

可視・近赤外多波長反射率を用いた 汽水域有機・無機 SS および Chl-a のリモートセンシング

岡本航¹・古津年章²・下舞豊志²・三瓶良和²・瀬戸浩二³

Remote sensing of organic and inorganic SS, and Chl-a in brackish water region using VIS/NIR multi-band reflectances

Wataru Okamoto¹, Toshiaki Kozu², Toyoshi Shimomai²,
Yoshikazu Sampei² and Koji Seto³

Abstract: A study of the remote sensing of suspended solids (SS) and Chlorophyll-a (Chl-a) in a brackish lagoon area (specifically Lake Shinji) is conducted using multi-band reflectances observed by Visible-NIR spectroradiometer and in-situ water samples. Since the composition of SS in this area is generally complicated, Organic-SS (OSS) and Inorganic-SS (ISS) are separately estimated. In addition, Chl-a estimation is simultaneously attempted by considering its usefulness as an indicator of water quality in this lake. Empirical relations connecting reflectance at multiple wavelength bands to OSS, ISS, or Chl-a are established, from a total of 29 in-situ observation cases consisting of spectroradiometer data, Compact-CTD (to measure Chl-a concentration), and water sample data. First, considering the existing and/or future hyper-spectral satellite sensors such as Hyperion on the EO-1 satellite, it is assumed that a maximum of 41 wavelength bands ranging from 400 to 800 nm can be used. To optimize and reduce the number of observation bands, the ISE-PCR method is used. Sufficient accuracies are obtained when 7 to 14 bands (10 nm bandwidth) are used for the estimations of these three water quality parameters. Next, the use of existing and/or past satellite sensors specifically Landsat-5/TM is considered, and accuracies are evaluated using the same in-situ observation data. In this case, only 3 bands (Band 1, Band 2, Band 3) are used. Empirical equations are obtained from the TM-simulated spectroradiometer data using the PCR method. Although the accuracy is significantly degraded (Relative RMSE about 30%) in comparison to the above-mentioned hyper-spectral case, it is concluded that "rough" estimations of these water quality parameters are still useful. Finally, a case analysis is attempted using an actual TM observation scene on November 3, 2000, around Lake Shinji. This scene is selected to be the same as that used in a recent study to estimate the "origin" of SS to evaluate the consistency between the two results, i.e. between the estimates of "origin" and the "concentration" from the present study. The results of this case analysis are found to be generally encouraging.

Key words: suspended solids, chlorophyll-a, spectroradiometer, Landsat-5/TM.

¹ 日亜化学工業株式会社 Nichia Corp. 491 Oka, Kaminaka-cho, Anan-shi 774-8601, Japan

² 島根大学大学院総合理工学研究科 Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Shimane-University, 1060 Nishikawatsu-cho, Matsue 690-8504, Japan

³ 島根大学汽水域研究センター Research Center for Coastal Lagoon Environments, Shimane University

1. 緒言

島根鳥取両県に跨る宍道湖及び中海は日本有数の汽水域であり、近年流れ込む栄養塩の供給過多によって富栄養化し、赤潮やアオコが頻発するようになってきた(島根県, 2012)。このような現象は、この水域における水質環境異常の頻発を示唆しており、景観や悪臭などに加えて貧酸素化などの被害に繋がることも考えられる(日本水環境学会, 2006)。そのため、更なる水環境観測の充実が重要視されている。これまで汽水域の水環境の把握には、船舶や定点による観測が行なわれてきたが、広域で時間的、空間的な変動の激しい汽水域ではその観測にも限界がある。そこで、人工衛星などを用いて、観測対象に直接触れることなく広域なデータを同時に取得することができるリモートセンシング技術を用いた水質観測が有効で、活用が期待されている。このような要求に対し、これまでのリモートセンシング技術を用いた汽水域の観測研究では、観測対象として光の反射に直接関係するパラメータである懸濁物質(SS: Suspended Solids)や濁度、クロロフィル a (Chl-a: Chlorophyll-a) 濃度推定が試みられてきた(作野ほか, 2004; 山本ほか, 2007; 作野・松永, 2008)。また最近では、リモートセンシング技術を用いて霞ヶ浦における Chl-a と植物プランクトンを含まない SS (NPSS: Non-Phytoplankton Suspended Solids) の推定手法の開発(Oyama et al., 2009)や、宍道湖・中海における SS の起源推定手法の研究(大森ほか, 2012)が行われている。

Chl-a は植物プランクトン中の葉緑素のひとつで、多くの植物プランクトンに含まれているため、その濃度は、水中に存在する植物プランクトン濃度の定性的指標として用いられる。汽水域では、濁りの原因である SS の起源としては、主に「湖中の植物プランクトン起源」、「河川からの流入起源」、「湖底からの巻き上げ起源」の3つが存在し、各起源によって、プランクトンや陸上植物の有機成分に由来する有機懸濁物質(OSS: Organic SS)と無機懸濁物質(ISS: Inorganic SS)の比率が異なることが示唆されている(大森ほか, 2012)。OSS と ISS の合計が SS となる。河川からの流入する SS は ISS の土砂であることが多いが、宍道湖及び中海では、陸上起源の OSS が河川流入によって汽水域に運搬され、濁りの原因となる場合が存在するため、SS を OSS と ISS に区別し、Chl-a を加えた濃度推定が水質環境のより詳細な理解のために有用であると考えられる。これまで、米国などにおいて、沿岸域の水質を、OSS, ISS 分離により解析した研究

はある(Gardner et al., 1989; Cerco et al., 2013)が、筆者らの知る限り、宍道湖・中海においては、OSS と ISS を区別して測定、評価した例は存在しない。

水中の SS が増加すると、可視・近赤外域の波長帯では反射率が増加し、その中に Chl-a を加えると、反射率が低下し、中でも 680 nm 付近の反射率は Chl-a の吸収帯の存在によって反射率が低下し、700nm 付近の反射率は“ピーク”状になるなど、反射スペクトルは複雑な波長特性を示す(Han, 1997)。宍道湖の表層 SS は通常、大雨、強風など特別な気象イベントがない限り、「湖中のプランクトン起源」が多くを占めると考えられている(三瓶 私信, 2013)。この場合、OSS 濃度と分光反射スペクトルの関係が、Chl-a 濃度と分光反射スペクトルの関係に類似することになる。

