

2018 年度（第 54 回）水工学に関する夏期研修会講義集

水工学シリーズ 18-B-5

リモートセンシングによる沿岸環境モニタリング
～これまでとこれから～

広島大学・准教授

作野裕司

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2018 年 9 月

リモートセンシングによる沿岸環境モニタリング～これまでとこれから～

Coastal environment monitoring by remote sensing -Current situation and future-

作 野 裕 司
Yuji SAKUNO

1. はじめに

2011年8月の「水工学に関する夏季研修会」において、「沿岸環境評価のためのリモートセンシング(RS)データ利用における現状と課題」と題して講義をした。その時から7年ほど経過して、また同様なタイトルで講演を依頼されたのだが、実は2010年前後を境にRSをとりまく環境はドラスティックに変化したため、当時講義した時代からRSに関する状況は一変している。まず、2011年3月に発生した東日本大震災以降、急速にドローンが世間に普及した。その進化は言うまでもなく、ドローンに搭載したカメラからの映像はRSという学問を知らない一般の方も関心が高まったことがあげられる。次に、一般の方だけでなくRSデータを古くから使っているユーザーにとって、地球観測衛星データのオープン化(無料配布)が大きい。例をあげると、米国では2008年に地球観測衛星として世界的に有名な「Landsat」シリーズの全データが無償化となった。そして2013年に新たに打ち上げられた「Landsat-8」からは、沿岸の解析に有利な高解像度・高感度のデータが使えるようになり、爆発的な利用者数となった。欧州ではコペルニクス計画と呼ばれる政策により、2014年から新たな地球観測衛星データのオープン化が始まっており、「Sentinel シリーズ」と衛星データ(10mの解像度のSAR画像も含む)が無料で入手できるようになった。従来、1シーンあたり数万円以上の金額を支払って購入していた衛星データが無料になったことで、衛星データが新たにビジネスとして脚光を浴びている。このような衛星データのオープン化やビジネス化の詳細については、岩崎(2014)や井上(2016)などを参照してほしい。さらに、この間、衛星データのオープンだけでなく、高頻度化・高波長分解能化に代表される衛星観測の高度化が実現された。例えば、韓国が2010年に打ち上げた「COMS-1 GOCI」という衛星では、世界で初めて静止軌道での海色(Chla:クロロフィルa濃度)観測が実現され、500m解像度で1時間に1回という高解像度・超高頻度で、韓国・日本の周辺海域のChlaを観測できるようになった(作野, 2012) また、2014年に打ち上げられた静止気象衛星「ひまわり8号」は、本来雲を中心とした気象を観測する衛星だが、同時に半球の「海面水温(SST)」や「Chla」も2km程度の解像度ではあるが、10分に1回観測できるようになった。しかもこれらの衛星データは無料で配布されている。

以上のように、2011年に講義をした時期から今日に至るまで、RSデータをとりまく環境は激変したため、沿岸においても従来のRSデータからは大きく異なる発想の解析も可能になってきている。そこで、ここでは、前回の講義以降のRS環境でなければ実現しないような沿岸の解析例を中心に紹介する。またモニタリングする対象としては、濁度(ダム湖)、水温(流れ)、藻場、海岸プラスチックゴミを取り上げる。ただし、近年、爆発的な発展を遂げているドローンによるモニタリングについては、本講演会において別の講演があるため、ここでは2011年の講義以降の新しい衛星データや新しい発想によるリモートセンシングの応用に限って説明する。

2. 沿岸環境モニタリングに使われる新旧の衛星について

表-1に示すように、2010年頃を境にRSを取り巻く環境は大きく変わり、新しいタイプの衛星データも続々と打ち上げられている。これまで海岸工学の分野で衛星の利用が進まなかったのは、「欲しいときに画像データが得られない」、「水質パラメータの導出などに欠かせない詳細な分光情報が得られない」、「空中写

真のような高解像度で安価な画像情報が得られない」といった多くの問題点があったからだと言われている。ところが、2010年頃を境に表-1に示すような衛星が登場したことによって、急速に利用環境が向上してきている。この中でLandsat-8とSentinel-2搭載センサの詳細な観測波長と解像度を表-2に示す。具体的にはCOMS-1 GOCIやHimawari-8に代表とされるように500m-1km程度の解像度で、観測周期が非常に短い衛星により海洋（特に沿岸域）のクロロフィルa（Ch-a）や水温データを高頻度に入手できるようになったこと、Landsat-8やSentinel-2に代表されるように10-30m程度の高解像度の衛星により湖や河川のChlaや水温だけでなく、情報量（ビット数が増えると、より微細な反射・放射情報をとらえることができる）が増えたことなどがあげられる。本講演では、これらのデータを使った応用事例を解説する。なお、具体的な衛星データの入手方法は本テキストの最後につけた付録を参照してほしい。

表-1 2010年前後の打ち上げ衛星センサの比較。太字は特筆すべき特徴。

衛星名	センサ名	打上年月	解像度	観測周期	観測幅 km	バンド 数	情報量 bit	用途
2010 年以前								
Landsat-7	ETM	1999.4	15-60 m	16 日	185	8	8	汎用
Terra / Aqua	MODIS	1999.12	0.25-1 km	1 日	2330	36	12	海色
ENVISAT	MERIS	2002.3	0.3-1.2 km	3 日	1450	15	12	海色
MTSAT-2	JAMI	2006.2	1-4 km	1 時間	半球	5	10	気象
2010 年以降								
Landsat-8	OLI/TIRS	2013.2	15 m/30m/100m	16 日	185	9	12	汎用
COMS-1	GOCI	2010.6	500 m	1 時間	2500	8	12	海色
Sentinel-2	MSI	2015.6	10 m	10 日	290	12	14	汎用
Himawari-8	AHI	2014.10	0.5-2 km	2.5-10 分	半球	16	11-12	気象

表-2 Landsat-8とSentinel-2搭載センサの観測波長と解像度。

Landsat-8 MSI			Sentinel-2 MSI		
バンド番号	中心波長	解像度	バンド番号	中心波長	解像度
B1	443 nm	30 m	B1	443 nm	60 m
B2	488 nm	30 m	B2	490 nm	10 m
B3	563 nm	30 m	B3	560 nm	10 m
B4	655 nm	30 m	B4	665 nm	10 m
			B5	705 nm	20 m
			B6	740 nm	20 m
			B7	775 nm	20 m
			B8	842 nm	10 m
B5	865 nm	30 m	B8a	865 nm	20 m
			B9	940 nm	60 m
B9	1375 nm	30 m	B10	1375 nm	60 m
B6	1610 nm	30 m	B11	1610 nm	20 m
B7	2200 nm	30 m	B12	2190 nm	20 m
B8 (PAN)	590 nm	15 m			
B10	10.9 μm	100 m			
B11	12.0 μm	100 m			

3. 応用事例

3.1 高解像度・多波長観測衛星によるダム湖の濁度推定事例

(1) 背景

集中豪雨による濁水やアオコに代表される富栄養化に関わる水質悪化は世界各地の閉鎖性水域における共通的な問題となっている。また広域にわたる実測調査は、人出や予算的に限界があるため、衛星画像の利用が期待されている。しかし、これまで海洋と比較して高解像度、高波長分解能が必要な陸水の水質を測定するセンサが存在しなかった。そこで本研究では、2015年に打ち上げられ、陸水の水質計測が期待されている Sentinel-2（解像度は10～60m、10日周期）データが、実際の水質モニタリングに利用可能か検討された。具体的には、極めて濁度が高く、かつ湖岸ではしばしばアオコも発生するような南アフリカ共和国のバールダム湖において、分光反射率および水質の実測調査を行うことによって、Sentinel-2バンドによる非接触による濁度推定の可能性を検討した。

(2) 濁度推定手法

リモートセンシングによる濁度推定は、簡単に言えば図-1（左）に示すように一般に反射率が高ければ高いほど濁度は高い（つまり水の色が明るいほど濁っている）という仮定の下、行われてきた。数式で表すと、次式で示されるように、特に従来「赤」（例えば645nm）～「近赤外」（例えば835nm）の1波長の反射率や2波長の反射率比が有効とされてきた（Chen et al., 2007; Doxaran et al., 2009）。

$$\text{Turb} \propto R_i \quad \text{or} \quad \text{Turb} \propto R_i / R_j \quad (1)$$

ここで、Turbは濁度、Rは反射率、 i, j はそれぞれ波長を示す。しかし、この方法はCDOMやChlaが高い水域の場合は赤の波長にもそれらの光吸収の影響があるため濁度推定精度を悪くするという欠点があった。そこで、Kutserら（2016）は、810nm付近の反射率ピークの高さを利用した次式のような濁度推定モデルを提案した。

$$\text{Turb} \propto R_{810} - (R_{770} + R_{840}) / 2 \quad (2)$$

この手法の原理は図-1（右）に示す通りで、一般にChla、濁度が非常に高い水域では、比較的澄んだ水域と比較して710nm付近と810nm付近反射率が非常に高くなることを利用している。また、右辺第2項の「770nmと840nmの平均値（ $R_{810} - (R_{770} + R_{840}) / 2$ ）」はベースラインを意味している。ちなみにChlaの定量の場合には同様の考えで710nm付近の反射率の高さを利用する。衛星を使う場合は、例えば前述したSentinel-2と呼ばれる衛星を使った場合、やや810nm付近のピーク波長がずれるが、図-1のような前後の2波長の反射率を使って、濁度の指標となるピークの高さを推定することができる。

