

分光反射率計測による北潟湖の水質評価

青山 隆司*、安部 礼恵**、松井 佑介***

Evaluation of Water Quality of Lake Kitagata based on Measurement of Spectral Reflectance

Takashi Aoyama*, Hiroe Abe** and Yusuke Matsui***

The goal of this research is to develop a procedure for extracting information on the water quality of Lake Kitagata from multi-spectral satellite images. As the first step of this research, controlled laboratory experiments have been carried out 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). In this paper, the validity of the procedure for the extraction of chlorophyll-a component (plant matter) from the water in the lake has been discussed and confirmed.

Keywords: Lake Kitagata, spectral reflectance, chlorophyll-a concentration, water quality

1. 緒論

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、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、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手法の開発を最終目的として、北潟湖水の分光反射率計測を2008年5月、2009年8月、9月および2010年1月に実施するとともに、クロロフィルa (Chlorophyll-a、以後Chl-aと略記) 濃度の計測も同時に行った。湖水中に含まれる主要水質成分を分光反射率計測から求める手法については既に報告^{(1)~(3)}しているが、本報告では新たに行った分光反射率計測の結果を用いて、提案した手法の妥当性について検討を加えたのでその結果について報告する。

2. 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

* 宇宙情報科学科、** 電気工学専攻(修士)大学院生、*** 電気工学専攻(博士)大学院生

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必要である。それが解れば、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(浮遊懸濁物質:Suspended Sediment)、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。その第一段階として、現在までに4回にわたり、北潟湖の泥および13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てきた。以下に湖水の分光反射率計測の実験装置、分光反射率計測の結果、さらにそれらの分光データからChl-a成分を抽出する手法およびその結果について述べる。

2. 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、夜間に暗室で行った。太陽光の代用として2個のハロゲンランプを用い、ビーカー(容量3ℓ、直径13.5cm、高さ22.5cm)は、側面から入射する光を遮断するため黒く塗装した物を使用する。この中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。実験装置の模式図を図1に示す。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、基準白色板(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が計測される。

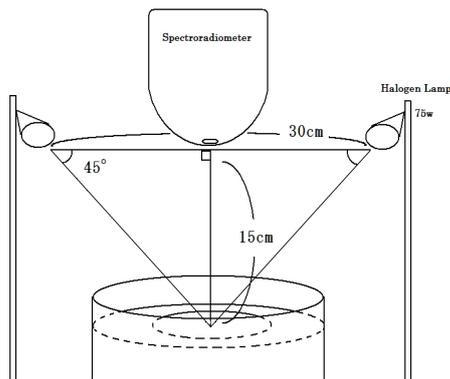


図1 分光実験装置の模式図

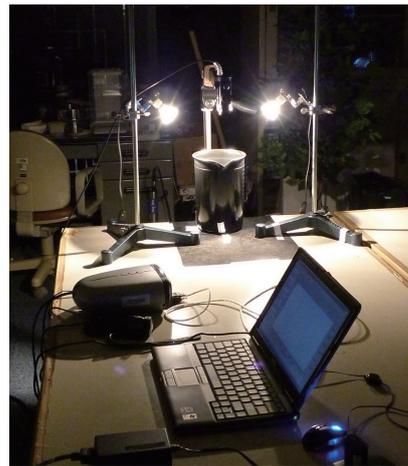


図2 実験室内での分光反射率計測の様子

2. 2 13観測点で採取した北潟湖水の分光反射率計測

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13観測点において湖水を採取した。採水場所を図3に示す。一例として2009年8月5日の分光反射率計測の結果を図4(a)に示す。また、北潟湖底に堆積する泥を採取し、乾燥させてから水中に浮遊する程度まで乳鉢で細かく

図3 北潟湖の13観測点(IKONOS衛星による2007年6月17日の画像に観測点を記入)。2009年と2010年は④では採水を行っていない。⑭は図外左下に位置する。



すり潰し、5mg/l から 150mg/l までの濃度に対し計測した泥水の分光反射率を図 5(a)に示す。横軸が波長(nm)、縦軸が反射率を示している。また、図 4(a)および図 5(a)の一番下のグラフは純水の分光反射率を示している。図 4(a)と図 5(a)の反射率から実験装置の特性を取り除くために純水の反射率を引いた結果が図 4(b)と図 5(b)となり、さらにノイズを軽減するために 9 点の移動平均処理を行ったグラフが図 4(c)と図 5(c)である。

