



|                  |                                                                                                 |
|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Title            | 衛星画像を用いたオホーツク海北海道沿岸河口付近の沿岸水分類方法の検討                                                              |
| Author(s)        | 朝隈, 康司; 兼上, 裕作; 島, 岳志                                                                           |
| Citation         | 低温科学, 74, 85-93                                                                                 |
| Issue Date       | 2016-03-31                                                                                      |
| DOI              | <a href="https://doi.org/10.14943/lowtemsci.74.85">https://doi.org/10.14943/lowtemsci.74.85</a> |
| Doc URL          | <a href="https://hdl.handle.net/2115/61189">https://hdl.handle.net/2115/61189</a>               |
| Type             | departmental bulletin paper                                                                     |
| File Information | 085-093.pdf                                                                                     |



# 衛星画像を用いたオホーツク海北海道沿岸河口付近の 沿岸水分類方法の検討

朝隈 康司<sup>1)</sup>, 兼上 裕作<sup>1)</sup>, 島 岳志<sup>1)</sup>

オホーツク海北海道沿岸域は高い漁獲量を誇っており、このうちホタテガイやカキに代表されるベントス類が3割以上を占める。回遊ができないベントス類を養うには豊富な基礎生産と、これを維持するための栄養塩類が豊富である必要がある。しかしながら、この海域を流れる宗谷暖流は黒潮を起源とする対馬暖流の支流のため貧栄養である。このため、宗谷暖流への栄養塩供給源を解明することは、持続的な地域水産業の発展へ貢献できる。本研究は、ホタテガイの好漁場である常呂沖を対象に、河川水を宗谷暖流への栄養塩供給源の1つと考えてその影響範囲をモニタリングすることを目的に、MODIS 画像の4チャンネルのみを用いて沿岸水の種類方法を検討したものである。その結果、衛星画像から常呂川河口から北東方向へ8.5 km 程度の懸濁物の輸送を見ることができた。

## Study of the classification method for the costal water in an outfall area along the Hokkaido coast in the Okhotsk Sea from satellite imagery

Koji Asakuma<sup>1</sup>, Yusaku Kenjyou<sup>1</sup> and Takeshi Shima<sup>1</sup>

The shore area along the Hokkaido coast in the Okhotsk Sea have high fish catches and shellfishes live in the ocean bed such as scallops or oysters accounts for 30% among fisheries resources in these area. Abundant primary production and enough nutrients to support production are necessary to maintain resource of benthos which cannot make migration. However the Soya Warm Current flow in these sea area which is the dynamic current of the Tsushima Current originated the Kuroshio Current have a low in nutrients. Therefore it can contribute to the sustainable local fisheries in the Okhotsk area to elucidate nutrients sources of supply to the Soya Current. This study is to development the classification method with four channels at most from MODIS satellite imagery for coastal water around the mouth of the Tokoro River, which is the good inshore fishery spot for scallops, for the purpose of monitoring of the influence range of the river water which would be supposed as one of the nutrient sources of supply to the coastal area of Soya Current. As a result, the transportation of the suspended solids was able to observe about 8.5 km to the northeast direction from the mouth of the Tokoro River in satellite imagery.

キーワード：宗谷暖流, 沿岸域, 河川水, 衛星リモートセンシング, 画像分類  
the Soya warm current, coastal waters, river water, satellite remote sensing, image classification

### 1. はじめに

オホーツク海北海道沿岸域は水産業が盛んなことで知られており、オホーツク海に面するオホーツク振興局内の水産物漁獲高は305,770トンである（水産林務部総務課, 2013）。これは北海道の漁獲高1,239,456トンの24.7%, 日本全国の漁獲高4,729,000トンの6.5%を占める（農林水産省, 2013）。著者の所属する東京農業大学生物産業学部（立地する網走市前浜及び内水面での水産物漁獲高は62,354トンであり、オホーツク振興局内の漁獲高の20.4%に達する（網走市, 2013）。網走市前浜

---

連絡先

朝隈 康司

東京農業大学 生物産業学部

〒099-2493 北海道網走市八坂 196

Tel. 0152-48-3914

e-mail : k-asakum@bioindustry.nodai.ac.jp

1) 東京農業大学 生物産業学部

Faculty of Bioindustry, Tokyo University of Agriculture,

Abashiri, Japan

での漁獲高を魚種別に見ると、ホタテガイが(34.2%, うち稚貝 7.0%)と突出しており、次いでサケ(24.7%), スケトウダラ(23.4%)となっている(網走市, 2013)。このうちホタテガイはベントスとしての性質上、地撒き、垂下に関わらず漁獲までの期間を沿岸の固定海域で成長する。ホタテガイがこのような高い漁獲高を得るためには、局所的に安定した餌料環境が必要であり、そのためには一次生産者である植物プランクトンが高い基礎生産力をもつ必要がある(Lalli and Parsons, 1995)。基礎生産力を高く維持できる植物プランクトンとしては、大きさが  $10\text{ }\mu\text{m}$  以上の大型の植物プランクトンが適している。大型の植物プランクトンが優先するためには栄養塩濃度が高くなければならない(塩本, 2011)。一方、オホーツク海の表層にはオホーツク海固有で栄養塩濃度の比較的低いオホーツク海表層低塩分水、その下層には栄養塩濃度の高い中冷水(青田, 1979; 米田, 1985)、さらに、北海道沿岸から沖合 40 km 付近まで宗谷暖流が流れている(青田, 1972; Takizawa, 1982; 青田ほか, 1989)。宗谷暖流は黒潮を起源とする対馬暖流の続流であるため宗谷暖流の影響を受けた水塊の栄養塩濃度が低く、とくに硝酸態窒素に関しては、オホーツク海表層低塩分水に対して 1 桁程度低い(米田, 1985; 米田・戸屋, 1986; 工藤ほか, 2011)。また、宗谷暖流は春から夏にかけて東方向への流速が増加し分布域も広がるが(Takizawa, 1982)、晩秋までには流速が小さくなり、冬季には海底に潜流するという季節変動をするため(青田, 1972)、沿岸域への栄養塩の供給も季節ごとに変化する。ホタテガイの主要な漁場である北見市常呂町沖においては、冬季から 5 月にかけて栄養塩濃度が高い中冷水の張り出しが観測されているが、6 月には全層において宗谷暖流水が存在している(工藤ほか, 2011)。このため、宗谷暖流水塊の影響を受けた春季以降において、中冷水以外の栄養塩の供給メカニズムを解明し、その変動をモニタリングすることは、この地域における持続可能な水産資源の確保に役立つ。

