

# ALOS/AVNIR-2データを使った広島湾南部の クロロフィルa濃度分布推定の初期評価

## PRELIMINARY STUDY FOR THE ESTIMATION OF SURFACE CHLOROPHYLL-A CONCENTRATION IN THE SOUTHERN PART OF HIROSHIMA BAY USING ALOS/AVNIR-2 DATA

菅田一行<sup>1</sup>・作野裕司<sup>2</sup>

Kazuyuki SUGATA and Yuji SAKUNO

<sup>1</sup>学生会員 広島大学 大学院工学研究科 (〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1)<sup>2</sup>正会員 博(工) 広島大学助教 大学院工学研究科 (〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1)

The purpose of this research is to study the estimation of surface chlorophyll-a concentrations (Chl-a) using the ALOS/AVNIR-2 data. The southern part of Hiroshima Bay was chosen as a test site. The Chl-a estimation was tried using the AVNIR-2/in-situ Chl-a data set of two days. As a result, a strong negative correlation was observed in the relationship between the AVNIR-2 Band 1 and Chl-a. Moreover, to treat the data at different time with the same data range, the correction of the pointing angle is the most effective. The AVNIR is certified as an effective tool to the Chl-a estimation in the closed gulf such as Hiroshima Bay through this research.

**Key Words :** ALOS, AVNIR-2, Spectral reflectance, chlorophyll-a concentration, Hiroshima Bay

### 1. はじめに

近年、地球温暖化防止に関する議論の高まりの中で、二酸化炭素吸収源である植物の一次生産量推定研究が盛んに行われている<sup>1), 2)</sup>。海洋における一次生産者は植物プランクトンであり、特に沿岸の汽水域で高濃度分布をしている。その植物プランクトン量の把握のために衛星センサ (SeaWiFSやMODIS等) は、今や地球環境研究に欠かせない技術となっている。しかし、専用のクロロフィルセンサがある外洋のリモートセンシングに対して、陸と海の接点にある沿岸域の海色リモートセンシング研究は、極めて遅れているのが現状である。

このような観点から、筆者らは約10年以上、宍道湖・中海において、様々な高解像度衛星・航空機と同期した現地調査を伴うクロロフィル推定または一次生産量推定手法の研究を行ってきた<sup>3), 4)</sup>。しかし、異なる水域や観測時期により、クロロフィルa濃度 (以下、Chl-aと略す) 推定のためのモデルを変更しなければならず、衛星からのChl-a推定モデルの一般化は非常に難しいのが現状である。一方、宍道湖・中海よりも10分の1程度とChl-aが低い広島湾でも筆者らは主に海色センサMODISを使って同様の研究を行い、平常時では外洋のChl-a推定モデルがある程度適用可能であることを報告している<sup>5)</sup>。また、赤潮時のようなChl-aが高い時には外洋とは異なるChl-aアルゴリズムを使うことを提案している<sup>6)</sup>。し

かし、これらの解析も500m~1kmの解像度であるため、高解像度のChl-a分布推定ができない等の問題点があった。特に広島湾においては牡蠣筏周辺のChl-a分布や岩国沖や周防大島周辺の藻場地帯における透明度やChl-a分布に関する研究は重要であり、高解像度のChl-a分布図が必要とされる。このような高解像度のChl-a分布図作成には実測データのみが使われる場合が多いが、局所的なChl-aのパッチを見逃す可能性がある。従って、現実的には実測データと高解像度衛星データとは相互補間的に使用されるのが望ましいと考えられる。

