

水産振興

水産海洋分野の衛星リモート センシングとICT

一般社団法人 漁業情報サービスセンター
漁海況部長 齋藤克弥



第 609 号
(第 52 卷 第 9 号)

編 集
発 行

一般財団法人 東京水産振興会

「水産振興」発刊の趣旨

日本漁業は、沿岸、沖合、そして遠洋の漁業といわれるが、われわれは、それぞれが調和のとれた振興があることを期待しておるので、その為には、それぞれの個別的な分析、乃至振興施策の必要性を、痛感するものである。坊間には、あまりにもそれぞれを代表する、いわゆる利益代表的な見解が横行しすぎる嫌いがあるのである。われわれは、わが国民経済のなかにおける日本漁業を、近代産業として、より発展振興させることが要請されていると信ずるものである。

ここに、われわれは、日本水産業の個別的な分析の徹底につとめるとともにその総合的視点からの研究、さらに、世界経済とともに発展振興する方策の樹立に一層精進を加えることを考えたものである。

この様な努力目標にむかってわれわれの調査研究事業を発足させた次第で冊子の生れた処以、またこれへの奉仕の、ささやかな表われである。

昭和42年7月

財団法人 東京水産振興会
(題字は井野碩哉元会長)

目次

水産海洋分野の衛星リモートセンシングとICT

第609号

1. はじめに	1
2. 日本をとりまく漁業の現状	4
3. 漁業に利用される衛星データ	7
4. 漁場探索への応用	29
5. GISとリモートセンシングと漁業	36
6. エビスくんの利用実証について	44
7. ユーザーからの意見とユーザーから期待される衛星情報	50
8. おわりに	55
9. 参考文献	56

さいとう かつや
斎藤 克弥

【略歴】

▷1989年東海大学海洋学部卒、1990年社団法人漁業情報サービスセンター入社、2003年北海道大学大学院水産科学研究科博士課程後期修了、水産科学博士。2015年より一般社団法人漁業情報サービスセンター漁海況部部长。専門は衛星海洋学、水産海洋学。衛星データやGISの水産海洋分野への応用研究に従事。海洋学会会員、リモートセンシング学会会員。リモートセンシング学会理事。

水産海洋分野の衛星リモートセンシングと ICT

一般社団法人 漁業情報サービスセンター
漁海況部長 斎藤 克弥

1. はじめに

「水産振興」に漁業情報サービスセンター（以下 JAFIC という）の為石博士（前専務理事）が、「衛星・航空リモートセンシングの水産への応用」と題して寄稿されたのが平成 6 年 6 月の第 318 号です。リモートセンシングの漁業への応用を、当時の技術開発を中心に総括的に説明した内容でした。当時の世相は、1990 年代に入ってバブルが崩壊し、いよいよ日本経済の低空飛行が始まった時期でした。そんな時代に、水産での衛星を利用した「新しい可能性」を分かりやすく説明しました。

それから 24 年の歳月が過ぎました。この 24 年で日本の漁業を取り巻く環境は劇的に変化しています。直近でも 2017 年 6 月に、将来の世界の漁業と海の利用に関する方向性を決める重要な会議である**国連海洋会議**が開催され、海洋汚染や IUU 漁業など幅広い課題が議論されています（笹川平和財団、2018）。

先端技術としての**衛星リモートセンシング**も劇的な技術革新が起きています。民生利用では数十センチの解像度、軍事利用では数センチの解像度で衛星から地球を観測できると言われています（デジタルグローブ社の WorldView 等、<https://www.digitalglobe.com/>）。解像度以外にも技術開発が大幅に進んでおり、海色や集魚灯などこれまで衛星では見えなかったものが衛星から見えるようになっていきます。

船側の設備も劇的に変わっています。洋上で漁船がパソコンを使って漁

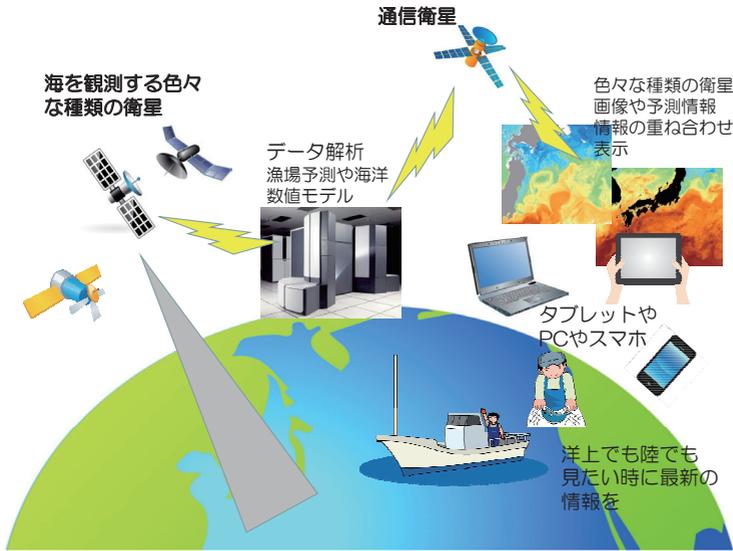


図1 衛星リモートセンシングと漁業の今

場探索するのは言うに及ばず、携帯電話、タブレット端末などを活用して手軽に海や天気の情報を得るといふ、24年前だったら夢のようなことが、今は浜で普通に行われています。今のイメージを図1に示してみました。

本稿では、最新の衛星データの漁業への応用を紹介しつつ、トレンドとなっているビッグデータ、GIS、AI などについても紹介していきます。人工衛星、リモートセンシングという、今でもまだ難しいという認識を持つ方も多数います。本稿では、技術用語やキーワードに分かりやすい説明を付加するようにしました。興味のあるキーワード説明だけ読んで面白くように書いてあります。

🔑 キーワードの説明

魚と人工衛星

これがなぜ繋がるのか、ピンとこない方もまだ多数います。漁師さんは漁場を探すときに海水温などを参考にします。魚は種類や時期によって獲れる水温が分かっているからです。この海水温を測るのに人工衛星を使うわけです。

リモートセンシング

直訳すると遠隔探査。離れた場所から何かを探査することです。飛行機で探査する場合は航空機リモートセンシング、衛星なら衛星リモートセンシングです。魚群探知機も広い意味ではリモートセンシングです。

人工衛星

「機能をもった人工天体」といいます。通信を行うもの、海を観測するもの、ハッブル宇宙望遠鏡のような宇宙を観測するものなど色々あります。大きいものは数トン、最小では4gというものまであります。人工衛星は意外に知られていませんが、寿命があります。油切れや充電電池の劣化が起きるのです。

国連海洋会議

国際連合広報センター (<http://www.unic.or.jp/>) にも日本語で詳しく書いてあります。本文中に挙げてある海洋白書2018は更に分かりやすく書かれています。途上国と先進国の海に対する考え方の違いなど、興味深い記述がたくさんあります。

ビッグデータ

実は定義が結構曖昧です。一般的にビッグデータの要件は3V (Volume、Velocity、Variety) と言われます。漁船が測る水温は1点のデータですが、約15万隻のすべての日本漁船が毎日1回水温観測したら1年で集まるデータの数は実に54,750,000点のデータ (Volume、Velocity) になります。水温以外にも漁場の情報、魚価の情報などあらゆる情報 (Variety) などが1か所に集められたら、それは極めて有益なデータセットになります。これがビッグデータです。これはもう人が解析できる限界を超えてしまうので、AIを活用するわけです。

AI

人工知能。昔から研究されてきましたが、ビッグデータと相まって急激に技術開発が進んでいます。大量のデータをコンピュータが学習して法則性を見出し、最適な回答を出してきます。ここで魚がとれる！という予報をAIが行うのも不可能ではなくなりつつあります。

GIS

地理情報システム(Geographical information system)といいます。地図にいろいろな情報を乗せて解析するシステムで、Google Mapなどはその好例です。最近では「G空間」と呼んで政府も積極的にGISの利活用を推進しています。しかし海のGISは陸のGISにくらべて相当遅れています。

2. 日本をとりまく漁業の現状

日本の排他的経済水域 (EEZ) の面積は世界第6位の広さがあります(農林水産省、水産白書2014)。陸地面積は世界第61位(CIA, The World Factbook)です。ですから潜在的な国力は非常に高いといえます。

1996年の**国連海洋法条約**批准により日本は本格的なEEZ時代に入りました。この条約では、沿岸国はEEZを宣言できます。端的に言うと日本は世界で6番目の広さの海、そこに住まう水産生物や海底資源に対し管轄権を主張できるのです。しかし同時にEEZの生物資源の保存・最適利用促進の義務が課せられます。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、いわゆる**TAC (Total Allowable Catch)** 制度がスタートしました。更に2001年に制定された水産基本法により、日本は資源管理型漁業へ大きく舵を切りました。

