

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 15 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25420555

研究課題名(和文) 植物プランクトンの吸収係数に基づいた湖沼の基礎生産量推定手法の確立

研究課題名(英文) Developing a method for estimating primary productivity based on absorption coefficient of phytoplankton in Lakes

研究代表者

松下 文経 (MATSUSHITA, Bunkei)

筑波大学・生命環境系・准教授

研究者番号：80361319

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、人工衛星からのデータを活用することによって、湖沼の基礎生産量を広範囲且つ長いスパンでの推定を試みたものである。このため、まず衛星データに含まれている大気の影響を除去するための大気補正アルゴリズムを開発した。次に、大気補正済みの衛星データから湖水の固有光学特性(すなわち、吸収係数と後方散乱係数)を推定し、それをもとに、湖水の消散係数と有光層深度の推定アルゴリズムを開発した。最後に、これらのパラメータを用いて、霞ヶ浦湖水の基礎生産量の推定を行った。この成果は健全な水利用、水域生態系の保全、及びグローバルな炭素循環の見積もりに利用可能である。

研究成果の概要(英文)： In this research, we tried to estimate the primary production of lakes from satellite data in a wide range and a long span. For this purpose, we first developed an atmospheric correction algorithm to eliminate the influence of the atmosphere contained in satellite data. Next, we estimated the inherent optical properties (i.e., coefficients of absorption and backscattering) of the lake from atmospherically corrected satellite data, and then developed algorithms for estimating the diffuse attenuation coefficient and euphotic zone depth of water bodies based on the remotely estimated inherent optical properties. Finally, we estimated primary production in Lake Kasumigaura using these parameters. This result can be used for healthy water use, conservation of aquatic ecosystems, and estimation of global carbon cycle.

研究分野：リモートセンシング

 キーワード：湖沼基礎生産量 大気補正 生物光学モデル クロロフィルa濃度 植物プランクトン吸収係数 有光層  
 深度 経年変動 リモートセンシング

## 1. 研究開始当初の背景

水域の基礎生産量(Primary Productivity: 以下 PP)は、有機物循環の始まりとして生物の相や量を左右するとともに、水域の水環境を決定する要因の一つである。また、地球炭素循環の一過程として地球温暖化とも関係している。特に湖沼、内湾、沿岸海域など PP が高く、環境汚染の進んだ水域は、人類の活動に強く関係している。すなわち、湖沼での PP を適切に管理することが、そうした水域の健全な水利用、生態系保全をもたらすことになるだけでなく、グローバルな炭素循環の見積もりにも、無視できない存在である。この適切な管理の原点となるのは、まずこれらの水域の実態を的確に把握することである。

リモートセンシング技術をベースにした湖沼 PP の推定には水中の植物プランクトンの量を表す指標であるクロロフィル a の濃度 (以下 Chl-a) が一般的に用いられている (Field et al., 1998)。しかし、Chl-a と PP の間の直接の関係が明確ではないため、PP の推定には大きな不確定性が含まれているという指摘がある (Marra et al., 2007)。一方、湖水固有光学特性の一つである植物プランクトンの吸収係数は (以下  $a_{ph}$ :  $a_{ph}=a^* \times \text{Chl-a}$ 、ここに  $a^*$  は単位 Chl-a あたりの植物プランクトンの吸収係数の意味)、植物プランクトンの光合成に利用可能な光の量 ( $a^*$  で表す) と Chl-a 両方の情報を持つため、PP との関係がより強くなる (Lee et al., 2011)。さらに、この湖水の固有光学特性は、水塊からの分光反射特性 (反射率として衛星センサーで直接計測できる物理量) と直接の関係 (生物光学モデルで表せる) を持つため、衛星画像から高精度での推定が可能となる。すなわち、Chl-a の推定よりも、 $a_{ph}$  を推定した方がより精度の高い PP の推定につながると考えられる。

