

## 衛星リモートセンシングによる中海・宍道湖の 水質濃度マッピング (その1)

—アオコ発生時の透明度, 懸濁物質濃度および  
クロロフィル a 濃度の面的把握—

作野裕司<sup>1</sup>・中山大介<sup>2</sup>・松永恒雄<sup>3</sup>・高安克己<sup>4</sup>・六川修一<sup>1</sup>・  
中村幹雄<sup>5</sup>・國井秀伸<sup>4</sup>

**Water quality mapping in Lake Shinji and Lake Nakaumi using satellite remote  
sensing data (part1)**  
**-Horizontal distribution of secchi depth, suspended substance concentration and chlorophyll-a  
concentration under algal bloom condition-**

**Yuji Sakuno<sup>1</sup>, Daisuke Nakayama<sup>2</sup>, Tsuneo Matsunaga<sup>3</sup>, Katsumi Takayasu<sup>4</sup>,  
Shuichi Rokugawa<sup>1</sup>, Mikio Nakamura<sup>5</sup> and Hidenobu Kunii<sup>4</sup>**

**Abstract :** Simultaneous water quality research with satellite observation were carried out in Lake Shinji and Lake Nakaumi from June to November, 1997. The objective of this report is to know horizontal distributions of Secchi depth (SD), suspended substance concentration (SSC) and chlorophyll-a (C) in Lake Shinji and Lake Nakaumi, 1997. Average SD ranges 1.0-1.3 m, average SS ranges 5-8mg/l, average C ranges 25-42  $\mu$ g/l in Lake Shinji. C is the most variable of the three water quality parameters in Lake Shinji. Honjo area water located in the northern part of Lake Nakaumi, showed higher SD, lower SS and lower C than the Nakaumi area water. Under algal bloom condition, Lake Shinji water showed lower SD, higher SS and much higher C than Lake Nakaumi water. An empirical approach of relating SPOT2/HRV data with simultaneous C data through simple linear regression analysis was employed. Highly significant relationships ( $r=0.79$ ) were identified between HRV band1 (Green) and C. With the linear regression model ( $C=3.864+HRV \text{ band1} \times 8.64$ ), C map in Lake Shinji and Lake Nakaumi was displayed. The C map in Lake Shinji showed wholly high concentration, especially in the northern parts of the lake.

**Key words :** remote sensing, SPOT2/HRV, algal bloom, Lake Shinji, Lake Nakaumi

<sup>1</sup> 東京大学大学院工学系研究科

Graduate School of Engineering, The University of Tokyo, Bunkyo-ku 113-8656, Japan

<sup>2</sup> 島根大学大学院理学研究科

Graduate School of Science, Shimane University, Matsue 690-8504, Japan

<sup>3</sup> 工業技術院地質調査所

Geological Survey of Japan, Tsukuba 305-0045, 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> 島根大学水産試験場三刀屋内水面分場

Mitoya Branch of Shimane Prefectural Fisheries Experimental Station, Mitoya 690-2405, Japan

表1 1997年衛星同期調査結果の概要

Tab.1 Results of simultaneous water quality research with satellite in Lake Shinji and Lake Nakaumi, 1997.

No.	Date	Satellite or Airborne	Sensor	Path-Row	Imagery	Field Data
1	97.6.3	JERS-1	OPS	76-241	Available	Available
2	97.6.4	Landsat-5	TM	112-35	-	Available
3	97.7.13	SPOT-2	HRV	317-279	-	Available
4	97.8.8	SPOT-2	HRV	317-279	Available	Available
5	97.8.11	Airborne	MSS	-	-	Available
6	97.9.24	Landsat-5	TM	112-35	-	Available
7	97.10.9	SPOT-2 Airborne	HRV MSS	317-279 -	Available Available	Available Available
8	97.10.13	JERS-1	OPS	76-241	-	Available

表2 衛星通過当時の気象データ（松江地方気象台の観測データ）

Tab.2 Meteorological data of satellite overflight (Data from Matue local meteorological station)

Date	Time (JST)	Air temp. (°C)	Air press. (hPa)	Wind direction	Wind speed (m/s)
97.6.3	11:00am	24.6	1009.6	W	4.0
97.8.8	11:00am	33.6	1002.4	SW	5.0
97.10.9	11:00am	21.0	1015.7	W	2.5

## はじめに

1997年、宍道湖におけるアオコの発生やしじみの大量死など、水質状況の変化が起因したと思われる異常な現象が起り、漁業関係者、地元住民や行政関係者などに水質悪化への不安が広がった。このような不安を解消するために、湖の水質状況をリアルタイムでモニタリングするシステムの構築が求められている。水質リモートセンシング技術は広域性、瞬時性、周期性に優れており、モニタリングツールとしての活用が期待されている。

汽水湖を対象にしたリモートセンシング研究は Jensen *et al.* (1989), Lopez Garcia and Caselles (1990) などの報告があるが、海洋や淡水湖の研究例と比較するとまだその数は少なく、実用段階に達していない。また我が国の汽水域におけるリモートセンシング研究は、皆無に等しい。宍道湖・中海では鳥井ほか (1980) や井岡ほか (1980) が、航空機 MSS を使って流れのパターンや水質量推定の試みを行っているが、その後の報告はない。そこで筆者らは、現在稼働中または今後打ち上げられる高分解能光学衛星センサー（撮影周期は数週間）を組み合わせ、数日周期で汽水湖の水質をモニタリングするための研究を進めている。この研究のテストサイトとして、宍道湖を選び衛星が飛来する日時と同期した水質調査（以下衛星同期調査と呼ぶ）を行ってきた（作野ほか, 1996, 1997a; 松永ほか, 1996; 1997年の調査結果は本報, 付表1~8に掲載）。現在までに26回の衛星同期調査を試み、そのうち8日分（6月~11月の毎月）の衛星・水質データセットが得られている（付表9）。特に雲がほとんど見られない（Cloud-free）画像データは、1995年11月7日、1996年10月11日、1997年10月9日の3日である。1997年は宍道湖の他に中海（本庄工区を含む）も調査の対象とした。

本報告では1997年の調査結果として、1995年の調査から継続して報告している、衛星同期調査結果による宍道湖の透明度、懸濁物質（Suspended Sub-

stance, 以下 SS と略して呼ぶ）濃度およびクロロフィル a（Chlorophyll-a, 以下 Chl-a と略して呼ぶ）濃度の水平分布特性、同様に中海での透明度、SS 及び Chl-a の水平分布特性について記載する。さらに1997年に行った衛星同期水質調査では宍道湖にアオコが発生した時の水質データと衛星データを取得することができた。したがってアオコ発生時の宍道湖・中海の透明度、SS および Chl-a の水平分布特性についても報告する。さらにアオコ発生時に取得した衛星画像を使って、宍道湖・中海の表層 Chl-a 濃度マップを作成した。その結果、宍道湖北岸の高濃度分布、本庄工区の水域（以下本庄水域と略して呼ぶ）の低濃度分布が明瞭に表現されたのでここに報告する。

## 方 法

### 1) 現地データの取得

衛星が宍道湖、中海の上空を飛来する日時に合わせて水質調査を行った。1997年に行った調査結果の概要を表1に示す。また衛星通過時の気象データを表2に示す。水質調査測点は、図1に示すように宍道湖が12点、中海が6点（うち3点は本庄工区）、計18点である。また以下に議論はしないが、8月11日に美保湾において水質調査（東西方向に3点）を行っている（付表5を参照）。位置決定は100m程度の測定誤差を伴うGPS（日本無線製）を使用した。データ取得は2つの異なる調査船を使って、衛星が通過する午前11時前後の約1時間以内で行った。

