

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 3 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23404015

研究課題名(和文) リモートセンシング手法による東アジア湖沼の生態系情報解析手法の開発

研究課題名(英文) Development of algorithms for retrieving ecosystem information in East Asian lakes using remote sensing technique

研究代表者

福島 武彦 (FUKUSHIMA, Takehiko)

筑波大学・生命環境系・教授

研究者番号：90124354

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,800,000円

研究成果の概要(和文)：一次生産量に関しては、透明度の低い水域で、反射スペクトルからクロロフィルa、その光吸収係数、有光層厚、光減衰係数を半解析的に推定するアルゴリズムを確立し、実湖沼で精度検証を行い良好な結果を得た。次に、湖沼の水草(抽水・浮葉植物)とアオコを分離抽出する手法を開発し、日本、インドネシアの数湖沼で水生植物繁茂域の経年変化を解析した。沈水植物に関しては、それが存在するラインでの反射率の解析から湖沼の沈水植物を簡易に抽出する手法を考案した。アオコ発生状況に関してはFAIという指標を用い、見た目アオコ指標レベル分類を行うことを可能とし、日本とインドネシア湖沼に適用した。

研究成果の概要(英文)：Regarding to primary production, the algorithms for retrieving chlorophyll-a concentration, its absorption coefficient, euphotic zone depth, light diffuse attenuation coefficient etc. were developed for turbid water regions and validated with in-situ measured values. We developed the method distinguishing aquatic macrophytes (floating and emergent) and surface cyanobacterial blooms and applied it to Japanese and Indonesian lakes to analyze the yearly changes in the coverages of aquatic macrophytes. In addition, the method to detect submerged macrophytes was proposed and applied successfully to a Japanese lake. Last, the algorithms for monitoring levels of cyanobacterial blooms using the visual cyanobacteria index and floating algae index and the effective use was validated in Japanese and Indonesian lakes.

研究分野：水環境科学

キーワード：リモートセンシング 生態系 アジア 湖沼 アオコ 水草

1. 研究開始当初の背景

水域における一次生産量は、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り、当然のことながら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。また、アオコは藍藻類の大量増殖により生じるが、有毒性を有するものがあり、景観なども害することから、水利用の障害の代表的要素となっている。さらに、水草は、水域物質循環への寄与が大きく、その有無は物質循環の段階を変化させることから (regime shift)、近年、その適切な管理が注目されている。すなわち、水域で一次生産量、アオコ、水草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が、まずはそうした特性を的確にモニタリングすることが管理の原点となる。

リモートセンシング手法を用いた水域の水質解析に関しては、様々な研究が行われていて、実用化も近づいている。たとえば、我々は MERIS や Landsat 衛星画像を対象に、湖沼の植物プランクトン、トリプトン (植物プランクトン以外の懸濁粒子)、CDOM (Colored Dissolved Organic Matter : 色のついた溶解有機物質) の濃度分布を推定する方法を提案し、実際の濃度分布をほぼ再現していることを確認している。同様に、リモートセンシングを用いた一次生産量、アオコ、水草の推定への期待も大きいですが、手法として確立していないのが現状である。

2. 研究の目的

リモートセンシング手法を用いて、湖沼における一次生産量、アオコ発生状況、水草の種類と分布域といった生態系情報を衛星画像から推定する手法の確立を目指す。特に、一次生産量では光吸収係数の観測を通して推定を、アオコでは藍藻類の分離と表面に集積したものをカラム平均濃度として推定することを、水草では抽水、浮葉、沈水植物への分離を念頭にアオコ、陸上植生との正確な分別を、目標とする。アジアの数湖沼での観測をベースに、こうした手法を洗練することから、水質とあわせて、衛星画像によるモニタリングのプロトコルを完成させる。また、得られた手法を東アジア数湖沼に適用し、近年における一次生産量、アオコ、水草変化特性を定量的に明らかにし、さらに東アジア各国の主要な湖沼におけるデータベースを作成する。

