

福島沖における通常流況と極値流速の予測に関する研究

Numerical Prediction of Normal and Extreme Sea Current at Fukushima Offshore Site

石原 孟^{*1} 種本 純^{*2} 山口 敦^{*3}
Takeshi ISHIHARA Jun TANEMOTO Atsushi YAMAGUCHI

^{*1} 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

^{*2} Researcher, Engineering Department, Wind Energy Institute of Tokyo Inc.

^{*3} Project Assistant Professor, Institute of Engineering Innovation, The University of Tokyo

Abstract

Numerical predictions of sea currents are carried out for one year by using Princeton Ocean Model (POM) and validated by using measurement data at Fukushima Floating Offshore wind farm demonstration site. Predicted current speed and direction show good agreement with measurement. Then, a method for the prediction of the variation of annual average current speeds is proposed. In this method, the ratio of the annual mean current obtained from high resolution simulation and that from low resolution simulation are multiplied to the annual mean wind speed obtained from long-term low resolution data. Predicted variation of annual mean current speed show good agreement with that from high resolution simulation. Finally, prediction methods for the extreme current speed with recurrence period of 50 years are discussed. The extreme current speed based on corrected low resolution long-term data shows better agreement with that obtained from long-term high resolution data than those values estimated from high-resolution short-term data.

キーワード：海流の予測，通常流況，極値流速

Key Words：Sea current prediction, Normal current state, Extreme current speed

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荷重を評価するために、海流を求める必要がある。洋上風力発電設備の設計に関する国際基準「IEC61400-3」¹⁾では、これらの海流条件は建設予定地固有のデータベースを用いて評価することが定められている。

建設予定地における海象条件は、近傍の観測値を参照する、あるいは建設予定地において新たに観測を実施することによって評価される。しかし、現地観測では、観測期間が限られているため、50年再現期間の極値を求めるには、数値シミュレーションによる評価が期待される。

近年、数値シミュレーションの技術の向上に伴い、数値シミュレーションを用いた風速²⁾³⁾及び波浪⁴⁾⁵⁾の評価手法を提案してきた。しかし、海流について実

施された例が少なく、観測値による精度検証が望まれる。

本研究では、福島沖浮体式洋上風力発電実証研究サイトにおいて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、短期間の低解像度と高解像度の再解析値の関係をj用いて、長期間の低解像度再解析値を補正することにより、海流の極値流速を予測する手法を提案する。

2. 福島沖における海流観測の概要

本研究では、福島復興・浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業（Floating OffshoRe Wind fARm Demonstration project, FORWARD project）で観測されている海流データを用いる。Fig. 1に、本事業の実施海域を示す。気象海象観測は、北緯37度18.6486分、東経141度14.4042分、離岸距離約20km、水深約120mの地点に設置されている浮体式サブステーションにおいて実施されている。浮体式サブステーション及び測器配置の概観をFig. 2に示す。気象要素については、風速・風向、天気、雨量、日射、温度、海象要素は波

^{*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} 株式会社風力エネルギー研究所

^{*3} 東京大学大学院工学系研究科特任講師
(原稿受付：2016年7月15日)

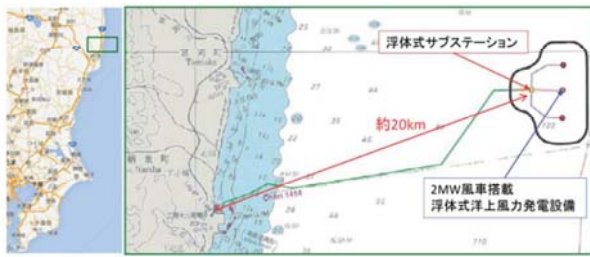


Fig. 1 Location of FORWARD project.

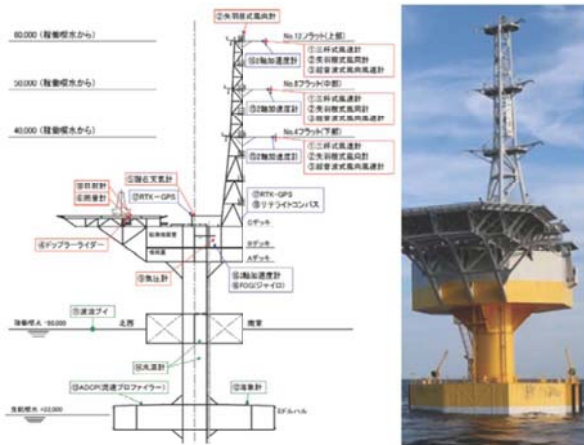


Fig. 2 Overview of the floating substation and the mounting places of measurement equipment.

