

衛星リモートセンシングによる赤潮の移動と消長過程の観測

青山 隆 司* ・ 松井 佑 介**

Observation of Movement and Rise-and-Fall Process of Red Tide using Satellite Remote Sensing Technique

Takashi Aoyama and Yusuke Matsui

Since 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. In the process of image data analysis, we obtained continuous seven days data series showing red tide bloom. This paper is the first report for the retrieval of the movement and rise-and-fall process of red tide using these data series. The preliminary results of our data analyses indicate the complicated eddy motion of the red tide in Wakasa Bay and relatively stable motion of the red tide on the Tsushima Current in inshore region of Shimane Prefecture and Tottori Prefecture. It is also indicated that the red tide moves with the sea current, repeating the increase and decrease of the concentration of Phytoplankton.

Keywords: red tide, rise-and-fall process, Wakasa Bay, Tsushima Current, Terra, Aqua/MODIS, Band1 image, NDVI image

1. はじめに

我々は過去数年にわたり、若狭湾の赤潮発生条件を求める研究および低解像度衛星の分光画像を用いた赤潮の確認手法の開発^{(1)~(5)}を続けてきた。この研究には衛星に搭載された光学センサーによって得られる分光画像データを使用するため、対象海域に雲や霞が無い条件が必要であり観測機会が少ないことが難点であった。しかし、2009年4月に取得されたMODIS（NASAの地球観測衛星TerraおよびAquaに搭載された光学センサー）データの中に、1週間ほど連続して赤潮を確認できるデータが得られた。本論文では、この連続観測された衛星分光画像を用いて、赤潮の移動およびその消長課程（植物プランクトンの増減）を理解することを目的に解析を行った。ここではその初期成果について報告する。

* 電気電子情報工学科

** 電気工学専攻（博士課程）大学院生

2. 日本海に発生する赤潮の観測

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、あわらキャンパスに設置された衛星受信設備を用いて継続している。現在まで、この MODIS データを用いた若狭湾の赤潮発生条件に関する研究(1)~(5)を行ってきた。赤潮発生条件を求めるため、クロロフィル a (Chlorophyll-a: 以下 Chl-a と略記)濃度と表面海水温(SST: Sea Surface Temperature)に着目し解析を行ってきた。2003 年 11 月から 2007 年 5 月までの間で、雲や霞がなく若狭湾が見通

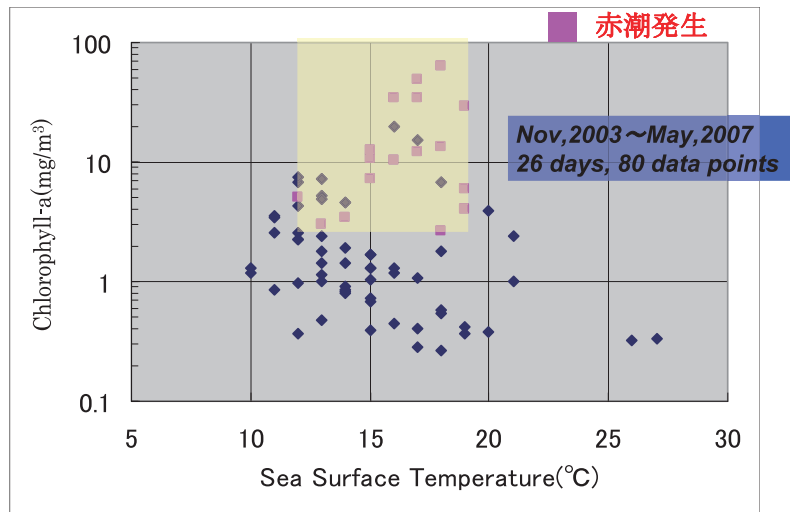


図 1. Chl-a 濃度、SST と赤潮発生の関係。

黄色の範囲が赤潮発生条件を示している。

せる 26 日間のデータを使用し、海水温が異なる場所を 1℃きざみで 80 点のデータポイントとして表し、統計処理した結果を図 1 に示す。縦軸はクロロフィル a 濃度を対数表示で示しており、横軸は表面海水温を示している。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。なお、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、JAXA/東海大が提供しているバイナリーデータを用いて解析を行った。また、赤潮の確認には福井工大の MODIS データ処理システムにより作成した True Color 画像、Band1 画像、NDVI 画像等を用いている。解析手法の詳細については参考文献(4),(5)を参照されたい。

統計処理の結果、赤潮の発生は表面海水温では 12~19℃の範囲、クロロフィル a 濃度では 3.0 mg/m³ 以上でのみ確認されている (図 1 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ている。この発生条件に合致するデータポイントの 83%が赤潮である事が確認されており、確度の高い発生条件が得られている。

