

### 衛星リモートセンシングによる海洋観測 漁場環境のモニタリングに向けて

株式会社サイエンスアンドテクノロジー 林 正能

#### 1. はじめに

2021年9月に北海道太平洋沿岸域で発生した大規模有害赤潮は、サケやウニのほか、ツブ貝、タコといった多様な魚種に甚大な被害をもたらし、その被害額は令和4(2022)年2月28日現在で81.9億円に達すると報告されている<sup>1)</sup>。その後、北海道と北海道大学による調査・研究によって、高濃度の植物プランクトンがロシア方面の海域から親潮に沿って南下してきたこと<sup>2)</sup>、赤潮の原因種が渦鞭毛藻類の*Karenia selliformis* (カレニア・セリフォルミス)であること<sup>3)</sup>、被害が広域化した原因はカレニア・セリフォルミスが北海道東部沿岸の海流によって広範囲に拡げられた可能性があること<sup>4)</sup>が分かってきた。この一連の調査・研究の中で、宇宙航空研究開発機構(JAXA)が打ち上げ、運用している人工衛星GCOM-C「しきさい」による植物プランクトン(クロロフィルa濃

度)の観測から、9月中旬から10月にかけて植物プランクトンが増殖する状況や、道東沿岸に沿って南下していることが明らかにされ<sup>2)</sup>、衛星を用いたリモートセンシングによる解析が寒冷域赤潮の実態の解明に重要な役割を果たした。

衛星リモートセンシングでは、水循環・気候<sup>5)</sup>のほか、海象や海色、氷雪などを観測・解析できる。水産分野においても、昭和50年代より一般社団法人漁業情報サービスセンター(JAFIC)によって衛星情報の漁業利用に関する研究が進められ、人工衛星を利用した各種の海況情報を漁業者に配信している。また、近年の衛星リモートセンシング技術の進展に伴い、遠洋・沖合漁業の漁場探索、沿岸漁業の効率化、増養殖漁業のリスク管理、定置網漁業の最適化などに応用され<sup>6)</sup>、ICTと組みあわせたスマート沿岸漁業の取り組みも進んでいる<sup>7)</sup>。

しかし、センサの技術開発が進み、新たな人工衛星が打ち上げられると同時に、ミッションを終え運用が停止される衛星も多く、海洋観測に活用できる衛星プラットフォームやセンサは年々変化しているといえる。そこで本稿では、水産分野における衛星リモートセンシングの更なる活用に向けて、現在利用できる海洋観測衛星とセンサの性能、および衛星データの活用による漁場環境のモニタリングの事例について紹介する。

## 2. 現在の主要な海洋観測衛星

海洋観測が可能な衛星・センサとその観測対象については、日本リモートセンシング学会に属する「海洋・湖沼リモートセンシング研究会」が中心となってとりまとめた「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」<sup>8)</sup>に詳細が記載されている。報告書では観測対象を5つのカテゴリーに区分し(表1)、利用可能な衛星と搭載されているセンサの現状、時空間解像度について解説している。ここでは、海洋環境、特に漁場環境のモニタリングに活用されている水温と海色(表2)について紹介する。

### (1)海面水温

衛星リモートセンシングによる水温観測では、衛星が計測した光(熱赤外線やマイクロ波)を、物理法則などを利用して水温に換算する。この水温は海表面の温度に相当するため「海面水温」と呼ばれる。

海面水温観測で、高い時間・空間解像度を有する衛星センサは「しきさい」に搭載されたSGLI(Second-generation Global Imager、表2)であり、2日の時間解像度、250mの空間解像度は従来の衛星では困難であった沿岸域の海洋環境観測への利用が期待されている。100mという高い空間解像度を有するLandsat-8のTIRS(Thermal Infrared Sensor)も沿岸域での応用が期待されるが、時間解像度が16日であり水温の時系列変化を追跡できないこと、観測精度が「しきさい」の0.41 K(ケルビン:絶対温度)に対してLandsat-8は0.7 Kと低いことが欠点となっている。また、Himawari-8,9「ひまわり8号、9号」のAHI(Advanced Himawari Imager)などの静止衛星は、時間解像度が10分と非常に高いが、空間解像度が2kmと極軌道の衛星センサに比べて低い<sup>8)</sup>。

表1 海洋観測で利用可能な人工衛星の観測対象と数

カテゴリー	観測対象	衛星の数(注1)
1	水温	15
2	海色(クロロフィルa、TSS:全懸濁物質、CODM:有色溶存有機物など)	12
3	海水	11
	海上気象(海上風・降水)	6
	塩分	3
	海面高度	4
4	測位	17
5	可視高解像度	26
	SAR:合成開口レーダー	17

