

## 航空機搭載合成開口レーダによる宍道湖・中海観測 ：散乱係数の風速依存性とシグナチャ解析

栗田賢一<sup>1</sup>・古津年章<sup>1</sup>・下舞豊志<sup>1</sup>・作野裕司<sup>2</sup>  
松永恒雄<sup>3</sup>・中山大介<sup>4</sup>・高安克己<sup>5</sup>

### Airborne SAR observation of Lakes Shinji and Nakaumi: wind speed dependence of normalized radar cross-section and surface signature analysis

Ken'ichi Kurita<sup>1</sup>, Toshiaki Kozu<sup>1</sup>, Toyoshi Shimomai<sup>1</sup>, Yuji Sakuno<sup>2</sup>,  
Tsuneo Matsunaga<sup>3</sup>, Daisuke Nakayama<sup>4</sup>, Katsumi Takayasu<sup>4</sup>

**Abstract:** All-weather operation and high-resolution data are among the most important elements in remote sensing observations in coastal lagoon regions. Remote sensing from an aircraft platform has flexibility in observation timing and in the selection of observation areas. Multi-parameter and high-resolution Pi-SAR observations were conducted from 2001 to 2003 to obtain the basic characteristics of Normalized Radar Cross-section (NRCS) and SAR images over Lakes Shinji and Nakaumi to study the usefulness of such airborne SAR observations for coastal lagoon areas. X-band NRCSs obtained from the three observations show that NRCS values and the wind-speed dependence are similar to those obtained in experiments over the ocean, indicating that X-band SAR can be used for high-resolution wind speed mapping. Frequency and polarization dependences of NRCS in "clean" and "signature" areas were also analyzed. This indicated that the depression of NRCS at some signatures have a clear frequency dependence, while others do not. This finding suggests that multi-frequency SAR could be used to classify signatures.

**Key words:** Synthetic Aperture Radar (SAR), coastal lagoon, Normalized Radar Cross Section (NRCS), wind speed, signature

#### 1. はじめに

日本有数の汽水湖である宍道湖・中海では、近年の環境変化の影響で、生態系の変化や漁獲高の減少が問題となっている。汽水域の環境保全がますます重要となってきた今日、広域の環境モニタリングの

観点から、リモートセンシングの有用性が認識されてきた。

リモートセンシングは電磁波を用いて、目標物(湖面)から離れたところから直接触れることなく、目標物の特徴や現象を測定する技術である。従来は可視・赤外を用いたリモートセンシングが多く

<sup>1</sup> 島根大学大学院総合理工学研究科 Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Shimane University, Matsue, 690-8504, Japan

<sup>2</sup> 広島大学大学院工学研究科 Graduate School of Engineering, Hiroshima University, Higashihiroshima, 739-8527, Japan

<sup>3</sup> 独立行政法人国立環境研究所 National Institute for Environmental Studies, Tsukuba, 305-0053, Japan

<sup>4</sup> 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

<sup>5</sup> 島根大学 Shimane University, Matsue, 690-8504, Japan

表 1. Pi-SAR の主要諸元

Table 1. Major engineering parameters of Pi-SAR.

周波数	X-band (9.55 GHz)	L-band (1.27 GHz)
レンジ方向分解能	1.5m/ 3m	3m/ 5m/ 10m/ 20m
アジマス方向分解能	1.5m (4 look Processing)	3m (4 look Processing)
雑音レベル等価 NRCS	-40 dB 以下	-40 dB 以下
SN 比	10 dB 以上	10 dB 以上
Polarimetry	HH/ HV/ VV/ VH	HH/ HV/ VV/ VH
位相精度	5 deg. 以下	5 deg. 以下
入射角	10 ~ 75 deg.	20 ~ 60 deg.
NRCS 測定精度	0.5 dB 以下	0.5 dB 以下
アンテナサイズ	105 cm (L) x 19 cm (W)	155 cm (L) x 65 cm (W)
アンテナタイプ	Slotted Waveguide Array	Microstrip Patch Array
ピーク送信電力	8.3 kW	3.5 kW
送信パルス長	10 microsec.	10 microsec.
Developed by	Gulfstream II (Diamond Air Service Co. Ltd.)	

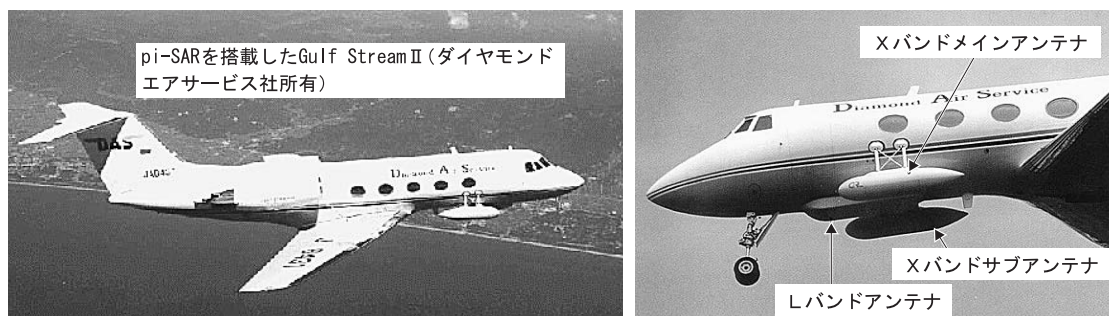


図 1. Pi-SAR の外観

(Pi-SAR を搭載した Gulf stream II (左), Pi-SAR のアンテナ (右))

Fig. 1. Picture of Gulf stream II airplane carrying the Pi-SAR (left) and Pi-SAR antenna (right).

用いられてきたが、近年は可視・赤外に比べ、天候に関係なく昼夜を問わず観測可能といった利点を持っていることから、マイクロ波リモートセンシングが注目されている。

特に、本研究における観測対象領域は、宍道湖・中海といった狭い閉鎖水系であるので、空間分解能をできる限り向上させる必要がある。合成開口レーダ(SAR)は、合成開口処理を行うことで実開口レーダ(RAR)よりも高分解能な観測が可能であることから、汽水域観測に適したセンサといえる。また汽水域は、周囲の河川や海洋との相互作用で一般に現象が複雑であり、映像化のみならず物理量の導出を狙うためには、多周波・多偏波など“マルチパラメータ”の観測が必要と考えられる。そのため

我々は、独立行政法人情報通信研究機構(NICT)および宇宙航空研究開発機構(JAXA)で開発された多偏波・干渉計型合成開口レーダ(Pi-SAR)を用い、2001年から2003年にかけて3回の観測実験を行った(市川ほか, 2002; 古津ほか, 2003)。

Pi-SARは2周波(X-band: 9.55 GHz, L-band: 1.27 GHz)・多偏波(HH・HV・VV・VH)<sup>\*1</sup>の同時観測が可能という特徴があり、周波数・偏波特性について高精度の検討が可能である。Pi-SARの主要諸元を表1に、またPi-SARの外観を図1に示す。

これまでSARによる海洋観測研究は多く行われており、海面の散乱係数(NRCS)<sup>\*2</sup>と海上風速の関係式の導出(Shimada *et al.*, 2003)や、スリック<sup>\*3</sup>に覆われた海面と清浄海面の間のNRCS減衰量を調べる

<sup>\*1</sup> 同じ偏波(H, V)で送受信することを平行偏波(HH, VV), また異なる偏波で送受信することを直交偏波(HV, VH)という。例えばHVは水平(H)送信, 垂直(V)受信を意味する。

<sup>\*2</sup> Normalized Radar Cross-Section (単位面積あたりの後方散乱断面積)

<sup>\*3</sup> 油, アルコールなど自然界で生成される, あるいは人工の物質による水面膜

研究などが行われてきた(増子, 1989). その結果, SAR が油污染域や赤潮などの検出に有効であることが示されている.

しかし, これまで狭い閉鎖水系においては, SAR 観測の有用性を詳しく検討した例はほとんどなかった. 我々は, 宍道湖・中海の衛星搭載 SAR 観測データの詳細な統計処理を通して風速場の推定の可能性を示した(Ichikawa *et al.*, 2002; 市川ほか, 2002). また Pi-SAR 観測データの予備解析を行い, 航空機搭載 SAR の有用性を検討してきた(古津ほか, 2003). それらの解析のなかで, 特に低風速下の SAR 映像にしばしば特異な“シグナチャ”<sup>\*4</sup> が現れることが明らかになった. しかし, その成因や SAR 観測諸元との関係など詳しい検討は課題として残されていた. また 2001 年, 2002 年の Pi-SAR 観測は比較的低風速下で行われたので, 航空機搭載 SAR から求められた NRCS の風速依存性はあまり明確ではなかった.

