汽水湖東郷池における 非接触クロロフィル推定手法の検証

作野 裕司¹・前田 晃宏²・宮本 康²・森 明寛²・
岡本 将揮²・畠山 恵介³・九鬼 貴弘⁴

¹正会員 広島大学准教授 大学院工学研究院エネルギー・環境部門
(〒739-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-1)

E-mail: sakuno@hiroshima-u.ac.jp

²鳥取県衛生環境研究所水環境対策チーム
(〒682-0704 鳥取県東伯郡湯梨浜町南谷 526-1)

³鳥取県衛生環境研究所大気・地球環境室
(〒682-0704 鳥取県東伯郡湯梨浜町南谷 526-1)

⁴鳥取県水・大気環境課
(〒680-8570 鳥取県鳥取市東町 1-220)

本研究の目的は、鳥取県中央部に位置する汽水湖の東郷池において、非接触で Chla を推定する手法を検証することである。この検証のために 2013 年 5 月から 2015 年 7 月までに取得された 42 個（4 時期）の実測分光反射率／Chla データセットが取得された。その結果、「湖山池モデル」（672 nm と 704 nm の 2 波長比）では $40 \mu\text{g L}^{-1}$ 以上の高濃度部で大きな誤差が生じた。この誤差を抑制するために、水中の生物光学的な理論に基いた新しい 3 波長モデルを取り入れて、この湖に適した計算式や設定波長について検討した。最終的には、適切に波長選択された 3 波長（650 nm, 703 nm, 740 nm）を使った場合、Chla 推定誤差は「湖山池法」と比較して約 8% の大幅な精度向上があった。

Key Words : remote sensing, drone, reflectance, chlorophyll-a, 3 band model

1. はじめに

鳥取県中部に位置する東郷池では、湖中心部に温泉が湧く観光地であるが、近年富栄養化が進行し¹⁾、シジミの不漁や赤潮またはアオコによる景観悪化等が問題²⁾となっている。山陰地方の東西に並ぶ汽水湖の湖山池、中海、宍道湖も同様な問題を抱えている。最近では異常気象（豪雨や温暖化）、越境大気汚染などの影響もうけて、将来的に汽水湖の水質環境が大きく変動することも予想される。そのため、これらの湖沼では多角的な視点からのモニタリングが求められている。特にリモートセンシング（RS）による水質モニターは安価で時空間的なモニタリングが可能な手法として、地元では大きく期待されている。ただし、現行の衛星では雲の影響や長い観測周期、限定的な観測波長等の欠点があり、定常的なモニタリング利用は難しかった。そこで筆者らは、雲下の低空からイベント時にも即時観測可能で、近年脚光を浴びている自立飛行型ドローンを使ったモニタリング手法を検討している。その基礎研究として、すでに筆者らはドローン搭載のデジタルカメラによる東郷池の赤潮観測法を

考案し、そのマッピングに成功している³⁾。さらに、高精度の植物プランクトン分布を把握する手法として、ドローン搭載の多バンド分光計を使って非接触で水質分布を推定する手法も検討している。これまでの研究で湖山池において船上からの分光反射率により懸濁物質濃度（SS）に影響されない非接触クロロフィルa（Chla）推定式（湖山池法と呼ぶ）を見いだした⁴⁾。しかし、この推定式は現時点で湖山池のみでしか検証されていない。そこで、本研究では東郷池において、複数回、船による実測分光反射率と同期した水質調査を行い、湖山池法の検証をするともに、東郷池においてより安定した非接触 Chla 推定式を検討することを目的とした。また近年の研究で、富栄養化水域に適した新しい非接触 Chla 推定モデルがいくつか提案されているため、本研究ではそのような新しいモデルの適用可能性についても検討する。

