

# 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稼働率の評価

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

菊地由佳<sup>\*1</sup>  
Yuka KIKUCHI

石原孟<sup>\*2</sup>  
Takeshi ISHIHARA

<sup>\*1</sup>Research Associate, Department of Civil Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo Bunkyo Tokyo, 113-8656, Japan, Fax:+81-3-5841-1147, E-mail: kikuchi@bridge.t.u-tokyo.ac.jp

<sup>\*2</sup>Professor, Department of Civil Engineering, The University of Tokyo

## Abstract

In this study, the workability was assessed for offshore wind farm construction by using the numerical simulations for winds and waves. The predicted wind speeds, significant wave heights and significant wave periods were compared with measurements. Annual average values of absolute monthly error of wind speed, significant wave height and significant wave period were 4.30%, 12.3% and 7.8%, respectively. Then, seasonal occurrence times were examined for measured and predicted wind speeds, significant wave heights and significant wave periods. Predicted wave heights smaller than 1.0 m and predicted wave periods smaller than 6 s overestimated the measurements. The biases of predictions were modeled with linear equations and corrected to improve the accuracy of predictions. Construction records and work criteria of Choshi and Kitakyushu offshore wind farms were investigated and the sensitivity of construction methods on weather downtime were investigated. Choshi had a high sensitivity where the wave condition is severe, while Kitakyushu had a low sensitivity where the wave condition is mild. Finally, the weather downtimes were assessed with the investigated criteria and predicted wind and wave conditions, which had a good accordance with the records.

キーワード：洋上風力発電所，海象・気象条件，数値予測，施工稼働率

Key Words：offshore wind power plant, wave and wind simulations, weather downtime

## 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、風速に関してそれぞれ作業限界値があり、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気象・海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が<sup>1)</sup>、SWANを用いた海象シミュレーションで波周期の予測精度に課題があるとともに、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。さらに沖合における洋上風力発電所の建設実績がないため、作業限界値が不明であった。一方、気象シミュレーションについては、福島ら<sup>2)</sup>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は、種本、石原<sup>3)</sup>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することにより、近年その予測精度を向上した。また、2012年に千葉県銚子沖洋上風力発電所および福岡県北九州沖洋上風力発電所が運開し、風と波の観測データが同時に得られるとともに、施工方法も明らかとなった。

そこで、本研究では、まず、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検証する。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、銚子沖、北九州沖洋上風力発電所における作業中止条件を調べ、気象・海象シミュレーションを用いた施工稼働率の予測精度を明らかにする。

\*1 東京大学大学院工学系研究科助教  
E-mail: kikuchi@bridge.t.u-tokyo.ac.jp  
〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

\*2 東京大学大学院工学系研究科教授  
(原稿受付：2015年6月11日)

## 2. 気象・海象シミュレーションと観測

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) <sup>4)</sup> を用いた。WRF は、積雲パラメタリゼーション、雲微物理過程、放射過程、大気境界層過程等の大気力学、熱力学に関するあらゆる物理過程を含む非静力学、完全圧縮の気象モデルである。解析領域は Fig.1 に示すよう 3 段階に設定し、水平解像度を 18km, 6km, 2km とした。気象データとして NCEP (National Center for Environmental Prediction) の全球解析データ、地形データとして国土地理院 50m メッシュ標高データおよび国土数値情報 100m メッシュ土地利用データ、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。計算条件を Table 1 にまとめる。

波高及び波周期の時系列データを得るために、WW3 Ver3.14 (Wave Watch III) <sup>5)</sup> を用いた。直交 2 次元空間上における波浪スペクトルのエネルギー変化は以下のように表される。

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} (c_x N) + \frac{\partial}{\partial y} (c_y N) + \frac{\partial}{\partial \sigma} (c_\sigma N) + \frac{\partial}{\partial \theta} (c_\theta N) = \frac{S}{\sigma} \quad (1)$$

