

## 多時期 Landsat/TM データによる宍道湖・中海の 表層クロロフィル a 濃度分布推定

作野裕司<sup>1</sup>・吉田武史<sup>1</sup>・山本正智<sup>1</sup>・松永恒雄<sup>2</sup>  
中山大介<sup>3</sup>・高安克巳<sup>3</sup>・古津年章<sup>4</sup>・下舞豊志<sup>4</sup>

### Estimation of surface chlorophyll-a concentration using multi-date Landsat/TM data in Lake Shinji and Lake Nakaumi

Yuji Sakuno<sup>1</sup>, Takeshi Yoshida<sup>1</sup>, Masatomo Yamamoto<sup>1</sup>, Tsuneo Matsunaga<sup>2</sup>,  
Daisuke Nakayama<sup>3</sup>, Katsumi Takayasu<sup>3</sup>, Toshiaki Kozu<sup>4</sup> and Toyoshi Shimomai<sup>4</sup>

**Abstract:** An algorithm for the estimation of surface chlorophyll-a (chl-a) was developed and validated using the multi-date Landsat TM data as well as the conjunctive *in situ* data in Lake Shinji and Lake Nakaumi. This highly significant predictive algorithm for surface chl-a is obtained using the TM bands 1, 2, 3, 4, 5 and 7 after dark pixel subtraction as a simple atmospheric correction.

**Key words:** Landsat/TM, chlorophyll-a, multi regression analysis

#### 1. はじめに

汽水域は水産資源豊富な水域としてその価値が再評価されているが、一方で陸と海の接点にあるため富栄養化しやすいという欠点もある。このような水域において、富栄養化メカニズムの解明の基礎となる物質循環研究において、植物プランクトンの分布特性を定量的に明らかにすることは重要な課題の一つである。しかし、汽水域の植物プランクトン分布の時間的・空間的な変動は大きく、従来の調査船による現場観測の点データのみによってその三次元的な分布を捉えることは難しかった。一方人工衛星からの画像は広範囲の植物プランクトン分布を面的に明らかできる可能性があるが、現時点で宍道湖・中海のような湖の水質を専用に計る衛星センサはない。

以上のような背景から筆者らは、陸域観測用に開発された衛星センサデータを利用して、汽水域の水質をモニタリングするための研究を 1995 年から現在まで継続して行ってきた (例えば作野ほか, 1996)。そして、これまでに SPOT データを用いた宍道湖の一次生産量推定法等を報告している (作野ほか, 2001)。

本論では、宍道湖・中海においてまだアルゴリズムが確立されていない、Landsat/TM データによる表層クロロフィル a 濃度 (以下 Chl.a と略す) 推定式を作成し、別のデータを使って検証する。そして TM データから推定される両湖の表層 Chl.a 分布の特徴について考察を行った。

<sup>1</sup> 広島大学大学院工学研究科 Graduate School of Engineering, Hiroshima University, Higashihiroshima, 739-8527, Japan

<sup>2</sup> 国立環境研究所 National Institute for Environmental Studies, Tsukuba, 305-0053, Japan

<sup>3</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>4</sup> 島根大学総合理工学部 Interdisciplinary Faculty of Science and Engineering, Shimane University, Matsue, 690-8504, Japan

