福井工業大学研究紀要　第40号　2010

衛星分光画像を用いた小浜湾の水質計測
―水質の季節変化―

青山　隆司*、　松井　佑介**

Measurement of Water Quality of Obama Bay based on Satellite Spectral Images
－　Seasonal Variation of Water Quality　－

Takashi Aoyama* and Yusuke Matsui**

The purpose of this research is to develop a procedure for extracting information on the water quality from multi-spectral satellite images. As the initial stage of this research, controlled laboratory experiments have been carried out to measure the spectral reflectance of the seawater in Obama Bay. In this paper, the seasonal variations of suspended sediment and chlorophyll-a concentration in Obama Bay obtained from spectral reflectance measurements have been pointed out. Moreover, the validity of some algorithms to evaluate chlorophyll-a concentration in Obama Bay using multi-spectral satellite images has been discussed.

Keywords: Obama Bay, spectral reflectance, chlorophyll-a concentration, water quality, seasonal variation

１．はじめに

福井県の若狭湾に含まれる小浜湾は、閉鎖性の海域であり、湾奥では海水の交換が悪く、富栄養化による植物プランクトンの増殖が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。

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。小浜湾についても2008年より研究を始めており、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の開発を進めている。衛星分光画像データを用いる前段階として、小浜湾から採取した海水の室内分光実験により、海水中に含まれる主要成分を特定する手法およびその結果については既に報告している[(1)、(2)、(3)]。ここでは、これまで複数回行ってきた海水の室内分光実験から懸濁物質（Suspended Solid、以降SSと略記）やクロロフィルa（Chlorophyll-a、以後Chl-aと略記）濃度の季節変化が明らかになったので報告する。また、海水採取日と同日の衛星分光画像を用いて、衛星分光画像からChl-a濃度を評価するアルゴリズムについて検討を行ったのでその結果についても報告する。

＊ 宇宙情報科学科　　** 電気工学専攻（博士）大学院生

２．小浜湾の水質調査結果と季節変化

２．１　県による水質調査と季節変化

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箇所で行われている（調査場所については図１に示す)。また、図１の画像は Terra 衛星に搭載された ASTER センサー（空間解像度 15m）で得られた分光画像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、燐)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。福井県が公開しているデータを解析し、各指標に対して 1998 年４月から 2009 年３月までの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