一方、2006年1月には国産の衛星「ALOS (通称: だいち)」が打ち上げられ、2006年末から本格的にユーザーへ画像データが配布されている。ユーザー配布から約1年たった今日において、広島湾付近を撮影した高品質なALOS画像がすでに数シーン得られている。ALOSはLANDSATにはないポインティング機能 (カメラの首振り機能) があり、今後リクエスト次第では数日間の連続観測も可能となる。また、ASTERセンサにはない青色領域のバンドを有しており、ALOSに搭載されているAVNIR-2と呼ばれる高解像度 (10m) の可視・近赤外センサはLANDSAT/ETM (30m)、ASTER (15m) と比べて解像度が1.5倍又は3倍に上がっている。さらにLANDSATやASTERは設計寿命を大きく経過しているため稼働停止時期が迫っている。従ってALOSによるChl-a推定に関する研究は世界的にも重要度を増している。

以上のような背景から、本研究では、高解像度の新しい衛星センサALOS/AVNIR-2データを用いて広島湾におけるChl-a推定を行なうことにより、AVNIR-2センサを使ったChl-a推定上の問題点を明らかにするとともに、広島湾Chl-a分布特性の事例を示すことを目的としている。

## 2. 方法およびデータ

### (1) 研究地域およびクロロフィル分布特性

瀬戸内海の西部に位置している広島湾は、南北55km、東西約30kmの楕円形の湾で、海域の面積が約1000km<sup>2</sup>、容積が約27km<sup>3</sup>、平均水深25.6m、流入河川量5.94 km<sup>3</sup>の南側に開口部を持つ陸地に囲まれた海域である。このうち、本研究では図-1に示すような、広島湾中央部から南部にかけての比較的深い、濁度の低い海域を対象とする。

次に本研究に深く関連する広島湾のChl-a分布の特徴について述べる。広島県水産試験場の報告<sup>7)</sup>によると、同湾における最近の表層Chl-aの水平分布の特徴は、以下のように記述されている。すなわち、広島湾では、1年を通じてChl-aが高く、沖合の方向に向かって低くなっている。特に夏季には湾奥と沖合の差が大きくなり、冬季には小さくなる。図-2は広島湾中央部(図-1のSt.13地点)において広島県水産試験場(現、広島県水産海洋技術センター)が実施している浅海定線調査により測定された最近10年間(1996年~2005年)の「表層(水深0m)および底層(海底-1m)のChl-a平均値」の経月変化を示している。これより広島湾中央部のChl-aは表層(実線)で約1~3μg/lで推移しており、夏から秋にかけてChl-aが特に高くなっていることがわかる。また表層と底層(破線)の差が7-8月は1μg/l以上と激しいが、その他の月ではほぼ表層と表層の差が1μg/l以下であり、値の推移も概ね互いに連動していることがわかる。

### (2) 衛星による表層クロロフィル推定方法

一般に海の色は植物プランクトン量に大きく影響される。この性質を利用して衛星が観測した可視光線の分光特性を解析することにより、逆に植物プランクトン量を推定することが可能となる。植物プランクトン量が異なる様々な海域で、海中から上がってくる光の強度(分光放射輝度)を波長ごとに計測すると、図-3のような分光反射率が得られる。通常、植物プランクトン量はChl-aで表されることが多く、このChl-aが高くなると440nm付近の光を吸収するため反射率は低くなり、反対に500~600nm付近の光がプランクトン粒子に散乱され反射率は高くなる。このような理論から、人工衛星によるChl-a推定は、440nm付近の反射率のみから、または入射光量や水面反射光の影響を少なくするため440nmと550nm付近の反射率比(または輝度比)を取ることで可能となる。また衛星から求められる反射率とChl-aは両対数をとる

と線形の相関が得られることがよく知られている。このような関係をモデル式で書くと次式ようになる。

$$\text{Log}_{10}(\text{Chl-a}) = a \text{Log}_{10}[R_{(440\text{nm})}] + b \quad (1)$$

$$\text{Log}_{10}(\text{Chl-a}) = a' \text{Log}_{10}[R_{(440\text{nm})}/R_{(550\text{nm})}] + b' \quad (2)$$

ここで、Chl-aはクロロフィルa濃度、a,bおよびa', b'は定数、Rは水面直上の反射率である。ただし、本研究ではAVNIR-2によるChl-a推定の初期的な解析のため、最も単純である式(1)が成り立つと仮定して、議論を進める。

