

機関番号：12102

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20510003

研究課題名 (和文) リモートセンシングと生物光学モデルを結び付けた高濁度水域の水質監視手法の開発

研究課題名 (英文) Integrating Remotely Sensed Data and Bio-optical Model to Monitor Water Quality in High Turbid Case-2 Waters

研究代表者

松下 文経 (MATSUSHITA BUNKEI)

筑波大学・大学院生命環境科学研究科・准教授

研究者番号：80361319

研究成果の概要 (和文)：

湖沼は、飲料水や工業・農業用水の供給や、また身近な漁場として、人類の生活にとって重要な役割を担っている。しかしながら、近年、富栄養化に伴う藻類の異常発生など様々な環境問題が生じている。本研究では、衛星データから高濁度湖沼の水質パラメータ、すなわちクロロフィル a 濃度、トリプトン濃度、波長 440nm における溶存有機物の吸収係数、を推定するための3つの新しい手法を開発した。これらの手法の有効性について、2つの高濁度のアジア湖沼において検証した結果、良い推定結果が得られた。

研究成果の概要 (英文)：

Lakes play important roles as freshwater resources for drinking, agriculture, industry, fishing, recreation, and tourism. However, accelerated eutrophication is a widespread and significant problem for lakes around the world. In this study, we proposed one new index and two new methods for long-term monitoring of water quality in turbid lakes. We tested these index and methods in two turbid Asian lakes and obtained acceptable accuracies both for in situ datasets and satellite images.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：リモートセンシング

科研費の分科・細目：環境学・環境動態解析

キーワード：リモートセンシング、生物光学モデル、高濁度水域、クロロフィル a 濃度、無機懸濁物濃度、溶存有機物濃度、SAMO-LUT 法、RMIM 法

## 1. 研究開始当初の背景

水中の植物プランクトンの含有量は、水域における基礎生産量の推定のみならず、水域や流域の開発活動、環境汚染、地球規模の気候変動が水域環境に及ぼす影響を評価する上でも必須な情報となっている。また、植物プランクトン以外の無機懸濁物の含有量も、

重金属や微量汚染物質のフラックスに強く関係しているため、水質管理に対して極めて重要な役割を演じている。自然水域におけるこれらの懸濁物の含有量は、これまでの観測船による定期的な調査から調べてきたが、これらの調査は、調査地域に対して、限られている数地点、かつ異なる時間での観測しかで

きず、その時間的・空間的な分布変化の評価は困難である。その上、多くの時間と労力、そして資金も必要となる。また、調査されていない場所や、特に過去に調査が行われなかった水域に対する情報を知ることが不可能となる。これらの問題点に対して、1970年代後半からの膨大な画像データを蓄積してきた衛星リモートセンシング手法は、環境負荷が水域に引き起こす変化を、定期的・広域的・かつ簡便にモニタリングできる可能性を秘めている。

しかし、湖沼、内湾、沿岸水域など基礎生産量が高く、環境汚染の進んだ水域において、リモートセンシングによる植物プランクトンなど懸濁物量のモニタリング手法の確立には幾つかの問題点が残されている。まず、(1) こうした水域には植物プランクトン以外に、無機懸濁物、溶存有機物が存在し、反射スペクトルに相互影響を及ぼし、植物プランクトン情報の抽出が難しい。(2) 従来の衛星データを用いた水質の計測は回帰分析による経験モデルが多く、大量なグラウンドトゥースを衛星通過時刻より前後 2~3 時間以内に取得することが必要であった。(3) その回帰モデルは時間と場所により変化するという問題点も有していた。

## 2. 研究の目的

本研究では、上記のような問題点を解決することとあわせて、リモートセンシングによる高濁度水域において有効な水質監視手法を開発することに目指す。このため、水体の固有光学特性(吸収係数、後方散乱係数など)と水体の分光反射スペクトルとの間の関係を、現地調査、生物光学モデルのシミュレーション及び衛星データの解析によって、詳細に調べる。