本研究では、宍道湖及び中海を観測サイトとし、分光放射計による水域の反射率測定、水サンプルの採取(分析器により OSS, ISS 濃度を導出)、Compact-CTD による Chl-a 濃度測定を行った。それらのデータを用いて、可視・近赤外の多波長反射率が測定できるハイパースペクトルセンサ観測を想定した OSS, ISS, Chl-a 濃度の推定シミュレーションを試みた。さらに、大森ほか(2012)において起源推定に使用された、Landsat-5 搭載 TM センサによる推定シミュレーションも行った。求めた推定式を使用し、起源推定の結果との整合性の確認の目的も含めて、大森(2012)が使用した4つのシーンのうち、河川からの流入水が顕著な1シーンについて OSS, ISS, Chl-a 濃度推定の事例解析を試みた。

2. 観測方法および OSS・ISS・Chl-a 推定方法

2.1 現場観測とそのデータ処理

現場観測は、2007年から2011年にかけて宍道湖と中海の間に位置する大橋川、中海に流入する朝酌川、および宍道湖西部の斐伊川河口で29回行った。現場観測では、分光放射計による水面からの分光反射率、バケツ採水による水サンプル取得、JFE アドバンテック社 Compact-CTD (ASTD687) による Chl-a 濃度測定を行った。Compact-CTD では、470 nm の LED を発光させ、640 ~ 680 nm での蛍光強度を測定する。蛍光強度は、ウラン換算濃度($\mu\text{g/l}$)として出力される。

使用した分光放射計は、Ocean Optics 社の USB2000+ である。この機器は 340 nm ~ 1024 nm の範囲の分光放射輝度に比例するカウント値(以下カウント値)を波長分解能 0.37 nm ~ 0.39 nm で測

定可能で、これを以下の式から反射率に変換した。

$$R = \frac{y}{x} \times 0.014 \times 100 \quad (1)$$

R は反射率 [%], y は水面のカウント値, x は 2 % 反射板の場合のカウント値, 0.014 は, 2 % 反射板の使用波長域における校正値 (1.4 %) である。なお, カウント値はそれぞれ, 分光放射計内部の暗電流 (微小なカウント値) を 0 にするように補正を行っている。また, 分光放射計自体の分光放射データは, 約 0.38 nm 毎に得られるが, 隣り合う波長のデータはほとんど独立性がないので, 400 nm ~ 800 nm を, 10 nm 間隔の 41 バンドに変換して (例えば, 400 nm は, 395 nm ~ 405 nm の平均を意味する), データ処理に用いた。

分光放射計の視野角は ± 25 度であるが, 余裕をみて, ± 45 度程度の範囲内に水面からの反射率に誤差を生じさせるような障害物が存在しないように, 観測条件を設定した。また, センサの指向角度は基本的に鉛直としたが, 太陽光の入射角によっては, 水面からのフレネル反射がサングリントを生じさせる場合がある。サングリントの発角度は観測時刻により異なるので, それを避けるため, 適宜, 鉛直方向からセンサ指向角度をずらせて観測した。

分光放射計で観測される反射率は, 水面からの反射光と水中の SS からの反射光の両者によるものであり, 水面反射の寄与が大きいと, SS 濃度を反射率から推定するときの誤差 要因となる。厳密な水面反射率の評価は, 水面粗度や大気光成分の寄与などが関係し, 大変複雑な問題である (沖ほか, 1996)。Fukushima et al.(1998) は, 670 nm より長い波長においては SS からの反射はほぼ無視できる, という仮定を用いている。この場合, 衛星で観測される反射率は, 大気・エアロゾル, 水面反射の寄与のみとなる。分光放射計観測では大気の影響は無視できるので, 水面反射の寄与のみと考えられる。ただし汽水域では, 外洋に比べて SS 濃度が高く, その仮定が成り立つかが問題である。しかし我々が行った分光放射計観測によると, SS が 20 mg/l 以上と大きい場合を含むデータの統計解析結果 (700 nm ~ 850 nm) でも, 730 nm より長い波長では, SS や Chl-a の変化に対する反射率の応答はほとんど見られなかった。この結果より, 今回は, 可視域から 850 nm 付近まで, 水面反射による反射率はほぼ同じと考えて, 850 nm 付近 (830 nm ~ 870 nm の反射率を平均) の反射率を, 観測反射率から差し引く手

法を採用した。

水サンプルは濾過, 乾燥させて, まず SS 濃度を求めた。その後, CNS 元素分析装置を用いて得た水 1 リットル中の炭素や窒素, 硫黄などの重量から OSS と ISS の量を求めた。具体的には以下の手順で求めた。

(1) 乾燥させたガラス繊維フィルタ (濾紙 GF/F) を用いて水サンプルを濾過し, 乾燥させる。乾燥後の重量と乾燥濾紙のみの重量の差から SS の重量を求める。これを, 水サンプル 1 リットルあたりに換算すれば, SS 濃度 (mg/l) が求められる。

(2) SS の付着した乾燥濾紙を粉末状にし, 既知 SS 量の粉状サンプルを作成する。更に塩酸処理により無機炭素を除去する。

(3) CNS 元素分析装置によって, この試料中の有機炭素, 全窒素および全硫黄濃度を求める。この結果とプランクトンのレッドフィールド比 (重量比で, O:C:N:Si=113:42:7:15) (西条・三田村, 1995; 原島, 2008) を用いて, O と Si の重量を算出する。これらの重量を合計して, 分析に用いた試料中の OSS 重量を求める。

(4) 上記で求めた OSS 重量を水 1 リットル当りに換算し, OSS 濃度を求める。最後に, 手順 (1) で求めた SS 濃度から OSS 濃度を差し引き, ISS 濃度とする。なお, 植物プランクトンのレッドフィールド比により OSS 重量を求める方法は, 陸上植物起源の OSS が支配的な場合に誤差要因となるが, 宍道湖・中海では, 多くの場合プランクトン起源の OSS が支配的であることが経験的に知られているので, ここでは上記の手法を用いた。

2.2 衛星搭載センサとそのデータ処理概要

本研究における事例解析で使用した衛星データは, 米国 NASA より 1984 年 5 月 1 日に打ち上げられた地球資源リモートセンシング衛星 Landsat-5 に搭載された TM (Thematic Mapper) センサ (宇宙技術開発 (株), 2013) によるものである。TM は, 可視域から熱赤外域に 7 バンドの観測波長帯を持ち, 30 m の空間分解能 (熱赤外は 120 m), 観測幅 185 km という性能を持ち, 主に水色や土壌, 植生のモニタリングに使用される。