図 1.　福井県による小浜湾の水質調査地点

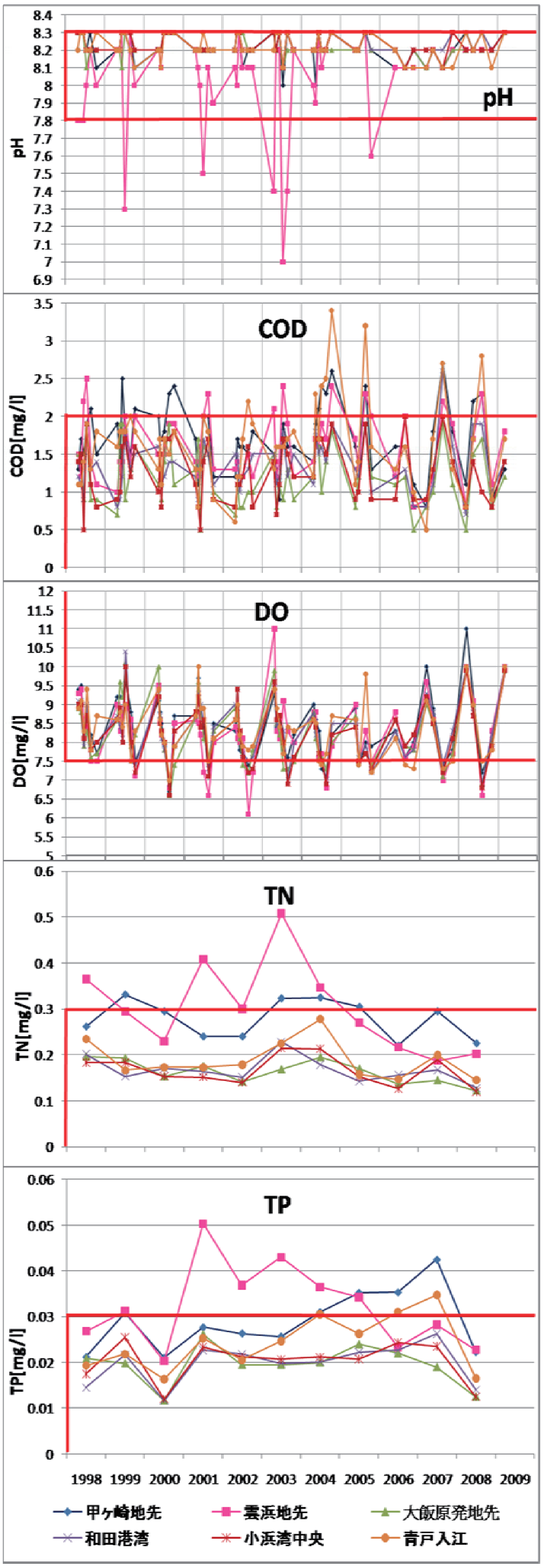

図 2.　水質指標の年変化。上から pH、COD、DO、TN（全窒素）及び TP（全燐）を示している。赤い直線は基準値を示す。

平均値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2mg/ℓであるが、季節によって基準値を超えている。全燐は基準値 0.03mg/ℓ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、雲浜地先のpH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。全窒素と全燐の指標値が高いのも同様の理由によるものだと思われる。

次に水質が季節によって、どのように変化するかを解析した。図3は、CODとDO (Dissolved Oxygen)について各水質調査地点における各月の値を示したもので、各月の値は、1998年から2009年までの平均値である。

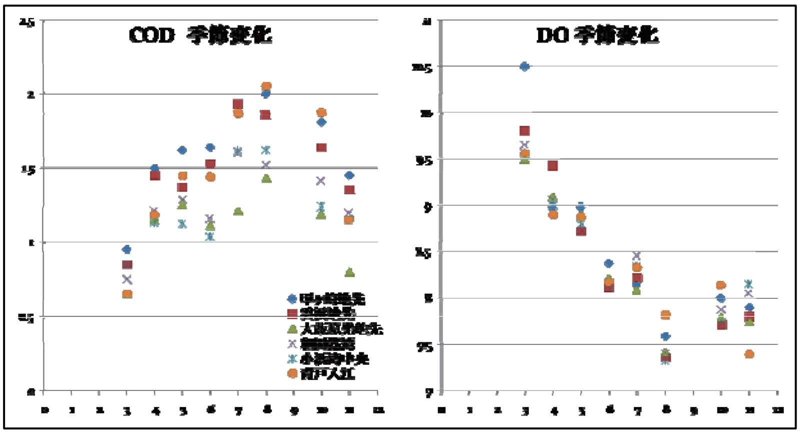

図3　COD（左のパネル）とDO（右のパネル）の季節変化

CODは全ての地点で7月、8月に最も高い値を示している。これは、小浜湾では夏に最も有機物量が多くなっていることを示している。また、DOはCODとは逆相関を示し、夏に最も低い値を示した。この結果は夏に有機物量が多くなり、海水中の酸素が消費されることに対応している。

２．２　Chl-a濃度の季節変化

室内分光計測を行うために小浜湾で採取した海水の一部は北陸環境科学研究所においてChl-a濃度の計量が行われている。計量は2009年4月、6月、8月、10月、2010年3月の5回行っている。図4に室内分光計測及びChl-a濃度計量用の海水を採取した地点を赤丸で示している。図5は各海水採取地点でのChl-a濃度の季節変化を表したグラフである。また、海水採取地点の中で、川の河口に位置する地点④、⑤、⑧は河川水の影響を強くうけるため、この解析では除外してある。

解析結果は、8月にChl-a濃度が最も高くなり、季節が夏から離れるに従って値が低くなることを示している。このことは、福井県の観測データ（図3参照）が示すように、夏に有機物量が最も高くなる傾向と一致しており、小浜湾では夏に植物プランクトンが増殖し、Chl-a濃度が高くなることが我々の観測からも裏付けられた。

図 4　小浜湾の海水採取地点

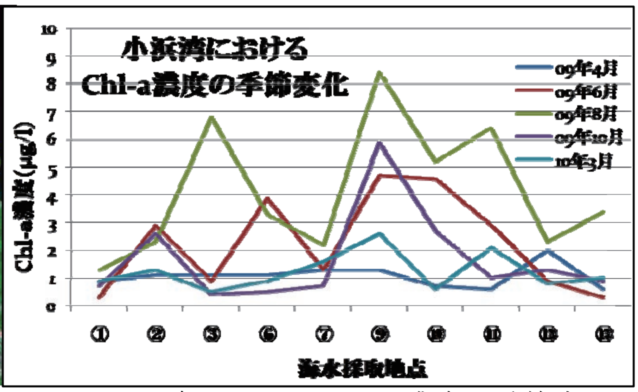

図 5　小浜湾における Chl-a 濃度の季節変化

3．室内分光反射率計測値の季節変化

3．1　実験装置

人工衛星の分光画像を用いて小浜湾の水質計測を行うためには、海水中に含まれる主要成分を特定することが必要になる。そのため、図 4 に示す採水地点で採取した海水に対し、分光放射計(FieldSpec HandHeld)を用いた分光反射率計測を行った。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。この実験で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。