## 3. 研究の方法

### (1) 生物光学モデル

水面直下のリモートセンシング反射率は以下の式で表せる。

$$r_{rs}(\lambda) = f \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda) + b_b(\lambda)} \quad (1)$$

ここで  $a(\lambda)$  と  $b_b(\lambda)$  はそれぞれ総吸収係数と総後方散乱係数である。 $f$  は太陽天頂角の関数で、以下の式で表せる。

$$f = 0.975 - 0.629\mu_0 \quad (2)$$

ここで  $\mu_0$  は太陽天頂角、直達光と散乱光の比率に依存する。水面直下のリモートセンシング反射率から以下の式を用いて水面直上のリモートセンシング反射率に変換できる。

$$R_{rs}(\lambda) = 0.544r_{rs}(\lambda) = 0.544f \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda) + b_b(\lambda)} \quad (3)$$

総吸収係数は以下の式のように展開できる。

$$a(\lambda) = a_w(\lambda) + [\text{Chl-a}] \times a_{ph}^*(\lambda) + [\text{TR}] \times a_{tr}^*(\lambda) + [\text{CDOM}] \times a_{CDOM}^*(\lambda) \quad (4)$$

ここで  $[\text{Chl-a}]$  と  $[\text{TR}]$  はそれぞれ Chl a とトリプトンの濃度、 $[\text{CDOM}]$  は波長 440nm における CDOM 吸収係数である。 $a_w(\lambda)$  は純水の吸収係数である。 $a_{ph}^*(\lambda)$ 、 $a_{tr}^*(\lambda)$ 、 $a_{CDOM}^*(\lambda)$  はそれぞれ植物プランクトン、トリプトン、CDOM の特定吸収係数である。

同様に、総後方散乱係数は以下のように展開できる。

$$b_b(\lambda) = b_{b,w}(\lambda) + [\text{Chl-a}] \times b_{b,ph}^*(\lambda) + [\text{TR}] \times b_{b,tr}^*(\lambda) \quad (5)$$

ここで  $b_{b,ph}^*(\lambda)$ 、 $b_{b,tr}^*(\lambda)$ 、 $b_{b,w}(\lambda)$  はそれぞれ植物プランクトン、トリプトン、純水の後方散乱係数である。

### (2) SAMO-LUT 法の開発

衛星データから高濁度湖沼の水質パラメータ、すなわちクロロフィル a 濃度、トリプトン濃度、波長 440nm における溶存有機物の吸収係数、を同時に推定するため、SAMO-LUT (Semi-Analytical Model Optimizing and Look-Up Tables) 法を以下の通りで提案する。

ステップ 1 : 衛星データから選択された水中各基本成分の濃度に対応する指標を計算する。

クロロフィル a 濃度の推定指標 :

$$R_{rs}(b_{10})/R_{rs}(b_7) - R_{rs}(b_{10})/R_{rs}(b_9) \quad (6)$$

トリプトン濃度の推定指標 :  $R_{rs}(b_{10})$  (7)

波長 440nm における溶存有機物の吸収係数の推定指標 :

$$R_{rs}(b_7)/R_{rs}(b_5) \quad (8)$$

ここで  $b_5$ 、 $b_7$ 、 $b_9$ 、および  $b_{10}$  はそれぞれ MERIS のバンド 5 (555-565 nm)、バンド 7 (660-670 nm)、バンド 9 (703.75-713.75 nm)、バンド 10 (750-757.5 nm) である。

ステップ 2 : シミュレーションデータによって作成した推定モデルを用いて、水中各基本成分の濃度の初期値 ( $[\text{Chl-a}]_0$ 、 $[\text{TR}]_0$ 、 $[\text{CDOM}]_0$ ) を計算する。

クロロフィル a 濃度の推定モデル :

$$[\text{Chl-a}] = 223.86[R_{rs}(b_{10})/R_{rs}(b_7) - R_{rs}(b_{10})/R_{rs}(b_9)] + 23.95 \quad (9)$$

