

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 4 月 1 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22360379

研究課題名（和文） 合成開口レーダー・散乱計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 survey method for offshore wind energy resources using synthetic aperture radar, scatterometer 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）：合成開口レーダー・散乱計及びメソ気象モデルによる瞬時の海上風推定手法の検証と改良を行い、合成開口レーダー風速推定アルゴリズムにメソ気象モデルの計算風向を用いて海上風速を推定する手法を改良し、一般化を図った。また合成開口レーダー、散乱計及びメソ気象モデルを組み合わせた新しい風力資源賦存量推定手法の開発に関しては、風車ハブ高度の風力資源量の推定を行い、合成開口レーダーから得られた 10m 高度風速に、メソ気象モデルから得られた鉛直風速比（80m 高度風速/10m 高度風速）をかけ合わせることで求める手法を適用した。

研究成果の概要（英文）：Estimation methods of instantaneous offshore wind speeds using synthetic aperture radar, scatterometer and mesoscale meteorological model are validated and improved. Especially offshore wind speed estimation algorithms using synthetic aperture radar as an input of simulated wind directions using a mesoscale meteorological model are developed and improved. Moreover estimation methods of offshore wind energy resources at the wind turbine hub height are adopted by using the ratio of wind speed at 80m height and the one at 10m height derived from the mesoscale meteorological model.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	11,200,000	3,360,000	14,560,000
2011 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2012 年度	1,900,000	570,000	2,470,000
総計	14,500,000	4,350,000	18,850,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学、地球・資源システム工学

キーワード：リモートセンシング、海上風、風力資源賦存量、合成開口レーダー、散乱計、メソ気象モデル

1. 研究開始当初の背景

(1) 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調査手法の開発：成果と限界

平成 19 年度から 21 年度にかけて実施した「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」（基盤

研究（B）（一般）では、メソ気象モデルより得られる推定風向を CMOD4 と呼ばれる風速推定モデルに入力することにより、日本沿岸で初めて 49 シーンに及ぶ合成開口レーダー画像の重ね合わせに基づく洋上風力資源統計量（Weibull 平均風速、Weibull エネルギー密度）マップを作成した。申請者らはこれらの成果を欧州洋上風会議（European

Offshore Wind Conference 2009) において発表し、参加者より様々な評価を受けた。特に指摘された点は風向が異なることにより洋上風力資源統計量の推定精度が大きく異なることである。理由として気温—海面水温差で代表される大気安定度が鉛直風速分布に影響を与えていると申請者らは考えている。日本近海は山岳地域が沿岸まで迫り、また海面水温が相対的に気温より高いため海陸風循環が卓越する海域が多い。このような条件下ではCMOD4のように大気安定度が中立であることを仮定することは困難であり、このため基準となる海面高 10 メートル及びさらに高高度の推定風速は不安定時には中立時より過小評価、安定時には過大評価となる傾向のあることが申請者らの先行研究より明らかになっている。

(2) 沿岸域固有の問題点

洋上風力資源調査において問題となっているのが沿岸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://app2.infoc.nedo.go.jp/nedo/top/top.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 25kmx25km の格子上で 1 日 2 回、誤差 1~2m/s の精度で 10 メートル高の海上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沿岸から数十 km 程度までの沿岸域である。沿岸海域では、海岸線の影響を受けるため空間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取得す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把握が難しい海域であると言える。

(3) 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衛星から地表に向けてマイクロ波を照射し後方散乱エネルギーを受信するレーダーであり、海面状態と後方散乱エネルギーを関連付けることにより、海上風速を数 10m という高い空間解

像度でかつ高い精度(1~2m/s)で推定することができる。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、合成開口レーダー、マイクロ波散乱計及びメソ気象モデルを利用した洋上風力資源調査に関する研究を集中的に行ってきた。そして沿岸では多数の合成開口レーダー画像、外洋ではマイクロ波散乱計データを基に洋上風力資源賦存量を推定し評価するという目標に対してある程度の方向性を見出すことができた。今後すべきこと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鉛直風速推定モデルを利用した高高度(例えば 100m)における統計情報(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。

