

衛星分光画像を用いた北潟湖の水質評価

青山隆司*、庄司直弘**、松井佑介***

Evaluation of water quality of Lake Kitagata using multi-spectral images

Takashi Aoyama, Naohiro Shoji and Yusuke Matsui

The ultimate goal of this research is to develop a procedure for extracting information on the water quality of Lake Kitagata (which is considered heavily eutrophic) from multi-spectral satellite images. As the first step of this research, a controlled laboratory experiment was conducted to measure the spectral reflectance of samples obtained from Lake Kitagata in order to determine the principal components of the water. Preliminary results of the laboratory experiment indicate that the main components of the water in Lake Kitagata are sediment and plant matter (including phytoplankton). Moreover, the interaction effects between main components (sediments and plant matter) contained in the water of the lake and light have been discussed.

1. はじめに

北潟湖はあわらキャンパスに隣接する富栄養化が進んだ汽水湖であり、小規模ながら漁業も行われている。また、北潟湖周辺には住宅も多く生活環境の面でも水質の浄化が求められている。水質改善のためにはまず、湖水の水質の現状を正確に把握する必要があり、福井県でも過去 30 年近くの間、北潟湖の水質調査を行いその結果を公表している。しかし、この結果は採水地点のその時点での水質であり、湖水全域の水質が得られているわけではない。そこで我々は北潟湖全域の水質を人工衛星に搭載された光学センサーを用いて計測する研究をスタートし、初期成果を得たのでここに報告する。

衛星リモートセンシングを用いて懸濁物質 (SS : Suspended Sediments) の多い水域の水質を計測する技術は、多くの研究^{(1)、(2)、(3)、(4)}が行われているものの現在でも確立されていない。そこで我々は、オープン・リサーチ・センター整備事業、福井工業大学特別研究費、科学研究費補助金の援助を受け、高空間分解能光学センサーである Terra/ASTER、ALOS/AVNIR-2、IKONOS、QuickBird 等の分光画像データと、湖水中のクロロフィル a 濃度およびその他の水質諸量 (懸濁物質濃度、栄養塩濃度等) との関係性を求め、衛星分光画像から水質情報を抽出する手法を開発することを目的に研究を開始した。その第一段階として、北潟湖水の分光計測実験を行い、その分光特性を調べることで、湖水中に含まれる成分を特定することを試みた。その初期成果は既に公表^{(5)、(6)}しているが、本報告ではその後行われた本格的な湖水および泥水の分光計測実験とその成果について述べる。

* 宇宙通信工学科

** 福井工業大学大学院修士課程

*** 福井工業大学大学院博士課程

2. 北潟湖の水質実態

北潟湖の水質について、福井県（福井県衛生環境研究センター）は隔月で年6回、28年間（1977～2004年）の水質調査を行っており、その結果を Web 上に公開している。その観測点 9 ヶ所の位置を Fig.1 に示すが、この画像は IKONOS 衛星の解像度 1m のパンシャープン True Color 画像の上に観測点を加えたものである。

福井県の調査項目のうち代表的な水質指標につき、28 年間の時間変化および観測場所による違いにつき検討した。詳細は参考文献^{(5)、(6)}に譲るが、pH 以外のほとんどの指標では水質基準を満たしていないことが明らかになった。例えば COD（Chemical Oxygen Demand：化学的酸素要求量）の水質基準は 5mg/l であり、日本海に繋がる末端、北部を除いて基準値を超えている。

SS（Suspended Sediments：懸濁物質）の基準値は 15mg/l であり、北潟湖南西部の塩尻橋、南部、昭和橋の観測点で水質基準を超える年があるものの、最近では基準値内おさまってきている。一方、全磷、全窒素は、それぞれ 0.05 mg/l、0.6 mg/l が基準値であるが、ほとんど全ての年、全ての観測点で水質基準を上回っており、湖全体で富栄養化が進んでいることを示している。また、各指標の年変化については増加傾向（全窒素）のものと下降傾向（COD、SS、全磷）のものが存在するが、全体的に見て年変化は小さく、水質改善が進んでいないことを示唆している。