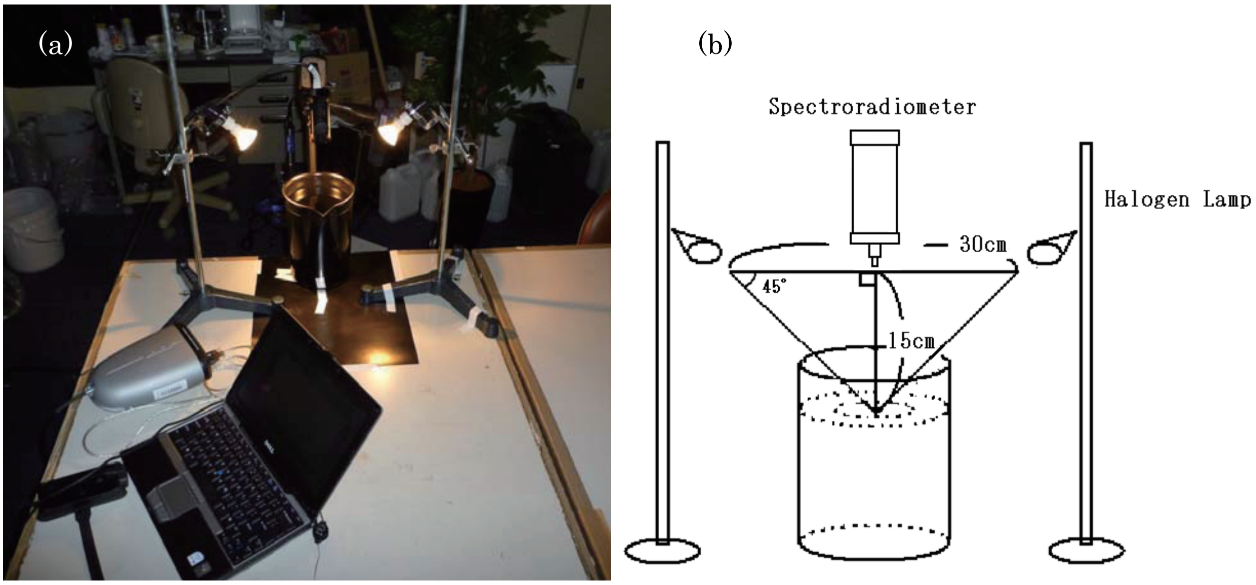

図 6.　室内分光実験の様子(a)と模式図(b)

３．２　分光反射率に表れる小浜湾の海水の季節変化

室内分光反射率計測はこれまで 2008 年 8 月、2009 年 3 月、4 月、6 月、8 月、10 月の 6 回行っている。海水は、小浜湾内から 12 ヶ所、湾外から 1 ヶ所（あるいは 2 ヶ所）で採取している。採水地点を図 4 に示すが、湾外からも採取しているのは湾内との比較のためと、湾外の採水地点でも養殖を行っているためである。

図 7(a)に 2009 年 8 月に採取した海水と純水の分光反射率を示す。横軸は波長(nm)、縦軸は反射率である。ここでは、人工のノイズを軽減するため、9 点の移動平均処理を行っている。また、分光反射率計測の結果について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 7 (a)のグラフから採水地点によって反射率が大きく異なることが読み取れる。これまで行った 6 回の分光反射率計測の結果、湾奥の採水地点③や⑨、河川の河口近くに位置している採水地点④と⑤で海水の分光反射率が高く、湾外の採水地点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採水地点⑥や⑦などで分光反射率が低い値を示す傾向にあることが確認できた。

次に、海水の分光反射率が季節によってどのように変化するのかについて解析を行った。図 7(b)は海水採取地点⑩での分光反射率の季節変化を表したグラフである。このままでは計測時の機器の特性ノイズが存在し、季節変化が読み取りにくいため、海水の分光反射率から純水の分光反射率を差し引く処理を行った。処理後のグラフを図 7(c)に示す。このなかで海水採取時に風が強く波が高い状況であり、泥が混じりやすい状態にあった 2009 年 8 月と 10 月（反射率の高い方から 2 番目と 3 番目のグラフ）を除外すると、春先に分光反射率が高く、夏に低くなることが明らかとなっ

