



# 合成開口レーダ・散乱計及びメソ気象モデルを用いた洋上風力資源評価方法に関する文献レビュー

大野, 恭兵  
香西, 克俊

---

**(Citation)**

神戸大学大学院海事科学研究科紀要, 08<商船・理工論篇>:59-65

**(Issue Date)**

2011-07

**(Resource Type)**

departmental bulletin paper

**(Version)**

Version of Record

**(JaLCD0I)**

<https://doi.org/10.24546/81003311>

**(URL)**

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/81003311>



合成開口レーダ・散乱計及びメソ気象モデルを用いた  
洋上風力資源評価方法に関する文献レビュー  
**Literature review on evaluation method for offshore wind  
energy resource using synthetic aperture radar, scatterometer  
and mesoscale meteorological model**

大野恭兵\*・香西克俊  
Kyouhei OHNO\*, Katsutoshi KOZAI

(2011年4月8日提出)

要旨

近年、再生可能エネルギーが注目を集め、中でも洋上風力発電は期待されており欧州を中心に導入が盛んに行われている。洋上に風車を設置するためには洋上風力資源量を指標に海域を選定する必要がある。ここでは洋上風力資源量を推定する手法として代表的な衛星搭載合成開口レーダ、マイクロ波散乱計、メソ気象モデルの特徴について論ずる。

1.はじめに

京都議定書で取り上げられたように二酸化炭素が地球温暖化に寄与し(環境省,1997)、また化石燃料などの枯渇などの問題も発生しており、再生可能エネルギーに対する注目度が一段と大きくなった。その中でも風力発電は温暖化や化石燃料枯渇の対抗策として期待されている。理由としては EPT(Energy Payback Time: 生産から廃棄までの期間に投入されるエネルギーを発電によって生み出すためにかかる稼働期間。期間が短いものがよいとされる)と EPR(Energy Payback Ratio: 生産から廃棄までの期間に投入されるエネルギーとその期間に生み出すエネルギーとの比。大きいものが良いとされる)と呼ばれる再生可能エネルギーの評価指標が他の再生可能エネルギーよりも優秀であり、風力発電の EPT、EPR はそれぞれ 0.56~0.79 年、38~54 であり、再生可能エネルギーの代表格のひとつである太陽光発電は 1.4~2.6 年、16~31 である(産総研,2008)。また発電コストについても風力発電は優れており、風力発電の発電コストは 9~15 円/KWh であるのに対し、太陽光発電の発電コストは 37~46 円/KWh である(NEDO,2010)。しかし日本における風力発電導入にはいくつかの問題点があり、騒音・景観問題や設置場所の適地不足などが挙げられる。これらの問題の解決策として陸上ではなく洋上で風力発電を行うという考えがある。理由として洋上は陸地に比べて乱れが少ない強い風が吹いていて、また日本は世界第 6 位の EEZ(Exclusive Economic Zone: 排他的経済水域)を有しているということが挙げられる。これらの要因があるため陸上で風力発電を行う際の問題点を洋上で行うことにより解消することができる。しかし洋上で発電することにより発生する問題もあり、その最たるものとして挙げられるのが海域の選定方法である。海域の選定を行う指標は風力資源量であり、これは風力エネルギー密度で表現でき、風力エネルギー密度は風速の三乗に比例するため風速を計測することにより現場の風力資源量を知ることができる。陸上での風力発電適地の選定方法は、風況マップから候補地を選び現場で長期の風況観測を行うというものであるが、洋上において現場観測を行う場合、莫大な費用がかかるため現実的ではない。また現場

観測では定点の海上風速しか得ることができず、広範囲の風速場を知ることができない。そこで観測鉄塔を建設する以外の方法で、広域の海上風速を推定する手段としてメソ気象モデル、マイクロ波散乱計、合成開口レーダなどが考えられる。これらの手法には様々な特徴があり、次章ではメソ気象モデル、マイクロ波散乱計、合成開口レーダの特徴を比較する。

