

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 12 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760679

研究課題名(和文) 合成開口レーダ画像および海洋観測に基づく海上風シミュレーションの精度向上

研究課題名(英文) Sea surface wind speed retrievals with high accuracies by a Synthetic aperture radar and a mesoscale meteorological model

研究代表者

竹山 優子 (Takeyama, Yuko)

独立行政法人産業技術総合研究所・再生可能エネルギー研究センター・主任研究員

研究者番号：00510025

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、洋上風力発電に資する日本沿岸域の海上風推定として、人工衛星搭載合成開口レーダ(SAR)と数値気象モデルを用いた手法開発を実施した。まずはSARによる海上風推定では、既存のモデル関数(GMF)の比較によって大気安定度がSAR風速推定に与える影響について評価し、さらにこの影響を除くためのGMF選定と影響補正手法を提案した。また、風速推定に不可欠な風向情報として数値気象モデルWRFの出力風向の有効性を示し、SARと気象モデルを組み合わせた海上風手法を確立した。最後に、この手法を使って和歌山県白浜沖の風況マップを作成し、その精度評価を実施した。

研究成果の概要(英文)：In this project, methods for sea surface wind speed retrievals have been developed by a Synthetic aperture radar (SAR) and a mesoscale meteorological model to select a suitable site of an offshore wind farm in Japan. Firstly, SAR retrieved wind speeds using some geophysical model functions (GMFs) are compared with in-situ wind speeds to estimate an effects of atmospheric stabilities on the SAR retrieved wind. Then a method for a reducing the effect has been suggested. In the next step, it is clarified that wind directions from the mesoscale meteorological model, WRF are useful as input wind directions for the GMF to retrieve the sea surface wind speed from SAR images. Finally, offshore wind resource maps offshore Shirahama have been made, and accuracies of the maps are evaluated using in-situ measurements.

研究分野：海洋気象学

キーワード：洋上風力発電 合成開口レーダ リモートセンシング 数値気象モデル

1. 研究開始当初の背景

(1) 研究着想の背景

先の大震災とその後の原発事故の経験から、安心・安全かつ安定した電力供給のエネルギー源が求められ、自然エネルギーの実用にむけた研究開発は不可欠なものとなってきた。特に風力発電は発電効率が低いとされ、今後の自然エネルギーの中核を担うものである。近年、風車の低周波問題、騒音問題を解消するため、また、より安定した大きな風速を獲得するため、風車の設置は洋上へと移行する傾向にある。洋上風力発電の導入量は欧州を中心に近年急増しており、EU 圏内の導入量は現在の 2GW (原発 2 基分) から 2030 年には 150GW まで拡大すると予測されている。日本においても洋上風力発電への取り組みはここ 5、6 年で本格化しつつあり、平成 21 年度からは新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) による実証研究プロジェクトも始まっている。このような背景の中で、申請者は気象学的な観点から、風車の適地選定に必要な洋上風況把握の研究に従事してきた。洋上では陸上と比べて気象観測ポイントが少なく、風車適地選定に活用できる十分な空間分解能および時間分解能を有したデータが存在しない。過去の研究では、風力発電の先進国である欧州で行われている手法をそのまま日本沿岸域で適応しても、実用レベルに達しない事が判明している。この状況を打開するため、欧州の従来手法を日本沿岸域に適したものに改良することが不可欠であるという結論に至った。これが本研究の着想に至った経緯であり、洋上風況マップの作成を最終目標とする長期計画の中では、従来研究で浮き彫りになった問題点を具体的に解決する主要段階として位置付ける。

(2) 洋上風況把握手法の課題

発電量(風力エネルギー)は風速の 3 乗に比例するため、風速推定での 10% の誤差は約 30% の発電量推定誤差につながる。日本沿岸ではメソ気象モデルによる年平均風速の誤差はしばしば 10% を超え、10 分平均風速の誤差に至っては 40% 以上にもなる。それぞれ数%、10 数% という欧州での海上風推定精度とは比べ物にならない程悪い。また、合成開口レーダ (SAR) を用いた海上風推定誤差は 10% から 20% 程度であり、瞬間の風推定はメソ気象モデルよりも高精度である。しかし、欧州での推定に比べて精度は低く、また、1 衛星だけでは回帰周期が 1 か月と時間分解能が低すぎる。日射の強い低緯度に位置する日本では局地循環が卓越し、また、入り組んだ沿岸地形は複雑な風況をもたらす。これが、欧州と比べてメソ気象モデルおよび SAR 風速推定の誤差が大きくなる理由である。理想的な運用は、それぞれ利点と欠点を持つ SAR とメソ気象モデルを組み合わせ、欠点を補完しつつ年平均風速を算出することである。

