

MODIS画像に基づく若狭湾の赤潮発生条件

青山 隆 司*・大 家 寛*

Condition of red tide appearance in Wakasa bay based on MODIS images

Takashi Aoyama and Hiroshi Oya

Since June, 2004, studies on triggering factors of the red tide have been carried out in Awara Space Radio Observatory (ASRO), Fukui University of Technology utilizing directly received data of MODIS on the Terra and Aqua satellites which have been acquired in ASRO. Preliminary results of the data analyses for the period from July, 2001 to September, 2006 indicate conditions, for the appearance of the red tide bloom in Wakasa bay as follows: (1) the threshold amount of chlorophyll-a is close to 1.5mg/m^3 , (2) the range of sea surface temperature (SST) is limited in a range from 12 to 20°C and (3) the period of sunlit time in spring is also a significantly sensitive factor. We also propose here to utilize MODIS band1 images corresponding to a red band with spatial resolution of 250m together with NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) images which has also spatial resolution of 250m, for the confirmation of the red tide.

1. はじめに

福井工大では、地球環境観測衛星 Terra, Aqua に搭載された MODIS データの受信を 2003 年 9 月より、あわらキャンパス内のあわら宇宙電磁現象研究施設 (Awara Space Radio Observatory: ASRO) で継続している (観測システムおよびデータ公開については参考文献(6)参照)。現在まで、Terra, Aqua/MODIS、Terra/ASTER、ALOS、IKONOS 等の衛星画像データを用いて、若狭湾の赤潮発生条件及び赤潮検出法、福井豪雨被害の検証と防災対策、北潟湖の水質計測等に関する研究を進めてきた。本論文では、MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 画像データを用いた若狭湾の赤潮発生条件について述べる。なお、既に公表している文献 (1) ~ (5) で用いた画像データの範囲は 2001 年 7 月から 2005 年 4 月までであったが、ここでは 2006 年 9 月までのデータを新たに追加し解析を行った結果について報告する。

赤潮は日本のみならず世界中で大きな漁業被害をもたらしており、そのための研究も盛んに行われている。しかしそれらの研究は、実際に対象海域において海水を採取する手法で行われている場合が大半である。海水を採取する場合、赤潮プランクトンおよび関連する水質諸量を直接計測でき正確な値が得られるが、その情報は観測時の観測点近傍での情報であり、広い海域全体を継続的に観測することは困難である。従って、衛星リモートセンシングを用いて赤潮関連情報を得ることは、直接観測と相補的な意味で重要である。特に定期的な海水の計測が行われていない若狭湾においては、衛星リモートセンシングによる観測が唯一の方法である。また、赤潮の発生条件は地域性が顕著で、他の海域での研究結果をそのまま利用することが出来ないため、海域

* 宇宙通信工学科

毎に発生条件を求める必要がある。したがって、衛星リモートセンシングを用いた若狭湾の赤潮発生条件に関する我々の研究は全く新規のものである。

2. 若狭湾の赤潮発生条件

赤潮の発生を予測するためには、その発生条件を出来る限り詳細に知る必要がある。赤潮が植物プランクトンの増殖により発生することを考えれば、葉緑素（クロロフィル a）の濃度が赤潮発生の直接的な指標になることは明らかである。また、赤潮発生を制御するその他の要因として、海水温、日照時間、栄養塩の量、プランクトン種、さらには海流、河川からの淡水および懸濁物質（SS: Suspended Sediment）の流入、降雨等気象条件を考慮する必要がある。そこで我々は、これらの赤潮発生要因を究明していく第一歩として、クロロフィル a 濃度 (Chl-a: Chlorophyll-a)、表面海水温 (SST: Sea Surface Temperature) および日照時間に着目し赤潮発生との関係を調べてきた。

使用したクロロフィル a 濃度値および表面海水温の画像データについては、大気補正がなされている JAXA（宇宙航空研究開発機構）/東海大提供のデータを使用し、赤潮の確認にはあわらキャンパスに設置されている MODIS データ処理システムにより作成した True Color 画像、Band1 画像（赤色のバンド）、NDVI（正規化植生指標）画像等を用いている。

まず、衛星から得られる画像データから情報を抽出する際、画像上のどの点のデータを用いるかを定める必要がある。我々は JAXA/東海大提供のクロロフィル a 濃度と表面海水温の画像データから、以下のような基準でデータポイントを決定した。