注1)異なる衛星に同じセンサが搭載されているものも含む(2020年12月現在)。

注2)日本リモートセンシング学会<sup>8)</sup>をもとに作成

表2 水温・海色が観測可能である主要な人工衛星とその諸元 (観測開始年順)

観測対象	衛星名 / センサ名	センサ種類	時間解像度	空間解像度	観測開始年	軌道	開発機関 (注1)
水温	Aqua/MODIS	熱赤外	1日	1km	2002	極軌道	NASA
	Aqua/AMSR-E	マイクロ波	2回/日	30km	2002	極軌道	NASA
	GCOM-W/AMSR2	マイクロ波	2回/日	30km	2012	極軌道	JAXA
	LANDSAT-8/TIRS	熱赤外	16日	100m	2013	極軌道	USGS/ NASA
	Himawari-8,9/AHI	熱赤外	10分	2km	2016	静止軌道	JMA
	GCOM-C/SGLI	熱赤外	2日	250m	2017	極軌道	JAXA
海色	Aqua/MODIS	可視・ 近赤外	1日	1km	2002	極軌道	NASA
	COMS/GOCI		1時間	500m	2010	極軌道	KIOST
	LANDSAT-8/OLI		16日	30m	2013	極軌道	USGS/ NASA
	Himawari-8,9/AHI		10分	500m-2km	2014	静止軌道	JMA
	Sentinel-2A,2B/MSI		5日	10m-60m	2015	極軌道	ESA
	Sentinel-3A,3B/OLCI		2回/日	30m	2016	極軌道	ESA
	GCOM-C/SGLI		2日	250m	2017	極軌道	JAXA

注1) NASA: National Aeronautics and Space Administration (アメリカ航空宇宙局); JAXA: Japan Aerospace Exploration Agency (宇宙航空研究開発機構); USGS: United States Geological Survey (米国地質調査所); JMA: Japan Meteorological Agency (気象庁); KIOST: Korea Institute of Ocean Science and Technology (韓国海洋科学技術院); ESA: The European Space Agency (欧州宇宙機関)

注2) 日本リモートセンシング学会<sup>8)</sup>をもとに作成

上記の人工衛星は、熱赤外線を計測する水温センサを搭載しているが、AquaのAMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer-EOS)、GCOM-W「しずく」のAMSR2 (Advanced Microwave Scanning Radiometer-2) などマイクロ波を計測する水温センサを搭載した衛星もある。熱赤外線のセンサは、空間解像度や観測精度は高いが、雲がある場合には観測できない。一方、マイクロ波のセンサは、雲の影響を受けないため常時モニタリングが可能であるが、空間解像度が低い (30km程度) という欠点がある<sup>8)</sup>。

## (2) 海色

海水中の懸濁物質や溶存物質は、それぞれ固有の波長特性を持ち、海の色を変化させる。衛

星に搭載された海色センサは、海面上の光の波長変化 (すなわち海の色) を測定し、海水に含まれる物質の量や光学特性を推定する高感度センサである。海色リモートセンシングは、1978年に打ち上げられた気象衛星Nimbus-7搭載の海色センサCZCS (Coastal Zone Color Scanner) による海洋植物プランクトンの観測が始まりであったが、本格的には1996年以降で、ADEOS「みどり」のOCTS (Ocean Color and Temperature Scanner)、OrbView-2のSeaWiFS (Sea-Viewing Wide Field-of-View Sensor) およびAquaのMODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer) によって観測が継続されてきた。

これらのセンサの空間解像度は約1kmであっ

たが、現在の12機の海色の衛星センサで高い時間・空間解像度を有しているのは、「しきさい」のSGLIである(2日、250m)。LANDSAT-8のOLI(Operational Land Imager)やSentinel-2のMSI(Multispectral Imager)の空間解像度はそれぞれ30 m、10 m～60 mと高いが、これらのセンサは陸域用に開発された高解像度センサで、時間解像度はそれぞれ16日、5日と低い。「ひまわり」は時間解像度がもっとも高い(10分)が気象衛星のため、海色観測には限界がある<sup>8)</sup>。

