばらつきに依存する。 加えて、ダウンホール物理検層と現場の剛性測定も使用されることがある。 ○岩盤または岩盤+土におけるモノパイル式基礎： <ul style="list-style-type: none"> 先端支持に依存しない杭の場合、サンプリングと岩盤コアリングが必要。必要な深度としては、「杭の予想根入れ長」+「杭径の 0.5 倍の長さ」。 土の場合や岩盤が十分な強度でない場合は追加の CPT 調査がデータの品質向上に有効。 加えて、ダウンホール物理検層と現場の剛性測定も使用されることがある。 		

<ul style="list-style-type: none">○ジャケット式 (4 本脚) / トリポット式 (3 本脚) 基礎：<ul style="list-style-type: none">・モノパイル式と同様。ただし、予想される根入れ深さを越えたボーリング孔で先端支持の変動性を考慮する必要があるとされた場合を除く。・大きな横方向の変動が基礎に対して予想される場合には、追加の CPT 調査が必要。○重力式基礎：<ul style="list-style-type: none">・計画された構造物の中心位置にて、サンプルボアホールまたは連続的な CPT が必要。必要な深度としては、「押し込み深さ」+「ベースの直径/幅に対して 1.5 倍の長さ」。・大きな土壌変動性が予想される場合は、ベース周辺にて更に浅い CPT またはサンプルボアホールが必要。・加えて、ダウンホールの物理検層と現場の剛性測定も使用されることがある。○サククション式基礎：<ul style="list-style-type: none">・サンプルボアホールまたは連続的な CPT が必要。 必要な深度としては、「サククションの直径」+「押し込み深さ (最低でも直径の 1.5 倍)」。○アンカー/連結した基礎：<ul style="list-style-type: none">・それぞれのアンカー位置におけるサンプル/CPT 用のボアホールまたは海底 CPT。・調査深度は地質により異なる。 <p>・最終的な地盤調査作業範囲を決定する際には以下の点に考慮する必要がある。</p> <ul style="list-style-type: none">→地盤強度の観点から、ボアホール/CPT の取得数が少ないことによるリスクは、原位置解析に対してより保守的な設計パラメータを用いることで対応できるかどうか。→ボアホール/CPT の取得数が少ないことによる施工上のリスクが高まるかどうか (例えば、目標深度まで杭が貫入できないなど)。また、そのようなリスクに対して、より大きな打設ハンマーの使用や、場合によってはより太い杭を用いることによって対応できるかどうか。 <p>⇒地盤調査データの取得数の妥当性 (調査数量の不足によるリスク) について、課題認識がある。</p>

No.	タイトル	著者	発行年月
16	IEC 61400-3-1 (洋上風車の設計要件) Wind energy generation systems –Part 3-1: Design requirements for fixed offshore wind turbines	国際電気標準会議 (IEC)	2020年4月
出典	国際電気標準会議 (IEC) によって発行された風力発電システムに係る国際規格 (IEC 61400 シリーズ) の一つ。		
要点	<p>・ CPT と浅い地点でのパイプロコアはボーリング調査の補足的なデータとして使われてもよい。 CPT はボーリング調査が実施されなかった地点で使ってもよい。 →キャリブレーションとして、CPT の 1 つはボーリング調査の近傍で行うこととする。</p> <p>6.4.7 Assessment of soil conditions</p> <p>Soil investigations shall be performed to provide adequate information to characterise soil properties throughout the depth and area that will affect or be affected by the foundation structure. The investigations shall in general include the following:</p> <ul style="list-style-type: none"> • geological survey of the site; • bathymetric survey of the sea floor including registration of boulders, sand waves or obstructions on the sea floor; • geophysical investigation; • geotechnical investigations consisting of in-situ testing and laboratory tests. <p>In order to develop the required foundation design parameters, data obtained during the investigations shall be considered in combination with an evaluation of the shallow geology of the region. If practical, the soil sampling and testing program should be defined after reviewing the geophysical results.</p> <p>Soil investigations shall include one or more soil borings to provide soil samples for in-situ tests and laboratory tests to determine data suitable for definition of engineering properties. The number and depths of borings required shall depend on the number and location of wind turbine foundations in the offshore wind farm, the soil variability in the vicinity of the site, the type of foundation, and the results of any preliminary geophysical investigations. Cone penetration tests (CPT) and shallow vibro-core borings may be used to supplement soil borings in the soil investigation. Site-specific soil data shall in principle be established for each foundation within the wind farm. CPTs may be used for this purpose at wind turbine locations where soil boring is not undertaken. For calibration of the CPTs, one CPT shall be performed in the vicinity of one of the soil borings.</p> <p>The soil investigation shall provide the following data as the basis of the foundation design:</p> <ul style="list-style-type: none"> • data for soil classification and description of the soil; • shear strength parameters, including soil degradation effects; • deformation properties, including consolidation parameters; 		

No.	タイトル	著者	発行年月
17	ANSI/API RECOMMENDED PRACTICE 2GEO	American Petroleum Institute (米国石油協会)	2021年1月
出典	米国石油協会 (API) によって発行された海洋支持構造物の地盤と基礎の設計に関する規格。		
要点	<p>【杭の先端支持力】</p> <ul style="list-style-type: none"> 杭の極限支持力の推定のため、CPT を活用した 4 つの方法が示されている。 <ul style="list-style-type: none"> 方法 1) ICP-05 を簡略化したもの(Imperial Collage Pile 2005) 方法 2) UWA-05 を簡略化したもの (University of Western Australia) 方法 3) Fugro-05 方法 4) NGI-05 (Norwegian Geotechnical Institute 2005) これらの方法は、CPT による先端抵抗と直接的な相関関係に基づいたもので、API 2A-WSD で推奨されている既存の簡便な方法と較べて、より広い範囲の非粘性土壌をカバーし、優れた手法。 <p>In 8.1.4 a simple method for assessing pile capacity in cohesionless soils is presented, which is a modification of methods recommended in API 2A-WSD. Changes were made to remove potential unconservatism. C.8.1.4.2.1 through C.8.1.4.2.5 present recent and more reliable CPT-based methods for predicting pile capacity. <u>These methods are all based on direct correlations of pile unit friction and end bearing data with cone tip resistance values from cone penetration tests (CPT). These CPT-based methods cover a wider range of cohesionless soils, are considered fundamentally better and have shown statistically closer predictions of pile load test results.</u></p> <p>The four recommended CPT-based methods discussed herein are</p> <ul style="list-style-type: none"> — Method 1, Simplified ICP-05 (as described in this document), — Method 2, Offshore UWA-05, References [154] and [155], — Method 3, Fugro-05, References [154] and [156], and — Method 4, NGI-05, References [154] and [157]. 		

【摩擦抵抗】

方法 1、2、3)

- ・ともに以下の摩擦抵抗の一般式における特殊ケースとして整理。

$$f(z) = u \times q_c(z) \times \left(\frac{p'_0(z)}{p_a} \right)^a \times A_r^b \times \left[\max \left(\frac{L-z}{D}, v \right) \right]^c \times [\tan \delta_{cv}]^d \times \left[\min \left(\frac{L-z}{D} \times \frac{1}{v}, 1 \right) \right]^e \quad (C.5)$$

where, in addition to prior definitions,

$f(z)$ is the unit shaft friction, in stress units, which is a function of depth, geometry and soil conditions;

$q_c(z)$ is the CPT cone-tip resistance at depth, z , in stress units;

$p'_0(z)$ is the effective vertical stress at depth z ;

p_a is the atmospheric pressure, in stress units, (e.g. $p_a = 100$ kPa);

A_r is the pile displacement ratio, $A_r = \frac{A_w}{A_p} = 1 - \left(\frac{D_i}{D} \right)^2$;

A_w is the area of the rim of the steel pile, $A_w = \frac{\pi}{4} (D^2 - D_i^2)$;

D_i is the pile inside diameter, $D_i = D - 2WT$;

WT is the pile wall thickness;

L is the embedded length of the pile below the original seafloor;

δ_{cv} is the sand constant volume friction angle at the interface between the sand and the pile wall.

開放型鋼管杭における摩擦式パラメータ

Method	Parameter						
	a	b	c	d	e	u	v
Method 1:							
compression	0.1	0.2	0.4	1	0	0.023	$4\sqrt{A_r}$
tension	0.1	0.2	0.4	1	0	0.016	$4\sqrt{A_r}$
Method 2:							
compression	0	0.3	0.5	1	0	0.030	2
tension	0	0.3	0.5	1	0	0.022	2
Method 3:							
compression	0.05	0.45	0.90	0	1	0.043	$2\sqrt{A_r}$
tension	0.15	0.42	0.85	0	0	0.025	$2\sqrt{A_r}$

方法 4)

Ultimate unit shaft friction values for tension, $f_t(z)$, and compression, $f_c(z)$, for driven open-ended steel pipe piles in Method 4 are given in Reference [157]:

$$f_t(z) = (z/L) p_a F_{sig} F_{Dr} > 0.1 p'_o(z) \quad (C.13)$$

$$f_c(z) = 1.3 (z/L) p_a F_{sig} F_{Dr} > 0.1 p'_o(z) \quad (C.14)$$

where, in addition to the general definitions given in C.8.1.3.1,

$$F_{sig} = (p'_o(z)/p_a)^{0.25} \quad (C.15)$$

$$F_{Dr} = 2.1 (D_r - 0.1)^{1.7} \quad (C.16)$$

$$D_r = 0.4 \times \ln \left(\frac{q_c(z)}{22(p'_o(z) p_a)^{0.5}} \right) \geq 0.1 \quad (C.17)$$

NOTE $D_r > 1$ should be accepted and used

As with the "full" Methods 1, 2 and 3, higher safety factors should be considered when using Method 4.

【杭の先端支持力】

方法 1)

The unit end bearing, q , for open-ended pipe piles follows the recommendations of Reference [158]. These specify a unit end bearing for plugged piles given by:

$$q = q_{c,av,1.5D} \left[0.5 - 0.25 \log_{10} \left(\frac{D}{D_{CPT}} \right) \right] \geq 0.15 q_{c,av,1.5D} \quad (C.6)$$

where, in addition to the general definitions given in C.8.1.4.2.1,

$q_{c,av,1.5D}$ is the average value of $q_c(z)$ between $1.5D$ above the pile tip and $1.5D$ below the pile tip;

$$q_{c,av,1.5D} = \frac{1}{3D} \times \left[\int_{L-1.5D}^{L+1.5D} q_c(z) dz \right];$$

方法 2)

C.8.1.4.2.3.2 End bearing

References [154] and [155] present design criteria for ultimate unit end bearing of plugged open-ended pipe piles. Their "full" design method for pipe piles includes an empirical term allowing for the favorable effect of partial plugging during pile driving. For offshore pile design, Reference [154] and [155] recommend to ignore this effect, resulting in the recommended design equation for plugged piles in Method 2:

$$q = q_{c,av,1.5D} (0.15 + 0.45A_r) \quad (C.10)$$

where, again in addition to the general definitions given in C.8.1.3.2.1,

方法 3)

The basis for the ultimate unit end bearing on pipe piles according to Method 3 is presented in a research report to AP[159] and summarized in Reference [156]. The recommended value of the unit end bearing for plugged piles is given by:

$$q = 8.5 p_s \left(\frac{q_{c,av,1.5D}}{p_b} \right)^{0.5} A_p^{0.25} \quad (C.11)$$

Both Method 2 and Method 3 do not specify unplugged end bearing capacity because typical offshore piles behave in a plugged mode during static loading[160]. It can be shown that plugged behavior applies if either:

- the cumulative thickness of sand layers within a soil plug is in excess of $8D$, or
- the total end bearing Q_p is limited as follows:

$$Q_p \leq Q_{t,i,clay} e^{L_s/D} \quad (C.12)$$

where

$Q_{t,i,clay}$ is the cumulative shaft friction capacity of the clay layers within the soil plug, in force units;

L_s is the length of the soil plug in the sand layers.

The cumulative frictional capacity of the clay layers within the soil plug, $Q_{t,i,clay}$, can be estimated using similar procedures as for computing estimated pile friction in clay (see 8.1.3).

Equation C.12 applies for fully drained behavior of sand within the pile plug. Criteria for undrained/partially drained sand plug behavior are presented in Reference [161].

方法 4)

The recommended equation for the ultimate unit end bearing of plugged open-ended steel pipe piles in Method 4[158] is:

$$q = \frac{0.7 q_{c,av,1.5D}}{1 + 3D_f^2} \quad (C.18)$$

where,

$q_{c,av,1.5D}$ is the average value of $q_c(z)$ between $1.5D$ above the pile tip and $1.5D$ below the pile tip;

$$q_{c,av,1.5D} = \int_{L-1.5D}^{L+1.5D} q_c(z) dz / (3D) \quad (C.19)$$

D_f is derived as described in Equation C.17.

NOTE Values of $D_f > 1$ should be accepted and used.

The resistance of non-plugging piles should be computed using a unit end bearing value for the steel pile rim, $q_w(z)$, shown in Equation C.20.

$$q_w(z) = q_c(z) \quad (C.20)$$

- 4手法ともに、より高い安全係数を考慮する必要あり。
- いずれの手法についても、洋上風力発電設備に関する技術基準の統一解説（改定版）付属書 2 に記載のあるとおり、各照査式の各方法の使い分け方について明記されておらず、採用については十分に注意する必要あり。

【地盤バネ】

8.5.6 Lateral capacity for sand

The ultimate lateral bearing capacity for sand has been found to vary from a value at shallow depths determined by Equation 26 to a value at deep depths determined by Equation 27. At a given depth the equation giving the smallest value of p_u should be used as the ultimate bearing capacity. These equations can be unconservative for layered soil conditions when the sand is overlain by soft clay.

$$p_{us} = (C_1 z + C_2 D) \gamma' z \quad (26)$$

$$p_{ud} = C_3 D \gamma' z \quad (27)$$

where

p_u is the ultimate resistance (force/unit length), (s = shallow, d = deep);

γ' is the submerged soil unit weight;

z is the depth below the original seafloor;

ϕ' is the angle of internal friction of sand;

D is the pile outside diameter;

C_1, C_2, C_3 are the coefficients determined as follows as function of ϕ' ;

$$C_1 = \frac{(\tan \beta)^2 \tan \alpha}{\tan(\beta - \phi')} + K_o \times \left[\frac{\tan \phi' \times \sin \beta}{\cos \alpha \times \tan(\beta - \phi')} + \tan \beta \times (\tan \phi' \times \sin \beta - \tan \alpha) \right];$$

$$C_2 = \frac{\tan \beta}{\tan(\beta - \phi')} - K_a;$$

$$C_3 = K_a \times [(\tan \beta)^8 - 1] + K_o \times \tan \phi' \times (\tan \beta)^4.$$

where

$$\alpha = \frac{\phi'}{2};$$

$$\beta = 45 + \frac{\phi'}{2};$$

$$K_o = 0.4;$$

$$K_a = \frac{1 - \sin \phi'}{1 + \sin \phi'}.$$

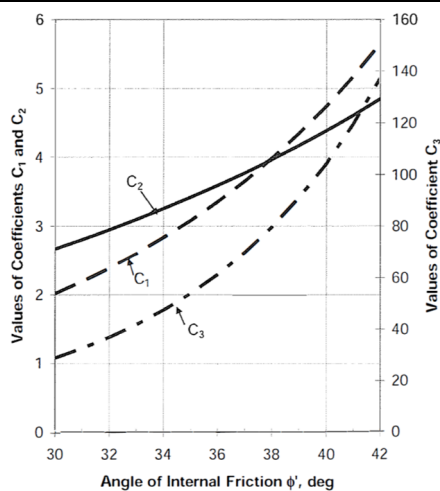


Figure 4—Coefficients C_1 , C_2 , C_3 , as function of ϕ'

8.5.7 Lateral soil resistance–Displacement (p - y) curves for sand

The lateral soil resistance-deflection (p - y) relationship for sand is also non-linear and in the absence of more definitive information may be approximated at any specific depth, z , by Equation 28.

$$p = A \times p_u \tanh \left[\frac{k \times z}{A \times p_u} y \right] \quad (28)$$

where

A is the factor to account for cyclic or static loading condition, evaluated by

$A = 0.9$ for cyclic loading;

$A = \left(3.0 - 0.8 \frac{z}{D} \right) \geq 0.9$ for static loading;

p_u is the ultimate lateral resistance at depth z ;

k is the rate of increase with depth of initial modulus of subgrade reaction, see Table 5;

y is the lateral deflection at depth z ;

z is the depth below the original seafloor.

The database for lateral soil-pile behavior in sands consists of free-head tests on piles in clean sands, with angles of internal friction ranging from 34° to 42° , as determined by shear box tests, drained triaxial tests or correlations with in situ tests.

Extrapolation of these data to soils outside the limits of experience, particularly to those sands with angles of internal friction less than 30° , should be done with caution. In particular, laboratory test results on such soils should be critically reviewed for evidence of anomalous behavior and for the presence of considerable fractions of cohesive soils, either of which could require a different formulation for the p - y relationships.

In the absence of more definitive information, the values of the initial modulus of subgrade reaction, k , given in Table 5 are recommended.