## 2. 洋上風速推定手法の比較

メソ気象モデル WRF(Weather Research and Forecasting)は NCAR(National Center for Atmospheric Research) 及び NCEP(National Centers for Environmental Prediction)等が共同開発しており、非静力学モデル MM5 の後継モデルである(Skamarock et al., 2008)。客観解析値と呼ばれる空間的に不規則に分布している気象データから、格子点上の気象変数の数値を数学・物理的な手順を踏んで計算した値を用いることでより時間空間解像度の高い値を算出することができる。次に、マイクロ波散乱計とは能動的にマイクロ波を海面に放射し、海面からの後方散乱の強度から風速を推定することができるセンサのことである。1978年6月に SEASAT に搭載された SASS(SEASAT-A Satellite Scatterometer)を皮切りに、1991年には ERS-1 に搭載された AMI(Advanced Microwave Instrument)が、1995年には ERS-2 に搭載された SCAT が ESA(European Space Agency)によって打ち上げられ、1996年には NSCAT と呼ばれる SCAT よりも観測幅の大きいセンサが、1999年には SeaWinds という NSCAT の3倍の観測幅を持つセンサが QuikSCAT 衛星に搭載され打ち上げられた。2002年には QuikSCAT と同センサを搭載した Midori-2 が、2006年には ASCAT が MetOp-1 に搭載され打ち上げられた。今回私はこれらマイクロ波散乱計の中で空間解像度・観測幅が最も優れ、約10年という長期間運用された QuikSCAT を議論に用いる。一方、合成開口レーダとはマイクロ波散乱計と同じくマイクロ波を放射して風速を推定することができるセンサであるが、合成開口処理という特殊な処理を行うことにより空間解像度がマイクロ波散乱計の約100倍にもなる。1978年に SEASAT に L-band SAR センサが搭載され、1991年にはそれぞれ S-band SAR を搭載した ALMAZ-1、ALMAZ-2、C-band SAR を搭載した ERS-1 が打ち上げられ、2002年には C-band ASAR を搭載した Envisat が飛び、2006年には L-band PALSAR を搭載した ALOS が打ち上げられた。今回私は空間解像度と観測幅が優れており、海面からの後方散乱の値から海上風推定をするためのモデル(CMOD)が数多く発表されている ASAR を議論に用いる。WRF、SeaWinds、ASAR の海上風速推定に大きな影響を与える、空間解像度、時間解像度、観測幅の仕様については以下に表でまとめる。

表 1. 各推定方法の仕様

	WRF	SeaWinds	ASAR
空間解像度	500m~	25km	12.5m~75m
時間解像度	1 時間	12 時間	35 日
観測幅	150km~3000km	1800km	5km~406km

表 1 より空間解像度は ASAR が非常に優れており、WRF の約 6~40 倍、SeaWinds の約 333~2000 倍の空間解像度を誇る。空間解像度が高ければより細かな風速場を推定することができ、洋上に風車を建てる際のリスクを低減することができる。また時間解像度は WRF が最も高く、ASAR の画像を 1 枚取得

するまでに WRF は 840 シーン分の風速を計算することができ、SeaWinds と比較すると 12 倍の解像度があることが分かる。時間解像度が高ければ、同期間の平均風速を推定・算出した場合、平均値の母数が多くなるため平均風速の信頼度が上がる。観測幅については SeaWinds、WRF が広い。観測幅が広ければ広域の風速場を知る際に有利になる。WRF の観測幅に範囲が設けられているのは、元データとなる客観解析値に依存するからである。ASAR は各観測モードで空間解像度・観測幅が異なるので範囲が設けられている。次章では実際に洋上風速を推定・計算しその精度を比較・検証する。

### 3.各推定手法の日本周辺域における大気安定度を考慮した海上風速推定精度比較・検証

前章で挙げた WRF、SeaWinds 及び ASAR の日本周辺域の大気安定度を考慮した海上風速推定精度の比較・検証を行う。検証を行うためデータは本研究室の修士論文(壺内 2011,丹羽 2011)から抜粋させていただく。まず WRF と SeaWinds の精度を比較する。真値として用いられる値は日本周辺海域に設置されている 4 地点のブイであり、期間は 2007 年、2008 年の 2 年間である。図 1 は今回用いた観測ブイの配置である。

