

## 衛星分光画像を用いた北潟湖の全燐濃度の推定

青山 隆司\* ・ 松井 佑介\*\*

### Evaluation of Total Phosphorus Concentration in Lake Kitagata using Multi-Spectral Satellite Images

Takashi Aoyama and Yusuke Matsui

The purpose of this study is to develop a procedure for estimating the total phosphorus concentration of highly eutrophic lakes from multispectral satellite images. The test site is Lake Kitagata which is a brackish, eutrophic lake and has high chlorophyll-a concentration. The correlation coefficients between total phosphorus concentration and chlorophyll-a concentration (field survey data provided by Fukui Prefectural Institute of Public Health and Environmental Science) have been calculated to obtain the procedure for estimating total phosphorus concentration.

The preliminary results indicate that the correlation coefficients between them in the water area with high chlorophyll-a concentration, are very high. It is, therefore, possible to obtain the total phosphorus concentration from chlorophyll-a concentration which can be obtained using multi-spectral satellite images.

**Keywords:** chlorophyll-a concentration, total phosphorus concentration, spectral images, Lake Kitagata

#### 1. はじめに

北潟湖は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る。福井県（福井県衛生環境研究センター）でも過去30年以上にわたって、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、特に採水による直接計測以外に方法がなかった全燐濃度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目指した。

現在までに、人工衛星による分光画像観測および室内分光反射率計測実験を繰り返し行い、北潟湖のクロロフィルa（Chlorophyll-a、以後 Chl-a と略記）濃度の計測手法の開発を行ってきており、その計測アルゴリズムの決定に成功している<sup>(1)~(5)</sup>。本報告では衛星分光画像から求めた Chl-a 濃度を用いて、全燐濃度を推定する新たな手法を提案する。

---

\* 電気電子情報工学科

\*\* 電気工学専攻（博士課程）大学院生

## 2. 北潟湖の水質実態

北潟湖は福井工業大学あわらキャンパスに隣接する周囲 14km、全長 6km、平均水深 2.5m の湖で、その北端で日本海に繋がる汽水湖である（図1（2003年5月3日の IKONOS 衛星の True Color 画像）参照）。周辺には住宅も多く、水質改善に向けて下水道の整備や浚渫工事などが行われてきたが、富栄養化状態は現時点でも改善されていない。

### 2.1 水質基準

湖沼に対する水質基準は、生活環境に対しては表1に示すように4段階（AA～C）、窒素、磷に関しては表2に示すように5段階（I～V）で規定されており、北潟湖の場合はB、IVと指定されている。この基準はいずれも下から2番目であり、かなり緩い基準値であるが、pHを除いたほとんどの指標で基準値を満たしていないことが過去の我々の解析から明らかになっている。

表1 湖沼の水質基準（生活環境）

項目	基準値単位	AA	A	B	C
pH	—	6.0～8.5	6.0～8.5	6.0～8.5	6.5～8.5
COD	mg/L以下	1	3	5	8
SS	mg/L以下	1	5	15	ゴミなし
DO	mg/L以上	7.5	7.5	5	2
大腸菌群数	MPN/100ml以下	50	1,000	—	—
AA	水道1級、水産1級、自然環境保全及びA以下の項目				
A	水道2、3級、水産2級、水浴及びB以下の項目				
B	水産3級、工業用水1級、農業用水及びC以下の項目				
C	工業用水2級、環境保全				

表2 湖沼の水質基準（窒素、磷）

類型	湖沼の利用目的の適応性	全窒素	全リン
I	自然環境保全およびII以下の欄	0.1mg/L以下	0.005mg/L以下
II	水道1、2、3級（特殊なものを除く）、水産1級、水浴およびIII以下の欄	0.2mg/L以下	0.01mg/L以下
III	水道3級（特殊なもの）およびIV以下の欄	0.4mg/L以下	0.03mg/L以下
IV	水産2級およびVの欄に掲げるもの	0.6mg/L以下	0.05mg/L以下
V	農業用水、水産3級、工業用水および環境保全	1.0mg/L以下	0.1mg/L以下

