

着床式洋上風力発電導入ガイドブック 別冊
銚子沖洋上風力発電実証研究施設導入事例

2018年3月

国立研究開発法人
新エネルギー・産業技術総合開発機構

はじめに

洋上風力発電実証研究の成果を関係者に広く活用していただくため、着床式洋上風力発電導入ガイドブックの別冊として、銚子沖洋上風力発電実証研究施設の事例をとりまとめた。導入計画の進め方に沿って情報を整理しており、目次構成はガイドブック本編の「Ⅲ. 着床式洋上風力発電の導入手引き」に概ね対応している。

なお、本別冊は洋上風力発電等技術研究開発委員会での資料やNEDO成果報告会での資料、および下記の報告書等の情報に基づいて作成されている。詳細は、下記の報告書を参照されたい。

- ・ 「平成20年度 洋上風力発電実証研究F/S調査 報告書」(NEDO, 2009)
- ・ 「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(銚子沖) 報告書」(NEDO, 2017)
- ・ 「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 洋上風力発電システム実証研究(銚子沖) 報告書」(NEDO, 2017)

※F/Sはフェージビリティ・スタディを表す。本文ではFSと表記する。

目次

| | 頁 |
|---------------------|----|
| 1 実施体制 | 1 |
| 2 立地環境調査 | 2 |
| 2.1 自然条件 | 3 |
| (1) 気象 | 3 |
| (2) 海象 | 4 |
| (3) 海洋生物 | 15 |
| 2.2 社会条件 | 19 |
| (1) 対象法令 | 19 |
| (2) 社会的制約条件 | 19 |
| 2.3 利害関係者協議 | 22 |
| 3 海域・気象・海象調査 | 25 |
| 3.1 風況 | 25 |
| (1) 洋上の風況の推定 | 25 |
| (2) 洋上の風況の観測 | 33 |
| 3.2 波浪 | 37 |
| (1) 波浪の推定 | 37 |
| (2) 波浪の観測 | 42 |
| 3.3 海潮流 | 46 |
| (1) 海潮流の推定 | 46 |
| (2) 海潮流の観測 | 47 |
| 3.4 海底地形・土質 | 49 |
| (1) 海底地形調査 | 49 |
| (2) 土質調査 | 54 |
| 4 基本設計 | 66 |
| 4.1 風車設置点の決定 | 66 |
| 4.2 風車の仕様 | 67 |
| 4.3 支持構造物の選定 | 68 |
| 4.4 計画段階のコストと実際のコスト | 70 |
| 5 実施設計 | 72 |
| 5.1 設備設計 | 72 |
| (1) 支持物設計 | 72 |
| (2) 風車設計 | 79 |
| (3) 送変電設備設計 | 81 |
| 5.2 工事設計 | 85 |
| (1) 電気工事設計 | 85 |
| (2) 土木・建築工事設計 | 85 |

| | | |
|-----|----------------|-----|
| 5.3 | 工事計画 | 86 |
| (1) | 工事工程 | 86 |
| (2) | 風車の施工方法 | 87 |
| (3) | 海底ケーブルの施工方法 | 100 |
| 6 | 建設工事 | 105 |
| 6.1 | 基礎工事 | 105 |
| 6.2 | 観測タワーの設置工事 | 108 |
| 6.3 | 風車の設置工事 | 110 |
| 6.4 | 海底ケーブルの布設 | 113 |
| 7 | 運転・保守 | 114 |
| 7.1 | 運転・保守の方法 | 114 |
| (1) | モニタリング | 114 |
| (2) | 点検 | 116 |
| 7.2 | 運転・保守の結果 | 118 |
| (1) | 運転の実績 | 118 |
| (2) | 保守の実績 | 119 |
| 7.3 | 洋上風車のアクセスに係る検討 | 121 |
| (1) | 稼働率 | 121 |
| (2) | 洋上風車へのアクセス | 122 |
| 7.4 | 運転・保守から確認された課題 | 124 |
| 8 | 撤去 | 129 |
| 9 | 環境影響評価 | 132 |
| 10 | 参考文献 | 133 |

1 実施体制

銚子沖における洋上風力発電実証研究は、図 1-1 のような実施体制で行った。風況観測システムについては NEDO が 100% の費用を負担する業務委託であり、東京電力ホールディングス株式会社と国立大学法人東京大学が共同で実施した。風力発電システムについては、費用の 2/3 を NEDO が負担し、残りの 1/3 を東京電力が負担する共同研究であった。

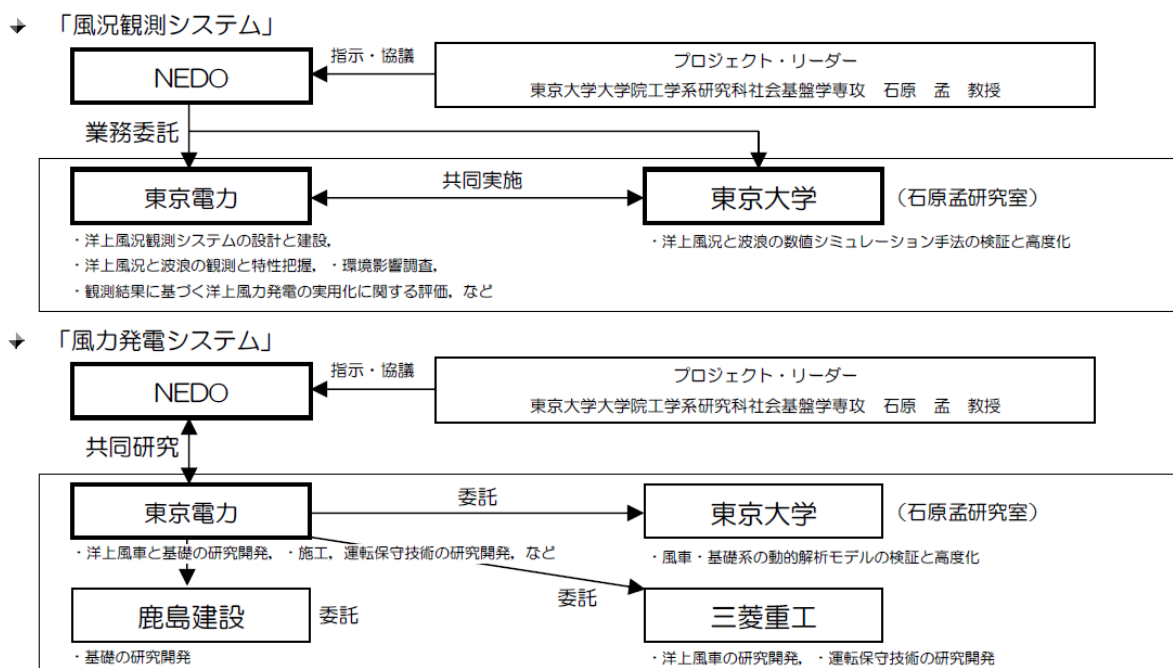


図 1-1 銚子沖における洋上風力発電実証研究の実施体制

2 立地環境調査

本実証研究では、候補海域として関東地方の沿岸で風況が良く、遠浅の海域である、図 2-1 の赤点線で示す千葉県銚子市、旭市、匝瑳（そうさ）市の沿岸海域を選定した。



図 2-1 洋上風力発電実証研究候補海域（赤点線内）

2.1 自然条件

(1) 気象

実証研究候補海域の気象概況を把握するため、当海域から最も近い気象官署である銚子地方気象台の観測データを確認した。当地方気象台における1998年から2007年の過去10年間の年平均風速（観測高28.2m）を調べたところ、5.81m/sであった（図2.1-1）。

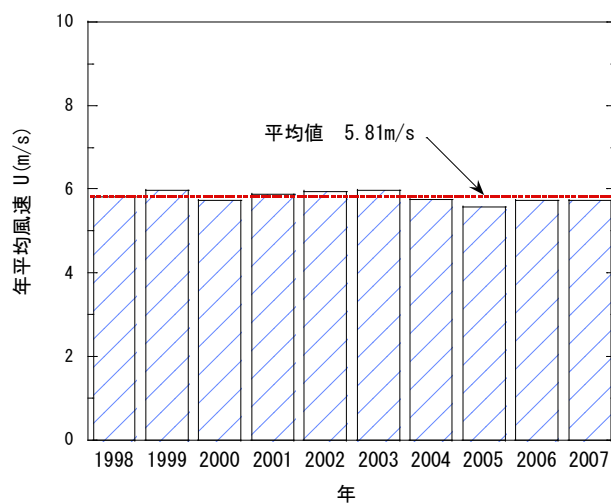


図 2.1-1 1998 年から 2007 年までの年平均風速

(2) 海象

1) 海底地形・水深、底質

①海底地形・水深

実証研究候補海域の海底地形・水深を、図 2.1-2 の海底地形図を基に整理した。実証研究候補海域の北東部には基盤の露出した起伏地形が分布し、この地塊の後背地には屏風ヶ浦を経て銚子半島の台地が発達している。これ以外の海域では一部を除き沖積層で被覆され、極めて平滑化された平坦面が形成されている。この広大な平坦面は、沖合から漸移して九十九里平野へと続く。ただし、この平坦面は水深 14m、65m 付近に傾斜の変換点が認められ、総体的には緩やかな段丘状を呈している。段丘面は北から南に帯状に分布し、礁面は無数の谷地形により刻まれケスタ状を呈している。

図 2.1-2 に犬吠埼周辺の海底地形図、図 2.1-3 に屏風ヶ浦沖から九十九里浜沖の海底地形図、図 2.1-4 に海底地形分類図を示す。

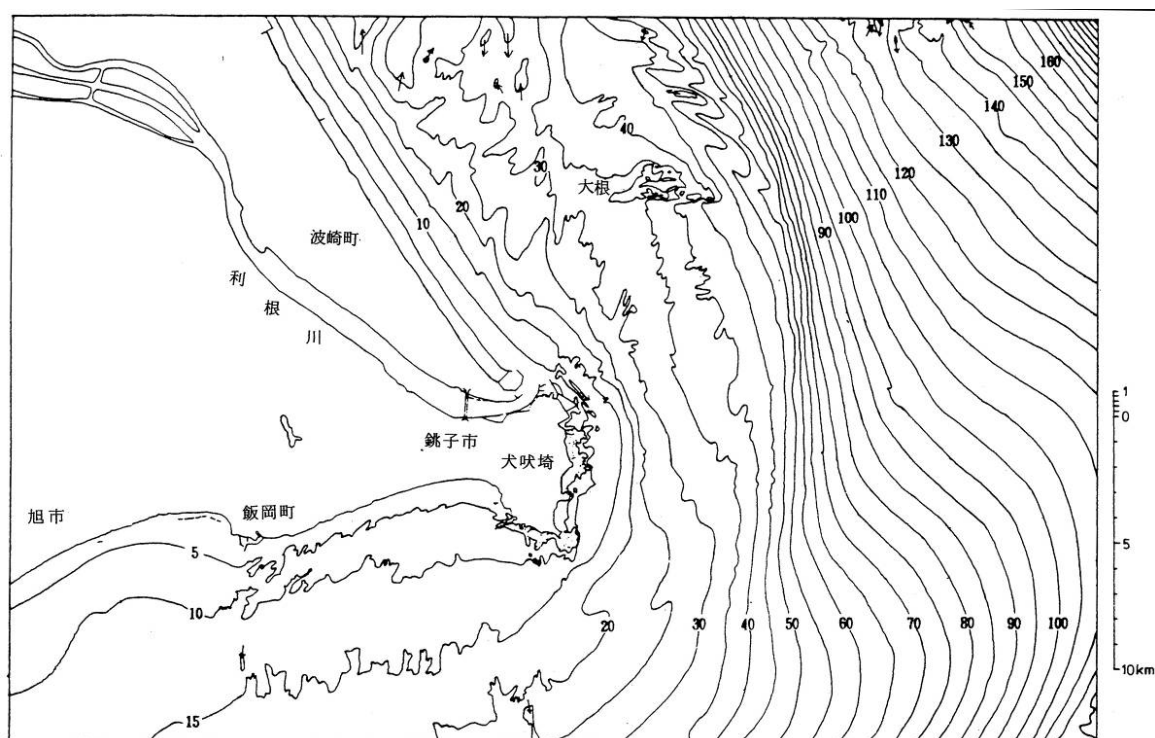


図 2.1-2 犬吠埼周辺の海底地形図(海上保安庁水路部, 1984)

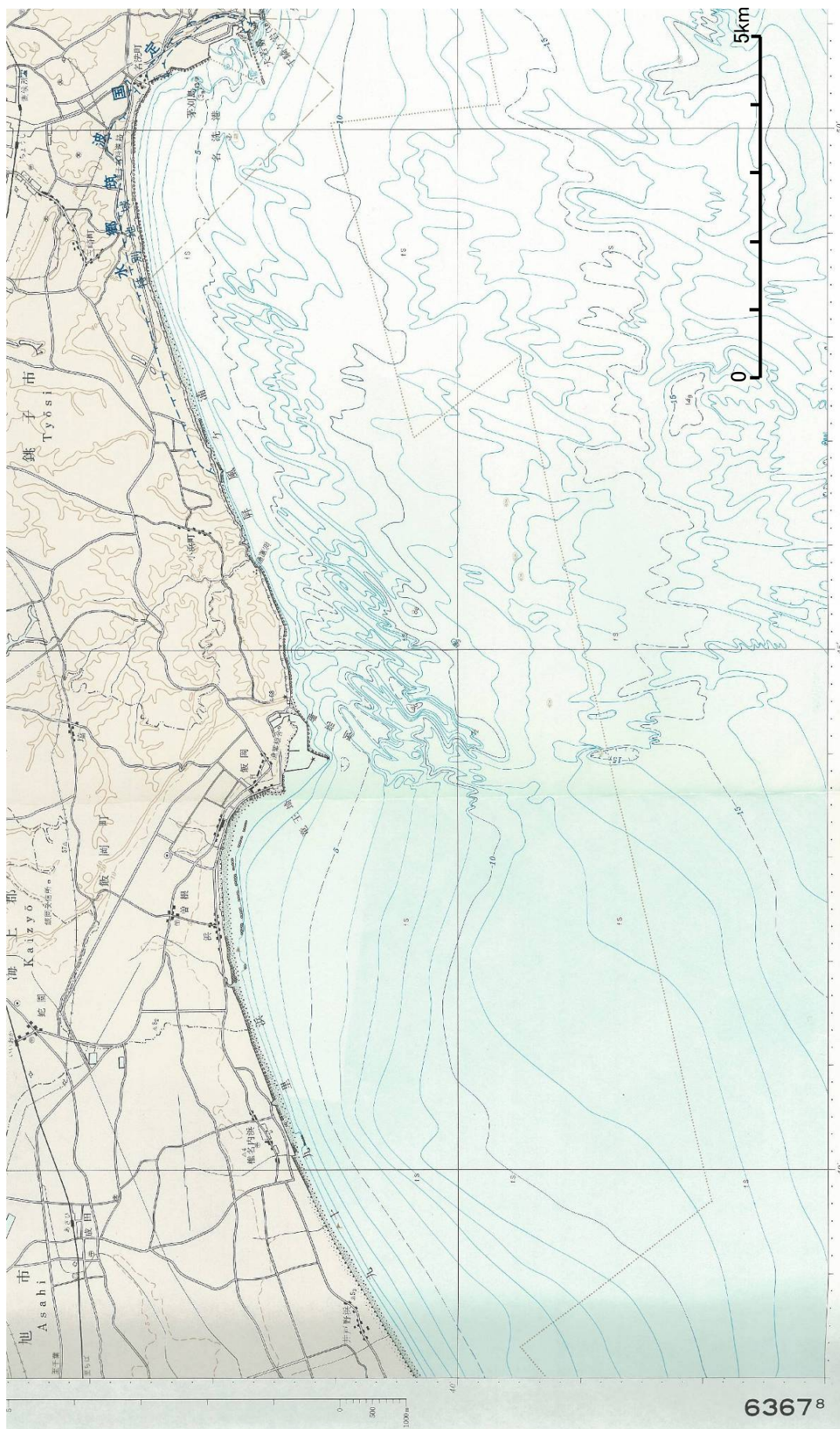


図 2.1-3 屏風ヶ浦沖から九十九里浜沖の海底地形図 (海上保安庁水路部, 1984)

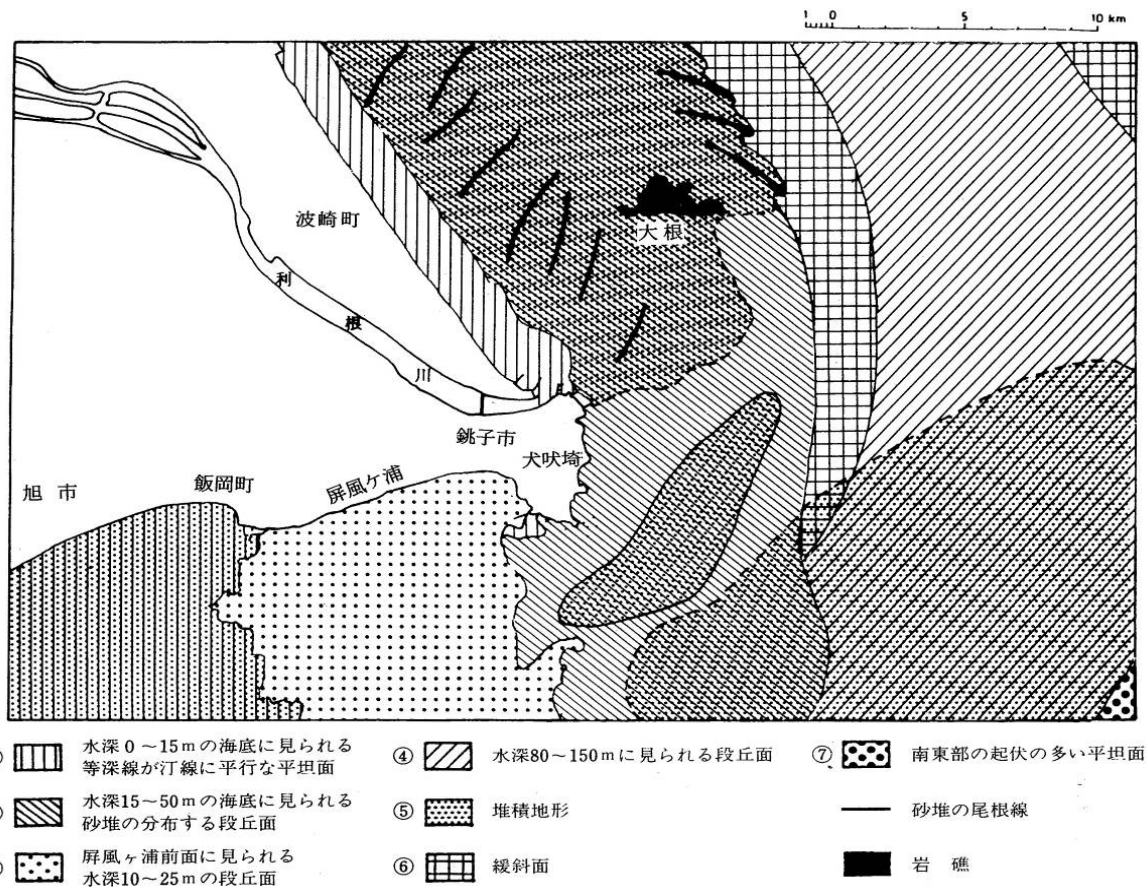


図 2.1-4 海底地形分類図（海上保安庁水路部，1984）

②底質

犬吠埼周辺海域の底質分布図、堆積層等層厚線図、堆積層基底図をそれぞれ図 2.1-5～図 2.1-7 に示す。底質については、北東部および木戸川沖に露岩域が分布し、その他の大陸棚上には砂質堆積物が広く分布している。北東部の露岩域上面は非常に起伏に富んでおり、非常に平滑化されている木戸川沖とは対照的である。大陸棚上には、中砂と細砂が分布している。

対象海域の岩の分布は、以下の 2 箇所に認められる。

- ・屏風ヶ浦前面海域：沖合水深約 25m から屏風ヶ浦の海食崖直下付近まで広く分布している。
- ・犬吠埼周辺海域：水深 15～20m 以浅に分布している。

粗砂は、犬吠埼南東の沖合、水深約 35m 付近と屏風ヶ浦前面の岩（泥質）の上に薄く分布する。中砂は飯岡町（現、旭市飯岡）※の沖合の水深約 15m 付近に分布する。細砂は水深約 15m 以浅の旭市※前面海域に分布している。

※ 2005 年に飯岡町は、旭市と合併した。図面が 2005 年以前のものであるため、ここでは合併前の旭市、飯岡町で分類した。

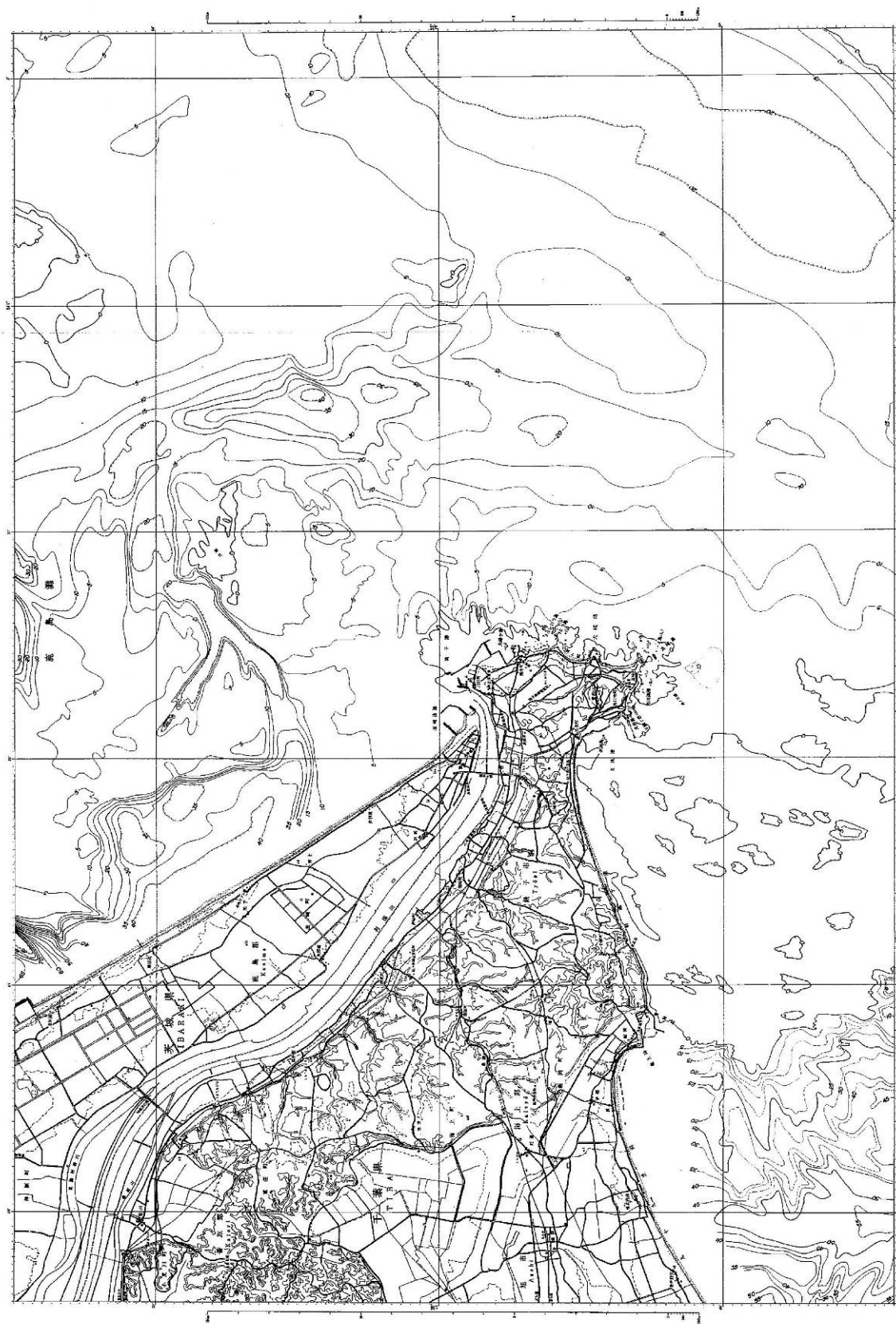


图 2.1-6 堆积层等厚线图 (海上保安庁水路部, 1984)

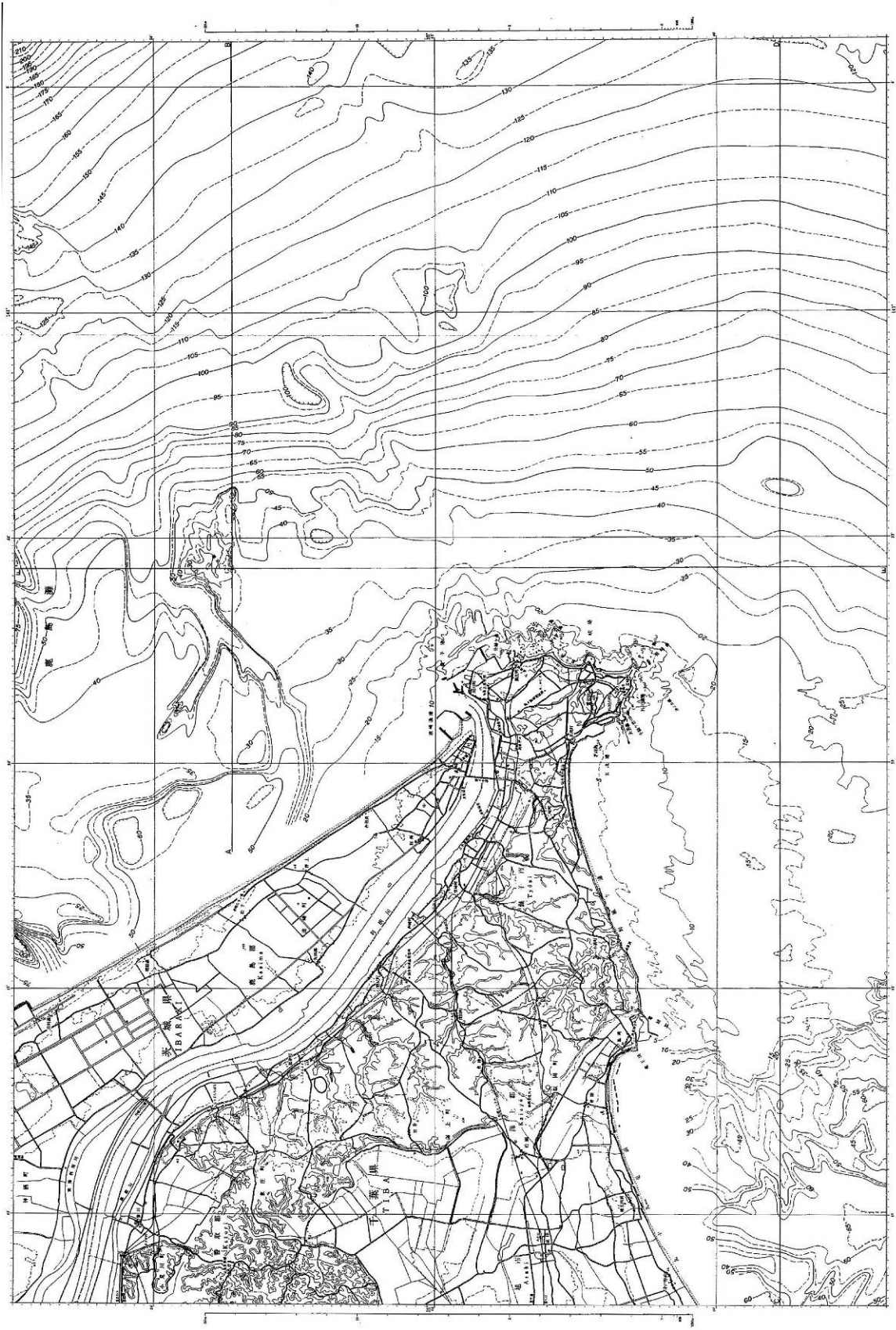


图 2.1-7 堆积层基底图 (海上保安厅水路部, 1984)

2) 波浪、海潮流

①波浪

実証研究候補海域における波浪については、実証研究候補海域に近い観測点の波浪の時系列データ（波高および波周期）を集めて調査を行うこととした。ただし、後述のように実測データには欠測期間がかなり含まれるため、設計期間の最大波などの設定のために、波浪の統計データについても別途入手して検討した。また、観測値の他に、(独)海上安全技術研究所（以下、海技研と記す）における波浪推算結果も用いた。

使用データとして、a)犬吠埼目視観測データ、b)千葉県海象データ、c)鹿島ナウファス(NOWPHAS)データの3つの観測点データとd)海技研の波浪推算結果の計4種のデータを用いた。図2.1-8にa)~c)の観測地点を示し、図2.1-9にd)海技研データの対象範囲（緯度番号25、経度番号42）を示す。

犬吠埼の目視観測は犬吠埼灯台から東方約1kmの地点で行われており、最も陸に近い。また、南北には砂浜と岬が伸びており、南方や北方からの波浪の影響を受けにくいと考えられる。千葉県の海象データは、沖合7km程度の位置で観測されており、3地点の中では最も陸から離れた地点で計測されている。南方には遮る地形がなく、台風時期のうねりなどが直接入ってくる地点であると考えられる。鹿島のナウファスデータは、鹿島港の南東で、岸から3km程度の位置での計測である。南方には犬吠埼があり、台風時期のうねりなどは入りにくいと考えられる。海技研のデータは、図2.1-10に示した0.5°格子海域における1994~2004年の10年間の波浪推算結果（計算格子間隔：緯度2分、経度2分）である（辻本・石田，2005）。

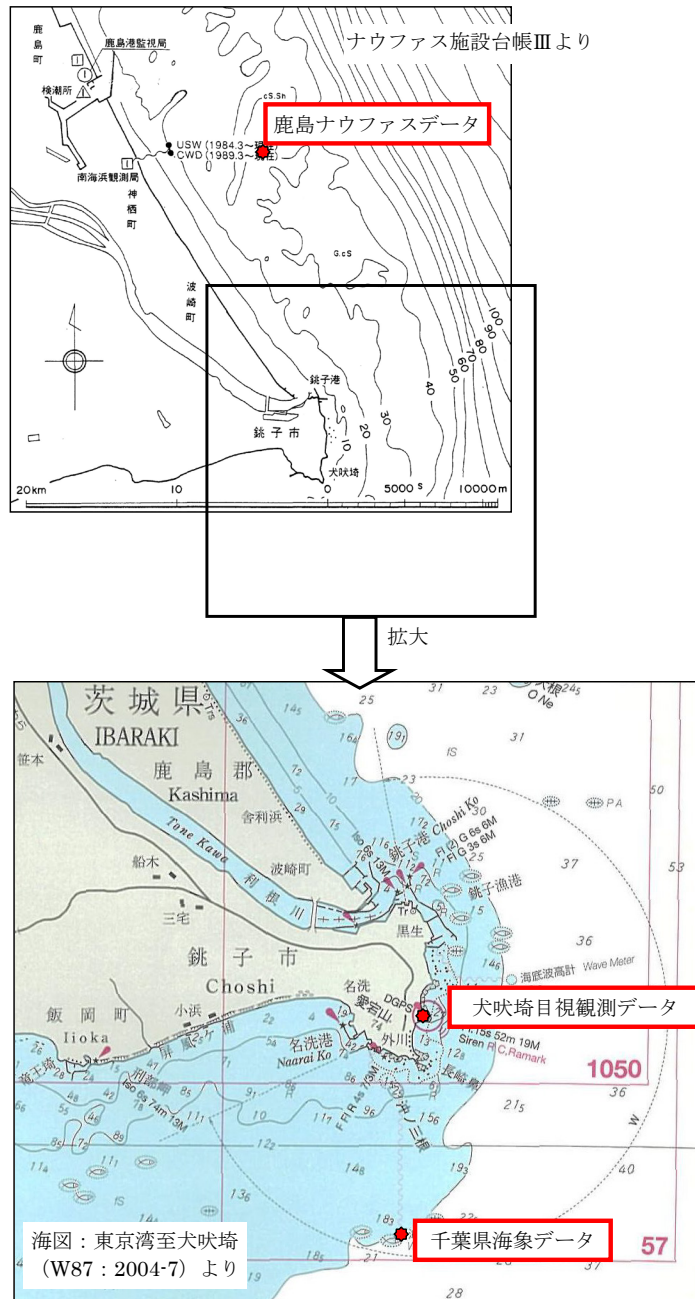


図 2.1-8 データを収集した観測点

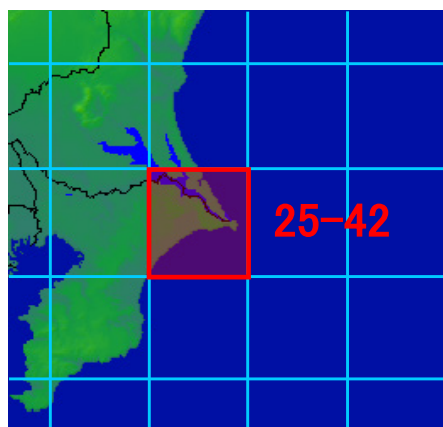


図 2.1-9 海技研データベースの地点

データの取得期間は下記の通りである。

a) 犬吠埼目視観測データ

2000年4月～2008年3月（2008年3月22日からはレーダ観測）

b) 千葉県海象データ

波浪 1992年7月21日～2004年7月28日

風向・風速 1992年12月19日～2004年12月31日

潮位 1989年7月5日～2004年12月31日

c) 鹿島ナウファスデータ

1972年4月から波浪観測開始（2005年10月から連続観測開始）

d) 海技研データ

1994年2月1日～2004年1月31日の10年間の波浪推算結果

各地点のデータ取得方法は下記の通りである。

a) 犬吠埼目視観測データ

目視観測により、表 2.1-1、表 2.1-2 に基づいて判定した毎時 25 分、55 分のデータである。

表 2.1-1 犬吠埼観測所 風浪階級表

| 階級 | 説明 | 波の高さ (m) |
|----|--------------|-----------------|
| 0 | 鏡のようになめらかである | 0 |
| 1 | さざ波がある | 0 をこえ 0.1 まで |
| 2 | なめらか、小波がある | 0.1 をこえ 0.5 まで |
| 3 | やや波がある | 0.5 をこえ 1.25 まで |
| 4 | かなり波がある | 1.25 をこえ 2.5 まで |
| 5 | 波がやや高い | 2.5 をこえ 4 まで |
| 6 | 波がかなり高い | 4 をこえ 6 まで |
| 7 | 相当荒れている | 6 をこえ 9 まで |
| 8 | 非常に荒れている | 9 をこえ 14 まで |
| 9 | 異常な状態 | 14 をこえる |

表 2.1-2 犬吠埼観測所 うねり階級表

| 階級 | 周期 | 波高 |
|----|-----------------------|-----------------------|
| 0 | うねりがない | |
| 1 | 短いまたは中位 | 弱い (波高 2m 未満) |
| 2 | 長い | |
| 3 | 短い | やや高い (波高 2m 以上、4m 未満) |
| 4 | 中位 | |
| 5 | 長い | |
| 6 | 短い | 高い (波高 4m 以上) |
| 7 | 中位 | |
| 8 | 長い | |
| 9 | 2 方向からうねりが来て海上が混乱している | |

b) 千葉県海象データ

下記計測器による、毎正時のデータ

波浪 超音波波高計 USW-150

(参考 風向・風速 プロペラ型自記風向風速計 C-W253)

潮位 ブース型長期捲検潮器 LFV-V

c) 鹿島ナウファスデータ

下記計測器による、毎偶数正時のデータ

波高 超音波式波高計 USW

波向 超音波式波向計 CWD

d) 海技研データ

図 2.1-9 に示した対象領域の中の、15×15 の小エリアのデータを使用した。有義波高、有義周期は 1 日 2 回 (9 時、21 時) の 12 時間間隔のデータ、風速は高さ 10m における 1 日 2 回の 10 分間平均値である。データ個数は 1,642,500 個 (15×15×2 回×365 日×10 年) のうち、欠測を除く 1,051,646 個である。

異なる地点で得られた観測データの比較を行った。まず、犬吠埼目視観測データと千葉県海象データを比較した。データの形式が違うため直接の比較が難しいが、例えば工事を行うような静穏な状態の各月発生割合として、犬吠埼は「なみ」と「うねり」の階級、千葉県は有義波高と周期に制限を加えて示した (図 2.1-10)。

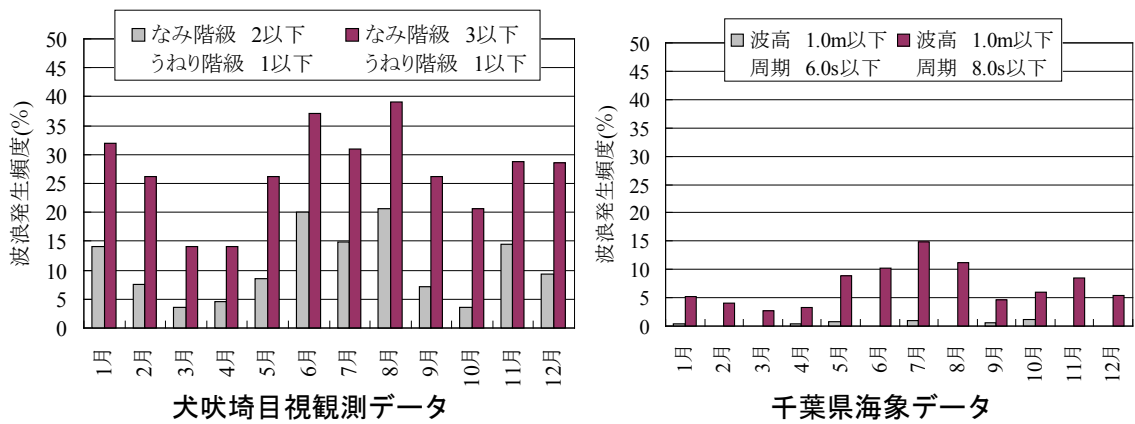


図 2.1-10 波浪発生頻度の比較 (0～18 時の間連続で条件を満たす割合)

この図を見ると、犬吠埼で「なみ階級 2 以下・うねり階級 1 以下」のときと、千葉県海象データで波高 1m 以下・周期 8s 以下のときに発生頻度の大きさが近くなり、夏場に高く、2～4 月や 9～10 月で下がるなどの傾向が両地点にて類似することがわかる。

千葉県海象データと鹿島ナウファスデータについても比較を行った。図 2.1-11 に千葉県海象データと鹿島ナウファスデータの波高の頻度 (通年) を示す。

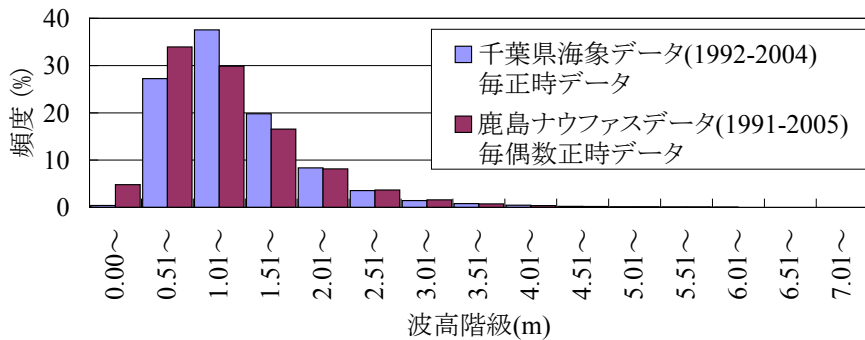


図 2.1-11 千葉県海象データと鹿島ナウファスデータの波高頻度比較

2 地点の波高頻度には高い類似性があることがわかる。以上から、異なる地点の波浪データにはある程度の共通性があり、どのデータを使用しても信頼性があると言える。

以上より、波浪の参考には、実証研究候補海域に最も近い千葉県海象データが適切と考えられた。ただし、千葉県海象データには欠測データが多いという問題もある。

②海潮流

潮位について、平成 21 年潮位表 (気象庁発行) に記載されている、実証研究候補海域に最も近い銚子漁港における潮位実況を確認した。基本水準面 (C.D.L.) と各潮位の関係は以下のようになっていた。

$$\text{朔望平均満潮位 H.W.L.} = \text{C.D.L.} + 1.50\text{m}$$

平均潮位 $M.W.L. = C.D.L. + 0.87m$
東京湾中等潮位 $T.P. \pm 0.00 = C.D.L. + 0.86m$
朔望平均干潮位 $L.W.L. = C.D.L. - 0.02m$

(3) 海洋生物

1) 鳥類

文献調査より、鳥類の主な出現種を整理した。桑原ら（2006）の現地調査において実証研究候補海域周辺で確認された鳥類を中心に、沖合海上で確認される可能性が考えられる種、個体数は少ないが重要性が高いと思われる種と合わせて、代表的な鳥類として 54 種を抽出した。それら 54 種の概要を表 2.1-3 に示す。また、その情報を基に作成した実証研究候補海域の鳥類分類模式図を図 2.1-13 に示す。



図 2.1-13 実証研究候補海域周辺の鳥類分類模式図

2) 海棲哺乳類

文献調査より、海棲哺乳類の主な出現種を整理した。千葉県（2000）によると、銚子沖で見られる小型クジラ類は、スナメリ、カマイルカ、セミイルカ、バンドウイルカ、イシイルカ、コビレゴンドウ、オキゴンドウ、ハナゴンドウ、シャチなどであり、この他にマッコウクジラ、ツチクジラなどが知られているとされる。これらの種類は、銚子沖 15～30km の範囲で確認されており、4～8 月によく確認できる種はカマイルカやセミイルカの数千頭その他、スナメリの約 100 頭である。特にスナメリは群れで泳いでいる集団をよく見るとされる。

3) 漁業生物

文献調査および漁業者への聞き取りにより、漁業生物の状況を整理した。2004～2008 年の「千葉農林水産統計年報 総合編」によれば、実証研究候補海域で漁業を操業する銚子漁業協同組合、海匠（かいそう）漁業協同組合による 2002～2006 年の多獲魚種は、カタクチイワシ、サバ類、サンマ、マイワシ、マアジ、ブリ類、キンメダイ、スルメイカ、サメ類、サケ・マス類などであった。また漁業者からの聞き取りによれば、実証研究候補海域での漁業対象種と漁業の種類は下記の通りであった。

- ・イワシ類・サバ類（中型まき網）
- ・シラウオ（機船船びき網）
- ・スズキ・タイ・カレイ等（延縄）
- ・岩ガキ、イセエビ等（共同漁業権区域）

田村他（1963）によれば、実証研究候補海域における漁獲種は107種類で、このうち漁獲量が多く生息水深20m以浅の種は、スズキ、マダイ、イシモチ、カワハギ、アイナメ、ヒラメなど28種類であった。

2. 2 社会条件

(1) 対象法令

実証研究候補海域の周辺状況に基づき、対象法令を抽出した。その結果は表2.2-1の通りである。

表 2.2-1 実証研究候補海域への実証研究設備設置に関わる法令

| 法令の目的 | 対象法令 | 事前協議先 |
|---------------------|--|--------------------|
| 風車と観測タワーの設置 | 建築基準法（建築確認申請） | 千葉県県土整備部 |
| 風車と観測タワー、海底ケーブルの設置 | 国有財産法、国土交通省所管公共用財産管理規則、使用料及び手数料条例（千葉県） | 千葉県県土整備部 |
| 海底ケーブルの設置 | 千葉県海面漁業調整規則 | 千葉県農林水産部 |
| | 港湾法、千葉県港湾管理条例、港湾区域内及び港湾隣接地域内における工事等の規制に関する規則 | 千葉県県土整備部 |
| | 海岸法、海岸法施行令、千葉県海岸管理規則 | 千葉県県土整備部 |
| | 漁港漁場整備法、千葉県漁港管理条例 | 千葉県農林水産部 |
| 送電ケーブル（陸）、変電設備の設置 | 港湾法、千葉県港湾管理条例、千葉県港湾管理条例施行規則 | 千葉県県土整備部 |
| | 自然公園法 | 千葉県環境生活部 |
| | 漁港漁場整備法、千葉県漁港管理条例 | 千葉県農林水産部 |
| 風車と観測タワーの設置 | （海上保安庁による行政指導） | 海上保安庁銚子海上保安部 |
| 船舶の航行安全 | 航路標識法 | 海上保安庁銚子海上保安部 |
| | 国際航路標識協会（IALA）の推奨方法 | 海上保安庁銚子海上保安部 |
| | The Marking of Offshore Wind Farms | |
| 無線への影響 | 電波法 | 千葉県漁業協同組合連合会、電波産業会 |
| 航空障害灯の設置（洋上風車の取り扱い） | 航空法 | 国土交通省東京航空局 |

(2) 社会的制約条件

一般的に、洋上風力発電設備の設置に対する社会的制約条件として、漁業への影響や、環境への影響、景観への影響、船舶の航行安全に対する影響があげられる。

実証研究候補海域は我が国有数の漁場であることから、漁業への影響をできるだけ少なくした洋上風車・観測タワー設置予定地点の選定や設備の設計が必要となる。風車と観測タワーの設置候補海域は、はえ縄漁、シラウオ漁、釣り船、共同漁業権漁業（岩ガキ、イセエビなどの採取）の漁場に近接しているため、銚子市漁業協同組合や海匠漁業協同組合に説明し、また協議を行う必要がある。

環境への影響については、重要な海鳥と海産哺乳類が実証研究候補海域に生息していることがあげられた。東京都によって御蔵島の営巣地が保護されている重要種・オオミズナギドリは当海域を採餌場としている。また、国際野生希少動物種であるスナメリ（イルカ的一种）も当海域に生息している。これら2種については、実証研究の段階で、観察による影響評価が必要であった。

銚子市の犬吠崎近傍には、「犬吠崎の白亜紀浅海堆積物」として国から天然記念物に指定されている地形があり、実証研究設備の設置に際しては十分な配慮が必要であった。銚子市には、太平洋を一望できる「地球の丸く見える丘展望館」や海に面した景勝地である屏風ヶ浦がある。また、銚子ヨットハーバーを拠点として、ヨット・セイリングやイルカ・ウォッチングが行わ

れている。実証研究候補海域を対象とした景観に関する法規制はないが、当海域は海の景観が観光資源となっており、実証研究において景観に対する調査と評価が必要であった。

また、船舶の航行安全においては、風車と観測タワーは海上保安庁の「航路誌」(海上保安庁、2006年)に示された500t以上の船舶の航路からは十分に離れている。一方、近隣にヨットハーバーなどがあるため、近隣の漁船に加えヨット、プレジャーボートの安全を確保しなければならない。このため、日本の航路標識法と国際航路標識協会の推奨方法に従い、白色フラッシュライトを設置し、風車タワー基部を黄色に塗装するとともに、濃霧への対応として音波標識(設備の位置を知らせるラップ)も併せて設置することとした。