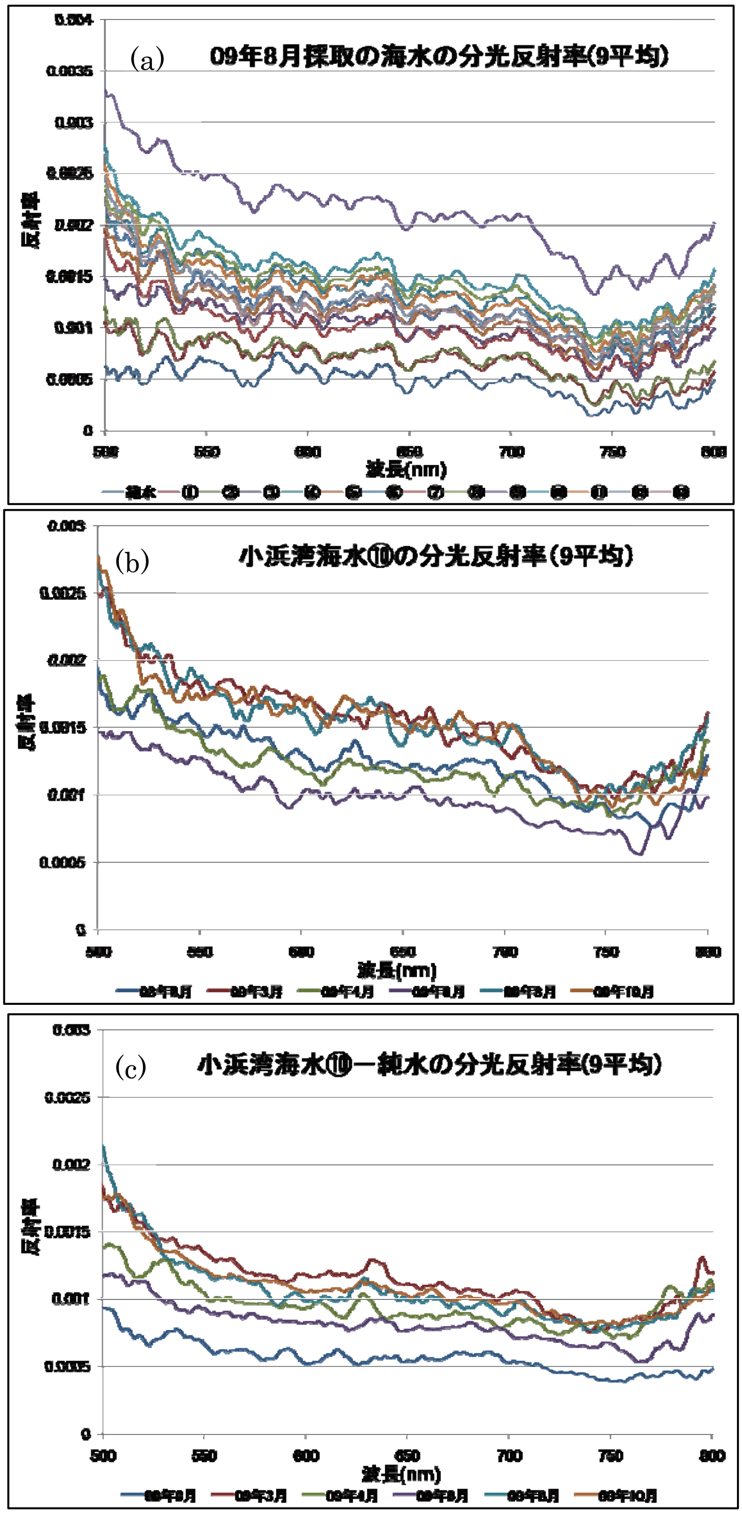

図 7　小浜湾の分光反射率　(a):2009 年 8 月の各海水採取地点での分光反射率　(b):採水地点⑩における分光反射率の季節変化　(c)：(b)から純水の分光反射率を差し引いたもの

た。これは、春先に海の表層と深層の温度差がなくなることで対流が起こりやすくなり、泥などが巻き上げられることによって起こると考えられる。

３．３　分光反射率計測によるChl-a成分の抽出と実測値との比較

海水の分光反射率は海水中の各成分の分光反射率の和でほぼ表されることが提案(1)、(2)、(3)されている。小浜湾の海水中に含まれる主要成分は泥などのSS成分と植物プランクトンであることが予想されるので、海水の分光反射率から小浜湾の泥の分光反射率を差し引くことで植物プランクトンの反射率成分を抽出することを試みた。

図8(a)は小浜湾で採取した泥を純水に混ぜた泥水の分光反射率から、機器の特性を取り除くために純水の分光反射率を差し引いたグラフである。泥の濃度は2mg/ ℓから20mg/ ℓまで変化させて計測を行った。この中から海水の分光反射率に近いものを選び、海水の分光反射率(青いグラフ)から差し引くときに、ある波長で反射率が0になるように定数倍した泥水の分光反射率が図 8(b)の赤いグラフである。また、海水の分光反射率(青いグラフ)から定数倍された泥水の分光反射率(赤いグラフ)を差し引いたものが図8(b)の緑のグラフである。この緑のグラフが海水から泥の成分を取り除いた植物プランクトンによる分光反射率成分であると考えられる。