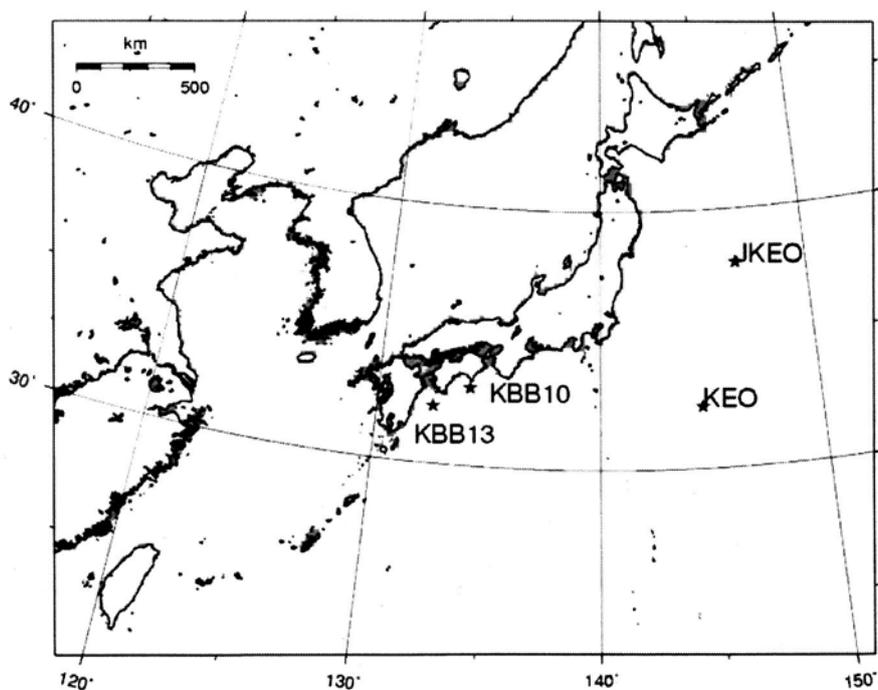


図 1. 各観測ブイの配置(壺内 2011)

評価指標には Bias と RMSE(Root Mean Square Error: 二乗平均平方根誤差)及び相対 Bias、相対 RMSE を用いる。Bias とは推定値と真値の差であり、正の値であれば過大評価の傾向に、負の値であれば過小評価の傾向にあると判断できる。RMSE とは真値からの誤差を示すものであり、0 に近い値であればあるほど精度の高い推定ができていると判断できる。Bias、RMSE とともに平均風速が大きくなることに比例して値が大きくなるため、Bias、RMSE を平均風速で割り、百分率で表現したものをそれぞれ相対 Bias、相対 RMSE として評価指標の一つとしている。次にそれぞれの地点における Bias、RMSE、相対 Bias、相対 RMSE を表にまとめる。

表 2. SeaWinds と WRF の推定精度比較

	SeaWinds		WRF	
	Bias	RMSE	Bias	RMSE
KEO	-0.10m/s (-1.1%)	1.73m/s (18.8%)	-0.43m/s (-4.6%)	2.76m/s (29.7%)
JKEO	0.51m/s (5.4%)	2.39m/s (25.2%)	-0.40m/s (-4.2%)	2.47m/s (26.1%)
KBB10	-0.25m/s (-3.0%)	1.80m/s (21.9%)	-0.28m/s (-3.5%)	2.39m/s (29.1%)
KBB13	0.09m/s (1.1%)	1.72m/s (20.3%)	-0.16m/s (-6.1%)	2.57m/s (30.4%)
Average	-0.25m/s (2.4%)	1.91m/s (21.6%)	-0.32m/s (-4.6%)	2.55m/s (28.8%)

KEO、JKEO、KBB10、KBB13 は各観測ブイの名称である。括弧内は各々の相対 Bias 及び RMSE である。比較した結果、4 地点全てにおいて SeaWinds が Bias、RMSE、相対 Bias、相対 RMSE 全てにおいて精度が高く、全ての地点の平均値で比較すると SeaWinds の RMSE が WRF の RMSE よりも 0.6m/s 程度低い値であり、SeaWinds の方がより精度の高い推定をしていることが分かる。次に ASAR と WRF を比較する。真値として用いられる値は和歌山県白浜、神奈川県平塚にある海洋観測鉄塔の観測値であり、期間は 2005 年から 2008 年までである。比較した結果を下記の表にまとめる。

表 3. ASAR と WRF の推定精度比較

	ASAR		WRF	
	Bias	RMSE	Bias	RMSE
白浜	-0.27m/s (-4.7%)	1.66m/s (28.6%)	0.78m/s (13.3%)	2.02m/s (34.8%)
平塚	-0.05m/s (-1.1%)	1.48m/s (30.4%)	0.06m/s (1.2%)	1.61m/s (33.0%)

