



# 合成開口レーダーを用いた洋上風速推定手法に関する文献レビュー

安保, 遼太郎

香西, 克俊

---

**(Citation)**

神戸大学大学院海事科学研究科紀要, 11:45-53

**(Issue Date)**

2014

**(Resource Type)**

departmental bulletin paper

**(Version)**

Version of Record

**(JaLCD0I)**

<https://doi.org/10.24546/81008069>

**(URL)**

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/81008069>



安保遼太郎\*・香西克俊

Ryotaro ABO\*, Katsutoshi KOZAI

(2014年6月30日提出)

要旨

現在、再生可能エネルギーの一つである洋上風力発電が期待されている。洋上風車を設置する海域を選定するためには対象海域の風力資源量を調査する必要があるが現場観測は困難であるため、精度の高い洋上風速推定手法が必要となる。風速推定手法にはメソ気象モデルを用いた風速推定手法や人工衛星を用いた風速推定手法があり、丹羽ら(2011)によってCバンド合成開口レーダーASARの衛星画像を用いた風速推定は、メソ気象モデルによる風速推定よりも風速推定精度が高いことが明らかになっている。X, C, Lの3バンド、11種類の風速推定アルゴリズムの調査から、合成開口レーダー(SAR)による洋上風速推定は以下の課題を抱えていることが明らかになった。1: 時間解像度が低く、対象海域を含むSAR画像のシーン数が限られている。2: 各モデルの日本沿岸域での風速推定精度をさらに向上させる必要がある。3: SARを使用して日本沿岸域の風速推定を行う際、最適な洋上風速推定アルゴリズムを選定する必要がある。上記の課題を解決することが、SARを利用して洋上風速推定を行う際に必要である。

1. はじめに

2011年3月11日、東日本大震災の影響により発生した福島第一原子力発電所事故により、広範囲に高い線量の放射能汚染が発生した。この事故により原子力発電の安全性が疑問視され、原子力に代わるエネルギーが求められている。そこで注目されているのが再生可能エネルギーである。中でも洋上風力発電は欧州での実用化に加え、日本の排他的経済水域の面積は世界6位であることから注目されており、福島県北九州市沖では試験運用も行われている(荒川,2014)。

洋上風力発電を行うには、まず導入する海域を選定するために、対象海域の風況を調査する必要がある。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される。風力エネルギー密度は風速の3乗に比例するため、わずかな風速の誤差が風力資源量に大きな影響を与える。そのため、対象海域の正確な風速を知ることが必要となってくる。

風況調査方法として最適なものは現場観測であるが、洋上で現場観測を行うためには観測用鉄塔やブイなどの観測設備の設置が必要である。しかし、これらの観測設備の設置及び保全には多額の費用がかかり、広大な面積をもつ日本沿岸域全体の風況をすべて現場観測により調査することは困難である。

現場観測以外の手法としてはメソ気象モデルを用いた風速推定手法や人工衛星を用いた風速推定手法が挙げられる。しかし現場観測とは異なり、これらの手法で得られた推定風速には誤差が生じる。先ほども述べたようにわずかな風速の誤差でも風力資源量に大きな影響を及ぼすため、精度の高い洋上風速の推定手法が必要である。

メソ気象モデルによる風速推定は、客観解析値と呼ばれる空間的に不規則に分布している点から、格子点上の気象変数の数値を数学、物理学的な手順を踏んで計算した値を用いることで行われる。人工衛星を用いた風速推定は、衛星画像から得られるデータを基に、衛星が送受信しているマイクロ波の周波数毎に作成された風速推定アルゴリズムを用いる。衛星による風速推定は、時間解像度はメソ気象モデルに劣るが、丹羽ら(2011)によるCバンド合成開口レーダーASARの衛星画像を用いた風速

推定は、メソ気象モデルによる風速推定よりも風速推定精度が高いことが分かっている。そのため、ここでは合成開口レーダーを用いた風速推定手法を文献レビューの対象とする。

## 2. 合成開口レーダー(SAR)

合成開口レーダー（以下 SAR）とは、物理的サイズに限界があるアンテナを移動させ、仮想的に大きくすることにより高分解能を達成したレーダーのことである（大内,2005）。図 1 に合成開口処理の模式図を示す。

