

ADEOS/AVNIR データによる 内湾クロロフィル濃度の推定

Chlorophyll-a concentration in the inland sea from ADEOS/AVNIR

保本正芳¹, 向井苑生², 佐野 到², 玉井元治²
¹近畿大学理工学総合研究所, ²近畿大学理工学部
〒577-8502 東大阪市小若江 3-4-1

Masayoshi Yasumoto¹, Sonoyo Mukai², Itaru Sano² and Motoharu Tamai²
¹*Research Institute for Science and Technology, Kinki University,*
²*Faculty of Science and Technology, Kinki University,*
3-4-1 Kowakae, Higashi-Osaka, 577-8502 Japan

(Received December 8, 2003)

Abstract

We intend to propose an effective procedure of monitoring the water quality in the inland sea from space. Retrieval of chlorophyll-a concentration, which is a typical indicator of the water environment, from the satellite data is called ocean color remote sensing. Ocean color sensors are designed to observe the ocean with rather coarse spatial resolution in general. Inland sea analysis demands the precise geographical information, and hence high resolution satellite images are required for our present study.

In practice, ADEOS/AVNIR data is examined to monitor the chlorophyll-a concentration in Ise bay and Kushiro port. Chlorophyll-a concentration is estimated from the ratio of water-leaving radiance at a wavelength of 0.560 μm to that at 0.460 μm after atmosphere correction on AVNIR data. Aerosol optical properties for atmospheric correction of AVNIR data are retrieved from near-infrared data of 0.670 and 0.865 μm given by ADEOS/OCTS and POLDER.

It is shown that AVNIR data are available to monitor the water quality in the inland sea.

Key words: water quality monitoring, chlorophyll-a, atmospheric correction, ADEOS/AVNIR, OCTS, POLDER

1. はじめに

温室効果ガスの増加による地球温暖化、
オゾン層破壊、酸性雨、産業活動に伴う海

洋汚染や大気汚染等、地球規模の環境破壊
が問題となって久しい。広範囲を継続して

効率良く測定する人工衛星によるリモートセンシングは、地球環境観測に不可欠な技術である。この特徴を生かし、衛星データはグローバルな環境問題に活用される事が多かった。しかし近年、リモートセンシング技術の進歩により、ローカルな問題への実利用が活発になっている。その一例として、ここでは高解像度センサ ADEOS/AVNIR データを用いた湾内水質監視の可能性を探る。

現在日本の沿岸水域は、富栄養化による水産生物の減少や透明度の低下などの環境問題を抱えている。これら水環境の悪化は、人類活動と密接な関係がある。例えば、1997年4月に諫早湾を閉め切った諫早湾干拓事業が、有明海の養殖のりや漁獲量の減少をもたらしたとする指摘もある^[1]。韓国では、同様な干拓事業による環境への影響が報告され、遂には事業そのものが見直されて排水門が開放されるという結果になった^[2]。今や、社会資本の整備は自然環境保護もしくは自然との共生が不可欠である。

1998年6月、北海道で初めて釧路港がエコポートモデル港に指定され、同時に「水生動物との協調型防波堤」として島防波堤がエコポートモデル事業に認定された。エコポートとは、開発と環境を次世代にわたって協調させていく「環境と共生する港湾」を意味する。エコポート計画の実施に当た

2. 沿岸水域整備事業

2.1 長良川河口堰事業

河口堰は、治水、利水などを目的として日本各地の河川に設置されている。伊勢湾北部に流入する長良川でも1995年5月より運用され、環境問題として注目を集めている。長良川河口堰事業モニタリング調査グ

ループは、河口堰が自然環境に与える影響を調査するため、長良川から揖斐川、伊勢湾沿岸域にかけて定期的な水質調査を実施している^[4]。

り、釧路港湾整備による環境への影響を検討するために、港湾区域およびその周辺において水質および生物調査が進められている^[3]。しかし、ポイント的な実地計測だけでは、時間的、空間的変動の激しい沿岸域の諸現象を捉えることは難しい。海の生産性を示す指標として、クロロフィル-a濃度がある。海洋食物連鎖の最も基本レベルに位置する植物プランクトン量を表す。一方、沿岸域や内湾では、工場や家庭排水による富栄養化が植物プランクトンの過剰をもたらし、時として赤潮といった水環境劣化の象徴ともなる。いずれにしても海洋クロロフィル-a濃度が適正値を保つことが水環境保全の目安といえる。本研究では、広域性・継続性という利点をもつ衛星観測を利用した水環境監視の可能性を、伊勢湾及び釧路港をケーススタディとして検討する。具体的には、1996年に打ち上げられた地球観測衛星 ADEOS (日本名:みどり) に搭載された高解像度センサ AVNIR データを用いて、伊勢湾及び釧路湾の海洋クロロフィル-a濃度を推定する。さらに、ADEOS 衛星に同時に搭載された OCTS センサや POLDER センサデータを用いて AVNIR データの大気補正処理を行い、より精度の高いクロロフィル-a濃度の推定を試みる。

図1に伊勢湾沿岸域調査点3ポイントの位置と、得られた海洋上層部のクロロフィル-a濃度 (Chl-a [$\mu\text{g}/\text{l}$]) を示す。図1(b)

