

海洋エネルギーポテンシャル及び安全性評価指標に関する研究

谷口 友基, 石田 茂資, 藤原 敏文, 井上 俊司, 高田 篤志

A Study on Energy Potential and Safety Evaluation Factor for Ocean Renewable Energy

by

Tomoki TANIGUCHI, Shigesuke ISHIDA, Toshifumi FUJIWARA, Shunji INOUE
and Atsushi TAKADA

Abstract

Recently, some demonstration projects which harness ocean renewable energy (ORE) are beginning around Japan. Both assessment of ORE resources and assessment of accessibility to ORE devices are important for accelerating of ORE utilization. In this paper, joint frequency tables of sea states are constructed using 20-year numerical forecasting dataset (significant wave height, significant wave period, wave direction, mean wind speed, and wind direction) and JCOPE2 (Japan Coastal Ocean Predictability Experiment 2) reanalysis data around Japan. The theoretical capacity factor (CAF_t), which is defined as a combined parameter of device power characteristics and joint frequency tables of sea states, is proposed for estimation of ORE potential around Japan. Based on the CAF_t , wind, wave and ocean current energy potential are estimated about 997 GW, 488 GW and 172 GW respectively. In order to assess accessibility to devices, two new parameters are proposed. One is the operational probability, and the other is forecasted waiting time. So as to check effectivity of the proposed parameters, accessibility to an ORE device is evaluated at Sakata and Shionomisaki. From the results, the operational probability is more useful than conventional parameter which assesses accessibility when suitable weather condition for the operation and maintenance (O&M) activities occurs intermittently.

* 海洋利用水中技術系

原稿受付 平成28年9月9日

審査日 平成28年10月20日

目 次

1. まえがき	72
2. 海象推算データベース	73
2.1 概要	73
2.2 長期波浪推算データベース	74
2.3 高解像度波浪推算データベース	74
2.4 海流推算データベース	76
3. エネルギーポテンシャル	76
3.1 概要	76
3.2 エネルギー密度によるポテンシャル評価法	76
3.3 発電特性を考慮したポテンシャル評価法	77
3.3.1 発電装置の出力特性	77
3.3.2 理論設備利用率	78
3.3.3 理論設備利用率の年変化	81
3.3.4 日本沿岸域での風力・波力・海流エネルギーポテンシャル	85
4. 安全性及び経済性評価のための標準海象	88
4.1 概要	88
4.2 50年再現期待値	88
4.3 標準的な海象の発現頻度分布	90
5. 静穏海象の継続時間及び待機時間評価	95
5.1 概要	95
5.2 静穏海象継続確率	96
5.3 静穏時作業可能確率	96
5.4 2つの指標の相違点	97
5.5 静穏海象発現特性の試解析	98
5.6 待機時間評価	101
6. まとめ	103
参考文献	103

1. まえがき

我が国はエネルギー資源の大部分を海外に依存しており、一次エネルギーとして供給するエネルギー資源の自給率は、原子力を除けば約 4%にすぎない。また、近年は地球温暖化問題への対策として、エネルギー起源の温室効果ガス抑制も重要な課題となっている。海洋再生可能エネルギーは、国内で調達可能なクリーンエネルギーであることから、実用化に向けた研究開発が進んでおり、今後の導入が期待されている。

海洋再生可能エネルギーの利用を考えると、海域の資源量を把握する必要がある。本論では、海洋再生可能エネルギーとして、洋上風力、波力、海流エネルギーの3種類を対象とする。これらのエネルギーを対象とした既往の資源量調査例を以下に紹介する。

洋上風力エネルギーについて、長井ら¹⁾は、海岸に設置された灯台で観測された風向風速資料を用いて、海岸地点における風況解析とモデル風車を想定した年間発電量推定を行い、陸上よりも大きな資源量が沿岸域に賦存する可能性を示した。近年では、風況の数値シミュレーション技術の高度化を背景に、(国研)新エネルギー・産業技術総合開発機構(以下、NEDO)²⁾、長井ら³⁾、環境省地球環境局地球温暖化対策課⁴⁾、伊藤忠テクノソリューションズ⁵⁾、エックス都市研究所⁶⁾等により我が国の海上風況の解析が行われ、洋上風力の資源量推定に用いら

れている。また、NEDO⁷⁾は、風況情報に加えて、水深、海底地質等の環境情報、港湾区域、航路等の社会環境情報等の情報を一元化し、洋上風力に適した海域選定等を支援する「洋上風況マップ」の作成に着手している。

波力エネルギーについて、田端ら⁸⁾、高橋ら⁹⁾は、ナウファス波浪観測データを用いて、我が国沿岸の平均的な波パワー及びその変動特性を調査した。前田ら¹⁰⁾は船舶通報データ10年分（1964年～1973年）を用いて波高と波周期の結合確率密度関数を推定し、日本近海の波スペクトルがISSC型標準スペクトルで凡そ近似できると仮定を置き、日本近海を19の海域に分割して各海域について四季毎及び通年での波パワーを試算した。

海流エネルギーについて、小平ら¹¹⁾は、JCOPE2再解析データ¹²⁾を用いた海流発電の適地選定を行った。さらに、三宅島での海流及び潮流の観測、並びに同海域における流場の高解像度数値シミュレーションを行い、海流発電の事業性検討の際は、現地での観測と高解像度数値シミュレーションを行うことが重要だと指摘した。また、清松ら¹³⁾は、三宅島での1年間の観測結果を基に、黒潮の有無、潮流、海上風が流速に影響を与えることを示し、小牧ら¹⁴⁾は、黒潮流軸データと観測データを基に、トカラ海峡が海流発電に有望な海域である可能性を示唆した。

NEDOは、波力、海流、潮流、海洋温度差を対象に、我が国近海での海洋エネルギー資源量調査を行っている。平成22年度に実施した調査事業¹⁵⁾では、先行研究結果を踏まえ、波力、海流、潮流、海洋温度差の資源量を再評価した。また、平成26年度から平成28年度まで実施した「海洋エネルギー発電技術共通基盤研究」¹⁶⁾の成果として、海洋再生可能エネルギーを利用する発電装置（以下、発電装置）の適地選定に資するWeb-GISデータベースを整備している。

上述の資源量調査は、基本的にエネルギー密度（風力及び海流： W/m^2 、波力： W/m ）である。この評価法は、風速、波高及び波周期、流速等の値を用いて簡便に資源量を推定することが出来る。しかし、実際は賦存するエネルギー全てを回収出来ず、発電装置の性能や運転条件等の制約を受ける。本論では、海上技術安全研究所（以下、当所）がこれまでに整備した長期気海象推算データベースを用いて、簡易的ではあるが、発電装置の性能や運転条件も考慮するエネルギーポテンシャル推定法を紹介する。また、発電装置の開発段階において、型式認証等における安全性照査、ステージゲートにおける発電性能照査等で利用可能な気海象条件、具体的には終局強度を評価する極値海象条件と疲労強度及び発電性能を評価する気海象の発現頻度表に関して長期気海象推算データベースを用いて整備した結果も紹介する。

海洋再生可能エネルギーの導入に適した海域は、一般的に、気海象条件が厳しい海域とも言える。資源量が十分な海域であっても、発電装置の設置や保守点検及び修理の為、発電装置にアクセスする時間を確保出来なければ、発電装置の非稼働時間が増え、結果として発電単価が上昇する。従って、海域の静穏海象の継続時間評価、及び静穏海象が出現するまでの待機時間評価は、資源量評価と同じく重要である。我が国沿岸域での静穏海象の継続時間について、西田ら¹⁷⁾は、観測データを基に、外海に面した港湾では、作業限界波高以下の静穏な海象が連続した出現する日数が内海に比べて非常に少なく、施工計画に大きな影響を与えることを報告した。また、石原ら¹⁸⁾は、洋上風力発電所の施工に関して、高解像度の気海象シミュレーションデータを用いた施工稼働率評価を行った。

本論では、当所が整備した高解像度の波浪推算データベースを用いてウェザーウィンドウ解析¹⁹⁾を行い、海上オペレーションの稼働率評価を行う。本論では、静穏海象の継続時間という指標に加え、作業機会の捉えやすさも評価する指標を提案した。また、待機時間評価では、従来の作業可能な海象が出現する間隔という指標に加え、待機時間の期待値を求める指標を提案した。

2. 海象推算データベース

2.1 概要

船舶、海洋構造物、海洋再生可能エネルギーを利用する発電装置等の安全性・経済性評価を行う上で、気海象情報は重要な役割を持つ。気海象情報は、対象海域の十分な観測データを基に統計解析した結果として得られるべきものであるが、通常、そのようなデータは入手できない場合が多い。この問題を解決する為、対象海域の気海象データ（風、波浪、海流）として、各種の推算データが用いられる。

当所では、船舶の安全性及び経済性評価を行う為、船舶技術研究所時代から気海象データベースの整備に取り組んで来た^{20)~21)}。参考文献 20)は、北太平洋の風と波を対象とし、主に船舶通報データ（観測データ）をまとめたものである。その後、スペクトル法による波浪推算法の開発及び実用化に伴い、この手法による波浪推算データを用いて、日本近海を対象とする波浪推算データベースを構築した²¹⁾。気海象データベースの整備は 2014 年まで継続しており、1994 年~2014 年の合計 20 年間のデータベースとなった。また、2009 年~2014 年までの 5 年間は、従来の波浪推算データベースよりも時間解像度が高いデータベースも整備している。さらに、海流の推算データに関しても 20 年間分のデータベースを整備した。

2.2 長期波浪推算データベース

20 年間の風と波の推算データは、気象庁から 1 日 2 回配信される日本沿岸波浪 GPV(Grid Point Value, 空間解像度：6 分)を基に、(一財)日本気象協会によって地形による遮蔽影響と局所的な風波を考慮に入れ、空間解像度 2 分（約 3.6km）の値に内挿・再計算を行ったものであり、計算領域は図 2.1 の白抜き部である。出力要素は、有義波高、有義波周期、卓越波向、海面上 10m の平均風速および平均風向である。

当所では、1994 年 2 月~2004 年 1 月の 10 年間のデータを統計処理し、これら 5 要素全てを組み合わせた 2 相関発現頻度表と、波の 3 要素を組み合わせた 3 相関発現頻度表を作成し「日本近海の波と風データベース」としてまとめた。簡易版をホームページ上で公開²²⁾している他、詳細版を一般に有償提供しており、関係各所で広く利用されている。その後、様々なニーズに応えるため、上記推算データを 2014 年 1 月まで拡張し、合計 20 年間のデータベースとしている。20 年間に拡張されたデータベースは、各格子点（緯度経度 2 分）での気海象の平均値や再現期待値の推定に用いられている。また、図 2.1 中の赤枠で囲われた海域に含まれる 20 年間のデータを統計解析し、日本近海の波と風データベースと同様に、各種発現頻度表を構成している。なお、頻度表は一辺 0.5°（約 56 km）四方の海域毎に構築している。

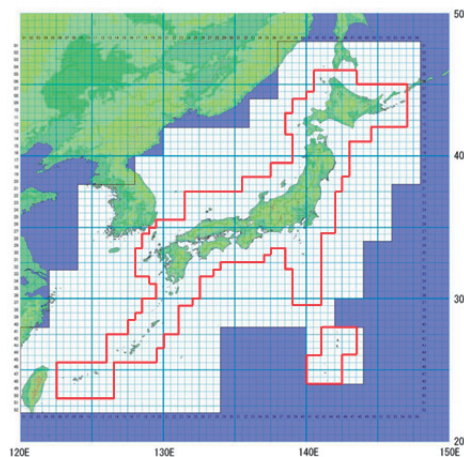


図 2.1 20 年間長期データベースの対象海域
(データ領域：白抜き部，発現頻度表構築海域：赤枠部)

2.3 高解像度波浪推算データベース

2.2 節で紹介した長期波浪推算データベースは、時間解像度が 6 時間であることから、台風等の短時間で波浪場が急変する場合の波高のピークを再現できないこと²³⁾、海域の静穏度解析等において同一の気海象状態が 6 時間継続するという仮定を置かなければならないこと等から、より時間解像度の高いデータベースへの要望が高まってきた。一方、近年の計算機の演算処理能力向上は目覚ましく、空間解像度並びに時間解像度を高解像度化する事にも十分に対応できる。当所では、(一財)日本気象協会が開発した、高解像度波浪推算データベースを用いて、海洋オペレーションの稼働率評価等を行っている。高解像度波浪推算データベースの対象海域を図 2.2 に示す。また、データベースの諸元を表 2.1 に示す。高解像度波浪推算データベースは、NCEP(National Centers for Environmental Prediction)及び気象庁から提供される毎時大気解析値（海上風）を入力値として、第三世代波浪推

算モデル（WAM）を用いて計算されている。図2.2に示すように、領域1から領域4まで、ネスティング計算を行い、領域4は日本沿岸をカバーするよう22領域が設定される。なお、当所のデータベースは、領域2のデータを基に、領域3及び領域4のデータを合成し、北緯20~50度、東経120~150度の範囲で、緯度経度2分間隔のデータとしている。このデータベースの利用可能期間は2009年1月~2014年2月までの5年間である。

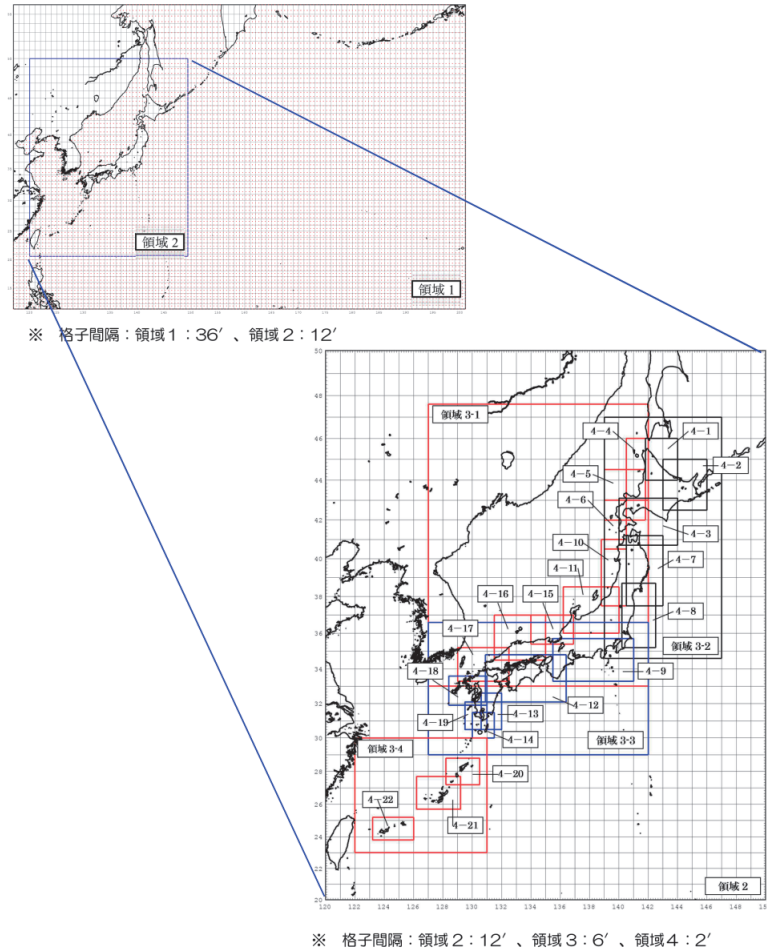


図2.2 高解像度波浪推算データベース計算領域

表2.1 高解像度波浪推算データベースの諸元

計算領域	領域 1	領域 2	領域 3	領域 4
入力値（海上風）	NCEP	気象庁 GPV		
空間解像度	2.5°	東西 0.0625° ， 南北 0.05°		
時間解像度	6 時間	1 時間		
計算領域	11.0 N~56.0 N	20.6 N~50.0 N	4 領域※	22 領域※
	117.0 E~201.0 E	120.0 E~149.4 E		
出力値	有義波高，有義波周期，平均波向，風向，風速(海面上 10 m)			
空間解像度	36' (約 67 km)	12' (約 37 km)	6' (約 11 km)	2' (約 3.7 km)
時間解像度	2 時間	1 時間		
要素	有義波高，有義波周期，平均波向，風速，風向（海面上 10m）			

※：図2.2 参照

2.4 海流推算データベース

海流推算データベースは、(国研)海洋研究開発機構が開発した JCOPE2 再解析データ¹²⁾20 年分(1994 年 2 月～2014 年 1 月)を利用している。JCOPE2 再解析データは、空間解像度が 5 分、時間解像度が 24 時間(1 日平均値)であり、計算用域は東経 120°～150°、北緯 20°～50° の範囲である。出力要素は、東西流速及び南北流速を主に利用している。海流推算データベースは、単独で利用する場合は、各格子点(緯度経度 5 分)での海象の平均値や再現期待値の推定、流速流向発現頻度表の構築等に利用している。また、2.2 節で述べた、長期波浪推算データベースと組み合わせて統計解析を行い、例えば、有義波高、有義波周期、流速の 3 相関発現頻度表等を構築している。なお、長期波浪推算データベースと組み合わせる場合は、両者の時空間解像度を一致させる必要がある。ここでは、海流推算データベースに対して、空間的に線形補間を行い、東西流速及び南北流速の空間解像度を 2 分に内挿した。また、時間解像度についても流速の 1 日の変動が小さいと仮定し、時間解像度 6 時間のデータとして扱っている。