### 2.2 全磷濃度と全窒素濃度の推移

湖水の富栄養化状態の重要な指標である全磷（TP）濃度と全窒素（TN）濃度の経年変化（1977年～2004年）を図2に示す。太い横線は水質基準値を示しており、全磷濃度に対しては 0.05mg/L、全窒素濃度に対しては 0.6mg/L 以下であることが求められている。福井県による9ヶ所の観測点での実測値を折れ線グラフで表している。この図から解るように、全ての観測点において水質基準を超える値を示しており、水質の改善は進んでいない。



図1 北潟湖の衛星画像(IKONOS)

赤丸は福井県による水質観測点

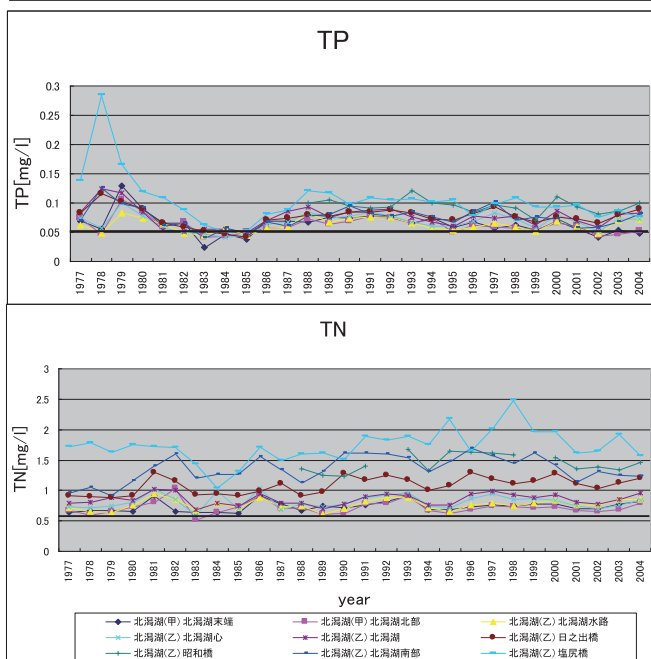


図2 全磷濃度と全窒素濃度の年変化

### 3. クロロフィル a 濃度と全磷濃度の計測法

#### 3.1 Chl-a 濃度の計測法

衛星リモートセンシングを用いて、海や湖などの水域における Chl-a 濃度を計測する手法については多くの研究が行われてきた。外洋の Chl-a 濃度の計測に関してはいくつかの成功例が報告されているが、懸濁物質の多い水域、例えば沿岸域や湖沼などでは一般的な計測手法は確立されていないのが現状である。我々も、若狭湾内の小湾である小浜湾および北潟湖に対して Chl-a 濃度抽出アルゴリズムの開発を行ってきた<sup>(1)～(5)</sup>。具体的には、暗画素法<sup>(6)</sup>により簡易大気補正を行った衛星分光画像 (ALOS/AVNIR-2) データについて、各 Band の採水地点付近での値を読み取り、その値を用いて以下に示す 6 種類の比演算および付加的な差演算について Band 間演算を行った。

$$, \quad \frac{R_{Band i}}{R_{Band j}}, \quad \frac{R_{Band i} - R_{Band j}}{R_{Band i} + R_{Band j}}, \quad \frac{R_{Band i}}{R_{Band j} + R_{Band k}},$$

$$\frac{R_{Band i} + R_{Band j}}{R_{Band k}}, \quad \frac{R_{Band i}}{R_{Band j} - R_{Band k}}, \quad \frac{R_{Band i} - R_{Band j}}{R_{Band k}}$$

および  $R_{Band i} - R_{Band j}$ 、(i, j: 1, 2, 3, および 4)。ここに、 $R_{Band i}$  は Band i の放射輝度を表わし、ALOS/AVNIR-2 の場合は、Band1, 2, 3, 4 はそれぞれ青、緑、赤、近赤外帯の波長に対応している。