本研究では, 多波長観測のできるハイパースペクトルセンサ (例えば, 米国が 2000 年に打上げた EO-1 衛星搭載の Hyperion センサ程度の観測波長数 (427 nm ~ 702 nm で 28 波長) か, それ以上の波長数を持つもの) を想定したシミュレーションをま

ず行った。次に TM センサの可視域から近赤外域の Band1 (450 nm ~ 520 nm), Band2 (520 nm ~ 600 nm), Band3 (630 nm ~ 690 nm) の 3 バンドを用いた衛星観測を想定し、分光放射計で測定した反射率を TM のバンドに対応させて OSS, ISS, Chl-a 濃度推定シミュレーションを行なった。

本論文において、“シミュレーション”とは、分光放射計で観測した反射率を、リモートセンサで観測されたものと考え、推定目的の物理量 (OSS など) を複数の波長の反射率により推定する実験式 (推定式) を作成し、その精度を評価することを意味している。ただし、ハイパースペクトルセンサ想定シミュレーションでは、後述する ISE-PCR 法により、10 nm 間隔の平均処理された 41 波長から最適波長を選択していく手法を採用したので、必ずしも Hyperion の波長に一致しているわけではない。しかし、別途 Hyperion の波長にあわせたシミュレーションを行ったところ、ほとんど同程度の精度が得られた (3.1 に記述)。

2.3 OSS, ISS, Chl-a 濃度推定のための主成分回帰および ISE-PCR 法

従来水質パラメータ推定には重回帰分析が主流で、スペクトル上の特徴的なピークなどを説明変数として選択するなど、主観的な説明変数の選択が行われてきた。しかし、説明変数として選択しなかった変数の情報の欠落や、説明変数である反射率の間に高い相関がある場合、重回帰分析の信頼性を低下させてしまう多重共線性の問題が生じる。本研究では 400 nm ~ 800 nm を 10 nm 毎に平均化した 41 波長分の反射率を使用するため、多重共線性の発生する可能性が高いと考えられる。

そこで、本研究では説明変数に反射率を主成分分析し、互いに独立な変数とした主成分スコアを使用して重回帰分析を行う。主成分回帰 (PCR: Principal Component Regression) 法を用いて推定式を求めた。PCR 法は本研究のようなスペクトルなどの各変数間の相関が高く、説明変数の数が多い分析において有効である (Kawamura et al., 2010)。バンド数の少ない Landsat-5/TM のデータ処理では、この方法を用いて推定式を求めた。

しかし、ハイパースペクトルセンサでは波長数 (説明変数) が多く、PCR 法は変数選択を行わないため、求まる推定式は、複雑かつ必ずしも推定精度がよくない。例えば、今回現場観測に用いた分光放射計では、10 nm の波長幅に平均後でも 41 個の

説明変数を持つ。説明変数の中には回帰式に悪影響を及ぼす変数が存在する可能性があり、この変数を取り除く必要がある。そこで、そのような場合に適切な推定式を求めるために、ISE-PCR 法 (Iterative Stepwise Elimination-PCR method) を用いた。この方法は森ほか (2012) で使用された ISE-PLS 法と類似であるが、目的変数がひとつである点が異なる。

この手法は PCR 法を計算する度に重み付けされた回帰係数の小さい変数 Z_i を順次削除し、各 PCR 法の計算で得られるクロスバリデーション (CV) における RMS 誤差 (RMSECV) が最も小さい場合の回帰式を使用する。 Z_i は以下の式で表される。

$$Z_i = \frac{|b_i|s_i}{\sum_{j=1}^V |b_j|s_j} \quad (i, j = 1, 2, 3, \dots, V) \quad (2)$$

b_i, b_j は回帰係数、 s_i, s_j は標準偏差、 V は説明変数の個数である。

PCR 法及 2 び ISE-PCR 法は非常に計算が複雑であるため、統計解析プログラミング言語 R 言語を用いて解析を行った。

3. 結果

3.1 ISE-PCR による推定式作成結果とその精度評価

分光放射計で観測した 400 nm ~ 800 nm の反射率を 10 nm 毎に平均した 41 波長分の反射率と前章で説明した方法で導出した OSS, ISS, Chl-a 濃度 29 サンプルを用いて、ISE-PCR 法により不要な変数を削除しながら推定式を求めた。図 1 に縦軸を求めた推定式による推定値、横軸を現場観測値として、それぞれ (a) OSS, (b) ISS, (c) Chl-a 濃度の推定結果の散布図、表 1 (a) に求めた推定式と (b) に現場観測値と推定値の相関係数、RMSE、変動率、使用波長数を示す。推定式中の R_x は中心波長 x [nm] の反射率 R [%] を表す。

表中の変動率 (Relative RMSE) は現場観測値の最大値と最小値の差に対する RMSE の割合で、実用性の尺度とした。この結果、OSS, ISS, Chl-a いずれの場合も波長は 10 波長前後まで削減することができ、十分な精度でハイパースペクトルセンサ応用が可能であることが判明した。

なお、分光放射計を 10 nm 毎に平均した 41 波長のうち、Hyperion の 28 波長に対応する波長のみを用いて ISE-PCR 法により求めた推定式を用いた場合の RMS 誤差は、OSS, ISS, Chl-a でそれぞれ 2.09