図 2.2-1 と図 2.2-2 に、実証研究候補海域の漁業権設定区域、国定公園、海上保安庁が示す航路(500t以上の船舶)を示す。

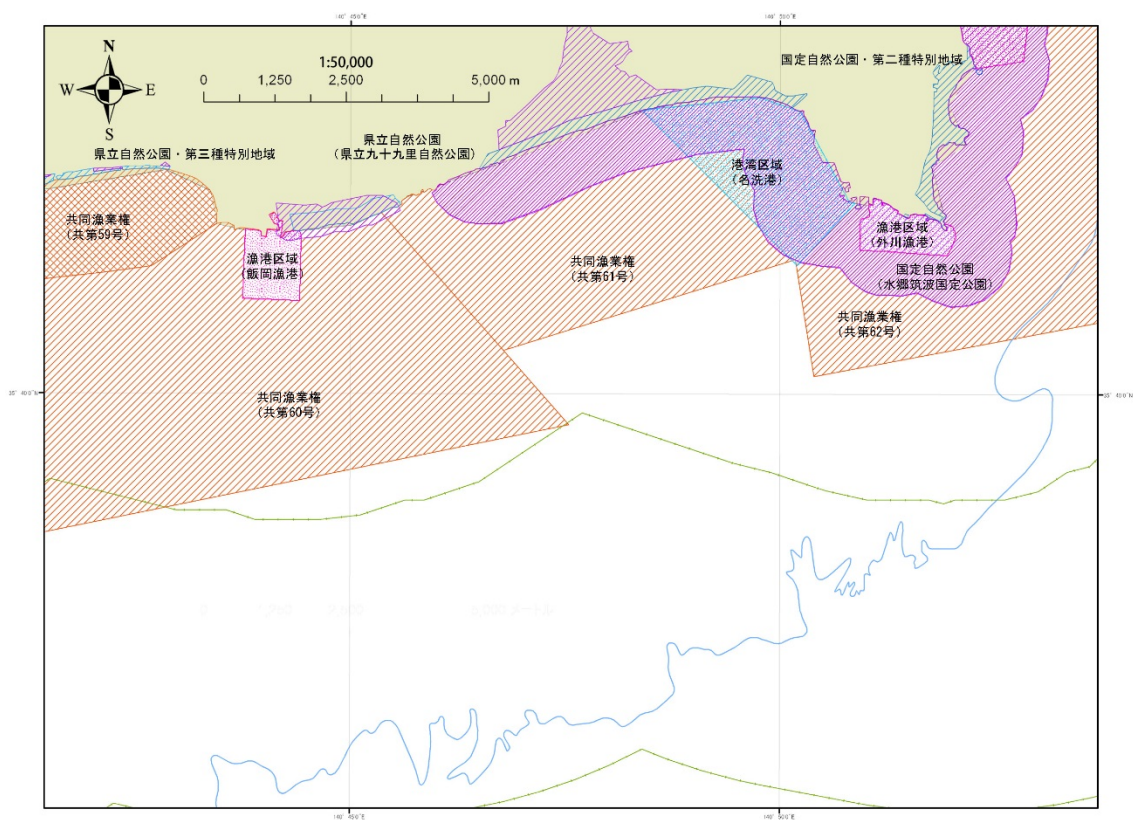


図 2.2-1 実証研究候補海域の漁業権設定区域と国定公園などの位置
(東京電力, 2007)

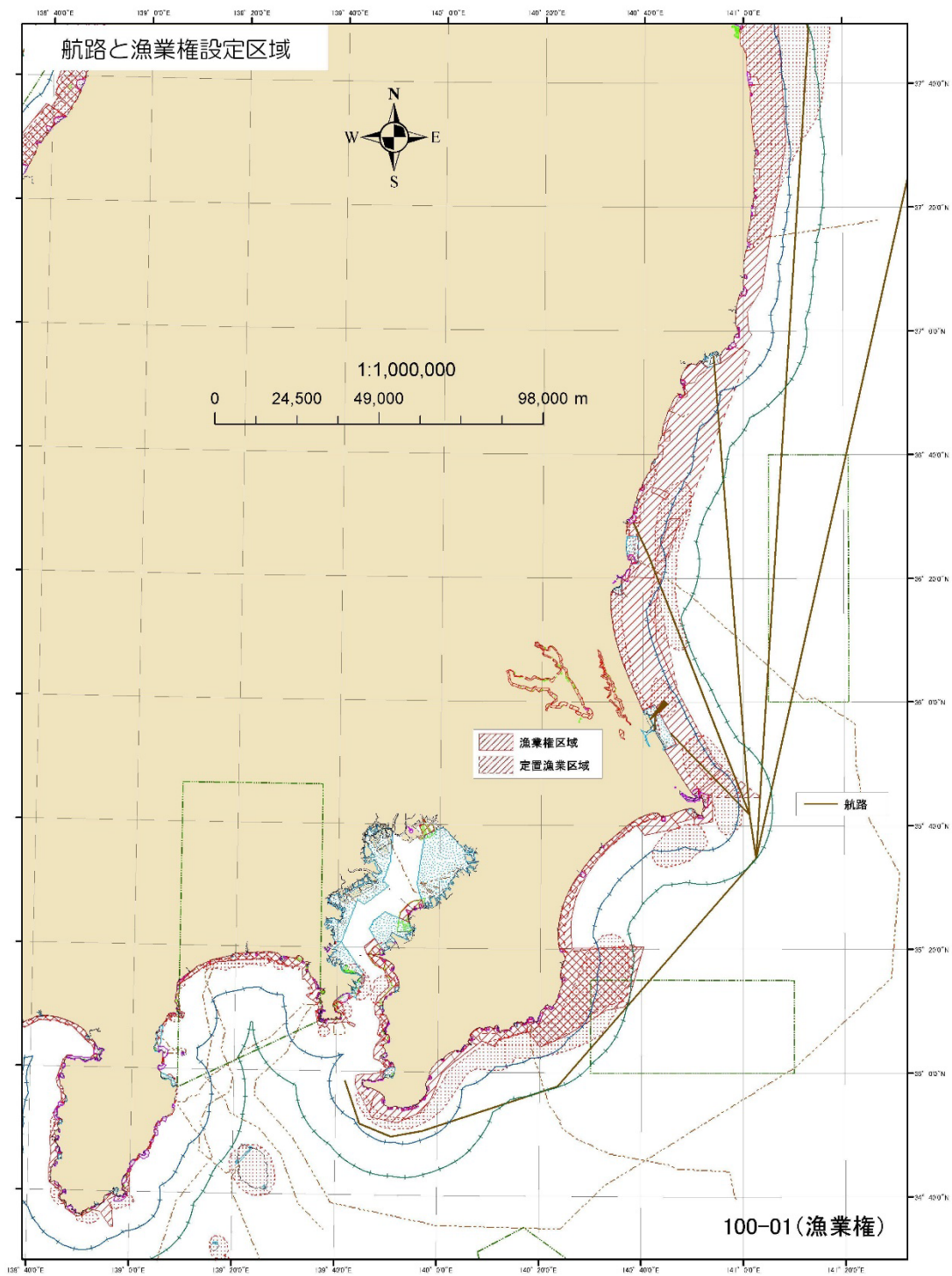


図 2.2-2 関東地方、福島県、静岡県沿岸の航路と漁業権設定区域
(東京電力, 2007)

2.3 利害関係者協議

実証研究候補海域のうち銚子市の屏風ヶ浦沖は、他の海域に比べ平均風速が大きく、海底が岩盤であるため施工の比較的容易な重力式基礎を適用することができる。このため、事前協議は銚子市屏風ヶ浦沖を実証研究予定地点の第1候補として、漁業協同組合や自治体、関係当局他と事前協議を行った。

銚子市屏風ヶ浦沖を漁場とする銚子市漁業協同組合、海匠漁業協同組合（旭市、匝瑳市）の組合員の方々と事前協議を行い、実証研究設備（風車1基、観測タワー1基、海底ケーブル）の設置と実証研究の実施の了解を得た。事前協議において漁業協同組合から出された要望は大きく2つあり、1つ目は漁船の安全確保、2つ目は地域との共存共栄策であった。漁船の安全確保については、航路標識法と国際航路標識協会の推奨方法に基づき、白色フラッシュライトを設置するとともに、風車タワー基部（海面上15m以下）に黄色塗装をすることとし、漁業協同組合の了解を得た。また、濃霧時の音波標識（ラッパ）も併せて設置し、屏風ヶ浦沖で発生する濃霧対策とすることも説明した。地域との共存共栄策については、漁業協同組合の漁船を施工や環境影響調査時に傭船したり、風車と観測タワーの基礎の魚礁効果を明らかにするための調査を、有識者や漁業協同組合などの協力を得ながら実施したりすることとした。

千葉県の関係各部との事前協議の結果、実証研究設備を設置するにあたって、表2.3-1に示す法規制と手続きがあることがわかった。また、実証研究予定地点で実証研究設備の設置を禁止する法規制はないが、地域の方々の理解と協力が得られる形で進めていくべきとの指示があった。景観に関して、洋上風力発電設備を対象とした法規制はなかったが、地域の方々の意見を調査しそれらを反映した形で進めるべきとの指示があった。また、銚子市の犬吠埼近傍に、国指定の天然記念物「犬吠埼の白亜紀浅海堆積物」という地形（露頭）があるため、実証研究設備の設置に際して十分配慮すべきとの指示があった。

表 2.3-1 千葉県に関わる法令と手続き

| 行為 | 関係する法令 | 届出、許可申請（窓口）、特記事項 |
|------------------------------------|--|---|
| 風車の設置 | 建築基準法（建築確認申請） | ・確認申請→海匝地域整備センター（指定性能評価機関による安全性評価、大臣認定が必要） |
| 風車と観測タワー、海底ケーブルの設置（海域の占有） | 国有財産法、国土交通省所管公共用財産管理規則、使用料及び手数料条例（千葉県）（公共用財産使用許可申請など、占有面積（基礎マウンド含む）・ケーブル直径に応じた使用料） | ・許可申請→海匝地域整備センター銚子整備事務所 |
| 海底ケーブルの設置（共同漁業権設定区域内での岩礁破砕） | 千葉県海面漁業調整規則（岩礁破砕等許可申請） | ・許可申請→農林水産部水産局水産課 |
| 海底ケーブルの設置（港湾区域の通過・占有） | 港湾法、千葉県港湾管理条例、港湾区域内及び港湾隣接地域内における工事等の規制に関する規則 | ・許可申請→県土整備部港湾課 ・申請窓口→海匝地域整備センター銚子整備事務所 |
| 海底ケーブルの設置（海岸保全区域での土地掘削等） | 海岸法、海岸法施行令、千葉県海岸管理規則 | ・許可申請→海匝地域整備センター銚子整備事務所 |
| 海底ケーブルの設置（海岸保全区域内の公共海岸の通過・占有） | 海岸法、千葉県海岸管理規則 | ・許可申請→海匝地域整備センター銚子整備事務所 |
| 送電ケーブル（陸）の設置（港湾施設の通過・占有） | 港湾法、千葉県港湾管理条例、千葉県港湾管理条例施行規則（目的外使用許可申請） | ・許可申請→海匝地域整備センター銚子整備事務所 |
| 送電ケーブル（陸）、変電所の設置（国定公園普通地域での工作物の設置） | 自然公園法（工作物の新築行為届出）（高さのある工作物：高さ30m以上、建築物：高さ13m以上又は延べ面積1,000㎡以上） | ・事前協議→環境生活部自然保護課 ・届出→海匝地域整備センター銚子整備事務所 |
| 送電ケーブル（陸）（国定公園第2種特別保護地区での工作物の設置） | 自然公園法（工作物の新築許可申請）（その他工作物（ダム、橋、鉄塔等）人為的労作によって築造される施設） | ・事前協議→環境生活部自然保護課 ・許可申請→海匝地域整備センター銚子整備事務所 |
| 漁港区域内の水域及び公共空地における工作物の設置 | 漁港漁場整備法 | ・許可申請→銚子漁港事務所 |
| 甲種漁港施設に工作物の設置 | 千葉県漁港管理条例 | ・許可申請→銚子漁港事務所 |

海上保安庁銚子海上保安部との事前協議の結果、実証研究設備の設置に関して、表 2.3-2 に示す法規制と手続きがあることがわかった。実証研究設備の設置を禁止する法規制はないが、地元の漁業者やヨット・プレジャーボート関係者（銚子マリーナ、銚子マリクラブなど）の了解を得て進めていくべきとの指示を受けた。また、海底ケーブルの設置に関しては、底曳網漁業の方々と十分な協議をすべきとの指示を受けた。

表 2.3-2 海上保安庁に関わる法令と手続き

| 行為（対象） | 関係する法令 | 手続き |
|-----------------|-------------------------|---|
| 実証研究設備の設置 | 航路標識法、国際航路標識協会の推奨方法 | 標識の設置方法に関する指導 |
| | 航路標識法（15カンデラ未満の光波標識の場合） | 届出 |
| | 航路標識法（15カンデラ以上の光波標識の場合） | 第3管区海上保安本部長の許可（NEDOからの許可申請） |
| 工事の実施 | — | 実証研究開始時にNEDOから銚子海上保安部長あてに実証研究実施に関する協議書を提出 工事の安全対策などを示した工事届けを提出 |
| 工事の実施（工事エリアの明示） | 航路標識法（15カンデラ未満の光波標識の場合） | 届出 |
| | 航路標識法（15カンデラ以上の光波標識の場合） | 第3管区海上保安本部長の許可（NEDOからの許可申請） |

実証研究設備の基礎や風車は、茨城県の鹿島港（東京電力鹿島火力発電所の物揚場を予定）で構築する予定であったため、鹿島港の利用に関して、海上保安庁の鹿島海上保安署と事前協議を行った。その結果、工事開始前に、鹿島港内の各企業や周辺漁業協同組合で構成される「鹿島港災害対策協議会」で了解されることが必要であることがわかった。

無線への影響については、有識者へのヒアリングにより、実証研究予定地点が重要無線通信の確保のために指定された伝搬障害防止区域でないことや、TV 電波の伝搬経路上に位置しないため、影響がないことを確認した。一方、漁業無線については、有識者へのヒアリングの結果、洋上風力発電設備による影響が現段階ではわからないため、実証研究において、その影響を評価する必要があることがわかった。

洋上風力発電設備の航空障害灯の設置方法については、国土交通省東京航空局と事前協議を行い、陸上の風車と同等の装備が必要であることが示された。また、海上に設置する灯火が灯台の光と混同される可能性があるため、海上保安庁の確認が必要であることが併せて示された。

3 海域・気象・海象調査

3. 1 風況

(1) 洋上の風況の推定

1) 調査方法の概要

①気象モデル

実証研究予定地点における風況を把握するため、気象モデルによる風況予測を実施した。風況予測に用いた力学的局所化手法（山口ら，2006）の流れを以下に述べる。まず、全球モデルの客観解析値（ECMWF）を初期・境界条件とし、地域気象モデル RAMS（Pielke et al., 1992）を用い1年間にわたり時系列解析を行うことにより、水平 1km 程度の解像度をもつ1年分の時系列風速データを得た。水平解像度 1km 以下のスケールの微細地形の影響を取り入れるため、非線形風況予測モデル MASCOT（Micro-wind-climate Analysis System for Complex Terrain）（石原ら，2003）を用い、微細地形の効果を考慮に入れた局所風況に地域風況を変換した。この際、微細地形の効果は風向のみに依存すると仮定し、MASCOT を用いた定常解析により微細地形の影響を風向別に評価した。図 3.1-1 にこの手法の流れを示す。

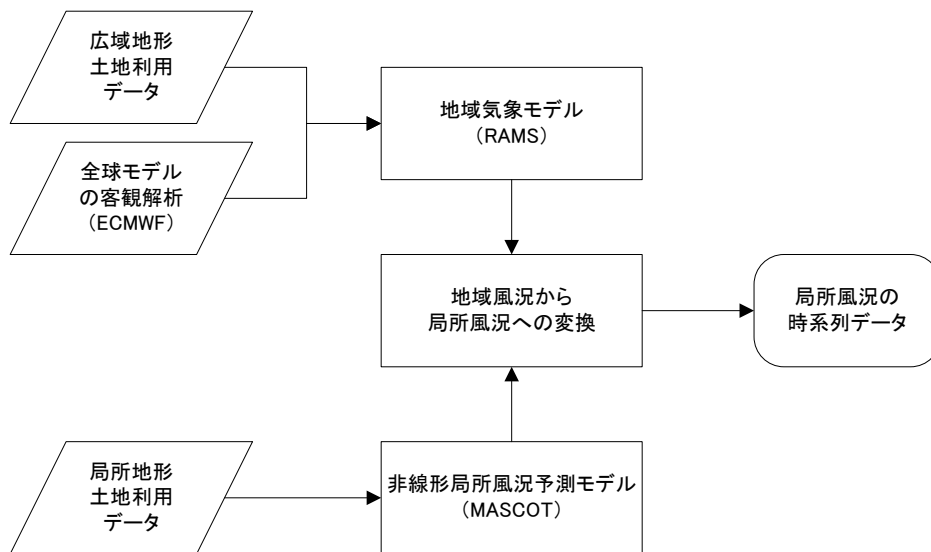


図 3.1-1 力学的局所化手法の流れ

②台風モデル

台風時の風速は、孟ら（1996）によって提案された台風モデルによって行った。このモデルでは台風パラメータより推定された気圧場より上空風を求め、その後地上風を推定した。

③50年再現期待値の推定方法

a. 非台風時

非台風時における、再現期間別最大風速の予測方法について述べる。年最大風速の確率分布を求めるため、次式で示される Gomes and Vickery (1977) による手法を用いて再現期待値別の風速 U_s を求めた。

$$U_s \cong U_1 + (1/a) \ln R$$

ここで、

$$U_1 = c(\ln N)^{1/k} \left[1 + \left(\frac{k-1}{k^2} \right) \frac{\ln(\ln N)}{\ln N} \right], \quad 1/a = \frac{c}{k} (\ln N)^{1/k-1} \left[1 + \frac{k-1}{k \ln N} - \left(\frac{k-1}{k} \right)^2 \frac{\ln(\ln N)}{\ln N} \right]$$

$$N = 2\pi v_u \beta_u (k\sigma_u / c)$$

であり、 c はワイブル分布の尺度定数、 k はワイブル分布の形状定数である。また、本研究では $v_u=675$ 、 $\beta_u=0.36$ とした。ワイブル分布の尺度定数および形状定数は、力学的局所化手法によって得られた基準年の風速累積頻度を用いて最小二乗法により求めた。

b. 台風時

台風による再現期間別最大風速は、台風シミュレーション (松井ら, 1996) により推定した。図 3.1-2 には、台風シミュレーションによる年最大風速の算定フローを示した。まず、対象地点に対し過去の台風データ (対象地点を中心に半径 500km を通過した台風) から気圧場に関する確率分布を作成した。次に作成された確率分布に従い、モンテカルロシミュレーション手法により 100 年分の台風を 100 回、通算 10,000 年分の台風を発生させ上空風を求め、ベキ法則により地上風を求めた。求められた地上風は 60 分平均風速に相当するため、平均化時間の違いを補正し、10 分平均風速の最大値を求めた後に年最大風速を抽出した。

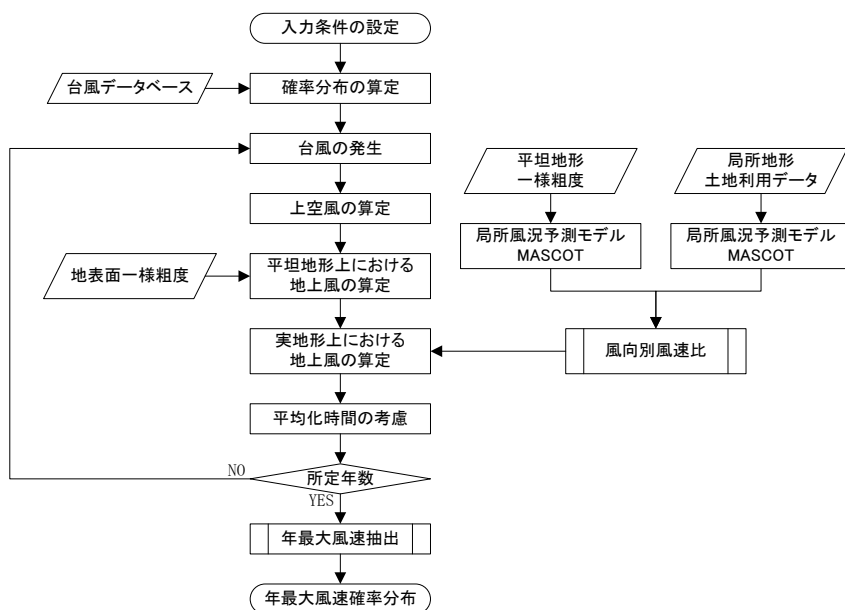


図 3.1-2 台風シミュレーションによる年最大風速の算定フロー

④年間風速出現頻度の推定方法

台風時と非台風時に分けて風速の出現頻度を推定し、両者の成因別出現頻度で重みをつけて年間の出現頻度を推定した。1967年から41年間における台風経路を基に、台風が銚子地方気象台から半径500km以内を通過し、中心気圧が985hPa以下となったときを台風時、それ以外のときを非台風時とし、台風時と非台風時の成因別出現頻度を求めた（表3.1-1）。

表 3.1-1 台風経路データを基に求めた成因別比率

| 成因 | データ個数（10分毎） | 比率（%） |
|-----|-------------|--------|
| 全成因 | 2,156,382 | 100.00 |
| 非台風 | 2,129,022 | 98.73 |
| 台風 | 27,360 | 1.27 |

2) 実証研究予定地点における年間発電量の推定

①実証研究予定地点の風況推定

本項では、実証研究予定地点（図3.1-3）における風況の概況を推定する。

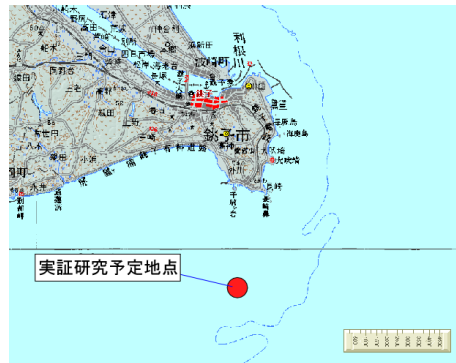


図 3.1-3 実証研究予定地点の位置

図3.1-4には、実証研究予定地点のハブ高さ（78m）における風向階級別の風速頻度を示した。卓越風は、北西から北東方向の風と南から南西方向の風である。また、図3.1-5には同地点の風速階級別出現頻度を示した。平均風速は7.48m/sであり、風速分布はワイブル分布とよく一致している。

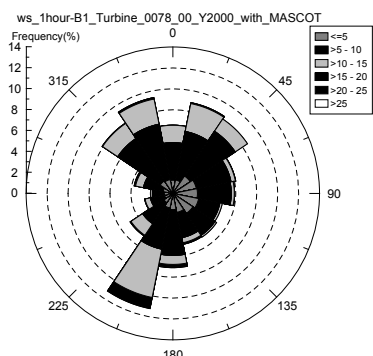


図 3.1-4 風向別頻度

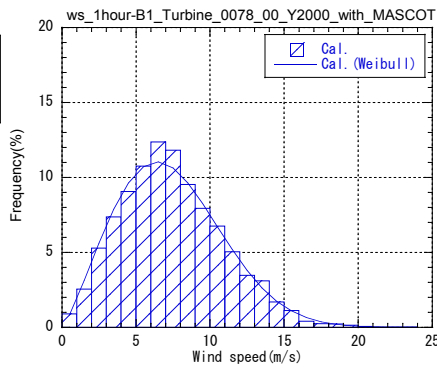


図 3.1-5 風速階級別頻度

②年間風力発電量・設備利用率の推定

実証研究予定地点における風車の年間発電量 AEP (Annual Energy Production) は、風車のパワーカーブと風車のハブ高さにおける風速出現頻度分布を用いて以下の式により求めた。

$$AEP = \sum_{k=1}^m [P(V_k) \times f(V_k) \times 8760]$$

ここで、AEP は年間発電量[kWh]、 $P(V_k)$ は風速 V_k の発生電力[kW]、 $f(V_k)$ は風速 V_k の出現頻度、8,760 は年間時間数 (=365×24) である。図 3.1-6 に、年間発電量予測に用いる風車 (三菱重工業製 MWT92/2.4) のパワーカーブを示した。

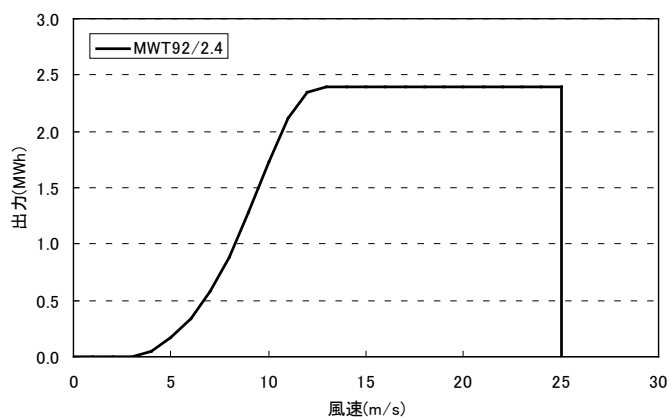


図 3.1-6 風車 (MWT92/2.4) のパワーカーブ

また、風車の定格出力に対する利用率として、設備利用率 CF (Capacity Factor) を次式により求めた。

$$CF(\%) = \frac{AEP(\text{kWh})}{RP(\text{kW}) \times 8760(\text{h})} \times 100$$

ここで、AEP (Annual Energy Production) は年間発電量[kWh]、RP (Rated Power) は風車の定格出力[kW]、8,760 は年間時間数 (=365×24) である。

表 3.1-2 に実証研究予定地点における年平均風速、年間発電量および設備利用率を示す。年平均風速は 7.48m/s であり、年間発電量は 7900.4MWh、設備利用率は 37.58%であった。

表 3.1-2 実証研究予定地点における年間発電量および設備利用率

| 年平均風速 U (m/s) | 年間発電量 AEP (MWh) | 設備利用率 CF (%) |
|---------------|-----------------|--------------|
| 7.48 | 7900.4 | 37.58 |

3) 実証研究予定地点における設計風速の推定

本節では、実証研究予定地点の設計風速をシミュレーションから求める手法として、まず 50 年再現期間に対応する最大風速①、風速鉛直分布のべき指数②、乱れ強度③について記述した。また④では、疲労荷重の算定のために必要な風速別出現頻度について示した。

①再現期間別最大風速の推定

実証研究予定地点における年最大風速は、非台風時と台風時の2つの確率分布を重ね合わせて求めた。まず、非台風時の年最大風速の算定において、力学的局所化手法によって求めた基準年のハブ高さ 78.0m の風速から累積頻度分布図（図 3.1-7）を作成し、3.1(1)1)に示したようにワイブル係数を求めた。表 3.1-3 にそれらの値を示した。

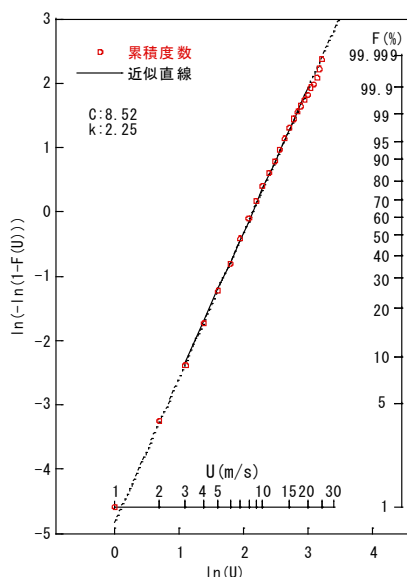


図 3.1-7 風速の累積度数分布（実証研究予定地点）

表 3.1-3 非台風時のワイブル係数

| | |
|------------|------|
| 平均風速 (m/s) | 7.49 |
| 標準偏差 (m/s) | 4.93 |
| ワイブル尺度係数 C | 8.52 |
| ワイブル形状係数 k | 2.25 |

このパラメータを基に、本別冊 3.1(1)1)③で示した Gomes and Vickery (1977) の手法により、非台風時の年最大風速の確率分布を推定したものを図 3.1-8 に示した。

台風時の年最大風速の算定においては、台風シミュレーションによる気象台上空の風から平坦地形、一様粗度区分 II の高さ 10.0m 上の風速を算定し、予定地点の実地形上のハブ高さ 78.0m における風速へと変換した。次に、予定地点の実地形上のハブ高さ 78.0m における風速を基に 100 年ごとに年最大風速の確率分布を求め、100 回分の各出現階級の風速の平均値および標準偏差 (σ) を求めた。図 3.1-8 には、予定地点における台風時の年最大風速も併せて示す。台風時のハブ高さ (78.0m) の 50 年再現期待値の風速の 100 回平均値は 46.46m/s であり、100 回平均値と標準偏差を加えた風速は 49.01m/s であった。

以上のように求めた、台風時と非台風時の再現期間別の風速の確率分布を合成したものを図 3.1-8 に赤線で併せて示した。

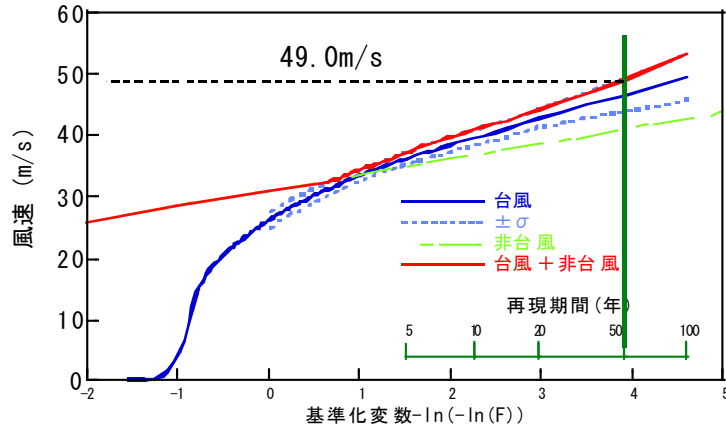


図 3.1-8 台風時と非台風時の再現期間別年最大風速（実証研究予定地点）

これにより、年最大風速の信頼区間（ 1σ ）を考慮し、ハブ高さの 50 年再現期間の風速は 49.0m/s であると推定した。

②べき指数の推定

暴風時の実証研究予定地点における風速分布のべき指数は、局所風況予測モデル MASCOT の結果を用いて定めた。図 3.1-9 には、シミュレーションにより求めたハブ高さで基準化した 16 方位の鉛直風速分布を示した。また、べき指数 0.1 の風速の鉛直分布を併せて示した。べき指数 0.1 の鉛直分布は、陸からの風と海からの風の間であり、本調査ではべき指数 0.1 で代表させた。

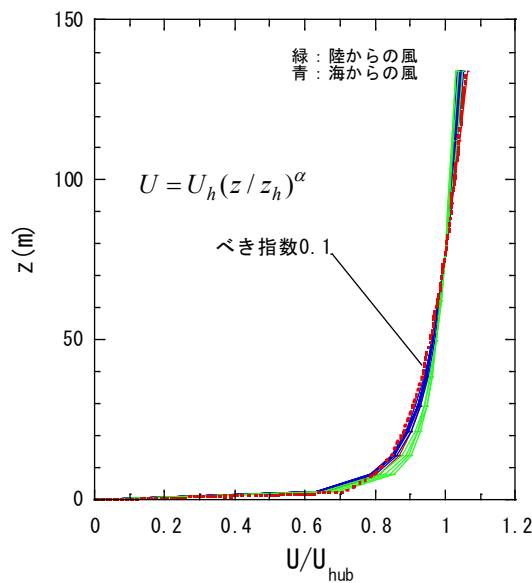


図 3.1-9 実証研究予定地点における風速分布

③乱れ強度の推定

暴風時の実証研究予定地点における乱れ強度を、局所風況予測モデル MASCOT の結果を用

いて定めた。バックグラウンドの乱れ強度 I_a を考慮するために、次式に示す「土木学会風力発電設備支持物構造設計指針・同解説 2007 年版」による方法を用いた。

$$I_u = \sqrt{I_{\text{surface}}^2 + I_a^2}, \quad I_a = 0.1, \quad I_{\text{surface}} = \frac{0.93\sqrt{\tilde{k}}}{\tilde{U}}$$

ここで、 \tilde{k} 、 \tilde{U} はそれぞれ数値シミュレーションにより求めた平均風速と乱流エネルギーである。図 3.1-10 にはハブ高さ（海面上 78m）における乱れ強度を示す。22.5 度（北北東）から 247.5 度（西南西）までは上流に陸地がない風向に相当し、乱れ強度はおよそ 11% となり、IEC61400-1 に規定される値と一致していた。一方、270 度（西）から 0 度（北）までは、上流に陸地があるため、乱れ強度が大きくなっていた。特に 315 度（北西）、337.5 度（北北西）の風向では 12% を超える乱れ強度が見られた。図 3.1-11 に風向別の平均風速の風速比を示す。同図より、315 度、337.5 度の風向に対しては平均風速が大幅に減速しており、最大荷重にならなかった。そのため本実証研究では、予定地点における乱れ強度を 12% の値に設定した。

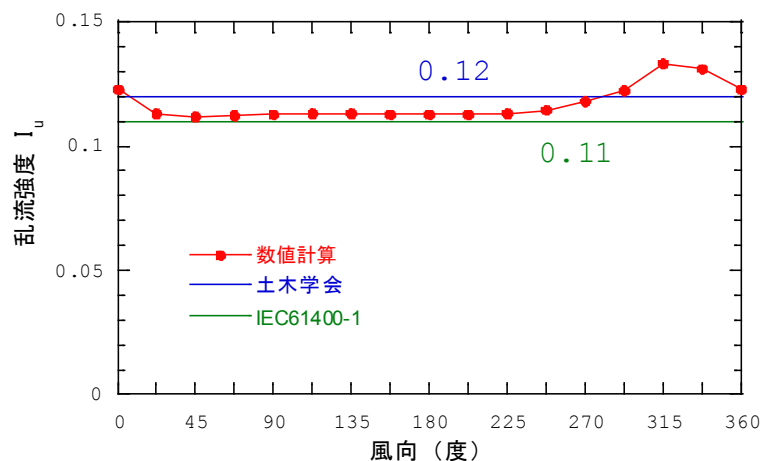


図 3.1-10 実証研究予定地点における乱流強度の風向変化

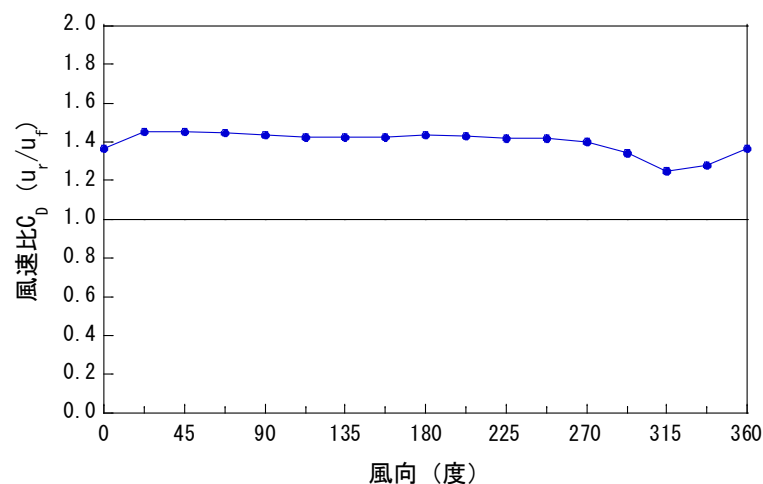


図 3.1-11 実証研究予定地点における風速比の風向変化（高さ 78m）

④年間の風速出現頻度の推定

疲労荷重の算定のために必要な、実証研究予定地点の風速出現頻度分布を推定した。力学的局所化手法により基準年の実証研究予定地点のハブ高さ 78m の風速を算定し、このデータから風速階級別出現頻度を求めた後、成因比率 (98.73%) を乗じて非台風時の風速頻度を求めた。

台風時の風速出現頻度は、モンテカルロシミュレーションより 1 万年の台風を発生させ平坦地形上の地表面高さ 10.0m の風速を求め、次に MASCOT による気流解析結果を用いてハブ高さ 78.0m における風速に変換し、成因比率 (1.27%) を乗じて求めた。図 3.1-12 に、台風時と非台風時の風速出現頻度分布を示す。

疲労評価の風速は 10 分間の平均化時間であるが、図 3.1-12 に示した台風時の評価では、50 年再現期待値に相当する 49m/s の作用時間が 2.49 分 (=20 年×365 日×24 時間×60 分×2.373E-07) であり、10 分より短かった。設計風速 49m/s を記録する台風が来襲するときに、風車が疲労荷重により損傷を受けないために、最大風速が 50 年再現期待値となる台風が一回は来襲するものと仮定し、台風シミュレーションを利用して台風時における各風速の継続時間を算出した。強風頻度の推定方法は、以下の通りである。1 万年間の台風シミュレーションより得られた全台風より、最大風速が 50 年再現期待値となる全ての台風を抽出した。抽出された風速の時系列データより各風速階級における 1 台風当たりの出現頻度を集計し、平均化時間に乗じるにより風速階級別作用時間とした。

具体的には、実証研究予定地点のハブ高さ 78.0m における 1 万年間の台風シミュレーション結果から、最大風速が 49±0.5m/s を記録した風速時系列を抽出した。抽出した 30 個の台風の風速記録より集計した結果、50 年再現期待値 (49m/s) の出現回数は 35 回であり、平均時間は 11.7 分であった。他の風速階級についても同様に算出し、その際、10 分未満の風速階級に関しては平均作用時間を 10 分間とした。図には、50 年再現期待台風 1 回当たりの作用時間を併せて示した。また、3 種の合成した作用時間も示した。

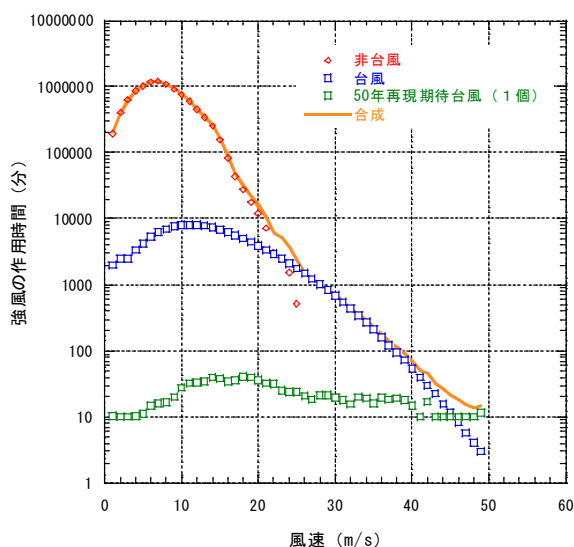


図 3.1-12 実証研究予定地点における成因別の風速階級別作用時間

これにより、疲労解析評価のための台風時と非台風時ならびに 50 年再現期待台風の 1 台風を混合した風速の出現作用時間の分布が得られた。

(2) 洋上の風況の観測

実証研究海域においては、風車導入の事前段階で洋上における風況観測は実施していないが、実証研究の一環として風車とともに風況観測タワーを設置し、観測を継続している。

ここでは、洋上風況観測タワーの観測機器の概要および2013年～2016年の月別平均風速値および月別乱流強度データを取り上げて示した。

1) 洋上観測タワーの概要

実証研究海域における洋上風況観測タワーは、水深12m、離岸距離3.1kmの地点に2012年8月に設置された（観測開始は2013年1月）。観測タワーは、海面からの高さが100mの三角断面鋼管トラス構造であり、支持構造物は重力式である（図3.1-13）。表3.1-4に観測計画を示す。気象関係の観測機器は15mから95mまでの10層に設置され、タワーによるウエイクの影響を考慮して、同じ観測高度に複数個の三杯型風速計と矢羽根式風向計が取り付けられた（図3.1-13;表3.1-5）。

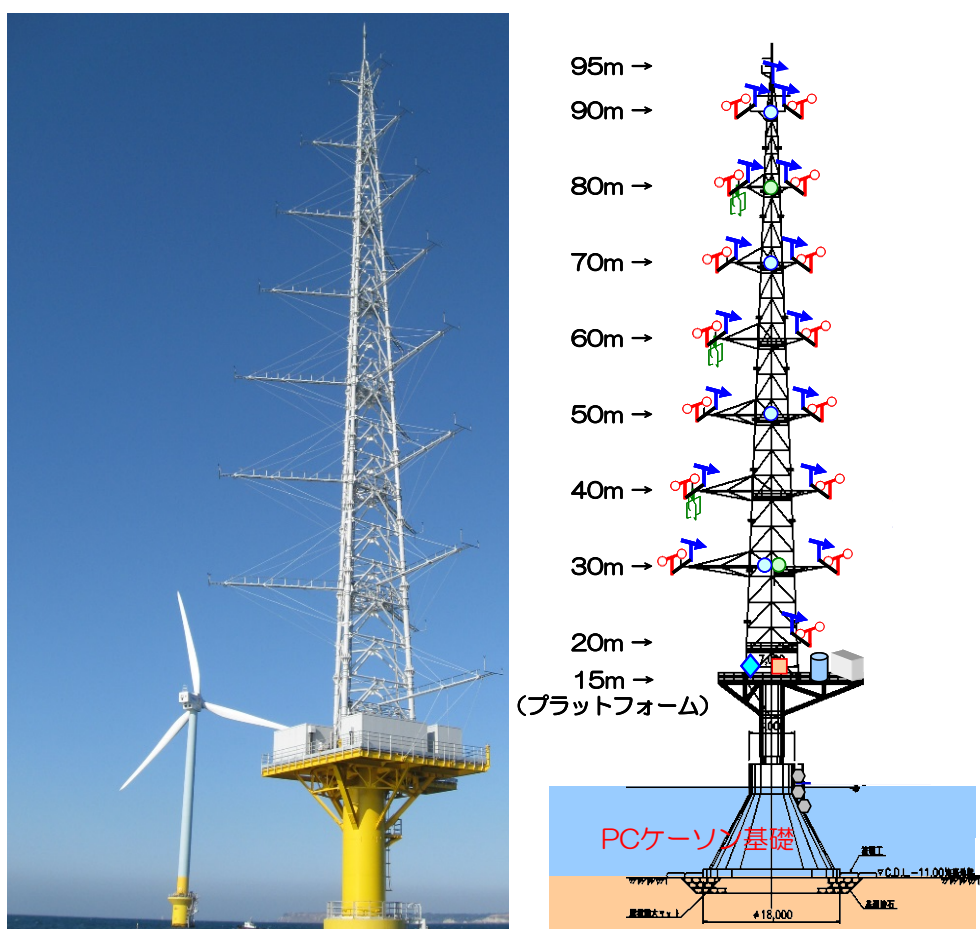


図 3.1-13 実証研究海域の洋上風況観測施設（左図）と観測機器の設置状況（右図）

表 3.1-4 気象関係の観測計画

| 計測項目 | 計測機器 | 計測目的 |
|-----------|---------------------------|---|
| 風向・風速 | 三杯型風速計 矢羽根式風向計 | 基本風況特性の把握 (平均風速, 最大風速, 乱れ強さ, 風向出現率等) |
| | 超音波式風向風速計 | |
| | ドップラーライダ | ハブ高さ以上の高高度における風況特性の解明 |
| 気圧・温湿度・水温 | 気圧計 湿度計 温度差計 水温計 | 大気安定度の評価 |
| 天候 | 雨量計 視程計 | ドップラーライダの利用可能な環境条件の解明 |

表 3.1-5 観測高度別観測機器の設置状況

| 海面からの 観測高度 (m) | 三杯型 風速計 | 矢羽根式 風向計 | 超音波式 風向風速計 | ドップラー ライダ | 気圧計 | 温湿度計 | 温度差計 | 雨量計 | 視程計 | 水温計 |
|-------------------|------------|-------------|---------------|--------------|-----|------|------|-----|-----|-----|
| -2~0 | | | | | | | | | | ○ 3 |
| 15 | | | | ○ | ○ | | | ○ | ○ | |
| 20 | ○ 1 | ○ 1 | | | | | | | | |
| 30 | ○ 3 | ○ 3 | | | | ○ | ○ | | | |
| 40 | ○ 3 | ○ 3 | ○ 1 | | | | | | | |
| 50 | ○ 3 | ○ 3 | | | | | ○ | | | |
| 60 | ○ 3 | ○ 3 | ○ 1 | | | | | | | |
| 70 | ○ 3 | ○ 3 | | | | | ○ | | | |
| 80 | ○ 3 | ○ 3 | ○ 1 | | | ○ | | | | |
| 90 | ○ 3 | ○ 3 | | | | ○ | | | | |
| 95 | | ○ 1 | | | | | | | | |

2) 洋上の風況の観測結果

銚子沖洋上観測タワー80m 高における月別平均風速を図 3.1-14、表 3.1-6 に示す。2013 年の月別平均風速は 5.9~10.3m/s で、年平均風速は 7.5m/s に達していた。月別に見ると 6 月~8 月は低く、3 月~4 月、10 月は高かった。

2014 年、2015 年はデータ欠測により、また 2016 年はデータがそろっていないことにより年平均で評価できなかった。3 年分の月別平均風速を見ると、秋季 (9 月頃) から冬季を経て春季 (4 月頃) まで高く、それ以降は低くなる傾向にあったが、2014 年 8 月は高い値となっていた。