そして、Band 間演算値を説明変数とした回帰分析を行い、採水地点での chl-a 濃度実測値と最も良い相関を示す組み合わせを求めた。なお、北潟湖の衛星データについては、太陽光の鏡面反射による影響が少ない 2006 年 9 月 25 日と 2009 年 2 月 15 日のデータを用い、Chl-a 濃度値は福井県衛生環境研究センターが隔月で Chl-a 濃度等の水質を測定して web 上に公開しているデータを使用した。北潟湖の場合、実測値と同日の衛星データが得られていないので、10 日間ほど前後する衛星データを用いて相関を取っている。解析結果を表 3 に示す。ただし、相関係数の高い上位 6 位までの Band 組み合わせ (アルゴリズム) のみを示している。この中で、(Band4/Band2) の演算式が最も良い相関を示し、相関係数は 0.95 であった。また、表 3 に示す全てのバンド組み合わせが Band4 (近赤外帯) を含んでおり、北潟湖のような Chl-a 濃度が高い水域では、近赤外 Band を用いた濃度抽出アルゴリズムが有効であることを示している。

表 3 ALOS/AVNIR-2 の Band 組み合わせと Chl-a 濃度実測値との相関係数 (上位 6 位まで)

Combination	R
Band4/Band2	0.950878
(Band4-Band2)/Band3	0.944418
(Band4-Band2)/(Band4+Band2)	0.941712
Band4/(Band2+Band3)	0.939824
(Band3+Band4)/Band2	0.928170
Band4/(Band1+Band2)	0.911487

ここでは詳細は省略するが、Chl-a 濃度が比較的低い小浜湾に対する同様の解析を行った結果、可視 Band (Band1,2,3) を用いる Band 組み合わせが高い相関係数を与えることが明らかになっており、Chl-a 濃度の違いにより抽出アルゴリズムを変更する必要があることを示している。

### 3.2 全磷濃度の計測法

富栄養化状態の重要な指標である全磷濃度を衛星リモートセンシングを用いて計測できれば、対象水域の富栄養化状態を把握する事ができる。衛星を用いる計測法はいくつかの波長帯での分光画像を用い、各水質成分が太陽光の分光反射率に与える効果を抽出する事により可能となる。前節で示した Chl-a 濃度の場合は、植物に含まれる葉緑素の反射・吸収特性を利用し、青色と緑色の反射率の比、あるいは近赤外帯における強い反射特性を用いて行われるのが一般的である。しかし、全磷濃度については特徴的な分光特性がないため、衛星分光画像を用いた直接的な全磷濃度の計測は困難である。そこで、衛星分光画像を用いて計測可能な Chl-a 濃度を用いて全磷濃度を間接的に求める手法を検討した。具体的には、Chl-a 濃度と全磷濃度の相関関係を調べた。

福井県の実測調査は通常年 6 回行われているが、観測地点、観測年によっては年 5 回以下の場合もあるため、1988 年から 2004 年までの間で年 6 回の実測が行われている観測点のデータのみを使用し、1 年間（6 回の計測値）の Chl-a 濃度と全磷濃度の相関係数（縦軸）を求め、その年の Chl-a 濃度 ( $\mu\text{g/L}$ ) の平均値（横軸）に対しプロットしたものを図 3 (a) に示す。さらに、北潟湖の

