Kobe University Repository : Kernel

PDF issue: 2025-12-05

WRFによって計算される海岸線付近の水平風速勾配の検証

見﨑，豪之 ； 大澤，輝夫 ； 香西，克俊 ； 竹山，優子 ； 馬場，康之 ； 川口，浩二

(Citation)
日本風工学会論文集,42(2):57-66

(Issue Date)
2017-04

(Resource Type)
journal article

(Version)
Version of Record

(URL)
https://hdl.handle.net/20.500.14094/90005018

J. of Wind Engineering, JAWE
Vol.42, No.2(No.151), April 2017

日本風工学会論文集
第 42 巻第 2 号（通号第 151 号）平成 29 年 4 月

論　文

WRF によって計算される海岸線付近の水平風速勾配の検証

Validation of Horizontal Gradient of Offshore Wind Speed near a Coastline Simulated by the WRF Model

見﨑豪之[*1]　大澤輝夫[*2]　香西克俊[*3]
Takeshi MISAKI,　Teruo OHSAWA,　Katsutoshi KOZAI
竹山優子[*4]　馬場康之[*5]　川口浩二[*6]
Yuko TAKEYAMA,　Yasuyuki BABA,　Koji KAWAGUCHI

SUMMARY

In this study, the accuracy of the WRF (the Weather Research and Forecasting model)-simulated horizontal gradient of offshore wind speed near a coastline is evaluated using in-situ measurements and Envisat/ASAR (Advanced Synthetic Aperture Rader) images. The WRF simulation is conducted for the coastal waters off Shirahama in Wakayama Prefecture and the accuracy is examined in comparison with in-situ measurements from the offshore platform of Shirahama Oceanographic Observatory (referred to as Shirahama) and the Wakayama Southwest buoy (SW-buoy). It is found that WRF overestimates wind speed at Shirahama through the year, while it underestimates wind speed at SW-buoy only for northwesterly winds, which are predominant through the year. For these reasons, WRF tends to have a weaker horizontal gradient of wind speed between these two sites. Compared with wind speed fields obtained from ASAR, it is found that the underestimation at SW-buoy is partly due to the offshore shift of a strong wind zone, formed by the speed-up effect from two upstream strains, in the WRF simulation.

key words: offshore wind, horizontal wind speed gradient, WRF, SAR

＊1 神戸大学　大学院　海事科学研究科　大学院生
Graduate Student, Graduate School of Maritime Sciences, Kobe University
＊2 神戸大学　大学院　海事科学研究科　准教授
Associate Professor, Graduate School of Maritime Sciences, Kobe University
＊3 神戸大学　大学院　海事科学研究科　教授
Professor, Graduate School of Maritime Sciences, Kobe University
＊4 産業技術総合研究所　再生可能エネルギー研究所　主任研究員
Senior Researcher, Renewable Energy Institute, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology
＊5 京都大学　防災研究所　准教授
Associate Professor, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University
＊6 海上・港湾・航空技術研究所　港湾空港技術研究所　グループ長
Head of Group, Port and Airport Research Institute, National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology
（原稿受理年月日：2016年3月24日，採用決定年月日：2016年12月10日）

1．はじめに

近年，日本においても洋上風力発電の導入可能性を検討するために海上風推定手法の確立が急務となっている。海上風推定手法を考える際には，風況特性の違いから外洋と沿岸海域に分けて考えるとよい[1]。風況の時空間変動が比較的小さい外洋では，時間・空間解像度の低い人工衛星搭載マイクロ波散乱計やマイクロ波放射計といったリモートセンシング技術を用いた手法でも高精度な推定が可能である。これに対して，洋上ウィンドファームの主な開発海域となる海岸線から数十 km 沖合までの沿岸海域では，陸域地形の力学的作用や海陸分布に起因する熱力学的な作用により複雑な風況が形成されるために，高空間解像度で風況推定が可能なメソ気象モデルによる数値シミュレーションや人工衛星搭載合成開口レーダ SAR（Synthetic Aperture Rader）の利用が有力である。メソ気象モデルに関しては，任意の計算領域・期間，空間解像度等を自由に設定できる利点があり，これまで多くの沿岸海域において海上風況推定に用いられてきた[2),3),4)]。一方で，SAR に関しては，撮影時間帯やシーン数の制限およびコストの問題から長期間の平均風速や洋上風力資源を直接推定することは不得手であるが，現実に取得された後方散乱係数に基づく海上風推定値は沿岸域においても現場観測値に次ぐ信頼性を有する推定手法として位置付けられてきた[5),6),7)]。

ただし，信頼性が何より重要となる実際の風況調査においては，メソ気象モデルや SAR の推定精度に不確定性があることが大きな問題となっている。これはひとえに，精度検証に使える海上風観測値が少ないことによるものである。このような状況においては，現場観測と比較する以外にも，異なった情報源に基づく風速推定値を相互に比較することが重要となってくる。本論文が対象とする和歌山県白浜沖海域においては，こうした相互比較が実際になされており，その例として以下のような既往研究がある。

丹羽ら[8)]は，京都大学防災研究所が所有する白浜海象観測所海洋観測鉄塔（以下，白浜鉄塔）の現場観測値を用いて，メソ気象モデル WRF（the Weather Research and Forecasting model）[9)]による数値シミュレーションと合成開口レーダ Envisat/ASAR（Advanced SAR）が撮影した 27 シーンの画像から算出した風速値の比較・検証を行った。その結果，白浜鉄塔では WRF よりも SAR の方が風速の推定精度が高いこと，および，WRF は海岸線に沿って帯状に風速を過大評価すること等が明らかになった。また見﨑ら[10)]は白浜鉄塔およびその沖合 18 km に位置する国土交通省の和歌山南西沖ブイ（以下，南西沖ブイ）において，気象庁メソ客観解析値 MANAL（JMA Meso-ANALysis）の風速値（空間解像度 5 km）と，それを WRF によりダウンスケーリングした風速値（空間解像度 1 km）の精度比較を行った。そして，白浜鉄塔，南西沖ブイの風速値共に，MANAL よりも WRF の方が高精度となることを示した。

1 つのサイトにおける風速推定値の精度も重要ではあるが，岸沖方向にどのように風速が増速するか，すなわち，水平風速勾配の再現性についても，洋上ウィンドファームの適地選定を行う上では大変重要な問題である。

そこで，本研究では観測風速値および SAR 風速を用いて，WRF によって計算される海岸線付近の水平風速勾配の計算精度を検証し，その誤差要因を考察することを目的とする。具体的には，1）現場検証サイトを 1 点から 2 点に増やし，2）最新の WRF 計算技術および入力データを用い，さらに，3）SAR 画像のシーン数を増やすことにより，丹羽ら[8)]の研究の追試を試みる。