3. エネルギーポテンシャル

3.1 概要

海洋再生可能エネルギーを利用する発電装置の導入を検討する場合、利用するエネルギー(風力、波力、海流等)のエネルギー密度は重要な指標の 1 つとなる。エネルギー密度は、風速、波高及び波周期、流速等の平均値を用いて簡便に推定することが出来る。一方、実際には賦存するエネルギー全てを回収出来る訳ではなく、発電装置の性能や運転条件等の制約を受ける。例えば、風力発電装置の場合、カットイン、定格、カットアウト風速に応じて発電装置の出力特性は異なるので、これらも考慮してエネルギーポテンシャルを推定する方法も有用と考えられる。

ここでは、2 章で述べた各種のデータベースを用いて、日本沿岸域での海洋再生可能エネルギーポテンシャルを評価した結果を報告する。3.2 節では、エネルギー密度に基づいた評価結果を報告する。3.3 節では、発電装置の出力特性や運転条件等を考慮したエネルギーポテンシャル評価法及び評価結果について述べる。まず、3.3.1 節でエネルギーポテンシャルの試計算に用いた発電装置の出力特性を紹介する。次に、3.3.2 節で発電装置の出力特性や運転条件等を考慮したエネルギーポテンシャル評価法として、理論設備利用率(Theoretical Capacity Factor: CAF_t)を提案する。最後に、3.3.3 節並びに 3.3.4 節では CAF_t を用いたエネルギーポテンシャル評価結果について報告する。

3.2 エネルギー密度によるポテンシャル評価法

深海波の仮定の基、あらゆる方向から到来する不規則波を考えた場合の波力エネルギー密度(波パワー: W/m)は、(3.1)式で求められる。また、海面上の高度 80m での平均風速を用いた風力エネルギー密度(W/m^2)は、(3.2)式で求められる。(3.1)式中の ρ_w, g, H_s, T_s は、それぞれ海水密度、重力加速度、有義波高、有義波周期を示し、(3.2)式中の ρ_a, V_{w80} は、それぞれ空気の密度、海面上の高度 80m での平均風速を示している。

$$P_{wave} = \frac{1}{64\pi} \rho_w g^2 H_s^2 T_s \quad (3.1)$$

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \rho_a V_{w80}^3 \quad (3.2)$$

波パワーと風力エネルギー密度の推定結果²⁴⁾を図3.1, 3.2に示す。波パワーと風力エネルギー密度の推定には、2.2節で述べた長期波浪推算データベースの各格子点における有義波高，有義波周期，平均風速の20年間平均値を用いた。図3.1, 3.2より，日本沿岸の波パワーと風力エネルギー密度の分布の概略を把握することが出来る。

エネルギー密度を基にした海洋再生可能エネルギーのポテンシャル評価は，発電装置の発電効率や設備利用率を一定値の定数として仮定し，ポテンシャル評価を行う。この場合，発電装置の出力特性や運転条件等は必ずしも考慮されていない点に留意する必要がある。

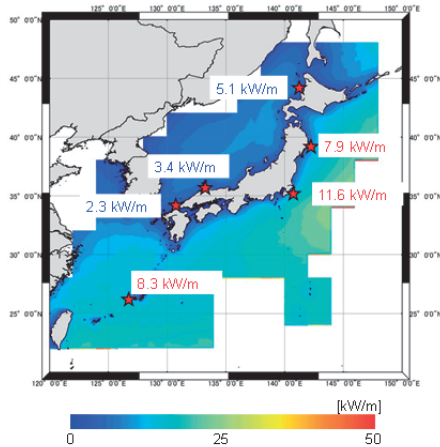


図3.1 波力エネルギーポテンシャル
(20年間平均)

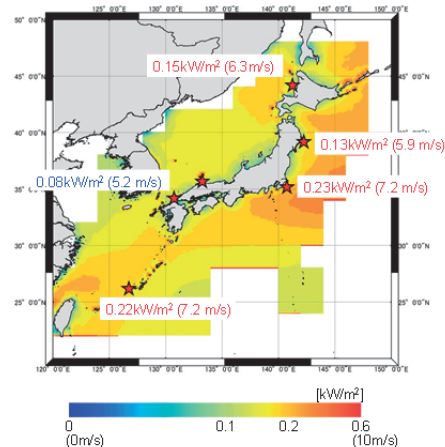


図3.2 風力エネルギーポテンシャル
(20年間平均，海面上80m)

3.3 発電特性を考慮したポテンシャル評価法

エネルギー密度を基にした海洋再生可能エネルギーのポテンシャル評価は，発電装置の発電効率や設備利用率を一定値の定数としていた。しかし，設備利用率は，発電装置に入力される外力条件やダウンタイム等の発電装置が稼働しない時間により大きく変化する値であり，定数として扱う場合，その値の設定に細心の注意を払わなければ，ポテンシャル評価の精度悪化を招く恐れがある。一方，発電装置の出力特性を利用すれば，外力条件に応じた発電量を考慮すること，発電装置の運転条件を考慮することが可能となる。そこで，発電装置の出力特性と気象の発現確率を組み合わせる理論設備利用率²⁵⁾を定義し，エネルギーポテンシャルを評価する方法を提案した。なお，理論設備利用率は，ダウンタイム等の発電装置が稼働しない時間を考慮していないので，ある発電装置を想定した場合の設備利用率の最大値と考えることができる。

3.3.1 発電装置の出力特性

理論設備利用率を算出するため，風力，波力及び海流発電装置の出力特性をそれぞれ図3.3~3.5と仮定する。風力発電装置は，ハブ高さ80m，定格出力2MWとした。カットイン風速，定格風速，カットアウト風速はそれぞれ4.0 m/s, 12.0 m/s, 25.0 m/sとしている。

波力発電装置は，定格出力100kWとした。稼働範囲は有義波高0.5 m~5.0 mかつ有義波周期5.0 s~12.0 sとした。なお，稼働範囲以外では発電を行わないものとする。

海流発電装置は，定格出力400kW，カットイン流速，定格流速，カットアウト流速はそれぞれ0.6 m/s, 1.7 m/s, 1.8 m/sとしている。

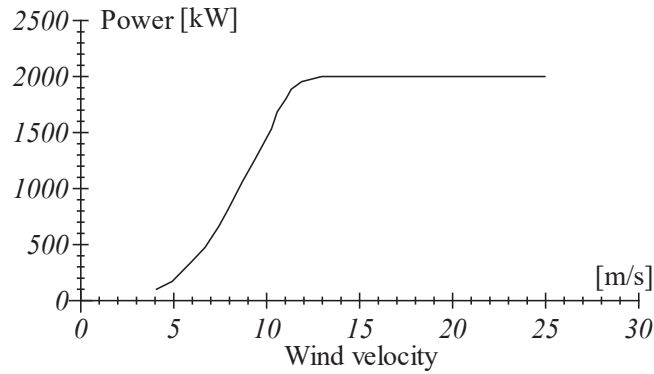


図 3.3 風力発電装置の出力特性例（定格 2MW）

		Significant wave period [s]							
		5	6	7	8	9	10	11	12
Significant wave height [m]	0.5	1.5	2.5	3.5	4	4	4.5	4	4
	1	8	9.5	12	16	16.5	16.5	16.5	15
	1.5	19	25	30	35	37	37	35	32
	2	35	45	52	58.5	61	61	58	54
	2.5	50	66.6	79	87	90	88.8	83.4	76.4
	3	66.2	90.5	99.4	99.7	100	100	100	100
	3.5	67.8	95.1	100	100	100	100	100	100
	4	58.8	90.3	100	100	100	100	100	100
	4.5	55	89.6	100	100	100	100	100	100
	5	50	89	100	100	100	100	100	100

図 3.4 波力発電装置の出力特性例（定格 100kW）

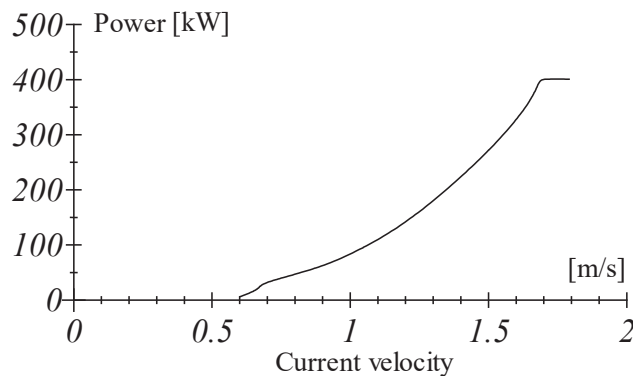


図 3.5 海流発電装置の出力特性例（定格 400kW）

3.3.2 理論設備利用率

気海象の発現確率は、2.2 節で述べた長期波浪推算データベースを基に、一辺 0.5° （約 56 km）四方の海域毎に構築された発現頻度表を用いて算出した。発現頻度表の各 bin の発現確率を f 、各 bin 中央値の気海象条件に対応する発電装置の出力を P 、発電装置の定格出力を P_R として、 CAF_i を(3.3)式と定義する。(3.3)式は一例として波力発電装置を単独で用いる場合について示している。なお、ここで定義した理論設備利用率に利用可能率（運転可能な時間割合）および出力補正係数（実運転での出力特性と理想的な出力特性の比）を掛け合わせることで、実際の設備利用率が得られる。なお、風力発電装置の CAF_i を求める場合は、(3.4)式に示した指数則に従い、海面上 10 m 高さでの平均風速を風力発電装置のハブ高さ（ Z [m]）での値に換算している。

$$CAF_t = \left(\sum \left\{ \frac{P(H_s, T_s)}{P_R} \cdot f(H_s, T_s) \right\} \right) \times 100 \quad (3.3)$$

$$\frac{V_A(z)}{V_A(10)} = \left(\frac{Z}{10} \right)^{0.14} \quad (3.4)$$

図3.6~3.8に風力発電装置，波力発電装置，海流発電装置を対象に，通年の頻度表を用いた CAF_t の推定結果を示す．図3.6に示した風力発電装置の結果より，太平洋側の海域で CAF_t が50%以上となる海域が広がり，日本海側では本州の陸域に近い海域を中心に CAF_t は50%以下となることが分かる．図3.7に示した波力発電装置の結果を見ると，伊豆諸島，小笠原諸島等の島嶼部を中心に高い CAF_t が得られている．図3.8に示した海流発電装置の結果では，黒潮が通過する領域以外の海域で CAF_t は非常に低い値となる．これは，ここで仮定した海流発電装置のカットイン流速が0.6 m/s と高く，強潮流域以外では発電装置の稼働率が極端に低くなるためである．なお，JCOPE2 を基にした海流推算データは，島嶼間，その他の地形影響により生じる局地的な流速増加を考慮するには，空間的，時間的にも十分な解像度ではないので，注意が必要である．

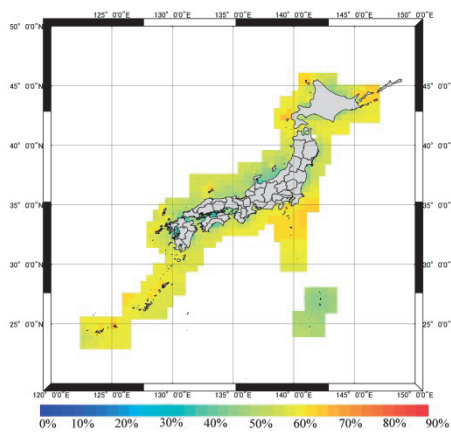


図 3.6 風力発電装置の理論設備利用率

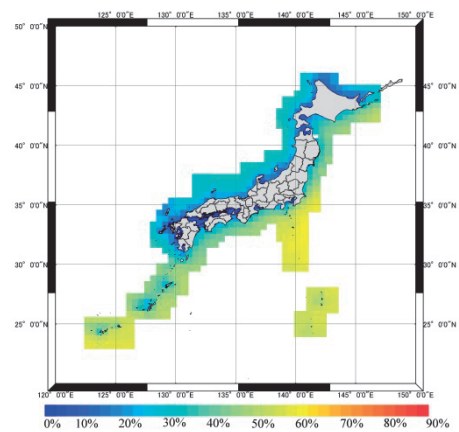


図 3.7 波力発電装置の理論設備利用率

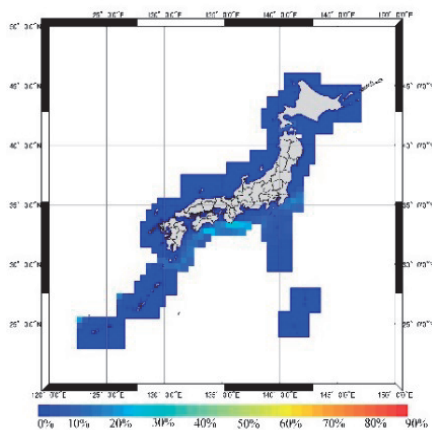


図 3.8 海流発電装置の理論設備利用率

図 3.9~3.11 に房総半島沖、潮岬沖及び能登半島沖の 3 海域における CAF_t を月別に整理した気海象の発現確率を用いて推定した結果を示す。風力発電装置を対象とした CAF_t の推定結果は、3 海域とも冬季に高く、夏季に低くなる傾向が見られた。3 海域の中では、日本海側の能登半島沖で最も大きな CAF_t の月別変化が生じている。次に、波力発電装置を対象とした CAF_t の推定結果を見ると、日本海側と太平洋側で値の変化の傾向が異なることが分かる。日本海側の能登半島沖では、冬季における CAF_t の値は 60 % 程度となるが、夏季は 10 % まで減少する。このことから、日本海側で波力発電を計画する場合、太平洋側よりもエネルギー回収量の月別変化に留意する必要があると示唆される。最後に、海流発電装置を対象とした CAF_t の推定結果を見ると、海流発電装置のカットイン流速以上の流速が得られる太平洋側の 2 海域では、 CAF_t の月別変動は小さく、安定したエネルギー回収量が見込まれることが分かる。

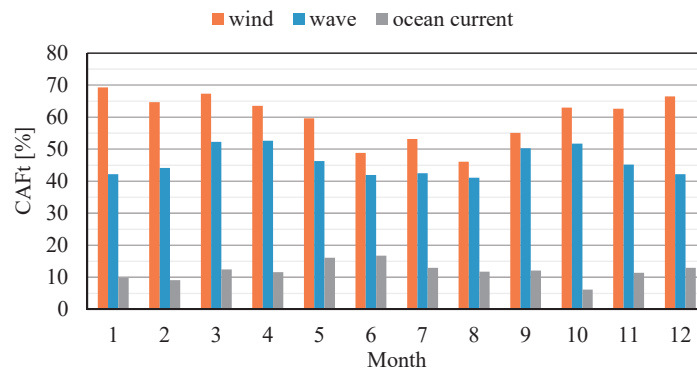


図 3.9 房総半島沖での理論設備利用率の月別変化

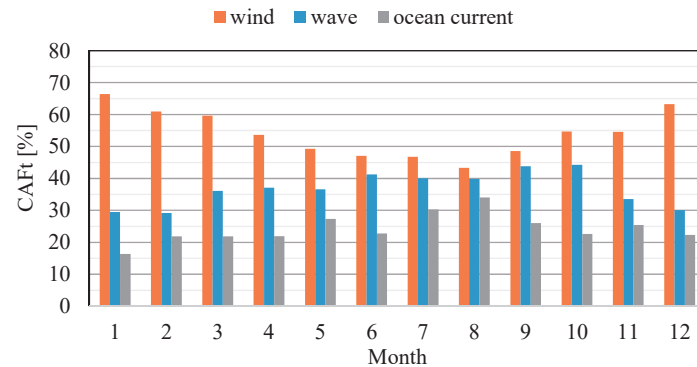


図 3.10 潮岬沖での理論設備利用率の月別変化

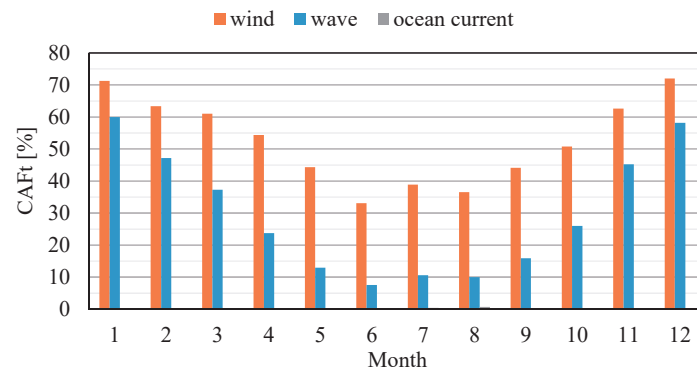


図 3.11 能登半島沖での理論設備利用率の月別変化

3.3.3 理論設備利用率の年変化

図 3.12 に示した 7 海域を対象に、2.2 節で述べた長期波浪推算データベースを用いて、各年毎に気海象の発現確率を求め、図 3.3, 3.4 の出力特性を持った風力、波力発電装置を用いた場合の理論設備利用率の年変化²⁶⁾を求めた。