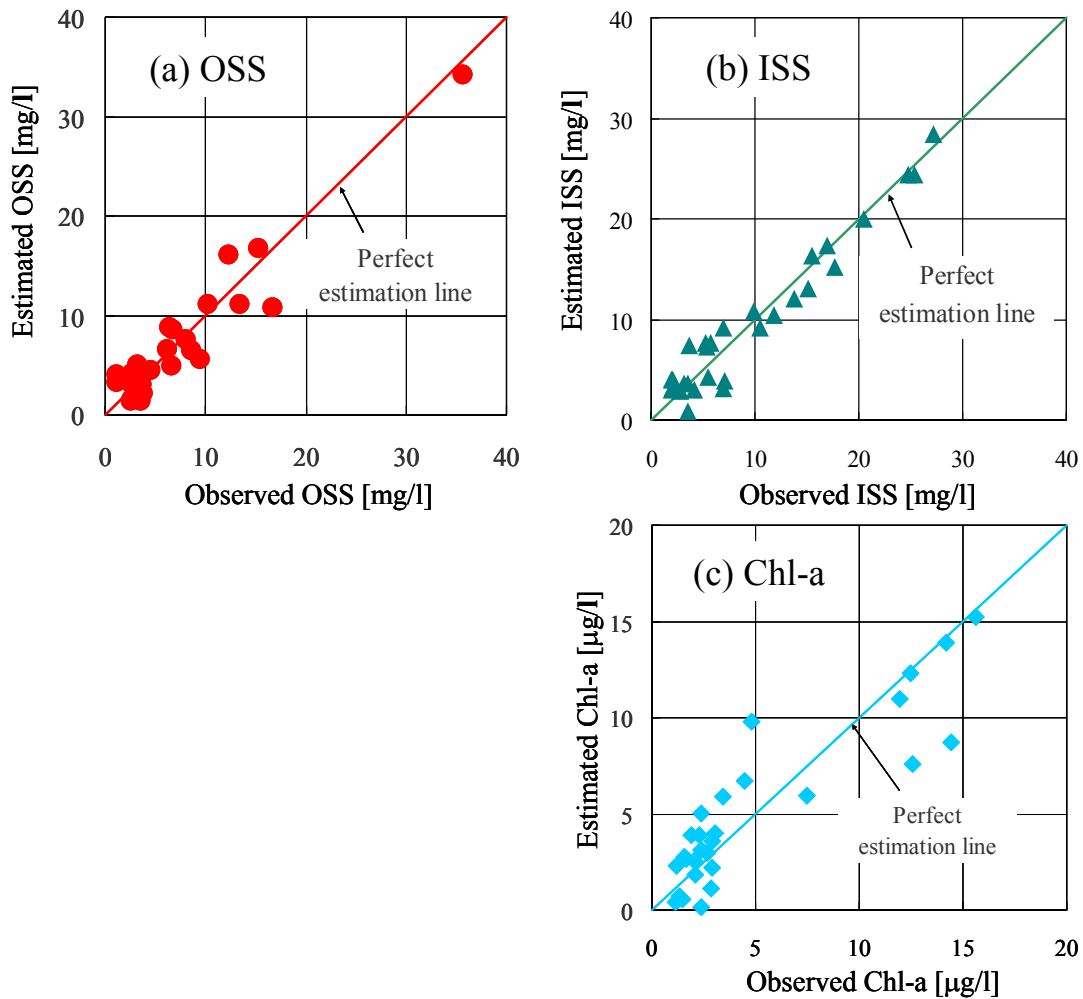


図 1 ISE-PCR 法を用いた OSS, ISS, Chl-a の現場観測値と推定値の散布図.

(a) OSS, (b) ISS, (c) Chl-a.

Fig. 1 Scatter chart of observed and estimated OSS,ISS and Chl-a using ISE-PCR method.

(a) OSS, (b) ISS, (c) Chl-a.

mg/l, 2.19 mg/l, 2.31 µg/l と、表 1 に示した結果と同程度か、わずかに低下する程度の精度であった。

ここで、表 1 に示した推定式について定性的な考察を試みる。まず OSS 濃度の推定式では、Chl-a の吸収波長に相当する 430 nm で係数が負になり、Chl-a の反射が大きい緑付近 (540 nm) と蛍光波長に近い 700 および 710 nm (沖・安岡, 1996) で正になっている。これは、OSS が主に植物プランクトン由来のケースが多かったことを示唆している。Chl-a 濃度の推定式は、波長数が多く複雑ではあるが、青波長域 (470 nm 以下) の負の係数、690 nm ~ 710 nm 付近の正の係数が比較的大きいのは、Chl-a の吸収および蛍光波長に対応すると考えられる。しかし、590 nm ~ 650 nm の波長帯は、Chl-a と Chl-b の比較的弱い吸収領域が重複しており、プランクトンの

種類によって光吸収度が微妙に変化することが、推定式に影響しているものと思われる。最後に ISS 濃度の推定式は、530 nm ~ 690 nm の範囲で同程度の大きさの係数が正負両方現れている。もし SS の主な成分が ISS である場合は、Chl-a などによる吸収・蛍光の影響が少なく、570 nm ~ 700 nm 程度の波長範囲で、ISS 濃度の増加とともに単調に反射率が増加すると考えられる (大森ほか, 2012)。しかし今回の推定式は、OSS も混在した中から ISS 成分だけを抽出するために、このような式になったものと思われる。

3.2 PCR による Landsat-5/TM 用推定式作成結果とその精度評価

前述したように、ハイパースペクトルセンサを

表 1 ISE-PCR 法による OSS, ISS, Chl-a 推定結果. (a) 推定式, (b) 相関係数, RMSE, 変動率 (Rel. RMSE), 使用波長数.

Table 1 Results of estimation of OSS, ISS and Chl-a using ISE-PCR method. (a) estimate equation, (b) correlation coefficient, RMSE, relative RMSE (Rel. RMSE), and the number of wavelengths used.

(a)	Equation
OSS [mg/l]	$OSS = -4.42R_{430} + 4.31R_{540} - 2.01R_{620} - 1.97R_{630} - 1.86R_{640} + 2.22R_{700} + 3.75R_{710} + 3.38$
ISS [mg/l]	$ISS = -11.52R_{530} + 14.03R_{550} - 13.34R_{580} - 10.20R_{590} + 13.20R_{600} + 10.86R_{610} + 6.33R_{620} + 10.48R_{630} - 11.60R_{650} - 4.99R_{660} - 9.77R_{680} + 5.65R_{690} + 8.54$
Chl-a [μg/l]	$Chl-a = -1.21R_{400} - 0.52R_{440} - 0.42R_{450} - 0.33R_{460} - 0.23R_{470} + 0.07R_{590} + 0.08R_{600} + 0.08R_{610} + 0.08R_{630} + 0.09R_{640} + 0.09R_{650} + 0.16R_{690} + 0.23R_{700} + 0.29R_{710} + 6.27$

(b)	Corr. Coef.	RMSE	Rel. RMSE	Number of wavelengths
OSS	0.95	2.09mg/l	6.05%	7
ISS	0.97	1.82mg/l	7.28%	12
Chl-a	0.89	2.11 μg/l	14.11%	14

想定した OSS, ISS, Chl-a 濃度推定の可能性を示唆することができた。次に、バンド数の少ない Landsat-5/TM による観測の可能性検討を試みるためのシミュレーションを行なった。更に次節で述べるように、ここで得られた推定式を用いて、同じく Landsat-5/TM データを用いた SS の起源推定の行なわれたシーン (大森, 2012) の一つにおいて OSS, ISS, Chl-a 濃度推定を行ない、起源推定の結果との整合性を確認することを目的とした事例解析を行った。