沿岸域における中冷水以外の栄養塩の供給は、表層混合層の乱れによる水深の浅い海底からの供給と、河口域では河川水による供給が考えられる。さらに、ホタテガイなどの底生生物(ベントス)は、表層から底層に向かって沈降する無機・有機の懸濁物質を直接取り込むため、栄養塩のみならず河川起源の懸濁物の輸送も重要である。

近年、北海道沿岸河口域において河川水からの影響が注目されており、石狩湾、天塩川、十勝川河口域では、河口付近の表層堆積物中の淡水生珪藻類の遺骸から、河

川水の流れや、碎屑物粒子の運搬が解明されてきている(嵯峨山, 2006; Agboola and Kudo, 2014)。とくに宗谷海峡から 100 km 程度に位置する天塩川(流域面積,  $5,590\text{ km}^2$ ; 平均流量,  $233.5\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$ )において、淡水生珪藻類が河口から 31 km の地点まで確認されていることから(嵯峨山, 2006)、宗谷暖流に対する天塩川の影響は無視できない。一方、常呂町付近には、常呂川および湧別川が流入する。常呂川は、オホーツク海北海道沿岸最大の河川であり、流域面積は  $1,930\text{ km}^2$ 、平均流量は  $26.41\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$  である。また、湧別川は流域面積  $1,480\text{ km}^2$  であり、平均流量は  $33.56\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$  と、常呂川より流量が多い。しかしながら、この地域において宗谷暖流への河川水の影響に関する知見は少ない。このような未知の影響範囲を調べる場合には、衛星画像の利用が有効である。衛星画像は対象範囲が表層のみに限定されるが、過去のデータの蓄積があるという利点のみならず、将来に渡って継続的なデータ取得も可能である。

本研究は、常呂川からオホーツク海へ流入する河川水の影響範囲を把握することを目的に、MODIS 画像を用いて沿岸水の分類を試みたものである。衛星画像を用いた外洋の海中物質のモニタリングは古くからおこなわれており、とくに植物プランクトンがもつクロロフィル a 濃度の算出は 1970 年代からおこなわれてきた(Morel and Prieur, 1977)。これは、分光学的に外洋水(Case I Water)が、一部の白波などによる海表面反射率の増加を除いては、海水とクロロフィル a による反射または吸収のみから構成されると仮定することから始まった(Morel, 1988)。近年では、MODIS や SGLI など可視域から近赤外域に 16 バンド以上をもつ中～高程度の波長分解能をもつセンサの運用により(OBPG, 2015)、クロロフィル a 以外の色素を用いた藻類の分類(井上, 2006)をはじめとして、沿岸水(Case II Water)や湾内水においては、有色有機溶存態(colored dissolved organic matter, CDOM)、有機懸濁物(organic suspended solids, OSS)、無機懸濁物(inorganic suspended solids, ISS)などの分類も可能となってきた。その一方で、今回対象とする常呂沖などの微地形を対象とするには高い空間分解が求められ、さらには河川からの流入物の運搬は短い時間スケールで変化することから高い時間分解能も求められる。波長分解能と空間分解能、時間分解能はトレードオフの関係にあり、沿岸域の生態系のモニタリングを目的とした場合は、空間分解能、時間分解能を優先せざるを得ない。以上のことから、本研究では、なるべく少ないチャンネル数で河口付近の沿岸水を分類する方法を検討した。対象地域は、宗谷暖流への影響が大きく、

これまでの研究実績も多い天塩川河口域と、ホタテガイの好漁場である常呂川河口域とした。

## 2. MODIS HKM 画像における沿岸水の分類

### 2.1 利用データと分類方法

本研究で利用した衛星画像は、2009 年から 2012 年に東京農業大学生物産業学部で受信された TERRA および AQUA/MODIS の画像の中から、目視で雲の無い日の画像 34 枚を選択し、天塩川河口域  $38 \times 28$  画素 ( $8.5 \times 7 \text{ km}^2$ ) および常呂川河口域  $60 \times 28$  画素 ( $15 \times 7 \text{ km}^2$ ) を切り出した。利用したチャンネルは、可視バンドのチャンネル 1 (QKM (250 m 解像度), 赤, 620–670 nm), 4 (HKM (500 m 解像度), 緑, 545–565 nm), 3 (HKM, 青, 459–479 nm) の 3 チャンネルと、近赤外バンドのチャンネル 2 (QKM, 841–876 nm), 短波長赤外バンドのチャンネル 6 (HKM, 1628–1652 nm) を用いた。チャンネル 5 (1230–1250 nm) および 7 (2105–2155 nm) は、ノイズの影響が大きかったため除外した。HKM 解像度の画像は 4 分割し、QKM 解像度に合わせて 1 画素とした。衛星画像は大気上端から対象物を観測するので、大気効果によりみかけ上の反射率と対象物質の真の反射率が異なったり、周辺画素からの影響による滲みが発生したりするため分類精度に問題が発生する (Wang and Gordon, 1994)。そこで、放射伝達コード 6S (Vermote et al., 1997) を用いて大気分子による吸収とレイリー散乱の補正をおこなった。図 1a に、2012 年 4 月 15 日のレイリー補正済みの MODIS RGB 合成画像を示す。この日は、天塩川ならびに常呂川双方の河口付近において目視でブルームが確認できた。時期的にこのブルームは雪融け水によるものと考えられる。図 1b に天塩川河口付近の拡大図、図 1c に常呂川河口付近の拡大図を示す。エアロゾルによるミー散乱の補正については、サンフォトメータなどによる正確な光学パラメータが必要で、さらに膨大な計算時間がかかるため、本研究では、エアロゾルによる大気効果がある程度低減されると報告されている小野ら (2002, 2003) による、全バンドの総和に対する各バンド  $i$  ( $i \in \{1, 2, 3, 4, 6\}$ ) の観測値  $L_i$  の割合である規格化された輝度値：

$$R_i = \frac{L_i}{\sum L_i}, \quad i \in \{1, 2, 3, 4, 6\}, 0 \leq R_i \leq 1 \quad (1)$$

