

気象・海象シミュレーションを利用した 洋上風力発電所の施工継続時間の評価*

Assessment of weather window for the construction of offshore wind power plants
by using wind and wave simulations

菊地由佳**

Yuka KIKUCHI

石原孟***

Takeshi ISHIHARA

1. 序論

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、風速に関してそれぞれ作業限界値を有し、またこれらの限界値は、施工法や作業船の種類によって異なる。実際の施工においては、作業限界値以下の気象・海象条件が数時間以上継続することが求められる。海上作業の安全性や定時性の確保、及び作業船種の選択によ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、石原らは気象・海象シミュレーションを用いて施工稼働率を評価している¹⁾。しかし、風車が建設される外洋での観測データが存在せず、予測精度の検証が問題であった。一方、2012年に千葉県銚子沖洋上風力発電所が建設され、風と波の観測データが同時に得られた。また、気象シミュレーションについて福島、山口、石原²⁾が地形、土地利用および海面水温が予測値に与える影響を明らかにするとともに、海象シミュレーションについて種本、石原³⁾が波浪推算モデルと合成風速場を用いた風波とうねりの数値予測手法を提案しており、近年その予測精度が向上している。

そこで、本研究では、最新の気象・海象シミュレーションの予測精度を銚子沖洋上風力発電所における観測データを用いて確認する。次に、季節別の風速、波高、波周期の階級別出現時間を求め、その予測精度を検証すると共に、バイアス補正を行い低波高・短周期における予測精度を向上する。さらに、気象・海象シミュレーションを用いて施工継続時間を評価し、限界波高を変化させた場合の月別施工稼働率の予測精度について検討する。

2. 波浪推算と気象予測

風速の時系列データを得るために、メソスケールモデル WRF Ver3.4.1 (Weather Research and Forecasting)⁴⁾を用いた。解析領域を図1に示すように水平解像度を18km, 6km, 2kmとして設定した。また、海面水温データとして英国気象庁の OSTIA (Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis) を用いた。解析の詳細は、参考文献2)を参照されたい。

波高及び波周期の時系列データを得るために、NOAA/NCEPにより開発された WW3 Ver3.14 (Wave Watch III)⁵⁾を用いた。解析領域は4段階に設定し、領域1の海面境界条件には全球客観解析値であるNCEP-FNLを、領域2~4ではメソスケールモデルWRFの予測風速を用い、水平解像度はそれぞれ18km, 6km, 2kmとした。また、熱帯低気圧襲来時には種本・石原によるメソスケールモデルと台風モデルの合成風速場を用いた。有義波高、有義波周期はスペクトルと代表波の統計的な関係に基づいて計算した。解析の詳細は参考文献3)を参照されたい。

気象・海象シミュレーションは、千葉県銚子沖洋上風力発電所建設地点において2013年2月から2014年1月の期間実施した。予測精度の検証に用いる風・波浪観測データは、銚子沖洋上風力発電所に設置された波高計によって観測された20分間平均有義波高と20分間平均有義波周期、およびライダーによって計測された高さ80m地点における10分間平均風速を用いた。

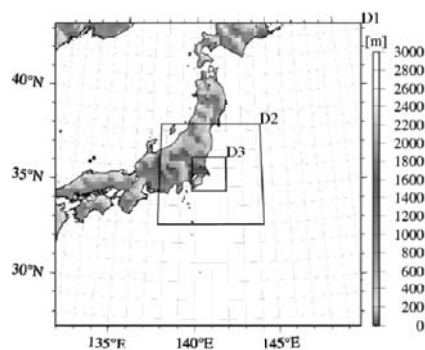


図1 解析領域の設定

* 平成26年11月28日第36回風力エネルギー利用シンポジウムにて講演

** 学生会員 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻
〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1

*** 会員 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻

3. 気象・海象条件の予測と観測値による検証

気象・海象シミュレーションによる風速、波高、波周期の予測精度を、観測データを用いて検証した。図2には、夏季と冬季の代表として7月と1月の有義波高、有義波周期、風速の予測値と観測値との比較を示す。図中のプロットは観測値を表し、実線は解析値を表す。また、図3には月別平均値の予測値と観測値との比較を示し、表1には月別平均値の予測値の観測値との相対誤差およびその絶対値の年平均相対誤差を示した。