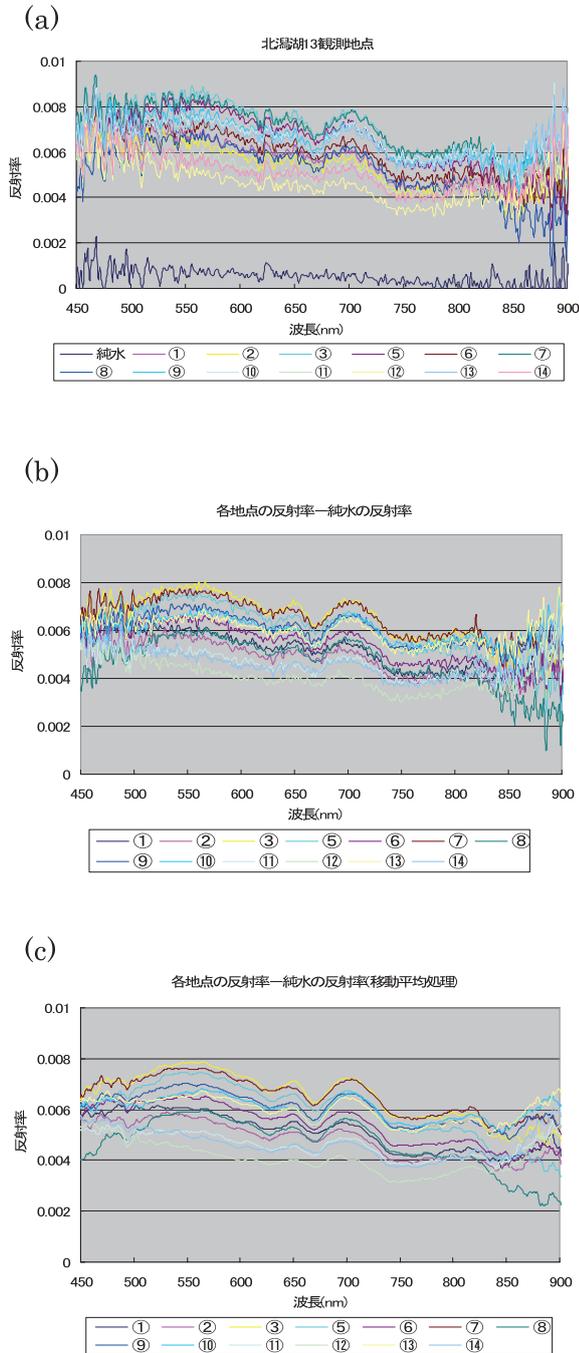


図 4 (a):北潟湖の分光反射率計測(2009年8月)
(b):各地点の反射率と純水の反射率の差
(c):(b)の9点移動平均処理

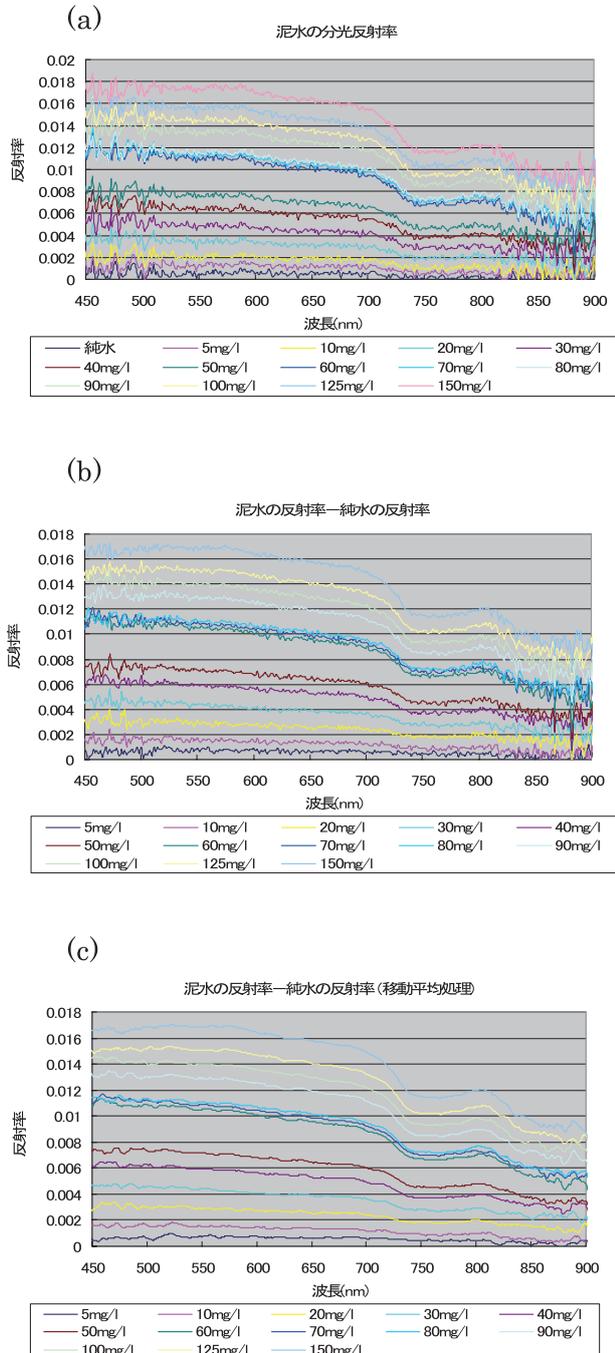


図 5 (a):泥水の分光反射率
(b):泥水の反射率と純水の反射率の差
(c):(b)の9点移動平均処理

図 4(c)と図 5(c)を見るとスペクトルに明らかな違いが見られる。このことより、北潟湖水には泥以外の成分が含まれていることが明確に見て取れる。

2. 3 北潟湖水と泥水の分光反射率を用いた Chl-a の抽出

一般的に考えて湖水の分光反射率は湖水中の各水質成分の分光反射率の和で表されることが予想^{(4),(5)}される。そこで、北潟湖水の分光反射率(図 4(c))から主要水質成分と考えられる泥の分光反射率(図 5(c))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一例として、図 6(a)に採水点⑤の湖水と 40mg/lの濃度の泥水の分光反射率を示す。そこで、この泥水の分光反射率が湖水の分光反射率の極小値 (675nm付近)と一致するように定数倍(ここでは 1.14 倍)し引き算を行う。引き算を行った結果は図 6(b)のオレンジ色のグラフになり、差がゼロとなる 675nm付近を挟んで2つの盛り上がりが見られる。この操作を全採水点の湖水に対して行い、まとめた結果を図 7 に示す。図 7には2つの反射率のピーク(波長 530~620nm付近と 690~800nm付近)が明確に見られる。これはY. Oyama et al., 2007⁽⁴⁾による培養植物プランクトンに含まれるChl-aの分光反射率(次節図 8(c)参照)の特徴である二山構造とよく一致している。この結果は、泥以外の湖水の主要成分がChl-aを含む植物プランクトンであることを強く示唆している。なお、図 7の 800~900nmあたりの盛り上がりは実験時に混入する人工ノイズであり、ノイズ混入が無ければ低い値を示す事がわかっている。

