

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2) -1998年3月の調査

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

Water quality mapping in Lake Shinji and Lake Nakaumi using satellite remote sensing data (part 2) -March, 1998

Yuji Sakuno¹⁾, Daisuke Nakayama²⁾, Tsuneo Matsunaga³⁾, Katsumi Takayasu⁴⁾,
Shuichi Rokugawa¹⁾, Mikio Nakamura²⁾ and Hidenobu Kunii⁴⁾

Abstract: Horizontal and vertical distribution of chlorophyll-*a* concentration (Chl-*a*) in Lake Shinji was estimated using Landsat TM data, vertical Chl-*a* ($\mu\text{g/l}$), relative illuminance (%), water temperature ($^{\circ}\text{C}$), salinity (psu) data simultaneously acquired on 3 March 1998 at about 10:30 a.m. As a result, the following things were found out : 1) Chl-*a* along the south shore side in Lake Shinji was lower than that along the north shore side. 2) Vertical Chl-*a* in Lake Shinji gradually increased to lower layer. 3) When the depths of the euphotic layers are assumed as the depths at which illuminance is 1% of the surface level, the average $\pm$ SD of Chl-*a* standing stock in Lake Shinji was $49.4 \pm 13.5\text{mg/m}^2$.

Key words: chlorophyll-*a*, Lake Shinji, Landsat TM, standing stock

はじめに

宍道湖 (島根県)・中海 (島根県と鳥取県) は、シジミに代表される水産資源の豊富な水域として知られている。そのため宍道湖・中海では水産資源の保護

対策の立案を目的として、多くの研究者や自治体等による水質調査が継続的に行なわれてきた。そのような水質調査においては、特に魚介類の餌となる植物プランクトン量の指標であるクロロフィル *a* 濃度 (以下 Chl-*a* と呼ぶ) が重要な調査項目の一つとなっ

1) 東京大学大学院工学系研究科

Graduate School of Engineering, The University of Tokyo, Bunkyo-ku, 113-8654, JAPAN

2) 島根大学大学院理学研究科

Department of Geology, Shimane University, Matsue, 690-8504, JAPAN

3) 東京工業大学大学院総合理工学研究科

Department of Environmental Science and Technology, Tokyo Institute of Technology, Yokohama, 226-8502, JAPAN

4) 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

5) 島根県水産試験場

Shimane Prefectural Fisheries Experimental Station, Hirata, 691-0076, JAPAN

ている。しかし宍道湖・中海は東西約40kmもある広い湖であり、かつ海や河川とつながっているために水の動きが激しく、船舶による水質調査だけでは湖全体における植物プランクトン量の把握は容易ではなかった。このような問題点を解決するための新しい水質調査法として、水域全体の表層Chl-*a*や表層水温の分布等を瞬時にかつ比較的安価で計測できる衛星リモートセンシングが注目されている。

以上のような背景の下、筆者らは衛星リモートセンシングによる宍道湖・中海のChl-*a*推定を行うにあたっての第1段階として、衛星飛来日に宍道湖・中海において水質調査を継続的に行ってきた(作野ほか, 1996・1997・1998)。その結果、現在までに計24回の衛星同期水質調査を行い、7日分のSPOT HRV (High Resolution Visible, フランス製, 空間分解能: 20m (マルチスペクトルモード), 量子化: 8ビット) 画像, 2日分のLandsat TM (Thematic Mapper, アメリカ製, 空間分解能: 可視・近赤外域=30m; 熱赤外域=120m, 量子化: 8ビット) 画像, 2日分のJERS-1 OPS (Optical Sensor, 日本製, 空間分解能: 20m, 量子化: 6ビット) データを収集することができた。筆者らはすでに7日分のSPOT HRVデータと宍道湖・中海における表層Chl-*a*データとの関係について報告している(作野ほか, 1999)。また衛星飛来日と同期した航空機MSS観測によって、1997年10月9日及び1998年3月3日の宍道湖における表層Chl-*a*濃度分布が明らかになっている(松永ほか, 1998a, b)。本報告では1998年3月3日に宍道湖において取得されたLandsat TMデータ、鉛直のChl-*a*、相対照度、水温及び塩分等のデータを使用して、この日の宍道湖における表層及び鉛直Chl-*a*分布を考察した。

衛星リモートセンシングによる湖沼のChl-*a*推定の現状と問題点

衛星リモートセンシングとは、「対象物における電磁波の反射、放射及び散乱等の分光特性を人工衛星で観測することにより、広い範囲の対象物情報を得る技術」のことである。このうち水質を対象とした衛星リモートセンシングは、衛星から水の分光特性を調べることににより、水中に含まれる植物プランクトンや土粒子等の物質濃度を推定しようとするものである。現在、外洋ではすべての植物プランクトンに含まれるChl-*a*色素の吸収帯を観測する衛星センサ(以下、外洋センサと呼ぶ)のデータを利用して、全地球レベルの表層Chl-*a*分布情報を得るまでに至ってい

る。そしてそのデータは、海洋の基礎生産量推定等に役立てられようとしている(例えばIshizaka, 1998)。

しかし外洋センサは空間分解能(約1km)が悪いため、湖沼や内湾等の比較的狭い水域(例えば、宍道湖の南北幅は約5kmである)の水質現象を推定することは難しい。従ってこれまで湖沼や内湾の表層Chl-*a*推定を行うために、本来陸域の諸現象解析を目的に開発されたLandsat TMやSPOT HRV等の高空間分解能光学衛星センサ(数10mの空間分解能、以下高空間分解能センサと呼ぶ)を利用する方法が工夫されてきた(例えばSugihara *et al.*, 1985)。高空間分解能センサを使った湖沼や内湾のChl-*a*推定では、比較的簡単な統計的方法(以下、統計法と呼ぶ)がよく用いられてきた。統計法を使うためには可能なかぎり多くの衛星・水質データセットが必要である。しかし雲の有無や観測周期(Landsatは16日周期)に依存する衛星データの取得率は低く、衛星に同期したChl-*a*データはさらに少ない。そのため各地の湖沼や内湾では、衛星とChl-*a*の関係を検証することすら困難であるという根本的な問題を抱えている。また衛星データにより表層Chl-*a*濃度分布図が得られたとしても、それが植物プランクトンの総量の指標となる有光層内積算Chl-*a*現存量との関係が明らかにならなければ、生物や水産分野の研究に利用されにくいというのが現状である。

以上のような背景を把握した上で、宍道湖・中海のChl-*a*濃度分布を推定するためには、まず1) 衛星と同期したChl-*a*データを蓄積し、衛星データとChl-*a*データの間関係を知ること、2) 表層Chl-*a*と鉛直Chl-*a*の間関係を明らかにすることが、早急の課題である。本報告はこれらの問題を解決するために宍道湖で行った研究例と位置づけられる。

衛星同期水質調査及びデータ処理の方法

1 衛星同期水質調査法

1998年3月3日に、図1に示した宍道湖14地点で船舶による水質調査を行った。Landsat衛星は午前10時30分頃に宍道湖上空を北から南へ通過し、船舶による水質調査は衛星飛来時刻の前後約1時間の範囲で実施した。位置決定には100m程度の誤差を伴うGPSを用いた。水質調査項目は表層Chl-*a* ($\mu\text{g/l}$)、表層懸濁物質濃度 (mg/l) (以下表層SSと呼ぶ)、そしてpH、塩分、水温及び溶存酸素(水深0.5, 1.0及び2.0mで計測)及び透明度(m)である。透明度はセッキ板で現場観測し、表層Chl-*a*及び表層SSは各測点で2lの

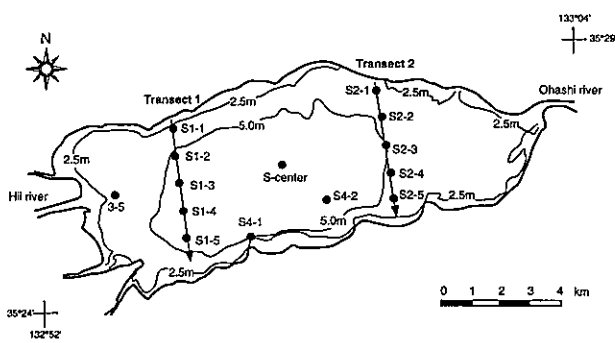


図1. 宍道湖における調査地点 (1998年3月3日).