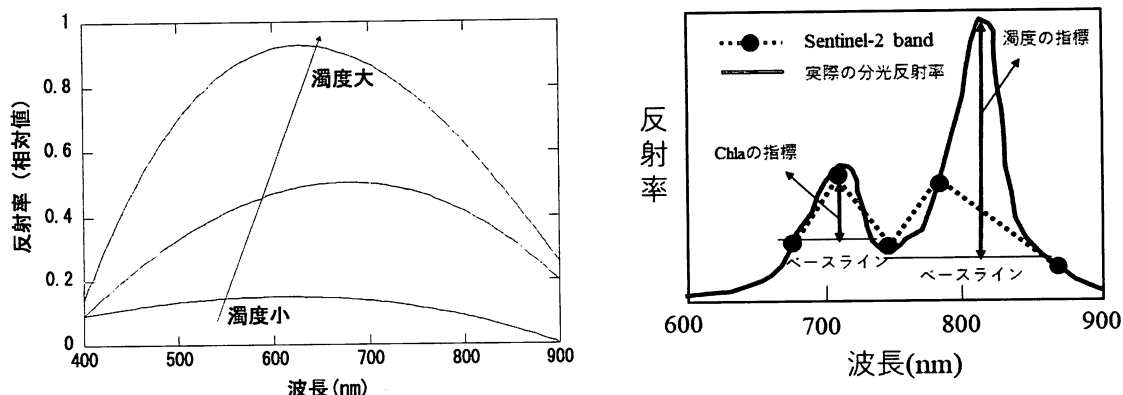


図-1 従来の濁度モデル（左）と新しい濁度モデル（右）概念図

(3) 応用事例

研究地域は、図-2に示される南アフリカ共和国のプレトリア市郊外に位置するバールダム貯水池（全長が880km、平均水深23m程度の巨大なダム湖）である。筆者らは2016年度にこの水域において、表-3に示すような水質データ（Chlaと濁度）と分光反射率データを取得した。これより、バールダムの濁度は、約140～1700NTUと極めて高い濁度の水域であることがわかる。実際、「バール」とは現地語で「濁った」という意味である。測定に使われた水質計はDatasonde（Hydrolab）である。また、水質観測と同時に、ポータブル分光放射計（MS720, EKO社、測定範囲：350～1050nm、波長分解能：3.3nm）による分光反射率測定が行われた。具体的には、水面直上の分光放射照度と白色板ZB6010 (Japan Color Institute)で反射された太陽光の分光放射照度（分光計付属のソフトにより1nmステップの放射照度に変換された）をそれぞれ3回測定した。本研究で用いられる分光反射率は、それらの平均放射照度の比を円周率で割った値（リモートセンシング反射率（Rrs））と定義した。

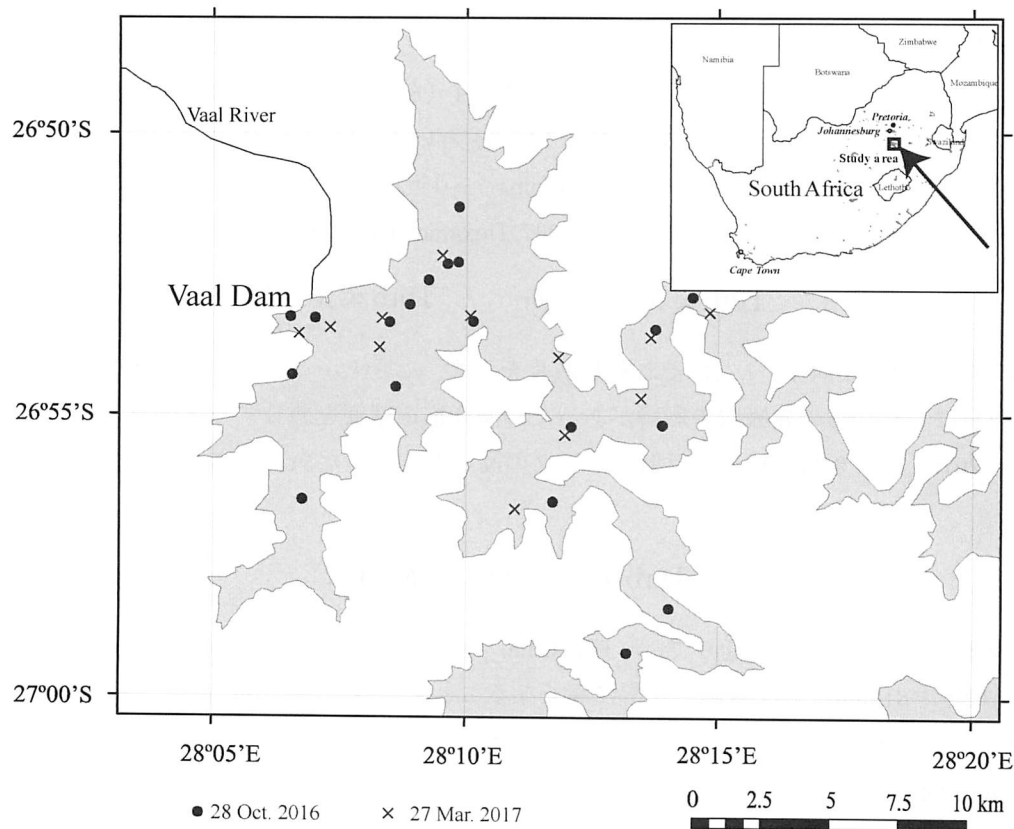


図-2 南アフリカのバールダムにおける調査地点図

表-3 バールダムで取得された水質データレンジ

日付	Chla (mg m ⁻³)		濁度 (NTU)		データ数
	最小値	最大値	最小値	最大値	
2016/10/26	2.1	13.8	386	1678	18
2017/3/27	3.0	4.6	106	146	10

図-3(a)はパールダム貯水池と島根県と鳥取県の県境に位置する宍道湖・中海において測定された分光反射率特性の比較である。ただし、分光特性を強調するために、900nmの反射率を0とする正規化処理を行った。宍道湖・中海は典型的な富栄養化水域の分光特性といつてよい。これより、濁度の高いパールダム貯水池において、特に600~700nmの赤バンドで全体的に反射率が高く、かつ810nm付近の反射率が高い特徴がよくわかる。

図-4は実際に式(3)のモデルを使って推定された濁度と実測濁度の関係を示している。このうち、(a)は730nmと770nmの平均値をベースラインとした場合の810nmの反射率高、(b)はSentinle-2のバンドを模擬して740nmをベースラインとした場合の775nmの反射率高の関係である。これより両者とも高い相関（それぞれ $R^2=0.79$, $R^2=0.77$ ）が得られ、他の統計的な推定法と比べても高濁度の推定にこの方法が有効であることが検証された。ただし、100NTU以下の低濁度では、式(1)や式(2)を用いる方が効果的である。本テキストには紙面の関係上示さないが、この方法を使った衛星画像から推定されたパールダム貯水池の濁度分布は全く異なる濁度分布特性が明瞭に示されており、同水域のモニタリングに新しい衛星データを使うことの重要性が示された。なお、本研究の詳細はSakuno et al. (2018)を参照いただきたい。