- (1) 表面海水温が一度異なる海域毎に 1 点のデータポイントを選択する。
- (2) 同一海水温の海域中でクロロフィル a 濃度が最大の点をデータポイントとする。

この基準で選択したデータポイントの決定例を Fig. 1 に示す。Fig. 1 は 2004 年 5 月 2 日の Terra 衛星に搭載された MODIS センサーにより得られたデータ例で、(a) がクロロフィル a 濃度分布を表し、(b) が表面海水温分布を示している。図中 A, B, C で示した点が上記の基準で決定されたデータポイントであり、A, B, C 点でのそれぞれの読み取り値は A: Chl-a 濃度 20.0mg/m³、SST 18℃、 B: Chl-a 濃度 3.0mg/m³、SST 19℃、 C: Chl-a 濃度 2.0 mg/m³、SST 20℃である。

2001 年 7 月から 2006 年 9 月までの間で、雲や霞がなく若狭湾が見通せる 50 日間のデータを使用し、海水温が異な

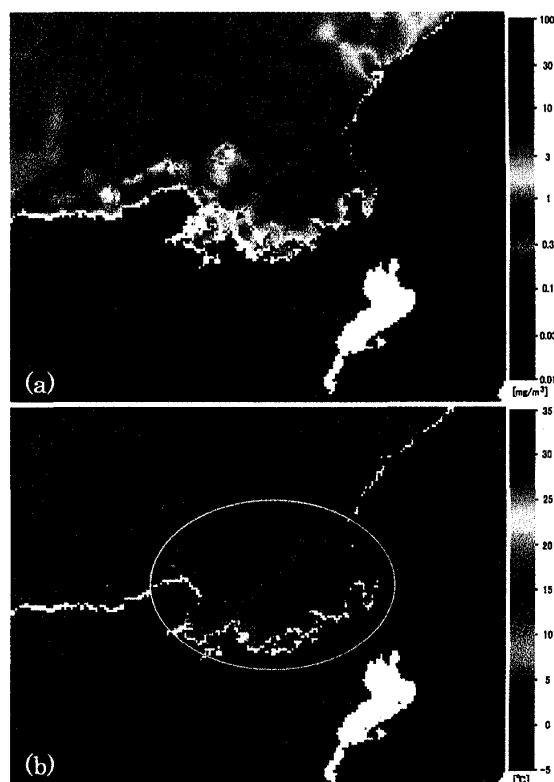


Fig.1 Chlorophyll-a (Chl-a) concentration (a) and Sea Surface Temperature (SST) (b) image data provided by JAXA and Tokai Univ. (TSIC/TRIC) through Web. A, B and C with arrows indicate positions where data are sampled. (Courtesy of JAXA/TOKAI University)

る場所を1℃きざみで 140 点のデータポイントとして表し、統計処理した結果を Fig. 2 に示す。縦軸はクロロフィル a (Chlorophyll-a)濃度を対数表示で示しており、横軸は表面海水温 (SST: Sea Surface Temperature)を示している。ここで、赤潮が発生したデータポイントをピンク色の四角で示している。また、青色の菱形で示すデータポイントは赤潮が発生していない場合のクロロフィル a 濃度と表面海水温を示している。

統計処理の結果、赤潮の発生は表面海水温では 12~20℃の範囲、クロロフィル a 濃度では 1.5 mg/m³以上でのみ確認されている (Fig.2 の黄色の枠内)。つまり、表面海水温については適温範囲があり、クロロフィル a 濃度については下限が存在することが明らかになった。この統計結果を四季に分けて示したのが Fig.3 である。Fig.3 では白抜ききの四角が赤潮発生時のデータポイントを示している。我々が検討対象にしたデータの範囲では、若狭湾の赤潮の発生は春 (3~5 月) に集中しており、春先の日照時間の増加が植物プランクトンの増殖を引き起

