

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

古津年章¹・池内伸行¹・市川啓祐¹・下舞豊志¹
作野裕司²・中山大介³・高安克巳³

High-resolution airborne SAR observation of a coastal lagoon environment: preliminary results

Toshiaki Kozu¹, Nobuyuki Ikeuchi¹, Keisuke Ichikawa¹, Toyoshi Shimomai¹,
Yuji Sakuno², Daisuke Nakayama³ and Katsumi Takayasu³

Abstract: High-resolution airborne SAR observations were conducted over Lakes Shinji and Nakaumi area in 2001 and 2002 using the CRL/NASDA's "pi-SAR" that has the capability for a simultaneous dualfrequency (L-band and X-band) and multi-polarization observation. Coupled with the pi-SAR survey, extensive *in situ* field measurement were also made in order to detailed analyses of pi-SAR images and back-scattering coefficients (σ^0). The preliminary analyse revealed that the SAR images L- and X-bands have somewhat different signatures suggesting that the X-band backscatter rapidly responds to fine structure of atmospheric turbulence as well as "average" wind field. Flow-like dark signatures are also found, suggesting the capabilities of SAR in detecting the surface slick and water flow patterns. Incidence angle, frequency and polarization dependences of σ^0 obtained from the pi-SAR are also studied. The results indicate the potential of the SAR for high-resolution wind field mapping as well as the necessity of more detailed studies of wind-water surface interactions and surface wave spectra in coastal lagoon areas where water bodies are small and surrounded by land.

Key words: airborne sensor, Synthetic Aperture Radar (SAR), coastal lagoon, normalized radar cross-section

1. ま え が き

汽水域環境の広域かつ迅速な把握において、リモートセンシングの重要性が認識されつつある。これまで衛星搭載可視～熱赤外分光放射計により、クロロフィル a, 濁度, 水温などの 2 次元マッピングの可能性が示されている (作野, 2000; 作野ほか, 2002; 山本ほか, 2002)。しかし光学センサは、天候

に左右され、また可視・近赤外域のリモートセンシングは太陽光の散乱を利用するため、観測時間帯が日中に限定されるという問題がある。特に季節に依っては、曇天のためほとんど観測ができない状況も生じ得る。そのため、近年マイクロ波センサ、特に汽水域のような狭い水域において、現在のところ使用可能な高い空間分解能を持つ唯一の衛星搭載マイクロ波センサである合成開口レーダ (SAR) を用い

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

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

³ 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

表 1. pi-SAR の主要諸元 (CRL, 2002 a).

Table 1. Major engineering parameters of pi-SAR (CRL, 2002 a).

項目	Xバンド SAR	Lバンド SAR
周波数	9.55 GHz	1.27 GHz
レンジ方向分解能	1.5 m/3 m	3 m/5 m /10 m/20 m (Variable)
アジマス方向分解能	1.5 m (4-look Processing)	3 m (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 位相精度	HH/HV/VV/VH 5 deg.以下	HH/HV/VV/VH 5 deg. 以下
入射角	10-75 deg.	20-60 deg.
NRCS 測定精度	0.5 dB 以下	0.5dB 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.

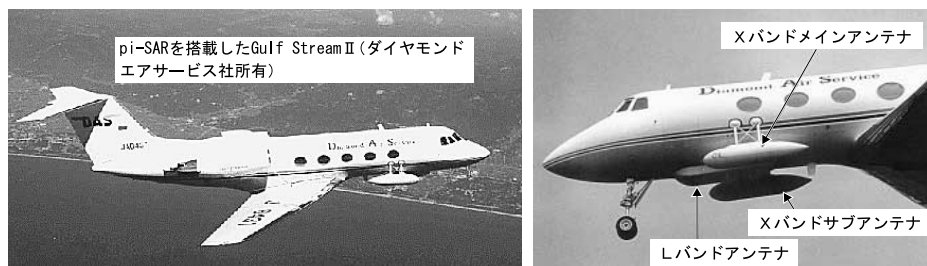


図 1. pi-SAR の外観 (左は pi-SAR を搭載した航空機, 右はアンテナ部の拡大写真).

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

たりリモートセンシングの使用可能性が研究されてきた。その結果、高分解能の風速分布推定の可能性が示唆されている (Ichikawa et al., 2002 ; 市川, 2003)。

従来の宍道湖・中海リモートセンシングの研究は, Matsunaga et al. (1999) による航空機搭載多波長分光計観測を除いて, 全て衛星搭載センサを用いたものであった。航空機観測は, 研究段階ではコスト面で実施が困難な面はあるが, 衛星センサに比べて多波長・高空間分解能など高性能の観測が可能のため, リモートセンシング技術開発の上で貴重な情報を提供し得る。また実用段階では, 衛星観測と比較して観測日時や場所の柔軟性・機動性, および研究段階と同様センサ自体の高性能化による高精度観測などの利点を有する。

このような観点から, 我々は 2001 年および 2002 年の計 2 回, 独立行政法人通信総合研究所 (CRL) および宇宙開発事業団 (NASDA) の協力を得て, これらの機関が所有する多偏波・干渉計型合成開口レーダ (pi-SAR) による汽水域観測を実施した (市川

他, 2002; Kozu et al., 2002)。pi-SAR の外観と主要諸元をそれぞれ図 1 および表 1 (CRL, 2002 a) に示す。pi-SAR は, 2 周波 (L バンド; 1.27 GHz, X バンド; 9.55 GHz) かつ垂直偏波 (V) および水平偏波 (H) の送信が交互に, また垂直・水平偏波の受信は同時に行える多偏波 SAR であり, 更に X バンドでは 2 台のアンテナを搭載することによる干渉計機能を有する。多偏波観測機能を具体的に示すと, H 送信・H 受信 (HH) および H 送信・V 受信 (HV) の組と V 送信・V 受信 (VV) および V 送信・H 受信 (VH) の組がそれぞれ同時に, HH/HV の組と VV/VH の組が交互に観測できることになる。また空間分解能は, 衛星搭載 SAR (10~20 m) に比べて極めて高く (X バンド; 1.5 m, L バンド; 3 m), 汽水域のような狭い水域では, 水面の微細構造を詳細に把握するのに有利である。

一方 pi-SAR は, 衛星搭載 SAR や, 風向・風速 (まとめて風ベクトルと呼ぶ) 測定用マイクロ波散乱計 (古濱他, 1986) の空間分解能 (数十 km) に比べて極

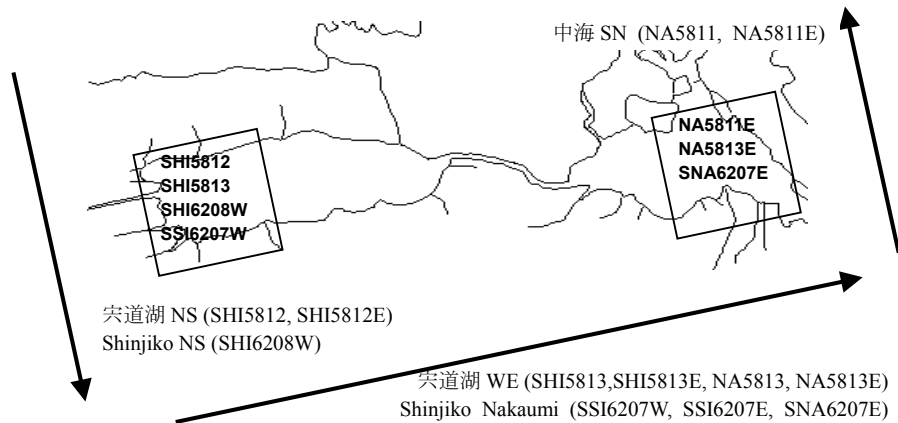


図2. 実験時のフライトコース(矢印)と解析に使用した映像領域の概略。フライトコースは実験1と実験2でほぼ同じ(ただし、実験2では中海SNは実施せず)。

Fig. 2. Outline of pi-SAR flight course (arrow) and imaged areas used in the present analysis. Note that the Nakaumi SN flight was conducted only in Experiment 1 (Nov. 10, 2001).