3. 連続観測による赤潮の移動と消長過程

3.1 赤潮の連続観測

前節で示した赤潮発生条件を求めるために使用した MODIS データは 2007 年 5 月までのものであった。今回、それ以降の MODIS 画像を解析する中で、ほぼ 1 週間連続して赤潮の発生が確認できるデータを発見した。若狭湾および山陰地方の日本海沿岸域では、天候の関係で海域が観測できる衛星の光学データは限られており、1 週間連続して、かつ 1 日に複数回のパスで観測デ

ータが得られた例は初めてである。そこで、このデータを用いて赤潮の移動および消長過程について研究を行う事にした。本論文はその最初のレポートである。

図2～4に連続する7日間の12パス（衛星の周回）で得られた若狭湾付近の衛星画像を示す。上段はMODISの36の分光画像（Band）の内、最も空間解像度の高いBand1（赤色、解像度250m）画像で、下段は正規化植生指標NDVI画像（解像度250m）である。赤潮の確認のためには、赤色に反応するBand1画像および植物プランクトンに反応するNDVI画像を用いる事が有効である事が過去の我々の研究^{(2),(4),(5)}により明らかになっている。また、一番上の文字は観測した衛星（T：Terra、A：Aqua）と観測日時（UT）を示している。

図2～4の全てのBand1画像、NDVI画像において、大きな塊状に見えるのは雲であり、若狭湾内および丹後半島近辺に白っぽい筋状に見えるのが赤潮である。1例を図2右端の画像に赤丸で囲って示す。4月6日から10日までは、同じ日に2回の観測データが得られており、白い筋状に見える赤潮の複雑な変化（移動および消長過程）が見て取れる。なおNDVI画像においては、薄い雲がかかり海面が透けて見える状態では、雲の分光反射率を考慮して解析する必要がある点に注意しなければならない。次節で若狭湾および山陰沖の画像を例に取り、詳細な解析を行った結果について報告する。

