

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

極値波高予測に関する研究*

Extreme wave height prediction by using combined wind field of mesoscale and typhoon model

種本 純**

Jun TANEMOTO

石原 孟***

Takeshi ISHIHARA

1. はじめに

洋上風力発電設備の設計波高を評価するために 50 年再現期間の極値波高を求める必要がある。極値波高を推定する手法として観測値に基づく推定手法が挙げられる。この手法では、長期波浪観測データの年最大波高から極値統計を用いて極値波高を推定することができる。しかし、長期観測データが利用できる場所は限られており、新たな観測箇所の設置には建設コストやデータの蓄積に時間を要するため、シミュレーションにより波浪観測に代替できれば、より低コストで短期間での洋上風力発電設備の導入が期待できる。

近年では、波浪シミュレーションの予測値を観測値に代替する手法が提案されている。森ら¹⁾は北太平洋において全球再解析値の風速場を海面境界条件に用いた長期波浪推算を行い、有義波高の平均値及び出現頻度をよく再現できることを示した。しかし、年最大有義波高及びそれらから求めた極値波高の予測値は、観測値を大きく過小評価する結果となった。

Ou et al.²⁾は、台風時において台風モデルの風速場を海面境界条件に用いた波浪シミュレーションを行い、台風接近時の有義波高の予測値が観測値と良く一致することを示した。しかし、台風接近時以外には有義波高を過小評価している。極値波高を予測する際には有義波高の年最大値から極値分布により 50 年再現期待値を求めるが、遠方の台風により年最大波高がもたらされる場合もあるため、この過小評価は 50 年再現期待値を予測する際に無視できない。

波浪シミュレーションの予測精度は風速の予測精度に依存する。種本と石原³⁾はメソスケールモデルと台風モデルの予測風速の精度を台風の中心からの距離別に評価し、メソスケールモデルの予測風速は台風

の中心付近で過小評価する一方、台風モデルの予測風速は台風の中心からの距離が 250km 以上の場所で大きく過小評価することを明らかにした。この結果は、気象シミュレーションによる風速場を用いた波浪推算で年最大有義波高を過小評価する森ら¹⁾の研究及び台風モデルの風速場を用いた波浪推算で台風の中心から離れた場所での有義波高を過小評価する Ou et al.²⁾の研究と関連しており、風速場の予測値の過小評価が有義波高の予測値の過小評価に繋がることを示唆している。この問題を克服するために、種本と石原³⁾は、メソスケールモデルと台風モデルを合成することで台風の接近距離に依存しない高精度な台風時の風速場の予測手法を提案した。

本研究では、種本と石原³⁾が提案したメソスケールモデルと台風モデルの予測値の合成風速場を用いた波浪シミュレーションにより、極値波高の予測を行う。具体的には鹿島港において 10 年間、中城湾において 18 年間の台風によりもたらされた年最大有義波高をシミュレーションし、観測値から求めた 50 年再現期待値と比較することで、合成風速場を用いた極値波高の予測精度を評価する。また、メソスケールモデル及び台風モデルの風速場を単独で用いた波浪シミュレーションの年最大有義波高の予測値と比較し、波浪シミュレーションに用いる風速場の違いが極値波高の予測精度に与える影響について議論する。

2. 予測手法の概要

2.1 合成風速場

本研究では、波浪シミュレーションの海面境界条件として、種本と石原³⁾により提案された合成風速場を用いる。メソスケールモデルの予測風速を u_M 、台風モデルの風速を u_T とすると、合成風速場の風速 u_C は(1)式により得られる。

