見　　　　　　　解

活動的縁辺域における持続可能な洋上風力発電開発に向けた海底地質リスク評価予測と対策に関するガイドライン

令和８年（２０２６年）９月１８日

日　本　学　術　会　議

総合工学委員会

エネルギーと科学技術に関する分科会

この見解は、日本学術会議総合工学委員会エネルギーと科学技術に関する分科会持続可能な開発目標達成のための洋上風力発電開発検討小委員会の審議結果を踏まえ、総合工学委員会エネルギーと科学技術に関する分科会において取りまとめ公表するものである。

日本学術会議総合工学委員会
エネルギーと科学技術に関する分科会

委員長	高田　保之	（第三部会員）	九州大学カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所特命教授／名誉教授／エディンバラ大学名誉教授
副委員長	岩城智香子	（連携会員）	株式会社東芝総合研究所首席技監／東京科学大学特任教授
幹事	齋藤　公児	（連携会員）	一般財団法人金属系材料開発研究センター特別研究員
	下田　吉之	（第三部会員）	大阪大学大学院工学研究科教授
	朝倉　薫	（連携会員）	日本電信電話株式会社執行役員
	伊藤　公孝	（連携会員）	中部大学客員教授・卓越教授／大学共同利用機関法人自然科学研究機構核融合科学研究所フェロー・名誉教授
	大久保泰邦	（連携会員）	地熱技術開発株式会社探査部研究主幹
	大野　恵美	（連携会員）	株式会社ＩＨＩ技術理事・技術戦略室
	兒玉　了祐	（連携会員）	大阪大学レーザー科学研究所長
	鈴置　保雄	（連携会員）	愛知工業大学工学部電気学科教授／名古屋大学名誉教授
	武田秀太郎	（連携会員）	慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科准教授
	藤田　　修	（連携会員）	北海道大学教育イノベーション機構特任教授
	宮崎久美子	（連携会員）	東京工業大学（現 東京科学大学）名誉教授
	藤岡　惠子	（連携会員（特任））	株式会社サーマルサイエンス代表取締役

日本学術会議総合工学委員会
エネルギーと科学技術に関する分科会
持続可能な開発目標達成のための洋上風力発電開発検討小委員会

委員長	大久保泰邦	（連携会員）	地熱技術開発株式会社探査部研究主幹
副委員長	松島　　潤		東京大学大学院新領域創成科学研究科環境システム学専攻教授
幹事	川村喜一郎		山口大学大学院創成科学研究科教授
幹事	佐藤　智之		国立研究開発法人産業技術総合研究所地質調査総合センター地質情報研究部門地球変動史研究グループ主任研究員

高田　保之	（第三部会員）	九州大学カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所特命教授／名誉教授／エディンバラ大学名誉教授
岩城智香子	（連携会員）	株式会社東芝総合研究所首席技監／東京科学大学特任教授
岩下　智也		一般財団法人日本海事協会認証本部再生可能エネルギー部部長
岡田　和也		独立行政法人エネルギー・金属鉱物資源機構再生可能エネルギー事業本部洋上風力事業部主席研究員
木戸ゆかり		国立研究開発法人海洋研究開発機構企画部門事業推進部海洋 STEAM 推進課
小澤　岳史		株式会社地球科学総合研究所営業部部長付
佐々　真志		国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所港湾空港技術研究所地盤研究領域動土質研究グループ長
白枝　哲次		一般社団法人日本風力発電協会理事／清水建設株式会社エンジニアリング事業本部副本部長兼洋上風力プロジェクト推進室長
竹内　彩乃		東邦大学理学部生命圏環境科学科准教授
野村　英雄		基礎地盤コンサルタンツ株式会社代表取締役社長
横田　　弘		一般財団法人沿岸技術研究センター参与

本見解作成にあたり、以下の職員が事務及び調査を担当した。

事務	新田　浩史	参事官（審議第二担当）
	渡邉英一郎	参事官（審議第二担当）（令和８年７月から）
	角田美知子	参事官（審議第二担当）付参事官補佐
	冨岡千香子	参事官（審議第二担当）付審議専門職付
調査	辻　　政俊	上席学術調査員

要　　　　　旨

１　作成の背景

洋上風力発電は欧州を中心に世界で開発が進められている。世界全体の導入量は、2011年に3.8GWであったが、2024年には83.2GWに達した。一方、全ての再生可能エネルギーの2025-2030年の新規導入量は、世界全体で4600GWと見込まれている。この中で、洋上風力発電の導入目標を掲げている欧米を中心とした世界22か国（欧州16、アジア５、北米１）の2030年までの導入目標値は、洋上風力発電の設備容量最大の中国（2032年までの累積導入量169.5GW）を除き、263GWとなっており、世界的に導入が拡大している。

日本においても洋上風力発電は、海に囲まれた立地とあいまって大きな期待がかけられ、洋上風力の導入拡大を目的とした「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」の施行や、カーボンニュートラルを目指す政府宣言などの後押しを受け、政府主導のセントラル方式調査が開始され、その開発はますます活発になっている。また将来的にはサプライチェーンの形成等を通じて国際競争力を高め、アジアへの展開とともに、排他的経済水域（EEZ）まで設置領域を拡大しようとしている。

本見解は、2023年９月22日に発出した第25期見解「活動的縁辺域における持続可能な洋上風力発電開発に向けてー海底地質リスク評価の重要性ー」を踏まえたものであり、“海底地質リスク”の根幹を成す重要な点・事象・性質・特性に関する現状及び問題点について改めて述べるとともに、これらを踏まえた本見解の内容を以下に記している。

２　現状及び問題点

洋上風力事業の官民推進が謳われる一方で、開発には日本周辺海域を含む活動的縁辺域固有のリスクが存在する。海底地形の様相は、欧州のような大陸縁である非活動的縁辺域と、日本などの島弧・陸弧といった活動的縁辺域とで大きく異なる。

欧州において洋上風力が進んでいる場所は主に北海の水深200m以浅の地域で、英国周辺から400 km以上離れたノルウェーまで広がっている。その面積は約75万km^2である。英国の場合、開発対象海域は海岸線から200km沖まで広がる。これらの海域は、遠浅で波浪が比較的穏やかで、海底地盤の変動は少ない。洋上の構造物に対する高潮、高波の影響が課題となるが、海底地盤の変動については考慮の必要性はほとんどない。

一方、日本周辺の海域で洋上風力発電開発の主対象となる水深200m以浅の地域は、ほとんどが海岸線から50km以内の海岸沿いである。この海域では、気象海象条件が厳しく、高潮、高波に加え、地震・津波、台風の外力が強く、海岸に近い狭小な浅海底への影響が大きい。そのため、海底域で地質・地盤災害が生じる可能性が高い。このような海底地質リスクは、地震・高波による液状化や海底地すべりなど多岐にわたり、台風時の暴風波浪による液状化は、洗掘（構造物周りの土砂の流出）とも密接に関わっていることが分かっている。

地震、津波、台風は欧州に少ない自然現象であり、波浪などの外力が構造物へ直接及ぼす影響はリスクとして検討が進められている。しかし、外力と海底地盤と構造物の全体系、

特に、地盤及び基礎との相互作用については十分検討が進んでいない。地盤は構造物を支える土台なので、地盤が不安定になると洋上風力発電施設自体が運用できなくなるため、海底域の地質・地盤災害としての海底ジオハザードは現在見過ごされている緊急かつ重大なリスクである。

このため、日本においては風車の構造基礎や電力ケーブル設置に対する海底地質リスクを適切に把握し、評価、管理することが必要となる。洋上風力発電事業におけるリスクは欧州においてはガイドラインなどによりまとめられており、波浪が構造物に与える影響評価などが反映されているが、活動的縁辺域固有の地質・地盤災害が構造物に与える影響評価に適応できるまでには至っていない。

上述のような海底ジオハザードリスクの評価予測には、地質・地盤情報が必要不可欠である。第 25 期においては、日本の海岸線付近には活動的縁辺域固有の地質・地盤災害が生じるリスクの認知の必要性、海底地質リスクの体系的ガイドライン整備の必要性、既存の海底地質データの利活用、及び人材育成と産学官連携の必要性を示した。これを踏まえ、本見解を当該ガイドラインとしてまとめた。

３　見解の内容

本見解は、洋上風力発電の今後の持続可能な開発・運用を安全・安心に実現するための予防保全の取り組みとして、将来の地質・地盤災害(ジオハザード)のリスクを軽減するための対策とその考え方を示す。すなわち、活動的縁辺域における海底地質リスク評価のための地質・地盤調査（２章)、海底地質リスクの評価予測（３章)、並びに海底地質リスクに対する予防保全・対策（４章）について記す。活動的縁辺域における海底地質リスク軽減のガイドラインは世界に先駆けたものとなり、日本は主導的な立場を担う。

(1)　海底地質リスク評価のための地質・地盤調査

我が国で現在行われている基本調査（セントラル調査）と詳細調査を分けて述べている。基本調査においてはその目的と仕様について、詳細調査についてはその実施手順とジオハザードに対応する調査の方法、及びジオハザードを検知した事例について記している。

(2)　海底地質リスクの評価予測

地震大国かつ気象海象条件も厳しい活動的縁辺域に位置する日本の沿岸域において、洋上風力発電の持続可能な開発を実現するために必要となる海底地質リスクの評価予測について述べている。とりわけ、地球規模の気候変動により世界の波浪条件は激甚化傾向にあり、大規模で継続時間の長い地震動や連続地震の顕在化を含む、着床式及び浮体式洋上風力発電施設に対する地震・津波・高波による沿岸・海底域のジオハザードリスク、すなわち、地震による液状化・海底地すべり、高波による液状化・海底地すべり、並びに、津波・高波－地盤－構造物相互作用の評価予測法について記している。

(3)　海底地質リスクに対する予防保全・対策

上記評価予測を踏まえた予防保全対策の種類と考え方、並びに、施設の計画段階での風車配置対策から配置後の施設の設計・施工段階での予防保全・対策について述べている。

特に、着床式洋上風力発電施設については、洋上風力発電施設の安定化設計・対策として高波による液状化－洗掘対策について示すとともに、海底地すべりの影響・インパクト評価対策の考え方について記している。浮体式洋上風力発電施設については、水深100m程度までは地震・高波による液状化、当該水深以深では地震による液状化を対象として、海底地盤の液状化・流動の影響を受けにくいアンカー構造・対策及びケーブル敷設・対策について、各アンカー種類・係留方式並びに液状化時のアンカー挙動及びケーブル挙動を踏まえた海底ジオハザードリスクに対する予防保全・対策のあり方について記している。

本ガイドラインを通じた基本・詳細調査と海底地質リスクの評価予測結果に基づき必要な予防保全対策を行うことによって、海底地質リスクを適切に考慮した安全性の高い持続可能な事業計画を立てることができ、追加調査や事故による工程の遅れや売電計画の遅れのないスムーズな開発を行うことができる。今後は、多岐にわたる調査データを共有・活用し得るデータベースの構築・整備とともに、オープンデータを軸にした産学官連携による循環的発展が重要になる。

目　次

１　はじめに 1
２　海底地質リスク評価のための地質・地盤調査 3
⑴　基本調査（セントラル方式調査） 3
①　概要 3
②　ジオハザードへの対応 4
⑵　詳細調査 5
①　詳細調査の手順 5
②　詳細調査の手法 6
３　海底地質リスクの評価予測 9
⑴　地震による液状化・海底地すべり 9
⑵　高波による液状化・海底地すべり 9
⑶　津波・高波－地盤－構造物相互作用 11
４　海底地質リスクに対する予防保全・対策 13
⑴　風車配置対策 13
⑵　着床式の予防保全・対策 13
①　高波による液状化－洗掘対策 13
②　海底地すべりの影響・インパクト評価対策 15
⑶　浮体式の予防保全・対策 15
①　海底地盤の液状化・流動の影響を受けにくいアンカー構造・対策 15
②　海底地盤の液状化・流動の影響を受けにくいケーブル敷設・対策 16
５　まとめ 18
＜用語の説明＞ 20
＜参考文献＞ 24
＜参考資料＞審議経過 29
＜付録-1＞　セントラル方式調査の全体概要 30
⑴　セントラル方式調査の導入経緯 30
⑵　セントラル方式調査の構成・枠組み 31
⑶　案件形成におけるセントラル方式調査の位置付け 32
⑷　補足 33
＜付録-2＞　公開シンポジウム 34

１　はじめに

洋上風力発電は欧州を中心に世界で開発が進められている[1-1]。世界全体の導入量は、2011 年に 3.8GW であったが、2024 年には 83.2GW に達した。一方、全ての再生可能エネルギーの 2025-2030 年の新規導入量は、世界全体で 4600GW と見込まれている [1-2]。この中で、洋上風力発電の導入目標を掲げている欧米を中心とした世界 22 か国（欧州 16、アジア５、北米１）の 2030 年までの導入目標値は、洋上風力発電の設備容量最大の中国（2032 年までの累積導入量 169.5GW）を除き、263GW となっており、世界的に導入が拡大している [1-3]。

日本においても洋上風力発電は、①四方を海に囲まれた立地により大量導入が可能、②先行する欧州では風車の大型化等に伴いコスト低減が進展している、③洋上風力発電設備は構成機器・部品点数が多く事業規模（建設費）は１発電所（500MW 程度）あたり数千億円であり国内での経済波及効果が期待される、といった理由から再生可能エネルギーの主力電源化に向けた切り札と位置付けられている。また将来的にはサプライチェーンの形成等を通じて国際競争力を高め、気象・海象が似ており市場拡大が見込まれるアジアへの展開も目指すとされている [1-4]。さらに今後世界的に拡大が見込まれる浮体式は商用化を加速させるとともに、排他的経済水域（EEZ）まで設置領域を拡大しようとしている。

このように日本において洋上風力発電は大きな期待がかけられ、洋上風力発電の導入拡大を目的とし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（再エネ海域利用法）の施行や、カーボンニュートラルを目指す政府宣言などの後押しを受け、２章で述べるセントラル方式調査 1) が開始され、その開発はますます活発になっている[1-5]。

しかし一方で、開発には活動的縁辺域 2) 固有の課題が存在する。海底地形は、欧州のような大陸縁である非活動的縁辺域 3) と、日本などの島弧・陸弧といった地震・火山活動が活発な活動的縁辺域とで様相が大きく異なる。