は Chl-a 濃度の 3 点平均値の調査期間(1995 年 4 月から 2000 年 3 月)における月変化を表わす。Chl-a 濃度値が季節変化することが確認できる。即ち、4 月から 10 月の植物プランクトンの成育期に当たる夏季と、成長が抑制される 11 月から 3 月の冬季に分けられる。図 1(c)に、Chl-a 濃度値の 5, 7, 9, 11, 12 月の 1995 年から 2000 年にわたる年変化を示す。5, 7, 9 月の夏季は変動が大きく、11, 12 月の冬季の年変化は小さい。冬は植物の生育が抑えられ、年変動も殆どないことが分かる。

2.2 釧路港エコポートモデル事業

釧路港は 17 世紀中頃、松前藩の商船がアイヌとの交易のために釧路川に進水したのが始まりとされる。1899 年に開港、1951 年重要港湾に指定され、1999 年に開港 100 周年を迎えた。釧路市は、古くから、水産・石炭・紙パルプの 3 大基幹産業が盛んで、港もこれらの産業と共に発展してきた。また、釧路港の背後の経済圏には、我が国有数の酪農農業地域が控えており、これらの産業に関わる釧路港の総取扱貨物量は、年間約 2 千万トンを超える。貨物取扱量が増加するにつれ、沖待滞船時間は 3 万時間にもなり、港湾機能の整備が緊急の課題となっている。このような背景から、1996 年 12 月に 2008 年を目標年次とする港湾計画の改訂が承認された。1997 年度から、その調査・設計が始まり、1998 年 5 月には西港第 2 期工事が着工され、第 4 埠頭の造成が始まった。6 月には北海道で初めて釧路港西港区がエコポートモデル港に指定された。エコポートとは、開発と環境を次世代にわたって協調させていく「環境と共生する港湾」のことであり、1994 年 3 月、近年の水質環境悪化などの環境問題に対する関心の

高まりなどを背景に当時の運輸省が新たな港湾政策として策定したものである。このエコポートを早期に実現する観点から、全国の模範となる港湾において、港湾インフラの整備を総合的・先行的に行なうエコポートモデル事業が創設された。

釧路港がエコポートモデル港に指定されるとともに、島防波堤が「水生生物との協調型防波堤」として全国で初めて直轄によるエコポートモデル事業に認定され、以下の環境への取り組み事項が設定された^[5]。

- (1) 浚渫土砂の有効利用により、背後マウンドを形成する。
- (2) マウンドを有用な海藻類の藻場とする。
- (3) 魚介類の産卵礁、稚魚類の保護礁としての機能の創出。
- (4) 潮流に悪影響を与えない防波堤の形成。各地で沿岸海域の埋め立てや海砂の浚渫や磯焼けによる藻場の消失が環境問題として注目されている。例えば海草の 1 種アマモの 1m^2 当たりの酸素合成能力は熱帯雨林と同程度だと言われている。光を十分に受けた海藻藻場は高い生産性を誇っている。玉井等は^[6]、釧路港エコポートモデル事業において、人工的な藻場育成が可能な環境にやさしい栄養強化した多孔質ポーラスコンクリート (PoC) で新設防波堤のマウンドを実験施工することを提案した。図 2 に、従来型防波堤モデル(a)と島防波堤に採用されたモデル(b)の模式断面図を示す。モデルは、背後にマウンドを形成したことにより、ケーソン (Caisson: コンクリート製の箱) を、従来の物より 2 割程度縮小することが出来るので、非常に経済的でもある。

釧路港湾整備による環境への影響を評価するため、環境調査が始まった。一般対象として、陸域調査と海域調査を 2000 年 11 月 2 日に実施した。海域調査の中に水質調査と海域生態調査がある。水深に応じて上