次に観測場所（採水場所）による指標値の違いを見ると、全ての指標値に対し、海と繋がる北東部から南西部に向かう程、各指標値が増加する傾向を示している（参考文献(5)および(6)参照）。この理由は、陸域からの生活排水および植物、泥等の流入による SS、Chl-a 等の蓄積が、海に繋がる湖の北東部に比べ南西部では浄化されにくいことを示している。つまり、北東部の湖水域は海水との混合が十分行われていることを示唆している。

3. 北潟湖水の分光反射率計測

衛星で得られるデータはいくつかの波長帯で撮影された分光画像であるため、湖水に含まれる水質関連成分が分光反射特性にどのように反映されるかを知ることが第一義的に必要である。それが解かれれば、衛星分光画像を用いて、どのような処理をすれば湖水中の SS、Chl-a 濃度等の水質指標を分離抽出できるかを決定できるはずである。ここではその第一段階として、北潟湖の泥および 14 箇所の採水地点で採取した湖水に対し分光反射率計測を行った。

3. 1 実験装置

実験は太陽仰角の変化や大気による散乱光ノイズを避けるため、夜間に暗室内で行った。太陽光の代用とし



Fig.1. Sampling points in Lake Kitagata are plotted on an IKONOS image.

て 2 個のハロゲンランプを用い、内側を黒く塗装したビーカー(容量 30、直径 13.5cm、高さ 22.5cm)に計測対象の泥水や北潟湖水等を入れ、その反射光を分光放射計で計測した。実験装置

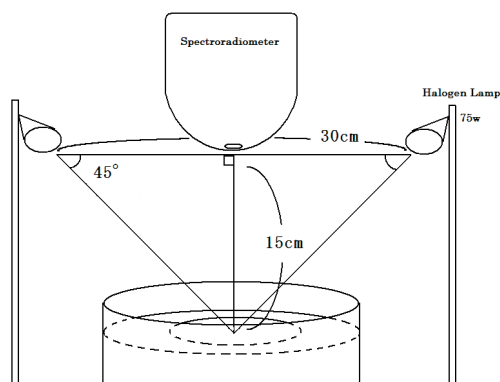


図1 実験装置の模式図



図2 実験室内での分光反射率計測の様子。中央が分光放射計(FieldSpec Handheld)である。

の模式図を図1に示す。黒塗りのビーカーを使用する理由は、外来光のビーカー内への入射を極力排除するためである。分光放射計(FieldSpec Handheld)の観測波長帯は 325~1075nm であり、その観測視野角は 25° である。計測される物理量は分光反射率であり、水面と同位置に置いた基準白板(完全散乱体)の分光反射輝度に対する観測対象物の分光反射輝度の比で求められる。なお分光反射率の計測値は、連続する 25 回のスペクトル計測の平均値を用いている。

3.2 北潟湖 14 観測地点の分光反射率計測

我々は北潟湖の水質成分と分光反射率との関係を明らかにするために、14 観測地点において湖水を採取した。採水場所を図3に示し、その分光反射率計測の結果を北潟湖を北部(a : ①、②、③および④)、中部(b : ⑤、⑥、⑦、⑧および⑨)、南部(c : ⑩、⑪、⑫、⑬および⑭)にわけて図4に示している。図4の各グラフの縦軸は反射率、横軸は波長(nm)を示している。図4からわかるように、北潟湖水の分光反射率は南部へ行くほど高くなり、汚染が進んでいる事を示している。北部では、日本海に繋がっているため日本海との間で水の交換があり、そのため低い反射率を示したと考えられる。中部の観測地点⑥で分光反射率が異常に高い値を示すが、これは、北潟湖に流れ込む観音川の河口に位置するため観音川から流入する泥の影響であると考えられる。湖水の分光反射率計測から得られるこれらの結果は、衛星分光画像を用い



図3 北潟湖の 14 観測地点 (IKONOS)