第 2 章において本研究で用いる手法を述べた後，第 3 章では，白浜鉄塔および南西沖ブイの現場観測値を用いて WRF および SAR による推定風速値の精度を示し，両者の風速分布の比較を行う。第 4 章では，風速勾配と風速分布を観測風向に基づく風系毎に比較することで WRF の風速計算傾向について議論を行う。第 5 章に，本研究で得られた結果をまとめて結語とする。

2．手法

2．1　メソ気象モデル WRF

本研究では，メソ気象モデル Advanced Research WRF (ARW) version 3.5.1[9)]を使用した。WRF は米国大気研究センター（NCAR）と米国海洋大気庁環境予測センター（NCEP）が共同開発をしているメソスケール予報システムである。その特徴として，放射過程や乱流過程，大気境界層過程，積雲過程等の大気素過程について最新の物理スキームが組み込まれている点が挙げられる。

本研究における WRF の計算領域を図 1 に，計算条件を表 1 にそれぞれ示す。SAR 画像の撮影時刻の前 12 時間を助走期間として計算を行い，2 地点の観測時刻および SAR の撮影時刻が一致するときの計算値を検証に用いた。気象データの初期値・境界値・同化値には MANAL を使用し，下面境界条件である土壌データには米国大気庁環境予測センター最終全球解析値 NCEP FNL を，海面水温には英国気象庁海面水温値 Met office OSTIA を用いた。ここで，同化値とは，気象データのうち，グリッドナッジング手法により 4 次元同化（FDDA）される値である。計

算領域には，対象海域を中心に水平解像度 5 km の第 1 領域と，水平解像度 1 km の第 2 領域から成る 2 つの領域を設定した。鉛直層は地表から 100 hPa までに 40 層を設定し，そのうち大気境界層に相当する最下層から鉛直約 2 km までには 19 層を設けた。データ同化についてはいずれの領域においてもナッジング係数を $3.0\times10^{-4}s^{-1}$ とし，第 1 領域には全層に，第 2 領域には大気境界層（2 km）より上層のみ同化を施した。地表風推定に対して感度の高い大気境界層スキームには MYJ（Mellor-Yamada-Janjic）scheme を選択した。MYJ は Mellor-Yamada レベル 2.5 クロージャーに基づくスキームであり，国内外において多くの実績がある [2), 4), 5), 8), 10)]。観測値との検証には，第 2 領域で算出された毎正時の 10 m 高度推定風速値を用いた。

２．２　合成開口レーダ SAR

SAR はリモートセンシング技術の 1 つであり，マイクロ波を対象物に向けて射出し，その反射波を受信することで，対象物の物性や凹凸等を観測することができるレーダである。センサを極軌道衛星に搭載することで全球規模の観測が可能となる [11)]。SAR が撮影した画像から海上風を求めるためには，一般的に GMF（Geophysi-cal Model Function）と呼ばれる風速推定アルゴリズムを使用する。GMF に画像から求まる後方散乱係数とマイクロ波の入射角およびレーダ照射方向に対する相対風向の 3 つのパラメータを入力することにより，10 m 高度の風速を推定することができる。本研究では，SAR 画像として欧州宇宙機関（ESA）の地球観測衛星 Envisat に搭載された高性能合成開口レーダ ASAR から取得した画像シーンを使用し，GMF には CMOD5.N[12)]を用いた。ただし，本論文では新規に SAR による風速推定はせず，白浜沿岸海域を網羅する 2003 年 3 月 14 日から 2012 年 1 月 16 日の期間の衛星データの中で，Takeyama et al.[5)]が処理を行った計 104 シーンの 10 m 高度推定風速値を使用した。これらのシーンの画像は観測モードが異なる，IMP（the Precision Image Product）と WSM（Wide Swath Mode）を用いており，それぞれシーン数は 64 と 40，画素間隔は 12.5 m と 75 m である。SAR による風速推定手法の詳細については同論文を参照して頂きたい。

２．３　現場観測値

WRF および SAR 推定値の検証には，図 1 に示す白浜沿岸海域の 2 地点の現場観測値を使用した。国土交通省の南西沖ブイ（図中, (a)）は，北緯 33 度 38 分 32 秒，東経 135 度 09 分 24 秒，京都大学防災研究所白浜海象観測所の白浜鉄塔（図中, (b)）は，北緯 33 度 42 分 32 秒，東経 135 度 19 分 58 秒に位置する。2 つの観測サイトの直線距離は約 18 km であり，海岸線からの距離は南西沖ブイで約 20 km，白浜鉄塔で約 2 km である。

検証には，南西沖ブイと白浜鉄塔に設置されたプロペラ型風向風速計から得られた毎正時の 10 分間平均風向・風速値を使用した。観測高度は南西沖ブイで 7 m，白浜鉄塔で 23 m である。WRF および SAR から得た 10 m 高度推定値との検証を行うにあたり，LKB コード [13)]から算出した鉛直プロファイルを用いて，各観測風速値を 10 m 高度の風速値に変換した。鉛直プロファイルはモニン・オブコフ相似則に基づいて次式で示される。

$$u = \frac{u_*}{\kappa}[\ln(\frac{z}{z_0}) - \Psi_u(\zeta)] \tag{1}$$

ここで，u_*は摩擦速度，κ はカルマン定数(=0.4)，z_0 は粗度長，ζ は大気安定度を表すパラメータ，$\Psi_u(\zeta)$は大気安定度の補正を表す普遍関数である。本来，LKB コードは，マイクロ波散乱計の海上風推定アルゴリズムを評価することを目

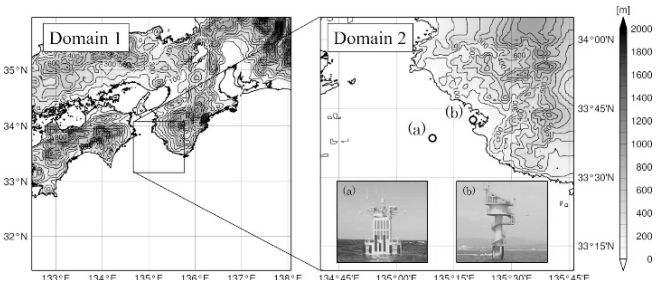

図 1　計算領域と現場観測サイト（(a)南西沖ブイと (b)白浜鉄塔）

Fig. 1 Domains used in the WRF simulation. Two circles in the Domain 2 indicate locations of (a) the Southwest Wakayama buoy and (b) the Shirahama offshore platform.