層・中層・下層の3層に分けて測定している^[3]。図3に調査点13ポイントの位置(a)と測定された海洋上層部のChl-a濃度値(b)を示す。

次節で、これらのシーツルース・データと衛星データから導出したクロロフィル-a濃度値を比較検討する。

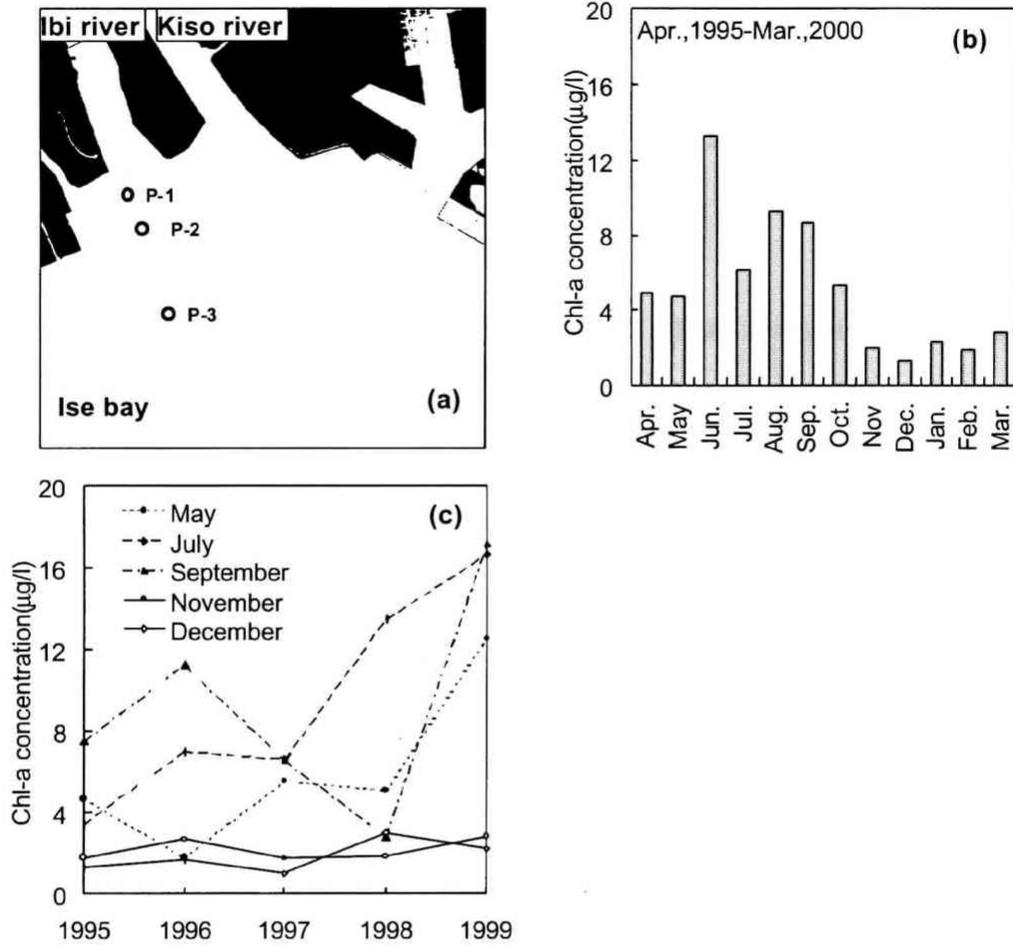


Figure 1: Survey points for water quality in Ise bay (a), and monthly and annual change of the measurements of chlorophyll-a concentration near the sea surface, (b) and (c), respectively.

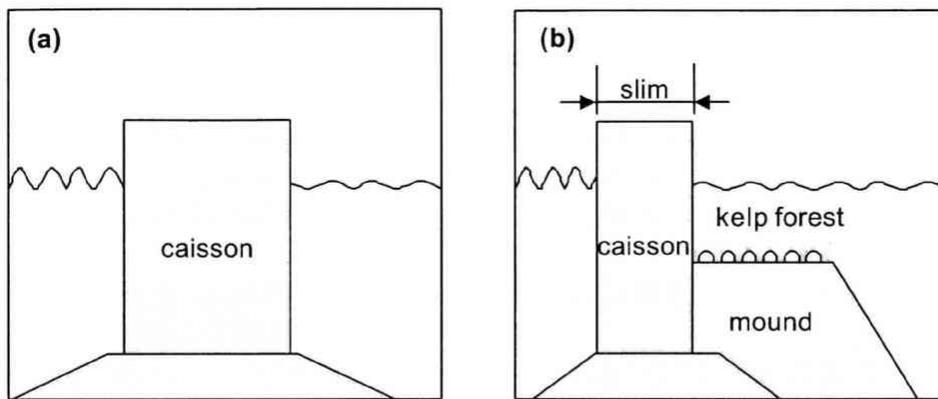


Figure 2: An illustration of bank model. (a) conventional type, (b) 'ECO-PORT' type.

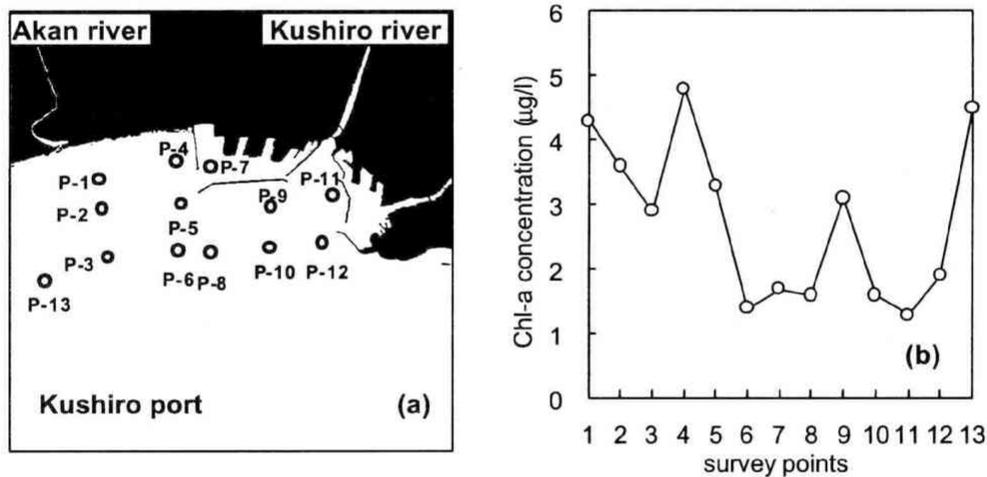


Figure 3: Survey points for water quality in Kushiro Port (a), and the measurements of chlorophyll-a concentration near the sea surface at each survey point (b) on 2 November, 2000.