欧州において洋上風力発電が進んでいる場所は主に北海の水深 200m 以浅の海域で、英国周辺から 400 km 以上離れたノルウェーまで広がっている。その面積は約 75 万 km^2 である。英国の場合、開発対象海域は海岸線から 200km 沖まで広がる。これらの海域は、遠浅で波浪が比較的穏やかで、海底地盤の変動は少ない。洋上の構造物に対する高潮、高波の影響が課題となるが、海底地盤の変動については考慮の必要性はほとんどない。

一方、日本周辺で洋上風力発電開発の主対象となる水深 200m 以浅の海域は、ほとんどが海岸線から 50km 以内の海岸沿いである。この海域では、気象海象条件が厳しく、高潮、高波に加え、地震・津波、台風の外力が強く、海岸に近い狭小な浅海底への影響が大きい。そのため､海底域で地質･地盤災害が生じる可能性が高い｡このような海底地質リスク 4) は、地震・高波による液状化や海底地すべりなど多岐にわたり、台風時の暴風波浪による液状化は、洗掘とも密接に関わっていることが分かっている。

地震、津波、台風は欧州に少ない自然現象であり、波浪などの外力が構造物へ直接及ぼす影響はリスクとして検討が進められている[1-6]。しかし、外力と海底地盤と構造物の全体系、特に、地盤及び基礎 5) との相互作用については十分検討が進んでいない。地盤は構

*肩括弧番号は＜用語の説明＞への参照

造物を支える土台なので、地盤が不安定になると洋上風力発電施設自体が運用できなくなるため、海底域の地質・地盤災害としての海底ジオハザード[6]は現在見過ごされている緊急かつ重大なリスクである。

このため、日本においては風車の基礎構造や電力ケーブル設置に対する海底地質リスクを適切に把握し、評価、管理することが必要となる。また、我が国の自然条件に鑑み、浮体式は、着床式に比べて、長大な送電距離など解決すべき課題が多く、着床式より案件形成に時間を要すると考えられる。洋上風力発電事業におけるリスクは欧州においてはガイドラインなどによりまとめられており、波浪が構造物に与える影響評価などが反映されているが、活動的縁辺域固有の地質・地盤災害が構造物に与える影響評価に適応できるまでには至っていない。活動的縁辺域における海底地質リスク軽減のガイドラインは世界に先駆けたものとなり、日本は主導的な立場を担うことになる。

上述のような海底ジオハザードリスク[4]の評価予測には、地質・地盤情報が必要不可欠であるが、このことについて余り認識されずに開発が進められている。そこで海底ジオハザードリスクへの認識を促すための議論を第 25 期より開始した。第 25 期においては、日本の海岸線付近には活動的縁辺域固有の地質・地盤災害が生じるリスク（図 1-1）の認知の必要性、海底地質リスクの体系的ガイドライン整備の必要性、既存の海底地質データの利活用、及び人材育成と産学官連携の必要性を述べる見解［1-7］を公表した。これを踏まえ、本見解では、海底地質リスク評価予測と対策に関するガイドラインを示す。具体的には、活動的縁辺域における海底地質リスク評価のための地質・地盤調査（２章)、海底地質リスクの評価予測（３章)、並びに海底地質リスクに対する予防保全・対策（４章）について記す。したがって、本見解は、洋上風力発電の今後の持続可能な開発・運用を安全・安心に実現するための予防保全の取り組み［1-8］として、将来の地質・地盤災害(ジオハザード)のリスクを軽減するための対策とその考え方を示すものである。

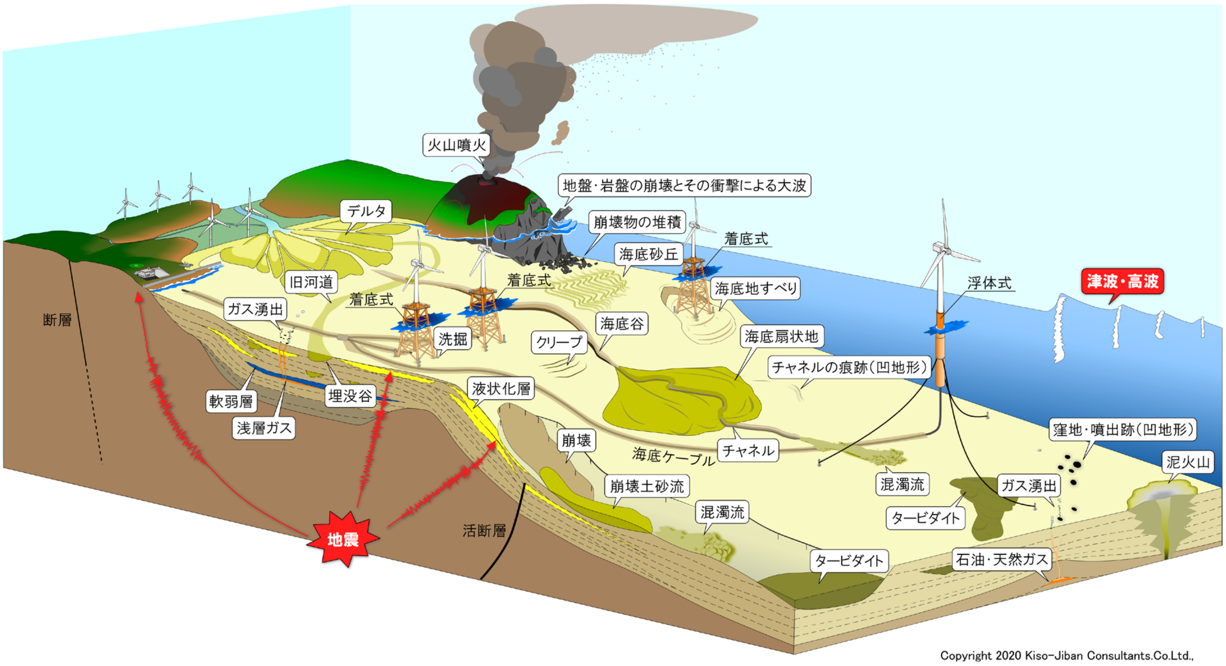


図 1-1　洋上風力発電施設と海底ジオハザードの関係

（出典）第 25 期見解［1-7］

2　海底地質リスク評価のための地質・地盤調査

本章では、先ず、我が国における洋上風力発電設備の基本設計に必要な調査として位置付けられているセントラル方式調査について述べた後、当該基本調査を踏まえた海底地質リスク評価のための詳細調査について記す。

(1)　基本調査（セントラル方式調査）

①　概要

独立行政法人エネルギー・金属鉱物資源機構（以下 JOGMEC）が実施する基本調査（セントラル方式調査）は、風況調査、海底地盤調査、気象海象調査から成るが、本見解の主たるテーマであるジオハザードに最も関連が深い海底地盤調査について概要を述べる。海底地盤調査では、海底地形調査、海底面状況調査、反射法弾性波探査、ボーリング調査などを行い、着床式または浮体式風力発電の基礎設計に必要となる、海底地形、底質、岩盤分布、土質、地盤物性、地震リスクなどを評価するための基本情報を収集する。基本仕様[2-1]の要点を表 2-1 に示す。

表 2-1　基本調査（セントラル方式調査）の仕様

海底地形・海底面状況調査	着床式	目的:	風車の基礎形式や発電設備の配置検討を行うために、海底の地質構造や地盤状況を把握。
		要求水準:	マルチビームとサイドスキャンソナーの併用による調査を基本とし、水深 1mピッチのコンター線で等深線図を作成。音響画像図、底質分布図、海底障害物分布図を作成し、底質の分布状況や魚礁・沈船等の有無を把握。対象海域全体を面的に網羅。
		考慮事項:	調査範囲は水深 10m以深の範囲。代表箇所を選定して、底質土のサンプリングを実施。
	浮体式	目的:	係留方式やアンカー形式を検討するために、海底面の標高、海底地形、海底面の状況を把握。
		要求水準:	着床式と同様。
		考慮事項:	調査海域全域において要求水準に記した精度となるように配慮。基本的には高解像度のデータを取得できる 500m 以浅を対象とするが、500m 以深についてはデータ提供先となる事業者のニーズを把握した上で調査仕様を決定。
反射法弾性波探査	着床式	目的:	風車の基礎形式や発電設備の配置検討を行うために、海底の地質構造や地盤状況を把握。
		要求水準:	海底地質断面図、解釈断面図、深度構造図等により海底下の地質構造・地盤状況や各層の分布状況を把握。測線間隔1～3km 程度の格子状の測線配置としつつ、地質の複雑さを考慮した上で測線間隔を決定。
		考慮事項:	調査範囲は水深 10m以深の範囲。工学的基盤が把握できるように音源を選択。解釈精度の向上並びにジオハザード抽出の観点から、ストリーマケーブル長を十分にとる等の工夫による高精度化も考慮。
	浮体式	目的:	係留方式やアンカー形式を検討するために、海底下の地質構造や地盤状況を把握。
		要求水準:	着床式と同様の水準のデータに加え、概ね海底下 100m までの層序を把握でき、区域の地質構造の把握及びジオハザード（海底地すべり、断層、ガス層等）の分析に資するデータ取得を要する。
		考慮事項:	ジオハザードの観点等から海底下 100m 以深のデータも必要となることがあるが、産業技術総合研究所等が実施した反射法弾性波探査データなどをコンパイルすることも考慮。
ボーリング等調査	着床式	目的:	風車基礎の基本設計や洋上風力発電設備の配置検討を行うために、ボーリング、原位置試験、試料のサンプリング及び室内試験を実施し、調査海域の地層構成や地盤の工学的特性を把握。
		要求水準:	標準貫入試験（以下SPT）、孔内載荷試験、乱れの少ない試料採取、室内試験、PS 検層、密度検層、キャリパー検層を実施。また、CPTも併せて実施し、SPT データとの相関性の評価が可能となるようにデータを取得。地震時の検討等に必要となる各層の S 波速度、P 波速度、工学的基盤（5m以上連続してVs≧400m/s を確認）を把握。海底微動アレイ探査は、各層のS 波速度と工学的基盤を把握。
		考慮事項:	ボーリングの実施地点は、対象海域に分布する地質及び地盤物性値が把握できるよう配置することが望ましい。
	浮体式	目的:	係留方式やアンカー形式を検討するために、調査対象海域の地盤の構成や構造、地盤物性を把握。
		要求水準:	コアリングとともに CPT も併せて実施する。コアリングは、乱れの少ないコア試料を取得することにより室内試験に供することで、各層の物理特性、力学特性を把握。
		考慮事項:	浮体式の場合、係留方式やアンカー形式によって必要とされる探査深度等の水準が大きく異なることに加え、浮体形式が未確定であることを前提に調査計画を検討することが必要。

（出典）[2-1]より抜粋

実際の運用に当たっては、海底地形や地質条件が調査海域ごとに大きく異なっている事に鑑み、基本仕様だけではカバーしきれない個々の調査海域特有の要求に対応するために個別仕様で詳細を調整する。

②　ジオハザードへの対応

セントラル方式による海底地盤調査は、対象海域全域を対象として着床式または浮体式風力発電の基本設計に必要となる基礎的な情報を収集する事を目的としており、ジオハザードの検知そのものを調査の目的とはしていないが、基礎設計においては、調査で得られたデータから土質、地盤強度、地震応答特性、液状化リスクなどが評価される事を見ても本調査とジオハザードとは不可分であり、調査において何らかのジオハザードの可能性が検知されれば、情報として発電事業者に提供される。ただし、ここで留意すべき点は、調査仕様は上記の目的に沿って策定しており、検知されるジオハザードの可能性も、あくまで当該の調査仕様で検知可能なものに限られる点である。例えば、ボーリングで海底下を調査する際の掘削深度は、風車基礎を施工する深度及び工学的基盤の深度を大きく超えるものではない。したがって、例えば地下のより深部に伏在する断層などのジオハザードは検知することができない。セントラル方式による海底地盤調査の調査仕様で検知される可能性があるジオハザードとしては、マルチビームソナー[7)]により海底地形の異常として認識される海底谷、海底地すべり、シャローガス[8)]に起因する海底窪地がある。また、弾性波速度または密度が互いに異なる媒質の境界が形成された場合に反射法弾性波探査によって検知される海底下の比較的浅部に位置する断層や海底地すべり、シャローガスが挙げられる。シャローガスは、将来、噴出する可能性があるが、ガスを含む堆積物は周囲の地層と比べて密度や弾性波速度（特にＰ波速度）が低く、音響インピーダンスが大きく変化する。このため、この境界面で音波が強く反射して、高振幅反射（bright spot）や音響空白（acoustic blanking）などとして検知される場合がある（図 2-1）。

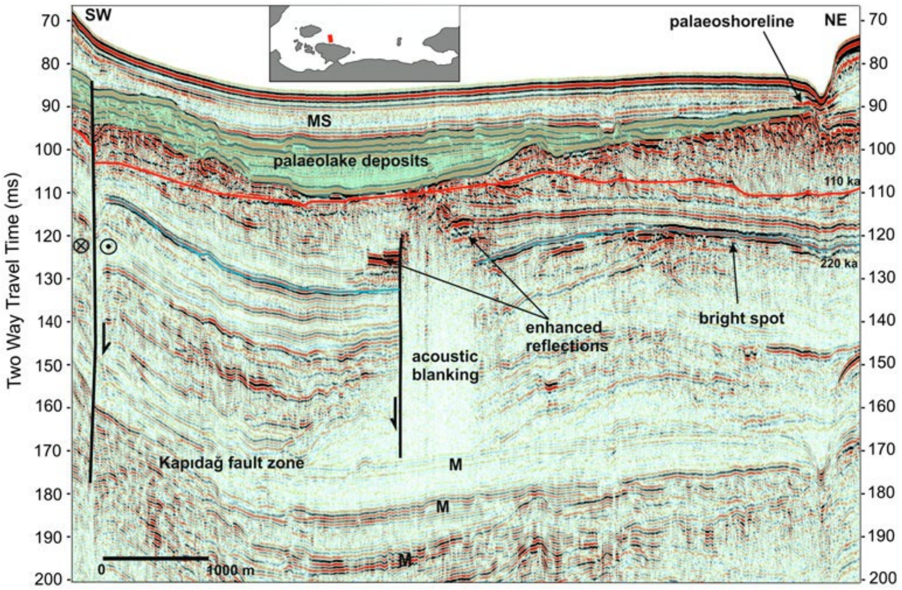


図 2-1　反射法弾性波探査で検知されたシャローガスによる異常の例

（出典）[2-2]