水産基本法で求められる漁業は、魚をたくさん獲ろう！といった漁業ではなく、漁獲をコントロールして資源をうまく使おう！という漁業です。このような漁業では、正確に資源を把握し計画的に漁業を行うこと、効率

的に操業することが必要不可欠です。漁業大国日本では、民間企業が昔から効率的な漁業のための技術開発を推進してきました。その分野は多岐に渡り、LED 集魚灯のような漁具開発、網成りをモニターするセンサーがついた漁網、省エネエンジンの開発など様々です。ハードウェアの技術開発と同様に、ソフトウェアの技術開発も進められており、漁業の ICT 化も急速に進んでいます。ID 野球 (Important Data 野球) は 1990 年に当時ヤクルトの野村監督が提唱したスタイルですが、一部の漁業では ID 漁業と呼んでも良いほどに漁労技術の高度化が進んでいます。

日本海洋学会の会長を務められ、水産海洋学会を創設された宇田先生は、漁場位置やその短期的変化を予測する場合には、漁場付近の魚群量に加えて、漁場への来遊に関する情報を知る必要があります、後者には水温等の海況条件が重要である、としています (1940a,1940b)。古来より凄腕の漁師さんはこれを経験的に知っていました。この経験を数値化できれば、それはまさに ID 漁業です。ここで必要となるのが、正確な海水温の分布や海流の状況、植物プランクトン分布といった海の情報です。精度のよい海の情報を集められれば、漁場探索時間の短縮や安全操業に大きく貢献します。しかし、海は絶えず変化するので正確な把握は難しく、またその情報が迅速に漁師さんに届かなければ役に立ちません。漁師さんは魚と同じように情報の鮮度をとても気にします。このような観点では、常に海の状況をモニタリングできる衛星リモートセンシングは理想的な観測機器であり、漁業の ICT 化には必要不可欠といえます。

図 2 に海の衛星リモートセンシングの優位性や弱点をまとめました。衛星リモートセンシングは万能ではありません。海の中は観測できない、大気が障害になるなど、技術上の多くの問題があります。また、難しい、お金がかかるといった技術以外の問題もあります。しかし、そういう欠点を補って余りある情報が得られます。特に海を相手にする場合は優位性が顕著で、広いエリアを時々刻々リアルタイムでモニタリングし、何度も繰り返

返し観測できる測器は衛星だけと言えます。

優位性

- 広域を観測できる
- 瞬時に観測できる
- リアルタイムで観測できる
- 何度も観測できる
- 大量のデータが取れる

弱点

- 水の中は直接観測不可
- 海と人工衛星の間には大気があって、それが誤差などの原因になる
- お金がかかる
- 難しい？

図2 衛星リモートセンシングの利点と弱点

衛星リモートセンシングの技術開発によって、情報の種類が増えていることもポイントです。海水温に加え、今では植物プランクトンの分布、海流の分布など、いろいろなものが衛星から見るできるようになっています。併せて、**通信衛星**の高性能化も漁業にとって非常に重要です。少し前までは洋上通信といえば船舶電話かFAXのみで、洋上データ通信は極めて低速でした。ところが今は洋上で高速通信ができるようになりつつあります。情報の種類が増えることで、海況情報の情報量はどんどん増える傾向にあるので、これを船に送るための洋上の通信環境の高速化は、実は海を観測する衛星の技術開発と同じぐらい重要なのです。

🔑 キーワードの説明

EEZ

排他的経済水域。水産生物や海底資源に対し管轄権を主張できる海域です。面積1位はアメリカ、2位はオーストラリア、3位はインドネシア、4位はニュージーランド、5位はカナダです。ちなみにEEZ+領土の順位では日本は世界第9位、意外と広いのです。

国連海洋法条約

水産資源以外にも海底鉱物資源まで含めた広範囲をカバーする国際条約です。実はアメリカはこの条約を批准していません。

TAC

漁獲可能量。法律は1996年に制定されました。日本の水産の歴史で、複数の魚種について総量規制を行う初めての制度でした。TAC数量はABC(=生物学的可能漁獲量)とセットで考えられます。ABCは研究機関が分析しています。

ICT

ITとも言います。コンピュータやインターネットを使った技術やサービスの総称です。水産でも活用されていますが、農業や林業はさらに利用が進んでいます。無人トラクター、無人農場などは好例です。

通信衛星

船舶電話やデータ通信やBS放送を行う衛星の総称です。最近では漁船の乗組員により良い洋上就労環境を提供するため、こういった部分に投資する漁業会社も増えています。ただネックはやはり通信料です。

3. 漁業に利用される衛星データ

水産海洋研究の分野でも衛星リモートセンシングの重要性はかなり早くから言われてきました。Laurs et al. (2002) 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、広範囲で有効かつ強力なツールであるとしています。Laurs et al. (1984) は、1980年代にマグロの漁獲量と衛星で観測された水温・海色を比較解析し、衛星画像を活用することによる漁獲効率が上がることを示し、漁業現場での有効性を明らかにしました。日本周辺海域での漁業への応用研究では、Saitoh et al. (1986) や、Sugimoto and Tameishi (1992) が、衛星リモートセンシングで得られた海表面水温と漁場との比較を行って、衛星画像の漁業現場での有効性を示しています。

JAFIC では、1970 年代から衛星リモートセンシングの漁業への応用について技術開発を進めてきました（漁業情報サービスセンター、1977）。技術開発のスタート当初は、海面水温を精度よく推定することが目標で、沖合漁業を中心に研究開発が進められました。現在は衛星センサーの進歩によって、海面水温に加え海流や植物プランクトン量といった海に関する様々な情報を人工衛星で観測可能となっています。加えて、沖合から沿岸にシフトした研究開発が活発になっています（斎藤、2016）。また 1970 年代には、衛星データの解析は非常に専門的でしたが、1990 年代後半からコンピュータの進歩やインターネットの拡大で、誰でも容易に衛星データを入手・解析したりできるようになりました。これまでの大きな流れを図 3 に示します。

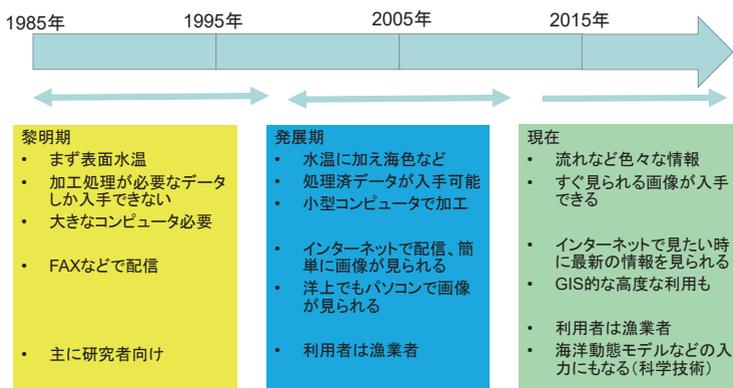


図3 水産での衛星リモートセンシングの利用の歴史

3.1 最も使われている表面水温画像

水産分野での衛星リモートセンシングの最も分かりやすい応用例は、漁場探索での衛星データの活用です。前述の宇田先生が書かれている中にも「水温等の海況条件が重要である」とあります。現在も漁場探索には衛星で観測された水温画像がよく利用されています。特にサンマやマグロなどの表層回遊魚の漁場探索では衛星水温が必須です。魚類は変温動物で体温を調節する機能がいないため、周囲の水温が直接体温に影響します。そのため、魚の分布

と水温分布の間には密接な関係があって、魚種による分布水温の差異が生まれます。これを適水温と呼んでいます。過去の研究でも魚種別に色々な適水温が報告されています（松原ほか,1979、落合ほか,1986）。

図4は2012年10月26日のNOAA衛星に搭載されたセンサーのAVHRRによって観測された海面水温画像です。衛星画像自体は単なる数字の配列のようなデータです。ただ、その数字が海面水温に変換できるわけです。一般的に衛星画像に色を付ける場合、虹の配色が使われます。水温の場合、青色は冷水、暖水は赤色を割り当てます。赤いマーカーは実際の漁場位置を示しています。丸いマーカーはカツオを対象とした竿釣りの漁場、三角のマーカーはサンマを対象とした棒受け網の漁場です。冷たい水を好むサンマは低水温域（青色域）、暖かい水を好むカツオは三陸沖の暖水域（赤色域）に漁場が分布しているのが分かります。注目すべき点がいくつかあります。まず40° N・142° 30' E付近のサンマ漁場です。親潮第一分枝の冷水が南下した部分に漁場が形成されています。ところで39° N・145° E付近に冷たい水が南下する最先端にサンマ漁場の▲がみられますが（黒矢印、これはサンマ調査を行っている調査船の位置です。カツオ漁場は金華山沖の暖水域に沿って形成されています。38° 30' N・142° E付近には金華山方向に暖水が伸びており、そこに漁場が形成されています。