本論文では, 風速が 6~9 m/s と比較的強かった 2003 年の Pi-SAR 観測データを加え, NRCS の風速依存性を更に詳しく調べるとともに, 航空機搭載 SAR による水面汚染監視を念頭において, 宍道湖西部で観測されたシグナチャの NRCS 低下量の周波数依存性や偏波依存性を調べる.

## 2. Pi-SAR による汽水域観測概要

### 2.1 水面からのマイクロ波後方散乱

一つの散乱体に対して電波を照射する場合, 入射電力の一部は散乱体自身に吸収され, それ以外の電力はあらゆる方向へ散乱される. 波源(送信側)方向に散乱波が戻ってくる場合を, 後方散乱という. しかし, 湖面や海面のような平面状の対象物の場合では, 単一の散乱体という捉え方が困難であることから, 単位面積当たりの後方散乱断面積(NRCS)を用いる.

湖面上の風の影響で, 水面上には様々な波長を持ったさざ波が生成され, ランダム表面となる. このようなランダム表面からの電磁波散乱問題を厳密に解くことは, 一般に極めて困難である. そのため, 様々な仮定(モデル)を用いて近似解が求められている. たとえば表面のランダム変動が, 上下方向については電磁波の波長に比べて十分小さく, また横方向についてはと同程度という仮定(これは一般にマ

イクロ波の斜め入射観測に適用できる)のもとに近似的に解かれた後方散乱解では, 後方散乱に寄与する水面波の波長を  $\Lambda$ , 入射角を  $\theta$  とすると, 次のような関係があることが示されている(Ulaby *et al.*, 1982).

$$2 \Lambda \sin \theta = \lambda \quad (1)$$

(1) 式はブラッグ散乱の条件に等しく, 送信波の入射角  $\theta = 45^\circ$  とすれば, X-band では  $\Lambda = 2.2$  cm の水面波が, L-band では  $\Lambda = 16.7$  cm の比較的短波長の水面波が後方散乱に寄与することになる. また, この波長域の波浪スペクトル強度が, NRCS と直接関係することになる.

### 2.2 フライト方向と観測シーン

我々は, 2001~2003 年まで計 3 回 Pi-SAR を用いた汽水域観測を行った. 2002 年および 2003 年に行なわれた観測時のフライトパラメータを表 2 (a: 2002/09/12, b: 2003/08/23) に示す<sup>\*5</sup>. また, フライト方向と観測シーンについては, 図 2 に示す. 括弧内は, 年度ごとのシーン名を表わしたものである. 付録 1 に, 2003 年の観測シーンの詳細をまとめて示す.

### 2.3 観測現場の風向・風速

2003 年の風観測では, 2 隻の小型船舶を用い宍道湖上を 7 地点, 中海上を 7 地点測定する予定であったが, 宍道湖側は強風のため測定が困難となり, 1 地点のみの測定を行った. また, 定常観測点として, 国土交通省の宍道湖および中海の湖心タワーと気象庁の出雲空港および美保空港出張所の測定値も使用した.

上記に加え, 湖岸での風観測を, 宍道湖側で 4 地点, 中海側で 6 地点において実施した. これらをまとめたものを付録 2 に示す. 2001 年および 2002 年の観測データは, 市川ほか(2002), 古津ほか(2003)を参照されたい. 観測現場(宍道湖西部)の風向・風速をベクトルで表わしたものを図 3 (a: 2002/09/12, b: 2003/08/23) に示す.

## 3. NRCS 風速依存性

風向・風速は観測を行なった年ごとに異なっている. 風速は小さい方から順に, 2002→2001→2003 年となっており, 風向は, 2001 年および 2002 年では

<sup>\*4</sup> 本論文では, シグナチャを「画像中に見られる比較的一様な NRCS 値とは異なる特異な NRCS 低下領域」と定義する.

<sup>\*5</sup> 2001 年(2001/11/10 実施)のフライトパラメータは, 古津ほか(2003)に記載があるので省略する.

表 2. 観測時のフライトパラメータ  
 (a) 2002 年 9 月 12 日, (b) 2003 年 8 月 23 日  
**Table 2.** Pi-SAR and in-situ observation parameters.  
 (a) September. 12. 2002., (b) August. 23. 2003.

(a)

バス諸元 観測バス名	データ取得		飛行方向 (真方位)	アンテナ中心 オフナディア角	航空機高度
	時刻(JST)	航空機位置(deg:min)			
Shinjiko_ Nakaumi	12:46 -	132:32.39/35:15.17 -	79.6 deg	52 deg	12.71 km
	12:52	133:32.61/35:23.83			
Shinjiko NS	13:06 -	132:42.72/35:43.09 -	169.8 deg	52 deg	12.78 km
	13:09	132:49.56/35:11.51			

(b)

バス諸元 観測バス名	データ取得		飛行方向 (真方位)	アンテナ中心 オフナディア角	航空機高度
	時刻(JST)	航空機位置(deg:min)			
宍道湖・中海 WE	11:46 -	132:28.62/35:14.61 -	87.1 deg	50 deg	12.82 km
	11:52	133:32.27/35:23.78			
中海 SN	12:04 -	133:25.71/35:06.70 -	357 deg	50 deg	12.82 km
	12:08	133:17.95/35:42.61			
宍道湖 NS	12:16 -	132:42.76/35:42.88 -	177 deg	50 deg	12.81 km
	12:20	132:50.53/35:06.97			

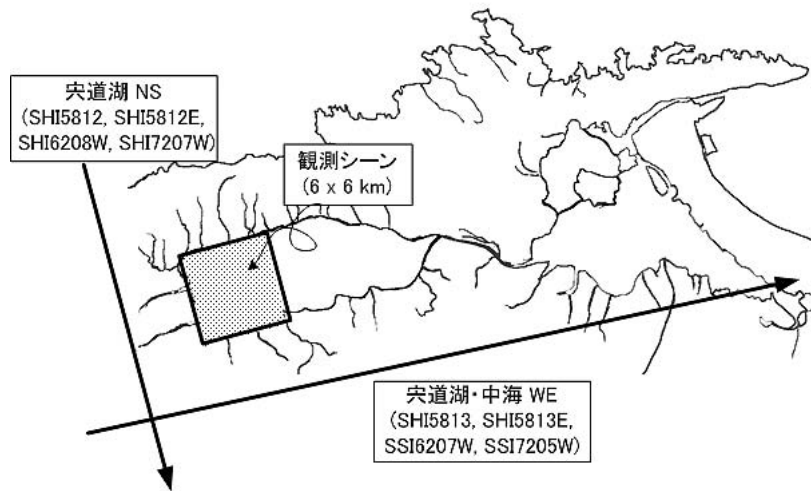


図 2. Pi-SAR 飛行方向 (矢印) と観測シーン  
**Fig. 2.** Pi-SAR flight course (arrow) and observation scene.

概ね東風, 2003 年は概ね西風である.

宍道湖 NS フライトのシーンをを用い, 年ごと (2001~2003 年) の送信波の入射角に対する NRCS (dB 値) の変化を比較・検討する. この入射角に対する NRCS 変化を図 4(a: X-band, b: L-band) に示す. 図 4 に用いたデータは, L-band では 10×10 ピクセル (25×25 m) の NRCS 平均値であり, X-band では 20×20 ピクセル (25×25 m) の NRCS 平均値である.

図 4 より, X-band, L-band 共に HH 偏波および VV 偏波に関係なく風速が大きくなるほど, NRCS 値が大きくなっていることが分かる. これは, 風速が大きくなるにつれて湖面上に励起される波が強くなる, すなわち各周波数におけるブラッグ散乱に寄与する波浪スペクトル強度が増加することが原因と考えられる.