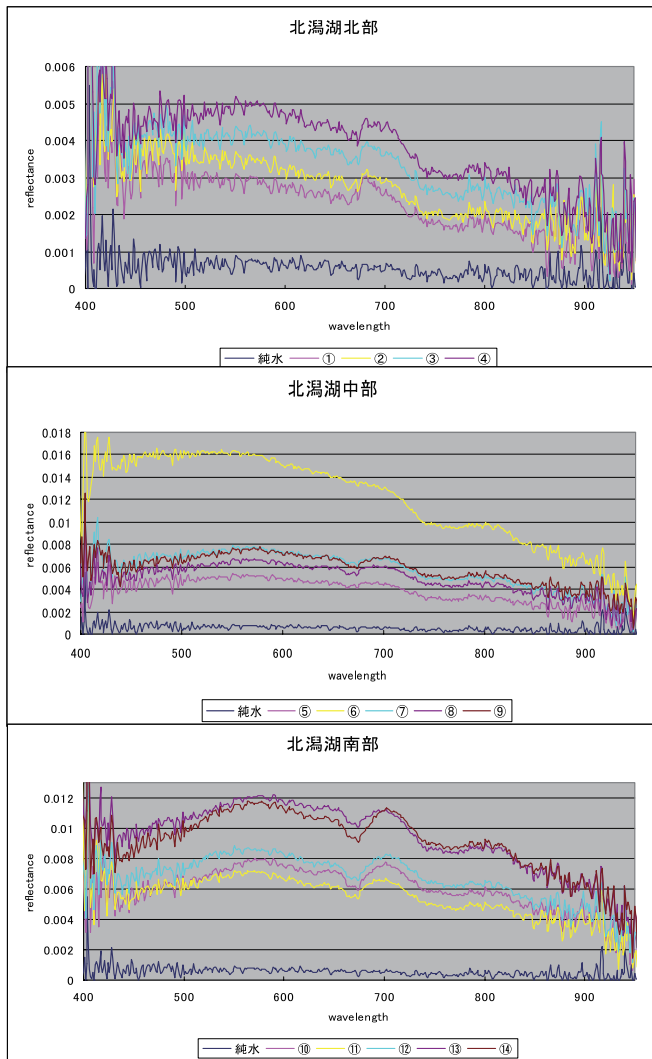


図4 北潟湖の分光反射率。(a)：北潟湖北部、(b)：北潟湖中部、(c)：北潟湖南部を示し、一番下は純水の分光反射率を表している。

た解析結果や福井県が行った実測結果（参考文献(5)、(6)参照）とも良く一致している。

一方、図5は北潟湖底に堆積する泥を採取し、ふるいにかけてゴミを取り除き、さらに乳鉢で磨り潰したものを純水に溶かし、100mg/ℓから500mg/ℓまでの濃度に対し計測した泥水の分光反射率である。図4と同様に縦軸は反射率、横軸は波長(nm)である。この結果から泥の濃度が増えるに伴い、反射率も増加することが解かる。また、泥の濃度と反射率には非常に高い正の相関($R \geq 0.98$)があることも明らかになった。

さらに図4に示す湖水の分光反射率と図5の泥水の分光反射率のスペクトル特性は明らかに異なり、北潟湖水には泥以外の成分が含まれていることを示している。そこで我々は、これらの分光反射率計測の結果を用い、北潟湖水に含まれる泥以外の主要成分の抽出を試みた。

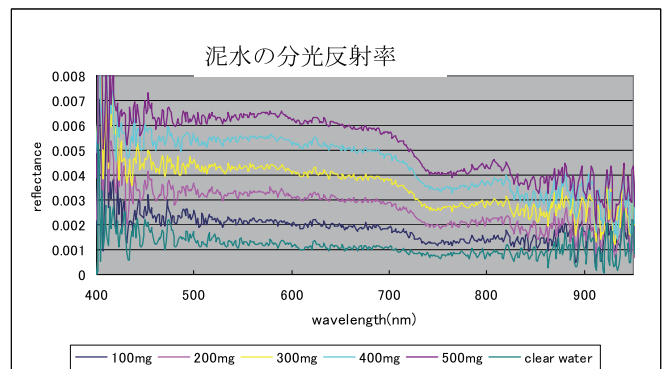


図5 泥水の濃度別分光反射率と純水の分光反射率

3.3 北潟湖水と泥水の分光反射率計測を用いた Chlorophyll-a の抽出

湖水の分光反射率は湖水中の各成分の分光反射率の和で表されることが予想される^{(7)、(8)}。そこで我々は、北潟湖水の分光反射率から泥水の分光反射率を差し引くことで、泥以外の主要成分の抽出を試みた。

