

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－

青 山 隆 司*・庄 司 直 弘**

Estimation of Water Quality of Lake Kitagata based on Remote Sensing Technique －Spectral measurement of Lake Kitagata－

Takashi Aoyama and Naohiro Shoji

The purpose of our research is to develop the procedure to extract the information of water quality of Lake Kitagata (heavily eutrophic lake), from multi-spectral satellite images. As the first step of our research, the controlled experiment in the laboratory, measuring the spectral reflectance of water of Lake Kitagata to search the principal components in it, has been carried out. Preliminary results of the laboratory experiment indicate that the main components of the water of Lake Kitagata are mud and plant including phytoplankton. Moreover, the results of the analyses for the direct sampling data of Lake Kitagata obtained by local government of Fukui prefecture are also reported.

1. はじめに

福井工業大学は2005年7月にあわら市と相互協力協定を結び、各種協力事業を実施することとしているが、その協力項目の中に北潟湖の水質改善が謳われている。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る。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に着手した。

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^{(8), (11)}が行われているものの現在でも確立されていない。この点は、我々が現在までに行ってきた若狭湾の赤潮に関する研究^{(1)~(7)}において使用したJAXA提供のChl-a濃度計測値が、SSの多い沿岸域および赤潮発生の中心部において正確なChl-a濃度を計測できていない現状を見ても明らかである。そこで我々は、本年度オープン・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

* 宇宙通信工学科 ** 福井工業大学大学院修士課程

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。本論文では、その初期成果について報告する。また、北潟湖の水質の現状を事前に把握するため、福井県が行った水質調査データを用いた解析結果についても報告する。

2. 北潟湖の水質実態

北潟湖の水質について、福井県は隔月で年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年間の時間変化をFig. 2 (a)～(e)に示す。横軸は観測した年、縦軸は水質指標値（年6回の観測値の平均）、各線は9ヶ所の観測地点に対応している。また、太い横線は北潟湖に指定された水質基準を示している。水質基準は生活環境（pH、COD、SS、DO、大腸菌）に対しAA、A、B、Cの4段階、窒素、磷に対してはI～Vの5段階でランク分けされており、北潟湖はB、IVに指定されている。この基準はいずれも下から2番目のかなり緩い基準であるが、6.0～8.5の範囲と決められたpH（Fig.2(a)）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解かる。Fig.2(b)に示すCOD（Chemical Oxygen Demand：化学的酸素要求量）の水質基準はBランクでは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（Fig.2(c)）。一方、全磷、全窒素（Fig.2(d), (e)）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、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ため、SS、Chl-a 濃度、COD、全窒素について、各観測点における指標値をほぼ10年毎の平均値として表したものをFig.3に示す。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。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。

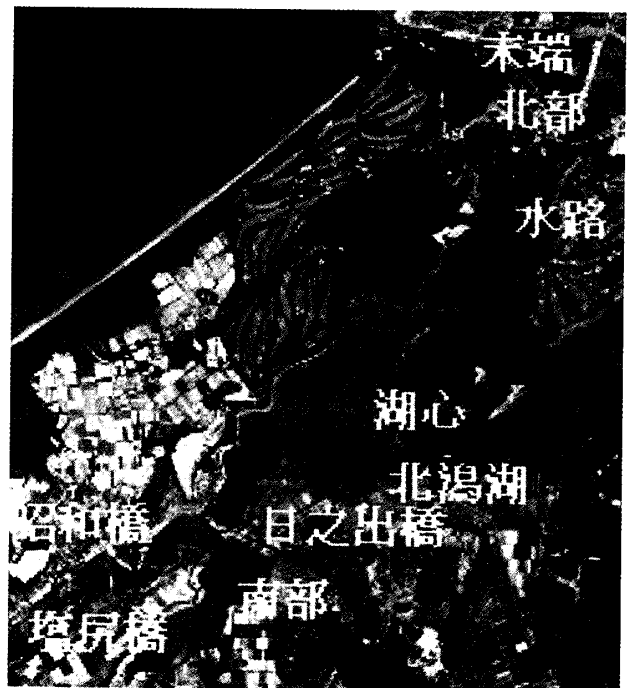


Fig.1. Sampling points in Lake Kitagata are plotted on an IKONOS image.