表 1　計算条件

Table 1 Model configuration

Model		WRF(ARW) version 3.5.1	
Period		12 h corresponding to the overflight of Envisat	
Input data	Geographical data	30 s × 30 s USGS terrain height and land use	
	Soil data	6-hourly, 1 deg× 1 deg NCEP FNL	
	Meteorological data	3-hourly, 5 km × 5 km JMA MANAL	
	SST data	Daily, 0.05 deg × 0.05 deg Met office OSTIA	
Vertical resolution		40 levels (Surface to 100 hPa)	
Nesting option		1 way nesting	
Domains		Domain 1	Domain 2
Horizontal resolution		5 km	1 km
Grids point		101 × 101	101 ×101
Time step		30 sec	6 sec
FDDA		Grid nudging including PBL	Grid nudging excluding below 2000 m
Nudging coefficient		3.0×10^{-4} s^{-1}	3.0×10^{-4} s^{-1}
Physical option	Short wave radiation	Dudhia scheme	
	Long wave radiation	RRTM scheme	
	Microphysics	Ferrier (new Eta) microphysics, operational High-Resolution Window	
	Cumulus parameterization	Kain-Fritsch (new Eta) scheme	
	Planetary Boundary Layer	Mellor-Yamada-Janjic (Eta) TKE scheme	
	Surface Layer	Monin-Obukhov (Janjic Eta) scheme	
	Land surface	Unified Noah land-surface model	

的に開発された，観測風速を等価中立風速に変換するプログラムである。本研究では，その一部のアルゴリズムを利用して，各サイトで観測された気温，相対湿度，海面水温の 3 変数から反復計算によって u_*, z_0, ζ を求めて，(1)式より 10 m 高度風速を算出している。

また風速値の観測分解能は，南西沖ブイで 0.1 m/s，白浜鉄塔で 0.01 m/s である。高度補正を行うにあたっては，南西沖ブイにおける 3 m の高度差により生じる風速の差は小さく，0.1 m/s のオーダーでは表現できないため，両サイトの風速の表記を 0.01 m/s に統一している。

いずれの検証においても，風速値の高度は SAR の観測高度である 10 m に統一したものを用いる。

３．WRF 風速と SAR 風速の比較

３．１　観測サイトにおける精度検証

まず 2 つの観測値を用いて各推定手法の計算精度の比較を行う。図 2 に(a)南西沖ブイと(b)白浜鉄塔における観測値と WRF の風速散布図を，図 3 に SAR 推定値によるものをそれぞれ示す。また各散布図には，直線 y = x とサンプルに対する回帰直線（点線），回帰直線の式を示している。サンプル数は，白浜鉄塔では SAR のシーン数と同じ 104 となるが，南西沖ブイではデータの取得期間が短いため 28 となる。各サイトにおける平均風速値を見ると，南西沖ブイで 4.08 m/s，白浜鉄塔で 4.91 m/s となり，前者よりも後者の方が高い値を示す。これは，白浜鉄塔ではサンプルが 1 年間の期間に偏りなく分布しているのに対し，

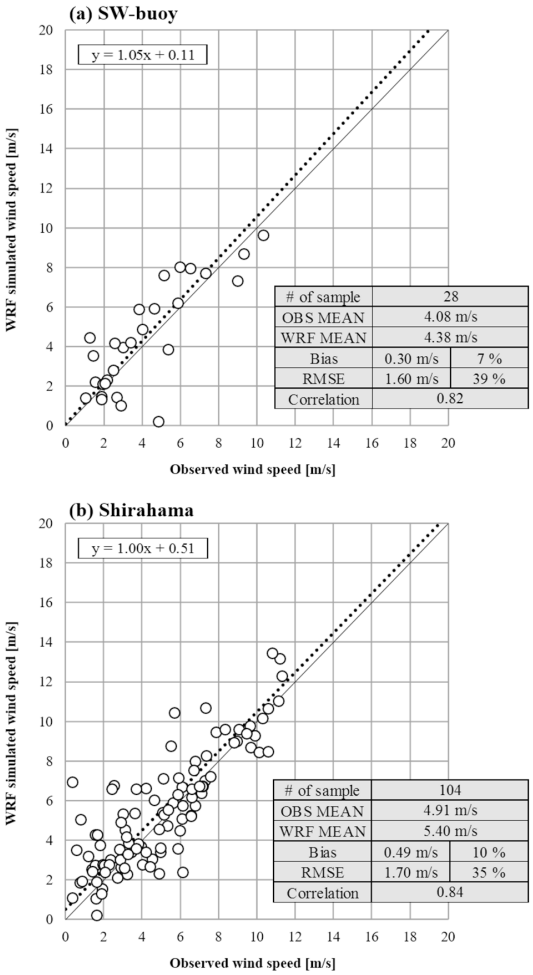

図 2　(a)南西沖ブイと(b)白浜鉄塔における観測値と WRF 計算値の風速散布図

Fig. 2 Scatter plots of WRF versus observed wind speeds at (a) SW-buoy and (b) Shirahama

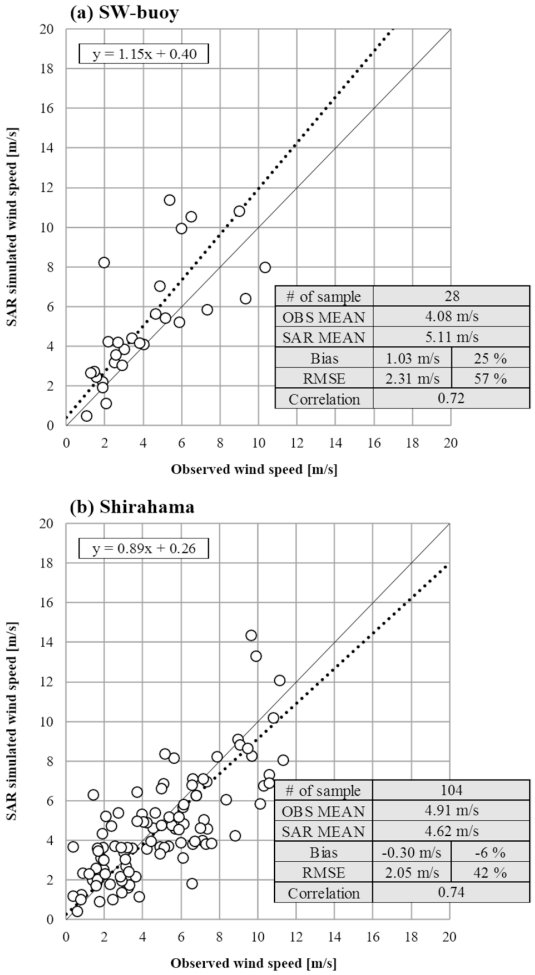

図 3　(a)南西沖ブイと(b)白浜鉄塔における観測値と SAR 計算値の風速散布図

Fig. 3 Scatter plots of SAR versus observed wind speeds at (a) SW-buoy and (b) Shirahama