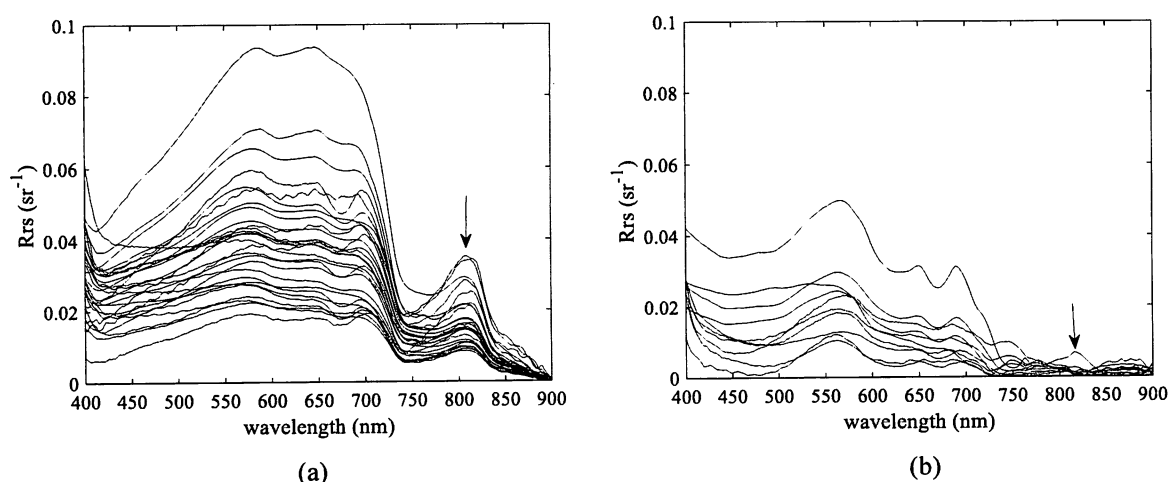


図-3 パールダム（100 NTU<）(a)と宍道湖・中海（<10NTU）(b)の分光特性の比較

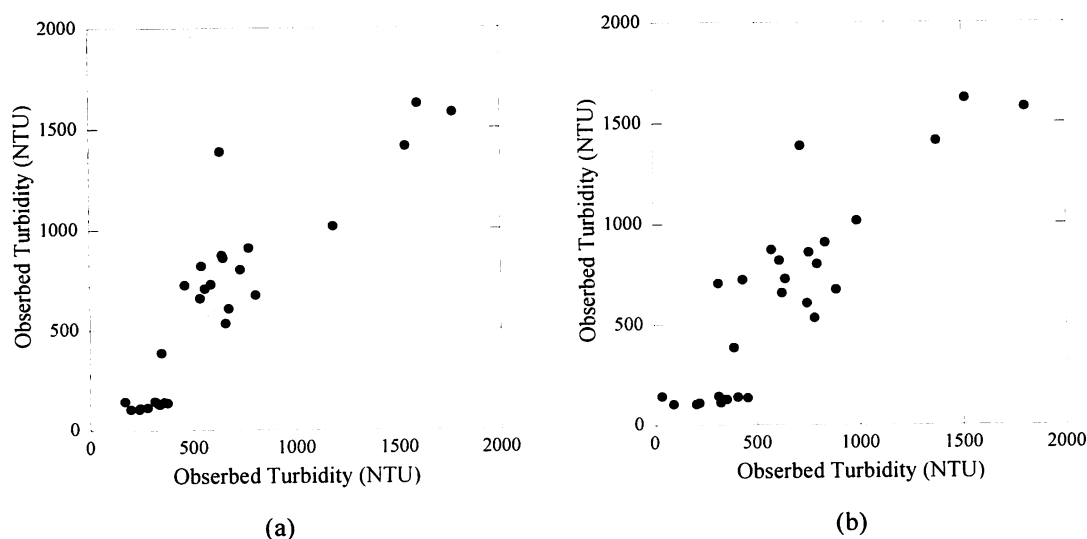


図-4 新しいモデルによる推定濁度と実測濁度の関係. (a)730nmと770nmの平均値をベースラインとした場合の810nmの反射率高, (b) 740nmをベースラインとした場合の775nmの反射率高(Sentinel-2)の場合.

3.2 静止衛星の時系列水温データによる流速推定事例

(1) 背景

近年の異常気象や地球温暖化に代表される世界的な気候変動を把握するため、海洋の気象、海面水温、海面高度などのデータの蓄積は非常に重要である。そのため、近年、TRINTON ブイや Argos フロートに代表される世界規模の海洋観測網（Hosoda et al., 2008）が充実してきた。そうした中、インドネシア海域における「インドネシア通過流（Indonesian throughflow, ITF）」（例えば Meyers, 1996 ; Feng et al., 2018）の把握が気候変動のメカニズム解明に重要とされているが、同海域における海洋観測網が不足しているという問題点があった。観測機器による海洋の流向・流速の実測の状況としては、点的な観測には電磁流向流速計、面的な観測には ADCP が使用されている。ただし、面的な観測は非常に限られた範囲であるため、高範囲での面的な流向流速の実測が難しい。そこで本論文では、広範囲及び超高頻度の温度観測を行っている「Himawari-8」の時系列水温画像に着目し、ITF の流速分布推定を試みた。

(2) 流速推定手法

衛星から取得された時系列な水温データが存在する場合、どのようにして流速を推定するか次に説明する。Crocker et al. (2007) は、1km 程度の解像度を有する水温やクロロフィル a の時系列衛星画像から、沿岸の流れ（流速ベクトル）を推定した。具体的には、図-5 に示すようにまず 1 つの画像の特徴点であるテンプレートを用意しもう 1 つの画像との相関が最も高いエリアを見つけ出し、対応する場所の流速ベクトルを次々と算出する、「最大画像相関法（Maximum Cross Correlation: MCC）」（またはテンプレートマッチング法）である。同様の研究は、Emery et al. (2003), Warren et al. (2016) など、世界各地で行われてきた。

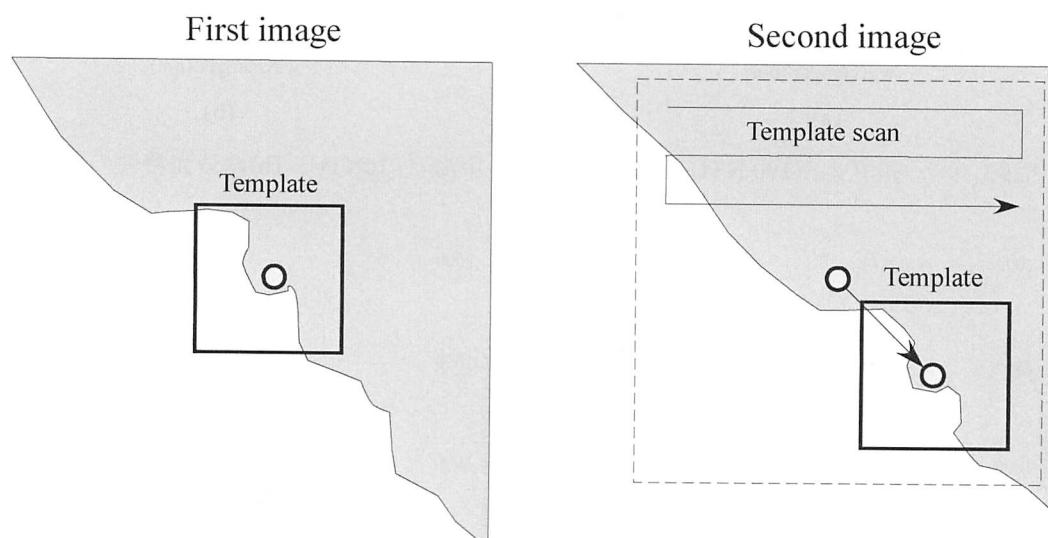


図-5 最大画像相関法の概念図（Crocker et al. (2007)の図を一部改変）

(3) 応用事例

研究地域は、図-6 に示されるインドネシア周辺地域である。このうち、右下の四角で囲んでいる水域がロンボク海峡で、この海峡の南北方向に ITF が通過する。また、ここでは結果を示さないが、画面左の星印は、米国の水温ブイがある地点で、スマトラ島とジャワ島の南にある番号地点は、入手できた実測の鉛直水温、水質測点で、水温精度の検証地点である。使用データとして、Himawari-8 の水域プロダクトが取得できる JAXA の分野横断型プロダクト提供システム（P-Tree）の海面水温プロダクト（Ver1.2, 昼間モード）のデー

タを使った。このデータのファイル形式は NetCDF で、元データの観測領域はフルディスク（6001×6001 ピクセル），時間分解能は1時間（Level 3，時間積分処理あり，国際時 UT で格納），空間分解能は 2km である。従って，0.6m/s 程度（2000m/[60*60]s）がこの方法による流速推定の限界といえる。なお，このプロダクトの水温精度は約 0.6℃と公表されている（Kurihara et al., 2016）。

図-7 は 2017 年 8 月 28 日における，ある 1 時間に取得された 2 枚の画像を前述した MCC 法を使って流速推定した例であり，流速図内の線は 26.5℃と 27.5℃の等水温線図である。この手法で，結果的には，ロンボク海峡で 0.5m/s 程度の流速が推定された。これは，Sprintall et al.(2009)の実測結果のオーダーとほぼ一致した。