Fig.1. Survey points in Lake Shinji, 3 March 1998.

表層水 (水深約0.5m) をバケツ採集した後, 実験室に持ち帰って分析した. 表層SSは試水の濾過前後の濾紙の重量差とし, 表層Chl-aはアセトン抽出・吸光度法により UNESCOの式に従って計算した. ただし筆者らの表層Chl-a測定精度は, 測定値20 $\mu\text{g/l}$ に対し標準偏差が2 $\mu\text{g/l}$ 程度である. 水質調査法の詳細については (作野ほか, 1996) を参照されたい. また今回の調査及びその翌日に宍道湖・中海において得られた水質データを付表1, 2に示した.

また, 宍道湖の鉛直Chl-a分布及び鉛直の光量子, 水温及び塩分の分布は, 水中投入式クロロフィル測定装置 (アレック電子社製, ACL1151-DK) を使って現場で計測した. 本装置における水深, 光量子, 水温及び塩分 (電気伝導度により換算) の測定精度と分解能 (括弧内) はそれぞれ0.06m (0.01m), 0.5% (1 μEin), 0.05 $^{\circ}\text{C}$ (0.01 $^{\circ}\text{C}$), 0.005mS (0.015mS) である. このうち光量子データは, 水深0mの値を100%とし, 以下の水深における光量子の値を水深0mの値で割ることにより, 相対照度 (%) に換算した. またACL1151-DK (蛍光法) を使って計測したクロロフィル量 (フェオ色素も含んだ全量) は, 相対値 (N値) として出力される. 今回はN値を物理量に変換するために, アセトン抽出・吸光度法によって計ったChl-a値とN値を使って検量線 (Chl-a ($\mu\text{g/l}$) = $-3.171 + 0.135 \times \text{N値}$, $n=35$, $r=0.894$) を作成し, Chl-aに換算した. 筆者らが作成した検量線によるChl-aの測定精度 (実測値から推定値を引いた残差の標準偏差) は2.74 $\mu\text{g/l}$ であった. なお, ACL1151-DKによるクロロフィル測定の詳細は中山ほか (本誌中) の報告を参考にされたい.

2 データ処理法

本研究における一連のデータ処理過程を図2に示す. 本節では衛星データによる宍道湖の表層Chl-a分

布図作成過程 (STEP1~STEP5) を説明する. 今回使用した衛星データは Landsat TM (レベル2 処理済) データである. 一般にChl-aや水温に関係すると言われている可視・近赤外波長帯及び熱赤外波長帯の観測範囲は, バンド1が0.45~0.52 μm (青), バンド2が0.52~0.62 μm (緑), バンド3が0.63~0.69 μm (赤), バンド4が0.76~0.90 μm (近赤外), バンド6が10.4~12.5 μm (熱赤外) である. 衛星データから表層Chl-a (C) 及び表層水温 (Ts) を推定するモデルは, それぞれ湖沼や内湾等でよく用いられている以下のような単バンド及び比バンドの単回帰モデル, 及び重回帰モデルを使った.

$$C = \alpha (TM_i) + \beta \quad (1), \quad C = \alpha (TM_i / TM_j) + \beta \quad (2),$$

$$C = \alpha (TM_i) + \beta (TM_j) + \gamma (TM_k) + \dots + \delta \quad (3),$$

$$Ts = \alpha (TM_6) + \beta \quad (4)$$

ここでCは表層Chl-a, Tsは表層水温, TMはTM各バンドにおけるDN, TM6はTM6のDN, i, j 及び k はTMの各バンド, α, β, γ 及び δ は回帰係数を示す. また, これらの回帰式を使って推定されたChl-a及び水温の誤差 (以下, errの記号で表す) は, 次式で表すことにする.

$$\text{err} = \sqrt{\frac{1}{(N-1)} \sum (Y_{\text{estimated}} - Y_{\text{in-situ}})^2} \quad (5)$$

ここで, $Y_{\text{estimated}}$ は推定Chl-a及び推定水温, $Y_{\text{in-situ}}$ は現場測定したChl-a及び水温を示す.

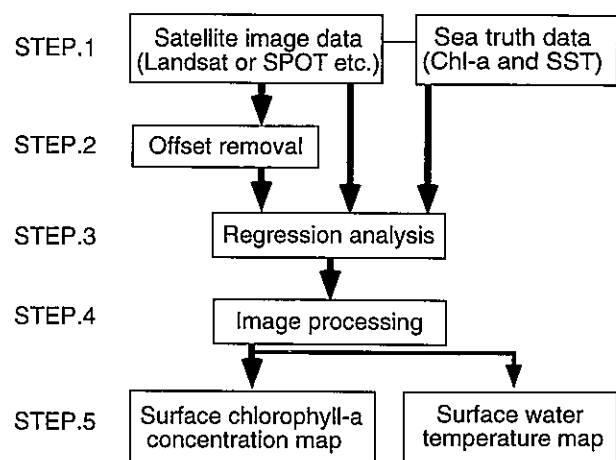


図2. 本研究のデータ処理過程.

Fig.2. Flow chart of data processing in this study.

衛星データによる宍道湖の表層Chl-*a*及び表層水温推定

1 実測データによる透明度、表層SS及び表層Chl-*a*の水平分布特性

実測の結果得られた宍道湖湖心の表層水質データと3月の平年値(島根大学理学部化学科環境分析化学研究室, 1994)との比較を表1に示す。これによると、本調査時は平年と比べて高透明度、低SS、低Chl-*a*、低塩分、高DOであったことがわかる。特にChl-*a*や塩分は平年の半分程度の値であったが、水温は平年並みであった。一方、本調査時における宍道湖の透明度、表層SS及び表層Chl-*a*の水平分布を図3に示す。全体に見て宍道湖南岸ほど高透明度、低表層SS及び低表層Chl-*a*であったことがわかる。筆者らは1995年から1997年の間、宍道湖の衛星飛来時刻(午前10～11時)前後約1時間以内における透明度、表層SS及び表層Chl-*a*の水平分布を継続的に調査し、いずれも沿岸部で湖水が澄んでいる傾向にあることを報告してきたが(作野ほか, 1996・1997・1998)、今回も同様の傾向であった。このことから、午前10～11時前後においては、一般に宍道湖沿岸水は澄んでいる傾向にあると推測される。

2 可視・近赤外データと表層Chl-*a*の回帰分析

現在、我が国において継続的に衛星同期水質調査を使って表層Chl-*a*推定を試みている湖沼や内湾は少ないが、最近東京湾の衛星・水質データセットを使って水尾ほか(1998)が表層Chl-*a*推定のための重回帰式を報告した。

$$\text{Log}_{10}(C) = 0.158 \times TM4 - 0.057 \times TMI + 4.512$$

$$(n=66, r=0.837) \quad (6)$$

ここでCは表層Chl-*a*、TM4及びTMIはそれぞれTMバンド4と1のDNである。そこでまず、東京湾の式が本調査時にも適用できるか検証した。現場調査のデータを3式に代入して得た表層Chl-*a*と実測した表層Chl-*a*の関係を図4に示す。これより、宍道湖のデータは3式から大きく外れてしまい、この式が本調査時には適用できないことがわかった。3式が本調査で適用できなかった理由については、東京湾と宍道湖における水の光学的特性が異なることや、東京湾と宍道湖上空大気のアerosol特性が異なること等が考えられた。

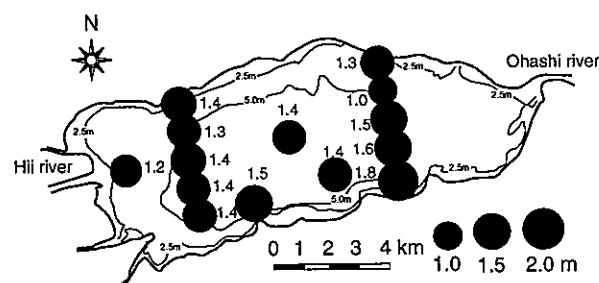
今回は3式が使えなかったため、本調査時の宍道湖

表1. 宍道湖湖心の透明度及び表層の懸濁物質濃度、クロロフィル*a*濃度、水温、塩分及び溶存酸素項目における本調査値と平年値の比較。

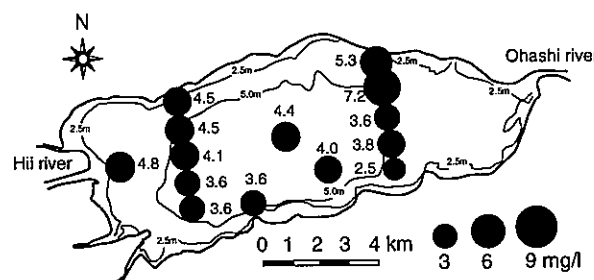
Table 1. Comparison between this survey and monthly mean data of transparency, surface suspended solid, chlorophyll-*a* concentration, water temperature, salinity, dissolved oxygen at the center of Lake Shinji.