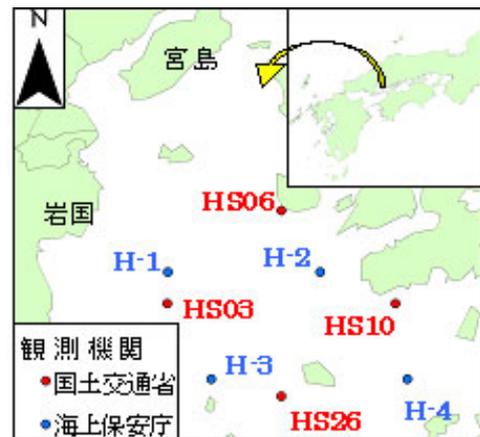


図-1 研究地域と実測点

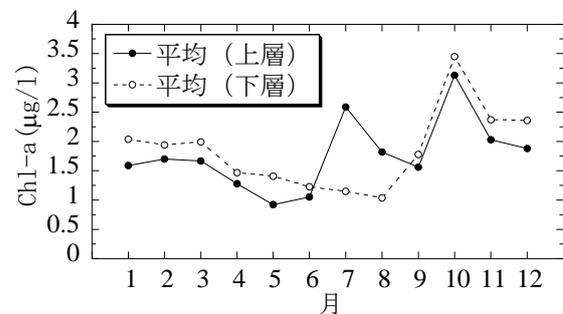


図-2 広島湾中央部の上層および下層におけるChl-aの経月変化。最近10年(1996年~2005年)の平均値を使用。

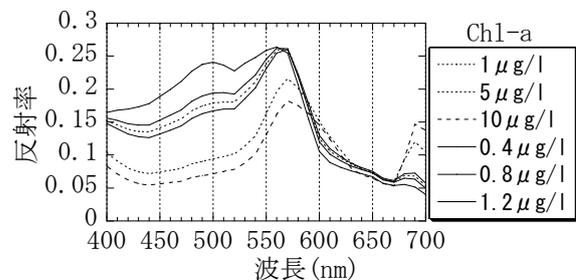


図-3 水中光学モデルから導出した異なるChl-aによる分光反射率特性<sup>8)</sup>。

(3) ALOS/AVNIR-2データおよび反射率変換

今回用いた衛星データは、2006年1月24日に宇宙航空研究開発機構（JAXA）によって打ち上げられたALOS(Advanced Land Observing Satellite)の初期データである。ALOSには、AVNIR-2(Advanced Visible and Near Infrared Radiometer type 2)と呼ばれる解像度10mの可視・近赤外4バンドからなるセンサが搭載されている。AVNIR-2センサの諸元を表-1に示す。

研究に使用したAVNIR-2データは、図-4に示す2006年10月30日11時34分（ポインティング角：41.5度）および2007年1月19日10時40分（ポインティング角：-34.3度）の2シーン（L1B2ジオレファレンス、GeoTIFFデータ）である。実際の解析には図4に示す可視カラー画像（B:Band1, G:Band2, R:Band3）のうちBand1のみの画像を使用した。この2画像は周囲に若干雲が映っているものの、これまでAVNIR-2が取得した広島湾画像の中で数少ない良品の画像である。

また、実測した分光反射率データと比較するため、ALOSデータから反射率を計算する必要がある。反射率計算は様々な方法が提案されているが、本研究では、比較的簡単に衛星水質推定の研究に古くから使われている以下の式(3)<sup>8)</sup>に従って反射率変換を行った。

$$R_{\lambda} = (\pi L_{\lambda} d^2) / (ESUN_{\lambda} \cos \theta_z) \quad (3)$$