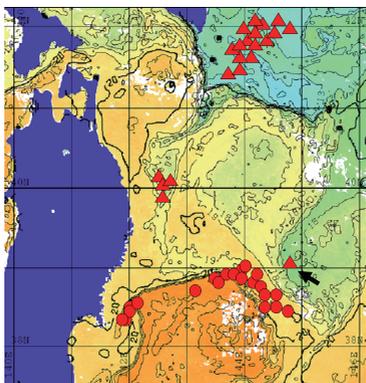


図4 2012年10月26日の東北沖衛星水温と漁場

NOAA/AVHRRが撮影。配色は暖色ほど暖かく、寒色ほど冷たい。▲はサンマ漁場、●はカツオ漁場。カツオ漁場のすぐ近くに孤立したサンマ漁場が見られるが（黒矢印）、これはサンマの調査を行っている調査船の位置。

特にカツオ漁場は水温が急激に変わる海域、等温線が込み入った前線域に漁場が形成されているのが分かります。暖流と寒流のように性質の違う水が接する海域には段差状の水温帯が形成されます。これを潮境や潮目と呼びます。潮境に漁場が出来るのは経験的に知られていますが、これは「北原の法則」と言います。大正期に発表されたこの知識は、今も漁場探索の基礎知識となっています（北原,1921）。階段状に水温が変化している場所を衛星から抽出する方法があります。周りに比べて水温が大きく変化している部分を抽出すればいいわけです。このような画像処理をフィルタ処理とといいます。図5に図4をフィルタ処理した画像を示します。ぐにゃぐにゃと水色の筋が多数見えますがこれが潮境です。

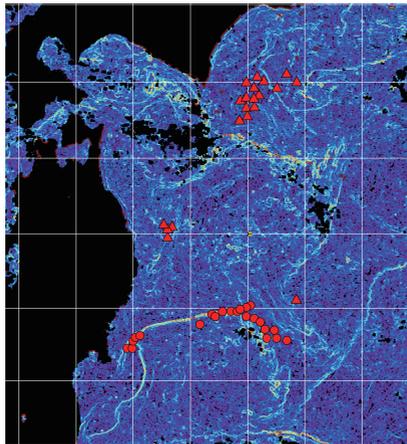


図5 図4から潮境を抽出した画像

2017年12月にJAXAはGCOM-C「しきさい」を打ち上げに成功しました。この衛星にはSGLIという高性能センサーが搭載されています。このセンサーは水温や植物プランクトンを観測しますが、最大の特徴は最小250mという解像度です。一般的に解像度が高くなると、見える範囲が狭くなり、撮影できるエリアが限られてきて、毎日データが得られなくなります。GCOM-C/SGLIは1日～2日に1度の頻度で、250m～1000mの解像度

で全球を観測します。これは海の色や温度を観測するセンサーとしては世界最高レベルです。図6に GCOM-C 「しきさい」 の撮影した2018年2月27日の日本周辺の水温図と拡大図を示します。非常に微細な水温の違いを見ることができます。直近でもっとも利活用が期待できる衛星センサーです。

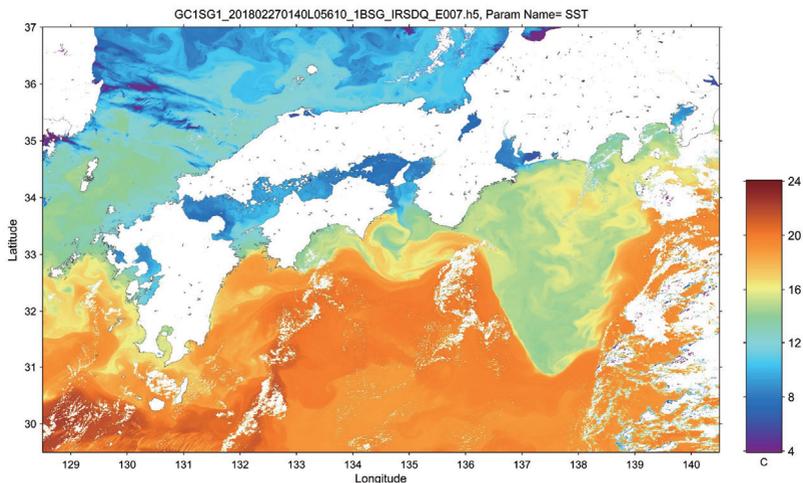


図6 GCOM-C/SGLI が撮影した水温画像 (JAXA 提供、精度については検証中)

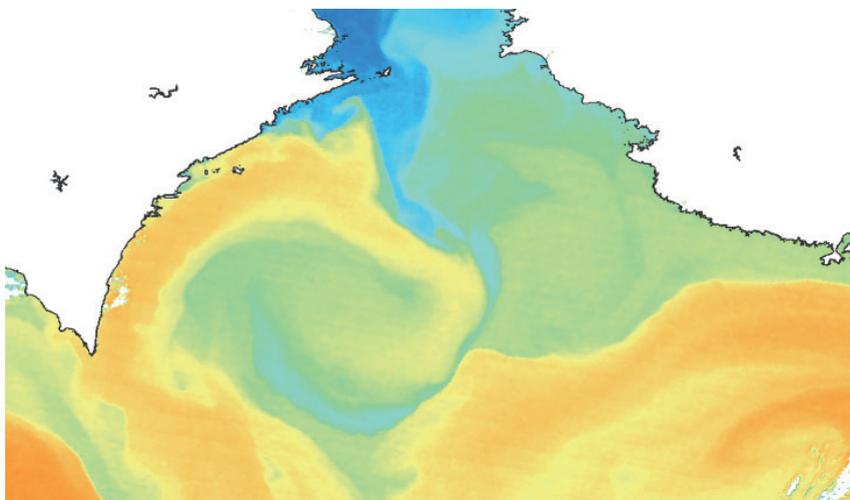


図6-2 紀伊水道を拡大表示したもの

🔑 キーワードの説明

NOAA/AVHRR

アメリカの衛星/センサーの名前。漁業で使う衛星の原点といえる衛星です。漁師さんが最低限必要とする性能、1日1回の観測、1kmの解像度、0.1~0.2℃の感度、それをこの衛星が決定しました。元々は大気を観測する衛星で、1960年代から続くアメリカの衛星計画の基幹を成しています。最近19号をもってNOAA計画は一度完了しましたが、NPPという衛星をNOAA-20号としてシリーズ継続しています。

北原の法則

潮境(潮目)では魚が集まる…学校の授業でも教えられる知識ですが、これを世界で最初に示したのは大正期の研究者の北原先生です。世界に誇る日本の研究成果です。さて、潮境はどこにできるか？性質の違う水が接する場所です。特に有名なのが親潮(冷たい、低塩分の水)と黒潮(暖かい、高塩分の水)が接する場所です。世界3大漁場と呼ばれている東北沖はこういう潮境が各所に発生します。

GCOM-C(しきさい)

2017年にJAXAが打ち上げた世界最高性能の衛星です。250mの解像度で水温とクロロフィル濃度を観測できます。2018年12月より正式に情報配信がスタートする予定です。

3.2 植物プランクトンがわかる海色画像

図7は図4と同日の2012年10月26日のTERRA衛星に搭載されたMODISセンサーが撮影した植物プランクトン(正確にはクロロフィルa)濃度画像です。植物プランクトン画像を含め可視光をベースに観測された海の画像を**海色画像**と呼びます。図4の水温とは全く違った分布パターンを見ることができます。海の色は時々刻々と変わります。最も分かりやすいのが赤潮です。では、海色はなぜ変わるのでしょうか？沿岸では海の色に影響を与えるものが多いため、一概に海の色は〇〇で決まる！と言えませんが、沖合では植物プランクトンの量が強く影響します(功刀, 2009)

ど)。少し乱暴な言い方ですが植物プランクトンが多ければ緑色、少なければ青（または黒）に見えます。筆者も大学時代に海洋観測をしていて、黒潮が本当に黒いことに驚いた記憶があります。それが東北沖や北海道沖に行くと黒ではなくやや緑がかった濁った海色に変化して行きます。

図7の配色は、寒色ほどクロロフィル濃度が低く、暖色ほど高い配色になっています。図4同様、丸のマーカ―はカツオ漁場、三角のマーカ―はサンマ漁場です。サンマが植物プランクトンの多い海域に分布、カツオは三陸沖の植物プランクトンの少ない海域に漁場が分布しているのが確認できます。特にカツオ漁場付近は、図4の水温では東西に広がる顕著な潮境がみられていますが、クロロフィル濃度画像では縞状のクロロフィル濃度の濃淡域が見られ、潮境のような段差とはなっていません。

