

数値シミュレーションを用いた極値海流予測に関する研究*

Extreme Sea Current Prediction by Using Numerical Simulation

石原 孟**
Takeshi ISHIHARA

種本 純***
Jun TANEMOTO

1. はじめに

浮体式洋上風力発電設備の設計においては、浮体、係留索及び送電ケーブルにかかる終局荷重を評価するために、50年再現期間の海流による極値流速を予測する必要がある。洋上風力発電設備の設計に関する国際基準「IEC61400-3」¹⁾では、50年再現期間の極値流速はサイト固有の気象海象データベースを用いて評価することが定められている。

極値流速は、長期間の観測値から極値分布を用いて外挿することにより求めることができるが、風車建設予定サイトにおいて長期間の観測値が入手できない場合は、数値シミュレーションにより求める必要がある。また、日本周辺海域における海流データベースとして、日本海洋データセンター (Japan Oceanographic Data Center : JODC)²⁾により整備された海流統計値が利用できる。このデータは、1953年から1994年までの41年分の観測値を基に、 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ メッシュで月平均流速及び月最大値が整備されているが、41年分の値を全て集約して月別の統計値を出しているため、極値統計に用いることができない。

著者らはこれまで、数値シミュレーションを用いることにより、洋上風力発電設備の設計に必要な気象海象条件を評価する手法を提案してきた³⁾⁴⁾。本研究では、福島沖浮体式洋上風力発電実証検証サイトにおいて1年間の海流の数値シミュレーションを実施し、観測値と比較することにより予測精度を評価する。さらに、22年分の低解像度長期再解析データと本研究で実施した海流シミュレーション結果を用いて極値流速を予測し、予測結果の妥当性について評価する。

2. 数値シミュレーション及び使用データの概要

本研究では、まず、1年間の海流シミュレーションを実施し、観測値と比較することにより、シミュレーションによる流速の予測精度を評価する。次に、20分毎に得られる海流シミュレーションによる予測流速

と、同一期間の1日毎に得られる長期再解析値による流速の関係から日最大流速の補正係数を算出し、22年分の長期再解析値による年最大流速を補正することで、極値流速を予測する。

以下、2.1節で海流シミュレーションの概要を、2.2節ではシミュレーションの精度を検証するための観測値の概要を述べ、2.3節では長期再解析値について説明する。

2.1 海流シミュレーションの概要

本研究では、プリンストン大学により開発された海洋モデルであるPOM⁵⁾ (Princeton Ocean Model)を用いて、2014年7月1日から2015年6月30日までの1年間の海流シミュレーションを実施する。本研究における計算領域及び計算条件をFig. 1及びTable 1にそれぞれ示す。水平解像度は $0.02^{\circ} \times 0.02^{\circ}$ (約2km)、鉛直層は45層とした。初期条件及び側面境界条件として、国立研究開発法人水産総合研究センター (Fisheries Research Agency of Japan, FRA) 及び国立研究開発法人海洋研究開発機構 (Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, JAMSTEC) が開発した海洋モデルによる再解析値であるFRA-JCOPE 2⁶⁾ (Japan Coastal Ocean Predictability Experiment 2, 以降、JCOPE 2と呼ぶ)を用いた。海面境界条件には、メソスケールモデルWRF (Weather Research and Forecasting

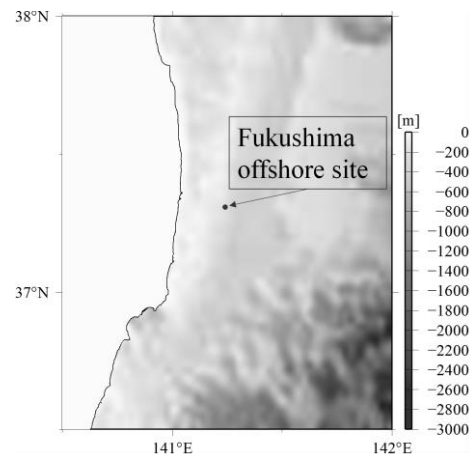


Fig. 1 Computational domain used in the simulation.