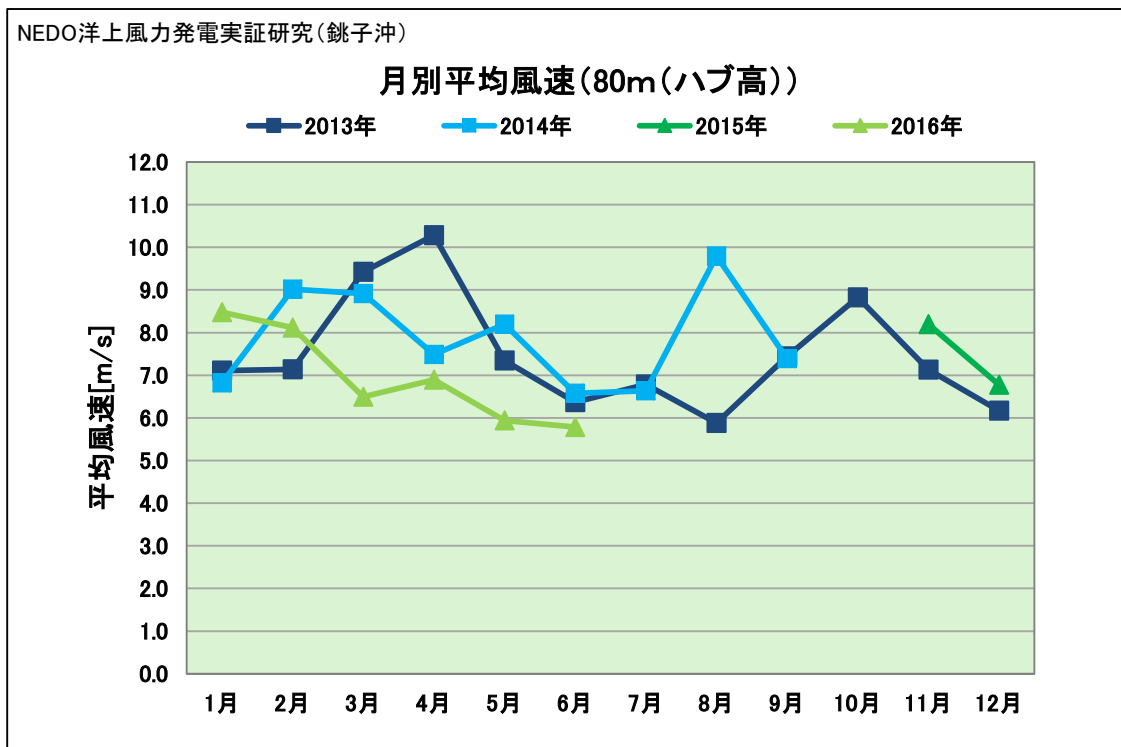


図 3.1-14 実証研究海域での月別平均風速

表 3.1-6 実証研究海域での月別平均風速

NEDO洋上風力発電実証研究(銚子沖)

| 項目 | 観測年・月 | 1月 | 2月 | 3月 | 4月 | 5月 | 6月 | 7月 | 8月 | 9月 | 10月 | 11月 | 12月 | 年平均 |
|---------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|------|
| 平均風速 [m/s] | 2013年 | 7.1 | 7.1 | 9.4 | 10.3 | 7.3 | 6.4 | 6.8 | 5.9 | 7.4 | 8.8 | 7.1 | 6.2 | 7.5 |
| | 2014年 | 6.8 | 9.0 | 8.9 | 7.5 | 8.2 | 6.6 | 6.6 | 9.8 | 7.4 | - | - | - | - |
| | 2015年 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 8.2 | 6.8 | - |
| | 2016年 | 8.5 | 8.1 | 6.5 | 6.9 | 5.9 | 5.8 | - | - | - | - | - | - | - |
| データ取得率 [%] | 2013年 | 4.0 | 99.0 | 99.3 | 99.5 | 98.2 | 99.6 | 94.2 | 99.4 | 98.1 | 99.8 | 100.0 | 100.0 | 90.9 |
| | 2014年 | 77.6 | 89.6 | 72.1 | 88.2 | 92.4 | 95.8 | 94.1 | 92.7 | 83.8 | - | - | - | - |
| | 2015年 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 77.9 | 87.6 | - |
| | 2016年 | 75.1 | 82.5 | 92.5 | 95.4 | 93.2 | 89.4 | - | - | - | - | - | - | - |

注1) 観測高度：80m 高（ハブ高）

注2) 2013年1月は、観測を開始した1月30日から2日間の結果であるため、データ取得率が4%となっている。

注3) 2014年10月～12月、2015年1月～10月のデータは欠測。

銚子沖洋上観測タワー80m 高における月別平均乱流強度を図 3.1-15、表 3.1-7 に示す。2013年の月別平均乱流強度は、1月を除き 5.0%～11.5%で、年平均は 8.0%となっていた。月別に見ると6月～8月が低く、それ以後9月～1月まで増加し、以後低下した。

2014年、2015年、2016年はデータ欠測のため、年平均を評価できなかった。月別平均乱流強度は2013年同様に6月～8月が低く、それ以後9月～2月まで増加し、以後低下した。

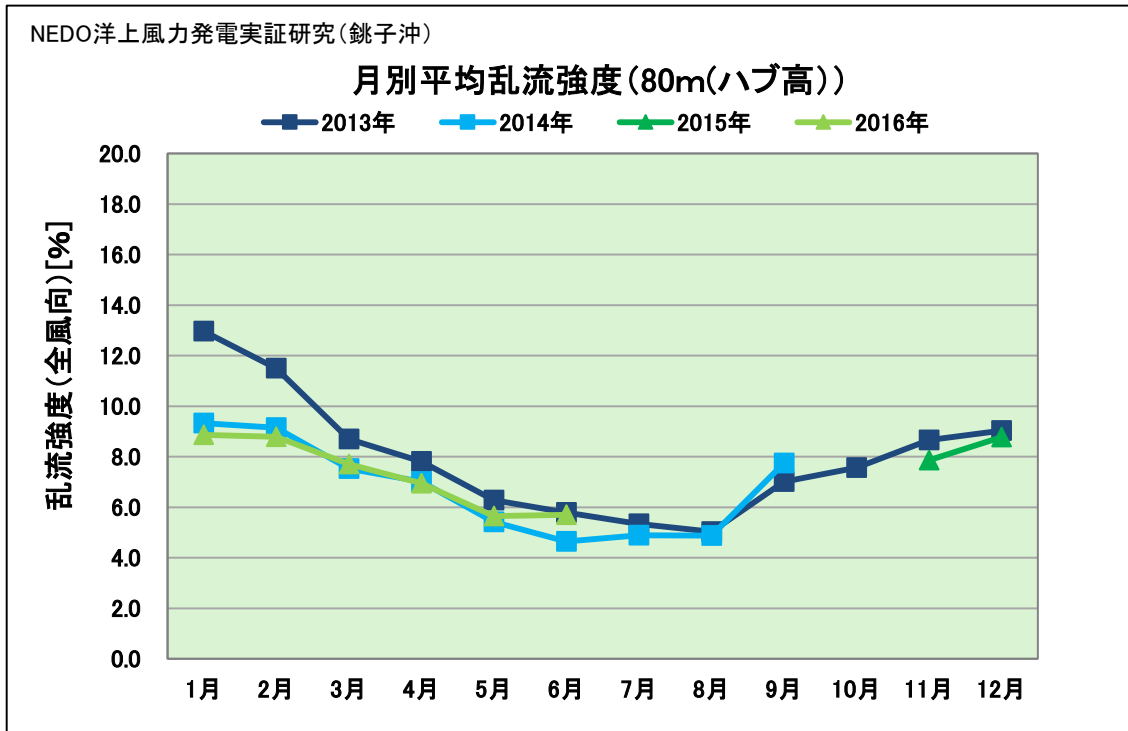


図 3.1-15 実証研究海域での月別平均乱流強度

表 3.1-7 実証研究海域での月別平均乱流強度

NEDO洋上風力発電実証研究(銚子沖)

| 項目 | 観測年・月 | 1月 | 2月 | 3月 | 4月 | 5月 | 6月 | 7月 | 8月 | 9月 | 10月 | 11月 | 12月 | 年平均 | |
|--------------------|-------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---|
| 乱流強度 平均値 [%] | 2013年 | 13.0 | 11.5 | 8.7 | 7.8 | 6.3 | 5.8 | 5.3 | 5.0 | 7.0 | 7.6 | 8.7 | 9.0 | 8.0 | |
| | 2014年 | 9.3 | 9.1 | 7.5 | 7.0 | 5.4 | 4.6 | 4.9 | 4.9 | 7.7 | - | - | - | - | |
| | 2015年 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 7.9 | 8.8 | - |
| | 2016年 | 8.9 | 8.8 | 7.7 | 6.9 | 5.6 | 5.7 | / | / | / | / | / | / | / | |

注1) 観測高度：80m 高 (ハブ高)

注2) 2013年1月は、観測を開始した1月30日から2日間の結果であるため、データ取得率が4%となっている。

注3) 2014年10月～12月、2015年1月～10月のデータは欠測。

3. 2 波浪

(1) 波浪の推定

1) 波浪シミュレーションの概要

実証研究予定地点における波浪を把握するため、非台風時の波浪と台風時の波浪に分けてそれぞれの波浪推算を行った。波浪推算モデルは、波浪方向スペクトル成分波間の非線形相互作用を評価した第三世代波浪推算モデル SWAN (Booij et al., 1999) を用いた。

第三世代波浪推算モデル SWAN は、オランダのデルフト工科大学で開発されたモデルであり、直交座標系による湾や湖程度の局所領域スケールの波浪推算から球面座標系による全球スケールの波浪推算まで、幅広いスケールの計算が可能である。また、風から波へのエネルギー輸送、4 波共鳴非線形相互作用による成分波間でのエネルギー輸送、白波砕波によるエネルギー散逸、底面摩擦によるエネルギー散逸に加え、浅水砕波によるエネルギー散逸、極浅海域で顕著となる 3 波共鳴非線形相互作用による成分波間でのエネルギー輸送など、浅海域での波浪伝播に関わる点についても考慮されている。

本調査では、非台風時のシミュレーションとして、基準年である 2000 年 1 年間の波浪推算を行った。また、台風時における波浪推算では、全球気象場に台風時の風速場を組み込み、非台風時と同様に波浪推算モデル SWAN を用いて 1966 年から 2001 年の 36 年間に対象海域を中心とする半径 200km の円内を通過した台風を対象に、波浪シミュレーションを行った。

図 3.2-1 に波浪推算の流れを示す。

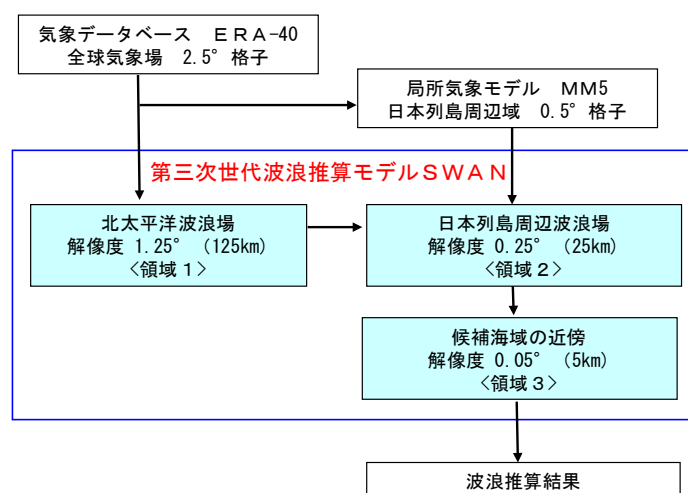


図 3.2-1 波浪推算の流れ

2) 設計波高の推定

① 50 年再現期間の設計波高

ここでは、実証研究予定地点における 50 年再現期間の設計波高を推定した。入手した波浪時系列のうち、実証研究海域に最も近く参考にすべきデータは千葉県観測データであるが、欠

測の期間が長いという問題があり、統計的な観点から設計波に用いる沖波の情報とするには不足する懸念がある。よって、長期的に発生する確率波浪の資料を別途入手することとした。

「千葉東沿岸海岸保全基本計画」の資料には、表 3.2-1 の 50 年確率波高が記載されている。このうち、設計波の算定に用いる沖波としては、実証研究海域に最も近く、表に示された中で最高の波高を持つ「名洗港～太東漁港 50 年確率波の波向別最大値」を採用した。

表 3.2-1 千葉東沿岸海岸保全基本計画記載の沖波

| | 波浪観測所 (検証計算) | 沖波波高 H_0 (m) ※波向別の最大値 | 周期 T (sec) | 最大波高時の波向 |
|--|------------------|----------------------------|---------------|----------|
| 銚子漁港～名洗港 | 銚子漁港(1971～2000年) | 11.62 | 14.2 | SE |
| 名洗港～太東漁港 | 片貝漁港(1971～2000年) | 12.24 | 14.5 | SSE |
| 太東漁港～洲崎 | 乙浜漁港(1971～2000年) | 11.88 | 14.6 | SSE |
| 気象資料に基づく推算より得た統計資料に、確率処理を施して求めた確率波浪 | | | | |
| 50年確率波：1951年～2000年（50年間）の気象資料を基に 波浪推算法（スペクトル法）により決定 | | | | |

この表から、沖波は下記のように与えられる。

沖波波高 $H_0=12.24\text{m}$

沖波周期 $T_0=14.5\text{s}$

波向き SSE

次に、実証研究海域の概略の波高分布をエネルギー平衡方程式モデルにより計算した。図 3.2-2 は、領域下端において沖波を与えた際の、本別冊 3.4(2)にて海底土質調査を行っている海域内の代表 4 地点を含むエリアのスペクトル有義波高分布を計算した結果である。その結果、表 3.2-2 のように最終的な実証研究予定地点に最も近い点 B（水深 15m）において、有義波高は 9.44m となり、A～D の中で最大の波高が計算された。また、上記のエネルギー平衡方程式のモデルで 1.0m の沖波波高（すなわち、碎波しない小さい波高）を与えた場合の B 地点の波高は 1.0m であり、これは B 地点までの屈折係数が 1.0 であることを示している。

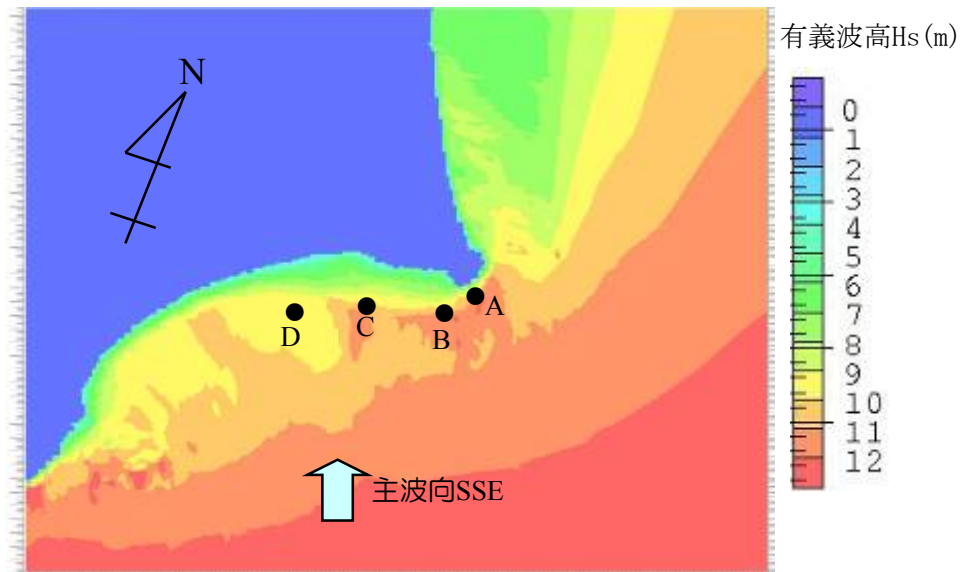


図 3.2-2 エネルギー平衡方程式モデルによる実証研究海域のスペクトル有義波高分布

表 3.2-2 各地点の有義波高計算値（エネルギー平衡方程式モデル）

| 地点 | 有義波高 H_s (m) |
|----|-------------------|
| A | 7.32 |
| B | 9.44 |
| C | 9.03 |
| D | 8.55 |

設計に用いる波としては、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」（2007）（以下、港湾基準と記す）においてゼロアップクロス波高で定義される、有義波高 $H_{1/3}$ および最高波高 H_{max} を使用した。

沖波波高 12.24m・周期 14.5s を用いて、屈折係数を上記より 1.0（換算沖波波高＝沖波波高）とし、実証研究海域の海底勾配を 1/500 として、浅水変形および合田の砕波モデル（合田, 1975）を考慮して各水深における $H_{1/3}$ および H_{max} を求めると、図 3.2-3 のようになった。この図から、水深 15m の地点（暴風波浪時の潮位=H.H.W.L.2.65 m を加えた水深は 17.65m）における波高は下記となった。なお、波周期は沖波と変わらないとする。

$$H_{1/3}=9.84\text{m}$$

$$H_{max}=13.03\text{m}$$

$$T_{1/3}=14.5\text{s}$$

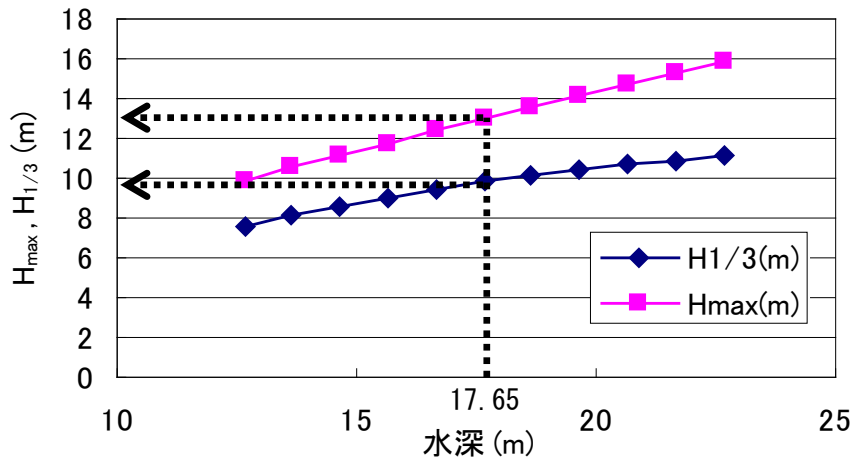


図 3.2-3 水深と $H_{1/3}$ および H_{max} の関係
(浅水変形+合田の碎波モデル、海底勾配 1/500)

②基礎の耐久性検討に用いる波

基礎の耐久性の検討に用いる波は、港湾基準に則り 50 年間に 10,000 回オーダー作用する波とした。千葉県海象データ（水深 21m 地点）からレイリー分布を仮定して求め、波高は(1)と同様に浅水変形および合田の碎波モデルを考慮して水深 15m 地点の波高に換算した。潮位は M.W.L.として計算した。

$$H_{1/3}=8.27\text{m}$$

$$T_{1/3}=11.9\text{s}$$

③有義波高と有義波周期の年平均値

年平均値として、千葉県海象データ（水深 21m 地点）の有義波高と有義波周期の平均値を求め、波高は浅水変形および合田の碎波モデルを考慮して、水深 15m 地点の波高に換算した。潮位は M.W.L.として計算した。これらの計算結果は地震時における検討で使用する。

$$H_{1/3}=1.40\text{m}$$

$$T_{1/3}=7.5\text{s}$$

④波浪と風速の関係

風車発電時の最大荷重を求める際や疲労設計を行う際には、風速と有義波高との関係および、有義波高と有義波周期との関係が必要である。本調査では、既存のデータベースおよび波浪シミュレーション結果に基づき、風速と有義波高、有義波高と有義波周期の関係を推定した。

a. 有義波高と風速の関係

波浪シミュレーション結果と海技研のデータベースを基に、有義波高と風速の関係を検討した。図 3.2-4 には、実証研究海域における 2000 年の非台風時と台風時の波浪シミュレーション結果による有義波高と風速との関係を示す。図には併せて海技研のデータベースの値を示した。

この値は、各風速階級別にビン平均を求めた値である。シミュレーション結果と海技研のデータは、概ね一致している。シミュレーションの値の期間は1年間であり、海技研の値の期間は10年間であるので、ここでは海技研のデータベースを用いて風速と有義波高との関係式を求めた。

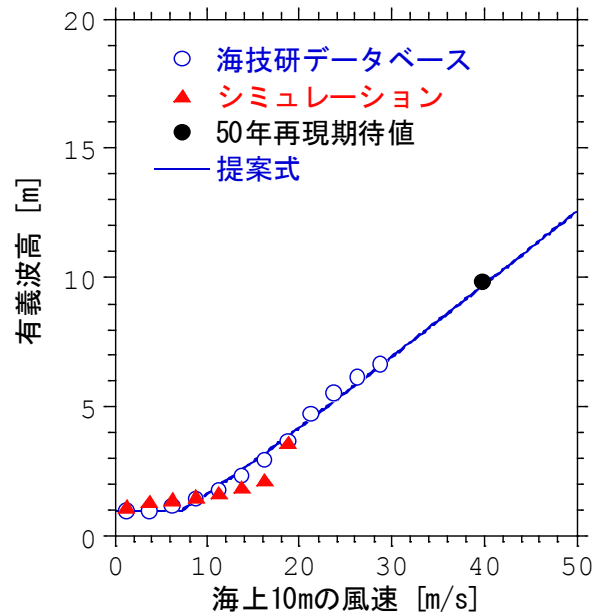


図 3.2-4 有義波高と風速の関係

風速と有義波高との関係式はSMB法を使用して求めた。下記の式は、SMB法による風速 U と有義波高 H_{smb} との関係式である。ここで、 F は吹送距離を表し、 g は重力加速度を表す。

$$H_{SMB} = 0.3 \left[1 - \left(1 + 0.004 \sqrt{gF/U^2} \right)^{-2} \right] \frac{U^2}{g}$$

海技研の観測データに最もよく一致するように吹送距離 F を同定すると 140km となったため、本調査では吹送距離 F を 140km とした SMB 式を提案式とした。図 3.2-4 に下記の本提案式を実線で示した。ただし、風速 7m/s 以下の風速の有義波高は 1m とした。

$$H_s = \max(1.0, H_{SMB})$$

$$F = 140,000$$

本計画では、この関係式を実際の設計に用いた。また参考のために、図 3.2-4 には 50 年再現期待値の設計波高 ($H_s=9.84m$) と海面上高さ 10m の風速 39.9m/s を示した。

b. 有義波高と有義波周期の関係

次に有義波高と有義波周期の関係を求めた。IEC 61400-3 (ED.1) では、有義波高と有義波周期の関係を次式で表し、有義波周期が下記の範囲の中であることを示している。

$$11.1\sqrt{H_s/g} \leq T_s \leq 14.3\sqrt{H_s/g}$$

図 3.2-5 には、予定地点における海技研のデータベースを用いて有義波高 H_s と有義波周期 T_s の関係を示した。海技研データベースの値は、有義波高の階級別に求めた有義波周期の平均値である。本実証研究では図中の実線で示した次式を用いた。

$$T_s = 14.0\sqrt{H_s/g}$$

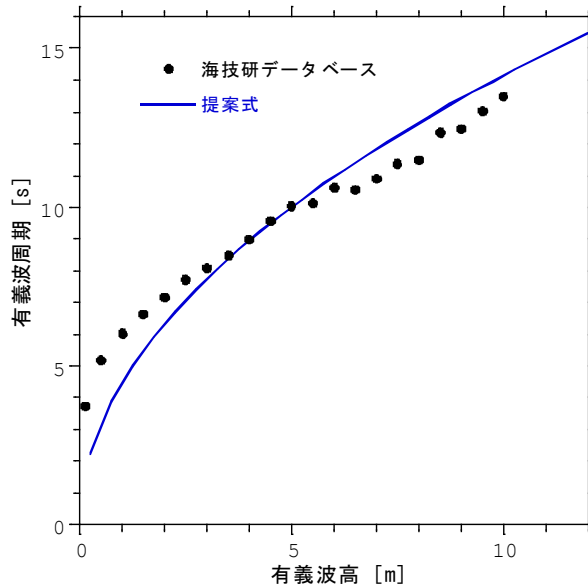


図 3.2-5 有義波高と有義波周期の関係

(2) 波浪の観測

実証研究海域においては、風車導入の事前段階から波浪と海潮流の発生特性の実態を把握するため、海底設置型の計測機器を設置し、波浪・海潮流データの取得を行った（観測開始は 2010 年 1 月）。また、それらのデータを元に高度な数値シミュレーションの検証データとして活用した。

ここでは、波浪観測の概要と「本別冊 3.3(2)1海潮流観測の概要」をまとめて紹介するとともに、波浪・海潮流観測機器の概要および 2013 年～2016 年の月別有義波高・月別有義波周期および月別平均流速データを取り上げて示した。

1) 波浪観測の概要

計測の項目を表 3.2-3 に示す。

表 3.2-3 海象観測項目

| 項目 | 使用観測機器 | 観測内容 |
|-----|--------|---|
| 波浪 | 波高計 | 水位変動、および底層流速・流向の時系列 時系列解析を行い、波の統計量を得る（有義波高、最高波高、有義波周期、主波向） |
| 海潮流 | 流速計 | 流速東西成分および南北成分の時系列 |

波高計・流速計の設置位置は、図 3.2-6 に示すように実証研究風車予定位置と観測タワーの中間点の位置とし、主波向きの波が実証研究風車・観測タワー基礎の影響を受けにくくなるようにした（基礎に対して横方向に 135m（約 1 波長）離れた）。太平洋に面し、波高が極めて高く、砕波領域ともなる実証研究海域の波浪を代表的に計測できる位置である。

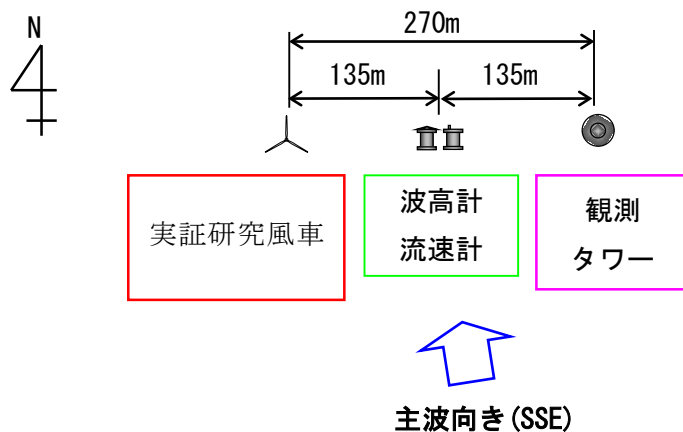


図 3.2-6 波高計・流速計設置位置

観測には以下の機器を用いた。

波高計・・超音波式波高計（アイオーテックニク製 WAVE HUNTER08-Σ）（図 3.2-7）

流速計・・超音波ドップラー式流向流速分布計（ADCP、RD-Instruments 製ワークホース ADCP センチネル 600kHz）（図 3.2-8）

波高計および流速計は機器単独で設置し、内部メモリーにデータを蓄積する。ただし、代表値は洋上ブイ上に設置した通信装置（パケット通信機）により陸上のサーバに送信し、データの確認と月報の作成等に用いた。機器設置の概要を図 3.2-9 に示す。

維持管理として、3ヶ月に一度の頻度で潜水作業により機器の引き上げを行い、データ回収・電池交換・再設置を行った。



図 3.2-7 超音波式波高計



図 3.2-8 ADCP

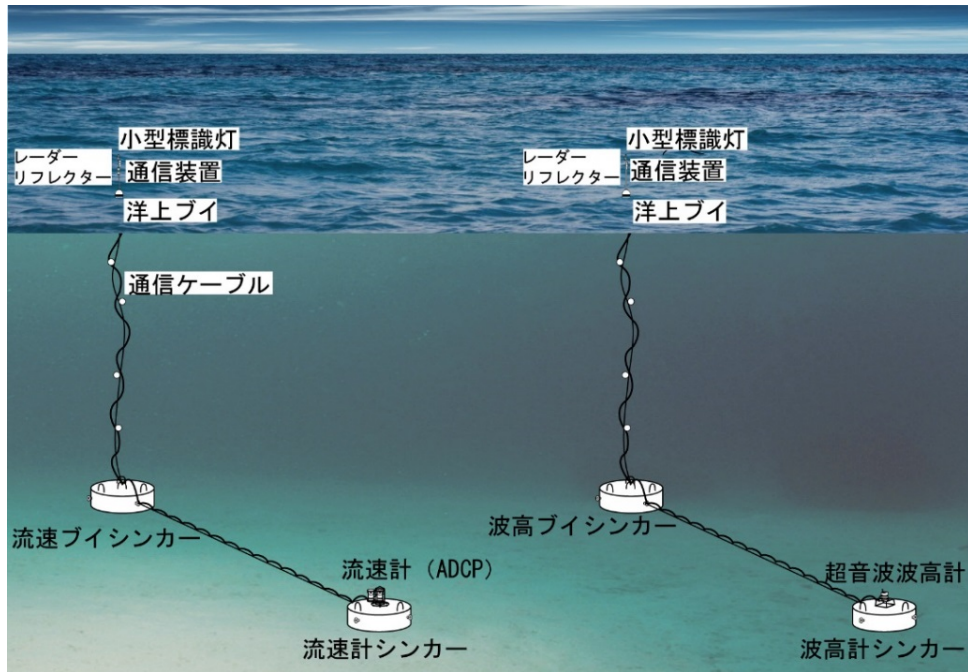


図 3.2-9 機器設置概要

2) 波浪の観測結果

銚子沖洋上観測タワー付近における月別平均有義波高を図 3.2-10、表 3.2-4 に示す。2013 年～2016 年の月別平均有義波高は 0.8～1.7m の範囲内にあり、年平均有義波高は 1.2～1.3m となっていた。月別に見ると概ね 9 月頃から翌年 4 月頃まで高く、それ以後夏にかけて 1m 程度まで低下する傾向にあったが、2015 年では夏季に高くなっていた。

◆平均有義波高・データ取得率（月別）

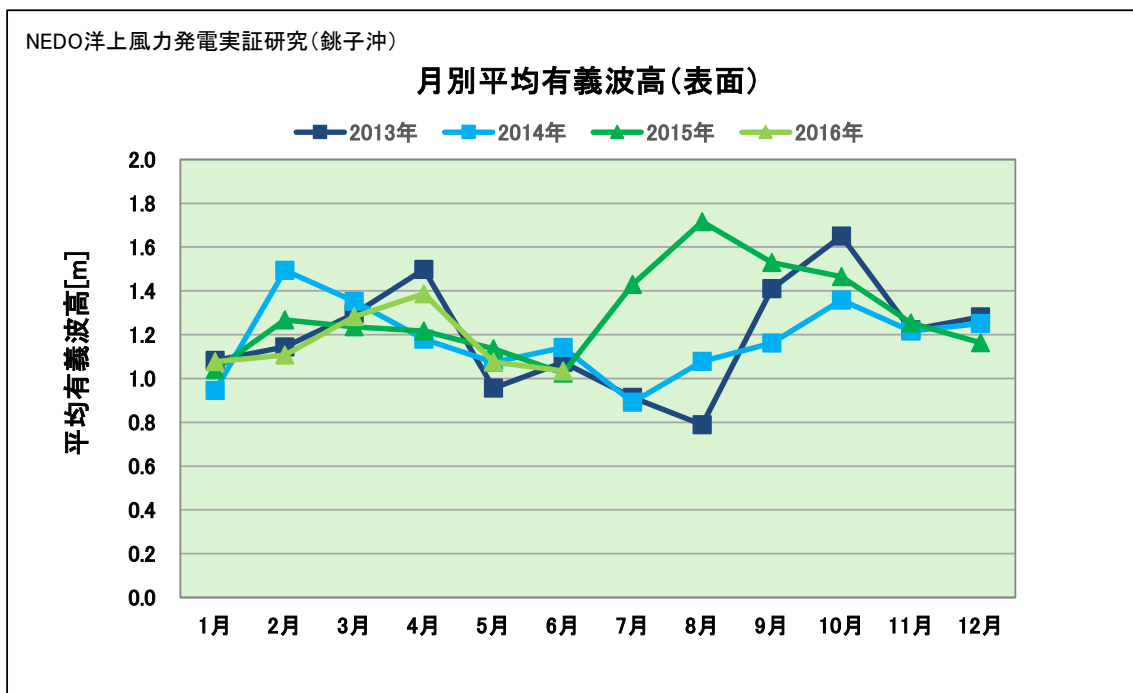


図 3.2-10 実証研究海域での月別平均有義波高

表 3.2-4 実証研究海域での月別平均有義波高

NEDO洋上風力発電実証研究(銚子沖)

| 項目 | 観測年・月 | 1月 | 2月 | 3月 | 4月 | 5月 | 6月 | 7月 | 8月 | 9月 | 10月 | 11月 | 12月 | 年平均 |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 平均有義波高 [m] | 2013年 | 1.1 | 1.1 | 1.3 | 1.5 | 1.0 | 1.1 | 0.9 | 0.8 | 1.4 | 1.6 | 1.2 | 1.3 | 1.2 |
| | 2014年 | 0.9 | 1.5 | 1.4 | 1.2 | 1.1 | 1.1 | 0.9 | 1.1 | 1.2 | 1.4 | 1.2 | 1.3 | 1.2 |
| | 2015年 | 1.0 | 1.3 | 1.2 | 1.2 | 1.1 | 1.0 | 1.4 | 1.7 | 1.5 | 1.5 | 1.3 | 1.2 | 1.3 |
| | 2016年 | 1.1 | 1.1 | 1.3 | 1.4 | 1.1 | 1.0 | / | / | / | / | / | / | / |
| データ取得率 [%] | 2013年 | 100.0 | 100.0 | 99.9 | 100.0 | 100.0 | 99.9 | 100.0 | 100.0 | 99.9 | 100.0 | 100.0 | 99.9 | 100.0 |
| | 2014年 | 96.9 | 100.0 | 99.9 | 100.0 | 100.0 | 99.9 | 100.0 | 100.0 | 99.9 | 99.6 | 100.0 | 100.0 | 99.7 |
| | 2015年 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 99.9 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 99.9 | 100.0 | 100.0 | 100.0 |
| | 2016年 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | / | / | / | / | / | / | / |

銚子沖洋上観測タワー付近における月別平均有義波周期を図 3.2-11、表 3.2-5 に示す。2013年～2016年の月別平均有義波周期は、6.4～9.5秒の範囲内にあり、年平均は7.7～8.1秒となっていた。実証研究海域は太平洋の強いうねりの影響を受けるため、年間を通して周期が長かった。

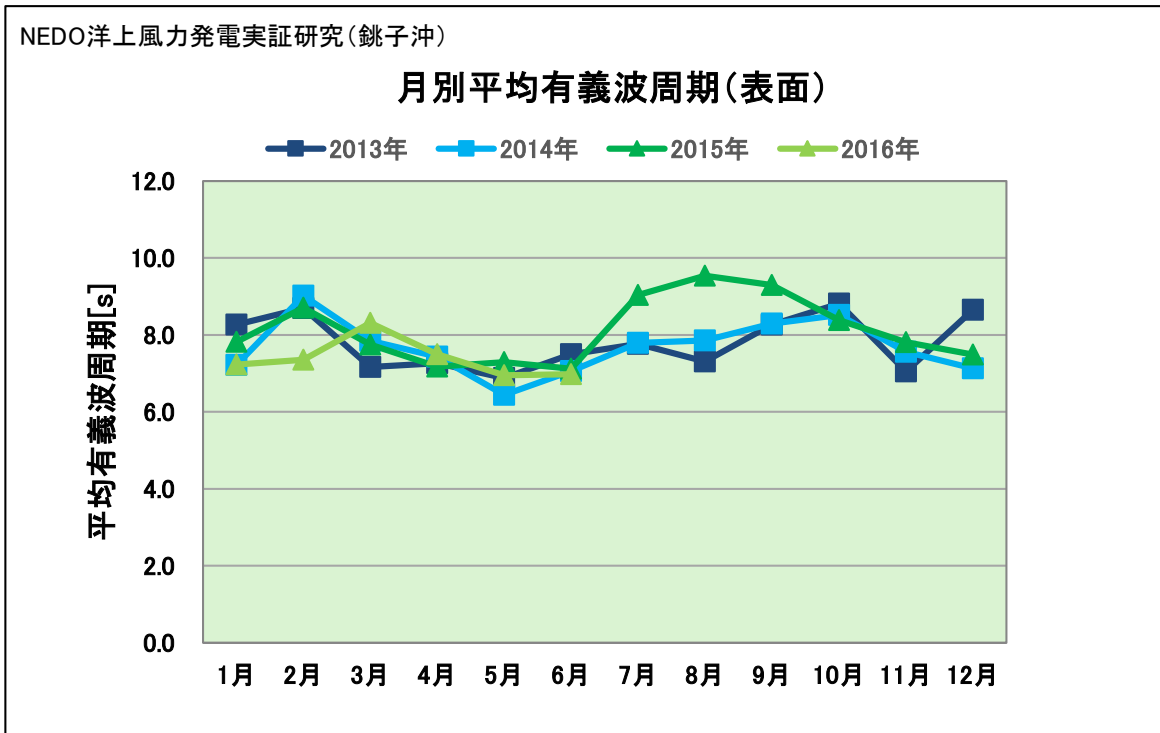


図 3.2-11 実証研究海域での月別平均有義波周期

表 3.2-5 実証研究海域での月別平均有義波周期

NEDO洋上風力発電実証研究(銚子沖)

| 項目 | 観測年・月 | 1月 | 2月 | 3月 | 4月 | 5月 | 6月 | 7月 | 8月 | 9月 | 10月 | 11月 | 12月 | 年平均 |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 平均有義波周期 [s] | 2013年 | 8.3 | 8.7 | 7.2 | 7.3 | 6.9 | 7.5 | 7.8 | 7.3 | 8.3 | 8.8 | 7.1 | 8.7 | 7.8 |
| | 2014年 | 7.2 | 9.0 | 7.8 | 7.4 | 6.4 | 7.1 | 7.8 | 7.9 | 8.3 | 8.5 | 7.6 | 7.1 | 7.7 |
| | 2015年 | 7.8 | 8.7 | 7.8 | 7.2 | 7.3 | 7.1 | 9.0 | 9.5 | 9.3 | 8.4 | 7.8 | 7.5 | 8.1 |
| | 2016年 | 7.2 | 7.4 | 8.3 | 7.5 | 7.0 | 7.0 | / | / | / | / | / | / | / |
| データ取得率 [%] | 2013年 | 100.0 | 100.0 | 99.9 | 100.0 | 100.0 | 99.9 | 100.0 | 100.0 | 99.9 | 100.0 | 100.0 | 99.9 | 100.0 |
| | 2014年 | 96.9 | 100.0 | 99.9 | 100.0 | 100.0 | 99.9 | 100.0 | 100.0 | 99.9 | 99.6 | 100.0 | 100.0 | 99.7 |
| | 2015年 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 99.9 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 99.9 | 100.0 | 100.0 | 100.0 |
| | 2016年 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | / | / | / | / | / | / | / |

3.3 海潮流

(1) 海潮流の推定

実証研究海域における海潮流については、外房沿岸海域における海流の流向・流速の出現確率分布を「続・日本全国沿岸海洋誌—解説編・増補編—」（日本海洋学会編，1990）より調べた。それによれば、外房沖合部には常時黒潮本流があり、概ね北東流（北東に向かう流れ）が卓越していることがわかった。海流の流速は、岸に近づくにつれて小さくなることが知られているが、実証研究海域に最も近い沖合地点で最大 3kt (1.5m/s)、平均で 1kt (0.5m/s) 以下となっていた。

同様に、潮流の流向・流速の出現割合を上記文献より調べた。それによると、潮流の向きは沿岸に沿った向きになっており、実証研究海域では東西方向～北東⇄南西方向の流れが卓越すると考えられる。流速は、最大で 0.5m/s 程度、平均的には 0.3m/s 程度と推定される。

以上から、実証研究海域の海流および潮流についてまとめると、以下のようになった。

- ・海流：概ね北東流（北東に向かう流れ）が卓越。

最大 3kt (1.5m/s)

平均で 1kt (0.5m/s) 以下

- ・潮流：潮流の向きは、沿岸に沿った向き（北東⇄南西）。

流速は、最大で 0.5m/s 程度

平均的には 0.3m/s 程度

実証研究海域における潮位については、港湾基準に定められた方法で推定を行った。

「本別冊 2.1(2)2)②海潮流」より、実証研究海域に最も近い銚子漁港における潮位実況は以下のようになっていた。

朔望平均満潮位 $H.W.L. = C.D.L. + 1.50$ (m)

平均潮位 $M.W.L. = C.D.L. + 0.87$ (m)

東京湾中等潮位 $T.P. \pm 0.00 = C.D.L. + 0.86$ (m)

朔望平均干潮位 $L.W.L. = C.D.L. - 0.02$ (m)

高潮による潮位偏差（気象潮分）は、50年暴風波浪時の潮位上昇分として、港湾基準のモデル高潮の推算式から推定した。この式では、低気圧による海面の吸い上げ分および風による吹き寄せ分が考慮される。

$$z = a(p_0 - p) + bW^2 \cos \theta + c$$

z：潮位偏差 (cm)

$p_0 - p$ ：気圧低下量 (m)

W：10分間平均風速の最大値 (m/s)

θ ：主風向と最大風速のなす角

銚子では、定数として $a=0.622$ 、 $b=0.056$ 、 $c=0$ 、主風向SSWが与えられる。気圧低下量、平均風速最大値は50年確率再現期待値を用いて、

$$p_0 - p = 67.9 \text{ (hPa)}$$

$$W = 36 \text{ (m/s)}$$

$$q = 0$$

とすると、

$$z = 42.2 + 72.6 + 0 = 114.8 \text{ (cm)}$$

よって、高潮による水位上昇を考慮した設計高潮位 (H.H.W.L.) は、H.W.L.に上記値を足して算出でき、

$$\text{H.H.W.L.} = \text{H.W.L.} + z = \text{C.D.L.} + 1.50 + 1.15 = \text{C.D.L.} + 2.65 \text{ (m)}$$

となり、C.D.L.に対して2.65m分だけ高い値となる。

まとめると、実証研究海域の潮位は以下のようになった。

$$\text{H.H.W.L.} = \text{C.D.L.} + 2.65 \text{ (m)}$$

$$\text{H.W.L.} = \text{C.D.L.} + 1.50 \text{ (m)}$$

$$\text{M.W.L.} = \text{C.D.L.} + 0.87 \text{ (m)}$$

$$\text{T.P.} \pm 0.00 = \text{C.D.L.} + 0.86 \text{ (m)}$$

$$\text{L.W.L.} = \text{C.D.L.} - 0.02 \text{ (m)}$$

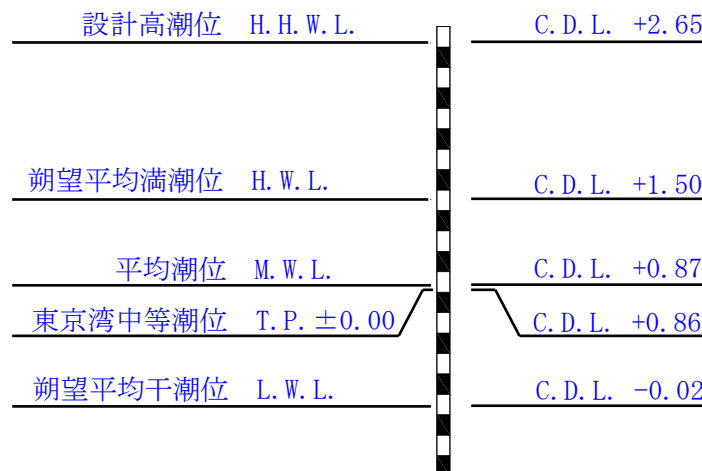


図 3.3-1 潮位のまとめ

(2) 海潮流の観測

1) 海潮流観測の概要

海潮流観測の概要は、「本別冊 3.2(2)1)波浪観測の概要」にまとめて示した。

2) 海潮流の観測結果

銚子沖洋上観測タワー付近の月別平均流速（海面下 2m）を図 3.3-1、表 3.3-1 に示す。2013 年～2015 年の月別平均流速（海面下 2m）は 0.11m/s～0.18m/s の範囲内で、年平均は 0.15m/s となっており、流速は年間通して小さかった。なお、流速観測は洋上風車等の設置前（2010 年）より継続実施してきたが、一定のデータ取得ができたため、2015 年 6 月で終了した。

NEDO洋上風力発電実証研究(銚子沖)

月別平均流速(海面下2m)

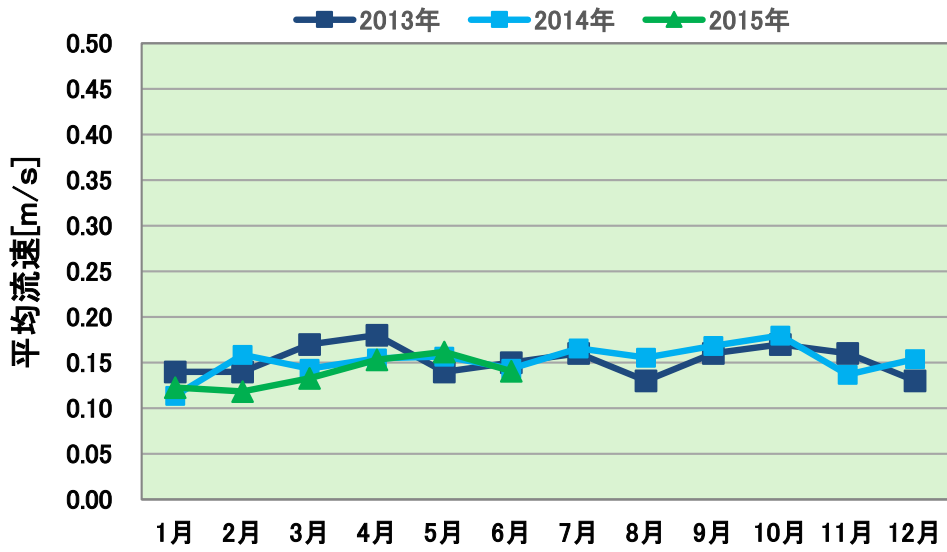


図 3.3-1 実証研究海域での月別平均流速

表 3.3-1 実証研究海域での月別平均流速

NEDO洋上風力発電実証研究(銚子沖)

| 項目 | 観測年・月 | 1月 | 2月 | 3月 | 4月 | 5月 | 6月 | 7月 | 8月 | 9月 | 10月 | 11月 | 12月 | 年平均 |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 平均流速 [海面下2m] 【m/s】 | 2013年 | 0.14 | 0.14 | 0.17 | 0.18 | 0.14 | 0.15 | 0.16 | 0.13 | 0.16 | 0.17 | 0.16 | 0.13 | 0.15 |
| | 2014年 | 0.11 | 0.16 | 0.14 | 0.15 | 0.16 | 0.14 | 0.17 | 0.16 | 0.17 | 0.18 | 0.14 | 0.15 | 0.15 |
| | 2015年 | 0.12 | 0.12 | 0.13 | 0.15 | 0.16 | 0.14 | / | / | / | / | / | / | / |
| データ 取得率 [%] | 2013年 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 |
| | 2014年 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 99.3 | 99.9 | 99.9 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 99.9 |
| | 2015年 | 100.0 | 100.0 | 99.9 | 100.0 | 100.0 | 74.7 | / | / | / | / | / | / | / |

3. 4 海底地形・土質調査

(1) 海底地形調査

実証研究設備設置予定地点の水深・海底地形等を把握するため、図 3.4-1 に示す銚子市、旭市、匝瑳市の前面海域において、海底地形調査、海底面状況調査、海底底質（地層層厚）調査を行った（海底面状況調査および海底底質（地層層厚）調査の内容は「本別冊 3.4(2)土質調査」に後述した）。これらの調査は 2008 年 10 月 16 日～17 日、10 月 26 日の 3 日間にかけて行った。