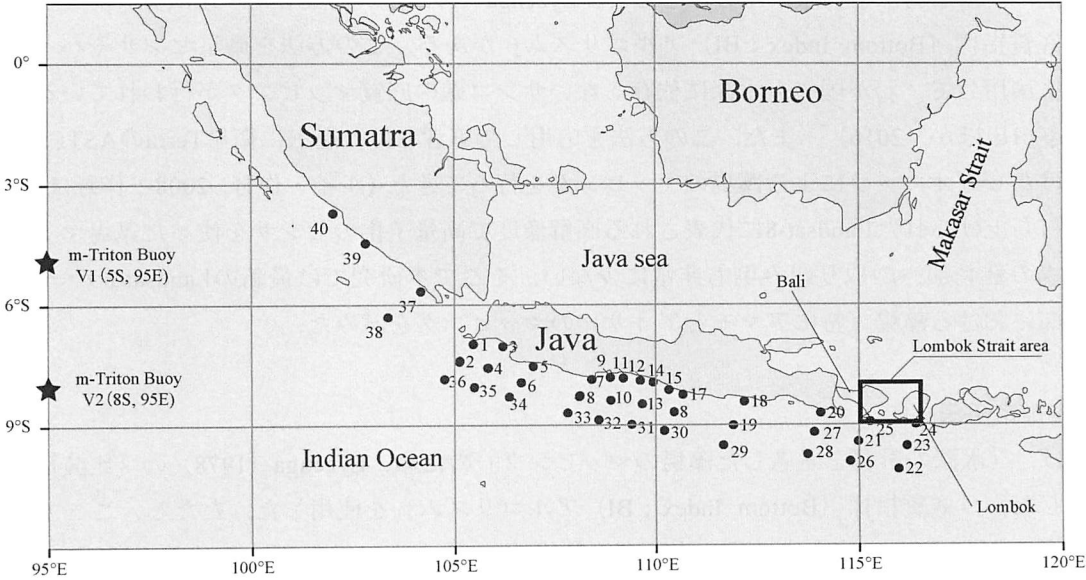


図-6 研究地域の全体図，流速を推定する地域は右下の四角に含まれるロンボク海峡。

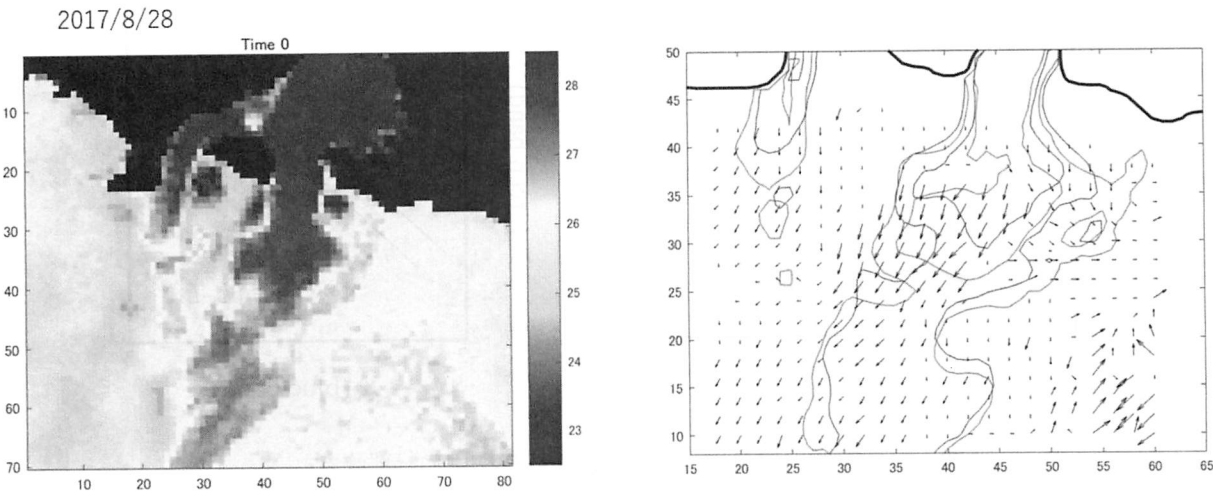


図-7 ロンボク海峡南部の流速ベクトル解析例（Sakuno et al., 発表予定）

3.3 衛星による藻場分布推定

(1) 背景

アマモなどの海草藻場は魚介類の産卵・生育場所だけでなく、近年ではブルーカーボンと呼ばれるCO₂の吸収場 (Tokoro et al., 2014) として、非常に注目されている。しかしその分布は地域的、時期的 (潮位による時間変化や季節変化) に大きく変化するため、詳細に把握するための時間的、金銭的成本は膨大であった。そのため、広域的に繰り返し観測できる衛星リモートセンシングによる藻場の把握が、自動的にできれば、非常に有用である。しかし、陸上の土地被覆分類と異なり、水底に生息している海草の把握は、水による光の減衰が大きなノイズになり、非常に難しい。また、水中での光の減衰率は、長波長の光ほど大きいいため、水上からでは近赤外より長い波長の情報は使えず、可視域の光の情報しか使うことができないという制約もある。このような弱点を克服する方法として、Lyzenga (1978) が提案した「比演算アルゴリズム」を基にした、「底質指標 (Bottom Index ; BI) アルゴリズム」がある。この方法を衛星センサやハイパースペクトルセンサに適用して、わが国でも水深に依存しないサンゴ礁の底質マッピングが行われている (小林・小川, 2008 ; 小田川ほか, 2016) 。また、この方法を応用して筆者らは、過去に衛星TerraのASTERセンサや気球に取り付けたビデオカメラによる藻場のマッピングを行ってきた (ルイ・作野, 2008 ; 作野ほか, 2009) 。一方、近年打ち上げられたLandsat-8に代表される高解像度で高量子化のセンサを使った藻場マッピングへの応用や、藻場の種判別への取り組み例も非常に少ない。そこで本研究では最新のLandsat-8データを使って、瀬戸内海中部における藻場 (特にアマモとアオサ) のマッピングを試みた。

(2) 藻場分布推定手法

本研究では、「水深の影響を考慮した藻場のマッピング」のため、Lyzenga (1978) の「比演算アルゴリズム」を基にした、「底質指標 (Bottom Index ; BI) アルゴリズム」を使用した。ただし、ここでいう「底質」とは、地質学で使われる「水底を構成する岩及び堆積物 (bottom material) 」とする狭義の意味ではなく、「藻類、サンゴ、砂地、岩等、藻場・サンゴ礁を構成する海底被覆物 (bottom cover) 」の意味である。底質指標は、図-8で示すように、「底質が同じならば、異なる2バンドの底質反射率比 (実際には自然対数型) は一定になる」という仮定に基づいて開発されたモデルである。

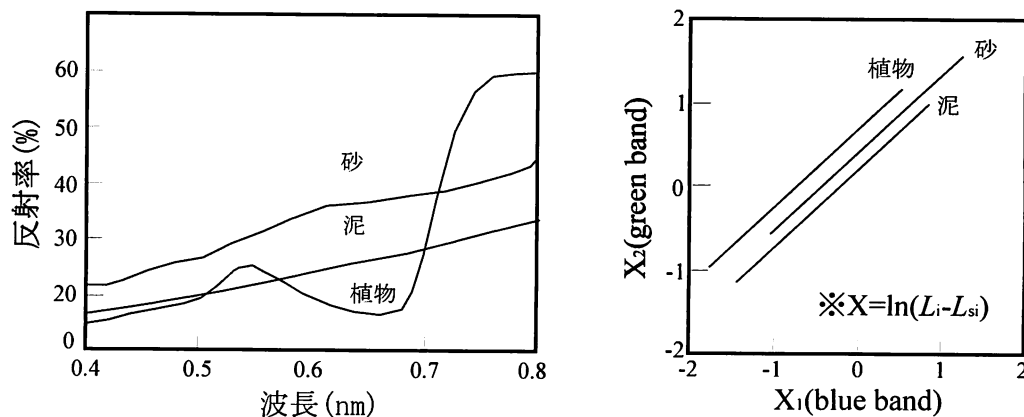


図-8 底質指標の概念図 (Lyzenga (1978)の図を一部改変)

以下に底質アルゴリズムの実際に応用する場合の理論を数式を使って簡単に説明する。Lyzengaは、衛星に搭載されたセンサが浅海域において波長 λ で検出する放射輝度(L_λ)を次式で表した。

$$L_\lambda = L_{s\lambda} + E_\lambda r_{B\lambda} \exp(-k_\lambda f z) \quad (3)$$

ここで L_{si} は水深の深い地点で観測した放射輝度、 E_i は定数（地上に到達する太陽の放射照度、大気と水面の透過率を含む）、 r_{Bi} は底質による分光反射率、 k_i は水の消散係数、 f は光路長（無次元値）、 z は水深である。図-10に任意の底質が存在する水域における水中の光学過程を示す。画像から底質を判別するために最も有効な方法は式(2)から r_{Bi} を求めることである。しかし、水深や水質（消散係数に反映される）が不明な底質環境に対して、式(2)の r_{Bi} を解くことは非常に難しい。そこで、画像を比演算することにより水深の影響を除去する。これらの過程を式で表すと、以下ようになる。即ち、異なる2バンド i, j により衛星が観測する放射輝度は、式(2)からそれぞれ以下の式で表される。

$$L_i = L_{si} + E_i r_{Bi} \exp(-k_i f z) \quad (4)$$

$$L_j = L_{sj} + E_j r_{Bj} \exp(-k_j f z) \quad (5)$$

式(4)と式(5)を整理すると、以下のように水深 z を除去した式となる。

$$LN \left[\frac{r_{Bi} E_i}{(r_{Bj} E_j)^{k_{ij}}} \right] = LN \left[\frac{(L_i - L_{si})}{(L_j - L_{sj})^{k_{ij}}} \right] \quad (6)$$

ここで、左辺の変動の多くは「2バンド間における海底反射率の比」に支配されており、底質の情報を持つ。よって、これを底質指標（Bottom Index）とし、 BI_{ij} とする。これより、底質指標 BI_{ij} は以下の式で求められる。

$$\begin{aligned} BI_{ij} &= LN \left[\frac{(L_i - L_{si})}{(L_j - L_{sj})^{k_{ij}}} \right] \\ &= LN(L_i - L_{si}) - k_{ij} LN(L_j - L_{sj}) \end{aligned} \quad (7)$$

