

洋上風力発電技術に関する 現状と動向調査（その1）

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

環境技術小委員会 洋上風力分科会 委員

職名	氏名	所属	分担
主査	仲敷 憲和	(一財)電力中央研究所	1章、5章
副主査	藤田 岳	電源開発(株)	1章、5章
委員	松本 省吾	(株)大林組	3.2章
〃	宮本 久士	鹿島建設(株)	3.1章
〃	島谷 学	五洋建設(株)	3.5章
〃	田中 仁志	清水建設(株)	3.3章
〃	白枝 哲次	清水建設(株)	3.3章
〃	清水 正巳	大成建設(株)	3.4章
〃	佐藤 郁	五洋建設(株)	2.3章
〃	齋藤 寿秋	北海道電力(株)	4.1章
〃	岸部 大蔵	東北電力(株)	4.5章
〃	古川 俊也	東北電力(株)	4.5章
〃	松尾 敏	東京電力ホールディングス(株)	2.4章
〃	村口 英之	東京電力ホールディングス(株)	2.4章
〃	杉山 陽一	中部電力(株)	4.5章
〃	中村 孝之	北陸電力(株)	4.2章
〃	直江 裕之	北陸電力(株)	4.2章
〃	横田 克哉	関西電力(株)	4.4章
〃	原田 裕明	関西電力(株)	4.4章
〃	谷田 哲也	中国電力(株)	4.1章
〃	及川 隆仁	中国電力(株)	4.1章
〃	荻山 和樹	四国電力(株)	4.4章
〃	山下 太久	四国電力(株)	4.4章
〃	池田 博嗣	九州電力(株)	4.3章
〃	川崎 貴道	九州電力(株)	4.3章
〃	春口 雅寛	九州電力(株)	4.3章
〃	藤田 亮一	九州電力(株)	4.3章
〃	清水 良平	電源開発(株)	2.1章、2.2章
〃	田村 英寿	(一財)電力中央研究所	4.2章、4.3章
委員兼幹事	滝野 晶平	東京電力ホールディングス(株)	1章、5章
オブザーバー	石原 孟	東京大学大学院	
〃	清水 隆夫	元(一財)電力中央研究所	
〃	佐々木 淳	新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)	

〃	三枝 俊介	新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)	
〃	江草 弘章	新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)	
〃	木村 文昭	新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)	
〃	森下 和輝	新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)	
〃	村田 博一	新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)	
〃	山本 正嗣	新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)	
〃	大和田 千鶴	新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)	
〃	木原 直人	(一財)電力中央研究所	
〃	岩下 智也	(一財)日本海事協会	

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	3-6
波浪、津波、地盤(工学的基盤)、地盤(調査)、液状化、耐震設計	
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

1. はじめに

2015年に採択されたパリ協定¹⁾は、「産業革命前からの世界平均気温上昇を2°Cより十分低く、できれば1.5°Cに抑える努力を追求すること」（1.5°C目標）が合意された。これに伴い、我が国では、2021年4月に「2050年カーボンニュートラルの実現に向け、野心的な目標として、2030年度に温室効果ガスを2013年度レベルから46%削減する」ことを表明した。2021年に閣議決定された第6次エネルギー基本計画²⁾では、社会全体としてカーボンニュートラルを実現するには、電力部門では非化石電源の拡大を進めることが必要とされている。2030年度の総発電電力量を9,340億kW程度と想定して、「2030年度の温室効果ガス46%削減に向けては、一段の施策強化等に取り組むこととし、合計3,360~3,530億kWh程度(電源構成では36~38%)の再エネ導入」が目指されている。このうち洋上風力発電は、欧州を中心として世界各地で導入が進められ、(1)大量導入、(2)コスト低減、(3)経済波及効果など、再生可能エネルギーの主要な電源として期待されている。「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」では、洋上風力に関して以下の取り組みが行われている³⁾。

洋上風力

主な今後の取組

導入目標を明示し、国内外の投資を呼び込む

- 2030年までに1,000万kW
2040年までに3,000万kW~4,500万kW

系統・港湾のインフラを計画的に整備する

- 2022年度中に、系統整備のマスタープランの完成を目指す
- 2021年3月に、洋上風力発電の適地から大需要地をつなぐ海底の長距離直流送電の整備に向けて、検討会を立ち上げ
- 2020年度末に秋田港の整備を完了。残る3港も引き続き工事を実施。また、2021年度中に、基地港湾の全国配置や地域振興の方策等を取りまとめ

競争力を備えたサプライチェーンを形成する（産業界として目標設定）

- 国内調達比率：2040年までに60%
- 着床式の発電コスト：2030年~2035年までに8~9円/kWh

規制の総点検によって事業環境を改善する

- 2021年4月から、電気事業法と港湾法・船舶安全法の審査を一本化。また、同月から、電気事業法の安全審査についても、一定の条件下で手続を合理化。
- 2021年度前半に、海洋汚染等防止法に基づく、風車撤去時の残置許可基準の明確化について、一定の考えを示す。
- 2021年度内を目途に、航空法に基づく、洋上風力発電設備への航空障害灯の設置等に係る基準の緩和策を取りまとめる。

「技術開発ロードマップ」に基づいた実証を見据え、要素技術開発を加速する

- 「技術開発ロードマップ」（2021年4月策定）に基づき、特にサプライチェーン構築に不可欠な風車や中長期的に拡大の見込まれる浮体式等について、グリーンイノベーション基金の活用も検討しつつ、実海域での実証を見据えて、要素技術開発を加速化。

出典：経済産業省「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略、洋上風力・太陽光・地熱産業」³⁾

洋上風力発電を建設する場合には、都道府県条例による海域占用許可は3～5年程、港湾区域では港湾法に基づく海域占用許可は20年であり、小規模な洋上風力発電の導入が進展した（条例5区域、港湾5区域⁴⁾）。

一方、大規模な洋上風力発電を促進するため、一般海域では2019年4月に施行された「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（以下、再エネ海域利用法）」第8条に基づき、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、現在、第3ラウンド（青森県沖日本海(南側)、山形県遊佐町沖）の公募が行われている⁴⁾。洋上風力発電の大規模化に伴い、使用する風車は、第1ラウンドでは12.6MW（五島沖を除く）、第2ラウンドでは15～18MWと大型化している。

また、早期に促進区域に指定できる見込みがあり、より具体的な検討を進めるべき区域である「有望な区域」として9区域（北海道石狩市沖、北海道岩宇・南後志地区沖（着床）、北海道島牧沖（着床）、北海道檜山沖、北海道松前沖、青森県沖日本海（北側）、山形県酒田市沖、千葉県いすみ市沖、千葉県九十九里沖（九十九里町、山武市及び横芝光町沖））、都道府県からの情報提供を踏まえ「一定の準備段階に進んでいる区域」として8地域（北海道岩宇・南後志地区沖（浮体）、北海道島牧沖（浮体）、青森県陸奥湾、岩手県久慈市沖、富山県東部沖（入善町及び朝日町沖）、福井県あわら市沖、福岡県響灘沖、佐賀県唐津市沖）が位置付けられている⁵⁾。

さらに、洋上風力発電を促進するため、「有望な区域」などにおいて、計画の初期段階で政府または政府に準ずる主体が風況調査、海底地盤調査、気象海象調査、環境アセス関連調査、漁業実態調査、系統確保などを実施し、データを管理する「日本版セントラル方式」が導入され、2023年度からエネルギー・金属鉱物資源機構（JOGMEC）及び新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）により調査・実証が行われている。

以上のように、我が国においてもカーボンニュートラルを目指して大規模な洋上風力の導入に向けた制度や基地港の整備、使用する風車の大型化など急速に進んでいる。これまでに、促進区域では着床式の洋上風力発電を中心に4.6GW分の案件が進捗しており、さらなる導入の拡大を目指し、浮体式洋上風力の実証候補区域の選定（北海道などの4地区）や、排他的経済水域（EEZ）への展開を可能とするための環境整備などの取り組みが行われている。

洋上風力に関する状況は日進月歩であるが、本調査報告書では、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。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。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。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。第5章では、全体を通しての課題や提言について取りまとめを行った。

参考文献

- 1) 外務省: 「2020年以降の枠組み: パリ協定」
https://www.mofa.go.jp/mofaj/ic/ch/page1w_000119.html (参照 2025/12/5)
- 2) 経済産業省 資源エネルギー庁: 「エネルギー基本計画の概要」, 2021年3月
- 3) 経済産業省: 「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略、洋上風力・太陽光・太陽光・地熱産業」
https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/ggs/01_yojotaiyoko.html
(参照 2025/12/5)
- 4) 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24回) 「資料1 これまでの洋上風力政策の進捗」, 2024年4月
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/saisei_kano/yojo_furyoku/024.html
(参照 2025/12/5)
- 5) 経済産業省: 「再エネ海域利用法に基づく促進区域の指定、セントラル方式による調査対象区域及びGI基金(浮体式実証)の候補区域について」, 2023年10月
<https://www.meti.go.jp/press/2023/10/20231003002/20231003002.html> (参照 2025/12/5)

2. これまでの建設事例と課題

2.1 洋上風力発電事業の意義と現状

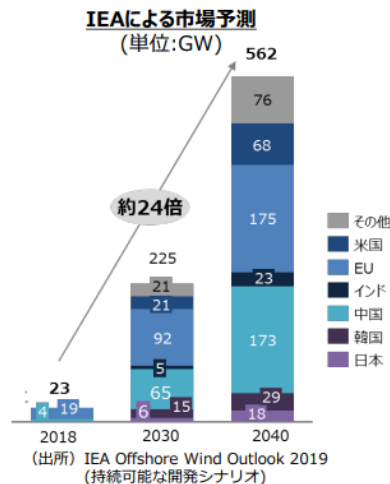
- 政府は洋上風力の産業競争力強化に向けた基本戦略として、2030年までに10GW、2040年までに30～45GWの意欲的な目標を設定した。
- 洋上風力産業ビジョン(第1次)に示された通り、洋上風力発電は、①大量導入、②コスト低減、③経済波及効果が期待される。
- 現在、洋上風力産業の多くが国外に立地しているが、日本にも潜在力のあるサプライヤーは存在している。

【参考】洋上風力発電導入の意義

- 洋上風力発電は、①大量導入、②コスト低減、③経済波及効果が期待されることから、再生可能エネルギーの主力電源化に向けた切り札。

①大量導入

- 欧州を中心に世界で導入が拡大
- アジア市場が急成長が見込まれる
- 四方を海に囲まれた日本でも、今後導入拡大が期待されている。



②コスト低減

- 先行する欧州では、落札額が10円/kWhを切る事例や市場価格(補助金ゼロ)の事例が生ずる等、風車の大型化等を通じて、コスト低減が進展。

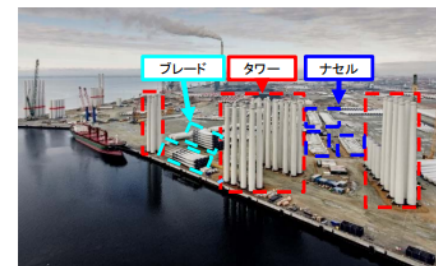
国	プロジェクト名	価格 (€=123.6円) ※2019年平均相場
オランダ	Hollande Kust Zuid 3 & 4	市場価格 (補助金ゼロ)
フランス	Dunkirk	44 EUR/MWh (5.4円/kWh)
イギリス	Sofia	44.99EUR/MWh (5.6円/kWh)
イギリス	Seagreen Phase 1 - Alpha	47.21EUR/MWh (5.8円/kWh)
イギリス	Forthwind	44.99EUR/MWh (5.6円/kWh)
イギリス	Doggerbank Teeside A	47.21EUR/MWh (5.8円/kWh)
イギリス	Doggerbank Creyke Beck A	44.99EUR/MWh (5.6円/kWh)
イギリス	Doggerbank Creyke Beck B	47.21EUR/MWh (5.8円/kWh)

③経済波及効果

- 洋上風力発電設備は、構成機器・部品点数が多く(数万点)、事業規模は数千億円。
- 日本に潜在的サプライヤーは存在するも、現状、関連産業は国外に立地。

欧州における港湾都市の事例(デンマーク・エスビアウ港)

- ・建設・運転・保守等の地域との結びつきの強い産業も多いため、地域活性化に寄与。
- ・エスビアウ市では、企業誘致にも成功し、約8,000人の雇用を創出。



洋上風力発電事業の現状

▶ 洋上風力発電事業の開発に関しては、個社の努力分野である競争領域と、それ以外の非競争領域に大別できる。本委員会では、非競争領域として風況観測、気象・海象観測および環境アセスメントに焦点を当て、これまでの建設事例から見た洋上風力発電事業の現状について整理した。

技術開発項目のロングリスト

- 欧米の技術開発項目や日本の環境等を踏まえ、有識者や産業界の意見を反映の上、項目をグループ化してリスト化。
- このリストのうち、「世界の動向」「日本の特性」「日本の強み」を踏まえ、重点技術開発項目を抽出（次ページ以降）。

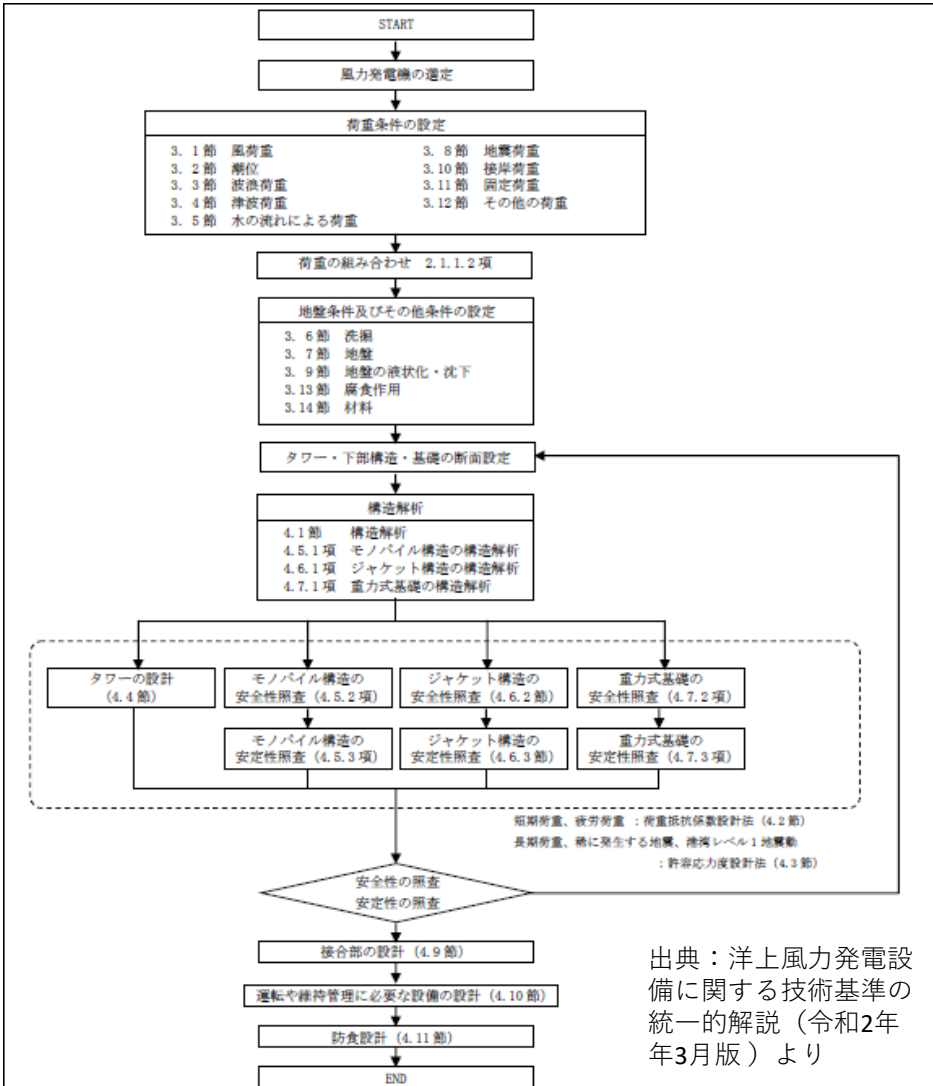
区分	分野	技術開発項目案	
共通	① 調査開発 (風況観測・配置最適化等)	<ul style="list-style-type: none"> ● 風況観測（各種ライダーや低コスト風況観測タワー等） ● ウェイク及び発電量予測モデルの高度化 	<ul style="list-style-type: none"> ● 洋上風力用の気象海象計測データ整備 ● 地盤条件データベースの開発
	② 風車 (風車設計・ブレード・ナセル部品・タワー等)	<ul style="list-style-type: none"> ● 風車仕様の最適化 ● 風車の高品質大量生産技術 ● 浮体搭載風車の最適設計 ● 次世代風車要素技術開発 ● 低風速域向けブレード 	<ul style="list-style-type: none"> ● 洋上風車の長寿命化技術 ● 大型風車の開発 ● ブレード侵食防止技術 ● ブレードリサイクル技術 ● タワーの高高度化と低コスト化
着床	③ 着床式基礎製造 (モノパイル・ジャケット等)	<ul style="list-style-type: none"> ● 複雑な地質・厳しい気象海象条件に対応した基礎構造 ● タワー・基礎接合技術の高度化 	<ul style="list-style-type: none"> ● 基礎構造用鋼材の高強度化・低コスト化 ● 基礎溶接技術の高度化
	④ 着床式設置 (輸送・施工等)	<ul style="list-style-type: none"> ● 低コスト施工技術の開発 ● 洗掘防止工の高度化 	<ul style="list-style-type: none"> ● ロジスティクスの高度化 ● 撤去
浮体	⑤ 浮体式基礎製造 (浮体・係留索・アンカー等)	<ul style="list-style-type: none"> ● 一体設計 ● 浮体基礎の最適化 ● 係留システムの最適化 ● 浮体の量産化 	<ul style="list-style-type: none"> ● ハイブリッド係留システム ● メンテナンスフリー技術 ● 浮体システムの計測技術
	⑥ 浮体式設置 (輸送・施工等)	<ul style="list-style-type: none"> ● 低コスト施工技術の開発 ● 作業船と輸送システム 	<ul style="list-style-type: none"> ● 大規模修繕技術 ● 撤去・リサイクル
共通	⑦ 電気システム (海底ケーブル・洋上変電所等)	<ul style="list-style-type: none"> ● 高電圧ダイナミックケーブル ● 浮体式洋上変電所 ● 次世代洋上直流送電技術 	<ul style="list-style-type: none"> ● 洋上送電ケーブル敷設の高効率化 ● 発電需給の統合予測 ● 系統安定化技術
	⑧ 運転保守 (O&M)	<ul style="list-style-type: none"> ● 運転保守及び修理技術の開発 ● デジタル技術による予防保全・メンテナンス高度化 ● 監視及び点検技術の高度化 	<ul style="list-style-type: none"> ● 落雷故障自動判別システムの開発 ● リモートセンシングと予報技術による発電量向上
官民協議会等における検討と連携して推進する項目		<ul style="list-style-type: none"> ● 人材育成 ● サプライチェーン ● ステークホルダーの合意（漁業協調、騒音低減等） 	<ul style="list-style-type: none"> ● ガイドライン・標準化 ● 海底直流送電 ● 水素変換とエネルギー貯蔵

出典：洋上風力の産業競争力強化に向けた官民協議会 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)、
洋上風力の産業競争力強化に向けた技術開発ロードマップ(案) (2021年4月1日資料)より

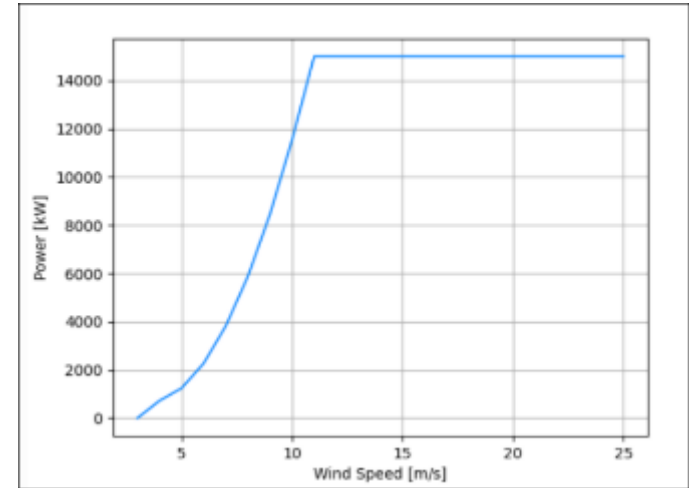
2.2 響灘実証機 -風況観測を中心として-

2.2.1 洋上風力における風況観測について

➤ 洋上風力発電事業の事業性評価・構造設計の検討をするにあたり、風荷重や波浪荷重が必要となる。



例：支持構造物の設計の流れ



出典:NREL 15MW_240 Power curveより

「風車の出力は風速の3乗に比例」と言われるように、風況の測定誤差は発電電力量の誤差に繋がる。

例えば
観測装置による測定誤差が5%として、風速8m/s～8.4m/sの範囲で電力量を計算をした場合、8m/sでは5,000kWに対し、8.4m/sでは6,000kWと1,000kWの誤差であり、電力量では20%の誤差となる可能性も考えられる。

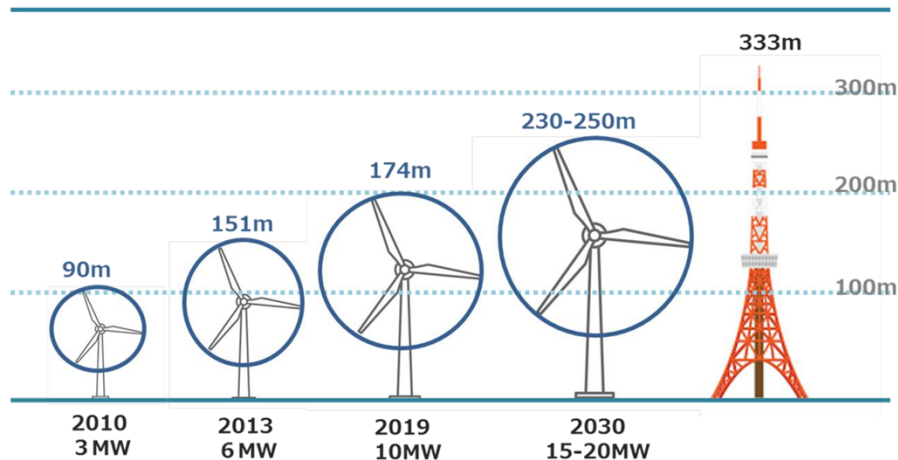
上記は一例であるが、風車機種や環境条件により変動するが、洋上風力発電事業において風況・気象海象観測には高い精度が求められる。

出典：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）より

WF認証に求められる観測塔条件

- 発電事業の予定地では現地での風況観測を少なくとも1年以上実施すること。
- 観測高さは、計画する風車のハブ高さの2/3以上とする。
- 観測地点は当該地点を中心に10km以内の計画風車を代表することができる。(平坦地形)
- 近年の風車大型化の傾向から、要求される観測高さは60mを超える。
- 近年、促進区域に指定される区域であれば、観測塔1台でエリア内の計画風車を代表できる。
※離岸距離が短い場合、沿岸部の影響を受ける可能性があるため、事前検討が必要となる。

<洋上風車の大型化>



【出典】「IEA(2019) Offshore Wind Outlook」及び「MHIゲストス提供資料」より資源エネルギー庁作成



秋田県男鹿市、潟上市及び秋田市沖に係る促進区域

出典：資源エネルギー庁資料「浮体式洋上風力発電に関する国内外の動向等について」
https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/green_innovation/green_power/pdf/004_04_00.pdf (参照2025/12/26)

出典：資源エネルギー庁「秋田県八峰町及び能代市沖」、「秋田県男鹿市、潟上市及び秋田市沖」、「新潟県上市及び胎内市沖」、「長崎県西海市江島沖」に係る公募占用指針(案)について
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denyoku_gas/saisei_kano/yojo_furyoku/pdf/017_01_00.pdf (参照2025/12/26)

2.2.2 響灘実証機の概要

- 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の受託研究として、「洋上風況 観測システム実証研究(北九州市沖)」を電源開発(株)にて実施した。
- 響灘沖合の洋上にて、平均風速、風向、乱流強度、ウインドシア、風-波同時生起性、ウエイク、統合解析システムの開発を目的に洋上風況観測塔を設置した。



洋上風況観測塔 (2012年6月設置)

- 水深 : 約14m
- 離岸距離約 : 1.4km
- 海面高さ : 85m
- 風車との距離 : 250m
- 構造 : 鋼管トラス構造
(支持構造物は重力・ジャケットハイブリッド方式を採用)

観測計器は海面から15m～81.6mまでの8層に設置

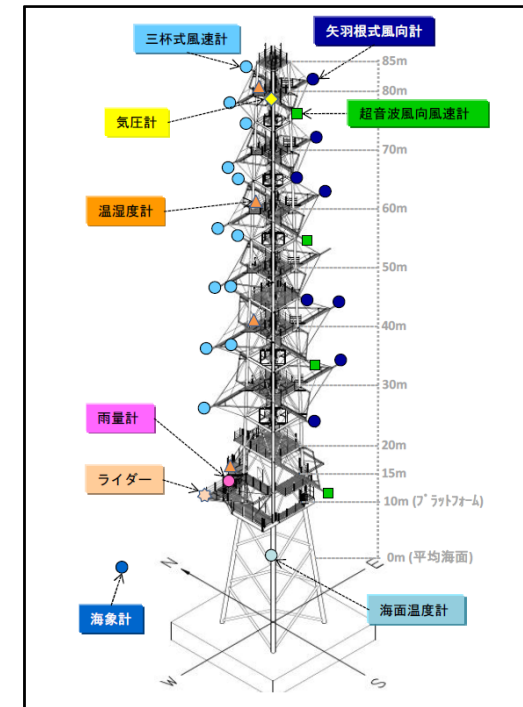
- 風向,風速計 (三杯型風速計・矢羽根式風向計)
- 鉛直ライダー
- 超音波式風速計
- 温度計、湿度計、気圧計
- 海象計

2.2.3 観測等建設に於ける課題・建設コスト

観測機器情報

No.	観測機器	観測要素	数量	サンプリング周波数	設置階	観測高	備考
1	三杯式風速計	風速	12	4Hz	80,70,60,50,40,30m	設置階+1.6m	
2	矢羽根式風向計	風向	9	4Hz	80,70,60,50,40,30m	設置階+1.6m	
3	超音波風向風速計	風速・風向	4	20Hz	80,60,40,20m	設置階+1.6m	
4	ライダー	風速・風向	1	1Hz	15m	60~220mまでの20m 毎10高度+1.3m	
5	温度計	温度	4	4Hz	80,60,40,15m	設置階+1.0m	
6	湿度計	湿度	4	4Hz	80,60,40,15m	設置階+1.0m	
7	気圧計	気圧	1	4Hz	80m	80m	
8	雨量計	雨量	1	4Hz	15m	15m	0.5mmカウント
9	海面温度計	海面温度	3	4Hz	-1m	-1m	
10	海象計	波高・周期・波向・流れ・潮位	1	2Hz	-14m	-14m	観測塔から北西方向の海底に設置

風況観測塔導入コスト：15億円
(建設費、維持管理費、研究費を含む実証研究受託額)



観測塔建設の課題

- 観測塔の設置コストが高い。
- 建築基準法に基づく性能評価、大臣認定、工作物確認が必要である。
- 基礎構造物の地盤調査が工期、コスト増加につながる。
- 大規模洋上ウインドファームの場合、沖合に多数の観測塔を設置することとなり、コスト増加につながる。

費用面	技術面	法制度ほか
<ul style="list-style-type: none"> 設置箇所の地質条件によるが、岩盤削孔に膨大な費用と工期(実証機10ヶ月)がかかる。 海上での工事は波浪の影響により工事時期が限られ、工期が長期化し、コスト増加につながる。 調査地点の気象・海象条件の調査にも費用と工期がかかる。 	<ul style="list-style-type: none"> 荷重の種類に応じて各部位の許容値を満足する様に設計が必要である。 観測塔の共用年数は20年とされる。 	<ul style="list-style-type: none"> ウインドファーム認証ではタワー高さの2/3以上の計測が必要であるが、風車大型化に伴い、ハードルが上がる。(下回る場合は複数高度より推定) 風況データを最低でも1年以上の風況観測が一般的、長期観測は事業者の負担増となる。

出典: 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)、平成21年度～平成28年度成果報告書 風力等自然エネルギー技術研究開発 洋上風力発電等技術研究開発 洋上風況観測システム実証研究(北九州市中)(1/2)、20190000000055(2019年3月)より

2.2.4 デュアルスキャンングライダーの活用

- デュアルスキャンングライダーの構成として、むつ小川原サイトで校正されたスキャンングライダー2基に加え、鉛直ライダー1基、陸上気象マスト1基にて計測される。
- 風況観測塔の代わりにデュアルスキャンングライダーを採用することで、風況観測の導入コストを15億円から数億円(1/5~1/10程度)とすることが可能であり、洋上風力発電の低コスト化に繋がる。



図 4.1 DSLによる洋上風況観測点の例(むつ小川原港)

出典:新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)、
洋上風力観測ガイドブック(2023年3月)より

- 2019年~2022年9月の期間において、スキャンングライダーの精度調査を実施中
- 2021年11月19日 第43回風力エネルギー利用シンポジウム「むつ小川原サイトにおけるスキャンングライダー実験」にてデュアルスキャンングライダーの計測精度について報告(途中経過)された。
- 長期検証においてシステムの運転状況および気象条件によりデータ取得率が変動するが、10分平均風速及び風向の計測精度については基準を満足していた。乱流強度もデータ取得率の違いを考慮した場合でもマストデータと大差ないことが報告された。

コスト比較(概算)

デュアルスキャンングライダー	
スキャンングライダー2基	数億円
気象マスト	数千万円
鉛直ライダー	数千万円
合計	数億円

風況観測塔	
風況観測塔(建設費、維持管理費、研究費含む実証研究受託額)	15億円
合計	15億円

洋上風況観測ガイドブック:デュアルスキャニングライダーによる観測監修



2023年3月 洋上風況観測ガイドブック発表

- 第1章 概説
- 第2章 風況観測及び風条件の評価
- 第3章 洋上風況観測マストによる観測
- 第4章 デュアルスキャニングライダー(DSL)による観測
- 第5章 シングルスキャニングライダー(SSL)による観測
- 第6章 鉛直ライダー(VL)による観測
- 第7章 フローティングライダー(FLS)による観測
- 第8章 観測データ欠測時の補完方法及び精度検証
- 第9章 レポート作成
- 附属書A ハードターゲット調整
- 附属書B 事前精度検証
- 附属書C データ取得率確認
- 附属書D FLS設置工事の例

出典: 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)、洋上風力観測ガイドブック(2023年3月)より

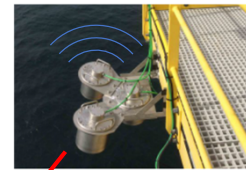
2.3 五島市沖洋上風力発電 -波浪観測を中心として-

2.3.1 洋上風力における波浪観測について

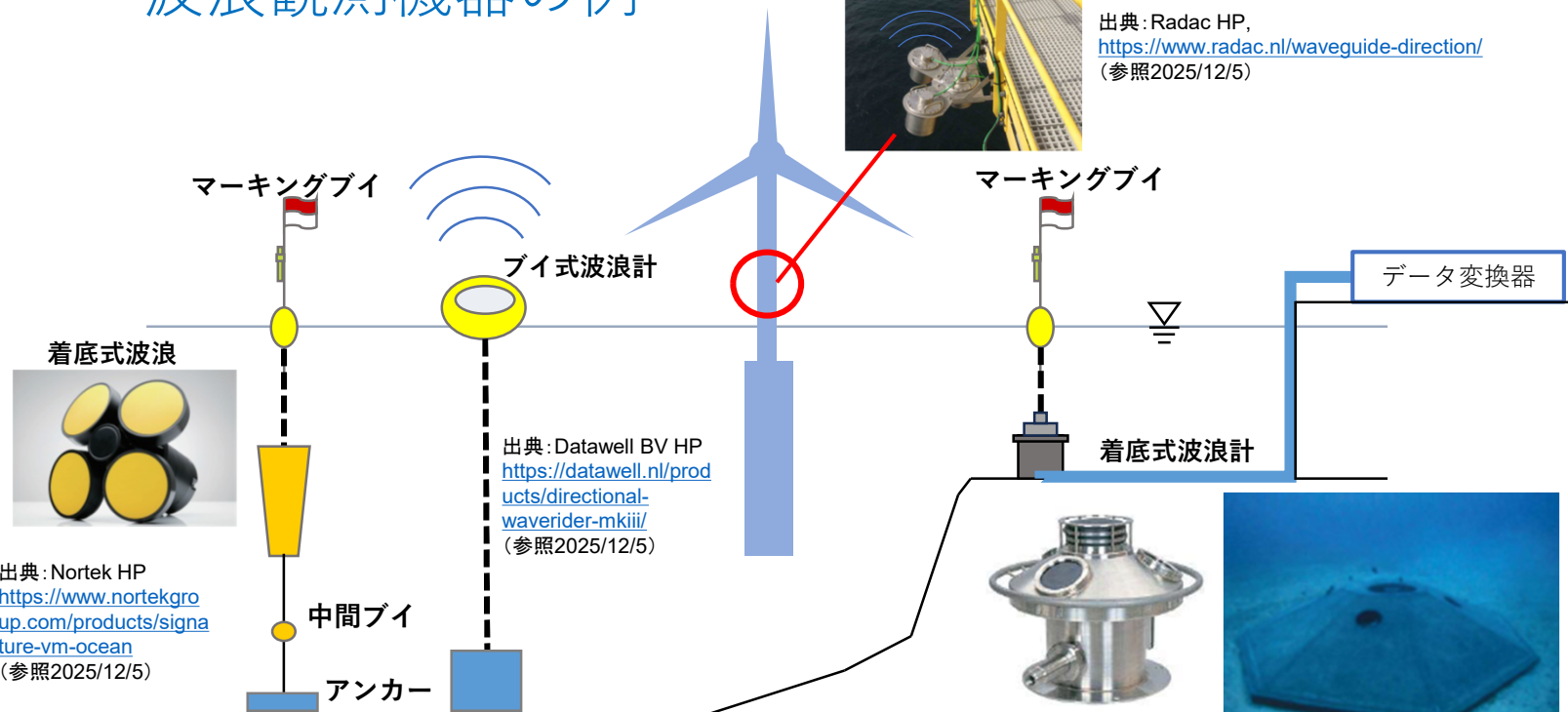
- ブイ式:リアルタイムでの計測が可能。電池寿命1年程度であることに加え、海上に浮遊しているため、破損の可能性がある。コストは買い取り価格で1,000万円程度。
- 着底式:50m以深では精度が低下するため、リアルタイムでの計測は困難である。コストは1,300万円程度。
- レーダー式:戸田建設にて試験中。波高は0~60mを1cmの精度で測定可能であり、波向きや形が測定できる点が大きな利点である。コストは800万円程度。ただし、電波法により届出と免許が必要であり、導入のハードルとなっている。