ここで  $N(\sigma, \theta)$  は作用密度であり、波数  $\sigma$  を乗じることにより波のエネルギー  $E(\sigma, \theta)$  が求まる。 $\theta$  は方向を表す。 $c_x, c_y, c_\sigma, c_\theta$  は、それぞれ空間  $(x, y)$  における  $x, y$  方向の進行速度及びスペクトル空間  $(\sigma, \theta)$  における  $\sigma, \theta$  方向の進行速度で、以下のように表せる。

$$c_x = c_g \cos \theta, c_y = c_g \sin \theta, c_\sigma = \frac{\partial}{\partial t} \sqrt{gk \tanh(kh)} \quad (2)$$

$$c_\theta = \frac{c_g}{c} \left( \sin \theta \frac{\partial c}{\partial x} - \cos \theta \frac{\partial c}{\partial y} \right) \quad (3)$$

また、エネルギーソース項  $S$  は、次式で表せる。

$$S = S_{in} + S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{db} \quad (4)$$

ここで  $S_{in}$ ,  $S_{in}$  はそれぞれ線形的、非線形的な風から波へのエネルギー伝達を表し、 $S_{nl}$  は 4 波共鳴と呼ばれる波の非線形相互作用をモデル化した項である。 $S_{ds}$ ,  $S_{bot}$ ,  $S_{db}$  は、白波、海底摩擦、砕波による散逸項である。デフォルト設定に用いられている各ソース項のモデルを Table 3 に示す。

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。合成風速場における風速は式(5)で表される。

Table 1 WRF parameters and schemes

	Domain 1	Domain 2	Domain 3
Calculation time	2013.2 – 2014.1		
Spin-up	More than 10 days		
Domain	133°-149°E, 28.0°-44.0°N	138.5°-142.5°E, 33.5°-37.5°N	139.7°-141.3°E, 34.7°-36.3°N
Vertical resolution	45 levels (Surface to 50 hPa)		
Horizontal resolution	18km (100 × 100 grids)	6km (100 × 100 grids)	2km (100 × 100 grids)
Meteorological data	NCEP-FNL 1°×1° 6-hourly		
Sea surface temperature	OSTIA 0.05°×0.05° 6-hourly		
Geographical data	Elevation: Geographical Survey Institute 50m Landuse: National Land Information Division 100m		
Time step	72s	24s	8s
Microphysics scheme	Ferrie (new Eta) microphysics scheme		
Planetary boundary layer	Mellor-Yamada-Janlic TKE level2.5 scheme		
Surface layer	Monin-Obukhov (Janjic Eta) scheme		
Land surface	Unified Noah land surface scheme		
4DDA	Grid nudging (excluding domain 3)		

Table 2 WW3 parameters and schemes

	Domain 1	Domain 2	Domain 3	Domain 4
Calculation time	2013.2 – 2014.1			
Spin-up	More than 10 days			
Horizontal resolution	0.5°×0.5° (161×121 grids)	0.2°×0.2° (81×81 grids)	0.05°×0.05° (81×81 grids)	0.02°×0.02° (81×81 grids)
Domains	110°-190°E, 0.0°-60.0°N	133°-149°E, 28.0°-44.0°N	138.5°-142.5°E, 33.5°-37.5°N	139.7°-141.3°E, 34.7°-36.3°N
Bathymetry	ETOPO2		ETOPO1	
Sea surface boundary	NCEP-FNL(1.0°) Or NNRP(2.5°)	WRF(18km)	WRF(6km)	WRF(2km)
Lateral boundary	Open	Nest down (2-way nesting)		
Spectrum resolution	36 directions and 36 frequencies (0.0345~0.97Hz)			

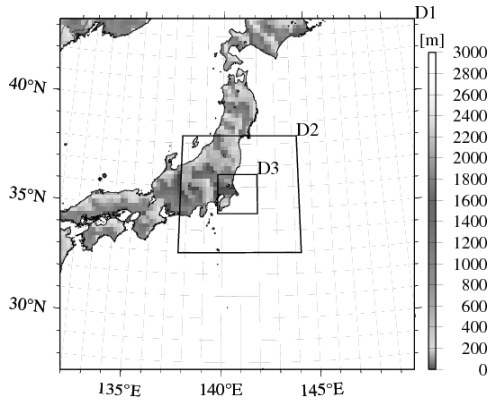


Fig. 1 Computational domain for WRF

$$u_c = Wu_T + (1-W)u_M \quad (5)$$

ここで  $u_M$  は気象モデルの予測風速,  $u_T$  は石原らが提案した台風モデルの風速である. また,  $W$  は重み関数であり, 台風の中心に近い場所ほど台風モデルの風速場が重みをもつ.