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

ここで、 W は重み関数であり、合成風速場では台風の

*平成 25 年 11 月 13 日第 35 回風力エネルギー利用シンポジウムにて講演

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

***会員 東京大学工学系研究科

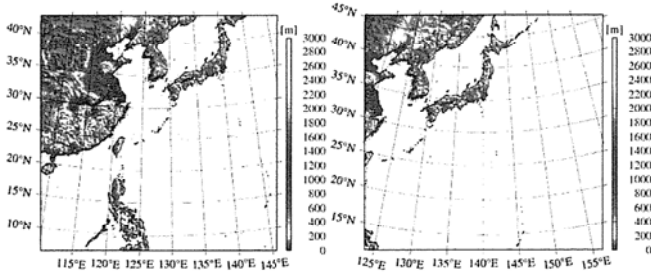


図1 WRF の計算領域

中心に近い場所ほど台風モデルの風速が重みを持つ。詳細は種本と石原³⁾を参照されたい。

メソスケールモデルには、Weather Research and Forecasting (WRF) model Ver.3.4 を用いた。WRF の計算領域を図1に示す。水平解像度は10km×10kmに設定し、400×400の格子を用いた。初期値及び境界値には、National Center for Environmental Prediction / National Center for Atmospheric Research (NCEP / NCAR) Reanalysis Project (以降、NNRP)を用いた。その他の設定は種本と石原³⁾を参照されたい。

台風モデルには石原⁴⁾により提案されたモデルを用いた。台風パラメータは、台風モデル単独で用いる場合には種本と石原³⁾が構築したデータベースを使用し、合成モデルとして用いる場合にはWRFの地上気圧の予測値を用いて新たに同定した。台風モデルでは、一様粗度の風速場が計算されるが、洋上では風速により海面粗度が変化するため、本研究では(2)に示す風速の鉛直を表す分布対数則と(3)式に示すCharnockの関係式を用いて10m高度の風速 u_{10} から海面粗度 z_0 を算出し、台風モデルの鉛直分布式にフィードバックして反復計算を行うことで、海面粗度を考慮した10m高度の風速を導いた。

$$u_{10} = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{10}{z_0} \right) \quad (2)$$

$$z_0 = 0.018 \frac{u_*}{g} \quad (3)$$

ここで、 u_* は摩擦速度、 κ はカルマン定数である。

2.2 波浪モデル

波浪シミュレーションには、第三世代の波浪モデルであるSWAN (Simulating Waves Nearshore)を用いた。本研究では、NOWPHASによる長期観測データが利用できる鹿島港及び中城湾を検証地点として波浪推算を行う。波浪シミュレーションに用いた計算領域を図2に、計算条件を表1にそれぞれ示す。本研究では、有義波高観測時刻に鹿島港及び中城湾から半径

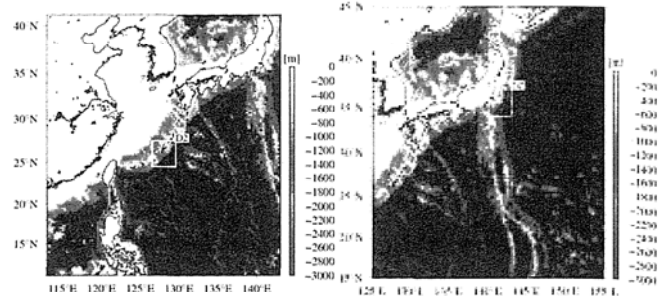


図2 SWAN の計算領域

表1 SWAN の計算条件の概要

	Domain 1	Domain 2
Resolutions	0.25°×0.25°	0.05°×0.05°
Number of grids	120×120	60×60
Boundary	Lateral	Nestdown
condition	Open	
Surface	Typhoon model, mesoscale model or combined wind field	
Spectrum resolution	36 directions, 32 frequencies (0.052Hz~1Hz)	
Time step	20min.	10min.