図8にGCOM-C「しきさい」の撮影した2018年2月27日の日本周辺の植物プランクトン分布を示します。図8-2は有明海を拡大したものです。高解像度と高精度で河川の影響や諫早湾なども見ることが出来ます。海色は特に沿岸での利活用が期待されます。

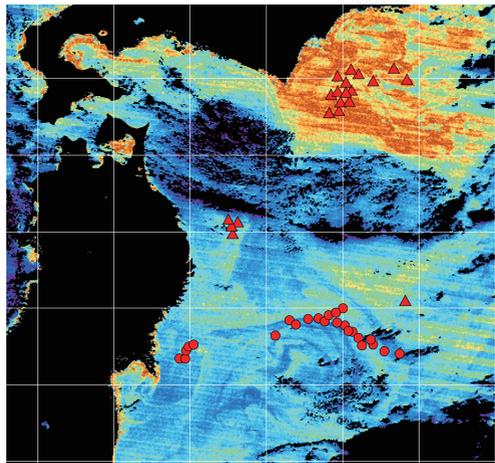


図7 2012年10月26日の植物プランクトン画像

MODISが撮影。配色は、暖色ほど植物プランクトンが多く、寒色ほど少ない。親潮域はプランクトンが多い。▲はサンマ漁場、●はカツオ漁場。

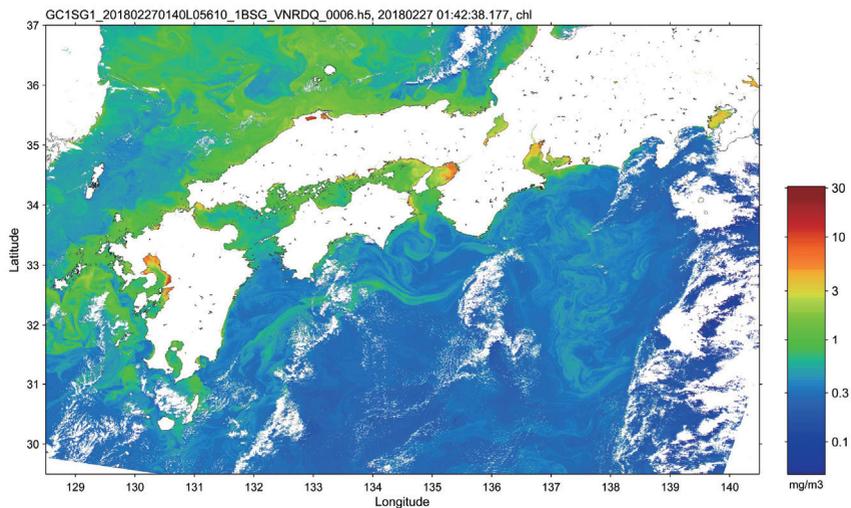


図8 GCOM-C/SGLIが撮影した植物プランクトン（下）画像（JAXA提供、精度については検証中）

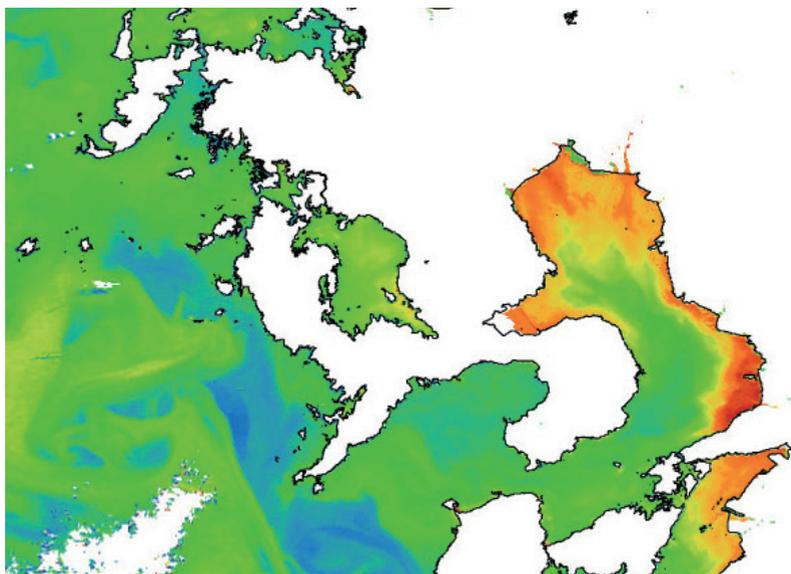


図8-2 有明海を拡大表示したもの

🔑 キーワードの説明

海色(かいしょく)

水色(すいしょく)と呼ぶ場合もあります。海色から植物プランクトンの分布を見ることができます。海のリモートセンシングでは水温と並んで早い段階から技術開発が進められてきました。植物プランクトンが増えると動物プランクトンが増える、それを食べる小魚が増えて、大きな魚が集まる、という壮大な物語を明らかにしてくれると期待されます。一般に水温が低いと植物プランクトンが多い傾向があり、親潮は栄養が豊富でプランクトンも豊富です。ちなみにリゾート地のエメラルドグリーンの海はきれいですが、あれは逆にプランクトンが少なくて光の通りが良いため海底の反射できれいに見えるのです。

3.3 海流や渦が分かる海面高度画像

海は海岸や船上からみると平坦に見えますが、実は海流や渦の影響で凸凹しており、山や谷があります。これを**海面高度**といいます。その高低差は1 m以上になる場合もあります(気象庁、2013)。高低差があるとそこに流れが発生します。天気図の高気圧、低気圧、風と似たイメージです。

図9は図4と同日の2012年10月26日の海面高度計による力学的海面高度画像です(University of Colorado, Colorado Center for Astrodynamics Research)。配色は暖色ほど海面高度が高く、寒色ほど高度が低くなっています。矢印は海面高度から推定した表面の平均的な流れです。マーカーは丸がカツオ漁場、三角がサンマ漁場です。海面高度計は下層に分布する中規模渦を見ることができるため(Chelton et al.2007)、下層の水塊構造の把握にも活用できます。図9でもカツオ漁場が渦のような流れに沿って形成されているのが確認できます。海面高度計による海洋観測の歴史は古く、1970年代から始まっていますが、漁業で利用されるようになったのは最近です。今ではカツオやマグロなどの高度回遊性魚種を対象とした漁業では、必要不可欠な情報となっています。また、流れがわかるので航路選定にも活用されます。

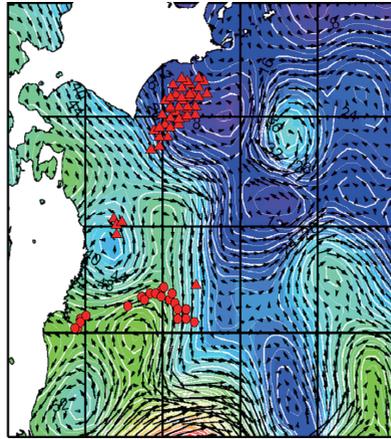


図9 2012年10月26日の海面高度画像と漁場

配色は暖色ほど海面高度が高く、寒色ほど低い。矢印は表面の流れ。
▲はサンマ漁場、●はカツオ漁場。

🔑 キーワードの説明

海面高度

海の気圧配置図と言えます。水温と並んで沖合漁業では必須の情報です。海面の高さは海底地形や海水の密度の違いや海流など様々な影響を受けます。海面高度計はこの高さを正確に計測します。海面の高い場所では、その下に暖水塊や暖流が分布している可能性が高いのです。では暖かい水はどこからくるのでしょうか？ 日射で温められるのはごく表面だけで、海面高度計に現れるような高さの変化は、海流など大規模な海水の動きが影響します。日本付近の上空に吹く偏西風のように、海には地球規模の大きな流れがあります。黒潮はその代表例で南から熱を運んでいます。ちなみに黒潮は周辺より1 mぐらい高いと言われています。

3.4 雲の影響を受けずに観測できるマイクロ波放射計

3.1で説明した水温図は、簡単に言うと赤外線カメラで海の温度を観測しています。しかし雲があると観測できません。温度はマイクロ波でも観測できません。マイクロ波放射計は温度によってマイクロ波放射が変わるのを観測します。このセンサーの最大の特徴は、雲の影響を受けにくいことです。

