

多時期 Landsat データを用いた宍道湖・中海の クロロフィル a 濃度分布推定

作野 裕 司* ・ 吉 田 武 史** ・ 松 永 恒 雄***
古 津 年 章**** ・ 高 安 克 己*****

本研究は、30 m の解像度を有する LANDSAT/TM データを用いて、宍道湖・中海のクロロフィル a 濃度 (Chl-a) 分布を推定する式を作成し、両湖の表層 Chl-a 分布の特徴について検討したものである。まず、4 時期の衛星/現場データセットを使って、統計的方法により 5 バンドの重回帰モデルによる Chl-a 推定式を作成した。そして、別の日のデータセットを使って、その有効性を検証した。その際、大気成分の除去が必要であることも示した。得られた Chl-a 推定式を使って、宍道湖・中海の Chl-a 分布図を作成した結果、宍道湖は中海より全般的に Chl-a が高く、斐伊川河口部、中海本庄工区は相対的に Chl-a が低い傾向があることがわかった。

1. はじめに

宍道湖・中海(島根県・鳥取県)はシジミやアサリ等の水産資源豊富な水域として、またシジミによる水質浄化能力が示唆される(中村ら, 2001)等、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。このような汽水域において、富栄養化や水質浄化のメカニズム解明のために、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である。しかし、汽水域の時間的・空間的な水質変動は大きく、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に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 30 回以上の衛星同期調査を中心に継続して行ってきた(作野ら, 1999; 作野ら, 2001)。

本研究は、このようなデータセットを有効に活用することにより宍道湖・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(以下 TM データと略す)による恒常的な表層クロロフィル a 濃度(以下 Chl-a と略す)推定式を作成し、両湖の Chl-a 分布の特徴について検討することが目的である。

2. 衛星データによる Chl-a 濃度推定方法

TM のような比較的高解像度の衛星データから水質

を推定する方法は、大別して物理的方法と統計的方法に分類される。前者では、水中の物質組成量と分光特性の関係、また大気散乱光、水面反射光等による影響を物理光学的な理論モデルを用いて記述する。しかし理論モデルでは、モデルに含まれるパラメータ設定が難しく、モデルが複雑になればなる程解くことが複雑になる等の問題点が古くから指摘されており(安岡, 1983)、現在でも沿岸における理論モデルによる推定法は難しい。

一方統計的方法は、衛星データと実際に水面上で測定したデータ(現場データ)を用いて、両者の関係を統計的にモデル化するもので、単回帰モデルや重回帰モデル等が使われる。この方法では、モデルを推定するために常に現場データを必要とする欠点はあるが、処理が簡単であり実験の繰り返しによりある程度安定した推定モデルが得られる等の利点があり、水質分布の作成には有効である。筆者らはこれまで宍道湖・中海において衛星と同期した多くの現場データを収集しており、今回はこの統計的な方法を使って、衛星データによる宍道湖・中海の水質推定モデルを作成する。

今、湖上の測定点 k における水質(ここでは Chl-a)を y_k 、測定点 k に対応する TM 画像上の点のデジタル値を $(d_{1k}, d_{2k}, d_{3k}, d_{4k}, d_{5k}, d_{6k})$ とする。ここで 1~7 の番号は TM が観測する波長帯域のバンドを表す。各測点定点におけるデータセット $\{y_k\}$ 及び $\{d_{ik}\}$ ($i=1, 2, 3, 4, 5, 7$) を用いて、同様の研究で最もよく使われる以下の 2 種類のモデルについて試行し、水質推定モデルの可能性を検討した。

$$\text{単回帰モデル: } y = \alpha \cdot d_i + \beta \quad \cdots (1)$$

$$\text{重回帰モデル: } y = \sum (\alpha_i \cdot d_i) + \beta \quad \cdots (2)$$

ただし、 y は自然対数型でモデル化されることも多いので、今回は y の自然対数をとらない場合ととる場合の両方を試す。さらに、通常 d の値はパスラジアンズと呼ばれる大気散乱光成分が 70~90% を占めると言われており、異なる時期のデータを扱う場合には、このパスラジアンズ成分をあらかじめ除去しなければならない場合が