ここで、 $R_{\lambda}$ は反射率（無次元値）、 $L_{\lambda}$ は衛星データから得られる放射輝度（ $W/m^2/sr/\mu m$ ）、 $d$ は太陽-地球間距離（天文単位）、 $ESUN_{\lambda}$ は大気圏外分光放射照度（ $W/m^2/\mu m$ ）、 $\theta_z$ は太陽天頂角（°）（ $90^{\circ}$ -太陽高度角）である。このうち、AVNIR-2データのデジタル値（DN）からの $L_{\lambda}$ 変換は、以下のような変換式とAVNIR-2データのヘッダーに書かれている表-2の変換係数に基づいて計算した。

$$L_{\lambda} = aDN + b \quad (4)$$

ここで、 $a$ 、 $b$ は放射輝度変換係数をそれぞれ表す。また、太陽天頂角は次式<sup>9)</sup>から求めた。

$$\cos \theta_z = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cosh \quad (5)$$

ここで、 $\phi$ は観測地の緯度（°）、 $\delta$ は赤緯（°）、 $h$ は時角（°）である。このうち、 $\phi$ は広島湾の中心緯度（ $34.1^{\circ}$ ）、 $\delta$ および $d$ はIqbal<sup>9)</sup>の推定式（年月日および時刻の関数）を、 $ESUN_{\lambda}$ は村上らの文献値<sup>10)</sup>（AVNIR-2の

波長応答によって重み付けした分光太陽照度）をそれぞれ用いた。以上のようにして求められたAVNIR-2データのESUNの値を表-3に示す。さらに、ポインティング角（AVNIR-2センサの観測角度、）による補正は式(3)にポインティング角 $\theta_z$ （2006年10月30日： $41.5^{\circ}$ 、2007年1月19日： $-34.3^{\circ}$ ）の余弦（cos）を乗じることにより導かれる。



(a) 2006年10月30日 (b) 2007年1月19日

図-4 使用したALOS/AVNIR-2の広島湾画像

表-1 AVNIR-2センサの諸元

バンド	Band1 : 420-500nm Band2 : 520-600nm Band3 : 610-690nm Band4 : 760-890nm
解像度	10m(直下)
観測幅	70km
量子化	8ビット

表-2 AVNIR-2の放射輝度変換係数

バンド	a	b
1	0.588	0.000
2	0.573	0.000
3	0.502	0.000
4	0.835	0.000

表-3 AVNIR-2の反射率変換パラメータ

バンド	ESUN ( $W/m^2/\mu m$ )	d	$\cos \theta_z$	$\delta$
1	1959	(10月)	(10月)	(10月)
2	1851	0.993	0.621	-13.9
3	1546	(1月)	(1月)	(1月)
4	1061	0.984	0.577	-20.3

#### (4) 現場Chl-aデータ

本研究で使用した現場Chl-aデータは、国土交通省および海上保安庁が定期的に観測している表層Chl-aデータを用いた。ただし今回、衛星通過日時データのデータは得られなかったため、衛星観測日の3日前（2006年10月27日）と1日前（2007年1月18日）の表層Chl-aデータ（それぞれ最も上層のデータである水面下1mおよび水面下2mの値）を用いた。衛星データと実測データ観測日の3日間は比較的気候が安定しており、また回帰分析を行なう測点の近くに大きな河川もないことから、今回の報告では各測点におけるChl-aはほぼ一定であると仮定した。

両データは広島湾において基本測点14点（国土交通省）、5点（海上保安庁）のデータがホームページ上<sup>11)</sup>、<sup>12)</sup>に収録されているが、このうち衛星データの観測範囲からずれている測点、雲がかかっている測点、および実測Chl-aが $2\mu\text{g/l}$ を超えるような広島湾北部の測点を除いた。その結果、実際に使用した現場Chl-aデータは、図-1中および表-4に示す4点×2日で計8点となった。また、両データのChl-aの測定水深が若干異なること、さらに使用機器の測定精度が不明であることから両者のデータを同一レベルで扱うことの危険性はあるが、今回は衛星／現場データセットが極めて少ないこと、また両現場データの極めて近い測点（H1とHS3）におけるChl-aデータがほぼ一致していることから、両者のデータを同一と仮定して解析を行った。