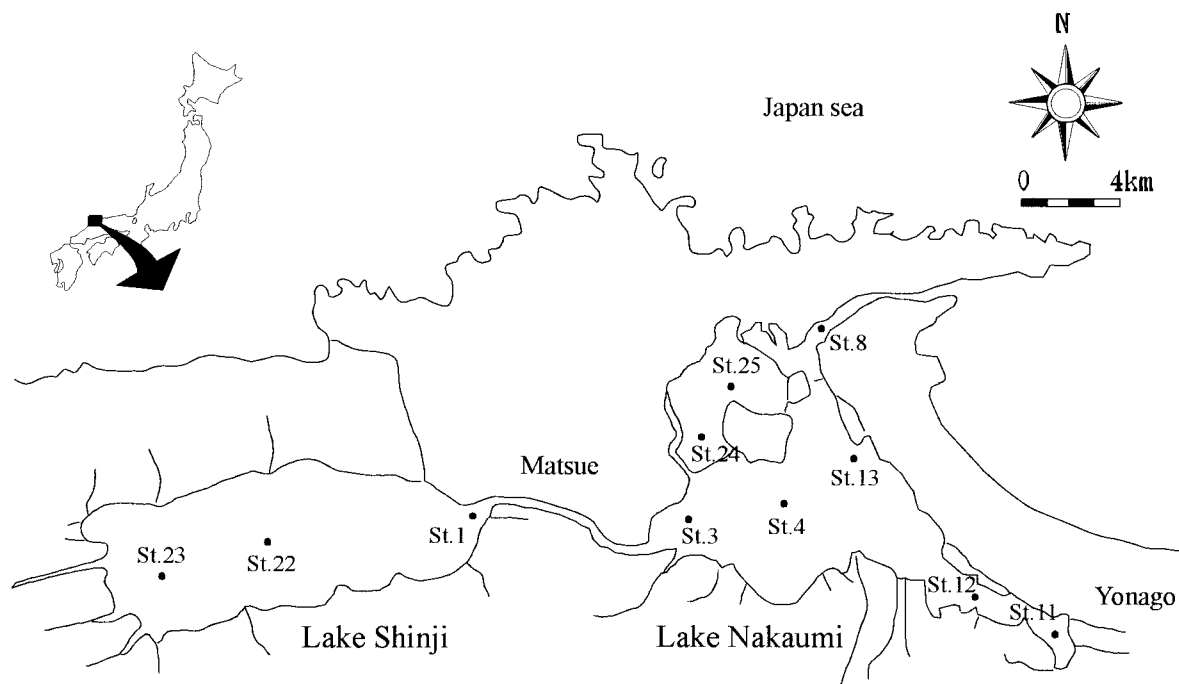


図1. 宍道湖・中海の現場データ取得位置（島根大学理学部の観測点）。

Fig. 1. Sampling points of *in situ* data in Lake Shinji and Lake Nakaumi.

## 2. TMデータによる宍道湖・中海のクロロフィル a 濃度推定式の作成

### 2.1 宍道湖・中海のクロロフィル a 濃度推定法及び使用データ

本論では、TMデータのChl.a推定に多く用いられる以下のような統計的なモデル<sup>1)</sup>を用いて、単回帰分析及び重回帰分析による表層Chl.a推定式の作成を行った。

<単回帰分析によるChl.a推定モデル>

$$Chl.a = aTM + b \quad (式1)$$

<重回帰分析によるChl.a推定モデル>

$$Chl.a = a'TM_1 + b'TM_2 + c'TM_3 + d'TM_4 + e'TM_5 + f'TM_6 + g \quad (式2)$$

ここで、Chl.aは表層Chl.aである（自然対数型を含む）。TMはLandsat/TMデータのデジタル値(DN)、1~6はTMのバンドをそれぞれ示す。またa, b, a', b', c', d', e', f及びgは定数で、現場Chl.aデータと衛星データの単回帰分析又は重回帰分析によって得られる回帰係数が入力される。

研究に使用したLandsat/TMデータは1990/5/9~1998/3/3の5時期に撮影された可視・近赤外データ（空間分解能：30 m）である。各日のChl.a観測値の

表1. 使用したクロロフィル a 濃度データの濃度レンジと測点数。

Table 1. Ranges of *in situ* chlorophyll-a and number of observation points.

No.	Date	Chl.a ( $\mu\text{g/l}$ )	Point
1	9 May 1990	26.5-78.3	7
2	1 July 1995	3.0-6.0	7
3	16 May 1996	2.6-8.5	6
4	12 May 1997	2.6-14.4	5
5	3 Mar.1998	5.2-11.7	12

濃度レンジ及び観測地点数を表1に示す。衛星データの処理は、観測点を中心に3×3ピクセルで平均しその地点の代表値とした。また簡易的な大気補正法として暗画素法を用いた。衛星が観測するDNは、大気上端で反射した光と対象物から反射した光の和で表される。画像上で暗い画素は対象物からの影響が小さく、大気上端で反射した光（パスラディアン成分）に最も近い値になると言われている。暗画素法とは、上述の関係を利用して、パスラジアンのみを除去する方法である。

さらに回帰式作成に用いた現場Chl.aは、島根大学理学部環境分析化学研究室が観測した宍道湖・中海における上層の値（計37点）を用いた（表1）。今回使用したデータの観測点位置を図1に示す。一方、