事例解析に用いた推定式は、2.1 で述べた現場観測における分光放射計観測から得られた反射率を TM の Band1, Band2, Band3 の波長分解能 (60 ~ 80nm) の間で平均した“模擬” TM 観測反射率と、Compact-CTD からの Chl-a, 水サンプル解析からの OSS および ISS 濃度との関係を PCR により求めたものである。本来は、TM データと現場観測値から推定式を求めるべきであるが、同期観測データが存在しないため、今回は分光放射計による推定式を用いた。なお、上記の模擬 TM データを作る際、簡略化のため、TM の波長応答関数は考慮せず、上記の波長分解能の間の単純平均値を用いた。

図 2 に、縦軸をシミュレーションによる推定値、横軸を現場観測値として、それぞれ (a) OSS, (b)

ISS, (c) Chl-a のシミュレーション結果の散布図を示す。また、求めた推定式及び推定式による推定値と現場観測値の相関係数, RMSE, 変動率を表 2 に示す。また、事例解析は宍道湖を対象としたため、大橋川のデータ 18 サンプルと宍道湖に流入する河川である斐伊川のデータ 2 サンプルの合計 20 サンプルを使用した。シミュレーション結果より、変動率が 30% 程度であり、高精度による推定は困難であるが、「高濃度」、「中濃度」、「低濃度」といった 3 段階の大まかな推定は可能であると判断された。

3.3 TM による事例解析結果

事例解析に用いたシーンは図 3(a) 宍道湖の True Color 画像に示すような、2000 年 11 月 3 日 10 時 25 分 (JST) に Landsat-5/TM により観測されたシーンで、西側に多くの SS が存在しており、河川から流入した濁りであると推測できる。これは、宍道湖西側から流入し、全河川流入の 70% を占めると言われる斐伊川 (高安, 2001) の流域において、観測日の 1 ~ 2 日前に、2 日間で約 110 mm の降水があったこと (気象庁, 2013) によると考えられる。図中の◎は宍道湖湖心水質観測所 (国土交通省, 2013) の位置を示す。

大森ほか (2012) による起源推定結果によると、同

表 2 Landsat-5/TM シミュレーション用に求めた推定式とその精度.

Table 2 Estimate equations and their accuracies for Lansat-5/TM simulation.

	Equation	Corr. Coef.	RMSE	Rel. RMSE
OSS	$OSS = -6.59B_1 + 9.85B_2 - 4.80B_3 - 0.45$	0.67	5.49mg/l	34.88%
ISS	$ISS = -1.69B_1 + 0.05B_2 + 4.49B_3 + 2.22$	0.79	3.60mg/l	24.19%
Chl-a	$Chl-a = -5.60B_1 + 7.48B_2 - 5.39B_3 + 2.77$	0.63	3.10 $\mu\text{g/l}$	34.74%

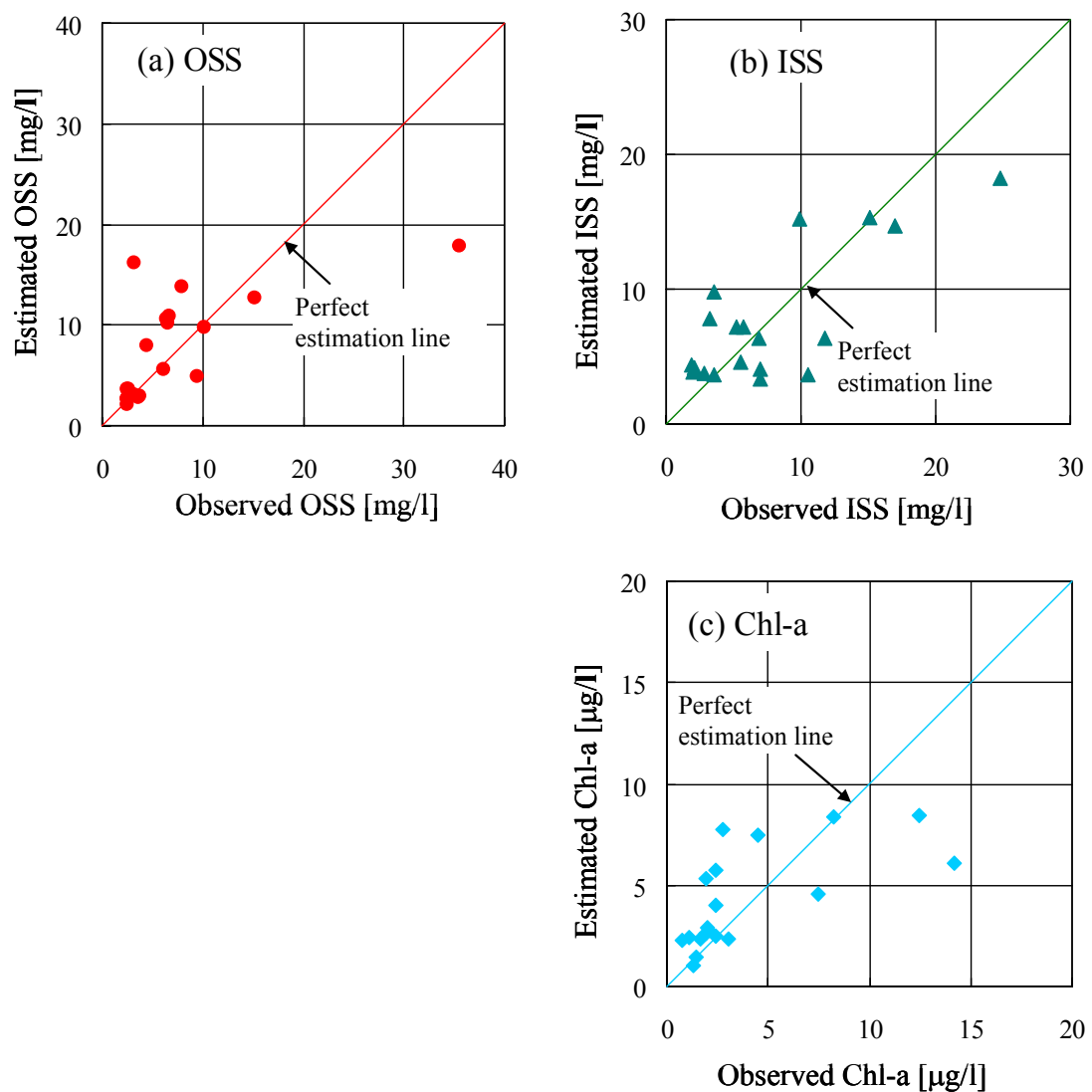


図 2 Landsat-5/TM シミュレーション結果の散布図. (a) OSS, (b) ISS, (c) Chl-a.

