

衛星搭載合成開口レーダによる汽水域の環境観測： 湖上風速分布推定可能性の予備検討

市川啓祐¹・古津年章¹・下舞豊志¹・高安克己²・作野裕司³・松永恒雄⁴

Preliminary study of SAR monitoring of coastal lagoon environments: Possibility of wind speed estimation

Keisuke Ichikawa, Toshiaki Kozu, Toyoshi Shimomai, Katsumi Takayasu
Yuji Sakuno, Tsuneo Matsunaga

Abstract: Coastal lagoon is more directly affected by surrounding environment than open ocean areas, so it is important to continuously monitor its environment. The Synthetic Aperture Radar (SAR) is an active microwave sensor having a high spatial resolution and all-weather monitoring capability. Thus it should be especially useful to observe narrow water areas like coastal lagoon. We have been studying the feasibility developing a satellite remote-sensing system to explore the possibility of wind of utilizing a satellite SAR (Synthetic Aperture Radar) as a part of monitor the environment of Lake Shinji and Lake Nakaumi. In this paper, we analyze JERS 1/SAR data, acquired until now for several years, as a preliminary an examination of wind speed estimation with the SAR. As a result, good correlations are obtained between in-situ wind speed and NRCS observed by the SAR in moderate to high wind conditions. We have conducted a series of coincident satellite and in-situ observation experiments at Lake Shinji and Lake Nakaumi in 2001. We also summarize these observations.

Key words: Synthetic Aperture Radar, JERS-1, SAR, coastal lagoon, wind

1. はじめに

衛星を用いた環境観測には、広い範囲のデータを同時に取得できるという利点がある。また、マイクロ波帯のセンサには、夜間や悪天候時においても観測が可能、水面上の風向・風速を推定可能、という可視・赤外線センサにはない利点がある。

一方で、マイクロ波帯のセンサには可視・赤外線センサに比べ、分解能が大きく劣るといった欠点がある。このことは特に汽水域のような狭い範囲の水域を観測する際には問題となる。しかし合成開口レー

ダ (SAR) は、合成開口処理により可視センサと同等の高い空間分解能を得ることができる唯一の衛星搭載マイクロ波センサであり、狭い水域の観測を行うことが可能である。SAR による環境観測の可能性としては風速推定、油汚染、潮目の検出などある。風速の推定はこれまでに同様のことが海上風に関しては行われてきており (古濱他, 1986), 実現の可能性は高く、衛星を用いた汽水域の環境観測の初期段階には適していると考えられる (Kozu et al, 2001)。

最近島田ら (2001) は JERS 1/SAR を用いた Geophysical Model Function (GMF) を提案した。ま

¹ 島根大学総合理工学部 Interdisciplinary Faculty of Science and Engineering, Shimane University, Matsue, 690-8504, Japan

² 島根大学汽水域研究センター Research Center for Coastal Lagoon Environments, Shimane University, Matsue, 690-8504, Japan

³ 広島大学大学院工学研究科 Graduate school of Engineering, Hiroshima University, Higashihiroshima, 739-8527, Japan

⁴ 国立環境研究所 National Institute for Environmental Studies, Tsukuba, 305-0053, Japan

表1 2001年までに打ち上げられた搭載衛星散乱計および地球観測用 SAR

Table 1 List of satellite scatterometers and SARs for Earth observation launched by the end of 2001.

(a) Scatterometer

	Frequency(GHz)	Year of Launch
Seasat1/SASS	14.6 (Ku-band)	1978
ERS1/SCAT	5.3 (C-band)	1991
ERS2/SCAT	5.3 (C-band)	1995
ADEOS/NSCAT	13.995 (Ku-band)	1996

(b) SAR

	Seasat1/SAR	ERS1/AMI	ERS2/AMI	JERS1/SAR	Radarsat1/SAR
Frequency (GHz)	1.28 (L-band)	5.30 (C-band)	5.30 (C-band)	1.275 (L-band)	5.30 (C-band)
Wavelength (cm)	23.5	5.66	5.66	23.5	5.66
Polarization*	HH	VV	VV	HH	HH
Look Angle (deg.)	20	20	20	35	20-49
Swath Width (km)	100	100	100	75	100-500
Resolution (m)	25×25	30×30	30×30	18×18	25-150
Look	4	3-4	3-4	3	
Year of Launch	1978	1991	1995	1992	1995

* H: Horizontal, V: Vertical, HH (VV): Horizontal (Vertical) transmit and receive.

た磯口(2001)は、地球資源衛星1号(JERS-1)搭載 SAR(以下 JERS-1/SAR と略す)イメージに島田ら(2001)の GMF を適用し、海上の風速分布図を求めた。しかし一般に、海上風推定のためのマイクロ波センサには C バンド以上の高い周波数が用いられており、JERS-1/SAR のような L バンドにおいて海上風と SAR データの関係性を調べた例は少ない。

そこで今回は、汽水域における SAR データを使った風速分布推定の第1段階として、過去(1992~1997年)に取得された JERS-1/SAR データの解析を行った。これは、現在我々が進めている陸域観測技術衛星(ALOS)搭載合成開口レーダ(PALSAR)および高性能可視近赤外放射計2型(AVNIR-2)を用いた光・電波センサ複合観測による汽水域環境モニタ技術の研究(Kozu et al., 2001)の予備検討としても位置付けられる。

JERS-1/SAR データの解析に用いた風向風速データは、気象庁や国土交通省の定常観測点で観測されたデータのみであった。そのため2001年には衛星観測時に同期して地上観測を行い、より細かな現場データを取得することとした。本論文では、この同期観測の概要および初期結果も併せて報告する。

2. レーダによる水域観測の原理と本研究で使用した SAR の概要

レーダの受信電力から直接測定されるのは基本的

に単位面積当たりの後方散乱断面積(NRCS)(古濱他, 1986)であり、風速を直接測定することはできない。しかし、既に C バンド(5 GHz 帯)から Ku(14 GHz 帯)ではマイクロ波センサを用いた風速推定手法は実用化の域にある(古濱他, 1986; Liu, 2001)。

水面上の表面張力波~短波長重力波は水面直上の風と水面との相対速度の差による摩擦力と水面の張力・粘度による相互作用によって励起される。マイクロ波帯の電波の波長(10~30 cm)と風に対する応答の良いこれらの水面波の波長との間に次式で示される Bragg 散乱の条件が成立する。

$$2\Delta \sin \theta = n\lambda \quad (n=0, 1, 2) \quad (1)$$

ここで、 Δ は海洋波浪の波長、 λ はレーダ波の波長、 θ はレーダ波が水面に入射するときの入射角である。この時観測される NRCS は基本的に風によって励起される水面波スペクトル強度に強く依存することになる。風速に対する波の応答が定常状態に達するには吹送距離や吹送時間が関係するが、短波長水面波は一般に応答が早く、汽水域における NRCS による風速推定の可能性は十分考えられる。

SAR による風速推定における問題の一つは観測方向が単一であることである。斜め入射の場合、アンテナの視線方向の地表に水平な成分の方向と風向との間には、0度、180度で極大、90度、270度で極小になるという関係がある(Ulaby et al., 1982)。こ

表2 Pi-SAR の諸元
Table 2 Characteristics of Pi-SAR.