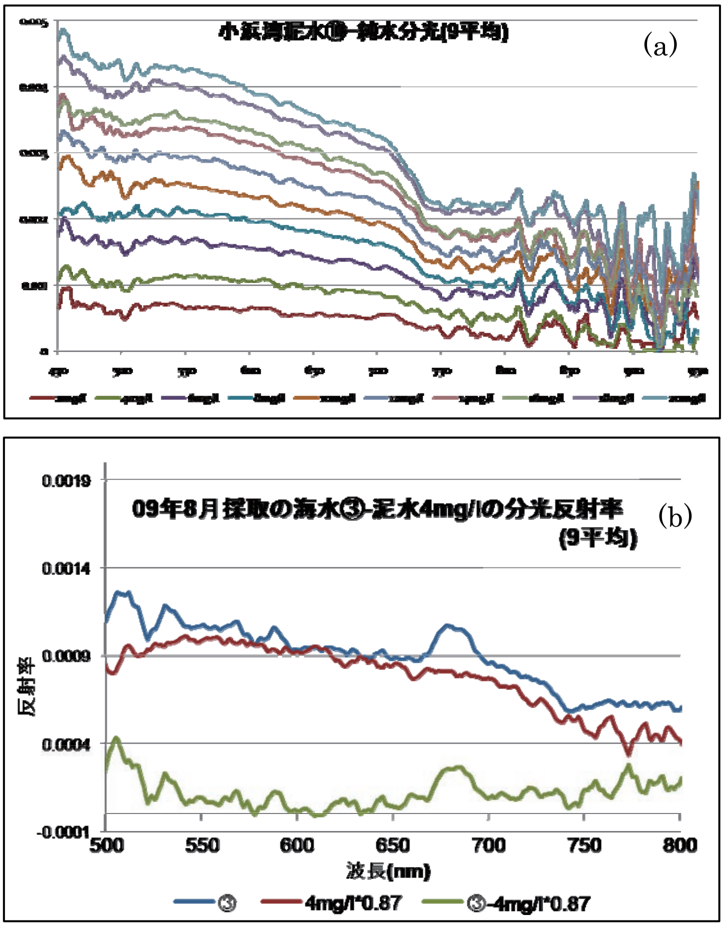

図 8 (a)：泥水の濃度別分光反射率から純水の分光反射率を差し引いたグラフ　(b)：海水の分光反射率から定数倍された泥水の分光反射率を差し引き Chl-a の反応を取りだしたグラフ

図9は産業総合研究所の尾山氏より提供を受けた、実験室で培養された植物プランクトンのChl-a濃度別の分光反射率である(4)。赤枠は特徴的なピークを示す波長帯(630-720nm)を示している。図8(b)の緑のグラフと図9を比較した場合、小浜湾の植物プランクトンによるChl-a成分である緑のグラフに、図9の赤枠で示す盛り上がりに対応するものが見られる。しかし、図 9 に顕著に現れるChl-aの特徴的なピークが図8(b)ではあまりはっきりしない。この理由は、小浜湾のChl-a濃度が10μg/ ℓ未満（図11参照）と非常に低い事を考慮すれば、妥当な結果であると言える。

図10は海水採取地点⑨について、海水採取日別に海水の分光反射率と泥水の分光反射率の差を表したグラフである。グラフ右上の数値は各時期の同日、同地点のChl-a濃度の実測値である。このグラフの中でChl-aの特徴的なピークを示す波長帯の630-720nmに注目すると、夏に最も高

く、夏の季節から離れるに従って反射率が低くなっており、Chl-a 濃度の実測値（図 10 右上の数値参照）と良い対応をしている事が読み取れる。

次に、分光反射率と Chl-a 濃度の実測値との相関を求めるために、Chl-a の実測を行っている 4 回の採水日（2009 年 4 月、6 月、8 月、10 月）の全ての採水地点の分光反射率について、波長が 630-720nm 間の値を平均した分光反射率平均値と Chl-a 濃度実測値の散布図を図 11 に示すとともに両者の相関を取った。結果は、相関係数 R=0.61 と比較的良い結果となった。特に全ての時期で他の地点より Chl-a 濃度値が高かった、湾の奥の地点③、⑨、⑩、⑪（赤い点で表示）のみの相関係数は R=0.85 となり非常に高い値を示した。一方、Chl-a 濃度値が低い地点①、⑤、⑦、⑬（青い点で表示）のみの相関係数は R=0.58 と低くなり、Chl-a 濃度の高い地点程相関が良い結果となった。これは、Chl-a 濃度の低い地点では分光反射率も低くなり、反射率計測時に混入するノイズ成分が、計測結果に相対的に大きく影響を与えることが考えられる。また、その他の地点（緑の点で表示）については河口付近であるため、川の影響が強く出る地点である。