図 3.13~3.16 に、能登半島沖と潮岬沖における長期波浪推算データベースから得た平均風速（以下、推算平均風速と表記）と風力発電装置の CAF_t の年変化を示す。 CAF_t のグラフには 3 年間、5 年間の移動平均値も示している。また、平均風速を示したグラフには、対象海域に最も近い気象庁の地域気象観測所で計測された平均風速（以下、観測平均風速と表記）も示している。2 つの海域とも CAF_t の推定結果には長期的な変動があり、この変動は推算平均風速の年変化の傾向に一致する。 CAF_t と推算平均風速の変化の傾向が一致することは、他の 5 海域でも同じであった。なお、観測平均風速は陸上で計測されており、海上での推算平均風速と直接比較は出来ないが、図 3.13, 3.15 を見ると、両者の年変化の傾向は概ね一致している。

図 3.17 に、風力発電装置に関して CAF_t の長期平均値に対する変動量を示す。図 3.17 の CAF_t は、3 年間移動平均値を対象としている。この結果から、対象とした 7 海域は、日本海側（黒線）、太平洋側（赤線）とも CAF_t は一定値とならず、2008 年以降は、日本海側、太平洋側とも長期平均値よりも高い CAF_t となっていることが分かる。

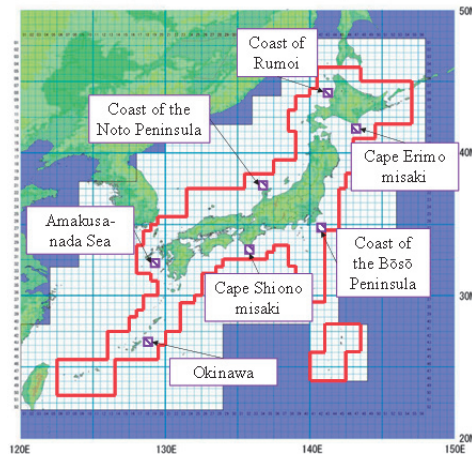


図 3.12 理論設備利用率の長期変化を評価する 7 海域

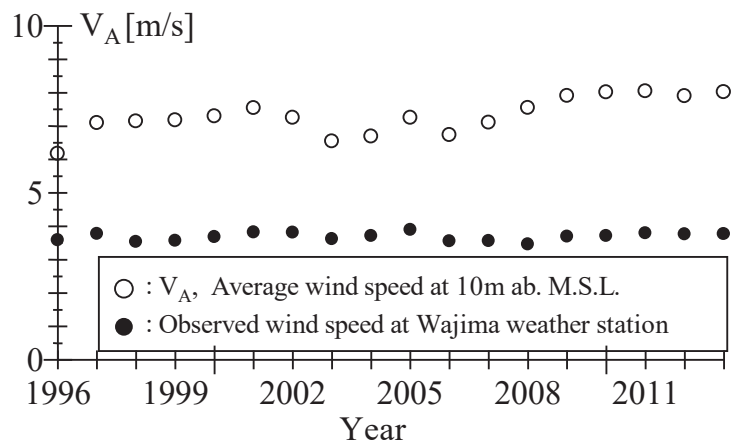


図 3.13 能登半島沖における推算平均風と観測平均風速の年変化

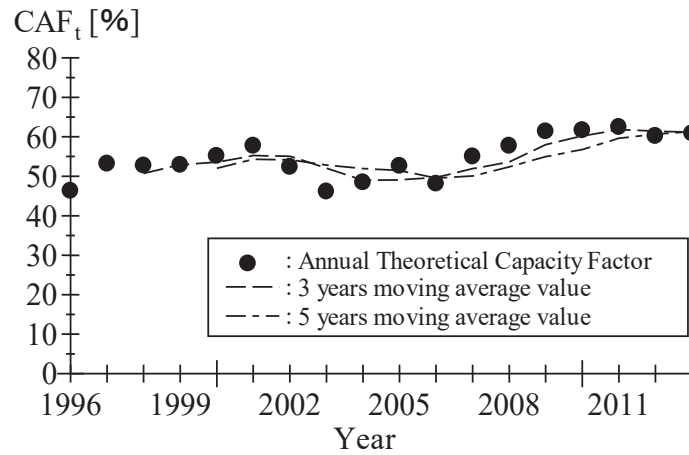


図 3.14 能登半島沖における理論設備利用率の年変化（風力発電装置）

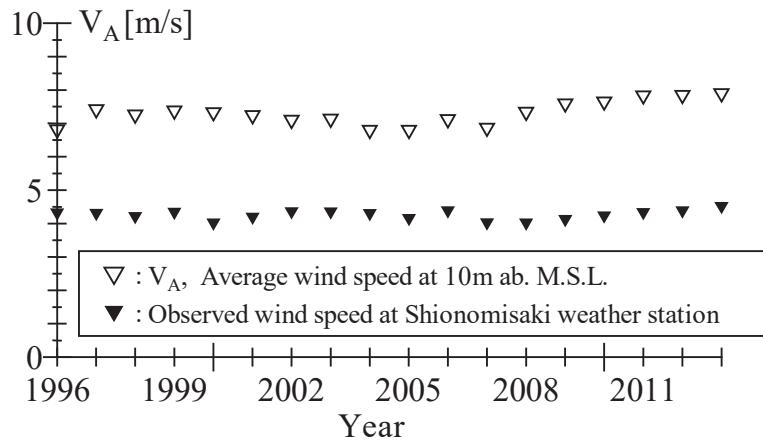


図 3.15 潮岬沖における推算平均風速と観測平均風速の年平均値の推移

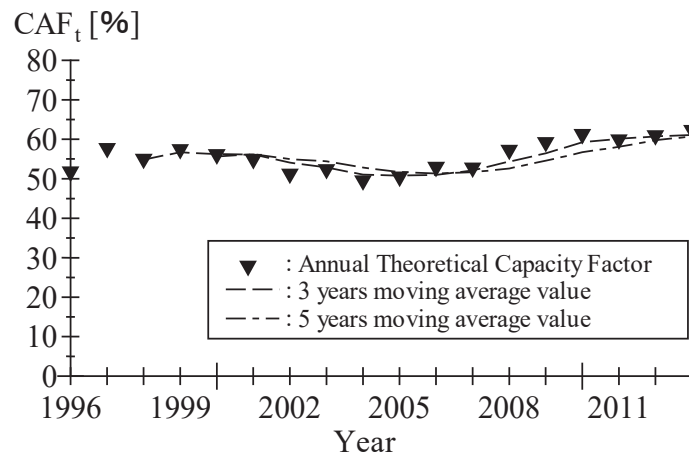


図 3.16 潮岬沖における理論設備利用率の年変化（風力発電装置）

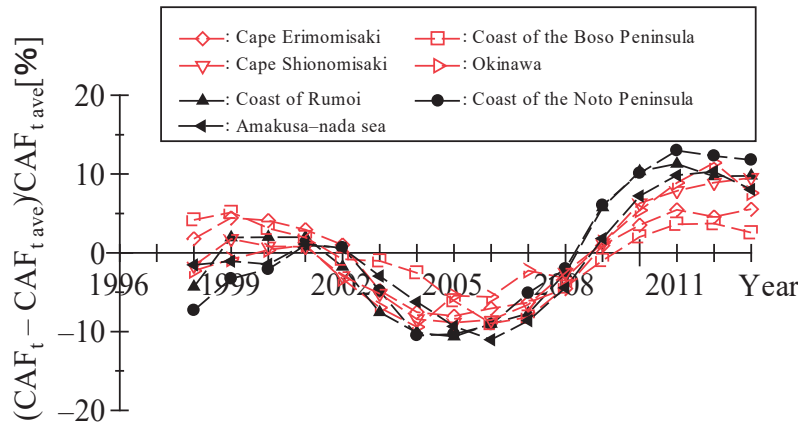


図 3.17 理論設備利用率の変動率（風力発電装置）

図 3.18~3.21 に、能登半島沖と潮岬沖における、有義波高、有義波周期の年平均値の推移と図 3.4 に示した出力特性を持った波力発電装置の CAF_t 推定結果を示す。 CAF_t のグラフには 3 年間、5 年間の移動平均値も示している。

図 3.19 に示した能登半島沖での CAF_t 推定結果を見ると、2000 年頃から CAF_t の値は減少し、2010 年頃から増加に転じる。図 3.21 に示した潮岬沖の CAF_t 推定結果は、能登半島沖に比べて全体的に高い値を示すものの、単調な変化とならず、変動量も大きい。

図 3.22 に、波力発電装置に関して CAF_t の長期平均値に対する変動量を示す。図 3.22 の CAF_t は、3 年間移動平均値を対象としている。この図より、波力発電装置の CAF_t の年変化は、日本海側（黒線）と太平洋側（赤線）で傾向が異なり、対象とした 7 海域では、太平洋側の海域の方が日本海側の海域よりも短い周期の変動を示している。また、日本海側及び太平洋側の CAF_t の年変化の傾向は、それぞれの海域の有義波高の年変化の傾向に概ね一致している。なお、図 3.22 の沖縄近海の結果は、太平洋側であるが、有義波高の変化が他の 3 海域に比べて小さいため、 CAF_t の変動量も小さくなっていると推測される。

これらの結果から、波力エネルギーのポテンシャル評価や回収されるエネルギー量を評価する場合、可能な限り長期間のデータセットを用いることが望ましく、特に本州の太平洋側での評価を行う際には有義波高の年平均値の推移に十分留意する必要があると言える。

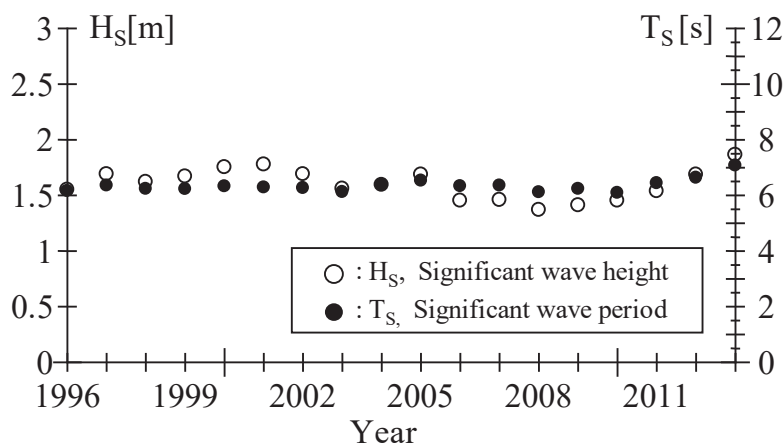


図 3.18 能登半島沖における有義波高と有義波周期の年平均値の推移

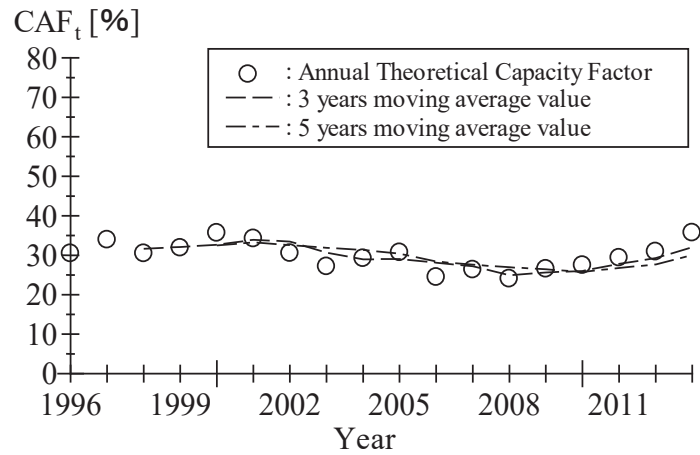


図 3.19 能登半島沖における波力発電装置の理論設備利用率

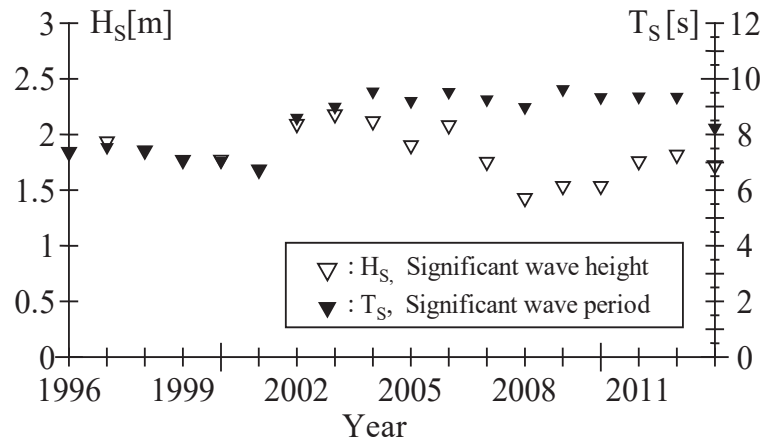


図 3.20 潮岬沖における有義波高と有義波周期の年平均値の推移

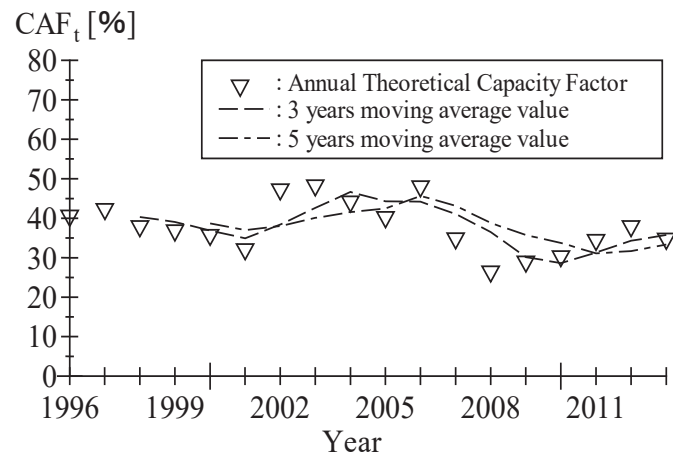


図 3.21 潮岬沖における波力発電装置の理論設備利用率

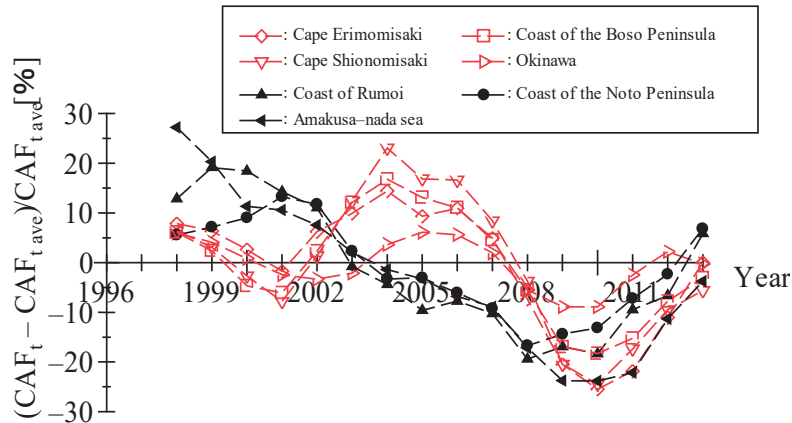
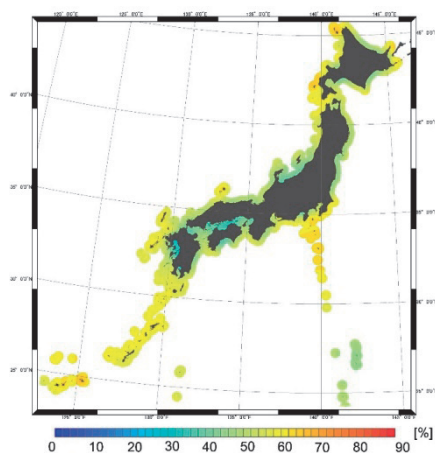
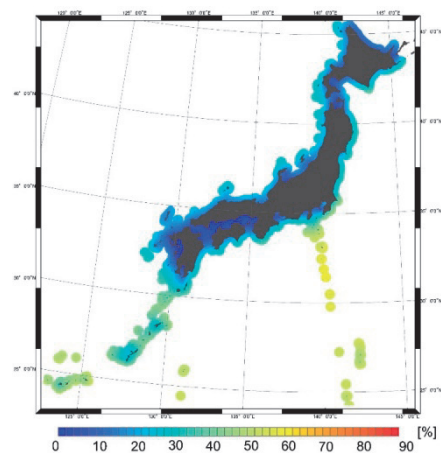


図 3.22 理論設備利用率の変動率（波力発電装置）

3.3.4 日本沿岸域での風力・波力・海流エネルギーポテンシャル

3.3.3 で求めた理論設備利用率を用いて、日本沿岸域での海洋再生可能エネルギーによる理論可採最大総電力（Theoretical recoverable maximum total power : TRMTP）を試算する。理論可採最大総電力は、(3.5)式で定義する。(3.5)式中の n , $CAF_t(i)$, P_R , $S(i)$, d は、それぞれ対象海域数、 i 番目の海域における理論設備利用率、発電装置の定格出力、 i 番目の海域における設置海域面積、発電装置の設置密度を表す。理論可採最大総電力は、対象とする発電装置を設置海域全面に一定の密度で配置した場合に回収できる最大電力である。理論設備利用率を用いている為、発電装置の出力特性と運転条件が考慮されている。設置海域は、離岸距離、水深等の地理的制約条件及び漁業区域、航路、自然保護区等の社会的制約条件を考慮して設定する必要がある。ここでは、日本沿岸域の海洋再生可能エネルギーポテンシャルの概略を把握する為、離岸距離と水深のみを地理的制約条件とし、社会的制約条件は考慮していない。一例として、離岸距離 30 km 以内に限った場合の風力、波力、海流発電装置の理論設備利用率マップを図 3.23~図 3.25 に示す。離岸距離 30 km は、欧州を中心に展開される洋上風力発電ファームでの実用化されている、送電技術を考慮して決定した²⁷⁾。

$$TRMTP = \sum_{i=1}^n (CAF_t(i) \times S(i) \times P_R \times d) \quad (3.5)$$

図 3.23 風力発電装置の理論設備利用率
(離岸距離 30km)図 3.24 波力発電装置の理論設備利用率
(離岸距離 30km)

