

平成 22 年 5 月 24 日現在

研究種目：基盤研究 (B)
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19360406
 研究課題名 (和文) 合成開口レーダー及びメソ気象モデルを用いた洋上風力資源調査手法の開発
 研究課題名 (英文) Development of investigation method for offshore wind energy resources using synthetic aperture radar and mesoscale meteorological model
 研究代表者
 香西 克俊 (KOZAI KATSUTOSHI)
 神戸大学・大学院海事科学研究科・教授
 研究者番号：30186613

研究成果の概要 (和文)：本研究は、合成開口レーダーとメソ気象モデルを組み合わせた洋上風力資源推定手法の確立を3年間の最終目標とし、それを達成するため、1. メソ気象モデルにより推定される風向分布を合成開口レーダー画像に相対風向として入力することにより、高精度な風速場を推定する手法を確立した。2. 1. で構築された手法を用いて実際に日本沿岸の2海域において風力資源賦存量マップを作成した。1つは和歌山県白浜沖、他の1つは神奈川県平塚沖である。特に白浜沖のマップには、大気安定度が不安定な状態に起因すると思われるワイブルエネルギー密度の増加傾向が見られた。

研究成果の概要 (英文)：The purpose of this study is to establish the estimation method of offshore wind energy resources by combining synthetic aperture radar and mesoscale model. In order to achieve this purpose the followings have been done. The first one is to establish the estimation method of high resolution offshore wind speed field based on synthetic aperture radar with input of relative wind direction calculated from simulated mesoscale model wind direction field. The second one is to make maps of potential offshore wind energy resources at Shirahama and Hiratsuka using the method developed above. Especially the increase of Weibull energy density is found at Shirahama. This may be attributable to atmospheric unstable conditions.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	11,600,000	3,480,000	15,080,000
2008年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2009年度	2,300,000	690,000	2,990,000
年度			
年度			
総計	15,600,000	4,680,000	20,280,000

研究分野：衛星海洋学

科研費の分科・細目：地球・資源システム工学

キーワード：洋上風力資源賦存量、合成開口レーダー、メソ気象モデル

1. 研究開始当初の背景

(1) 洋上風力発電の将来性と日本の現状

風力発電は、地球温暖化問題に対する具体的対策として、また石油資源枯渇に備える代替

エネルギー源として、世界規模で急速に導入量が増加しており、2005年の世界の総設備容量は前年度比25%を記録した。陸上での適地減少に伴って、この先数十年の間には風力発

電の主力は良質で強い風の得られる洋上に移行すると考えられており、例えばドイツでは2025年までに電力需要の15%を洋上風力で供給する国策を打ち出している。こうした世界的な急展開の一方で、日本の洋上風力資源の利用に関する取組みは欧米に比べて格段に遅れている。長期的な視点に立つ時、世界第7位の海岸線総延長を誇る日本がその沿岸海域に潜在する風力資源を活用しない手はない。複雑な地形の影響で日本は風況が悪いというイメージが先行し過ぎている感があるが、気象学的には日本近海はストーム・トラックと言われる世界的な強風帯の一つである。申請者らの事前研究においても風車ハブ高度の年平均風速で8m/s以上の海域はかなり広範囲に見込まれている。非着底型の浮体式洋上風車や低風速域で発電効率の良い風車の開発等、日本独自の新しい技術が次々と開発されつつある今、その実現を目指した具体的かつ高精度な洋上風力資源調査の必要性が高まっている。

(2) 陸と外洋の狭間で

洋上風力資源調査のネックとなっているのが、沿岸海域での風況データの不足である。例えば陸上に風力発電施設を設置する場合、事業者は風況マップ(NEDO ホームページ <http://www2.infoc.nedo.go.jp/nedo/index.html>)等)に基づいて候補地を選定し、そこで実際に年間観測を行うことにより、その結果次第で最終的に設置するかどうかの判断を行うことができる。一方、陸から遠く離れた外洋においては、マイクロ波散乱計を搭載した人工衛星からのリモートセンシングによって風況を把握できる。例えばQuikSCATのデータを用いれば25km×25kmの格子上で1日2回、誤差1~2m/sの精度で海上の風ベクトルを推定できる。これに対し問題となるのが、洋上風力発電の主たる対象海域である岸から数十km程度までの沿岸海域である。沿岸海域では、海岸線の影響を受けるため解像度の低い散乱計データは利用できず、また技術的にも採算的にも長期間の現地観測は困難であるため、現時点において信頼すべき風況データを得る手段が確立されていないのが現状である。そればかりか、沿岸海域は海陸の熱的コントラストや陸上地形の力学的影響を受けて複雑な風況となるため、気象学的な観点からも外洋に比べて風況の把握が難しい海域であると言える。