Table 5—Initial modulus of subgrade reaction values

ϕ'	k	
	MN/m ³	(lb/in ³)
25°	5.4	(20)
30°	11	(40)
35°	22	(80)
40°	45	(165)

4.3.3 まとめ

(1) CPT 結果を基にした地盤特性の推定

欧州では CPT による地盤調査が既に主流となっている。CPT を活用した設計に必要な地盤特性値の推定にあたっては、これまで調査した文献等を参考に、国内地盤においてもその推定が可能とされている。

但し、実際の適用にあたっては、地点特性を踏まえ、各々の推定式に対し「その推定式を用いることの妥当性を検証する」「各パラメータを推定する際には実際の調査結果と突合せを行い適宜推定式の補正をする」等の対応をすることが望ましい。

例えば、鈴木らは、CPT 結果から Robertson の土質分類 Ic 値を用いて、国内地盤を対象とした地盤特性値の推定方法を提案しているが、国内の CPT 試験の実績が少ないことをあげており、今後のデータの蓄積により、推定式が修正されるものとしている。

これは、既存の文献による CPT の結果を用いた地盤特性の関係式は、限られたデータや特定の地盤条件下で導かれたものであり、個々の開発エリア及び風車地点での活用においては、SPT や室内試験等との比較により、その適用妥当性を確認する必要があることを示唆している。

(2) 実務における課題

調査対象地点の水深によっては、ボーリング台船（固定櫓）の設置が困難な場合もあり、調査船からの CPT しか実施できない状況が想定しうる。

加えて、調査用資機材の確保や工期短縮等の経済性、調査の安全性といった観点からは、調査船を使用した CPT やサンプリングによって地盤特性を把握することが有効である。

一方、CPT により得られた試験値から、設計用物性値の設定に至る換算方法や既往の推定式に対するキャリブレーションの考え方やその評価については、これまでの実績も少なく、具体的な方法が明確でないなどの課題がある。

物理性状や強度特性等の把握のための室内試験に必要な試料サンプリング手法についても、調査船を使用した場合の動揺対策やサンプリング時における管理基準等は明確でない。

(3) 提言事項

今後、様々な海域を対象に、多様な地質、地盤条件下での調査、設計が増えてくることが想定されるため、より柔軟かつ高度な調査、設計手法を整理していく事は、開発促進はもとより、事業の経済合理性や競争力を高めることにも繋がると想定される。

多様な調査、試験方法によって得られた地盤特性を設計に反映させるための研究や実証を行い、知見を蓄積し、学会レベルでの基準策定やガイドライン等を整理していく事は意義があると考えられる。

4.4 設計・認証基準の実態調査

4.4.1 概要

日本における設計、認証基準としては、「洋上風力発電設備に関する技術基準の統一的解説（令和2年3月版,洋上風力発電施設検討委員会）」（以下、統一的解説）が上位基準としての位置付けにある。しかし、「統一的解説」においては、すべての設計項目について詳細が記載されているわけではなく、引用する国内外基準に具体的な設計内容が記載されている場合もある。

実態調査に当たっては、まず「統一的解説」に引用されている国内外の基準類を下表のとおり整理した。次に、設計項目ごとに各基準における記載内容を確認した。例として、「地震荷重に対する設計」、「疲労荷重に対する設計」、「洗堀防止」に関する文献および記載内容を紹介する。

表 4.4.1.1 準拠基準（上位）

主な適用箇所	基準名
・設計全般	洋上風力発電設備に関する技術基準の統一的解説（令和2年3月版,洋上風力発電施設検討委員会） （以下、統一的解説）

表 4.4.1.2 準拠基準（下位：統一的解説で引用している基準）

No	文献名	設計項目
1	日本港湾協会（2018），港湾の施設の技術上の基準・同解説	地震時評価、荷重抵抗係数設計法、許容応力度設計法、モノパイル式基礎設計、ジャケット式基礎設計、重力式基礎設計、浮体式基礎設計、CPTによる地盤評価、洗堀防止対策
2	土木学会（2010），風力発電設備支持物構造設計指針・同解説	地震時の荷重評価、抵抗係数 γ_m 、許容応力度設計法、接合部設計、気象海象データ外挿手法、CPTによる地盤評価
3	土木学会（1973），海洋鋼構造物設計指針（案）解説	洗堀防止対策
6	国土交通省海事局安全政策課（2020），浮体式洋上風力発電施設技術基準	荷重抵抗係数設計法、許容応力度設計法、浮体式基礎設計、防食設計
7	国土交通省港湾局（2015），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）	洗堀防止対策

8	日本規格協会 (2017), JIS C1400-1: 風車—第 1 部: 設計要件	疲労設計法、抵抗係数 γ_m 、気象海象データ外挿手法
9	日本規格協会 (2014), JIS C 1400-3: 風車—第 3 部: 洋上風車の設計要件	荷重抵抗係数設計法、疲労設計法、抵抗係数 γ_m 、タワー設計、付属設備設計、防食設計、気象海象データ外挿手法、氷荷重評価
10	International Electrotechnical Commission (2019), IEC 61400-1 “Wind energy generation systems - Part 1: Design requirements”	荷重係数 γ_f 、抵抗係数 γ_m 、熱帯低気圧考慮
11	International Electrotechnical Commission (2019), IEC TS 61400-3-2 Wind energy generation systems: Part 3-2 Design requirements for floating offshore wind turbines	荷重抵抗係数設計法、許容応力度設計法、浮体式基礎設計、熱帯低気圧考慮
12	Patrik Passon・Kim Branner Larsen・Søren Ejling Larsen・Jørgen Hvenekær Rasmussen(2015), Offshore Wind Turbine Foundation Design, DTU Wind Energy	地震時の荷重評価
13	Marc Seidel・M Von Mutius・Dirk Steudel(2004), Design and load calculations for offshore foundations of a 5MW turbine, Conderence Proceedings DEWEK 2004, DEWI 2004	地震時の荷重評価
14	DNV (2014), DNV-OS-J101 Design of offshore wind turbine structures	タワー設計
15	DNVGL (2016), DNVGL-RP-C203 Fatigue design of offshore steel structures	疲労設計法
16	DNVGL (2018), DNVGL-ST-0119 “Floating wind turbine structures”	浮体式基礎設計
17	DNVGL (2016), DNVGL-ST-0126 Support structures for wind turbines	接合部設計、抵抗係数 γ_m 、洗堀防止対策
18	DNVGL (2016), DNVGL-RP-0360 Subsea power cables in shallow water	付属設備設計
19	Germanischer Lloyd (2010) , GL Guideline for the certification of wind turbines	疲労設計法、モノパイル式基礎設計
20	Germanischer Lloyd (2012), Rules and guidelines IV Industrial Services Guideline for the certificate of offshore wind turbines	タワー設計
21	American Petroleum Institute (2011), API-RP-2GEO Geotechnical and Foundation Design Considerations 1st Edition	モノパイル式基礎設計、CPTによる地盤評価
22	American Petroleum Institute (2014), API-RP2A-WSD Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platforms - Working Stress Design 22nd Edition	モノパイル式基礎設計

23	International Organization for Standardization (2013), ISO 19901-7:2013 “Petroleum and natural gas industries – Specific requirements for offshore structures – Part 7:Stationkeeping systems for floating offshore structures and mobile offshore units”	浮体式基礎設計
24	International Organization for Standardization (2007), ISO 12944 Paints and varnishes— Corrosion protection of steel structures by protective paint systems — Part 5: Protective paint systems	防食設計
25	International Organization for Standardization (2007), ISO 19902 Petroleum and natural gas industries — Fixed steel offshore structures	疲労設計法、抵抗係数 γ_m
26	International Organization for Standardization (2006), ISO 19903 Petroleum and natural gas industries — Fixed concrete offshore structures	疲労設計法
27	EUROCODES (2004), Eurocode 7: Geotechnical design - Part 1: General rules	抵抗係数 γ_m
29	日本海事協会 (2012), 浮体式洋上風力発電設備に関するガイドライン	浮体式基礎設計
30	日本建築学会 (2005), 鋼構造設計規準	接合部設計
32	日本建築学会 (2001), 建築基礎構造設計指針	接合部設計
	NEDO(2018), 着床式洋上風力発電導入ガイドブック	モノパイル式基礎設計、ジャケット式基礎設計、接合部設計
	NEDO (2018), 浮体式洋上風力発電技術ガイドブック	浮体式基礎設計
	石原 孟・石井 秀和(2010), 風車タワーに作用する発電時最大風荷重の予測、第 21 回風工学シンポジウム論文集	気象海象データ外挿手法
	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	モノパイル式基礎設計
	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	モノパイル式基礎設計

4.4.2 文献リストと要点

4.4.2.1 地震荷重に対する設計

(1) 設計項目の調査

設計項目「地震荷重に対する設計」に関する基準、文献における設計内容を調査した。

(2) 設計項目「地震荷重に対する設計」の調査（文献 No. 1～5）

上位基準である「洋上風力発電設備に関する技術基準の統一的解説」および引用する文献類から設計内容を調査した。

表 4.4.2.1-1 調査文献リスト

No.	タイトル	著者	発行年月
1	洋上風力発電設備に関する技術基準の統一的解説	洋上風力発電施設検討委員会	2020年3月
2	風力発電設備支持物構造設計指針・同解説	土木学会	2010年
3	港湾の施設の技術上の基準・同解説	日本港湾協会	2018年
4	浮体式洋上風力発電施設技術基準	国土交通省海事局安全政策課	2020年
5	Offshore Wind Turbine Foundation Design, DTU Wind Energy	Patrik Passon ・ Kim Branner Larsen ・ Søren Ejling Larsen ・ Jørgen Hvenekær Rasmussen	2015年

表 4.4.2.2① 調査文献の要点

No.	タイトル	著者	発行年月
1	洋上風力発電設備に関する技術基準の統一的解説	洋上風力発電施設検討委員会	令和2年3月
出典	洋上風力発電施設検討委員会, 経済産業省 HP, https://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/shingikai/yojo_furyoku/20200327_01.pdf (参照 2026/01/05)		
要点	<p>構造解析におけるモデルは、支持構造物の動的特性及び海洋環境条件が風車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、タワー及び風車からなる構造をモデル化することを基本とする。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・風の荷重効果を足し合わせる解法による求めることが示されている。</p> <p>(解析モデル) pp.139-142</p> <p>第4章 洋上風力発電設備等の設計</p> <p>4.1 構造解析</p> <p>4.1.1 風及び波を考慮するモデル</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>(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。</p> <p>(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。</p> </div> <p>【解説】</p> <p>(1) 解析モデル</p> <p>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次元部品組みモデル・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。</p> <p>着床式洋上風力発電設備の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。</p> <ol style="list-style-type: none"> 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変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(スウェーイ・ロッキングモデル)により地盤剛性を考慮することができる。 		

(一体モデルの例) ※に基づく

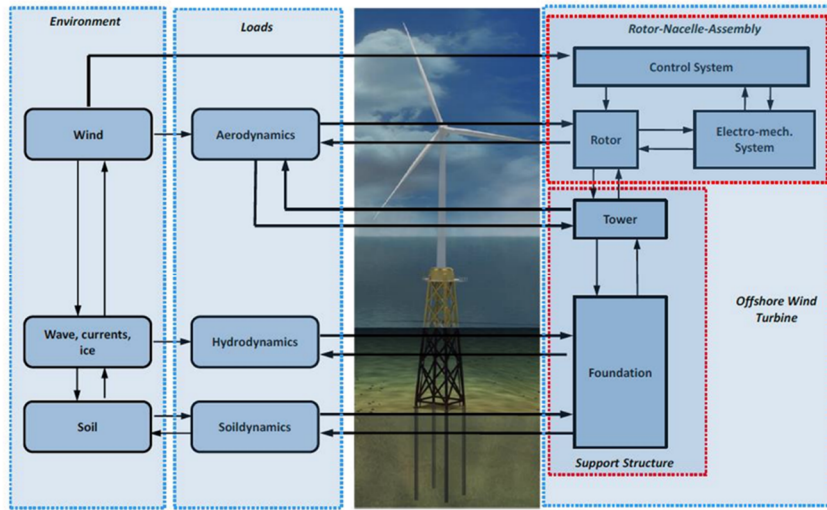


図-解 4.1.1 一体モデルの例¹⁾

(下部構造側を等価な特性行列で置き換える場合：等価分離解法)

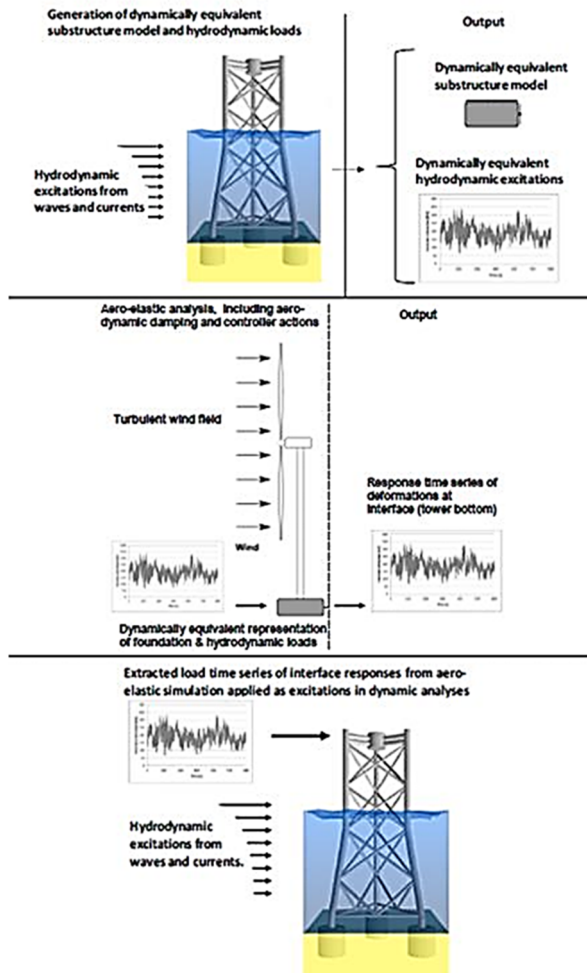


図-解 4.1.2 等価分離解法によるステップ(下部構造側を等価な特性行列で置き換える場合)¹⁾

(下部構造以下を等価な代替構造に置き換える例)

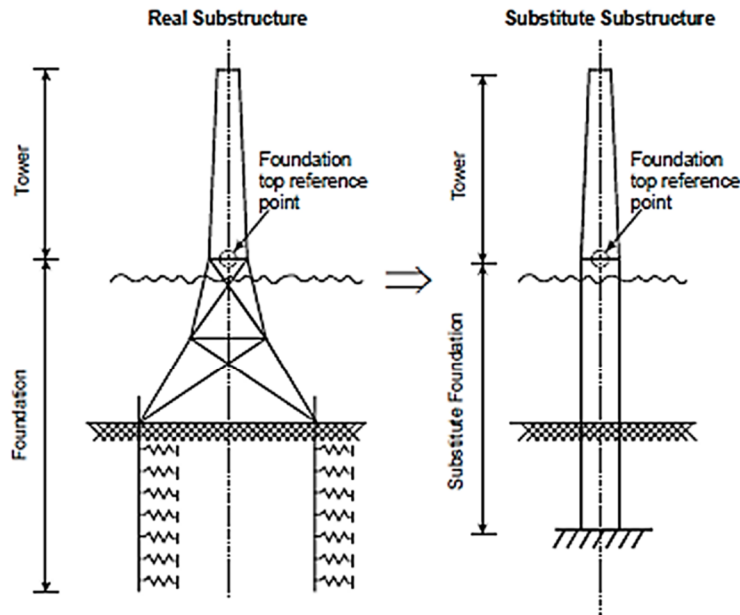


Fig. 3: Creation of the substitute model

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²⁾

(地震時の荷重評価) p.143

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。なお、地震時の荷重係数については、4.2.2 荷重係数 γ_r (2) 荷重係数の設定に示すとおり 1.0 とする。
- 2) 地震時に組み合わせる波・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³⁾や風力発電設備支持物構造設計指針・同解説⁴⁾により求めることができる。2) の地震時の風の荷重効果については、3.1 節「風荷重」(3) 時刻歴応答解析の風モデルを参照のこと。

参考文献

- 1) Patrik Passon・Kim Branner Larsen・Søren Ejling Larsen・Jørgen Hvenekær Rasmussen, Offshore Wind Turbine Foundation Design, 2015, DTU Wind Energy
- 2) Marc Seidel・M Von Mutius・Dirk Steudel, Design and load calculations for offshore foundations of a 5MW turbine, Conderence Proceedings DEWEK, 2004, DEWI 2004

表 4.4.2.2② 調査文献の要点

No.	タイトル	著者	発行年月
2	風力発電設備支持物構造設計 指針・同解説	土木学会	2010年
出典	土木学会, 構造工学委員会, 風力発電設備耐風設計小委員会 編		
要点	<p>第5章に地震時の荷重評価について示されており、地盤の影響を考慮した時刻歴応答解析手法を用いることが説明されている。入力地震動は目標スペクトルに適合させた模擬地震動、観測地震波、サイト波となる。</p> <p>(第5章の目次)</p> <div style="border: 1px solid gray; padding: 5px;"> <p>第5章 地震荷重の評価</p> <p>5.1 地震荷重の評価の基本 151</p> <p>5.1.1 基本的な考え方 151</p> <p>5.1.2 時刻歴応答解析による地震荷重評価の手順 152</p> <p>5.2 工学的基盤面における地震動と地震地域係数 154</p> <p>5.2.1 工学的基盤面における水平地震動 154</p> <p>5.2.2 工学的基盤面における上下地震動 154</p> <p>5.2.3 地震地域係数 155</p> <p>5.3 入力地震動の評価 156</p> <p>5.3.1 基本的な考え方 156</p> <p>5.3.2 スペクトル適合波 157</p> <p>5.3.3 観測地震波 162</p> <p>5.3.4 サイト波 163</p> <p>5.3.5 表層地盤による増幅 163</p> <p>5.4 時刻歴応答解析による地震荷重の評価 171</p> <p>5.4.1 風車タワー・基礎・地盤のモデル化 171</p> <p>5.4.2 直接基礎用の地盤ばねの評価 174</p> <p>5.4.3 杭基礎用の地盤ばねと減衰係数の設定 178</p> <p>5.4.4 固有値解析 187</p> <p>5.4.5 応答解析 189</p> <p>5.4.6 地下震度の算定 191</p> <p>5.4.7 杭応答の評価 191</p> <p>5.5 付加的な荷重効果 194</p> <p>5.5.1 P-Δ効果 194</p> <p>5.5.2 ねじれの影響 195</p> <p>5.5.3 上下動の影響 196</p> <p>5.5.4 荷重の組み合わせ 197</p> </div>		

(工学的基盤面における地震動、上：水平 下：鉛直)

※指針では 50 年再現期間の基本最大加速度を 160gal、500 年再現期間のそれを 320gal としており、レベル 2 は平成 12 年建設省告示に定められた「極めて稀に発生する地震動」である。

5.2.1 工学的基盤面における水平地震動

工学的基盤における水平動の加速度応答スペクトルは、次式により定める。

$$S_{a0}(T, 0.05) = \begin{cases} a_0(1+9.375T) & (T \leq 0.16) \\ 2.5a_0 & (0.16 < T < 0.64) \\ 1.6a_0/T & (T \geq 0.64) \end{cases} \quad (5.1)$$

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/s²), 減衰比 5%

a_0 : 工学的基盤面での基本最大加速度
レベル 1 地震動 : 160cm/s² (160gal), レベル 2 地震動 : 320cm/s² (320gal)

T : 周期 (s)

風車建設地点における工学的基盤の加速度応答スペクトルは、式(5.1)に地震地域係数を乗じた値とすることができる。

5.2.2 工学的基盤面における上下地震動

工学的基盤における上下動の加速度応答スペクトルは、図5.1に示す比率を5.2.1項に示す水平動の加速度応答スペクトルに乗じて求めるか、または次式により定めた加速度応答スペクトルを用いる。

$$S_{av}(T, 0.05) = \begin{cases} a_0(1+9.375T) \times 20/31 & (T < 0.1) \\ 2.5a_0 \times 1/2 & (0.1 \leq T < 0.64) \\ 1.6a_0/T \times 1/2 & (T \geq 0.64) \end{cases} \quad (5.2)$$

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/s²), 減衰比 5%

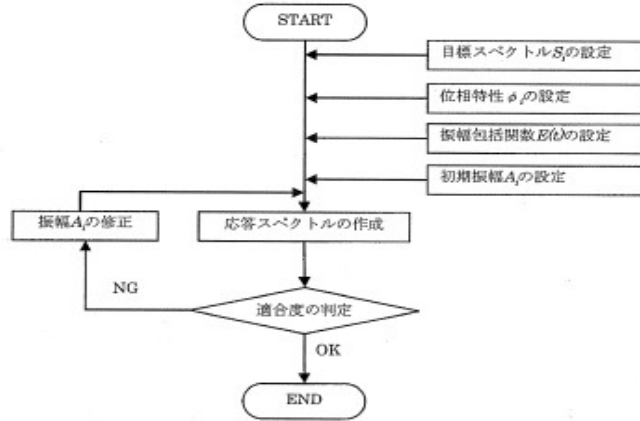
a_0 : 工学的基盤面での基本最大加速度
レベル 1 地震動 : 160cm/s² (160gal), レベル 2 地震動 : 320cm/s² (320gal)

T : 周期 (s)

(模擬地震波の作成フロー)

(1) 目標スペクトル

模擬地震波の作成フローを図解 5.5 に示す。目標スペクトルは 5.2.1 項に定めた加速度応答スペクトルを用いる。



図解 5.5 模擬地震波の作成フロー

(2) 位相

位相特性については 3 波以上検討する必要がある。海洋型、直下型地震、代表的大地震の観測波の位相または乱数位相を用いることが望ましい。ここでは、継続時間が長く繰り返し回数の多い海洋型の代表的

(既往観測波の最大加速度と最大速度)