セントラル方式による海底地盤調査において、これらの異常が観測された場合は、情報としてデータとともに発電事業者に提供され、詳細調査及び基礎設計におけるリスク評価に供される。

(2)　詳細調査

①　詳細調査の手順

活動的縁辺域における海底地質リスク評価のための詳細調査について、本ガイドラインが推奨する実施手順の考え方を図 2-2 に示す。

① セントラル調査で実施した調査データに対して、海底地形の判読や、音波探査画像の解釈といったデータ分析を行う。なおその際には既存文献調査も併せて行い、既知の海底ジオハザードを整理しておくのが良い。
② データ分析の結果から開発地域に存在する可能性があるジオハザードを抽出する。
③ 風車レイアウトやアンカーレイアウト、ケーブルルート、基礎形式・構造を設定する。
④ 詳細調査の計画を立案する。詳細調査内容は風車やアンカー・ケーブル設計に必要な情報を得る目的の調査内容と、海底ジオハザードを特定する目的の調査内容で構成するが、この両者は重複する調査項目も多いので合理的な調査ができるよう配慮する。
⑤ 詳細調査を実施する。なお詳細調査の結果、想定外の地層の出現や設計上の問題点の判明、想定外の海底ジオハザードの出現等によって追加調査が必要となる場合がある。
⑥ 必要に応じて追加調査を計画して実施する。
⑦ 調査結果を分析して存在する海底ジオハザードの種類・位置・深さ・規模を特定する。
⑧ 特定した海底ジオハザードを踏まえ、発電設備に対する海底地質リスクの評価予測を行う。
⑨ 海底地質リスクに対する対策や予防保全措置を検討する。
⑩ 海底地質リスク対策内容によっては追加調査が必要となる場合がある。例えば風車レイアウトの変更やケーブルルートの変更等に伴って新たな風車設置位置の地質情報が必要になる場合や、新しいケーブルルート沿いの地質情報の取得が必要となる場合等である。

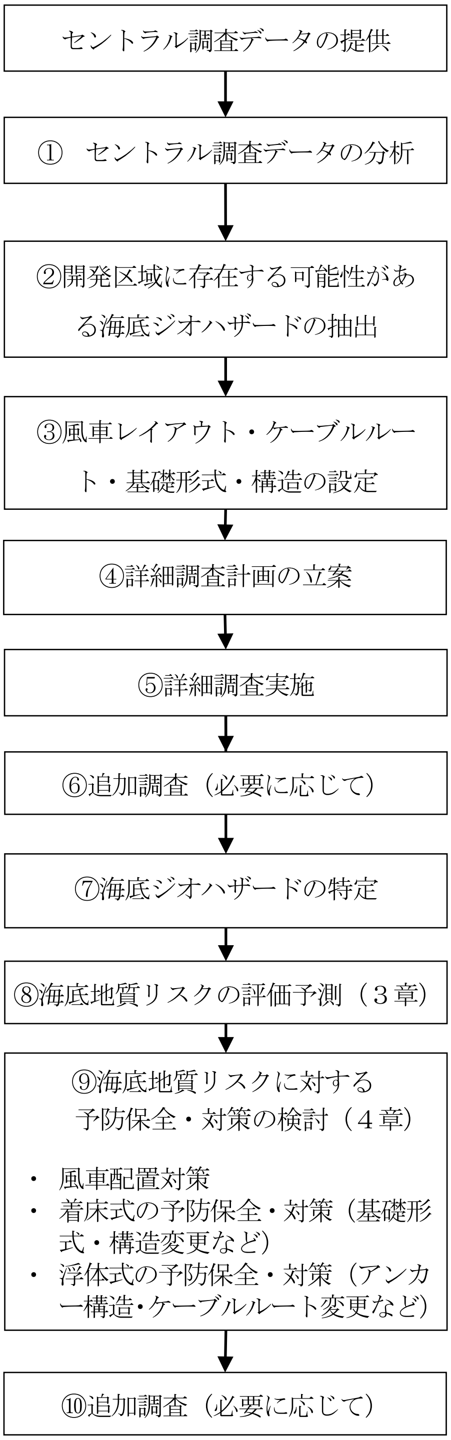


図 2-2 海底地質リスク軽減のための詳細調査の位置付けと実施手順の考え方及び各章との関係

想定されるジオハザードの種類と規模によっては、図 2-2 に示した標準的な手順以外の手法の方が良い場合もありうる。例えば、シャローガスが複雑に分布していて、風車レイアウトや配置可能な風車基数がシャローガスの分布範囲に大きく影響を受けることが考えられる場合などでは、シャローガスに関する詳細調査を先行して実施し、風車タイプ・基数・レイアウトを決定した後に、風車配置位置の地質調査やケーブルルート調査を実施する方が合理的である。このように想定されるジオハザードによって、柔軟で合理的な詳細調査の手順を検討することが重要である。

② 詳細調査の手法

詳細調査においては対象とするジオハザードに応じて表 2-2 に示すような調査手法と内容で実施すると良い。以下にこれらの調査によってジオハザードを検知した事例を示す。

海底地盤にシャローガスが存在する場合、図 2-3 に示すようにサイドスキャンソナー[9]画像において海底面での噴出跡（gas seeps）が確認されることがある。音波探査の反射画像においてもガス噴出経路がチムニーとして捉えられたり、ガス滞留層が音波散乱面として捉えられることがある。また図 2-4 に示すように海底面の画像撮影によって、ガスの噴出が確認されたり、ガスが存在する場合に発生することが多いバクテリアマット[10] が存在したりすることがある。また、ガスの存在する地層を掘削すると掘削用パイプを通ってガスが噴出してくることがある。

海底にサンドウェーブ[11] が存在する場合、図 2-5 に示すようにサイドスキャン画像やマルチビーム測深の起伏図によってとらえることができる。サンドウェーブは潮流や低気圧の影響でその大きさや位置が変化するので、将来の状況を予測するためには経年的な観測を行うことが重要である。

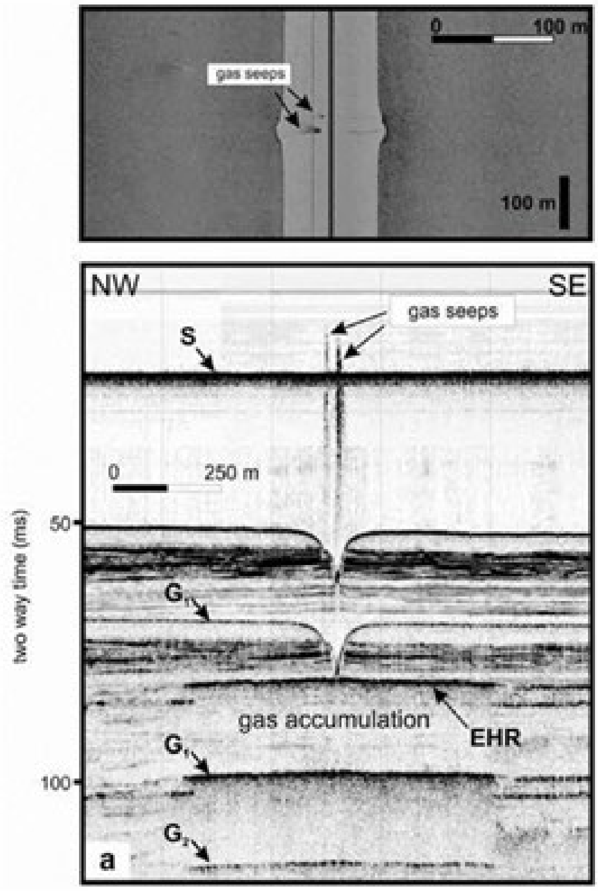
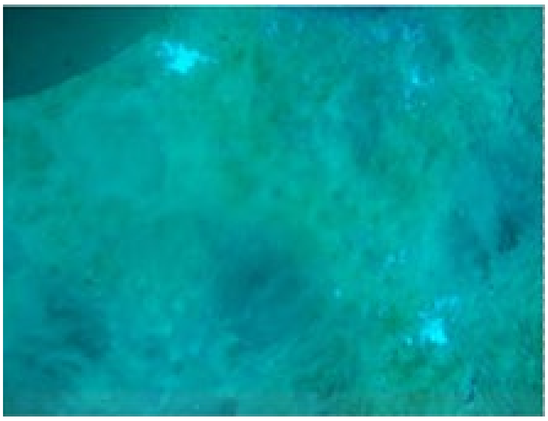


図 2-3　音波探査画像によるシャローガス判定例
（出典）[2-3]

表 2-2　ジオハザードの種類とその調査方法

ハザードの種類	洋上風力施設に与える影響	ハザードの調査方法
液状化	・風車支持構造物の倒壊、変位 ・浮体式風車におけるアンカーの沈み込み・浮き上り、把注力の低下 ・電力ケーブルの沈み込み・浮き上り ・液状化流動による流動圧の発生	ボーリング調査・CPT調査（液状化層の有無・分布と液状化の予測判定） 音波探査（ボーリング調査と突き合わせて液状化層の分布範囲を把握）
シャロ―ガス	・メタン等の可燃性ガス噴出による、爆発事故や火災 ・ガス噴出に伴う地盤の攪乱と基礎杭の支持力低下、アンカーの把駐力低下	文献調査（近傍の陸域を含む広域な地質構造からの推定） 音波探査（音波散乱層や地層形状からガス滞留深度や噴出箇所の判定） サイドスキャンソナー（ポックマークやくぼみ・穴などの噴出痕跡の確認） UAVや水中ドローン等による直接目視（海底面からの気泡噴出やバクテリアマットなどの噴出痕跡の確認） ボーリング調査・ガス調査（ガス滞留域を直接掘削してガスの有無と種類、噴出量・溶存量、成因（熱起源or生物起源を確認する）
海底地すべり	・風車支持構造物の倒壊、変位 ・浮体式におけるアンカーケーブルの破断や浮体構造の海中への引込み ・電力ケーブルの破断	文献調査（既知の海底地すべり地の確認） マルチビーム測深・サイドスキャンソナー（海底地形や海底面画像から地すべり地形を判読し、地すべり範囲を判定） ２次元・３次元音波探査（地層のズレ等から地すべり範囲を判定） ボーリング調査（地すべり面付近の地層を採取し、地層に含まれる花粉や化石等から滑動年代を判定）
活断層	・近傍で発生する地震動による風車の損傷 ・海底面の亀裂や段差・隆起の発生による風車基礎の損傷や電力ケーブルの損傷 ・海底地すべりの誘発 ・液状化の誘発	文献調査（既知活断層の確認） 音波探査（探査画像から断層位置・深さを判定） ボーリング調査（断層面付近の地層を採取して地層に含まれる花粉や化石等から直近の活動年代を判定するとともに今後の活動性を評価）
サンドウェーブ	・着床式風車基礎の洗掘による支持力の低下・タワーの変状 ・浮体式風車におけるアンカーの洗掘と把駐力の低下 ・埋設海底ケーブルの露出と、船舶による損傷リスクの増大	マルチビーム測深とサイドスキャンソナーの経年測定（海底地形の判読と海底地形の経年変化の観測） 底質採取（土質確認） 地形変化予測シミュレーション（サンドウェーブの移動や地形変化を予測）
重力流とその堆積物	・着床式風車基礎への側方土圧増加に伴う風車変状 ・浮体式風車におけるアンカーケーブルの引込み ・海底ケーブルの破断	マルチビーム測深・サイドスキャンソナー（海底地形や海底面画像から重力流によって形成されるチャネルや海底扇状地地形を判読）

海底面から噴出する気泡



海底面のバクテリアマット

掘削中に掘削用パイプを通って、
ガスが泡状に噴出して来た事例

図 2-4　シャローガス詳細調査の事例

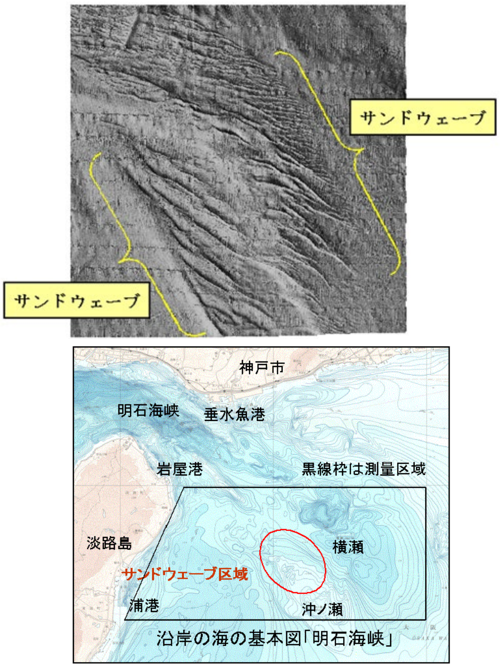


図 2-5　大阪湾におけるサンドウェーブのマルチビーム音響測深機による起伏図

（出典）[2-4]

３　海底地質リスクの評価予測

本章では、活動的縁辺域における代表的な海底地質リスクとして、地震、津波、高波による地質リスクを取り上げ、その評価予測法について記す。なお、本章の内容は、第 25 期見解［1-7］における２章「海底地質リスクとその評価手法」の内容を更新したものである。

(1)　地震による液状化・海底地すべり

地震・波浪による海底地すべりの発生から、高濃度重力流 12) 並びに再堆積に至る一連の過程は、流動中の相変化を伴う水と土の２相系の物理によって支配される[3-1, 3-2, 3-3]（第 25 期見解：図 2-2）。