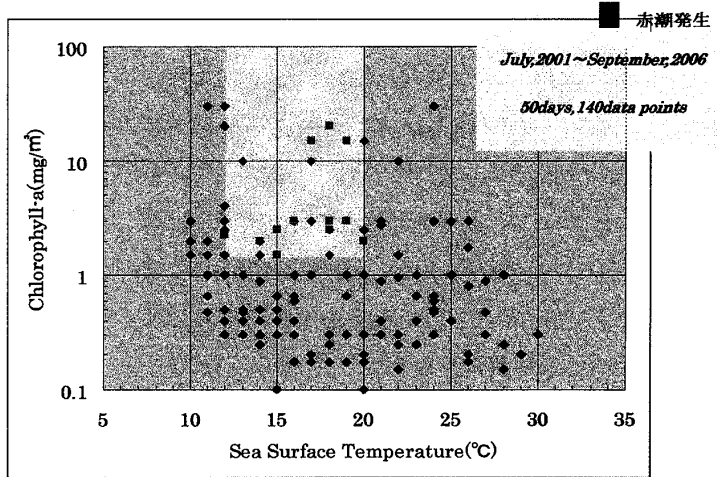


Fig.2 Relationship of the red tide appearance with chlorophyll-a (Chl-a) concentration and sea surface temperature (SST) in Wakasa bay.

こし、赤潮が発生したものと考えられる。また、この間赤潮が顕著に発生したのは 2002 年、2004 年の春であり、今回解析に使用した 2003 年、2005 年、2006 年のデータの中では赤潮の発生は確認されていない。この原因を探るため、若狭湾に近い福井県小浜市における春先 (2 月~4 月) の日照時間について検討を行った

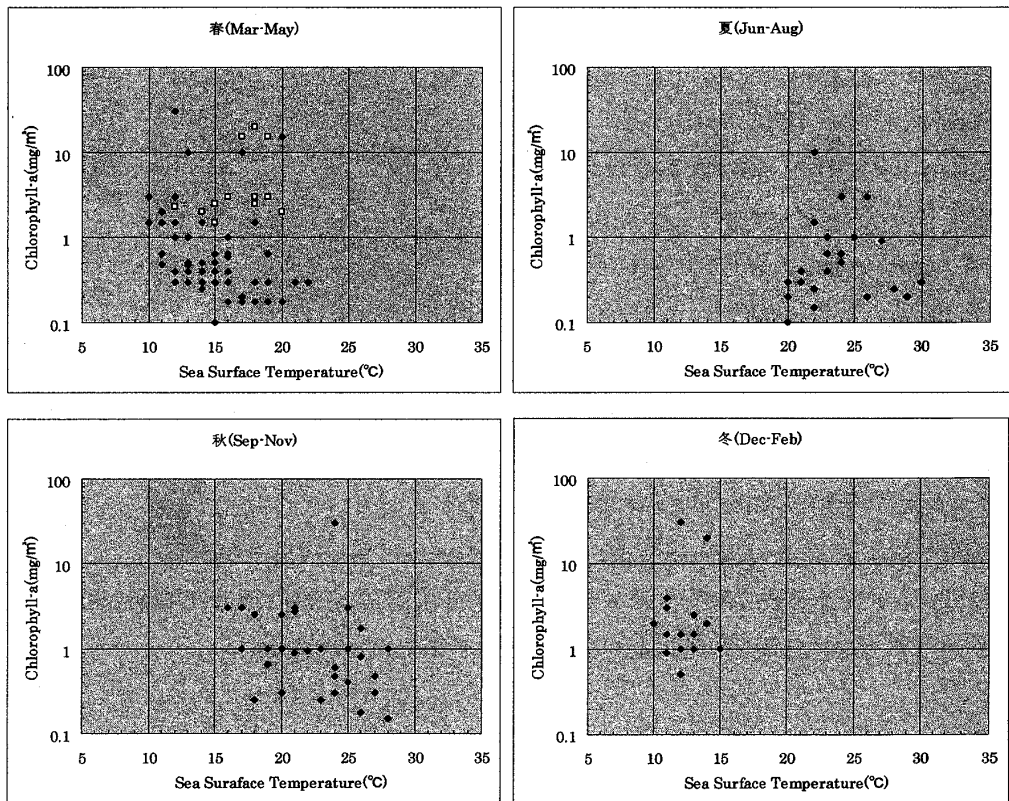


Fig.3 Seasonal dependence of the red tide appearance.

