

人工衛星を利用した  
海洋の可視化の推進に向けた調査報告書

契約日：令和2年5月13日

報告日：令和3年2月15日

日本リモートセンシング学会

目次

1. はじめに .....	1
2. 海洋可視化対象に関する調査.....	2
2.1 海洋可視化対象の抽出	
2.1.1 海洋における解決すべき課題	
2.1.2 課題に関する観測可能性の根拠	
1) 環境	
(a) 海洋温暖化	
・ 海面水温	
・ 海面高度	
・ 海氷面積	
・ 海洋温暖化と衛星観測	
(b) 富栄養化	
・ 富栄養化	
・ 赤潮	
・ 青潮	
(c) 生物多様性の保全	
(d) 海洋プラスチック	
(e) 流れ藻	
2) 水産	
(a) 水産資源管理の拡充・強化	
(b) IUU (Illegal, Unreported and Unregulated) 漁業	
(c) 養殖業・沿岸漁業	
3) 資源・エネルギー	
(a) 海洋油汚染	
(b) 自然エネルギー	
(c) 海洋エネルギー資源開発に関する環境アセスメント	
4) 災害・国土管理	
(a) 風水害	
(b) 海岸浸食	
(c) 津波・高潮	

(d) 海底火山活動

2.2 海洋可視化のための衛星プラットフォーム及びセンサに関する調査 .....	50
2.2.1 水温	
2.2.2 海色	
2.2.3 海氷・塩分・海洋気象	
1) 海氷	
2) 海上風・降水	
3) 海面塩分	
2.2.4 測位・海面高度	
1) 測位	
2) 海面高度	
2.2.5 可視高解像度・合成開口レーダ (SAR)	
1) 可視高解像度	
2) 合成開口レーダ (SAR)	
3. 海洋可視化対象と関連する衛星センサの関係 .....	66
3.1 海洋可視化対象と関連する衛星センサについて	
3.2 衛星センサの将来展望	
4. まとめ .....	73

## 1. はじめに

近年、海洋においては、海洋温暖化の進行、激甚災害の増加、海洋汚染の拡大、水産資源の枯渇、生物多様性の減少など、多くの問題が発生している。これらの問題解決の一步は、観測すべき対象の直接的な可視化を行うことである。しかし、海洋における可視化は観測船やブイなどによる方法では限界があり、古くから広域を面的に測定できる各種リモートセンシングが利用されてきた。日本において開発された最近の衛星だけをみても、GCOM (Global Change Observation Mission) ミッションのGCOM-W (Water) やGCOM-C (Climate) に代表される水循環、海象、海色、氷雪などを観測できる優れたセンサが次々と打ち上げられている。ただし、このような海洋観測に特化した衛星プラットフォームやセンサの現状や問題点は、意外と知られていない。実際、海洋RSの衛星やその精度、あるいは活用法を網羅的に説明したWebサイトですら見つからないのが現状である。そこで、本調査では、現状において海洋観測に用いられているリモートセンシングプラットフォーム及びそれに搭載されている観測機材及びセンサの現状を調査することにより、海洋の可視化の実態を把握することを目的とする。

なお、本報告書は、日本リモートセンシング学会の研究会の1つとして2016年4月に発足した「海洋・湖沼リモートセンシング研究会」(略称「OLaReS」)の会員と会員の共同研究者等が中心となって執筆した。以下に本報告書執筆にあたっての著者・会計担当者の一覧を示す。

### <報告書執筆者>

- 作野裕司 日本リモートセンシング学会 海洋・湖沼リモートセンシング研究会 会長,  
本報告書 執筆責任者, 広島大学
- 斎藤克弥 日本リモートセンシング学会 海洋・湖沼リモートセンシング研究会 会員,  
本報告書 執筆副責任者, 一般社団法人漁業情報サービスセンター
- 石坂丞二 日本リモートセンシング学会 海洋・湖沼リモートセンシング研究会 会員,  
本報告書 執筆内容検討委員, 名古屋大学
- 虎谷充浩 日本リモートセンシング学会 海洋・湖沼リモートセンシング研究会 会員,  
本報告書 執筆内容検討委員, 東海大学
- 比嘉紘士 日本リモートセンシング学会 海洋・湖沼リモートセンシング研究会 幹事,  
本報告書 執筆内容検討委員, 横浜国立大学
- 向井田明 本報告書 執筆内容検討委員, 一般財団法人リモート・センシング技術センター
- 富田裕之 本報告書 執筆委員, 名古屋大学
- 堀 雅裕 本報告書 執筆委員, 富山大学

### <会計責任者>

- 木村 篤史 日本リモートセンシング学会 財務理事, 株式会社パスコ

## 2. 海洋可視化対象に関する調査

### 2.1 海洋可視化対象の抽出

ここでは、海洋における解決すべき問題点を整理し、それらの解決すべき問題点をリモートセンシング分野の立場から整理する。

#### 2.1.1 海洋における解決すべき課題

現在、様々な海洋における解決すべき課題が存在するのは、周知の通りである。しかし、そのような課題を1つ1つとりあげて説明することは議論が複雑となる。そこで、ここでは、現在または将来、リモートセンシング技術で関連の観測が期待される課題を表 2.1.1 に示す4つの課題カテゴリー（「環境」、「水産」、「資源・エネルギー」、「災害・国土管理」）にわけた。

表 2.1.1 海洋における解決すべき課題に関するキーワード

課題	カテゴリー	キーワード
1	環境	(a)海洋温暖化 (b)富栄養化（赤潮，青潮） (c)生物多様性の保全 (d)海洋プラスチック (e)流れ藻
2	水産	(a)水産資源管理の拡充・強化 (b)IUU（Illegal, Unreported and Unregulated）漁業 (c)養殖業・沿岸漁業
3	資源・エネルギー	(a)海洋油汚染 (b)自然エネルギー (c)海洋エネルギー資源開発に関わる環境アセスメント
4	災害・国土管理	(a)風水害 (b)海岸侵食 (c)津波・高潮 (d)海底火山活動

#### 2.1.2 課題に関する観測可能性の根拠

ここでは、表 2.1.1 で抽出した海洋における解決すべき課題のうち、アルファベット((a), (b)など)で示したキーワードごとに、リモートセンシング観測の現状と課題を文献を示しながら、それぞれ簡単に説明する。

1)環境

(a)海洋温暖化

海洋における地球温暖化の影響は、海水温の上昇、海面高度の上昇、海氷の減少などとして、現れている。地球規模の変動をモニタリングする上で、人工衛星リモートセンシングは必須のツールである。この章では、地球温暖化の海洋への影響について、IPCC（気候変動に関する政府間パネル）第5次報告書(2013) [1]と海洋・雪氷圏特別報告書(2019) [2]や気象庁の気候変動監視レポート 2019(2020) [3]に基づいて、説明する。

・海水温

人類が放出する二酸化炭素による温室効果によって、気温の上昇が続いている。これに伴って、海水温の上昇が引き起こされている。IPCC 第5次報告書<sup>1)</sup> および気候変動監視レポート 2019<sup>3)</sup>によれば、世界平均の海洋表層（0-700m）での貯熱量の変化は、近年上昇し続けており（図 2.1.1）、1971年から2010年までの40年間に地球全体で蓄積された熱エネルギーの9割以上は海洋に吸収と推定されている。海面水温の上昇は、世界全体平均で+0.55°C/100年（図 2.1.2）、北太平洋で+0.52°C/100年と推定される。

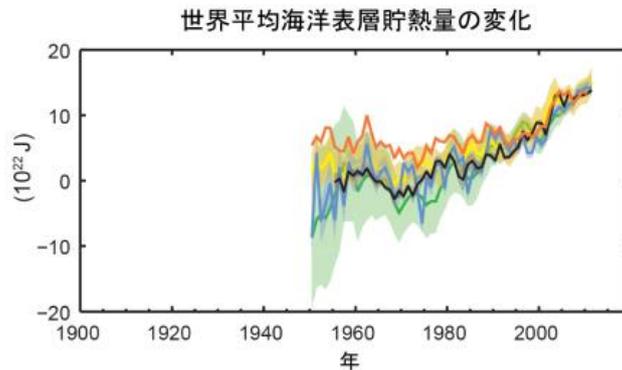


図 2.1.1 海洋表層（0-700m）での貯熱量の変化  
 (出典 IPCC AR5 WG I SPM Fig. SPM 3(c) [1])

日本近海においても海水温は上昇しているが、その上昇割合は全世界平均や北太平洋平均のおよそ倍の1.14°C/100年上昇しており（図 2.1.3）、日本近海の海洋生物の生態系に大きな影響を及ぼしつつあると考えられる。

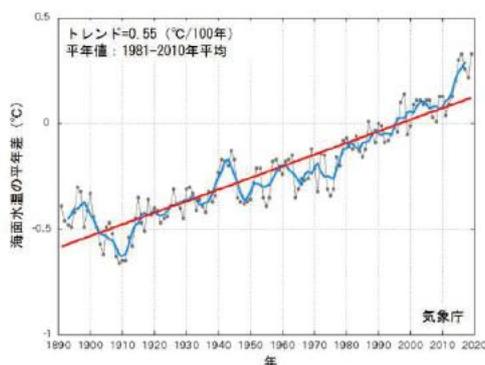


図 2.1.2 世界全体の年平均海面水温平年差の経年変化  
(出典 気象庁 気候変動監視レポート 2019 図 2.5-1 [3])

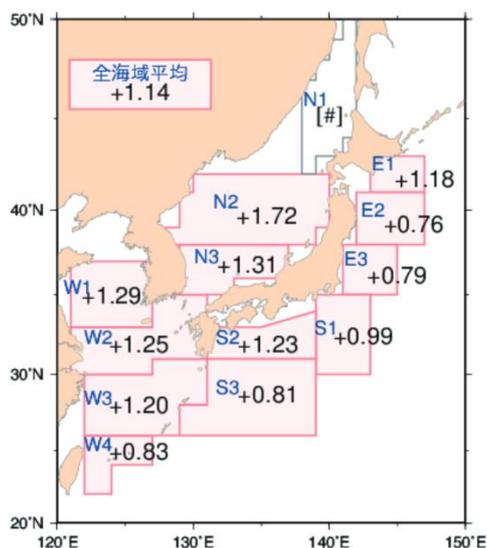


図 2.1.3 日本周辺海域の平均海面水温の長期変化傾向 (°C/100 年)  
(出典 気象庁 気候変動監視レポート 2019 図 2.5-3 [3])

海水温の上昇は、膨張による海面水位の上昇を起こしており、海水温の分布や海流が変われば、長期間にわたって気候に影響を及ぼすことが懸念されている。

・海面高度

地球温暖化による海面水位の上昇が懸念されている。海洋・雪氷圏特別報告書(2019) [2]によれば、海面上昇の原因は、氷河の融解によるものが4分の1、残り4分の3は海水が温まることによるものである。図 2.1.4 は、世界平均海面水位の変化を示している。世界平均海面水位の平均上昇率は3.2mm (1993～2010年)であり、これは1901年～2010年の1.7mmと比較して2倍近くとなっている。海面水位の上昇は、海岸浸食、高潮・高波・異常潮位な

どの沿岸災害の激化、沿岸湿地喪失などによる生態系への被害が予測されている。

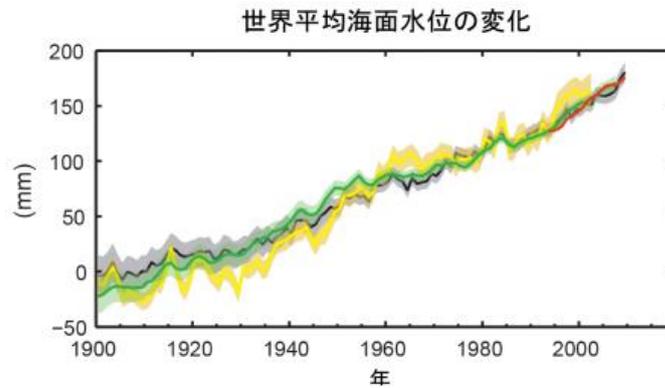


図 2.1.4 世界平均海面水位の変化

(出典 IPCC AR5 WG I SPM Fig. SPM 3(d) [1])

・海氷面積

温暖化により、極域の海氷面積は、減少の一途をたどっている。北極域の年平均海氷面積は 1979 年から 2012 年の期間にわたって減少し、その減少率は 10 年あたり 3.5~4.1% (10 年あたり 45~51 万 km<sup>2</sup>) 減少している(図 2.1.5)。海氷面積は、温暖化の指標のひとつであるとともに、北極圏航路の可能性を調査する上で重要である。

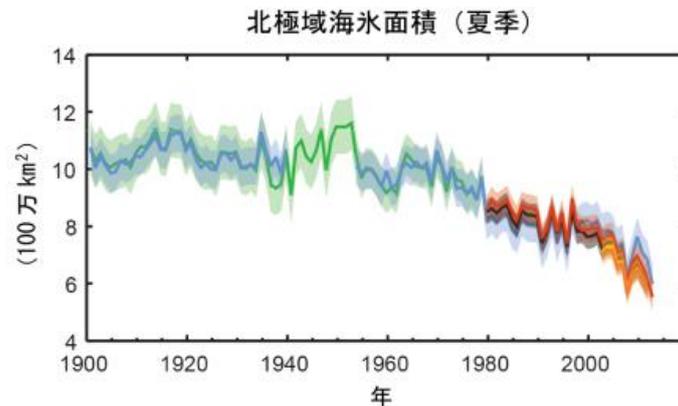


図 2.1.5 北極行き海氷面積 (夏季)

(出典 IPCC AR5 WG I SPM Fig. SPM 3(b) [1])

・海洋温暖化と衛星観測

IPCC 第 5 次評価報告書[1], IPCC 海洋・雪氷圏特別報告書[2], 気候変動監視レポート 2019[3], で指摘されるように、気候変動は海洋生態系への影響が大きく、また沿岸域は気

候に関するハザードにさらされている。これらの変動をモニタリングする上で、衛星観測による海面水温、海面高度、海氷などの情報は必要不可欠である。

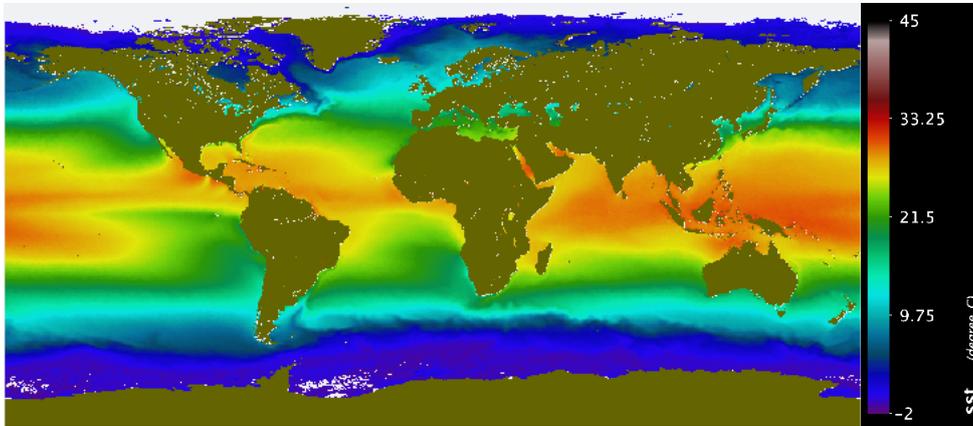


図 2.1.6 MODIS/Aqua による全球の海面水温 (2002～2019 年秋の平均値)

海面水温の観測には、衛星に搭載された熱赤外放射計やマイクロ波放射計が活用されている。図 2.1.6 は MODIS/Aqua による全球の海面水温を示している。海面水温の熱赤外線やマイクロ波による観測は、大気の透過率の高い波長  $4\sim 12\mu\text{m}$  や周波数  $6\sim 10\text{GHz}$  を使用している[4]。熱赤外線は空間解像度  $1\text{km}$  で観測精度は  $0.38^\circ\text{C}$  と優れているが雲があると観測出来ない。一方、マイクロ波は雲の影響をほとんど受けないが空間解像度が  $30\sim 50\text{km}$  で沿岸の観測ができない。観測の原理はプランクの法則（温度を持つ物体から放射量）に基づいている。海面の極表層（数  $\mu\text{m}$ ）からの放射を観測しており、海面がべた凧で日射がある場合、衛星で観測する表皮水温と水面下の水温に誤差が生じることがある。

海面高度の観測には、マイクロ波高度計が活用されている。海面高度の観測は、計測誤差  $2\sim 3\text{cm}$  であるが、衛星軌道直下のみでの観測となるため、空間解像度を上げるには複数の軌道のデータが必要となる。また、パルスを照射する範囲内に陸地や流氷などの海面以外物体があると誤差が生じる。現在、沿岸域への拡張や高空間分解能化の検討が行われている[5]。図 2.1.7 は、海面高度のジオイド面（地球の重力異常を反映した基準面）からの偏差を示している。軌道直下の 10 日間のデータを使って全球画像化されたものである[6]。

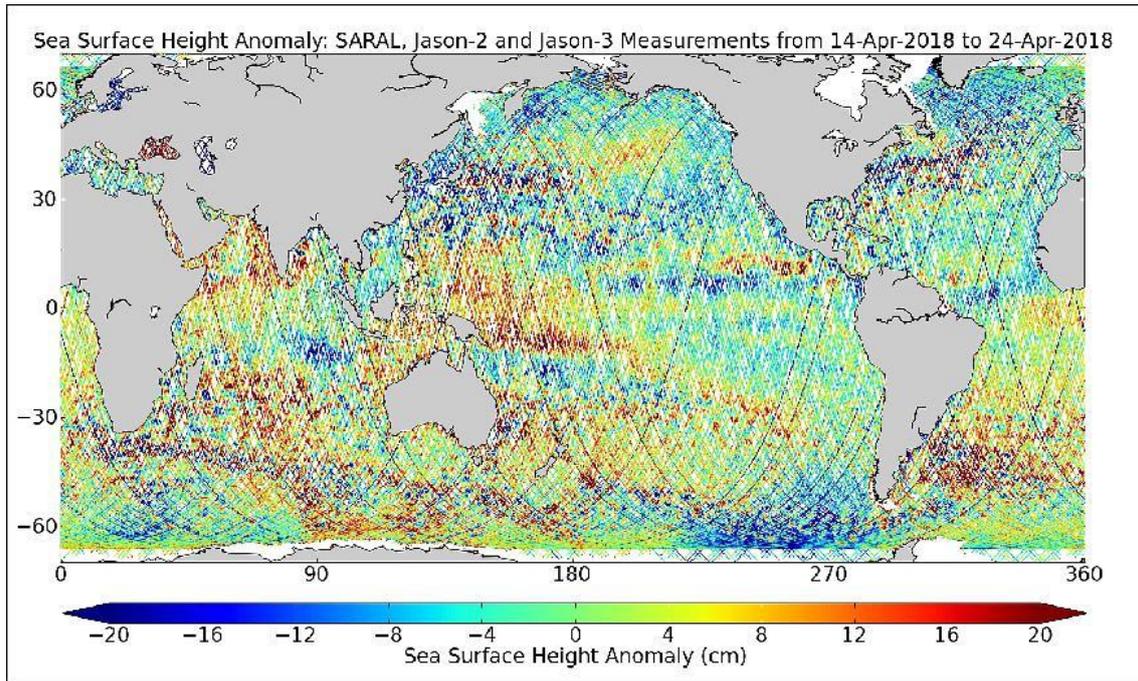


図 2.1.7 海面高度のジオイド面（地球の重力異常を反映した基準面）からの偏差画像（出典 eoPortal Directory, Jason-3 [6]）

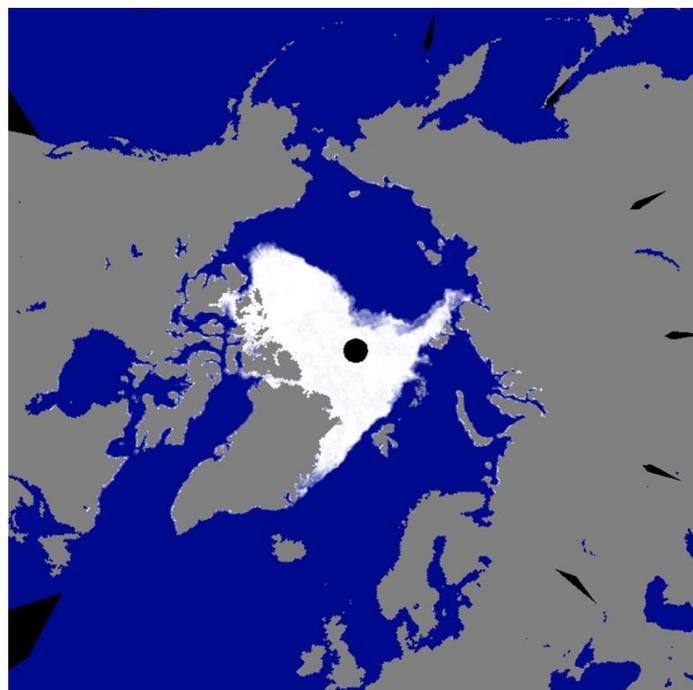


図 2.1.8 AMSR-E が捉えた北極域の 2007 年 9 月 24 日の海氷密接度分布  
（出典 JAXA/EORC 地球が見える 2012 年[8]）

海氷の観測には、可視域やマイクロ波放射計が使われている[7] (図 2.1.8)。可視域の放射計は高空間分解能で海氷分布が得られるが、雲があると観測出来ない。一方、マイクロ波放射計は雲の影響をほとんど受けず、海氷分布と海氷密接度(氷の厚み)が観測できるが、空間分解能は劣る。

このような地球観測衛星によるグローバルな観測データと数値シミュレーションの組み合わせは、将来予測のための重要なツールとなっている。

#### 参考文献

- [1] IPCC, Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp., 2013.
- [2] IPCC, IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]., 2019  
<https://www.ipcc.ch/srocc/download/>, 参照 2020-12-5.
- [3] 気象庁, 気象庁気候変動監視レポート 2019, pp. 90., 2020.  
[https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/monitor/2019/pdf/ccmr2019\\_all.pdf](https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/monitor/2019/pdf/ccmr2019_all.pdf), 参照 2020-12-5.
- [4] 細田皇太郎, 衛星リモートセンシングによる海面水温観測, 写真測量とリモートセンシング, 52 巻, 5 号, 234-238, 2013.
- [5] 市川香, 21 世紀初頭の衛星海面高度計, 海の研究, Vo. 23, No. 1, pp. 13-27, 2014.
- [6] eoPortal Directory, Jason-3, <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/j/jason-3>, 参照 2020-12-18.
- [7] 長幸平, 直木和弘, AMSR2 による海氷観測の高度化, 日本リモートセンシング学会誌, Vol. 33, No. 4, pp. 283-292, 2013.
- [8] JAXA/EORC, 地球が見える 2012 年, <https://www.eorc.jaxa.jp/earthview/2012/tp120825.html>, 参照 2020-12-18.