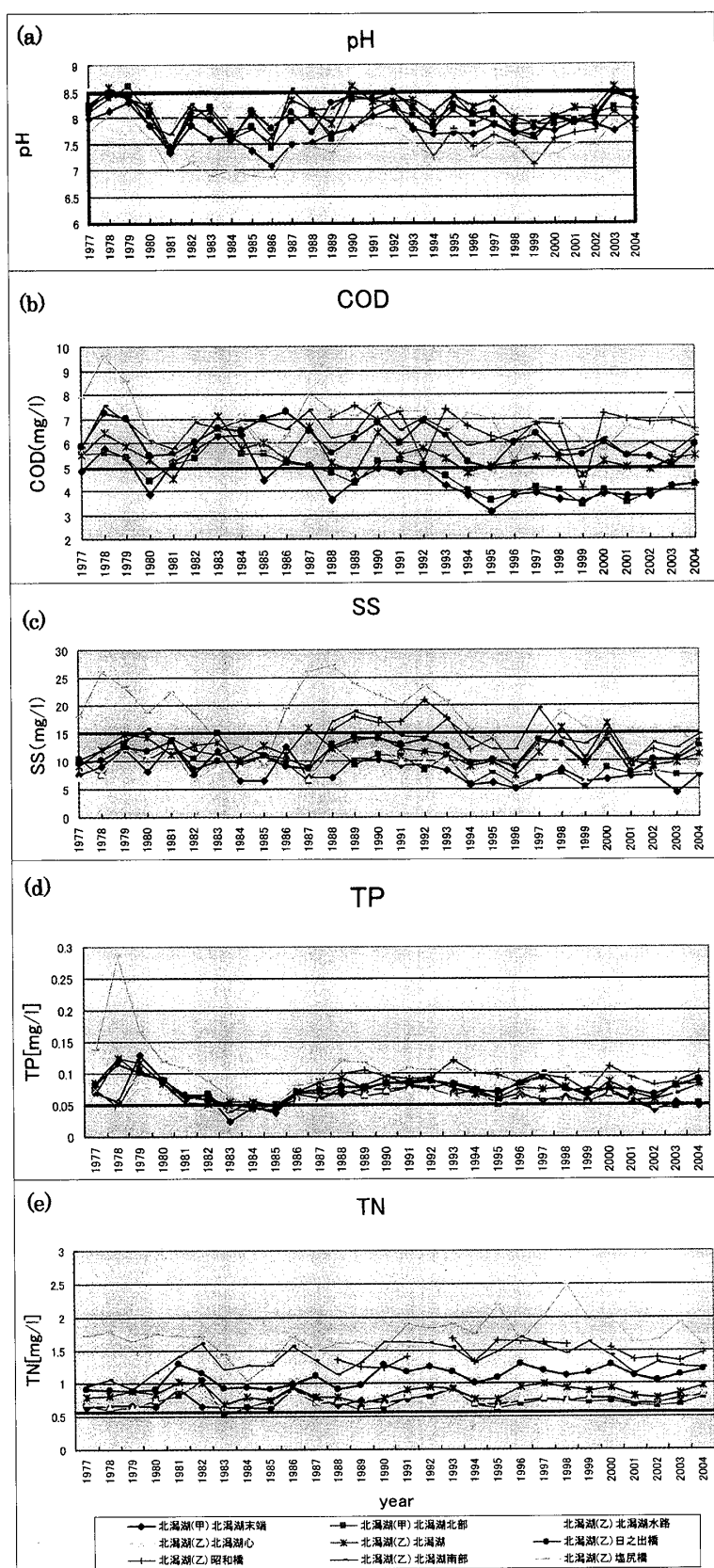


Fig.2. Annual changes of water quality indices in Lake Kitagata.

(a), (b), (c), (d) and (e) correspond to pH, COD, SS, Total Phosphorus and Total Nitrogen, respectively.