3. 研究の方法

(1) 一次生産量推定のための検討

一次生産量は、クロロフィル a 濃度と有光層水深から推定する方法とクロロフィル a による光吸収係数と水深ごとの光量から推定する方式があり、本研究ではそれらを反射スペクトルから推定する方式の構築を目指した。透明度の高い水域では反射スペクトルか

らクロロフィル a、その光吸収係数、有光層厚さ、光減衰係数などを推測する半解析モデルが提案され、かなりの精度を有することが確認されているが、透明度の低い水域では実用に耐える方式は提案されていない。このため、透明度の低い水域でも反射光が強い比較的長波長のレンジでの反射率を用いて、半解析的に上記のような諸量を推定する方式を理論的に求めた。また、透明度の低い水域で、反射スペクトルと上記の諸量を測定することで、提案した推定アルゴリズムの検証が可能とした。

これらと並行して、霞ヶ浦 5 地点表層で国土交通省が実施している DO, pH, 水温連続測定結果を約 10 年分提供してもらい、それらを解析することから一次生産量の経日変化を算定した。

(2) アオコと水面を覆う水草の分離と抽水・浮葉植物分布

Landsat 画像を対象に、浮遊している藻類の指標である Floating Algae Index (FAI) の閾値 0.05 により、湖水とそれ以外 (アオコ・水草) を分離した。次に、植物の水分含量の指標である Normalized Difference Water Index (NDWI_{NIR,SWIR}, 衛星センサーの近赤外バンドと中間赤外バンドの反射率から計算) の閾値 0.63 により、水草を抽出した。この手法を日本、アジアのそれぞれ数湖沼に適用し、実際の状況を再現していることを確認し、また水草が卓越する湖沼を対象にその分布域の経年変化傾向を衛星画像から推定した。また、より広域的かつ高頻度でアオコの発生・消長等を観測するためには観測範囲が広い Terra/MODIS 画像の利用が好ましいので、上記の手法を Terra/MODIS 画像用に改良した。

(3) 沈水植物分布の推定

WorldView-2 画像から沈水植物を簡易に抽出する方法を開発した。沈水植物が部分的に繁茂する湖沼において、浅水域から深水域にかけて 3 本の観測ラインを設定し、WorldView-2 の各バンドの放射強度を抽出し、両者の関係を解析した。10 m 以深の地点における DN 値の最小値を求め、この値を閾値とみなし、閾値以下の DN 値が観測された地点を抽出して沈水植物分布を推定した。推定精度の検証のためにソナーによる沈水植物分布の観測も行った。

(4) アオコレベルの推定

アオコ量の評価は、アオコが水面に集積している場合には濃度としての評価が適当ではないと考えられるため、ここでは見た目アオコ指標を用いてアオコ量を評価することにした。400~2500nm の波長域においてアオコと水草の反射スペクトルを測定した。同時に見た目アオコ指標を用いてアオコの発生程度をレベル 1 から 6 まで区分した。両者

の関係解析することから、反射率からアオコ量を推定する手法を作成した。

(5) アジア湖沼での調査

2011年7月にインドネシアスマトラ島の Singkara 湖と Maninjau 湖、2012年3月にインドネシアジャワ島の Rawa Pening 湖と Gajah Mungkur 湖、2012年7月と2013年3月に中国雲南省の洱海、2012年7月にインドネシアジャワ島の Seguling 貯水池、2012年10月にはインドネシアスラベシ島の Tempe 湖、2013年3月には同島の Tondano 湖と Limboto 湖、2013年10月にはインドネシアバリ島の Buyan 湖と Batur 湖、2014年3月にはインドネシアスマトラ島の Singkara 湖、Maninjau 湖と Toba 湖、2014年7月にはインドネシアジャワ島の Jatiluhur 貯水池、2015年3月には同島の Cirata 貯水池で反射スペクトル、クロロフィル a や SS といった水質の鉛直分布、透明度の測定と同時に水を採取して、クロロフィル a、SS、CDOM の分析にあてた。共同研究機関であるインドネシア LIPI/Centre for Limnology や中国科学院水生生物研究所との連携により、上記以外の期間での現地湖沼での観測に際して反射スペクトルの測定などを実施してもらい、データの提供を受けた。