めて狭い水域からの散乱波を受信するため、主に水面の「粗さ」によって決定される散乱係数の時空間変動特性が従来の広い水面からの後方散乱を受信するセンサと異なる可能性も否定できない。

一般に、SARのような斜め入射における後方散乱係数(Normalized Radar Cross-Section; NRCS)は、水面直上での乱流によると水との摩擦によって生じる風波によるブラッグ散乱によって決まると考えられる(古濱他, 1986)。水面直上に風の空間的乱れ(乱流)があると、空間的にランダムな圧力変動やせん断応力が水面高の微小な乱れを発生させる。水面高の乱れに対して風の水平成分が更に水面の乱れを促進させる役割を果たすことによって風波が発達する。直接励起される水面波は大気の流れのスケールに対応した波長を持つものであるが、風と波の相互作用の非線形性によって、他の水面波成分も次第に発達してくると考えられる(鳥羽, 1996)。上述のメカニズムから、(i)風波の発生・発達には、水の密度、摩擦力、粘性などの物理的特性が関係すること、(ii)風波エネルギーの2次元スペクトルは、風向との相対角に依存すること、(iii)水面流や油などによる水面汚染は風と水面の相互作用、すなわち風波の発生・発達度を変化させる要因となること、などの性質が理論的に、あるいは実験的に明らかにされている(増子, 1989; 鳥羽, 1996; 古津他, 1996)。航空機搭載SARが高空間分解能であることは、風波、水流、水面汚染などの2次元構造を詳細に観測できる可能性を持つことを意味している。

本論文では、上に述べたpi-SAR観測実験の概要

をまとめるとともに、本センサで得られたSAR映像やNRCSの周波数、偏波、入射角特性などを示し、これまでの海洋における観測結果や波浪スペクトルモデルなどと比較する。これらをもとに、高分解能SARによる汽水域観測の特徴や今後の研究課題について議論する。

2. 観測実験概要

2.1 pi-SAR 飛行および観測諸元

観測実験は、2001年11月10日(実験1)および2002年9月12日(実験2)の2回行われた。表2に、観測実験の概要をまとめて示す。また図2に、pi-SARの飛行コース概略と本論文で使用する映像(シーン)領域を示す。付録1には、今回の解析に使用したシーンの詳細をまとめる。飛行コース決定の基本的考え方は、映像およびNRCSの方位角特性を取得するために、同一領域を90度異なる方位角で2回観測することであるが、実験2では飛行時間の関係で中海の観測は1方向のみで行われた。また実験1ではpi-SARのアンテナビーム中心オフナディア角は入射角48度、実験2では52度となるように設定された。なお入射角とは、映像の各点における鉛直方向と電波入射方向のなす角と定義され、航空機観測の場合、SAR送信波のオフナディア角(航空機における鉛直方向と電波の発射方向のなす角)にほぼ等しい。アンテナビーム中心オフナディア角を除くと、実験1および実験2におけるSAR観測諸元は同一である。SARデータとして取得された領域のう

表 2. pi-SAR 同期観測実験概要.

Table 2. Outline of pi-SAR and simultaneous *in situ* observations.

2001 年 11 月 10 日 (実験 1)

パス諸元 SAR パス名	データ取得 時刻(JST)	データ取得航空機位置 Lon/Lat (deg:min)	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
中海 SN	14:06 - 14:10	133:25.37 / 35:08.30 - 133:17.78 / 35:43.39	-11.4 deg	48 deg	12.16 km
宍道湖 NS	14:18 - 14:22	132:42.72 / 35:43.095 - 132:50.31 / 35:08.00	169.4 deg	48 deg	12.19 km
宍道湖 WE	14:34 - 14:40	132:32.39 / 35:15.17 - 133:32.61 / 35:23.83	77.7 deg	48 deg	12.20 km
現場観測項目	小型船舶 2 隻を使って、宍道湖・中海の水質（濁度、SS、クロロフィル a、透明度等）及び気象観測を行う。また湖岸で風ベクトルの測定を行う。				

2002 年 9 月 12 日 (実験 2)

パス諸元 SAR パス名	データ取得 時刻(JST)	データ取得航空機位置 Lon/Lat (deg:min)	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
Shinjiko_ Nakaumi	12:46 - 12:52	132:32.39 / 35:15.17 - 133:32.61 / 35:23.83	79.6 deg	52 deg	12.71 km
Shinjiko_NS	13:06 - 13:09	132:42.72 / 35:43.095 - 132:49.56 / 35:11.51	169.8 deg	52 deg	12.78 km
現場観測項目	小型船舶 2 隻を使って、宍道湖・中海の水質（濁度、SS、クロロフィル a、透明度等）及び気象観測を行う。また湖岸で風ベクトルの測定を行う。				

ち、図 2 に示す 6 km×6 km のシーンを用いて、SAR 映像および NRCS (σ^0) の諸特性を解析した。デジタル値 (DN) から NRCS (σ_{dB}^0 ; σ^0 の dB 単位表現) への換算には次式を用いた。

$$\text{X-band HH: } \sigma_{dB}^0 = 20 * \log 10 DN - 4.3 \quad (1 a)$$

$$\text{X-band VV: } \sigma_{dB}^0 = 20 * \log 10 DN - 4.5 \quad (1 b)$$

$$\text{L-band HH: } \sigma_{dB}^0 = 20 * \log 10 DN + 4.7 \quad (2 a)$$

$$\text{L-band VV: } \sigma_{dB}^0 = 20 * \log 10 DN + 5.2 \quad (2 b)$$

上記は CRL で用いられている SAR 処理システム (NEC-SAR) による DN に対する校正式である (CRL, 2002 b)。なお参考のため NASDA で開発されたデータ処理システム (sigma-SAR) による DN から島田 (2002) による換算式

$$\text{L-band: } \sigma_{dB}^0 = 20 * \log 10 DN - 71 \quad (3)$$

で導出した σ^0 との比較を行ったが、NEC-SAR/CRL

校正式を使用した方が σ^0 が 2~3 dB 大きかった¹。本論文では、議論の一貫性を保つため「NEC-SAR/CRL 校正式」による σ_{dB}^0 を使用する。

2.2 現場観測

観測日には、2 隻の小型船舶を用い、水質および気象データを 18 地点 (実験 1) あるいは 8 地点 (2002 年) で取得した。また湖岸では風速計を用いて湖岸における風ベクトルを 9 地点 (実験 1)、7 地点 (実験 2) で測定した。更に、定常観測データとして、気象庁の出雲空港および美保空港出張所、国土交通省の宍道湖および中海湖心の観測タワーの測定値を使用した。これらのデータを付録 2 にまとめる。これらのデータより作成した現場風ベクトルマップを図 3 に示す。実験 1 においては、宍道湖、中海とも概ね北東の風 5~7 m/s、また実験 2 においては、概ね宍