式(7)より、異なる2バンドの衛星データの関係から消散係数比がバンド比（異なるバンドの輝度値の対数をプロットした時の傾き）として求まり、理論的には画像のみから水深の影響を除去した底質（今回は藻場）の判別が可能（反射率比が異なる底質の場合）となる。なお、実際の消散係数比 k_{ij} の求め方としては、底質が同じで異なる水深の場所（砂浜の沖の数ピクセルを使用する場合が多い）で、2波長の輝度比（ L_s 補正済み）の対数値の散布値から傾きを導けば、それが理論上の消散係数比となる。

(3) 応用事例

研究地域は、図-9に示されるような天然の藻場が広域に存在する広島県竹原市沖の瀬戸内海に位置する生野島（図中の検証サイト1）と吉名干潟（図中の検証サイト2）の周辺を検証サイトとした。この地域の藻場は、少なくともアマモに代表されるアマモ場（*Zostera bed*）、アオサに代表されるアオサ場（*Ulva bed*）が存在する。研究地域におけるこれらの藻の生育水深は約10m未満であり、透明度は約3-6m（4-8月の平均値）である。また同地域における干満差は最大で4m程度ある。研究地域の藻場は沿岸から沖方向に約50-200mに渡って点在している。今回用いた衛星データは、2015年の2月14日、3月27日、8月2日、10月21日の4時期のLandsat-8データ（解像度30m、パスローウ：111-36または112-36）である。観測時刻は10：44±4分、潮位はそれぞれ161cm、166cm、362cm、131cmであった。

解析の結果、図-10、図-11に示されるように、現地調査データの藻場位置と衛星データから推定された藻場の位置は概ね一致した。また検証サイト2では、アオサ場とアマモ場でわずかな底質指標の値の差がみられ、これによって、アオサ場とアマモ場を分離することができた。ただし、アマモ場とガラモ場で底質指標の値に差がほとんどなかったため、今後はさらに分離手法を検討する必要がある。

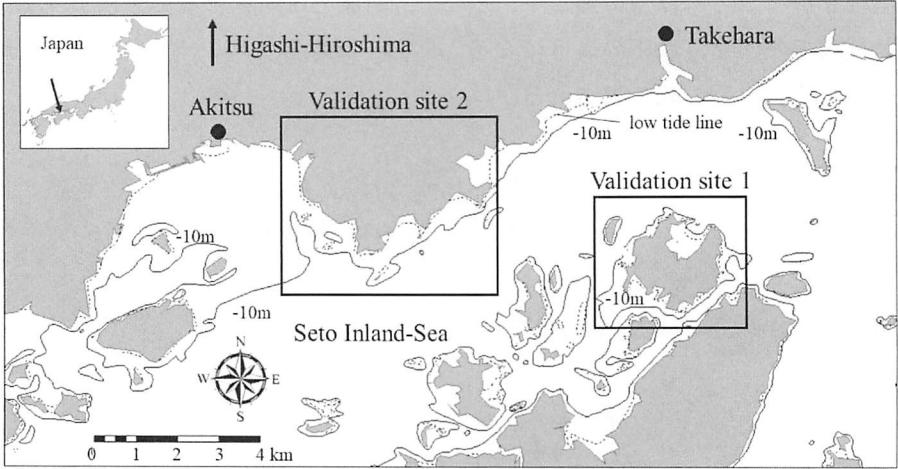


図-9 藻場分布推定サイト

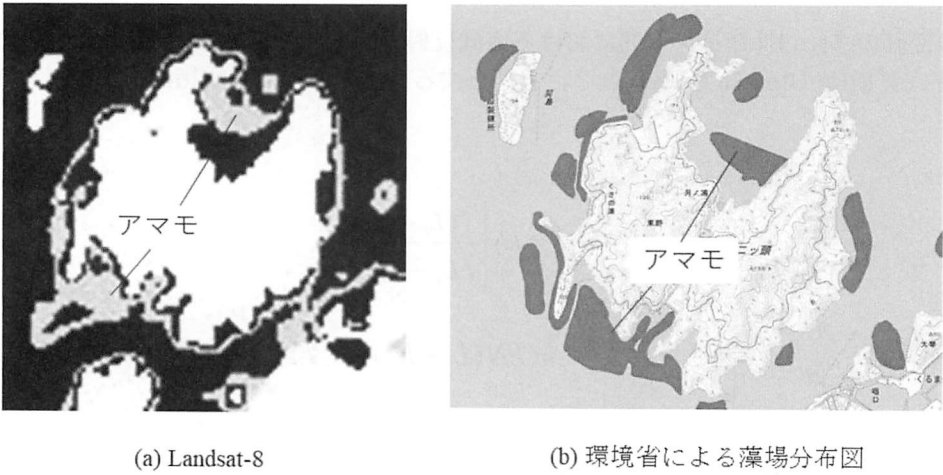


図-10 検証サイト1における衛星データと現地調査に基づく藻場分布の比較
(現地調査データは、環境省による1998-1999年に行われた自然環境調査結果)

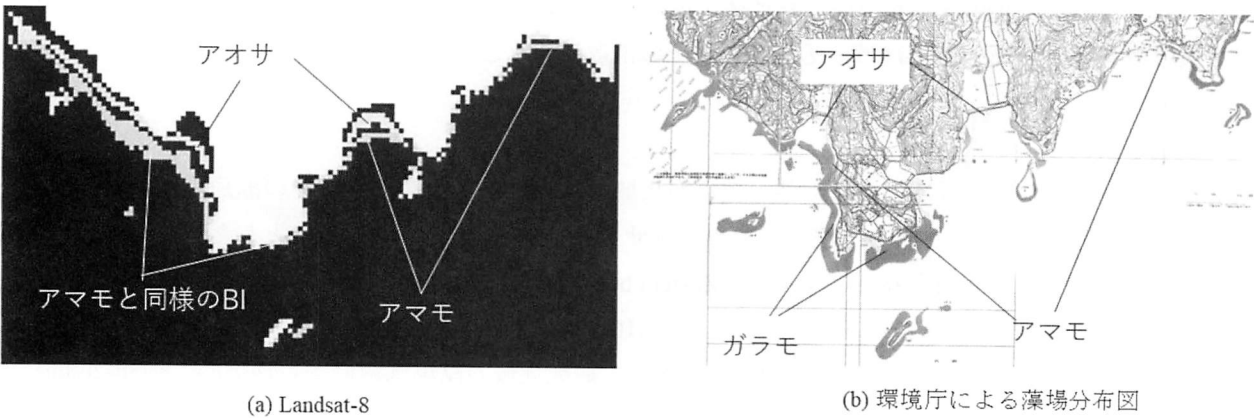


図-11 検証サイト2における衛星データと現地調査に基づく藻場分布の比較
(現地調査データは、環境庁による1991-1992年に行われた自然環境調査結果)

3.4 衛星によるプラスチック検出の試み

(1)背景

近年、プラスチックゴミによる海洋の汚染が世界的に大きな環境問題（海洋環境の悪化、船舶航行への障害、観光・漁業への悪影響、沿岸域居住環境の劣化）となっている（Jambeck, 2015）．特に海水中に漂うマイクロプラスチック（1 mm以下の微細なプラスチック）が生態系に与える影響は深刻化している（Browne, 2011）．マイクロプラスチックの多くは、レジ袋やペットボトルなどで、人為的に直接海へまたは河川に廃棄されて海洋へと運ばれたものである．こうした多くのプラスチックゴミは、海底に沈むか生物によって捕食されるが、分解しないため、永久的に生態系へダメージを与える．図-12は筆者が実際、他の研究で目撃した河川や海岸周辺に廃棄されているプラスチックゴミの例である．通常、このような海ゴミの研究では、海岸に打ち上げられるプラスチックや海洋に浮いたプラスチックを目視やデジタルカメラで把握したり、実験室に持ち帰り顕微鏡で把握するなどの方法がとられている．しかし、このような目視によるプラスチックのゴミ分別は、非常に手間がかかり、広域的に客観的な方法による検査技術が求められる．最も効果的な手法の1つとして、リモートセンシングによる現場で測定できる技術が考えられる．現在、リモートセンシングによるプラスチックごみの検出は、Webカメラや超高解像度衛星を使った、可視画像（色）による検出方法が試みられている（磯辺ほか, 2012；青山ほか, 2016）．しかしながら、図-12（中央、右の写真）を見ても明らかのように、プラスチックは透明または半透明な場合が多く、可視画像で見分けるのは非常に困難である．一方、近年発達が目覚ましい近赤外域のイメージ分光技術により、プラスチックの吸収線の合成画像により、プラスチックの種別（ポリスチレン、ポリエチレン、塩化ビニールなど）が可能になってきた（代田ほか, 1999）．ただし、これはあくまで背景が均一で形もほぼ一定の条件下（例えば工場内のベルトコンベアなど）で行える技術である．