南西沖ブイでは年間に対してサンプルの取得期間が風速の弱い 6 月～9 月に集中しているからである [10), 14)]。WRF の Bias 値は, 南西沖ブイで 0.30 m/s（平均風速比：7 %）, 白浜鉄塔で 0.49 m/s（10 %）となり, WRF が両サイト共に風速を過大評価することがわかった。この結果は, 見﨑ら [10)] が得た年間計算の結果と一致する。他方で, SAR においては, 南西沖ブイで 1.03 m/s（25 %）, 白浜鉄塔では-0.30 m/s（-6 %）となり, SAR が沖合では風速値を過大評価し, 海岸線付近では過小評価することが示された。RMSE に関しては, WRF が南西沖ブイで 1.83 m/s（36 %）, 白浜鉄塔で 1.70 m/s（35 %）となり, SAR は南西沖ブイで 2.31 m/s（57 %）, 白浜鉄塔で 2.05 m/s（42 %）となった。相関係数に関しては, WRF が南西沖ブイで 0.82, 白浜鉄塔で 0.84 となり, SAR は南西沖ブイで 0.72, 白浜鉄塔で 0.74 となった。

これらの統計量を見比べると, SAR よりも WRF の方が風速推定精度は高いと言える。これは, SAR の精度が WRF を上回ると結論付けた丹羽ら [8)] の結果とは異なる。ただし, 彼らの論文における WRF 風速の統計量（Bias 値が-0.28 m/s, RMSE が 1.66 m/s）と比較すると, 本研究の WRF の精度は明らかに改善している一方で, SAR の精度は悪化している。前者については, 入力データ（OSTIA 等）や計算条件（陸面モデルの利用, 4 次元データ同化のかけ方等）の違いによるものであると考えられる。後者については, 観測モードの違うデータを追加して混在させたことにより精度が悪化したものと考えられる。今回使われている WSM（Wide Swath Mode）の風速推定値は, 丹羽ら [8)] で使われた IMP（Image Mode Precision）よりも精度が悪いことが分かっている [5)]。

次に散布図の中の回帰直線に着目する。WRF の南西沖ブイでの回帰直線の傾きは 1.05, 切片は 0.11 となり, 直線 y＝x に対してわずかに上方に傾く結果となった。一方, 白浜鉄塔での傾きは 1.00, 切片は 0.51 となり, 回帰直線が y＝x に対して上方に平行移動した形となり, WRF が風速の大小に関係なく全体的に過大評価していることがわかる。このことから, WRF の過大評価傾向となる要因は沖合と海岸線付近でやや異なっていることが示唆される。

３．２　推定平均風速分布の比較

図 4 に(a)WRF および(b)SAR による 104 シーンの推定平均風速分布を示す。図中の各観測サイトの位置は白丸

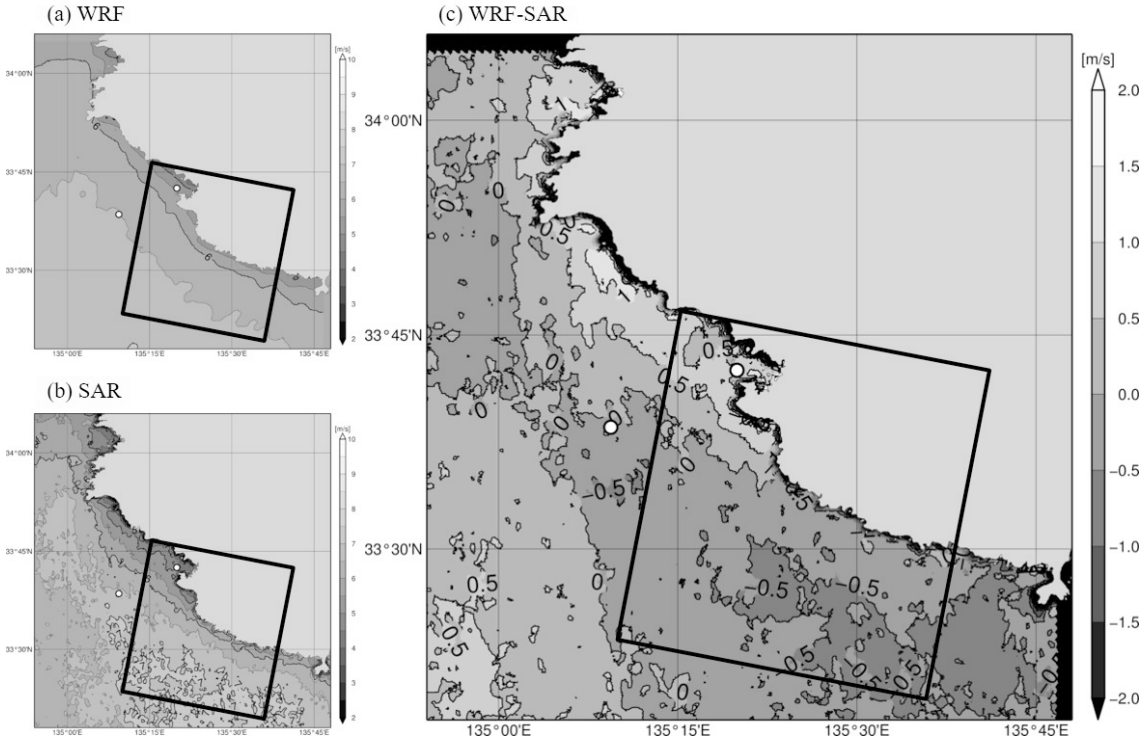

図 4　SAR 画像 104 シーンにおける(a)WRF と(b)SAR による推定平均風速分布および(c) (a)WRF 風速から(b)SAR 風速を引いた分布

Fig. 4 Distributions of mean wind speeds based on (a) WRF and (b) SAR and (c) wind speed difference between (a) WRF and (b) SAR, using 104 SAR images

で表し, SAR 画像が 95 シーン以上取得できた領域を黒枠で囲んでいる。白浜鉄塔周辺に目を向けると, 風速は WRF では 5.5 m/s 前後, SAR では 5.0 m/s 前後となり, SAR に対して WRF の方が高風速な場となっていることがわかる。WRF の風速分布（図 4(a)）を見ると, 南西沖ブイ付近を 6.5 m/s の等値線が走っており, その南西側には北から南に延びる強風域が分布している。ここで, この強風域を巨視的に捉えるために, 図 5 に WRF の第 1 領域における 2010 年の推定平均風速分布を示す。風速は, 白浜沿岸海域では 7.0 m/s 以上, その北西方向に位置する紀淡海峡と鳴門海峡付近では 5.0 m/s～6.0 m/s となっている。この海域では年間を通して北寄りの風が卓越するために風上側から風下側にかけて風速が強まり [14], 白浜沖の強風域が風上側の地形による風の収束効果によって形成されていることを示唆している。