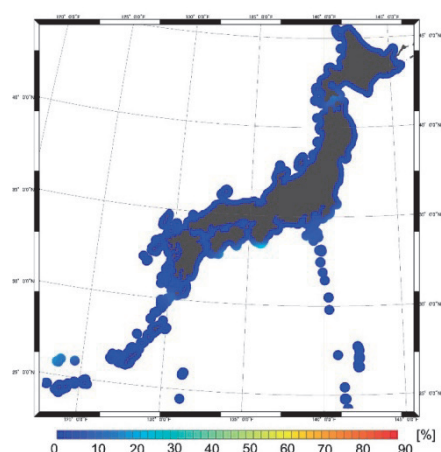


図 3.25 海流発電装置の理論設備利用率
(離岸距離 30km)

図 3.26 に、離岸距離 30 km 以内及び水深 200m の条件を満たす海域に限定した場合の設置海域を示す。なお、日本沿岸域の水深データとして、日本海洋データセンターが提供する、J-EGG500 (JODC Expert 500m Grid data for Geography)を用いた²⁸⁾。設置海域は、合計約 239,000km²となる。離岸距離に加えて水深を限定することで、太平洋側の島嶼部等では、設置海域が非常に限定されていることが分かる。表 3.1 に、理論可採最大総電力の算定時における海域及び発電装置に関する仮定条件を示す²⁹⁾。風力発電装置の設置密度は、発電装置のロータ直径を 90 m と想定し、流軸方向にロータ直径の 10 倍、流軸の直交方向にロータ直径の 3 倍の間隔で設置すると仮定した。波力発電装置設置密度は、波力発電装置の代表長さを 10 m と想定し、アレイを構築した場合に発電装置の間隔を代表長さの 10 倍として設置すると仮定した。海流発電装置の設置密度は、発電装置のロータ直径を 10 m と想定し、流軸方向にロータ直径の 10 倍、流軸の直交方向にロータ直径の 5 倍の間隔で設置すると仮定した³⁰⁾。

日本沿岸域の海洋再生可能エネルギーポテンシャル推定結果を表 3.2 に示す²⁹⁾。風力発電に関して、日本風力発電協会（以下、JWPA）は日本沿岸域に設置可能な風力発電装置の設備容量を試算している³¹⁾。JWPA の試算では、海域 1 km² 当たり設置できる設備容量を 10MW とし、風力発電装置の設置に適した海域として、表 3.1 で示した条件に加えて年平均風速が 7.0 m/s 以上の海域に限定している。設置に適した海域全てに対し、着床式と浮体式を区別せず、設備容量は 925,000 MW としている。これは表 3.2 での試算結果を基にすると、設置密度の修正（2MW×4 units/km²→2MW×5 units/km²）をした上で、例えば、年平均風速が 7.0 m/s 以上の海域の割合を 40% として、平均の理論設備利用率を年平均 50%とした値に相当しており、両者の値の関係は不自然では無い。

波力発電、海流発電に関する発電ポテンシャルの試算例として、NEDO¹⁵⁾はそれぞれ 160,507 MW（離岸距離 30 km の外周ラインに沿って波エネルギー密度を線積分した値）、39,010MW（離岸距離 30 km 以内で津軽暖流と黒潮のそれぞれ 1 断面での海流エネルギー密度を面積分した値）と示している。表 3.2 で示した試算は、面的に海洋再生可能エネルギーを取得する場合の評価結果であり、NEDO による試算と基本的な考え方が異なるので、単純比較は難しい。波力および海流については、現実的なポテンシャルをどの様に考えるか、今後更に検討が必要である。

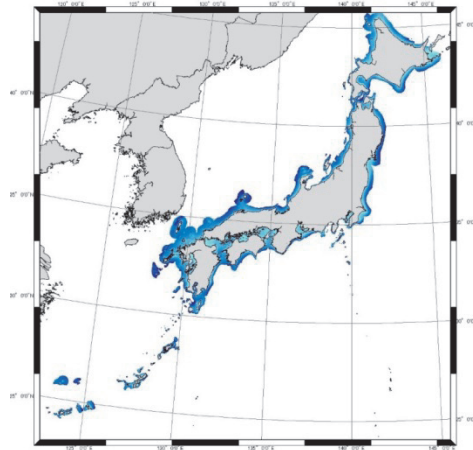


図 3.26 発電装置設置海域（離岸距離 30km 以内，水深 200m 以浅）

表 3.1 理論可採最大総電力の算定時における海域及び発電装置に関する仮定条件

$S(i)$: Available sea area conditions	
Distance to coast	$0 < 30 \text{ km}$
Water depth	$0 < 200 \text{ m}$
Total area	$239,000 \text{ km}^2$
P_R : Rated power	
Wind device	2 MW
Wave device	100 kW
Ocean current device	400 kW
d : Number of installation units per km^2	
Wind device	4 units/ km^2
Wave device	100 units/ km^2
Ocean current device	200 units/ km^2

表 3.2 海洋再生可能エネルギーポテンシャル推定結果

Wind energy	997 GW
Wave energy	488 GW
Ocean current energy	172 GW

4. 安全性及び経済性評価のための標準海象

4.1 概要

海洋再生可能エネルギーを利用する発電装置は、特定の海域に設置され、一定期間運用される。その為、発電装置の安全性及び発電性能評価における気海象の設計条件は設置海域毎に設定されるべきものである。しかし、発電装置の開発段階等で、具体的な設置海域が決定されていない場合でも、型式認証等の安全性照査やステージゲートにおける発電性能照査等を求められることがある。このような場合、日本沿岸域で何らかの統一的な気海象条件が設定されていると、発電装置の開発者にとって有用な情報であると考えられる。

ここでは、型式認証等の安全性照査やステージゲート等における発電性能照査を行う際に利用できる、日本沿岸域を代表し、且つ十分に安全側の検討が行える気海象パラメータ（以下、標準海象と表記する）を設定することを目標とする。ここでは、その基礎的検討として、終局強度を評価する極値海象条件と疲労強度及び発電性能を評価する気海象の発現頻度表を2.2節で述べた長期波浪推算データを基に構築した結果について報告する³²⁾。なお、発電装置が沿岸域（離岸距離27.5 km 以内）に設置されるものと想定し、図4.1に示した離岸距離約27.5 km に沿った外周線上で長期波浪推算データベースの解析を行った。

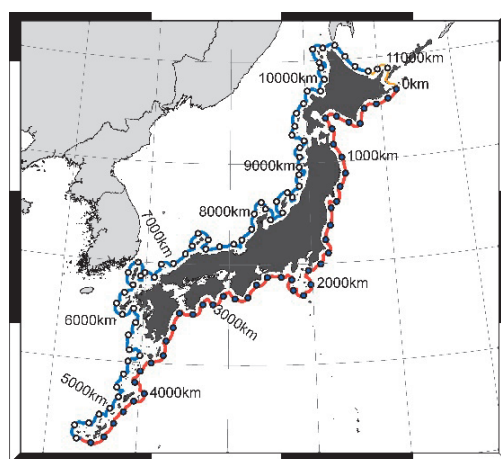


図 4.1 離岸距離 27.5km の外周ライン

4.2 50 年再現期待値

発電装置の終局強度評価における利用を想定し、気海象の50年再現期待値を検討した。ここでは、平均風速と有義波高を対象に図4.1に示した外周ラインに沿った解析を行い、外周ライン上で極値の変化率が大きい地点及び地理的な特徴を考慮して、外周ラインを幾つかの海域に分け、海域毎に極値を設定する。なお、極値を求める際に分布関数のあてはめを行う必要があるが、この検討ではWeibull($k=2.0$)分布を採用している。また、ここでは、台風等の突発的なイベントのみを抽出若しくは除外等の処理は行っていないことに留意されたい。

図4.2, 4.3に平均風速の50年再現期待値（青色一点破線）、50年再現期待値を500 km 毎に移動平均をとった値（赤色実線）、海域毎に設定した50年再現期待値（黒色太実線）の標準値を示す。図4.2, 4.3には、参考値として、外周ラインに沿った20年間平均風速の分布（黒色実線）も示している。

図4.4, 4.5に有義波高の50年再現期待値（青色一点破線）、50年再現期待値を500 km 毎に移動平均をとった値（赤色実線）、海域毎に設定した50年再現期待値（黒色太実線）の標準値を示す。図4.4, 4.5には、参考値として、外周ラインに沿った有義波高の20年間平均値（黒色実線）も示している。

