

# 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

Numerical study of wave and wind conditions and weather window for construction of offshore wind power plants

石原 孟<sup>\*1</sup>

山口 敦<sup>\*2</sup>

ムハマド ワヒード サーワー<sup>\*3</sup>

老川 進<sup>\*3</sup>

Takeshi ISHIHARA Atsushi YAMAGUCHI Muhammad Waheed SARWAR Susumu OIKAWA

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

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

<sup>\*3</sup>Research Fellow, Department of Civil Engineering, The University of Tokyo

## Abstract

In this study, numerical simulations for waves and winds are carried out using SWAN and RAMS and the predicted significant wave height, wave period and wind speed are compared with measurement. Annual average values of absolute monthly error of wave height, wave period and wind speed are 15.0%, 8.7% and 9.2%, respectively. Occurrence of significant wave heights smaller than 1.0m depends on season and shows higher value during summer. However, small seasonal variations in occurrence are observed for significant wave periods smaller than 8sec and wind speeds below 10m/s. Monthly bias correction is adopted to improve the accuracy of predicted occurrence of significant wave height and wind speed. For significant wave periods lower than 6sec, the weather window of construction remains very low throughout the year. A significant improvement in the weather window of autumn and winter is obtained by increasing maximum allowable wave period to 8sec and wave height from 1.0m to 1.3m. Monthly variations of the available construction periods are predicted well by the numerical simulations.

キーワード: 洋上風力発電所、海象と気象条件、数値予測、施工稼働率

Key Words: offshore wind power plant, wave and wind condition, numerical simulation, weather window of construction

## 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。本研究では、波周期と風速がそれぞれある一定値以下の時に限界波高の値を下回る時間と全時間との比として施工稼働率を定義する。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は現地観測に基づく手法がある。しかし、海上での現地観測が難しい上、観測点周辺の海象・気象条件を把握できないという問題もある。一方、近年、第三代波浪推算モデル SWAN<sup>1)</sup> に代表される波浪シミュレーションや RAMS<sup>2)</sup> に代表される気象シミュレーションが広く用いられてきた<sup>3) 4)</sup>。しかし、これらの研究のほとん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、観測データを用いてその予測精度を検証する。また、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、作業船の耐波性能により規定される限界波高と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. 波浪推算と気象予測

### 2.1 波浪推算

洋上風力発電所を建設する際に必要な波高及び波周期の時系列データを得るために、本研究では、波浪方向スペクトル成分波間の非線形相互作用を評価できる第三代波浪推算モデル SWAN 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表される<sup>1) 5)</sup>。

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

ここで  $N$  は作用密度であり、波数を乗じることにより波のエネルギー  $E$  が求まる。 $c_x, c_y, c_\sigma, c_\theta$  は、それぞれ空間

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

\*2 東京大学大学院工学系研究科特任助教

\*3 東京大学大学院工学系研究科特任研究員  
(原稿受付: 年 月 日)

( $x, y$ ) 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  $\sigma$  と  $\theta$  方向の進行速度で、以下のように表せる。

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

$$c_\theta = \frac{c_g}{c} \left( \sin \theta \frac{\partial c}{\partial x} - \cos \theta \frac{\partial c}{\partial y} \right) \quad (2)$$

また、エネルギーソース項  $S$  は、次式で表せる。

$$S = S_{in} + S_{ds} + S_{br} + S_{bf} + S_{nl} + S_{tri} \quad (3)$$

ここで、 $S_{in}$  は、風から波へのエネルギー輸送効果を表し、SWAN では  $S_{in}$  に Phillips(1957)の共鳴理論と Miles(1957)の相互作用理論が用いられている。また  $S_{ds}$  は、白波砕波によるエネルギー放出の効果を表し、SWAN では Hasselmann(1974)の白波モデルを浅海域まで拡張したモデルを用いている。一方、 $S_{br}$  は、波浪が浅海領域に侵入した時の浅水砕波によるエネルギー散逸の効果を表し、Battjes and Janssen(1978)のモデルを用いている。また  $S_{bf}$  は、浅海領域において底面摩擦によって生じる波浪減衰の効果を表し、SWAN では Bertotti and Cavaleri(1994)の式を用いている。 $S_{nl}$  は波数の異なる4つの成分波の間における非線形相互作用によるエネルギーの輸送の効果を表し、SWAN では深海条件の Hasselmann (1963)の式に浅海波の補正係数を乗じて算定している。 $S_{tri}$  は、極浅海域における 3 波成分波間での非線形相互作用エネルギーの輸送効果を表し、SWAN では Eldeberky(1996)による近似解法で求めている。表1には、波浪推算モデル SWAN で用いた記号の定義を示す。