水質の測定法については作野ほか (1996) が詳細に示しているので、ここでは簡単に記載する。透明度はセッキ板で測定した。SS および Chl-a 測定用サンプルはバケツで採取した水をポリ容器に入れ、実験室に持ち帰った。採水したサンプルは直ちにガラスフィルター（GS25ろ紙を使用）でろ過を行い、ろ過後の重量差を SS 濃度とした。また、アセトン抽出法でクロロフィル色素を抽出し、UNESCO (1966) の提唱する式に従って吸光度（663nm, 645nm および 630nm の各波長）を測定することによって

Chl-a 濃度を算出した。

また、1997 年の調査から、衛星データに含まれる大気ノイズを評価するための基礎資料を集める目的で、6月、8月及び10月の調査時に大気的光学的厚さや地上の分光反射率測定を行った。これらの調査方法及び解析結果については、別の機会に報告するとして本報では概要を記載する。

## 2) 衛星画像の処理

### a. 衛星データと現地データとの位置合わせ

1997 年の衛星同期調査時に取得された衛星・センサ (JERS1/OPS, SPOT2/HRV) の諸元を表 3 に示す。取得した衛星データは、地上基準点 (Ground Control Point: 以下 GCP と略す) による幾何補正を行い、現地調査測点と位置合わせを行う。具体的には国土地理院発行 5 万分の 1 地形図に対して、宍道湖、中海湖岸の半島 (例えば湯町鼻の先端) や人工構造物 (例えば出雲空港の滑走路の先端) など約 20 点の GCP 設定を行った。そしてヘルマート変換またはアフィン変換と呼ばれる手法で、画像を地形図と同じ座標系に変換し、衛星データと現地調査測点とを対応づけた。現地調査測点に対応するデジタル番号値 (以下 DN 値と略して呼ぶ) は、位置決定誤差を考慮して、幾何変換処理で決定した地点を中心に 3×3 画素の平均値とした。

### b. 水陸分離

水と陸の分離には、近赤外バンドの特性を利用した。近赤外バンドの DN の頻度分布は、水域と陸域を境界とした 2 峰分布している。そのため、その境界部をしきい値として 2 値化処理を行えば、陸を 0 (水を 1) とした 2 値化画像ができる。得られた 2

表 3 衛星センサーの諸元

Tab.3 Characteristics of satellite sensors.

Satellite	Sensor	Band width	Quant. level	Resolution
JERS-1 (Japan)	VNIR (Visible and Near Infrared Radiometer)	Band1: 0.52-0.60(Green) Band2: 0.63-0.69(Red) Band3: 0.76-0.86(IR)	6bit (64 grey)	20m*20m
SPOT-2 (France)	HRV (High Resolution Vible and Middle Infrared)	Band1: 0.50-0.59(Green) Band2: 0.61-0.68(Red) Band3: 0.79-0.89(IR)	8bit (256grey)	20m*20m

値化画像とそれぞれのバンドの画像との演算 (積) により、水域のみの解析画像を作成した。

## 結果および考察

### 1) 1997 年度衛星同期調査の概要

1997 年の衛星同期調査の調査のうち、衛星データの取得できた 6月3日、8月8日および10月9日の調査結果について簡単に述べる。

#### 6月3日

天候は薄曇りであったが、宍道湖の表層水質データ及び JERS1/OPS データを得た。また、千葉大学環境リモートセンシングセンター (以下千葉大 CEReS と略して呼ぶ) の協力を得て、衛星データ観測当時の大気の透過率特性を把握するため、太陽自動追尾式のサンフォトメーター (プリード社製、千葉大 CEReS 所有) を使用して、島根大学上空における大気的光学的厚さの時間的変化を測定した (図 2)。また衛星観測スペクトルと地上観測スペクトルとの差を評価するための基礎資料を得る目的で、衛星画像の画素と同規模な地上基準点 (約 50m 四方) として松江市ガス局横の駐車場 (アスファルト質; 位

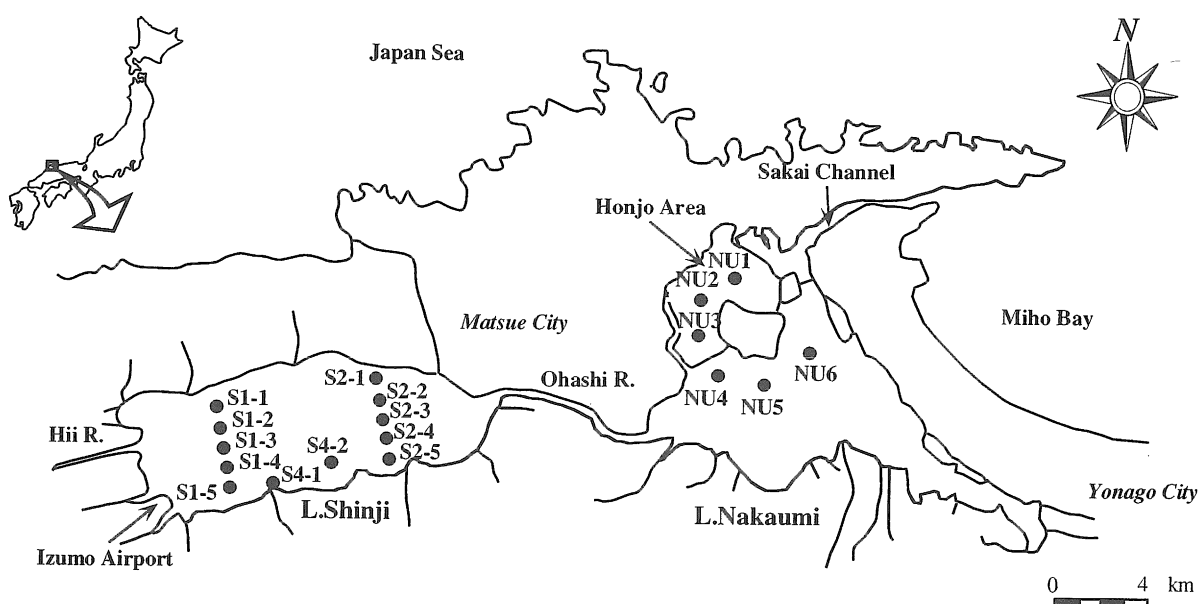


図 1 調査測点 (1997)

Fig.1 Research points, 1997.