マイクロ波放射計の水産への応用の歴史は意外に長く、1997年打ち上げのTRMM/TMIに始まります。雲の影響を受けずに観測できるTRMM/TMIは画期的なデータを提供しました。筆者も初めてこの衛星データを見た時に、これで世界が変わるかもしれない!と感じたほどです。マイクロ波放射計は開発が難しいため、高度な技術を有する日本は世界的に強い優位性を持っています。強力なセンサーですが弱点もあります。マイクロ波自体は微弱な電波なので高解像度で観測できないのです。また電波ノイズの多い沿岸で観測が出来ません。しかし、曇りの日が継続する梅雨時や冬の日本海などでも雲の影響を最小限に水温データが得られます。現在もGCOM-W「しずく」/AMSR2は漁業操業、特に漁場探索を円滑に行う上で極めて有益なデータを提供しています。

図10はマイクロ波放射計TRMM/TMIと赤外波長放射計NOAA/AVHRRの比較です。左図の赤外画像では雲がかかって海面がほとんど見えていませんが、マイクロ波放射計では雲があっても右図のように海面水温の観測が可能となっています。図11はマイクロ波放射計と漁場との比較例です。

マイクロ波リモートセンシングは気象や陸域の観測でもよく使われています。3.3で説明した海面高度計もマイクロ波を利用しています。この他にも、海上風を推定する場合にはマイクロ波散乱計が使われます。図12にマイクロ波散乱計の画像を示します。海上風が強い場所は暖色、弱い場所が寒色となっています。海上風の衛星画像は古くから気象予報などで活用されてきました。

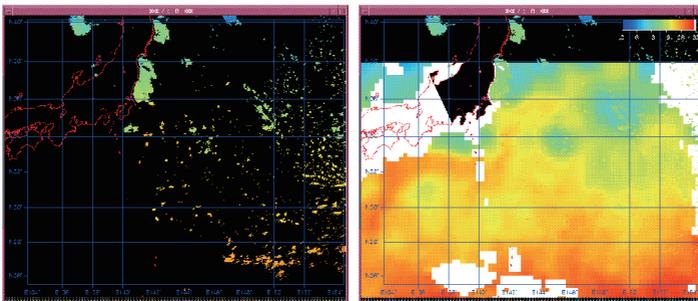


図10 同じ日に撮影されたNOAA/AVHRR水温図(左)とTRMM/TMI水温図(右)の比較
左図で黒い場所は雲の影響で水温の観測が出来ていないエリア

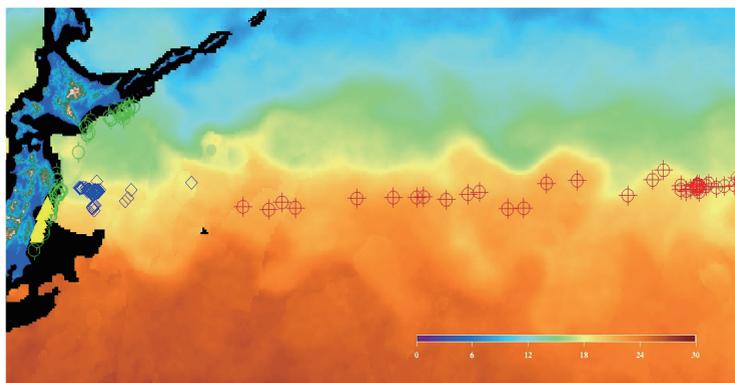


図11 マイクロ波放射計（AMSR-E）で観測された表面水温と漁場
 配色は暖色ほど暖かく、寒色ほど冷たい。赤は延縄などマグロ類の漁場、青はサンマ棒
 受け網漁場、緑はまき網漁場。

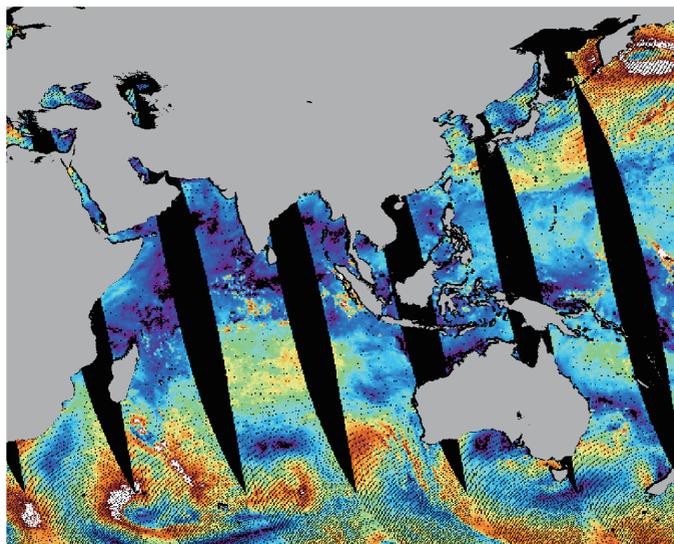


図12 2003年4月10日 ADEOS2/SeaWindsマイクロ波散乱計による海上風の画像(NASA
 のHPより)
 配色は暖色ほど海上風が強く（荒れている）、寒色ほど海上風が弱い（凪ている）。黒い
 エリアは観測のなかったエリア。

🔑 キーワードの説明

マイクロ波放射計

日本付近は雲が多いので、雲があると海を観測できない可視センサーや赤外線センサーにとっては鬼門といえるエリアです。これに対しマイクロ波放射計は雲の影響をあまり受けずに観測することができます。日本周辺で使うにはベストな衛星センサーです。解像度が悪いのですが、観測できるとできないでは雲泥の差です。ちなみに電子レンジと同じ波長です。

マイクロ波散乱計

これも歴史があり実利用の進んだセンサーで、海上風を観測できます。マイクロ波を発射して、その反射から海面の荒れ具合を画像化します。海面はなぜ荒れるのでしょうか？ほとんどの場合は風の影響です。風が強ければさらに海は荒れます。これを応用して海上での風の強さを推定しています。

GCOM-W「しずく」/AMSR2

2012年に打ち上げられた現在稼働しているマイクロ波放射計です。6年たってもなお、世界最高性能の衛星センサーです。この衛星センサーこそ継続的に打ち上げて日本がイニシアチブを取るべきであり、後継機の打ち上げがタイムリーに行われることが極めて重要です。

3.5 静止軌道衛星画像（ひまわり 8号）

静止軌道衛星ひまわりは誰でも知っている気象衛星です。天気予報にはなくてはならない衛星です。2014年に打ち上げられたひまわり 8号に搭載されているセンサー（AHI: Advanced Himawari Imager）は、それ以前のひまわりに搭載されていたセンサーに比べ大幅な性能強化が行われました。これにより高解像度化と、精度よく水温やクロロフィル濃度を観測できるようになりました。センサー自体は、3.1、3.2で説明した赤外線・可視域を観測するセンサーなので雲の影響を受けます。**衛星軌道**はとても重要で、静止衛星は常に日本周辺を観測する軌道を通っており、図2で示した優位性のうち、広域を常時観測できるという特筆すべき特徴を持ってい

ます。一方3.1～3.4で説明した衛星は、静止軌道ではなく**極軌道**という北極・南極間を周回する軌道を通っています。つまり常時日本の上空を観測しているわけではないのです。図13にひまわり8号が撮影した全域水温図を示します。ひまわり8号の場合、最短では2.5分に1回、データを取ることができます。つまり、2.5分ごとに起きる現象を観測することが出来る能力を持っています。2.5分おきに観測できれば、その間にどんどん雲が動いて、海の観測ができる可能性も高まります。解像度の向上も特筆すべき改善点で、図14に図13を拡大した東北沖の水温を示します。暖水塊や親潮などが明瞭に確認することができます。ひまわり8号以前では解像度が4kmと低かったため、このような鮮明な水温図を得ることが出来ませんでした。

しかし、ひまわり8号も万能とは言えません。一つは、2.5分おきに日本周辺を撮影しても、梅雨時や冬季の悪天候時には全く海を撮影できない期間が続くことがあります。そして、雲を見る分には良いのですが、海を見る場合にはまだ弱い部分があり、薄い雲や水蒸気の多い場所でのノイズを十分に除去しきれないのです。そのため、他の衛星データとの併用、現場（船舶観測等）データ

