

衛星リモートセンシングを用いた小浜湾の水質計測

松井 佑介*・青山 隆司**

Measurement of Water Quality of Obama Bay based on Remote Sensing Technique

Yusuke Matsui and Takashi Aoyama

The purpose of this research is to develop a procedure for extracting information on the water quality of Obama Bay from multi-spectral satellite images. As the first step of this research, a controlled laboratory experiment was performed to measure the spectral reflectance of samples obtained from Obama Bay 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 Obama Bay are sediment and phytoplankton. In addition, we compared of the spectral measurement in laboratory with that of analysis using satellite images. Moreover, the results of the analyses of the direct sampling data of Obama Bay provided by local government of Fukui prefecture are also reported.

1. はじめに

我々は、数年前より、衛星リモートセンシングを用いた海や湖沼の水質計測に向けて研究を進めてきた^{(1), (2), (3), (4)}。しかし、水質悪化により発生する赤潮等の被害が大きいのは養殖場だと思われるため、本研究では小浜湾で行われている養殖場の水質を研究対象とした。

小浜湾は若狭湾の一部に含まれる閉鎖性海域であり、面積 58.7 k m²、湾口幅 2.4 k m、湾内最大水深 35m のリアス式海岸でもある。そのため海水交換が悪く、富栄養化によるプランクトンの増殖により赤潮を発生させる原因になっている。このような水質状況ではあるが、漁業が盛んで、湾奥では真珠や牡蠣などの養殖が行われている。漁業、特に養殖業においては、養殖海域の水質を維持することが重要であり、水質の監視が望まれている。そこで我々は、衛星分光画像データを用い、小浜湾の水質情報を抽出する手法を開発する研究に着手した。本研究はその第一段階として、小浜湾の海水について室内分光実験を行い、その分光特性を調べることにより海水中に含まれる主要成分を特定することを試みた。また、衛星分光画像と室内分光計測の結果を比較し、衛星画像から定量的な水質計測が可能であるかを検証した。なお、小浜湾の水質の現状把握については、福井県（北陸環境科学研究所）が実施している水質調査データを用いた。

* 福井工業大学大学院博士課程 ** 宇宙通信工学科

2. 小浜湾の水質調査結果

小浜湾の湾奥の沿岸域では牡蠣と真珠の養殖が行われているが、近くの河川から栄養塩類が流れ込むことで富栄養化しやすい状況にある。事実、毎年のように小浜湾では赤潮の発生が報告されている。そこでまず、小浜湾の水質の実態を把握するため、福井県が行っている水質調査の結果を解析した。

福井県は小浜湾の水質調査を1998年から毎年実施しており、その結果をWeb上に公開している。水質調査は小浜湾内の6箇所で行われており調査場所については図1に示す。また、この画像はTerra衛星に搭載されたASTERセンサー（解像度15m）で得られたデータを用いて作成した疑似True Color画像に調査地点を書き加えたものである。

海域に対する水質基準は生活環境（pH、COD、DO、大腸菌）に対し、A、B、Cの3段階、富栄養化項目（窒素、磷）に対しては、I～IVの4段階の類型に分類されており、小浜湾はA、II類型に指定されている。公開データを解析し、各指標に対し経年変化をグラフにしたものを図2に示す。横軸は観測した年、縦軸は各水質指標の値である。また、生活環境項目については観測値そのものを指標値としており、富栄養化項目については年間平均値