	X-band SAR			L-band SAR	
Frequency (GHz)	9.55			1.27	
Wavelength (cm)	5.6			23.6	
Off-nadir Look Angle (deg.)	10-75(Variable)			20-60(Fix)	
Obdervation Mode	2-ch. ^{*2} Pol./Interfero	4-ch. ^{*3} Polarimetry	6-ch. ^{*4} Pol.&Interfero	1-ch. ^{*1}	4-ch. ^{*3} Polarimetry
Swath Width (Observed from 12,000m Altitude)	19.6/42.5km	8.2/19.6km	4.3/11.9km	42.5km	19.6km
Slant Range Resolution	1.5/3m	1.5/3m	1.5/3m	3/5/10/20m	3/5/10/20m
Azimuth Resolution (4/8-look)	1.5/3m			3/6m	

*1 1-ch [L] (HH) or (VV)

*2 2-ch [X] Polarimetry: (HH,HV) or (VV,VH)/Interferometry:(Vmain, Vsub)

*3 4-ch [X,L] Polarimetry: (HH,HV,VH,VV)

*4 6-ch [X] Polarimetry & Interferometry: (HH,HV,VH,VV,Vmain,Vsub)

れまでに打ち上げられた衛星搭載型の風速推定用散乱計では複数方位の観測を行い風速と風向の同時推定を行っている (Elachi, 1987). また表 1 に示すように、風に対する応答の速い C バンド以上の高い周波数を用いている。一方、表 1 に合わせて示す SAR は L~C バンドである (Elachi, 1987; Li and Raney, 1991; JPL, 2002; Li and Raney, 1991; NASDA, 2002). これまでの、また現在運用中の SAR は一方向からの観測しかできないため、風向の不確定性によって風速の推定も SAR データのみでは精度的に問題がある。そのため現在のところ、周辺の現場データや気象モデルによる風向情報の併用が必要である。しかし航空機搭載 SAR のように短時間で複数方向からの観測が可能な場合は、風向推定も可能と考えられる。

前章で述べたように、今回主に解析に使用したのは、L バンド (波長 約 24 cm) HH 偏波 (水平偏波送信, 水平偏波受信) の JERS-1/SAR である。一方、2001 年度の衛星同期実験に使用した SAR は、衛星搭載 SAR としては Radarsat-1/SAR と ERS-2/AMI, 航空機搭載型 SAR としては Pi-SAR である。

Radarsat-1 は 1995 年にカナダが、また ERS-2 は 1995 年に ESA (European Space Agency) が打ち上げた SAR 搭載の地球観測衛星である。Radarsat-1/SAR, ERS-2/AMI (映像取得モード)¹ の諸元は表 1 に示した通りである。また表 2 に Pi-SAR の諸元を示す。共に周波数帯は C バンドであり電波の波長は約 5.6

cm である。前者は偏波が HH, 後者が VV (送受信とも垂直偏波) である。このため、Bragg 散乱の成立する水面波の波長が JERS-1/SAR とは異なり、ERS-2 と Radarsat-1 では偏波の違いも存在する。このため Radarsat-1, ERS-2 では JERS-1 とはそれぞれ異なる特徴を持つイメージ、データが取得されると期待される。

Pi-SAR は郵政省通信総合研究所 (CRL) と宇宙開発事業団 (NASDA) が共同して開発した航空機搭載高分解能マルチパラメータ SAR であり、L バンドと X バンド、HH, VV, HV, VH の 2 バンド 4 偏波での観測が可能などの特徴を持つ多機能の映像レーダである (CRL/NASDA, 1998)。ほぼ同時に X と L バンド、様々な偏波における観測が可能のため、異なる周波数、異なる偏波のデータを高精度で比較できる。そのため、今後、周波数や偏波の違いによる NRCS の風速依存性の違いを研究する上で非常に有用であると考えられる。

3. JERS-1/SAR データおよび解析方法

3.1 雑音レベル NRCS の推定方法

今回解析を行ったのは、1992 年から 1997 年にわたる 15 シーンの JERS 1/SAR データ (Level 2.1) である。Level 2.1 に格納されているデータは SAR の受信電圧に比例したカウント値 (DN) であるので、定量的な解析を行うため、次式の NASDA による変換式 (NASDA, 1992) を用い、規格化後方散乱断面積 (NRCS; $\bar{\sigma}^0$) を求めた。

$$\bar{\sigma}^0 = 20 \log_{10}(DN) + CF \quad (2)$$

¹ AMI (Active Microwave Instrument) は、複数の機能を持つ C バンドレーダであり、映像、波浪、風の 3 つの観測モードを持つ。

表3 解析に用いた JERS-1/SAR データおよび観測日の風向風速データ

Table 3 Outline of JERS-1/SAR data and wind speed/direction data used for the analysis.

Date	Path-Row	Izumo Airport			Center of Lake Shinii			Center of Lake Nakaumi			Miho Airport		
		Direction (deg.)	Relative Direction	Velocity (m/s)	Direction (deg.)	Relative Direction	Velocity (m/s)	Direction (deg.)	Relative Direction	Velocity (m/s)	Direction (deg.)	Relative Direction	Velocity (m/s)
1992/10/27	77-241	VRB	-	1.5	SSE	Cross	1.8	No data	Cross	1.0	210	Cross	2.1
1992/12/10	77-241	60	Up	1.0	SW	Cross	1.9	No data	Cross	0.0	200	Cross	1.0
1993/1/23	77-241	60	Up	2.6	SSE	Cross	0.8	No data	Cross	0.4	VRB	-	0.5
1993/3/8	77-241	340	Cross	3.6	SSW	Down	6.8	No data	Cross	2.9	350	Cross	4.6
1993/4/21	77-241	70	Up	3.6	SE	Up	5.2	ENE	Up	5.8	70	Up	7.2
1993/6/4	77-241	260	Down	6.7	SSW	Down	9.0	WNW	Down	7.9	280	Down	7.2
1993/7/18	77-241	300	Down	1.5	SSW	Up	2.6	NE	Cross	4.2	40	Cross	3.6
1993/8/31	77-241	40	Cross	3.1	ESE	Up	2.2	NNE	Up	1.0	60	Up	3.1
1996/7/22	77-241	240	Down	4.6	W	Down	4.4	WNW	Down	2.8	250	Down	3.6
1996/10/18	77-241	VRB	-	1.5	WNW	Down	2.4	NE	Up	0.5	190	Cross	2.6
1997/1/14	77-241	230	Cross	4.6	No data	Down	No data	SW	Down	9.3	250	Down	7.7
1997/4/12	77-241	260	Down	8.2	W	Down	8.4	WNW	Down	7.0	270	Down	6.7
1997/7/9	77-241	40	Cross	1.5	NE	Cross	0.8	NNW	Down	2.5	340	Cross	2.6
1997/8/22	77-241	250	Down	8.7	W	Down	10.9	WNW	Down	8.1	260	Down	7.7
1997/11/18	77-241	260	Down	7.7	W	Down	12.5	WSW	Down	13.2	260	Down	12.3

表4 JERS-1/SAR データ解析に用いた風向風速データ観測点 (国土交通省湖心観測所と気象庁測候所) の位置

Table 4 Location of wind vector observation stations operated by Ministry of Land, Infrastructure and Transportation (MLIT) and Meteorological Agency used for the JERS-1/SAR data analysis.