SWAN では各計算格子点上での波浪方向スペクトルを変数としており、周波数  $\sigma$  の分割数は 32、方向角  $\theta$  の分割数は 36 である。

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、関東地方・東北部の沿岸を含む格子解像度  $0.2^\circ$ の領域 I と千葉県沿岸を含む格子解像度  $0.05^\circ$ の領域 II を設定した。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 (水平解像度  $1.5^\circ$ 、時間分解能 6 時間、方向スペクトルの周波数分割数 25、方向角の分割数 12) を線形内挿した値を用いた。海面の境界条件としては、メソスケールモデル MM5 により求めた海面上の風速値を用いる。解析期間は 2000 年 1 月から 12 月の 1 年間とした。表2には波浪シミュレーションの解析条件を示す。

Table 1 List of symbols used in SWAN

Symbol	Definition
$N$	action wave density spectrum
$E$	wave energy density spectrum ( $E = \sigma N$ )
$x, y$	coordinate of east-west and north-south
$t$	time
$\sigma, \theta$	wave radian frequency, wave direction
$c_x, c_y$	propagation velocities in spatial $x$ and $y$ space
$c_\sigma, c_\theta$	propagation velocities in spectral space $\sigma$ and $\theta$ space
$c, c_g$	wave phase velocity, wave group velocity
$k$	wave number
$h$	water depth
$g$	gravitational constant
$S_{in}$	wave generation by wind
$S_{ds}$	dissipation of white-capping
$S_{br}$	dissipation of surf breaking
$S_{bf}$	dissipation of bottom friction
$S_{nl}$	quadruplet nonlinear wave-wave interactions
$S_{tri}$	trinity nonlinear wave-wave interactions

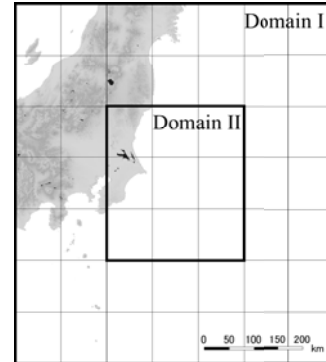


Fig.1 Computational domain for SWAN

Table 2 Computational conditions and grid resolution

	Domain I	Domain II
Computational domain	138°~145°E 32°~39°N	140°~143°E 34°~37°N
Grid resolution	0.2°×0.2°	0.05°×0.05°
Grid number	35×35	60×60
Boundary condition	Lateral	ECMWF reanalysis (ERA40)
	Surface	Nestdown
Bathymetry resolution	grid	Mesoscale analysis (0.5°×0.5°)
Spectrum resolution	0.25°×0.25°	0.025°×0.025°
Spectrum resolution	36 directions, 32 frequencies (0.052Hz~1 Hz)	
Time step	20min.	10min.

本研究では有義波高  $H_s$  ならびにスペクトルピーク周期  $T_p$  は、各々波スペクトル密度から次式により求めた<sup>6)</sup>。

$$H_s = 4\sqrt{\iint E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta} \quad (4)$$

$$T_p = 1.4T_{m0.2} = 1.4 \times 2\pi \left( \frac{\iint \sigma^2 E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta}{\iint E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta} \right)^{1/2} \quad (5)$$

ここで、 $T_{m0.2}$  はスペクトル平均周期である<sup>7)</sup>。

波の観測結果と比べるために、SWAN で算定された波高、波周期と観測からゼロアップクロス法により求められる有義波高  $H_{1/3}$  と有義波周期  $T_{1/3}$  との間に、 $H_{1/3} = c_1 H_s$  並びに  $T_{1/3} = c_2 T_p$  の比例関係があると仮定した<sup>8)</sup>。有義波高の補正係数  $c_1$  は波高がレーリー分布に従うならば 1.0、波が砕波帯内ならば 0.95 等の値が示されているが<sup>9)</sup>、本研究では、 $c_1$  を 1.0 とした。有義波周期の補正係数  $c_2$  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から算定し 1.8 とした。

## 2.2 気象予測

洋上風力発電所を建設する際に必要な風速の時系列データを得るために、本研究では、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)<sup>2)</sup> を用いた。メソスケール気象モデル RAMS は、風速、仮温位、エクスター関数、混合比を従属変数とする質量保存則、運動量保存則、熱力学方程式、水分の保存則を数値的に解き、初期条件、境界条件の下で従属変数の時間変化を求める。 $x, y, z$  方向の 3 つの速度成分に関する運動方程式は、それぞれ以下のように表される。