Fig. 2 Scatter chart of result of simulation for Landsat-5/TM. (a) OSS, (b) ISS, (c) Chl-a.

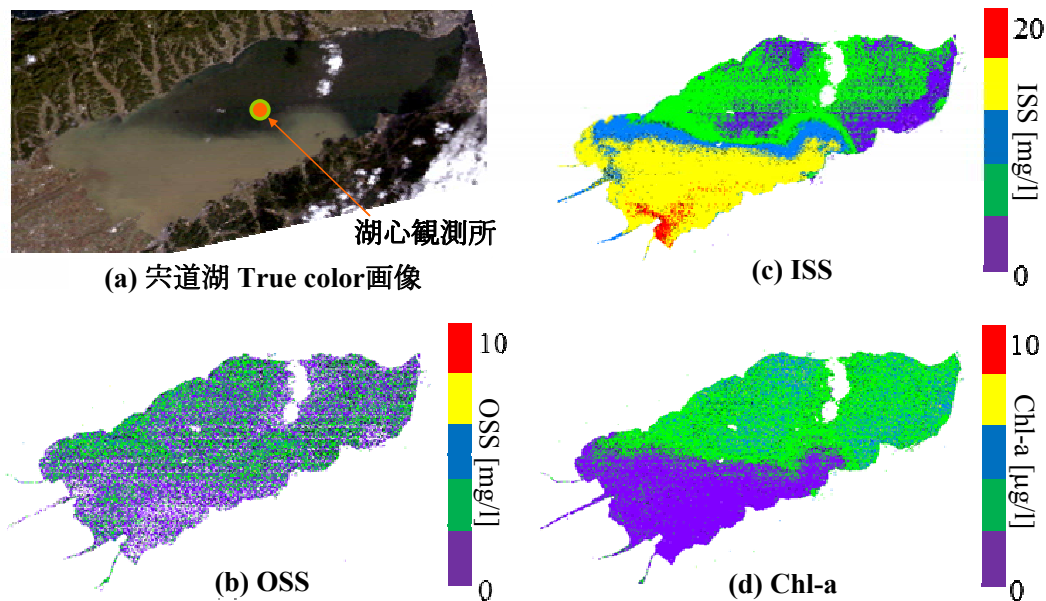


図3 Landsat-5/TM 観測データを用いた OSS, ISS, Chl-a 推定結果 (2000年11月3日). True color 画像中の○は宍道湖湖心水質観測所の位置.

(a) 宍道湖 True color 画像, (b) OSS, (c) ISS, (d) Chl-a.

Fig. 3 Result of estimation of OSS, ISS and Chl-a using Landsat-5/TM observation data (November 3, 2000). The “orange-colored” circle in true color image shows the location of the Lake Shinji central water-quality observatory.

(a) True color image of Lake Shinji, (b) OSS, (c) ISS, (d) Chl-a.

シーンにおける宍道湖の表層 SS は、西側が河川からの流入、東側は植物プランクトン起源であったことから、西側の河川より多くの SS が流れ込んでいると推定できるが、彼らの結果では OSS, ISS, Chl-a 濃度は不明であった。

そこで我々は、3.2 に述べた分光放射計観測を基にした推定式を用いて、宍道湖における OSS, ISS, Chl-a 濃度マップを作成した。その結果を、それぞれ図 3 (b) OSS, (c) ISS, (d) Chl-a に示す。なお前節で“3 段階程度”の濃度推定が可能と述べたが、これはあくまで標準偏差を指標にした「目安」であり、自然界では、OSS などの濃度は、ある程度空間的に、また濃度的に連続性を持って分布することを考慮し、その変化の様子を見やすくするため、図では 5 段階のカラーバーとした。

OSS, ISS, Chl-a 濃度推定結果より、以下のことが見て取れる。

(i) OSS

ほぼ一様に 0 ~ 4 mg/l の濃度で分布しているが、西側から流入した SS の中には OSS は少なく、西側に比べて東側の方が OSS の濃度が僅かに高くなっている。

(ii) ISS

上述したように、衛星観測日の 1 ~ 2 日前の大量の降雨による山林や農地からの土砂流入により、西側より流入する河川水は高い ISS 濃度を持ち、それにより宍道湖西側の ISS が 12 ~ 20 mg/l と高くなっていると推測される。また、図 3 (a) の True Color 画像では判断が難しいが、宍道湖西側の ISS 濃度が高い領域と北東側の湖水の境界では ISS の濃度は希釈され、低下していることがわかる。

(iii) Chl-a

図 3 (d) に示すように、西側では、Chl-a 濃度が低く、北東側で高い、というふたつの領域に区別されている。これらの領域は (ii) で述べた ISS 濃度の濃淡領域とよく対応している。従って、西側は流入した河川水 (淡水は密度が小さいので表層に現れる) の特性が図に表れ、北東側では、流入河川水が到達していない領域と考えられる。西側においても、河川水流入前は、北東部と類似の水質であったと仮定すると、Chl-a 濃度は、北東部と同じようなプランクトン主体の水域であったと考えられる。例えば、目立った降雨が観測されていない日が続いている場合、宍道湖では比較的一様な濁度分布を示し、表層