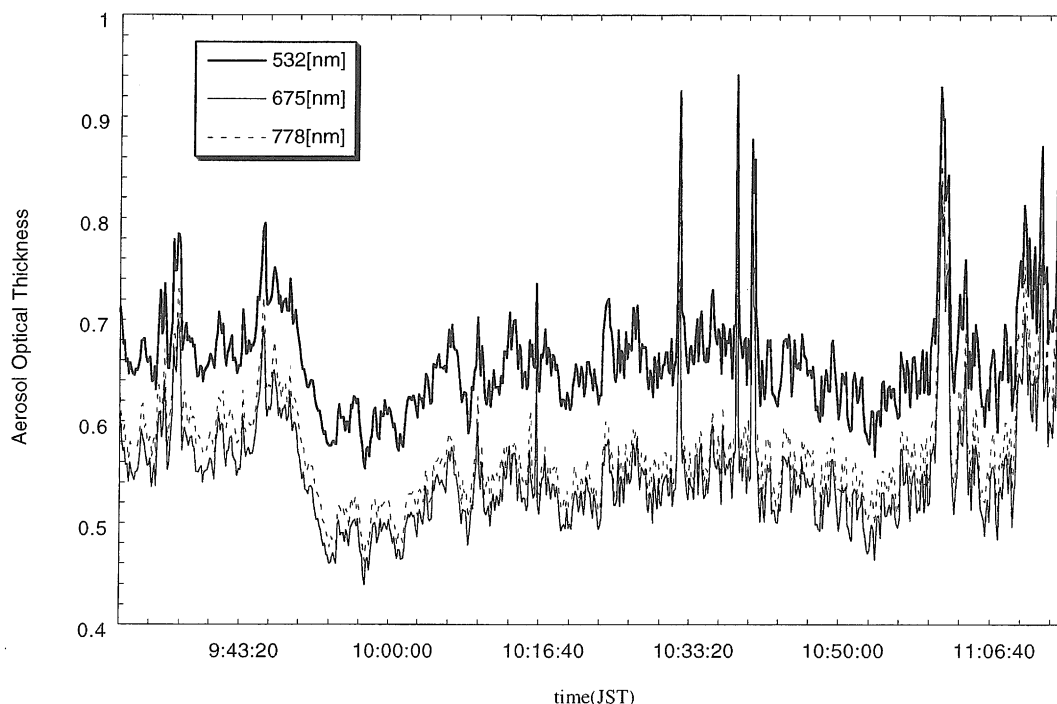


図2 大気の光学的厚さデータ (1997年6月3日, 島根大学上空)

Fig.2 Aerosol optical thickness data, Jun. 3, 1997 at the sky of Shimane University.

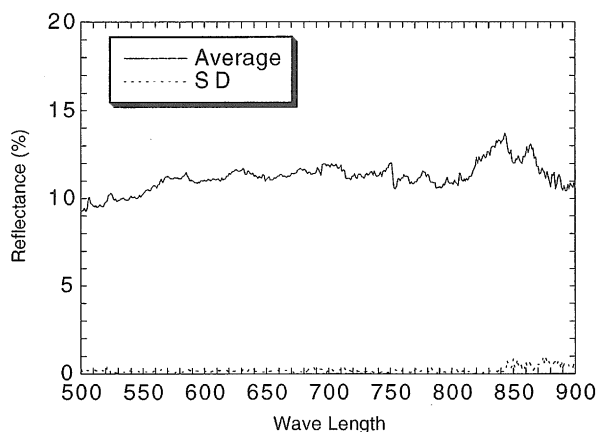


図3 アスファルトの分光反射率データ (1997年6月3日, 駐車場)

Fig.3 Spectral reflectance data of asphalt, Jun. 3, 1997 at a parking lot.

松江市ガス局横の駐車場 (アスファルト質; 位置: N35°27'57", E133°04'04") の地上分光反射率を測定した (図3)。これらのデータ処理結果は、筆者らがすでに報告を行っているので (作野, 1997b), ここでは生データを示すのみとする。取得した OPS データは雲量が 50% と多く, 宍道湖・中海の水質解析は困難な状況であった。

#### 8月8日

天候は晴れであった。衛星通過時には南西の風 5.0m/s とやや強い風が吹いていた。この日は宍道湖・中海の表層水質データ及び SPOT2/HRV データを得

た。また, 平田市の湖遊館グランド (位置: N35°26'36", E132°52'14") において地上分光反射率データおよび大気の光学的厚さデータを取得した。この日の地上, 大気データの解析結果については現在処理中のため, 別の報告に委ねる。取得した衛星画像から判断して中海では雲が多く, 中海の解析は困難だと思われる。しかし宍道湖には雲がなく, 解析可能なデータが得られた。

#### 10月9日

天候は快晴で, 湖面も穏やかであった。この日は宍道湖においてアオコが発生し, 湖面が一面緑色を呈していた。収集したデータは宍道湖・中海の表層及び垂直の水質データ, SPOT2/HRV データおよび航空機 MSS データである。また, 松江市北公園グランド (位置: N35°28'05", E133°04'06") において地上反射率スペクトルデータおよび大気の光学的厚さデータを取得した。この日の地上・大気データの解析結果については現在処理中のため, 別の報告に委ねる。取得した衛星画像から判断して, 宍道湖・中海上空に雲はなく, 両湖とも解析可能な良質データが得られた。

#### 2) 宍道湖・中海における透明度, SS 及び Chl-a の平均的水平分布

1997年の衛星同期調査によって得られた宍道湖・中海における透明度, SS 及び Chl-a の平均的な濃度分布について記載する。宍道湖については, 図4に6月3, 4日, 8月8, 11日, 9月24日及び10月

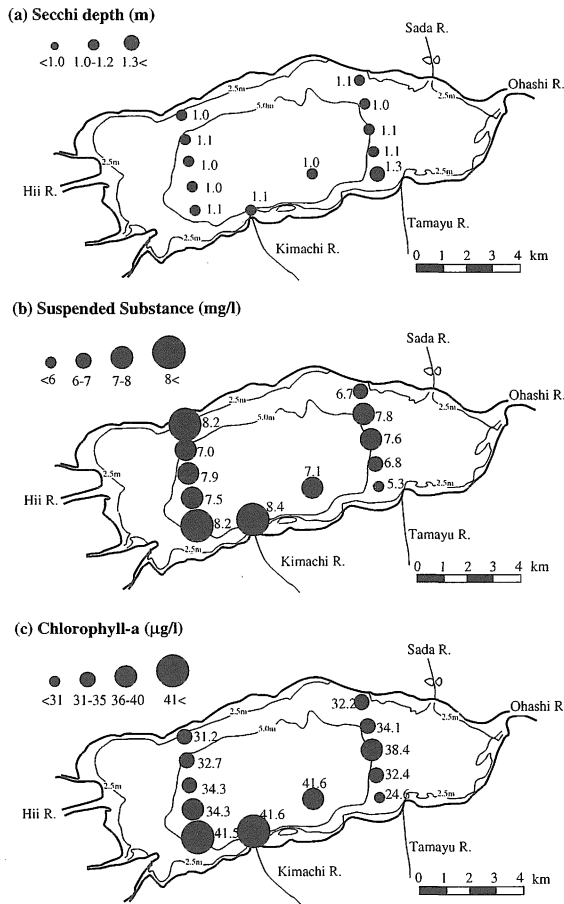


図4 宍道湖における透明度, SS 及び Chl-a の平均値分布(1997年). (a)透明度(m), (b)懸濁物質, (c)クロロフィル a, 調査日: 6/3, 6/4, 8/8, 8/11, 9/24, 10/9, 10/13. 測定時刻: 9時~11時.

Fig.4 Mean distribution of secchi depth, suspended substance and chlorophyll-a in Lake Shinji, 1997. (a) secchi depth (m), (b) suspended substance (mg/l), (c) chlorophyll-a ( $\mu\text{g/l}$ ). Date of research: Jun.3, Jun.4, Aug.8, Aug.11, Sep.24, Oct.9, Oct.13. Time of research: from 9 to 11am.