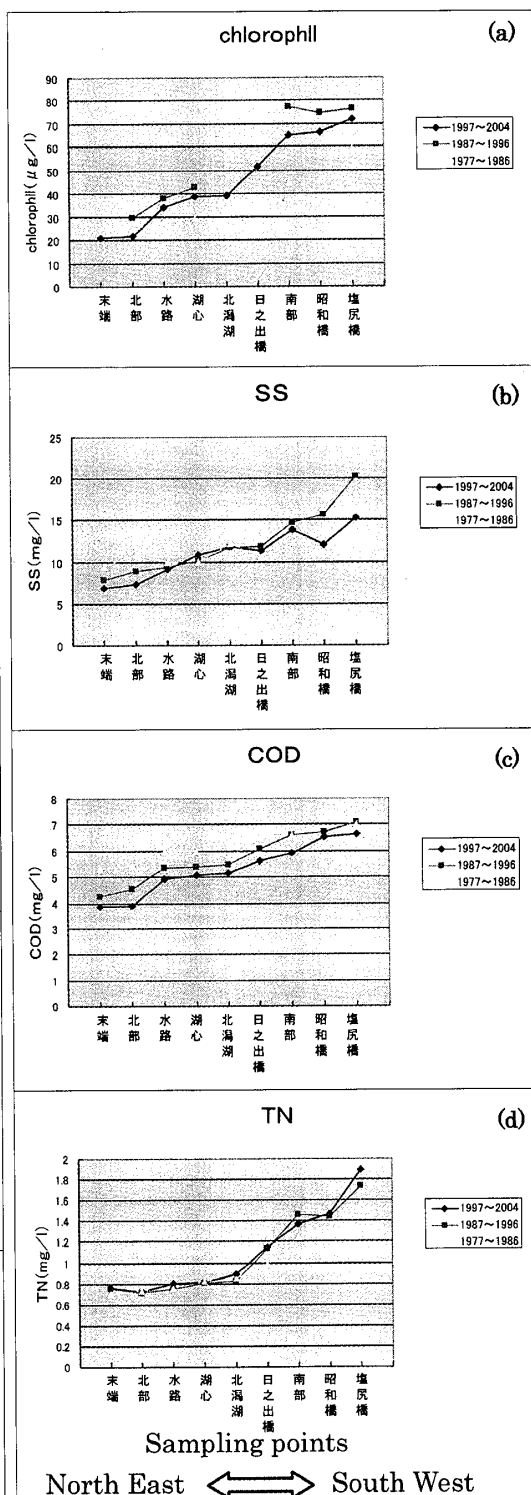


Fig.3. The abscissa and ordinate denote the sampling points and the values of indices; Chlorophyll-a concentration (a), SS (b), COD (c) and TN (d), respectively. Each line shows the average value of about ten years.

以上述べてきたような北潟湖の水質に対し、人工衛星搭載の光学センサーを使いどの程度まで水質関連の情報を引き出せるかを検討した。まず、2006年1月に打ち上げられた日本の地球観測衛星ALOS（だいち）の光学センサーであるAVNIR-2の赤色バンド（Band3）および近赤外バンド（Band4）の画像データを用い、Band3画像とNDVI画像を作成した。ここに、NDVI（Normalized Difference Vegetation Index）画像は正規化植生指標と呼ばれ、以下のバンド間演算により求められる。

$$\text{NDVI} = (\text{Band 4} - \text{Band 3}) / (\text{Band 4} + \text{Band 3})$$

NDVIは陸域の植物量及び植物活性度を表す標準的な指標であるが、我々はこれを湖水中に存在する植物プランクトンを含む植物量（クロロフィルa濃度に対応）の指標として用いている。一方、Band3の反射率は湖水に含まれる懸濁物質（SS）の良い指標になることが知られている^{(9), (10)}。これらの特性を利用し、衛星画像からSSおよびクロロフィルa濃度の情報を抽出するため、Band3画像とNDVI画像を作成し、それぞれの画像の対応するピクセルの値を2次元散布図（Scatter Plot）に表したものがFig.4(b)および(d)である。これら2つの散布図は全く同一のものであり、Band3およびNDVIがともに低い値を示す散布図の左下部分が

水域（湖および海）に対応している。そこでまず、Fig.4(b)の水域部分にBand3（縦軸）の値が低い方から高い方に向けて水色、青色、緑色、赤色の順に着色しBand3の強度を色分けする。そして着色された散布図上の各点に対応するピクセルを同色で表示した画像をFig.4(a)に示している。同様に、Fig.4(d)においては、水域部分に対応する左下部分に対し、NDVI