(3) 中長期的な研究計画の中での本研究の位置付け

申請者らは、このような特徴を持つ沿岸海域での洋上風力資源調査に対して、合成開口レーダー(Synthetic Aperture Radar, SAR)及びメソ気象モデルの利用が有望であると考えている。合成開口レーダーは人工衛星から地表に向けてマイクロ波を照射し散乱波

を受信するレーダーであり、海面の状態と散乱波を関連付けることにより、海上風を数10mという高い空間解像度で、かつ高い精度(誤差1~2m/s)で推定することができる。一方メソ気象モデルは、現実的な気象現象の推移をシミュレーションするソフトウェアであり、気象機関から提供される広域数値気象情報を境界条件とすることにより、対象海域の風況を時間的に連続な格子点値として算出することができる。

申請者らは、この合成開口レーダー及びメソ気象モデルMM5に関する研究をここ数年集中的に行ってきた。そして瞬時の海上風場を高精度に推測するという目標に対してはある程度の方向性を確立するに至った。引き続いてすべきは、多数のケーススタディに基づくその手法の検証及び改良と、得られた多数の瞬時値から風力資源調査で実際に意味を持つ統計情報(年平均風速、ワイブル係数、風配図等)を引き出す手法の確立である。そしてこの目標が達成された段階で、最終的なゴールである日本沿岸海域での高解像・高精度な洋上風力資源賦存量マップの作成が現実のものとなる。

2. 研究の目的

本研究は、合成開口レーダーとメソ気象モデルを組み合わせた洋上風力資源推定手法の確立を3年間の最終目標とし、それを達成するため以下に示す5つのステップに細分化される。

(1) 海上風推定に適したSAR画像の特定: 本研究では複数の衛星からのSAR画像を用いるが、周波数や偏波、撮影モードの違い等により様々な種類のSAR画像が利用できる。ここでは各画像の特徴を明らかにすると共に、それぞれの海上風推定への適用可能性について検討する。

(2) メソ気象モデル内の大気境界層スキームの改良: デンマークの洋上風力発電施設を対象にした我々の研究により、メソ気象モデルに含まれる大気境界層スキームには風速鉛直プロファイルを計算する上で大きな問題があることが示された。本ステップではこの問題点の解決を図る。

(3) 海上風推定手法の検証と改良: 対象海域・期間を大幅に増やし、さらに(1)及び(2)の検討を加えることにより、平成17・18年度に行われた3つのプロジェクトにおいて確立された海上風推定手法の検証とそれに基づくアルゴリズムの改良を行う。

(4) 風力資源賦存量の推定手法の確立: ある海域の風力資源賦存量を評価するには、(3)で求まる複数時刻の海上風情報を統計処理し、年平均風速やワイブル係数などの統計値を算出する必要がある。数少ないSAR画像から高精度な統計値を得るこの手法の確立こ

そが本研究の核心部分である。

(5) 有望海域での風力資源賦存量マップの作成：本研究で構築された手法を用いたプロダクトの一例として、これまでの調査により好風況が見込まれる数海域において、高解像（目標空間解像度：500m）かつ高精度（目標精度：年平均風速誤差±5%）な風力資源賦存量マップを作成する。

3. 研究の方法

(1) 従来の SAR による海上風推定とその問題点

SAR データから瞬時の海上風況を推定する方法はこれまでも多くの研究があり、特に ERS-2 衛星 (European Remote Sensing Satellite-2) や ENVISAT 衛星に搭載された C バンドの SAR に対しては、CMOD と呼ばれる手法が確立されている。この手法は、SAR より得られる正規化レーダー後方散乱係数、相対風向、入射角、偏波を基に高度 10m の風速を推定するものである。申請者らの事前研究により、この手法には以下の問題点が存在することがわかっている。

①風向推定の問題：CMOD を用いて風速を推定するには風向情報が必要になるが、船舶による航跡や陸上地形の影響を受けて風速の弱い沿岸海域においては SAR 画像自体からの風向推定は非常に難しい。それ故、実測値や気象モデルからの出力等、別の風向情報源が必要となる。

②風車ハブ高度での風速推定の問題：SAR から推定される海面上 10m の風速値から洋上風車のハブ高度（高度 50～100m）の風速を推定するには、風速鉛直プロファイルを設定する必要があるが、この仮定は一般的に難しく、大きな推定誤差に結びつきやすい。