*平成27年11月27日第37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

***会員 株式会社風力エネルギー研究所

Table 1 Configuration of POM

Simulation period	1 Jul. 2014 - 30 Jun. 2015
Domain	140.5°E - 142.0°E, 36.5°N-38.0°N
Resolution	Horizontal: 0.02°×0.02° Vertical: 45 layers
Bathymetry	ETOPO 1 (Arc 1 min.)
Initial and lateral boundary	SST, salinity, current speed component and water level obtained from FRA-JCOPE-2 (Every 1 day)
Sea surface boundary	WRF 10m height winds (Every 1 hours)
Time steps	External mode: 2 sec. Internal mode: 30 sec.
Output temporal resolution	20 min.

Model) Ver. 3.7.0 により予測した 10m 高度の風速から Oey et al.⁷⁾ の式を用いて計算した抵抗係数により計算した風応力を用いた。WRF の計算条件については、福島ら⁸⁾ と同じとしたが、計算領域については観測地点を中心とする領域に変更した。

計算結果は、観測値と同様に 20 分毎に出力した。なお、表層における計算結果は風による吹走流の影響を受ける可能性があるため、本研究では水深 0~10m までの各鉛直層において出力した流速を、層厚で加重平均した値を使用した。

2.2 観測データの概要

本研究では、浮体式サブステーションに設置された海象計による流速の観測値を用いた。浮体式サブステーションは、北緯 37 度 18.6486 分、東経 141 度 14.4042 分（世界測地系）、離岸距離約 20km、水深約 120m の地点に設置されている。海象計は、浮体式サブステーションのミドルハル部分に設置されており、水深 16m に位置するセンサにより、水深 5m、7.5m 及び 10m の 3 水深の流速を観測している。検証には、水深 5m において観測された 20 分平均流速を使用した。

2.3 長期再解析値の概要

本研究では、長期再解析値として、2.1 節における海流シミュレーションに用いた JCOPE 2 による流速の再解析値を用いる。Table 2 に JCOPE 2 再解析値の概要を示す。JCOPE 2 再解析値は、1993 年 1 月 1 日から現在までの日本近海（108-180°E, 10.5-62°N）のデータが JAMSTEC によりアーカイブされており、学術目的

Table 2 Summary of archived FRA-JCOPE 2 data

Archived Period	1 Jan. 1993 - Present
Area	108.0-180.0°E, 10.5-62.0°N
Resolution	Horizontal: 0.083°×0.083° Vertical: 46 layers
Temporal resolution	1 day

に限り無償で利用できる。ただし、空間解像度は約 8km、時間解像度は 24 時間と粗いため、本研究では 2.1 節による海流シミュレーションの結果を用いて補正することにより、50 年再現期待値を求める。補正方法の詳細については、4 章で説明する。

3. 海流シミュレーションの精度検証

Fig. 2 に、海流シミュレーションによる予測値（図中 POM）と観測値の比較の一例として、2014 年 10 月の時系列を示す。本研究で実施した POM による予測流速は、観測値の時系列に示される傾向と若干異なる部分もあるが、観測値と概ね同じオーダーの流速を予測できている。また、10 月 15 日付近において観測値に見られる流速の変化を良く再現できている。

Fig. 3 には、海流シミュレーションによる予測値と観測値の月平均流速の比較を、Fig. 4 には、予測値と観測値の月別の Bias を示す。2014 年 12 月から 2015 年 4 月までの期間においては、海象計による観測値に欠損が生じているため、統計値を示していない月があるが、浮体式プラットフォームに設置されたもう一台の観測装置である ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) 流速計による値は得られるため、今後は ADCP 流速計の観測値と併せることで欠損部分を補い、年間の統計値を算出する予定である。POM による予測流速と観測値の月別流速の Bias は、最も大きい 2015 年 5 月で +20% 程度 (0.035m/s) の誤差があるが、全期間の Bias は -10% 程度 (0.02m/s) であり、観測値の年平均流速を概ね再現できている。