	Date	Chl- <i>a</i> ($\mu\text{g/l}$)	Tr. (m)	SS (mg/l)	W.Temp. ($^{\circ}\text{C}$)	Sal. (psu)	DO (%)
This survey	3.Mar.98	9.4	1.4	4.4	7.6	1.6	162
Monthly mean	Mar.1982-1993	19.6	1.2	6.2	7.4	2.7	112

(a) Transparency (m)



(b) Suspended solid (mg/l)



(c) Chlorophyll-*a* ($\mu\text{g/l}$)

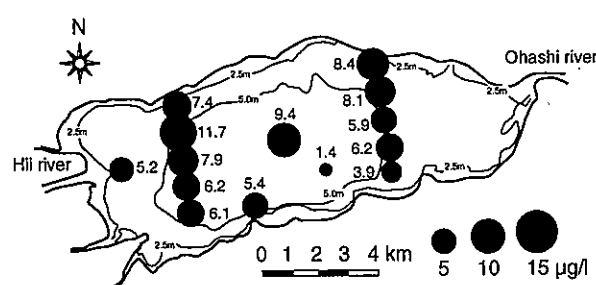


図3. 宍道湖における透明度、表層懸濁物質濃度及び表層クロロフィル*a*濃度の水平分布(1998年3月3日午前8:40～11:23)。(a) 透明度(m), (b) 表層懸濁物質濃度(mg/l), (c) 表層クロロフィル*a*濃度($\mu\text{g/l}$)。

Fig.3. Horizontal distribution of transparency, surface suspended solid concentration and surface chlorophyll-*a* concentration in Lake Shinji, 3 March 1998. (a) Transparency, (b) Suspended solid concentration, (c) Surface chlorophyll-*a* concentration.

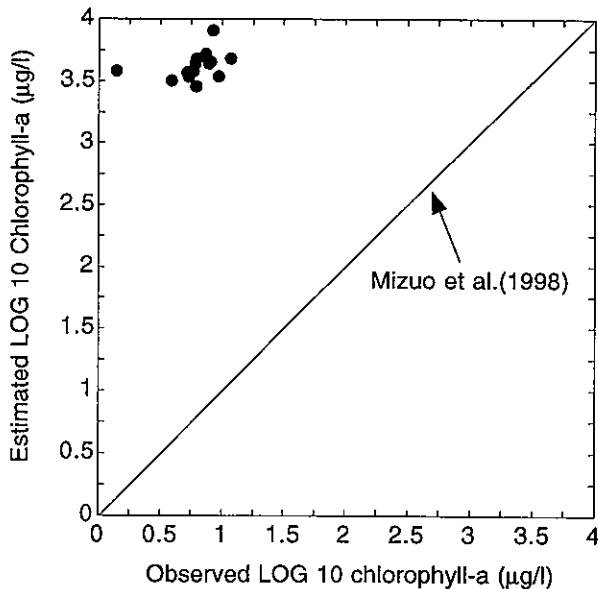


図4. 式6を使用した推定クロロフィルa濃度と実測クロロフィルa濃度の関係 (1998年3月3日).

Fig.4. Correlation between observed and estimated surface water temperature using equation 6 in Lake Shinji, 3 March 1998.

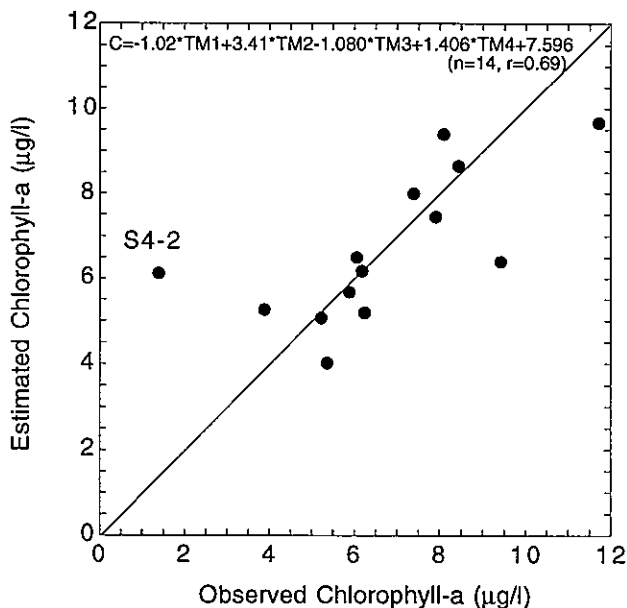


図5. 式7を使用した推定クロロフィルa濃度と実測クロロフィルa濃度の関係 (1998年3月3日).

Fig.5. Correlation between observed and estimated surface water temperature using equation 7 in Lake Shinji, 3 March 1998.

における表層Chl-a推定には別の式を作成することにした。そこで、まず本調査で得た表層Chl-aとTM各バンドデータとの相関を調べた(表2)。その結果、透明度及び表層SSとTM2, TM3及びTM4データの間

表2. 宍道湖におけるTMデータと透明度、表層懸濁物質濃度及びクロロフィルa濃度の相関係数(1998年3月3日)。

Table 2. Correlation coefficient between TM data and transparency, surface suspended solid, surface chlorophyll-a concentration data in Lake Shinji, 3 March 1998.

	TM1	TM2	TM3	TM4	SS	Chl-a
Tr.	-0.40	-0.71	-0.67	-0.50	-0.90	-0.35
SS	0.19	0.54	0.49	0.47	-	0.44
Chl-a	0.10	0.38	0.24	0.38	-	-

n=14

には有意な相関(有意水準0.05でt検定を行って、「相関がない」が棄却された。以下相関があると述べる時は、これと同じ方法によって検定された結果とする)が得られたが、表層Chl-aについてはいずれのバンドでも有意な相関は得られなかった。このことは今回は単バンドのTMデータではChl-a推定が難しいことを示している。よって複数のバンドを使ってChl-a濃度をするため、2, 3式で表した比バンドによる単回帰モデルと重回帰モデルを使って宍道湖表層Chl-aとTMデータの関係を調べた。ただし、比バンドモデルは、暗画素法によるパスラジアンズ除去を行った場合(作野ほか, 印刷中)も試行した。その結果は表2に示すとおり、TMの4バンドを使った重回帰式(次式)による推定Chl-aと実測Chl-aの相関が最も高くなった。

$$C = -1.02 \times TM1 + 3.41 \times TM2 - 1.080 \times TM3 + 1.406 \times TM4 + 7.596 \quad (n=14, r=0.69) \quad (7)$$

ここでCは表層Chl-a (µg/l), TM1, TM2, TM3及びTM4はそれぞれのバンドのDNである。各測点のTMデータを4式に代入して得られる推定表層Chl-aと実測した表層のChl-aの関係を図5に示す。これより測点S4-2は回帰直線上から外れていた。その理由の一つとして、測点S4-2の表層Chl-aは1.4µg/lと低い値を示しているため、筆者らのChl-a測定法(アセトン抽出・吸光度法)では正しく計測できていなかった可能性が考えられた。