1000km以内に台風が位置する場合を台風による有義波高と定義し、それぞれの観測地点において、台風による年最大有義波高を観測したイベントをシミュレーションした。シミュレーション期間は、台風が図2に示す大領域に入る1日前から大領域を出た1日後とした。Domain1は開境界とし、Domain2にはDomain1の計算結果を側面境界条件として与えた。海面の境界条件は、メソスケールモデル、台風モデル、合成風速場をそれぞれ1時間毎に与えてシミュレーションを行った。

SWANでは、(4)式に示す Wu の式を用いて抵抗係数 C_d を評価し、(5)式により10m高度の風速から摩擦速度を計算して風から波へのエネルギーを伝達している。

$$C_d \times 10^{-3} = \begin{cases} 1.2875 & u_{10} < 7.5 \text{ m/s} \\ 0.8 + 0.065 \times u_{10} & u_{10} \geq 7.5 \text{ m/s} \end{cases} \quad (4)$$

$$u_* = \sqrt{C_d} u_{10} \quad (5)$$

(4)式では強風時の抵抗係数が考慮されていないため、風速7.5m/s以上で抵抗係数が線形的に大きくなる。Huang⁵⁾らは、メキシコ湾を襲来したハリケーンを対象に、抵抗係数の予測式を変化させたSWANのシミュレーションを行い、(4)式を用いた場合に有義波高の予測値を過大評価することを示すと同時に、(6)式に示す強風時の抵抗係数を考慮したOey et al.⁶⁾の式を推奨している。

$$C_d \times 10^{-3} =$$

$$\begin{cases} 1.2 & u_{10} \leq 11 \text{ m/s} \\ 0.49 + 0.065 \times u_{10} & 11 < u_{10} \leq 19 \text{ m/s} \\ 1.364 + 0.0234 \times u_{10} - 0.00002 \times u_{10}^2 & u_{10} > 19 \text{ m/s} \end{cases} \quad (6)$$

本研究では, Huang⁵⁾ の研究成果を参考に, SWAN に Oey et al.⁶⁾ の式を実装してシミュレーションを行った.

3. 結果

鹿島港において 1996 年から 2007 年までの 12 年間の, 中城湾において 1992 年から 2009 年の 18 年間の台風による年最大有義波高を観測したイベントについて, 波浪シミュレーションを行った.

鹿島港及び中城湾における有義波高の予測値と観測値の時系列の一例を図 3 に示す. 図 3-(a)では, メソスケールモデルの風速場を用いた波浪シミュレーションは, 観測値の時系列における有義波高の最大値を概ね再現できているが, 台風モデルの風速場を用いたシミュレーションでは観測値を大きく過小評価している. 一方, 図 3-(b)では, 台風モデルの風速場を用いた有義波高の予測値は観測値の時系列における有義波高の最大値と概ね一致しているが, メソスケールモデルの風速場を用いた有義波高の予測値は, 観測値を大きく過小評価している. 合成風速場を用いた有義波高の予測値は, 図 3-(a)ではメソスケールモデルの風速場を用いたシミュレーション結果と, 図 3-(b)では台風モデルの風速場を用いたシミュレーション結果とほぼ一致しており, 両事例において観測値の有義波高を

概ね再現できている.

図 4 に, 予測値と観測値の年最大有義波高の比較を, 表 2 に予測値と観測値の Bias を示す. ここで, 本研究で検証に用いた NOWPHAS のデータでは, 2006 年以前は毎偶正時の観測値しか得られないため, 本研究ではシミュレーション結果の毎偶正時の値から年最大有義波高を抽出して比較した. なお, 統計値の算出は, 台風による最大有義波高の観測時刻から±1 日以内の観測値に欠損があった鹿島港の 1996 年, 1998 年, 2002 年, 2006 年及び中城湾の 1993 年, 1996 年, 1997 年, 2003 年を除いて行った. 図 4-(a)から, 鹿島港においては, メソスケールモデルの風速場を用いてシミュレーションした有義波高の予測値は観測値と概ね一致している. 図 4-(b)に示す中城湾においては, メソスケールモデルの風速場を用いた有義波高の予測値が観測値を大きく過小評価するケースがあり, 特に 18 年間で最も大きい有義波高を記録した事例についての予測値は, 観測値より 4m 以上小さい値を示している. その他でも, 6m 以上の年最大有義波高を観測した事例で, 顕著に過小評価することがある. また, 図 4-(a)及び図 4-(b)でともに, 台風モデルによる風速場を用いたシミュレーションでは, 高波高時の観測値を良く再現できているが, 低波高時に大きく過小評価するケースがある. 一方, 合成風速場を用いた波浪シミュレーションでは, 鹿島港, 中城湾でそれぞれ台風モデル, メソスケールモデルの風速場を単独で用いた場合の波浪シミュレーションで起こる有義波高の顕著な過小評価が改善されており, 両地点で最も良い Bias を示