図1. 小浜湾の水質調査地点

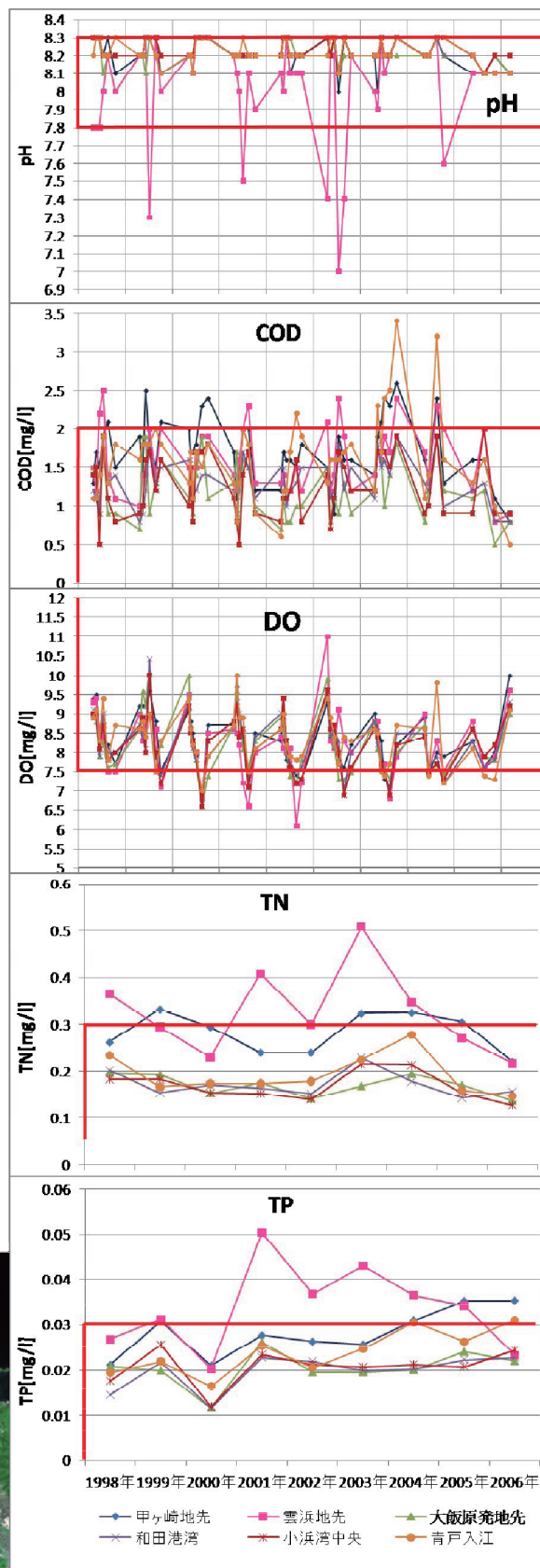


図2. 水質指標の年変化。上から pH、COD、DO、TN（全窒素）及び TP（全磷）を示している。

を指標値としている。解析の結果、湾奥で養殖が行われている海域では水質基準を満たしていないことが明らかとなった。例えばCOD (Chemical Oxygen Demand)の水質基準はA類型で $2\text{mg}/\ell$ であるが、年によって基準値を超えている。全窒素は基準値が $0.3\text{mg}/\ell$ で近年減少傾向にあるが、全磷は基準値 $0.03\text{mg}/\ell$ で近年、湾奥の観測点で基準値を上回っており、甲ヶ崎地先、青戸入江等の湾奥で富栄養化が進んでいることを示している。また、pHで雲浜地先の指標値が極端に低くなっているが、これは観測地点が河口付近に在ることで河川の影響を強く受けるためだと考えられる。全窒素と全磷の指標値が高く表わされているのも同様の理由によるものと思われる。

3. 室内分光実験

小浜湾の海水中に含まれる主要成分を特定することを目的として、採取した海水に対し、分光放射計(FieldSpec HandHeld)による室内実験を行った。室内分光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、夜間に暗室内で行い、被計測溶液を入れる容量3ℓのビーカーは、(直径13.5cm、高さ22.5cm)側面から入射する光を遮断するため、内面を黒く塗りつぶした物を使用した。光源には太陽光の代用として75wのハロゲンランプを2個使用した。分光放射計と被計測溶液の水面との間は15cm、2つのハロゲンランプ間は30cm離し、水面の中心を向くように 45° に傾けた。実験の様子と模式図を図3(a)及び(b)に示す。

