

銚子沖における波浪の数値予測に関する研究*

Numerical prediction of Waves at Choshi 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¹⁾。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)}。

本研究では、まず銚子沖洋上風力発電実証サイトにおいて、格子解像度が対象サイト近傍の地形及び水深に与える影響を明らかにすると共に、有義波高・波向の発生頻度の格子解像度による違いを示す。次に、月平均有義波高・有義波周期、年平均有義波高・有義波周期及び有義波高の出現頻度の予測値と観測値を比較することにより、予測精度の評価を行う。最後に、月最大スペクトル有義波高と有義波周期の関係を示すと共に、IEC61400-3の式および合田の式と比較することにより、銚子における波浪特性を明らかにする。

2. 銚子沖における波浪観測と波浪予測

2.1 波浪モデルの概要

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。

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

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

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

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

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

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_m	風による波の線形的な発達を表すソース項
$S_{m'}$	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 計算条件及び予測値の補正方法

計算期間は2011年1月1日から2016年12月13日までの約6年間とした。波浪モデルの計算条件の概要を Table 2 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	ドメイン4
計算期間	2011.1.1~2016.12.13			
水平解像度	0.5° (約50km)	0.2° (約20km)	0.05° (約5km)	0.01° (約1km)
格子数	320×240	80×80	80×80	80×80
海底地形	ETOPO1			
海面条件	NCEP-FNL (1.0°)	WRF (18km)	WRF (6km)	WRF (2km)
側面境界条件	開境界			
スペクトル解像度	ネストダウン(2-way) 周波数: 36(0.0345~0.97Hz) 方向: 36			

本研究では、WWIII による波浪シミュレーションで得られたスペクトル有義波高 H_s 及びスペクトル有義波周期 T_s は、式(6)と式(7)により有義波高 $H_{1/3}$ 及び有

*第 39 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

義波周期 $T_{1/3}$ に変換した.

$$H_{1/3} = 0.956H_s \quad (6)$$

$$T_{1/3} = T_s \quad (7)$$

予測されたピーク波高を補正するために、月最大有義波高及び年最大 20 波に対して、山口・石原⁴⁾の評価時間の補正方法により、式(8)により補正した。予測値は $M=180$ 分 (3 時間) 相当と仮定し、20 分値への補正係数 1.072 を用いた。砕波しない深い水深では間瀬ら⁵⁾の補正係数 1.19 を用いたが、本研究では浅い水深で砕波することを考慮し、補正係数 1.29 とした。式 (9) にある C は予測されたピーク波高 $H_{1/3}^M$ の補正係数 ($1.072 \times 1.29 = 1.38$) である。更にピーク波高の前後 9 時間において式(10)に示す線形補正係数により補正し、 $\Delta t = 9$ の時に補正係数 $C' = 1$ になるようにした。

$$\frac{H_{1/3}^M}{H_{1/3}^{20}} = 1 - 0.05 \left(\frac{M - 20}{60} \right)^{0.3} \quad (8)$$

$$H_{1/3}^{Max} = CH_{1/3}^M \quad (9)$$

$$H'_{1/3,i} = C'H_{1/3,i}^M \quad (10)$$

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

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

ここで、 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。

2.3 波浪観測の概要

本研究では、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) により観測された波浪観測データを用いた。Fig. 1 に、波浪観測装置の設置位置を示す。設置位置は、北緯 35 度 40 分 53 秒、東経 140 度 49 分 18 秒で、離岸距離は約 3km、水深は約 11.9m (平均水位) である。銚子沖における波高と波周期の観測データは、超音波式波高計により観測された値である。