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} = & -u \frac{\partial u}{\partial x} - v \frac{\partial u}{\partial y} - w \frac{\partial u}{\partial z} - \theta_0 \frac{\partial \pi'}{\partial x} + fv \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left( K_m \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_m \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_m \frac{\partial u}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} = & -u \frac{\partial v}{\partial x} - v \frac{\partial v}{\partial y} - w \frac{\partial v}{\partial z} - \theta_0 \frac{\partial \pi'}{\partial y} - fu \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left( K_m \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_m \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_m \frac{\partial v}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial t} = & -u \frac{\partial w}{\partial x} - v \frac{\partial w}{\partial y} - w \frac{\partial w}{\partial z} - \theta_0 \frac{\partial \pi'}{\partial z} - \frac{g\theta'}{\theta_0} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left( K_m \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_m \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_m \frac{\partial w}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

また、質量保存則は以下のように表される。

$$\frac{\partial \pi'}{\partial t} = -\frac{R\pi_0}{c_v \rho_0 \theta_0} \left( \frac{\partial \rho_0 \theta_0 u}{\partial x} + \frac{\partial \rho_0 \theta_0 v}{\partial y} + \frac{\partial \rho_0 \theta_0 w}{\partial z} \right) \quad (9)$$

RAMS では熱力学方程式の変数として、Tripoli and Cotton(1982)によって提案された水の相変化に関わらず保存される物理量である液相・固相の相当温位(ice-liquid potential temperature)を用い、熱力学方程式は、以下のように表される。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta_{il}}{\partial t} = & -u \frac{\partial \theta_{il}}{\partial x} - v \frac{\partial \theta_{il}}{\partial y} - w \frac{\partial \theta_{il}}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left( K_h \frac{\partial \theta_{il}}{\partial x} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_h \frac{\partial \theta_{il}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_h \frac{\partial \theta_{il}}{\partial z} \right) + \left( \frac{\partial \theta_{il}}{\partial t} \right)_{rad} \end{aligned} \quad (10)$$

また、水分の保存則は、次式で表される。

$$\begin{aligned} \frac{\partial r_n}{\partial t} = & -u \frac{\partial r_n}{\partial x} - v \frac{\partial r_n}{\partial y} - w \frac{\partial r_n}{\partial z} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left( K_h \frac{\partial r_n}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_h \frac{\partial r_n}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_h \frac{\partial r_n}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

式中の記号の定義を表 3 に示す。

Table 3 List of symbols in RAMS

Symbol	Definition
$u$	east-west wind component
$v$	north-south wind component
$w$	vertical wind component
$x$	east-west coordinate
$y$	north-south coordinate
$z$	vertical coordinate
$t$	time
$f$	Coriolis parameter
$K_m$	eddy diffusivity for moment
$K_h$	eddy diffusivity for heat
$\theta_0$	layer domain-averaged potential temperature
$\theta'$	potential temperature
$\theta_{il}$	ice-liquid water potential temperature
$r_n$	water mixing ratio species of total water, rain, and aggregates
$\rho_0$	layer domain-averaged density
$rad$	subscript denoting tendency from radiation parameterization
$g$	gravitational constant
$\pi_0$	exner function
$\pi'$	perturbation exner function

RAMS にはサブモデルとして、大気放射モデル、積雲モデル、地表面過程モデル、乱流モデルが組み込まれている。乱流モデルとしては、乱流エネルギーおよび乱流長さスケールは移流方程式を解き、応力方程式に境界層近似を適用する Mellor-Yamada(1982)のレベル 2.5 を用いた。また、地表面および海面の境界条件としては Louis(1979)の手法に基づき各方程式のフラックスを計算する。

本研究では、図 2 に示すように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 I(水平格子間隔 10km)と銚子近傍の海域を含む内側の領域 II(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 4 には計算領域と格子間隔等を示す。ECMWF の全球客観解析値を初期条件と境界条件とし、2000 年 1 月から 12 月までの 1 年間の解析を行い、時系列風速データを作成した。

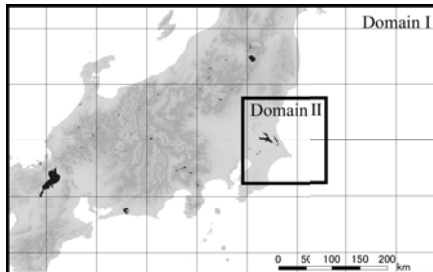


Fig.2 Computational domain for RAMS

Table 4 Computational conditions and grid resolution

	Domain I	Domain II
Computational domain center	139°30'E 36°00'N	140°45'E 36°00'N
Grid number (x×y×z)	77×53×30	76×84×34
Horizontal grid interval ΔX×ΔY	10km×10km	2km×2km
Vertical grid interval	40~1000m	20~1000m
Boundary condition	ECMWF analysis	Nestdown
Time Step	40sec	20sec