表 3 より ASAR の推定風速が平塚、白浜両地点において WRF よりも精度が高いことが分かった。SeaWinds と ASAR は同地点を観測する時刻が異なるために比較することが困難であり、今回、直接比較は行っていない。しかし、表 1 から空間解像度に大きな開きがあり、もし SeaWinds で洋上風力発電の対象海域である岸から数十 km の海上風速を推定する場合、陸地の影響を受け正しい値が得られない場合もある。またより細かい風況を調査するためにはより空間解像度が高い方が好ましい。これらのことから SeaWinds を用いて対象海域を選定し ASAR を用いてより細かな精度の高い風況調査を行うことが良いと判断できる。だが、表 1 を見ると時間解像度が WRF に比べ、格段に劣り ASAR で長期的な風況調査を行うことは極めて困難である。この時間解像度の短所を補うためには、あらゆる種類の SAR 画像を利用する必要がある。また合成開口レーダ全般に言えることだが、合成開口レーダで海上風速を推定する場合、相対風向（合成開口レーダから見た風向のこと。マイクロ波照射方向に対する向い風を 0 度として、時計回りに増加する）が必要であるという問題がある。今回は WRF によって計算された風向を用いているが、観測風向を入力として使用する場合と比較して両者の風速推定誤差に大きな違いはないため (Kozai et al., 2007)、観測風向の得られない海域では今後 WRF による風向入力が一般的になるであろう。さらに ASAR で選定場所の風況調査を行うのであれば、風力エネルギー密度の場合、約 1300 シーン以上の画像が必要になると言われる。(Kozai et al., 2009)。しかし精度の高い風速推定を行わなければ洋上で風力発電する場合のリスクが大きくなってしまふ。だが推定の精度が悪ければいくら画

像を集めても意味がない。そこで期待されている衛星が次の章で紹介する TerraSAR-X である。

#### 4. TerraSAR-X による風況調査

TerraSAR-X とは DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt、ドイツ航空宇宙センター) が 2007 年に打ち上げた世界初の X-band 合成開口レーダを搭載した衛星の名称である。この TerraSAR-X は空間解像度が 8.5m と ASAR より優れており、時間解像度も 11 日と ASAR の 3 倍の性能を誇る。合成開口レーダで海上風速を推定することができる原理は海上で風が吹いた際、風の強さによって発生する波の大きさが異なりその粗度(海面の凹凸の程度)の違いを放射したマイクロ波の後方散乱の強さによって、判別することができるためである。しかし、海面が平面(ここでは波が起こっていない時の海面)である場合マイクロ波は後方には散乱せず、前方に散乱してしまい海上風速を推定することができない。波長によっては風が波を発生させているのにもかかわらず、平面と判断してしまう場合もある。これは海面を平面であるか粗面であるかを判断する基準である粗度がマイクロ波の波長と入射角(レーダビームと地表の垂線との間の角度)に依存しているためである。粗度は海面の高さの標準偏差で表すことができ、例えば波長が 30cm、入射角が 40 度の場合、地表面の高さの標準偏差が 5cm 以下であると海面は平面であると判断されてしまう。ASAR の波長は約 5.6cm であり入射角が同じならば、高さの標準偏差が約 0.9cm 以下であると平面と判断されて後方散乱が弱まり、海上風速を推定することができなくなる。TerraSAR-X の場合波長は約 3.1cm であるので入射角が同じであるならば、高さの標準偏差が約 0.5cm 以下の時、平面と判断される。以上のことから TerraSAR-X は ASAR よりも粗度に対して感度が高く、風が弱い場合でもマイクロ波が後方散乱するため海上風速を推定するのにより適していることが分かる(飯坂, 1998)。しかしながら TerraSAR-X の観測値から風速を推定するモデルは航空機搭載 Scatterometer から作成されたモデル(Masuko et al., 1986, Moore et al., 1979)しかなく、同じ風速であっても航空機から計測した後方散乱値と衛星から計測した後方散乱値は異なり、正の誤差を生じることが分かっている(Keller et al., 1992)。2011 年 4 月現在シャトル搭載 X-band SAR のデータを用いて作成された X バンド合成開口レーダ用の海上風速推定モデル XMOD は存在するが(Guillermo et al., 2010)、未完成であるため詳細な係数などは公表されていない。また ASAR の海上風速推定モデル(CMOD)はより精度の高い海上風速推定をするためには考慮しなければならないと考えられている大気安定度を勘案したモデル CMOD5.N(Hersbach, 2008)が作られており、実際に CMOD5.N と大気安定度を加味していないもの(CMOD5)を比較した場合、考慮している CMOD5.N の方がより精度が高いということが明らかになっている(橋角, 2009)。以上のことより大気安定度、航空機と衛星の後方散乱値の違いなどを考慮した海上風速推定モデルを開発し、精度の良い風速推定を行うことが TerraSAR-X による風力エネルギー賦存量調査をするためには重要になってくる。