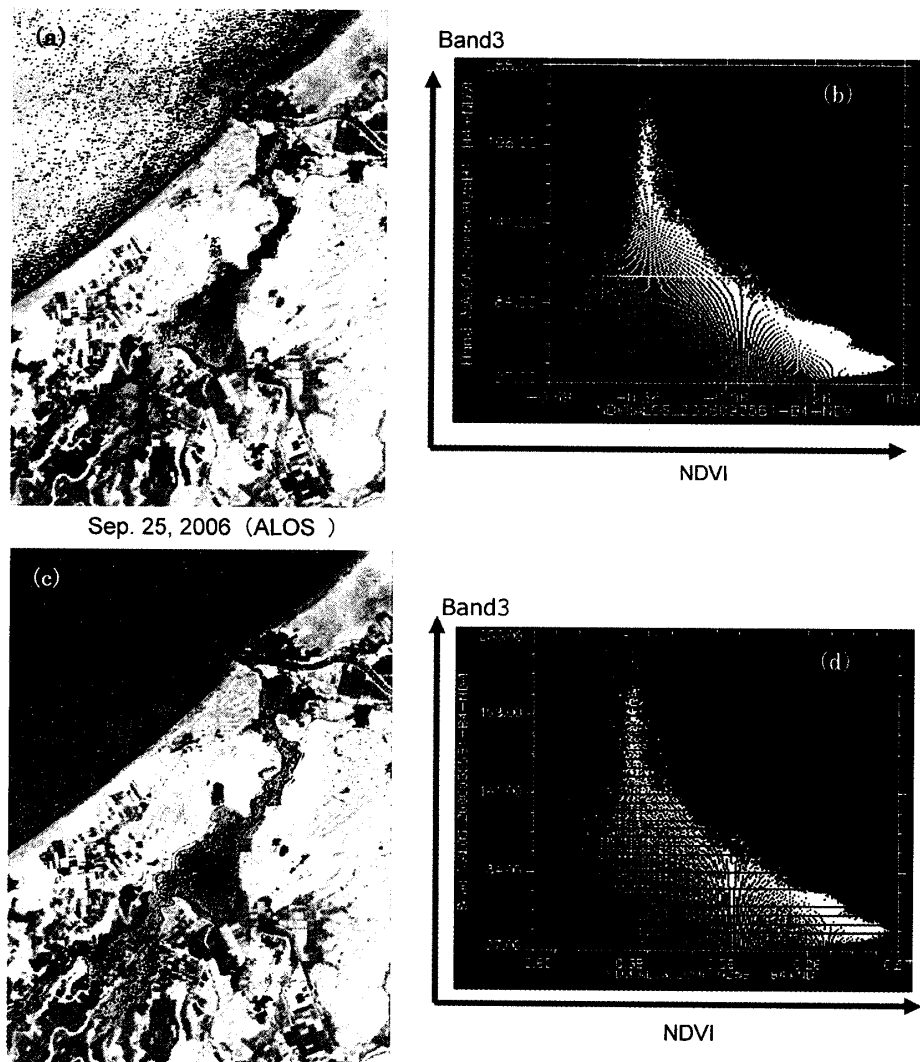


Fig.4. Scatter plots ((b) and (d)) for Band1 and NDVI, and corresponding pseudo-color images ((a) and (c)) of Lake Kitagata and the Sea of Japan using ALOS/AVNIR-2 data. Red, green and blue colors correspond to high, middle and low Band3 and NDVI values, respectively. Light blue region in (a) corresponds to the region of lower band3 value than that of blue region.

(横軸)の値が低い方から高い方に向けて青色、緑色、赤色に順で着色し、対応するピクセルを同色で表示した画像を Fig.4(c)に示している。つまり、Fig.4(a)では、水色から、青色、緑色、赤色になるほど Band3 の値が高く SS 量が多いことを示しているが、この結果は湖の南西部が北東部に較べて懸濁物質が多いという Fig.3(b)に示した SS 濃度の実測結果とも良い一致を示している。また、Fig.4(c)においては、青色から、緑色、赤色になるほど NDVI 値 (植物量の指標) が高いことを示しており、Fig.3(a)に示した Chl-a (Chlorophyll-a) 濃度の実測結果とも対応は良い。しかし衛星画像から得られた NDVI や Band3 等のピクセル値と、対応する地点での実際の Chl-a 濃度、SS 濃度、栄養塩濃度等との定量的な関係は明らかにされていない。本研究はこの点の解明を目指すものである。

3. 北潟湖水質の分光観測実験

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、湖水の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、マルチスペクトルあるいは今後主流となると思われるハイパースペクトル衛星画像を用いて、どのバンドをどのように処理すれば湖水中の SS、Chl-a 濃度等の水質指標を抽出計測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、北潟湖の泥および採取した湖水に対し分光計測実験を行った⁽¹¹⁾。