L-band・VV 偏波 (2003 年) では, 入射角が大きく

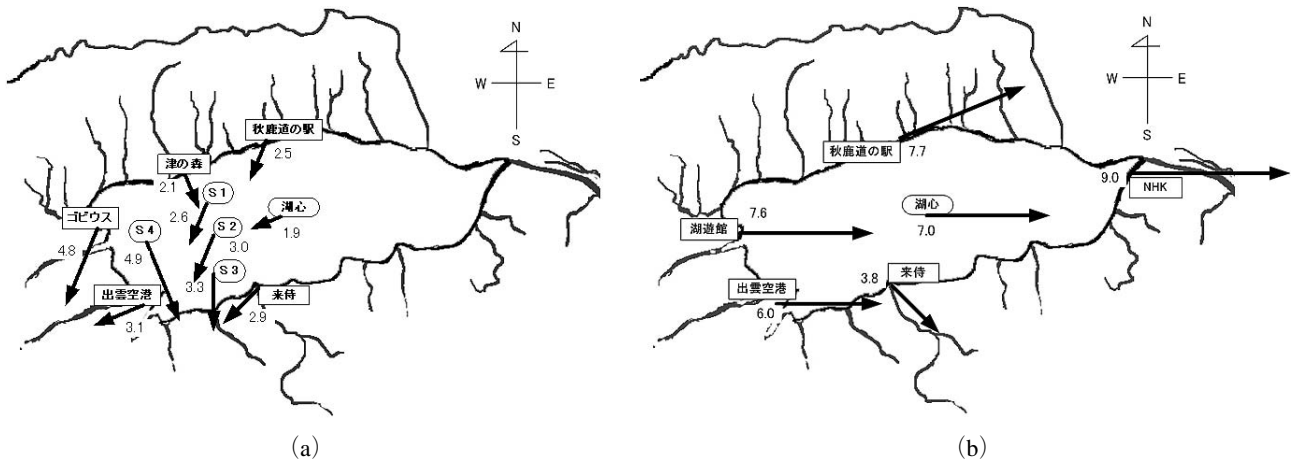


図 3. 宍道湖西部の風ベクトル  
 (a) 2002 年 9 月 12 日, (b) 2003 年 8 月 23 日  
**Fig. 3.** Wind vector in the western part of Lake Shinji.  
 (a) September. 12. 2002., (b) August. 23. 2003.

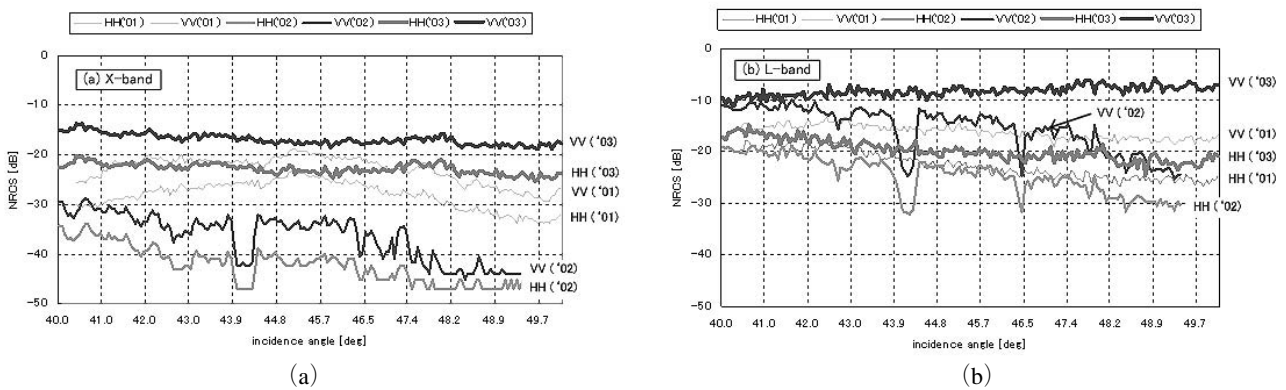


図 4. NRCS の入射角特性  
 (a) X-band, (b) L-band  
**Fig. 4.** Incidence angle dependence of NRCS.  
 (a) X-band, (b) L-band

なるに伴い NRCS 値が増加している。しかし、これ以外の周波数・偏波はすべて、入射角が大きくなるに伴い、NRCS 値が減少している。一定の風速場において、入射角と共に NRCS 値が小さくなるのは、前述のブラッグ散乱モデルからも、またこれまでの実験結果からも予想される結果であるが、大きくなることは考えにくい。

そこで、2001 年および 2002 年と 2003 年の風向・風速の相違点を考えてみる。

- (1) 2001 年および 2002 年の風は、概ね東風であるのに対し、2003 年では概ね西風である。
- (2) 2001 年および 2002 年の風速 3~6 m/s であるのに対し、2003 年では 7 m/s 以上である。

まず、(1) 風向の違いについて考えてみる。2001

年および 2002 年では風は宍道湖西側の湖岸に向かって吹いており、逆に 2003 年では宍道湖西側の湖岸から離れるように吹いている。よって、2003 年の場合は、入射角が大きくなるに伴い水面上の波が発達していくと考えられる。

すなわち L-band・VV 偏波(2003 年)に起こった現象は、風速が大きいことで風浪が発達し、風下に向かって L-band のブラッグ散乱に寄与する波が増加したことによって生じたためと思われる。一般に VV 偏波 NRCS の入射角依存性は HH 偏波に比べて緩やかである (Masuko *et al.*, 1986)。そのため、VV 偏波 NRCS は入射角とともに増加しても、HH 偏波 NRCS ではまだ入射角に対して減少傾向のまま留まっていた、と解釈できる。X-band の NRCS では、

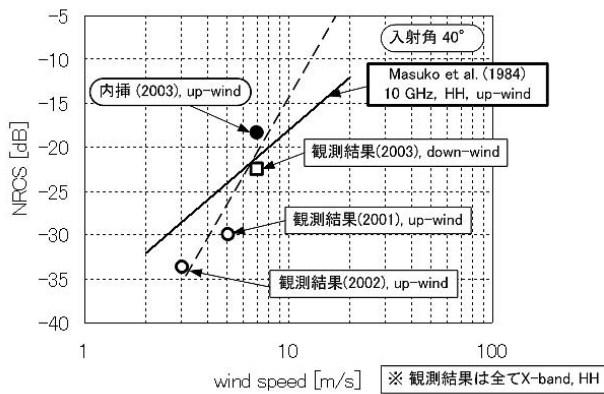


図5. 入射角  $40^\circ$  における NRCS の風速特性(X-band, HH)

Fig. 5. Wind speed dependence of NRCS values at 40 degree incidence (X-band, HH).

VV 偏波でも NRCS が増加傾向にならなかったのは、X-band 電波の後方散乱に寄与する短波長水面波は、水面直上の風に直ちに反応して励起減衰する(鳥羽, 1996)ため、吹送距離によって波浪の発達度が異なる現象が現れにくいことが原因と思われる。別の要因として、宍道湖西部では湖岸の存在で、波浪スペクトル自体が影響を受けることも考えられる。このような現象は、水面や風速場の一様性が高い外洋ではあまり考えなくてもよいが、汽水域のような閉鎖水域では、NRCS 特性の解析や風速場の推定において注意を要する点と考えられる。

ここで、海洋上で測定された風速と NRCS の関係(Masuko *et al.*, 1986)と、今回の実験結果を比較する(図5)。図5の海洋上のデータは、周波数 10 GHz・HH 偏波・up-wind\*<sup>6</sup> の場合の風速対 NRCS 特性を対数スケールで直線近似したものである。次に、2001~2003年の Pi-SAR 観測結果を図5中に○及び□で示す。○は up-wind, □は down-wind を示している。このように、ビーム方向と風向の相対方位角が観測毎に異なっている。そこで、風速毎に調べられた相対方位角と NRCS の関係(Masuko *et al.*, 1986)を参照し、高風速下(7~8 m/s)での、HH 偏波における up-wind NRCS 値と down-wind NRCS 値の差、約 3 dB を用いて 2003 年の観測値を補正する。その結果を●として、図5中に示す。この結果から、汽水域における X-band NRCS は海洋上の結果と比べて傾きが急であるが、概ね風速依存性は一致していると考えられる。

