

福島沖における波浪の数値予測に関する研究*

Numerical prediction of Waves at Fukushima Offshore Site

石原 孟**

大森 政則***

荒川 洋***

山口 敦**

Takeshi ISHIHARA

Masanori OHMORI

Hiroshi ARAKAWA

Atsushi YAMAGUCHI

1. はじめに

洋上風力発電設備の設計外力を評価するためには、高波浪時の波高及び波周期を求める必要がある。日本における波浪の特徴としては、解放海域である太平洋側で大きなうねりを伴うことや台風による高波が挙げられるが、このような風波とうねりを予測する手法としては、第三世代の波浪モデルが知られている。

著者らはこれまで、数値シミュレーションにより、洋上風力発電設備の構造設計に必要な気象条件及び海象条件を評価する手法を提案し、観測データと比較することにより、精度検証を行ってきた^{1),2)}。

そこで、本研究では、まず福島沖浮体式洋上風力発電実証検証サイトにおいて1年間の波浪場の数値シミュレーションを実施し、観測値と予測値との比較を行うことにより、予測精度を評価する。次に、30年分の波浪シミュレーションによる予測値から、全方位及び方向別の50年再現期間の極値波高を求めると共に、国が定める福島沖近傍地点における50年再現期待値との比較を行うことにより、解析年数の違いが予測結果に与える影響を明らかにした。最後に、有義波高・有義波周期の平均値、標準偏差、出現頻度及び相関の分布関数をモデル化し、モンテカルロシミュレーションによる有義波高及び有義波周期の結合確率分布を示す。

2. 福島沖における波浪予測

2.1 波浪予測モデルの概要

本研究における波高及び波周期の予測には、第三世代の波浪モデルである WWIII ver. 4.18 (Tolman(2014)³⁾)を用いた。

WWIII の基礎方程式を式(1)から(5)に示し、式に用いた記号を Table 1 に示す。

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{x}N + \frac{\partial(kN)}{\partial k} + \frac{\partial(\theta N)}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma} \quad (1)$$

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{c}_g + \mathbf{U} \quad (2)$$

$$\dot{k} = -\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial s} - \mathbf{k} \cdot \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial s} \quad (3)$$

$$\dot{\theta} = -\frac{1}{k} \left[\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + \mathbf{k} \cdot \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial m} \right] \quad (4)$$

$$S = S_{in} + S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{db} \quad (5)$$

Table 1 WWIIIの基礎方程式に用いられる記号

記号	記号の意味
N	作用密度
\mathbf{c}_g	群速度
k	波数
θ	方向
σ	角周波数
\mathbf{U}	流速
d	水深
s	接線方向の座標
m	動径方向の座標
S_{in}	風による波の線形的な発達を表すソース項
S_{in}	風と波の相互作用を表すソース項
S_{nl}	波の非線形相互作用を表すソース項
S_{ds}	白波砕波による波の減衰を表すソース項
S_{bot}	海底摩擦による波の減衰を表すソース項
S_{db}	浅海域砕波による波の減衰を表すソース項

2.2 計算条件と評価方法

計算期間は1987年1月1日から2016年12月31日までの30年間とした。波浪モデルの計算条件の概要を Table 2、計算領域を Fig.1 に示す。

Table 2 波浪モデルの計算条件の概要

	ドメイン1	ドメイン2	ドメイン3
計算期間	1987.1.1~2016.12.31		
水平解像度	0.5° (約50km)	0.2° (約20km)	0.05° (約5km)
格子数	320×240	70×70	80×80
海底地形	ETOPO1		
海面条件	NCEP-FNL (1.0°)	WRF (18km)	WRF (6km)
側面境界条件	開境界		
スペクトル解像度	周波数: 36(0.0345~0.97Hz) 方向: 36		

*第40回風力エネルギー利用シンポジウムにて講演

**会員 東京大学工学系研究科 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

*** 株式会社水城ネットワーク

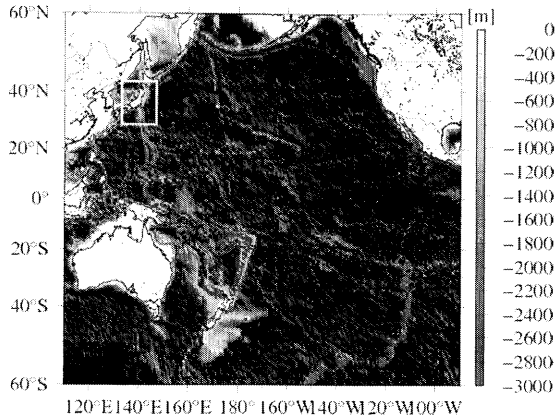


Fig. 1 波浪モデルの計算領域(ドメイン1・2)