波浪モデルはスペクトル法により, 波高, 周期を計算している. 一方, 観測値はゼロアップクロス法で有義波高, 有義波周期を計算する. 本研究では, 有義波高及び有義波周期は, 式(6)及び式(7)で表されるスペクトルとの統計的な関係を用いて求めた.

$$H_s \approx 0.956 H_{m0} = 0.956 \times 4\sqrt{m_0} \quad (6)$$

$$T_s \approx T_{m-1.0} = \frac{m_{-1}}{m_0} \quad (7)$$

ここで,  $m_n$  は  $n$  次モーメントであり, 波浪モデルのエネルギースペクトル  $E(f, \theta)$  と周波数  $f$  の積を積分した式(8)で表される.

$$m_n = \iint f^n E(f, \theta) df d\theta \quad (8)$$

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の予測風速を用いた. 太平洋を伝わるうねりを予測するために, 領域1の大きさを変更した数値実験を行い, 有義波周期の予測値が計算領域に依存しなくなる最小の領域を領域1として決定している. 計算条件をTable 2に示す.

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. Table 4には, 波浪と気象の観測概要を示す. 観測期間は2013年2月から2014年1月である.

Table 3 Parameters in WW3

$S_{lin}$	Cavaleri and Malanotte-Rizzoli (1981)
$S_{inn}$	Tolman and Chalikov (1996)
$S_{nt}$	Hasselmann et al. (1985)
$S_{ds}$	Tokman and Chalikov (1996)
$S_{bot}$	Hasselmann et al. (1985)
$S_{db}$	Bettjes and Janssen (1987)

Table 4 Description of wave and wind observation

Wave	Observation period	2013.2-2014.1
	Location	N35°53'55" E140°45'14"
	Water depth	15m
	Measuring instrument	Ultrasonic Wave Detector
	Averaging time	20min.
Wind	Observation period	2013.2-2014.1
	Location	N35°44'18" E140°51'24"
	Observation height	80m
	Measuring instrument	Lidar
	Averaging time	10min

### 3. 気象・海象条件の予測と検証

#### 3.1 風速・波高・波周期の月別平均値の予測

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. 予測誤差を定量的に評価するために, 式(9)に示す相対誤差  $\gamma$  を用いた.

$$\gamma = (X_s - X_o) / X_o \quad (9)$$

ここで,  $X_o, X_s$  は観測値と予測値の平均値を表わす. Fig. 2には, 夏季と冬季の代表として7月と1月の風速, 有義波高, 有義波周期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, 実線は予測値を表す. また, Fig. 3には月別平均値の予測値と観測値との比較を示し, Table 5には月別平均値の予測値と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. 予測値の月別平均値は, 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る。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をよく再現している。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。予測値の月別平均値は、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、11~2月に過小評価している。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い。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月の予測値は、うねりによる長周期を再現しているが、周期6s前後の短周期領域で過小評価している。1月の予測値は、観測値を概ね再現しているが、7月と同様に短周期領域で過小評価している。予測値の月別平均値は、年間の傾向を概ね再現しているが、6~8月の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。

過小評価がみられた有義波高1m, 有義波周期6sは、施工の作業限界値に近い値であり、施工稼働率の評価に大きな影響を与えるため、次章において、季節別の階級別出現時間を求め、詳細に調べる。