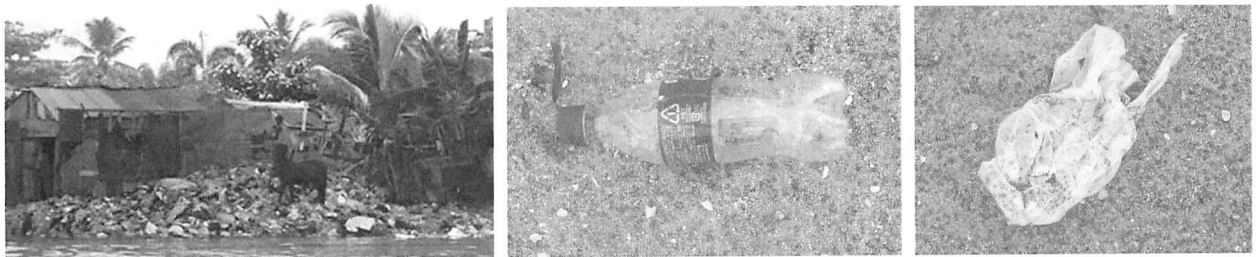


図-12 河川や海岸に捨てられたゴミ（申請者撮影）．ドミニカ共和国首都のサントドミンゴを流れるオザマ川沿いに捨てられたゴミ（左）、日本の海岸によく廃棄されているペットボトル（中央）やレジ袋（右）

(2)プラスチック推定手法

リモートセンシングによりプラスチックを推定するためには、まず正確なプラスチックの分光特性（特徴的な吸収や散乱の波長）を知る必要がある．室内での分光反射率は図-13（左）のように、光源（ハロゲンランプなど）の入射光量とプラスチックなどの反射光量の比率を測定する．野外でも同様にして、図-13（右）のように分光計で反射率を測定する．図-14は室内で測定されたプラスチックの分光反射率特性である．これより、従来の研究で指摘されている吸収線波長（例えば1205nm, 1375nm, 1640nm）で、相対的に低い反射率が得られた．リモートセンシングによるプラスチック推定の場合、原理的には、ハイパースペクトルセンサを使って、このような吸収波長（ λ_1 ）と吸収しない波長（ λ_2 ）との反射率比の差を以下のようなモデル式に当てはめれば、プラスチックの有無を指標化または画像化することができる．

$$\text{Index} = \frac{R(\lambda_2) - R(\lambda_1)}{R(\lambda_2) + R(\lambda_1)} \quad (8)$$



図-13 プラスチックの分光反射率測定の様式図（左）と海岸における実際の海ゴミの分光反射率計測の様子（右）

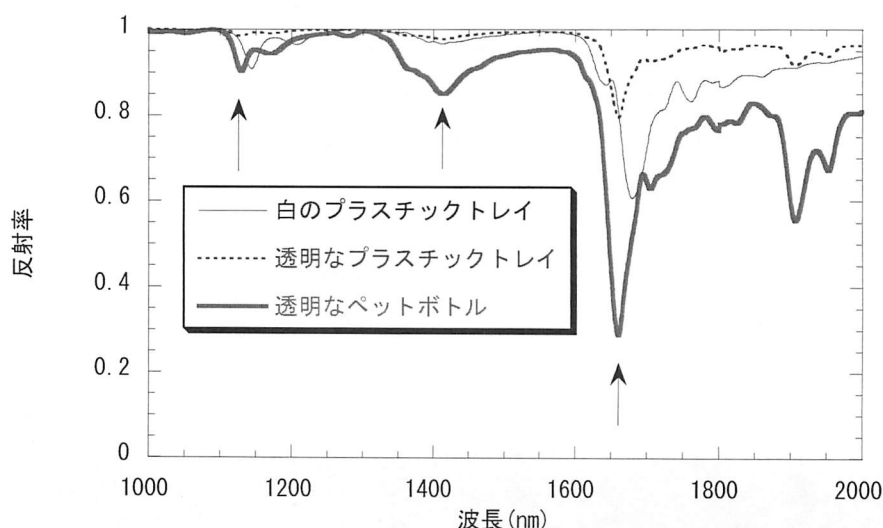


図-14 室内で予備的に測定された代表的な海ゴミの近赤外域の分光反射率特性

(3) 応用事例

研究地域としては、広島県安芸郡坂町水尻にある海水浴場「ベイサイドビーチ坂」において、砂、流木、ペットボトル、ビールケース（プラスチック製）の分光反射率特性を測定した（図-15）。図のA、B、Cのエリアが室内実験でプラスチックの吸収がみられる波長域である。これより、ペットボトル、ビールケースで同様の吸収線が確かめられた。また、背景となる砂にも同様の箇所に吸収波長がある場合、プラスチックの吸収把握が難しくなるが、この測定から、そのような危険性はないことが判明した。さらに、野外の分光反射率には、室内の測定では現れなかった強いノイズが、1350-1420nm、1800-1970nmで観測された。これは、太陽光が大気吸収を受けて非常に弱くなる波長であり、野外でプラスチック観測を行う上での注意すべき点であることも分かった。これにより、可視光線の色の影響をうけないリモートセンシングによるプラスチック検出条件がわかったわけであるが、現実これを海岸ゴミの調査に適用する場合、大きな障害が2つあることも事実である。1つは、近赤外線のハイパースペクトルカメラが高額（通常300万円以上）であること、衛星を使う場合は、現状では解像度が悪すぎることである。しかしながら、技術の発展（例えば、AnGaAsカメラの低価格化とドローンへの搭載など）によって、これらの問題がクリアされれば、将来的に安価で確実な海岸のプラスチックゴミ探査が可能となるだろう。実際、室内のデモ実験であるが、図-16のような室内実験用の近赤外ハイパースペクトルカメラ実験では、筆者らが確かめた吸収帯の画像化により、プラスチックの種別判別までできることが確かめられた。これらのさらに詳しい成果は、作野・森本（印刷中）を参照

してほしい。

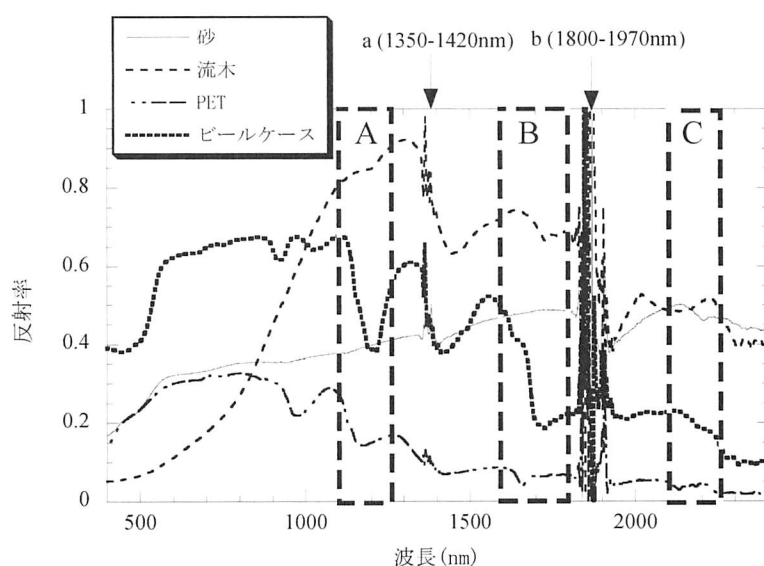


図-15 ベイサイドビーチ坂の砂浜において取得された物体の分光反射率特性（作野・森本，印刷中）



4. まとめ

本テキストでは，特に2010年以降に打ち上げられた衛星センサやデータ取得方法の紹介と，それらの新しいセンサを使った応用事例（濁度，流速，藻場）や，近年トピックとなっている海岸ゴミのリモートセンシングに関する最新の研究事例を紹介した．このように，近年のリモートセンシング技術は，日進月歩であり，次々に新しい衛星センサも打ち上げられている．日本では，2017年12月末には日本国産の人工衛星の「GCOM-C SGLI」（愛称「しきさい」）が打ちあがり，250mの解像度で，日本沿岸の水質を精度よくモニタリングできると，世界から注目されている．今後は，このような多くのリモートセンシングデータを個々の問題にどのように応用するかというユーザーのアイデアが重要となるだろう．今回の講義や資料がその発想の一助となれば，幸いである．