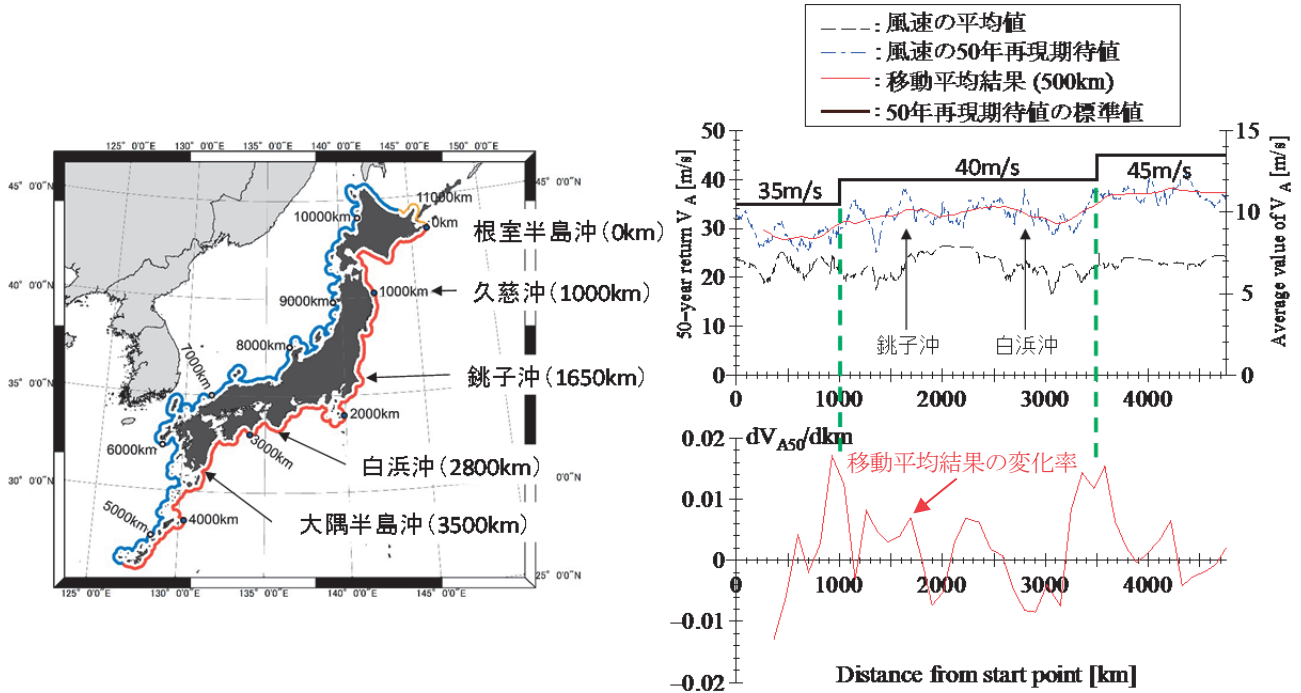


図 4.2 平均風速の 50 年再現期待値（太平洋側）

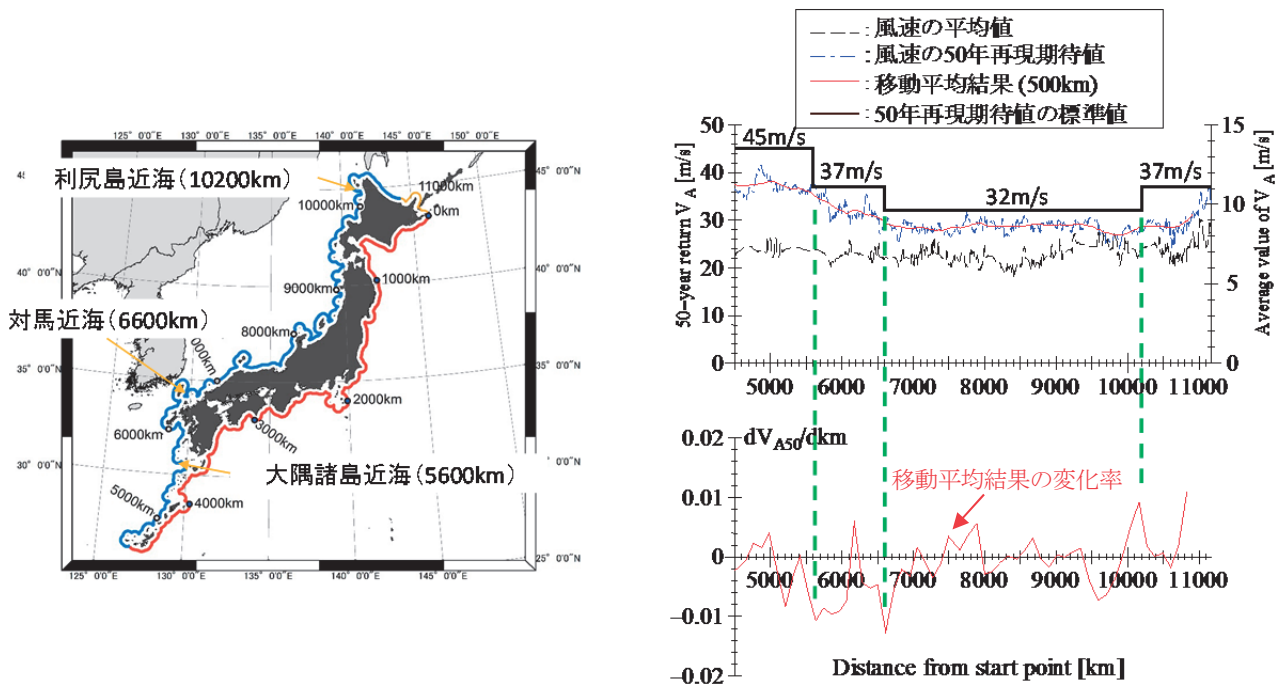


図 4.3 平均風速の 50 年再現期待値（日本海側）

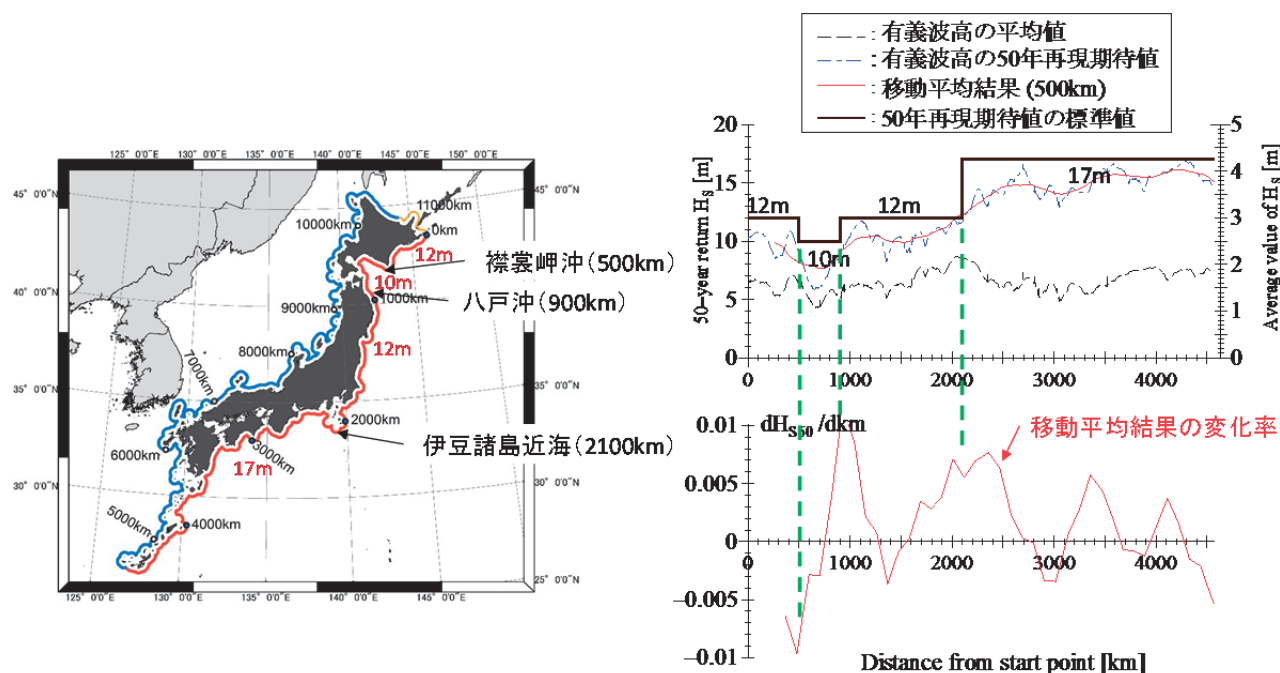


図 4.4 有義波高の 50 年再現期待値の設定例（太平洋側）

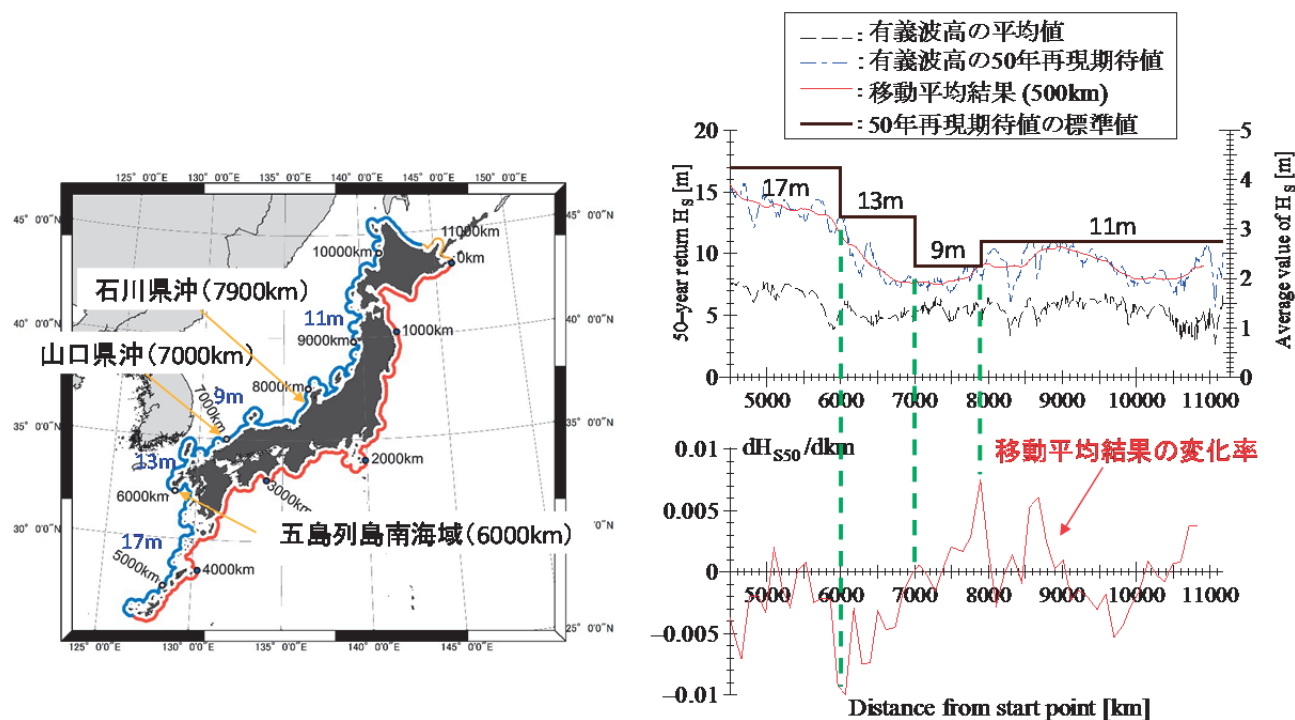


図 4.5 有義波高の 50 年再現期待値の設定例（日本海側）

4.3 標準的な海象の発現頻度分布

発電装置の疲労強度照査や発電性能照査等での利用を想定し、標準的な有義波高一有義波周期結合頻度分布を検討する。4.2 節と同様に、図 4.1 に示した外周ライン上での有義波高と有義波周期の 20 年間平均値及び標準偏差の分布に着目し、図 4.6 に示す海域分類例を検討する。図 4.6 は、主として有義波高の分布に着目したものであるが、有義波周期の特性も概ね包含できていると考えられる。

2.2 節で述べた長期波浪推算データベースを用いた海象の頻度表は、一辺 0.5° （約 56 km）四方の海域毎に構築されている。そこで、図 4.6 に示した海域分類例を基に、外周ラインが通過する海域の頻度表を重ね合わせて、

標準的な有義波高一有義波周期結合頻度分布を作成した。図4.7, 4.8に分類された海域毎に波高と波周期の平均値及び標準偏差の関係を散布図で示し、海域毎の平均値と標準偏差の結果を表4.1に示す。また、海域毎に構築された標準的な有義波高一有義波周期結合頻度分布を図4.9~4.15に示す。

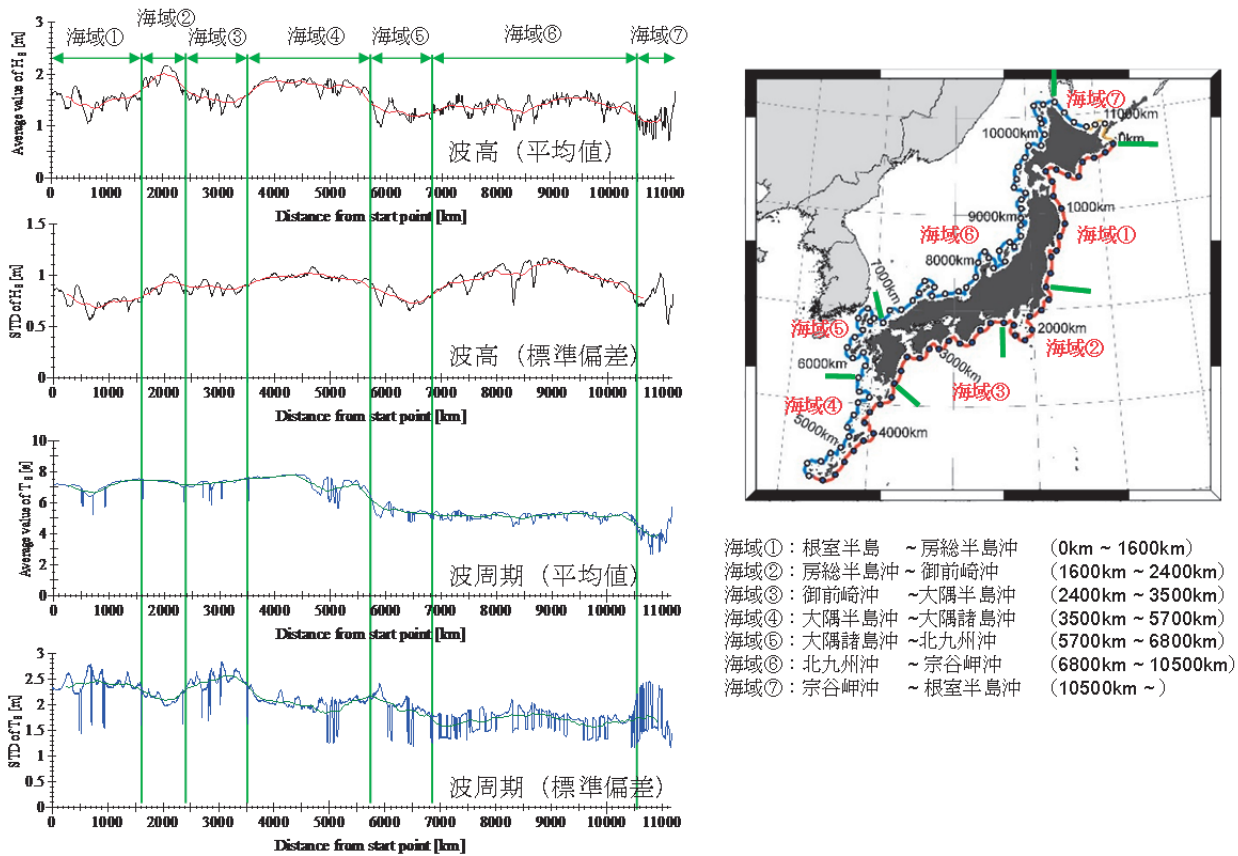


図4.6 標準的な有義波高一有義波周期結合頻度分布における海域分類例

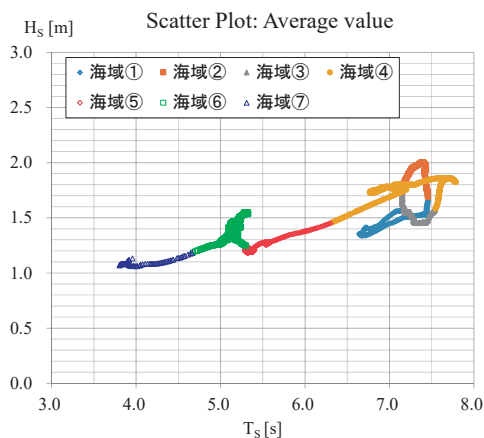


図4.7 有義波高の平均値と有義波周期の平均値の散布図

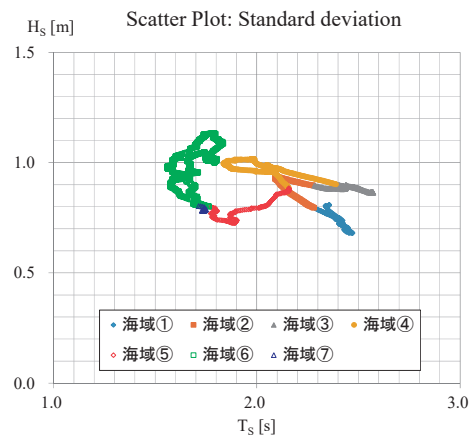


図4.8 有義波高と有義波周期の標準偏差の散布図

表 4.1 海域分類毎の波の特性

項目／海域	1	2	3	4	5	6	7
有義波高 平均値 [m]	1.48	1.78	1.44	1.76	1.22	1.29	1.16
有義波高 標準偏差 [m]	0.79	0.88	0.88	0.97	0.80	0.94	0.86
平均波周期 平均値 [s]	7.70	8.04	7.62	8.27	6.2	5.73	5.78
平均波周期 標準偏差 [s]	2.40	2.23	2.50	2.14	2.06	1.68	2.18

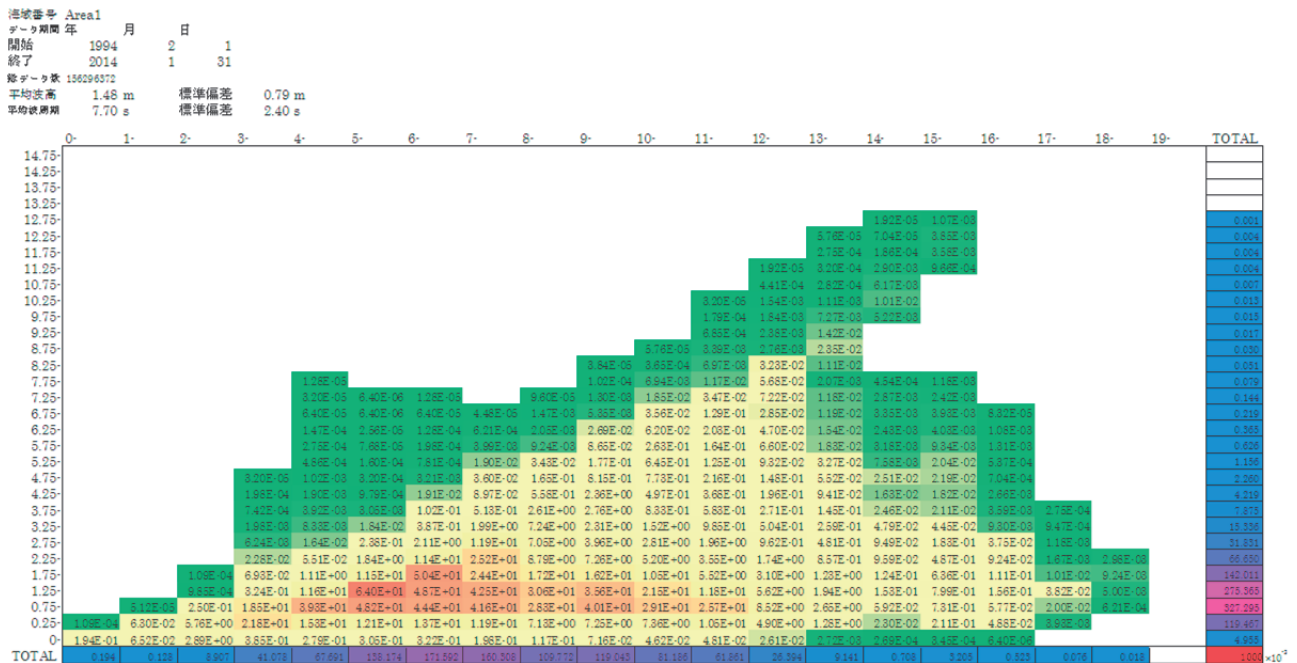
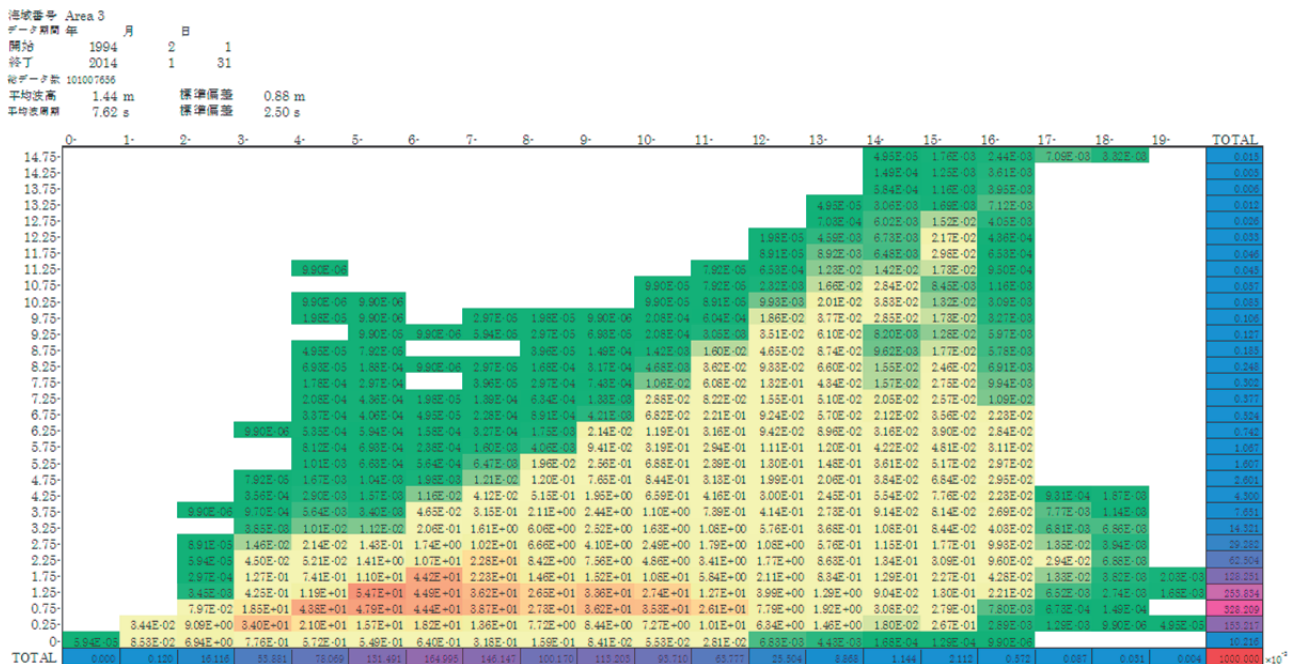
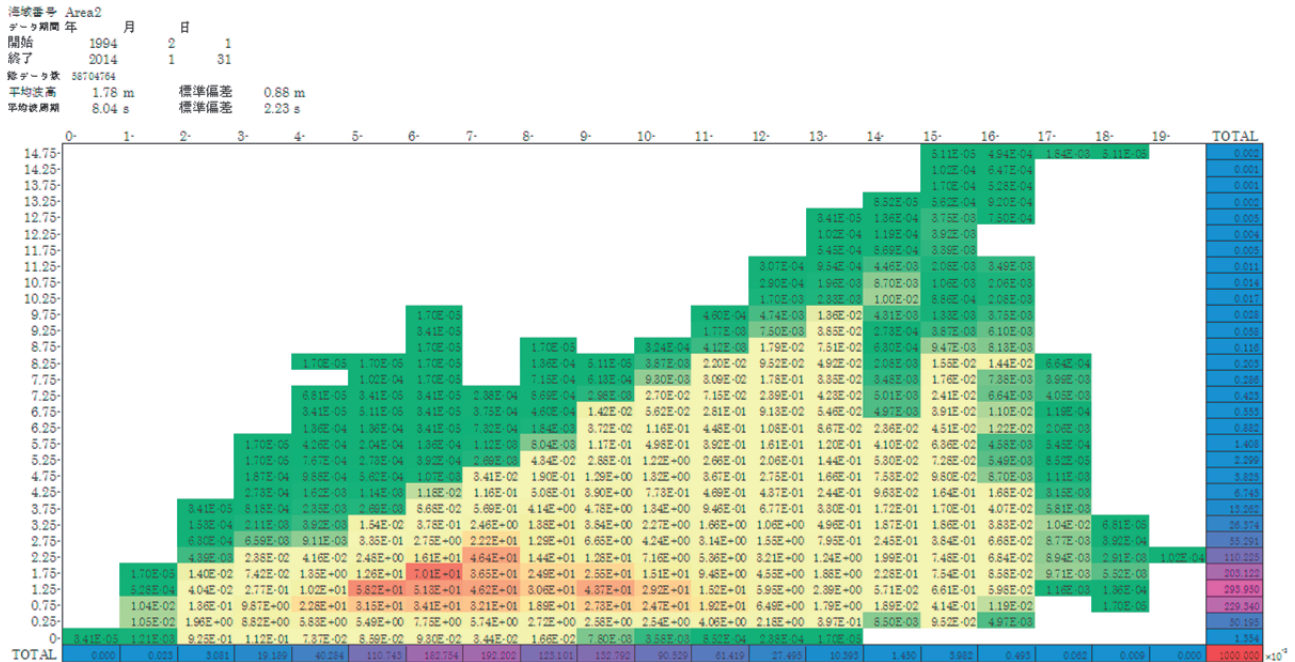