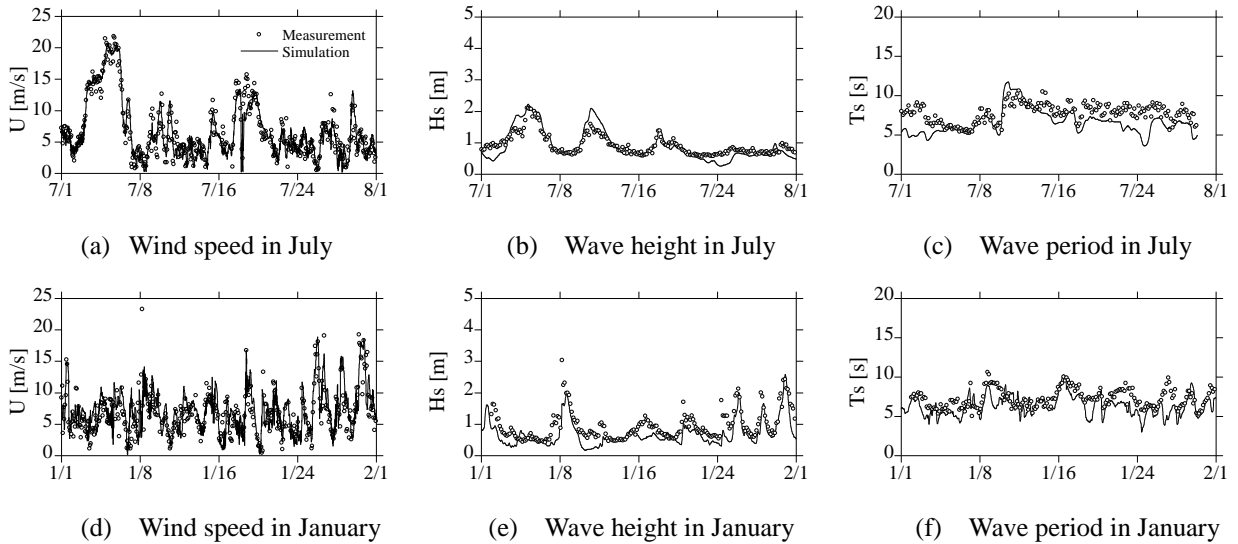


Fig. 2 Comparison between measured and predicted wind speed, wave height and wave period in summer and winter

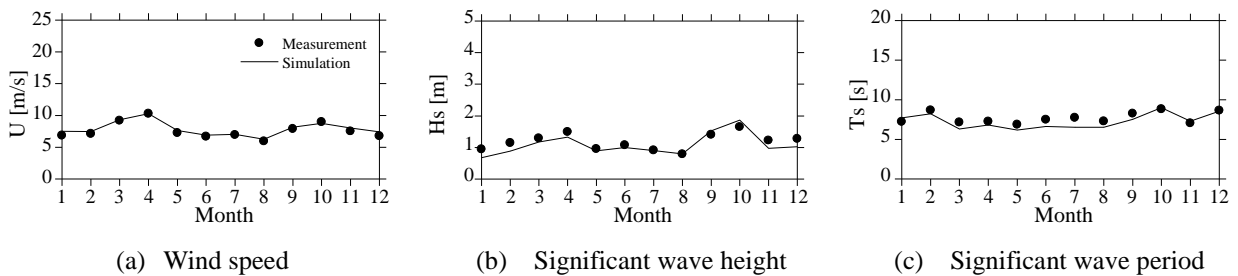


Fig. 3 Comparison of measured and predicted monthly average of wind speed, wave height and wave period

Table 5 Relative error of measured and predicted monthly averaged value and these absolute average (%) of wind speed  $U$ , significant wave height  $H_s$  and significant wave period  $T_s$

Mon.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Ave.
$U$ (%)	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
$H_s$ (%)	-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
$T_s$ (%)	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

### 3.2 季節別出現頻度分布の予測

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 Fig. 4 に示す.