WWIIIによる波浪シミュレーションでは、周波数 f と方向 θ の関数で表されるエネルギースペクトル $E(f, \theta)$ のモーメントにより波高及び波周期を算出している。合田⁴⁾によると、波の確率分布はレイリー分布を仮定した場合には、 $H_{1/3}$ は $H_{m0}(=H_s)$ とほぼ等しい。また $T_{1/3}$ は $T_{m-1,0}(=T_s)$ ともほぼ等しいため、本研究では式(6)~(7)のように有義波高と有義波周期を定義した。

$$H_{1/3} = H_s = H_{m0} = 4\sqrt{m_0} \quad (6)$$

$$T_{1/3} = T_s = T_{m-1,0} = \frac{m_{-1}}{m_0} \quad (7)$$

ここで、 m_n は n 次モーメントであり、式(8)で表される。

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

2.3 ピーク波高の補正

予測されたピーク波高を補正するために、2m以上の有義波高に対して、式(9)の山口・石原⁵⁾の評価時間の補正方法により、評価時間20分と $M=180$ 分、及び $M'=60$ 分における結果の比(1.072/1.046)である補正係数1.025と、間瀬ら⁶⁾と同様の補正係数1.19を用いた。式(10)にある C は、予測されたピーク波高 $H_{1/3}^M$ の補正係数(1.025×1.19=1.22)である。なお、抽出したピーク波高の前後2日は、同一波浪のイベントであるとみなし、ピーク波高の抽出は行わないものとした。

$$\frac{H_{1/3}^M}{H_{1/3}^{20}} = 1 - 0.05 \left(\frac{M - 20}{60} \right)^{0.3} \quad (9)$$

$$H_{1/3}^{Max} = CH_{1/3}^M \quad (10)$$

また、ピーク波高の前後9時間において、式(11)に示す線形補正係数により補正し、 $\Delta t = 9$ のときに補正

係数 $C' = 1$ となるようにした。

$$H'_{1/3,i} = C' H_{1/3,i}^M \quad (11)$$

$$C' = \left[\frac{R_t - \Delta t}{R_t} \right] \cdot (C - 1.0) + 1.0$$

$$\Delta t = |t_0 - t_i|$$

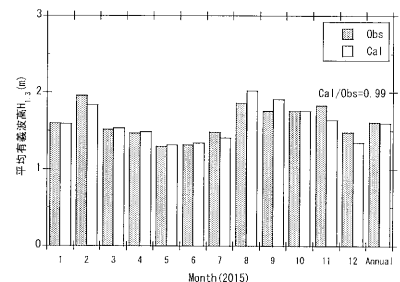
ここに、 R_t は最大補正時間(9時間)、 t_0 はピーク波高が出現する時刻、 t_i は補正対象時刻、 i は番号である。

3. 予測結果と考察

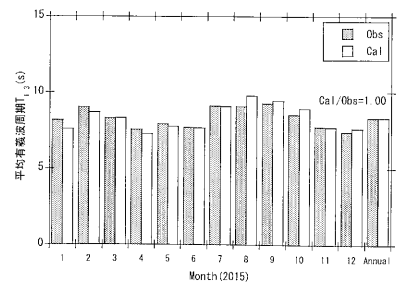
3.1 波浪予測の精度検証

2015年1月から12月までの1年間の観測結果と、前章で述べた解析方法にて補正を行った水平解像度 0.05° での予測結果との比較を行った。

Fig. 2に、2015年1月から12月までの1年間の観測値と予測値との月平均有義波高及び有義波周期の月別変動の比較結果を示す。有義波高・有義波周期共に観測値とよく一致した。対象期間1年間の平均有義波高及び平均有義波周期は、観測値が1.61mと8.32sであるのに対して、予測値が1.60mと8.33sで、予測値/観測値の比は、有義波高が0.99、有義波周期が1.00であった。



(a) 有義波高



(b) 有義波周期

Fig. 2 月平均有義波高及び有義波周期の月別変動の比較

3.2 極値波高の推定

Fig. 3には、1987年から2016年までの30年間の予

測結果から求めた年最大有義波高に、先に示した間瀬らの補正係数(=1.19)と、評価時間 60 分への補正係数(=1.025)を乗じて求めた極値波高分布を示す。なお、極値分布にはガンベル分布を用いることとし、ガンベル分布のパラメータは積率法により求めた。この分布から求めた 50 年再現期待値は 12.43m であった。図中には、国土交通省 国土技術政策総合研究所(以後「国総研」と称す)が公開している富岡地点における 50 年再現期待値 11.71m の値も示した。本研究により求めた波高の 50 年再現期待値は国総研の値に近いことが分かる。