を用いた。

分類項目は、低波長分解能を想定しているため、分類クラスを少な目に見積もって、海水 (sea water, SW), 植物プランクトンのもつクロロフィル a (CHL), 有機、

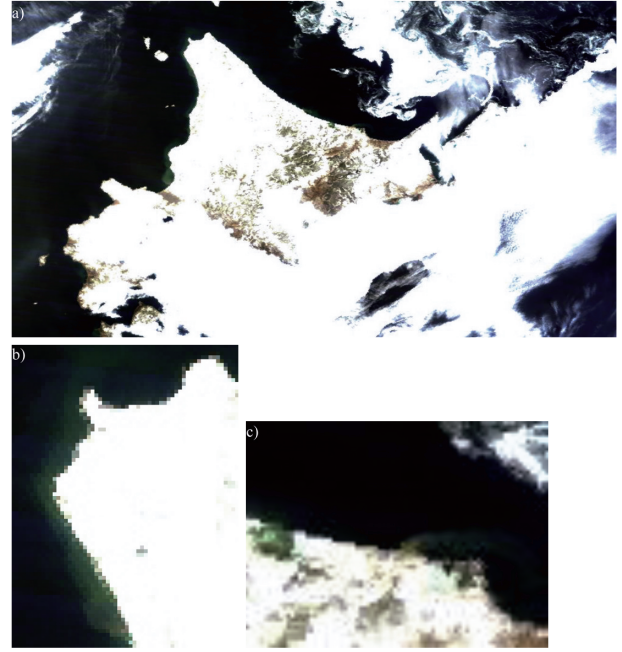


図 1 : (a) 6S を用いてレイリー補正された 2012 年 4 月 15 日の MODIS 可視合成画像。 (b) a の天塩川付近の拡大図。 (c) a の常呂川付近の拡大図。

Figure 1 : (a) MODIS RGB composed image with Rayleigh corrected radiance obtained from 6S the radiative transfer code on 15 April, 2012. (b) Enlarged image around mouth of the Teshio River of image a. (c) Same as image b but around mouth of the Tokoro River.

無機を区別しない懸濁物質 (total suspended solids, SS), 有色溶存有機態物質 (colored dissolved organic matter, CDOM) の 4 クラスとした。

### 2.2 沿岸水の分類

全期間の天塩川、常呂川それぞれの範囲の RGB 合成画像から、目視で河口域に存在する有色物質と、無色の海水に画素を分けた後、各画素のもつ規格化された各チャンネルの輝度値  $R_i$  のヒストグラムを作成した (図 2)。図 2a はチャンネル 3 ならびに図 2b はチャンネル 4 のヒストグラムであり、共に三峰性の分布が見られた。またチャンネル 3、チャンネル 4 共に一番輝度値の低い峰と 2 番目の峰が海水と重なっていた。このため、チャンネル 3 は、SW ( $51.4 \pm 2.2$ ) と SW より高い輝度をもつクラス ( $56.1 \pm 2.5$ ) の 2 のクラスに分類した。同様にチャンネル 4 は、SW ( $27.4 \pm 2.8$ ) と、SW より高い値とるクラス ( $33.3 \pm 3.1$ ) の 2 つのクラスに分類した。図 2c はチャンネル 1 および図 2d はチャンネル 2 を示す。双方共に二峰性の分布に見えるが、峰の頂点同士の距離が分布幅の 1% 程度と狭く分離が難しかった。図 2e はチャンネル 6 を示すが、分布が 0 付近に集中しているため分類には利用できなかった。以上のことから、チャ

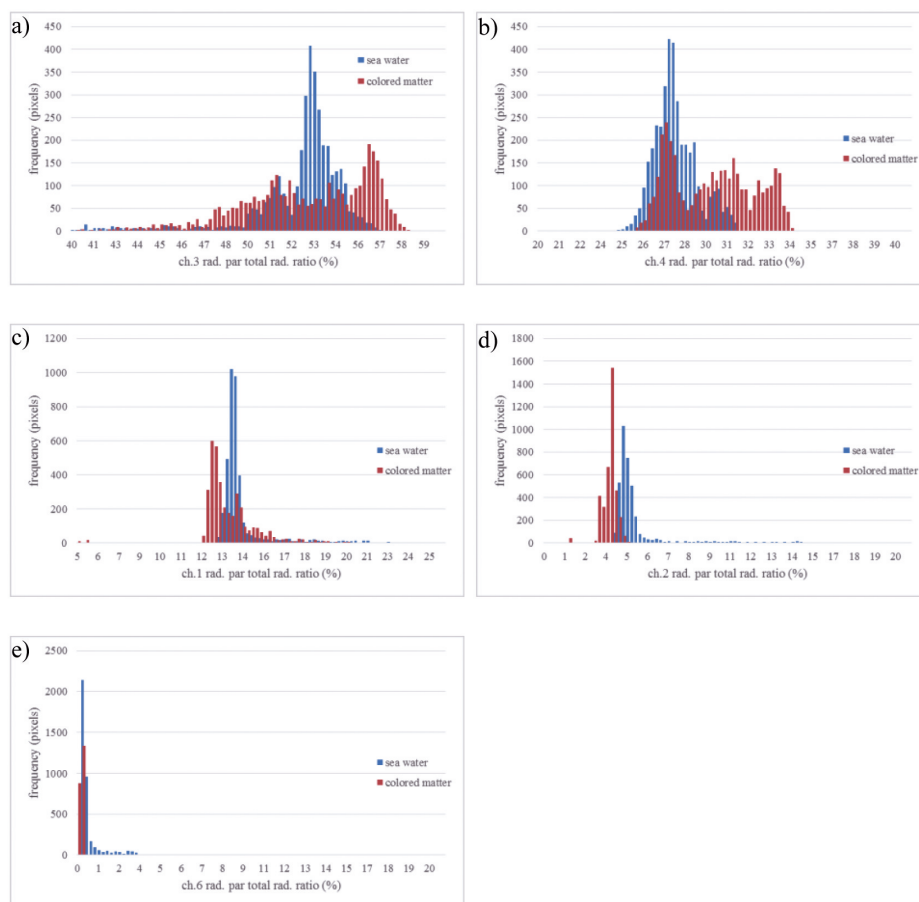


図2：2009年から2012年までの34シーン中の天塩川河口周辺の正規化されたMODIS各チャンネル輝度のヒストグラム (a) チャンネル3(青). (b) チャンネル4(緑). (c) チャンネル1(赤). (d) チャンネル2(近赤外). (e) チャンネル6(短波長赤外).