### 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 12 月までの 1 年間の 2 時間毎の有義波高と有義波周期のデータ(20 分間観測値)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(10 分平均値)は、銚子地方気象台の 2000 年 1 月から 12 月までの 1 年間に観測された風速データを用いた。表 5 には、波浪と気象の観測概要を示す。

Table 5 Description of wave and wind observation

Wave	Observation period	Year 2000
	Location	Kashima wave observation facility (NOWPHAS) N35°53'55" E140°45'14"
	Water depth	24.5m
	Measuring instrument	Ultrasonic Wave Detector
	Averaging time	20min. per every even hour
Wind	Observation period	Year 2000
	Location	Choshi Local Meteorological Observatory N35°44'18" E140°51'24"
	Observation height	28.2m
	Measuring instrument	Propeller-Vane Anemometer
	Averaging time	10min

また、予測誤差を定量的に評価するために式(12)に示す相対誤差  $\gamma$  を用いた。

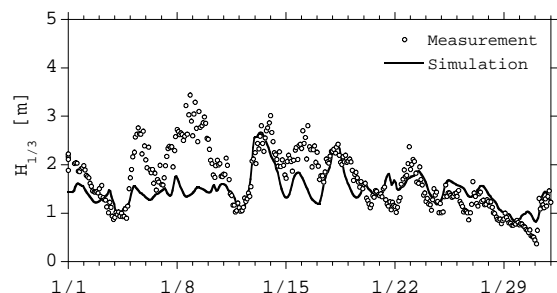
$$\gamma = (X_s - X_o) / X_o \quad (12)$$

ここで、 $X_o, X_s$  は観測と解析から得られた平均値を表わす。

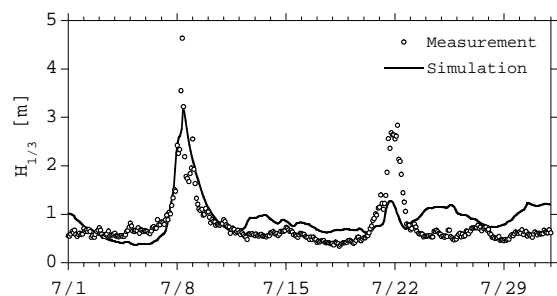
### 3. 気象・海象条件の予測と観測による検証

本章では、波浪シミュレーションと気象シミュレーションにより算定された波高、波周期、風速について、観測データと比較し、その予測精度を検証する。

図 3 には、冬季と夏季の代表として 2000 年の 1 月と 7 月の有義波高の解析値と観測値の比較を示す。図中のプロットは観測値を表し、実線は解析結果を表す。図3から、1月では季節風による高波高の周期的変化、7月では静穏期のうねりに伴う低波高と台風による高波浪の特徴を概ね再現していることが分かる。ただし、1月 5~10 日と 7 月 8 日と 22 日には、有義波高の過小評価がみられる。1 月 5~10 日の過小評価は大型の低気圧の通過の影響を、また、7 月 8 日と 22 日の過小評価は台風 3 号と台風 5 号の通過の影響を受けている。台風ボーガス<sup>10)</sup>や台風モデル<sup>11)</sup>を取り入れた解析を行うことにより、精度の向上を図ることが可能である。



(a) January



(b) July

Fig.3 Comparison of simulated and observed significant wave heights

図 4 には、波高の月別平均値と標準偏差を示す。図中のプロットは観測値を表わし、実線と点線は解析結果を表す。解析による有義波高の月平均値は、夏季の 6 月、7 月に低く、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6月、7月の静穏な時期は、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。また解析による3月と8月の有義波高の標準偏差は、観測値より低い。これは、3月17日と20日に通過した低気圧による高波高および8月13～15日にかけて通過した台風9号による高波高のピークを再現できなかったことによるものである。また、図中には波高の月別相対誤差(黒四角と一点鎖線)をあわせて示した。波高の月別相対誤差は-21.9%～33.0%の範囲にあり、12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15.0%である。

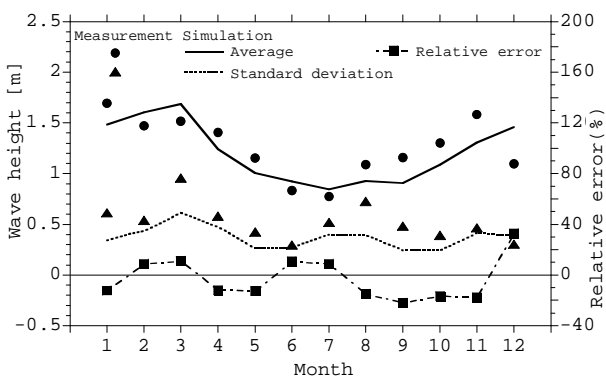


Fig.4 Comparison of simulated and observed monthly average, standard deviation and relative error of significant wave height