3. 沿岸域海色リモートセンシング

3.1 海色センサ

衛星データを使用した水質リモートセンシングの代表的な例として、NOAA 衛星シリーズによる水温モニタリングや、NIMBUS-7/CZCS, ADEOS/OCTS, SeaSTAR/SeaWiFS などによる海洋クロロフィル濃度分布図の作成が挙げられる。後者は水温に

対し水色（あるいは海色）リモートセンシングと呼ばれ、計測器は水色（海色）センサと呼ばれる。一般に海洋は陸域に比べ、局所的な変化が少ないため海洋探査センサの空間分解能（解像度）は低い。例えば、1996年8月に打ち上げられ、電気系統の故障により8ヶ月の寿命であった NASDA/ADEOS 衛星搭載の海色センサ

OCTSの空間分解能は700mである。一年後の1997年8月に、NASAから打ち上げられた海色センサ SeaWiFSの分解能は1.1kmである。SeaWiFSセンサは、現在も稼動中で海色データを継続的に取得している。通常、海色センサは波長分解能が高く詳細なスペクトル情報をもたらす反面、空間分解能が粗いため広域（グローバル）水質モニタリングに適している。

一方、空間分解能の高い（高解像度）センサは、全球レベルでの広域モニタリングよりはむしろ、地域/局所（ローカル）スケールでの高精度観測監視に向く。すでに、アメリカNASAの地球観測衛星LANDSATに搭載された高解像度センサTMデータを用いたChl-a濃度推定アルゴリズムが報告されている^[7]。LANDSAT/TMは、名前通り陸域探査を目的としており、海色センサに比べて観測波長バンド数は少ないが、空間分解能は30mと高く細かい位置情報が得られる。詳細な空間情報を必要とする日本各地の内湾や湖沼でも、LANDSAT/TM^[1, 8, 9]やSPOT/HRV^[10]データを用いた水質モニタリングが実施されている。

ADEOS衛星には、コアセンサとしてOCTSの他に高解像度を持つAVNIRセンサが搭載されている^[11]。AVNIRは、空間分解能16mのマルチスペクトル4バンドと、分解能8mのパンクロ1バンドを持っており、地形変化の激しい陸域、沿岸域等の観測に適している。本研究では、LANDSAT/TM用に提案された海洋表層クロロフィル-a濃度推定アルゴリズムを、さらに空間分解能の高いADEOS/AVNIRセンサデータに適用して、伊勢湾及び釧路港におけるクロロフィル-a濃度推定の可能性を探る。

3.2 AVNIRから観る内湾域クロロフィル濃度分布

AVNIRの観測バンドの中心波長は、バンド1が0.460 μ m、バンド2が0.560 μ m、バンド3が0.650 μ mおよびバンド4が0.825 μ mである^[11]。クロロフィルは波長0.5 μ m以下の短波長や[0.6 μ m, 0.7 μ m]域で強い吸収を示すため陸域植生の識別には近赤外波長データが用いられる。しかし、波長が長くなると水の吸収が大きくなるため近赤外衛星データから海洋クロロフィル情報を抽出するのは難しい。このため水色リモートセンシングでは、可視波長域においてクロロフィルが比較的高い反射率を示す[0.5 μ m, 0.6 μ m]波長域を海洋クロロフィル検知バンドとしている^[12]。AVNIRデータでは、バンド1がクロロフィル吸収バンドに、バンド2がクロロフィル検知バンドに対応する。従って、両バンドで観測された衛星データの（バンド2のバンド1に対する）比はクロロフィル濃度に比例すると考え、提案されたのが次式である^[1, 2]。

$$C(\text{chl-a}) = \frac{A\{U_{AV}(0.56)\}}{A\{U_{AV}(0.46)\}} + B, \quad (1)$$

ここで、C(Chl-a)はクロロフィル-a濃度(μ g/l)を、 $U_{AV}(0.46)$ 、 $U_{AV}(0.56)$ はAVNIRバンド1及びバンド2の取得データを表す。ここでは係数A、Bは回帰分析結果から決定される定数とする。

ここでは、まず、伊勢湾沿岸域でADEOS運用期間中（1996年11月～1997年6月）の1997年2月4日に測定された水質データと1997年2月3日に観測されたADEOS/AVNIRデータを比較する。図4(a)の横軸(x)が1997年2月3日のAVNIRデータのバンド2/バンド1の比で、縦軸(y)が

1997年2月4日のChl-a濃度値である。図は正の相関（相関係数 $\gamma=0.92$ ）を示し、データ数は少ないが得られた回帰式は対象水域のクロロフィル濃度値を表しているともみなす。

一方、釧路港の水質調査は、ADEOS運用期間中には実施されていない。図1(c)の伊勢湾沿岸域データから、冬期のChl-a濃度値の年変化が非常に小さいことが分かっている。釧路港は伊勢湾より北に位置しており、11月の水温は更に低く、釧路の海は冬であることに間違いはない。従って、11月の釧路港におけるChl-a濃度値の年変化は小さいとみなし、水質データは2000年11月2日のものを使用し、AVNIRデータは釧路港上空が晴れて、水質データとは4年ずれているが季節的に類似した1996年11月14日のデータを使用する。ADEOS衛星飛行時期と地上観測日が同期していないため

4年のずれがあるが、本稿は衛星データから内湾クロロフィル-a濃度のモニタリングが可能かどうか検討することを目的とするケーススタディとして釧路港を取り上げる。図4(b)は1996年11月14日のAVNIRデータのバンド2/バンド1の比と2000年11月2日のChl-a濃度値である。図より、相関にバラツキは見られるが全体として強い正の相関（相関係数0.89）を示している。これより、2000年11月2日の実測データを「実測近似データ」として使用した。

図4の回帰式を用いてAVNIRデータから得られた伊勢湾及び釧路港でのChl-a濃度分布を図5に示す。黒で示しているのは陸域と雲領域である。伊勢湾では、揖斐川からの富栄養物質の流入や揖斐川河口域と伊勢湾内の水環境の違いが見られる。釧路港においても、湾内部ほど高いChl-a濃度値を示している。