* 正会員 博(工) 広島大学助手大学院工学研究科社会環境システム専攻
** 広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻
*** 博(工) (独法)国立環境研究所主任研究員
**** 博(工) 島根大学教授総合理工学部電子制御システム工学科
***** 理 博 島根大学教授汽水域研究センター

多い。そこで今回は同種の研究で有効とされる暗画素法を用いた場合と、用いない場合の両方を試す。ここで暗画素法とは、対象とする画像中で最も暗く写っている画素(暗画素)の値はパスラジアン成分に相当すると仮定し、それぞれのバンドにおける暗画素のデジタル値を d の値から引く簡易的な大気補正法である(MacFarlenら, 1984)。

3. 使用した衛星/現場データセット

今回水質推定モデル式作成に用いた衛星/現場データセットは以下のとおりである。まず、衛星データはすでに現場 Chl-a データが存在する 4 時期(1990 年 5 月 9 日, 1995 年 7 月 1 日, 1996 年 5 月 16 日, 1997 年 5 月 12 日)の Landsat 5 号 TM センサの画像である。TM センサの諸元を表-1 に示す。また、現場 Chl-a データは、TM データが撮影した日時に島根大学理学部環境分析化学研究室が図-1 に示す宍道湖・中海の測点の位置において観測した上層値(計 25 点)を用いた。現場 Chl-a データの濃度レンジを表-2 に示す。

一方、作成した推定式の妥当性を調べるために、前述した衛星/現場データセットとは別のデータセットを用いて検証した。ここでいう別データセットとは、1998 年 3 月 3 日に筆者らが宍道湖において船舶を利用して行った衛星同期水質調査で得た 12 データである(測点は図-1 参照)。Chl-a の取得は調査船からバケツ採水した表層水を実験室に持ち帰り、アセトン・抽出吸光度法を用いた。

TM データの処理としては、画像座標を地上基準点により緯度・経度変換したあと、観測点におけるデジタル値を抽出した。その際、画像ノイズ低減の目的で 3×3 ピクセルの平均値をとり、各測点の代表値とした。

4. Chl-a 推定式の作成及び検証

(1) 単回帰分析結果

表-3 に 1990/5/9~1997/5/12 の 4 日間における各バンドの DN 値(暗画素法による大気補正済み)と現場 Chl-a の相関係数(R)を示す。また図-2 に最も相関係数が高かった Band 1 の値と LN Chl-a (自然対数型)の

表-1 Landsat TM センサの諸元

観測波長帯(μm)	解像度(m)	備考
Band 1: 0.45- 0.52	30	可視
Band 2: 0.52- 0.60	30	可視
Band 3: 0.63- 0.69	30	可視
Band 4: 0.76- 0.90	30	近赤外
Band 5: 1.55- 1.75	30	中間赤外
Band 7: 2.08- 2.35	30	中間赤外
Band 6: 10.40-12.50	120	熱赤外

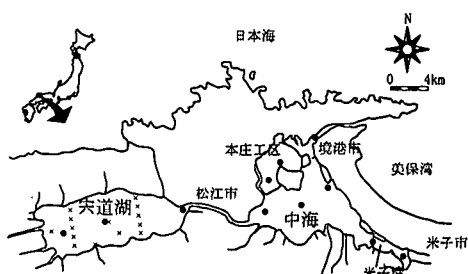


図-1 宍道湖・中海における Chl-a 観測点、●は島根大学理学部による測点、×は筆者らが 1998 年 3 月 3 日に行った調査の測点(検証データに使用)

表-2 本研究に使用した現場 Chl-a の濃度レンジ

No.	日付	Chl-a ($\mu\text{g/l}$)	データ数
1	1990年5月9日	26.5-78.3	7
2	1995年7月1日	3.0-6.0	7
3	1996年5月16日	2.6-8.5	6
4	1997年5月12日	2.6-14.4	5
5	1998年3月3日	5.2-11.7	12