## 4. NRCS シグナチャ解析

### 4.1 シグナチャの定義

NRCS は 2 次元配列 (X-band:  $4800 \times 4800$  ピクセル, L-band:  $2400 \times 2400$  ピクセル) として格納されていることから、それらを映像化することで、周波数・偏波ごとの NRCS 画像が得られる。それらを図 6(a: 2002/09/12, b: 2003/08/23) に示す。

2002 年の NRCS 画像中(図 6(a))では“筋状”シグナチャ、“島状”シグナチャあるいは“雲状”シグナチャ(X-band 画像全域, L-band には見られない)が明確に検出されていることがわかる。本論文では、それらのうち“筋状”および“島状”シグナチャに注目し、特徴的な 4 パターンのシグナチャを選出する。これらを図 7 に示す。SG 2 が“筋状”シグナチャ、SG 1・SG 3・SG 4 が“島状”シグナチャである。

### 4.2 雑音差引とフェージング

今回の実験における観測対象は、ランダムな水面である。このような場合、レーダの受信電力は時間的に不規則な揺らぎを伴ってしまう。この不規則な揺らぎは、フェージング(fading)と呼ばれており、熱雑音とフェージングが共存する場合は、両者が受信信号に影響を与える。

本観測では、同一時間内に同一ターゲットを多偏波観測している。各偏波の NRCS 画像の違いを比較すると、平行偏波は、明確に NRCS 値の変化が見受けられたのに対し、直交偏波は、NRCS 値が小さい上に、NRCS 値の変化はほとんど見受けられなかった。ブラッグ散乱モデルの理論的基礎となる波長に比べて十分小さな高さ方向のランダム変動を持つ表面からの後方散乱を求めると、直交偏波成分は、平行偏波成分に比べて 20 dB 程度小さいことが示されている(Ulaby *et al.*, 1982)。Pi-SAR の結果は、この理論計算とも矛盾していない。ゆえに、ここでは VV あるいは HH 偏波と HV および VH 偏波の NRCS の差が 10 dB 以内であるとき、HV および VH 偏波を雑音レベルとみなした。直交偏波において得られた NRCS 値(真数)を、雑音レベル(熱雑音)と考え、平行偏波における NRCS 値(真数)から差引くことによって、より精度の高い信号(NRCS 値)が得られることになる。

観測入射角が一定である場合、雑音レベルにはあ

\*<sup>6</sup> up-wind・down-wind は送信波の向きに対して風向が平行であり、cross-wind は送信波の向きに対して風向が直交である。

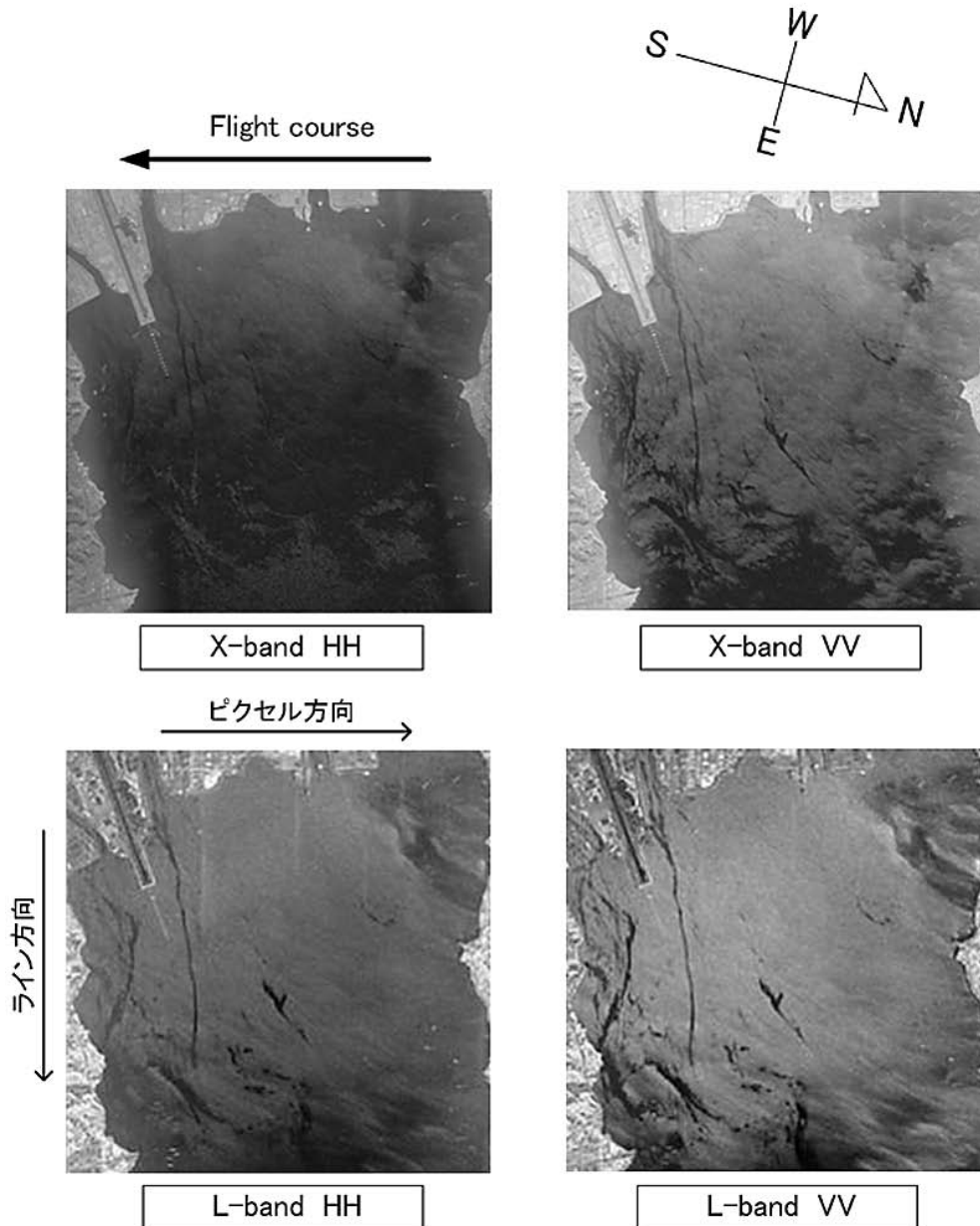


図 6. (a)

図 6. 宍道湖西部の NRCS 画像

(a) 2002 年 9 月 12 日 [SHI 6208 W], (b) 2003 年 8 月 23 日 [SHI 7207 W]

**Fig. 6.** NRCS image in the western part of Lake Shinji.

(a) September. 12. 2002. [SHI 6208 W], (b) August. 23. 2003. [SHI 7207 W]

まり変化が見られないので、1000 ピクセル分 (L-band) ないし、2000 ピクセル分 (X-band) を平均化した NRCS 値を雑音レベルと考え、平行偏波の値より差引くこととした。

シグナチャ画像作成には、3×3 ピクセル分 (L-band) ないし、6×6 ピクセル分 (X-band) の NRCS 値を平均化したデータを用いる。1 ピクセル中に、インコヒーレント平均された 4 個のデータが格納されているので、解析に用いたデータは、36 個の独立

サンプル数を平均したものである。ここで、レイリーフェージングを仮定すると、ランダム誤差の標準偏差は、0.7 dB となる。通常では、独立サンプル数を増やすことで、フェージング雑音の軽減が可能である。