レーダーの空間分解能は、望遠鏡や顕微鏡の空間分解能が開口であるレンズが大きくなるにつれて向上するのと同様に、開口であるアンテナが大きくなるにつれて向上する。しかし、アンテナの大きさには限界があるため、実開口の場合は達成可能な分解能にも限界が生じる。そこで、レーダーから放射されるマイクロ波の位相はレーダーの位置により系統的に変化するため、地上のある 1 地点に着目したとき、その地点がマイクロ波の照射域に入ってから出るまでに受信された信号は合成可能であることを利用し、マイクロ波を送信させながらアンテナを動かし、その間に受信したマイクロ波を合成することによって仮想的に大きなアンテナを作りだし、空間分解能を向上させている(大内,2005)。

合成開口レーダーはマイクロ波を用いているため大気、雲や雨による減衰が小さく、また光学センサーのように太陽光を必要としないため、全天候で昼夜を問わずに観測が可能である。そのため周期的にデータを確実に得ることが可能である。しかし、同一地点に回帰するまでに時間がかかるため、時間解像度が低いのが欠点である。

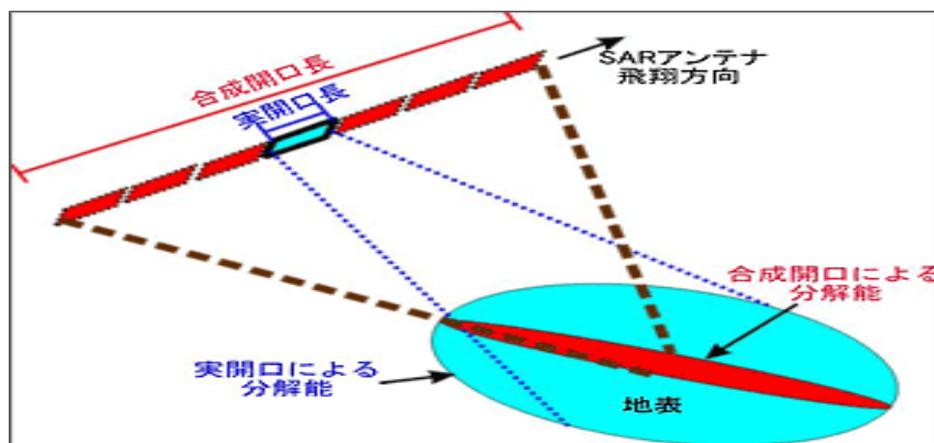


図 1. 合成開口処理の模式図

(<http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/sar/mechanism/mechanism01.html>)

## 3. 風速推定アルゴリズム

SAR を利用して風速推定を行う際、様々なデータから導かれた周波数毎の風速推定アルゴリズムを用いて風速推定を行う。周波数毎の風速推定アルゴリズムを以下に示す。

### 3.1. X バンド SAR の風速推定アルゴリズム

X バンド SAR の風速推定アルゴリズムには MooreXMOD、MasukoXMOD、RenXMOD、XMOD2 があり、XMOD2 には、CMOD4 ベースの XMOD2(CMOD4)、CMOD5 ベースの XMOD2(CMOD5)と COSMO-SkyMed(CSK) から得られた後方散乱エネルギーを基に導かれた XMOD2(CSK)がある。

MooreXMOD は Moore ら(1979)によって提唱された、航空機搭載型 X バンドマイクロ波散乱計から得られた後方散乱エネルギーを基に導かれた洋上風速推定アルゴリズムである。MooreXMOD は以下

の式で表される。

$$\sigma^0 = a_0 u^{\gamma_0} + a_1 u^{\gamma_1} \cos \varphi + a_2 u^{\gamma_2} \cos 2\varphi \quad (1)$$

但し、 $a_0 \sim a_2$ 、 $\gamma_0 \sim \gamma_2$ は入射角、偏波による係数、 $\varphi$ は相対風向、 $u$ は20m高風速である。このモデルは係数の値を変えることによってHH、VVの両偏波に適応できる。

MasukoXMODは増子ら(1984)によって提唱された、航空機搭載型Xバンドマイクロ波散乱計から得られた後方散乱エネルギーを基に導かれた洋上風速推定アルゴリズムである。MasukoXMODは以下の式で表される。

$$\sigma^0 = 10(G(\lambda, p, \theta, \varphi) + H(\lambda, p, \theta, \varphi) \log_{10}(U)) \quad (2)$$

但し、 $G, H$ は波長 $\lambda$ 、偏波 $p$ 、入射角 $\theta$ 、相対風向 $\varphi$ によって決定される係数、 $U$ は19.5m高風速である。こちらも先ほどのMooreXMODと同様に、係数の値を変えることによってHH、VVの両偏波に適応できる。

