

着床式洋上風力発電導入ガイドブック 別冊
北九州市沖洋上風力発電実証研究施設導入事例

2018年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、北九州市沖洋上風力発電実証研究施設の事例をとりまとめた。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。

- ・「洋上風力発電技術開発 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（北九州市沖） 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（北九州市沖） 報告書」(NEDO, 2017)

※F/S はフィージビリティ・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	6
(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	20
2.3 利害関係者協議	21
3 海域・気象・海象調査	22
3.1 風況	22
(1) 洋上の風況の推定	22
(2) 洋上の風況の観測	33
3.2 波浪	38
(1) 波浪の推定	38
(2) 波浪の観測	57
3.3 海潮流	61
(1) 海潮流の推定	61
(2) 海潮流の観測	61
3.4 海底地形・土質	63
(1) 海底地形調査	63
(2) 土質調査	64
4 基本設計	70
4.1 風車設置点の決定	70
4.2 風車の仕様	71
4.3 支持構造物の選定	72
4.4 計画段階のコストと実際のコスト	75
5 実施設計	77
5.1 設備設計	77
(1) 支持物設計	77
(2) 風車設計	82
(3) 送変電設備設計	89
5.2 工事設計	92
(1) 電気工事設計	92
(2) 土木・建築工事設計	92

5.3	工事計画	93
(1)	工事工程	93
(2)	風車の施工方法	95
(3)	海底ケーブルの施工方法	101
6	建設工事	103
6.1	基礎工事	103
6.2	観測タワーの設置工事	106
6.3	風車の設置工事	109
6.4	海底ケーブルの布設	112
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	117
7.2	運転・保守の結果	119
(1)	運転の実績	119
(2)	保守の実績	120
7.3	洋上風車のアクセスに係る検討	122
7.4	運転・保守から確認された課題	123
(1)	ケーブルの不具合	123
(2)	ピッチ通信エラー	124
(3)	主要変圧器中のアセチレンガスの増加	124
8	撤去	126
9	環境影響評価	134
10	参考文献	135

1 実施体制

北九州市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。洋上風況観測システムについては NEDO から電源開発株式会社（J Power）への業務委託であり、洋上風力発電システムについては NEDO と電源開発との共同研究であった。

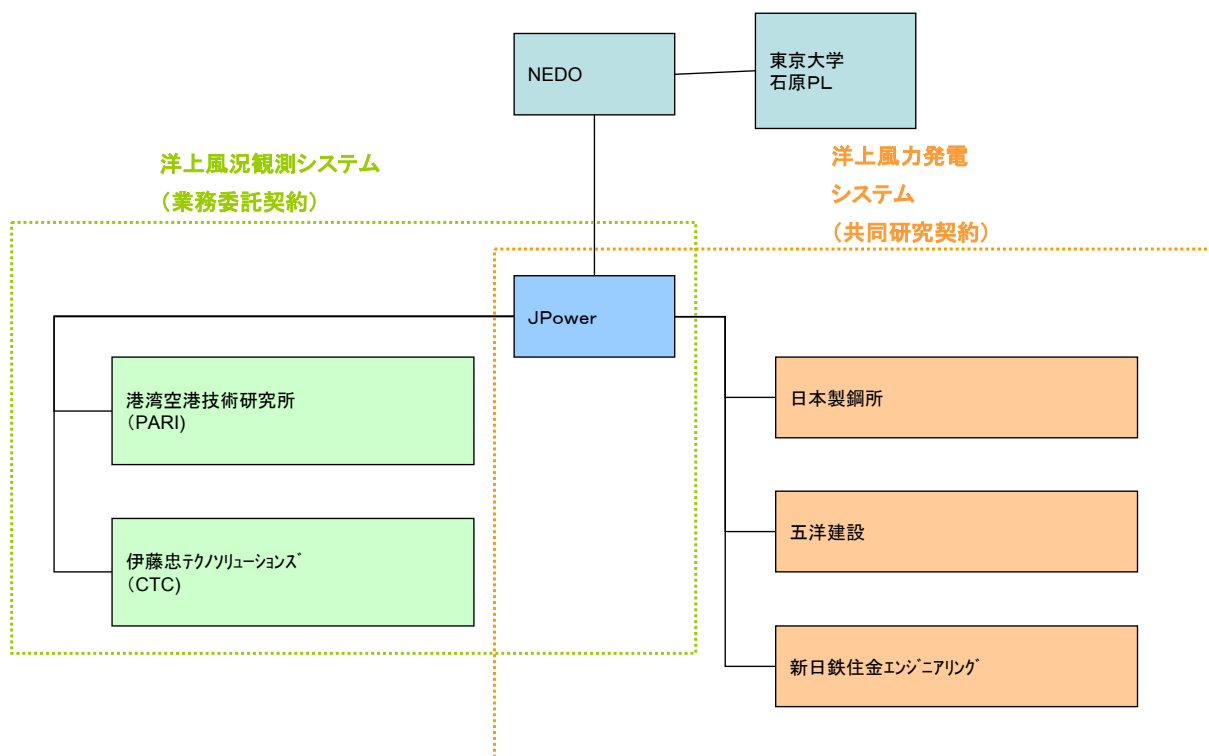


図 1-1 北九州市沖における洋上風力発電実証研究の実施体制

2 立地環境調査

本実証研究では候補海域として、福岡県北九州市沖響灘を選定した（図2-1）。調査当初における実証研究候補海域の選定理由は、以下の通りである。

- ・社会的条件に関しては、実証研究候補海域は自然公園（玄海国定公園）区域外で、北九州市で定める環境影響評価条例および景観法の対象外であり、また航空法に基づく制限区域でないこと。
- ・系統連系接続に関しては、実証研究候補海域の沿岸付近に九州電力若松変電所があること。
- ・北九州市沖における実証研究の実施にあたり、実証研究候補海域を決定する上で事業者である電源開発と漁協関係者が協議を重ねることができたこと。

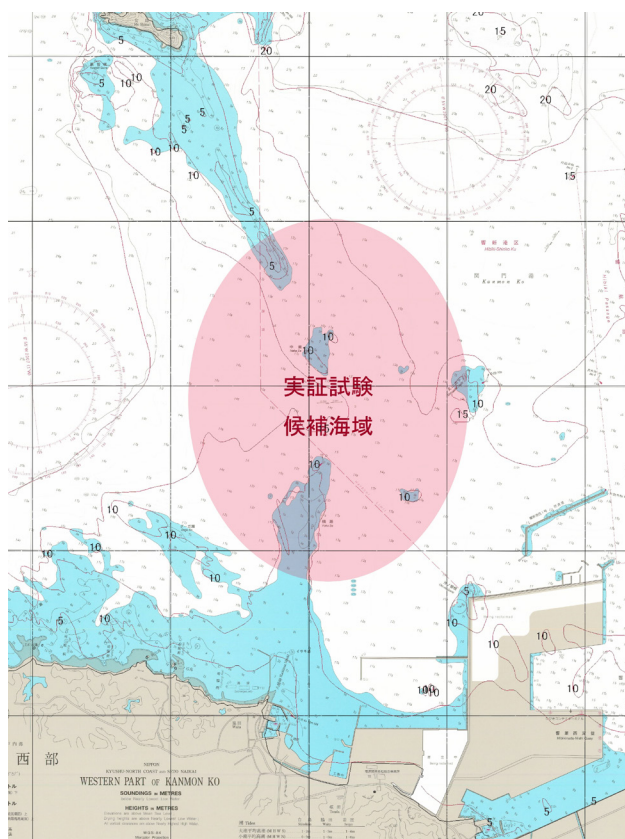


図 2-1 実証研究候補海域位置図

(出典：海図 W1267 関門港西部、海上保安庁)

実証研究候補海域は、北九州港港湾区域内で響灘西地区にあたり、浅瀬であり風況が良好である。近傍には、風力発電所「エヌエス ウインドパワーひびき」（1.5MW×10基、2003年3月運転開始）、脇之浦・脇田両漁港などがある。

2.1 自然条件

(1) 気象

1) 風況の概況

実証研究候補海域の風況の概況を把握するために、NEDO および CTC（伊藤忠テクノソリューションズ）が発行している風況マップを調べた。図 2.1-1 および図 2.1-2 に NEDO、CTC の年間平均風速マップを示す。NEDO の局所風況マップによると、地上高 70m での実証研究候補海域の年間平均風速は約 7.0m/s、CTC の WINPAS では、地上高 80m で約 6.4m/s となっていた。両者のシミュレーション結果は、いずれも気象庁 GPV データを入力値として算出した推定値であるが、概ね 6.4～7.0m/s 程度と推定することができた。

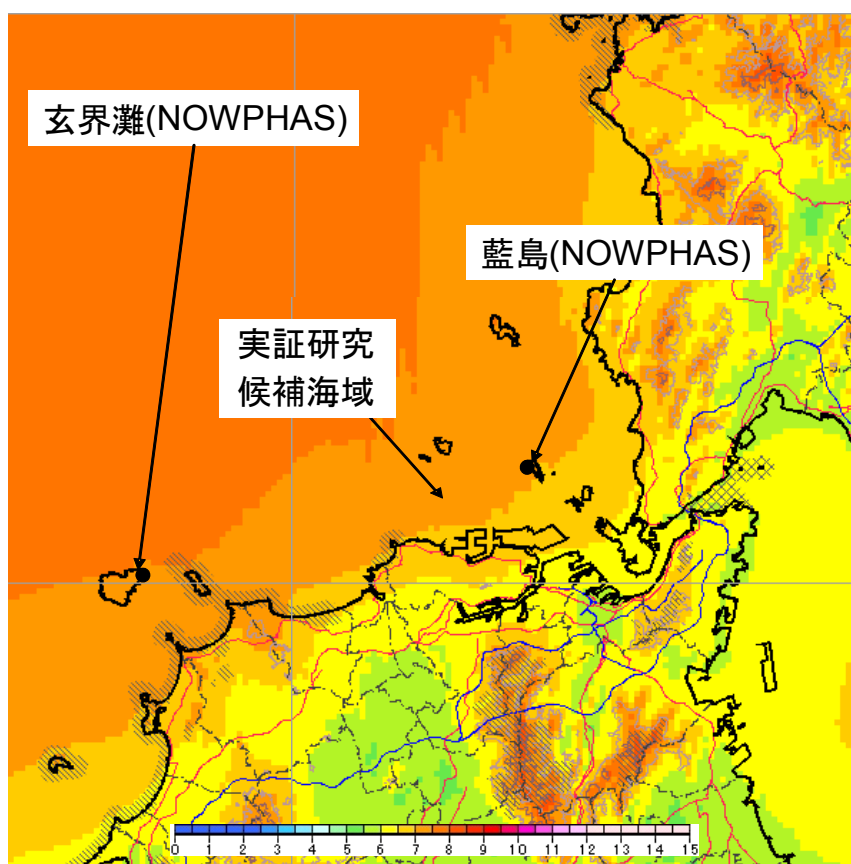


図 2.1-1 NEDO 局所風況マップにおける地上高 70m の年間平均風速 (水平格子間隔 : 500m)
(出典 : NEDO 局所風況マップ : <http://app2.infoc.nedo.go.jp/nedo/index.html> を編集)

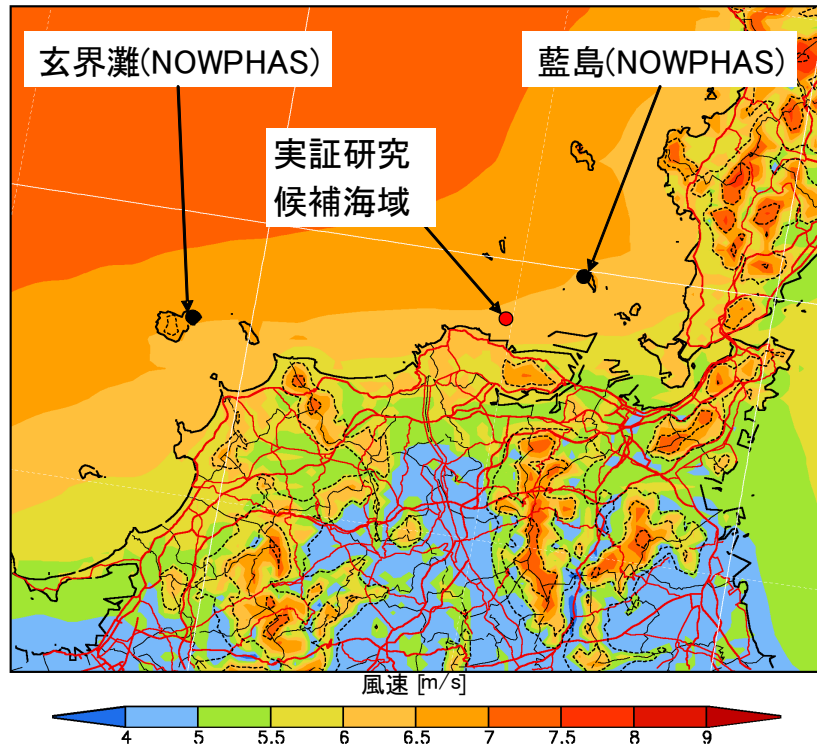


図 2.1-2 CTC WINPAS による年間平均風速マップ (2000 年)
地上高 80m (水平格子間隔 : 約 1km)

図 2.1-3 および図 2.1-4 に、NEDO および CTC WINPAS より取得した実証研究候補海域近傍における年間の風配図を示す。両データとも東南東方向の風速が卓越し、強風帯の発生頻度は北西方向を中心とする範囲で発生頻度が高かった。したがって、陸風 (南) よりも海風 (西から北) の風向時の方が、風力発電に適した風速が多いことが推測された。

経度：130° 48' 0"
 緯度：33° 59' 36"
 地上高：70m

年平均風速：7.0m/s

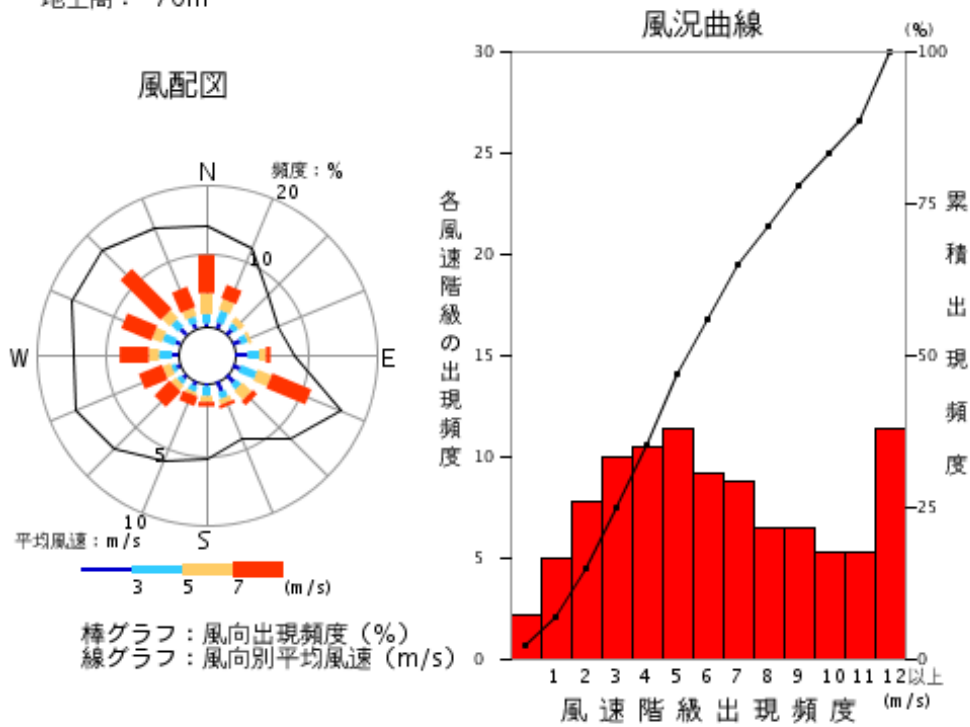


図 2.1-3 実証研究候補海域近傍における年間風配図および風況曲線 地上高 70m

(出典：NEDO 局所風況マップ：http://app2.infoc.nedo.go.jp/nedo/index.html より取得)

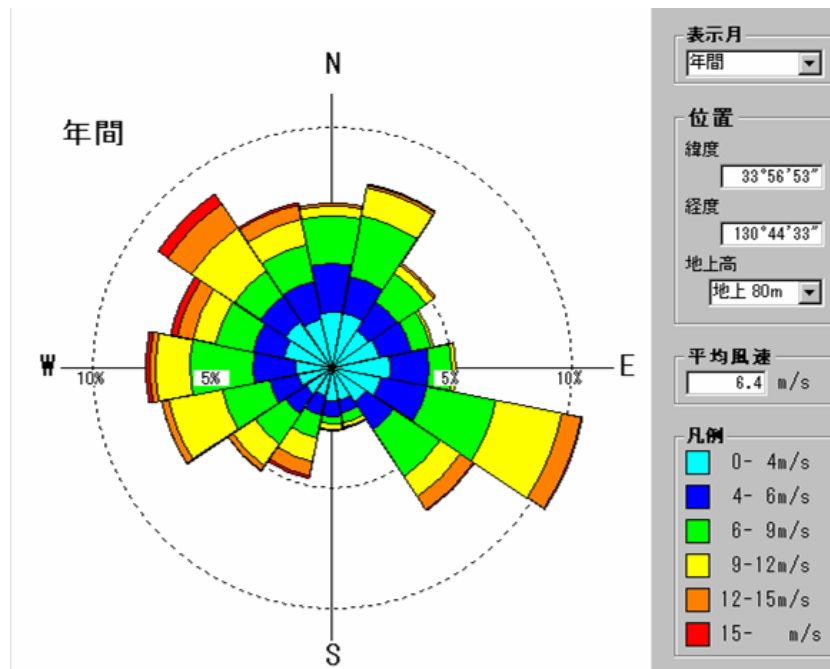


図 2.1-4 実証研究候補海域近傍における年間風配図 地上高 80m

(出典：CTC WINPAS より取得)

2) 落雷の概況

実証研究候補海域近傍にある下関気象観測所の、落雷日数のデータを調べた。下関における1970年から2008年までの落雷日数の経年変動を図2.1-5に示す。落雷日数は年によりばらつきがあり、10日から28日の範囲であった。実証研究候補海域は雷多発地域ではないものの、風力発電が集積する東北地方太平洋側等と比べると落雷頻度は高かった。また、洋上に設置し陸上に比べて被雷しやすい構造物となるため、相応の雷対策をする必要がある。

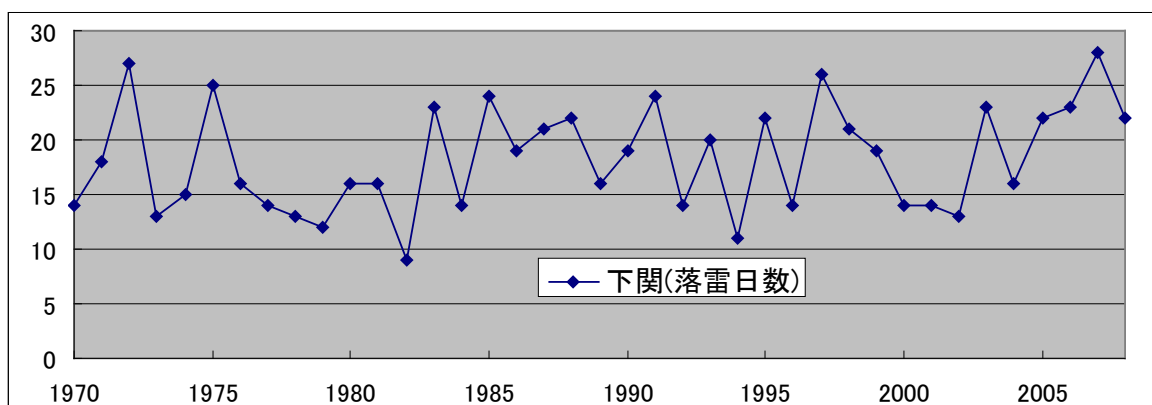


図 2.1-5 下関における落雷日数

3) 台風、竜巻の概況

気象庁の過去の統計記録では、2008年の時点で九州北部地方に接近した台風は年間平均で3.2回、九州地方への上陸数は年間平均で1.2回であった。

竜巻はこれまで、福岡県洋上において1951年からの観測開始以来、2008年の時点までに2回発生している。発生原因としては、気圧の谷・局地性じょう乱、寒冷前線とされているが、突風状況等の詳細な風の情報は得られていない。

(2) 海象

1) 海底地形・水深、底質

①海底地形・水深

関係各所との事前協議（本別冊2.3参照）に基づき、洋上風力発電設備の設置候補位置（以下、候補位置と表記する）を選定した。選定結果を図2.1-6、図2.1-7に示す。

図2.1-7に示す通り、候補位置の水深はD.L.-13~14m（D.L.は基本水準面）であるため、設計に用いる風力発電設備の設置水深を、施工時の地表面の緩みや洗掘を考慮して保守側にD.L.-14mとした。西側の横瀬からは数100m離れており、候補位置周辺における水深の変化は小さく、比較的平坦であると予想された。なお最終的な設置位置については、海上ボーリング結果を考慮して判断するため、本設置水深は設計用の暫定値である。

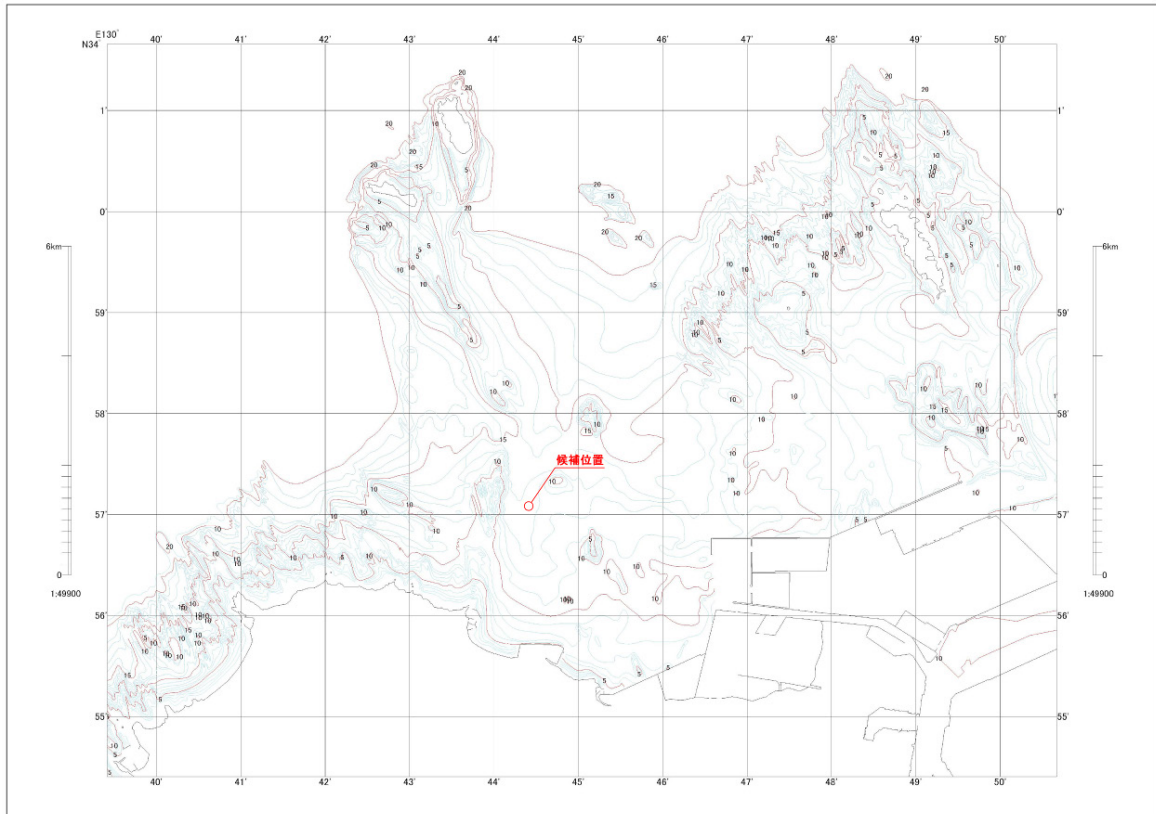


図 2.1-6 風力発電設備 設置候補位置

(出典：海底地形デジタルデータ M7000 シリーズ M7014 Ver2.0 対馬海峡 世界測地系，日本水路協会，2008 年 5 月 に加筆)



図 2.1-7 風力発電設備 設置候補位置の拡大図

次に、海底地質構造図を用いて支持層深度の推定を行った。図 2.1-8 に海底地質構造図および候補位置を示す。図 2.1-9 に候補位置周辺の堆積層厚（単位：m）と底質を網掛け表記で示す。候補位置周辺の水深の浅い箇所は岩が露頭（「R」と表記）しており、候補位置を含む広範囲に沖積層（斜線で表記）として砂、礫、貝殻（各々「S」「G」「Sh」と表記）が堆積している。また採取底質からは、粒径 2mm 程度を中心に均一性が比較的高い灰褐色の礫混り砂であ

ることが確認されている（中央粒径値-0.08、淘汰度 1.59：海上保安庁水路部，1983 より）。

候補位置には更新統が広く分布しているものの、(図 2.1-8 右上の縦断図のように) 下層に白亜紀の関門層群が堆積している可能性もある。ここでは、いずれの場合であっても岩盤として取り扱うこととした。

なお、設置位置は海上ボーリングおよび音波探査の結果に応じて、若干ずらすことができる。

したがって、既存資料調査での支持層深度すなわち堆積層厚については、図 2.1-9 および図 2.1-10 より 11m と評価し、この精度を安全側に 1m 見込み、 $11\text{m}+1\text{m}=12\text{m}$ とした。

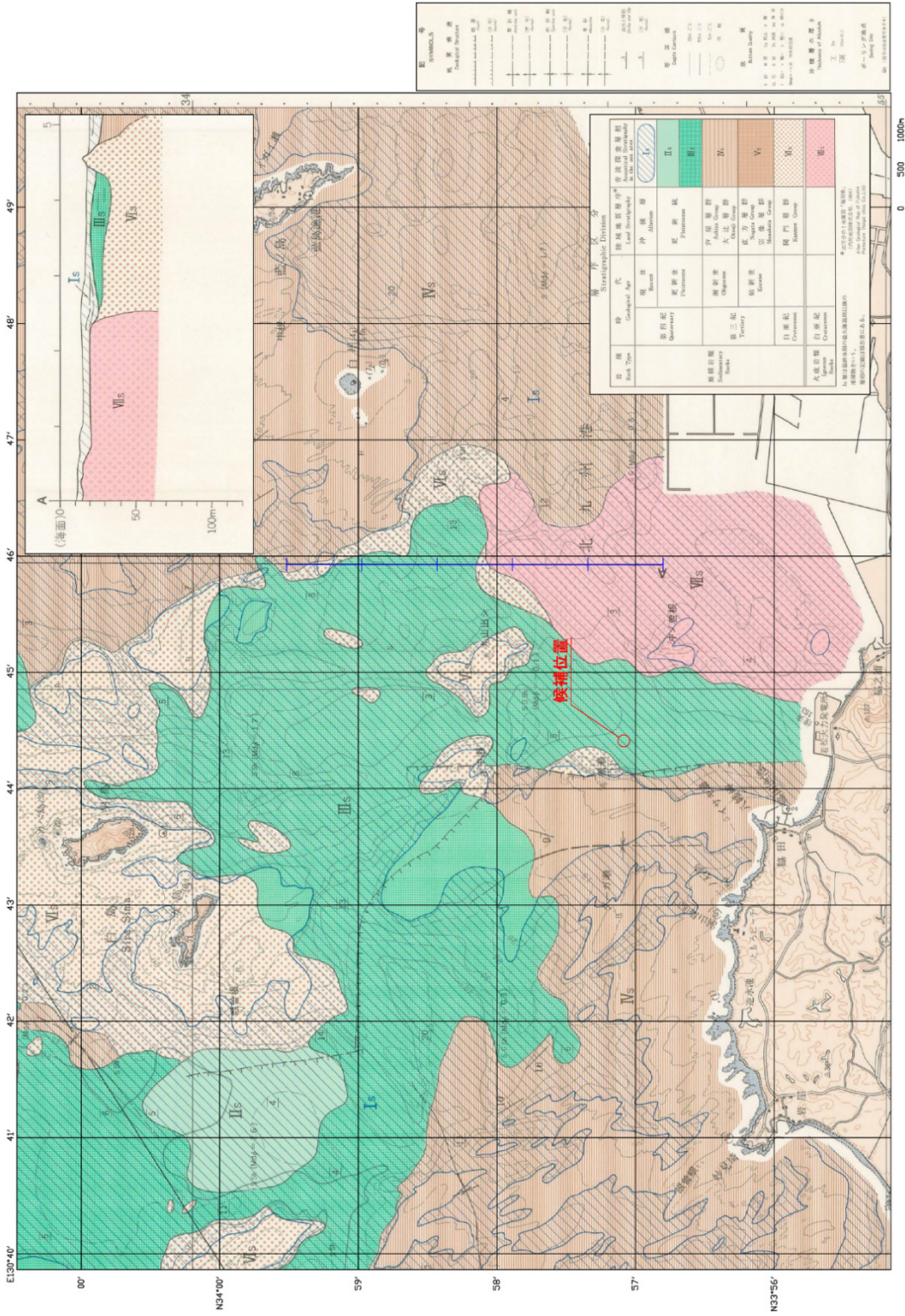


図 2.1-8 地質構造範囲および設置候補位置 (海上保安庁水路部, 1983 (に加筆))

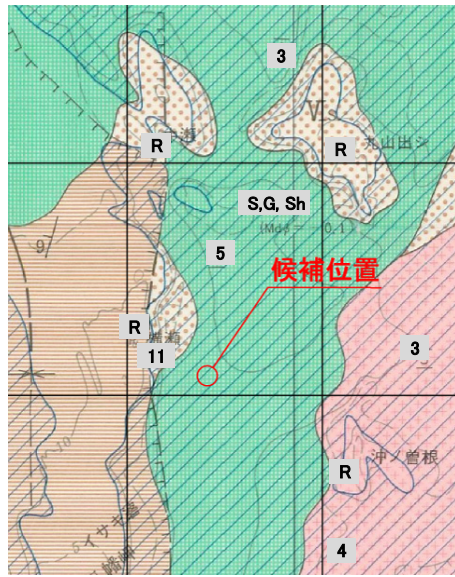


図 2.1-9 堆積層厚と底質

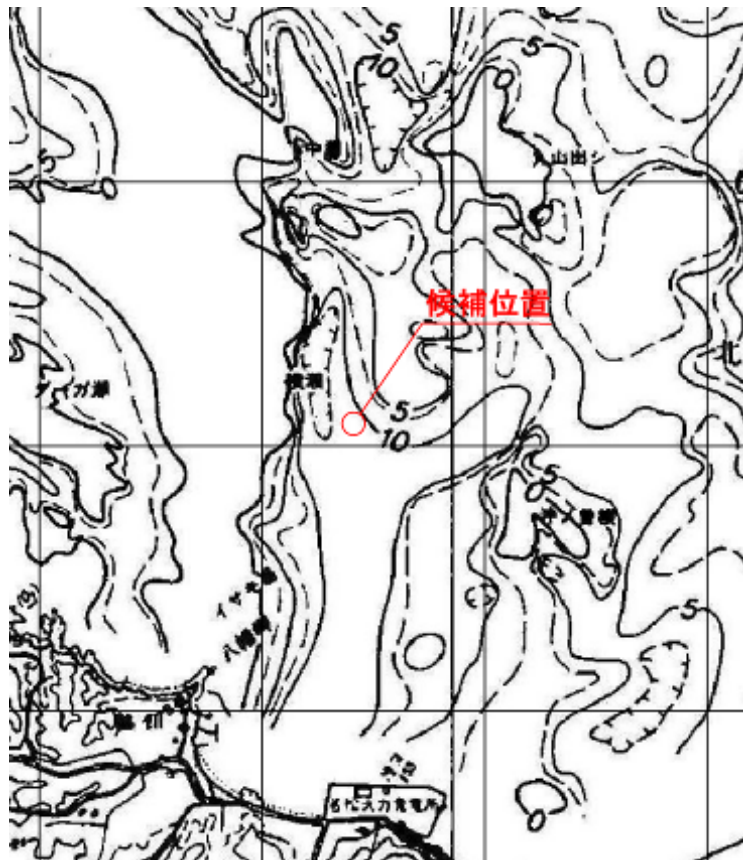


図 2.1-10 堆積層等層厚線図 (海上保安庁水路部, 1983 に加筆)

②底質

図 2.1-11 に示す海上保安庁が実施したボーリング調査位置 (No.1~4) と、図 2.1-12 に示した地質構造の対比を行った。すると、白島近傍のボーリング位置 (No.1) と候補位置の地質構造が比較的類似していることが分かった。両者はともに 10m 以上の堆積層 (沖積層) が上層、更新統および関門層群が下層である可能性があり、海底地形の状況 (図 2.1-8 右上の縦断図を参照) から判断して、白島南側より候補位置まで関門層群がつながっているものと考えられる。

図 2.1-12 に示す No.1 の柱状図より、堆積層 (沖積層) は N 値 10 以上の砂、砂礫による互層 (一部、粘性土あり) となっており、堆積層の下には N 値 50 以上の安山岩溶岩および安山岩質火山砕屑岩が確認されているため、候補位置においても同様の地盤構成が推察される。

しかしながら、候補位置西側の直方 (宗像) 層群 [図 2.1-12、No.2 柱状図より頁岩と推察]、もしくは東側の火成岩類 [電源開発 (株) 若松総合事業所の工事実績より花崗岩と推察] が堆積層の下に露頭している可能性も否定できない。

したがって、候補位置の地盤物性は安全側の設定となるように、堆積層を N=10 の砂、砂礫と評価し、堆積層の下は岩種を特定せず N=50 の岩盤 (岩種不明) とした。

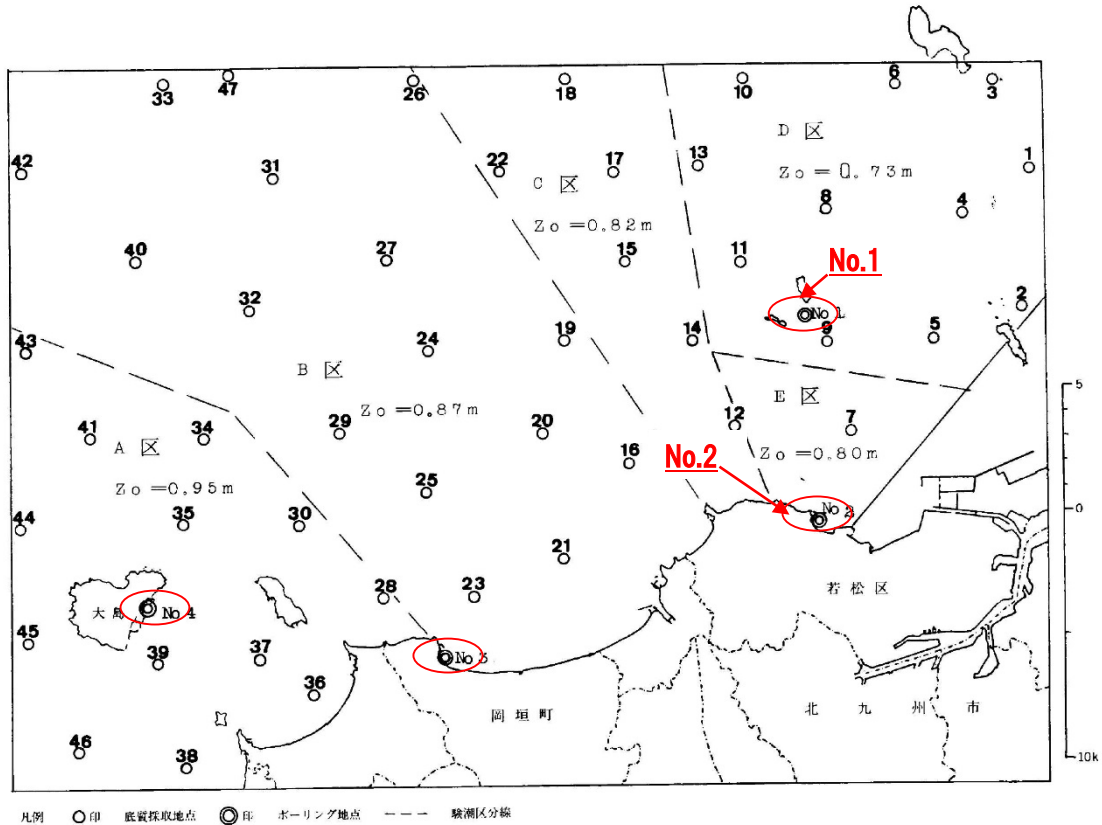


図 2.1-11 ボーリング調査位置 (海上保安庁水路部, 1983 に加筆)

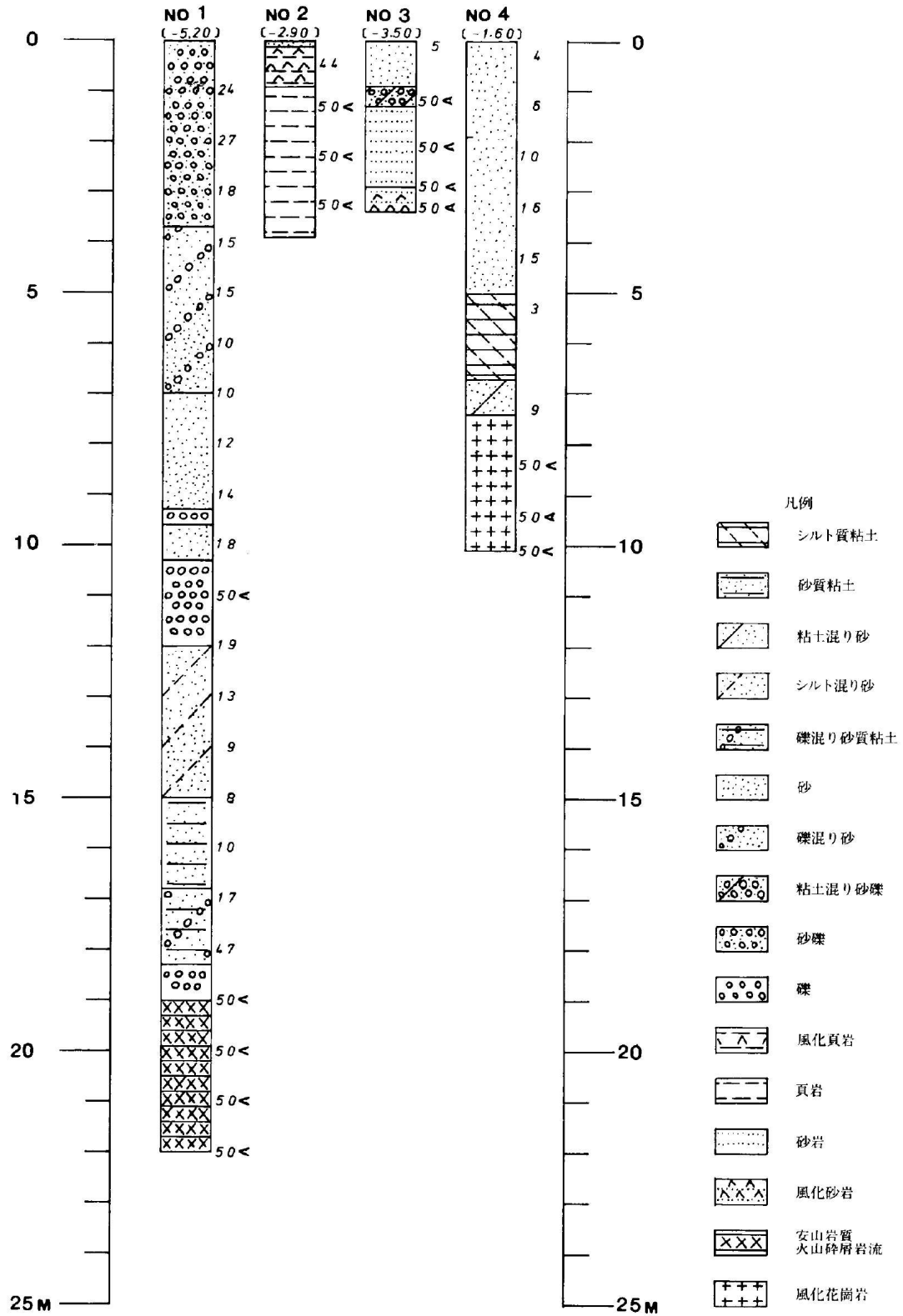


図 2.1-12 柱状図 (No. 1 : 白島近傍、No. 2 : 脇田漁港近傍) (海上保安庁水路部, 1983)

2) 波浪、海潮流

①波浪

波浪の概況を把握するため、NOWPHAS（ナウファス）のデータを調べた。永井（2002）には、NOWPHAS（ナウファス）藍島・玄界灘における高波一覧が示されていた。表 2.1-1 より、夏場は台風によって、冬場は日本海低気圧や西高東低の冬型気圧配置によって異常波浪が来襲することがわかる。なお、1987年2月に発生した二つ玉低気圧および冬型気圧配置に伴った異常波浪では、白島石油備蓄基地の防波堤の一部が被災するなどの甚大な被害をもたらした。

表2.1-1 高波一覧（永井，2002）

(a) NOWPHAS 藍島

表-9.17.1 高波一覧表（藍島，1975年～1999年（25ヵ年統計））

順位	発生期間	最大有義波の起時	有義波		最高波		気象要因
			波高(m)	周期(s)	波高(m)	周期(s)	
1	87年2月2日20時 - 87年2月4日14時	87年2月3日18時	5.61	12.1	9.39	14.4	二つ玉低気圧及び冬型気圧配置
2	91年9月27日22時 - 91年9月28日6時	91年9月27日22時	5.44	10.8	7.82	11.9	台風9119号
3	80年12月23日10時 - 80年12月25日4時	80年12月24日18時	4.28	9.2	6.67	6.7	二つ玉低気圧及び冬型気圧配置
4	80年9月10日18時 - 80年9月12日12時	80年9月11日18時	4.23	9.2	5.79	10.2	台風8013号
5	92年1月14日4時 - 92年1月14日20時	92年1月14日8時	3.80	9.1	6.11	10.1	冬型気圧配置
6	88年11月28日6時 - 88年11月29日16時	88年11月28日22時	3.77	8.9	5.40	6.9	日本海低気圧及び冬型気圧配置
7	94年9月29日8時 - 94年9月30日10時	94年9月29日20時	3.68	8.8	5.36	9.3	台風9426号
8	83年2月18日2時 - 83年2月20日22時	83年2月18日16時	3.67	7.8	6.01	6.7	二つ玉低気圧
9	95年11月7日20時 - 95年11月9日10時	95年11月8日2時	3.64	8.0	6.34	7.2	冬型気圧配置
10	91年2月15日18時 - 91年2月18日0時	91年2月16日2時	3.54	8.3	5.72	7.3	二つ玉低気圧及び冬型気圧配置
11	82年4月9日4時 - 82年4月10日2時	82年4月9日16時	3.53	8.6	6.13	9.4	日本海低気圧
12	81年2月24日14時 - 81年2月27日10時	81年2月26日12時	3.51	7.3	6.05	8.1	冬型気圧配置
13	90年12月11日10時 - 90年12月12日8時	90年12月11日20時	3.48	9.1	5.32	11.3	日本海低気圧及び冬型気圧配置
14	90年12月26日2時 - 90年12月28日0時	90年12月26日20時	3.39	7.5	5.08	6.7	二つ玉低気圧及び冬型気圧配置
15	99年3月19日10時 - 99年3月20日12時	99年3月19日12時	3.38	8.2	5.37	8.2	南岸低気圧
16	96年12月22日14時 - 96年12月23日22時	96年12月22日20時	3.38	7.7	5.51	6.8	日本海低気圧及び冬型気圧配置
17	83年3月17日6時 - 83年3月18日14時	83年3月17日14時	3.36	7.8	5.37	8.1	二つ玉低気圧
18	86年12月18日20時 - 86年12月20日8時	86年12月19日22時	3.33	9.2	4.82	9.7	二つ玉低気圧及び冬型気圧配置
19	97年11月22日10時 - 97年11月23日0時	97年11月22日12時	3.32	8.7	5.63	8.2	二つ玉低気圧
20	98年2月8日2時 - 98年2月9日4時	98年2月8日12時	3.28	8.3	5.71	8.1	冬型気圧配置
21	80年10月25日12時 - 80年10月26日10時	80年10月25日18時	3.28	7.7	5.24	6.4	二つ玉低気圧及び冬型気圧配置
22	94年2月9日2時 - 94年2月10日12時	94年2月10日2時	3.27	8.5	6.34	10.7	二つ玉低気圧及び冬型気圧配置
23	91年9月14日12時 - 91年9月14日14時	91年9月14日12時	3.24	7.3	4.93	7.2	台風9117号
24	98年1月24日2時 - 98年1月24日20時	98年1月24日12時	3.22	7.5	4.44	7.6	冬型気圧配置
25	87年1月12日16時 - 87年1月14日8時	87年1月13日4時	3.20	7.5	4.95	9.6	二つ玉低気圧及び冬型気圧配置
26	84年3月21日4時 - 84年3月21日20時	84年3月21日10時	3.20	7.4	5.17	8.8	南岸低気圧及び冬型気圧配置
27	84年11月19日16時 - 84年11月20日20時	84年11月20日2時	3.17	8.0	5.91	7.8	南岸低気圧及び北高型気圧配置
28	91年12月27日14時 - 91年12月30日4時	91年12月28日14時	3.16	7.8	5.03	9.0	二つ玉低気圧及び冬型気圧配置
29	80年12月3日20時 - 80年12月5日10時	80年12月4日0時	3.12	7.6	5.00	8.2	日本海低気圧及び冬型気圧配置
30	96年11月30日6時 - 96年12月2日2時	96年12月1日12時	3.11	7.7	4.67	7.9	冬型気圧配置

(b) NOWPHAS 玄界灘

表-9.18.1 高波一覧表(玄界灘, 1983年~1988年(6ヵ年統計))

順位	発生期間	最大有義波の起時	有義波		最高波		気象要因
			波高(m)	周期(s)	波高(m)	周期(s)	
1	87年2月2日20時 - 87年2月5日12時	87年2月3日18時	7.72	12.3	11.52	13.5	二つ玉低気圧及び冬型気圧配置
2	85年4月11日6時 - 85年4月14日4時	85年4月12日20時	5.66	9.9	8.35	11.3	南岸低気圧
3	83年9月27日12時 - 83年9月29日14時	83年9月28日18時	5.62	10.7	9.26	11.0	台風8310号及び崩れの低気圧
4	84年11月19日10時 - 84年11月21日2時	84年11月20日0時	5.50	10.5	9.38	8.8	南岸低気圧及び北高型気圧配置
5	87年1月10日4時 - 87年1月14日20時	87年1月13日18時	4.79	11.1	8.08	9.1	冬型気圧配置
6	84年4月18日22時 - 84年4月21日16時	84年4月19日22時	4.59	10.1	6.48	10.3	南岸低気圧
7	87年11月27日16時 - 87年12月4日10時	87年11月27日18時	4.46	9.0	7.48	8.7	南岸低気圧及び冬型気圧配置
8	86年12月18日18時 - 86年12月22日12時	86年12月20日0時	4.45	9.9	6.55	10.5	二つ玉低気圧及び冬型気圧配置
9	87年12月6日4時 - 87年12月7日12時	87年12月6日14時	4.30	9.7	7.35	9.1	二つ玉低気圧及び冬型気圧配置
10	87年11月13日12時 - 87年11月15日6時	87年11月13日18時	4.24	8.9	6.78	9.5	冬型気圧配置
11	84年3月21日2時 - 84年3月22日8時	84年3月21日10時	4.24	8.9	6.33	5.9	南岸低気圧及び冬型気圧配置
12	85年12月14日0時 - 85年12月18日20時	85年12月17日22時	4.23	9.9	6.19	9.1	冬型気圧配置
13	84年11月15日18時 - 84年11月16日12時	84年11月16日0時	4.11	8.4	7.78	8.4	南岸低気圧
14	87年9月15日20時 - 87年9月18日18時	87年9月16日8時	3.97	8.2	6.58	7.5	台風8713号
15	86年10月22日8時 - 86年10月23日8時	86年10月22日14時	3.92	7.9	6.20	8.6	日本海低気圧及び冬型気圧配置
16	87年9月31日0時 - 87年9月1日4時	87年9月31日8時	3.63	7.6	5.99	5.7	台風8712号
17	84年2月17日22時 - 84年2月18日16時	84年2月18日2時	3.62	8.0	6.08	7.3	南岸低気圧及び冬型気圧配置
18	88年5月7日16時 - 88年5月9日2時	88年5月7日16時	3.57	7.7	5.83	7.3	南岸低気圧
19	87年3月7日0時 - 87年3月8日2時	87年3月7日16時	3.55	8.0	5.76	6.8	南岸低気圧
20	87年4月26日8時 - 87年4月27日4時	87年4月26日16時	3.51	7.6	5.23	6.9	南岸低気圧
21	83年9月21日22時 - 83年9月23日0時	83年9月22日4時	3.47	7.7	5.62	7.5	南岸低気圧
22	86年12月15日0時 - 86年12月16日14時	86年12月15日12時	3.42	8.9	6.45	9.1	南岸低気圧及び冬型気圧配置
23	85年5月29日4時 - 85年5月30日10時	85年5月29日20時	3.41	8.0	5.19	9.6	南岸低気圧
24	86年2月15日0時 - 86年2月16日18時	86年2月15日14時	3.36	7.3	4.94	7.2	南岸低気圧及び冬型気圧配置
25	86年3月22日22時 - 86年3月24日10時	86年3月23日12時	3.33	7.6	5.70	7.2	南岸低気圧及び冬型気圧配置
26	87年10月31日2時 - 87年11月1日10時	87年10月31日10時	3.28	8.2	4.29	10.4	日本海低気圧及び冬型気圧配置
27	83年11月16日16時 - 83年11月18日22時	83年11月17日14時	3.24	6.8	5.60	6.6	日本海低気圧及び冬型気圧配置
28	84年12月11日8時 - 84年12月13日8時	84年12月11日10時	3.19	7.8	4.13	7.1	日本海低気圧
29	86年12月28日0時 - 86年12月29日14時	86年12月28日20時	3.15	9.6	4.86	11.1	二つ玉低気圧及び冬型気圧配置
30	88年3月22日6時 - 88年3月23日4時	88年3月22日10時	3.12	7.5	4.21	9.5	南岸低気圧及び冬型気圧配置