#### 4. 結果および考察

##### (1) 衛星画像に対する補正結果

図-5にAVNIR-2から導出したDN（衛星のデジタル値）とChl-aの関係を示す。2時期のデータは単一日では負の相関（10月は $R=0.71$ 、1月は $R=0.89$ ）があるものの、互いのデータレンジは大きく離れ、傾きも異なっている。このような違いは入射光量の絶対値や太陽天頂角、ポインティング角の違いにより生じると考えられる。図-6は式(3)に従って計算した反射率（入射光量の絶対値や太陽天頂角の補正） $R$ とChl-aの関係を示した図である。これより、入射光量の絶対値や太陽天頂角の補正で両者データセットのデータレンジは近づいたものの、やはり両データを同一レベルで比較することはかなり困難である。図-7は式(3)から導かれた反射率 $R$ をさらにポインティング角の余弦を乗じて角度補正した後の反射率（ $R'$ ）とChl-aの関係を示した図である。これより、両日のデータは同一線上にプロットされ、全体の相関係数およびRMS誤差も図-6の $R=0.16$ および $\text{RMSE}=0.35$ （Chl-a換算で $2.2\mu\text{g/l}$ ）から $R=0.92$ 、 $\text{RMSE}=0.13$ （Chl-a換算で $1.4\mu\text{g/l}$ ）と大きく向上した。また、有意水準 $\alpha=0.05$ 、自由度6においてt検定を行った結果、図6の場合は相関がなく、図7の場合は相関があると判断された。

表-4 Chl-a実測地点の位置

測点	緯度	経度	観測日	観測機関
HS03	34°04'32"	132°17'59"	06/10/27	国土交通省
HS06	34°08'52"	132°23'13"	06/10/24	
HS10	34°04'32"	132°28'27"	06/10/27	
HS26	34°00'12"	132°23'13"	06/10/27	
H-1	34°06'00"	132°18'00"	06/10/17	海上保安庁
H-2	34°06'00"	132°25'00"	06/10/17	
H-3	34°01'00"	132°20'00"	06/10/18	
H-4	34°01'00"	132°29'00"	06/10/18	