¹ NEC-SAR からの DN と sigma-SAR からの DN は異なることに注意されたい。

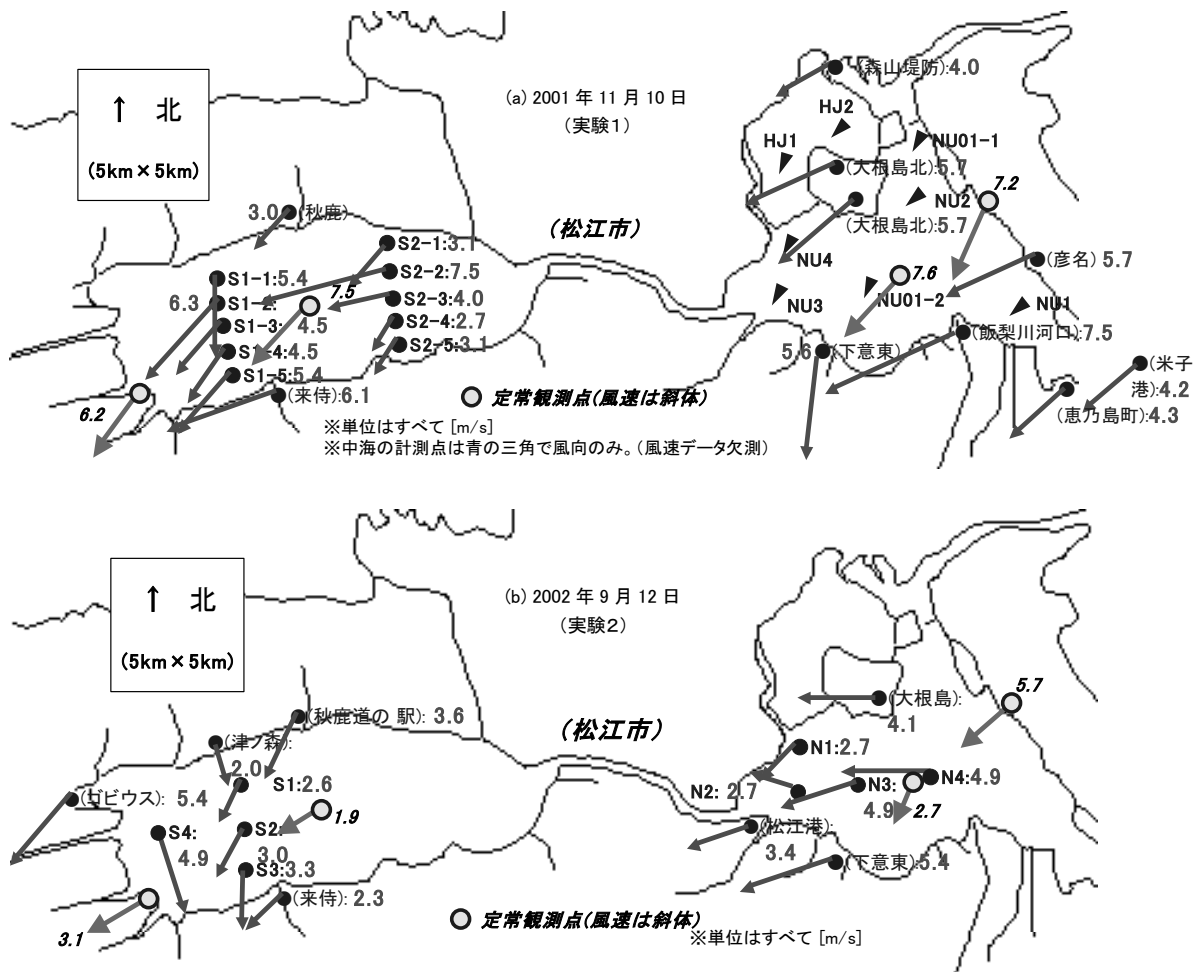


図3. 同期観測実験における現場データ取得地点と測定された風ベクトル概略.

Fig. 3. Location of *in situ* observation points and outline of wind vectors observed.

道湖では北北東の風、中海は東北東の風ともに約3~5 m/sであった。

3. SAR 映像の特徴

実験1および実験2における宍道湖西部(SHI 5812およびSHI 6208 W)の映像をそれぞれ図4(a), (b)に示す。これらの図から、Lバンド映像は湖面全体が一樣で、特徴的な“シグナチャ”²はほとんどみられないのに対し、Xバンド映像には湖面を雲が覆ったようなシグナチャがみられることがわかる。更に実験2では、Lバンド、Xバンドともに多くの“筋状シグナチャ”が存在していることが分かる。そのうちの2本は出雲空港滑走路を挟む五右衛門川と新建

川からの何らかの風波発達を抑える物質の流出とも考えられる。Xバンドの映像には実験1と同様“雲状シグナチャ”も表れている。

これらのシグナチャの原因は特定できていないが、湖面直上の乱流構造や湖面の汚染分布などを反映している可能性がある。

4. 後方散乱係数 (NRCS) の諸特性

4.1 NRCS の一般的特性

斜め入射時(入射角 θ)の水面からのマイクロ波(波長 λ)のNRCS(σ^0)は、ブラッグ散乱条件:

$$\Lambda = \lambda / (2 \sin \theta) \quad (4)$$

を満たす波長(Λ)の水面波の強度によって決定さ

² 本論文では“シグナチャ”とは、風に応答する短波長水面波によるとみられる比較的一様な映像濃淡とは異なる特異な濃淡パターンと定義する(市川, 2003)。

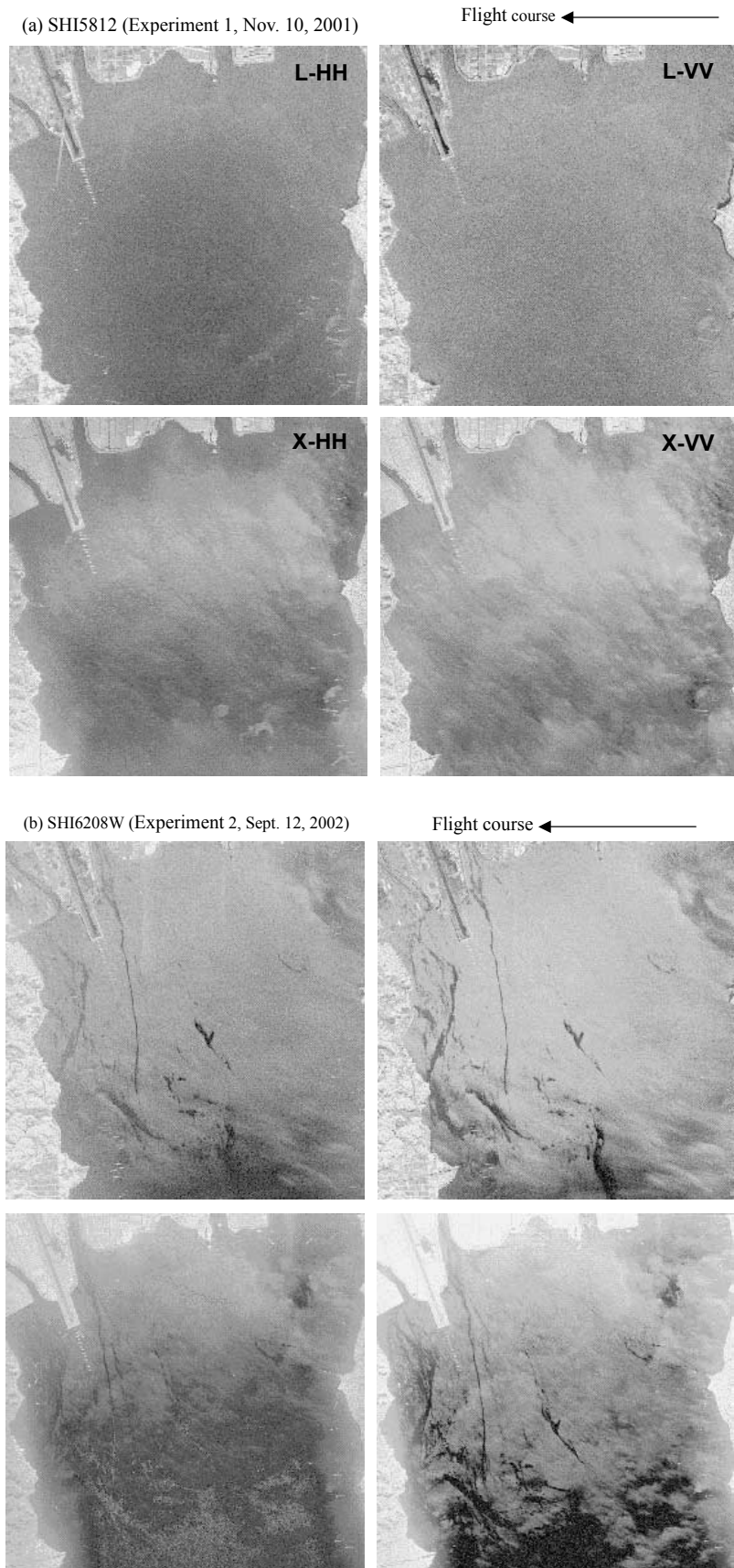


図4. 取得された pi-SAR 映像例。(a)実験1, (b)実験2, 共に宍道湖西部。(映像輝度は NRCS の対数に比例。輝度値は任意。)

Fig. 4. Examples of pi-SAR images, Western part of Lake Shinji obtained in Experiment 1 (a) and Experiment 2 (b). (Note: Image brightness is proportional to the logarithm of NRCS, but the absolute brightness is arbitrary.)