	Izumo Airport	Center of Lake Shinji	Center of Lake Nakaumi	Miho Airport
North latitude	35° 24' 38"	35° 26' 50"	35° 27' 48"	35° 29' 21"
East longitude	132° 53' 33"	132° 57' 45"	133° 11' 38"	133° 14' 21"
Altitude	10.3	5.7	14.1	7.2

ここで、 CF (Conversion Factor) は -85.34 (dB) (NASDA 島田政信氏 私信, 2001) であり, 求まる $\bar{\sigma}^0$ はデシベル単位である. しかし, 式 (2) で求められる $\bar{\sigma}^0$ には, 雑音電力も含まれているため, SN 比の悪い場合には注意が必要である.

JERS-1/SAR 観測日と衛星飛来時刻に近い当日の午前 11 時における定常観測点の風向風速データを表 3 に, また定常観測点の位置を表 4 に示している. そのうちの強風時 (風速, 約 12~13 m/s) (97 年 8 月 22 日) と弱風時 (風速, 約 1~2.5 m/s) (92 年 10 月 27 日) の代表的な 2 イメージを図 1 に示す. 図からは強風時のほうが全体的に明るい (NRCS が大きい). また, 特に宍道湖においては明るい場所と暗い場所が識別できることがわかる.

JERS 1/SAR は感度の問題で, NRCS の小さい水域では雑音が支配的になっている可能性がある. そのため以下の方法で雑音レベルの差引きを行った.

雑音レベルを推定するため, 今回は宍道湖・中海の水域をそれぞれ細かく分割し (1 ブロック約 2000 m²), それぞれのブロックにおける平均 NRCS を算出した. その各ブロックのうち, 15 シーンにおける最小平均 NRCS を雑音等価 NRCS とした. これは, 細かく分割されたブロックの中には, NRCS が

非常に小さく雑音が支配的なブロックが存在すると考えられるためである. この結果, 雑音等価 NRCS (σ^{0}_{noise}) は -19.8 [dB] となった. σ^{0}_{noise} の差引きを行うことで, より定量的な解析を行うことが可能となる. 以降解析に使用する NRCS (σ^0) は σ^{0}_{noise} を差し引いたものであり, 次式により算出した.

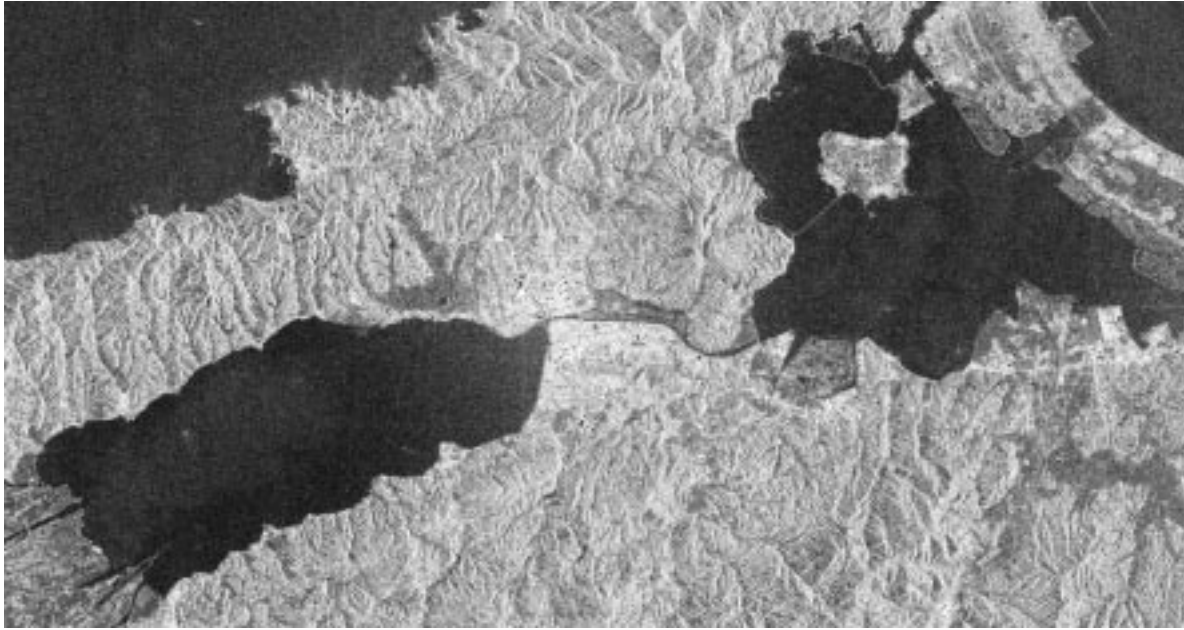
$$\sigma^0 = 10 \log_{10} \left(10^{\frac{\bar{\sigma}^0}{10}} - 10^{\frac{\sigma^{0}_{noise}}{10}} \right) \quad (3)$$

水面風速と σ^0 の相関解析においては, 風向と SAR 視線方向の地表に水平な成分の方向との相対角度による風速と σ^0 の関係の依存性を併せて調べた. これは, 先に述べたようなレーダ波入射方向と風向の相対角度の関係が汽水域においても成立するのかわを確認するためである. なお, 風向風速データは宍道湖・中海とも湖心のデータを使用し, 平均 NRCS も湖心付近 1 km 四方におけるものである.

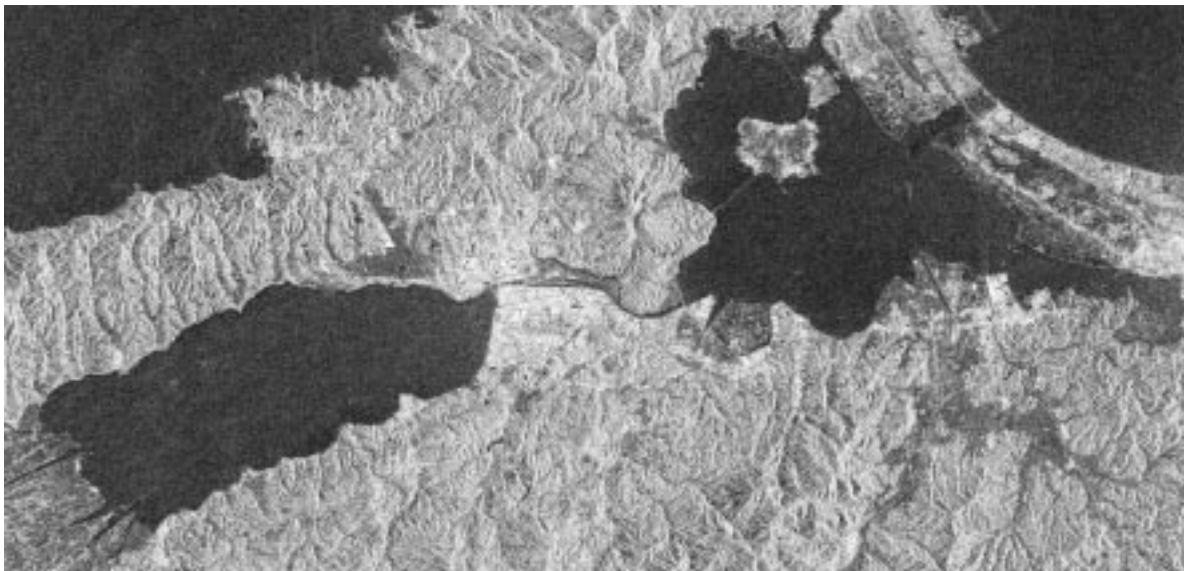
4. 2001 年 SAR 搭載衛星同期観測実験

4.1 実験概要

2001 年 3 月から 12 月にかけて合計 9 回の衛星同期風向風速観測実験を行った. 表 5 に同期観測実験の概要をまとめる. 9 月の観測からは湖岸にも人員