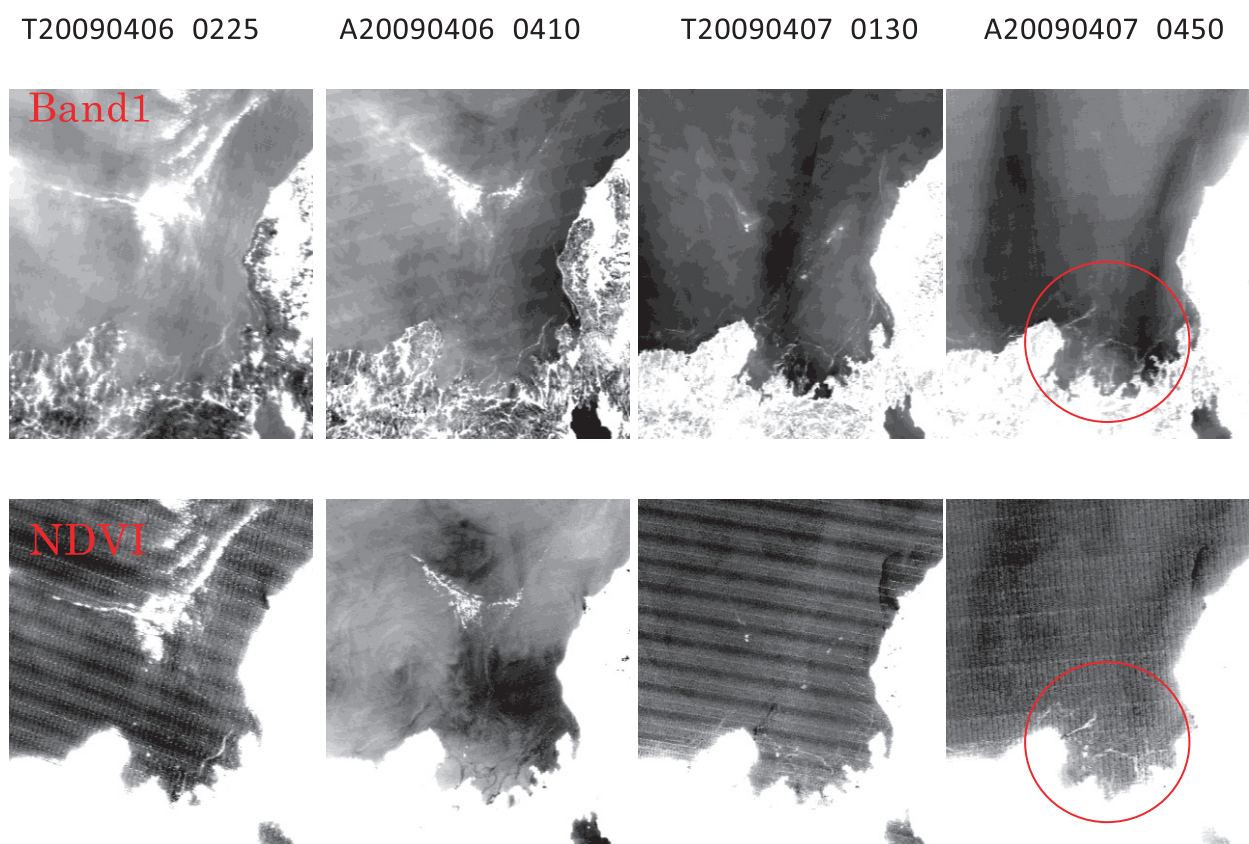


図2. 若狭湾周辺のBand1（上段）およびNDVI画像（下段） 2009年4月6日～4月7日

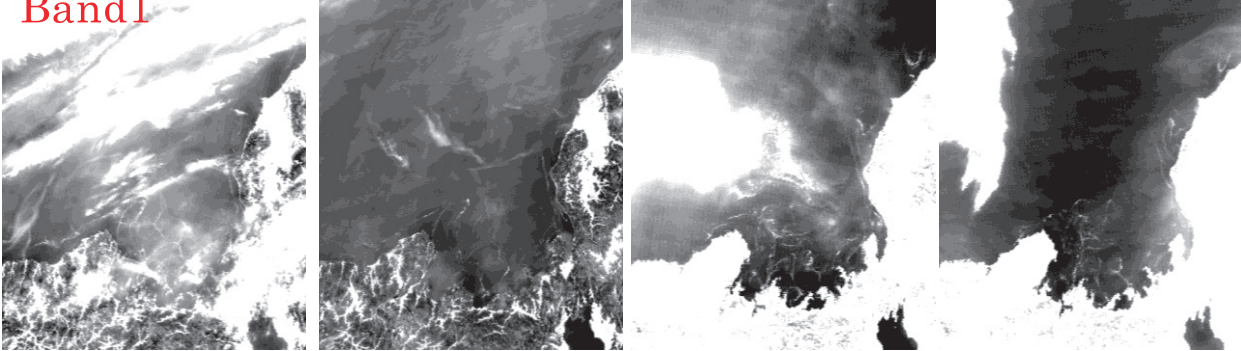
T20090408 0215

A20090408 0355

T20090409 0120

A20090409 0440

Band1



NDVI

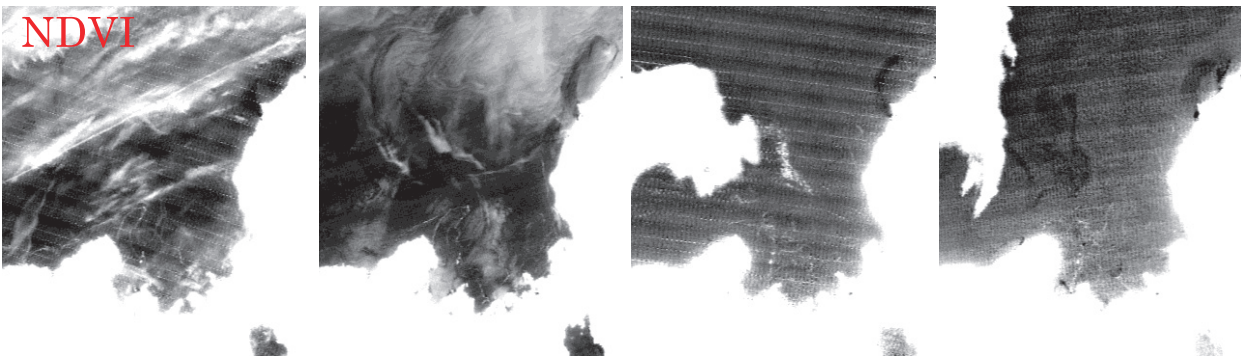


図 3. 若狭湾周辺の Band1（上段）および NDVI 画像（下段）

2009 年 4 月 8 日～4 月 9 日

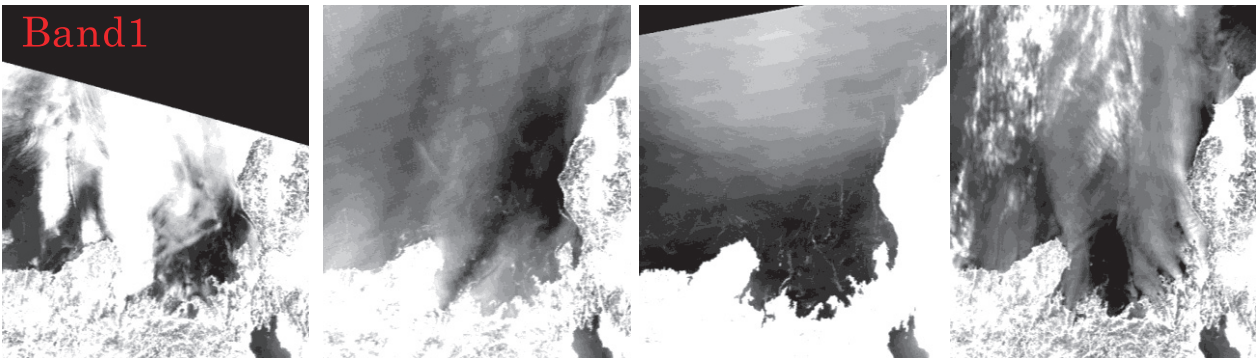
T20090410 0205

A20090410 0345

A20090411 0425

T20090412 0150

Band1



NDVI

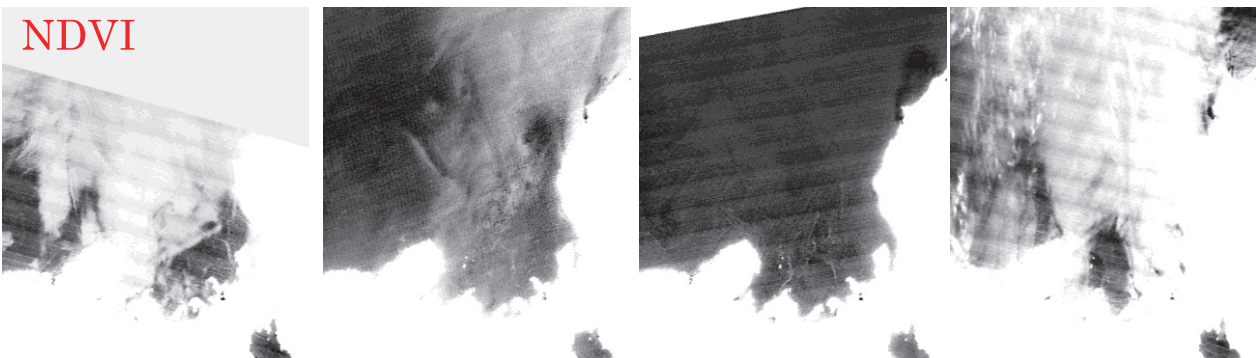


図 4. 若狭湾周辺の Band1（上段）および NDVI 画像（下段）

2009 年 4 月 10 日～4 月 12 日

3.2 若狭湾内の赤潮の移動と消長過程

連続観測された MODIS 画像を用いて、赤潮の移動と消長過程を抽出する事を試みた。2009 年 4 月 9 日の 1 時 20 分 (UT) と 4 時 40 分 (UT) に Terra 衛星と Aqua 衛星に搭載されている MODIS センサーによって得られた若狭湾から丹後半島沖にかけての合成画像を図 5 に示す。この図では、2 枚の画像の違いを比較しやすくするため、1 時 20 分の Terra 衛星の Band1 画像を RGB 表示の赤 (R) の強度に、200 分後の 4 時 40 分の Aqua 衛星の Band1 画像を RGB 表示の緑と青 (G,B) の強度に対応させカラー合成したものである。つまり、Band1 に反応する赤潮や雲の位置の変化が赤色と青緑色の色のずれとして確認でき、赤色の部分が 200 分後に青緑色の部分へ移動したことを意味している。この図から解るように、赤潮は若狭湾内では極めて複雑な動きをみせている。赤潮の動きをより詳細に見るために、図 5 の黄色の枠内を拡大したものを西から東に向かって図 6 (a)、(b)、(c)および(d)に示す。