波浪観測機器の例

レーダー式波浪計



出典: Radac HP,
<https://www.radac.nl/waveguide-direction/>
(参照2025/12/5)



出典: Nortek HP
<https://www.nortekgroup.com/products/signature-vm-ocean>
(参照2025/12/5)



出典: Datawell BV HP
<https://datawell.nl/products/directional-waverider-mkiii/>
(参照2025/12/5)

出典: 株式会社ソニック「TU-300カタログ」
<https://u-sonic.co.jp/web-catalog/HTML5/pc.html#/page/80>
(参照2025/12/5)

2.3.2 波浪観測機器の特徴(ブイ式、着底式、レーダー式)

	ブイ式	着底式	レーダー式
特徴	<ul style="list-style-type: none"> リアルタイムにデータを取得可能 電源は内臓バッテリー、太陽電池 水深の制限なし 	<ul style="list-style-type: none"> 流況を計測可能 電源は外部電源、内臓バッテリー 	<ul style="list-style-type: none"> 設置や計測に水中作業は不要 ブイや着底式と比較して軽量 リアルタイムにデータを取得可能 電源は外部電源 水深に制限なし
データ処理	<ul style="list-style-type: none"> ネットワーク メモリー 	<ul style="list-style-type: none"> 通信ケーブル メモリー ネットワーク 	<ul style="list-style-type: none"> ネットワーク メモリー
課題	<ul style="list-style-type: none"> 船舶衝突による破損の可能性あり 荒天時にリアルタイムデータの取得が困難 	<ul style="list-style-type: none"> 水深に制限あり リアルタイムデータ取得に空中までの配線が必要 	<ul style="list-style-type: none"> 日本の電波法に適合していない

波浪観測機器の特徴(ブイ式)

	ブイ式	ブイ式	ブイ式
名称	Directional Waverider MkⅢ (オランダ製)	ゼニライトブイ製GPS波浪計 (日本製)	Spotter (アメリカ製)
参照元	https://datawell.nl/categories/buoys/ (参照2025/12/5)	https://www.zenilite.co.jp/ja/prod-kansoku-2smart.html#gps_haroukei_buoy (参照2025/12/5)	https://www.sofaroccean.com/products/spotter/solutions/spotter (参照2025/12/5)
外観			
データ取得	Argosシステムによる衛星通信	メモリ	ネットワーク・メモリ
サンプリングレート	3.84 Hz	カタログ等記載無し	2.5 Hz
波高測定	-20~+20 m (精度0.5-1.0%)	0~20 m (精度: 10 cm)	カタログ等記載無し (精度: 2 cm)
波周期測定	1.6~30秒	3~16秒	1-30秒
波向き	カタログ等記載無し	360 deg (精度: 0.4~2 deg)	0~540 deg
流況	カタログ等記載無し	流速: 0~500 cm/s 流向: 0~540 deg	カタログ等記載無し
電源	バッテリー、16か月間駆動可	太陽電池、蓄電池 (6ヶ月以上の観測可能)	太陽電池、蓄電池
対応水深	制限なし	制限なし	カタログ等記載無し
機器寸法、重量	直径700 mm、109 kg	直径800 mm、35 kg	直径420 mm高さ310 mm、7.45 kg
費用	500~600万円、Argosサービス月額1.2万円	カタログ等記載無し	\$ 5,900
特徴	<ul style="list-style-type: none"> 計測データはArgosシステムにより、衛星回線を通じてサーバに保存され、インターネットを通じてリアルタイムにアクセスできる。 	<ul style="list-style-type: none"> 単独測位方式のGPSセンサのみで波浪を観測できる。 台風通過時の有義波高7m程度の波を測定できた。 	<ul style="list-style-type: none"> 水面温度を測定できる。 水面における風速を算出できる。 他のブイ式と比較してコンパクトで軽量である。
課題	<ul style="list-style-type: none"> 船舶衝突による破損 荒天時におけるリアルタイムデータの取得が困難 	<ul style="list-style-type: none"> 船舶衝突による破損 	<ul style="list-style-type: none"> 船舶衝突による破損

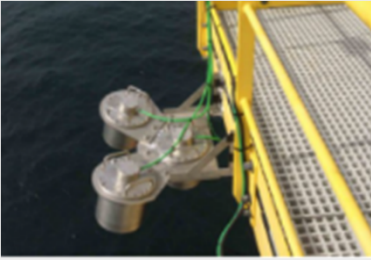
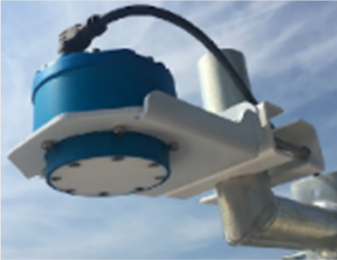


波浪観測機器の特徴(着底式)

	着底式	着底式		
名称	TU-300 (日本)	Signature250 (ノルウェー)	AWAC 1 MHz (ノルウェー)	SentinelV100 (Waves Array付) (アメリカ)
参照元	https://u-sonic.co.jp/product/category/detail/sid:9a5fa18d-cd94-11e9-b11b-9ca3ba0232db/pid:a63162bc-050a-11ea-bcc9-ae9f117a2f7b (参照2025/12/5)	https://www.nortekgroup.com/products/signature250 (参照2025/12/5) (中層フロートはカタログのみ記載)	https://premium.ipros.jp/nortekgroup/product/detail/2000453488/ (参照2025/12/5)	https://www.teledynemarine.com/products/sentinel-v-waves-array (参照2025/12/5)
外観				
データ取得	通信ケーブル (デジタル信号)	メモリー	メモリー、オンライン	メモリー、オンライン
サンプリングレート	2 Hz	1 Hz	1Hz	~1Hz
波高測定	-15 ~ +15m	-15 ~ 15 m (精度: 測定値の1%)	-15~15 m (精度: 測定値の1%)	10.0 cm~ (サーフェストラック)
波周期測定	解像度1秒	2~50秒	0.5~50秒	1秒~ (サーフェストラック)
波向き	0 ~ 540 deg	0 ~ 359 deg (精度: 2 deg)	カタログ等記載無し (精度: 2 deg)	測定可能
流況	流速: 0~500 cm/s 流向: 0~540 deg	流速: 0~5m/s 流向: 0~359 deg	流速: ±5 m/s	流速: ±5 m/s 流向: 0~360 deg
電源	電源ケーブルで供給AC100V	アルカリ(540Wh)、リチウム(1800Wh)電池パック 標準消費電力400 mW	DC9~18V 平均消費電力0.65W	外部電源、内臓バッテリー
対応水深	50mまで	150 m (中層フロートを付けると制限なし)	30 m	80m
機器寸法、重量	直径540 mm高さ483mm	直径464 mm高さ523mm、23.5 kg (中層フロートを付けると直径480 mm高さ1150mm、65 kg以上)	直径210 mm高さ175mm、6.1 kg	直径265.6mm高さ471.0mm、16.3kg
費用	送受信器650万円+変換器640万円	カタログ等記載無し	カタログ等記載無し	カタログ等記載無し
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・ジンバル機構によりセンサが傾いても表面波の補正が可能である。 ・センサは架台内に格納し魚網に対策している。 ・流況の観測が可能である。 ・50台以上の出荷実績がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・圧力センサによる海面高度測定を用いて砕波等に起因するデータ欠損をカバーできる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・数千台の使用実績がある (カタログ記載)。 	<ul style="list-style-type: none"> サーフェストラック (超音波到着時間による海面距離)、水粒子速度、圧力の3つの手法を同時に用いて、波高、波向、周期を計算する。
課題	<ul style="list-style-type: none"> ・リアルタイムデータ取得には空中まで配線が必要 	<ul style="list-style-type: none"> ・リアルタイムデータ取得は困難 		

波浪観測機器の特徴(レーダー式)

◆レーダー式採用の目的

➤ リアルタイムの波高測定値を船の運航判断に利用できないか検討中。今後の浮体洋上におけるO&Mではリアルタイム測定が可能なレーダー式が必要と思案した。

	レーダー式		レーダー式		
名称	WG5-HT-CP (オランダ)		LX-80 (アメリカ)	US-500 (日本)	SM-140 (ノルウェー)
参照元	https://www.radac.nl/waveguide-direction/ (参照025/12/5)		https://www.geolux-radars.com/product/lx-80/ (参照2025/12/5)	https://www.u-sonic.co.jp/product/category/detail/sid:9a6192c5-cd94-11e9-b11b-9ca3ba0232db/pid:a631aad2-050a-11ea-bcc9-ae9f117a2f7b (参照2025/12/5)	https://www.ipros.com/product/detail/2000586740/ (参照2025/12/5)
外観					
データ取得	ネットワーク	デジタル信号	メモリー	アナログ信号：電圧または温度、デジタル信号	メモリー、オンライン
サンプリングレート	10 Hz		10Hz	8 Hz	50 Hz
波高測定	0~60 m 精度±1 cm		0.1~30m	0~10m	0~92m (精度：1cm)
波周期測定	1~100秒 精度50ミリ秒		カタログ等記載無し	カタログ等記載無し	0.5~128秒 (精度：0.1秒)
波向き	360 deg 精度±2 deg		カタログ等記載無し	カタログ等記載無し	カタログ等記載無し
流況	×		カタログ等記載無し	カタログ等記載無し	カタログ等記載無し
電源	レーダー部8 W/基+コントローラ4.8 W		9-27 VDC 標準消費電力1.8W	AC100V、DC12V	DV24 V 消費電力7W未満
対応水深	制限なし		制限なし	制限なし	制限なし
機器寸法、重量	直径265mm高さ245mm、12.5kg		幅65mm高さ55mm奥行65mm、0.5kg	直径250mm高さ278mm	幅500mm高さ136mm奥行400mm、11kg
費用	850万円		カタログ等記載無し	カタログ等記載無し	カタログ等記載無し
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・空中線電力が1mWと低い。(電波法による設置の際に届け出を必要とする空中戦電力は10W) ・小型かつ軽量である。 ・メンテナンスを必要としない。 		<ul style="list-style-type: none"> ・設置や計測に水中作業を必要としない。 ・消費電力が低い。 	<ul style="list-style-type: none"> ・設置や計測に水中作業を必要としない。 	<ul style="list-style-type: none"> ・メンテナンスコストが低い。 ・Webディスプレイなどクラウドサービスが多い。
課題	<ul style="list-style-type: none"> ・周波数帯が広く、日本の電波法に適合していないため、免許が必要 (5年毎更新) 			<ul style="list-style-type: none"> ・送受信器設置点より11mより下は測定不可 	

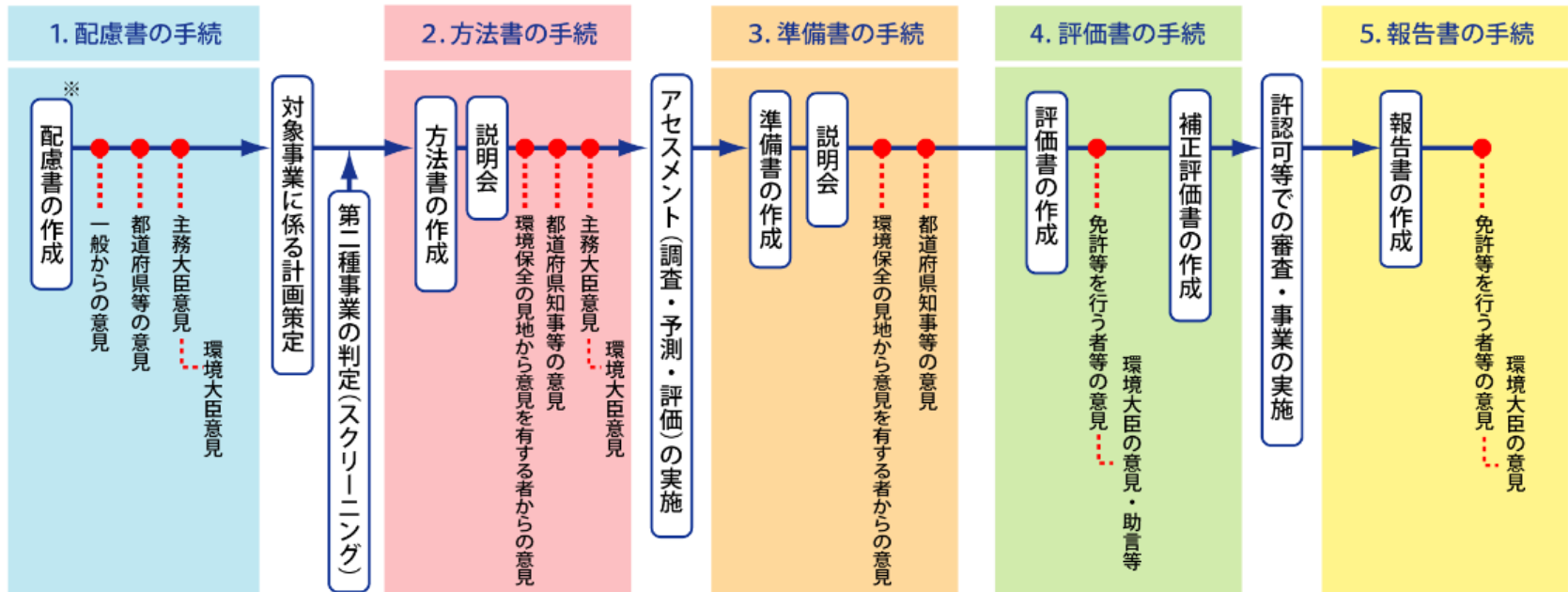
2.4 銚子沖洋上風力発電所 -環境アセスメントを中心として-

2.4.1 環境影響評価法の改正とその概要(2013/4施行)

- 環境影響評価法は、環境の悪化を未然に防止し、持続可能な社会の構築と環境に大きな影響を及ぼすおそれのある事業について環境アセスメントの手続を定め、環境アセスメントの結果を事業内容に関する決定(事業の免許等)に反映させることにより、事業が環境の保全に十分に配慮して行われるようにすることを目的とする。
- 地方公共団体においても、環境影響評価法と同じような考え方で環境アセスメントに関する条例が定められているが、地方公共団体の条例は、地域の実情に応じた特徴のあるものとなっている。

▶ 環境アセスメントの手続

環境アセスメントは、対象事業が周辺の自然環境、地域生活環境などに与える影響について、一般の方々や地域の特性をよく知っている住民の方々、地方公共団体などの意見を取り入れながら、下図の流れに沿って事業者自らが調査・予測・評価を行うことをいいます。



※配慮書の手続については、第2種事業では事業者が任意に実施する。

出典: 環境影響評価情報支援ネットワーク、環境アセスメントガイドより

http://assess.env.go.jp/1_seido/1-1_guide/index.html(参照2025/12/5)

2.4.2 銚子沖実証事業の配慮書事例

- 銚子沖及び北九州市沖の自然条件の整理項目はそれぞれ 17 項目及び 18 項目で、銚子沖では騒音・振動(大気)、動植物プランクトン、魚卵・稚仔魚が対象外となっている。なお、これらの項目は主に文献、既往調査資料等を収集・整理して取りまとめており、その他関係機関等へのヒアリングも実施されている。

表 3.1.1-2 銚子沖・北九州市沖において対象とした自然項目

項目／候補海域	銚子沖	北九州市沖
気象	○	○
海象	○	○
海底地形・地質	○	○
水質	○	○
底質	○	○
流況(海流・潮流)	○	○
騒音・振動(大気)	—	○
水中騒音	○	—
電波障害	○	○
景観	○	○
動植物プランクトン	—	○
底生生物	○	○
魚類等遊泳動物	○	○
魚卵・稚仔魚	—	○
鳥類	○	○
海棲哺乳類	○	○
海草藻類・藻場	○	○
潮間帯生物	○	○
海棲爬虫類	○	—
漁業生物	○	○
合計(○印)	17項目	18項目

○：自然条件整理の対象項目、—：対象外項目

銚子沖実証事業の環境影響準備書・評価書事例

➤ 発電所アセス省令別表第5の参考項目(平成24年7月31日告示)【網掛部分】を示しているが、当該実証研究の参考項目選定は2009年度に実施していることから、一部の別表第5参考項目は考慮されていない。

表 3.3.1-2 銚子沖サイトの参考項目

環境要素の区分		影響要因の区分		工事の実施			土地又は工作物の存在及び供用		
				工事用資材等の運搬出入	建設機械の稼働	造成等施工等による一時的な影響	地形変化及び掘削の存在	施設の種類	
環境の自然構成要素の良好な状態の保持を旨として、調査、予測及び評価されるべき環境要素	大気環境	大気質	窒素酸化物						
			粉じん等						
		騒音・超低周波音	騒音						
	超低周波音								
	水環境	振動	振動						
			水質	水の濁り					
		底質	有害物質						
			その他	洗掘(海底地形)				○	
	その他の環境	地形及び地質	重要な地形及び地質						
			風車の影						
その他		水中音					○		
生物の多様性の確保及び自然環境の体系的保全を旨として調査、予測及び評価されるべき環境要素	動物	重要な種及び注目すべき生息地(海域に生息するものを除く。)	鳥類					○	
			海域に生息する動物	底生生物				○	
		植物	重要な種及び重要な群集(海域に生育するものを除く。)	魚類(漁業生物)					○
				海棲哺乳類			○		○
	生態系	海域に生息する植物	海藻藻類					○	
			地帯を特徴づける生態系(陸域)						
人と自然との豊かな触れ合いの確保を旨として調査、予測及び評価されるべき環境要素	景観	主要な眺望点及び観光資源並びに主要な眺望景観					○		
人と自然との触れ合いの活動の場	主要な人と自然との触れ合いの活動の場								
環境への負荷の量の程度により予測及び評価されるべき環境要素	廃棄物等	産業廃棄物							
		残土							
【電波障害】							○		

注) 網掛部分: 発電所アセス省令の別表五で取り上げられている参考項目、○印: 選定した項目

【】内の項目: 法アセスの参考項目には該当していない項目

銚子沖実証事業での調査項目および調査時期

調査項目

1. 海底地形
2. 流向・流速
3. 水中騒音
4. 鳥類
5. 底生生物
6. 魚介類（漁業生物）
7. 海棲哺乳類
8. 藻場（海藻藻類）
9. 景観
10. 電波障害

表4.1.1-1 銚子沖サイトにおける各調査項目の調査時期・調査測点・調査方法等

調査項目	調査時期			調査測点等	調査方法
	事前	工事中	供用時		
1 海底地形	○		○	実証機等設置点周辺(80m×80m)	マルチナロービーム測深器による海底地形測深
2 流向・流速	○		○	実証海域周辺3点	自記式流向流速計(電磁流速計)による流向・流速測定
3 水中騒音			○	実証海域周辺3点	水中マイクロホンによる連続観測(7日間)
4 鳥類(船舶トランセクト調査)	○		○	実証海域周辺(4側線)	船舶における目視調査
5 鳥類(定点調査)	○			陸上2地点、実証海域周辺4地点	陸上及び海上の定点における目視調査
6 鳥類(レーダー調査)	○		○	陸上1点(事前)/観測塔1点(事後)	レーダーによる24時間連続調査
7 鳥類(衝突感知システム)			○	実証機1点	衝突感知システムによる衝突監視
8 底生生物	○		○	実証海域周辺3点	採泥器によるベントス採取
9 魚介類(漁業生物)※	○		○	実証海域周辺3点	機船船びき網による採捕調査
10 海棲哺乳類	○	○	○	実証海域周辺(6側線)	船舶における目視調査(トランセクトライン調査)
11 藻場(海藻藻類)	○			海底ケーブルルート上9点	潜水士による目視観察・定量採取等
12 景観	△		○	陸上3点(主要眺望点)	フォトモンタージュ等による景観調査及びアンケート調査
13 電波障害(漁業無線)	○		○	南東～西北2km×北東～南西11kmの範囲内の32点	銚子漁協無線の受信状況・電界強度調査
14 観測タワー基礎などへ蟻集する魚類等の確認			○	実証機基礎周辺	潜水士による目視調査・付着生物定量調査
15 振動			○	実証機基礎周辺	振動計による調査
16 底質・地質			○	実証海域周辺3点	採泥器による調査
17 水質・動植物プランクトン			○	実証海域周辺5点	採水法・プランクトンネット等による採取調査
18 計量魚探			○	実証海域周辺3点及び4測線	計量魚探による魚類調査
19 魚介類(漁業生物)※ 【底刺網】			○	実証海域周辺3点	底刺網による魚類調査

注1) △: 景観は本実証研究FSIにて事前調査済。

注2) No15～19: 2015(平成27)年度以降の追加調査内容。

注3) ※魚介類(漁業生物): 当初は地元漁協の意向により、当該海域で刺網調査の許可が得られなかったが(2010(平成22)年7月～2016(平成28)年1月(事前・供用時)は機船船びき網調査実施)、2016(平成28)年3月以降は底刺網調査の許可が得られたため、両手法による魚介類調査を実施。

出典: 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)、
着床式洋上風力発電の環境影響評価手法
に関する基礎資料(最終版)、2018 より

調査時の留意点: 海棲哺乳類(スナメリ)、景観

表4.1.2-7 海棲哺乳類(スナメリ)への影響予測・評価の検証(概要)

項目	作業概要	時期	対象海区	海棲哺乳類(スナメリ)の調査・予測・評価結果
事前調査	スナメリ調査(船上から目視観察して出現個体数等を確認)	H22年7月・8月・9月・10月・11月・12月・H23年2月	事業実施区域及び周辺海域(トランセクトライン6本)	<ul style="list-style-type: none"> ◆スナメリは7月に12頭、8月に435頭、9月に4頭、10月に14頭、11月に12頭、12月に1頭出現し、特に8月に多く出現した。 ◆スナメリは主に水深10m前後の海域で確認され、特に大吹場南側で多く出現していた。
予測・評価	既往調査事例等を基に、風車の基礎掘削工事時及び風車稼働時の水中騒音によるスナメリへの影響を予測・評価	工事中(捨石工事) 供用時(稼働時)	開発区(事業実施区域)	<p>【工事中】</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆既往の捨石工事中の水中騒音距離減衰図を基に、スナメリを含む海棲哺乳類の一般的な水中騒音反応閾値レベル(120dB re 1μPa)を照し合せ、工事地点付近から距離900m程度までは反応閾値レベルを超過するもの、それ以上では当該レベル以下になると予測。 ◆工事地点付近から距離900mの範囲内では工事騒音によってスナメリが回避反応を起こす可能性が考えられるが、工事期間は一時的であり、表証子定点周辺900m以上については反応閾値レベル以下であることから、工事中の本種生息環境への影響は小さいと評価される。 <p>【風車供用時(稼働時)】</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆【供用時の2MW洋上風車水中騒音(推定値)】=ピーク周波数25Hzの音源音圧レベル(119dB re 1μPa @1m) ◆※魚類(カタチワシ)同様 ◆【スナメリと同科のネズミイルカ(Harbour Porpoise)の聴覚閾値(推定値)】=周波数25Hzの聴覚閾値155dB re 1μPa ◆上記推定値を比較した結果、2MW洋上風車供用時の風車直近1mの水中騒音は、ピーク(25Hz)で119dB re 1μPaとなるが、ネズミイルカの25Hzの聴覚閾値は155dB re 1μPaであるため、風車直近1mの水中騒音はネズミイルカの聴覚閾値以下となることが予測された。よって、供用時(稼働時)における水中騒音による本種の生息環境への影響は小さいと評価された。
事後調査	スナメリ調査(事前調査と同様)	工事中(H24年6月・7月・8月・9月・10月・12月) 稼働期間(H25年2月・6月・7月・8月・9月・10月・12月・H26年2月)	事業実施区域及び周辺海域(トランセクトライン6本)	<ul style="list-style-type: none"> ◆工事中期間中、スナメリはH24年6月に10頭、7月に47頭、8月に4頭、9月に10頭、10月に5頭、12月に5頭確認され、特に7月に多く出現した。 ◆スナメリは調査範囲の概ね全体に出現していた。 ◆稼働期間中、スナメリはH25年6月に58頭、7月に125頭、8月に35頭、9月に4頭、10月に46頭、12月に31頭・H26年2月は10頭で、特に6月・7月に多く出現した。 ◆スナメリは調査範囲の概ね全体に出現しており、特に大吹場南側で多く出現していた。
検証	①工事中の水中騒音の予測・評価 ●工事時(捨石工事)の水中騒音予測については、工事中に水中騒音を実測されていないため検証できない。			
	②供用時の水中騒音の予測・評価 ●既往文献値による水中騒音予測値と実証機の供用時調査結果を基にした水中騒音の予測値について比較・検討した。 ●文献値と実測値を基にした音源音圧レベルを比較すると、文献値を基にした予測値(119 dB re 1μPa @1m)に対して、実測値を基にした予測値(113dB re 1μPa @1m)であり、オーダーレベルに大きな相違が無く、当該既往文献値を基にした水中騒音の予測は概ね妥当と考えられた。			
留意点	③工事中のスナメリの予測・評価 ●工事中のスナメリ調査結果を見ると、工事地点付近で数回確認されているが、事前調査時よりやや分散している傾向にあった。 ●別途実施したスナメリの鳴音調査(受動的音響探知機調査)結果によれば、工事中の鳴音数は、開発区では事前に比べて大幅に減少しているが、対照区では開発区より大きな低減は無く、事前時に近い状況であった。また、事後には開発区の鳴音数は対照区レベルに増加していた。 ●開発区におけるスナメリは工事中は一旦少なくなるが、3km離れた対照区では工事中にスナメリ鳴音が確認されていることから、当該予測・評価は妥当と考えられる。			
	④供用時のスナメリの予測・評価 ●供用時のスナメリは、工事中調査(71個体)から241個体まで増えており、それらの分布域は事前調査時と同様に大吹場側の海岸に多く出現する傾向が確認されている。 ●別途実施したスナメリ鳴音調査でも事前に比べ、工事中は一旦減少するが、稼働時には事前と同レベルまで回復している。 ●以上から供用時の水中騒音によるスナメリへの影響はほとんどないと考えられるため、当該予測・評価は妥当と考えられる。			
留意点	●洋上風車稼働時の水中騒音データは基礎種類・規模・気象条件等によって異なるため、予測・評価時には対象風車の諸条件に併せた既往事例の収集が必要。 ●評価対象となる海棲哺乳類によって聴覚閾値が異なるため、予測・評価時には各種あるいは近隣の聴覚閾値知見の収集が必要。			

表4.1.2-8 景観への影響予測・評価の検証(概要)

項目	時期	対象海区	景観の調査・予測・評価結果
事前調査	H20年	事業実施区域	<p>主要な眺望地点として「地球の丸く見える丘展望館」、「外川漁港」および「飯岡刑部岬展望館」の3点を選定し、現況写真を撮影した。</p>
予測・評価	風車供用時	事業実施区域	<p>◎3点の写真を基にフォトモンタージュを作成した結果、3眺望点からいずれも視認されるが、視距離は3km以上離れており、遠景域に分類される。 ◎視覚占有率(閾値1.5%以下)、見込角度(眺望の主対象角度:15度、人間の識別可能な角度:1~2度)で評価した結果、いずれも極めて影響は小さいと予測された。</p>
事後調査	風車供用時(H27年2月)	事業実施区域	<p>◎地球の丸く見える丘展望館において、再度写真撮影を実施し、フォトモンタージュと比較した結果、概ね同様の景観となっているとされている。 ◎銚子沖洋上風力現場見学者の来館者に対するアンケート調査(景観に係る項目)の結果、洋上風車の大きさについては全体の52%が「どちらともいえない」、全体の32%が「大きい・少し大きい」と回答された。風車までの距離については全体の55%が「どちらともいえない」、全体の20%が「遠い・少し遠い」と回答された。風車の色については全体の78%が違和感ないと回答されていた。</p>
検証	◎フォトモンタージュ写真・事後調査写真を比較すると概ね同様の景観状態で、背景に溶け込んでおり、景観的にはほとんど気にならないことから予測・評価は妥当と考えられた。 ◎ただし、事前と事後写真の撮影時期・天候・時間等できるだけ同一条件で撮影して、景観を比較することが望ましいと考えられた。 ◎景観に係るアンケートは、地球の丸く見える丘展望館以外に、外川漁港等主要眺望点の訪問者等を対象に実施し、影響評価の検証を行うことが望ましい。		
留意点	◎地球の丸く見える丘展望館以外に、外川漁港等主要眺望点にて予測・評価した視覚占有率・視距離等に対する事後調査結果が無いことから、今後の留意点と考えられる。		

出典: 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)、着床式洋上風力発電の環境影響評価手法に関する基礎資料(最終版)、2018 より

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

➤ 風力発電は新しい事業種であり、これまで環境アセスメントの実績がある事業種（道路や鉄道など）と比べて環境影響に関する情報が少ないため、懸念や不安の声が多い。このため、経済産業省・環境省では、技術的な知見や考え方を取りまとめたガイドや指針等を作成し、風力発電所の環境アセスメントの円滑な実施に向けて取り組んできたところ。

- 風力発電所のリプレイスに係る環境影響評価の合理化に関するガイドライン（令和2年3月）
- 環境アセスメント迅速化手法のガイドー前倒環境調査の方法論を中心に（平成30年3月）
- 鳥類調査結果を用いた影響予測手法等について（参考）（平成29年9月）
- 風力発電施設から発生する騒音に関する指針について（平成29年5月）
- 風力発電施設から発生する騒音等測定マニュアル（平成29年5月）
- 環境影響評価法における報告書の作成・公表等に関する考え方（平成29年3月）
- 洋上風力発電所に係る環境影響評価の基本的考え方に関する検討会報告書（平成29年3月）
- 環境アセスメント技術ガイド 生物の多様性・自然との触れ合い（平成29年3月）
- 環境アセスメント技術ガイド 大気環境・水環境・土壌環境・環境負荷（平成29年3月）
- 複数の調査手法を用いた鳥類調査結果について（参考）（平成28年9月）
- 海ワシ類の風力発電施設バードストライク防止策の検討・実施の手引き（平成28年6月） 等

風力発電所の環境アセスメントの迅速化



風力発電所の環境アセスメントの迅速化

○再生可能エネルギーの導入には、地元との調整や、環境アセスメント、立地のための各種規制・制約への対応が必要であり、導入に時間がかかることが課題とされ、平成25年6月、「日本再興戦略」及び「規制改革実施計画」に、**環境アセスメントの迅速化**が位置づけられる。

環境アセスメントの迅速化 3～4年程度とされる手続期間の半減を目指す

○これを踏まえ、環境省・経済産業省の連携の下、「国による審査期間の短縮」及び「事業者による調査期間の短縮」のための施策、取組を推進。

<国による審査期間の短縮>

【国の取組】

- ・国の審査を、自治体の審査と並行して実施。自治体審査との効率的な連携や迅速化への協力について国から自治体に要請。(環境省・経産省)
- ・環境審査顧問会で一般的によくなされる質問・指摘等が確認できる**チェックリストを整備**。円滑な審査に向けた**事例集を公表**。(経産省)
- ・環境審査顧問会の運営合理化(経産省)

【自治体の取組】

- ・住民意見・事業者見解等が揃う前から実質審査を開始する等の取組

<事業者による調査期間の短縮>

- 地域の自然的状況、社会的状況等の情報を収録した**環境アセスメントデータベース“EADAS”を整備**。立地検討の早期の段階で、自然的社会的な事業リスクを見える化。(環境省)
- 環境調査を前倒しして、他のアセスメント手続と並行して進める前倒環境調査の手法について、実証事業を通じて検討を実施。(経産省)
- 平成29年度に**迅速化手法のガイド**としてとりまとめ、事業者による期間短縮の方法論を具体化。平成30年度に**発電所アセスの手引に収録し、迅速化手法を一般化**。(環境省・経産省)

○令和元年6月、「規制改革実施計画のフォローアップ結果について」において、「風力発電における環境アセスメントの期間短縮(期間半減の一般化)」(経済産業省・環境省)は、上記の施策、取組を通じた措置により、解決との評価。