(a) October 27, 1992



(b) August 22, 1997

図1 JERS-1/SARの宍道湖映像の例(1992年10月27日および1997年8月22日)

Fig. 1 Examples of JERS-1/SAR image of Lake Shinji (October 27, 1992 and August 27, 1997). (c) METI/NASDA

を配置し風向風速観測を開始した。2001年の風向風速観測実験は中海を中心に行った。同期調査に使用した衛星搭載SARはRadarsat-1/SARおよびERS 2/AMI, 可視・近赤外波長帯の光学センサはSPOT 2である。また, 11月10日には航空機搭載のPi-SARとの同期観測を行った。なお, 若干日時がずれるが, 9月4日午前にはLandsat 7およびASTER, 11月11日午前にはSPOT-1, 11月14日午前にはLandsat 7およびASTERの観測が行われた。

同期実験において, 船上では衛星の飛来する時刻とその前後10分の3ポイントで, 船に固定されたデジタル式の風向風速計(ウェザーモニターⅡ)で風向風速ともに30秒間の値の平均値を記録した。また, ウェザーモニターⅡは風向風速の他に温度(室内, 屋外), 気圧, 湿度(室内, 屋外), 露点, 体感温度が観測でき, これらの観測値は1分毎にメモリに記録される。一方, 湖岸では携帯用の風向風速計を用いて, 30秒間風向風速を観測した。この作業

表5 2001年に実施した宍道湖・中海衛星および航空機搭載 SAR 観測、並びに同期現場観測の概要
Table 5 Summary of satellite and airborne SAR observations of Lake Shinji and Lake Nakaumi, and simultaneous in-situ observations conducted in 2001.

Date	Sattelite	Observation time	Number of point		Observed data									
			Coast	Over water	Met. data (※2)	Spectral reflectivity at visible wavelength	Chl.a	Secchi depth	Turbidity	SS	Water temp.	Salinity	pH	DO
3/14	Radarsat1	6:16	0	2	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
9/4	Radarsat1	17:56	10	6	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
9/6	ERS2/SPOT2	10:47/11:12	10	7	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
10/30	ERS2/SPOT2	10:47/11:12	9	3	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
11/10	Pi-SAR	13:57~14:35	10	20(12)※1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
11/15	ERS2/SPOT2	10:47/11:12	9	4	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
12/1	ERS2/SPOT2	10:47/11:12	10	4	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

※1 Only wind direction was obtained at eight points because of the failure of the Instrument

※2 Meteorological data include air temperature, humidity and pressure.

を衛星の飛来する前後 10 分の計 21 分間、1 分毎に繰り返し行った。今回湖岸での観測で用いた風速計は、風速に応じ風杯が回転する軸回転を利用したものであり、歯車伝導機構により 30 秒間の平均風速値が直示できるものである。また風向は目視により 30 秒間の平均値を 16 方位で記録した。宍道湖・中海上空への衛星飛来時間は日本標準時で、朝あるいは夕方が飛来時刻である Radarsat の場合、3 月 14 日が午前 6 時 16 分、9 月 4 日が午後 5 時 56 分、その他の太陽同期衛星 (ERS-2, SPOT など) は午前 11 時前後である。また Pi-SAR による観測は午後 2 時からであった。湖岸および船舶観測は、基本的にこれら飛来時刻に合わせて実施した。

観測地点としては、湖岸では図 4 に示す非定常観測地点のうちから最大 10 地点を選び観測を行った。観測地点は事前に下見をし、周囲の地形や建造物の影響を受け難い場所を選択した。また、湖上の観測地点は基本的に場所よりも衛星の飛来時間に合わせることを優先し、衛星の飛来時間とその 10 分前、10 分後の 3 地点で観測を行った。その際、今後の解析で観測地点の高度も必要なため船上、湖岸ともに風向風速計を設置した高度も記録した。また、衛星画像には船舶の航跡が映ることも考えられるため、観測時には移動する船舶の有無や水面の様子なども記録した。

ただし、Pi-SAR の同期実験時には以下の理由から若干方法を変え観測を行った。Pi-SAR は航空機搭載型であるため衛星に比べ速度が遅く、また今回の観測では中海上空を南から北へ、宍道湖上空を北から南へ、中海上空を西から東への 3 つのコースを通り観測を行ったため、観測開始から終了まで約 40 分かかる。このため、中海に加えて宍道湖においても同期観測を行い湖上では 20 地点で観測

を行った。一方、湖岸での観測地点数は 10 地点であるが、1 分毎ではなく 2 分毎に観測を行った。

4.2 取得データの概要

同期観測によって得られた風向風速データのうち湖岸におけるものを表 6 に、船上におけるものを表 7 に示す。2001 年 3 月 14 日については、湖岸における携帯風向風速計観測は実施しておらず、気象庁などの定常観測点におけるデータを入手済であるので、他の観測日とは別に表 8 にまとめる。なお、風向の決定において、単純にその平均値を取ると、変動が大きい場合には適切でない方向が風向となる可能性がある。そのため、1 つの観測点の観測データにおける 16 方位のうちの最頻値を風向とした。ただし、風向が 180 度以上変動している場合には VRB (Variable) とした。

なお、水質、分光関係のデータ取得についての詳細は (作野他, 本誌中) を参照されたい。

また、2001 年 9 月以降の観測についても、周囲の気象庁測候所や国土交通省観測タワーなどの定常観測点の風向風速観測を今後入手し、併せて解析をすすめる予定である。

5. NRCS と風速の相関解析結果

相対角度が (1) 0 ± 45 度 (Up) および 180 ± 45 度 (Down), (2) 90 ± 45 度および 270 ± 45 度 (Cross) の場合の 2 つに分類し、それぞれの場合における風速と NRCS の相関を調べた結果を図 2 に示す。

図 2 は横軸に風速の対数を、縦軸に雑音を除去した NRCS をとったものであるが、図 2 からは相対風向が Up 及び Down の場合には良い相関があることわかる。このことは、汽水域における風速推定モデル作成の可能性を示している。しかし、低風速域で

表 6 2001 年衛星・航空機同期観測実験時の風向風速測定結果（湖岸）

Table 6 Results of wind speed and direction measurements simultaneous with satellite and airborne SAR observations in 2001 (at the coast of Lake Shinji and Lake Nakaumi).