図5には、1月と7月の有義波周期の解析値と観測値の比較を示す。1月の解析結果では、全体的な観測値を概ね再現している。一方、7月の解析結果では、7月10～13日に過大評価されていることが分かる。

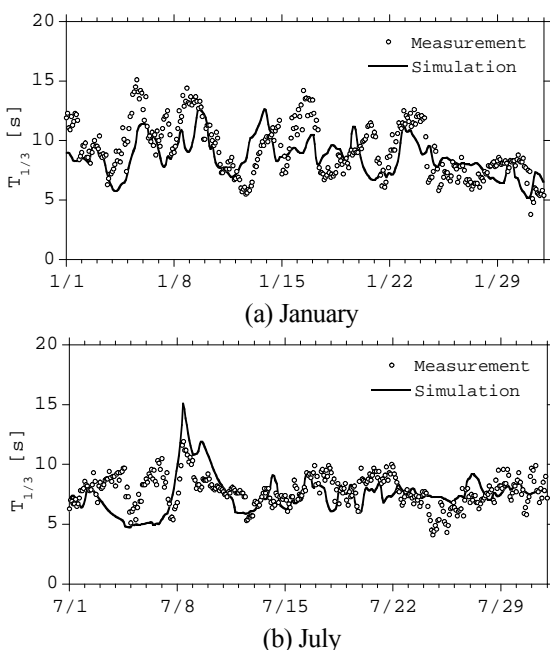


Fig.5 Comparison of simulated and observed significant wave periods

図6には、観測と解析の波周期の月別平均値と標準偏差を示す。有義波周期の月平均値は7～10sの範囲にあり冬季1～2月に長めの周期となり、夏季6～7月に低めの周期となる特徴を解析値ではよく再現しているが、12月の解析値は過大評価となっている。12月の波周期の過大評価は、波高の過大評価に対応している。また、周期の標準偏差は、有義波高と比べると年間を通じて変化が小さく、解析結果も観測値と概ね一致している。また、図中には波周期の月別相対誤差(黒四角と一点鎖線)をあわせて示した。波周期の月別相対誤差は-9.6%～22.6%の範囲にあり、波高と同様に12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8.7%である。

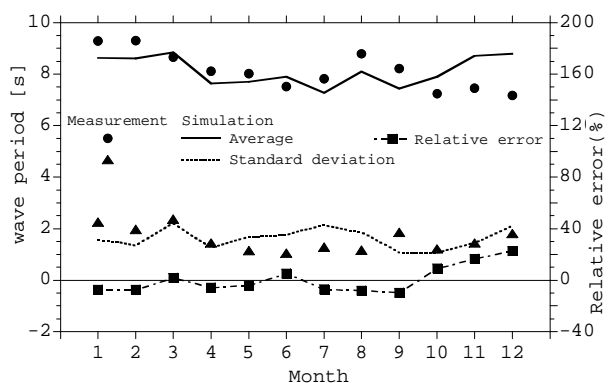


Fig.6 Comparison of simulated and observed monthly average, standard deviation and relative error of significant wave period

図7には、気象シミュレーションRAMSによる解析結果と銚子地方気象台地点における風速の観測結果の比較を示す。本研究では、RAMSから得られた結果に非線形風況予測モデルMASCOT (Micro-wind-climate Analysis System for Complex Terrain)<sup>12)</sup>を用いて求めた風速比を乗じることにより微細地形の影響を取り入れた。1月の解析結果では、約3日周期のサイクルをよく再現している。また、7月の解析結果では概ね観測値を再現している。7月8日と7月22日には、台風3号と台風5号の通過の影響を受け、風速が過小評価されている。

図8には、観測と解析の風速の月別平均値と標準偏差を示す。月平均風速は、冬季に高く、夏季に低くなる特徴をよく再現している。風速の標準偏差は、年間を通じて観測値と解析値はよく一致している。また、図中には風速の月別相対誤差(黒四角)をあわせて示した。風速の月別相対誤差は-8.8%～18.3%の範囲にあり、冬季の相対誤差が大きい。月別相対誤差の絶対値の年平均値は9.2%である。