3 熱赤外画像データと水温データの回帰分析

TMの熱赤外バンド(バンド6)の「DN」と湖沼や内湾における「表層水温」との間には、高い相関があることが知られている(例えばLathrop and Lillesand, 1986)。そこで本調査日のデータについても4式に示した単回帰モデルを使って回帰分析を行った。その

結果、次式のような線形回帰式が得られたが、相関係数は0.47と低かった。

$$Ts = 0.232 \times TM6 - 14.675 \quad (n=14, r=0.47) \quad (8)$$

ここで、 T_s は表層水温(°C)、 $TM6$ はTMバンド6のDNを表す。

しかし、1日のデータだけでは両者の関係を評価できないと考え、宍道湖・中海湖心で1時間毎の自動観測を行っている建設省の「上層水温データ(1990年2月9日, 5月9日, 8月20日及び9月21日の午前10時観測)」と「TMバンド6データ」との回帰分析を行った。その結果、両者には高い相関があり、次のような線形回帰直線が得られた。

$$Ts = 0.312 \times TM6 - 21.806 \quad (n=7, r=0.991) \quad (9)$$

これは、最近、水尾ほか(1998)が報告した東京湾の表層水温推定式($SST = 0.315 \times TM6 - 20.891$, $n=66$, $r=0.968$)とほぼ同じ傾きであった。ここで8式と9式に使用したTMバンド6データと表層水温データの関係を図6に示す。これよりTMバンド6データを使って、宍道湖・中海の季節的な水温差は比較的精度よく推定できることがわかった。しかし、宍道湖・中海に

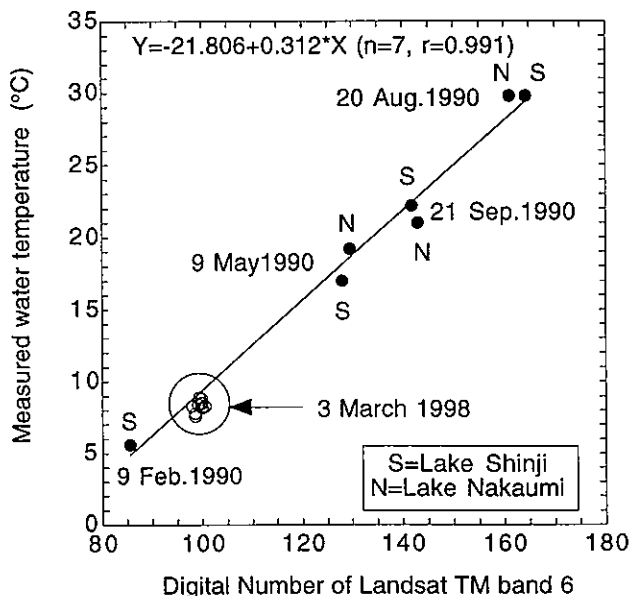


図6. 式8を使用した推定表層水温と実測表層水温の関係(1998年3月3日)。

Fig. 6. Correlation between observed and estimated surface water temperature using Equation 8 in Lake Shinji, 3 March 1998.

おける地点間の水温差はいずれの時期も1~2°C程度であり、両者の相関は必ずしもよくない。従ってTMバンド6のデータを使う場合、宍道湖・中海における地点間の相対的な水温差は議論できるが、定量的な議論をするのは難しいと考えられる。

4 TMデータを使って推定された宍道湖の表層Chl-a分布及び表層水温分布

図7に、TMの可視・近赤外データを使って推定された宍道湖の(a)表層Chl-a濃度及び(b)表層水温の分布図を示す。ただし、4-3で述べた通り、TMバンド6を使った地点間の表層水温推定は相対的な議論しかできない。しかし本調査時の水温の目安として、式9を使って得た推定水温を画像の水温表示に用いた。

図7(a)によると湖心から南岸の広範囲にわたって広い範囲でChl-aが低濃度だったと推測される。現場調査における衛星通過の約40分前(午前9時40分頃)における表層Chl-a分布については、松永ほか(1998)が航空機MSSデータを使って、推定Chl-a分布図を作成している。それによると、この日の表層Chl-a濃度は

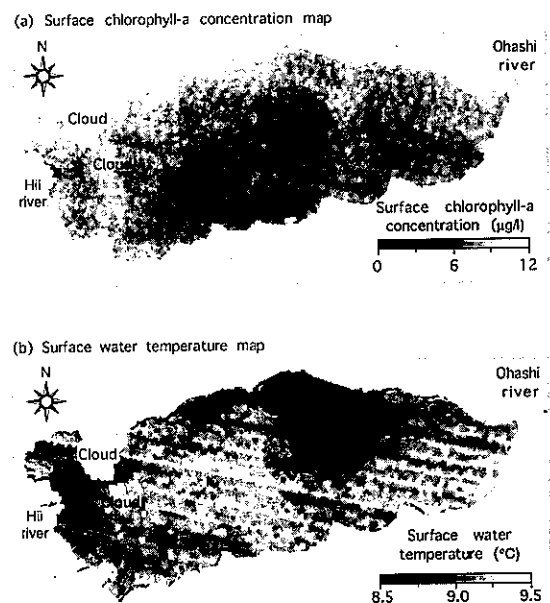


図7. 宍道湖における式7を使用した推定クロロフィルa濃度分布図と式9を使用した推定水温分布図(1998年3月3日)。(a)表層クロロフィルa濃度(µg/l), (b)表層水温(°C)。

Fig. 7. Maps of surface chlorophyll-a concentration estimated using equation 7 and surface water temperature estimated using Equation 8 in Lake Shinji, 3 March 1998. (a) Surface chlorophyll-a concentration (µg/l), (b) Surface water temperature (°C).

沿岸全域が低表層 Chl-*a* で沖が高表層 Chl-*a* であるという分布傾向を示した。衛星観測と MSS 観測には時間的な開きがあり、両者の推定精度評価は難しいが、南岸が広い範囲にわたって低濃度分布であったという結果はよく一致していた。

一方、図7 (b) の宍道湖表層水温分布図によると、斐伊川から宍道湖北岸にかけて冷水塊が伸び、湖心西部から南岸にかけての暖かい水塊と2分している様に見える。このような分布は表層 Chl-*a* 濃度分布のパターンと似ていることから両者に何らかの関係があったと考えられる。今回の表層 Chl-*a* 及び表層水温の分布パターンは、流入河川流量、風、日射等に起因する湖流 (吹送流や熱による対流) 及び懸濁物粒子の沈降速度等から説明できると考えられ、今後の研究が待たれる。

宍道湖における表層 Chl-*a* と有光層内積算クロロフィル現存量の関係

1 Chl-*a* の鉛直分布特性

現場調査における Chl-*a* と相対照度の鉛直分布を図8 (a) 及び (b) に示す。これによると下層 (特に水深1mより下方) ほど高 Chl-*a* である傾向を示している。すでに宍道湖では「表層に比べて3mあるいは5mと

いう深さの方がクロロフィル量が多い」という報告があり (國井, 1996), 今回もこれを支持する結果となった。一般に外洋や湖の表面付近では光が強すぎるため、強光阻害を起こし、亜表層に Chl-*a* ピークを形成することがよく知られている。本調査時も午前10時前後で快晴であったことから、強光阻害の影響をも考えられる。また宍道湖のような比較的浅い湖における晴天時の日中では、湖底付近まで光合成に必要な光が十分届いているために、下層に植物プランクトンが濃集したのではないかと考えられる。実際、図8 (b) をみるとほとんどの測点で湖底付近まで1%程度の相対照度であった。また、相対照度の分布から最小二乗法によって求めた消散係数の平均値±標準偏差は $1.05 \pm 0.10 \text{ m}^{-1}$ であった。

近藤ほか (1994) は中海の鉛直 Chl-*a* 分布について、塩分躍層以浅に高濃度分布しており、それ以深では急激に減少する傾向が認められたと報告している。このことから今回のデータは中海の一般的な鉛直 Chl-*a* 分布とは異なる分布をしており、その理由の一つとして宍道湖は塩分躍層が形成されにくい性質があるからだと考えられた。しかしここでは、表層 Chl-*a* と有効層内積算クロロフィル現存量の関係を求めることを目的としており、Chl-*a* の鉛直分布に対する詳細なメカニズムは別の研究に委ねる。