(a) 9/4/2001

Observation Point		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Wind velocity [m/s]	Average	1.5	0.6	3.2	2.9	1.3	2.4	3.9	3.9	3.5	3.8	No data	No data
	Max	2.0	1.3	4.5	3.8	2.2	3.4	4.5	4.5	4.0	4.5		
	Minimum	0.5	0.0	2.3	2.0	0.1	1.0	3.5	3.5	3.0	2.0		
Wind direction		NNE	NNE	NE	ENE	ENE	E	ENE	ENE	ENE	NE		
ASL[m]		2.0	1.0	1.0	2.0	3.2	2.5	3.0	7.0	3.0	2.5		

ASL: Above Sea Level

(b) 9/6/2001

Observation Point		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Wind velocity [m/s]	Average	1.2	0.0	0.1	3.2	7.5	5.9	3.1	4.0	0.3	2.2	No data	No data
	Max	2.0	0.3	0.8	4.5	9.0	7.0	4.0	5.5	1.9	4.0		
	Minimum	0.5	0.0	0.0	2.0	5.2	4.8	2.0	3.0	0.0	0.5		
Wind direction		ENE	VRB	VRB	S	S	SW	SSW	S	SW	VRB		
ASL[m]		2.0	1.0	1.0	2.0	3.2	2.5	3.0	7.0	3.0	2.5		

(c) 10/30/2001

Observation Point		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Wind velocity [m/s]	Average	No data	0.2	0.7	1.8	2.7	0.4	1.5	1.2	0.9	2.2	No data	No data
	Max		1.4	2.1	3.2	3.4	1.5	2.2	1.9	2.9	2.8		
	Minimum		0.0	0.0	0.0	1.5	0.0	0.0	0.2	0.1	1.9		
Wind direction		No data	VRB	NNE	ESE	W	WSW	NE	N	N	ENE		
ASL[m]			1.0	1.0	2.0	3.2	2.5	3.0	7.0	3.0	2.5		

(d) 11/10/2001

Observation Point		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Wind velocity [m/s]	Average	No data	3.8	5.7	5.1	3.5	4.1	4.2	6.4	5.4	No data	3.2	6.0
	Max		4.9	6.6	6.1	4.3	5.0	5.3	7.8	6.3		4.7	7.1
	Minimum		2.9	4.8	3.8	2.2	3.1	3.5	4.0	4.0		2.3	4.8
Wind direction		No data	NE	ENE	NE	NNE	NE	NE	NE	N	No data	NE	ENE
ASL[m]			1.0	1.0	2.0	3.2	2.5	3.0	7.0	3.0		2.0	4.0

(e) 11/15/2001

Observation Point		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Wind velocity [m/s]	Average	No data	0.2	0.9	0.6	0.3	No data	1.4	2.0	0.7	No data	0.7	3.3
	Max		1.0	2.1	2.8	1.6		2.1	2.9	2.0		2.0	3.7
	Minimum		0.0	0.0	0.0	0.0		0.1	0.2	0.0		0.0	0.0
Wind direction		No data	VRB	NNE	WSW	WNW	No data	NNW	NNW	WSW	No data	WSW	E
ASL[m]			1.0	1.0	2.0	3.2		3.0	7.0	3.0		3.0	2.5

(f) 12/1/2001

Observation Point		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Wind velocity [m/s]	Average	No data	6.0	2.7	5.9	2.4	2.4	6.1	0.4	2.2	No data	0.1	1.3
	Max		6.5	4.5	6.6	3.2	4.0	6.5	1.4	4.0		0.6	2.1
	Minimum		5.2	1.7	5.0	1.5	1.0	5.3	0.0	0.5		0.0	0.1
Wind direction		No data	SW	W	W	W	WSW	W	VRB	SW	No data	WSW	SW
ASL[m]			1.0	1.0	2.0	3.2	3.2	3.0	7.0	3.0		3.0	2.5

表7 2001年衛星・航空機同期観測実験時の風向風速測定結果(湖上, 小型船舶による観測)

Table 7 Results of wind speed and direction measurements simultaneous with satellite and airborne SAR observations in 2001 (on Lake Shinji and Lake Nakaumi, measurements with small boats).

(a) 9/4/2001

Observation Time(JST)	17:46	17:57	18:07	17:45	17:57	18:07
North latitude	35° 27' 41.8"	35° 28' 29.7"	35° 29' 18.6"	35° 26' 53.5"	35° 27' 46.4"	35° 28' 25.5"
East longitude	133° 13' 30.8"	133° 13' 02.8"	133° 12' 32.4"	133° 11' 17.1"	133° 11' 35.7"	133° 11' 43.1"
Wind velocity [m/s]	2.4	3.7	2.8	4.1	2.6	2.7
Wind direction [deg.]*	71	81	57	87	90	96
ASL[m]	1.6	1.6	1.6	2.0	2.0	2.0

*: From Mag. North

(b) 9/6/2001

Observation Time(JST)	10:36	10:47	10:57	10:34
North latitude	35° 27' 47.5"	35° 27' 47.6"	35° 29' 46.8"	35° 30' 59.4"
East longitude	133° 09' 37.9"	133° 12' 23.7"	133° 12' 22.8"	133° 09' 40.0"
Wind velocity [m/s]	0.9	4.5	6.0	0.6
Wind direction (deg.)	270	180	340	324
ASL[m]	1.7	1.7	1.7	1.6

Observation Time(JST)	10:47	10:57	11:13
North latitude	35° 29' 39.9"	35° 28' 29.2"	35° 28' 39.6"
East longitude	133° 09' 02.2"	133° 08' 57.0"	133° 11' 59.9"
Wind velocity [m/s]	0.9	1.3	2.2
Wind direction (deg.)	80	182	146
ASL[m]	1.7	1.6	1.6

(b) 10/30/2001

Observation Time(JST)	10:37	10:50	11:01
North latitude	35° 27' 19.1"	35° 27' 41.6"	35° 27' 46.4"
East longitude	133° 09' 07.3"	133° 09' 58.5"	133° 11' 35.7"
Wind velocity [m/s]	3.0	1.5	1.5
Wind direction (deg.)	326	65	10
ASL[m]	1.8	1.8	1.8

(d-1) 11/10/2001(Lake Shinji)

Observation Time(JST)	13:04	13:17	13:36	13:49	14:01	14:23
North latitude	35° 27' 13.3"	35° 26' 47.2"	35° 26' 16.7"	35° 25' 53.3"	35° 25' 23.2"	35° 25' 50.6"
East longitude	132° 54' 49.9"	132° 55' 06.1"	132° 55' 08.8"	132° 55' 12.0"	132° 55' 17.8"	132° 56' 39.5"
Wind velocity [m/s]	5.4	6.3	4.5	4.5	5.4	4.0
Wind direction (deg.)	0	40	40	30	40	40
ASL[m]	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6

Observation Time(JST)	14:42	15:12	15:24	15:34	15:44	15:54
North latitude	35° 26' 20.8"	35° 28' 00.7"	35° 27' 33.1"	35° 27' 03.8"	35° 26' 32.6"	35° 26' 04.9"
East longitude	132° 57' 42.8"	132° 59' 35.9"	132° 59' 39.4"	132° 59' 48.5"	132° 59' 57.6"	133° 00' 04.1"
Wind velocity [m/s]	6.3	3.1	7.5	4.0	2.7	3.1
Wind direction (deg.)	30	40	60	60	30	30
ASL[m]	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6

の相関は良いとは言えない。これは、風速による湖面の応答が十分でないことや、有機物などによる水面汚染、水流などの影響が考えられる。今回取得したシーンに対応する Cross の場合のデータ数は少なく、はっきりとその相関を確認することはできな

い。しかし全体的に Up, Down 時よりも NRCS は低い傾向があり、定常的にはこれまでの観測結果と矛盾していない。今後のデータ入手の際には Cross のものを優先的に入手し、解析を行う予定である。

また、図2には JERS 1/SAR と同じ水平偏波で航

表7 続き

(d-2) 11/10/2001 (Lake Nakaumi)