RenXMODはRenら(2010)によって提唱された、MasukoXMODを基礎に、シャトル搭載型X-band合成開口レーダーSIR-Xから得られた後方散乱エネルギーを基に導かれたVV偏波用の洋上風速推定アルゴリズムである。RenXMODは以下の式で表される

$$\sigma_0 = x_0 + x_1 U + x_2 \sin \theta + x_3 \cos 2\varphi + x_4 U \cos 2\varphi \quad (3)$$

但し、 $x_0 \sim x_4$ は係数、 $\theta$ は入射角、 $\varphi$ は相対風向、 $U$ は10m高風速である。モデルの係数は一定数のSAR画像及びERA-40(<http://old.ecmwf.int/research/era/do/get/index>)等をもとに作成した風向、風速等のデータセットを使用してチューニングすることにより決定されており、現時点でLi(2011)に記載されているものとRen(2012)に記載されている3種類の計4種類存在する。このモデルの問題点としてRen(2012)はSIR-X-SARを利用したミッションが実行されたのは1994年の4月と10月の2回しかなく、またその期間で得られた風速は6~14m/sと限られていたことを挙げている。

XMOD2(CMOD4)は、Liら(2011)によって提唱された、1997年にヨーロッパ中期予報センター(ECMWF)によって提唱されたCMOD4をベースにTerraSAR-Xから得られた後方散乱エネルギーを用いて各係数を決定したVV偏波用の風速推定アルゴリズムである。XMOD2(CMOD4ベース)は以下の式で表される。

$$\sigma^0 = b_0(1 + b_1 \cos \varphi + b_3 \tanh b_2 \cos 2\varphi)^{1.6} \quad (4)$$

但し、 $b_0 \sim b_4$ は10m高風速、入射角で決定される係数、 $\varphi$ は相対風向である。

XMOD2(CMOD5)は、Liら(2014)によって提唱された、Hersbachら(2003)のCMOD5をベースにTerraSAR-Xから得られた後方散乱エネルギーを用いて各係数を決定した、VV偏波用の風速推定アルゴリズムである。XMOD2(CMOD5ベース)は以下の式で表される。

$$\sigma^0 = B_0^p(v, \theta)(1 + B_1(v, \theta) \cos \varphi + B_2(v, \theta) \cos 2\varphi) \quad (5)$$

但し、 $B_0 \sim B_2$ は風速、入射角で決定される係数、 $p$ は係数、 $v$ は10m高風速、 $\theta$ は入射角、 $\varphi$ は相対風向である。このモデルの問題点として、Li(2014)は風速20m/s以上のデータが存在しないため、それらの風速に対する検証は実施されていないことを挙げている。

XMOD2(CSK)は、Nirchioら(2013)によって提唱された、COSMO-SkyMed(CSK)から得られた後方散乱エネルギーから導かれたVV偏波用の洋上風速推定アルゴリズムである。XMOD2(CSK)は以下の式で表される。

$$\sigma^0 = B_0(U, \theta)(1 + B_1(U, \theta) \cos \varphi + B_2(U, \theta) \cos 2\varphi) \quad (6)$$

但し、 $B_0 \sim B_2$ は風速、入射角で決定される係数、 $U$ は10m高風速、 $\theta$ は入射角、 $\varphi$ は相対風向である。

Nirchioらは結論において、このモデルはSAR画像から風向を直接推定することができれば、モデルの風速推定の性能向上が期待できると述べている。

### 3.2. Xバンド SAR の風速推定アルゴリズムの風速推定精度と問題点

3.1 で挙げた風速推定アルゴリズムのうち、MooreXMOD、MasukoXMOD、RenXMOD は大野 (2012)、XMOD2(CMOD5)は Li ら(2014)、XMOD2(CSK)は Nirchio ら(2013)によって風速推定精度の検証が行われている。

大野(2012)によって行われた 2009 年 9 月 13 日から 2012 年 11 月 12 日までに TerraSAR-X によって撮影された 52 シーンの ScanSAR mode 画像と白浜海象観測鉄塔の現場観測データを使用して MooreXMOD、MasukoXMOD、RenXMOD の風速推定精度を検証した結果、Li ら(2014)によって行われた 2012 年 7 月から 2013 年 1 月までに TerraSAR-X と TanDEM-X によって撮影された 47 シーンの Strip map mode 画像とアメリカの National Data Buoy Center(NDBC)、カナダの Integrated Science Data Management(ISDM)のデータを使用して XMOD2(CMOD5)の風速推定精度を検証した結果と、Nirchio ら (2013)によって行われた 2013 年 1 月 31 日から 2013 年 2 月 16 日までに撮影された 24 シーンの画像と NDBC のデータを使用して XMOD2(CSK)の風速推定を検証した結果を表 1 に示す。但し、XMOD2(CMOD5)の相対 Bias における括弧内の数値は、RMSE と相対 RMSE を基に平均風速を求め、得られた平均風速で Bias を除したものであり、文献内に記載されているものではない。