まず、小浜湾沿岸部の12箇所と小浜湾外の沿岸部から2箇所の計14箇所から採取した海水の分光反射率計測を行った。また同時にポータブル水質計による水質計測も行っている。小浜湾外の2箇所でも採水した理由は、湾内との比較のためと、この箇所でも養殖を行っているためである。採水箇所を図4に示す。

分光反射率計測の結果は散乱光ノイズが少ない500nmから800nmにかけての波長帯に注目し解析している。図5(a)に全14箇所の海水および純水の分光反射率を示す。図5(b)はノイズ軽減のため9点の移動平均を取った結果を示している。どの地点の海水も純水より分光反射率が高く、海水の中の

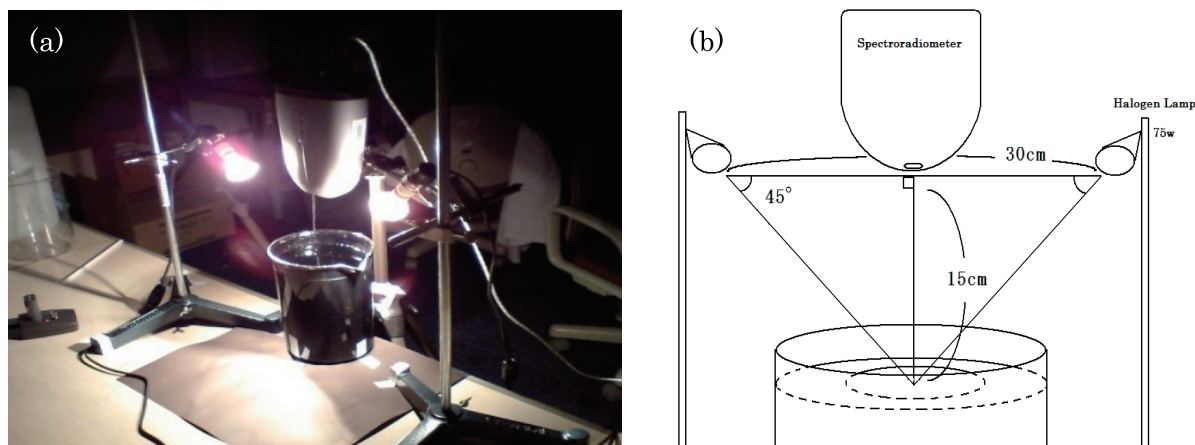


図3. 室内分光実験の様子(a)と模式図(b)



図 4. 小浜湾沿岸の 14 箇所の採水地点

不純物の存在を示している。また、湾奥である地点③や⑨、河川の河口近くに位置している地点④と⑧では海水の分光反射率が高く、湾外の地点⑬、⑭や人的影響が少ない箇所である①、岩場があり清浄な海域である地点⑥や⑦などでは低い値を示している。

次に、海水中に含まれる主要成分を求めることを考える。小浜湾の海水に含まれる主要成分の一つは、泥であることが予想されるため、純水に溶かした泥の分光反射率計測を行った。泥は小浜湾の海底に堆積したものを採取した。養殖が行われていて海水の分光反射率が高かった図 4 の地点③、⑨と分光反射率の低かった地点⑦の計 3 箇所を選定し、小浜湾の泥をサンプルとして採取した。これを実験室に持ち帰り、乾燥し、篩いにかけてゴミを取り除いた。海水中に浮遊している泥は海底に堆積している泥よりも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(平均直径数 μm)まで粉砕したものを使用した。