図 4.9 海域①有義波高一有義波周期結合頻度分布



海域番号 Area 4

データ期間 年 月 日

開始 1994 2 1

終了 2014 1 31

観測データ数 145424718

平均波高 1.76 m

標準偏差 0.97 m

平均波周期 8.27 s

標準偏差 2.14 s

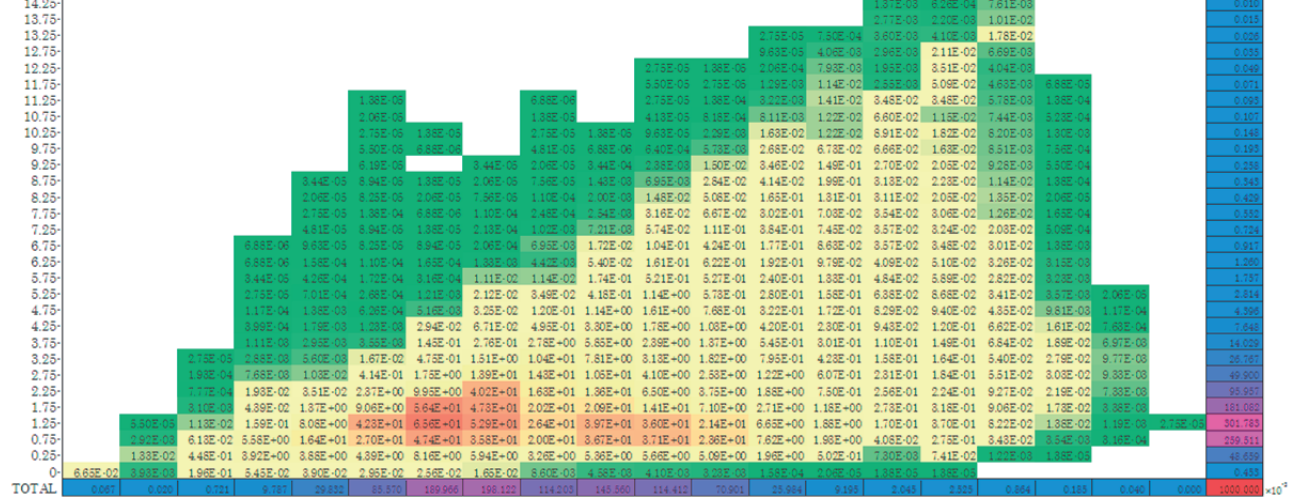


図 4.12 海域④有義波高一有義波周期結合頻度分布

海域番号 Area 5

データ期間 年 月 日

開始 1994 2 1

終了 2014 1 31

観測データ数 91204904

平均波高 1.22 m

標準偏差 0.80 m

平均波周期 6.20 s

標準偏差 2.06 s

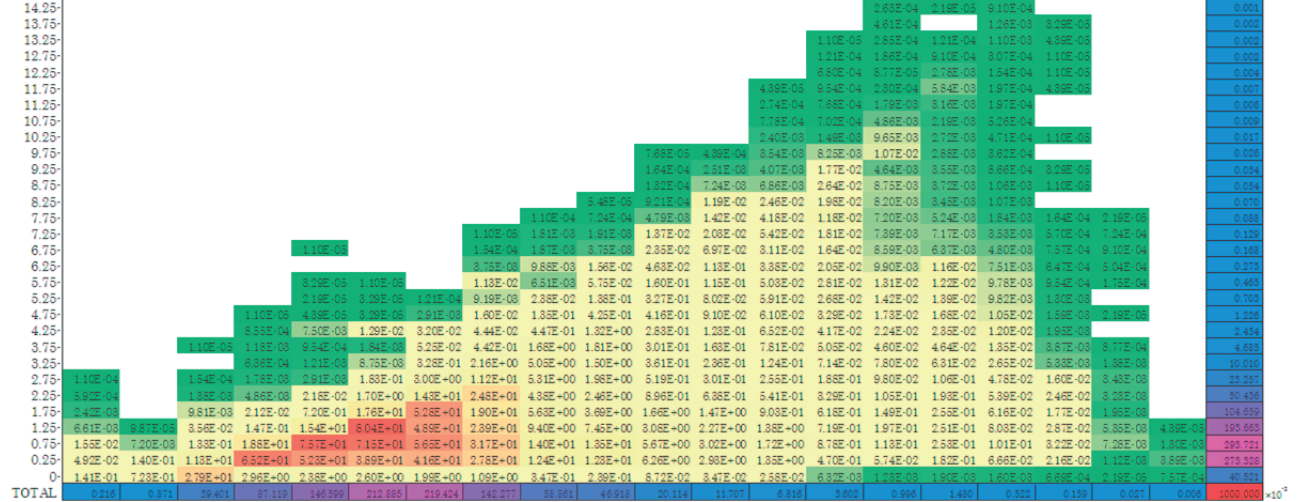
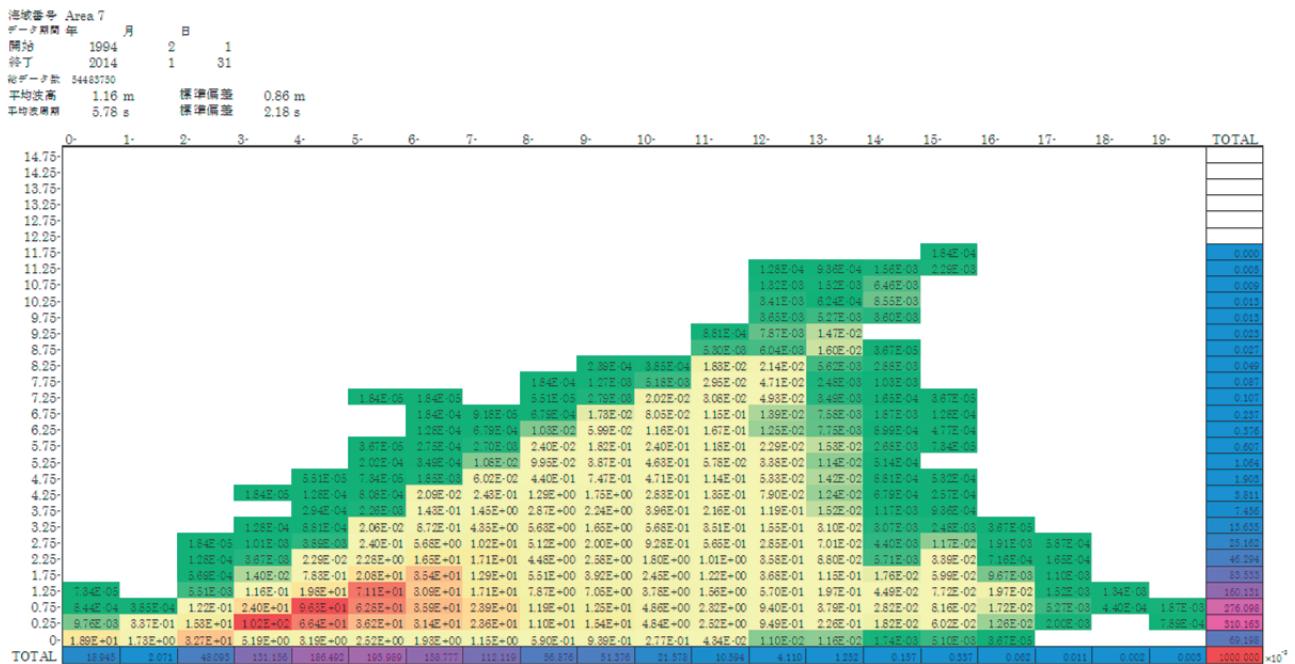
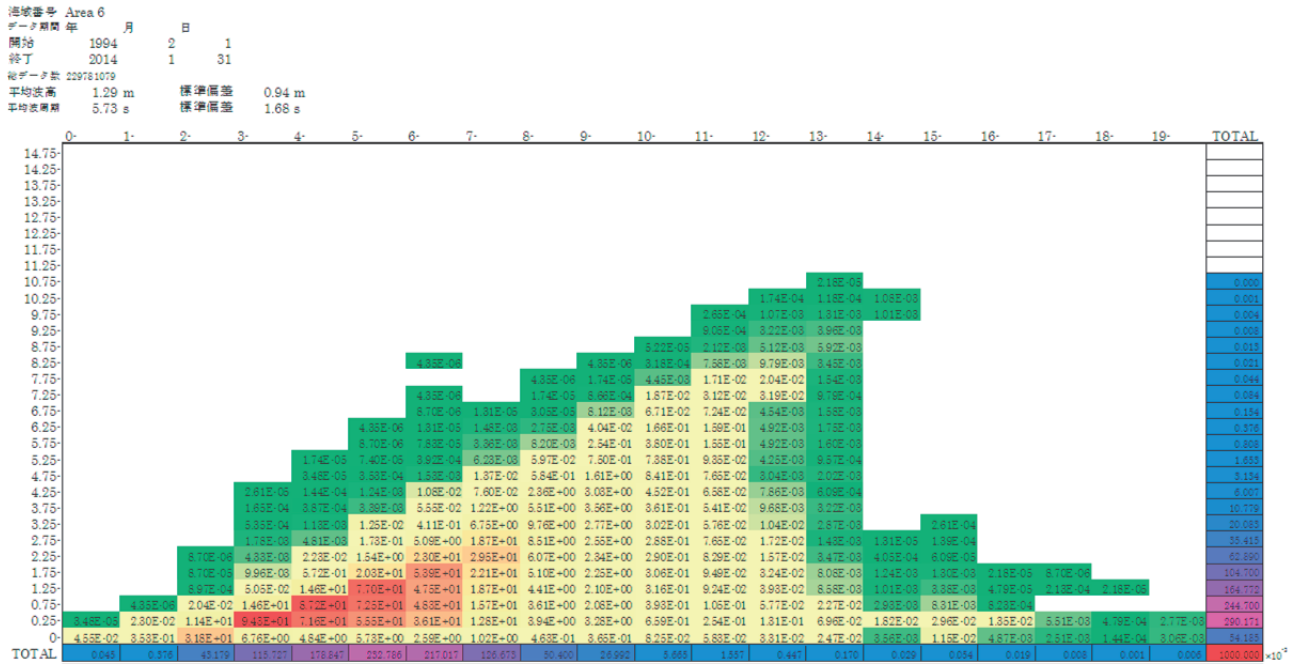


図 4.13 海域⑤有義波高一有義波周期結合頻度分布



5. 静穏海象の継続時間及び待機時間評価

5.1 概要

海洋再生可能エネルギーの実証事業やその先の商業利用が増加するに従い、洋上での機器の設置や保守点検等の海洋オペレーション（以下、オペレーションと表記）は、発電装置の安全で安定的な運用という視点のみならず、事業採算性を確保するためのライフサイクルコスト低減という観点からも重要性が高まると考えられる。

オペレーションでは、目的に応じて様々な船舶等が用いられる。オペレーションの稼働率は、船舶等の海象条件に対する作業限界や必要な作業時間に依存する。従って、オペレーションにおける稼働率を評価するためには、

作業海域の静穏海象発現特性を把握する必要がある。静穏海象発現特性を評価する場合、従来は、海象の閾値（例えば、作業限界の波高）とウィンドウ長さを設定し、静穏海象の継続時間割合（以下、静穏海象継続確率という）を求める手法、所謂、ウェザーウィンドウ解析¹⁹⁾を行っていた。ウェザーウィンドウ解析では、ウィンドウ長さをオペレーションに必要な作業時間と見なすことで、オペレーションの稼働率を評価する。しかしながら、この解析は、時系列上に理想的に作業を配列した場合の最大作業時間を評価しているのであって、不確定要因がある中での作業機会の捉えやすさを表していない。例えば、閾値以下となる海象の全継続時間が等しくても、静穏海象が纏まって発生する場合（作業スケジュールに変動要因が多くても作業機会の捉えやすい海域）と静穏海象が疎らに発生する場合（確実にタイミングを捉えないと作業できない難しい海域）を区別出来ない。

ここでは、作業機会の捉えやすさも評価できる指標（以下、静穏時作業可能確率という）を提案する^{33, 34)}。静穏海象継続確率及び静穏時作業可能確率の概念と相違点を解説するとともに、試解析を通じて2つの指標の特性を評価する。また、待機時間評価では、作業可能な海象が出現する間隔という従来の指標に加え、待機時間の期待値を求める指標を提案する。試解析は、2.3節で述べた高解像度波浪推算データベースを用いており、山形県酒田市沖と和歌山県潮岬沖の2海域を対象としている。

5.2 静穏海象継続確率

静穏海象継続確率（ P_{per} ）は、海象条件の閾値とウィンドウ長さ（以下、 WL ）を設定した場合に、閾値以下の海象が少なくとも WL の期間継続する時間の全評価時間に対する割合である。 P_{per} は、海洋エネルギー発電施設に関するプロトコルの1つである、EquiMar³⁵⁾にも、実証サイトの気海象条件として収集・解析することが推奨されている指標である。

波高の場合を例に、静穏海象継続確率の考え方を示す。図5.1のように閾値以下（作業限界波高： H_{SL} ）の海象継続時間を $Ph(i)$ とおく。 $Ph(i)$ の中で確保出来るウィンドウ数は、 $Ph(i)$ を WL で割った商であり、これを $Q(Ph(i)/WL)$ と表記する。 WL の値によっては余りが生じるが、余った時間ではオペレーションは完了できないので、余りは無効とする。なお、オペレーションに必要な作業時間をウィンドウ長さ（ WL ）と見た場合、(5.1)式で定義する P_{per} はオペレーションの稼働率と見ることも出来る。

$$P_{per} = \frac{\sum_{i=1}^N (Q(Ph(i)/WL) \times WL)}{T} \times 100 \quad (5.1)$$

なお、(5.1)式中の T 、 N は、全評価時間及び全評価時間の中で閾値以下の海象継続時間が発現する回数である。試解析では、有義波高（ H_S ）に対して静穏海象継続確率を求めた。

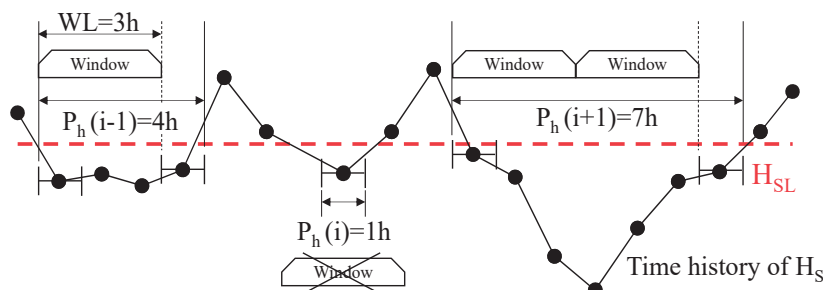


図 5.1 静穏海象継続確率の概念図

5.3 静穏時作業可能確率

静穏時作業可能確率（ P_{op} ）は、気海象条件が閾値以下となる継続時間とウィンドウ長さ（ WL ）が与えられた場合、閾値以下の気海象継続時間内でオペレーションを完了することができる機会が何回得られるかを評価する。

ここでは、高解像度波浪推算データの時間解像度が1時間である為、オペレーションを開始する機会が、1時間に1回あると仮定する。 P_{op} は、5.2節の静穏海象継続確率(P_{per})で考えたWLが1hずつシフトする見方に相当しており、概念図を図5.2に示す。また、 P_{per} と同様に、なお、オペレーションに必要な作業時間をウィンドウ長さ(WL)とした場合、 P_{op} は作業機会の捉えやすさも考慮したオペレーションの稼働率と見ることも出来る。

P_{op} は(5.2)式で算出する。

$$P_{op} = \frac{\sum_{i=1}^N (Ph(i) - WL + 1)}{T - WL + 1} \times 100 \quad (5.2)$$

なお、(5.2)式の分子($Ph(i) - WL + 1$)が負となる場合は、無効データとしてカウントしない。試解析では、有義波高(H_s)に対して静穏時作業可能確率を求めた。