湖水と泥水の反射スペクトルの違いを見るために、図6(a)に観測点（採水地点）⑭の湖水と200mg/ℓの濃度の泥水の分光反射率を示す。この両者の差をとった結果を図6(b)に示すが、この際には泥以外の成分が現時点で不明なため、湖水の分光反射率の極小値に当たる波長670nm付近で泥水の反射率が湖水の反射率と一致するように定数倍（ここでは1.32倍）して差をとっている。図6(b)の下部の黄色の線で表したものが両者の差の成分であるが、波長670nm（0に対応）の両側に盛り上がりが見られる2つの山のパターンを示す。

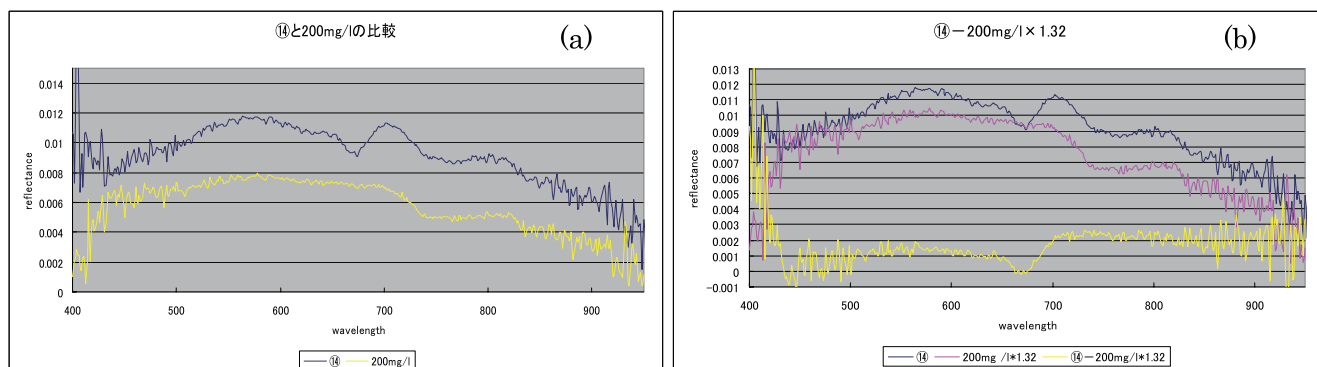


図6 (a)：観測点⑭の湖水の分光反射率と 200mg/l の濃度の泥水の分光反射率。(b)：湖水の分光反射率と泥水の分光反射率成分との差。泥以外の成分が現時点で不明のため、波長 670nm 当たりの湖水の反射率の極小値で両者を一致させるため定数倍する。ここでは 1.32 倍。

この傾向を明確にするため、同様の操作を各観測地点に対して実施し、その差の成分を抽出した結果を図7に示す。ただしこの図では、人工のノイズを軽減するため、9 点の移動平均値を示している。湖の北部(a)、中部(b)および南部(c)に分けて示しているが、いずれの観測地点に対してもスペクトルの2つ山構造が明らかである。また、濃度が高くなるほど（北部から南部に行くほど）短波長側（450nm～670nm）のピークの形が右下がりの直線状（図7(a)）から山形の盛り上った形（図7(b),(c)）になる傾向が見て取れる。この傾向は図8に示す培養植物プランクトンに対する分光反射率測定の結果ともよく一致しており、北潟湖水には大量の植物プランクトン（体内に chlorophyll-a を持つ）が含まれていることを示唆している。

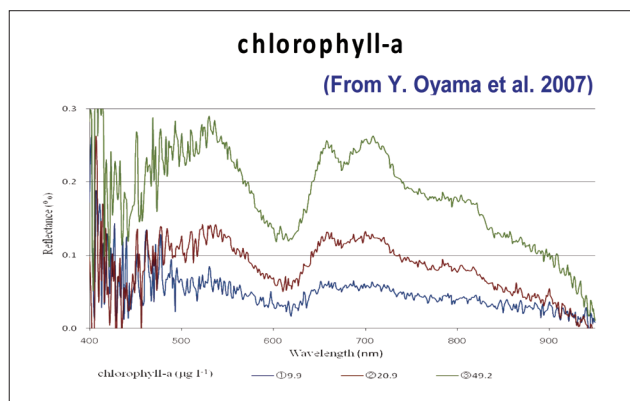


図8 実験室で培養した植物プランクトンに含まれる Chlorophyll-a の分光反射率。
(after Y. Oyama et al., 2007)

