



Offshore wind resource assessment using synthetic aperture radar and meteorological mesoscale model

Takeyama, Yuko

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2013-09-25

(Date of Publication)

2014-09-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第5973号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1005973>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



(別紙様式 3)

論文内容の要旨

氏 名 竹山 優子

専 攻 海事科学専攻

論文題目 (外国語の場合は、その和訳を併記すること。)

Offshore Wind Resource Assessment using Synthetic

Aperture Radar and Meteorological Mesoscale Model

(合成開口レーダと数値気象モデルによる洋上風力資源量評価)

指導教員 大澤 輝夫

(注) 2, 000 字～4, 000 字でまとめること。

本論文は人工衛星に搭載された合成開口レーダ(SAR)および数値気象モデルを用いた海上風推定と洋上風力発電の資源量評価手法について述べるものである。既に大型風力発電所を運用している欧州では、比較的安価に風況および資源量評価を行う手段として SAR とメソ気象モデルが実用され、外洋におけるこれらの手法についての精度評価も既に実施されている。しかし、複雑な海岸地形を有し、かつ、卓越する季節風と太平洋に沿って流れる暖流黒潮によって不安定な大気状態である日本沿岸域においては、検証が十分とは言えない。そこで、本論文では ENVISAT 衛星搭載の SAR 画像とメソ気象モデル(WRF)を用い、日本沿岸域における風況推定に必要な手法の検証および開発を行う。その後、この検証・開発した手法から推定された風速および風向情報を用いて風力資源量推定を行い、その分布図を作成する。以下に各章の内容をまとめる。

第一章は序章として研究背景、海上風速および風向推定の既存研究調査、および本論文の研究目的を述べる。これまで、再生可能エネルギーは地球温暖化や日本における低いエネルギー自給率問題の解の一つとして期待されてきた。また、福島第一原子力発電所の事故以来、安全なエネルギー源の一つとしても注目されている。過去、風力発電は周辺住民からの低周波による人体への影響や構造上の強度に対する不信心により、否定的な評価をされることがあった。しかし、現在、風力発電は陸上から洋上への移行しつつある。これにともない、我々は旧来の問題から新たな洋上風況把握についての問題に対峙している。風力発電において、風車設置に必要な風況は最も重要な情報の一つである。欧州では既に SAR を用いた海上風推定が実施され、その検証結果もいくつか存在するが、これらは外洋における研究が中心であり、陸の影響を受ける可能性の高い沿岸域における検証は少ない。また、沿岸域は海面とはいえ、陸域の影響を大きく受ける。さらに、SAR は風の直接観測ではなくマイクロ波による海面観測を行っているため、大気安定度が風速の推定精度に影響を与える可能性がある。日本沿岸域は世界でも有数の大気状態が不安定な特殊海域であり、これらが風速の推定精度に与える影響を検証する必要がある。SAR による海上風推定で用いられるモデル関数(GMF)は既にいくつか開発されているが、大気安定度の考慮については対応が分かれている。第二章では日本沿岸域を観測した SAR 画像から複数の GMF を用いて推定した海上風の検証を行い、大気安定度が SAR 風速推定精度に与える影響明らかにするとともに、日本沿岸域に適した GMF の選定と大気安定度補正方法の開発を行う。一方で、SAR による海上風推定で用いる GMF は風速算出の際に風向の情報を必要とする。第三章では安定した風向情報の取得が可能な数値気象モデル WRF の算出風向を GMF の入力値とする手法を試みる。WRF 風向の比較データとして、他の利用可能な複数の風向情報を用い、GMF の風向依存性を明らかにし、WRF 風向の GMF への利用可能性について検討を行う。第四章では、