図 6 (a)～(c)に示しているのは、採水地点③、⑦、⑨の泥水の分光反射率から純水の分光反射率を差し引き、移動平均(9点)処理したものである。また、黒線は同地点の海水から純水の分光反射率を引いたものをそれぞれ示している。図 6 から解かるように、泥水の分光反射率と海水の分光反射率には明確な違いがあり、海水中に泥以外の物質が含まれていることを示している。そこで、採取した海水に含まれる泥以外の成分を抽出するため、海水の分光反射率と泥水の分光反射率の差をとった。一例として、図 7(a)は地点③の海水と地点③の泥水(濃度 $10\text{mg}/\ell$)の分光反射率を示している。ここでは波長 696nm において両者の分光反射率が一致するように泥水の分光反射率を定数倍(ここでは 1.28 倍)して差をとった(図 7(b))。泥水の分光反射率を定数倍する根拠は、図 6 から解かるように、泥の濃度と泥水の分光反射率がほぼ比例関係にあるためである。また、地点⑦、⑨も③と同じように海水から定数倍した泥水の分光反射率を差し引き、海水中に含

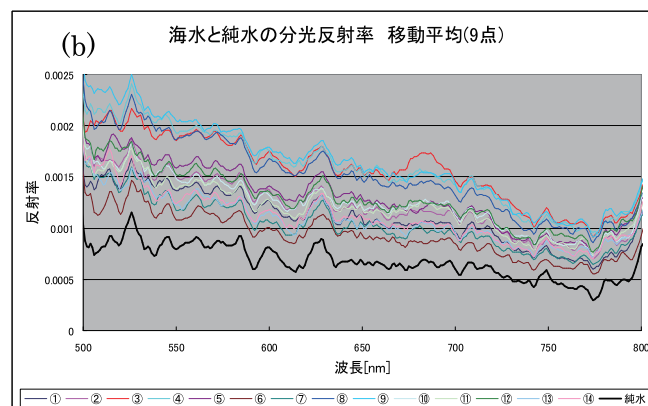
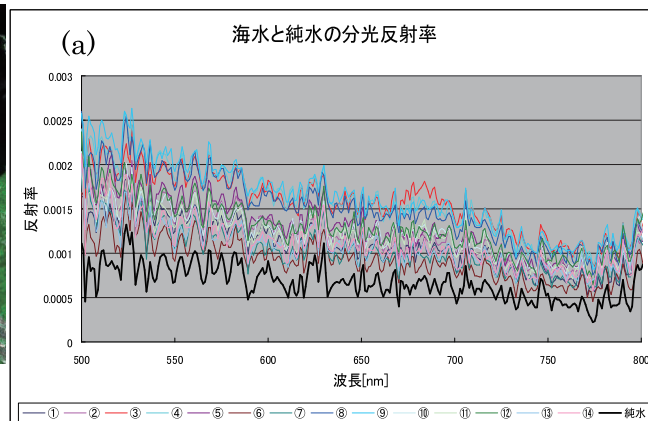