表 1 より、MooreXMOD、MasukoXMOD はどちらも風速を 1m/s 以上過大評価する傾向が見られるのに対し、XMOD、XMOD2(CMOD5)は風速を過小評価する傾向が見られる。また RMSE は 1.3m/s～3.44m/s とモデル間の差が大きい。これらの相違が生じた原因として、対象地点、モデル作成時に使用した SAR、検証に使用した画像の撮影モード、検証地点、シーン数、画像処理方法の違いが挙げられる。XMOD2(CMOD4)と XMOD2(CSK)は Bias のデータがないのでこれらの傾向を議論することが出来ない。

また XMOD2(CMOD4)は風速推定精度の検証が行われておらず、XMOD2(CMOD5)、XMOD2(CSK)は日本沿岸域での精度検証が行われていない。よってこれらのモデルの日本沿岸域での風速推定精度検証を行う必要がある。

表 1. Xバンド SAR の風速推定アルゴリズムの精度検証結果

風速推定アルゴリズム	対象地点	シーン数	RMSE(m/s)	相対RMSE(%)	Bias(m/s)	相対Bias(%)
MooreXMOD	白浜海象観測鉄塔	44	1.81	35.4	1.21	23.7
MasukoXMOD	白浜海象観測鉄塔	44	3.44	67.4	2.77	54.3
RenXMOD (Data set 1)	白浜海象観測鉄塔	52	2.90	58.3	-2.18	-43.8
XMOD2(CMOD5)	NDBC, ISDM	47	1.46	15.6	-0.29	(-3.1)
XMOD2(CSM)	NDBC	24	1.3	-	-	-

### 3.3. Cバンド SAR の風速推定アルゴリズム

Cバンド SAR の風速推定アルゴリズムには CMOD4、CMOD\_IRF2、CMOD5、CMOD5.N がある。

CMOD4 は、Stoffelen ら(1997)によって提唱された、ERS-1 から得られた後方散乱エネルギーを基に最尤推定法によって導かれた VV 偏波用の風速推定アルゴリズムである。式は(4)と同形である。また、推定可能な風速の範囲は 2m/s～24m/s となっている。

CMOD\_IRF2 は、Quilfen ら(1998)によって提唱された、ERS-1 から得られた後方散乱エネルギーを基に導かれた熱帯低気圧の風況を調べることを目的とした VV 偏波用の風速推定アルゴリズムである。

CMOD\_IRF2 は以下の式で表される。

$$\sigma^0 = 10^{\alpha+\beta\sqrt{V}} \times (1 + b_1 \cos\phi + \tanh b_2 \times \cos 2\phi) \quad (7)$$

ただし、V は風速、φは相対風向、α,βは入射角によって決定される係数、b<sub>1</sub>,b<sub>2</sub>は風速、入射角で決

定される係数である。このモデルはまず式(7)で風速を推定した後、 $V \leq 10\text{m/s}$ 、 $10\text{m/s} < V \leq 22\text{m/s}$ 、 $V > 22\text{m/s}$  のそれぞれの風速域ごとに推定風速を補正している。

CMOD5 は、Hersbach ら(2003)によって提唱された、ERS-1 と ERS-2 から得られた後方散乱エネルギーを基に、高風速域では風速を過小評価する傾向がある CMOD4 を、ECMWF (ヨーロッパ中期予報センター) のモデルによる推定風速データや、24m/s~35m/s の高風速域下で得られた実験結果を使用して改良した VV 偏波用の風速推定アルゴリズムである。このモデルの式は(5)式と同形である。

CMOD5.N は、Hersbach ら(2008)によって提唱された、CMOD5 に等価中立風の概念を導入した VV 偏波用の風速推定アルゴリズムである。3.2.1 から 3.2.3 までのモデルはすべて衛星やブイ観測値との比較をもとに作成されており、大気安定度は中立に近い状態と仮定されていたが、大気安定度を考慮しない場合の風速と大気安定度を考慮した風速では約 0.2m/s 程度の差がある。そのため、このモデルでは、CMOD5 の計算式で使用されている係数を変え、大気安定度を考慮した等価中立風に対応する風速を推定している。モデルの式は(5)式と同形である。