海底地形調査には、ナローマルチビーム測深機（シーバット）を用いた。図 3.4-1 に測深機による測線配置概要、図 3.4-2 に測定状況模式図、表 3.4-1 に機器仕様を示した。

測深調査の結果、実証研究設備設置予定地点周辺の水深はおおよそ 16～18m であった（図 3.4-3、図 3.4-4）。

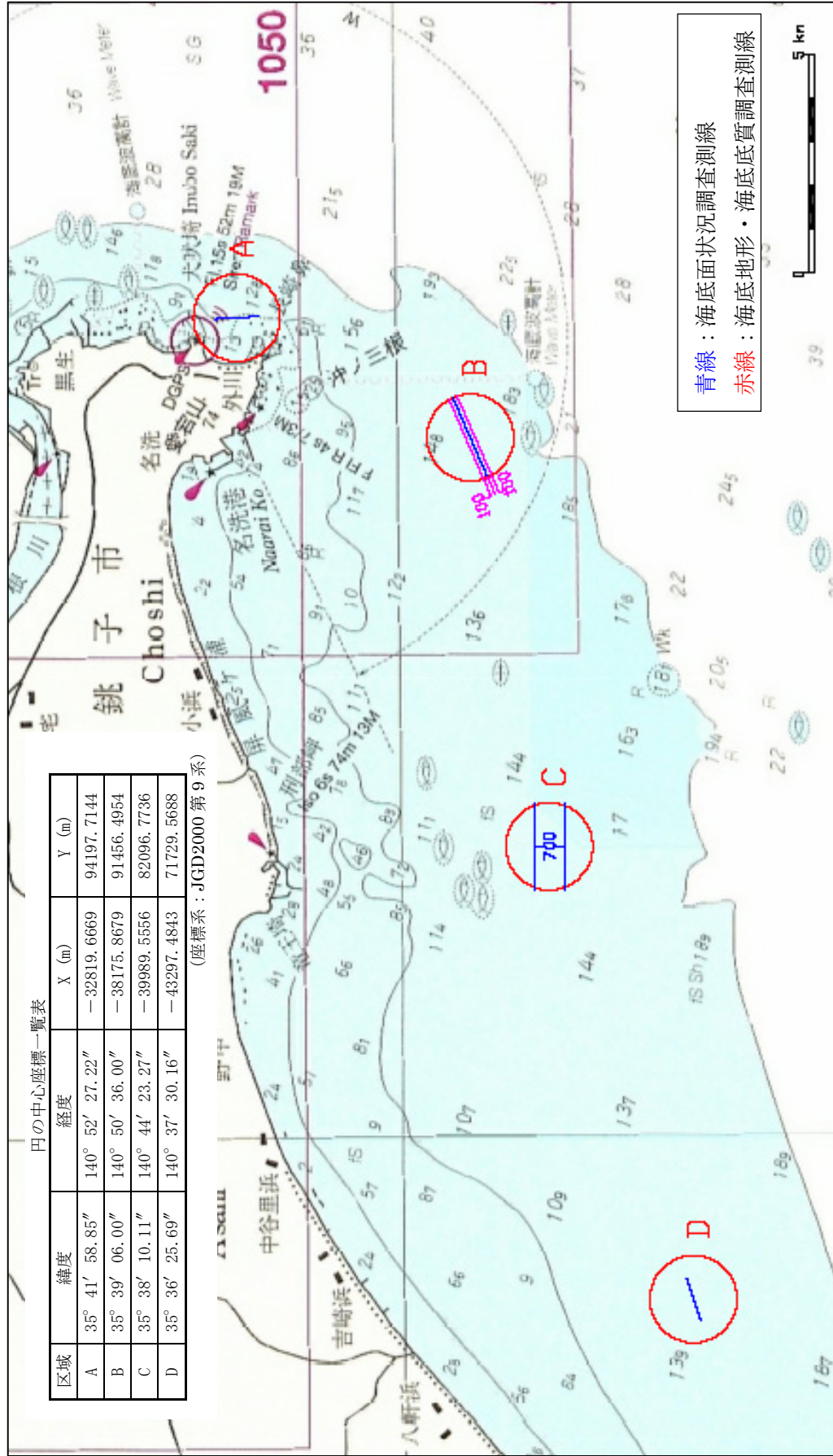


図 3.4-1 調査位置図 (A~Dの赤丸が調査位置 : 赤丸の直径2km 海図W87に加筆)

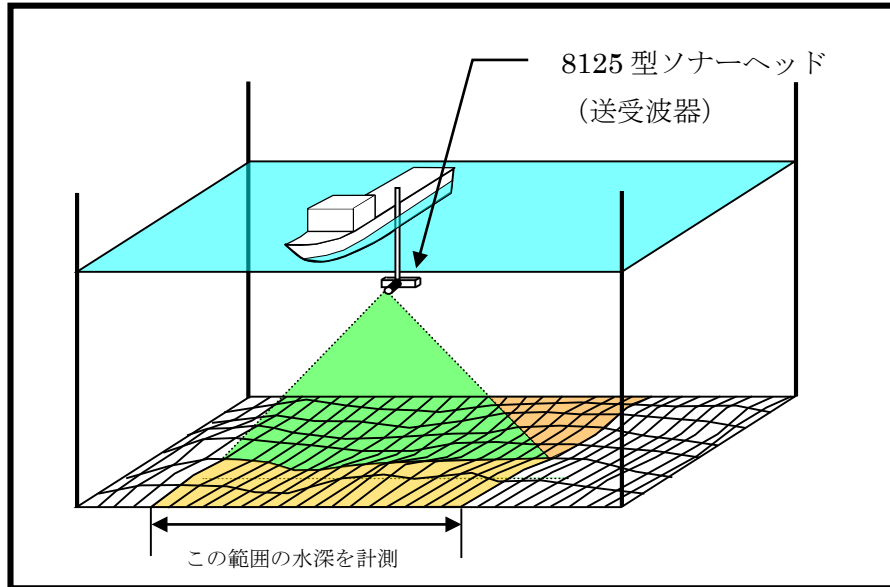


図 3.4-2 海底地形調査模式図

表 3.4-1 主要機器一覧

| 名 称 | 型 式 | 仕 様 | 数 量 |
|----------------------|--------------------------|---|-----|
| 調査船 | 福井丸 | 3.99 トン | 1 隻 |
| ナロー マルチビーム 測深機 | RESON 社製 SeaBAT8125 型 | 発信周波数：455 kHz ビーム角：1°（前後方向） 0.5°（直角方向） ビーム数：240 本 スワ幅：120° 測深分解能：6mm | 1 式 |
| データ収録・ 処理ソフト | HYPACK Inc. HYPACK | 処理 PC：Windows XP、2000 デジタルデータ収録 処理機能：動揺補正、音速度補正、潮位補 正等深線図作成、土量計算など | 1 台 |
| DGPS | CSI WirelessI 社製 | ディファレンシャル方式 補正信号にビーコン局使用 測位精度：1～2m | 1 台 |

(2) 土質調査

1) 海底面状況調査、海底底質（地層層厚）調査

実証研究設備設置予定地点の海底面の状況を把握するため、サイドスキャンソナーによる海底面状況調査を実施した。図 3.4-1 に測線配置概要、図 3.4-5 に測定状況模式図、表 3.4-2 に機器仕様を示した。測線配置および測定は以下の要領で行った。

① 図 3.4-1 の各区域に青色で示したような測線を配置した。

A 区域：1km×1 測線

B 区域：2km×1 測線

C 区域：2km×2 測線（測線間隔は 700m とした）

D 区域：1km×1 測線

② 調査船の海上測位は、D-GPS 測位システムを使用した。

③ 調査船は予定測線上を約 4kt で航行した。

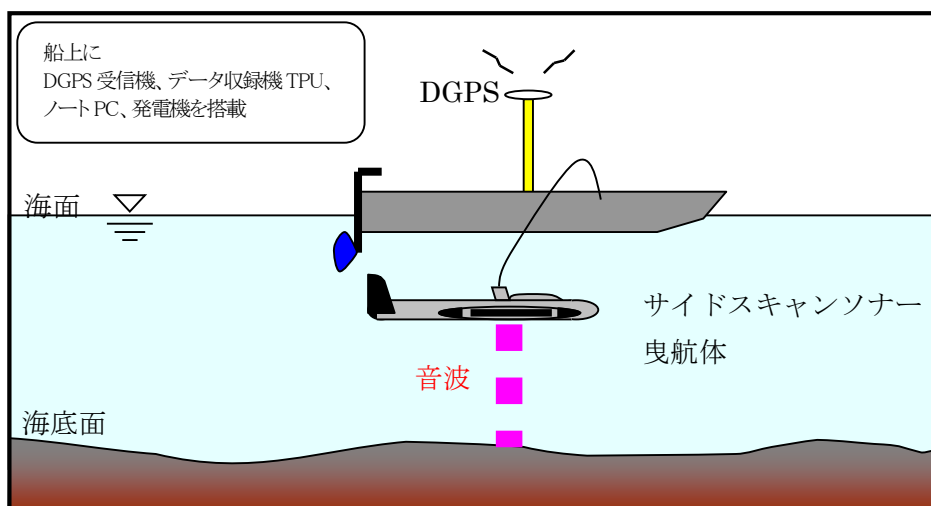


図 3.4-5 海底面状況調査模式図

表 3.4-2 主要機器

| 名 称 | 型 式 | 仕 様 | 数 量 |
|-----------------|------------------------|--|-----|
| 調査船 | 三浦丸 | 4.64 トン (A、C、D 区域) | 1 隻 |
| 調査船 | 福井丸 | 3.99 トン (B 区域) | 1 隻 |
| サイドスキャンソナー | KLEIN 社製 SYSTEM3000 | 発信周波数：130kHz、445kHz パルス幅：25～400μsec ビーム角度 水平方向：1° (130kHz) 水平方向：0.2° (445kHz) 垂直方向：40° (130・445kHz 共通) 探査幅：片弦 25m～1,500m TVG レンジ：80dB | 1 式 |
| データ収録・ 処理ソフト | Triton Eric ISIS | 専用 PC：Windows2000 デジタルデータ収録 処理機能：高度補正、方位補正、振幅調整、 デジタルモザイク作成など | 1 台 |
| DGPS | CSI Wirelessl 社製 | ディファレンシャル方式 補正信号にビーコン局使用 測位精度：1～2m | 1 台 |

また、実証研究設備設置予定地点の海底質の状況を把握するため、音波探査機 (Chirp II) による調査を実施した。図 3.4-1 に海底底質 (地層層厚) 調査の測線配置概要、図 3.4-6 に測定状況模式図、表 3.4-3 に機器仕様を示した。

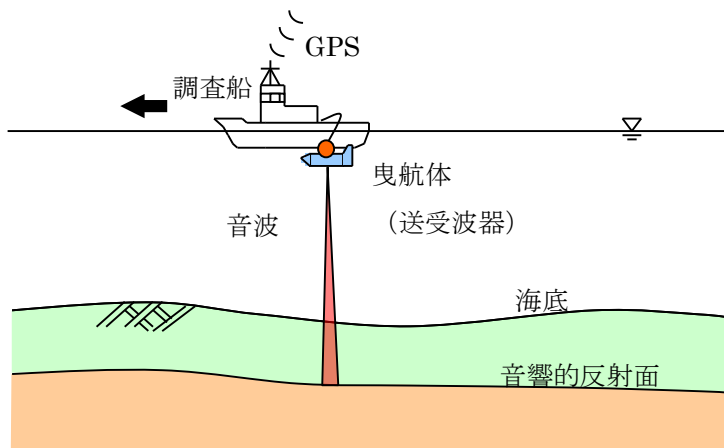


図 3.4-6 海底底質 (地層層厚) 調査模式図

表 3.4-3 主要機器一覧

| 名 称 | 型 式 | 仕 様 | 数 量 |
|-------|------------------------|---|-----|
| 調査船 | 家田丸 | 9.3 トン | 1 隻 |
| 音波探査機 | Benthos 社製 Chirp II | 音源タイプ：電歪方式、スウィープ音源 発振周波数：2kHz～7kHz 発振出力：2kW（4 素子） 音響ビーム角：45°（4 素子） システム分解能：76.2～152.4mm | 1 式 |
| DGPS | CSI WirelessI 社製 | ディファレンシャル方式 補正信号にビーコン局使用 測位精度：1～2m | 1 台 |

図 3.4-7～図 3.4-10 に A 地区～D 地区の海底面状況図を、図 3.4-11 に B 地区の断面図を示す。また図 3.4-12 に候補海域の海底地盤の状況図、図 3.4-13 に海底地質構造図を示す。本調査の結果から下記のことが推察される。

- ・ A 区域の底質土は、砂質土が主体であり、調査区域の中央付近と中央西側、および北側に岩が分布している。
- ・ B 区域の底質土は、砂質土が主体であり調査区域の南西方向に岩盤が分布している。さらに、一部の岩盤周辺に泥質分を含む砂質土が堆積していると考えられる。
- ・ C 区域の底質土は、東方に岩盤が分布し、西方は砂質土が大半を占めているが、一部に礫あるいは貝殻成分を含む砂質土、さらに、泥質分を含む砂質土も分布している。また、岩盤周辺の一部に泥質分を含む砂質土が分布している。この岩盤の表面には南北方向の層理が明瞭に見られる。
- ・ D 区域の底質土は、砂質土である。この砂質土の中には、漁具などの人工物と考えられるものがいくつか見られた。

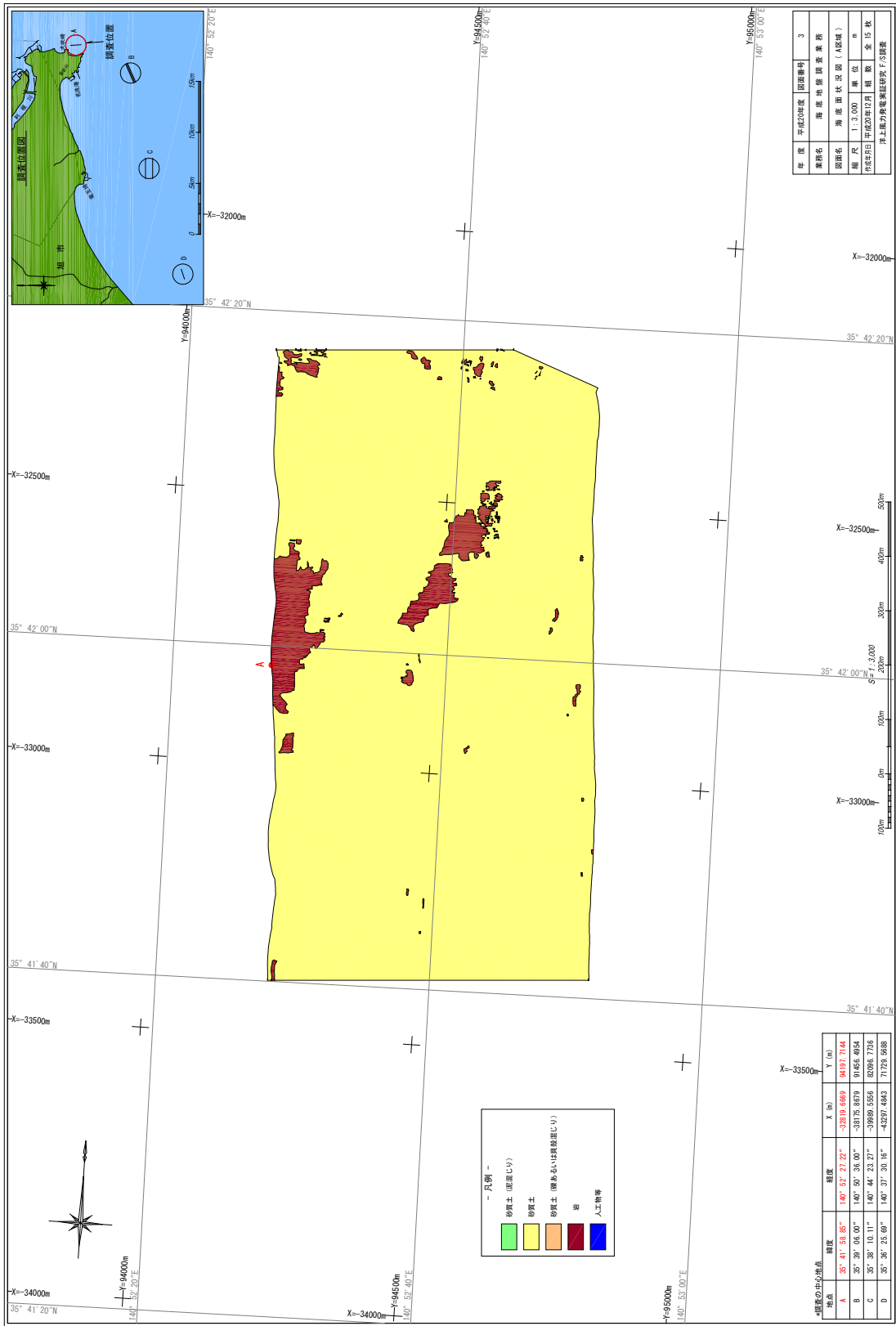


図 3.4-7 海底面状況図 (A 地区)

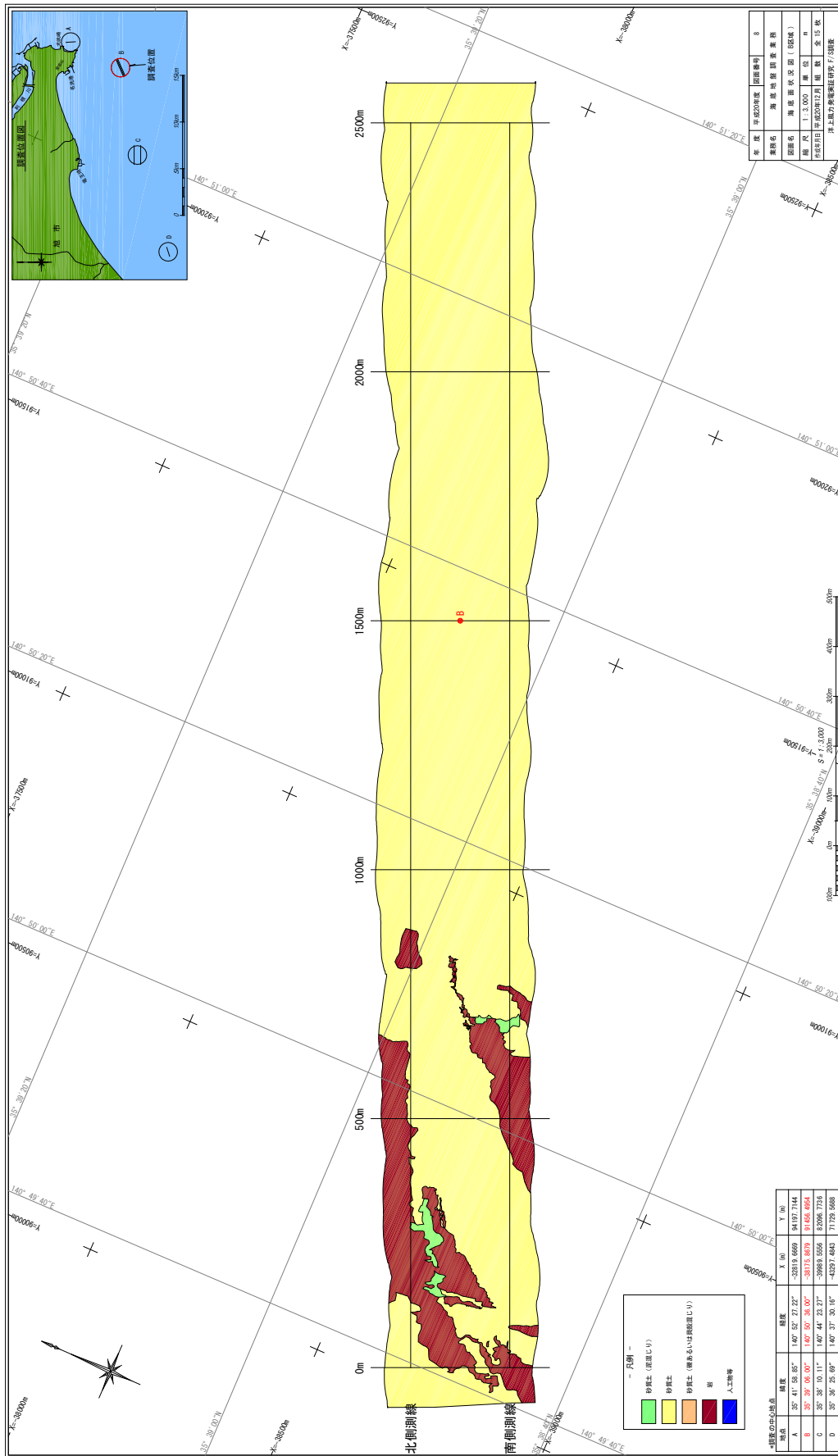


図 3.4-8 海底面状況図 (B地区)

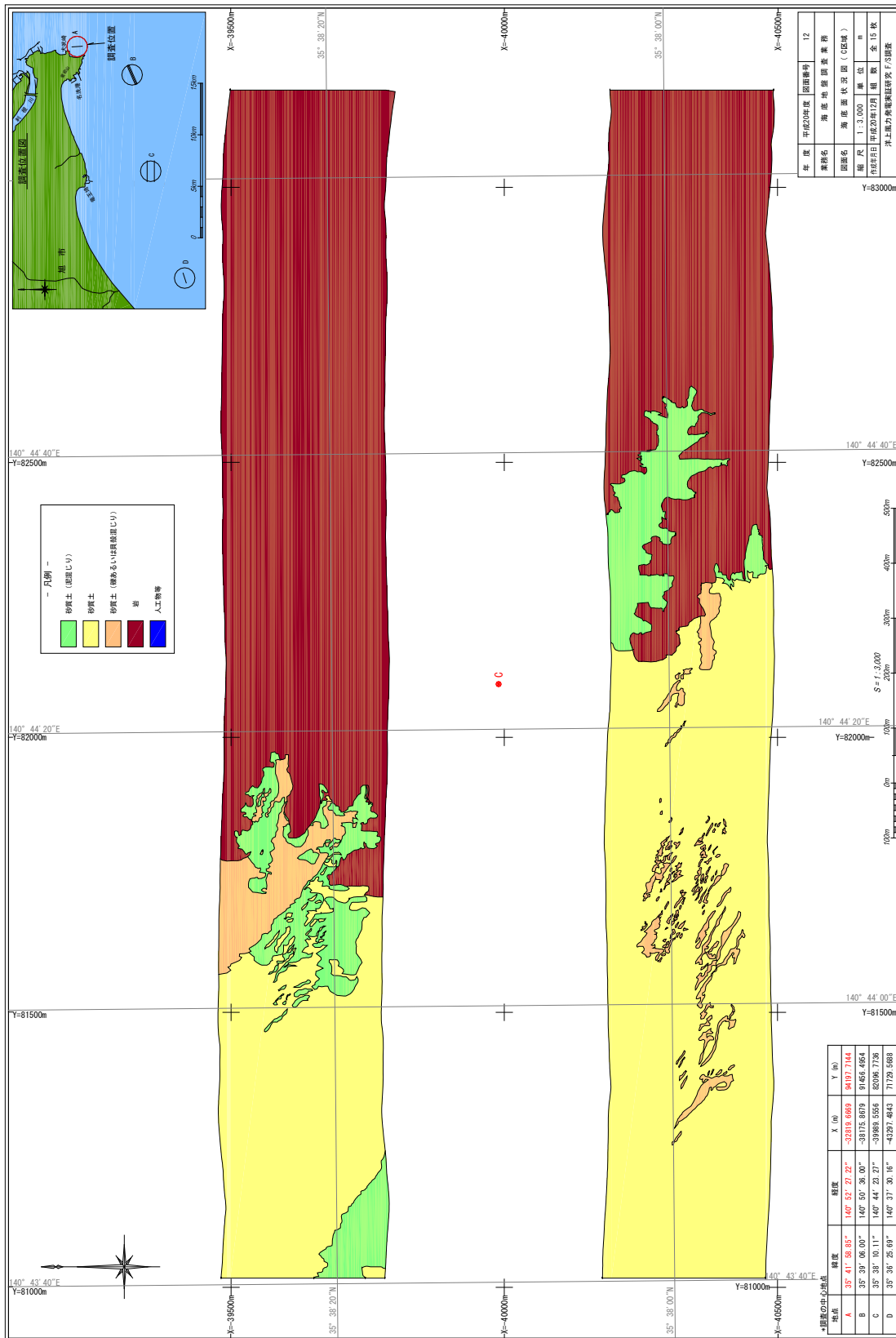


图 3.4-9 海底面状况图 (C地区)

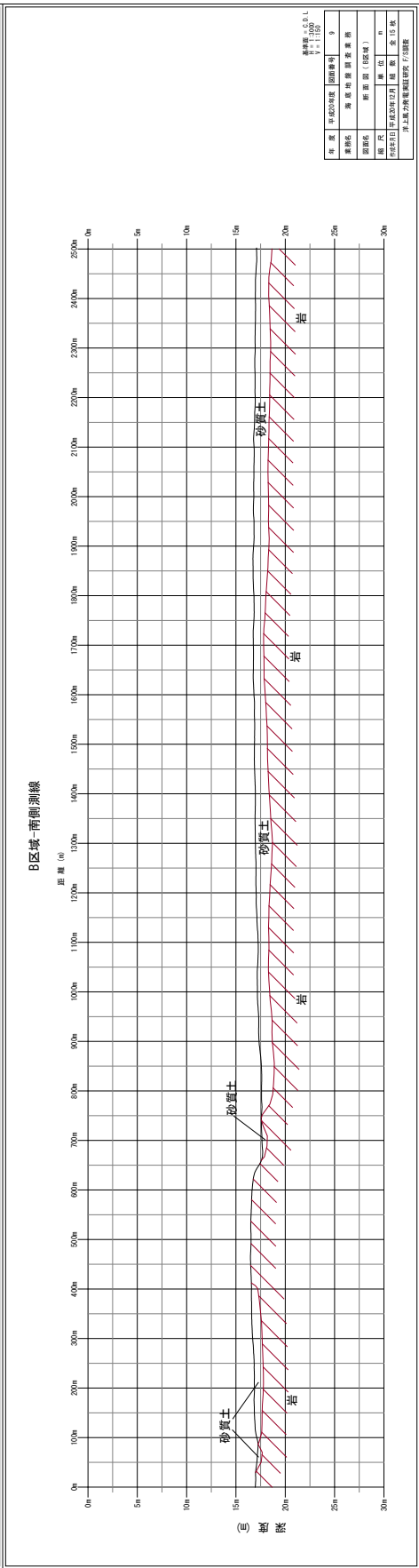
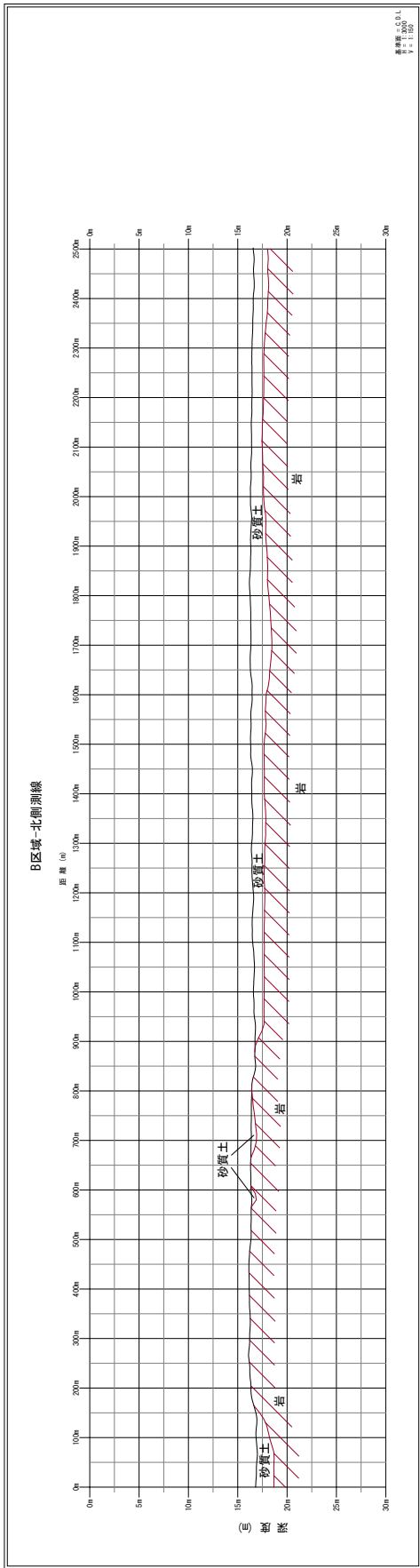


图 3.4-11 断面图 (B 地区)

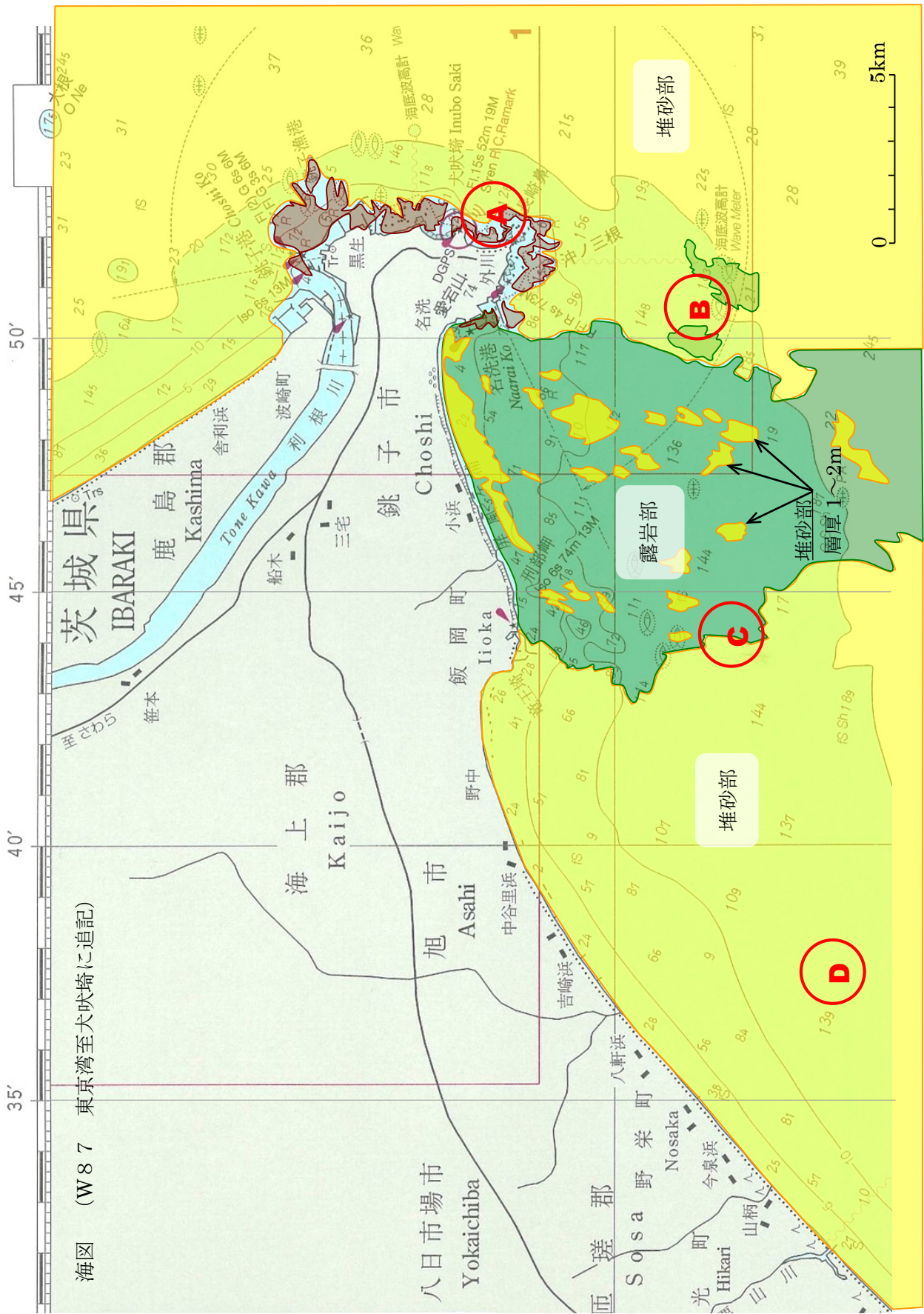


図 3.4-12 候補地の海底地盤の状況図

| 層序区分 | | Stratigraphic Division | |
|----------------------|---------------------|-------------------------------|--|
| 時代 Geological Age | 現世 Recent | 陸上地質層序* Land Stratigraphy | 音波探査層相 Acoustical Stratigraphy in the sea area |
| | 第四紀 Quaternary | 沖積層 Alluvium | I _i |
| 第三紀 Tertiary | 更新世 Pleistocene | 圃東ローム層 Kanto Loam | II _i |
| | | 香取層 Katori Formation | III _i |
| | 鮮新世 Pliocene | 豊里層 Toyosato Formation | IV _i |
| 先第三紀 Pre-Tertiary | 中新世 Miocene | 飯岡層 Ihoka Formation | V _i |
| | | 名洗層 Naarai Formation | VI _i |
| | 第三系 Pre-Tertiary | 夫船ヶ鼻層 Metogahana Formation | |

I_i層は最終氷期の最大海進期以後の地積物であり、
 VI_i層は夫船ヶ鼻層の火山岩類を含む。
 層相の記載は報告書による。

*Yasumochi Matoba (1967)

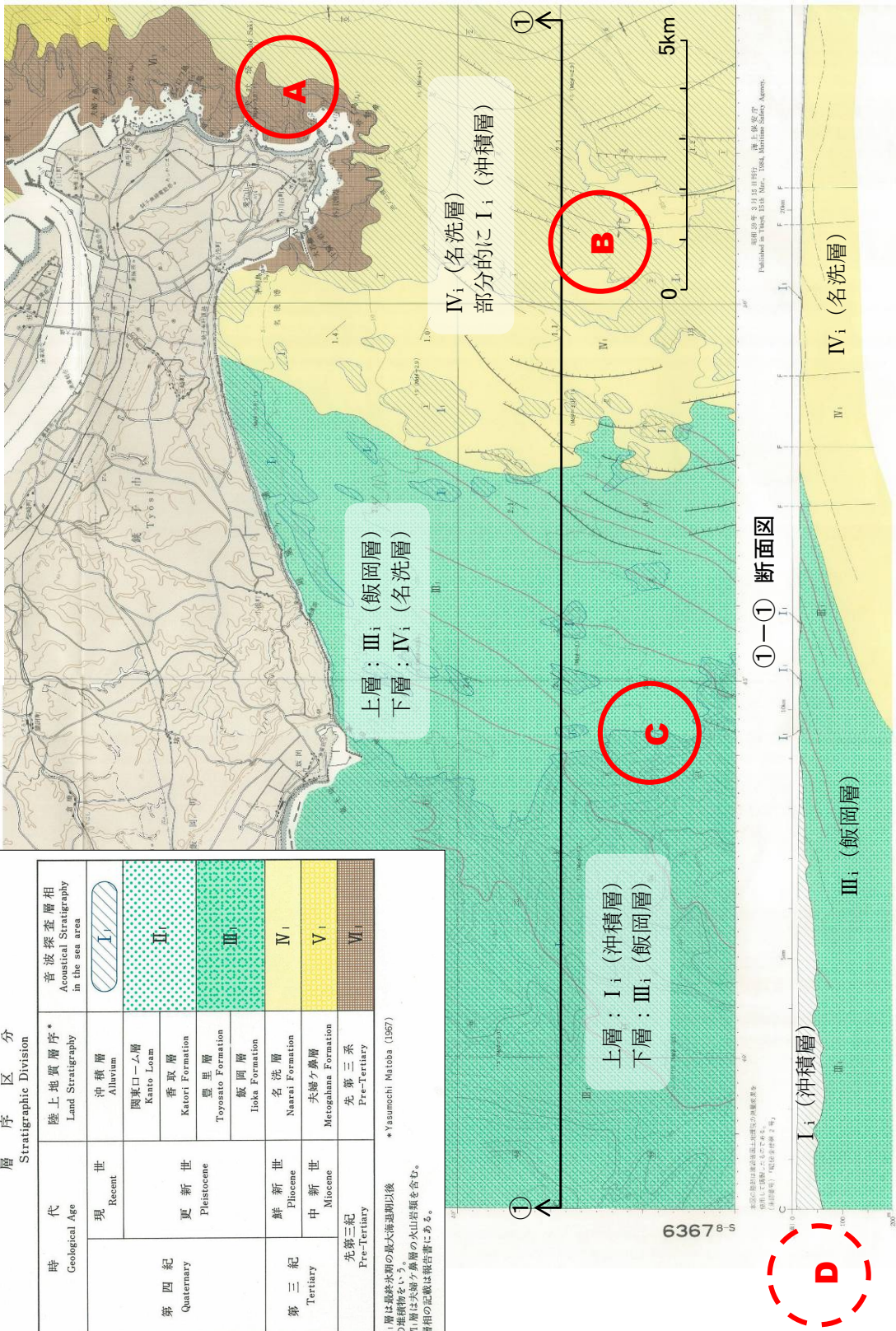


図 3.4-13 候補海域の海底地質構造図 (海上保安庁水路部, 1984 (加筆))

2) ボーリング調査

実証研究設備設置予定地点の地質状況を把握するため、ロータリー式ハイドロリックフィード試錐機を用いて、ボーリングを実施した。ボーリング調査の結果、陸上ボーリングおよび海上ボーリングで、軽石を混入する砂岩の分布を確認した。この地質は、文献の記述や踏査で確認した名洗層の層相と一致することから、名洗層に相当する地質と評価した。また、陸上ボーリングでは、名洗層の下位の地層として、名洗層の基底礫岩、愛宕山層群の分布を確認した。

ボーリングコアで確認した地質の対比を行う目的で、地質文献を収集、整理するとともに、現地の地質踏査を実施した。その結果、ボーリングコアで確認した地質は、下記の地質に相当すると判定した。

■愛宕山層群

陸上では、愛宕山や千騎ヶ岩付近の露頭で確認できる。地質の性状は、下記の通りである。

- ・塊状砂岩：断層が多数発達し、大小のブロックに分断される。塊状砂岩中に、黒色泥岩が挟在する。
- ・礫岩：基質は、上述の塊状砂岩とほぼ同質である。礫岩層の上位および下位は、塊状砂岩に移化する。礫径は、1cm～十数cm程度で淘汰が悪く、扁平で円磨されているものが多い。礫種は、花崗岩、犬山岩類、石灰岩、チャート、砂岩、泥岩、変成岩類など多岐にわたっている。
- ・砂岩泥岩互層：厚さ5～10cmの砂岩と厚さ2～5cmの泥岩がリズムカルな互層をなしている。砂岩層には斜交葉理が発達する。泥岩層には、細かな平行葉理を持っている。既存調査結果によれば、愛宕層上群の上面は、5～10m程度の比高の凹凸状に分布することが確認されている。

■名洗層

陸上では、名洗町の海岸沿いや千騎ヶ岩付近の露頭で確認できる。浮石凝灰質砂岩と海緑石を含み、多種類の凝灰岩や浮石を挟在する。凝灰質の砂岩を主とする。基底は、新生界の礫や夫婦ヶ鼻層中の火山礫を含む礫岩からなる。傾斜は水平に近く、1～4°西または北西に傾く。基底部の礫岩層中に、化石が多産する。

銚子地域の地質分布を図3.4-14に示す。当地域では、半島の南部から東海岸にかけて中生代の地層が露出し、これを新第三紀中新世～第四期更新世の堆積物が広く覆っている。また、台地の上部には更新世後期の砂層や関東ロームが広く分布し、河川沿いの低地には軟弱な泥層、砂層が堆積している。

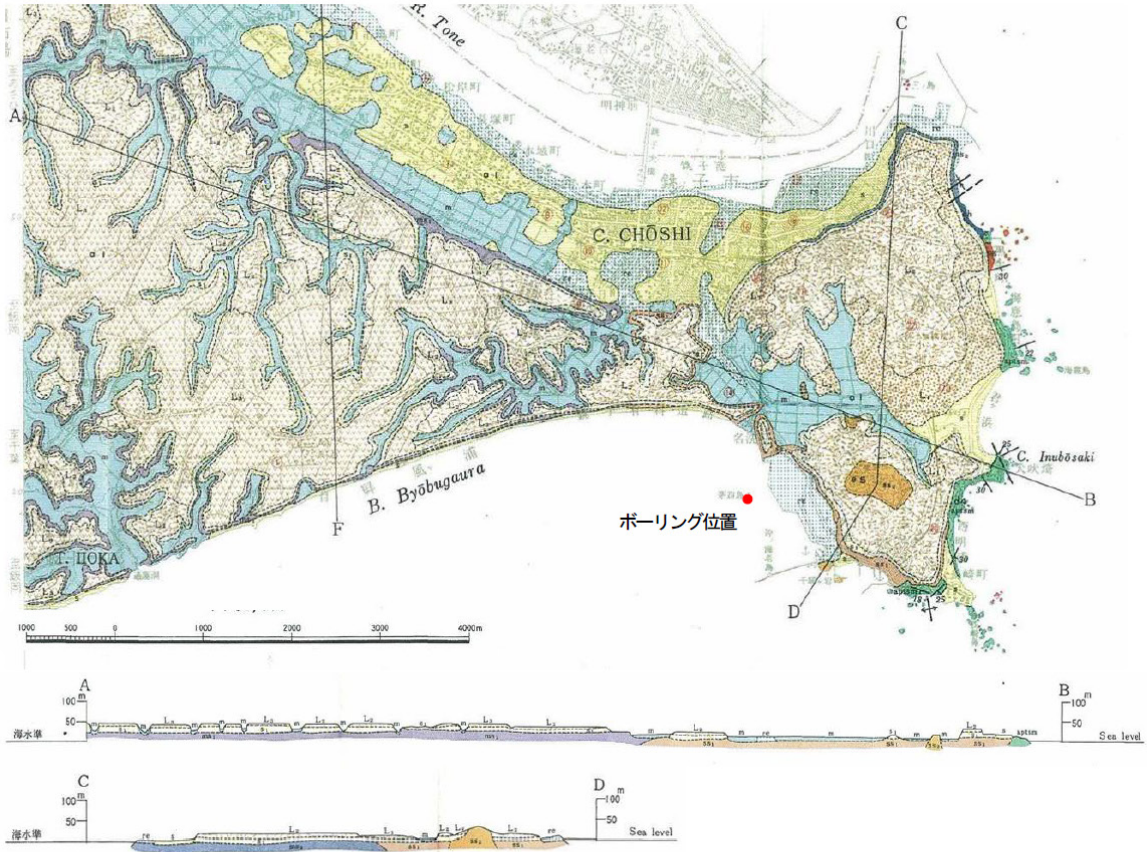


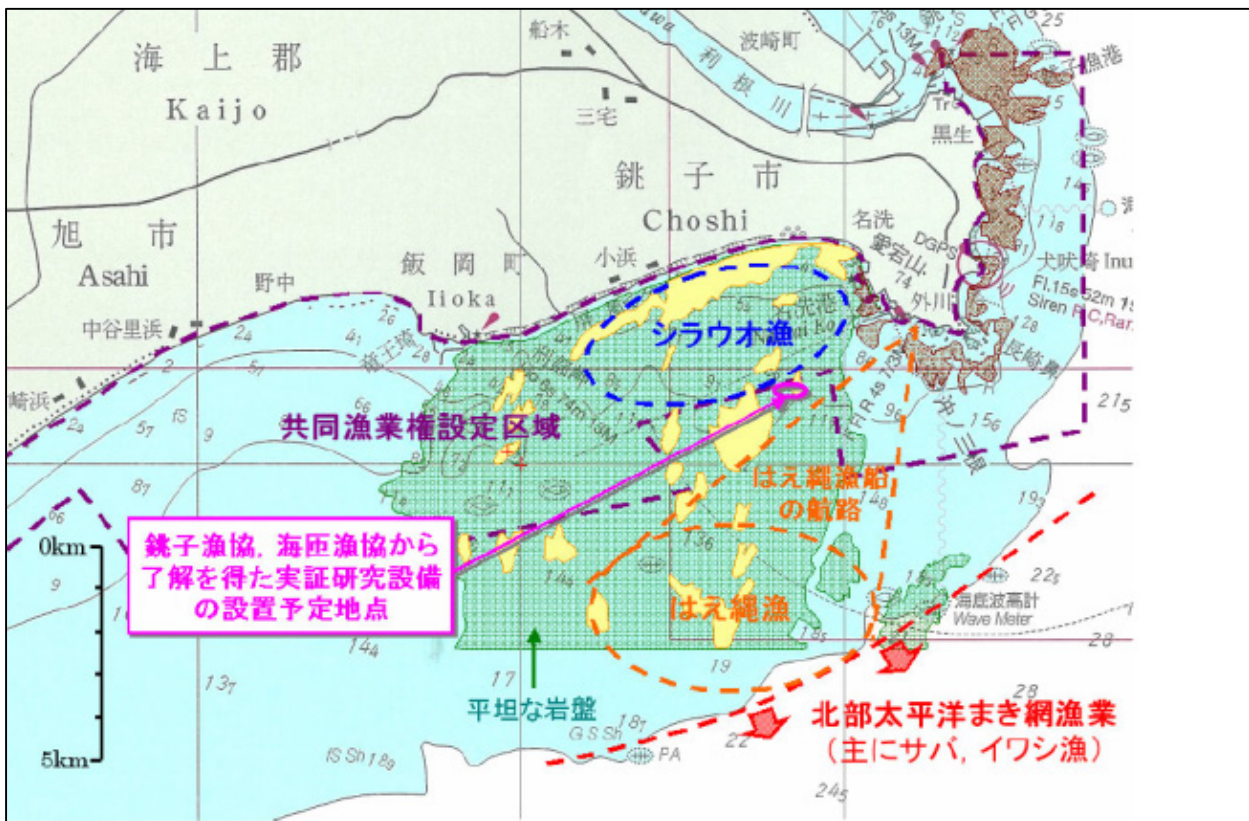
図 3.4-14 海底底質 (地層層厚) 調査模式図

4 基本設計

4.1 風車設置点の決定

本実証研究の候補海域内を管轄する銚子市漁業協同組合・海匝漁業協同組合、千葉県、銚子市、銚子海上保安部等関係部局との事前協議を実施し、下記の協議結果から実証研究設備設置予定地点を選定した。