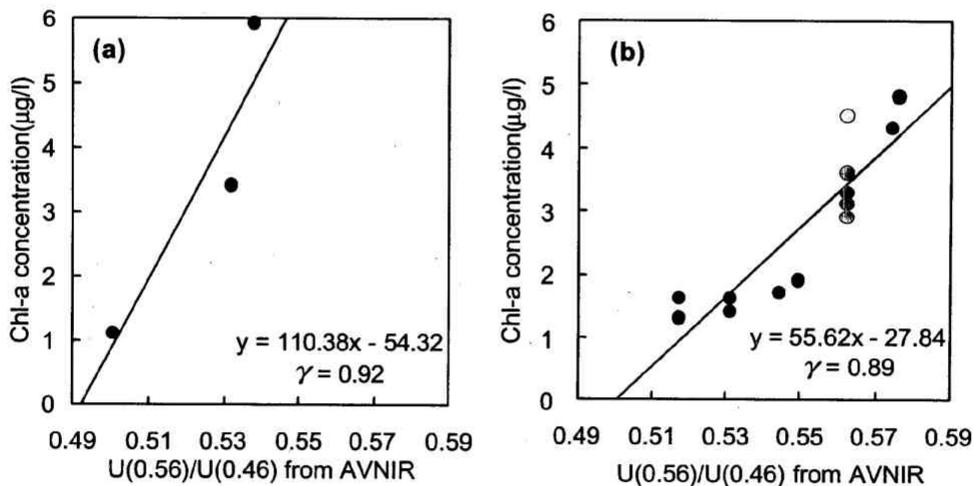


Figure 4: Correlation between the observed chlorophyll-a concentration on 3 February in 1997 and the ratio of $U(0.56)/U(0.46)$ from AVNIR on 4 February in 1997 in Ise bay (a), and the same as (a) but for the measurements on 2 November in 2000 and AVNIR data on 14 November in 1996 in Kushiro port (b).

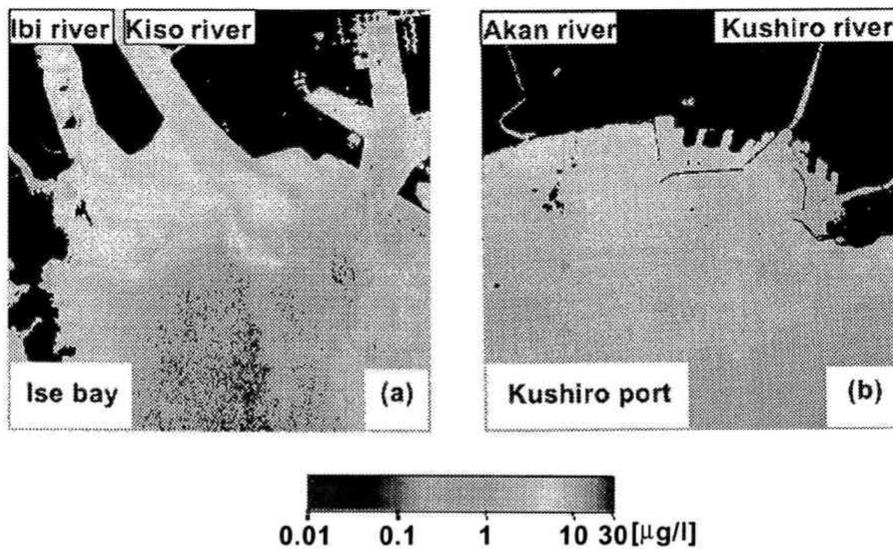


Figure 5: Distribution of chlorophyll-a concentration near the sea surface by using AVNIR data observed on 4 February, 1997 in Ise bay (a), and on 14 November, 1996 in Kushiro port (b).

4. 大気効果補正

前節で使用した AVNIR データには地球大気中の分子やエアロゾルによる多重散乱光が含まれている。一般に可視波長で得られる海洋衛星データの殆どは大気（散乱）光で占められ、海からの寄与（海中光）は 1, 2 割に過ぎないと言われている^[12]。衛星データから大気光を除く処理は大気（効果）補正と呼ばれ、海色リモートセンシングでは避けられない処理過程である。もちろん前節の手法では、バンド比を用いているので、これら 2 バンド間で大気光の寄与が大きく変わらないとみなせる場合には、大気効果の影響はそれ程大きくはないだろう。本節では 2 波長（ $0.460\mu\text{m}$ と $0.560\mu\text{m}$ ）において、地球大気—海洋放射モデルを作成し多重散乱光計算を実施して大気補正処理を行い、得られる海洋クロロフィル濃度画像を前節の結果と比較する。

大気補正処理で最も問題になるのは、季

節や場所によって、特性を大きく変える大気エアロゾルの同定である。AVNIR センサはエアロゾル推定に適した観測バンドを持っていないが、ADEOS は総合観測衛星で 8 つの特徴的なセンサを搭載した。その中に、既に紹介した海色センサ OCTS や POLDER がある。両センサは、大気エアロゾル特性推定に適した近赤外波長に、観測バンドを持っている。近赤外 2 波長データを用いた大気エアロゾル推定（リトリーブ）アルゴリズムは既に報告している^[13, 14] 詳細は割愛する。以下に、OCTS/POLDER データとの複合利用による AVNIR データの大気補正処理のおおまかな手順を紹介する（図 6 参照）。

- (1) OCTS/POLDER レベル 1 データから、近赤外 2 波長 $0.670\mu\text{m}(U_{OC}(0.67))$ と $0.865\mu\text{m}(U_{OC}(0.86))$ において、伊勢湾及び釧路港を含む画像を切り出す、