れる (Ulaby et al., 1982). これは λ に比べて十分小さい波高と, λ と同程度のスケールの水平方向乱れ構造を持つ水面における電磁界の境界値問題を, 摂動法によって近似的に解き, 後方散乱電磁界を求めた結果である. その結果, 電磁波の波数を $k(=2\pi/\lambda)$, 水面波高の分散を s^2 として

$$\sigma^0(\theta, \phi) = 8k^4 \cos^4\theta |\alpha_{pp}|^2 s^2 W(K, \phi) \quad (5)$$

で表せる (Ulaby et al., 1982). ここで, K は水面波の波数 ($=2\pi/\Lambda$), ϕ は風向からの相対方位角 (向かい風方向への電波入射時に $\phi=0$), $W(K, \phi)$ は水面波の規格化 2 次元波浪スペクトルである. また α_{pp} (pp は偏波を表す指標) は, 水の複素比誘電率 $\epsilon_r(=\epsilon'_r - j\epsilon''_r)$ により次式で表せる.

$$\alpha_{HH} = \frac{\cos\theta - \sqrt{\epsilon_r - \sin^2\theta}}{\cos\theta + \sqrt{\epsilon_r - \sin^2\theta}} \quad (6a)$$

$$\alpha_{VV} = (\epsilon_r - 1) \frac{\sin^2\theta - \epsilon_r(1 + \sin^2\theta)}{(\epsilon_r \cos\theta + \sqrt{\epsilon_r - \sin^2\theta})^2} \quad (6b)$$

なお, 式 5 にある波浪スペクトル強度 $s^2 W(K, \phi)$ は, 式 4 の Bragg 散乱条件を満たす Λ に対応するものである. 式 5 および式 6 から以下のことがわかる.

(i) σ^0 は波浪スペクトル強度に比例する. これが風速および方位角依存性を持てば, それを利用して σ^0 から風ベクトル推定が可能となる.

(ii) σ^0 の入射角特性は, $\cos^4\theta$, $|\alpha_{pp}|$ および Bragg 条件の θ 依存性によって決まる. 主に $\cos^4\theta$ の効果により, σ^0 は入射角とともに減少する.

(iii) σ^0 の偏波依存性は $|\alpha_{HH}|$ と $|\alpha_{VV}|$ の違いによって決まる. 一般に VV 偏波の σ^0 が大きく, その差は入射角と共に増加する. Xバンドでは入射角 45 度で 5 dB 以上の差になる.

(iv) σ^0 の周波数依存性は, k (レーダ周波数の 4 乗に比例して増加) と Bragg 散乱に寄与する波浪スペクトル強度 (通常レーダ周波数の増加とともに減少) の積によってほぼ決まる. これらに比べて, 誘電率に関係する項 $|\alpha_{pp}|$ の周波数依存性は小さい.

Bragg 散乱に寄与する短波長の海洋波浪スペクトルについては, マイクロ波レーダによる海洋観測の研究が盛んになってから精力的に研究が行われ, これまでの散乱計観測などを元に, 海上風速・方位角をパラメータに取り込んだ実験式が提案されている (Fung and Lee, 1982). σ^0 の計算では, 長波長 (数 m 以上) の重力波にマイクロ波 Bragg 散乱に寄与する数 cm 程度の短波長波が重畳しているとする “2 スケール” モデルを用いて, 長波長重力波による局所的な入射角変化を考慮した数値計算が行われ, 概ね

観測値と矛盾しない結果が得られている (Fung and Lee, 1982; Ulaby et al., 1986).

汽水域のような閉鎖水域でも, 水上風によって励起される短波長波が存在することは確かであり, それにตอบสนองするマイクロ波レーダによる風速・風向推定は基本的には可能であると考えられる. しかし吹送距離が短く, 岸の影響が無視できないと考えられる閉鎖水域では, 波浪スペクトルが海洋と異なることは十分予想できる.

4.2 平均化によるフェージング雑音の軽減

ランダムに分布する物体からのレーダ受信信号強度は, 通常個々の散乱体からの電界の相互干渉のために大きな変動 (フェージング) を生じる (Ulaby et al., 1982). SAR 映像上ではいわゆる “ゴマ塩ノイズ” として現われる. これは σ^0 測定における主なランダム誤差要因となる. この誤差を軽減するためには統計的に独立とみなせるデータを平均する必要がある. 通常 SAR では空間的な平均 (マルチルック処理) が行われる. 表 1 に示した空間分解能は既に 4 個のデータを空間的に平均した後の値である. ここでは σ^0 を更に精度よく測定するため, アジマス方向 (航空機の進行方向に平行) に 10 ピクセル, レンジ方向 (航空機の進行方向に直交) に 10 ピクセルの平均を行っている. 表 1 の空間分解能を考慮すると約 300 個の独立サンプルを平均したことになる. Rayleigh フェージングを仮定すると, ランダム誤差の標準偏差は 0.3 dB 以下になると考えられる (岡本, 1999). 平均の結果, 空間分解能は X バンドで 13 m, L バンドで 26 m 程度になっている.

4.3 pi-SAR で観測された NRCS 特性

実験 1 および 2 で観測された宍道湖西部 (図 4) の pi-SAR 映像のうち, 映像の中心付近からレンジ方向 (東西) に沿った線上のデータを用いて求めた σ^0 の入射角特性を図 5 に示す. 但し図 5(a) の L バンド入射角特性と同図 (b) の X バンド入射角特性では, 南北方向に数 100 m ずれた位置のデータであり, 詳細な σ^0 増減に関して (a) と (b) の比較はできないことに注意されたい.

他の領域や中海についても調べた結果, 以下のことが明らかになった.

(i) 図 5 にも示されるように, σ^0 は大略入射角とともに減少する. しかし必ずしも一様に減少するのではなく, 入射角の増加に対して σ^0 が緩やかな (1~2 km の空間スケール) 増減がみられる場合もある. これは湖面上における風速場の変化を反映しているものと思われる. しかし湖岸に近いところで X バンドと

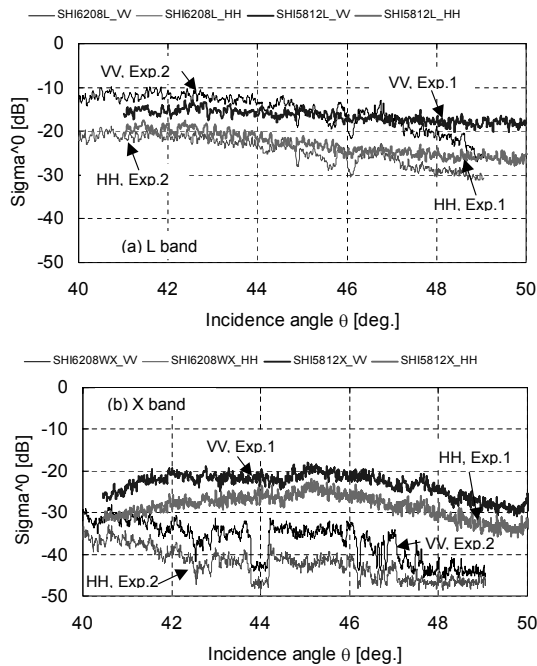


図 5. NRCS の入射角特性例。(宍道湖西側，実験 1 および 2 の比較)。

Fig. 5. Example of incidence angle dependence of NRCS. (Western part of Lake Shinji, the results from Experiments 1 and 2 are compared).