風速について、7月の予測値は、観測値を概ねよく再現すると共に、高風速をよく捉えている。1月の予測値は、約3日周期のサイクルをよく再現している。月別相対誤差は、春季、秋季に高く、夏季に低くなる特徴をよく再現している。月別相対誤差は-2.7~9.3%の範囲にあり、冬季の相対誤差が大きい。これは、海面水温の誤差が冬季では大きいことに起因すると考えられている²⁾。月別相対誤差の絶対値の年平均値は4.3%である。

有義波高について、7月の予測値は、静穏期のうねりに伴う低波高と前線による高波浪、1月の予測値は、季節風による高波高の周期的変化の特徴を概ね再現している。しかし、波高1m以下の低波高領域で観測

値を過小評価している。月別平均値は、夏季に低く、冬季には高くなる太平洋沿岸の特徴を概ね再現しているが、秋季、冬季では観測値との差異がみられる。これは夏季の静穏な時期は波高の再現性はよいが、秋季、冬季では低気圧による高波高の再現性が低い時があるためである。月別相対誤差は-27.7%~13.3%の範囲にあり、1月の相対誤差が最も大きくなった。月別相対誤差の絶対値の年平均値は12.3%である。

有義波周期について、7月の予測値では、うねりによる長周期を再現しているが、短周期領域で過小評価している。1月の予測値では、7月と同様に、予測値は観測値を概ね再現しているが、短周期領域で過小評価がみられる。月別平均値は、6~10秒の範囲にあり、解析値は、冬季に長めの周期となり夏季に短めの周期となる傾向を再現しているが、夏季に過小評価している。月別相対誤差は-15.9%~6.9%の範囲にあり、7月の相対誤差が最も大きい。月別相対誤差の絶対値の年平均値は7.8%である。