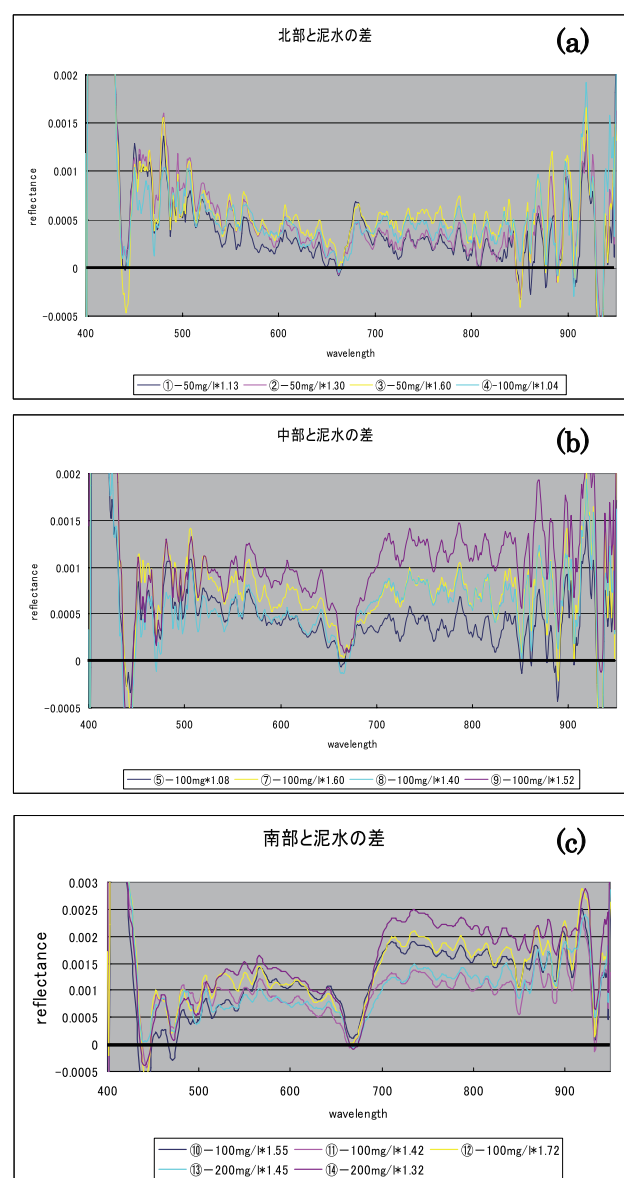


図7 (a)北部、(b)中部、(c)南部の分光反射率との泥水の分光反射率の差

4. 主要成分間の相互作用効果

前節において、北潟湖水の主要成分は泥と Chlorophyll-a であることが判明した。つまり湖水の分光反射率 $R(\lambda)$ は

$$R(\lambda) = C_1 X_1(\lambda) + C_2 X_2(\lambda) + C_3 X_3(\lambda) + \dots + F(\lambda) \quad \dots \dots (1)$$

と表されると考えてよい。ここに、 X_i : SS(泥)、Chlorophyll-a (植物プランクトン)、water 等、 $F(\lambda)$: X_i 間の相互作用効果、 C_i : 濃度あるいは質量である。