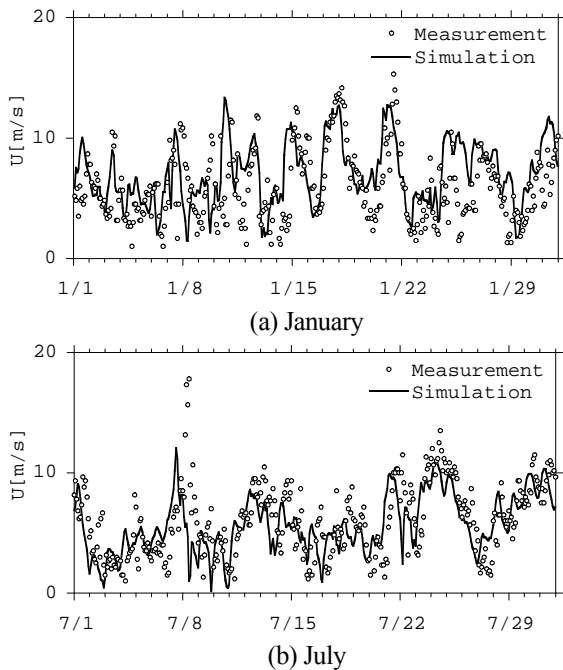


Fig.7 Comparison of simulated and observed wind speeds

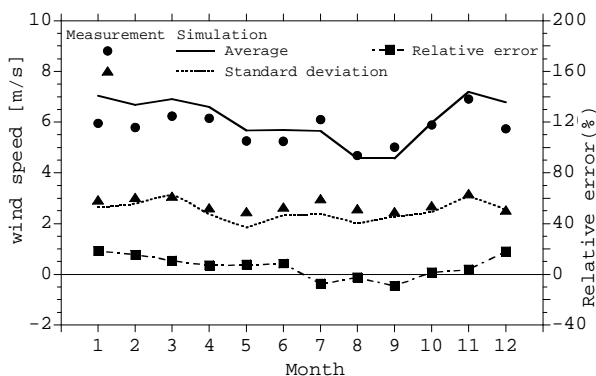


Fig.8 Comparison of simulated and observed monthly average, standard deviation and relative error of wind speed

#### 4. 気象・海象条件と施工稼働率の季節変化

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、海象・気象条件の季節変化を調べると共に、観測値と比較することによりその予測精度を明らかにする。また作業船の性能により規定される限界波高と波周期の値を変化させ、施工稼働率に与える影響を調べる。

本研究では嶋田ら<sup>13)</sup>の研究を参考に、解析結果に対して各月のバイアス補正を行った。具体的には、各月の波高、波周期、風速の解析結果の平均値  $X_s$  と観測データから得られた平均値  $X_o$  から求めた比  $(X_o/X_s)$  を時系列データに乗じて補正した。

##### 4.1 波高、波周期、風速の季節変化

図9には、季節ごとの有義波高、有義波周期、10分間平均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、実線、破線、一点鎖線は解析結果を表し、細線はバイアス補正後の結果を表す。

まず、有義波高(黒丸)が1.0m未滿の合計時間は、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、秋季と冬季の平均波高が1.0m前後であるため、波高のわずかな予測誤差が出現時間の再現性に大きな影響を与えるためである。月バイアスを補正することにより、秋季と冬季の波高の出現時間の予測精度が大きく向上した。

次に、有義波周期8s未滿の合計時間は、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、観測値から得られた出現時間を過大評価している。

最後に、風速10m/s未滿の合計時間は、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観測値をよく再現している。

##### 4.2 施工稼働率の季節変化

施工稼働率は、波周期と風速がそれぞれある一定値以下の時に限界波高の値を下回る時間と全時間との比として定義される。本研究では、風速を10m/s以下に設定し、有義波周期を6秒と8秒以下にした時に、限界波高を変化させ、月別施工稼働率の変化を調べる。風速10m/sはクレーンの作業限界に対応しており、有義波周期6秒と8秒は作業船の耐波性能により規定される。

図10と図11には、月別施工稼働率の限界波高による変化を示す。ここで、有義波高の限界値を0.7m、1.0m、1.3mの3種に変化させた。図10には有義波周期6秒以下、図11には8秒以下の結果を示す。有義波周期6秒以下では(図10)、いずれの限界波高においても施工稼働率は非常に低い。有義波周期8秒以下(図11)かつ限界波高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非常に低い。限界波高を1.0m、1.3mへと高くすると、夏季のみならず、春季、秋季の施工稼働率も高まる。このことから、作業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 10 と図 11 に示すように、解析から得られた施工稼働率は、夏季に過大評価されているが、他の季節においては観測から得られた施工稼働率を概ね再現している。