また、国内湖沼でも同様な観測を実施した。調査を行ったのは、阿寒湖、達古武湖、猪苗代湖、霞ヶ浦、印旛沼、本栖湖、西湖、精進湖、琵琶湖、池田湖、鰻池などである。

4. 研究成果

(1) 一次生産量推定のための検討

透明度の低い水域で、反射スペクトルから利用可能なクロロフィル a、その光吸収係数、有光層厚、光減衰係数を半解析的に推定するアルゴリズムを確立した(雑誌論文、)。霞ヶ浦での様々な時期で、それらを実測することから、その精度検証を行い、良好な結果を得た。一次生産量に関しても、検証は行ってはいないものの、アルゴリズムの基礎式を検討した。

衛星画像から上記の諸量を推定するためには、大気補正を行い、水面上の反射スペクトルを推定する必要がある。しかしながら、透明度の高い水域では大気補正法は確立されているが、透明度の低い水域では汎用性の高い大気補正法は存在しなかった。ここでは、参考波長を長波長にするなどの改良を行い、実用に耐える方式を確立した(雑誌論文、)。こうした手法を組み合わせ、MERIS 画像のみから、約10年にわたる霞ヶ浦のクロロフィル a 濃度を1ヶ月以下の時間分解能で推定し、実測値とよく適合することを確認した(雑誌論文)。本手法は観測値の少ないアジア湖沼の水質評価に活用できる(雑誌論文)。

(2) アオコと水面を覆う水草の分離と抽

水・浮葉植物分布

湖沼の水草(抽水・浮葉植物)とアオコを分離抽出する手法を日本とインドネシアの湖沼に適用した結果、水生植物が繁茂する三方湖、シラルト湖、Limboto 湖では水生生物が、アオコが卓越する諏訪湖、八郎湖、Sutami 湖、Maninjau 湖ではアオコが卓越する結果が得られ、本手法が有効であることが確認された(雑誌論文)。本手法を活用して、印旛沼、三方湖、塘路湖、達古武湖、伊豆沼、内沼、長沼、諏訪湖、Rawa Pening 湖、Limboto 湖などでの水生植物繁茂域の経年変化を解析した(投稿中)。

(3) 沈水植物分布の推定

阿寒湖を対象に解析を行った。沈水植物が存在するラインでは、WorldView-2 のバンド 2、3、4 において、沈水植物が繁茂している地点で DN 値の減少がみられた。特にバンド 3 では、沈水植物が繁茂している場所とそうでない場所との違いが明瞭であった。沈水植物が生息していない他のラインではこのような傾向がみられなかった。水深 10 m 以上の水域において観測された最も低い DN 値を閾値とし沈水植物分布を得た。バンド 3 の DN 値を用いた沈水植物分布の抽出結果は、ソナーを使った現地観測結果と概ね一致し、 κ 係数は 0.81 と非常に高い値を示した。以上から、WorldView-2 衛星のバンド 3 の情報を用いることにより、湖沼の沈水植物が簡易に抽出できる可能性を示すことができた(投稿中)。

(4) アオコレベルの推定

見た目アオコ指標でアオコレベル 1、2、3、4 に関しては、Landsat 画像を対象に FAI を用いてレベル分類を行うことが可能であることを示した。FAI が 0.1 以上となるとアオコレベルは 5 以上となるが、その場合バンド 3 の反射率をもとに両者を分けることができる。以上から、Landsat 画像を対象としたアオコレベル推定システムを構築し、それを霞ヶ浦、八郎湖に適用し、実測結果との適合性が高いことを確認した(雑誌論文)。また、上記の手法を Terra/MODIS 画像にも適用できるように改造し、八郎湖に適用し、数日間隔で約 2 ヶ月にわたるアオコ変化を推定した。