②海潮流

海流の特性を、日本水産学会(1974)等の文献で確認した。実証研究候補海域の外洋には対馬海流がある。対馬海流は、九州西方沖に分布する黒潮系の水塊と、東シナ海の沿岸水が混ざり合った海水が対馬海峡を通過して日本海に流入する暖流である。その厚さは200m、海域によっては300mあるとも言われ、流速は流軸付近で毎秒50cm程度である。

潮位については、響灘検潮所の潮位データ(図2.1-13)を調べた。実証研究候補海域は日本海側に近いため、天文潮はさほど大きくない。また、実証研究候補海域は外洋に面しており、湾奥部のように風の吹き寄せ効果による高潮が頻繁に発生するような海域とは考え難い。例えば気象庁の記録を見ても、高潮等の異常潮位は頻繁に発生していない。したがって、設計潮位は既往最高潮位ではなく朔望平均満潮面 H.W.L.とし、響灘検潮所における潮位観測結果より、以下の通りとした。

- ・ 朔望平均満潮面 H.W.L.=D.L.+1.60 (m)
- ・ 朔望平均干潮面 L.W.L.=D.L.+0.09 (m)



図 2.1-13 響灘検潮所の潮位

(出典：海底地形デジタルデータ M7000 シリーズ M7014 Ver.2.0 対馬海峡 世界測地系，日本水路協会，2008 年 5 月)

(3) 海洋生物

1) 鳥類

文献調査より、鳥類の状況を整理した。北九州市（2006）による響灘周辺で観察された鳥類および北九州市（1994）による北九州市内で観察された鳥類として、58 科 317 種が確認されている。

福岡県（2001）によれば、「重要なハビタット」として響灘周辺では白島が以下のように選定されている。

白島：男島と女島からなり、男島は常緑広葉樹林におおわれカラスバトが繁殖し、また、オ

オミズナギドリの集団繁殖地となっている。春秋の渡りの時期には陸鳥の中継地になっている。白島石油備蓄基地があり、大部分が県設鳥獣保護区の特別保護地区になっている。

北九州市（1994）によれば、猛禽類のハチクマおよび小鳥類のヒヨドリの渡りルートは図2.1-14のようになっており、陸上の風師山、足立山、皿倉山あるいは貫山、石峰山上空がハチクマやヒヨドリの渡りルートとなっている。

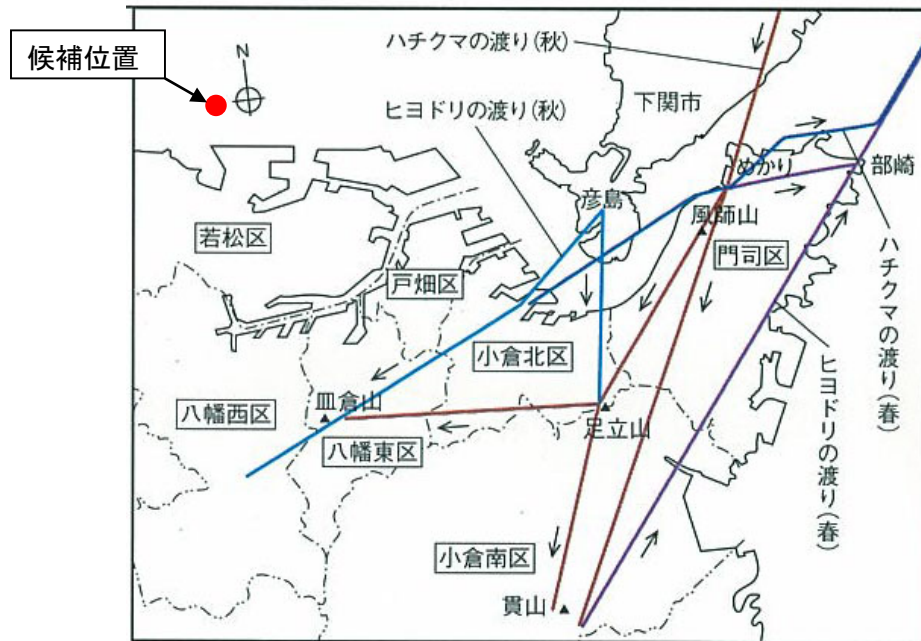


図 2.1-14 鳥類の渡りのルートの概要（ハチクマ、ヒヨドリ）（北九州市，1994）

また海鳥の生息状況および渡り鳥のルートを把握するため、学識経験者および地元の野鳥研究者へヒアリングを行った。その結果をまとめたものを図2.1-15に示す。候補位置周辺には、ウミウ、アイサ、カモメ等の海鳥が11月～3月ごろに多く見られる。水辺の鳥であるシギ、チドリ類は海岸線沿いに渡る。そしてハチクマ、ヒヨドリは陸地を渡りのルートにしている。

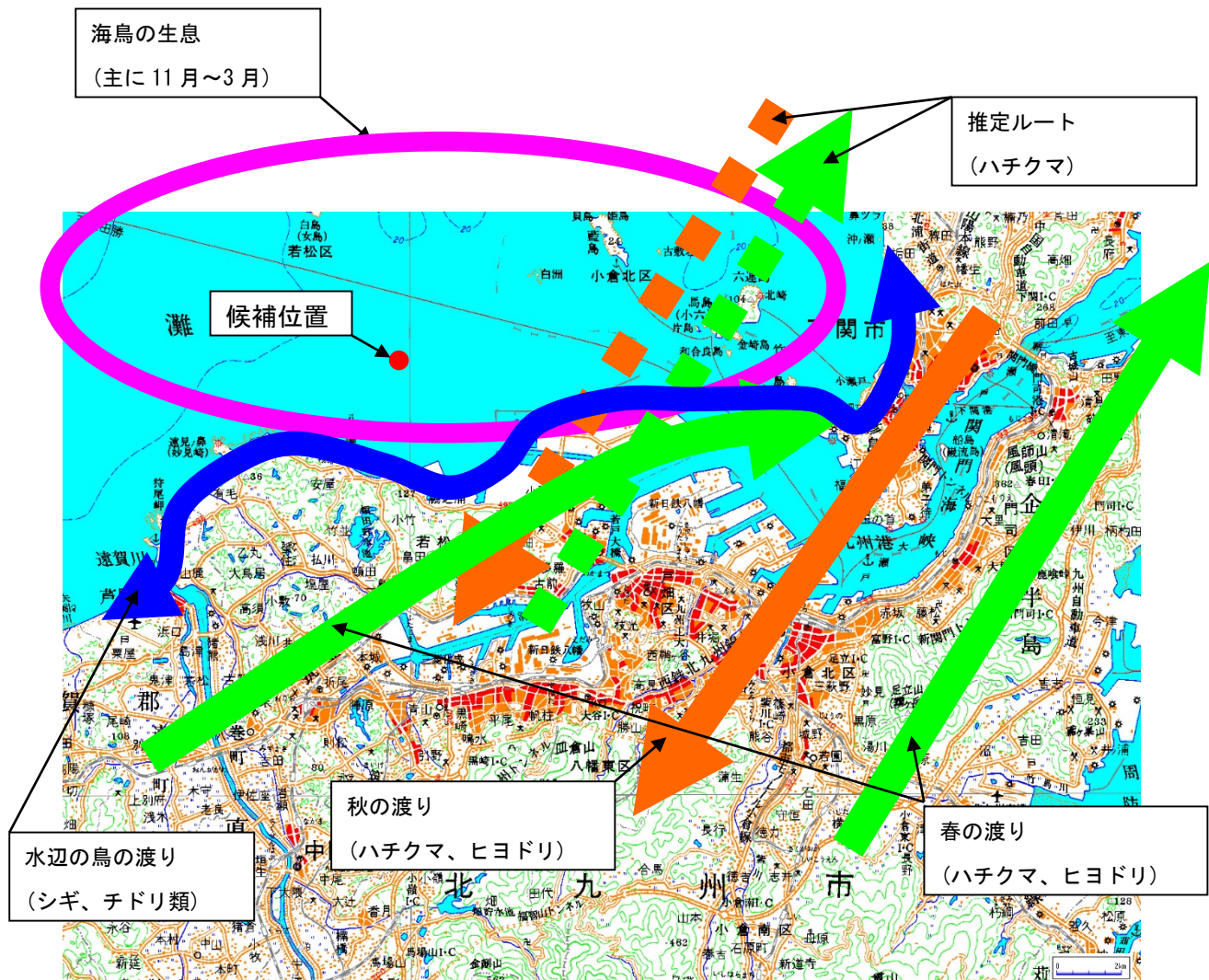


図 2.1-15 海鳥の生息状況および渡り鳥のルート概要 (ヒアリング結果を基に作成)

2) 海棲哺乳類

響灘周辺の海産哺乳類の代表的な種としてスナメリがあげられる。藍島南西の沿岸で生息していることが知られており、地元藍島小学校では年2回スナメリウォッチングを行うなどの調査を行い、保護活動に努めている。福岡県の海の中道水族館、山口県の下関市立水族館から聞き取り調査を行ったところ、響灘周辺海域におけるスナメリの生息状況等に関する詳細なデータはなく、その生態は明らかでない部分が多いが、冬場は少なく春から夏にかけて多く出現する。藍島周辺では1頭から多いときで10頭程度の群れで見られ、時には漁船について泳ぐ姿も見られるとのことであった。

実証研究候補海域の鯨やイルカの生息状況を把握するため、ストランディングデータを確認した。ストランディングとは、鯨類が生きたまま座礁したり、死体が漂着したり、あるいは本来の生息域から離れて河川などに迷入する現象の総称である。日本鯨類研究所が公開している鯨類の2003年9月～2007年12月までのストランディングレコードによると、福岡県内では37件のストランディングの報告があり、そのうち北九州は12件となっていた。12件の報告の中で11件がスナメリであり、残り1件はハナゴンドウであった。一方、山口県内では68件の報告があり、そのうち北九州市に隣接する下関市では25件となっていた。25件の報告の中で

24 件がスナメリであり、残り 1 件はマイルカであった。

また、下関市にある水族館の海響館でも、山口県と福岡県における 1998 年からのストランディングデータをウェブ上で公開している。それによると、2008 年 11 月までに福岡県内では 44 件のストランディングの報告があり、そのうち北九州は 29 件となっていた。29 件の報告の中で 21 件がスナメリであった。実証研究候補海域の近傍では、脇之浦漁港におけるハナゴンドウの迷入や脇田漁港へのオウギハクジラの迷入、洞海湾へのユメゴンドウの群れの迷入の報告が寄せられていた。一方、山口県内では 128 件の報告があり、そのうち下関市では 69 件となっていた。69 件の報告の中で 62 件がスナメリであり、圧倒的にスナメリの報告が多い結果となっていた。

3) 漁業生物

漁業生物の状況を文献により把握した。北九州市（2004）によると、実証研究候補海域がある筑前海は多くの島や天然礁に恵まれているため、タイ・ブリ・ヒラメなどを対象とした釣り・刺し網・小型定置網やアワビ・サザエなどの磯根漁業が盛んに行われている。主な水産物としては、魚類ではブリ、サワラ、マダイ、ヒラメ、フグ、メバル、カサゴ、スズキ、キスなどがあげられ、その他にアオリイカやコウイカなどのイカ類、マダコ、ウニ、アワビ、サザエ、ナマコや海藻類があげられる。また、作り育てる漁業を基本施策として、魚礁の設置などによる漁場造成、種苗の購入、中間育成や放流事業を行い、水産資源の適切な管理を推進している。

2. 2 社会条件

(1) 対象法令

候補海域における実証研究施設（2MW級風力発電機および観測施設各1基、海底ケーブル1条）設置の条件となる法的な規制の確認を、既存の公開資料・文献および関係者へのヒアリングにより実施した。その結果は表2.2-1の通りである。

表 2.2-1 候補海域への実証研究施設設置に関わる法令

名 称	適用の有無およびその制約条件	対応
(1) 自然公園法	なし。（若松北海岸に玄海国定公園があるが、候補海域外）	不要。
(2) 国土利用計画法および国土形成計画法	なし。	不要。
(3) 海岸法（漁港漁場整備法含む）	なし。（海岸保全区域外）	不要。
(4) 港湾法	あり。占有の許可が必要。港湾構造物の技術基準への適合性確認審査は不要。	港湾空港局へ水面占有申請を行う。
(5) 港則法	あり。工事および施設試験中の海上交通に対する制約あり。海上交通安全法は適用対象外。	港長へ許可申請へ工事等の許可および進水等の届出
(6) 航路標識法	あり。	設置工事の際に必要。設置設備については地質調査等実施後、最終の位置を決定して当局に確認する。
(7) 漁業法	対象海域は筑共第16号の免許が与えられている。免許期間は平成15年9月1日～平成25年8月31日、免許者は北九州市漁業協同組合、脇田漁業協同組合である。	設置工事、実証研究時に関する調整・協議が必要。施設設置位置については両漁協漁区境として確認した。⇒当初位置では沖積層が厚いことから、最終的には設置位置を変更
(8) 航空法	あり。	航空障害灯の設置。高さ制限なし
(9) 文化財保護法	なし（史跡名勝天然記念物なし）	遺跡発見時は届出
(10) 景観条例等	なし。（対象外）	情報提供。
(11) 民法	なし。	不要。
(12) 建築基準法	あり。	風力発電機の施設設置時に工作物確認申請実施。

(2) 社会的制約条件

候補海域における実証研究施設設置の条件となる社会的制約条件の確認を、対象法令の確認と同様に行った。その結果は表2.2-2の通りである。法規制との関係が深い項目については、表2.2-1の該当項目との対応関係を示した。

表 2.2-2 候補海域への実証研究施設設置に関わる社会的制約条件

名 称	適用の有無およびその制約条件	対応
(1) 自然公園指定海域	なし。(表2.2-1(1)参照)	不要。
(2) 海中公園指定海域	なし。(海中公園はない。)	不要。
(3) 漁業権漁業海域	あり。(表2.2-1(7)参照)	同左。
(4) 指定漁業海域	なし。(当該海域は候補海域近傍にはない。)	不要。
(5) 港湾区域	あり。(表2.2-1(4)参照)	同左。
(6) 漁港区域	なし。(表2.2-1(3)参照)	同左。
(7) 制限表面区域	なし。(表2.2-1(8)参照)	同左。
(8) 自衛隊訓練海域	なし。	同左。
(9) 漁業無線	なし。	不要。
(10) 自衛隊レーダ使用海域	なし。	不要。
(11) 海底ケーブル敷設海域	なし。	不要。
(12) 航路	なし。(表2.2-1(1)参照)	不要。
(13) 灯台・浮標(航路標識)	あり。(表2.2-1(6)参照)	同左。
(14) 漁場(漁礁)	あり。(表2.2-1(7)参照)	同左。
(15) 海中遺跡・海中考古物	なし。(表2.2-1(9)参照)	同左。
(16) 所有権・使用権等	なし。(表2.2-1(11)参照)	同左。

2. 3 利害関係者協議

実証研究にかかる候補海域の選定について、以下の関係機関と協議を行った。

- ・地元行政（北九州市港湾空港局、同環境局、同産業経済局（水産課））
- ・海上保安庁（若松海上保安部）
- ・漁業協同組合（北九州市漁業協同組合脇之浦支部、響灘漁業協同組合）
- ・電力会社（九州電力株式会社）

実証研究候補海域については、協議の結果、当初予定位置の南側（陸地から 1～2km）の地点で、500×100m の範囲となった。また、この海域は北九州港港湾区域内であり、開発にあたっては港湾法に基づいた手続きが必要となる。また、実証研究候補海域は船舶航行に支障はないと考えられるものの、設置工事の際は船舶航行に支障をきたさない対策（障害灯など）が必要となる。

主要な許認可は、以下の通りである。

- ・水域占用許可：観測タワー設置に係る水域占用（許可権者 北九州市港湾・空港局）
- ・作業許可：海域における調査、工事の実施に伴う許可（許可権者 若松海上保安部）

なお、調査、工事等に活用する交通船、警戒船について、関係漁業協同組合より手配を行うことで、実証研究に関する理解促進、地域との協調を図ることとした。

系統連系については、電力会社にて募集された風力発電系統連系にて研究を対象とした研究枠（定格出力合計 2,000kW 以下）があり、その枠にて事前検討申込みを行った。連系点として申し込んだ送電線の上位系統への逆流抑制のため、最大出力 1,980kW 以下とする条件となった。実証研究の際には、受電設備に余剰電力吸収装置を設け、最大出力 1,980kW を超える恐れがある場合に、この装置の投入により系統へ流れる電力を吸収することで出力制限に対応する。

3 海域・気象・海象調査

3.1 風況

(1) 洋上の風況の推定

1) 実証研究候補海域における海上風（極値）の推定

①海上風の推定結果と評価

北九州市響灘沖を対象とした洋上風力発電施設の設計を行うために、ハブ高 80m を対象とした設計風速（10分平均最大風速の50年再現期間期待値）の解析を実施した。

解析手法として、

- ・極値統計解析による設計風速の算出
- ・建築基準法および日本型風力発電ガイドラインに基づく設計風速の算出

の2つの方法から設定し、上記2つの方法からより安全側の設計風速値を本調査における設計風速とした。

図 3.1-1 に設計風速設定のためのフローを示す。

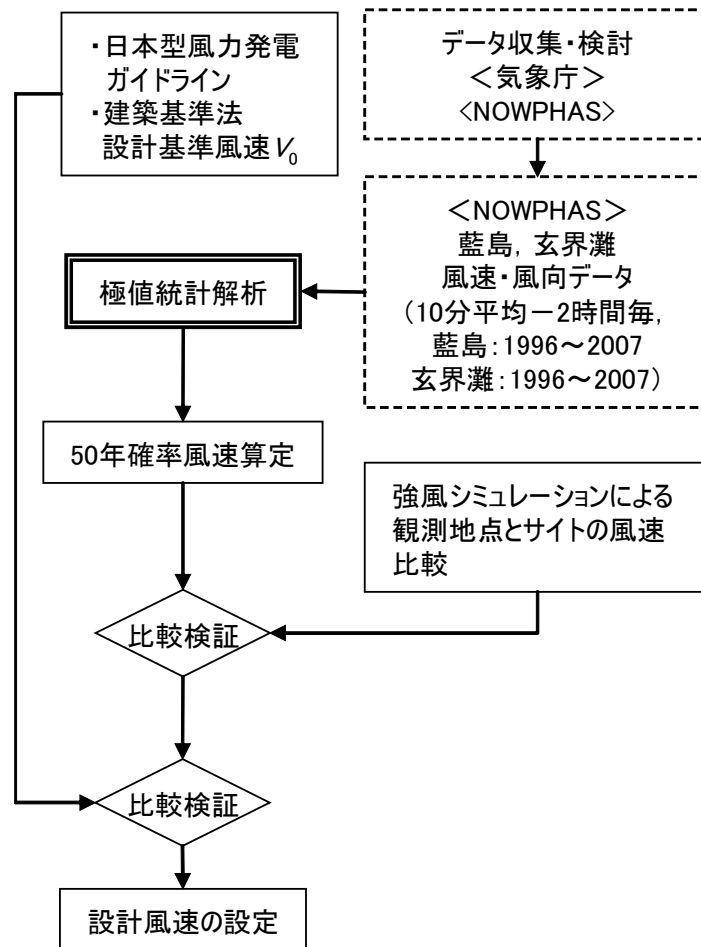


図 3.1-1 設計風速設定フロー

a. 使用データ

実証研究候補海域周辺の近隣 2 地点（NOWPHAS 藍島、玄海灘）の沿岸風観測データを利用した*。解析には、超音波風向風速計によって約 10 年程度計測された観測データを利用した。なお、実証研究候補海域近傍に気象庁のアメダス観測地点八幡があるが、穴生浄水場の敷地内にあり、周囲に建物等が隣接することから、解析対象として周辺を代表する風況場が得られないと判断したため、今回の使用データの対象外とした。

※国土交通省港湾局提供((独)港湾空港技術研究所 海洋・水工部 海象情報研究領域より受領)

b. 年最大風速解析

藍島観測地点、玄界灘観測地点における、極値解析に用いた年最大風速（10 分平均値）の観測結果はそれぞれ表 3.1-1、表 3.1-2 の通りである。

表 3.1-1 藍島観測地点における極値解析に用いた年最大風速

年	年最大風速 (m/s)	出現風向
1996	23.6	NW
1997	23.9	W
1998	26.9	W
1999	22.4	W
2000	11.4	W
2001	11.1	W
2002	10.7	NW
2003	8.4	S
2004	22.3	WSW
2005	19.6	WNW
2006	18.7	W
2007	17.9	W

表 3.1-2 玄界灘観測地点における極値解析に用いた年最大風速

年	年最大風速 (m/s)	出現風向
1998	19.1	ENE
1999	21.3	ENE
2000	23.2	S
2001	22.6	NW
2002	24.2	ENE
2003	31.1	S
2004	26.8	ESE
2005	23.0	NW
2006	33.6	S
2007	24.1	S

c. 極値統計による設計風速解析

藍島・玄海灘観測地点の年最大風速の観測結果を用いて、極値統計解析を実施した。設計風速に用いる再現期間期待値の推定には、一般極値（GEV）モデルを利用した。なお、GEV モデルは下式で示される。

$$F(x; \mu, \sigma, \xi) = \exp \left\{ - \left[1 + \xi \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right) \right]^{-\frac{1}{\xi}} \right\}$$

GEV モデルを用いて推定した、最大風速と再現期間との関係は図 3.1-2、図 3.1-3 の通りである。

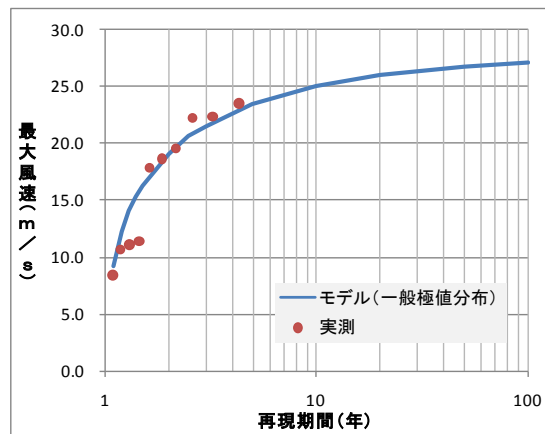


図 3.1-2 藍島の観測地点における最大風速と再現期間の関係

$\xi = -0.6166542$ 、 $\mu = 16.9765444$ 、 $\sigma = 6.6595631$

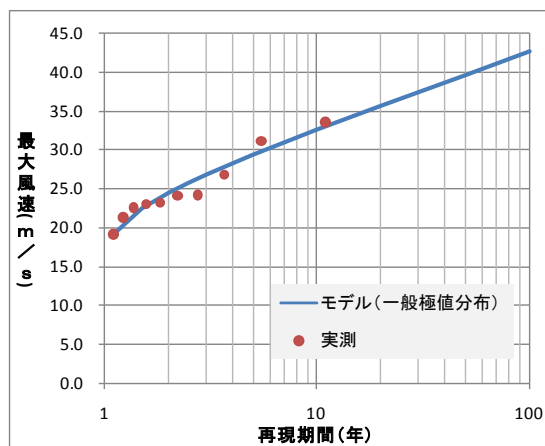


図 3.1-3 玄界灘の観測地点における最大風速と再現期間の関係

$\xi \rightarrow 0$ ($\xi=0$)、 $\sigma = 4.3026$ 、 $\mu = 22.767$

図 3.1-2、図 3.1-3 で推定した最大風速と再現期間との関係をもとに、観測高度における 50 年再現期間期待値の推定を行った。次に、ハブ高 80m を対象とした設計風速を算出するために、それぞれの地点で、べき乗則を用いてハブ高 80m の風速に変換を行った。平坦な場所での風の高度分布 (N 値=7) で高度補正を行い、観測高度からハブ高への補正を行った。各地点の解析結果は表 3.1-3 の通りである。

表 3.1-3 藍島・玄海灘観測地点における 10 分平均最大風速の 50 年再現期間期待値

観測地点	観測高度	50 年再現期間期待値 (観測高度)	50 年再現期間期待値 (ハブ高 80m)
藍島	10m	27m/s	36m/s
玄界灘	24.6m	40m/s	47m/s

観測設備に関する資料によると、藍島の観測地点に関しては観測測器下部まで樹木の存在があり、これにより風が減衰している可能性が考えられる。一方、玄海灘の観測地点に関しては、藍島に比べ測定高度が高く (24.6m)、樹木の存在があるものの藍島よりは樹木の影響を受けにくいと推測できる。

したがって、候補位置における 10 分平均最大風速の 50 年再現期間期待値として、周囲の測定状況および、玄界灘の 47m/s が藍島の 36m/s より高く安全側に評価できることから、第一推定値として、候補位置における設計風速を 47m/s とした。

d. 強風シミュレーションによる妥当性の確認

玄界灘における 10 分平均最大風速の 50 年再現期間期待値をサイト位置の設計風速としたが、設計風速の妥当性を確認するため、風況シミュレーションソフト LOCALS™ による強風シミュレーションを実施した。

表 3.1-4 に、各流入風向における候補位置、藍島、玄界灘における風速値の一覧を示す。表 3.1-4 の結果から、候補位置における強風発生時の風速は、いずれの風向においても玄界灘の風速値よりは弱いことが示された。したがって、候補位置における設計風速を算定する場合、玄界灘の 10 分平均最大風速の 50 年再現期間期待値とすれば、安全側の評価結果が得られることが定性的に推察される。

表 3.1-4 各流入風向における候補位置、藍島、玄界灘の風速値

	風速[m/s] (H=80m)			
	S	N	NW	W
サイト位置	22.26	39.53	40.73	33.46
玄海灘	47.20	42.52	47.33	46.02
藍島	38.97	42.08	41.89	36.08

e. 建築基準法および日本型風力発電ガイドラインに基づく設計風速の算出

7. 建築基準法

候補位置は北九州市沖となるため、平成 12 年建設省告示第 1454 号によると、 $V_0=34\text{m/s}$ の区域となる。洋上のため、地形粗度区分を I、評価高さをハブ高さ 80m とした。したがって、候補位置における設計風速 U_h は、

$$U_h = E_{tV} E_{pV} V_0$$

で算出される。

ここで、

E_{tV} : 割増係数

E_{pV} : 高度補正係数

のため、 E_{tV} は洋上のため、1 と設定し、

$$E_{pV} = 1.7(H/ZG)^\alpha$$

で規定されるため、表 3.1-5 に示される数値を用い、

$$E_{pV} = 1.7(H/ZG)^\alpha = 1.7 \times (80.0/250.0)^{0.10} = 1.5$$

$$U_h = E_{tV} E_{pV} V_0 = 1 \times 1.5 \times 34 = 51.57 = 51.6$$

となり、ハブ高さ 80m における設計風速は 51.6m/s と算出された。

表 3.1-5 地表面粗度区分に応じて掲げる数値一覧

地表面粗度区分		Zb (単位 m)	ZG (単位 m)	α
I	都市計画区域外にあって、極めて平坦で障害物がないものとして特定行政庁が規則で定める区域	5	250	0.10

4. 日本型風力発電ガイドライン

日本型風力発電ガイドラインにおいて、設計風速を算出するフローは図 3.1-4 で示されている。図中、6.1、6.2、6.3 において複雑地形の判定があるが、今回の候補位置は洋上であるため、複雑度は小であると判断できる。したがって、極値風速マップから極値風速 V_{ref} の判定を行った。

候補位置近辺の風速値は、45m/s から 50m/s の範囲内に存在する。安全側に評価して高度 70m で 50m/s とした場合、

$$U_{80} = U_{70} \times (Z_{70}/Z_{80})^{(1/7)} = 50 \times (70/80)^{(1/7)} = 50.96 = 51.0\text{m/s}$$

と推定できた。

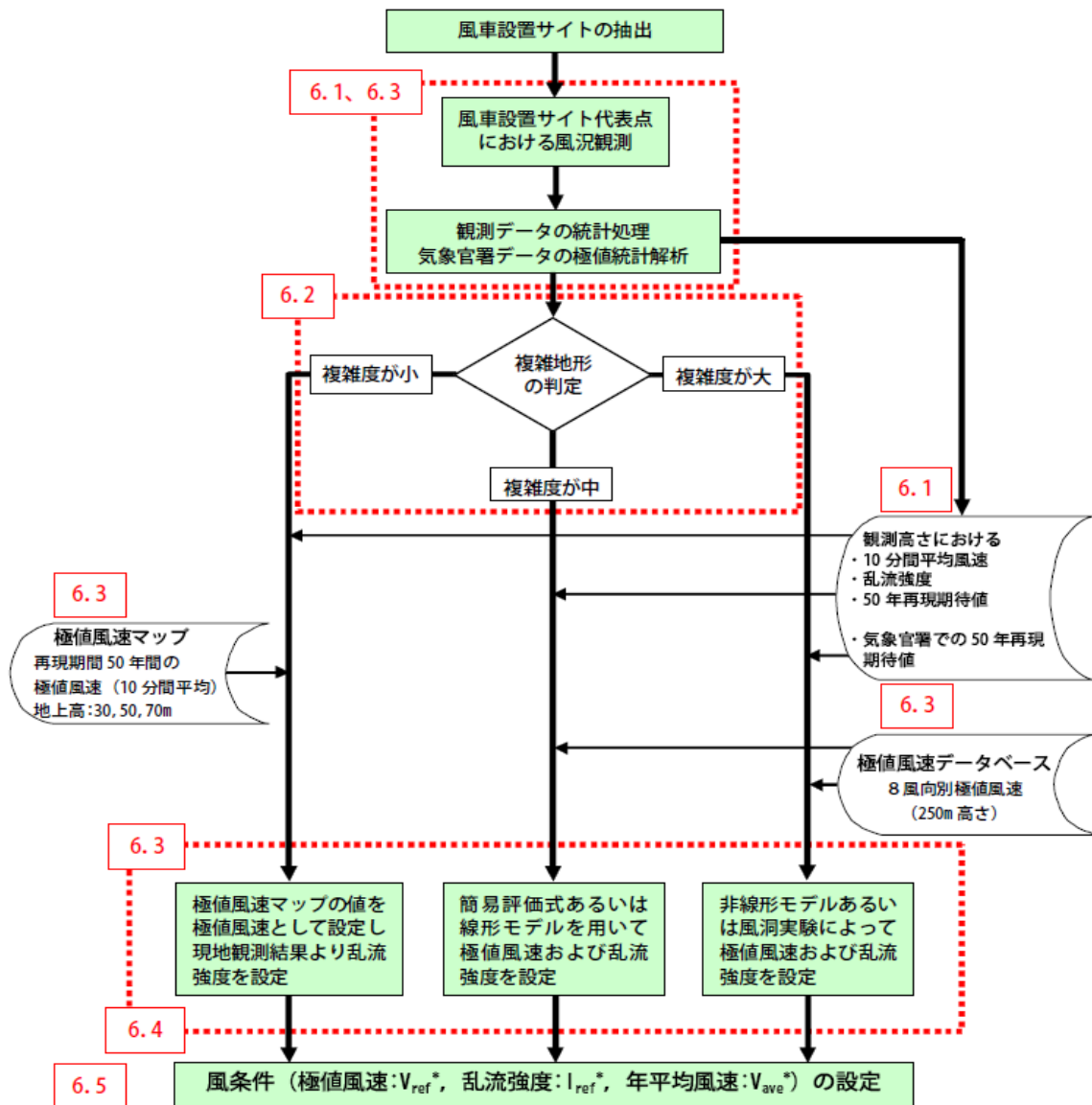


図 3.1-4 風条件の評価手順 (NEDO, 2008)

ウ. 建築基準法および日本型風力発電ガイドラインに基づく設計風速の算出のまとめ

建築基準法および日本型風力発電ガイドラインから算定した候補位置における設計風速は、ハブ高さ 80m においてそれぞれ 51.6m/s、51.0m/s と、ほぼ同様の算出結果となった。

本節での設計風速基準として、安全側を考慮して建築基準法で設定した 51.6m/s を採用することとした。

f. まとめ

以上の結果、極値統計解析および、建築基準法他の手法にてそれぞれ設計風速を設定した。

極値統計解析：46.0m/s < 建築基準法他：51.6m/s

上記のように、建築基準法他の設計風速が極値統計解析の設計風速を上回っているため、安全側の評価として、建築基準法他で設定した 51.6m/s を設計風速として採用した。

下記に、検討した設計風速算定のフローをまとめた。

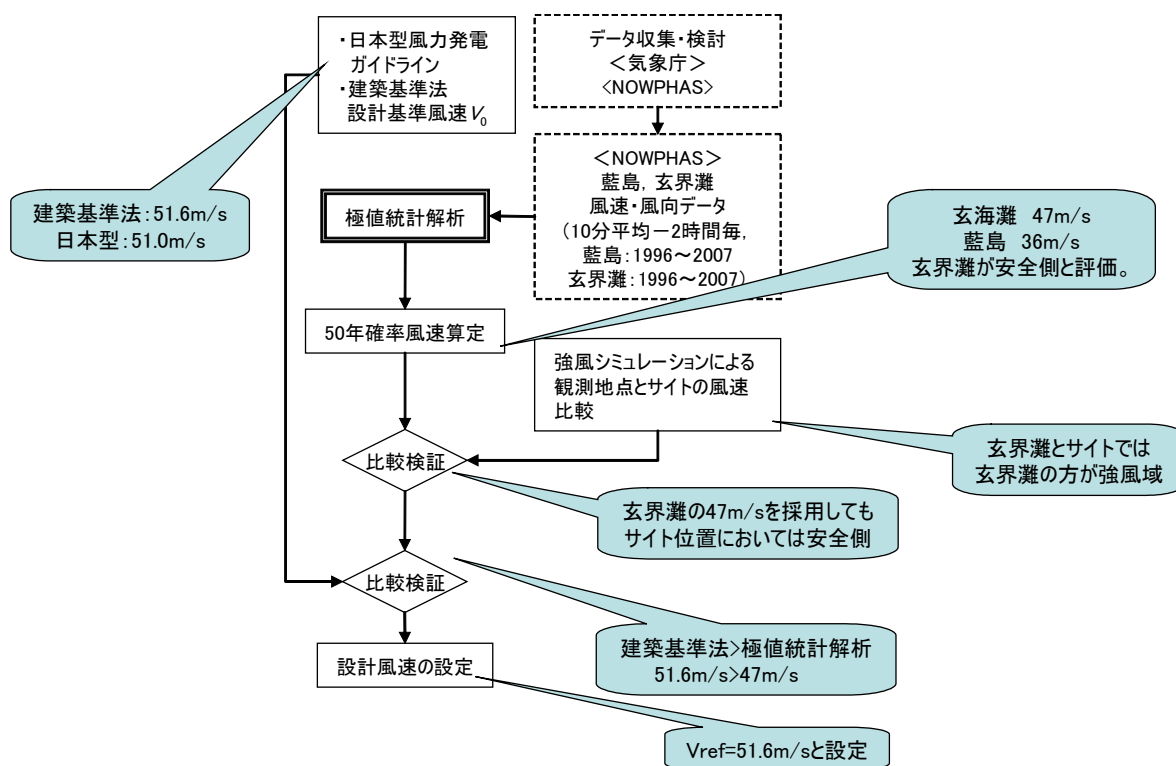


図 3.1-5 設計風速算定のフロー(まとめ)

②乱流強度

設置点近傍の陸上におけるマスト高さ 20m の観測値より、風速 15m/s 時の乱流強度の期待値 (I_{ref}) を求めたところ、0.10~0.11 であった。これを安全側に評価して、風車ハブ高さにおける I_{ref} を ($I_{ref} = 0.12$ (カテゴリ C)) とした。

2) 実証研究候補海域における海上風(常時)の推定

①海上風の推定方法

海上風の推定方法として、CTC が開発した発電量予測手法に基づいた風況および発電量の推定を実施した。推定フローは以下の通りである(図 3.1-6 参照)。

- ①気象庁 RSM-GPV データ(20km メッシュ)および NOWPHAS 玄海データを入力値として、LOCALS™ による風況シミュレーション(以下、広域風況シミュレーション、3km メッシュ)を 2007 年 1 月から 2007 年 12 月までの 1 年間に対して行った。
- ②広域風況シミュレーション結果および NOWPHAS 玄海データを入力値として、LOCALS™ による風況シミュレーション(以下、狭域風況シミュレーション、500m メッシュ)を 2007 年 1 月から 2007 年 12 月までの 1 年間に行い、1 時間ごとの風況の推定を行った。

③本調査にて想定している機種・基数（日本製鋼所製 J82-2.0 1基）と、狭域風況シミュレーション結果の推定風速に基づき、当該サイトに設置した場合の年間発電量（グロス値）の推定を行った。

④算出された年間平均風速、年間発電量（グロス値）および、過去 11 年分の NOWPHAS データの風速変動率を基に、年間平均風速、総発電量の平年値換算を行い、超過確率の算出を行った。

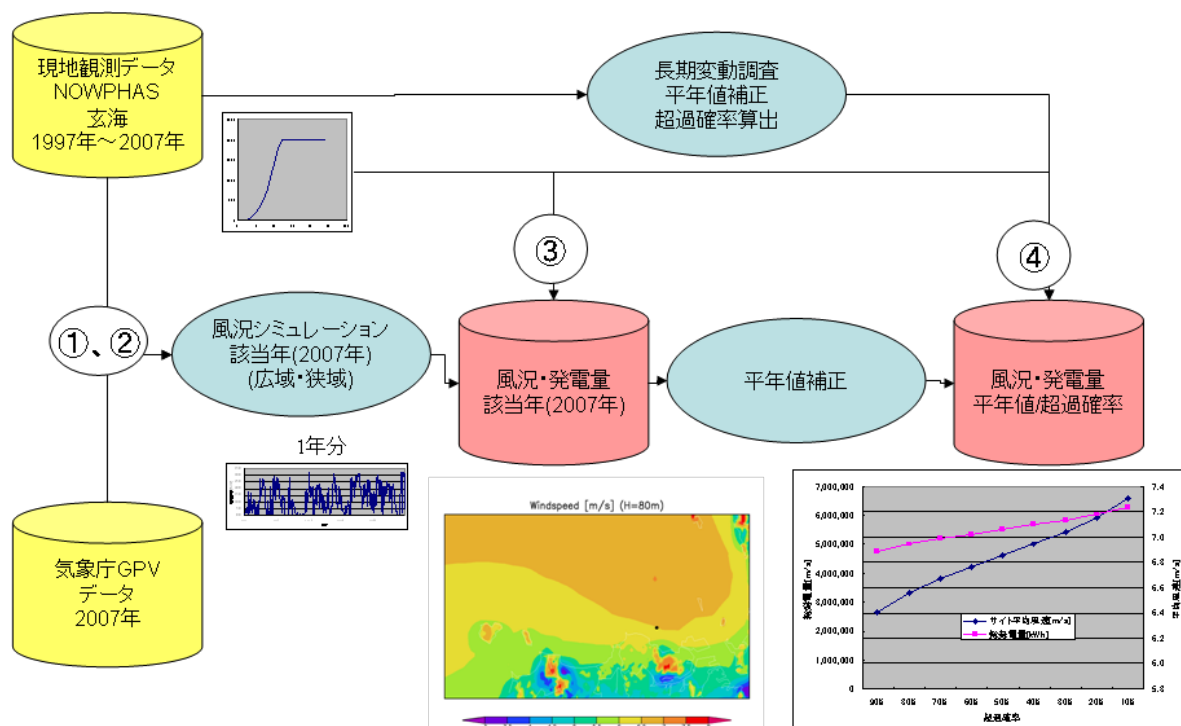


図 3.1-6 推定フロー

②パワーカーブ

日本製鋼所製 J82-2.0 のパワーカーブを発電量算出用に使用した。J82-2.0 の基本仕様を表 3.1-6、パワーカーブを図 3.1-7 に示す。

表 3.1-6 J82-2.0 の基本仕様

型式名	J82-2.0
定格出力	2,000kW
ロータ直径	82.6m
ハブ高さ	80m
定格風速	12m/s
カットイン風速	25m/s

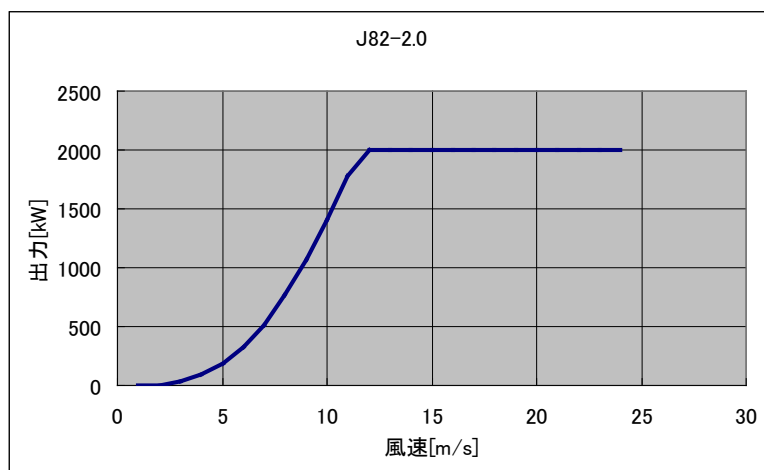


図 3.1-7 J82-2.0 のパワーカーブ

③海上風の推定結果と評価および、年間風力発電量・設備利用率の算定

a. 推定結果

風況シミュレーションおよび玄海灘 NOWPHAS データを参照した、候補位置における平均風速、総発電量、設備利用率の年別推定値を表 3.1-7、図 3.1-8 に示す。

1997年～2007年までの平均風速の平均値は 6.85m/s、総発電量は 5,517MWh、設備利用率は 31.5%と推定された。なお、この推定結果にはメンテナンス、故障等による停止時間を考慮していない。

表 3.1-7 平均風速、総発電量、設備利用率の推定値

	平均風速[m/s]	総発電量[kWh]	設備利用率	稼働率
1997	6.65	5,165,067	29.5%	97.7%
1998	6.67	5,175,729	29.5%	98.0%
1999	7.16	6,045,356	34.5%	98.0%
2000	7.00	5,771,901	32.9%	98.4%
2001	7.15	6,030,873	34.4%	98.3%
2002	7.26	6,204,638	35.4%	98.4%
2003	7.19	6,086,037	34.7%	98.5%
2004	6.04	4,151,300	23.7%	98.4%
2005	6.84	5,495,543	31.4%	97.1%
2006	6.95	5,687,807	32.5%	98.2%
2007	6.49	4,881,053	27.9%	98.3%
平均	6.85	5,517,755	31.5%	98.1%
標準偏差	0.35	598,815	3.4%	0.4%

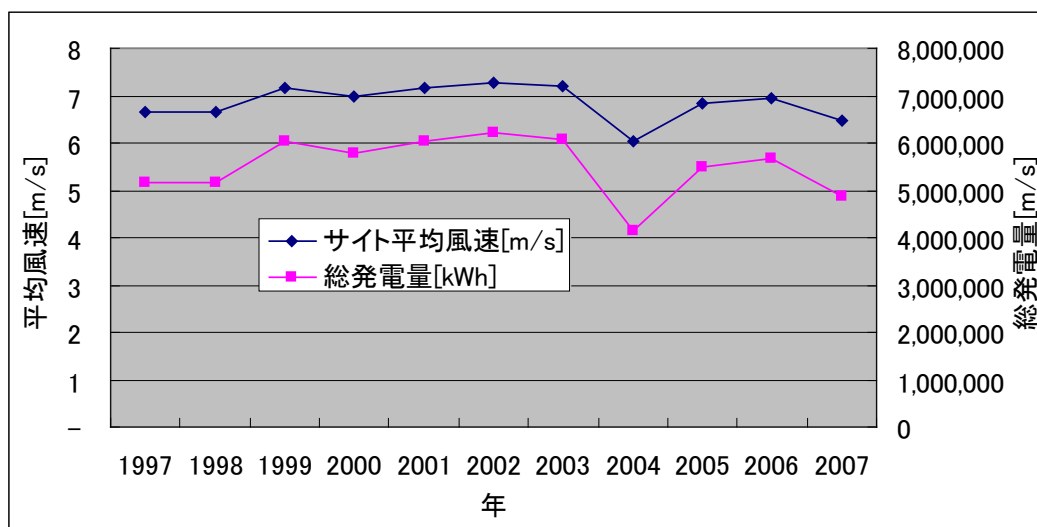


図 3.1-8 年別年平均風速および年間総発電量推定値

図 3.1-9 にシミュレーション実施年（2007 年）および平年値における風速頻度分布を示す。図中ワイブル分布でフィッティングした場合の尺度係数(c)、形状係数(k)は、それぞれ平年値において、 $c=7.026$ 、 $k=2.169$ と推定された。

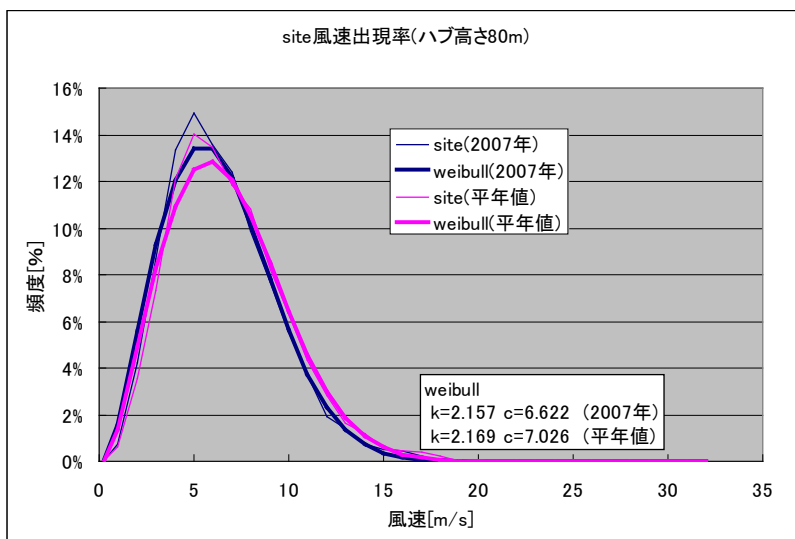


図 3.1-9 シミュレーション実施年および平年値における風速頻度分布およびワイブル係数

b. 風配図

候補位置における風配図を図 3.1-10 に示す。主風向は西北西～北西、東南東であり、特に西風成分が卓越するときのパターンが風速が強く、発電量の割合も大きい。

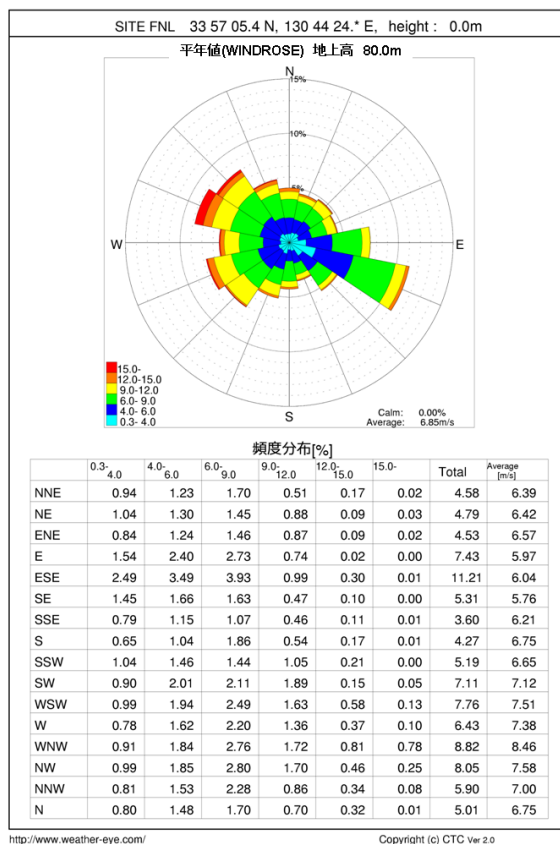


図 3.1-10 候補位置における風配図(平年値換算)

c. エネルギー密度

候補位置における平年値の方位別エネルギー密度を図 3.1-11 に示す。空気密度として、下関の海面更正気圧、平均気温から推定した空気密度 1.203kg/m^3 を使用した。全体のエネルギー密度は 320.5W/m^2 であり、また、主風向である西北西のエネルギー密度が 600W/m^2 を超す値と推定された。

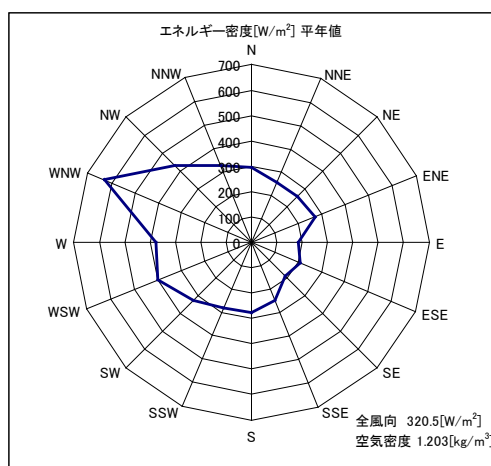


図 3.1-11 候補位置におけるエネルギー密度分布(平年値)

(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及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 14m、離岸距離 1.4km の地点に 2012 年 6 月に設置された（観測開始は 2012 年 10 月）。観測タワーは、海面からの高さが 85m の方形断面鋼管トラス構造であり、支持構造物は重力・ジャケットハイブリッド式である（図 3.1-12）。表 3.1-8 に観測計画を示す。気象関係の観測機器は 15m から 81.6m までの 8 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 3.1-12; 表 3.1-9）。