トリプトン濃度の推定モデル :

$$[\text{TR}] = 49909R_{rs}^2(b_{10}) - 61.38R_{rs}(b_{10}) + 4.74 \quad (10)$$

波長 440nm における溶存有機物の吸収係数の推定モデル :

$$[\text{CDOM}] = 3.03[R_{rs}(b_7)/R_{rs}(b_5)] + 0.35 \quad (11)$$

ステップ 3 : 水中各基本成分の濃度の初期値を用いて、LUT (Lookup Table) から水中各基本成分の濃度を推定するための新たなモデルを探し出す。そして、探し出した推定

モデルを用いて、水中各基本成分の濃度を新たに計算し（[Chl-a]<sub>1</sub>、[TR]<sub>1</sub>、[CDOM]<sub>1</sub>）、初期値を代替する。

ステップ4：ステップ3での作業を繰り返す、毎回新たに計算した水中各基本成分の濃度と前回で計算した濃度と比較し、その差が十分小さくなれば（例えば変化5%以下）、繰り返しを終了する。最後の水中各基本成分の濃度値は最終結果として出力する。

繰り返し回数を変化させた結果、10回の繰り返しがあれば十分な出力精度が得られることがわかった（詳細は雑誌論文③に参照）。

### (3) RMIM法の開発

SAMO-LUT法を対象水域へ適用する際、対象水域の特定固有光学特性（SIOPs）が必要だが、SIOPsは観測項目として一般的ではない。一方、多くの湖沼ではChl a濃度、総懸濁物（SS）濃度（トリプトン濃度への変換可）、溶存有機態炭素（DOC）濃度（440nmでのCDOMの吸収係数への変換可）がデータベース化されている。さらに衛星画像も、人工衛星が定期的に地球表面を観測しており、入手が容易である。これらのデータを利用すれば、従来、測定されていなかったSIOPsの推定が可能になり、さらにこの推定したSIOPsとSAMO-LUT法を合わせることで、観測日以外の水中基本成分濃度分布の推定も可能となる。そこで、本節では、SIOPsを必要としない水中基本成分濃度を推定する新しい手法（RMIM: Relaxed Matrix Inversion Method）を提案する。

従来のMIM法は、SIOPsを既知のパラメータ、水中基本成分の濃度を未知変数としている。同様に、数地点の水中基本成分の濃度が事前に分かれば、SIOPsを未知変数にすることも可能である。この場合、式(4)と式(5)を式(1)に代入し、書き換えをすれば、以下の式になる。

$$a_{ph}^*(\lambda) \cdot [\text{Chl-a}]_i \frac{r_{ns,i}(\lambda)}{f} + a_w^*(\lambda) \cdot [\text{TR}]_i \frac{r_{ns,i}(\lambda)}{f} + a_{CDOM}^*(\lambda) \cdot [\text{CDOM}]_i \frac{r_{ns,i}(\lambda)}{f} + a_w(\lambda) \cdot \frac{r_{ns,i}(\lambda)}{f} + b_{sph}^*(\lambda) \cdot [\text{Chl-a}]_i \left( \frac{r_{ns,i}(\lambda)}{f} - 1 \right) + b_{br}^*(\lambda) \cdot [\text{TR}]_i \left( \frac{r_{ns,i}(\lambda)}{f} - 1 \right) + b_{w}(\lambda) \cdot \left( \frac{r_{ns,i}(\lambda)}{f} - 1 \right) = 0 \quad (12)$$

N個のサンプルがあれば、i番目のサンプルのj番目のバンドに対して、式(12)を以下の式に書き換えできる。

$$a_{ph}^*(\lambda_j) \cdot [\text{Chl-a}]_i \frac{r_{ns,i}(\lambda_j)}{f} + a_w^*(\lambda_j) \cdot [\text{TR}]_i \frac{r_{ns,i}(\lambda_j)}{f} + a_{CDOM}^*(\lambda_j) \cdot [\text{CDOM}]_i \frac{r_{ns,i}(\lambda_j)}{f} + b_{sph}^*(\lambda_j) \cdot [\text{Chl-a}]_i \left( \frac{r_{ns,i}(\lambda_j)}{f} - 1 \right) + b_{br}^*(\lambda_j) \cdot [\text{TR}]_i \left( \frac{r_{ns,i}(\lambda_j)}{f} - 1 \right) = b_{w}(\lambda_j) \left( 1 - \frac{r_{ns,i}(\lambda_j)}{f} \right) - a_w(\lambda_j) \frac{r_{ns,i}(\lambda_j)}{f} \quad (13)$$