- ・銚子市漁業協同組合・海匝漁業協同組合との事前協議（銚子市漁業協同組合：2008年5月27日～2009年3月末、海匝漁業協同組合：2008年9月2日～2009年3月5日）の結果、屏風ヶ浦沖の水深20m以深では北部太平洋まき網漁業が操業し、事前協議先が多数の漁協になる可能性が高く、当該実証研究期間に了解を得ることが困難であるため、候補外とした。
- ・千葉県・海上保安部等との事前協議から、法令上、研究予定海域へ研究設備を設置することが禁止されていないことが確認できた。



| | | |
|-------------|-----------------------------|------------------------------|
| 実証研究予定地点の確定 | 千葉県銚子市屏風ヶ浦沖合(外川漁港から3.1km沖合) | |
| 予定地点 | 位置(国際緯度経度系) | 35° 41' 0"N、140° 49' 6"-16"E |
| | 水深 | 10-15m |
| | 離岸距離 | 3.1km |
| | 海底土質 | 砂岩及び泥岩、部分的に堆砂あり。 |
| | 海底地形 | 海底勾配が小さく、不陸(平坦ではないこと)も小さい。 |

図 4.1-1 銚子沖における実証研究設備設置予定地点の選定結果

4.2 風車の仕様

本実証研究では、三菱重工業株式会社製の風力発電機「MWT92/2.4」を採用し、洋上に対応した風車の仕様の検討を行い、各種対策を施すこととした。実証研究に用いる風車の諸元は表4.2-1の通りである。

表 4.2-1 銚子沖洋上風力発電実証研究で用いる風車の諸元

| 項目 | 諸元 |
|--------|-----------|
| メーカー | 三菱重工業株式会社 |
| 機種 | MWT92/2.4 |
| 定格出力 | 2.4MW |
| ナセル重量 | 約119t |
| ロータ直径 | 約92m |
| ブレード重量 | 約10t×3 |
| ハブ高さ | 約80m |

洋上風車向けの対策内容は以下の通りである。

①塩害対策

塩害対策の基本は、風車ナセル内部に対する塩分の侵入をできる限り低減することにある。本洋上風車では、ナセル内部への外気侵入防止策、ナセル内への流入空気の除塩策などを検討する。またタワー内塩害対策、塗装仕様についても検討する。

②湿度対策

湿度についても考慮が必要であるが、ナセル内への水分進入の観点からすると、前項の塩害対策と共通の点が多い。しかし、電気機器における結露に関しては湿度特有の問題であり、電気品を対象にした湿度対策の仕様を設定する必要がある。

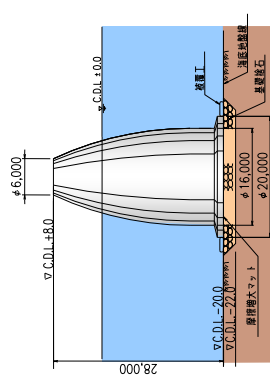
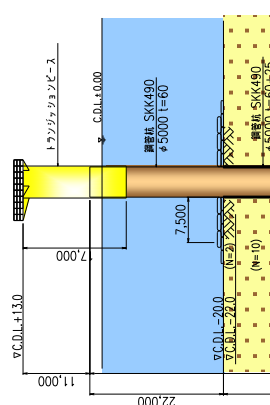
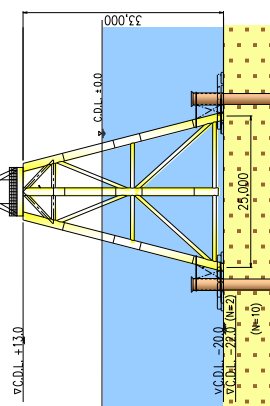
③船舶の航行安全対策

船舶の安全な航行を確保するため、海上には、航路標識（Marine Aids to Navigation）が設置される。洋上風車の設置においても、航路標識を設置することが必要である。

4.3 支持構造物の選定

実証研究設備設置予定地点における洋上風車の支持構造物について、重力式、モノパイル式、ジャケット式の3種類から選定を行った。この3種類について、概略設計を行った上で比較検討を行った結果、海底が比較的平坦で岩盤のため、杭を打設しない重力式を採用することとした。比較検討結果を表 4.3-1 に示す。

表 4.3-1 基礎形式の比較検討結果

| | 重力式ケーソン案 | モノパイル案 | ジャケッタ案 |
|--------------------|---|--|--|
| 基礎の構造形式 (水深20m) |  |  |  |
| 適用地盤 | 岩盤エリア (支持層が浅く堅固な地盤) | 堆砂エリア (支持層が深く、軟弱な地盤) | 堆砂エリア (支持層が深く、軟弱な地盤) |
| 構造概要 | 中空PCケーソン重量：2,700 t 完成時基礎重量：約 10,000 t 高比重の中詰材、摩擦増大マット使用 陸上製作ヤードでケーソン基礎を製作し、4,100 t吊りクレーン船で吊って運搬、設置し、中詰材を投入して安定させる方式。 | 大口径鋼管杭φ5.0mモノパイル、根入深さ48m、鋼管杭：580 t、トランジションピース：130 t 油圧ハンマーによる大口径の鋼管杭打設の国内実績はないため、大型パイプローママー方式を採用。 | 鋼管杭φ1.8m×12本、根入深さ35m 杭重量：465 t、ジャケッタ：388 t トランジションピース：150 t ジャケッタは、台船で運搬し、700 t吊りクレーン船で仮置きする。ジャケッタの据付は、仮杭・先行方式。 |
| 施工方法 | | | |
| コスト比較 | 1.0 | 1.1 | 2.1 |
| 評価 | ○ | × | × |
| 備考 | 最終的な候補地は、地元との協議の結果、露岩または支持層が浅い岩盤エリアとなるため、重力式ケーソンを採用する | | |

4.4 計画段階のコストと実際のコスト

実証研究設備設置予定地点におけるコストについて以下に整理した。

本節では、FSの段階で試算された事業費と、「洋上風力の調達価格に係る研究会取りまとめ報告書」（資源エネルギー庁 省エネルギー・新エネルギー部，2014）で示された導入実績の事業費を紹介する。ただし、あくまで銚子沖の洋上風力発電施設は実証研究として行っており、そして風車1基当たりの事業費用であるため、実際の大規模な発電事業を行う場合に比べ高コストになっている点に留意が必要である。実際の大規模な発電事業では、コスト削減のインセンティブが働くとともに、多くの風車を建設してウインドファーム化するため、1基当たりの事業費はもっと低くなるとされている。

FSにおいて、洋上風車1基および観測タワー1基を建設することを想定した場合の事業費の試算を行っている。設備設計に係る事業費、設備運搬・施工方法に係る事業費はそれぞれ表4.4-1、表4.4-2の通りである。

表 4.4-1 銚子沖実証研究における設備設計に係る事業費の試算

| 項目 | 金額 (単位：百万円) | 備考 |
|-----------|----------------|----------|
| 調査計画立案・評価 | 3.9 | |
| 風車基礎設計 | 34.3 | 本設及び仮設基礎 |
| 観測タワー設計 | 9.1 | |
| 観測タワー基礎設計 | 31.2 | |
| 動解析による設計 | 47.2 | |
| 詳細設計確認試験 | 13.0 | 水理模型実験 |
| 大臣認定対応 | 70.0 | |
| | | |
| 合計 | 208.7 | |

※ 金額は税抜き金額

表 4.4-2 銚子沖実証研究における設備運搬・施工方法に係る事業費の試算

| 項目 | 金額 (単位: 百万円) | 備考 |
|-----|---------------|---------------------|
| 調査費 | 予備調査 | 2.3 サイドスキャンソナー |
| | 地盤調査 | 236.0 風車、観測タワーエリア |
| | 地盤調査 | 38.6 海底ケーブルエリア |
| | (小計) | 276.9 |
| 資材費 | 洋上仕様風車購入 | 1,100.0 |
| 工事費 | 施工計画 | 11.0 |
| | ヤード整備 | 53.1 風車仮基礎を含む |
| | 風車設置 | 750.2 陸上仮組立を含む |
| | 風車基礎製作・設置 | 776.8 |
| | 観測タワー製作 | 140.3 |
| | 観測タワー設置 | 183.0 |
| | 観測タワー基礎製作・設置 | 776.8 |
| | 観測タワー電源設備 | 20.9 |
| | 海底ケーブル | 422.4 |
| | 変電所・陸上系統連系統線 | 323.4 |
| | 航行安全装置 | 55.0 |
| | (小計) | 3,512.9 |
| | 実証研究設備の建設費の合計 | 4,889.7 調査費+資材費+工事費 |

※ 金額は税抜き金額

「洋上風力の調達価格に係る研究会取りまとめ報告書」(資源エネルギー庁 省エネルギー・新エネルギー部, 2014) では、銚子沖実証研究施設の資本費の実績が示されている(表 4.4-3)。当実績値には、観測タワーに係る費用は含まれていない。

表 4.4-3 銚子沖実証研究における資本費の実績
(洋上風力の調達価格に係る研究会, 2014 より作成)

| 項目 | 小項目 | 金額 (単位: 百万円) |
|-----|--------------------------|--------------|
| 調査費 | 海底地盤、環境、系統連系 | 170 |
| 設計費 | 風車・基礎、ケーブル、電気設備 | 160 |
| 設備費 | 風車、基礎、海底ケーブル | 1,080 |
| 工事費 | 風車、基礎、海底ケーブル、陸上ケーブル、電気設備 | 1,920 |
| 計 | | 3,350 |

※税抜き、端数四捨五入

5 実施設計

5.1 設備設計

本節では、設備設計の基本的な考え方を「平成20年度 洋上風力発電実証研究F/S調査 報告書」(NEDO, 2009)に基づき、記載した。個別の設計条件の数値については「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(銚子沖) 報告書」(NEDO, 2017)および「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 洋上風力発電システム実証研究(銚子沖) 報告書」(NEDO, 2017年3月)を参照されたい。

(1) 支持物設計

1) 主な準拠規準

主な準拠基準は下記の通りである。

- ・港湾の施設の技術上の基準・同解説, 日本港湾協会, 2007年
- ・道路橋標準示方書・同解説, 日本道路協会, 2002年

2) 設計条件

風力発電設備ならびに観測タワーを予定地点において設計するためには、外部環境である設計条件を設定する必要がある。本項で説明する設計条件は、①水深、②海底土質、③設計風速、④設計波高、⑤設計潮位、⑥設計海潮流、⑦設計地震動、⑧基礎天端高、最大波頂高である。また、⑨に示すように、荷重を組み合わせた荷重ケースを想定して、構造物が安全であることを照査した。

①水深

候補地の水深は C.D.L.-10~15m と推定されるため、設計上の計画水深を C.D.L.-15m とした。

②海底土質

候補地周辺の海底土質は、第四期更新世・飯岡層(泥岩)、および第三期鮮新世・名洗層(砂岩)であり、一軸圧縮強度: 1MN/m²以上(軟岩・土丹の物性)と設定した。

③設計風速

設計風速として、表 5.1-1 に示すように定格風速、発電時風速、50年再現期待値、年平均風速の4種類の風速条件を設定した。

表 5.1-1 設計風速

| | 項目 | 値 | 設定根拠 |
|----------|------|--|--|
| 定格風速 | 平均風速 | 12.5m/s | 風車の仕様 |
| | べき指数 | 0.14 | IEC61400-3 |
| | 乱れ | なし | — |
| 発電時風速 | 平均風速 | 3.0～25.0m/s (カットイン風速～カットアウト風速) の範囲において荷重が最大となる風速 | |
| | べき指数 | 0.14 | IEC61400-3 |
| | 乱れ強度 | 0.12×(0.75U+5.6) (IEC 乱流モデル c) | IEC61400-1 |
| 50年再現期待値 | 平均風速 | 49.0m/s | 台風シミュレーションと気象シミュレーションにより算定 (本別冊 3.1(1)3)①参照) |
| | べき指数 | 0.10 | 気象シミュレーションにより算定 (本別冊 3.1(1)3)②参照) |
| | 乱れ強度 | 0.12 | 気象シミュレーションにより算定 (本別冊 3.1(1)3)③参照) |
| 年平均風速 | 平均風速 | 7.5m/s | 気象シミュレーションにより算定 (本別冊 3.1(1)2)②参照) |
| | べき指数 | 0.14 | IEC61400-3 |
| | 乱れ | なし | — |

④設計波高

設計波高として、表 5.1-2 に示すように、定格風速時の波高、発電時の波高、50年再現期待値、年平均値、耐久性検討に用いる常時の波の5種類の条件を設定した。

表 5.1-2 設計波高

| | 項目 | 値 | 設定根拠 |
|---------------|-------|--------|--|
| 定格風速時の波高 | 有義波高 | 2.3m | 本別冊 3.2(1)2)④a. で求めた風速と有義波高との関係式に、ハブ高さ風速を海面上 10m の風速に修正した値を代入 |
| | 有義波周期 | 6.7s | 本別冊 3.2(1)2)④b. で求めた有義波高と有義波周期との関係式に上記有義波高を代入 |
| 発電時の波高 | 有義波高 | Hs(U) | 既往のデータとシミュレーションを参考に算定 (本別冊 3.2(1)2)④参照) |
| | 有義波周期 | Ts(Hs) | 既往のデータと IEC61400-3 を参考に算定 (本別冊 3.2(1)2)④参照) |
| 50年再現期待値 | 最高波高 | 13.03m | 千葉東沿岸海岸保全基本計画に示された沖波を、浅水変形および合田の砕波モデルを考慮して水深 15m 地点の値に換算。潮位は H.H.W.L. で算定。(本別冊 3.2(1)2)①参照) |
| | 有義波周期 | 14.5s | 千葉東沿岸海岸保全基本計画 (本別冊 3.2(1)2)①参照) |
| 年平均値 | 有義波高 | 1.4m | 千葉県海象データ (水深 21m 地点) を浅水変形および合田の砕波モデルを考慮して水深 15m 地点の値に換算。潮位は M.W.L. で算定。(本別冊 3.2(1)2)③参照) |
| | 有義波周期 | 7.5s | |
| 基礎の耐久性照査に用いる波 | 有義波高 | 8.27m | 千葉県海象データ (水深 21m 地点) からレーリー分布を仮定して、50年間に 10,000 回オーダー作用する波を求め、浅水変形および合田の砕波モデルを考慮して水深 15m 地点の波高に換算。潮位は M.W.L. で算定。(本別冊 3.2(1)2)②参照) |
| | 有義波周期 | 11.9s | |

⑤設計潮位

設計潮位として、表 5.1-3 に示すように、計画高潮位、平均潮位の 2 種類の条件を設定した。

表 5.1-3 設計潮位

| 設計潮位 | 値 | 設定根拠 |
|---------------------|-----------------|--|
| 計画高潮位 (H.H.W.L.) | C.D.L.+2.65 (m) | H.W.L.に港湾基準のモデル高潮の潮位偏差（気象潮）を加えた潮位（本別冊 3.3(1)参照） |
| 平均潮位 (M.W.L.) | C.D.L.+0.87 (m) | 平成 21 年潮位表（気象庁発行）の、現場海域に最も近い銚子漁港における潮位実況（本別冊 3.3(1)参照） |

⑥潮流・海流速

設計海潮流速として、表 5.1-4 に示すように、年平均値を設定した。

表 5.1-4 設計海潮流速

| 設計海潮流 | 項目 | 値 | 設定根拠 |
|-------|----|--------|--|
| 年平均値 | 潮流 | 0.3m/s | 「続・日本全国沿岸海洋誌－解説編・増補編－」 （日本海洋学会編, 1990）（本別冊 2.1(2)2)②参照） |
| | 海流 | 0.5m/s | |

⑦設計地震動

地震動を受けた時に風車に要求される性能を検討する際には、損傷限界と倒壊・崩壊限界を考慮することが必要である。これら 2 つの要求性能に対応して 2 つの地震動レベルが想定されている。すなわち、風車の使用期間中に一度以上は遭遇すると考えられる、「稀に発生する地震動（レベル 1）」および考慮すべき最大級である「極めて稀に発生する地震動（レベル 2）」である。これらの地震動を入力とした動解析により地震荷重を評価した。動解析に用いる地震動として、過去の代表的な地震動を基準化した既往波と、応答スペクトルをターゲットとして生成した告示波をそれぞれ 3 波ずつ作成し、使用した（表 5.1-5）。

表 5.1-5 設計地震動

| | | |
|--------------|-----|---|
| レベル 1 地震動 | 既往波 | El Centro NS 成分、八戸 NS 成分、Taft EW 成分の計測値を最大速度振幅 25cm/s で基準化 |
| | 告示波 | 告示 1461 号に示されたレベル 1 の応答スペクトルを目標応答スペクトルとして地震動を作成し、神戸 NS 位相、八戸 EW 位相および乱数位相の 3 種類の異なる告示波を発生 |
| レベル 2 地震動 | 既往波 | El Centro NS 成分、八戸 NS 成分、Taft EW 成分の計測値を最大速度振幅 50cm/s で基準化 |
| | 告示波 | 告示 1461 号に示されたレベル 2 の応答スペクトルを目標応答スペクトルとして地震動を作成し、神戸 NS 位相、八戸 EW 位相および乱数位相の 3 種類の異なる告示波を発生 |

⑧基礎天端高、最大波頂高

a.基礎天端高

計画天端高：C.D.L.+8.0 (m)

b.最大波頂高

$H_{1/3}=9.84$ (m)

$H_{max}=13.03\text{m}$ (碎波)

$h=15.00+2.65=17.65$ (m)

$H_{1/3}/h=9.84/17.65=0.56$

図 5.1-1 最高波頂高と相対波高との関係 より

$\eta_c(\max)/H_{max}=0.75$ とすると

$\eta_c(\max)=0.75 \times 13.03=9.77$ (m)

波頂高到達レベル= $\eta_c(\max)+H.H.W.L=9.77+2.65=12.42$ (m)

※波浪時には、風車タワーの基部の約 5m 区間には波力が作用する。

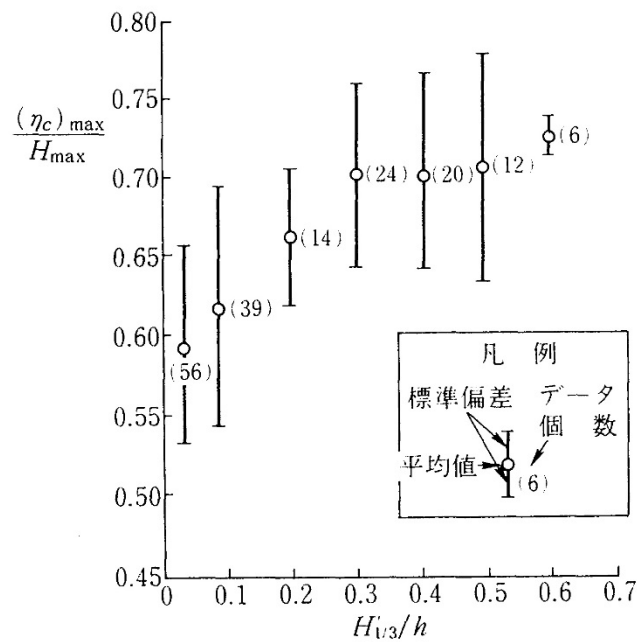


図 5.1-1 最高波頂高と相対波高との関係 (合田・永井, 1974)

⑨荷重ケース

風力発電設備の設計に際しては、終局荷重・疲労荷重ならびに耐久性検討荷重を考慮する必要がある。表 5.1-6 に示すように終局荷重として常時、風車発電時、暴風波浪時、レベル 1 地震時、レベル 2 地震時の 5 つの荷重ケースを想定し、概略設計を実施した。

表 5.1-6 風力発電設備に作用する終局荷重ケース

| 荷重ケース | 風 | 波浪 | 海潮流 | 潮位 | 地震動 |
|-------------|---|--|--------------------------------|--|-------------------------|
| 長期荷重 | 常時 定格風速値 平均風速：12.5m/s べき指数：0.14 乱れ強度：なし | 定格風速に対応する値 有義波高：2.3m 有義波周期：6.7s | 平均流速 潮流：0.3m/s 海流：0.5m/s | 平均潮位 (M.W.L.) C.D.L.+0.87 (m) | - |
| 稀に発生する荷重 | 風車発電時 発電時風速 平均風速：3.0～25.0m/s べき指数：0.14 乱れ強度：IEC 乱流モデル C | 発電時に対応する値 有義波高： $H_s(U)$ 有義波周期： $T_s(H_s)$ | 平均流速 潮流：0.3m/s 海流：0.5m/s | 平均潮位 (M.W.L.) C.D.L.+0.87 (m) | - |
| | 暴風波浪時 50年再現期待値 平均風速：49.0m/s べき指数：0.1 乱れ強度：0.12 | 50年再現期待値 最高波高：13.03m 周期：14.5s | 平均流速 潮流：0.3m/s 海流：0.5m/s | 計画高潮位 (H.H.W.L.) C.D.L.+2.65 (m) | - |
| | L1地震時 年平均風速 平均風速：7.5m/s べき指数：0.14 乱れ強度：なし | 年平均値 有義波高：1.40m 有義波周期：7.5秒 | 平均流速 潮流：0.3m/s 海流：0.5m/s | 平均潮位 (M.W.L.) C.D.L.+0.87 (m) | L1地震動 最大速度 25kine |
| 極めて稀に発生する荷重 | L2地震時 年平均風速 平均風速：7.5m/s べき指数：0.14 乱れ強度：なし | 年平均値 有義波高：1.40m 有義波周期：7.5秒 | 平均流速 潮流：0.3m/s 海流：0.5m/s | 平均潮位 (M.W.L.) C.D.L.+0.87 (m) | L2地震動 最大速度 50kine |

疲労荷重としては、表 5.1-7 に示す発電時とアイドル時の 2 種類の荷重ケースを想定して概略設計を実施した。

表 5.1-7 風力発電設備に作用する疲労荷重ケース

| 荷重ケース | 風 | 波浪 | 海潮流 | 潮位 |
|-------|---|--|--------------------------------|----------------------------------|
| 発電時 | 定格風速値 平均風速：3.0～25.0m/s べき指数：0.14 乱れ強度：IEC 乱流モデル C | 各風速に対応する値 有義波高： $H_s(U)$ 有義波周期： $T_s(H_s)$ | 平均流速 潮流：0.3m/s 海流：0.5m/s | 平均潮位 (M.W.L.) C.D.L.+0.87m |
| アイドル時 | 発電時風速 平均風速：25.0～49.0m/s べき指数：0.14 乱れ強度：IEC 乱流モデル C | 各風速に対応する値 有義波高： $H_s(U)$ 有義波周期： $T_s(H_s)$ | 平均流速 潮流：0.3m/s 海流：0.5m/s | 平均潮位 (M.W.L.) C.D.L.+0.87m |

また、ケーソン基礎の耐久性照査の荷重としては、表 5.1-8 に示す荷重ケースを想定して概略設計を実施した。

表 5.1-8 風力発電設備（基礎部）の耐久性照査用荷重ケース

| 荷重ケース | 風 | 波浪 | 海潮流 | 潮位 | 地震動 |
|-------|---|--|--------------------------------|-------------------------------------|-----|
| 常時 | 定格風速値 平均風速：12.5m/s べき指数：0.14 乱れ強度：なし | 耐久性検討時の波浪 有義波高：8.27m 有義波周期：11.9s | 平均流速 潮流：0.3m/s 海流：0.5m/s | 平均潮位 (M.W.L.) C.D.L.+0.87 (m) | - |

3) 支持物設計の概要

実証研究設備設置予定地点の海底地盤条件は、露岩エリアまたは堆積層が数 m 程度の岩盤エリアであることから、風車の基礎形式として、図 5.1-2 に示すような重力式の PC ケーソンを選定した。

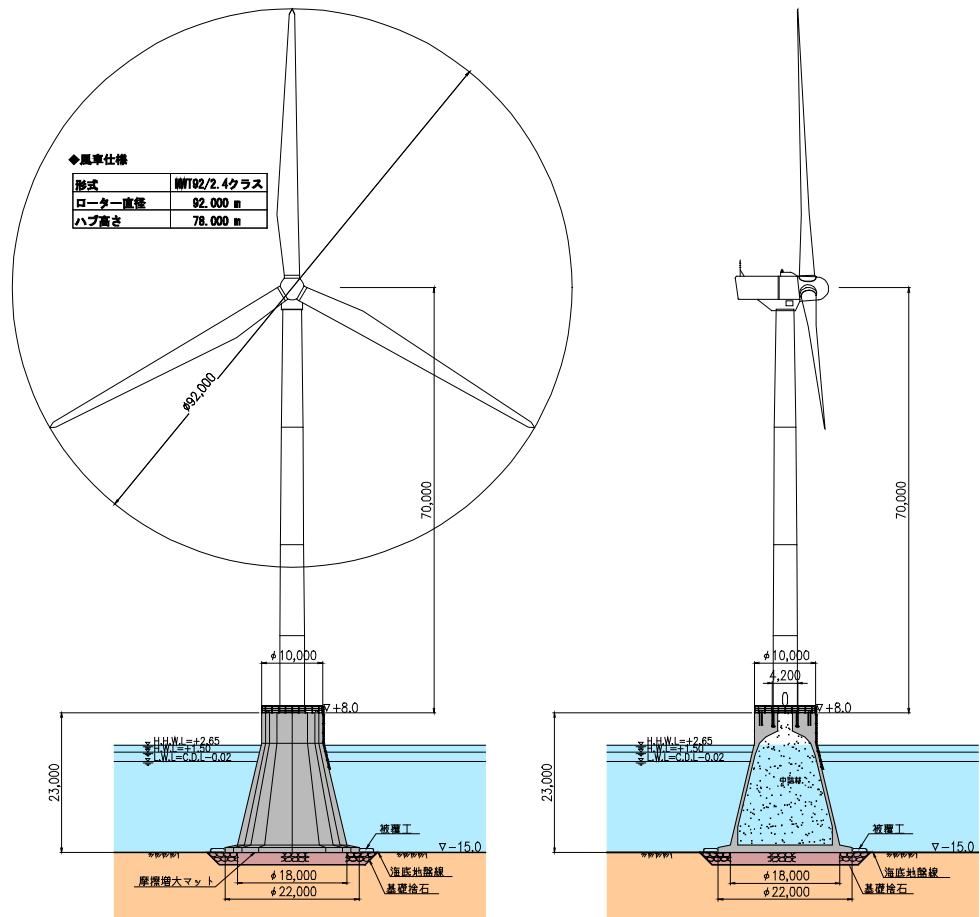


図 5.1-2 風力発電設備用 基礎概要図

①風車基礎の概要

- ・重力式基礎の形状は、円錐台（コーン型）の中空 PC ケーソン構造とし、内部には高比重の中詰材（銅水砕スラグ）を入れて、完成時の基礎の安定を保つ構造とした。
- ・基礎底部には、滑動抵抗と基部の不陸緩和用に摩擦増大マットを敷設した。
- ・風車用のアンカーボルトは、ケーソン製作時に躯体に埋め込んでおき、風車設置時にレベル調整が可能な構造とした。
- ・計画サイトは露岩部であり、基礎の設置にあたっては、海底地盤を若干掘り込んで、捨石を敷き、平坦にした上で基礎を設置した。
- ・基礎の周囲には、洗掘防止工としてフィルターユニットなどを設置した。

②風車基礎の要求性能

- ・耐風性能
暴風時（50年再現確率）においても、施設の健全な機能を損なわない。
- ・耐波性能
波浪時（50年再現確率）に鉄塔および基礎に衝撃砕波力が作用する場合でも、施設の健全な機能を損なわない。
- ・耐震性能

レベル 1 (L1) クラスの地震が作用した場合でも、施設の健全な機能を損なわない。
レベル 2 (L2) クラスの巨大地震が作用した場合でも、施設は倒壊しない。

③風車反力

動的解析結果より算出した 2.4MW 相当の風車タワー基部の反力を用いた。

④使用材料

コンクリート：設計基準強度 $f_{ck}=40 \text{ N/mm}^2$

鉄筋：SD345

PC 鋼材：SWPR19（円周方向）、SBPR930/1180（鉛直方向）

4) 実際に製作された支持構造物

実際に製作された風車用の支持構造物は、図 5.1-3 左の通りである。



図 5.1-3 実際に製作された支持構造物

(2) 風車設計

1) 設計条件

設計風速として、表 5.1-9 に示すように定格風速、発電時風速、50 年再現期待値、年平均風速の 4 種類の風速条件を設定した。

表 5.1-9 設計風速

| | 項目 | 値 | 設定根拠 |
|-----------|------|---|---|
| 定格風速 | 平均風速 | 12.5m/s | 風車の仕様 |
| | べき指数 | 0.14 | IEC61400-3 |
| | 乱れ | なし | — |
| 発電時風速 | 平均風速 | 3.0m/s～25.0m/s(カットイン風速～カットアウト風速)の範囲において荷重が最大となる風速 | |
| | べき指数 | 0.14 | IEC61400-3 |
| | 乱れ強度 | 0.12×(0.75U+5.6) (IEC 乱流モデル c) | IEC61400-1 |
| 50 年再現期待値 | 平均風速 | 49.0m/s | 台風シミュレーションと気象シミュレーションにより算定(本別冊 3.1(1)3)①参照) |
| | べき指数 | 0.10 | 気象シミュレーションにより算定(本別冊 3.1(1)3)②参照) |
| | 乱れ強度 | 0.12 | 気象シミュレーションにより算定(本別冊 3.1(1)3)③参照) |
| 年平均風速 | 平均風速 | 7.5m/s | 気象シミュレーションにより算定(本別冊 3.1(1)2)②参照) |
| | べき指数 | 0.14 | IEC61400-3 |
| | 乱れ | なし | — |

2) 洋上向け仕様

①塩害対策

塩害対策の基本は、風車内部に対する塩分の侵入をできる限り低減することにある。ここでは、実証研究用の洋上風車の塩害対策仕様を設定した。前提条件としては、既存の MWT92/2.4 風車の陸上仕様を採用し、実証研究に耐え得る仕様変更を施すこととした。

陸上風車では機器はナセル内に多く存在し、電気機器の一部がタワー下部にも存在することから、ナセルおよびタワーに対する塩害対策の仕様を設定した。さらに、風車内部・外部に共通の問題である塗装に関しても仕様を設定した。

a. ナセル内塩害対策

該当風車の横浜に建設された試験機(沿岸実証機と称する)では、これまでの運転実績より塩害は実質的に生じていない。よって、ナセル内塩分濃度を沿岸実証機レベル程度まで低減する対策を施すため、そのような能力のある除塩フィルタをナセル吸気口に追加した。そして必要により、吸気口面積あるいはファンの能力増加、運転条件/外気 40℃の緩和を検討した。

MWT92/2.4 風車の現仕様では、積極的な塩分進入防止対策を設けておらず、内部機器単体

として、トランスに除塩フィルタを設置しているのみである。

なお、風車前部モジュールに換気用の吸気口が設置されており、雨水進入防止のために設置しているガラリが多少の耐塩効果を有している可能性が見込まれる。トランス部の除塩フィルタ交換周期は、1年を想定している。

以上より、実証研究用の洋上風車耐塩仕様を以下の通りとした。

- ・ナセル吸気口に除塩フィルタを追加設置
- ・盤類下部の密閉性強化
- ・トランスに除塩フィルタを設置

b. タワー内塩害対策

MWT92/2.4 風車の陸上仕様では、タワー下部にも電気機器を有しており、タワードア部の換気口に除塩フィルタを設置しており、換気口には水浸入対策として専用縦ルーバーを採用している。タワードア部の除塩フィルタ交換周期は、1年を想定している。

上記の通り、最低限の対策が済んでいることから、実証研究用洋上風車のタワー内塩害対策仕様に、特に変更は施さないこととした。

c. 塗装仕様

風車外部および内部においては、表面塗装の仕様を定める必要があり、洋上風車としての仕様も設定が必要である。大気と直接接触する、または外部および除塩フィルタ通過後の大気と接触するナセル内の機械品は、陸上仕様からグレードアップすることとした。具体的な仕様案を表 5.1-10 に示す。

表 5.1-10 実証研究用洋上風車の塗装仕様案

| | 対象箇所 | 陸上仕様 | 実証研究用の洋上風車仕様案 |
|-----|--------------|-------|-------------------|
| 内部 | ローターヘッド内部 | C3-H | C3-H (密閉のため変更なし) |
| | ナセル内部 | C3-H | C4-H (電気盤類は C3-H) |
| | タワー内部 | C3-H | C4-H (電気盤類は C3-H) |
| 外部 | ローターヘッド外部 | C4-H | C5M-H |
| | ナセル外部 | C4-H | C5M-H |
| | タワー外部 | C4-H | C5M-H * |
| その他 | タワー基礎アンカーボルト | 亜鉛メッキ | 亜鉛メッキ |

*:最高潮位から 15m は航路標識塗装(黄色)を追加

【記号説明】 ISO-12944-5 に基づく以下の組合せによる塗装グレードを示す。

- | | |
|----------------|---------|
| ・大気環境 | ・耐用年数 |
| C3:工場屋内、汚染多い屋外 | L:2~5年 |
| C4:低塩分沿岸屋外 | M:5~15年 |
| C5M:沿岸地域屋外 | H:15年以上 |

②湿度対策

湿度についても考慮が必要であるが、ナセル内への水分進入の観点からすると、前項の塩害対策と共通の点が多い。しかし、電気機器における結露に関しては湿度特有の問題であり、電気品を対象にした湿度対策の仕様を設定する必要がある。

高湿度に対して、電気品の結露対策が必要である。風車運転時には基本的に結露の発生はなく、運転停止時の結露対策が必要である。電気品の発電機および盤類では、基本的に受電時にヒータを入れ、結露対策を実施している。

MWT92/2.4 風車の陸上仕様としては、発電機および盤類の一部に結露防止用ヒータを設置しており、電気品の湿度対策を実施している。そのため、実証研究用の洋上風車仕様として、機器モータに結露防止用のスペースヒータを追加設置し、単体機器の湿度対策を実施することとした。

③船舶の航行安全対策

船舶の安全な航行を確保するため、海上には、航路標識 (Marine Aids to Navigation) が設置されている。洋上風車の設置においても航路標識を設置することが必要である。海上に設置する航路標識については、国内法では、航路標識法という法律が定められている。また、国際的には、IALA (International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities、国際航路標識協会) が、洋上風車に関する事項を推奨方法 (Recommendation) という形で取り決めを行っており、欧州に設置されている洋上風車はこれに従っているものと考えられる。

実証研究では、日本の航路標識法と IALA の推奨方法に基づき、下記のような航行安全対策仕様とした。

- ・風車タワー (鋼管) 下部の黄色塗装

また、風車の仕様ではないが、実証研究設備としては、IALA の推奨方法に基づき下記の航行安全対策を施すこととした。

- ・基礎 (プレストレスト・コンクリート) 上部への白色フラッシュ・ライトの設置
- ・基礎上部への濃霧対策のラッパ (音波標識) の設置

(3) 送変電設備設計

1) 海底ケーブルの構造仕様

海底ケーブルの構造仕様を検討するにあたり、電力線、通信線、鎧装それぞれの構造仕様を検討した。

①電力線の構造仕様

海底ケーブルの内部絶縁方式は、陸上 CV ケーブルとほぼ同じで絶縁体が電力用規格 A-216 (1998) 「22・33kV CV ケーブル」に準拠した性能を有するものとし、水中布設などの使用条件を考慮し、ケーブルメーカーの製造・布設実績から選定した。

②通信線の構造仕様

通信線は光ファイバユニットとした。光ファイバユニットについても水中布設などの使用条件を考慮し、ケーブルメーカーの製造・布設実績から選定した。光ファイバユニットは電力ケ

ケーブル3個撚りの肩部となり、電力ケーブルの外径により、仕上外径の上限制約を受ける。そのため無用な側圧をかけないものとし、寸法設計を行う必要がある。

③ 鎧装の構造仕様

海底ケーブルは、布設船から懸垂されながら海中に布設されるため、ケーブルに大きな張力、圧力などが加わる。また布設後海底の岩石砂礫と潮流による摩耗、底引漁具および船舶の投錨による外傷などの可能性もある。これらを防ぐため、鉄線鎧装の使用が一般的である。鎧装にはいくつか種類があり、線路の布設環境を勘案し決定する必要がある。本実証研究では、外傷防止の観点から2重鉄線鎧装構造を選定した。

以上①～③より海底ケーブルの構造仕様の検討結果は、表 5.1-11 のようになった。

表 5.1-11 海底ケーブル構造仕様の検討結果

| 項目 | 仕様 | 考え方 |
|-----|-------------------------------|--|
| 線心数 | 3心 | 3相3線式 |
| 導体 | 全長水密銅導体 | 事故時、導体部浸水による長手方向への水走りを防止。導体サイズを負荷電流と許容電流との比較、製造実績他を加味し選択する必要がある。 |
| 絶縁体 | 架橋ポリエチレン 3層同時押出・ 乾式架橋方式 | 架橋ポリエチレンは実績が多く、信頼性が高い。 絶縁厚は陸上 CV と同様 (7mm) |
| 遮水層 | 鉛被 | 金属層による遮水、実績が多く加工性も良い。 |
| 鎧装 | 2重鉄線鎧装 | 外傷防止の観点から選択 |
| 通信線 | 光ファイバ | 光ファイバユニットは電力ケーブル3個撚りの肩部となり、仕上外径の制限がある。 |

次に、実証研究での負荷電流と許容電流との比較、ケーブルメーカーのケーブル製造実績を加味し、所用導体サイズを検討した。

① 負荷電流と許容電流から見た導体サイズ

風車および観測タワーの負荷容量による負荷電流計算結果と許容電流計算結果の対比より、許容電流という観点で必要な導体サイズは 22mm² となった。

② 製造実績から見た導体サイズ

通常、陸上の 22kVCV ケーブルは 60mm² 以上が標準サイズでもあり、22kV 海底ケーブルでも 60mm² 以下の細いサイズでの製造実績がない。

また、6.6kV 海底ケーブルでは、公称断面積 60mm² 未満 (22 mm²、38mm²) でも製造実績を有するが、6.6kV と 22kV では絶縁厚さが異なり、かつ製造設備との兼ね合いもあることから、22kV 海底ケーブルで 60mm² 未満を製造するには、実検証前に試作を実施し製造性を確認

する必要がある。さらに、風車～観測タワー区間については、負荷電流が小さく、許容電流という観点で 22mm² より細いサイズで充分であるが、ケーブル製造性、光ケーブルユニットの複合スペース確保などの観点から、布設区間全長を同一導体サイズにて一括で製造した方が効率的である。

以上より、22kV ケーブルの製造実績サイズを考慮し、導体サイズを公称断面積 60mm² とした。

海底ケーブルは図 5.1-4 のようなルートに布設することとした。



2) 陸上連系設備仕様

①連系候補鉄塔の選定

実証研究の風力発電機の定格出力は 2,400kW であることから、系統アクセスルールに則り、連系電圧は 66kV とした。実証研究設備設置予定地点近傍の 66kV 送電線として、66kV 犬吠線と 66kV 高神線が存在する。送電線ルート、亘長および連系変電所の地形、立地条件、資機材搬入などを考慮し、連系候補鉄塔を選定した。

②送電方式の選定

送電線については、実証研究の風車電圧が 22kV であることから、送電電圧を 22kV とした。送電方式については、施工性、撤去の容易性、経済性を考慮して架空送電線を基本とした。高架下を通る等、架空送電線建設が不可能な箇所等については埋設地中線とすることとした。

③支持物の選定

支持物については大部分コンクリート柱の運搬、および建柱車による建柱が可能であることから、基本的に 12~14m のコンクリート柱を使用するものとした。建柱車にて施工不可能な傾斜部分については、パンザマストを使用することとした。

④電線・ケーブルの選定

風力発電機の定格出力は 2,400kW であり、電線路に流れる定格電流は、

$$2,400[\text{kW}] / (\sqrt{3} \times 22[\text{kV}]) = 63[\text{A}]$$

である。電線の選定にあたっては、上記電流値以上の常時許容電流性能を有する電線とした。経済性および耐塩性を考慮し、電線種類を鋼心アルミニウム導体架橋ポリエチレン絶縁電線 (ACSR-OC) とした。電線サイズについては、付属品の調達利便性を考慮し、汎用性のある 120mm² (常時許容電流 310A <40℃) とした。地中埋設ケーブルについても、常時許容電流性能を満足する CVT60mm² (常時許容電流 215A <40℃) とした。

⑤連系変電所

連系変電所は、経済性を考慮し屋外型変電所とした。66kV 開閉器には、メンテナンス性と経済性を考慮し C-GIS を採用した。風車定格容量が 2,400kW×1 基であることから、連系変圧器の容量は 2,700kVA とした。定格電圧は 22kV/66kV、冷却方式は油入自冷変圧器 (ONAN) とした。22kV 開閉設備は、屋外閉鎖型配電盤 (キュービクルタイプ) とした。各機器の耐塩仕様については、連系変電所の海岸からの距離を考慮して決定する。管理棟建屋は設置せず、キュービクルの中に制御監視盤を設けることとした。

5. 2 工事設計

(1) 電気工事設計

電気工事に適用される法規や基準のうち、主なものを以下に示す。

- ・電気事業法
- ・電気事業法施行令
- ・電気事業法施行規則
- ・電気設備に関する技術基準
- ・電気設備に関する技術基準の解釈
- ・発電用風力設備に関する技術基準
- ・発電用風力設備に関する技術基準の解釈
- ・電力品質確保に係る系統連系技術要件ガイドライン
- ・電気工事業法
- ・建設業法

(2) 土木・建築工事設計

土木・建築工事に適用される法規や基準等のうち、主なものを以下に示す。

- ・港湾法
- ・港則法
- ・海洋汚染等および海上災害の防止に関する法律
- ・海上交通安全法
- ・航路標識法
- ・各港湾管理者が定める条例
- ・航空法
- ・コンクリート標準示方書（土木学会）
- ・共通仕様書（土木工事共通仕様書）
- ・電気事業法/建築基準法・同施行令（当実証研究での風車の設置以降の 2014 年 4 月に、建築基準法の安全規制は電気事業法の安全規制に一本化された）
- ・建築基礎構造設計指針（日本建築学会）
- ・鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説（日本建築学会）
- ・建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事（日本建築学会）

5. 3 工事計画

(1) 工事工程

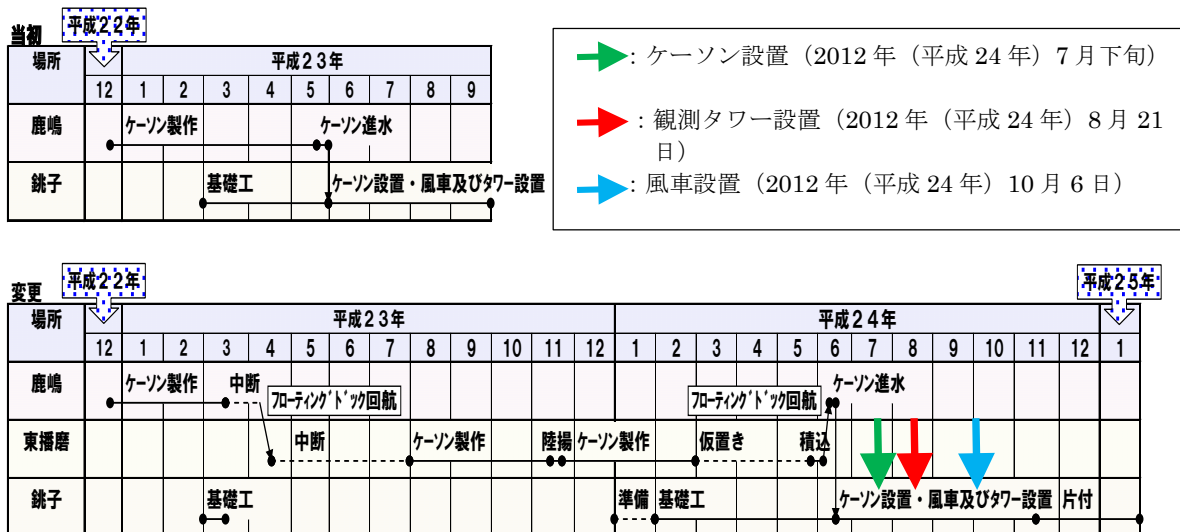
実証研究海域における工事の全体工程を表 5.3-1 に示す。2010 年度の第 4 四半期から観測タワー、風車、ケーソン基礎等の製作を開始したが、2011 年 3 月 11 日の東日本大震災の影響により現場作業は 1 年間延期された。

表 5.3-2 は、ケーソンの製作から設置までの概略の工事工程である。震災後、ケーソンの製作を兵庫県東播磨で行ったため、運搬にも時間を要し、東播磨でのケーソンの製作から実証研究海域に設置するまで約 1 年間かかった。観測タワー用および風車用のケーソンの設置を同時期に行い、観測タワーを 2012 年 8 月 21 日、風車を 2012 年 10 月 6 日に設置した。

表 5.3-1 実証研究海域における工事の全体工程

| | H22年度 | | | | H23年度 | | | | H24年度 | | | |
|---------|-------|----|-----|----|-------|----|-----|----|-------|----|-----|----|
| | I | II | III | IV | I | II | III | IV | I | II | III | IV |
| 観測タワー | | | | ■ | | ■ | ■ | ■ | ■ | | | |
| 風車 | | | | ■ | ■ | | | | | | | |
| ケーソン基礎 | | | | ■ | | ■ | ■ | ■ | | | | |
| 浚渫工・基礎工 | | | | ■ | | | | ■ | | | | |
| 基礎運搬・据付 | | | | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | | |
| 観測タワー設置 | | | | | | | | | | ■ | ■ | |
| 風車設置 | | | | | | | | | | | ■ | ■ |
| 電気通信設備 | | | | | | | | | | | ■ | ■ |
| 変電所 | | | | | | | | | ■ | ■ | ■ | ■ |
| 海底ケーブル | | | | ■ | | | | | | ■ | ■ | ■ |

表 5.3-2 実証研究海域におけるケーソン工事の工程



(2) 風車の施工方法

以下に風車の施工方法を示す。なお各工種の施工場所は図 5.3-1 の通りである。



図 5.3-1 各工種の施工場所(国土地理院電子国土 Web に加筆)

1) 浚渫

① 浚渫船回航・現場係留・浚渫

基地港となる銚子漁港黒生-7.5m 岸壁から、浚渫船と土運船を現場作業地点まで曳航する(図 5.3-2、図 5.3-3)。GPS と光波測距機を用いて作業地点を確認し、浚渫船を係留する。浚渫船係留後、土運船を浚渫船に接舷させる(図 5.3-4)。