このような海底液状化土砂流動のダイナミクスは、洋上風力発電施設などの沿岸・海洋構造物並びに、津波発生に甚大な影響をもたらす[3-4, 3-5, 3-6, 3-7, 3-8]。とりわけ、地震、液状化、地すべり、津波の連鎖・複合災害の理解と軽減の重要性が国際的に高まっており[3-9, 3-10, 3-11, 3-12]、その近年の代表例として、第 25 期見解の図 2-3 に掲げた 2018 年インドネシア・スラウェシ地震津波災害の事例は、広範囲の液状化による沿岸国土の崩落と流動が、湾内の複数の地点で同時多発的に津波をもたらしたものである。実際、同図中の複数の津波発生場所と規模の分布及び方位が、液状化によって沿岸の土地が崩落・流動した場所・規模の分布・方位と一致している。地震や厳しい波浪作用によって生じる海底液状化土砂流動は、国内外においてケーブル・パイプライン等の破断・損傷を引き起こしており[3-11, 3-12]、海底液状化流動 13) が、各種の洋上風力発電基礎に及ぼすインパクト・影響評価の重要性に関する概念図を第 25 期見解の図 2-4 に掲げている。同図は、各種の洋上風力発電施設への海底液状化流動の衝突とこれによる施設の揺動・不安定化を通じて、海底土砂流動が、異なる水深域の着床式・浮体式の多様な洋上風力発電施設の安定性に重大な影響・インパクトをもたらし得ることを表している。海底液状化土砂流動のダイナミクスの一連の過程を評価予測可能な解析フレームワークが開発されており[3-1, 3-2, 3-13]、同リスク評価予測への適用・展開が期待される。この際、大規模な海底土砂流動を引き起こす地盤液状化の評価予測においては、現地地盤強度の情報が必要であり、２章で述べた基本・詳細調査の結果を用いることができる。これまで世界各国で用いられている標準貫入試験 14) による地盤 N 値（地盤の強度を表す数値）、コーン貫入抵抗値 15) 並びにせん断波速度値 16) などを採用した様々なタイプの液状化予測判定チャート 17) に活用できるよう一般化し、かつ、地震動波形の不規則性や継続時間等の多様な地震外力特性を現実的に考慮した液状化予測判定法が開発・実用化[3-14, 3-15]されており、大規模で継続時間の長い地震動や連続地震を含む、洋上風力発電施設の液状化リスク評価予測に適用することができる。

(2)　高波による液状化・海底地すべり

高波の来襲によって、防波堤法尻部（マウンド海側下部、第 25 期見解：図 2-5）が液状化すると地盤の支持力が失われるとともに、土砂移動及び洗掘が助長される[3-16]。その結果、ケーソン 18) は沈下する。また、離岸堤 19) の場合でも、波による液状化、洗

掘及び土粒子輸送に伴ってブロックが沈下する(第 25 期見解：図 2-5)。このような防波堤・離岸堤の設置水深は 60m 以浅であり、着床式洋上風力発電の設置海域と一致する。従って、高波による海底地盤の液状化は、着床式洋上風力発電の対象水深域である水深 60m までの沿岸海洋構造物の安定性に大きく影響する。さらに、地球規模の気候変動により世界の波浪条件は激甚化傾向にあり[3-17,3-18]、気候変動による厳しい波浪作用下では、浮体式洋上風力発電の対象水深域である水深 100m 程度まで波による液状化リスクがあることが明らかとなっている[3-19]。

波による液状化は、構造物周りやその前面に形成される波浪様式によって、液状化抵抗が顕著に異なることが知られており[3-20,3-21]、国内外での近年の高波による液状化被災・リスク評価事例として、潜堤（堤体が水面下に没した構造物）の沈下、浅海底斜面の崩壊・流動、並びに、パイプラインの浮上損傷が挙げられる[3-22,3-23,3-24,3-25]。

近年では、水深 47m の海域において有義波高 6.5m の高波によってシルト質（砂と粘土の中間的な大きさの粒子を主体とする）の海底傾斜地盤が不安定化し、液状化重力流[20)]へ遷移した結果、約 12 万 m^3 の崩壊土砂が幅 250m、延長 1500m にわたり流動した事例[3-24]が挙げられる(第 25 期見解：図 2-6)。

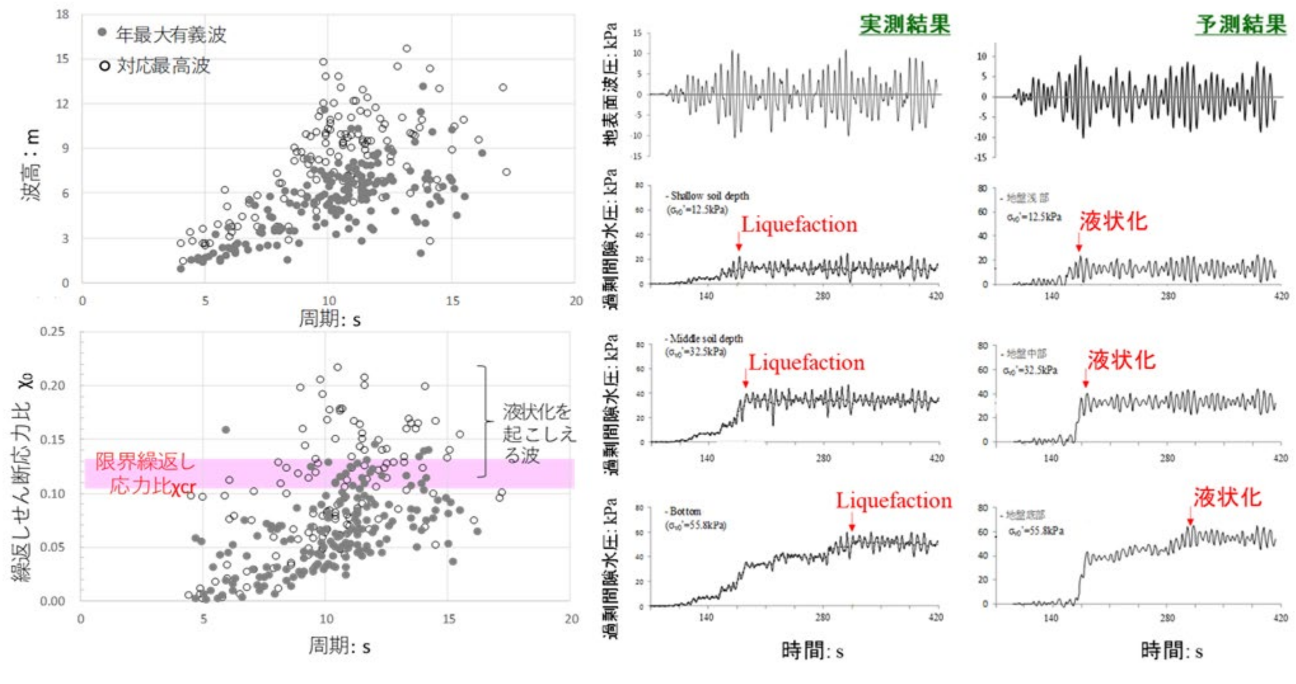


図 3-1　日本沿岸の波による液状化リスクの評価予測（左図）波高と周期及び液状化発生限界の繰返しせん断応力比の関係（右図）不規則波浪による地盤内過剰間隙水圧と液状化過程の予測結果及び実測結果の比較

（出典）[3-27]より抜粋・改変［3-3］

第 25 期見解：図 2-7 再掲

年最大有義波[21),22)]や対応最高波[23)]などの波高、周期及び２章に記した地盤情報に基づいて、液状化発生限界に関わる繰返しせん断応力比[24)]を算定し、現地高波による液状化の可能性や液状化深さ・範囲を評価することができる[3-15,3-26,3-27]（図 3-1：第25期見解：図2-7再掲）。同左図は、全国沿岸の実海域で観測された沖合観測点を除く、60地点の波高（有義波・最高波）－周期－波によるポテンシャルの関係を示しており、数多くの地点で液状化が発生し得ることを表している。同右図は、暴波浪時の時系列の波浪観測データを用いて、液状化の発生と進展[3-26,3-27]を解析したものであり、現地波浪による液状化の発生及び進展過程の予測結果が、実測結果とよく対応している（図3-1：第25期見解：図2-7再掲）。

(3)　津波・高波－地盤－構造物相互作用

洋上風力発電施設の安定性及び災害リスクの評価予測においては、前述の海底土砂流動がもたらすインパクト・影響評価とともに、高波－地盤－洋上風力発電基礎相互作用の本質的理解が重要である[3-28]。すなわち、厳しい波浪作用による海底地盤の液状化によって洋上風力発電施設は大きく影響を受けて不安定化し得る。洋上風力発電の基礎形式として最も一般的なモノパイル（杭）[25)]の場合、高波作用時の地盤内の残留過剰間隙水圧[26)]の蓄積により液状化すると、パイルは揺動しはじめ、その後の液状化の進展・拡大に伴いパイルの傾斜が進み、倒壊に至る[3-29]。また、サクションバケット基礎[27)]の安定性は、バケット基礎回りの波による液状化の発生・進展と密接に関わっていることが明らかとなっており[3-30]、各種の洋上風力発電基礎の安定性を評価する上で、前述の波による液状化の評価予測は重要である。

津波－地盤－構造物相互作用においては、津波を受ける重力式構造物[28)]の沖側・陸側で生じる水位差に伴う基礎マウンド内の浸透流[29)]によって、基礎地盤は侵食され、構造物基礎は沈下する[3-31]（図3-2中央）。また、津波浸透による過剰間隙水圧とともに基礎の支持力は低下し、マウンドは流動する[3-31,3-32]（図3-2左右）。そして、津波の重力式構造物上の越流[30)]と浸透流の連成作用によって、マウンド・地盤の洗掘は助長され、構造物基礎は不安定化する[3-33]。このような津波による構造物基礎の安定性の向上には押え盛土が有効であり[3-31,3-32,3-33]、津波－地盤－構造物相互作用の安定性照査手法[3-31,3-34]を津波に対する洋上風力発電基礎の安定性評価に活用することができる。

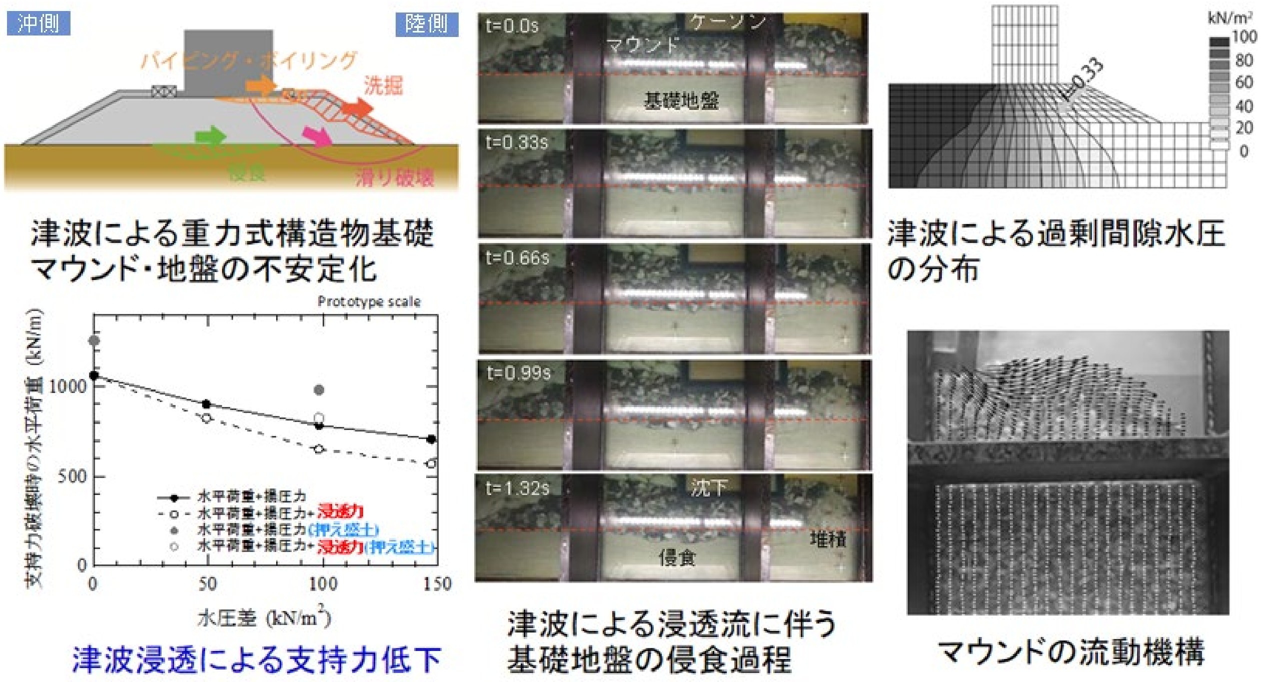


図 3-2　津波－地盤－構造物相互作用

（図中央）津波を受ける重力式構造物の沖側と陸側の水位差に伴う基礎マウンド内の浸透流による基礎地盤の侵食と構造物基礎の沈下（図左右）津波浸透による過剰間隙水圧分布、基礎の支持力低下とマウンドの流動、並びに、津波の重力式構造物上の越流と浸透流の連成作用によるマウンド・地盤の洗掘の助長と構造物基礎の不安定化、及び、津波による構造物基礎の安定性の向上における押え盛土の有効性（本文説明に基づく）

（出典）[3-31, 3-32] より抜粋・編集

４　海底地質リスクに対する予防保全・対策

海底地質リスクに対する予防保全・対策の考え方を表 4-1 に示す。同表に示すように予防保全・対策の種類は、風車配置の変更、風車の支持構造物や周辺構造物の構造変更や強化を行う方法、被害は許容しながら被害規模を小さくする方法、将来の被害を防止するためにモニタリングを行う方法に大別される。

風車配置の変更は、ジオハザードの位置と、ジオハザードが活動した際の平面的な影響範囲を避けて風車を配置するものである。適用できるジオハザードの種類が多いことが特徴であるが、風車配置の自由度が小さくなり、発電量が減少することがある。

構造の変更・強化はジオハザードの存在を許容しながら支持構造物の強化や防止工を設置して被害を防ぐまたは軽減する方法である。液状化や液状化に伴う流動、海底地すべりに伴う流動、規模の小さいシャローガスは、基礎構造の工夫や施工方法の工夫、ケーブル設計の変更によって対応が可能である。また洗掘やサンドウェーブについては、洗掘抑止工の設置やケーブル埋設深度の工夫によって影響を避けることが可能である。

被害を小さくする方法は、ジオハザードによる被害の発生は避けられないものとして、その被害の影響を小さくするものである。ジオハザードを完全に避けるようなレイアウトの工夫が難しい海底ケーブルは送電ケーブルを複線化し、ジオハザードの活動によって一つの断線が発生しても、健全なケーブルを利用して送電ルートを変えることで全面的な送電中断を避けることができる。また、ジオハザードの活動確率と被害額が算出できれば、それを基に保険を適用することも考えられる。

サンドウェーブのように経年的に変化していくハザードについては、風車設置後も海底地盤のモニタリングを行って海底地形の経年変化を把握し、将来の危険性を検討することも重要である。

以上を踏まえ、ここからは、施設の計画段階での風車配置対策、配置後の施設の設計・施工段階での着床式及び浮体式のそれぞれ特有の予防保全・対策について述べる。なお、本ガイドラインでは、施設の供用期間内において優先的に検討しておくべきハザードを主対象としている。