風速の観測値 (黒四角) について, 10m/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, 施工稼働率に及ぼす影響が少ないことが分かる. 予測値 (細い点線) について, 春季, 夏季, 秋季における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 日程度に増加し, 施工稼働率の季節変化に大きな影響を与えることが分かる. 予測値 (細い実線) について, 四季を通じて波高 1m 以下の領域で出現時間を過大評価した. 冬季は, 波高 1m 以上の領域でも出現時間を過大評価しており, これは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, 8s 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 (細い点線) について, 周期 8s 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は, 施工稼働率の評価に大きく影響することが考えられるため, バイアス補正を行った. 波高の予測値  $H_{s, pred}$  に対して 0.25m ごと, 波周期の予測値  $T_{s, pred}$  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観測値の平均値の差であるバイアス  $\beta_{H_s}$ ,  $\beta_{T_s}$  を評価した結果を Fig.5 に示す. 評価したバイアスは最小二乗法によって近似し, 式(10), (11)を用いてバイアス補正を行った.

$$\beta_{H_s} = 0.16H_{s, pred} - 0.25 \quad (10)$$

$$\beta_{T_s} = 0.34T_{s, pred} - 3.01 \quad (11)$$

また, 平均化時間について, 予測値は 6 時間であるのに対し, 観測値は 10 分間である. 施工稼働率の評価では, 作業可能条件の継続時間の評価が必要となるため, 平均化時間の違いによる標準偏差の変動が評価に与える影響が大きい. そこで, 石原らによる論文<sup>6)</sup>を参考に, 予測値の平均化時間を 6 時間から 10 分間に補正した.

バイアスおよび平均化時間を補正した予測値を太線で Fig. 4 に示す. 補正を行うにより, 波高 1.0m 以下, 周期 6s 以下の出現時間の評価精度が大きく向上したが, 周期 8s 以下の出現時間を過大評価している.

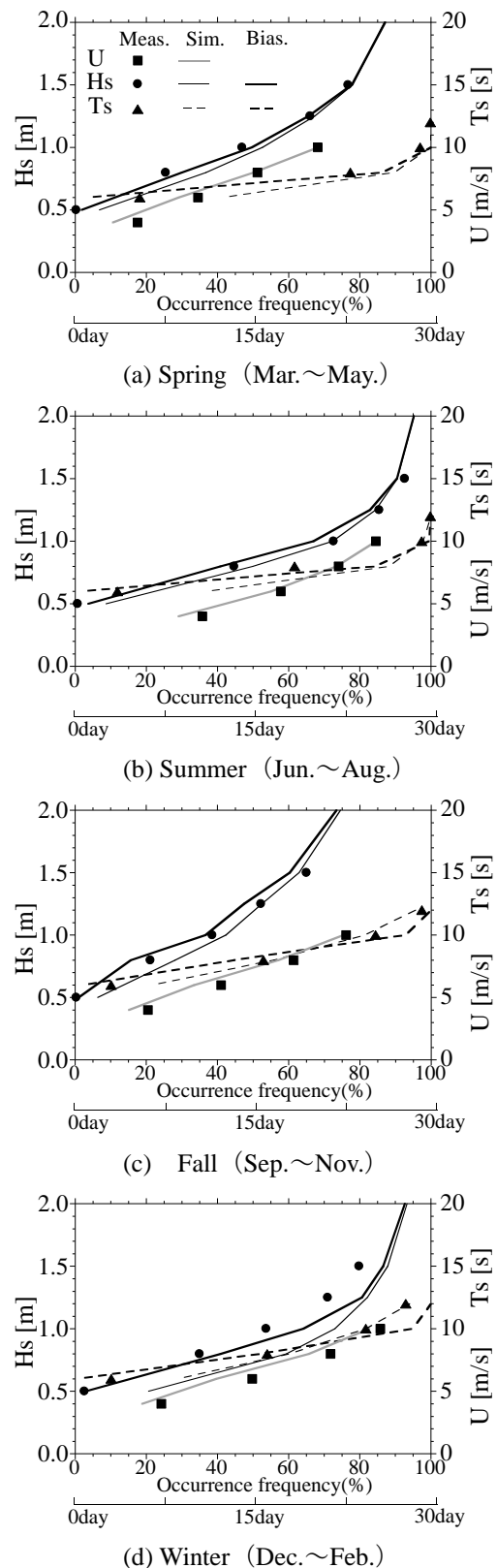
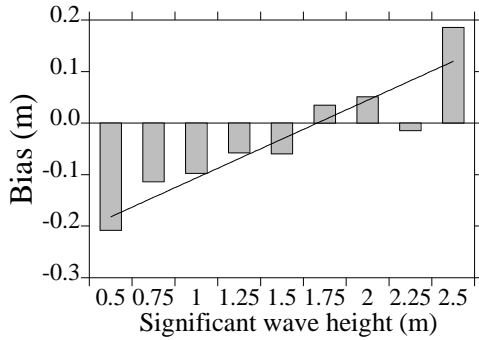
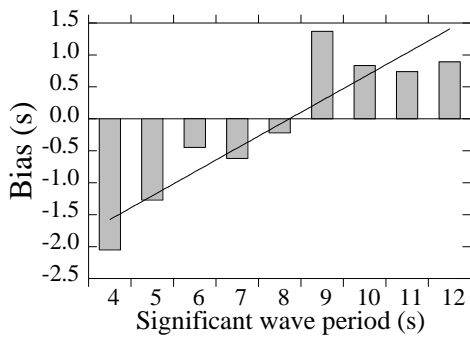