2. 研究の目的

SAR と気象シミュレーションを組み合わせた風況把握手法を確立するため、まずはメソ気象モデルおよび SAR 風速推定の両手法の改良が必要となる。そこで、本研究では沿岸海上風シミュレーション精度の向上を目的として、SAR 風速推定における大気安定度の影響除去を海洋鉄塔観測に基づいて実施し、SAR 風速の精度を上げる。その後、数値モデル WRF に実装された大気境界層スキームの見直しを行う。

3. 研究の方法

(1) 洋上風況観測の実施

和歌山県田辺湾の白浜海洋観測鉄塔において、海上風および関連する気象海象の同期観測を行う。日本沿岸の洋上において気象・海象データを直接観測しているポイントは希少である。この白浜の観測により、海上風のみならず、風速分布に影響する大気安定度等を 10 分毎に収めた包括的な観測データセットを作成する。データセットはメソ気象モデル及び SAR 海上風推定手法の改良の基礎データとして用いる。

(2) 合成開口レーダの精度向上

既存研究では、欧州を中心として開発された合成開口レーダ (SAR) による海上風推定アルゴリズムを日本沿岸海域に適用すると誤差が生じることが明らかになっている。これは、既存のアルゴリズムが全球平均の大気安定度に合わせてあり、日本沿岸域の様な非常に不安定な大気状態に対応していないためである。日本沿岸域は世界でも稀な大気不安定海域である。大気安定度が SAR 海上風推定に与える影響を定量的に評価するとともに、この影響を除去するための手法を開発し、その精度を検証する。検証には、既存の等価中立風を算出可能なモデルと算出不可のモデルの両方を用いて比較を行う。その後、等価中立風を実際の風速である安定度依存風に補正し、さらにその精度検証を実施する。また、SAR 風速推定において必要となる風向情報として数値気象モデルの出力風向とその他入手可能な風向情報との比較を行い、気象モデル出力風向の有効性を明らかにするとともに、SAR と数値気象モデルを組み合わせた推定手法の確立を行う。

(3) メソ気象モデルの大気境界層スキーム選定

既存研究では、メソ気象モデル WRF には複数の大気境界層スキームが用意されているが、境界層の高度が激しく変化する沿岸域において海上風を計算する際にどのモデルが最適かは明らかになっていない。複数スキーム用いた比較検証を実施し、最適なモデル選定を行う。

(4) SAR と気象モデルを用いた風況マップの作成

実測データの存在する和歌山県白浜沖を対象として、SAR データおよび気象モデルを組み合わせた手法で年平均風速および年平均風力エネルギー密度分布図の作成を行い、実測値との比較による精度の検証を実施する。

4. 研究成果

(1) 実測気象データ整備

初めに、人工衛星データおよび気象モデルの検証を行う際に必要となる実測気象データの整備を実施した。

和歌山県田辺湾に京都大学防災研究所が設置・運用している白浜海象観測鉄塔における気象観測データセットの作成を行った。データ項目は、時刻・23m 高度風速・23m 高度風向・気温・水温、気圧であり、期間は衛星データと同期する 1994 年から 2011 年とした。また、衛星データから推定される 10m 高度風速との比較検証を容易に行うために、LKB コード (Liu & Tang, 1996) を用いて大気安定度を考慮した風速の高度変換を行い、10m 高度風速もデータセットに追加した。さらに、神奈川県平塚湾において防災科学研究所が運用を実施していた 2003 年から 2009 年までの時刻・23m 高度風速、23m 高度風向、陸上風速、陸上風向、水温、気温についてデータセットを作成した。白浜の場合と同様に、23m 高度風速から 10m 高度風速を算出して追加している。