低波高・短周期領域における過小評価は、施工稼働率の評価に影響を与えるため、次章において、季節別の階級別出現時間を求め、その影響を調べる。

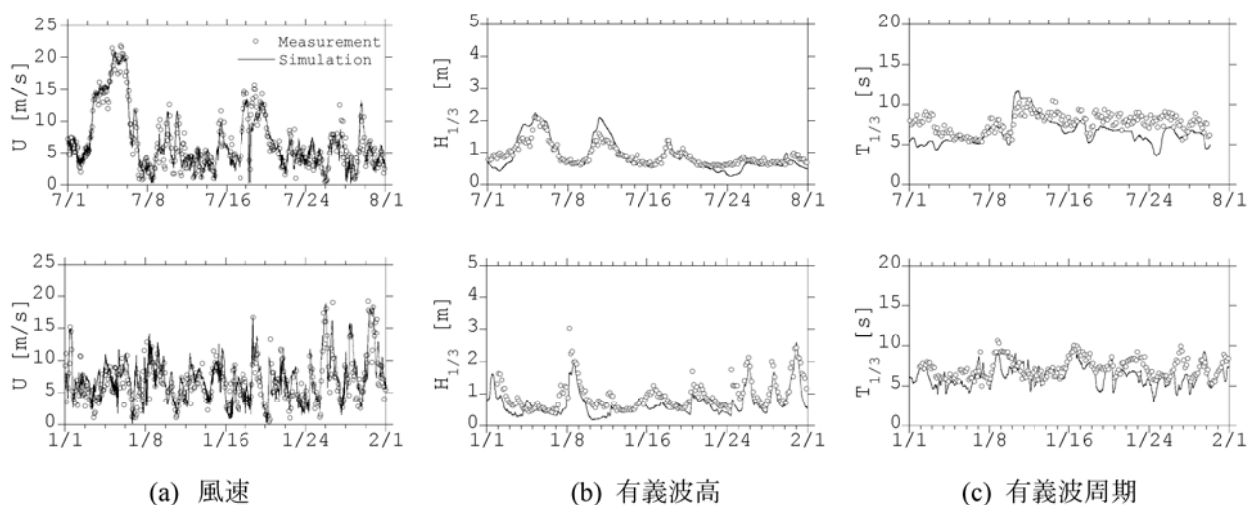


図2 夏季（上段）・冬季（下段）における風速・有義波高・有義波周期の予測値と観測値との比較

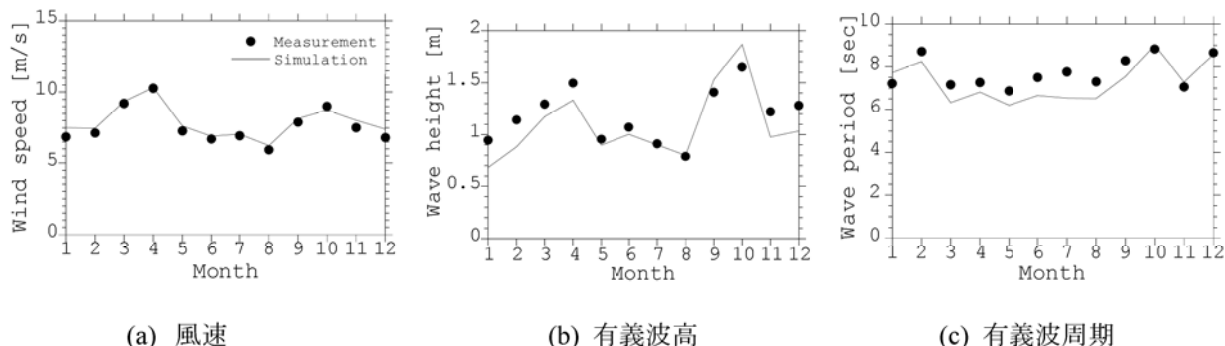


図3 風速・有義波高・有義波周期の月別平均値の予測値と観測値との比較

表 1 月別平均値の予測値と観測値との相対誤差および相対誤差の絶対値の年平均値 (%)

	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	平均
風速	4.4	1.6	0.3	4.9	2.7	1.7	5.2	3.2	-2.7	7.1	8.8	9.3	4.3
波高	-27.7	-22.9	-9.2	-11.1	-6.07	-6.6	-1.4	1.3	8.6	13.3	-20.0	-19.1	12.3
波周期	6.9	-5.3	-11.8	-6.2	-9.9	-11.3	-15.9	-10.7	-8.9	2.0	3.2	-0.9	7.8

4. 気象・海象条件と施工稼働率の季節変化

4.1 気象・海象条件の季節変化と予測値の補正

観測値、予測値を用いて、風速、有義波高、有義波周期の季節変化を求めた結果を図 4 に示す。

風速の観測値（黒四角）について、10 m/s 未満の合計時間は、四季を通じて月あたり 20~25 日と長く、風速が施工稼働率に及ぼす影響が少ないことが分かる。春季、夏季、秋季において予測値の出現時間は観測値をよく再現しているが、冬季において少し過小評価している。

有義波高の観測値（黒丸）について、1.0 m 未満の合計時間は、春季、秋季では月あたり 15 日を下回るのに対し、冬季は 15 日程度、夏季は 20 日程度に増加する。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。予測値は、四季を通じて波高 1 m 以下の領域で出現時間を過大評価した。冬季は、波高 1 m 以上の領域でも出現時間を過大評価しており、風速の過小評価と対応していると考えられる。

有義波周期の観測値（黒三角）について、8 秒未満の合計時間は、四季を通じて、月あたり 15~20 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。予測値は、周期 8 秒以下の領域で出現時間を過大評価した。

低波高・短波周期領域にみられた予測値の過小評価を解消するため、波高の予測値 $H_{1/3, pred}$ に対して 0.25m ごと、波周期の予測値 $T_{1/3, pred}$ に対して 1 秒ごとのビンを設定し、ビンごとに予測値の平均値と実測値の平均値の差であるバイアス $\beta_{H1/3}$ 、 $\beta_{T1/3}$ を評価した。評価したバイアスは最小二乗法によって式(1)、(2)で近似され、この式を用いてバイアス補正を行った。

$$\beta_{H1/3} = 0.16H_{1/3, pred} - 0.25 \quad (1)$$

$$\beta_{T1/3} = 0.34T_{1/3, pred} - 3.01 \quad (2)$$

また、施工稼働率の評価では、作業継続時間の評価が問題となり、平均化時間の違いによる標準偏差の変動の影響が大きい。そこで、石原らによる論文⁶⁾を参考に、予測値の平均化時間を補正した。