Figure 2 : Histograms of the normalized radiance of the MODIS each channel around the mouth of the Teshio River while 2009 to 2012. (a) Channel 3 (Blue). (b) Channel 4 (Green). (c) Channel 1 (Red). (d) Channel 2 (Near Infra-Red). (e) Channel 6 (Short Wave Infra-Red).

ンネル3とチャンネル4の輝度が低い峰と高い峰を組みあわせた4つのクラス  $G_{LL}$ ,  $G_{LH}$ ,  $G_{HL}$ ,  $G_{HH}$  にマルチレベル濃度スライス法を用いて分類した (Rees, 1990). このうち,  $G_{LL}$  は海水を示しているので  $G_{sw}$  と書き換えた.

分類は2009年から2012年までの34枚の画像を対象に行ったが, 3つのクラスすべてが揃う頻度は少なかった. 図3にすべてのクラスが見られた2010年8月18日の天塩川河口付近の画像を示す. 図3aはRGB合成画像を示す. 同年8月14日に天塩町では80mmの大雨が降った後であり (気象庁ホームページ), 4日後の18日も河口付近に流出した河川水の影響が強くみられる. 図3bの橙色で示す画素が  $G_{HH}$ , 緑が  $G_{LH}$ , 赤が  $G_{HL}$  に分類されたものである. 河口から近い順に  $G_{HH}$ ,  $G_{LH}$ ,  $G_{HL}$  となっている. 河口からの長距離輸送と考えれば粒子状のSSは溶存態のCDOMより先に沈降すると考えられる. 分光学的にも土砂などは反射率が長波長に向かって緩やかに増大するが, クロロフィルaや (Lalli

and Parsons, 1995), CDOMは青の吸収が強いことから (Kutser et al., 2005; Zhang et al., 2007), 青緑共に観測値の高い  $G_{HH}$  は, SSである可能性が高い. このため,  $G_{HH}$  を  $G_{ss}$  と書き換えた. また,  $G_{LH}$ ,  $G_{HL}$  はCHLまたはCDOMのいずれかの可能性が高いが,  $G_{HL}$  は青の観測値が緑より高い物質とみなせるので, CHL, CDOMのいずれもこの特徴に一致しない. このことについては, 3節で考察するが, 規格化により青バンドが過大評価されていると考えられる. また, 規格化により赤および近赤外バンドでは峰頂間の差が小さくなり分類クラス境界の閾値を決めること, また, 相対値であるため対象物質固有の分光特性を用いた議論が難しくなった. さらに, 微地形を対象とした高解像度化へ対応のため, なるべく少ないチャンネル数での分類を検討したが, 単純なマルチレベルスライス法ではCHLとCDOMを区別することは難しかった.

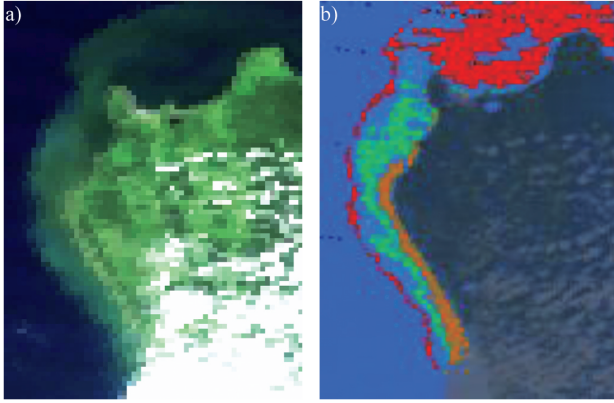


図3：(a) 2010年8月16日の天塩川河口付近のMODIS RGB合成画像。(b) 同日のマルチレベルスライスによる分類画像。水色がクラス  $G_{sw}$  (海水), 橙色が  $G_{LH}$ , 緑がクラス  $G_{HH}$ , 赤がクラス  $G_{HL}$  を示す。

Figure 3 : (a) MODIS RGB composed image around the mouth of the Teshio River on August 16, 2010. (b) Classified image obtained from the multi-level slice classification method with MODIS images. Light blue pixels belong with the class  $G_{sw}$  (sea water), orange pixels with the class  $G_{LH}$ , green pixels with the class  $G_{HH}$  and red pixels with the class  $G_{HL}$ .

### 3. 沿岸水分類項目の濃度指標の作成

2.2の分類結果からCHLとCDOMの区別は難しいため  $G_{LH}$ ,  $G_{HH}$  を合わせて  $G_{chl}$  と書きなおした。次に、この3つの分類クラス  $G_{sw}$ ,  $G_{ss}$ ,  $G_{chl}$  の濃度に関する指標の作成を検討した。指標の計算には、波長の長い方から近赤外バンドのチャンネル2, 可視バンドの1, 4, 3チャンネルのレイリー補正された地表面反射率  $L_i$  を用いた。チャンネル6は分類に効果が無いと考えられるため除外した。この4チャンネルのうち2チャンネルごとの正規化差値 (Normalize difference channel value: NDV) の全ての組み合わせ：

$$d_{ij} = \frac{L_i - L_j}{L_i + L_j}, (i, j \in \{2, 1, 4, 3\}; i \neq j) \quad (2)$$

を求めた。ただし、 $i, j$  が逆となる組み合わせは符号が反転するだけなので、波長の長い方から短い方を減じたNDVのみを残した。次に、各NDVと各分類クラスとの関連性を検討した。

図4および図5に、図1と同日の天塩川河口付近および常呂川河口付近の各NDV画像を示す。この日は時期的に雪解け水による流出と考えられる。 $d_{21} (= (L_1 - L_2) / (L_1 + L_2))$  は、陸域のリモートセンシングで用いられる一般的な植生指標 (Normalize vegetation index: NDVI) と同じである。図4aを見ると、 $d_{21}$  の値は、 $G_{sw}$  に分類される画素では0になり、 $G_{chl}$ ,  $G_{ss}$  に分類される画素では共に負の値となった。図4bを見ると、 $d_{24}$  は、 $G_{sw}$ ,  $G_{chl}$ ,  $G_{ss}$  の全てが負の値となり、 $G_{chl}$ ,  $G_{ss}$  が僅