衛星画像を用いた水塊固有光学特性の推定は、2000 年代から欧米の研究者により海洋を対象に盛んに行われてきた (例えば、Lee et al., 2002)。しかし、海域に比べて、湖沼 (特にアジアの湖沼) は、植物プランクトン以外に、トリプトン (植物プランクトン以外の懸濁粒子) や CDOM (Colored Dissolved Organic Matter: 有色溶存有機物質) などの物質も多く含まれているため (すなわち、濁水生態系)、欧米の海洋で開発されたアルゴリズムはアジアの湖沼にほとんど適用できなかった。

## 2. 研究の目的

本研究では、アジアの湖沼を対象に、まず、生物光学モデルを基にして、湖水の固有光学特性 (すなわち、吸収係数と後方散乱係数) を衛星データから推定する手法の確立を目指した。次に、推定した固有光学特性を用いて湖水の分光消散係数と真光層 (euphotic

zone) を推定し、さらに、湖水中の植物プランクトンの吸収係数を湖水の総吸収係数から分離する手法を確立した。こうして衛星データから推定した各パラメータを通して、湖沼の基礎生産量を推定するためのさらに有効な手法の確立を最終目標とした。

## 3. 研究の方法

### (1) 大気補正

水域の衛星データには、大気からの影響が大半を占めている。従って、衛星画像による湖沼の基礎生産量を推定する前に、衛星データに対して、大気補正を行う必要がある。本研究では、まず先行研究により開発された 4 つの大気補正法を霞ヶ浦から採集してきた現地の分光反射率で検証し、既存手法の特徴および欠点を明らかにした。そして、これらの結果によって、新しい大気補正法の開発を行った (詳細は雑誌論文 に参照)。

### (2) 湖水の吸収係数と後方散乱係数の推定

衛星画像から湖沼の基礎生産量を推定するために、まず、衛星画像から湖水の固有光学特性 (すなわち、水塊の吸収係数と後方散乱係数) 特に植物プランクトンの吸収係数、を推定する必要がある。このため、我々の先行研究では QAA\_Turbid (quasi-analytical algorithm for turbid inland waters) というアルゴリズムを開発した (Yang et al., 2013)。QAA\_Turbid 法による得た湖水の総吸収係数 ( $a$ ) から次の式を用いて、植物プランクトンの吸収係数 ( $a_{ph}$ ) を推定できる。

$$a_{ph}(443) = -0.7488a(411) + 1.392a(443) - a_w(443) \quad [1]$$

ここで、 $a_w(443)$  は波長 443nm における純水の吸収係数である。

### (3) 湖水消散係数の推定

Lee et al. (2005) によれば、湖水の消散係数 ( $\bar{K}_d(\lambda)$ ) は、湖水の固有光学特性に強く依存し、次の式から推定できる。

$$\bar{K}_d(\lambda) = (1 + 0.005\theta_a)a(\lambda) + 4.18(1 - 0.52e^{-10.8a(\lambda)})b_b(\lambda) \quad [2]$$

ここで、 $\theta_a$  は太陽の天頂角であり、衛星画像の撮影時間と場所による推定可能である。

$a(\lambda)$  と  $b_b(\lambda)$  は湖水の総吸収係数と総後方散乱係数であり、QAA\_Turbid 法により推定できる (詳細は雑誌論文 に参照)。

### (4) 湖水有光層深度の推定

湖沼基礎生産量を推定するためのもう一つ重要なパラメータは湖水の有光層深度 (Euphotic Zone Depth) である。Lee et al. (2007) によれば、水深  $z$  における PAR (Photosynthetic available radiation) の垂直透過率 ( $T_{PAR}(z)$ ) は、以下の式より計算