図 4(c)は WRF 風速から SAR 風速を差し引いたものである。白浜鉄塔付近においては風速差＋0.5 m/s 前後の正値が広がっている。WRF が風速値を過大評価し, SAR が過小評価するという白浜鉄塔で見られたそれぞれの計算特性が海岸線に沿って面的に分布していることが見て取れる。これに対して沖合（枠内南部）は, -0.5 m/s 以下の負値が広く帯状に出現している。この負領域は WRF 風速が SAR 風速よりも低くなることを示し, SAR が沖合（南西沖ブイ）で大きく過大評価を示すことによるものである。

上記の結果から, 図 2 で確認された沿岸と沖合の 2 点の Bias 値の相違が図 4 にみられる空間的な特性と関係していることが示唆された。そこで次章では, 4 つの風系から水平風速勾配と風速分布を比較することで, WRF の計算特性に関して議論を進めていく。

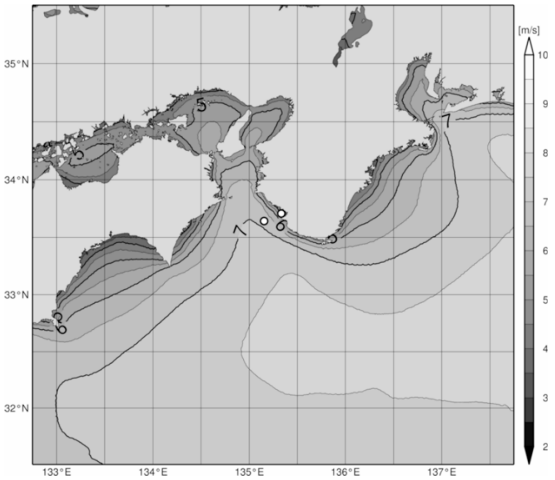

図 5　2010 年における WRF の推定風速の平均分布
Fig. 5 Mean wind speed distribution based on WRF in 2010

4．風系に基づいた検証

4．1　水平風速勾配の検証

本節では, 見﨑ら [10]が得た 2010 年の年間計算結果を利用して, 観測風向値を基に分類した風系から WRF による水平風速勾配を検証する。風系は, 白浜鉄塔に対して, 白浜沖の広範囲の風況を代表する南西沖ブイの観測風向値 θ を用いて分類した。2 地点の観測サイトを結んだ直線とその垂線を方位の基準にして, 4 つの風系（北東風系：21º ≤θ＜111º, 南東風系：111º≤θ＜201º, 南西風系：201º≤θ＜291º, 北西風系：291º≤θ≤360º, 0º≤θ＜21º）に分類し, 観測風速値が 1.0 m/s 未満の場合は静穏と定義する (図 6(a))。2010 年における風系の出現頻度は, 北東風系 19 %, 南東風系 18 %, 南西風系 11 %, 北西風系 50 %となり, 静穏 2 %となった。北西風系の出現頻度が最も高くなるのは, 同海域で年間を通して卓越する北寄りの冬季季節風が含まれているためである。

水平風速勾配は, 通常, ΔU を風速差, Δx を距離としたとき ΔU/Δx で表わされるが, 本研究では見﨑ら [10]と同様に, 定数となる距離 Δx を省略し, 南西沖ブイの風速値から白浜鉄塔の風速値を引いた風速差 ΔU（$U_{SW\text{-}buoy}$-$U_{Shirahama}$）を風速勾配と言及する。

各風系における WRF の推定平均風速分布を図 7 に示す。また同図の白丸に対応した海岸線から沖合までの 2 km 毎の地点の平均風速値を図 8 に示す。北西風系では, 風速が 8.0 m/s 以上の高風速値が広く分布し, 南西沖ブイと白浜鉄塔の間では 0.25 m/s 毎に引かれた等風速線の間隔が密になり風速勾配が大きいことがわかる。一方, 北西風系を除いた 3 つの風系では相対的に低風速場となり, 様々な風況の重ね合わせとなるため, 南西沖ブイ-白浜間の水平風速勾配は小さくなる。

表 2 に, 各風系における WRF 風速と水平風速勾配の統計量を示す。WRF 風速から, いずれの風系においても陸域から離れるほどに風速値が大きくなる様子が見て取れる。これは, WRF が沿岸風況にみられる陸域の影響を適

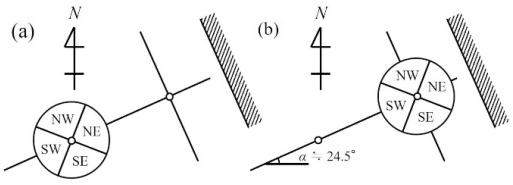

図 6　(a)南西沖ブイと(b)白浜鉄塔における 4 風系の定義
Fig. 6 Definition of four wind conditions at (a) SW-buoy and (b) Shirahama

切に再現できていることを意味する。北西風系では, 2 地点の観測風速値が南西沖ブイで 8.89 m/s, 白浜鉄塔で 6.20 m/s, 風速差が 2.69 m/s となる。Bias 値は, 南西沖ブイでは-0.33 m/s, 白浜鉄塔では 0.38 m/s となり, その差は-0.71 m/s となる。すなわち, WRF が風速値を南西沖ブイで過小評価し, 白浜鉄塔で過大評価することで, 岸沖方向への正の風速勾配を過小評価していることを意味する。一方, 北西風系を除いた風系ではの Bias 値が 2 地点ともに正となるが, 南西沖ブイの方がその絶対値が大きくなるために風速勾配は過大に評価されている。

上記の検証から, WRF が白浜鉄塔ではいずれの風系においても風速値を過大評価し, また南西沖ブイでは卓越する北西風系においてのみ風速値を過小評価していることがわかった。つまり, これらが重なった結果として, 見﨑 [10]らが示した, 年間を通して 2 地点間の水平風速勾配の過小評価傾向が表れていると考えられる。白浜鉄塔の傾向については, 陸域で表れる WRF 風速の過大評価傾向 [2),15)]の影響が海岸線近傍にまで及んでいること, 南西沖ブイの傾向については, 沖合の WRF 風速の精度が北西風系時に現れる強風域の分布に関係していることが示唆される。

4．2　北西風系における検証

前節の結果の中で特筆すべき点は, 沖合海上に高風速域を伴う北西風系においてのみ, 年間結果 [10]と同じように WRF の水平風速勾配が過小評価となったことである。そこで最後に, 同風系における WRF 風速の計算誤差の要因について考察を行う。北西風系の定義は, 前節と同様に 2 地点の観測サイトを結んだ直線および観測風向値 θ ($291^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$, $0^\circ \leq \theta < 21^\circ$) に基づくが, 観測値に関しては, 図 6(b)のように SAR のシーン数が多い白浜鉄塔のものを採用する。この分類により北西風系に該当する SAR 画像データは, 白浜鉄塔では 48, 南西沖ブイでは 2 となる。そのため精度検証には, 南西沖ブイを除き, 白浜鉄塔における検証のみ行う。