※設計用水平地震動として過去における代表的な観測地震波を 3 波以上、適用する。

表解 5.1 既往観測波の最大加速度と最大速度

地震波	継続時間 (s)	既往観測波		規準化した地震動 (レベル 1/レベル 2)	
		最大加速度 A_m (m/s^2)	最大速度 V_m (m/s)	最大加速度 A_r (m/s^2)	最大速度 V_r (m/s)
EL CENTRO 1940(NS)	53	3.417	0.335	2.55/5.10	0.25/0.50
EL CENTRO 1940(EW)	53	2.101	0.369	1.42/2.85	0.25/0.50
TAFT 1952(NS)	54	1.527	0.157	2.43/4.86	0.25/0.50
TAFT 1952(EW)	54	1.759	0.177	2.48/4.97	0.25/0.50
八戸 1968(NS)	51	2.296	0.344	1.67/3.34	0.25/0.50
八戸 1968(EW)	51	1.802	0.378	1.19/2.38	0.25/0.50
東北 1978(NS)	40	2.581	0.362	1.78/3.56	0.25/0.50
東北 1978(EW)	40	2.034	0.276	1.84/3.68	0.25/0.50

注) 最大加速度の規準化の方法は $A_r = A_m V_r / V_m$ とした。最大加速度の規準化した地震動欄の左項はレベル 1, 右項はレベル 2 の値を示す。

表 4.4.2.2③ 調査文献の要点

No.	タイトル	著者	発行年月
3	港湾の施設の技術上の基準・同解説	日本港湾協会	2018年
出典	国土交通省港湾局 監修, 港湾の施設の技術上の基準・同解説検討委員会 編集		
要点	<p>第6章に地震について示されており、サイト特性、時刻歴波形など条件設定に關することが説明されている。入力地震動はレベル1、レベル2地震動となる。</p> <p>(上巻 p.363 抜粋)</p> <p>第6章 地震</p> <p>[告示] (地震動)</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>第十六条 レベル一地震動については、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ものとする。</p> <p>2 レベル二地震動については、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ものとする。</p> </div> <p>(解釈)</p> <div style="border: 1px dashed black; padding: 5px;"> <p>7. 自然状況等の設定</p> <p>(6) 地震に関する事項 (基準省令第6条、基準告示第16、17条関係の解釈)</p> <p>①地震動を設定する深度</p> <p>レベル1地震動及びレベル2地震動の時刻歴波形を設定する深度を②で定める工学的基盤とすることを標準とする。なお、技術基準対象施設の性能照査において工学的基盤以外の深度における地震動の設定が必要な場合には、一次元の地震応答計算等の方法により工学的基盤における地震動に基づいた当該深度における地震動を設定する。</p> <p>②工学的基盤</p> <p>工学的基盤は、それよりも下方にある全ての土層が以下のいずれかである土層の上面とする。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・岩盤 ・標準貫入試験値 (N 値) が50以上の砂質土層 ・一軸圧縮強さが650 [kN/m²] 以上の粘性土層 ・せん断波 (S波) 速度が300 [m/s] 以上の土層 <p>③サイト特性</p> <p>サイト特性の設定に当たっては、対象の区域内及びその周辺地域における地震動の実測値を適切に考慮する必要がある。</p> <p>④時刻歴波形</p> <p>技術基準対象施設の性能照査に当たっては、必要に応じて、レベル1地震動及びレベル2地震動を、地震動の実測値に基づき、当該施設を設置する地点の地盤の特性を考慮して、工学的基盤における加速度、速度、又は変位の時刻歴波形として適切に設定する。</p> </div>		

表 4.4.2.2④ 調査文献の要点

No.	タイトル	著者	発行年月
4	浮体式洋上風力発電施設技術基準	国土交通省海事局安全政策課	2020年
出典	国土交通省海事局安全政策課, https://www.mlit.go.jp/common/001331375.pdf (参照 2026/01/05)		
要点	<p>4-1 に説明があり、地震は過去発生した最大レベルを考慮し、同時に通常状態の風、波等の環境荷重を考慮することが記載されている。</p> <p>(原文抜粋)</p> <p>4-1. 地震</p> <p>(1) 地震の影響について適切に考慮すること。地震は、設置海域周辺において過去発生した最大レベルのものを考慮しなければならない。</p> <p>(2) 津波の影響について適切に考慮すること。津波は、設置海域周辺において過去発生した最大津波を考慮しなければならない。ただし、水深が十分深い場合は、津波による影響は、潮位変動及び海流として差し支えない。</p> <p>(3) 地震及び津波を考慮する際の風、波等の環境荷重は通常状態のものとして差し支えない。</p> <p>(4) 地震が生じた場合の地盤の液状化について考慮しなければならない。</p>		

表 4.4.2.2⑤ 調査文献の要点

No.	タイトル	著者	発行年月
5	Offshore Wind Turbine Foundation Design, DTU Wind Energy	Patrik Passon ・ Kim Branner Larsen ・ Søren Ejling Larsen ・ Jørgen Hvenekær Rasmussen	2015 年
出典	DTU Orbit, https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/122903957/Offshore_Wind_Turbine_Foundation_Design.pdf (参照 2026/01/05)		
	<p>3 章に地震動の荷重評価について記載されており、荷重評価は、基礎設計者と風車メーカーが一緒になり、個々のステップを逐次計算によってシミュレーションすることとなっており、その行程は以下の 3 ステップから成る。</p> <ol style="list-style-type: none"> ① 基礎設計者は海洋構造物（基礎構造）と流体力学荷重（波荷重）をモデル化し、波・海流などの荷重を作用させ、動的に同等となる下部構造モデルおよびその応答を出力。 ② ①の下部構造モデルに空力弾性を考慮した風車機器を組み合わせ、①の振動結果を入力し、タワー下部での応答を出力。 ③ ②で得られた応答を①のモデルに作用させることで、基礎構造への設計荷重を出力。 <p>なお、①及び②の荷重を同期させる方法も紹介されている。</p> <p>(基礎構造と風車機器を統合させた解析モデルの概要)</p> <p>Figure 14: Integrated OWT model in LACflex with foundation and loads from ROSA.</p>		

(荷重計算手法)

Load Calculation Approaches

Chapter 3

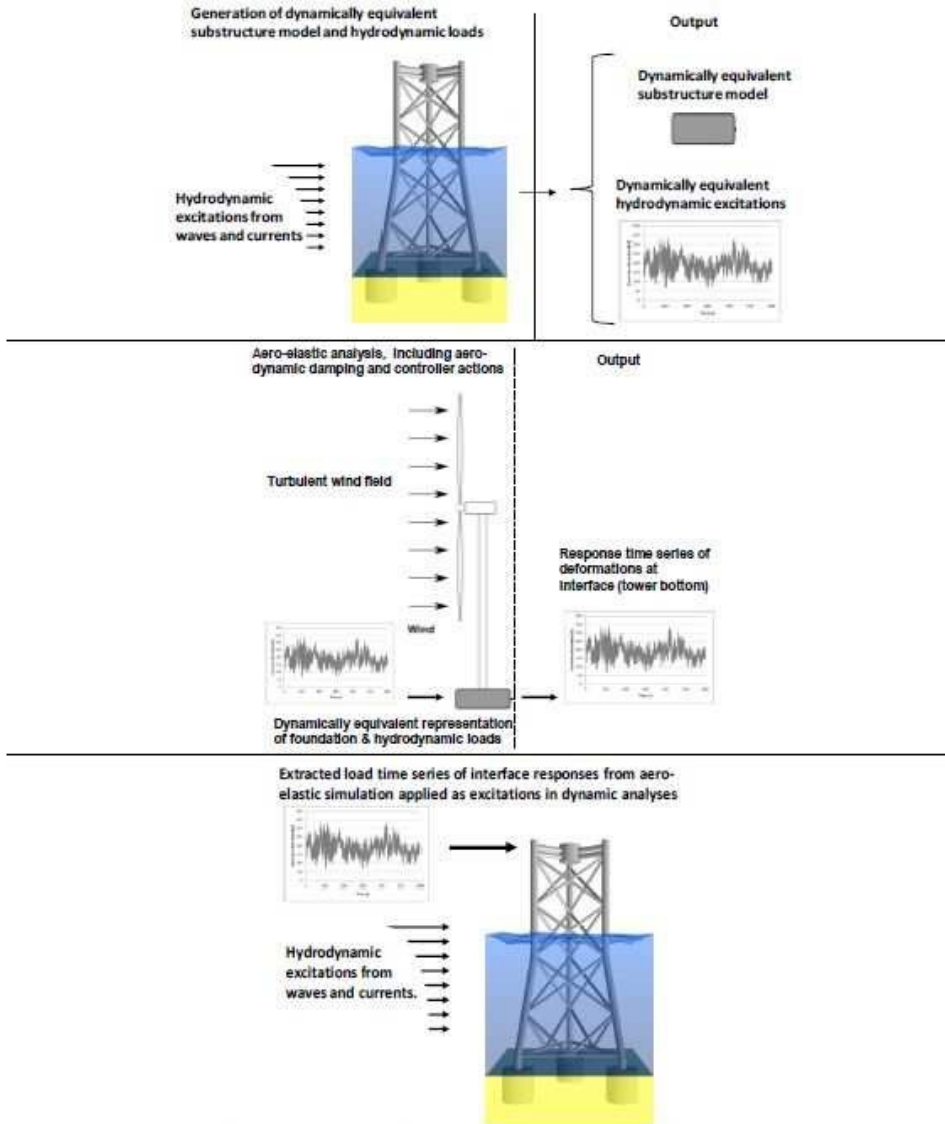


Figure 16: Subsequent steps in the sequentially integrated load calculation approach.

4.4.2.2 疲労荷重に対する設計

(1)設計項目の調査

設計項目「疲労荷重に対する設計」に関係する基準、文献における設計内容を調査した。

(2)設計項目「疲労荷重に対する設計」の調査（文献 No. 1～6）

上位基準である「洋上風力発電設備に関する技術基準の統一的解説」および引用する文献類から設計内容を調査した。

表 4.4.2.2-1 調査文献リスト

No.	タイトル	著者	発行年月
1	洋上風力発電設備に関する技術基準の統一的解説	洋上風力発電施設検討委員会	2020年3月
2	Rules and guidelines, IV Industrial Services, 1 Guideline for the certificate of offshore wind	Germanischer Lloyd	2012年
3	ISO 19902 Petroleum and natural gas industries — Fixed steel offshore structures	ISO	2007年
4	DNVGL-RP-C203 Fatigue design of offshore steel structures	DNV	2016年
5	DNV-OS-J101 Design of Offshore Wind Turbine Structures	DNV	2014年
6	JIS C1400-1: 風力発電システムー第1部：設計要件	日本規格協会	2017年

表 4.4.2.2 ① 調査文献の要点

No.	タイトル	著者	発行年月
1	洋上風力発電設備に関する技術基準の統一的解説	洋上風力発電施設検討委員会	令和2年3月
出典	洋上風力発電施設検討委員会, 経済産業省 HP, https://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/shingikai/yojo_furyoku/20200327_01.pdf (参照 2026/01/05)		
要点	<p>4.4 タワーの設計において疲労照査が解説されており、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、JIS C 1400-3 に記載されたガイドラインが紹介されている。</p> <p>(原文) タワーの設計 p.152</p> <p>4.4 タワーの設計</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>(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。</p> <p>(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。</p> <p>(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。</p> <p>(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。</p> <p>(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。</p> <p>(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。</p> </div> <p>【解説】</p> <p>(6) 疲労照査</p> <p>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 C 1400-3¹⁾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。</p> <p>a) Rules and guidelines IV Industrial Services Guideline for the certificate of offshore wind turbines²⁾</p> <p>b) DNV-OS-J101 Design of Offshore Wind Turbine Structures³⁾</p> <p>また、タワーの設計耐力は、JIS C 1400-1⁴⁾の 7.6.3 によって求めることができる。</p> <p>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 8 に示す。</p> <p>参考文献</p> <p>1) 日本規格協会, JIS C1400-3, 2014, 風車—第 3 部: 洋上風車の設計要件</p> <p>2) Germanischer Lloyd, Rules and guidelines IV Industrial Services Guideline for the certificate of offshore wind turbines, 2012</p> <p>3) DNV, DNV-OS-J101, 2004, Design of Offshore Wind Turbine Structures</p> <p>4) 日本規格協会, JIS C1400-1, 2017, 風車—第 1 部: 設計要件</p>		

表 4.4.2.2 ② 調査文献の要点

No.	タイトル	著者	発行年月																		
2	Rules and guidelines, IV Industrial Services, 2 Guideline for the Certification of Offshore Wind Turbines	Germanischer Lloyd Industrial Services GmbH	2012 年																		
出典																					
要点	<p>材料特性に部分安全係数を考慮することとなっており、疲労解析の場合は、コンクリートで 1.5 と示されている。</p> <p>(部分安全係数) pp.5-19</p> <p>5.4.1.2 Partial safety factors γ_M</p> <p>The design resistance shall be determined with due consideration of the partial safety factors γ_M according to Table 5.4.1. For calculations of deformations within the scope of second order theory for towers made of reinforced and prestressed concrete, $\gamma_M = 1.2$ may be assumed for the modulus of elasticity of concrete.</p> <p>Table 5.4.1 Partial safety factors for the material γ_M</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Material</th> <th colspan="2">Ultimate limit state</th> <th rowspan="2">Serviceability limit state</th> </tr> <tr> <th>Fracture and stability failure</th> <th>Fatigue</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Concrete</td> <td>1.5¹ (1.2)²</td> <td>1.5</td> <td>1.0</td> </tr> <tr> <td>Spun concrete</td> <td>1.4¹ (1.2)²</td> <td>1.4</td> <td>1.0</td> </tr> <tr> <td>Reinforcing and prestressing steel</td> <td>1.15¹</td> <td>1.15</td> <td>1.0</td> </tr> </tbody> </table> <p>¹ For unusual design situations, e.g. earthquake calculations, $\gamma_M = 1.3$ can be set for concrete and spun concrete and $\gamma_M = 1.0$ for reinforcing steel and prestressing steel.</p> <p>² For the calculation of deformations when taking account of non-linearities of the geometry and/or the material, $\gamma_M = 1.2$ may be taken (value in brackets).</p> <p>³ For precast concrete elements, a reduction of the partial safety factor for concrete γ_M is allowable if this reduction is given in the recognized design code used (EC 2 or DIN 1045-1). In this case, the conditions of the code for the reduction shall be fulfilled. Required measures shall be specified in consultation with GL. Mixing of the two codes is not permitted.</p> <p>(疲労解析) pp.5-21</p> <p>5.4.2.2 Fatigue analysis</p> <p>(1) For components of reinforced concrete or prestressed concrete, detailed fatigue analysis shall be provided for the concrete, the reinforcing steel and the prestressing steel with the loads of group F. The verification shall be performed by means of load spectra and corresponding mean values or Markov matrices. CEB-FIP Model Code 1990 [5.5 a/b], Section 6.7.4 and 6.7.5, or equivalent shall be applied for fatigue verification.</p>			Material	Ultimate limit state		Serviceability limit state	Fracture and stability failure	Fatigue	Concrete	1.5 ¹ (1.2) ²	1.5	1.0	Spun concrete	1.4 ¹ (1.2) ²	1.4	1.0	Reinforcing and prestressing steel	1.15 ¹	1.15	1.0
Material	Ultimate limit state		Serviceability limit state																		
	Fracture and stability failure	Fatigue																			
Concrete	1.5 ¹ (1.2) ²	1.5	1.0																		
Spun concrete	1.4 ¹ (1.2) ²	1.4	1.0																		
Reinforcing and prestressing steel	1.15 ¹	1.15	1.0																		

表 4.4.2.2 ③ 調査文献の要点

No.	タイトル	著者	発行年月
3	ISO 19902 Petroleum and natural gas industries — Fixed steel offshore structures	ISO	2007 年
出典	日本船舶技術研究協会 HP, https://www.jstra.jp/html/PDF/ISO_19902_2007.pdf (参照 2026/01/05)		
要点	<p>16 章に鋼製海洋構造物について疲労限界状態を満足することを検証する方法が示されている。</p> <p>(16 章) pp.155-156</p> <p>16 Fatigue</p> <p>16.1 General</p> <p>16.1.1 Applicability</p> <p>Clause 16 presents general considerations and methods for verifying that fixed steel offshore structures satisfy the fatigue limit state (FLS) at all locations in the structure during their entire life, from fabrication via the in-place situation to the removal of the structure.</p> <p>16.1.2 The fatigue process</p> <p>Fatigue refers to the cumulative damage done by repeated application of time-varying stresses at a specific location in the structure. These time-varying stresses are caused by variable actions, especially, but not exclusively, due to wave action. For general reference, a brief overview of the fatigue process is given in A.16.1.2.</p> <p>16.1.3 Fatigue assessment by analysis using $S-N$ data</p> <p>Normally, during design a fatigue assessment is performed by analysis using $S-N$ data. The following major aspects for determining fatigue damage due to wave action are addressed in Clause 16:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) general requirements for a fatigue assessment (see 16.2); b) a description of the long-term wave environment during the design service life (see 16.3); c) a description of particular aspects of the stress analyses needed for a fatigue assessment (see 16.4); d) the characterization of the stress range data governing fatigue (see 16.5); e) the long-term local stress range history (see 16.6 to 16.9); f) the geometric stress range concept, including stress concentration factors (see 16.10); g) the fatigue resistance of the material (see 16.11); h) the fatigue damage assessment during a period of exposure (see 16.12). <p>Points e) to h) are specific to the particular location in the structure being considered and shall be repeated for all locations that are fatigue sensitive.</p> <p>The various aspects a) to h) are integral parts of a fatigue assessment and cannot be seen as independent elements. Despite the fact that they generally involve distinctly different technologies, which are often developed by different specialists, they shall be treated in an interrelated manner. This is essential in view of the large influence they can jointly have on the results obtained. Lack of appreciation of these interrelationships presents an inherent danger to any fatigue assessment. However, the various steps in the assessment are usually performed separately and in sequence; therefore it is most convenient to also discuss them separately.</p> <p>Clause 16 provides the fundamental requirements that shall be met to achieve reliable results. It leaves flexibility where possible or necessary to accommodate differences in the details of calculation procedures that are embodied in established practices or in computer programs that are used in the industry.</p> <p>The design assessment is concluded with some observations on fatigue damage due to causes other than wave action (16.13) and some practical design considerations (16.14).</p>		

表 4.4.2.2 ④ 調査文献の要点

No.	タイトル	著者	発行年月
4	DNVGL-RP-C203 Fatigue design of offshore steel structures	DNV	2016年
出典			
要点	<p>本文献では疲労解析について全般のことが記載されており、本文献の内容として最初に以下のことが示されている。</p> <p>疲労解析は、検討した溶接部の疲労試験および線形損傷仮定により求めた S-N データに基づいて行う必要があり、大規模構造物の正確な調査や破壊力学的解析を実施することも検討すべきである。</p> <p>長期的な応力範囲の分布は、決定論的解析またはスペクトル解析により求めることができる。</p> <p>動的な影響は応力範囲履歴を長期的に検討するとともに、そのうち、最も疲労に大きく寄与する部分の損傷は最も慎重に評価されるべきである。</p> <p>なお、ワイブル分布の形状パラメータは、疲労損傷予測に与える影響が大きい ため、安全側に設定する必要がある。</p> <p>(原文) pp.7-8</p> <p>1.3 Methods for fatigue analysis</p> <p>The fatigue analysis should be based on S-N data, determined by fatigue testing of the considered welded detail, and the linear damage hypothesis. When appropriate, the fatigue analysis may alternatively be based on fracture mechanics. If the fatigue life estimate based on S-N data is short for a component where a failure may lead to severe consequences, a more accurate investigation considering a larger portion of the structure, or a fracture mechanics analysis, should be performed. For calculations based on fracture mechanics, it should be documented that there is a sufficient time interval between time of crack detection during in-service inspection and the time of unstable fracture.</p> <p>All significant stress ranges, which contribute to fatigue damage, should be considered. The long term distribution of stress ranges may be found by deterministic or spectral analysis, see also ref. /1/. Dynamic effects shall be duly accounted for when establishing the stress history. A fatigue analysis may be based on an expected stress history, which can be defined as expected number of cycles at each stress range level during the predicted life span. A practical application of this is to establish a long term stress range history that is on the safe side. The part of the stress range history contributing most significantly to the fatigue damage should be most carefully evaluated. See also App.D, Commentary, for guidance.</p> <p>It should be noted that the shape parameter h in the Weibull distribution has a significant impact on calculated fatigue damage. For effect of the shape parameter on fatigue damage see also design charts in Figure 5-1 and Figure 5-2. Thus, when the fatigue damage is calculated based on closed form solutions with an assumption of a Weibull long term stress range distribution, a shape parameter to the safe side should be used.</p>		