できる。

$$T_{PAR}(z) = \exp[-K_d(PAR, z) * z] \quad [3]$$

ここで、 $K_d(PAR, z)$ は水面と水深  $z$  との間の PAR の減衰係数であり、次の式により計算できる。

$$K_d(PAR, z) = K_1 + K_2 / (1+z)^{0.5} \quad [4]$$

ここで、 $K_1$  と  $K_2$  はそれぞれ以下の式により推定できる。

$$K_1 = [-0.057 + 0.482\sqrt{a(490)} + 4.221b_b(490)][1 + 0.09\sin(\theta_a)] \quad [5]$$

$$K_2 = [0.183 + 0.702a(490) - 2.567b_b(490)][1.465 - 0.667\cos(\theta_a)] \quad [6]$$

ここで、 $\theta_a$  は太陽の天頂角であり、衛星画像の撮影時間と場所による推定可能である。 $a$  と  $b$  は湖水の総吸収係数と総後方散乱係数であり、QAA\_Turbid 法により推定できる(詳細は雑誌論文に参照)。

#### (5) 湖水基礎生産量の推定

リモートセンシングによる水域一次生産量の推定モデルとして、クロロフィル a 濃度をベースにしたモデル(Chl-a-based モデル、Behrenfeld and Falkowski, 1997)と植物プランクトンの吸収係数をベースにしたモデル(aph-based モデル、Lee et al., 1996)が提唱されている。本研究では、この二種類の推定モデルと式[1] [6]を用いて、霞ヶ浦の基礎生産量の推定を試みた。

### 4. 研究成果

#### (1) 大気補正の結果

本研究は、既存の大気補正アルゴリズムが適用できない高濁度水域を対象にし、新たな大気補正アルゴリズムを開発した。この新大気補正法は、高濁度という湖の特徴を生かし、従来の大気補正法にあるエアロゾルモデルの選定という難題を克服した。また、大気補正アルゴリズムに必要な生物光学モデルを利用する際に、従来の経験式の代わりに半理論式を取り込むことができ、新大気補正アルゴリズムの適用性を向上した。この結果、従来の大気補正アルゴリズムと比べ精度が格段に高いことを示した。例えば、霞ヶ浦においては、従来の手法より良い大気補正ができ、相対誤差は 21.8%以下であった(図 1)。しかし、濁度の低い 4 つのアメリカ沿岸水域においては、大きな推定誤差が生じ(相対誤差 84% - 1391%、新手法の限界を示した。

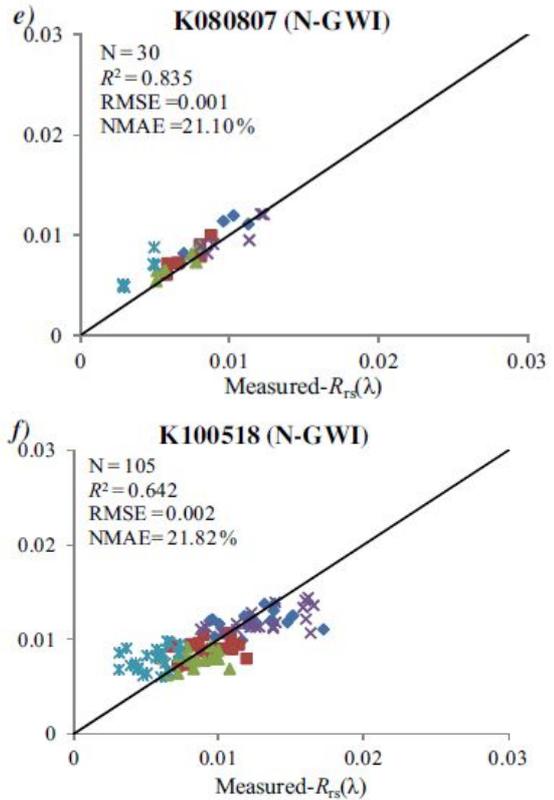
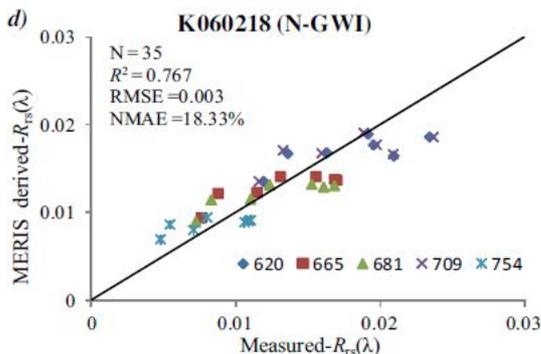