2. 研究の目的

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いる。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いるが、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。本研究は、平成 19 年度から 21 年度にかけて実施した「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」(基盤研究(B)(一般))の成果を基に、合成開口レーダー、マイクロ波散乱計及び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 年間の目標とし、陸上の風況マップに順ずる、日本沿岸海域の風況データベース構築を最終目的とする。

本研究は、合成開口レーダー、マイクロ波散乱計及び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 年間の目標とし、それを達成するため以下の 5 つのステップに分ける。

(1) **海上風推定に適した SAR 画像の特定**: 本研究では C, L, X バンドの 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 SAR 画像が利用できる。ここではそれぞれの特徴を明らかにすると共に、海上風推定への適用可能性について検討する。

(2) **メソ気象モデル内での鉛直風速推定モデルの改良**: Monin-Obukhov 相似則に基づく鉛直風速推定モデルを用いる。メソ気象モデル内の鉛直風速推定モデルと比較し改良を加える。

(3) **SAR、散乱計及び鉛直風速推定モデルに**

よる海上風推定手法の検証と改良：対象期間を大幅に増やし、1)及び2)の検討を加えることにより、平成19～21年度に行われた2つのプロジェクト(10頁参照)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) SAR、散乱計及び鉛直風速推定モデルによる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ジェクトの一例として、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

SARによる海上風推定には様々な問題点が存在することが明らかになっており、それらを改善することにより本研究を実施する。具体的な問題点として風向推定、風速推定の仮定、風車ハブ高度での風速推定、SAR画像数が挙げられる。これらに対してそれぞれメソ気象モデルWRF風向の利用、等価中立風の概念の導入、WRF鉛直風速比の利用、PI申請による安価なXバンドSAR画像の入手により改善策を講じる。またSAR画像の取得に関しては、海上風観測点のある和歌山県田辺湾と神奈川県相模湾の2海域を対象としてENVISAT/ASAR、ALOS/PALSAR、TerraSAR-X画像を取得する。これにより平成22年度は海上風況推定に適したSARの選定、鉛直風速推定モデルの改良とそれに基づくWRFによる風況推定を実施し、平成23年度以降はSAR、WRFと散乱計を組み合わせた瞬時の海上風推定手法の検証と改良、及び新しい風力資源調査手法の開発を目指す。

(1) 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に多くの研究があり、特に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。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海面高度10mの風速推定における仮定の問題：CMODにより推定される風速は気温—海面水温差により代表される大気安定度が中立であることを仮定している。ところが日本近海ではこの仮定を満たす海域が少なく、また申請者らの先行研究では大気安定度が鉛直風速分布に影響を与えていることが明らかになっている。

③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、風速の鉛直分布を仮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3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。

④SAR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4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WRF(大気研究大学連合(UCAR)及び米国国立環境予測センター(NCEP)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。WRF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WRF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SAR画像固有のスペクトルノイズを除去して風速推定の安定性を向上させるために有効な処置であり、またSAR画像格子をWRFの計算格子と重ねることでレイヤー処理を容易にする。また本研究で

は SAR と同期するマイクロ波散乱計から得られる風向を CMOD アルゴリズムに入力することにより海上風速を推定し、WRF 風向入力により推定される海上風速と比較する。

問題点②の改善策：大気安定度を考慮した等価中立風(Equivalent neutral wind)の概念を導入することにより改善を図る。等価中立風は現場風速、相対湿度、気温及び海面水温より導かれる。またこれに対応したCMODであるCMOD5. Nを用いることによりSARより推定される海上風速の推定精度向上を図る。

問題点③の改善策：申請者らの先行研究によれば、風速の鉛直分布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分布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、SAR 風速の高度補正に WRF の計算結果を利用することにより、風速の鉛直分布に関する問題の改善を図る。