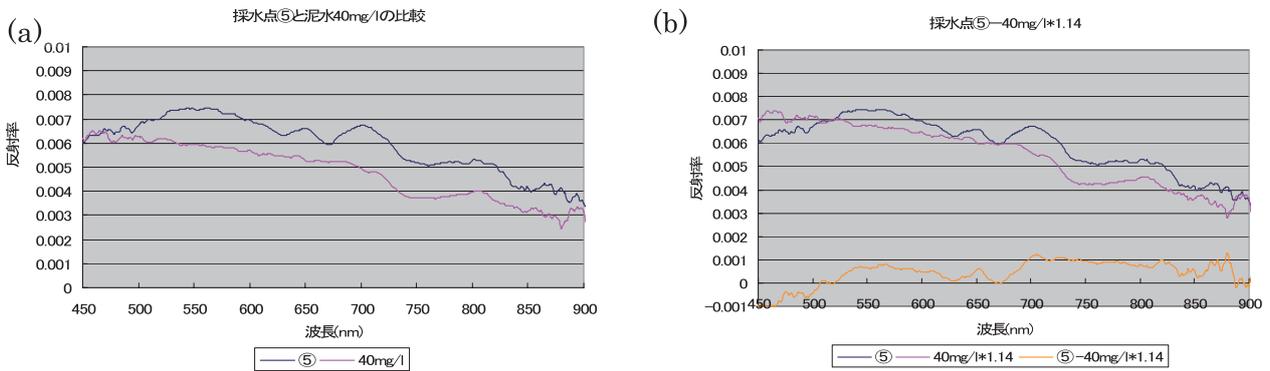


図 6 (a): 採水点⑤の湖水の分光反射率と 40mg/l の泥水の分光反射率 (b): 湖水の分光反射率と泥水の分光反射率の定数倍との差

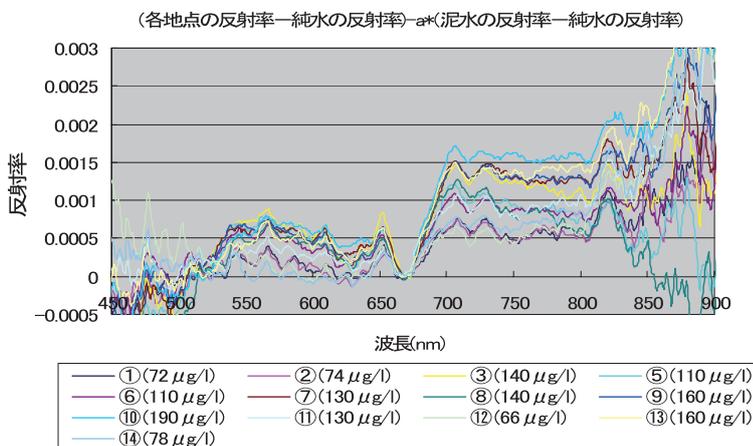


図 7 2009 年 8 月の北潟湖 13 観測点の分光反射率と泥水の分光反射率の差(数値は Chl-a 濃度の実測値)

3. 分光反射率計測による Chl-a 濃度評価

3. 1 Chl-a 濃度の評価法の妥当性について

2.3 節で述べたように我々は、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際、泥水の分光反射率が湖水の分光反射率の極小値と一致するよう定数倍している。これは北潟湖水にどのくらい泥が含まれているか解らないためである。このような処理をした後の2つの波長帯での反射率ピークの平均的な高さから Chl-a 濃度との関係を明確にするため、Y. Oyama et al., 2007.の実験データ(図8)を用いて解析を行なった。

含まれる植物プランクトンの種類により反射率がピークを示す波長帯は異なるが、この場合の2つの波長帯は、450~570nm と 640~735nm と考えて良い。植物プランクトンをいくつかの濃度で溶かした溶液の反射率を図8(a)に示す。この図で2つの波長帯の平均的な反射率と Chl-a 濃度との相関を求めると、どちらの波長帯でも相関係数が $R=0.996$ となり非常に高い値を示した。次に我々が行っている手法と同じように、純水の反射率を引き(図8(b)参照)、その極小値(620nm 付近)を各濃度に対し一致(零点に合わせる)させたものを図8(c)に示す。図8(c)で、2つ山の波長帯の平均的な反射率と Chl-a 濃度との相関を求めると、相関係数は $R=0.999$ ($450 < \lambda < 570$) と $R=0.998$ ($640 < \lambda < 735$) となり、こちらも極めて高い値となった。この結果は、現実の湖水に対