図 1 新大気補正法より補正した衛星データの反射率と実測反射率の比較結果。上：2006年 2月 18日、中：2008年 8月 7日、下：2010年 5月 18日

#### (2) 湖水消散係数 $K_d$ の推定結果

QAA\_Turbid 法と式(2)を組み合わせたことによって推定した湖水消散係数  $K_d$  と実測した  $K_d$  との比較結果を図 2 に示す。図 2 から、波長 443nm、556 nm、669 nm における  $K_d$  の推定値は実測値と良く一致し、RMSE は  $0.17\text{m}^{-1}$ 、相対誤差は 12.96%であった。この結果は、湖水の消散係数を衛星データから精度良く推定できる可能性を示唆している。

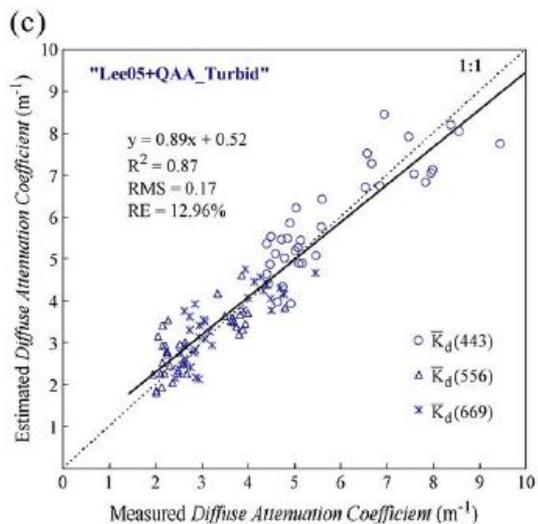


図 2 湖水消散係数  $K_d$  の推定値と実測値との

## 比較結果

### (3) 湖水有光層深度の推定結果

湖水有光層深度の推定精度について、高濁度湖沼霞ヶ浦から収集したデータを用いて検証した。その結果、RMSEは0.12m(有光層深度の範囲:1.15-2.26m) 相対誤差は-1.84%、推定値の不確かさは8.01%、決定係数は0.84であり、従来手法より推定精度が向上した(図3、また、従来法の精度:RMSEは0.37-8.31m、相対誤差は16.47-539.94%、推定値の不確かさは17.47-184.82%、決定係数は0.001-0.55) 以上の結果より、新手法は高濁度湖沼に適用可能であることが示唆されている。