(Fig.4 参照)。2002年、2004年の両年の2月から4月の総日照時間が、2003年、2005年および2006年に比べ長いことから、春先の日照時間が赤潮の発生に大きな影響を与えていることを示唆している。なお、2007年2月の日照時間は2004年の2月の日照時間に近いうえ暖冬により海水温の上昇も早いため、2007年の春(3月～5月)には若狭湾において赤潮の大量発生が予想される。

赤潮の発生は Fig. 2 の黄色の枠内でのみ確認されているが、この発生条件を満たすものの赤潮発生が見られない例も少なくない。この原因として、衛星データを用いてクロロフィル a 濃度を求める際に使用する指標(クロロフィル a の可視光域の分光特性を利用)が、懸濁物質(SS)が多く存在する沿岸域および河口域では正しいクロロフィル a 濃度を与えないことが考えられる⁽⁷⁾、⁽⁸⁾、⁽⁹⁾。そこで、NDVI(正規化植生指標：植物量の多さを示す指標)画像を用いて、懸濁物質とクロロフィル a (植物プランクトン)とを分離することを試みた。

その結果、黄色の枠内であっても赤潮が発生していない観測点の多くは、懸濁物質をクロロフィル a として誤って計測していることが明らかになった。一例を Fig. 5 に示す。Fig. 5 (a), (b), (c)にそれぞれ True Color 画像、JAXA/東海大提供のクロロフィル a 濃度画像、NDVI 画像を示す。(a)で舞鶴沖に見える変色域(黄色の円内)は(b)のクロロフィル a 濃度画像では茶色で表されており、濃度値は $10\text{mg}/\text{m}^3$ と高い値を示し、このときの表面海水温は 17°C である。つまり、前節で求めた赤潮発生条件を満たしている。しかし、(c)の NDVI 画像では周囲の海域に比べて低い(黒い)値を示しており、植物プランクトンではなく河川から放出された懸濁物質(SS: Suspended Sediment)による

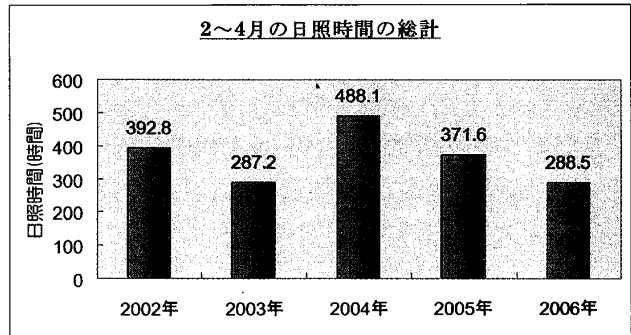


Fig. 4 Sunlit time during February to April in Obama city near Wakasa bay from 2002 to 2006 (Courtesy of Fukui Local Meteorological Observatory).

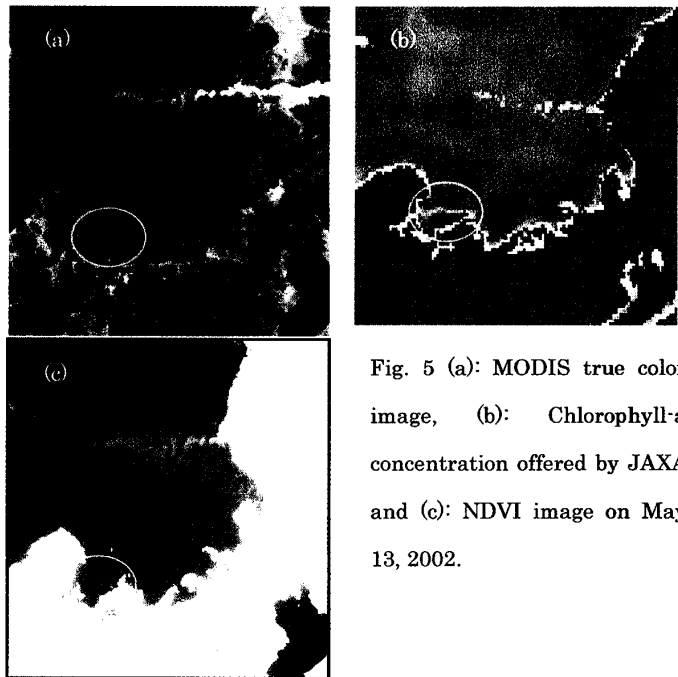


Fig. 5 (a): MODIS true color image, (b): Chlorophyll-a concentration offered by JAXA and (c): NDVI image on May 13, 2002.