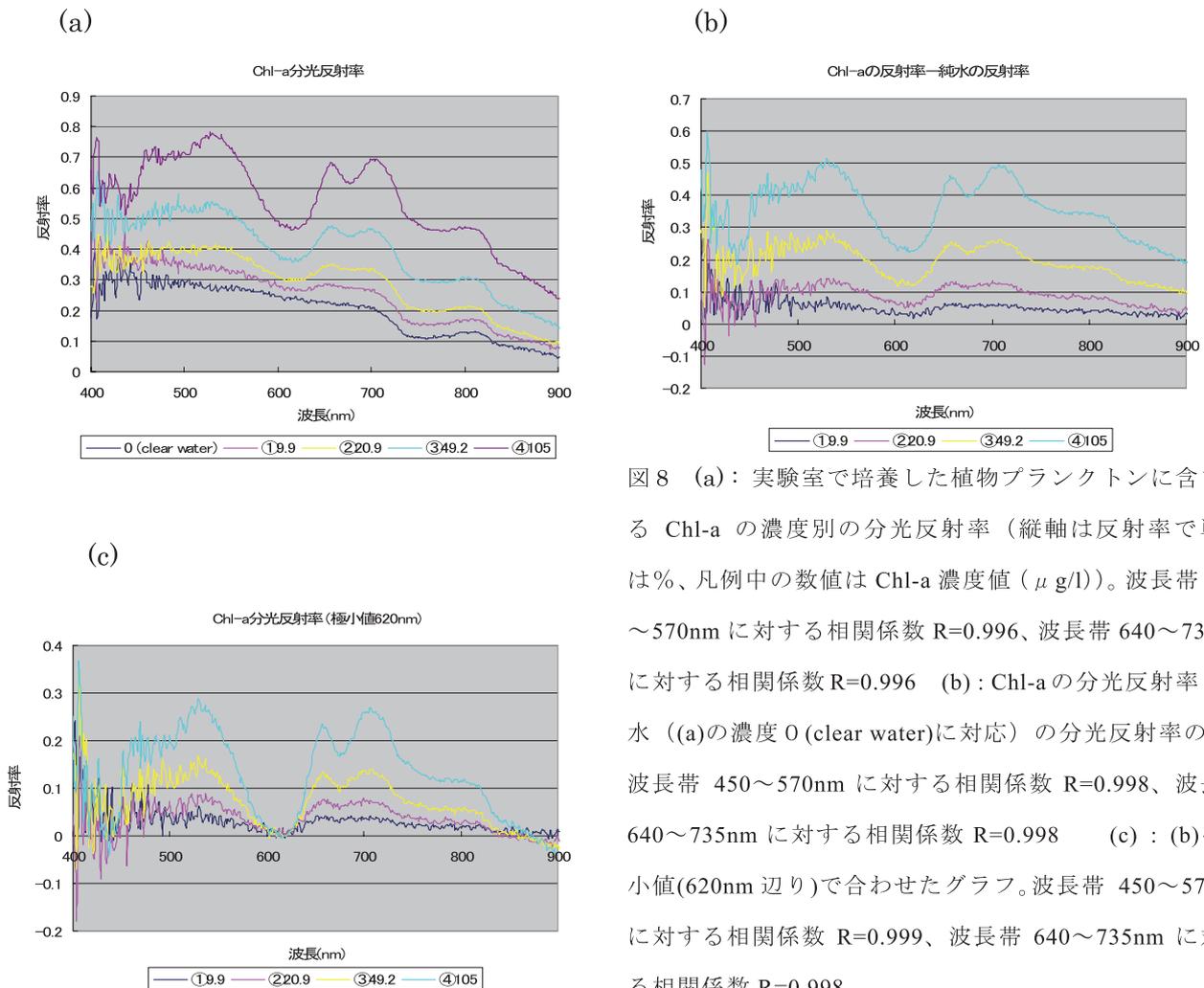


図8 (a)：実験室で培養した植物プランクトンに含まれる Chl-a の濃度別の分光反射率（縦軸は反射率で単位は%、凡例中の数値は Chl-a 濃度値 ($\mu\text{g/l}$)）。波長帯 450~570nm に対する相関係数 $R=0.996$ 、波長帯 640~735nm に対する相関係数 $R=0.996$ (b)：Chl-a の分光反射率と純水 ((a)の濃度 0 (clear water)に対応) の分光反射率の差。波長帯 450~570nm に対する相関係数 $R=0.998$ 、波長帯 640~735nm に対する相関係数 $R=0.998$ (c)：(b)を極小値(620nm 辺り)で合わせたグラフ。波長帯 450~570nm に対する相関係数 $R=0.999$ 、波長帯 640~735nm に対する相関係数 $R=0.998$

しても、そこに含まれる泥以外の主要成分が Chl-a のみである場合は、600nm 台の反射スペクトルの極小値に泥水の反射率を一致させて差し引き、その差として表れる2つ山の盛り上がり部分の平均値が Chl-a 濃度と高い相関関係を持つことを意味している。逆に、このようにして求めた相関係数が小さい場合は、植物プランクトンによる Chl-a 以外の物質が湖水に含まれていること、さらにはそれら主要成分間の相互作用効果が無視できないことを意味している。

3. 2 分光反射率と Chl-a 濃度の関係

2.3 節において、湖水の分光反射率から泥による分光反射率を差し引いた結果、Chl-a の特徴である2つの反射率のピークが現れることを示した。一方、3.1 節で示したように、Y. Oyama et al., 2007 の実験データを用いた解析の結果、この引き算処理の後の2つ山の平均的な高さは Chl-a 濃度と非常に良い相関を示す事が明らかになっている。そこで我々は、既に図7に2009年8月の例を示したが、2009年9月と2010年1月の分光計測結果にも同様な処理を行いその結果を図9と10に示す。これら3つの図において反射率の盛り上がり方が明らかに異なるが、その主たる理由は植物プランクトン量の季節変化であり、8月、9月に対し1月の植物プランクトン量が少ない事の反映であると考えられる。