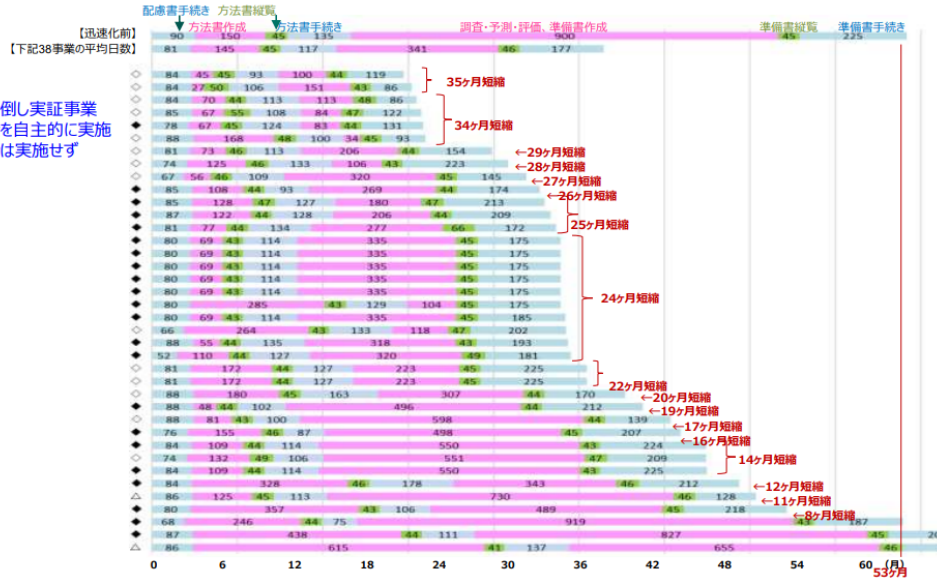
6

環境アセスメントの期間短縮の実例

- ▶ 環境調査を前倒して、他のアセスメント手続きと並行して進める前倒環境調査の手法など、平成29年年度に迅速化手法のガイドがまとめられ、事業者による期間短縮の方法論を具体化。平均して3~4年程度とされた環境アセスメントが平均で約30ヶ月に短縮された。

環境アセスメントの期間（配慮書～準備書）の事例の実績

- 迅速化の取組を開始して以降、手続（配慮書～準備書）が終了した38事例のほとんどでアセス期間が短縮（※前倒し調査を実施した36事例のうち35事例で短縮化）



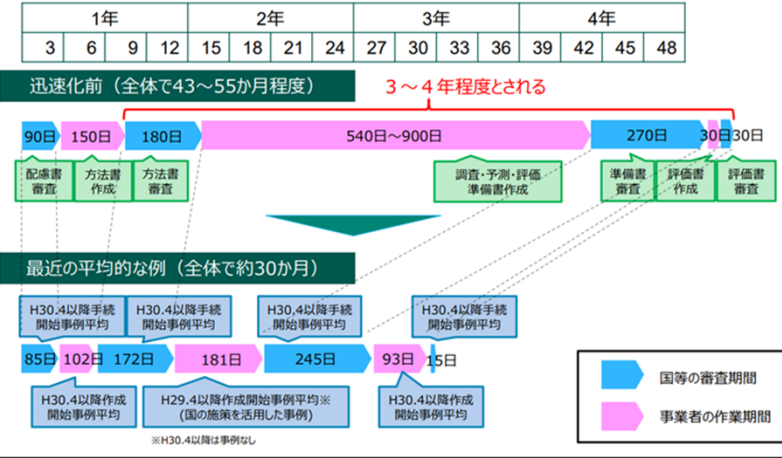
環境アセスメント迅速化手法のガイド

—前倒環境調査の方法論を中心に—

風力発電所 総論

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構
New Energy and Industrial Technology Development Organization

環境アセスメントの迅速化の達成状況（平均的な例）



出典：環境影響評価の対象となる風力発電所の規模の検討の経緯について～風力発電所の環境アセスメント～
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（2021年1月21日 環境省）より

再エネ海域利用法と環境アセスメント

- 洋上風力発電事業の適地となる促進区域を指定、公募による事業者選定を行う再エネ海域利用法と環境影響評価法は独立しており、選定された事業者は法に基づき環境アセスメントを実施する必要がある。
- 事業者は洋上風力発電事業の迅速化に向けて、事業者選定前までに配慮書・方法書まで実施する傾向にある。
- 現況調査については、期間・費用が高額(数億円程度)かかることもあり、事業者選定後に実施される。
- 洋上風力発電事業に於いて、環境アセスメントをどこまで短縮できるかが今後の課題となる。



図 1-1 風力発電事業の一般的な事業工程¹

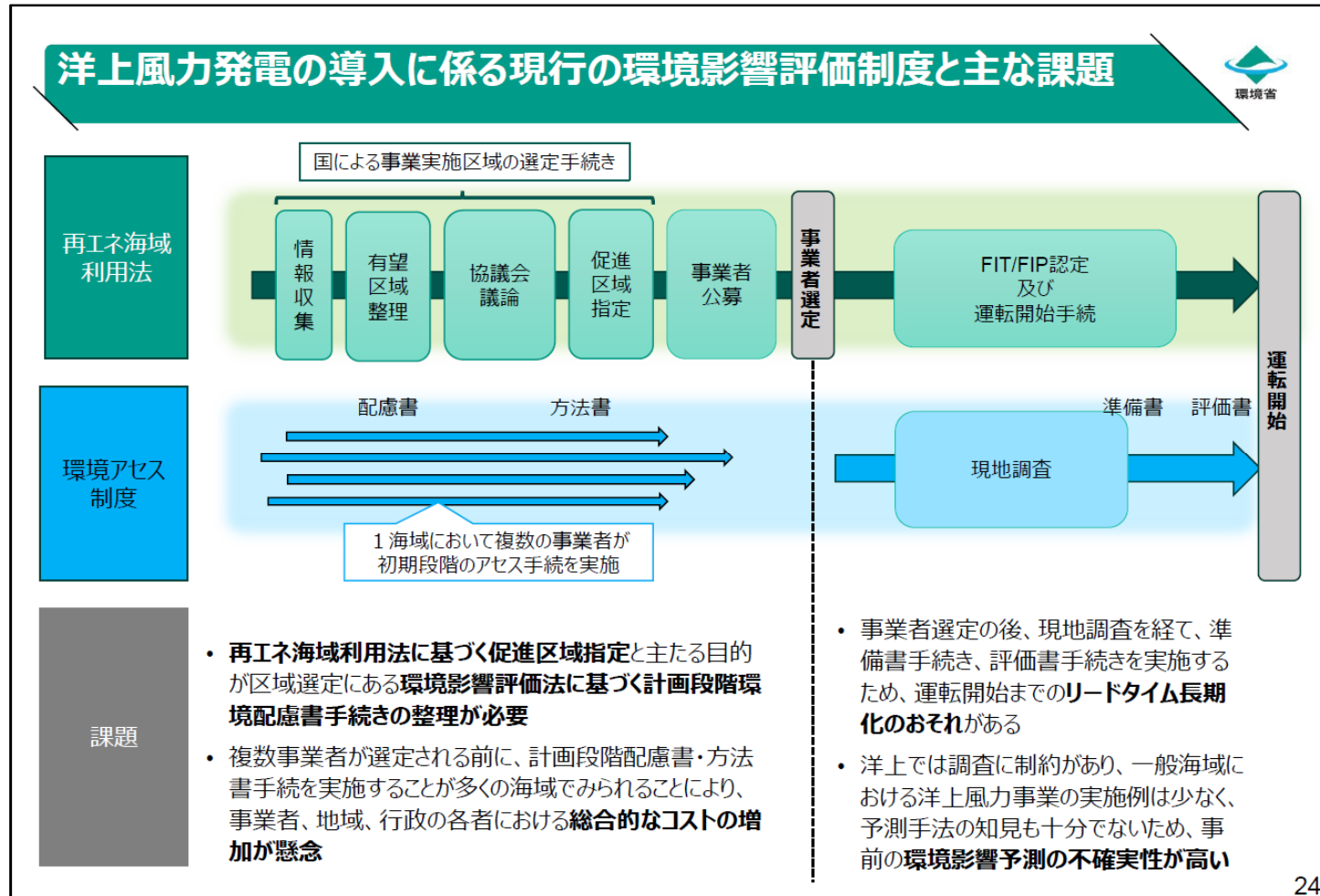


*1: 研究会報告²を参考にして設定した仮定は、次のとおりである。
 ・ 現況調査の期間: 猛禽類調査を2営巣期(18ヶ月)実施すると仮定。
 ・ 図書の作成期間: 配慮書・方法書は3ヶ月、準備書は6ヶ月、評価書は1ヶ月と仮定。

図 1-2 環境影響評価の所要期間(一般工程)

洋上風力発電の環境影響評価制度の最適な在り方に関する検討会(2021.7~)

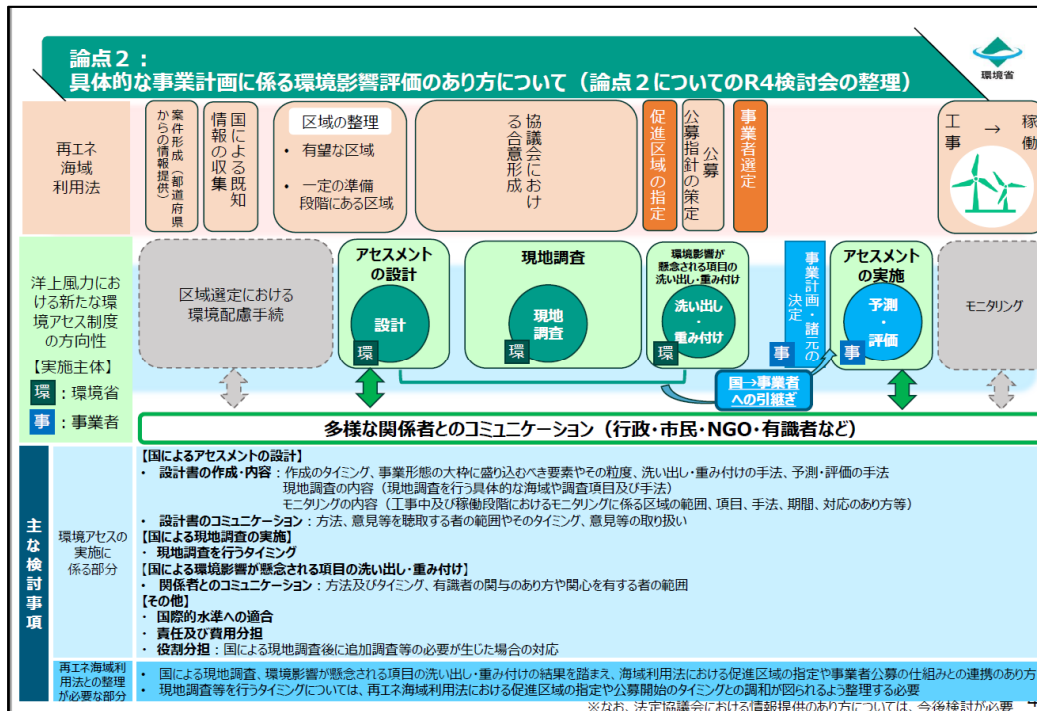
- 関係省庁および大学機関にて環境影響評価制度に関する最適な在り方について協議が行われている。
- 複数事業者による同一海域での環境影響評価の回避と迅速化が望まれる。



洋上風力発電の環境影響評価制度の最適な在り方に関する検討会(2021.7~)

▶ 新たな制度を検討する際の基本的な視点

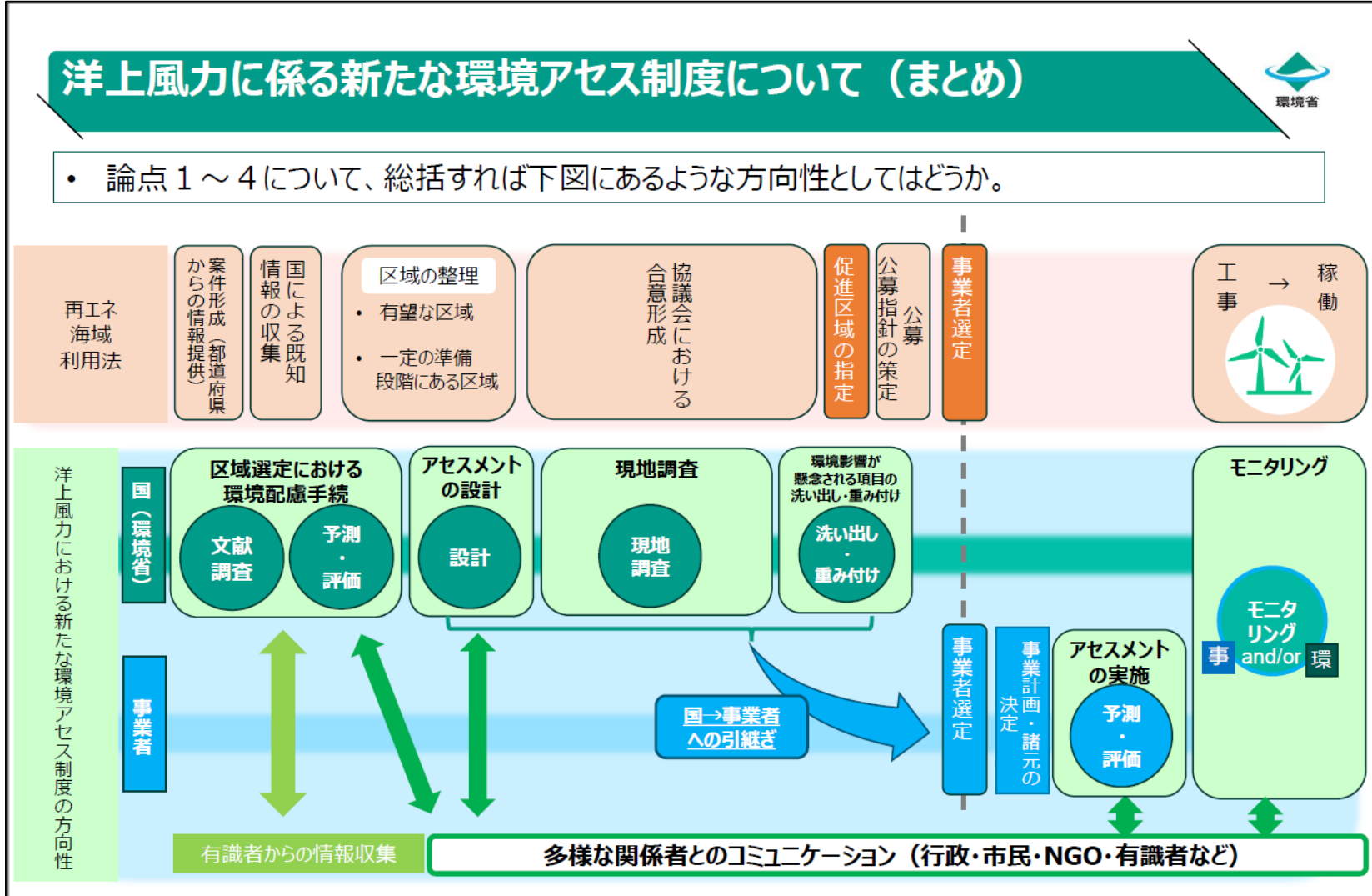
- ① 再エネ海域利用法に基づくプロセスと環境アセスメント制度の連携
- ② 事業者の予見可能性の確保
- ③ 領海と EEZ は原則同様の仕組みとする
- ④ 環境配慮の質の担保
- ⑤ 環境影響の相互理解のために必要な関係者とのコミュニケーションの確保
- ⑥ 事業者選定後の環境アセスメントの迅速化
- ⑦ 個別事業に係る環境アセスメントの結果や環境影響のデータを踏まえた科学的知見の 充実と共有



出典: 洋上風力発電の環境影響評価制度の最適な在り方に関する検討会、参考資料5、
令和4年度洋上風力発電の環境評価制度の諸課題に関する検討会取りまとめ(概要)、令和5年7月31日

洋上風力発電の環境影響評価制度の最適な在り方に関する検討会(2021.7~)

洋上風力発電の環境アセスメントの方向性として、環境省による新たな制度案が検討中。



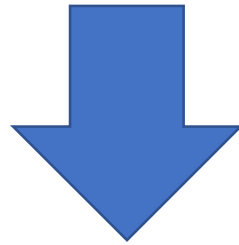
出典: 洋上風力発電の環境影響評価制度の最適な在り方に関する検討会、

参考資料5、令和4年度洋上風力発電の環境評価制度の諸課題に関する検討会取りまとめ(概要)、令和5年7月31日

2.5 まとめ

- 風況、波浪観測の低コスト化、高効率化や環境アセスメント期間の短縮は洋上風力の導入を促進し、更なる大量導入、コスト低減、経済波及効果に寄与するものと考えられる。
- 現在は、実証機導入時期と比較すると、技術面、制度・法の設備が進み、政府による導入目標である2040年までに30～45GWの案件形成に向けて状況が加速している。
- 一方で、政府の導入目標達成にはサプライチェーン形成、港湾インフラの整備、系統インフラの整備、EEZへの拡大、浮体式導入、低コスト化、次世代技術開発など課題も多い。
- 政府が掲げる導入目標を達成するには、先行する海外での取組を参考としつつ、風況観測や気象海象、環境アセスメントに代表される非競争領域において洋上風力市場全体による協力が不可欠であると考えられる。

- ・デュアルスキヤニングライダーの活用
- ・レーダー式波浪計の導入による、O&M効率化
- ・環境アセスメント期間の短縮



大量導入

コスト低減

経済波及効果

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 日本特有の設計手法 -地震・台風-

3.1.1 概要

日本特有の地震・台風などを含む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いるため、同基準をベースとして調査項目を抽出し、関連する基本的な文献等を調査・収集する。

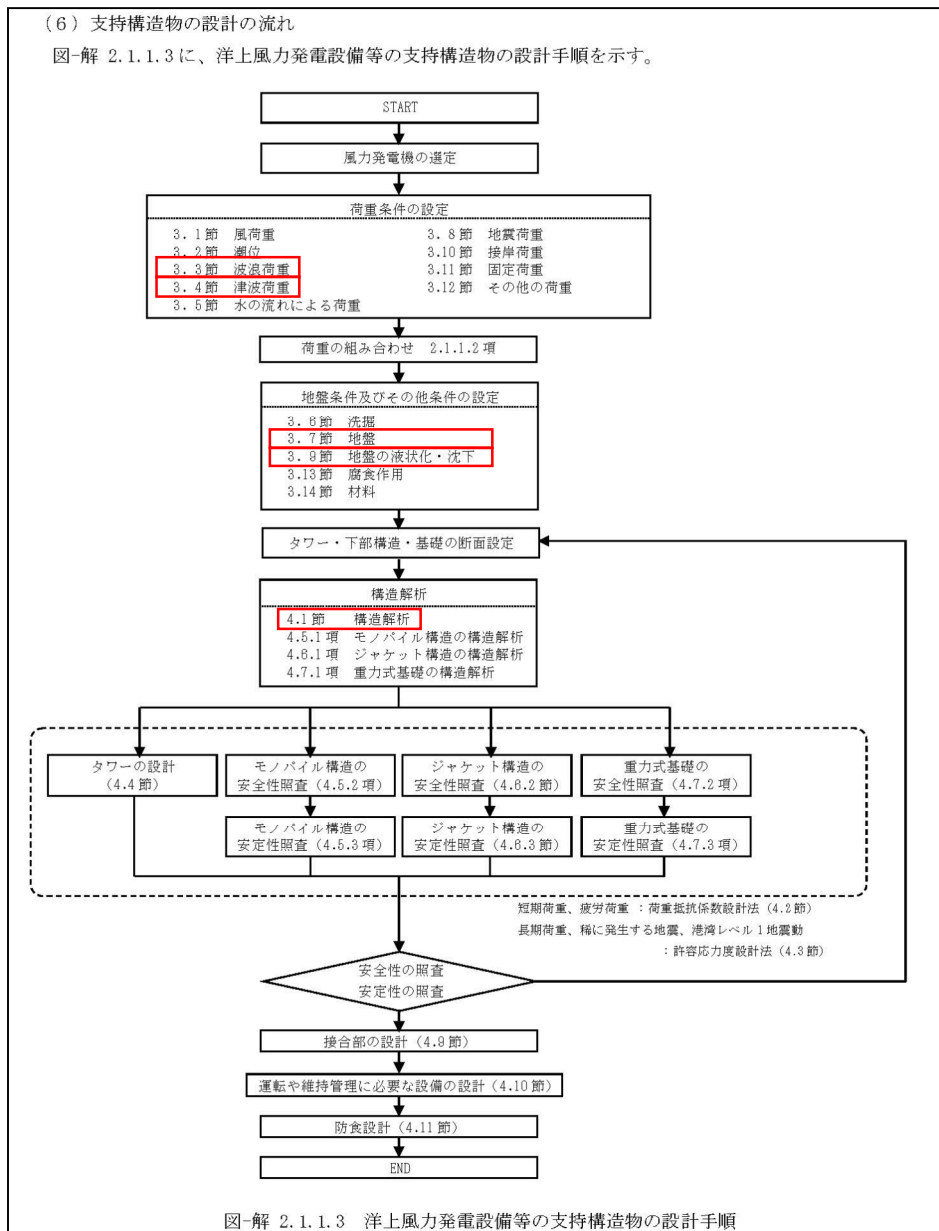


図 3.1.1-1 「洋上風力発電設備に関する技術基準の統一的解説（令和2年3月版）」に示される設計手順（出典：洋上風力発電施設検討委員会）

3.1.2 調査項目

「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）」をベースに抽出した調査項目を表3.1.2-1に、調査文献の一覧を表3.1.2-2に示す。

表 3.1.2-1 調査項目

該当する 設計手順	自然条件				調査項目	調査文献
	台風	海象	地震	他		
荷重条件 の設定	3.3 波浪荷重		○		太平洋側に特徴的な、風波とうねりが混在する二山型のスペクトルモデルにつき、統一的解説で例示される「種本ら」の手法を含む関連情報を調査・収集する。	キーワード“二山型スペクトル”の文献検索で該当したものうち、8件について調査する。 (No.1～8)
	3.4 津波荷重		○		統一的解説では、適切な設計津波高さの設定を要求しているものの、その具体的な方法が明記されていない。 適切な設定方法として例示されている2つの方法につき、関連する情報を調査・収集する。	キーワード“設計津波高さ”の文献検索で該当したものうち、2件について調査する。 (No.9,10)
地盤条件及びその他条件 の設定	3.7 地盤			○	工学的基盤の定義は明記されているものの、各種試験方法とそれら結果を活用した工学的基盤設定方法については記載されていない。 洋上風車の耐震設計における工学的基盤の設定について、関連する情報の調査・収集を行う。	キーワード“工学的基盤面 洋上風力”の文献検索で該当したものうち、6件について調査する。 (No.11～16)

該当する 設計手順	自然条件				調査項目	調査文献
	台風	海象	地震	他		
地盤条件及びその他条件の設定	3.7 地盤			○	<p>統一的解説では、地盤条件設定に資する調査について、例示を含む網羅的な記載がなされている。</p> <p>モノパイル基礎の設計に用いる土層構成、地盤物性を得るための地盤調査・各種試験の情報を調査・収集する。</p>	<p>関連資料として以下4件について調査する。 (No.17~20)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・応用地質、「風力発電と地形・地質」 ・「着床式洋上風力発電導入ガイドブック」 ・「洋上風力発電設備に係る海底地盤の調査及び評価の手引き」 ・「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」
	3.9 地盤の液状化・沈下			○	<p>統一的解説では、モノパイル基礎の液状化に対する設計手法の具体は明記されておらず、複数の手法が例示されている。</p> <p>基本情報として、同基準内で例示される複数の手法の情報を収集する。</p>	<p>液状化に関して統一的解説に示されている、以下基準類について調査する。(No.21~23)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・埋立地の液状化対策ハンドブック ・港湾施設の技術上の基準・同解説 ・建築基礎構造設計指針
構造解析	4.1.2 地震時の荷重評価			○	<p>統一的解説には、地震時の荷重評価のための解析モデルや手法についての明記が無く、参考資料として、「日本港湾協会(2018)、港湾の施設の技術上の基準・同解説」や「土木学会(2010)、風力発電設備支持物構造設計指針・同解説」が示されている。</p> <p>モノパイル基礎の耐震設計(液状化を含む)に適用する解析モデルや地盤ばねを含む物性値の設定方法につき、関連する文献や研究の調査・収集を行う。</p>	<p>関連する基準として「土木学会(2010)、風力発電設備支持物構造設計指針・同解説」(No.24)、及びその他関連文献3件を調査する。(No.25~27)</p>

表 3.1.2-2 調査文献

No.	タイトル	著者	発行年月	
波浪	1	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
	2	風と波の結合確率論分布モデルに関する研究	種本 純, 石原 孟	2015年
	3	二山型スペクトル波の代表周期と代表波高の算定法に関する研究	安田 誠宏, 森川 湧太, 間瀬 肇	2020年
	4	台風による二山型スペクトルを有する現地波浪の諸特性	永井 康平, 小沢 大造, 岸良 安治, 西村 達郎	1986年
	5	双峰型スペクトル波の浅海変形	間瀬 肇, 小沢 勇介	1995年
	6	東京湾における台風1915号による波浪スペクトル特性と対策施設整備の留意点	高橋 康弘, 高山 知司, 遠藤 敏雄, 鈴木 善光, 浜口 正志, 松藤 絵理子, 石本 健治, 原 信彦	2020年
	7	現地観測に基づく越流型モデルを用いた伝達波計算法の検証	阿部 光信, 貝沼 憲男, 興野 俊也, 定森 良夫	1998年
	8	日本海側の洋上風車に対応した風と波の長期結合確率分布モデル	田中 陽二, 吉岡 健, 仲井 圭二, 永井 紀彦	2019年
津波	9	海岸保全基本計画	—	—
	10	グリーン法の法則	—	—
地盤 (工学的基盤)	11	洋上風力発電設備建設に係る地盤リスク低減を考慮した地盤調査に関する一考察	野口 孝俊, 赤坂 幸洋, 田中 淳	2021年
	12	新しい地盤調査法—海底微動アレイ探査システムの開発とその適用—	井上 雄介, 今井 幹浩, 松原 由和, 平出 亜	2022年
	13	SEP船を用いた新しい地盤調査法—CPTと海底逆PS検層の統合調査—	原 由和, 川崎 悠介, 野中 建太, 平出 亜	2022年
	14	洋上風力発電設備に係る海底地盤の調査及び評価の手引き	沿岸技術研究センター, 海洋調査協会	2022年
	15	[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

No.	タイトル	著者	発行年月
	16 令和5年度セントラル方式による調査計画(概要)	エネルギー・金属鉱物資源機構	2023年1月
地盤(調査)	17 風力発電と地形・地質(その1:概要および洋上風力発電)	応用遅筆学会 環境地質研究部会 船山 淳(パシフィックコンサルタンツ)	2021年
	18 着床式洋上風力発電導入ガイドブック(最終版)	新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)	2018年3月
	19 [前述No.14] 洋上風力発電設備に係る海底地盤の調査及び評価の手引き	[前述No.14]	[前述No.14]
	20 [前述No.15] 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	[前述No.15]	[前述No.15]
液状化	21 埋立地の液状化対策ハンドブック	沿岸開発技術研究センター	1997年
	22 港湾の施設の技術上の基準・同解説	日本港湾協会	2018年
	23 建築基礎構造設計指針	日本建築学会	2019年
耐震設計	24 風力発電設備支持物構造設計指針・同解説	土木学会	2010年
	25 液状化地盤におけるモノパイル式洋上風力発電設備を対象とした風と地震の連成解析の基礎検討	大矢 陽介	2022年
	26 洋上風力発電モノパイル基礎の地震時の地盤減衰評価(その1:逸散減衰効果の検討)	山本 康之, 新田 康男, 池田 竜介, 河本 悠歩, 石原 孟	2023年
	27 洋上風力発電モノパイル基礎の地震時の地盤減衰評価(その2:薄層法及びFEMの適用)	田中 栄次, 新田 康男, 池田 竜介, 河本 悠歩, 石原 孟	2023年

3.1.3 調査文献の要点

調査した基準, 文献等の要点を以下に示す。

【波浪】

No.	タイトル	著者	発行年月
1	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, 風力エネルギー利用シンポジウム, 2016, 38巻, pp.289-292 https://windeng.t.u-tokyo.ac.jp/ishihara/presentation/2016-3.pdf (参照2025/12/5)		
要点	<p>洋上風車の設計においては, 有義波と有義波周期から得られる波浪スペクトルモデルによる波の時系列を入力値として, 時刻歴応答解析を実施し, 風車及びその基礎に作用する荷重を評価する。このとき, 強風時の終局荷重のみでなく, 通常運転時の疲労荷重も評価する必要がある。波浪スペクトルの形状は風速階級により様々であり, うねりを伴う太平洋側では, 銚子における観測事例から, 風波とうねりが混在する時刻において二山型のスペクトルが観測されることが明らかになっている。</p> <p>この論文では, 風と波の結合確率分布の平均値の関係を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が提案されている。また, 福島沖浮体式洋上風力発電実証研究サイトにて, 実測スペクトルとの検証が行われている。</p> <p>本論文は, 「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)」 p.114に, 二山型スペクトルの例として示されている。</p> <p>(8) 波の運動</p> <p>上記の最高波高を目標として, 波の周波数スペクトルに基づく不規則波の時刻歴波形を作成する。作成にあたり, 波の周波数スペクトルの定式化は重要な要素であり, 修正プレットシュナイダー・光易型、JONSWAP 型等の中から, 実測値に最も適合する式及びパラメータを選定する必要がある。なお, 浅海域では浅水変形後の波浪に適用できるスペクトルを使用する必要がある。太平洋側のように, 風波とうねりが混在し二山型のスペクトル形状を示す海域では, 例えば種本ら¹⁰⁾を参照することができる。また JIS C</p> <p>我が国の洋上風力施設設計において, 太平洋側で用いるスペクトルとして標準的なものになると考えられる。</p> <p>具体的なスペクトルモデルの中身を以下に示す。</p> <p>風波とうねりを考慮した混合スペクトルを, 風波成分のスペクトルとうねり成分のスペクトルの線形足し合わせとする。それぞれの成分のスペクトルは, 標準的なJONSWAPスペクトルを用いる。</p>		

風波成分とうねり成分の有義波高と有義波周期は、観測値から得られる合成波の有義波高と有義波周期をもとに、No.2に掲載の種本・石原（2015）による風速・有義波高及び風速・有義波周期の平均値を表す関係式の風波成分とうねり成分の割合を用いて分離する。

種本・石原（2015）によれば、風波とうねりの両方を考慮した風速と有義波高及び風速と有義波周期は、式(5)及び式(6)により表される。

$$\mu_{H_{1/3},C}(U_{10}) = \sqrt{\mu_{H_{1/3},W}^2 + \mu_{H_{1/3},S}^2} \quad (5)$$

$$\mu_{T_{1/3},C}(U_{10}) = \frac{\mu_{T_{1/3},W} \mu_{H_{1/3},W}^2 + \mu_{T_{1/3},S} \mu_{H_{1/3},S}^2}{\mu_{H_{1/3},W}^2 + \mu_{H_{1/3},S}^2} \quad (6)$$

ここで、 $\mu_{H_{1/3},W}$ 及び $\mu_{T_{1/3},W}$ はSMB法で表される有義波高及び有義波周期の風波成分であり、10m高度の風速 U_{10} の関数で表される。 $\mu_{H_{1/3},S}$ 及び $\mu_{T_{1/3},S}$ は定数で表される有義波高及び有義波周期のうねり成分である。添え字cは合成波を表す。

式(5)及び式(6)において、任意の値の有義波高 $H_{1/3}$ 、有義波周期 $T_{1/3}$ に対しても、風波成分とうねり成分の割合が式(5)及び式(6)の関係を満たすと仮定すると、観測値の有義波高 $H_{1/3}$ 、有義波周期 $T_{1/3}$ は、10m高度における風速 U_{10} の関数として、式(7)～式(10)により風波成分 $H_{1/3,W}$ 、 $T_{1/3,W}$ 及びうねり成分 $H_{1/3,S}$ 、 $T_{1/3,S}$ に分解できる。

$$H_{1/3,W} = H_{1/3} \sqrt{1 - \left(\frac{\mu_{H_{1/3},S}}{\mu_{H_{1/3},C}} \right)^2} \quad (7)$$

$$H_{1/3,S} = H_{1/3} \sqrt{1 - \left(\frac{\mu_{H_{1/3},W}}{\mu_{H_{1/3},C}} \right)^2} \quad (8)$$

$$T_{1/3,W} = \frac{T_{1/3} H_{1/3}^2}{H_{1/3,W}^2} \left(1 - \frac{\mu_{T_{1/3},S} \mu_{H_{1/3},S}^2}{\mu_{T_{1/3},C} \mu_{H_{1/3},C}^2} \right) \quad (9)$$

$$T_{1/3,S} = \frac{T_{1/3} H_{1/3}^2}{H_{1/3,S}^2} \left(1 - \frac{\mu_{T_{1/3},W} \mu_{H_{1/3},W}^2}{\mu_{T_{1/3},C} \mu_{H_{1/3},C}^2} \right) \quad (10)$$

【波浪】

No.	タイトル	著者	発行年月
2	風と波の結合確率論分布モデルに関する研究	種本 純, 石原 孟	2015年
出典	日本風力エネルギー学会, 風力エネルギー, 2015, 39巻, 3号, pp.44-51 https://www.jstage.jst.go.jp/article/jwea/39/3/39_A_44/pdf/-char/ja (参照2025/12/5)		
要点	<p>No.1の二山スペクトルの論文で引用されている, 風と波の結合確率論分布モデルに関する研究である。</p> <p>洋上風力発電設備の設計に関する国際基準「IEC61400-3」では, 疲労荷重の照査のための気象海象条件を, 風速・波高及び波周期の結合確率分布を用いて評価することが定められている。この結合確率分布は関数の形で記述されておらず, 観測値や気象・海象シミュレーションの予測値から直接得られる散布図を用いて出現頻度を算出することになっている。しかし, 観測期間が短い場合には, 強風及び高波高の観測がほとんど得られず, また, 欠測でデータが欠落する問題もあるため, 風速, 波高及び波周期の関係を平均値, 標準偏差, 相関係数などの簡単なパラメータによりモデル化し, 結合確率分布を予測する必要がある。</p> <p>本研究では, 10年分の波浪シミュレーションによる予測値を分析し, 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が提案されている。また, 提案したモデルを用いたモンテカルロシミュレーションにより, NEDO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と比較検証が行われている。</p> <p>銚子沖海域を対象とした結合確率分布のモデルは以下となっている。</p>		

Table 1 Proposed joint probability distribution model of wind and wave.