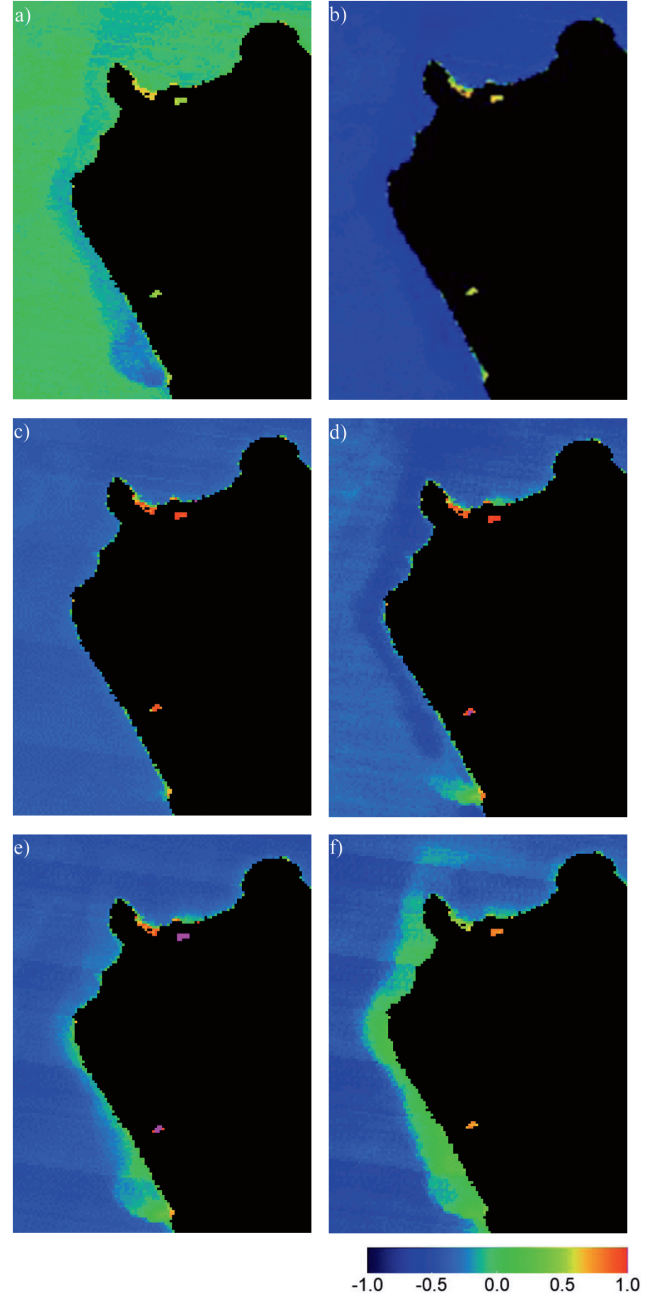


図4：(a) 2012年4月15日の天塩川河口周辺のチャンネル2と1の正規化差画像。(b) (a)同様にチャンネル2と4の差画像。(c) チャンネル2と3の差画像。(d) チャンネル1と4の差画像。(e) チャンネル1と3の差画像。(f) チャンネル4と3の差画像。

Figure 4 : (a) Normalized difference value image between channel 2 and ch. 1 around the mouth of the Teshio river on 15 April, 2012. (b) Same as NDV image (a) but difference between ch. 2 and ch. 4. (c) NDV image of ch 2 and ch. 3. (d) NDV image of ch. 1 and ch. 4. (e) NDV image of ch. 1 and ch. 3. (f) NDV image of ch. 4 and ch. 3.

かに  $G_{sw}$  より低い値となった。図4cを見ると、 $d_{23}$  でも、 $G_{sw}$ ,  $G_{chl}$ ,  $G_{ss}$  の全てが負の値となるが、特徴的な差違が見られなかった。図4dを見ると、 $d_{14}$  では、 $G_{ss}$  が正の値となり、 $G_{sw}$ ,  $G_{chl}$  が共に負の値であるが、 $G_{chl}$ ,

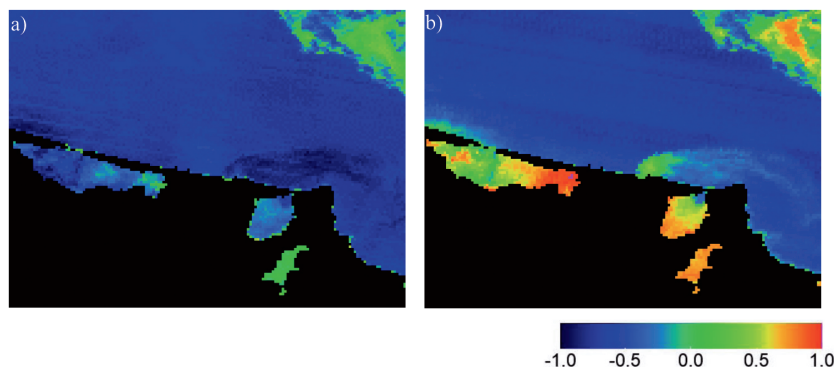


図5：(a) 2012年4月15日の常呂川河口周辺のチャンネル1と4の正規化差画像。(b) (a)と同様にチャンネル4と3の差画像

Figure 5 : (a) Normalized difference value image between channel 1 and ch. 4 around the mouth of the Tokoro river on 15 April, 2012. (b) Same as NDV image (a) but difference between ch. 4 and ch. 3.