そこで相互作用を表す $F(\lambda)$ を評価するため、尾山氏⁽⁷⁾の好意により提供を受けたクロロフィル a と泥の分光反射率計測データを用いて解析を行った (霞ヶ浦が研究対象)。図 9 (a) は NPSS (植物プランクトンを除く浮遊物質であり、主に泥と考えてよい) と Chlorophyll-a (培養した植物プランクトン) の混合液の分光反射率である。図 9 (a) の上、中、下のパネルは、NPSS がそれぞれ 30mg/l、60mg/l、90mg/l の濃度溶液に、Chlorophyll-a を $0 \mu\text{g/l}$ 、 $9.9 \mu\text{g/l}$ 、 $20.9 \mu\text{g/l}$ 、 $49.2 \mu\text{g/l}$ 、 $105 \mu\text{g/l}$ の濃度になるよう溶かし込んだ混合液の分光反射率を示している。一方 (b) は NPSS と Chlorophyll-a の単独の分光反射率を数値的に加算したものである。図 9 (a) から、NPSS の濃度が高くなるほど Chlorophyll-a の典型的なパターンである 2 つ山構造が崩れてゆき、NPSS の分光反射パターンに近づいていく傾向にあり、相互作用効果が明確に現れている。

両者を較べると、(a) に示す混合液の方の反射率が (b) より低くなっていることが解かり、相互作用効果が反射率を減少させる方向に働くことを意味している。この相互作用効果 $F(\lambda)$ を求めるため、(1) 式において主要成分として SS、Chlorophyll-a および水だけを考え、泥の反射率および Chlorophyll-a の反射率の数値的な和を泥と Chlorophyll-a の混合液の分光反射率から差し引いた。これを式で表せば、

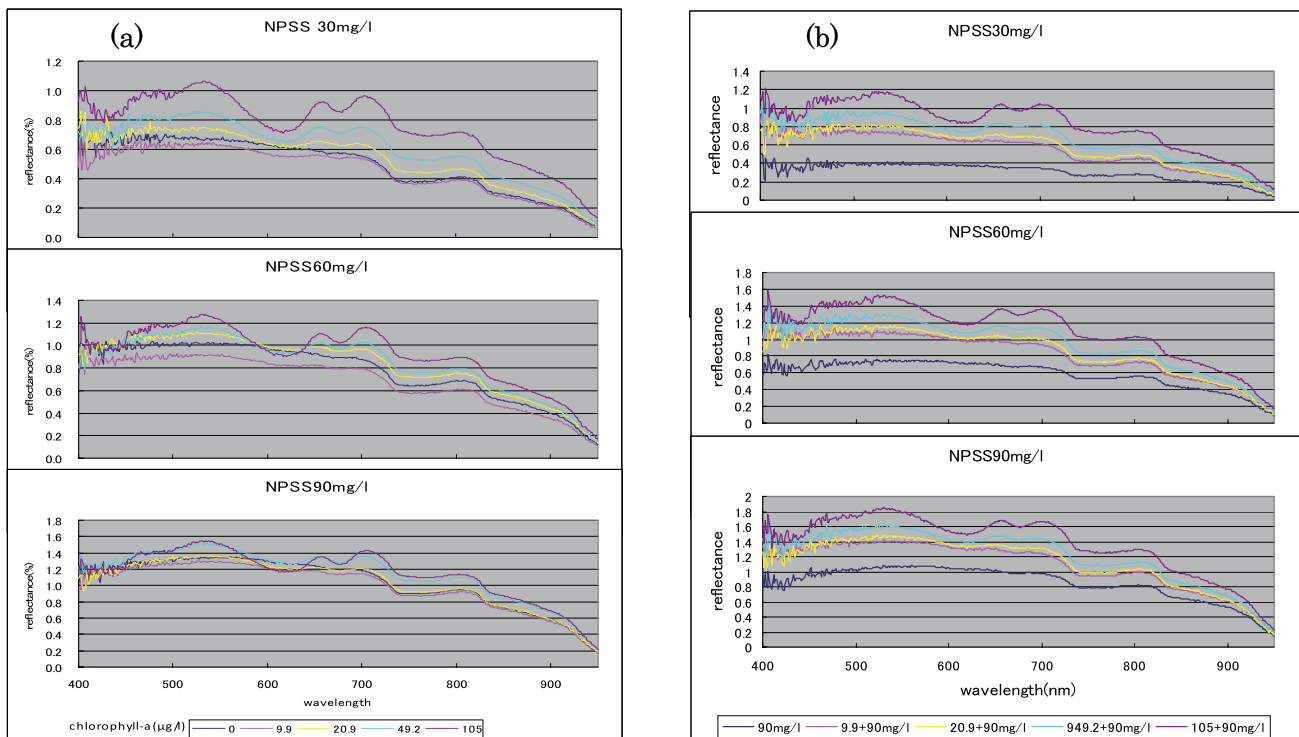


図9 (a) : SS と培養された植物プランクトンとの混合液の分光反射率と (b) : SS の分光反射率と植物プランクトンの分光反射率を数値的に単純加算したもの