2. 研究の方法

(1) 調査地域

東郷池は、面積4.1km²、平均水深1.8m、最大水深3.6m、貯水量743万m³、滞留時間29日、流域面積49.0km²、湖岸延長10 km⁵の図-1に示すような形状をした汽水湖である。同湖の流入河川は南西部から埴見川、羽衣石川、東郷川、舎人川の4河川で、すべて南域の山地から流入する。一方、流出河川は、北部の「橋津川」で、この川の長さは約2 kmで日本海に通じており、潮汐によって海水が遡上し湖内に流入するため、同湖の水は汽水となっている。1996年度からは流出河川の南端付近に設置された水門によって塩分調整がされている。また、東郷池は古くからシジミを代表とする内水面漁業が盛んである。しかし、近年、貧酸素水塊の発生、栄養塩類の溶出、さらには硫化物の堆積や硫化水素の発生などの水環境問題が深刻化している²⁾。特に、これらの問題と密接に関係するアオコや赤潮の発生は、内水面漁業に大きな被害を与える要因となるため、アオコや赤潮の指標となるChlaモニタリングは同湖にとって特に重要なモニタリングパラメータとなる。同湖のChlaは齊ら²⁾の2005年の調査では表層・底層ともに0~29 µg L⁻¹の範囲で推移し、6、9月で高い値を示した。また、湖北部で低く、湖中央部から南部にかけて高い傾向があると報告されている²⁾。

(2) 現地調査データ

表-1に示すような4日間、午前9~11時の間に図-1に示す東郷池の11の基本測点において、分光反射率・Chla・懸濁物質質量(SS) データセットの収集を行った。水面直上における分光反射率は、船上からポータブル分光放射計(EKO社, MS720)を使って、400 - 900 nmの波長範囲を1nm間隔で測定した。一方、Chlaは同じ測点において表層水をバケツ採水後、UNESCO法に従って実験室

図-1 東郷池の基本測点

表-1 取得された現地の水質データレンジ

Date	Chla (µg L ⁻¹)		SS (mg L ⁻¹)		N
	Min	Max	Min	Max	
2013/5/30	21.5	77.2	3.6	9.6	10
2013/8/8	6.1	60.4	4.8	12	11
2014/3/7	81.1	145	18	27	11
2015/7/21	3.3	27.7	0.4	28	10
Total	3.3	145	0.4	28	42

で測定した。表-1に取得されたChlaとSSのデータレンジを示す。

(3) 非接触Chla推定モデル

非接触によるChla推定には、通常Chla吸収の大きい青バンドとChla吸収の小さい緑バンドの反射率比が使われることが多く、最も基本的なChla推定モデルとして、以下のような2波長モデルによる推定が知られている。筆者らが湖山池において同様の研究を行った際もこの2波長モデルを使用した。

$$Chla \propto R(\lambda_i) / R(\lambda_j) \quad (1)$$

ここで、 R は水面上の反射率を示し、 λ は波長を表す、実際に使われる2波長 λ_i と λ_j は、水域によって異なる。例えば、外洋では「440 nmと550 nm」付近、沿岸では「670 nmと720 nm」付近があげられる⁶⁾。これまで筆者らが湖山池で見いだした最適2波長は「672 nmと704 nm」(±約5 nm)⁴⁾であり、後者のモデルにあたる。本研究では、2波長を使ったモデルとして、すでに筆者らが見いだした湖山池のモデルを「湖山池モデル」、前述した外洋の代表的なモデルを「モデルA」、沿岸の代表的なモデルを「モデルB」と呼ぶ。

一方、前述した2波長の経験的なモデルとは別に、近年、水中の生物光学的な理論に裏付けられた半解析的な3波長モデル^{7,8)}の有効性が指摘されている。ここでは、Gitelsonら⁸⁾の理論に従って、この3波長モデルの説明を簡単に行う。ここでいう3波長モデルとは2波長モデルと同様、Chlaとの関係を以下のような単純な式で表すことができる。

$$Chla \propto [R^{-1}(\lambda_1) - R^{-1}(\lambda_2)] \times R(\lambda_3) \quad (2)$$

ここで λ_1 、 λ_2 、 λ_3 は、水中の光学特性によって選定される3波長を示す。この式の物理的な背景を説明するため、水中に溶存する物質の光学的な理論に基づいて反射