## 5. まとめ

本研究では、波浪と気象シミュレーションを実施し、その予測精度を観測により検証した。また、波高、波周期、風速の季節変化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) 波浪と気象シミュレーションによる波高、波周期、風速の予測結果は、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、月別予測誤差の絶対値の年平均値は、それぞれ 15.0%、8.7%、9.2% である。
- 2) 1.0m 以下の有義波高の出現頻度は、夏季に高く、春季、秋季、冬季に低い。一方、8.0 秒以下の有義波周期の季節変化は小さく、月あたりの出現頻度は 11~20 日程度である。10m/s 以下の風速の出現頻度は季節によらず同じ傾向を示し、月あたりの出現頻度は 25~27

日程度である。波浪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、バイアスを補正することにより、予測精度が向上したが、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した。

- 3) 有義波周期 6 秒以下の施工稼働率は、いずれの波高限界においても施工稼働率は非常に低い。有義波周期 8 秒以下では、限界波高を高くすることにより秋季と春季における施工稼働率が大きくなる。限界波高と波周期、すなわち、作業船の耐波性能は、施工稼働率に与える影響が大きい。解析により求めた施工稼働率は、夏季に過大評価をしているが、他の季節においては観測から得られた施工稼働率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。

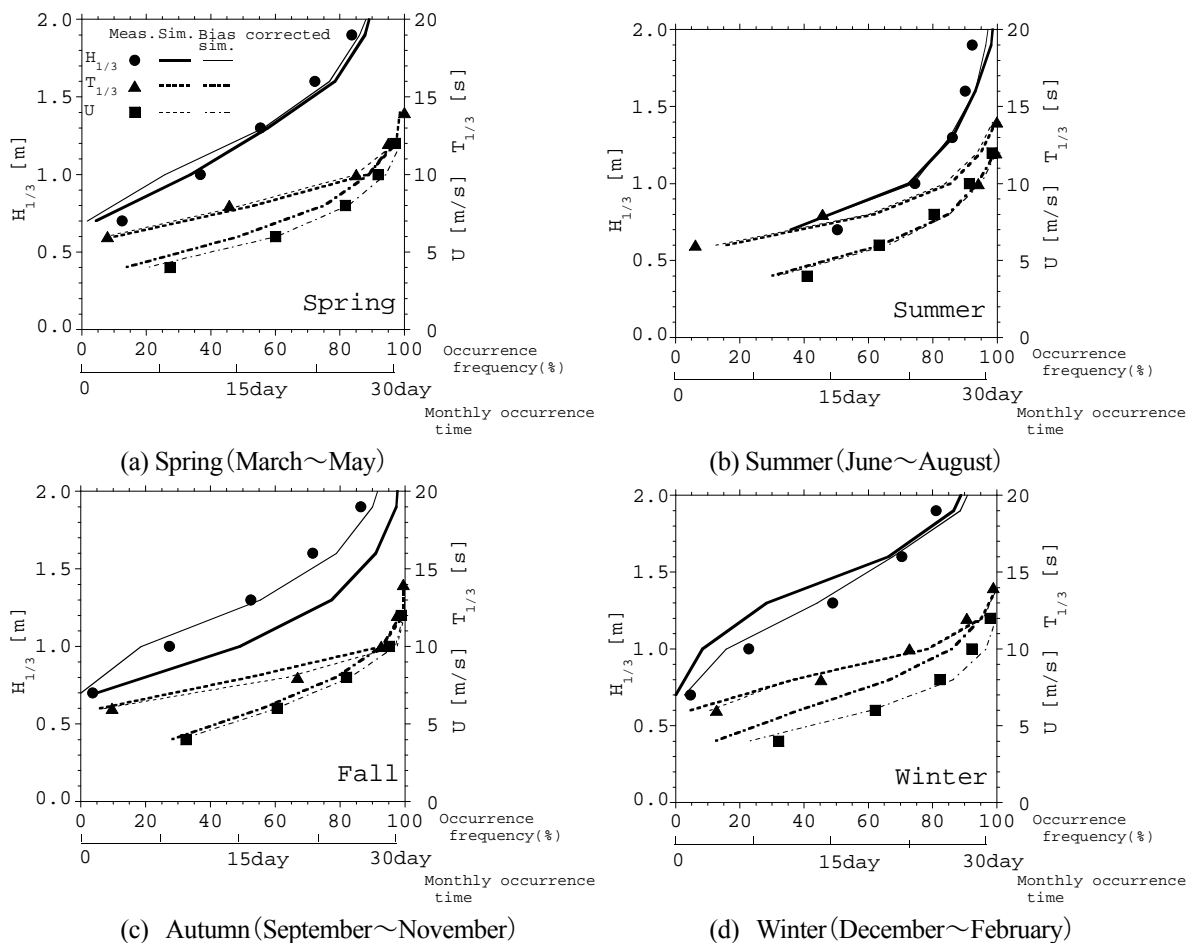
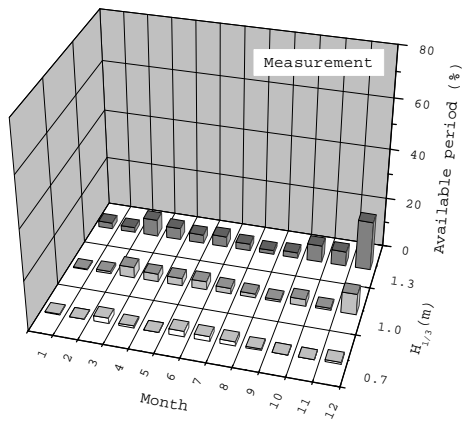
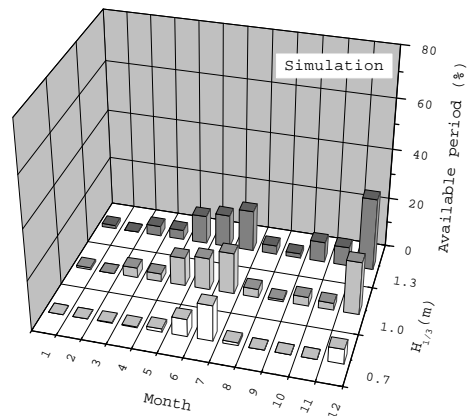