の方が  $G_{sw}$  より低い値となった。図 4e の  $d_{13}$  では、 $G_{sw}$  が負の値となり、 $G_{ss}$ 、 $G_{chl}$  が共に正の値をとるが、 $G_{ss}$  の方が  $G_{chl}$  より高い値となる。図 4f を見ると  $d_{43}$  は、 $G_{sw}$  が負の値となり、 $G_{ss}$ 、 $G_{chl}$  は共に正の値をとるが明確な差は見られなかった。この 6 パターンの NDV と分類クラスの関係から、分類クラスの波長依存性について考察した。 $G_{ss}$  の成分として、無機懸濁物質として土砂が含まれていると考えられるが、一般的な土砂の分光特性として観測波長が短波長から長波長にかけて反射率は緩やかに高くなる (Clark et al., 2007; Baldridge et al., 2009)。しかし、海水中に存在する土砂には見かけ上水による吸収が加わる。水の分光特性としては短波長から長波長側にかけて吸収が強くなる。この 2 つの特性から、土砂の濃度にもよるが、最も波長が長い近赤外を含む観測波長では水の特徴が強く表れ  $d_{21}$ 、 $d_{24}$ 、 $d_{23}$  で負の値となったと考えられる。一方、可視域においては土砂の特徴が強く表れ、 $d_{14}$ 、 $d_{13}$ 、 $d_{43}$  で正の値になったと考えられる。一方、クロロフィル a の分光特性として陸上では、近赤外、緑、赤、青の順に反射率が高いが、 $G_{chl}$  が示す植物プランクトンの場合は水による吸収のため、緑、赤、近赤外、青の順に反射率が高い値となる。このため、 $d_{21}$  は陸上の NDVI とは逆に負の値をとり、 $d_{43}$  は正の値をとる。以上のことから、水の吸収による影響が最も少ない  $d_{43}$  と、 $G_{ss}$  と  $G_{chl}$  の符号が逆となる  $d_{14}$  を用いれば  $G_{ss}$  と  $G_{chl}$  の分離が可能と考えられる。そこで、クロロフィル a の濃度を  $C_{chl}$ 、懸濁物の濃度を  $C_{ss}$ 、衛星のパスによる効果や大気による効果を適当なパラメータとして、 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $b_1$ 、 $b_2$  を伴えば、 $d_{43}$  ならびに  $d_{14}$  とクロロフィル a、および懸濁物の濃度との関係は：

$$\begin{cases} d_{43} = a_1 C_{chl} + b_1 C_{ss} \\ d_{14} = a_2 C_{chl} + b_2 C_{ss} \end{cases} \quad (3)$$

と書くことができる。これに濃度補正のための係数  $m$ 、 $n$  を伴わせて、みかけ上のクロロフィル a 濃度を  $mC_{chl}$ 、みかけ上の懸濁物の濃度を  $nC_{ss}$  を用いて：

$$\begin{cases} mC_{chl} = a_1 d_{14} - \beta_1 d_{43} \\ nC_{ss} = a_2 d_{43} - \beta_2 d_{14} \end{cases} \quad (4)$$

と書き直した。大気効果が不明の場合は、通常、懸濁物が無いと仮定できる外洋水の反射率を近赤外域で 0 と仮定して放射伝達モデルを用いて大気効果求める (Wang and Gordon, 1994)。対象物の反射率が仮定できない場合は、ある程度狭い領域内では大気効果が均質であると仮定して、海面とみられる全ての画素の反射率が非負かつ最小となる大気パラメータを総当たりで求める方法がある (Kimura et al., 2001)。今回は可視域を含むため、後者の方法を参考に、対象領域内の  $G_{sw}$  に分類されている全ての画素の  $mC_{chl}$  ならびに  $nC_{ss}$  の総和が非負の最小値となる  $a_1$ 、 $\beta_1$ 、 $a_2$ 、 $\beta_2$  を求めた。この  $a_1$ 、 $\beta_1$ 、 $a_2$ 、 $\beta_2$  を、 $G_{chl}$  ならびに  $G_{ss}$  に分類されている画素に代入して得られた  $mC_{chl}$  を分離されたクロロフィル a の濃度指標 (chlorophyll-a concentration index, CCI) ならびに  $nC_{ss}$  を懸濁物の濃度指標 (suspended solid concentration index, SCI) とした。

#### 4. 結果と考察

図 6a に 3 の方法で分離した図 1 と同日の 2012 年 4 月 15 日の天塩川河口付近の SCI、図 6b に CCI を示す。このとき  $a_1 = 2.0$ 、 $\beta_1 = 0.7$ 、 $a_2 = 1.0$ 、 $\beta_2 = 2.8$  であった。

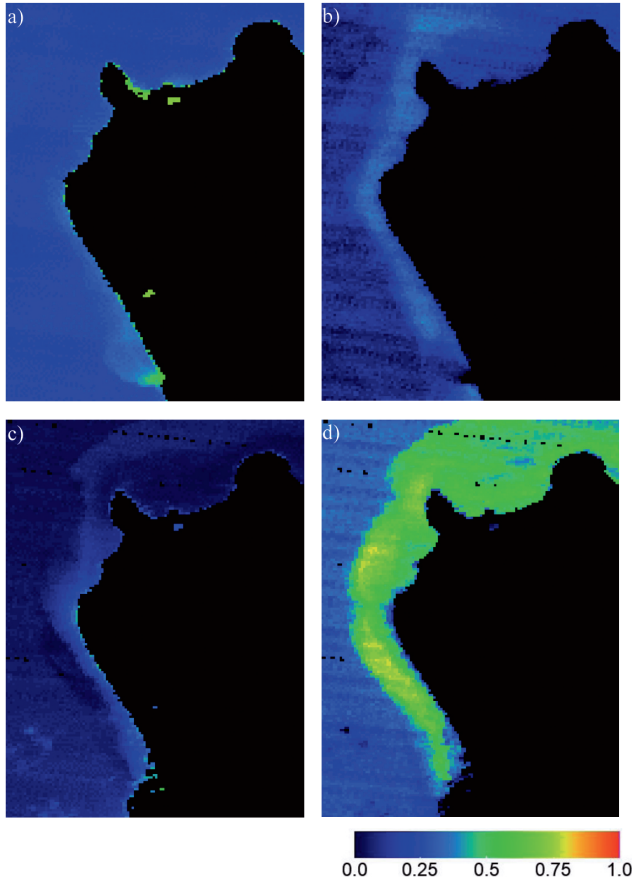


図6：(a)2012年4月15日の天塩川河口周辺の懸濁物指標 (SCI). (b) (a)と同日のクロロフィル a 指標 (CCI). (c) 2010年8月16日の天塩川河口周辺の SCI. (d) (c)と同日の CCI. Figure 6: (a) Suspended solid concentration index (SCI) around the mouth of the Teshio River on 15 April, 2012. (b) Chlorophyll-a concentration index (CCI) on same as (a). (c) SCI on 16 August, 2010. (d) CCI on same as (c).