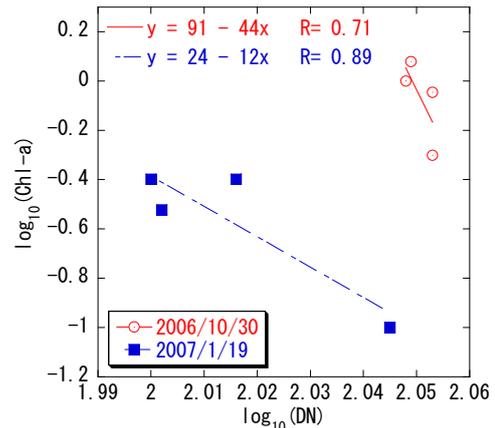


図-5 DNとChl-aの関係

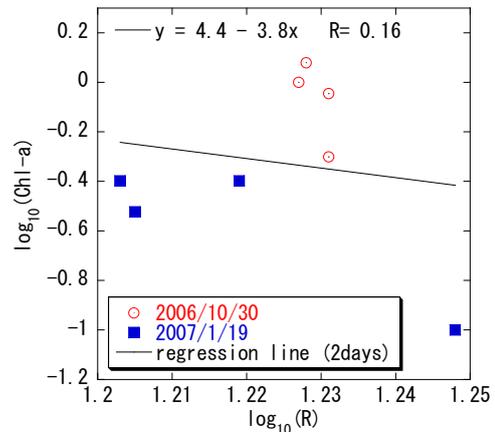


図-6 反射率（ポインティング角補正前） $R$ とChl-aの関係

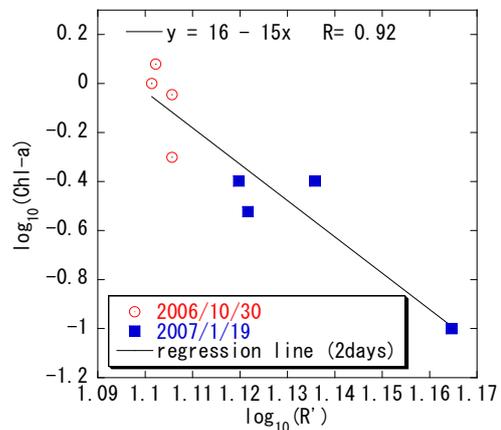


図-7 反射率（ポインティング角補正後） $R'$ とChl-aの関係

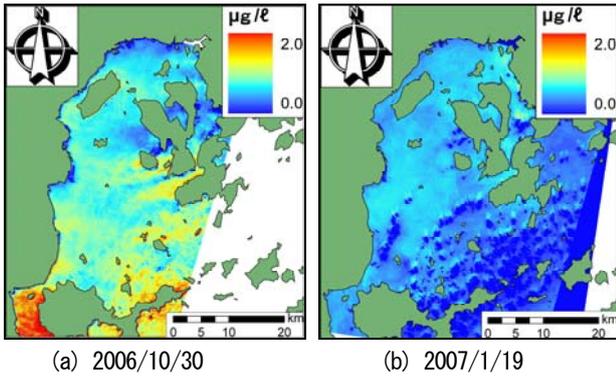


図-8 AVNIR-2から推定されたChl-a分布図

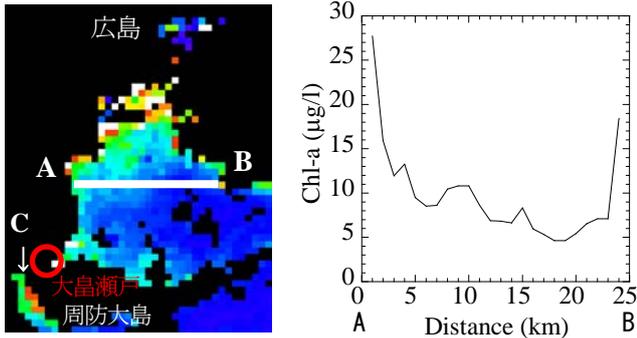


図-9 MODISから推定されたChl-a分布図(左)とA-Bの横断面図(右)。MODISデータは東京情報大学提供データ。

これらのことから、AVNIR-2によるChl-a推定の際には、Landsat等ポインティング機能をもたない衛星とは異なり、ポインティング角の補正が極めて重要であることがわかった。このようにして導かれたChl-a推定式を次式で表す。

$$\text{Log}_{10}(\text{Chl-a}) = -14.8 * \text{Log}_{10}[R_{(\text{AVNIR-2 Band 1})}] + 16.3 \quad (6)$$

ここで本来ならば、式(6)を別の衛星/現場データセットを用いてさらに妥当性の検証をすべきである。しかし今回はそのようなデータセットがないため、推定式のさらなる検証は今後の課題となった。ただし、一度式(6)が妥当な推定式だと検証できれば、今後ALOSデータが得られれば、同様の方法で現場データを用いることなく、広島湾の高解像度Chl-a分布を比較的簡単な方法で推定できることになる。

## (2) Chl-a推定式を用いた画像演算の結果

図-8は式(6)のChl-a推定式を使って推定した広島湾南部のChl-a分布図である。これより、10月と1月を比較した場合、明らかに1月の方が全体的にChl-aが低い様子が観察できる。しかしながら、今回は画像中に雲が多く、水平分布の評価は難しかった。当日の同湾南部におけるChl-a分布の参考データとして海色センサデータを示す。図-9は東京情報大学が配信している1km解像度 MODIS Chl-aデータ(衛星AQUAに搭載されたMODISデータを