Observation Time(JST)	13:15	13:30	13:47	14:05
North latitude	35° 30' 26.5"	35° 30' 23.5"	35° 28' 30.1"	35° 27' 45.4"
East longitude	133° 10' 45.0"	133° 08' 43.3"	133° 08' 51.1"	133° 09' 37.1"
Wind velocity [m/s]	No data	No data	No data	No data
Wind direction (deg.)	45	20	30	30
ASL[m]	2.0	2.0	2.0	2.0

Observation Time(JST)	14:21	14:40	15:03	15:21
North latitude	35° 27' 47.0"	35° 27' 46.3"	35° 29' 30.2"	35° 30' 31.9"
East longitude	133° 11' 32.0"	133° 13' 38.2"	133° 12' 19.2"	133° 12' 28.2"
Wind velocity [m/s]	No data	No data	No data	No data
Wind direction (deg.)	30	50	50	45
ASL[m]	2.0	2.0	2.0	2.0

(e) 11/15/2001

Observation Time(JST)	10:25	10:47	10:56	11:14
North latitude	35° 27' 46.4"	35° 27' 46.5"	35° 27' 46.6"	35° 29' 30.1"
East longitude	133° 09' 41.5"	133° 11' 32.3"	133° 13' 38.8"	133° 12' 17.0"
Wind velocity [m/s]	0.5	2.5	1.8	0.4
Wind direction (deg.)	19	315	300	260
ASL[m]	2.0	2.0	2.0	2.0

(f) 12/1/2001

Observation Time(JST)	10:32	10:44	11:03	11:21
North latitude	35° 27' 48.1"	35° 27' 46.6"	35° 27' 45.4"	35° 29' 29.8"
East longitude	133° 09' 38.9"	133° 11' 33.5"	133° 13' 41.3"	133° 12' 20.0"
Wind velocity [m/s]	3.0	2.0	0.4	2.7
Wind direction (deg.)	280	285	VRB	270
ASL[m]	2.0	2.0	2.0	2.0

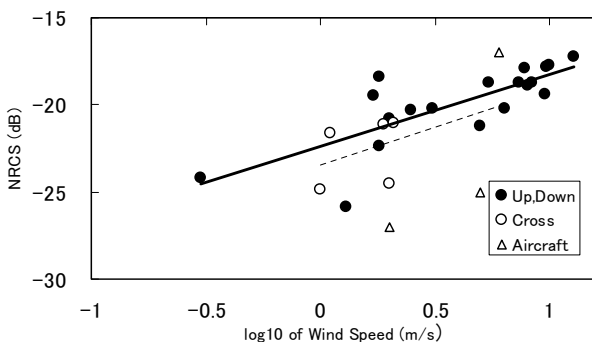


図2 宍道湖および中海中心部における風速(国土交通省タワーにおける観測)とJERS-1/SAR NRCSの相関

Fig. 2 Correlation between wind speed measured at Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MLIT) stations and JERS-1/SR NRCS at Lake Shinji and Lake Nakaumi.

空機搭載のレーダを用いて観測された NRCS (Δ) (Guinard and Daley, 1970) が併せて示してある。これと今回算出した NRCS との差は数 dB ほどであった。一方で、今回求めた NRCS は島田らによる GMF から算出したものと比較すると 4~10 dB ほど大きい。これは雑音推定方法の違いなどが原因として考えられる。

6. SAR 画像に見られる特徴的なシグナチャ

6.1 JERS-1/SAR 画像

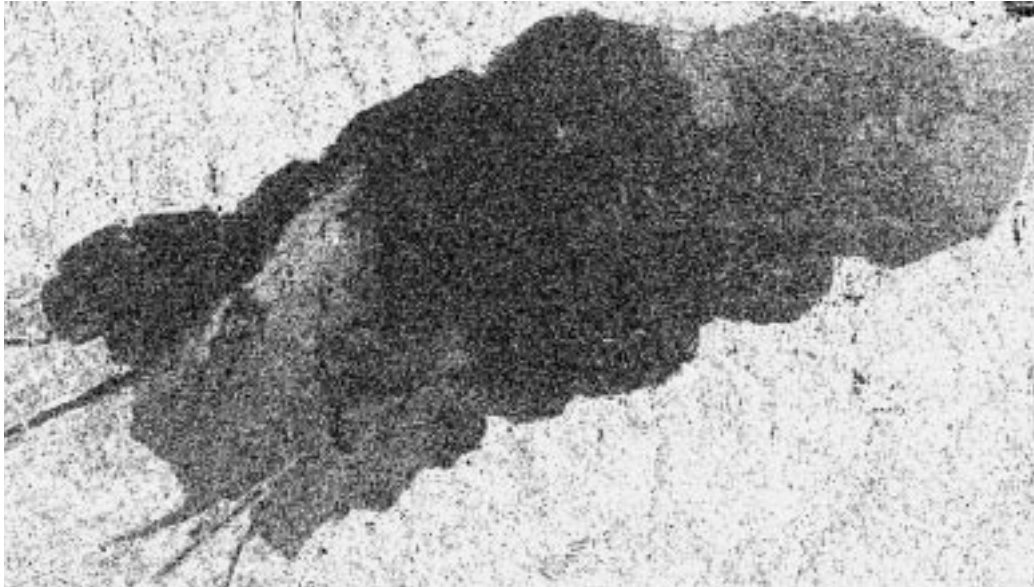
図3には今回解析を行った15シーンのJERS 1/SAR イメージの中で、特に特徴的なシグナチャが現れていた1993年1月23日、8月31日の宍道湖のイメージを示す。図3(a)では西岸の斐伊川などから、

表 8 2001 年 3 月 14 日の Radarsat-1 飛来時間帯における風向風速データ

Table 8 Wind speed and direction data on and around the time of Radarsat-1/SAR observation on March 14, 2001.

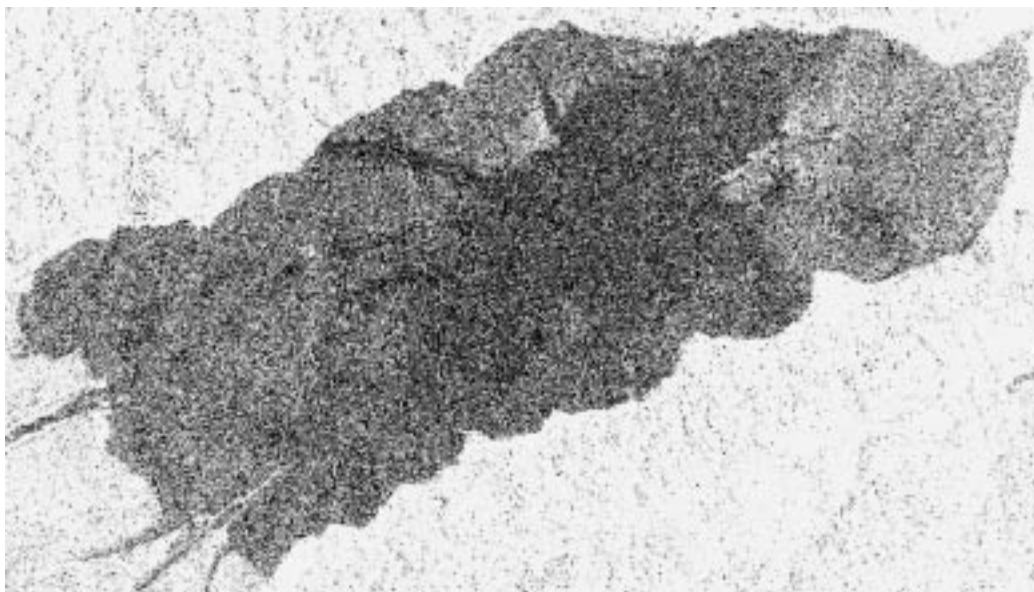
Observation Time(JST)	6:02	6:19	6:35
North latitude	35° 27' 66.7"	35° 27' 68.3"	35° 29' 30.0"
East longitude	133° 10'	133° 14' 02.4"	133° 12'
Wind velocity [m/s]	2.4	2.7	1.3
Wind direction[deg.]*	270	205	52

*: From Mag. North



(a) January 23, 1993.