率と水中物質との関係を簡単に解説する. まずは, 水面直上で観測される水面の反射率は以下のような式で表される.

$$R(\lambda) \propto b_b(\lambda) / [a(\lambda) + b_b(\lambda)] \quad (3)$$

ここで, a と b_b はそれぞれ水中物質の吸収係数と散乱係数である. 非接触による沿岸の Chla 推定において Chla の強い吸収がある青波長では陸域起源の CDOM (有色溶解有機物) の吸収も大きいので, Chla 推定精度が悪くなる. そこで, 沿岸では CDOM の吸収が比較的小さい赤波長の Chla 吸収を利用することを考える. 赤～近赤外の特徴的な3つの異なる波長を選んだ場合, 式(3)は次のようにさらに詳しい水中物質の吸収係数と散乱係数で表すことができる.

$$R(\lambda_1) \propto b_b / (a_{chla} + a_{cdom} + a_{tripton} + a_{water} + b_b) \quad (4)$$

$$R(\lambda_2) \propto b_b / (a_{cdom} + a_{tripton} + a_{water} + b_b) \quad (5)$$

$$R(\lambda_3) \propto b_b / a_{water} \quad (6)$$

ここで, b_b は水中物質の後方散乱係数, a_{chla} , a_{cdom} , $a_{tripton}$, a_{water} はそれぞれ植物プランクトン, CDOM, 無機懸濁物質, 純水の吸収係数を示す. また実際に使われる3波長として λ_1 は Chla 吸収が青波長に次いで大きい「670 nm 付近」, λ_2 は Chla 吸収を0と仮定できるまたは無視できるほど小さく, CDOMや無機懸濁物質の吸収係数が λ_1 とほぼ同じ波長の「710 nm 付近」, λ_3 は a_{water} を除く吸収係数はほぼ無視できるほど小さいと仮定できる「740 nm 付近」がそれぞれ使われる. これらの吸収係数の分光特性と選択波長の位置関係を確認するために, 図-2に水中物質の吸収係数の分光特性と3波長モデルの基本波長の位置を示す. ただし, この図で使用される吸収係数(*を付したのは比吸収係数)は富栄養化水域の霞ヶ浦で行われた Oyama ら⁹⁾およびYang ら¹⁰⁾の研究に使用されている文献や数式を参考に, 筆者が新たに作図したものである. さらに3波長モデルでは, 赤～近赤外域において, b_b の波長依存性が小さい(ほぼ同値とみなす)と仮定すると, 式(4), 式(5)の逆数の差は以下の式で表すことができる.

$$[R^{-1}(\lambda_1) - R^{-1}(\lambda_2)] \propto [a_{chla}(\lambda_1) + a_{water}(\lambda_1) - a_{water}(\lambda_2)] / b_b \quad (7)$$

このうち a_{water} は地点ごとには変化しない係数なので, 式(7)を式(8)に書き換える.

$$[R^{-1}(\lambda_1) - R^{-1}(\lambda_2)] \propto [a_{chla}(\lambda_1)] / b_b \quad (8)$$

ここで式(8)の分母の b_b も地点ごとに変化するため, 式(8)と式(6)を掛け合わせて b_b の影響を打ち消すと, 式(2)の3波長モデルが完成する. ただし, 式(6)の a_{water} も地点ごとには変化しない係数であるため, この係数は無視できるとする. なお, ここでは「 $\lambda_1=670$ nm」, 「 $\lambda_2=710$ nm」, 「 $\lambda_3=740$ nm」を式(2)に代入したモデルを「モデルC」と呼ぶ.

図-2 水中物質の吸収係数の分光特性と3波長モデルの基本波長の位置

3. 結果および考察

(1) 東郷池の分光特性

図-3に東郷池で取得された全分光反射率データの分光特性を示す(ただし, 分光特性を比較しやすくするために700-900 nmの最小値を0とするオフセット処理を行っている). 東郷池の湖水の分光特性は, 570 nm 付近に最大値, 750 nm 付近にそれ以上に最小値, 440 nm 付近と670 nm 付近に極小を持つ特徴は, 湖山池⁴⁾と同様で典型的な富栄養化水の分光特性を示している. また図-4は湖山池の分光特性を示した論文⁴⁾で指摘した, 富栄養化水の Chla 推定に重要な700 nm 付近のピーク波長を示しており, 東郷池データでも概ね704 nm±5 nm 付近に集中していることが分かる.