### 3. 衛星リモートセンシングの活用

#### (1) クロロフィルa濃度による赤潮の検知と追跡

2021年9月中旬に北海道東部の太平洋沿岸で発生した赤潮については、当社でも日々の報道から被害状況を注視するとともに、「しきさい」を利用してクロロフィルa濃度の分布域を追跡した(図1)。最初の報道は、9月17日の釧路市桂恋漁港の海水の変色であったが、9月末には赤潮による漁業被害が根室から釧路、十勝、そして日高までの海域に広がった(表3)。衛星データによるクロロフィルa濃度の高濃度域の動きは、新聞報道による赤潮の発生と漁業被害の状況とほぼ一

致していた。北海道大学が2021年10月6～12日にかけて襟裳岬西岸から厚岸沖で実施した調査においても、表面海水中に出現したカレニア・セリフォルミスの細胞数密度とクロロフィルa濃度の間には有意な正の関係が観察されている<sup>9)</sup>。

衛星リモートセンシングを用いた有害藻類の検出手法については、瀬戸内海のカレニア・ミキモトイ(*Karenia mikimotoi*)<sup>10)</sup>、有明海のシャトネラ(*Chattonella*)<sup>11)</sup>などを対象としたAqua/MODISによる開発事例がある。これらの有害藻類の検出には、殻の有無などの形態や細胞内の色素に由来する分光特性を利用することが多い。検出精度は観測センサの空間解像度や分光特性に依存するが、今回の北海道の赤潮の原因種であるカレニア・セリフォルミスの検出については、Aqua/MODISよりも空間解像度が高く、海色用途のバンド数の多い波長帯を有する「しきさい」を用いた試みがなされている<sup>12)</sup>。

赤潮の検出は直接的な防除対策とはならないが、原因種が優占する水塊を衛星データにより検出し、赤潮ほど高密度になる前に、事前に準備した何らかの防除対策を施すことが重要であると考えられている<sup>9)</sup>。

表3 北海道東部におけるクロロフィルa濃度の分布状況と赤潮の発生状況

衛星データによるクロロフィルa濃度の分布状況	新聞報道による赤潮の発生と漁業被害の状況
9月16日：道東海域のクロロフィルa濃度は沿岸よりも沖合で高く、沖合では10mg/m <sup>3</sup> 以上の濃度の分布が確認された。	9月17～20日：釧路市の桂恋漁港で、海水が茶褐色に変色する赤潮が発生していたことが水産研究・教育機構釧路庁舎(釧路市)の調べで分かった。13日ごろから庁舎で飼育するベニザケやウニなどが相次いで死んだ。17日に赤潮の原因となるカレニア・ミキモトイなどのプランクトンの増殖を確認。(北海道新聞、9月25日)
9月19日：釧路市の桂恋漁港沿岸で10mg/m <sup>3</sup> 以上のクロロフィルa濃度が接岸した。	9月23日：大樹町内では漁港内の海面に赤い濁りが見られるようになった。(十勝毎日新聞、9月27日)
9月23日：十勝沿岸の厚内漁港、大津漁港および大樹町沿岸で10mg/m <sup>3</sup> 以上のクロロフィルa濃度が確認された。	9月25日：十勝管内豊頃町の大津漁港で、定置網漁で水揚げされた秋サケ1,300匹以上が死んでいたことが分かった。(北海道新聞、9月26日) 浦幌町の厚内漁港や大樹町内の漁港でも赤潮が確認された。
10月9日：このような10mg/m <sup>3</sup> 以上のクロロフィルa濃度の分布が北海道東部の太平洋沿岸域を覆う状況は10月9日まで確認された。	9月29日：赤潮は釧路管内厚岸町から日高管内えりも町付近の沿岸の広い範囲で、29日現在も発生している。(北海道新聞、9月30日)