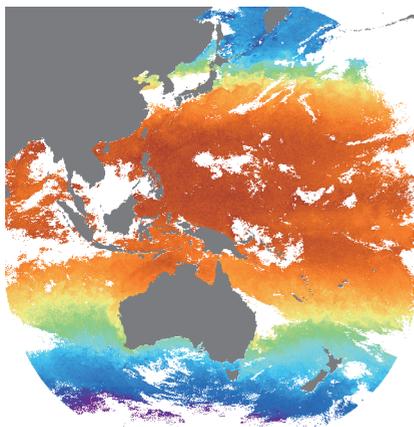


図13 ひまわり8号による2017年10月1日の全域水温画像

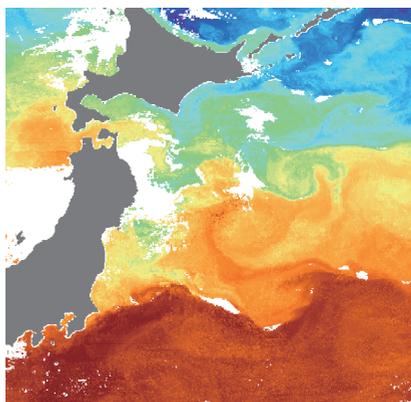


図14 ひまわり8号が撮影した2017年10月1日東北沖の水温

との比較検証は必須といえます。なお、ひまわりデータは一般財団法人気象業務支援センターから簡単に購入することができますが、データ量が膨大なのでその利用には注意が必要です。

🗝️ キーワードの説明

人工衛星の軌道

人工衛星にとって最重要事項の一つが軌道です。人工衛星は地球の近くにあれば、地球の引力に引かれてどんどん落下していきます。逆に地球から離れすぎると、今度は公転や他の星の引力を受けてどこかにいってしまいます。軌道選びと軌道制御は非常に重要です。

静止軌道衛星

衛星が地球から離れたり近づいたりしないで、地球の自転と同じ周期で回り続ける軌道を静止軌道といいます。力がバランスしている距離です。一般的に地上から36,000kmが静止軌道です。そんな離れたところから水温を観測できるひまわりは画期的な衛星です。

極軌道衛星

海を観測する衛星の多くがこの軌道です。北極から南極まで地球を縦に周回しています。高度はまちまちですが、一般的に地上からおよそ700kmぐらいの高度を飛んでいます。ちなみに国際宇宙ステーションは400kmの高度にあり、肉眼で見えることも可能のようです。このほか、日本版GPSとよばれる「みちびき」はなるべく日本の上空にいるように、準天頂軌道という変則的な軌道です。

3.6 夜間可視画像（集魚灯マップ）

アメリカでは軍事目的で打ち上げられている衛星がありますが、機密指定が解除されて民生利用が可能となった衛星に **DMSP** という衛星があります。この衛星は OLS という強力なセンサーを搭載していました。夜の雲を観測するためのセンサーだったので、夜間でもよく見えるように非常に高い感度を有していました。これにより雲以外にも夜の地球でユニークな

観測を多数行いました。代表的な例が森林火災の検知や、都市の光の強さを比較する試みなどです (Elbrighe 他、1997)。日本でも集魚灯の分布を観測するための研究が試みられました (Kiyofuji and saito, 2004)。

図 15 は 2014 年 8 月 16 日の NPP/VIIRS による DNB (Day/Night band) 夜間可視画像です。DMSP/OLS と同じく、夜間観測が可能なセンサーです。白いほど輝度が高く (明るい)、黒いほど輝度が低い (暗い) コントラストになっています。全体に弱い反射のグレー部分は雲がかかっている部分ですが、日本海の洋上に高輝度画素 (白い点) が多数分布しているのが確認できます。これはイカ釣り船などの集魚灯と考えられます。残念ながら光のデータだけでは漁業種類や正確な光力は分からないのですが、外国船や他船の操業位置など、秘匿性の高い位置情報を得られるため、漁師さんが注目する情報となっています。

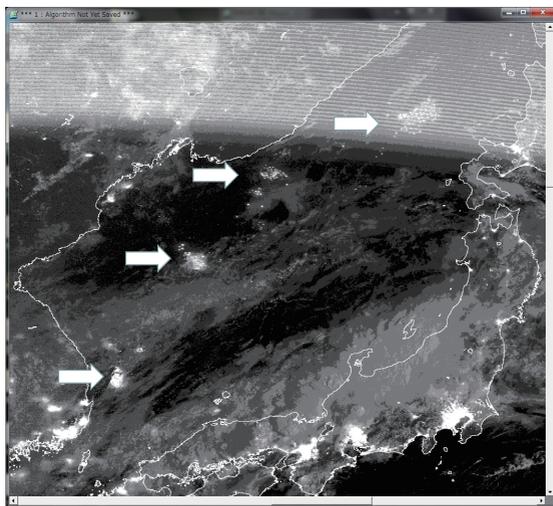


図 15 2014 年 8 月 16 日に NPP/VIIRS が撮影した DNB 画像 (夜間可視画像)
明るい場所は白、暗い場所は黒となっている。グレーのエリアは雲の反射。日本周辺は雲がかかっているが、白い矢印の部分が集魚灯と思われる明るい点。東京など都市圏も明るい。

🗝️ キーワードの説明

DMSP/OLS

アメリカの衛星/センサーで夜の雲を観測する目的の衛星センサーでしたが、森林火災や街の灯を観測することが可能とわかり、色々な研究に活用されるようになりました。集魚灯マップが作れるという、水産分野では画期的なセンサーでした。日本海のだ真ん中に東京並みに明るいエリアがあり、集魚灯のことを知らないアメリカの研究者が悩んだという話もあります。

NPP

アメリカの今後の極軌道衛星計画の核となる衛星です。いろいろな部分で世界の衛星のスタンダードといえる性能を持っています。

3.7 今後利用が進むと予想される高解像度画像

衛星リモートセンシングの応用が進んでいるのは、海よりも空や陸です。Google Earthなどは非常にわかりやすい例です。特に**陸を対象**としたリモートセンシングは、高解像度化が今も技術トレンドになっています。また大型衛星で高解像度撮影するのではなく、小型の安い衛星をたくさん打ち上げて高解像度撮影するのが大きなトレンドとなりつつあります。米国の Planet Labs 社が Google 社から衛星画像解析事業部門を買収するなど、宇宙ビジネスの持つ大きな可能性が伺えます。

ここ数年で、陸用の高解像度センサーを海に應用しようという流れが活発になっています（斎藤、2016 や作野、2016）。陸の衛星リモートセンシングのスタンダードとなっている衛星が LANDSAT で、15 m の解像度で観測できます。LANDSAT の 15m という解像度と、水産での標準的な 1km 解像度でどの程度見え方が違うかを図 16 に示します。左図では明石海峡大橋も見えます。図 17 は LANDSAT8 号に搭載されているセンサー OLI が撮影した山口県沿岸です。肉眼に近い色調整をしています。陸上で

はゴルフ場、海では沿岸・沖合の色の違いや船の航跡が確認できます。LANDSAT シリーズは TM というセンサーから海への応用が検討されてきました（香西、1996 など）。しかし元々コントラストのはっきりした陸を見るセンサーだったので、微細な海の変化を検知できませんでした。これが 7 号に搭載されたセンサーの ETM、8 号に搭載されたセンサーの OLI で感度が大幅に向上し、海での有用性が飛躍的に高まりました。図 17 の画像に海陸判別処理を加え、海で植生指標（NDVI）を計算した例を図 18 に示します。NDVI は陸上植物の活性を表すものですが、ここでは海に適用して、海の植物活性＝植物プランクトンと仮定しています。沿岸や島周りなどで NDVI が相対的に高くなっているのが確認できます。図 19 は有明海湾奥のノリの養殖場の画像です。特殊な合成処理により感度の違う物体を際立たせています。柳川沖でノリ網が鮮明に写っています。また船の航跡や船の分布も確認できます。

優れた性能を持つ LANDSAT ですが海で使う場合は問題がいくつかあります。最大のポイントは回帰周期です。LANDSAT の場合、1 度撮影してから次に撮影できるのは 16 日後になります。これは海のリモートセンシングでは大きな問題です。もし当日雲がかかっていたら、さらに 16 日待たなければなりません。陸向け衛星センサーの海への応用は似た様な問題を抱えています。もう一つは、海のだ真ん中では正確な緯度経度を得難いことです。陸の場合はビルなど目印となるものが多いため、正確な画像の位置補正ができますが、沿岸から少し離れると正確な位置補正が難しいのです。