9, 13日の7時期データの平均値を示す。また中海についてはデータが若干少ないが、8月8日、10月9, 13日の平均値を図5に示した。以下には両湖の平均的な透明度, SS および Chl-a の分布特性を記載する。また表4(a), (b)に各測点の平均値, 標準偏差(以下SDと呼ぶ)および変動係数(標準偏差x100/平均値, 以下CVと略して呼ぶ)を示す。

宍道湖

a) 透明度

図4(a)に示すように、宍道湖における透明度はいずれの地点でも1.0-1.1mと安定した値を示している。このような安定した分布傾向は、1995年~1997年の調査を通じて変わらない。地点毎の調査時期による透明度の変動をCVで表現すると、宍道湖全

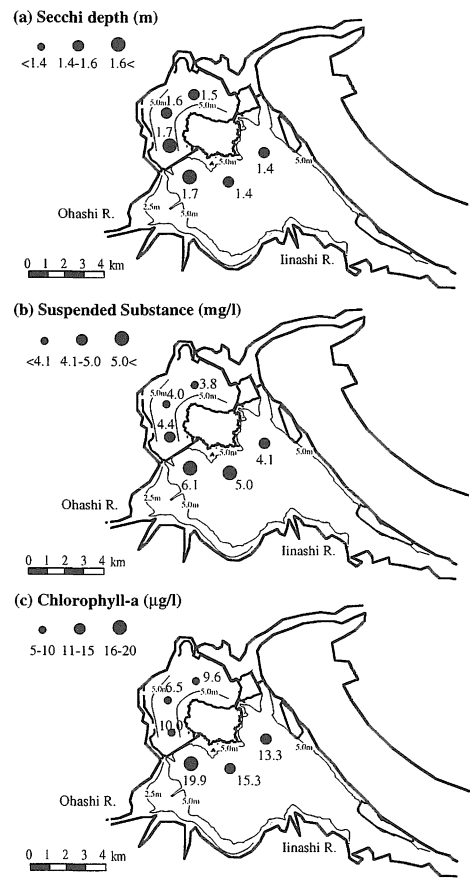


図5 中海における透明度, SS 及び Chl-a の平均値分布(1997年). (a)透明度(m), (b)懸濁物質, (c)クロロフィル a, 調査日: 8/8, 8/11, 10/9. 測定時刻: 9時~11時.

Fig.5 Mean distribution of secchi depth, suspended substance and chlorophyll-a in Lake Nakaumi, 1997. (a) secchi depth (m), (b) suspended substance (mg/l), (c) chlorophyll-a ( $\mu\text{g/l}$ ). Date of research: Aug.8, Aug.11, Oct.9. Time of research: from 9 to 11am.

体では25%程度の小規模な変動であった。

b) SS

図4(b)に示すように宍道湖におけるSSは5~8mg/lの範囲で推移している。分布の傾向としては、湖の西側の測線1では北岸と南岸(測点1-1, 1-5)で高く、その中間がやや低濃度になる。一方、湖の東側の測線2では湖岸部が低く、中央部ほど高い傾向がある。測線2のように湖岸部ほど低くなる傾向は1995年の調査結果と調和的である。また測線1-1のSSが特に高いのは1996年の調査と同様の結果であり、斐伊川の流れと関連して興味深い現象だと考えられる。地点毎の調査時期によるSSの変動をCVで表現すると、宍道湖全体では33%程度の変動であった。地点別のCVでは来待川河口に近い測点4-1が

表4 宍道湖・中海における透明度, SS 及び Chl-a の測点別統計値。(a) 宍道湖, (b) 中海。

Tab.4 Statistic value for each research point of secchi depth, suspended substance and chlorophyll-a in Lake Shinji and Lake Nakaumi. (a) Lake Shinji, (b) Lake Nakaumi.

(a) Lake Shinji														
Water quality parameters	Station	S1-1	S1-2	S1-3	S1-4	S1-5	S2-1	S2-2	S2-3	S2-4	S2-5	S4-1	S4-2	Total
Secchi depth (m)	Ave.	1.0	1.1	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0	1.1	1.1	1.3	1.1	1.0	1.1
	SD	0.3	0.4	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.2	0.4	0.3	0.3	0.3
	CV(%)	28.1	33.6	21.5	20.8	17.5	32.7	24.7	23.9	20.9	31.2	25.7	24.0	25.4
Suspended Substance (mg/l)	Ave.	8.2	7.0	7.9	7.5	8.2	6.7	7.8	7.6	6.8	5.3	8.4	7.1	7.4
	SD	2.5	2.2	2.7	1.8	2.7	2.2	2.1	2.7	2.5	1.9	3.8	1.9	2.4
	CV(%)	30.2	31.8	33.7	24.2	32.8	32.7	27.3	34.9	37.1	35.9	45.9	26.9	32.8
Chlorophyll-a ( $\mu\text{g/l}$ )	Ave.	31.2	32.7	34.3	36.3	41.5	32.2	34.1	38.4	32.4	24.6	41.6	35.6	34.6
	SD	13.3	13.0	10.2	11.1	22.8	20.5	13.8	21.8	17.5	7.6	30.3	13.8	16.3
	CV(%)	42.7	39.8	29.7	30.6	54.9	63.6	40.4	56.7	54.0	31.1	72.7	38.8	46.3

(n=7)

## (b) Lake Nakaumi

Water quality parameters	Station	NU1	NU2	NU3	NU4	NU5	NU6	Total
Secchi depth (m)	Ave.	1.5	1.6	1.7	1.7	1.4	1.4	1.6
	SD	0.3	0.2	0.1	0.6	0.4	0.3	0.3
	CV(%)	16.4	9.4	6.7	36.7	29.0	22.4	20.1
Suspended Substance (mg/l)	Ave.	3.8	4.0	4.4	6.1	5.0	4.1	4.6
	SD	0.7	1.6	0.3	1.4	1.8	1.8	1.3
	CV(%)	17.0	40.2	6.6	22.8	36.1	43.5	27.7
Chlorophyll-a ( $\mu\text{g/l}$ )	Ave.	9.6	6.5	10.0	19.9	15.3	13.3	12.4
	SD	0.6	2.3	2.6	13.8	6.8	5.0	5.2
	CV(%)	6.2	35.9	25.6	69.1	44.4	37.5	36.5

(n=3)

46%とやや高くなっている。

## c) Chl-a

図4(c)に示すように宍道湖におけるChl-aは25~42  $\mu\text{g/l}$  の範囲で推移している。分布の傾向としては、湖の西側の測線1では北岸から南岸に向かって高濃度になる。一方、湖の東側の測線2では湖岸部が低く、中央部ほど高濃度の傾向がある。測線2で湖岸部ほど低くなるという傾向は、1995年の調査結果と同様である。また測線1-1はSSが高いにも関わらずChl-a濃度が低くなっており、SSの成分が湖内生産の植物プランクトン由来の懸濁物ではなく、河川性の無機堆積物の懸濁物で構成されていたことを示す資料となると考えられる。地点毎の調査時期によるChl-aの変動をCVで表現すると、宍道湖全体では46%の変動で、透明度やSSのCVよりも高い傾向にある。このことは宍道湖のChl-aが透明度やSSよりも時期的な変化が大きいことを示している。地点別のCVでは測点4-1が73%とSS同様高くなっており、来待川からの淡水流入と関係する結果だと考えられた。