上記 2 つは瞬時の海上風況を推定する際の問題点であるが、実際の洋上風力資源調査で必要とされるのは瞬時の海上風況ではなく、複数の海上風況を統計処理した年間統計値（年平均風速、ワイブル係数、風配図等）である。それ故、統計に利用できる SAR 画像の数は、統計的な安定性上、風力資源調査の精度に大きな影響を与え得る。これに関連して以下の大きな問題点が挙げられる。

③SAR 画像数の問題：信頼できる年間統計値を得るためには 100 シーン以上の画像数が必要と言われている。風況の複雑な日本沿岸ではそれ以上の画像数が必要になるであろう。しかし衛星の回帰日数と予算の面から、SAR 画像をそれ程大量に取得することは通常容易ではない。

(2) 本研究における改善策

これら 3 つの問題点に対し、本研究では以下のような改善策を講じる。

問題点①の改善策：メソ気象モデル MM5（米国立大気研究センター及びペンシルバニ

ア州立大学により開発）によって計算される風向情報を用いることにより改善を図る。MM5 により計算された風向を CMOD アルゴリズムに入力することにより SAR 画像より高度 10m の海上風速が得られる。この風速分布の空間解像度は MM5 の計算解像度に合わせて 500m となり、SAR 本来の空間解像度よりは低下するが、これはスペckルノイズを除去して風速推定の安定性を向上するために有効な処置であり、また SAR 画像格子を MM5 の計算格子と重ねることでレイヤー処理を容易にする。

問題点②の改善策：今冬新潟県大潟海岸の棧橋上で実施したドップラーソーダー（ドップラー効果を利用した遠隔風速観測装置）観測では、風速鉛直プロファイルが海陸コントラストに起因する水平循環に大きく影響されていることが示された。この結果は、沿岸海域の風速鉛直プロファイルの推定にメソ気象モデルを用いた 3 次元シミュレーションが必要であることを示唆している。ここでは、これまでに問題が指摘されている大気境界層スキームの改良を行った上で、SAR 風速の高度補正に MM5 の計算結果を利用することにより、風速鉛直プロファイルに関する問題の改善を図る。

問題点③の改善策：高額な SAR 画像の大量入手を目的として、現在、申請者らはデンマーク国立 Riso 研究所の研究者と共同で、欧州宇宙機関の PI (Principal Investigator) に登録申請中である。これにより、1 枚約 8 万円の SAR 画像が数千円で入手できるようになり、本研究申請の予算内で、洋上風況調査手法を構築するのに十分な枚数の画像を使うことができるようになる。

(3) SAR 画像の取得計画

本研究の対象海域は、海上風観測点のある和歌山県田辺湾、新潟県大潟海岸（以上、京都大学防災研究所）、神奈川県相模湾（防災科学技術研究所）である。これら 3 海域について ERS-2/SAR、ENVISAT/ASAR の各画像を取得する。各衛星の画像アーカイブから、各海域に対してそれぞれ合計約 100 シーンの SAR 画像が利用可能である。これに加えて、田辺湾（京都大学防災研究所白浜海象観測所）では 19 年度に衛星上空通過と同期したドップラーソーダーによる風速鉛直プロファイル観測が実施される予定であり、これに合わせて SAR 画像を新たに数百シーン分リクエストする計画である。

ERS-2/SAR、ENVISAT/ASAR に加えて、海上風推定に適した SAR 画像を選定するため、2006 年 2 月宇宙航空研究開発機構により打ち上げられ 2006 年 10 月より利用可能な

ALOS (Advanced Land Observing Satellite) 搭載 PALSAR (Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar) 画像を上記 3 海域に対して

取得する。PALSAR と同じLバンドを搭載した過去の JERS/SAR 画像も利用可能であるが、キャリブレーションに問題があることが相模湾を対象とした海上風の検証実験より明らかになっており、本研究ではLバンドレーダー後方散乱係数—風速変換アルゴリズムを新たに開発する。

4. 研究成果

本研究は、合成開口レーダーとメソ気象モデルを組み合わせた洋上風力資源推定手法の確立を3年間の最終目標とし、それを達成するため以下に示す項目を実施した。

(1)合成開口レーダーとメソ気象モデルを組み合わせた新しい風力資源賦存量の推定手法の確立：合成開口レーダーの高い海上風推定精度とメソ気象モデルの時間連続性の両面を組み合わせることにより、高精度な洋上風力資源調査手法の確立を目指した。具体的には、メソ気象モデルにより推定される風向分布を合成開口レーダー画像に相対風向として入力することにより、高精度な風速場を推定する手法を確立した。49シーンを対象としたワイブル平均風速、ワイブルエネルギー密度は現場風速を基にしたそれぞれの統計量より 0.05m/s , 76.4W/m^2 小さく、過小評価の傾向が明らかになった。