変色域であることが明確である。つまり赤潮発生条件を議論する際には、NDVI 画像を用いて JAXA/東海大提供のクロロフィル a 濃度値に影響を与える SS の存在を常に考慮する必要がある。

3. Band1 および NDVI 画像を用いた赤潮確認法

すでに述べてきたように、赤潮発生条件を求める際に、衛星画像から赤潮の判定をする必要がある。ここでは MODIS 画像を用いて赤潮を判定する新たな手法について述べる。

若狭湾に発生する赤潮の例を Fig.6(a), (b)に示す。Fig.6(a)は MODIS データ (2002年 4月 2日、Terra) を用いて作成した解像度 500m の True Color 画像で、(b)は(a)の黄色の四角で表した領域に対応する

Terra/ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer)による解像度 15m の擬似 True Color 画像である。(b)で見られるように、若狭湾の赤潮は通常幅数十 m の細い筋状に現れることが多い。これらの赤潮を 500m 解像度の True Color 画像で確認することは、小規模な赤潮の場合それほど簡単ではない。つまり、1画素中に赤潮部分と赤潮が見られない部分とが混在する Mixel 状態になり、衛星画像はボケる上に色あせてみえるためである。

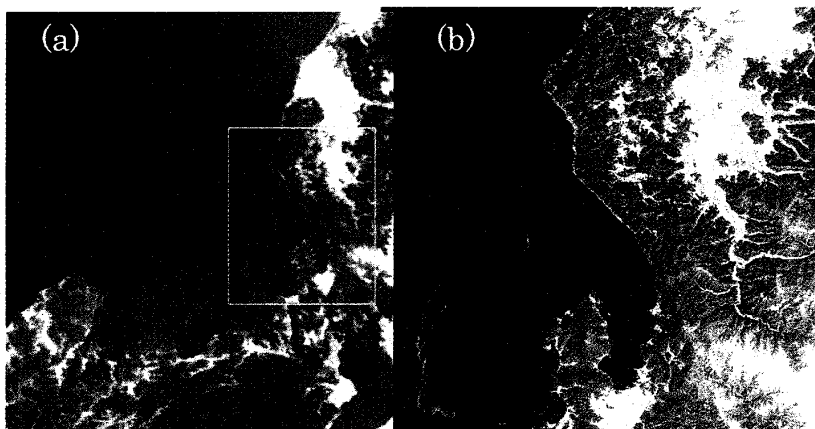


Fig.6 (a): MODIS true color image on 2002/04/02 with spatial resolution of 500m, (b): same image corresponding to the yellow square in (a) obtained by Terra/ASTER with spatial resolution of 15m.

このような状況を改善するため、MODIS で最高の分解能を持つ band 1 と band 2 のみを用いて赤潮を判定することを試みた。Fig.7 にその例を示す。Fig.7(a), (b), (c)はそれぞれ Band1 画像、NDVI 画像、True Color