Table 1 Outline of the measurement equipment of sea current.

	Wave meter	ADCP
Equipment	USW-2000	Workhorse Sentinel
Method	Ultrasonic doppler	
Sampling Frequency	2Hz	1Hz
Range	0-5m/s	±5m/s
Mounting Depth	18m	18m
Measurement Depth	5, 7.5, 10m	1.23, 3.34, 5.45, 7.56, 9.76, 11.78, 13.89m

高・波周期、流速・流向が観測されている。各観測項目について複数種類の観測機器を配置することにより、観測値の信頼性を確保し、測器の不具合などによる欠損時には相互補完することが可能となっている。

海流観測は、浮体式サブステーションのミドルハルに設置された海象計及びADCP流速計により実施されている。これらの測器の概要を Table 1 に示す。ADCP 及び海象計による観測は 2014 年 8 月 7 日及び 2014 年 9 月 18 日より開始されている。本研究では、水深 10m における海象計により観測され、20 分平均値に統計処理された流速及び流向の観測値を用いる。ただし、海象計による観測値が得られなかった 2014 年 8 月～9 月 17 日、12 月 8 日から 2015 年 4 月 28 日までの期間は、10 分平均値に統計処理された、水深 9.76m における ADCP の毎 20 分の流速及び流向を用いた。

3. 数値シミュレーションの概要

3.1 海洋モデルの概要

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 POM⁶⁾ (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。また、株式会社フォーキャスト・オーシャン・プラスの海潮流モデル JCOPE-T⁷⁾ (Japan Coastal Ocean Predictability Experiment with Tide resolving) による再解析値も併せて用いて、比較検討を行う。JCOPE-T は、POM をベースにしたモデルであるため、以下では海洋モデル POM のみ説明する。

POM では、鉛直座標系として水深と水位により無次元化された σ 座標が用いられ、基礎方程式は、連続の式、運動方程式、水温及び塩分濃度の保存式により表される。また、水平方向の乱流の表現は Smagorinsky モデル、鉛直方向は Mellor - Yamada Level 2.5 モデルが実装されている。なお、JCOPE-T では、沿岸域での精度向上を目的とし、潮汐変動による外力が境界条件としても与えられている。

タイムステップは、伝搬速度が速い水位を解くタイムステップと、伝搬速度は比較的遅いが 3 次元構造を解くため計算コストがかかる流速、水温及び塩分濃度を解くタイムステップを分けている。また計算はモード分割法を用いることにより、計算コストを削減している。

3.2 計算条件

本研究における POM の計算領域及び計算条件を Fig. 3 及び Table 2 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は、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 2⁸⁾ (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 Model) Ver. 3.7.0 により予測した 10m 高度の風速から Oey et al.⁹⁾ の式を用いて計算した抵抗係数により計算した風のせん断応力を用いた。WRF の計算条件については、福島ら²⁾ 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。

JCOPE-T による再解析値は、水平解像度

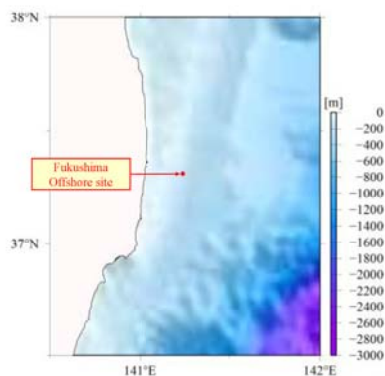


Fig. 3 Computational domain used in this study.

Table 2 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.

0.0278°×0.0278°, 鉛直層 47 層で計算された 1 時間毎の計算結果であり、株式会社フォーキャスト・オーシャン・プラスより提供されている。計算条件の詳細は文献 7 を参照されたい。本研究では海流の極値流速を予測する際、JCOPE-T による 2002 年 1 月 1 日から 2014 年 12 月 31 日までの 13 年間の再解析結果を用いた。