関係を示す。これらより単バンドごとの相関は最高でも $R = -0.50$ と極めて低いことがわかる。ここで Band 1 の相関係数が他の Band よりも若干高い負の相関傾向が見られる理由としては、 $0.45 \mu\text{m}$ 付近にある Chl-a 吸収帯の影響と考えられる。ただし $0.65 \mu\text{m}$ 付近にも Chl-a の吸収帯があるにもかかわらず、相関係数は低い。これは、宍道湖・中海のような懸濁物質濃度が高い水域では、 $650 \mu\text{m}$ 付近の反射率が相対的に高くなり、Chl-a の吸収が検知しにくいとめと考えられる。さらに、ここには結果は示さないが、各日にちごとの相関を調べると、各日によって相関係数が高いバンドが全く異なるという結果となった。このような結果は、霞ヶ浦(沖ら, 1996)等における同様の研究でも指摘されており、宍道湖・中海においてもある決まった TM 単バンドデータから恒常的に Chl-a を推定する式を得ることは困難であると考えられた。

(2) 重回帰分析結果

単回帰分析で Chl-a を推定するのは困難であるため、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 6 バンドの重回帰式を以下に示す。

$$\begin{aligned} \text{LN Chl-a} = & 3.33 - 0.11 \times \text{Band 1} + 0.47 \times \text{Band 2} \\ & - 0.18 \times \text{Band 3} - 0.06 \times \text{Band 4} \\ & + 0.05 \times \text{Band 5} - 0.09 \times \text{Band 7} \dots (3) \end{aligned}$$

式(3)より推定された Chl-a と現場 Chl-a の関係は相関係数 $R = 0.93$ (RMSE = 0.38, Chl-a 換算で $1.5 \mu\text{g/l}$) と高い相関が得られた(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

表-3 TM 各バンドデータとChl-aの相関係数

	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 7
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

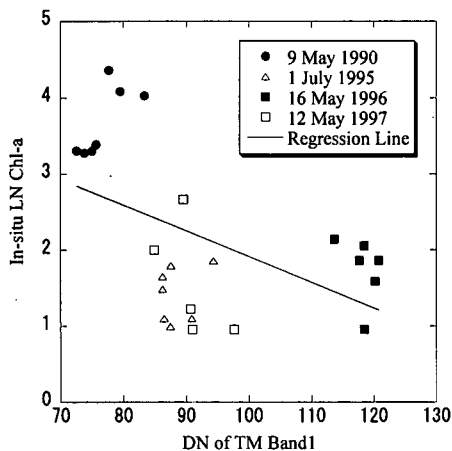


図-2 4 時期の衛星/現場データセットによる TM Band 1 と現場 Chl-a (自然対数型) の関係

データに適用して同様の解析を行い,新たに次式も得た。

$$\begin{aligned} \text{LN Chl-a} = & 3.20 - 0.28 \times \text{Band 1} + 0.67 \times \text{Band 2} \\ & - 0.34 \times \text{Band 3} \\ & - 0.02 \times \text{Band 4} \\ & + 0.07 \times \text{Band 5} + 0.23 \times \text{Band 7} \quad \dots (4) \end{aligned}$$

式(3)より推定されたChl-aと現場Chl-aの関係は相関係数 $R=0.84$ (RMSE=0.49, Chl-a換算で $1.5 \mu\text{g/l}$)と図-3の結果よりも若干相関係数は低い,比較的高い相関を示した(図-4)。大気補正を行ったにもかかわらず,相関が若干悪くなった理由は,パスラジアン成分の値が大きいため,補正後の衛星データ値が小さくなり,見かけ上値のばらつきが大きくなったためだと考えられる。

(3) Chl-a 推定式の検証

前節で得られた式(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確かめるために,1998年3月3日の衛星/現場データセットを用いて検証した。その結果のうち,式(3)を用いた場合の結果を図-5(×印)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,季節でその影響が異なる大気(特にパスラジアン成分)の成分の問題が考えられた。そこで,大気

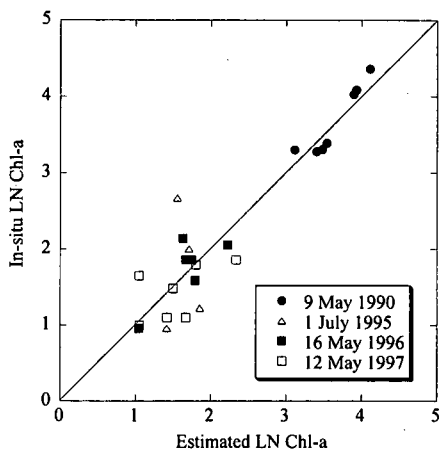


図-3 重回帰モデルによるChl-a推定値と現場Chl-aの関係(大気補正なしの場合)