5. 主な発表論文等

(雑誌論文)(計 17 件)

松下文経、ラルー ムハメド シャエラニ、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、印刷中 DOI 無 査読有

W. Yang, B. Matsushita, K. Yoshimura, J. Chen and T. Fukushima: A Modified Semi-Analytical Algorithm for Remotely Estimating Euphotic Zone Depth in Turbid

- Inland Waters. IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 8, 1545-1554, 2015. DOI: 10.1109/JSTARS.2015.2415853 査読有
- L. M. Jaelani, B. Matsushita, W. Yang and T. Fukushima: An improved atmospheric correction algorithm for applying MERIS data to very turbid inland waters. International J. Applied Earth Observation and Geoinformation. 39, 128-141, 2015. DOI: 10.1016/j.jag.2015.03.004 査読有
- B. Matsushita, W. Yang, G. Yu, Y. Oyama, K. Yoshimura and T. Fukushima: A hybrid algorithm for estimating the chlorophyll-*a* concentration across different trophic states in Asian inland waters. ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing. 102, 28-37, 2015. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2014.12.022 査読有
- Y. Oyama, T. Fukushima, B. Matsushita, H. Matsuzaki, K. Kamiya and H. Kobinata: Monitoring levels of cyanobacterial blooms using the visual cyanobacteria index (VCI) and floating algae index (FAI). International J. Applied Earth Observation and Geoinformation. 38, 335-348, 2015. DOI: 10.1016/j.jag.2015.02.002 査読有
- Y. Oyama, B. Matsushita and T. Fukushima: Distinguishing surface cyanobacterial blooms and aquatic macrophytes using Landsat/TM and ETM+ shortwave infrared bands. Remote Sensing of Environment. 157, 35-47, 2015. DOI: 10.1016/j.rse.2-14.04.031 査読有
- G. Yu, W. Yang, B. Matsushita, R. Li, Y. Oyama and T. Fukushima: Remote estimation of chlorophyll-*a* in inland waters by a NIR-red-based algorithm: validation in Asian lakes. Remote Sensing. 6, 3492-3510, 2014. DOI: 10.3390/rs6043492 査読有
- W. Yang, B. Matsushita, J. Chen, K. Yoshimura and T. Fukushima: Application of a semi-analytical algorithm to remotely estimate diffuse attenuation coefficient in turbid inland waters. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 11, 1046-1050, 2014. DOI: 10.1109/LGRS.2013.2284343 査読有
- L. M. Jaelani, B. Matsushita, W. Yang and T. Fukushima: Evaluation of four MERIS atmospheric correction algorithms in Lake Kasumigaura, Japan. Int. J. Remote Sensing, 34:24, 8967-8985, 2013. DOI: 10.1080/01431161.2013.860660 査読有
- W. Yang, B. Matsushita, J. Chen, K. Yoshimura and T. Fukushima: Retrieval of inherent optical properties for turbid inland waters from remote-sensing reflectance. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 50-12, 1-13, 2013. DOI: 10.1109/TGRS.2012.2220147 査読有
- K. Yoshimura, N. Zaito, Y. Sekimura, B. Matsushita, T. Fukushima and A. Imai: Parameterization of chlorophyll *a*-specific absorption coefficients and effects of their variations in a highly eutrophic lake: A case study at Lake Kasumigaura, Japan. Hydrobiologia, 691, 157-169, 2012. DOI: 10.1007/s10750-012-1066-4 査読有
- M. M. Terrel, T. Fukushima, B. Matsushita, K. Yoshimura and A. Imai: Long-term light environment variability in Lake Biwa and Lake Kasumigaura, Japan: Modeling approach. Limnology, 13, 237-252, 2012. DOI: 10.1007/s10201-012-0372-x 査読有
- B. Matsushita, W. Yang, P. Chang, F. Yang and T. Fukushima: A simple method for distinguishing global Case-1 and Case-2 waters using SeaWiFS measurements. ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing, 64, 74-87, 2012. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2008.04.005 査読有
- 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, 35(A), 43-47, 2012. 招待論文 DOI 無 査読無
- J. Zhu, J. Chen, B. Matsushita, W. Yang, and 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. Int. J. Remote Sensing, 33, 3713-3732, 2012. DOI: 10.1080/01431161.2011.632656 査読有
- W. Yang, B. Matsushita, J. Chen, and 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, 49, 3381-3392, 2011. DOI: 10.1109/TGRS.2011.2126048 査読有
- W. Yang, B. Matsushita, J. Chen, and 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, 115, 1247-1259, 2011. DOI: 10.1016/j.rse.2011.01.007 査読有