3.3 解析結果の一例

海流の数値シミュレーションによる予測結果と観測値との比較の一例を以下に示す。

(1) 海流の慣性振動

Fig. 4 には福島沖において観測及び予測された流速と流向の時系列の一例を示す。流向は、「海流が向かって行く方向」と定義され、風向の定義と逆であり、注意を有する。Fig. 4 から、流向の観測値には 1 日よりやや短い周期的な変化が見られる。これは海流の慣性振動によるものである。慣性振動は、地球回転によるコリオリ力が外力として働くことにより起こる振動のことであり、空間的に一様かつ外力が加わらない流れ場において見られる。慣性振動の周期 T はコリオリパラメータ $f = 2\omega \sin\phi$ を用いて、 $T = 1/f$ と表され、東西方向成分と南北方向成分が 90 度異なる位相を持つことから北半球では時計回りの回転運動として現れる。ここで、 $\omega = 7.29 \times 10^{-5}$ rad/s は地球の回転角速度、 ϕ

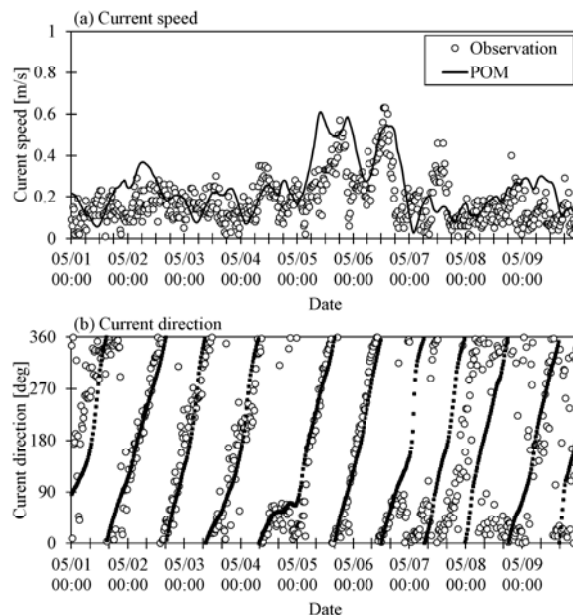


Fig. 4 Comparison of measured and simulated current speeds and directions (at 5m depth).

は緯度であり、本サイトにおける緯度 37.3° を適用すると $T = 19.7$ h となり、観測値から見られる周期と概ね一致する。

POM によるシミュレーション結果は観測値と同様の流向の変化を示していることが分かる。

(2) 強風イベント

次に、検証期間において観測値の最大流速をもたらしたイベントについて検証する。本イベントは、台風が温帯低気圧化した後に、福島沖実証研究事業サイトを襲来したものであり、2014 年 10 月 14 日 13 時 0 分から 20 分まで 20 分間の平均流速は最大値の 0.83m/s を記録した。

Fig. 5 には本イベントにおける平均風速及び平均流速の予測値と観測値の時系列の比較を示す。平均風速の比較では 62.95m におけるライダーの観測値を用いた。Fig. 5 から、10 月 14 日 6 時前後において観測風速が最も大きな値を示しているが、観測流速については同日 6 時を過ぎてから次第に大きくなり、13 時 20 分に最大流速が観測されている。

Fig 6 には 2014 年 10 月 14 日 13 時における気象シミュレーション及び海流シミュレーションにより得られた風速場及び流速場の比較を示す。検証地点より東側に、領域中最も風速が大きい地点がある一方、最も流速が大きくなっている地点は、風速が最も大きい地点より西側に位置することがわかる。

POM によるシミュレーション結果は観測流速のピーク時刻を捉えている。この理由は、海面境界条件に用いた風速の時系列が WRF により再現されているこ

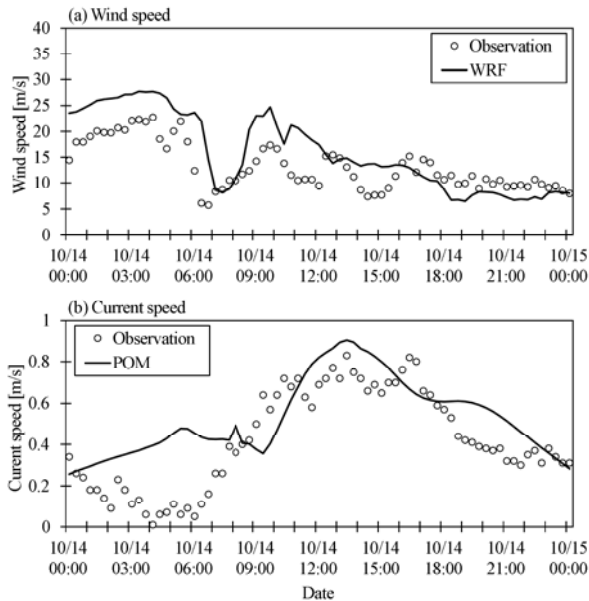


Fig. 5 Comparison of measured and simulated wind speeds and currents speeds (at 62.95m and 5m depth).