式(13)をマトリクスの形で書き換えれば以下になる。

$$\begin{bmatrix} [\text{Chl-a}]_i \frac{r_{ns,i}(\lambda_1)}{f} & \dots & a_{ph}^*(\lambda_1) \\ \dots & \dots & a_w^*(\lambda_1) \\ \dots & \dots & a_{CDOM}^*(\lambda_1) \\ [\text{Chl-a}]_i \frac{r_{ns,i}(\lambda_2)}{f} & \dots & b_{sph}^*(\lambda_2) \\ \dots & \dots & b_{br}^*(\lambda_2) \\ \dots & \dots & b_{w}(\lambda_2) \end{bmatrix}_{N \times 5} = \begin{bmatrix} b_{w}(\lambda_1) \left( 1 - \frac{r_{ns,i}(\lambda_1)}{f} \right) - a_w(\lambda_1) \frac{r_{ns,i}(\lambda_1)}{f} \\ \dots \\ b_{w}(\lambda_2) \left( 1 - \frac{r_{ns,i}(\lambda_2)}{f} \right) - a_w(\lambda_2) \frac{r_{ns,i}(\lambda_2)}{f} \end{bmatrix}_{N \times 1} \quad (14)$$

式(14)から、5個以上の水サンプルがあれば、SIOPsを推定できることが分かる。式(14)で推定したSIOPsを従来の方法で測定したSIOPsと区別するため、ESIOPs（Estimated SIOPs）と呼ぶ。ESIOPsを推定できれば、従来のMIM法を他の地点へ適用することは可能となる（詳細は雑誌論文②に参照）。

### (4) 新指標ETBIの提案

湖沼における反射スペクトルからクロロフィルa濃度を推定するための従来の3波長指標は以下の3つの仮定に基づいている。

仮定1:  $a_{ph}(\lambda_1) \gg a_{ph}(\lambda_2)$ ,  $a_{tr}(\lambda_1) \approx a_{tr}(\lambda_2)$ ,

$a_{CDOM}(\lambda_1) \approx a_{CDOM}(\lambda_2)$

仮定2:  $a_w(\lambda_3) \gg a_{ph}(\lambda_3) + a_{tr}(\lambda_3) + a_{CDOM}(\lambda_3)$

仮定3:  $b_b(\lambda_1) \approx b_b(\lambda_2) \approx b_b(\lambda_3)$

以上の3つの仮定によって、従来の3波長指標は以下ようになる。

$$[1/R_{rs}(\lambda_1) - 1/R_{rs}(\lambda_2)] \times R_{rs}(\lambda_3) = [a_{ph}(\lambda_1) + a_w(\lambda_1) - a_w(\lambda_2)] / a_w(\lambda_3) \quad (15)$$

ここで、 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\lambda_3$ はそれぞれMERISのバンド7（660-670 nm）、バンド9

（703.75-713.75 nm）、バンド10（750-757.5 nm）である。しかし、高濁度水域においては、仮定2が成り立たなくなるため、従来の3波長指標は以下ようになる。

$$[1/R_{rs}(\lambda_1) - 1/R_{rs}(\lambda_2)] \times R_{rs}(\lambda_3) = [a_{ph}(\lambda_1) + a_w(\lambda_1) - a_w(\lambda_2)] / [a_w(\lambda_3) + b_b(\lambda_3) + a_d(\lambda_3)] \quad (16)$$