(b) 富栄養化

・ 富栄養化

日本をはじめ多くの世界の沿岸域では、人間活動が盛んになることによって陸上からの有機物や栄養塩の流入が増加し、富栄養化していると考えられている。富栄養化によって植物プランクトンの増殖に必要な栄養塩類が増加すると、植物プランクトンの量が増加することが知られている。植物プランクトンによる有機物生産が多くなることは、海域の生産力が高まり良い面もあると考えられる。しかし、植物プランクトンが増加することによって、後に述べる赤潮を引き起こしたり、沈降した有機物が海底近くで分解することによって溶解酸素が減少して、貧酸素水塊となり、さらに後に述べる青潮を引き起こすことがある。これらの現象によって、一般的には人為的な富栄養化は魚介類が死ぬなどの人間社会にも悪影響を及ぼすと考えられている。

富栄養化によって植物プランクトンが増加するため、リモートセンシングで観測が可能な植物プランクトンの色素であるクロロフィル a が増加することが知られている。そこで、20 年以上のデータが蓄積されている海色リモートセンシングデータを用いて、富栄養化を把握する試みが行われている。国連環境計画 (UNEP) の北西太平洋地域海行動計画 (NOWPAP) では、図 2.1.9 に示すように日中韓露の周辺海域において、20 年間分のクロロフィル a 濃度の高低、および増加・減少・変化が少ない海域、の 6 海域に分けることによって、富栄養化の予備的判別を行い、政府レベルの対策に生かす取り組みが行なわれている [1]。

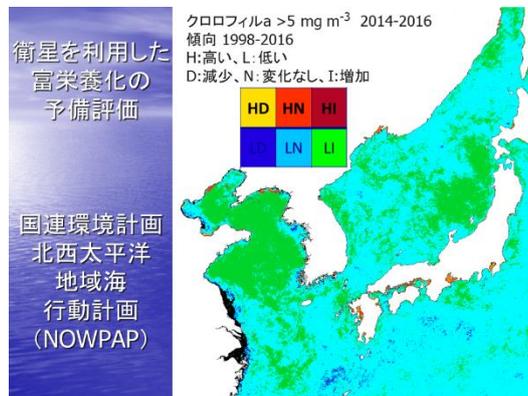


図 2.1.9 NOWPAP によって行われている衛星クロロフィル a 濃度を用いた富栄養化の予備評価。 ([1]を改変)

富栄養化は沿岸海域で多く起こっているが、沿岸域ではプランクトン以外の物質が色に影響を与えている可能性が多く、さらに大気補正も誤差が大きい。そのためにクロロフィル a 濃度の精度も低い。今後の衛星センサの精度向上は必須であるが、富栄養化などの長期モニタリングのためには、複数のセンサ間での相互校正がしっかりと行われる必要もある。

一方、富栄養化は世界中の沿岸域で進行しており問題となっているが、最近日本の沿岸域

では、流入する有機物や栄養塩類を削減が進んで、貧栄養化しているとも言われている。さらにこの貧栄養化によって、逆に魚介類の生産が減少している可能性も指摘されている。また、もともと栄養塩が少なく生物生産も低い外洋域において、温暖化による成層の強化等によって、貧栄養化が進行している可能性も指摘されている。同様に衛星で取得される海表面水温、光合成有効放射と合わせて、基礎生産を算出する試み[2]や、植物プランクトンの群集構造を把握する試み[3]も行われており、それらの長期変化を把握することも可能になりつつある。

#### ・赤潮

赤潮は、植物あるいは微小動物プランクトンが海水中で大量発生し、海水が着色する現象である。赤潮は自然にも起こることが知られているが、人間活動の盛んな沿岸域で多く起こる赤潮は、富栄養化によって起きていると考えられている。赤潮が起こることによって、養殖場の魚が斃死したり、ノリ養殖に必要な栄養塩が消費されるなど、水産被害が起こることも多く、有害藻類ブルーム (Harmful Algal Bloom; HAB) と呼ばれることもある。しかし、厳密には赤潮の全てが有害藻類ブルームではなく、有害藻類ブルームの全てが赤潮を形成するわけでもない。有害藻類ブルームは特定の種類の生物群集によって起こる場合が多く、またどのような水産業が営まれるかによっても、その被害状況は異なるため、同じ生物群集でも有害となる場合、ならない場合もある。現在でも、九州や瀬戸内海等では頻繁に赤潮による養殖業の被害が起きており、養殖場に影響しないうちに赤潮を予測できれば、餌を減らしたりしたり、養殖場を移動するなどの対処をすることが可能であるため、リモートセンシングによる赤潮の観測情報も期待されている。

リモートセンシングによって赤潮を調べる試みは、LANDSATなどのセンサを利用され、古くから行われてきた[4]。しかし、LANDSATは観測頻度が少なく、また波長解像度も充分でないために、正確に赤潮の挙動を把握することは困難であった。植物プランクトンの観測を目的に設計された衛星海色センサが、ほぼ毎日1kmの解像度でクロロフィルa濃度を測定するようになって、図2.1.10に示すように、赤潮をクロロフィルa濃度の高い海域として観測できるようになった[5]。また、さらに海色の波長特性を利用することによって、赤潮海域を特定する研究もおこなわれている。上に述べたように、赤潮はその形成する生物群集が重要であるため、最近では特定の海域の特定の赤潮に関して判別する試みが多く行われている[6, 7]。

上述したように、現状のリモートセンシングでも赤潮検出の試みは行われているが、特に生物群集の判別に関しては課題が多い。日本の海色センサ「しきさい」では250mの空間解像度で測定が可能であるが、さらに小さな空間スケールの情報が好ましい。一方で、可視域のリモートセンシングを利用しているために、雲があることによって観測ができない場合が多く、静止衛星などで頻繁に観測をすることも期待される。さらに、現在のリモートセンシングでは、可視域の波長数が限られるために、生物群集を分けることが難しいことも考え

られ、今後波長解像度の高いハイパースペクトルの衛星データが期待される。

一方、衛星で観測する限り *Kalenia mikimotoi* のように表層よりも深い場所で増殖し、養殖被害を与える種類の検出は困難である。また、衛星を利用する限りは、ある場所での赤潮の発生予測を行うことは困難である。従って、今後は沿岸域の流れと生物の増加・減少を予測する数値モデル等と組み合わせることが必須であると考えられる。

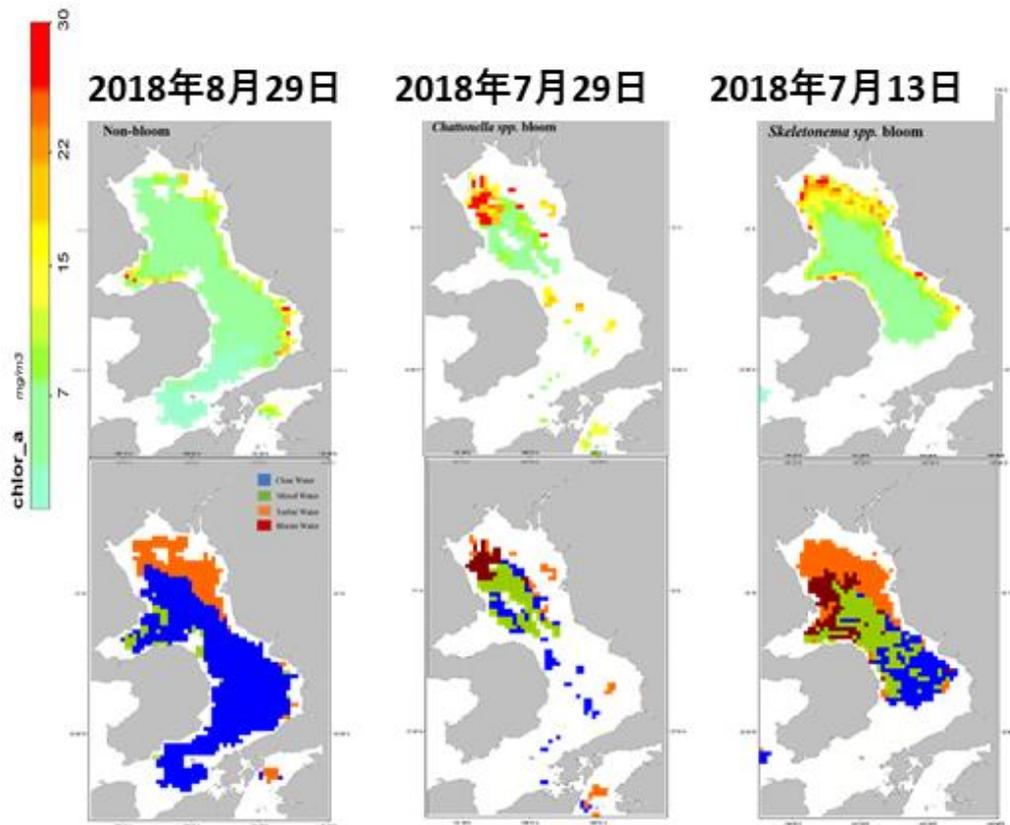


図 2.1.10 海色衛星センサ MODIS による有明海のクロロフィル a 濃度（上）と、赤潮海域（下）。（下）の赤茶色の海域が赤潮，青はきれいな海域，オレンジ色は濁った海域，緑は赤潮ほど植物プランクトンの多くない海域。2018年8月29日（左）には赤潮は発生しておらず，7月29日（中）はラフィド藻類 *Chattonella* spp. 7月13日（右）は珪藻 *Skeletonema* spp. の赤潮が発生していた。（[7]を改変）

#### ・青潮

富栄養化が著しい閉鎖的な水域では、過剰に増加した有機物が海底に沈降し、有機物の分解過程において酸素が消費されるため、底層において度々無酸素状態になる。無酸素下では、海底に蓄積された有機物が嫌気性の微生物によって分解され、その過程において硫化水素が生成される。硫化水素は無酸素水塊中に溶出し、底層にて蓄積されるが、風等の外力によ

り底層水が湧昇すると、湧昇過程において硫化水素は溶存酸素と反応し、硫黄が生成される。硫黄はコロイド粒子であり、表層に拡がると太陽光を散乱するため、図 2.1.11(左図)に示すように、海色は青白く変色したように見える。これが青潮と呼ばれている。硫黄を含む青潮水は、溶存酸素が著しく低く、浅場や漁場に侵入し生物へ晒されるとダメージを与える。また、青潮が大規模な場合には漁業被害に繋がることもあり、重大な環境問題として認識されている。

青潮のリモートセンシングでは、青潮特有の水面の濁りを可視や近赤外波長での輝度値の相違で捉える手法が用いられている。はじめは、Landsat TM 画像を使用し、可視及び近赤外波長の輝度値が青潮発生箇所と青潮が発生していない河口や湾奥と比較して高めになることを利用し、教師あり分類によって青潮を検出する手法が提案された[6]。その後、現地での青潮の分光特性が把握され、また、2010年韓国によって打ち上げられた静止海色衛星センサ GOCI が青潮分布を捉えた画像を多く取得することが可能となったため、このような現地及び衛星の光学データを使用し、青潮検出のアルゴリズムが開発されることになる[9-11]。静止海色衛星センサ GOCI を使用する利点は、500m 解像度の画像を日中1時間に1枚取得するため、短期スケールで変化する青潮の空間分布を連続的に把握することが可能である。現状の青潮検出法としては、青潮による濁りを散乱光として 660 nm の赤色のバンドで捉え、この散乱光と青潮の基である硫黄濃度の増減を関係付けることによって、図 2.1.11(右図)に示すように、青潮を硫黄濃度として推定する手法が提案されている[12]。通常、660nm は植物プランクトンの光吸収帯と重なるが、主に青潮水は底層起源であり、植物プランクトンは殆ど含まれていないと仮定をおくことでこの手法が成り立つ。しかし、閾値を設けて青潮発生箇所と非発生箇所とを区別するため、河口域で濁度が著しく増加した場合などには誤判定される可能性があることを注意する必要がある。さらに、硫黄の光吸収係数や後方散乱係数が測定され、硫黄を単純な濁りとして推定するだけでなく、固有光学特性を推定する詳細なアルゴリズムも提案されており、今後、青潮発生箇所と非発生箇所を光学的特徴から区別する手法の開発が期待される [13]。

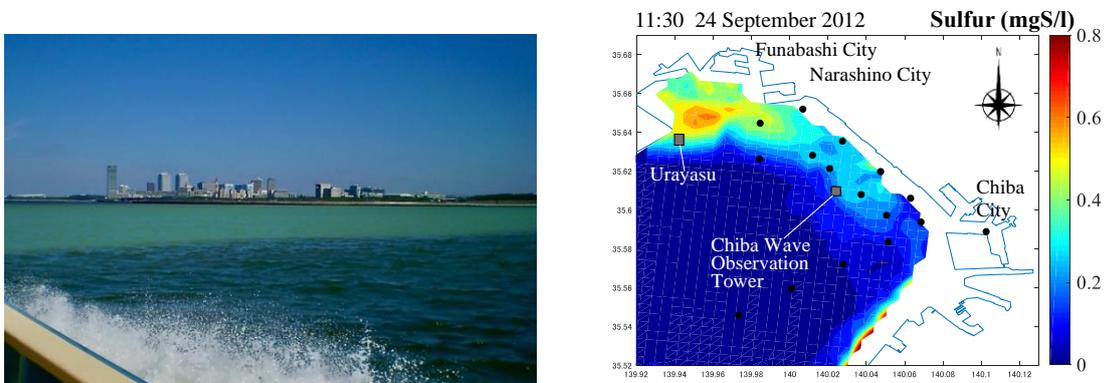


図 2.1.11 2015年8月24日の青潮(左), GOCIによる青潮推定結果(右)

上述した通り、青潮検出において青潮による濁りと河川が流入する無機態懸濁物による濁度の増加との判別が課題として残されている。今後の研究において、それぞれの光学的な特徴が詳細に把握されることによって解決されることが期待される。また、現在使用されている GOCI は 500m 解像度であり、青潮が小規模である場合や面積が小さい港内や浅場への拡がりを捉えるには解像度が不足しており、今後、高頻度高解像度の海色センサが将来打ち上がることで、より詳細な青潮のモニタリングが可能になることが期待される。

#### 参考文献

- [1] Terauchi G, Maure, E. d. R, Yu, Z., Wu, Z., Lee, C., Kachur, V., Ishizaka, J.: Assessment of eutrophication using remotely sensed chlorophyll-a in the Northwest Pacific region. *Proc SPIE*, 10778:107780H - 4. doi:10.1117/12.2324641, 2018.
- [2] Kameda, T., and Ishizaka. J.: Size-Fractionated Primary Production Estimated by a Two-Phytoplankton Community Model Applicable to Ocean Color Remote Sensing. *Journal of Oceanography*, Vol. 61, No. 4, pp.663-72. Doi:10.1007/s10872-005-0074-7, 2005.
- [3] Zhang, H., Wang, S., Qiu, Z., Sun, D., Ishizaka. J., Sun, S., He, Y.: Phytoplankton Size Class in the East China Sea Derived from MODIS Satellite Data, *Biogeosciences*, Vol. 15 No.13, pp. 4271-89. Doi:10.5194/bg-15-4271-2018.
- [4] 大内晟. 広島湾奥部における赤潮予報研究の現状. 沿岸海洋研究ノート, Vol. 20, No. 1, pp, 33-42, 1982,
- [5] Ishizaka J, Kitaura Y, Touke Y, et al. Satellite detection of red tide in Ariake Sound, 1998-2001. *J Oceanogr.*, Vol. 62, No.1, pp. 37-45. doi:10.1007/s10872-006-0030-1, 2006.
- [6] Siswanto E, Ishizaka J, Tripathy SC, Miyamura K. Detection of harmful algal blooms of *Karenia mikimotoi* using MODIS measurements: A case study of Seto-Inland Sea, Japan. *Remote Sens Environ.*, Vol. 129, pp. 185-196. doi:10.1016/j.rse.2012.11.003, 2013.
- [7] Feng C, Ishizaka J, Saitoh K, Mine T, Yamashita H. A Novel Method Based on Backscattering for Discriminating Summer Blooms of the Raphidophyte (*Chattonella* spp.) and the Diatom (*Skeletonema* spp.) Using MODIS Images in Ariake Sea, Japan. *Remote Sens.*, Vol. 12, No. 9, 1504. doi:10.3390/rs12091504, 2020.
- [8] 宮崎早苗, 八木宏, 小倉久子, 灘岡和夫: 衛星画像解析に基づく東京湾の青潮発生状況把握の試み. 海岸工学論文集, 42, 1076-1080, 1995.
- [9] 作野裕司, 小林拓, 比嘉紘士, 鯉渕幸生, 虎谷充浩: 青潮発生時における海色の定量評価の試み. 土木学会論文集 B3 (海洋開発), 67(2), I\_376-I\_381, 2011.
- [10] 作野裕司: 2017年6月に東京湾奥で発生した大規模な青潮の概要と衛星データ取得状況. 日本リモートセンシング学会誌, 37(4), 373-374, 2017.
- [11] 比嘉紘士, 鯉渕幸生, 小林拓, 虎谷充浩, 作野裕司: 衛星リモートセンシングを用いた東京湾における青潮分布の形成過程に関する解析. 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 69(2), I\_1451-I\_1455,

2013.

- [12] Higa, H., Sugahara, S., Salem, S. I., Nakamura, Y., Suzuki, T.: An estimation method for blue tide distribution in Tokyo Bay based on sulfur concentrations using Geostationary Ocean Color Imager (GOCI). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol. 235, 106615, 2020.
- [13] 比嘉紘士, 中村航, 管原庄吾, 中村由行, 鈴木崇之: 静止海色衛星による硫黄の光学特性に基づいた青潮分布推定手法の開発. 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 75(2), I\_1057-I\_1062, 2019.

(c) 生物多様性の保全

2010 年名古屋で開催された生物多様性条約第 10 回締約国会議（COP10）においての海洋に関する成果として、「海洋と沿岸の生物多様性：生態的及び生物学的に重要な海域（EBSA）については、締約国や FAO 等の関係機関等と協力し、資金が利用可能であることを条件に、一連の地域ワークショップを開催し、EBSA 設定の基準の適用に関する理解の向上を図るとともに、その際に得られる科学的及び技術的情報並びに事例の集積を行うことを CBD 事務局に対して求めること。また、海洋生物資源についても、生物多様性に配慮して持続的に利用するための適切な措置をとるよう各国に促すことなどが決定された。」[1]とされ、海洋の生物多様性においては特に人類の生産活動の影響を大きく受ける沿岸域の環境の把握と保全の重要性が指摘されている。また、地球観測システムには、Global Earth Observation System of Systems（GEOSS）に人工衛星による地球規模観測も位置付けられている。

水産庁は平成 28 年に藻場・干潟ビジョンを策定した[2]。藻場・干潟ビジョンにおいては、広域的に藻場の分布状況・消長を把握する手法として衛星画像を用いた解析手法に言及されている（図 2.1.12）。

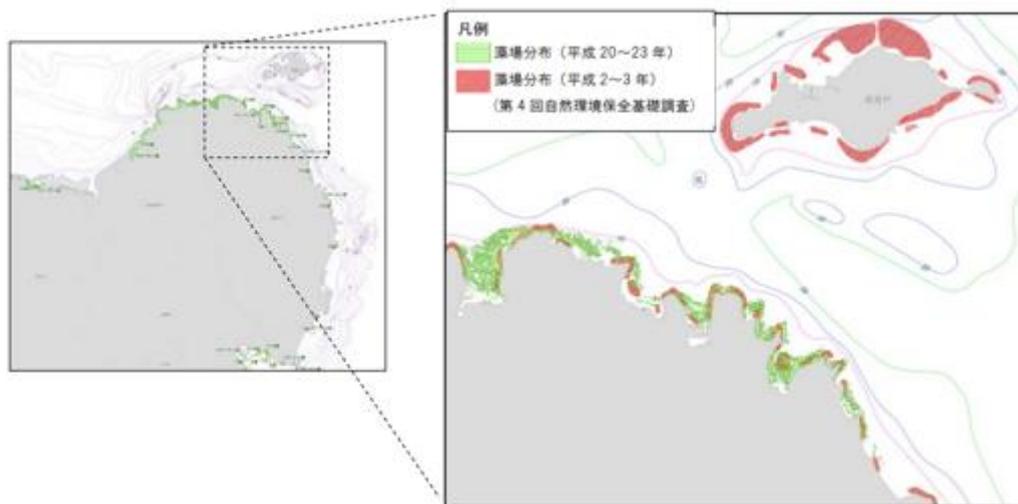
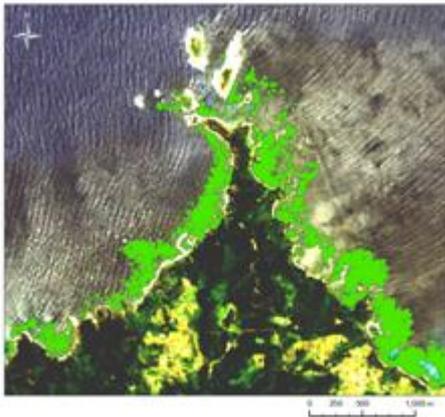


図 2.1.12 衛星画像を用いた藻場分布，水深分布，藻場の消長状況の把握（国東半島周辺の例）（出典 水産庁藻場・干潟ビジョン）

また、環境省においても平成 27 年度から 3 ヶ年で閉鎖性海域対策として、衛星データなどを瀬戸内海における藻場・干潟分布調査を実施した[3]。光学衛星での観測データを基に現地でのヒヤリング，過去データとの比較を組み合わせることで、太陽光有効深度内において従来の調査手法によるものよりも広域且つ，より詳細な分布域の把握が可能になっている（図 2.1.13）[4]。この手法では、太陽光が透過する水深およそ 20m 程度に限定される（水質，特に濁度に依存する）。



解析結果



環境省、自然環境保全基礎調査

図 2.1.13 ALOS/AVNIR-2 を用いた藻場の把握例  
(出典 平成 24 年 RESTEC 技術成果報告会資料)

温暖化による水温上昇の影響を受けやすいサンゴ礁の状況の把握に関しては、環境省において”サンゴ礁生態系保全行動計画 2016-2020”が策定されている[5]。モニタリング技術としても、地球観測衛星データを用いて、特に白化のモニタリング、底質や藻場との分類手法に関する研究がされている(図 2.1.14) [6]。特に、近年衛星搭載光学センサが高空間分解能化、高波長分解能化が進んでいることから、より詳細な状況把握が進んでいる。また、小型衛星コンステレーションにより観測頻度が飛躍的に向上していることから、被雲による欠測が少なくなり且つ、より条件の良いデータ取得が可能となってきている。

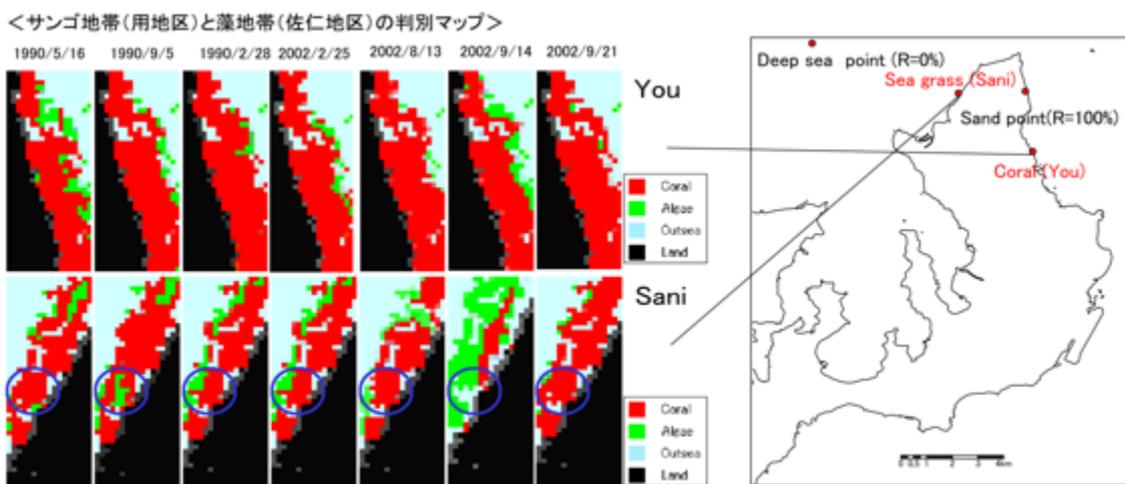


図 2.1.14 サンゴ地帯と藻場の Landsat による分類例  
(出典 日本サンゴ礁学会 2005 年度ポスター発表)