これらの図中に見られる2つの反射率ピークの平均的な高さ、Chl-a 濃度の実測値との相関を2009年8月、9月、2010年1月の測定結果を用いて求めた。まず、各観測点の2つの反射率ピークの単純平均を取り、その平均値と Chl-a の実測値との関係を散布図(図11(a)、(b)、図12(a)、(b)、図13(a)、(b))として示した。図11(b)、図12(b)、図13(b)から解るように、波長の長い方(690~800nm)の山については、2009年8月、9月、2010年1月の相関係数は非常に高い値($R=0.898\sim 0.942$)を示している。一方波長の短い方(530~620nm)の山では、2009年8月と9月の相関係数は高い値($R=0.808$ と 0.856 、図11(a)、図12(a)参照)を示しているが2010年1月は 0.173 と非常に低い値となった(図13(a)参照、Chl-a 実測値の低い6ヶ所のデータを除いた場合の相関係数は 0.72)。さらに、2009年8月、9月、2010年1月の全ての観測データに対し相関を取った結果を図14に示す。

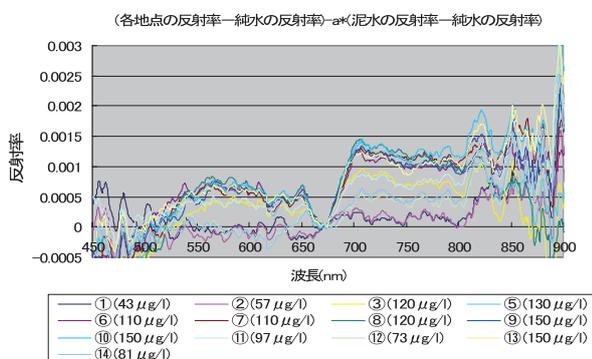


図9 2009年9月の北潟湖13観測地点の分光反射率と泥水の分光反射率の差(数値はChl-a濃度の実測値)

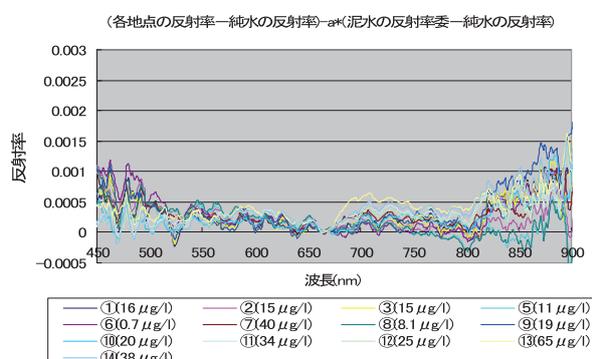


図10 2010年1月の北潟湖13観測地点の分光反射率と泥水の分光反射率の差(数値はChl-a濃度の実測値)

この場合も長波長側（図 14(b)）の盛り上がりに対する相関係数は 0.962 と高く、短波長側（図 14(a)）では 2010 年 1 月のデータの相関が悪い事を反映して 0.664 という低い相関値となった。

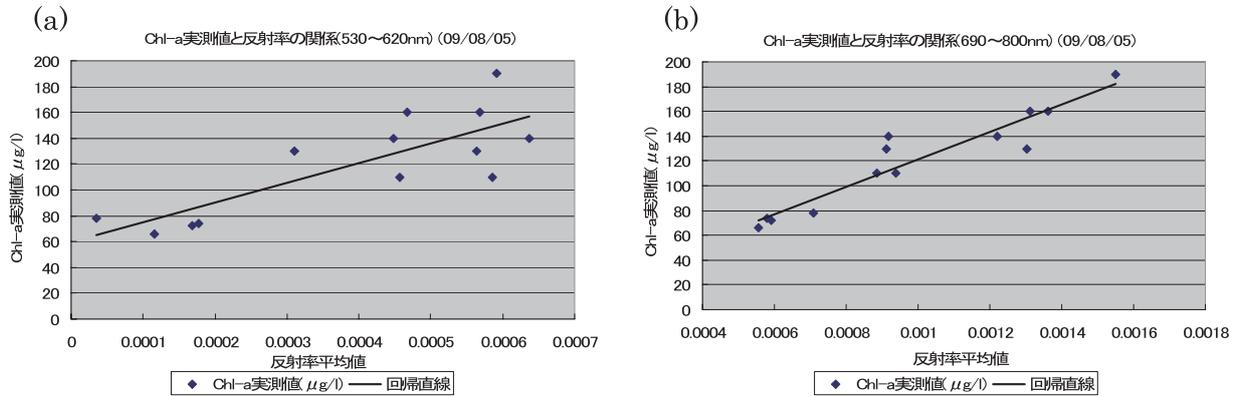


図 11 2009 年 8 月の Chl-a 実測値と平均反射率との関係 (a)：波長帯 530～620nm に対する相関、相関係数 R=0.808 (b)：波長帯 690～800nm に対する相関、相関係数 R=0.942