	Significant wave height	Significant wave period
Mean values	$\mu_{H_{1/3}} = \sqrt{\mu_{H_{1/3,W}}^2 + \mu_{H_{1/3,S}}^2}$ $\mu_{H_{1/3,W}} = \frac{0.30U_{10}^2}{g} \left[1 - \left\{ 1 + 0.004 \left(\frac{gF}{U_{10}^2} \right)^{1/2} \right\}^{-2} \right]$ $\mu_{H_{1/3,S}} = 1.24\text{m}$ <p>where, $g = 9.81\text{m/s}^2$, $F = 235,000\text{m}$</p>	$\mu_{T_{1/3}} = \frac{\mu_{T_{1/3,W}} \mu_{H_{1/3,W}}^2 + \mu_{T_{1/3,S}} \mu_{H_{1/3,S}}^2}{\mu_{H_{1/3,W}}^2 + \mu_{H_{1/3,S}}^2}$ $\mu_{T_{1/3,W}} = \frac{2.74\pi U_{10}}{g} \left[1 - \left\{ 1 + 0.008 \left(\frac{gF}{U_{10}^2} \right)^{1/3} \right\}^{-5} \right]$ $\mu_{T_{1/3,S}} = 7.75\text{s}$ <p>where, $g = 9.81\text{m/s}^2$, $F = 235,000\text{m}$</p>
Standard deviation	$\sigma_{H_{1/3}} = aU_{10} + b$ <p>where, $a = 0.0323\text{s}$, $b = 0.318\text{m}$</p>	$\sigma_{T_{1/3}} = cU_{10} + d$ <p>where, $c = -0.0210\text{m}^{-1}$, $d = 1.56\text{s}$</p>
Probability distribution Function	$f(H_{1/3}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta_{H_{1/3}} H_{1/3}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln H_{1/3} - \lambda_{H_{1/3}}}{\zeta_{H_{1/3}}} \right)^2 \right]$ $\lambda_{H_{1/3}} = \ln \mu_{H_{1/3}} - \frac{1}{2}\zeta_{H_{1/3}}^2, \quad \zeta_{H_{1/3}}^2 = \ln \left[1 + \left(\frac{\sigma_{H_{1/3}}}{\mu_{H_{1/3}}} \right)^2 \right]$	$f(T_{1/3}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta_{T_{1/3}} T_{1/3}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln T_{1/3} - \lambda_{T_{1/3}}}{\zeta_{T_{1/3}}} \right)^2 \right]$ $\lambda_{T_{1/3}} = \ln \mu_{T_{1/3}} - \frac{1}{2}\zeta_{T_{1/3}}^2, \quad \zeta_{T_{1/3}}^2 = \ln \left[1 + \left(\frac{\sigma_{T_{1/3}}}{\mu_{T_{1/3}}} \right)^2 \right]$
Correlation coefficient	$R_{H_{1/3}-T_{1/3}} = \tanh(\alpha U_{10} + \beta)$ <p>where, $\alpha = 0.0484\text{s/m}$, $\beta = 0.643$</p>	

【波浪】

No.	タイトル	著者	発行年月
3	二山型スペクトル波の代表周期と代表波高の算定法に関する研究	安田 誠宏, 森川 湧太, 間瀬 肇	2020年
出典	土木学会, 土木学会論文集B3(海洋開発), 2020, 76巻, 2号, pp.I_187-I_192 https://www.jstage.jst.go.jp/article/kaigan/76/2/76_I_187/_pdf/-char/ja (参照2025/12/5)		
要点	<p>本論文は、港湾構造物に作用する二山型スペクトル波の、代表周期および代表波高の算定方法を数値シミュレーションにより検討している。</p> <p>背景として、うねり性波浪による港湾構造物の被災事例が報告されていること、中でもうねりと風波が重なるスペクトルが二山となるような波浪では、統計的性質が複雑で改正された技術基準でもその重要性が示されていることを踏まえている。谷本ら(1986)が、防波堤(混成堤)直立部に働く二山型スペクトル波の波力特性を実験により明らかにしており、その精度を上げるためには代表周期の正しい算定が重要となっている。</p> <p>本論文では、二山型スペクトルの有義波周期の算定法について、数値シミュレーション結果に現地観測データも加味し、谷本ら, Goda, van der Meerのこれまで提案されている手法について適用性の比較検討を行っている。さらに、現地観測データへの適用結果を通じて、谷本らの代表周期算定式の修正方法を提案し、それにより精度が向上することを確認した。</p> <p>本論文は港湾構造物を対象としており、No.1/No.2の論文とはアプローチが異なり、パラメータに風速を使わず波浪のみで完結させ、港湾構造物の波浪算定に用いる代表の有義波高・有義波周期を求める内容になっている。</p>		

【波浪】

No.	タイトル	著者	発行年月
4	台風による二山型スペクトルを有する現地波浪の諸特性	永井 康平, 小沢 大造, 岸良 安治, 西村 達郎	1986年
出典	土木学会, 土木学会海岸工学講演会論文集, 1986, 33巻, pp.144-148 https://www.jstage.jst.go.jp/article/proce1970/33/0/33_0_144/pdf/-char/ja (参照2025/12/5)		
要点	<p>台風接近時に湾内で発生した二山型スペクトルの観測実例を示した論文。1985年の台風8509号と8511号の2つが、沖縄県の中城湾に来襲したときのデータを分析したものである。</p> <p>湾外からの侵入波（うねり）と湾内で発生した風波による二山のスペクトルが観測されており、2つの波浪系の存在する波の波高はエネルギーの重ね合わせ方式による一般的な式で算出されることなどが確認された。</p> <p>本論文は観測された二山型スペクトルの紹介であり、スペクトルモデルの提案等までには至っていない。</p> <p>例：台風8509号で観測された波浪スペクトル。通過の途中で二山スペクトルが計測されている。</p>		
	<p>Figure 4 consists of three subplots showing wave spectral density (SPECTRAL DENSITY in cm²*sec) versus frequency (Hz) on a log-log scale. The plots are for three different stations: St. 1, St. 2, and St. 3, recorded at different times on August 12, 1985. Each plot shows two distinct peaks, characteristic of a two-peak spectrum. The parameters for each peak are provided: peak height (H_{1/2}) and peak period (T_{1/2}). A dashed line in each plot represents the '回折波' (diffracted wave). - Station 1 (8月12日16時): H_{1/2} = 2.19m, T_{1/2} = 9.3s; H_{1/2} = 0.55m, T_{1/2} = 7.0s - Station 2 (8月12日18時): H_{1/2} = 1.70m, T_{1/2} = 9.7s; H_{1/2} = 0.62m, T_{1/2} = 5.4s - Station 3 (8月12日22時): H_{1/2} = 1.52m, T_{1/2} = 7.8s; H_{1/2} = 0.76m, T_{1/2} = 4.5s</p>		
	<p>図-4 中城湾内外の波のスペクトルの例（台風8509号のケース）</p>		

【波浪】

No.	タイトル	著者	発行年月
5	双峰型スペクトル波の浅海変形	間瀬 肇, 小沢 勇介	1995年
出典	土木学会, 土木学会論文集, 1995, No.509/II-30, pp.183-191 https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscej1984/1995/509/1995_509_183/pdf/-char/ja (参照2025/12/5)		
要点	<p>波浪スペクトルは沖合から沿岸に波が進むにつれて、浅海変形（浅水変形）により変化していく。本論文では、双峰型（二山型）スペクトル波の浅海変形、すなわち、エネルギースペクトルと有義波高および有義波周期の変化を検討している。</p> <p>二山型スペクトルは沿岸より沖合において発現頻度が高いことが知られており、そのメカニズムについても検討している。</p> <p>本論文では、予測モデルとしてハイブリッド型不規則波浪変形理論を用いている。この理論はスペクトル変形理論と砕波減衰確率モデルを組み合わせたもので、波が浅海域に伝わる時の浅水変形と砕波を考慮できる。高周波側波列は低周波側波列に比べ、岸近くのshoaling領域および砕波帯でエネルギーが急速に減少し、低周波側波列のピークが卓越した単峰型スペクトルになる傾向になることが示されている。</p> <p>本論文は二山型スペクトルの定義方法についての論文ではなく、二山型のスペクトルは観測などで得られていることを前提に、その伝播時の変形を検討したものである。</p>		

【波浪】

No.	タイトル	著者	発行年月
6	東京湾における台風1915号による波浪スペクトル特性と対策施設整備の留意点	高橋 康弘, 高山 知司, 遠藤 敏雄, 鈴木 善光, 浜口 正志, 松藤 絵理子, 石本 健治, 原 信彦	2020年
出典	土木学会, 土木学会論文集B3(海洋開発), 2020, 76巻, 2号, pp.I_193-I_198 https://www.jstage.jst.go.jp/article/kaigan/76/2/76_I_193/pdf/-char/ja (参照2025/12/5)		
要点	<p>本論文は、令和元年房総半島台風（台風1915号）時に横浜付近で発生した二山型スペクトルについて、その特性と被災状況を分析したものである。</p> <p>但し、この論文で扱われている二山型スペクトルは、No.1～5の論文のように周期の異なる波成分の重なりではなく、周期はほぼ同一で波向き異なる2成分波によるものである（すなわち、周波数スペクトルが二山ではなく、方向スペクトルが二山）。この現象は、起きる確率は低いと考えられるが、発生すると2方向からの波が大きな波高を生み、沿岸に被害が発生する確率が高まると考えられる。</p> <p>本論文の検討により、東京湾の地形と、遅く通過した台風1915号の特性が絡んで横浜近辺に二山型方向スペクトルが発生していることが考察されている。</p> <p>本論文は「風波とうねり」の関係ではないものの、海岸の地形によってはこのような現象も起き得るという点で重要と考えられる</p> <p>論文より：台風1915号で横浜付近で観測された二山方向スペクトル</p>		

【波浪】

No.	タイトル	著者	発行年月
7	現地観測に基づく越流型モデルを用いた伝達波計算法の検証	阿部 光信, 貝沼 憲男, 興野 俊也, 定森 良夫	1998年
出典	土木学会, 海岸工学論文集, 1998, 第45巻, 土木学会, pp.680-690 https://www.jstage.jst.go.jp/article/proce1989/45/0/45_0_686/pdf/-char/ja (参照2025/12/5)		
要点	<p>論文は、港湾などの防波堤内部の波高（港内波高）を対象とした論文である。防波堤越波時の伝達波による物理機構を再現した越流型モデルを平面波浪場に適用できるように改良を加え、新たな伝達波計算方法として提案している。さらに、太平洋岸において実施した伝達波に関する現地波浪観測データを用いて、提案した港内波算定手法の実海域での適性を明らかにしている。</p> <p>このモデルによる港内波浪の解析結果、および現地での観測データにおいて、防波堤を越流し伝達した伝達波と、防波堤開口部から入射した入射波による二山型のスペクトルが解析されており、その特性について述べられている。伝達波による波浪は入射波の倍の周波数をもつ傾向が解析で示され、現地波浪観測データでも見られている。</p> <p>論文より：回折波が卓越するS-1地点では一山型スペクトルであるが、伝達波の影響を受けるD-1, D-3地点では入射波周期に対応した0.1Hz付近の周波数のほかに、その倍周波数のピークが見られている。</p>		

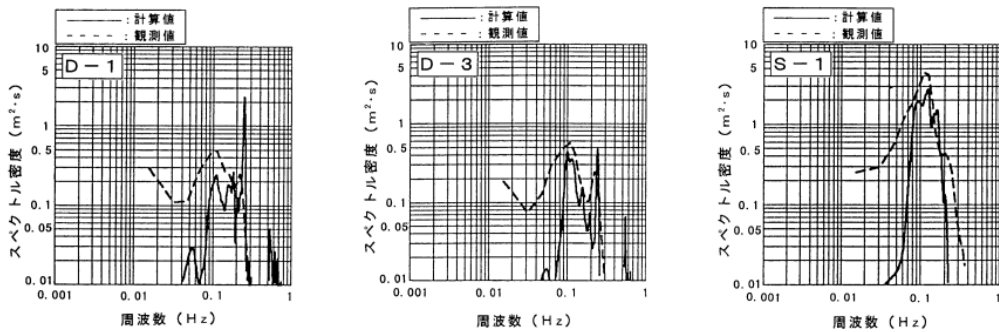
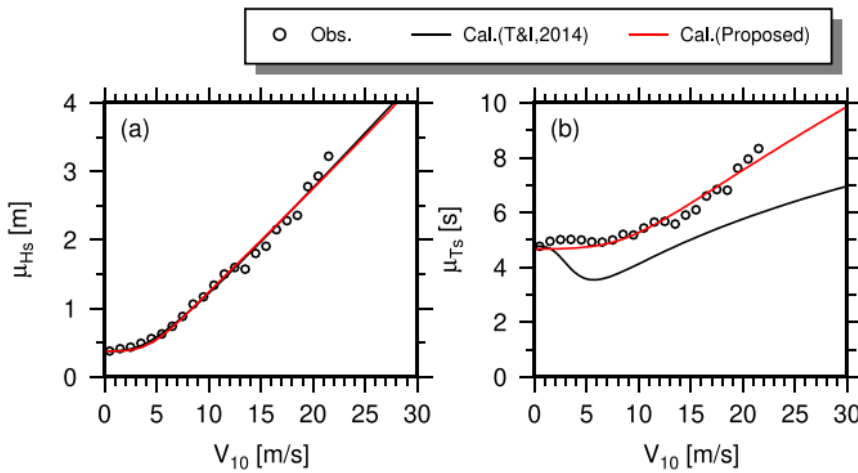


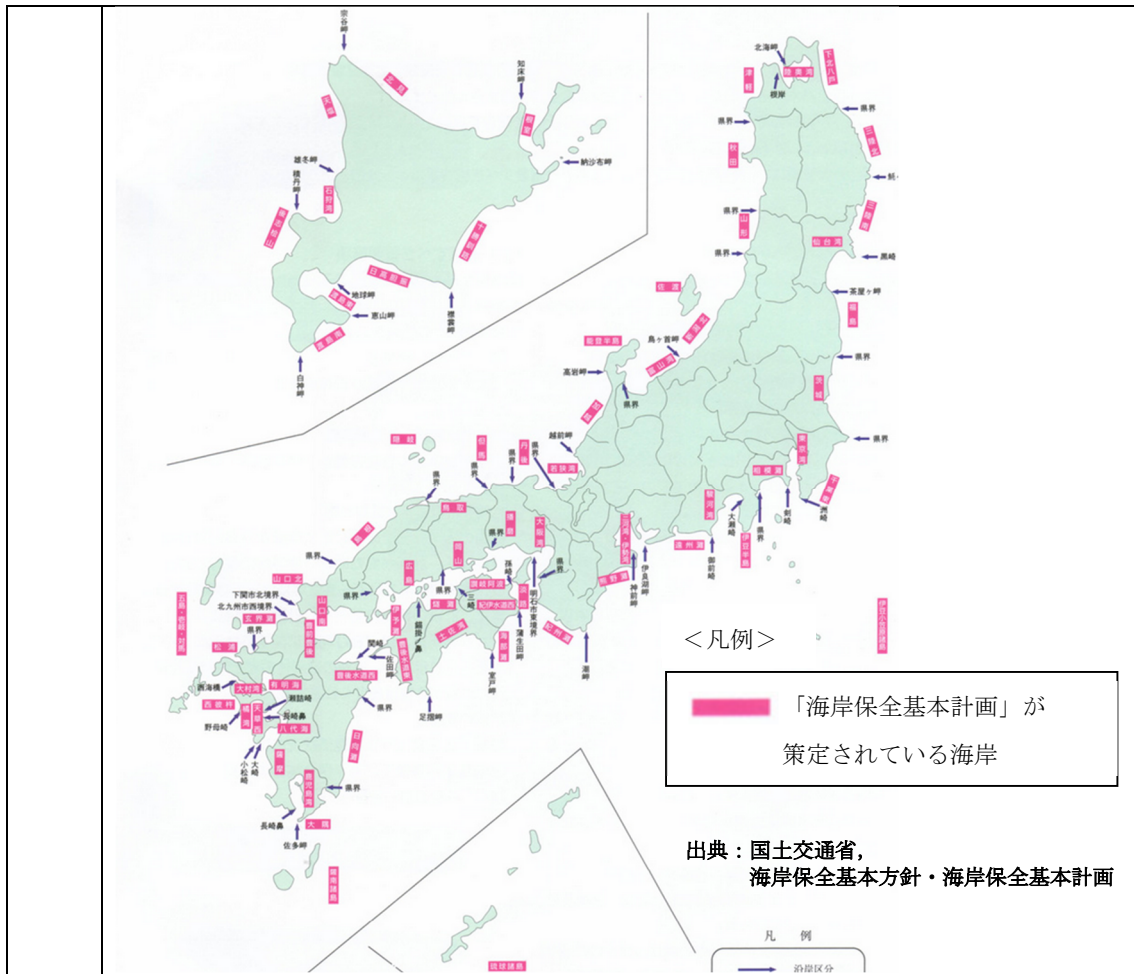
図-9 波浪観測地点での周波数スペクトルの観測値と計算結果の比較

【波浪】

No.	タイトル	著者	発行年月
8	日本海側の洋上風車に対応した風と波の長期結合確率分布モデル	田中 陽二, 吉岡 健, 仲井 圭二,, 永井 紀彦	2019年
出典	土木学会, 土木学会論文集B3(海洋開発), 2019, 75巻, 2号, pp.I_31-I_36 https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejoe/75/2/75_I_31/pdf/-char/ja (参照2025/12/5)		
要点	<p>本論文は, No.2で示した種本・石原の風と波を考慮した長期結合確率分布モデル(風波とうねりを考慮)について, 日本海側の響灘で適用する際のパラメータ設定とモデルの改良について記したものである。</p> <p>一般的に日本海側ではうねりの影響は少ないとされるが, 響灘では西側の渤海・東シナ海からの波浪が入るため, うねり影響を受けるものと思われる。しかし, 種本・石原モデルをそのまま適用すると, 波周期が過小評価となる課題が見られた。本論文ではこの課題克服のため, 風波の減衰および発達過程をモデルに加えることを試みている。その結果, 新しい風と波の結合確率分布モデルは, 風速 V_{10}, 発達沖波波高 H_0, 波高発達率 K_w の結合確率として表されている。これにより, 観測値との適合性が大幅に向上したとしている。また, 論文中の表-1にパラメータの推定手順が示されている。</p> <p>本論文は, 種本・石原モデルを, さらに他の海域に用いる際にも参考となると思われる。</p> <p>論文より: 響灘における種本・石原モデル (T&I) と改良モデルによる波高・周期の推定結果</p>  <p>Figure 3 consists of two subplots, (a) and (b), comparing observed data (Obs.) with two calculation models: Cal.(T&I, 2014) and Cal.(Proposed). Both plots have V₁₀ [m/s] on the x-axis (0 to 30). Subplot (a) shows the mean wave height μ_{Hs} [m] on the y-axis (0 to 4). The observed data (open circles) shows a non-linear increasing trend. The 2014 model (black line) is a straight line, while the proposed model (red line) follows the observed data curve much more closely. Subplot (b) shows the mean wave period μ_{Ts} [s] on the y-axis (0 to 10). The observed data (open circles) shows a slight dip around V₁₀ = 5 m/s before increasing. The 2014 model (black line) shows a significant dip and lower values than observed. The proposed model (red line) follows the observed data trend very well.</p>		
<p>図-3 波高平均値(a)と周期平均値(b)の推定結果</p>			

【津波】

No.	タイトル	著者	発行年月
9	海岸保全基本計画	国土交通省、各都道府県	-
出典	国土交通省、海岸保全基本方針・海岸保全基本計画 https://www.mlit.go.jp/river/kaigan/main/coastplan/index.html (参照2026/1/22)		
要点	<p>(参考)</p> <p>「海岸保全基本計画」に関する、「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）」の記載箇所抜粋</p> <p>3.4 津波荷重</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>各地方自治体の海岸保全基本計画等で設定されている設計津波をもとに、津波荷重を設定するものとする。</p> </div> <p>【解説】</p> <p>設計津波の津波高は、各地方自治体の海岸保全基本計画等で定められた津波をもとに設定する。海岸保全基本計画等で示される津波高は海岸部であることが多いため、グリーンの法則等の適切な方法にて風車設置位置での津波高を推定するものとする。津波荷重の算定については、港湾の施設の技術上の基準・同解説¹⁾、及び防波堤の耐津波設計ガイドライン²⁾において津波波力の算定式が提示されているが、これらは延長の長い防波堤を対象としている。支持構造物に作用する津波荷重については、波荷重と同様に、津波流速に対するモリソン波力（抗力成分のみ）により津波荷重を設定してもよい。津波流速の算定については、港湾の施設の技術上の基準・同解説¹⁾を参照することができる。潮位の設定については、津波荷重が厳しくなる条件として、H.W.L.又はL.W.L.のいずれかを設定する。津波流速は水深が浅くなると速くなる傾向にあるが、潮位が高くなると波圧合力が大きくなるため、どちらが支配的になるか比較検討が必要である。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・「海岸保全基本計画」とは、国が策定する「海外保全基本方針」に基づき都道府県が策定することとされている計画で、海岸の保全に関する基本的な事項を定めたものである。 ・下図に示す全国91の沿岸に対して「海岸保全基本計画」が策定されており、都道府県によってはこの「海岸保全基本計画」に設計津波水位を記載している。 		



・設計津波水位の記載例として、「秋田沿岸海岸保全計画（秋田県）」の抜粋を以下に示す。

地域海岸名 ※1	対象地震	地区名	設計津波 の水位 (T.P.+m)	高潮・波浪 防護高 (T.P.+m)	津波、高潮 のチェック	計画 天端高 (T.P.+m)
八森地域海岸	庄内沖地震(1833)	八森地域海岸	4.7	5.5	高潮	5.5
能代地域海岸	北海道南西沖地震(1993)	能代地域海岸	4.1	5.5	高潮	5.5~6.8※2
男鹿地域海岸	庄内沖地震(1833)	北浦～島漁港	3.0	5.5	高潮	5.5
		戸賀	4.0	4.0	高潮	4.0
		加茂青砂～台島	4.8	5.5	高潮	5.5
秋田・船川港地域海岸	庄内沖地震(1833)	船川港	5.7	3.5	津波	4.5~6.0
		脇本漁港～脇本船越	4.7	5.5	高潮	5.5
		天王～秋田港(北)	5.4	5.5~6.0	高潮	5.5~6.0
新屋・下浜地域海岸	日本海中部地震(1983)	秋田港(南)	6.0	6.0	高潮	6.0
		新屋・下浜	5.3	5.5	高潮	5.5
由利地域海岸	日本海中部地震(1983)	由利地域海岸	4.5	5.5	高潮	5.5
鳥海地域海岸	日本海中部地震(1983)	鳥海地域海岸	4.0	5.5	高潮	5.5

【津波】

No.	タイトル	著者	発行年月
10	グリーンの法則	—	—
出典	—		
要点	<p>(参考)</p> <p>「グリーンの法則」に関する、「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）」の記載箇所抜粋</p> <p>3.4 津波荷重</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>各地方自治体の海岸保全基本計画等で設定されている設計津波をもとに、津波荷重を設定するものとする。</p> </div> <p>【解説】</p> <p>設計津波の津波高は、各地方自治体の海岸保全基本計画等で定められた津波をもとに設定する。海岸保全基本計画等で示される津波高は海岸部であることが多いため、グリーンの法則等の適切な方法にて風車設置位置での津波高を推定するものとする。津波荷重の算定については、港湾の施設の技術上の基準・同解説¹⁾、及び防波堤の耐津波設計ガイドライン²⁾において津波波力の算定式が提示されているが、これらは延長の長い防波堤を対象としている。支持構造物に作用する津波荷重については、波荷重と同様に、津波流速に対するモリソン波力（抗力成分のみ）により津波荷重を設定してもよい。津波流速の算定については、港湾の施設の技術上の基準・同解説¹⁾を参照することができる。潮位の設定については、津波荷重が厳しくなる条件として、H.W.L. 又は L.W.L. のいずれかを設定する。津波流速は水深が浅くなると速くなる傾向にあるが、潮位が高くなると波圧合力が大きくなるため、どちらが支配的になるか比較検討が必要である。</p> <p>・グリーンの法則は、津波の波高と水深の関係を表す法則で、下式により定義される。また下式は、“水深が浅くなると津波の高さは高くなる”ことを意味している。</p> $H = H_0 \left(\frac{h_0}{h} \right)^{\frac{1}{4}}$ <p>H, H₀ = 風車建設位置及び海岸部での津波水位 H, h₀ = 風車建設位置及び海岸部での水深</p> <p>・各都道府県の海岸保全基本計画等で示される設計津波水位は、海岸部における津波水位であることが多い。従って、沖合部（風車建設位置）の津波水位については、グリーンの法則を用いて推測することができる。</p>		

【地盤（工学的基盤）】

No.	タイトル	著者	発行年月
11	洋上風力発電設備建設に係る地盤リスク低減を考慮した地盤調査に関する一考察	野口 孝俊, 赤坂 幸洋, 田中 淳	2021年
出典	土木学会, 土木学会論文集B3(海洋開発), 2021, 77巻, 2号, pp.I_421-I_426 https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejoe/77/2/77_I_421/pdf/-char/ja (参照2025/12/5)		
要点	<p>洋上風力発電事業の企画立案に際しては, 既往資料を基に対象エリアの海底面状況・海底面下の土層構成を推定し, エリア全体の地盤特性を把握する。</p> <p>その後, 当該エリアでの事業性が見込まれた後, 海底面状況を把握する1次調査, 詳細な土層構成・工学的基盤面を把握する2次調査, 風車建設地点における詳細な3次調査を行う流れとなる。</p> <p>工学的基盤面設定に関する具体的な調査は2次調査以降となる。</p> <p>[2次調査（海底面2次元調査+鉛直2次元調査）]</p> <p>1次調査(海底面2次元調査)の次段階として, 音波探査で確認した地盤構成を元にCPTおよびボーリングを行う地点を選定して, 詳細な地盤構成を把握（土層図を作成）, 工学的基盤面の設定を行う。着床式構造においては, 海底地盤面下の地質構造を広範囲かつ海底地盤の堆積状況を連続的に捉える必要がある。</p> <p>[3次調査（鉛直2次元詳細調査）]</p> <p>風車建設位置における地盤の特性を把握するためジャストボーリング（SPT, CPT調査）を行うことで詳細な地盤状況を把握する。</p>		

【地盤（工学的基盤）】

No.	タイトル	著者	発行年月
12	新しい地盤調査法－海底微動アレイ探査システムの開発とその適用－	井上 雄介, 今井 幹浩, 松原 由和, 平出 亜	2022年
出典	物理探査学会, 物理探査, 2022, 第75巻, pp.sp50-sp59 https://www.jstage.jst.go.jp/article/segj/75/0/75_sp50/pdf/-char/ja (参照2025/12/5)		
要点	<p><抄録></p> <p>2019年4月より再エネ海域利用法が施行されたことにより, 洋上風力発電施設に係る地盤調査市場は大幅に拡大している。洋上における地盤の支持層分布あるいは工学的基盤深度の把握に必要なS波速度の測定は, ボーリング孔を利用したサスペンションPS検層が一般的に行われてきた。しかしながら, 洋上風力発電事業(着床式)は年間平均風速7 m/s以上, 水深10~40 m程度の海域を対象としており, 厳しい環境下でのボーリング作業は容易ではない。著者らはこのような厳しい環境下でもボーリング調査を必要とせず, 短期間でS波速度構造を把握することができる海底微動アレイ探査システムを開発した。本稿では, 当手法の開発について概説した後, 適用事例及び海底微動の特徴について示した。これらの結果より, 得られたS波速度構造はPS検層および音波探査と整合的な結果が得られたことから海底微動アレイ探査の有用性が示された。</p>		

【地盤 (工学的基盤)】

No.	タイトル	著者	発行年月
13	SEP船を用いた新しい地盤調査法 —CPTと海底逆PS検層の統合調 査—	原 由和, 川崎 悠介, 野中 建 太, 平出 亜	2022年
出典	物理探査学会, 物理探査, 2022, 第75巻, pp.sp30-sp41 https://www.jstage.jst.go.jp/article/segj/75/0/75_sp30/_pdf/-char/ja (参照2025/12/5)		
要点	<p><抄録></p> <p>洋上風力事業では, 地盤定数の測定法として仮設が容易で迅速な調査が可能な洋上CPTがSEP船等を用いて実施されるケースがある。ただし, 日本近海の海底地盤では多くの場合CPTで必要深度まで押し込み続けることはできず, 例えばパーカッションドリル掘削のように高速な掘削方法で所定深度まで掘り進めてはCPTを繰り返すという方法が一般的である。</p> <p>また, 日本における海底地盤調査においては, 工学的基盤層 ($V_s \geq 400$ m/s) の把握が重要なポイントとなっている。一般的にS波速度の取得は, ボーリング孔を利用したサスペンションPS検層 (以下susPS検層と称す) で行われることが多いが, 掘削径や孔壁の仕上がり状況の影響を受けるなどの問題も指摘されている。本論文では, 洋上ボーリングで標準貫入試験 (SPT) 実施時の振動, ならびに洋上CPTで用いるパーカッションドリル掘削時の振動を用いた新たなPS検層法の結果を示す。このPS検層は陸上で実施するダウンホールPS検層の逆 (起振と受振が逆) であることから海底逆PS検層と名付けた。海底逆PS検層をsusPS検層と同一孔あるいは直近の孔で実施してS波速度を比較した結果, 海底逆PS検層においてもsusPS検層と同様な結果が得られることが分かった。本手法は, 孔中に測定用ゾンデを挿入する必要がなく, susPS検層で対応が難しい崩壊のある孔や大孔径 (通常susPS検層の適応孔径はおおよそ200 mm以下とされている) において有効である。</p>		

【地盤（工学的基盤）】

No.	タイトル	著者	発行年月
14	洋上風力発電設備に係る海底地盤の調査及び評価の手引き	沿岸技術研究センター, 海洋調査協会	2022年
出典	沿岸技術研究センター, 海洋調査協会		
要点	<p>工学的基盤面を把握するための現地調査項目として手法とその手法によって得られる情報が以下のように示されている。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ボーリング調査による標準貫入試験, PS検層 →土層構成, 工学的基盤面, Vs深度分布 ・CPT調査によるPS検層 →土層構成, 工学的基盤面, Vs深度分布 ・海底微動アレイ探査 →工学的基盤面, Vsの深度分布 <p>[調査頻度及び測定間隔]</p> <p>ボーリングやCPT調査については, ゾーニング結果を受けて, 各エリアで最低1地点の実施が望まれる。また, サンプルングや孔内載荷試験は必要に応じ想定される地層毎に1か所程度実施する。工学的基盤面とされる$V_s \geq 400$ m/sの地層を予測し, ボーリングまたはCPT調査で確認する。工学的基盤が深い場合(例えば, 海底面下60mから80m以深) や不確実な場合は海底微動アレイ探査などを併用する。</p> <p>[調査結果の精査]</p> <p>ボーリング孔を利用したPS検層またはサンプルング試料の室内試験結果によって, 工学的基盤面とされる$V_s \geq 400$ m/sの地層を確認し, それ以深では400m/sを下回らないことを確認することが望ましい。</p> <p>ここまでは, 一般的な海底地盤エリアにおける工学的基盤確認及び評価方法の記載であるが, 新生代第三紀鮮新世の堆積軟岩(砂岩, 泥岩など) が分布するエリアでの地盤調査については以下のような留意点が示されている。</p> <p><ボーリング調査></p> <ul style="list-style-type: none"> ・標準貫入試験(SPT) でN値が50以上と想定される地盤では予備打ちを本打ちに代えることができる。特に軟岩では無理に貫入するとSPTサンプラーが地盤に噛んで引き抜けなくなることがあり注意が必要である。 ・S波速度(V_s) が400 m/s以上の岩盤では標準貫入試験を無理に行わずに, オールコアボーリングに切り替えてコアを採取し, コアの状態から岩級区分 		

	<p>を評価することが必要である。</p> <ul style="list-style-type: none">・ オールコアボーリングの後にPS検層を実施し, S波速度 (V_s) を把握する。 また必要に応じて採取したコアで強度試験や超音波伝播速度測定を実施する。 <p><CPT (電気式コーン貫入試験) 調査></p> <ul style="list-style-type: none">・ CPTコーンが貫入不能となった場合は, コアボーリングに切り替えてコアを採取し, コアの状態を観察することが必要である。・ 削孔した孔でPS検層を実施し, S波速度 (V_s) を把握する。 <p><強度定数の評価></p> <p>岩盤の強度は, 試験時に生じる乱れの影響を踏まえて評価する必要がある。</p>
--	--