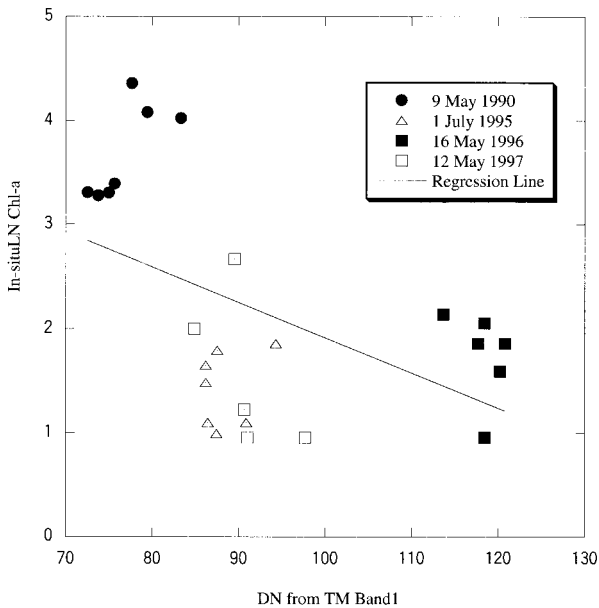


図2. TM バンド 1 とクロロフィル a 濃度(対数)の関係。  
Fig. 2. Correlation between TM Band 1 and LN chlorophyll-a.

表2. TM 各バンドの DN と現場クロロフィル a 濃度の相関係数。

Table 2. Correlation coefficient between *in situ* chlorophyll-a and DN of TM bands.

	Band1	Band2	Band3	Band4	Band5	Band7
Chl.a	-0.49	-0.15	-0.28	-0.34	0.06	0.11
LN Chl.a	-0.50	-0.16	-0.31	-0.41	-0.06	0.02

作成した回帰式の妥当性を調べるために、1998/3/3 に筆者らが行った衛星同期調査で得た衛星/現場データセットを用いて検証した。

## 2.2 回帰分析によるクロロフィル a 濃度推定式の検討結果

### 1) 単回帰分析結果

表2に1990/5/9~1997/5/12の4日間における各バンドのDNと現場Chl.aの相関係数を示す。また図2に単バンドで最も相関係数の高かったバンド1とLN Chl.a(Chl.aの自然対数をとった値)との関係を示す。これより単バンドごとの相関は最高でも0.50であり、衛星データからChl.aを推定することは困難であると考えられた。

### 2) 重回帰分析結果

次に、TMの6個のバンドを用いて重回帰分析を試みた。その結果得られたChl.a推定式を式3に示す。

$$\begin{aligned} LN\ Chl.a = & -0.11*TM\ 1 + 0.47*TM\ 2 - 0.18*TM\ 3 \\ & - 0.06*TM\ 4 + 0.05*TM\ 5 - 0.09*TM\ 7 \\ & + 3.33 \end{aligned} \quad (式3)$$

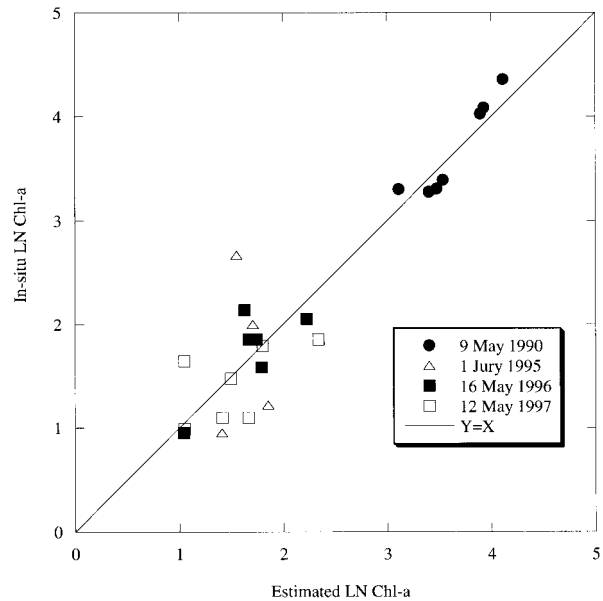


図3. 重回帰モデルを用いて推定した推定クロロフィル a と現場クロロフィル a の関係。

Fig. 3. Correlation between the estimated chlorophyll-a from TM data using multi-regression model and the *in situ* LN chlorophyll-a.