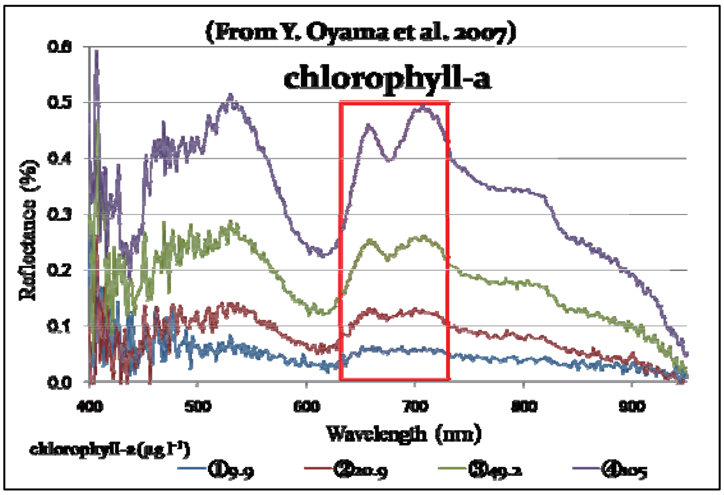

図 9　実験室で培養された植物プランクトンの Chl-a 濃度別の分光反射率

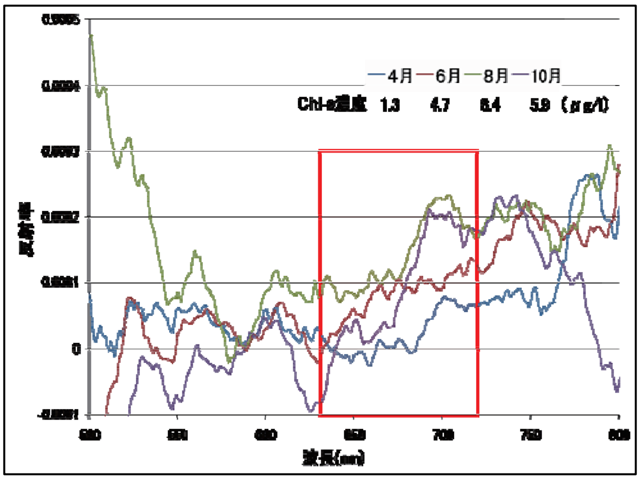

図 10　採水地点⑨における海水の分光反射率と泥水の分光反射率の差の季

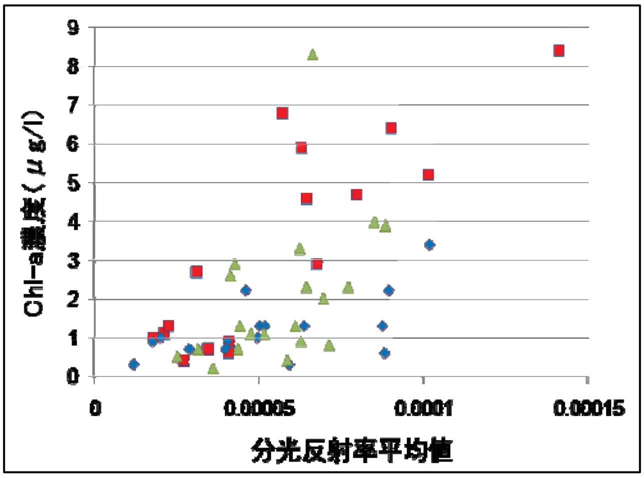

図 11　横軸：分光反射率平均値、　縦軸：Chl-a 濃度の実測値

4．衛星分光画像と Chl-a 濃度の比較

海水採取日と同じ日（2009 年 8 月 18 日）に撮影された人工衛星の分光画像を用いて、衛星画像から Chl-a 濃度を評価するアルゴリズムについて検討を行った。なお、用いた衛星画像は ALOS の AVNIR-2 センサのものでバンド数は 4、空間分解能は 10m である。