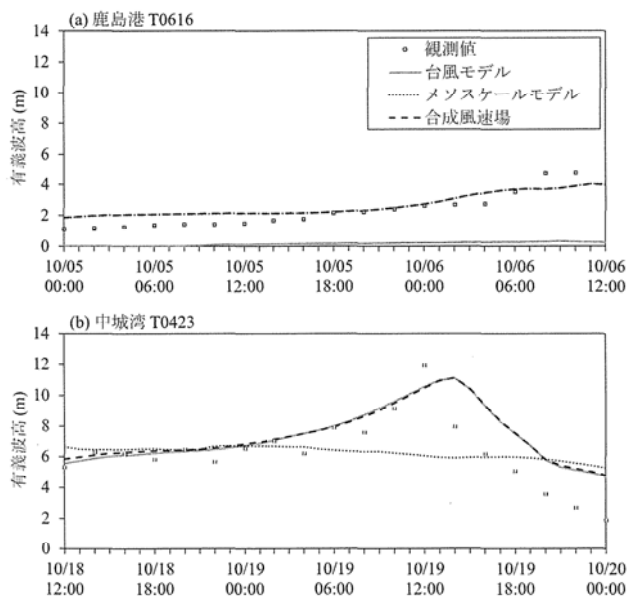


図 3 有義波高の予測値と観測値の時系列

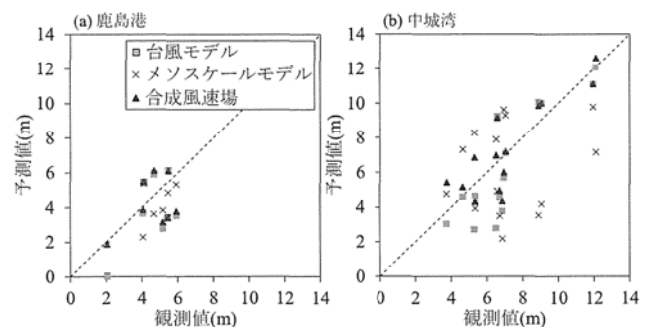


図 4 年最大有義波高の予測値と観測値の比較

表 2 年最大有義波高の Bias (%)

	台風 モデル	メソスケール モデル	合成 風速場
鹿島港	-16.1	-16.5	-7.8
中城湾	-9.4	-14.4	+2.8

している（表2）。

年最大有義波高の予測値と観測値から、有義波高の50年再現期待値を推定した。50年再現期待値は、年最大有義波高の平均値と標準偏差からガンベル分布を用いて求めた。鹿島港及び中城湾における予測値と観測値から求めた年最大有義波高の極値分布を図5に、50年再現期待値を表3に示す。表2において大きな負のBias示したメソスケールモデルの風速場を用いた波浪シミュレーションでは、観測値から求めた極値分布を過小評価し、その結果50年再現期待値を過小評価している。台風モデルの風速場を用いたシミュレーションも同様に表2において負のBiasを示したが、50年再現期待値は過大評価している。これは、図5からわかるように、年最大有義波高が著しく過小評価する年があり、その影響で極値分布の傾きが大きくなるためである。合成風速場を用いた波浪シミュレーションは、鹿島港、中城湾とともに最も精度が高く、その誤差はそれぞれ+4.8%、+5.3%であり、観測値から推定した有義波高の50年再現期待値を良く再現できている。