#### 4.3 清浄およびシグナチャ領域の決定

1 つのシグナチャに対して全体的な解析を行なおうとした場合、一次元シグナチャ解析を何箇所も行

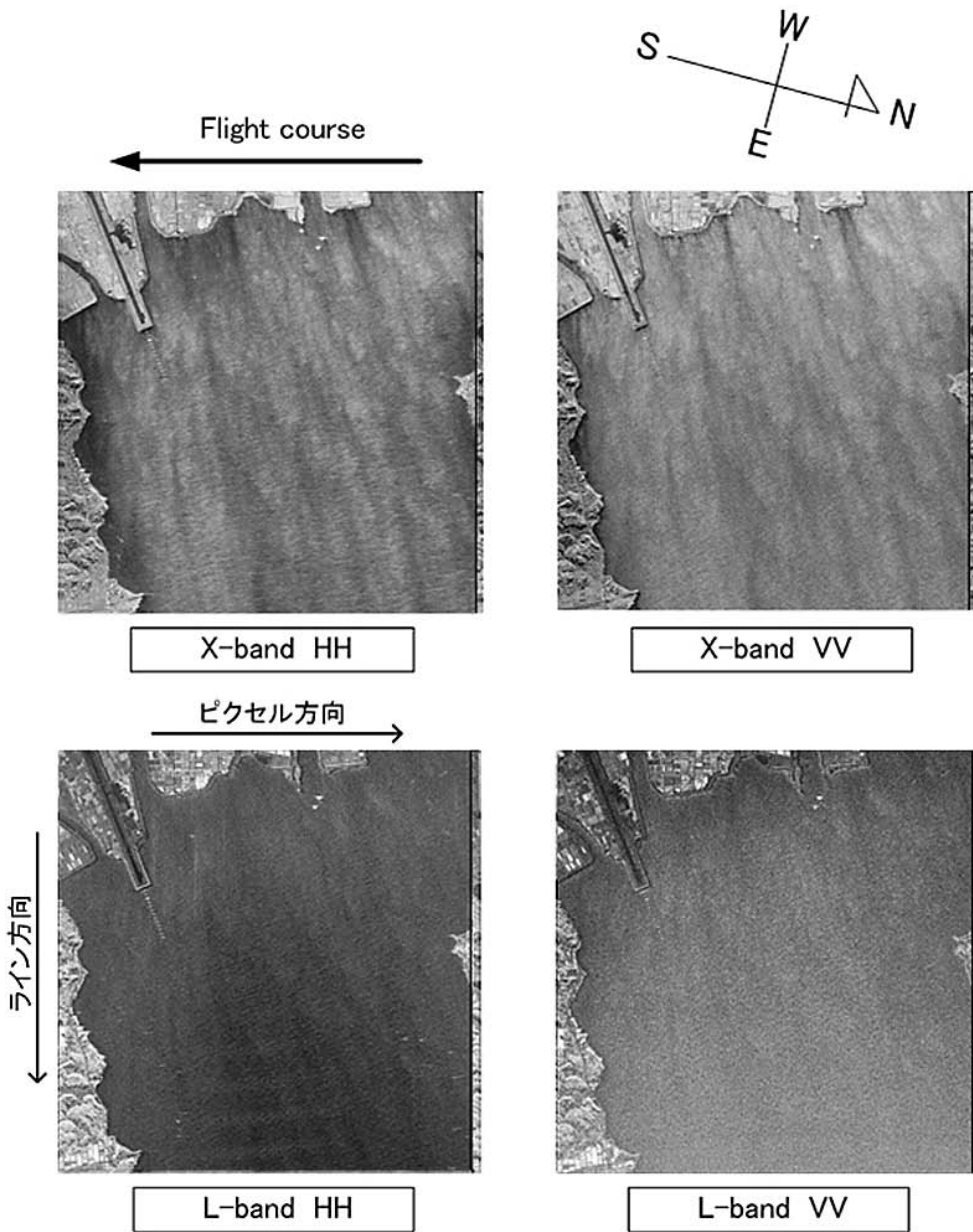


図 6. (b)

なう必要が出てくる。しかし、シグナチャ全体を NRCS コンター図(二次元)で見ることによって、明確にシグナチャ領域を捉えることができる。二次元イメージ化することにより、シグナチャと清浄領域の境界 (boundary) を見つけることも容易となる。

4 パターンのシグナチャを解析することで、宍道湖西部における様々な条件下での結果と比較することを試みる。図 8 (a: SG 1, b: SG 3) に NRCS コンター図を示す。図 8 より、シグナチャ領域 (減衰領域) と清浄領域の境界を目視で決定することができ

る。SG 1 から SG 4 すべてのシグナチャに対して、シグナチャ領域での NRCS 平均と清浄領域での NRCS 平均の差を取ることで、各周波数・偏波ごとの  $\Delta NRCS$ \*7 を求めた。各周波数・偏波における  $\Delta NRCS$  を表 3 (a: SHI 6208 W, b: SSI 6207 W) に示す。NRCS コンター図を用いることで、ライン解析よりも高い精度で境界を決めることが可能である。

なお、シグナチャ領域において雑音レベル以下の NRCS も多く存在する場合は、 $\Delta NRCS$  を求めることができない。この現象は、全ての X-band・HH 偏波、

\*7 シグナチャ (減衰) 領域と清浄領域の NRCS 値 (dB 値) の差



表 3. 各周波数・偏波における  $\Delta NRCS$   
 (a) 宍道湖 NS (SHI 6208 W), (b) 宍道湖・中海 WE (SSI 6207 W)

Table 3.  $\Delta NRCS$  in multi-frequency and polarization.

(a) Shinjiko NS (SHI 6208 W), (b) Shinjiko · Nakaumi WE (SSI 6207 W)

(a)

宍道湖 NS (SHI6208W)	L-band		X-band	
	HH	VV	HH	VV
SG 1	10.6	10.3	—	10.7
SG 2	9.0	9.3	—	11.0
SG 3	5.4	5.1	—	9.3
SG 4	6.5	7.2	—	12.3

[単位 : dB]

(b)

宍道湖・中海 WE (SSI6207W)	L-band		X-band	
	HH	VV	HH	VV
SG 1	—	8.4	—	—
SG 2	6.6	6.8	—	7.2
SG 3	—	5.8	—	—
SG 4	3.7	3.2	—	3.9

[単位 : dB]

ならびに宍道湖・中海 WE フライト (SSI 6207 W) SG 1 および SG 3 の L-band・HH 偏波と X-band・VV 偏波で発生したため、それらの場合  $\Delta NRCS$  を測定不能とした。

#### 4.4 $\Delta NRCS$ の比較と検討

表 3 (a) に示した宍道湖 NS フライトにおける  $\Delta NRCS$  の偏波および周波数特性について検討する。

偏波特性：L-band では、SG 1~4 すべてのシグナチャにおいて、HH 偏波と VV 偏波の差は 1 dB 未満となっており、偏波依存性は確認できなかった。また X-band では、HH 偏波が測定不能であるため、偏波間で比較することができなかった。

周波数特性：SG 1 および SG 2 では、X-band と L-band の  $\Delta NRCS$  に大きな差は見受けられなかった。しかし、SG 3 および SG 4 では、ともに X-band の方が L-band よりも  $\Delta NRCS$  が 4~5 dB 大きい結果が得られた。

次に上記の結果をもとに、シグナチャの成因について考察する。図 3(a) より、観測時における湖上の風速は、2~5 m/s と弱風であることから、水面波はそれほど発達せず、“さざ波”程度であったと考えら