参考文献

- [1] 環境省：生物多様性条約第 10 回締約国会議の開催について（結果概要），  
<https://www.env.go.jp/press/files/jp/16459.pdf>, 参照 2020-12-07
- [2] 水産庁：藻場・干潟ビジョン，  
[https://www.jfa.maff.go.jp/j/gyoko\\_gyozyo/g\\_thema/attach/pdf/sub53-1.pdf](https://www.jfa.maff.go.jp/j/gyoko_gyozyo/g_thema/attach/pdf/sub53-1.pdf), 参照 2020-12-07
- [3] 環境省：瀬戸内海における藻場・干潟分布状況調査結果（概要），  
<http://www.env.go.jp/water/totalresult.pdf>, 参照 2020-12-07
- [4] RESTEC：衛星データによる藻場分布の把握，<https://www.restec.or.jp/pdf/h24pg7.pdf>, 参照  
2020-12-07
- [5] 環境省：サンゴ礁生態系保全行動計画 2016-2020，  
[http://www.env.go.jp/nature/biodic/coralreefs/pamph/C-project2016-2020\\_L.pdf](http://www.env.go.jp/nature/biodic/coralreefs/pamph/C-project2016-2020_L.pdf), 参照 2020-12-  
07
- [6] 作野ら：衛星リモートセンシングによる奄美大島のサンゴ礁底質マッピング（日本サンゴ礁学会  
2005 年度ポスター発表），<https://home.hiroshima-u.ac.jp/sakuno/bousai/JCRS2005poster.pdf>,  
参照 2020-12-07

(d) 海洋プラスチック

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[1]．特に海水中に漂うマイクロプラスチック（5mm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[2]．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ごみは，海洋表面を浮遊、海底に沈積、あるいは生物によって捕食されるが，いずれの場合でも難分解性であり，半永久的に生態系へダメージを与える．

プラスチックゴミに代表される海岸ゴミの調査法としては，一般的には「水辺の散乱ごみの指標評価手法（海岸版）」などの方法で，調査員が海岸において目視または写真によって概略を把握する[3,4]．しかし，このような調査は，確実ではあるが，一般に人手や手間がかかり，調査者の主観が入りやすいという欠点がある．客観的にゴミの量を評価する方法として，リモートセンシングによる方法が考えられる．現在，リモートセンシング（RS）による海岸ゴミの検出には，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[5-7]．しかし，この方法では，ペットボトルのような透明なプラスチックや，砂浜や周辺の植生と同じような色をしたゴミは検出できないという問題点があった．

一方，近赤外線（可視より波長が少し長い領域）のあるいくつかの波長には，プラスチック特有の光吸収が見られる[8-9]．この目に見えない光を使えば，原理的にはプラスチックごみを見つけることができる．図2.1.15は実験室において，近赤外カメラと呼ばれる特殊なカメラを使ってプラスチックの種類を判別した結果である．このように透明に見えるプラスチックも，特殊なカメラを使うことによって，プラスチックの種類まで色分けすることが期待されている

普通のデジタルカメラ写真



近赤外カメラ写真



図 2.1.15 近赤外カメラによるプラスチック種の判別実験例

ここまで、リモートセンシングによるプラスチック探査を紹介したが、水面では近赤外の吸収が極めて激しいため、実用化には課題も多い。現在、このような技術を応用して、世界の研究者が、衛星や飛行機から海洋プラスチックごみの分布をモニタリングしようと研究を進めている[10]。もちろんリモートセンシング研究の他にも、新たに発見されたプラスチックを分解する微生物を使って海洋プラスチックを根本から減らす研究[11]など、世界では様々な海洋プラスチックごみを監視し、減らす研究やとりくみが行われている。

#### 参考文献

- [1] Jambeck, J. R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T. R., Per-ryman, M., Andrady, A., Narayan, R. and Law, K. L: Plas-tic waste inputs from land into the ocean, Science, Vol.347, No.6223, pp.768-771, 2015.
- [2] Browne, M. A., Crump, P., Niven, S. J., Teuten, E., Tonkin, A., Galloway, T. and Thompson, R.: Accumulation of mi-croplastic on shorelines woldwide: sources and sinks, Environmental science & technology, Vol.45, No.21, pp.9175-9179, 2011.
- [3] 国土交通省東北地方整備局, JEAN/クリーン アップ全国事務局, 特定非営利活動法人パートナーシップオフィス: 水辺の散乱ゴミの指標評価手法(海岸版), 2004.
- [4] 広島県: 海岸漂着物等対策推進地域計画, pp.1-53, 2017.
- [5] 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, 第49巻, 2号, pp. 139-151, 2012.
- [6] 青山隆司, 野沢志帆: 衛星リモートセンシングによる海洋漂流物の抽出, 福井工業大学研究紀要, 第45号, pp.1-6, 2015.
- [7] 青山隆司, 倉田且: 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, 第46号, pp. 1-7, 2016.
- [8] Garaba, S. P. and Dierssen, H. M.: An airborne remote sensing case study of synthetic hydrocarbon detection using short wave infrared absorption features identified from marine-harvested macro-and microplastics. Remote Sensing of Environment, 205, 224-235, 2018.
- [9] 作野裕司, 森本雅人: 海岸のプラスチックゴミ検出のための近赤外分光反射率特性と衛星からの検出可能性. 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 74(2), I\_1471-I\_1476, 2018.
- [10] Themistocleous, K., Papoutsas, C., Michaelides, S., and Hadjimitsis, D.: Investigating Detection of Floating Plastic Litter from Space Using Sentinel-2 Imagery. Remote Sensing, 12(16), 2648, 2020.
- [11] Odd New: 南極のトビムシの体内にもマイクロプラスチック、地球規模の汚染拡大に懸念, <https://www.cnn.co.jp/fringe/35155765.html>, 参照 2020-11-30

(e) 流れ藻

流れ藻は海面に浮遊している流出した海藻（草）のことであり、メバル類やブリなどの幼稚魚の育成場所やサヨリやサンマの産卵床として重要視されている[1]。また流れ藻を含む藻場は魚介類の産卵・生育場所だけでなく、ブルーカーボンと呼ばれる CO<sub>2</sub> 吸収源としても、近年再注目されている[2][3]。流れ藻の種としては、春から初夏にかけて東シナ海や日本海でアカモクやホンダワラに代表される大規模な流れ藻が現場で観測されている[4-6]。しかし流れ藻は、時期的・時間的にもその分布が大きく変化するため船による適切な把握は難しい。そのため、広域的・面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流れ藻の把握が期待されている。

リモートセンシング研究において、流れ藻が注目されたのは、2008 年夏の北京オリンピック前後における中国沿岸（主に黄海、東シナ海）における藻の大発生である。このような大量の流れ藻をモニタリングするために同時期に発表された衛星データを使った「浮き藻指数 (Floating Algae Index, FAI)」[7]はその後の同種の研究に大きなインパクトを与えた。FAI は、流れ藻の近赤外波長の強い反射を指標化した指数で、MODIS の 645nm (赤), 859nm (近赤外), 1240nm (短波長赤外) の 3 バンドを使って次式のようにして計算される。

$$FAI = R_{859} - \left[ R_{645} + (R_{1245} - R_{645}) \times \frac{(\lambda_{859} - \lambda_{645})}{(\lambda_{1245} - \lambda_{645})} \right]$$

このうち、 $R$  は反射率（下付き文字は具体的な波長を示す）、 $\lambda$  が波長を示す。この数式の意味を簡単に言えば、下図に示すように、859nm 付近の反射率 (A) のベースライン (B) からの高さ (A-B)。つまり正味の 859nm 反射率強度である。FAI を使った応用研究としては、Oyama et al. [8], Garcia et al. [9] など多数存在する。また、JAXA EORC では、GCOM-C SGLI (250m 解像度) に FAI を適用し流れ藻を可視化した Web サイト「流れ藻モニタ」[10]を 2021 年 1 月から公表している (図 2.1.16 参照)。

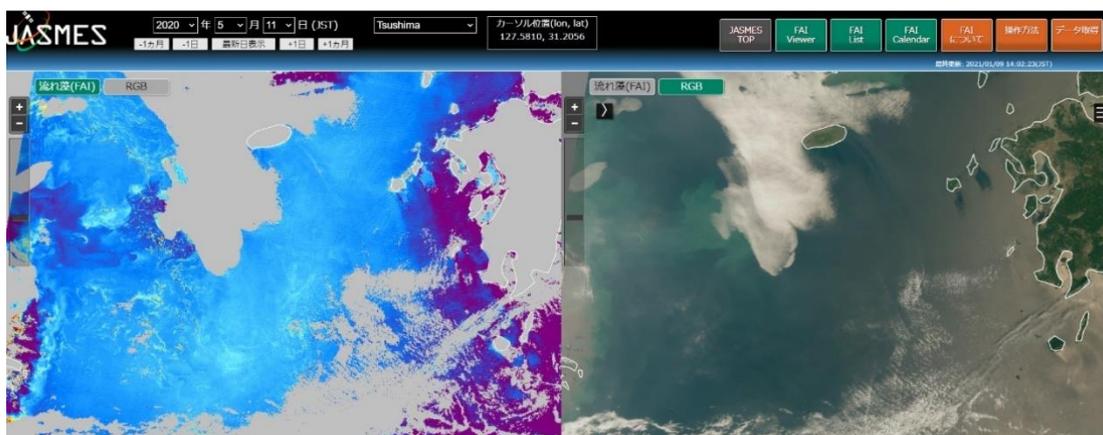


図 2.1.16 JAXA EORC による「流れ藻モニタ」の Web サイト[10]

以上のように衛星 FAI は、あくまで流れ藻の有無を知る方法であり、その種類まではわからない。また、MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) や SGLI (Functions of Second Generation Global Imager) などの海色センサでは解像度面や観測周期面で小規模な流れ藻の動きの把握も難しい。従って、今後は衛星から流れ藻の種類を同定する手法やタンDEM観測している高解像度衛星による流れ藻追跡手法が課題となる。一方、流れ藻の存在を検証する手段としては、小型 GPS ブイなどを使った流れ藻の直接的な追跡研究[11]が重要であろう。

参考文献

- [1] 山本昌幸, 藤原宗弘, 山賀賢一, 棚野元秀: 瀬戸内海中央部における流れ藻の構成種. 水産増殖, 第50巻, 3号, pp. 375-376, 2002.
- [2] Tokoro, T., Hosokawa, S., Miyoshi, E., Tada, K., Watanabe, K., Montani, S. and Kuwae, T.: Global change biology, Vol. 20, No. 6, pp. 1873-188, 2014.
- [3] 堀正和, 桑江朝比呂: ブルーカーボン-浅海における CO2 隔離・貯留とその活用, 地人書館, 253p., 2017.
- [4] Komatsu, et al. Distribution of drifting seaweeds in eastern East China Sea. Journal of Marine Systems, Vol.67 (3-4), pp.245-252, 2007.
- [5] 桐山隆哉, 高木信夫, 高田順司: 2015 年に長崎県沿岸でみられた大量のアカモク流れ藻, 長崎県水産試験場研究報告, 42, 2016.
- [6] 森脇晋平, 為石起司, 齋藤寛之, 古江幸治, 若林英人: 島根沿岸の流れ藻に付随する魚類の出現特性. 島根県水産試験場研究報告, pp.33-42, 2005.
- [7] Hu, C. A novel ocean color index to detect floating algae in the global oceans. Remote Sensing of Environment, Vol.113, No.10, pp.2118-2129, 2009
- [8] Oyama, Y., Matsushita, B., Fukushima, T. Distinguishing surface cyanobacterial blooms and aquatic macrophytes using Landsat/TM and ETM+ shortwave infrared bands. Remote Sensing of Environment, 157, pp.35-47, 2015.
- [9] Garcia, R. A., Fearn, P., Keesing, J. K., Liu, D. Quantification of floating macroalgae blooms using the scaled algae index. Journal of Geophysical Research: Oceans, Vol.118, No.1, pp.26-42, 2013.
- [10] JAXA EORC: 流れ藻モニタ, <https://www.eorc.jaxa.jp/JASMES/FAI/>, 参照 2020-11-30
- [11] Hasegawa, T. et al. Continuous behavioral observation reveals the function of drifting seaweeds for *Seriola* spp. juveniles. Marine Ecology Progress Series, Vol.573, pp.101-115, 2017.

## 2) 水産

SDGs (sustainable development goals) は、社会の持続可能な発展のために 2030 年までに達成すべき目標を分野別に定めたもので、2015 年に国連で採択された。SDGs の 14 番目に「海の豊かさを守ろう」という目標 (SDG14) があり、ここに挙げられている課題の多くが水産業と関連したものになっている。

水産庁は SDGs を含む国内外の水産業をとりまく環境の変化を受けて、2018 年に、実に 70 年ぶりに漁業法を改正した。この改正の目的は、水産資源管理の拡充・強化によるわが国周辺の水産資源の回復・維持と、わが国水産業の成長産業化である[1]。ここでは、漁業法改正を受けた今後の漁業政策のうち、①水産資源管理の拡充・強化、②IUU 漁業対策の強化、③養殖業・沿岸漁業の推進の 3 つについてリモートセンシングの関わりと研究の現状について説明する。

### (a) 水産資源管理の拡充・強化

#### ・水産資源管理の現状

1996 年の国連海洋法条約批准により日本は本格的な EEZ 時代に入った。この条約では、沿岸国は EEZ 内の生物資源に対し排他的な権利を行使できるが、同時に EEZ 内の生物資源の保存と最適利用を促進する義務が課せられる。これを受けて日本は 1997 年に海洋生物資源の保存管理法を施行し、漁獲量の総量規制がスタートした。更に 2001 年に制定された水産基本法により、水産政策の基本が、漁業生産性の向上から水産物の安定供給に転換され、将来にわたる漁業の持続可能性が意識されるようになった。

水産資源管理の拡充・強化には、正確な資源状態を把握し、計画的かつ適正に漁業を行うことが必要不可欠である。正確な資源状態の把握については、改正された漁業法の重点項目の 1 つであり、資源評価対象種の拡大に加えて、MSY (最大持続生産量) に基づく国際的にみて遜色のない科学的な評価方法及び個別割当て等による効果的な管理方法の導入を進めている[1]。

一方、伝統的な漁業国であるわが国においては、古くから、漁業操業の効率化を目指した技術開発が進められてきた。その分野は多岐に渡り、LED 集魚灯のような漁具開発、省エネルギーの開発などハードウェア寄りのものから、漁場予測のようなソフトウェアの開発にも及んでいる。近年は政府が提唱する Society 5.0 の実現へ向けて、水産業においても ICT (Information and Communication Technology) 化やスマート化が急速に進んでいる。適切に水産資源管理を行いつつ適正かつ効率的な漁業操業を実現するためには、資源と漁場という時空間スケールの異なる事象を一体で考える必要がある。図 2.1.17 にその概念図を示す。

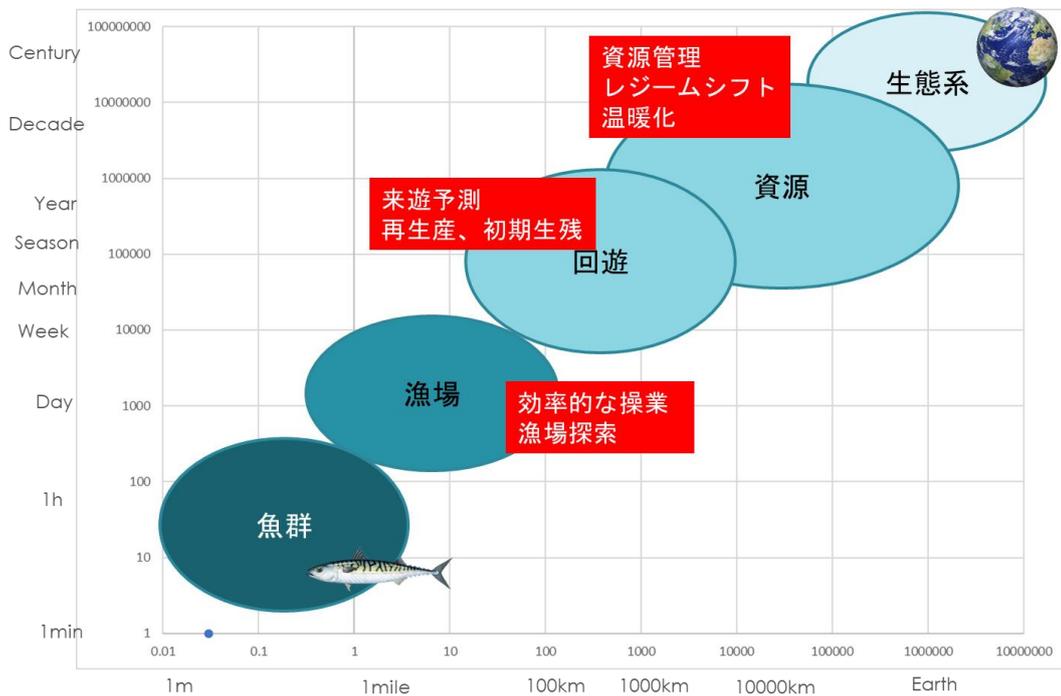


図 2.1.17 資源管理の時空間スケール

喫緊の問題として、近年のサンマやスルメイカなどの重要魚種の不漁がある。その背景には様々な要因が重なり合っているが、本稿でも触れている地球温暖化は最も重要な要因の1つである。漁業者からは「近年海が変わった」という話がよく聞かれる。正確な海の状況を把握することは、水産資源の変動予測の点でも効率的な漁業操業の点でも重要である。

・水産資源管理へのリモートセンシング研究の現状

衛星リモートセンシングの水産海洋への応用の歴史は長い。水産資源管理への応用の基本は、衛星から表面水温や海流やクロロフィル濃度などの海洋環境を把握し、そこから魚群や漁場を間接的に推定することである。現在の技術では、衛星から直接魚群を捉えるには至っていない。漁業情報サービスセンター（以下「JAFIC」）では、1970年代から漁場探索等に関する技術開発を進めてきた[2]。Laurs et al. は、1980年代に衛星で観測された水温・海色とマグロの漁獲量を比較解析し、漁業現場での有効性を明らかにした [3]。日本周辺海域での漁業への応用研究においても、衛星で観測された海面水温と漁場との比較を通じて、衛星リモートセンシングの漁業現場での有効性が示されている[4][5]。初期の研究は漁場探索の効率化などが主要なテーマであった。研究開始から40年近くを経た現在、衛星情報の利用は漁業現場では必須となっている。また解像度や観測波長の異なる多様なセンサが利用されており、その応用範囲は漁場から藻場・干潟まで多岐に渡っている。漁業者への漁海況情報配信の社会実装の例として「エビスくん」（(一社) 漁業情報サービスセンター）などがある[6]。

Lours et al. は、広範囲を瞬時に観測できる衛星リモートセンシングは海洋観測、漁業管理、保護種の調査、そして操業現場での利用と、広範囲で有効なツールであるとしており、漁業・水産分野での応用範囲の広さを説明している [7]。水産資源の把握を目的とした研究には、数理統計解析や生態系モデルなどが使われており、実際に現在の水産行政に応用されている ([8] など)。また初期生残や再生産関係などを通じた水産資源の変動には、水温や餌料生物生産などの海洋環境が重要な影響を与えることは知られている ([9] [10] [11] など)。海洋環境を把握する上で衛星リモートセンシングは有用である。実際に日本海のマイワシ資源と衛星クロロフィル濃度画像を比較して日本海のマイワシの再生産と春季ブルームの関係を明らかにした例もある [12]。また近年は海洋生態系数値モデルも提案されており [13]、衛星リモートセンシングのデータが活用されている。

#### ・水産資源管理の拡充・強化に関するリモートセンシング研究の課題と問題点

正確に海の状況を把握することは、水産資源への影響の把握と効率的な漁業操業の両方に資する。これには、高い時間解像度と即時性に加え、高い空間解像度が求められる。ひまわり 8 号や GCOM-W/AMSR2 などのマイクロ波放射計、GCOM-C/SGLI など、ここ 10 年で急速に衛星及びセンサの技術が進歩しており、これらの要件に応える研究開発が進められている。GCOM-C/SGLI に代表される極軌道衛星の高解像度化の流れに加え、特に静止衛星や準天頂衛星など常時日本の EEZ をモニタリングすることが可能な衛星の利用推進は必須である。また、これらの静止軌道の衛星センサには高解像度化も期待されている。一方、偏西風や梅雨前線など気象の影響を受けやすい日本周辺海域において、マイクロ波などの活用も必要不可欠である。マイクロ波放射計は世界的にも日本の技術が最先端である。他にもレーダセンサなど、水産分野ではまだ積極的に活用されていない衛星データも多いことから、この利活用推進も求められる。また、現在の衛星技術では、魚群を直接見ることはできない。今後は 4K カメラ、ハイパースペクトルのセンサなどの活用が期待されるが、それでも多くの魚が遊泳する水深 50m 以深の亜表層を衛星でモニタすることは難しい。

近年、衛星リモートセンシングによる現状のモニタリングから一歩進んだ応用も求められるようになりつつある。その一つが予測である。赤潮予測や漁場予測などは、ベンチャー企業などの積極的な参入もあり、これに向けた研究開発の推進は今後重要になると予想される。海況の予測については、実用可能な海洋数値モデルの開発が急速に進みつつある。衛星リモートセンシングでは基本的に表層の情報しか得ることができないが、漁業の中には下層や底層の水温などに対するニーズがある。これを把握するには海洋数値モデルなどとの組合せが必要である。

以上のように、水産分野での衛星リモートセンシングには多様な分野で高いニーズがある。すでに社会実装されているものもあり、継続的かつ安定的に衛星データが得られることがこの分野での実利用において最も重要な要件である。

参考文献

- [1] 水産庁：水産政策の改革（新漁業法等）のポイント，平成30年度水産白書，  
[https://www.jfa.maff.go.jp/j/kikaku/wpaper/h30\\_h/trend/1/t1\\_1\\_3.html](https://www.jfa.maff.go.jp/j/kikaku/wpaper/h30_h/trend/1/t1_1_3.html), 2018.
- [2] 社団法人漁業情報サービスセンター：昭和51年度人工衛星利用調査検討事業報告書，1977.
- [3] Laurs, R. M., P. C. Fiedler and D. R. Montgomery.: Albacore tuna catch distributions relative to environmental features observed from satellites, *Deep-Sea Research*, 31, 9, pp.1085-1099, 1984.
- [4] Saitoh, S., S. Kosaka and J. Iisaka: Satellite infrared observation of Kuroshio warm-core rings and their application to study of Pacific saury migration, *Deep-Sea Research*, Vol.33, Nos 11/12, pp.1601-1615, 1986.
- [5] Sugimoto, T. and H. Tameishi: Warm-core rings, streamers and their role on the fishing ground formation around Japan, *Deep-Sea Research*, 39, 1, pp.183-201, 1992.
- [6] 社団法人漁業情報サービスセンター：エビスくん，<http://www.jafic.or.jp/service/ebisukun/>, 2010.
- [7] Laurs, R.M. and J. J. Polovina: Satellite remote sensing: an important tool in fisheries oceanography. *Fisheries Oceanography*, Paul J. Harrison and Timothy R. Parsons, eds., Blackwell Science, pp.146-160, 2002.
- [8] 田中 昌一：21世紀の水産資源管理，*NIPPON SUISAN GAKKAISHI*, 68(3), pp.313-319, 2002.
- [9] 伊藤進一：黒潮・親潮混合水域の環境変動のメカニズムと魚類資源に及ぼす影響に関する研究，*水産海洋研究* 77(3), pp.167-173, 2013.
- [10] Tetsuichiro Funamoto, Orio Yamamura, Tokihiro Kono, Tomonori Hamatsu and Akira Nishimura: Abiotic and biotic factors affecting recruitment variability of walleye pollock (*Theragra chalcogramma*) off the Pacific coast of Hokkaido, Japan, *FISHERIES OCEANOGRAPHY*, 22:3, pp.193-206, 2013.
- [11] Takasuka A, Oozeki Y, Kubota H: Multi-species regime shifts reflected in spawning temperature optima of small pelagic fish in the western North Pacific, *Mar Ecol Prog Ser* 360, pp.211-217, 2008.
- [12] Kodama Taketoshi, Wagawa Taku, Ohshimo Seiji, Morimoto Haruyuki, Iguchi Naoki, Fukudome, Ken-Ichi, Goto Tsuneo, Takahashi, Motomitsu, Yasuda, Tohya: Improvement in recruitment of Japanese sardine with delays of the spring phytoplankton bloom in the Sea of Japan, *FISHERIES OCEANOGRAPHY*, 27-4, pp.289-301, 2018.
- [13] 岸 道郎：海洋生態系の数値モデル研究，*Oceanography in Japan*, 17(1), pp.7-18, 2008. ■