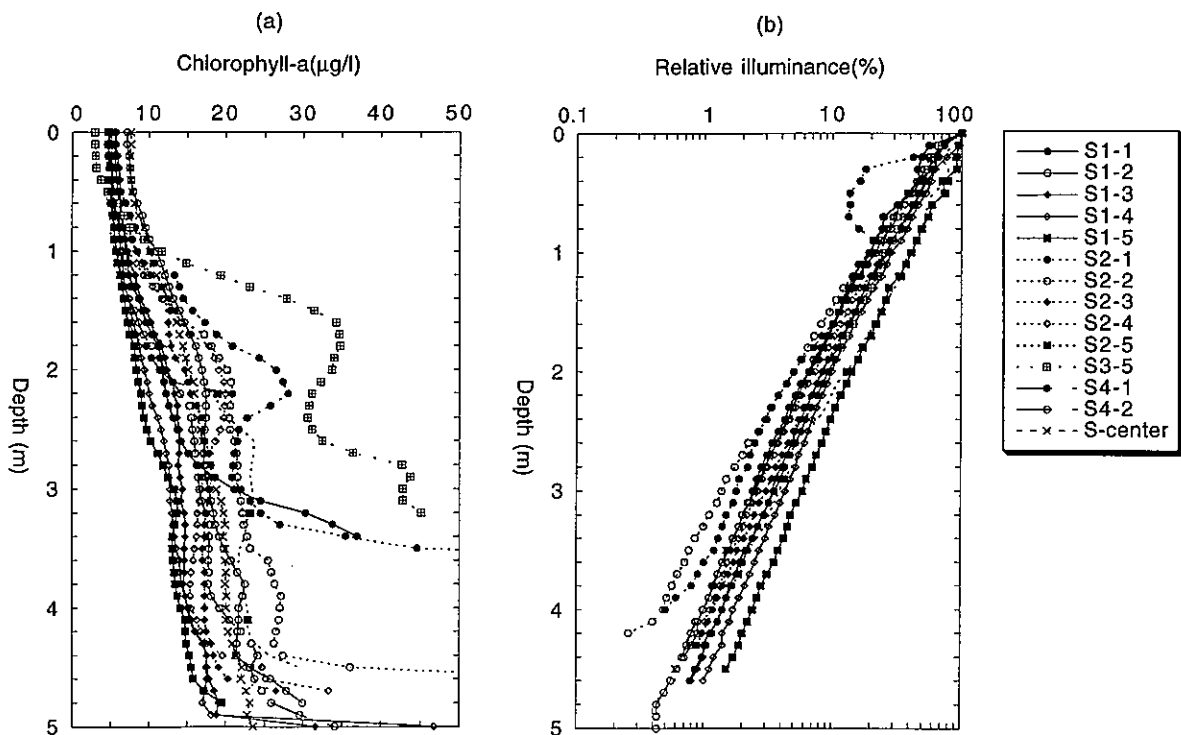


図8. 宍道湖におけるクロロフィル*a*濃度と相対照度の鉛直分布 (1998年3月3日). (a) 表層クロロフィル*a*濃度 ($\mu\text{g/l}$), (b) 相対照度 (%).

Fig.8. Vertical distributions of chlorophyll-*a* concentration and relative illuminance in Lake Shinji, 3 March 1998. (a) Chlorophyll-*a* concentration ($\mu\text{g/l}$), (b) Relative illuminance (%).

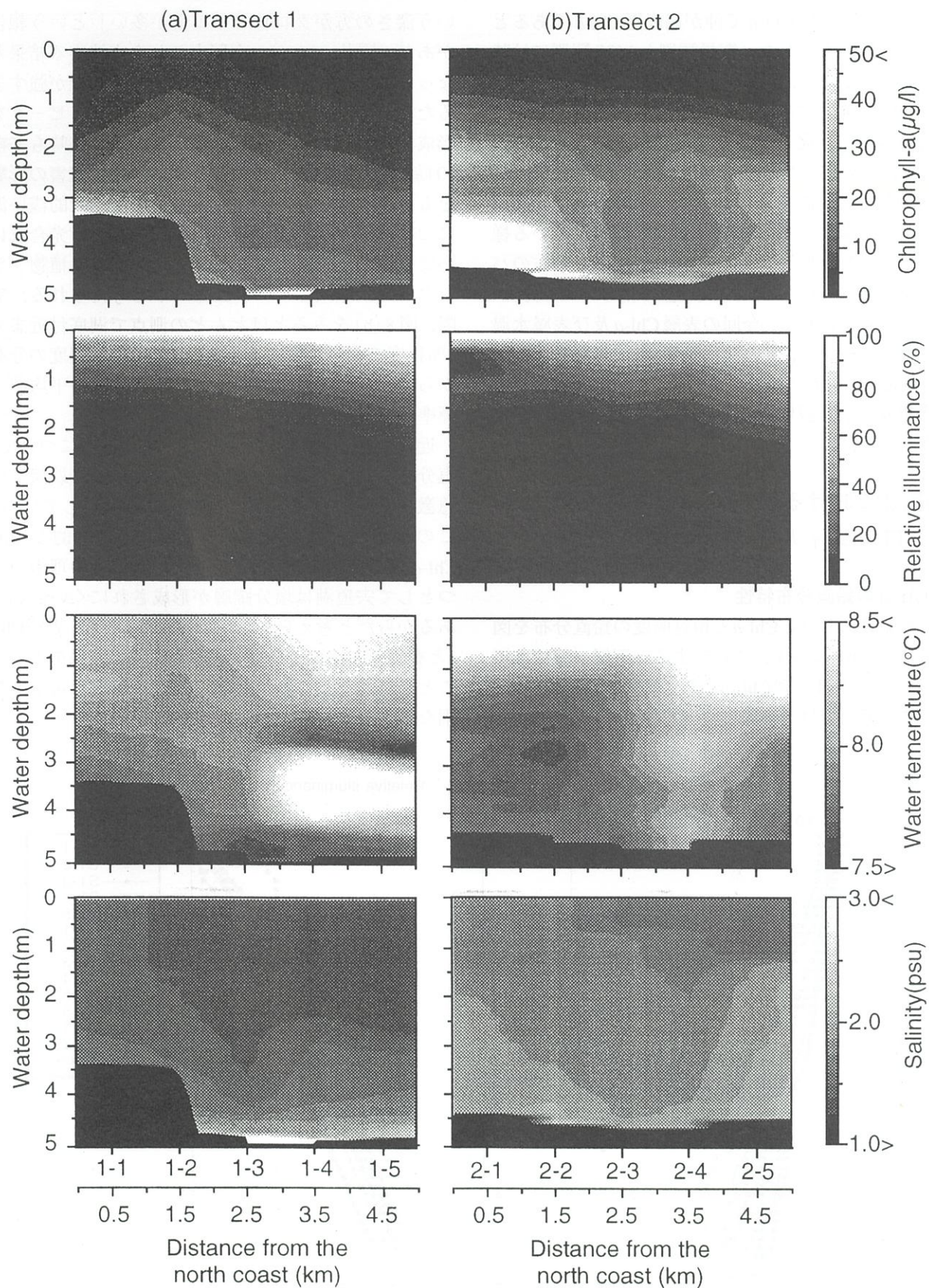


図9. 宍道湖の南北測線におけるクロロフィルa濃度、相対照度、水温及び塩分の鉛直分布（1998年3月3日）。（a）測線1，（b）測線2。

Fig.9. Vertical distributions of chlorophyll-a concentration, relative illuminance, water temperature and salinity along the north-south sections in Lake Shinji, 3 March 1998. (a) Transect 1, (b) Transect 2.