(2) SAR 海上風推定手法における大気安定度の影響とモデル関数の選定

SAR 画像から海上風推定を行う際、Geophysical Model Function(GMF)を用いて画像から抽出した後方散乱係数、風向、レーダ入射角から 10m 高度の風速を推定する。従来の GMF は外洋で校正され、大気安定度については考慮しない方針が開発が行われてきた。しかし、日本沿岸域は世界でも稀な大気不安定海域であり、従来の手法では風速推定精度が低くなる可能性がある。そこで、白浜および平塚の 2 海域を対象として、従来の 4 つの GMF である CMOD4, CMOD5, CMOD_IFR2 および CMOD5.N の精度検証を実施し、さらに、大気安定度が風速推定精度に与える影響について調べた。この結果、最少二乗誤差 (RMSE) と平均誤差 (Bias) が最も小さかったのは等価中立風を仮定した CMOD5.N であることが明らかになった。表 1 に白浜および平塚における精度検証の結果をまとめる。また、日本沿岸域における大気安定度の影響は約 $\pm 1\text{m/s}$ の SAR 推定風速に相当し、CMOD5.N と算出された等価中立風に対して LKB コードを用いて変換する手法によって、特に大気状態が中立ではない時に高精度となることが示された (Takeyama et al., 2013)。

表 1 SAR 風速推定における GMF の精度比較

		CMOD4	CMOD_IFR2	CMOD5	CMOD5.N
平塚	RMSE(m/s)	2.17	2.34	2.06	2.03
	Bias(m/s)	-1.15	-1.13	-0.98	-0.77
	Cor.	0.80	0.77	0.80	0.79
白浜	RMSE(m/s)	1.97	2.05	1.77	1.76
	Bias(m/s)	-1.10	-1.06	-0.64	-0.42
	Cor.	0.80	0.79	0.81	0.79

(3) SAR 風速推定精度に与える風向情報の影響と風向推定

SAR 風速推定に一般的に用いられる GMF では、レーダの後方散乱強度を示す後方散乱係数が風速、風向、レーダ入射角の関数となっている。従って、風速を算出する際には風向情報が入力値として必要となる。既存研究では風向情報を SAR 画像そのものから推定する手法も提案されているが、これらの方法は使用できる気象・海象条件が限られているだけでなく、推定された風向は 180 度の曖昧さが存在する。そこで、より SAR 風速推定の確実性を高めるため、外部の風向情報の使用を検討した。使用した風向データは気象庁客観解析データ (MANAL)、マイクロ波散乱計 (QuikSCAT)、アメリカ環境予測センター再解析データ (NCEP FNL)、初期値として MANAL を使用した数値気象モデル WRF の出力風向の 4 種の風向を (1) でその精度が保障された CMOD5.N を用いて、白浜における風速推定精度を検証した。その結果、WRF の出力値である風向を CMOD5.N の入力として SAR 風速推定を実施した時が最も高精度で、RMSE 1.12 m/s、Bias -0.13m/s となった。この際、風速推定における陸の影響を取り除くため、陸から沖に吹く Offshore 風向は取り除き、Onshore 風向に限っている (Takeyama et al., 2013)。

(4) WRF 風速算出における大気安定度 (PBL) スキームの選定

10 種類の PBL スキームを持って WRF 風速を算出し、それぞれの比較検証を実施した。対象海域は高度別の風速の実測値が取得できる北海、ドイツ沿岸にある 2 か所の洋上風力発電所 FINO1 と Egmond aan Zee (OWEZ) とし、精度を比較した。その結果、Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino Level 2 and 3 (MYNN2 and MYNN3) の精度が高く、PBL スキームとして適していることが明らかになった (Shimada et al., 2014)。

(5) 白浜沖洋上風況マップ

上記の成果を基に、SAR データおよび気象モデルから白浜沖の風速のワイブル分布を求め、実測から算出したワイブル分布との比較を実施した (図 1)。また、年平均風速および年平均エネルギー密度分布を 10m 高度と風車の平均的なハブ高度である 80m において作成した (Takeyama et al., 2013)。