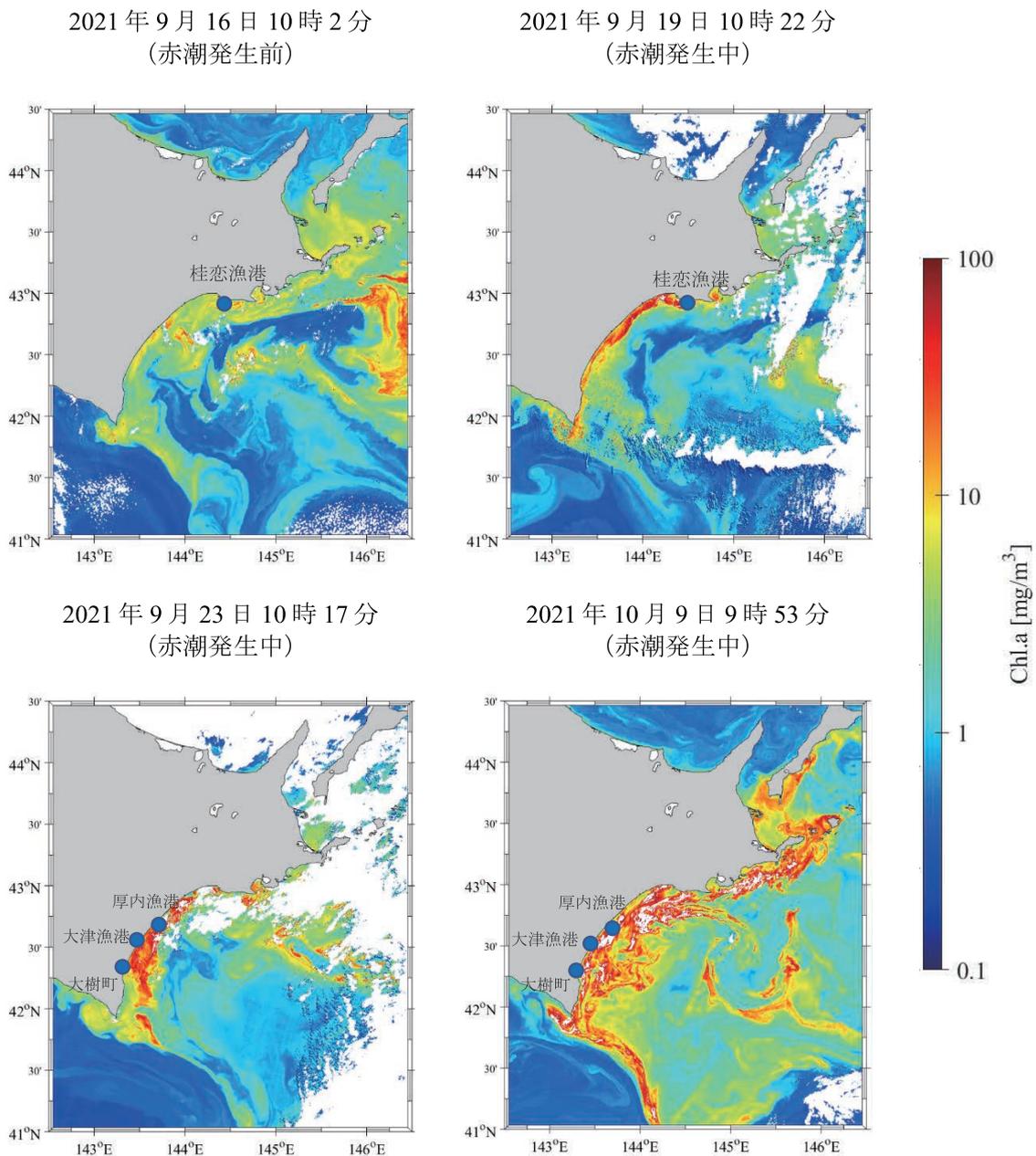


図1 人工衛星「しきさい」の観測データから作成した  
北海道道東の太平洋沿岸で発生した赤潮期間におけるクロロフィルa濃度の分布  
(数値データ提供:SGLI準リアルデータ提供サービス (JAXA))

## (2) 基礎生産量の推定

海洋の植物プランクトンが担う基礎生産は、海洋生態系の食物網の基礎であり、動物プランクトンや魚介類などの餌料環境を支える重要な役割を果たしている。また、地球温暖化など環境問題への社会的関心が高まるなか、大気中のCO<sub>2</sub>の主要な吸収源である海洋の炭素循環を把握するうえでも、基礎生産を見積もることが重要である。

海洋の基礎生産の測定は、船舶観測におけるC<sup>13</sup>を用いた現場法あるいは疑似現場法などで測定されていたが、人工衛星による推定が可能となったのは、前述したとおり1978年に打ちあがったNimbus-7に搭載されたCZCS以降である。衛星リモートセンシングによる基礎生産量の推定アルゴリズムについては平譚ら<sup>13)</sup>が取りまとめている。海洋の純基礎生産量は、単位時間あたりに、ある深度に生息する植物プランクトンに吸収され

た光子エネルギーが、光合成回路に伝達され、有機物として固定された炭素量として表される。クロロフィルaは光合成に必須の色素であると同時に植物プランクトンの現存量の指標となるため、一般に純基礎生産量の推定には「クロロフィルa濃度」を使う。また、植物プランクトンの活性に重要な環境条件として考えられる項目としては、「水温」と光合成のエネルギー源である「光（光合成有効放射など）」がある。本来は栄養塩濃度も