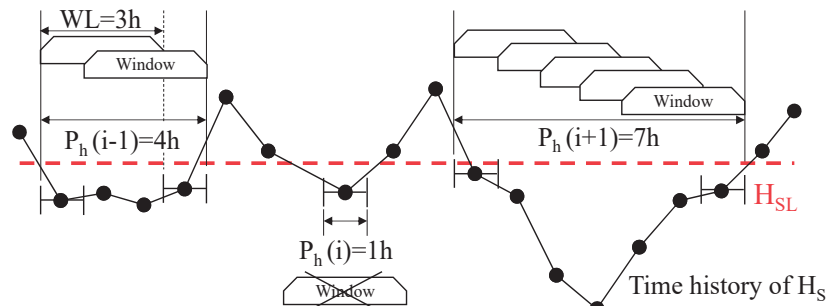


図 5.2 静穏時作業可能確率の概念図

5.4 2つの指標の相違点

5.2節で述べた P_{per} と5.3節で述べた P_{op} は、気海象の継続性を現す指標であり、オペレーションに必要な作業時間をウィンドウ長さ(WL)と見た場合は、ある種の稼働率として考えることができる。 P_{per} と P_{op} に関して、全評価時間と有義波高の閾値以下となる時間数が等しい2つの時系列が図5.3の様に与えられた場合、(5.1)式で得られる P_{per} は、A)とB)どちらの時系列でも60% (=6/10)と同じ値となる。一方、(5.2)式で得られる P_{op} は、A)の時系列では50% (=4/8)であり、B)の時系列では25% (=2/8)である。

P_{per} を用いた稼働率の評価では、静穏海象条件が纏まって発現する場合と図5.3に示されたB)の時系列の様に疎らに発現する場合を区別できない点に注意が必要である。また、(5.1)、(5.2)式より、 P_{per} と P_{op} はWL=1hの時に等しい値をとる。

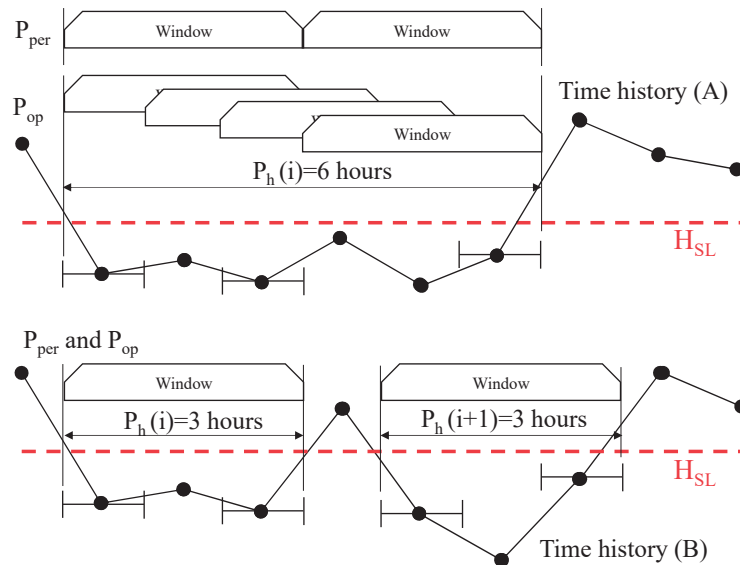


図 5.3 静穏海象継続確率 (P_{per}) と静穏時作業可能確率 (P_{op}) の比較例

5.5 静穏海象発現特性の試解析

P_{per} と P_{op} に関して、図 5.4 に示した酒田沖、潮岬沖の 2 海域において、2012 年の波浪推算データを用いて試解析を行った。ここでは、有義波高に関して静穏海象発現特性の解析を行った結果を報告する。試解析を行った海域は、緯度方向及び経度方向が 0.25 度 (約 28 km) の四角形で囲まれた範囲である。高解像度波浪推算データベースの空間解像度は緯度経度 2 分であるから、四角形で囲まれた範囲には 64 個の計算格子点があり、これらの平均値を代表値として解析に用いた。

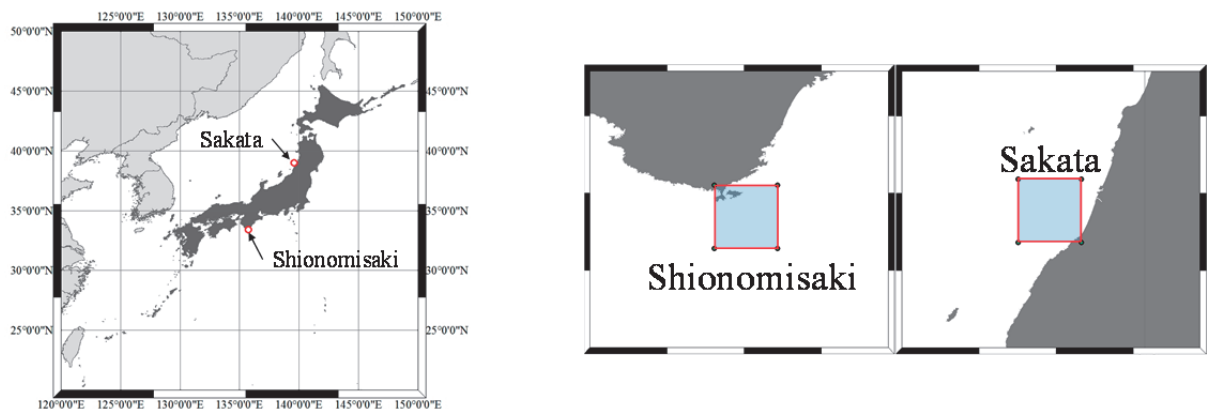


図 5.4 静穏海象発現特性評価海域

有義波高について、酒田沖を対象に P_{per} と P_{op} を比較した結果を表 5.1, 5.2 に示す。これらは、海象の閾値 (作業限界波高: H_{SL}) と作業時間 (WL) を与えた時の P_{per} と P_{op} の推定結果を示している。表 5.1 は 3 月の推定結果であり、表 5.2 は 6 月の推定結果である。

表 5.1, 5.2 より、 H_{SL} の値を固定すると、 WL を長くするに従い P_{per} 及び P_{op} の値は減少する傾向が見られる。 P_{per} と P_{op} を比較すると、2 つの指標の差は、 H_{SL} が小さく WL が長い程大きくなる傾向がある。この差は、5.4 節で述べた様に、 P_{per} は H_{SL} 以下の静穏海象が纏まって発現する場合と疎らに発現する場合を区別できない点に起因する。図 5.5 に、3 月の酒田沖における有義波高の時系列推定結果を示す。 H_{SL} を 1.5 m、 WL を 96 h とした場合、条件を満たす海象が発現する期間は 2 回ある。この条件で、 P_{per} 及び P_{op} の値は、それぞれ 25.8% 及び 6.8% であり、両

者の差は無視できないほど大きい。図 5.7 の時系列を詳しく見ると、2 回目に条件を満たす海象が現れる期間は WL に等しく、ウィンドウを 1 つ得られるが、確実に作業のタイミングが捉えられなければ作業が完了しない。

表 5.1 酒田沖における P_{per} (左図) と P_{op} (右図) の比較結果 (3 月)

Occurrence (%)		Window length (h)							
		1	6	12	24	48	72	96	
H_{SL} (m)	5<	100.0	100.0	100.0	100.0	96.8	96.8	90.3	
	5	100.0	100.0	100.0	100.0	96.8	96.8	90.3	
	4	100.0	100.0	100.0	100.0	96.8	96.8	90.3	
	3.5	98.1	97.6	95.2	93.5	90.3	87.1	77.4	
	3	94.5	93.5	91.9	87.1	83.9	77.4	64.5	
	2.5	86.8	84.7	82.3	77.4	71.0	67.7	64.5	
	2	74.2	71.8	67.7	61.3	45.2	38.7	25.8	
	1.5	58.6	54.8	53.2	45.2	32.3	19.4	25.8	
	1	39.1	34.7	32.3	22.6	19.4	0.0	0.0	
	0.5	14.5	12.9	11.3	6.5	0.0	0.0	0.0	

Occurrence (%)		Window length (h)							
		1	6	12	24	48	72	96	
H_{SL} (m)	5<	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	
	5	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	
	4	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	
	3.5	98.1	96.5	94.8	91.4	84.2	76.5	68.3	
	3	94.5	92.4	89.9	85.3	77.9	70.0	61.5	
	2.5	86.8	83.9	80.8	75.5	64.3	52.3	39.4	
	2	74.2	69.3	64.0	53.4	33.4	20.1	8.5	
	1.5	58.6	53.6	48.3	37.4	22.5	13.7	6.8	
	1	39.1	34.0	27.7	20.0	7.7	0.0	0.0	
	0.5	14.5	11.4	8.2	3.3	0.0	0.0	0.0	

表 5.2 酒田沖における P_{per} (左図) と P_{op} (右図) の比較結果 (6 月)

Occurrence (%)		Window length (h)							
		1	6	12	24	48	72	96	
H_{SL} (m)	5<	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	93.3	
	5	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	93.3	
	4	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	93.3	
	3.5	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	93.3	
	3	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	93.3	
	2.5	99.7	98.3	98.3	96.7	93.3	90.0	80.0	
	2	98.1	97.5	96.7	93.3	86.7	90.0	80.0	
	1.5	96.9	96.7	96.7	93.3	86.7	90.0	80.0	
	1	94.7	93.3	91.7	90.0	86.7	80.0	80.0	
	0.5	72.6	70.8	68.3	63.3	53.3	50.0	40.0	

Occurrence (%)		Window length (h)							
		1	6	12	24	48	72	96	
H_{SL} (m)	5<	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	
	5	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	
	4	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	
	3.5	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	
	3	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	
	2.5	99.7	99.0	98.2	96.4	92.7	88.8	84.5	
	2	98.1	97.3	96.5	94.7	90.9	86.9	82.6	
	1.5	96.9	96.2	95.3	93.5	89.7	85.7	81.3	
	1	94.7	93.3	91.5	87.9	80.4	72.3	67.4	
	0.5	72.6	68.4	64.7	58.0	45.8	35.3	26.7	

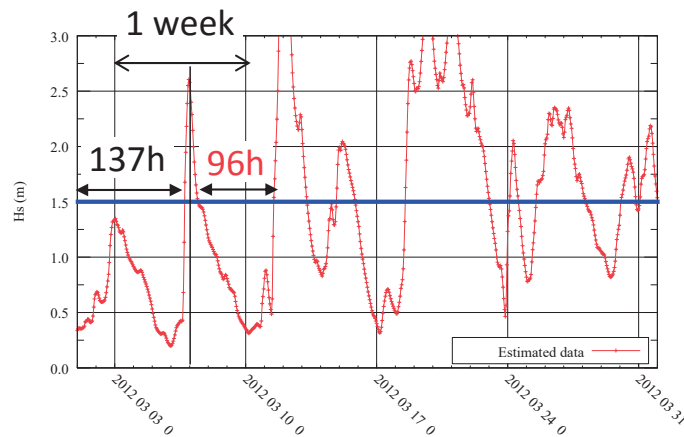


図 5.5 酒田沖における有義波高の時系列 (3 月)

図 5.6 に、酒田沖を対象に P_{per} と P_{op} の月別変化を示す。図 5.6 では、 WL を 48 h として H_{SL} を 1.0 m 及び 1.5 m と変化させている。この結果から、 H_{SL} が 1.0 m の場合、全ての月で P_{per} は P_{op} よりも大きくなるのがわかる。一方、 H_{SL} が 1.5 m の場合、5 月から 9 月にかけて P_{per} は P_{op} よりも僅かに小さくなっている。図 5.7 の様に、酒田沖は 5 月から 9 月にかけて静穏な海象が継続し、条件を満たす海象継続時間がその月のほとんどを占めるようになる。 P_{per} を求める際は、 $Ph(i)$ を WL で除した余りは無効時間として扱う為、 P_{per} が P_{op} よりも小さくなったと考えられる。

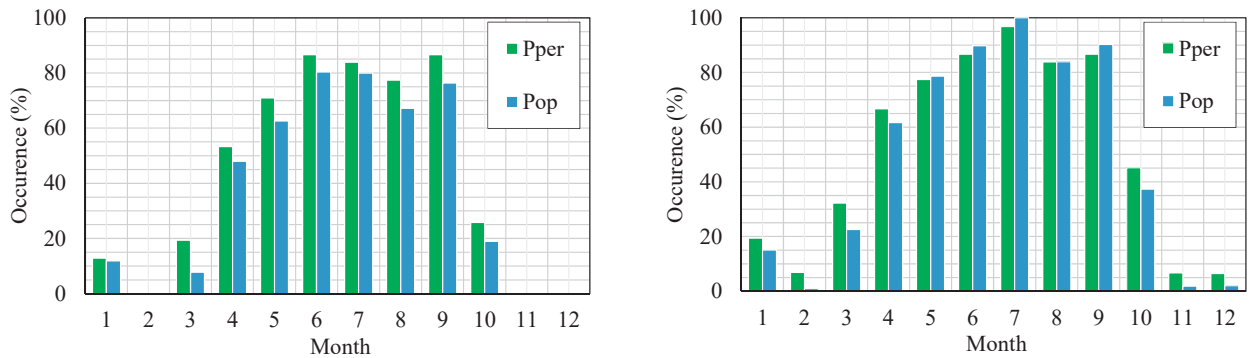


図 5.6 酒田沖における P_{per} と P_{op} の月別変化 (左: $H_{\text{SL}}=1.0$ m, $WL=48$ h, 右: $H_{\text{SL}}=1.5$ m, $WL=48$ h)

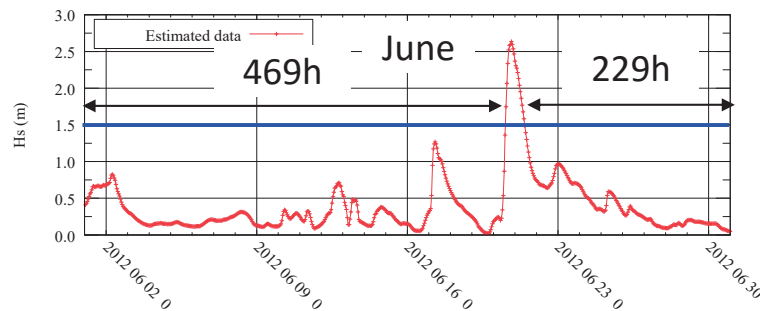


図 5.7 酒田沖における有義波高の時系列 (6 月)

表 5.3, 5.4 に、潮岬沖における P_{per} と P_{op} の比較結果を示す。表 5.3, 5.4 は、3 月と 6 月を対象に、海象の閾値 (作業限界波高: H_{SL}) と作業時間 (WL) を与えた時の P_{per} と P_{op} の推定結果を示している。酒田沖での結果と同じく、 H_{SL} が小さく、 WL が長くなるほど、 P_{per} と P_{op} の差が広がる傾向が分かる。また、 P_{per} と P_{op} の月別変化を示した図 5.8 より、潮岬沖においては、 H_{SL} が 1.0 m では年間を通じてオペレーションの実施が困難であることが分かる。 H_{SL} が 1.5 m に緩和された場合、各月のオペレーションの稼働率は改善するが、 P_{per} と P_{op} の差は酒田沖よりも顕著に表れている。これは、太平洋側の潮岬沖は、日本海側の酒田沖よりも短い期間で海象が変化していることを示唆している。一例として、潮岬沖における 6 月の有義波高の推定結果を図 5.9 に示す。

この様に、オペレーションが可能となる静穏海象が疎らに発生する海域では、ここで提案した作業機会の捉えやすさも評価できる静穏時作業可能確率 (P_{op}) の方が、オペレーションの稼働率評価に対して有効であると考えられる。

表 5.3 潮岬沖における P_{per} (左図) と P_{op} (右図) の比較結果 (3 月)

Occurrence (%)		Window length (h)							
H_{SL} (m)	5<	100.0	100.0	100.0	100.0	96.8	96.8	90.3	
	5	100.0	100.0	100.0	100.0	96.8	96.8	90.3	
	4	100.0	100.0	100.0	100.0	96.8	96.8	90.3	
	3.5	99.6	99.2	98.4	96.8	96.8	96.8	90.3	
	3	96.4	95.2	91.9	87.1	83.9	77.4	77.4	
	2.5	91.1	88.7	88.7	80.6	71.0	67.7	51.6	
	2	75.8	72.6	69.4	61.3	51.6	29.0	38.7	
	1.5	51.1	47.6	43.5	38.7	32.3	19.4	25.8	
	1	17.7	14.5	11.3	3.2	0.0	0.0	0.0	
	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

Occurrence (%)		Window length (h)							
H_{SL} (m)	5<	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	5	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	4	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	3.5	99.6	98.9	98.1	96.7	96.6	96.4	96.3	
	3	96.4	93.0	89.2	82.8	71.9	60.2	47.6	
	2.5	91.1	88.1	84.7	78.9	67.9	56.0	44.4	
	2	75.8	70.0	63.8	54.6	39.3	26.3	16.2	
	1.5	51.1	45.5	40.5	31.5	19.8	10.6	3.5	
	1	17.7	11.1	5.2	0.4	0.0	0.0	0.0	
	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

表 5.4 潮岬沖における P_{per} (左図) と P_{op} (右図) の比較結果 (6 月)