2 照度、水温及び塩分が鉛直 Chl-a 分布に及ぼす影響

宍道湖の南北2測線に沿った Chl-a, 相対照度, 水温, 塩分の鉛直断面を図9に示す。測線1の表層 Chl-a は沿岸部ほど低濃度であるが, 両測線とも下層ほど高濃度を示すように成層化しており, 特に湖底付近では高濃度になっていることがわかる。また Chl-a と水温の構造はよく似ており, 互いに関係しあっていると考えられた。しかし, 測線1の水温で水深3~4mに2km程度の幅の暖水塊, 測線2の3.5m~4.5m付近で1km程度の幅の高 Chl-a 水塊が見られ, このような場所では水温と Chl-a は無関係の分布形態を示していた。相対照度は先に図示したが, 南岸ほど深くまで光が入射していたことがわかる。また両断面とも水深2m付近で相対照度が10%程度になっており, それ以降が比較的高 Chl-a 濃度となっていることがわかる。塩分については南岸ほど低濃度となる傾向があるが, 湖水はよく混ざり合っており中海のよう明瞭な塩分躍層は見られなかった。ただし測線1の最も深い湖底地形(幅約1km)となっている部分に高塩分水(約3psu以上)が分布していた。また, その場所では Chl-a も高濃度で分布しており, かつ低水温であった。以上の結果から照度, 水温, 塩分は鉛直 Chl-a 分布に影響を与えていると推測され, 相互関係について今後定量的に検討する必要があると考えられた。

3 表層 Chl-a と有光層内積算 Chl-a 現存量の関係

有光層 Chl-a を見積もるためには, まず有光層を定義しなければならない。一般に有光層とは, 「植物プランクトンの光合成と呼吸が等しくなる深度より浅い層」と定義される。有光層の下限は「表面光を100%とした場合の相対照度が1%になる深さ」(有賀, 1973), 「透明度の2~2.5倍」(宝月, 1998) とほぼ一致することが知られている。しかし, これまで宍道湖における有光層の下限について議論した例は少ない。従ってここでは宍道湖の有光層を, 1) 透明度の2倍以浅の層, 2) 各測点における相対照度1%以浅の層, 3) 湖底以浅の層と仮定した。そして本調査時の相対照度データを使ってそれぞれの有光層深度を10cm深の分解能で求め, 有光層内の積算 Chl-a 現存量 (mg/m^2) を計算した。有光層と仮定した深度 (m) と有光層有光層 Chl-a (mg/m^2) の平均値と標準偏差をそれぞれ表3(a), (b)に示す。これによると宍道湖の有光層下限の水深は平均値で約3~4mにあり, 仮定1, 2, 3の順で深く見積もられることがわかった。一方, 推定された有光層 Chl-a は, 平均値で31~71 mg/m^2 の範

表3. 宍道湖における推定有光層深度と推定有光層内クロロフィルa現存量の平均値と標準偏差 (1998年3月3日)。(a) 推定有光層深度 (m), (b) 推定有光層内クロロフィルa現存量 (mg/m^2)。

Table 3. Estimated depth of euphotic layer, and standing stock of chlorophyll-a concentration in Lake Shinji, 3 March 1998. (a) Depth (m) of euphotic layer, (b) Standing stock of chlorophyll-a in the euphotic layer.

(a)				
Lower limit of euphotic layer	Depth of euphotic layer(m)			
	Ave.	SD	Min.	Max.
Transparency*2	2.8	0.4	2.0	3.6
1% illuminance	3.7	0.8	1.8	4.6
Bottom	4.4	0.9	2.2	5.4

(b)				
Lower limit of euphotic layer	Standing stock of chlorophyll-a (mg/m^2)			
	Ave.	SD	Min.	Max.
Transparency*2	31.4	9.5	20.0	49.2
1% illuminance	49.4	13.5	10.8	62.3
Bottom	71.4	32.7	16.2	162.7

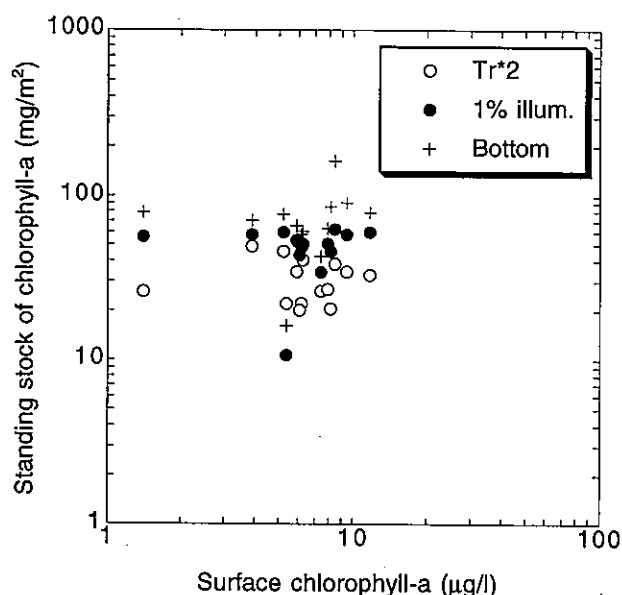


図10. 表層クロロフィルa濃度と有光層内クロロフィルa現存量の関係 (1998年3月3日)。

Fig.10. Comparison between surface chlorophyll-a concentration and standing stock of chlorophyll-a in the euphotic layer of Lake Shinji, 3 March 1998.

囲内で, 仮定3 (水中全層総クロロフィル量) の平均値±標準偏差は $71.4 \pm 32.7 \text{ mg}/\text{m}^2$ であった。國井 (1996) は, 1995年11月~1995年11月にかけて毎月宍道湖湖心において水中全層総クロロフィル量を測定した結果, 最大値, 平均値±標準偏差, 最小値がそれぞれ, 341.4, 132.7 ± 80.7 , $41.6 \text{ mg}/\text{m}^2$ であったと報告している。このことから今回は, 水中全層のクロロフィル量としては宍道湖の平均的な値かそれ以下の低い値であったことがわかった。

また図10は今回の調査時における宍道湖の表層

Chl-*a*と有光層 Chl-*a*の関係を表している。両者の関係について、宍道湖においてはまだ報告されていないため、外洋や内海で研究された例を参考に考察する。外洋においては、Smith and Baker (1978) が、「光学的深度（消散係数の逆数）における平均 Chl-*a*濃度」と「有光層平均 Chl-*a*濃度」の関係を両対数プロットすると、両者に直線関係 ($n=140$, $r=0.955$) があることを示した。同様に Morel and Benthon (1989) も高い相関 ($n=3492$, $r^2=0.872$) を得た。一方、葛西ほか (1998) は春季ブルーム時の親潮水域において、柳ほか (1998) は瀬戸内海において、それぞれ表層 Chl-*a*と有光層 Chl-*a*の関係を調べ、いずれもミカエリス-メンテン式の形状 ($Y=a \times X/(X+b)$)、ここで a , b は回帰係数、 Y は有光層 Chl-*a*, X は表層 Chl-*a*) で表されたと報告した。

以上のような背景から「光学的深度における平均 Chl-*a*濃度」と筆者らが測定した「表層 Chl-*a*濃度」が線形関係に有ると仮定した場合、表層 Chl-*a*濃度と有光層 Chl-*a*分布の関係は、指数関数の式またはミカエリス-メンテン式の形状の関数等で表される可能性がある。しかし今回のデータはいずれの式を仮定した場合でも、有光層下限の設定条件にかかわらず、表層 Chl-*a*と有光層 Chl-*a*の間に有意な相関は得られなかった。これは、今回統計解析に使用したデータ数 ($n=14$) が少なかったために、宍道湖における両者の関係を統計的に推測することができなかったからだと考えられる。従って、今後筆者らが蓄積しているデータに対し同様な処理を行い、データ数を増やすことによって、宍道湖における表層 Chl-*a*と有光層 Chl-*a*の関係が明らかになるものと期待される。

ま と め

本報告では1998年3月3日午前10時半頃に宍道湖において同時的に取得した Landsat TM データ、垂直 Chl-*a*, 相対照度、水温及び塩分等のデータを使用して、宍道湖の表層及び鉛直 Chl-*a*分布を考察した。その結果、以下のようなことがわかった。