【地盤（工学的基盤）】

No.	タイトル	著者	発行年月																				
15	[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.nedo.go.jp/content/100949074.pdf （参照2025/12/5）																						
要点	<p>工学的基盤面設定に際しての調査項目、考え方について以下の記載が確認出来る。</p> <p>[海底地盤調査／音波探査]</p> <table border="1"> <caption>音波探査</caption> <tr> <td>調査目的</td> <td>・洋上風力発電設備や海底送電線などウインドファームの基本設計ができるよう、調査海域において音波を海中に発信して海底下の地層境界で反射した反射波を連続的に記録し、その記録の解析を行って地質構造や地盤状況を把握する。</td> </tr> <tr> <td>調査期間</td> <td>—</td> </tr> <tr> <td>調査地点数等</td> <td>・調査海域全体の地質状況を把握できるよう、格子状の測線（格子は2～3km程度のメッシュ間隔）で実施する。なお、調査海域が広い場合は調査海域の面積を踏まえ測線間隔を決定する。 ・調査エリアは船舶航行の観点から水深10m以深の範囲とする。</td> </tr> <tr> <td>調査手法・仕様</td> <td>・音源は、分布地質及び工学的基盤の深さを踏まえ、プーマー、スパーカー、ウォーターガン、エアガン等から選定する。 ・反射波の受信方法は、シングルチャンネル音波探査（1つの受振器）及びマルチチャンネル音波探査（複数の受振器）から選定する。 ・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）海洋調査協会に準拠する。</td> </tr> <tr> <td>調査成果</td> <td>・海底地質断面図、解釈断面図、代表層の上面等深線図、航跡図等を作成する。</td> </tr> </table> <p>[海底地盤調査／地盤物性値【着床式】]</p> <table border="1"> <caption>地盤物性値【着床式】</caption> <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調査、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>・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 ・海底微動アレイ探査：調査地点数は3地点以上とし、調査海域の広さに応じて設定する。なお、ボーリング調査のPS検層においてGL-100mを超えてもS波速度(Vs)が400m/s以上を満足しないなど、結果的にボーリング調査により工学的基盤が把握できなかった場合は、直近で海底微動アレイ探査を実施して工学的基盤の深度を推定する。</td> </tr> <tr> <td>調査手法・仕様</td> <td>・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、地盤の液化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（Vs ≧400m/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>・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、海底微動アレイ探査により深度方向のVs分布及び、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。</td> </tr> </table>			調査目的	・洋上風力発電設備や海底送電線などウインドファームの基本設計ができるよう、調査海域において音波を海中に発信して海底下の地層境界で反射した反射波を連続的に記録し、その記録の解析を行って地質構造や地盤状況を把握する。	調査期間	—	調査地点数等	・調査海域全体の地質状況を把握できるよう、格子状の測線（格子は2～3km程度のメッシュ間隔）で実施する。なお、調査海域が広い場合は調査海域の面積を踏まえ測線間隔を決定する。 ・調査エリアは船舶航行の観点から水深10m以深の範囲とする。	調査手法・仕様	・音源は、分布地質及び工学的基盤の深さを踏まえ、プーマー、スパーカー、ウォーターガン、エアガン等から選定する。 ・反射波の受信方法は、シングルチャンネル音波探査（1つの受振器）及びマルチチャンネル音波探査（複数の受振器）から選定する。 ・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）海洋調査協会に準拠する。	調査成果	・海底地質断面図、解釈断面図、代表層の上面等深線図、航跡図等を作成する。	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調査、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	・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 ・海底微動アレイ探査：調査地点数は3地点以上とし、調査海域の広さに応じて設定する。なお、ボーリング調査のPS検層においてGL-100mを超えてもS波速度(Vs)が400m/s以上を満足しないなど、結果的にボーリング調査により工学的基盤が把握できなかった場合は、直近で海底微動アレイ探査を実施して工学的基盤の深度を推定する。	調査手法・仕様	・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、地盤の液化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（Vs ≧400m/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	・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、海底微動アレイ探査により深度方向のVs分布及び、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。
調査目的	・洋上風力発電設備や海底送電線などウインドファームの基本設計ができるよう、調査海域において音波を海中に発信して海底下の地層境界で反射した反射波を連続的に記録し、その記録の解析を行って地質構造や地盤状況を把握する。																						
調査期間	—																						
調査地点数等	・調査海域全体の地質状況を把握できるよう、格子状の測線（格子は2～3km程度のメッシュ間隔）で実施する。なお、調査海域が広い場合は調査海域の面積を踏まえ測線間隔を決定する。 ・調査エリアは船舶航行の観点から水深10m以深の範囲とする。																						
調査手法・仕様	・音源は、分布地質及び工学的基盤の深さを踏まえ、プーマー、スパーカー、ウォーターガン、エアガン等から選定する。 ・反射波の受信方法は、シングルチャンネル音波探査（1つの受振器）及びマルチチャンネル音波探査（複数の受振器）から選定する。 ・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）海洋調査協会に準拠する。																						
調査成果	・海底地質断面図、解釈断面図、代表層の上面等深線図、航跡図等を作成する。																						
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調査、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	・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 ・海底微動アレイ探査：調査地点数は3地点以上とし、調査海域の広さに応じて設定する。なお、ボーリング調査のPS検層においてGL-100mを超えてもS波速度(Vs)が400m/s以上を満足しないなど、結果的にボーリング調査により工学的基盤が把握できなかった場合は、直近で海底微動アレイ探査を実施して工学的基盤の深度を推定する。																						
調査手法・仕様	・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、地盤の液化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（Vs ≧400m/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	・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、海底微動アレイ探査により深度方向のVs分布及び、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。																						

【地盤（工学的基盤）】

No.	タイトル	著者	発行年月
16	令和5年度セントラル方式による調査計画（概要）	エネルギー・金属鉱物資源機構	2023年1月
出典	エネルギー・金属鉱物資源機構（JOGMEC） https://www.jogmec.go.jp/content/300382020.pdf （参照2025/12/5）		
要点	<p>エネルギー・金属鉱物資源機構（JOGMEC）が“令和5年度セントラル方式による調査計画（概要）”として作成した資料の中で、工学的基盤面設定に対する考え方が以下のように示されている。</p> <p>[岩宇・南後志地区沖 調査概要]の中で、既に実施されているNEDO地盤調査結果に基づき、</p> <ul style="list-style-type: none"> ・工学的基盤面を確認するためのボーリング調査 ・貫入試験(SPT/CPT) ※ボーリング本数は複数孔を予定 ・音波探査を海域の一部で実施 <p>と示されており、SPTとCPTの相関および音波探査などを行うことが示されている。</p>		

【地盤（調査）】

No.	タイトル	著者	発行年月
17	風力発電と地形・地質（その1：概要および洋上風力発電）	環境地質研究部会 船山 淳 (パシフィックコンサルタンツ)	2021年
出典	日本応用地質学会, 応用地質, 2021, 第62巻, 第1号, pp.30-34 https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjseg/62/1/62_30/_pdf (参照2025/12/5)		
要点	<p>洋上風力発電施設の海底地形・地質調査の内容については、着床式の技術指針で推奨内容が示されている。また、港湾の施設の技術上の基準・同解説（日本港湾協会, 2018）を参考とすることができるとされている。以下に、これらで示されている調査内容を紹介する。</p> <p>(1) 調査項目, 調査方法</p> <p>① 予備調査：既存資料の収集を行う。</p> <p>② 海底地形調査：深淺測量により施設設置地点の水深, 海底面の起伏, 巨石や障害物の有無等を確認する。サイドスキャンソナー探査（海上から発信し海底面から戻る音波の強弱を濃淡表示する方法）により海底の表面が変動しやすい軟らかい状態かなど底質を推定する。</p> <p>③ 物理探査：海底地盤面下の堆積物分布や地質構造を広範囲に把握するもので音波探査などがある。探査機材の選定では、調査エリアの水深と海底地盤面下の探査深度により決定する。</p> <p>④ 海上ボーリング調査・サンプリング：地盤の構成や構造の把握を行う。</p> <p>⑤ サウンディング・土質試験：原位置試験（標準貫入試験, コーン貫入試験等）および室内土質試験を行う。関係技術基準の付属書3では、コーン貫入試験による測定結果の評価事例が示されている。</p> <p>(2) 調査位置・間隔</p> <p>ボーリング調査・サウンディングは、原則として施設設置位置で実施する。物理探査等の結果から、地盤の構造や土質性状が類似すると判断した場合はグルーピングを行い、規模に応じて調査数量を決定し、原位置試験及び室内試験はグループで1ヵ所以上行うとされている。多種類のサウンディングを併用する場合、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、コーン貫入試験を実施した箇所10%以上の箇所で標準貫入試験を実施することが推奨されている。</p> <p>(3) 調査深度</p> <p>調査深度は、地層及び構造物の形状に応じて設定するものとされ、埋立地の液状化対策ハンドブックの考え方が参考として示されている。すなわち、調査深度は原則として支持層が確認できる深さまでとし、目安として杭基</p>		

礎でない場合はN値30以上, 杭基礎の場合にはN値50以上, 岩盤到達の場合には少なくとも1mのコアで岩質を確認するまでなどである。耐震検討を行う際の調査深度は工学的基盤の深度及び液状化検討層の深度によるとされ, 工学的基盤の深度はせん断波速度 (S波速度: V_s) が400m/s以上の層, 岩盤の場合はその性質により検討する。液状化検討層の深度は海底面より20mの深さまでが標準 (液状化しない層がある場合は20m以浅としてもよい) となっている。

(4) 地形の変化特性に関する調査

設計地盤標高を設定するため海底地盤面標高の変動を把握する必要がある, 定期的な横断測量や変化に関する解析を行う。

(5) 地盤条件の設定

地盤調査及び土質試験結果をもとに各種地盤定数を設定する。強度に関するパラメータは, 港湾の施設の技術上の基準・同解説等を参考に特性値を設定するとされている。

【地盤（調査）】

No.	タイトル	著者	発行年月
18	着床式洋上風力発電導入ガイドブック(最終版)	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/100889993.pdf （参照2025/12/5）		
要点	<p>調査地点, 調査間隔および地盤調査の深度は, 設置予定点の推定される地盤状況および風車規模, 支持構造物の種類に応じて決定する。地質柱状図の既往調査資料がない場合には, ボーリング調査（ガイドブック中の図III.3.3-3 ; SEP船からコアサンプラーを垂下して行う）を実施する。地盤の状況に応じて原位置試験（標準貫入試験, 透水試験等）, 室内試験（土粒子の密度試験, 圧縮試験等）, 貫入試験を行い, 支持力・沈下特性ならびに基礎工事の施工に必要な地盤の性質を求める。また, 改正建築基準法の施行に伴い, 孔内水平載荷試験, PS検層等時刻歴応答解析を行うための調査も行う。海底土質調査に関してIEC61400-3の12.15では, 調査にあたっては1箇所以上のボーリング調査と室内土質試験の実施が必要で, 基礎ごとの土質調査が望まれるとしている。日本ではN値による設計法が一般的であるが, 欧州ではCPT（Cone Penetration Test）等の比較的経済的な土質調査法が普及している。したがって, CPTとバイブロコアにより収集した試料の室内土質試験と併用し, 1箇所のボーリング試験とのキャリブレーションを実施検証する。</p>		

【地盤（調査）】

No.	タイトル	著者	発行年月
19	[前述No.14] 洋上風力発電設備に係る海底地盤の調査及び評価の手引き	[前述No.14]	[前述No.14]

出典 [前述No.14]

要点 洋上風力発電設備に係る海底地盤調査において実施する主要な照査項目は以下のよう大別されている。

表-2.2-1 主要な調査項目一覧

	項目	目的	既存資料調査または調査手法	得られる情報
机 上 調 査	海域の利用状況	調査エリアの利活用状況の把握	海図、海洋状況表示システム（海しる）、洋上風況マップ（NeoWins）、自治体の漁業調整規則等の確認	航路、魚礁、漁業権区画、海底資源、海底パイプライン、海底通信ケーブル等
	海底地形、水域の状況	調査エリアの海底地形、水深、潮位、潮流等の把握	海底地形図、海図、海洋状況表示システム（海しる）、洋上風況マップ（NeoWins）の確認	海底地形、水深、岩礁、溺れ谷、潮位、潮流等
	海域の地盤の状況	海底面の表層地質、地層構成、地盤強度、基盤深度、断層、沿岸陸域の地質構造の把握	海図、海洋状況表示システム（海しる）、海の基本図、海洋地質図、ボーリングデータベース（Kunijiban）の確認	海底地質、地層層序、基盤深度、断層、地盤定数
	地震の情報	調査エリアにおける地震関係情報の把握	海溝型地震・活断層型地震の評価結果、全国地震動予測地図、沿岸域海底活断層調査の確認	地震履歴、地震動予測
現 地 調 査	海域の利用状況	調査エリアの利活用状況の確認	現地踏査、関係者からの聞き取り（深淺測量・サイドスキャンナー記録に基づき）	航路、魚礁、養殖施設、海底資源、海底パイプライン、海底通信ケーブル等
	海底地形、水域の状況	調査エリアの海底地形、水深の把握	深淺測量による	海底地形、水深、海底勾配、岩礁、魚礁・パイプライン等の設置物
	海底面の状況	海底面の状況、表層地質の把握	サイドスキャンナーによる 底質採取による	海底面の状況、底質分布、岩礁、魚礁・パイプライン等の設置物 海底面表層地質の性状
	海底地盤の状況	海底面下の地盤状況の把握	音波探査による	海底面下の音響的地層層序、地質構造
			海底微動アレイ探査による	工学的基盤面、Vsの深度分布
			ボーリング調査による 標準貫入試験 PS検層 孔内載荷試験、現場透水試験 サンプリング、コアリング	海底面下の地層構成、工学的基盤面、地盤の物性値 N値の深度分布 Vs、Vpの深度分布 地盤の変形係数、地盤の透水係数 地盤の各種物性値
海底面下の地盤強度の把握	CPT調査による コーン貫入試験 PS検層 サンプリング、コアリング	海底面下の地層構成、工学的基盤面、地盤の物性値 コーン押込時の先端抵抗力、周面摩擦力、間隙水圧の深度分布 Vs、Vpの深度分布 地盤の各種物性値		

これらの調査項目が、設計の流れの中でどのタイミングで必要となっていくのかが以下のフローに纏められている。

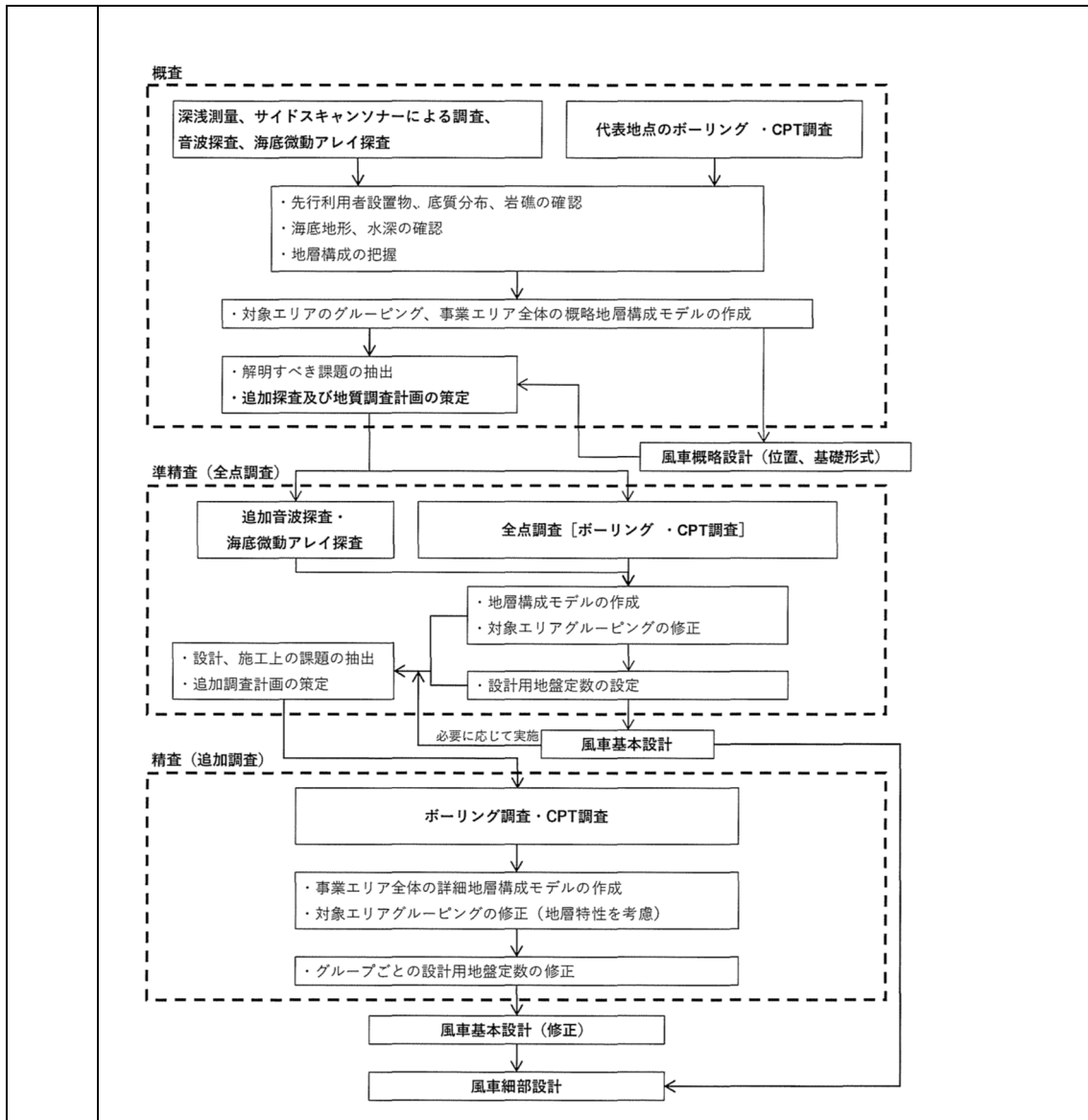


図-2.2-1 調査フロー

また、構造形式毎に設計で必要となる地盤定数と、その地盤定数を入手するための試験方法の具体例が以下のように示されている。

表-1.6-1 設計用地盤定数及び試験方法の例

設計用地盤定数の種別	モノパイル式・ジャケット式・重力式		浮体式 ^{※1}		代表的な試験方法
	運転・暴風波浪時	地震時	運転・暴風波浪時	地震時	
土層区分 (層序・層厚)	○	○	○	○	ボーリングによる試料採取(浮体式の場合は、底質や海底面下表層部の試料採取で代替)音波探査
単位体積重量 γ [kN/m ³]	○	○			密度/含水比/粒度/液性・塑性限界/湿潤密度試験 (JIS A 1202/1203/1204/1205/1225)
非排水せん断強さ c_u [kN/m ²]	○	○			土の一軸圧縮試験 (JIS A 1216)
せん断抵抗角 ϕ [°]	○	○			土の圧密排水 (CD) 三軸圧縮試験 (JGS 0524)
変形係数 E [kN/m ²]	○				地盤の指標値を求めるためのプレッシャーメータ試験 (JGS 1531)
細粒分含有率 F_c [%] 粒度 塑性指数		○	○ (粒度)	○ (粒度)	密度/含水比/粒度/液性・塑性限界/湿潤密度試験 (JIS A 1202/1203/1204/1205/1225)
N 値	○	○			土の標準貫入試験 (JIS A 1219)
N_c 値	○	○			電気式コーン貫入試験 (JGS 1435)
せん断波速度 V_s [m/s]		○			地盤の弾性波速度検層 (JGS 1122)
液状化強度比		○			土の繰返し非排水三軸試験 (JGS 0541)
ひずみ依存特性 (G_0 , $\gamma-G/G_0$, $\gamma-h$)		○			土の変形特性を求めるための繰返し三軸試験 (JGS 0542)
圧密特性 ^{※2}	※3	※3			土の段階的荷重による圧密試験 (JIS A 1217)

※1 浮体式の場合でも、海底係留点がコンクリートシンカーブロックの場合は、重力式に記載の設計用地盤定数及び試験方法を検討する必要がある。

※2 圧密特性には、圧密曲線、圧縮指数、圧密降伏応力、圧密係数、体積圧縮係数、透水係数、過圧密比が含まれる。

※3 粘性土地盤に荷重が作用することが想定される場合は、圧密沈下の検討を行う必要がある。

調査位置及び調査間隔については、統一的解説に記載のとおり、原則として、洋上風力発電設備の全設置位置において、ボーリングによる試料採取及び原位置試験を行う必要がある。ただし、全設置位置でボーリングを実施する必要がないと判断できる場合は、一部の設置位置については、コーン貫入試験（以下「CPT」という。）等により、表-1.6-1に示す地盤調査を省略することが可能である。なお、CPTを使用する場合は、複数の地点において、標準貫入試験と試験結果の比較を行うことが望ましい。

洋上風力発電設備の設置間隔は数百メートルから数キロメートルとなり、基本的には洋上風力発電設備設置地点のみの調査となる。この場合、データ数が少なくなることも想定され、その少ない地盤調査結果から適切な統計処理を行って設計用地盤定数を設定することになる。概略調査結果より、通常の調査間隔や頻度でサンプリングや試験を行った場合、データ数が少なくなると考えられる場合には、データ数が多くなるよう詳細調査計画を策定することが望ましい。

また、表-1.6-1は地盤が土の場合を前提としている。地盤が岩石の場合は、そのまま適用することはできないため、代わりに下記に例示する室内岩石試験方法等を参考にすることができる。

＝代表的な室内岩石試験方法（例）＝

- ・粗骨材の密度及び吸水率試験方法（JISA1110）：密度, 吸水率
- ・岩石の密度試験方法(JGS2132-2009)：自然密度, 湿潤密度
- ・パルス透過法による岩石の超音波速度測定方法（JGS2110-2009）：弾性波速度
- ・岩石の一軸圧縮試験方法（JGS2521-2009）：圧縮強度

なお、洋上風車設計のために実施した海底地盤調査結果は、現地試験となるSPTとCPT, および室内試験結果の相関を図る必要があるため、同書巻末の「参考資料2：設計用地盤定数の設定上の留意事項」にキャリブレーション方法の参考例が示されている。

【地盤（調査）】

No.	タイトル	著者	発行年月
20	[前述No.15] 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	[前述No.15]	[前述No.15]

出典 [前述No.15]

要点 海底地盤調査の実施項目ととりまとめについて以下の一覧が示されている。

海底地盤調査	
沿岸の各種情報	
調査目的	・実海域での実測調査に先立ち、調査海域における海底地盤に関する既存調査資料や文献等の調査を行い、洋上風力発電設備の基本設計に必要な実測調査の調査項目や調査手法等を整理する。
調査期間	—
調査地点数等	・調査海域及び沿岸の陸上部を含む。
調査手法・仕様	・文献資料、公開データベース、公開図幅などの既存資料を調査し、最大限の活用可能性を検討する。 ・必要に応じて、地元関係者（漁協など）に海域の状況をヒアリングする。 ・「海底地形」～「地盤物性値」の調査項目について、過去の調査結果が利用できる場合、「沿岸の各種情報」において既存情報を整理し、内容に応じて現地調査の数量を減らすなど効率化を検討する。
調査成果	・沿岸陸域及び対象海域の地形図、地質図、底質図、音波探査データ、ボーリングデータ、原位置試験、室内土質試験、地震関係資料（断層、津波、液状化など）、海象データ等の既存資料をとりまとめる。
海底地形	
調査目的	・洋上風力発電設備や海底送電線などウィンドファームの基本設計ができるよう、対象海域全体の海底面の標高、海底地形、海底面の状況を把握することを目的とする。
調査期間	—
調査地点数等	・調査海域の全体で実施し、測線ピッチは200m以下とする。 ・調査エリアは船舶航行の観点から水深10m以深の範囲とする。
調査手法・仕様	・砂・泥が広く平坦に分布する範囲では、シングルビーム測深とサイドスキャンソナーの併用を基本とする。 ・岩礁など複雑な地形が分布するエリアなどでは、マルチビーム測深による面的把握が必要と考えられる一方、費用が高額となることを踏まえ実施の有無を検討する。実施の場合には、測深範囲および測線間隔（スワス角）の設定などを検討し、効率的な方法で実施する。 ・測深方法は「海洋調査技術マニュアル-深浅測量-」（一社）海洋調査協会」に準拠する。
調査成果	・海底地形図（等深線図）、航跡図等を作成する。
海底面状況	
調査目的	洋上風力発電設備や海底送電線などウィンドファームの基本設計ができるよう、海底の底質（砂・泥・岩盤）分布を把握するとともに、海底障害物（魚礁・沈船等）の状況を把握することを目的とする。
調査期間	—
調査地点数等	・サイドスキャンソナーは調査海域全体を網羅するよう面的に実施する。 ・底質土のサンプリングは、底質分布から代表箇所を選定して実施する。 ・調査エリアは船舶航行の観点から水深10m以深の範囲とする。
調査手法・仕様	・サイドスキャンソナーによる音圧データの取得に加えて、底質土のサンプリングを行い結果を補足する。 ・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」に準拠する。
調査成果	・海底面音響画像図、底質分布図、海底障害物分布図（魚礁・沈船等）、航跡図等を作成する。 ・底質土の粒度や含水比などの土質試験結果を整理する。
音波探査	
調査目的	・洋上風力発電設備や海底送電線などウィンドファームの基本設計ができるよう、調査海域において音波を海中に発信して海底下の地層境界で反射した反射波を連続的に記録し、その記録の解析を行って地質構造や地盤状況を把握する。
調査期間	—
調査地点数等	・調査海域全体の地質状況を把握できるよう、格子状の測線（格子は2～3km程度のメッシュ間隔）で実施する。なお、調査海域が広い場合は調査海域の面積を踏まえ測線間隔を決定する。 ・調査エリアは船舶航行の観点から水深10m以深の範囲とする。
調査手法・仕様	・音源は、分布地質及び工学的基盤の深さを踏まえ、ブーマー、スーパーカー、ウォーターガン、エアガン等から選定する。 ・反射波の受信方法は、シングルチャンネル音波探査（1つの受振器）及びマルチチャンネル音波探査（複数の受振器）から選定する。 ・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」に準拠する。
調査成果	・海底地質断面図、解釈断面図、代表層の上面等深線図、航跡図等を作成する。

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 <p>・海底微動アレイ探査：調査地点数は3地点以上とし、調査海域の広さに応じて設定する。なお、ボーリング調査のPS検層においてGL-100mを超えてもS波速度(V_s)が400m/s以上を満足しないなど、結果的にボーリング調査により工学的基盤が把握できなかった場合は、直近で海底微動アレイ探査を実施して工学的基盤の深度を推定する。</p>
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を目標とする。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波速度（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。
調査結果のとりまとめ	
調査目的	・洋上風力発電設備や海底送電線などウィンドファームの基本設計ができるよう、対象海域全体の海底地形および地層分布、工学的基盤面の深度等、風車基礎等の基本設計に必要な地盤情報をとりまとめる。
調査期間	—
調査地点数等	・調査海域の全体を対象とする。
調査手法・仕様	<ul style="list-style-type: none"> ・文献資料調査、実海域での実測調査結果に基づき、洋上風力発電設備の設置に係る基本設計に必要な海底地盤調査結果についてとりまとめを行う。また、各種調査結果をもとに海底地盤の3次元モデルを作成する。 ・沿岸の陸上データ：陸上地形図、陸上地質図、陸上ボーリング柱状図、地震関係資料（断層、液化化など）、等 ・海底面の状況：海底地形図、海底地質図、底質分布図、海底障害物分布図
調査成果	<ul style="list-style-type: none"> ・海底地質の状況：海底地質断面図、支持層が浅（中間層）の等層厚線図、支持層の上面等深線図、工学的基盤の上面等深線図、ボーリング柱状図、CPT結果、海底微動アレイ探査結果等 ・地層毎の地盤物性値（物理定数、強度定数）、代表地点の地盤モデル ・耐震検討資料（工学的基盤、地盤のS波速度、地盤の変形特性、地盤の液化化等） ・海底地盤の3次元モデル

【液状化】

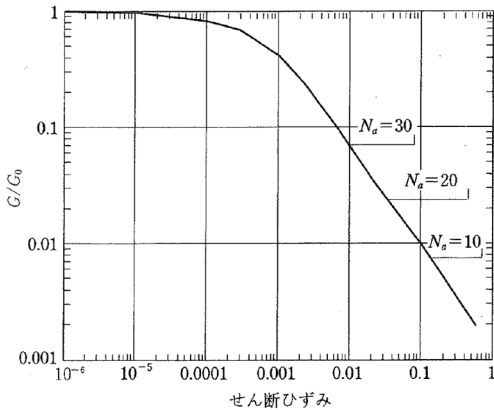
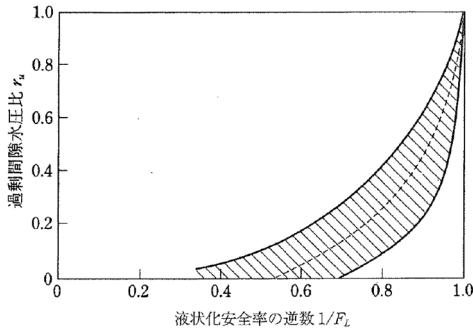
No.	タイトル	著者	発行年月																																
21	埋立地の液状化対策ハンドブック	沿岸開発技術研究センター	1997年																																
出典	沿岸開発技術研究センター																																		
要点	<p>液状化予測法の分類が下表の通り示されている。</p> <p style="text-align: center;">表-4.1.1 各種液状化予測法の分類</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>番号</th> <th>地盤の液状化強度の推定方法</th> <th>地震動レベルなどの推定方法</th> <th>予測法の例</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>①</td> <td>—————</td> <td>マグニチュード・震央距離</td> <td>栗林・龍岡ら¹⁾、若松²⁾</td> </tr> <tr> <td>②</td> <td>微地形</td> <td>—————</td> <td>古藤田・若松ら³⁾</td> </tr> <tr> <td>③</td> <td rowspan="4">粒度・N値</td> <td>—————</td> <td>危険物の規制に関する規則⁴⁾</td> </tr> <tr> <td>④</td> <td>地表の最大加速度</td> <td>道路橋示方書・同解説⁵⁾</td> </tr> <tr> <td>⑤</td> <td>地表の最大加速度・マグニチュード</td> <td>建築基礎構造設計指針⁶⁾</td> </tr> <tr> <td>⑥</td> <td>全応力モデル</td> <td>港湾の施設の技術上の基準・同解説⁷⁾</td> </tr> <tr> <td>⑦</td> <td rowspan="2">繰返し三軸試験等</td> <td>全応力モデル</td> <td>Seed and Idriss⁸⁾, 石原⁹⁾</td> </tr> <tr> <td>⑧</td> <td>有効応力モデル</td> <td>Finn et al.¹⁰⁾, 井合ら¹¹⁾</td> </tr> </tbody> </table> <p>上記液状化予測法のうち、「粒度とN値による予測・判定」と、「繰返し三軸試験結果による予測・判定」の具体的な手法が示されている。</p> <p>「粒度とN値による予測・判定」については、港湾の施設の技術上の基準・同解説と概ね同内容。</p> <p>「繰返し三軸試験結果による予測・判定」については、石原らが不規則波を用いて行った実験に基づく方法¹⁾を示している。</p> <p>なお、その他の手法として、Seedらの方法²⁾、岩崎らの方法³⁾、累積損傷度理論を用いた方法⁴⁾についての解説と、これらの主な相違点（補正係数の考え方の違い）について示している。</p> <p>参考文献</p> <p>1) 石原研而：土質動力学の基礎，鹿島出版会，1976.</p>			番号	地盤の液状化強度の推定方法	地震動レベルなどの推定方法	予測法の例	①	—————	マグニチュード・震央距離	栗林・龍岡ら ¹⁾ 、若松 ²⁾	②	微地形	—————	古藤田・若松ら ³⁾	③	粒度・N値	—————	危険物の規制に関する規則 ⁴⁾	④	地表の最大加速度	道路橋示方書・同解説 ⁵⁾	⑤	地表の最大加速度・マグニチュード	建築基礎構造設計指針 ⁶⁾	⑥	全応力モデル	港湾の施設の技術上の基準・同解説 ⁷⁾	⑦	繰返し三軸試験等	全応力モデル	Seed and Idriss ⁸⁾ , 石原 ⁹⁾	⑧	有効応力モデル	Finn et al. ¹⁰⁾ , 井合ら ¹¹⁾
番号	地盤の液状化強度の推定方法	地震動レベルなどの推定方法	予測法の例																																
①	—————	マグニチュード・震央距離	栗林・龍岡ら ¹⁾ 、若松 ²⁾																																
②	微地形	—————	古藤田・若松ら ³⁾																																
③	粒度・N値	—————	危険物の規制に関する規則 ⁴⁾																																
④		地表の最大加速度	道路橋示方書・同解説 ⁵⁾																																
⑤		地表の最大加速度・マグニチュード	建築基礎構造設計指針 ⁶⁾																																
⑥		全応力モデル	港湾の施設の技術上の基準・同解説 ⁷⁾																																
⑦	繰返し三軸試験等	全応力モデル	Seed and Idriss ⁸⁾ , 石原 ⁹⁾																																
⑧		有効応力モデル	Finn et al. ¹⁰⁾ , 井合ら ¹¹⁾																																

- | |
|---|
| <p>2) Seed, H. B. : Soil Liquefaction and Cyclic Mobility Evaluation for Level Ground during Earthquakes, J.GED, ASCE, 1979, Vol.105, No.GT2, pp.201~205</p> <p>3) 岩崎敏男, 龍岡文夫, 常田賢一, 安田進 : 砂質地盤の地震時流動化の簡易判定法と適用例, 第5回日本地震工学シンポジウム講演集, 1978, pp.641~648.</p> <p>4) Annaki M. and Lee, K. L : Equivalent Uniform Cycle Concept for Soil Dynamics, J. GED., ASCE, 1977, Vol.103, No.GT6, pp.549~564.</p> |
|---|

【液状化】

No.	タイトル	著者	発行年月
22	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	日本港湾協会		
要点	<p>液状化の予測・判断手法として、下図「液状化の基本的予測・判定手順」に示す、「粒度とN値による予測・判定」及び「繰返し三軸試験による予測・判定」の手法が示されている。</p> <p>一般に「粒度とN値による予測・判定」を使用して良いが、同手法では予測・判定が困難となった場合や、より詳細な検討を必要とする場合に「繰返し三軸試験による予測・判定」を用いることができるとしている。</p> <div style="text-align: center;"> <pre> graph TD subgraph "粒度とN値による予測・判定" A[粒度とN値により各土層について液状化の予測・判定を行う。] --> B[粒度とN値による各土層についての検討結果をもとにして、地盤全体としての液状化の判定を行う。] B --> C[地盤全体として液状化すると判定する。] B --> D[粒度とN値による検討のみでは判定できない。] B --> E[地盤全体として液状化しないと判定する。] end subgraph "繰返し三軸試験による予測・判定" F[繰返し三軸試験により検討すべきと判定された土層について繰返し三軸試験により予測・判定を行う。] --> G[粒度とN値による土層ごとの判定結果と繰返し三軸試験による土層ごとの判定結果をもとにして、地盤全体としての液状化の判定を行う。] G --> H[地盤全体として液状化すると判定する。] G --> I[地盤全体として液状化しないと判定する。] end D --> F </pre> </div> <p>図-2.1.1 液状化の基本的予測・判定手順</p>		

【液状化】

No.	タイトル	著者	発行年月
23	建築基礎構造設計指針	日本建築学会	2019年
出典	日本建築学会		
要点	<p>液状化の予測・判断手法として、「粒度とN値による予測・判定」を示している。</p> <p>液状化の影響を考慮して地盤剛性を低下させる手法についても以下の通り示されている。</p> <p>■地盤剛性低下</p> <p>a) 地盤剛性の低下</p> <p>液状化した水平地盤における直接基礎の概略の沈下量予測や等価線形応答解析による地盤変形予測に必要な地盤剛性の評価は、以下の方法によることができる。なお、直接基礎の詳細な沈下量予測は、下記e)による。</p> <p>① 図 3.2.10 の剛性低下率 G/G_0 とせん断ひずみの関係から各層のせん断ひずみに適合した等価剛性を推定する。</p> <p>② 液状化に対する安全率 F_L が 1 以上で、有効応力低下の影響を評価したい場合は、図 3.2.11^{32.19)} または次式により過剰間隙水圧比 r_u を求め、剛性が有効応力の平方根に比例すると考えて等価剛性を推定する。なお、図 3.2.10 は、その影響を考慮している。</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>図 3.2.10 補正 N_s 値と剛性低下率の関係</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>図 3.2.11 安全率と水圧上昇の関係^{32.19)}</p> </div> </div> $r_u = F_L^{-7} \tag{3.2.20}$ <p>たとえば、$F_L=1.2$ の場合、等価剛性は式 3.2.20 より $\sqrt{1-1.2^{-7}}=0.85$ 倍となる。</p>		

■水平地盤反力係数の低減

b) 水平地盤反力係数の低減

液状化地盤における杭の水平抵抗の検討では, 水平地盤反力係数 k_{HL} (kN/m^3) および塑性水平地盤反力 p_{yL} (kN/m^2) を次式により求める [図 3.2.12 参照].

$$k_{HL} = \frac{k_{H0L}}{\sqrt{\frac{y_r}{0.01}}} = \frac{\beta_L k_{H0}}{\sqrt{\frac{y_r}{0.01}}} \quad (3.2.21)$$

$$p_{yL} = \alpha_L p_y \quad (3.2.22)$$

ここに, α_L : 補正係数, β_L : 補正係数 [図 3.2.13], k_{H0L} (kN/m^3): 液状化した地盤における基準水平地盤反力係数, k_{H0} (kN/m^3): 基準水平地盤反力係数 [式 6.6.12], y_r (m): 液状化を考慮した杭と地盤の相対変位, p_y (kN/m^2): 砂質土の塑性水平地盤反力度 [式 6.6.18]

塑性水平地盤反力度の補正係数 α_L については, 杭基礎の測定変形モードの逆算から 0.05~0.2 程度の値が推定されている^{32.21)}. したがって, 本指針では暫定的に $\alpha_L = \beta_L$ とする. これは, 液状化地盤の最大地盤反力が全上載圧の 0.2~1 倍程度になっていることに対応する. なお, 図 3.2.13 の関係はサイクリックモビリティの影響を考慮している.