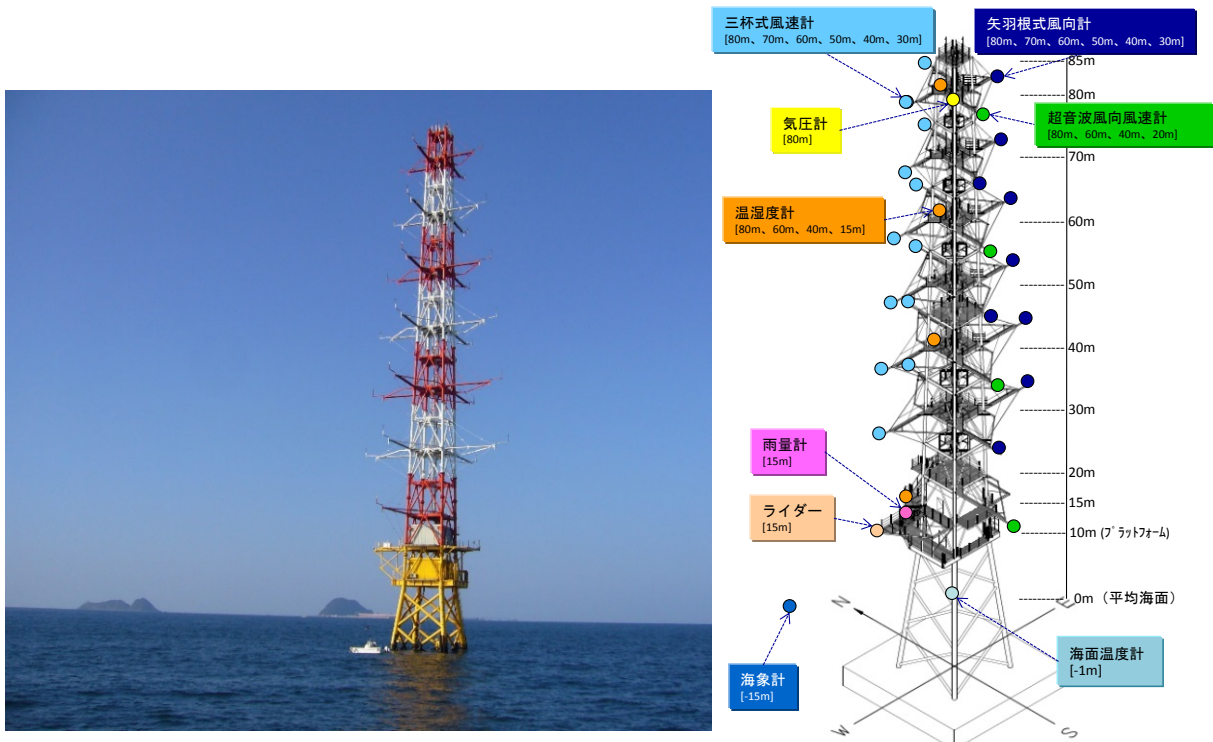


図 3.1-12 実証研究海域の洋上風況観測施設（左図）と観測機器の設置状況（右図）

表 3.1-8 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	
	ドップラーライダー	風車性能評価の可能性検討 代替観測手法としての適用性評価
気圧・温湿度・水温	気圧計 湿度計 温度計 水温計	大気安定度の評価

表 3.1-9 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	温度計	湿度計	雨量計	水温計
-1												○
15							○		○	○	○	
20					○	1						
31.6	○	2	○	2								
41.6	○	2	○	1	○	1			○	○		
51.6	○	2	○	2								
61.6	○	2	○	1	○	1			○	○		
71.6	○	2	○	2								
81.6	○	2	○	1	○	1		○	○	○		

注) 数字はセンサの設置基数。数字のない計器は1基の設置。

2) 洋上の風況の観測結果

北九州市沖洋上観測タワー80m高における月別平均風速を図 3.1-13、表 3.1-10 に示す。2013年～2016年の月別平均風速は概ね8月～9月に低く、1月～4月、12月に比較的高い傾向にあった。

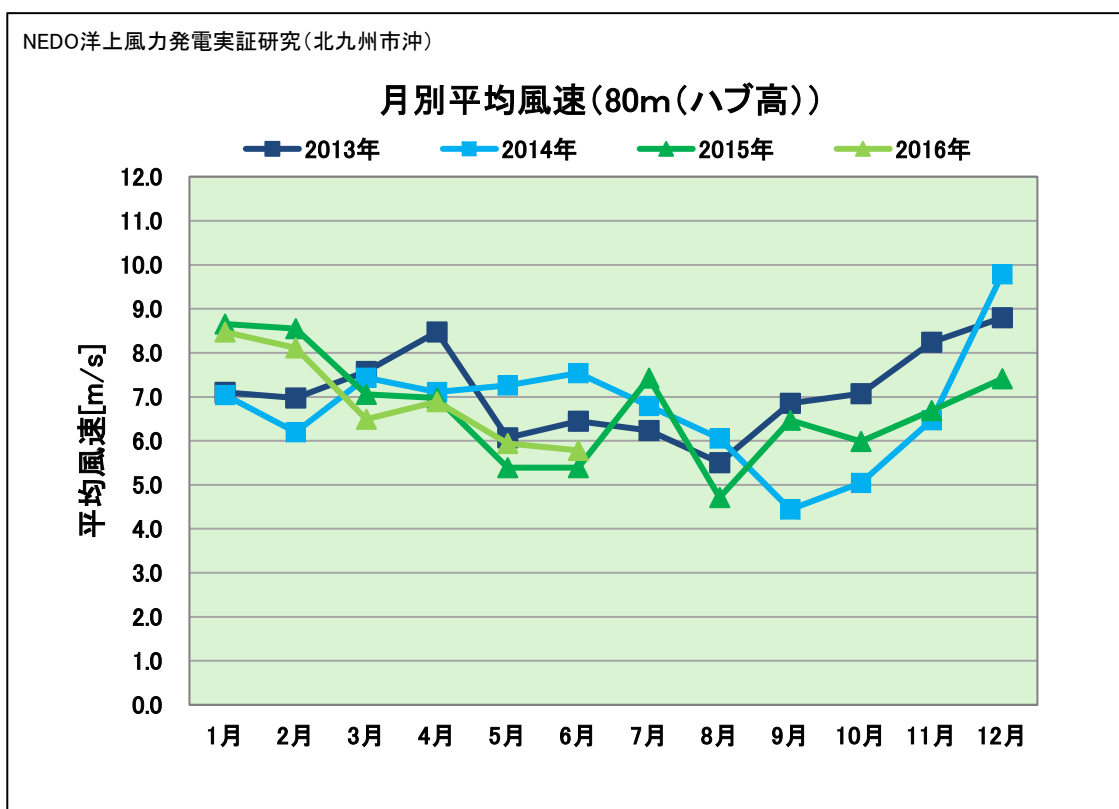


図 3.1-13 実証研究海域での月別平均風速

表 3.1-10 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(北九州市沖)

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	7.0	7.6	8.5	6.1	6.4	6.2	5.5	6.9	7.1	8.2	8.8	7.1
	2014年	7.0	6.2	7.4	7.1	7.3	7.5	6.8	6.1	4.4	5.0	6.5	9.8	6.8
	2015年	8.7	8.5	7.1	7.0	5.4	5.4	7.4	4.7	6.5	6.0	6.7	7.4	6.7
	2016年	8.5	8.1	6.5	6.9	5.9	5.8	/	/	/	/	/	/	/
データ取得率 [%]	2013年	75.6	100.0	57.1	71.8	86.2	60.8	91.0	71.6	41.5	63.3	95.1	89.4	75.3
	2014年	92.6	55.7	80.8	61.4	56.5	44.7	58.0	32.8	24.8	27.0	79.7	97.1	59.3
	2015年	91.2	74.9	62.5	87.4	89.6	78.9	82.6	80.8	77.2	79.4	79.0	92.1	81.3
	2016年	94.6	95.9	83.9	87.5	84.0	85.4	/	/	/	/	/	/	/

注1) 観測高度: 80m(ハブ高)

北九州市沖洋上観測タワー80m 高における月別平均乱流強度を図 3.1-14、表 3.1-11 に示す。2013 年～2016 年の月別平均乱流強度は、11 月～2 月に約 9～10%のレベルで推移したが、3 月～10 月には約 7～9%のレベルで推移していた。

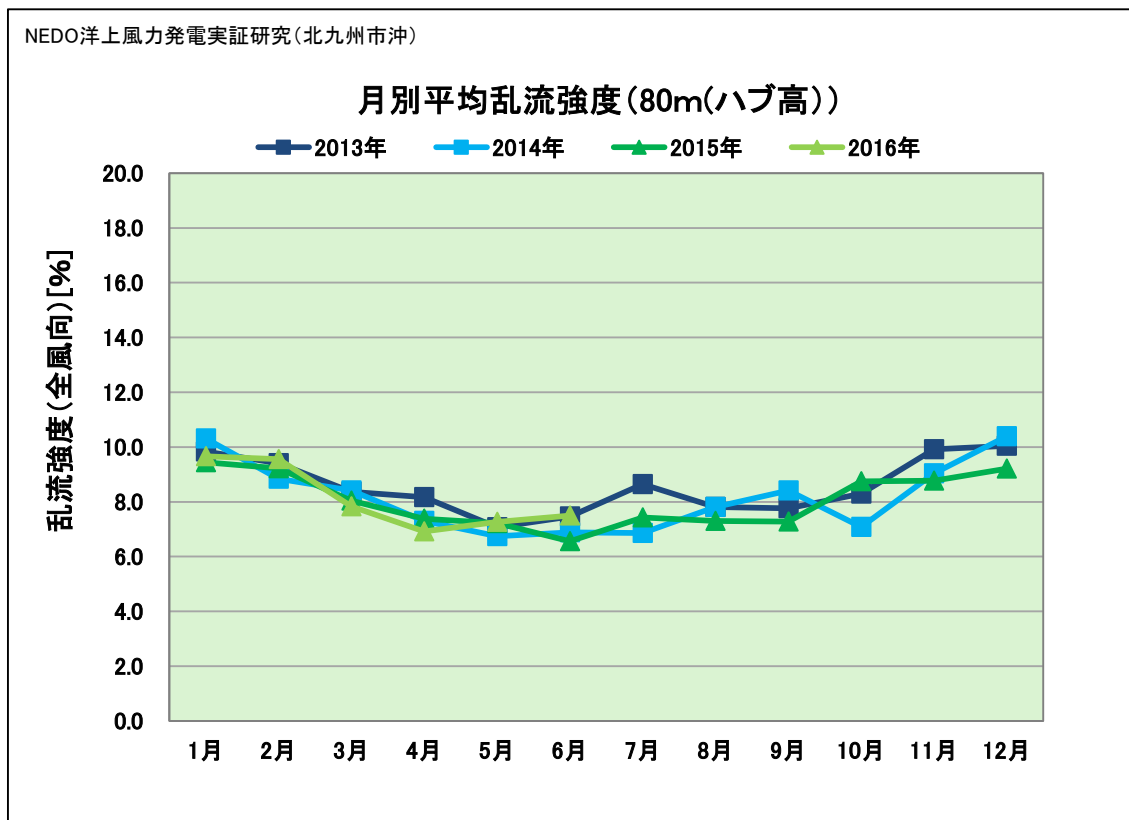


図 3.1-14 実証研究海域での月別平均乱流強度

表 3. 1-11 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(北九州市沖)

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	9.8	9.4	8.4	8.2	7.1	7.5	8.6	7.8	7.8	8.3	9.9	10.0	8.8
	2014年	10.3	8.8	8.4	7.3	6.7	6.9	6.9	7.8	8.4	7.1	9.0	10.4	8.2
	2015年	9.4	9.2	8.0	7.4	7.2	6.6	7.4	7.3	7.3	8.7	8.8	9.2	8.1
	2016年	9.7	9.6	7.8	6.9	7.3	7.5	/	/	/	/	/	/	/

注1) 観測高度: 80m(全風向)

3.2 波浪

(1) 波浪の推定

本別冊 4.1 で後述するが、実証研究設備設置予定地点は当初の候補位置から変更することとなった。それに伴い、波浪の推定結果は FS 段階での推定結果から変わることとなった。本節では、変更後の実証研究設備設置予定地点における推定結果を示す。

1) 実証研究海域における波浪（極値）の推定

①耐用年数と再現期間

本実証研究海域における波浪推算の条件として、風車の耐用年数と再現期間は一般の風力発電設備と同様に耐用年数 $L=20$ 年とし、荷重（極値波浪）の再現期間 $R_p=50$ 年とした（同条件の先行事例の供用期間中の対象荷重の遭遇確率は 33%）。

②沖波の設定

a. 波浪推算および極値統計解析

沖波の設定にあたり、国土交通省 九州地方整備局 下関港湾空港技術調査事務所において作成された、「確率波高計算処理システム」による波浪推算および極値統計解析結果を用いた。響灘海域に近いのは地点番号 WSTS.234、WSTS.277、WSTS.248 である。

また、「電源開発（株）響灘 3 号埋立地建設工事」においても当該システムの解析結果を用いており、響灘埋立地地点に近く西系波が卓越していた地点番号 (23,9) (WEST.216) の結果を採用している。

「確率波高計算処理システム」の概要を表 3.2-1 に示す。

表 3.2-1 「確率波高計算処理システム」（九州地方整備局）の概要

項目	内容
検討対象期間	1956 年～1998 年 (43 年間、117 擾乱：台風 65+低気圧 52)
波浪推算手法	<海上風推算モデル> Blackadar-Cardone モデル+Myers 台風モデル <波浪推算モデル> スペクトル法 JWA-3GS (第 3 世代スペクトルモデル、日本気象協会開発)
極値統計解析手法	P-A 法 (Petruaskas・Aagaard)
極大値/年最大値	極大値 (部分極大値資料)

図 3.2-1 に沖波算定位置、NOWPHAS 藍島・玄界灘の波高計設置位置および響灘検潮所位置を示す。

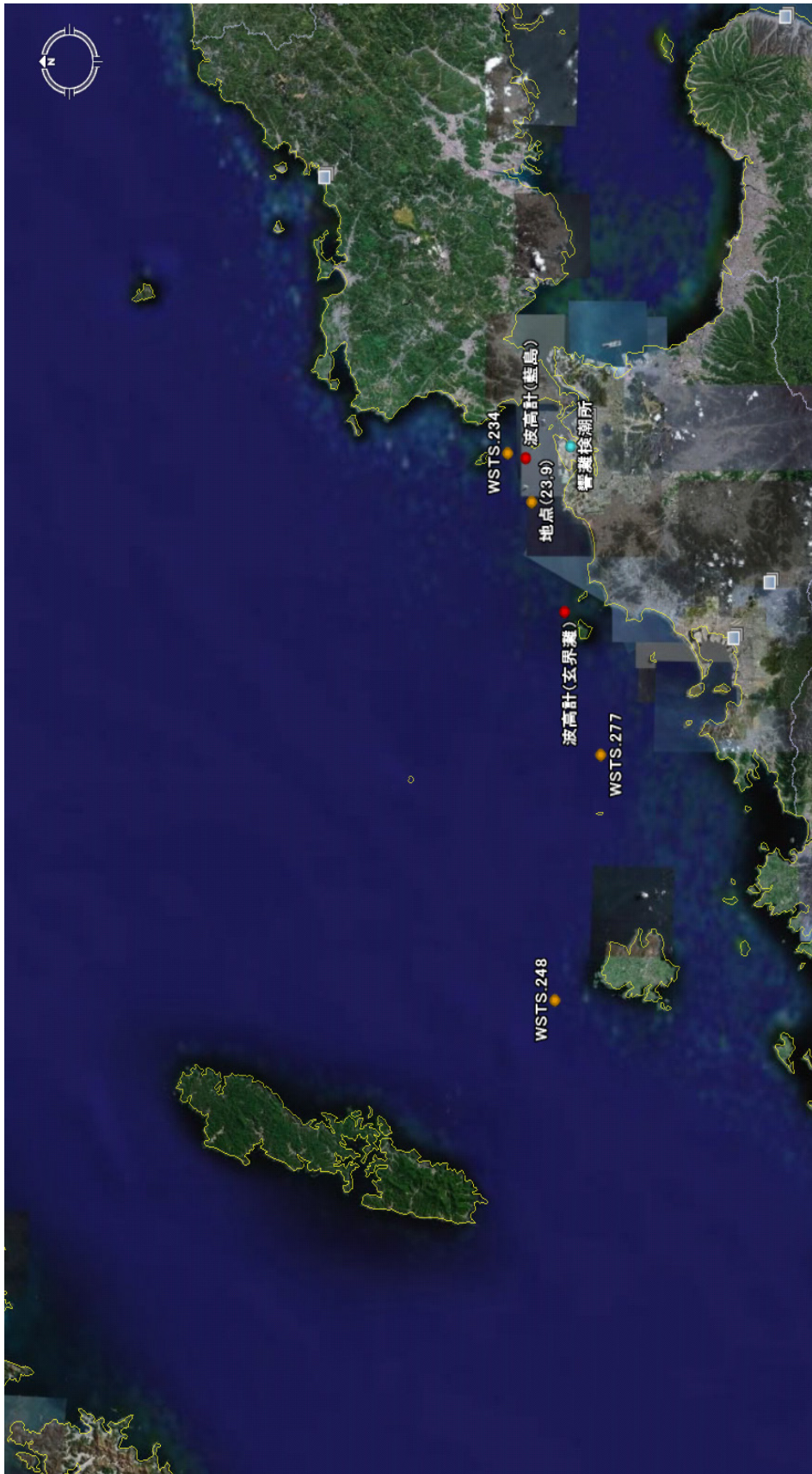


図 3. 2-1 沖波算定位置, NOWPHAS 藍島・玄界灘の波高計設置位置および響灘検潮所位置

b. 沖波の設計波

実証研究設備設置予定地点に最も近い地点である、地点番号 (23,9) (WEST.216) のデータを用いて、極値統計解析より確率波を求めた。その結果を表 3.2-2、図 3.2-2 に示す。

表 3.2-2 沖波表 ((23,9) WEST.216)

地点番号		(23,9) WEST.216																
再現期間		N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	
10年	波高(m)	5.79	5.28	3.37	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6.01	6.58	6.39	6.35
	周期(s)	10.2	9.9	8.1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	10.5	10.8	10.5	10.6
30年	波高(m)	6.51	6.05	4.03	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	7.12	7.57	7.27	7.17
	周期(s)	10.8	10.6	8.8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	11.5	11.6	11.2	11.2
50年	波高(m)	6.82	6.38	4.33	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	7.58	7.98	7.63	7.52
	周期(s)	11.0	10.9	9.2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	11.9	12.0	11.5	11.5
100年	波高(m)	7.20	6.79	4.73	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	8.16	8.50	8.10	7.96
	周期(s)	11.4	11.3	9.6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	12.4	12.4	11.9	11.8
裾長さパラメータ γ_{50}		1.18	1.21	1.28	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.26	1.21	1.19	1.18

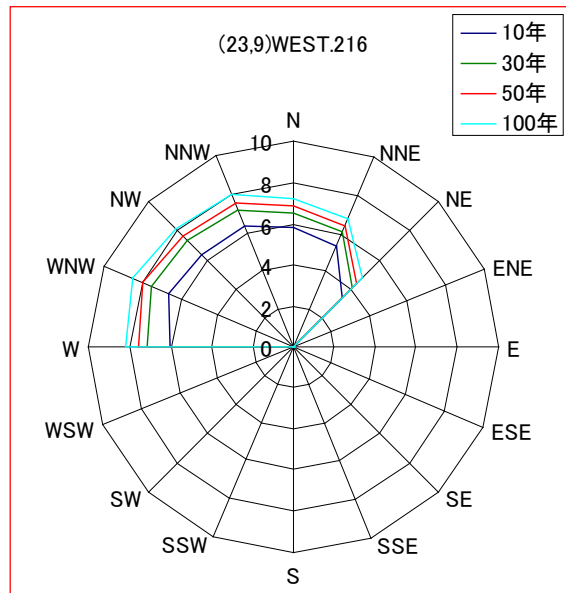


図 3.2-2 波向別確率波高

表 3.2-2 中に示した裾長さパラメータ γ_{50} とは、合田 (2002) が提案する、沖波極値分布形の裾の長さを表す汎用指標であり、50年確率波高/10年確率波高で定義されるものである。 γ_{50} が大きいと極大波の来襲可能性があり、逆に 1 に近いと毎年同程度の波浪が来襲することを意味している。一般的には、台風が卓越する海域 (太平洋側) では γ_{50} が 1.2 以上と大きく、冬季風浪が卓越する海域 (日本海側) では 1.1 程度と小さい値を示すとされている。実証研究海域の中で東側に位置する (23,9) (WEST.216) において γ_{50} が総じて小さいのは、上記の傾向を表しているものと考えられる。

地点番号 (23,9) (WEST.216) では、N~W 方向の波浪が卓越しており、その方向において、波高・周期に明確な差が見られないことがわかる。したがって、次項の波浪変形解析に用いる沖波の設計波 (波高・周期・波向) を以下の通りとした。

- ・ 沖波（有義）波高： $H_0=8.0\text{m}$ （波向きによらず一定）
- ・ 沖波周期： $T_0=12.0\text{s}$ （波向きによらず一定）
- ・ 波向： $N \cdot \text{NNW} \cdot \text{NW} \cdot \text{WNW} \cdot \text{W}$ （5方向）

このとき、沖波の波形勾配は以下となった。

$$\text{沖波波長 } L_0 = 1.56T_0^2 = 225\text{m}$$

$$\text{沖波波形勾配 } H_0/L_0 = 0.036 (\gg 0.002)$$

③浅海波の波浪変形計算

a. 計算条件

- ✓ 基礎方程式：候補地点では、以下の理由により波の回折・反射の影響は小さいと考え、波の屈折変形を解析することが可能なエネルギー平衡方程式を用いた。
 - ・ 港内ではなく、港外であること
 - ・ 50年確率波の有義波周期 12s = 波長 225m であり、反射面からの距離 / 波長が4以上であること
 - ・ 響灘3号埋立地の北護岸、西護岸はともに消波ブロックが施工されており、よって反射率は $0.3 \sim 0.5$ と小さいこと
 - ・ 耐波設計の際に用いる設計波高は進行波の波高を用いること

- ✓ 入射波（沖波）条件：前述の通り

- ✓ 入射波の方向スペクトル： $S(f, \theta) = S(f)G(f; \theta)$

- 周波数スペクトル $S(f)$ ：Bretschneider-光易型

$$S(f) = 0.257H_{1/3}^2 T_{1/3} (T_{1/3} f)^{-5} \exp[-1.03(T_{1/3} f)^4]$$

- 方向関数 $G(f; \theta)$ ：光易型

$$G(f; \theta) = G_0 \cos^{2S} \left(\frac{\theta - \theta_0}{2} \right)$$

ここに、

$$G_0 = \frac{1}{\pi} 2^{2S-1} \frac{\Gamma^2[S+1]}{\Gamma[2S+1]}$$

∵ Γ : ガンマ関数

$$S = \begin{cases} S_{\max} \cdot (f/f_p)^5 & : f > f_p \\ S_{\max} \cdot (f/f_p)^{-2.5} & : f < f_p \end{cases}$$

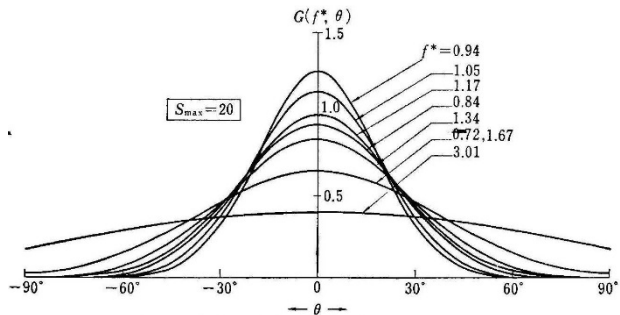


図 3.2-3 光易型方向関数の例示 (合田・鈴木, 1975)

✓ 方向集中度パラメータ S_{\max} :

図 3.2-4 より、 $S_{\max}=10$ (風波) とする。

I) 風波	: $S_{\max}=10$
II) 減衰距離の短いうねり (波形勾配が比較的大)	: $S_{\max}=25$
III) 減衰距離の長いうねり (波形勾配が小)	: $S_{\max}=75$

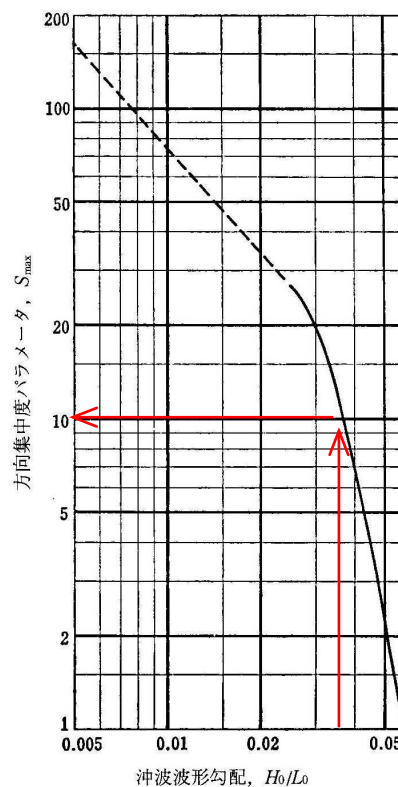


図 3.2-4 S_{\max} と H_0/L_0 の関係
(合田, 2008)

✓ 潮位 wl : H.W.L.=D.L.+1.60m

✓ 海底勾配 s : 1/100 (海底地形コンターより設定)

✓ 計算領域 : 図 3.2-5

- 元データ : 海底地形デジタルデータ、M7014 対馬海峡, 日本水路協会
(水深 200m までは 10m ピッチ、これより沖は 100m ピッチ)

- メッシュ : 50m ピッチ

- 領域 : 75km×65km

(深海波の目安となる水深 $h=L_0/2 \div 100\text{m}$ が入射境界となるように設定。さらに、波向 N~W であるため、矩形領域を 45° 回転。)

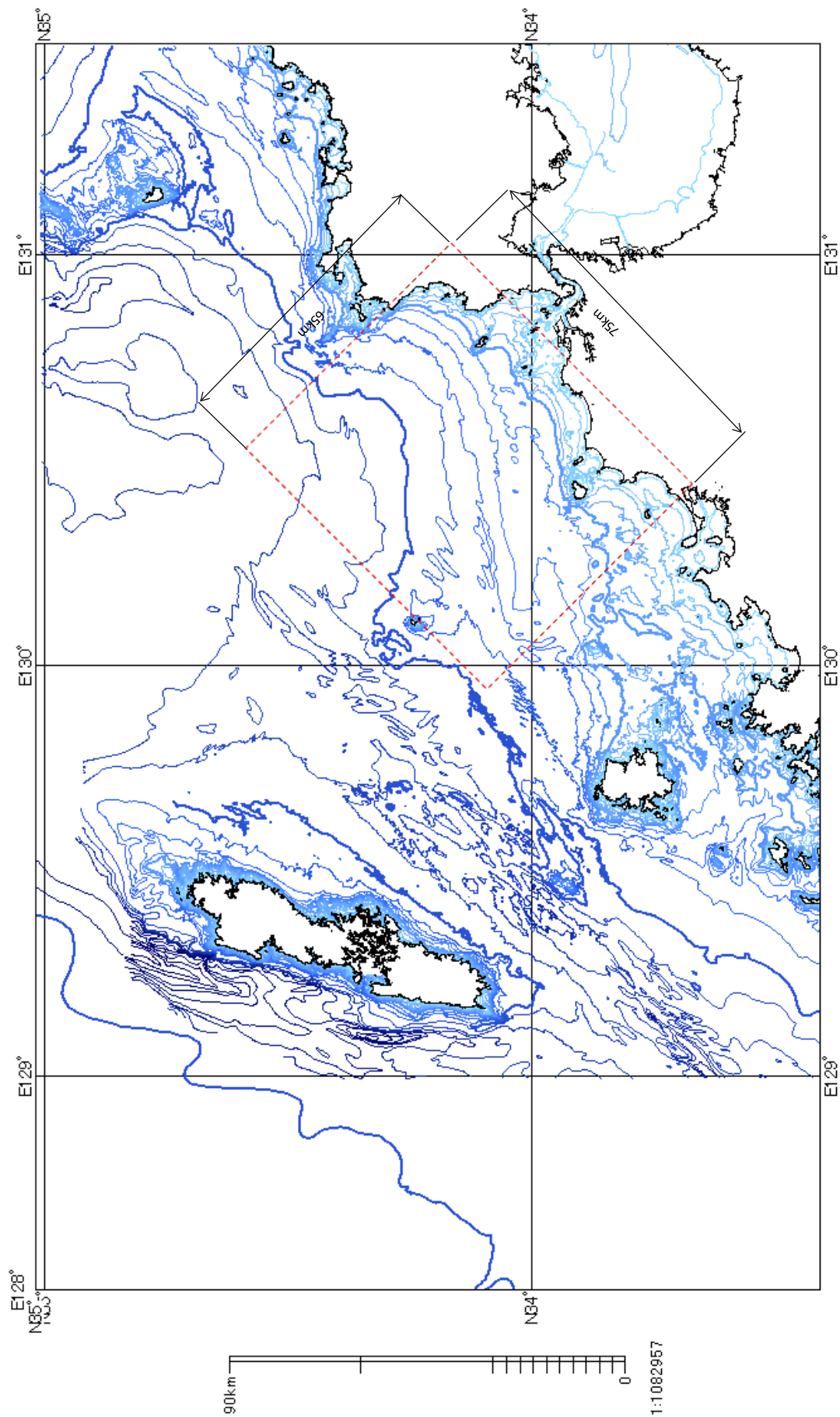


図 3.2-5 波浪変形計算の計算領域

b. 計算結果

実証研究設備設置予定地点での屈折係数が最も大きいNW方向入射での屈折係数コンターを図 3.2-6 に示す。

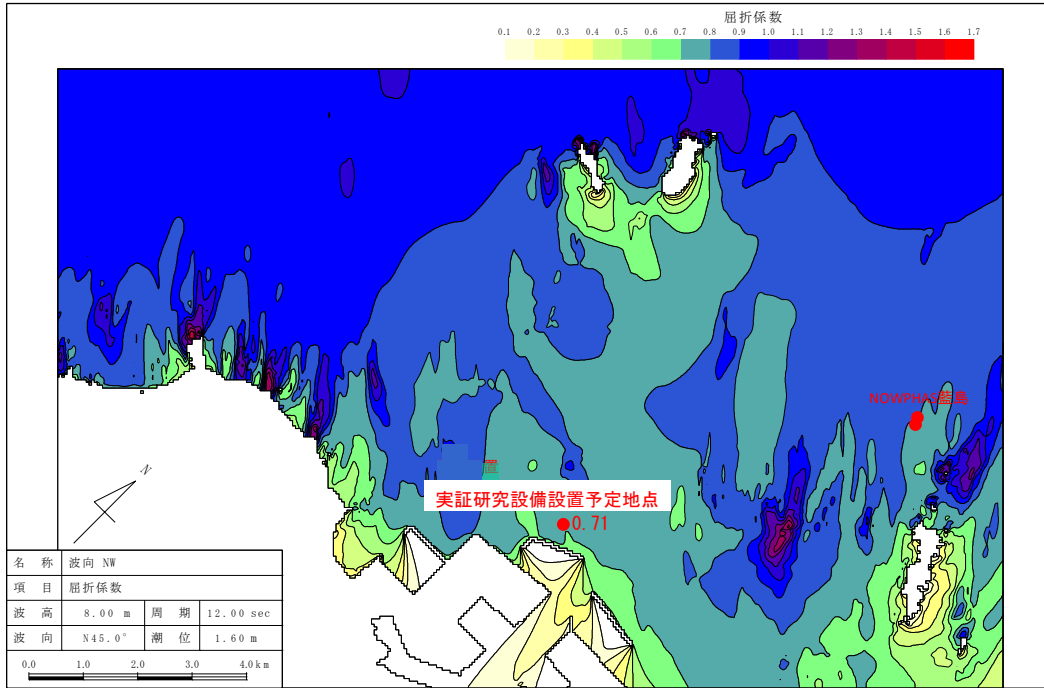


図 3.2-6 屈折係数コンター (NW 方向入射)

これより、実証研究設備設置予定地点における換算沖波波高を表 3.2-3 の通り決定した。

表 3.2-3 換算沖波波高

項目	設置点	備考
沖波波高 H_0	8.0m	
沖波周期 T_0	12s	
沖波波長 L_0	225m	$= 1.56 (g/2\pi) T_0^2$
水深 h	16.1m	H.W.L.
屈折係数 K_r	0.71	
換算沖波波高 H_0'	5.68m	$= K_r H_0$
波形勾配 H_0'/L_0	0.025	
相対水深 h/H_0'	2.83	

④実証研究設備設置予定地点における設計波の設定

合田 (1975) の浅水変形・碎波変形計算により、実証研究設備設置予定地点における設計波を設定した。ここで、海底勾配は海底地形コンターより 1/100 とした。計算結果を表 3.2-4 に示す。

表 3.2-5 反射波の影響度検討

項目	記号	設置点	備考
護岸・防波堤反射率	λ	0.4	異形消波ブロック斜面
方向集中度	S_{max}	10	風波
角度	θ_{11}	44°	
"	θ_{12}	-44°	
"	θ_{21}	19°	
"	θ_{22}	-8°	
波のエネルギー	$P_E(\theta_{11})$	96%	波のエネルギー累加曲線(下図)
"	$P_E(\theta_{12})$	11%	"
"	$P_E(\theta_{21})$	79%	"
"	$P_E(\theta_{22})$	41%	"
反射波のエネルギー	ΔE_1	85%	$=P_E(\theta_{11})-P_E(\theta_{12})$
"	ΔE_2	38%	$=P_E(\theta_{21})-P_E(\theta_{22})$
反射波高/入射波高	H_{R1}/H_{I1}	0.37	$=\sqrt{(\Delta E_1) \times \lambda}$
"	H_{R2}/H_{I2}	0.25	$=\sqrt{(\Delta E_2) \times \lambda}$
設計波高割増率		10%	$=1 - \sqrt{1 + (H_{R1}/H_{I1})^2 + (H_{R2}/H_{I2})^2}$

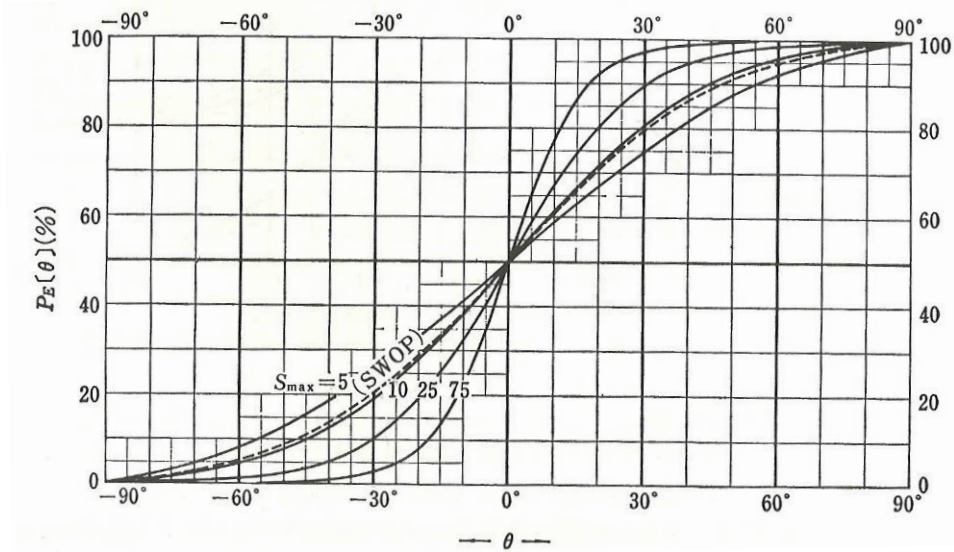


図 3.2-8 波のエネルギー累加曲線

これより、設計波を 10%割増することとした。なお、算出値は、設置点近傍（西南西 約 250m）に設置される観測タワーの設計波以下であることから、安全側の評価として観測タワーの設計波を採用した。

$$H_{1/3} = 5.51 \times 1.10 = 6.06\text{m} \Rightarrow 6.3\text{m} \quad \text{：設計有義波高}$$

$$H_{max} = 9.75 \times 1.10 = 10.73\text{m} \Rightarrow 10.9\text{m} \quad \text{：設計最高波高}$$

以上より、実証研究設備設置予定地点における設計波をまとめると、表 3.2-6 のようになった。

表 3.2-6 設計波

有義波高 $H_{1/3}$	最高波高 H_{max}	有義波周期 $T_{1/3}$	備考
6.3m	10.9m	12s	50年確率波

⑥耐久性照査用波浪（使用限界波）の設定

耐久性照査用波浪すなわち使用限界照査に用いる設計波は、長尾(1994)に基づき設定した。具体的には、NOWPHAS 藍島の波浪観測データ(1996年～2007年)を用いて、図 3.2-9 の通り供用期間(20年)中に出現する波高別頻度より一万回波として算定した。

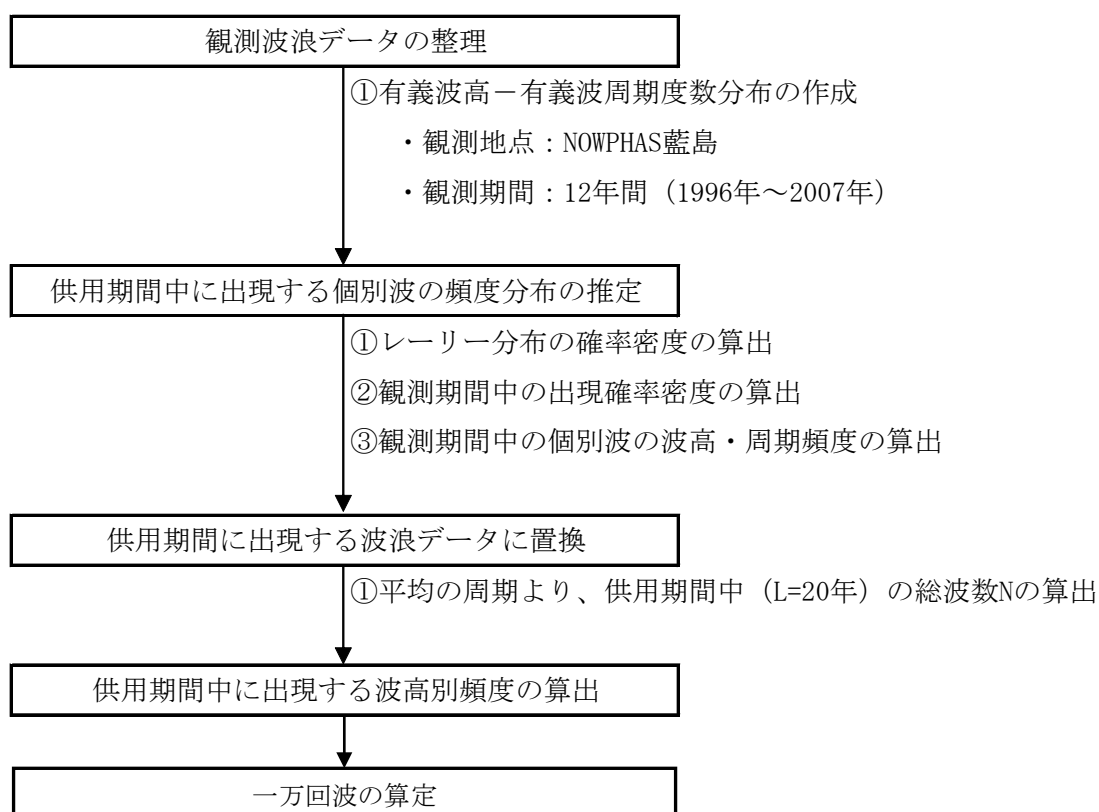


図 3.2-9 使用限界波の算出フロー

図 3.2-9 に基づき、NOWPHAS 藍島における一万回波を算定した。さらに波高については、図 3.2-9 に基づき計算した NOWPHAS 藍島における 50 年確率有義波高(表 3.2-7 参照)と実証研究設備設置予定地点の 50 年確率有義波高の比率 $6.3/6.0=1.05$ を乗じることにより割増した。

以上より、耐久性照査用波浪（使用限界波）は波高 4.3m、周期 7s となった。

表 3.2-7 浅水変形・碎波変形計算結果（海底勾配 1/100、波形勾配 0.028）

相対水深 h/H0'	有義波高比 H1/3/H0'	最高波高比 Hmax/H0'	浅水係数 KS
3.47	0.9358	1.6823	0.9351

項目	記号	単位	NOWPHAS 藍島位置
換算沖波波高	H0'	m	6.4
有義波高比	H1/3/H0'	-	0.9358
有義波高	H1/3	m	5.99
最高波高比	Hmax/H0'	-	1.6823
最高波高	Hmax	m	10.77

≒ 6.00

2) 実況研究候補海域における波浪（常時）の推定

NOWPHAS 藍島での間欠観測記録（2時間ごと、1996～2007年）を用いて、実証研究設備設置予定地点での常時波浪を推定した。NOWPHAS 藍島での波高・周期別出現頻度表を表 3.2-8 に示す。表 3.2-8 から得られた NOWPHAS 藍島での年平均有義波高および年平均有義波周期は、それぞれ 0.66m、4.8s であった。

有義波高については波浪変形計算結果の NOWPHAS 藍島と実証研究設備設置予定地点の 50 年確率有義波高の比率 $6.3/6.0=1.05$ を乗じた。また最高波高は、IEC61400-3（6.4.1.6 Extreme wave height）と港湾基準とを比較して、安全側の設定となる前者に基づき有義波高の 1.86 倍とした。

以上より、実証研究設備設置予定地点での年平均波浪は、有義波高 0.7m、最高波高 1.3m、周期 5s となった。

表 3.2-8 NOWPHAS 藍島 波高・周期別出現頻度表（通年）

1996年-2007年 通年													
波高(m)	周期(sec)										計	割合(%)	平均(sec)
	0~2	2~4	4~6	6~8	8~10	10~12	12~14	14~16	16~18	18~			
0.00 ~ 0.50		12581	10301	885	19	1					23787	48.27	4.03
0.50 ~ 1.00		2336	10399	3204	194	4					16137	32.74	5.08
1.00 ~ 1.50		20	3617	2022	190	3					5852	11.87	5.83
1.50 ~ 2.00			802	1432	103	1					2338	4.74	6.33
2.00 ~ 2.50			41	745	44						830	1.68	6.77
2.50 ~ 3.00			1	231	28						260	0.53	7.25
3.00 ~ 3.50				39	22	1					62	0.13	7.84
3.50 ~ 4.00				3	8	1					12	0.02	8.49
4.00 ~ 4.50					4						4	0.01	8.82
4.50 ~ 5.00													0.00
計		14937	25161	8561	612	11					49282	100.00	

3) 候補海域における風と波の同時生起性の検証

①NOWPHAS 藍島・玄界灘 観測諸元

NOWPHAS（ナウファス）のうち、実証研究候補海域に隣接する藍島および玄界灘における沿岸風、波浪データを用いて、その相関出現分布を調べ、極値風・極値波の同時生起性を検証

した。

NOWPHAS 藍島・玄界灘の設備諸元（菅原ら（1999）より）、観測データ諸元を以下に示す。

表 3.2-8 設備諸元

諸元	NOWPHAS 藍島	NOWPHAS 玄界灘 (宗像大島)
波観測		
当該地点観測開始年月	1972年1月	1997年11月
現波高計種別	海象計((株)カイジョー)	海象計((株)カイジョー)
当該機器観測開始年月	2004年8月	1997年11月
測定点(世界測地系)	N34°00'43" E130°47'35"	N33°56'02" E130°28'05"
設置水深 h, 設置高 R	h=D.L.-21.1(m), R=0.6(m)	h= D.L.-39.5(m), R=1.8(m)
過去履歴	超音波式波高計 USW :1972.1~2004.7	超音波式波高計 USW or 超音波流速計型波向計 CWD :1980.8~1997.10(別位置)
風観測		
当該地点観測開始年月	1971年11月	1989年1月
現波高計種別	超音波式風向風速計 ((株)カイジョー)	超音波式風向風速計 ((株)カイジョー)
当該機器観測開始年月	1995年10月	1998年3月
測定点(世界測地系)	N33°59'55" E130°48'38"	N33°54'38" E130°26'29"
設置標高 h、地上高 R	h=D.L.+32.0(m), R=10.0(m)	h=D.L.+119.6(m), R=24.6(m)
過去履歴	風車型自記風向風速計 :1971.11~1982.10 超音波式風向風速計 :1982.11~1995.9	超音波式風向風速計 :1989.1~1998.2 (海上保安部大島固定局タワーに 設置。R=10.5m)

表 3.2-9 観測データ諸元

	波観測		風観測	
	間欠観測 (従来)	連続観測	間欠観測 (従来)	連続観測
データ種	平均波 \bar{H}, \bar{T} 有義波 $H_{1/3}, T_{1/3}$ 1/10 波 $H_{1/10}, T_{1/10}$ 最高波 H_{\max}, T 波向 (度) β	同左	10分平均 風速 U 風向 (16方位) θ	同左
データ 間隔	毎偶正時 (2時間ごと)	20分ごと	毎偶正時 (2時間ごと)	10分ごと
生データ	$\Delta t 0.5s \times$ 前後 10 分=2,400 個	同左	$\Delta t 5s \times$ 前 10 分 =120 個	$\Delta t 0.5s \times$ 前 10 分 =1,200 個 ^{*3}
データ取得 期間	1991~2007 ^{*1}	藍島： 2007 ^{*2} 玄界灘： 2005~2007 ^{*2}	藍島： 1996~2007 ^{*2} 玄界灘： 1997~2007 ^{*2}	藍島： 2007 ^{*2} 玄界灘： 2005~2007 ^{*2}

※1) 1991~2003 : 国土交通省港湾局監修 : 全国港湾海洋波浪観測資料 ((財) 沿岸技術研究センター発刊)

2004~2005 : NOWPHAS (ナウファス) HP

(<http://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/>) よりダウンロード

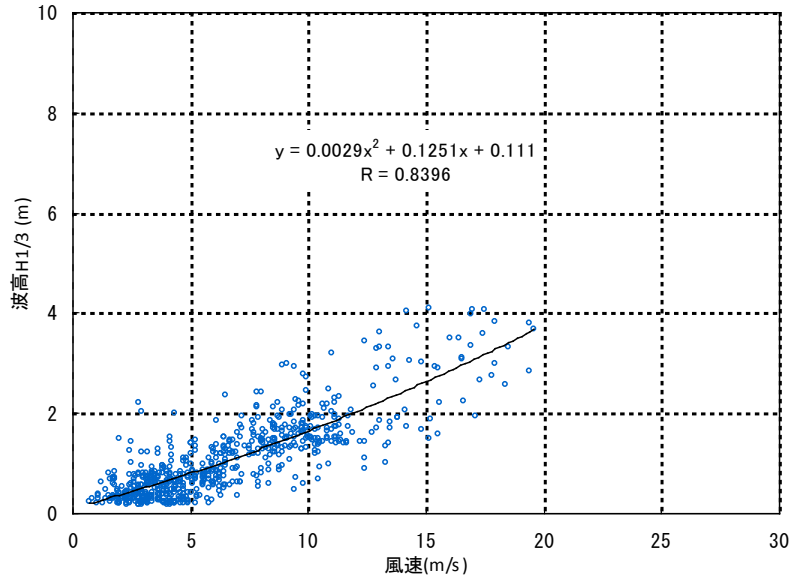
2006~2007 : 国土交通省港湾局提供 ((独) 港湾空港技術研究所 海洋・水工部 海象情報研究領域より受領)

※2) 国土交通省港湾局提供 ((独) 港湾空港技術研究所 海洋・水工部 海象情報研究領域より受領)

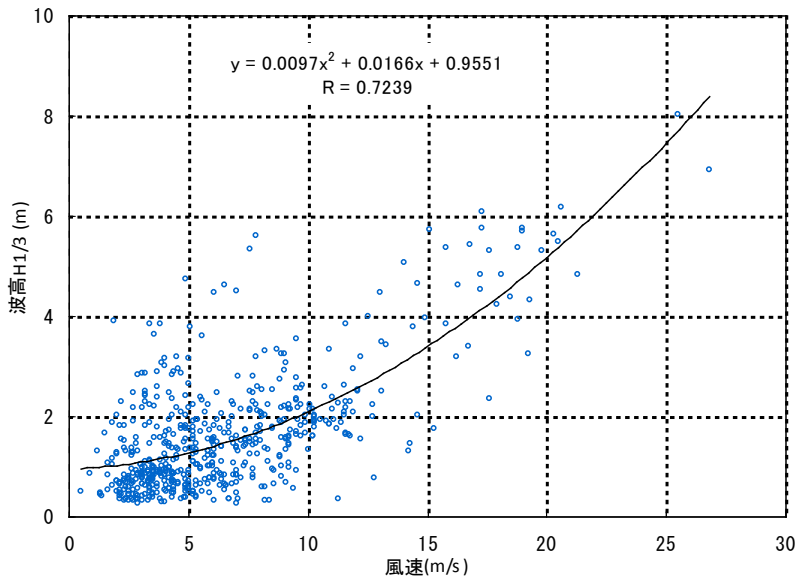
※3) 国土交通省港湾局提供 ((独) 港湾空港技術研究所 海洋・水工部 海象情報研究領域より連続観測生データを受領)。ただし、玄界灘 2005 は $\Delta t 5s \times$ 前 10 分=120 個のデータ。

②間欠観測記録による検証

間欠観測記録 (2時間ごと) のうち、波・風データが同時観測されている藍島 : 1996~2007 年、玄界灘 : 1997~2007 年のデータを用い、両方のデータが存在する上位高波 5 波の相関性を調べた。その結果を図 3.2-9 に示す。図 3.2-9 から、高波発生 (時化) 時に限定することにより、風速と波高の相関性が向上すること、玄界灘よりも藍島の方が相関は高いことがわかった。



(a) 藍島



(b) 玄界灘

図 3.2-9 10 分平均風速 U と有義波高 $H_{1/3}$ の相関 (上位 5 波)

③連続観測記録による検証

前項にて日スケールの風速と波高の相関性を確認したが、ここでは連続観測記録を用いて時間スケールの相関出現分布について検証した。対象とする時化は、連続観測記録が存在する、藍島：ピーク日時 2007/7/15 6:00、玄界灘：ピーク日時 2006/9/18 10:00 およびピーク日時 2006/10/24 12:00 とした。