表 4.4.2.2 ⑤ 調査文献の要点

No.	タイトル	著者	発行年月
5	DNV-OS-J101 Design of Offshore Wind Turbine Structures	DNV	2014 年
出典			
要点	<p>7.10 に疲労限界状態に対する設計の要求事項として、</p> <ul style="list-style-type: none"> • S-N カーブ • 応力範囲分布 • 特性累積ダメージおよび設計累積ダメージ • 設計疲労度係数が示されている。 <p>(S-N カーブ) p.129</p> $\log_{10} N = \log_{10} a - m \log_{10} \left(\Delta\sigma \left(\frac{t}{t_{ref}} \right)^k \right)$ <p>in which</p> <p>N = fatigue life, i.e. number of stress cycles to failure at stress range $\Delta\sigma$ $\Delta\sigma$ = stress range in units of MPa m = negative slope of S-N curve on logN-logS plot $\log a$ = intercept of logN axis t_{ref} = reference thickness, $t_{ref} = 32$ mm for tubular joints, $t_{ref} = 25$ mm for welded connections other than tubular joints, such as girth welds t = thickness through which the potential fatigue crack will grow; $t = t_{ref}$ shall be used in expression when $t < t_{ref}$ k = thickness exponent, also known as scale exponent, see Table 7-14.</p> <p>The S-N curves for the most frequently used structural details in steel support structures for offshore wind turbines are given in Table 7-14. The use of the S-N curves in Table 7-14 is an option. They can be used when project-specific or manufacturer-specific data are not available for all ranges of applicability of S-N curves. Some of the S-N curves in Table 7-14 depend on the attachment length l, see Figure 7-9 for definition.</p> <p>(特性累積ダメージ (Miner の法則) および設計累積ダメージ (設計疲労度係数)) p.134</p> <p>When Miner's rule is used for prediction of linear cumulative damage, the characteristic cumulative damage D_C is calculated as</p> $D_C = \sum_{i=1}^I \frac{n_{C,i}}{N_{C,i}}$ <p>in which</p> <p>D_C = characteristic cumulative damage I = total number of stress range blocks in a sufficiently fine, chosen discretisation of the stress range axis $n_{C,i}$ = number of stress cycles in the ith stress block, interpreted from the characteristic long-term distribution of stress ranges $N_{C,i}$ = number of cycles to failure at stress range of the ith stress block, interpreted from the characteristic S-N curve</p> <p>---e-n-d---of---G-u-i-d-a-n-c-e---n-o-t-e---</p> <p>7.10.4.2 The design cumulative damage D_D is obtained by multiplying the characteristic cumulative damage D_C by the design fatigue factor DFF</p> $D_D = DFF \cdot D_C$		

8.海上コンクリート構造物の詳細設計において、疲労限界状態での設計は
DNV-OS-C502 Sec6M を参照とされている。 p.139

8.5 Fatigue limit state

8.5.1 General

Fatigue design shall be carried out in accordance with DNV-OS-C502 Sec.6M. If structures are not planned to be inspected the cumulative fatigue damage shall be limited to 0.33.

9.グラウト接合部の設計と施工においても、接合部のせん断キーの有無などの
形状にあわせた疲労設計が紹介されている。 p.161

9.3 Fatigue limit states

9.3.1 Conical grouted connections in monopiles without shear keys

9.3.1.1 All stress fluctuations imposed during the design life of the grouted connection and which are significant with respect to fatigue evaluation shall be taken into account when the long term distribution of stress ranges is determined.

表 4.4.2.2 ⑥ 調査文献の要点

No.	タイトル	著者	発行年月
6	JIS C1400-1: 風力発電システムー第1部: 設計要件	日本規格協会	2017年
出典			
要点	<p>疲労破壊について、適切な疲労破壊計算を用いて予測することが記載されており、疲労解析の定式化の例として Miner 則が示されている。</p> <p>(原文) p.35 (付属書 G Miner 則) pp.74-78</p> <p>7.6.3 疲労破壊解析</p> <p>疲労破壊は、適切な疲労破壊計算を用いて予測する。例えば、Miner 則の場合、累積損傷が1を超えたとき、限界状態に到達したとする。そのため、風車の設計寿命の範囲内での累積損傷は1以下である。疲労破壊計算は、サイクル範囲と平均ひずみ(又は応力)レベルとの両方の作用を加味して公式化を考える。全ての部分安全率(荷重、材料及び損傷結果)は、各疲労サイクルに関する損傷の増加を評価するために、各疲労サイクルひずみ(又は応力)の範囲に適用する。定式化の例は、付属書 G に Miner 則として示す。</p>		

表 4.4.2.2 ⑥ 調査文献の要点

No.	タイトル	著者	発行年月
6	JIS C1400-3: 風車—第3部： 洋上風車の設計要件	日本規格協会	2014年
出典			
要点	<p>疲労破壊について、設計耐力は ISO の海洋構造物設計規格又はその他の一般に認知された海洋設計規格に従って求めなければならないとあり、タワーの設計耐力については JIS C 1400-1 : 2010 の 7.6.3 によって求めてもよいとなっている。</p> <p>(原文) pp.43-44</p> <p>7.6.3 疲労破壊</p> <p>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他の一般に認知された海洋設計規格に従って求めなければならない。したがって、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公式は、上記の規格のものを用いなければならない。ただし、タワーの設計耐力については、JIS C 1400-1:2010 の 7.6.3 によって求めてもよい。疲労設計荷重ケース及び関連する荷重安全率については、この規格 (JIS C 1400-3) に規定する値を用いて、支持構造物を設計しなければならない。</p> <p>評価対象の支持構造物部品ごとに、かつ、疲労強度解析が要求される表 1 及び表 2 の荷重ケースごとに、マージンが最も少ない最も重要な限界状態について設計基準を検証しなければならない。</p>		

4.4.2.3 洗掘防止に関する設計

(1) 設計項目の調査

設計項目「洗掘防止」に係る基準、文献における設計内容を調査した。

(2) 設計項目「洗掘防止」の調査（文献 No. 1～3）

上位基準である「洋上風力発電設備に関する技術基準の統一的解説」および引用する文献類から設計内容を調査した。

表 4.4.2.3-1 調査文献リスト

No.	タイトル	著者	発行年月
1	洋上風力発電設備に関する技術基準の統一的解説	洋上風力発電施設検討委員会	2020年3月
2	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）	国土交通省 港湾局	2015年
3	DNVGL-ST-0126 Support structures for wind turbines	DNVGL	2016年

表 4.4.2.3 ① 調査文献の要点

No.	タイトル	著者	発行年月
1	洋上風力発電設備に関する技術基準の統一的解説	洋上風力発電施設検討委員会	2020年3月
出典	洋上風力発電施設検討委員会, 経済産業省 HP, https://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/shingikai/yojo_furyoku/20200327_01.pdf (参照 2026/01/05)		
要点	<p>3.6 に洗掘を適切に考慮することが記載されており、解説で現象として局所洗掘、広域洗掘が説明されている。また、洗掘範囲や深さを推定する参考方法として、DNVGL-ST-0126 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が挙げられている。</p> <p>(原文) 洗掘 p.121</p> <p>3.6 洗掘</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>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。</p> </div> <p>【解説】</p> <p>(1) 洗掘現象について</p> <p>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。</p> <ol style="list-style-type: none"> 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。 <p>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。埋設された海底ケーブルが洗掘により露出した場合、投錨等で破損することにより港湾の利用もしくは保全に支障を与えるため、注意が必要である。</p> <p>(2) 洗掘の対処方法について</p> <p>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-0126¹⁾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²⁾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-0126¹⁾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)³⁾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⁴⁾などを参考にできる。</p> <p>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を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。</p> <p>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。</p>		

表 4.4.2.3 ② 調査文献の要点

No	タイトル	著者	発行年月
2	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)	国土交通省 港湾局	2015年3月
出典	国土交通省港湾局, https://www.mlit.go.jp/common/001084179.pdf (参照 2026/01/05)		
要点	<p>洗掘防止対策についての記載はなく、洗掘発生の有無や洗掘量推定式について記述がある。</p> <p>(1)風車基礎の洗掘 (①波による直立壁前面の洗掘) p.55 下図に示す護岸前面の洗掘グラフを使用して堤脚部が洗掘型であるのか堆積型であるかの判定の参考にできる。</p> <p>①波による直立壁前面の洗掘 構造物前面の洗掘は波の反射率と密接な関係があることが知られており、矩形や台形ケーソン等の重力式基礎前面における洗掘量については、下図に示す護岸前面の洗掘グラフを使用して堤脚部が洗掘型であるのか堆積型であるかの判定の参考にできる。 この図において、K: 護岸の反射率、H_o/L_o: 波形勾配、d_{50}: 底質の中央粒径、α: 護岸の法面勾配 ($\alpha=90$度の時 直立堤)、l: 平衡断面時の波の遡上位置から護岸設置位置までの距離である。</p> <p>図. 参. 1 護岸堤脚部の洗掘・堆積の判定条件 出典: 「港湾技術基準 平成 19 年版」、p259</p>		

(② 流れによる円柱まわりの洗掘) p.55

下記に示す算定式により、流れによる円柱まわりの洗掘量を推定できる。

②流れによる円柱まわりの洗掘

Shen (1969) の流れによる洗掘量 Z の推定式は下記で示されている。

$$Z=1.4D \quad (D \leq 0.9\text{m})$$

$$Z=1.05 D^{0.75} \quad (D > 0.9\text{m})$$

ここにおいて、 Z : 洗掘深さ (m)

D : 流れに対する円柱の投影幅 (m)

出典 : 海洋鋼構造物設計指針 (案) 解説、土木学会 1973 年

(③ 波による円柱まわりの洗掘) p.55

Sumer (1992) の波による動的な最大洗掘量 S の推定式は下記で示され、この式は DNV のガイダンス (2014) にも掲載されている。

$$\frac{S}{D} = 1.3(1 - e^{-0.03(KC-6)}) \quad \text{for } KC > 6$$

ここにおいて、 S : 最大洗掘深さ (m)

D : 円柱基礎の径 (m)

KC : Keulegan-Carpenter 数で次式であらわされる。

$$KC = \frac{u_{\max} \cdot T}{D}, \quad u_{\max} = \frac{\pi \cdot H}{T \sinh(kh)}$$

ここにおいて、 u_{\max} : 海底における流速変化の最大値(m/s)

T : 波の周期(s)

H : 波高 (m)

h : 水深 (m)

k : 波数(次式で求められる)

$$\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 = g \cdot k \tanh(kh)$$

出典：“APPENDIX-J SCOUR AT A VERTICAL PILE”, DNV-OS-J101 Design of Offshore Wind Turbine Structures, 2014.5

波による円柱基礎まわりの洗掘量は図 参. 2 に示されるように KC 数が大きくなると洗掘深さ S は $1.3D$ に漸近していくことが示されている。ただし、実海域のモノポール基礎の実測値では、この 1.3 の値を超える $S/D=1.38$ ($S=5.8\text{m}$) の例 (Scorby Sands Offshore Wind Farm, 英国) が報告されており、設計においては余裕をもった設計洗掘量を設定しておく必要があると考えられる。

出典：“The nature of scour development and scour protection at offshore windfarm foundations”, Richard JS Whitehouse et al, Marine Pollution Bulletin, Vol62, 2011. 01.

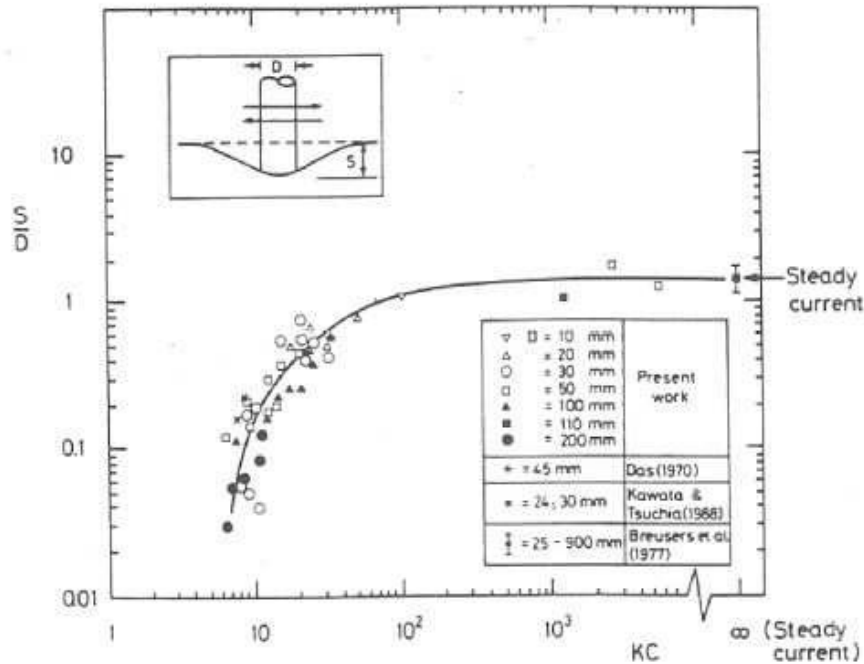


図. 参. 2 波による円柱基礎まわりの洗掘深さの推定式と実験値
 出典: "Scour and Scour Protection-Design of Maritime Structures", US Army Corps of Engineers

④ 洗掘発生限界) p.57

「流れ」と「波」による洗掘発生有無の判断について、以下の通り記載されている。

④洗掘発生限界

流れによる洗掘発生の有無は、岩垣公式「水理公式集 平成 11 年版」(土木学会 p.158) やシールズダイアグラム「水理公式集 平成 11 年版」(土木学会 p.158) を用いて判断することができる。また、波による洗掘発生の有無は、初期移動限界水深「水理公式集 平成 11 年版」(土木学会 p.514) や移動限界シールズ数「水理公式集 平成 11 年版」(土木学会 p.515) など判断することができる。ただし、上記の手法では構造物周りの渦による流速増加は考慮されていないことに注意する必要がある。

表 4.4.2.3 ③ 調査文献の要点

No.	タイトル	著者	発行年月
3	DNVGL-ST-0126 Support structures for wind turbines	DNVGL	2016 年
出典			
要点	<p>垂直杭における洗掘について、Keulegan-Carpenter number (KC) 係数に支配される、洗掘堀深度の推定式に加え、海底速度、そのせん断応力が示されている。また、洗掘の進展時間の推定式も示されている。</p> <p>(KC 係数) p.156</p> <p>D.3.1.6 In the case of waves, the horseshoe vortex and the lee-wake vortex form the two processes that govern the scour. These two processes are primarily governed by the Keulegan-Carpenter number, KC, which is defined by</p> $KC = \frac{u_m \cdot T_p}{D} \quad (D.3)$ <p>where T_p is the peak wave period, D is the cylinder diameter and $u_m = 1.41u_{rms}$. u_{rms} is the standard deviations of the velocity at the seabed.</p> <p>(洗掘深さの推定) p.157</p> <p>D.3.2.1 Unless data, e.g. from model tests, indicate otherwise, the following empirical expression for the equilibrium scour depth, S due to waves may be used:</p> $\frac{S}{D} = 1.3 \cdot \{1 - \exp[-0.03(KC - 6)]\} \quad KC \geq 6 \quad (D.4)$ <p>Caution must be exercised when using this expression, in particular for large-diameter cylinders such as monopiles. The expression is valid for live-bed conditions, i.e. for $\theta > \theta_{cr}$, in which the Shields parameter θ is defined below together with its critical threshold θ_{cr}.</p> <p>(潮流の海底速度) p.157</p> <p>D.3.2.5 For steady current the undisturbed bed shear velocity, U_{fc} is given by the Colebrook and White equation</p> $\frac{U_c}{U_{fc}} = 6.4 - 2.5 \cdot \ln \left(\frac{2.5 \cdot d}{h} + \frac{4.7 \cdot \nu}{h \cdot U_f} \right) \quad (D.5)$ <p>where ν equal to $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ is the kinematic viscosity. The bed shear is related to the bed shear velocity $\tau_c = \rho U_{fc}^2$ where ρ is the water density.</p>		

(波浪の海底速度) p.157

D.3.2.6 For waves, the maximum value of the undisturbed bed shear velocity is calculated by:

$$U_{fw} = \sqrt{\frac{f_w}{2}} \cdot u_m \quad (D.6)$$

where f_w is the coefficient of friction given by

$$f_w = \begin{cases} 0.04 \cdot (\alpha/k_N)^{-0.25} & \alpha/k_N > 100 \\ 0.04 \cdot (\alpha/k_N)^{-0.75} & \alpha/k_N < 100 \end{cases} \quad (D.7)$$

Here, α is the free stream amplitude, defined by

$$\alpha = \frac{u_m \cdot T}{2\pi} \quad (D.8)$$

and k_N is the bed roughness equal to $2.5 \cdot d_{50}$, where d_{50} denotes the median grain diameter in the particle size distribution of the seabed material. The bed shear is related to the bed shear velocity $\tau_w = \rho U_{fw}^2$.

(波浪と潮流が混在する場合の海底せん断応力) p.157

D.3.2.7 In combined waves and current the bed shear stress oscillates around a mean value, τ_m , and has maximum value, τ_{max} . The mean and maximum undisturbed combined bed shear stress is calculated as

$$\tau_{max} = \tau_c \left[1 + 1.2 \left(\frac{\tau_w}{\tau_c + \tau_w} \right)^{3.2} \right] \quad (D.9)$$

$$\rho U_{fw,max}^2 = \tau_{max} = \sqrt{(\tau_m + \tau_w \cos(\phi))^2 + \tau_w^2 \sin^2(\phi)} \quad (D.10)$$

where ϕ is the angle between wave and current direction.

(洗掘の進展予測) p.158

D.3.3 Time scale of scour

The time development of the scour depth, S , can be expressed as:

$$S_t = S(1 - \exp(-t/T_1)) \quad (D.11)$$

in which t denotes the time, and T_1 denotes the time scale of the scour process. The time scale T_1 of the scour process can be found from the non-dimensional time scale T^* through the following relationship

$$T^* = \frac{\sqrt{g(s-1)d^3}}{D^2} T_1 \quad (D.12)$$

where T^* is given by the empirical expressions:

$$T^* = \frac{1}{2000} \frac{h}{D} \theta^{-2.2} \quad \text{for steady current} \quad (D.13)$$

$$T^* = 10^{-6} \left(\frac{KC}{\theta} \right)^3 \quad \text{for waves} \quad (D.14)$$

It shall be noted that time scale for backfilling is slower than found by the above equations.

