

洋上風力発電のための波浪シミュレーションによる海象条件の予測*

Prediction of wave conditions for constructions of offshore wind power plants

山口 敦** 石原 孟** ムハマド ワヒード サーワー*** 老川 進**

Atsushi YAMAGUCHI Takeshi ISHIHARA Muhammad Waheed SARWAR Susumu OIKAWA

1. はじめに

洋上風力発電所を建設する際には、施工稼働率の算定が重要である。海上工事では、波高、波周期、風速がある許容値を超えると、作業が中止される。この許容値は使用する工法や作業船の種類によって異なるため、作業環境の安全性や工事作業の定時性の確保、あるいは作業船種の選択など施工方法に関わる経済性の検討には、風車建設地点における海象・気象条件を高精度に推定するとともに、想定される工法を使用した際の施工稼働率を的確に予測することが不可欠である。

海上における施工稼働率を推定する手法としては観測データに基づく手法がある。しかし、この手法では対象地点における現地観測が必要になるのに加え、観測点周辺の海象・気象条件の空間的な分布を推定できない。一方、近年、海洋構造物等の耐波設計のために第三世代波浪推算モデル SWAN に代表される波浪シミュレーションが広く用いられている。波浪観測期間の短い地点や波浪観測のない地域においては、波浪シミュレーションにより長期間かつ広範囲な波浪データが短時間で得られるようになってきた^{1) 2)}。しかし、これらの研究の殆どは高波浪時を対象としており、施工稼働率の算定に必要な低波浪時の予測精度について不明な点が残されている。

そこで、本研究では、波浪シミュレーションと気象シミュレーションを実施し、季節ごとの波高、波周期、風速の階級別出現時間を求めると共に、観測データを用いてその予測精度を検証する。また許容波高と許容波周期を変化させた場合の月別施工稼働率についても検討する。

2. 波浪推算モデルと気象予測モデル

2.1 波浪推算モデル

波浪推算モデルは、波浪方向スペクトル成分波間の非線形相互作用を評価した第三世代波浪推算モデル SWAN³⁾を用いた。本研究では、図1に示すように2段に

ネスティングした解析領域を設定した。SWAN におけるネスティングは1方向ネスティングであり、外側領域の解析結果を境界条件として、内側領域の解析を実施する。本研究では、日本近海を含む格子解像度 0.2° の領域 I と千葉県沿岸を含む格子解像度 0.05° の領域 II を設定した。表1には波浪シミュレーションの解析条件を示す。

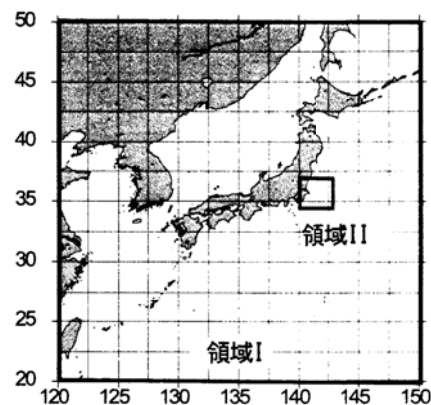


図1 解析領域

表1 波浪シミュレーションの解析条件

	領域 I	領域 II
計算領域 東西 南北	120°~150°E 20°N~50°N	140°E~143°E 34°N~37°N
格子解像度	$0.2^\circ \times 0.2^\circ$	$0.05^\circ \times 0.05^\circ$
解析時間解像度	20 分	10 分
側面境界条件	客観解析値	ネストダウン
海底地形の格子 解像度	$0.25^\circ \times 0.25^\circ$	$0.025^\circ \times 0.025^\circ$
海面境界条件 (10m高度風速)	メソスケールモデル解析値($0.5^\circ \times 0.5^\circ$)	
方向スペクトル 分解能	波向: 10° 周波数: 0.0521Hz から 1 Hz を 32 分割	

海面の境界条件としては、メソスケールモデル MM5(水平解像度 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$)により求めた海面上の風速値を用いる。海底の境界条件としては、領域 I は水平解像度 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 、領域 II は $0.025^\circ \times 0.025^\circ$ の海底地形データを用いた。側面境界条件は、外側の領域 I にはヨーロッパ中期気象予報センター ECMWF が提供している全球波浪客観解析データ ERA40 を用いた。解析時間は 2000 年の 1 年間とした。なお、SWAN による有義波周期の解析結果