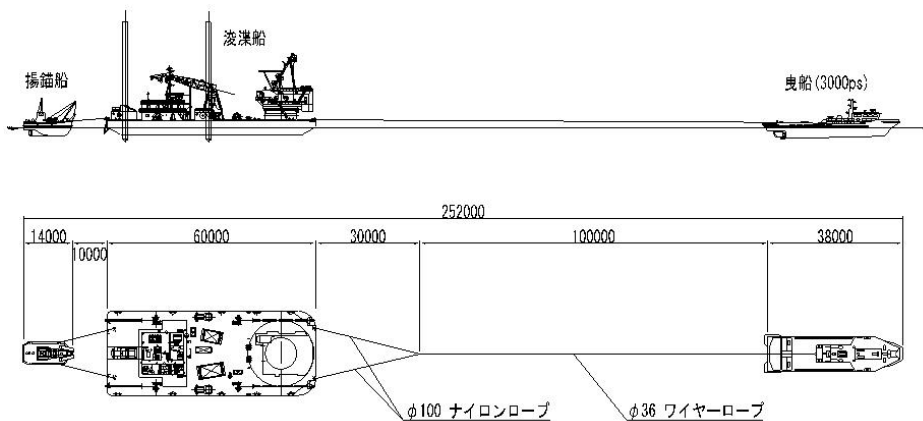


図 5.3-2 浚渫船曳航姿図

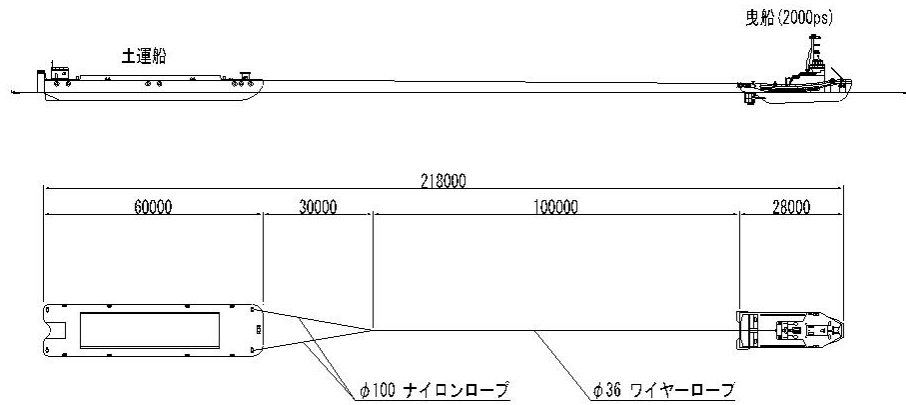


図 5.3-3 土運船曳航姿図

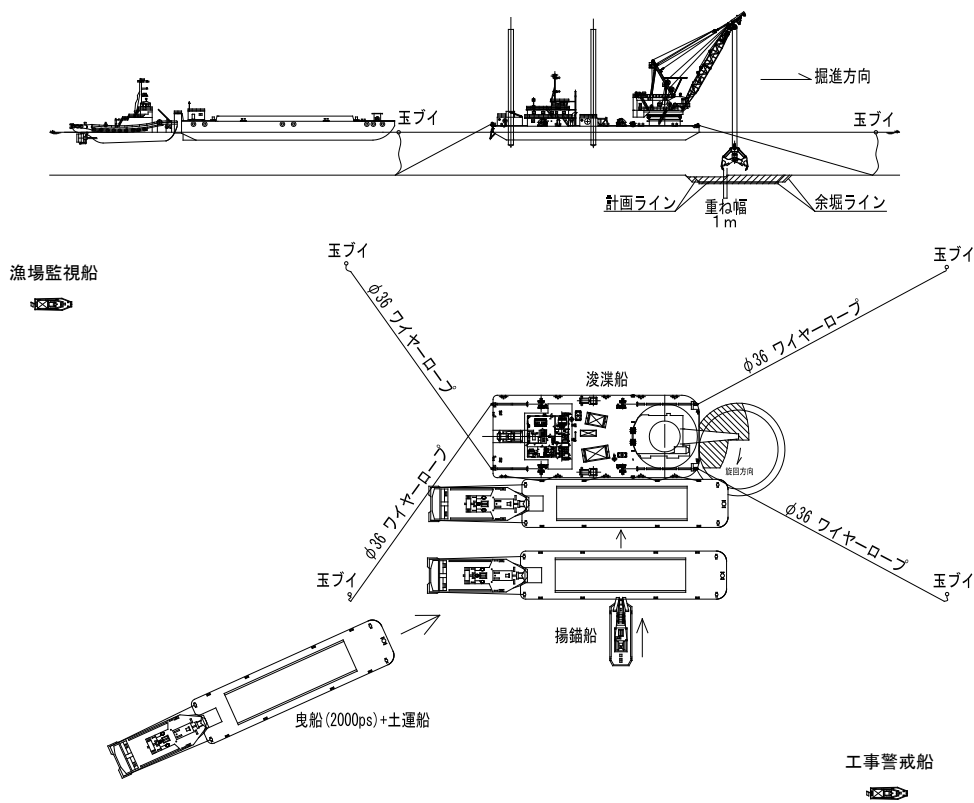


図 5.3-4 浚渫作業および土運船接舷状況図

GPS を利用した施工管理システム（図 5.3-5）を用いて浚渫を実施する。浚渫バケットは重量型（容量 9m³、自重 90t）を使用する。最後に出来形確認測量を行う。

グラブ浚渫船施工管理システム

1. 陸上に設置したGPS基準局より、RTK補正データを送信する。
2. 操作室に設置したGPS及び方位センサーにより、台船の形状をPC上でグラフィカルに表示する。
3. クレーン情報（ジブ角度計、旋回角度計）の取込みにより、クレーンの動きもリアルタイムに表示する。
4. グラブの開閉信号を取込み、自動的にグラブ軌跡を記録、表示する。
5. ワイヤロープ繰り出し長信号の取込みにより、グラブ軌跡を深度別に色分け表示する。
6. 操作室クレーン室間は、専用ケーブルで通信され同一画面を2ヶ所でモニター可能。

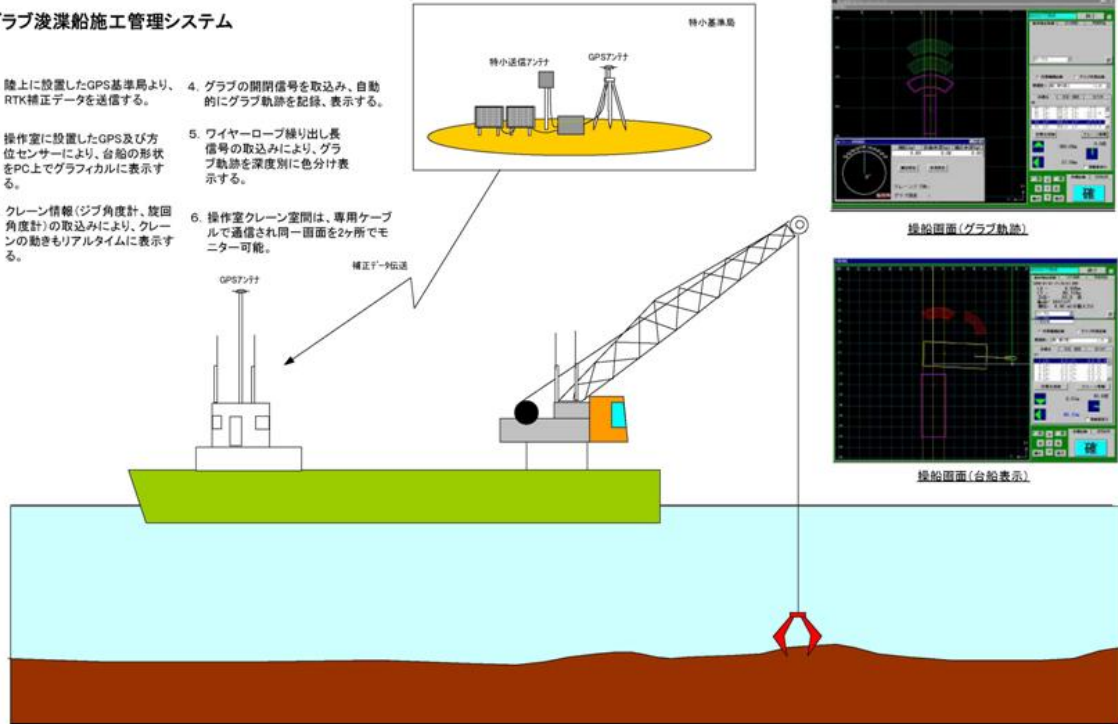


図 5.3-5 グラブ浚渫船施工管理システム

②土運搬

銚子黒生港において、浚渫土の土運搬船からガット船への積み替えを実施する（図 5.3-6）。

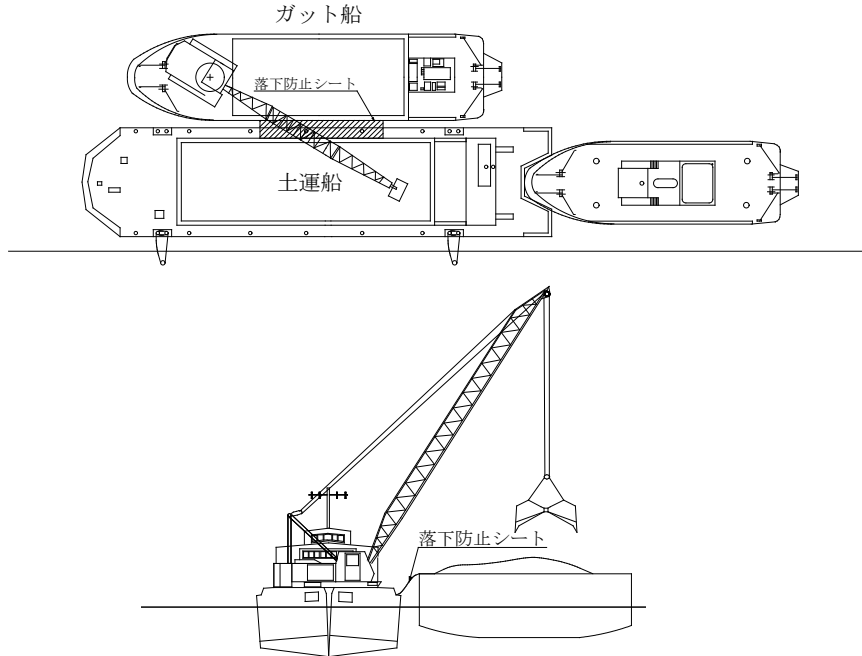


図 5.3-6 土砂積替え状況図

ガット船に積替えた土砂を銚子漁港黒生から千葉県木更津港まで海上運搬し、陸揚げする。陸揚げされた土砂をダンプトラックで処分場へ陸上運搬し、処分する。

2) 砕石ならし

①基礎捨石投入

GPS を使用してガット船を投入場所に移動調整して基礎捨石を投入する（図 5.3-7）。なお投入管理は、ガット船上から測深レットを使用して確認する。

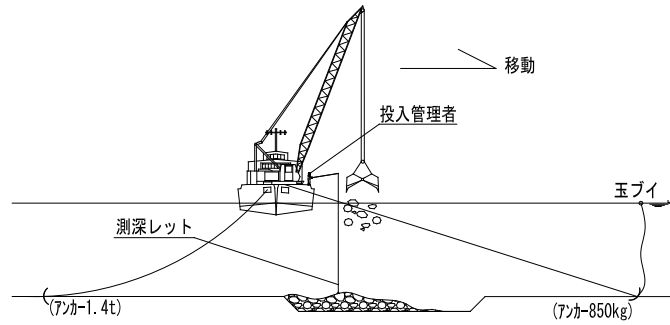


図 5.3-7 捨石投入状況図

②基礎捨石本ならし工

基礎捨石投入後、GPS および水中水準測量装置を使用して、潜水士により基礎捨石本ならし場所に丁張りを設置する（図 5.3-8）。

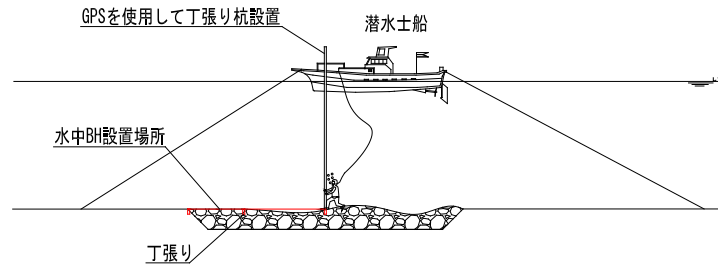


図 5.3-8 丁張り状況図

基礎捨石本ならし作業は1施工場所当り潜水士船を2隻係留し（図 5.3-9）、1隻から交代で1人ずつ潜り2人同時作業を行う（図 5.3-10）。丁張りに合わせて捨石の不陸整正および間詰めを行い±丁張りの精度でならしを実施する。基礎捨石本ならし作業において基礎捨石が不足した場合は、ガット船を配船し不足の基礎捨石を追加投入する。最後に出来形確認測量を行う。

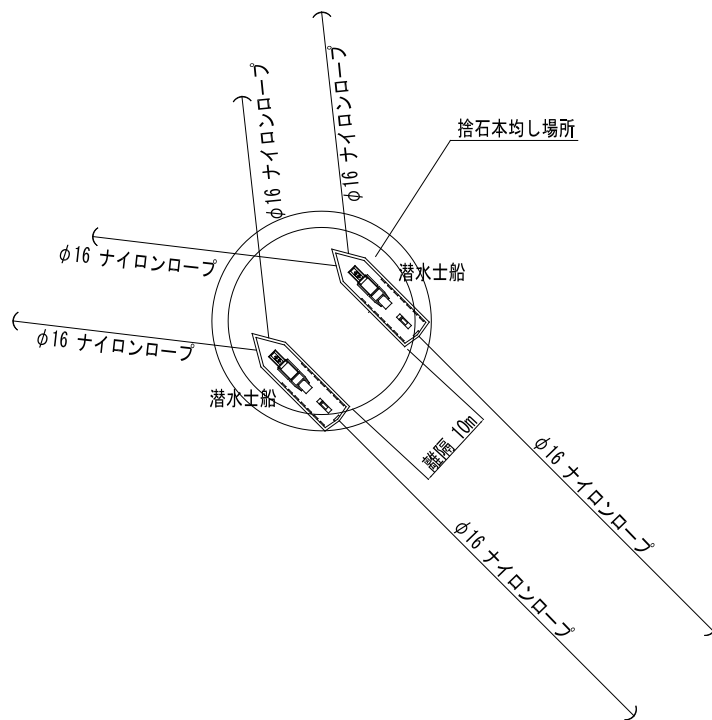


図 5.3-9 潜水士船係留状況図

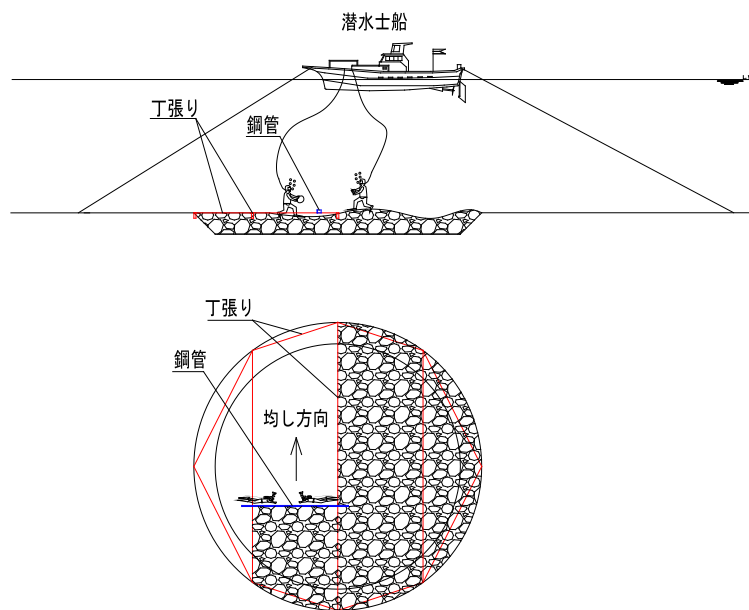


図 5.3-10 捨石本ならし状況図

必要に応じ、水中バックホウを用いた機械ならしを実施する。基礎捨石本ならし場所にクレーン付台船（水中バックホウ支援船）を係留し（図 5.3-11）、クレーン付台船（水中バックホウ支援船）から降ろした水中バックホウを使用してならしを実施する（図 5.3-12）。

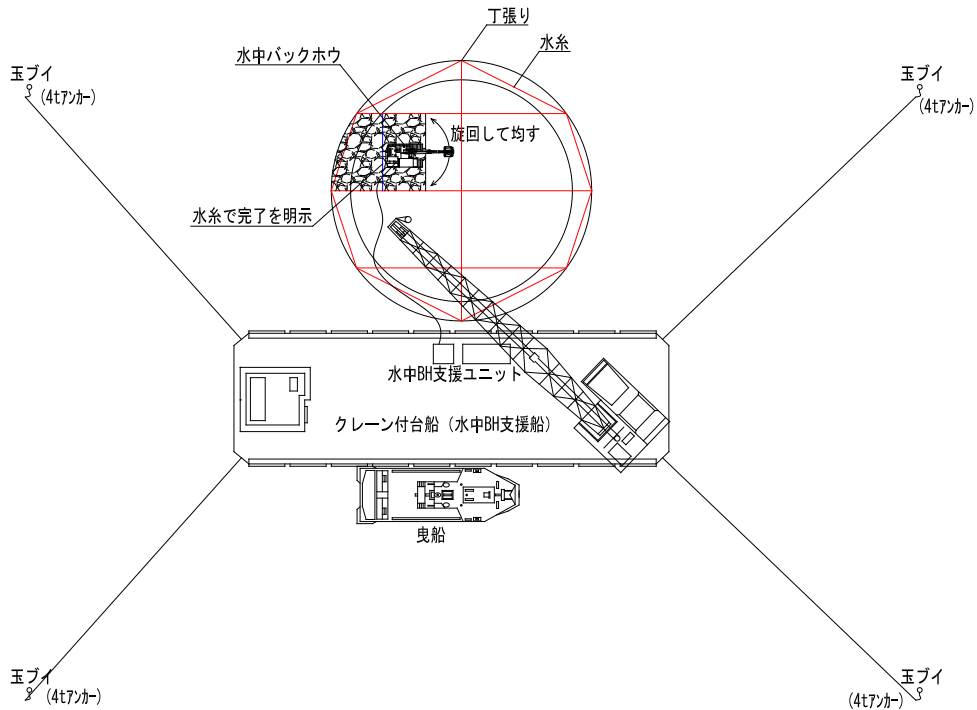


図 5.3-11 クレーン付台船(水中バックホウ支援船)係留状況図

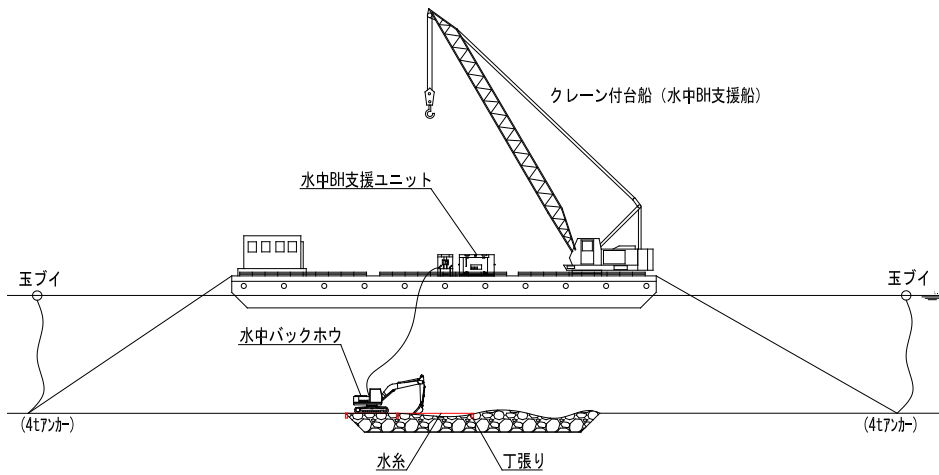


図 5.3-12 捨石本ならし状況図

3) 基礎積替・運搬・据付

①基礎積替

鹿島港内にて、以下の手順でフローティングドック上の基礎を起重機船に積み込む(図 5.3-13)。まず起重機船フックに風車基礎玉掛用の吊具をセットする。フローティングドックおよび起重機船を待機場所から、ケーソン積載場所へ移動させ、係留する。そしてフローティン

グドックを沈下させ、基礎に所定の浮力を作用させる。風車基礎は、起重機船右舷に艀装した専用檣に積載する。起重機船を後退し、基礎を右舷まで旋回させ、檣に基礎の吊枠を固定し、基礎下部は固縛用キーパーで把持する。

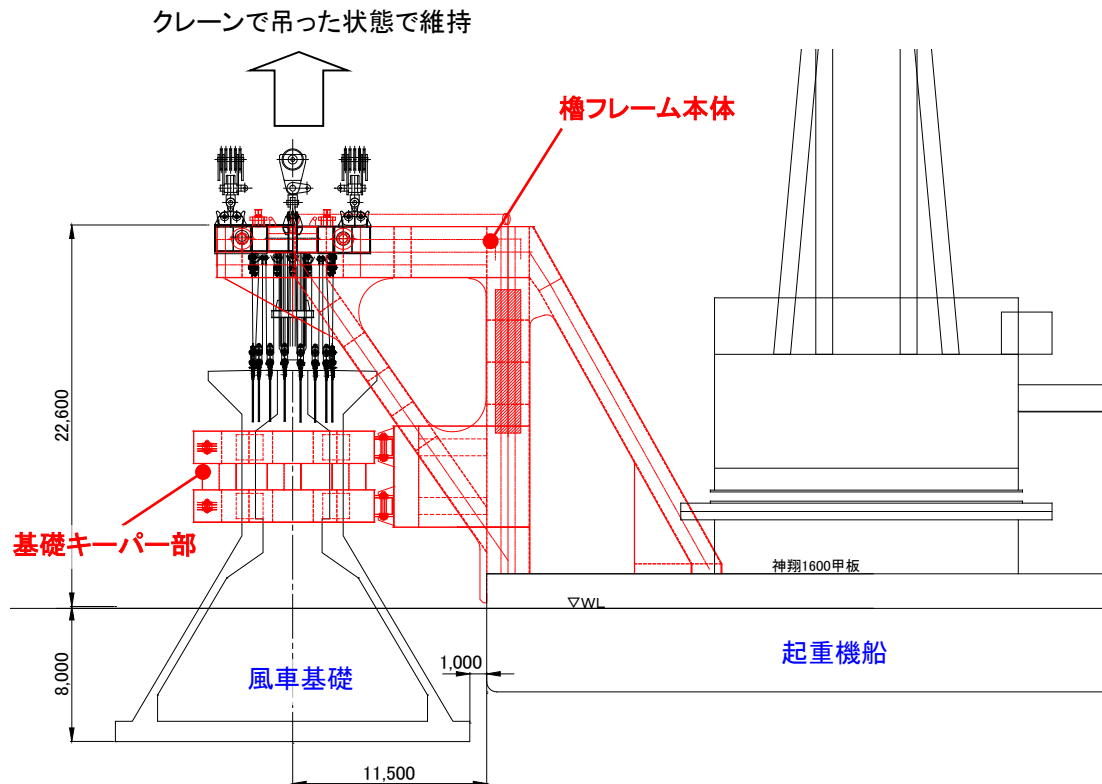


図 5.3-13 風車基礎吊込・積載側面図

②基礎運搬・据付

鹿島港から銚子沖の据付場所へ基礎を積載した起重機船を曳航する。据付場所へ起重機船を係留し、起重機船のウインチ操作で基礎を所定の据付位置へ誘導したのちに、基礎内に注水しながら基礎を下降、着底させる（図 5.3-14）。玉掛解除完了後、基礎天端の東西 2 箇所に小型標識灯を設置する。

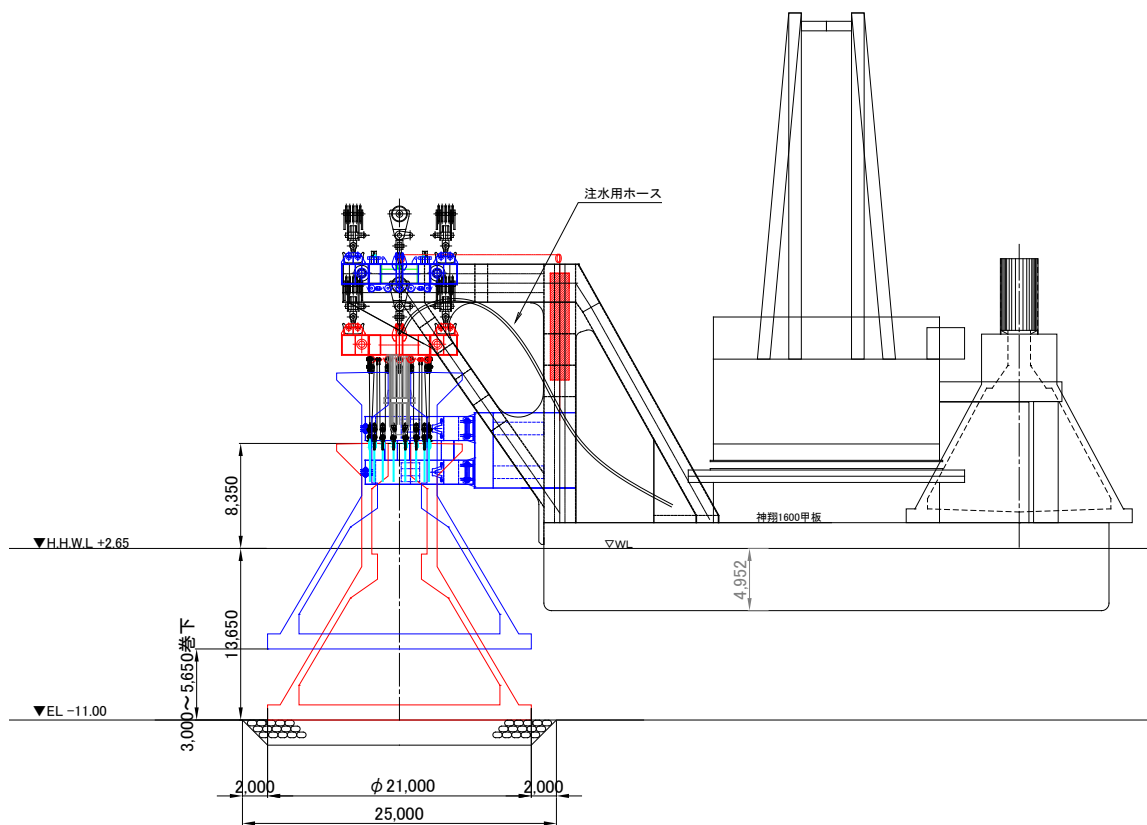


図 5.3-14 風車基礎据付側面図

4) 中詰工

中詰材を積み込んだガットバージを基礎近傍に係留し、基礎に設置したホッパー（投入口）へガットバージのバケットで投入する（図 5.3-15）。投入完了の確認は、投入口に設置したセンサーで行う。

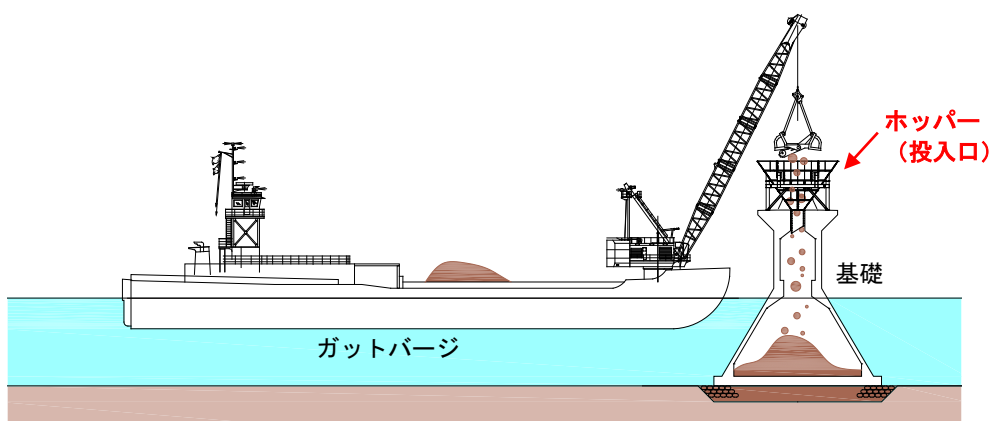


図 5.3-15 中詰材投入図

5) フィルターユニット設置

名洗港の陸上ヤードで製作したフィルターユニット（9t 型 FU）をクレーン付台船に積込・運搬し、基礎近傍に係留後に潜水土による誘導で基礎底版の周辺に設置する（図 5.3-16）。

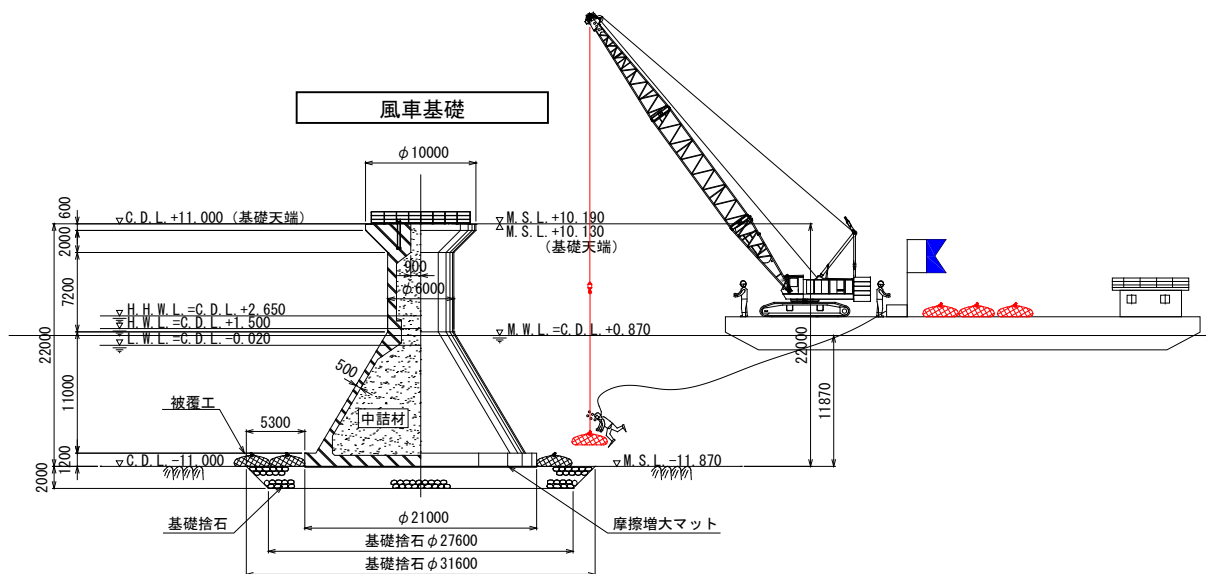


図 5.3-16 フィルターユニット設置状況図

6) 据付

①部材積込・運搬

三菱重工業横浜製作所本牧工場岸壁において、風車部材および資機材（※650t クローラクレーンは事前に搭載済み）を2隻のSEP船に積み込み（表 5.3-3）、建設地点まで曳航する。現場付近で、船尾側に補助曳船を配置し、施工位置に入域し係留する。

表 5.3-3 SEP 船主要搭載部材

| | SEP くろしお | SEP あそ |
|------|--|--|
| 洋上風車 | <ul style="list-style-type: none"> 650t クローラクレーン タワー（1～3 節） ナセル | <ul style="list-style-type: none"> ブレード（No1～3） タワー（4 節） ローターヘッド |

②風車据付

SEP 船 2 隻を基礎回りに据付し（図 5.3-17）、SEP 船～基礎間に架設歩廊を設置する（図 5.3-18）。

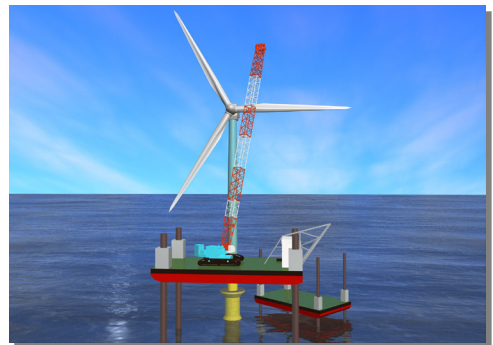
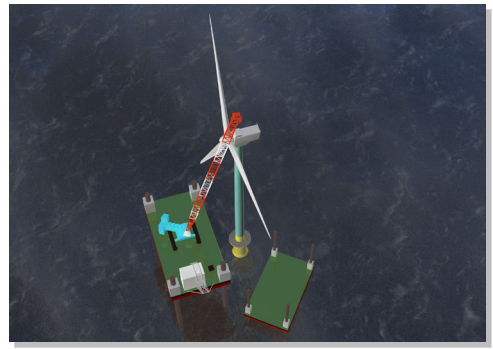
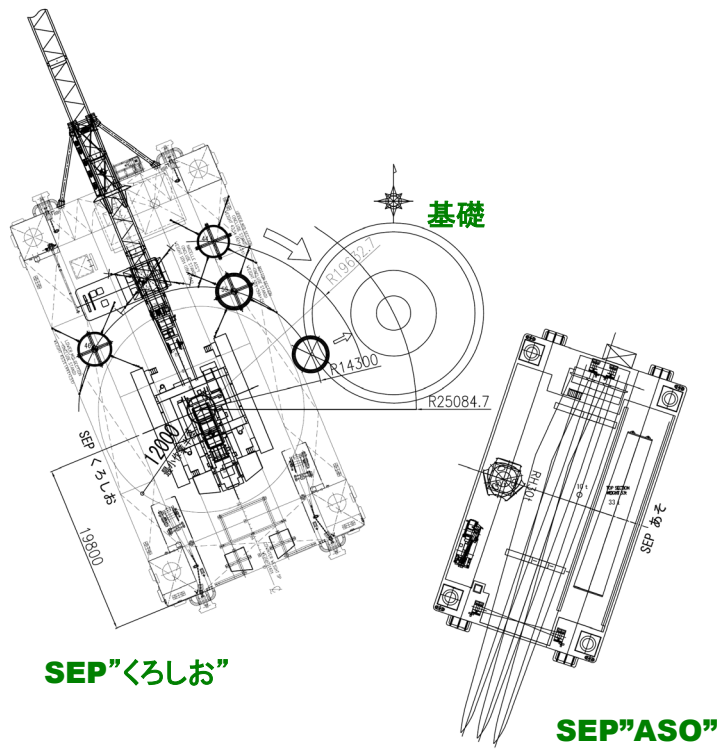


図 5.3-17 SEP 船据付位置(風車施工時)

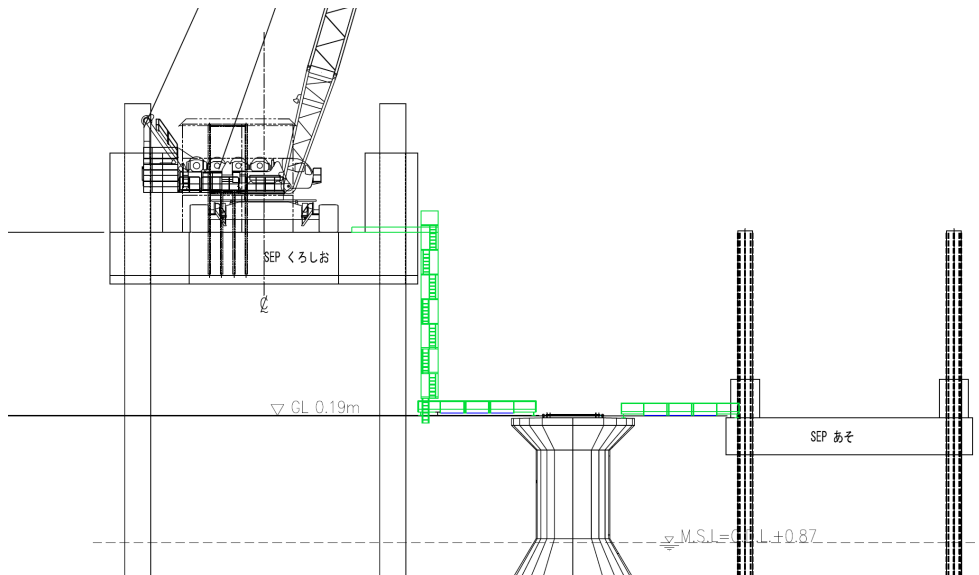


図 5.3-18 SEP 船～基礎渡廊下設置図

図 5.3-19 のフローに従い、風車の据付を行う。

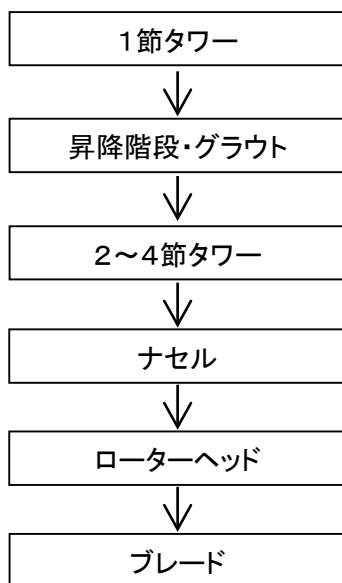


図 5.3-19 風車据付フロー

まず、4分割のタワーを据付ける（図 5.3-20）。

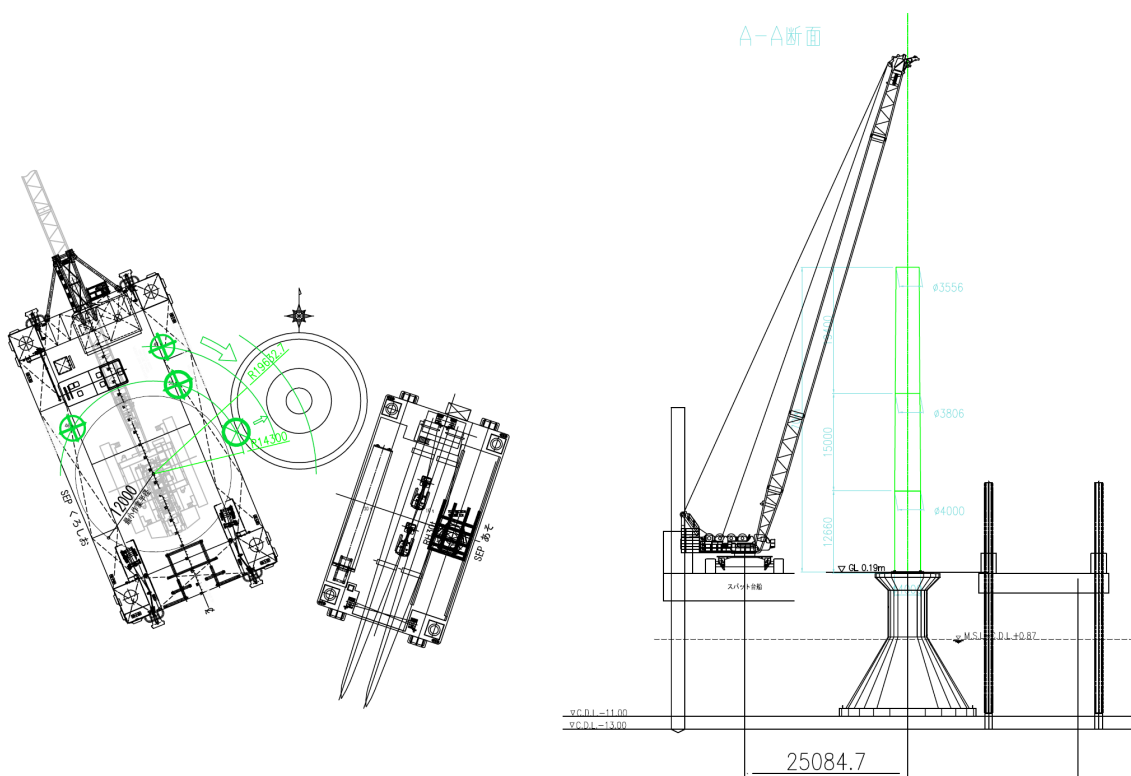


図 5.3-20 タワー据付

次にナセル・ローターヘッドを据付ける（図 5.3-21、図 5.3-22）。

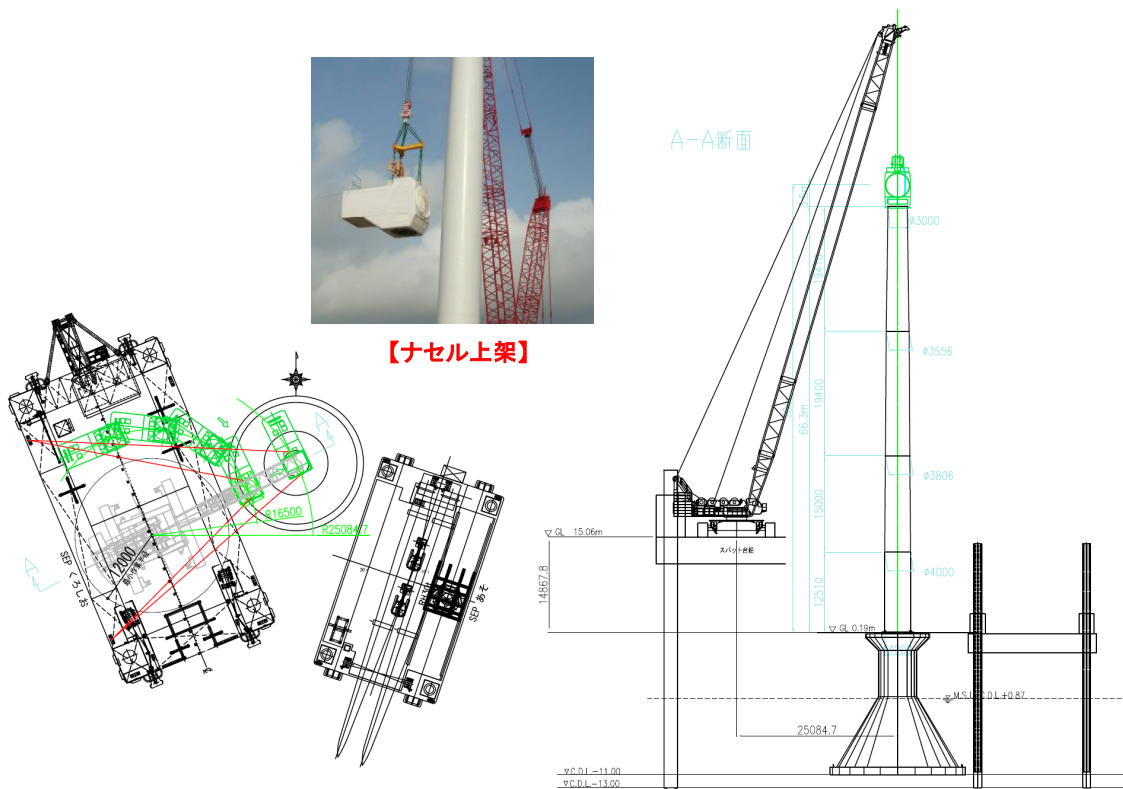


図 5.3-21 ナセル据付

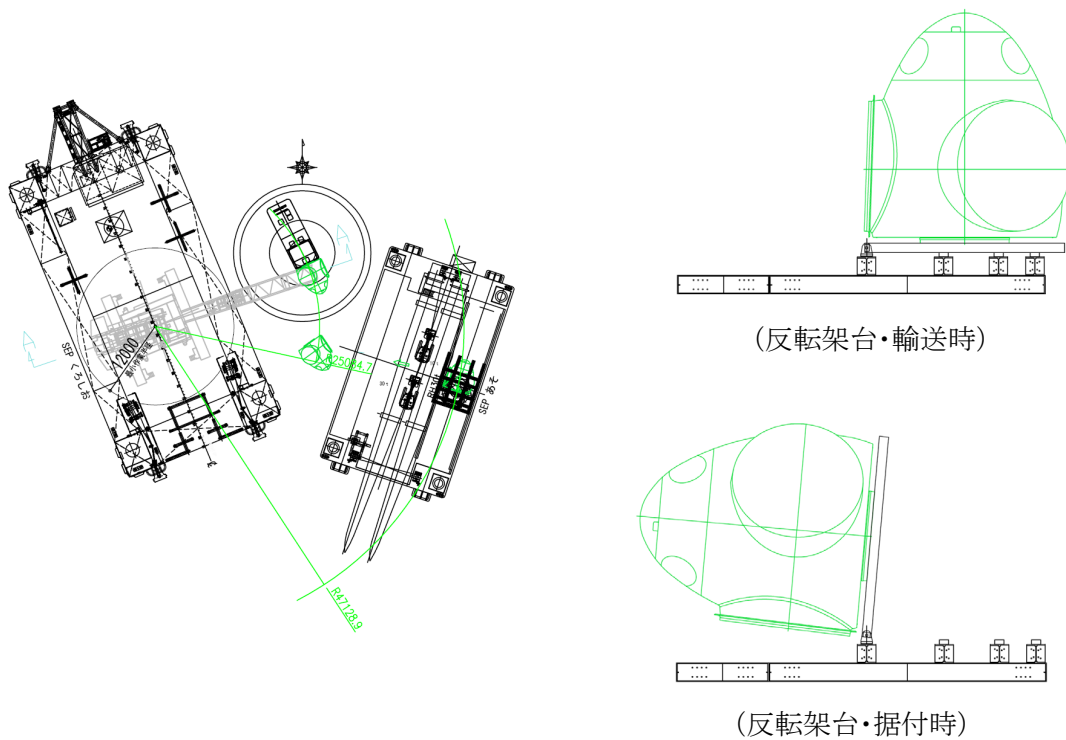


図 5.3-22 ローターヘッド据付

そしてブレードを1本ずつ据付ける（図 5.3-23）。

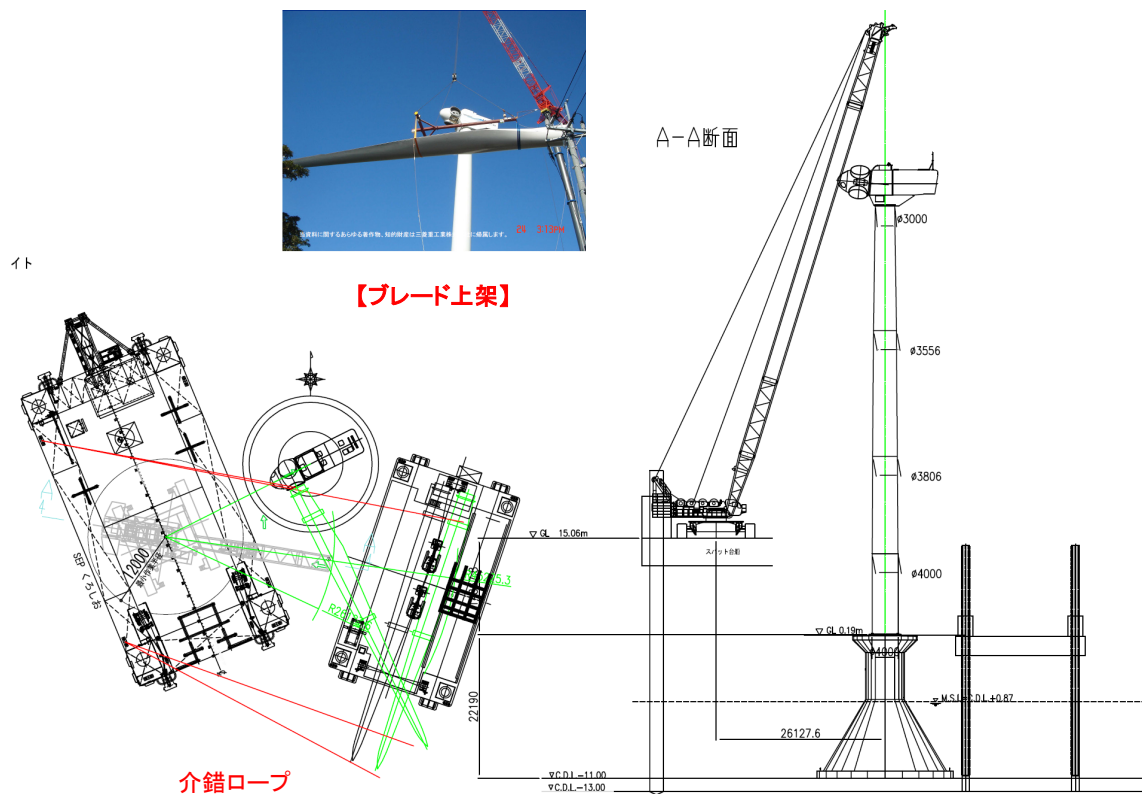


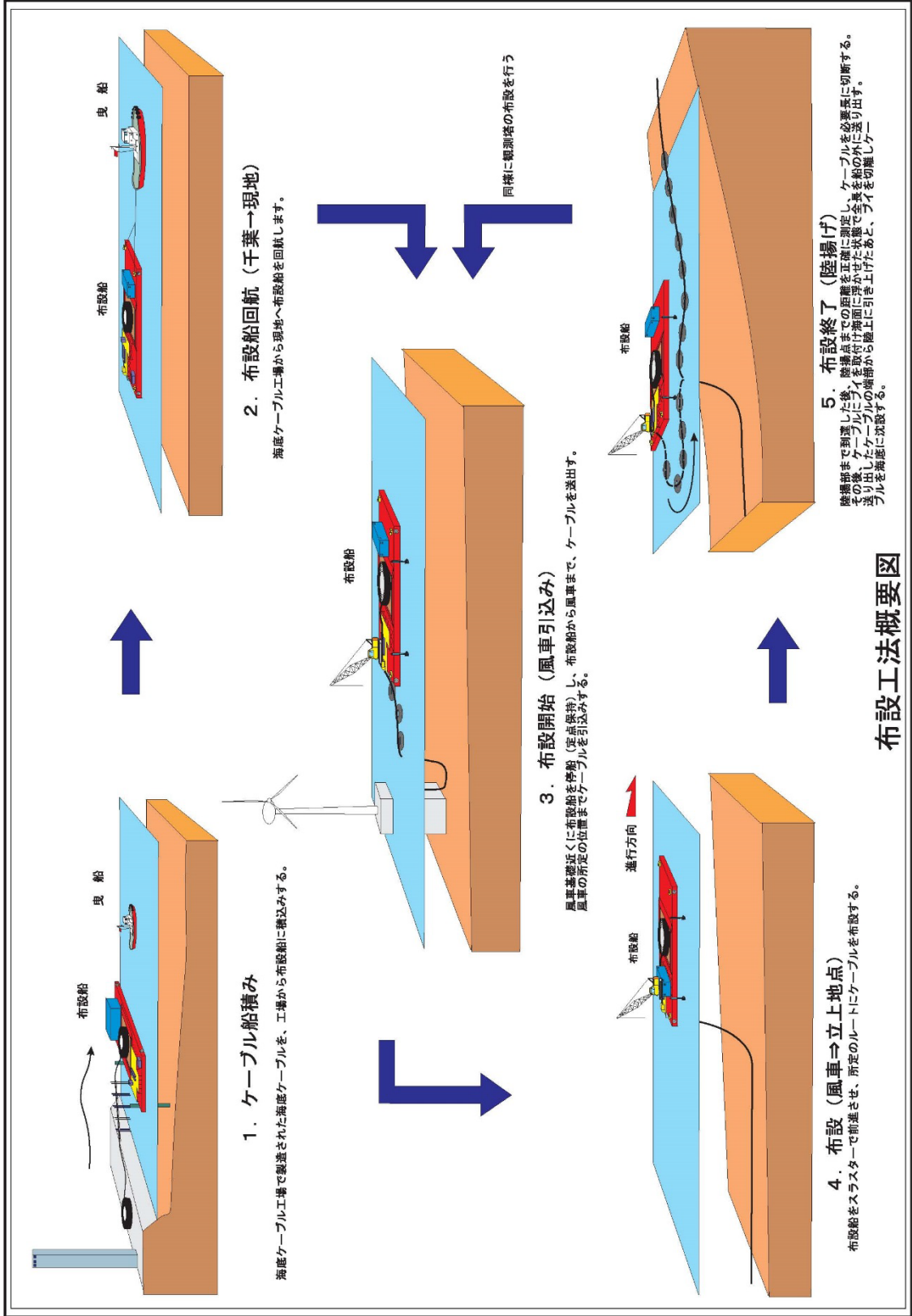
図 5.3-23 ブレード据付

(3) 海底ケーブルの施工方法

1) 布設工法

今回選定した布設ルートは、岩盤が多くアンカーによる布設船の定点保持・移動が困難と想定された。また、曳航方式では正確な位置に布設することが困難である。そのため、布設の作業効率や精度を重視し、アンカーを打設しないで定点保持およびケーブル布設が可能な DPS (Dynamic Positioning System) による自航布設を選定した。