基礎生産を決定する重要な要因であるが、残念ながら栄養塩を衛星リモートセンシング技術で直接測定するのは困難であるため、水温等の影響に含まれていると仮定されている<sup>14)</sup>。基礎生産推定モデルとしては、光合成に有効な「波長」・日照「時間」・有光層「水深」をあらかじめ積分したVGPM (Vertically Generalized Production Model) モデル<sup>15)</sup>が比較的多く利用されている。Kameda and Ishizaka<sup>16)</sup>はVGPMモデルがクロ

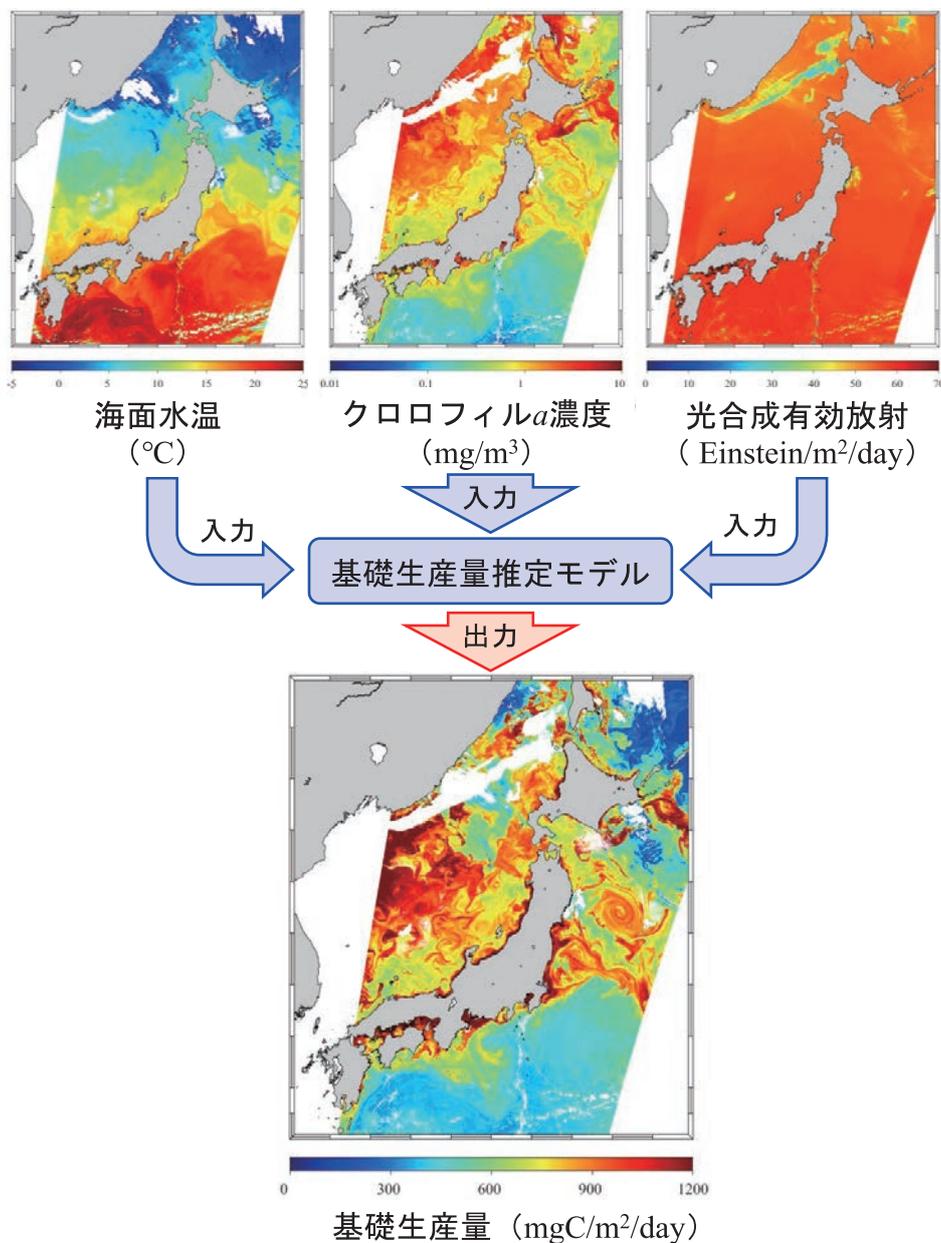


図2 人工衛星「しきさい」の海面水温、光合成有効放射およびクロロフィルa濃度データから推定した日本周辺海域における基礎生産量 (2018年4月29日10時21分)  
(数値データ提供:SGLI準リアルデータ提供サービス (JAXA))