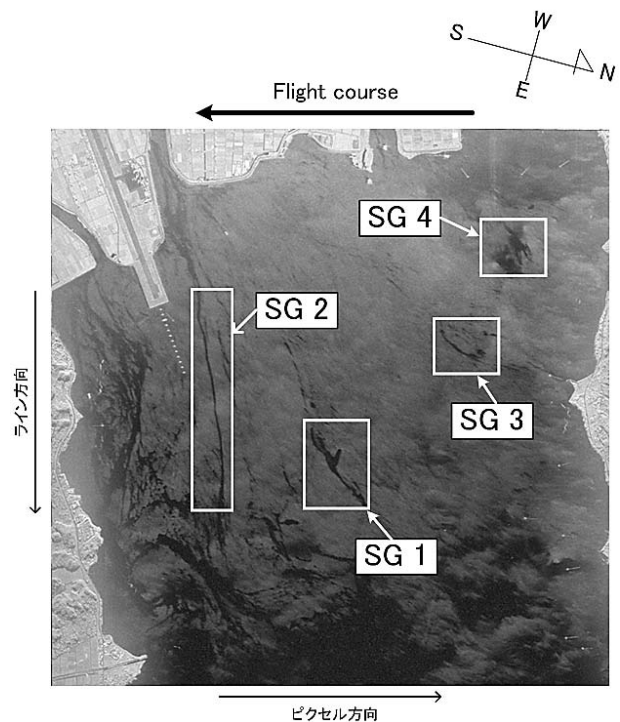
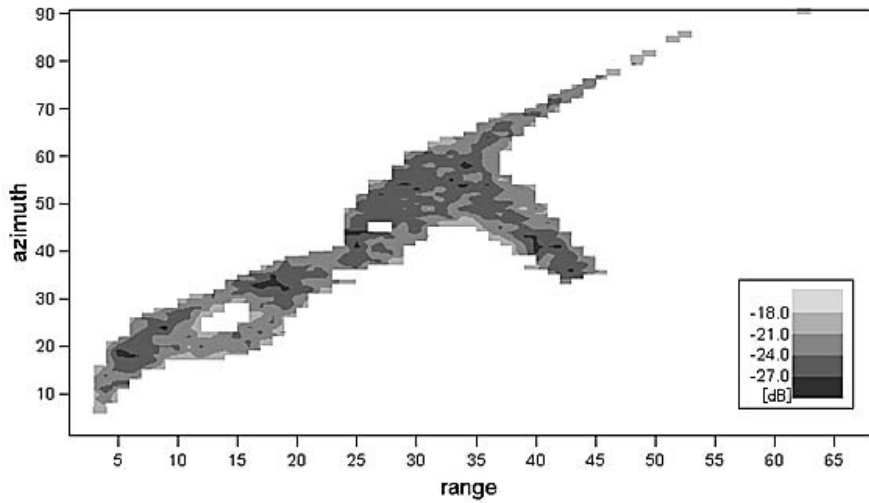
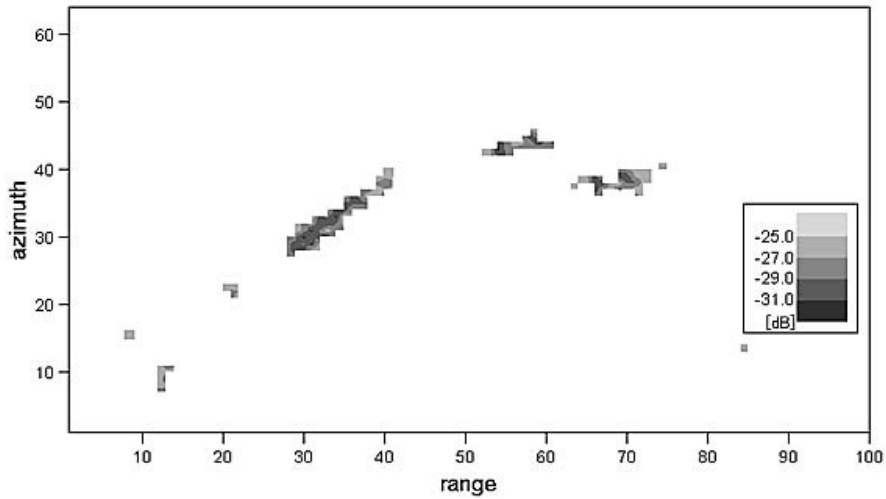


図 7. 解析で用いたシグナチャ 1~4 [SHI 6208 W, X-band, VV]

Fig. 7. Signature 1~4 used for analysis [SHI 6208 W, X-band, VV].



(a)



(b)

図 8. シグナチャ領域の NRCS コンター図

(a) SG 1 [SHI 6208 W, L-band, VV], (b) SG 3 [SSI 6207 W, L-band, VV]

Fig 8. Contour plot of NRCS at signature areas.

(a) SG 1 [SHI 6208 W, L-band, VV], (b) SG 3 [SSI 6207 W, L-band, VV]

れる。このような場合、水面あるいは水面付近に何らかの波を抑制する物質(油膜など)あるいは水流などが存在すると、その影響は風による水面波の励起よりも顕著に作用し、NRCS の低下、すなわちシグナチャとして現れるものと考えられる。風速が大きいと、風波励起が支配的になり、水面汚染起源のシグナチャは出現しにくくなると予想される。これは、2001 年および 2003 年の SAR 画像に、風場の乱流と関係すると推測される“雲状”シグナチャ以外見られなかったことと矛盾していない。

従来から SAR 画像により、油汚染域や水流が多く

検出されているが、その成因の識別は、形状や出現場所、風速場や河川水の想定される流れの向きとの関係など、経験的もしくは外部情報に依存するものであった (Elach., 1987)。今回取得された Pi-SAR 画像に現れたシグナチャのうちでは、“筋状”シグナチャ SG 2 は、明らかに岬雲空港北側の五右衛門川からの河川水によって流出したものと考えられる。

これまで、いくつかの研究機関で行われた海洋での薄い擬似油膜による実験結果 (Huhnerfuss *et al.*, 1983)によると、X-band に比べて L-band では明らかに  $\Delta NRCS$  が小さい。これは、薄い油膜(スリック)

による水面波抑圧効果が水面波波長に依存し、波長が短い水面波の方が抑圧度が大きいことを示唆している。ゆえに、今回解析したシグナチャのうち、SG 3およびSG 4はスリックによって引き起こされた可能性がある。 $\Delta NRCS$  のみの情報では、油膜の起源まで推定することは困難と考えられるが、従来から行われているように、形状、周辺状況などから推測することも可能かもしれない。厚い油膜、赤潮、アオコなどでは、粘性などによる顕著な水面波の減衰も考えられるが、それらの特性解析は今後の課題である。

次に、 $\Delta NRCS$  の方位角依存性について検討する。観測領域は同じであるが、方位角が異なっているので、送信波の向きと湖面上の風向に関係していると考えられる。レーダのレンジ方向と風向の相対的な角度を、次のように定義する。ただし、レンジ方向を $0^\circ$ とする。

- (i) up-wind ( $0^\circ \pm 45^\circ$ )
- (ii) down-wind ( $180^\circ \pm 45^\circ$ )
- (iii) cross-wind ( $90^\circ \pm 45^\circ$ ,  $270^\circ \pm 45^\circ$ )

図3(a)より、観測領域における風は、西へ向かって吹いていることを考慮すれば、宍道湖 NS フライトの場合の相対風向は up-wind に、また、宍道湖・中海 WE フライトの場合の相対風向は cross-wind に相当する。このことから、 $\Delta NRCS$  が up-wind では大きく、cross-wind では小さいことが分かる。同様の結果は、海洋上における油汚染観測実験でもみられている(古津ほか, 1987)。よって、 $\Delta NRCS$  は、観測現場の風向に大きく影響を受ける、すなわちシグナチャの検出感度を上げるためには、観測方位角の選定が重要であることを示している。

## 5. ま と め

2001年から2003年にかけて、Pi-SAR 実験を3回実施し、そのデータ解析を通して、NRCS 風速依存性およびシグナチャについての基本特性を明らかにした。

3回のPi-SAR 観測データを比較した結果、NRCS 風速依存性は、XおよびL-bandとも偏波に関係なく風速が大きくなるほど、NRCS 値が大きくなっている。これはL-bandに比べX-bandで顕著である。風速が大きくなるにつれて湖面上の波の立ち方も大きくなることから、XおよびL-bandのブラッグ散乱に寄与する波浪スペクトル強度の増加が原因と考えられた。また、X-bandにおける風速対NRCS 特性は、傾

きは異なっていたが海洋上の観測データと概ね一致していた。これは、汽水域のような閉鎖水域においても、波長数 cm の水面波における波浪スペクトルとその風速依存性は、海洋と類似の特性を持っていることを示唆している。

低風速下にみられた“筋状”および“島状”シグナチャに着目し、それらをコンター図に表わし、異なる方位角(2方向)で $\Delta NRCS$  の周波数・偏波特性について検討した。その結果、宍道湖 NS フライトのSG 3およびSG 4では、X-bandの $\Delta NRCS$  が大きく、SG 1およびSG 2ではあまり周波数特性がみられないことが分かった。過去の油実験結果を参考にするSG 3およびSG 4では何らかのスリックが存在した可能性がある。

また、宍道湖 NS フライトと宍道湖・中海 WE フライトの $\Delta NRCS$  を比較した結果、宍道湖 NS フライトの方が大きかった。この結果を観測日の風向と比較した結果、 $\Delta NRCS$  は送信波の送信方向と風向との相対角度が関係していることが分かった。具体的には、 $\Delta NRCS$  は up-wind で大きくなり、cross-wind で小さくなっている。

二次元波浪スペクトル強度は方位角特性を持っており、風向に平行な向きでは強くなり、直交方向では弱くなることが知られているが、上記の結果は、清浄領域とシグナチャ領域において波浪スペクトルの方位角依存性が異なることを示唆している。