式3より推定されたChl.aと現場Chl.aの関係は相関係数 $R=0.93$ と非常に高かった(図3)。しかし前述した結果には大気効果を全く考慮していない。そこで暗画素法を衛星データに適用して同様の解析を行い、新たに次式も得た。

$$\begin{aligned} LNChl.a = & -0.28*TM\ 1 + 0.67*TM\ 2 - 0.34*TM\ 3 \\ & - 0.02*TM\ 4 - 0.07*TM\ 5 + 0.23*TM\ 7 \\ & + 3.20 \end{aligned} \quad (式4)$$

## 2.3 クロロフィル a 濃度推定式の検証

得られた式3及び式4を使って、任意のTMデータから宍道湖・中海の表層Chl.a推定がどの程度正確に行われるか、その妥当性を確かめるために、1998/3/3の衛星/現場データセットを用いて検証した。そのうち、式3を用いた場合の結果を図4に示す。これより、1998/3/3の推定Chl.aは明らかに実測値と大きく異なる値であることがわかった。そのため式3を使って、任意のTMデータから宍道湖・中海のChl.aを推定するのは危険であると考えられた。1998/3/3のデータが現場Chl.aと大きな誤差を生んだ原因の一つとして、季節により異なる大気(特にパステリアンス成分)の影響が考えられた。

そこで、大気の影響を簡易的に除去することによって得られた式4による推定表層Chl.aと現場

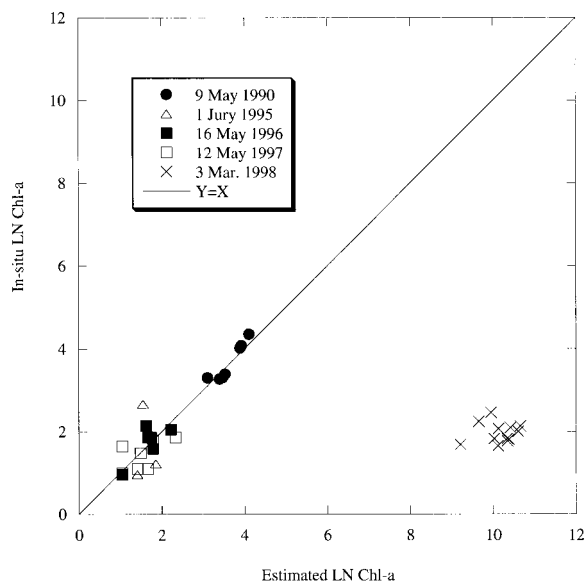


図4. 式3を用いて推定したクロロフィル a と現場クロロフィル a の関係。

Fig. 4. Correlation between the validated chlorophyll-a from TM data and the *in situ* chlorophyll-a using Equation 3.

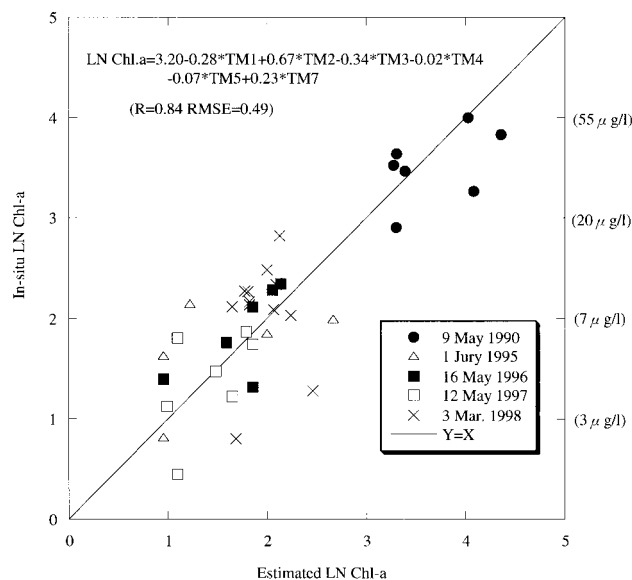


図5. 式4を用いて推定したクロロフィル a と現場クロロフィル a の関係。

Fig. 5. Correlation between the validated chlorophyll-a from TM data and the *in situ* chlorophyll-a using Equation 4.