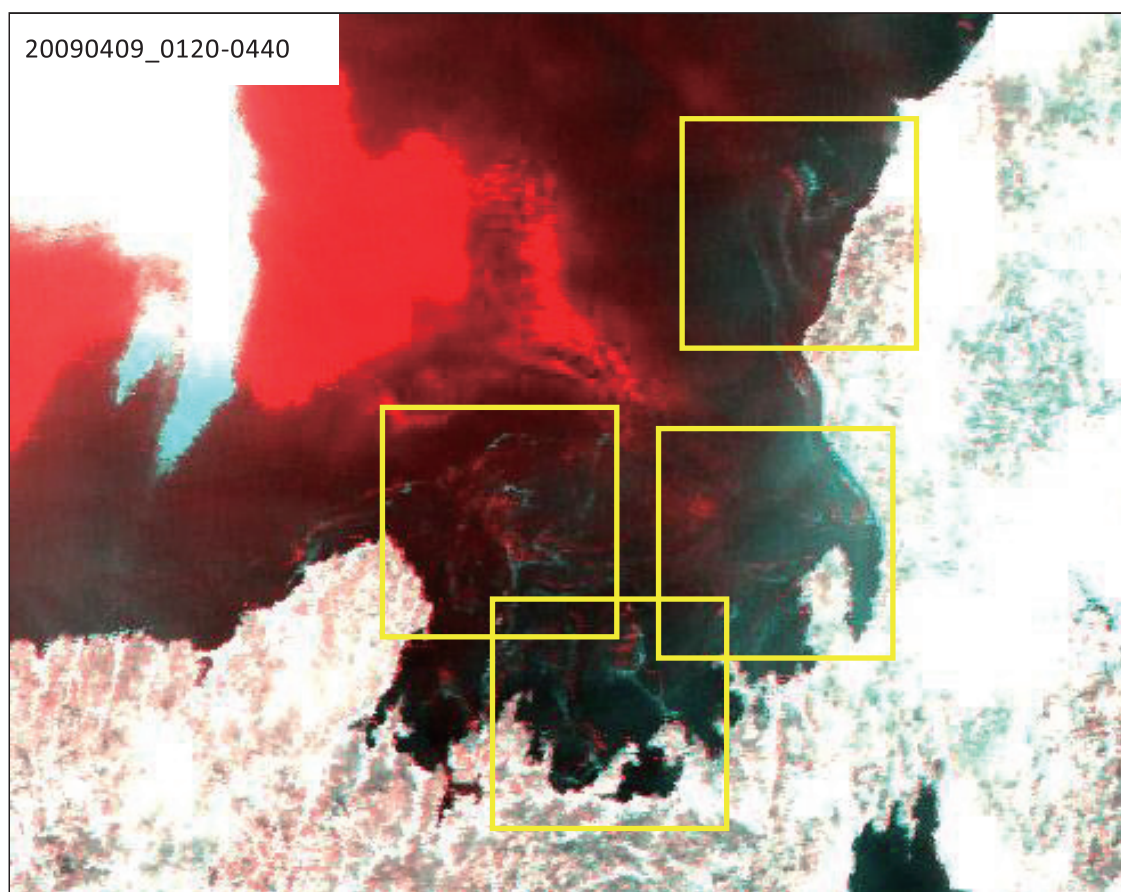


図 5. 2009 年 4 月 9 日の 1 時 20 分 (Terra 衛星) と 4 時 40 分 (Aqua 衛星) の Band1 画像をそれぞれ赤 (R) および緑、青 (G,B) の強度としてカラー合成した画像

図 6 には赤潮の特徴的な部分の移動方向を黄色の矢印で、移動速度を矢印の長さで表し、画像解析により計測した時速 (km/h) を数値で記入している。図 6 (a)では、図の上部 (北) では対馬海流の西から東への流れに沿って北東に向かう赤潮の動きがみられるが、若狭湾の奥 (図の下部) では南に向かう流れがある。(b)を見ても場所により移動方向が異なっており、他の部分の動

きを合わせてみると右回り（時計回り）の渦状の海流に赤潮が流されている様子が見られる。(d)の中央部に縦方向に3本の筋状の赤潮が見られるが、右側の赤潮は東向きに、左の赤潮は西向きにわずかに移動し、中央の赤潮はほとんど移動していない。このように若狭湾内の赤潮の動きはきわめて複雑で、幾つかの渦状の海流に乗って漂流していると考えられる。また、この図の赤色や青緑色の明るさは、赤潮の原因である植物プランクトンの濃度に関連しているため、その明るさの変化は赤潮の消長過程を表していることになる。この点に関しては他の高解像度衛星画像を用いて今後詳細に解析する予定であるが、植物プランクトンが増殖と死滅を繰り返しつつ海流に乗って移動している様子が見られている。なお、移動速度は若狭湾内ではほぼ1km/h以下の値を示しており、沖合の対馬海流の平均的流速より低い値を示している。