(2)有望海域での風力資源賦存量マップの作成：上記で構築された手法を用いて実際に日本沿岸の2海域において風力資源賦存量マップを作成した。1つは和歌山県白浜沖、他の1つは神奈川県平塚沖である。特に白浜沖のマップには、大気安定度が不安定な状態に起因すると思われるワイブルエネルギー密度の増加傾向が見られた。また風向別の風力資源賦存量では、風向により異なる推定精度を示した。これら風力資源賦存量マップの推定精度は今後合成開口レーダー画像数の増加に伴い改善することが期待される。図1, 2に白浜沖におけるWRF及び合成開口レーダーASARに基づくワイブルエネルギー密度分布を示す。

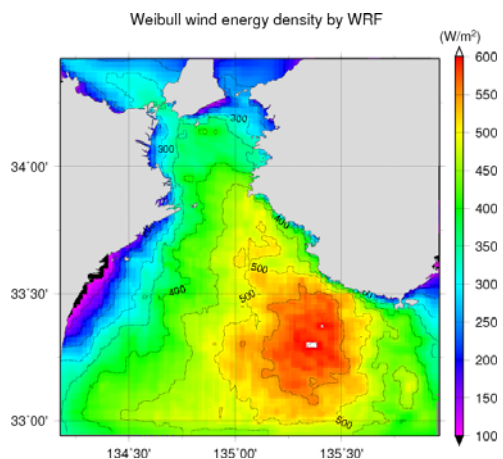


図1 WRF に基づく白浜沖におけるワイブルエネルギー密度の分布

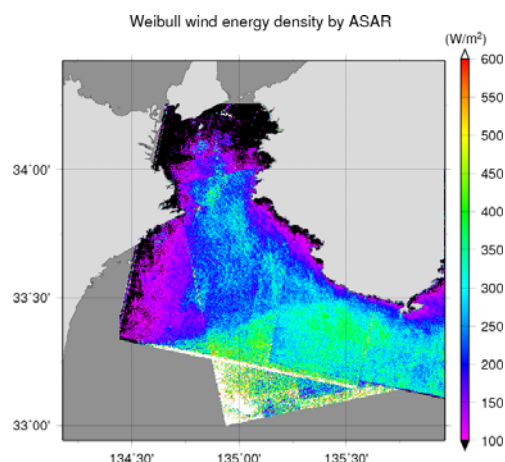


図2 ASARに基づく白浜沖におけるワイブルエネルギー密度の分布

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 16 件)

1. COMPARISON OF ENVISAT/ ASAR- ESTIMATED OFFSHORE WIND RESOURCE MAPS AROUND SHIRAHAMA WITH THOSE FROM MESOSCALE MODELS MM5 and WRF, K. Kozai, T. Ohsawa, S. Shimada, Y. Takeyama, C. Hasager, M. Badger, Proceedings of the European Offshore Wind Conference, P0. 131. 2009 (abstract 査読有)
2. Estimation Method for Offshore Wind Energy using Synthetic Aperture Radar and Weibull Parameters, K. Kozai, T. Ohsawa, R. Takahashi, Y. Takeyama, Proceedings of the Nineteenth International Offshore and Polar Engineering Conference, pp. 419-423. 2009 (フルペーパー 査読有)
3. Offshore Wind Resource Assessment in Japanese Coastal Waters, T. Ohsawa, S. Shimada, N. Tsubouchi, K. Kozai, Proceedings of the European Offshore Wind Conference, P0. 142. 2009 (abstract 査読有)
4. Characteristics of Offshore Winds at Shirahama Oceanographic Observatory, S. Shimada, T. Ohsawa, S. Serizawa, I. Yoneda, Proceedings of the Nineteenth International Offshore and Polar Engineering Conference, pp. 424-428. 2009 (フルペーパー 査読有)
5. Assessment of Offshore Wind Resources Within Japan's EEZ Using QuikSCAT Data, T. Ohsawa, M. Tanaka, S. Shimada, N. Tsubouchi, K. Kozai, Journal of the

Environmental Sciences, pp.841-845. 2009 (査読有)