(b) IUU 漁業

・ IUU 漁業の現状

IUU 漁業とは、国内法・国際法に違反する操業 (illegal)、漁獲量の無報告や過少報告 (unreported)、旗国や沿岸国の許可を得ない無許可操業 (unregulated) の総称である。水産資源管理の効果を損い、公正な水産物取引を阻害するばかりでなく、強制的に IUU 漁業に従事させられている漁業者の人権問題も提起されている。

魚介類は世界の動物性たんぱく質供給において重要な供給源を担っている。世界人口の増加により、世界全体の魚介類の消費量はこの半世紀で5倍に増加しており、今後、食料資源としての魚介類に対する期待や依存は一層高まると予想される。このような状況において、IUU 漁業は大きな不確定要素であり、喫緊に対処すべき課題である ([1][2][3])。このため、SDG14においても、具体的な対処を要する課題として IUU 漁業が挙げられており、その撲滅へ向けて、操業監視や漁獲物の水揚げや市場流通を阻止するため国際的に連携した取組みが進められている。非営利活動法人である Global Fishing Watch(GFW)は、Google と連携し、web サイトを通じて世界の IUU 操業を地図上で可視化した情報を継続的に発信している [4]。

・ IUU 漁業に関するリモートセンシング研究の現状

IUU 漁業を監視する上で、衛星リモートセンシングは極めて有効な手段である。前項の魚群や漁場のように海洋環境から間接的に推定するのは異なり、直接衛星から各種電磁波により漁船を捉えることができる。具体的には、概ね以下の4つのタイプの衛星センサが考えられる。これらを組み合わせたモニタリングのイメージを図 2.1.18 に示す。

- ①夜間可視画像によるモニタリング
- ②レーダセンサによるモニタリング
- ③衛星 AIS によるモニタリング
- ④高解像度衛星センサによるモニタリング

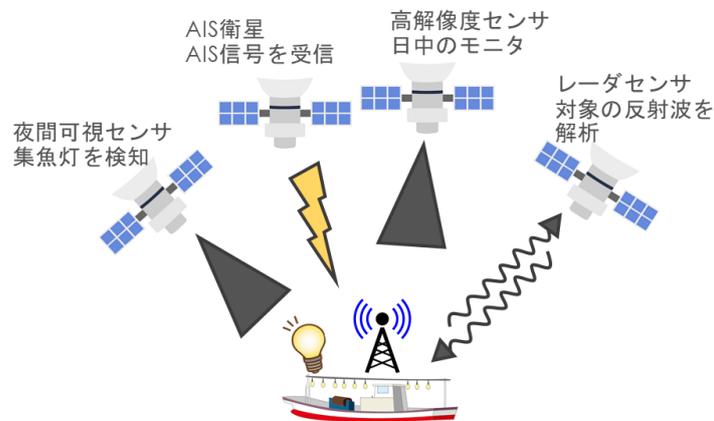


図 2.1.18 衛星リモートセンシングによる IUU 漁船の探知のイメージ

多くの漁業が集魚灯を使って夜間に操業している。この集魚灯は非常に明るいことから衛星から可視センサによる観測が可能である。これが夜間可視画像を利用した IUU 漁業のモニタリングの基本的な考え方である。夜間可視画像を利用したモニタリングは常時観測が可能であり、コスト的には最も実用的なものである。これに関する研究はこれまで多数行われている[5] [6] [7]。特に現在稼働している NOAA シリーズや Suomi NPP などの衛星に搭載された VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) には夜間可視バンドがあり、高解像度かつ高頻度で夜間の集魚灯の分布をモニタリングすることが可能となっている。図 2.1.19 に夜間可視画像の例を示す。

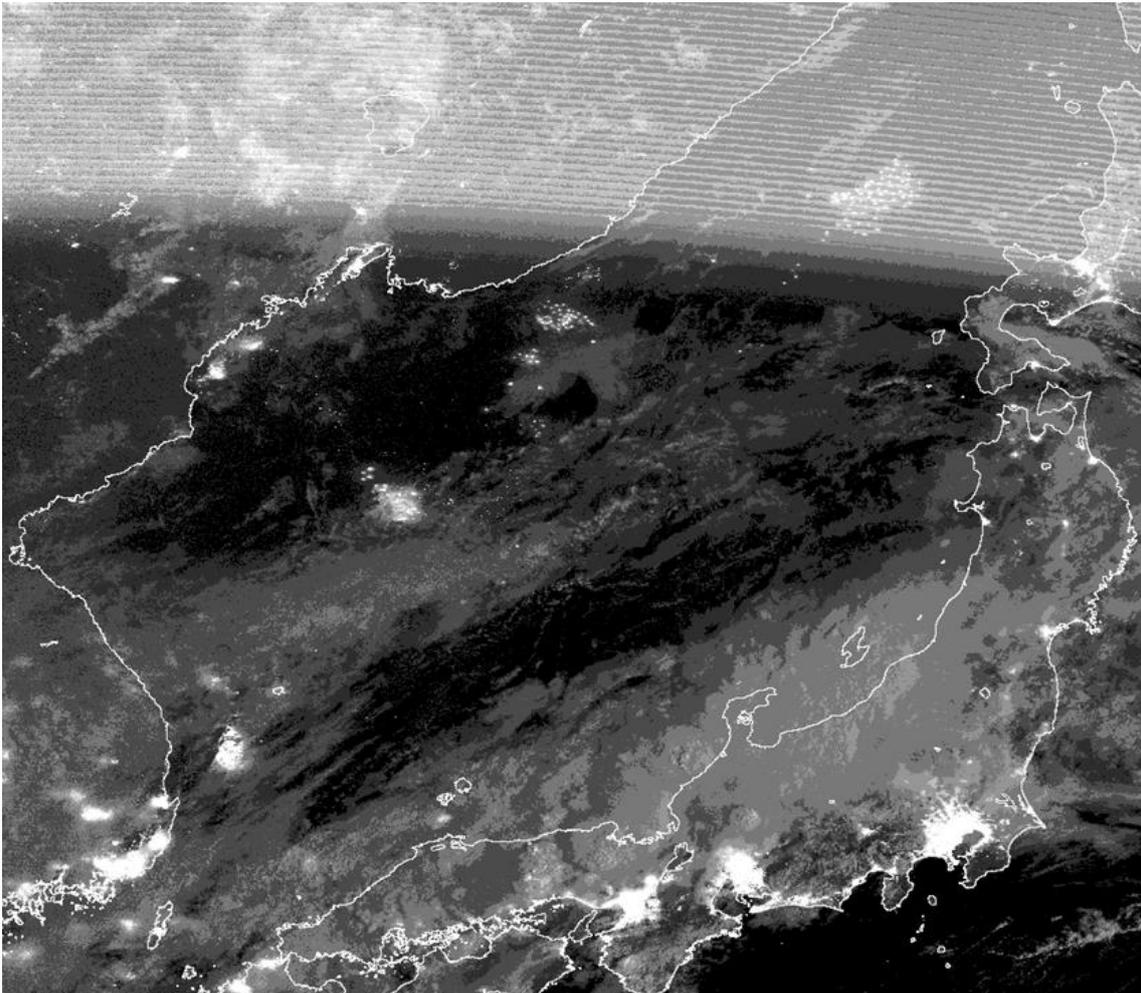


図 2.1.19 NPP/VIIRS による夜間可視画像  
(日本海に分布する白いドットの塊が漁船の集魚灯)

SAR (合成開口レーダ) などのレーダセンサによるモニタリングは、アクティブモニタリングである。SAR はレーダ波(マイクロ波やミリ波)を射出し、その反射波を観測して反射させた物体や事象を把握するものである。SAR による船舶識別に関する研究もこれまで多数行われている[8]。

AIS（自動船舶識別装置）は船舶同士の衝突を避ける装置であるが、使用されている VHF 波は直進性が強く、衛星でも受信が可能である。船舶 AIS を衛星で受信することは JAXA の研究でも実証されている [9]。AIS は総トン数 300 トン以上の外航船舶に搭載が義務付けられていることから、衛星での受信に限らず AIS を活用することは IUU のモニタリングでは必須である。図 2.1.20 に衛星 AIS の例を示す。

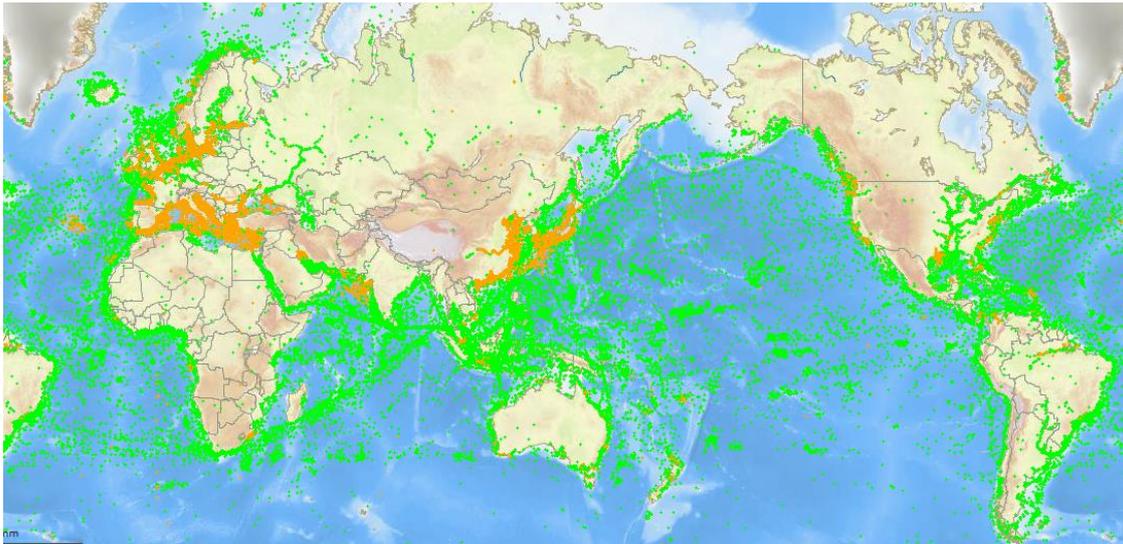


図 2.1.20 衛星 AIS と陸上局の AIS を組み合わせた全球の漁船位置マップ  
(<http://jp.shipfinder.com>, 東洋信号通信社提供)

緑色の点は衛星 AIS 信号, オレンジの点は陸上局で受信した AIS 信号

・ IUU 漁業に関するリモートセンシング研究の課題と問題点

衛星リモートセンシングによる IUU 漁業監視は有効であるが、これで完全にモニタリングすることは難しい。夜間可視画像によるモニタリングでは、集魚灯を使わないタイプの IUU 漁船を監視することはできない。また、洋上での漁獲物の他船への転載なども、衛星リモートセンシングによる把握には限界がある。LANDSAT や WorldView などの高解像度可視センサを搭載した衛星の活用も考えられるが、衛星が撮影可能な範囲（画角）と解像度はトレードオフの関係にあり、実際に利用するためには膨大なデータの取得が必要である。また、その膨大なデータから IUU 漁船を検出するロジックを確立しなければならないことなど、クリアすべき課題が多い。加えて、単独の衛星では観測頻度の向上には限りがあり、複数の衛星の連携が必須となる。

一方、AIS は今後さらに普及が進むことから、IUU 漁業の監視における重要性が一層高まると考えられ、衛星 AIS の技術開発は IUU 漁業の監視を進める上で重要度が高い。加えて SAR は日本が世界に対してアドバンテージを持つ技術であり、今後高精度化や広域観測が期待できることから、更なる IUU 漁業モニタリングへの応用が期待される。

参考文献

- [1] Y. Oozeki et al. : Reliable estimation of IUU fishing catch amounts in the northwestern Pacific adjacent to the Japanese EEZ: Potential for usage of satellite remote sensing images. Marine Policy 88, pp.64-74, 2018.
- [2] Park et al. : Illuminating dark fishing fleets in North Korea, Sci Adv, 6 (30), 2020.
- [3] FAO: The state of world fisheries and aquaculture, 2018
- [4] Global Fishing Watch : <https://globalfishingwatch.org/>, 2014.
- [5] 伊藤, 長, 下田, 坂田: OLS 可視・赤外画像に見られる漁船の分布と海面温度の関係, 日本写真測量学会誌, Vol. 37, No. 4, pp.34-42, 1998.
- [6] K. Cho, R. Ito, H. Shimoda, T. Sakata, “Fishing fleet lights and sea surface temperature distribution observed by DMSP/OLS sensor” , Int. J. Remote Sensing, Vol. 20, No. 1, pp.3-9, 1999.
- [7] Kiyofuji H., S. Saitoh, Y. Sakurai, T. Hokimoto, K. Yoneta, Spatial and temporal analysis of fishing fleet distribution in the southern Japan Sea in October 1996 using DMSP/OLS visible data, Proceedings of the First International Symposium on Geographical Information System (GIS) in Fisheries Science, pp.178-185, 2001.
- [8] 有井基文 他: 衛星搭載合成開口レーダによる海洋監視技術の進化と深化, MSS 技報, Vol.22, pp6-12, 2012.
- [9] JAXA: SPAISE 衛星搭載船舶自動識別システム ( AIS ) 実験 , <https://www.satnavi.jaxa.jp/experiment/spaise/>, 2012.

(c) 養殖業・沿岸漁業

・養殖業・沿岸漁業の現状

前項で述べたとおり、世界人口の増加にともない水産物の需要は世界的に拡大しており、今後の食料問題、特に動物性たんぱく質の確保において、水産物の重要性は更に高まると予想される。図 2.1.21 は FAO の統計資料から作成した世界の漁業・養殖業生産量の推移である。世界の漁業・養殖業生産は一貫して増加を続けており、特に養殖業生産量の伸びが著しい。

図 2.1.22 は日本の漁業種類別の水揚げの推移である。沖合漁業や遠洋漁業が大幅減や低調に推移している一方、沿岸漁業や養殖業の減少は緩やかである。世界的に水産物需要が増加するなか、国内への水産物供給の安定化をはかり食料自給率を上げるためには、養殖業や沿岸漁業の振興が重要であり[1]、改正漁業法におけるポイントの1つでもある。

技術的視点、漁業経営の安定化の観点から見て、養殖業や沿岸漁業は将来性のある事業分野である。遠洋漁業のように長期間洋上に滞在することがないため、漁業者、とりわけ若手の漁業者にとっては就業しやすい。また比較的陸に近い場所で事業が行われるため、4G 回線範囲であることも多く、高速でのデータ通信が可能となっている。これは操業現場で迅速な情報収集が可能となる上、漁具にセンサなどを多数設置しても、通信費用負担が少なく済むメリットがある。養殖業などでは、時々刻々と変わる環境モニタリングのニーズが高いため、陸上からその状況が詳細に把握できることは大きなメリットである。

具体的な例として、定置網のような敷設型の沿岸漁業では、急潮などのモニタリングがある。養殖業では、海苔の色落ち、魚類の斃死、貝毒などによる消費者被害など、多大な漁業被害をもたらす赤潮のモニタリングなどは、衛星データと現場データの複合利用が重要である[2]。

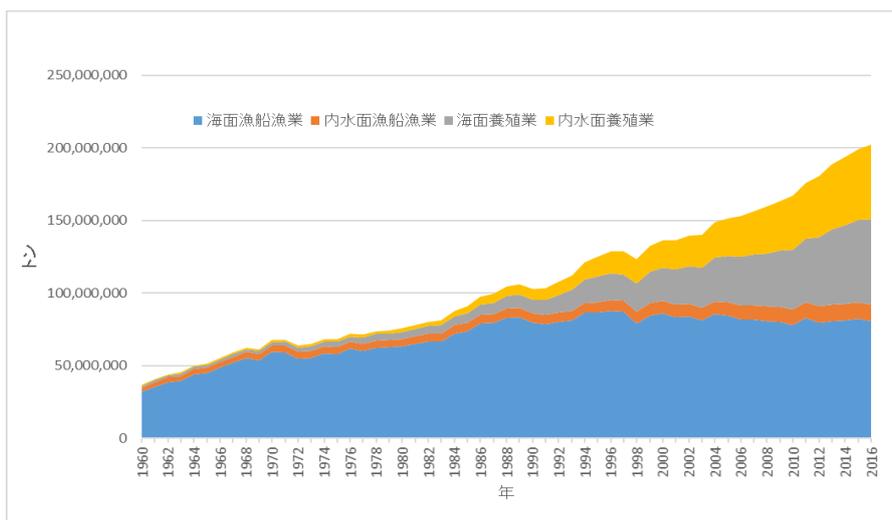


図 2.1.21 世界の漁業・養殖業生産量の推移

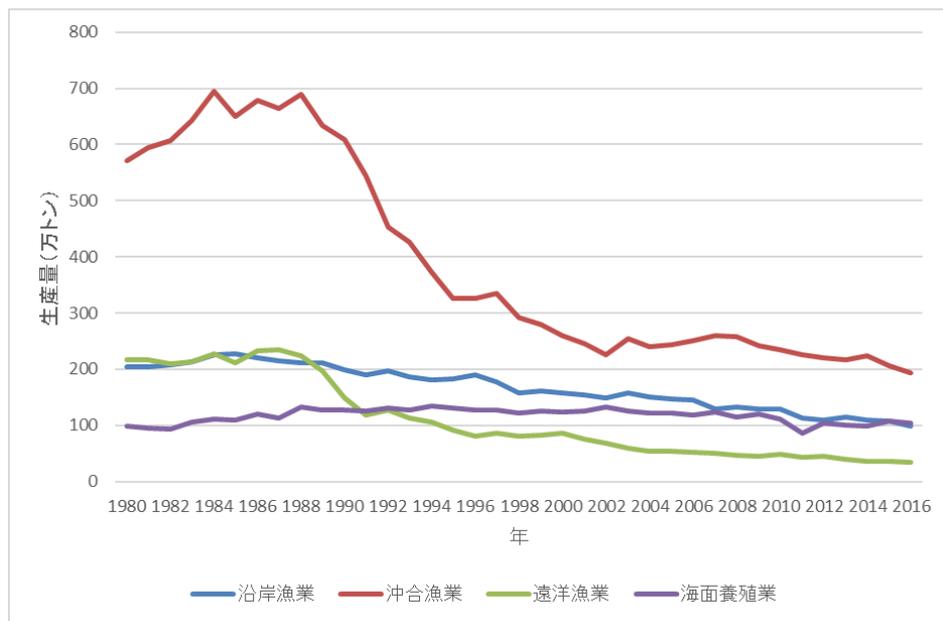


図 2.1.22 日本の漁業種類別生産量

・養殖業・沿岸漁業へのリモートセンシング研究の現状

近年、漁業・養殖業における沿岸域の重要性が再認識されるようになってきた[3]。沿岸漁業等への応用の基本は、水産資源への応用と同様に衛星から海洋環境を把握し、そこから漁場等を間接的に推定することであるが、沿岸の敷設漁具などはリモートセンシングで直接捉えることができる。図 2.1.23 に高解像度衛星 (LANDSAT) により撮影された有明海のノリ養殖場を示す。特に養殖業関連は前述のとおり 4G 回線をフルに活用した ICT 化が積極的に進められている。安定した養殖業生産にとって養殖施設周辺の海洋環境の把握は重要であり、ブイなどを活用したベンチャー企業の参入も盛んである。例えば、ウミトロン株式会社は衛星データを活用した沿岸環境情報の配信サービスを開始した[4]。また漁業被害を引き起こす赤潮のモニタリングには高度な衛星の利活用が進められている[5]。台風などの自然災害と漁業との関係についても、ここ数年の異常気象に対応して衛星データの活用が進められている[6]。

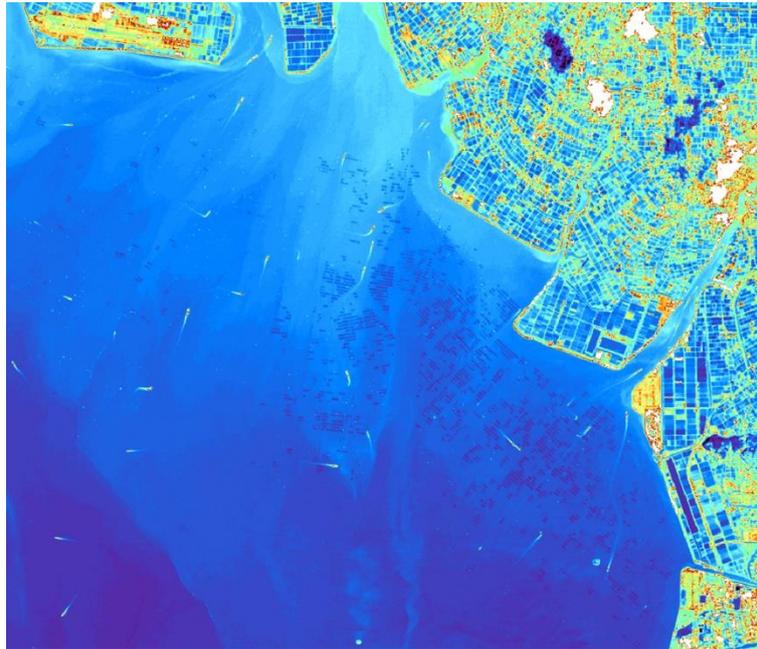


図 2.1.23 LANDSAT による有明海ノリ養殖場のモニタリング

(反射率が高いほど暖色、低いほど寒色。陸や船舶や沿岸水の分布域は反射率が高い。洋上に分布する短いくさび状の物体は船舶およびそのウエキー。沿岸の広範囲にバーコード状に分布しているのはノリ養殖の漁具)

・養殖業・沿岸漁業のリモートセンシング研究の課題と問題点

沿岸域は外洋に比べて河川水の影響などで水理構造が複雑な上に、気象等による擾乱を受けやすいこと、さらに閉鎖的な水域の場合は海水循環などに複雑な物理過程が関わることから、海況の時空間変化が激しい。これを衛星リモートセンシングでモニタリングするには、観測の高頻度化、高解像度化が必須であり、先に述べた水産資源管理の拡充・強化に関連して求められる要件よりもハードルが高い。赤潮のモニタリング、急潮のモニタリング、いずれも高解像度、高頻度がキーワードである。新しい技術として、低軌道衛星や安価な小型衛星などの積極的な利用推進も考えらえる。

しかし、現在の日本の沿岸漁業・養殖業には零細な経営体が多く、海洋環境のモニタリング等に要する経費は経営にとって大きな負担である。沿岸域の海洋情報は水産業のみならず、建設・運輸などの産業やレジャーなどでも活用されていることから、市民生活や社会の基盤情報として常に衛星などでモニタリングする体制の整備が求められる。

参考文献

[1] 藤田仁司: 我が国養殖業の構築に向けた政策展開 -養殖業成長産業化総合戦略-, バイオサイエンスとインダストリー, VOL. 78, NO. 3, 2020.

- [2] 宮村和良：大分県豊後水道沿岸におけるカレニア赤潮対策とその効果（特集 新たな予測技術と利用効果：早期発見・迅速対応）産地と消費地をネットする水産情報誌, 18(11), pp.22-26, 2015.
- [3] 斎藤克弥：衛星データの水産利用と沿岸への応用, 沿岸海洋研究, 第54巻, 第1号, pp.63-68, 2016.
- [4] ウミトロン：高解像度衛星データを活用した水産養殖向け海洋データサービス,  
<https://pr-ja.umitron.com/post/624833147514847234/pulse>, 2020.
- [5] Yang Meng Meng, Ishizaka Joji, Goes Joaquim I, Gomes Helga do R., Maure Eligio de Raus, Hayashi Masataka, Katano Toshiya, Fujii Naoki, Saitoh Katsuya, Mine Takayuki, Yamashita Hirokazu, Mizuno Akiko: Improved MODIS-Aqua Chlorophyll-a Retrievals in the Turbid Semi-Enclosed Ariake Bay, Japan, REMOTE SENSING, 10, 9, 2018.
- [6] JAXA: 記録的な被害をもたらした台風19号の脅威 地球が見える 2019年,  
<https://www.eorc.jaxa.jp/earthview/2019/tp191028.html>, 2019.