図-3 東郷池の全実測分光反射率特性

図-4 Chla による 700 nm 付近の波長シフト (いずれも T2 測点)

(2) 2 波長モデルと 3 波長モデルの検証

図-5 は、湖山池法を適用した場合の東郷池の実測 Chla と推定 Chla の関係を示した図である。この図から両者は概ね一致しているが、Chla が $40 \mu\text{g L}^{-1}$ 以上になると、誤差が大きくなることがわかる。また図-6 は、モデル A、モデル B、モデル C を使った Chla 推定モデルを適用した東郷池の実測 Chla と推定 Chla の関係を示す。典型的な 2 波長を使ったモデル A、モデル B、3 波長を使ったモデル C を比較したところ、モデル C で比較的大きな精度向上が確認できた。なお、本論文における精度の指標は「相対平均二乗誤差 (Relative Root Mean Square Error: RRMSE)」で表し、この場合、少なくとも 17% 以上の精度向上があった。ただし、この 3 波長モデルに関する既往の研究において、非常に富栄養化が進んだ水環境下 (Chla が $107 \sim 3000 \mu\text{g L}^{-1}$ 、濁度が $11 \sim 423 \text{ NTU}$) では、 λ_1 は 670 nm 付近ではなく、 650 nm 付近が最適であったという報告がされている¹¹⁾。特に前者のシフトは、植物プランクトンの種類による誤差¹²⁾を回避することができると考えられる。また、その時の λ_2 は図-4 に示されるような、反射率の極大ピーク付近の波長を使っている。そこで、本研究ではモデル C で使われた 3 波長モデルに従って、東郷池で最適な波長 (具体的には「 670 nm 」を「 650 nm 」に、「 710 nm 」を「 703 nm 」) に置き換えた。そして新たに波長を変更したこの 3 波長モデル (「モデル D」と呼ぶ) と実測 Chla の関係を図-7 に示す。これより、東郷池の Chla 精度は表-2 に示すように、湖山池法と比べ RRMSE で約 6% の精度向上があり、 $40 \mu\text{g L}^{-1}$ 以上高濃度部の誤差も大きく抑制された。なお表-2 には参考値として平均二乗誤差 (Root Mean Square Error: RMSE) も同時表記した。モデル D による最終的な非接触 Chla 推定式は以下のように表される。

$$\text{Chla} = 396[R^{-1}(650) - R^{-1}(703)] \times [R(740)] + 54.1 \quad (9)$$

しかしながら、この推定式を使った場合、図-7 に見られるように、Chla が $100 \mu\text{g L}^{-1}$ 以上の高濃度は依然誤差が大きく、改良の余地が残された。

図-5 湖山池法を適用した場合の東郷池の実測 Chla と推定 Chla の関係

図-6 既往研究モデルを適用した東郷池の実測 Chla と推定 Chla の関係

図-7 モデル D を適用した場合の東郷池の実測 Chla と推定 Chla の関係

表-2 モデルによる Chla 推定精度比較

	Model	r^2	RMSE ($\mu\text{g L}^{-1}$)	RRMSE (%)
1	Koyama-ike	-	22.5	40.8
2	Model A ⁶⁾	0.38	29.1	190.1
3	Model B ⁶⁾	0.70	20.5	100.4
4	Model C ⁷⁾	0.76	18.1	83.0
5	Model D (This study)	0.87	13.0	34.5
6	Model E (This study)	0.90	11.8	33.3