式(16)からは、高濁度水域において、従来の3波長指標は植物プランクトン以外の成分による影響が残っていることが分かる。一方、高濁度水域においても、以下の仮定が成り立つ。 $a_{ph}(\lambda_2) \approx a_{ph}(\lambda_3)$ ,  $a_{tr}(\lambda_2) \approx a_{tr}(\lambda_3)$ ,  $a_{CDOM}(\lambda_2) \approx a_{CDOM}(\lambda_3)$

この仮定に基づいて、以下の新しい3波長指標（ETBI: Enhanced Three-band Index）を提案する。

$$[1/R_{rs}(\lambda_1) - 1/R_{rs}(\lambda_2)] / [1/R_{rs}(\lambda_3) - 1/R_{rs}(\lambda_2)] = [a_{ph}(\lambda_1) + a_w(\lambda_1) - a_w(\lambda_2)] / [a_w(\lambda_3) - a_w(\lambda_2)] \quad (17)$$

式(17)からは、高濁度水域においても、ETBIは植物プランクトンの変化のみに依存することが分かる（詳細は雑誌論文④に参照）。

## 4. 研究成果

(1) SAMO-LUT 法による基本成分濃度の推定  
 4 時期の MERIS データ (霞ヶ浦で 2006 年 2 月 18 日、2008 年 8 月 7 日、および中国滇池で 2007 年 10 月 24 日、2009 年 3 月 13 日) を用いて SAMO-LUT 法の有効性を検証した。衛星画像は、幾何補正・陸及び雲のマスク、および大気補正を行った。その結果を図 1 に示す。図 1 から、SAMO-LUT 法を用いたクロロフィル a 濃度、トリプトン濃度、CDOM 濃度の推定誤差はそれぞれ  $12.64 \text{ mg m}^{-3}$ 、 $4.44 \text{ g m}^{-3}$ 、 $0.32 \text{ m}^{-1}$ 、相関係数はそれぞれ 0.76、0.89、0.26 であった。従来法よりも精度よく水中光学基本成分の濃度が推定できた。