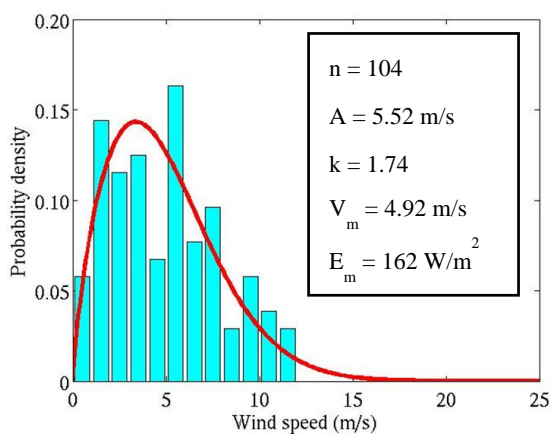
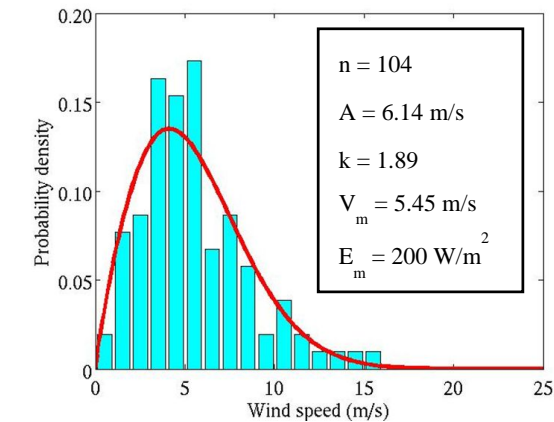
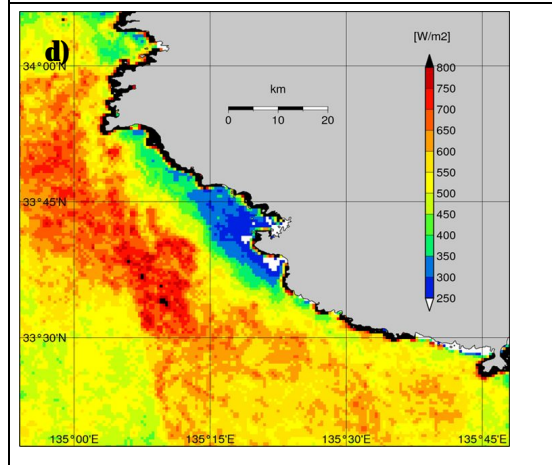
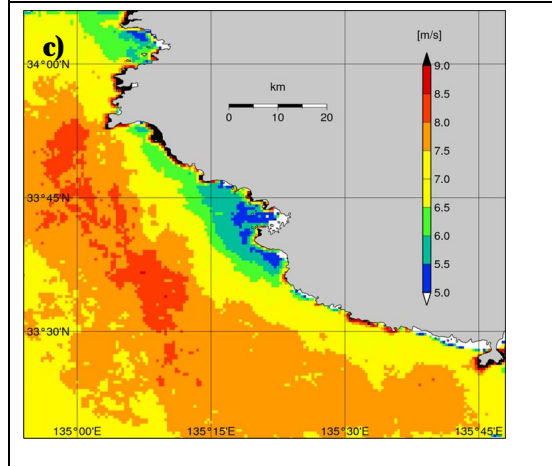
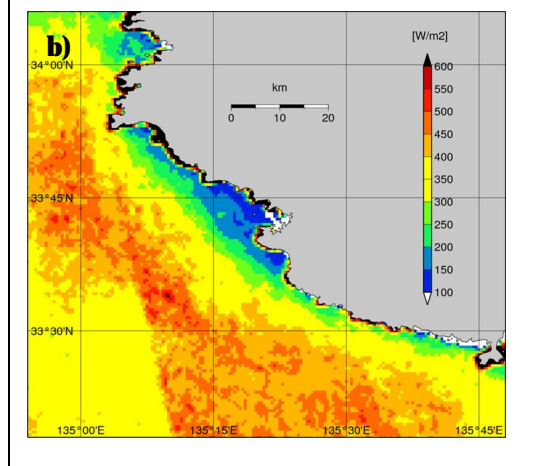
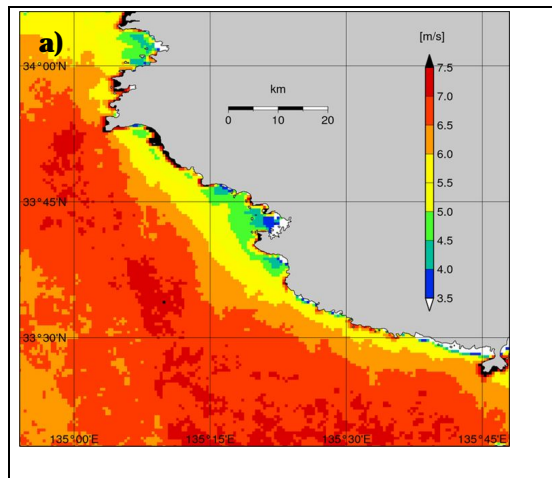


図1 SAR データと気象モデル風向によって作成された白浜のワイブル分布図(上)と実測風速によって算出されたワイブル分布図(下).