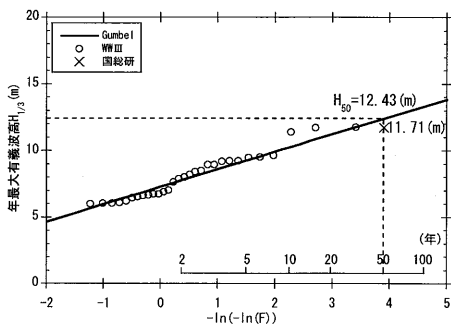


Fig. 3 30年間の年最大有義波高による極値波高の分布

また、50 年再現期間に対応する年最大波高の標準偏差 σ_H を式(12)により求め、対象年数の違いによる不確かさの変化を調べた。

$$\sigma_H^2 = \frac{\sigma_N^2}{N} [1 + 0.885(y - \gamma) + 0.6687(y - \gamma)^2] \quad (12)$$

ここで、 N は推定に用いた母集団のデータ数、 σ_N は母集団の標準偏差、 y は 50 年再現期間に対応する基準化変数(=3.902)、 γ はオイラー定数(=0.57722)である。

Table 3 及び Fig. 4 に、予測値の対象年数を 10・15・20・25・30 年と変化させた際の 50 年再現期待値の不確かさの違いを示す。50 年再現期待値の不確かさは、解析年数を長くなるにつれ、低下している。

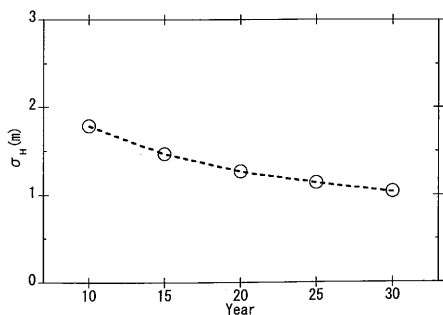


Fig. 4 50年再現期待値の不確かさの解析年数による変化

Table 4 及び Fig. 5 に、国総研が公開している富岡地点の NE から S までの 7 方位における 50 年再現期待値と、30 年間の予測値から求めた方位別の 50 年再現期待値の比較結果を示す。なお、Fig. 5 には 2007 年から 2016 年の 10 年間の予測結果から求めた方位別の 50 年再現期待値も併せて示した。国総研が示す 7 方位の 50 年再現期待値と予測値との差の標準偏差は、10 年間の場合が 1.38m、30 年間の場合が 0.88m と、対象年数を 30 年とすることにより、予測精度が向上した。

Table 3 50年再現期間の不確かさの解析年数による変化

	10年	15年	20年	25年	30年
σ_H (m)	1.79	1.47	1.27	1.14	1.04

Table 4 方位別の 50 年再現期待値の比較

	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S
①国総研(m)	11.06	10.96	10.21	10.18	10.69	11.10	10.96
②Cal(m)	11.42	10.13	9.76	10.21	12.71	11.01	10.32
②/①	1.03	0.92	0.96	1.00	1.19	0.99	0.94

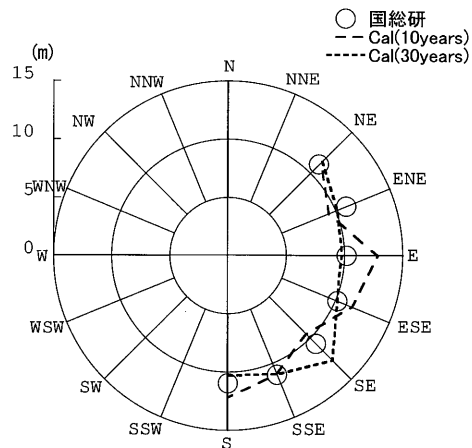


Fig. 5 方位別の 50 年再現期待値の比較

3. 3 波高と波周期の相関関係の再現

洋上風力発電所の設計に関する国際基準である IEC61400-3⁷⁾では、疲労荷重の照査のための気象海象条件を、風速・波高及び波周期の結合確率分布を用いて評価することが定められている。本研究では、種本・石原²⁾による風速・波高及び波周期の結合確率分布モデルを参考に、メソスケールモデル WRF による気象シミュレーションにおける 10m 高度の風速 U_{10} の関数として、有義波高と有義波周期の平均、標準偏差、出現頻度及び有義波高と有義波周期の相関の分布関数をモデル化した。モデル化した分布関数を用いて、モンテカルロシミュレーション(以後、MCS と称す)

