

令和 5 年 5 月 25 日現在

機関番号：12614

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04856

研究課題名（和文）合成開口レーダを用いた沿岸風況統計値の信頼性向上

研究課題名（英文）Improving the Reliability of Coastal Wind Statistics Using Synthetic Aperture Radar

研究代表者

竹山 優子（Takeyama, Yuko）

東京海洋大学・学術研究院・准教授

研究者番号：00510025

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：洋上風力発電に資する風況把握手法の1つとして、人工衛星搭載合成開口レーダ（SAR）を用いた日本沿岸域の風速推定精度を明らかにするとともに、誤差要因の特定および風速推定に必要な物理量である風向情報の算出について複数手法の比較を行った。これにより、SAR固有のスペックルノイズおよび沿岸域に多い人工構造物、砕波の影響の低減には500m程度の平滑化が有効であることが明らかになった。また、従来、外部からの風向情報を利用した風速推定が一般的であったが、Sentinel-1のOCNプロダクトの風向情報の有効性を示し、SARプロダクトのみで海上風推定ができることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

カーボンニュートラルな社会を目指す我が国において、洋上風力発電の普及は切り札として位置づけられている。しかし、発電量に直結する重要な風況情報を洋上で正確に計測することは容易ではない。長期間継続した風況情報を正確に計測する手法の1つとして、人工衛星の活用には期待が大きい。本研究はマイクロ波を能動的に用いて海上風を計測できる合成開口レーダを用いて、日本沿岸における風速推定精度を示すとともに風況統計で一般的に用いられるワイブル分布における近似がどのくらい一致するかを明らかにし、合成開口レーダの利用可能性を示したものである。

研究成果の概要（英文）：In this study, the accuracy of wind speed estimation in coastal areas of Japan using a synthetic aperture radar (SAR) onboard Sentinel-1 was clarified, and a comparison of multiple methods was conducted for identifying suitable wind direction for the wind speed retrieval.

The results show that smoothing at 500 m is effective in reducing the effects of speckle noise in SAR images, artificial structures and breaking waves that are common in coastal areas. The results also showed the effectiveness of the wind direction information from the Sentinel-1 OCN product. It means that we can retrieve wind speeds from SAR images without wind direction information from external sources.

研究分野：海洋気象学

キーワード：合成開口レーダ Sentinel-1 洋上風況把握

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

欧州では 20 年ほど前から洋上に風車を複数基設置する大型ウィンドファームが計画・運用されるようになった。この頃より、必要基礎情報としての洋上風況の研究が多様化し、その中で人工衛星観測を活用した風況把握手法の開発が本格的に実施されてきた。人工衛星搭載合成開口レーダ (SAR) は数十 m と高い水平空間分解能で海上風を観測することができるが、一度に観測する観測幅が狭く、同一地点を再度観測するまでの回帰周期が 1 か月以上と時間分解能が非常に粗いという欠点があった。低い時間分解能を補うために全過去観測データを用いた統計処理の手法も提案されているが、その統計値の信頼性を確保するためのデータ数を確保するのに 10 年以上の期間が必要であった。これは、1 つの人工衛星の目標運用期間を超える年数であり、実用には絶対的にデータ数が不足していた。しかし、近年、欧州宇宙機関 (ESA) が運用を行っている Sentinel-1/SAR ([https://www.esa.int/Our\\_Activities/Observing\\_the\\_Earth/Copernicus/Sentinel-1](https://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-1)) を例に見ると、同じ衛星を 2 基同時に運用するなどの工夫によって観測頻度を高め、洋上風況把握に必要な観測データを数年で確保することが可能となった。

データ数問題が解決されたとはいえ、SAR による推定風を洋上風況把握に利用するためには 2 つの問題がある。1 つ目は、日本沿岸域において風向および風速の精度検証が十分に行われていない点である。過去研究では、Sentinel-1/SAR の前任機である ERS-1/SAR、ERS-2/SAR および ENVISAT/ASAR の検証が北海の洋上ウィンドファームや太平洋上の観測ブイなど、さまざまな海域で実施されている。しかし、日本沿岸域では洋上の既設ブイや鉄塔データはほぼ公開されておらず、精度検証が実施可能な海域は少ない。このため、Sentinel-1/SAR についても日本沿岸域での検証は本格的に実施されておらず、信頼性が保証されていない状況であった。

2 つ目は、風速算出についてはモデル関数を利用した手法が確立されているが、風向については算出方法が定まっていない問題である。最もよく使用されている手法は SAR 観測データから得られる後方散乱強度画像を周波数分解し、風波の方向から風向を推定する方法である。しかし、この方法は 180 度の曖昧さを残すほか、画像ノイズの影響が大きい時には適用できないという問題があった。その他の方法として、本研究の応募者は過去に数値気象モデルから算出される風向と SAR 風速推定を組み合わせる手法を提案している。ただ、この方法は数値気象モデルを実行しなければならない煩雑さがあり、SAR 画像そのものから風向を抽出する手法の開発が求められていた。

### 2. 研究の目的

本研究では日本周辺海域の海上風推定の信頼性向上を目的とし、Sentinel-1/SAR の観測データを用いた海上風の推定を実施した。特に、日本海を含むこれまで未検証の海域における海上風推定精度の検証と SAR 観測データからの風向情報の抽出手法の開発に取り組んだ。