図 5. (a)海水と純水の分光反射率
(b) 9 点の移動平均処理後の分光反射率

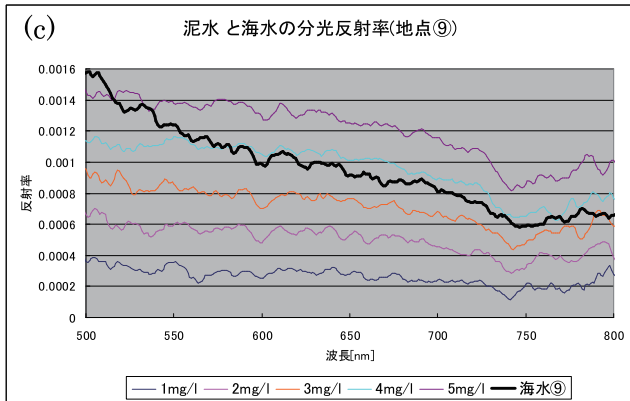
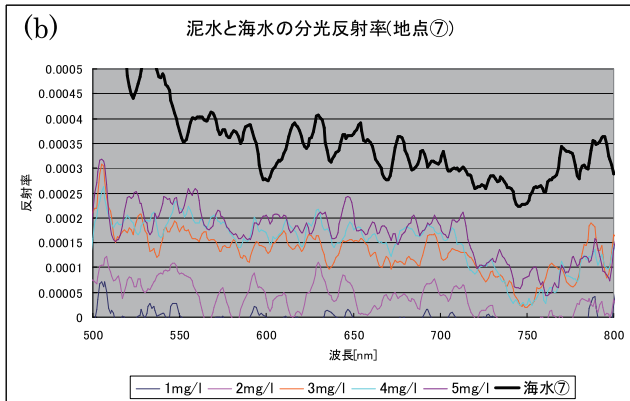
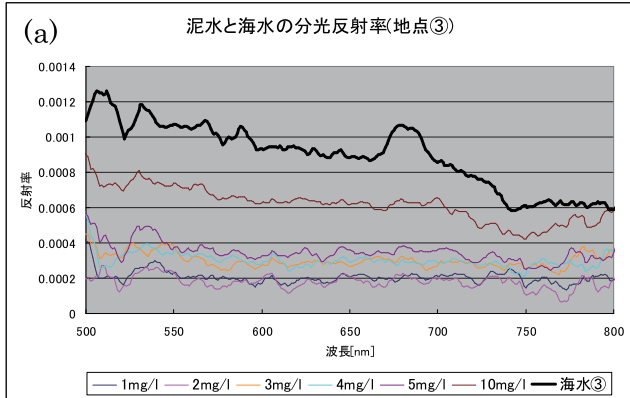


図6. 濃度別の泥水と海水の分光反射率(9点の移動平均処理後)。(a)、(b)、(c)はそれぞれ③、⑦、⑨の地点の海水(黒い太線)および泥水に対応している。

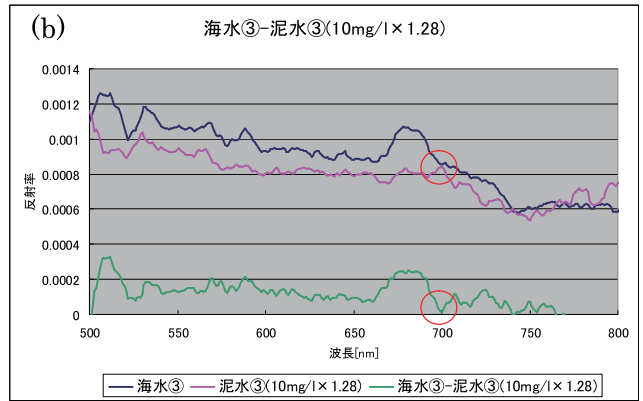
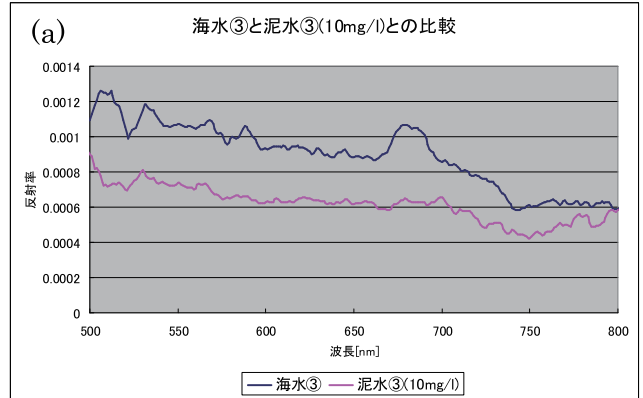