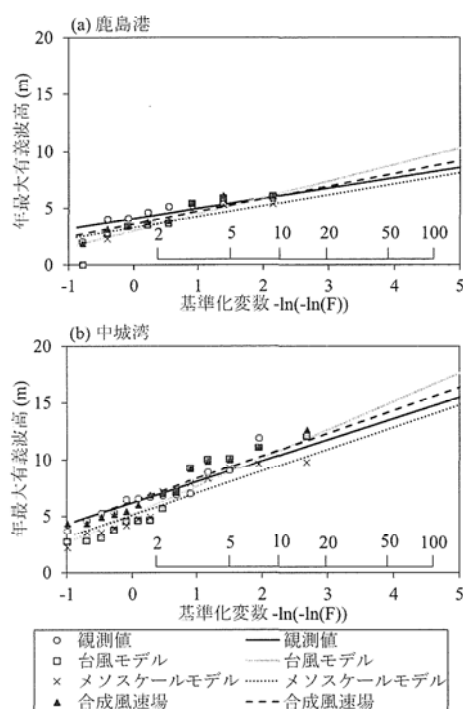


図5 予測値と観測値の年最大有義波高の極値分布

表3 有義波高の50年再現期待値と誤差(%)

	観測 値	台風 モデル	メソスケール モデル	合成 風速場
鹿島港	7.4m	8.7m (+14.8%)	7.0m (-7.1%)	7.9m (+4.8%)
中城湾	13.5m	14.9m (+10.8%)	12.7m (-5.7%)	14.1m (+5.3%)

4. まとめ

本研究では、メソスケールモデル、台風モデル及びそれらの合成風速場を用いて波浪シミュレーションを行い、極値波高の予測精度を評価した。主要な結論を以下に示す。

1. 台風モデルの風速場を用いた波浪シミュレーションでは、高波高時の観測値をよく再現できている。一方、年最大有義波高が小さい時に顕著に過小評価しており、この過小評価が極値分布の傾きに影響するため、観測値から求めた有義波高の50年再現期待値を過大評価する。
2. メソスケールモデルの風速場を用いた波浪シミュレーションでは、高波高を観測した年最大有義波高を過小評価し、観測値から求めた有義波高の50年再現期待値を過小評価する。
3. 合成風速場を用いた波浪シミュレーションにより、台風モデルまたはメソスケールモデルを単独で用いた場合の波浪シミュレーションにより起こる有義波高の顕著な過小評価が改善される。合成風速場を用いた波浪シミュレーションにより予測した有義波高の50年再現期待値と観測値から推定した値との誤差は5%程度であり、観測値から求めた有義波高の50年再現期待値を良く再現している。

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。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) 森信人, 安田誠宏, 間瀬肇: NCEP/NCAR 再解析値を用いた北太平洋波候の解析. 京都大学防災研究所年報, No.52-B, pp.501-508, 2009.
- 2) S.H. Ou, J.M. Liau, T.W. Hsu and S.Y. Tzang: Simulating typhoon waves by SWAN wave model in coastal waters of Taiwan. Ocean Eng., Vol.29, pp.947-971, 2002.
- 3) 種本純, 石原孟: 熱帯低気圧に伴う風速場の予測手法に関する研究. 日本風力エネルギー学会論文集, Vol.37-3, 2013 (印刷中).
- 4) 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性質, その2, 台風時の強風. 日本風工学会論文集, No.66, pp.3-14, 1996.
- 5) Y. Huang, R. H. Weisberg, L. Zheng and M. Zijlema: Gulf of Mexico hurricane wave simulations using SWAN: Bulk formula-based drag coefficient sensitivity for Hurricane Ike. J. Geophys. Res., Vol.118, pp.3916-3938, 2013.
- 6) L.-Y. Oey, T. Ezer, D.-P. Wang, S.-J. Fan, and X.-Q. Yin: Loop Current warming by Hurricane Wilma. Geophys. Res. Lett., Vol.33, L08613, doi: 10.1029/2006GL025873, 2006.