一般的な海底ケーブルの布設工法を基本とし、洋上風力発電所の施工条件に適用させた布設フローを図 5.3-2 に示す。



布設工法概要図

図 5.3-2 布設フロー

※ 本計画は概略案ですので、工事条件決定後、詳細設計させていただきます。

2) 防護工法

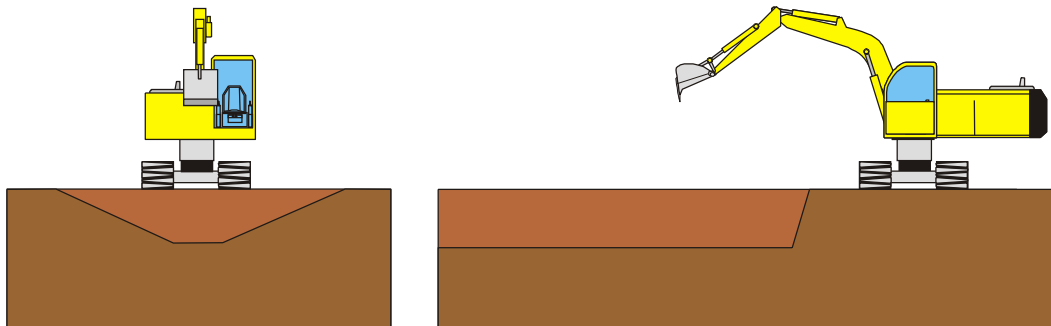
現地海域は、漁業権が設定されており、漁業活動の支障とならないよう、海底ケーブルは埋設されることが望ましい。また、ケーブルの信頼性を確保する目的からも防護の必要性は高い。

今回は、波浪の影響の大きい水深 5m までの区間は岩盤部・砂層部ともに海底面を掘削し埋設防護することとし、水深 5m 以深については海底面直置きとした。なお、陸上渚部の防護は、トレンチ掘削と防護管によるケーブル防護を選定した。

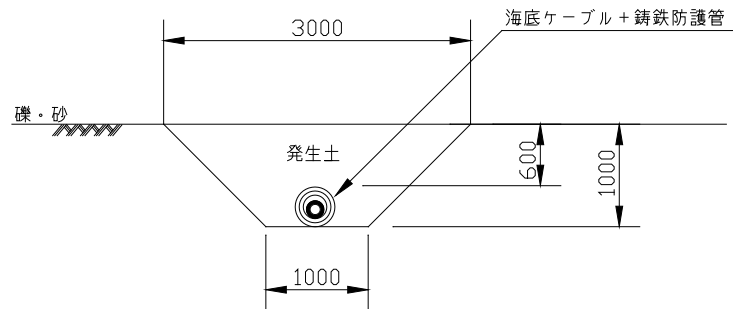
選定した各工法の概要、標準断面を、図 5.3-3 および図 5.3-4 に示す。一般的な埋設フローを図 5.3-5 に示す。

①渚部トレンチ掘削・埋戻し工法

陸上渚部の防護は、バックホウによりトレンチ掘削し、ケーブル布設後埋め戻しを行った。



施工概要図

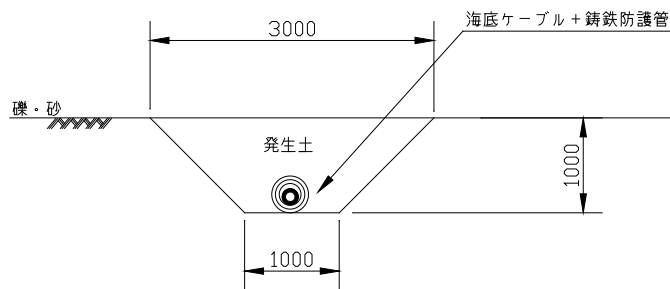
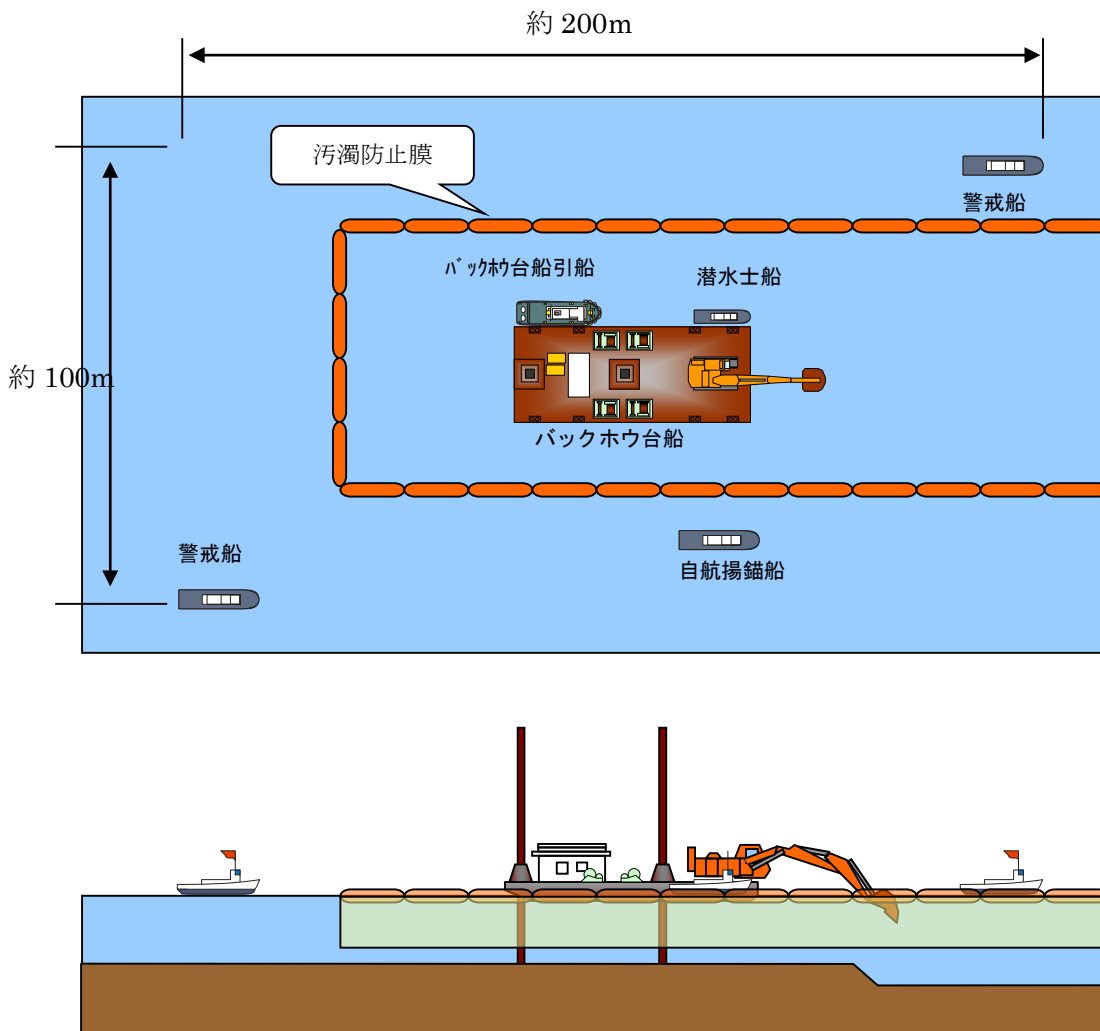


標準断面図

図 5.3-3 渚部トレンチ掘削・埋設工法

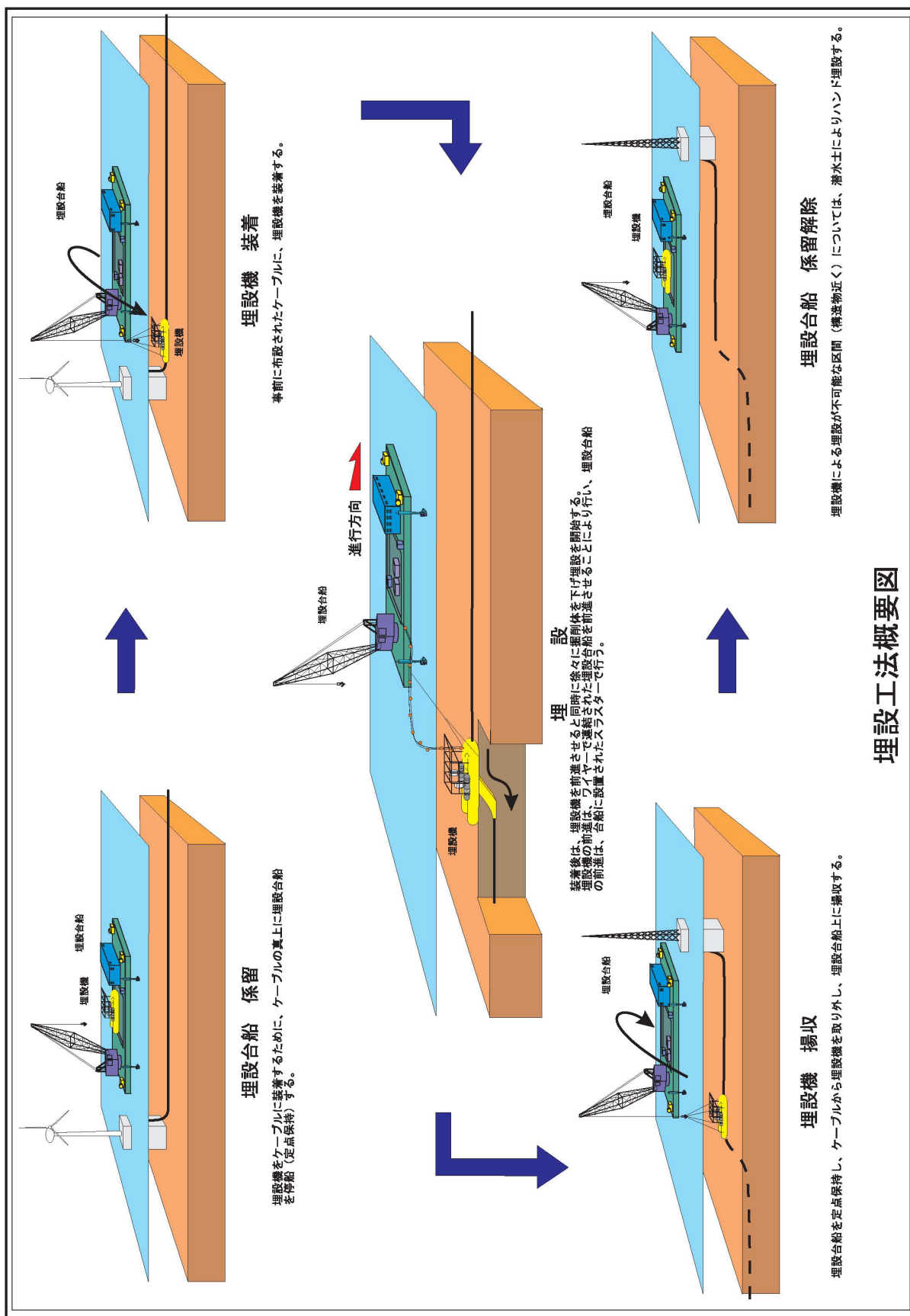
② トレンチ掘削・埋戻し工法

水深 5m 以浅の渚付近の防護は、バックホウ台船よりトレンチ掘削し、ケーブル布設後に埋め戻しを行うこととした。なお、汚濁の拡散を防止するため、汚濁防止膜を設置することとした。



標準断面図

図 5.3-4 トレンチ掘削・埋設工法



埋設工法概要図

図 5.3-5 埋設フロー

※ 本計画は概略案ですので、工事条件決定後、詳細設計させていただきます。

6 建設工事

6.1 基礎工事

実証研究海域において不陸調整（窪みを埋めて平坦にすること）のため、2011年2月下旬から浚渫作業を開始していたが、震災と津波の影響により作業が中断され、翌年の3月から浚渫作業を再開した。作業手順は、浚渫→捨石投入→ならし作業（水中バックホウと潜水士による水平度を確保するための作業）である（図 6.1-1 と図 6.1-2）。洋上風況観測タワーおよび洋上風車の基礎マウンドのならしは±4cmの精度で施工され、管理値（天端の高さ）±5cmを満足したことを確認した。

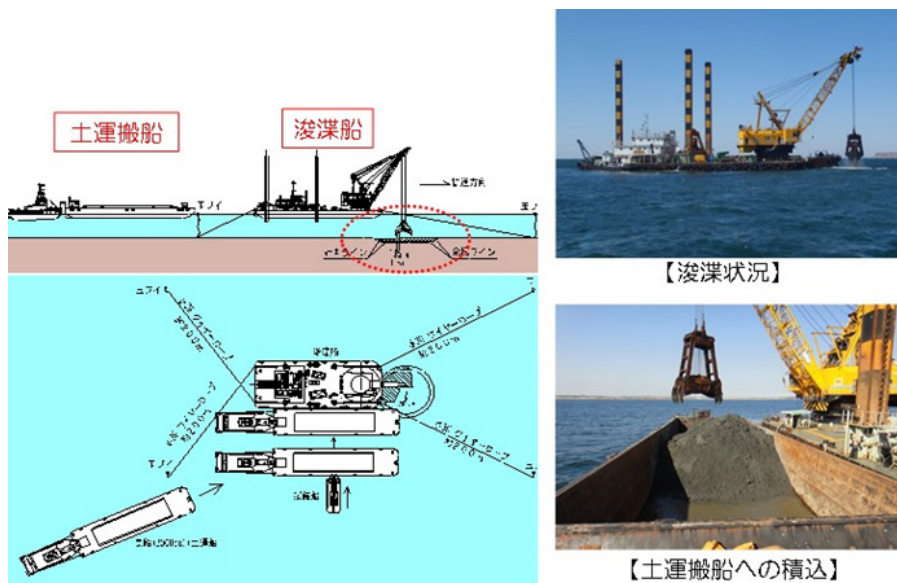


図 6.1-1 浚渫・土運搬作業

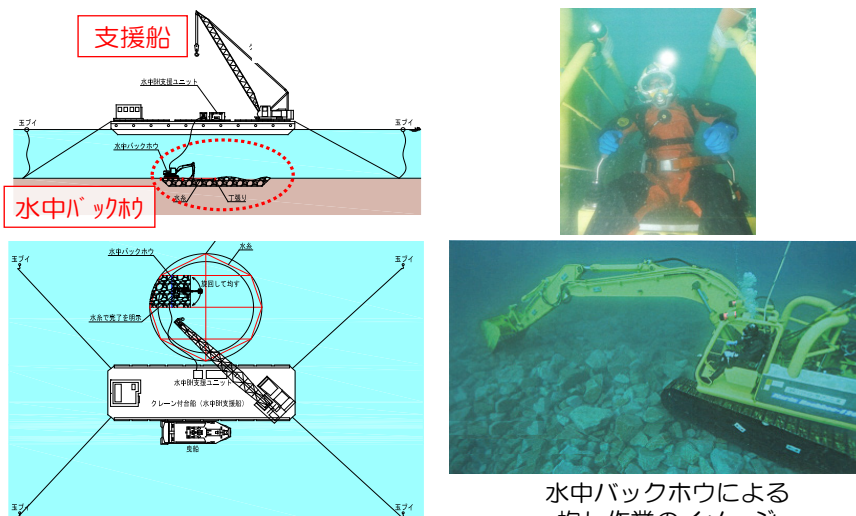


図 6.1-2 ならし作業

支持構造物は、東播磨港でフローティングドック (FD) に積み込まれ、鹿島港に回航された。鹿島港からは、全旋回式起重機船 (日本最大級) を使って実証研究設備設置地点まで運んだが、クレーン能力が 1,600t であったため、起重機船の揺れの小さい中央部分に専用の架台を取り付けて支持構造物を固定して運搬し、吊り下げ着底させた (図 6.1-3)。鹿島港から実証研究設備設置地点までの運搬距離は 70km で、起重機船の往復航行時間と着底に要するサイクルタイムを計 36 時間とし、施工は鹿島港と銚子沖が同時に静穏になる気象・海象条件を予測して行った。

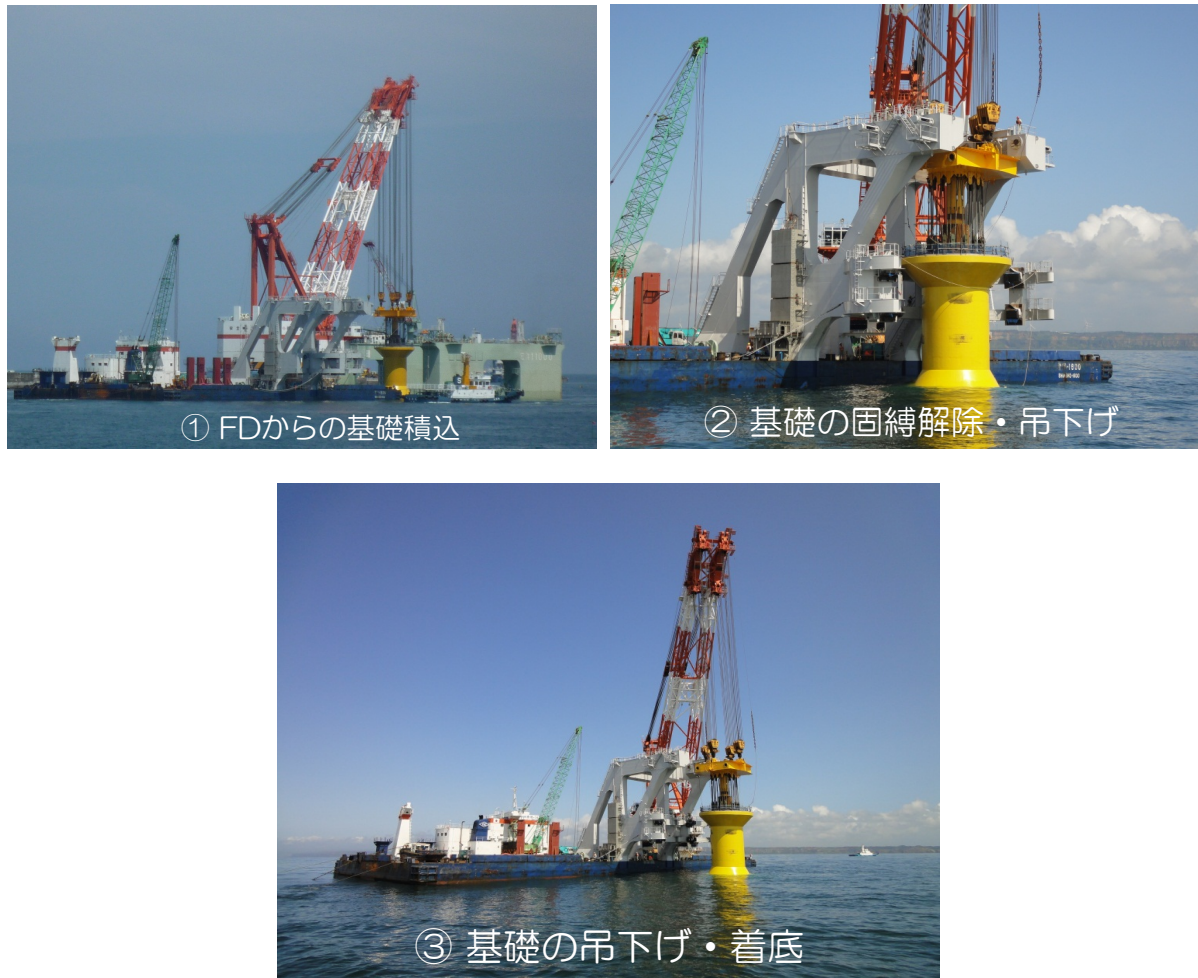


図 6.1-3 洋上風車の支持構造物の運搬・据付

支持構造物の据付後に、ガッドバージ船により中詰材 (銅水砕スラグ) を投入した。洋上風車用の支持構造物の完成重量は 5,400t (中詰材: 3,100t) となった (図 6.1-4)。洗掘防止策として支持構造物周辺にフィルターユニットを据え付け、基礎工事が完了した (図 6.1-5)。

銅水碎スラグの山

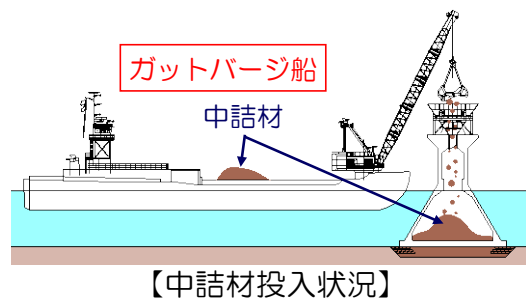


図 6.1-4 中詰材（銅水碎スラグ）の投入状況

フィルターユニット保管状況（名洗港）

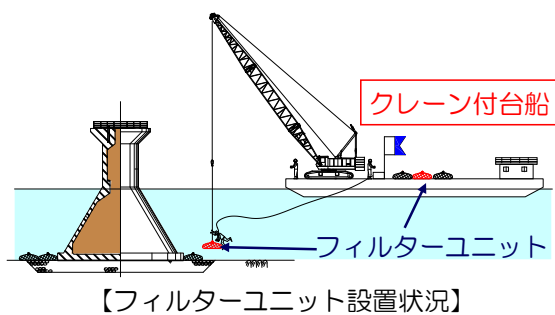


図 6.1-5 フィルターユニットの据付状況

6. 2 観測タワーの設置工事

観測タワーは、工場においてブロック化（7分割）し地組して搬出した。ただし、洋上では図 6.2-1 に示すように、SEP 船上で②と③および⑤と⑥のブロック化を行い、最終的には洋上において 5 つにブロック化したタワーを組み立てた。

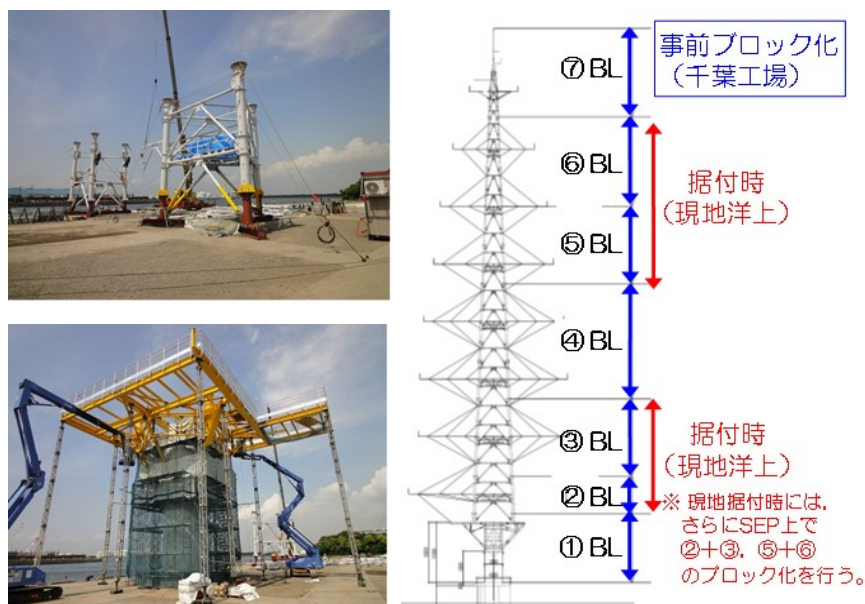


図 6.2-1 洋上風況観測タワーの地組状況

据付は、作業限界風速（10m/s）以下の条件下において、「くろしお」と「あそ」の 2 隻の SEP 船を使い、「くろしお」に搭載されたクローラークレーン（650t）により行った（図 6.2-2）。観測タワーの据付状況と完成時の状況を図 6.2-3 と図 6.2-4 にそれぞれ示す。なお、観測タワーの鉛直度（タワーの軸からのズレ）は 5mm で、管理値（89mm 以内）を大きく下回っていた（管理値： $H/1,000\text{mm}$ 、 H =タワー本体高、電気通信設備施工管理の手引き、（一般社団法人建設電気技術協会））。

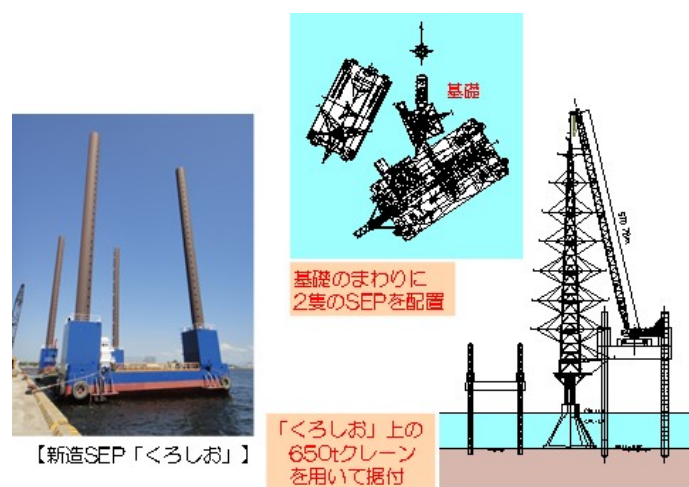


図 6.2-2 洋上風況観測タワーの据付時における SEP 船の配置



①SEP 船、設置完了 ②プラットフォーム設置完了、③タワー2,3 ブロックの設置
④タワー5,6 ブロックの設置、⑤組立完了

図 6.2-3 洋上風況観測タワーの据付状況



図 6.2-4 洋上風況観測タワーの完成時の状況

6.3 風車の設置工事

風車の据付には、作業限界風速（10m/s、ただしブレード組立てでは8m/s）以下の条件下において、洋上風況観測タワーと同様に「くろしお」と「あそ」の2隻のSEP船を使用した。「くろしお」にはクローラークレーン（650t）、1～3の節タワーおよびナセルを搭載し、「あそ」には4節のタワー、ブレード3翼およびロータヘッドを積み込んで作業を行った。図6.3-1に「くろしお」と「あそ」の配置状況を示す。

据付は、タワー（1～4節）→ナセル・ロータヘッド→ブレード（3翼：1翼ずつ取付け）の順序で行った（図6.3-2～図6.3-4）。完成時の状況を図6.3-5に示す。なお、洋上風車の鋼管タワー組立の管理値を、第1節トップフランジのレベル差（h）を4mm以内（ $h_{max}=d/1000$ 、d: トップフランジ外径、メーカー基準）と設定し、0mmの精度で据え付けた。



図 6.3-1 「くろしお（右）」と「あそ（左）」の配置状況

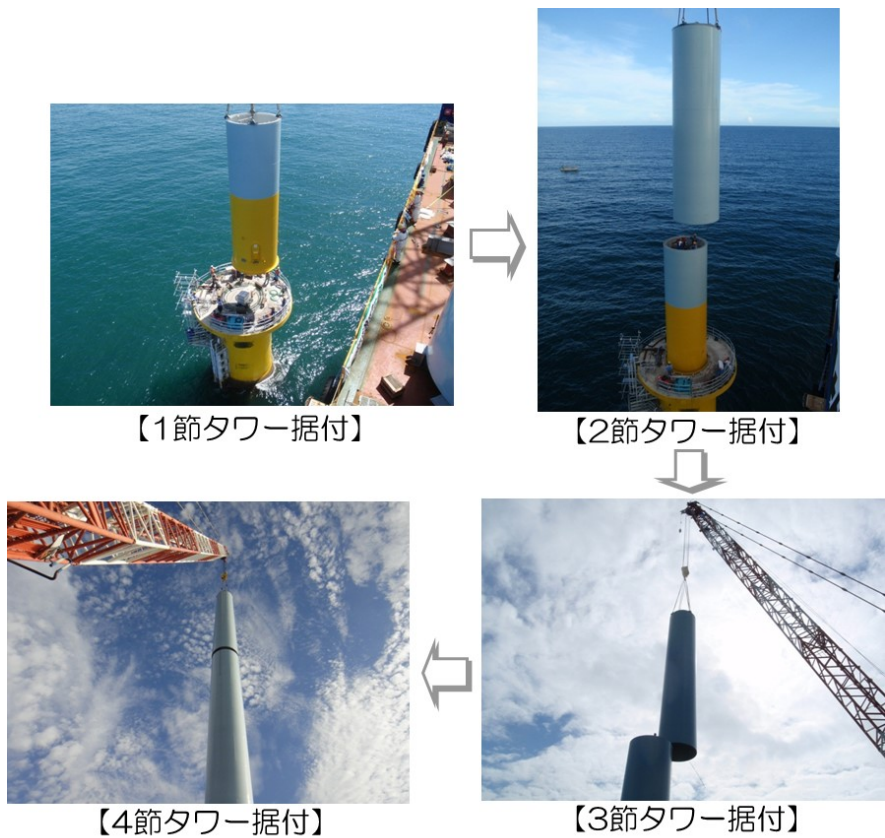


図 6.3-2 タワーの据付状況



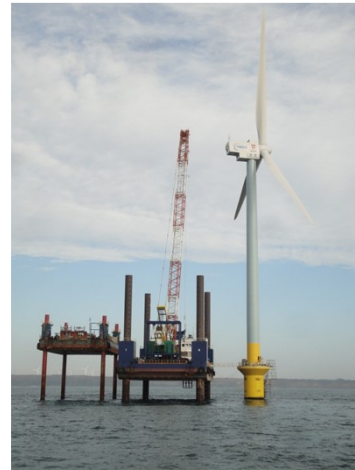
図 6.3-3 ナセル・ローターヘッドの据付状況



【ブレード吊り上げ】



【ブレード据付】



【風車部材据付完了】

図 6.3-4 ナセル・ロータヘッドの据付状況



図 6.3-5 洋上風車の完成時の状況

基礎工事、観測タワーの設置工事、風車の設置工事の施工稼働率をまとめると、表 6.3-1 のようになった。

表 6.3-1 施工稼働率のまとめ

| | 工種 | 作業期間 | 稼働日／作業日 | 稼働率 |
|---|----------|--------------|---------|-------|
| ① | 浚渫・土運搬工 | 2月23日～ 4月 6日 | 7日／44日 | 15.9% |
| ② | 砕石・均し工 | 4月 7日～ 6月25日 | 37日／80日 | 46.3% |
| ③ | 基礎据付工 | 6月12日～ 7月10日 | 8日／29日 | 27.6% |
| ④ | 中詰材投入工 | 7月 4日～ 8月11日 | 10日／39日 | 25.6% |
| ⑤ | FU設置工 | 6月25日～ 7月27日 | 11日／33日 | 33.3% |
| ⑥ | 観測タワー据付工 | 7月25日～ 8月25日 | 28日／32日 | 87.5% |
| ⑦ | 風車据付工 | 9月 9日～10月25日 | 30日／47日 | 63.8% |

※ ①～⑤工種での稼働率は、風車・観測タワーを合わせて算出。

6. 4 海底ケーブルの布設

洋上風況観測タワーおよび洋上風車の支持構造物の据付後、海底ケーブルの布設を行った(布設工の稼働率 37.6% (77 日/205 日) ; 2012 年 8 月 7 日～2013 年 1 月 27 日)。水深 5m 以深の海域では、海底ケーブルを海底面に直置きするため、22kV 架橋ポリエチレン絶縁鉛被シース二重鉄線鎧装海底ケーブル (φ 109mm, 延長 4.1km) を採用した。この海底ケーブルを布設台船に積み込み、風車から陸上に向けて布設を行った (図 6.4-1)。洋上風況観測タワーおよび洋上風車の支持構造物への海底ケーブルの引き上げ後、構造物の側面に沿って、SUS 管を用いて固定した。



図 6.4-1 布設台船による海底ケーブル布設状況

なお、陸上部ではケーブルを防護管で防護し(図 6.4-2)、洋上風車で発電した電力を電圧 22kV で海底ケーブルにより送電し、銚子市内の 66kV 配電線網へ接続するための変電設備を設置した。



図 6.4-2 陸上部のケーブルの防護状況

7 運転・保守

7.1 運転・保守の方法

(1) モニタリング

実証研究海域の洋上風車および支持構造物には、各種モニタリング装置を取り付けた。モニタリング装置の設置位置を表 7.1-1、図 7.1-1 に示す。

表 7.1-1 洋上風車および支持構造物に取り付けた各種モニタリング装置

| 分類 | 部位 | 測定項目 | 使用機器 | 取付け個数 | 備考 |
|-------------|---------|------------|--------------|-------|---------|
| 風車 (ナセル) | 主軸受 | 軸受振動 | 振動計 | 3 | |
| | 増速機 | | | 5 | |
| | 発電機 | | | 2 | |
| | 増速機 | 回転数 | 回転数計 | 1 | |
| 支持構造物 | 海面下の基礎 | 波圧 | 波圧計 | 4 | |
| | 基礎の底面 | 揚圧力 | 揚圧力計 | 4 | 予備2個を含む |
| | アンカーボルト | 張力 | 張力計 | 4 | |
| | コンクリート | 応力 | 応力計 | 4 | |
| | 鉄筋 | 歪み | 歪計 | 16 | |
| | コンクリート | 歪み/応力/熱電対計 | 歪計/無応力計/熱電対計 | 1 | 長期歪み変化 |

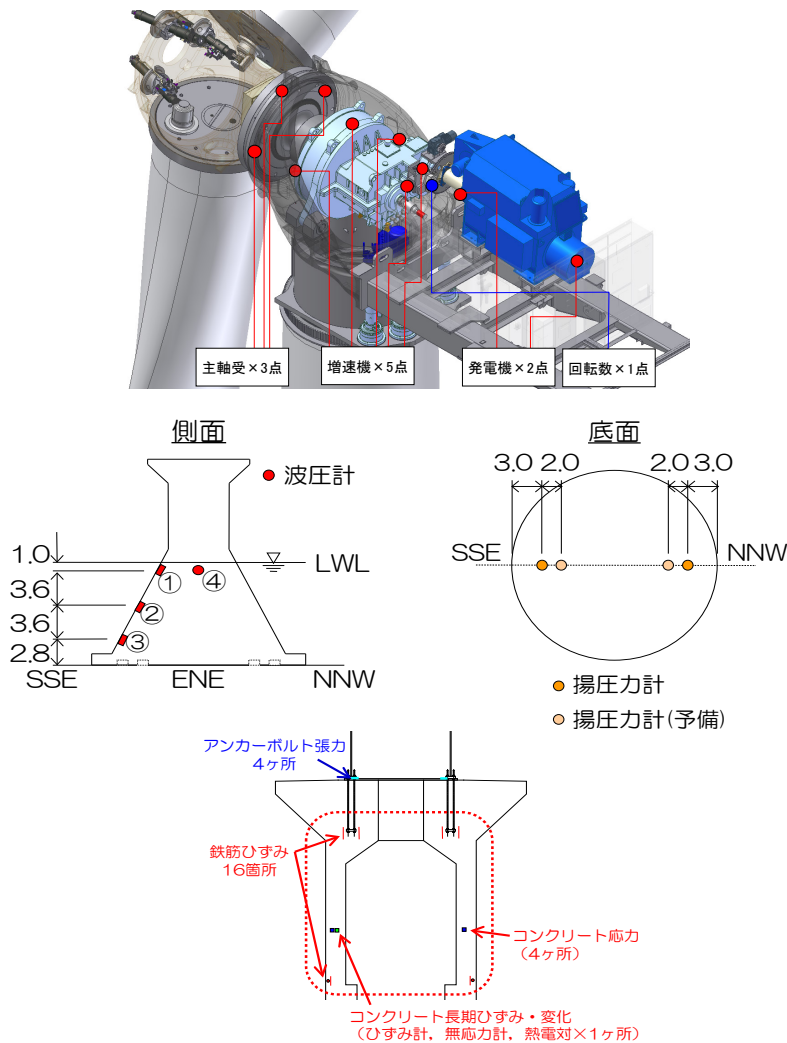


図 7.1-1 洋上風車および支持構造物に取り付けている各種モニタリング装置

現地設備は常時無人とし、運転監視は遠隔で 24h 体制とし、設備異常警報などが発生した場合は、24h 監視箇所へ警報内容が通報される体制とした。風車遠隔監視室からの運転監視状況を図 7.1-2 に示す。

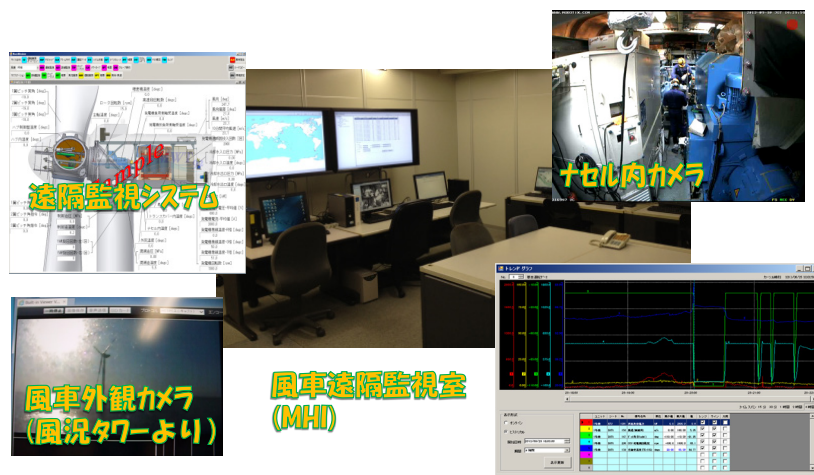


図 7.1-2 風車遠隔監視室からの運転監視状況

銚子沖実証研究施設には、CMS（状態監視システム）を導入し、主軸、増速機、発電機等に

振動計、ひずみ計等を取り付けて、運転パラメータの遠隔モニタリングを実施している。その記録事例を図 7.1-3 に示す。

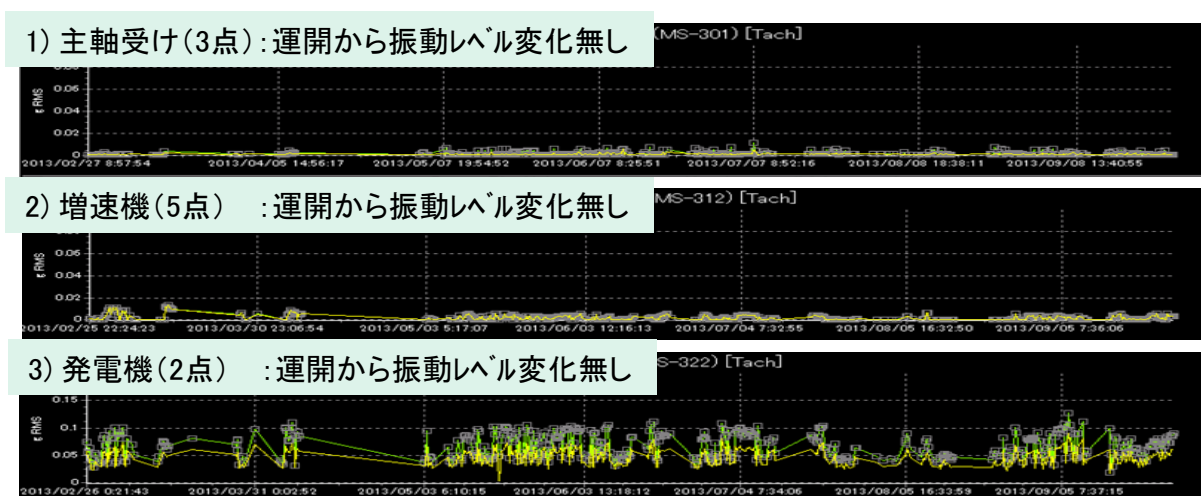


図 7.1-3 CMS の記録事例

(2) 点検

銚子沖洋上風力発電所の電気工作物を維持するにあたり、経済産業省へ届け出をした保安規程に基づき、具体的な点検方法や点検周期を計画し、メンテナンスを実施している。銚子沖洋上風力発電所には電気工作物として、主に洋上風車、観測タワー、陸上電気設備、ならびに送電ケーブル（海底ケーブルと連系線）がある。さらに、洋上設備という視点で「航路標識灯」や「クレーン」（風車点検等で必要な機材を交通船から洋上設備へ荷揚げする際に利用する機器）があり、これらについても点検対象としている。

点検は設備ごとに必要に応じて、月例巡視、定期点検、臨時巡視に分けて計画し、実施している。

①月例巡視

1ヶ月に一度、目視確認で設備全体の健全性を把握している。

②定期点検

1年に一度、目視以外に、消耗品交換、ボルト増し締め、電氣的測定試験、警報試験などを実施し設備の健全性を把握している。

研究期間内に定期点検を必要とした主な設備は、風車、航路標識灯、クレーンなどで、風車については各年度のメーカー点検推奨項目に従い実施している。

(消耗品の例)

グリス給脂、フィルタ交換、エアブリーザ交換、ブラシ交換、冷却水交換、増速機潤滑油交換、ギアカップリンググリス交換、UPS 交換、GO ポンプ交換、GO モータ交換など

(電氣的測定試験の例)