Lバンドの σ^0 入射角特性が大きく異なっている(特に実験1)のは、後方散乱に寄与する水面波の水上風への応答速度の違いに加えて、湖岸に近い領域と湖心では一定風速場でも波浪スペクトル自体が異なるという可能性もあり、今後更に検討が必要である。

(ii) 実験2におけるXバンドの σ^0 入射角特性(44度付近)には、図4(b)にみられる“筋状シグナチャ”によるステップ状の σ^0 低下が存在する。

(iii) VV偏波とHH偏波を比較すると、VV偏波の σ^0 が5~10 dB程度HH偏波より大きい。これは5.1に示した σ^0 の偏波依存性と矛盾しない結果である。湖上風速への応答など、目的の物理量検出感度に偏波依存性が少なければ、感度の点ではVV偏波を用いた方が有利と言える。

(iv) 海洋における波浪スペクトルと汽水域の波浪スペクトルを比較するため、Fung and Lee (1982)らの提案した海洋波浪スペクトルモデルを用い、5.1に示した摂動法によって求めた σ^0 の値(以下“海洋モデル計算値”と呼ぶ)を、今回の観測結果と比較した結果を図6に示す。図中、海洋モデル計算値は σ^0 の方位角依存性を平均したものであり、Xバンドについては観測値(ほぼ向かい風; Up-wind)よりも2~3 dB低い値が妥当と考えられることを考慮され

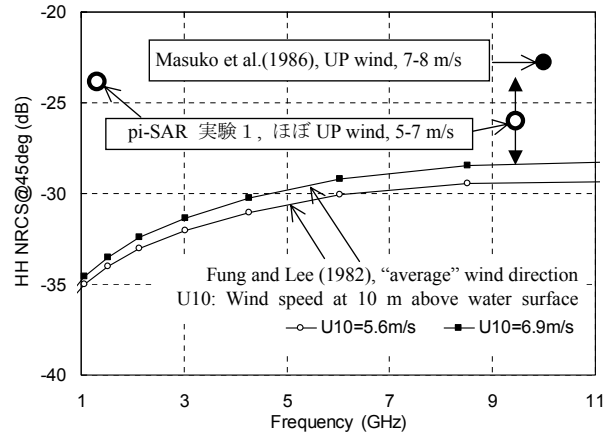


図 6. 入射角 45 度における NRCS の周波数特性：観測値と海洋モデル値の比較。

Fig. 6. Frequency dependence of NRCS values at 45-degree incidence: Comparison between observations and sea spectrum model results.

たい。この図から、Xバンドについては海洋モデル計算値、今回の観測結果および Masuko et al. (1986) による海洋上の観測結果は相互に矛盾しない結果であることがわかる。これに対しLバンドでは、pi-SAR から σ^0 を求める際の校正精度や σ^0 の方位角依存性を考慮しても、今回の観測値の方が6~8 dB程度大きい結果となった。市川(2003)によるLバンド衛星搭載 SARにより求められた宍道湖・中海の σ^0 も今回の観測結果と同程度である。これらの結果は十数 cm の波長を持つ水面波あるいはそれ以上の長波長領域において、汽水域の波浪スペクトルが海洋とは異なることを示唆している。

(v) 実験1と実験2における風速は、前者が5~7 m/s、後者が3~5 m/sであった。この差による σ^0 の変化は、湖面上の場所により異なり、更に詳細解析が必要であるが、図5に示すように、Xバンドでは全般に実験1の方が高く、場所によっては10 dB以上もの差が見出された。一方Lバンドにおいては、実験1と実験2で σ^0 に大きな差は認められなかった。これはXバンドにおけるNRCSが風速変化に対して感度がよく、Lバンドでは悪いことを示唆しており、海洋モデル計算結果や汽水域の衛星搭載 SAR 観測結果(市川, 2003)と矛盾しない。しかし風速の違いによる σ^0 値の変化は、Masuko et al. (1986)の結果に比べ、2倍以上であり、今回の観測時における風速場の時空間変動や、低風速下における風波の生成について更に詳細な検討が必要と思われる。

5. む す び

高分解能航空機搭載 SAR による汽水域環境観測の可能性を検討するため、2001 年および 2002 年に pi-SAR による観測実験を実施した。本論文では、観測実験の内容や取得データの詳細をまとめるとともに、SAR 映像や NRCS 特性に関する初期解析結果を示した。

SAR 映像の定性的解析に加え、斜め入射の場合のマイクロ波帯での NRCS が風波からの Bragg 散乱によることを考慮して、今回は主な研究テーマとして NRCS と風ベクトルの関係を調べることにした。そのため現場観測も風ベクトルを中心として実施した。

2 回の実験で取得された pi-SAR 映像からは、周波数による“シグナチャ”の違いが明確に現われた。特に“雲状シグナチャ”はこれまでの衛星搭載 SAR では検出されなかった特徴である。その原因究明や関連物理現象解析への応用は今後の興味ある課題と言える。また“筋状シグナチャ”は、衛星搭載 SAR でも現われていた現象であるが、今回の実験ではこのシグナチャについて、周波数および偏波依存性が得られているので、今後詳細解析をすすめることで、シグナチャの成因などとの関連がつけられる可能性もある。

NRCS の入射角および偏波依存性については、これまでの海洋モデル計算値、海洋におけるレーダ観測値、汽水域における衛星搭載 SAR 観測値と概ね矛盾しない結果が得られた。しかし、XバンドとLバンドのNRCS比較およびその空間分布の解析から、波浪スペクトルが汽水域の「場所」に依存する可能性、汽水域と海洋における十数 cm 程度の波長域でのスペクトル強度の違いなどが示唆された。今後、NRCS と現場観測風ベクトルの関連づけにおいて、風ベクトル観測値の時空間変動を考慮した比較が必要と思われる。更に、実験時の現場観測で得られている多くの水質データ（作野他、2002）と SAR 映像や筋状シグナチャとの関連についても今後検討が必要である。

謝 辞

本研究の推進に関し、ご教示頂いている国立環境研究所松永恒雄主任研究官、広島大学陸田秀実助手、通信総合研究所(CRL)pi-SAR グループ各位、宇宙開発事業団島田政信主任開発部員に深謝する。観

測実験実施にあたり、松江土建(株)環境部各位に多大な協力を頂いた。実験実施にはまた島根大学汽水域研究センター各位並びに広島大学工学部および島根大学総合理工学部学生諸氏の協力を得た。

pi-SAR 観測およびデータ処理は、通信総合研究所および宇宙開発事業団により行われ、幾何補正・ラジオメトリック補正済みデータが島根大学に提供されたものである。また気象および水質データは、国土交通省出雲工事事務所並びに気象庁出雲空港および美保空港出張所から提供を受けたものである。

参 考 文 献

- CRL(2002 a) <http://www2.crl.go.jp/dk/c215/PI-SAR/J/>.
 CRL(2002 b) <http://www2.crl.go.jp/dk/c215/PI-SAR/J/CD/docs/readme-j.htm>.
 Fung, A. K. and Lee, K. M. (1982) A semi-empirical sea-spectrum model for scattering coefficient estimation, *IEEE J. Oceanic Engineering*, OE-7, 166-176.
 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, 電子通信学会, コロナ社, 東京, 275 p.
 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*, 9, 63-75.
 Ichikawa, K., Kozu, T., Shimomai, T., Sakuno, Y., Matsunaga, T., and Takayasu, K (2002) Feasibility of spaceborne SAR monitoring of coastal lagoon environments, *Proc., 23rd International Symp. on Space Technology and Science*, Matsue, May 26–June 2.
 市川啓祐(2003)衛星搭載合成開口レーダを用いた汽水域の環境観測, 島根大学総合理工学研究科電子制御システム工学専攻修士論文, 63 p.
 古津年章, 浦塚清峰, 中村健治, 尾嶋武之(1996)改良型航空機搭載映像レーダによる海洋油汚染観測, *日本リモートセンシング学会誌*, 16, 23-35.
 Kozu, T., Ichikawa, K., Shimomai, T., Nakayama, D., Takayasu, K., Sakuno, Y., and Matsunaga, T. (2002) Spaceborne SAR application to high resolution wind field mapping over coastal lagoons, *PISAR 2002 Workshop*, Aug.29-30, Comm. Res. Lab., Tokyo.
 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.