Fig. 5 には、予測値と観測値の流配図の比較を示す。シミュレーションによる流配図は、観測値に比べ若干低流速側の出現頻度が多くなっており、流向別の出現頻度についても、観測値より若干広がりを持つ分布になる。卓越流向に着目してみると、シミュレーションでは観測値と 1 方位分のずれが見られるが、観測値に

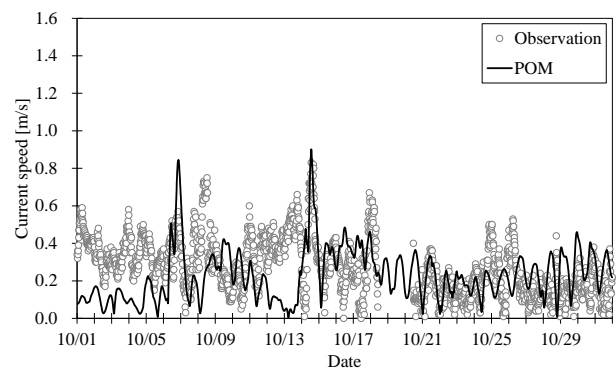


Fig. 2 Comparison of observed and simulated current speeds.

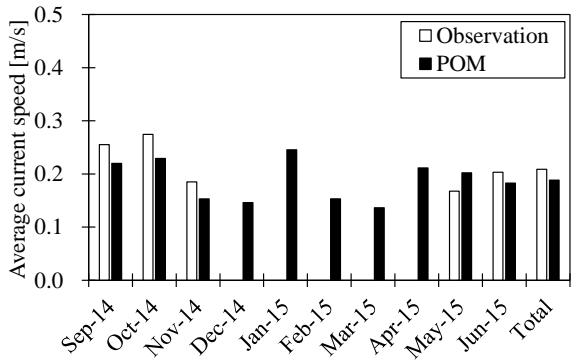


Fig. 3 Comparison of observed and simulated monthly mean current speed.

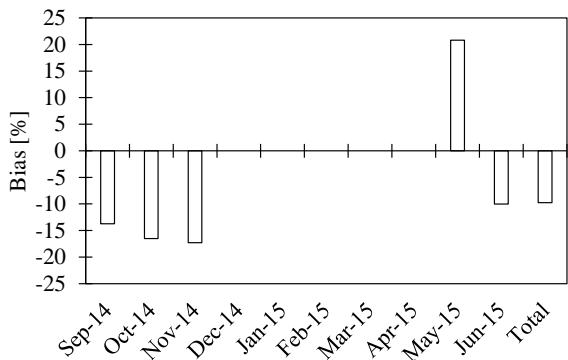
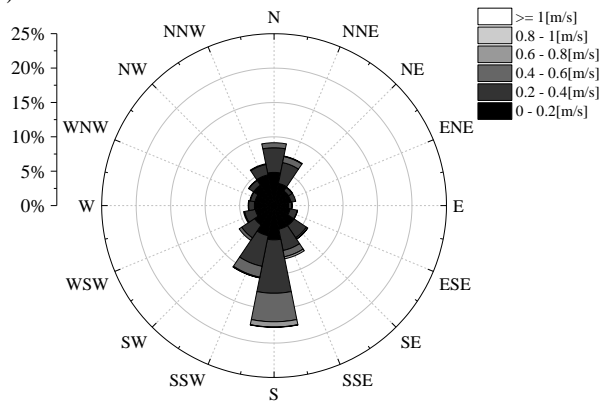


Fig. 4 Monthly biases between observations and simulations.