衛星画像のバンド間演算処理は海面での反射光の影響を出来る限り取り除くために、バンド間

の比演算を基本として、考えうる組み合わせを全て試みた。そして、バンド間演算を行った後の各採水地点での DN 値(各画素値)と、Chl-a 濃度の実測値との相関を求めた。バンド間演算には以下の式を用いた。

$$\frac{R_{Band\,i}}{R_{Band\,j}} \quad \cdots\cdots(1)$$

$$\frac{R_{Band\,i}-R_{Band\,j}}{R_{Band\,i}+R_{Band\,j}} \quad \cdots(2)$$

$$\frac{R_{Band\,i}}{R_{Band\,j}+R_{Band\,k}} \quad \cdots(3)$$

$$\frac{R_{Band\,i}+R_{Band\,j}}{R_{Band\,k}} \quad \cdots(4)$$

$$\frac{R_{Band\,i}}{R_{Band\,j}-R_{Band\,k}} \quad \cdots(5)$$

$$\frac{R_{Band\,i}-R_{Band\,j}}{R_{Band\,k}} \quad \cdots(6)$$

ALOS/AVNIR-2
*Band1 : 420～500nm
*Band2 : 520～600nm
*Band3 : 610～690nm
*Band4 : 760～890nm

ここに、$R_{Band\ i}$、$R_{Band\ j}$、$R_{Band\ k}$ は、ALOS/AVNIR-2 のBand1 からBand4 のDN値に対応している。i、j、k に入る数字（1～4）は重複ありで全てのパターンを検討した。

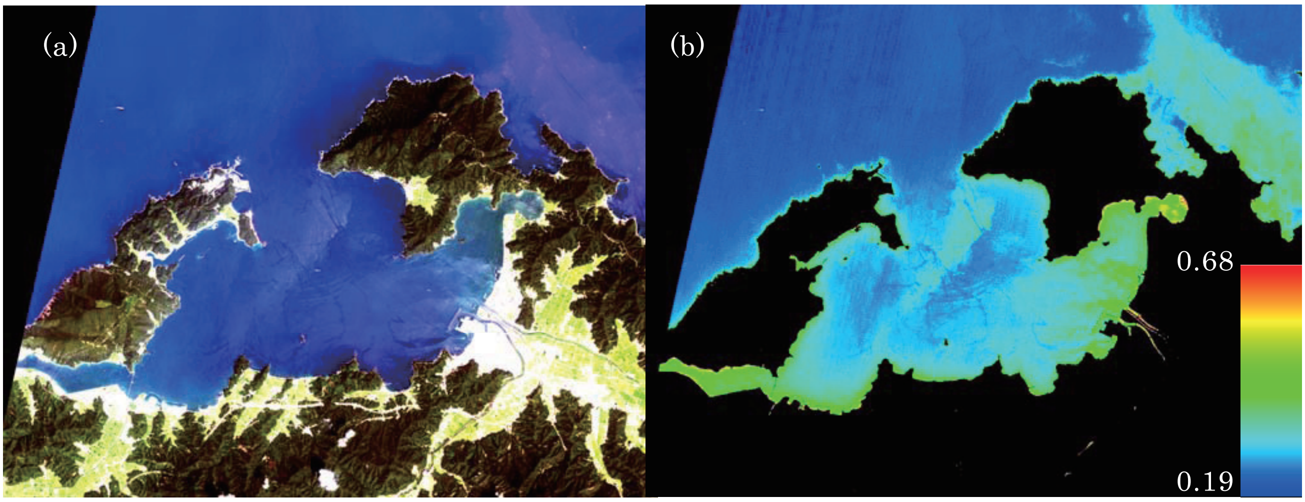

図 12　衛星分光画像による小浜湾　(a)：ALOS/AVNIR-2(2009/08/18)の True Color 画像、(b)：ALOS/AVNIR-2 の Band4/(Band1-Band2)のバンド間演算処理を行った画像

図 12(a)は ALOS/AVNIR-2 の True Color 画像で、図 12(b)は Band4/(Band1-Band2)のバンド間演算処理を行った画像である。陸域は黒色でマスク処理を行っている。

具体的には、バンド間演算を行った画像の海水採取地点付近から数値を読み取り、Chl-a 濃度実測値との相関を取る。この際、実際の読み取りポイントは海域と陸域が混ざり合ったミクセル状態となるため、多少沖合で数値を読み取っている。また、今回入手した ALOS/AVNIR-2 画像は図

12(a)からも解るように小浜湾東部で太陽光の鏡面反射を起こしているため、データの信頼性が低いと見なければならない。したがって、画像からの数値の読み取りは、採水点近くで出来るだけ鏡面反射の起きていない（DN 値が低い）ピクセルを選択した。各バンド間演算後の画像からの読み取り値と Chl-a 濃度実測値との相関が最も高くなった上位５つを表１に示す。