Fig.4 Comparison of seasonal frequency distribution of wind speed, significant wave height, and significant wave period among measurements, predictions and modified predictions



(a) Significant wave height



(b) Significant wave period

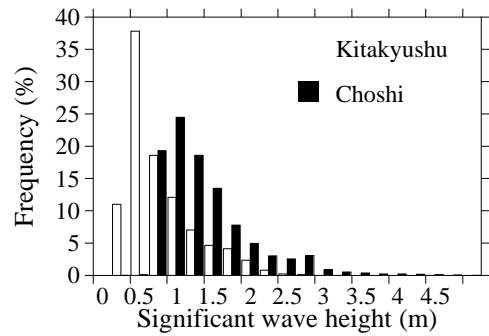
Fig. 5 Bias of predicted significant wave height and significant wave period

#### 4. シミュレーションを用いた施工稼働率の評価

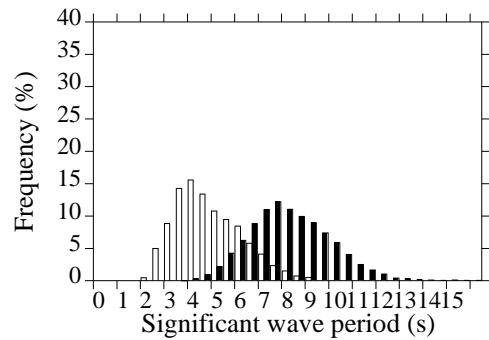
##### 4.1 実証研究の海象条件と施工実績

銚子沖および北九州沖洋上風力発電所の有義波高、有義波周期の観測値の頻度分布を Fig. 6 に示す。有義波高の年平均値は、北九州沖では 0.67m に対して銚子沖は 1.24m であり、有義波高 1m 以下の出現確率が北九州沖では 80.40% であるのに対して銚子沖では 0% であった。有義波周期の年平均値は、北九州沖では 4.93s に対し銚子沖は 8.13s であり、有義波周期 8 s 以下の出現確率が北九州沖では 99% であるのに対して銚子沖では 57% であった。

銚子沖および北九州沖における施工方法と作業限界値を、それぞれ施工方法 1, 2 として Table 6 にまとめた。海底工事は、方法 1 では波高の影響が少ない水中バックホウを用いる一方、方法 2 では、水平精度が求められる起重機船による重錘均しを用いる。支持構造物の設置は、両方法とも起重機船を用いるが、支持構造物の重量に応じて船舶の大きさが異なる。風車の設置は、作業員の SEP (Self Elevating Platform) 船へのアクセス方法がクライテリアとなっており、方法 1 では銚子のうねりに対応できる大型のサブライポートとバスケットで吊移動する特殊な方法を用いるのに対し、方法 2 ではアクセス船を用いて SEP に接触し梯子を登る手法を用いる。このように、施工方法、作業船、アクセス方法の違いが