#### 3.4. C バンド SAR の風速推定アルゴリズムの風速推定精度と問題点

3.3 で挙げた風速推定アルゴリズムの推定精度は、山下(2012)と竹山(2013)によって検証が行われている。山下(2012)によって行われた、2010年6月24日から2012年1月16日までに ENVISAT ASAR によって撮影された 57 シーンの Wide Swath mode 画像(WSM)と白浜海象観測鉄塔、黒潮牧場 10 号ブイ、伊勢湾湾口灯標の現場観測データを使用して CMOD4, CMOD\_IRF2, CMOD5, CMOD5.N の風速推定精度を検証した結果と、竹山(2013)によって行われた 2003年5月7日から2012年1月16日までに ENVISAT ASAR によって撮影された 73 シーンの WSM, Image mode 画像(IMP)と白浜海象観測鉄塔の現場観測データ、2003年2月1日から2008年12月22日までに ENVISAT ASAR によって撮影された 33 シーンの IMP と平塚沖観測鉄塔の現場観測データを使用して CMOD4, CMOD\_IRF2, CMOD5, CMOD5.N の風速推定精度を検証した結果を表 2,3 に示す。

表 2,3 より、山下(2012)の検証結果ではすべての検証地点で RMSE が 2m/s 未満であるのに対し、竹山(2013)の検証結果ではモデルや検証地点によっては RMSE が 2m/s 以上である。また、同一検証地点である白浜海象観測鉄塔での山下(2012)と竹山(2013)の風速推定精度検証結果を比較すると、山下(2012)の Bias は CMOD4 以外すべてのモデルで正だが、竹山(2013)の Bias はすべてのモデルで負であり、CMOD4 以外のモデルの風速推定傾向が一致しない。これらの相違が生じた原因として、対象期間、検証に使用した画像の撮影モード、シーン数や画像処理方法の違いが挙げられる。

また、検証に使用している衛星 ENVISAT は 2012年4月に運用が停止しており、ENVISAT ASAR の後継機として 2014年4月3日に Sentinel-1 が打ち上げられている。そのため、Sentinel-1 で撮影された衛星画像を使用して上記モデルの風速推定精度を再度検証する必要がある。

表 2. 山下(2012)による精度検証結果

風速推定アルゴリズム	対象地点	RMSE(m/s)	相対RMSE(%)	Bias(m/s)	相対Bias(%)
CMOD4	白浜海象観測鉄塔	1.34	29.1	-0.10	-2.3
	黒潮牧場10号ブイ	1.83	26.7	-0.87	-12.7
	伊勢湾湾口灯標	1.41	26.6	-0.46	-8.8
CMOD_IRF2	白浜海象観測鉄塔	1.95	42.4	0.19	4.2
	黒潮牧場10号ブイ	1.75	25.5	0.05	0.7
	伊勢湾湾口灯標	1.70	32.0	-0.12	-2.2
CMOD5	白浜海象観測鉄塔	1.71	37.1	0.58	12.7
	黒潮牧場10号ブイ	1.71	24.9	0.40	5.8
	伊勢湾湾口灯標	1.45	27.4	0.46	8.7
CMOD5・N	白浜海象観測鉄塔	1.80	39.1	0.76	16.4
	黒潮牧場10号ブイ	1.83	26.7	0.72	10.5
	伊勢湾湾口灯標	1.58	29.8	0.78	14.8

表 3. 竹山(2013)による精度検証結果

風速推定アルゴリズム	対象地点	RMSE(m/s)	Bias(m/s)
CMOD4	白浜海象観測鉄塔	1.97	-1.10
	平塚沖観測鉄塔	2.17	-1.15
CMOD_IFR2	白浜海象観測鉄塔	2.05	-1.06
	平塚沖観測鉄塔	2.34	-1.31
CMOD5	白浜海象観測鉄塔	1.77	-0.64
	平塚沖観測鉄塔	2.06	-0.98
CMOD5.N	白浜海象観測鉄塔	1.76	-0.42
	平塚沖観測鉄塔	2.03	-0.77