- (2) 近赤外 2 波長 (0.670 μm と 0.865 μm) において、光学的厚さ、サイズ、屈折率をパラメタとするエアロゾル・モデルを含む大気-海洋放射システムを作成し、太陽入射光の多重散乱計算を実施する。大気分子に関するパラメタは大気標準コード LOWTRAN 7 を参照する^[15]。算出された大気上面上向き光輝度値を衛星観測値のシミュレーション値として、ルックアップテーブルに格納する、
- (3) OCTS/POLDER 各画素毎に、角度情報 (衛星と太陽それぞれの天頂角と方位角) をもとに、衛星データとルックアップテーブル内のシミュレーション値を 2 波長アルゴリズムに従って比較参照し、最適なエアロゾル・モデルを選定する、
- (4) 波長 0.460 μm と 0.560 μm において、最適エアロゾル・モデル (AERO) を含む大気-海洋システムに対し、手順 2 と同様な多重散乱光シミュレーションを実施する。計算から求めた大気上面上向き光輝度値の 2 波長比 ($U(0.56)/U(0.46)$) と伊勢湾及び釧路港上空 AVNIR データの 2 波長比 ($U_{AV}(0.56)/U_{AV}(0.46)$) を比較参照しながら AVNIR 画像各画素毎に最適な海モデル (アルベド A) を決める、
- (5) AVNIR 各画素において選定された最適な大気-海洋モデルでのシミュレーション値の中、海面上向き光輝度値と大気上面上向き光輝度値の比 (R) を大気補正係数としてルックアップテーブル LUT(R) に格納する、
- (6) AVNIR 各画素のデータ $U_{AV}(0.56)$ と $U_{AV}(0.46)$ それぞれに LUT(R) の大気補正係数 $R(0.56)$ と $R(0.46)$ をかけ、大気補正処理された海面上向き光輝度値

($U_{WL}(0.56)$, $U_{WL}(0.46)$) を求める。

POLDER, OCTS, AVNIR では解像度が異なるので AVNIR 画像 1 画素毎に異なるエアロゾル・モデルが求まるわけではない。OCTS の解像度に準じた大気モデルが選定される。エアロゾル・モデルは、POLDER と OCTS 両センサデータの結果が矛盾しないよう留意している。しかし、内湾の複雑な地形に対応した水質監視を目的としているので、海モデルは解像度の高い AVNIR 画像の 1 画素毎に選定する。即ち、大気は OCTS の解像度に準じ、海は AVNIR の解像度に準じた大気補正処理を実施している事になる。実際に AVNIR 画像に大気補正処理を施すには、大気光の放射強度が角度の関数であるため、画素毎のセンサの走査角度情報が必要である。しかし、NASDA から提供される AVNIR データには角度情報が与えられておらず、また OCTS センサとは走査角度が異なる。ここで ADEOS 衛星に搭載されたもう一つのセンサ POLDER を参照する。POLDER は一点を多方向から観測するという利点を持っている。AVNIR センサの走査角に相当する POLDER 角度データを転用する。即ち、ADEOS 衛星に同時搭載された AVNIR, OCTS, POLDER という 3 つのセンサを複合利用することになる。

図 7 はこうして得られた大気補正後の ADEOS/AVNIR 海面上向き光輝度値 (海中光) の 2 波長比 (x 軸) と伊勢湾(a)及び釧路港(b)で得られたクロロフィル-a 濃度 ($\mu\text{g/l}$) (y 軸) の回帰分析図である。大気補正前の AVNIR データを用いた同様な図 4 に比べ、相関係数が高くなっているのがわかる。釧路港の相関度が伊勢湾に比べ若干低いのは、衛星データとシーツルース・データの 4 年のずれが一因とも考えられる。

図 7 の回帰式を用いて、1997 年 2 月 3 日の伊勢湾上空並びに 1996 年 11 月 14 日の釧

路港上空で得られた大気補正済みのAVNIRデータから導出された海洋表層クロロフィル-a濃度分布推定画像を図8に載せる。大気補正処理を厳密に評価するには、陸域の影響を含む複雑な地形の考慮や川からの流入物の評価等、シミュレーションと測定値の両面からより詳細な準備と議論が必要である。現在、内湾・沿岸域水域のエアロゾル・リトリーバル、大気補正、海色解析の精密化に取り組んでいるが^[16]、伊勢湾及

び釧路港に限定して図8と図5を比較すると、一見して次の事がわかる。

- (1) クロロフィル濃度のダイナミックレンジが広がり、
- (2) 大気効果により平滑化されて、ぼやけていた分布パターンが鮮明になった、
- (3) その結果、伊勢湾や釧路港における河口流域のクロロフィル高濃度域がはっきり検知できる。