図6aから、SCIはブルーム状に北西方向（西方向に28画素（7.0 km）、北方向に26画素（6.5 km））に広がり、その先でSCIは0に近づく。また、沿岸に沿って北向きには抜海村付近の84画素（21.0 km）まで、SCIの高い領域が見られた。このSCIの高い領域は、嵯峨山ら（2006）による天塩川からの淡水濃度が15%となる地点に等しい。図6bを見るとCCIの高い領域はSCIの高い西側28画素の地点から帯状に北側納沙布岬を超えて170画素（42.5 km）の地点まで伸びている。図6a, bを総合してみるとSCIの高い領域では、CCIが低くなる傾向にある。これは、懸濁物と植物プランクトンの分離可能性を示すが、嵯峨山ら（2006）により淡水性珪藻類遺骸の堆積物が河口から36 kmまで確認されていることから、CCIが低くSCIの高い領域にもクロロフィルaは存在していると考えられる。このことから、SCIは、懸濁物とクロロフィルaの混在量を示し、CCIはクロロフィルaのみを示す指標として利用することが望まし

い。なお、クロロフィルaと無機懸濁物の分離は、全球を対象としたSeaDASなどの汎用リモートセンシングシステムで可能であるが（OBPG, 2015）、4 km以上の空間解像度が必要である。本研究方法はチャンネル1, 4, 3の可視3チャンネルのみで分離可能としていることから高解像度への移行が容易であると考えられる。

次に、マルチレベルスライスによる分類との比較のため、図6cに図3と同日の2010年8月16日のSCIを示す。この日は、SCIはブルーム状には広がらず沿岸に沿って細い帯状に分布している。図3bと比べると、 $G_{ss}$ に分類された領域とSCIの高い領域は一致している。マルチレベルスライスによってSSは分類できるが、濃度変化を見ることのできるSCIの方が利用しやすいと言える。図6dを見るとCCIが特に高い領域と図3cの $G_{HH}$ が、それよりCCIがやや低い領域に $G_{HL}$ が一致している。このことは、クロロフィルaが存在している領域は青バンドの反射が高いということになり矛盾を生じたため、観測輝度値の総和で各チャンネルと正規化すると少なくとも海面においては青バンドが過大評価されている可能性がある。

以上のことをふまえて、図7に示す常呂川河口付近を見ると、図7aのSCIが高い領域は、河口から北東方向（北に11画素（2.75 km）、東に34画素（8.5 km））にブルームが見られた。図7bのCCIが高い領域は、沿岸からSCIが高い領域を除いて、北東方向（河口から北に11画素（2.75 km）、東に49画素（12.25 km））に広がった先、能取岬を超えて南東方向（河口から東へ80画素（20 km）、南へ23画素（5.55 km））へ渦を巻くように広がっていた。SCIが高い領域はホタテガイの地撒きをおこなっている常呂漁港沖と一致し、CCIが高い領域は網走漁港沖と一致している。とくに、CCIが高い領域は、採泥やセジメントトラップによる沈降粒子の捕集が開始されたばかりであるが、今後、リモートセンシングデータと合わせて検討を継続していく。なお、SCI, CCIは実際の濃度ではないため、今後現場実測値との関係性を検討する予定である。

一方、本研究のように衛星画像を利用する場合、雲の影響により河川水の流量が最も大きくなる降雨時の観測ができないだけでなく、観測可能な日数が少ないという構造的な問題点がある。本研究の手法は可視バンド3チャンネルで実施できるため、市販のデジカメなどへの転用と、近年、高解像度地上観測で注目されている無人航空機（Unmanned aerial vehicles, UAV）などの地表面に近い高度からのリモートセンシングへ展開していくことを検討している（Victor, 2015）。また、地表面に近い

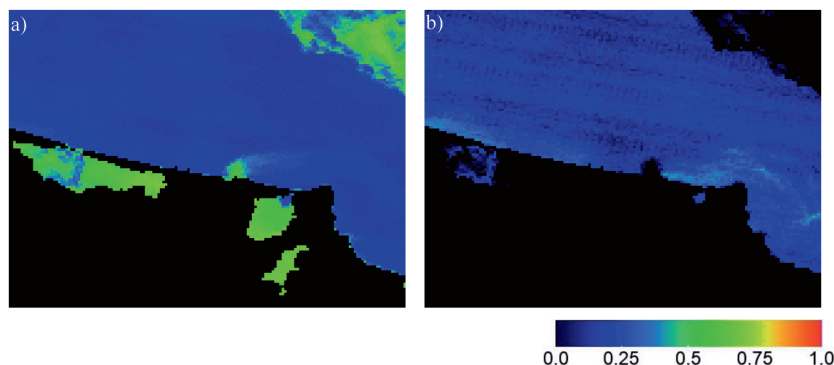


図7：(a) 2012年4月15日の常呂川河口周辺の懸濁物指標 (SCI). (b) (a)と同日のクロロフィル a 指標 (CCI).

Figure 7 : (a) Suspended solid concentration index (SCI) around the mouth of the Tokoro River on 15 April, 2012. (b) Cchlorophyll-a concentration index (CCI) on same as (a).

場所から観測をおこなえば、大気効果を見捨てることのできる。このため、各バンドの観測値においてSNの向上が期待でき、今回は分離が難しかったクロロフィル a と CDOM を対象に、今後、SCI と CCI のとる値の範囲でこれらの物質を分類する方法を検討していきたい。

## 謝辞

本研究は、北海道大学低温科学研究所共同研究「陸域と海洋間における縁辺海の自然科学的な機能と人間活動への役割」(2014-2015)により実施された成果の一部である。ならびに千葉大学環境リモートセンシング研究センター共同利用研究(2013-2014)により実施された成果の一部である。また、東京農業大学大学戦略研究プロジェクト「北海道オホーツク海沿岸域の豊かさを支えるメカニズムの解明：低次生産からのアプローチ」(2013-2015, 代表：塩本明弘氏(東京農業大学, 生物産業学部教授))からも予算支援を頂いた。ここに記して感謝いたします。

## 参考文献

網走市 (2013) 平成 25 年度版水産統計. <http://www.city.abashiri.hokkaido.jp/030shisei/020toukei/080suisanntonkei/index.html>, (最終アクセス 2015-08-20).