3) 資源・エネルギー

(a) 海洋油汚染 (SAR)

化石燃料, 特に石油にその多くを依存する社会構造において, 石油の輸送は海上輸送が支配的な役割を占める. その際の事故は, 沿岸域, 浅海域での座礁が多く, そのような海域の生態系に大きな影響を与える. また, 海洋油田での事故によるものも, 2010 年米国メキシコ湾における海洋油田流出事故は記憶に新しい[1]. そうしたことから, 油流出の影響把握において合成開口レーダ (SAR) 搭載の衛星による観測されるケースが増えてきている (図 2.1.24).

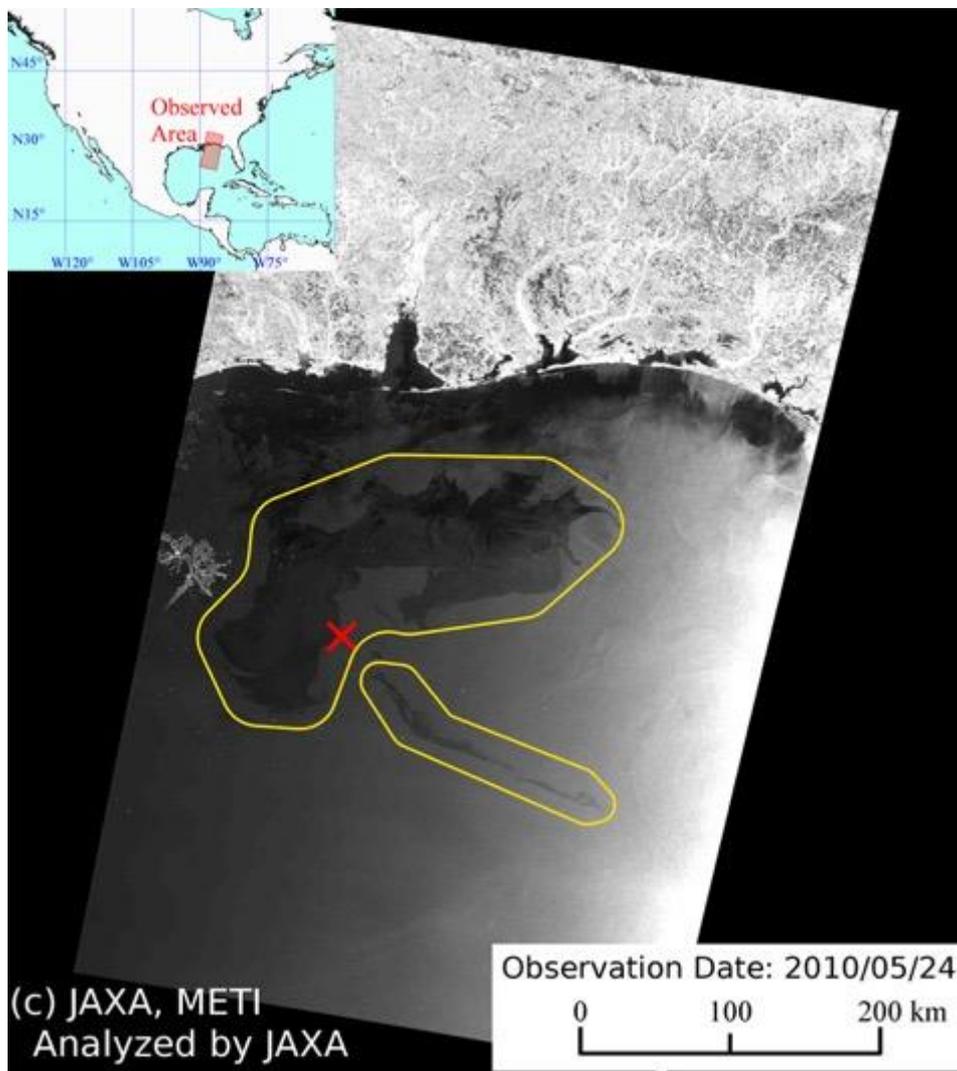


図 2.1.24 ALOS/PALSAR による 2010 年メキシコ湾汚染海域分布図の例 (出典 JAXA/EORC)

SAR による油汚染域の観測原理は、海面に広がる油膜部分とそれ以外の部分では表面張力が変わることにより起こる粗度 (Roughness) の違いによる、後方散乱断面積の違いにより判別される。つまり、SAR で観測した時の風波の立つ海面と、油膜により鏡面反射される海面の違いを分類することが基本原理となる。しかしながら、島陰や、風波が発達していない海域での比較が難しい点や、SAR の観測波長帯、入射角で見え方が大きく変わる点、など解析の際に考慮すべき点が挙げられる。特に一般的に用いられている SAR の観測波長帯である、Xバンド、Cバンド、Lバンドそれぞれの波長に対するブラッグ散乱帯が異なるため、観測される物理現象が異なることは留意すべき点である。

最近では、機械学習を用いて効率的な油汚染海域の把握が可能にありつつある (図 2. 1. 25) [2].

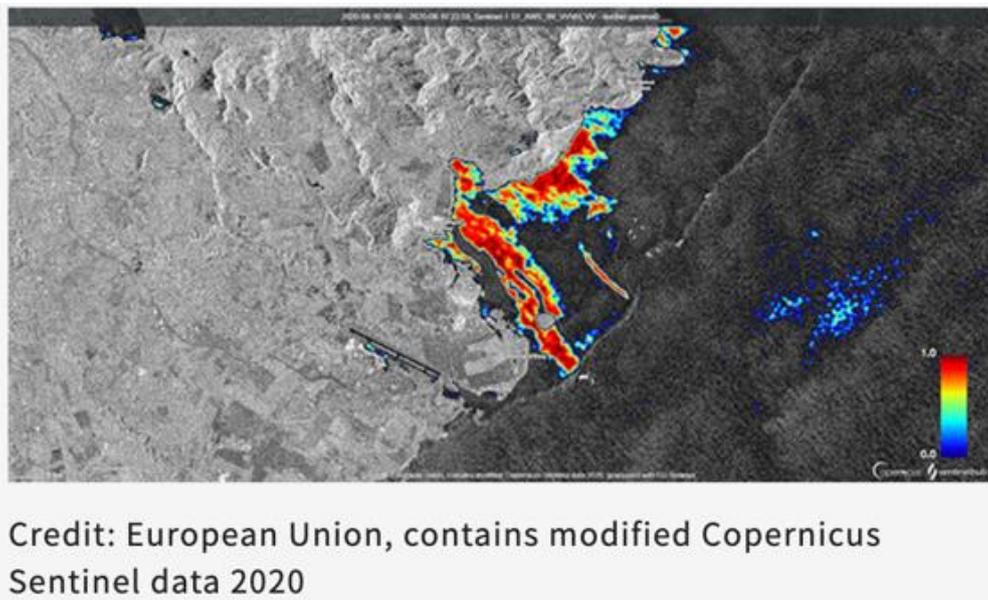


図 2. 1. 25 機械学習を用いた Sentinel-1 によるモーリシャス油流出域検出の例 (出典 Yahoo ニュース)

#### 参考文献

- [1] JAXA : 陸域観測技術衛星「だいち」(ALOS)搭載のLバンド合成開口レーダ(PALSAR;パルサー)によるメキシコ湾原油流出事故の観測結果について, 参照 2020-12-07  
[https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/img\\_up/jdis\\_pal\\_mexoil\\_100524.htm](https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/img_up/jdis_pal_mexoil_100524.htm), 参照 2020-12-07
- [2] YahooNews : レーダー衛星画像でモーリシャス重油流出 被害の範囲を知る,  
<https://news.yahoo.co.jp/byline/akiyamaayano/20200818-00193944/>, 参照 2020-12-07

(b) 自然エネルギー

東日本大震災を契機に、再生可能エネルギーの実装、一つのエネルギー供給源に依存しない多様化が加速した。再生可能エネルギーは化石燃料に頼ることなく自然エネルギーを利用するものが多く、安定した電力供給を行うためには自然環境をよく把握することが重要となる。主に、発電施設を設置する際の適地選定、電力を安定して供給するための自然環境変化の予測などが重要とされる項目と考えられる。以下に、海洋環境を積極的に利用する自然エネルギーにおける事例について衛星データの利用可能性を示す。

風力に関しては、衛星での観測はマイクロ波散乱計、マイクロ波放射計、合成開口レーダ（SAR）により導出が可能である。このうちマイクロ波散乱計のみ風向（ベクトル）の導出が可能であり、ほかのセンサ単体では風速（スカラー）のみ計測される。通常、海洋風力発電は沿岸域に設置されることが多いため、高い空間分解能を利用した沿岸付近での風場の把握が求められる。このニーズに耐えうるのはSARのみである。しかしながら、SARの時間分解能（観測頻度）は海上風のように短いタイムスケールの物理現象を追うまでには至っていない。また、観測から情報として提供されるまでのレイテンシ（提供時間）を考慮すると、SAR観測単体で予測に対応するようリアルタイムデータを提供することは難しい。よって、SARを用いた沿岸海域での統計的な風速マップを風力発電施設を設置する際の適地選定に用いることが行われている（図2.1.26）[1]。

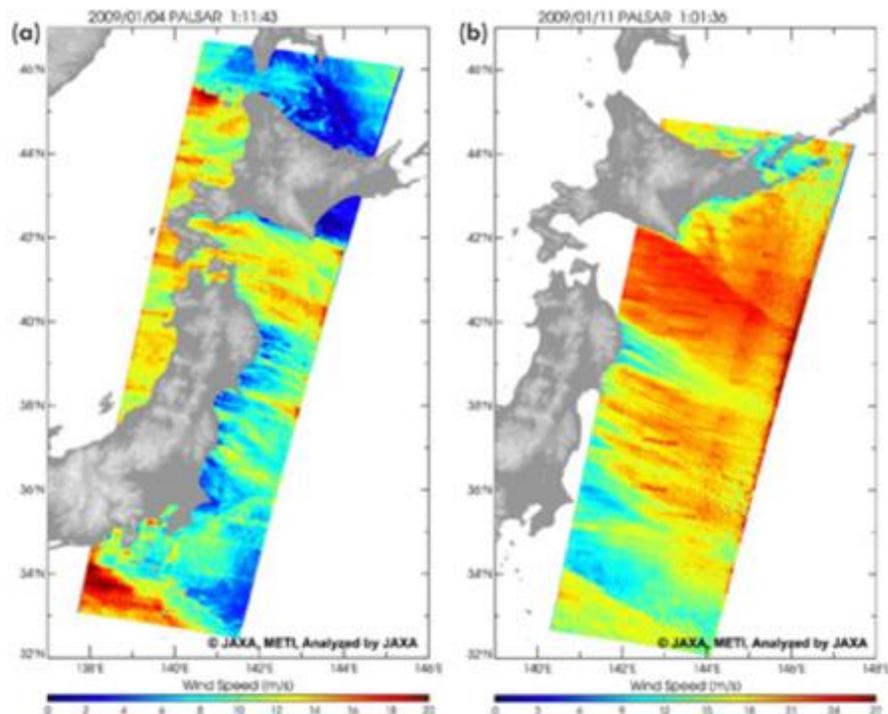


図 2.1.26 ALOS/PALSAR で観測した海上風ポテンシャルマップの例（出典 JAXA 地球が見える）

基本的な SAR による海上風速の計測原理は、SAR で計測される海面の粗度からその地点で吹いている風速をモデル推定するものである。波力に関しても同様の SAR の観測原理から有義波高を推定することで発電設備設置条件が良好な海域が推定することが可能と思われる。沖合であれば、マイクロ波放射計の利用も可能であるが空間分解能は SAR のそれと比較すると劣る。

海流に関しては、沿岸部の海流場を衛星観測のみで直接把握することは難しい（大きなスケールでの地衡流場は海面高度計による把握は可能）。通常、メンテナンスしやすく、送電しやすいごく沿岸部の海流場は、海岸地形の影響を受けながら、潮汐、湧昇流、陸水の流入などの影響を受ける複雑な構造となっているために、十分にダウンスケールされた物理モデルなどを用いることが現実的である。モデルを駆動する際の解析値に衛星観測データを同化することが行われている[2]。主には海面水温などのデータが用いられるケースが多い（図 2.1.27）。

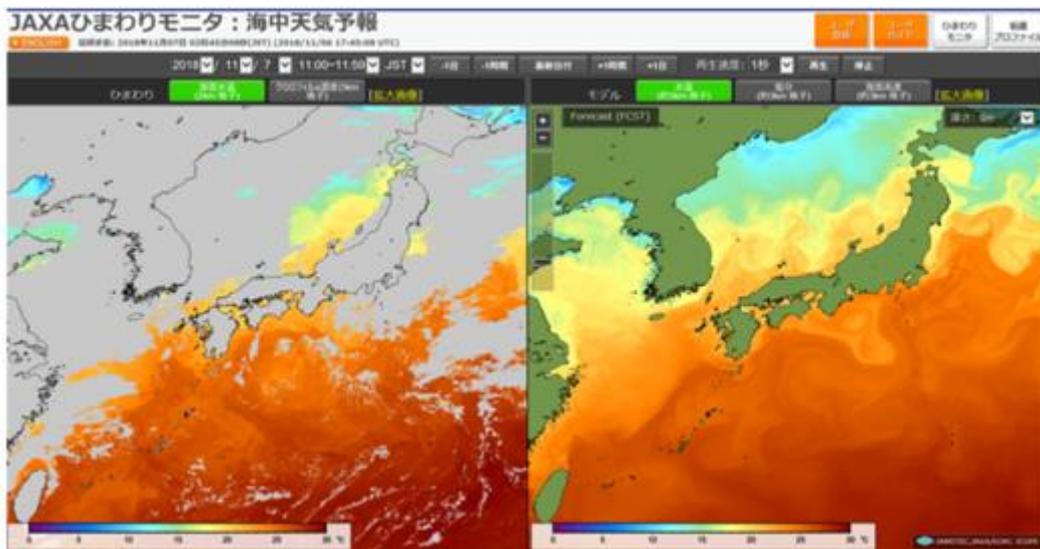


図 2.1.27 モデルの水温，塩分とひまわり 8 号が観測した海面水温，クロロフィル a 濃度を比較（出典 JAXA 地球が見える）

温度差発電に関しても海流同様に、直接的な衛星観測データを用いることは困難で、海洋の内部構造をシミュレートできるモデルを利用することが一般的である。その際の初期条件、境界条件として衛星データ由来のパラメータが与えられることがある。

閉鎖的な海域に設置されるメガソーラーパネルによる太陽光発電には、衛星から観測される日射量（光合成有効放射量：PAR）を利用することで、発電量の予測、発電効率の良い運用のために用いられる。なお、太陽光発電における日射量の利用は海洋に限らず、陸上でも用いられる。

参考文献

- [1] JAXA：地球が見える 2013年海上風のエネルギー活用～再生可能エネルギーへの挑戦を支援する衛星観測～, <https://www.eorc.jaxa.jp/earthview/2013/tp130528.html>, 参照 2020-12-07
- [2] JAXA：地球が見える 2018年シリーズ「衛星データと数値モデルの融合」(第2回)衛星海面水温を用いた「海中天気予報」システムの運用を開始しました,  
<https://www.eorc.jaxa.jp/earthview/2018/tp181107.html>, 参照 2020--12-07

## (c) 海洋エネルギー資源開発に関わる環境アセスメント

海洋エネルギー資源開発の中で、特に自然エネルギーの適地選定等に関しては、上述されている。自然エネルギーのための適地選定を行った後にも、発電装置等の設置のための工事や設置を行った後の環境の変化のモニタリングが行われる必要がある、そこにリモートセンシングの情報が利用することが期待される。沿岸での開発ではその影響を評価するために直接利用できると考えられる。メタンハイドレート採掘など深海底での開発においては、深海の状況は直接リモートセンシングを用いてモニタリングすることは困難と考えられるが、バックグラウンドとして開発海域の表面での生物生産や海水の濁り等の状況を確認するためにはリモートセンシングデータの利用が期待される。

沿岸の火力発電所の温排水のモニタリングには、以前から熱赤外のリモートセンシングデータが利用されてきた[1]。最近、注目されている洋上風力発電でも、影響予測の難しい状況の中で、事前・事後の長期的なモニタリングの重要性が考えられ、その中でリモートセンシング技術も、他の観測手法やモデリングと組み合わせることが期待されている[2]。特に、浅海域に計画される洋上風力発電施設開発の場合には、藻場のような重要な海域状況把握が欠かせないため、そのためにもリモートセンシングデータの利用が期待される[3]。沿岸に近い陸域での資源開発の影響に関しては、沿岸への土砂の流入などに関して、リモートセンシングデータが利用されている[4]。沖合での資源開発においても、石油採掘においては、上述されたように石油流出事故の場合のモニタリング等に利用されている。深海底での採掘では、まだ事業としておこなわれていないために、利用された例はあまり見当たらない。

これまで沿岸の陸側での開発の影響評価にリモートセンシングデータを利用した例はあるが、まだその数は限られている。また沿岸海域や沖合では、今後開発事例が増加することが想像される。沿岸海域や沖合での様々な情報は限られており、リモートセンシングデータは重要なデータセットと考えられる。環境省は環境アセスメントデータベース[5]を作成しているが、現状では海洋のデータはほとんど見当たらず、今後リモートセンシングデータの利用が期待される。さらに、今後は開発を行う場合、きちんとした生態系管理が期待されるため、バックグラウンド調査やモニタリングのためにも、また影響予測数値モデルなどへのデータ同化のためにも、さらにリモートセンシングデータの利用が期待される[6, 7]。

## 参考文献

- [1] 水鳥雅文, 坂井伸一, 仲敷憲和: LANDSAT 衛星による温排水モニタリングの実用性, 海岸工学論文集, 38, pp. 886-890, 1991.
- [2] 中田英昭: 洋上風力発電が海洋生物やその生息環境に及ぼす影響, 海洋と生物, 232, Vol. 39, No. 5, pp. 423-429, 2017.
- [3] 小松輝久: 藻場や浅海生物への影響とその調査方法, 海洋と生物, 232, Vol. 39, No. 5, pp. 456-464, 2017.
- [4] Alonzo M, Van Den Hoek J, Ahmed N.: Capturing coupled riparian and coastal disturbance from

industrial mining using cloud-resilient satellite time series analysis. Scientific Report, Vol. 6: pp.1-12. doi:10.1038/srep35129, 2016.

- [5] <https://www2.env.go.jp/eiadb/ebidbs/>, 参照 2020-12-19.
- [6] Muller-Karger, F., M. Roffer, N. Walker, M. Oliver, O. Schofield, M. Abbott, H. Graber, R. Leben, and G. Goni: Satellite Remote Sensing in Support of an Integrated Ocean Observing System. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, Vol. 1, No. 4, pp. 8 - 18, doi.org/10.1109/MGRS.2013.2289656, 2013.
- [7] 鈴木昌弘：環境影響評価研究の概要－環境影響評価の進め方と調査の進捗状況，表層型メタンハイドレートの研究開発，2020年度，一般成果報告会，  
<https://unit.aist.go.jp/georesenv/topic/SMH/forum/forum2020/environment.pdf>, 参照 2020-12-17.

4) 災害・国土管理

(a) 風水害

2018年7月の西日本豪雨（中国地方中心）、2019年9月・10月の台風による豪雨（関東地方中心）、そして2020年7月豪雨（九州地方中心）など、近年日本各地で豪雨災害が頻発している。このような災害時に、陸域の災害調査は迅速に行われるが、海域の災害調査は極めて少ない。これは災害時には多くの人命に関わる陸上の復旧や調査が優先されることや災害直後は悪天候でかつ港までの経路や航路において危険を伴うことなどの理由が考えられる。一方、危険を伴わず非接触で計測できる衛星データの利用は特に災害時の初動調査として期待される技術である。中でも、東日本大震災で問題となった養殖筏の破損状況や西日本豪雨で問題となった土砂流出の把握（海底生物の死滅や赤潮のトリガーの懸念）は、衛星データの活用が最も期待される分野である。

風水害に関連したリモートセンシング研究の現状としてまず養殖筏の検出に関しては、光学センサを搭載した高分解能衛星「IKONOS (1m 解像度)」を使った方法[1]などがあるが、災害時には悪天候となるため、近年全天候型の衛星 SAR による検出[2][3]や航空機 Pi-SAR（約 2m 解像度）[4]による検出が試みられている。一方、土砂流出の把握では、衛星の懸濁物質推定の方法が応用される。最近では比較的高分解能な Landsat-8 (30m 解像度, 16 日周期) や Sentinel-2 による研究[5][6]や、図 2.1.28 に示すような、中分解能の GCOM-C SGLI による把握 (250m 解像度, 2-3 日周期) [7]などがある。

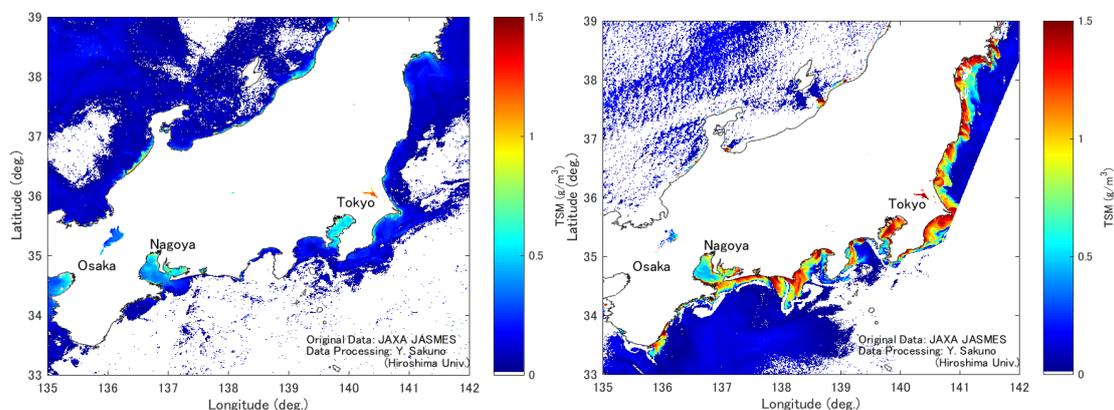


図 2.1.28 GCOM-C SGLI を利用した 2019 年 10 月台風 19 号による豪雨災害前後の懸濁物質質量分布の例。左：災害前，右：災害後。（文献[7]の図を一部改変）

前述したように、近年頻発する風水害時において沿岸環境をリアルタイムで把握するためにリモートセンシングが果たす役割はますます高くなると思われる。陸域では定着してきている「ハザードマップ」に対して、海の「ハザードマップ」、いわゆる「マリンハザードマップ」はほとんど知られておらず、今後整備が必要な分野の一つだろう。しかし、リモートセンシングの分野では、悪天候時には光学センサが使いにくい、全天候での

SAR 画像は色情報が得られない、解析が難しいなどの問題点があり、他の分野の研究と比べて、その事例は極めて少ないのが問題点である。

参考文献

- [1] Komatsu, T., Takahashi, M., Ishida, K., Suzuki, T., Hiraishi, T., Tameishi, H., Mapping of aquaculture facilities in Yamada Bay in Sanriku Coast, Japan, by IKONOS satellite imagery. *Fisheries science*, 68(sup1), pp.584-587, 2002.
- [2] Szuster, B. W., Steckler, C., & Kullavanijaya, B. Detecting and managing coastal fisheries and aquaculture gear using satellite radar imagery. *Coastal Management*, 36(3), pp.318-329, 2009.
- [3] Sugimoto, M., Ouchi, K., Nakamura, Y., Comprehensive contrast comparison of laver cultivation area extraction using parameters derived from polarimetric synthetic aperture radar data. *Journal of Applied Remote Sensing*, 7(1), 073566, 2013.
- [4] Murata, H., Komatsu, T., Yonezawa, C., Detection and discrimination of aquacultural facilities in Matsushima Bay, Japan, for integrated coastal zone management and marine spatial planning using full polarimetric L-band airborne synthetic aperture radar. *International Journal of Remote Sensing*, 40(13), pp.5141-5157, 2019.
- [5] Vanhellemont, Q., & Ruddick, K., Turbid wakes associated with offshore wind turbines observed with Landsat 8. *Remote Sensing of Environment*, 145, pp.105-115, 2014.
- [6] Caballero, I., Ruiz, J., & Navarro, G., Sentinel-2 satellites provide near-real time evaluation of catastrophic floods in the west mediterranean. *Water*, 11(12), 2499, 2019.
- [7] 作野裕司, 2019 年台風 19 号直後の衛星・現地データによる東京湾の濁度および重油の分布推定. *土木学会論文集 B2 (海岸工学)*, 76(2), pp.I\_1381-I\_1386, 2020.