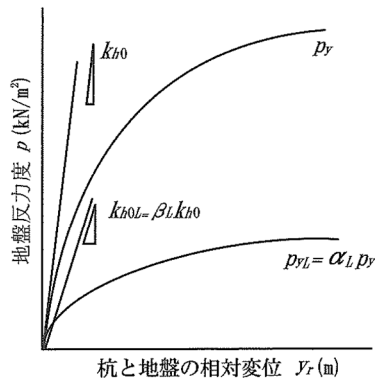


図 3.2.12 杭の水平地盤反力—変位関係のモデル化

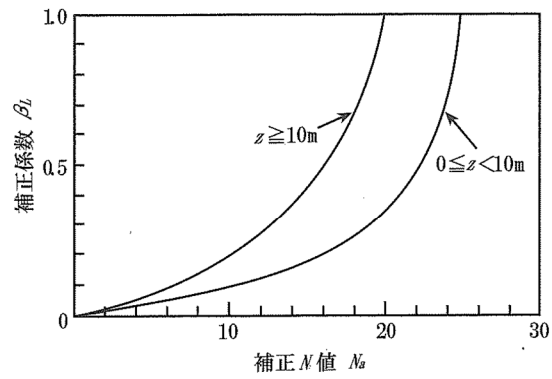


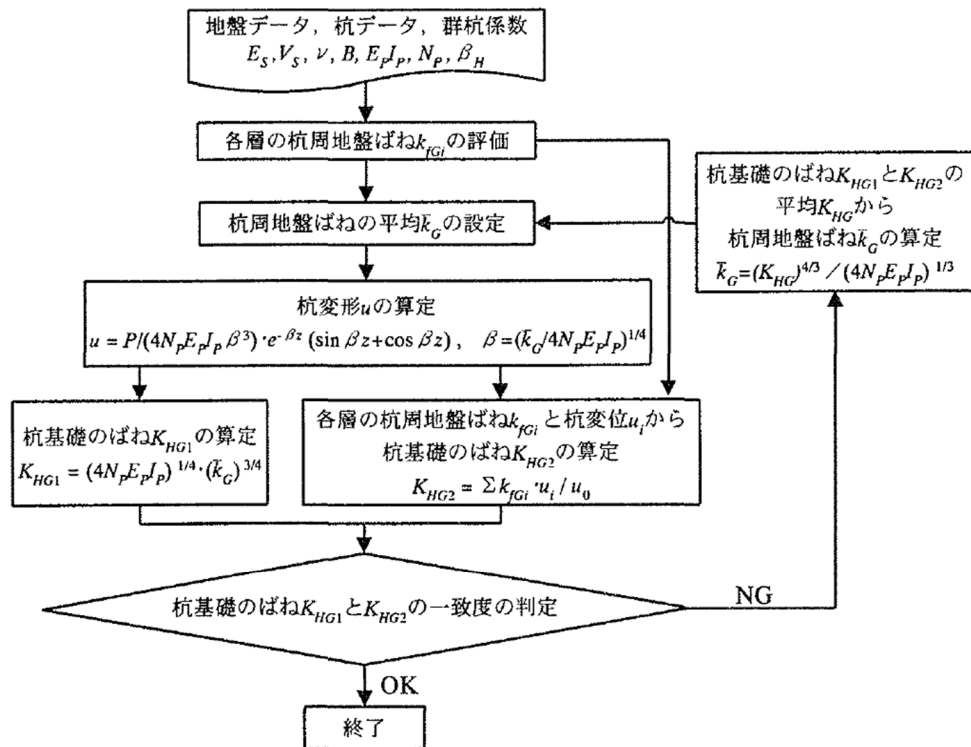
図 3.2.13 地盤反力係数の低減率^{32.20)}を修正

【耐震設計】

No.	タイトル	著者	発行年月
24	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 地震時の地盤ばね設定手法として, Francisの式及びGazetasらによる方法を示している。水平地盤ばねのばね定数 K_{HG} は, 下図フローに従い, K_{HG1} と K_{HG2} が等しくなるように, \bar{k}_G が収斂するまで繰り返し計算することにより求めるとされている。



図解 5.16 弾性支承梁の理論解を利用した地盤ばねの評価フロー³⁾

また, その他の水平方向の杭周地盤ばねの評価方法として, 成層地盤内における杭配置や群杭効果を厳密に考慮できる薄層法, 及びN値により算定した基準水平地盤反力係数を用いて地盤ばねのばね定数を算定する「建築基礎構造設計指針」による方法を用いても良いとされている。

参考文献

3) 日本建築学会, 建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計, 2006

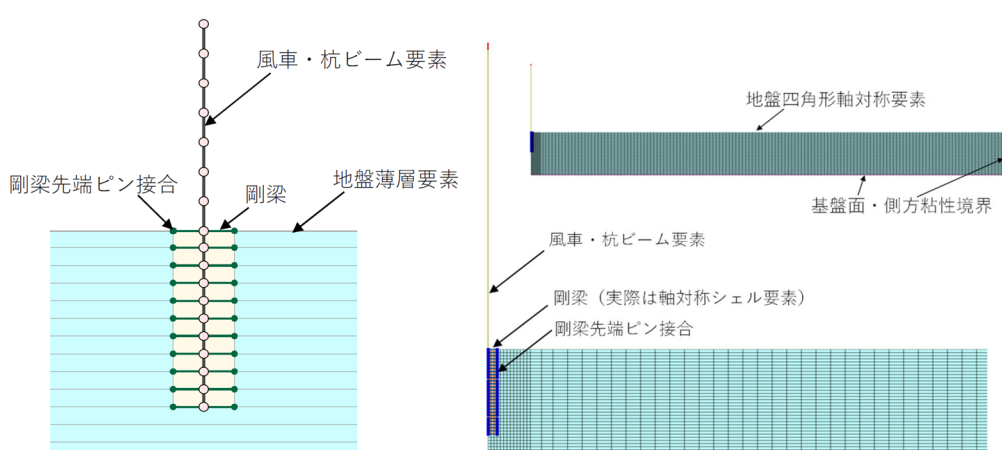
【耐震設計】

No.	タイトル	著者	発行年月
25	液状化地盤におけるモノパイル式洋上風力発電設備を対象とした風と地震の連成解析の基礎検討	大矢 陽介	2022年
出典	土木学会, 土木学会論文集B3 (海洋開発), 2022, 78巻, 2号, pp.I_895-I_900 https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejoe/78/2/78_I_895/pdf/-char/ja (参照2025/12/5)		
要点	<p>統一的解説による地震時の荷重評価としては、地震波を対象とした時刻歴応答解析結果と、地震時に組み合わせる波・風の荷重効果を時刻歴により別に求めて、これらの最大値を足し合わせる分離解法が示されている。</p> <p>しかし分離解法は、風を受ける洋上風力発電設備の地震時挙動を精緻に評価できず、経済面で不利な設計となっている可能性がある。</p> <p>このことから、風・波と地震の連成解析が可能な解析コードを開発し、モノパイル地震時挙動を検討した結果について示した文献である。</p> <p>検討の結果、連成解析を用いることで、分離解法と比較して地震時の応答変位と断面力は小さくなる事が確認された。</p> <p>また液状化の影響としては、以下3ケースにおいて影響を比較している。</p> <p>Case1 液状化を考慮しない地盤条件のケース</p> <p>Case2 液状化を考慮して、液状化地盤のばね定数を低減させたケース</p> <p>Case3 液状化を考慮して、かつ地盤の地震応答解析で得られた過剰間隙水圧の時刻歴より、相互作用ばねのばね定数を時々刻々と変化させたケース</p> <p>結果としては、液状化地盤の簡易的なモデル化法であるCase2は、Case1と比較して断面力を大きく評価することができたが、風車の振動特性が大きく変わり、応答値を過大に評価している可能性が示唆された。</p> <p>一方で、より緻密なモデル化をしたCase3では、Case2より断面力が小さく評価され、より合理的な設計に繋がる可能性を示唆する結果が得られている。</p>		

【耐震設計】

No.	タイトル	著者	発行年月
26	洋上風力発電モノパイル基礎の地震時の地盤減衰評価 (その1 : 逸散減衰効果の検討)	山本 康之, 新田 康男, 池田 竜介, 河本 悠歩, 石原 孟	2023年
出典	土木学会, 令和5年度土木学会全国大会, 第78回年次学術講演会 https://windeng.t.u-tokyo.ac.jp/ishihara/presentation/2023-6-2.pdf (参照2025/12/25)		
要点	<p>風車の大型化に伴って地震解析における減衰の設定の重要性が高まっている。従来の土木学会指針に示されている地盤の逸散減衰の設定法（ウインクラーばね＋ダッシュポット）では減衰が小さく評価され、安全側の設定となるようになっていた。</p> <p>吉岡らの提案する逸散減衰をレーリー減衰として設定する方法をモノパイル基礎の風車に適用して従来法と比較検証した結果を示している。従来の減衰設定法の2次モードに対応するようにレーリー減衰の2次モードを増加させることで、合理的な地震応答を再現することができるとされている。</p>		
	<p style="text-align: center;">図 検証に用いた解析モデル</p>		

【耐震設計】

No.	タイトル	著者	発行年月
27	洋上風力発電モノパイル基礎の地震時の地盤減衰評価（その2：薄層法及びFEMの適用）	田中 栄次, 新田 康男, 池田 竜介, 河本 悠歩, 石原 孟	2023年
出典	土木学会, 令和5年度土木学会全国大会, 第78回年次学術講演会 https://windeng.t.u-tokyo.ac.jp/ishihara/presentation/2023-5-2.pdf (参照2025/12/25)		
要点	<p>前述No.26に続き, 薄層法や3次元FEMとの比較も実施した結果を示している。その1 (前述No.26) で提案した方法は薄層法により逸散減衰を設定したモデルの応答とほぼ結果が一致しており, 手法の妥当性を確認している。また, 3次元FEMによる解析結果とも比較しているが, 3次元FEMによる応答の方が小さくなる傾向が見られた。これは1次元モデルでは3次元効果が考慮されていないためと主張しており, 今後の課題としている。</p> <div style="text-align: center;">  </div> <p>図 検証に用いた解析モデル (左：薄層法一体モデル, 右：軸対称FEM一体モデル)</p>		

3.1.4 まとめ

日本特有の設計手法（地震・台風など）につき、「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）」をベースとして調査項目を抽出し、関連する基本的な文献等を調査・収集した。

なお、グループC, Dの報告書にも、設計基準全般やサイト条件評価に関する文献調査結果が整理されているため、そちらも併せて参照されたい。

3.2 着床式:SEP 船の規格・基準の整備、施工方法

3.2.1 各社 SEP 船仕様

国内外における SEP 船の現況を、表 3.2.1-1 に示す。

- ・国内では 10MW/基未満の中型風車が設置できる SEP 船の建造から始まり、大型風車に対応可能な 2,500t 超の吊り能力を持つ SEP 船の建造が行われたが、新たに同クラスの新造船の計画はない。
- ・大型風車を採用する動向に応じて海外では 2,500t 超の吊能力を持つ新造船が 2023 年～2026 年にかけて就航する予定。

3.2.2 風車大型化に伴う施工時の課題

① 風車の大型化に適した SEP 船調達

- ・2025 年～2028 年頃に建設が予定されている洋上プロジェクトでは 12MW から 15MW クラスの風車が予定される他、中国で試作が進む 20MW 機の採用も視野に入る。12-15MW 機のモノパイルの杭径は 8～12m、杭重量は約 2,000t、風車ローター高は海面から 160～190m にもなる。これに対応する SEP 船は風車施工で 1,600t 級、基礎施工には 2,500t 級と想定される。
- ・このような中 800～900t 級の SEP 船保有者は、大型風車施工に対応できるよう近年、レグ延長やクレーンのグレードアップによるフック高と吊り能力の改善を行ってきたが能力アップには限界があり、大型風車の施工案件では、TP 設置作業や補助的・部分的施工に従事することが求められる。
- ・2,500 t 吊以上の大型 SEP 船は国内では 1 社に限られており、計画段階で調達を確約できないケースが多い。また、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。

② 外国船調達に伴う留意点

- ・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。最寄りの寄港地としては韓国の釜山港が有力となる。回航の所要日数は東北地方日本海側からは往復 10 日/回程度の日数が必要である。
- ・カボタージュ規制に関しては、例外的に外国籍船の国内輸送も可能とする国土交通大臣の特別許可（船舶法第 3 条但し書に規定）がある。

内閣府主導の再エネ等規制等総点検タスクフォースにおける現状の取組の成果(令和 3 年 6 月 3 日)の報告では、上記の特別許可の審査基準を国土交通省 HP 等にて明確化するとして「措置済」の扱いであるが、その後明確な発表はなく不明確なままである。従って、現段階で特例措置が認められるという前提で傭船契約を進めるのはリスクを伴うことになる。

- ・外国船籍を日本船籍に変更するには、設備機器の日本仕様への変更を伴う上、船舶法に基づき船舶検査、測度（トン数の算定）、登録手続きが必要となり、計画から完了までの標準的な処理期間は SEP 船等の特殊船で 1 年以上かかる、とされている（令和 4 年 3 月、国土交通省海事局検査測度課）。場外国船所有者は日本市場に船舶を投入するために備船を中断するリスクを伴うことから、日本市場参入の障壁の一因となっている。
- ・外国船を日本籍船に船籍変更して日本領海内で作業を行う場合、日本法人が外国の船社へ貸渡し、外国籍船員の配乗権を得て使用する方式（マルシップ方式）が適用される。この条件として外国人船員とは別に、操船作業ができる日本人船員チーム（8 名程度）が乗船する必要がある、追加費用負担が発生することになる。

③ 軟弱な海底地盤での施工（支持力の比較的高い砂質層下に軟弱粘土層を挟んでいる互層も対象）

- ・洋上ウィンドファーム建設のための MWS ガイドライン（2023 年 3 月、日本海事協会編）では Site Specific Assessment の要求事項の一つに地盤調査結果に基づくレグ貫入量の検討（Leg Penetration Analysis, LPA）がある。海底地盤の支持力が不足し、レグの地盤貫入量が過大になることで下記のリスクが生じる可能性をチェックするが、大型船での施工に伴い増大する傾向にある。
- ・ジャッキアップ後、船体が上昇状態での作業中、海底地盤の支持力不足のためレグが突き抜けてしまうパンチスルーが発生し危険な状況になる。
- ・海底地盤の支持力不足のためレグが過大に沈下し、レグの貫入及び引き抜きに想定以上の時間がかかる。

④ 基地港での護岸整備の問題

- ・洋上ウィンドファーム建設のための基地港に求められるのは重量物である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、岸壁護岸際に設置する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。しかし現在そのような岸壁の整備はウィンドファーム案件に比して遅延しており、下記のようなリスクが存在している。
- ・日本の岸壁の多くが設計地耐力の低い（ $\sim 2 \text{ t/m}^2$ ）ケーソン岸壁のため、水切りや浜出し作業時にケーソン後背地から部材を揚重できるだけのブーム長が必要。
- ・岸壁前面で SEP 船のジャッキアップを行うため、支圧荷重が岸壁に及ぼす影響（沈下等の変位やひび割れ等）を事前に解析し、影響を及ぼすリスクがある場合には、ジャッキアップ位置を受動崩壊面の外側まで離すなどの措置も必要なケースがあり SEP 船の揚重能力を十分活かしきれない（石狩湾新港）。
- ・杭や風車部材の大型化に伴い、岸壁および野積地の地耐力の確保のため地盤改良を行う

場合、港湾管理局から原状復旧して返却することが要求されることが多く撤去についてのコストアップに留意する必要がある。

⑤ 太平洋側でのリスク上昇の問題

- 工事实績のある日本海側の春～秋施工と比較して太平洋側での気象海象条件は台風の通過も含め、一年を通じて悪い。
- 波浪の影響を直接受ける着床式モノパイル基礎の施工精度の確保のためにバイブロハンマー併用を選択した場合、機器一式分の重量や容積を SEP 船の積載可能重量から減じるため、基礎部材の積込可能基数が減り、稼働率が低下するケースもある。
- カボタージュ規制が適用される場合、最も近い寄港地として選択される韓国への回航でも海象条件が悪い上に長距離となり日本海側に比べ更に日数増が見込まれる。

SEP船現況

表 3.2.1-1 国内外における SEP 船の現況

日本船籍 SEP船 (※日本船籍化の予定を含む)

No.	1	2	3	4	5	6
SEP船	1300 t級		1600 t級			2500 t級
所有会社	大林/東亜	戸田/熊谷/西松/若築/岩田地崎/吉田組	Van Oord	五洋/鹿島/寄神	五洋/DEME (JOMO)	清水建設
船名	柏鶴	JWFC Sunrise	Aeolus	CP-16001	Sea Challenger	Blue Wind
吊上げ能力 (t)	1,250	1,300	1,600	1,600	900 (1,600改造予定)	2,500
積載重量 (t)	4,800		11,990		6,000	10,000
デッキ長さ (m)	88.0	112.0	139.4	123.0	132.4	142.8
デッキ幅 (m)	40.0	50.0	44.5	45.0	39.0	50.0
喫水 (最大) (m)	4.6		8.6	5.6	5.8	6.2
最大作業水深 (m)	29.0	60.0 (レグ長130m)	45.0	50.0	55.0	45 - 65
自航/非自航	非自航	非自航船	自航	非自航	自航	自航
建造引渡し年	2023	2014	2014	2023/09	2014	2023/1

海外船籍 SEP船

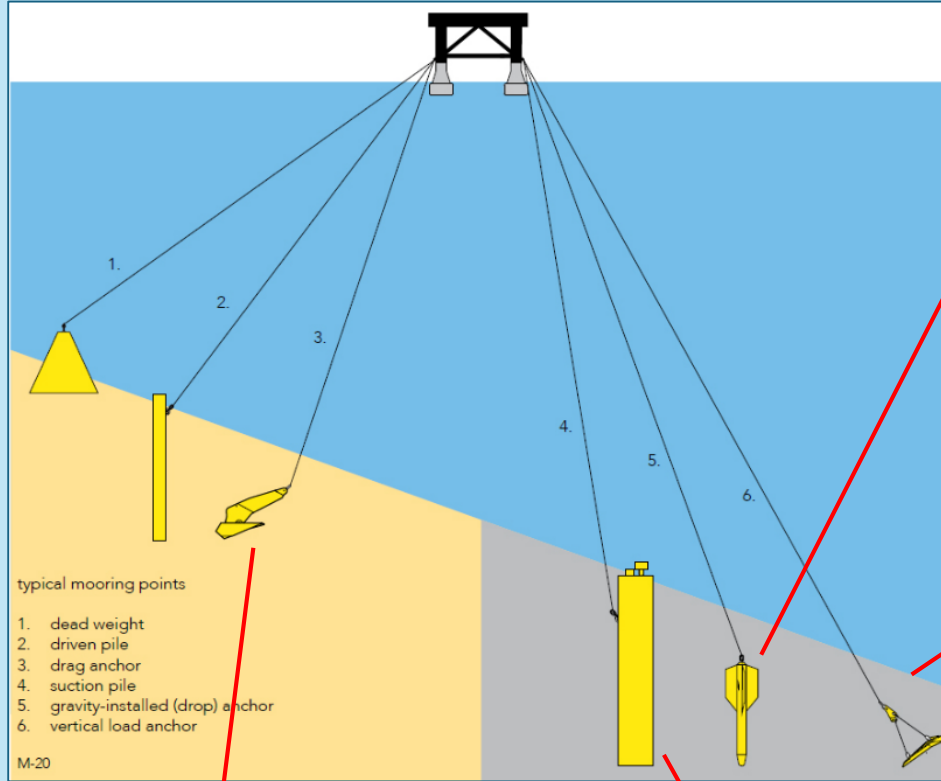
No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SEP船	1200 t級	1600 t級								2500 t級
所有会社	Hyundai Engineering	Jan De Nul	Cadeler	DEME	DEME USA	Cadeler	Cadeler	Fred Olsen	Fred Olsen	Seaway7
船名	Hyundai Frontier	Vole Au Vent	Wind Scylla	Innovation	Sea Installer	Wind Orca	Wind Osprey	Bold Tern	Brave Tern	Ventus
吊上げ能力 (t)	1,200	1,500	1,500	1,500	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	2,500
積載重量 (t)		8,000	8,000	8,000	8,000			9,000	9,000	10,931
デッキ長さ (m)	85.0	140.4	139.0	147.5	132.4	155.6	155.6	132.0	132.0	142.0
デッキ幅 (m)	41.0	41.0	50.0	42.0	46.0	49.0	49.0	45.0	45.0	50.0
喫水 (最大) (m)		6.3	6.0	7.3	5.8	6.0	6.0	5.8	5.8	9.4
最大作業水深 (m)		50.0	65.0	65.0	55.0			60.0	60.0	65.0
自航/非自航	非自航船	自航	自航	自航	自航	自航	自航	自航	自航	自航
建造引渡し年	2023	2013	2015	2015	2012	2012	2012	2013	2013	2023/12

No.	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
SEP船	2500 t級					3000 t級				
所有会社	Cadeler	Cadeler	Cadeler	Cadeler	Cadeler	Van Oord	Jan De Nul	Havfram Wind	Havfram Wind	Cadeler
船名	Wind Peak	Wind Pace	Wind Ally	Nessie	Siren	Boreas	Voltaire	NG-20000X	NG-20000X-HF	Wind Ace
吊上げ能力 (t)	2,500	2,500	2,500	2,600	2,600	3,000	3,200	3,250	3,250	3,000クラス
積載重量 (t)							21,500	16,100	16,100	
デッキ長さ (m)	151.1	151.1	151.1	148	148	175	169.3	151.1	151.1	
デッキ幅 (m)	58.0	58.0	58.0	56	56	63	60	58	58	
喫水 (最大) (m)				6.35	6.35	8.5	7.5			
最大作業水深 (m)	70.0	70.0	70.0	65.0	65.0	70	80	70	70	
自航/非自航	自航	自航	自航	自航	自航	自航	自航	自航	自航	自航
建造引渡し年	2024Q3予定	2025Q2予定	2025Q3予定	2024予定	2024予定	2024予定	2022	2024予定	2025Q4予定	2026Q3

3.3 浮体式: 海底ケーブルおよび係留索の施工方法

3.3.1 アンカーの種類

係留索や係留チェーンを保持するアンカーについては、以下のものの使用が想定される。



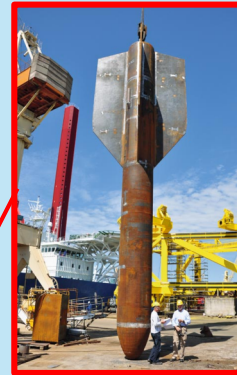
出典: Vryhof Manual, the guide to anchoring, https://www.plaisance-pratique.com/IMG/pdf/Vryhof_Anchor_Manual2015.pdf (参照2025/12/25)



出典: <https://www.nauticexpo.com/prod/vryhof/product-68605-504985.html> (参照2025/12/25)



出典: <https://semar.no/oil-and-gas/> (参照2025/12/25)



出典: <https://norwegianscitechnews.com/2009/12/new-approach-to-offshore-anchors/> (参照2025/12/25)



出典: <https://norwegianscitechnews.com/2009/12/new-approach-to-offshore-anchors/> (参照2025/12/25)

		Dead weight	Drag embed	Pile	Vertical load
地盤の種類	粘土層 (軟)	○	○	○	○
	粘土層 (中)	○	○	○	○
	粘土層 (硬)	○	○	△	△
	砂質土層	○	○	○ (suction 以外)	△
	礫層	○	△	△	△
支持力	全方向	○	△	○	○
	水平方向	○	○	○	○
Ultimate Holding Capacity(UHC値)		△	○	△	○
施工費用		安い	非常に安い	高い	高い

出典: Tecnico, Design optimization of the mooring system for a floating offshore wind turbine foundation, https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/281870113704214/Master%20Thesis%20Daniel%20Toledo_Final.pdf (参照2025/12/25) より和訳

3.3 浮体式：海底ケーブルおよび係留索の施工方法

3.3.2 係留方法の種類

係留方法の種類

浮体の係留における位置保持としては、以下の方法が用いられる。

係留方法	特徴	メリット	デメリット
緩係留 (Catenary)  <p>出典: Design of a 10MW Wind Turbine Rotor Blade for Testing of a Scaled-down Floating Offshore Support Structure, TUDelft, Oct.25, 2017</p>	海底のアンカーと浮体をカテナリー状に接続する。主として、鋼製チェーンで接続する方法。	<ul style="list-style-type: none"> 国内でも実績が豊富にある。 多様な水深に対応可能。 	<ul style="list-style-type: none"> 浅水深においては、係留設計が困難になる。 チェーン本数が増えると、浮体重量や設置コスト増大につながる。
トート係留 (Taut)  <p>出典: https://www.tensiontech.com/services/mooring (参照2025/12/25)</p>	初期張力を調整して索の伸びにより係留力を得て接続する方法。	<ul style="list-style-type: none"> 係留索の重量がチェーンよりも軽くなり、大水深に適用しやすい。 係留展開面積をカテナリー係留よりも小さくできる。 	<ul style="list-style-type: none"> 把駐力として、アンカーは水平と鉛直方向が拮抗しなければならない。 設置コストが高い。
緊張係留 (Tension Leg Platform)  <p>出典: Design of a 10MW Wind Turbine Rotor Blade for Testing of a Scaled-down Floating Offshore Support Structure, TUDelft, Oct.25, 2017</p>	浮体と海底基礎を接続し、浮体構造が強制的に沈めて得られる浮力により接続する方法。	<ul style="list-style-type: none"> 浮体の運動を小さくすることができる。 	<ul style="list-style-type: none"> 設置コストが高い。

3.3 浮体式：海底ケーブルおよび係留索の施工方法

3.3.2 係留索の種類

係留索の種類

浮体の係留における位置保持としては、以下の方法が用いられる。

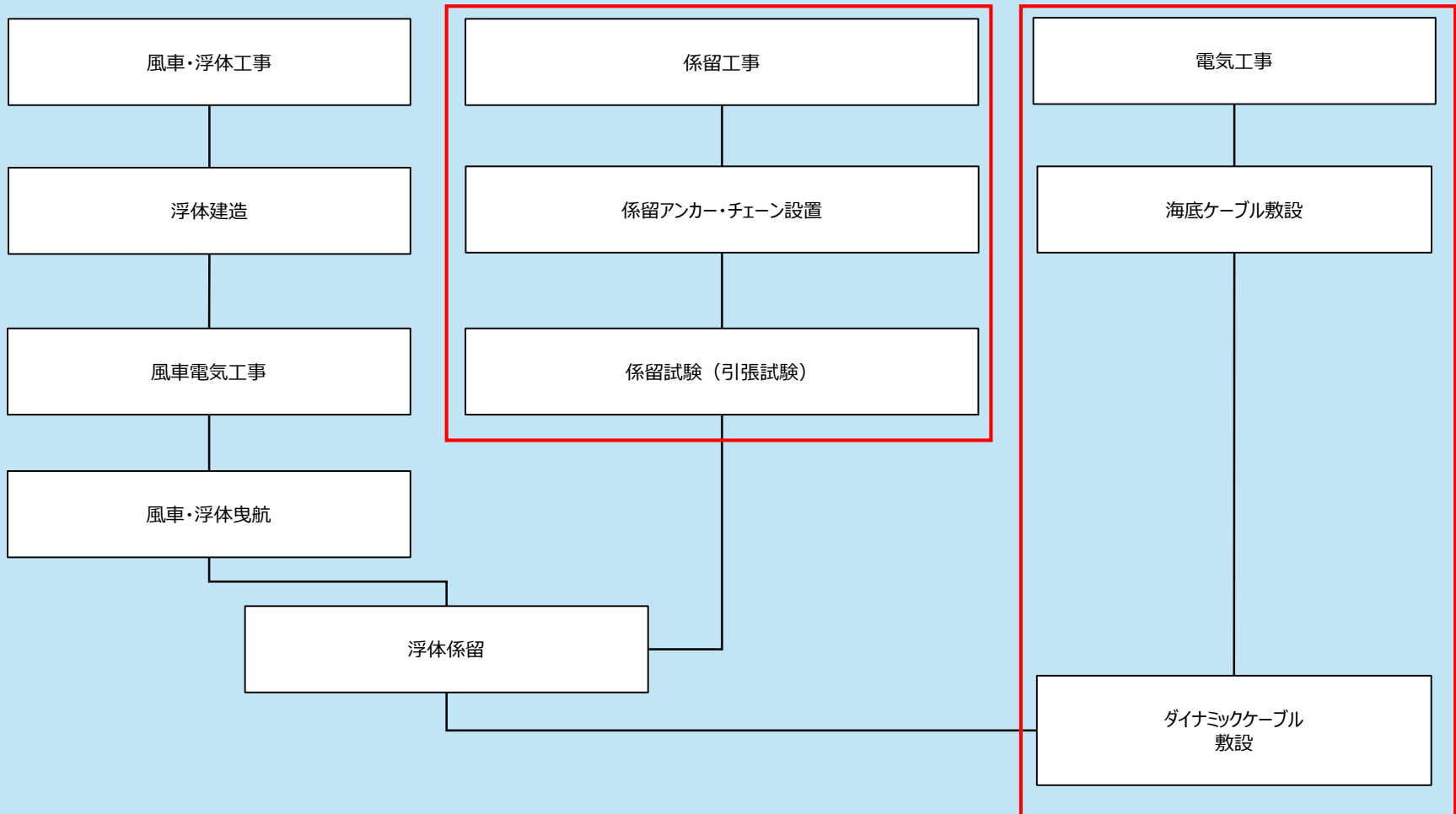
	チェーン		ワイヤーロープ	合繊ロープ		
	スタッドレス	スタッドリンク	亜鉛メッキワイヤー	ポリプロピレン・ナイロン	ポリエステル	アラミド・HMPE
線径密度	高い	非常に高い	やや低い	低い	低い	低い
摩擦/紫外線/マリングロウスの耐性	高い	高い	高い	低い	普通	やや高い
疲労破壊耐性	普通	やや高い	高い	低い	高い	非常に高い
弾性	小さい	小さい	やや小さい	高い	普通	小さい
施工性	簡単	非常に簡単	普通	困難	困難	困難
補修のしやすさ	簡単 (部分補修可)	簡単 (部分補修可)	困難 (すべて取替必要)	困難 (すべて取替必要)	困難 (すべて取替必要)	困難 (すべて取替必要)
コスト	非常に安い	安い	普通	安い	普通	高い