表１　バンド間演算処理後の読み取り値と Chl-a 濃度実測値との相関（相関係数の上位５つ）

バンド間演算式	相関係数
Band4/(Band1-Band2)	0.78562
(Band3+Band4)/Band1	0.78296
Band3/(Band1-Band2)	0.78195
Band1/(Band3+Band4)	-0.77253
Band3/(Band1-Band4)	0.76927

バンド間演算処理を行った画像において、海水採取地点での読み取り値（DN 値）と Chl-a 濃度の実測値との相関を取ったところ、最も相関が良かった演算処理は Band4/(Band1-Band2)であり、相関係数は R=0.78562 であった。

通常、Chl-a 濃度と良い相関を示すものとして、青色と緑色の比（Band1/Band2）や NDVI（(Band4-Band3) /(Band4+Band3)）等が知られており、Chl-a 抽出アルゴリズムとして利用される場合が多い。しかし、今回の結果は(Band1/Band2)が R=-0.68686 とかなり良い相関を示している一方で、NDVI は R=0.11352 であり、NDVI については全く相関がないと言って良い。このような結果となったのは、小浜湾の Chl-a 濃度が、富栄養化が進んだ湖沼などと比較して低いことに加えて、分光反射率に与える泥の成分の効果が大きい事を示していると考えている。また、用いた分光画像が一部の海面で太陽光の鏡面反射を起こしており、海水採取地点の数値が一部正しくなかった可能性があることや、採水と衛星の同時計測が今回用いた一日分のデータしか入手できなかったため、相関処理に用いるデータが少なかったことも要因の一つと考えられる。またこの結果は、低濃度 Chl-a 海域を対象とした Chl-a 抽出アルゴリズムとして、NDVI は全く不適切で、外洋での植物プランクトン濃度の検出に用いられる青色と緑色の比（Band1/Band2）の他に、表 1 に示すような、(Band1、Band2、Band4)、(Band1、Band3、Band4)、(Band1、Band2、Band3) 等のバンドの組み合わせを用いたアルゴリズムが有効である事を示しているかもしれない。

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（福井県衛生環境研究センター）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地点で、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。このデータを季節変化の観点から見ると、COD 等が夏に最も高くなり、有機物量が夏に高くなることが明らかになった。また、

我々が小浜湾から採取した海水を北陸環境科学研究所に依頼し、Chl-a 濃度の計量を行ったところ、こちらも夏に最も高くなり、植物プランクトンが夏に増殖することが、Chl-a 濃度の実測結果からも支持されている。

我々は衛星分光画像を用いて、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。本報告では小浜湾の水質の季節変化に関連した研究結果について述べた。2008 年 8 月より数回にわたって海水採取を行い、分光反射率計測を行った結果、海水の分光反射率は春先に最も高く、夏場に低くなる傾向が見られた。これは表面近くの海水温の季節変化による成層化の影響であると考えている。また、海水の分光反射率から泥水の分光反射率を引くことにより Chl-a の反射率成分を抽出し、その季節変化を解析した結果、夏に最も高い反射率を示すことが明らかになった。さらに、分光計測による Chl-a 濃度の特徴値（2つ山のスペクトルの平均的な高さ）と Chl-a 濃度の実測値との相関を見た場合、Chl-a 濃度が常に高い湾奥の地点では、Chl-a 濃度の低い観測点（相関係数 R=0.58）に較べて、相関係数が 0.85 と高い値を示した。これは、Chl-a 濃度が低く、分光反射率も低くなる清浄な海域では、分光計測を行う際に人工ノイズの影響を強く受ける可能性を示唆している。

また、衛星分光画像と Chl-a 濃度の実測値との比較では、通常 Chl-a 濃度の評価に用いられるアルゴリズムである(Band1/Band2)や NDVI よりも Band4/(Band1-Band2)や(Band3+Band4)/Band1 の方が高い相関（相関係数 0.78 以上）を示す結果となった。これは、Chl-a 濃度が低い水域では、Chl-a 濃度の評価指標として NDVI は不適切であり、新たなアルゴリズムの開発が必要であることを示している。

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） 松井佑介、青山隆司、衛星リモートセンシングを用いた小浜湾の水質計測、2009、福井工業大学研究紀要、第 39 号、pp.337-344

（2） 青山隆司、松井佑介、衛星リモートセンシングによる小浜湾の水質計測に向けて、2009、海洋理工学会平成 21 年度春季大会講演論文集、15A2、pp.53-56

（3） 松井佑介、青山隆司、衛星リモートセンシングによる小浜湾の水質計測-小浜湾の水質の季節変化-、2009、海洋理工学会平成 21 年度秋季大会講演論文集、A05.、pp.65-66

（4） 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 22 年 3 月 31 日受理）