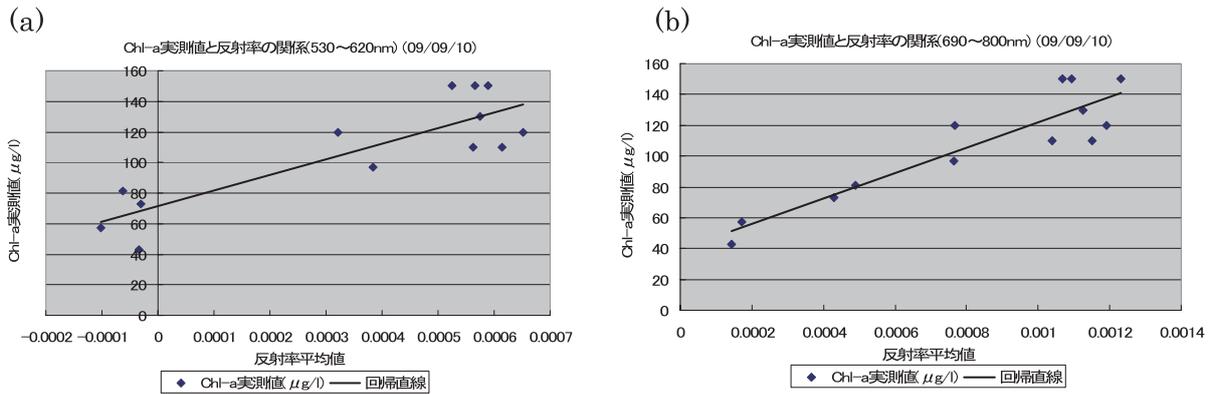


図 12 2009 年 9 月の Chl-a 実測値と平均反射率との関係 (a)：波長帯 530～ 620nm に対する相関、相関係数 R=0.856、(b)：波長帯 690～800nm に対する相関、相関係数 R=0.911

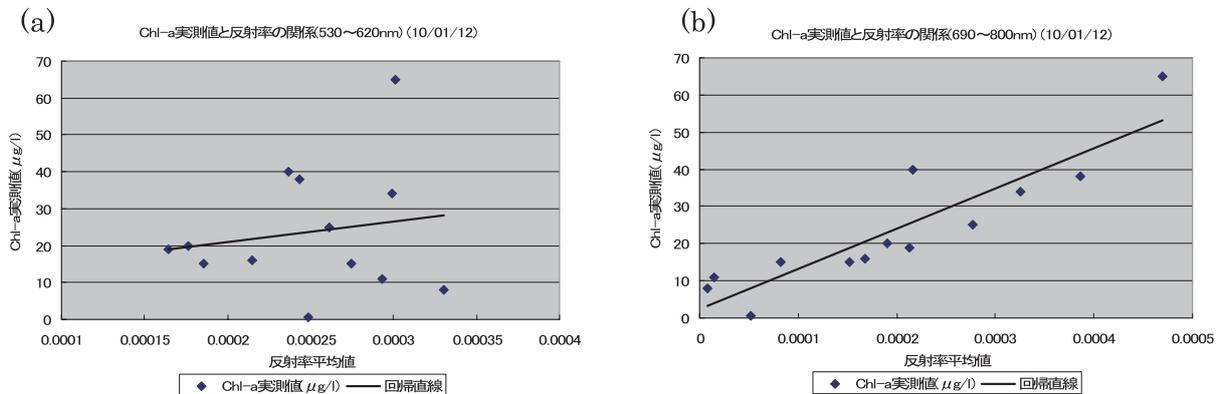


図 13 2010 年 1 月の Chl-a 実測値と反射率との関係 (a)：波長帯 530～620nm に対する相関、相関係数 R=0.173、(b)：波長帯 690～800nm に対する相関、相関係数 R=0.898