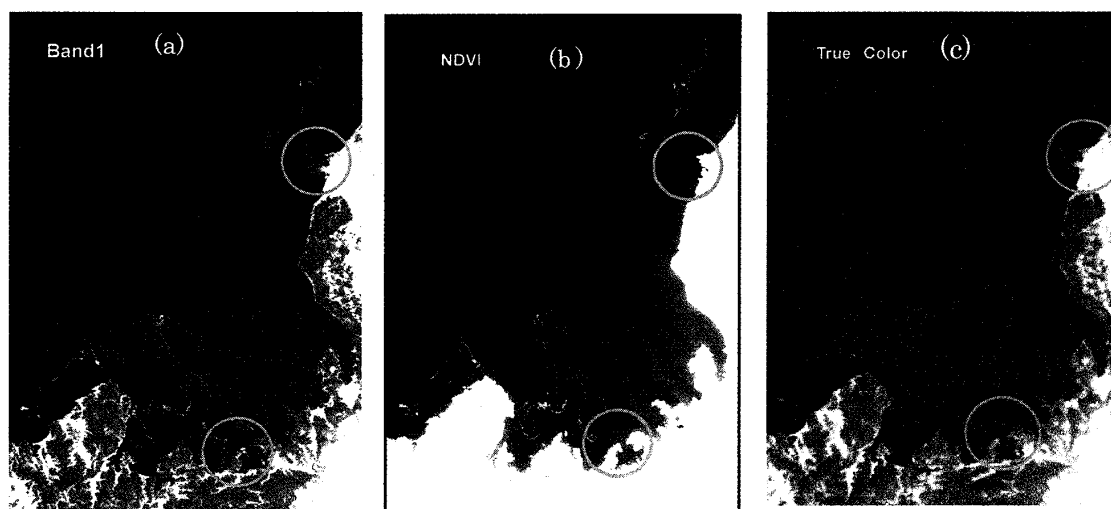


Fig.7 (a): MODIS band1 image, (b): NDVI image and (c): true color image (R, G, B = B1, B4, B3) in Wakasa bay on May 2, 2004 obtained by Terra /MODIS. Yellow circles in each panel show the region of the mouth of Kuzuryu river and Obama bay.

画像である。まず Band1 のみを用いた場合、赤潮部分の抽出は 250m 解像度で可能であるが、SS による変色域、例えば九頭竜川河口付近も同様に抽出してしまう。Fig. 7(a)上の黄色の丸で示した部分が、九頭竜川河口沖の変色域を示している。これは SS の Band1 帯域の反射が赤潮同様強いことによる。この困難を解決す

るため、NDVI 画像 (b) を併用して用いることを考える。NDVI 画像では SS は低い値で示され ((b) 上の丸部分) 赤潮領域と明確に区別される。同時に赤潮と思われる筋状の部分の一部 ((b) 下の黄色の丸) も比較的低い NDVI 値を示すことが判明した。この部分は(c)の True Color 画像では赤潮とほとんど区別がつかないが、死滅したか活性度が低い赤潮プランクトンに占められている領域と考えられる(1)-(4)。

SS 領域と死滅した赤潮領域を区別するため、Band1 画像と NDVI 画像を用いた scatter plot を利用した。その結果、Band1 画像と NDVI 画像を独立に比較するより、画像の各ピクセルの Band1 と NDVI の値をそれぞれ縦



Fig.8 Scatter plot (b) for Band1 and NDVI and corresponding image (a). Relationship between characteristic regions and colors is as follows; green: forest, purple: city and land without forest, light blue: cloud, brown: boundary between land and sea, blue: sea, red: red tide, light green: dead or inactive phytoplankton, yellow: SS (mud in the sea).