(a) Significant wave height



(b) Significant wave period

Fig. 6 Frequency of wave height and wave period at Choshi and Kitakyushu<sup>8)</sup>

作業限界値を決定していることが分かる。







施工方法の違いが施工稼働率に与える影響を調べるために、銚子沖・北九州沖の 2 海域で方法 1, 2 を用いた場合の施工稼働率を評価した結果を Fig. 7 に示す。ここで、施工稼働率は、全施工時間に対する施工可能時間の比として評価した。気象・海象条件には 2013 年の観測値を用い、施工時期は、Table 7 に示す銚子沖の実績を仮定した。海象条件の厳しい銚子沖では、方法 2 の施工稼働率が方法 1 に対して大幅に低くなっているのに対し、北九州沖では方法 1, 方法 2 による施工稼働率の差は少ない。海象条件によって、施工方法が施工稼働率に与える影響の度合いが異なり、気象・海象条件を考慮した施工方法が必要であることが分かる。

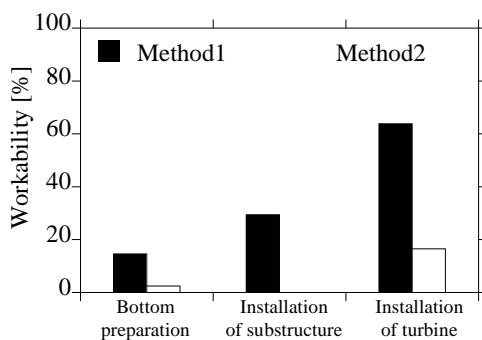
##### 4.2 施工稼働率の予測と検証

施工方法が施工稼働率に大きく影響する銚子沖洋上風力発電所において、気象・海象シミュレーションを用いて施工稼働率を予測し、その精度を検証する。2011 年 2 月から 2012 年 10 月の施工期間における銚子沖洋上風力発電所の施工稼働率の実績を調査した結果を Table 7 にまとめた。ここで、施工稼働率は、全施工日数に対する実際の施工日数の比率として評価されている。

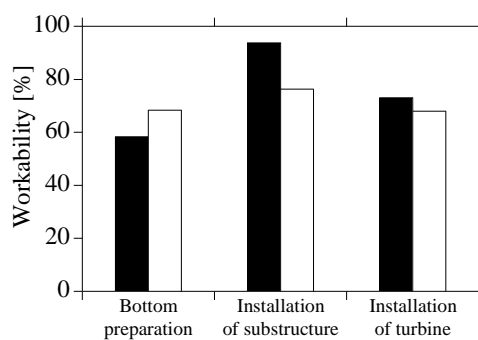
Table 7 に示す銚子沖の施工期間において、気象・日本風力エネルギー学会 論文集

Table 6 Method for constructing bottom-up offshore wind farm

	Construction method 1	Construction method 2
Bottom preparation	$H_s \leq 1$ m Required duration: several hours in daytime Submerged backhoe 	$H_s \leq 0.8$ m for several hours Required duration: several hours in daytime Weight free falling base leveling With floating crane <sup>7)</sup> 
	Source: Shibuya Diving Industry, Co <sup>8)</sup>	Source: NEDO <sup>9)</sup>
Installation of substructure	$H_s \leq 1.25$ m, $T_s \leq 8.0$ s Required duration: 36 hours Floating crane Shinsho-1600 	$H_s \leq 0.5$ m Required duration: several hours in daytime Floating crane Musashi-3700 
	Source: Kajima Corporation <sup>10)</sup>	Source: NEDO <sup>9)</sup>
Installation of wind turbine	$H_s \leq 2.5$ m, $U \leq 10$ m/s ( $U \leq 8$ m/s for installing blades) Required duration: several hours in daytime Basket 	$H_s \leq 1$ m, $U \leq 10$ m/s ( $U \leq 6$ m/s for installing blades) Required duration: several hours in daytime Access vessel 
	Source: Kajima Corporation <sup>10)</sup>	Source: NEDO <sup>9)</sup>