$$\angle R(\lambda) = C_1 X_1(\lambda) + C_2 X_2(\lambda) + C_3 X_3(\lambda) + F(\lambda) - \{C_1 X_1(\lambda) + C_2 X_2(\lambda) + C_3 X_3(\lambda)\} = F(\lambda) \cdots (2)$$

となる。もし泥と Chlorophyll-a の混合液が (1) 式のように表されるとすれば、この引き算の結果、 $F(\lambda)$ が求まるはずである。図 9 の上のパネル (NPSS が 30mg/l の場合) について引き算を実行した結果を図 10 に示す。図 10(a) が $F(\lambda)$ を表しており、前に述べたように負の値となっている。そこで符号を逆転させたグラフ ($-F(\lambda)$) を図 10(b) に示す。この分光反射率スペクトルの概形は、図 9(b) の上のパネルに示されている NPSS (30mg/l) のみの分光反射率 (5 本のグラフの内一番下の青色のグラフ) の概形と非常によく似た形になることが明らかになった。

この結果は、相互作用効果 $F(\lambda)$ はほぼ SS による分光反射率 $X_{ss}(\lambda)$ の定数倍で表現できる事を示している。つまり、

$$F(\lambda) = \alpha X_{ss}(\lambda) \cdots (3)$$

と表せる。ここに α は負の定数であり、 $X_{ss}(\lambda)$ は SS の分光反射率である。このことは、相互作用効果は Chlorophyll-a と SS 間に起こる光の吸収、散乱過程による複雑な効果であると考えていたが、実験を行った SS や Chlorophyll-a の濃度範囲では、ほぼ SS の分光反射率だけで決定されることが明らかになった。しかし、我々が使用したデータ⁽⁷⁾は、霞ヶ浦で採取された NPSS を用い、Chlorophyll-a としては研究室で培養したシアノバクテリアを用いている。一般的に相互作用効果 $F(\lambda)$ は SS の種類や濃度、植物プランクトンの種類にも依存することが考えられるため、研究対象である北潟湖の SS や植物プランクトンに対して今後研究を進める必要がある。この相互作用効果が確定できれば、事前に計測しておいた各主要成分の分光反射率 $X_i(\lambda)$ を、衛星分光画像 ($R(\lambda)$) の波長帯に対応させることにより、SS、Chlorophyll-a 等の濃度に対応する C_i を未知数とした連立方程式を作成することが可能となり、それを解くことにより北潟湖水に含まれる主要成分である SS や Chlorophyll-a の濃度を決定できると考えている。

5. 結論

我々の最終目標は北潟湖の水質諸量を衛星分光画像を用いて計測する手法を開発することである。その第一段階として北潟湖水と泥に対する室内分光計測を行った。その結果、北潟湖に含まれる主要成分は泥(SS)と植物プランクトン(Chlorophyll-a)であることが明らかになった。また、それらを含む混合液中での光の吸収、散乱による相互作用効果 $F(\lambda)$ は、ほとんど泥(SS)の反射率に起因していることも判明した。今後、この相互