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。Fig.5に示すように、太陽光の代用として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3リットル) 内に計測対象の泥水や北潟湖で採取した水等を入れ、その反射光を分光放射計 (Fig.5 中央) で計測した。黒塗りのビーカーを使用した理由は、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、その範囲を 3.5nm の波長分解能で計測可能であり、その観測視野角は 25 度である。計測される物理量は分光反

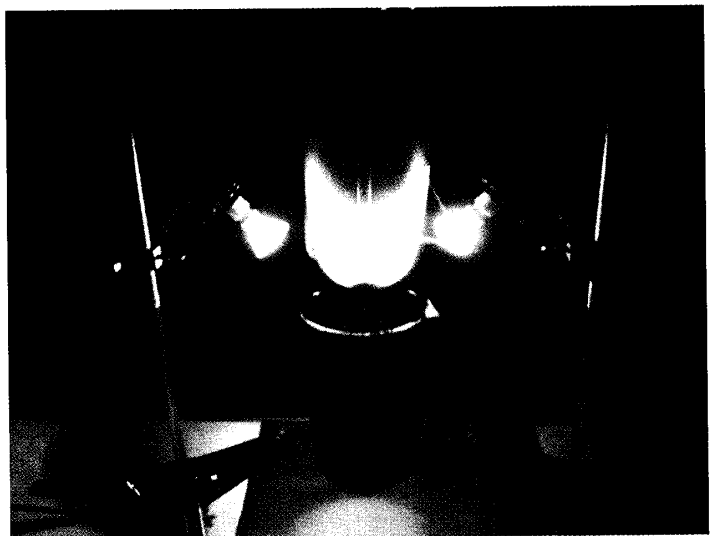


Fig.5. Experimental set up for measurement of reflection spectra in the laboratory.

射率であり、水面と同位置に置いた基準白版 (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率が計測される。なお分光反射率の計測値は、連続する 5 回のスペクトル計測の平均値を用いている。

3. 2 懸濁物質および湖水の分光観測

北潟湖水に含まれる主要成分は、泥であることが予想されるため、泥水の分光反射率の計測を行った。泥は

北潟湖の湖底に堆積したものを現地で採取し、実験室で乾燥し、篩いにかけてゴミを取り除いた。湖水中に浮遊している泥は湖底に堆積した泥より細かいと思われるため、採取した泥を乳鉢で磨り潰し、純水に溶かした際に沈殿しない程度の細かさ（平均粒径 $\sim 160\mu\text{m}$ ）まで粉砕したものを使用した。溶かし込む泥の平均粒径が後方散乱特性に重要な影響を与えるため、今後さらにいろいろな粒子径の泥水に対しても計測を実施してゆく計画である。Fig. 6 に結果を示すが、横軸が波長 (nm) で縦軸が反射率である。各線は 2.5 リットルの純水に溶かした泥の重量 (mg) を示しており、1 番下の線は泥を加えない純水のみ反射率である。ノイズの多い 450nm 以下と 850nm 以上の波長帯を除けば、泥の濃度が増えるに伴い反射率が增加することが解かる。また、



Fig.7 Sampling points (three yellow circles) of water in Lake Kitagata. Sampling points are named as Kitagata, Hinode Bridge and Shiojiri Bridge in order from east to west.

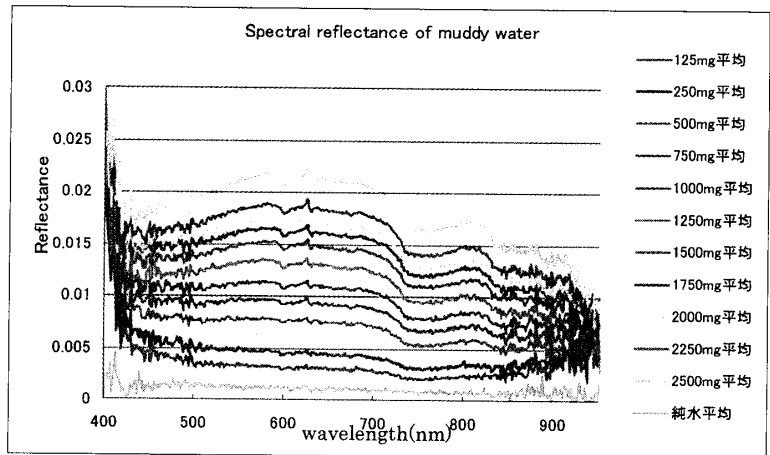


Fig.6. Spectral reflectance measurements of clear water and clear water with various levels of SS (mud) concentrations.