第二章、第三章で検証・開発された手法を用い、和歌山県白浜沖における風力資源量の推定とその分布図の作成を行う。

第二章では、陸域に近く、大気状態が変化しやすい日本沿岸域において、SAR画像から複数のGMFを用いた風速の推定精度検証を実施した。対象海域である神奈川県平塚と和歌山県白浜で観測された実測値は4つのGMFであるCMOD4、CMOD_IFR2、CMOD5およびCMOD5.Nから算出された風速の検証要として使用した。検証の結果、これらのGMFのうち、最新のモデルであるCMOD5.Nは両海域において最も小さな平均誤差と最小二乗誤差を示した。また、全てのGMFによって算出された風速は実測値に対して過小評価傾向となった。この過小評価の原因を調べるため、全ての風向をonshore（海から陸への風）とoffshore（陸から海への風）に分類したところ、offshore時にのみこの過小評価傾向が強く表れることが分かり、過小評価傾向が陸からの吹送距離（フェッチ）の長さにある可能性が高いことが分かった。一方、大気安定度について安定、中立および不安定な時に分けた場合、中立の時には大気安定度を考慮していないCMOD5と大気安定度の影響を考慮しているCMOD5.Nはほぼ同じ風速推定精度であったが、安定および不安定な時にはCMOD5.Nの方が高い精度を示し、CMOD5.Nが日本沿岸域における大気安定度の補正に有効であることが分かった。

第三章では、第二章にてその効果が示されたCMOD5.Nを用いて、このCMOD5.Nに入力値として必要となる風向情報として、WRFによって算出された風向の有効性を検証した。この検証のため、WRF風向を用いて算出されたSAR風速は他に入手可能な風向情報、気象庁メソ客観解析値(MANAL)、マイクロ波散乱計(QuikSCAT)およびアメリカ国立環境予測センター再解析データ(NCEP FNL)を用いた時のSAR風速との比較検証を行った。検証の結果、4つの風向のうち、WRF風向は高い空間分解能で風向を推定することが可能であり、かつ、他の3つの風向よりも風向そのものの精度が高いにもかかわらず、他の風向よりも高い風速推定精度を示さなかった。この理論に合わない結果の要因について、第二章でも問題となった短い吹送距離による陸の影響が疑われた。この影響を取り除くため、検証対象データをonshoreに絞り、再度4つの風向を用いた検証を実施した。この結果、WRF風向を入力したSAR推定風速が最も小さなRMSEを示した。さらに、WRF風向を入力値としたSAR推定風速のRMSEの95%信頼区間は1 m/s以下となり、他の風向の信頼区間よりも明らかに狭く、小さい値を示すことが分かった。Onshoreの風に限定したことで検証のサンプル数は小さくなったが、95%信頼区間によりこの検証の信頼性が示され、WRFの風向情報がSARによる風速推定に有効であることがわかった。

第四章では、ENVISAT ASAR 104 シーンを用いて、白浜沿岸域を対象とした風力資

源量マップの作成を実施した。第二章および第三章で検証を行ったCMOD5.NおよびWRF風向を用いて白浜沖における風速分布を求め、その後、得られた風速からワイブル分布関数を用いて平均風速および平均エネルギー分布を算出した。また、精度の検証用として、白浜観測鉄塔及び和歌山沖南西沖ブイの長期実観測風速データを使用した。検証の結果、SARから推定された風速は白浜において0.52m/sの平均誤差と2.33m/sの最小二乗誤差を持ち、過大評価傾向にあることが分かった。また、この誤差により、ワイブル分布関数によって導かれた平均風速にも過大評価の傾向があることが分かった。この過大評価は長期現場風速の観測結果と比べて白浜において1.07倍、南西沖ブイにおいて1.23倍という結果であった。最終的に精度の高いエネルギー密度分布図を作成するため、これらSAR平均風速と長期現場平均風速の比率を使ってSAR平均風速の補正を行い、10m高度における平均風速とエネルギー密度分布図を作成した。また、その後、WRFから推定された10m高度風速と80m高度風速比を用いて風車ハブ高度にあたる80m高度の平均風速とエネルギー密度分布図の作成を実施した。

第五章では、本論文の全体総括と今後の課題について述べる。今後の課題として、沿岸域における短い吹送距離による陸の影響の補正手法の開発がある。海面の粗度には様々な大気現象が関係しており、さらにその大気現象自体も相互作用によって影響されているため、陸の影響には非常に複雑な要因が関係していると予想できる。しかし、この陸の影響はSAR海上風推定において無視できるものではない。より多くの種類の異なった観測モードのSAR画像を用いた解析を行う必要がある。また、風力資源量マップにはより多くのSAR画像を適用することにより、さらに高精度なマップ作成が可能になると考える。これらは次の課題としたい。