- 1) 宍道湖の表層 Chl-*a* は南岸全域が北岸より低い傾向にあった。
- 2) 宍道湖における垂直 Chl-*a* の分布は、下層ほど濃度が高く、ほぼ成層化していた。
- 3) 宍道湖の有光層 Chl-*a* は有光層を相対照度の1%と仮定した場合、有光層深度及び有光層 Chl-*a* の平均値±標準偏差は、それぞれ $3.7 \pm 0.8\text{m}$, $49.4 \pm 13.5\text{mg/m}^2$ の値を示した。

今後は、多時期の衛星・水質データセットを使って宍道湖の表層 Chl-*a* 分布図を作成するとともに、表層 Chl-*a* とクロロフィル現存量の関係を調べるためのデータを増やし、両者の関係を明らかにしたい。そして宍道湖の衛星データからクロロフィル現存量の分布または基礎生産量の分布を導きたい。

謝辞：本研究で使用した Landsat データは、米国政府所有で、Space Imaging EOSAT / 宇宙開発事業団によって処理され、提供されたものである。宍道湖・中海の湖心表層水温データは建設省出雲土木工事事務所から提供していただいた。また現地調査にあたっては島根大学及び東京大学の大学院生の方々に手伝っていただいた。関係各位にお礼申し上げます。

引 用 文 献

- 有賀祐勝 (1973) 水界植物群落の植物生産Ⅱ—植物プランクトン—。生態学講座6巻。共立出版、東京、91p.
- Ishizaka, J. (1998) Spatial distribution of primary production off Sanriku, Northwestern Pacific during spring estimated by Ocean Color and Temperature Scanner (OCTS). *J. Oceanogr.*, 54: 553-564.
- 葛西広海・斉藤宏明・津田敦 (1998) 1997年春季ブルーム時の親潮域における基礎生産特性—リモートセンシングによるクロロフィル *a* 現存量推定の有効性—。1998年日本海洋学会春季大会講演要旨集, 87.
- 國井秀伸 (1996) 宍道湖湖心における水深別クロロフィル量と光合成速度の季節変化 (予報)。LAGUNA (汽水域研究), 3: 97-101.
- 近藤邦男・清家泰・橋谷博 (1994) 汽水湖中海における栄養塩類および植物プランクトンの鉛直分布を支配する塩分躍層の役割。日本陸水学会, 55, 47-60.
- 宝月欣二 (1998) 湖沼生物の生態学—富栄養化と人の生活にふれて—。共立出版、東京、161p.
- Lathrop, R. G. and Lillesand, T., M. (1986) Use of Thematic Mapper data to assess water quality in Green Bay and Central Lake Michigan. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 52: 671-680.
- 松永恒雄・作野裕司・中山大介・高安克己・國井秀伸・中村幹雄・山室真澄 (1998a) 宍道湖・中海の航空機MSS観測。平成9年8月と10月。日本リモートセンシング学会, 第24回学術講演論文集, 131-132.

- 松永恒雄・作野裕司・中山大介・高安克己・國井秀伸・中村幹雄・山室真澄 (1998b) 航空機MSSによる宍道湖・中海表層クロロフィル a 濃度マッピング. 日本陸水学会第63回大会講演予稿集, 196.
- 水尾寛己・岡敬一・小倉久子・二宮勝幸・大道章一・飯村晃・安藤晴夫・三嶋義人・安岡善文 (1988) 人工衛星データによる水質モニタリング—関連自治体による環東京湾プロジェクトの紹介—. 日本リモートセンシング学会, 18:286-290.
- Morel, A. and Berthon, J. (1989) Surface pigments algal biomass profiles, and potential production of euphotic layer: Relationships reinvestigated in view of remote sensing applications. *Limnol. Oceanogr.*, 34: 1545-1562.
- 作野裕司・高安克己・松永恒雄・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: 57-72.
- 作野裕司, 中山大介, 高安克己, 松永恒雄, 中村幹雄, 國井秀伸 (1997) 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・中山大介・高安克己・松永恒雄・中村幹雄・國井秀伸 (1998) 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—. LAGUNA (汽水域研究), 5: 29-37.
- 作野裕司・六川修一・松永恒雄 (1999) 衛星画像による湖沼水質評価のための大気補正法の比較 - 宍道湖・中海のSPOTデータを利用して. 千葉大学環境リモートセンシング研究センター共同利用研究発表報告集, 4, 13-18.
- Shimada, M., Oaku, H., Mitomi, Y., Murakami, H., Mukaida, A., Nakamura, Y., Ishizaka, J., Kawamura, H., Tanaka, T., Kishino, M. and Fukushima, H. (1998) Calibration and validation of the oceanic color version-3 product from ADEOS OCTS. *J. Oceanogr.*, 54: 401-416.
- Smith, R. C. and Baker, K., S. (1978) The bio-optical state of ocean waters and remote sensing. *Limnol. Oceanogr.*, 23: 247-259.
- 島根大学理学部化学科環境分析化学研究室 (1994) 橋谷教授退官記念, 宍道湖・中海水質月報. 260-261.
- Sugihara, S., Kishino, M. and Okami, N. (1985) Correlation of chlorophyll concentrations and suspended solid with near-surface upward irradiance within LANDSAT Band 4, 5 and 6. *J. Oceanogr.*, 41, 81-88.
- Tada, k., Monaka, K., Morishita, M. and Hashimoto, T. (1998) Standing stocks and production rates of phytoplankton and abundance of bacteria in the Seto inland sea, Japan. *J. Oceanogr.*, 54: 285-295.
- 柳哲雄・石丸隆・佐藤博雄・塚本秀史 (1998) 紀伊水道のクロロフィル分布に関する現地観測と衛星画像. 海の研究, 7: 369-374.

付表 1. 宍道湖・中海における水質調査データ (1998 年 3 月 3 日)。

Appendix 1. Water quality survey result in Lake Shinji and Lake Nakaumi 3 March 1998.