### 3.5. Lバンド SAR の風速推定アルゴリズム

Lバンド SAR の風速推定アルゴリズムには Isoguchi & Shimada LMOD がある。Isoguchi & Shimada LMOD は、磯口ら(2009)によって提唱された、PALSAR から得られた後方散乱エネルギーを基に導かれた HH 偏波用の風速推定モデルである。Isoguchi & Shimada LMOD は以下の式で表される。

$$\sigma^0 = A_0(w, \theta)(1 + A_1(w, \theta)\cos\phi + A_2(w, \theta)\cos2\phi) \quad (8)$$

但し、 $A_0 \sim A_2$  は風速、入射角で決定される係数、 $w$  は 10m 高風速、 $\theta$  は入射角、 $\phi$  は相対風向である。このモデルの問題点として、磯口ら(2009)は入射角  $35^\circ \sim 40^\circ$  かつ風速  $5 \sim 10\text{m/s}$  に対する感度が C バンドのモデルに比べて低く、加えて入射角  $35^\circ \sim 40^\circ$  では PALSAR が受信する後方散乱エネルギーのノイズが大きくなるので、規格化後方散乱断面積(NRCS)と風速の相関が弱まる。そのため、よりノイズが少ない L バンドで得られた NRCS を使用して再調査する必要があるとしている。

### 3.6. Cバンド SAR の風速推定アルゴリズムの風速推定精度と問題点

3.5 で挙げた風速推定アルゴリズムの推定精度は、神田(2012)によって行われている。神田(2012)によって行われた、2007年1月8日から2010年9月20日までに PALSAR によって撮影された 26 シーンの高分解能モード画像と白浜海象観測鉄塔の現場観測データ、2009年1月30日から2010年9月20日までに PALSAR によって撮影された 9 シーンの高分解能モード画像と和歌山南西沖ブイの現場観測データ、2007年1月13日から2010年12月26日までに PALSAR によって撮影された 22 シーンの高分解能モード画像と黒潮牧場 10 号ブイの現場観測データと、2007年1月18日から2010年9月13日までに PALSAR によって撮影された 10 シーンの高分解能モード画像と黒潮牧場 13 号ブイの現場観測データを使用して Isoguchi & Shimada LMOD の風速推定精度を検証した結果を図 2 に示す。

図 2 より、このモデルは風速を 1m/s 以上過大評価する傾向が見られる。また、神田(2012)は風速誤差の入射角依存性の検証も行っている。検証結果を図 3 に示す。図 3 より、入射角増加に伴い、推定風速が過大評価傾向となっており、磯口ら(2009)が示していた入射角が増加するほど風速推定誤差が増加するという傾向が本州南岸の検証地点でも見られた。

また、検証に使用している衛星 ALOS は 2011 年 5 月に運用が停止しており、ALOS の後継機として 2014 年 5 月 24 日に ALOS2 が打ち上げられている。そのため、ALOS2 搭載 L バンド合成開口レーダー PALSAR2 で撮影された SAR 画像を使用して上記モデルの風速推定精度を再度検証する必要がある。