Chl.a の関係に 1998/3/3 のデータを入力した結果を図5に示す。その結果、暗画素法を適用して式4から推定した1998/3/3の表層Chl.aは現場Chl.aとよく一致した。このことから宍道湖・中海においてTMデータを用いた表層Chl.a推定の際には暗画素補正後(簡易大気補正後)に式4を使用するのが現時点で最良の方法であると考えられた。

### 3. 宍道湖・中海の表層クロロフィル a 濃度分布の特徴

#### 1) 表層クロロフィル a 濃度分布特性

図6に式4を用いてTMデータから推定した宍道湖・中海のChl.a分布図を示す。これによると、宍道湖は中海よりChl.aが高いという傾向があることがわかる。また斐伊川河口部、中海本庄工区は相対的に低いことがわかった。宍道湖・中海における実測に基づくChl.aの水平的な分布については清家(2001)の報告等があり、米子湾が特に高い値を示す、あるいは冬期の中海でのChl.aが赤潮などの影響で高くなる等の傾向は、今回の少ないTM画像から判断することは難しかった。しかし今後、多くのTMデータにより両湖のChl.a分布図が作成されれば、実測データとの比較により、宍道湖・中海の3次元的なChl.a分布が明らかになる可能性が高いと考えられる。

#### 2) 表層水温分布特性

図7に図6と同じ日における宍道湖・中海の表層水温分布図(相対値)を示す。この図は熱赤外バンドであるTMバンド6(10.4~12.5 μm)を用いてシェードカラー画像を作成したものである。この図から斐伊川河口部で低温分布を示すことが多く、また中海の方が相対的に高温分布を示すことも多いことがわかる。ただしその水温差は1~2℃と低い。

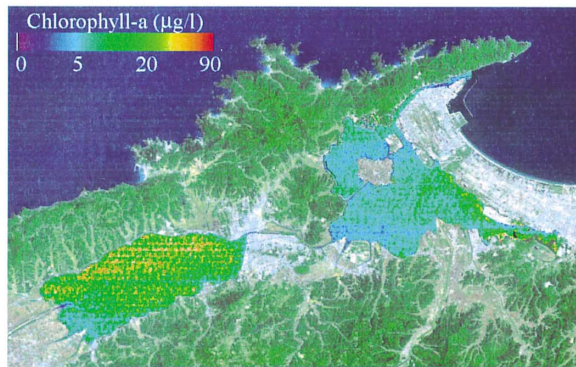
#### 3) 表層クロロフィル a 濃度分布と表層水温分布の比較

図6と図7を比較すると、表層Chl.a分布と表層水温分布は逆相関的な分布を示している傾向がわかる。つまり表層Chl.aが高いと表層水温は低くなり、表層Chl.aが低いと表層水温は高くなるという傾向が見られた。このような表層Chl.aと表層水温の逆相関的な関係は國井(1996)、國井(1998)が宍道湖湖心及び中海湖心のデータからも読み取れる。今回の結果から、湖心で見られるような関係が湖全体にも同様に見られることが定性的に示された。ただし例外として、河口部では表層Chl.a分布、水温分布ともに低い値を示している場合が多かった。