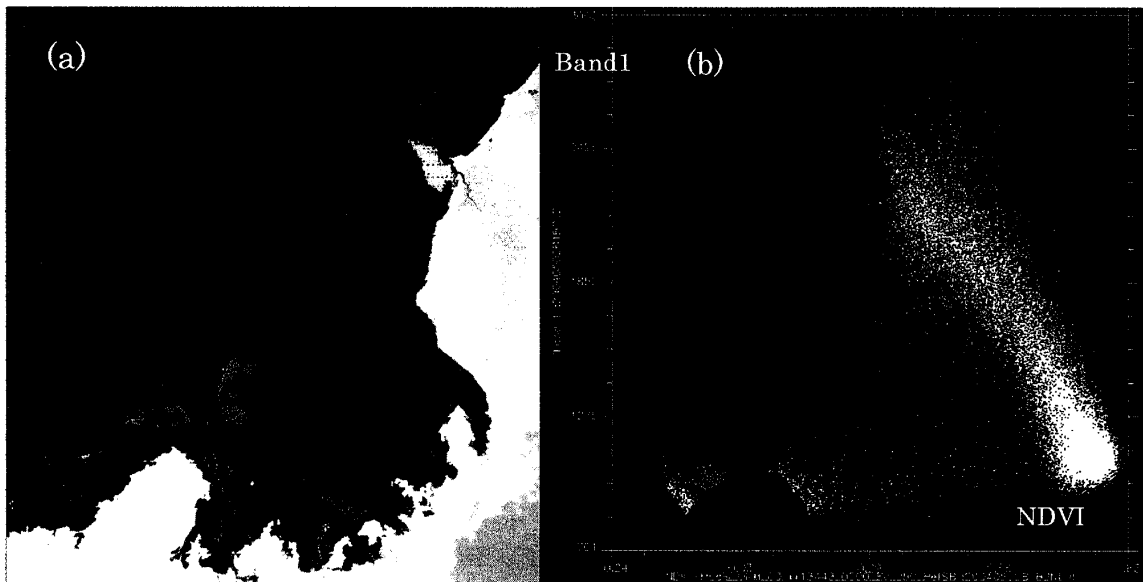


Fig.9 Same plot as Fig.8 for the range of Band1 value lower than 3000. The image only in sea area is expressed using four colors, red, light green, yellow and blue corresponding to the region of red tide, dead or inactive phytoplankton, SS and sea, respectively.

軸と横軸にとった scatter plot を作成することにより、さらに詳細な分類が可能になった。Fig. 8(b)に Fig.7と同じ日の画像データに対する scatter plot を示す。画像中の特徴領域を区別するため Fig.8(b)の各ピクセルに色付けし、対応する画像 (Fig.8(a)) に対しても同じ色付けで示している。色と対象領域の対応は、緑：森林、紫：都市部あるいは裸地、明るい青：雲、茶：陸域と海の境界、青：きれいな海、赤：赤潮、明るい緑：死滅した赤潮、黄：SS (泥) を含む海をそれぞれ表している。Fig. 8(b)の scatter plot において、海域は Band1 も NDVI も値の低い左下部分に表れる。この海域部分をさらに詳細に見るため Band1 のレベルが 3000 以下の部分のみを海域のみに着色して Fig. 9(b)に表示し、対応する画像を Fig.9(a)に示す。

ここで、青、赤、明るい緑、黄は Fig. 8 と同様にきれいな海、赤潮、死滅した赤潮、SS にそれぞれ対応している。この図から、きれいな海 (青) と他の3つの領域つまり赤潮、死んだ赤潮プランクトン、SS (赤、薄緑、黄) は Band1 の値の違いとして分離され、3つの領域は NDVI 値の違いにより明確に区別される。確認のため、赤潮が発生していない日の同じ海域の scatter plot を Fig.10 に示す。この図から、SS 部分は存在するものの、Fig.9に見られる赤潮および死んだ赤潮プランクトンに対応する部分が全く欠落していることが解る。この結果から、scatter plot を用いた解析は、Band1 と NDVI の画像を独立に扱うよりもはるかに効果的に海域の特徴領域、すなわちこの場合は赤潮、死滅した赤潮 SS 領域を識別できることが示された^{(5), (6)}。

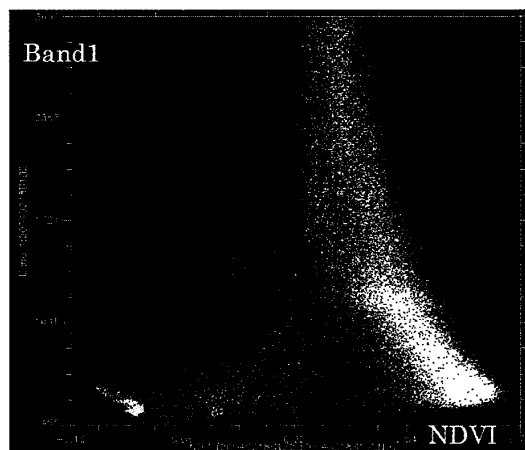


Fig.10 An example of scatter plot for the image without red tide appearance (Feb. 18, 2004).

4. 検討

第2節で述べたように、若狭湾における赤潮発生には一定の基準値が見出されたが、若狭湾に繋がる広域の日本海において、この赤潮発生条件がそのまま適用できないことも既に明らかになっている。一例として、2003年8月末から9月初めにかけて日本海を対馬暖流に乗って移動する大規模な赤潮が報告されている。そのときのクロロフィル a 濃度は3~7 mg/m³程度であり、表面海水温はおよそ27℃であった。これは、若狭湾の赤潮発生条件の内、表面海水温度 (12~20℃) に対して7℃も高い値を示している。この温度範囲の違いは、若狭湾で観測される赤潮は、東シナ海で発生し対馬暖流により日本海に流されてきたものではなく、湾内の河川から供給される栄養塩類と日照時間等の条件により、湾内で局所的に発生したものであることを示唆している。したがって、赤潮発生条件は海域、湾岸等の特質により大きく左右されることを認識し、今後さらに広域の日本海についてこの研究を発展させていく必要がある。