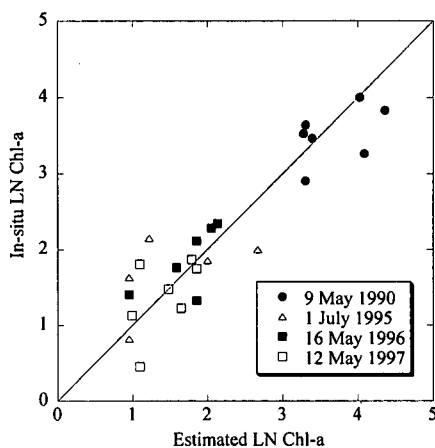


図-4 重回帰モデルによるChl-a推定値と現場Chl-aの関係(大気補正をした場合)

の影響を簡易的に除去して得られた式(4)から推定された表層Chl-aと現場Chl-aの関係に1998/3/3のデータを入力した結果を図-5(●印)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の推定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。

5. 宍道湖・中海におけるChl-a分布の特徴

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傾向が見られるが,その原因については現在調査中である。

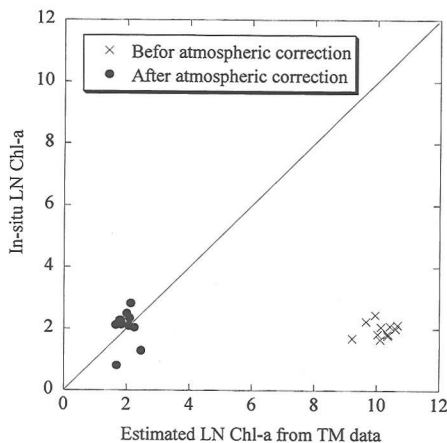


図-5 大気補正前後における重回帰モデルの検証結果

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橋谷ら (1991) 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。

さらに、衛星画像では判断できない、鉛直 Chl-a の濃度分布については、これまでに宍道湖ではあまり差がないのに対し、中海では明瞭な差があることが知られている (清家ら, 1999)。図-7 は筆者らが、1997 年～1998 年に両湖における鉛直 Chl-a をそれぞれ約 40 回測定した結果であり (中山ら, 1999)、宍道湖では鉛直の濃度差が小さく、中海では濃度差が大きい (特に亜表層においてピークがある) という前述した傾向が検証されている。これらの結果を踏まえると、シジミの浄化力を評価する際等に必要な鉛直 Chl-a 総量を見積もるためには、宍道湖の場合、衛星から推定した表層 Chl-a に水深をかけた値に近似できると考えられる。一方、中海においては、表層と各水深の Chl-a 分布は異なっており、鉛直 Chl-a 総量を見積もるには表層の濃度分布から鉛直の形状を推定するモデル (Kameda ら, 1998) を構築する必要があると考えられた。

6. ま と め

衛星/現場データセットを用いて、TM の 6 バンドデータによる表層 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、得られた Chl-a 推定式を使って、宍道湖・中海の Chl-a 分布図を作成した結果、宍道湖・中海の概略的な Chl-a 分布を把握することができた。