## (b) 海岸侵食

我が国は島国であり、総延長約3万5千kmにおよぶ長い海岸線を有しており、貴重な国土の維持・管理のためにも海岸保全は極めて重要である。海岸において供給される砂量が流出する砂量を下回ったとき、動的平衡状態が崩れ、結果的に海岸の砂が減少することで海岸線が後退する。この現象が海岸侵食である。一般に海岸侵食は、供給源での土砂生産量の変化、漂砂移動力としての波・流れの変化、沿岸地形の人為的变化及び海岸地形の歴史的な形成過程等が独立的あるいは同時に影響し合うことが原因となる。また、地震や台風といった災害、温暖化に伴う海面上昇も海岸侵食の原因となる。一旦海岸侵食が進行し砂浜が消失すると、その再生には莫大なコストがかかることになるため、海岸侵食の早期発見のために定期的な海岸の健康診断が重要である。そのため、低労力・低コストで海岸線を空間的にモニタリング可能な衛星データによる海岸線抽出が期待されている。

海岸侵食の状態を把握するため、陸域と水域との境目を抽出する汀線域の抽出が行われる。可視衛星を利用した海岸線抽出では、陸域と水域との境目を明確に捉えるため、高解像度画像を利用する必要がある。解像度30mのlandsatや解像度10m以下の超高解像度の衛星が利用される[1-2]。また、近赤外域の波長帯の電磁波は、水に強く吸収される特性があるため、陸域と水域との区分に有効である。近赤外域で捉えられた画像をベースとして、輝度値のヒストグラムから陸域と水域の境目を特定し、閾値を決めた上で2値化処理を行うことで簡易的に区分可能であるが、解析者により閾値の設定が異なる可能性がある点に注意する必要がある。また、可視衛星は雲や日照条件の制約により定期的な監視が困難であるデメリットがあるため、これらの影響を受けない合成開口レーダ（Synthetic Aperture Radar : SAR）を使用した海岸線抽出が行われている[3-4]。図2.1.29にその結果の一例を示す。SARは、地表におけるマイクロ波の散乱強度の平面分布を捉えることが可能であり、一般に、陸域は水面より凹凸が大きく、後方散乱強度が水面のそれより大きくなる特性を利用することで陸域と水域を区分する。SARを使用した海岸線抽出では、客観性・汎用性が課題としてあるが、自動抽出の適用性と誤差要因の特定が進んでおり、真下からビームを当てる方向に向けた角度であるオフナディア角や対象前浜における砂の粒径等が精度に影響することが分かっている[5]。

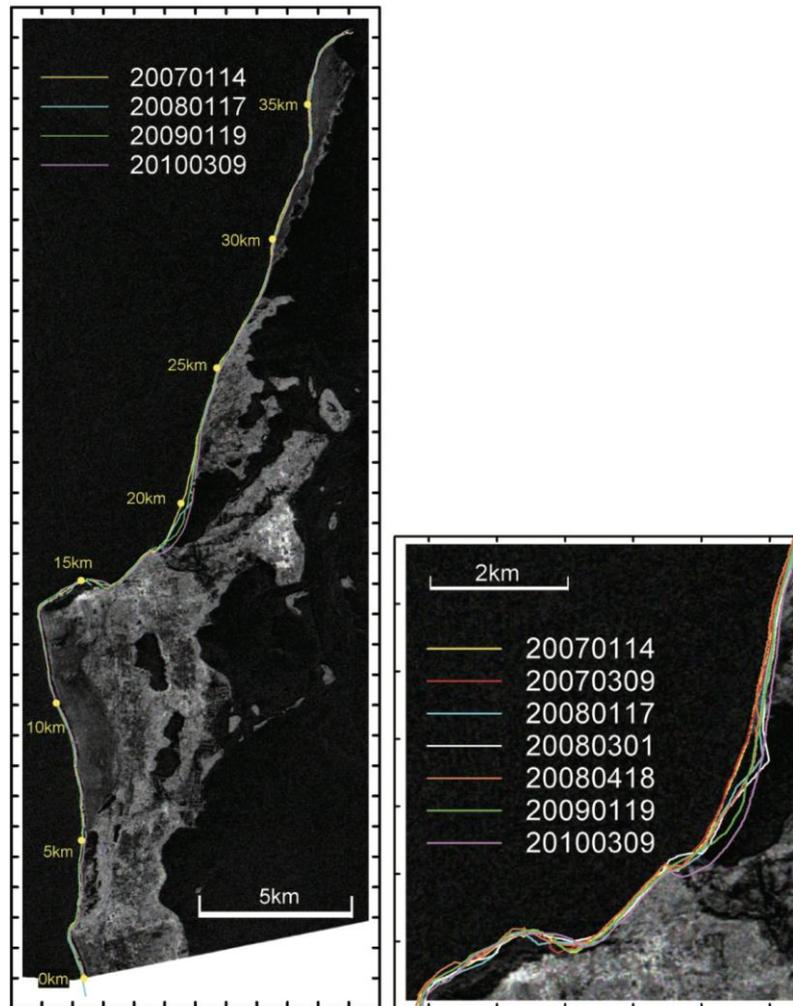


図 2.1.29 スリランカ西海岸 Kalpitiya における SAR 画像から抽出した汀線位置の比較  
 (Source: 田島ら (2011). 衛星データおよび砂粒子の熱ルミネッセンスの分析に基づくスリランカ西海岸における沿岸漂砂環境の解明. 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 67(2), I\_631-I\_635.)

上述の通り、可視衛星を用いた海岸線抽出では、高解像度の衛星データを使用して詳細に海岸線の抽出が可能である一方で、人為的に行う閾値の設定の良否に結果が依存することや、雲や日照条件の制約により定期的なモニタリングが困難であるデメリットがある。そのため、季節変動や潮汐などの短期的な変動と長期的なトレンドを分離することは困難である。一方で、SAR を使用した海岸線抽出では、日照条件や雲の被覆率に影響を受けることなく定期的に海岸の健康状態を把握することが可能である。今後、SAR を使用した海岸線抽出においても、高精度の結果が得られるための限界の把握や、客観性、汎用性のある解析手法が望まれる。

参考文献

[1] 浅野敏之, 幸野淳一, 佐藤孝夫, 嶺泰宏: 衛星画像データを用いた台風時波浪による汀線変化の解

- 析, 海岸工学論文集, 47, 671-675, 2000.
- [2] 浅野敏之, 松元涼子, 駒口友章, 嶺泰宏, 箕作幸治: 衛星画像による志布志港周辺海域の長期海浜変形の解析, 海洋開発論文集, 18, 467-472, 2002.
- [3] 田島芳満, 望月翔平, 舟竹祥太郎, 祖父江真一, 佐藤慎司: 衛星データおよび砂粒子の熱ルミネッセンスの分析に基づくスリランカ西海岸における沿岸漂砂環境の解明, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 67(2), I\_631-I\_635, 2011.
- [4] 赤松空之, 田島芳満, 下園武範, 佐藤慎司: 海岸線モニタリングにおける合成開口レーダの適用性の分析, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 73(2), I\_1621-I\_1626, 2017
- [5] 渡邊国広, 加藤史訓, 佐野滝雄: 衛星 SAR 画像からの海岸線自動抽出の適用性と誤差要因の分析, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 75(2), I\_1285-I\_1290, 2019.

(c)津波・高潮

自然災害として大きな犠牲者を出した東日本大震災での津波，さらに気候変動による甚大化により特に低緯度の島嶼国における被害が報告されている高潮に関しては防災としての適応策の検討が急務である。

津波は地震に起因するもの，また高潮は多くの場合は大型の低気圧によるものと原因は異なる。しかし，両者に共通する点としては沿岸の海底地形と沿岸部の陸上地形により陸上での被害範囲，規模が決まる点である。光学衛星観測データを用いて，浅海域の海底地形を詳細に計測することができる。また，海岸付近の陸地の地形に関しても地形図が未整備の地域に関しては光学衛星によるステレオ視観測から最高 50cm 空間分解能の DSM(Digital Surface Model)を解析することができる。両者を用いて南太平洋島嶼国における気候変動適応対策として，環境省によるハザードマップ整備が行われた（図 2.1.30）[1]。

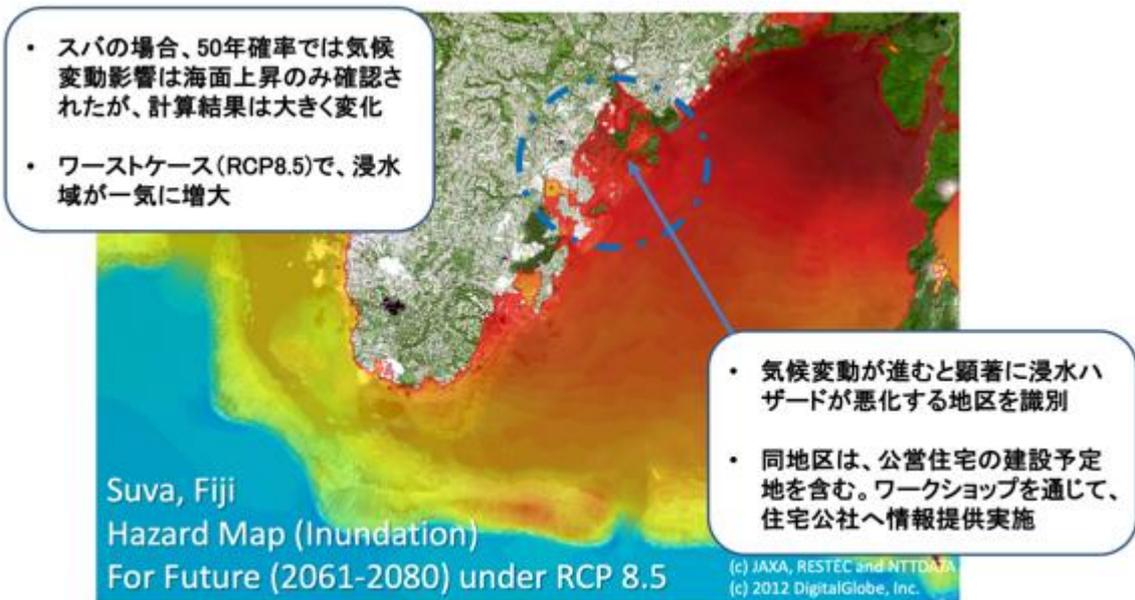


図 2.1.30 環境省によるフィジー国における高潮による浸水域予測マップ(出典 RESTEC)

また，津波などによる災害監視，被災規模把握においては，陸域と冠水域を比較的天候の影響を受けずに観測できる合成開口レーダ(SAR)衛星が利用されている[2]。これにより，初動に必要な情報の提供や二次災害，三次災害のリスクを低下することが可能となる（図 2.1.31）。

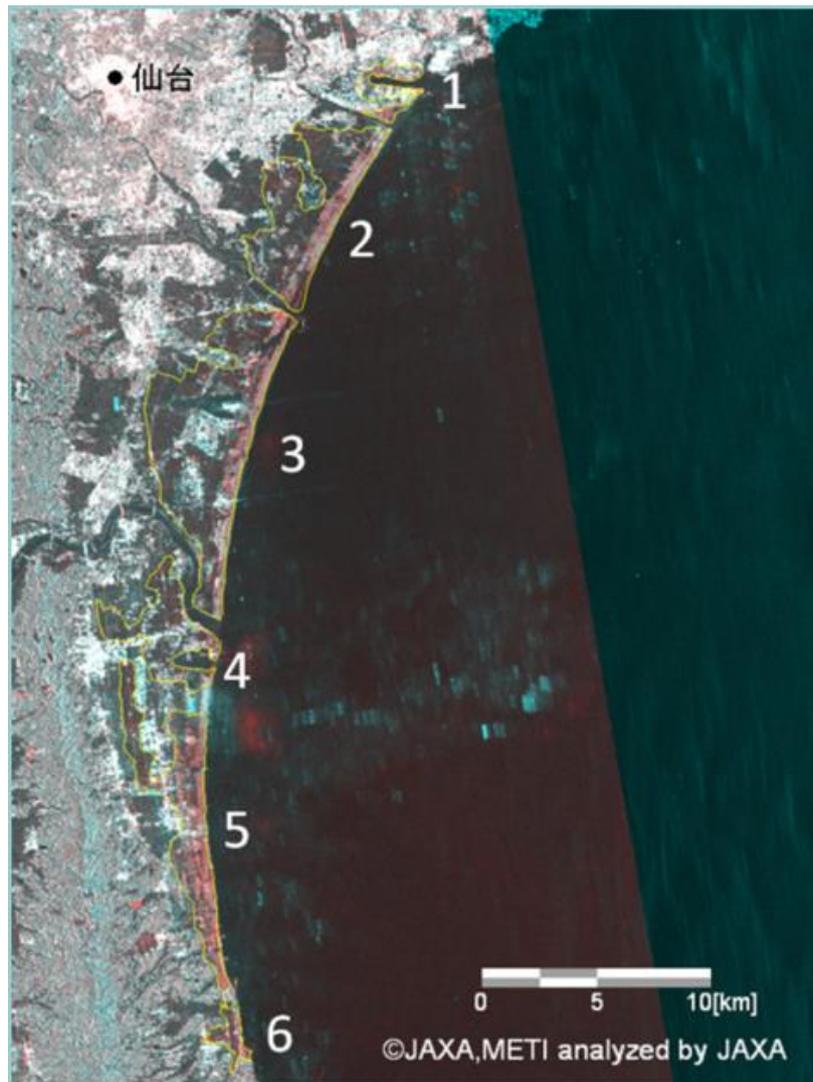


図 2.1.31 ALOS/PALSAR による東日本大震災の宮城県の観測  
(黄色枠線内が浸水域を示す。画像は震災前の 2011 年 3 月 3 日観測の画像を赤に、震災後の 2011 年 3 月 13 日観測の画像を緑、青に割り当てたカラー合成画像) (出典 JAXA/EORC)

参考文献

- [1] RESTEC : 気候変動適応策の取組み～島しょ国でのリモセン活用～,  
[https://www.restec.or.jp/pdf/02\\_env\\_RESTEC.pdf](https://www.restec.or.jp/pdf/02_env_RESTEC.pdf), 参照 2020-12-07
- [2] JAXA : 陸域観測技術衛星「だいち」(ALOS)による東日本大震災の緊急観測結果(11),  
[https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/img\\_up/jdis\\_pal\\_tohokueq\\_110313-18.htm](https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/img_up/jdis_pal_tohokueq_110313-18.htm). 参照 2020-12-07

## (d)海底火山活動

2018年12月に噴火したインドネシアのアナク・クラカタウ、2019年12月に噴火したニュージーランドのホワイト島、そして2019年12月から2020年12月現在も活発な噴火活動が続いている日本の西之島に代表されるように、近年海底火山の噴火が頻発している。このような海底火山の噴火は、船舶や航空機の航行の障害となるだけでなく、時には人命にかかわるため、その監視は極めて重要である。このような海底火山の主な監視項目[1]としては、海底地形、地震、火山灰、火山ガス、変色水、火山温度などがある。しかしこれらの調査はいずれも危険を伴うため、直接的な現地調査は難しく、リモートセンシングによる調査が期待されている。

海底火山の監視項目のうち、リモートセンシングによる調査としては、衛星 SAR データを使った火山島の地形解析[2][3]、ヘリコプター、航空機、衛星に搭載した熱赤外センサ（サーモグラフィ）を使った山体の温度解析[4][5]、ASTER に代表される衛星の赤外センサを使った火山ガスである  $\text{SiO}_2$  解析[5][6]、気象衛星の可視・赤外センサなどによる噴煙解析[7]、航空機や衛星の可視センサを使った火山性の変色水の解析[8][9]など、多岐にわたる。図 2.1.32 は 1 年間以上噴火を続けている西之島を Landsat-8 画像を使ってモニタリングした例を示す。これより、地形の変化や、噴煙、海色の変化などが読み取れる。

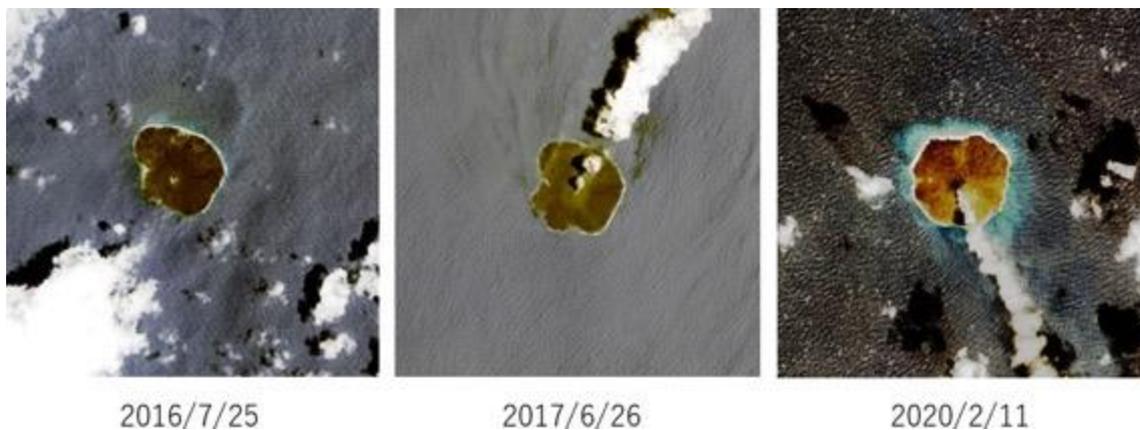


図 2.1.32 Landsat-8 画像による西之島のモニタリング例（作野，未公表）

背景で述べたように、海底火山活動の調査は危険を伴うため、リモートセンシングによる調査が適している。一方で、海底火山が存在する位置は、離島などが多く、検証のための現地調査データが極めて得にくく、得られるとしても一部の公的機関のデータしかないため、公表までに時間がかかる、またはそもそも公表されないという問題点もある。西之島や口永良部島のような近年噴火が頻発している場所では、検証用データの取得サイトとそのデータを誰でも得られるようにするモニタリングスポットの存在が重要であろう。

参考文献

- [1] 武尾実, 大湊隆雄, 前野深, 篠原雅尚, 馬場聖至, 渡邊篤志, 市原美恵, 西田究, 金子隆之, 安田敦, 杉岡裕子, 浜野洋三, 多田訓子, 中野俊, 吉本充宏, 高木朗充, 長岡 優: 西之島の地球物理観測と上陸調査, 海洋理工学会誌, 24 巻 1 号, 2018.
- [2] 大野裕幸, 野崎高義, 大木真人: 各種センサの画像で見る西之島火山活動の変遷. 写真測量とリモートセンシング, 54(1), 46-51, 2015.
- [3] Babu, Arun, and Shashi Kumar: InSAR coherence and backscatter images based analysis for the Anak Krakatau volcano eruption, Multidisciplinary digital publishing institute proceedings. Vol.24. No. 1. 2019.
- [4] 井口正人, 鍵山恒臣, 薩摩硫黄島火山における空中赤外熱測定. 薩摩硫黄島火山・口永良部島火山の集中総合観測, 京都大学防災研究所附属火山活動研究センター, 43-50, 2002.
- [5] 高木朗充, 長岡優, 福井敬一, 安藤忍, 木村一洋, 土山博昭, 2013-2015 年西之島噴火のモニタリングに関する研究, 気象研究所技術報告, 78. DOI : 10.11483/mritechrepo.78, 2017.
- [6] 浦井稔, 衛星搭載型熱赤外線センサによる火山活動, リモートセンシングの応用・解析技術 (中山裕則・杉村俊郎監修, 第 7 章, 第 1 節), 株式会社エヌ・ティー・エス, 2019.
- [7] Kaneko, T., Maeno, F., Yasuda, A., Takeo, M., & Takasaki, K.: The 2017 Nishinoshima eruption: combined analysis using Himawari-8 and multiple high-resolution satellite images. Earth, Planets and Space, 71(1), 1-18, 2015.
- [8] 福島資介, 佐藤寛和, 大谷康夫: ランドサットデータによる火山性変色水の調査. 1981.
- [9] 渡辺一樹: 海域火山周辺における変色水の色の RGB 値と化学組成の比較. 海洋情報部研究報告= Report of hydrographic and oceanographic researches, (52), 49-55. 2015.

2.2 海洋可視化のための衛星プラットフォーム及びセンサに関する調査

ここで、海洋観測が可能な衛星・センサとその観測対象について5カテゴリー（1. 水温、2. 海色、3. 海氷・海上気象（海上風・降水）・塩分、4. 測位・海面高度、5. 可視高解像度・SAR）に分けて記述する。なお、2.2 で示す、各カテゴリー項目の主要な衛星センサの性能一覧の詳細は、別途付表1のExcelファイルにまとめたので、別途参照いただきたい。

2.2.1 水温

表 2.2.1 に、主要な衛星水温センサの性能一覧を示す。水温に関する衛星は15機（異なる衛星に同じセンサが搭載されているものも含む）あり、最も古くから稼働しているセンサが1999年から観測が開始された Terra/MODIS（Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer）である。時間解像度、空間解像度は、それぞれ1日程度、1km程度のセンサが多い、また、備考欄に書かれているのは「熱赤外」「マイクロ波」という計測電磁波の違いであり、熱赤外の方が空間解像度（1km程度）や観測精度は良いが、雲がある場合、観測出来ない。一方、マイクロ波のセンサの空間解像度（30km程度）は劣るが、雲の影響をうけないため、常時モニタリングが可能である。さらに空間解像度が数10mというLandsat-8のような高解像度の熱赤外センサは、沿岸（特に海峡のような狭い空間）での応用が期待されるが、時間解像度が16日であり、時系列な水温変化を計測できない点や観測精度が劣る点が欠点である。GOES（Geostationary Operational Environmental Satellite）、Meteosat、Himawari は、静止衛星であり、時間解像度が10～15分と非常に良いが空間解像度と観測精度が極軌道の熱赤外衛星センサに比べて、劣る。

表 2.2.1 主要な衛星水温センサ性能一覧

No.	衛星	センサ	時間解像度	空間解像度 (km)	観測精度 (K)	観測開始年	備考
1	Terra	MODIS	1日	1	0.38	1999	熱赤外
2	Aqua	MODIS	1日	1	0.38	2002	熱赤外
3	Aqua	AMSR-E	2回/日	30	0.58	2002	マイクロ波
4	Meteosat-8	SEVIRI	15分	3	0.58	2005	熱赤外
5	NOAA	AVHRR/2	半日	1.1	0.38	2009	熱赤外
6	GOES	GEOS Imager	30分	1	0.93	2010	熱赤外
7	Suomi/NPP	VIIRS	1日	0.75	0.38	2011	熱赤外
8	GCOM-W	AMSR2	2回/日	30	0.75	2012	マイクロ波
9	LANDSAT-8	TIRS	16日	0.1	0.7	2013	熱赤外
10	Meteosat-11	SEVIRI	15分	3	0.56	2015	熱赤外

11	Himawari-8,9	AHI	10分	2	0.59	2016	熱赤外
12	JPSS-1/NOAA-20	VIIRS	1日	0.75	0.38	2017	熱赤外
13	GCOM-C	SGLI	2日	0.25	0.41	2017	熱赤外
14	MetOp	AVHRR/3	2回/日	1.1	0.38	2018	熱赤外
15	GOES-16,17	ABI	15分	2	0.45	2018	熱赤外

2.2.2 海色

表 2.2.2 に、主要な衛星海色センサの性能一覧を示す。海色に関する主な衛星は 12 機ある。海色の衛星観測は、1996 年から本格的に始められ ADEOS/OCTS (Advanced Earth Observing Satellite/ Ocean Color and Temperature Scanner) , Seastar/SeaWiFS (Sea-Viewing Wide Field-of-View Sensor) と継続され、20 年以上観測が継続されている。これまでは極軌道衛星による時間解像度 1 日程度、空間解像度は 1km 程度の観測が行われてきたが、現在は空間解像度では GCOM-C の 250m や Sentinel-3 の 300m が主流になりつつある。Sentinel-2 および 3 は A と B の 2 機体制で時間解像度を上げている。また、COMS (Communication, Ocean and Meteorological Satellite), KOMPSAT-2 (Korea Multi-Purpose Satellite-2) といった静止海色衛星センサが開発され、時間解像度の良いセンサも登場しつつある。海色センサは、海水のわずかな色の変化を捉える高感度なセンサである、LANDSAT-8 や Sentinel-2 のような陸用に開発された高解像度センサも輝度分解能の向上により海色観測に適用可能になってきているが、時間分解能や観測精度は劣る。Himawari は時間解像度がもっとも良いが気象衛星のため、海色観測には限界がある。表 2.2.3 に海色に関連する主なプロダクトの観測精度を示す。将来センサとしては、空間解像度や観測精度を向上させた静止衛星か、複数の極軌道衛星で時間解像度上げたシステムが期待される。備考欄に「レーザー」と書かれている CALIOP は、衛星ライダーである。衛星直下しか測定出来ないため、時間解像度、空間解像度は記載していない。雲・エアロゾル観測を主目的としているが、海中に向けられたグリーン(波長 532nm)の後方散乱と海中のクロロフィル a 濃度との関係の研究[1]が進められている。

表 2.2.2 主要な衛星海色センサの性能一覧

No.	衛星	センサ	時間解像度	空間解像度 (km)	観測開始 年	備考
1	Terra	MODIS	1 日	1	1999	
2	Aqua	MODIS	1 日	1	2002	
3	CALIOP	CALIPSO	-	-	2006	レーザー
4	COMS	GOCI	1 時間	0.5	2010	静止
5	Suomi/NPP	VIIRS	1 日	0.75	2011	
6	LANDSAT-8	TIRS	16 日	0.03	2013	
7	Himawari-8,9	AHI	10 分	0.5-2	2014	静止
8	Sentinel-2A/B	MSI	5 日	0.01-0.06	2015	
9	Sentinel-3A/B	OLCI	2 回/日	0.3	2016	
10	GCOM-C	SGLI	2 日	0.25	2017	
11	JPSS-1/NOAA-20	VIIRS	1 日	0.75	2017	
12	KOMPSAT-2	GOCI2	不明	2	2020	静止

表 2.2.3 海色センサの観測精度

	表 2.2.2 衛星センサの番号	
海色センサ 静止海色センサ	1, 2, 4, 5, 9, 10, 11, 12	クロロフィル a 濃度：-60～150% 懸濁物質濃度：-60～150% 有色溶存有機物質の吸収係数：-60～150% 光合成有効放射量：15% (10km/月)
陸域高解像度	6, 8	(ケーススタディはあるが、精度は定まっていない)
静止気象センサ	7	クロロフィル a 濃度：38%(7月の8日間平均) 冬は太陽高度が低くなるため、精度悪化する

- [1] J. H. Churnside: Review of profiling oceanographic lidar, Opt. Eng. 53(5), 051405, doi: 10.1117/1.OE.53.5.051405, 2017.