- Matsunaga, T., Sakuno, Y., Nakayama, D., Takayasu, K., Kunii, H., Nakamura, M., Yamamuro, M., and Rokugawa, S. (1999) Water quality mapping using airborne and satellite multispectral sensors—Lake Shinji and Lake Nakaumi, Japan, *Proc., Fourth International Airborne Remote Sensing Conf. and Exhibition/21 st Canadian Symp. on Remote Sens.*, 21-24, Ottawa, Canada.
- 岡本謙一(編)(1999)地球環境計測, ウェーブサミット講座, オーム社, 324 p.
- 作野裕司(2000)衛星リモートセンシングによる宍道湖のクロロフィル a 濃度及び一次生産量のモニタリングに関する研究, 博士(工)論文, 東京大学, 190 p.
- 作野裕司, 本井裕志, 松永恒雄, 古津年章, 高安克巳, 下舞豊志, 中山大介(2002)衛星光学センサを用いた汽水域のクロロフィル濃度推定の可能性—宍道湖・中海における2001年の現場調査結果—, *Laguna*, 9, 55-61.
- 作野裕司, 吉田武史, 山本正智, 松永恒雄, 中山大介, 下舞豊志, 高安克巳(2002)多時期 Landsat/TM データによる汽水域の鉛直クロロフィル a 総量の推定, 日本リモートセンシング学会, 第33回学術講演会論文集, 11月.
- 島田政信(2002)私信, 宇宙開発事業団.
- 鳥羽良明(編)(1996)大気・海洋の相互作用, 東京大学出版会, 336 p.
- Ulaby, F. T., Moore, R. K., and Fung, A. K. (1982) *Microwave Remote Sensing, Active and Passive, Vol. II*, Artech House, Norwood MA, 1064 p.
- Ulaby, F. T., Moore, R. K., and Fung, A. K. (1986) *Microwave Remote Sensing, Active and Passive, Vol. III*, Artech House, Norwood MA, 2162 p.
- 山本正智, 吉田武史, 作野裕司, 松永恒雄(2002) ASTER データを用いた宍道湖・中海の水温・濁度推定(2000~2002)年, 日本リモートセンシング学会, 第33回学術講演会論文集, 11月.

付録1. 取得された X バンド pi-SAR 映像データ (CRL 提供データの“info ファイル”抜粋. L バンドデータ諸元も, IMAGE_SIZE が 2400 となる以外はほぼ同じ.)

2001 年 11 月 10 日 中海 SN

NA 5811	NA 5811 E
SCENE_START_TIME = 2001/11/10/05:07:00	SCENE_START_TIME = 2001/11/10/05:06:51
SCENE_END_TIME = 2001/11/10/05:07:38	SCENE_END_TIME = 2001/11/10/05:07:29
LATE_NEAR_LAT = +035:29:59.635	LATE_NEAR_LAT = +035:29:49.451
LATE_NEAR_LONG = +133:10:58.221	LATE_NEAR_LONG = +133:14:23.542
LATE_FAR_LAT = +035:29:21.244	LATE_FAR_LAT = +035:29:11.521
LATE_FAR_LONG = +133:07:04.816	LATE_FAR_LONG = +133:10:30.068
EARLY_NEAR_LAT = +035:26:48.756	EARLY_NEAR_LAT = +035:26:38.479
EARLY_NEAR_LONG = +133:11:45.184	EARLY_NEAR_LONG = +133:15:09.932
EARLY_FAR_LAT = +035:26:10.365	EARLY_FAR_LAT = +035:26:00.549
EARLY_FAR_LONG = +133:07:51.779	EARLY_FAR_LONG = +133:11:16.458
GROUND_RG_NEAR = 1.4235430 e+04	GROUND_RG_NEAR = 9.2293400 e+03
GROUND_RG_CENTER = 1.7234805 e+04	GROUND_RG_CENTER = 1.2228715 e+04
GROUND_RG_FAR = 2.0234180 e+04	GROUND_RG_FAR = 1.5228090 e+04
INC_ANGLE_NEAR = 4.9485766 e+01	INC_ANGLE_NEAR = 3.7176320 e+01
INC_ANGLE_CENTER = 5.4785561 e+01	INC_ANGLE_CENTER = 4.5138712 e+01
INC_ANGLE_FAR = 5.8986684 e+01	INC_ANGLE_FAR = 5.1369627 e+01
SCENE_SIZE_AZ = 6.0000000 e+03	SCENE_SIZE_AZ = 6.0000000 e+03
SCENE_SIZE_GR = 6.0000000 e+03	SCENE_SIZE_GR = 6.0000000 e+03
IMAGE_SIZE_AZ = 4800	IMAGE_SIZE_AZ = 4800
IMAGE_SIZE_GR = 4800	IMAGE_SIZE_GR = 4800

2001 年 11 月 10 日 宍道湖 NS

SHI 5812	SHI 5812 E
SCENE_START_TIME = 2001/11/10/05:20:22	SCENE_START_TIME = 2001/11/10/05:20:16
SCENE_END_TIME = 2001/11/10/05:20:57	SCENE_END_TIME = 2001/11/10/05:20:52
LATE_NEAR_LAT = +035:24:06.226	LATE_NEAR_LAT = +035:25:01.404
LATE_NEAR_LONG = +132:53:05.318	LATE_NEAR_LONG = +132:56:14.988
LATE_FAR_LAT = +035:24:42.472	LATE_FAR_LAT = +035:25:37.212
LATE_FAR_LONG = +132:56:58.971	LATE_FAR_LONG = +133:00:08.771
EARLY_NEAR_LAT = +035:27:17.528	EARLY_NEAR_LAT = +035:28:12.788
EARLY_NEAR_LONG = +132:52:21.029	EARLY_NEAR_LONG = +132:55:31.229
EARLY_FAR_LAT = +035:27:53.774	EARLY_FAR_LAT = +035:28:48.596
EARLY_FAR_LONG = +132:56:14.682	EARLY_FAR_LONG = +132:59:25.012
GROUND_RG_NEAR = 1.0083989 e+04	GROUND_RG_NEAR = 1.5107395 e+04
GROUND_RG_CENTER = 1.3083364 e+04	GROUND_RG_CENTER = 1.8106770 e+04
GROUND_RG_FAR = 1.6082739 e+04	GROUND_RG_FAR = 2.1106145 e+04
INC_ANGLE_NEAR = 3.9603097 e+01	INC_ANGLE_NEAR = 5.1101424 e+01
INC_ANGLE_CENTER = 4.7028888 e+01	INC_ANGLE_CENTER = 5.6051487 e+01
INC_ANGLE_FAR = 5.2843776 e+01	INC_ANGLE_FAR = 5.9992116 e+01
SCENE_SIZE_AZ = 6.0000000 e+03	SCENE_SIZE_AZ = 6.0000000 e+03
SCENE_SIZE_GR = 6.0000000 e+03	SCENE_SIZE_GR = 6.0000000 e+03
IMAGE_SIZE_AZ = 4800	IMAGE_SIZE_AZ = 4800
IMAGE_SIZE_GR = 4800	IMAGE_SIZE_GR = 4800

2001 年 11 月 10 日 宍道湖 WE (宍道湖側)