⑴　風車配置対策

風車配置を変更する方法は、活断層の直上やシャローガスの分布域、海底地すべりの活動範囲や重力流の流下範囲を避けて風車を配置することで、ジオハザードが活動した際の直接的な影響を避けるものである。また断層活動によって発生する地震加速度の影響は断層からの距離とともに低下していくので、風車が許容できない加速度範囲を設定し、それを避けるように風車を配置する方法も有効である。

⑵　着床式の予防保全・対策

①　高波による液状化－洗掘対策

通常の洋上風力発電施設の安定化設計・対策として用いられる石材による洗掘対策は､液状化抵抗と密接に関わっていることが明らかとなっている(第25期見解:図2-8)。実際、波による地盤の液状化抵抗は、洗掘抑止工の対策範囲（杭径のｎ倍）によって

表 4-1　海底地質リスクに対する予防保全・対策の考え方

<table>
<tr><th>予防保全・対策の種類</th><th>対策の内容と適用できる対象物</th><th>適用できるジオハザード</th></tr>
<tr><td>a. 風車配置変更</td><td>ジオハザードの位置と、ジオハザードが活動した場合に影響を受ける範囲を避けるようにして風車をレイアウトする。（着床式・浮体式）</td><td>シャローガス
海底地すべり（滑動範囲と位置が特定できる場合）
活断層（活動した場合の地震動と加速度の想定も同時に行って影響範囲を想定する）
重力流（流下範囲と位置が特定できる場合）</td></tr>
<tr><td rowspan="4">b. 構造の変更・強化</td><td>風車支持構造の強化によって影響を低減する（着床式）。
アンカーの種類や構造設計によって影響を低減する（浮体式）。
ケーブル密度を変更して浮き上りや沈下を防止する。</td><td>液状化
液状化による流動
海底地すべりに伴う流動</td></tr>
<tr><td>防爆仕様の施工機器による工事計画や、ガスが滞留しにくい構造に変更する（着床式）。</td><td>シャローガス（ガスの賦存量が少なく、大きなガスだまりが無い）</td></tr>
<tr><td>風車基礎に洗堀抑止工を設置する（着床式）</td><td>洗掘</td></tr>
<tr><td>将来の地形変化量を算定し、供用期間中にケーブルが海底面に露出しないような埋設深度に設置する（海底ケーブル）。
保護工を設置してケーブルが海底面に露出しても漁具等で破断し難くする（海底ケーブル）。</td><td>サンドウェーブ
液状化</td></tr>
<tr><td rowspan="3">c. 被害を小さくする方法</td><td>送電ケーブルを複線化してジオハザードを避ける配置とし、ジオハザードが活動した場合の全面的な送電中断を避ける。（海底ケーブル）</td><td>液状化・重力流
海底地すべり
活断層
サンドウェーブ（埋設した海底ケーブルが地形変化によって海底面に露出して、漁具等による破断リスクが発生する場合）</td></tr>
<tr><td colspan="2">b. の構造変更・強化の方法も含まれる（構造変更・強化を実施しても想定を超える規模でジオハザードが活動した場合には被害軽減はできるが、被害ゼロにできないことがある）</td></tr>
<tr><td>ジオハザードの活動確率と被害額を想定し、被害額をカバーできる保険をかける。（全構造物）</td><td>活断層（再現確率が算定できる場合）</td></tr>
<tr><td>d. モニタリング</td><td>風車設置後にMBES・サイドスキャンソナーの経年測定を行って海底地形の変化を観測し、危険性が高まってきた場合には保護工等の対策を追加する。（着床式・浮体式）</td><td>サンドウェーブ</td></tr>
</table>

変化し、通常の洗掘対策範囲で約２割、その２倍の対策範囲で約４割、液状化抵抗が増加する[3-29]（第 25 期見解：図 2-8)。

この際、重要なことは、増加した液状化抵抗を上回る厳しい波浪作用下では、液状化が発生し、パイルの不安定化や風車タワーの倒壊を免れないことである[4-1]。従って、洋上風力発電施設の安定化設計・対策においては、３章に記した海底土砂流動のインパクト・影響評価とともに、波による液状化の評価予測が肝要である。２章に記した現地地質・地盤情報を踏まえ、当該海域における年最大有義波や対応最高波を考慮した設計波 [31] と地盤の有効単位体積重量等の地盤条件下で繰返しせん断応力比を算定し、現地土質に対応した限界繰返し応力比との比較を通じて波による液状化が発

生すると評価予測された際には、当該液状化を抑止する上で必要となる液状化抵抗を満足するように洗掘抑止工の対策範囲を設定し、高波による液状化ー洗掘対策とすることができる[3-15, 3-19, 3-24, 3-27]。

② 海底地すべりの影響・インパクト評価対策

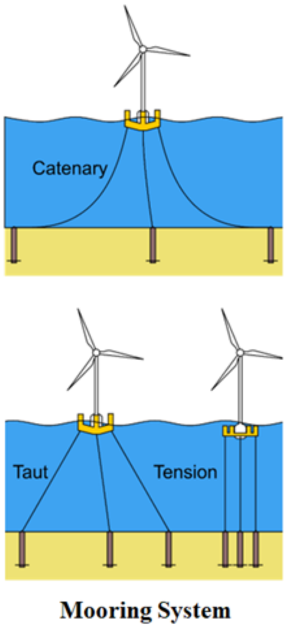
海底液状化流動は多様な洋上風力発電施設基礎に重大なインパクト・影響をもたらし得る(第 25 期見解：図 2-4)。海底地すべり・液状化流動が構造物にもたらす影響・インパクトは、現地の液状化地盤密度に相当する高密度流体として特性化可能であることが明らかとなっており、現地液状化密度を考慮した最大衝撃圧[4-2]と施設の設計耐力との比較を通じて、対応する海底地すべり・液状化流動体に対する予防保全策とすることができる。また、構造物に作用する海底地すべり・液状化流動の衝撃圧は、海底面に作用する圧力の倍以上となることが分かっており、海底面下への埋設及びその深度・領域設定に応じて海底地すべり・液状化流動の影響・インパクトを大きく低減することができる[4-3]。

(3) 浮体式の予防保全・対策

① 海底地盤の液状化・流動の影響を受けにくいアンカー構造・対策

浮体式の洋上風力発電施設においては、前述のとおり、水深 100m 程度までは波による液状化リスクがあるため、３章及び４章(2)①で述べた波による液状化の評価予測・対策が肝要となる。当該水深以深では、海底に設置・固定されるアンカー・ケーブル等に対して、地震による海底地盤の不安定化及び液状化、並びに海底地すべり・土砂流動等が及ぼす影響・インパクトの評価が重要となる。

浮体式洋上風力発電施設のアンカー種類は、ドラッグアンカー 32) 、パイルアンカー



アンカー種類		
ドラッグアンカー，パイルアンカー，サクションアンカー，重力アンカー		
係留方式		
カテナリー係留，トート係留，緊張係留		
常時の鉛直方向の緊張力 T_V		
無し，	有り，	有り
アンカー体密度，アンカー体積，液状化地盤密度		
ρ_A,	V_A,	ρ_L
液状化時のアンカー挙動		
$(\rho_A-\rho_L)gV_A-T_V>0$ の場合，「沈下」		
$(\rho_A-\rho_L)gV_A-T_V<0$ の場合，「浮上」		
$(\rho_A-\rho_L)gV_A-T_V\cong0$ の場合，「保持」		

図 4-2 浮体式洋上風力発電施設のアンカー種類・係留方式と液状化時のアンカー挙動
（出典）[4-4]

液状化時のアンカー挙動		海底ジオハザードの影響を受けにくいアンカー構造・対策
$(\rho_A - \rho_L) g V_A - T_V > 0$ の場合，「沈下」	⇨	$T_V = 0$ の場合： $(\rho_A - \rho_L)$ が小となるアンカー構造・選択 $T_V \neq 0$ の場合： $(\rho_A - \rho_L) g\, V_A / T_V$ が１に近づくアンカー構造・選択・係留
$(\rho_A - \rho_L) g V_A - T_V < 0$ の場合，「浮上」	⇨	$T_V = 0$ の場合： $(\rho_L - \rho_A)$ が小となるアンカー構造・選択 $T_V \neq 0$ の場合： $(\rho_A - \rho_L) g\, V_A / T_V$ が１に近づくアンカー構造・選択・係留
$(\rho_A - \rho_L) g V_A - T_V \cong 0$ の場合，「保持」	⇨	海底地盤の液状化時，浮上・埋没・沈下を防ぎ， 地盤内で同一深さを保持し，浮体の安定性を持続的に発揮 （アンカーの移動抵抗も持続的に発揮）

海底面上にアンカーが一部露出している場合は，アンカーの海底面下の体積 V_B として，「$(\rho_A - \rho_L)\, g V_A$」を「$\rho_A g V_A - \rho_L g V_B - \rho_w g (V_A - V_B)$」に,$Tv=0$の場合の「$(\rho_A - \rho_L)$」を「$\rho_A - \rho_L V_B / V_A - \rho_w (1 - V_B / V_A)$」に置き換える。

図 4-3　海底ジオハザードリスクに対する予防保全・対策：浮体式，アンカー
（出典）[4-4]

33)、サクションアンカー 34)、及び重力アンカー 35)、その係留方式は、カテナリー係留 36)、トート係留 37)、緊張係留 38) が挙げられる（図 4-2）。この際、各係留方式により、常時の鉛直方向の緊張力 T_v の有無が分かれる（図 4-2）。アンカーの体密度を ρ_A、アンカー体積を V_A、液状化地盤密度を ρ_L とすると、液状化時のアンカー挙動は、図 4-2 に示す３つの条件に応じて、「沈下」、「浮上」、「保持」となる[4-4]。各アンカー挙動に対して、$T_v = 0$ と $T_v \neq 0$ の各条件下で、図 4-3 中に示す仕様のアンカー構造を選択し当該係留方式・状態を実現することによって、海底ジオハザードの影響を受けにくいアンカー構造・対策とすることができる[4-4]。また、液状化時のアンカー挙動が「保持」の場合には、海底地盤の液状化時に、浮上・埋没・沈下を防ぎ、もって地盤内で同一深さを保持し、浮体の安定性を持続的に発揮することができる[4-4]。この際、アンカーの移動抵抗も持続的に発揮し、海底地すべり・流動の影響を大幅に低減する[4-4]。

②　海底地盤の液状化・流動の影響を受けにくいケーブル敷設・対策

ケーブル密度を ρ_C、液状化地盤密度を ρ_L とすると、液状化時のケーブル挙動は、図 4-4 に示す３つの条件に応じて、「沈下」、「浮上」、「保持」となる[4-4]。各ケーブル挙動において、「沈下」の場合には、予防保全・沈み込み対策を、「浮上」の場合には、予防保全・浮き上がり対策を行うことによって、海底ジオハザードの影響を受けにくいケーブル対策とすることができる[4-4]。また、液状化時のケーブル挙動が「保持」

の場合には、海底地盤の液状化時に、浮上・埋没・沈下を防ぎ、もって地盤内で同一深さを保持し、浮体の安定性を持続的に発揮することができる[4-4]。この際、ケーブルの移動抵抗も持続的に発揮し、海底地すべり・流動の影響を大幅に低減する[4-4]。

３章に記した海底地質リスクの評価予測結果を基に、上記の予防保全・対策が重要となるとともに、「保持」と「沈下」及び「浮上」の境界領域では被災リスクが高まるため特に留意が必要である[4-4]。以上の海底地質リスク軽減の主要な考え方については、国際地質科学連合のアジア・ヨーロッパ・アメリカ・アフリカ横断の海底ジオハザードリスク特集号においても紹介されている[4-5]。

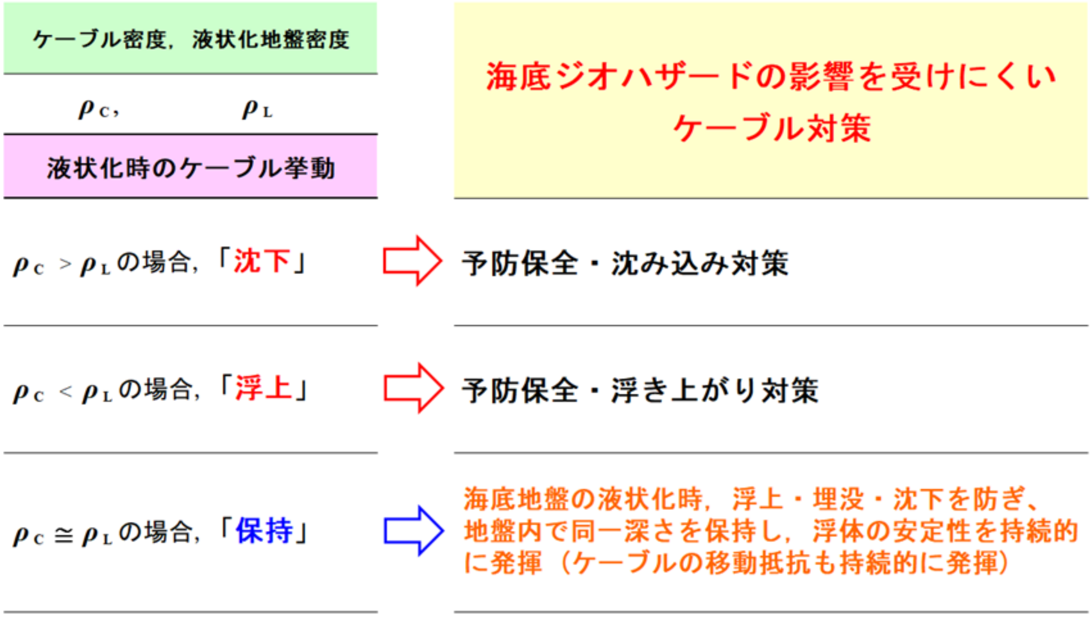


図 4-4　海底ジオハザードリスクに対する予防保全・対策：浮体式，ケーブル
（出典）[4-4]

５　まとめ

本見解のまとめを以下に記す。

１章では、活動的縁辺域においては海底地質リスク軽減のためのガイドラインが必要であることを述べた。欧州で洋上風力発電の開発が進む中、日本でもセントラル方式調査を開始し、開発が活発になっている。しかし日本周辺で開発対象となる水深200m以浅の海域は、高潮、高波に加え、地震・津波、台風の外力が強く、海底域で地質・地盤災害が生じる可能性が高い。本見解で示すガイドラインは、活動的縁辺域における海底地質リスク評価のための地質・地盤調査、海底地質リスクの評価予測、海底地質リスクに対する予防保全・対策で構成される。