1 つ目の課題では、日本周辺海域で可能な限り収集し、特にこれまで未知であった日本海のデータを含む約 20 海域の観測データを収集し、これら観測データとの比較検証により Sentinel-1/SAR の Level-1 GRD データから求めた海上風推定値の精度を明らかにした。これまで、SAR による風速推定には大気状態が中立であることを仮定したモデル関数が利用されてきた。これは、ほぼ中立の海域を多く有する欧米を中心にモデル開発が行われてきたからである。また、安定度の変化の小さい比較的沖の海域において比較検証がされてきたことにも由来している。本研究の応募者は過去に SAR の等価中立風に対して大気安定度の補正手法の開発を行い、海上風の推定精度が向上することを示してきた。ただし、これらの検証も神奈川県平塚沖 和歌山県白浜沖、

茨城県波崎沖といった太平洋側の関東以西のみで実施されている。これらの海域は黒潮の流軸上に位置し、非常に不安定な大気状況という特異な海域のみである。日本周辺は日本海側、太平洋側共に寒流と暖流による複雑な海水温分布を有しており、大気安定度の時空間変動も大きい。日本周辺の様々な海域でもこの手法が有効かどうかの検証が必要である。この検証により、これまで特定の海域に留まっていた精度に関する議論を日本沿岸域全域に対して行うことが可能となった。

次に、2つ目の課題として SAR 画像から風向情報の抽出手法の開発を行った。SAR 観測データから風速を求めるモデル関数では、観測データから得られるマイクロ波の後方散乱強度を風速、風向、マイクロ波入射角の関数で表されると仮定して開発されている。つまり、風速算出には風向情報が必須となる。従来は数値気象モデルなどの外部からの入力風向を用いることで風速算出を行っていたが、近年は後方散乱強度画像のノイズが軽減されたこともあり、フーリエ変換を用いて周波数成分に分解する手法で風波の進行方向から風向を求めることが可能だと考えられた。風向情報は風速推定の精度にも直接影響するため、高い精度が求められる。一部の Sentinel-1/SAR データに低分解能の風向情報が付随しているプロダクトも存在するが、沿岸域における海上風推定では陸の混入を防ぐために 100m 程度の高水平空間分解能が必要となるため、風速推定で使用する Level-1 GRD データからの風向抽出が望ましい。本研究では風速算出を行う 100m の空間分解能における後方散乱強度画像からの風向算出を試み、この手法の確立を目指した。

### 3. 研究の方法

1つ目の課題では、高知県魚海況情報システムにて公開されている黒潮牧場ブイなどの日本沿岸において Sentinel-1/SAR の海上風推定精度の検証を行う。特にここでは、時間、空間的に同期する SAR 観測データと現場観測データ毎の比較検証を行い、各観測海域における精度を明らかにするとともに、その精度に地域的な差が存在するのか、周辺の地形の影響を受けるのか、また、大気安定度の違いによる差についても詳細な検証を行った。

2つ目の課題では、最新の Sentinel-1 の後方散乱強度画像に対して周波数成分の分解で風向抽出を試みて、その風向精度を 1つ目の課題でも使用する観測データを用いて検証した。さらに、公開されている低分解能の Sentinel-1/SAR プロダクトの風向情報を内挿処理により疑似的に高分解能化した風向の精度検証も実施し、これらの風向情報から、実観測風向に近い値を示す風向情報の採用を提案する。

### 4. 研究成果

日本沿岸の 5 海域において Sentinel-1A および 1B に搭載された SAR から得られた 825 シーンの画像を用いて海上風推定を行い、Bias は -4.4% から 14.8%、二乗平均平方根誤差 (RMSE) が 21.9% から 29.4% であった。SAR 画像から得られた後方散乱強度の平滑化範囲は 100m の時よりも 500m の時の方が高精度であることも分かり、これは沿岸域において船舶や人工構造物、砕波の影響があることが原因であることが判明した。特に遠浅の沿岸域における砕波の影響は海岸線から 500m 程度まで認められ、500m よりも狭い平滑化範囲ではその影響が顕著であった。また、SAR 風速推定に必要な風向情報についてもメソ客観解析値 (MSM)、SAR の高次処理プロダクトである OCN プロダクト、さらに、SAR 画像上に現れるウィンドストリークスを 2 次元高速フーリエ変換して抽出した風向情報を用いて精度の検証を行い、OCN 風向を用いる場合に最も風速推定精度が高いことが分かった。また、SAR 画像からの風向抽出には中風速以上の風が吹く場合のみ可能であるため、利用しにくい問題があることも明らかとなった。なお、これらの結果は 2 偏の査読付き論文として公表済である。

1. 大久保 諒也, 竹山 優子, 池谷 毅, 大澤 輝夫, 2021: 合成開口レーダを用いた海上風推定に適した風向情報, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. 77, No. 2.
2. 大久保 諒也, 竹山 優子, 池谷 毅, 大澤 輝夫, 2020: Sentinel-1搭載合成開口レーダを用いた日本沿岸の海上風推定, 土木学会論文集B3 (海洋開発), Vol. 76, No. 2, p. I\_49-I\_54.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 大久保 諒也, 竹山 優子, 池谷 毅, 大澤 輝夫	4. 巻 77
2. 論文標題 合成開口レーダを用いた 海上 風推定に 適した 風向情報 風向情報 風向情報	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 土木学会論文集B2(海岸工学)	6. 最初と最後の頁 I_1117-I_1122
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/kaigan.77.2_I_1117	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 大久保 諒也, 竹山 優子, 池谷 毅, 大澤 輝夫	4. 巻 76
2. 論文標題 Sentinel-1搭載合成開口レーダを用いた日本沿岸の海上風推定	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 土木学会論文集B3 (海洋開発)	6. 最初と最後の頁 I_49 ~ I_54
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejoe.76.2_I_49	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 大久保 諒也, 竹山 優子, 池谷 毅, 大澤 輝夫
2. 発表標題 合成開口レーダを用いた 海上 風推定に 適した 風向情報 風向情報 風向情報
3. 学会等名 第68回海岸工学講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------