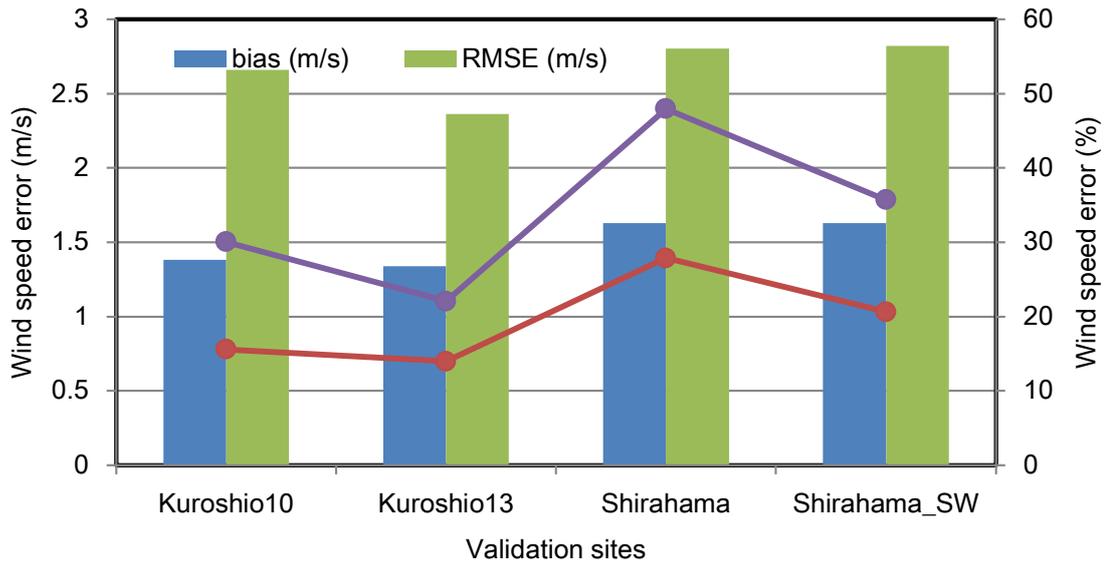


図2. 神田(2012)による検証結果

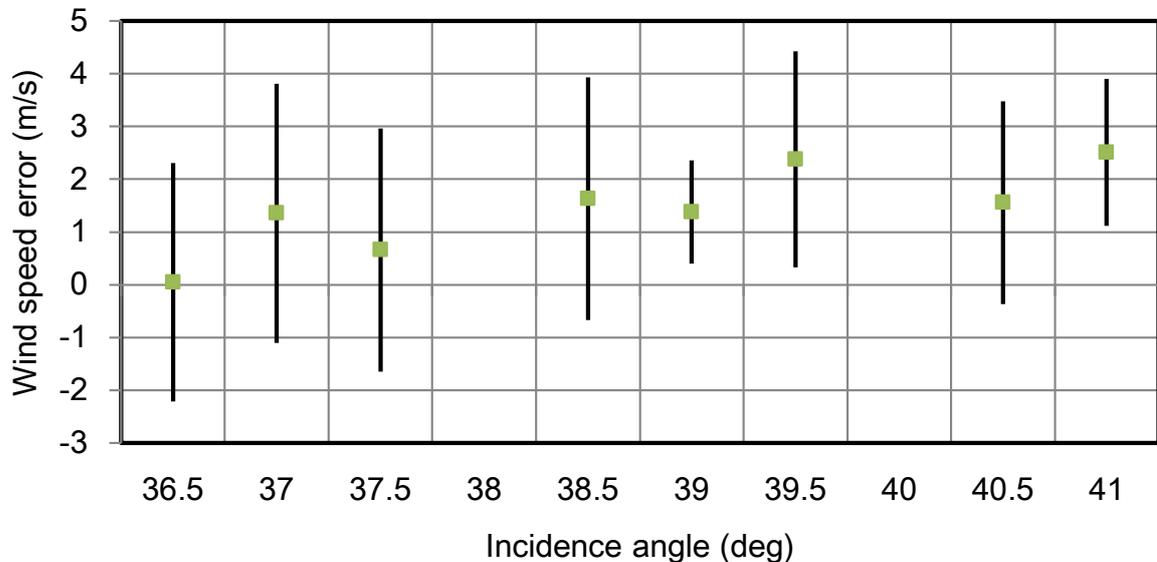


図3. 風速誤差の入射角依存性(神田,2012)

#### 4. SAR を利用した風速推定手法における課題

SAR を利用した風速推定手法における課題を以下に挙げる。

1. 香西ら(2009)は、90%の信頼区間を想定して長期の風速を統計解析する場合、最低でも74~128シーンのSAR画像が必要であるとしている。しかし、3.2、3.4、3.6で挙げた風速推定精度検証時に使用されているSAR画像のシーン数は、香西ら(2009)が示したシーン数すべて下回っている。これはSARの時間解像度が低く、対象海域を含むSAR画像のシーン数が限られているためだと考えられる。この問題を解決するためには、より多くのシーン数が確保できる対象海域に変更して精度検証を行うか、航空機等を使用して、対象海域のシーン数を増やしてから精度検証を行う必要がある。ただし、航空機等を使用して対象海域のシーン数を増やす場合、SARを搭載するプラットフォームの違いによる影響も考慮する必要がある。
2. 大澤(2012)は、日本沿岸域でのメソ気象モデルの洋上風速推定精度の一つの達成目標を相対

Bias±5%以内としている。3.2、3.4、3.6で挙げた精度検証の内、日本沿岸域で行われたものに注目すると、上記の目標を達成しているモデルは、ENVISAT ASARのWSMを使用して風速を推定した場合のCMOD\_IRF2のみである。その上、時間解像度がメソ気象モデルに比べて低いため、長期間の洋上風速推定を行うためには上記の目標以上の風速推定精度が必要である。そのため、各モデルの風速推定精度をさらに向上させる必要がある。