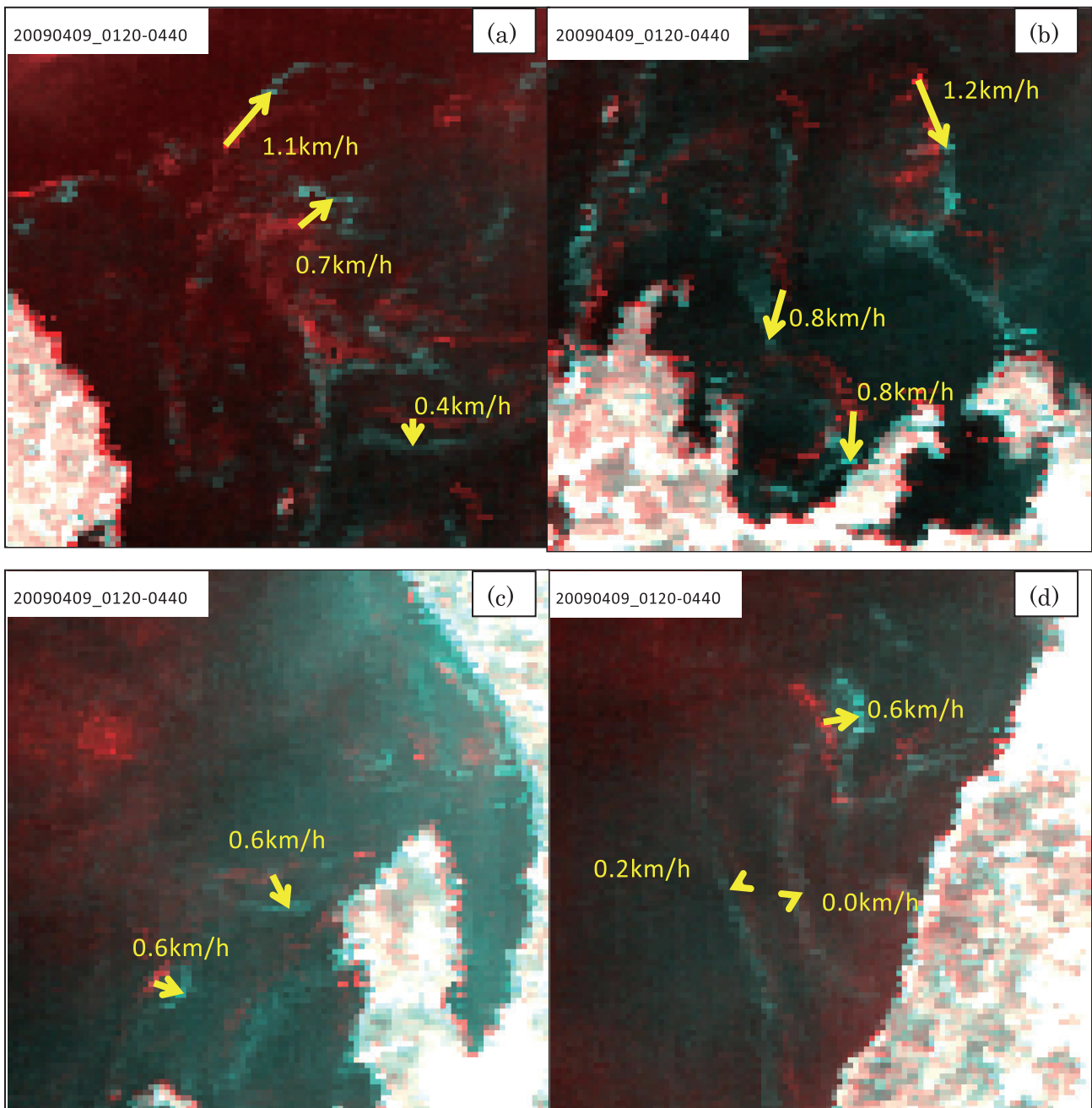


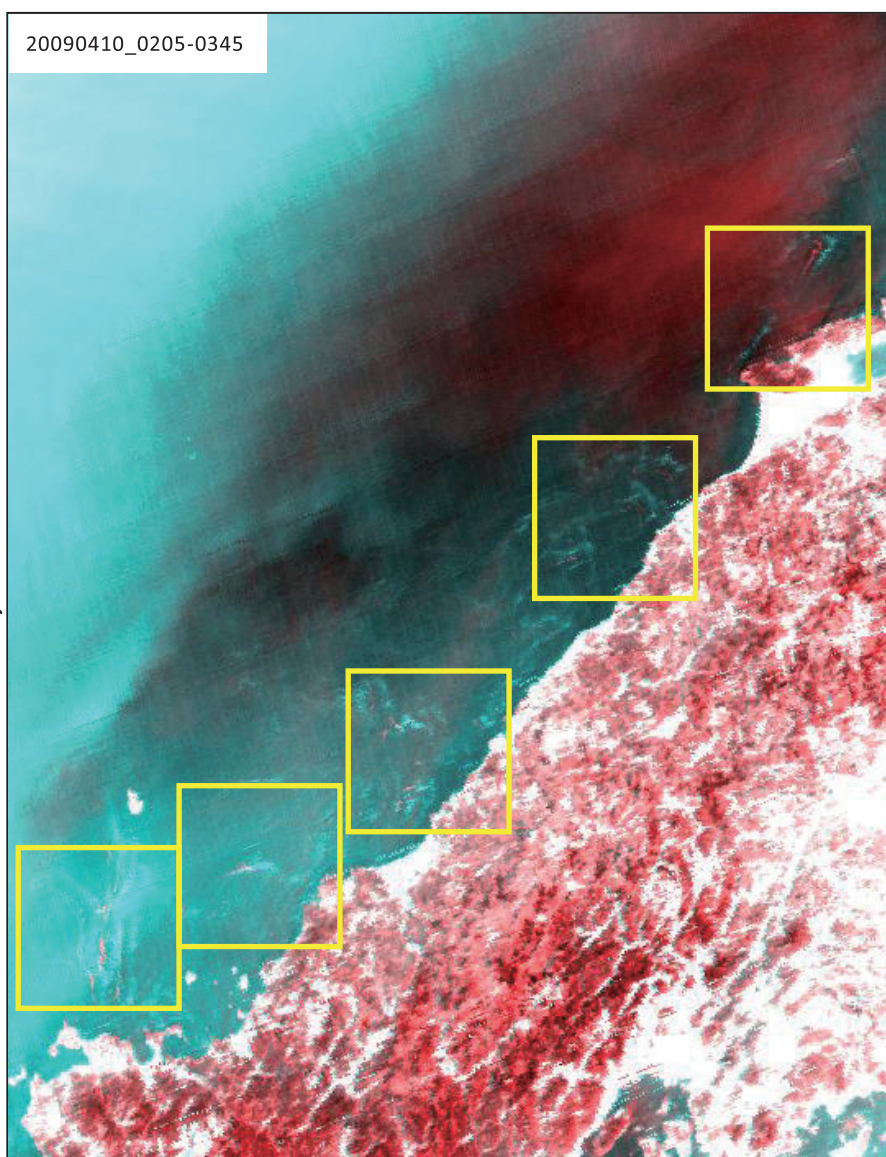
図6. 図5の黄色の枠内を拡大した画像

西から東へ(a)、(b)、(c)、(d)の順

3.3 山陰沖に発生した赤潮の移動と消長過程

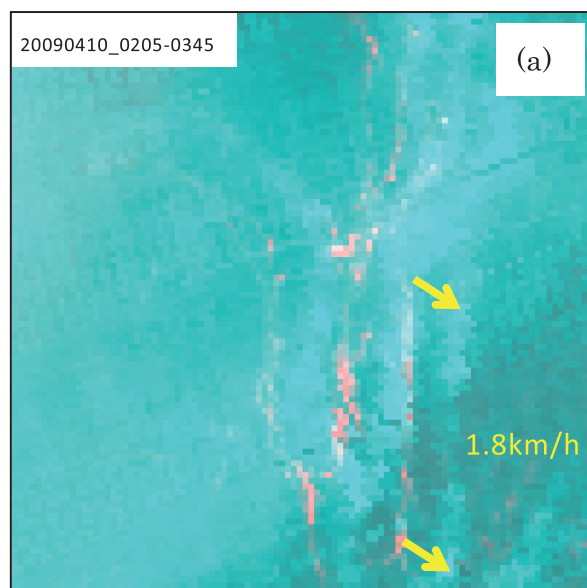
2009年4月10日の山陰地方沿岸域の同様な画像を図7に示す。この場合、Terra衛星の観測から100分後のAqua衛星の画像を比較している。山陰沖に大規模な赤潮が発生し、海流に乗って北東へ流されていく様子がみられる。図中の黄色の枠内を拡大した画像を西から東へ順に図8(a)、(b)、(c)、(d)、(e)に示す。赤潮の移動方向を見ると、基本的には東に向かう対馬海流に乗った動きであり、若狭

図7. 2009年4月10日の2時5分(Terra衛星)と3時45分(Aqua衛星)のBand1画像をそれぞれ赤(R)および緑、青(G,B)の強度としてカラー合成した画像



湾内の様な複雑な渦状の動きは見られない。しかし沿岸に近いため、それほど安定した層流にはなっていないことが解る。速度としては、平均的には1.5~2.0km/h位の値をとるが、陸域との距離および沿岸域の地形により大きな違いが現れている。また、赤潮の消長過程については、経過時間が図6の場合の半分の100分間であることもあり、あまり明確ではないが、今後研究を進めたいと考えている。

図8(a)