問題点④の改善策：高額な SAR 画像の大量入手を目的として、申請者らはドイツ航空宇宙センター(DLR)のPI(Principal Investigator)に登録申請し承認された。これにより、1シーン約35万円(商用ベース)のXバンドSAR画像(TerraSAR-X, 50シーン)が1シーン23000円で入手できるようになった。これに加えCバンドのASAR画像及びLバンドのPALSAR画像を本研究申請の予算内で購入することにより、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。

4. 研究成果

(1) 2010年度の研究成果

①海上風況推定に適した SAR の選定(香西、竹山)：ENVISAT/ASARのWide swathモード(画像幅400km, 空間解像度100m)とImageモード(画像幅100km, 空間解像度30m)、ALOS/PALSAR広域観測モード(画像幅350km, 空間解像度75m)と高分解能モード(画像幅70km, 空間解像度12m)、TerraSAR-X ScanSARモード(画像幅100km, 空間解像度19m)の3種類5モードのSAR画像の海上風推定への適応可能性について比較・検討した。この内平塚を対象としたPALSAR広域観測モードは地上からの干渉波の影響が画像に見られたため、白浜周辺海域を対象とした高分解能モード画像を基に海上風速推定精度を比較した。その結果、PALSARはCバンドのASARより高いバイアス1.32m/s、RMS誤差2.66m/sを示すことが明らかになった。TerraSAR-Xについては、Xバンドレーダー後方散乱係数—風速変換アルゴリズムを今後開発予定である。

②鉛直風速推定モデルの改良とWRFに基づく

風況推定(大澤)：海面上10mの高さで得られるマイクロ波散乱計の風速について、メソ気象モデルWRFの計算値から得られた鉛直風速比率を利用することにより、風車ハブ高度(60m及び80m)の風速を算出した。外洋においては、WRFから得られた鉛直風速比率(U60/U10、U80/U10)は、Monin-Obukhov相似則に基づく風速比率と大きく変わらないことが分かった。

(2) 2011年度の研究成果

①合成開口レーダー・散乱計及びメソ気象モデルによる瞬時の海上風推定手法の検証と改良(香西、大澤、竹山)：和歌山県田辺湾周辺海域を対象とした合成開口レーダーを用いた研究から、対象海域、シーン数を増やし、さらに昨年度のC,L,Xバンド合成開口レーダーの海上風推定への適用可能性の結果と、鉛直風速推定モデルの検証と改良結果の検討を加えることにより、合成開口レーダー風速推定アルゴリズムにメソ気象モデルの計算風向を用いて海上風速を推定する手法を改良し、一般化を図った。

②合成開口レーダー、散乱計及びメソ気象モデルによる風力資源賦存量推定手法の確立(香西、大澤、竹山)：海面上10mの高さで求められる合成開口レーダー及びマイクロ波散乱計の風速推定値に対して、メソ気象モデルにより計算される10m高度と風車ハブ高度(60~80m)の風速比率を乗じることにより、大気安定度を考慮した形で風車ハブ高度の風速推定を行った。海岸線から数十km以上の外洋域に関しては、散乱計とメソ気象モデルを上記のように組み合わせることにより、ある程度信頼性のある風力資源賦存量推定手法が確立できたものとする。沿岸域に関しては、合成開口レーダーとメソ気象モデルの同様な組み合わせた手法の確立を目指しているが、両者共に瞬時の風速推定に未だ無視できない大きな誤差があることが明らかになり、この改善に関しては来年度の課題とする。

(3) 2012年度の研究成果

①合成開口レーダー・散乱計及びメソ気象モデルによる瞬時の海上風推定手法の検証と改良(香西、大澤、竹山)：和歌山県田辺湾周辺海域を対象とした合成開口レーダーを用いた研究から、対象海域を土佐湾周辺海域へ拡大し、シーン数を増やした。さらに昨年度のC,L,Xバンド合成開口レーダーの海上風推定への適用可能性の結果と、鉛直風速推定モデルの検証と改良結果の検討を加えることにより、合成開口レーダー風速推定アルゴリズムにメソ気象モデルの計算風向を用いて海上風速を推定する手法を改良し、一般化を図った。特にCバンド合成開口レーダーASARの海上風推定アルゴリズムの内、等価中立風を考慮したCMOD5. Nによる風速推定精度