Number of data: 42

(3) 3 波長モデルの改良

前節で指摘したように、Chla が $100 \mu\text{g L}^{-1}$ 以上の高濃度では、モデル D の 3 波長モデルでも誤差が大きくなる。この誤差の原因は「式(6)右辺の分母に後方散乱成分 b_b とデトリタスと呼ばれる吸収成分 (a_d) が無視できないほど含まれる」から¹⁰⁾¹³⁾だと考えられる。この b_b と a_d の影響を軽減するために、最近の研究¹⁰⁾では以下のような新たな 3 バンドモデル(ここでは「モデル E」とする)が考案された。

$$\text{Chla} \propto [R^{-1}(\lambda_1) - R^{-1}(\lambda_2)] / [R^{-1}(\lambda_3) - R^{-1}(\lambda_2)] \quad (10)$$

このモデルは式(2)と基本的な理論に変わりはないが、式(9)の分母の引き算で、近赤外域の b_b と a_d の影響を低減することができる。ただし、ここでも、「 λ_2 と λ_3 の波長における a_{cdom} , a_{tripton} , a_d はほぼ同値とみなす」という仮定がおかれている。

図-8 は、モデル E を適用した場合の東郷池の Chla 推定の検証結果を示している。このうち、(a)はモデル E と実測 Chla の関係を示しており、線形よりも 2 次の曲線でよりよい近似 ($r^2=0.90$, $\text{RMSE}=11.8 \mu\text{g L}^{-1}$) が得られた。ここで得られた Chla 推定式は以下の式で表される。

$$\text{Chla} = 54.8 + 121x + 69.4x^2 \quad (11)$$

$$x = [R^{-1}(650) - R^{-1}(703)] / [R^{-1}(740) - R^{-1}(703)] \quad (12)$$

この近似式による Chla 推定は、表-2 で示される最も推定精度の高いモデル D よりも、さらに 1.2% (湖山池法と比べ約 8%) の精度向上があった。また式(10)、式(11)を使って推定された Chla と実測 Chla の関係は図-8(b)に示すとおり、Chla が $100 \mu\text{g L}^{-1}$ 以上の高濃度でも他のモデルと比べてばらつきが抑えられていることが確認できる。

図-8 モデルEを適用した場合の東郷池のChla推定の検証結果。(a) Model E と実測 Chla の関係、(b) Model E から推定された Chla と実測 Chla の関係

4. まとめ

本研究では、東郷池で取得された実測分光反射率/Chla データセットを使って、非接触 Chla 推定精度の検証を行った。その結果、「湖山池法」(2 波長モデル)では $40 \mu\text{g L}^{-1}$ 以上の高濃度部で大きな誤差が生じた。この誤差を抑制するために、水中の生物光学的な理論に基づき、新しい 3 波長モデルの計算式や設定波長について検討された。最終的には、適切に波長選択された 3 波長モデル(モデル E)を使った場合、Chla 推定誤差は「湖山池法」と比較して約 8% の大幅な精度向上があった。

今後は、本研究で得られた非接触 Chla 推定モデルをより多くのデータセットを使って検証する予定である。またドローン搭載した分光計により、より高い高度における非接触 Chla 推定精度の検証も行いたい。最終的には、自動走行したドローンから、アオコや赤潮などの詳細な分布を定量的にマッピングするシステムを構築したい。

謝辞: 本研究は, 科研費(課題番号:15K14041, 25281054), および環境研究総合推進費, 新規戦略型課題 (S-9)「アジア規模での生物多様性観測・評価・予測に関する総合的研究」(研究代表, 矢原徹一)の成果の一部である. 関係者各位に謝辞を表す.