クロロフィルa濃度の高い場所で過大になることに着目し、日本周辺海域のデータを付け加えて再解析を行い、水柱内最大光合成活性が水温だけでなくクロロフィルa濃度に依存していることを明らかにし、日本周辺海域の基礎生産の推定精度を向上させた。

当社において、人工衛星「しきさい」の海面水温、光合成有効放射およびクロロフィルa濃度を入力データとし、Kameda and Ishizakaモデル<sup>16)</sup>を用いて日本周辺海域の基礎生産量を推定した例を図2に示した。三陸沖の親潮と黒潮の混合域や、紀伊半島沖の黒潮蛇行流路の内側等で基礎生産量が高い様子が分かる。前述したように、「しきさい」は、時間解像度2日、空間解像度250mと従来衛星よりも時空間解像度が高い。そのため、漁業権が設定されている内湾・沿岸域の漁場においても、魚介類の餌料環境を広域的かつ経時的にモニタリングできると考えられる。

#### 4. サロマ湖における当社の漁業モニタリングの事例

当社では平成29(2017)年度よりサロマ湖養殖漁業協同組合が運営する「サロマ湖関連情報集約システム」の事業に参画し、リアルタイム情報の発信システムの構築を含めたホームページの作成と保守管理を担当している。

サロマ湖は、ホタテガイ養殖発祥の地であり、現在では湖面の50%以上がホタテガイとカキの養殖に利用されているほか、外海に放流するホタテ稚貝の生産漁場にもなっている。サロマ湖養殖漁業協同組合は、湖の漁場環境と漁業資源を包括的に管理し、永続的に利用することを目的として、常呂、佐呂間、湧別の3漁協によって設立された組織である<sup>17)</sup>。

組合のホームページでは、サロマ湖周辺のアメダスなどの気象観測所における気温、風向・風速のほか、湖内に毎年5～10月に設置する水質観測ブイによる水温、塩分などのリアルタイム情報

(毎正時更新)を分布図などで公開している(図4)。また、組合では、サロマ湖内と外海の漁場環境の調査、ホタテガイ養殖生産に係わる各種調査の結果を「養殖センターだより」にとりまとめ組合員に速報している。この「養殖センターだより」は過去のバックナンバーも含めてホームページに掲載しているが、年間の発行数は約60回に達している。調査の内容を紹介すると、ホタテガイ養殖に係わる調査では、4～6月には産卵時期を推定するための「生殖巣熟度調査」、採苗器投入時期を決定するための外海と湖内における「ラーバ(浮遊幼生の分布)調査」、5～7月には「採苗付着状況調査」、4～11月には「ホタテガイの成長モニタリング調査」を実施している。漁場環境に係わる調査では、ホタテガイの生育に影響を及ぼす水質項目として、4月には低塩分水(<30)、水温が上昇する7～9月には高水温(22℃以上)と底層の貧酸素(<5mg/L)の出現状況を、湖内中央部で実施する水温、塩分、溶存酸素の鉛直観測で監視している。サロマ湖が結氷する冬季には、「オホーツク海流水分布状況」、「湖内結氷状況」について組合員に情報を提供している。

このように、サロマ湖のホタテガイ養殖で必要となる漁場環境情報は多岐にわたる。当社では、サロマ湖情報集約システムの利便性を高めるため、「しきさい」による漁場環境情報の提供を検討している。「しきさい」の空間解像度(250m)は、従来の人工衛星よりも高い。例えば、MODIS(1km)と比較すると16倍、サロマ湖の面積152km<sup>2</sup>で考えるとデータ(メッシュ)数は152から2,432となり、衛星データによる広域情報に加え、沿岸域のローカルな情報として空間データを切り出すことも可能となる。サロマ湖の漁場環境モニタリングに適用可能な衛星データとしては、ホタテガイ採苗期における湖内と外海の水温、養殖ホタテガイや養殖カキの餌料環境の指標となるクロロフィルa濃度あるいは基礎生産量、湖内の結氷状況などがあげられる。これらの情報を

漁業生産に生かすためには、漁業関係者との情報交換によって、どのような情報を、どのタイミングで、どのように可視化し、提供するかを検討する必要がある。また、水質観測ブイや現地観測によるデータとの相互比較によって、衛星データの精度と有効性を検証し、信頼性の高い情報提供