氏名	竹山 優子		
論文 題目	Offshore wind resource assessment using synthetic aperture radar and meteorological mesoscale model (合成開口レーダと数値気象モデルによる洋上風力資源量評価)		
審査 委員	区 分	職 名	氏 名
	主 査	准教授	大澤 輝夫
	副 査	教授	香西 克俊
	副 査	教授	小林 英一
	副 査		
	副 査		
要 旨			
<p>【論文概要】</p> <p>本学位申請論文は、日本沿岸海域において信頼性の高い洋上風力資源量調査手法を確立することを目的として、人工衛星に搭載された合成開口レーダ (SAR: Synthetic Aperture Radar) とメソ気象モデルを用いた洋上における風速推定手法と資源量評価手法について述べたものである。合成開口レーダには欧州宇宙機関が運用する ENVISAT 衛星搭載の C-band Advanced SAR、メソ気象モデルについては米国大気研究センター及び米国環境予測センターが共同開発した WRF (Weather Research and Forecasting model) を用いている。手法の検証サイトは、和歌山県田辺湾の白浜海洋観測鉄塔及び神奈川県相模湾の平塚海洋観測鉄塔の2ヶ所である。</p> <p>論文全体は五章より構成され、各章の内容については下記の通りである。</p> <p>第一章では、洋上風力発電の世界的な導入状況を含めた研究背景、合成開口レーダを用いた洋上風力資源量調査に関する既往研究のレビュー、日本沿岸における合成開口レーダに関する研究の必要性等について述べ、本論文の目的と全体の構成を示している。</p> <p>第二章では、合成開口レーダ画像上の後方散乱係数値を風速値へと変換するモデル関数 (GMF: Geophysical Model Function) である CMOD4、CMOD_IFR2、CMOD5、CMOD5.N の4つのパフォーマンスを比較し、白浜及び平塚での検証結果を示している。その結果、両サイト共に、等価中立風を出力可能な CMOD5.N が最も小さな平均二乗平方根誤差 (RMSE) を示すことが明らかになり、日本沿岸における大気安定度補正の重要性を示す結果となった。その一方で、CMOD5.N を含めて全ての GMF において陸風時に顕著な負バイアスが見られることが明らかになり、今後、陸域 (フェッチ) の影響を除去できるよう GMF のアルゴリズムを改善する必要性が示された。</p> <p>第三章では、GMF での風速推定に必要な風向情報について、メソ気象モデル WRF から出力される高解像度な風向計算値の有効性を検証している。ここでは風向情報として、気象庁メソ観解析値 MANAL、マイクロ波散乱計 QuikSCAT/SeaWinds、米国環境予測センター全球解析値 NCEP-FNL を用いることにより、最終的に算出される風速推定精度について比較・検討がなされた。その結果、WRF 風向を用いた場合の風速推定精度が最も良いことが明らかになり、複雑な海岸地形を持つ日本沿岸では風向が空間的に大きく変化するため、欧米の既存研究で行われているような低解像度の風向情報では風速推定誤差が大きくなることが示された。</p> <p>第四章では、第二章と第三章の成果を基にして、ENVISAT ASAR 104 シーンに対する風速場の推定を行い、格子毎にワイブル分布関数を適用することにより、白浜沖海域における高度 80m の平均風速及び平均風力エネルギー密度の分布図が作製された。風速推定には CMOD5.N を使い、大気安定度補正と風向の算出、及び風速の高度補正 (海面表層 10m 高度から風車ハブ高度への変換) には WRF による計算結果を用いている。白浜海洋鉄塔及び和歌山南西沖ブイでの精度検証の結果、推定された平均風力エネルギー密度は実際の値に対してそれぞれ 1.07 倍、1.23 倍過大評価することが明らかになった。これに対する考察として、SAR による風力エネルギー密度の推定精度を上げるためには、解析に用いる SAR 画像の数を増やすことが必須であることが述べられている。</p> <p>第五章では、本論文で得られた研究成果を総括すると共に、今後の研究課題に言及している。第二章と第三章では短いフェッチに起因する陸の影響が大きな問題として認識されたため、その除去を特に優先すべき課題として挙げている。</p>			