* 平成 22 年 11 月 25 日 第 32 回風力エネルギー利用シンポジウム

** 会員 東京大学大学院工学系研究科

*** 非会員 東京大学大学院工学系研究科

〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

は、観測値を過小評価しているため、本研究では、解析による波周期の年平均値と観測による年平均値の比を求め、解析から得られた波周期の時系列データに乗じた。

2.2 気象予測モデル

気象シミュレーションには、コロラド大学で開発されたメソスケール気象モデル RAMS (Regional Atmospheric Modeling System)⁴⁾ を用いた。本研究では、関東地方とその周辺の山岳地帯を覆う領域を含む外側の領域 1 (水平格子間隔 10km) と銚子近傍の海域を含む内側の領域 2 (水平格子間隔 2km) の 2 段にネスティングした解析領域を設定した。表 2 には計算領域と格子間隔を示す。

表 2 気象シミュレーションの計算領域と格子間隔

	領域 I	領域 II
解析領域中心	140°30'E 37°00'N	141°30'E 37°20'N
水平格子間隔	10km×10km	2km×2km
水平格子数	55×84	56×84
鉛直格子間隔	40m ~ 1000m	20m ~ 1000m
鉛直格子数	30	34

全球モデルの客観解析値 (ECMWF Operational Analysis データ) を初期条件と境界条件とし、2000 年 1 月から 1 年間の解析を行い、時系列風速データを作成した。メソスケール気象モデルにより得られた風速には、海陸風、山谷風などの局地循環、大気成層による局地風、水平スケール 1km 以上の地形や粗度変化による影響が含まれているが、1km 以下のスケールの詳細地形の影響は含まれていない。そこで、水平解像度 1km 以下のスケールの微細地形の影響を取り入れるため、非線形風況予測モデル MASCOT (Micro-wind-climate Analysis System for Complex Terrain)⁵⁾ を使い、地域風況を微細地形の効果を考慮に入れた局所風況に変換した。

2.3 検証用の波浪観測データと気象観測データ

波浪シミュレーションの検証に用いる波浪観測データは、鹿島港の南東 3km の位置にあるナウファス鹿島観測地点における 2000 年 1 月から 1 年間の 2 時間毎の有義波高と有義波周期のデータを用いた。また気象シミュレーションの検証に用いた風観測データは、銚子地方気象台の高さ 28.2m において 2000 年 1 月から 1 年間に観測された風向・風速データをもとに、MASCOT の気流解析結果を用いてナウファス鹿島観測地点近傍における洋上高さ 10m の地点に変換した風向・風速データである。

3. 気象・海象条件と施工稼働率の季節特性

本章では、ナウファス鹿島地点における波高、波周期、風速の季節別の出現時間を算出し、精度検証を行う共に、各種許容値が施工稼働率に与える影響を調べる。

年間風速を推定する際には、計算風速から年間のバイアスを差し引くことにより推定誤差が改善されることが嶋田ら⁶⁾により報告されている。本研究では、解析結果と共に各月のバイアス補正を行った後の結果も示した。具体的には、各月の波高、波周期、風速の解析結果の平均値 X_{cal}^{Month} と観測データから得られた平均値 X_{obs}^{Month} から補正係数 $R_{Month} (= X_{obs}^{Month} / X_{cal}^{Month})$ を求め、補正前の時系列データに乗じて、補正後の時系列データを求めた。

3.1 波高、波周期、風速の季節特性

図 2 には、季節ごとの有義波高、有義波周期、風速の階級別非超過確率を示す。図下の横軸は、月あたりの出現時間を示している。図中のプロットは、観測結果を表し、実線、破線、一点鎖線は解析気象結果を表し、細線は月バイアス補正後の解析結果を示す。

まず、有義波高が 1.0m 未満の合計時間は、春季、秋季、冬季では月あたり 5~8 日程度であるのに対して、夏季では 23 日に大きく増大する。この波高の出現時間の季節変化は、施工稼働率の季節変化に大きな影響を与える。また解析から得られた波高の秋季と冬季の出現時間は観測値との差が大きい。これは、秋季と冬季の波高が 1.0m 前後であるため、波高のわずかの予測誤差が出現時間の再現性に大きな影響を与えるからである。月バイアスを補正することにより、波高の出現時間の予測精度が向上した。