図2 (右の段) SAR データと気象モデル風向によって作成された白浜沖の a) 10m高度の年平均風速分布図, b) 10m高度の年平均エネルギー密度, c) 80m 平均風速, d) 80m 高度平均エネルギー密度



5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計4件)

Takeyama Y., T. Ohsawa, T. Yamashita and K. Kozai: Estimation of offshore wind resource in coastal waters off Shirahama using ENVISAT ASAR images, Remote Sensing, 5(6), pp.2883-2897, 2013, DOI: 10.3390/rs5062883. (査読あり)

Takeyama, Y., T. Ohsawa, K. Kozai, C. B. Hasager, M. Badger: Comparison of geophysical model functions for SAR wind speed retrieval in Japanese coastal waters, Remote Sens 5(4), pp.1956-1973, 2013, DOI: 10.3390/rs5041956. (査読あり)

Takeyama, Y., T. Ohsawa, K. Kozai, C. B. Hasager, M. Badger: Effectiveness of WRF wind direction for retrieving coastal sea surface wind from Synthetic Aperture Radar, Wind Energy, Volume 16, Issue 6, pages 865-878, September 2013, DOI: 10.1002/we.1526 (査読あり)2012

Kozai K.T., Ohsawa, Y. Takeyama: Evaluation Method for Offshore Wind Energy Resources Using Scatterometer and Weibull Parameters, Journal of Energy and Power Engineering 6, pp. 1772-1778, 2012. (査読あり)

〔学会発表〕(計 6 件)

Takeyama, Y., T. Ohsawa, K. Kozai, C. B. Hasager, M. Badger: Fetch effect on sea surface wind speed retrieval from SAR image in coastal waters, EWEA OFFSHORE 2015, 10 - 12 March, Copenhagen, Denmark.

Shimada S., T. Ohsawa, Y. Takeyama, T. Kogaki, G. Steinfeld and D. Heinemann: Comparison of wind speeds simulated with WRF using seven planetary boundary layer schemes at two offshore met masts in the North Sea, EWEA OFFSHORE 2015, 10 - 12 March, Copenhagen, Denmark.

嶋田進, 竹山優子, 小垣哲也, 大澤輝夫: 複雑地形における大気安定度と風速の鉛直プロファイルの関係, 第 36 回風力エネルギー利用シンポジウム, 11 月 27-28 日, 2014, 東京. (査読なし)

大澤輝夫, 嶋崎翔太, 中尾知博, 市川弘人, 香西克俊, 嶋田進, 竹山優子, 小垣哲也, 川口浩二, 中村聡志: 波崎海洋研究施設におけるブイ観測・数値シミュレーション併用型洋上風況調査手法の精度検証, 第 36 回風力エネルギー利用シンポジウム, 11 月 27-28 日, 2014, 東京. (査読なし)

Takeyama, Y., T. Ohsawa, T. Yamashita, K. Kozai, Y. Muto, Y. Baba and K. Kawaguchi: Making offshore wind resource maps in Japanese coastal waters by ENVISAT ASAR images, EWEA OFFSHORE 2013, 19-21 November 2013, Frankfurt, Germany. (Abstract 査読あり)

Kanda, K., K. Kozai, T. Ohsawa, Y. Takeyama: Validation of PALSAR-derived wind speed against ASCAT wind speed around coastal seas of Japan, International Symposium on Remote Sensing 2012, 10 -12 November, Korea. (Abstract 査読あり)

6 . 研究組織

(1)研究代表者

竹山 優子 (Yuko Takeyama)

国立研究開発法人産業技術総合研究所

再生可能エネルギー研究センター

研究者番号 : K08K002856B