各時化を含む約 2 ヶ月間の経時変化を図 3.2-10 に示す。

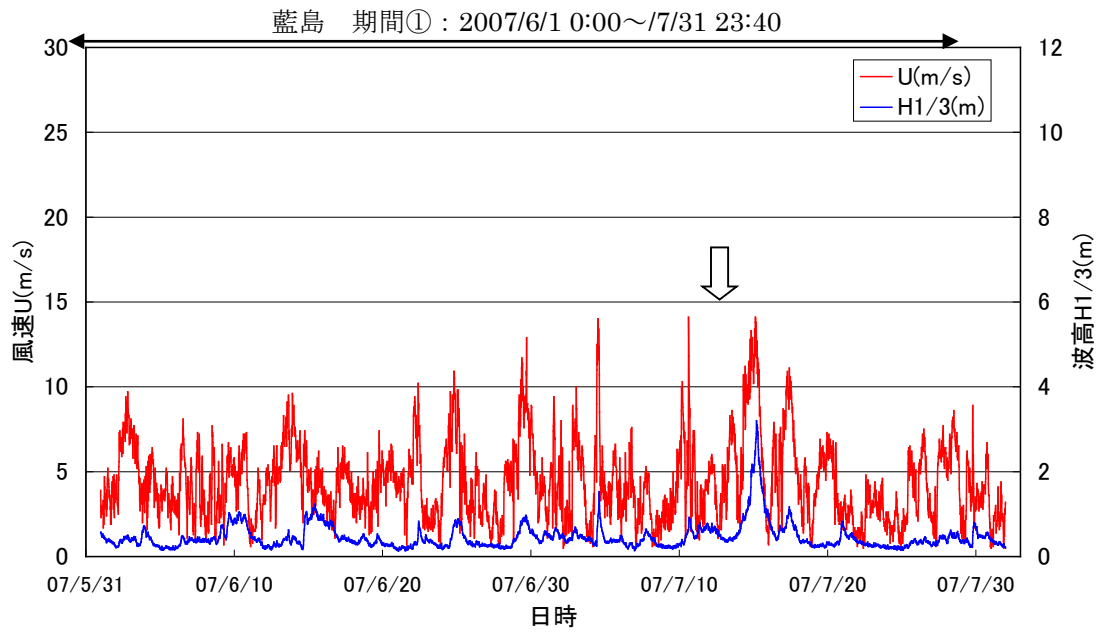


図 3.2-10a 藍島 (連続観測) 2007/6~7 経時変化

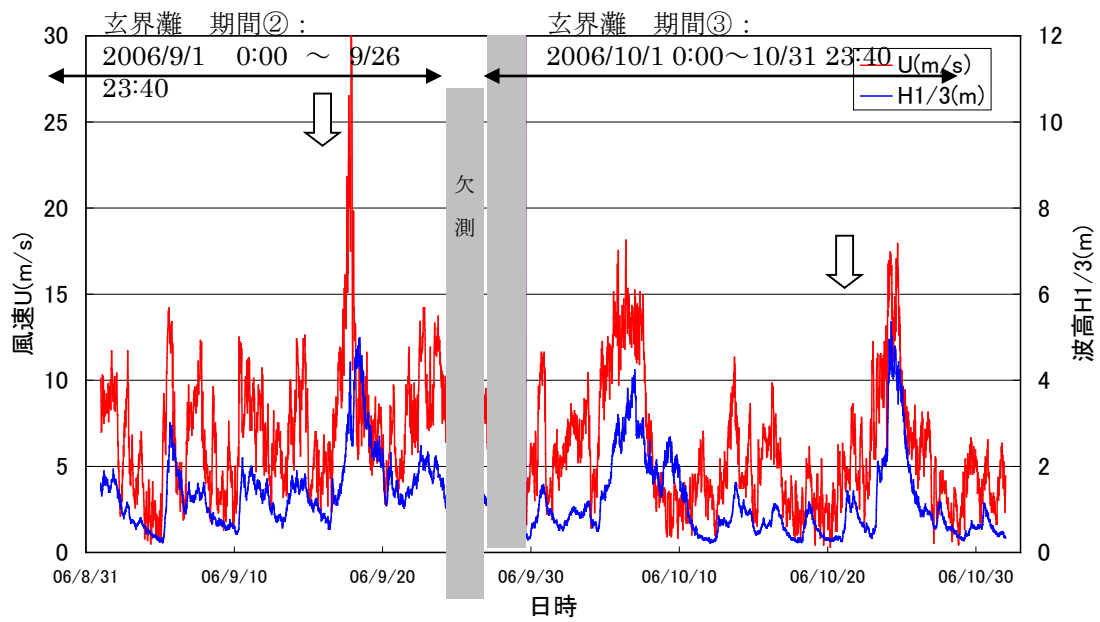


図 3.2-10b 玄界灘 (連続観測) 2006/9~10 経時変化

各時化の前後 10 日間について拡大した経時変化を図 3.2-11 に示す。

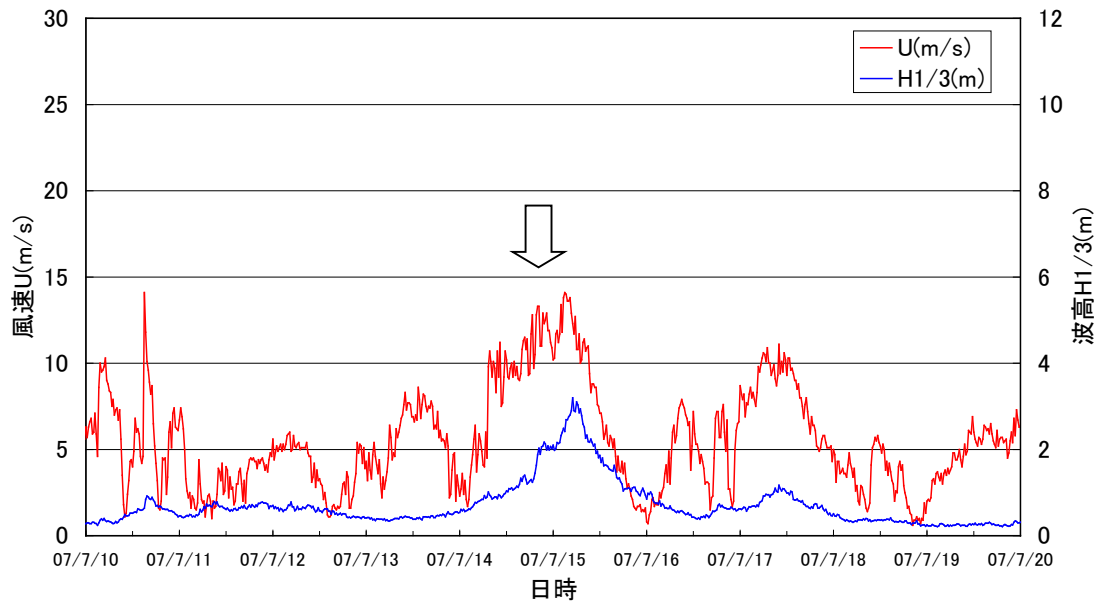


図 3.2-11a 藍島 (連続観測) 2007/7/10~7/20 経時変化

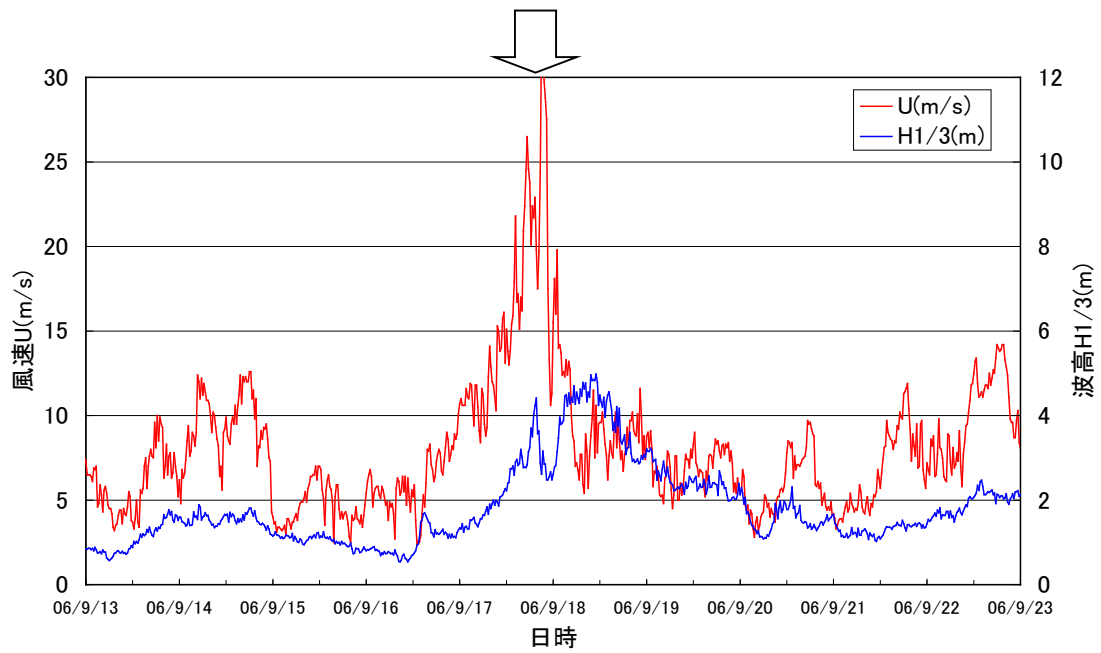


図 3.2-11b 玄界灘 (连续観測) 2006/9/13~9/23 経時変化

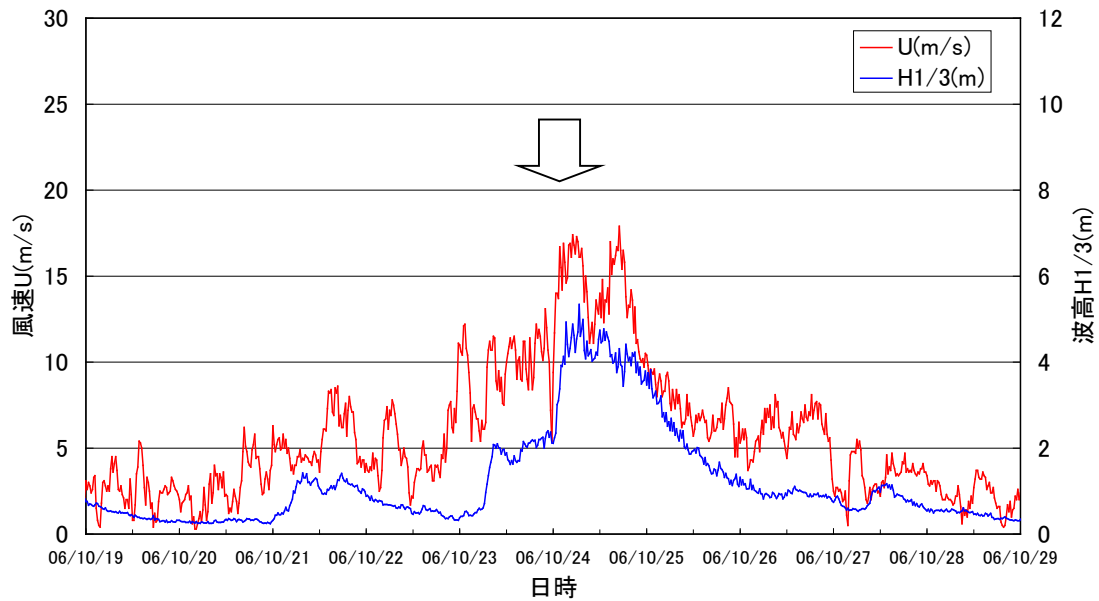


図 3.2-11c 玄界灘（連続観測） 2006/10/19～10/29 経時変化

図 3.2-10 中の期間①②③における 10 分平均風速 U と有義波高 $H_{1/3}$ のパワースペクトル、コヒーレンスおよびフェイズを図 3.2-12 に示す。

まず、パワースペクトルを見ると、30 時間以上の日スケールの変動について、10 分平均風速 U と有義波高 $H_{1/3}$ は類似のスペクトル形を示していることがわかった。これにより、日スケール変動成分のコヒーレンスが高くなっている。フェイズ（位相差）については、玄界灘の日スケール変動成分については、20～30 度程度の位相差（波高の遅れ）が見受けられるが、藍島の日スケール変動成分については明確ではなかった。

玄界灘の観測記録に位相差が見られる理由としては、藍島に比べ外洋からのうねりの伝播が卓越していることが考えられる。沖波表より、玄界灘周辺海域の方が藍島周辺海域よりも沖波周期が大きく、すなわち波形勾配が小さい、つまり方向集中度パラメータ S_{max} が大きくなっている。このことから、風速と波高の同時生起性については、波形勾配や方向集中度と関係があるのではないかと推察された。

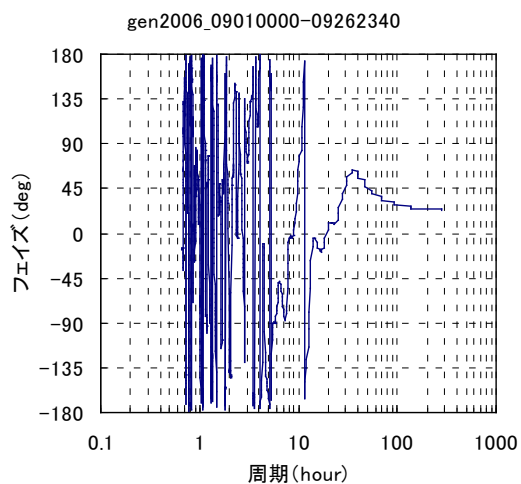
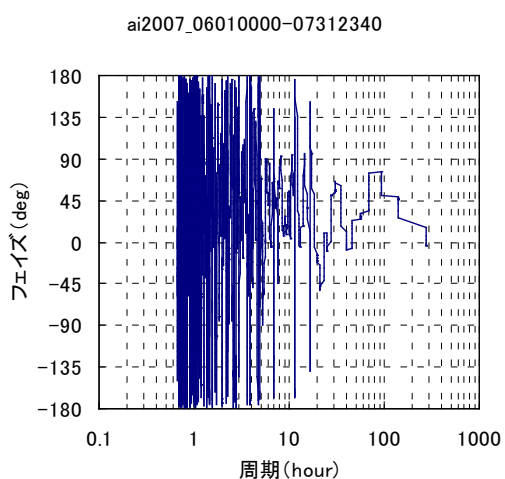
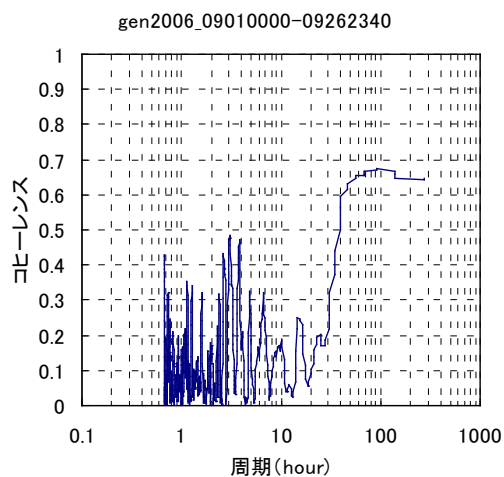
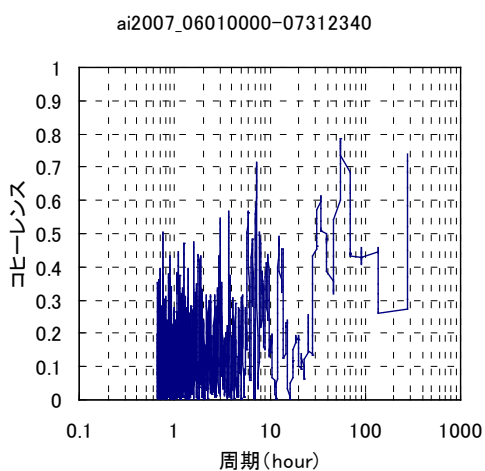
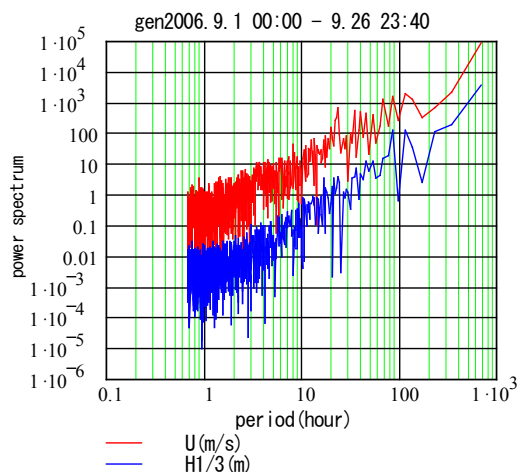
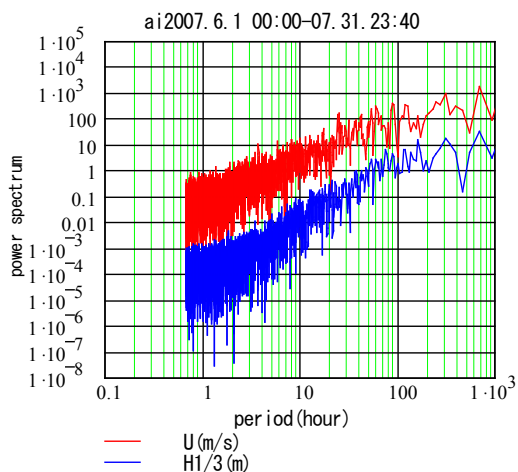


図 3.2-12a 藍島 (期間①) における
パワースペクトル, コヒーレンス, フェイズ

図 3.2-12b 玄界灘 (期間②) における
パワースペクトル, コヒーレンス, フェイズ

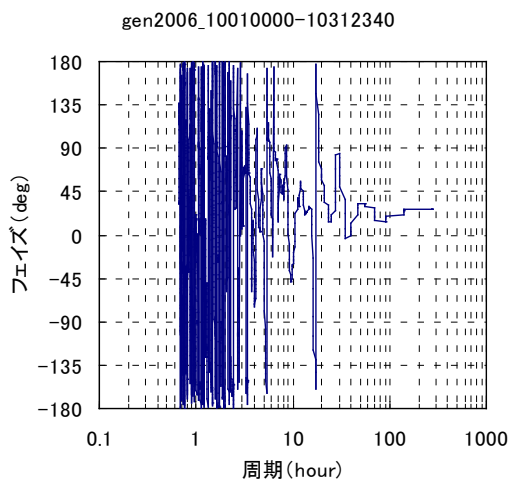
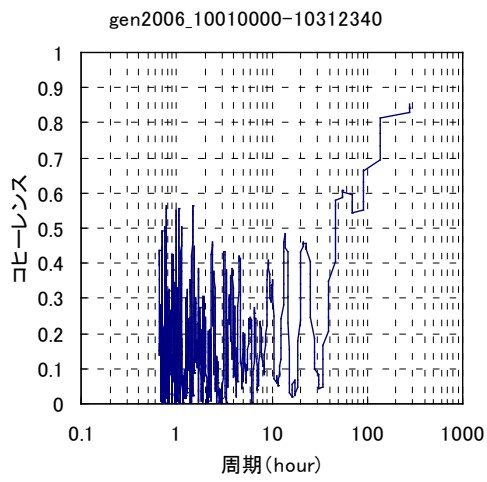
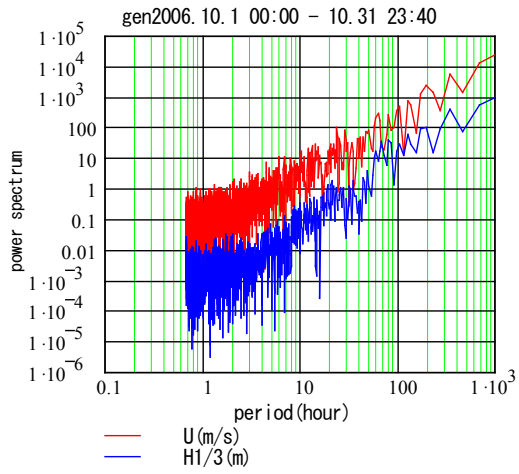


図 3.2-12c 玄界灘 (期間③) における
パワースペクトル、コヒーレンス、フェイズ

④まとめ

以上の検証結果をまとめると以下の通りとなる。

- ・候補位置（NOWPHAS 藍島に隣接）においては、極値風と極値波は同時生起する可能性が高いと考えられる。ただし、本検証はあくまで代表値である 10 分平均風速と有義波高に基づくものであり、設計で用いるガスト影響を考慮した最大風速や、一時化の波群中の最高波高に基づく検証ではないことに注意する必要がある。この点についても、実証研究において慎重に検討すべき課題である。以上より、本調査では、安全側に、極大風速（最大風速）と極大波高（最高波高）が同時かつ同一方向に作用するものとする。
- ・実証研究候補海域において同時生起性が高い理由として、風波が卓越する海域であることが考えられる。逆に、うねりが来襲する海域においては、風速に対して波高の位相遅れが生じ、両者の同時生起性（相関性）は低くなるものと考えられる。

(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で波浪・海潮流観測は実施していないが、実証研究の一環として洋上風況観測タワーとともに海象計を設置し、観測を継続している。

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

実証研究海域の波高・周期・波向・流れ・潮位を観測するため、観測タワーから北西方向約 100m の水深 14m 程度の海底に海象計を設置した。海象計の概要を図 3.2-13 に示す。

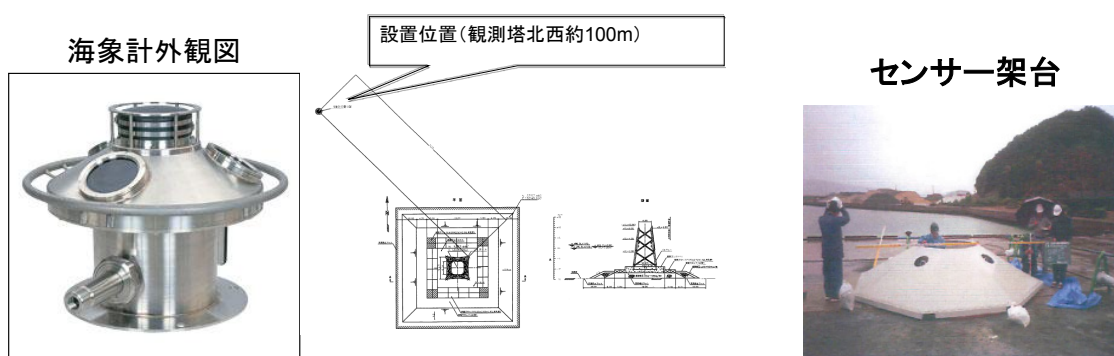


図 3.2-13 海象計の概要

- 型 式 : TU-200
 測定方式 : 水粒子速度 超音波ドップラー方式
 (120° 交差3ビーム)
 表面波 超音波伝搬時間測定方式
 (鉛直1ビーム 振動子ジンバル保持方式)
 使用周波数 : 500kHz (水粒子速度)、200kHz (表面波)
 雷サージ保護 : 5KV (10/200μs)
 防水筐体材質 : SUS316 (一部SUS304使用)
 設置水深 : 8~65m
 その他 : 海象計送受波器用架台 1式
 4芯波浪観測用ケーブル 1本

図 3.2-14 海象計の仕様

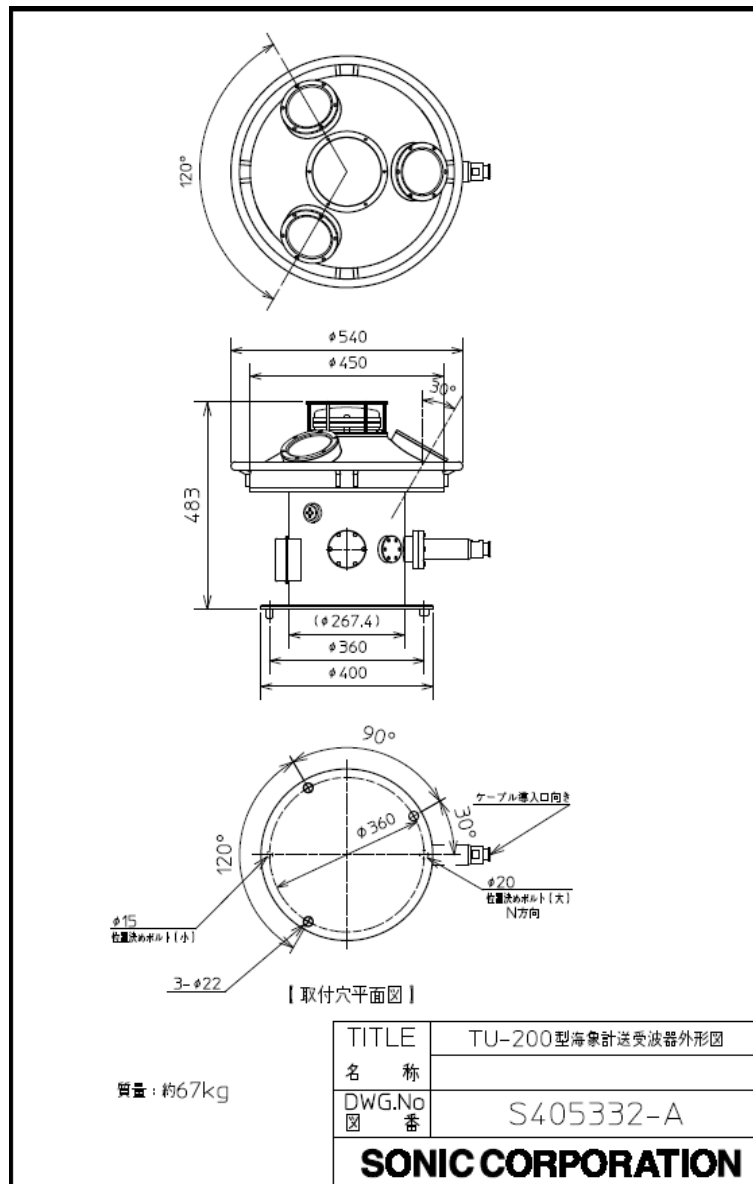


図 3.2-15 海象計の外形図

当海象計の特徴と実績を以下に示す。

- ・交差3ビームの観測により、高精度な方向スペクトルの取得が可能。
- ・ジンバル機構により、センサが傾いても表面波の捕捉が可能。
- ・24時間連続リアルタイム観測が可能。
- ・一台の水中センサで、波高・波向・流況等の多項目同時観測が可能。
- ・センサは架台内に格納し、魚網対策を実施。
- ・平成11年特許取得（第948472号）。（独）港湾空港技術研究所との共同研究による最新の処理手法を実用化。
- ・同等機器は、国土交通省のNOWPHAS（45箇所）ほか、50台超の出荷実績あり。

2) 波浪の観測結果

北九州市沖洋上観測タワー付近における月別平均有義波高を図3.2-16、表3.2-10に示す。2013年～2016年の月別平均有義波高は0.3～1.2mの範囲内にあり、年平均有義波高は0.6～0.7mとなっていた。月別に見ると、概ね12月～翌年1月の期間は1.0m以上となるが、2月～11月にかけては1.0m以下で、特に5～8月は0.5m以下となる月が多かった。

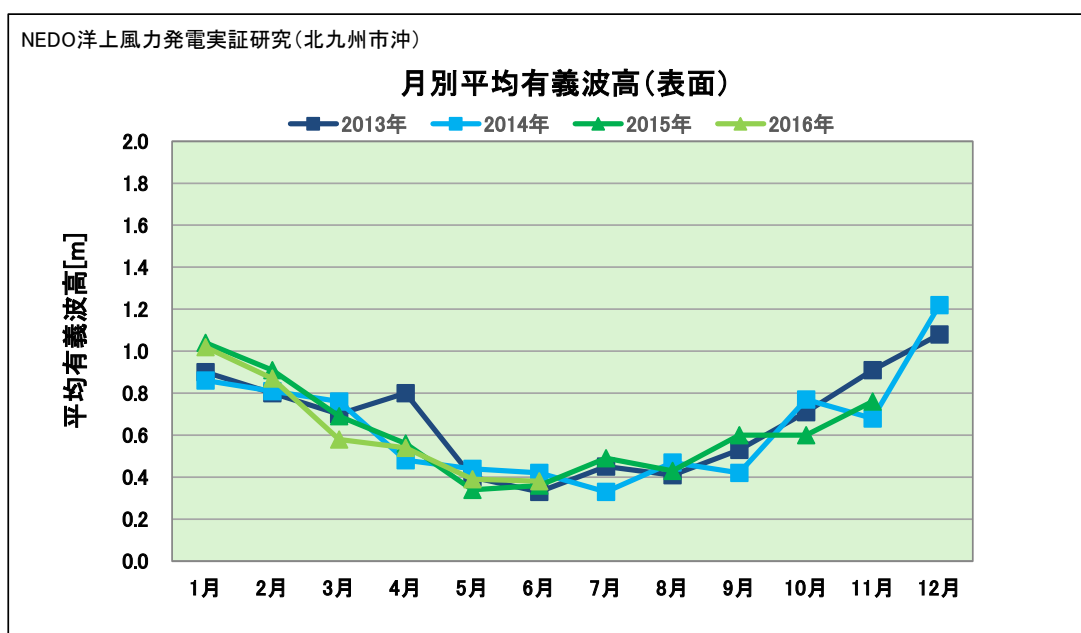


図3.2-16 実証研究海域での月別平均有義波高

表 3.2-10 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(北九州市沖)

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	0.9	0.8	0.7	0.8	0.4	0.3	0.5	0.4	0.5	0.7	0.9	1.1	0.7
	2014年	0.9	0.8	0.8	0.5	0.4	0.4	0.3	0.5	0.4	0.8	0.7	1.2	0.6
	2015年	1.0	0.9	0.7	0.6	0.3	0.4	0.5	0.4	0.6	0.6	0.8	0.8	0.6
	2016年	1.0	0.9	0.6	0.5	0.4	0.4							
データ取得率 [%]	2013年	100.0	100.0	79.5	80.0	97.8	94.7	99.7	99.3	99.1	89.8	99.2	100.0	94.9
	2014年	99.7	90.5	88.6	99.7	99.9	99.6	97.2	99.6	99.1	86.9	97.5	100.0	96.5
	2015年	100.0	100.0	99.4	99.9	100.0	100.0	90.2	99.2	98.6	99.9	100.0	100.0	98.9
	2016年	100.0	100.0	99.7	100.0	100.0	100.0							

北九州市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3.2-17、表3.2-11に示す。2013年～2016年の月別平均有義波周期は3.7～6.2秒の範囲内にあり、年平均は4.9秒となっていた。月別に見ると、概ね11月頃から翌年2月頃の期間は6.0秒以上になる場合があるが、3月～10月にかけてはそれ以下の周期となっていた。

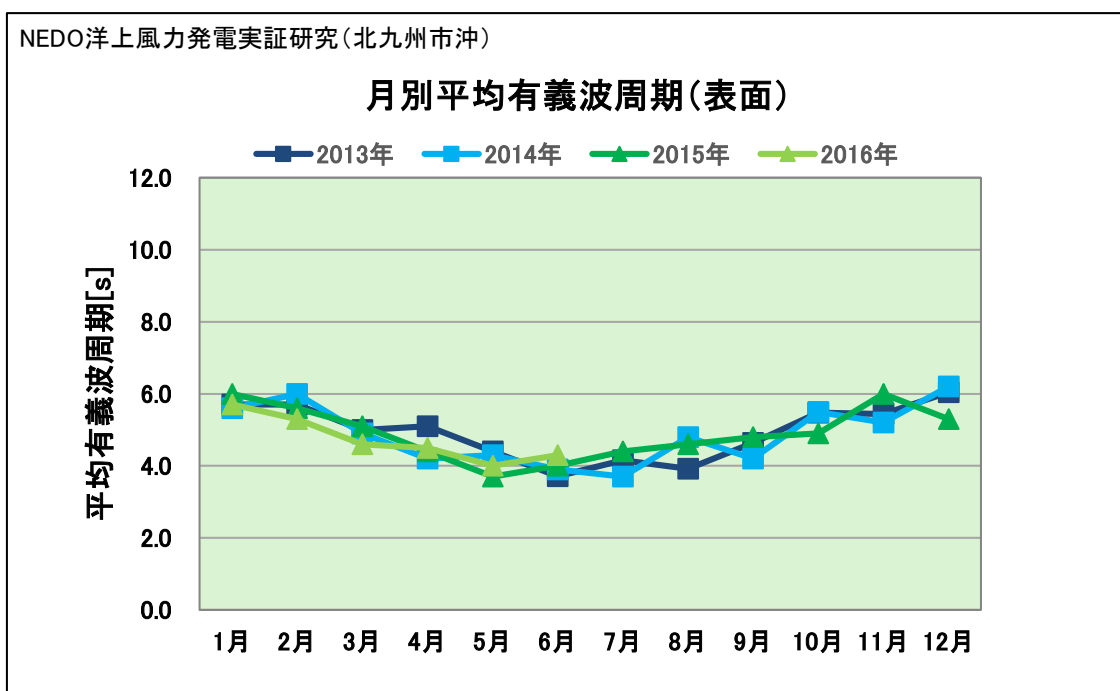


図 3.2-17 実証研究海域での月別平均有義波周期

表 3.2-11 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(北九州市沖)

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	5.7	5.7	5.0	5.1	4.4	3.7	4.2	3.9	4.6	5.5	5.4	6.0	4.9
	2014年	5.6	6.0	4.9	4.2	4.3	3.9	3.7	4.8	4.2	5.5	5.2	6.2	4.9
	2015年	6.0	5.6	5.1	4.4	3.7	4.0	4.4	4.6	4.8	4.9	6.0	5.3	4.9
	2016年	5.7	5.3	4.6	4.5	4.0	4.3							
データ取得率 [%]	2013年	100.0	100.0	79.5	80.0	97.8	94.7	99.7	99.3	99.1	89.8	99.2	100.0	94.9
	2014年	99.7	90.5	88.6	99.7	99.9	99.6	97.2	99.6	99.1	86.9	97.5	100.0	96.5
	2015年	100.0	100.0	99.4	99.9	100.0	100.0	90.2	99.2	98.6	99.9	100.0	100.0	98.9
	2016年	100.0	100.0	99.7	100.0	100.0	100.0							

3.3 海潮流

(1) 海潮流の推定

候補位置における海潮流の状況を把握するため、既存調査事例を調べた。第七管区海上保安本部では、2005年3月のひびきコンテナターミナルの供用開始に伴い、響航路を航行する船舶に対しての流況情報の提供に必要な基礎データ整備を目的として、関門港響航路において潮流観測(2005年10月17日～11月4日、超音波式ドップラー流速計 ADCP)を実施している。当観測報告では、「関門港響航路付近の潮流は、最大流速が1kt未満で流れは弱く(図3.3-1)、全般的に周期的な往復流を示すが、流れが弱いため気象等の影響を受けやすい海域である」と結論付けている。

以上の知見より、本実証研究候補海域における海潮流は流速 $V=0.5\text{m/s}$ ($\approx 1\text{kt}$) とした。

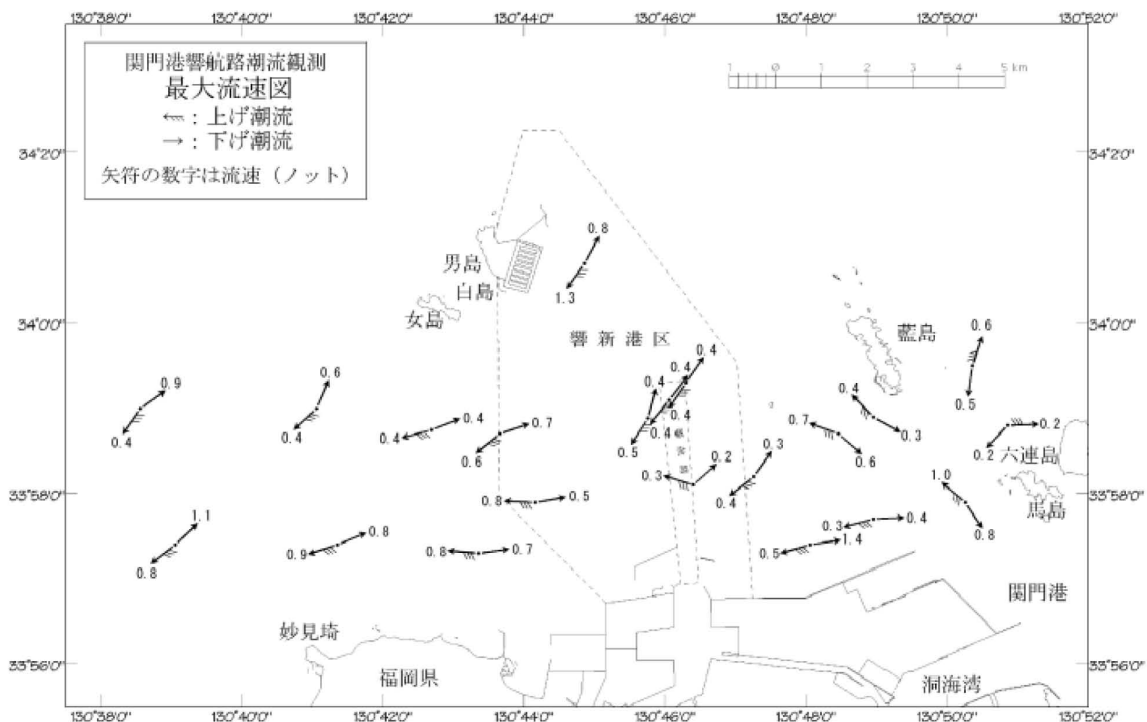


図 3.3-1 響航路潮流観測 大潮期最大流速図 (海上保安庁第七管区海上保安本部, 2006)

(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

北九州市沖洋上観測タワー付近の月別平均流速(海面下 3.5m)を図 3.3-2、表 3.3-1 に示す。2013年～2015年の月別平均流速(海面下 3.5m)は、年による若干の違いが見られるが、0.10～0.23 m/s の範囲内で、年平均は 0.11～0.19m/s となっており、流速は年間を通して小さかった。

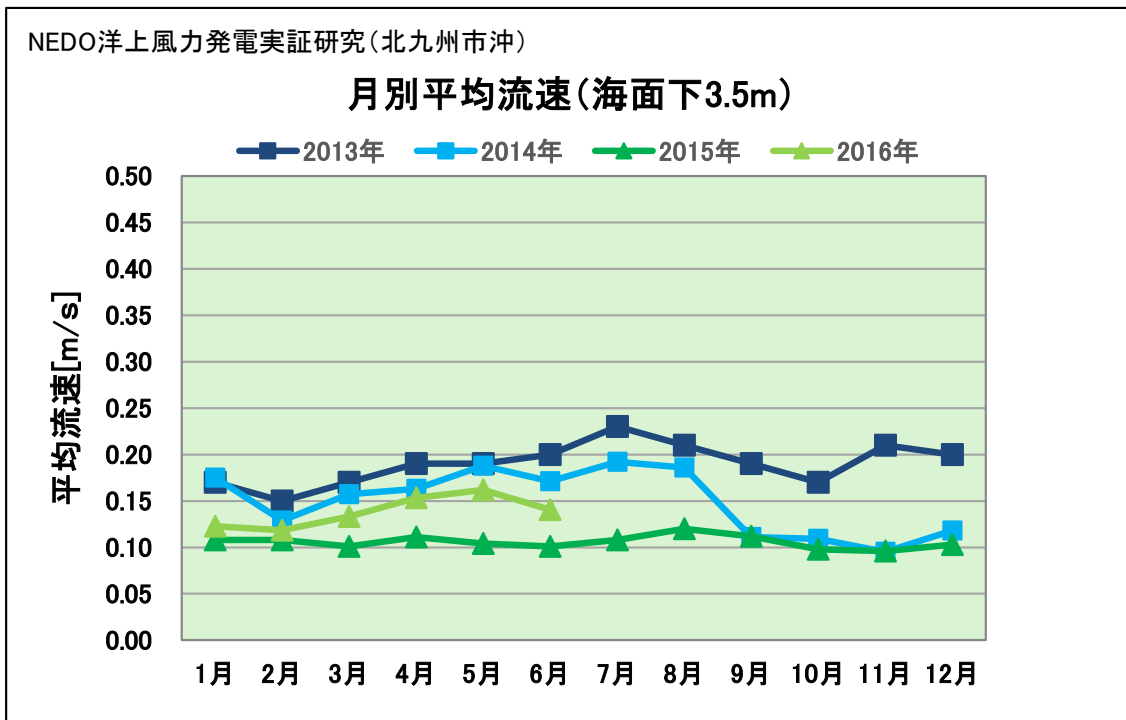


図 3.3-2 実証研究海域での月別平均流速

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(北九州市沖)

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3.5m] 【m/s】	2013年	0.17	0.15	0.17	0.19	0.19	0.20	0.23	0.21	0.19	0.17	0.21	0.20	0.19
	2014年	0.18	0.13	0.16	0.16	0.19	0.17	0.19	0.19	0.11	0.11	0.10	0.12	0.15
	2015年	0.11	0.11	0.10	0.11	0.10	0.10	0.11	0.12	0.11	0.10	0.10	0.10	0.11
	2016年	0.11	0.11	0.09	0.10	0.10	0.11							
データ 取得率 [%]	2013年	99.9	99.2	78.7	79.6	93.5	83.8	95.4	92.1	96.5	89.6	98.0	93.3	91.6
	2014年	89.7	83.6	80.8	97.2	95.2	94.2	91.3	97.4	95.6	86.3	96.3	99.2	92.2
	2015年	98.8	98.8	98.1	98.1	96.7	98.6	89.0	98.8	97.8	98.1	98.5	98.7	97.5
	2016年	98.7	98.9	98.7	97.5	98.2	98.4							

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・海底地形等に関する既往の測量結果の妥当性を確認するため、簡易的に深淺測量を行った。水深図と測量位置は図 3.4-1 の通りであり、既往の測量結果が今回の結果と大きく変わらないことを確認した。なお次項の「3.4(2)土質調査」の結果を受けて、実証研究設備設置予定地点は深淺測量を行った位置から東側に移動している。当深淺測量の目的はあくまで既往の測量結果の確認であったこともあり、移動後の実証研究設備設置予定地点の実際的水深は、次項の「3.4(2)土質調査」で実施した海上ボーリング調査の際に合わせて確認した。

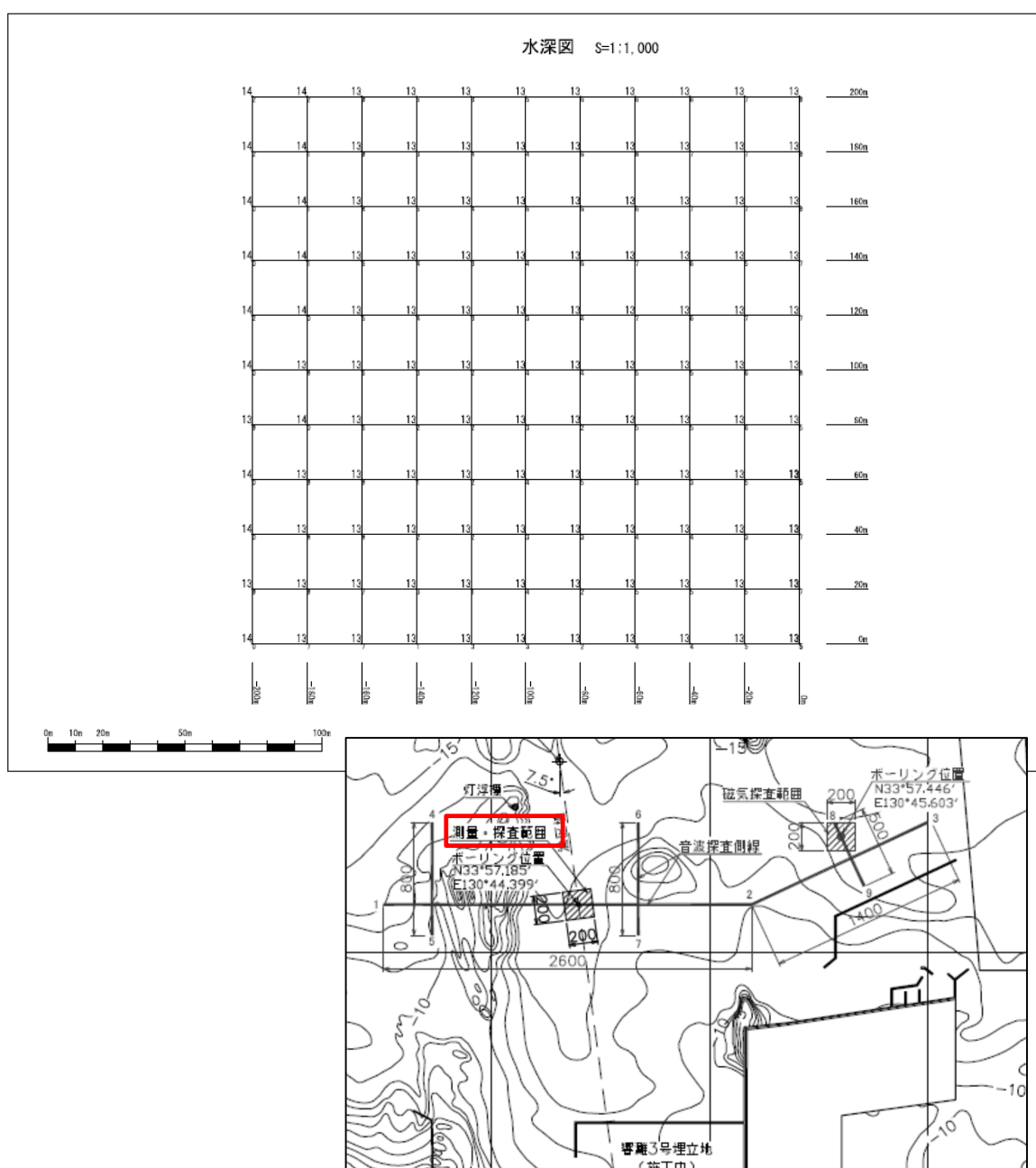


図 3.4-1 水深図と測量位置

(2) 土質調査

実証研究設備設置予定地点の海底地質等を把握するため、地質構造の調査として海上音波探査および海上ボーリングを実施し、孔内試験として標準貫入試験、PS 検層、密度検層（孔径検層含む）を実施して工学的層区分を検討した。また、試料採取ボーリングにより室内試験供試体を採取した。

図 3.4-2 に示す通り、地質構造調査として海上ボーリングを 3 箇所、海上音波探査を図の横断測線とこれに直交する副測線の 3 測線で実施した。なお図中の OMM-S（Offshore Met Mast-Spot）は観測タワーの設置予定地点を、OWTC（Offshore Wind Turbine Generator）は洋上風車の設置予定地点を示す。

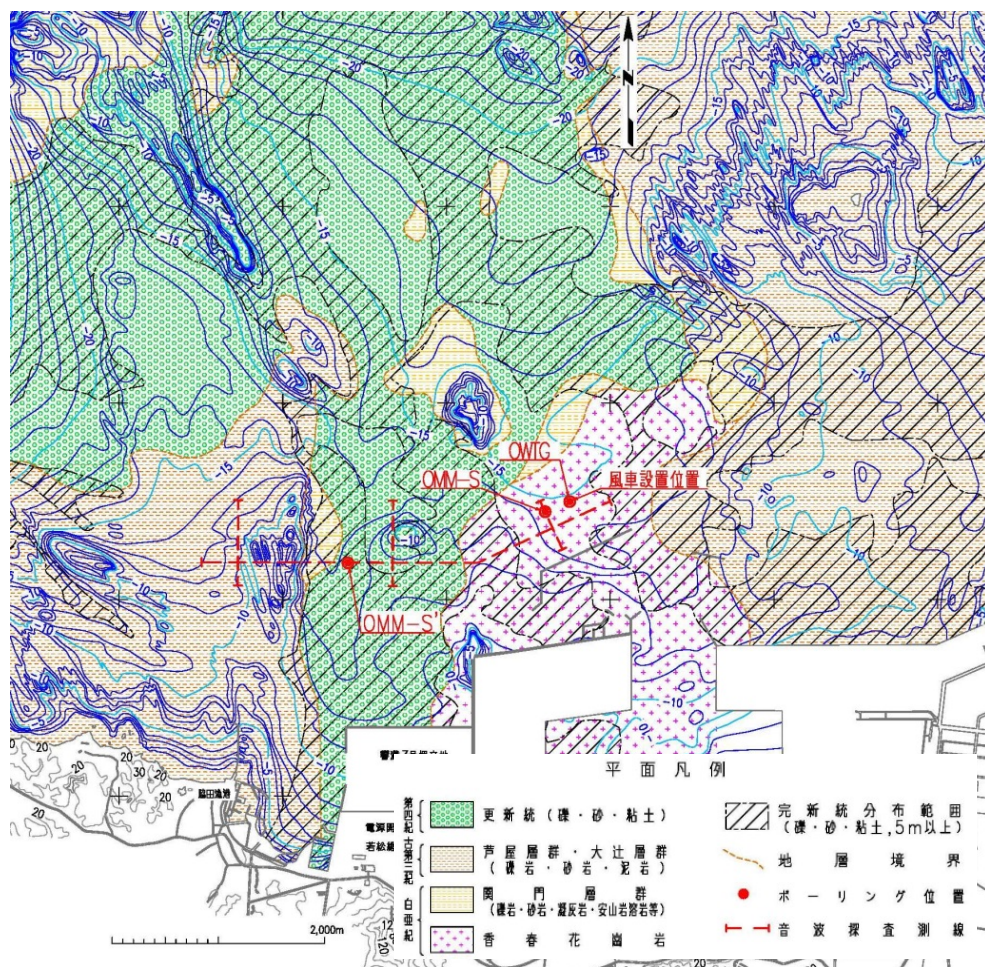


図 3.4-2 地質構造調査の実施箇所

調査の初期には、計画時点での観測タワーの予定設置位置であった OMM-S'孔でのボーリングと海上音波探査を実施した。OMM-S'孔では、堆積層（沖積層）が 5m 以上堆積し、その下には基盤岩の旧河川を埋積した更新統（洪積層）が分布していることを予想していた。OMM-S'孔での孔内試験の結果、沖積層の強度が予想より低いことが主に標準貫入試験から予想されたため、東側の花崗岩分布域へ位置を移動することとした。OMM-S'孔の地質の予想と調査結果との比較を図 3.4-3 に示す。

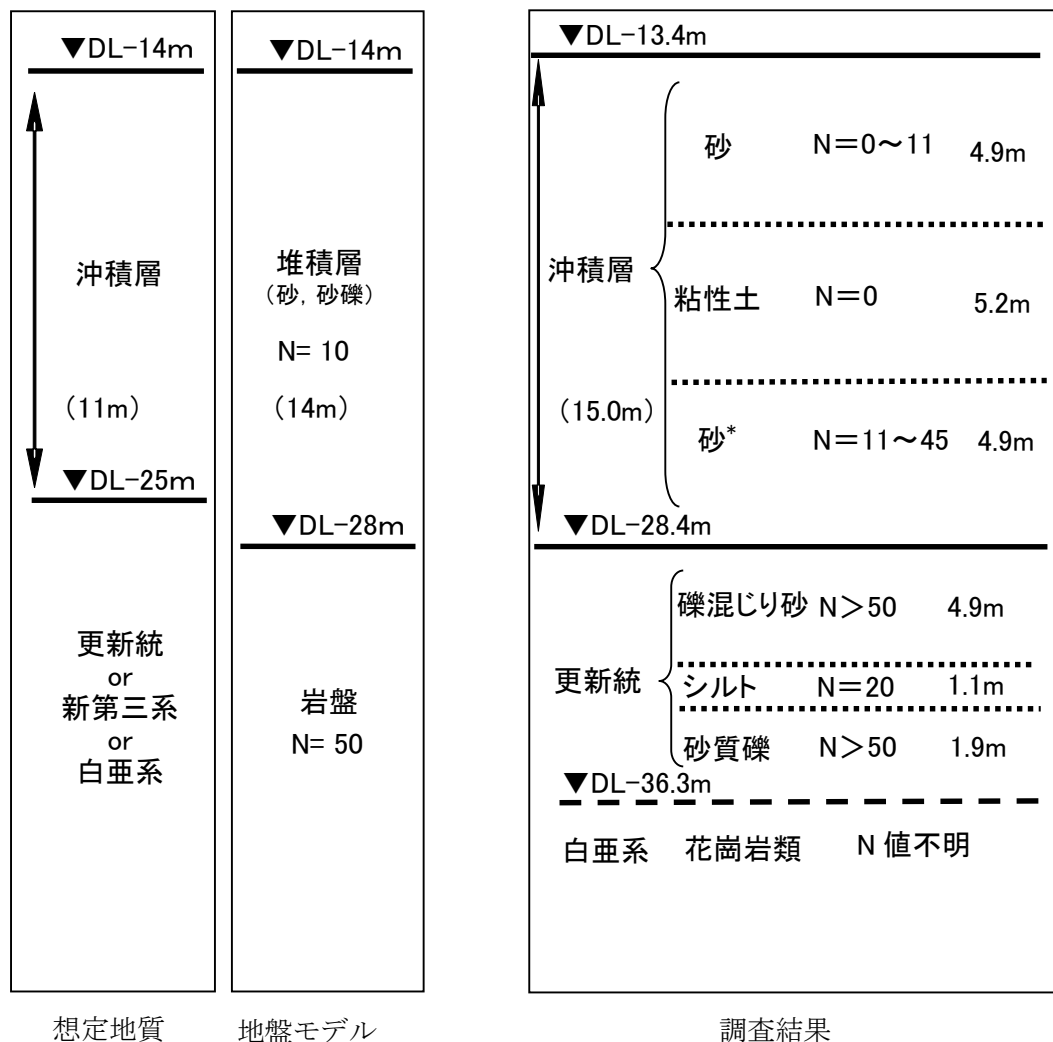


図 3.4-3 OMM-S'孔の地質の予想と調査結果との比較

図 3.4-3 左側は OMM-S'地点を想定したものである。文献調査により、水深を DL-14m に設定し、堆積層厚を近傍で最も大きい値である 11m と評価した。また地盤モデルでは、堆積層厚に 3m の裕度を見込んで 14m とした。地盤物性については、近傍にボーリングデータが存在しないため、地質構造が比較的類似している白島近傍を参照した上で、堆積層 (=沖積層) を安全側に N=10 と評価し、堆積層の下に N=50 の岩盤が存在すると考えた。