次に、有義波周期 8s 未満の合計時間は、月あたり 11~20 日程度であり、波高のような大きな季節変化は見られない。春季、秋季、冬季の解析結果は観測値をよく再現しているが、夏季の解析結果は月バイアス補正の有無によらず、観測値の出現時間を 1.5 倍ほど過大評価しており、今後さらに改善していく必要がある。

最後に、風速 10m/s 未満の合計時間は、四季を通じて月あたり 25~27 日と波高、波周期に比べ、出現時間が長い。このことから、風速は施工稼働率に与える影響が小さいことが予想される。また月バイアスを補正した風速の解析結果は季節によらず観測値をよく再現している。

3.2 施工稼働率の季節特性

施工稼働率は、波高、波周期、風速のすべての許容値を下回る時間と全時間との比として定義されている。通常、風速の許容値は 10m/s であるため、本研究では、風速の許容値を 10m/s の一定値とし、許容有義波高と許容有義波周期を変化させ、月別施工稼働率の変化を調べる。

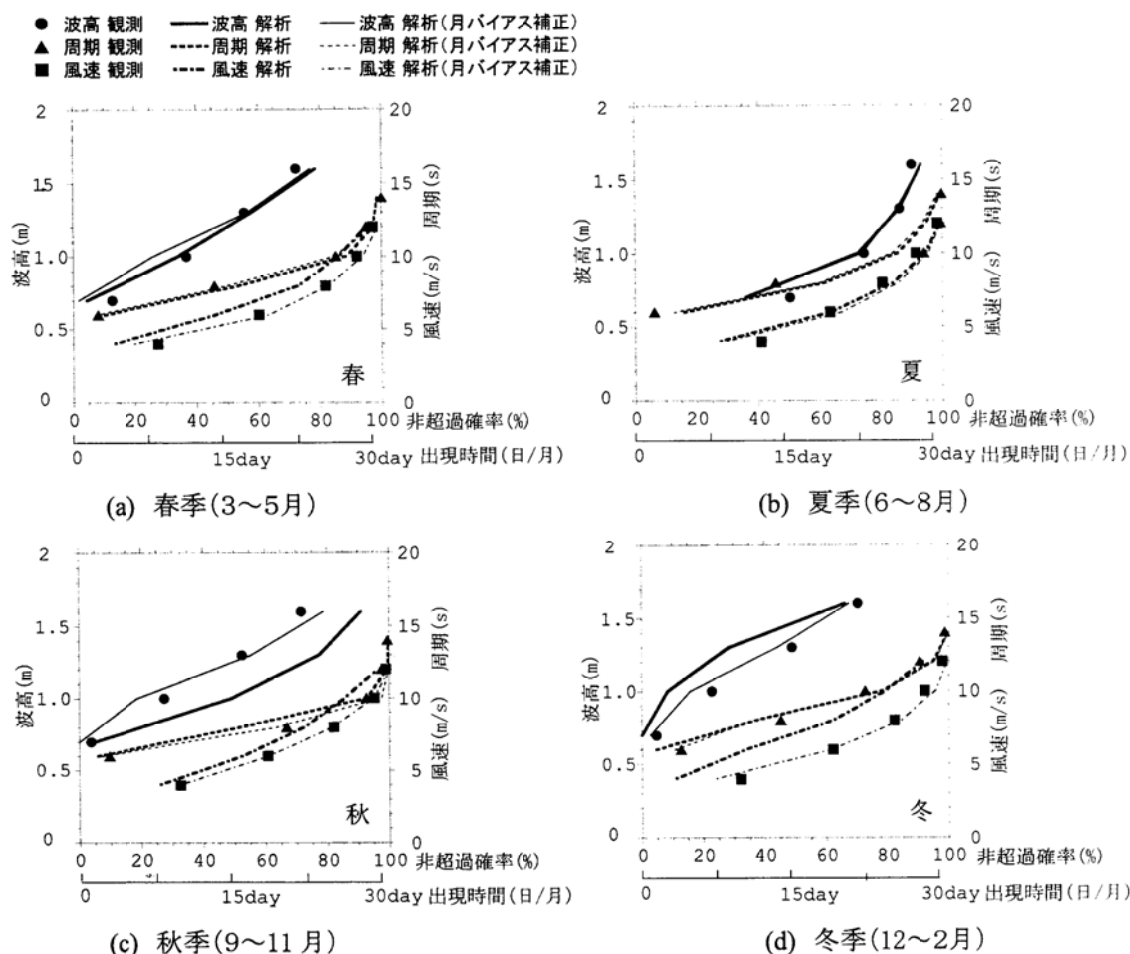


図2 季節別の波高、波周期、風速の非超過確率

図3には、有義波周期の許容値を8sの一定値にした時の月別施工稼働率の許容波高による変化を示す。ここで、許容波高は0.7m、1.0m、1.3mの3種に変化させた。図3(a)には観測値、図3(b)には解析結果を示す。許容波高0.7mでは、夏季の6月と7月の施工稼働率が高いが、春季、秋季、冬季の施工稼働率は著しく低い。これは、波高の季節別の出現頻度(図2)の傾向と同じである。許容波高を1.0m、1.3mへと高くすると、夏季のみならず、春季、秋季、冬季の施工稼働率も高まる。このことから、施工船の性能を向上させることにより、年間の施工稼働率を上げることができることが分かる。図3(b)に示すように解析から得られた施工稼働率は、夏季に過大評価をしているものの、観測から得られた施工稼働率を概ね再現している。