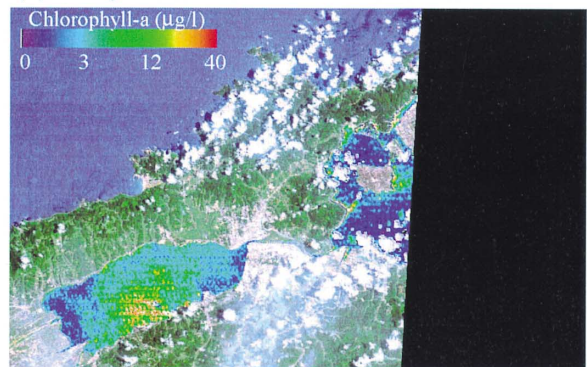
## 4. ま と め

衛星/現場データセットを用いて、TMの6バンド

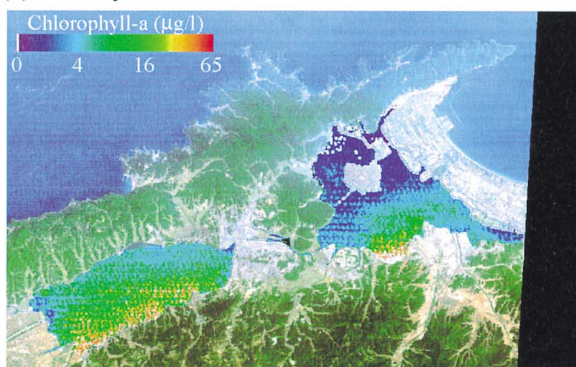
(a) 9 May 1990



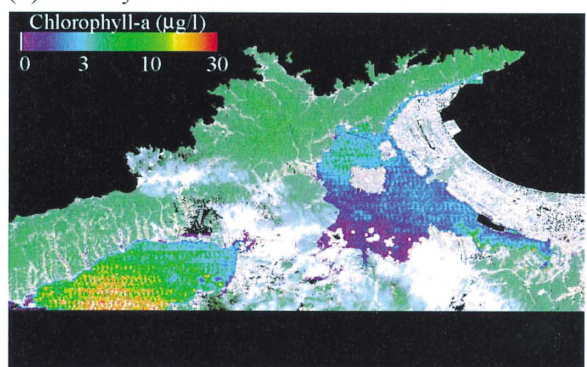
(b) 1 July 1995



(c) 16 May 1996



(d) 12 May 1997



(e) 3 March 1998

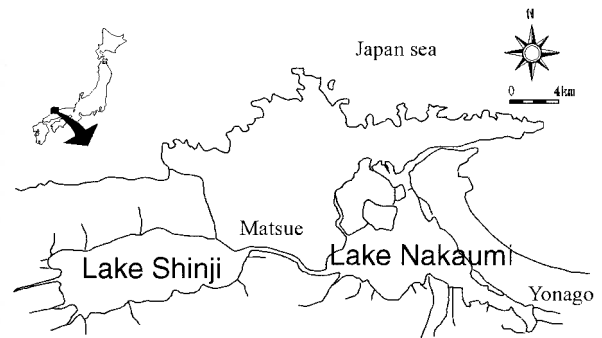
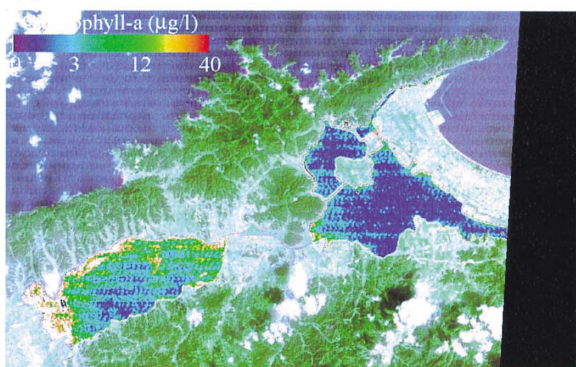


図 6. Landsat-5/TM データから推定した宍道湖・中海の表層クロロフィル a 濃度分布. 推定アルゴリズムは重回帰アルゴリズムを使用. (a) 1990 年 5 月 9 日, (b) 1995 年 7 月 1 日, (c) 1996 年 5 月 16 日, (d) 1997 年 5 月 12 日, (e) 1998 年 3 月 3 日.

**Fig. 6.** Horizontal distribution of surface chlorophyll-a concentration in Lake Shinji and Lake Nakaumi derived from Landsat-5/TM data using a multi regression algorithm. (a) 9 May 1990, (b) 1 July 1995, (c) 16 May 1996, (d) 12 May 1997, (e) 3 March 1998.

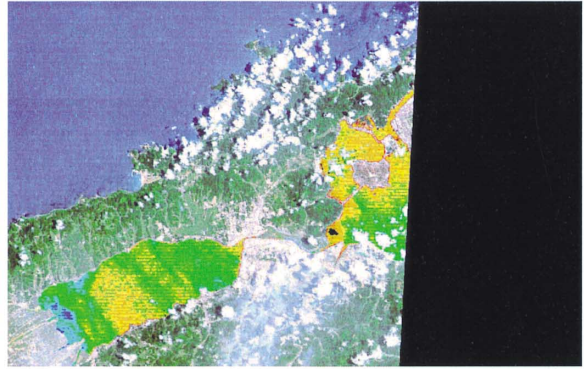
データによる表層 Chl.a 推定式(重回帰式)を作成し, 別のデータセットを用いて, その推定式の妥当性を検証した. その結果, 暗画素補正後(簡易大気補正後)に重回帰分析を行った Chl.a 推定式が現時点での最良の推定式であることがわかった. またこの推定

式を使用して, 宍道湖・中海の表層 Chl.a マッピングを行い, 表層水温分布図と比較した結果, 表層 Chl.a 分布と表層水温分布は湖全体で逆相関的な分布を示していることが定性的に明らかになった.