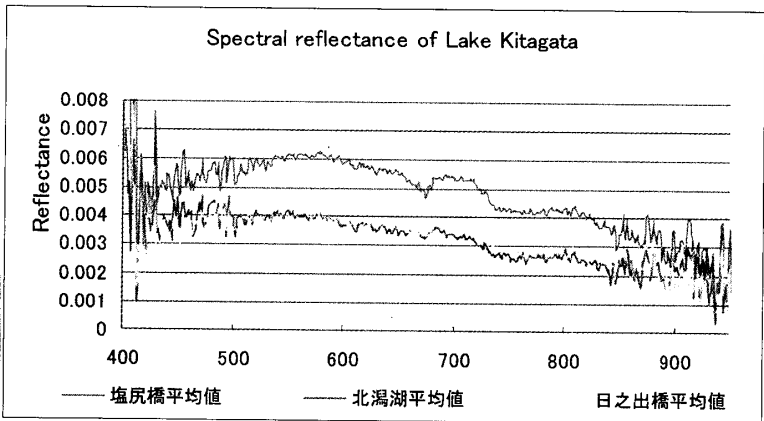


Fig.8. Results of a controlled laboratory experiment. Spectral reflectances of Lake Kitagata at three data sampling points are shown.

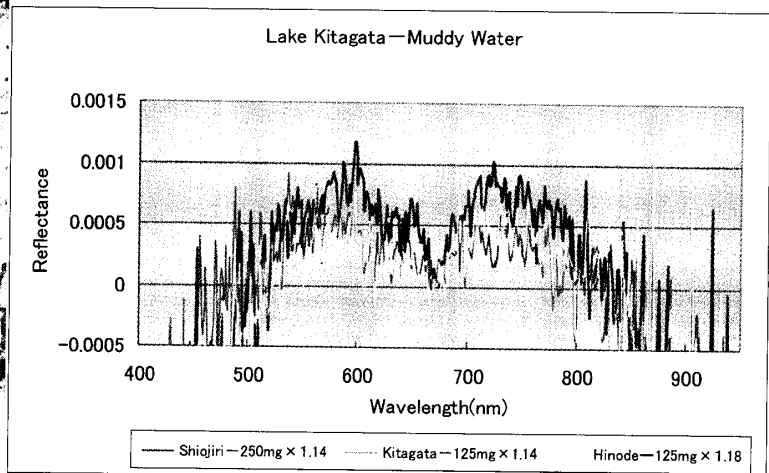


Fig.9. Difference of spectral reflectance between water of Lake Kitagata and muddy water.

泥の濃度と反射率には、各波長とも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。

次に北潟湖の3箇所 (Fig. 7内の黄色の丸印が採取場所。左が塩尻橋、中央が日の出橋、右が北潟湖) で採取した湖水に対し、同様な分光反射率計測を行った結果を Fig. 8 に示す。ノイズの少ない 450nm から 850nm にかけての波長帯を比較すると、泥の重量 125mg から 250mg に対する分光反射率に近いが、必ずしも一致する訳ではないことがわかる。その違いを明確にするため、泥水の分光反射率と湖水の反射率の差をとった結果を Fig. 9 に示す。この際、675nm 付近の湖水の反射率極小値と一致するよう泥水の分光反射率を定数倍し、両者の差をとっている。その結果は、緑色波長帯 (500nm～600nm) および近赤外波長帯 (700nm～800nm) における反射率の増加と赤色波長帯 (600nm～700nm) での減少が明確に表れている。次に葉緑素を含む水の分光反射特性を調べるため、ほうれん草に含まれる葉緑素の分光特性を計測した。ほうれん草から葉緑素を抽出するため、ほうれん草の葉を乳鉢で磨り潰し、純水を加え数回カ