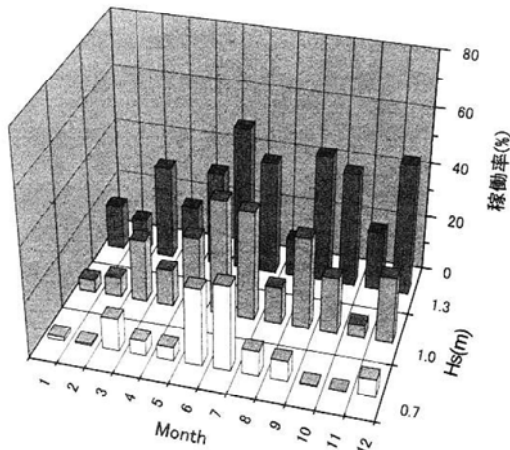
図4には有義波高の許容値を1.0mの一定値にした時の月別施工稼働率の許容波周期による変化を示す。許容波周期は、8s、10s、12sと3種変化させた。許容波周期8sでは夏季の6月と7月の施工稼働率が高い。許容波周期を8sから10sへ上げることにより夏季の施工稼働率は大きく上昇するが、他の季節の施工稼働率は波高1.0mの出現時間(図2)によって制限されるため、その増加は小さい。

また許容波周期を12sにしても、波周期10sとの出現時間の差が小さいため(図2)、施工稼働率の増加は小さい。解析から得られた夏季の施工稼働率は、許容波周期値8sの場合に観測値を過大評価しているものの、許容波周期値10s、12sの場合には観測値を概ね再現している。

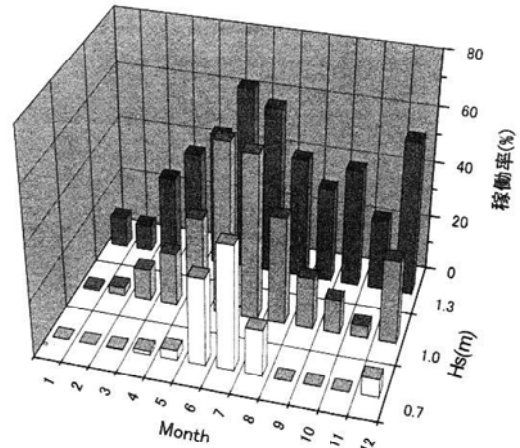
4. まとめ

本研究では、波浪シミュレーションと気象シミュレーションを実施し、季節ごとの波高、周期、風速の階級別出現時間を求めると共に、その予測精度の検証および施工稼働率の季節特性の検討を行い、以下の結論を得た。

- 1) 1.0m未満の有義波高の季節別の出現頻度は、夏季に高く、春季、秋季、冬季に低い。一方、8.0s未満の有義波周期の季節変化は小さい。10m/s未満の風速の出現頻度は季節によらず同じ傾向を示す。波浪シミュレーションと気象シミュレーションにより求めた各季節の有義波高と風速の出現時間は、月バイアスを補正することにより、観測値を精度よく再現できる。一方、波浪シミュレーションによる有義波周期の夏季の出現時間はバイアスを補正しても観測値を過大評価する。