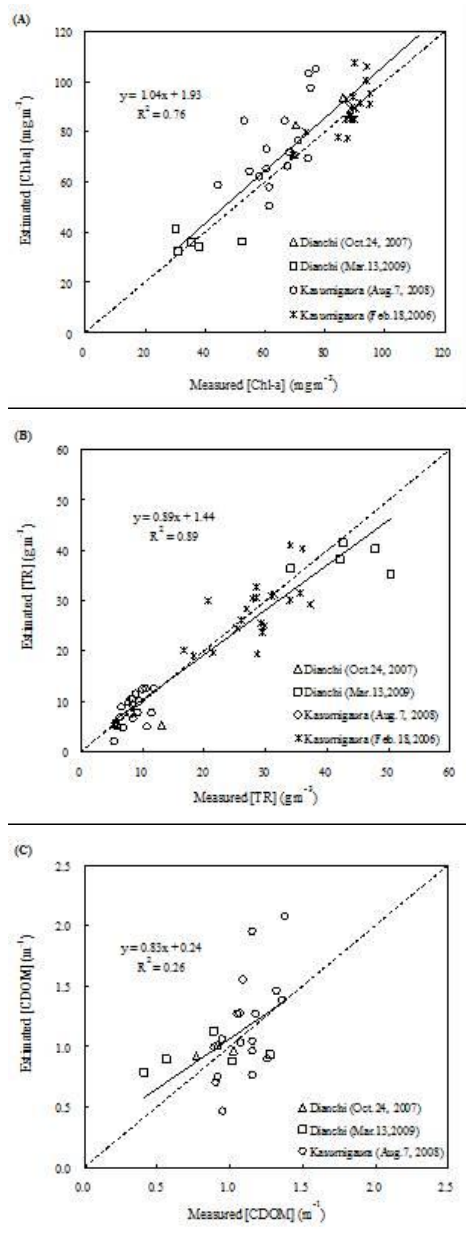


図 1 推定値と測定値の比較 (A) Chl a、(B) トリプトン、(C) CDOM 濃度

(2) RMIM 法による基本成分濃度の推定  
 RMIM 法の精度評価のため、RMIM 法で推定

した Chl a 濃度、トリプトン濃度、および 440nm での CDOM の吸収係数と、それらの実測値を比較した (図 2)。ESIOPs の推定には 2008 年 8 月 7 日の一部のデータを使用した。図 2 から、2007 年 9 月と 2008 年 8 月の推定値は実測値と良く一致した。Chl a 濃度、トリプトン濃度、および 440nm での CDOM の吸収係数の推定誤差はそれぞれ  $10.2 \text{ mg m}^{-3}$ 、 $1.9 \text{ g m}^{-3}$ 、 $0.31 \text{ m}^{-1}$  未満であった。しかし、2010 年 5 月の推定値は大きな誤差を示し、Chl a 濃度、トリプトン濃度、および 440nm での CDOM の吸収係数の推定誤差はそれぞれ  $27.6 \text{ mg m}^{-3}$ 、 $9.5 \text{ g m}^{-3}$ 、 $0.54 \text{ m}^{-1}$  であった。

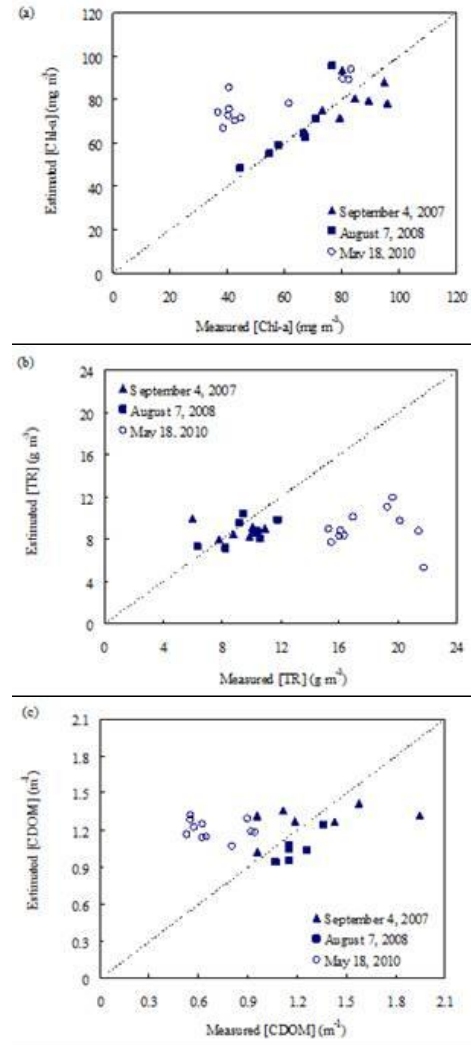


図 2 RMIM 法を用いた推定値と実測値との比較結果。(a) Chl a 濃度、(b) トリプトン濃度、(c) 440nm での CDOM の吸収係数

RMIM 法で推定される水中光学基本成分濃度の精度が、時期により異なる理由として、SIOPs の時間的な変動が考えられる。図 3 には過去 28 年間 (1980 年~2008 年) で平均した各月の藻類の優先種を示す。図 3 から、優先する植物プランクトン種が季節により異なることが明らかである。植物プランクトン

種構造の変化は、植物プランクトンの SIOPs を変化させると十分に考えられる。このような時期的な SIOPs の変動が、RMIM 法の精度に影響したと考えられるため、RMIM 法には SIOPs の変動が小さくなるよう、時期を分けた適用が必要と思われた。

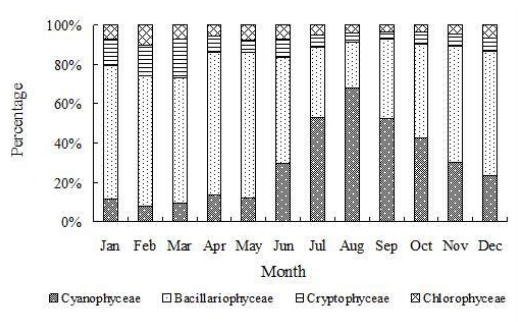


図 3 霞ヶ浦における 4 つの藻類優先種の月平均割合 (1980 年～2008 年)