## 中海

## a) 透明度の水平分布

図5(a)に示すように、中海における透明度の平均値は1.4~1.7mの範囲で推移している。本庄工区以外の中海(以下中海水域と呼ぶ)と大根島北部

に位置する本庄工区(以下本庄水域と呼ぶ)では本庄水域の方が透明度が高い傾向にある。透明度の時期的変動は、本庄水域ではCV=6~20%、中海水域ではCV=21~35%という結果から、本庄水域における透明度は中海水域と比べ変動が小さいといえる。

## b) SSの水平分布

図5(b)に示すように、中海におけるSSの平均値は3.8~6.1mg/lの範囲で推移している。中海水域と本庄水域では本庄水域の方がSSが低い傾向にある。SSの時期的変動は、本庄水域において測点NU2でCV=40%と高いが、その外の地点では透明度同様、中海水域の方が平均して変動が大きかった。

## c) Chl-aの水平分布

図5(c)に示すように、中海におけるChl-aの平均値は7~20  $\mu\text{g/l}$  の範囲で推移している。中海水域と本庄水域では本庄水域の方がChl-aが低い傾向にある。透明度の時期的変動は、本庄水域ではCV=6~35%、中海水域がCV=38~69%で、中海水域の方が平均して変動が大きかった。中海水域ではより日本海側に近い測点ほど低濃度で小規模な変動であった。

## 3) アオコ発生時の宍道湖・中海における透明度, SS及びChl-a濃度の水平分布

1997年10月9日は、筆者らが3年間の衛星同期

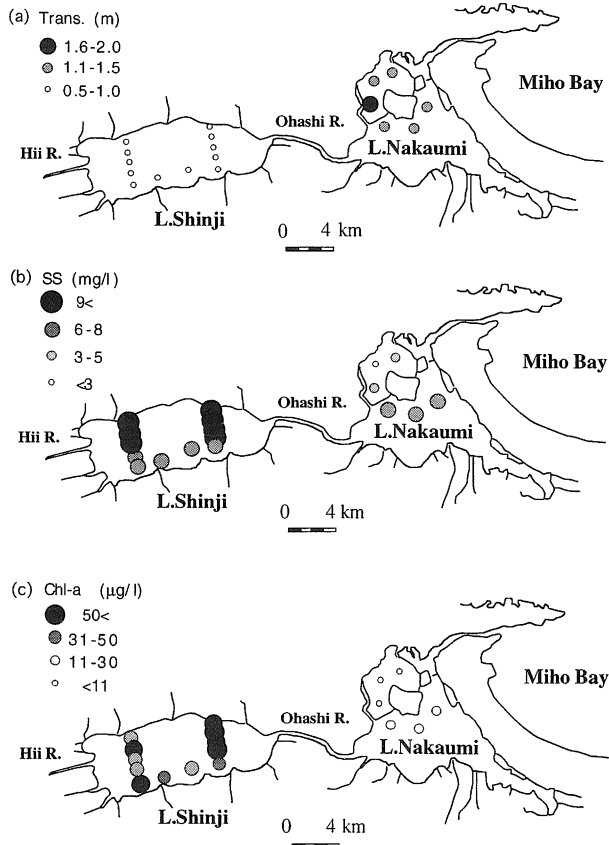


図6 アオコ発生時の透明度, SS 及び Chl-a の水平分布 (1997年10月9日)

Fig.6 Horizontal distribution of secchi depth, suspended substance and chlorophyll-a under algal bloom condition in Lake Shinji, Oct.9, 1997).

調査で、初めてアオコが発生したケースである。アオコとは植物プランクトンが大量発生し、湖水の色を変えるような現象を呼ぶ。中でもミクロキスティスなどのラン藻類が主体となる場合には、湖面がちょうど緑色の粉をまいたような状態になるので、「アオコ (青粉)」と呼ぶ。宍道湖のアオコを形成する植物プランクトンとしては、ミクロキスティス、オシラトリアおよびアナベナなどが確認されている (伊達, 1988)。アオコを形成するラン藻類は Chl-a 色素を持ち (Chl-b, Chl-c 色素は持たない)、面的に広がるのでアオコの分布状況把握には、リモートセンシング計測が適している。以下は宍道湖にアオコが発生した1997年10月9日の現地水質データと衛星画像データにより、当時の宍道湖・中海における透明度, SS および Chl-a の状況について若干の考察を行う。

図6 (a), (b), (c) に、アオコ発生時に取得した宍道湖・中海の透明度, SS および Chl-a の分布を示す。3つの水質パラメーターの水平分布から、中海と比較して宍道湖の低い透明度, 高いSS濃度, 高いChl-a濃度が共通している。これはそれぞれの水質パラメーターが互いに関係している性質に

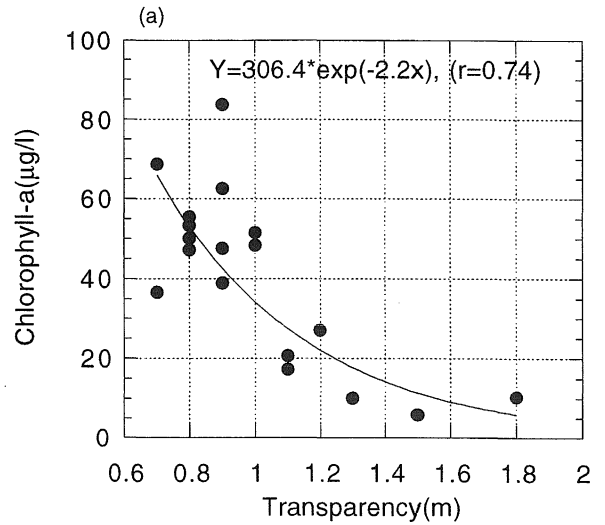


図7a 宍道湖・中海における透明度とChl-aの関係 (1997年10月9日)

Fig.7a Relationship between secchi depth and chlorophyll-a in Lake Shinji and Lake Nakaumi, Oct.9,1997.

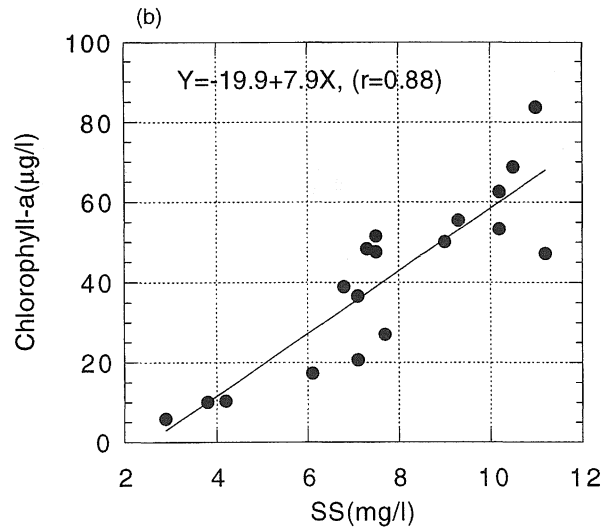


図7b 宍道湖・中海におけるSSとChl-aの関係 (1997年10月9日)

Fig.7b Relationship between suspended substance and chlorophyll-a in Lake Shinji and Lake Nakaumi, Oct.9,1997.