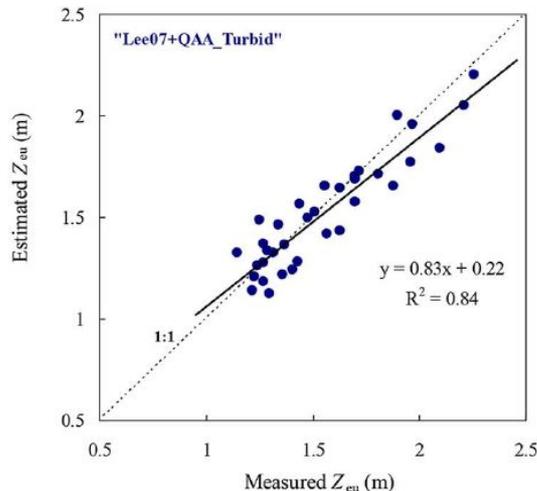


図3 有光層深度の推定値と実測値との比較結果

### (4) 衛星データからクロロフィルa濃度の推定結果

本研究で開発した新大気補正法と我々の別の先行研究で開発した水質パラメータ推定法を併用することによって、215シーンのMERIS画像から霞ヶ浦における約8年間(2003年12月~2012年3月)のクロロフィルa濃度の推定を行った。推定したクロロフィルa濃度を霞ヶ浦データベースによるクロロフィルa濃度の実測値と比較した結果、推定値と実測値が良く一致し、平均推定誤差は約24-34%であった。現地観測時と衛星画像撮影時のずれの差を3日以内から1日以内に変更する場合、平均推定誤差は22-28%まで低下した。また、MERISデータから推定したクロロフィルa濃度は、植物プランクトンの時間・空間変化を再現することができ(相関係数0.59-0.78、 $P < 0.001$ ) 将来の水環境・水資源管理に活用される可能性を示唆した(詳細は雑誌論文に参照)。

### (5) 湖水基礎生産量の推定結果

前述した各手法を組み合わせることによ

って、霞ヶ浦における湖水基礎生産量の推定を試みた結果、クロロフィルa濃度をベースにしたモデルに比べ、植物プランクトンの吸収係数をベースにしたモデルの方が推定精度高かった(図4、相対誤差47%)。しかし、湖水基礎生産量の季節変化の再現については、クロロフィルa濃度をベースにしたモデルの方が推定値と実測値が良く一致した。

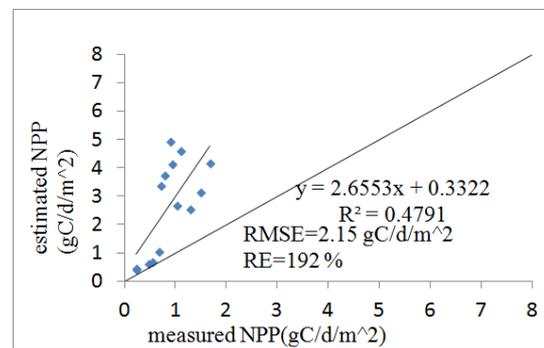
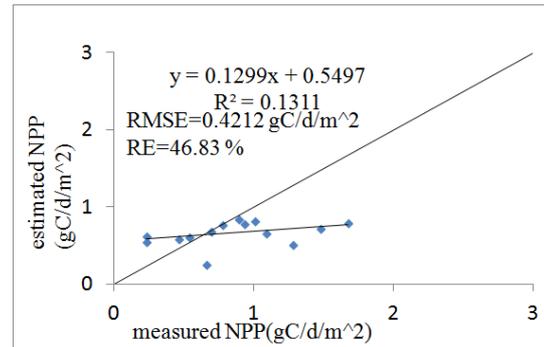


図4 湖水基礎生産量の推定値と実測値の比較。上: aph-basedモデル、下: Chl-a-basedモデル

### <引用文献>

- Field et al., Primary Production of the Biosphere: Integrating Terrestrial and Oceanic Components. Science, 281, 237-240, 1998.
- Marra et al., Phytoplankton pigment absorption: a strong predictor of primary productivity in the surface ocean. Deep-Sea Research 154, 155-163, 2007.
- Lee et al., Deriving inherent optical properties from water color: A multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters. Appl. Opt., 41, 5755-5772, 2002.
- Lee et al., An assessment of optical properties and primary production derive from remote sensing in the Southern Ocean (SOGasEx). J. Geophys. Res., 116, C00F03, 2011.
- Yang, Matsushita et al., Retrieval of inherent optical properties for

turbid inland water from remote sensing reflectance. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 51, 3761-3773, 2013.

Lee et al., A model for the diffuse attenuation coefficient of downwelling irradiance. J. Geophys. Res., 110, C02016, 2005.

Lee et al., Euphotic zone depth: Its derivation and implication to ocean-color remote sensing. J. Geophys. Res., 112, C03009, 2007.

Behrenfeld and Falkowski, A consumer's guide to phytoplankton primary productivity models. Limnol. Oceanogr. 42, 1479-1491, 1997.