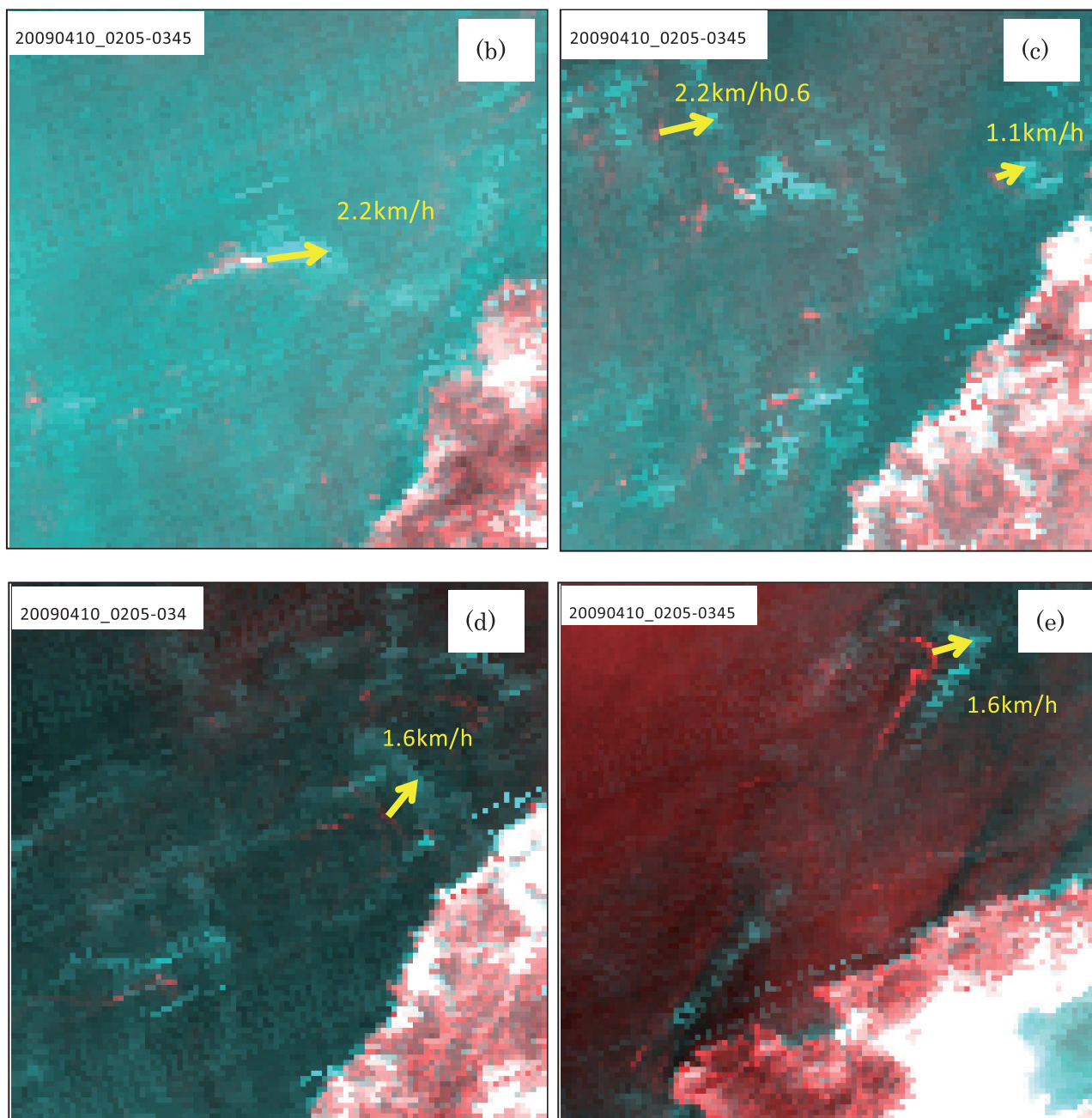


図 8. 図 7 の黄色の枠内を拡大した画像 西から東へ(a)、(b)、(c)、(d)、(e)の順

4. 結論

連続する 2 つの衛星パス（100 分あるいは 200 分の間隔）の MODIS の Band1 のデータを比較する事により、赤潮と判断できる Band1 および NDVI の強い領域の移動速度が得られた。その結果、若狭湾内では複雑な渦状の海流に乗った赤潮の動きが見られる一方、山陰沖沿岸に近い部分を除く海域では対馬海流に乗った比較的一様な移動が確認された。また、移動の速さは、若狭湾内ではほぼ 1km/h 以下であり、山陰沖では平均として 1.5～2km/h 程度である事が示された。

一方赤潮の消長過程については今後さらに検討する課題であるが、赤潮の増殖と死滅過程を衛

星の分光画像により解析することができれば、それは全く新規の情報であり、今後の赤潮研究に大きな貢献ができると考えている。

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。

参考文献

- (1) 青山隆司, 船木俊宏, 大家寛, 2004, MODIS データを用いた若狭湾の赤潮予測, 日本リモートセンシング学会第 37 回学術講演会論文集, B14, pp. 115-116
- (2) 青山隆司, 大家寛, 2005, MODIS データを用いた若狭湾の赤潮検出, 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) 青山隆司, 大家寛, 2006, 福井工業大学 Terra, Aqua/MODIS 受信・解析システム, Journal of Advanced Marine Science and Technology Society, Vol. 12, No. 1, pp. 69-74
- (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-1-8, Goa, India
- (5) 青山隆司, 大家寛, 2007, MODIS 画像に基づく若狭湾の赤潮発生条件, 福井工業大学研究紀要第 37 号, pp. 343-350

(平成 23 年 3 月 31 日受理)