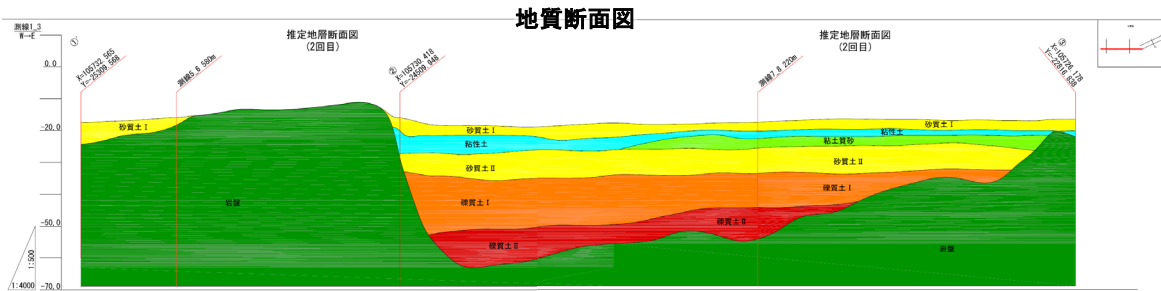
図 3.4-3 右側は、海上ボーリング結果を示したものである。水深と沖積層の厚さは概ね想定通りであったが、沖積層の上部 10m 区間の N 値が低く、特に N=0 と極端に強度の低い粘性土層が 5m も連続している点が想定と大きく異なっていた。

そのため、沖積層が薄い花崗岩の分布海域へ観測タワーの設置位置を移動し、OMM-S 孔を風車の設置位置に OWTG 孔を掘削した。両孔ともに 5m 未満の砂層 (沖積層) の下に花崗岩の岩盤が分布し、花崗岩が工学的基礎として十分な強度を持つことを標準貫入試験で確認した。

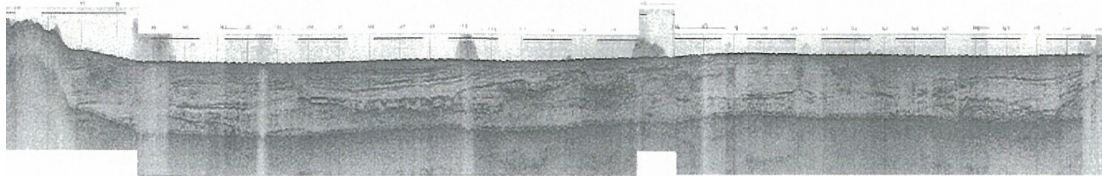
OMM-S'周辺の横断方向の海上音波探査結果を図 3.4-4 に示す。OMM-S'周辺には完新統 (洪積層) の埋没谷と厚い沖積層が予想されていた。埋没谷は、深度が深いためエネルギーの大きなスパーカー波源とし、沖積層は解像度の高いソノプローブ波源とした。これらを重ね合せて

解釈図を作成した。

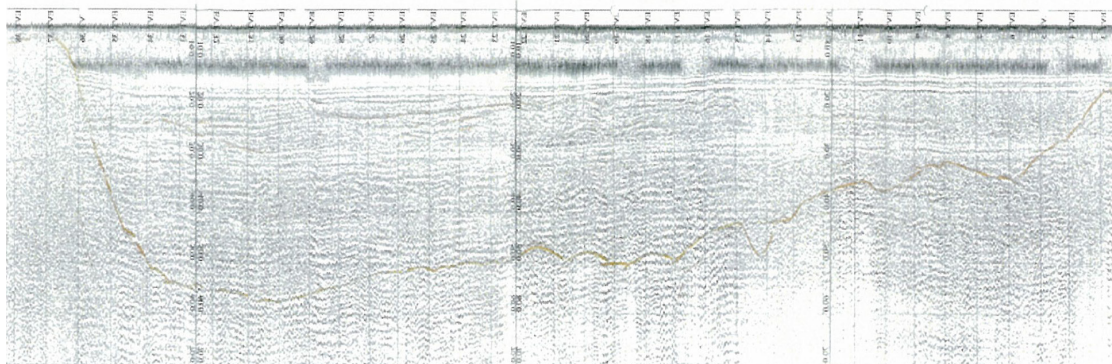
2つの波源を適用することにより、浅部から深部までの主な地層境界に相当する反射面を得ることができた。結果は図 3.4-4 の通りで、OMM-S'孔との対応から、完新統（洪積層）は赤く表示した礫質土Ⅱとオレンジの礫質土Ⅰ、沖積層は黄色の砂質土Ⅱが下部砂層、水色の粘性土が中部泥層、上部の黄色の砂質土Ⅰが上部砂層に相当する。



図：ソノプローブ記録



図：スパーカー記録



図：合成記録

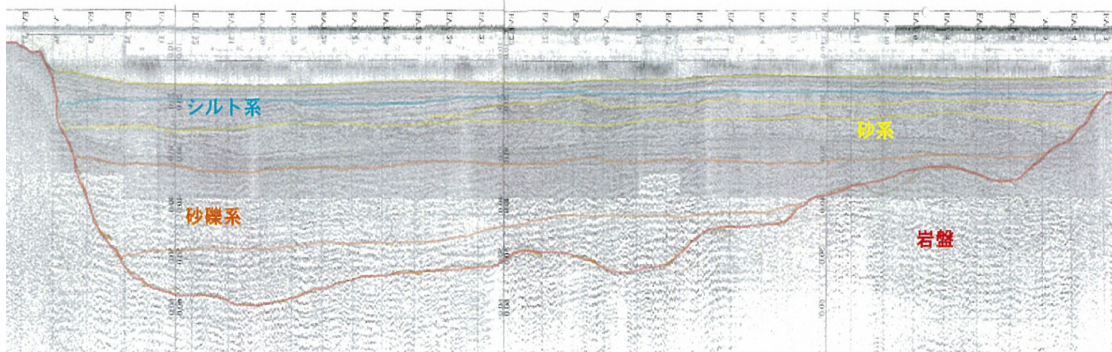


図 3.4-4 OMM-S'周辺の横断方向の海上音波探査結果

ボーリング試料の観察により、柱状図に示す土質区分を行った。このうち、標準貫入試験の結果により細分不要な地層を統合すると、弾性波探査による反射面と同様な地質区分となった。

ボーリング柱状図

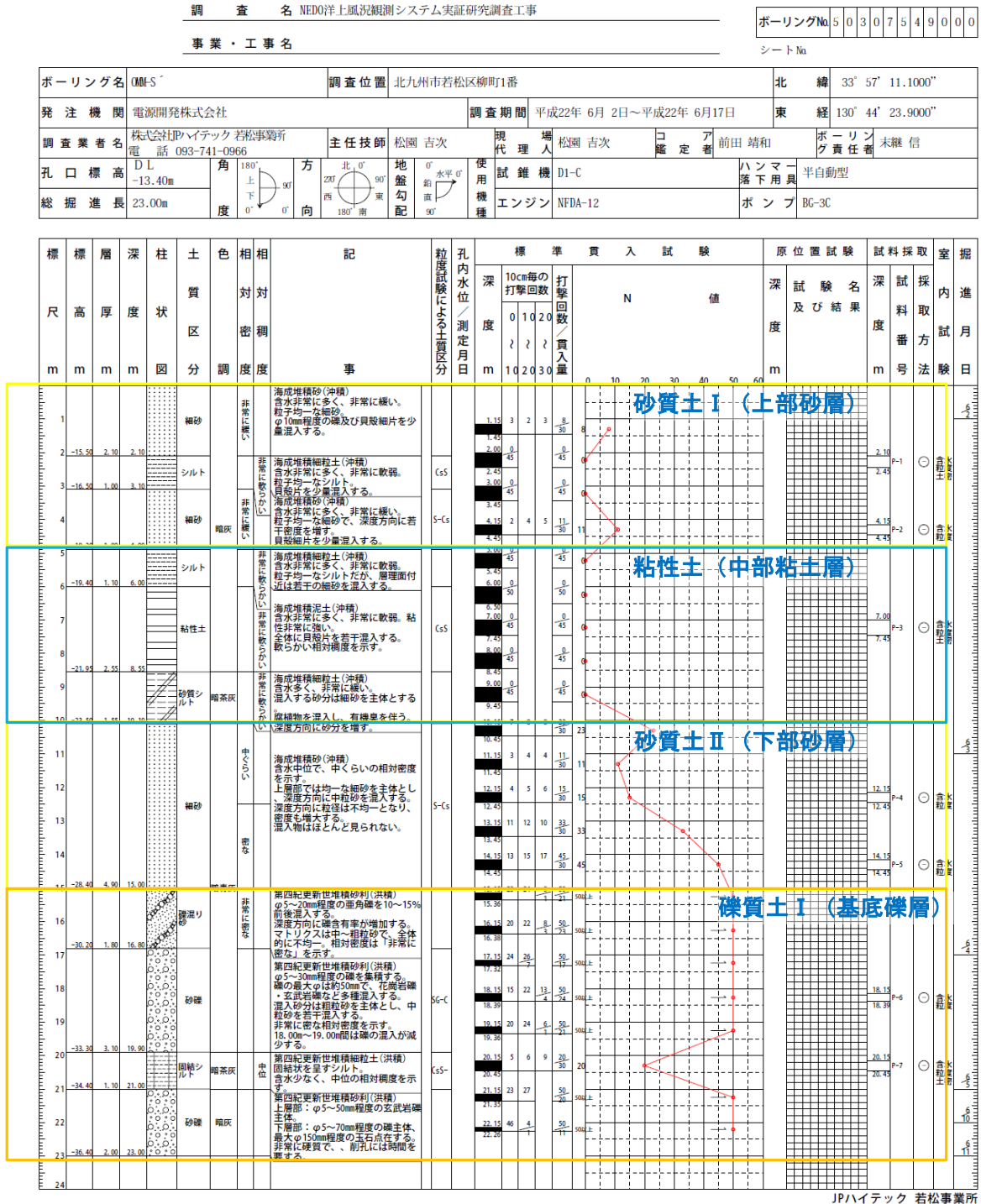


図 3.4-5 土質区分を行った OMM-S' 孔のボーリング柱状図

室内土質試験では、当初計画で観測タワーを計画した OMM-S 孔と、見直した位置の OMM-S 孔のそれぞれに隣接して掘削した試料採取ボーリングによって採取した試料を用いた。試料採取位置は柱状図に示した。

OMM-S 孔には、全ての沖積層と完新統の上部層が出現していることから、全ての地層区分において物理試験を実施した。OMM-S 孔は上部砂層と岩盤のみであり、岩盤は十分堅硬で平坦面を成していることから工事上の懸念がないと判断し、上部砂層のみ力学特性を把握することとした。

ボーリング柱状図

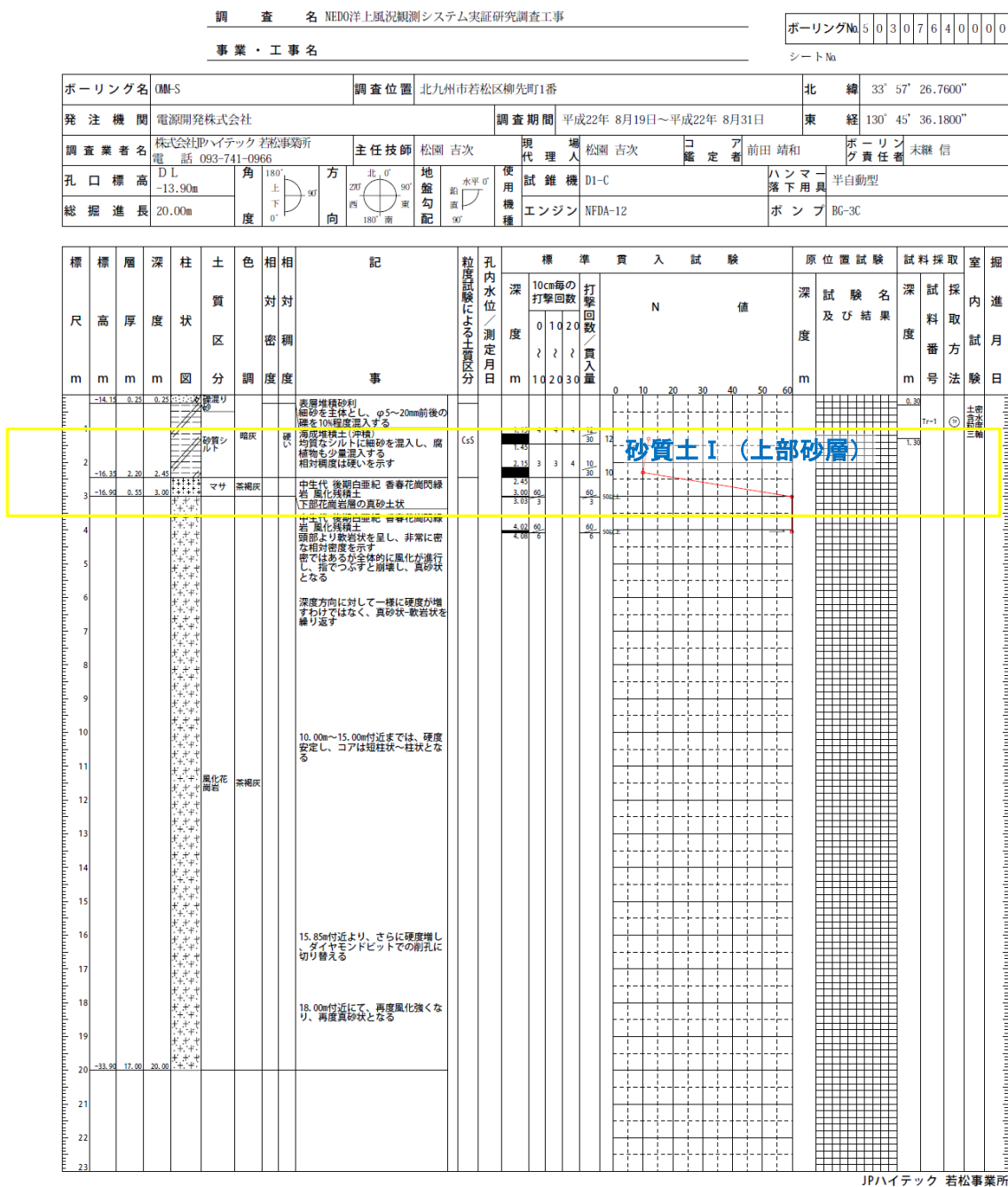


図 3.4-6 OMM-S 孔のボーリング柱状図

表 3.4-1 室内土質試験実施一覧表

孔名	試料番号	深度	試験名	柱状図の土質名
OMM-S'	P-1	2.10m~2.45m	土粒子の密度	シルト
			含水比	
			粒度(粘性土)	
	P-2	4.15m~4.45m	含水比	細砂
			粒度	
	P-3	7.00m~7.45m	土粒子の密度	粘性土
			含水比	
			粒度(粘性土)	
	P-4	12.15m~12.45m	含水比	細砂
			粒度	
	P-5	14.15m~14.45m	含水比	細砂
			粒度	
	P-6	18.15m~18.45m	含水比	砂礫
			粒度	
P-7	20.15m~20.45m	土粒子の密度	固結シルト	
		含水比		
		粒度(粘性土)		
OMM-S	Tr-1	0.30m~1.30m	土粒子の密度	砂質シルト
			含水比	
			粒度(粘性土)	
			三軸圧縮(UU)	
			圧密	
	Tr-2	0.30m~1.30m	三軸圧縮(UU)	砂質シルト
	Tr-3	0.30m~1.30m	三軸圧縮(UU)	砂質シルト
			圧密	
	Tr-4	0.30m~1.30m	土粒子の密度	砂質シルト
			含水比	
			粒度(粘性土)	
			繰返し三軸圧縮	
	Tr-5	0.30m~1.30m	土粒子の密度	砂質シルト
			含水比	
粒度(粘性土)				
繰返し三軸圧縮				

OMM-S'付近では、地質構造と物理試験結果を総合的に評価し、工学的地質断面図は、海上音波探査と海上ボーリング調査等で作成した地質断面図(図 3.4-4 上図)と同じとした。OMM-S付近は岩盤が浅いため、岩盤のみの工学的地質モデルとした。

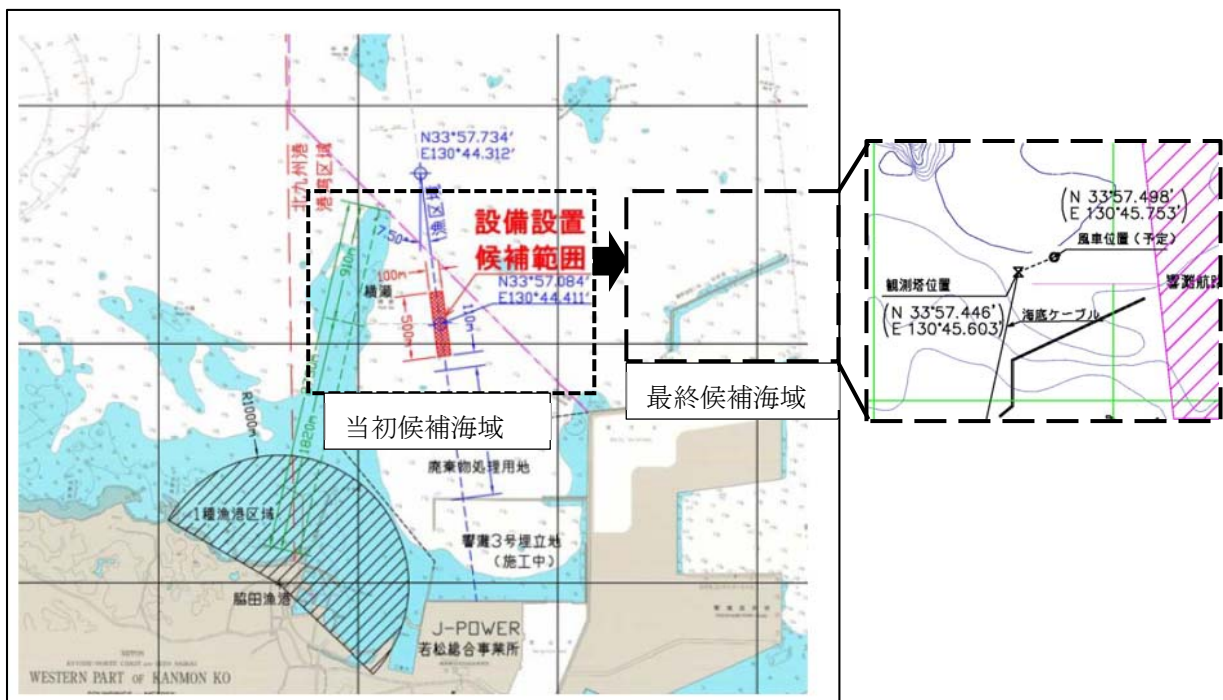
4 基本設計

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北九州市漁業協同組合脇之浦地区、ひびき灘漁業協同組合、北九州市（港湾空港局・環境局、産業経済局（水産課））、海上保安庁若松海上保安部、九州電力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。

- ・実証研究海域は当初予定位置の南側（陸地から1~2km）の地点で、500×100mの範囲として設定した。
- ・実証研究海域は北九州港港湾区域内であり、開発にあたっては港湾管理者（北九州市）の許可が必要となる。また、当該海域は船舶航行に支障はないと考えられるものの、設置工事の際は船舶航行に支障をきたさない対策（障害灯等）が必要となる。

なお、FS段階では、電源開発若松総合事務所沖の当初候補海域を対象に検討したが、その後、海底部底質の条件等から最終候補海域に変更した（下表は最終候補海域の諸元）。



実証研究予定地点の確定		福岡県北九州港 響灘3号埋立地沖合1.5km沖合
予定地点	位置(国際緯度経度系)	35° 57' 27"~29" N、130° 36' -45"E
	水深	14m
	離岸距離	1.4km
	海底土質	砂・砂礫(堆積層:12m層厚)、岩盤
	海底地形	海底勾配が小さい(響灘3号埋立地から沖合に向かって10m程度の堆積層の海域が延びている末端部)。

図 4.1-1 北九州市沖における実証研究海域の選定結果

4.2 風車の仕様

洋上に風力発電機を設置する場合、設備へのアクセスが困難であるという点から、故障確率を最小限にすることが重要となる。そのためには、発電機構造をシンプルにし、部品点数を少なくする必要がある。そこで、ギアレス永久磁石型同期発電機方式を採用している日本製鋼所製 J82-2.0 風力発電機を採用した。この発電機方式の特長として、回転部分が少ないため、消耗部品と潤滑油の使用量が少なく、かつ自動給油装置を採用したこともあり、保守点検のインターバルとコストの面で優れている点があげられる。当風車の諸元は表 4.2-1 の通りである。

表 4.2-1 北九州市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	株式会社 日本製鋼所
機種	J82-2.0
定格出力	2.0MW
ナセル重量	約94t
ロータ直径	約83m
ブレード重量	約6.5t×3
ハブ高さ	約80m

標準の J82-2.0 風力発電機は陸上設置を前提としているため、洋上に設置するにあたり、高塩分、高湿度、波浪、洋上風等の過酷な使用環境に適合させる必要がある。

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の一次選定として、主要4形式である重力式（ケーソン式）、杭式（モノパイル式、組杭式、ジャケット式）について概略設備設計を行い、比較検討を行った。その評価結果を表4.3-1に示す。

表 4.3-1 風力発電設備用基礎構造 基礎形式の一次選定の評価結果

項目	Case1 重力式（ケーソン式）	Case2 モノパイル式	Case3 組杭式	Case4 ジャケット式
構造図				
構造安全性	<ul style="list-style-type: none"> ●波力が最も大きい分、所要重量も大きくなっており、合理化の余地あり ●高いモーメント荷重のため支持力が支配的であり、偏心傾斜荷重による不等沈下の恐れあり ○マウンド材により、基礎地盤の洗掘の恐れが小さい 	<ul style="list-style-type: none"> ●最も剛性が低く、自励振動の恐れあり ●高いモーメント荷重に対し、鋼管の曲げ耐力で抵抗する構造であるため、合理化の余地あり ●地盤条件のばらつきに対する影響が大きい 	<ul style="list-style-type: none"> ●高いモーメント荷重に対し、鋼管の曲げ耐力で抵抗する構造であるため、合理化の余地あり 	<ul style="list-style-type: none"> ○支管（ブレース材）により高いモーメント荷重を軸圧縮力に変換して抵抗するため合理的
耐疲労性	○最も剛性が高く、疲労耐力は十分大きい	○最も剛性が低く、疲労耐力は小さい	○モノパイル式に次いで剛性が低く、疲労耐力に不安定がある	○重力式の次に剛性が高く、疲労耐力は大きい
施工性	●施工時安定性（中詰め砂投入時、上部工打設前） ・概略海上工期 4.5ヶ月	●岩盤割孔に多大な工期と費用が発生 ・概略海上工期 4ヶ月	●岩盤割孔に多大な費用が発生 ・概略海上工期 4.5ヶ月	●同左 ・概略海上工期 5ヶ月
経済性（コスト比）	1.0	1.5	2.5	2.8
耐久性	○RC構造であり腐食が生じにくいため、最も耐久性が高い	○適切な防食により、設計供用年数20年の耐久性は十分維持可能	○同左	○同左
環境性	●ケーソンは不透透であり海況を遮断するため、環境に悪影響の恐れあり	○透透性であり環境への影響が最も小さい	○透透性であり環境への影響は小さい	○透透性であり環境への影響は小さい
魚礁効果	●捨石マウンドおよびケーソン背面の効果はあるが、内部空間がない分、魚類の生息可能空間は小さい	●内部空間がないため、魚礁効果はほとんど期待できない	●内部空間があるものの支管を持たないため、ジャケットよりは劣る	●マウンド部がない分、魚礁効果はジャケット部に限定される
総合評価	○	×	△	△

※ 評価欄：◎極めて有効である、○有効である、△あまり有効でない、×有効でない

一次選定の結果、杭式の場合は、実証計画地点の地盤条件では岩盤削孔に多大な費用と工期が必要となるため、重力式（ケーソン式）が経済性の観点から優位であるとの結論に達した。

続いて二次選定として、重力式の主に経済面における利点とジャケット式の主に構造安全性・施工性における利点を生かしたハイブリッド重力式を考案し（図 4.3-1）、一次選定で優位であった重力式（ケーソン式）との比較を行った。その評価結果を表 4.3-2 に示す。

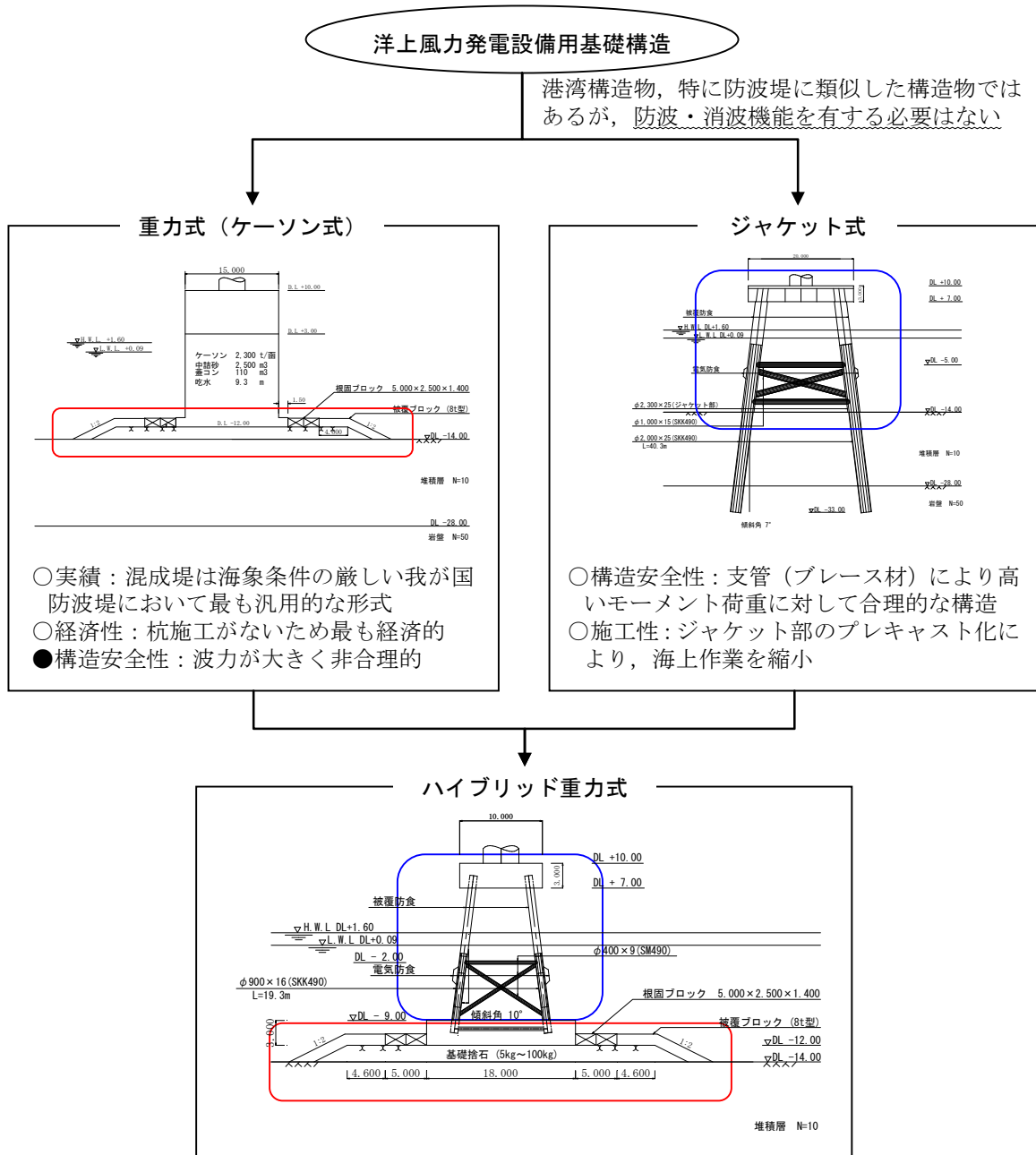


図 4.3-1 ハイブリッド重力式の考案

表 4.3-2 風力発電設備用基礎構造 基礎形式の二次選定の評価結果

項目	Case1 重力式 (ケーソン式)	Case5 ハイブリッド重力式
構造図	<p>平面図</p> <p>断面図</p>	<p>平面図</p> <p>断面図</p>
構造安全性	<p>●波力が最も大きい分所要重量も大きくなっており、合理化の余地あり</p> <p>●高いモーメント荷重のため支持力が支配的であり、偏心傾斜荷重による不等沈下の恐れあり</p> <p>○マウンド材により、基礎地盤の洗掘の恐れが小さい</p>	<p>○Case1 に比べ、作用波力を低減</p> <p>●それでもモーメント荷重が大きいため、偏心傾斜荷重による不等沈下の恐れは若干あり</p> <p>○マウンド材により、基礎地盤の洗掘の恐れが小さい</p>
耐疲労性	○最も剛性が高く、疲労耐力は十分大きい	○充填コンクリートにより疲労耐力向上
施工性	<p>●施工時安定性 (中詰め砂投入時、上部工打設前)</p> <ul style="list-style-type: none"> 概略海上工期 4.5 ヶ月 連続海上作業日数 4 日 	<p>○底版コンクリート+ジャケット (充填コンクリート含む) をプレキャストとすることにより、海上作業を最小化</p> <ul style="list-style-type: none"> 概略海上工期 4 ヶ月 連続海上作業日数 2 日
経済性 (コスト比)	1.0 (D.L.-30m の場合、2.5)	1.1 (D.L.-30m の場合、1.7)
耐久性	○RC 構造であり腐食が生じにくい、最も耐久性が高い	○適切な防食により、設計供用年数 20 年の耐久性は十分維持可能
環境性	●ケーソンは不透過であり海況を遮断するため、環境に悪影響の恐れあり	○透過性であり環境への影響は小さい
魚礁効果	●捨石マウンドおよびケーソン背面の効果はあるが、内部空間がない分、魚類の生息可能空間は小さい	○捨石マウンドおよびジャケットにより、最も魚礁効果が高い
総合評価	○	◎

※ 評価欄：◎極めて有効である，○有効である，△あまり有効でない，×有効でない

表 4.3-1、表 4.3-2 より、提案するハイブリッド重力式が総合的に最も優れているものと考えられたため、本形式を採用した。

4.4 計画段階のコストと実際のコスト

実証研究設備の設置位置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コストを紹介する。ただし、あくまで北九州市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（工事費）の試算を行っている。結果は表4.4-1の通りである。本事業費は、概略設計レベルでの設備ごとの設計仕様・数量、施工方法、工程に基づき、仮見積もり・実績を参考に概算で算定したものである。支持構造物形式は、風力発電設備および観測設備に共通であり、施工も同一時期・方法にて工事費を算定したことから、支持構造物設置費用は風力発電設備に一括計上し、各設備の据付費用はそれぞれに区分した。

表 4.4-1 北九州市沖実証研究における事業費（工事費）の試算

項目		金額（単位：百万円）	備考
海域調査費		165.00	
設計費	風力発電設備	50.00	
	観測設備	44.00	
	付帯設備	3.20	
	(小計)	97.20	
制作費	風力発電設備	482.50	支持構造物制作費は風力発電設備工事費に計上。
	観測設備	314.04	支持構造物制作費は風力発電設備工事費に計上。
	付帯設備	80.49	
	(小計)	877.03	
工事費※	風力発電設備	1,490.53	
	観測設備	111.54	支持構造物の設置費用および本体設置工事間接費は風力発電設備で計上。
	付帯設備	406.18	
	(小計)	2,008.25	
	建設費合計	3,147.48	海域調査費＋設計費＋制作費＋工事費

※工事保険含まず。

「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、北九州市沖実証研究施設の資本費の実績が示されている。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 4.4-2 北九州市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	40
設計費	風車・基礎、ケーブル、電気設備	50
設備費	風車、基礎、海底ケーブル	1,320
工事費	風車、基礎、海底ケーブル、陸上ケーブル、電気設備	1,640
計		3,040

※税抜き、端数四捨五入

5 実施設計

5.1 設備設計

(1) 支持物設計

1) 準拠基準

ハイブリッド重力式基礎構造は、主にジャケットと底版コンクリートからなる。

ジャケットの部材断面及び継手の設計に用いる準拠基準及びケース毎の許容値を表 5.1-1、表 5.1-2 に示す。

表 5.1-1a ジャケットの評価基準一覧（疲労照査以外）

照査項目		準拠規準	検討ケース	許容値
部材照査 (主管)	軸力と 曲げモーメント に対する照査	コンクリート充填鋼管 構造設計施工指針 2008 (日本建築学会)	常時	長期許容耐力
			短期	短期許容耐力
			レベル 1 地震時	短期許容耐力
			レベル 2 地震時	弾性限耐力 ^{*1}
	せん断力に 対する照査	コンクリート充填鋼管 構造設計施工指針 2008 (日本建築学会)	常時	長期許容耐力
			短期	短期許容耐力
鋼管と コンクリートの 付着照査	コンクリート充填鋼管 構造設計施工指針 2008 (日本建築学会)	レベル 1 地震時	短期許容耐力	
		レベル 2 地震時	短期許容耐力	
部材照査 (支管)	軸力と 曲げモーメント に対する照査	鋼管トラス構造設計 施工指針・同解説 2002 (日本建築学会)	常時	長期許容応力
			短期	短期許容応力
			レベル 1 地震時	短期許容応力
			レベル 2 地震時	弾性限応力 ^{*1}
	せん断力に 対する照査	鋼構造設計規準 2005 (日本建築学会)	常時	長期許容応力
			短期	短期許容応力
		レベル 1 地震時	短期許容応力	
		レベル 2 地震時	短期許容応力	
鋼管と鋼管の 継手部の 照査	主管局部変形に 対する照査	鋼管トラス構造設計 施工指針・同解説 2002 (日本建築学会)	常時	長期許容耐力
			短期	短期許容耐力
	パンチングシ アアに対する照 査		レベル 1 地震時	短期許容耐力
			レベル 2 地震時	短期許容耐力

表 5.1-1b ジャケットの評価基準一覧（疲労照査以外）

照査項目		準拠規準	検討ケース	許容値
タワー・ジャケット接続部	軸力と曲げモーメントに対する照査	鋼構造設計規準 2005 (日本建築学会)	常時	長期許容応力
			短期	短期許容応力
			レベル1 地震時	短期許容応力
			レベル2 地震時	弾性限応力※1
	せん断力に対する照査	鋼構造設計規準 2005 (日本建築学会)	常時	長期許容応力
			短期	短期許容応力
			レベル1 地震時	短期許容応力
			レベル2 地震時	短期許容応力

※1：F 値を 1.1 倍する。

表 5.1-2 ジャケットの評価基準一覧（疲労照査）

照査項目		準拠規準	許容値
継手部 鋼管と鋼管の	疲労照査	OFFSHORE STANDARD DNV-OS-J101 DESIGN OF OFFSHORE WIND TURBINE STRUCTURES 2010.11 RECOMMENDED PRACTICE DNV-RP-C203 FATIGUE DESIGN OF OFFSHORE STEEL STRUCTURES 2010.4	累積疲労損傷率 1.0 以内
タワー・ジャケット接続部	疲労照査	OFFSHORE STANDARD DNV-OS-J101 DESIGN OF OFFSHORE WIND TURBINE STRUCTURES 2010.11 RECOMMENDED PRACTICE DNV-RP-C203 FATIGUE DESIGN OF OFFSHORE STEEL STRUCTURES 2010.4	累積疲労損傷率 1.0 以内

底版コンクリートの構造計算に用いる準拠規準を以下に示す。

表 5.1-3 底版コンクリートの評価基準一覧（疲労照査以外）

照査項目	準拠基準
1)基礎の安定計算	風力発電設備支持物構造設計指針・同解説 2010 (土木学会)
2)底版コンクリートの設計	道路橋示方書・同解説 平成 14 年 4 月 (土木学会) 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 2010 (日本建築学会) 港湾の施設の技術上の基準・同解説 (日本港湾協会)
3)ジャケット脚部の設計 ・ 押込み力に対する検討 ・ 引抜き力に対する検討 ・ 水平力およびモーメント に対する検討	建築基礎構造設計指針 2001 (日本建築学会) コンクリート充填鋼管構造設計施工指針 2008 (日本建築学会) 杭基礎設計便覧 平成 18 年度改定版 (日本道路協会)
4)ブロックの安定計算 ・ 被覆ブロック ・ 根固ブロック	港湾の施設の技術上の基準・同解説 (日本港湾協会)

2) 設計条件

①風況条件

「本別冊 3.1(1)洋上の風況の推定」での推定結果より、設計に用いる風況条件を表 5.1-4 に示す。

表 5.1-4 風況条件

項目	数値	備考
平均水面からの高さ 80m レベル(風車ハブ高 さ 80m を想定)の設計風 速	$V_{ref}=51.6\text{m/s}$	「3.1(1)1)①」で算出
風速 15m/s 時の乱流強 度の期待値	$I_{ref}=0.12$ (カテゴリ C)	3.1(1)1)②で算出
年平均風速	7.0m/s	3.1(1)2)で算出した 6.85m/s を 安全側に評価

②海象条件

「本別冊 3.2(1)波浪の推定」および「本別冊 3.3(1)海潮流の推定」より、設計に用いる海象条件を表 5.1-5 に示す。

表 5.1-5 海象条件の総括

項目	内容			備考
設計潮位	H.W.L.=D.L.+1.60m			出典：「北九州港港湾計画資料、平成 8 年」響灘検潮所の記録
設計波	有義波高 $H_{1/3}$	最高波高 H_{max}	有義波周期 $T_{1/3}$	50 年確率波
	6.3m	10.9m	12s	
耐久性照査用波浪	波高 H	周期 T		1 万回波
	4.3m	7s		
年平均波浪	有義波高 $H_{1/3}$	最高波高 H_{max}	有義波周期 $T_{1/3}$	NOWPHAS 藍島データ(1996 年～2007 年)より設定
	0.7m	1.3m	5s	
設計海潮流	V=0.5m/s (≒1kt)			出典：「平成 17 年度 関門港(響航路)潮流観測報告」

③地震条件

設置点(福岡県北九州市沖)の地震条件として、昭和 55 年建設省告示第 1793 号より地域係数 Z=0.8(福岡県)を採用した。

3) 支持物の構造の概要

各種設計条件を元にジャケットと底版コンクリートの構造を検討した。両者を合わせた基礎構造の検討結果の概要を図 5.1-1 に示す。

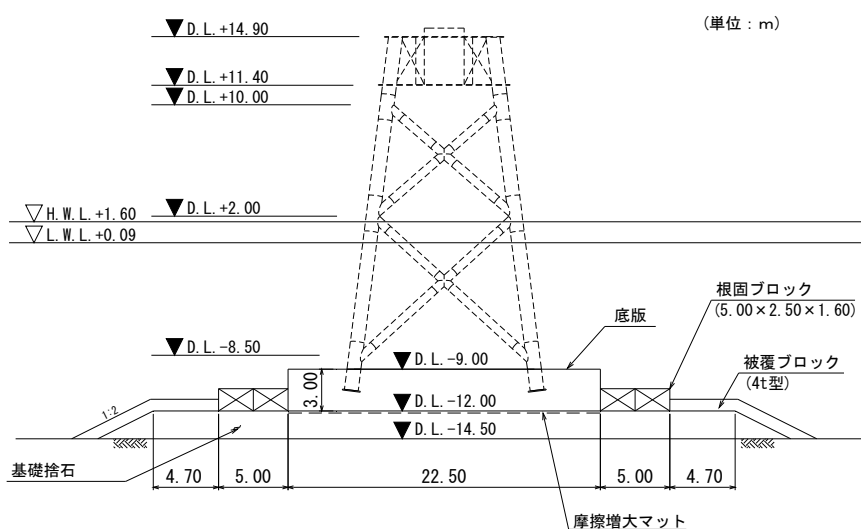


図 5.1-1 基礎構造図

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（ジャケット部）は図 5.1-2 左の通りである。

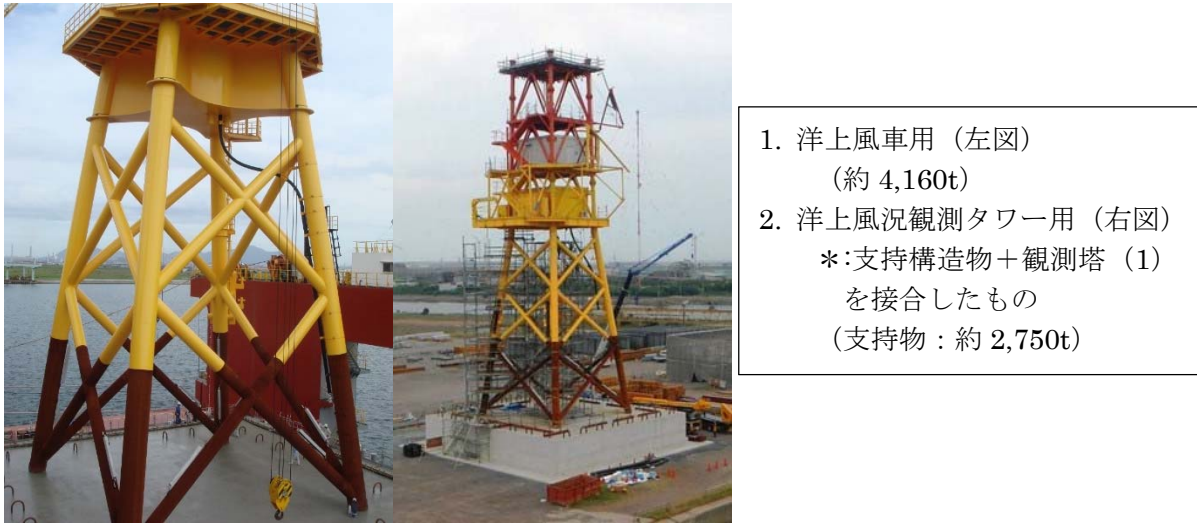


図 5.1-2 実際に製作された支持構造物

(2) 風車設計

陸上設置を前提とした J82-2.0 風力発電機を洋上に設置するにあたり、洋上環境に適合させるための仕様を検討した。

1) 洋上仕様風車内換気システム

洋上特有の問題点として、海面付近の波浪、高湿度、高塩分濃度の外気等があげられる。このような過酷な室外環境の下で、外気を発電機等の熱源冷却に直接使用した場合、様々な問題が発生することが予想される。例えば、電装機器の故障頻度の増加、構造部品および機械部品の腐食、錆の発生等による製品寿命の低下等の問題の発生が考えられる。したがって、風車設備内に取込む外気は、除塩および除湿処理することが望ましい。

洋上仕様風車内換気システムの概略図を図 5.1-3 に示す。空冷による冷却を必要とする機器は、従来型の給排気システムと同様であり、発電機を冷却する発電機冷却システムと、主変圧器、およびラジエータを冷却するトランスルーム冷却システムに大きく分けることができる。洋上の給排気システムでは、さらに電装機器が多数配置されるナセル室内の圧力を外部ファンにより正圧とし、外気流入を防止するシステムを追加した。

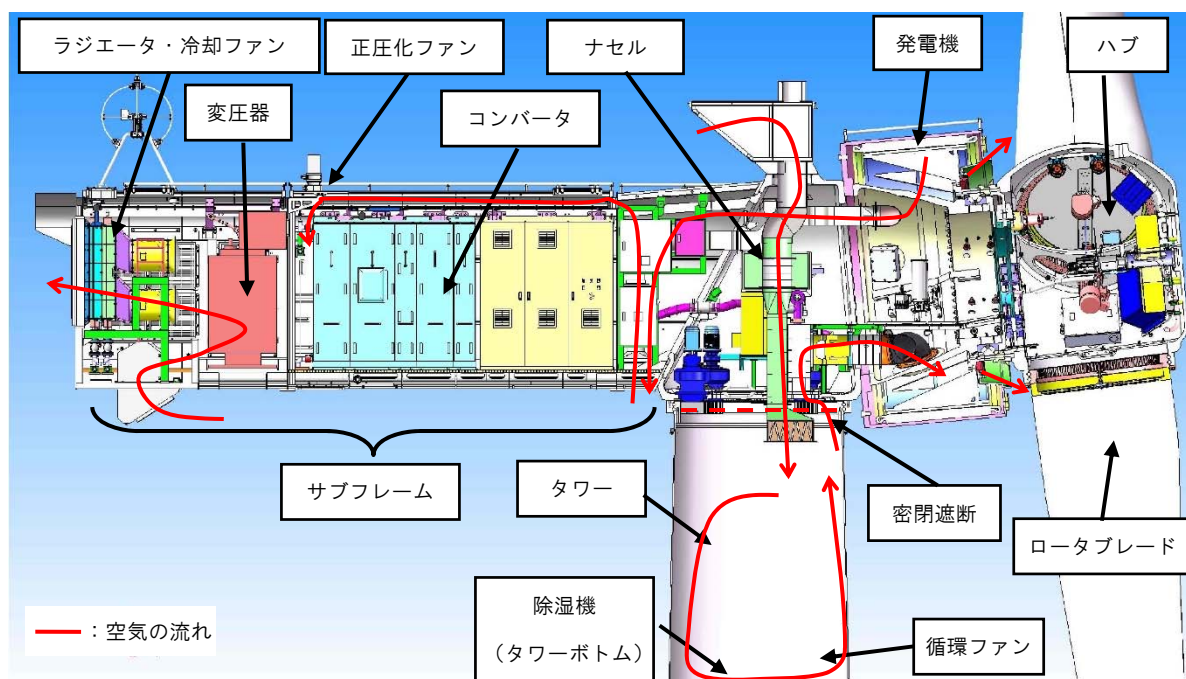


図 5.1-3a 洋上仕様風車内換気システムの構成図

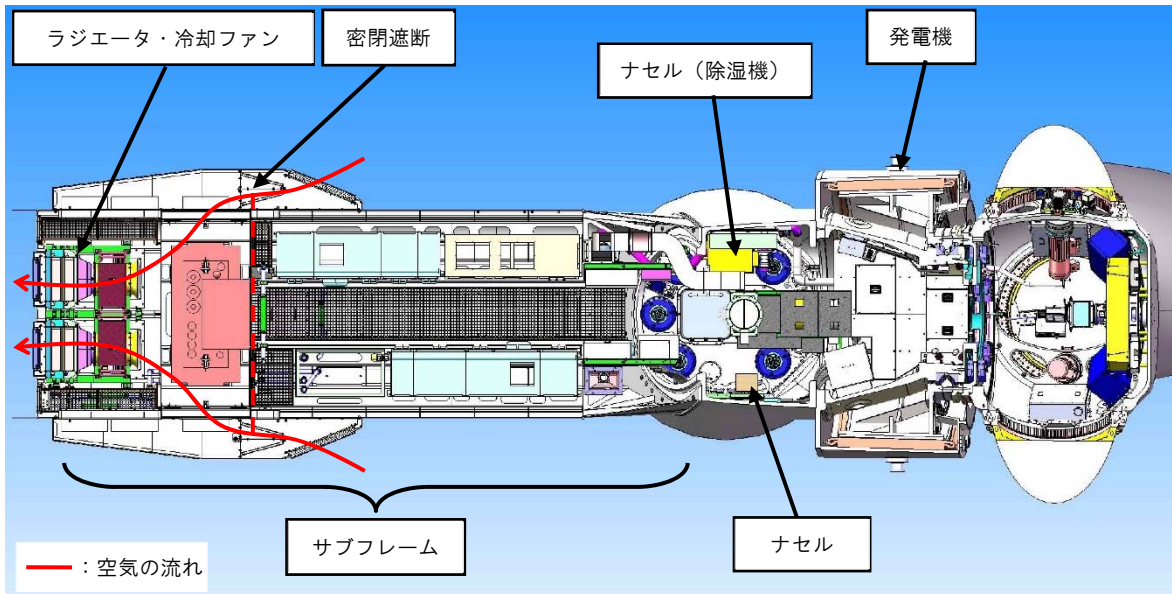


図 5.1-3b 洋上仕様風車内換気システムの構成図

2) ナセル内の正圧化

洋上において風車を運用する上で、塩分を含んだ外気をナセル内に浸入させないためには、風車の気密性を向上させる必要がある。しかし、風車は様々な電装機器、構造部品および機械部品で構成されており、風車に存在するすべての隙間を設計段階で把握することは困難である。したがって、洋上仕様では、あらかじめ風車外部から塩害フィルタを通して外気をナセル内へ取込み、電装機器が多数配置されるナセル内を加圧することで、塩分を含んだ外気が浸入することを防止することとした。ナセル内正圧化ダクトの構成図を図 5.1-4 に示す。