ーゼで濾すことにより不純物を取り除き、Fig. 5 に示す実験装置で分光反射率の計測を行った。Fig. 10 にその結果を示す。横軸は波長で縦軸が反射率を表しており、各線は葉緑素濃度の違いを表している。この場合の Chl-a 濃度値は現時点では未計測であるため相対的な分光反射特性となる。Fig. 9 と同様に緑色波長帯および近赤外波長帯における高い反射率と赤色波長帯での吸収が明確に表れている。Fig. 9 と Fig. 10 の分光反射特性の一致は、植物や植物プランクトンの持つ葉緑素 (Chl-a) が北潟湖水に多く含まれていることを示している。このことから北潟湖水に含まれる物質は、泥と植物 (植物プランクトンを含む) が主成分であることが推測される。これらの特性を利用することにより、衛星分光画像から植物成分を定量化する方向性が見えてきたが、この差の成分には他の含有物の効果が含まれることも明らかであり、今後さらに詳細な研究が必要である。

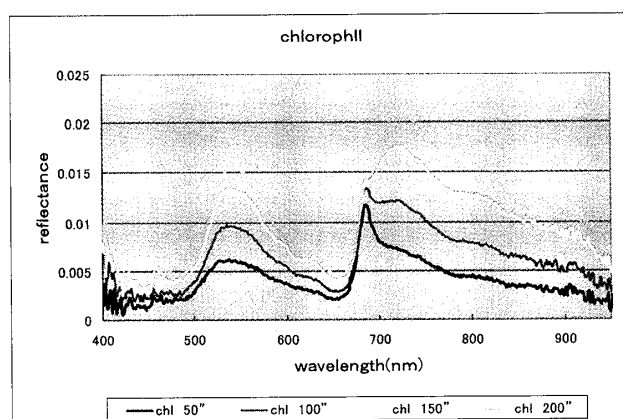


Fig.10. Results of spectral reflectance measurement of clear water with various levels of Chl-a concentrations.

4. 結論

研究対象の北潟湖の水質実態を把握するため、福井県が行った現地での実測調査データを詳細に解析した。その結果、COD、SS、全磷、全窒素等の水質指標は基準値を上回っており、全体的にみて富栄養化の進んだ湖であることが確認された。また、富栄養化の程度は場所により異なり、日本海に繋がる湖の北東部に比べ南西部の富栄養化が顕著であることが明らかになった。さらに水質の年変化は緩やかで、水質浄化が叫ばれているにもかかわらず、水質改善が進んでいないことも確認された。

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が、その第一段階として北潟湖水に含まれる成分を分光反射率計測により求めるため室内実験を行った。その結果、北潟湖水に含まれる物質の主成分は、泥 (SS) と植物成分 (葉緑素: Chl-a) であることが明らかになった。今後さらに詳細な分光実験を行うことにより、多くの物質の混合体である湖水の成分を分離抽出する手法を開発す

る計画である。

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、現在修士課程2年、松井佑介の各氏に感謝致します。

参考文献

- (1) 青山隆司、八木浩、福井工大 MODIS 高次処理システムと赤潮検出について、2005、海洋理工学会平成17年度秋季大会講演論文集、P7、pp. 87-88
- (2) 青山隆司、大家寛、MODIS データを用いた若狭湾の赤潮検出、2005、日本リモートセンシング学会第39回学術講演会論文集、B17、pp. 103-104
- (3) Aoyama T., Condition of Red Tide Appearance in Wakasa Bay Based on Terra, Aqua/MODIS Data, 2006, International Symposium on Functional Organic Materials and Science & Technology for Sustainable Society, Abstracts, 17-1 - 17-2
- (4) Aoyama T. and H. Oya, Condition of red tide appearance in Wakasa bay based on Terra, Aqua/MODIS images, 2006, SPIE Asia-Pacific Remote Sensing, Proceedings, Vol. 6412, 64120V-1 - 64120V-8, Goa, India.
- (5) 青山隆司、松井佑介、MODIS 画像を用いた赤潮確認法、2006、日本リモートセンシング学会第41回学術講演会論文集、B28、pp. 163-164.
- (6) 青山隆司、松井佑介、MODIS 画像を用いた赤潮発生条件と赤潮抽出法、2007、海洋理工学会平成19年度春季大会講演論文集、A13、P.75-76. 2007年5月.
- (7) 青山隆司、松井佑介、MODIS バイナリーデータを用いた赤潮発生条件の高精度化、海洋理工学会平成19年度秋季大会講演論文集、A1、P.53-54. 2007年11月.
- (8) 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.
- (9) 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.
- (10) 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.
- (11) 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.

(平成20年3月31日受理)