引用文献

- 青山隆司, 倉田旦: 衛星画像を用いた海ゴミ抽出手法の検証. 福井工業大学研究紀要, 46, 1-7, 2016.
- 井上敬介: 地球観測衛星のデータ公開の現状と今後の展望. みずほ情報総研レポート, 12, 2-12, 2016.
- 磯辺篤彦, 日向博文, 清野聡子, 馬込伸哉, 加古真一郎, 中島悦子, 小島あずさ, 金子博: 漂流・漂着ゴミと海洋学—海ゴミプロジェクトの成果と展開—. 沿岸海洋研究, 49(2), 139-151, 2012.
- 岩崎晃: 身近になる地球観測衛星. 生産研究, 66(5), 463-470, 2014.
- 小田川信哉, 武田知己, 山野博哉, 松永恒雄: ハイパースペクトルデータを用いたサンゴ礁底質被度推定手法の提案. 日本リモートセンシング学会誌, 36(1), 1-10, 2016.
- 小林弘幸, 小川進: 衛星データとGIS による西表島の生態系評価. 地球環境研究, 10, 11-18, 2008.
- 作野裕司: 韓国が打ち上げた世界初の静止衛星海色センサ COMS GOCI の魅力, 日本リモートセンシング学会誌, 32(2), 106-107, 2012.
- 作野裕司, ルイ ソチエー, 國井秀伸, 田中義和, 國貞英二, 若松芳樹: 気球搭載ビデオカメラによる中海のアマモ場の植被推定, 水工学論文集, 第53巻, 1357-1362. 2009.
- 佐々木政幸, 操野年之: 地球環境観測衛星ひまわり8号及び9号について, 日本リモートセンシング学会誌, 31(2), 255-257, 2011.
- 代田寧, 坂本広美, 牧野宏, 桜井敏郎, 米田健一: 近赤外線を用いた廃プラスチックの材質識別に関する研究, 神奈川県環境科学センター研究報告, 22号, pp. 8-14, 1999.
- ルイソチエー, 作野裕司: 衛星 Terra/ASTE データを使った吉名干潟における藻場モニタリング. 水工学論文集, 52, 1381-1386, 2008.
- Browne, M. A., Crump, P., Niven, S. J., Teuten, E., Tonkin, A., Galloway, T. and Thompson, R.: Accumulation of microplastic on shorelines worldwide: sources and sinks, Environmental science & technology, 45(21), 9175-9179, 2011.
- Chen, Z., Hu, C., Muller-Karger, F.: Monitoring turbidity in Tampa Bay using MODIS/Aqua 250-m imagery. Remote sensing of Environment, 109(2), 207-220, 2007.
- Crocker, R. I., Matthews, D. K., Emery, W. J., Baldwin, D. G.: Computing coastal ocean surface currents from infrared and ocean color satellite imagery. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 45(2), 435-447, 2007.
- Doxaran, D., Froidefond, J. M., Castaing, P., Babin, M.: Dynamics of the turbidity maximum zone in a macrotidal estuary (the Gironde, France): Observations from field and MODIS satellite data. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2009, 81(3), 321-332. 2009.
- Emery, W. J., Baldwin, D., & Matthews, D.: Maximum cross correlation automatic satellite image navigation and attitude corrections for open-ocean image navigation. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 41(1), 33-42, 2003.
- Feng, M., Zhang, N., Liu, Q., Wijffels, S.: The Indonesian throughflow, its variability and centennial change. Geoscience Letters, 5(1), 3, 2018.
- Hosoda, S., Ohira, T., Nakamura, T.: A monthly mean dataset of global oceanic temperature and salinity derived from Argo float observations. JAMSTEC Report of Research and Development, 8, 47-59, 2008.
- Jambeck, J. R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T. R., Perryman, M., Andrady, A., Narayan, R. Law, K. L: Plastic waste inputs from land into the ocean, Science, 347(6223), 768-771, 2015.
- Kurihara, Y., Murakami, H., Kachi, M.: Sea surface temperature from the new Japanese geostationary meteorological Himawari - 8 satellite. Geophysical Research Letters, 43(3), 1234-1240, 2016.

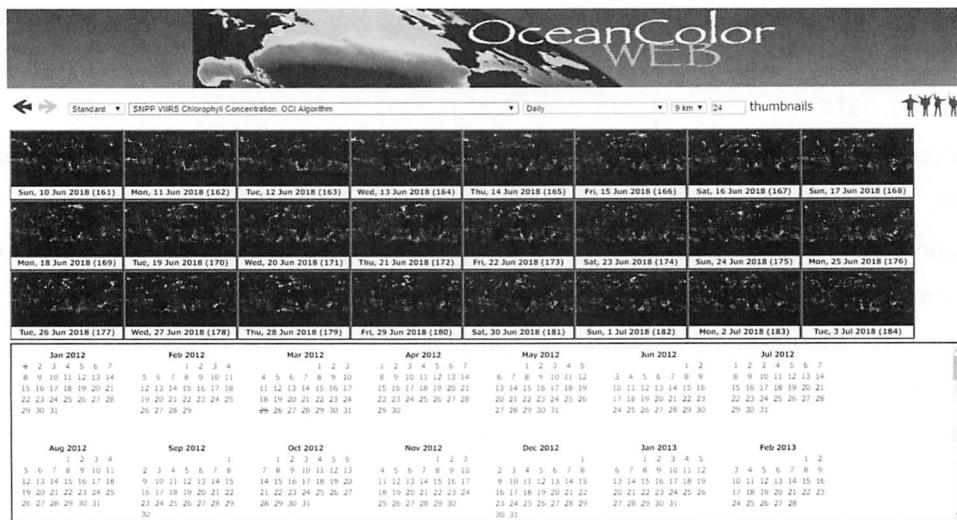
- Kutser, T., Paavel, B., Verpoorter, C., Ligi, M., Soomets, T., Toming, K., Casal, G.: Remote sensing of black lakes and using 810 nm reflectance peak for retrieving water quality parameters of optically complex waters. *Remote Sensing*, 8(6), 497, 2016.
- Lyzenga D. R.: Passive remote sensing techniques for mapping water depth and bottom features, *Applied Optics*, 17(3), 379-383, 1978.
- Meyers, G. Variation of Indonesian throughflow and the El Niño- Southern Oscillation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 101(C5), 12255-12263, 1996.
- Sakuno, Y., Yajima, H., Yoshioka, Y., Sugahara, S., Abd Elbasit, M. A., Adam, E., Chirima, J. G.: Evaluation of Unified Algorithms for Remote Sensing of Chlorophyll-a and Turbidity in Lake Shinji and Lake Nakaumi of Japan and the Vaal Dam Reservoir of South Africa under Eutrophic and Ultra-Turbid Conditions. *Water*, 10(5), 618, 2018.
- Sprintall, J., Wijffels, S. E., Molcard, R., Jaya, I. Direct estimates of the Indonesian Throughflow entering the Indian Ocean: 2004–2006. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 114(C7), 2009.
- Tokoro, T., Hosokawa, S., Miyoshi, E., Tada, K., Watanabe, K., Montani, S. and Kuwae, T.: Net uptake of atmospheric CO₂ by coastal submerged aquatic vegetation. *Global change biology*, 20(6), 1873-1884, 2014.
- Warren, M. A., Quartly, G. D., Shutler, J. D., Miller, P. I., & Yoshikawa, Y.: Estimation of ocean surface currents from maximum cross correlation applied to GOCI geostationary satellite remote sensing data over the Tsushima (Korea) Straits. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121(9), 6993-7009, 2016.

付録1 衛星データの入手方法

衛星データは扱いたいけど、まずその入手方法がわからないという人は意外に多い。極端な話、RSの研究者でも例えば陸域を専門に扱っている人は、海域のデータの入手先は全く見当がつかないという人も少なくない。今や衛星データはインターネットにあふれており、10mより粗い解像度であれば、ほとんどが無料で入手できる時代になっているにもかかわらず、その入手経路は意外と知られていない。ここでは、表-1に紹介した2010年以降に打ち上げられた衛星データのうち、筆者がおすすめするインターネットサイトにおけるデータの入手方法について簡単に解説する。

(1) MODISデータ

MODISの水域関係のデータを入手する場合、付図-1に示すようなNASAが運用する「Ocean Color Web」のレベル3ブラウザーが便利である。一番上のプルダウンメニューを左から、「Standard」，「Aqua MODIS Chlorophyll concentration」，「Monthly」，「4km」と選択すると、4km解像度の月平均のクロロフィル画像が得られる。さらに、これらの生のデータ（詳細な数値データ）を得たい場合は、任意の日の画像の下側両角にカーソルを移動させると、HDFと呼ばれるフォーマットでのダウンロード表示が出てくるので、そのままクリックすれば、数値データをダウンロードすることができる。なお、このサイトから得られる物理量は、4kmか9km解像度の世界規模のクロロフィル濃度や海面水温の他に、粒子状無機炭素（PIC），粒子状有機炭素（POC）も得られる。