出典：Tecnico, Design optimization of the mooring system for a floating offshore wind turbine foundation,
https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/281870113704214/Master%20Thesis%20Daniel%20Toledo_Final.pdf (参照2025/12/25)より和訳

3.3 浮体式: 海底ケーブルおよび係留索の施工方法

3.3.3 浮体式洋上風力の施工フロー

浮体式洋上風力発電設備における一般的な施工フローを以下に示す。



3.3 浮体式: 海底ケーブルおよび係留索の施工方法

3.3.4 国内の施工実績

福島浮体式洋上ウインドファーム実証研究事業における施工例を以下に示す。

1. 係留工事

実証で用いた係留チェーンは、係留チェーン径が132mm でR3S の規格。我が国の厳しい気象・海象条件に適している。

係留アンカーについては、ドラッグアンカー方式（オランダにあるVryhof 製のStevshark）を採用。



係留チェーン
係留チェーン



係留アンカー
係留アンカー

実証研究実施海域にコンパクトセミサブ浮体及びサブステーションを係留する係留アンカー及び係留チェーンの設置を行う。



係留チェーン敷設

係留チェーンと係留アンカーの敷設の後、設計上のチェーンの把駐力を得るために引張試験を実施する。

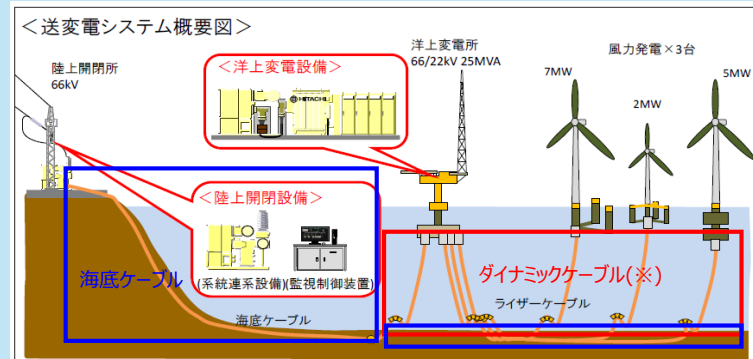


引張試験

2. 電気工事

本実証事業における送変電システムの概要図を以下に示す。

設置する3基の風力発電設備にて発電された電気は、一度洋上変電所に集められ、66kV まで昇圧し、海底ケーブルをとおして、陸上の開閉所につながる。



出典：海底電力ケーブルシステムの技術動向と開発課題および取り組み, 古河電工時報第141号(令和4年4月)より

(※)浮体の波浪動揺や潮流による流体力によって曲率変動や張力変動などのダイナミック挙動を繰り返し受けることで、ケーブルには張力や曲げに対する耐久性が求められる。

送変電システムの概要図

陸上開閉所のある広野海岸にて沖合いの作業船から海底ケーブルの引き込みを海岸まで実施した後、作業船は実証海域まで海底ケーブルを敷設した。



海底ケーブル敷設（陸から）

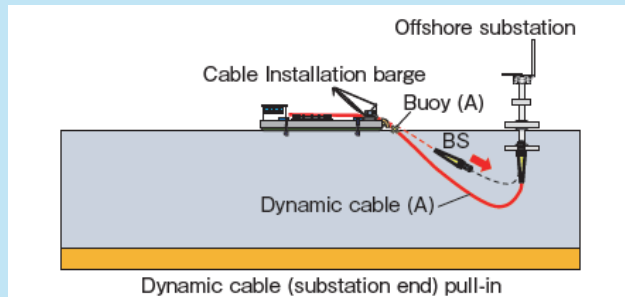
出典：浮体式洋上風力発電導入マニュアル、福島洋上風力コンソーシアム(2019年3月)より

3.3 浮体式：海底ケーブルおよび係留索の施工方法

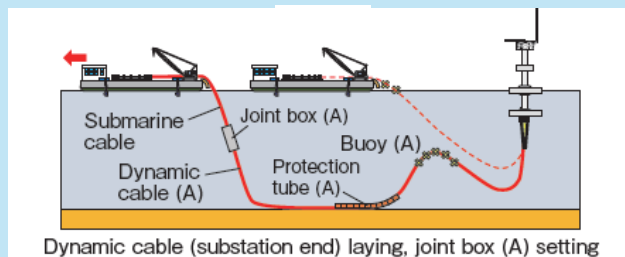
3.3.5 ダイナミックケーブルの施工手順

福島浮体式洋上ウインドファーム実証研究事業における施工例を以下に示す。

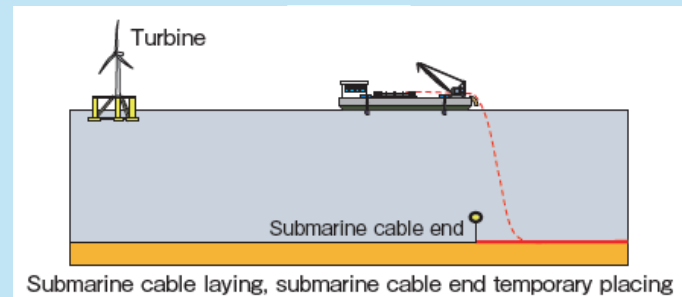
①ダイナミックケーブルを、布設船から送り出し、洋上変電所へ引き込む。



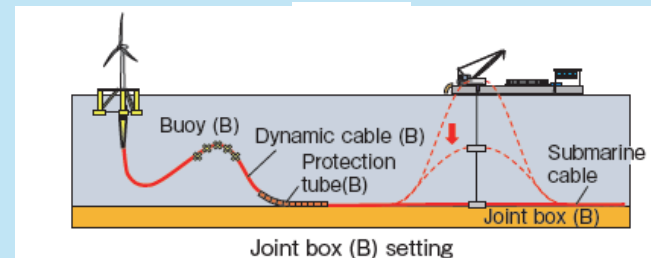
②分散ブイなどのアクセサリ類を取り付けながらケーブルを布設し、所定の位置で海底電力ケーブルと接続して接続箱を沈設する。



③風車に向けて海底電力ケーブルを布設し、所定の位置でケーブル端部を海底に仮置きする。



④洋上変電所側と同様の手順で風車にダイナミックケーブルを引込んで布設し、仮置きした海底電力ケーブルを布設船上に引上げて接続作業を行う。その後接続箱を沈設し、布設完了となる。




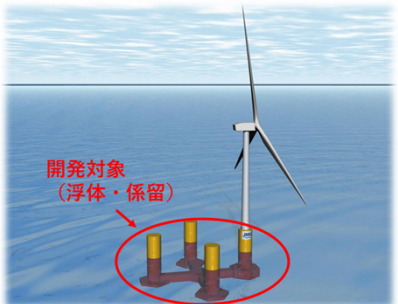
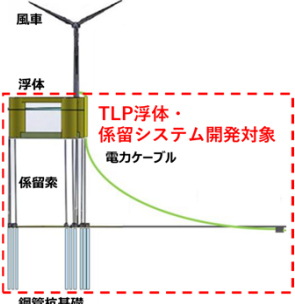



ダイナミックケーブルの敷設手順

3.3 浮体式：海底ケーブルおよび係留索の施工方法

3.3.6 国内プロジェクト

国内プロジェクトの実績を以下に示す。グリーンイノベーション基金事業(以下、GI基金事業)の次世代技術開発としても係留システムや海底ケーブル布設技術はテーマに取り上げられている。

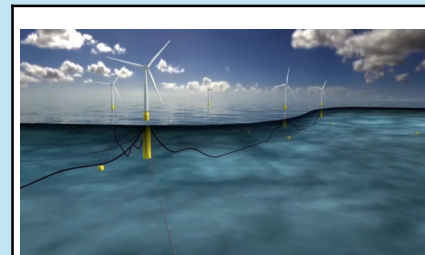
<p>崎山沖2MW浮体式洋上風力発電所「はえんかぜ」 長崎県崎山沖 (2010~)</p>	<p>福島浮体式洋上ウインドファーム実証研究事業 福島県沖 (2011~2021)</p>	<p>次世代浮体式洋上風力発電システム実証研究 (バージ型)「びびき」 北九州沖 (2014~2021)</p>
 <p>出典：自然エネルギー財団, 浮体式の洋上風力発電で日本初の商用運転ー長崎県・五島市で漁業との共生を目指すー, 2018 https://www.renewable-ei.org/activities/column/20180111.html (参照2025/12/25)</p>	 <p>出典：福島洋上風力コンソーシアム https://www.fukushima-forward.jp/gaiyou/index.html (参照2025/12/25)</p>	 <p>出典：NEDO, 次世代浮体式洋上風力発電システム実証研究 https://www.nedo.go.jp/floating/ (参照2025/12/25)</p>
<p>セミサブ型浮体・ハイブリッド係留システムに係る 技術開発及び施工技術開発 (GI基金事業ph.1)</p>	<p>低コストと優れた社会受容性を実現するTLP方式による 浮体式洋上発電設備の開発 (GI基金事業ph.1)</p>	<p>海底ケーブル布設専用船 (Cable Laying Vessel : CLV) 開発プロジェクト (GI基金事業ph.1)</p>
 <p>開発対象 (浮体・係留)</p> <p>出典：NEDO, 事業戦略ビジョン, セミサブ型浮体・ハイブリッド係留システムに係る 技術開発及び施工技術開発 https://green-innovation.nedo.go.jp/resources/pdf/offshore-wind-power-generation/item-001-2/vision-nscy-003.pdf (参照2025/12/25) を加筆修正して転載</p>	 <p>風車 浮体 係留索 鋼管杭基礎</p> <p>TLP浮体・ 係留システム開発対象 電力ケーブル</p> <p>出典：NEDO, 事業戦略ビジョン, 低コストと優れた社会受容性を実現するTLP 方式による浮体式洋上発電設備の開発 https://green-innovation.nedo.go.jp/resources/pdf/offshore-wind-power-generation/item-001-2/vision-furukawa-003.pdf (参照2025/12/25) を加筆修正して転載</p>	 <p>出典：NEDO, 事業戦略ビジョン, 海底ケーブル布設専用船 (Cable Laying Vessel : CLV) 開発プロジェクト https://green-innovation.nedo.go.jp/resources/pdf/offshore-wind-power-generation/item-001-4/vision-furukawa-003.pdf (参照2025/12/25)</p>

3.3 浮体式: 海底ケーブルおよび係留索の施工方法

3.3.7 海外プロジェクト

海外の係留索の施工実績を以下に示す。使用アンカーはドラッグアンカー、係留方式はカタナリー方式が多く採用されている。

	プロジェクト名	国名	施工年	使用アンカー	係留方式	備考
①	Hywind Scotland	イギリス	2007	サクシオン式	カタナリー方式	チェーン3本
②	Kincardine	イギリス	2021	ドラッグアンカー	カタナリー方式	チェーン4本
③	Dolphyn Hydrogen	イギリス	2024-	ドラッグアンカー	カタナリー方式	チェーン3本
④	Pentland Floating WindFarm	イギリス	2026-	TBD	TBD	
⑤	AFLOWT Hexafloat	アイルランド	2022	ドラッグアンカー	カタナリー方式	合繊ロープ3-6本
⑥	FloatGen	フランス	2016-2017	ドラッグアンカー	カタナリー方式	合繊ロープ6本
⑦	EolMed	フランス	2022-2023	ドラッグアンカー	カタナリー方式	合繊ロープ6本
⑧	EFGL Leucate	フランス	2024-	ドラッグアンカー	カタナリー方式	チェーン3-4本
⑨	Groix & Belle Ile	フランス	Cancel	ドラッグアンカー	カタナリー方式	チェーン5本
⑩	Provence Grand Large	フランス	2021	サクシオン式	トート方式	ダブルチェーン3本
⑪	Eolink	フランス	2024-	複数使用	カタナリー方式	1点係留方式
⑫	Unitech Zefyros	ノルウェー	2009	サクシオン式	カタナリー方式	チェーン3本
⑬	TetraSpar Demo	ノルウェー	2021	ドラッグアンカー	カタナリー方式	チェーン3本
⑭	FLAGSHIP	ノルウェー	2030	ドラッグアンカー	カタナリー方式	
⑮	HYWIND Tampen	ノルウェー	2020-2023	サクシオン式	カタナリー方式	チェーン3本
⑯	SeaTwirl S2	ノルウェー	TBD	ドラッグアンカー	カタナリー方式	
⑰	Sonnevindar	ノルウェー	2027-	TBD	TBD	
⑱	DemoSATH	スペイン	2022	ドラッグアンカー	カタナリー方式	ハイブリッド チェーンとポリエステルロープ
⑲	CanArray	スペイン	2023-	ドラッグアンカー	カタナリー方式	ハイブリッド チェーンとナイロンロープ
⑳	WindFloat Atlantic	ポルトガル	2018-2020	ドラッグアンカー	カタナリー方式	
㉑	7 Seas Med	イタリア	2025-	TBD	TBD	
㉒	New England Aqua Ventus I	アメリカ	2023		カタナリー方式	チェーン3本
㉓	CADEMO(VAB)	アメリカ	2023	複数使用	カタナリー方式	ハイブリッド チェーンとポリエステルロープ



浮体形状 (②Kincardine Project)

出典: <https://www.bbc.com/news/uk-scotland-north-east-orkney-shetland-40947146>
(参照2025/12/25)



サクシオン式アンカー (⑧HYWIND Tampen)

出典: <https://semar.no/wp-content/uploads/2022/05/Suction-anchors-Installation.pdf>
(参照2025/12/25)



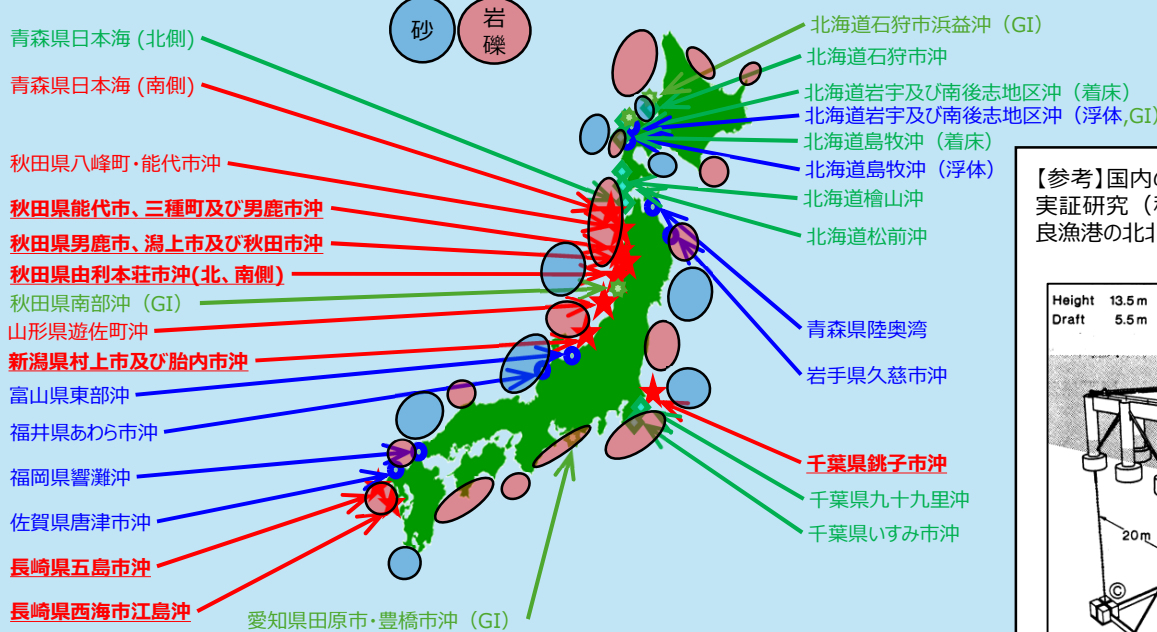
1点係留方式 (⑪Eolink)

出典: <https://www.eolink.fr/en/article-p5mw-en>
(参照2025/12/25)

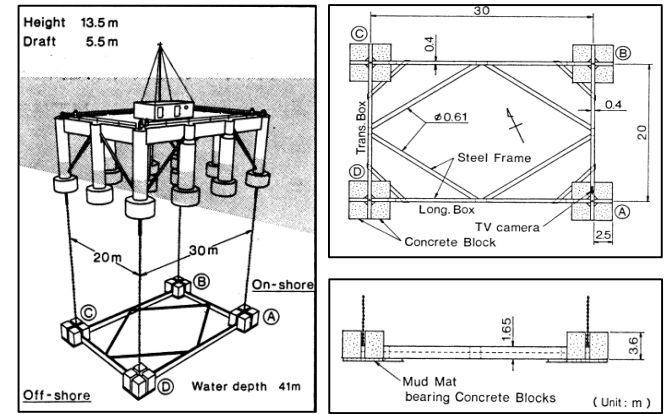
3.3 浮体式：海底ケーブルおよび係留索の施工方法

3.3.8 日本の海底地盤への適用

将来的なTLPやトート係留の採用にあたってはアンカーと地盤の関係が重要である。日本の海底地盤の地質マップ（概要）※を以下にまとめた。



【参考】国内の緊張係留に関する研究として「緊張係留方式の実海域実証研究（科学技術庁）」(1985-1986)があり、山形県鶴岡市由良漁港の北北西約 2.6km沖合、水深約41mの海域に設置された。



TLPの概要図

シンカーのコンセプト

- 施工実績として次の内容が報告されている。
- 海底面が平坦な位置にシンカー鋼構造＋コンクリートブロックを沈設
 - 緊張係留の他に作業用に弛緩係留も使用
 - 初期張力の確認にあたり、全バラストを排出
 - 計画喫水、初期張力補正用のチェーンリンク数を予備として準備した

出典：海洋技術センター、シバタ工業、浮体式海洋構造物の緊張係留に関する研究（第5報）-緊張係留システムの実海域実験-、日本造船学会論文集、1987、第161号、pp.173-182

- 【凡例】
- ★... 促進区域：10海域（案を含む、下線は事業者選定済）
 - ◆... 有望な区域：8海域
 - ... 準備段階の区域：8海域
 - ☆... GI基金ph.2（浮体実式証）実施候補海域：4海域

これより、TLPやトート係留の採用にあたって日本の海底地盤の地質毎に次のようなアンカーの組み合わせが考えられる。

- 砂層：重力式、サクシオン式、パイル式
- 粘土層：重力式、パイル式
- 岩礫層：重力式

今後の技術開発検討としてTLP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る。よって次のような利点がある。

- 限られた占有面積でのwind farm 基数の増加が可能
- 将来的な漁業共存への貢献

3.3 浮体式：海底ケーブルおよび係留索の施工方法

3.3.9 GI基金事業

GI基金事業等にて開発されている次世代技術例を以下に示す。

ハイブリッド係留システム	TLP方式	海底ケーブル布設専用船
<div data-bbox="112 482 660 868"> <p>従来施工 (台船施工)</p> <p>提案施工 (アンカーハンドリング船施工)</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 係留索 <ul style="list-style-type: none"> ・オールチェーン係留索 ・ハイブリッド係留索 ● アンカー <ul style="list-style-type: none"> ・ドラッグアンカー ・サクションアンカー <p><施工法：上記の組み合わせで検討></p> </div>	<div data-bbox="743 396 1174 1002"> </div>	<div data-bbox="1290 354 1646 731"> <p>海底ケーブル布設工事 ワークフロー</p> <ul style="list-style-type: none"> CLV用船手配 CLV移動 (出荷工場へ) ケーブル積み込み(工場出荷) CLV移動 (工場→サイト) 1st End Pull In(第1風車基礎へケーブル引き込み) 風車間ケーブル布設 2nd End Pull In(第2風車基礎へケーブル引き込み) </div> <div data-bbox="1510 745 1831 1016"> <p>小型船出帆CLV (CLV: Crew Transfer Vessel)</p> <p>海上風力プロジェクト</p> <p>海底ケーブル布設専用船 (CLV: Cable Laying Vessel)</p> </div>
<p>係留索の一部に合成繊維索を用いるハイブリッド係留索を採用。</p> <p>さらにドラッグまたはサクションアンカーを組合せ、従来の台船による敷設ではなく、アンカーハンドリング船を使用して敷設する手法が提案された。</p> <p>出典：東京電力ホールディングス, 五洋建設, 東京大学, 浮体式洋上風力発電低コスト化技術開発調査研究 (大型スパー浮体), 日本風力エネルギー学会誌, 2021, vol.45, No.4 より</p>	<p>セミサブ型と TLP 型の長所を併せ持った浮体および係留方式。</p> <p>セミサブ浮体の安定性を活かし、風車搭載～設置サイトへの曳航～設置作業までを行い、浮体設置後の運用時は緊張係留にするコンセプトが提案された。</p> <p>出典：三井海洋開発株式会社, 浮体式洋上風力発電低コスト化技術開発調査研究 (TLP 型), 日本風力エネルギー学会誌, 2021, vol.45, No.4 より</p>	<p>CLV導入により、大幅に工程短縮出来、更に、冬場にも建設・メンテナンス工事が実施可能。布設コスト：20%削減、布設工程：60%短縮。</p> <p>日本の洋上風力マーケットでは、CLVが未整備、バージでの海底ケーブル布設工事を余儀なくされている。</p> <p>出典：NEDO, 事業戦略ビジョン, 海底ケーブル布設専用船 (Cable Laying Vessel: CLV) 開発プロジェクト, GI基金事業, 洋上風力発電の低コスト化, https://green-innovation.nedo.go.jp/resources/pdf/offshore-wind-power-generation/item-001-4/vision-furukawa-003.pdf (参照2025/12/25) より</p>

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

3.4.1 設計

3.4.1.1 コンクリート材料特性としての疲労耐久性

(1) 背景および課題¹⁾

波浪の繰返し作用下では、タワー基部での鋼材との接合部や発生応力が大きい部位からコンクリートの局所的なひび割れが徐々に進展し、破壊モードに影響を及ぼすことから、接合部の疲労耐久性に配慮した設計の重要性が認識されている。

また、コンクリートが水中あるいは湿潤状態にあるときは、コンクリート自体の疲労強度が低下するだけでなく、繰返し作用によってコンクリート内部の微小細孔構造の飽和水に生じる水圧、あるいはマクロひび割れに生じる水圧によって、損傷が加速される場合がある。

(2) 解決策の方向性

解決策として、これについては、荷重履歴によるコンクリートの疲労損傷を再現可能な構成モデルを有する非線形有限要素解析により再現でき、これらの数値シミュレーション技術の洋上風力発電施設設計への適用が考えられる。¹⁾また、一般にプレストレストコンクリートとして、コンクリートに建造時に圧縮力を与えるなど、引張力による構造的なひび割れが生じ、それが進展しないように設計する²⁾。

3.4.1.2 コンクリートの水密性・化学的作用に対する抵抗性

(1) メンテナンスフリーに向けた課題と対策

コンクリート製浮体施設は、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る。²⁾

そこで、浮体式洋上風力施設の浮体部分が鉄筋、PC 鋼材が密に配置される構造になることを想定し、繰返し作用下における高流動・高強度コンクリートを用いたプレストレスト・コンクリート (PC) を用いることを主とし、供用期間中は可能な限り「メンテナンスフリー」となるようにどのような設計方針とすべきかについて、①水結合材比および水密性、②単位セメント量、③最小かぶりの確保について述べる³⁾。

① 水結合材比および水密性³⁾

コンクリートの水密性を支配する最大因子は水セメント比 (W/C) であり、W/C が同一のときは、セメント量が多くなる (W/C が小さくなる) につれて水密性が高くなる。よって、水セメント比の上限は、飛沫帯および海上大気中に供される部材の場合は 40%、海中に供される部材の場合は 45%を標準とすること、また主構造部材に用いるコンクリートの圧縮

強度の特性値 f'_{ck} (設計基準強度) は、 30N/mm^2 以上を標準とすることが望ましい。また、混和材料として、高炉スラグ微粉末やフライアッシュ、シリカフェーム等を適切に使用することによって、密実で海水の化学的作用に対する抵抗性が高いコンクリートとなるため、コンクリート内部への塩化物イオンの侵入の抑制に効果が期待できる。さらに、アルカリシリカ反応の抑制にも有効であることから、浮体施設に使用するコンクリートには、これらの混和材を適切に使用することが望ましいと考えられる。

② 単位セメント量³⁾

単位セメント量 (単位結合材量) に下限あるいは上限が規定されている場合には、これらの規定を満足させるが、特に規定の無い場合は土木学会コンクリート標準示方書に示される、海洋コンクリートにおける単位セメント量の標準値に準拠するのが良い。

③ 最小かぶり

鉄筋の最小かぶりの標準値を飛沫帯および海上大気中では 60mm 、海中では 50mm とするのが良い。なお、実際の設計時においては中性化と水の浸透深さに伴う鋼材腐食に対する照査および塩化物イオンの侵入に伴う鋼材腐食に対する照査を行った上で、耐用年数を満足する設計値とすることが必要であり、鉄筋のかぶり量の全数検査を実施するのが望ましい。なお、DNVGL-ST⁵⁾に記される最小かぶりは上記標準値よりも小さい値となっているケースもあるが、塩化物イオンの侵入に対する鋼材腐食を照査した結果、20年の耐久性を確保するには上記標準値を用いることが適切であると考えられている³⁾。

また、凍結融解作用によるポップアウト、スケーリング、微細ひび割れといった凍害によるコンクリートの劣化により、コンクリートの種々の材料特性は影響を受け、物質透過性は大きくなり、強度や剛性といった力学特性が低下する。特に、コンクリート製浮体施設が供用される海洋環境下においては、凍結融解作用による凍害が進行しやすい。対策として、水セメント比を45%以下とし、かつ、空気量を6%以上にする等の対応をとることが望ましい²⁾。

3.4.1.3 鉄筋等鋼材の腐食およびコンクリートの塩害

(1) 背景および課題²⁾

コンクリート製浮体施設は、鉄筋のかぶりが不足すると水の浸透や塩化物イオンの侵入に伴う鉄筋腐食により、設計耐用期間中に構造物の耐力が低下し、破壊に至る可能性があり、打継ぎやプレキャスト部材の接合が不完全な場合、水や塩化物イオンなどの劣化因子の侵入経路となり、鉄筋腐食や水密性が低下する恐れがある。

(2) 解決策の方向性

1) 混和材の使用¹⁾

洋上風力発電施設のように、コンクリート構造内部に配置される鉄筋の腐食リスクを軽減する必要があり、各種混和材の積極活用は有効な解決策となると考えられている。

セメントの一部を高炉水砕スラグおよび石炭灰に置き換えた混合セメントは既に JIS 化されており、それぞれ最大置換割合は 70%、30%となっている。さらなる副産物利用を目指した研究が進み、高炉スラグ微粉末、フライアッシュ、シリカフェーム等の混和材によって、セメントの 70%以上（質量比）を置換したコンクリートの設計および施工に関する標準を取りまとめた「混和材を大量に使用したコンクリート構造物の設計・施工指針（案⁴⁾」が、土木学会より 2018 年に出版されていることから、これらの混和材の使用はコンクリート中の鉄筋腐食のリスク軽減に大きな可能性が期待されている。

2) 海水・海砂の使用¹⁾

セメント以外でコンクリートを構成する主要材料は、水および細骨材と粗骨材からなる骨材である。塩分を除去しない海砂や海水そのものを鉄筋コンクリート構造に用いることは、コンクリートの早期強度を促進する利点があるが、鉄筋等の鋼材腐食のリスク要因があるため、一般には認められていない。なお、エポキシ樹脂で塗装された鉄筋は既に 30 年以上の実績があり、耐海水環境においても有効であることが知られている。また、ステンレス鉄筋も実用として使用することが可能となっている状況でもある。

しかし、十分な鉄筋かぶりと低水セメント重量比配合と適切な施工管理のもとで製造された海水利用のコンクリート構造物では、数十年にわたって良好に機能しているものもいくつか存在する。今日、海水および海砂を利用した“海水練りコンクリート”の展開が推し進められており、世界的にも普及が進んでいる。また、アジア諸国においては、真水と骨材の入手が困難な地域は少なくないため、海水と海砂の使用はコンクリート構造材料のサプライチェーンにおいては、大きな利点を有する。更には、海底から砂を採取できることは、同様に沿岸域での材料調達と施工に大きな利点をもたらすことも考えられる。

3) FRP の使用¹⁾

海水練りコンクリートの研究とも並行して、FRP 等の非鉄補強材を鉄筋に代えてコンクリート構造物に用いる研究も盛んに行われている。代表的なものとして、炭素繊維、ガラス繊維、アラミド繊維であるが、近年はバサルト繊維の検討例もある。これらは、①鉄筋のような棒（ロッド）状あるいはワイヤー状（連続繊維）に加工して構造物内に配置し、②短繊維として練り混ぜ時にコンクリート（あるいはモルタル）に加えて打設することが可能となっている。

いずれの FRP も強度や剛性といった力学性能は従来の鉄筋に匹敵し、特に軽量ゆえに施工や輸送の省力化にも寄与するものと考えられており、電気化学反応に基づく鋼材腐食の懸念がないことは、海洋構造物に歓迎すべき大きな利点であるものの、海水中のアルカリによる浸食のリスクに注意を払う必要がある。

4) 電気防食

電気防食技術は海洋港湾構造物で広く活用されている。長期共用された構造の補修に使われる電気防食も、建設当初から新設構造の維持管理にそもそも適用できるものであり、この場合、鉄筋や鋼材が確実に陰極側に位置付けられるように、電場設計を事前に行うことが前提となることが考えられる。部分的な電気防食が別の部分でのマクロセル腐食を起こして寿命を縮めた事例もあることから、コンクリート製浮体の新設構造設計に活かされるべきものと考えられる⁹⁾。

また、鉄筋コンクリートに通電を行うことによって ASR 膨張が助長されるものの、電気防食工法を適用する前に、電気防食工法における電流密度よりもきわめて大きな電流密度を一定期間供給することにより、電気防食工法適用中の ASR 膨張を抑制できる可能性があることが示唆されている⁹⁾ことから、これらの電気防食工法と ASR との関連性についても予め考慮しておく必要があると考えられる。

3.4.1.4 船級取得の基準がない

(1) 背景および課題

商用化に向けて、コストダウンかつ大量生産を指向し、コンクリートによる検討が求められている。国内における洋上風力発電指示浮体に関する設計基準では、日本海事協会において「浮体式洋上風力発電設備に関するガイドライン (2021 年 12 月)」が整理されているものの、鋼船規則を参照したものである。⁷⁾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)」が整理されているが、コンクリート浮体を対象とした船級取得のための基準として明確に認められているものではないことが課題である。

(2) 解決策の方向性

解決策として、国内外の類似基準を準用し、日本海事協会に個別に承認を得たうえで適用することとなる。

3.4.2 施工

3.4.2.1 労働力の確保

(1) 背景および課題

コンクリート製浮体式基礎の現地製造は、鋼製浮体式基礎の製造に比べるとより多くの雇用を提供できるという特徴がある⁸⁾⁹⁾。

一方で、わが国の建設業においては就業者の高齢化が進んでおり、今後、高齢就業者の大量退職が見込まれることから、将来の担い手不足も懸念されている¹⁰⁾。そのため、労働力の確保という点はコンクリート製浮体式基礎の製造における大きな課題になる。

(2) 解決策の方向性

国土交通省では i-Construction を推進しており、その中で①ICT 技術の活用や、②プレハブ化/プレキャスト化は生産性の向上が図れるため、省力化への寄与が期待される。

① ICT 技術の活用

ICT 技術の活用により、左官や鉄筋組立など、ロボット等による代替が可能な作業の機械化・自動化等が進み、省人化や無人化による生産性の向上が期待されている¹⁰⁾。

② プレハブ化・プレキャスト化

鉄筋のプレハブ化やプレキャストの埋設型枠、コンクリート部材の工場製作などにより、現地作業の生産性向上が期待されている。また、大型構造物へのプレキャストコンクリートの適用も生産性向上の方向性として示されている¹¹⁾¹²⁾。