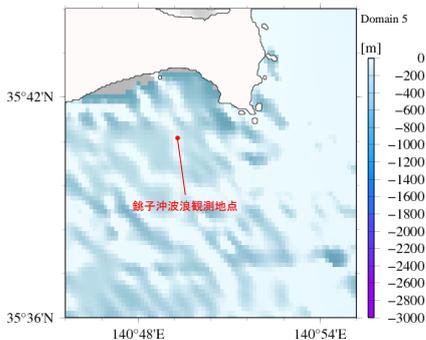


Fig. 1 波浪観測装置の位置

3. 波浪予測の精度検証

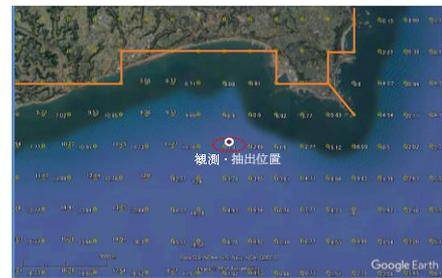
3.1 格子解像度の影響

対象地点の銚子沖洋上風力発電実証サイトは、離岸距離が約 3km と海岸線から近傍に設置された地点であるため、水深及び地形の再現性が予測結果に大きな影響を与えることが考えられる。本研究では、まず格子解像度による海岸線と水深の再現性が予測結果に与える影響を調べた。なお、本研究では漁港及び港湾施設に囲まれた格子点を陸域とし、海岸線からの離岸距離が解像度の 1/3 以下の格子点も陸域とした。また水深データは観測地点の水深と一致するように全水深データに対して補正を行った。

Fig. 2 に、6km と 1km の解像度における水深と海岸線の変化を示す。6km の解像度を用いる場合には、観測位置と計算格子とのずれが生じ、海岸線の再現性も低いが、1km の解像度では、海岸線の再現性が向上していることが分かる。Fig. 3 に、2013 年 2 月から 2014 年 1 月までの 1 年間における観測値と、解像度 6km・1km による有義波高・波向の発生頻度の予測値との比較を示す。解像度 6km の結果は、計算格子の水深は 11.7m と観測位置の水深 11.9m と概ね同じ値であるが、抽出位置が観測位置と大きく異なるため、有義波高と波向の予測値は観測値と大きくずれている。一方、解像度 1km では、計算格子の水深は観測位置の水深と同じであり、近傍の海岸線の形状もほぼ再現されているため、波高及び波向の予測値は観測値とよく一致した。本研究では解像度 1km の予測値を用いることとした。

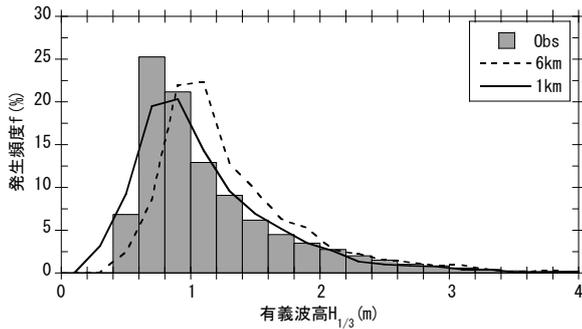


(a) 解像度 6 km

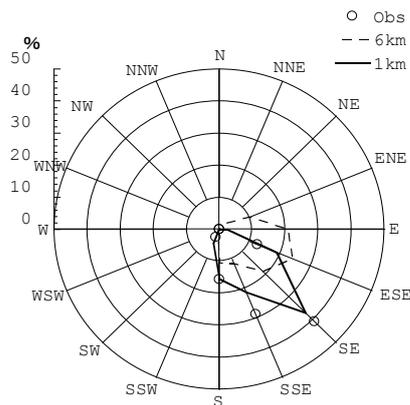


(b) 解像度 1 km

Fig. 2 解像度による計算水深と海岸線への影響 (地図データ: Google, TerraMetrics)