2.2.3 海氷・海洋気象・塩分

1)海氷

表 2.2.4 と表 2.2.5 に、主要な海氷センサの性能一覧を示す。海氷観測に係る衛星は 11 機あり、Sentinel-3 シリーズには同一機に受動型光学センサと能動型マイクロ波センサを搭載しているため、センサの総数は 13 機である。内訳は、受動型光学センサが 7 機、能動型光学センサが 1 機、受動型マイクロ波センサが 2 機、能動型マイクロ波センサが 3 機である。時間解像度、空間解像度については、受動型センサは時間解像度が 1 日程度で、空間解像度は光学センサが 250m-1km 程度、マイクロ波センサは 5-36km 程度である。また、能動型センサについては、空間解像度は光学・マイクロ波どちらも 150-380m 程度と受動型の高分解能側と同程度であるが、観測幅に限られるため、時間解像度は 30-91 日程度と受動型に比べて大変長くなっている。能動型は、時間分解能がよくない欠点があるものの、高度方向（海氷上の積雪深も含めた海氷高）の情報が得られるという利点があり、受動型センサと併用することで、海氷の収束域・発散域の特定、長期的な薄氷化の検出等、海氷動態をより詳細に把握することが可能である。

将来的には、受動型センサの観測幅を広げるとともに地表面分解能を向上させ、時間・空間双方の解像度を高めることで、温暖化が進む極域海洋における海氷移動量や生成・融解等の海氷動態のメカニズム解明に資するデータを取得するとともに、氷海航路ナビゲーションにむけた海氷位置情報としても有用なデータになると期待される。

表 2.2.4 主要な海氷センサの性能一覧

No.	衛星	センサ	時間解像度	空間解像度 (km)	観測開始年	備考
1	Terra	MODIS	1 回/日	1	1999	光学 (受動型: 可視-熱赤外)
2	Aqua	MODIS	1 回/日	1	2002	光学 (受動型: 可視-熱赤外)
3	DMSP	SSMIS	2 回/日	36	2003	マイクロ波 (受動型)
4	Cryosat-2	SIRAL-2	30 日	0.38	2010	マイクロ波 (能動型)
5	NPP	VIIRS	1 回/日	0.375	2012	光学 (受動型: 可視-熱赤外)
6	GCOM-W	AMSR2	2 回/日	5	2012	マイクロ波 (受動型)
7	Sentinel-3A	SLSTR	2 回/日	1	2016	光学 (受動型: 可視-熱赤外)
		SRAL	60	0.3		マイクロ波 (能動型: SAR 高度計)
8	JPSS-1	VIIRS	1 回/日	0.375	2017	光学 (受動型: 可視-熱赤外)
	(NOAA-20)					
9	GCOM-C	SGLI	1 回/日	0.25	2017	光学 (受動型: 可視-熱赤外)

10	Sentinel-3B	SLSTR	0.5	1	2018	光学（受動型：可視-熱赤外）
		SRAL	60	0.3		マイクロ波（能動型：SAR高度計）
11	ICESat-2	ATLAS	91	0.15	2018	光学（能動型：レーザ高度計）

表 2.2.5 海氷センサの観測精度

番号	衛星	センサ	観測物理量	精度
1	Terra	MODIS	海氷表面温度	3.7 K
2	Aqua	MODIS	海氷表面温度	3.7 K
3	DMSP	SSMIS	海氷密接度	<= 5 % (冬)
				<= 15 % (夏)
4	Cryosat-2	SIRAL-2	海氷高	1.6 cm/年（北極海の多年氷厚変動）
5	NPP	VIIRS	海氷表面温度	1 K
6	GCOM-W	AMSR2	海氷密接度	<= 10 %
7	Sentinel-3A	SLSTR	雪氷面温度	1 K
		SRAL	海氷高	3.5 cm (海面高度)
8	JPSS-1	VIIRS	海氷表面温度	1 K
	(NOAA-20)			
9	GCOM-C	SGLI	海氷,	海氷 <= 7 %,
			積雪粒径,	粒径 <= 50 %,
			雪氷面温度	温度 <= 2 K
10	Sentinel-3B	SLSTR	雪氷面温度	1 K
		SRAL	海氷高	3.5 cm (海面高度)
11	ICESat-2	ATLAS	海氷高	<= 3 cm

2)海上気象（海上風・降水）

表 2.2.6 に主要な海上風センサーの性能一覧を示す。これより衛星は 6 種類あり、マイクロ波放射計、マイクロ波散乱計、GNSS (Global Navigation Satellite System) 反射波に分類される。最も古くから駆動しているセンサーはマイクロ波放射計の SSM/I (Special Sensor Microwave/Imager) , SSMIS であり、DMSP (Defense Meteorological Satellite Program) シリーズの衛星により現在まで運用されている。マイクロ波散乱計は、アクティブセンサーで海上風速に加えて風向の観測が可能である点が特徴で、ASCAT (Advanced SCATterometer) シリーズが 2006 年から現在まで運用されている。これらのセンサーの時空間解像度は 50-25 km で、時間解像度は 0.5 日である。最も新しい手法として GNSS 反射波を用いる CYGNSS (Cyclone Global Navigation Satellite System) がある。CYGNSS 衛星は、世界中の GNSS 衛星からの信号の海面反射波を 8 機の小型衛星により受信するというユニークな手法により、平均で 6 時間毎の観測を実現しているが、今のところマイクロ波放射計や散乱計ほどの精度はない。

降水については、マイクロ波放射計によるパッシブな観測と、レーダによるアクティブな観測がある。パッシブな観測については、同じマイクロ波放射計を用いる海上風観測とほぼ共通する。アクティブなセンサーは現在 GPM が 2014 年から運用されている。

次世代センサーとして現状のセンサーでは解像することが困難なサブメソスケールの大気海洋相互作用や、より沿岸付近に迫ることが可能な空間解像度 25km を超えるセンサーが期待される。

表 2.2.6 主要な海上気象センサーの性能一覧

No.	衛星	センサー	時間解像度	空間解像度 (km)	観測開始年	備考
1	DMSP シリーズ	SSM I, SSMIS	2 回/日	50	1987	マイクロ波放射計
2	Coriolis	WindSat	2 回/日	25	2003	マイクロ波放射計
3	METOP-A, B, C (or シリーズ)	ASCAT	2 回/日	25	2006	マイクロ波散乱計
4	GCOM-W	AMSR2	2 回/日	25	2012	マイクロ波放射計
5	GPM	GMI	2 回/日	25	2014	マイクロ波放射計
6	CYGNSS	CYGNSS	4 回/日 (平均)	25	2016	GNSS 反射波

3)海面塩分

表 2.2.7 に主要な衛星塩分センサの性能一覧を示す。海面塩分の衛星観測の歴史はかなり新しく、2009年に欧州の SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity Mission) 衛星から開始され、その後、米国の Aquarius 衛星、そして SMAP (Soil Moisture Active Passive) ミッションに繋がっている。いずれも L バンドのマイクロ波放射計で、空間解像度は 150-50km 程度、時間解像度は 0.5 日である。L バンドのセンサはアンテナサイズがネックとなり高解像度化は困難であるがメソからサブメソスケール現象（水平スケール 100~300 km 規模から 1~50 km 規模の現象）を解像することが可能な 50km を超えるセンサが期待される。

表 2.2.7 主要な衛星塩分センサの性能一覧

No.	衛星	センサ	時間解像度	空間解像度 (km)	観測開始年	備考
1	SMOS	MIRAS	2 回/日	50	2009	マイクロ波放射計
2	SAC-D	Aquarius	2 回/日	150	2011	マイクロ波放射計
3	SMAP	SMAP	2 回/日	60-70	2015	マイクロ波放射計

2.2.4 測位・海面高度

表 2.2.8 に、主要な衛星測位・海面高度計センサの性能一覧を示す。海面高度計による地球観測は 1970 年から始まり、継続して衛星が打ち上げられている。海面高度計は、可視・赤外センサなどの受動型センサとは異なり、センサ自らが発信したパルスの反射を計測する能動型センサである。これまでに運用されてきた海面高度計は、衛星が通過した直下しか観測できず、そのデータは線的なものであった。そのため、複数の衛星が観測したデータを空間的に補完することでマップデータを作成している。海面高度計が観測する海面の高さは、海底地形や水塊構造の違いなどにより生じるが、

物理現象によって生じる海面高度（力学的海面高度）の変化を抽出することで流れを把握できる。このようにして得られた海面高度データは、黒潮や暖水塊のような数百キロスケールより大きな現象を観測する能力を有しており、海洋学の分野で不可欠なデータとなっている。また海面高度計のデータは、研究開発が進む海洋数値モデルの初期値となっている点でも重要度が高い。

今後、海面高度計に求められるのは、まず衛星を増やして観測を密にすることだが、将来的に求められるのは単一の衛星センサによる面的な観測である。前述のとおりセンサの性質上、現在は線での観測となっているが、面的に観測する技術開発も進められている。

測位・モニタリングに関しては、これも 1970 年代から衛星を核としたシステムが構築されてきた。GPS やアルゴスは海洋に限らず、すべての分野で必要不可欠な観測システムとなっている。このうち、近年利用が進んでいる・期待されるのが、準天頂衛星や AIS である。自船の正確な位置を把握する、他船の正確な位置を把握することは、事故等を未然に防ぐ重要な情報となる。自動操舵、操船補助等も将来の有望な技術であり、衛星測位・モニタリングは核となる技術である。今後も測位・モニタリングのニーズは更に高まると予想される。

表 2.2.8 主要な衛星測位・海面高度計センサの性能一覧

No	グループ	衛星	センサ	空間解像度	時間解像度	観測開始	備考
1	海面高度	Cryosat シリーズ	SIRAL			2010	マイクロ波（アクティブ）
2	海面高度	Jason シリーズ (1-3)	Poseidon	6km	10 日 (2, 3)	2001	マイクロ波（アクティブ）
3	海面高度	Sentinel3	SRAL	300m-20km	30 日	2016 および 2018	マイクロ波（アクティブ）
4	海面高度	CFOSAT	SWIM	20m-180km	13 日	2018	マイクロ波（アクティブ）
5	測位モニタリング	アルゴス			常時	1978	通信・測位
6	測位モニタリング	インマルサット			常時	1982	通信

7	測位モニタリング	GPS			常時	1995	発信情報：時間、衛星測位情報
8	測位モニタリング	オーブコム	AIS		常時	1995	通信・AIS
9	測位モニタリング	イリジウム			常時	1998	通信・測位
10	測位モニタリング	ISS	AIS		常時	1998	測位(AIS)
11	測位モニタリング	exactEarth	AIS		常時	2009	測位(AIS)
12	測位モニタリング	みちびき			常時	2010	発信情報：時間、衛星測位情報
13	測位モニタリング	Viasat			常時	2011	通信
14	測位モニタリング	OneWeb			常時	2012	通信
15	測位モニタリング	Spire			常時	2012	通信
16	測位モニタリング	SES (03b)			常時	2013	通信
17	測位モニタリング	ALOS2	SPAISE2 (AIS)		14日周期	2014	測位(AIS)

2.2.5 可視高解像度・合成開口レーダ (SAR)

1) 可視高解像度

表 2.2.9 に主要な衛星可視高解像度 (30m より優れた解像度) センサの性能一覧を示す。可視・可視高解像度衛星は、打ち上げられた数が多く、全てを取り上げることは困難であるが、表 5 には主要なセンサのみ記載している。可視高解像度の衛星の一例として、WorldView は見ての通り、超高解像度である上、比較的期間解像度も高く、高スペックの衛星が既に利用可能である。また PlanetScope や SkySat は民間企業が打ち上げた小型衛星であり、複数の衛星を打ち上げることでコンステレーション (多数個の人工衛星の一群) を形成し、これにより高解像度かつ時間分解能を大きく向上させることに成功している。

可視・可視高解像度衛星の海洋利用では、雲の影響が大きな問題となるが、主にクロロフィル、TSM、油濁、サンゴ、水深、藻場、プラスチックゴミ等の検出に利用されている。今後、小型衛星の利用拡大により、さらに時空間分解能は向上すると考えられる。さらなる時空間分解能の向上によって、雲が移動した瞬間を捉える確率が高まり、雲の影響による弱点をある程度克服することが可能となれば、災害発生時もしくはその直後の、洪水の発生状況、港湾の被害状況、タンカー油流出状況、海洋への濁水の流入状況等、様々な緊急性が高い状況におけるモニタリングに期待される。

表 2.2.9 主要な衛星高解像度センサの性能一覧

No.	衛星	センサ	時間解像度	空間解像度 (m)	観測開始年
1	SPOT 2	HRV	26 日	10	1990
2	SPOT 4	HRVIR	26 日	10	1998
3	SPOT 5	HRG	26 日	10	2002
4	SPOT 6	NAOMI	26 日	8	2012
5	SPOT 7	NAOMI	26 日	8	2014
6	Landsat7 号	ETM+	16 日	30	1999
7	Landsat8 号	OLI, TIRS	16 日	30	2013
8	Landsat9 号	OLI-2, TIRS-2	16 日	30	2020
9	ASRAR0-1	OPS	43 日	2	2014
10	PlanetScope		1 日	3.7	2016
11	RapidEye		1 日	6.5	2008
12	SkySat-1		4 - 5 日	1	2013
13	SkySat-2		4 - 5 日	1	2014
14	SkySat-3		4 - 5 日	1	2016
15	SkySat-4-7		4 - 5 日	1	2016

16	SkySat-8-13		4 - 5 日	1	2017
17	SkySat-14, 15		4 - 5 日	1	2018
18	Deimos-2		2 日	1	2014
19	WorldView-1	WV60	1.7 日	0.46	2007
20	WorldView-2	WV110	1.1 日	0.46	2009
21	WorldView-3		1 日	0.31	2014
22	WorldView-4		2 日	0.31	2016
23	GeoEye-1	GIS	3 日	0.46	2008
24	Pleiades-1A	HiRI	26 日 (2機により 4 日以内)	2.8	2011
25	Pleiades-1B	HiRI	26 日 (2機により 4 日以内)	2.8	2012
26	KOMPSAT-3A	AEISS-A	28 日	2.2	2015

2) 合成開口レーダ (SAR)

表 2.2.10 に、主要な衛星測位・海面高度計センサの性能一覧を示す。合成開口レーダ(SAR)は、民間衛星と各国宇宙機関により開発運用されている衛星に大別される。宇宙機関による SAR 衛星のメジャーなものとしては、欧州の Sentinel-1 シリーズと日本の ALOS シリーズが挙げられる。欧州は古くは ERS-1 から始まり、Cバンドのレーダにより海洋観測、雪氷観測などを主に継続シリーズとなっている。日本の ALOS シリーズは JERS-1/SAR から始まり、一貫して世界で唯一の Lバンドのレーダを開発運用している。主に、資源探査、森林モニタリングなどを主なミッションとしている。

民間の SAR 衛星としては、MAXAR の RADARSAT (Cバンド)、Airbus の TerraSAR-X (Xバンド)、e-geos の COSMO-SkyMed (Xバンド) が大型衛星として挙げられる。民間衛星は顧客の観測リクエストを受付けてデータを取得販売するが、その多くが安全保障系のユーザを主たる顧客になっている。昨今はこの民間の動きに加えて、スタートアップが ICEYE、Capella など小型コンステレーション衛星が運用フェーズに入っている。また日本においても Synspecive、iQPS などのスタートアップが小型 SAR 衛星を計画している。

SAR で観測される海洋現象は、波浪、海上風、油汚染、海岸侵食（汀線モニタリング）などが挙げられるが、特に波浪、海上風などは時間スケールの小さい現象を解析するためには観測頻度の向上が求められているため、次期システムとしては小型衛星コンステレーションに期待されている。

表 2.2.10 主要な衛星 SAR センサの性能一覧

No.	衛星	センサ	時間解像度	空間解像度	観測開始年
1	ENVISAT	ASAR/MERIS/MIPAS /RA- 2/GOMOS/MWR/AATS R/SCIAMACHY	35 日回帰軌道	image mode: 28x28m	2002
				wave mode: 28x30m	
				wide swath: 150x150m	
2	ALOS	PALSAR/PRISM/AVN IR2	46 日回帰軌道	10x10m, 100x100m	2006
3	TerraSAR-X	TSX-SAR	11 日回帰軌道	Spotlight SL mode: 1x2m	2007
				Stripmap mode: 3x3m	
				ScanSAR mode: 16x16m	
4	RADARSAT-2	SAR	24 日回帰軌道	standard: 28x28m	2007
				wide: 25x28m	

				low incidence: 40x28m	
				high incidence: 20x28m	
				fine: 10x9m	
				scanSAR wide: 100x100m	
				scanSAR narrow: 50x50m	
				standard quad polarization: 25x28m	
				fine quad polarization: 11x9m	
				multi-look fine: 11x9m	
				ultra fine: 3x3m	
5	COSMO-SkyMed-1	SAR-2000	16 日回帰	spotlight: 1m 以下	2007
			*4 機コンステレーションにより数時間以内に同一点観測可能	himage: 3-15m	
				wideregion: 30m	
				hugeregion: 100m	
				pingpong: 15m	
6	COSMO-SkyMed-2	SAR-2000	16 日回帰	spotlight: 1m 以下	2007
			*4 機コンステレーションにより数時間以内に同一点観測可能	himage: 3-15m	
				wideregion: 30m	
				hugeregion: 100m	
				pingpong: 15m	
7	COSMO-	SAR-2000	16 日回帰	spotlight: 1m 以下	2008

	SkyMed-3		*4機コンステレーションにより数時間以内に同一点観測可能	himage: 3-15m	
				wideregion: 30m	
				hugeregion: 100m	
				pingpong: 15m	
8	TanDEM-X	TDX-SAR	11日回帰軌道	Spotlight SL mode: 1x2m	2010
				Stripmap mode: 3x3m	
				ScanSAR mode: 16x16m	
9	COSMO-SkyMed-4	SAR-2000	16日回帰	spotlight: 1m以下	2010
			*4機コンステレーションにより数時間以内に同一点観測可能	himage: 3-15m	
				wideregion: 30m	
				hugeregion: 100m	
				pingpong: 15m	
10	Sentinel-1A,	SAR	12日回帰軌道	stripmap: 5x5m	2014
				IWS: 5x20m	
				EWS: 25x100m	
				wave: 5x20m	
11	ALOS2	PALSAR-2/SPAISE2	14日回帰軌道	spotlight: 1x3m	2014
				stripmap: 3, 6, 10m	
				scansar: 100m	
12	Sentinel-1B	SAR	12日回帰軌道	stripmap: 5x5m	2016
				IWS: 5x20m	
				EWS: 25x100m	
				wave: 5x20m	

13	ASNAR02	XSAR	最短1日（緊急時日本）	spotlight:1x1m	2018
				stripmap: 3x3m	
				scansar:16x16m	
14	SAOCOM-1A	SAR-L	16日回帰*1A, 1Bの2機体制で8日回帰	stripmap sp: 10x10m	2018
				stripmap dp: 10x10m	
				stripmap qp: 10x10m	
				topsar narrow sp: 30x30m	
				topsar narrow dp: 30x30m	
				topsar narrow qp: 50x50m	
				topsar wide sp: 50x50m	
				topsar wide dp: 50x50m	
				topsar wide qp: 100x100m	
15	ICEYE-X1	SAR		20, 3, 1.5, 1.0m	2018
16	ICEYE-X2	SAR	14日回帰軌道	stripmap: 3x3m	2018
				spotlight: 1x1m	
				scansar: 20x20m（開発中）	
17	Capella	X-SAR			2018

3. 可視化対象と関連する衛星センサとその将来展望

3.1 海洋可視化対象と関連する衛星センサについて

表 3.1.1 に海洋における解決すべき課題と利用衛星センサの関係を示す。主観的な判断ではあるが、◎が最重要、○が重要、空欄は通常はあまり使われない衛星センサである。大雑把に評価すると、カテゴリー1（環境）、カテゴリー2（水産）は水温・海色系のセンサ、カテゴリー3（資源・エネルギー）は海洋気象・SAR系のセンサ、4（災害・国土管理）では高解像度・SAR系のセンサが多く使われていることがわかる。

表 3.1.1 海洋における解決すべき課題と利用衛星センサの関係

番号	課題カテゴリー	衛星センサ								
		水温	海色 (可視)	海氷	塩分	海洋 気象	測位	海面 高度	高解 像度	SAR
1	海洋温暖化	◎		◎		○		◎		
	赤潮・青潮		◎						○	
	生物多様性の保全								◎	◎
	海洋プラスチック		○						◎	
	流れ藻		◎						◎	
2	資源管理型漁業	◎	◎		○	○	○	◎		
	IUU 漁業		◎				◎			◎
	養殖業・沿岸漁業	◎	◎			○			◎	○
3	海洋油汚染								○	◎
	自然エネルギー	○	○			◎				◎
	環境アセス	◎	◎	○	○	○		○	○	
4	風水害		○						◎	◎
	海岸侵食								◎	◎
	津波・高潮								◎	◎
	海底火山	◎	◎			○			○	◎