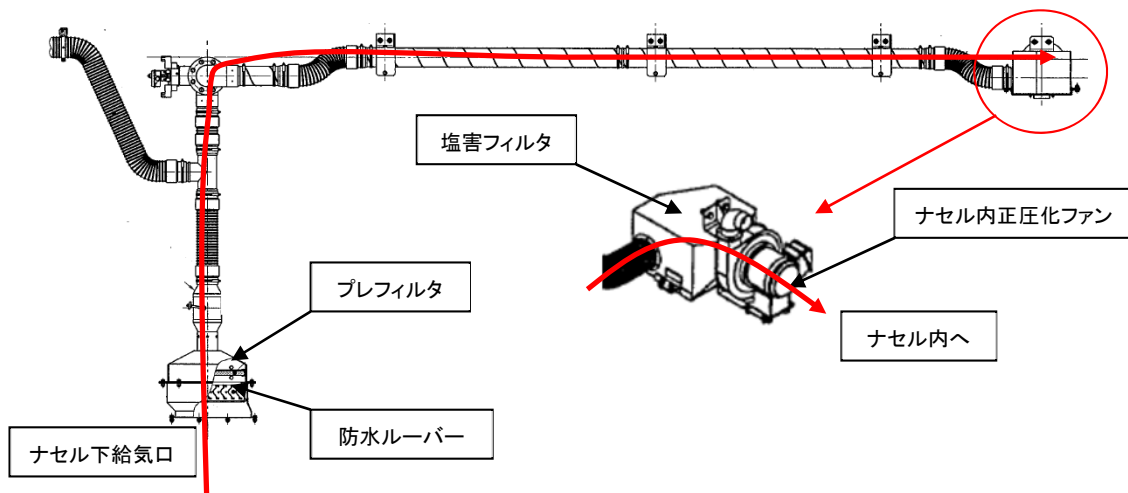


図 5.1-4 ナセル内正圧化ダクト

3) 給気口位置の変更

洋上仕様では、海面近傍の塩分濃度が高い空気の影響を鑑み、給気口の位置を変更した。陸

上仕様では、タワーボトムのマンドアより空気を取り入れている構造であるのに対し、洋上仕様では、ナセル上部から空気を取り入れる構造とした。ナセル上部から取り込まれた外気は、フィルタリングされ、タワー内に給気される。タワー内に給気された外気は、発電機ナセル側に設置された冷却ファンにより冷却ダクトを通して発電機を冷却し、廃熱は排気口および一部発電機の隙間より行われる。その一方、タワー内の換気を配慮し、洋上仕様では、タワー内に除湿器と循環ファンを設置することとした。洋上仕様風車内換気システムの給気口位置変更に関する構成図を図 5.1-5 に示す。

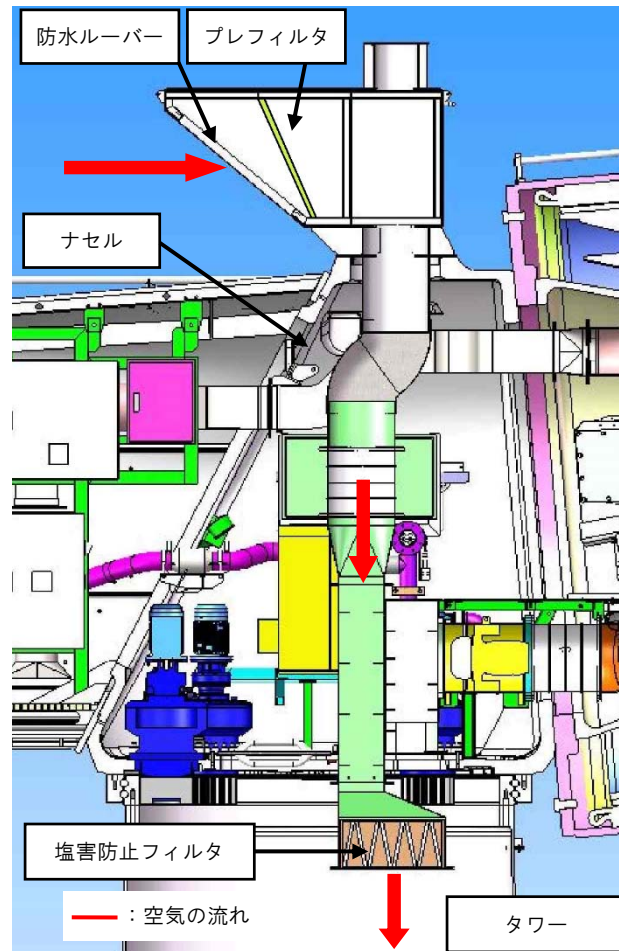


図 5.1-5 給気口位置の変更

4) フィルタの設置

海塩粒子の処理には、塩害防止フィルタの設置が有効である。塩害防止フィルタの性能は、海塩粒子の捕集率、定格風量、圧力損失、粉塵捕集容量等で評価される。室内の塩分濃度管理の観点から評価すれば、最も重要な要素は捕集率である。しかし洋上では、洋上風車へのアクセス頻度の問題から、可能な限り高捕集率であることに加えて長寿命であることが要求される。

そこで、給気口と塩害フィルタの間にプレフィルタを採用した。塩害防止フィルタが $1\sim 2\mu\text{m}$ 以下の微細粉塵の除去と、大気中に含まれた海塩粒子の除去を目的とするのに対し、プレフィルタは主に $5\mu\text{m}$ 以上の粗い粉塵を除去するために使用される。海上の空気には塩分のような微細粒子だけでなく、黄砂や浮遊ゴミといった様々な粒子サイズのゴミが浮遊している。プレフ

フィルタはこれらの粗ゴミの除去を目的としており、耐水性、耐久性に優れている。給気口におけるフィルタの概略構成を図 5.1-6 に、フィルタの設置個所を図 5.1-7 に示す。

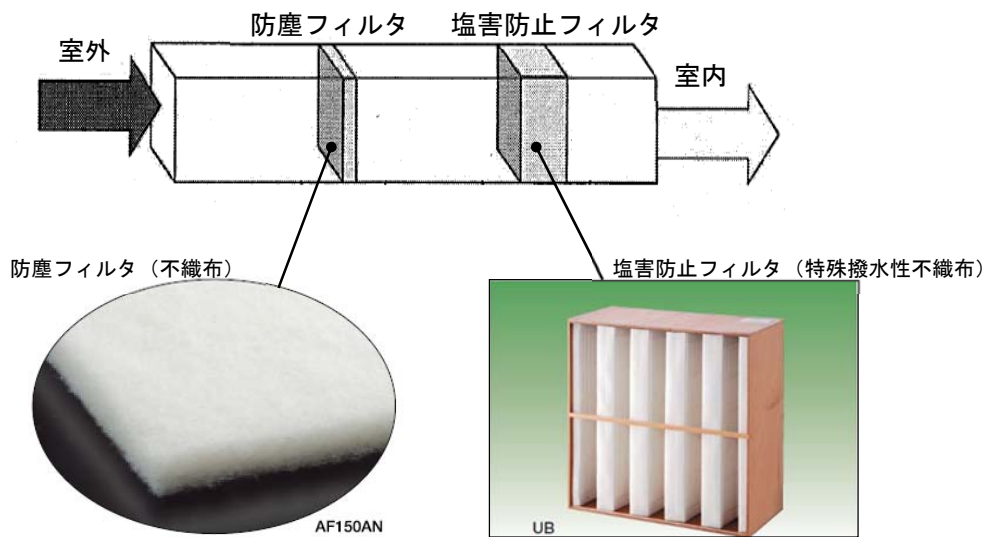


図 5.1-6 給気口におけるフィルタの概略構成

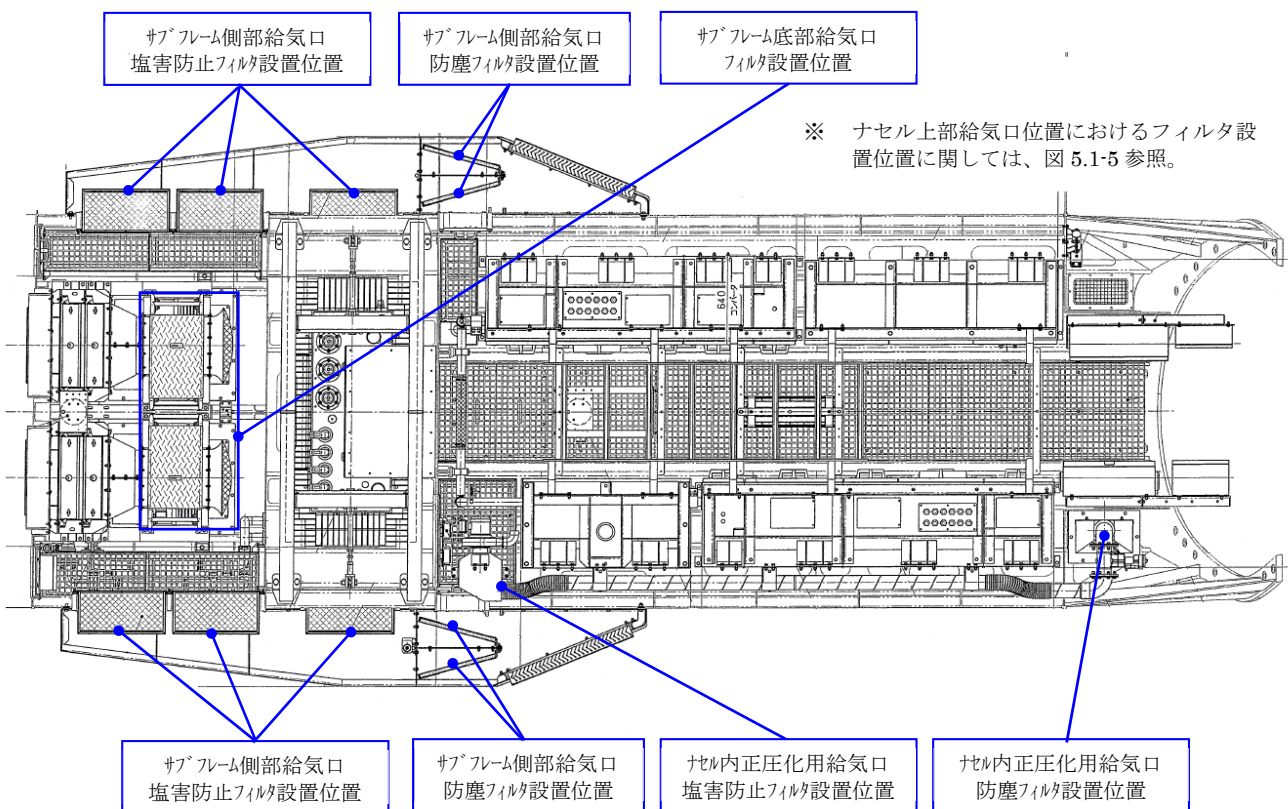
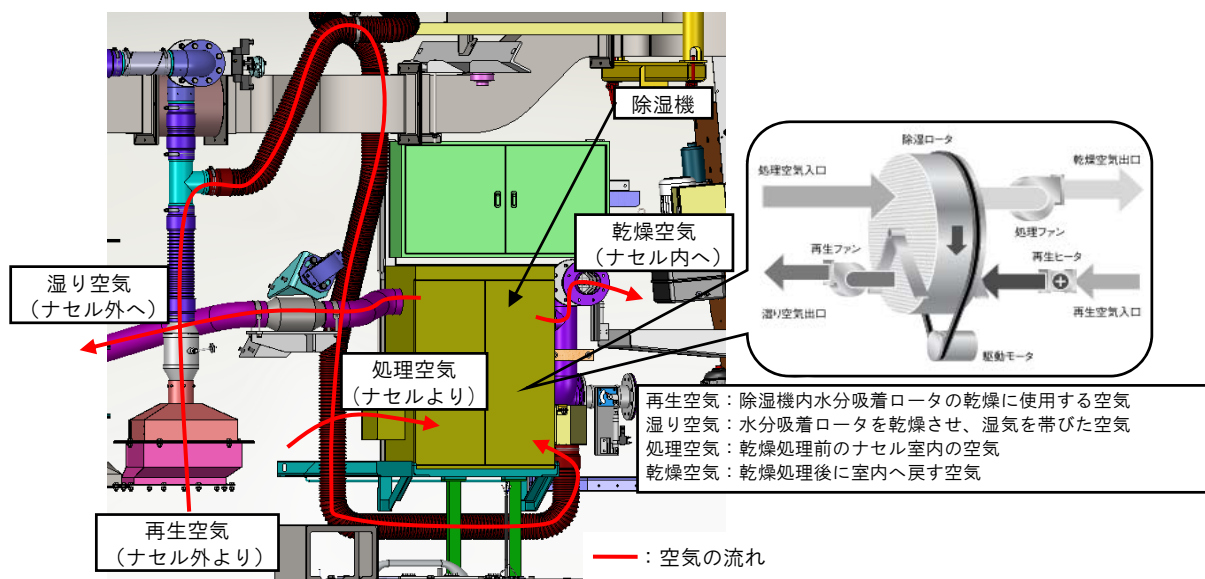


図 5.1-7 フィルタの設置位置

5) ナセル内及びタワーベース内における除湿器の設置

洋上機では、陸上機と比較して高湿度となることが予想される。高湿度は、電装機器の故障

や、各構造部品や機械部品の錆の発生などの悪影響を及ぼすことから、ナセル内を適切な湿度で管理することが求められる。洋上仕様では、ナセル内、タワーベース内に除湿器を設置することとした。また、長期停止中にも、室内の湿度は適正に制御される機構を設けた。強制的に除湿が必要な場合は遠隔で操作することができる。ナセル内の除湿器の構成図を図5.1-8に示す。タワーベース内の除湿器も構造は同様である。除湿器は室内相対湿度70%以上を基準として稼動する。除湿器動作時に室内温度が30℃を超えた場合、室内相対湿度に関わらず除湿器は停止する。これは、除湿機のヒータ熱による室内温度上昇を防止することが目的である。目標室内相対湿度は60～65%程度とし、目標値に達した時点で除湿機は停止することとした。ファンが故障等で停止した場合、除湿機を稼動させない制御とした。



※除湿機の動作について

除湿機はナセル内から取込んだ処理空気を内部の水分吸着ロータにて処理し、乾燥空気としてナセル内に送る。ロータに吸着された水分はナセル内より取込んだ再生空気及び無いぬヒータにより気化され、湿り空気としてナセル外へ排出される。

図 5.1-8 ナセル内除湿器の構成図（タワー内除湿器の構成も同様である）

6) 洋上仕様発電機内換気システムの構成

J82 風力発電機に採用している永久磁石同期発電機は、回転子側に永久磁石、固定子側に巻線が配置されており、回転子と固定子間のラビリンスシール部と言われる箇所に隙間が存在する。この隙間から外気が流入する可能性があり、高湿度の外気が流入し続けた場合、発電機に悪影響が出る可能性がある。陸上仕様では、発電機への外気流入を防止する対策として、ファンによる発電機内から室外への送風、発電機内の結露を防止する対策としてスペースヒータが設置されている。発電機内換気システムの概略図を図 5.1-9 に示す。

洋上機は陸上仕様の換気システムに加え、風車運転停止時の発電機への外気流入防止対策として、流路切替えシステムを採用した。流路の切替えは、コンプレッサーの蓄圧を利用したエアシリンダー式開閉バルブを使用した。運転停止時は、運転時に発電機の冷却を目的としていたファンが発電機内圧力を上昇させるファンとして機能する。排気口側の流路はバルブにより閉じられ、ラビリンスシール部の隙間からのみ排気する。停電時には上記の外気流入防止対策

は機能停止するが、電源喪失と同時に全てのバルブが閉じることで、ラビリンスシール部からの逆流による外気流入を最小限に抑える。

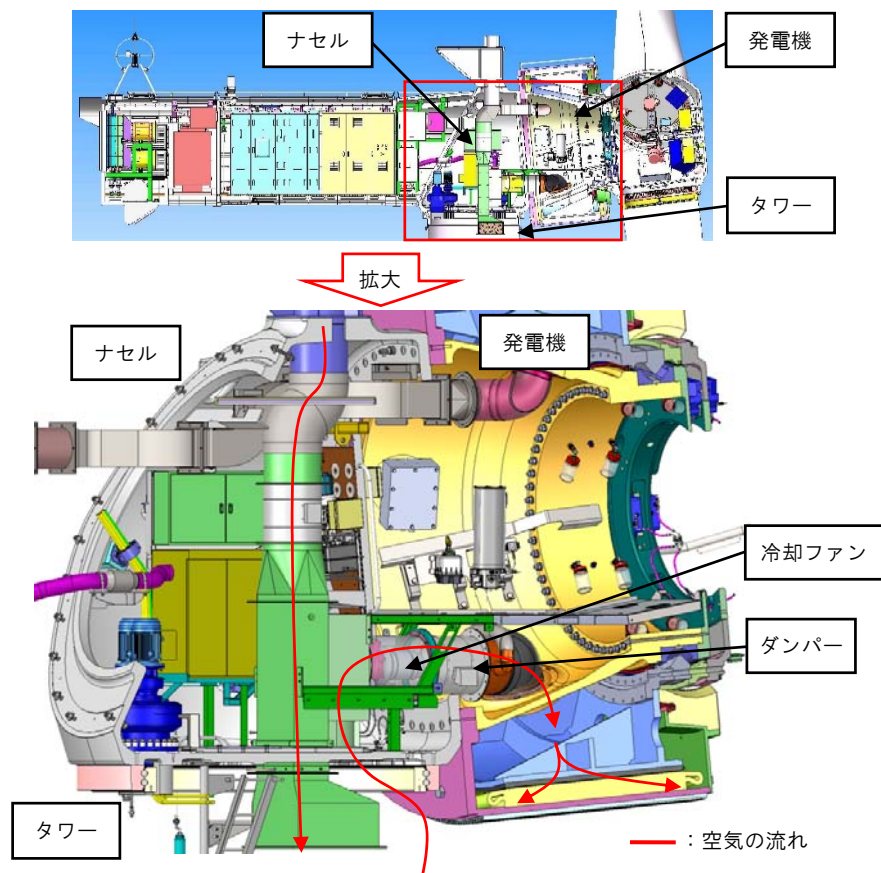


図 5.1-9 発電機内換気システム

7) 生分解性グリースの適用

ピッチやヨーなどの駆動部分には、大型のベアリングが設けられており、ベアリング内部の鋼球および鋼球の転がる面（レース面）を摩耗から保護するために、ベアリング内部にはグリースを封入しなければならない。グリースの機外への漏出を防止するためにシールが設けられているが、シールの主な材質はゴム製品であるために、シールの経年劣化は避けることができない。シールが取り付けられている場所は、アクセスすることが困難であり、グリースの漏出を発見して初めてシールの劣化に気が付くことも考えられる。このように万が一、機外にグリースが漏出した場合においても周辺環境に影響を与えることの無いよう、洋上風車においては生分解性グリースを採用した。生分解性のグリースは大気中に暴露した場合に紫外線及び微生物によって、その 60%が二酸化炭素と水に分解されるという特性を有する。図 5-1-10 に生分解性グリースの適用位置を示す。

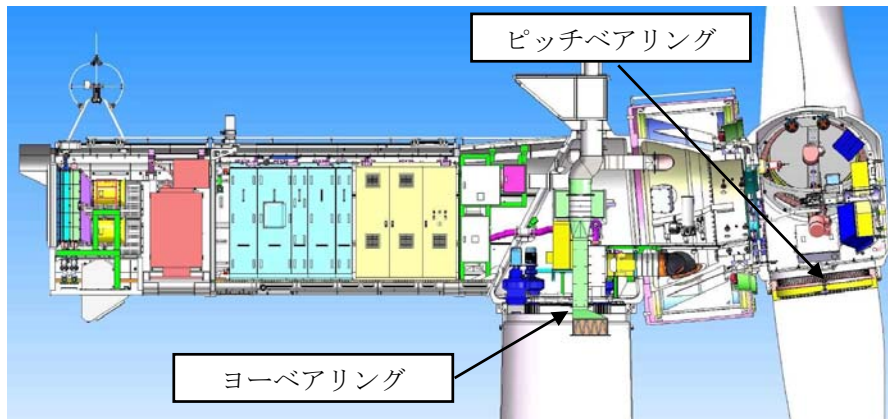


図 5.1-10 生分解性グリース適用位置

(3) 送変電設備設計

1) 送変電設備の構成

送変電設備を含む洋上風力発電設備の構成図を図 5.1-11 に示す。洋上から陸上の開閉設備の間には消波ブロック被覆護岸があるため、ケーブルを架空で通す必要が生じた。そのため、その間に海上鉄柱を設置することとした。

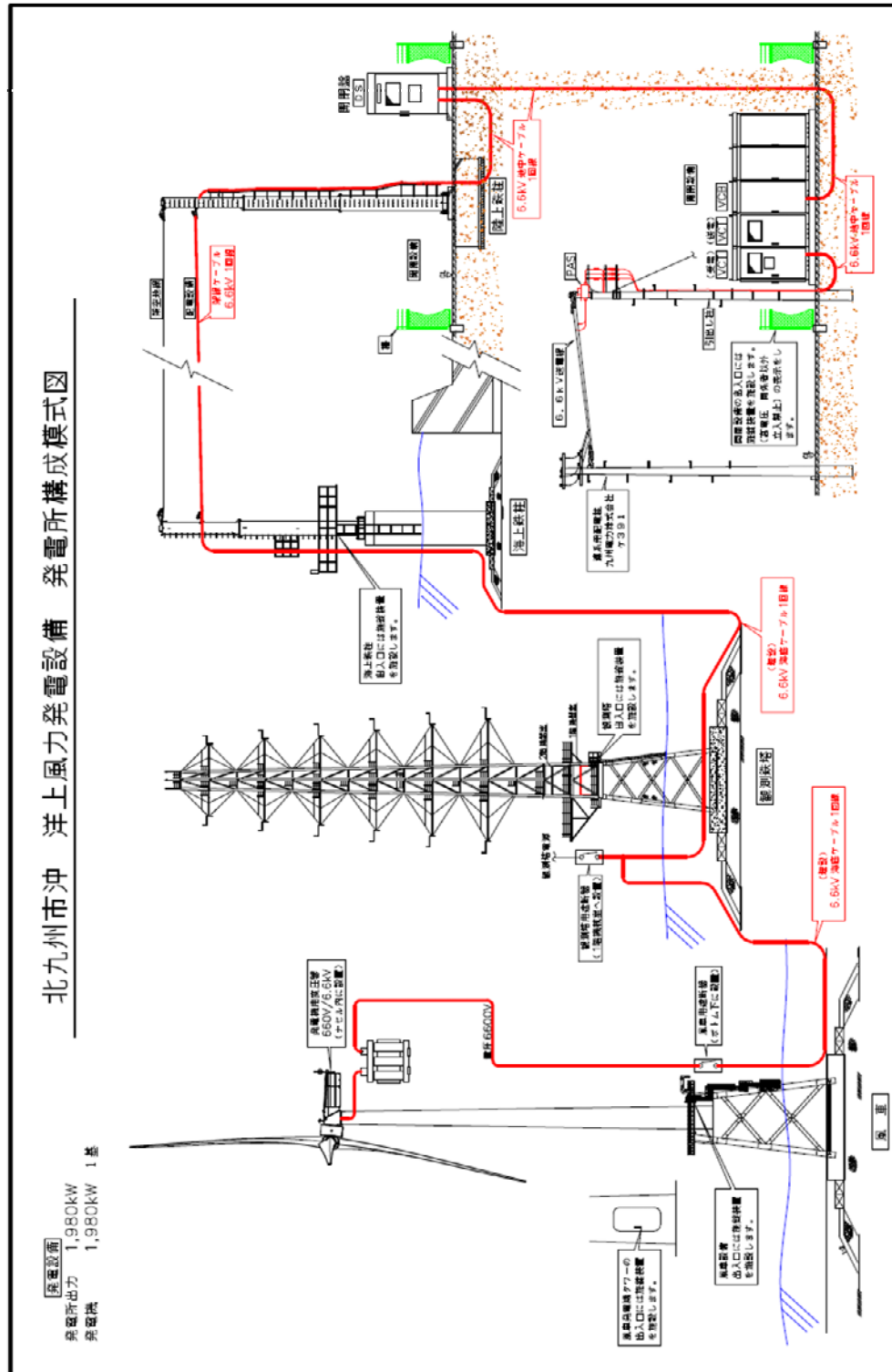


図 5.1-11 洋上風力発電設備の構成図

2) 海底ケーブル

海底ケーブルには、三相一括二重鉄線鎧装鉛被遮水層付の 6.6kV 架橋ポリエチレン絶縁海底ケーブル（6.6kV WCLWWA ケーブル）を採用した。光ファイバー複合の 6 心構造になっており、全長は 1,770m である。海底ケーブルの断面図を図 5.1-12、海底ケーブルのルートを図 5.1-13 に示す。

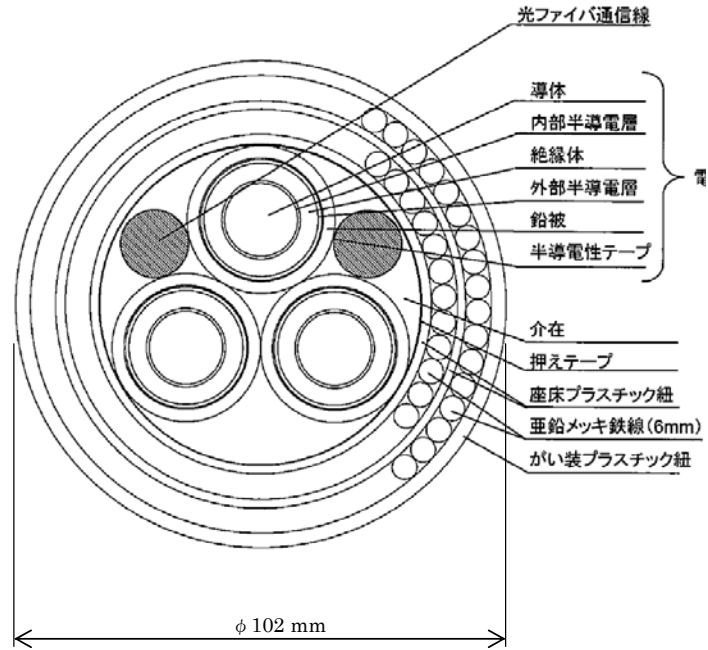


図 5.1-12 海底ケーブルの断面図

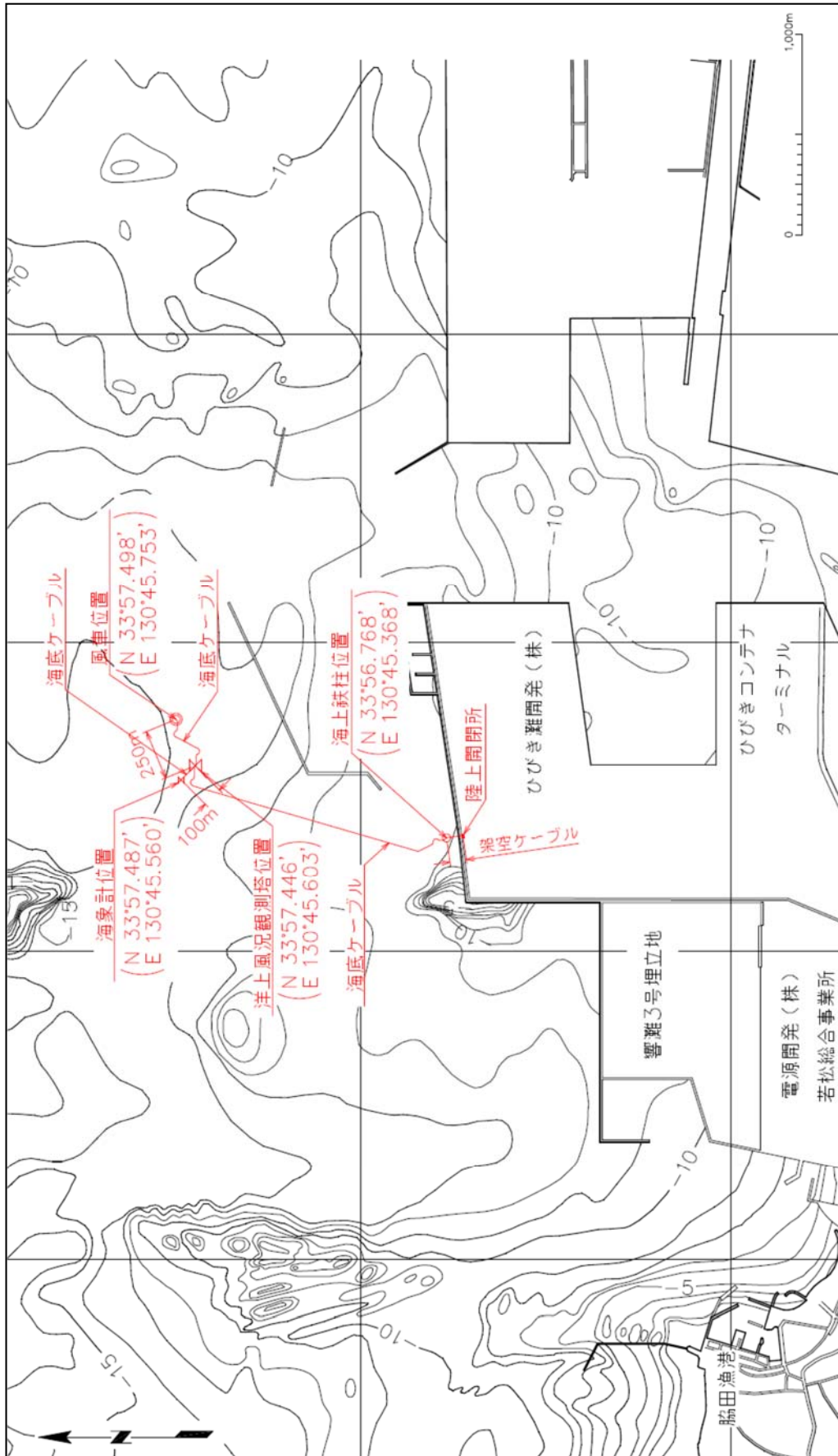


図 5.1-13 海底ケーブルルート図

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観測タワーと風車の工事工程を表 5.3-1 と表 5.3-2 に、それぞれ示す。

観測タワーおよび支持構造物の製作後、約 2 週間経った 2012 年 6 月 30 日に観測タワーを設置した。なお、海底ケーブルが布設され、観測タワーと陸上間が送電されたのは 2012 年 8 月 9 日であった。

風車用の支持構造物は、2012 年 9 月中旬に完成した。支持構造物の据付開始は 10 月 5 日（完成から据付まで約 20 日間）で、その後、ブロック据付工事があり 10 月 15 日に設置が完了した（風車への通電工事が完了したのは 10 月 26 日）。海上鉄塔は、海底ケーブルを陸上の変電所に系統接続するために護岸前面に設置した。本工事は、海底工事から鉄塔据付まで約 1 ヶ月間で完了した。

表 5.3-1 実証研究海域における観測タワーの工事工程

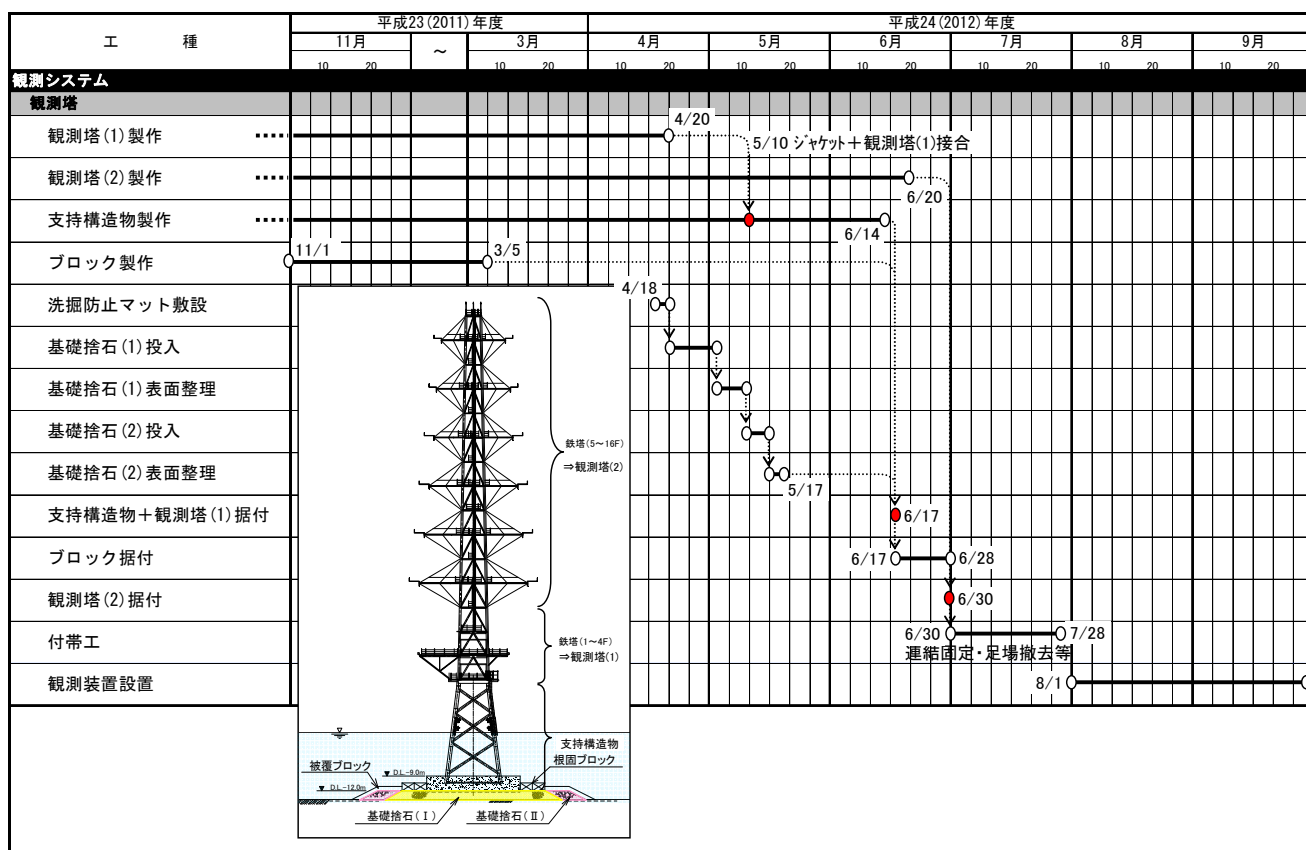


表 5.3-2a 実証研究海域における風車の工事工程

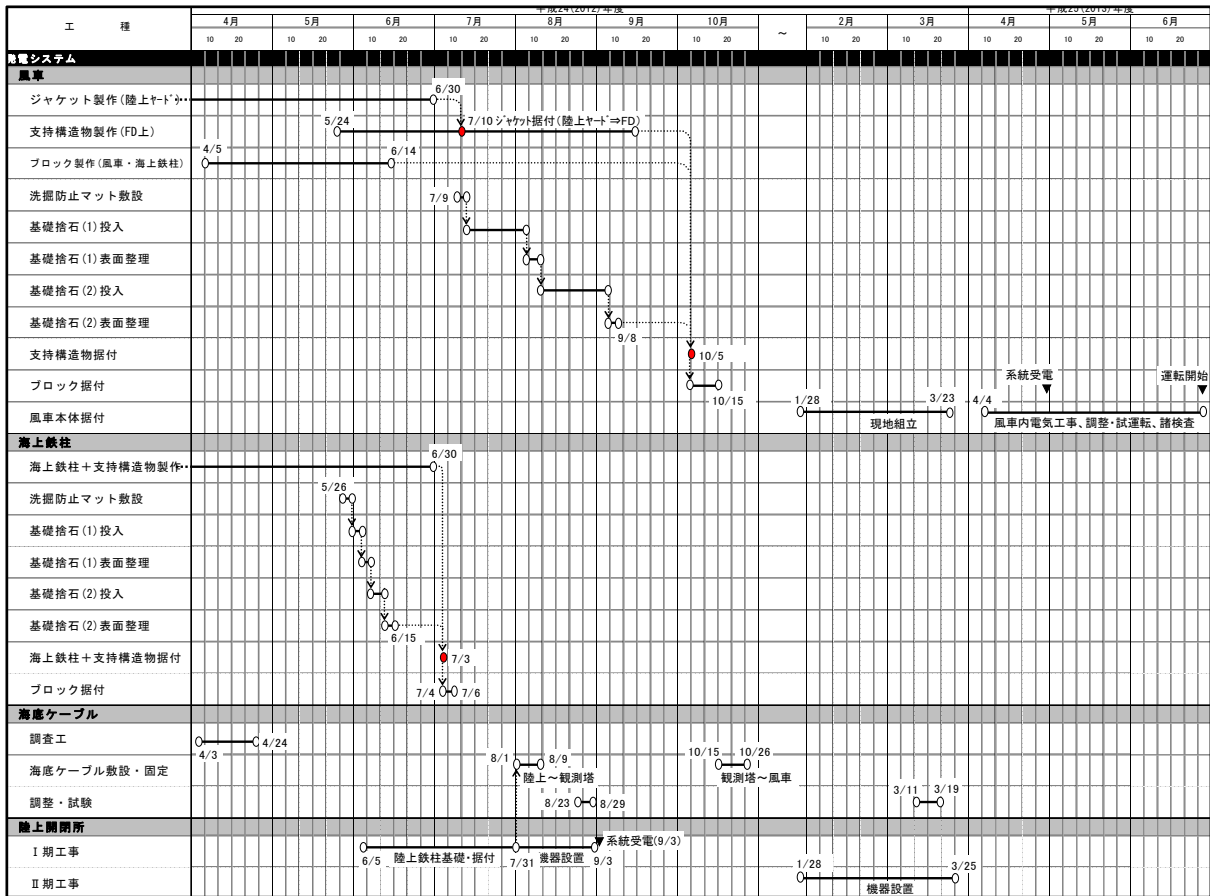
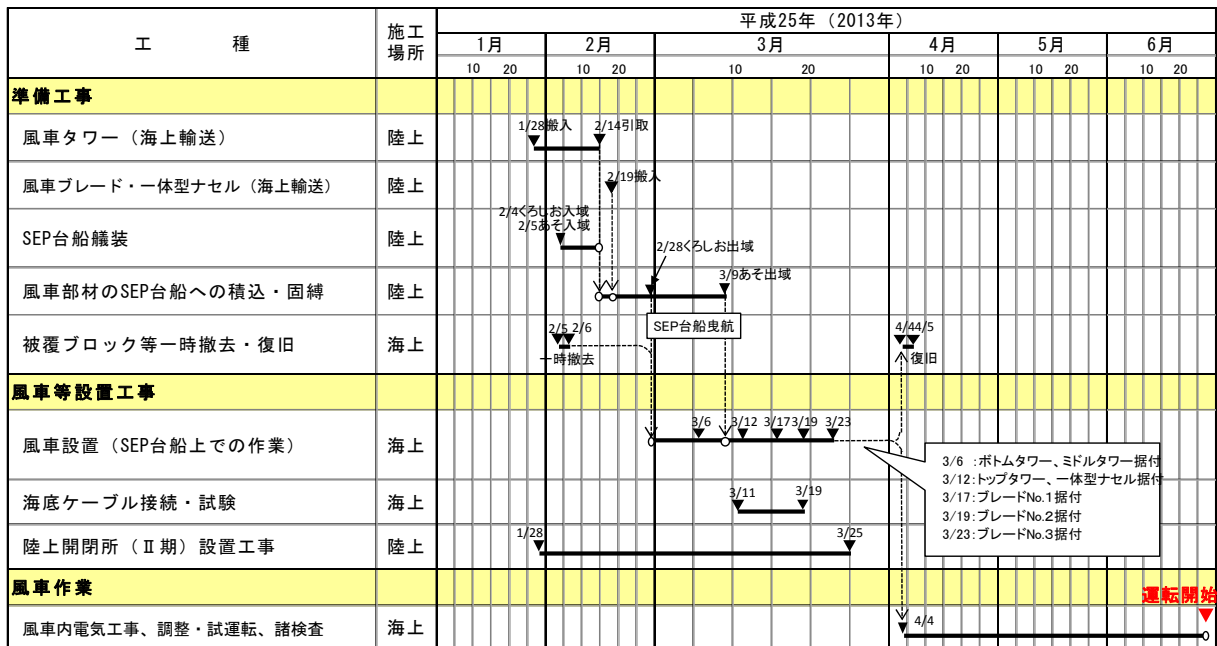


表 5.3-2b 実証研究海域における風車の工事工程



(2) 風車の施工方法

1) 施工概要

風車の施工フロー図を以下に示す。

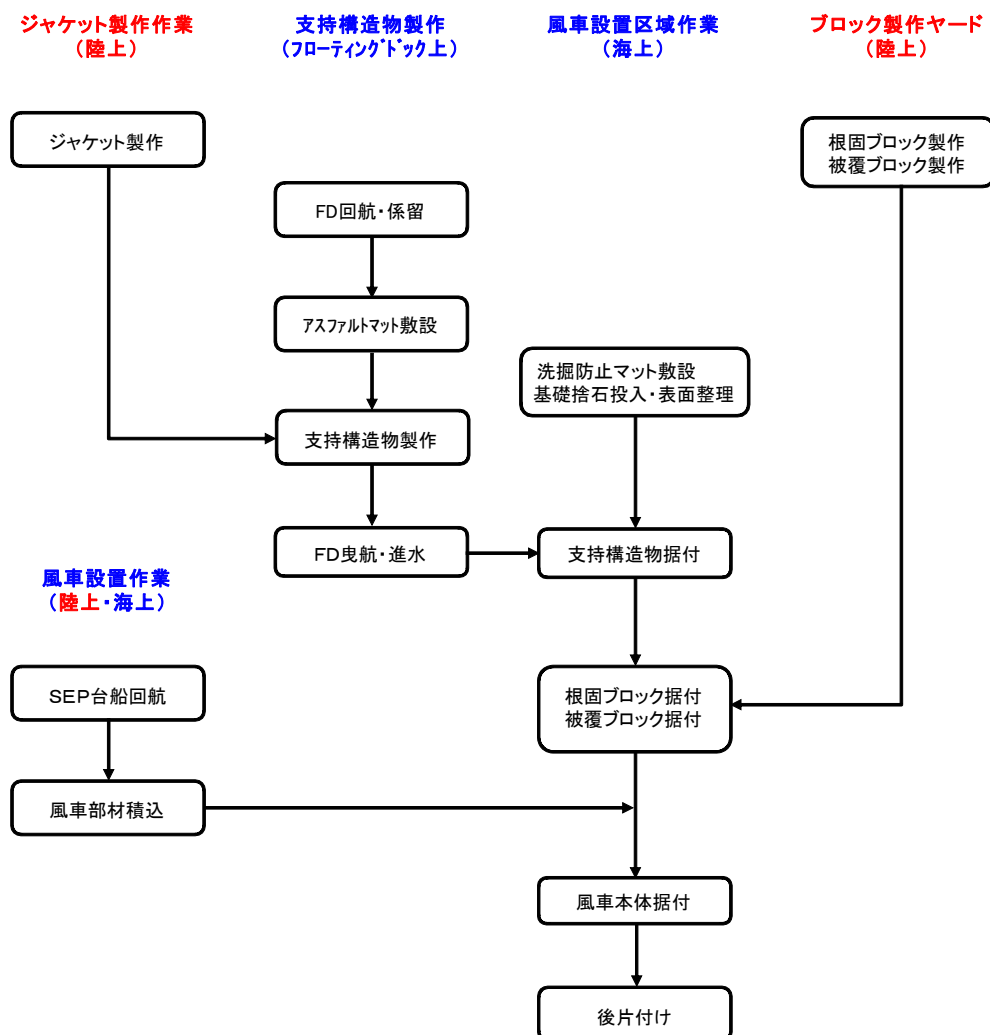


図 5.3-1 施工フロー図

2) 各施工段階の概要

①根固および被覆ブロック製作

ブロック製作ヤードの造成後、型枠組立～コンクリート打設～養生～型枠解体の一連作業を、所定のサイクルで繰り返して製作する。

②洗掘防止マット布設

現地盤部の洗掘防止のため、基礎捨石投入前に洗掘防止マットを布設する。洗掘防止マットの布設には、起重機船および潜水士船を使用し、吊上げ・着水後、所定の布設位置に吊下ろす。布設された洗掘防止マットは、潜水士により隣り合うマットと結束する。

③基礎捨石投入・基礎捨石表面整理

支持構造物の据付に先立って、基礎捨石の投入および基礎捨石の表面整理を行う。基礎捨石の投入は、潜水士の投入指示のもとガット船にて行う（図 5.3-2）。また、基礎捨石の投入完了後、支持構造物設置範囲（ならし精度：±5cm）および根固・被覆ブロック設置範囲（ならし精度：±30cm）に対して、それぞれならし作業を行う。なお、ならし作業は「起重機船による重錘ならし機を使用した転圧ならし（図 5.3-2）」および「潜水士による人力ならし」の組合せにより行う。

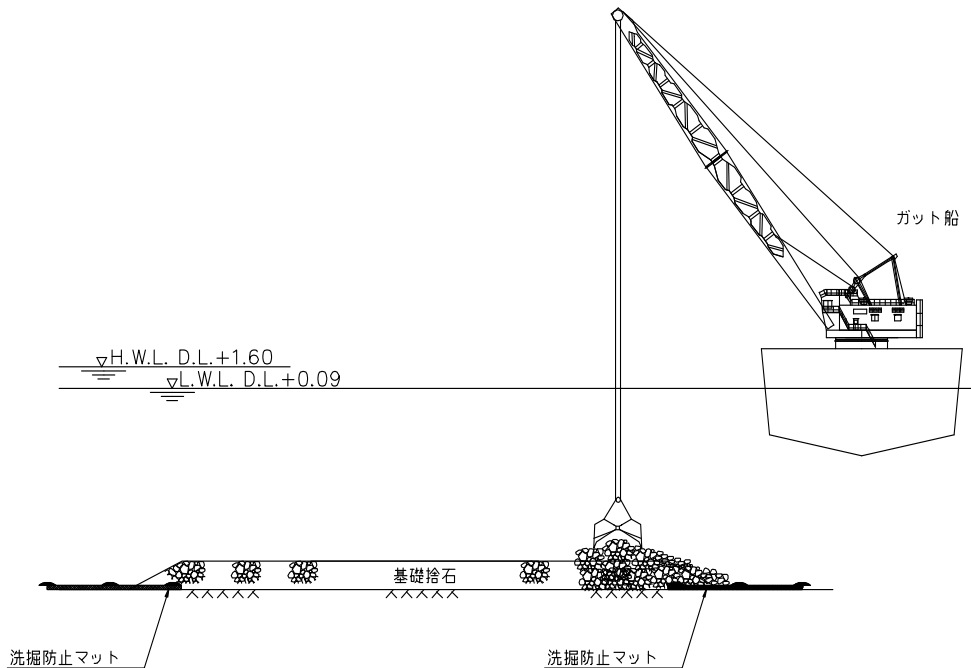


図 5.3-2 基礎捨石投入状況図

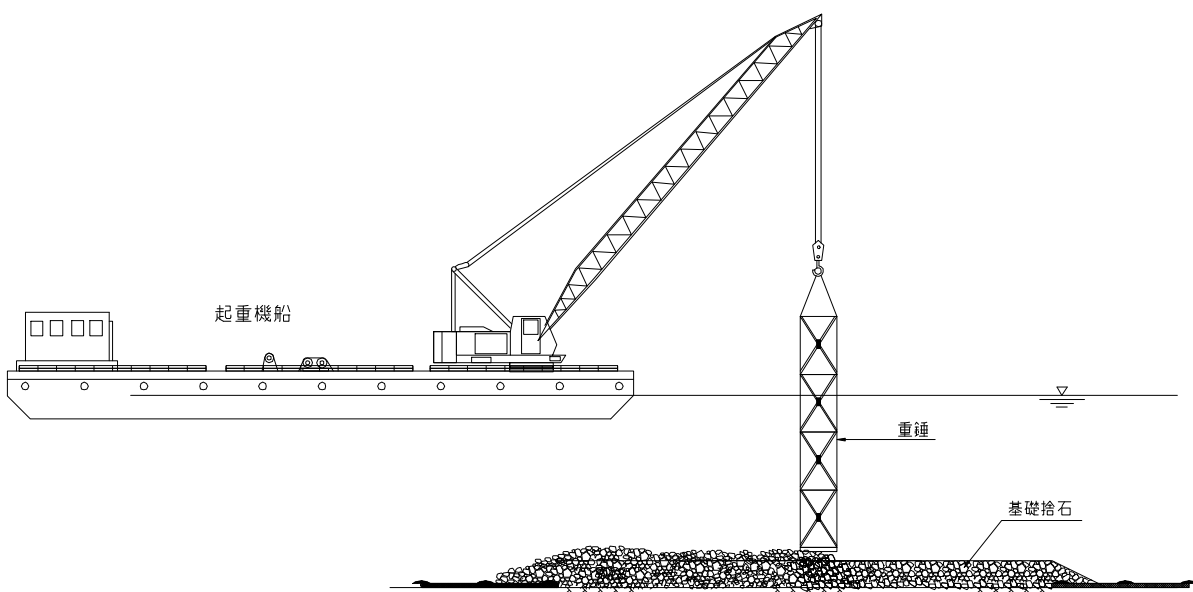


図 5.3-3 重錘ならし状況図

④支持構造物製作

支持構造物の製作は、岸壁前面に係留された FD（フローティングドック）上にて行う。底版コンクリートの施工に先立ち、底面にアスファルトマットを敷設し、鉄筋組立、型枠組立、足場設置を行った後に 1 段目（下層）のコンクリートの打設を行う。1 段目コンクリート打設・養生後、工場製作されたジャケット部の据付を行い、2 段目（上層）の底版コンクリートを施工する。その後、ジャケット内にコンクリートを充填し、付帯設備などの取付作業を行う。