4.4.3 まとめ

一般海域における洋上風力の設計基準に関しては、国内外の他の法令等に準拠する事例が多いが、海外の基準を取り入れた事例では、必ずしも国内のものと同じではなく、統一的な考えのもとに導入されたものとはなっていない。その他、IEC 基準を元に設定されているものについては、必ずしも十分でない分野（地震等）も散見される。

実際の審査では、明確な審査基準が整備されておらず、例えば、基礎設計では、海外基準をベースに国内建築基準や港湾基準を、適宜取り入れているような形で進められているのが実態である。内容によっては、審査官の独自の考えを適用せざるを得ない場合もあり、各事業者が試行錯誤の状態が進められているのが現状である。

設計実務においては、国内の洋上風力の実例が乏しく、またその設計内容が公開されていないため、各事業者が個々の案件を手探りで設計を進めているのが実態である。例えば、土木学会、建築学会、DNV、IEC など多岐に渡る基準から、最も保守側となるパラメータや設計値を検討するといった対応が求められることがあるが、近年の風車大型化に伴い、風車支持構造物（タワー及び基礎）の構造成立性（特に極稀地震時）が厳しくなっており、設計自体が困難といった事例もある。また、事業者側の負担という面では、構造解析のモデルの妥当性検証や耐力側評価に用いる基準の選定など、精緻かつ高度に専門的な検討が必要となり、コストと許認可を得るまでの時間的な見通しを立てることが困難な場合もある。

以上の実態を踏まえ、統一的でかつ合理的な設計基準の策定はもとより、事業者の負担を軽減する意味でも、審査基準の明確化が特に重要であると考えられる。

4.5 遠隔監視による O&M 省力化

4.5.1 概要

洋上風力発電所は海洋の中に建設されるものであり、陸上風力に比べると発電所に近づくことは容易ではない。このため、運転・保守を確実に実施するためには遠隔監視技術の高度な利用が求められている。国のガイドブックや指針類にもその重要性は述べられているが、その一方で、国内での洋上風力発電所の運用実績は少なく、また同技術は関係企業が現在進行形で開発を進めていることもあり、公開された文献数は限られている。

今回の文献調査では、まずは、経済産業省、国土交通省、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の発行しているガイドブックや指針類を対象に、運転・保守に関する内容を調査した。次に、日本風力エネルギー学会の至近年の論文の中で、運転・保守に関係したものとして発表数が多かった「風車機器の異常検知技術」、「車設備の損傷点検技術」、「落雷検出技術」に関する論文を収集・整理した。調査した論文の多くは洋上風力に対象を限定したものではなく、むしろ陸上風車用に開発された技術であったため、NEDO の成果報告書の中から、洋上風力にこだわらず参考となると考えられるものを追加で調査した。

4.5.2 文献リストと要点

(1) 文献リスト

調査を行った文献を表 4.5.2-1 に示す。

表 4.5.2-1 調査文献リスト

No.	タイトル	著者	発行年月
1	着床式洋上風力発電導入ガイドブック 別冊 北九州市沖洋上風力発電実証研究施設導入事例	新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)	2018年3月
2	着床式洋上風力発電ガイドブック 別冊 銚子沖洋上風力発電実証研究施設導入事例	新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)	2018年3月
3	浮体式洋上風力発電導入マニュアル	福島洋上風力コンソーシアム (経済産業省)	2019年3月
4	港湾における洋上風力発電設備の施工に関する審査の指針	港湾における洋上風力発電施設検討委員会 (国土交通省)	2018年3月
5	風車異常検知の効率的運用に向けた正常状態の特徴表現学習	長谷川 隆徳ほか	2021年12月
6	分布類似度に基づく健全性指標と風車異常検知システムの早期運用における効果	長谷川 隆徳ほか	2020年11月
7	あらゆる風車に適用可能な状態監視技術を目指して～風車主要機器におけるデータ駆動型異常検知とその評価	長谷川 隆徳ほか	2019年12月
8	Fatigue life prediction of wind turbine main bearing considering internal clearances and pounding forces	Takeshi Ishihara, et al.	2019年12月
9	洋上風力点検へのドローン技術活用の検討	藤本 修平ほか	2019年12月
10	風車ブレード画像における損傷探査のための教師あり・教師なし学習の比較	王 亦楠ほか	2019年12月
11	風車ブレード雷撃損傷痕の可視化手法の検討	藤本 修平ほか	2020年11月

12	エロージョン保護シートの空力特性改善手法に関する研究	川端 浩和ほか	2022年12月
13	風車用落雷検出装置が満たすべき性能とその試験方法	山本 和男ほか	2020年11月
14	音響計測による風車羽の雷撃損傷発生検知手法の検討	藤本 修平ほか	2019年12月
15	風車用落雷管理システムの開発	山本 和夫ほか	2022年12月
16	あわら北潟風力発電所の落雷実績からみた IEC61400-24 の課題	本庄 暢之ほか	2022年12月
17	平成 25 年度～平成 29 年度成果報告書 風力等自然エネルギー技術研究開発 風力発電高度実用化研究開発 スマートメンテナンス技術研究開発 (分析) (疲労予測等)	新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)	2019年3月
18	2013 年度～2017 年度成果報告書 風力等自然エネルギー技術研究開発/風力発電高度実用化研究開発/スマートメンテナンス技術研究開発 (2 分析) (リスク解析等)	新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)	2020年1月
19	2020 年度～2021 年度成果報告書 次世代浮体式洋上風力発電システム実証研究/洋上風力発電等技術研究開発/次世代浮体式洋上風力発電システム実証研究 (浮体式洋上風力発電低コスト化技術開発) / 浮体式洋上風力発電低コスト化技術開発に関する調査	新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)	2022年12月

(2) 調査文献の要点

① 文献調査の結果

(ア) 国の指針・ガイドブック等の調査 (文献 No. 1~4)

経済産業省、国土交通省、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) が発行したガイドブックや指針類を対象に、運転・保守に関する内容を調査した。文献 No.1~3 は、北九州沖洋上風力発電実証研究事業、銚子沖洋上風力発電実証研究事業、福島沖浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業について実施された運転・保守の内容および関連法令について解説されている。文献 No.4 は港湾法に基づく洋上風力発電設備等の施工に関する審査の観点を解説したものであり、運転・保守に関する記述は少ない。

(イ) 風車機器の異常検知技術に関する論文調査 (文献 No. 5~8)

風車機器の異常検知技術に関する最新の取組みを学術論文から調査した。文献 No.5~7 は風車の主要機器である主軸受等を対象とした取組であり、通常の AI を使った異常検知技術では対象風車毎に長期間の学習が必要となるという課題に対して、短時間で高精度な検知性能を獲得する技術について研究がなされている。文献 No.8 は風車の主軸受の寿命予測手法について ISO281 に代わるより適正な方法が提案されている。

(ウ) 風車設備の損傷点検技術に関する論文調査 (文献 No. 9~12)

風車設備の損傷点検技術に関する最新の取組みを学術論文から調査した。ブレードの損傷探査の省力化技術としてドローン撮影画像を使う方法が各種提案されている。文献 No.9 は雷撃痕の検出方法としてエタノール噴霧を併用したサーモグラフィ映像を使った方法を、文献 No.11 は同じく雷撃痕の検出方法としてブレードにあらかじめ偏光シートを貼付する方法を報告している。また、撮影した画像の損傷判定に AI 技術を適用した例が文献 9、10 に報告されている。文献 No.12 はエロージョン保護シートの有無によるブレードの空力特性への影響を評価し、保護シートに求められる条件を整理している。

(エ) 落雷検出技術に関する文献調査 (文献 No. 13~16)

風車設備への落雷検出技術と関連する規格類に対する取組みを学術論文から調査した。文献 No.13 は落雷検出装置と、その性能評価試験方法が規定されている新しい JEM 規格の内容が紹介されている。文献 No.14 は落雷検知技術として音響計測による方法が報告されている。文献 No.14 は落雷検出技術として監視カメラシステムを使った手法の開発状況が報告されている。文献 No.15 は、風車雷保護の国際規格である IEC61400-24 の規定が、日本の冬季雷に対して不十分であることを、落雷実績の分析から指摘している。

(オ) NEDO 成果報告書に関する文献調査 (文献 No.17~19)

至近の NEDO 成果報告から遠隔監視による O&M の省力化に関連する文献を調査した。

文献 No.17、18 は風車の各部位の損傷検知、機器の異常検知に関して CMS や SCADA を活用した具体的技術が整理されている。No.19 は洋上風力の低コスト化に資する要素技術を網羅的に調査したものであり、重点開発技術として遠隔監視におけるデジタル技術、スマートメンテナンス技術の重要性が指摘されている。

② 文献調査の要点

今回、調査した個々の文献の要点を表 4.5.2-2 に示す。

表 4.5.3-2 調査文献の要点

No.	タイトル	著者	発行年月
1	着床式洋上風力発電導入ガイドブック 別冊 北九州市沖洋上風力発電実証研究施設導入事例、2018年	新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)	2018年 3月
出典	新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) https://www.nedo.go.jp/content/100890005.pdf p.114-125 (参照 2026/01/05)		
要点	<p>本ガイドブックは、着床式洋上風力発電の実証研究の成果として、北九州市沖洋上風力発電実証研究施設の事例をとりまとめた文献。</p> <p>1 運転・保守の方法</p> <p>① モニタリング</p> <ul style="list-style-type: none"> ・洋上風車および支持構造物には、モニタリング装置を取り付け、実証研究施設には、CMS (状態監視システム) を導入し、運転パラメータの遠隔モニタリングを実施。 ・また、SCADA (監視制御システム) により風車設備の運転状況 (出力、温度、回転数他) や異常の有無を遠隔にて監視・記録するとともに、Web カメラを活用し視覚データ収集等によって故障発生情報を事前に把握し、予防措置を効果的に実施するシステムを構築し運用。 ・定期的な点検を遠隔で実施できるように風車の点検場所に固定式 Web カメラを設置し、常時監視体制を構築。固定式カメラの要求性能は、風車の重要部分を可視、可聴範囲に収められることとされた。 <p>② 点検</p> <ul style="list-style-type: none"> ・設備保安は、運転心得に基づいた保安規定により実施。運転心得とは、工事・維持・運用にあたり準拠しなければならない関連法規・条例を考慮した内容を反映されたもの。 ・設備点検は、月例点検、半年点検、年次点検、臨時点検に大別して実施。年次点検の水中心点検では、機械測量と潜水士による目視観察を実施。 ・日常は、SCADA (監視制御システム) により運転状況、異常の有無を遠隔で監視・記録するとともに、Web カメラによる視覚データ収集等で故障発生情報 		

を把握し、予防措置を実施。

2 運転・保守の結果

① 運転実績

2013年～2016年の発電電力量と設備利用率は、次のとおり。

- ・風速データに基づく推計値

年別累積発電電力量(MWh) : 2,451 (2013年)、4,683 (2014年)、4,416 (2015年)、2,065 (2016年)

年別月平均設備利用率 (%) : 28.8%(2014年)、27.6% (2015年)、2013年と2016年は不算出。

- ・実測値

年別累積発電電力量(MWh) : 1,522 (2013年)、2,134 (2014年)、2,655 (2015年)、2016年は不算出。

年別月平均設備利用率 (%) : 15.2% (2015年)、2013年・2014年・2016年は不算出。

② 保守実績

・アクセスにあたって安全性の確保は、気象海象予報とアクセス基準を組み合わせて適切な判断可能にしたこと、アクセス手引書を作成し安全知識を周知したこと、安全意識の向上のためにアクセストレーニングを行ったこと等により、3年間無事故・無災害を達成。

・水中部点検は、主に海水面以下の支持物や海底ケーブルの状況確認のため実施。調査はサイドスキャンソナーを用いて、頻度は1回/半年。

・水中部の基礎・支持物を安全かつ効率的に管理する手法として、水中メンテナンスロボットを開発。水中メンテナンスロボットを用いた計測作業により、根固めブロックの高さ計測では設計値とロボットによる計測結果は一致し、潜水士の活動に制限がかかる水深での適用を期待。

3 洋上風車のアクセスに係る検討

下記の方法で実施した。

・ピンポイント波浪予測によるアクセス可能日を選定した後、ピンポイント波浪予測 (15時発表) と気象予測 (風速、天候) により可否の一次判断を行う。

・次に、海象計データ (波高、周期)、気象予測 (雷、風速、天候)、交通船舶長による現地状況確認により、総括マネージャーが最終判断。

・作業中は、気象海象予測、海象計データを確認して、危険と判断される場合は、作業を中断し陸に帰還。

4 運転、保守の課題

以下の3件の異常の発生により運転停止を行った。

- ① ケーブルの不具合（海底ケーブルの変位と防食層の損傷）を確認。
 - ・原因は遊漁船のアンカーによる引っかけと推定。応急対策として防食テープで補修、恒久対策として鋳鉄防護管の取り付けを実施。遊漁船に対する注意喚起看板の設置も実施。
- ② ピッチ通信エラーが発生。
 - ・風車ハブ内にありブレードピッチ角制御を行う MDS と呼ばれる装置と、ナセル盤内の風車運転制御 PLC コントローラとの間の通信エラーカウンターの超過が原因。このエラーにより風車が運転停止を短周期で繰り返すようになったため、長期停止。原因はブレードなどの回転側と固定側間の電力通信伝送を担うスリップリングによるもので、スリップリングの製作上の不備があったと分かった。
- ③ 主要変圧器内のアセチレンを含む可燃性ガスの濃度が上昇する現象が発生。
 - ・濃度が上昇すると火災が発生する可能性があるため保安停止を実施。原因は、ナセルの振動による地絡の可能性のあるものの特定されなかった。今後、原因究明を図っていく予定。

No.	タイトル	著者	発行年月
2	着床式洋上風力発電導入ガイドブック 別冊 銚子沖洋上風力発電実証研究施設導入事例	新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)	2018年 3月
出典	新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) https://www.nedo.go.jp/content/100890004.pdf p.114-128 (参照 2026/01/05)		
要点	<p>本ガイドブックは、着床式洋上風力発電導入ガイドブックの別冊として、銚子沖洋上風力発電実証研究施設の事例をとりまとめたもの。</p> <p>1 運転・保守の方法</p> <p>① モニタリング</p> <p>・洋上風車および支持構造物に各種モニタリング装置を取り付けた。現地設備は常時無人、運転監視は遠隔で 24 時間体制、設備異常警報などが発生した場合、監視箇所に警報内容が通報される体制で実施。銚子沖実証研究施設には、CMS (状態監視システム) を導入し、遠隔モニタリングを実施。</p> <p>② 点検</p> <p>・経産省に届け出した保安規定に基づき、点検方法や点検周期を計画し、メンテナンスを実施。発電所には電気工作物として、洋上風車・観測タワー・陸上電気設備ならびに送電ケーブル、洋上設備として、航路標識灯・クレーンを点検対象とした。</p> <p>・点検は設備ごとに、月例巡視 (1 か月に 1 度)、定期点検 (1 年に 1 度)、臨時巡視 (地震や波浪に対し一定の基準を超えた場合) に分けて計画及び実施。</p> <p>2 運転・保守の結果</p> <p>① 運転の実績</p> <p>2013 年～2016 年までの発電電力量、設備利用率 (風速データに基づく推計値) は、次のとおり。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・月別発電電力量 : 400～900MWh ・月別設備利用率 : 20～50% <p>② 保守の実績</p> <p>・月例巡視 : 2013 年 2 月から 2017 年 2 月までの間の 49 回のうち 3 回は海象条件が悪く不実施。巡視時間は、風車 3 時間、タワー 30 分、変電所 30 分、交通船の移動時間は 20～60 分。</p>		

・定期点検：各年度メーカー点検マニュアルの推奨項目に準じて実施。このため、点検項目は各年度で異なる。

・臨時巡視：2013年2月から2017年2月までの間で14回実施。巡視方法は3通り。

陸上から双眼鏡等を使用して目視したケース（6回）

船で洋上設備を周回しながら目視確認したケース（2回）

洋上設備に渡って目視確認したケース（6回）

3 洋上風車のアクセスに係る検討

① 稼働率

・日中（6時から18時まで）12時間連続して基礎へのアクセスの波高条件（有義波高1.0m以下、1.5m以下、2.0m以下）を満たす日数がどの程度か整理。

有義波高1.0m以下：1月と7月に5割。その他は4割。最も低い月は約1.5割。

有義波高1.5m以下：最も高い月は約8割。最も低い月は約4.5割。

有義波高2.0m以下：最も高い月は約9割。最も低い月は約7割。

・6時から18時まで12時間連続してクレーン作業の波高/周期条件を満たす日の割合を示す稼働率を整理。

有義波高1.0m以下・有義波周期6.0秒以下：実績なし。

有義波高1.0m以下・有義波周期8.0秒以下：6月と7月に2割程度。他はそれ以下。

有義波高1.25m以下・有義波周期6.0秒以下：実績なし。

有義波高1.25m以下・有義波周期8.0秒以下：最も高い月で2割超え、他はそれ以下。

② 洋上風車へのアクセス

・銚子沖は有義波高が高く、交通船を使用してアクセス（有義波高1m以下）できる頻度が少なく、点検・補修稼働率は約33%と低かった。このためメンテナンスのためのアクセス船を適用することで、有義波高1.5m以上で可能になり、63%以上を達成。

4 運転・保守から確認された課題

・台風と南岸低気圧の接近により電力ケーブルの可とう保護管の損傷、固定架台の損傷などが生じて電力ケーブルの破断に至る事故が発生。水深10m程度で碎

<p>波が発生する場所に設置の洋上構造物は、設計波力に近い砕波波力を様々な方向から頻繁に受けることにより繰り返し応力が発生。普通ボルト継手を採用する場合、大きな繰り返し応力によりボルトにゆるみが発生することを想定し、摩擦接合の適用および滑りに対する検討を行い、ボルトのゆるみを防止する対策を取る必要があることが分かった。既存ケーブルの損傷原因が「架台を固定していたボルトのゆるみに起因するケーブル保護管の波浪中での動揺」のため、復旧のため新たに設置する電力ケーブル保護管および固定架台に求められる性能は、「ケーブル保護管が波浪中でも動かないこと」とされた。</p>
--

No.	タイトル	著者	発行年月
3	浮体式洋上風力発電導入マニュアル	福島洋上風力コンソーシアム	2019年 3月
出典	福島洋上風力コンソーシアム http://www.fukushima-forward.jp/reference/pdf/study020.pdf (参照 2026/01/05)		
要点	<p>本マニュアルは、浮体式洋上風力発電事業を進める発電事業者のため、これまで福島沖での実証研究事業で得られた知見等を反映し取り纏めたもの。国内外の浮体式洋上風力発電のプロジェクト動向のほか、福島沖の実証研究事業の成果等を基に、発電事業の流れ、必要となる許認可・手続きを整理し、汎用性の高い内容は一般的な手続きとして整理されている。</p> <p>1 運転保守段階における関係法令の整理 p.35-38</p> <ul style="list-style-type: none"> ・浮体式洋上風力発電の運転保守の段階に関連のある法令を、「着床式洋上風力発電導入ガイドブック (NEDO)」及び「一般海域における利用調整に関するガイド (経済産業省)」における記述をもとに、関係条項、法令内容、許可・届出、あて先について整理。 <p>2 運転保守の流れ p.116-121</p> <p>① メンテナンス計画の策定</p> <ul style="list-style-type: none"> ・メンテナンス計画の策定は、発電事業を効率的かつ効果的に行うため、メンテナンスにおける契約、保険、実施体制等を含むメンテナンス計画を、電気事業法及び船舶安全法上の手続きを策定するとし、風車・浮体の具体的なマニュアル記載項目、実施体制、保険などの詳細について纏めてある。 <p>② メンテナンスの実施</p> <ul style="list-style-type: none"> ・メンテナンスの実施は、法令点検・自主点検によるものや定期的なメンテナンスのみではなく、修繕等の工事を伴う場合は、工事の様態によって、適切な許認可を申請するとし、電気事業法による供給計画の提出と定期安全管理検査、船舶安全法による定期検査と中間検査、工事を伴うメンテナンスや船舶によるアクセスに関連する手続きも確認することが重要とある。 <p>③ 福島沖浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業の例</p> <ul style="list-style-type: none"> ・福島沖浮体式洋上ウィンドファーム実証研究でのメンテナンス計画の策定、メンテナンスの実施について内容の紹介があり、浮体メーカーが協力することにより、定期的検査の効率化につながり、結果としてコスト低減に貢献、AI や IoT の 		