を実施し、有義波高・有義波周期の結合確率分布を求めた。

Fig. 6に、2015年から2017年の3年間の観測結果及び30年間のMCSから求めた有義波高と有義波周期の結合確率分布の比較結果を示す。有義波高と有義波周期の結合確率分布の比較では、式(13)に示したIEC61400-3において定められた波高と周期の関係のうち、下限値側の条件($T = 11.1\sqrt{H_S/g}$)に値する境界線も併記した。

$$11.1\sqrt{H_S/g} \leq T \leq 14.3\sqrt{H_S/g} \quad (13)$$

観測結果ではIEC61400-3において定められた波高と波周期の関係の下限値を超える値が殆ど見られないのに対して、下限値を設定しないモンテカルロシミュレーション(MCS)の結果では、下限値を超える値(全体の4.1%)が生成されていることが分かる。本研究では、確率分布モデルを用いて、波を生成する際に、下限値以下の周期となる有義波高は発生しないという条件を加えた。その結果、下限値を設けて発生した有義波周期は観測値に近い分布になると共に、長期間のMCSを実施することにより、短期間の観測結果からは得られない高波高・長周期の波も予測することが可能となった。

イトにおいて、30年間の波浪シミュレーションを実施し、以下の結論を得た。

1. 30年分の波浪シミュレーションを実施し、ピーク及びその周辺の波高値を補正することにより全方位と方位別の50年再現期待値は、国が定める福島沖近傍地点の50年再現期待値を精度良く再現できることを示した。また、波浪シミュレーションの不確かさは解析年数を長くすることにより低減できることを示した。
2. 有義波高と有義波周期の平均、標準偏差、出現頻度及び有義波高と有義波周期の相関の分布関数から求めた確率分布モデルを用いて、30年間の条件付きモンテカルロシミュレーションを実施し、有義波高と有義波周期の分散図を求めた。その結果、波周期の下限値を設定しない場合には、観測では見られない短い周期の波が生成されるが、IEC61400-3で定めた波周期の下限値を設定することにより、この問題が解決された。

謝辞

本研究は、経済産業省の委託業務「福島・浮体式洋上ウインドファーム実証研究事業」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。

参考文献

- 1) 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, 2014, pp.124-131.
- 2) 種本純・石原孟, 風と波の結合確率分布モデルに関する研究, 風力エネルギー学会論文集, Vol.39, No.3, 2015, pp.44-51.
- 3) Tolman H. L. (2014): User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 4.18. NOAA/NWS/NCEP/MMAB Technical Note 316.
- 4) 合田良實, 耐波工学 港湾・海岸構造物の耐波設計, 鹿島出版会, 2008.
- 5) 山口敦・石原孟, 洋上風力発電設備設計のための有義波高の評価時間に関する研究, 第34回風力エネルギー利用シンポジウム, 2012, pp.215-218.
- 6) 間瀬肇・森信人・安田誠宏・作中淳一郎・宇都宮智昭, 北太平洋波浪解析値を用いた沿岸海域における設計波浪の算定システム, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.B2-65, No.1, 2009, pp.146-150.
- 7) IEC61400-3: Wind Turbine - Part 3: Design requirements for offshore wind turbines, pp.128, 2009.

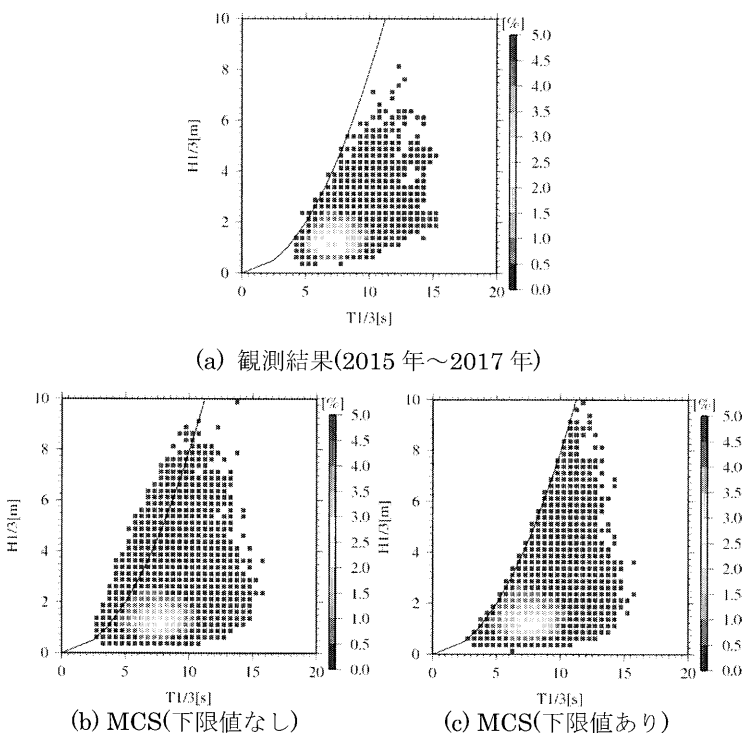


Fig. 6 有義波高と有義波周期の結合確率分布の比較

4. まとめ

本研究では、福島沖浮体式洋上風力発電実証研究サ