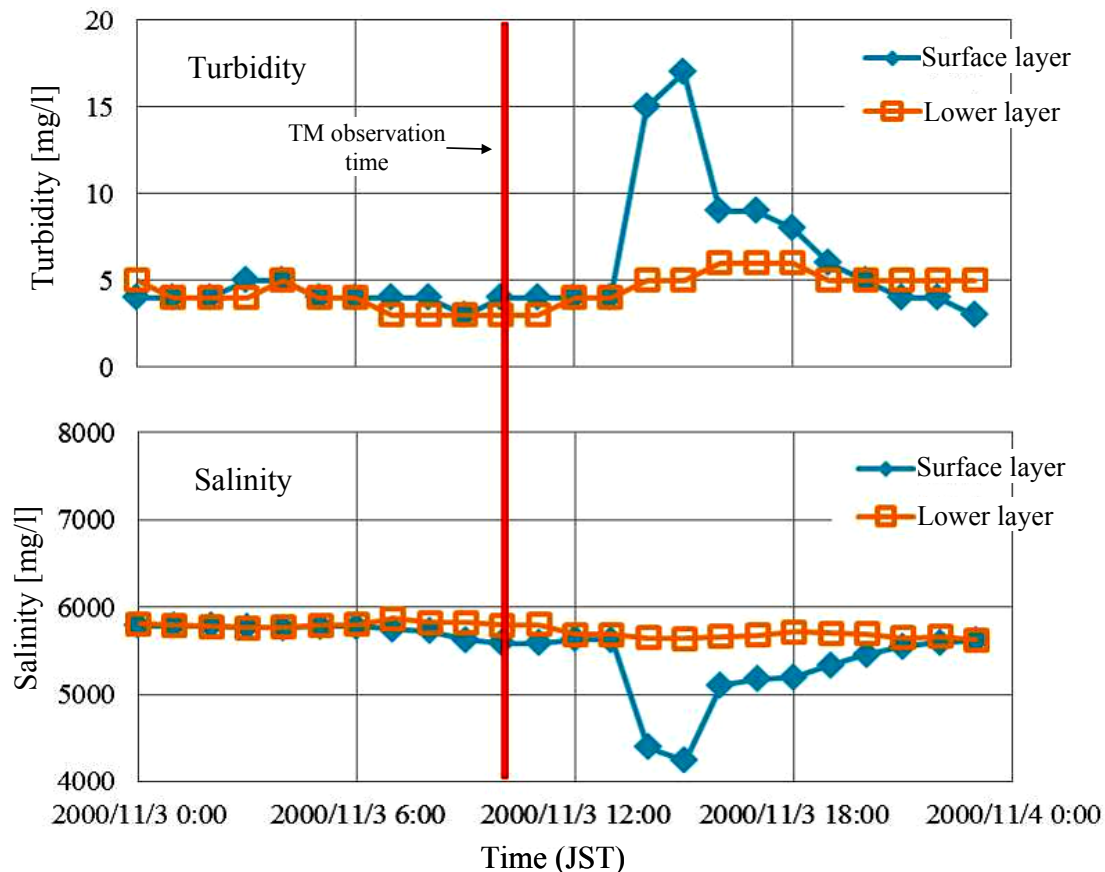


図4 宍道湖湖心水質観測所の濁度と塩分濃度の時間推移。

Fig. 4 Temporal variations of turbidity and salinity at the Lake Shinji central water-quality observatory.

に分布する SS は植物プランクトン起源と推定されている (大森ほか, 2012)。

次に、これまで図3の分布について述べてきた推定が妥当であるか検証するため、宍道湖湖心水質観測所データ (国土交通省, 2013) を確認する。図4に宍道湖湖心水質観測所で観測された濁度と塩分濃度の時間推移を示す。縦軸は濁度 [mg/l]、塩分濃度 [mg/l] を表し、横軸は時間 (JST)、図中の太い縦ラインは衛星の観測時間を表す。図4を見ると、観測時刻の約4時間後に表層で濁度が上昇し、同じく表層で塩分濃度が低下していることから、河川から濁った淡水が流入し、約4時間後に湖心観測所に到達したものだと考えられる。

以上のことより、今回の事例解析で得られた OSS, ISS, Chl-a 濃度推定の結果は、SS の起源推定 (大森ほか, 2012) による「宍道湖西側に河川流入起源の SS が存在し、東側に植物プランクトン起源の SS が存在している」という結果、並びに宍道湖湖心観測所のデータとも整合性をもつことが確認できた。

また、今後、湖心観測所の水質データと画像の関係性を詳しく検討することで、SS の移流速度推定の可能性も考えられる。

4. 考察

前述のように、可視・近赤外分光放射計を用いた水面反射スペクトルの測定などから、既存のならびに将来のハイパースペクトル衛星搭載センサによる OSS, ISS, Chl-a の同時推定の可能性が示された。また、可視域に3バンド程度のチャンネルを持つ既存の地球観測センサ (本論文では、Landsat-5/TM を使用) でも、ある程度の推定は可能であることが、分光放射計データを用いた推定式の精度評価から明らかになった。しかしながら、本手法で求めた推定式や、またその精度検証について、以下のような課題が残されている。

(1) 観測場所が3箇所に限られている。またサンプル数 (観測回数) も十分多いとはいえない。従って、存在する植物プランクトンの種類や SS の性質も限定さ

れたものになっている可能性がある。高安 (2001) に記述されているように、例えば宍道湖と中海では、支配的なプランクトンの種類は異なる。また、河川からの流入水の性質も気象条件によって、あるいは流域の環境変化によって、大きく変わる可能性がある。そのため、OSS, ISS, Chl-a 濃度を推定する推定式も、できるだけ多くの場所で、また様々な環境条件における観測結果に基づいたものでなければならない。ただ、大橋川における観測は、潮汐の状態によって、中海のあるいは宍道湖の水質特性に近いものに入れ替わることが、我々の観測結果から示唆されており、それらを区別して推定式を作ることによって精度向上の可能性がある。また、衛星観測と同期した現場観測を行ない、直接衛星リモートセンシング精度を検証することも必要である。

(2) 上記とも関連するが、現在、宍道湖・中海では、アオコ、赤潮などの多発が問題となっている。これらの分光反射特性測定はまだ十分行なっておらず、アオコ、赤潮などが発生した場合に、不適切な推定結果を示す可能性がある。今後、これらの観測結果を考慮した推定式を作成し、これらの検出や定量的推定を目指す必要がある。

(3) 今回は簡略化のため、水面反射補正は 850 nm 付近の反射率を差し引く手法を採用した。この手法は、850 nm 付近では水中の懸濁物質からの反射は無視できると仮定しているが、アオコなどが発生した場合は、その仮定が成り立たないことも考えられ、更に精度のよい手法の検討が必要である (沖ほか, 1996)。

(4) OSS 導出に植物プランクトンのレッドフィールド比を用いている。これは宍道湖においては多くの場合、植物プランクトン主体の OSS である、という経験的知見によるが、河川からの流入水に陸上起源の有機物が多く含まれ、それが汽水域の OSS の主成分となっている場合には、OSS 導出精度に影響する。今後検討が必要である。

5. 結 論

可視・近赤外域の多波長反射率を用いた汽水域有機・無機懸濁物質、クロロフィル a のリモートセンシングの可能性検討を行った。

汽水域の環境に影響を及ぼす SS には、有機成分である OSS と無機成分である ISS が存在し、SS 中の割合は SS の起源により様々である。粘土鉱物などによる ISS と、植物プランクトンや高等植物などによる