(a) Choshi



(b) Kitakyushu

Fig. 7 Workability by construction method 1 and 2 at Choshi and Kitakyushu site

海象データの観測値と Table 6 に示す作業限界値を用いて、各作業要素の施工稼働率を評価した結果を Fig. 8 の斜線棒に示す。ここで、施工稼働率は、実績値と同様、全施工日数に対する施工可能日数の比として評価した。施工可能日は、海底工事、風車据付では、6時から18時までの間において作業限界値以下の状態が半日以上続く日、基礎据付では、作業限界値以下の状態が連続36時間以上続く日とした。作業限界値を超える状態が20分間以下の場合には作業継続とした。気象データは、建設期間中は観測タワーによる観測が開始していないため、銚子地方気象台の10分間平均風速観測値を建設地点に変換した値を用い、海象データは海象計の観測値を用いた。予測された施工稼働率は実績値とおよそ一致し、調査した作業限界値の妥当性を示した。次に、気象・海象シミュレーションによる予測値を用いて同様に評価した施工稼働率を Fig.8 の黒棒に示す。予測値を用いて評価した施工稼働率は観測値を用いて評価した施工稼働率をよく再現し、気象・海象条件の高精度な予測と適切な作業限界値の設定により洋上風力発電所の施工稼働率を精度良く評価できることが示された。

Table 7 Workability at Choshi offshore wind farm

Work	Period	Workability
Bottom preparation	2012/2/23-2012/4/6	15.9% (7/44day)
Installation of substructure	2012/6/12-2012/7/10	27.6% (8/29day)
Installation of turbine	2012/9/9-2012/10/25	63.8% (30/47day)

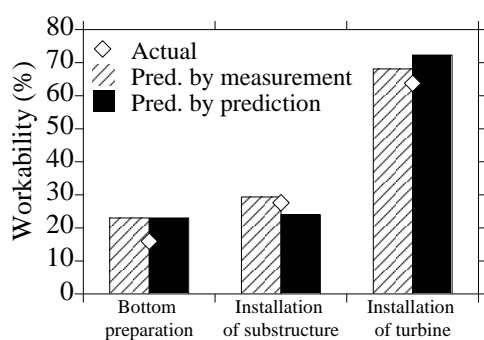


Fig. 8 Workability experienced and predicted by measured and simulated environmental condition

## 5. まとめ

本研究では、最新の気象・海象シミュレーションによる施工稼働率の予測を行い、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、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、出現時間の予測精度を向上させた。
- 3) 洋上風力発電所建設における作業限界値および気象・海象シミュレーションによって予測した有義波高、有義波周期、風速の時系列を用いて、銚子沖洋上風力発電所の施工稼働率を精度よく評価できることを示した。

## 謝辞

本研究は、国立研究開発法人新エネルギー・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。施工実績に関する調査に際して、電源開発株式会社の坂本登氏、川崎昌三氏、東京電力株式会社の福本幸成氏に多大なご協力を頂いた。ここに記して関係者の皆様に深く感謝申し上げる。

## 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*, pp. 333-336, 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*, Vol. 38, No. 4, pp. 124-131, 2014.
- 4) W. C. Skamarock, J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, X. Huang, W. Wang, and J. G. Powers, A description of the advanced research WRF version 3, *NCAR Technical Note*, 2008.
- 5) H. L. Tolman, User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 3.14, *NOAA/NWS/NCEP/MMAB Technical Note 276*, 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*, Vol. 18, pp.171-186, 2015.
- 7) 五洋建設株式会社, 北九州沖における洋上風車据付工事, *作業船第314号*, 2014.
- 8) 渋谷潜水工業株式会社, <http://www.shibuya-diving.co.jp/technology.html>
- 9) NEDO 洋上風力発電システム実証研究 (北九州沖), <http://www.nedo.go.jp/fuusha/index.html>
- 10) 鹿島建設株式会社, <http://www.kajima.co.jp/news/press/201302/27c1-j.htm>