6. 日本周辺海域の洋上風況マップに関する研究、大澤輝夫、壺内伸樹、嶋田進、香西克俊、風力エネルギー、Vol. 33, No. 2, pp. 92-97, 2009 (査読有)
7. リアルタイム沿岸海上風予測システムの開発と検証、大澤輝夫、竹本真大、日本航海学会論文集、第120号、131-136. 2009 (査読有)
8. Error factors in SAR wind retrieval for inshore areas, Y. Takeyama, T. Ohsawa, K. Kozai, Proceedings of the European Offshore Wind Conference, P0.136. 2009 (abstract査読有)
9. 日本周辺海域の洋上風況マップに関する研究、大澤輝夫、壺内伸樹、嶋田進、香西克俊、風力エネルギー利用シンポジウム予稿集、pp. 225-228. 2009 (査読無)
10. 白浜海象観測所における洋上風況特性について、嶋田進、大澤輝夫、芹澤重厚、米田格、風力エネルギー利用シンポジウム予稿集、Vol. 30, pp. 233-236. 2008 (査読無)
11. 合成開口レーダー及びワイブル分布統計解析による洋上風力エネルギー推定方法の検討、香西克俊、大澤輝夫、高橋倫也、日本リモートセンシング学会学術講演会論文集、pp. 21-22, 2008 (査読無)
12. Evaluation of offshore wind energy potential using SAR and MM5, K. Kozai, T. Ohsawa, Proceedings of SPIE, Optics and Photonics 2007, 66800Y-1~8, 2007 (abstract査読有)
13. ACCURACY OF OFFSHORE WIND RESOURCE ASSESSMENT BY USING ENVISAT/ASAR AND MM5, K. Kozai, T. Ohsawa, Proceedings of the European Offshore Wind Conference, P037-1-8 (abstract査読有)
14. 白浜海象観測所における洋上風況観測について、大澤輝夫、香西克俊、芹澤重厚、林泰一、飯坂崇、第29回風力エネルギー利用シンポジウム講演集、pp. 239-242, 2007 (査読無)
15. Derivation and application of an empirical equation to estimate hub-height wind speed from sea surface wind speed, Ohsawa, T., A. Kataoka, D. Heinemann, B. Lange, A. Peña and C. B. Hasager, Proceedings of European Offshore Wind Conference & Exhibition 2007, P0. 41. 2007 (アブストラクト査読有)
16. Evaluation of offshore wind simulations with MM5 in the Japanese and Danish coastal waters, Ohsawa, T., A. Hashimoto, S. Shimada, J. Yoshino, T. De Paus, D. Heinemann, and B. Lange,

Proceedings of European Wind Energy Conference & Exhibition 2007, BL3, 103. 2007 (アブストラクト査読有)

[学会発表] (計 6 件)

1. 香西克俊、大澤輝夫、嶋田進、竹山優子、Charlotte Hasager, Merete Badger、白浜周辺海域におけるメソスケールモデルWRF及び現場観測によるEnvisat/ASAR洋上風力資源パラメータの検証、日本リモートセンシング学会 第47回学術講演会論文集、2009年11月26日、名古屋大学
2. 山田秀明、香西克俊、大澤輝夫、竹山優子、ALOS/PALSARによる白浜沿岸域の海上風速推定と検証、2009年度日本海洋学会春季大会、2009年4月8日、東京大学
3. 香西克俊、大澤輝夫、高橋倫也、合成開口レーダー及びワイブル分布統計解析による洋上風力エネルギー推定方法の検討、日本リモートセンシング学会第45回秋季学術講演会、2008年12月4日、北海道情報大学
4. 竹山優子、大澤輝夫、香西克俊、ENVISAT/ASARによる平塚沿岸域の海上風推定、第30回風力エネルギー利用シンポジウム、2008年11月28日、科学技術館サイエンスホール
5. 香西克俊、大澤輝夫、合成開口レーダー及びメソ気象モデルを利用した洋上風力資源評価の方法、日本海洋学会秋季大会、2007年9月27日、琉球大学工学部
6. 香西克俊、大澤輝夫、合成開口レーダーによる洋上風力エネルギーポテンシャルの評価—海上風速検証—、日本リモートセンシング学会第42回学術講演会、2007年5月10日、日本大学文理学部

[図書] (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.nav.maritime.kobe-u.ac.jp/air-sea/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

香西 克俊 (KOZAI KATSUTOSHI)
神戸大学・海事科学研究科・教授
研究者番号：30186613

(2) 研究分担者

大澤 輝夫 (OHSAWA TERUO)
神戸大学・海事科学研究科・准教授
研究者番号：80324284

(3) 国内研究協力者

竹山 優子 (TAKEYAMA YUKO)

産業技術総合研究所・情報技術研究部門・
研究員
研究者番号：00510025

(4) 海外研究協力者

Charlotte Bay Hasager
Risoe National Laboratory for
Sustainable Energy, Technical
University of Denmark, Wind Energy
Department
Senior Researcher