Agboola, J. I. and I. Kudo (2014) Different contributions of riverine and oceanic nutrient fluxes supporting primary production in Ishikari Bay. *Cont. Shelf Research*, **88**, 140-150.

青田昌秋 (1972) 北海道オホーツク海沿岸沖における海況変動の研究 Ⅲ. 低温科学 物理篇, **29**, 213-224.

青田昌秋 (1979) オホーツク海・北海道沿岸域の海況変動. 沿岸海洋研究ノート, **17**, 1-11.

青田昌秋, 石川正雄, 山田俊郎 (1989) 宗谷海峡の流れについて. 低温科学 物理篇, **47**, 147-160.

Baldridge, A. M., S. J. Hook, C. I. Grove and G. Rivera (2009) The ASTER Spectral Library Version 2.0. *Remote Sens. Environ.*, **113**, 711-715.

Clark, R. N., G. A. Swayze, R. Wise, K. E. Livo, T. M. Hoefen, R. F. Kokaly and S. J. Sutley (2007) USGS Digital Spectral Library splib06a. <http://speclab.cr.usgs.gov/spectral.lib06/ds231/datatable.html>, (最終アクセス 2015-08-20).

井上勲 (2006) 藻類 30 億年の自然史 藻類からみる生物進化. 東海大学出版会, 643pp.

Kimura, Y., T. Izumiya and Y. Kawata (2001) Aerosol Optical Parameter Retrieval from Satellite Data. *Proc. Intl. Symp. On Remote Sensing of the Atmosphere and Validation of Satellite Data. CERES, Chiba Univ.*, 23-31.

気象庁ホームページ, 過去の気象データ検索. [http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/daily\\_al.php?prec\\_no=13&block\\_no=0024&year=2010&month=8](http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/daily_al.php?prec_no=13&block_no=0024&year=2010&month=8), (最終アクセス 2015-08-20).

工藤勲, フローラン・アヤ, 高田兵衛, 小林直人 (2011) オホーツク海沿岸域の海洋構造と生物生産. 沿岸海洋研究, **49**(1), 13-21.

Kutser, T., D. C. Pierson, K. Y. Kallio, A. Reinart and S. Sobek (2005) Mapping lake CDOM by satellite remote sensing. *Remote Sens. Environ.*, **94**, 535-540.

Lalli, C. and T. Parsons (1995) *Biological Oceanography: An Introduction, Second Edition*. Butterworth-Heinemann.

Morel, A. and L. Prieur (1977) Analysis of variations in ocean color. *Limnol. Oceanogr.*, **22**, 709-722.

Morel, A. (1988) Optical Modeling of the Upper Ocean in Relation to its Biogenous Matter Content (Case I Waters). *J. Geophys. Res.*, **93**-C9, 10749-10768, 1988.

西浜雄二 (1994) オホーツクのホタテ漁業. 北海道大学出版会.

農林水産省 (2013) 海面漁業生産統計調査, 漁業・養殖業生産統計, 総括表 (2015 年 2 月 17 日公表). [http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/kaimen\\_gyosei/index.html](http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/kaimen_gyosei/index.html),

- (最終アクセス 2015-08-20).
- Ocean Color Biology Processing Group (OBPG), NASA (2015) Ocean Color SeaDAS, <http://seadas.gsfc.nasa.gov/> (最終アクセス 2015-09-04).
- 小野朗子, 藤原昇, 小野厚夫 (2002) Landsat/TM スペクトル値の正規化による地形効果と大気効果の抑制. 日本リモートセンシング学会誌, **22**(3), 318-327.
- 小野朗子, 小野厚夫 (2003) バンド和による正規化スペクトルの応用. 日本リモートセンシング学会学術講演会論文集, **34**, 135-136.
- Rees, W. G (1990) *Physical Principles of Remote Sensing*. Cambridge University Press.
- 嵯峨山積 (2006) 北海道の十勝川・天塩川・石狩川沖の表層堆積物における淡水生珪藻遺骸の広がり. 地質学雑誌, **112**, **10**, 594-607.
- 塩本明弘 (2011) 晩春から初秋の知床半島沿岸域における植物プランクトン現存量と生産力: オホーツク海側と根室海峡側との比較. 沿岸海洋研究, **49**, 37-48.
- 水産林務部総務課 (2013) 平成 25 年北海道水産現勢. <http://www.pref.hokkaido.lg.jp/sr/sum/kcs/indexfiles/suitoukei/suitoukei.htm>, (最終アクセス 2015-08-20).
- Takizawa, T. (1982) Characteristics of the Soya Worm Current in the Okhotsk Sea. *J. Oce. Soc. of Japan*, **38**, 281-292.
- Klemas, V. V. (2015) Coastal and Environmental Remote Sensing from Unmanned Aerial Vehicles: An Overview. *J. Coast. Res.*, **31**(5), 1260-1267.
- Vermote, E. F., D. Tanre, J. L. Deuze, M. Herman and J. J. Morcrette (1997) Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6 S: An Overview. *IEEE Trans. on Geoscience and Remotesensing*, **35**(3), 675-686.
- Wang, M. and H. R. Gordon (1994) Estimating aerosol optical properties over the oceans with the multiangle imaging spectroradiometer: some preliminary studies. *Appl. Opt.*, **33**(18), 4042-4057.
- 米田義昭 (1985). 日本全国沿岸海洋誌, 日本海洋学会, 沿岸海洋研究部会, 「沿岸海洋誌」編集委員会. 東海大学出版会, 23-33.
- 米田義昭, 戸屋健治 (1986) 亜寒帯域における栄養塩の分布と構成比の特性. 水産海洋研究会報, **50**, 105-113.
- Zhang, Y., B. Qin, G. Zhu, L. Zhang and L. Yang (2007) Chromophoric dissolved organic matter (CDOM) absorption characteristics in relation to fluorescence in Lake Taihu, China, a large shallow subtropical lake. *Hydrobiologia*, **581**, 43-52.