(a) Observation



(b) POM

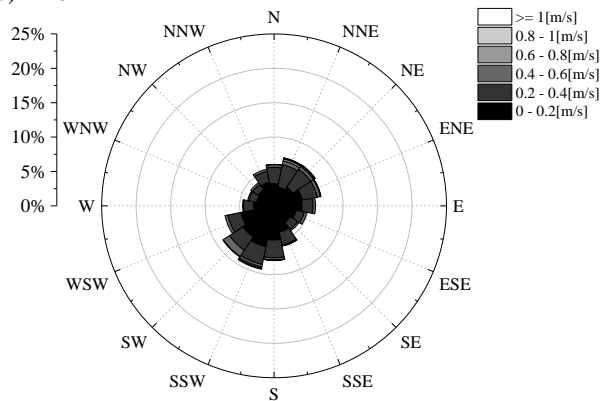


Fig. 5 Comparison of observed and simulated current roses.

見られる南北方向に卓越流向を概ね再現できている。方位のずれは浮体の中央にある支柱の影響も考えられ、今後調べていく予定である。

4. 極値流速の予測

本研究では、3章で実施した POM による海流シミュレーション結果(空間解像度 0.02° 、時間解像度 20 分)を用いて、2.3 節で説明した JCOPE 2 再解析値(空間解像度 0.83° 、時間解像度 24 時間)を補正することにより、22 年分の年最大流速を求め、年最大流速から Gumbel 分布により 50 年再現期間の極値流速を求める。具体的には、本研究においてシミュレーションを実施した 2014 年 7 月 1 日から 2015 年 6 月 30 日までの 1 年間における 2 種類のデータセットから、次式により日最大流速の関係を表す補正係数 a を求める。

$$a = \mu + \sigma$$

ここで、 μ 及び σ は上記 1 年間の POM による日最大流速 U_{POM} 及び JCOPE 2 による日最大流速 U_{JCOPE2} の比の平均値及び標準偏差であり、次式により表される。ただし、本研究では年最大流速に興味があるため、 U_{JCOPE2} の値が 0.15m/s 以上の時の流速比を用いることとし、上記条件の下で μ 及び σ を一度算出し、それらの値を用いて、 $U_{POM}/U_{JCOPE2} \geq \mu + 3\sigma$ 以上となる値を排除した後に、再び算出した μ 及び σ を補正係数として採用した。

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_i \left(\frac{U_{POM,i}}{U_{JCOPE2,i}} \right)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i \left(\frac{U_{POM,i}}{U_{JCOPE2,i}} - \mu \right)^2}$$

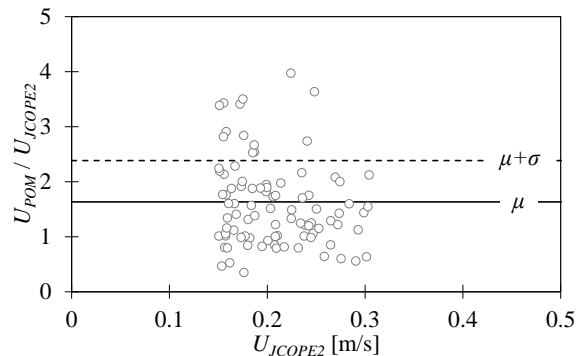


Fig. 6 Comparison of observed and simulated monthly maximum current speed.

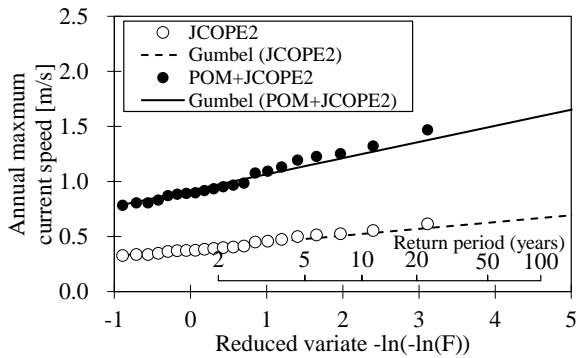


Fig. 7 Comparison of predicted extreme current speeds by using JCOPE 2 and present method (POM+JCOPE2).

Table 3 Comparison of extreme current speeds.