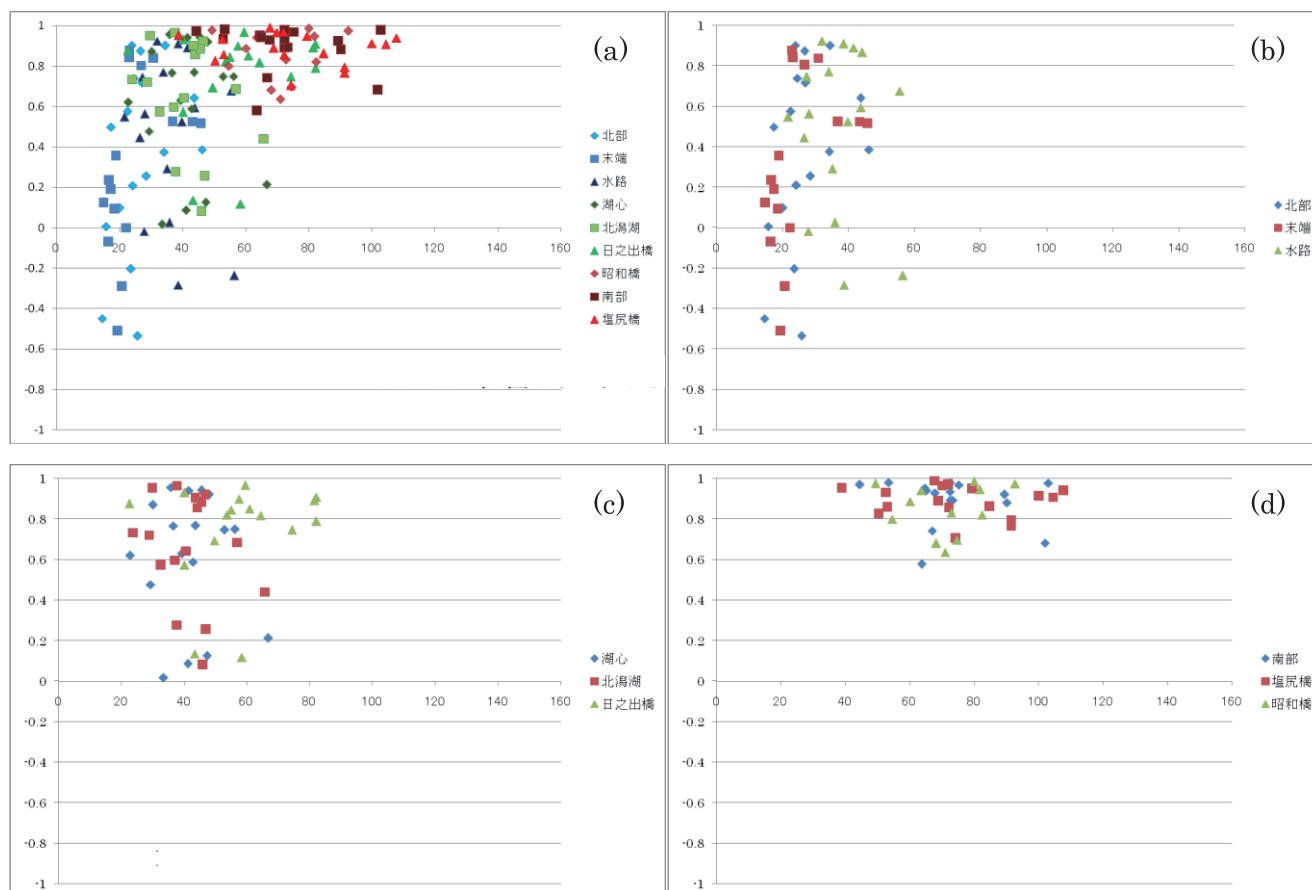


図 3 福井県の観測地点における年間の Chl-a 濃度 ( $\mu\text{g/L}$ ) の平均値（横軸）と Chl-a 濃度と全磷濃度の相関係数（縦軸）の関係。(a) 全 9 箇所の観測地点、(b) 北潟湖北東部 3 箇所の観測点（北部、末端、水路）、(c) 北潟湖中央部 3 箇所の観測点（湖心、北潟湖、日之出橋）、(d) 北潟湖南西部 3 箇所の観測点（南部、塩尻橋、昭和橋）



9箇所の観測点を湖の北東部（北部、末端、水路）、中央部（湖心、北潟湖、日之出橋）、南西部（南部、塩尻橋、昭和橋）に分けて図3(b)、(c)および(d)にそれぞれ示している。図3(a)の全観測点のデータでは、右上がりの分布が見られ、Chl-a濃度が高くなる程相関係数が大きくなる事を示している。観測点を3領域に分けた図3(b)、(c)、(d)については北東部(b)と中央部(c)では相関係数のバラつきが大きい、南西部(d)の観測点では平均的に見て相関係数が0.8以上と強い相関関係があることが解る。つまり、北潟湖の中で特に富栄養化が進んでいる南西部については、衛星分光画像から求めたChl-a濃度を用いて全磷濃度を推定できることを示している。このことは、今まで直接観測以外に計測手段がなかった全磷濃度に対して、衛星分光画像を用いて湖水の広範囲を面的に計測する可能性を初めて示したものである。