(Example showing possible water flow from Hii River).



(b) August 31, 1993

(Example showing possible water floats from small rivers)

図 3 宍道湖の JERS-1/SAR NRCS 映像: 特徴的なシグナチャを持つ例

Fig. 3 Example of NRCS image derived from JERS 1/SAR data at Lake Shinji (examples showing peculiar signatures). ((c) METI/NASDA)

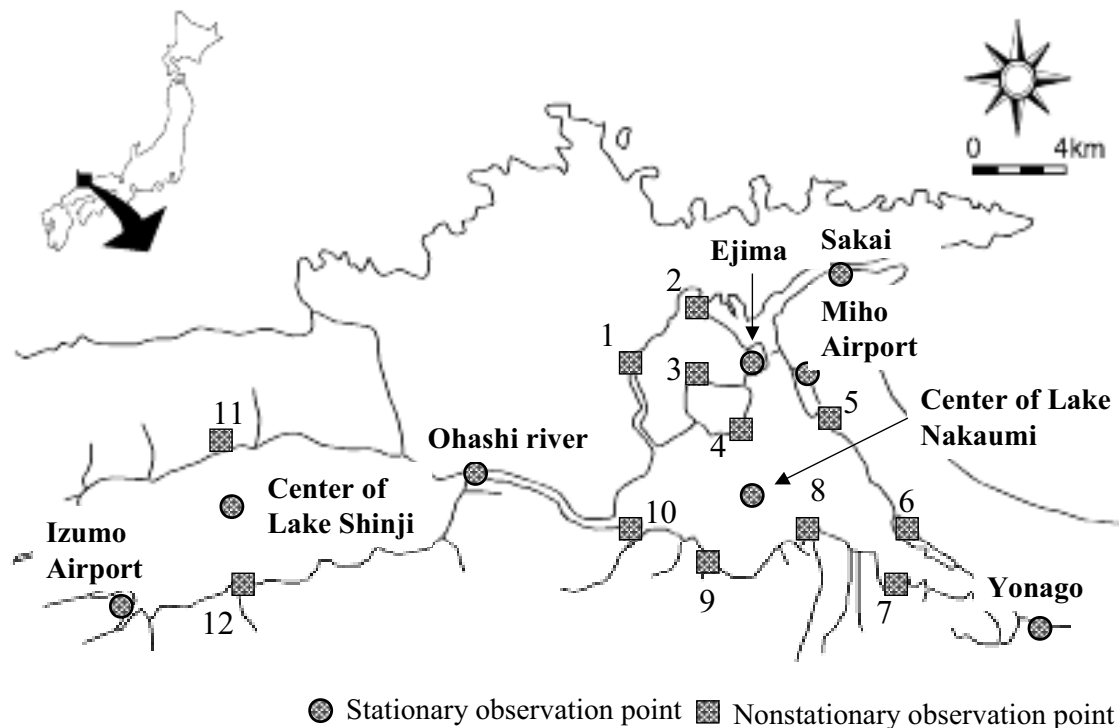


図4 湖岸における風向風速観測点

Fig. 4 Location of wind speed and direction measurement around the coast line of Lake Shinji and Lake Nakaumi.

図3 (b) では北岸の河川からの流入を示すようなシグナチャを見ることができる。なお両日とも風速は弱く、1月23日は宍道湖における風速約2 m/s、8月31日は約1~3 m/sである。また、当日を含め過去10日間の国土交通省出雲工事事務所鳥上観測所(仁多郡横田町鳥上)において合計27.8 mmの降雨が、8月31日も同様に過去10日間で27.5 mmの降雨が観測されており、シグナチャの現れる原因に関係している可能性もあるが、原因の解明には至っていない。また、宍道湖は中海に比べ特徴的なシグナチャが現れることが多く、今後、気象、水質などのデータを集め、シグナチャの原因を調査する予定である。

6.2 Radarsat-1/SAR 画像

図5に2001年3月14日の観測時のRadarsat 1/SAR画像を概略の風ベクトルと合わせて示す。図からは宍道湖・中海両湖において特徴的なシグナチャを確認することができる。当日湖上で観測された風速は1~3 m/s程度の極めて弱いものであり、風波はほとんどなかった。中海中心部や本庄工区におけるシグナチャは波によるものとしては不自然であり、なにか他の原因が考えられる。これまでにRadarsat 1/SARを用い、船舶の航跡がシグナチャ

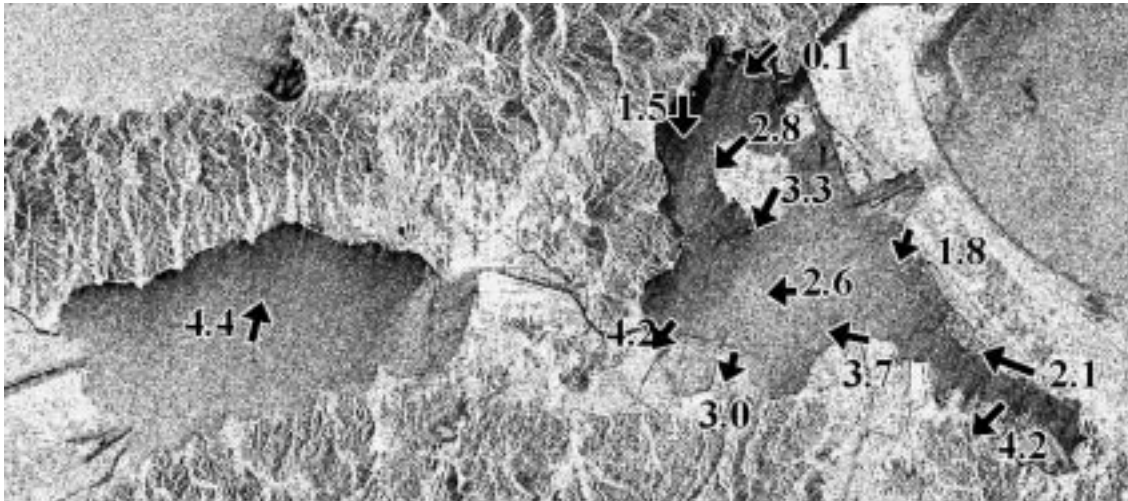
として現れるのを利用し船舶の検出を試みた例(Vachon, Olsen, 2000)があるが、当日は観測船以外にほとんど船舶は確認されおらずその可能性は低い。また海底地形との対応もなく、現在の所原因は解明できていない。