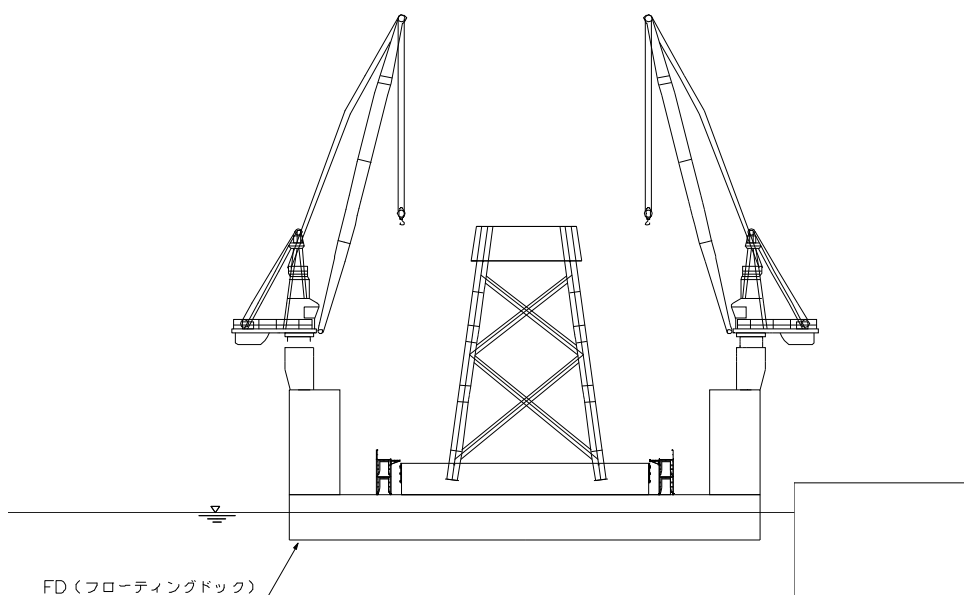


図 5.3-4 支持構造物製作状況図

⑤FD 進水・支持構造物引出し

FD を支持構造物据付け箇所付近まで曳航し、大型起重機船による吊上げ後、FD を進水して支持構造物を引き出す。

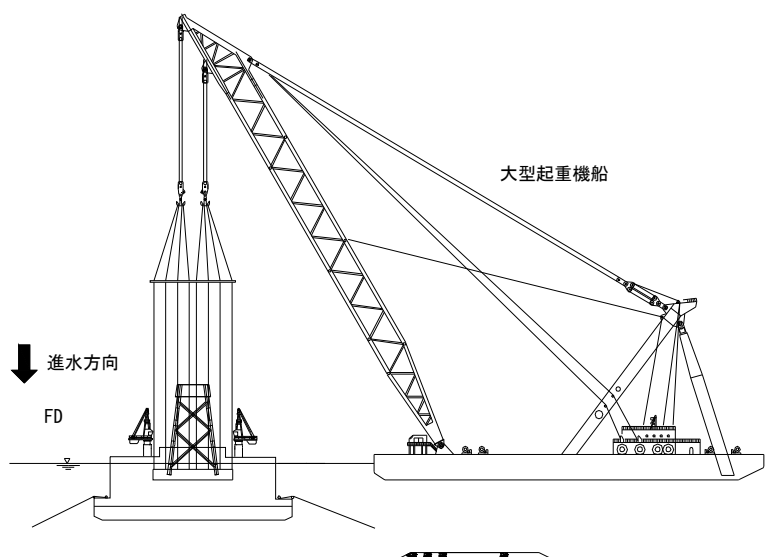


図 5.3-5 FD 進水・支持構造物引出し状況図

⑥支持構造物据付

大型起重機船による支持構造物の引き出し後、支持構造物を所定の位置に据付ける。

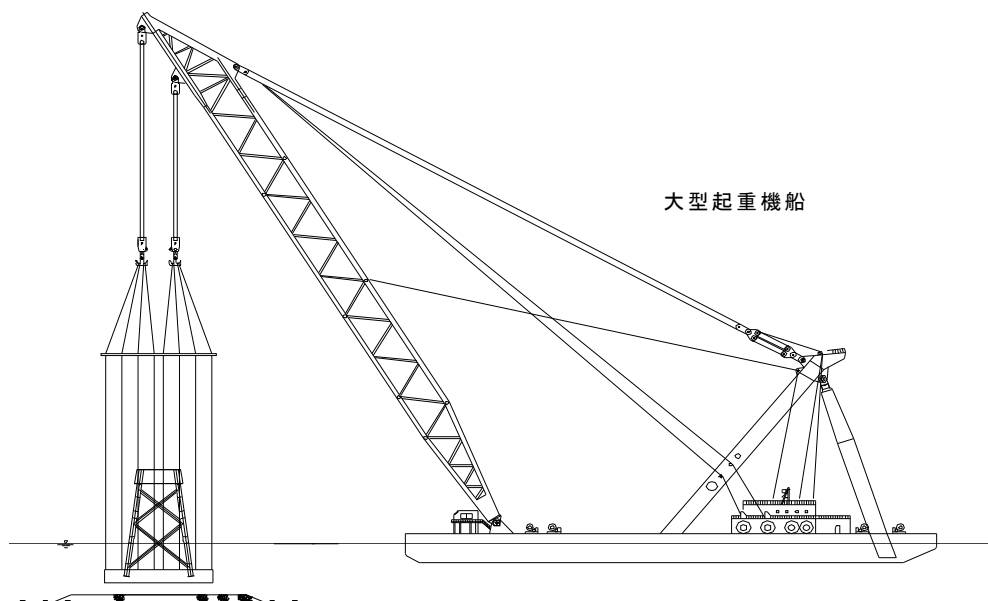


図 5.3-6 支持構造物据付状況図

⑦根固ブロック、被覆ブロック据付

支持構造物据付後、ブロック製作ヤードにて製作されたブロックを起重機船へ積み込み、ブロック据付箇所まで海上運搬する。据付箇所到着後、支持構造物の周囲に根固ブロック、被覆ブロックの順で起重機船を使用して潜水士船の合図にて据付ける。

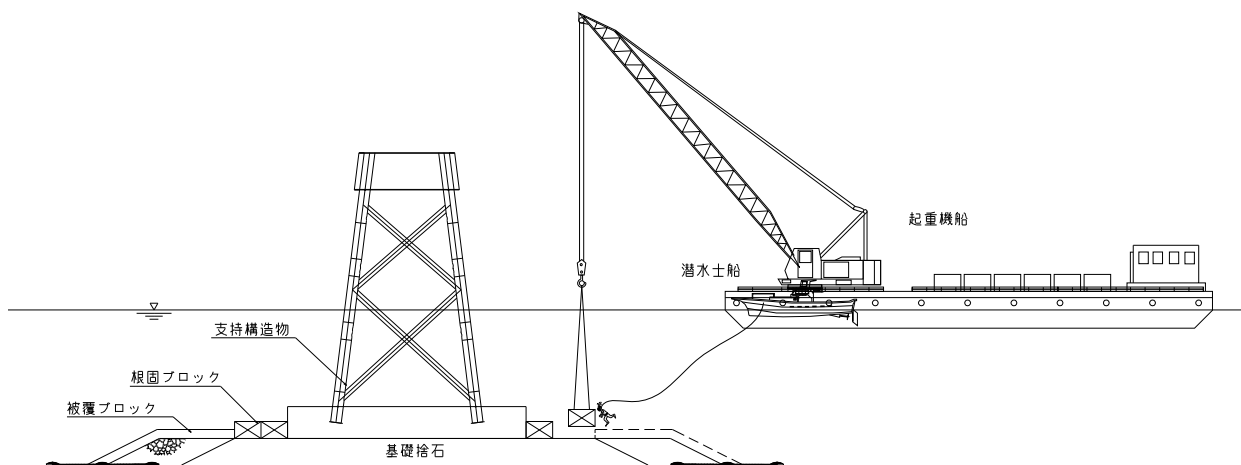


図 5.3-7 被覆・根固ブロック据付状況図

⑧SEP 船回航、風車部材積み込み

2隻のSEP船を作業ヤード前面に回航し、積み込み用クローラークレーンを使用して、1隻には風車の本体据付用のクローラークレーンを設置し、もう一隻には風車部材などの資機材を積み込み、補助用のクローラークレーンを設置して据付位置まで曳航する。

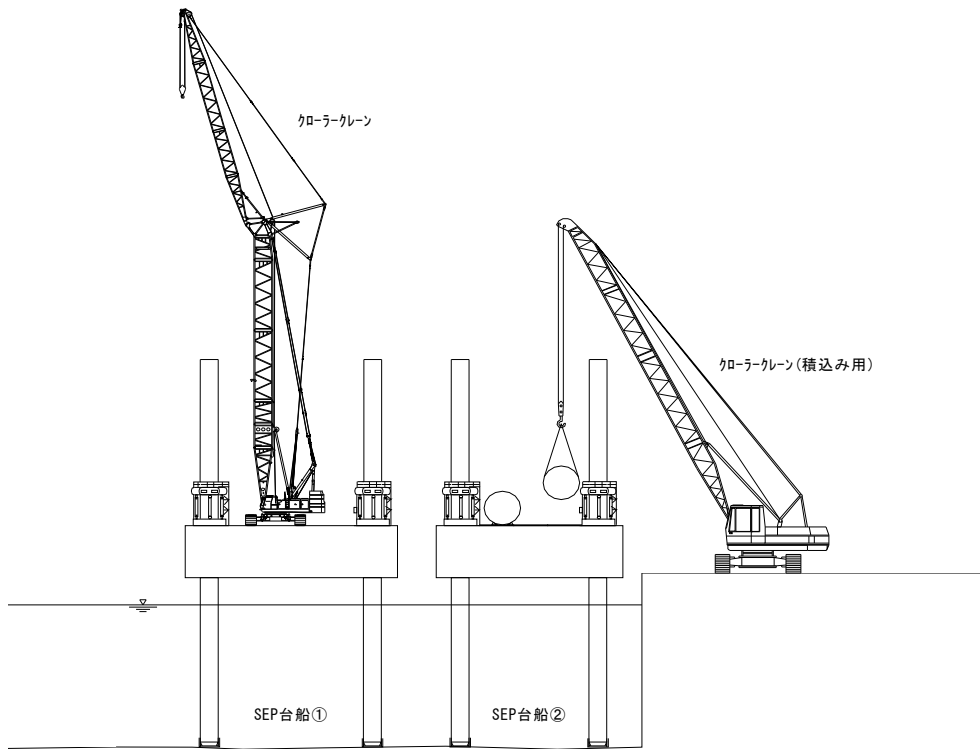


図 5.3-8 風車部材等積み込み状況図

⑨風車本体据付

据付箇所に着後、SEP 船を所定の高さまで上昇させ固定する。その後、クローラークレーンを使用してボトムタワー、ミドルタワーの順に据付ける。

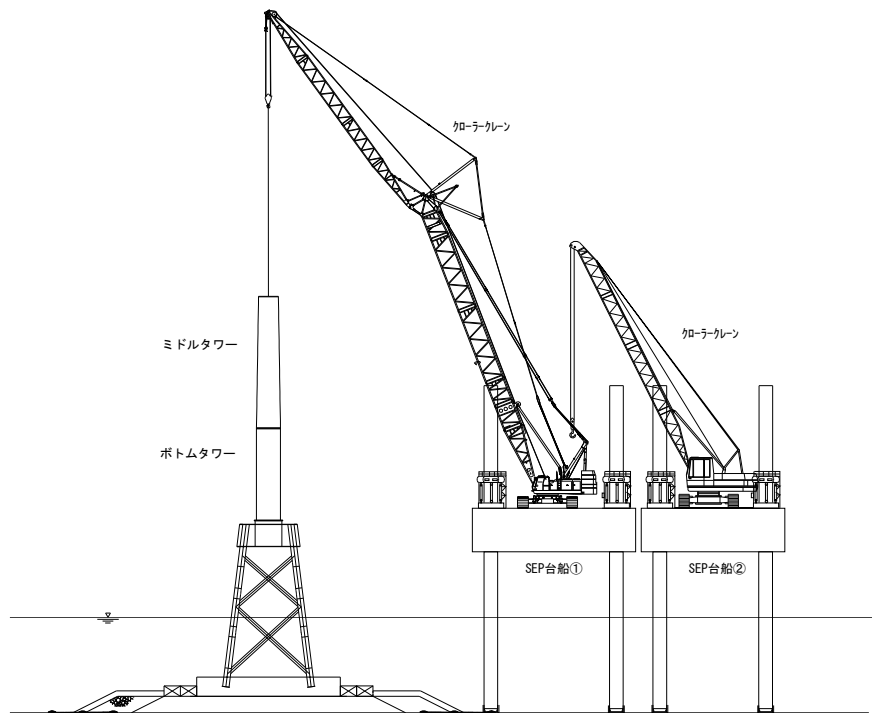


図 5.3-9 風車本体据付状況図

その後、SEP 台船②を陸上作業ヤードに曳航し、トップタワー、ナセル、ブレード、ハブ、発電機等の残り部材を積み込み、再び据付箇所へ曳航する。据付箇所到着後、クローラークレーンを使用して各部材を据付ける。

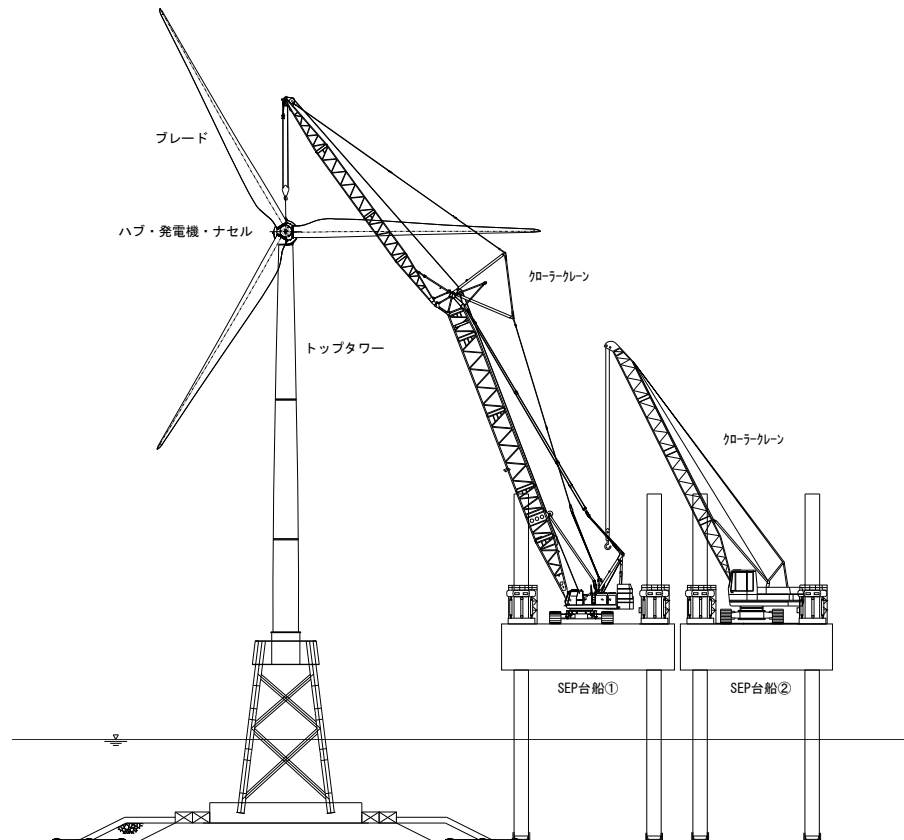


図 5.3-10 風車本体据付状況図

(3) 海底ケーブルの施工方法

1) 海底ケーブルの布設

海上鉄柱から観測タワー、観測タワーから洋上風車へと、布設船を使用して海底ケーブルの布設を行う（図 5.3-11）。観測タワーあるいは洋上風車に布設船が近づいたら、布設船を一時停船し海底ケーブルを必要長に切断処理する。布設船を定点保持し、海底ケーブルにチューブブイを取り付け海面上に海底ケーブルを送出する。その後海底ケーブルの端部を基礎部の保護管内に取り付ける（図 5.3-12）。

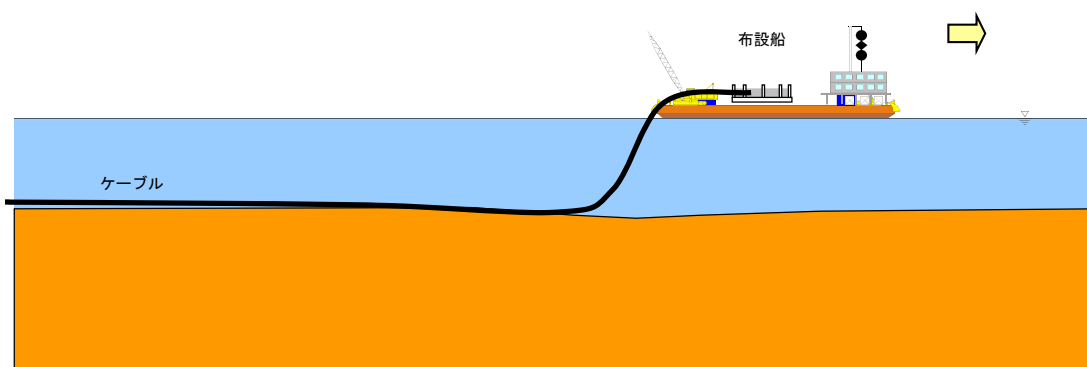


図 5.3-11 海底ケーブルの布設

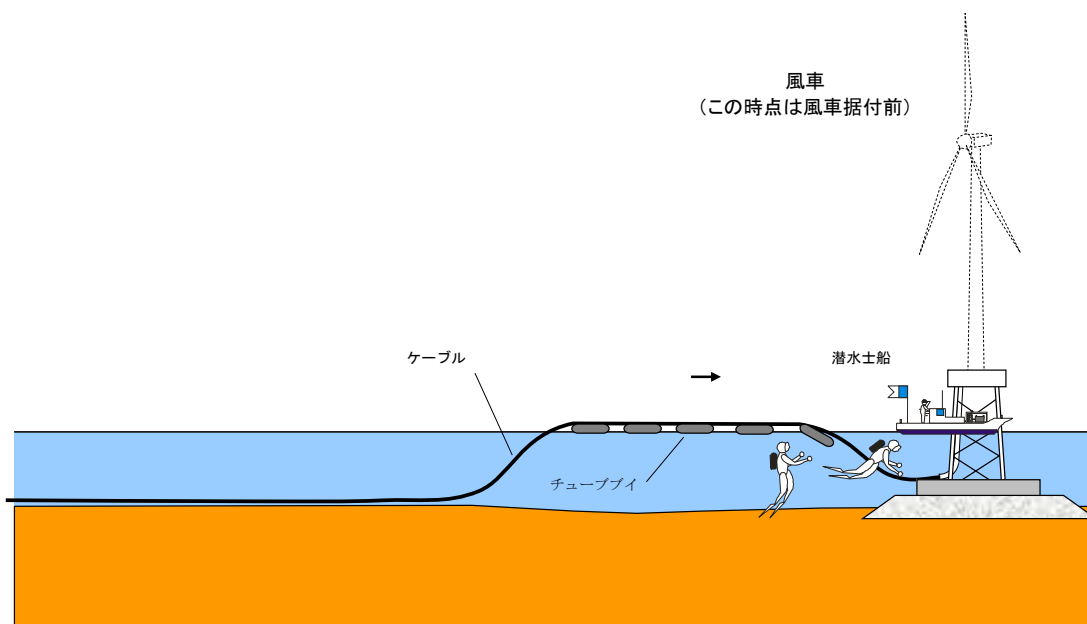


図 5.3-12 洋上風車への海底ケーブルの取付

2) 海底ケーブルの埋設

海底ケーブルの埋設は、ルート調査結果から埋設区間が短区間となったため、潜水士によるハンド埋設を選択した。ハンド埋設は、潜水士船から供給される水流により海底の土砂を吸い上げ、その溝に海底ケーブルを沈下させる方式である。ハンド埋設の概要を図 5.3-13 に示す。

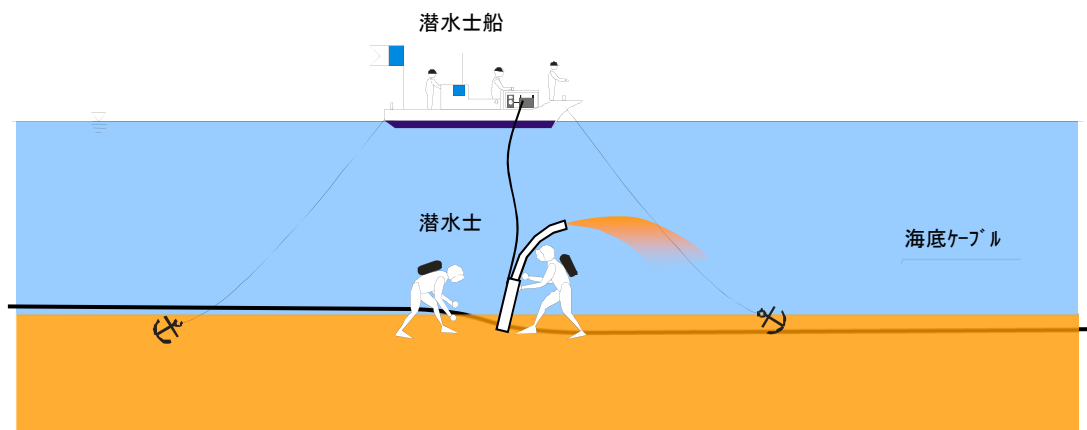


図 5.3-13 海底ケーブルのハンド埋設

3) 防護管の取付

防護管の取付は、海底ケーブル布設後、潜水士により実施する。防護管取付の概要を図 5.3-14 に示す。

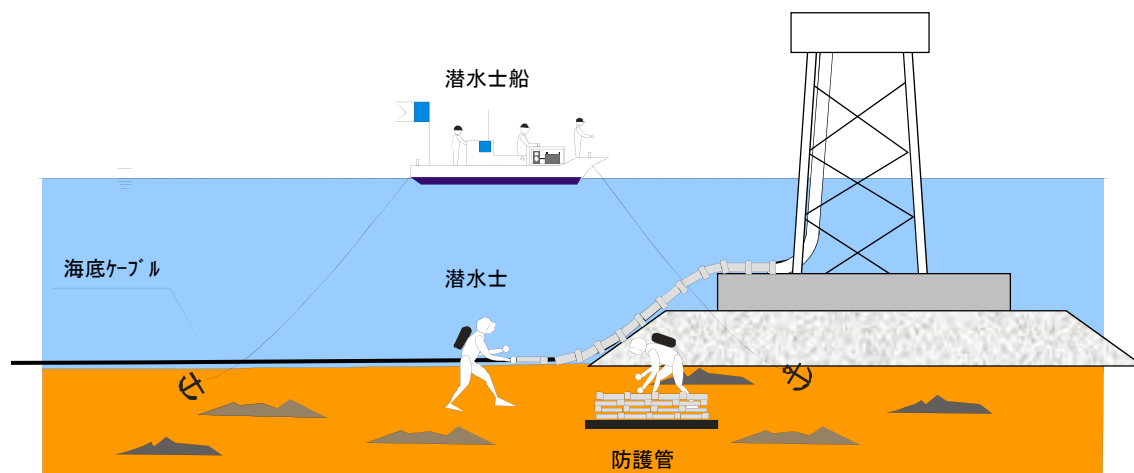


図 5.3-14 海底ケーブルへの防護管取付

6 建設工事

6.1 基礎工事

基礎マウンドは図 6.1-1 に示す構造形式となっており、洗掘防止マットの布設→捨石の投入→ならし作業→根固ブロック→被覆ブロックの順に工事を行った。なお、根固ブロックおよび被覆ブロックは支持構造物の据付後に併せて実施した。

洋上風況観測タワーの基礎マウンドは水平度が南北方向について $\pm 0.06^\circ$ 、方向のズレについて 0.6° の精度で施工され、それぞれの管理基準値 0.3° 未満、 1° 未満を満足したことを確認した。洋上風車の基礎マウンドは水平度が東西、南北方向ともに $\pm 0.13^\circ$ の精度で施工され、管理基準値 0.25° 未満を満足したことを確認した。

図 6.1-2 に捨石投入とならし作業等の状況を示す。

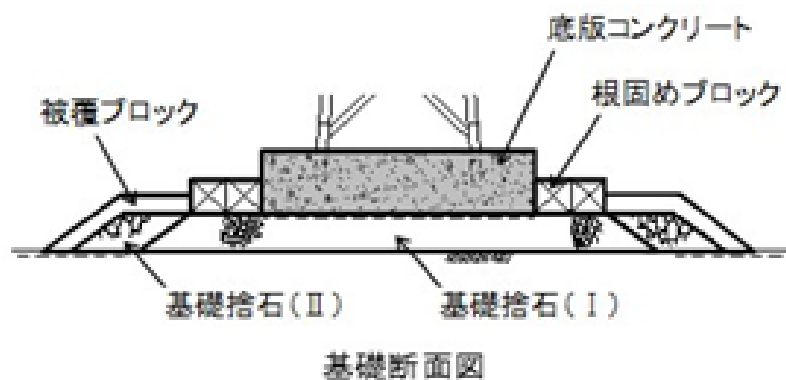


図 6.1-1 基礎マウンドの構造形式

捨石投入



捨石投入



重錘による基礎捨石均し



根固ブロック設置



図 6.1-2 捨石投入とならし作業等

北九州市港のヤード（洋上風況観測タワー用）とフローティングドック（洋上風車用）で支持構造物を製作した。洋上風況観測タワー用支持構造物については、運搬・据付を大型クレーン船（武蔵, 定格荷重：3,700t）により行った。洋上風車用支持構造物については、フローティングドックで運搬し、大型クレーン船（武蔵）により据付けた（図 6.1-3）。設置後に根固ブロックや被覆工事を行った。洋上風況観測タワーの支持構造物の工事は 2012 年 6 月末に、洋上風車の支持構造物の工事は 2012 年 10 月半ばに、それぞれ完了した。

洋上風況観測タワーの支持構造物と観測タワー天端の水平度は、南北方向の管理基準値 0.3° 未満に対して -0.03° 、東西方向の管理基準値 0.3° 未満に対して -0.02° であり、管理基準値を満たしていることを確認した。洋上風車の支持構造物の接合フランジ天端面の水平度は、南北方向の管理基準値 0.3° 未満に対して -0.07° 、南北方向の管理基準値 0.3° 未満に対して -0.07° であり、管理基準値を満たしていることを確認した。



- ①支持構造物のフローティングドックによる運搬
- ②支持構造物の係留（実証研究サイト）
- ③支持構造物の据付状況
- ④支持構造物の据付完了

図 6.1-3 北九州市沖における洋上風車の支持構造物の運搬・据付

6. 2 観測タワーの設置工事

観測タワーをヤードにて、ブロック化（2分割：観測塔(1)、観測塔(2)）して製作した。搬出に際しては観測塔(1)と支持構造物を一体化し、洋上での据付は「観測塔(1)+支持構造物」および「観測塔(2)」の2ブロックで行った（図 6.2-1）。

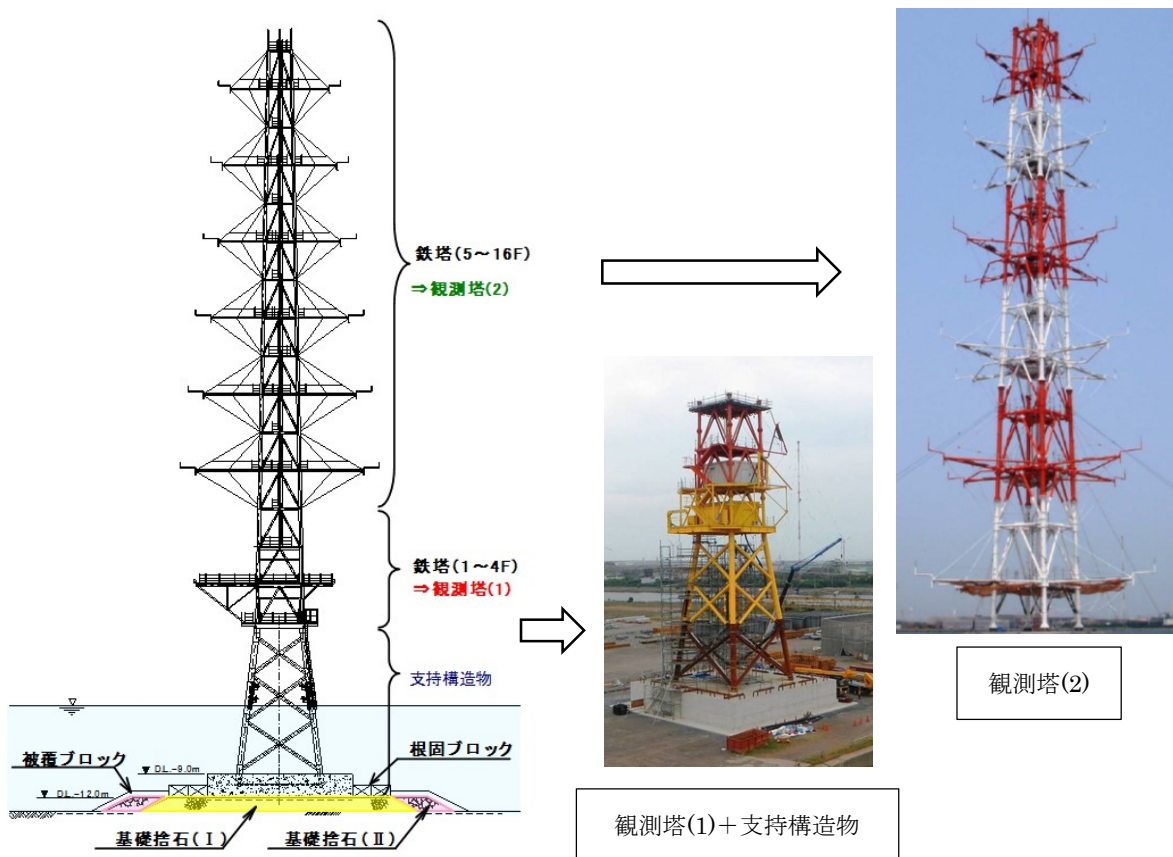


図 6.2-1 洋上風況観測タワーの地組状況

据付には、「観測塔(1)+支持構造物」では「武蔵（定格荷重：3,700t）」、「観測塔(2)」では「駿河（定格荷重：2,200t）」の大型起重機船を使用した。観測タワーの据付状況と完成時の状況を図 6.2-2 と図 6.2-3 にそれぞれ示す。また、洋上風況観測タワーの据付精度を図 6.2-4 に示す。

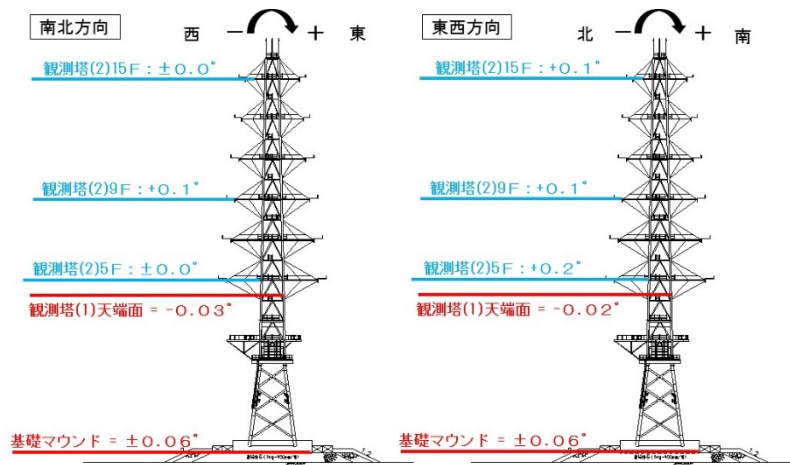


上段：観測塔(1)+支持構造物 ①海上輸送 ②位置合わせ・据付
 下段：観測塔(2) ③海上輸送 ④位置合わせ・据付

図 6.2-2 洋上風況観測タワーの据付状況



図 6.2-3 洋上風況観測タワーの完成時の状況



注) 観測塔(2)の、5F・9F・15F部分の値はグレーチング天端面でデジタル傾斜計により測定

* 基礎捨石ならし精度の向上および根固めにより、観測タワーの鉛直精度を確保

* 実施施工工数は5日（水中人力施工の1/4程度）

図 6.2-4 洋上風況観測タワーの据付精度

6.3 風車の設置工事

据付には、「くろしお」と「あそ」の2隻のSEP船を使用した。据付は、タワー（1～3節）→一体型ナセル→ブレード（3翼：1翼ずつ取付け）の順序で行った（図6.3-1、図6.3-2）。完成時の状況を図6.3-3に示す。また、洋上風車の据付精度を図6.2-4に示す。



① ボトムタワー据付 ②ミドルタワー据付 ③トップタワー据付 ④一体型ナセル据付

図6.3-1 タワーと一体型ナセルの据付状況



① ブレード No.1 据付 ②ブレード No.2 据付 ③ブレード No.3 据付 ④ブレード据付完了

図 6.3-2 ブレードの据付状況



図 6.3-3 洋上風車の完成時の状況

管理基準値 = ±0.25°

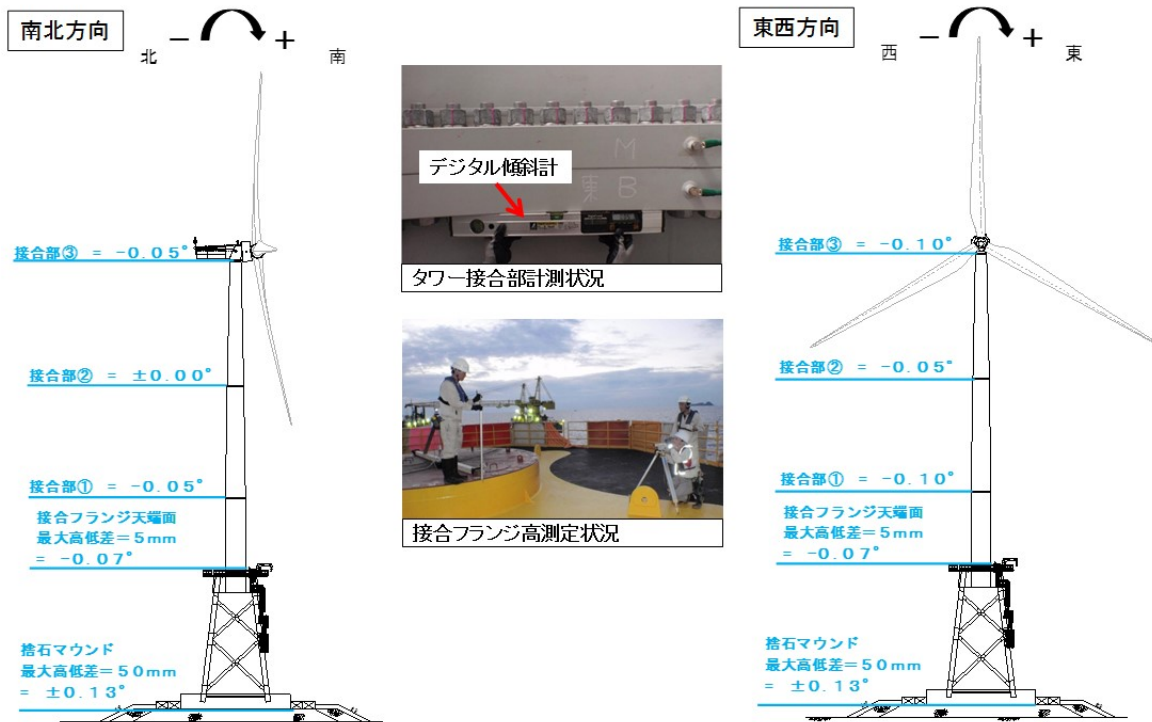


図 6.3-4 洋上風車の据付精度

観測タワー建設工事と風車建設工事の施工稼働率は、表 6.3-1 の通りである。

表 6.3-1 施工稼働率のまとめ

観測塔建設工事

(工期: 2011年8月22日~2012年9月30日)

工種	作業期間	稼働日/作業日	稼働率 (実績)	稼働率 (計画)
①捨石工	4/16~ 5/17	24日/32日	75.0%	55.9%
②支持構造物据付工	6/15~ 6/17	1日/3日	33.3%	48.3%
③根固工	6/16~ 6/18	3日/3日	100%	48.3%
④被覆工	6/19~ 6/28	4日/10日	40.0%	48.3%
⑤観測鉄塔(2)据付工	6/28~ 6/30	1日/3日	33.3%	24.0%

風車建設工事

(工期: 2011年11月2日~2013年5月31日)

工種	作業期間	稼働日/作業日	稼働率 (実績)	稼働率 (計画)
①捨石工	7/24~ 9/8	19日/46日	41.3%	56.8%
②支持構造物据付工	9/28~ 10/5	2日/8日	25.0%	42.8%
③根固工	10/6~ 10/9	3日/4日	75.0%	44.4%
④被覆工	10/9~ 10/13	4日/5日	80.0%	42.6%
⑤風車据付工	2/28~ 3/28	15日/29日	51.7%	46.7%

6. 4 海底ケーブルの布設

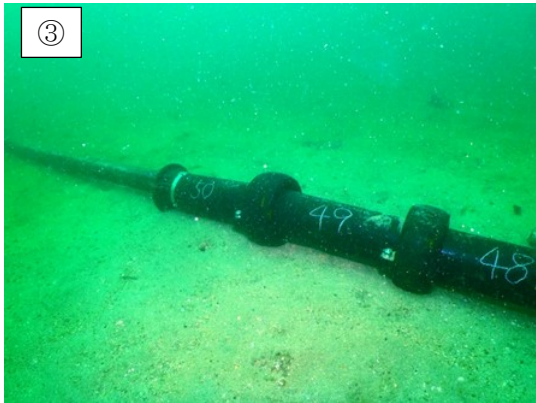
洋上から陸上の開閉設備の間には消波ブロック被覆護岸があるため、ケーブルを架空で通す必要があった。そのため、洋上風況観測タワーの据付後、海上鉄柱を設置した（図 6.4-1）。布設工期は、2012年5月26日～7月6日であった。



上左図：海上鉄柱の外観
上右図：海上輸送（駿河 2,200t）
下左図：海上鉄柱の設置

図 6.4-1 海上鉄柱の施工状況

海底ケーブルは、三相一括二重鉄線鎧装鉛被層付 6.6kV 架橋ポリエチレン絶縁海底ケーブル（光ファイバー複合 6 芯,全長 1.77km）で、布設工事は布設作業台船（開洋）により行った（図 6.4-2）。布設工期は、2012年8月1～9日、10月15～25日および2013年3月1～15日の3期にわたった。



- ①観測タワーの海底ケーブル布設準備状況
- ②観測タワーと洋上風車間の海底ケーブル布設状況
- ③海底防護部設置状況
- ④送電ケーブル（架空電力線）の据付完了

図 6. 4-2 海底ケーブルの布設状況

7 運転・保守

7.1 運転・保守の方法

(1) モニタリング

北九州市沖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。それぞれのモニタリングの内容を表 7.1-1、図 7.1-1 に示す。

表 7.1-1 洋上風車のナセル内のモニタリング

箇所	測定項目	方針
発電機	クランプ温度	発電量、コンバータ電圧及びベアリングの振動等の対比により発電機異常の早期発見、保全
ベアリング	振動	風速、風向、発電量、との対比より軸受けへの振動を分析し、疲労・荷重の傾向を把握する
	温度	
トランス	油面	油面計の異常検出によるトランス外部の機械的故障の有無
	油温	油温計の異常検出によるトランス内部の機械的・電気的故障の有無
トランスルーム	温度	温度のモニタリングによる異常発熱の有無
	振動	振動のモニタリングによる異常振動の有無、トランスの振動防止
ナセル内	温度	温度のモニタリングによる冷却設備容量アップの有効性検証、異常発熱の有無
	ウェブカメラ(画像)	ピッチグリス残量、漏油およびその他目視による異常検出
		風車稼働時のモニタリングにより機械的損傷や異常熱による発煙等の兆候の確認
加速度	振動のモニタリングによるナセル異常振動の検出、機器保護	
油圧ライン	圧力	圧力のモニタリングによるポンプ等機械系故障あるいはラインからの漏油の有無
冷却水ライン	温度	温度のモニタリングによる冷却設備容量アップの有効性検証、異常発熱の有無
	圧力	圧力のモニタリングによるポンプ等機械系故障あるいはラインからの漏水の有無

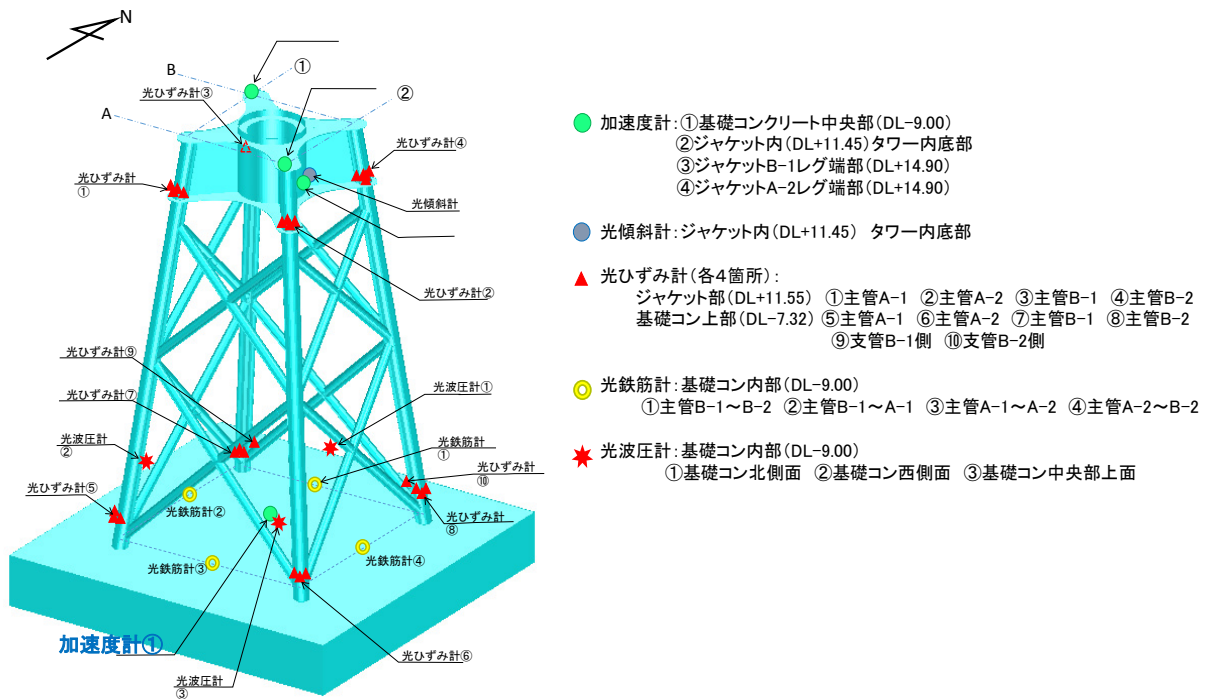


図 7.1-1 支持構造物のモニタリング

北九州市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。CMSによる風車運転状況 (台風 24 号 (2013 年 10 月 8 日~9 日) 接近時のケース) の事例を図 7.1-2 に示す。

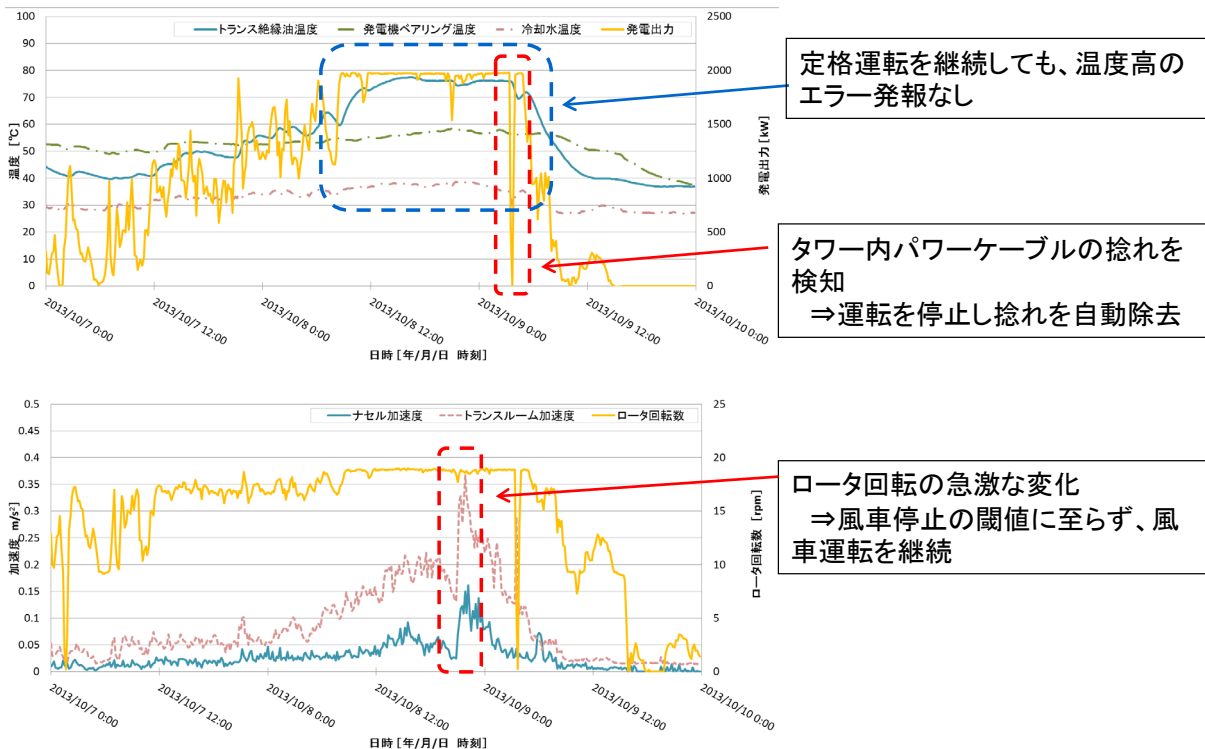


図 7.1-2 CMSによる風車運転状況の監視事例

また、SCADA（監視制御システム）により風車設備の運転状況（出力、温度、回転数他）や異常の有無を遠隔にて監視・記録するとともに、Webカメラを活用した視覚データ収集等によって故障発生情報を事前にキャッチし、予防措置を効率的に実施するシステムを構築し運用した。SCADAの画面例を図7.1-3に示す。



図 7.1-3 SCADA 画面例

洋上風力発電所の場合、季節による海象条件によって、アクセスに大きな制約を受け数ヶ月風車に行くことができなくなる可能性がある。そのため、定期的な点検を遠隔でも実施できるように風車の点検場所に固定式 Web カメラを設置し、常時監視体制を構築した（図 7.1-4）。あらかじめ風車の重要部分を可視、可聴範囲に収められることを固定式カメラの要求性能とした。



図 7.1-4 Web カメラの例

(2) 点検

風力発電設備は電気事業法および同法に基づく電気設備技術基準、発電用風力設備に関する技術基準等に準拠して保安規程を定め、管轄の経済産業局産業保安監督部へ届けることが義務付けられている。設備の保安はこの保安規程に基づき実施されるが、保安規程は最低限の内容であることから、北九州市沖風力発電施設における運用では細部を定めた「運転心得」に基づき実施している。運転心得には、電気事業法の定めだけでなく、洋上風力発電所の工事・維持・運用にあたり準拠しなければならない消防法、航空法、航路標識法等の関連法規・条例をも考慮して内容に反映した。

設備点検は、月例点検、半年点検、年次点検、臨時点検に大別される。各点検内容を表 7.1-2 に示す。日常的には、SCADA により風車設備の運転状況（出力、温度、回転数他）や異常の有無を遠隔にて監視・記録するとともに、風車内に設置した Web カメラを活用した視覚データ収集等によって故障発生情報を事前にキャッチし、予防措置を効率的に実施している。

表 7.1-2 主要な洋上風力発電設備ごとの点検頻度

項目	連系用開閉設備	配電設備	風力発電設備： 風力発電機	風力発電設備： 風車支持物	風力発電設備： 6.6kV受電盤	観測鉄塔（観測塔）： 観測鉄塔	観測鉄塔（観測塔）： ディーゼル発電機	観測鉄塔（観測塔）： 6.6kV受電盤
随時点検								
点検名	月例点検	(洋上風車および観測塔) 支持物他点検	月例点検	月例点検	月例点検	月例点検	月例点検	月例点検
点検対象設備	「陸上開閉所」内の6.6kV設備 (保護機能など付属設備を含む) ※海上鉄柱は及び6.6kV架空線は対象外	陸上開閉所 陸上鉄柱～風車 間の架空線および海底ケーブルおよび海上鉄柱 (埋設部含む)	風車、発電機、制御盤、変圧器など	風車 タワー、基礎など	6.6kV受電盤 (高圧遮断器盤)	観測塔 タワー、基礎、観測室など	ディーゼル発電機および制御盤、筐体など	6.6kV受電盤 (機器室1階)
点検頻度	2回/月	2回/年 H25年度は、1回とする。	1回/月	1回/月	1回/月	1回/月	1回/月	1回/月
定期点検								
点検名	陸上開閉所 定期点検	随時点検と同じ。実施該当年において、点検項目を追加することで対応する。	風車 定期点検	風車 定期点検あるいは、月例点検	風車 定期点検 実施該当年において、点検項目を追加することで対応する。	(洋上風車および観測塔) 支持物他点検あるいは、月例点検	観測塔 定期点検	観測塔 定期点検
点検対象設備	随時点検に準じる	随時点検に準じる	随時点検に準じる	随時点検に準じる	随時点検に準じる	随時点検に準じる	随時点検に準じる	随時点検に準じる
点検頻度/ 次回点検期日	6年毎、 次回期日は平成30年6月24日	6年毎、 次回期日は平成30年6月24日 架空線の測定試験：12年毎、 次回点検は平成36年6月24日 なお、架空線の測定については、検査の前倒し計画は「可」とする。	運用後2年間に5回、 3年目以降は1回/年 H25年に2回実施済み、 次回以降は、H26年春秋、H27年春秋に実施予定、 H28年以降は1回/年で実施予定	運転開始後、2年間に5回、 3年目以降は1回/年	6年毎、 次回期日は平成30年6月24日	1回/年	6年毎、 次回期日は平成30年6月24日	6年毎、 次回期日は平成30年6月24日

注) 当該点検頻度は実証研究中のもので、今後回数については、合理化を前提に減少を含む見直しをする

12ヶ月点検における点検部位別の点検要領を表 7.1-3 に示す。なお、水中点検では、機械測量 (マルチビーム+サイドスキャンソナー) と潜水士による目視観察を実施し、風車、観測タワーおよび海上鉄柱の状況を確認している。