図7. (a) 地点③の海水と泥水の分光反射率と (b) 分光反射率の差

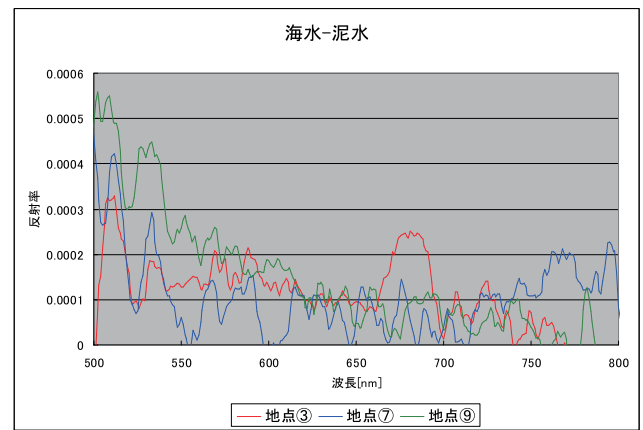


図8. 採水地点③、⑦、⑨の海水と同地点で採取した泥水の分光反射率の差

まれる泥以外の成分による分光反射率を求め図8にその結果を示す。海水から差し引いたそれぞれの地点の泥の濃度は、地点③では $10\text{mg}/\ell \times 1.28$ 、地点⑦では $5\text{mg}/\ell \times 1.5$ 、地点⑨では $3\text{mg}/\ell \times 1.14$ である。その結果、地点⑦の海水では分光反射率が0に近くなり、泥以外の含有物が殆ど存在していないことを示している。一方、地点③では緑色波長帯(500nm~600nm)および赤色から近赤外波長帯(650nm~750nm)にかけて分光反射率の増加が見られる。この結果は植物中の葉緑素の

一部であるクロロフィル a の分光反射率と一致しており、植物プランクトンの持つ葉緑素が地点③の海水に多く含まれていることを示している (図 9 (Oyama et al., 2007) 参照)。また、地点⑨の海水にはクロロフィル a の顕著な分光反射特性は見られないが、500nm~600nm にかけて地点③の分光反射率よりも高く、泥や植物プランクトン以外の物質が含まれている可能性を示唆している。更に、地点⑨およびその周辺に位置する⑩、⑪、⑫の海水と泥水⑨の分光反射率の差をとった結果を図 10 に示す。650nm~750nm にかけて地点⑩、⑪、⑫の海水も分光反射率の増加がみられ、地点③と同様にクロロフィル a (植物プランクトン) が含まれていることが考えられる。

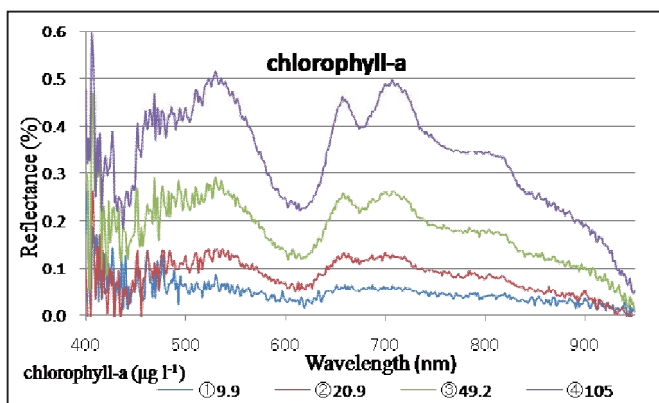


図 9. クロロフィル a の分光反射率
(Oyama et al., 2007)

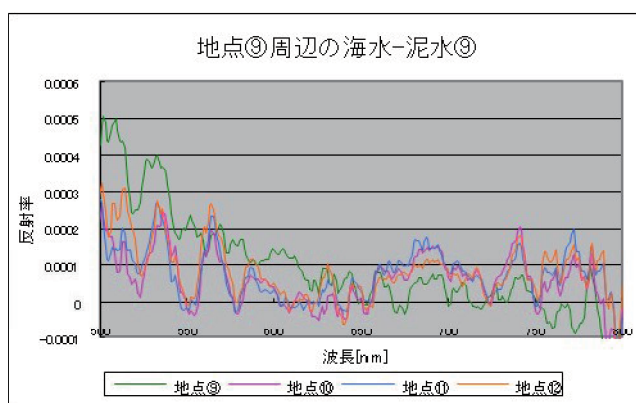


図 10. 地点⑨周辺の海水(地点⑨、⑩、⑪、⑫)と地点⑨の泥水の分光反射率の差

以上の分光反射率測定の結果から、海水の分光反射率は泥とクロロフィル a、水、その他の物質の分光反射率の和として表されることが想定される。つまり、

$$R(\lambda) = c_1X_1(\lambda) + c_2X_2(\lambda) + c_3X_3(\lambda) + \dots + F(\lambda) \quad \dots (1)$$