に努めなければならない。

当社では、今後とも現場の漁業関係者との対話を継続し、漁業生産の維持・拡大に貢献すべく、衛星リモートセンシングによる漁場環境モニタリング手法の開発と情報システムへの実装に取り組む所存である。

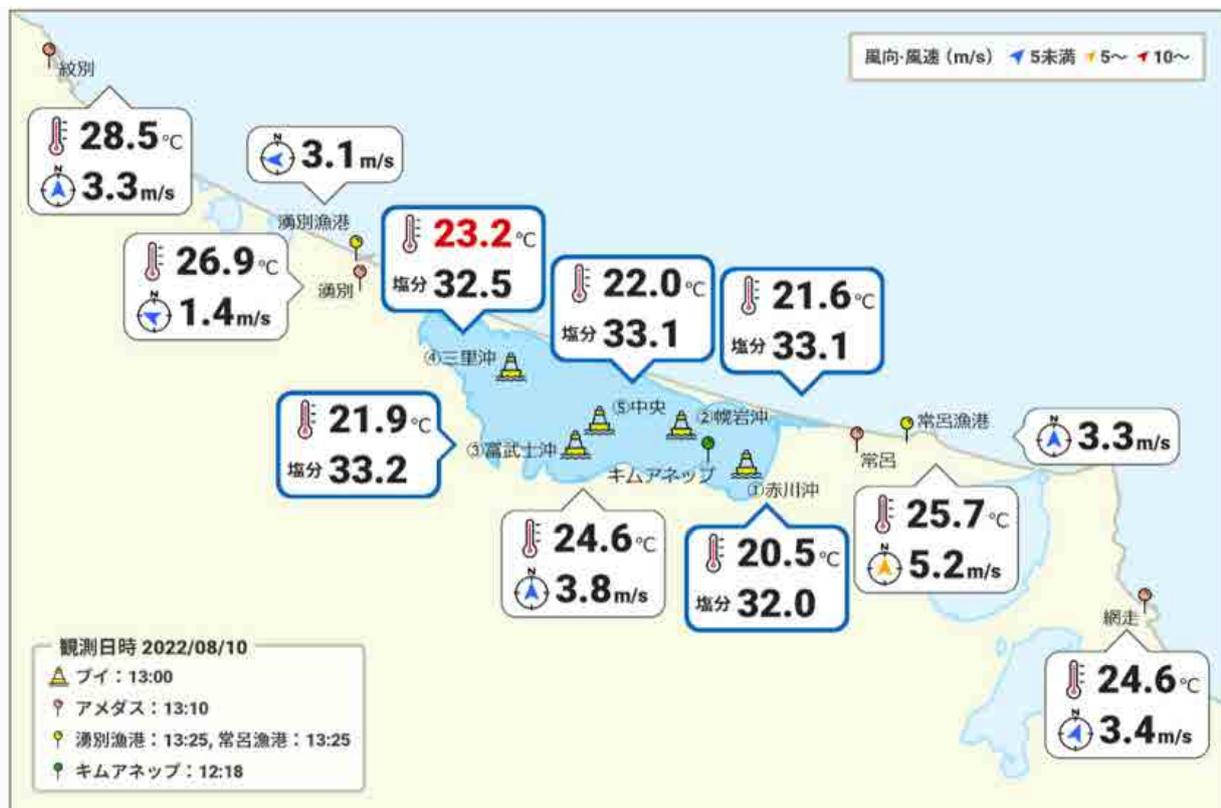


図4 「今日のサロマ湖」(2022年8月10日13時) サロマ湖養殖漁業協同組合ホームページ<sup>17)</sup>

水質観測ブイ (赤川沖、幌岩沖、富士沖、三里沖、中央:計5基)の表層の水温・塩分、アメダス観測所 (紋別、湧別、常呂、網走:計4カ所)とキムアネップの気温と風向・風速のほか、湧別漁港と常呂漁港の風向・風速を毎正時に更新している。三里沖の水温23.3°Cが赤字で表示されているのは、養殖ホタテに影響する高水温 (22°C以上)の出現を示すアラートである。

## 参考資料

- 1) 北海道水産林務部水産局水産振興課：太平洋海域における漁業被害の概況。(令和4年2月28日現在)  
[https://www.pref.hokkaido.lg.jp/fs/6/6/1/9/7/7/0/\\_/2022\\_02\\_28\\_higaiyoukyou.pdf](https://www.pref.hokkaido.lg.jp/fs/6/6/1/9/7/7/0/_/2022_02_28_higaiyoukyou.pdf)
- 2) 北海道大学 PRESS RELEASE：道東沖赤潮の横断観測にはじめて成功.