Lee et al., Estimating primary production at depth from remote sensing. Applied Optics, 35, 463-474, 1996.

## 5. 主な発表論文等

### [雑誌論文](計11件)

T. Fukushima, B. Matsushita, Y. Oyama, K. Yoshimura, W. Yang, M. Terrel, S. Kawamura & A. Takegahara: Semi-analytical prediction of Secchi depth using remote-sensing reflectance for lakes with a wide range of turbidity. Hydrobiologia, 査読有、780, 5-20, 2016.

DOI:10.1007/s10750-015-2584-7

W. Yang, B. Matsushita, K. Yoshimura, J. Chen & T. Fukushima: A Modified Semi-Analytical Algorithm for Remotely Estimating Euphotic Zone Depth in Turbid Inland Waters. Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 査読有、8, 1545-1554, 2015.

DOI:10.1109/JSTARS.2015.2415853

松下文経、ラル - ムハマド ジャエラニ、楊偉、尾山洋一、福島武彦、MERIS データによる霞ヶ浦のクロロフィルa濃度の長期モニタリング、日本リモートセンシング学会誌、査読有、35(3)、129-139、2015.

URL:

[https://www.jstage.jst.go.jp/article/rssj/35/3/35\\_129/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/rssj/35/3/35_129/_pdf)

L. M. Jaelani, B. Matsushita, W. Yang & T. Fukushima: An improved atmospheric correction algorithm for applying MERIS data to very turbid inland waters. International Journal

of Applied Earth Observation and Geoinformation, 査読有、39, 128-141, 2015.

DOI:10.1016/j.jag.2015.03.004

Y. Oyama, T. Fukushima, B. Matsushita, H. Matsuzaki, K. Kamiya & H. Kobinata: Monitoring levels of cyanobacterial blooms using the visual cyanobacteria index (VCI) and floating algae index (FAI). International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 査読有、38, 335-348, 2015.

DOI:10.1016/j.jag.2015.02.002

B. Matsushita, W. Yang, G. Yu, Y. Oyama, K. Yoshimura & T. Fukushima: A hybrid algorithm for estimating the chlorophyll-a concentration across different trophic states in Asian inland waters. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 査読有、102, 28-37, 2015.

DOI:10.1016/j.isprsjprs.2014.12.022

Y. Oyama, B. Matsushita & T. Fukushima: Distinguishing surface cyanobacterial blooms and aquatic macrophytes using Landsat/TM and ETM+ shortwave infrared bands. Remote Sensing of Environment, 査読有、157, 35-47, 2015.

DOI:10.1016/j.rse.2014.04.031

G. Yu, W. Yang, B. Matsushita, R. Li, Y. Oyama, T. Fukushima: Remote estimation of chlorophyll-a in inland waters by a NIR-red-based algorithm: validation in Asian lakes. Remote Sensing, 査読有、6, 3492-3510, 2014.

DOI:10.3390/rs6043492

F. Yang, B. Matsushita, W. Yang & T. Fukushima: Mapping the human footprint from satellite measurements in Japan. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 査読有、88, 80-90, 2014.

DOI:10.1016/j.isprsjprs.2013.11.020

W. Yang, B. Matsushita, J. Chen, K. Yoshimura & T. Fukushima: Application of a Semi-Analytical Algorithm to Remotely Estimate Diffuse Attenuation Coefficient in Turbid Inland Waters. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 査読有、11(6), 1046-1050, 2014.

DOI:10.1109/LGRS.2013.2284343

L. M. Jaelani, B. Matsushita, W. Yang, T. Fukushima: Evaluation of four MERIS atmospheric correction algorithms in

Lake Kasumigaura, Japan. International Journal of Remote Sensing, 査読有、34 (24), 8967-8985, 2013.  
DOI:10.1080/01431161.2013.860660

〔学会発表〕(計 17 件)

B. Matsushita, F. Setiawan, S. Luki, & T. Fukushima: Generating a long-term database for Indonesian lakes from Landsat satellite data. The 16th World Lake Conference, 2016 年 11 月 7 日 11 日、Bali, Indonesia.