◎：最重要，○：重要

### 3.2 衛星センサの将来展望

図 3.2.1(a)～図 3.2.1(d)は、現在海洋を観測する衛星センサの時間スケールと空間スケールの散布図である。一般に将来センサは左下に向かって開発される。このうち、図 3.2.1(a)に示す水温と海色のセンサは比較的高解像度、高頻度になってきており、将来は水温・海色とも 1 日周期、100m より優れた解像度のセンサが望まれる。図 3.2.1(b)に示す海氷と海上風のセンサは現状、沿岸の解析（目安として 1km 解像度・1 日周期より優れた性能）は難しく、将来は海氷と海上風とも 1 日周期で、かつ海氷では 100m より優れた解像度、海上風では 10km（可能なら数 km）より優れた解像度のセンサが望まれる。図 3.2.1(c)に示す降水と塩分のセンサも現状、沿岸の解析は難しく、降水と塩分とも 1 日周期、10km より優れた解像度のセンサが望まれる。一方、図 3.2.1(d)に示す可視高解像度・SAR のセンサは解像度的には数十 cm とほぼ限界まで達しており、これ以上の解像度の向上よりも、1 日よりも優れた時間解像度の向上が必要だろう。なお、時間・空間解像度が明確に定義できない、「測位・海面高度」については、図に示すことができないが、特に海面高度については、環境や水産の分野で極めて重要なセンサであるが、ラインセンサであるため、今後面的な測定が可能なセンサ開発が望まれる。

また表 3.2.1 は、衛星による主要な海洋物理量の標準精度の一覧を示す。ここまで説明してきたように海洋を観測する衛星には様々な種類のセンサが打ち上げられている。この表に示すのは、現在運用中（2020 年 12 月現在）の衛星プロダクト（製品）の一例である。水温、海色、海氷、海上風速（マイクロ波放射計）、降水量に関しては、日本の衛星 GCOM-C SGLI（Second Generation Global Imager）と GCOM-W AMSR2（The Advanced Microwave Scanning Radiometer 2）で作成されている衛星プロダクトの標準精度を、海上風の風向・風速（散乱計）は METOP-A, B（Meteorological Operational Satellite Program of Europe-A, B）/ASCAT を、海面高度計は Sentinel-6 の公称精度をそれぞれ列記した。これらの精度はあくまで宇宙機関による達成すべき標準的な値で、実際にはこれ以上の精度を有する場合が多い。このような海洋物理量の精度は、利用目的によって良し悪しが決まるため、この値は現時点の衛星観測精度のオーダーを知るための参考値の位置づけだが、今後のセンサ開発の目安にしてほしい。

ここまで示したように、いずれにしても、外洋を測定する衛星センサは極めて充実している反面、沿岸の衛星センサは専用のセンサ開発自体が発展途上であることがわかる。したがって、今後は、いずれの衛星センサも沿岸の解析に活用できる「1km 解像度、1 日周期」の開発を目指すことが重要である。

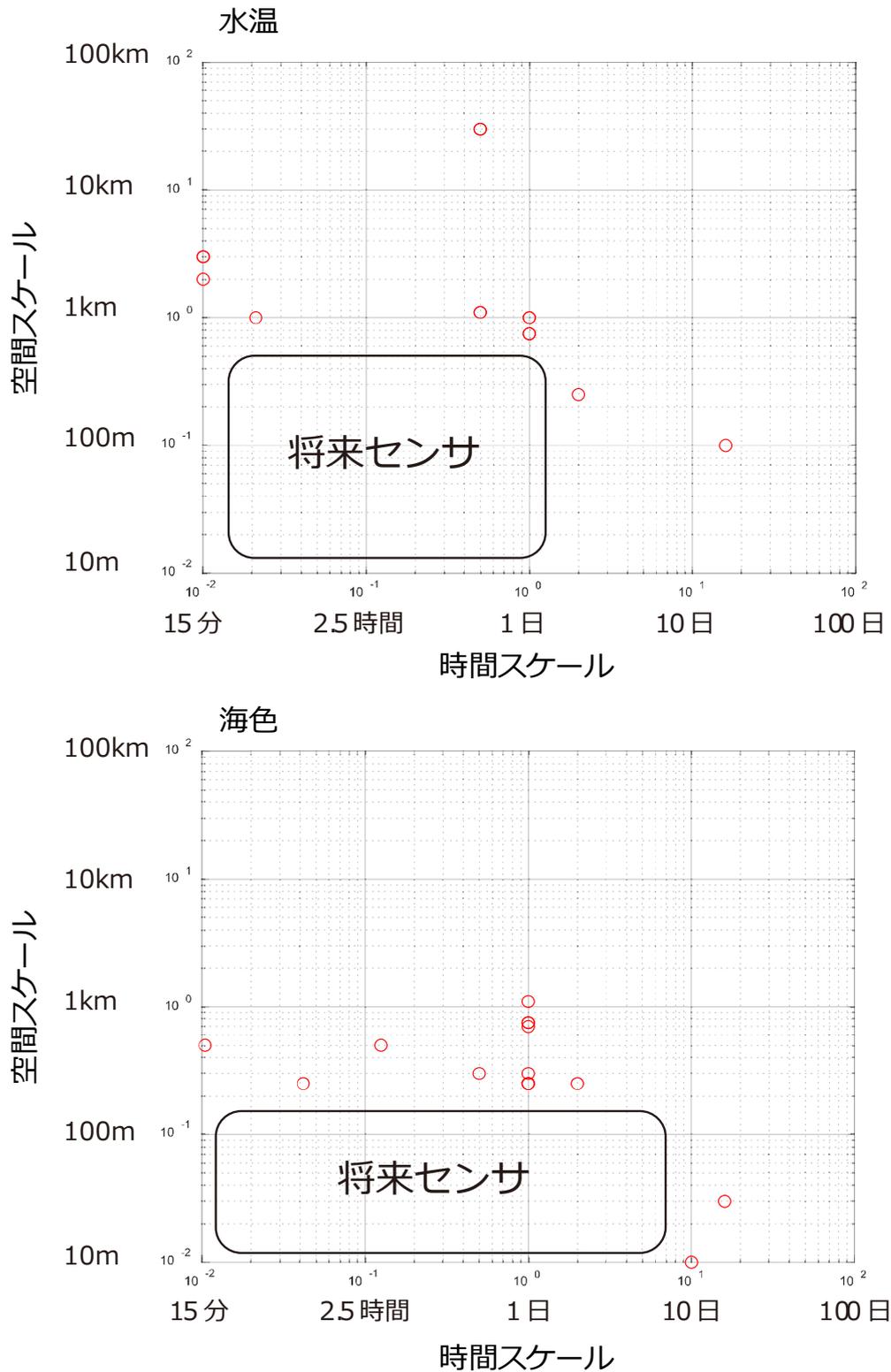


図 3. 2. 1(a) 海洋を観測する衛星センサの時間・空間解像度の関係

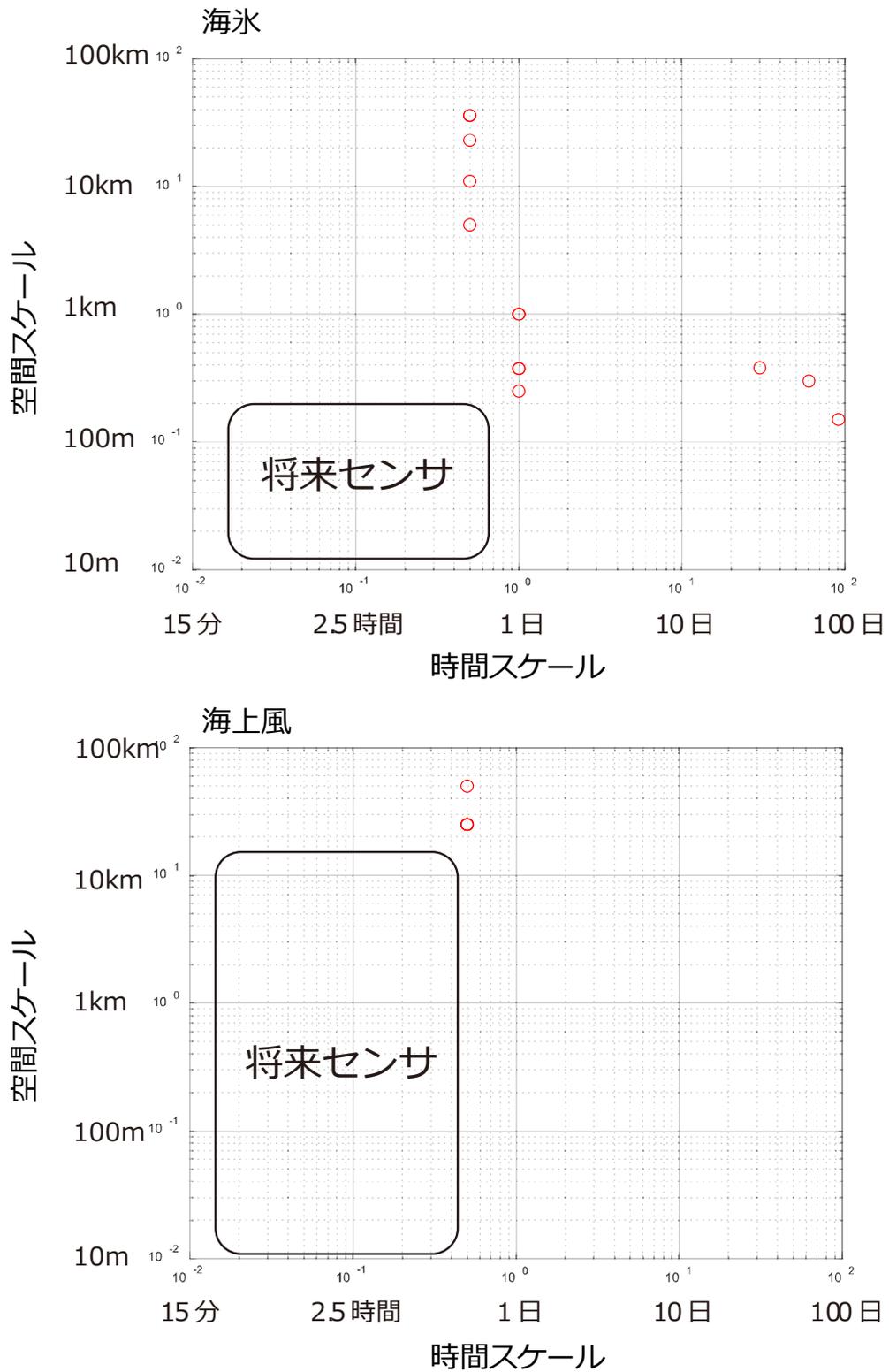


図 3.2.1 (b) 海洋を観測する衛星センサの時間・空間解像度の関係

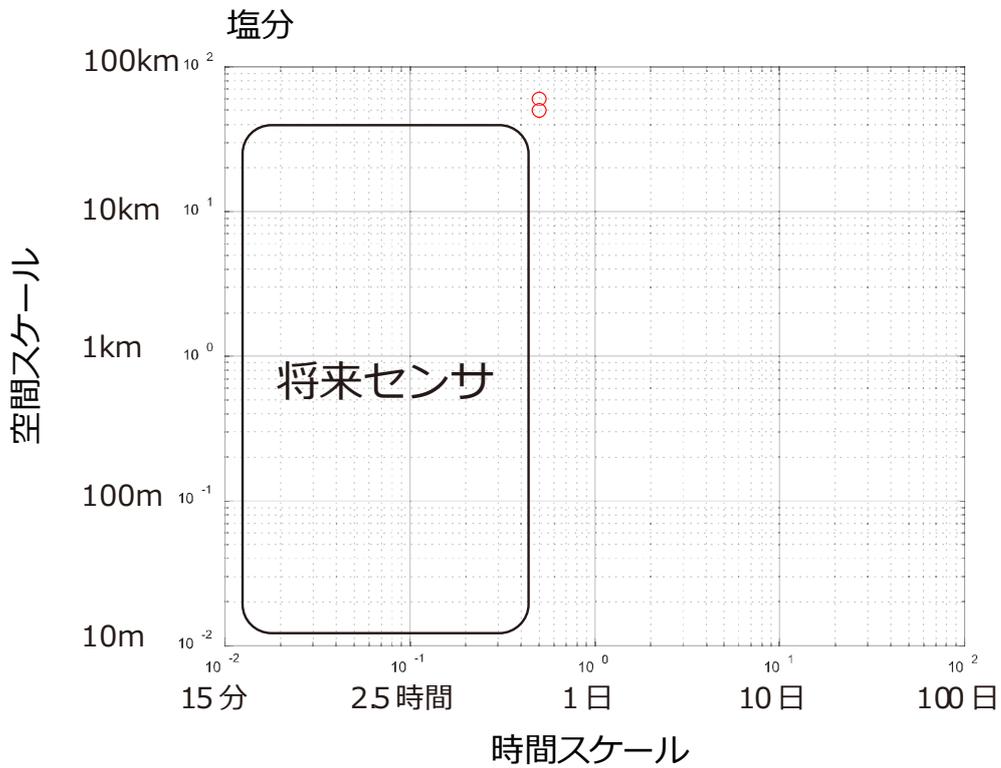
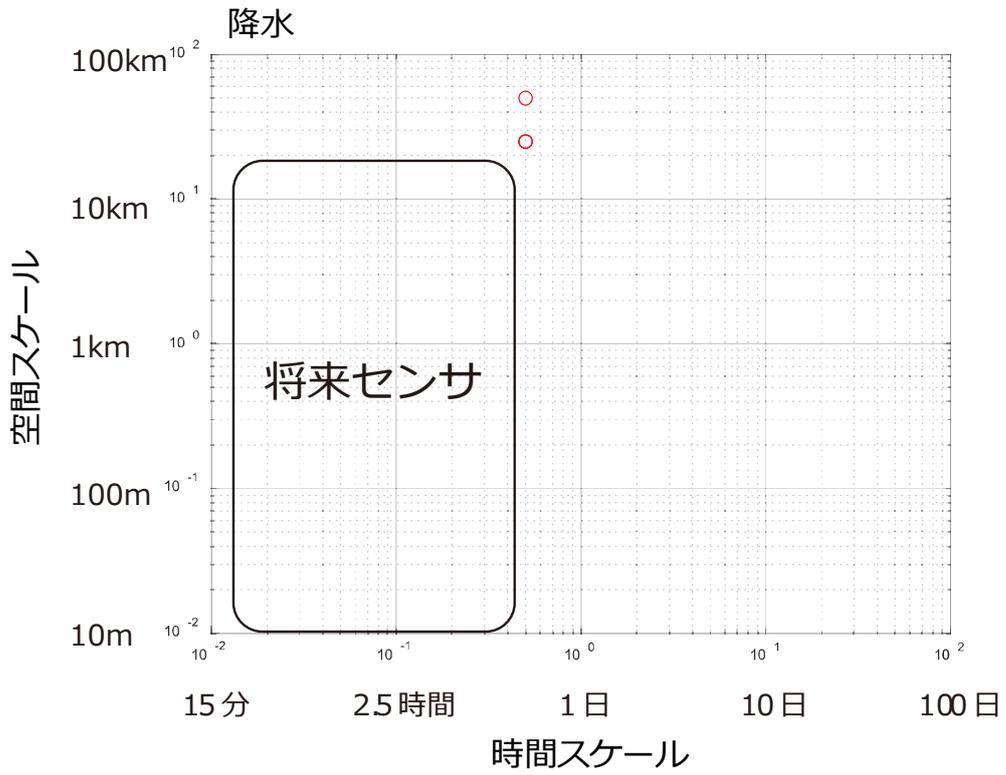


図 3.2.1(c) 海洋を観測する衛星センサの時間・空間解像度の関係

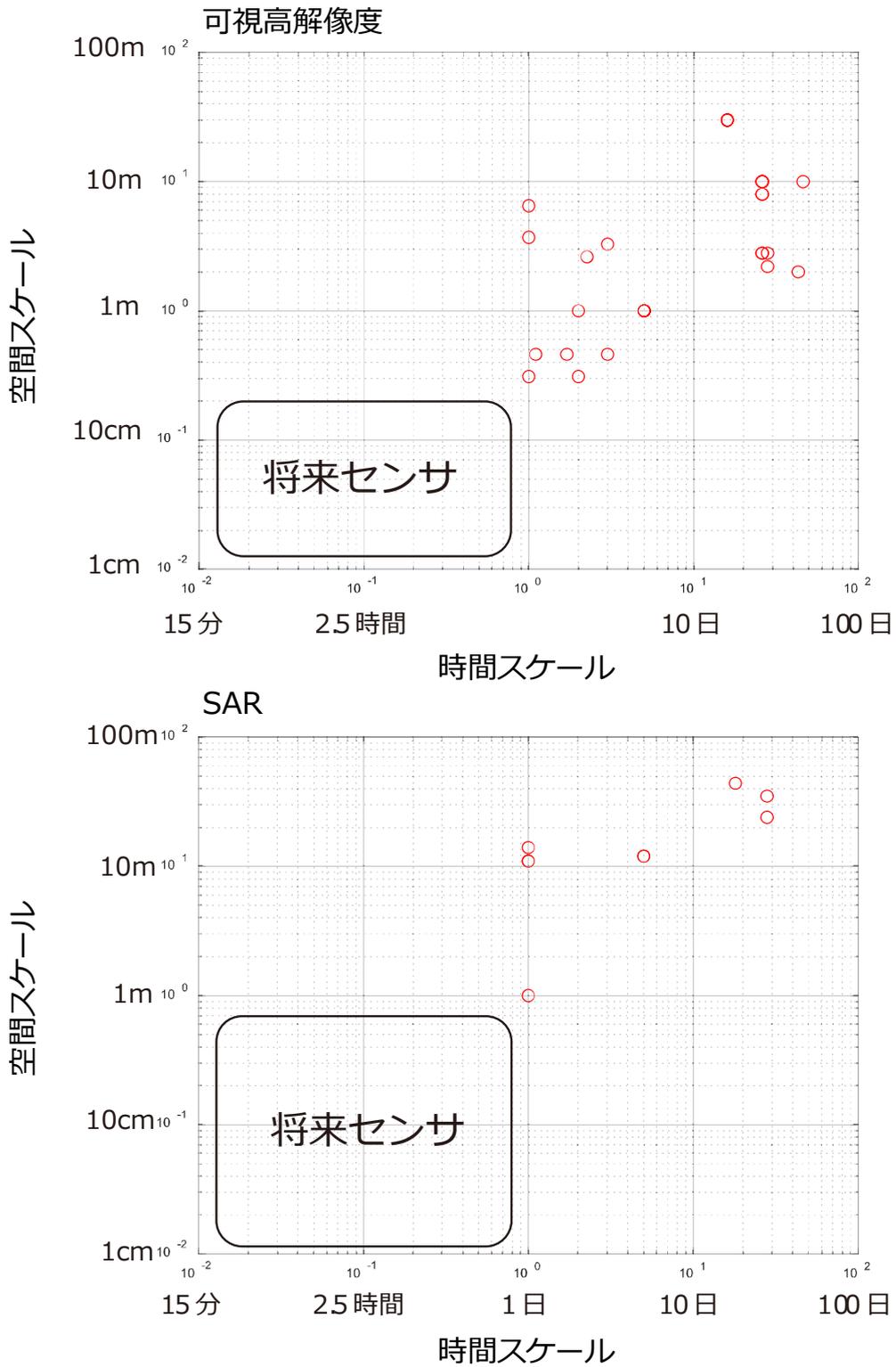


図 3. 2. 1(d) 海洋を観測する衛星センサの時間・空間解像度の関係

表 3.2.1 衛星による主要な海洋物理量の標準精度の一覧

物理量	プロダクト	略号	標準精度	観測周期	解像度	衛星/センサ	文献
海面	海面水温(熱赤外)		0.8K	2日	250m	GCOM-C/SGLI	[1]
水温	海面水温(マイクロ波)	SST	±0.5deg.C	-	50km	GCOM-W/AMSR2	[2]
海色	クロロフィル a 濃度	CHLA	-60~+150%	2日			
	懸濁物質濃度	TSM	-60~+150%	2日	250m	GCOM-C/SGLI	[1]
	有色溶存有機物吸光計数	CDOM	15%(10km/月)	2日			
海氷	積雪・海氷分布(可視)	SICE	7%	2日	250m	GCOM-C/SGLI	[1]
	雪氷面温度(熱赤外)	SIST	2K	2日	500m		
	海氷密接度(マイクロ波)	SIC	±10%	-	15km	GCOM-W/AMSR2	[2]
海洋	海上風速(放射計)		±1.0m/s	-	15km	GCOM-W/AMSR2	[2]
気象	海上風向・風速(散乱計)	SSW	2m/s, 20deg.	1日	25km	METOP-A, B/ASCAT	[3]
	降水量	PR	±50%	-	15km	GCOM-W/AMSR2	[2]
海面塩分	海面塩分	SSS	0.2psu(32-37psu)	1カ月	150km	Aquarius/SAC-D	[4]
海面高度	海面高度	SSH	4cm	10日	25km	Sentinel-6	[5]

[1][https://suzaku.eorc.jaxa.jp/GCOM\\_C/data/product\\_goal\\_std\\_j.html](https://suzaku.eorc.jaxa.jp/GCOM_C/data/product_goal_std_j.html)

[2][https://suzaku.eorc.jaxa.jp/GCOM\\_W/data/data\\_w\\_product-2\\_j.html](https://suzaku.eorc.jaxa.jp/GCOM_W/data/data_w_product-2_j.html)

[3]Yang and Zhang: Remote Sens. 2018, 10, 648; doi:10.3390/rs10040648

[4][https://www.nasa.gov/mission\\_pages/aquarius/overview/index.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/aquarius/overview/index.html)

[5]<https://earth.esa.int/eogateway/documents/20142/1557871/Sentinel-6-End-User-Requirements-Documents-EURD.pdf>

#### 4. まとめ

本報告書をまとめ終え、改めて近年の衛星センサによる海洋観測が日進月歩であり、専門家である我々も知らないセンサがたくさんあることに驚かされた。一方でこのような様々な衛星センサがあるにも関わらず、海洋計測の分野では高解像度・高頻度を要する沿岸域用のセンサは少なく、解析手法も確立していないというのが現状である。特に、沿岸域に使える海面水温・海色・海面高度のセンサや解析手法の開発は重要であろう。また、近年急速に発達している SAR の技術は、全天候型かつ高解像度という可視域では実現できない強みを持っており、海洋観測における重要度はますます高まるだろう。さらに、資源・エネルギー分野、災害・国土管理分野における利用事例まだ限定的で、持続的な社会への貢献や災害時の安全・安心といった観点から、その解析手法研究や事例研究を加速させる必要があるだろう。

さて、ここでまとめたように、すでに多くの衛星データが取得されている。しかし、その衛星データについて、容易に利用しやすく整備されているわけではない。現在、世界では多くの公的機関が自前の衛星センサの有無にかかわらず、他機関の取得したデータを含め、多くの衛星データを利用しやすいように整備しつつある。例えば、宇宙機関が直接配布しているデータだけではなく、地域別のアルゴリズムの開発と新たなデータセットの作成が行われたり、長期にわたる変化を明らかにするために複数のセンサの継続性を確保したり、あるいは複数の種類の衛星データを組み合わせる新たなデータセットが開発されつつある。今後、このようなデータセットやデータベースについても精査し、また日本として独自に利用しやすいデータセットやデータベースも開発していく必要がある。

さらに、ほとんどのリモートセンシングデータに関しては、海表面の情報に限られ、海洋の下の情報取得が困難である。また、リモートセンシング技術は観測技術であり、予測を行うことは困難である。従って、今後、海洋物理や生態系の数値モデル技術がさらに向上されれば、数値モデルにリモートセンシングデータを同化して、海洋の深部や将来を予測するなど4次元的な海洋構造の把握がより正確なものになることが想定される。

最後に、本報告書で扱った主要な海洋観測衛星センサの性能一覧（観測開始年順、2020年12月現在）を付表1のファイルに詳しく掲載したので、併せて参照してほしい。

以上