Fig.9 Seasonal variation in occurrence frequencies of significant wave height, wave period and wind speed

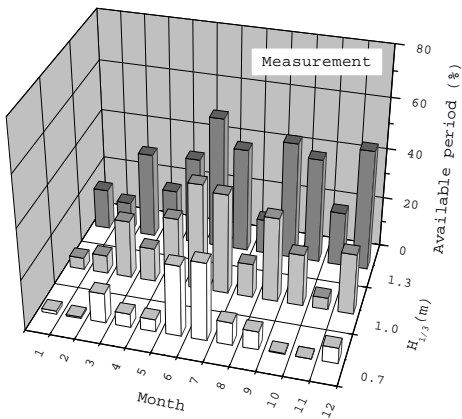


(a) Measurement

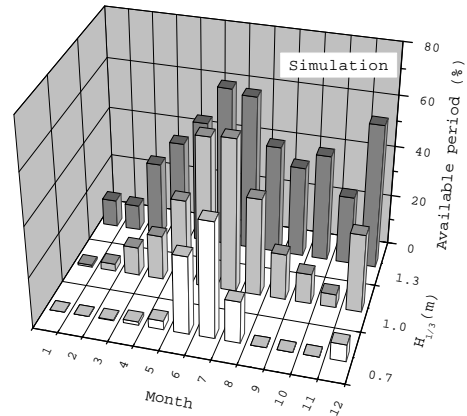


(b) Simulation

Fig.10 Monthly variation of weather window with maximum allowable wave heights for  $T < 6s$  and  $U < 10m/s$



(a) Measurement



(b) Simulation

Fig.11 Monthly variation of weather window with maximum allowable wave heights for  $T < 8s$  and  $U < 10m/s$

#### 参考文献

- 1) Holthuijsen, L. H.: Waves in Oceanic and Coastal Waters, Cambridge University Press, 2007.
- 2) Pielke, R. A. et al.: A Comprehensive Meteorological Modeling System – RAMS, Meteorol. Atmos. Phys., 49, 69-91, 1992.
- 3) 川口浩二, 橋本典明, 鈴木勝之: 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.
- 4) 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.
- 5) 小林智尚: 波浪推算システムとその応用, 第 38 回水工学に関する夏期研修会講義集, Bコース, B-7-1-B-7-20, 2002.
- 6) SWAN User Manual SWAN Cycle III Ver.40.72ABCD, 2009.
- 7) Twidell, J. and G. Gaudiosi, eds.: Turbine dynamics and fatigue, Offshore Wind Power, Multi-Science Publishing Co. Ltd., 2009.

- 8) ISO 21650: Actions from waves and currents on coastal structures, 2007.
- 9) 合田良実: 耐波工学 港湾・海岸構造物の耐波設計, 鹿島出版会, 2008.
- 10) 大澤輝夫: 台風時における 沿岸海上風の推定手法, 日本風工学会誌, Vol.32, No.3, 369-378, 2007.
- 11) 石原孟, 松井正宏, 日比一喜: 中立時の大気境界層における強風の鉛直分布特性 その 2 台風時の強風, 日本風工学会論文集, 66, 3-14, 1996.
- 12) 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.
- 13) 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.