図5 (b) に示される2001年9月4日のイメージは、3月14日のイメージと比較すると全体的に明るく、特徴的なシグナチャを見ることはできない。当日の風速は2~5 m/s程度で3月14日の観測に比べ風は強かった。このことがイメージの違いに現れている可能性があるかと推測できる。

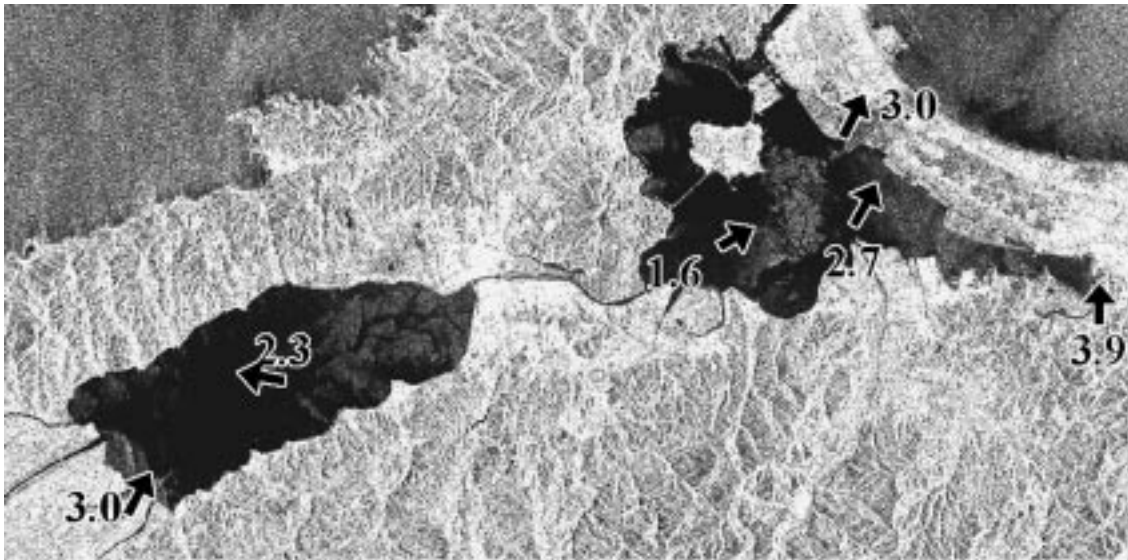
7. ま と め

汽水域における環境観測手法の一つとして風速推定手法の開発を目指し、その初期検討として過去の衛星データを用い、湖心タワーで観測された風向風速とNRCSの相関を調べた。また、更に詳細に汽水域のSAR観測の可能性を検討するため、2001年度に実施した衛星・航空機同期実験の概要を報告した。その結果、以下の結論を得た。

(1) 1992~1997年に取得されたJERS-1/SARデータを解析した結果、風速がある程度強い場合には、



(a) 3/14/2001, 6:16 AM (JST)



(b) 9/4/2001, 5:56 AM (JST)

図5 2001年3月14日および9月4日に取得された Radarsat 1/SAR 映像，並びに湖上および湖岸の風ベクトル。

Fig. 5 Radarsat 1/SAR images on March 14 and September 4, 2001. ((c) Canadian Space Agency (2001); provided from NASDA), superimposed by wind vectors measured simultaneously with the SAR observations.

風速と NRCS の間に良い相関があることが確認できた。これは、汽水域における風速推定の可能性を示すものである。

- (2) 一方で風速の弱い場合には，風速と NRCS の相関は低い。また，風速の大きい場合には見られない特徴的なシグナチャを確認できることが多い。
- (3) (1)，(2) は結果を考慮すると，SAR データの利用に際し，「使い分け」が必要であると推測される。風速の強い場合には水面の風に対する応

答が良く，それに従い NRCS と風速の相関も良くなるが，風速の弱い場合には応答が不十分である。そのため水質等の影響によるシグナチャが出現しやすいのだと推測できる。このため，強風域においては風速分布推定に，弱風域においては特徴的なシグナチャを抽出することで，水質汚染検出，水流検知などに SAR データの利用が考えられる。

今後さらに 2001 年度の衛星同期観測実験時のデータ解析をすすめると共に，種々の気象・水象条

件下における衛星データ，SAR の汽水域環境観測手法の検討を行う予定である。

謝 辞

JERS 1/SAR データは「経済産業省/宇宙開発事業団」が所有し，宇宙開発事業団から提供を受けたものである。気象データは国土交通省出雲工事事務所，気象庁松江地方气象台・出雲空港および美保空港出張所，境および米子測候所から提供を受けた。また，Pi-SAR による観測は通信総合研究所および宇宙開発事業団により行われた。

広島大学陸田秀実助手からは水面波と風の相互作用について，また東北大学川村宏教授並びに島田照久氏からは，GMF や SAR による風速推定の諸問題についてご教示を受けた。徳岡汽水環境研究所 徳岡隆夫所長，島根県内水面水産試験場中村幹雄場長，並びに島根大学の汽水域関係研究者各位からは，汽水域環境に関する有益なコメントや資料を頂いた。

同期実験実施に際し，松江土建(株)環境部の多大な協力を得た。中山大介氏には水質データの取得と処理に，また島根大学の多くの学生諸氏には，湖岸における風向風速観測に協力頂いた。

参 考 文 献

CRL/NASDA (1998) 航空機搭載高分解能マルチパ
ラメータ SAR (Pi-SAR) パンフレット. 通信総合
研究所.
Elachi, C. (1987) *Spaceborne radar remote sensing: Applications and techniques*. IEEE Press, New York, 255 p.
Guinard, N. W., and J. C. Daley (1970) An Experimental study of a sea clutter model, *Proceedings of the IEEE*,

58: 543-550

古濱洋治・岡本謙一・増子治信 (1986) 人工衛星によるマイクロ波リモートセンシング, (社)電子情報通信学会, 東京.
磯口治 (2001) SAR データを用いた沿岸域の海象現象把握の検討, *RESTEC*, 47 号, 東京, 23-36.
JPL (2002) Missions-SeaWinds on QuikSCAT. <http://winds.jpl.nasa.gov/>.
Kozu, T., K. Takayasu, Y. Sakuno, T. Matsunaga and H. Kobayashi (2001) Feasibility study of combined use of microwave and optical sensing for coastal lagoon environment monitoring, *Proceedings of the First ALOS PI Workshop*, Tokyo.
Li, F. K. and R. K. (1991) Special section on spaceborne radars for Earth and planetary observations, *Proceedings of the IEEE*, 79: 773-880.
Liu, W. T. (2001) Wind over troubled water. *Backscatter*, AMRS Association, 12, No.2: 10-14.
NASDA (2002) 地球観測衛星の紹介. 宇宙開発事業団地球観測センター (EOC) Web page <http://www.eoc.nasda.go.jp/>.
Shimada, T., H. Kawamura and M. Shimada (2001) Study on L-band Geophysical Model Function for ocean surface for ocean surface wind retrieval using JERS-1/SAR, *Proceedings of the First ALOS PI Workshop*, Tokyo.
Ulaby, F. T., R. K. Moore and A. K. Fung (1982) *Microwave remote sensing Vol.II: Active and passive. -Radar remote sensing and surface scattering and emission theory-*, Artech House, Norwood, MA, 1660-1684.
Vachon, P. W., R. B. Olsen (2000) Ship detection with satellite-based sensors: A summary of workshop presentations, *Backscatter*, AMRS Association, 11, No.4: 23-26.