よるものであると考えられる。これを確かめるために図7 (a), (b) に透明度とChl-aの散布図, SSとChl-aの散布図を作成した。まず透明度とChl-aは非線形 (指数関数) の相関 ( $r=0.74$ ) が高い。これは Lorensen (1980), Edmondson (1980) 及び Carlson (1980) らによって説明されている両者の関係 (非線形) と一致している。また筆者ら (作野, 1997a) が1995年と1996年の衛星同期調査結果で得た宍道湖の透明度とChl-aの散布図も、非線形の形状を示している。一方、SSとChl-aは線形の相関 ( $r=0.88$ ) が高い。これは作野ほか (1997a) で示した宍道湖

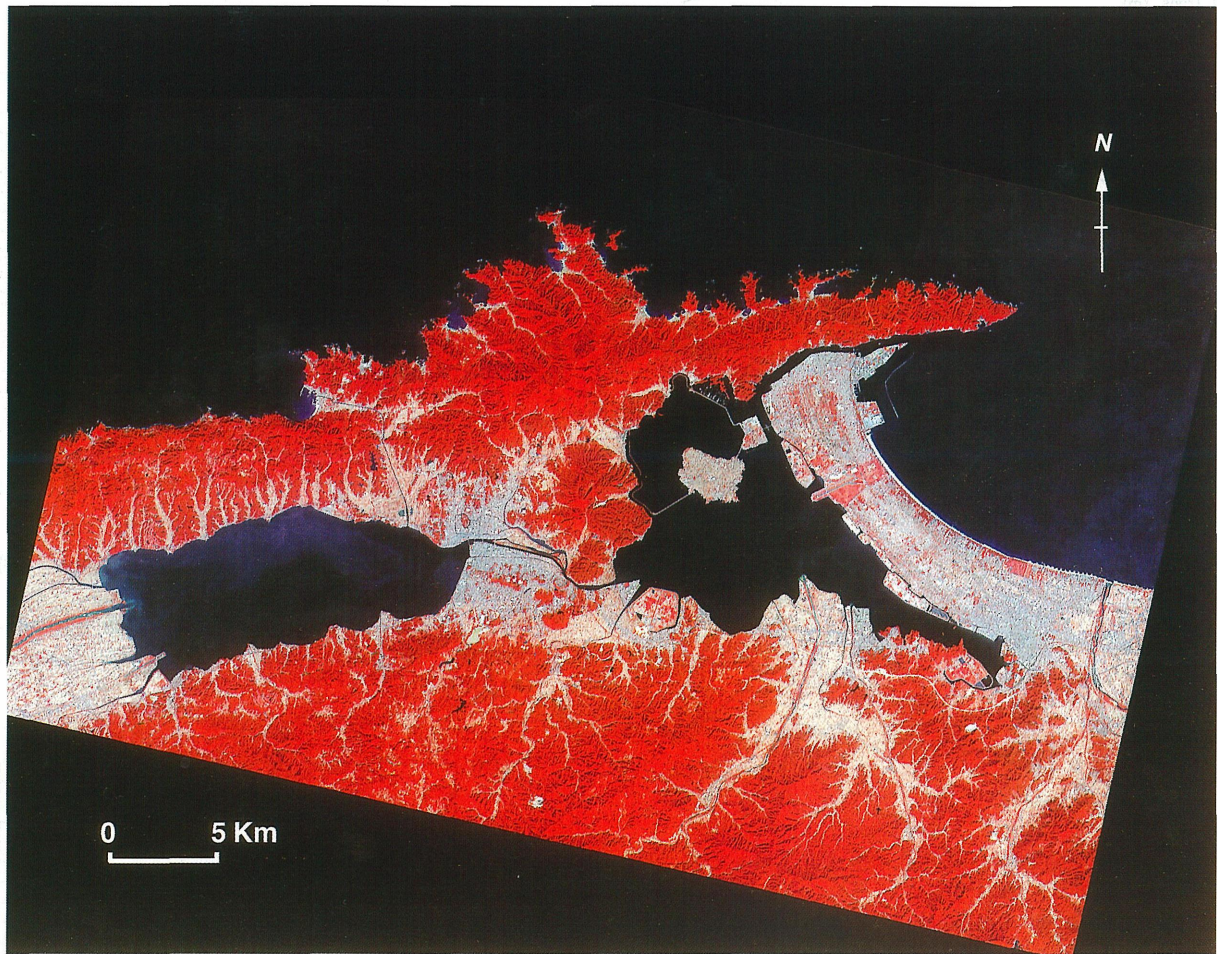


図8 アオコ発生時に宍道湖・中海を撮影した SPOT/HRV 画像。バンド1, 2, 3 をそれぞれ青, 緑, 赤に配色。  
**Fig.8** SPOT/HRV color composite of Lake Shinji and Lake Nakaumi study area obtained on Oct.9,1997. Bands 1, 2 and 3 are displayed in blue, green and red.

の SS と Chl-a の関係と同様の形状を示している。しかし低い透明度 (1m 以下) 高い SS (10mg/l 以上) では Chl-a との相関が低く、これらはすべて宍道湖のデータであった。以上の結果から宍道湖・中海における透明度, SS 及び Chl-a は、互いに関係しあって変動していることが推察される。しかしアオコ発生時のような低い透明度, 高い SS 濃度及び高い Chl-a 濃度の場所では、線形相関が崩れるケースがあることを示している。

アオコ発生時 (1997 年 10 月 9 日) に取得された衛星画像を図 8 に示す。図 8 は SPOT2/HRV センサーが取得した 3 バンドの合成カラー画像である。水域は陸域よりも反射率が低いため、陸域と比較すると水域のスペクトル情報は極端に小さい。事実、図 8 に示した画像中で水域の部分 (2050144 画素, 820km<sup>2</sup>) の統計をとると、バンド 1 で 11 カウント、バンド 2 で 10 カウント、バンド 3 で 9 カウントの幅であった。さらに衛星データのノイズとなる大気の情報からデータを引くと、残りは数カウントの情報しかない。しかしこのような水域の微細な情報から、

水質の検出に成功した例は多くある (例えば, Lathrop *et al*, 1991 ; Pattiarach *et al*, 1994)。我が国では、安岡・宮崎 (1985) や山本 (1993) が霞ヶ浦において、宮崎ほか (1991) が児島湖において、水尾ほか (1991) が東京湾において LANDSAT5/TM データを使って、それぞれの水域における Chl-a の定量に成功している。これらの解析のほとんどは、現地データと衛星デジタルデータとの回帰分析手法によるものである。ここでは宍道湖・中海におけるリモートセンシングによる水質計測の第一段階として、最も基礎的な単回帰分析手法 (Xi, 1991) を使って、宍道湖のアオコ発生時の Chl-a 濃度のマッピングを行った。各バンドと各水質データ (透明度, SS 及び Chl-a) との相関結果を表 5 に示す。いずれのバンドでも有意な相関があった。中でもバンド 1 と Chl-a との相関が高かった。バンド 1 と Chl-a との関係を図 9 に示す。Chl-a が 50~60  $\mu$ g/l を超えると両者には線形の相関が悪くなったが、全体としての両者の線形性は保たれていると判断した。そしてアオコの分布評価に適している Chl-a 濃度と、バンド 1 (緑波長) との回帰



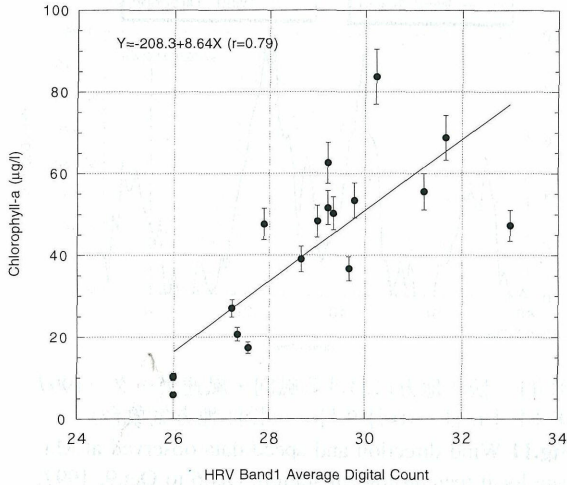


図9 Chl-a と HRV バンド1 との関係 (1997年10月9日). エラーバーは Chl-a の測定誤差を示す.