２章では、海底地質リスクを評価するための地質・地盤調査について、現在行われている基本調査（セントラル調査）と詳細調査について分けて述べた。基本調査においてはその目的と仕様について、詳細調査についてはその実施手順とジオハザードに対応する調査の方法、及びジオハザードを検知した事例について示している。現在の一般的な基本調査・詳細調査は風力発電の設計に必要な情報を取得することを目的としており、海底地質リスクの検知そのものを目的とはしていないが、基本調査・詳細調査においてジオハザードの可能性が検知されると、そのリスクを評価できるような調査手順・調査手法に変更していく必要がある。２章ではそのような際の具体的な対応を記載している。

３章では、地震大国かつ気象海象条件も厳しい活動的縁辺域に位置する日本沿岸域において、洋上風力発電の持続可能な開発を実現するために必要となる海底地質リスクの評価予測について述べた。とりわけ、地球規模の気候変動により世界の波浪条件は激甚化傾向にあり、大規模で継続時間の長い地震動や連続地震の顕在化を含む、着床式及び浮体式洋上風力発電施設に対する地震・津波・高波による沿岸・海底域のジオハザードリスク、すなわち、地震による液状化・海底地すべり、高波による液状化・海底地すべり、並びに、津波・高波－地盤－構造物相互作用の評価予測法について記した。これらの海底地質リスクの評価予測は、２章で述べた基本・詳細調査の結果を踏まえたものであり、地震、液状化、地すべり、津波などの連鎖・複合災害の理解と軽減の国際的な重要性の高まりについてもあわせて示した。

４章では、海底地質リスクに対する予防保全・対策として、予防保全対策の種類と考え方について述べた後に、施設の計画段階での風車配置対策から配置後の施設の設計・施工段階での予防保全・対策について述べた。特に、着床式洋上風力発電施設については、洋上風力発電施設の安定化設計・対策として高波による液状化－洗掘対策について示すとともに、海底地すべりの影響・インパクト評価対策の考え方について記した。浮体式洋上風力発電施設については、水深100m程度までは地震・高波による液状化、当該水深以深では地震による液状化を対象として、海底地盤の液状化・流動の影響を受けにくいアンカー構造・対策について、各アンカー種類・係留方式と液状化時のアンカー挙動を踏まえた海底ジオハザードリスクに対する予防保全・対策のあり方について記した。また、あわせて、海底地盤の液状化・流動の影響を受けにくいケーブル敷設・対策について、液状化時のケーブル挙動を踏まえた海底ジオハザードリスクに対する予防保全・対策のあり方について記した。これらは洋上風力発電の今後の持続可能な開発・運用を安全・安心に実現するた

めの予防保全の取り組みとして、将来の地質・地盤災害のリスクを軽減するための対策とその考え方を示したものである。

したがって、本ガイドラインが、洋上風力発電事業の計画・調査・設計・維持管理の各段階で、政府機関、事業者及び自治体等が海底地質リスクを考慮した意思決定を行う際の参考となることを期待する。また、同時に、学術的見解として、研究機関、大学、関係する学協会に広く共有されることを期待する。

本ガイドラインを通じた基本・詳細調査と海底地質リスクの評価予測結果に基づき必要な予防保全対策を行うことによって、海底地質リスクを適切に考慮した安全性の高い持続可能な事業計画を立てることができ、追加調査や事故による工程の遅れや売電計画の遅れのないスムーズな開発を行うことができる。また、本見解に記したジオハザードは、シャローガスや活断層を含め、相互に密接に関係していることから、それらの体系的解明と技術の一層の進展が今後期待される。その実現には、多岐にわたる調査データを共有・活用し得るデータベースの構築・整備が必要であり、オープンデータを軸にした産学官連携による循環的発展が重要になると考えられる。

＜用語の説明＞

1）セントラル方式調査：
国あるいは国に準じる特定機関が主体となって実施する、洋上風力発電所の開発に必要な風況情報や地盤情報等の初期情報を取得する調査。開発事業者はセントラル調査の結果を参考に概略事業計画を立案する。

2）活動的縁辺域：
海洋プレートの沈み込みやそれに関連する断層によって特徴付けられる海洋底と接する大陸の縁辺域。大陸地殻は日本列島のような島弧の地殻も含む。造山運動、地震活動、火山活動が観測される。

3）非活動的縁辺域：
二つの地殻が接するが、沈み込み・衝突やそれに関連する断層がない大陸の縁辺域。地質時代の大陸分裂や海洋底拡大によって形成された縁辺域で，造山運動、地震活動、火山活動が少ない特徴がある。

4）海底地質リスク：
海底域で地質・地盤災害（ジオハザード）が生じる可能性。海底ジオハザードリスクを表す。

5）基礎：
構造物からの力を地盤に伝え、構造物を安全に支える機能をもつ構造

6）海底ジオハザード：
海底域で生じる地質・地盤災害

7）マルチビームソナー：
扇状に放射した音波を用いて海底の地形を計測する音響測深機。海底地形図を作成することができる。

8）シャローガス：
地盤の浅層部に滞留するガス。掘削に伴って海底面に噴出することがある。

9）サイドスキャンソナー：
曳航体から左右の海底面へ扇状に音波を発信し、反射波の強弱を画像化して海底の地形、底質、埋設物などを可視化する音響調査装置

10）バクテリアマット：
海底の亀裂から湧き出るメタンや硫化水素をエネルギー源として、細菌が大量に増殖し、敷物状になったもの

11）サンドウェーブ：
海底に形成される波地形。その高さは水深の 25%の高さまで成長することがある。潮流や波浪によって移動する。

12）高濃度重力流：
堆積物と流体の混合物が重力によって高濃度状態で流動する現象

13）海底液状化流動：
地盤の液状化によって生じる海底域の土砂流動。海底液状化土砂流動を表す。

14）SPT（標準貫入試験）：
地盤の硬さ・強度や締まり具合を調べるための地盤調査方法。ボーリング孔を利用して、特定の重さの重錘を自由落下させて、地盤にサンプラーを打ち込み、所定の深さまでの貫入に必要な打撃回数（N 値）を測定する試験

15）コーン貫入抵抗値：
先端が円錐状のロッドを地盤中に押し込んだときのコーン（円錐状先端部）底面積当たりの貫入抵抗値。CPT（電気式コーン貫入試験）により得られる地盤の硬さや締まり具合の指標の一つ。

16）せん断波速度値：
地盤の中を伝播する弾性波（横波）の速度値

17）液状化予測判定チャート：
地震外力と地盤強度の関係に基づき、液状化の発生の可能性の大小を予測し評価するための図

18）ケーソン：
防波堤などの水中構造物等を構築する際に用いられるコンクリート製又は鋼製の大型の箱

19）離岸堤（ブロック）：
海岸の沖合に、海岸線とほぼ平行に設けられるブロック状の構造物

20）液状化重力流：
地盤の液状化に伴い発生する重力作用下の流動現象

21）有義波：
ある地点で一定時間に観測される波のうち、高い波から順に全体の 1/3 の個数の波について、波高及び周期をそれぞれ平均した仮想的な波

22）年最大有義波：
１年間に観測される最大の有義波

23）対応最高波：
ある観測期間中にみられる個別の波の中で波高が最も高い波

24）せん断応力比：
地震や高波の作用により地盤中に発生するせん断応力と当該深さの有効土被り圧の比

25）モノパイル形式：
単一の大口径杭を打設する基礎形式

26）残留過剰間隙水圧：
地震や高波の作用により地盤中に発生・残留する静水圧を超過した間隙水圧

27）サクションバケット基礎：
円筒形構造物（サクションバケット）の内部を排水することで海底下に貫入する基礎形式

28）重力式構造物：
構造物の自重によって支持を得る形式の構造物

29）浸透流：
基礎マウンドや地盤内の流れ

30）越流：
構造物の天端を越える流れ

31）設計波：
施設の設計時に想定する波浪

32) ドラッグアンカー：
海底に貫入し、アンカー本体に働く土圧で把駐力を得る形式のアンカー

33） パイルアンカー：
海底に杭を打ち込み固定する形式のアンカー

34） サクションアンカー：
中空円筒の内部を海水吸引により負圧にすることで海底に貫入する形式のアンカー

35） 重力アンカー：
アンカーの自重により把駐力を得る形式のアンカー

36） カテナリー係留：
主に懸垂線形状の係留ラインの自重によって係留力を得る係留方式

37） トート係留：
初期張力を調整して緊張状態にある係留ラインの伸びによって係留力を得る係留方式

38） 緊張係留：
海底面に固定されたアンカーと浮体構造物を弾性部材で接続し、常時発生する張力によって浮体構造物の係留力を得る係留方式

＜参考文献＞

1　はじめに
[1-1] 自然エネルギー財団 (2023):洋上風力発電の動向世界と日本における現状[第４版].
[1-2] International Energy Agency (IEA) (2025): Renewables 2025: Executive summary.
[1-3] Global Offshore Wind Alliance (GOWA) (2025): Offshore wind targets underpin acceleration to 2030 and beyond. 1-22.
[1-4] 洋上風力の産業競争力強化に向けた官民協議会：洋上風力産業ビジョン（第１次）概要.令和２年 12 月 15 日
[1-5] 土谷学,斉藤長,柴田学 (2022): 洋上風力の主力電源化を目指して. 号外地球,73, 洋上風力発電と海底地質リスク. 12-18.
[1-6] 戸田邦彦,宝川祥子 (2021): 日本における洋上風力発電事業～欧州との違いを踏まえた留意点～. 損保ジャパン RM レポート
[1-7] 日本学術会議見解「活動的縁辺域における持続可能な洋上風力発電開発に向けて－海底地質リスク評価の重要性－」、2023 年９月 22 日.
[1-8]日本学術会議公開シンポジウム「海底地質災害と洋上風力開発」パネルディスカッション：ガイドラインに向けて、2024 年 11 月 14 日、東京、2024

２　海底地質リスク評価のための地質・地盤調査
[2-1] 経済産業省 資源エネルギー庁 (2024): セントラル方式として JOGMEC が実施するサイト調査の基本仕様.
[2-2] Okay, S. and Aydemir, S. (2016): Control of active faults and sea level changes on the distribution of shallow gas accumulations and gas-related seismic structures along the central branch of the North Anatolian Fault, southern Marmara shelf, Turkey. Geodinamica Acta, 28(4), 328-346.
[2-3] Dondurur et al.(2011): Acoustic evidence of shallow gas accumulations and active pockmarks in the İzmir Gulf, Aegean sea. Marine and Petroleum Geology, 28, 1505-1516.
[2-4] Netherlands Enterprise Agency (2015): Morphodynamics of Borssele Wind Farm Zone WFS-I and WFS-II Final Report.

３　海底地質リスクの評価予測
[3-1] 佐々真志 (2020): 海底地すべりと津波:海底地すべり研究の最前線（現地調査・実験・数値解析）. 地盤工学会誌, 68(8), 86-93.
[3-2] Sassa, S. and Sekiguchi, H. (2010): LIQSEDFLOW: Role of two-phase physics in subaqueous sediment gravity flows. Soils and Foundations, 50(4), 495-504.
[3-3] 佐々真志 (2022): 沿岸・海底域のジオハザードリスクの評価予測. 号外地球, 73, 62-68.
[3-4] Sassa, S. and Takagawa, T. (2019): Liquefied gravity flow-induced tsunami: first evidence and comparison from the 2018 Indonesia Sulawesi earthquake and tsunami disasters. Landslides, 16(1), 195-200, doi:10.1007_s10346-018-1114-x.

[3-5] Sassa, S. (2020): Cascading Mechanisms behind the 2018 Indonesia Sulawesi Earthquake and Tsunami Disasters: Inland/Coastal Liquefaction, Landslides and Tsunami. Springer Series in Geomechanics and Geoengineering, Keynote Paper. doi:10.1007/978-3-030-46351-9_4.

[3-6] Sassa, S., Grilli, S.T., Tappin, D.R., Sassa, K., Karnawati, D., Gusiakov, V.K. and Løvholt, F. (2022): Understanding and reducing the disaster risk of landslide-induced tsunamis: a short summary of the panel discussion in the World Tsunami Awareness Day Special Event of the Fifth World Landslide Forum. Landslides, Vol. 19(2), 535-535, doi:10.1007/s10346-021-01819-x.

[3-7] 村田一城，佐々真志，相田康洋，居駒知樹 (2022): 海底地すべり流動が洋上風力基礎に及ぼす衝撃力に関する基礎検討. 第29回海洋工学シンポジウム講演論文集，in CD.

[3-8] Murata, K., Ebisuzaki, T., Sassa, S., Takagawa, T., Matsuda, K., Miyamoto, T., Ohno, M. and Maruyama, S. (2024): Submarine landslides and tsunami genesis in Sagami Bay, Japan, caused by the 1923 Great Kanto earthquake. Landslides, 21(8), 1811-1827, doi:10.007/s10346-024-02231-x.

[3-9] Sassa, S. (2023): Landslides and Tsunamis: Multi-Geohazards. Landslides, 20(7), 1335-1341. doi:10.007/s10346-023-02084-w.

[3-10] Sassa, S., Grilli, S.T., Tappin, D.R., Sassa, K., Karnawati, D., Gusiakov, V.K., Løvholt, F. (2023): Understanding and reducing the disaster risk of landslide-induced tsunamis: outcome of the panel discussion and the World Tsunami Awareness Day Special Event of the Fifth World Landslide Forum. Progress in Landslide Research and Technology, 1(1), 65-81. doi:10.1007/978-3-031-16898-7_4.

[3-11] Sassa, S., Naruse, H. and David Tappin (2026): Recent Advances in Understanding and Reducing Multi-Geohazard Risks: Liquefaction, Coastal and Submarine Landslides, Turbidity Currents, and Tsunamis. Progress in Landslide Research and Technology, 4(2), 53-77. doi:10.1007/978-3-032-18863-2_3.

[3-12] Sassa, S. (2024): Landslides and Tsunamis: Multiple-Geohazards. Inaugural Speech for Landslides-induced Tsunami and their Disaster Risk Reduction. The Integrated Research on Disaster Risk 2024 International Conference-Science for an inclusive, safe and sustainable world: ACTIONS OF IRDR GLOBAL COMMUNITY.

[3-13] Sassa, S. and Sekiguchi, H. (2012): Dynamics of Submarine Liquefied Sediment Flows: Theory, Experiments and Analysis of Field Behavior. Advances in Natural and Technological Hazards Research, 31, Springer, 405-416.