絶縁抵抗測定、巻き線抵抗測定など

③臨時巡視

本電気工作物が研究設備ということを考慮し、地震や波浪に対し一定の基準を設け、基準を超えた場合には、速やかに陸上もしくは船上から（場合によっては洋上設備へ渡って）目視確認している。

7. 2 運転・保守の結果

(1) 運転の実績

2013年～2016年の銚子沖風力発電施設における発電電力量と設備利用率を図7.2-1、表7.2-1に示す。

下記の期間は風車が停止し、そのためデータに欠損が生じた。

- ・2014年1月9日～6月3日：接地線の破断が発生したことにより、保安停止を実施した。
- ・2014年6月26日～7月18日：海底ケーブル防護管の損傷により、保安停止を実施した。
- ・2014年10月6日～2015年11月1日：海底ケーブルの損傷により、風車・観測タワーの電源が断たれた。三杯式風速計による観測を中断したため、推計値による算定もできなかった。

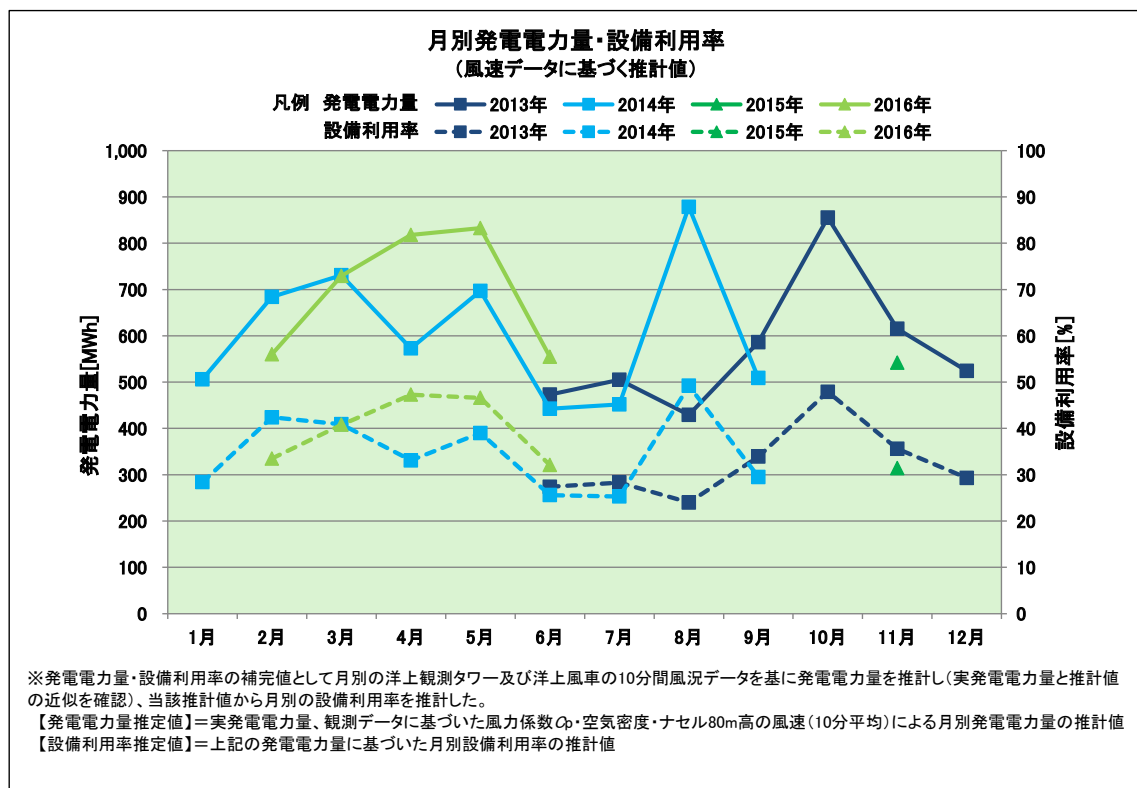


図7.2-1 銚子沖洋上風力発電施設での発電電力量、設備利用率(風速データに基づく推計値)

表7.2-1a 銚子沖洋上風力発電施設での発電電力量、設備利用率(風速データに基づく推計値)

| 発電電力量・設備利用率(風速データに基づく推計値) | | | | | | | | | | | | | NEDO洋上風力発電実証研究(銚子沖) | | |
|---------------------------|-------|----------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|---------------------|------------------------------|-----|
| 項目 | 発電年・月 | 1月 | 2月 | 3月 | 4月 | 5月 | 6月 | 7月 | 8月 | 9月 | 10月 | 11月 | 12月 | 【年別】 累積発電電力量/ 月平均設備利用率 | |
| | | 発電電力量 [MWh] | 2013年 | / | / | / | / | / | 473 | 505 | 429 | 586 | 855 | 615 | 524 |
| 2014年 | 506 | | 684 | 731 | 573 | 697 | 443 | 452 | 879 | 509 | - | - | - | 5,473 | |
| 2015年 | - | | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 542 | - | 542 | |
| 2016年 | - | | 560 | 729 | 818 | 833 | 555 | / | / | / | / | / | / | 3,494 | |
| 設備利用率 [%] | 2013年 | / | / | / | / | / | 27.4 | 28.3 | 24.0 | 33.9 | 47.9 | 35.6 | 29.3 | - | |
| | 2014年 | 28.4 | 42.4 | 40.9 | 33.1 | 39.0 | 25.6 | 25.3 | 49.2 | 29.5 | - | - | - | - | |
| | 2015年 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 31.4 | - | - | |
| | 2016年 | - | 33.5 | 40.8 | 47.3 | 46.6 | 32.1 | / | / | / | / | / | / | - | |

注1) 2015年12月と2016年1月は風測計不具合のため、推計値は算出していません。

表 7.2-1b 銚子沖洋上風力発電施設での発電電力量、設備利用率（実測値）

【参考】発電電力量・設備利用率（実測値）

NEDO洋上風力発電実証研究（銚子沖）

| 項目 | 発電年・月 | 1月 | 2月 | 3月 | 4月 | 5月 | 6月 | 7月 | 8月 | 9月 | 10月 | 11月 | 12月 | 【年別】 累積発電電力量/ 月平均設備利用率 |
|--------------|-------|----------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------------------------------|
| | | 発電電力量 [MWh] | 2013年 | / | / | / | / | / | 458 | 502 | 386 | 551 | 847 | 642 |
| 2014年 | 130 | | - | - | - | - | 394 | 166 | 750 | 546 | - | - | - | 1,987 |
| 2015年 | - | | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 34 | 559 | 593 |
| 2016年 | 459 | | 523 | 746 | 781 | 776 | 480 | / | / | / | / | / | / | 3,764 |
| 設備利用率 [%] | 2013年 | / | / | / | / | / | 26.5 | 28.1 | 21.6 | 31.9 | 47.4 | 37.1 | 30.6 | - |
| | 2014年 | 7 | - | - | - | - | 22.8 | 9.3 | 42.0 | 31.6 | - | - | - | - |
| | 2015年 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 1.9 | 31.3 | - |
| | 2016年 | 25.7 | 31.3 | 41.8 | 45.2 | 43.4 | 27.8 | / | / | / | / | / | / | - |

(2) 保守の実績

1) 月例巡視

2013年2月から2017年2月までの間で、海象条件が悪く予定していた月にできなかったのは49回のうち3回（6%）であったが、メンテナンス支援船導入以後（2016年1月～2017年2月）は予定した日に実施することができた。

月例巡視に要する時間は、概ね風車3時間、タワー30分、変電所30分であった。交通船の移動時間は20～60分であった。

2) 定期点検

定期点検は、各年度メーカー点検マニュアルの推奨項目に準じて実施したため、点検項目は各年度で異なることとなった。また、平成27年度は長期停止からの再開だったため、メーカー点検マニュアル項目以外に補機動作確認試験などの推奨項目以外の項目も実施した。

予定工期日数に対する作業実績日数を表7.2-2に示す。なお工期を2～5期に分けて実施した年度もある。

表 7.2-2 定期点検実績表

(単位：日)

| 年度 | 予定工期 | 作業実施 | 当日中止※1 | 前日休工※2 |
|-------|------|------|--------|--------|
| H25年度 | 15 | 15 | 0 | 0 |
| H26年度 | 12 | 6 | 0 | 6 |
| H27年度 | 26 | 22 | 2 | 2 |
| H28年度 | 42 | 28 | 3 | 11 |

※1 当日中止：前日に作業を計画していたが、当日海象等が悪く作業できなかった日数

※2 前日休工：前日に作業を休工にした日数

4) 臨時巡視

2013年2月から2017年2月までの間で14回実施した。14回のうち4回は、普通巡視と臨時巡視を同時に行っている。臨時巡視に要する時間は、巡視方法により以下となった。

- ・陸上から双眼鏡等使用して目視確認したケース 10分程度 (6回)
- ・船で洋上設備を周回しながら目視確認したケース 40分程度 (2回)
- ・洋上設備に渡って目視確認したケース 120分程度 (6回)

7. 3 洋上風車のアクセスに係る検討

(1) 稼働率

日中あたり（6時から18時まで）12時間連続して基礎へのアクセスの波高条件を満たす日数が、どの程度あるかを把握するために波高条件から見た月別稼働率を図7.3-1に示す。

- ✓有義波高 1.0m 以下：1月と7月に5割となるが、その他の月は4割以下で、最も低い月は4月の約1.5割であった。
- ✓有義波高 1.5m 以下：3月、4月、10月および11月を除いて6割を超え、最も高い月は7月の約8割、最も低い月は4月の約4.5割であった。
- ✓有義波高 2.0m 以下：2月、3月、4月、9月、10月および11月を除いて8割を超え、最も高い月は7月の約9割、最も低い月は4月の約7割であった。

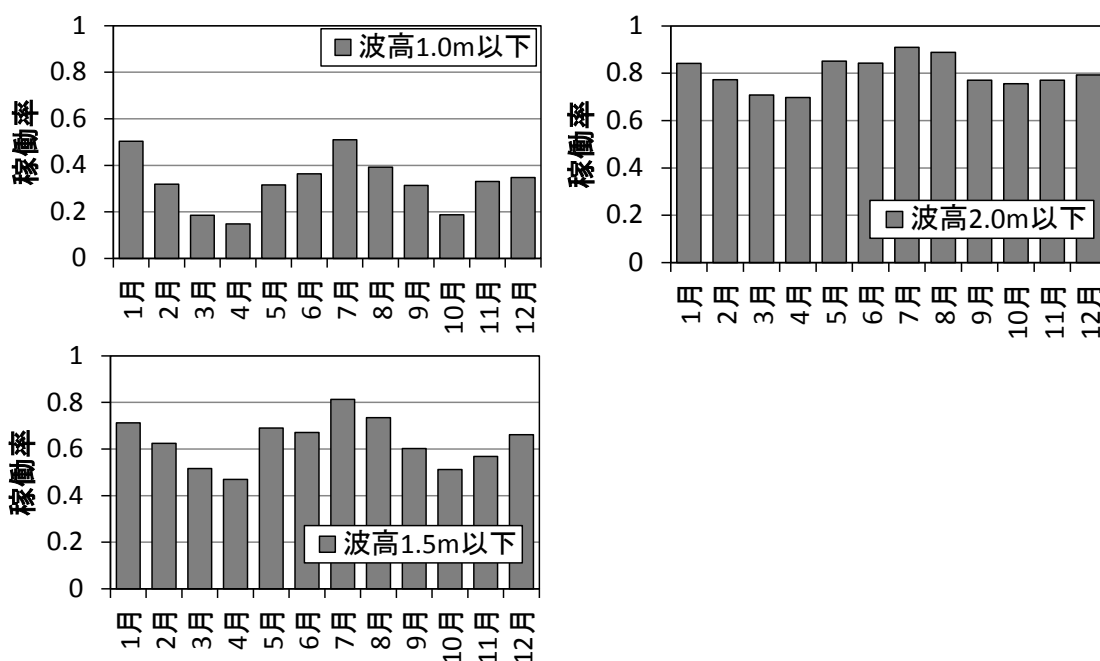


図7.3-1 波高条件から見た月別稼働率(6時から18時まで12時間連続して波高条件を満たす日)
(2010年1月～2014年8月)

6時から18時まで12時間連続してクレーン作業の波高/周期条件を満たす日の割合を示す稼働率を、図7.3-2に示す。

- ✓有義波高 1.0m 以下・有義波周期 6.0 秒以下：本条件を満たす月はほとんどなかった。
- ✓有義波高 1.0m 以下・有義波周期 8.0 秒以下：6月と7月に2割程度となるのみで、他の月はそれを下回り、3月は最も低く1割未満であった。
- ✓有義波高 1.25m 以下・有義波周期 6.0 秒以下：本条件を満たす月はほとんどなかった。
- ✓有義波高 1.25m 以下・有義波周期 8.0 秒以下：5月、6月、7月、8月、9月および11月に2割を超え、他の月はそれを下回り、3月は最も低く1割程度であった。

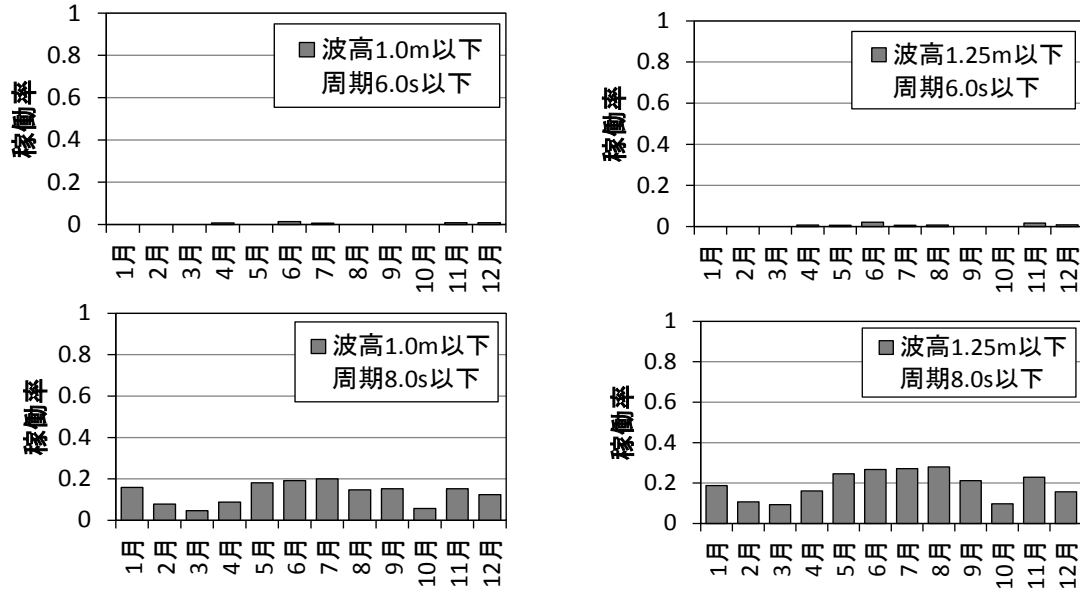


図 7.3-2 波高および周期条件から見た月別稼働率（6時から18時まで12時間連続波高/周期条件を満たす日）（2010年1月～2014年8月）

(2) 洋上風車へのアクセス

銚子沖においては周年にわたって有義波高が高く、交通船を使用して洋上施設へアクセス（通常、有義波高 1m 以下が条件）できる頻度が少なく、点検・補修の稼働率が約 33% と低いことが課題であった。その稼働率の向上を目指すため、日本で初めて設計・製造されたメンテナンスのためのアクセス船（表 7.3-1、図 7.3-4）を 2016 年 1 月より適用し、性能評価を行った。その結果、有義波高 1.5m 以上での安全なアクセスが可能となり（図 7.3-5）、運転・保守の稼働率が 63% 以上を達成することができた。ちなみに、風速に関する作業条件は、 10m/s 以下とされていた。



使用船舶（左）と船舶から風車への乗り移り状況（右）

図 7.3-3 交通船でのアクセス

表 7.3-1 新アクセス船の諸元

| 項目 | 諸元 |
|---------|--------------|
| 船名 | PORTCAT ONE号 |
| 船主 | 東京汽船株式会社 |
| 総トン数 | 19トン |
| 最大搭載人員 | 旅客12名、船員2名 |
| 最大貨物積載量 | 1t |
| 推進装置 | ウォータージェット2基 |
| 最大速力 | 29.2kt |
| 最大押付力 | 6.5t |



図 7.3-4 新アクセス船

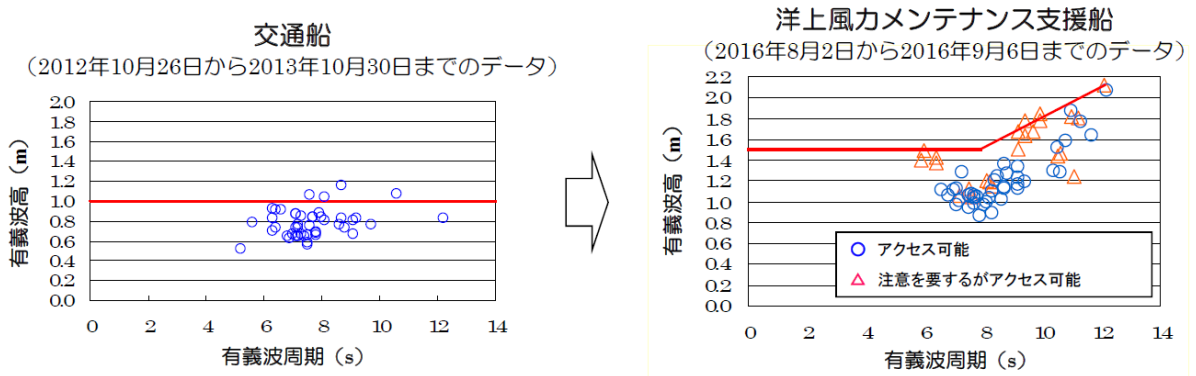


図 7.3-5 風車へアクセスできたときの有義波高と有義波周期の比較

7. 4 運転・保守から確認された課題

銚子沖では2013年10月の台風26号、2014年2月の南岸低気圧の襲来により、電力ケーブルの可とう保護管の損傷、固定架台の損傷などの不具合が生じ、最終的には電力ケーブルの破断に至る事故が生じた。電力ケーブルおよび保護管の損傷事故発生までの経緯を時系列で表7.4-1に示す。関連する情報として、図7.4-1に電力ケーブル保護管の損傷および応急復旧状況（2014年4月～7月）、図7.4-2に海面付近の電力ケーブルの損傷状況（2014年10月9、17、27日点検）を示す。

表 7.4-1 電力ケーブルおよび保護管の損傷までの経緯

| 日付 | 確認された事象 |
|--------------|---|
| 2013年10月16日 | 台風26号 最高波高 9.52m を観測（50年確率の設計波高は10.5m） |
| 2014年02月09日 | 南岸低気圧 最高波高 8.61m を観測 |
| 2014年02月15日 | 南岸低気圧 最高波高 9.16m を観測 |
| 2014年02月～03月 | 海面付近の可とう保護管の損傷、電力ケーブル鉄線鎧装の損傷、海底部の鋳鉄保護管の消失、電力ケーブル鉄線鎧装の損傷を確認 |
| 2014年05月19日 | 保護管の代わりとして、プラホースを用いて損傷個所の応急復旧を実施 |
| 2014年06月25日 | 応急復旧を行った海面付近のプラホースの一部消失を確認 |
| 2014年07月18日 | 2回目の応急復旧として、プラホースをステンレスバンドで固定、可とう保護管とプラホース間の隙間をなくすようプラホースを重ねて設置 |
| 2014年10月06日 | 台風18号 最高波高 8.31m を観測台風の影響により、22kV設備で地絡事故が発生し電源を喪失 |
| 2014年10月09日 | 海面上の電力ケーブル固定架台の一部損傷を確認 |
| 2014年10月17日 | 海中部の電力ケーブルの一部損傷を確認 |
| 2014年10月27日 | 海中部の電力ケーブルの一部断線を確認、海底部の鋳鉄保護管を2m程度消失、電線ケーブル一部損傷を確認 |

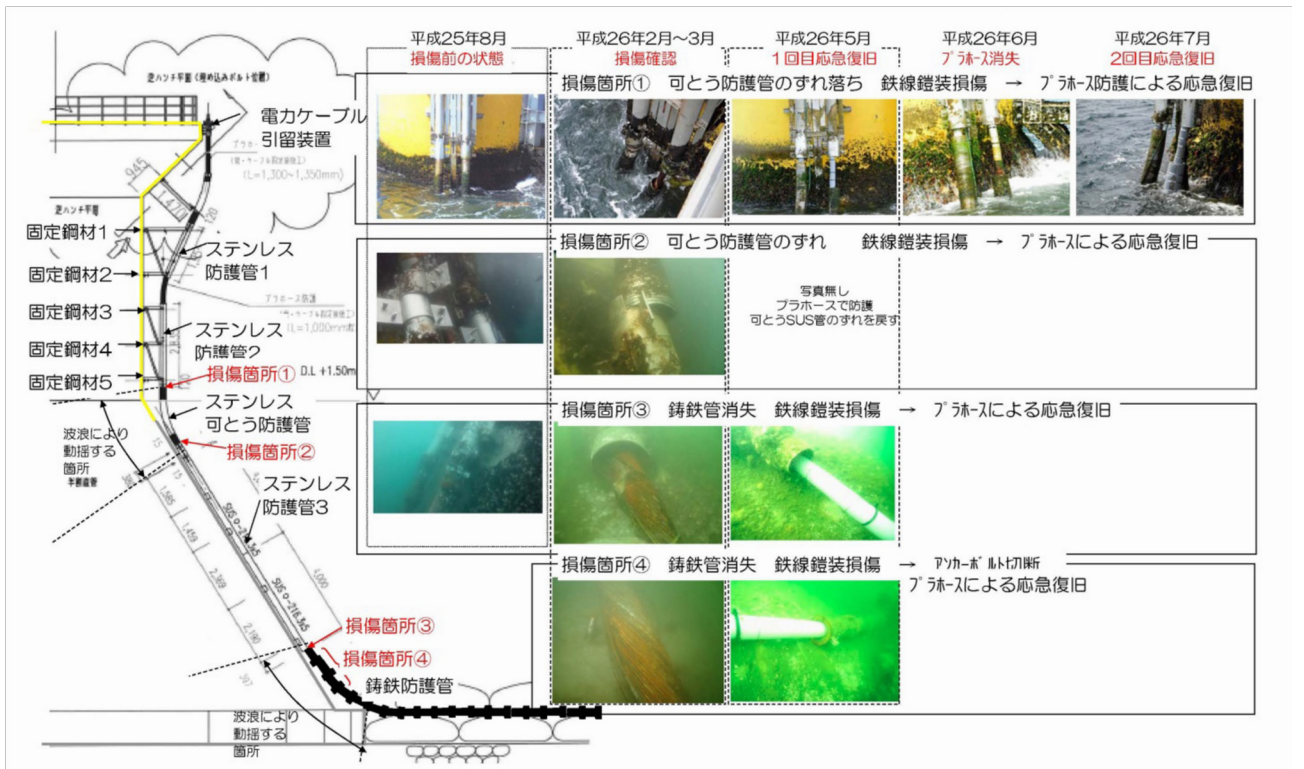


図 7.4-1 電力ケーブル保護管の損傷および応急復旧状況 (2014年4月~7月)

損傷箇所①: ケーブル固定用の架台がばらけ、ステンレス防護管の固定が無い状態
高波浪時にステンレス防護管と共にケーブルが動揺する状態
損傷箇所②: 【風車~観測タワー側】鉄線鎧装が切れて無くなり、電力線が露出して損傷、光ケーブルも1条断線している状態
【風車~陸上側】鉄線鎧装が一部切れて無くなり、電力線の絶縁体が一部露出している状態

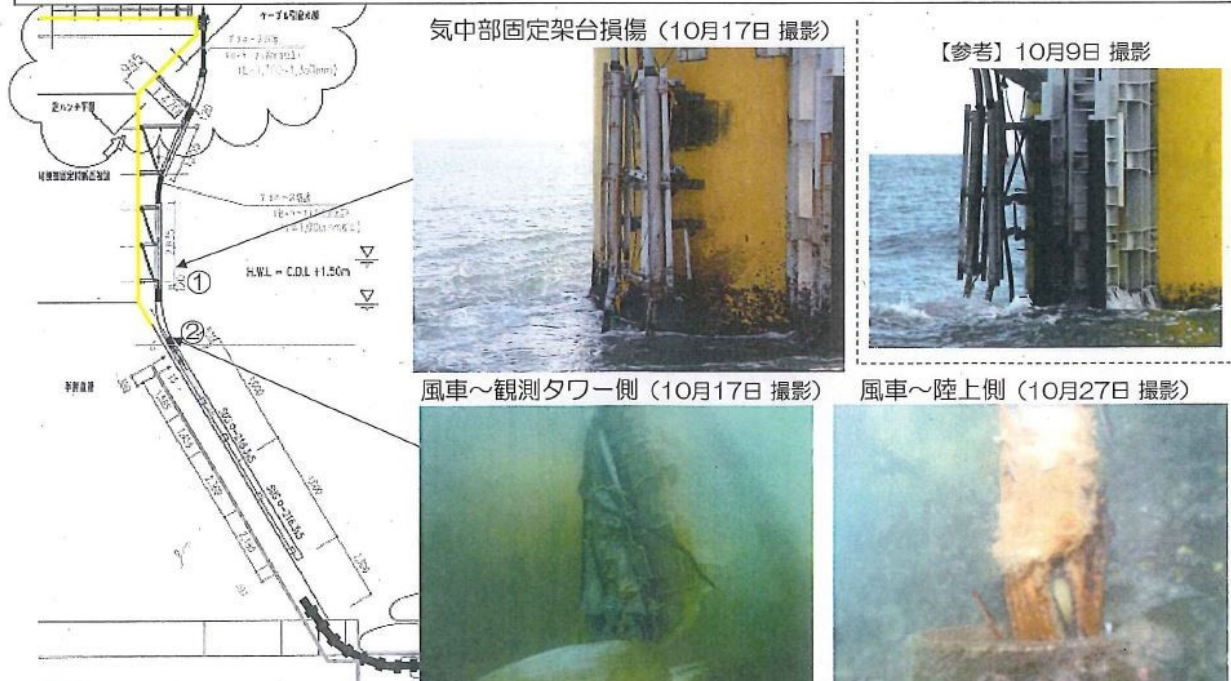


図 7.4-2 海面付近の電力ケーブルの損傷状況 (2014年10月9、17、27日点検)

当不具合の発生を受け、洋上風力発電等技術研究開発委員会の下に不具合対策ワーキングを設置し、原因の究明と対応策の検討を行った。調査の結果、事故の原因は以下のように考えられた。

- ①台風や大型低気圧によって、設計波高に近い砕波波力が頻繁に発生した。
- ②設計波高に近い砕波波力が、頻繁に固定架台に作用することによって締結部に繰り返し応力が発生し、それによってボルトに緩みが発生した。
- ③緩みが発生した状態でさらに繰り返し砕波波力を受け、ナットが外れボルトが抜ける箇所も発生し、さらに溶接部にも割れが発生した。
- ④これら固定架台の損傷により、ケーブル防護管の位置を適切に保持することが困難となり、海底ケーブルおよび海底ケーブル防護管が波浪によって動揺することになり、ケーソンに固定された海中部の防護管端部と海底ケーブルが繰り返し接触することで、最終的に海底ケーブルの破断に至った。

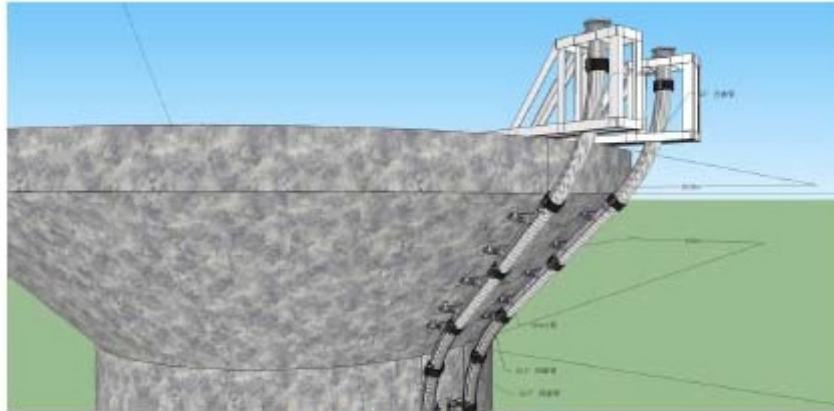
水深 10m 程度で砕波が発生するような場所に設置される洋上構造物においては、設計波力に近い砕波波力を様々な方向から頻繁に受けることに起因する繰り返し応力が発生する。そのため、当該箇所に普通ボルト継手を採用する場合には、このような大きな繰り返し応力によってボルトにゆるみが発生することを想定し、摩擦接合の適用および滑りに対する検討を行い、ボルトのゆるみを防止する対策を取る必要があることが分かった。

既存ケーブルの損傷原因が「架台を固定していたボルトのゆるみに起因するケーブル保護管の波浪中での動揺」であることから、復旧のため新たに設置する電力ケーブル保護管および固定架台（以後、新架台）に求められる性能は、「ケーブル保護管が波浪中でも動かないこと」に尽きる。

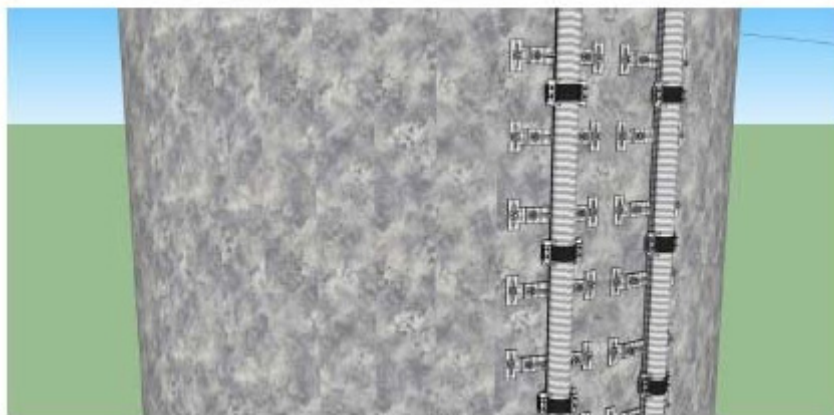
それを踏まえて、新たに設置する架台およびケーブル保護管の設計は下記のように行った。

- ・ケーブル保護管を一体化し、風車基礎に沿わせて固定することで、可動部となり得る部位を作らない構造を実現した。
- ・ボルト継手については、摩擦接合に基づいた設計を適用し、ボルトの径と数を増やすことにより、摩擦耐力を大幅に向上させた。その結果、ボルトがゆるむリスクを低減させた。
- ・ボルトのゆるみ防止として、ダブルナットに加えて HSE（ナット緩み止め金具）を使うことにより、仮にボルトの軸力低下が発生したとしても、ボルトが外れるリスクを低減。また、アクセスできない可能性のある洋上における二重保護を実現した。
- ・設計荷重をより精緻にかつ安全側に設定し、ケーブル保護管や架台など使用する部材については、腐食予備厚を差し引いて強度照査を行うことで、耐力を向上させた。

新架台の概念図を図 7.4-3、図 7.4-4 に示す。



躯体上部の線形概念図

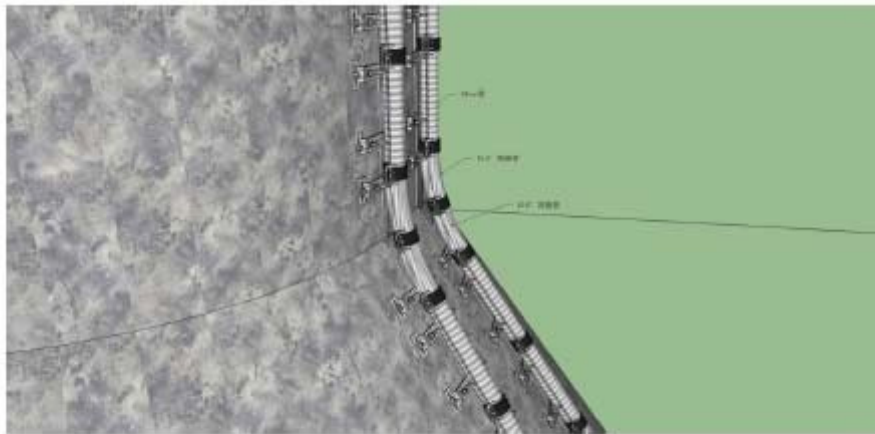


中間部線形

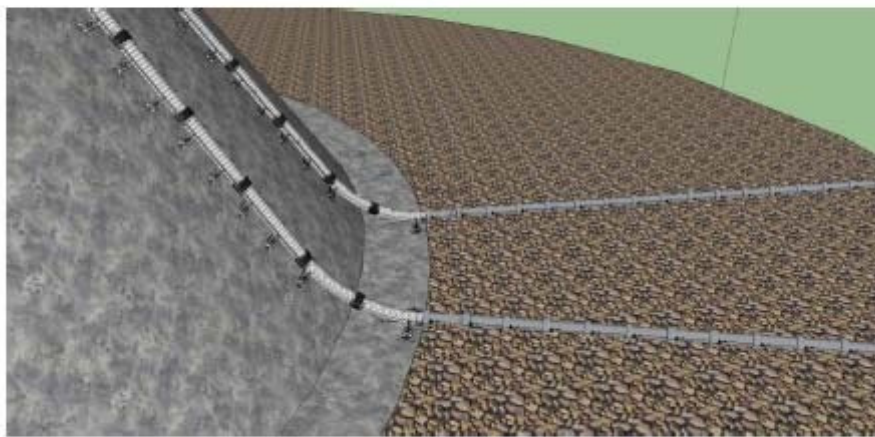


中間部取付状況

図 7.4-3a 新架台概念図



下部 R 部概念図



着底部線形

図 7.4-3b 新架台概念図

復旧工事終了後のケーブル保護管および固定架台の状況は、図 7.4-4 の通りである。



図 7.4-4 復旧工事終了後のケーブル保護管および固定架台の状況

8 撤去

銚子沖洋上風力発電実証研究施設は現在稼働中であるため、本章では銚子沖 FS 時に検討された撤去方法を紹介する。なお、本方法はあくまで FS 時に検討されたものであり、技術の進歩等により撤去方法は当然変わらうため、運転終了後に本方法で撤去が行われるわけではないことに留意が必要である。FS では以下のような撤去方法が検討された。

①風車の撤去解体

作業用プラットフォームおよび風車用特殊吊り治具を中型 SEP 船に搭載したクローラクレーンにてケーソンおよび風車に取り付ける。架設時と同じく、大型クレーン船で動揺軽減工法にて風車を一括して吊り上げる。そのまま吊曳航し、設置時に使用した岸壁上の基礎に設置する。設置された風車は大型クレーンにて分解搬出する。

②観測塔の撤去解体

中型 SEP 船に 400t 吊クラスのクローラクレーンないしはトラッククレーンを搭載し、観測塔をブロック状に解体する。解体したブロックは、2 隻目の中型 SEP に積み込み、岸壁まで運搬する。岸壁上で部材まで解体し、スクラップ処分する。

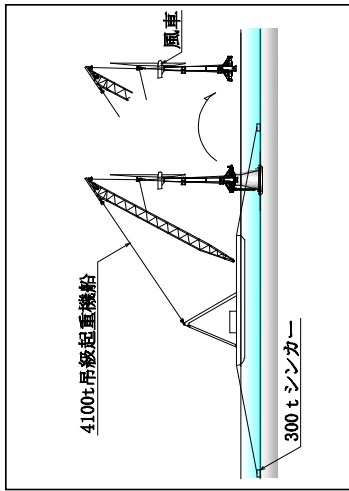
③中詰め材の撤去

風車および観測塔の撤去後に、ケーソンの蓋コンクリートをはつり取る。ケーソンの開口径は 2.4m と小さく、中詰め材は、動揺のある海域で直接ガット船などでの掘削ができない。したがって、中型 SEP 船に 50 t クラスのクローラクレーンを搭載し、クラムシェルで中詰め材を掘削し、SEP 船上に仮置きする。仮置きした中詰め材は、ガット船に積み込み、岸壁まで運搬し、産廃処分する。また、クローラクレーンにてケーソン周りのフィルターユニットも同様に撤去処分する。

④ケーソンの撤去解体

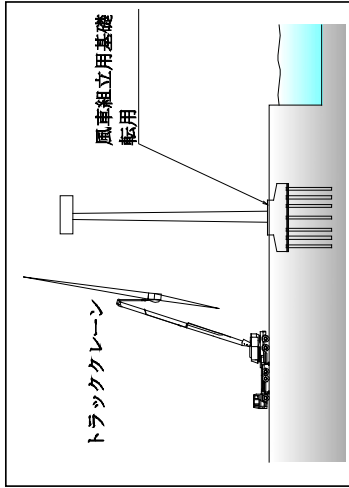
中詰め材およびフィルターユニットを撤去したケーソンを、4,100t 吊クレーン船で吊り上げ、4,500t 台船に積み込む。クレーン船および台船を岸壁まで曳航し、4,100t クレーン船で揚陸する。揚陸されたケーソンは、大型ブレイカー等により解体し、ガラは産廃処分する。

1. 風車撤去



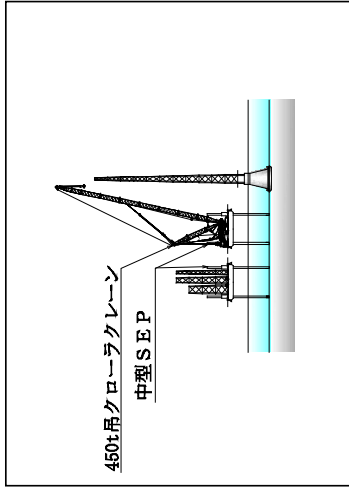
4100t吊級起重機船で、動揺軽減工法にて風車を一括して吊り上げる。

2. 風車解体



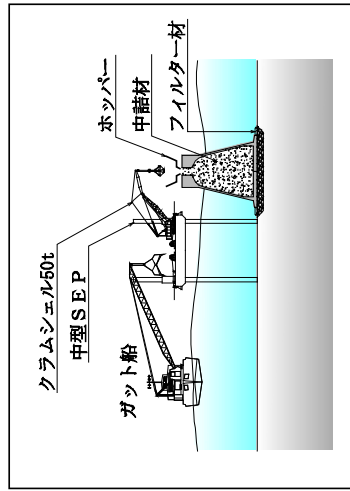
岸壁上の基礎に設置された風車は、大型クレーンにて分解搬出する。

3. 観測塔撤去・解体



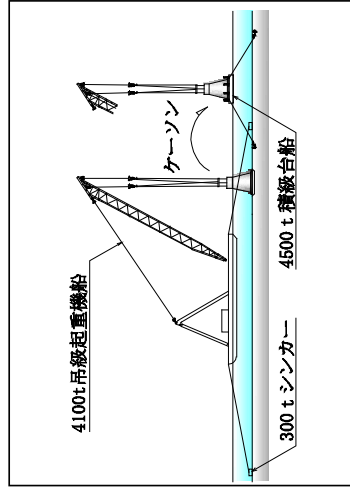
クローラクレーンで、観測塔をブロック状に解体し、2隻目の中型S.E.P.に積み込み、岸壁まで運搬する。岸壁上で部材まで解体し、スクラップ処分する。

4. 中詰め材撤去・処分



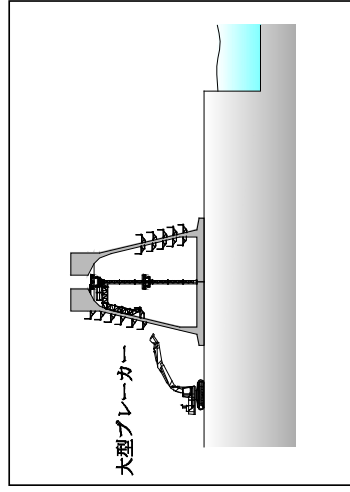
中型S.E.P.上のクラムシェルで中詰め材を掘削し、S.E.P.上に仮置きし、ガット船で運搬し、産廃処分する。

5. ケーソン撤去



4100 t 吊級起重機船で吊り上げ、4500 t 台船に積み込む。

6. ケーソン解体



掃蕩されたケーソンは大型プレーカー等により解体し、ガラスは産廃処分する。

図 8.1 撤去の施工フロー

⑤海底ケーブル撤去工事の方法

海底ケーブルの撤去は、布設と同等の船舶により、船の上にケーブルを巻き上げることにより行うのが一般的な工法である。撤去船には、布設船と同等の設備（ターンテーブルやケーブル巻上機）を装備する必要がある。

なお、埋設されているケーブルについては、海底面を掘り起こす力が加わるため、ケーブル巻上機（キャタピラ式）には十分な能力が必要となる。撤去時のケーブル張力は、過去の実績から埋設深さが1m程度の場合で2～3t程度と思われるが、実際の撤去の際にはより詳細に検討する必要がある。

⑥連系設備撤去工事の方法

架空送電線路の撤去については、設置時と同様に、高所作業車により架線・装柱材撤去後、人力にて掘削を行い建柱車により抜柱する。傾斜部については、架線・装柱材撤去後に人力にてパンザマストを撤去する。

地中埋設送電線路については、ケーブル撤去後管路退去するか、エアモルタル等を管路に充填する。

変電機器の撤去については、設置時と同様に、100t クラスクレーンにて連系変圧器撤去作業を実施する。

コンクリート基礎撤去工事については、大型ブレーカーを使用してコンクリートを径30cm程度に現地で破碎し、産業廃棄物として処理する。杭基礎についても大型ブレーカーにて破碎する。杭の撤去範囲については、工法の検討や地権者との協議が必要である。

9 環境影響評価

銚子沖実証研究施設の設置にあたっては、風力発電の法アセス化（環境影響評価法に基づく環境アセスメントの対象化）以前であり、千葉県環境影響評価条例の対象外であることから、千葉県・銚子市役所・銚子市漁協等地元関係機関との協議を基に、工事等事前段階の環境調査を実施し、工事中・供用時には事後調査を実施している。調査の詳細は「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）」（NEDO, 2017年3月）を参照されたい。

なお、環境影響評価を行うことが義務付けられている第1種事業の規模要件は出力10,000kW以上、環境影響評価の必要性について個別に判断される第2種事業の規模要件は出力7,500kW以上10,000kW未満であるが、当実証研究施設の出力は2,400kWである。そのため、当施設は規模要件により2012年の環境影響評価法施行令の改正以降でも法アセスの対象外となる。

10 参考文献

- Booij N.R., Ris R.C. and Holthuijsen L.H. (1999) : A third-generation wave model for coastal regions 1. Model description and validation. *Journal of Geophysical Research*, Vol.104, No.C4, pp7649-7666.
- 千葉県 (2000) : 千葉県の自然誌 本編7 千葉県の動物2, (財) 千葉県史料研究財団.
- 千葉県 (2003) : 千葉東沿岸海岸保全基本計画.
- 土木学会 (2007) : 風力発電設備支持物構造設計指針・同解説[2007年版].
- 合田良実、永井康平 (1974) : 波浪の統計的性質に関する調査・解析. 港湾空港技術研究所報告, Vol.13, No.1, pp3-38.
- Gomes L. and Vickery B.J. (1977) : On the prediction of extreme wind speeds from the parent distribution. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, pp21-36.
- 石原孟、山口敦、藤野陽三 (2003) : 複雑地形における局所風況の数値予測と大型風洞実験による検証. 土木学会論文集, No.731/I-63, pp195-211.
- 海上保安庁水路部 (1984) : 海底地形地質調査報告書 (犬吠埼) ,5万分の1沿岸の海の基本図.
- 海上保安庁 (2006) : 航路誌.
- 関東農政局 (2004) : 千葉農林水産統計年報 総合編 (平成14~15年) .
- 関東農政局 (2005) : 千葉農林水産統計年報 総合編 (平成15~16年) .
- 関東農政局 (2006) : 千葉農林水産統計年報 総合編 (平成16~17年) .
- 関東農政局 (2007) : 千葉農林水産統計年報 総合編 (平成17~18年) .
- 関東農政局 (2008) : 千葉農林水産統計年報 総合編 (平成18~19年) .
- 国土交通省、国土技術政策総合研究所、港湾空港技術研究所 : 全国港湾海洋波浪情報網 (NOWPHAS : ナウファス) . <http://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/index.html>, アクセス 2017年3月2日.
- 桑原和之、三沢博志、箕輪義隆、野口一誠、繁倉 崇、奴賀俊光、高木 武 (2006) : 銚子市鳥類目録. 我孫子市鳥の博物館調査研究報告第14巻, pp.71-147.
- 松井正宏、孟岩、日比一喜 (1996) : 台風シミュレーションによる年最大風速の推定. 第14回風工学シンポジウム論文集, pp.97-102.
- 孟岩、松井正宏、日比一喜 (1996) : 中立時の大気境界層における強風の鉛直分布性質 その2 台風時の強風. 日本風工学会論文集, No.66, pp.3-14.
- NEDO (2009) : 平成20年度 洋上風力発電実証研究F/S調査 報告書.
- NEDO (2017) : 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 (銚子沖) 報告書.
- NEDO (2017) : 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 洋上風力発電システム実証研究 (銚子沖) 報告書.
- 日本道路協会 (2002) : 道路橋標準示方書・同解説.
- 日本海洋学会編 (1990) : 続・日本全国沿岸海洋誌, 東海大学出版会.
- 日本海洋学会編 (1990) : 続・日本全国沿岸海洋誌一解説編・増補編一, 東海大学出版会.
- 日本港湾協会 (2007) : 港湾の施設の技術上の基準・同解説.
- Pielke R.A., Cotton W.R., Walko R.L., Tremback C.J., Lyons W.A., Grasso L.D., Nicholls M.E.,

Moran,M.D.,Welsey D.A.,Lee T.J. and Copeland J.H. (1992) : A Comprehensive meteorological modeling system-RAMS. Meteorology and Atmospheric Physics, Vol.49,pp69-91.

- ・資源エネルギー庁 省エネルギー・新エネルギー部 (2014) : 洋上風力の調達価格に係る研究会
取りまとめ報告書.
- ・田村弘二、鶴岡繁、高木仁平、増田宣雄 (1963) : 銚子地方の魚類 第2報.千葉大学銚子臨海研
究分室研究報告第5号.
- ・東京電力 (2007) : 漁業権等及び海洋構造物設置に伴う海洋生物の生態変化に関する調査業務
委託報告書.
- ・辻本勝、石田茂資(2005) : 日本近海の波と風の統計的性質.日本船舶海洋工学論文集 第2号,19-27.
- ・山口敦、石原孟、藤野陽三 (2006) : 力学統計局所化による新しい風況予測手法の提案と実測
による検証.土木学会論文集A,Vol.62,1.