と表すことができる。ここに、 $R(\lambda)$ は海水の分光反射率、 $X_i(\lambda)$ は SS (泥)、クロロフィル a、水、その他の水質成分の分光反射率、 $F(\lambda)$ は $X_i(\lambda)$ 間の相互作用効果を表している。従って、海水中に含まれる主要成分の決定と、それらの成分と光との相互作用の効果($F(\lambda)$)を決定することにより、 $R(\lambda)$ から各成分の濃度(c_i に対応)を求めることが可能となると考えられる。つまり、事前に計測しておいた各主成分の分光反射率 $X_i(\lambda)$ に衛星分光画像 $R(\lambda)$ を対応させることにより c_i に対する連立方程式として解を求めることが出来るはずである。

4. 衛星分光画像による検証

ここでは前節で求めた室内分光実験の結果を、衛星画像から得られる水質指標により検証することを試みた。なお、用いた衛星は分解能 2.4m の QuickBird である。

QuickBird が 2004 年 3 月に地点⑨~⑫の周辺を観測したデータのうち Band3(赤 Band)と Band4(近赤外 Band)を用いて、クロロフィル a 濃度の一つの指標となる NDVI 画像を作成し、室内分

光実験の結果と比較した。NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) は正規化植生指標とも呼ばれ、植生の有無や活性度を示す指標であり、QuickBird の場合は以下のバンド間演算で求められる。

$$\text{NDVI} = (\text{Band4} - \text{Band3}) / (\text{Band4} + \text{Band3})$$

求められた NDVI 画像と Band3 画像を用いて Scatter Plot を作成したものが図 11(b)に示すが、横軸が NDVI、縦軸が Band3 となっている。Scatter Plot の NDVI と Band3 の両方の値が低い左下の部分が海域に対応している。この海域において、NDVI 値が低い順に青、水色、緑、赤と色を付け、NDVI 画像に反映させ、擬似カラー表示させたものを図 11(a)に示す。ここから地点⑨付近は NDVI 値が低く、⑩、⑪、⑫付近は高く示されているのが見て取れる。また、(a)図内の赤文字の数値は海水の採水時にポータブル水質計で計測したクロロフィル a の量を示している。図 10 の室内分光実験の結果からも指摘されたように、地点⑩、⑪、⑫のクロロフィル a 濃度(7.2 μg/l~8.2 μg/l)が高く示されており、室内分光実験の結果と衛星の NDVI 画像とはよく一致していると言ってよい。この結果は、衛星画像データを用いた水質計測の可能性を示している。