OSS は、汽水域に与える影響も異なることから、分類して推定することで、より詳細な環境モニタリングが可能と考えた。そのため、現場観測により、水の分光反射率の測定、SS の採取からの ISS および OSS の導出、及び Compact-CTD による Chl-a の測定を行ない、ISE-PCR 法または PCR 法を用いて、これらの物理量の推定式を求めた。ISE-PCR 法及び PCR 法の計算にはプログラミング言語である R 言語の PLS パッケージを用いた。

はじめに、不要な説明変数を自動で削除していく ISE-PCR 法を用いて OSS, ISS, Chl-a 濃度の多波長推定シミュレーションを行なった。分光放射計を、41 バンド使用できるハイパースペクトルセンサと考え、シミュレーションを行なったところ、実用性の尺度である変動率も 15 % 以下で高精度の推定の可能性を示唆することができた。また、可視域に 3 バンドを持つ Landsat-5/TM を想定したシミュレーションを行ったところ、3 段階程度の濃度識別が可能であることが分かった。

次に、実際に Landsat-5/TM の観測データを用いて OSS, ISS, Chl-a 濃度推定の事例解析を行った。大森 (2012) により SS の起源推定の結果が報告されているシーンの一つである 2000 年 11 月 3 日のシーンについて OSS, ISS, Chl-a 濃度推定の事例解析を試みた。事例解析の結果、SS の起源推定結果、及び宍道湖湖心水質観測所データとの整合性の確認ができた。

本文では報告していないが、本シーンの他に Chl-a 濃度が 100 $\mu\text{g}/\text{l}$ を超えるような高 Chl-a 11 の富栄養化水域、アオコが発生したシーンなどの解析も試みたが、推定式を求めるための現場観測データにそのようなサンプルを組み込めていないため、妥当な推定結果を得ることはできなかった。今後多種多様な組成のサンプルを取得し、推定式を改良すること、その他、考察に挙げたような課題を解決していく必要がある。また、リモートセンシング技術の実用化のためには、価格や観測頻度などの面でもユーザにとって使用しやすいハイパースペクトルセンサが利用可能になることが望まれる。

謝 辞

本研究で使用した宍道湖の水質データは国土交通省出雲河川事務所から提供を受けました。Landsat-5/TM 観測データは米国 NASA が所有し、宇宙航空研究開発機構から提供を受けました。また、本研究を進めるにあたり、宍道湖・中海リモートセンシング全

般に渡りご指導いただいた広島大学大学院工学研究院作野裕司助教, ISE-PCR についてご指導いただいた広島大学大学院国際協力研究科川村健介准教授, 懸濁物質推定法などについてご指導頂いた大森康裕氏 (現 ヒラタ精機株式会社) に深謝いたします。

引用文献

- Cerco, C. F., Kim, S-C. and Noel, M. R. (2013) Management modeling of suspended solids in the Chesapeake Bay, USA. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 116: 87-98.
- Fukushima, H., Higurashi, A., Mitomi, Y., Nakajima, T., Noguchi, T., Tanaka, T. and Toratani, M. (1998) Correction of atmospheric effect on ADEOS/OCTS ocean color data: Algorithm description and evaluation of its performance, *J. Oceanography*, 54: 417-430.
- Gardner, L. R., Thombs, L., Edwards, D. and Nelson, D. (1989) Time series analyses of suspended sediment concentrations at North Inlet, South Carolina. *Estuaries*, 12: 211-221.
- 原島 省 (2008) 海洋生態系におけるケイ藻とシリカの役割. *J. Environ. Biotechnol.*, 8: 9-16.
- Han, L. (1997) Spectral reflectance with varying suspended sediment concentrations in clear and algae-laden waters. *Photo. Eng. & Remote Sens.*, 63: 701-705.
- Kawamura, K., Watanabe, N., Sakanoue, S., Lee, H-J., Inoue, Y. and Odagawa, S. (2010) Testing generic algorithm as a tool to select relevant wavebands from field hyperspectral data for estimating pasture mass and quality in a mixed sown pasture using partial least squares regression. *Grassland Science*, 56: 205-216.
- 気象庁 (2013) 気象統計情報, <http://www.jma.go.jp/jma/menu/report.html> (2013 年 5 月時点).
- 国土交通省 (2013) 水文水質データベース, <http://www1.river.go.jp/> (2013 年 5 月時点).
- 日本水環境学会 (編) (2006) 水環境ハンドブック. 朝倉書店.
- 沖 一雄・安岡善文 (1996) 高濃度水域における近赤外波長帯を含む二波長によるクロロフィル a 推定モデルの作成. *日本リモートセンシング学会誌*, 16: 1-9.
- 沖 一雄・安岡善文・高島 勉 (1996) 水域リモートセンシングの水面反射光除去モデルに関する研究. *日本リモートセンシング学会誌*, 16: 38-43.
- 大森康裕 (2012) PLS 法を用いたリモートセンシングによる汽水域懸濁物質起源推定. 島根大学大学院総合理工学研究科修士論文.
- 大森康裕, 古津年章, 下舞豊志, 三瓶良和, 瀬戸浩二 (2012) 分光放射計観測データを用いた PLS 法による汽水域懸濁物質起源推定. *リモートセンシング学会誌*, 32: 137-148.
- Oyama, Y., Matsushita, B., Fukushima, T., Matsushige, K. and Imai, A. (2009) Application of spectral decomposition algorithm for mapping water quality in a turbid lake (Lake Kasumigaura, Japan) from Landsat TM data. *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sens.*, 64: 73-85.
- 西条八東・三田村緒佐武 (1995) 新編 湖沼調査法. 講談社サイエンティフィック.
- 作野裕司・山本正智・吉田武史・松永恒雄・古津年章・下舞豊志・高安克己 (2004) 多時期 ASTER データを用いた宍道湖・中海の濁度・クロロフィル a 濃度推定. *LAGUNA*, 11: 147-153.
- 作野裕司・松永恒雄 (2008) 分光反射率データを用いた汽水湖における高クロロフィル a 濃度の推定精度評価. *環境工学研究論文集*, 45: 113-119.
- 島根県 (2012) 宍道湖・中海におけるアオコ及び赤潮の発生状況. 環境白書参考資料.
- 高安克己 (2001) 汽水域の「宿命」と「個性」. 『汽水域の科学』(高安克己編), たたら書房, 米子, pp. 139-149.
- 宇宙技術開発 (株) (2013) 衛星画像データサービス, http://www.sed.co.jp/sug/contents/satellite/satellite_items.html (2013 年 5 月時点).
- 山本周一郎・古津年章・下舞豊志・野々原伸吾・作野裕司 (2007) MODIS による宍道湖・中海の濁度分布推定. *LAGUNA*, 14: 57-68.