(a) 有義波高



(b) 波向

Fig. 3 有義波高・波向頻度分布の予測値と観測値との比較

3.2 通年波の予測

次に、月平均有義波高・月平均有義波周期及び年平均有義波高・年平均有義波周期の予測値と観測値の比較を行い、予測精度の検証を実施した。

Fig. 4 に、1 年間における月平均有義波高・月平均有義波周期の予測値と観測値の比較結果を示す。有義波高・有義波周期共に、予測値は観測値とよく一致していることが分かる。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 1.18m, 7.71s, 予測値が 1.16m, 8.31s である。両者の比 (予測値/観測値) は、有義波高が 0.983, 有義波周期が 1.078 である。

Fig. 5 に、6 年間における年平均有義波高・年平均有義波周期の予測値と観測値の比較結果を示す。月平均値と同様に、予測値の再現性は良好であり、対象期間 6 年間の平均有義波高及び平均有義波周期は、観測値が 1.18m, 8.31s, 予測値が 1.15m, 8.30s で、両者の比は、有義波高が 0.975, 有義波周期が 0.999 である。

Fig. 6 に、6 年間における有義波高の出現頻度の予測値と観測値の比較結果を示す。本研究で実施したピーク波高及びその周辺の波高の補正により、4~5m 付近における有義波高の出現頻度の予測精度が大きく向

上し、5m~7m の高波高側の出現頻度も精度良く再現できるようになった。

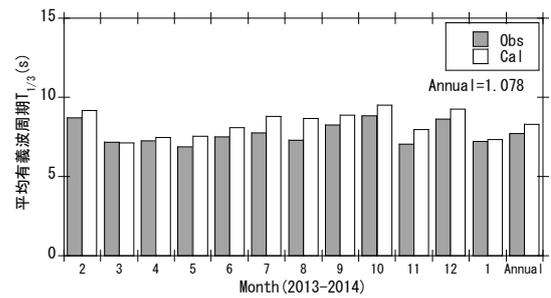
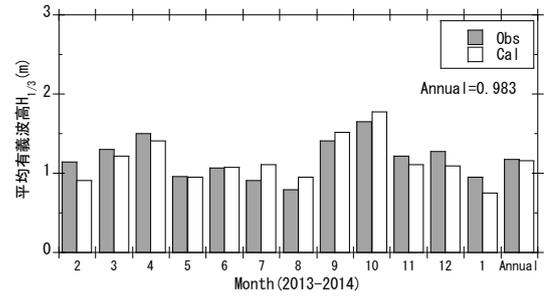


Fig. 4 月平均有義波高・有義波周期の予測と観測の比較

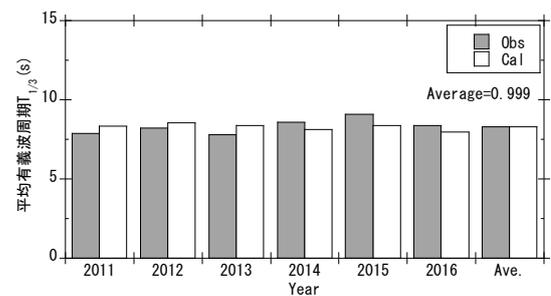
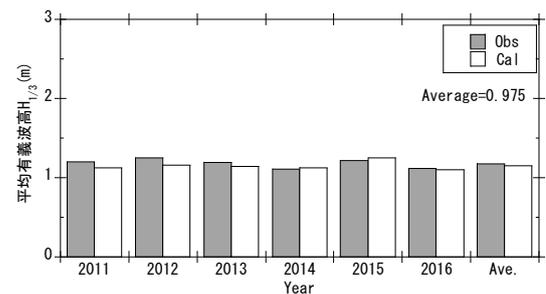