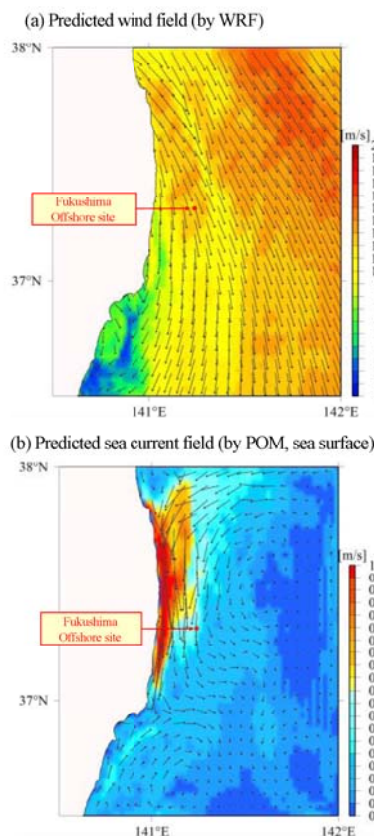


Fig. 6 Wind and current distributions at 13:00 JST on 14th Oct. 2014 (10m height and sea surface).

とによる。

Fig. 5 及び Fig. 6 に示す風速及び流速の時系列及び空間分布の関係から、本イベントにおいては、検証地点から離れた地点における強風が沿岸地域における高い流速をもたらす要因となっている。

以上のように、気象および海流の数値シミュレーション

により、観測値に見られる海流の物理現象を再現できることが示された。

3.4 福島沖における通常流況の評価

本研究では、2014年7月1日から2015年8月までの1年間のシミュレーションを実施し、通年流況を評価する。また、観測値及びJCOPE-T再解析値による値と比較することにより、POMの予測精度を評価する。なお、POMの計算を実施した期間の観測値において、2014年7月は観測開始前、2015年3月は海象計及びADCPがともに欠損であったため、観測データが得られていない。また、JCOPE-T再解析値については2015年6月のデータがアーカイブされていなかったため、上記の期間を除いて統計値を算出した。POMによる予測値及びJCOPE-T再解析値は、水深10mに内挿した値を用いた。

Fig. 7には、POMによるシミュレーション、JCOPE-T再解析値及び観測値による月平均流速の比較を示す。POMによるシミュレーション結果は、8月及び9月について観測値を過小評価、1月、2月については、過大評価している。その他の月については観測値と概ね一致している。またJCOPE-Tの流速は観測値の月平均流速が小さい1月及び2月の平均流速を良く再現している。POMにより予測された年平均流速のBiasは-10%程度であり、通年で見れば観測値の年平均流速を概ね再現していることが分かる。

Fig. 8には、POMによる予測値およびJCOPE-T再解析値と観測値の流速階級別出現頻度の比較を示す。本研究では、流速ビン幅を0.05m/sとして評価した。POMによるシミュレーション結果及びJCOPE-T再解析値による出現頻度は、ほぼ同じ分布をしており、観測値に比べて若干低流速側における出現頻度が多くなるものの、観測値の出現頻度を概ね再現している。

Fig. 9には、POMによる予測値およびJCOPE-T再解析値と観測値の流向別出現頻度の比較を示す。POMによる予測値とJCOPE-T再解析値の卓越流向はおおむね一致しているが、JCOPE-Tは東から南寄りの出現頻度が少なく、北北西に頻度が集中している。また、これらの数値シミュレーション結果と観測値の比較では、卓越流向に一方位(22.5度)分のずれが見られるが、POMによる予測値と観測値に見られる各卓越流向の出現頻度は概ね一致する。また、観測値に見られる東西方向の出現頻度が低いという流況の特徴を再現できている。

Fig. 10には、流向別平均流速の比較を示す。JCOPE-Tによる流速は、観測値を若干過小評価する。POMによ

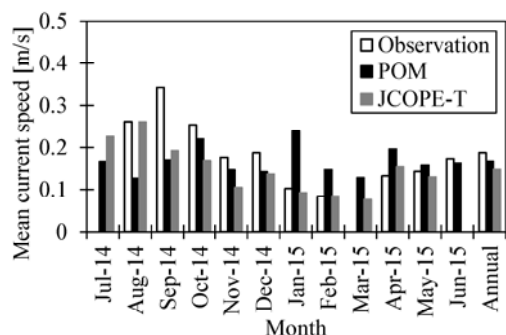


Fig. 7 Comparison of measured and simulated monthly mean current speeds.