3.4.2.2 施工方法の合理化

(1) 背景および課題

コンクリート構造物の特徴として、コンクリートの打設から必要な強度発現までには、一定の養生期間を要する点が挙げられる。現地にてコンクリート構造物を建造する場合はコンクリートの養生期間が工程上クリティカルとなる²⁾。

上記に加え天候の制約がある。一般的にコンクリート構造物の施工においては降雨等の天候の影響を受けないような施工方法が必要となる⁹⁾²⁾。

(2) 解決策の方向性

施工方法の合理化として、プレキャスト工法が挙げられる。コンクリート製浮体式基礎の製造においては、コンクリート部材をプレキャスト化し、できるだけ単純な形状（パネルなど）を現地にて接合することを前提とした浮体形状が推奨されている¹⁾。プレキャスト工法はコンクリート部材を事前に製作しておくことが可能であり、工場での製作も可能なため、現地打設と異なり天候の影響を受けづらく、養生期間による工程の影響も発生しないという利点がある¹¹⁾。

3.4.2.3 品質管理の合理化

(1) 背景および課題

コンクリート製浮体式基礎には高い水密性が求められるため、コンクリートのひび割れを防止、抑制するために過密な配筋やプレストレスの導入などが必要になり²⁾、施工時は高度な品質管理が必要になる¹³⁾。

従前の鉄筋コンクリート構造の腐食劣化の最大の原因は、設計通りにかぶり（鋼材の塗装厚に相当）が確保され得なかったことが主な理由であり、特に鉄筋の検査は非常に重要である。洋上風力においては、かぶり全数検査に基づく品質管理が不可欠としている¹⁾。

そのため、従来の検査手法では工程も労力も多大となるため、「0 施工方法の合理化」だ

けでなく品質管理の合理化も求められる。

(2) 解決策の方向性

これまで目視では鉄筋位置を検査することができなかったが、今日では非破壊検査で、容易にかぶり厚の全数検査が可能となった。鉄道施設ではかぶりの全数検査が標準化され、腐食リスクは格段に低下している¹⁾。また、今日では i-Construction の推進により施工・検査など自動化・ロボット化により、生産性だけでなく¹¹⁾品質管理の合理化も期待されるところである。

3.4.2.4 大型化・大規模化に向けた課題

(1) 背景および課題

一般的にコンクリート製浮体式基礎は鋼製浮体に比べると寸法が大きく、大量生産には広い施工面積が必要とされている。また、鋼製基礎よりも重量が大きく、施工に伴う揚重や曳航に労力を要するとされており、岸壁の地耐力や施工スペースの制約などが課題として挙げられている⁸⁾⁹⁾¹³⁾。

(2) 解決策の方向性

国土交通省において、浮体式洋上風力発電所に対応した基地港湾の最適な規模について検討しており、風車の大型化や発電所の大規模化に対応可能な基地港湾の整備方針や利用方法について示している。

その中で、セミサブ、バージ基礎の場合の施工パターンと港湾の役割として欧州における浮体式の施工事例から、大型化、大規模化を見据えた施工プロセスや港湾の役割について検討しており、大型化、大規模化においては、基地港湾内の地耐力や製作ヤードの確保、完成した浮体式基礎の保管水域の確保等が課題として挙げられている。

しかし、浮体式洋上風力発電に関しては、世界的に基礎の製造、輸送・設置の方法がまだ確立しておらず、技術開発の余地が大きい。連続製造に適した浮体の設計や、浮体製造のパネル化やブロック化、分割施工、ドックに依存しない浮体の大量製造等の技術の確立など、今後、更なる技術開発が必要である。¹⁴⁾

3.4.2.5 解体技術について

(1) 背景および課題

洋上風力発電の社会意義の一つとして脱炭素のみならず循環型社会の実現への貢献が挙げられている。脱炭素社会の目標達成には大規模な洋上風車建造が前提であるが、循環型社会の実現まで考慮すると、供用期間が過ぎた後の風車基礎解体技術が求められる。

一般的に建設後のコンクリート構造物の切断、解体に関してはワイヤーソーによる切断やブレイカーによるはつりが利用されるが、大型コンクリート製浮体式基礎の解体には、多大

な労力が必要になるため、解体しやすい工法の選定も課題として挙げられている¹⁾。

(2) 解決策の方向性

撤去について、商用水準となれば、一度に大量の撤去・解体を行う必要があるため、開発、建設当初から、解体コストの抑制や最大限リサイクルすることを念頭に置いた設計等を考慮すべきとしている¹⁵⁾。

3.4.3 その他

3.4.3.1 サプライチェーン

コンクリート製浮体式基礎（バージ式、セミサブ式）の設計面、施工面以外の課題を挙げていく。サプライチェーンの構築は課題の1つであり、コンクリート製浮体式基礎のサプライチェーンでは以下の利点と欠点が整理されている⁸⁾。利点は、現地に既存の鉄鋼製造サプライチェーンがない場合、コンクリート製浮体式基礎の製造は、新しい施設への投資が少なく済むため、より簡単に確立できる可能性がある。コンクリート製浮体式基礎製造の現地化は鋼製浮体式基礎の製造ヤードに比べ、より多くの雇用機会を生み出す。欠点は、コンクリート製浮体式基礎は鋼製浮体式基礎より重量が大きいため、揚重と曳航に多くの労力および港湾施設の地耐力が必要である。輸送に当たっては輸送コストが高く、また水路深さを深くする必要がある。

これらの利点と欠点を参考に、コンクリート製浮体式基礎におけるサプライチェーンの課題と解決の方向性について、3つの切り口から文献を調査した。

(1) 港湾施設に関する課題

1) 適切な港湾施設の取得

コンクリート製浮体式基礎の製造において費用対効果を高くするには、適切な港湾施設を取得することが不可欠である。適切な港湾施設の要件には、十分な建造エリア、大型の輸送・設置船を収容できる岸壁、十分な入口・岸壁の喫水が挙げられる¹⁶⁾。また、需給バランスや競争力、地域経済への貢献などを考慮して最適な港湾施設を選択し整備する必要がある。

適切な港湾施設を取得するための解決の方向性として、①コンクリート製浮体の製造施設に必要な特定の港湾施設要件をより詳細に調査して、必要なインフラ投資を定量化する。②製造・供給会社と協力して、製造施設のコスト構造と投資を可能にする商業的な要因（例えば、コミットされたプロジェクト・パイプラインの規模）を理解して、港湾施設の開発を進める。③港湾管理者と製造・供給会社がプロジェクトに間に合うように港湾用地の開発を推進できる政策的な支援策（インセンティブやメリット等）と資金調達の仕組みを確立する¹⁶⁾。

2) 港湾機能と施設規模の検討

国土交通省は、浮体式洋上風力発電の国際競争力確保や導入加速化に向けて、サプライチェーンの一部となる港湾について「洋上風力発電の導入促進に向けた港湾のあり方に関する検討会」¹⁷⁾にて検討を行っている。検討会では、導入促進に必要となる港湾機能の整理および浮体式洋上風力発電の建設に対応した施設の規模を整理している。

〈導入促進に必要となる港湾機能¹⁷⁾〉※コンクリート製浮体式基礎に関連する機能を抽出

- ・資機材生産機能：浮体基礎部品（モジュール）の生産・組立・積出
- ・設置・組立機能：浮体基礎部品（モジュール）の搬入・組立・曳航、風車の組立て（プレアセンブリ）・積出、浮体基礎の水域保管
- ・維持管理機能：大規模資機材の搬入・修理・積出、撤去後の資機材の搬入・解体・積出

〈港湾の施設規模〉

国土交通省の港湾のあり方に関する検討会¹⁷⁾ではセミサブ式浮体は鋼製、バージ式浮体はコンクリート製について港湾の施設規模を検討しているが、セミサブ式浮体のコンクリート製については検討されていない。そこで、コンクリート製浮体式基礎の建設に対応した施設の規模について BVG Associates の文献⁸⁾を調査した。

- ・コンクリート製浮体式建設の施設規模：岸壁延長 500m、水深 12～20m、地耐力 40～100t/m²、面積（陸上）15～20ha、面積（水域保管）10～12ha

港湾機能と施設規模の検討をするための解決の方向性として、検討会での文言を引用すると、浮体式の技術開発動向等を踏まえ、導入に向けて、将来の拡張性を見越しつつ、施工手順と対応する港湾施設について検討を行う¹⁷⁾ことが重要である。技術開発動向には、鋼製浮体式基礎に限らず、コンクリート製浮体式基礎の開発動向も踏まえ、将来の拡張性と施工手順に対応した港湾施設の機能と規模の諸元をとりまとめる必要がある。

3) 専用建設ドック

政府の導入目標の実現に向けて、浮体基礎の大量建造と連続生産、最適化した生産システムでの省力化が課題である。港湾施設の整備として専用建設ドック建設を提唱している事例がある¹⁸⁾。専用建設ドックは多数のコンクリート製浮体式基礎を効率的に建造するもので、提唱されたドックサイズは長さ 1,000m、幅 150m であり、ドック内で陸側から沖側へ向かって浮体式基礎の連続建造を行い、完成後は直接設置海域へ輸送する。風車はドック内で浮体上に搭載され、ドック周辺には部材の保管ヤード、関連器等の製造工場を併せ持つ構想である。

専用建設ドックの建設は一例であるが、浮体基礎の生産手法、風車一体化までの連続的な港湾利用、資機材のロジスティックス等を考慮して全体システムを構築し、建設サイクル全体の最適化を図る必要がある。

(2) 材料供給に関する課題

コンクリート製浮体式基礎を採用した浮体式洋上風力発電プロジェクトは、スパー・セミサブ・バージ等のコンクリート製浮体の種類や部位によって品質、強度、耐久性の要求性能が異なり、材料の供給量が一定でないことが課題である。

材料供給に関する解決の方向性として、調査した文献では以下2点が挙げられている¹⁶⁾。

- ① コンクリート製浮体を使用する可能性のある浮体式洋上風力発電プロジェクトのパイプラインを定量化し、材料と部品に対する将来の潜在的な需要の規模と時期を明確にする。
- ② 国内での材料供給増加のタイムスケールとその増加を引き起こす要因（政府の政策、需要の増加など）を調査する。

また、DNV はコンクリート製浮体の DNV 規格を浮体式洋上風力発電に向けてさらに開発しており¹⁹⁾、要求性能を最適化し、堅牢な性能を維持しながら、材料をより効率的に使用できることを目指している。

(3) 地域産業への波及効果

コンクリート製浮体式基礎の製造は、鋼製浮体式基礎の製造と比較して、地域産業への波及効果が期待できる。同様の利点は複数の文献で見られる。

近年の浮体式プロジェクトでは、主要材料に鋼製を用いた浮体が多くある中で、コンクリート製を用いた浮体も増加しており、コンクリート製は造船所以外の場所でも建造可能であることや設置海域付近の地元産業を活用可能である等の利点がある²⁰⁾。

浮体式風力発電は、海底地盤と隔離された構造であるため、地震波、海底地盤、水深などの影響が少なく、浮体基礎の設計が標準化できて、量産化しやすい特徴がある。日本全国に分布するコンクリート産業や鉄工所などの技術力を以て製造可能な部分が多く、地域産業への波及効果が期待できる²¹⁾。

3.4.3.2 コスト削減

材料コストに関する文献⁸⁾では、鋼板価格変動が激しく、1年以内(2023年5月より前)に最大50%の変動が記録されている中で、コンクリート価格はより安定していることが指摘されている。鉄筋コンクリート構造では、特に補強のために大量の鋼材が使用されているが、鋼材が主要材料である鋼製浮体に比べれば、全体的な使用量は数分の1である。

また、コンクリート製セミサブ浮体式基礎と鋼製セミサブ浮体式基礎の材料・製造コストの違いを評価した比較研究(2022年)²²⁾があり、鋼製の方がコンクリート製と比べて69%高価となる。このコスト比較研究では、鋼製の浮体式基礎をアジアで製造してヨーロッパまで輸送する輸送費が含まれている点と、アジアとヨーロッパでの製造コスト差が含まれている点に留意が必要である。また、このコスト比較評価には2022年以降の主要材料の価格

変動も考慮する必要がある。

ここまでは鋼製浮体式基礎とコンクリート製浮体式基礎の材料コストの比較を示すものであるが、材料価格の変動や留意点を考慮した場合の両者のコスト差は明確に示されていない。一方、コンクリート製浮体式基礎のコスト削減のための方向性が記述された文献は以下の2つがある。

- ① 風車と浮体構造のインターフェイスの最適化、浮体構造の標準化と量産化によって大型商用電源並みの発電コスト達成は可能であると考えられる²¹⁾。
- ② 風車の支持構造物では、耐用年数がロータの一般的な耐用年数である20年間程度を想定しているが、コンクリート技術の適用により支持構造物の耐用年数を倍にすることが可能であれば、二世代に渡って使用できることになり、洋上風力発電のメリットが拡大する²³⁾。

3.4.3.3 コンクリート製浮体の実証¹⁶⁾

コンクリート製のセミサブ浮体式基礎およびコンクリート製のバージ浮体式基礎の実証は世界でいくつかみられる^{24) 25) 26) 27)}。一方、国内ではコンクリート製のセミサブ浮体基礎およびコンクリート製のバージ浮体基礎の実証例はない。実証によってコンクリート製浮体が品質および安全性で実行可能な解決策であり、地域経済や雇用への効果があることを定量的に示す必要がある。

3.4.3.4 カーボンフットプリント

DNVの調査ではコンクリート製浮体と鋼製浮体基礎の製造におけるライフサイクル全体での二酸化炭素排出量を比較している²²⁾。調査結果では、コンクリート製セミサブ式浮体の二酸化炭素排出量は鋼製セミサブ式浮体と比較して、約2.5～3倍低いと評価されている。この調査の評価結果では、鋼製浮体をアジアからヨーロッパまで海上輸送しており、原材料の二酸化炭素排出量が多くなっている点に留意する必要がある。

この他に、バージ浮体を製造する際のコンクリート製と鋼製の二酸化炭素排出量を比較した報告²⁸⁾がある。新しい材料のみを使用する場合と、再生鋼と高炉セメントを使用する場合の2ケースを比べても、コンクリート製の方が約2倍優れているという評価結果である。

コンクリート製浮体基礎の二酸化炭素排出量を削減するための解決の方向性として、DNVの調査結果²²⁾では、コンクリート製セミサブ浮体に二酸化炭素を吸着させたセメントを活用することが挙げられている。セメント製造全体の二酸化炭素排出量を50%削減し、原材料の燃焼過程での二酸化炭素排出量を26%削減できる。

原材料の供給では、生産や輸送に多くのエネルギーや二酸化炭素の排出を伴うため、学識経験者や製造・供給会社による低炭素コンクリート開発を促進し、インセンティブを与えるためのロードマップを作成する¹⁶⁾。

参考文献

- 1) 藤山 知加子, 前川 宏一: 特集1 最新国内外の洋上風力発電特集 洋上風力発電推進のための最近のコンクリート技術, 日本風力エネルギー学会誌, 2020, Vol.44 No.4 p.587-p.590
- 2) 国土交通省: (別冊) コンクリート製浮体式洋上風力発電施設の設計施工ガイドライン 2023
- 3) 鈴木 英之, 中條 俊樹: 特集1 我が国の国家採択風力関連プロジェクトの紹介 浮体式洋上風力発電施設の安全評価手法等の確立のための調査研究, 日本風力エネルギー学会誌, 2021, Vol.45 No.4 p.615-p.619
- 4) 土木学会: 混和材を大量に使用したコンクリート構造物の設計・施工指針 (案) 2018
- 5) DNV GL, Offshore Concrete Structures, 2018. DNVGL-STC502
- 6) 黒田 保, 井上 正, 吉野 公, 西林 新蔵: 電気防食工法適用時における ASR 膨張抑制方法に関する検討, コンクリート工学年次論文集 Vol.36 No.1 2014.
- 7) 小松 怜史他: 洋上風力発電設備支持浮体へのプレキャストコンクリート適用, コンクリート工学会学会誌, 2023, Vol.61 No.1
- 8) BVG Associates : Guide to a Floating Offshore Wind Farm, 2023
- 9) Denis Matha et al. : Fabrication and installation constraints for floating wind and implications on current infrastructure and design, 2017
- 10) 国土交通省: 国土交通白書, 海上技術安全研究所, 2023, 第 20 巻, 別冊 (令和 2 年度), 第 20 回研究発表会講演集, pp.13-17
- 11) 国土交通省: i-Construction 委員会, 2016, 報告書
- 12) 国土交通省: 第 12 回コンクリート生産性向上協議会, 2023, 資料 1, 2023
- 13) Alexandre Mathern et al. : Concrete Support Structures for Offshore Wind Turbines: Current Status, Challenges, and Future Trends, 2021
- 14) 国土交通省: 第 3 回 2050 年カーボンニュートラル実現のための基地港湾のあり方に関する検討会(資料 6), 2021
- 15) 福島沖での浮体式洋上風力発電システム実証研究事業総括委員会: 福島沖での浮体式洋上風力発電システム実証研究事業総括委員会最終報告書, 2022
- 16) ORE Catapult : Manufacturing concrete floating wind foundations in Scotland 2021
- 17) 国土交通省: 洋上風力発電の導入促進に向けた港湾のあり方に関する検討会(第 1 回), 2023
- 18) 中條 俊樹, 黒岩 隆夫, 國分 健太郎: 浮体式洋上風力発電の将来ビジョンと海技研の取り組み, 海上技術安全研究所, 2020, 第 20 巻, 別冊 (令和 2 年度), 第 20 回研究発表会講演集, pp.13-17
- 19) DNV : Concrete for Floating Offshore Wind (FLOW) joint industry project
- 20) 中條 俊樹: 浮体式洋上風力発電の技術動向について, 日本風力エネルギー学会誌, 2020, Vol.44, No.4, pp.583-586
- 21) 松信 隆: 浮体式風力の市場競争力と今後の展開, 日本風力エネルギー学会誌, 2020, Vol.44, No.4, pp.579-582
- 22) DNV : Comparative study of concrete and steel substructures for FOWT, 2022 : <https://windworks->

- jelsa.no/app/uploads/2022/01/Comparative-study-of-concrete-and-steel-substructure-for-FOWT_final-for-distribusion.pdf (参照 2025/12/12)
- 23) 日紫喜 剛哲, 池谷 毅, 藤井 義久 : 洋上風力発電施設とコンクリート技術, コンクリート工学, 2006, Vol.44, No.7, pp.23-29
- 24) BW Ideol : FRANCE'S FIRST OFFSHORE WIND TURBINE AND BW IDEOL'S FIRST UNIT FLOATGEN : <https://www.bw-ideol.com/en/floatgen-demonstrator> (参照 2025/12/12)
- 25) RWE DemoSATH : <https://www.rwe.com/en/our-energy/discover-renewables/floating-offshore-wind/demosath/> (参照 2025/12/12)
- 26) THE UNIVERSITY OF MAINE VoltumUS : <https://composites.umaine.edu/volturnus/> (参照 2025/12/12)
- 27) aerodyn engineering gmbh SCDnezy : <https://aerodyn-engineering.com/products/nezzy-technology/scd-nezy/> (参照 2025/12/12)
- 28) Thomas Choynet, Bruno Geschier, Geoffroy Vetrano : INITIAL COMPARISON OF CONCRETE AND STEEL HULLS IN THE CASE OF IDEOL'S SQUARE RING FLOATING SUBSTRUCTURE, WWEC, 2016 : https://www.bw-ideol.com/sites/default/files/inline-files/A-2-3_WWEC_2016_Thomas_Choynet.pdf
- 29) (参照 2025/12/12)

3.5 風車の大型化・大規模化(ウィンドファーム) -効率的な施工方法、コスト削減方法-

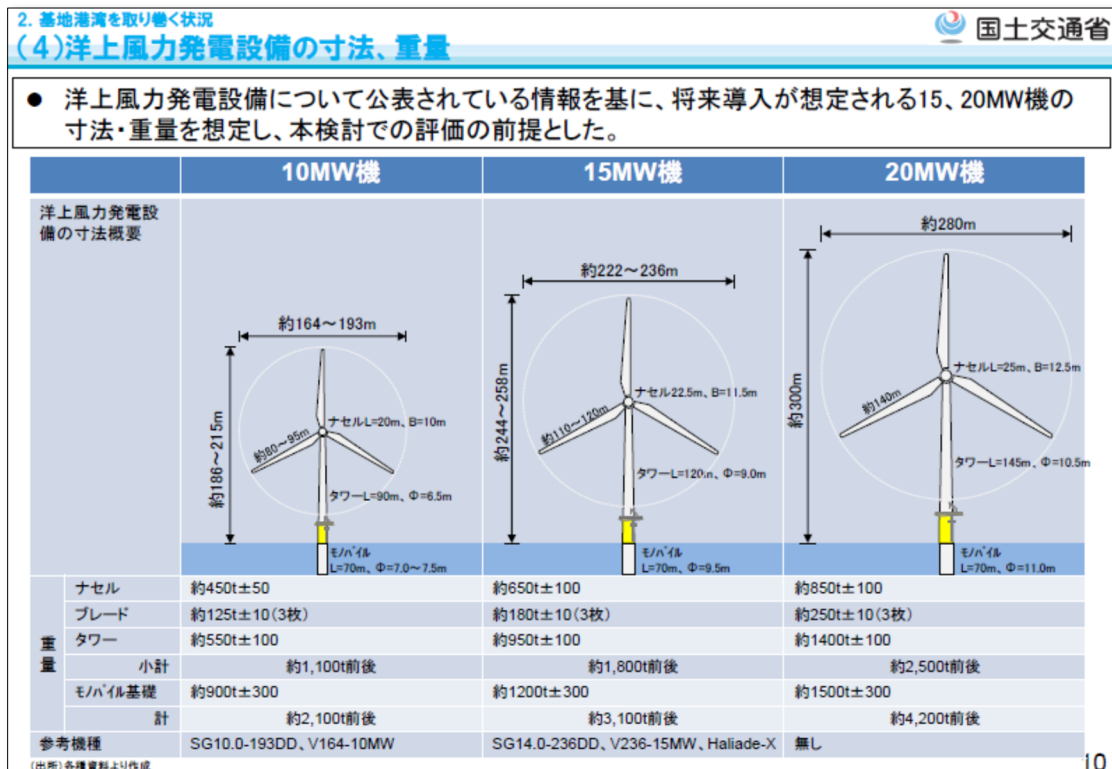
3.5.1 洋上風力発電に関する国内動向

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。ここでは、政府の導入目標を背景とした洋上風力発電の施工に関する国内動向を整理する。

3.5.1.1 風車の大型化

導入が先行する欧州などの海外では、発電効率を高める目的で風車の大型化が近年続いている。一方、国内では洋上風力向けの風車メーカーが存在せず、国内の発電事業者は海外の大型風車を採用せざるを得ない状況となっている。また、風車の大型化に伴い、それを支える基礎構造も自ずと大型化する状況となっている。

例えば、令和 5 年 12 月に発表となった、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。



出典: 国土交通省 港湾局「2050 年カーボンニュートラル実現のための基地港湾のあり方検討会 ～基地港湾の配置及び規模～」 <https://www.mlit.go.jp/kowan/content/001464703.pdf> (参照 2025/12/25)

図 3.5.1-1 洋上風力発電設備の諸元例

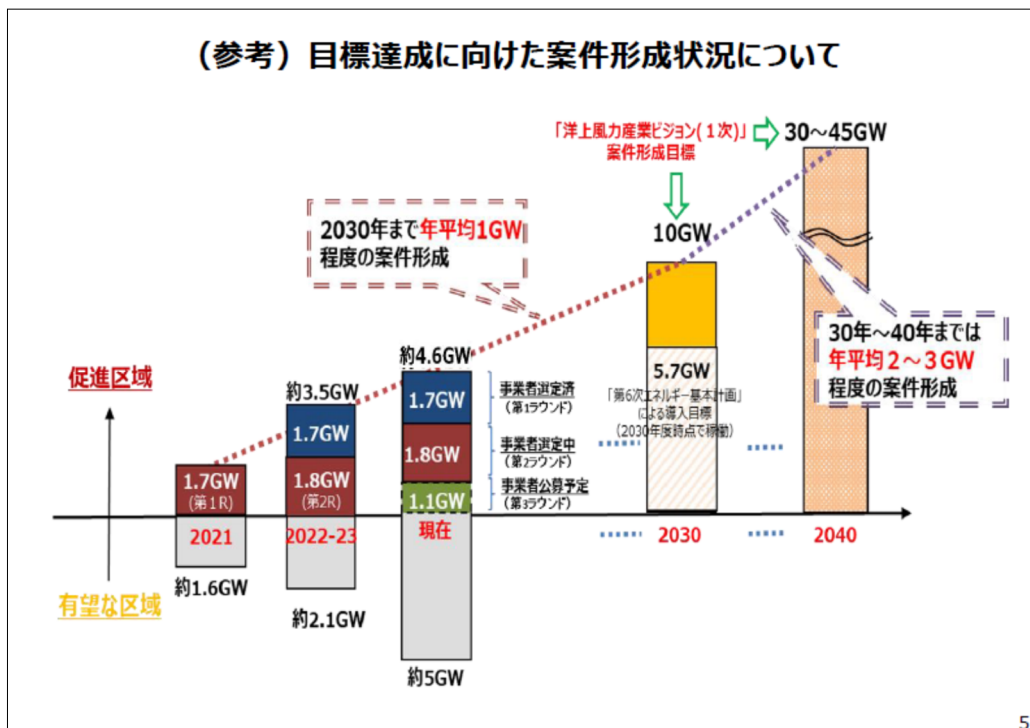
図 3.5.1-1 のように、例えば 15MW 機の場合、ハブ高さで約 150m、タワー重量で約 1,000t、モノパイル重量で約 1,200t という規模感になっている。また、水深や気象・海象といったサイト条件によっては更に大きな諸元になることも考えられる。

3.5.1.2 ウィンドファームの大規模化

図 3.5.1-2 のとおり、政府の導入目標を達成しようとする場合には、2030 年までは年平均で 1GW 程度、さらに 2030 年から 2040 年までは年平均で 2~3GW 程度の案件形成が必要となり、個別のウィンドファームとしても大規模化することに繋がっていくと考えられる。国内において大規模なウィンドファームを大量導入するためには、設置海域は港湾区域からより沖合への展開も必要になり、一般海域や EEZ（排他的経済水域）での設置が必要となってくる。

3.5.2 国内動向に伴う施工時の問題

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。ここでは、前述の国内動向に伴う建設費増大に繋がる具体的な問題点を整理する。



出典: 資源エネルギー庁「洋上風力発電に関する国内外の動向等について」
https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/green_innovation/green_power/pdf/008_04_00.pdf (参照 2025/12/25)

図 3.5.1-2 目標達成に向けた案件形成状況について

(1) 風車大型化の問題

・作業船の施工能力

図 3.5.1-1 に示したとおり、風車や基礎構造の諸元は大型化によって、揚程や吊り能力といった施工時のクレーン作業の制限（揚程、吊り能力）が生じる。また SEP 船であれば施工水深の制限など、既存の作業船では施工上の問題が生じる場合がある。

・基地港湾の仕様

洋上風力発電の導入が先行する欧州では、大規模な部材を効率良く施工可能な基地港湾が多く整備されている。これらの基地港湾は、広大な面積の確保、大型重機の稼働やタワーの仮組立などを想定した地耐力強化、大型船舶の接岸を想定した水深の確保、場合によっては岸壁前面での SEP 船のジャッキアップを想定した海底地盤改良など、洋上風力の施工に適した機能を有している。

国内においても、既存の港湾の中で、図 3.5.2-1 に示すように港湾法に基づく基地港湾（海洋再生可能エネルギー発電設備等拠点港湾）として、能代港、秋田港、鹿島港、北九州港、新潟港の計 5 港が指定され、整備が進められている。（その他に、現在公募中の案件においては、青森港や酒田港が促進区域と一体的に利用できる港湾としての指定を目指している。）



出典: 国土交通省「海洋再生可能エネルギー発電設備等拠点港湾(基地港湾)の概要」
<https://www.mlit.go.jp/kowan/content/001459708.pdf> (参照 2025/12/25)

図 3.5.2-1 基地港湾の概要

ただし、風車や基礎構造の大型化に伴い使用する船舶機械も大型化するため、例えば岸壁の延長や水深、背後地の地耐力向上などを考慮した整備が求められる。

(1) 大規模化の問題

・基地港湾の不足

ウィンドファームの大規模化により、風車や基礎構造の取扱量自体が増加するため、政府の導入目標を達成するために必要な基地港湾の数が不足することが懸念されている。また案件ごとの設置海域が近い場合には、基地港湾の確保が難しくなることも考えられる。

・沖合展開、施工時稼働率の低下

ウィンドファームの設置海域が沖合に展開していくと、基地港湾から現地までの距離が大きくなり、作業船の回航距離も増加するため工程も長くなるために建設費への影響が大きくなる。更に気象・海象もより厳しい環境となり、施工時稼働率への影響も大きくなっていく。

3.5.3 問題解決のための方法

前述の問題に対して、これまでに解決してきた方法、また将来を見据えた解決の動向を紹介する。

3.5.3.1 大型化への解決方法

・施工に適した作業船の調達

国内においても大型風車の建設に対応した SEP 船が建造され、既に稼働している。また海外では、SEP 船の吊り能力では施工できないモノパイルなどの施工のために、大型基礎施工船も稼働している。図 3.5.3-1 に洋上風力発電設備の施工に使用される SEP 船等の仕様の例を示す。

大型化した風車の施工には、設備の諸元に適した作業船の選定・調達が必須となる。

・部材重量の軽量化

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。将来、20MW 超の風車など更なる大型化も考えられるが、それに応じた作業船の新造を行った場合には、建設費の増大に繋がる懸念がある。

そこで、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。

例えば風車タワーの場合、通常は基地港湾で一体化されたタワーを SEP 船に積み込み現地にて設置する方法が一般的となっているが、吊り重量を低減するために分割されたタワー



出典:国土交通省 港湾局「2050年カーボンニュートラル実現のための基地港湾のあり方検討会 ～基地港湾の配置及び規模～」 <https://www.mlit.go.jp/kowan/content/001464703.pdf> (参照 2025/12/25)

図 3.5.3-1 SEP 船等の仕様例

を SEP に積み込み現地で組み立てるという方法も提案されている。

3.5.3.2 大規模化への解決方法

・施工効率化に向けた新技術の活用

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。また、国内ではモノパイル打設には適さない硬質な海底地盤のサイトも考えられるため、ドリリング技術の適用も重要となる。

一方、大規模化の点で将来導入が見込まれる浮体式の場合、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) が実施する「洋上風力発電低コスト施工技術開発」において、資本費の 20% 低減する施工技術を確認すべく実証研究が行われている。具体的には、図 3.5.1-5 に示す様に浮体形式、係留システム、アンカー等の最適化がテーマとなっており、早期の技術確立が期待される。

フェーズ1 - ② : 浮体式基礎製造・設置低コスト化技術開発事業

- 世界の動向：世界各国で**パーシ、セミサブ、スパー、TLP等の多様な浮体形式**を様々なメーカーが開発。各種技術間で競争してる状況。
- 日本の特性：**水深、海底地形、海象などが多様**であり、一つの浮体形式に絞り込まず、複数方式間での競争を喚起することが重要。（例：**太平洋側は大きなうねりがあり、日本海側は波傾斜が大きくなる傾向**）
- 日本の強み：**日本には造船技術の基盤あり**。その技術基盤やドッグ等のインフラを活用しながら、**浮体の大量生産技術を世界に先駆けて確立**する。

<ハイブリッド係留システム>



係留システムの一部をチェーンから合成繊維に置き換えることで、施工性が向上し、係留コストの低減が可能となる。複雑な地質の日本周辺海域の実情に適した合成繊維系からなる係留システムを開発する必要がある。

項目	技術開発の例
浮体基礎の最適化	風車の大型化および日本固有の気象・海象条件に対応した浮体基礎の最適化および材料削減によるコスト低減。
浮体の量産化	連続製造に適した浮体を設計し、浮体製造のパネル化やブロック化、分割施工、ドックに依存しない浮体の大量製造等の技術確立。
係留システムの最適化	共有アンカー、衝撃荷重、マリングロス等を考慮した係留システムの最適化、大水深又は浅海域における係留システムの低コスト化技術の提案、並びに漁業協調に貢献する海中占有面積の小さいTLP係留システムの開発。
ハイブリッド係留システム	軽量化可能な合成繊維係留索の特性を生かし、合成繊維係留索と鋼製係留索からなるハイブリッド係留システムの設計・製造技術を開発し、係留システムの低コスト化。
低コスト施工技術の開発	浮体製作場所に対応した浮体基礎の浜出し・曳航方法、クレーン付き台船やジャッキアップ型作業構台を活用した大型風車の据え付け方法、ハイブリッド係留システムおよび共用アンカーの施工技術の開発による低コスト化。

22

出典：資源エネルギー庁「「洋上風力発電の低コスト化」プロジェクトの研究開発・社会実装計画(案)の概要」
https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/green_innovation/green_power/pdf/001_04_00.pdf
 (参照 2025/12/25)

図 3.5.3-2 浮体式の低コスト化プロジェクトの概要

・効率的な工程計画の立案

効率的な工程計画の立案は、建設費低減のための重要な要素となる。例えば、最適な施工サイクルのための基地港湾の利用方法、精度の高い気象・海象予測に基づく適切な施工時期の選定、風車や基礎構造などの部材の搬入、保管、搬出といった基地港湾での作業の効率化は必須となる。