(3) ETBI によるクロロフィル a 濃度の推定  
 新 3 波長指標の有効性について、アジアの 2 つの高濁度湖沼 (すなわち、日本の霞ヶ浦と中国の滇池) から収集したデータを用いて検証した。その結果、2 つの湖沼において、新 3 波長指標とクロロフィル a 濃度の間に強い相関がみられ ( $R^2 > 0.83$ )、クロロフィル a 濃度を高精度で推定することができた。従来の 3 波長指標の利用と比較した結果、霞ヶ浦の場合は、RMSE は 13.97 から 8.68  $\text{mg m}^{-3}$  まで、相対誤差は 19.01% から 12.30% まで、滇池の場合は、RMSE は 41.29 から 15.28  $\text{mg m}^{-3}$  まで、相対誤差は 35.83% から 21.34% まで抑えることができた (図 4)。以上の結果より、ETBI は高濁度湖沼にも適用可能であることが示唆している。

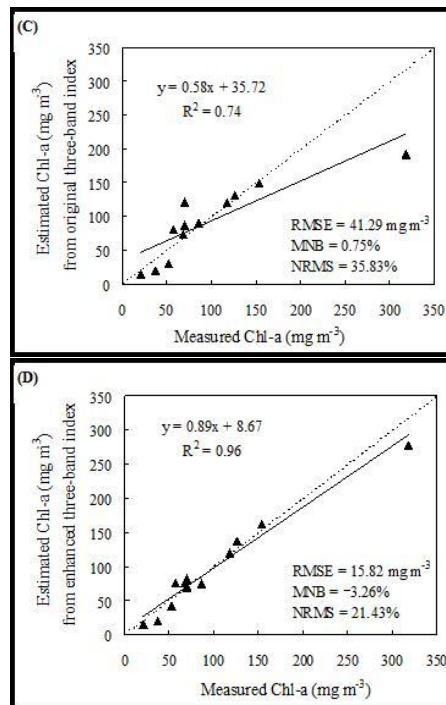
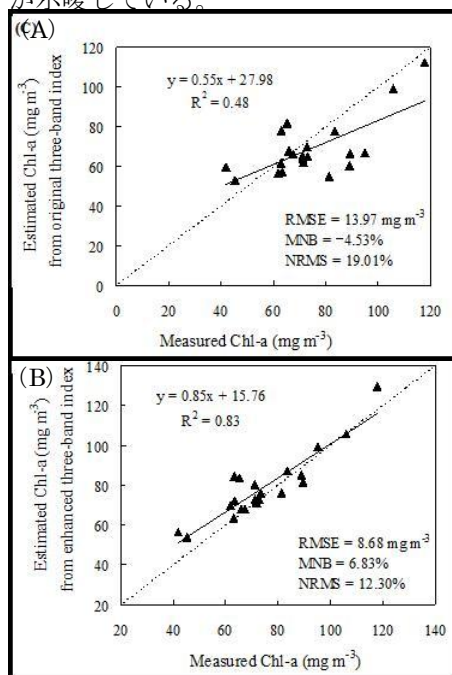


図 4 クロロフィル a 濃度の推定値と測定値の比較 (A), (B) 霞ヶ浦、(C), (D) 滇池

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 10 件)

- ① J. Zhu, J. Chen, B. Matsushita, W. Yang & T. Fukushima: Atmospheric correction of ENVISAT/MERIS data over Case II waters: the use of black pixel assumption in oxygen and water vapor absorption bands. International Journal of Remote Sensing, 査読有、accepted.
- ② W. Yang, B. Matsushita, J. Chen & T. Fukushima: A Relaxed Matrix Inversion Method for Retrieving Water Constituent Concentrations in Case II Waters: the Case of Lake Kasumigaura, Japan. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing of Environment, 査読有、accepted.
- ③ W. Yang, B. Matsushita, J. Chen & T. Fukushima: Estimating constituent concentrations in case II waters from MERIS satellite data by semi-analytical model optimizing and look-up tables. Remote Sensing of Environment, 査読有、115, 1247-1259, 2011.
- ④ W. Yang, B. Matsushita, J. Chen, T. Fukushima & R. Ma: An enhanced three-band index for estimating

chlorophyll-a in turbid case-II waters: Case studies of Lake Kasumigaura, Japan, and Lake Dianchi, China. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 査読有、7, 655-659, 2010.