[3-14] Sassa, S. and Yamazaki, H. (2017): Simplified Liquefaction Prediction and Assessment Method Considering Waveforms and Durations of Earthquakes. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 143(2), 1-13. doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001597, 04016091.

[3-15] 国土交通省港湾局監修 (2018, 2025)：港湾の施設の技術上の基準・同解説 地盤の液状化，408-417.

[3-16] 佐々真志 (2020): 沿岸地盤の多相系ダイナミクス, 土砂動態学, 共立出版.
[3-17] 気象庁 (2020): 日本の気候変動 2020 (詳細版), 180p.
[3-18] Reguero, B.G., Losada, I.J. and Méndez, F.J. (2019): A recent increase in global wave power as a consequence of oceanic warming. Nature Communications, 10, 205.
[3-19] Miyamoto, J. and Sassa, S. (2025): Projected Increase in Wave-induced Liquefaction Risks under Climate Change-induced Severer Wave Conditions. Proceedings of the 12th International Conference on Scour and Erosion. Online Library of ISSMGE.
[3-20] Sassa, S. and Sekiguchi, H. (1999). Wave-induced liquefaction of beds of sand in a centrifuge. Géotechnique 49, No.5, 621-638.
[3-21] Sassa, S. and Sekiguchi, H. (2001). Analysis of wave-induced liquefaction of sand beds. Géotechnique 51, No.2, 115-126.
[3-22] Sassa, S., Takayama, T, Mizutani, M. and Tsujio, D. (2006): Field observations of the build-up and dissipation of residual pore pressures in seabed sands under the passage of storm waves. Journal of Coastal Research, Special Issue 39, 410-414.
[3-23] Sumer, B.M. (2014): Liquefaction around marine structures. Advanced Ser. Ocean Eng. 39, World Scientific.
[3-24] 佐々真志 (2016):波による液状化と地盤流動への影響:最新事例分析. 土木学会論文集 B3, 72(2),378-383.
[3-25] Miyamoto, J., Sassa, S., Tsurugasaki, K. and Sumida, H. (2019): Wave-induced liquefaction and floatation of a pipeline in a drum centrifuge. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 146(2), 04019039.
[3-26] Sassa, S., Sekiguchi, H. and Miyamoto, J. (2001). Analysis of progressive liquefaction as a moving boundary problem. Géotechnique 51, No.10, 847-857.
[3-27] 宮本順司, 佐々真志 (2020): 日本沿岸で観測された暴波浪による液状化危険度評価と地盤内間隙水圧応答の予測. 土木学会論文集 B3, 76(2), 462-467.
[3-28] Sassa, S. (2021): Mechanics and Countermeasures of Scour and Internal Erosion: Tsunami/Wave-Seabed-Structure Interaction. Lecture Notes in Civil Engineering, 177, Keynote paper. doi:10.1007/978-981-16-4783-3.
[3-29] Miyamoto, J., Sassa, S., Tsurugasaki, K. and Sumida, H. (2021): Wave-induced liquefaction and instability of offshore monopile in a drum centrifuge. Soils and Foundations, 61(1), 35-49, doi:10.1016/j.sandf.2020.10.005.
[3-30] Miyamoto, J., Sassa, S., Ito, H., Tsurugasaki, K. and Sumida, H. (2023): Wave-induced liquefaction and stability of suction bucket foundation in drum centrifuge. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 149(4), 04023013. doi:10.1061/JGGEFK.GTENG-11247.
[3-31] Takahashi, H., Sassa, S., Morikawa, Y., Takano, D. and Maruyama, K. (2014):

Stability of caisson-type breakwater foundation under tsunami-induced seepage. Soils and Foundations, 54(4),789-805. doi:10.1016/j.sandf.2014.07.002.
[3-32] Sassa, S. (2014): Tsunami-Seabed-Structure Interaction from Geotechnical and Hydrodynamic Perspectives. Geotechnical Engineering Journal, 45(4), Special Issue on Offshore and Coastal Geotechnics, 102-107.
[3-33] Sassa, S., Takahashi, H., Morikawa, Y., and Takano, D. (2016): Effect of overflow and seepage coupling on tsunami-induced instability of caisson breakwaters. Coastal Engineering, 117, 157-165. doi:10.1016/j.coastaleng.2016.08.004.
[3-34] 国土交通省港湾局 (2015):防波堤の耐津波設計ガイドライン.

４　海底地質リスクに対する予防保全・対策

[4-1] Sassa, S. (2023): Recent Advances in the Mechanics and Countermeasures of Scour and Erosion. Opening Keynote Paper. Proceedings of the 11th International Conference on Scour and Erosion. Online Library of ISSMGE.
[4-2] 牧野凌弥, 宮本順司,佐々真志, 辻本剛三 (2024): 液状化地盤流動による海底構造物への衝撃圧に関する実大応力実験. 土木学会論文集, 80(17), 24-17208.
[4-3] Makino, R., Miyamoto J., Sassa, S. and Tsujino, G. (2025): Centrifuge experiments on submarine gravity flow of liquefied sand and its impact on structures. Proceedings of the 12th International Conference on Scour and Erosion. Online Library of ISSMGE.
[4-4] Sassa, S. (2024): Submarine Geohazards Resistant Design Concept for Anchors and Cables of Floating Offshore Wind. Keynote Speech for the 37th International Geological Congress 2024.
[4-5] Sassa, S., Naruse, H., Tappin, D. and Roulund, A. (2026): Submarine Geohazards and Mitigation Concept for Offshore Wind. IUGS Journal of International Geoscience Episodes, 49(2), Special Issue on Submarine Geohazards and Their Risks, 115-126. doi.org/10.18814/epiiugs/2026/02602s02.

＜付録-1＞　セントラル方式調査の全体概要

[A-1] 経済産業省, 国土交通省 (2022) 第 15 回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及び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資料, 「日本版セントラル方式」における調査対象区域の選定の考え方について.
[A-2] 経済産業省, 国土交通省 (2023) 第 18 回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及び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資料.
[A-3] NEDO (2021) 洋上風力発電の地域一体的開発に向けた調査研究事業報告.

［A-4］ JOGMEC （2023） 洋上風力発電に係る地質構造等の調査計画.
［A-5］ 経済産業省 （2025） 洋上風力発電に関する情報提供申請受付開始.
［A-6］ 経済産業省, 国土交通省 （2024)洋上風力発電に係るセントラル方式の運用方針.
［A-7］ 経済産業省, 国土交通省 （2022） 第 10 回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及び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資料, 「日本版セントラル方式」の検討に向けた論点について.
［A-8］ 経済産業省 資源エネルギー庁 （2024） セントラル方式として JOGMEC が実施するサイト調査の基本仕様.
［A-9］ 経済産業省 資源エネルギー庁 （2025） 再エネ海域利用法に基づく区域指定･事業者公募の流れ及び案件形成状況.
［A-10］ 経済産業省, 国土交通省(2025） 第 37 回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及び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資料, 第１ラウンド事業からの撤退の要因分析等.

＜参考資料＞審議経過

令和６年

６月６日　持続可能な開発目標達成のための洋上風力発電開発検討小委員会（第１回）
小委員会設置目的と委員紹介、役員（委員長、副委員長、幹事）の選出、第 25 期見解と今後の方針について、公開シンポジウムについて

10 月 31 日　持続可能な開発目標達成のための洋上風力発電開発検討小委員会（第２回）
セントラル方式について、公開シンポジウム（2024 年 11 月 14 日開催予定）について、IGC2024 報告

令和７年

２月６日　持続可能な開発目標達成のための洋上風力発電開発検討小委員会（第３回）
話題提供、ガイドラインについて、公開シンポジウム（2024 年 11 月 14 日開催）報告

２月 26 日　総合工学委員会エネルギーと科学技術に関する分科会（第４回）
申出書（見解案「活動的縁辺域における持続可能な洋上風力発電開発に向けた海底地質リスク評価予測と対策に関するガイドライン」）の承認

６月６日－17 日　総合工学委員会エネルギーと科学技術に関する分科会（第 26 期・第６回）、持続可能な開発目標達成のための洋上風力発電開発検討小委員会（第 26 期・第４回）合同メール審議
持続可能な開発目標達成のための洋上風力発電開発検討小委員会委員の辞任について

７月８日－16 日　総合工学委員会エネルギーと科学技術に関する分科会（第 26 期・第７回）、持続可能な開発目標達成のための洋上風力発電開発検討小委員会（第 26 期・第５回）合同メール審議
持続可能な開発目標達成のための洋上風力発電開発検討小委員会委員の辞任と追加について

８月１日　持続可能な開発目標達成のための洋上風力発電開発検討小委員会（第６回）
委員交代など、ガイドラインについて

８月 20 日　総合工学委員会エネルギーと科学技術に関する分科会（第８回）
見解案「活動的縁辺域における持続可能な洋上風力発電開発に向けた海底地質リスク評価予測と対策に関するガイドライン」の承認

＜付録-1＞　セントラル方式調査の全体概要

(1)　セントラル方式調査の導入経緯

日本政府は 2050 年にカーボンニュートラルを実現する目標を掲げ、再生可能エネルギーの主力電源化をエネルギー政策の柱の一つとする方針とした。洋上風力発電は、今後コスト低減が見込まれる電源として､我が国の電力供給の一定割合を占めることが見込まれ、急速なコストダウンと案件形成が進展する海外と同様、我が国の再生可能エネルギーの主力電源化に向けた「切り札」である。また、事業規模が大きく、産業の裾野も広いことから、建設や O&M 等を通じ雇用創出にも貢献するなど、経済波及効果が期待されている。第７次エネルギー基本計画においては､再エネ海域利用法に基づく公募制度等を通じて､2030 年までに 10GW、2040 年までに浮体式も含む 30GW～45GW の案件を形成することを目指し、引き続き、セントラル方式の対象海域を拡大するとともに、促進区域の指定の際に国が海洋環境調査を行う仕組みを検討する｡セントラル方式とは､初期段階から政府等が関与し、より迅速・効率的に地盤等の調査や適時の系統接続の確保等を行い、事業者の負担を軽減する仕組みであり、従来の制度では、事業者が風況調査、地質調査、環境影響評価を個別に実施する必要があり、事業者の重複調査による非効率性及びコスト増や地元の負担増などの問題があった事を解決するために導入されたものである。2021 年１月 13 日の経済産業省及び国土交通省の両省合同会議では、欧州のセントラル方式を参考に、日本の海域特性に合わせた制度設計が議論された[A-1]。

カーボンニュートラルの実現に向け、2022 年度に「独立行政法人エネルギー・金属鉱物資源機構法」が改正され、JOGMEC の業務に洋上風力発電に関する地質構造等の調査が追加された｡これにより JOGMEC がセントラル方式調査の中のサイト調査の実施主体として明確化され、風況や地質などのデータの収集が国の責任で行われる仕組みが確立した。2023 年１月 30 日の両省合同会議では、洋上風力発電に係るセントラル方式の運用方針を策定し、調査対象海域の選定基準やデータ公開のルールを定めた。選定基準には、対象区域における調査実施に対する理解、経済産業省令との適合性が含まれる[A-2]。

セントラル方式調査の実施に先立ち、2021 年に国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の調査研究事業の一環として、北海道岩宇及び南後志地区沖、山形県酒田市沖、岩手県洋野町沖の３海域を対象とする調査が日本版セントラル方式の確立に向けた実証事業として実施された[A-3]。2023 年には、北海道岩宇・南後志地区沖、同島牧沖、同檜山沖の着床式３海域がセントラル方式調査の対象として選定され[A-4]、JOGMEC による調査が開始された。以降、2024 年には、山形県酒田市沖（着床式）、北海道岩宇・南後志地区沖（浮体式）、同島牧沖（浮体式）がセントラル方式調査の対象として選定され、順次調査を展開している。

2025 年５月 20 日、北海道の檜山沖及び岩宇・南後志地区沖について、情報提供申請の受付が開始された[A-5]。これらの情報は、促進区域指定に向けた準備の一環であり、事業者公募の前提となるデータとなる。

(2)　セントラル方式調査の構成・枠組み

セントラル方式を構成する要素は以下の通りである[A-6]。これらの内、調査に相当する要素は 3)及び 5) 6)であるが、それぞれ 3)を JOGMEC、5)を環境省が主体的に実施する。6)は、対象海域及びその周辺の「①漁業操業の実態」と「②水産資源の実態」の二種類の要素から構成され、①は案件形成の初期段階において整理すべき情報として、情報提供を行う都道府県が、②は洋上風力発電の漁業影響調査における事前調査として、対象区域で洋上風力発電を実施する選定事業者がそれぞれ主体的に対応するものとする[A-6]。これらの関係を図 A-1 に示す。

1) 事業実施区域の指定及び発電事業者の公募

2) 案件形成に向けた地域調整

3) サイト調査（風況・海底地盤・気象海象）

4) 系統接続の確保

5) 環境影響評価

6) 漁業実態調査

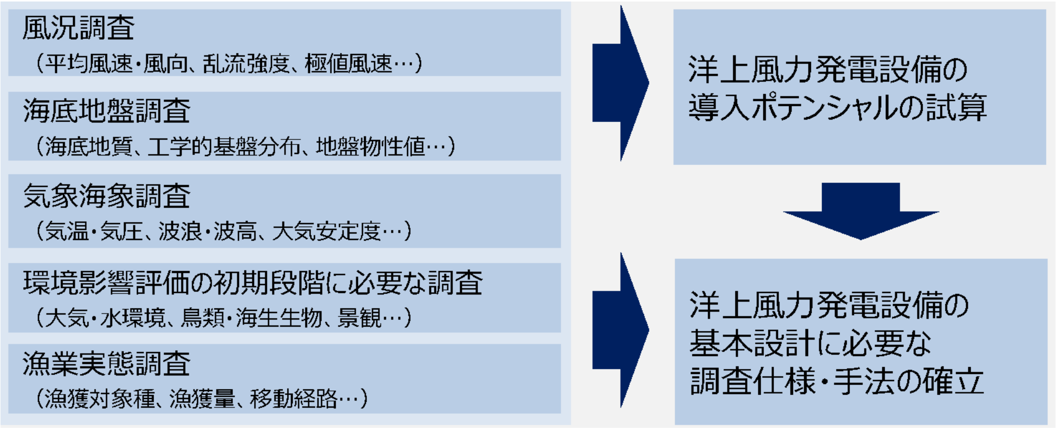


図 A-1　セントラル方式調査の全体概要（出典）[A-7]