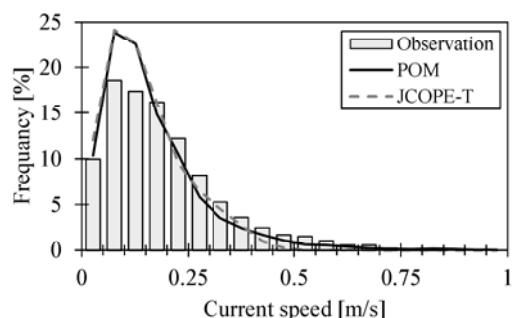


Fig. 8 Comparison of measured and simulated frequency distribution for each current speed bin.

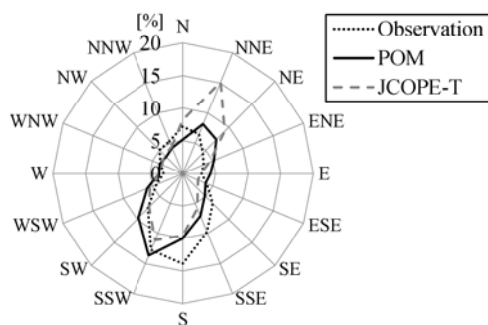


Fig. 9 Comparison of measured and simulated frequency distribution for each current direction.

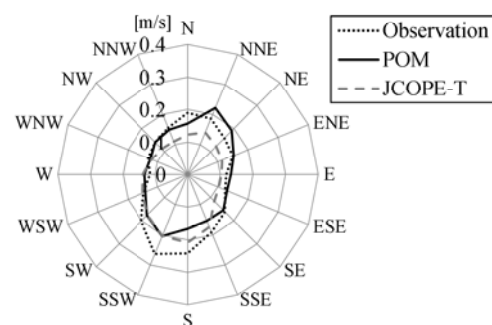


Fig. 10 Comparison of measured and simulated mean current speed for each current direction.

るシミュレーション結果は、南寄りの流向における流速を過小評価しているが、その他の流向については、観測値による平均流速を概ね再現している。

4. 年平均流速の長期変化の予測

4.1 長期再解析値の概要

海流の経年変化を予測するには、長期シミュレーションを実施する必要がある。高解像度で長期のシミュレーションを実施するには計算コストがかかる。本章では、短期間かつ同一期間の低解像度シミュレーション結果と高解像度シミュレーション結果を用いて補正係数を決定し、低解像度シミュレーション結果を補正することにより、年平均流速の長期変化を予測する手法を提案する。

本研究では、長期シミュレーション結果として、JCOPE 2 による流速の再解析値を用いる。Table 3 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、学術目的として無償で提供される。空間解像度は約 8km、時間解像度は 24 時間である。

POM による長期シミュレーションは計算時間がかかるため、本研究では、低解像度の JCOPE 2 再解析データを補正するための高解像度データとして、既にアーカイブされている JCOPE-T による再解析値を用いることとする。また、長期間の観測値が得られないため、JCOPE-T による 2002 年 1 月 1 日から 2014 年 12 月 31 日までの 13 年間の再解析値を真値と見なし、本研究で提案した手法の妥当性の検証を行う。さらに評価水深は、IEC61400-3¹⁾ において吹送流の影響を受けないとされる水深 20m とする。

Table 3 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

4.2 長期変化の予測手法の提案

本研究では、補正係数の算出方法を決定するために、日平均、月平均、年平均した低解像度データと高解像度データの相関を調査した。低解像度データと高解像度データの相関係数を Table 4 に示す。相関係数の算出には 2002 年 1 月 1 日から 2014 年 12 月 31 日までの 13 年間のデータを用いた。Table 5 から、低解像度データと高解像度データの間には正の相関があり、平均値を算出する期間が長くなるほど相関係数は高くなること

Table 4 Correlation coefficients between low and high resolution data.