SHI 5813	SHI 5813 E
SCENE_START_TIME = 2001/11/10/05:36:09	SCENE_START_TIME = 2001/11/10/05:36:29
SCENE_END_TIME = 2001/11/10/05:36:37	SCENE_END_TIME = 2001/11/10/05:36:57
LATE_NEAR_LAT = +035:24:41.423	LATE_NEAR_LAT = +035:25:35.751
LATE_NEAR_LONG = +132:56:57.902	LATE_NEAR_LONG = +133:00:07.342
LATE_FAR_LAT = +035:27:53.022	LATE_FAR_LAT = +035:28:47.551
LATE_FAR_LONG = +132:56:15.890	LATE_FAR_LONG = +132:59:26.719
EARLY_NEAR_LAT = +035:24:06.978	EARLY_NEAR_LAT = +035:25:02.449
EARLY_NEAR_LONG = +132:53:04.110	EARLY_NEAR_LONG = +132:56:13.281
EARLY_FAR_LAT = +035:27:18.577	EARLY_FAR_LAT = +035:28:14.249
EARLY_FAR_LONG = +132:52:22.098	EARLY_FAR_LONG = +132:55:32.658
GROUND_RG_NEAR = 1.0981778 e+04	GROUND_RG_NEAR = 1.1813889 e+04
GROUND_RG_CENTER = 1.3981153 e+04	GROUND_RG_CENTER = 1.4813264 e+04
GROUND_RG_FAR = 1.6980528 e+04	GROUND_RG_FAR = 1.7812639 e+04
INC_ANGLE_NEAR = 4.1975599 e+01	INC_ANGLE_NEAR = 4.4057126 e+01
INC_ANGLE_CENTER = 4.8875776 e+01	INC_ANGLE_CENTER = 5.0504276 e+01
INC_ANGLE_FAR = 5.4288424 e+01	INC_ANGLE_FAR = 5.5572225 e+01
SCENE_SIZE_AZ = 6.0000000 e+03	SCENE_SIZE_AZ = 6.0000000 e+03
SCENE_SIZE_GR = 6.0000000 e+03	SCENE_SIZE_GR = 6.0000000 e+03
IMAGE_SIZE_AZ = 4800	IMAGE_SIZE_AZ = 4800
IMAGE_SIZE_GR = 4800	IMAGE_SIZE_GR = 4800

2001年11月10日 宍道湖 WE (中海側)

NA 5813	NA 5813 E
SCENE_START_TIME = 2001/11/10/05:37:39	SCENE_START_TIME = 2001/11/10/05:38:00
SCENE_END_TIME = 2001/11/10/05:38:07	SCENE_END_TIME = 2001/11/10/05:38:28
LATE_NEAR_LAT = +035:26:46.525	LATE_NEAR_LAT = +035:26:37.033
LATE_NEAR_LONG = +133:11:43.048	LATE_NEAR_LONG = +133:15:08.491
LATE_FAR_LAT = +035:29:58.091	LATE_FAR_LAT = +035:29:48.442
LATE_FAR_LONG = +133:11:00.808	LATE_FAR_LONG = +133:14:25.198
EARLY_NEAR_LAT = +035:26:11.909	EARLY_NEAR_LAT = +035:26:01.558
EARLY_NEAR_LONG = +133:07:49.192	EARLY_NEAR_LONG = +133:11:14.802
EARLY_FAR_LAT = +035:29:23.475	EARLY_FAR_LAT = +035:29:12.967
EARLY_FAR_LONG = +133:07:06.952	EARLY_FAR_LONG = +133:10:31.509
GROUND_RG_NEAR = 1.0917423 e+04	GROUND_RG_NEAR = 9.6823402 e+03
GROUND_RG_CENTER = 1.3916798 e+04	GROUND_RG_CENTER = 1.2681715 e+04
GROUND_RG_FAR = 1.6916173 e+04	GROUND_RG_FAR = 1.5681090 e+04
INC_ANGLE_NEAR = 4.1813818 e+01	INC_ANGLE_NEAR = 3.8420651 e+01
INC_ANGLE_CENTER = 4.8750363 e+01	INC_ANGLE_CENTER = 4.6092624 e+01
INC_ANGLE_FAR = 5.4190600 e+01	INC_ANGLE_FAR = 5.2100827 e+01
SCENE_SIZE_AZ = 6.0000000 e+03	SCENE_SIZE_AZ = 6.0000000 e+03
SCENE_SIZE_GR = 6.0000000 e+03	SCENE_SIZE_GR = 6.0000000 e+03
IMAGE_SIZE_AZ = 4800	IMAGE_SIZE_AZ = 4800
IMAGE_SIZE_GR = 4800	IMAGE_SIZE_GR = 4800

2002年9月12日 Shinjiko_Nakaumi (宍道湖側)

SSI 6207 W	SSI 6207 E
SCENE_START_TIME = 2002/09/12/03:47:30	SCENE_START_TIME = 2002/09/12/03:47:51
SCENE_END_TIME = 2002/09/12/03:47:59	SCENE_END_TIME = 2002/09/12/03:48:20
LATE_NEAR_LAT = +035:24:41.848	LATE_NEAR_LAT = +035:25:36.808
LATE_NEAR_LONG = +132:56:58.257	LATE_NEAR_LONG = +133:00:08.236
LATE_FAR_LAT = +035:27:53.316	LATE_FAR_LAT = +035:28:48.288
LATE_FAR_LONG = +132:56:15.368	LATE_FAR_LONG = +132:59:25.427
EARLY_NEAR_LAT = +035:24:06.684	EARLY_NEAR_LAT = +035:25:01.712
EARLY_NEAR_LONG = +132:53:04.632	EARLY_NEAR_LONG = +132:56:14.573
EARLY_FAR_LAT = +035:27:18.152	EARLY_FAR_LAT = +035:28:13.192
EARLY_FAR_LONG = +132:52:21.743	EARLY_FAR_LONG = +132:55:31.764
GROUND_RG_NEAR = 1.1338032 e+04	GROUND_RG_NEAR = 1.2138929 e+04
GROUND_RG_CENTER = 1.4337407 e+04	GROUND_RG_CENTER = 1.5138304 e+04
GROUND_RG_FAR = 1.7336782 e+04	GROUND_RG_FAR = 1.8137679 e+04
INC_ANGLE_NEAR = 4.1749490 e+01	INC_ANGLE_NEAR = 4.3678780 e+01
INC_ANGLE_CENTER = 4.8457990 e+01	INC_ANGLE_CENTER = 4.9978816 e+01
INC_ANGLE_FAR = 5.3768134 e+01	INC_ANGLE_FAR = 5.4974685 e+01
SCENE_SIZE_AZ = 6.0000000 e+03	SCENE_SIZE_AZ = 6.0000000 e+03
SCENE_SIZE_GR = 6.0000000 e+03	SCENE_SIZE_GR = 6.0000000 e+03
IMAGE_SIZE_AZ = 4800	IMAGE_SIZE_AZ = 4800
IMAGE_SIZE_GR = 4800	IMAGE_SIZE_GR = 4800

2002年9月12日 Shinjiko_Nakaumi (中海側) および Shinjiko_NS

SNA 6207 E	SHI 6208 W
SCENE_START_TIME = 2002/09/12/03:49:26	SCENE_START_TIME = 2002/09/12/04:08:06
SCENE_END_TIME = 2002/09/12/03:49:55	SCENE_END_TIME = 2002/09/12/04:08:36
LATE_NEAR_LAT = +035:26:37.457	LATE_NEAR_LAT = +035:24:06.933
LATE_NEAR_LONG = +133:15:08.843	LATE_NEAR_LONG = +132:53:04.069
LATE_FAR_LAT = +035:29:48.733	LATE_FAR_LAT = +035:24:41.445
LATE_FAR_LONG = +133:14:24.679	LATE_FAR_LONG = +132:56:58.099
EARLY_NEAR_LAT = +035:26:01.267	EARLY_NEAR_LAT = +035:27:18.555
EARLY_NEAR_LONG = +133:11:15.321	EARLY_NEAR_LONG = +132:52:21.901
EARLY_FAR_LAT = +035:29:12.543	EARLY_FAR_LAT = +035:27:53.067
EARLY_FAR_LONG = +133:10:31.157	EARLY_FAR_LONG = +132:56:15.931
GROUND_RG_NEAR = 9.8165677 e+03	GROUND_RG_NEAR = 8.6626552 e+03
GROUND_RG_CENTER = 1.2815943 e+04	GROUND_RG_CENTER = 1.1662030 e+04
GROUND_RG_FAR = 1.5815318 e+04	GROUND_RG_FAR = 1.4661405 e+04
INC_ANGLE_NEAR = 3.7671457 e+01	INC_ANGLE_NEAR = 3.4266311 e+01
INC_ANGLE_CENTER = 4.5228244 e+01	INC_ANGLE_CENTER = 4.2526567 e+01
INC_ANGLE_FAR = 5.1203525 e+01	INC_ANGLE_FAR = 4.9066698 e+01
SCENE_SIZE_AZ = 6.0000000 e+03	SCENE_SIZE_AZ = 6.0000000 e+03
SCENE_SIZE_GR = 6.0000000 e+03	SCENE_SIZE_GR = 6.0000000 e+03
IMAGE_SIZE_AZ = 4800	IMAGE_SIZE_AZ = 4800
IMAGE_SIZE_GR = 4800	IMAGE_SIZE_GR = 4800

付録2. 観測時の現場気象データ.