色々問題も多い高解像度衛星センサーですが、今後の海のリモートセンシングにおいては重要なデータとなることは確実です。

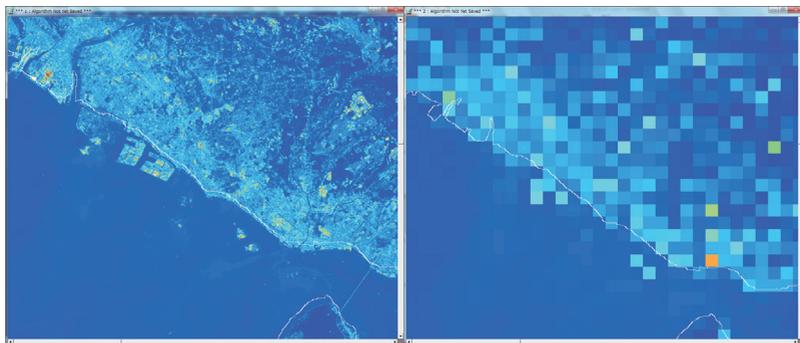


図16 15m解像度の衛星画像(左)と1km解像度の衛星画像(右)の違い
両方とも神戸エリア。左の図では右下に明石海峡大橋が確認できる。

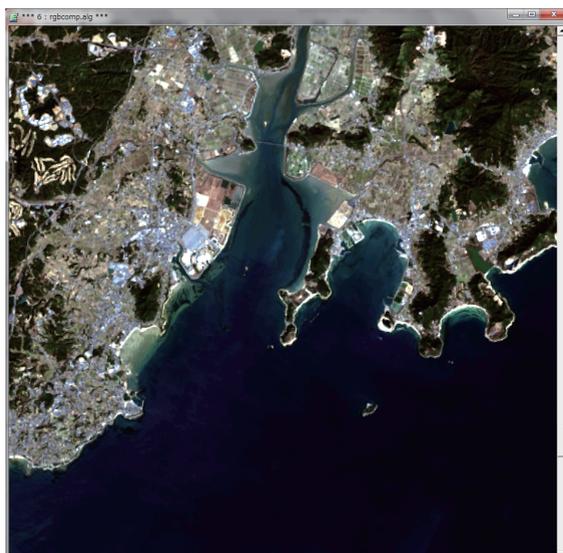


図17 2015年2月14日山口県沿岸のLANDSAT8のRGB合成画像
(R:ch4,G:ch3,B:ch.2、データは東海大学から)

RGB 合成は赤、緑、青の光の三原色にそれぞれの色を配色したもので、この図では人間の目で見える色に近い配色にした。陸ではゴルフ場など見えるが、海は青黒く、沿岸ではやや茶色がかった色が確認できる。

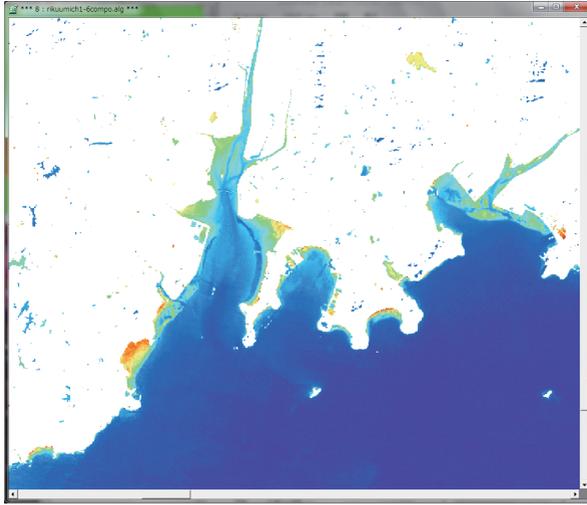


図18 2015年2月14日山口県沿岸のLANDSAT8のNDVI画像)

水と陸を分離後、可視光の波長間演算で植物の活性を算出する陸域データ処理の手法を海に適用した。

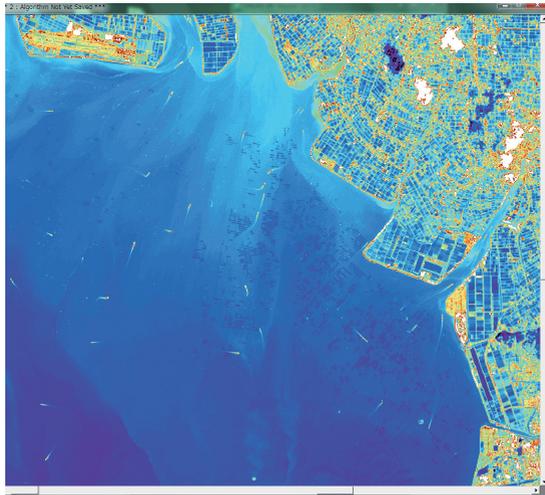


図19 2015年3月25日の有明海柳川沖のLANDSAT8画像(BAND8)

洋上では海苔の漁具がバーコードのように見える、また船が航跡波と一緒に確認できる。

🔑 キーワードの説明

陸の衛星リモートセンシング

海と陸ではいくつかの点で大きな違いがあります。研究対象にもよりますが、海は「時間変化が速い」ことが最大の違いです。陸の場合、建物や農地など対象が数時間単位で変わることがありません。そしてもう一つが現場（船舶観測等）データです。場所によりますが、陸なら簡単に現場データが取れますが、海だと現場に行くにはどうしても船が必要で、費用も時間もかかってしまいます。

LANDSATシリーズ

3.1で説明したNOAAが海を観測する衛星のスタンダードだとすると、陸観測衛星のスタンダードがLANDSATです。1972年に1号機が打ち上げられてから、今なお新しいセンサーを積んで新しいLANDSATが打ち上げられています。ちなみに5号機は28年も働き続けた鉄人の様な衛星です。

3.8 船の位置を把握する衛星 AIS (automatic identification system)

Google は 2016 年に Global Fishing Watch というサイトを開設しました。このサイトは画期的なサイトで、時間の遅れはありますが全世界の漁船位置 (AIS 等を設置している比較的大型の船が中心) を地図上で見ることが出来ます。この漁船位置情報のベースとなっているものが AIS です。元々は船同士の衝突を避けるためにお互いに船の情報を通信する装置ですが、使われている国際 VHF 波 (マリンバンドと呼ばれる) は直進性が強いので、これを人工衛星で受信することができ、衛星 AIS と呼ばれています。AIS および衛星 AIS の技術はあらゆる船舶の位置を把握できるため安全保障に直結した技術ですが、漁師さんは他船の位置がわかるので強い関心を持っており、将来的には漁業情報として水産の ICT 化に深く関わってくる可能性の高い技術です。

海外では衛星ビジネス大手が商用サービスを始めています。日本では 2012 年に JAXA が SDS-4 という小型衛星を打ち上げ、衛星 AIS の実験を成功させています。2014 年にもレーダーセンサーなどと組み合わせて打

ち上げており、このセンサーの重要性が分かります。図 20 は衛星 AIS と陸上局などで受信した AIS の全球マップです (<http://jp.shipfinder.com> より)。

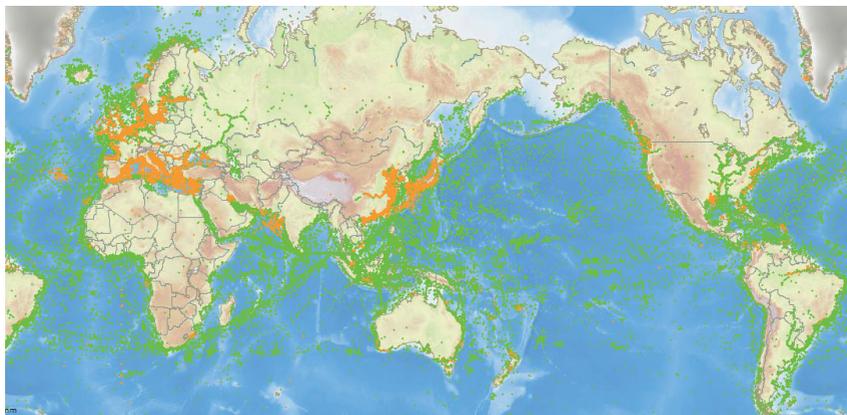


図20 衛星AISと陸上局のAISを組み合わせた全球の漁船位置マップ
(<http://jp.shipfinder.com>、東洋信号通信社提供)
緑色の点は衛星 AIS 信号、オレンジの点は陸上局で受信した AIS 信号

🗝️ キーワードの説明

AIS

特に衛星AISは漁業情報としての利用価値が高いと考えられますが、衝突事故防止が本来の目的なので、目的外使用には課題も多々あります。衛星AISでは、AIS信号を出している船がたくさんいると混信が起きてデータが得られません(これについては将来的に改善される可能性があります)。また小さい船はAISの設置義務がなく、位置が得られません。一方、少し物騒ですが、位置を発信するということは、海賊などに狙われる可能性も出てくるので、海域によっては要注意です。

4. 漁場探索への応用

衛星データを利用した水産での応用研究の成果として、漁場環境の解明と漁場予測について説明します。最初にシンプルな衛星データと漁場データとの単純比較によって漁場が出来やすい環境を推定し、それをを用いた経験的予測について紹介します。その後で、機械学習などを用いた新しい漁場予測手法について紹介します。

4.1 漁場データと衛星データの比較による解析

漁場予測で衛星リモートセンシングを活用する場合、最もシンプルなアプローチが衛星画像と漁場との比較によって関係を導き出す方法です。3.1で説明したとおり魚には適水温がありますが、たとえば索餌回遊期と産卵回遊期では魚の分布水温が異なります。正確な魚の分布を知るには、精密な衛星データと漁場の比較が必要となります。