氏名	竹山 優子
【審査内容及び評価】	
<p>洋上風力資源量の推定には、鉄塔やブイによる現場観測の他に、人工衛星からのリモートセンシングによる手法や気象モデルによる数値シミュレーションによる手法が用いられる。本学位申請論文は、衛星リモートセンシングの中でも、特に空間解像度の高い合成開口レーダとメソ気象モデルの利用に注目して行われた研究成果をまとめたものである。</p> <p>合成開口レーダを用いた洋上風力資源量調査は、欧州を中心に 1990 年代より始まっているが、そもそも画像データの処理が複雑であり、また画像自体が高価であることや撮影頻度も少ないことから、その風力資源量の推定精度については未だに多くの未解明な点が残されてきた。特に、日本沿岸のように複雑な海岸線を持ち、低緯度で局地循環が卓越し、且つモンスーンや暖流・寒流に影響される複雑な風況を有する海域においては、合成開口レーダによる洋上風力資源量の調査例はほとんどなく、その有効性は良くわかっていないのが現状であった。</p> <p>本学位申請論文は、日本沿岸において合成開口レーダを風力資源量調査に適用した初めての包括的な研究成果であり、その推定精度及び有効性を明らかにしたという点においてまず学術的価値が認められる。更に、本論文の最大の目玉は、メソ気象モデルによる数値シミュレーションを併用することで、大気安定度の補正や風向情報の入力、風速の高度補正に至るまで、合成開口レーダによる洋上風力資源量調査の精度を大幅に向上させた点にある。こうして、海岸地形や大気安定度の複雑な海域に対する合成開口レーダによる沿岸風力資源量調査の手法が確立され、実際に本論文後半ではこの手法により和歌山県白浜沖海域の風況マップを完成させている。</p> <p>合成開口レーダとメソ気象モデルの両技術をここまで融合した洋上風力資源量調査手法は世界的に見ても例はなく、実際にその手法が実海域において有効であることも確認されている。これをもって本学位申請論文は博士 (工学) の学位を得るに値する内容であると判断する。</p>	
<p>なお、本学位申請論文に関する公表論文は以下の有審査論文 5 編である。そのうち、論文 1) が本文第 2 章、論文 2) が本文第 1 章、論文 3) が本文第 4 章をそれぞれ構成している。</p>	
<ol style="list-style-type: none"> 1) <u>Yuko Takeyama</u>, Teruo Ohsawa, Katsutoshi Kozai, Charlotte Bay Hasager, and Merete Badger: Effectiveness of WRF wind direction for retrieving coastal sea surface wind from synthetic aperture radar. WIND ENERGY, Early View (Online version of record published before inclusion in an issue), 2012. 2) <u>Yuko Takeyama</u>, Teruo Ohsawa, Katsutoshi Kozai, Charlotte Bay Hasager, and Merete Badger: Comparison of geophysical model functions for SAR wind speed retrieval in Japanese coastal waters, Remote Sensing, 5(4), pp. 1956-1973, 2013. 3) <u>Yuko Takeyama</u>, Teruo Ohsawa, Tomohiro Yamashita and Katsutoshi Kozai: Estimation of offshore wind resource in coastal waters off Shirahama using ENVISAT ASAR images, Remote Sensing, 5(6), pp. 2883-2897, 2013. 4) Katsutoshi Kozai, Teruo Ohsawa, Rinya Takahashi, and <u>Yuko Takeyama</u>: Evaluation Method for Offshore Wind Energy Resources Using Scatterometer and Weibull Parameters, Journal of Energy and Power Engineering, 6, pp. 1772-1778, 2012. 5) Katsutoshi Kozai, Teruo Ohsawa, Rinya Takahashi, and <u>Yuko Takeyama</u>: Estimation Method for Offshore Wind Energy using Synthetic Aperture Radar and Weibull Parameters, Proceedings of the Nineteenth International Offshore and Polar Engineering Conference, pp. 419-423. 2009. 	