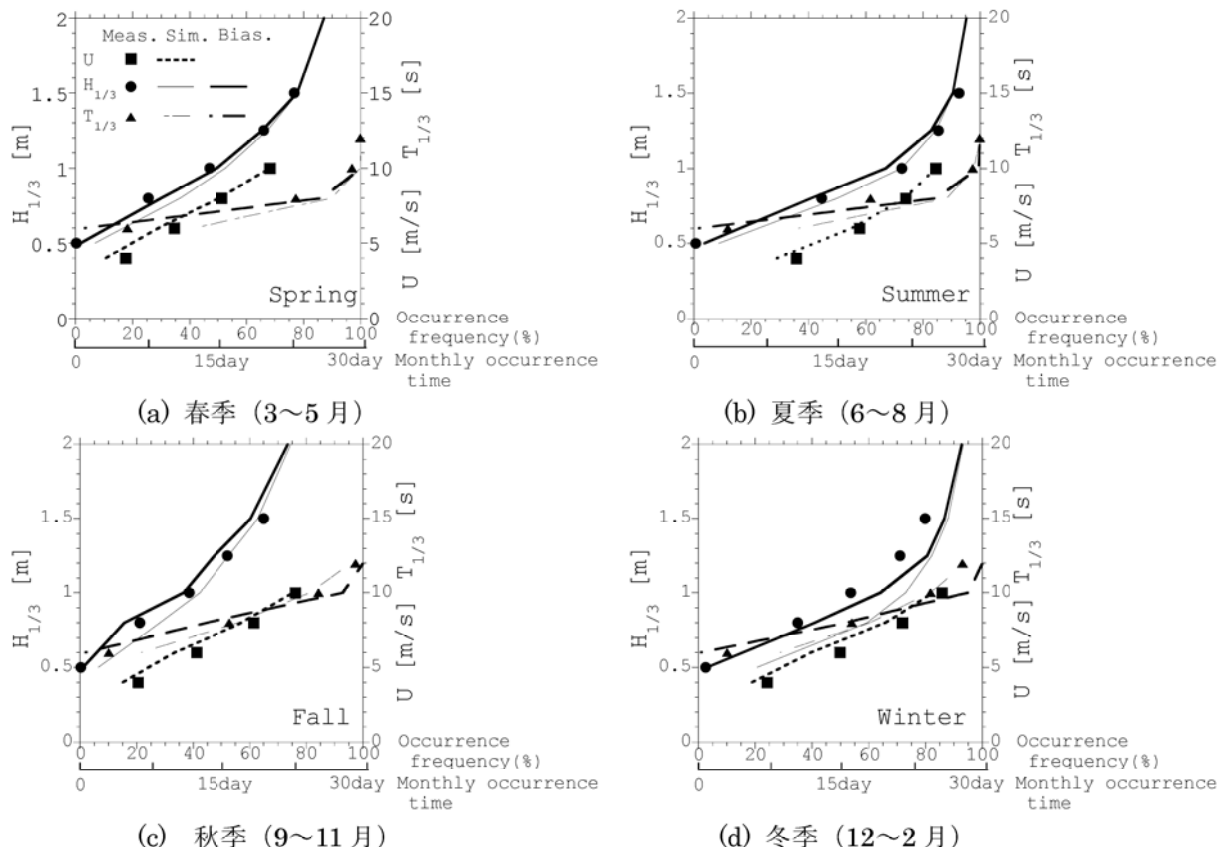
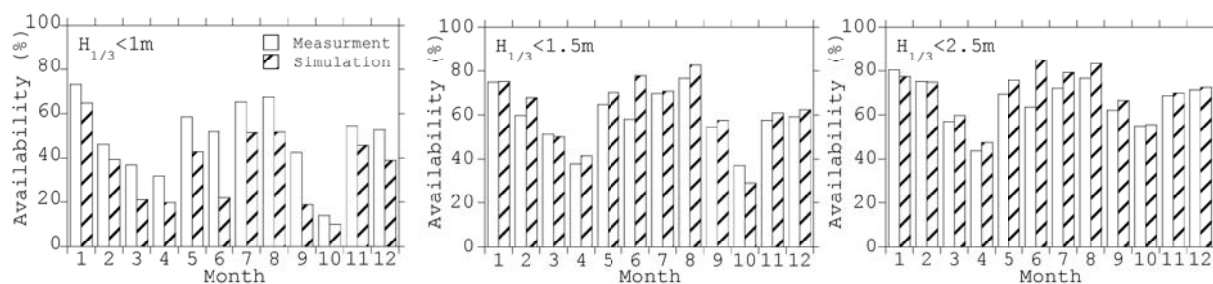