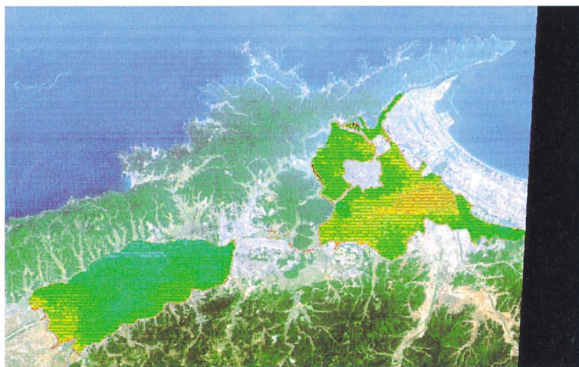
(a) 9 May 1990



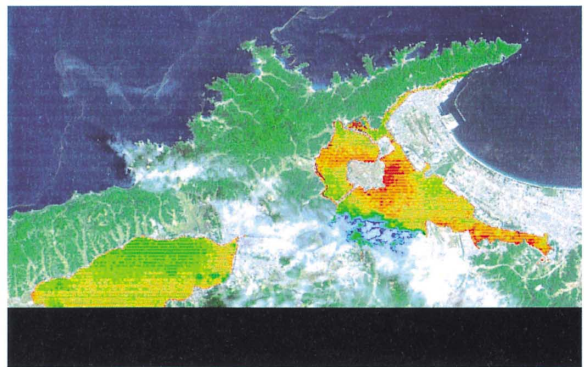
(b) 1 July 1995



(c) 16 May 1996



(d) 12 May 1997



(e) 3 March 1998

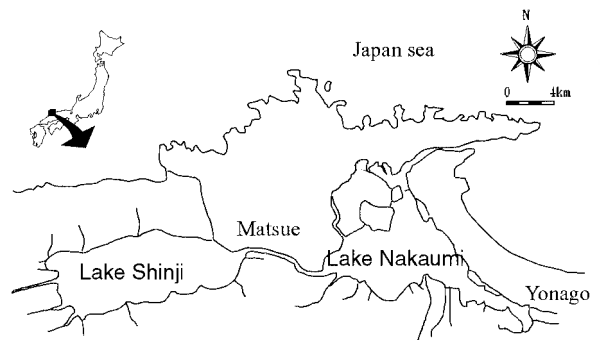


図7. Landsat-5/TM データから推定した宍道湖・中海の表層水温分布。低温で青く、高温ほど赤く示す。

(a)1990年5月9日, (b)1995年7月1日, (c)1996年5月16日, (d)1997年5月12日, (e)1998年3月3日。

**Fig. 7.** Horizontal distribution of surface water temperature in Lake Shinji and Lake Nakaumi derived from Landsat-5/TM data. Blue, low temperature; red, high temperature. (a) 9 May 1990, (b) 1 July 1995, (c) 16 May 1996, (d) 12 May 1997, (e) 3 March 1998.

## 謝 辞

本研究で使用した TM データは、ALOS 公募研究における支援として宇宙開発事業団から提供を受けた。関係機関に深く感謝します。

## 引用文献

- 1) 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.
- 2) 國井秀伸(1998)中海湖心および中海本庄工区にお

- ける 1996 年から 1998 年にかけての表層水の光合成速度の季節変化, LAGUNA (汽水域研究), 6: 1-11.
- 3) 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.
- 4) 作野裕司・松永恒雄・六川・高安克己・國井秀伸・中村幹雄 (2001) 多時期 SPOT/HRV データによる宍道湖表層の一次生産量モニタリング, 日本リモートセンシング学会誌, 21 (2): 141-149.
- 5) 清家泰 (2001) 汽水域の科学—中海・宍道湖を例として (高安克己編, 『汽水域の科学』講師グループ著), たたら書房, 19-37.
- 6) 安岡善文 (1983) リモートセンシングの湖沼汚濁監視への応用, 環境技術, 12: 317-322.