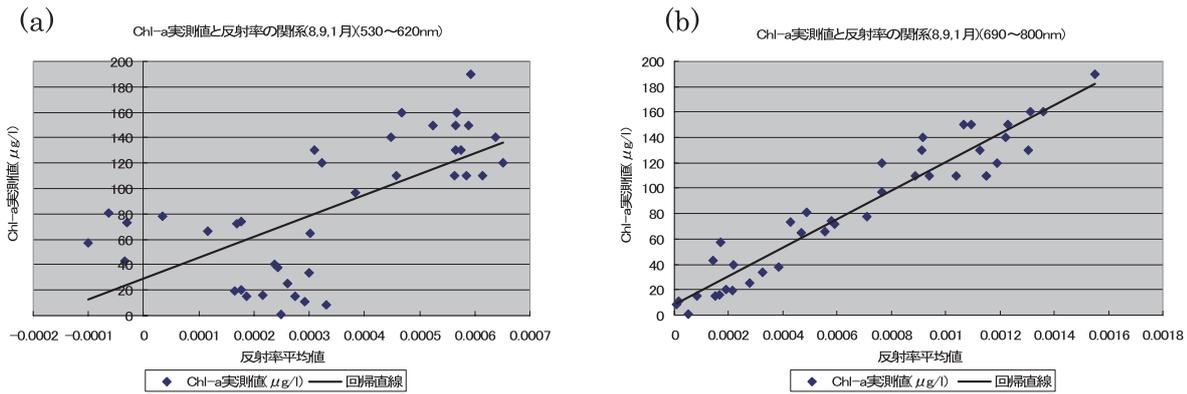


図 14 2009年8月、9月、2010年1月のChl-a実測値と反射率との関係 (a)：波長帯530～620nmに関する相関、相関係数R=0.664、(b)：波長帯690～800nm、相関係数R=0.962

この結果は、長波長側の山の盛り上がりの高さを用いる場合、季節を問わず高い相関(R=0.962)があることから、植物プランクトンのみを水に溶かした Y. Oyama et al., 2007 の実験結果(R=0.998)と同様に、北潟湖水に含まれる泥以外の主要成分は植物プランクトンであり、分光反射率に寄与するその他の成分は無視してよい事を強く示唆している。一方、短波長側の山の盛り上がりを用いた場合、長波長側の山のデータを用いた場合より相関係数は若干低く出る。特にChl-a濃度が低いデータが含まれる場合には相関値が大幅に低く出ることが明らかになった(図13(a)、図14(a)参照)。この事実は、我々が提案している分光反射率から各水質成分の濃度を定量的に求める手法、つまり湖水の分光反射率を泥、Chl-a、水などの水質成分およびそれらの相互作用効果による分光反射率の線形和として表現できるという式

$$R(\lambda) = C_1X_1(\lambda) + C_2X_2(\lambda) + C_3X_3(\lambda) + \dots + F(\lambda)$$

ここで、 $R(\lambda)$ ：湖水の分光反射率、 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。

における相互作用成分 $F(\lambda)$ が、長波長帯(690～800nm)に較べて短波長帯(530～620nm)により大きな影響を与える事を意味しているのかもしれない。この示唆は、泥(SS: Suspended Solid or Sediment)とChl-aが混在する湖水の場合、相互作用効果が泥の反射率に比例するという、青山他、2009⁽³⁾の結果とも良い対応を示している。

4. 結論

2009年と2010年に北潟湖の13観測点において新たに採取した湖水に対し分光反射率計測を行い、北潟湖水の分光反射率から泥水による分光反射率を差し引いた反射率成分とChl-a濃度の実測値との間の相関関係について詳細に調べた。その結果、分光反射率スペクトルの2つの盛り上がりの中、長波長側の山の盛り上がりの高さを用いる場合、季節を問わず高い相関(R=0.962)

が得られたことから、北潟湖水に含まれる泥以外の主要成分は植物プランクトンであり、分光反射率に寄与するその他の成分は無視してよい事が明らかになった。一方、短波長側の山の盛り上がりを用いた場合には、長波長側の山のデータを用いた場合より相関係数が低下すること、特に Chl-a 濃度が低いデータが含まれる場合には相関値が大幅に低く出ることが明らかになった。この事実は、我々が提案している分光反射率から各水質成分の濃度を定量的に求める手法における相互作用成分 $F(\lambda)$ が、長波長帯に較べて短波長帯により大きな影響を与える事を示しており、相互作用成分のスペクトル形状に対する一つの条件を与えるものであると考えている。

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深く感謝する。さらに、培養植物プランクトンの分光反射率計測結果等の資料を快く提供して頂いた産業総合研究所の尾山洋一氏に感謝する。

参考文献

- (1) 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
- (2) 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, Vol. 7150, pp. 71501H-1 ~ 71501H-9, Noumea, New Caledonia, Nov. 2008.
- (3) 青山隆司、庄司直弘、松井佑介、「衛星分光画像を用いた北潟湖の水質評価」、福井工業大学研究紀要、第 39 号、pp. 336-343、2009 年 5 月
- (4) Oyama Y., B. Matsushita, T. Fukushima, T. Nagai and A. Imai, 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, pp. 1437-1453, 2007.
- (5) 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, Vol.59, pp. 505-510, 1993.

(平成 22 年 3 月 31 日受理)