Occurrence (%)		Window length (h)						
		1	6	12	24	48	72	96
H_{SL} (m)	5<	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	93.3
	5	98.5	98.3	96.7	96.7	93.3	90.0	80.0
	4	98.1	97.5	96.7	96.7	93.3	90.0	80.0
	3.5	97.1	95.8	95.0	93.3	86.7	90.0	80.0
	3	96.1	95.0	95.0	93.3	86.7	90.0	80.0
	2.5	88.2	85.8	83.3	80.0	66.7	50.0	40.0
	2	71.1	67.5	61.7	60.0	46.7	20.0	26.7
	1.5	33.2	30.8	28.3	23.3	13.3	0.0	0.0
	1	1.5	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Occurrence (%)		Window length (h)						
		1	6	12	24	48	72	96
H_{SL} (m)	5<	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	5	98.5	97.8	96.9	95.1	91.4	87.4	83.0
	4	98.1	97.3	96.5	94.7	90.9	86.9	82.6
	3.5	97.1	95.7	93.9	90.4	83.7	79.4	74.7
	3	96.1	94.7	92.9	89.4	83.2	78.9	74.2
	2.5	88.2	83.9	78.7	68.0	48.4	32.4	20.8
	2	71.1	66.0	60.1	49.1	29.9	18.0	11.0
	1.5	33.2	29.2	24.4	15.5	0.4	0.0	0.0
	1	1.5	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

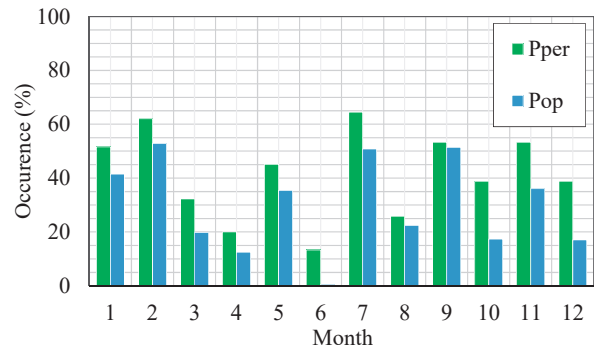
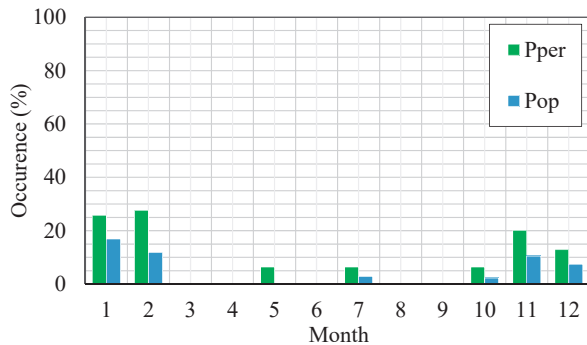
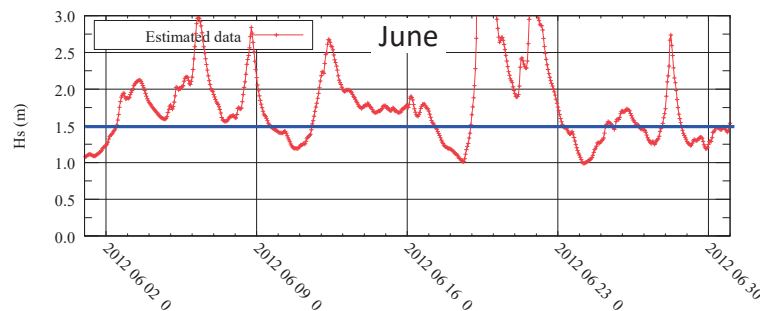
図 5.8 潮岬沖における P_{per} と P_{op} の月別変化（左： $H_{SL}=1.0$ m, $W_L=48$ h, 右： $H_{SL}=1.5$ m, $W_L=48$ h）

図 5.9 潮岬沖における有義波高の時系列（6月）

5.6 待機時間評価

ウェザーウィンドウ解析¹⁹⁾において、作業可能な静穏海象が出現する間隔（以下、待機間隔（ WT ））は、作業に必要なウィンドウ長さが与えられた場合、(5.3)式で定義される。

$$WT = \frac{1}{M_{WT}} \sum_{j=1}^{M_{WT}} WT(i) \quad (5.3)$$

(5.3)式中の M_{WT} , $WT(i)$ は、それぞれ全評価時間内で待機状態が発生した回数、 i 番目の待機間隔を示している。この指標は、単に、作業が出来ない海象条件の平均時間を示しているだけであり、待機時間の期待値を示しているわけではない。例えば、図 5.10 の様に、3 時間の作業時間（ウィンドウ長さが 3 時間）が見込まれるオペレーションを行う場合、 $i-1$ 番目の静穏海象継続時間 $Ph(i-1)$ では、最初の 2 時間以内にオペレーションを開始すれば、静穏海象継続時間内にオペレーションを完了することができる。しかし、オペレーションの開始が遅れれば、静穏海象継続時間内にオペレーションは完了しないので、この場合は待機状態となってしまう。このような考え方を基に、待機時間の期待値（以下、予想待機時間（ FWT ））は、(5.4)式で表すことができる²⁹⁾。

$$FWT = \frac{1}{M_{WT}} \sum_{i=1}^{M_{WT}} \left\{ \frac{\sum_{j=1}^{WT(i)+WL-1} j}{WT(i) + WL - 1} \right\} \quad (5.4)$$

図 5.11~5.14 に酒田沖と潮岬沖において、待機時間評価を行った結果を示す。図 5.11~5.14 には、月別の待機間隔 (WT) と予想待機時間 (FWT) を示している。これらの図から、 WT と FWT は定義が異なる為、定量的な値は一致しないが、月変化の傾向は一致しており、 FWT を待機時間評価の指標として用いることができることが分かる。

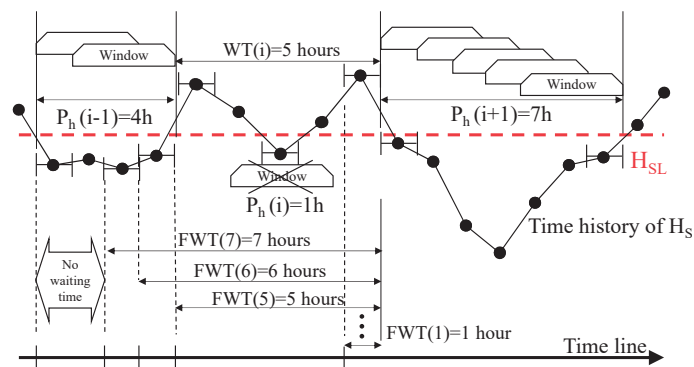


図 5.10 待機間隔 (WT) と予想待機時間 (FWT) の概念図

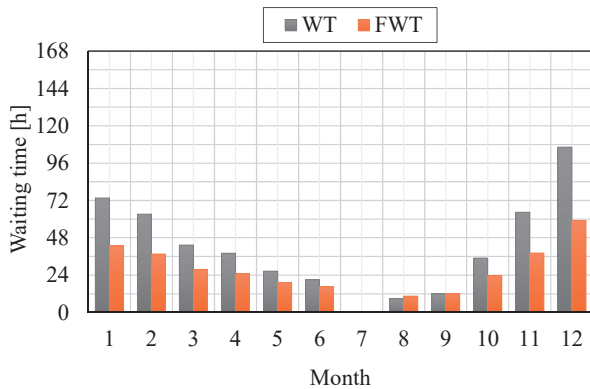


図 5.11 酒田沖における WT と FWT の比較
($H_{SL}=1.5$ m, $WL=12$ h)

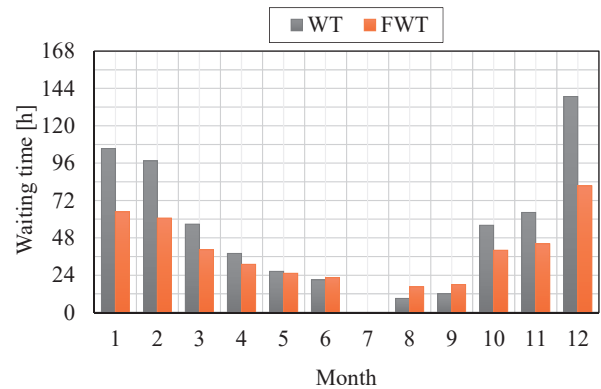


図 5.12 酒田沖における WT と FWT の比較
($H_{SL}=1.5$ m, $WL=24$ h)

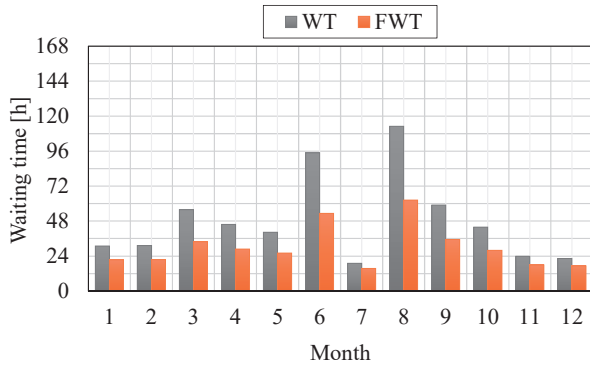


図 5.13 潮岬沖における *WT* と *FWT* の比較
($H_{SL}=1.5$ m, $WL=12$ h)

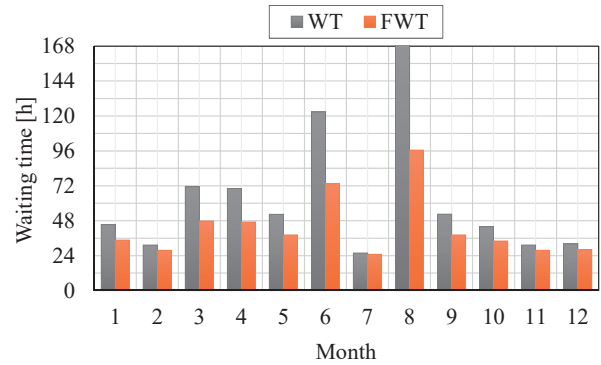


図 5.14 潮岬沖における *WT* と *FWT* の比較
($H_{SL}=1.5$ m, $WL=24$ h)

6. まとめ

当所が整備した各種の気海象推算データベースを用いて、日本沿岸域の海洋再生可能エネルギーポテンシャルの試算、発電装置の設計海象を設定する際に目安となる極値海象条件並びに気海象の発現頻度表の構築、及び発電装置の設置やメンテナンス等の海洋オペレーションを行う際の稼働率評価並びに待機時間評価を行った。

海洋再生可能エネルギーポテンシャルの試算では、発電装置の出力特性及び運転条件を考慮した理論設備利用率という指標を提案し、その指標を用いてエネルギーポテンシャルを推定した。

発電装置の設計海象を設定する際に目安となる極値海象条件並びに海象の発現頻度表の構築では、発電装置の設置海域は離岸距離約 30 km 以内と仮定し、日本沿岸を囲う離岸距離約 30 km の外周ライン上で、海域毎に極値海象条件と標準的な海象の発現頻度表を構築した。

海洋オペレーションの稼働率評価では、従来の稼働率評価指標では評価されなかった、オペレーションの作業機会の捉えやすさも評価する新たな評価手法及び待機時間の期待値の評価手法を提案し、試解析を行って新たな指標の有効性を確認した。

本論で紹介した研究成果が、我が国における海洋再生可能エネルギー利活用を指向する研究開発並びに実証事業等の一助になれば幸いである。

参考文献

- 1) 長井浩, 牛山泉, 上野康男: 日本におけるオフショア風力発電の可能性, 風力エネルギー, Vol. 22, No.1, 1998, pp. 34-37.
- 2) 新エネルギー・産業技術総合開発機構: 局所風況マップ, 2003, <http://app8.infoc.nedo.go.jp/nedo/>.
- 3) 長井浩, 池ヶ谷辰哉, 伊藤正治, 中尾徹: わが国沿岸海域における洋上風力発電の期待可採量, 風力エネルギー, Vol. 34, No.1, 1998, pp. 103-112.
- 4) 環境省地球環境局地球温暖化対策課: 平成 21 年度再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査報告書.
- 5) 伊藤忠テクノソリューションズ: 平成 22 年度新エネルギー等導入促進基礎調査報告書.
- 6) エックス都市研究所他: 平成 22 年度再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査報告書.
- 7) 新エネルギー・産業技術総合開発機構: 洋上風況マップ, http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100551.html.
- 8) 田端竹千穂, 柳生忠彦, 福田功: 日本沿岸における波のエネルギー, 港湾技術研究所資料, No. 364, 1980.
- 9) 高橋重雄, 安達崇: 日本周辺における波パワーの特性と波力発電, 港湾技術研究所資料, No. 654, 1989.

- 10) 前田久明, 木下健: 波浪発電, 生産研究, 31 巻, 11 号, 1979, pp. 717-726.
- 11) Kodaira T., Waseda T., Nakagawa T., Isoguchi O. and Miyazawa Y., 2013, Measuring the Kuroshio Current Around Miyake Island, a Potential Site for Ocean-Current Power Generation, *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, Vol.23, No.4, pp. 272-278..
- 12) Miyazawa, Y., R. Zhang, X. Guo et al., 2009, Water mass variability in the western North Pacific detected in a 15-year eddy resolving ocean reanalysis, *J. Oceanogr.*, in press.
- 13) 清松啓司, 小平翼, 門元之郎, 早稲田卓爾, 高木健: 三宅島近海流況観測とそれに基づく海流エネルギー資源量推定, 日本船舶海洋工学会論文集, Vol. 20, 2014, pp. 147-155.
- 14) 小牧裕幸, 山城徹, 城本一義, 二科文子, 中村啓彦, 広瀬直毅: 海流発電適地選定のためのトカラ海峡周辺海域における黒潮調査, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 69, No. 2, 2013, I-109-I-113.
- 15) NEDO: 平成 22 年度成果報告書海洋エネルギーポテンシャルの把握に係る業務, 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構, 2011.
- 16) 早稲田卓爾, Adrean Webb, 清松啓司, 藤本航, 他 7 名: 初期検討・FS に資する海洋再生可能エネルギー資源量推定一波浪・海流・潮流・温度差発電エネルギーポテンシャル, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 23 号, 2016, pp. 189-198.
- 17) 西田俊策, 赤塚雄三, 和智昭市: 外海におけるケーソン防波堤施工方法の研究, 土木学会論文報告集, Vol. 1969, No. 171, pp. 43-63.
- 18) 石原孟, 山口敦, SARWAR, Muhammad Waheed, 老川進: 洋上風力発電所建設のための海象・気象条件と施工稼働率の数値予測, 風力エネルギー, 2011, Vol. 35 (4), A_7-A_14.
- 19) Michael O'Connor, Tony Lewis and Gordon Dalton, 2013, Weather Window Analysis of Irish and Portuguese Wave Data With Relevance to Operations and Maintenance of Marine Renewables, 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE2013), Vol. 8.
- 20) 渡辺巖, 富田宏, 谷沢克治: 北太平洋の波と風(1974~1988), 船舶技術研究所報告別冊第 14 号, 1992, pp. 1-418.
- 21) 辻本勝, 石田茂資: 日本近海の波と風の統計的性質, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 2 号, 2005, pp. 19-27.
- 22) http://www.nmri.go.jp/wwwjapan/namikaze_main.html.
- 23) 宇都宮好博, 松藤絵理子, 富田雄一郎, 他 5 名: 波浪推算データベースの再構築及び活用について, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), 2012, Vol. 68, No. 2, pp. I_977-I_982.
- 24) T., Taniguchi, S., Ishida, Y., Minami, 2013, A Feasibility Study on Hybrid Use of Ocean Renewable Energy Resources around Japan, Proc. of the 32th International Conference on Ocean, Offshore & Arctic Engineering (OMAE2013).
- 25) 谷口友基, 石田茂資, 井上俊司, 高田篤志: 海洋エネルギーポテンシャルの新しい評価法, 第 24 回海洋工学シンポジウム, 2014.
- 26) 谷口友基, 石田茂資, 藤原敏文, 井上俊司: 20 年間の気海象データによる海洋再生可能エネルギーポテンシャルの評価, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 19 号, 2014, pp. 275-278.
- 27) Chong Ng and Li Ran, 2016, Offshore Wind Farms: Technologies, Design and Operation, Woodhead Publishing Series in Energy.
- 28) http://www.jodc.go.jp/data_set/jodc/jegg_intro_j.html.
- 29) T., Taniguchi, S., Ishida, S., Inoue, A., Takada, 2014, Evaluations of Ocean Renewable Energy Potential by the Theoretical Capacity Factor around Japan, Grand Renewable Energy 2014 International Conference.
- 30) Fergal O'Rourke, Fergal Boyle and Anthony Reynolds, 2010, Tidal Current Energy Resource Assessment in Ireland: Current Status and Future Update, *Antenna & High Frequency Research Centre Articles*.
- 31) 日本風力発電協会: 風力発電の賦存量とポテンシャルおよびこれに基づく長期導入目標とロードマップの算定(Ver. 1.1), 2010.
- 32) 谷口友基, 石田茂資, 藤原敏文, 井上俊司: 海洋再生可能エネルギー発電装置の安全性・性能評価に用いる標準海象の検討, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 19 号, 2014, pp. 279-281.
- 33) 谷口友基, 石田茂資, 藤原敏文, 井上俊司: 静穏海象発現特性の解析および評価法に関する検討, 第 25 回海洋工学シンポジウム, 2015.

- 34) T., Taniguchi, S., Ishida, T., Fujiwara and S., Inoue, 2016, Weather Window Analysis in Connection with Operation and Maintenance of Ocean Renewable Energy Devices, Proc. of the 35th International Conference on Ocean, Offshore & Arctic Engineering (OMAE2016).
- 35) Equimar Deliverable D4.1, 2011, Sea Trial Manual.