(1) 気象庁および国土交通省湖心タワーデータ (測定位置, 高度については市川他 (2002) 参照).

2001年11月10日

		(a) 美保空港			(b) 出雲空港		
時 間	hour:min	13:00	14:00	15:00	13:00	14:00	15:00
風 向	deg.	30	30	40	40	—	—
風 速	m/s	6.7	7.2	6.2	6.2	—	—
気 温	℃	19	17	18	15	12	14
気 圧	hPa	1019	1019	1019	1020	—	—
		(c) 中海湖心			(d) 宍道湖湖心		
時 間	hour:min		14:00	15:00		14:00	15:00
風 向	deg.		45	67.5		45	45
風 速	m/s		7.6	6.9		7.5	7.5

2002年9月12日

		(a) 美保空港			(b) 出雲空港		
時 間	hour:min	13:00	14:00	15:00	13:00	14:00	15:00
風 向	deg.	60	60	50	ENE	N	N
風 速	m/s	5.7	6.2	6.2	3.1	4.6	5.1
気 温	℃	28	28	28	28	28	27
気 圧	hPa	1012	1012	1012	1012.2	1012.0	1012.2
		(c) 中海湖心			(d) 宍道湖湖心		
時 間	hour:min	12:00	13:00	14:00	12:00	13:00	14:00
風 向	deg.	—	22.5	67.5	67.5	—	—
風 速	m/s	3.5	2.7	5.6	1.9	2.5	6.4

(2) 船舶・湖岸データ (2001年11月10日については市川他 (2002) を参照).

2002年9月12日

(a) 宍道湖

測 定 点	s 1	s 2	s 3	s 4
測定時間 [hour:min.]	13:00	13:20	13:36	13:56
舳先の向き [deg.]	25	10	30	22.5
風向 (コンピュータ読み値) [deg.]	5	12.5	325	325
実際の風向 [16 方位]	NNE	NNE	N	NNW
風 速 [m/s]	2.6	3	3.3	4.9
気 温 [℃]	(inside)			
	(outside)	29		28
湿 度 [%]	(inside)			
	(outside)	53		46
気 圧 [hPa]	1015.1		1015.6	1014.5
東 経 [deg:min:sec]	132:55:16	132:55:17	132:55:15	132:53:30
北 緯 [deg:min:sec]	35:26:60	35:26:04	35:25:09	35:26:09
湖面からの高さ [m]	1.9			

(b) 中海

測 定 点	n 1	n 2	n 3	n 4
測定時間 [hour:min]	12:50	13:09	13:27	13:48
舳先の向き [deg.]	-20	70	60	80
風向 (コンピュータ読み値) [16 方位]	ENE	NE	N	NNE
実際の風向 [16 方位]	NE	ESE	ENE	E
風 速 [m/s]	3.1	2.7	4.9	4.9
気 温 [℃]	(inside)	38	42	34
	(outside)	29	30	29
湿 度 [%]	(inside)	51	43	57
	(outside)	57	53	58
気 圧 [hPa]	1014.9	1014.2	1014.5	1014.2
東 経 [deg:min:sec]	133:08:53	133:09:37	133:10:29	133:11:33
北 緯 [deg:min:sec]	35:27:29	35:27:46	35:27:31	35:27:48
湖面からの高さ [m]	1.7			

湖岸風速・風向（風速の単位は m/sec）

		(c) ゴビウス付近		(d) 津の森				(e) 秋鹿道の駅		(f) 来侍	
時刻	風向	風速	風向	風速	時刻	風向	風速	風向	風速		
13:15	NNE	3.6	NNW	1.9	13:15	NNW	1.4	NE	2.1		
13:17	NNE	5.2	NNW	2.0	13:17	N	1.0	NE	3.0		
13:19	NNE	5.1	—	0	13:19	NNE	3.1	NE	3.0		
13:21	NNE	5.6	NNW	1.5	13:21	NNE	3.8	NE	3.2		
13:23	NE	5	N	2.5	13:23	NW	3.1	NE	2.8		
13:25	NE	4.3	NNW	2.5	13:25	NE	2.6	ENE	3.4		
13:27	NNE	6	N	1.5	13:27	N	3.9	ENE	2.5		
13:29	NNE	5.7	N	1.9	13:29	NNE	3.5	NE	2.8		
13:31	NE	5.6	N	1.9	13:31	NNE	3.0	NNE	0.8		
13:33	NE	4.9	N	2.5	13:33	NW	1.3	NNE	0.2		
13:35	NE	4.5	N	1.5	13:35	NW	1.1	NE	2.0		
13:37	NE	4.5	N	1.0	13:37	NNW	1.9	NE	2.6		
13:39	NNE	5.1	N	2.5	13:39	WNW	2.0	NE	0.9		
13:41	NNE	6.4	NW	2.5	13:41	N	2.3	NE	0.5		
13:43	NNE	5.4	N	3.3	13:43	N	2.9	NE	2.3		
13:45	NE	5.1	NW	2.0	13:45	NW	2.7	NE	3.1		
13:47	NNE	5.2	NW	1.8	13:47	N	3.1	ENE	2.3		
13:49	NE	5.8	—	0	13:49	NNW	2.0	ENE	1.6		
13:51	NE	5.4	NW	3.2	13:51	NW	3.1	NNE	2.8		
		(高さ 3 m)						(高さ 3.5 m)			
		(g) 大根島南		(h) 松江港				(i) 下意東			
時刻	風向	風速	風向	風速	時刻	風向	風速				
13:15	SE	4.5	E	3.4	13:15	NE	3.6				
13:17	E	3.8	ENE	3.4	13:17	ENE	5.2				
13:19	ENE	4.1	ENE	3.1	13:19	ENE	5.1				
13:21	ENE	4.1	ENE	4.2	13:21	NE	5.6				
13:23	NE	3.4	E	3.4	13:23	ENE	5.0				
13:25	ESE	4.5	ENE	4.1	13:25	NE	4.3				
13:27	E	4.1	ENE	5	13:27	ENE	6.0				
13:29	E	5.2	ENE	4.6	13:29	ENE	5.7				
13:31	ESE	4.8	E	4.5	13:31	ENE	5.6				
13:33	ESE	5.5	ENE	4.8	13:33	ENE	4.9				
13:35	ENE	4.6	E	5.3	13:35	ENE	4.5				
13:37	E	4.8	ENE	5.5	13:37	E	4.5				
13:39	E	5.3	E	4.9	13:39	ENE	5.1				
13:41	E	5	ENE	5.2	13:41	ENE	6.4				
13:43	ENE	4.2	ENE	4.8	13:43	E	5.4				
13:45	NE	4.9	ENE	5.1	13:45	ENE	5.1				
13:47	NE	4.3	E	5	13:47	ENE	5.2				
13:49	ENE	4.6	ENE	5.2	13:49	ENE	5.8				
13:51	NE	5.3	ENE	5.6	13:51	ENE	5.4				
		(高さ 2 m)		(高さ 2 m)				(高さ 3 m)			