図 4 有義波高、有義波周期、風速の観測値・予測値および予測補正值による季節別頻度分布の比較



(a) 有義波高 1.0m 以下

(b) 有義波高 1.5m 以下

(c) 有義波高 2.5m 以下

図5 観測値と補正した予測値による月別施工稼働率の比較

バイアスおよび平均化時間を補正した予測値を太線で図4に示す。補正した予測値は、波高 1.0 m 以下、周期 6 秒以下の出現時間の評価精度が大きく向上したが、周期 8 秒以下の出現時間を過大評価している。

4.2 施工稼働率の季節変化

観測値および補正した予測値を用いて施工稼働率を評価した結果を図5に示す。施工可能時間は、風速 10 m/s 以下のもと、限界波高がそれぞれ 1.0 m, 1.5 m, 2.5 m 以下の状態が 6 時間以上続く場合とした。

観測値による施工稼働率の評価は、夏季・冬季に高く、春季・秋季に低い傾向を示している。これは、春季・秋季に台風が来襲する影響である。波高の限界値 1.0 m, 1.5 m, 2.5 m に対して、施工稼働率の年平均値は 49.6 %, 58.4 %, 66.3 % となり、波高の作業限界値によって施工稼働率が大きく変わることが分かる。

補正した予測値による施工稼働率の評価は、夏季・冬季に高く、春季・秋季に低い結果をよく再現しているが、波高 1.0 m 以下の条件で過小評価している。また、作業船は波周期に対しても作業限界値を有するため、周期 10 秒以下という条件を加えて施工稼働率を評価した結果、図5とほぼ同じ傾向であることを確認した。

5. まとめ

本研究では、最新の気象・海象シミュレーションの予測精度を銚子沖洋上風力発電所における観測値を用いて検証するとともに、波高、波周期、風速と施工稼働率の季節変化の検討を行い、以下の結論を得た。

- 1) 気象・海象シミュレーションによる風速、波高、波周期の予測値は、夏季の低波高と低風速、冬季の高波高と高風速の特徴をよく再現しており、予測値の実測値に対する月別予測誤差の絶対値の年平均値は、それぞれ 4.3%, 12.3%, 7.8% である。
- 2) 観測値と予測値を用いて、季節別の風速、波高、波周期の階級別出現時間を求めた。風速の予測値は出現時間を精度良く再現したが、波高、波周期の予測値は、特に低波高・短周期の領域で観測値

を過大評価した。バイアス補正を行い、低波高・短波周期における出現時間の予測精度を向上した。

- 3) 施工稼働率は、夏季・冬季に高く春季・秋季に低い傾向がある。限界波高 1m, 1.5m, 2.5m に対して施工稼働率は 49.6%, 58.4%, 66.3% となり、波高の作業限界値によって、施工稼働率が大きく変わることが分かった。予測値による施工稼働率の評価は実測値を再現したが、限界波高 1m 以下の評価精度をさらに向上する必要がある。

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。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) 石原孟, 山口敦, 老川進, ムハンマドワヒードサーワー, 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, 風力エネルギー学会論文集, pp.7-14, 2012.
- 2) 福島雅人, 山口敦, 石原孟, メソスケールモデルを用いた洋上風況予測と不確実性の評価, 第36回風力エネルギー利用シンポジウム, 2014.
- 3) 種本純, 石原孟, 波浪推算モデルと合成風速場を用いた風波とうねりの数値予測, 風力エネルギー学会論文集, No.112, 2015. (印刷中)
- 4) W. C. Skamarock, J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, W. Wang, and J. G. Powers, A description of the advanced research WRF version 3, NCAR Tech. Note, 2008.
- 5) H. L. Tolman, User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 3.14, NOAA/NWS/NCEP/MMAB Technical Note 276, pp.194, 2009.
- 6) T. Ishihara, A. Yamaguchi, Prediction of the extreme wind speed in the mixed climate region by using Monte Carlo simulation and Measure-Correlate-Predict method, Wind Energy, 2014.