	Daily average	Monthly average	Annual average
Correlation coefficient	0.35	0.41	0.77

がわかる。日平均流速及び月平均流速の相関係数はそれぞれ 0.35 及び 0.41 である。一方、年平均流速の相関係数は 0.77 であり、高い相関を示している。

以上より、低解像度データと高解像度データは、年平均流速において高い相関があるため、本研究では年平均流速の比を補正係数とし、低解像度長期データを補正することにより、年平均流速の長期変化を求める手法を提案する。具体的には、式(1)による補正係数を用いて、式(2)により各年の年平均流速を求める。

$$C = \overline{U_H} / \overline{U_L} \quad (1)$$

$$\hat{U}_{H,i} = CU_{L,i} \quad (2)$$

ここで、 C は低解像度データによる流速を高解像度データによる流速に変換する補正係数、 $\overline{U_L}$ 及び $\overline{U_H}$ はそれぞれ同一期間の低解像度データ及び高解像度データによる年平均流速であり、本研究では評価期間を 4 年間とした。 $U_{L,i}$ 及び $\hat{U}_{H,i}$ は低解像度データによる各年の年平均流速及び補正後の年平均流速を表し、下付きの i は年を表す。本研究では式(2)により 2002 年から 2014 年までの 13 年間 ($i = 1, 2, \dots, 13$) の年平均流速を算出する。

4.3 予測結果の検証

Fig. 11 に、JCOPE 2、JCOPE-T 及び JCOPE 2 を式(2)により補正することによって得られた年平均流速の長期変化をそれぞれ示す。ここでは例として、2010 年から 2013 年の 4 年間から算出した補正係数 $C = 1.72$ を用いた値を示している。低解像度の再解析値である JCOPE 2 による年平均流速は、高解像度再解析値である JCOPE-T の年平均流速を過小評価している。一方、本提案手法により JCOPE 2 再解析値を補正した年平均流速は、JCOPE-T と概ね同じ値を示しており、年平均流速の比を用いた補正により、高解像度データから求めた年平均流速を再現できることがわかる。

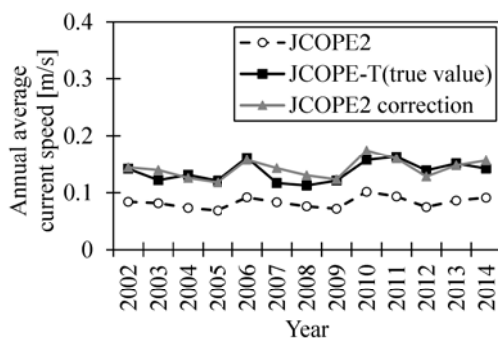


Fig. 11 Comparison of predicted annual average current speeds by using proposed correction method (based on 2010-2013) and direct simulation.

Table 5 Biases and standard deviation errors of annual average current speeds.

	JCOPE2	Based on 2002-2005	Based on 2006-2009	Based on 2010-2013
Correction coefficient	-	1.68	1.59	1.72
Bias [%]	-39.61	1.50	-4.04	3.85
SD Err [%]	8.36	8.18	8.05	8.25

Table 5 に、JCOPE 2 及び提案した補正手法により求めた 13 年間の年平均流速と、真値と見なせる JCOPE-T 再解析値による年平均流速の Bias 及び SD Error (Standard Deviation Error : 誤差の標準偏差) を示す。ここでは、2002 年から 2005 年、2006 年から 2009 年及び 2010 年から 2013 年の各 4 年間の年平均流速から算出した補正係数の値と、それらの値を用いて補正した年平均流速と JCOPE-T 再解析値から直接求めた年平均流速の誤差を定量的に評価している。Table 5 から、JCOPE 2 のデータを用いた場合には、Bias は -40% 程度となり、真値と見なせる JCOPE-T による年平均流速を大きく過小評価している。一方、本提案手法により得られた年平均流速の Bias の絶対値は、いずれの 4 年間から補正係数を算出した場合でも 5% 以下となり、真値と見なせる JCOPE-T と近い値を示している。

5. 極値流速の予測

5.1 水中流の極値流速の予測

極値統計解析においては、年最大値を用いるのが一般的であり、例えば風速に関しては、風力発電設備の設計に関する国際規格 IEC61400-1¹⁰⁾ において 10 年以上の年最大風速を用いることが推奨されている。しかし、10 年分の高解像度シミュレーションを実施するには計算コストがかかる。従って、本研究では、短期間の高解像度データを用いた極値流速の予測手法と補正係数を用いた予測手法を評価する。具体的には、4 年間の月最大流速を用いた極値流速の予測及び本研究で提案した補正方法を用いて 13 年間の低解像度データから得られる流速を補正する手法を用いた極値流速の予測手法を評価する。本提案手法では年最大流速に対して、Table 5 に示した年平均流速から求めた補正係数を掛けることとする。なお、ここでは、2002 年から 2014 年 13 年間の JCOPE-T による高解像度再解析値の年最大流速から極値統計解析により求めた 50 年再現期間の極値流速を真値と仮定し、各予測手法を評価する。