Data source	Extreme current speed	Note
Ishihara et al. ⁹⁾	1.50m/s	50 year recurrence value including uncertainty
JODC ²⁾	1.44m/s	Maximum value of 41 years (1953 - 1994)
Present study	1.49m/s	50 year recurrence value

Fig. 6 に、補正係数の算出に用いた POM 及び JCOPE 2 による日最大流速の比の関係を示す。本研究では上記手法により、 $\mu=1.60\text{m/s}$ 及び $\sigma=0.79\text{m/s}$ という値がえられ、最終的に補正係数 $a=2.38$ を得た。

以上により求めた補正係数を用いて、JCOPE 2 再解析値による 1993 年から 2014 年までの 22 年分の年最大流速を補正し、極値流速を求めた。Gumbel 分布のパラメータは、年最大流速の平均値及び標準偏差から、積率法により算出した。Fig. 7 に、補正前と補正後の極値分布を、Table 3 に、既存データセットまたは既存研究による 50 年再現期待値と、本研究により求めた 50 年再現期待値の比較を示す。石原ら⁹⁾の研究においても、長期再解析値として JCOPE 2 を使用しているが、本研究で実施した POM によりシミュレーションに代替する高解像度データセットとして、JAMSTEC により開発された海潮流予測モデルである JCOPE-t¹⁰⁾ (空間解像度 0.028 度、時間解像度 1 時間) 再解析値による流速を用いている。この研究では、不確かさを考慮することにより、1.5m/s という値が設計値として用いられている。また、JODC²⁾ によるデータセットは、1 章で述べたように、観測値を基に作成された 41 年間の最大流速であり、1.44m/s という値が得られている。本研究の手法により得られた流速の 50 年再現期待は 1.49m/s であり、異なる手法で求められた既存のデータベースである JODC 及び石原らの研究による値と概ね一致する値が得られることから、本手法により予測した極値流速は妥当であると言える。

5. まとめ

本研究では、福島沖浮体式洋上風力発電実証検証サイトにおいて、海流シミュレーションによる極値流速の予測を実施し、以下の結論を得た。

1. 実証検証サイトにおいて 1 年間の海流シミュレーション実施し、観測値と比較した。海流シミュレーションによる予測流速は、現時点では観測値の時系列との違いが見られるものの、月別の平均流速及び最大流速を概ね再現できる。
2. 本研究で実施した海流シミュレーションの結果を用いて、長期再解析値を補正することにより、極値流速を予測した。本手法において予測した流速の 50 年再現期待値は、既存研究及び既存データベースの値と概ね一致する。

謝辞

本研究は、経済産業省の委託業務「福島復興・浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業」で得られた研究成果である。また、FRA-JCOPE 2 のデータは、国立研究開発法人海洋研究開発機構に無償でご提供いただいた。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) IEC61400-3: Wind Turbine - Part 3: Design requirements for offshore wind turbines, pp.128, 2009.
- 2) 日本海洋データセンター：http://www.jodc.go.jp/.
- 3) 石原孟，山口敦：モンテカルロシミュレーションと MCP 法を用いた混合気候における極値風速の予測，日本風工学会論文集，Vol.37, No.3, pp.105-116, 2012.
- 4) 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.
- 5) Mellor G. L.: Users Guide for a three-dimensional, primitive equation numerical ocean model, Princeton University, Princeton, NJ 08544-0710, pp.41, 1998.
- 6) Miyazawa Y., R. Zhang, X. Guo, H. Tamura, D. Ambe, J.-S. Lee, A. Okuno, H. Yoshinari, T. Setou, and K. Ko-matsu: Water mass variability in the western North Pacific detected in a 15-year eddy resolving ocean reanalysis, J. Oceanogr., Vol.65, pp.737-756, 2009.
- 7) 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，pp.333-336, 2014.
- 8) Oey L.-Y., 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.
- 9) 石原孟，嶋田健司，今北明彦：福島沖浮体式洋上風力発電所のための気象・海象条件の評価，第 35 回風力エネルギー利用シンポジウム，pp.256-259, 2013.
- 10) Varlamov S, Y. Miyazawa, X. Guo: Regional nested tide-resolving real-time JCOPEt modeling system for coastal waters of southern Japan, 2nd International Workshop on Modeling the Ocean (IWMO), 2010.