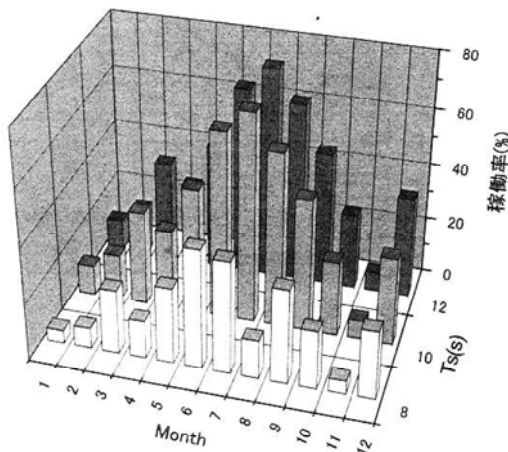


(a) 観測から求めた施工稼働率

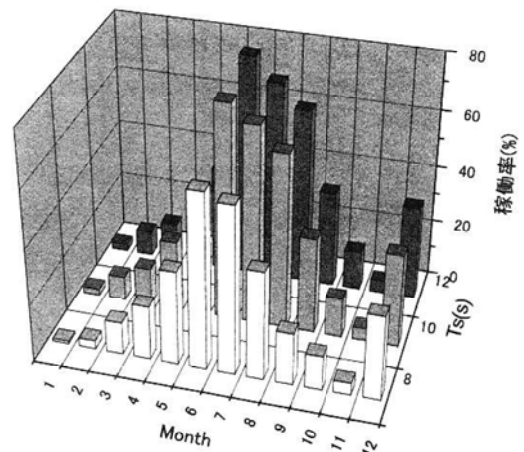


(b) 解析から求めた施工稼働率

図3 月別施工稼働率の許容波高による変化(有義波周期の許容値を8sの一定値にした場合)



(a) 観測から求めた施工稼働率



(b) 解析から求めた施工稼働率

図4 月別施工稼働率の許容波周期による変化(有義波高の許容値を1.0mの一定値にした場合)

2) 許容波高を高くした場合には、夏季の施工稼働率の向上とともに春季、秋季、冬季の施工稼働率も向上する。一方、許容波周期を長くした場合には、夏季の施工稼働率は顕著に増大するが、他の季節の施工稼働率の増加は小さい。施工稼働率の解析結果は、夏季に過大評価されるものの、観測から求められた施工稼働率の月変化を概ね再現している。

謝辞

本研究は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務で得られた研究成果である。また波浪シミュレーションに関しては、岐阜大学の小林智尚教授にご指導とご協力を賜った。ここに記して関係者の皆様に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 川口浩二, 橋本典明, 鈴山勝之: 波浪推算値に基づく日本沿岸波浪の出現特性について, 海岸工学論文集, 49, pp. 216-220, 2002.
- 2) 小林智尚, 佐々木博一, 吉野純, 安田孝志: ERA40 にもとづく日本列島周辺長期波浪データ, 海岸工学論文集, 54, pp. 141-145, 2007.
- 3) Booij, N. R., Ris, R. C. and Holthuijsen, L. H.: A third-generation wave model for coastal regions, Part I, J. Geophysical Research, Vol.104, No.C4, 1999.
- 4) Pielke, R. A. Cotton, W.R., Walko, R. LO., Tremback, C. J., Lyons, W. A., Grasso, L. D., Nicholls, M. E., Moran, M. D., Welsey, D. A., Lee, T. J., and Copeland, J. H.: A Comprehensive Meteorological Modeling System - RAMS, Meteorol. Atmos. Phys., 49, 69-91, 1992.
- 5) 石原孟, 山口敦, 藤野陽三: 複雑地形における局所風況の数値予測と大型風洞実験による検証, 土木学会論文集, No.731/I-63, pp.195-211, 2003.
- 6) 嶋田進, 大澤輝夫, 武藤裕則, 鈴木崇之, 久保輝広: 白浜海象観測所におけるメソ気象モデル WRF の海上風計算精度, 第31回風力エネルギー利用シンポジウム, pp.153-156, 2009.