	要素をメンテナンスに組み込むことで、効率化・省力化の期待がなされるとある。
--	---------------------------------------

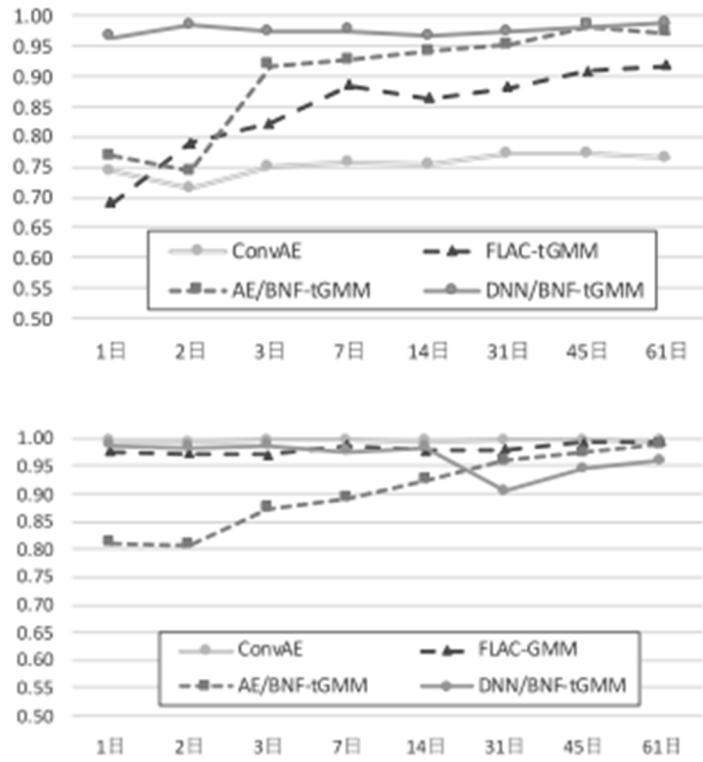
No.	タイトル	著者	発行年月
4	港湾における洋上風力発電設備の施工に関する審査の指針	港湾における洋上風力発電設備検討委員会（国土交通省）	2018年 3月
出典	国土交通省 https://www.mlit.go.jp/common/001228855.pdf p.42（参照 2026/01/05）		
要点	<p>本指針は、港湾法に基づく洋上風力発電設備等の施工に関する審査の観点を解説し、関係法令及び国内外関連規格、施工技術等を踏まえて策定したもの。</p> <p>1 適切な維持管理の実施</p> <ul style="list-style-type: none"> ・施工完了後も、設備等の維持管理を実施できる体制を構築すること。特に、落雷等の突発的な災害時に、ブレード等の大型資機材を直ちに修繕できる体制を構築することが望ましいとある。 ・関連する内容の文献として、「洋上風力発電設備の維持管理に関する統一的解説（令和2年3月版）：洋上風力発電施設検討委員会」において、「洋上風力発電事業者は、洋上風力発電設備等の維持管理に係る実施体制等について、設備等の維持管理を確実にを行う体制を構築し、適切に運用し体制を維持しなければならない。構築する体制は、洋上風力発電設備全体の保安監督を行う主任技術者が総括する体制とする。なお下部構造及び基礎等の維持管理は港湾法に基づく技術を有する者を適切に配置する必要がある。」と記載がある。一般的に洋上風力発電設備等は陸上に設置される風力発電設備と異なり厳しい海洋環境下にあるため、構造物の安全性の観点から、鋼材の腐食や基礎地盤の変化への配慮が必要で、専門的知識及び技術または知能を有する者の下で維持管理が行われる必要がある。 		

No.	タイトル	著者	発行年月
5	風車異常検知の効率的運用に向けた正常状態の特徴表現学習	長谷川 隆徳ほか	2021年12月
出典	日本風力エネルギー学会 論文集, 2021, Vol.45, No.3, pp.60-68 https://www.jstage.jst.go.jp/article/jwearonbun/45/3/45_60/pdf/-char/ja (参照 2026/01/05)		
要点	<p>風車に設置された各種センサの観測データから機器の異常（損傷）や、故障要因の診断を行う状態監視技術（データ駆動型状態監視技術）に対する期待が高まっている。しかし、風車の機種や内部機器の違い、センサ機器の違い、あるいは風車の設置された場所の周辺の気象状況によりデータ特性が変動するため、通常は監視対象の風車毎に長期間のデータを収集し適切にパラメータを調整する必要がある。また、風車は故障が頻発しないため、正常稼働状態と故障状態を識別するモデルを構築するアプローチは適切ではなく、正常稼働時のデータ分布のみを学習しその分布から外れた入力を異常と検知するアプローチが多く採用されているが、監視モデル構築にあたり様々な環境で観測されたデータを用いて正常状態モデルを汎化させてしまうと、未知の異常を見逃しやすくなる欠点がある。</p> <p>本研究では、異常検知システム構築時に異常状態の信号を用いることなく、環境の違いに頑健な特徴量を抽出する方式について検討を行った。具体的には、多数の類似機種で観測された正常データから自己符号化器（Autoencoder、AE）を構築し、これにより機器や気象条件、運転状況の違いに起因する情報が圧縮され、正常稼働状態を表す本質的な特徴量を抽出する。さらにこの特徴量を用いて混合ガウスモデル(Gaussian Mixture Model、GMM)を照合器として正常状態モデルを構築することで、監視対象機器ごとの長期間にわたるデータ収集を待たずに異常検知システムの性能向上が期待できる。論文では風車主軸受の加速度振動データを用いてAE/GMM タンデム接続型異常検知システムの検証を実施した。</p> <p>風車異常検知実験では、特徴量を抽出する方法として人手で設計する方法（FLAC）、監視対象風車のデータを使ったAE（target-AE）、監視対象外風車のデータを使ったAE（open-AE）の3種類を、照合器として監視対象風車のデータを使ったGMM(target-GMM)、監視対象外風車のデータを使ったGMM(open-GMM)の2種類を検討した。この結果、ほとんどの条件で、open-AE/target-GMMの組み合わせが最良の異常検知性能を達成した。なお、本実験においては異常の検知漏れは少ないものの、7日や14日分のデータでシステムを運用した場合の誤報率は2割から5割と高く、学習データが61日分まで確保できれば、誤報率は1割以下</p>		

	のような低い値となり、監視者による確認作業が現実的になると考えられる。
--	-------------------------------------

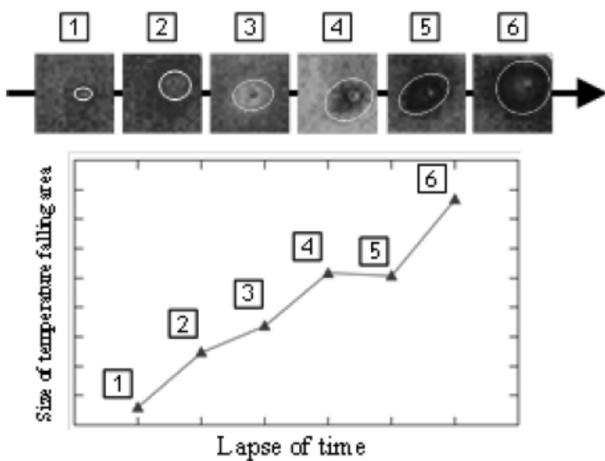
No.	タイトル	著者	発行年月																											
6	分布類似度に基づく健全性指標と風車異常検知システムの早期運用における効果	長谷川 隆徳ほか	2020年 11月																											
出典	日本風力エネルギー学会, 第42回日本風力エネルギー利用シンポジウム, 2020, p.183-186 https://www.jstage.jst.go.jp/article/jweasympo/42/0/42_183/_pdf/-char/ja (参照 2026/01/05)																													
要点	<p>機会学習に基づく異常検知システムを構築する際に、監視対象に対する知識がなければ、特徴抽出プロセスからデータを学習する必要があり必然的に監視対象に対する大量のデータが必要になる。一方、監視対象に関する知識（軸受や歯車の設計情報等）があれば異常検知するための特徴抽出プロセスを人手で設計できるので、ガウス分布のようなシンプルなモデルで正常状態を表現でき学習データを比較的少量で済ませることができ、早期に運用可能となると期待できる。本研究では、事前に与える知識としてバンドパスフィルターを利用して算出したメルフィルタバンク出力（Mel-Filter Bank、FBANK）を用いることとし、特徴抽出器として Variational Autoencoder（VAE）を用いて監視対象機器の正常状態を低次元で表現して正常稼働状態の分布を学習することとした。また、異常検知のための分布類似度の健全性指標として KL 距離を採用した。</p> <p>異常検知実験では今回の方法を含め 6 つの異常検知システムを比較した。この結果 FBANK を入力とした VAE を用いた手法が良好な異常検知結果となった。また、正常状態モデルとして GMM（混合ガウス分布）と KLD（単峰ガウス分布）を比較すると、特に後者は登録データが 1 日分から 3 日分の早期運用において高い異常検知性能を維持しつつ誤報率を格段に抑制できることが分かった。</p> <div style="text-align: center;"> <table border="1"> <caption>図5 風車 A の登録データ量と誤報率の関係</caption> <thead> <tr> <th>登録データ量</th> <th>VAE/GMM-lim (誤報率)</th> <th>VAE/KLD-lim (誤報率)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1日</td> <td>0.65</td> <td>0.20</td> </tr> <tr> <td>2日</td> <td>0.35</td> <td>0.15</td> </tr> <tr> <td>3日</td> <td>0.15</td> <td>0.05</td> </tr> <tr> <td>7日</td> <td>0.05</td> <td>0.02</td> </tr> <tr> <td>14日</td> <td>0.02</td> <td>0.01</td> </tr> <tr> <td>30日</td> <td>0.01</td> <td>0.01</td> </tr> <tr> <td>45日</td> <td>0.01</td> <td>0.01</td> </tr> <tr> <td>61日</td> <td>0.01</td> <td>0.01</td> </tr> </tbody> </table> </div>			登録データ量	VAE/GMM-lim (誤報率)	VAE/KLD-lim (誤報率)	1日	0.65	0.20	2日	0.35	0.15	3日	0.15	0.05	7日	0.05	0.02	14日	0.02	0.01	30日	0.01	0.01	45日	0.01	0.01	61日	0.01	0.01
登録データ量	VAE/GMM-lim (誤報率)	VAE/KLD-lim (誤報率)																												
1日	0.65	0.20																												
2日	0.35	0.15																												
3日	0.15	0.05																												
7日	0.05	0.02																												
14日	0.02	0.01																												
30日	0.01	0.01																												
45日	0.01	0.01																												
61日	0.01	0.01																												

No.	タイトル	著者	発行年月
7	あらゆる風車に適用可能な状態監視技術 を目指して～風車主要機器におけるデー タ駆動型異常検知とその評価	長谷川 隆徳ほか	2019年12月
出典	日本風力エネルギー学会, 第41回風力エネルギー利用シンポジウム, 2019, p.187-190 https://www.jstage.jst.go.jp/article/jweasympo/41/0/41_187/pdf-char/ja (参照 2026/01/05)		
要点	<p>風車などの産業機械に対する費用対効果の高いメンテナンスを実現するために、状態監視技術に対する期待は高い。ただし、現状の状態監視技術の性能は、風車機種や内部機器の違いやセンサ機器の違い、さらには設置場所や稼働条件の条件に強く依存するため、各々の環境ごとにシステムのチューニングや大規模なデータ収集、学習の再実行が必要になっている。これは、状態監視技術を実環境で稼働中の様々な風車に適用し、システムの早期運用を実現するうえで大きな課題である。著者らは状態監視システムの早期運用を実現するために、風車主軸受けを対象として正常と損傷状態の判別に寄与する特徴表現を学習するシステムを検討し、タンデム接続型異常検知が高い精度を持つことを実証してきた。本論文では、風車主要機器である主軸受け、増速器、発電機に適用し、その性能を検証するとともに、正常状態モデルの学習量と異常検知性能の関係を調査した。異常検知実験の結果、以下の知見を得た。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・低回転機器の主軸受けや複雑な歯車装置である増速器を対象とするときは、類似した機器のデータを活用し、正常と損傷の判別に寄与する特徴表現をデータから学習し、その特徴量で異常検知を行うタンデム接続型異常検知システム（AE/BNF-tGMM、DNN/BNF-tGMM）が良い。 ・高速回転機器の発電機を対象とするときは、監視対象機器のデータのみで異常検知システムを構築（ConvAE、FLAC-tGMM）するだけで十分高い異常検知が可能。 		



上図：主軸受、下図：発電機（縦軸：AUC 値、横軸：学習データ量）

No.	タイトル	著者	発行年月										
8	Fatigue life prediction of wind turbine main bearing considering internal clearances and pounding forces	Takeshi Ishihara, et al.	2019年 12月										
出典	日本風力エネルギー学会, 第41回日本風力エネルギー利用シンポジウム, 2019, p.106-110 https://www.jstage.jst.go.jp/article/jweasympo/41/0/41_106/_pdf-char/ja (参照 2026/01/05)												
要点	<p>風力発電機用主軸受については、ISO281 に示された公式を適用し軸受定格寿命 L10 を 90%の信頼度で予測するものとしているが、苫前ウインドファームの風車主軸受の高い故障率を説明することができない。このことは、ISO 281 の計算式に新しいパラメータを含める必要があることを示唆している。</p> <p>本研究では、内部クリアランスとパウンディング力を考慮した風力発電機用主軸受の疲労予測を行った。主軸受のパウンディングモデルを用い、荷重係数を評価した。ISO 281 の軸受定格寿命予測式 L10 を、寿命比と荷重係数の新しいパラメータを導入して修正した。この結果、以下の結論を得た。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 主軸受のパウンディングシミュレーションのための数値モデルを作成した。パウンディングによる荷重係数を主軸受の疲労寿命予測に用いることを提案した。 2) 寿命比と荷重係数をパラメータとして主軸受の疲労寿命を予測した。予測された定格寿命 L10 は現場の記録とよく一致したが、ISO 281 の公式による寿命は大幅に過大評価されることが分かった。 												
	<p>The chart displays the predicted rating life L10 in years for three different models. The y-axis represents Life (years) from 0 to 150. The x-axis lists the models: ISO original, ISO with ae, and ISO with ae and fw. The observed L10 is also shown as a reference bar.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Model</th> <th>Predicted Rating Life L10 (years)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ISO original</td> <td>141</td> </tr> <tr> <td>ISO with ae</td> <td>48</td> </tr> <tr> <td>ISO with ae and fw</td> <td>12</td> </tr> <tr> <td>Obs. L10</td> <td>12</td> </tr> </tbody> </table>			Model	Predicted Rating Life L10 (years)	ISO original	141	ISO with ae	48	ISO with ae and fw	12	Obs. L10	12
Model	Predicted Rating Life L10 (years)												
ISO original	141												
ISO with ae	48												
ISO with ae and fw	12												
Obs. L10	12												
	<p>Fig. 7 Predicted rating life L₁₀</p> <p>Ae:life ratio (寿命比)、 fw:load factor (荷重係数)</p>												

No.	タイトル	著者	発行年月
9	洋上風力点検へのドローン技術活用の検討	藤本 修平ほか	2019年12月
出典	日本風力エネルギー学会, 第41回風力エネルギー利用シンポジウム, 2019, pp181-182 https://www.jstage.jst.go.jp/article/jweasympo/41/0/41_181/pdf-char/ja (参照 2026/01/05)		
要点	<p>ドローンによる洋上風車（特にブレード）の雷撃痕の計測を想定した各種の検討について検討した。</p> <p>(1) ドローン点検画像を用いたブレード表面の雷撃ピンホールの検出方法の検討</p> <p>(a)サーモグラフィーを用いたピンホール検出の検討</p> <ul style="list-style-type: none"> ・雷撃によってブレード表面に生じたピンホール近傍に揮発性の高いエタノールを噴霧し、気化熱による冷却によりピンホール部と周囲の温度差を生じさせサーモグラフィー上で強調表示する方法を検討。 ・長さ約 8m のブレード模型を供試体とした実験では、図 1 に示すようにピンホール周辺にエタノール噴霧後、時間の経過とともにサーモグラフィーの変色範囲が拡大し、落雷によるピンホールが発見しやすくなることが確認された。 <div style="text-align: center;">  </div> <p>図 1 冷却剤噴霧後のピンホール近傍の温度変化</p> <ul style="list-style-type: none"> ・これは、噴霧したエタノールがピンホール部からブレード内部へ（模擬雷撃による内部剥離部等）浸透し、ピンホール自体より大きい範囲に温度変化を生じさせたためと考えられる。 		

(b)機械学習による画像認識を応用し、雷撃痕検査時の支援技術の検討

- ・リアルタイム物体検出技術の一つである SSD (Single Shot MultiBox Detector) を活用しサーモグラフィー観測で使したブレード模型を対象に、落雷痕のある箇所／ない箇所の画像データを作成し、ブレード、落雷痕、レセプタの検出について学習を行った。
- ・風車ブレード自体の検出や落雷痕およびレセプタの検出が可能であることが確認された。
- ・一方で、光の反射の影響で一部落雷痕が検出できない箇所もあり、今後の改善が必要である。

No.	タイトル	著者	発行年月
10	風車ブレード画像における損傷探査のための教師あり・教師なし学習の比較	王 亦楠ほか	2019年12月
出典	日本風力エネルギー学会, 第41回風力エネルギー利用シンポジウム, 2019, pp183-186 https://www.jstage.jst.go.jp/article/jweasympo/41/0/41_183/pdf/-char/ja (参照 2026/01/05)		
要点	<p>風車ブレード画像を用いた損傷探査において、教師あり物体検出手法と教師なし異常検出手法を比較する。教師ありの手法としては、Single Shot MultiBox Detector (SSD) を用いて、教師なし学習手法としては、One-class Support Vector Machine(SVM)と深層特徴量を組合せた手法を用いてブレードのクラック検出に適用した。</p> <p>1. 実験</p> <ul style="list-style-type: none"> ・DJI社製のMATRICE210というドローンで実際に撮影した風車ブレードを用いて、撮影する際には45mmのレンズをドローンカメラに装着し、手動でドローン进行操作し、ブレードのPS側とSS側に合焦して撮影した。 ・画像解像度は5280×2970で307枚の画像を収集した。収集した画像の中の不具合は主にエロージョンとクラックであり、エロージョンは4089箇所、クラックは514箇所である。 ・不具合のほかブレードの継ぎ目や重心マーク、汚れなど鮮明な特徴を持つ正常部分もデータセットに含めた。 <p>2. 評価指標</p> <ul style="list-style-type: none"> ・結果の評価はPrecisionとRecallを用いた。それぞれの定義は式(1)に示すとおりであり、TP (True Positive)、FN (False Negative) などの定義は表1に示す。 $\text{precision} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (1)$ $\text{recall} = \frac{TP}{TP + FN}$		