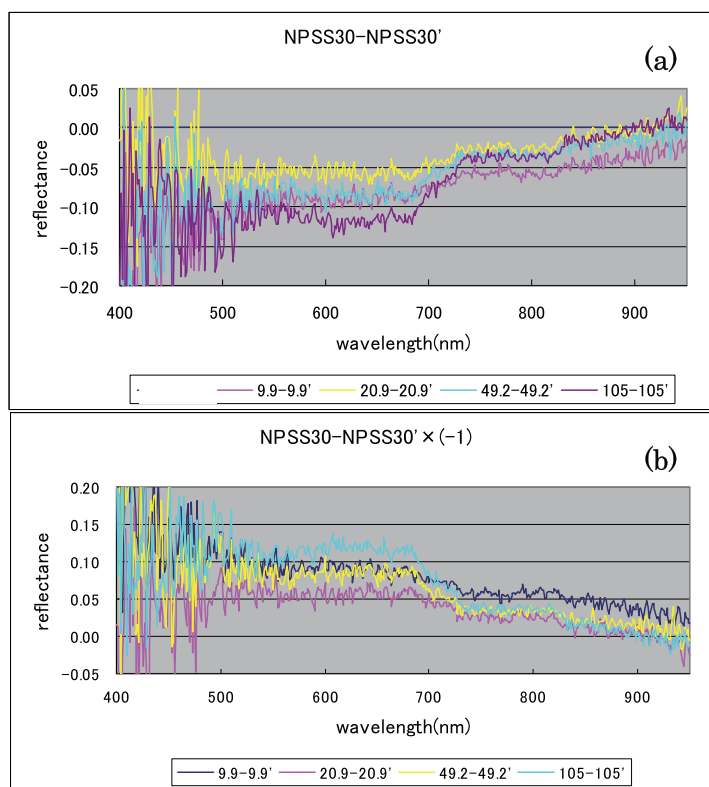


図 10 (a) : NPSS 濃度が 30mg/l の場合の相互作用効果 $F(\lambda)$ と (b) : $-F(\lambda)$

作用効果 $F(\lambda)$ を我々の研究対象である北潟湖の場合に確定し、衛星画像を如何にして(1)式に対応させるかについて研究を進めたい。

謝辞

本研究はオープン・リサーチ・センター整備事業、福井工業大学特別研究費、科学研究費補助金（課題番号 19560813）の援助を受けて実施された。ここにその援助に対し感謝するとともに、北潟湖の水質に対する統計処理および北潟湖水の分光実験に参加した平成 17 年度卒業研究生、斉藤瑤子、小川悟史、平成 18 年度卒業研究生、片野加奈子、松田真明の各氏に感謝致します。

参考文献

- (1) Oki, K. and Y. Yasuoka, 1996, Estimation of Chlorophyll-a Concentration in Rich Chlorophyll Water Area from Near-infrared and Red Spectral Signature, J. of the Remote Sensing Society of Japan, Vol. 16, NO. 4, pp.1-9.
- (2) Luoheng Han, 1997, Spectral Reflectance with Varying Suspended Sediment Concentrations in Clear and Algae-Laden Waters, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 63, No. 6, pp. 701-705.
- (3) Philippe Forget, Pierre Broche and Jean-Jacques Naudin, 2001, Reflectance sensitivity to solid suspended sediment stratification in coastal water and inversion: a case study, Remote Sensing of Environment, 77, pp. 92-103.
- (4) Susan L. Ustin, 2004, Remote sensing for natural resource management and environmental monitoring, John Wiley & Sons, Inc. 736pp.
- (5) 青山隆司、庄司直弘、「衛星リモートセンシングを用いた北潟湖の水質計測 —北潟湖水の分光計測—」、福井工業大学研究紀要、第 38 号、pp. 337-344、2008 年 5 月
- (6) Aoyama T., “Evaluation of water quality of Lake Kitagata based on satellite remote sensing technique - Spectral measurement of Lake Kitagata -”, Proceedings of SPIE Asia-Pacific Remote Sensing, 2008, 7150, Noumea, New Caledonia, pp. 7150H-1~7150H-9, Nov. 2008.
- (7) Oyama Y., B. Matsushita, T. Fukushima, T. Nagai and A. Imai, 2007, A new algorithm for estimating chlorophyll-a concentration from multi-spectral satellite data in case II waters: a simulation based on a controlled laboratory experiment, International Journal of Remote Sensing, Vol. 28, No. 7, 1437-1453.
- (8) Goodin D. G., Han, L., Fraser, R. N., Rundquist, D. C., Stebbins, W. A. and Schalles, J. F., “Analysis of suspended solids in water using remotely sensed high resolution derivative spectra,” Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 59, pp. 505-510 (1993).

(平成 21 年 3 月 31 日受理)