- ⑤ Y. Oyama, B. Matsushita, T. Fukushima, J. Chen, T. Nagai & A. Imai: Testing spectral decomposition algorithm (SDA) for different phytoplankton species by a simulation based on the tank experiments. International Journal of Remote Sensing, 査読有、31, 1605-1623, 2010.
- ⑥ B. Matsushita, W. Yang, J. Chen & T. Fukushima: Possibility of improving three-band model for different phytoplankton species in case II water: evidences from three experiments. Journal of The Remote Sensing Society of Japan, 査読有、29, 653-664, 2009.
- ⑦ B. Matsushita & T. Fukushima: Methods for retrieving hydrologically significant surface parameters from remote sensing: a review for applications to East Asia region. Hydrological Processes, 査読有、23, 524-533, 2009.
- ⑧ W. Yang, Jin Chen, & B. Matsushita: Algorithm for estimating chlorophyll-a concentration in case II waters based on bio-optical model. Spectroscopy and Spectral Analysis, 査読有、29(1), 38-42, 2009.
- ⑨ Y. Oyama, B. Matsushita, T. Fukushima, K. Matsushige & A. Imai: 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, 査読有、64, 73-85, 2009.
- ⑩ W. Yang, B. Matsushita, & J. Chen: Deriving inherent optical properties through training samples with known concentration of water constituents and reflectance spectra. Journal of Lake Sciences, 査読有、21(2), 143-148, 2009.

[学会発表] (計6件)

- ① W. Yang, B. Matsushita, T. Fukushima, and K. Yoshimura, Retrieval of water constituent concentrations in Case II waters by a relaxed matrix inversion method、Asian Workshop on Ocean Color

(AWOC) and The 7th Korea-Japan Workshop on Ocean Color Remote Sensing (KJWOC)、18-20 December 2010、サン・リフレ函館

- ② 吉村和也、松下文経、福島武彦、Case II 水域における Quantitative Filter Technique (QFT) を用いた懸濁物の吸光度測定、第75回日本陸水学会、2010年9月18日、弘前大学
- ③ W. Yang, B. Matsushita, and T. Fukushima、Remote estimation of water constituent concentrations in case II waters using a sample-based matrix inversion method、the 48th spring conference of the remote sensing society of Japan、May 27-28, 2010、産業技術総合研究所(中央)
- ④ B. Matsushita, W. Yang, J. Chen and T. Fukushima、Applicability of three-band model for estimating chlorophyll-a concentration in two Asian lakes (Lake Kasumigaura, Japan and Lake Dianchi, China)、AGU Fall Meeting、Dec. 18, 2009、San Francisco, USA
- ⑤ W. Yang, B. Matsushita, J. Chen and T. Fukushima、An improved three-band semi-analytical model based on MERIS channels for estimating chlorophyll-a in highly turbid waters、AGU Fall Meeting、Dec. 18, 2009、San Francisco, USA

[図書] (計2件)

- ① 上野健一・久田健一郎、他、古今書院、地球学調査・解析の基礎、2011、208(162-165)
- ② 福島武彦・松下文経、遺伝(衛星画像による湖沼評価)、オーム社、2009、132(39-45)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

松下文経 (MATSUSHITA BUNKEI)  
筑波大学・大学院生命環境科学研究科・  
准教授  
研究者番号：80361319

### (2) 研究分担者

福島武彦 (FUKUSHIMA TAKEHIKO)  
筑波大学・大学院生命環境科学研究科・  
教授  
研究者番号：90124354