5. 結論

本論文では、衛星画像を用いて赤潮の発生とクロロフィル a 濃度、表面海水温との関係を求めることにより若狭湾の赤潮発生条件を求めた。その結果、赤潮の発生条件としてクロロフィル a 濃度には下限値(1.5mg/m³)が、表面海水温に対しては適温範囲(12~20℃)が存在することが明らかになった。また、赤潮の発生が春先 (2

月～4月)の日照時間の長い年の春(3月～5月)に集中して見られることも明らかとなった。

赤潮発生条件に用いた JAXA/東海大提供のクロロフィル a 濃度は、懸濁物質(SS)が多く含まれた海域では正しい値を与えないことが NDVI (正規化植生指標) 画像を合わせて用いることにより明らかになった。したがって、赤潮判定条件を求める際には、対応する海域の NDVI 画像を用い、対象海域のクロロフィル a 濃度が SS による誤計測であるかどうかを常に考慮する必要がある。

また、低解像度の MODIS 画像を用いて赤潮を判定するため、MODIS で最高の分解能を持つ band 1 画像を用いて赤潮を判定することを試みた。その際に NDVI 画像を用いて赤潮と懸濁物質の分離を行った。しかし懸濁物質と死滅した赤潮が同様に低い NDVI 値を示すため、MODIS の Band1 と NDVI の各ピクセル値からなる 2 次元 Scatter plot を作成し、赤潮、死滅した赤潮、懸濁物質を分類する手法を開発した。この手法を用いることにより、Band1 画像と NDVI 画像を独立に用いた場合には困難であった、赤潮、死滅した赤潮、懸濁物質の分離が可能となった。

本論文で示した赤潮発生条件は若狭湾を対象にしたものであり、より広範な日本海の赤潮に対してはそのまま適用できないことも明らかになっている。この原因を究明するために、今後研究対象を日本海全域に拡大していく予定である。

参考文献

- (1) 青山隆司、八木浩、福井工大 MODIS 高次処理システムと赤潮検出について、2005、海洋理工学会平成 17 年度秋季大会講演論文集、P7、pp. 87-88
- (2) 青山隆司、大家寛、MODIS データを用いた若狭湾の赤潮検出、2005、日本リモートセンシング学会第 39 回学術講演会論文集、B17、pp. 103-104
- (3) Aoyama T., Condition of Red Tide Appearance in Wakasa Bay Based on Terra, Aqua/MODIS Data, 2006, International Symposium on Functional Organic Materials and Science & Technology for Sustainable Society, Abstracts, 17-1 - 17-2
- (4) Aoyama T. and H. Oya, Condition of red tide appearance in Wakasa bay based on Terra, Aqua/MODIS images, 2006, SPIE Asia-Pacific Remote Sensing, Proceedings, Vol. 6412, 64120V-1 - 64120V-8, Goa, India.
- (5) 青山隆司、松井佑介、MODIS 画像を用いた赤潮確認法、2006、日本リモートセンシング学会第 41 回学術講演会論文集、B28、pp. 163-164
- (6) 青山隆司、大家寛、「福井工業大学 Terra, Aqua/MODIS 受信・解析システム」、(査読付資料)、海洋理工学会誌 Journal of Advanced Marine Science and Technology Society, 2006, Vol. 12, No. 1, pp. 69-74.
- (7) Oki, K. and Y. Yasuoka, 1996, Estimation of Chlorophyll-a Concentration in Rich Chlorophyll Water Area from Near-infrared and Red Spectral Signature, J. of the Remote Sensing Society of Japan, Vol. 16, NO. 4, pp.1-9.
- (8) Luoheng Han, 1997, Spectral Reflectance with Varying Suspended Sediment Concentrations in Clear and Algae-Laden Waters, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 63, No. 6, pp. 701-705.
- (9) Philippe Forget, Pierre Broche and Jean-Jacques Naudin, 2001, Reflectance sensitivity to solid suspended sediment stratification in coastal water and inversion: a case study, Remote Sensing of Environment, 77, pp. 92-103.

(平成19年 3 月 30 日受理)