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。極値統計解析を実施するのに用いるデータは独立したイベントによりもたらされた流速を用いる必要があるが、月

最大流速を抽出する際に月を跨いで高流速が予測されるイベントがあるため、本研究では、ある流速時系列の最大値が得られた時刻から±2 日以上離れていれば、独立したイベントによりもたらされた流速であると定義した。水深は吹送流の影響を受けない水深 20m とした。

JCOPE-T 再解析値による 13 年間の年最大流速、4 年間の月最大流速及び JCOPE 2 を提案手法により補正し、13 年間の年最大流速から求めた極値分布を Fig. 12 にそれぞれ示す。ここでは一例として、2010 年から 2013 年の 4 年間のデータを用いた解析結果を示している。JCOPE-T による年最大法と月最大法のガンベル分布は重なっているので注意されたい。Fig. 12 から、いずれの手法を用いても、真値と見なせる JCOPE-T の年最大流速から求めた極値分布を概ね再現できている。

Table 6 には、Fig. 12 に示した各手法により得られた流速の 50 年再現期待値及び真値と見なせる JCOPE-T 再解析値を用いた年最大法による値との誤差を示す。ここでは、2002 年から 2005 年、2006 年から 2009 年及び 2010 年から 2013 年と対象期間を 3 通りに変えて極値統計解析を実施し、各手法において得られた 3 つの値と JCOPE-T の結果との Bias 及び SD Error を示している。Table 6 から、4 年間の月最大流速及び 13 年間の JCOPE 2 を補正した年最大流速のいずれを用いても、真値と見なせる 50 年再現期待値との Bias の絶対値は

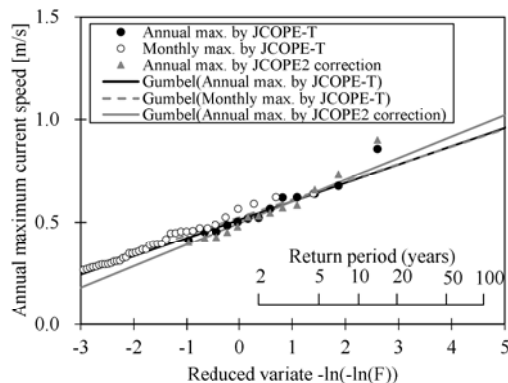


Fig. 12 Comparison of predicted extreme distributions for current speeds (based on 2010-2013).

Table 6 Comparison of extreme current speeds.

	50 years recurrence current speed [m/s] based on			Bias [%]	SDerr [%]
	2002-2005	2006-2009	2010-2013		
Annual max. by JCOPE-T (13years)	0.86			-	-
Monthly max. by JCOPE-T (4 years)	0.77	0.83	0.86	-4.61	5.81
Annual max. by JCOPE2 correction (13years)	0.89	0.84	0.91	1.83	3.35

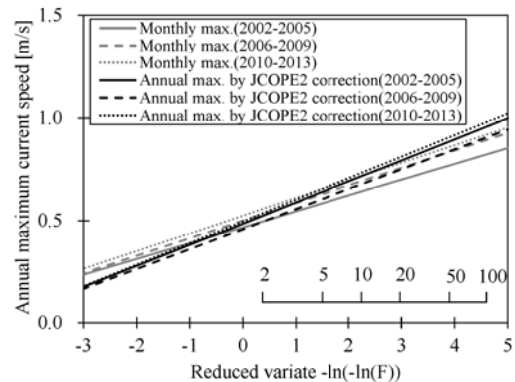


Fig. 13 Comparison of extreme current speed distributions predicted by using different terms database.