〔学会発表〕(計 11 件)

川村志満子、福島武彦、松下文経、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、つくば、9 月 13 日、2014

尾山洋一、松下文経、神谷航一、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、つくば、9 月 11 日、2014

T. Fukushima, B. Matsushita, Y. Oyama, W. Yang, F. Yang and L. M. Jaelani: Monitoring of water quality and ecosystem information in lakes using satellite images. The 15th World Lake

Conference. Perugia, Italy, September 4, 2014.

L. M. Jaelani, B. Matsushita, W. Yang and T. Fukushima: Evaluation of four MERIS atmospheric correction algorithms in Lake Kasumigaura, Japan. The 34th Asian Conference on Remote Sensing, Bali, Indonesia, October 24, 2013.

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. The 34th Asian Conference on Remote Sensing, Bali, Indonesia, October 24, 2013.

Y. Oyama, B. Matsushita, Luki Subehi and T. Fukushima: Monitoring the distribution of floating macrophytes in Lake Limboto using Landsat images. The 34th Asian Conference on Remote Sensing, Bali, Indonesia, October 21, 2013.

楊偉、松下文経、福島武彦：Remote Estimation of Water Quality Parameters for Turbid Inland Waters using MERIS Satellite Data. 第53回日本リモートセンシング学会、広島、11月19日、2012.

Y. Oyama, B. Matsushita, T. Fukushima, J. Nishihiro and N. Takamura: Use of vegetation indices to detect aquatic macrophytes from multispectral satellite data. 2012 ASLO Aquatic Sciences Meeting, Otsu, Jul. 12, 2012.

K. Yoshimura, N. Zaito, Y. Sekimura, B. Matsushita, T. Fukushima and A. Imai: Parameterization of chlorophyll a-specific absorption coefficient and effects of their variations in a highly eutrophic lake: a case of Lake Kasumigaura. 2012 ASLO Aquatic Sciences Meeting, Otsu, Jul. 10, 2012.

W. Yang, B. Matsushita, K. Yoshimura and T. Fukushima: An enhanced quasi-analytical algorithm for retrieving inherent optical properties of turbid inland waters. 2012 ASLO Aquatic Sciences Meeting, Otsu, Jul. 9, 2012.

W. Yang, B. Matsushita, J. Chen and T. Fukushima: Performance evaluation of the semi-analytical ocean color model GSM01 in Case 1 and Case 2 waters. AGU2011 (San Francisco, USA), Dec. 5-9, 2011.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕
出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕
ホームページ等
<http://www.ies.life.tsukuba.ac.jp/~mode/ling/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

福島 武彦 (FUKUSHIMA, Takehiko)
筑波大学・生命環境系・教授
研究者番号：90124354

(2) 研究分担者

松下文経 (MATSUSHITA, Bunkei)
筑波大学・生命環境系・准教授
研究者番号：80361319