Sampling Point	S1-1	S1-2	S1-3	S1-4	S1-5	S2-1	S2-2	S2-3	S2-4	S2-5	S3-5	S4-1	S4-2	S-center	NU-center
North latitude	35° 27.36'	35° 26.86'	35° 26.34'	35° 25.88'	35° 25.36'	35° 28.03'	35° 27.16'	35° 27.16'	35° 26.57'	35° 26.08'	35° 26.09'	35° 25.376'	35° 26.01'	35° 26.08'	35° 27.74'
East longitude	132° 54.97'	132° 55.02'	132° 55.13'	132° 55.22'	132° 55.25'	132° 59.63'	132° 59.89'	132° 59.89'	132° 59.96'	133° 00.03'	132° 55.60'	132° 56.74'	132° 58.29'	132° 58.34'	133° 11.46'
Time (Begin)	9:05	9:15	9:43	9:50	10:01	11:20	11:10	11:05	10:56	10:42	9:28	10:15	10:30	8:40	9:20
Time (End)	9:09	9:18	9:45	9:54	10:05	11:23	11:15	11:08	11:00	10:46	9:34	10:18	10:34	8:45	9:26
Water depth(m)	3.4	4.8	5	5	4.9	4.4	4.6	4.7	4.5	3.2	2.2	5.1	5.4	7.2	
Transparency (m)	1.4	1.3	1.4	1.4	1.4	1.3	1.0	1.5	1.6	1.8	1.2	1.5	1.4	1.4	1.6
Water temp. (°C) 0.5m	8.0	7.9	8.0	8.3	8.2	8.4	8.3	8.5	8.9	8.8	7.8	8.5	8.5	7.6	8.7
Water temp. (°C) 1.0m	8.0	7.9	7.9	8.2	8.2	8.3	8.0	7.9	8.4	8.5	8.0	8.5	8.3	7.6	8.7
Water temp. (°C) 2.0m	7.8	7.8	7.9	7.9	7.9	7.8	7.6	7.8	8.2	8.0	7.8	8.3	7.9	7.7	9.0
DO(mg/l) 0.5m	18.7	18.8	18.8	19.1	18.8	19.3	18.9	19.0	18.4	18.6	18.7	19.0	19.0	19.1	8.8
DO(mg/l) 1.0m	18.8	19.2	19.4	19.2	19.1	19.4	19.1	20.0	18.6	19.0	118.2	19.0	19.3	19.4	8.8
DO(mg/l) 2.0m	19.1	19.3	19.2	19.6	19.6	19.8	19.7	20.0	20.3	19.0	18.2	18.8	20.1	19.8	8.3
DO(%) 0.5m	157	159	161	161	161	164	160	163	159	160	157	160	165	162	82
DO(%) 1.0m	159	161	164	163	162	164	161	169	159	160	154	161	162	164	82
DO(%) 2.0m	162	165	161	164	168	161	165	169	172	161	154	161	170	167	77
pH 0.5m	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8.2
pH 1.0m	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8.3
pH 2.0m	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8.3
Salinity (psu) 0.5m	1.4	1.4	1.3	1.4	1.4	1.7	1.7	1.5	1.5	1.5	1.3	1.4	1.5	1.6	11.0
Salinity (psu) 1.0m	1.4	1.4	1.3	1.4	1.4	1.7	1.7	1.7	1.6	1.5	1.5	1.4	1.5	1.6	11.2
Salinity (psu) 2.0m	1.5	1.4	1.4	1.4	1.4	1.8	1.7	1.7	1.7	1.9	1.6	1.7	1.7	1.6	13.6
SS (mg/l)	4.5	4.5	4.1	3.6	3.6	5.3	7.2	3.6	3.8	2.5	4.8	3.6	4.0	4.4	5.8
*Chl-a (µg/l)	7.4	11.7	7.9	6.2	6.1	8.4	8.1	5.9	6.2	3.9	5.2	5.4	1.4	9.4	-
*Chl-b (µg/l)	1.1	1.0	1.3	0.8	0.7	1.2	0.7	0.5	0.8	-	0.4	0.4	0.6	1.2	-
*Chl-c (µg/l)	3.2	5.3	3.2	3.0	2.6	4.3	2.5	0.7	1.2	-	1.9	1.8	2.5	4.9	-
*Carot. (µg/l) 4E480	3.4	4.9	3.0	3.1	2.4	3.4	3.7	2.3	1.9	-	2.1	1.7	0.8	0.9	-
*Carot. (µg/l) 10E480	8.6	12.3	7.4	7.8	5.9	8.5	9.3	5.7	4.7	-	5.2	4.1	2.1	2.2	-
**Chl-a (µg/l)	6.7	11.0	7.5	6.2	6.1	7.7	7.4	5.4	5.2	-	4.7	5.0	-	7.7	-
**Phaeo. (µg/l)	1.4	1.4	1.2	0.2	0.4	1.6	1.5	1.0	2.1	-	1.2	0.9	-	2.8	-

*Unesco (1966) method

**Lorenzen (1967) method

付表 2. 宍道湖・中海における水質調査データ (1998 年 3 月 4 日)。

Appendix 2. Water quality survey result in Lake Shinji and Lake Nakaumi, 4 March 1998.

Sampling Point	S1-1	S1-2	S1-3	S1-4	S1-5	S2-5	S4-1	S4-2	NU-1	NU-2	NU-3	NU-4	NU-5	NU-6
North latitude	35° 27.40'	35° 26.87'	35° 26.34'	35° 25.84'	35° 25.36'	35° 26.08'	35° 25.37'	35° 26.01'	35° 30.83'	35° 30.22'	35° 29.19'	35° 28.51'	35° 28.33'	35° 29.08'
East longitude	132° 54.95'	132° 55.04'	132° 55.10'	132° 55.22'	132° 55.30'	133° 00.01'	132° 56.78'	132° 58.29'	133° 09.71'	133° 08.91'	133° 09.02'	133° 09.99'	133° 11.19'	133° 12.43'
Time (Begin)	9:06	9:15	9:24	9:30	9:38	10:25	9:15	10:06	9:56	9:45	9:26	9:09	8:53	8:38
Time (End)	9:09	9:18	9:27	9:35	9:41	10:29	9:54	10:10	10:01	9:48	9:34	9:11	8:57	8:40
Water depth(m)	3.4	5.0	5.2	5.2	5.1	4.8	3.2	5.3	6.0	6.2	6.8	5.6	6.7	6.8
Transparency (m)	1.6	1.3	1.4	1.5	1.4	1.4	1.5	1.5	1.8	2.1	1.9	1.1	1.6	1.6
Water temp. (°C) 0.5m	8.3	8.5	8.4	8.4	8.8	9.1	8.8	8.8	8.8	8.6	8.7	9.0	8.9	8.9
Water temp. (°C) 1.0m	8.3	8.4	8.4	8.6	8.7	9.0	8.8	8.8	8.8	8.6	8.7	9.1	8.9	8.8
Water temp. (°C) 2.0m	8.3	8.5	8.4	8.5	8.6	8.7	8.5	8.6	8.7	8.5	8.8	9.2	9.0	8.9
DO(mg/l) 0.5m	11.7	10.7	11.2	11.1	11.3	11.4	11.3	11.4	7.1	7.5	7.5	8.3	7.8	8.0
DO(mg/l) 1.0m	11.7	11.7	11.4	11.5	11.6	11.6	11.6	11.5	7.1	7.5	7.5	8.2	7.8	7.9
DO(mg/l) 2.0m	11.7	11.7	11.5	11.7	11.7	11.8	11.7	11.6	7.1	7.3	7.3	8.0	7.8	7.8
DO(%) 0.5m	99	93	97	94	97	99	97	98	67	74	74	77	72	74
DO(%) 1.0m	100	100	98	98	99	100	99	99	67	70	70	76	73	73
DO(%) 2.0m	99	110	97	100	99	101	99	99	67	68	68	74	73	72
pH 0.5m	7.9	8.0	8.0	8.0	8.0	8.1	8	8	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3
pH 1.0m	8.0	8.0	8.0	7.9	8.0	8.2	8	8.1	8.3	8.3	8.3	8.2	8.2	8.3
pH 2.0m	8.0	8.0	7.9	7.9	8.0	8.2	8	8.1	8.3	8.3	8.3	8.2	8.2	8.3
Salinity (psu) 0.5m	1.5	1.5	1.4	1.4	1.6	1.7	1.5	1.7	14.7	14.3	14.3	11.5	11.1	10.9
Salinity (psu) 1.0m	1.5	1.5	1.4	1.6	1.6	1.7	1.5	1.7	14.7	14.5	14.5	11.6	11.2	10.9
Salinity (psu) 2.0m	1.5	1.6	1.4	1.6	1.6	1.7	1.6	1.7	14.6	14.7	14.7	12.4	11.4	11.0
SS (mg/l)	4.0	2.7	3.2	4.1	3.6	2.4	2.9	8.4	2.5	1.7	5.9	3.8	3.1	3.1
*Chl-a (µg/l)	9.2	6.6	7.3	4.2	8.2	5.7	6.2	6.2	6.6	5.6	7.6	5.2	4.5	4.0
*Chl-b (µg/l)	2.1	0.6	0.6	1.2	0.9	0.8	-	0.6	0.0	-	0.0	0.7	-	0.1
*Chl-c (µg/l)	7.7	3.4	3.7	3.3	3.0	2.0	-	1.7	2.8	-	2.4	1.8	-	1.5
*Carot. (µg/l) 4E ₄₈₀	4.4	2.4	2.6	2.2	3.8	2.3	2.7	1.9	2.6	3.6	3.8	1.8	2.2	1.3
*Carot. (µg/l) 10E ₄₈₀	11.0	6.1	6.6	5.5	9.5	5.6	6.9	4.7	6.6	9.0	9.6	4.5	5.4	3.2
**Chl-a (µg/l)	2.7	0.5	2.2	3.8	6.4	-	2.6	2.9	5.3	1.9	4.2	0.6	2.5	2.3
**Phaeo. (µg/l)	11.6	10.5	8.7	1.1	3.3	-	6.0	5.6	2.3	6.2	5.9	8.0	3.4	3.0

*Unesco (1966) method

**Lorenzen (1967) method