5%以下に収まるが、4 年間の月最大流速を用いて算出した結果は、ばらつきが大きい。

Fig. 13 には、月最大流速及び JCOPE 2 を補正した年最大流速を用いて算出した、各 3 つの極値分布の比較を示す。Fig. 13 と Table 6 からわかるように、月最大流速を用いた場合は極値統計解析に用いた年による変動が大きく、最大で 9%程度真値を過小評価している。一方、JCOPE 2 を補正した年最大流速を用いた場合には、真値と同じ 13 年のデータを用いているため、極値分布のばらつきは小さく、いずれの 4 年から求めた補正係数を用いた場合でも、JCOPE-T から求めた 50 年再現期待値を良く再現している。

5.2 極値流速の鉛直分布

本研究では、2002 年から 2014 年までの JCOPE-T 再解析値による各水深の高解像度計算結果を極値統計解析することにより得られた極値流速を真値とし、IEC61400-3¹⁾ による海流の鉛直プロファイルを表現するモデルが 50 年再現期間の極値流速に適用できるかを調べた。

IEC61400-3 による海流モデルについては、Table 7 に示す値を入力値とした。ここで、水深 d は、JCOPE-T のモデル水深の値を用いた。1 時間平均の 10m 高度における極値流速 V_{1-hour} は、台風モンテカルロシミュレーションによる台風時と気象シミュレーションによる非台風時の極値風速から得られた 60m 高度における 50 年再現期待値 46m/s を $\alpha = 0.1$ としたべき指数により 10m 高度に変換した値を用いた。吹走流の影響を受けない水深 20m における流速の 50 年再現期待値は、JCOPE-T 再解析値から求めた。

Table 7 Input values used for the IEC61400-3 current profile model.

Water depth (d)	Wind speed at 10m, (1hours mean) (V_{10m})	50 years recurrent current speed at $z=20$ ($U_{ss}(20)$)
-108.4m	37.6m/s	0.86m/s

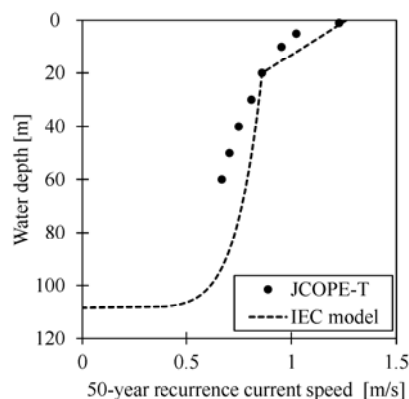


Fig. 14 Comparison of vertical profiles of extreme current speeds predicted by JCOPE-T and IEC 61400-3

Fig. 14 に、各水深における 13 年間の JCOPE-T 再解析値による年最大流速から極値統計解析より得られた流速の 50 年再現期待値と、IEC モデルから求めた 50 年再現期待値の鉛直分布の比較を示す。IEC61400-3 による海流モデルは、いずれの水深においても、JCOPE-T による各水深の流速を極値統計解析することにより得られた 50 年再現期待値より若干大きい値を示しているが、極値流速として評価する際には安全側となることがわかる。

6. 結論

本研究では、福島沖浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業サイトにおいて、海流シミュレーションにより通年の流況予測及び極値流速の予測を実施し、以下の結論を得た。

1. 実証研究サイトにおいて 1 年間の海流シミュレーションを実施し、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、観測値の年平均流速、流向別の出現頻度及び平均流速などの特徴を概ね再現した。
2. 短期間かつ同一期間の低解像度データと高解像度データの年平均流速比を用いた補正手法を提案した。提案手法を用いて長期間の低解像度データによる年平均流速を補正することにより、高解像度データから直接予測した年平均流速の長期変化を精度よく再現した。
3. 短期間の月最大流速及び提案した補正手法による長期間の年最大流速から極値流速の予測を実施し、長期間の高解像度データから予測した流速の 50 年再現期待値と比較した。その結果、短期間の月平均流速を用いる場合には、極値統計解析に用いるデータ期間によるばらつきが大きく、50 年再現期待値を大きく過小評価することがある。一方、本研究で提案した補正手法では、どの期間のデータを用いて

も、JCOPE-T の結果を精度良く再現した。

謝辞

本研究は、経済産業省の「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, 2009.
- 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) 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, 2012, pp.105-116.
- 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, 2014, pp.124-131.
- 5) 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.
- 6) Mellor G. L.: Users Guide for a three-dimensional, primitive equation numerical ocean model, Princeton University, Princeton, NJ 08544-0710, 1998, pp.41.
- 7) 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.
- 8) 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, 2009, pp.737-756.
- 9) 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.
- 10) IEC 61400-1: Wind turbines - part 1: design requirements. Ed. 3, 2005.