Fig.9 Relationship between chlorophyll-a and HRV band1 in Lake Shinji and Lake Nakaumi, Oct.9,1997.

式 (式1) を作成した.

$$\text{Chl-a} = 8.64 \times \text{HRV1} + 208.3 \quad (\text{式1})$$

$$r = 0.79, \quad \text{se} = 13.9 \mu\text{g/l}$$

ここで HRV1 は DN 値, r は相関係数, se は推定誤差の統計値で, この回帰式による Chl-a の推定誤差を示している. 図9において Y 軸のエラーバーには作野 (1997a) が報告した Chl-a の測定誤差 (8.03%)

表5 衛星データと水質データとの相関マトリクス. 下線は t 検定 (P=0.01) で有意な相関があることを示す.

Tab.5 Correlation matrix between satellite digital data and water quality data. Underline : Denotes significant 0.01.

Band	Trans.	SS	Chl-a
1 (Green)	<u>-0.81</u>	<u>0.87</u>	<u>0.79</u>
2 (Red)	<u>-0.68</u>	<u>0.85</u>	<u>0.69</u>
3 (Infrared)	<u>-0.62</u>	<u>0.73</u>	<u>0.71</u>

を示した. 式1を使って衛星画像を演算して得た宍道湖・中海における Chl-a 濃度分布図を作成した (図10). その結果, 宍道湖北部に東西方向に 5km 以上伸びた高濃度帯 (60 µg/l 以上), 宍道湖全体の高濃度分布 (40 µg/l 以上), 本庄水域の低濃度領域 (20 µg/l 以下) が比較的明瞭に色分けされた. 前述した 1997 年調査の平均値 (25~42 µg/l) から判断して分かるように 40 µg/l を越す高濃度域が, 特にアオコが顕著だった領域だと推察される. また風による Chl-a 分布の影響を知るための資料として, 図11に衛星通過時刻の 80 時間前からの風向・風速を示す. 衛星通過時刻の 20 時間前までは, 比較的風が弱かったが, 20~50 時間前までは約 4~10m/s の比較的強い西風が連続して吹いていた. これらの強風と

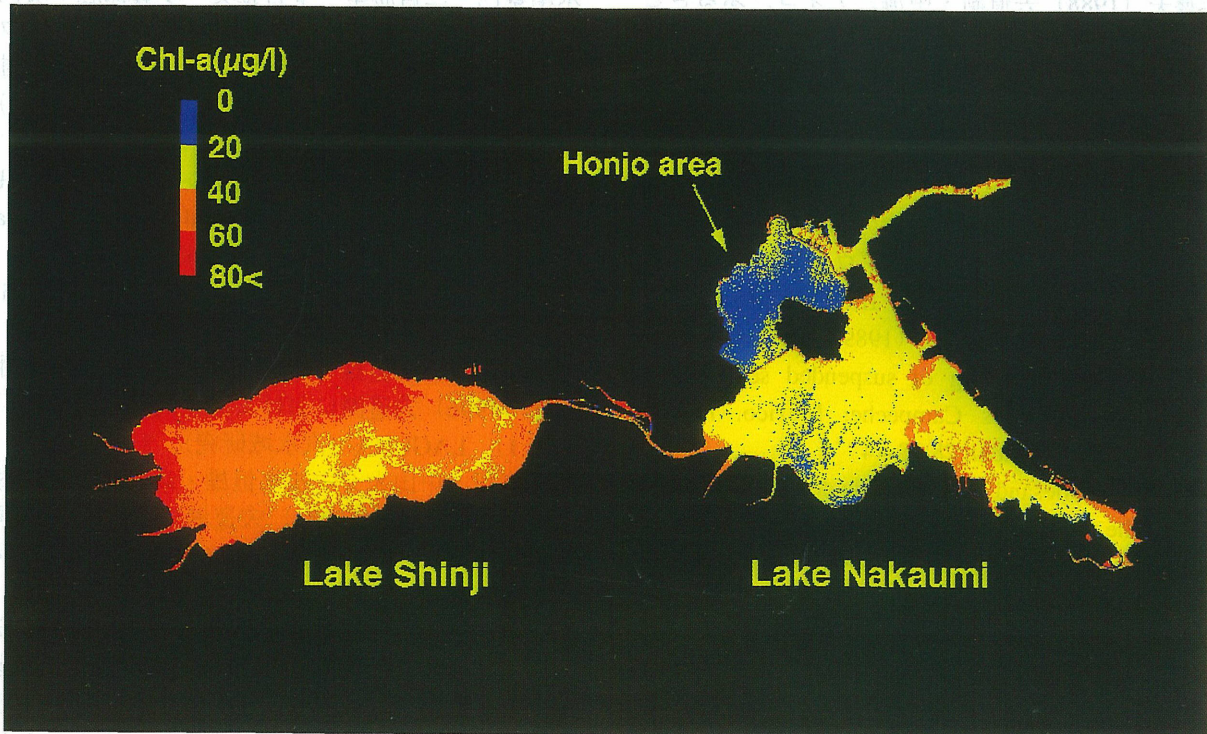


図10 アオコ発生時における宍道湖・中海のクロロフィル a 濃度マップ (1997年10月9日)

Fig.10 Map of chlorophyll-a concentration in Lake Shinji and Lake Nakumi from the simple regression algorithm under algal bloom condition, Oct.9,1997.

Chl-a の濃集との関係は今後の課題として残された。しかし斐伊川河口の高濃度帯や大橋川の中海側河口部の高濃度部は、斐伊川起源の無機懸濁物質や陸地からの高い放射輝度の影響でみかけ上、クロロフィル a 濃度が高く表現されている可能性が高い。

以上のように衛星データを使って水質濃度の推定図を作成することにより、現地調査だけではわかりづらい面的な水質濃度分布の把握が可能となり、湖内の物質循環や湖流の研究などに役立つものと期待される。

#### 謝辞

地質調査所の土田聡博士には現地調査および衛星データの処理について有益な助言をいただいた。千葉大学環境リモートセンシング研究センターの梶原康司博士には主に大気観測を手伝っていただいた。また鳥取大学乾燥地研究センター院生の岡田周平氏および学部生の川本珠生氏、東京大学大学院工学系研究科院生の間宮敦氏、鳥根大学総合理工学部学生諸氏には現地調査を手伝っていただいた。関係諸氏に深く感謝する。