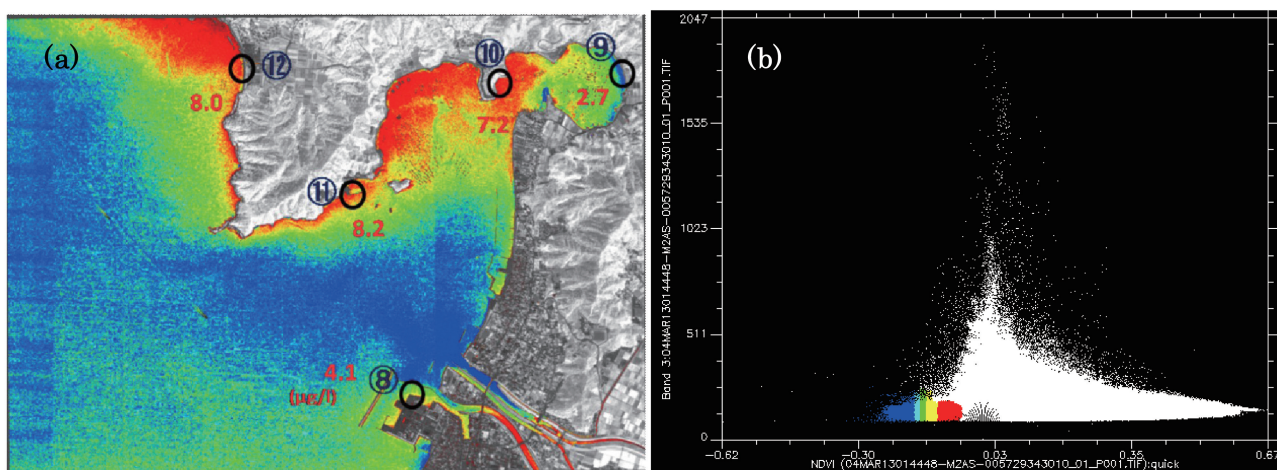


図 11. QuickBird 衛星による NDVI 画像と Scatter Plot(横軸 NDVI、縦軸赤 Band)。

図中の数値は水質計で計測したクロロフィル a の濃度である。

5. 結論

本研究を進めるにあたり、小浜湾の水質状況を確認し現状を把握するため、福井県(北陸環境科学研究所)から提供されている実測データを用い、詳細な解析を行った。その結果、小浜湾東部、西部の湾奥の養殖が行われている観測箇所等で水質基準を一部、上回っていることが確認され、これらの海域で富栄養化が進んでいることが示された。

我々は衛星分光画像から小浜湾の養殖海域の水質情報を定量的に抽出する手法を開発することを最終目的として研究を進めているが、その初期段階として小浜湾の海水について海水中に含まれる主要成分を特定するため室内分光実験を行った。小浜湾で採水した 14 箇所の海水と 3 箇所の海底の泥を用いた分光反射率計測の結果、小浜湾の海水に含まれている主要成分は泥と植物プ

ランクトン(クロロフィル a)であることが明らかになった。また、場所によって主要成分が異なることも示された。

一方、衛星画像と室内分光実験の比較では、NDVI 画像による植物プランクトンの濃度推定と室内分光実験によるクロロフィル a の抽出結果が良い一致を示した。また、同時に行った水質計でのクロロフィル a の濃度計測結果も衛星画像(NDVI)と良い一致を示した。このことは、海域における富栄養化状態を、衛星画像を用いて求める可能性を示唆している。

今後、更に詳細な分光実験を行い、水質成分と分光反射率特性の関係を究明し、多くの物質の混合体である海水の成分を分離抽出することを試みる。そして最終的には、衛星分光画像を用いて海水中の各主要成分の濃度計測を可能にする手法(式(1)を用いる)を開発することを目指す。

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)の補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、クロロフィル a の分光反射率等の資料を快く提供して下さった産業総合研究所の尾山洋一氏、小浜湾の水質に対する統計処理及び小浜湾海水の分光実験に参加した卒業研究生の木下祥一、修士課程 2 年の庄司直弘の両氏に感謝致します。

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ー北潟湖水の分光計測ー、2008、福井工業大学研究紀要、第 38 号、337-344
- (2) 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ー北潟湖水の分光計測実験 Iー、2008、日本リモートセンシング学会第 44 回学術講演会論文集、B21、pp.79-80
- (3) 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
- (4) 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に関する研究、2009、平成 20 年度修士論文
- (5) 木下祥一、衛星分光画像を用いた小浜湾の水質計測に関する研究、2009、平成 20 年度卒業論文
- (6) Oyama, Y., B. Matsushita, T. Fukushima, T. Nagai and A. Imai, 2007, International Journal of Remote Sensing, Vol. 28, No. 7, 1437-1453

(平成 21 年 3 月 31 日受理)