表 7.1-3 12ヶ月点検における点検部位別の点検要領

点検部位	点検要領
タワー	・外部および内部取付部材の緩み・損傷等の目視確認、ウインチ・インターホン、主要部材締結ボルトのトルク確認、昇降機の点検、直撃雷検出装置の点検
盤類	・外部および内部取付部材の緩み・損傷等の目視確認、ウインチ・インターホン、主要部材締結ボルトのトルク確認、昇降機の点検、直撃雷検出装置の点検 ・外観および内部の汚損・損傷等の目視確認、盤面スイッチ等の動作確認、盤内主要センサー (オーバースピードセンサー等) の動作確認
ナセル	・外部および内部取付部材の緩み・損傷等の目視確認、冷却ファンの動作確認、風量確認、冷却ファン用フィルタの交換、自動ダンパーの動作確認、風向風速計の動作確認、航空障害灯の動作確認、主要部材締結ボルトのトルク確認
冷却装置	・動作確認、圧力確認、流量確認
油圧装置	・動作確認・圧力確認、油量・オイル漏れ確認、作動油のフィルタリング
自動潤滑給脂装置	・目視確認、グリース使用量の確認・補充
ヨー	・ヨーモータ等の動作確認、ヨーモータブレーキギャップの測定、ヨーブレーキの動作確認、ブレーキパッドの確認、各種ボルトの緩み確認、ヨーギアへのグリース塗布、ヨー位置センサー等の動作確認
ハブ	・取付部材の緩み・損傷等の目視確認、主要部材締結ボルトのトルク確認、ピッチモータの動作確認、ピッチモータブレーキギャップの測定
発電機	・温度センサの表示確認、ローター遊転による異音確認、エアギャップの測定、絶縁抵抗測定
トランスルーム	・トランス外観の汚損・損傷等の目視確認、油漏れ・冷却水漏れの確認、冷却ファンの動作確認、風量確認、冷却ファン用フィルタの交換
ブレード	・外観、内部の目視確認、ブレードベアリングの確認

・人員：6名 (現場責任者1名, 作業員4名, 昇降機点検2名)、実施期間：6日 (実質)

7. 2 運転・保守の結果

(1) 運転の実績

2013年～2016年の北九州市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。

- ・2013年12月～2014年3月：同機種のレセプター事故発生に伴い、保安停止を実施した。
- ・2014年12月～2015年3月：ピッチ制御エラーおよび調査作業等のため、断続的に運転した。
- ・2016年1月～6月：同機種のブレード折損事故発生に伴い、保安停止を実施した。

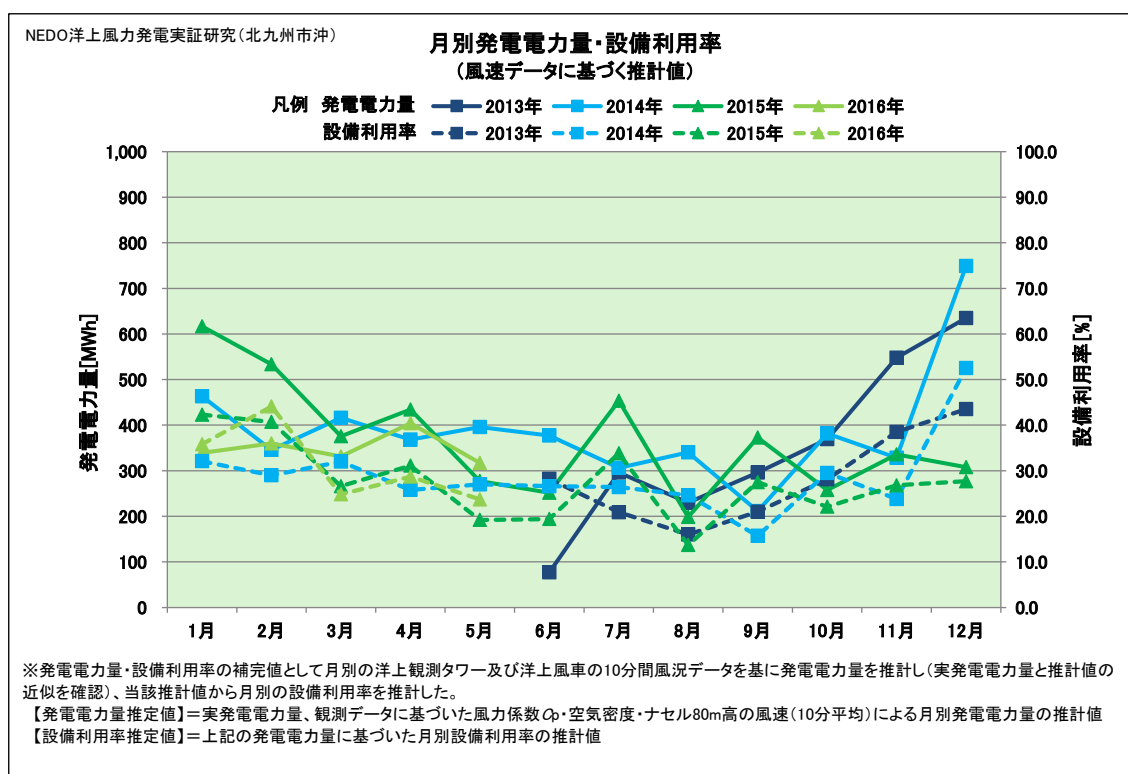


図 7.2-1 北九州市沖洋上風力発電施設での発電電力量、設備利用率（風速データに基づく推計値）

表 7.2-1a 北九州市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(北九州市沖)	
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】
発電電力量 [MWh]	2013年						77	296	230	296	369	548	635	2,451
	2014年	463	346	416	368	396	377	306	340	211	382	328	749	4,683
	2015年	617	534	376	434	277	252	453	199	373	258	336	308	4,416
	2016年	339	360	331	404	317	313							
設備利用率 [%]	2013年						28.2	20.9	16.0	21.0	28.1	38.5	43.5	—
	2014年	32.1	29.0	32.0	25.8	27.0	26.6	26.4	24.6	15.7	29.5	23.8	52.5	28.8
	2015年	42.3	40.7	26.6	31.1	19.2	19.4	33.8	13.7	27.5	22.1	26.8	27.7	27.6
	2016年	35.8	44.1	24.8	28.7	23.7	23.0							

表 7.2-1b 北九州市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(北九州市沖)

項目	発電年・月	【年別】												累積発電電力量/ 月平均設備利用率
		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	
発電電力量 [MWh]	2013年	/	/	/	/	/	76	294	173	174	360	445	-	1,522
	2014年	-	-	-	298	337	263	179	324	194	353	175	11	2,134
	2015年	5	8	58	187	266	224	458	142	338	293	337	339	2,655
	2016年	-	-	-	-	-	-	/	/	/	/	/	/	0
設備利用率 [%]	2013年	/	/	/	/	/	28.2	20.9	16.0	21.0	28.1	38.5	-	-
	2014年	-	-	-	20.9	22.8	18.5	12.2	22.0	13.6	24.0	12.3	0.7	-
	2015年	0.4	0.6	3.9	13.1	18.0	15.7	31.1	9.7	23.7	19.9	23.7	23.0	15.2
	2016年	-	-	-	-	-	-	/	/	/	/	/	/	-

(2) 保守の実績

1) アクセスにあたっての安全性の確保

「本別冊 7.3 洋上風車のアクセスに係る検討」で説明するように気象海象予報とアクセス基準を組み合わせて適切な判断を可能としたこと、アクセス手引書を作成し安全知識を周知したこと、安全意識の向上のためにアクセストレーニングを行ったこと等により、3年連続で無事故・無災害を達成した。

2) 水中心検

主に海水面以下の支持物や海底ケーブルの状況を確認することを目的として、水中心検を実施した。調査はサイドスキャンソナーを用い、1回/半年の頻度で実施した。ケーブルの不具合（本別冊 7.4(1)参照）以降、支持構造物、海底ケーブルに異常は確認されなかった。

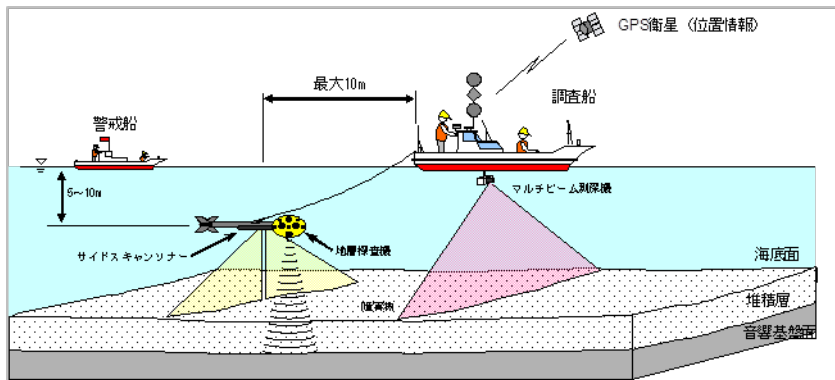


図 7.2-2 サイドスキャンソナーの調査イメージ

3) 水中メンテナンスロボット

大規模な洋上風力発電において、効率的な維持管理手法の開発は事業成立性に大きな影響を与える。特に、水中部に位置する基礎・支持物を、安全かつ効率的に点検することは維持管理の課題の一つである。この観点から、水中部の設備を安全かつ効率的に管理する手法として、水中メンテナンスロボットを開発した（図 7.2-3）。

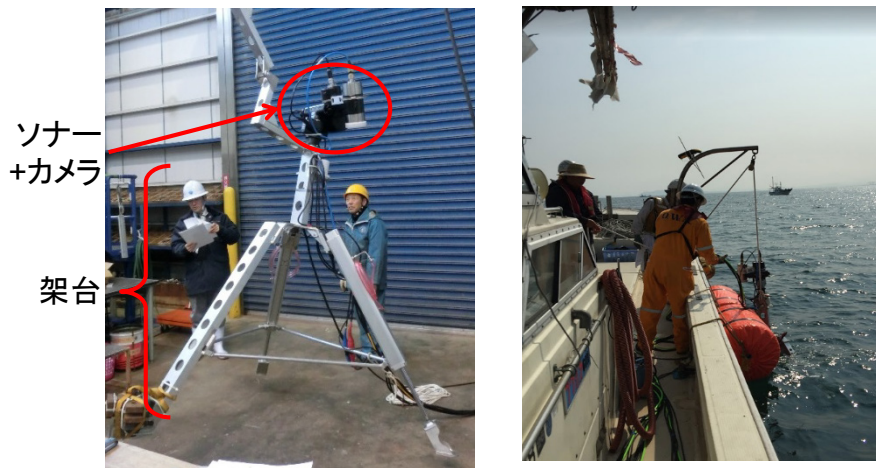


図 7.2-3 水中メンテナンスロボット（左：性能確認試験状況、右：海域への投入状況）

2016年8月と11月に風車や観測塔、鉄柱を調査対象域として、水中メンテナンスロボットを用いて実証海域で計測作業を行った。図 7.2-4 は計測作業においてロボットが取得した画像である。根固ブロックの高さの計測では、設計値とロボットによる計測結果が一致した。今後、潜水士の活動に制限がかかる水深での当技術の適用が期待される。

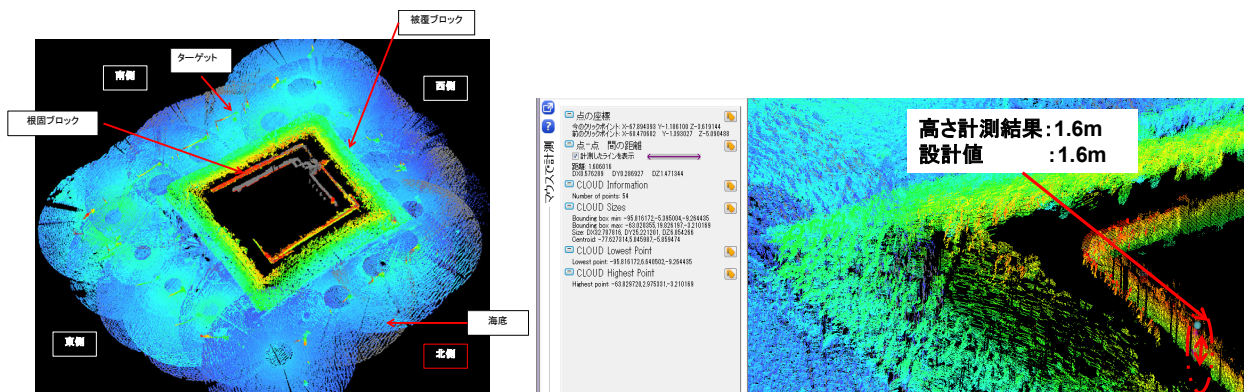


図 7.2-4 水中メンテナンスロボットの取得画像

7. 3 洋上風車のアクセスに係る検討

洋上風力発電施設および洋上風況観測タワーの点検には、月1回の月例点検、半年点検、年次点検および非定期的補修点検があり、事前に波浪（波高/周期）を予測してアクセスの可否を判断した。アクセスの判断基準図を図7.3-1に、アクセスの判断プロセスの流れを図7.3-2に示す。また、2014年7月上旬における、台風8号接近時のアクセス判断の事例を図7.3-3に示す。

「アクセスの基準の例」

- ・危険ゾーン: 有義波周期(0~5秒)で有義波高 $\geq 70\text{cm}$ 、有義波周期8秒で有義波高 $\geq 100\text{cm}$ 、有義波周期10秒で有義波高 $\geq 120\text{cm}$
- ・安全ゾーン: 有義波周期(0~5秒)で有義波高 $\leq 50\text{cm}$ 、有義波周期8秒で有義波高 $\leq 80\text{cm}$ 、有義波周期10秒で有義波高 $\leq 100\text{cm}$
- ・注意ゾーン: 両ゾーンの間

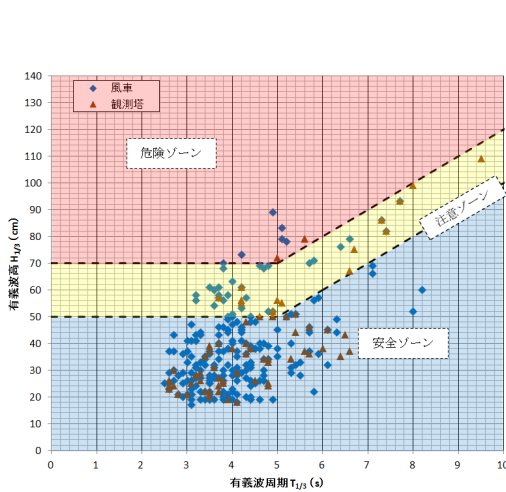


図 7.3-1 アクセスの判断基準図

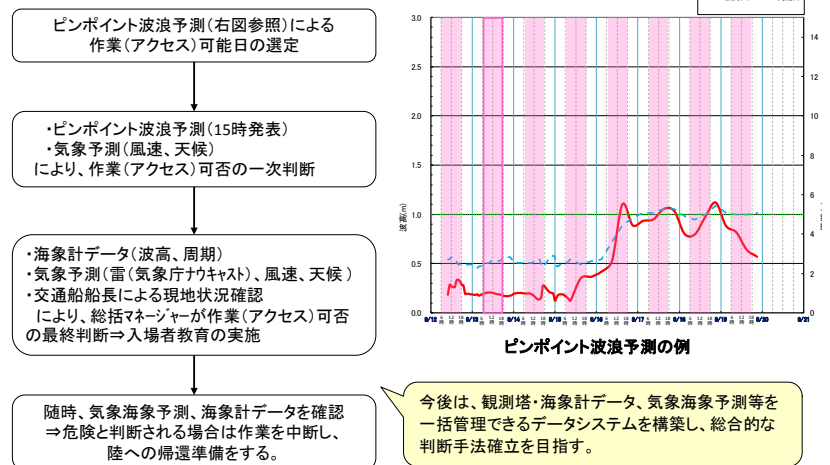


図 7.3-2 アクセスの判断プロセスの流れ

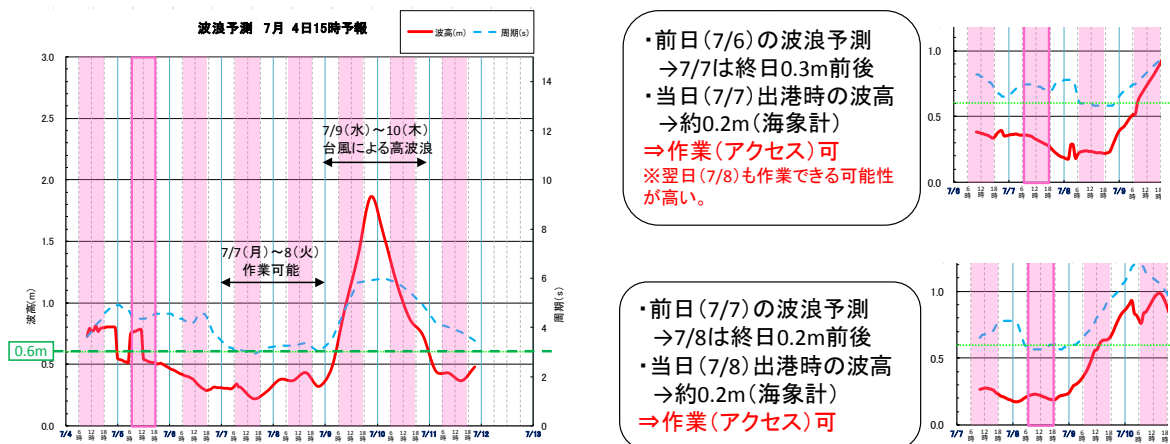


図 7.3-3 アクセス判断予測の例

(左図: ピンポイント波浪予測 (7/4 15:00 予測)、右図: 作業当日の前日予測)

7. 4 運転・保守から確認された課題

本実証研究を行っていく上で、洋上風車に下記のようないくつかの不具合が生じたため、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。

(1) ケーブルの不具合

2014年6月10日に、海底ケーブルの変位（ループ状にわん曲）と防食層の損傷が確認された。



図 7.4-1 海底ケーブルの変位状況防食層の損傷状況

当該海域では、日常的に遊漁船が設備周辺にアンカーを落としてレジャー釣りを実施していること（図 7.4-2）、水中心検にて毎回多くの放棄アンカーが設備周辺で回収されていること（図 7.4-3）から、原因を遊漁船のアンカーによる引っ掛けと推定した。



図 7.4-2 洋上風力発電施設周辺に集まる遊漁船の状況



図 7.4-3 水中心検にて設備周辺で回収された放棄アンカー

応急対策として、海底ケーブルの曲がり直しに対して防食テープで補修を行った。その後、恒久対策として鋳鉄防護管の取り付けを行った。鋳鉄防護管の取り付けを行ったのは、洋上風

車と洋上風況観測タワー間の埋設区間を除いた全範囲、および洋上風況観測タワーと陸上の間での観測タワーから 196.5m までの区間である。また、遊漁船に対する注意喚起看板の設置も行った。



図 7.4-4 遊漁船に対する注意喚起看板の設置状況

(2) ピッチ通信エラー

2014 年 11 月 14 日、風車ハブ内にありブレードピッチ角制御を行う MDS (Mita Drive System) と呼ばれる装置と、ナセル盤内に設置されている風車運転制御 PLC (コントローラ) との間における通信エラーカウント (以下、エラーカウント) の超過を原因として、“Emergency Pitching エラー” による主機停止が頻発するようになった。当該エラーにより、風車が運転停止を短周期で繰り返すようになったため、同日より通常運転から原因調査に限った運転に切り換え、実質的に洋上風車は長期停止に入った。

故障原因調査の中で、ブレードなどの回転側と固定側間の電力通信伝送を担うスリップリングを交換したところ、風車停止を発生させる Emergency Pitching エラーにつながる通信エラーが発生しなくなったことから、今回の風車停止の原因はスリップリングによるものと特定した。スリップリングの製作者に確認したところ、不具合の直接原因が製作上の不備であることを認めた。

スリップリングの交換工事を 2015 年 4 月 18 日、19 日に実施し、本問題の対応は終了した。

(3) 主要変圧器中のアセチレンガスの増加

2015 年 11 月に、ナセル内に設置した主要変圧器内のアセチレンを含む可燃性ガスの濃度が上昇する現象が発生した。アセチレンガスは、変圧器内部での部分放電やアーク放電発生を示唆する指標である。ガス濃度が上昇すると最悪の場合火災を引き起こすことから、同時期に発生した福井県あわら北潟風力発電所におけるブレード折損事故対応も兼ねて、保安停止を行った。

2015 年 11 月～2016 年 5 月までの変圧器の絶縁油中ガス分析結果を表 7.4-1 に示す。併せて表 7.4-2 に、日本で標準的に使用されるガス分析判定基準値 (電協研 65 号 1 巻参照) を示す。可燃性ガスの発生現象は、洋上風車と同型機を使用している福井県あわら北潟風力発電所でも確認されており、同発電所での分析結果も併記する。洋上風車におけるアセチレンガス濃度は 4ppm 以下で推移しており、異常値と言われる 5ppm を超えていないものの、要注意Ⅱレ

ベルに相当する。

表 7.4-1 可燃性ガス分析結果

ガス量(ppm)		あわら北潟風力発電所										北九州市沖洋上風力					
		1号機	2号機	3号機	4号機	5号機	6号機	7号機	8号機	9号機	10号機	洋上 (11月)	洋上 (12月)	洋上 (1月)	洋上 (3月)	洋上 (4月)	洋上 (5月)
H ₂	水素	14	78	10	10	18	31	15	50	10200	458	17	24	16	22	20	19
CH ₄	メタン	20	28	307	5	6	246	16	86	1635	1867	3	4	3	4	4	5
C ₂ H ₆	エタン	9	9	142	4	4	197	8	48	215	870	1	2	t	1	1	1
C ₂ H ₄	エチレン	7	4	692	2	2	452	4	149	3360	4096	4	4	3	4	3	3
C ₂ H ₂	アセチレン	n	t(0.04)	0.19	n	n	1.15	t(0.04)	0.4	5528	12.34	3.88	4.25	3.64	3.57	3.44	3.23
CO	一酸化炭素	162	226	321	122	115	338	83	1171	5963	1675	271	279	250	277	274	277
TCG	可燃性ガス総量	212	345	1472	143	145	1265	126	1504	26901	8978	300	317	276	312	305	308

表 7.4-2 油中ガス分析基準（電気協同研究 65 号 1 巻）

要注意Ⅰ	TCG	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	CO
	500	400	100	150	10	300
	C ₂ H ₂ が0.5ppm未満で検出。					
要注意Ⅱ	① C ₂ H ₂ ≥ 0.5					
	② C ₂ H ₄ ≥ 10でTCG ≥ 500					
異常	① C ₂ H ₂ ≥ 5					
	② C ₂ H ₄ ≥ 100でTCG ≥ 700					
	③ C ₂ H ₄ ≥ 100でTCG増加率 ≥ 70ppm/月					

2016年5月下旬に、同時期に実施したピッチベアリング交換工事に合わせて主要変圧器の交換を実施した（図 7.4-5）。そして、定期的な（数ヶ月に1回程度）油中ガス分析を実施していくこととした。その後、異常値である5ppmを超える現象は発生していない。



図 7.4-5 変圧器の交換作業

可燃性ガス発生の一因として、ナセルの振動による地絡の可能性が示唆されるものの、原因の特定には至っていない。今後、ナセル振動との関連性について、加速度データとの比較を行い、原因究明を図る予定となっている。

8 撤去

北九州市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、北九州市沖 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、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 時に検討された下部構造の撤去方法は起重機船のみを使用した工法となっているが、重量の都合上実際の据付時にはフローティングドック (FD) も必要としたため、運転終了後の撤去には FS 時とは別の工法を検討する必要がある。

FS 時に検討された工事全体の施工フローを以下に示す。なお、陸上仮設・作業ヤードについては、設備施工時と同様に工事区域から 5~10km の地点で確保できるものとしている。

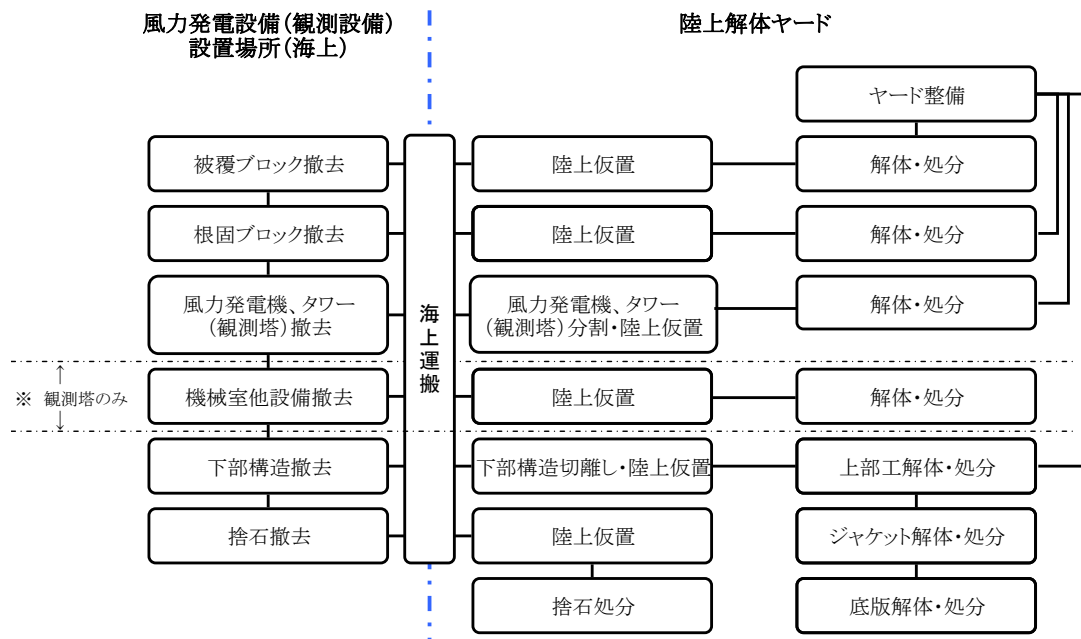


図 8-1 撤去工事全体の施工フロー

①根固・被覆ブロック撤去～処分

基礎の周囲の根固・被覆ブロックを撤去する。施工フローは図 8-2 の通りである。

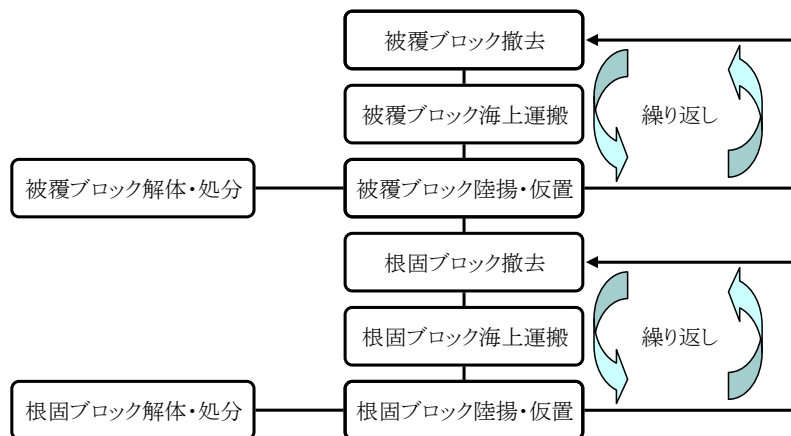


図 8-2 根固・被覆ブロック撤去～処分の施工フロー

a. ブロック撤去

下部構造の周囲に据え付けてあるブロックに潜水士により玉掛けを行い、起重機船（100t 吊 or 150t 吊）にて撤去し、起重機船に積み込む。

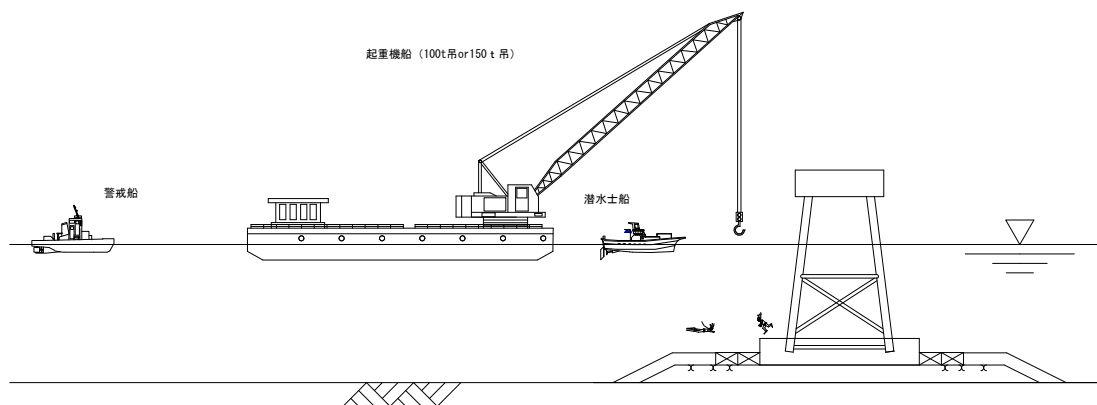


図 8-3 ブロック撤去状況図

b. 海上運搬・仮置き

ブロックを積みこんだ起重機船を海上運搬し、陸上仮設ヤードに陸揚げ、仮置きする。

c. ブロックの解体・処分

陸上に仮置きしたブロックをブレイカーにより解体する。解体したコンクリートガラはバックホウ（0.8m³）によりダンプトラックに積み込み、処分場へ運搬する。

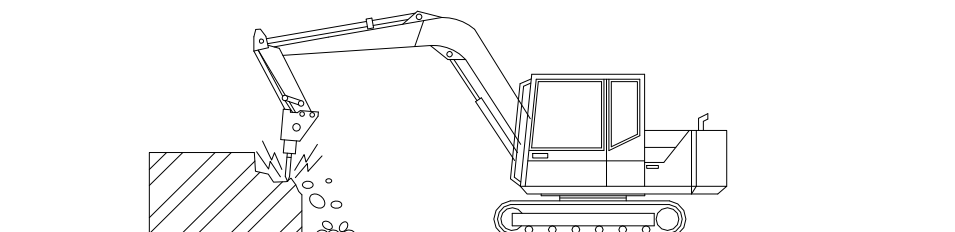


図 8-4 ブロック解体状況図

②風力発電機・タワー、観測塔撤去～処分

下部構造上（観測塔は機械室上）に設置された風力発電機・タワー、観測塔を撤去・処分する。風力発電機・タワー撤去、観測塔撤去、風力発電設備および観測設備下部構造撤去工事は、同時期に一連作業として施工する。そのため、これらの工事に用いる作業船は同一の 4,000t 起重機船とする。風力発電機下部構造を吊り上げる時の吊り荷重（約 3,150t）が最大であり、この荷重から 4,000t 起重機船を選定した。

風力発電機・タワー、観測塔撤去～処分の施工フローを図 8-5 に示す。

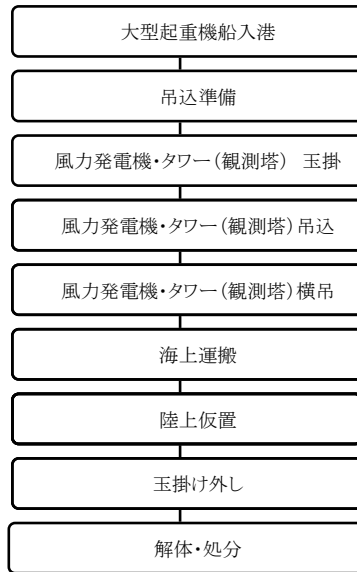


図 8-5 風力発電機・タワー、観測塔撤去～処分の施工フロー

a. 吊込準備～玉掛け

まず、玉掛けおよび撤去の準備を行う。吊枠・ワイヤーをセットし、下部構造あるいは機械室との接続部の切り離しの準備をしておく。吊込後は海上にて横吊りにするため、吊込時のワイヤーの他にタワー、観測塔下部に横吊用のワイヤーをこの時にセットする。

b. 風力発電機・タワー、観測塔吊込み～横吊り

風力発電機・タワー、観測塔撤去は起重機船（4,000t 吊級）を使用して行う。あらかじめセットされたワイヤーにより適当な吊上げ荷重をかけた状態で、下部構造あるいは機械室との接続部を切り離す。

風力発電機・タワー、観測塔を吊り上げたら、起重機船を下部構造から適当な距離をとるようシフトする。この状態で、吊込ワイヤーと横吊用ワイヤーを連動させて巻き上げ・巻き下げを行うことで横吊りの状態とする。

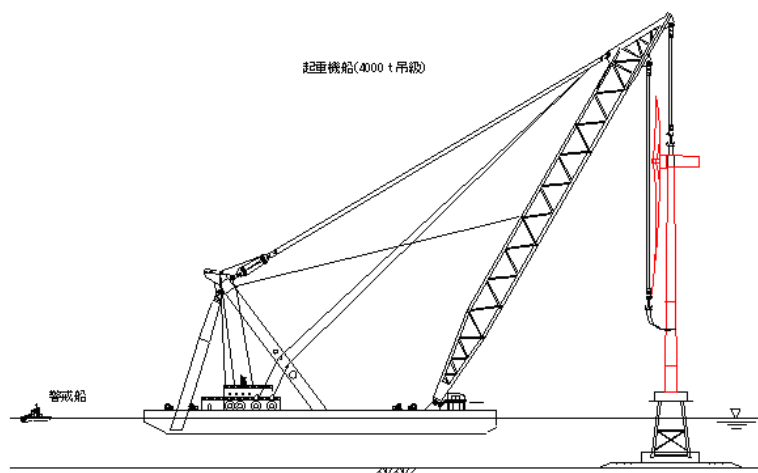


図 8-6 風力発電機・タワーの撤去状況

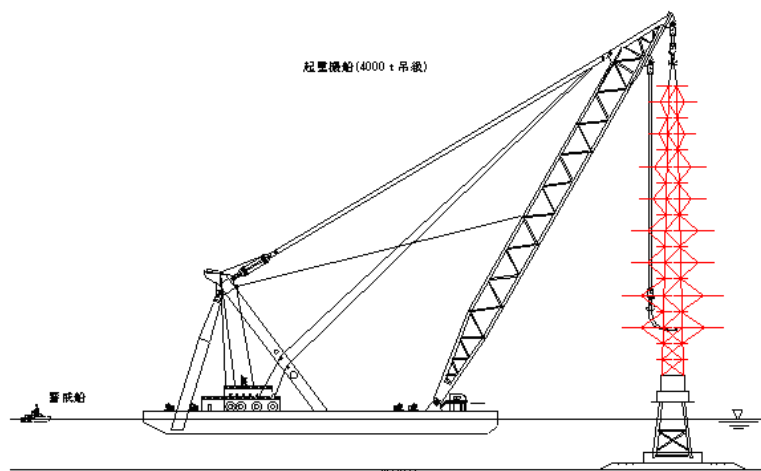


図 8-7 観測塔の撤去状況

c. 海上運搬、陸上仮置き

風力発電機・タワー、観測塔を横吊りにした起重機船を陸上の仮設ヤードへ海上運搬する。海上運搬した風力発電機・タワー、観測塔を起重機船によって陸上の仮設ヤードに仮置きする。

d. 風力発電機・タワー、観測塔解体・処分

陸上に仮置きされた風力発電機・タワー、観測塔を処分できる状態まで解体後、処分する。解体にはホイールクレーン（50t 吊）および高所作業車を使用する。

③機械室等設備撤去～処分

観測塔を撤去後、下部構造上に設置された機械室他の設備を撤去・処分する。

a. 機械室分割～積込

機械室等の設備を吊り上げられる状態まで解体する。その後玉掛けを行い、起重機船（100t 吊）にて機械室等を撤去する。撤去した機械室等は起重機船に積込む。

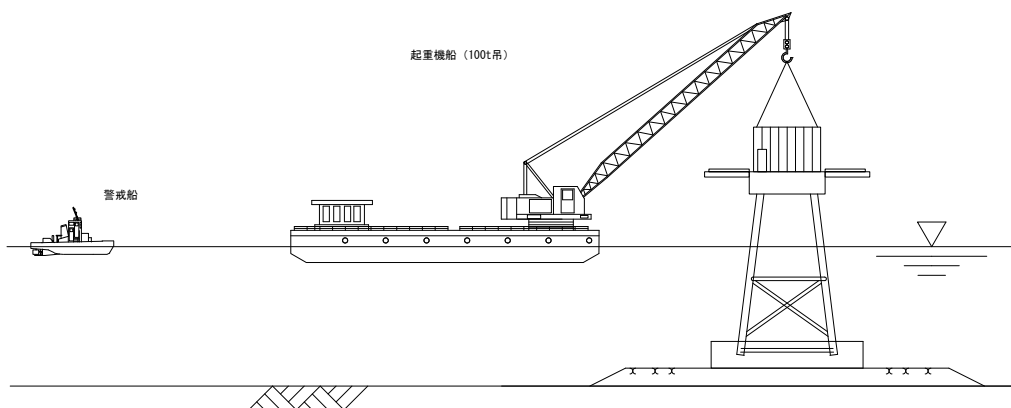


図 8-8 機械室の撤去状況

b. 機械室海上運搬～仮置

起重機船により撤去した機械室等を陸上仮設ヤードまで海上運搬する。海上運搬した機械室を起重機船によって陸上に仮置きする。

c. 機械室解体・処分

陸上に仮置きされた機械室等を処分できる状態まで解体後、処分する。

④下部構造撤去～処分

風力発電機・タワー、観測塔他の撤去の終了後、その下の下部構造を撤去・処分する。

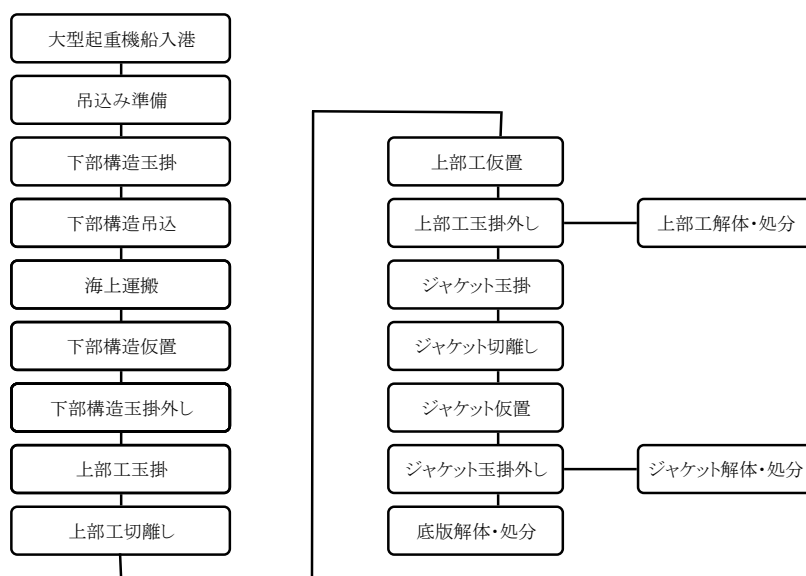


図 8-9 下部構造撤去～処分の施工フロー

a. 下部構造玉掛け・吊込み

下部構造を吊り込むため、玉掛けを行う。玉掛けは、あらかじめ用意しておいた吊枠を用いる。吊枠以下は、底版コンクリートに設置されている吊筋に潜水土によって玉掛けする。吊枠のセット等、玉掛け作業が終了したら、下部構造を吊り上げる。

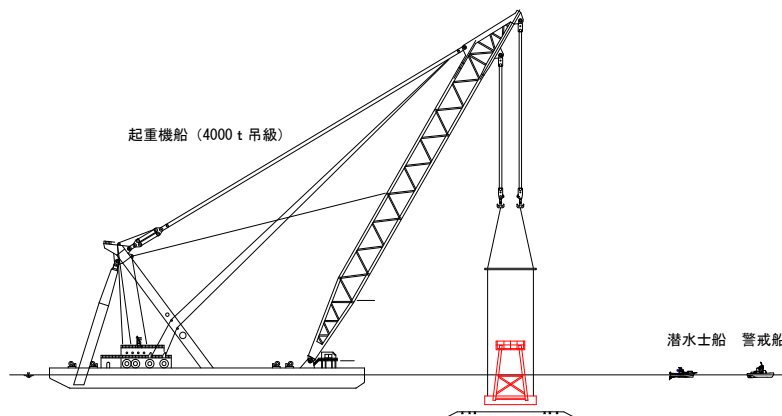


図 8-10 下部構造の吊込状況

b. 海上運搬

下部構造吊り上げ後、起重機船を曳船によって陸上仮設ヤードへ曳航する。曳航の際には誘導船を配置する。

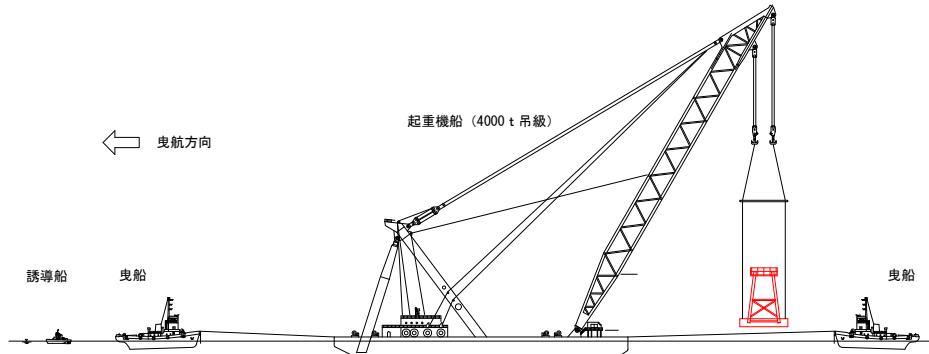


図 8-11 曳航の状況

c. 下部構造陸揚げ・玉掛け外し

起重機船および下部構造を陸上仮設ヤードへ曳航した後、下部構造の陸揚げを行う。陸揚げが完了したら玉掛けワイヤーの取外しを行う。

d. 上部工切離し

下部構造を陸揚げした後、上部工を切り離す。まず、岸壁につけている起重機船(4,000t吊)のワイヤーを上部工に玉掛けする。このままワイヤーに荷重を掛けた状態を保ち、陸上の高所作業車を使用して上部工取付部のジャケット鋼管(上端)をガス切断する。鋼管切断後、上部工を吊り上げ、起重機船をシフトして上部工を基礎の近くに降ろして玉掛けを解除する。

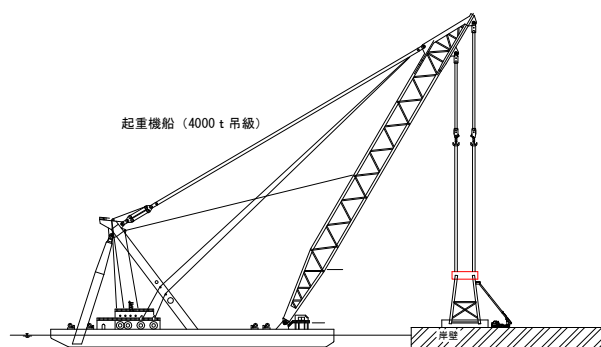


図 8-12 上部工切離し状況図

e. ジャケット切離し

続いてジャケット部を底版から切り離す。上部工同様にジャケットに玉掛けをし、起重機船(4,000t吊)にて吊荷重を与えた状態でジャケット取付部のジャケット鋼管(下端)をガス切断する。鋼管切断後は、ジャケット解体の作業性を考慮して、横吊りにしてから仮置きする。

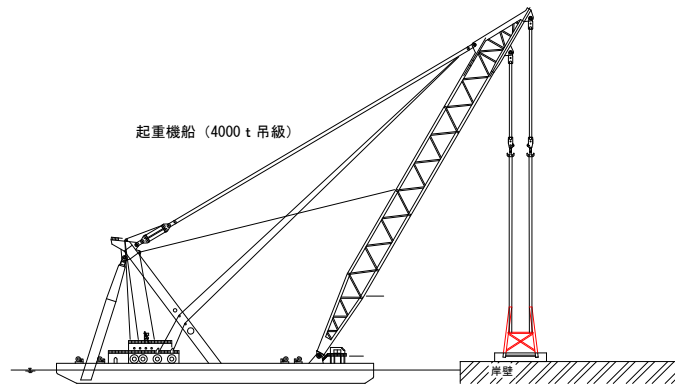


図 8-13 ジャケット切離し状況図

⑤上部工・底版解体・処分

分割後、仮置きした上部工および底版をブレーカーにより解体する。解体したコンクリートガラはバックホウによりダンプトラックに積込み、処分場へ運搬する。

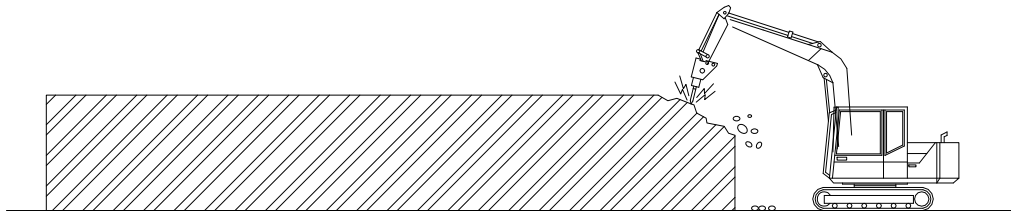


図 8-14 上部工・底版の解体状況

⑥ジャケット解体・処分

仮置きされたジャケットを解体・処分する。ジャケットの解体には、トラッククレーン (200t 吊×2 台) と高所作業車 (22m×2 台) を使用する。倒した状態のジャケットの鋼管を上から順に解体する。鋼管切断時は、トラッククレーンにて鋼管を吊った状態で高所作業車を使用してガス切断する。

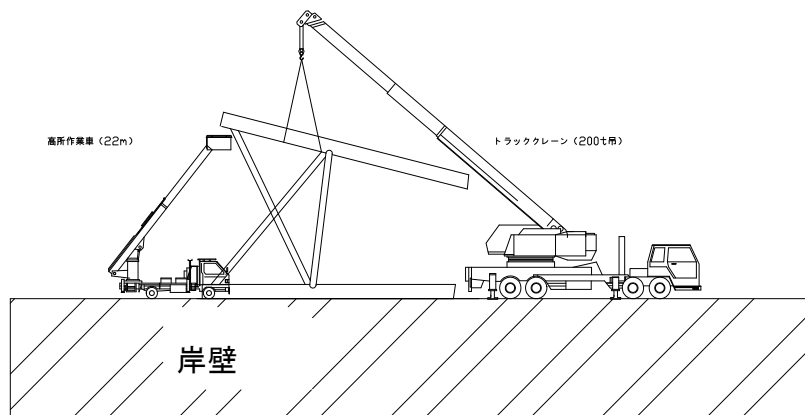


図 8-15 ジャケット解体状況図

⑦捨石撤去～処分

下部構造を撤去後、捨石 (5kg～100kg) の撤去を行う。

a. 捨石撤去

捨石の撤去は潜水士の指示のもと、起重機船（200t 吊）により行う。撤去した捨石は起重機船に積み込む。

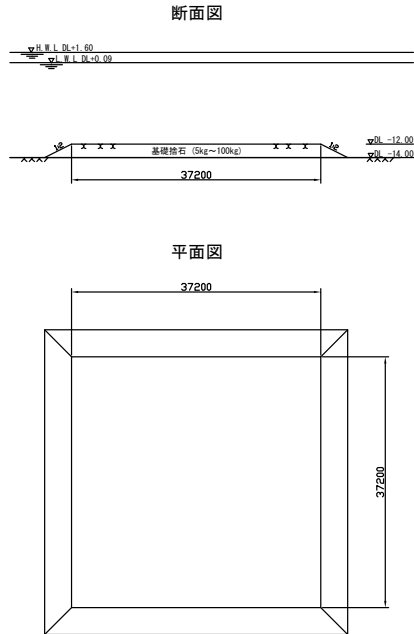


図 8-16 捨石基礎構造図（風車基礎）

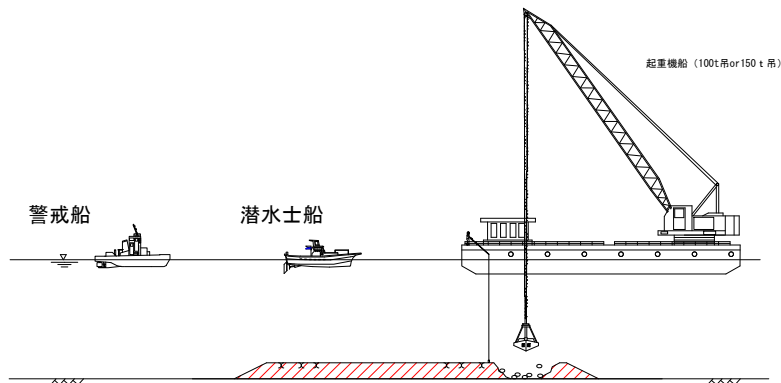


図 8-17 捨石撤去状況図

b. 捨石海上運搬、仮置

起重機船に積み込んだ捨石を仮設ヤードまで海上運搬する。海上運搬した捨石を仮設ヤードへ仮置する。

c. 捨石搬出

仮置きした捨石をバックホウ（0.8m³）によりダンプトラックに積み込み、処分場へ運搬する。

9 環境影響評価

北九州市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、北九州市環境影響評価条例の対象外であるが、「風力発電のための環境影響評価マニュアル第2版」（NEDO, 2006年2月）等を基にして自主的な環境影響評価を実施している。また、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2,000kW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

- ・福岡県（2001）：福岡県の希少野生生物.
- ・合田良実(1975)：浅海域における波浪の砕波変形.港湾技術研究所報告, Vol.14, No.3, pp.59-106.
- ・合田良実（2008）：耐波工学：港湾・海岸構造物の耐波工学.鹿島出版会.
- ・飯塚喜八郎監修（1994）：電力ケーブル技術ハンドブック.電気書院.
- ・海上保安庁水路部（1983）：海底地形地質調査報告書（白島）,5万分の1沿岸の海の基本図.
- ・海上保安庁第七管区海上保安本部（2006）：平成17年度関門港（響航路）潮流観測報告.
<http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KAN7/kaisyo/2005/pdf/hibiki05.pdf>,アクセス2017年3月2日.
- ・北九州市（1994）：北九州市の野鳥たち：渡りの十字路.
- ・北九州市（2004）：北九州市の水産便覧（2004年）.
- ・北九州市（2006）：北九州市自然エネルギー導入計画可能性調査報告書.
- ・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.
- ・間瀬肇、松本明男、岩垣雄一（1986）：不規則波の浅水・砕波変形計算モデルに関する研究.土木学会論文集,No.375,II-6,pp.221-230.
- ・永井紀彦（2002）：全国港湾海洋海象観測30か年統計（NOWPHAS1970-1999）.港湾空港技術研究所資料,No.1035.
- ・長尾毅（1994）：限界状態設計法の鉄筋コンクリート港湾構造物への適用に関する研究.港湾技術研報告,Vol33,No4
- ・NEDO（2003）：局所風況マップ.<http://app2.infoc.nedo.go.jp/nedo/index.html>,アクセス2017年3月2日.
- ・NEDO（2008）：日本型風力発電ガイドライン 台風・乱流対策編.
- ・NEDO（2009）：洋上風力発電技術開発 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（北九州市沖） 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（北九州市沖） 報告書.
- ・日本水産学会（1974）：対馬暖流 海洋構造と漁業.水産学シリーズ5, 恒星社厚生閣.
- ・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.
- ・菅原一晃、佐藤和敏、永井紀彦、川口浩二（1999）：全国港湾海洋海象観測施設台帳（ナウファス施設台帳Ⅲ）.港湾技術研究所資料,No.941.
- ・谷本勝利、高橋重雄、和泉田芳和（1978）：水平版に働く揚圧力に関する研究.港湾技術研究所報告,Vol.17,No.2,pp.3-47.