図 9 に北西風系における白浜鉄塔の観測値と(a)WRF および(b)SAR による風速散布図を示す。観測平均値は 6.28 m/s となり, 図 2(b)で示した 104 シーンのものよりも高くなる。Bias 値は WRF で 0.13 m/s, SAR で-0.63 m/s となり, 北西風系に限定してみても白浜鉄塔の風速値を WRF が過大評価し, SAR が過小評価するという結果が得られた。RMSE は WRF で 1.47 m/s, SAR で 2.04 m/s, 相関係数は WRF で 0.87, SAR で 0.75 となった。

図 10 は北西風系における(a)WRF と(b)SAR の推定風速分布である。ここでは, SAR 画像が 40 シーン以上得られた図中の黒枠内の領域を中心に議論を進める。白浜鉄塔近くの風速値は, WRF で 6.5 m/s 前後の風速となるが, SAR で 5.5～6.0 m/s の値を示す。沖合では WRF が 8.0 m/s 程度, SAR が 8.5 m/s 以上の風速を示している。巨視的に風速のピークを結んだ強風軸に注目すると, WRF では南西沖ブイの西側を通過するのに対し, SAR では矢印が紀伊水道から枠内にかけてほぼ直線的に示される。すなわち, WRF の方が SAR よりも沖合に強風軸を再現していると

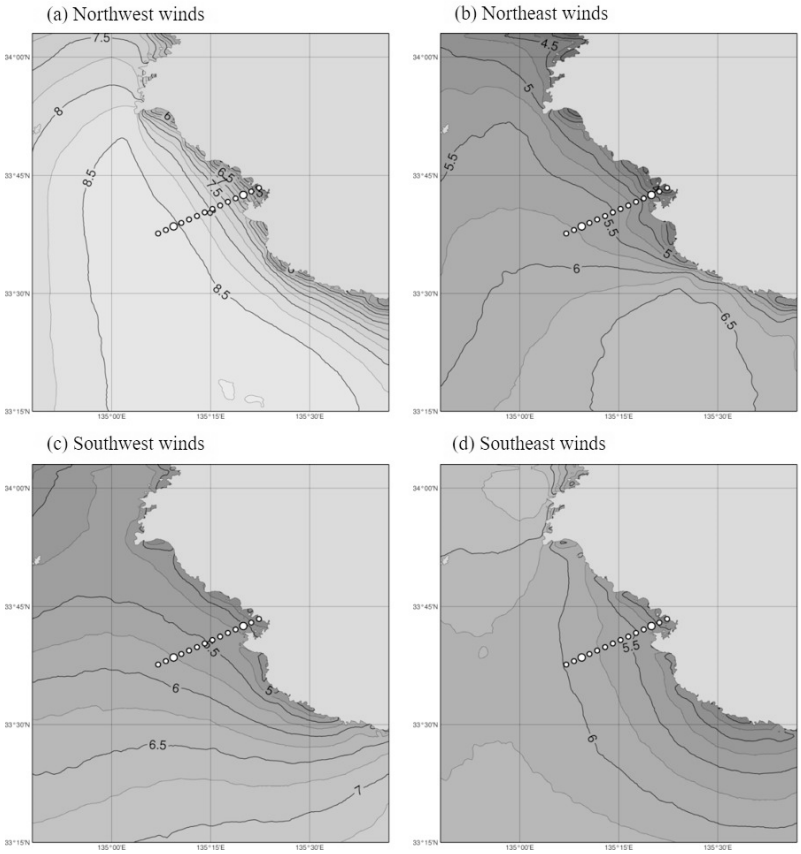

図 7　2010 年の 4 風系における WRF 推定平均風速分布
Fig. 7 Distributions of mean surface wind speed based on WRF for four wind conditions in 2010

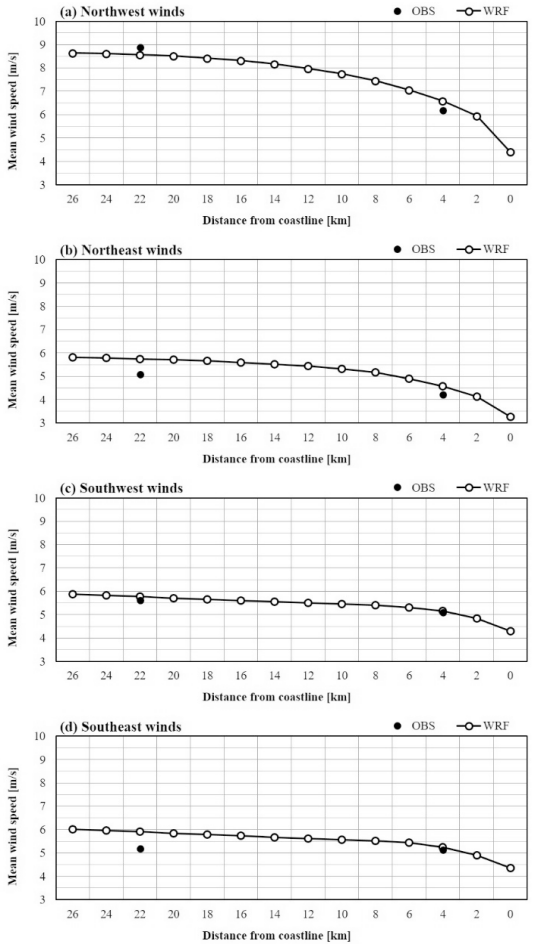

図8　4風系における2つの観測サイトの現場観測値を通る海岸線から沖合までの2 km毎の観測値とWRF風速の平均値

Fig. 8 Mean wind speeds based on WRF as a function of distance from coastline for four wind conditions

表 2　4風系における(a)南西沖ブイと(b)白浜鉄塔でのWRF風速と(c)風速差ΔUの統計量

Table 2 Comparisons of WRF simulated wind speeds with in-situ measurements at (a) SW-buoy and (b) Shirahama and (c) the difference ΔU, for four wind conditions

(a) $U_{SW\text{-}buoy}$

	ALL	NW	NE	SW	SE
OBS MEAN	7.00 m/s	8.89 m/s	5.09 m/s	5.60 m/s	5.17 m/s
WRF MEAN	7.15 m/s	8.57 m/s	5.75 m/s	5.76 m/s	5.90 m/s
Bias	0.14 m/s	-0.33 m/s	0.66 m/s	0.16 m/s	0.73 m/s