NASAの標準Chl-a推定プロダクトで算出した値)から推定されたChl-a分布図(左)とA-Bの横断面図(右)である。図-9のMODISとAVNIR-2データは2006年10月30日のほぼ同時刻に観測されている(2007年1月19日の広島湾データは欠損していて使用できなかった)。これより、当日は広島湾南部で低く、北部ほど高い傾向にあることが分かる。ただし海色センサのChl-aの絶対値がAVNIR-2のChl-aと比べて10倍程度過大評価されることは過去の研究で明らかになっている<sup>14)</sup>。そこでA-Bの横断面における両者の濃度を相対的に比較した。その結果、今回のAVNIR-2によるChl-a推定ではむしろパッチ状にChl-aの高い分布が広がっており、MODIS Chl-a分布と必ずしも一致していないように見えた。これは、湾内に点在する薄雲やエアロゾル等の影響が考えられた。一方、画面下部に位置する周防大島の南西部(図-9のC地点)における高濃度Chl-a分布等はMODISとAVNIR-2のパターンとよく類似している。特に周防大島と本州の間の海峡部(大島瀬戸)では、AVNIR-2 Chl-aでは南北の濃度差(1 µg/l程度)や濃度分布境界を詳細に確認することができる。大島瀬戸は海底地形が複雑で、広島湾西部から南下する湾岸水が湾外に流出する入り口となっており<sup>15)</sup>水質変化が激しい水域であると予想されるが、なぜこのような濃度差が形成されたかは現時点では不明である。このような詳細なChl-a分布は官公庁による定期的な定点現地調査データやMODISのような海色センサでは得ることが難しいため、AVNIR-2による高解像度のChl-a分布は貴重なデータだと思われる。

## 5. まとめ

本研究はAVNIR-2センサを使ったChl-a推定上の問題点を明らかにするとともに、広島湾Chl-a分布特性の事例を示すことを目的とし、広島湾南部の水域をテストサイトにして2時期の衛星/現場Chl-aデータセットを用いてAVNIR-2を使ったChl-a推定を試みた。その結果、AVNIR-2のバンド1とChl-a(両対数)は、個々の日で見ると非常に高い負の相関があったが同じデータレンジで両者を扱うことはできなかった。異なる時期のデータと同じデータレンジで扱うためには、ポインティング角の補正が最も効果的であることがわかった。さらに今回提案したChl-a推定式を使って、AVNIR-2画像から広島湾のChl-a分布特性の推定を試みた。雲の影響などで、詳細な分布特性を把握することができなかったが、周防大島西部の海峡部における南北のChl-a濃度差(南部で高濃度)を詳細に確認することができた。

現在ALOS/AVNIR-2は順調に稼動しており、今後ますますデータが蓄積されることが予想される。よって今後は、衛星と同期した現場データを可能な限り多く収集するとともに、今回提案したChl-a推定式の妥当性または改良について研究していきたい。改良点としては主に今回の報告で問題となった大気補正が挙げられる。一般に外洋では清浄海域の水面における長波長域の放射輝度が

ほぼ0であるという仮定を利用した大気補正がなされる。これは初期の海色センサであるCZCSセンサから現在の海色センサまで一般的に使われている大気補正方法である。具体的には清浄海域の水面において、海色センサが観測した長波長バンドの数値からエアロゾル量を計算する。エアロゾル量は長波長と短波長で比例関係にあることが分かっているため、長波長バンドから計算されたエアロゾル量を用いて短波長のエアロゾル量を計算することが可能である。沿岸域において外洋と同様の仮定が必ずしも成立するとは限らないが、AVNIR-2データでも同様の方法を応用して効果的な大気補正が可能であると考えられる。今回の報告では、観測範囲が広島湾のような狭い沿岸域であり、エアロゾル量分布差が非常に小さく、大気は一様であると仮定したが、AVNIR-2のような陸域観測センサにおいて、観測放射輝度の約80~90%がエアロゾル量であるといわれていることから長期のモニタリングには大気補正は不可欠であると考えられる。現時点でエアロゾルによる影響をどこまで除去できるかの定量的数値目標の提示は難しいが、特に大気が水平的に不均一である場合、現在のChl-a量推定精度に対して2~3割程度の改善を目指して研究をすすめていく予定である。