## 謝 辞

Pi-SAR 観測データは、独立行政法人情報通信研究機構(NICT)および宇宙航空研究開発機構(JAXA)から提供された。また、気象・水質データについては、国土交通省中国地方整備局出雲河川事務所ならびに気象庁から提供された。広島大学大学院工学研究科陸田秀実助教授には、水面と大気相互作用についてご教示頂いた。観測実験実施にあたり、(株)松江土建環境部から多大なご支援を頂いた。また、広島大学工学部、島根大学総合理工学部学生各位の協力を得た。

## 参 考 文 献

- Elachi, C.(1987) Introduction to the Physics and Techniques of Remote Sensing, John Wiley & Sons, 413 p.
- 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, コロナ社, 東京, 275 p.
- 長谷部望 (1995) 電波工学, コロナ社, 東京, 196 p.
- Huhnerfuss, H., Alpers, W., Cross, A., Garrett, W. D., Keller, W. C., Lange, P. A., Plant, W. J., Schlude, F., Schuler, D. L. (1983) The Modification of X and L band Radar Signals by Monomolecular Sea Slicks, *Journal of Geophysical Research*, 88 (C 14): 9817-9822.
- Ichikawa, K., Kozu, T., Shimomai, T., Sakuno, Y., Matsunaga, T., Takayasu, K. (2002) Feasibility of spaceborne SAR monitoring of coastal lagoon environments, 23rd International Symp. on Space Technology and Science, Matsue, May 26-June 2.
- 市川啓祐, 古津年章, 下舞豊志, 高安克巳, 作野裕司, 松永恒雄 (2002) 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, *LAGUNA 汽水域研究 No.9*: 63-75.
- 国土交通省中国地方整備局 (2003) 中海・宍道湖, パンフレット, 出雲河川事務所, 6 p.
- 古津年章, 池内伸行, 市川啓祐, 下舞豊志, 作野裕司, 中山大介, 高安克巳 (2003) 高分解能航空機搭載合成開口レーダによる汽水域観測: 初期解析結果, *LAGUNA 汽水域研究 No.10*: 73-86.
- 古津年章, 梅原俊彦, 尾嶋武之, 増子治信, 水津武, 猪股英行, 井口俊夫 (1987) 航空機搭載映像レーダによる油汚染広域監視技術の研究, 昭和61年度環境汚染物質に係る計測技術の高度化に関する総合研究報告書, 環境庁企画調整局研究調整課.
- 増子治信 (1989) 油膜/スリックによる海洋表面波の減衰とそのマイクロ波散乱特性, *通信総合研究所季報*, 35: 249-283.
- Masuko, H., Okamoto, K., Shimada, M., Niwa, S. (1986) Measurements of microwave back-scattering signatures of the ocean surface using X-band and Ka-band airborne scatterometers, *Journal of Geophysical Research*, 91 (C 11): 13065-13083.
- NICT (2004) <http://www2.nict.go.jp/dk/c215/index.html>
- 岡本謙一 (編) (1999) 地球環境計測, オーム社, 東京, 324 p.
- Shimada, T., Kawamura, H., Shimada, M. (2003) An L-band geophysical model function for SAR wind retrieval using JERS-1 SAR, *IEEE trans. Geoscience and Remote Sensing*, IEEE, 41 (3): 518-531.
- 高安克巳 (編) (2001) 汽水域の科学, たたら書房, 鳥取, 183 p.
- 鳥羽良明 (1996) 大気・海洋の相互作用, 東京大学出版会, 東京, 329 p.
- Ulaby, F. T., Moore, R. K., Fung, A. K. (1982) *Microwave Remote Sensing, Active and Passive*, vol II, Artech House, 1064 p.
- 梅原俊彦 (2002) 航空機搭載3次元高分解能映像レーダ (Pi-SAR) システムの開発, *通信総合研究所季報*, 48: 97-112.

付録1. Pi-SAR 映像データ\_X-band (2003) (CRL 提供 “info ファイル” 抜粋. L-band では, IMAGE\_SIZE が 2400 となる以外はほぼ同じ)

2003 年 08 月 23 日 宍道湖 NS および宍道湖・中海 WE (宍道湖側)

SHI7207W		SSI7205W	
SCENE_START_TIME	= 2003/08/23/03:18:06	SCENE_START_TIME	= 2003/08/23/02:48:24
SCENE_END_TIME	= 2003/08/23/03:18:39	SCENE_END_TIME	= 2003/08/23/02:48:57
LATE_NEAR_LAT	= +035:24:09.038	LATE_NEAR_LAT	= +035:24:41.136
LATE_NEAR_LONG	= +132:53:00.470	LATE_NEAR_LONG	= +132:56:57.656
LATE_FAR_LAT	= +035:24:38.499	LATE_FAR_LAT	= +035:27:52.822
LATE_FAR_LONG	= +132:56:55.526	LATE_FAR_LONG	= +132:56:16.238
EARLY_NEAR_LAT	= +035:27:21.501	EARLY_NEAR_LAT	= +035:24:07.178
EARLY_NEAR_LONG	= +132:52:24.474	EARLY_NEAR_LONG	= +132:53:03.762
EARLY_FAR_LAT	= +035:27:50.962	EARLY_FAR_LAT	= +035:27:18.864
EARLY_FAR_LONG	= +132:56:19.530	EARLY_FAR_LONG	= +132:52:22.344
GROUND_RG_NEAR	= 9.77E+03	GROUND_RG_NEAR	= 1.12E+04
GROUND_RG_CENTER	= 1.28E+04	GROUND_RG_CENTER	= 1.42E+04
GROUND_RG_FAR	= 1.58E+04	GROUND_RG_FAR	= 1.72E+04
INC_ANGLE_NEAR	= 3.73E+01	INC_ANGLE_NEAR	= 4.11E+01
INC_ANGLE_CENTER	= 4.49E+01	INC_ANGLE_CENTER	= 4.79E+01
INC_ANGLE_FAR	= 5.09E+01	INC_ANGLE_FAR	= 5.33E+01
SCENE_SIZE_AZ	= 6.00E+03	SCENE_SIZE_AZ	= 6.00E+03
SCENE_SIZE_GR	= 6.00E+03	SCENE_SIZE_GR	= 6.00E+03
IMAGE_SIZE_AZ	= 4800	IMAGE_SIZE_AZ	= 4800
IMAGE_SIZE_GR	= 4800	IMAGE_SIZE_GR	= 4800

2003 年 08 月 23 日 宍道湖・中海 WE (中海側) および中海 SN

SNA7205E		SSI7206E	
SCENE_START_TIME	= 2003/08/23/02:50:34	SCENE_START_TIME	= 2003/08/23/03:05:22
SCENE_END_TIME	= 2003/08/23/02:51:07	SCENE_END_TIME	= 2003/08/23/03:05:50
LATE_NEAR_LAT	= +035:26:35.903	LATE_NEAR_LAT	= +035:29:28.232
LATE_NEAR_LONG	= +133:15:07.530	LATE_NEAR_LONG	= +133:14:11.695
LATE_FAR_LAT	= +035:29:47.657	LATE_FAR_LAT	= +035:29:01.843
LATE_FAR_LONG	= +133:14:26.575	LATE_FAR_LONG	= +133:10:56.033
EARLY_NEAR_LAT	= +035:26:02.343	EARLY_NEAR_LAT	= +035:26:48.157
EARLY_NEAR_LONG	= +133:11:13.425	EARLY_NEAR_LONG	= +133:14:43.967
EARLY_FAR_LAT	= +035:29:14.097	EARLY_FAR_LAT	= +035:26:21.768
EARLY_FAR_LONG	= +133:10:32.470	EARLY_FAR_LONG	= +133:11:28.305
GROUND_RG_NEAR	= 9.89E+03	GROUND_RG_NEAR	= 1.01E+04
GROUND_RG_CENTER	= 1.29E+04	GROUND_RG_CENTER	= 1.26E+04
GROUND_RG_FAR	= 1.59E+04	GROUND_RG_FAR	= 1.51E+04
INC_ANGLE_NEAR	= 3.76E+01	INC_ANGLE_NEAR	= 3.80E+01
INC_ANGLE_CENTER	= 4.52E+01	INC_ANGLE_CENTER	= 4.43E+01
INC_ANGLE_FAR	= 5.11E+01	INC_ANGLE_FAR	= 4.95E+01
SCENE_SIZE_AZ	= 6.00E+03	SCENE_SIZE_AZ	= 5.00E+03
SCENE_SIZE_GR	= 6.00E+03	SCENE_SIZE_GR	= 5.00E+03
IMAGE_SIZE_AZ	= 4800	IMAGE_SIZE_AZ	= 4000
IMAGE_SIZE_GR	= 4800	IMAGE_SIZE_GR	= 4000