参考文献

- 1) 南條吉之, 福田明彦, 矢木修身, 福井由彦: 汽水湖沼におけるアオコおよび赤潮発生の抑制に関する基礎的研究, 水環境学会誌, 第 21 巻, 第 8 号, pp.530-535, 1998.
- 2) 齊幸治, 原田昌佳, 吉田勲, 平松和昭, 森牧人: 鳥取県東郷池における水質の季節的变化と分布特性, 農業土木学会論文集, No.247, pp.31-36, 2007.
- 3) 前田晃宏, 宮本康, 森明寛, 岡本将揮, 九鬼貴弘, 作野裕司: UAVを利用した汽水湖沼の実用的な赤潮観測の事例, 日本リモートセンシング学会誌, 第 36 巻, 第 2 号, pp.126-129, 2016.
- 4) 作野裕司, 畠山恵介, 宮本康, 初田亜希子, 森明寛, 九鬼貴弘: 汽水化直後の湖山池湖水の分光反射率特性と水質との関係, 土木学会論文集 B3(海洋開発), 第 69 巻, 第 2 号, pp.1551-1556, 2013.
- 5) (財)河川環境管理財団, 河川環境総合研究所: 我が国湖沼での沈水植物の再生及び利活用に関する資料集, 河川環境総合研究所資料, 第 30 号, 2011.
- 6) Gitelson A. A., Schalles J. F., and Hladik C. M.: Remote chlorophyll-a retrieval in turbid, productive estuaries: Chesapeake Bay case study, *Remote Sensing of Environment*, Vol.109, pp.464-472, 2007.
- 7) Dall'Olmo, G. and Gitelson, A.A.: Effect of bio-optical parameter variability on the remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters: experimental results. *Applied optics*, Vol.44, No.3, pp.412-422, 2005.
- 8) Gitelson, A.A., Dall'Olmo, G., Moses, W., Rundquist, D.C., Barrow, T., Fisher, T.R., Gurlin, D. and Holz, J.: A simple semi-analytical model for remote estimation of chlorophyll-a in turbid waters: Validation. *Remote sensing of environment*, Vol. 112, pp.3582-3593, 2008.
- 9) Oyama, Y., Matsushita, B., Fukushima, T., Matsushige, K. and Imai, A.: Application of spectral decomposition algorithm for mapping water quality in a turbid lake (Lake Kasumigaura, Japan) from Landsat TM data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote sensing*, Vol.64, No.1, pp.73-85, 2009.
- 10) Yang, W., Matsushita, B., Chen, J., Fukushima, T. and Ma, R.: An enhanced three-band index for estimating chlorophyll-a in turbid case-II waters: case studies of Lake Kasumigaura, Japan, and Lake Dianchi, China, *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, Vol. 7, No.4, pp.655-659, 2010.
- 11) Zimba, P.V. and Gitelson, A.: Remote estimation of chlorophyll concentration in hyper-eutrophic aquatic systems: Model tuning and accuracy optimization, *Aquaculture*, 256(1), 272-286, 2006.
- 12) 福島武彦, 松下文経: 東アジア湖沼水質モニタリング, 水環境学会誌, 第 35 巻, 第 2 号, pp.43-47, 2012.
- 13) Le, C., Li, Y., Zha, Y., Sun, D., Huang, C. and Lu, H.: A four-band semi-analytical model for estimating chlorophyll a in highly turbid lakes: The case of Taihu Lake, China. *Remote sensing of environment*, Vol.113, No.6, pp.1175-1182, 2009.

(2016.2.4 受付)

VALIDATION OF REMOTELY SENSED CHLOROPHYLL ESTIMATION MODEL IN BRACKISH LAKE TOGO-IKE

Yuji SAKUNO, Akihiro MAEDA, Yasushi MIYAMOTO, Akihiro MORI,
Masaki OKAMOTO, Keisuke HATAKEYAMA, and Takahiro KUKI

The objective of this study is to validate the method of chlorophyll-a (Chla) estimation in the brackish Lake Tougou-ike which is located in the central part of Tottori Prefecture. The 42 (4 times) in-situ spectral reflectance / Chla data set was acquired from May, 2013 to July, 2015 for the validation. As a result, a substantial margin of error at the high Chla area of more than 40 $\mu\text{g L}^{-1}$ was observed using "Koyama-ike model" using 2 bands of 672nm and 704nm. A new three band model based on bio-optical theory in the water was adopted and an optimal expression and suitable bands for this lake were discussed to reduce the error. Finally the Chla estimation model using 3 band model of 650nm, 703nm, and 740nm substantially improved the precision of about 8% compared with Lake Koyama-ike model.