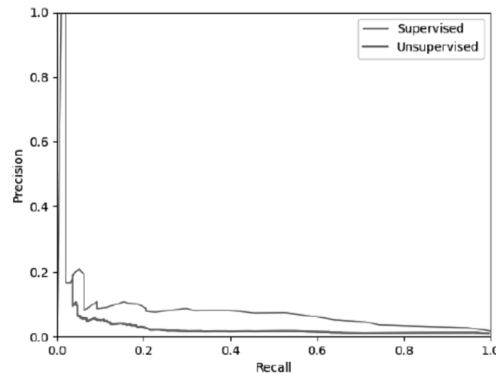
表 1 TP FP FN TN の定義

	損傷を検出	損傷を未検出
損傷がある	TP	FN
損傷がない	FP	TN

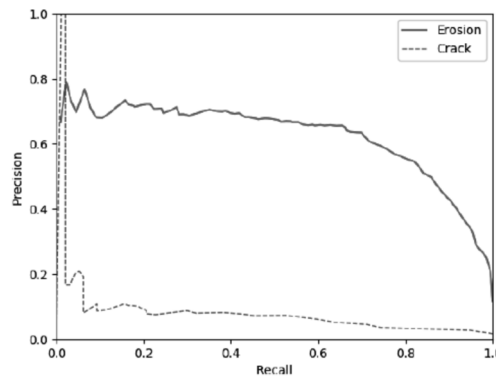
3. 結果

・学習で得られた教師ありとなしのモデルに閾値に関して走査を行うと、図 1(a)、図 1(b)のような Precision-Recall 曲線が得られる。図 1(a)に示したように、クラック検出に対して、Recall が 0.8 の Precision を見ると、教師あり手法は 0.04 であり、教師なし手法は、0.012 である。教師あり手法におけるエロージョンとクラック検出比較を図 1(b)に示す。Recall が 0.8 のエロージョンの Precision は 0.54 で、クラックは 0.04 である。

・クラック検出に関し、教師あり手法は学習データが少ないにもかかわらず、教師なし手法より精度が高い。教師あり手法に関しては、エロージョンの検出はクラックの検出に比較して良いが、浸食やチッピングの特徴と似ているので分類を間違えることがある。クラックは学習データが不足しているため、分類精度が低い。



(b) 教師ありと教師なし手法のクラック検出結果



(a) 教師あり手法でエロージョンとクラックの検出結果

図 1 Precision-Recall 曲線による比較

No.	タイトル	著者	発行年月
11	風車ブレード雷撃損傷痕の可視化手法の検討	藤本 修平ほか	2020 年 11 月
出典	<p>日本風力エネルギー学会, 第 42 回風力エネルギー利用シンポジウム, 2020, pp180-182</p> <p>https://www.jstage.jst.go.jp/article/jweasympo/42/0/42_180/pdf/-char/ja</p> <p>(参照 2026/01/05)</p>		
要点	<p>風車被雷後の点検時間削減を目的とし、画像検査によりブレード落雷痕を発見しやすくする方法について検討した。ドローンで画像撮影する際には、対象物との衝突を回避するため、対象物との間に少なくとも 10m 以上の距離をとることが望ましいため、この程度の距離からでも微小なピンホールを発見を容易にする一手法として、ブレード表面に雷撃痕可視用の材料を貼付けする方法を模擬雷撃実験により検討した。</p> <p>1. 実験方法</p> <p>本研究では、雷撃痕可視化の材料として偏光シートを用いた。偏光シートは特定の方向に振動する光のみを通過させる材料である。偏光シートを貼付けした状態でブレード表皮に落雷があった場合、雷撃時に発生する機械的力や熱等の影響により偏光シートの破壊や熱変性が生じると考えられる。このような偏光シートの変化が生じた場合、偏光フィルタを介して目視観測や画像撮影を行うと、偏光シートが変化した部分が強調されて観察できる。雷撃の影響で偏光シートに変化が生じると偏光シートを貼付した部分からの反射光の偏光状態も変化する。観測側の偏光フィルタの偏光方向を適切に設定すれば、雷撃損傷部（雷撃の影響で偏光状態が変化している）と健全部（雷撃の影響を受けていないため偏光状態は元のまま）と明確に区別できる。</p> <p>実験は大型電流発生装置を用いて行った。図 1 に実験概要を示す。100mm×100mm の GFRP 板の表面に偏光シートを貼付したものを試験片とした。</p> <p>模擬雷撃の印加電流を変化させ、表面に貼付した偏光シートの破壊状況等を観測した。</p>		

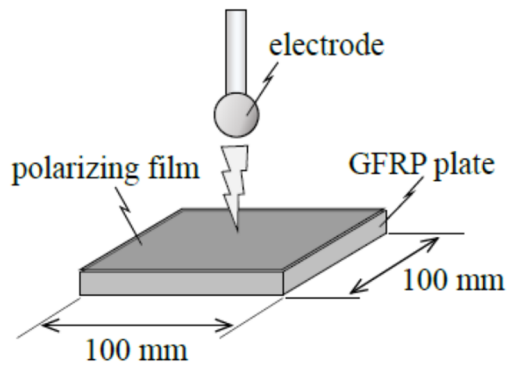


図1 模擬雷実験の概要

2. 実験結果

偏光フィルタを通して撮影した画像では、模擬雷撃箇所の小孔を中心として、小孔よりも広い範囲の円形状の輪郭が可視化されている。これは模擬雷撃時に発生した力等により試験片表面に貼付した偏光シートの接着状況に変化が生じ、それに伴って試験片表面からの反射光の偏光状態が部分的に変わったためと考える。

以上のようにして、通常の観測では遠隔での識別が難しい落雷の痕跡を、偏光フィルタを利用して検出できる可能性が示された。

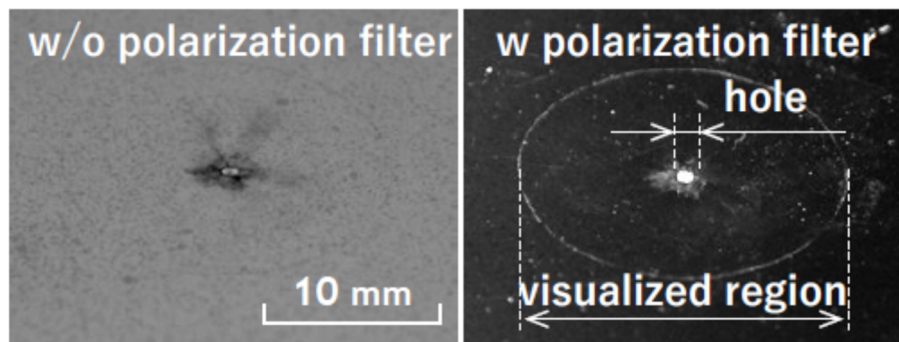


図2 偏光フィルタによる模擬雷撃痕の可視化

(左) 偏光フィルタなし (w/o)、(右) 偏光フィルタあり (w)

No.	タイトル	著者	発行年月
12	エロージョン保護シートの空力特性改善手法に関する研究	川端 浩和ほか	2022 年 12 月
出典	日本風力エネルギー学会, 第 44 回風力エネルギー利用シンポジウム, 2022, pp.246-249 https://www.jstage.jst.go.jp/article/jweasympo/44/0/44_246/pdf/-char/en (参照 2026/01/05)		
要点	<p>1. はじめに</p> <p>これまで開発してきたエロージョン保護シートの空力性能をさらに改善するため、設計パラメータを変化させたシートを製作して空力試験を行うとともに、エロージョンモデルとの空力性能比較を行うことで、シートの空力性能改善に重要となる点を明らかにすることを研究目的としている。</p> <p>2. 風洞実験</p> <p>本研究では、設計パラメータを変化させた「エロージョン保護シートを張った翼型」と、「エロージョン状態の翼型」の空力性能を風洞実験によって比較した。実機のエロージョンは、発生してからの経過時間や地理的条件によって、進行段階が異なる。そこで、エロージョンの状態は複数の想定を行った。</p> <p>3. まとめ</p> <p>エロージョン保護シートの空力性能改善を目的として、シートの様々な設計パラメータが空力性能に与える影響を調査するとともに、エロージョンモデルとの性能比較も行った。エロージョン保護シートの設計パラメータは、厚みが最も揚抗比に影響を与えており、一定の厚みを超えると揚抗比の低下量が飽和する傾向が見られたため、空力的に最適な厚みが存在すると考えられる。薄いシートでも翼性能の低下は避けられなかったため、ES 等の工夫を施すことでエロージョン保護シートの効果を最大限活用可能になると考えられる。あるため、空力性能に影響を与えないように最大厚みでシートを製作することが必要であると考えられる。</p>		

No.	タイトル	著者	発行年月
13	風車用落雷検出装置が満たすべき性能とその試験方法	山本 和男ほか	2020年11月
出典	<p>日本風力エネルギー学会, 第 42 回風力エネルギー利用シンポジウム, 2020, pp251-254</p> <p>https://www.jstage.jst.go.jp/article/jweasympo/42/0/42_251/pdf-char/en</p> <p>(参照 2026/01/05)</p>		
要点	<p>新 JIS C 1400-2 の落雷検出装置に関する部分と、その性能評価試験方法が規定されている新しい JEM 規格の内容の紹介。</p> <p>1. 落雷検出装置の種類</p> <p>風車への雷撃を検出する方法としては、①電流センサを用いて直接的に検出するもの、②落雷の雷光をトリガとし風車周辺に設置したカメラ等により雷撃を捕捉するもの、③落雷位置評定システム (Lightning Location System : LSS) の様に電磁界センサを離れた位置に設置し、雷撃を捕捉するものなどがあるが、そのうち①についての説明</p> <ul style="list-style-type: none"> ・大口径ロゴスキー・タワー型 <p>塔体部に大口径ロゴスキーコイルを巻きつけ、コイルに誘導した電圧を積分し、タワーを流れる電流を検出する装置。コイルがタワーの周りを囲んでおり、風車への雷撃を高い精度で捕捉できる特徴を有している。センサ部や周辺回路部へのノイズで装置が誤作動しないようにする対策が重要。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ソレノイド・タワー型 <p>ソレノイドコイル型の検出部をタワー側面に設置し落雷を検出する落雷検出装置である。塔体に電撃電流が流れるとその周辺に磁界が発生する。その磁界の微分値をタワー側面に設置されたソレノイドコイルの端子間電圧で検出して落雷を検知する装置。この種の開放系コイルを用いた装置は、設置した風車だけでなく周辺設備等への落雷を検知することがあり、誤検知対策が重要となる。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・小口径ロゴスキー (CT) ・ダウンコンダクタ型 <p>ダウンコンダクタに小口径ロゴスキーコイルや CT の電流センサを設置し、各ブレードへの落雷を検出する装置。電流経路がセンサ部に完全に鎖交しているため、風車への雷撃を高い精度で捕捉できる特徴を有している。ただし、ナセルに落ちた雷を捕捉できない課題がある。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・小口径ロゴスキー(CT) ・接地線型 <p>接地線に CT や小口径ロゴスキーコイルを取付け、風車に落雷があった際に、その接地線に分流する電流を検知することで落雷検出を行う装置。落雷があった際にその接地線にどの程度の雷電流が分流するのかを実験等により事前に把握し</p>		

ておく必要がある。接地線には他の機器から回り込んでくるノイズ電流が流れる場合も少なくない。そのノイズ電流のレベルが大きい場合には、この方法を用いた落雷検出は難しくなる。

2. 落雷検出装置の要求性能

新 JIS C 1400-24 では、地域ごとの最適な落雷検出装置のスペックが規定される予定である。その内容は表 1 と図 1 に示す通りで、図 1 で示される冬季雷地域には表 1 にあるクラス I の周波数帯域を有する落雷検出装置のみ設置可能となる。

表 1 落雷検出装置のクラス分類と周波数帯域

クラス	設置可能地域	電荷量検出機能の有無	周波数帯域
I	日本全国	有	0.1 Hz～100 kHz
II-1	夏季雷地域	有	10 Hz～100 kHz
II-2	夏季雷地域	無	1 kHz～100 kHz

注) クラス I は、クラス II の地域にも適用できる。



図 1 冬季雷地域と夏季雷地域

太い実線内とその周辺の海域を冬季雷地域、上記以外を夏季雷地域と呼ぶ。

No.	タイトル	著者	発行年月
14	音響計測による風車羽の雷撃 損傷発生検知手法の検討	藤本 修平ほか	2019年12月
出典	日本風力エネルギー学会, 第41回風力エネルギー利用シンポジウム, 2019, pp179~180 https://www.jstage.jst.go.jp/article/jweasympo/41/0/41_179/pdf-char/ja (参照 2026/01/05)		
要点	<p>ブレード内の空気中伝播音を計測し雷撃損傷の発生を検知する手法を検討した。</p> <p>・実験に用いた模型は図1に示す全長8.0mで先端および側面に金属レセプタを有する。また、ダウンコンダクタはブレード内壁面に埋設されている600kWクラスの実ブレードの先端部8mを模擬した実験用模型である。</p> <div data-bbox="557 900 1117 1258" data-label="Image"> </div> <p>図1 ブレード模型</p> <p>・図2に実験の概要を示す。大電流発生装置の放電電極をブレード模型の近傍に設置し、i)レセプタへの着雷(雷撃損傷なし)とii)ブレード表皮への着雷(雷撃損傷あり)を模擬した放電をそれぞれ行い、放電に伴って発生する空気中伝播音をブレード内に設置した加速度センサで計測した。</p> <div data-bbox="552 1574 1117 1933" data-label="Diagram"> </div> <p>図2 実験の概要</p>		

・ブレード模型の表面にホールソーで穴を開け、模型に接触させないように加速度センサを吊り下げた。加速度センサは、図3に示す3箇所（ブレード先端からそれぞれ6.0m、7.0m、7.8mの箇所）に設置した。

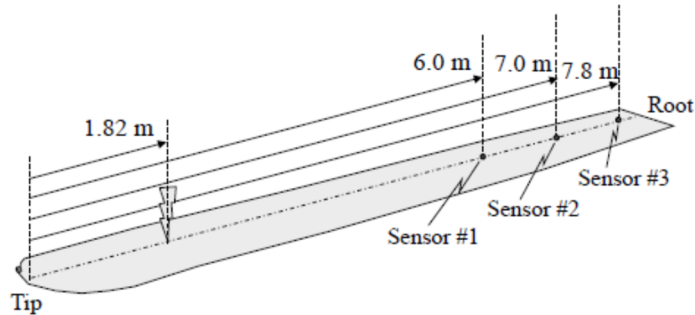
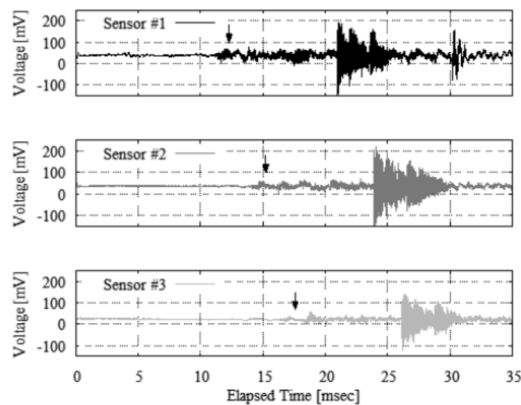
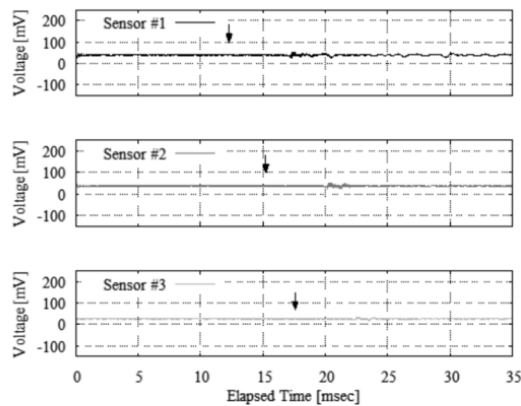


図3 加速度センサの設置位置

・図4に計測結果を示す。(a)模擬雷撃損傷ありと(b)模擬雷雷撃損傷なしの比較から、ブレード内部に設置したセンサで雷撃時の空气中伝播音を計測し、ブレード雷撃損傷の有無を判定する手法の実現の可能性が示された。



(a) 模擬雷撃損傷あり（ピーク電流 約 40 kA）



(b) 模擬雷撃損傷なし（ピーク電流 約 40 kA）

図4 加速度センサの計測結果

No.	タイトル	著者	発行年月
15	風車用落雷管理システムの開発	山本 和夫ほか	2022 年 12 月
出典	日本風力エネルギー学会, 第 44 回風力エネルギー利用シンポジウム, 2022, pp. 234-237		
要点	<p>グローバルシャッター撮影、超高感度撮影、近赤外線撮影が可能なカメラを用いた風車用落雷監視カメラシステムについてその開発動向と特徴を紹介。</p> <p>1. 風車用落雷監視カメラシステム</p> <p>1. 1 主な特徴</p> <p>基本性能は表 1 のとおり。</p> <p>1. 2 外観およびシステム構成例</p> <p>本カメラシステムは 2 台のカメラを用いて一つのシステムを構成している。1 台のカメラは風車への落雷の閃光を鮮明に撮影できるように各種パラメータが調整されており、もう一つのカメラは昼夜問わず、風車の姿を鮮明に撮影できるように各種パラメータが調整されている。2 つのカメラは同じカメラであり図 1 に示すような外観となっている。</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="357 1099 778 1429" data-label="Image"> </div> <div data-bbox="842 1081 1286 1447" data-label="Diagram"> </div> </div> <p>図 1 風車用落雷監視システムに用いられているカメラの外観</p> <p>図 2 風車用落雷監視システムのシステム構成図</p> <p>カメラシステム構成例を図 2 に示す。2 台のカメラは近接して設置される収納ボックス内の撮影用 PC に接続され映像が保存される。撮影された映像は撮影用 PC のみならず、クラウドにも保存されるようになっている。カメラには LAN ケーブルが接続されており、撮影用パラメータの外部制御が可能となっている。撮影された画像の分析は収納ボックス内の PC でリアルタイムに行うこともできるが、クラウドに保存されたデータを、分析用 PC を用いて分析することも可能となっている。</p>		

2. 充実した分析機能

2. 1 落雷検知機能

取得した動画映像をリアルタイムで画像分析し、風車への落雷を自動検出できる機能を有する予定である。

2. 2 落雷位置分析機能

雷撮影用のカメラにより捉えた雷道と風車撮影用のカメラにより撮影された風車の映像を合成し、風車のどの位置に落雷があったかを特定する機能も将来的には備える予定である。

2. 3 風車異常分析機能

撮影画像を分析することで、落雷により、ブレード等に物理的な破損が発生したかどうかを把握できる機能を将来的には備える予定である。

2. 4 レポート出力機能

上述の2. 1節から2. 3節の内容を総合的に分析した結果をレポートとして出力する機能も有する予定である。

3. おわりに

風車用落雷監視システムの開発状況と主な特徴について紹介した。洋上、陸上問わず、落雷時の風車の健全性把握は、近い将来、遠隔で行われるようになると予想される。そのためには、目視点検以上の制度で迅速に健全性を把握できる技術の確立が急務であり、そのような技術の実現のために、本カメラシステムが一助となると信じている。