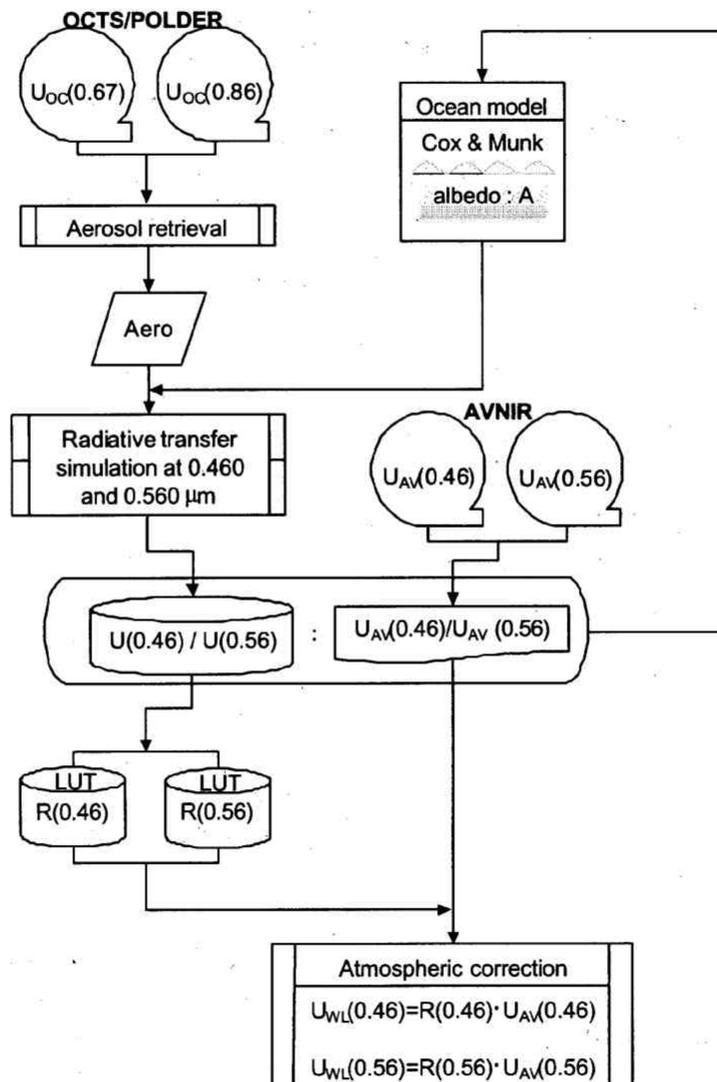


Figure 6: Block flow for atmospheric correction of AVNIR data by using OCTS/POLDER data.

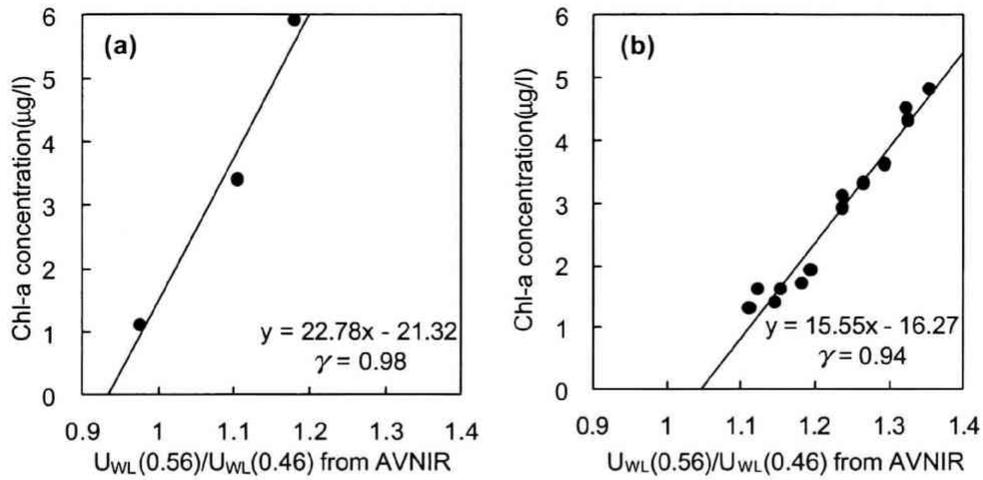


Figure 7: The same as Fig.4, but for atmospheric corrected AVNIR data.

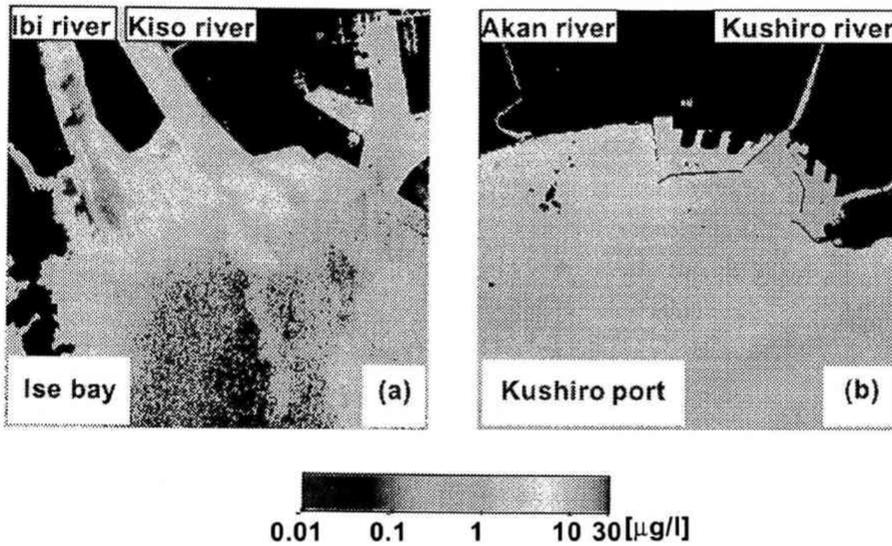


Figure 8: Distribution of chlorophyll-a concentration after atmosphere correction on 4 February, 1997 in Ise bay (a), and on 14 November, 1996 in Kushiro port (b).