## 引用文献

- Carlson, R.E. (1980) More complications in the chlorophyll - Secchi disk relationship. *Limnology and Oceanography*, **25** (2) : 378-379.
- 伊達善夫 (1988) 宍道湖・中海とアオコ。ふるさとブックレット 12。たたら書房。米子, 49p.
- Edmondson, W.T. (1980) Secchi disk and chlorophyll. *Limnology and Oceanography*, **25** (2) : 378-379.
- 井岡幹博・鳥井清司・福間順・伊達善夫 (1980) 航空機 MSS による宍道湖・中海の観測 (2) - 一回帰分析手法による中海の水質量分布の推定 - , 第 6 回リモートセンシングシンポジウム予稿集:69-72.
- Jensen, J.R., Kjerfve, B., Ramsey III, E.W., Magill, K.E., Medeiros, C. and Sneed, J.E. (1989) Remote sensing and numerical modeling of suspended sediment in Laguna de Terminos Campeche, Mexico. *Remote Sensing of Environment*, **28**:33-44
- Lathrop, R.G., Lillesand, T.M., and Yandell, B.S. (1991) Testing the utility of simple multi-data Thematic Mapper calibration algorithms for monitoring turbid in land waters. *International Journal of Remote Sensing*, **12** (10) :2045-2063.
- Lopez Garcia, M.J. and Caselles, V. (1990) A multi-temporal study of chlorophyll-a concentration in the Albufera lagoon of Valencia, Spain, using Thematic Mapper data. *International Journal of Remote Sensing*, **11** (2) :301-311.
- Lorenzen, M.W. (1980) Use of Chlorophyll-Secchi disk relationships. *Limnology and Oceanography*, **25** (2) :371-372.
- 松永恒雄・作野裕司・高安克己・中村幹雄・國井秀伸 (1996) 宍道湖における水面分光特性と水質。日本リモートセンシング学会第 20 回学術講演論文集:67-68.
- 宮崎清・鷹野洋・安岡善文 (1991) ランドサット TM データによる児島湖及び周辺水域の水質分布推定。日本リモートセンシング学会誌, **11** (2) : 191-193.
- 水尾寛己・二宮勝幸・雫石雅美・多賀保志・安岡善文 (1991) TM データによる東京湾のクロロフィル a 量の検討 - 中間赤外域における水質情報抽出の可能性。日本リモートセンシング学会誌, **11** (3) : 135-139.
- Pattiaratchi, C., Lavery, P., Wyllie, A. and Hick, P. (1994) Estimates of water quality in coastal water using multi-data. Landsat Thematic Mapper data, *International Journal of Remote Sensing*, **15** (8) :1571-1584.
- 作野裕司・松永恒雄・高安克己・中村幹雄・國井秀伸 (1996) 宍道湖における衛星同期水質調査 (その 1), *LAGUNA* (汽水域研究), **3** : 52-72.
- 作野裕司・中山大介・松永恒雄・高安克己・中村幹雄・國井秀伸 (1997a) 宍道湖における衛星同期水質調査 (その 2), *LAGUNA* (汽水域研究), **4** : 29-37.
- 作野裕司・六川修一・松永恒雄・中山大介・高安克己・國井秀伸・中村幹雄 (1997b) 宍道湖画像の大気補正に関する研究-JERS1/OPS データと地上反射率データとの比較, 日本リモートセンシング学会第 23 回学術講演論文集:191-192.
- 鳥井清司・井岡幹博・福間順・伊達善夫 (1980) 航

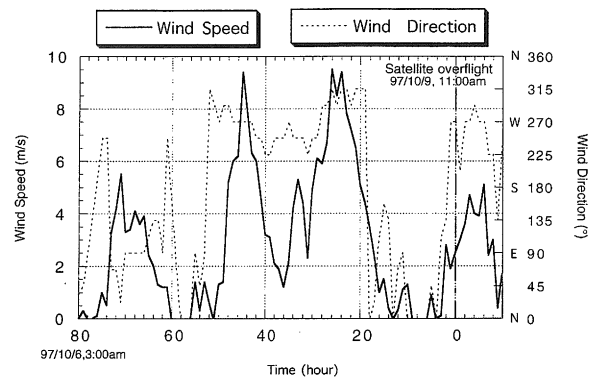


図 11 松江地方における風向・風速データ (1997 年 10 月 6 日~10 月 9 日) (松江地方気象台)

Fig.11 Wind direction and speed data observed at Matsue local meteorological station, Oct.6 to Oct.9, 1997. (Data from Matsue local meteorological station)

- 空機 MSS による宍道湖・中海の観測 (1) - 流れパターンの推定 -, 第 6 回リモートセンシングシンポジウム予稿集: 65-68.
- Unesco (1966) Determination of photosynthetic pigments in sea water. Report of SCORE-UNESCO working group 17 (Paris) : *Monographic Methodology* 1: 69.
- Xia,L. (1993) A united for quantitative remote sensing of suspended sediment concentration. *International Journal of Remote Sensing*, 14 (14) :2665-2676.
- 安岡善文 (1985) 遠隔計測による水質の定量, 国立環境研究所研究報告, 77 : 165-185.

付表 1. 宍道湖における水質調査データ (1997年6月3日)

Appendix 1. Raw data of water quality research in Lake Shinji, June 3, 1997.

Table with columns for Sampling Point (S1-1 to S4-2) and rows for various parameters including North latitude, East longitude, Time (Begin/End), Water depth, Secchi disk depth, Water temp., DO, pH, Salinity, SS, and various chemical parameters like Chl-a, Chl-b, Carot., and Phaeo.

付表 2. 宍道湖における水質調査データ (1997年6月4日)

Appendix 2. Raw data of water quality research in Lake Shinji, June 4, 1997.

Table with columns for Sampling Point (S1-1 to S4-2) and rows for various parameters including North latitude, East longitude, Time (Begin/End), Water depth, Secchi disk depth, Water temp., DO, pH, Salinity, SS, and various chemical parameters like Chl-a, Chl-b, Carot., and Phaeo.

付表 3. 宍道湖における水質調査データ (1997年7月13日)

Appendix 3. Raw data of water quality research in Lake Shinji, July 13, 1997.

Table with columns for Sampling Point (S2-2, S2-3, S2-4, S2-5, S3-3) and rows for various parameters including North latitude, East longitude, Time (Begin/End), Water depth, Secchi disk depth, Water temp., DO, pH, Salinity, SS, and various chemical parameters like Chl-a, Chl-b, Carot., and Phaeo.

付表4. 宍道湖における水質調査データ (1997年8月8日)
Appendix 4. Raw data of water quality research in Lake Shinji, Aug. 8, 1997.

Table with columns for Sampling Point, Latitude, Longitude, and various water quality parameters (Time, Depth, Temperature, DO, Salinity, SS, Chlorophyll) across 14 sampling locations (S1-1 to S4-2, NU1 to NU6).

付表5. 宍道湖における水質調査データ (1997年8月11日)
Appendix 5. Raw data of water quality research in Lake Shinji, Aug.11, 1997.

Table with columns for Sampling Point, Latitude, Longitude, and various water quality parameters (Time, Depth, Temperature, DO, Salinity, SS, Chlorophyll) across 14 sampling locations (S1-1 to S4-2, MB1, MB2, MB3).

付表6. 宍道湖における水質調査データ (1997年9月24日)
Appendix 6. Raw data of water quality research in Lake Shinji, Sep.24, 1997.

Table with columns for Sampling Point, Latitude, Longitude, and various water quality parameters (Time, Depth, Temperature, DO, Salinity, SS, Chlorophyll) across 14 sampling locations (S1-1 to S4-2).