#### 5. まとめ

以上に基づき下記のようにまとめる。

- (1) 洋上風力発電を行うための風況調査手法としてメソ気象モデル、マイクロ波散乱計、合成開口レーダなどが用いられている。
- (2) 大気安定度を考慮した風速推定精度はメソ気象モデルよりもマイクロ波散乱計・合成開口レーダの方が良い。
- (3) 時間解像度及び相対風向入力の問題を解決することが合成開口レーダによる風況調査するために

は必要不可欠である。

(4) TerraSAR-X は時間解像度及び弱風速の問題を解決、より精度の高い海上風推定が行える能力を備えている。

## 謝辞

TerraSAR-X データは DLR(ドイツ航空宇宙センター)との共同研究(OCE0510, Assessment of offshore wind resource using TerraSAR-X and MM5) により提供を受けた。白浜海象観測所データは京都大学防災研究所より提供いただいた。また本レビューの一部は科学研究費補助金基盤研究(B) (22360379、合成開口レーダ・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) の支援を受けた。

## 参考文献

飯坂譲二: 合成開口レーダ画像ハンドブック ~地球環境計測の新しい技術~ 朝倉書店 (1998-05)

環境省: 1997 京都議定書 [http://www.env.go.jp/earth/ondanka/mechanism/kpeng\\_j.pdf](http://www.env.go.jp/earth/ondanka/mechanism/kpeng_j.pdf)

壺内伸樹: 2011 QuikSCAT 海上風データに基づく洋上風況データベースの作成

独立行政法人産業技術総合研究所: 2008 再生可能エネルギー源の性能

[http://unit.aist.go.jp/rcpv/ci/about\\_pv/e\\_source/RE-energypayback.html](http://unit.aist.go.jp/rcpv/ci/about_pv/e_source/RE-energypayback.html)

独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO): 2010 NEDO 再生可能エネルギー技術白書の概要 ~新たなエネルギー社会の実現に向けて~ [http://www.nedo.go.jp/library/ne\\_hakusyo/gaiyou.pdf](http://www.nedo.go.jp/library/ne_hakusyo/gaiyou.pdf)

二宮洗三: 数値予測の基礎知識 オーム社 (2004-07)

丹羽亮介: 2011 合成開口レーダ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の検証

橋角英樹: 2009 白浜における洋上風速推定アルゴリズムの比較

Christiansen M.B., Koch W., Horstmann J., Hasager C.B., Nielasen M., 2006, Wind resource assessment from C-band SAR, Remote Sensing of Environment, 105, 68-81

Guillermo M. D., Susanne L., Francisco J. O., Xiao M L., Stephan B., 2010, Wind and wave observations off the south Pacific Coast of Mexico using TerraSAR-X imagery, International Journal of Remote Sensing, 4933-4955

Hasager C.B., P. Astrup., M. Nielsen, M. B. Christiansen, J. Badger(Riso), P. Nielsen(EMD), P.B. Sorensen(DONG energy), R.J. Bathelmie(Univ. Edinburgh and Riso), S.C. Pryor(Indiana Univ. and Riso), H. Bergstrom(Univ. Uppsala), 2007, SAT-WIND project Final report, Riso-R-Report

Hersbach H., 2008, CMOD5.N: A C-band geophysical model function for equivalent neutral wind, European Centre for Medium-Range Forecasts, Technical Memorandum No.554,

Kozai K., Ohsawa T., 2007, ACCURACY OF OFFSHORE WIND RESOURCE ASSESSMENT BY USING ENVISAT/ASAR AND MM5, Proceedings of the European Offshore Wind Conference, PO37-1-8

Kozai K., Ohsawa T., Takahashi R., Takeyama Y., 2009, Estimation Method for Offshore Wind Energy using Synthetic Aperture Radar and Weibull Parameters, Proceedings of the Nineteenth International Offshore and Polar Engineering Conference, 419-423

Keller M.R., Keller W.C., Plant W.J., 1992, A Wave Tank Study of the Dependence of X Band Cross Sections on Wind Speed and Water Temperature, Journal of Geophysical Research Vol. 97 No. C4 5771-5792

Masuko H., Okamoto K., Shimada M., Niwa S., 1986, Measurement of microwave backscattering signatures of the ocean surface using X band and Ka band airborne scatterometers, J.Geophys.Res., 91 13065-13083

- Moore R.K., Fung A.K., 1979, Radar Determination of Winds at sea, Proceedings of the IEEE vol.67, NO.11, 1504-1521
- Skamarock, W. C., J.B. Klemp., J. Didhia., D.O. Gill., D.M. Barker., W. Wang., J.G.Powes, 2008, A description of the advanced research WRF version 3. NCAR Tech. note TN-475+STR, 1-96