3. ここで挙げている洋上風速推定アルゴリズムだけでも11モデルあり、さらにそれらのモデル中には日本沿岸域での風速推定精度検証が行われていないモデルもある。そのため、まず日本沿岸域での風速推定精度検証が行われていないモデルの日本沿岸域での風速推定精度を検証し、その後どのモデルが日本沿岸域で洋上風速推定に適しているかを選定する必要がある。

#### 参考文献

- 荒川忠一 (2014) : 洋上風力の調達価格に関わる研究会取りまとめ報告書 p1-7
- 大内和夫 (2005) : リモートセンシングのための合成開口の基礎 東京電機大学出版局
- 大澤輝夫 (2012) : 洋上風力エネルギー賦存量の推定とその技術的課題、環境技術学会、Vol.41 No9 p550-555
- 大野恭平 (2012) : Xバンド合成開口レーダとメソ気象モデルを用いた沿岸洋上風力資源量の推定と検証、神戸大学大学院平成24年度修士論文
- 神田直和 (2012) : 散乱計ASCAT及び合成開口レーダPALSARを用いた日本沿岸域における洋上風速推定と検証、神戸大学大学院平成24年度修士論文
- 竹山優子 (2013) : 合成開口レーダと数値気象モデルによる洋上風力資源評価、神戸大学大学院平成25年博士論文
- 丹羽亮介, 大澤輝夫, 嶋田進, 香西克俊, 竹山優子 (2010) : 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、風工学シンポジウム論文集、第21巻、PP.203-208
- 山下智大 (2012) : 合成開口レーダーASAR及びメソ気象モデルWRFを用いた洋上風力資源量の推定と検証、神戸大学大学院平成24年度修士論文
- Isoguchi, O. and Shimada, M. (2009) : An L-Band Ocean Geophysical Model Function Derived From PALSAR, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 47, Issue 7, p1925-1936
- Hersbach, H. (2008) : CMOD5.N An improved geophysical model function for ERS C-band scatterometry, Technical Memorandum No.395
- 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., Shimada, S., Takeyama, Y., Hasager, C. (2009) : COMPARISON OF ENVISAT/ASAR-ESTIMATED OFFSHORE WIND RESOURCE MAPS AROUND SHIRAHAMA WITH THOSE FROM MESOSCALE MODELS MM5 and WRF, Proceedings of the European Offshore Wind Conference, PO.131. 2009
- Li, X. -M., Lehner, S., Bruschi, S., Ren, Y. (2011) : Sea surface wind measurement over offshore wind farm using TerraSAR-X data, Proc. of SPIE, Vol. 8175, 81750M-1-13
- Li, X. -M. and Lehner, S. (2014) ; Algorithm for Sea Surface Wind Retrieval From TerraSAR-X and TanDEM-X Data, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 52, No. 5, p2928-2939
- Masuko, M., Okamoto, K., Masanobu, S., and Niwa, S. (1986) : Measurement of Microwave Backscattering Signatures of the Ocean Surface Using X Band and Ka Band Airborne Scatterometers, Journal of Geophysical Research, Vol. 91, No. C11, p13065-13083

- Moore, R. K. and Fung, A. K. (1979) : Radar Determination of Winds at Sea, Proceedings of the IEEE, Vol. 67, No. 11, p1504-1521
- Nirchio, F. and Venefra, S. (2013) : XMOD2 – An improved geophysical model function to retrieve sea surface wind fields from Cosmo-SkyMed X-band data, European Journal of Remote Sensing-2013, 46, p583-595
- Quilfen, Y., Chapron, B., Elfouhaily, T., Katsaros, K. and Tournadre, J. (1998) : Observation of tropical cyclones by high-resolution scatterometry, Journal of Geophysical Research, Vol. 103, No. C4, p7767-7786
- Ren, Y., He, M. and Lehner, S. (2010) : Wind Field Retrieval over the Ocean Using X-band Polarization SAR Data, 2010 second IITA International Conference on Geoscience and Remote Sensing, p43-46
- Ren, Y., Lehner, S., Brusch, S. Li, X. –M. and He, M. (2012) : An algorithm for retrieval of sea surface wind field using X-band TerraSAR-X data, International Journal of Remote Sensing, Vol. 33, No. 23, p7310-7336
- Stoffelen, A. and Anderson, D. (1997) : Scatterometer data interpretation: Estimation and validation of the transfer function CMOD4, Journal of Geophysical Research, Vol. 102, No. C3, p5767-5780