JOGMEC が実施するサイト調査は、風況調査、海底地盤調査、気象海象調査から成るが、本見解の主たるテーマであるジオハザードに最も関連が深い海底地盤調査の概要は以下の通りである。

セントラル方式による海底地盤調査では、海底地形調査、海底面状況調査、ボーリング調査、反射法弾性波探査などを行い、着床式または浮体式風力発電の基礎設計に必要となる、海底地形、底質、岩盤分布、土質、地盤物性、地震リスクなどを評価するための基本情報を収集する。セントラル方式による海底地盤調査の標準的な枠組みは、出典[A-8]の基本仕様に、調査項目の目的、要求水準、考慮事項を包括的に規定している。また、実際の運用に当たっては、海底地形や地質条件が調査海域ごとに大きく異なっている事に鑑み、基本仕様だけではカバーしきれない個々の調査海域特有の要求に対応するために個別仕様

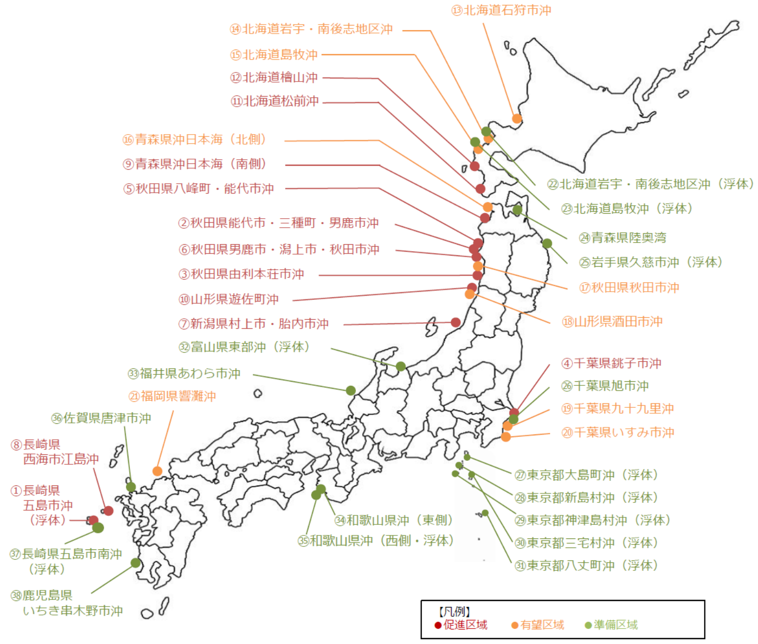
で詳細を調整する。個別仕様の作成に当たっては、対象区域の自然的条件に加えて、調査の実施に関し地元の漁業操業等との調整を踏まえた内容となるよう留意する。

(3)　案件形成におけるセントラル方式調査の位置付け

洋上風力案件の形成全体は、海洋再生可能エネルギー発電設備の整備に関する法律（以下、「海洋再エネ整備法」）を前提として進められており、①促進区域指定、②協議会運営、③公募、④選定事業者の認定の各プロセスを順に踏んで行われる。これらは海洋再エネ整備法が根拠であり、国が行う（経済産業省および国土交通省の共同所管）。

セントラル調査は、上記の案件形成プロセスの一部という位置づけであり、その対象海域は、原則として促進区域に指定される前の段階の有望区域や準備区域となる。したがって、セントラル方式導入以前から存在した促進区域は当然の事ながら、セントラル方式の対象海域と一致しない促進地域があり得る。区域指定の現況を図 A-2 に示す。

促進区域・有望区域等の指定・整理状況(令和７年10月３日時点)



	区域名	万kW※	
促進区域	①長崎県五島市沖（浮体）	1.7	事業者選定済
	②秋田県能代市・三種町・男鹿市沖	41.5	
	③秋田県由利本荘市沖	73.0	
	④千葉県銚子市沖	37.0	
	⑤秋田県八峰町・能代市沖	37.5	事業者選定済
	⑥秋田県男鹿市・潟上市・秋田市沖	31.5	事業者選定済
	⑦新潟県村上市・胎内市沖	68.4	事業者選定済
	⑧長崎県西海市江島沖	42.0	事業者選定済
	⑨青森県沖日本海（南側）	61.5	事業者選定済
	⑩山形県遊佐町沖	45.0	事業者選定済
	⑪北海道松前沖	25～32	
	⑫北海道檜山沖	91～114	
有望区域	⑬北海道石狩市沖	91～114	
	⑭北海道岩宇・南後志地区沖	56～71	
	⑮北海道島牧沖	44～56	
	⑯青森県沖日本海（北側）	30	
	⑰秋田県秋田市沖	37	
	⑱山形県酒田市沖	50	
	⑲千葉県九十九里沖	40	
	⑳千葉県いすみ市沖	41	
	㉑福岡県響灘沖	48	
準備区域	㉒北海道岩宇・南後志地区沖（浮体）	㉛東京都八丈町沖（浮体）	
	㉓北海道島牧沖（浮体）	㉜富山県東部沖（浮体）	
	㉔青森県陸奥湾	㉝福井県あわら市沖	
	㉕岩手県久慈市沖（浮体）	㉞和歌山県沖（東側）	
	㉖千葉県旭市沖	㉟和歌山県沖（西側・浮体）	
	㉗東京都大島町沖（浮体）	㊱佐賀県唐津市沖	
	㉘東京都新島村沖（浮体）	**㊲長崎県五島市南沖（浮体）**	
	㉙東京都神津島村沖（浮体）	**㊳鹿児島県いちき串木野市沖**	
	㉚東京都三宅村沖（浮体）		

※容量の記載について、事業者選定済の案件は選定事業者の計画に基づく発電設備出力量。それ以外は、事業者が確保している系統接続の最大受電電力、または系統確保スキームで算定した当該区域において想定する最大出力規模であり、区域の調整状況に応じて変動しうるもの。

図 A-2　区域指定・事業者公募の流れ及び案件形成状況（出典）[A-9]

洋上風力では事業化前に、風況観測、海底地盤調査、海象調査、地質構造調査などを行う必要がある。これらの調査には数億円から数十億円規模の費用がかかり、さらに調査した結果、事業化に至らない可能性もある。そのため、民間事業者単独では投資回収リスクが大きく、調査への参入が限定されるという問題があった。また、事業者による個別調査では、先行事業者だけがデータを保有することになり、①新規参入者が不利になる、②公募時の競争条件が不公平になる、③調査済み企業が著しく有利になる等の問題が生じた。

セントラル方式では国が取得したデータを公募参加者に提供するため、競争条件をできるだけ対等化できる。さらに、自治体単独では調査能力に限界があり、高度な専門技術や特殊機器を必要とする大規模な基礎調査を実施することは容易ではなく、国による実施が合理的と考えられた。

(4) 補足

2020 年 11 月から 2021 年 12 月にかけて再エネ海域利用法に基づく第１ラウンドの３海域(①秋田県能代市、三種町及び男鹿市沖、②秋田県由利本荘市沖(北側・南側)、③千葉県銚子市沖)における各洋上風力発電事業の公募が実施された。これらの事業の全てにおいて、三菱商事株式会社(以下、三菱商事)の子会社である三菱商事エナジーソリューションズ株式会社を代表企業とするコンソーシアムが選定事業者に選定されたが、2025 年８月 27 日、三菱商事により事業撤退が公表された。この事態を受けて国は、黎明期にある我が国の洋上風力発電の課題として以下の６点を挙げている[A-10]。

① インフレ等による資材価格等の変動リスクへの対応が不十分な供給価格の制度
② 入札前に事業者に提供される促進区域のおける地盤等のデータ提供の方法
③ 再エネ価値を高く評価する需要家の不足
④ 風車メーカーやサプライヤー等との価格交渉力を確保しづらい制度
⑤ 海外のサプライチェーンに依存していることによるコスト増
⑥ 事業実現性が相対的に過小評価され得る価格点の設計

これらの課題の内、①～⑤については下記の通り、一定の対応がなされている、もしくはなされる見込みであるとしている[A-10]。

① → 次回の公募から導入することとなっている価格調整スキーム
② → セントラル方式の一環として JOGMEC が行うサイト調査
③ → 再エネ価値が適切に評価される環境の整備に係る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での議論
④ → 風車メーカー等の変更に係る計画変更の要件の整理
⑤ → 洋上風力（主に浮体式）のサプライチェーン強靱化に向けた生産設備投資への支援

現在、残る⑥を中心に、リスク対応等により事業を完遂できるような計画を作成した事業者が選定されるよう、公募制度の見直し等による更なる対応がなされている。

＜付録-2＞　公開シンポジウム

「海底地質災害と洋上風力開発」

主　催：日本学術会議総合工学委員会エネルギーと科学技術に関する分科会、日本学術会議地球惑星科学委員会 IUGS 分科会
共　催：IUGS、公益社団法人日本地球惑星科学連合
後　援：公益社団法人地盤工学会、国際津波防災学会、公益社団法人物理探査学会、海底地質リスク評価研究会、International Consortium on Landslides、National Taiwan University、公益社団法人土木学会、一般社団法人日本風力エネルギー学会、一般社団法人環境情報科学センター、公益財団法人日本工学アカデミー
日　時：令和６年 11 月 14 日（木）10:00～18:00
場　所：日本学術会議講堂及びオンライン配信
開催趣旨：
　欧米など諸外国においては、洋上風力発電の開発が進み、再生可能エネルギーの主翼を担う存在となっている。日本においても洋上風力発電の開発が進められている。しかし日本のような活動的縁辺域は、急峻な海底地形で、地震・台風の外力が強く、海底の液状化、泥火山などの沿岸域での海底地質リスクがある。洋上風力発電の今後の持続可能な開発・運用を安全・安心に実現するには、開発者が海底地質リスクの存在を認識し、適切な計画の上で開発を実施することが必要となる。このシンポジウムでは、専門家、開発者が集まり、海底地質災害と洋上風力開発について議論する。

次　第
司　会　岩城　智香子（日本学術会議連携会員）
「開催趣旨」
　　大久保　泰邦（日本学術会議連携会員）
セッション１　Case Studies of Submarine Geohazard Events（コンビーナ：佐々　真志）
「海底ジオハザードリスクと洋上風力」
　　「Submarine Geohazards with the Risk to Offshore Wind」
　　佐々　真志（国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所港湾空港技術研究所）
　　Shinji Sassa (Port and Airport Research Institute, National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology)
「混濁流研究の最近の進展」
　　「Recent Advances in Understanding Turbidity Currents」
　　成瀬　元（京都大学）
　　Hajime Naruse (Kyoto University)
「海底地すべり・津波研究の最近の進展」
　　「Recent Advances in Understanding Submarine Landslides and Tsunamis」

David Tappin (British Geological Survey) (オンライン講演)

「洋上風力施設における洗掘対策の最近の進展」

「Recent Advances in the Mitigation of Scour in Offshore Wind」

Andreas Roulund (Ørsted) (ビデオ講演)

セッション２　Submarine Geological and Geophysical Data Archives (コンビーナ：木戸　ゆかり)

「地形と地下断面・粒度分布などの既存データを用いた広域な地質傾向を念頭に置いた局所リスク評価の必要性」

佐藤　智之 (国立研究開発法人産業技術総合研究所地質調査総合センター地質情報研究部門地球変動史研究グループ主任研究員)

「海底地形データのアーカイブとハザード評価への活用　～令和６年能登半島地震に係る海底地すべり及び海底活断層の把握～」

南　宏樹 (海上保安庁海洋情報部技術・国際課)

「Submarine Geological and Geophysical Data Archives」

Vicki Ferrini (Lamont-Doherty Earth Observatory, Columbia University) (オンライン講演)

「Seabed2030 and Hunga Tonga-Hunga Ha'apai eruption bathymetry expedition」

Kevin Mackay (National Institute of Water and Atmospheric Research) (ビデオとオンライン併用講演)

セッション３　Requirements of offshore geological and geophysical surveys to properly characterize submarine geohazard risks (コンビーナ：松島　潤)

「リスクと不確実性：物理探査を用いた地質評価を例にして」

「Risk and Uncertainty: Geophysical exploration for geological assessment」

松島　潤 (東京大学)

「Required marine geological, geophysical and geotechnical surveys for offshore wind farm development in Taiwan」

Char-Shine Liu (National Taiwan University) (オンサイト講演)

セッション４　Global review of submarine geohazard risks to offshore renewable energy (コンビーナ：川村　喜一郎)

「熊野灘大陸斜面における海底ジオハザードの可能性：海底地滑り発生要因の考察」

「Potential submarine geohazard on the Kumano-nada continental slope, West Japan: controlling factors of a submarine landslide」

金松　敏也　(国立研究開発法人海洋研究開発機構)

Toshiya Kanamatsu

「Geological framework and possible geohazards in central Taiwan Strait」

Jih-Hsin Chang (National Taiwan University) (オンサイト講演)

「The experience of the Italian Marine Geology Research community in standardized geohazard feature mapping on the Italian Seas」

Francesco Latino Chiocci (Geologia Marina Dipartimento Scienze della Terra Università La Sapienza) （ビデオ講演）

16:00「Opening remarks」

Maria Rose Petrizzo (IUGS vice-President)（オンライン講演）

セッション５　International Capacity Building（コンビーナ：竹内　彩乃）

「The Aura Centre for Doctoral Training in Offshore Wind Energy」Robert Dorrell (University of Hull) （ビデオ講演）

「The Geology of Wind Power: from the second largest wind economy in the mid-continent US to the offshore challenge」

Nicholas Hayman (University of Oklahoma) （ビデオ講演）

「The Research Institute for Volcanology and Risk Assessment (IVAR) and its potential as a training platform」

José Manuel Pacheco (IVAR - Instituto de Investigação em Vulcanologia e Avaliação de Riscos, Universidade dos Açores) （オンサイト講演）

「パネルディスカッション：ガイドラインに向けて」

パネラー：佐々　真志、木戸　ゆかり、松島　潤、川村　喜一郎、竹内　彩乃(東邦大学)

「まとめと閉会のあいさつ」

益田　晴恵（日本学術会議連携会員）

参加人数：

講演者等 28 名

その他の参加者　オンライン参加 312 名、現地参加 59 名

合計 399 名

特記事項：

- ✓ 電気新聞が取材のため、オンライン参加された。
- ✓ シンポジウムの後、2024 年 11 月 15、16 日に、共催団体である IUGS が主催した野外調査を実施した。