### 3.3 浚渫工事の影響

前節で示した統計結果（1988年から2004年）に新たに、2005年から2009年のデータを加え、同様な解析をした結果を図4に示す。図4と図3(a)を比較すると、相関係数が低い観測点（赤丸の部分）が南西部の塩尻橋および南部で現れている事が解る。この理由を明らかにするために、塩尻橋のChl-a濃度と全磷濃度の1988年から2009年までの全実測値を図5に示す。この図から、Chl-a濃度と全磷濃度は1998年から2006年頃までは非常に良い相関関係を保って変動しているが、2006年頃以降はその関係が崩れていることが解る。

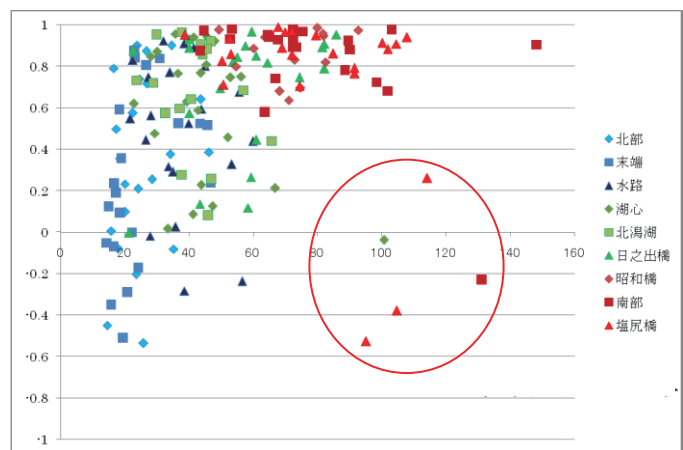


図4 全観測地点における年間のChl-a濃度の平均値（ $\mu\text{g/L}$ :横軸）とChl-a濃度と全磷濃度の相関係数（縦軸）の関係（1988年から2009年まで）

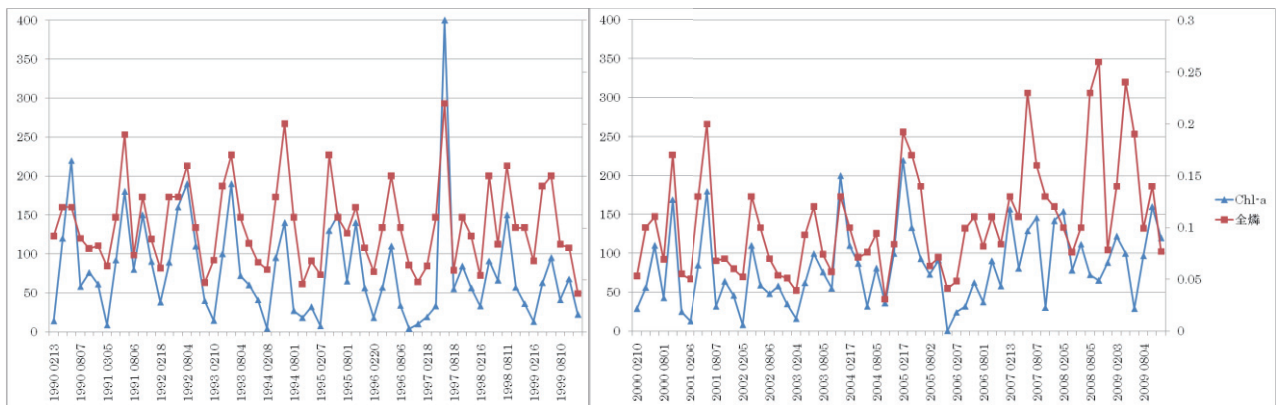


図5 塩尻橋におけるChl-a濃度（青線）と全磷濃度（赤線）の変動。左の縦軸がChl-a濃度（ $\mu\text{g/L}$ ）を表わし、右の縦軸が全磷濃度（ $\text{mg/L}$ ）を表わしている。横軸は観測年月日である。

この理由として、北潟湖南西部の水質改善のために行われた浚渫工事（湖底のヘドロを掬い取る工事）の影響が考えられる。図6に福井県が行った浚渫工事の計画表（地域と時期）を示す。塩尻橋から昭和橋にわたる広い範囲で、2004年秋から2009年にかけて浚渫工事が行われており、Chl-a濃度と全燐濃度の間の相関関係が崩れる時期とほぼ一致している。この事実、浚渫工事により湖水中のChl-a濃度と全燐濃度の相互関係が一時的に失われたことを意味しているのかもしれない。