が最も高いことが明らかになった。またLバンド合成開口レーダーPALSARの海上風推定への適用可能性について風速推定アルゴリズムの指数部分を補正することによりバイアスは0.5m/s近くまで改善されたが、RMS誤差は依然2m/s以上あり、PALSAR海上風推定精度の向上は今後の課題である。

②合成開口レーダー、散乱計及びメソ気象モデルを組み合わせた新しい風力資源賦存量推定手法の開発(香西、大澤、竹山)：合成開口レーダーの高い海上風速推定精度とWRF、散乱計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。合成開口レーダーの推定海上風速に基づく風力資源賦存量についてはワイブル分布を仮定した場合推定されるワイブル平均風速及びワイブルエネルギー密度は長期の白浜における現場観測から推定される風力資源賦存量と良い一致を示した。図1にワイブル平均風速の分布を、図2に風力エネルギー密度分布を示す。紀伊水道から潮岬にかけての沿岸域でそれぞれ6m/s、500W/m²以上のワイブル平均風速とエネルギー密度分布が見られる。風車ハブ高度の風力資源量の推定については、合成開口レーダーから得られた10m高度風速に、メソ気象モデルから得られた鉛直風速比(80m高度風速/10m高度風速)をかけ合わせるにより求める手法を適用した。

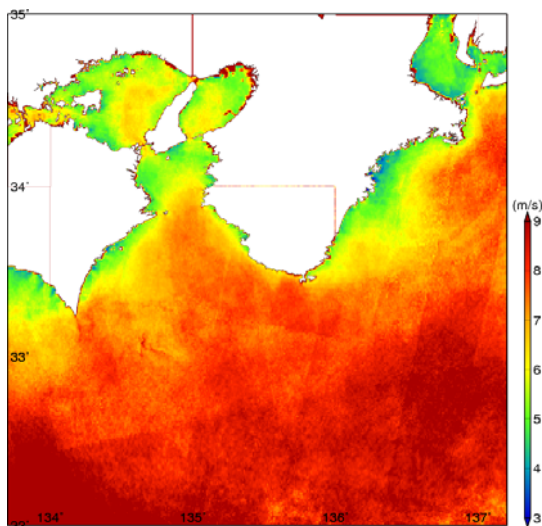


図1 ワイブル平均風速分布

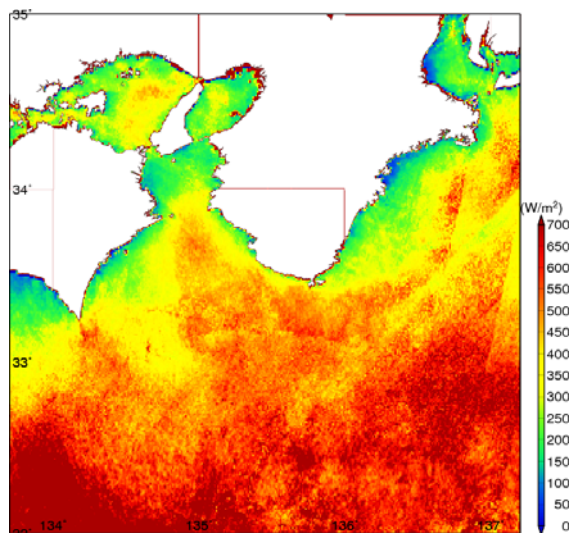


図2 風力エネルギー密度分布

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11件)

①Takeyama Yuko, Ohsawa Teruo, Katsutoshi Kozai, Charlotte Bay Hasager, and Merete Badger: Comparison of Geophysical Model Functions for SAR Wind Speed Retrieval in Japanese Coastal Waters, Remote Sensing, 査読有、5, 1956-1973, DOI:10.3390/rs5041956, 2013

②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、査読無、41巻、9号、22-27、2012

③大澤輝夫、嶋田進、種本純、竹山優子、香西克俊：メソ気象モデルによる洋上風況調査精度について、第34回風力エネルギー利用シンポジウム予稿集、査読無、11月27-28日、東京、334-337、2012