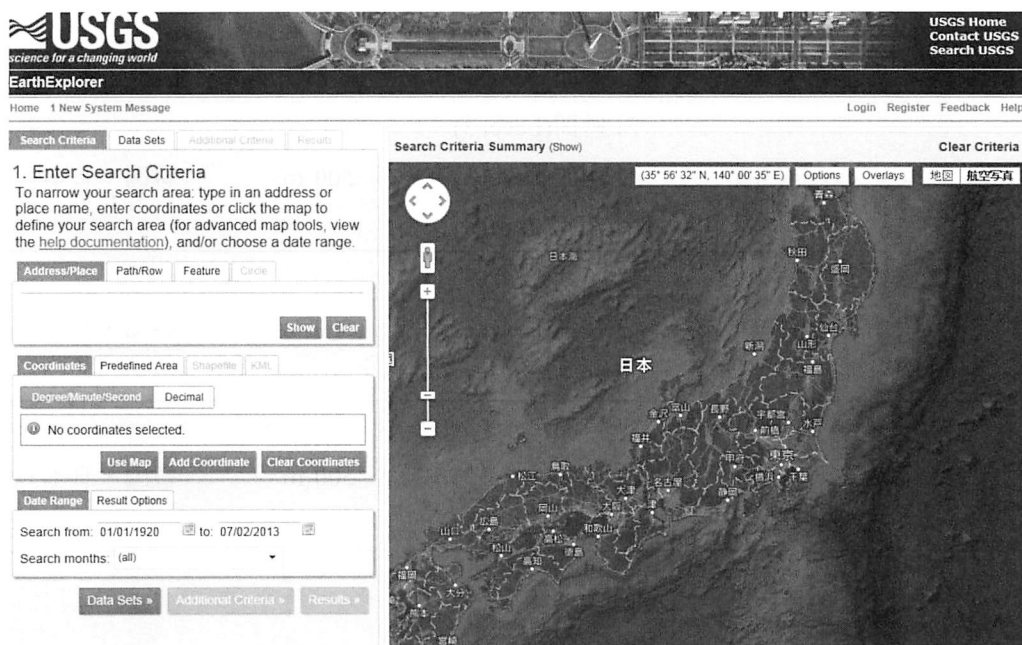
付図-1 「Ocean Color Web」 レベル3ブラウザのTOP画面

(2) Landsat-8とSentinel-2

Landsat-8やSentinel-2データ入手する場合、米国地質調査所（USGS）が運用する「Earth Explorer」が便利である。このサイトからは画像フォーマットとして有名なTIFデータ（正式には緯度経度情報が含まれたGeotiffデータ）となっている。以下にそのダウンロード手順を記述する。

<データのダウンロード手順>

- ① Earth Explorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) のダウンロードサービスを受けるため、付図-2の画面右上の「Register」でユーザーの名前、パスワードの登録（無料）を行う。登録が成功すれば、USGS から連絡が来るので、その後 USGS からの連絡をもとに、改めて Earth Explorer の login を行う。
- ② 付図-2の画面左上の「Search Criteria」の欄で、まず検索したい場所を付図-2の地図画面上でクリックする（付図-2の画面左中段の「Coordinates」欄にその場所の緯度経度が表示される）。必要に応じて、画面左のメニューで取得したい日にち、または期間を入力する。
- ③ 付図-2の画面左上の「Data Sets」をクリックし、「Landsat」の下階層である「Landsat Collection 1 Level 1」、「Landsat8 OLI/TIRS C1 Level 1」（Sentinel-2であれば、「Sentinel」の下階層にある「Sentinel-2」）にチェックを入れる。
- ④ 画面左下の「Results」というボタンを押せば、すぐに検索結果が表れる。検索結果の画面下には足跡マークや駐車禁止のようなマークがあるが、この中で、欲しい画像があれば、下向きの緑矢印とハードディスクのような形の描いてある「Download Option」というアイコンがあるので、これをクリックするとダウンロード選択画面が現れるので、最下段にある画像データ（Level-1 GeoTIFF Data Product）をダウンロードする。なお、1シーンのLandsat-8データは、約850Mbほどあるので要注意である。なお、Landsat-8の場合、少しデータ生成に時間がかかるが、手順③の工程で「Landsat Collection 1 Level 1 Level-2」のデータを選べば、面倒な大気補正作業をしなくても大気補正済みの反射率データが得られるため、特におすすめである。



付図-2 Earth ExplorerのTOP画面

(3) Himawari-8 と COMS-1 GOCI

Himawari-8 の水域関係のデータを入手する場合、応用例でも紹介した JAXA の分野横断型プロダクト提供システム (P-Tree) の水温, Chla データなどが使いやすい. これらのデータは, いずれも NetCDF というファイル形式で配布されており, 登録ユーザーは, 付表-1 に示される性能を持つ物理量プロダクトを無料で入手することができる.

<Himawari-8データのダウンロードサイト>

http://www.eorc.jaxa.jp/ptree/userguide_j.html

一方, 韓国の静止海色衛星 COMS-1 GOCI のデータも, 以下のサイトから付表-2 で示した物理量プロダクトを無料で入手できる.

<GOCIデータのダウンロードサイト>

http://kosc.kiost.ac.kr/eng/p10/kosc_p11.html

付表-1 Himawari-8 の水域関係の物理量の性能

物理量	時間分解能	空間解像度	観測領域	画素数
海面水温(昼間)	10 分(Level 2)	2km	半球	6001×6001pixel
	1 時間(Level 3)	2km	半球	6001×6001pixel
海面水温(夜間)	1 時間(Level 3)	2km	半球	6001×6001pixel
クロロフィル a	1 時間(Level 3)	5km	半球	6001×6001pixel
		1km	日本	2701×2601pixel
日射量/ PAR	10 分(Level 2)	5km	半球	6001×6001pixel
	1 時間(Level 3)	1km	日本	2701×2601pixel

付表-2 COMS-GOCI の物理量の性能

物理量	時間分解能	空間解像度	主要観測領域
クロロフィル a(Chla)	1 時間(Level 3)	500 m	韓国・日本
	1 週間(Level 3)		
	1 か月(Level 3)		
有色溶存有機物(CDOM)	1 時間(Level 3)	500 m	韓国・日本
	1 週間(Level 3)		
	1 か月(Level 3)		
総懸濁物質(TSS)	1 時間(Level 3)	500 m	韓国・日本
	1 週間(Level 3)		
	1 か月(Level 3)		

付録2 衛星データの処理

衛星データの処理には、これまで高価な衛星画像処理ソフトERDAS, ENVI, ER-Mapperなどがなければ解析が難しいとされ、RS以外の研究者や一般の方からは敬遠されがちであった。しかし、最近ではSeaDAS (Windows版, Mac版, Linux版) などのフリーのビューワーソフトやMultispec (Windows版, Mac版) などのフリーの解析ソフトを利用することによって、簡単な解析であれば、誰でもお金をかけずに挑戦できるようになってきている。

<フリーの衛星ビューワー・解析ソフトのダウンロードサイト>

SeaDAS (NASA) : <https://seadas.gsfc.nasa.gov/downloads/>

Multispec (Purdue大学) : <https://engineering.purdue.edu/~biehl/MultiSpec/>

一方、大学生やRS研究をこれから着手しようという研究者にとっては、これらのソフトでは物足りないと感じている人も多いだろう。そこで当研究室では、主に汎用の数値計算ソフトであるMatlab (学生ライセンスは1万円程度) またはOctave (フリーウェア) を使って、衛星画像を計算、マッピングを行っている。これらのソフトの良いところは、衛星データに特化していないソフトウェアにも関わらず、高度な行列計算を比較的簡単なプログラムだけで実現できること、そして自分自身が開発したアルゴリズムを簡単にプログラムに入れ込んで計算し、マッピングまで行えることである。さらに、過去の学生や教員が作成したプログラムを伝授していけば、初めて衛星データに触れる人でも最初は実行ボタン一つで難しい解析ができてしまうのである。一例として、以下にLandsat-8データから東京湾のSST (海面水温) マップを作成するMatlab (フリーのOctaveでも作動する) プログラムの例を示す。前述した方法でLandsat-8データをダウンロードして、任意のフォルダーでこのプログラムを実行すれば、東京湾の水温分布図を描くことができる。

<Matlab (Octave)プログラム例>

%ファイルの読み込み

DN5=imread('LC81070352014231LGN00_B5.TIF'); %Band5を読む

B5=double(DN5(5200:7000,2300:3800));

clear DN5

DN10=imread('LC81070352014231LGN00_B10.TIF'); %Band10を読む

B10=double(DN10(5200:7000,2300:3800));

```

clear DN10
DN11=imread('LC81070352014231LGN00_B11.TIF'); %Band11を読む
B11=double(DN11(5200:7000,2300:3800));
clear DN11
%放射輝度計算
L10=3.3420E-04*B10+0.10000; %B10の放射輝度変換
L11=3.3420E-04*B11+0.10000; %B11の放射輝度変換
clear B10 B11
%温度計算
K1_B10=774.89; %B10のプランク第1定数
K2_B10=1321.08; %B10のプランク第2定数
K1_B11=480.89; %B11のプランク第1定数
K2_B11=1201.08; %B11のプランク第2定数
T10=real(K2_B10./log(K1_B10./L10+1)-273.15); %Band10の輝度温度
T11=real(K2_B11./log(K1_B11./L11+1)-273.15); %Band11の輝度温度
MCSST=T10+1.95.*(T10-T11)-0.48; %MCSST計算(作野ら)
clear K1_B10 K2_B10 K1_B11 K2_B11 T10 T11
%陸マスク処理
landmask=double(B5<=8000); %陸を0, 海を1とする
seamask=double(B5>8000); %海を0, 陸を1とする
landmask2=seamask*(-1000); %陸を-1000, 海を0とする
Tmask=MCSST.*landmask+landmask2;
clear landmask seamask landmask2
%水温表示
colormap(jet(128));
map = colormap; % current colormap
map(1,:) = [0,0,0]; % 最初の値を黒とする
colormap(map)
imagesc(Tmask);figure(gcf);
colorbar
caxis([22 30]); %値の範囲
axis off; %軸の目盛をなくす
axis image; %サイズを画像に合わせる

```