No.	タイトル	著者	発行年月															
16	あわら北潟風力発電所の落雷実績からみた IEC61400-24 の課題	本庄 暢之ほか	2022 年 12 月															
出典	日本風力エネルギー学会, 第 44 回風力エネルギー利用シンポジウム, 2022, pp.238-241 https://www.jstage.jst.go.jp/article/jweasympo/44/0/44_238/pdf-char/en (参照 2026/01/05)																	
要点	<p>1. はじめに</p> <p>筆者らは風車の雷対策が未成熟な原因を、風車雷保護の国際規格である IEC61400-24 の規定にあると考え、日本の雷性状と IEC61400-24 のミスマッチ部分について検討してみた。</p> <p>2. あわら北風力発電所における落雷実績</p> <p>あわら風力は福井県と石川県の県境、日本海沿いの丘陵地区に位置している。典型的な冬季雷地区であり、運転開始当初から雷観測を継続している。本論文では NEDO の「風力等自然エネルギー技術研究開発／次世代風力発電技術研究開発／自然環境対応技術等（落雷保護対策）（以後 NEDO 次世代事業と略）」で計測された 2012 年 1 月 11 日～2013 年 2 月 14 日（401 日間）のあわら風力 1 号機への落雷実績をレビューする。</p> <p>観測期間の落雷回数は 65 回で、そのうち 42 回はログスキーコイルの雷電流データが記録されている。雷電流データの集約結果は表-1 の通りであった。</p> <p style="text-align: center;">表-1 あらわ風力落雷実績集計結果</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th></th> <th>あわら風力</th> <th>NEDO 次世代事業 25 地点</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>総放電電荷量</td> <td>2,999C</td> <td>52,124C</td> </tr> <tr> <td>平均放電電荷量</td> <td>71.4C</td> <td>77.6C</td> </tr> <tr> <td>平均比エネルギー量</td> <td>91.8kJ/Ω</td> <td>192.2kJ/Ω</td> </tr> <tr> <td>平均電流波高値</td> <td>8.79kA</td> <td>8.7kA</td> </tr> </tbody> </table> <p>あわら風力の落雷データを NEDO 次世代事業で観測された 25 地点、834 雷撃のデータと比較すると、平均比エネルギー量は、あわらは全国平均の半分程度であるが、平均電荷量、平均電流波高値は全国平均と同等であった。発電所あたりの雷撃数は、NEDO 次世代事業の 25 地点では、平均 33.3 回であったが、あわらは 65 回であり、全国平均の 2 倍程度の雷撃が観測されている。あわら風力の雷撃実績をまとめると、雷撃回数が多い、落雷の時間間隔が短い、受雷部（レセプタ）を外す落雷があるということになる。</p>				あわら風力	NEDO 次世代事業 25 地点	総放電電荷量	2,999C	52,124C	平均放電電荷量	71.4C	77.6C	平均比エネルギー量	91.8kJ/Ω	192.2kJ/Ω	平均電流波高値	8.79kA	8.7kA
	あわら風力	NEDO 次世代事業 25 地点																
総放電電荷量	2,999C	52,124C																
平均放電電荷量	71.4C	77.6C																
平均比エネルギー量	91.8kJ/Ω	192.2kJ/Ω																
平均電流波高値	8.79kA	8.7kA																

3. IEC61400-24 のレビュー

IEC61400-24 には、風車が耐えられなければならない雷電流のパラメータが定められている。代表的なものとして、雷が放電する電荷の量（放電電荷）、放電電流のピーク値、雷が 1Ω の抵抗を介して放電した場合のエネルギー（比エネルギー）などがある。また定性的な内容として、ブレード内部で放電してはいけない、受雷部（レセプタ）は人工雷発生装置を用いた試験で、100%放電を捕捉しなければならないことが定められている。しかしながら、冬季雷の特徴である、放電電荷量が多い、落雷回数が多い、落雷の時間間隔が短い、レセプタを外す落雷があるという点については、規定の内容が不十分であり、IEC61400-24 に準拠したブレードであっても、冬季雷に十分対応できないことが推測される。

3. 1 個別項目の評価

(1) 放電電荷量

IEC61400-24 で最も保護性能が高いクラス 1 の放電電荷量は 300C となっている。冬季雷では 300C を超える落雷が多く、従来はこの点について問題視されていた。しかし、2010 年頃には、我が国でも放電電荷量を 600C とした風車が納入されるようになってきているが雷害が根絶できていない。従い IEC で放電電荷量を 600C にしただけでは、落雷が根絶できないと推測される。

(2) 雷検出装置

付属書 L（参考）に雷検出装置の必要性が記載されているが、雷検出装置の様子は記載されていない。そのため市販の雷検出装置には誤動作、誤不動作が多いという問題があった。雷検出装置の様子は、日本勢が付属書の提案をしており、第 3 版に追加される予定となっている。

(3) 雷捕捉試験方法

付属書 D（参考）にレセプタの雷捕捉性能を確認する試験方法が記載されている。床面に置いた大地電位の平板電極上に試験用ブレードを吊るし、試験用ブレード側に試験電圧を印加する Setup A と、大地電位の試験用ブレードを床に置き、その上に平板電極を配置し、平板電極側に試験電圧を印加する Setup B が記載されている。IEC61400-24 に記載されている Setup A、Setup B いずれの方法も、静的な電界中の短ギャップ放電であり、数百 m の長ギャップと周辺の電界が動的に変動している実雷とは全く異なる状況にある。試験でレセプタが放電を 100%捕捉したとしても、フィールドでの 100%捕捉性能は担保できないと考えられる。

(4) 耐久試験

ブレード試験における雷放電回数については、付属図書 D（参考）に、保護レベル 1 の風車は 6 回（合計の放電電荷量 900C）、冬季雷を考慮した追加試験（600C を 3 回以上）が定められている。実際の冬季雷では、短い時間間隔で落雷が継続

<p>するため、放電で上昇したレセプタやダウンコンダクタの温度が十分冷却する前に、後続の雷撃で温度が上昇し、温度上昇限度を超過する可能性があるが、現行の試験方法では連続雷撃の影響は検証できない。</p>

No.	タイトル	著者	発行年月
17	平成 25 年度～平成 29 年度成果報告書 風力等自然エネルギー技術研究開発 風 力発電高度実用化研究開発 スマートメ ンテナンス技術研究開発 (分析) (疲労予 測等)	新エネルギー・産業技 術 総 合 開 発 機 構 (NEDO)	2019 年 3 月
出 典	NEDO 成果報告書, 報告書管理番号 20190000000059 https://www.nedo.go.jp/library/database_index.html (参照 2026/01/05)		
要 旨	<p>本文献は、風車の状態監視と診断に基づき、的確に対象部位の損傷予知や寿命を予測することにより、事故の未然防止、タイムリーなメンテナンスによる当該コストの低減や、ダウンタイム削減に資する技術についての調査が取りまとめられている。陸上風車を対象としているが洋上風車に対しても参考になるものである。</p> <p>第 2 章及び第 3 章では、故障・事故調査及び実際の事業者等へのヒアリングやメンテナンスに係るアンケートを通じて、我が国の故障・事故の傾向並びにメンテナンスに係る実態及び課題が整理されている。</p> <p>第 4 章では、風車の状態監視に係る技術として、既存の CMS に係る研究開発状況やタワーの異常検知、ドライブトレインの損傷検知について示されている。</p> <p>第 5 章では、疲労寿命予測手法として、タワートップボルトと主軸軸受けについては、検討されている。</p> <p>第 6 章では、CMS に基づくメンテナンス手法の評価が記載されており、日本における故障率の分布は日欧でほぼ同じであること、予備品の保有、状態基準保全の実施、さらには天気予報利用等を用いて定期点検時期を細かく設定することで、欧州並みの設備利用率を実現することが可能であることが示されている。</p> <p>第 7 章は CMS の認証に係る事例等の紹介</p> <p>第 8 章 CMS の技術資料とされ、本章だけで独立して活用できるように取りまとめられている。</p>		

No.	タイトル	著者	発行年月
18	2013 年度～2017 年度成果報告書 風力等自然エネルギー技術研究開発/風力発電高度実用化研究開発/スマートメンテナンス技術研究開発 (分析) (リスク解析等)	新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)	2020 年 1 月
出典	NEDO 成果報告書, 報告書管理番号 20190000001057 https://www.nedo.go.jp/library/database_index.html (参照 2026/01/05)		
要点	<p>本文献は、陸上風車の運用および O&M に係る風車の稼働率低下 (設備利用率の低下)、故障の増加や風車の停止時間の増大といった課題を解決することを目的として、目標稼働率 95% を達成可能なメンテナンス技術の開発等を実施したものであり、SCADA データ及び各種要素部品の状態監視システム (Condition Monitoring System、CMS) で取得する風車状態データを示す各種センサ波形データの活用と関係するセンサ群の開発や分析技術、故障検知技術などメンテナンスを意識した状態評価技術の開発や、各種 IoT を支える情報通信システムなどを検討しており、洋上風力においても参考とされるべき貴重な成果が記録されている。</p> <p>第 2 章から第 4 章には、国内外の陸上風車における O&M 実態やトラブル事例の調査やスマートメンテナンス導入による好事例の紹介、将来に向けた展望が述べられている。</p> <p>第 5 章では計測技術の具体例、すなわち SCADA や CMS の詳細、オイルリークモニタ、各種センサ、無線通信システムなどについて解説されている。</p> <p>第 6 章から第 10 章では風車の部位損傷検技術や異常検出技術の実例と実機に適用した場合の効果検証などについて記載されている。</p>		

No.	タイトル	著者	発行年月
19	2020 年度～2021 年度成果報告書 次世代浮体式洋上風力発電システム実証研究 /洋上風力発電等技術研究開発/次世代浮体式洋上風力発電システム実証研究（浮体式洋上風力発電低コスト化技術開発） /浮体式洋上風力発電低コスト化技術開発に関する調査	新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)	2022 年 12 月
出典	NEDO 成果報告書, 報告書管理番号 20220000000999 https://www.nedo.go.jp/library/database_index.html (参照 2026/01/05)		
要点	<p>本文献は、我が国における洋上風力発電の低コスト化技術開発のロードマップを作成するとともに、欧州で行われている Joint Industry Project (JIP) 方式による技術開発を調査し、我が国での JIP の在り方について検討されたものである。</p> <p>調査は洋上風力全般について扱うものであり、低コスト化に施策として O&M にも言及されている。O&M に関する重点開発項目として以下のように整理されており、デジタル技術、スマートメンテナンス技術の必要性が指摘されている。</p> <p>分野⑧：運転保守 (O&M)</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 世界の動向：コストの 35%程度を占めるメンテナンスの高度化は世界的にも課題。洋上風力発電所の運転中に得られたデータを分析・管理するためのプラットフォームの開発や、高度な分析による洋上風力のデジタル化、試験方法及び設備、厳しい海況下での人員輸送ソリューション、運転保守戦略及びツールの開発が行われている。 ● 日本の特性：台風やうねりなどに対応した運転保守技術の開発が必要。また世界的な潮流であるデジタル技術の導入を進める必要がある。 ● 日本の強み：陸上風力においてスマートメンテナンス技術が開発されており、洋上風力への活用が期待できる。特に落雷対策技術に関しての開発が継続的に行われている。また、デジタル技術やデータプラットフォームなどの他産業で開発されている技術の導入も期待できる。 <p>なお、欧州における洋上風力の低コスト化検討の結果の整理の中で、運転保守の中でリモートでのモニタリング、制御、メンテナンスにおける潜在的コスト低減効果 (対 LCOE) として、約 4% (2025 年まで)、約 5% (2050 年まで) とした試算結果を示している。</p>		

4.5.3 まとめ

洋上風力発電における運転・保守技術に関係すると考えられる文献を調査した。調査対象は、至近に発行された国の指針・ガイドブック、風力エネルギー利用シンポジウムの最近の論文に加え、NEDO の成果報告書とした。

まず、国の指針・ガイドブック等については、過去に実施された着床式、浮体式の実証研究事業の経験を踏まえ、運転・保守として実施すべき項目が洗い出されており、関連する法令の解説がなされていた。一方で、運転・保守に関する個々の技術について言及されているものはなかった。至近の論文については、主に、風車機器の異常検知技術、風車設備の損傷点検技術、落雷検出技術を扱ったものが多かった。異常検知技術については AI による高度な学習を取り入れた検知技術を扱ったもの、損傷点検技術についてはドローンを使った撮影技術や撮影した画像の判定に AI 技術を活用したものなどが見られた。落雷検出技術については、従来の大口径ロゴスキーコイルを利用したものとは別に、音響を使ったものや監視カメラを使ったものなど新しい取り組みが発表されていた。ただし、これらの多くは洋上風力に対象を限定したものではなく、むしろ陸上風車用に開発された技術と考えられる。そこで、主に陸上風力を対象とした運転・保守に関する NEDO の成果報告書を調査した。これらの文献には、風車の各部位の損傷や、機器の異常の実績について詳細に調査されており、運転・保守の低コスト化に資する要素技術を網羅的に調査されており、洋上風力を対象とした場合にも参考になると考えられる。

5. おわりに

洋上風力産業ビジョン（第一次）では「年間 100 万 kW 程度の区域指定を 10 年継続し、2030 年までに 1,000 万 kW、2040 年までに浮体式も含む 3,000 万 kW～4,500 万 kW の案件を形成する」という政府の導入目標が掲げられた。これに沿って、「海洋再生可能エネルギー発電設備の整備に係る海域の利用の促進に関する法律（2019 年 4 月）」に基づき、国が洋上風力発電事業を実施可能な促進区域を指定し、公募を行って事業者を選定、長期占用（30 年間）を可能とする制度が設けられた。これまでに、第 1 ラウンド（長崎県五島沖、秋田県 2 区域、千葉県銚子沖）、第 2 ラウンド（秋田県八峰町及び能代市沖、新潟県村上市・胎内市沖、長崎県西海市江島沖）で公募が行われ事業者が選定されており、第 3 ラウンド（青森県沖日本海(南側)、山形県遊佐町沖）の公募が行われた。洋上風力に関しては、現在大規模なウィンドファームの建設や、風車の大型化、浮体式洋上風力発電の実用化、などが進展している。本調査では、これまでに実績が多い着床式洋上風力を中心に、制度や技術に関して取りまとめを行った。主な結果を以下に示す。

第 2 章では、「これまでの建設事例と課題」として、実際に洋上風力を建設した事業者（着床式 2 地点、浮体式 1 地点）の知見に基づいて、洋上風力を立地する際の気象・海象調査やアセスメントについて調査を行った。

風車の設計に伴う気象・海象調査では、観測塔などの現状の手法では費用は大きく、デュアルスキャニングライダーによる風況の観測やレーダー式波高計の活用によるコスト削減が期待されている。

環境アセスメントについては実施例が示されており、洋上風力の導入の促進にはアセスメント期間の短縮や、促進区域でのアセスメント制度（国と事業者のかかわり）などの制度の整備が重要と考えられる。

その他、政府の目標である 2040 年までに 3,000 万 kW～4,500 万 kW の洋上風力発電の導入を達成するにはサプライチェーン形成、港湾インフラの整備、地域間送電網の整備、EEZ への拡大、海域先行利用者との協調、浮体式の導入など多方面に関わる課題が存在しており、国内における現状と課題を整理し、官民学一体となった協力が不可欠であると考えられる。

第 3 章では、「国内の洋上風力建設にかかわる現状」として、実際に洋上風力の建設に携わるゼネコン各社により、建設技術を中心に調査を実施した。

日本特有の設計手法としては地震や台風があり、支持構造物の設計手法は、「洋上風力発電設備に関する技術基準の統一的解説（令和 2 年 3 月版）」に取りまとめられており、波浪荷重、津波荷重、地盤の液状化・沈下や地震時の荷重評価、などの関連する基本的な文献について調査・収集を行った。

2025-2028 年頃には 12MW から 15MW クラスの風車の建設が予定されるが、これに対応

する **SEP 船**は風車施工で 1,600 トン級、基礎施工には 2,500 トン級と想定され、国内では 1 社に限られている。外国船の調達も欧州での案件が優先される傾向にあり選定の自由度が極端に低い事が問題である。外国船の調達には、カボタージュ規制に関連し、60 日に 1 回の海外寄港が必要である。外国船籍を日本船籍に変更するには、SEP 船等の特殊船で 1 年以上かかる、などの課題もある。

また、基地港に求められるのは基礎部材や風車部材の移動運搬に耐えられるヤードの地耐力と、組立ヤードや岸壁前面で係留する SEP 船のレグ支圧荷重に対して岸壁が安定していることであるが、岸壁の整備はウィンドファーム案件に較べて遅延している。

今後実用化が期待されている浮体式洋上風力では、**海底ケーブルおよび係留索の施工方法**について、各方法の特徴や国内外のプロジェクト、「福島浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業」における施工事例が示されている。TLP (Tension Leg Platform) やトート係留を進めることで、1 基あたりのフットプリントが小さくなり、①限られた占有面積でのウィンドファーム基数の増加が可能、②将来的な漁業共存への貢献、などの利点がある。

コンクリート製浮体式基礎については、海中、飛沫帯および海上大気中で供用され、波浪や海水飛沫の影響を受けるため、供用期間中にコンクリート自体の劣化や鋼材の腐食等によって、その機能が損なわれやすい環境にあり、供用期間中は可能な限り「メンテナンスフリー」となるように、水結合材比、単位セメント量、最小かぶりの確保に留意する。また、国土交通省において「コンクリート製浮体式洋上風力発電施設的设计施工ガイドライン (2023 年 3 月)」が発行され設計手法が整理されているが、船級取得のための設計基準として位置付けられているものではなく、船級取得のための設計基準を国内外の関連基準を基に体系的に整備することが必要である。コンクリート浮体式基礎は鋼製浮体式基礎と比較すると「浮体寸法」「浮体重量」が大きくなる傾向にあり浮体式基礎の製造に用いる際の課題として、①基地港湾内の地耐力や製作ヤードの確保、②完成した浮体式基礎の保管水域の確保、などが挙げられている。浮体式洋上風力発電に関しては、世界的に基礎の型式・製造方法、輸送・設置の方法がまだ確立しておらず、①連続製造に適した浮体の設計、②浮体製造のパネル化やブロック化、分割施工、③ドックに依存しない浮体の大量製造、など新しい技術の確立が求められている。

風車の大型化あるいはウィンドファームの大規模化といった動向は、風車や基礎構造の施工条件に影響するため、結果的に建設費にも大きく影響することとなる。再エネ海域利用法に基づく事業者公募の結果によれば、選定された各発電事業者は出力 15~18MW の風車機種を採用する計画となっている。SEP 船やクローラクレーンなどの作業船舶機械には、吊り能力や揚程といったクレーン作業に関する制限があるため、揚重作業が可能な部材諸元 (特に重量) には限界がある。既存の作業船舶機械によって、大型風車の施工が可能となるように、部材の分割施工などの工夫が期待される。着床式の基礎構造ではモノパイル式が採用されることが多いが、一般的にはモノパイルと風車との間にトランジションピース (TP) と呼ばれる部材が設置される。最近では、この部材を無くして TP レスモノパイルを採用して、

施工の合理化を図る工法も提案されている。将来導入が見込まれる浮体式では、浮体形式、係留システム、アンカーなどの最適化、など早期の技術確立が期待される。

第4章では、主に電力会社を中心に、事業者から見た「国内での設置計画、運用にかかわる現状と課題」について調査を行った。

日本版セントラル方式の制度設計に関しては、これまでの議論結果が「洋上風力発電に係るセントラル方式の運用方針〔骨子〕（案）」として取り纏められているが、項目によっては国の役割や関与（またはその必要性）が不明確であるなどの課題が残っている。

国外のデータベースに関しては、風車クラス別の設備利用率や着氷を考慮した月別の発電ロス率など、特徴的な情報が提供されており、こうした事例は今後の国内のDB構築への参考になる可能性がある。

コーン試験併用による認証に関しては、今後、多様な地質・地盤条件下の調査、設計が増えることが想定されるため、調査・試験で得られた多様な地盤特性を設計に反映させるための知見を蓄積し、学会レベルでの基準策定やガイドラインなどを整理していく事は意義があると考えられる。

設計基準に関しては、例えば、基礎設計では海外基準をベースに国内基準を適宜取り入れているような形で審査が進められているなどの実態から、事業者の負担を軽減する意味でも、審査基準の明確化が特に重要であると考えられる。

主に陸上風力を対象とした運転・保守に関するNEDOの成果報告書には、風車の各部位の損傷や、機器の異常の実績など、運転・保守の低コスト化に資する要素技術が網羅的に調査されており、洋上風力でも参考になると考えられる。

以上