④Takeyama Yuko, Ohsawa Teruo, 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, 査読有、DOI:10.1002/we.1526, 2012

⑤Tomohiro Yamashita, Katsutoshi Kozai, Teruo Ohsawa: WIND SPEED ACCURACY COMPARISON OF FOUR C-BAND GEOPHYSICAL MODEL FUNCTIONS USING ASAR WIDE SWATH IMAGES IN THE COASTAL SEAS OF JAPAN, Proceedings of the International Conference on Remote Sensing 2012, 査読無、Incheon, Korea, Award of

Excellent Contestant 受賞論文, 2012
 ⑥Katsutoshi Kozai, Teruo Ohsawa, Rinya Takahashi, Yuko Takeyama: Evaluation Method for Offshore Wind Energy Resources Using Scatterometer and Weibull Parameters, Journal of Energy and Power Engineering, 査読有、Vol.6, No.7, pp.1772-1778, 2012
 ⑦Takeyama, Y., T. Ohsawa, K. Kozai, C. B. Hasager, M. Badger, Atmospheric stability dependence of SAR wind speed retrieval in Japanese coastal areas, Proc. of European Offshore Wind Conference and Exhibition 2011, 査読無、Amsterdam, Netherlands, P0360, 2011
 ⑧Ohsawa, T., N. Tubouchi, R. Niwa, J. Tanemoto, S. Shimada, Y. Takeyama, Characteristics of offshore wind speed simulated with WRF in the seas around Japan, Proc. of European Offshore Wind Conference and Exhibition 2011, 査読無、Amsterdam, Netherlands, P0374, 2011
 ⑨Ding Yan, Katsutoshi Kozai, Teruo Ohsawa, Nobuki Tsubouchi: Evaluation of offshore wind energy resource in Chinese coastal sea using QuikSCAT data, Proceedings of ISRS (International Symposium on Remote Sensing), 査読無, Yeosu, Korea, TB302, Award of Excellent Contestant 受賞論文, TB302, 2011
 ⑩Shimada, 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, 査読有, Vol.7, pp.109-112, 2011
 ⑪壺内伸樹, 大澤輝夫, 嶋田進, 香西克俊: QuikSCAT海上風データに基づく海上風況データベースの作成、風力エネルギー、査読有、Vol.35, pp.1-6, 2011
 ⑫丹羽、大澤、嶋田、香西、竹山: 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, 査読有、pp.203-208, 2010

[学会発表] (計4件)

①Katsutoshi Kozai, Teruo Ohsawa, Tsuguhiko Morita, Yuko Takeyama: Investigation of offshore wind energy resource using AMSR2-derived wind speed and sea surface temperature products - Atmospheric stability effect on wind resource-, GCOM-W1 PI Workshop, Tokyo, Jan.31-Feb.1, 2013
 ② Katsutoshi Kozai, Teruo Ohsawa: Investigation of offshore wind energy resource using AMSR2-derived wind speed and sea surface temperature products -

Comparison of wind resource map-, GCOM-W1 PI Workshop, Tokyo, Jan.18-19, 2012

③K.Kozai: INVESTIGATION ON METHODOLOGY OF OFFSHORE WIND SPEED ESTIMATION BY USING SYNTHETIC APERTURE RADAR, The 4th Joint PI Symposium of ALOS Data Nodes for ALOS Science Program in Tokyo, 東京, Nov.15-16, 2010

④K.Kozai: Study on Evaluation Methods for Offshore Wind Energy Resources by Using Synthetic Aperture Radar and Mesoscale Meteorological Model, 2010 International Workshop on Operating System for Marine

Environment Monitoring and Forecasting (招待講演)、National Kaohsiung Marine University, Kaohsiung, Taiwan, ROC, Oct.27-29, 2010

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者

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

(3) 連携研究者

竹山 優子 (TAKEYAMA YUKO)
 独立行政法人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: Senior Researcher, Wind Energy Department, Risoe National Laboratory for Sustainable Energy, Technical University of Denmark