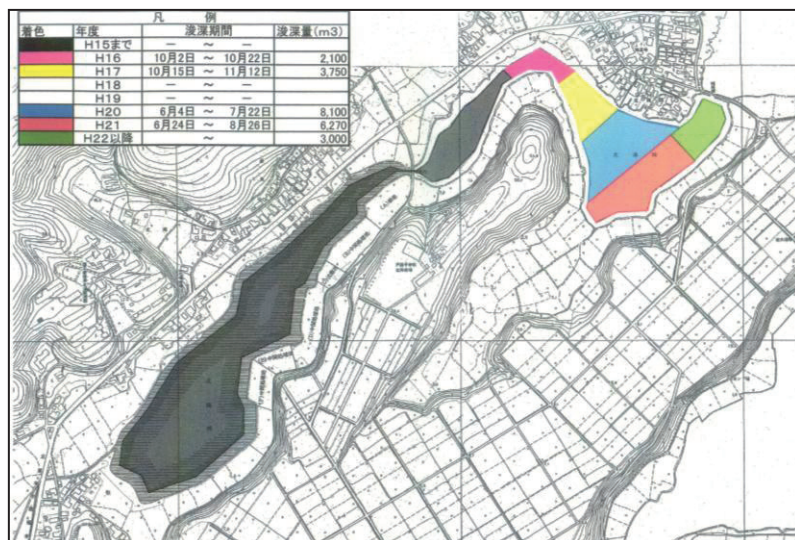


図6 北潟湖南西部の浚渫工事区域および実施時期

#### 4. 結論

北潟湖の富栄養化状態を把握するためには、全燐濃度の定期的な計測が必要であり、福井県は過去30年以上にわたり、年6回、9箇所の観測点において採水し、その濃度を計測している。この全燐濃度を人工衛星により計測することができれば、湖面全域に対し人手をかけることなく富栄養化状態をモニターできることになり、その意義は大きい。そこで我々は衛星分光画像を用いて全燐濃度を計測する手法の開発を目指し研究を行った。その結果、Chl-a濃度の高い湖の南西部については、衛星分光画像を用いて抽出可能なChl-a濃度と全燐濃度の強い相関関係を利用して、非常に高い確度で全燐濃度を推定することができることを示した。また、ここ数年間に行われた浚渫工事の期間は、その相関関係が崩れることも指摘したが、浚渫工事が終了し湖水の水質が安定すれば、Chl-a濃度と全燐濃度の相互関係は元に戻ることが予想される。

また、ここで提案した手法は、北潟湖以外の富栄養化が進んだ湖沼にも適用可能であると考えられるため、今後三方五湖や琵琶湖に対しても解析を進めてゆく予定である。

#### 謝辞

本研究は福井工業大学オープン・リサーチ・センター整備事業（平成17年度～21年度）、福井工業大学特別研究費（個人研究：平成19年度～20年度、共同研究：平成21年度～22年度、クラスター研究（戦略）：平成22年度）、科学研究費補助金（平成19年度～21年度、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。

また、湖水の分光実験や福井県の実測データの解析を手伝ってくれた大学院生（修士課程）の安部礼恵さんに感謝します。

## 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－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-1-9, Noumea, NewCaledonia, 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 8 月
- (4) 青山隆司、安部礼恵、松井佑介、「分光反射率計測による北潟湖の水質評価」、福井工業大学研究紀要、第 40 号、pp. 331－339、2010 年 6 月
- (5) Aoyama T., “Algorithm for estimating the chlorophyll-a concentrations in water areas with different qualities from satellite data”, Proc. SPIE Asia-Pacific Remote Sensing 2010, Vol. 7858, pp. 785819-1-8, Korea, Oct. 2010.
- (6) MacFarlane N. and Robinson I. S., “Atmospheric correction of LANDSAT MSS data for a multirate suspended sediment algorithm”, Int. J. Remote Sensing, Vol. 5, pp. 561-576, 1984.

(平成 23 年 3 月 31 日受理)