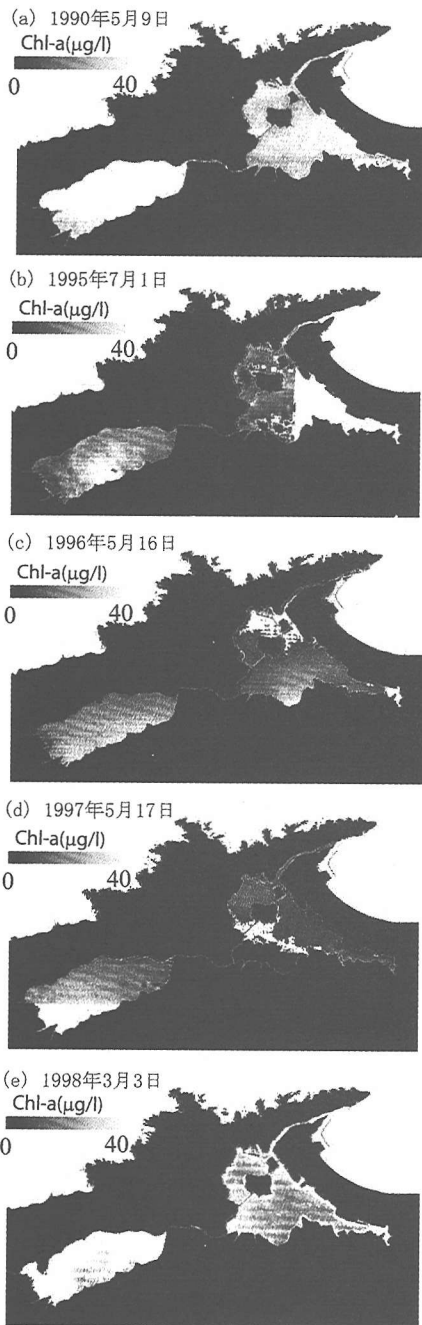


図-6 式 (4) を使って作成した宍道湖・中海の表層 Chl-a 分布図

今回の研究では、5 つの TM 画像のみを使って、Chl-a 分布の評価を行ったが、筆者らは、2004 年打ち上げ予定の ALOS 衛星に搭載される可視・近赤外センサを使った汽水域モニタリング手法開発の研究のため、宇宙開発事業団から 1985 年以降～現在までにおける宍道湖・中海の TM 画像数十シーンを提供されている。今後は今回提案

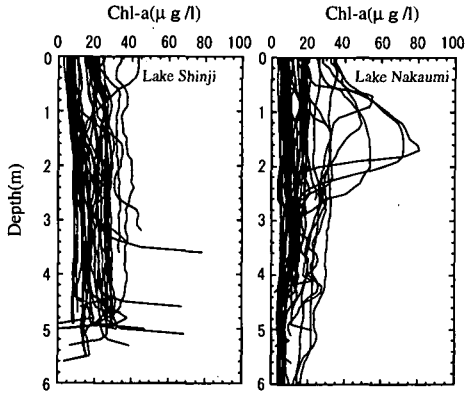


図-7 宍道湖・中海の鉛直 Chl-a 分布形状。中山ら (1999) の図を一部加筆。

した Chl-a 推定アルゴリズムを使って、約 15 年間の両湖における Chl-a をマッピングし、その分布についてさらに詳しく検討していくつもりである。

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。記して謝辞を表す。

参考文献

- 作野裕司・松永恒雄・六川修一・高安克己・國井秀伸・中村幹雄・山室真澄 (1999): SPOT/HRV データによるアオコ発生時の宍道湖表層クロロフィル a 濃度分布の推定, 日本リモートセンシング学会誌, 19 巻 2 号, pp. 20-36.
- 作野裕司・松永恒雄・六川修一・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総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 巻, 2 号, pp. 141-149.
- 清家 泰・奥村 稔・藤永 薫・千賀有希子 (1999): 中海本庄工区の生物と自然 (汽水域研究グループ代表國井秀伸編著), たたら書房, pp. 12-31.
- 中村義治・寺澤知彦・中村幹雄・三村信男 (2001): 宍道湖ヤマトシジミ個体群の水質浄化機能の評価解析, 海岸工学論文集, 48 巻, pp. 1236-1240.
- 中山大介・作野裕司・松永恒雄・高安克己・國井秀伸 (1999): 宍道湖・中海の鉛直クロロフィル a 濃度分布特性, LAGUNA (汽水域研究), 6 号, pp. 217-222.
- 橘谷 博・清家 泰・近藤邦男・奥村 稔・藤永 薫・伊達善夫 (1991): 月 1 回の定期調査からみた中海・宍道湖の水質一地点間変動, 山陰地域研究, 7 号, pp. 93-104.
- 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 巻 5 号, pp. 317-322.
- Kameda, T. and S. Matsumura (1998): Chlorophyll biomass off Sanriku, Northwestern Pacific, estimated by ocean color and temperature scanner (OCTS) and a vertical distribution model, J. Oceanogr., 54, pp. 509-516.
- MacFarlane, N. and I. S. Robinson (1984): Atmospheric correction of LANDSAT MSS data for a multirate suspended sediment algorithm, Int. J. Rem. Sens., Vol. 5, pp. 561-576.