F. Setiawan, B. Matsushita, & T. Fukushima: Estimating water clarity for Indonesia lakes using Landsat Imagery. The 16th World Lake Conference, 2016 年 11 月 7 日 11 日、Bali, Indonesia.

T. Fukushima: Lake environments under stress and their restoration challenges. The 16th World Lake Conference, 2016 年 11 月 7 日 11 日、Bali, Indonesia.

荒居博之・尾山洋一・松下文経・福島武彦: 衛星画像を用いたアジア湖沼のアオコモニタリング. 日本陸水学会第 80 回大会, 2015 年 9 月 26 日 29 日、北海道大学函館キャンパス(北海道函館市).

T. Fukushima, B. Matsushita, Y. Oyama, K. Yoshimura, W. Yang, M. Terrel, S. Kawamura, & A. Takegahara: Semi-analytical prediction of Secchi depth using remote-sensing reflectance for lake with a wide range of turbidity. 4th European Large Lakes Symposium, 2015 年 8 月 24 日 28 日 Yoensuu, Finland.

B. Matsushita, Y. Oyama, & T. Fukushima: Monitoring Lakes and Their Drainage Basins by Remote Sensing. 7th National Seminar on Limnology, 2014 年 9 月 16 日、Bogor, Indonesia. (招待講演)

尾山洋一・松下文経・福島武彦: リモートセンシングによるアオコの観測. 日本陸水学会第 79 回大会, 2014 年 9 月 10 日 13 日、筑波大学キャンパス・つくば国際会議場(茨城県つくば市).

川村志満子・松下文経・福島武彦・尾山洋一: リモートセンシング反射率による湖沼の透明度推定. 日本陸水学会第 79 回大会, 2014 年 9 月 10 日 13 日、筑波大学キャンパス・つくば国際会議場(茨城県つくば市).

T. Fukushima, B. Matsushita, & Y. Oyama: Critical review on monitoring

of lake water quality and ecosystem information using satellite image: Towards a new era of water color remote sensing. The 15th World Lake Conference, 2014 年 9 月 1 日 5 日、Perugia, Italy.

B. Matsushita, W. Yang, Y. Oyama, T. Fukushima, Luki Subehi and F. Setiawan: Validation of a NIR-red-based algorithm for estimating chlorophyll-a concentration in several Asian Lakes. 34th Asian Conference on Remote Sensing, 2013 年 10 月 20 日 24 日、Bali, Indonesia.

〔図書〕(計 3 件)

B. Matsushita, W. Yang, L. M. Jaelani, F. Setiawan and T. Fukushima: Monitoring water quality with remote sensing image data. Remote Sensing for Sustainability (Q. Weng editor), CRC Press, 357(163-189), 2016.

Y. Oyama, B. Matsushita and T. Fukushima: Cyanobacterial blooms as an indicator of environmental degradation in waters and their monitoring using satellite remote sensing. Aquatic Biodiversity Conservation and Ecosystem Services, Ecological Research Monographs (S. Nakano, T. Yahara, and T. Nakashizuka Eds.), Springer, 111(71-85), 2016.

B. Matsushita, F. Yang and T. Fukushima: Impervious surface area as an indicator for evaluating drainage basins. Integrative Observations and Assessments, Ecological Research Monographs (S. Nakano, T. Yahara, and T. Nakashizuka Eds.), Springer, 431 (239-252), 2014.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松下文経 (MATSUSHITA, Bunkei)  
筑波大学・生命環境系・准教授  
研究者番号: 8 0 3 6 1 3 1 9

(2) 研究分担者

福島武彦 (FUKUSHIMA, Takehiko)  
筑波大学・生命環境系・教授  
研究者番号: 9 0 1 2 4 3 5 4