5. おわりに

本稿では、高解像度の AVNIR センサデータを用いたクロロフィル-a 濃度の推定手法

を伊勢湾及び釧路港に応用した。得られた画像から、リモートセンシングデータを利

用した定量的な解析が、沿岸域水環境監視に役立つ技術であることが示された。特に、今後の釧路港エコポートモデル事業などの非常に狭い内湾域での環境への影響を評価する場合、高分解能センサによるモニタリングが必要であることを示唆した。また、有明海、東京湾の例は既に紹介されているが^[1,7,8]、水環境の悪化が懸念される琵琶湖や瀬戸内海、大阪湾等においても、シーツールス・データを集約整備し、各地域に応じたアルゴリズムの適用を準備中である。もちろん、内湾汚染は日本国内に限った問題ではない。広く地球規模で、その解明が期待される環境問題である^[14]。AVNIRの改良型センサ AVNIR-II が解像度を 10m に上げて、2004 年宇宙開発事業団から打ち上げ予定の陸域観測技術衛星 ALOS に搭載される。

詳細なクロロフィル-a 濃度の推定には、大気補正処理が必要なこともわかった。AVNIR センサには大気補正用バンドが準備

されていなかったため、同時搭載されていた OCTS や POLDER センサを参照した。沿岸域解析には空間分解能と波長分解能が共に高いセンサが望まれる。また、内湾地形の複雑さに加え、多様な溶存物質が水中に存在するため、衛星と同期した実測値（ツールスデータ）が必要である。

高解像度になる程、衛星画像に含まれる雑音も無視できなくなる。ノイズが観測バンド間で相関を持たない場合、比演算処理を行なうことでノイズが強調される可能性もある。画質を低下させる原因となるノイズ除去法の工夫も必要となる。

ADEOS/AVNIR, OCTS データは宇宙開発事業団 (NASDA) から、POLDER データはフランス CNES から提供されたものである。本研究の一部は学術振興会科学研究費 (基盤研究 (B) No.13450182) と宇宙開発事業団委託研究費 (NASDA-PSPC-29321) の援助の下に実施されたものである。

参考文献

- [1] 後藤 健介, 後藤 恵之輔: 有明海異変を衛星データで読む, 土木学会誌, 86 (10), pp. 89-92, 2001.
- [2] 後藤 健介, 後藤 恵之輔: 韓国・始華干拓に学ぶ有明海の今後, 土木学会誌, 86 (7), pp. 84-87, 2001.
- [3] 北海道開発局釧路開発建設部 釧路港湾建設事務所 社団法人寒地港湾技術研究センター: 平成 12 年度釧路港島防波堤施設設計検討その他業務—釧路港環境調査編—報告書 (概要版), 2001.
- [4] 長良川河口堰事業モニタリング調査グループ・長良川研究フォーラム: 日本自然保護協会報告書 85 号 長良川河口堰が自然環境に与えた影響, 財団法人日本自然保護協会, 1999.
- [5] 坪田幸雄, 窪内 篤: 釧路港エコポートモデル事業—水生生物との協調型防波堤—, 土木技術, 57 (9), pp. 94-101, 2001.
- [6] 玉井 元治: ポーラスコンクリート河川護岸工法の概要, コンクリート工学, 39 (8), pp. 10-15, 2001.
- [7] M. Zhang, K. Carter, F.E. Muller-Karger, Z. Lee, and D. B. Goldgof: Noise Reduction and

- Atmospheric Correction for Coastal Applications of Landsat Thematic Mapper Imagery, Remote Sense. Environ., 70, pp. 167-180, 1999.
- [8] 水出 寛之, 岩下 圭之, 西川 肇: LANDSAT MSS/TM データを利用した内湾の Chlorophyll-a 分布の時系列評価, 土木学会第 56 回年次学術講演会, pp. 394-395, 2001.
- [9] 人工衛星データによる水質モニタリングー関連自治体による環東京湾プロジェクトの紹介ー: 水尾寛巳, 岡 敬一, 小倉久子, 二宮勝幸, 大道章一, 飯村昇, 安藤晴夫, 三嶋義人, 安岡善文, 日本リモートセンシング学会誌, 18 (3), pp. 62-66, 1998.
- [10] 作野裕司, 松永恒雄, 中山大介, 六川修一, 高安克巳, 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.
- [11] M. Shimada, H. Oaku, H. Oguma, R. O. Green, Y. Miyachi, and H. Shimoda: Calibration of Advanced Visible and Near Infrared Radiometer, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 37 (3), pp. 1472-1483, 1999.
- [12] S. Mukai: Atmospheric Correction of Remote Sensing Images of the Ocean Based on Multiple Scattering Calculation, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 28, pp. 696-702, 1990.
- [13] I. Sano, and S. Mukai, Algorithm description of system flow for global aerosol distribution, Appl. Math. & Comp., 116, pp. 79-91, 2000.
- [14] 向井 苑生, 佐野 到: POLDER 多方向データから導出したエアロゾル特性の全球分布, 日本リモートセンシング学会誌, 20 (3), pp. 85-93, 2000.
- [15] Kneizys, F.X., E.P. Shettle, L.W. Abreu, J.H. Chetwynd, G.P. Anderson, W.O. Gallery, J.E.A. Selby, and S.A. Clough, Users guide to LOWTRAN 7, AFGL-TR-88-0177, Air Force Geophysics Laboratory, Hanscom AFB. MA, 1988.
- [16] Okada, S. Mukai and I. Sano: A new algorithm to retrieve aerosol over the Gulf of Cambay in India, J. Indian Remote Sensing, 30 (1), pp. 81-86, 2002.