そして、最終的には、広島湾においてAVNIR-2、海色センサ、現場データを総合的に利用した高解像度Chl-aモニタリングシステムを構築していきたい。

**謝辞**：本研究はALOS/AVNIR-2データは広島大学防災ネットワークの活動の一環として購入されたものである。関係各位に記して謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) Platt, T. and Sathyendranath, S., Oceanic primary production, Estimation by remote sensing at local and regional scales, Science, 241, pp.1613-1620, 1988.
- 2) Kasai, H., Saito, H., and Tsuda, A., Estimation of standing stock of chlorophyll a and primary production from remote-sensed ocean color in the Oyashio region, the Western Subarctic, during the Spring bloom in 1997, Journal of Oceanography, 54, pp.527-537, 1998.
- 3) 作野裕司, 松永恒雄, 中山大介, 六川修一, 高安克己, 國井秀伸, 中村幹雄, 山室真澄: SPOT/HRVデータによるアオコ発生時の宍道湖表層クロロフィルa濃度分布の推定, 日本リモートセンシング学会誌, 19(2), pp.20-36, 1999.
- 4) 作野裕司, 松永恒雄, 六川修一, 高安克己, 國井秀伸, 中村幹雄: 多時期SPOT HRVデータによる宍道湖表層の総一次生産量モニタリング, 日本リモートセンシング学会誌, 21(2), pp.141-149, 2001.
- 5) Sakuno, Y. and Yamaguchi, D.: Chlorophyll-a mapping using 500m resolution MODIS in Hiroshima Bay, Recent Advances in Marine Science and Technology 2004, pp.71-80, 2005.
- 6) 作野裕司, 山口大輔: 海色センサMODISを用いた広島湾の赤潮分布推定, 海岸工学論文集, 51, pp.956-960, 2004.
- 7) 広島県水産試験場: かき養殖体系再構築技術開発事業一平成10~12年度とりまとめ報告書, 平成13年12月, 28p, 2001.
- 8) Lathrop, R. G., T. M. Lillesand and B. S. Yandell (1991): Testing the utility of simple multi-date thematic mapper calibration algorithms for monitoring turbid inland waters, Int. J. Remote Sens., 12, 2045-2063.
- 9) Iqbal, M. (1983): An introduction to solar radiation, Academic Press, 390p.
- 10) 村上浩, 田殿武雄, 島田政信: 大気上端反射率の方向性関数を用いたAVNIR-2とMODISの輝度相互校正, 日本リモートセンシング学会誌, 27(4), pp.354-362, 2007.
- 11) 国土交通省: 瀬戸内海総合水質調査, <http://www.pa.cgr.mlit.go.jp/gicyo/suishitu/index.html>
- 12) 海上保安庁・第六管区海上保安本部海洋情報部: 瀬戸内海・宇和島沖の水質情報, <http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KAN6/suishitu/suishitumenu.htm>
- 13) 東京情報大学: 衛星海洋学のための日本近海のMODISデータセット, <http://www.frontier.tuis.ac.jp/modis/research/asanuma/indexMODIS.html>
- 14) 大西美奈, 石坂丞二, 笠原一世, 長田宏, 白山肇, 内山勇, 寺内元基: 海色衛星によって観測された富山湾における1998年と1999年のクロロフィルa濃度分布, 海の研究, 16(1), pp.7-22, 2007.
- 15) 上嶋英樹, 橋本英資, 山崎宗弘: 広島湾をモデルとした推理模型による水質汚濁予測実験について, 中国工業技術試験所報告, 15, pp.1-47, 1981.

(2007. 9. 30受付)