Fig. 5 年平均有義波高・有義波周期の予測と観測との比較

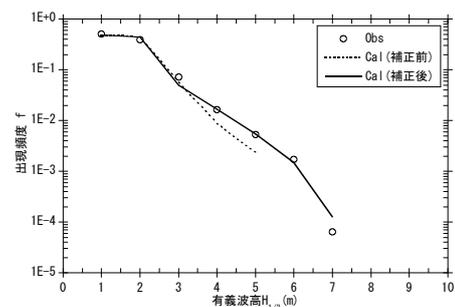


Fig.6 有義波高の出現頻度の予測と観測の比較

3.3 月最大波高と波周期の特性

Fig. 7 には、月最大スペクトル有義波高と有義波周期の関係を示す。IEC61400-3⁶⁾では、スペクトル有義波高と波周期の関係は式(11)により定められており、図中に併記した。

$$11.1\sqrt{H_s/g} \leq T \leq 14.3\sqrt{H_s/g} \quad (11)$$

Fig. 7 から分かるように、観測値と予測値共に、有義波周期の下限値は、式(11)で示す範囲内に収まっているが、上限値は式(11)で示す範囲を大きく超えている。これは銚子沖は太平洋に面しており、うねりの影響を大きく受けていることによるものと思われる。Fig. 7 には、合田⁷⁾により提案した風波・うねりの有義波高と有義波周期の関係を示した。波形勾配 $H_0/L_0=0.04$ 前後は風波に対応し、波形勾配 $H_0/L_0=0.0106$ はうねりに対応する。IEC61400-3 に示す範囲は風波のみの場合の波周期の範囲であり、うねりに伴う波周期を包絡することができないことが分かる。一方、うねりに対応する波形勾配 $H_0/L_0=0.0106$ の式を用いる場合は、ほぼすべての波周期を包絡していることが分かる。

以上のように、銚子沖のような太平洋側のうねりの影響が大きい地点では、IEC61400-3 に示す波周期の範囲を大きく超える波が出現する可能性があり、有義波周期の範囲は合田により提案されている風波・うねりの関係を用いる必要があることが分かった。

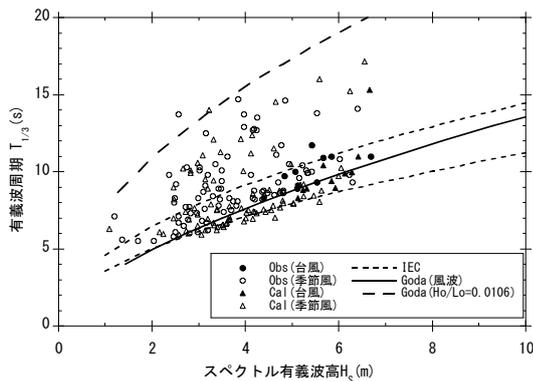


Fig.7 月最大スペクトル有義波高と有義波周期の関係

4. まとめ

本研究では、銚子沖洋上風力発電実証サイトにおいて、波浪シミュレーションにより、有義波高及び有義波周期の特性および月最大スペクトル有義波高と有義波周期の関係を調べ、以下の結論を得た。

1. 本研究において対象とした銚子沖では、格子解像度により水深及び海岸線の再現性が予測結果に大きく影響を与えることを示した。格子解像度を1kmとした場合、予測された波高・波向毎の発生頻度は、観測値と良く一致することを示した。
2. 波浪シミュレーションにより、月別及び年間の平均有義波高・平均有義波周期を精度よく予測できることを示した。またピーク波高及びその周辺の波高に対して補正することにより、有義波高における高波高側の出現頻度を精度よく予測できることも示した。
3. 銚子沖のような太平洋側のうねりの影響が大きい地点では、IEC61400-3 で定めた波周期の範囲を大きく超える波が出現する可能性があり、有義波周期の範囲は合田により提案されている風波・うねりの関係式を用いる必要があることを示した。

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「洋上風況観測システム技術の開発」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) 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かさの評価, 第36回風力エネルギー利用シンポジウム, 2014, pp.333-336.
- 3) Tolman H. L. (2014): User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 4.18. NOAA/NWS/NCEP/MMAB Technical Note 316.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) IEC61400-3: Wind Turbine - Part 3: Design requirements for offshore wind turbines, 2009.
- 7) 合田良實: 耐波設計 港湾・海岸構造物の耐波設計, 鹿島出版会, 2008.