## 付録2. 風観測データ

## (a) 宍道湖・中海の風観測データ (2003)

2003年08月23日

## (i) 宍道湖

観測時間 (JST)	観測地点	北緯(真北)			東経(真北)			気温	風向	風速
		°	'	"	°	'	"	°C	deg	m/s
9:08	OH 1	35	27	12.3	133	06	10.6	31	241	5.3
10:15	S2-3	35	26	59.8	132	59	46.9	29	196	10.3

## (ii) 中海

観測時間 (JST)	観測地点	北緯(真北)			東経(真北)			気温	風向	風速
		°	'	"	°	'	"	°C	deg	m/s
9:53	HJ 2	35	30	30.9	133	10	31.2	31	249	6.0
10:20	HJ 1	35	30	20.7	133	09	01.9	30	244	9.0
10:55	NU 4	35	28	20.0	133	09	12.2	32	226	10.0
11:15	NU 3	35	27	30.8	133	09	08.2	30	246	10.5
11:47	NU 5	35	27	47.2	133	11	31.4	31	276	9.5
12:35	NU 1	35	29	56.0	133	12	02.2	31	264	5.0
12:11	NU 2	35	29	21.9	133	12	25.8	31	244	8.0

## (b) 定常観測点の風観測データ (2003)

	(a) 美保空港出張所				(b) 出雲空港出張所			
時刻 [hour:min]	10:00	11:00	12:00	13:00	10:00	11:00	12:00	13:00
風向 [deg]	250	270	270	270	250	260	250	260
風速 [m/s]	8	8.5	9.5	10	8	8	10.5	9.5
温度 [°C]	32	32	33	33	30	30.6	30.5	30.9
湿度 [%]	24	23	23	22	63	62	61	66
気圧 [hPa]	1012	1012	1011	1011	1012.5	1012.4	1011.9	1011.6
	(c) 中海湖心				(d) 宍道湖湖心			
時刻 [hour:min]	10:00	11:00	12:00	13:00	10:00	11:00	12:00	13:00
風向 [deg]	248	270	270	270	270	270	248	270
風速 [m/s]	8.1	9.5	10.1	11.8	10.8	11.2	12.8	13.1

(c) 湖岸の風観測データ (2003年8月23日)

※ 時刻は JST, 風向は真北.

時刻	(a) 森山堤防		(b) 大根島北		(c) 大根島南		(d) 彦名		(e) 飯梨川河口	
	風向	風速	風向	風速	風向	風速	風向	風速	風向	風速
11:40	WNW	7.6	W	3.6	W	8.6	W	7.9	W	5.7
11:42	W	9.1	WNW	4.5	W	8.2	WNW	8.5	WNW	5.5
11:44	W	7.7	W	3.3	W	8.5	WNW	7.8	WNW	5.8
11:46	W	8.3	W	4.5	W	6.9	WNW	8.7	WNW	5.8
11:48	W	7.9	WSW	3.5	WNW	7.8	WNW	8.5	W	5.6
11:50	WNW	7.3	WSW	3.4	WNW	7.5	WNW	8.5	WNW	6.5
11:52	W	8.4	WNW	5.3	WNW	6.7	WNW	8.4	W	6.1
11:54	W	6.7	WSW	4.5	WNW	5.5	W	8.6	WNW	6.1
11:56	W	6.9	WNW	4.8	W	5.8	WNW	8.0	WNW	6.4
11:58	W	7.5	WSW	4.7	WNW	7.5	WNW	8.6	WNW	5.9
12:00	WNW	7.6	WNW	4.0	WNW	7.1	W	7.5	WNW	5.7
12:02	WNW	7.2	WNW	4.7	W	6.7	W	7.9	W	4.8
12:04	W	7.1	WSW	5.7	W	6.6	WNW	8.9	WNW	5.7
12:06	WNW	6.5	WNW	4.2	W	5.0	WNW	8.0	WNW	6.7
12:08	WNW	7.0	NW	4.0	WNW	6.5	WNW	8.0	WNW	5.5
12:10	W	7.7	WNW	5.4	WNW	5.8	WNW	8.1	WNW	6.0
12:12	W	6.4	WNW	3.5	W	6.4	WNW	8.8	WNW	6.2
12:14	W	5.8	WSW	4.7	WNW	6.5	WNW	8.6	W	5.9
12:16	WNW	5.7	W	5.1	W	7.9	WNW	9.0	WNW	5.9
12:18	W	5.6	WNW	5.8	W	6.0	NW	7.8	WNW	6.4
12:20	NW	5.3	WSW	4.4	WNW	6.8	NW	8.0	WNW	6.5
12:22	WNW	6.2	W	4.7	NW	7.1	NW	8.2	WNW	5.0
12:24	WNW	6.4	W	5.7	W	7.2	WNW	7.6	WNW	6.0
12:26	W	6.8	WSW	4.5	WNW	7.2	WNW	-	WNW	6.0
12:28	W	6.4			WNW	6.1	WNW	9.2	WNW	6.4
12:30	W	5.0			WNW	6.5	WNW	9.3	WNW	6.3
時刻	(f) 下意東		(g) 秋鹿		(h) 来待		(i) NHK 松江放送所		(j) 湖遊館	
時刻	風向	風速	風向	風速	風向	風速	風向	風速	風向	風速
11:40	NNE	4.2	WSW	7.8	NW	4.5	WNW	10.0	WSW	7.0
11:42	NE	4.2	SW	7.3	NW	4.1	WNW	9.5	SW	5.4
11:44	NE	3.8	WSW	7.5	WNW	4.0	W	9.5	W	6.2
11:46	NE	4.4	SW	6.6	WNW	3.9	W	9.6	W	9.0
11:48	NNE	-	WSW	7.4	NW	4.6	W	10.0	W	7.5
11:50	N	5.6	WSW	7.6	NW	3.9	WSW	10.2	WSW	7.3
11:52	N	4.5	WSW	7.8	NW	4.0	W	9.0	WSW	8.2
11:54	N	5.0	SW	8.0	NW	3.8	W	7.7	WNW	7.8
11:56	NNE	4.5	WSW	8.3	WNW	3.9	W	8.9	W	9.0
11:58	N	6.0	SW	7.2	NNW	3.8	W	9.5	WSW	7.2
12:00	NNE	5.5	SW	7.3	NW	3.3	W	9.8	W	9.1
12:02	N	2.3	WSW	7.4	WNW	3.9	WNW	9.0	W	6.7
12:04	NE	3.6	WSW	7.3	WNW	4.2	W	8.4	W	6.3
12:06	NE	4.3	WSW	7.8	NW	3.0	W	8.8	WSW	8.0
12:08	N	4.1	WSW	7.2	NW	4.0	W	9.0	WSW	5.8
12:10	N	4.5	WSW	8.3	NW	3.6	W	10.3	W	7.4
12:12	NNE	4.4	SW	7.8	WNW	4.0	W	10.1	W	7.2
12:14	NNE	4.9	SW	7.9	-	2.9	WSW	10.0	WSW	5.7
12:16	NNW	3.5	WSW	8.0	NW	3.6	W	9.0	WSW	6.6
12:18	NNE	4.7	SW	7.8	NW	3.6	W	9.4	WSW	6.7
12:20	N	3.5	SW	7.4	NW	3.7	W	9.4	W	7.0
12:22	NNE	4.0	SW	8.1	NW	4.0	W	9.2	WSW	6.9
12:24	N	4.3	WSW	7.4	W	3.8	W	9.4	W	8.2
12:26	N	5.0	WSW	7.9	WSW	3.3	WNW	9.0	WSW	6.0
12:28			WSW	8.8	SSW	4.5	WNW	8.3	W	8.3
12:30			WSW	8.6	NW	3.3	W	9.0	W	7.3

(※ 風速の単位は m/s)