[https://www.hokudai.ac.jp/news/pdf/211018\\_pr.pdf](https://www.hokudai.ac.jp/news/pdf/211018_pr.pdf)

- 3) Mitsunori Iwataki, Wai Mun Lum, Koyo Kuwata, Kazuya Takahashi, Daichi Arima, Takanori Kuribayashi, Yuki Kosaka, Natsuki Hasegawa, Tsuyoshi Watanabe, Tomoyuki Shikata, Tomonori Isada, Tatiana Yu. Orlova, Setsuko

Sakamoto: Morphological variation and phylogeny of *Karenia selliformis* (Gymnodiniales, Dinophyceae) in an intensive cold-water algal bloom in eastern Hokkaido, Japan in September–November 2021. *Harmful Algae*, 114, 2022.

- 4) 北海道水産林務部水産局水産振興課: 令和3年度北海道赤潮対策緊急支援事業(委託研究)の成果報告について。(令和4年4月21日)  
[https://www.pref.hokkaido.lg.jp/fs/6/6/1/9/7/7/2/\\_/R3公表用成果資料RC.pdf](https://www.pref.hokkaido.lg.jp/fs/6/6/1/9/7/7/2/_/R3公表用成果資料RC.pdf)
- 5) 可知 美佐子, 今岡 啓治, 前田 崇, 奥山 新, 直木 和弘, 堀 雅裕, 笠原 希仁, 下田 陽久, 沖 大幹: 第一期水循環変動観測衛星「しずく」(GCOM-W1)の概要と初期校正検証結果. *日本リモートセンシング学会誌*, 33 (4), 274-282, 2013.
- 6) 齊藤 誠一, 高橋 文宏, 五十嵐 弘道: 水産分野におけるリモートセンシング利用の現状・課題・展望. *日本リモートセンシング学会誌*, 41 (2), 189-199, 2021.
- 7) 斎藤克弥: 水産海洋分野の衛星リモートセンシングとICT. *水産振興*, 52 (9), 1-59, 2018.
- 8) 日本リモートセンシング学会: 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. *海洋デジタル社会の構築事業 資料 2021-2*.  
[https://www.spf.org/global-data/opri/visual/rep02\\_vis\\_satellite.pdf](https://www.spf.org/global-data/opri/visual/rep02_vis_satellite.pdf)
- 9) 山口 篤, 濱尾 優介, 松野 孝平, 飯田 高大: 2021年秋季北海道太平洋沿岸における有害赤潮藻*Karenia selliformis*の水平分布および植物プランクトンの群集構造. *水産海洋研究*, 86 (2), 41-49, 2022.
- 10) Eko, Siswanto., Joji, Ishizaka., Sarat, Chandra, Tripathy., Kazuyoshi,

Miyamura: Detection of harmful algal blooms of *Karenia mikimotoi* using MODIS measurements: A case study of Seto-Inland Sea, Japan. *Remote Sensing of Environment*, 129 (15), 185-196, 2013.

- 11) Chi Feng, Joji Ishizaka, Katsuya Saitoh, Takayuki Mine and Hirokazu Yamashita: 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.*, 12 (9), 1504, 2020.
- 12) 石坂 丞二, 村上 浩, 飯田 高大, 山口 篤, 有馬 大地, Eko Siswanto: しきさい (SGLI) を用いた北海道沖 *Karenia selliformis*赤潮の検出. *日本海洋学会 2022年度秋季大会 口頭発表*.
- 13) 平譯 享, 高尾 信太郎, 鈴木 光次, 西岡 純, 渡邊 豊, 伊佐田 智規: 衛星による海洋基礎生産力の推定. *海の研究*, 26 (3), 65-77, 2017.
- 14) 石坂丞二: 海洋リモートセンシング第4回基礎生産. *日本リモートセンシング学会誌*, 22 (4), 457-461, 2002.
- 15) Behrenfeld, M. J., and P. G. Falkowski: Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration. *Limnol. Oceanogr.* 42, 1-20, 1997.
- 16) Kameda, T., and J. Ishizaka: Size-fractionated primary production estimation by a two-phytoplankton community model applicable to ocean color remote sensing. *J. Oceanogr.*, 61, 663-672, 2005.
- 17) サロマ湖養殖漁業協同組合ホームページ  
<http://saromako.org/index.html>