(b) $U_{Shirahama}$

	ALL	NW	NE	SW	SE
OBS MEAN	5.45 m/s	6.20 m/s	4.22 m/s	5.09 m/s	5.13 m/s
WRF MEAN	5.74 m/s	6.58 m/s	4.56 m/s	5.15 m/s	5.25 m/s
Bias	0.29 m/s	0.38 m/s	0.35 m/s	0.06 m/s	0.12 m/s

(c) ΔU（$U_{SW\text{-}buoy}$ - $U_{Shirahama}$）

	ALL	NW	NE	SW	SE
OBS MEAN	1.56 m/s	2.69 m/s	0.87 m/s	0.52 m/s	0.04 m/s
WRF MEAN	1.41 m/s	1.99 m/s	1.18 m/s	0.61 m/s	0.65 m/s
Bias	-0.15 m/s	-0.71 m/s	0.31 m/s	0.10 m/s	0.61 m/s

言える。これに伴って, WRF では海岸線から沖合にかけて等風速線の間隔が広まり風速勾配は小さくなる一方で, SAR ではその間隔が強風軸に向かって一定となって相対的に風速勾配が大きくなる。つまり WRF と SAR の強風軸の再現性が異なることで, 両者の沖合の風速分布と風速勾配に明瞭な差が生じたと考えられる。

図10(c)はWRF風速からSAR風速を差し引いたものである。白浜鉄塔付近では0.5 m/s前後の正値が広がり, SAR風速よりもWRF風速の方が大きい。これは白浜鉄塔で見られたWRF風速の過大評価傾向[2),15)]が海岸線近傍に沿って帯状に分布していることを意味する。枠内の南側の領域では図4(c)と同様に-0.5 m/s前後の負値が広く分布していることから, 北西風系のみのシーンが104シーン全体の分布をよく代表していると考えられる。実風況に対し

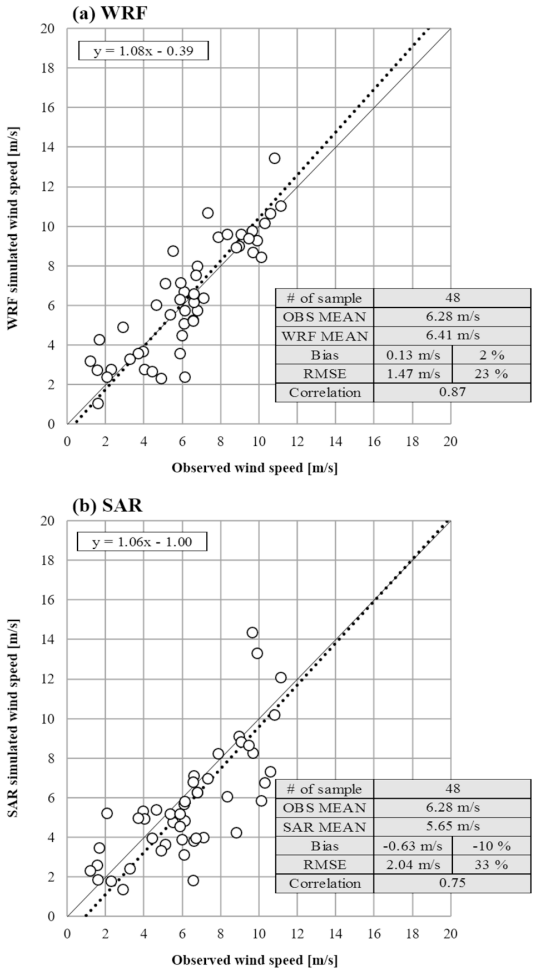

図 9　北西風系における白浜鉄塔での観測値と(a)WRFおよび(b)SAR計算値の風速散布図

Fig. 9 Scatter plots of (a) WRF and (b) SAR versus observed wind speeds at Shirahama for northwest winds

ても WRF が強風軸をより沖合に再現していると仮定すれば，強風域が西側に離れることで南西沖ブイ付近の風速が弱まり，過小評価傾向となったものと考えられる。

沖合における WRF の計算誤差を改善するためには，強風軸の成因となる北寄りの風が吹走する鳴門海峡～友ヶ島水道付近の陸域地形の再現性を向上させることが重要である。こうした地形は，本研究で設定した 5 km 解像度の第 1 領域（親領域）に含まれているが，1 km 解像度の第 2 領域（子領域）には含まれていない（図 1）。そのために今後は，対象地形を網羅するように計算領域を拡張する，さらには陸域格子の風を細かく解くために高解像度化する，といった計算条件の最適化が望まれる。

5．結語

本研究では，沿岸風況の推定精度の向上を目的に，白浜沿岸海域における 2 つの現場観測値から，WRF および SAR により算出された推定海上風の計算精度を検証した。さらに風系毎に分けた風速分布と水平風速勾配を検証することにより，WRF 風速の誤差要因に関して考察を行った。以下に主要な結論をまとめる。

- WRF 風速の Bias は南西沖ブイで 0.30 m/s（7 %），白浜鉄塔で 0.41 m/s（8 %），RMSE は，WRF が南西沖ブイで 1.83 m/s（36 %），白浜鉄塔では 1.70 m/s（35 %）となった。また SAR 風速の Bias は南西沖ブイで 1.03 m/s（25 %），白浜鉄塔で-0.32 m/s（-6 %）となり，RMSE は南西沖ブイで 2.31 m/s（57 %），白浜鉄塔では 2.05 m/s（42 %）となった。
- 両者の統計量を比べると，SAR よりも WRF の方が風速の推定精度が高いことがわかった。ただし，丹羽ら[8]の結果と比較すると，本研究の WRF の精度は改善した一方で，SAR の精度は悪化している。WRF については入力データや計算条件の最適化が図られたこと，SAR については観測モードの異なる画像データを混在させたことが原因であると考えられる。
- WRF が年間を通して 2 地点間の水平風速勾配を過小評価しているのは，海岸線付近で風系に関わらず風速値を過大評価し，沖合で北西風系時に過小評価するためである。前者は陸域における WRF 風速の過大評価傾向[2), 15)]の影響を受けたこと，後者は WRF が実風況よりも強風軸を海岸線から離れた位置に推定するために相対的に風速を弱めたことが原因であると考えられる。

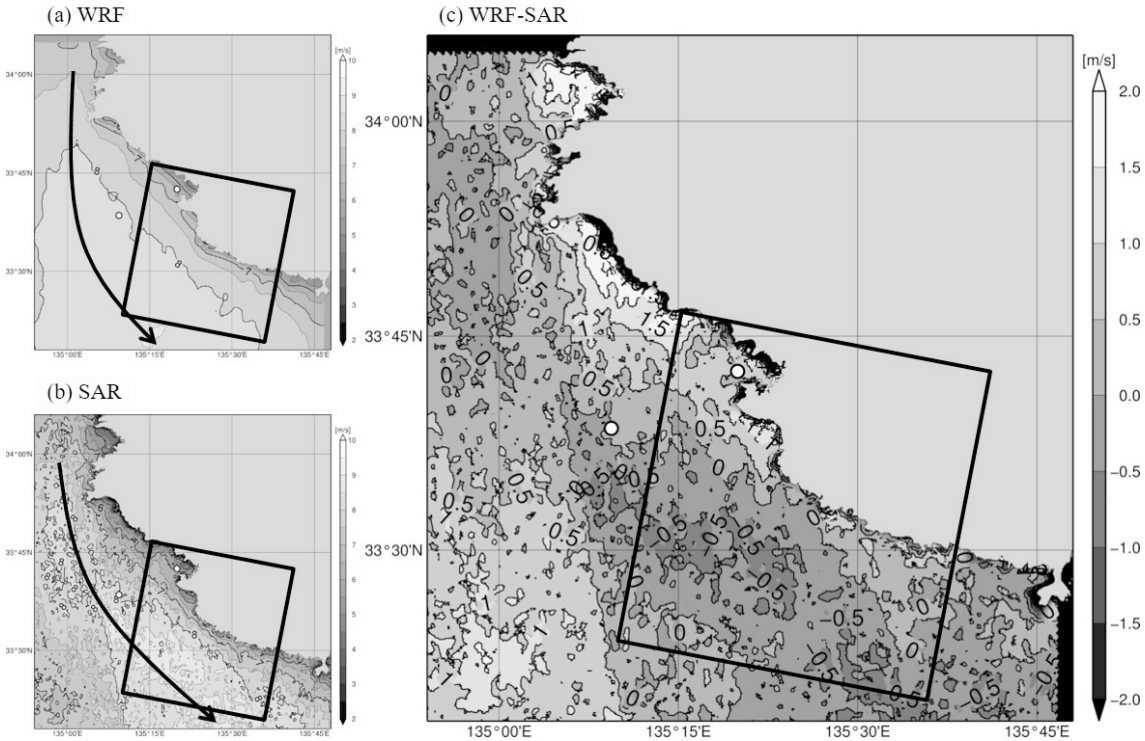

図 10　北西風系における(a)WRF と(b)SAR の推定風速分布および(c) (a)WRF 風速から(b)SAR 風速を引いた分布
Fig. 10 Distributions of mean wind speed for northwest winds based on (a) WRF and (b) SAR and (c) wind speed difference between WRF and SAR

謝辞

南西沖ブイのデータは国土交通省から提供して頂いた。本研究の一部は，科学研究費基盤研究（C）25420865 によるものである。ここに合わせて謝意を表する。また本研究は，平成 26 年度日本風工学会優秀修士論文賞を受賞したものである。

参考文献

1) 大澤輝夫，「洋上風力エネルギー賦存量の推定とその技術的課題」，環境技術, Vol. 41, No. 9, pp.22-27, (2012)

2) Peña D. A., Hahmann, A. N., Hasager, C. B., Bingöl, F., Karagali, I., Badger, J., Badger, M., and Clausen, N-E., "South Baltic Wind Atlas: South Baltic Offshore Wind Energy Regions Project", Roskilde: Danmarks Tekniske Universitet, Risø Nationallaboratoriet for Bæredygtig Energi. (Denmark. Forskningscenter Risoe. Risoe-R; No.1775(EN)), (2011).

3) 石原孟，山口敦，ムハマド ワヒード サーワー，老川進，「洋上風力発電所建設のための海象・気象条件と施工稼働率の数値予測」，日本風力エネルギー学会 論文集, 平成 24 年 2 月 第 35 巻 第 4 号, pp.7-14, (2012)

4) Giannakopoulou, E. M. and R. Nhili, "WRF model methodology for offshore wind energy applications, Hindawi Publishing Corporation, advances in meteorology", Vol. 2014, Article ID 319819, p.14, (2014)

5) Takeyama Y., T. Ohsawa, T. Yamashita, K. Kozai, Y. Muto, Y. Baba and K. Kawaguchi, "Estimation of Offshore Wind Resources in Coastal Waters off Shirahama Using ENVISAT ASAR Images", Remote Sensing, Vol. 5, No. 6, pp.2891-2894, (2013)

6) Hasager, C.B., Badger, M., Peña, A., Larsén, X.G., Bingöl, F., "SAR-based wind resource statistics in the Baltic Sea", Remote Sensing, 3, 117–144, (2011)

7) Christiansen, M.B., Koch, W., Horstmann, J., Hasager, C.B., Nielsen, M. "Wind resource assessment from C-band SAR", Remote Sensing, Environ. 2006, 105, pp.68–81, (2006)

8) 丹羽亮介，大澤輝夫，嶋田進，香西克俊，竹山優子，「合成開口レーダー画像を用いたメソ気象モデル WRF による沿岸海上風速分布」，第 21 回風工学シンポジウム論文集, pp.203-208, (2010)

9) NCAR-MMM, "User's guide for the Advanced Research WRF (ARW) version 3", 4 modeling system, p.384, (2014)

10) 見﨑豪之，大澤輝夫，香西克俊，馬場康之，川口浩二，「白浜沿岸海域における WRF および MANAL による推定風速場の精度検証」，第 23 回風工学シンポジウム論文集, pp.505-510, (2014)

11) 大内和夫，「リモートセンシングのための合成開口レーダの基礎 第 2 版」，東京電機大学出版局, pp.154-170, (2009)

12) Hersbach, H., "CMOD5.N: A C-band geophysical model function for equivalent neutral wind", ECMWF Technical Memoranda, p.20, (2008)

13) Liu, W. T. and W. Tang, "Equivalent Neutral Wind, Jet Propulsion Laboratory Publication", 96-17, p.8, (1996)

14) Shimada S., T. Ohsawa, S. Serizawa, I. Yoneda, "Characteristics of offshore winds at Shirahama Oceanographic Observatory", Proc. of the Nineteenth (2009) International Offshore and Polar Engineering Conference, 21-26 Jun 2009, Osaka, Japan, pp.424-428, (2009)

15) Shimada S., T. Ohsawa, S. Chikaoka, and K. Kozai, "Accuracy of the wind speed profile in the lower PBL as simulated by the WRF model", SOLA, 7, pp.109-112, (2011)

16) Takeyama Y., T. Ohsawa, K. Kozai, Hasager C. B., M. Badger, S. Shimada, T. Kogaki, "Fetch effect on sea surface wind speed retrieval from SAR image in coastal waters", Proc. of EWEA OFFSHORE 2015, 10-12 March 2015, Copenhagen, PO.174, p.10, (2015)