古いデータですが1996年～1997年の常磐のマイワシ漁場について、衛星で得られた水温および植物プランクトンとの比較について説明します。この期間はADEOS/OCTSという、昨年12月に打ち上げられたGCOM-C/SGLIの原型になった衛星が水温と植物プランクトンを同時観測しています。海のモニタリングで同時観測は重要です。時々刻々と変化する海は、衛星が異なることで撮影時間に違いがあると、海況が変わる場合があるからです。

図21にデータ処理の流れを示します。GISを活用した処理になっています。図22は、漁場水温と、漁場の植物プランクトン量と、マイワシの漁獲量の比較解析結果を3次元で示したものです。X軸が水温、Y軸が植物プランクトン量、そしてZ軸がマイワシ漁獲量です。ある特定の水温・植物プランクトン量の環境で漁獲量が多くなっているのが分かります。これがこのデータセットから導き出された好漁場環境です。この好漁場環境

域を衛星画像上に白色で表示したのが図 23 です。図 22 のような好漁場環境は魚種や季節によって大きく異なるので、丁寧に比較解析する必要があります。

図 2 のリモートセンシングの特徴の一つに「同じ場所を何度も観測できる」という特徴があります。これを応用することで、漁場形成前～漁場形成～漁場消滅の過程で海洋環境がどのように変化したかを見ることができます。漁場形成前後の情報は船舶観測では得られない情報です。図 24 は漁場ができる前後で水温と植物プランクトン量がどう変わったかを示したものです。この例では特徴的な傾向がみられており、漁場ができる直前に水温が下がり、植物プランクトン量が増加してから漁場が形成されています。水温が上昇傾向のエリア、植物プランクトンが増加傾向のエリアは、前日の画像と当日の画像の差を計算すれば検知できます。

図 22 や図 24 の結果、更に漁場水深、過去の漁場形成状況などを加味し、すべての好条件が適合したエリアを図 25 に白で示します。図 23 よりも更に狭いエリアに好漁場エリアを絞り込んでいるのが分かります。このデータでは、全漁場データの約 70% がこの条件に適合していました。衛星データと漁場データの比較解析で、70% 程度の確率で漁場を予測できたこととなります。

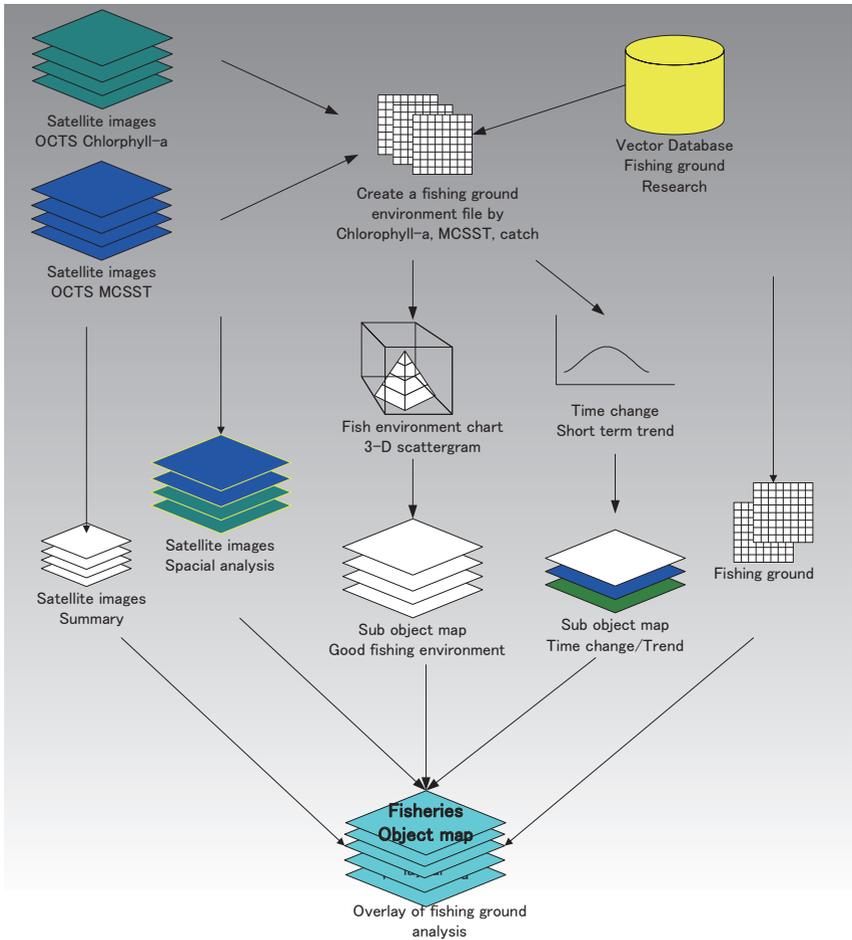


図 21 衛星データと漁場データの比較の流れ

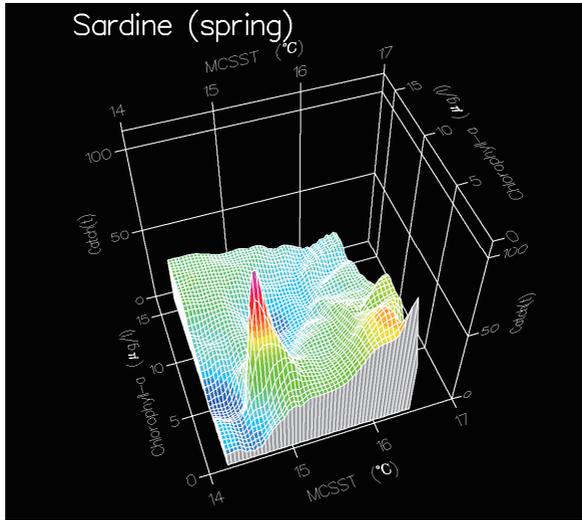


図 22 水温とクロロフィル濃度と漁獲量の 3 次元図
(X 軸は水温、Y 軸はクロロフィル濃度、Z 軸はマイワシの漁獲量)

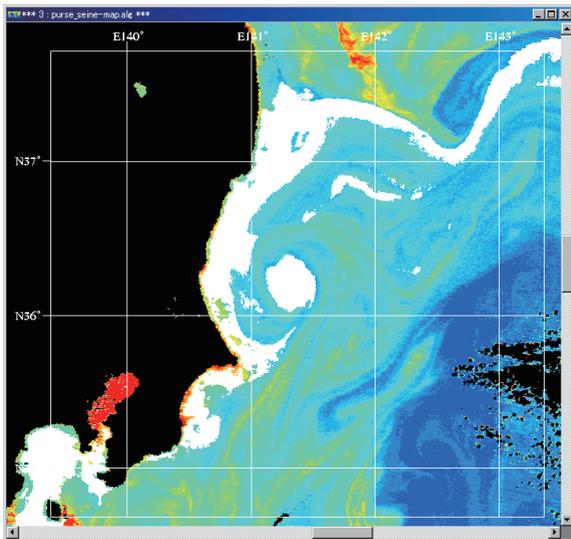


図 23 図 22 の条件で好環境と判断されたエリアの空間分布 (白い部分は好環境)

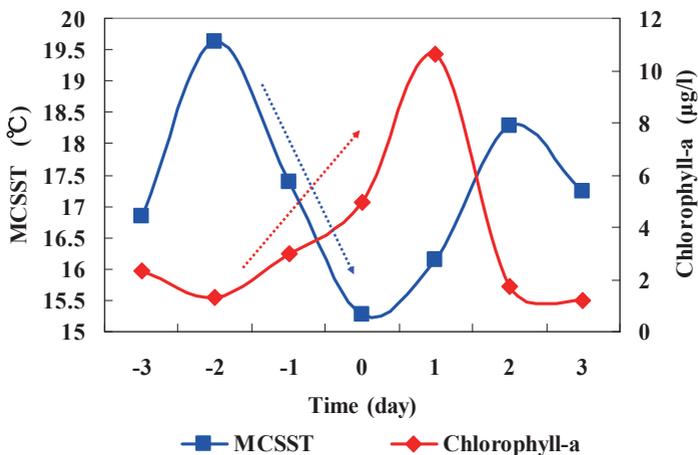


図 24 漁場ができた水域の水温と植物プランクトン量の時間変化

横軸 Time0 は漁場ができた当日、-3 は漁場ができる 3 日前、3 は漁場形成の 3 日後を表しています。船舶だけでは得られない水温和クロロフィルの時間変化を衛星を使うことで追跡できます。

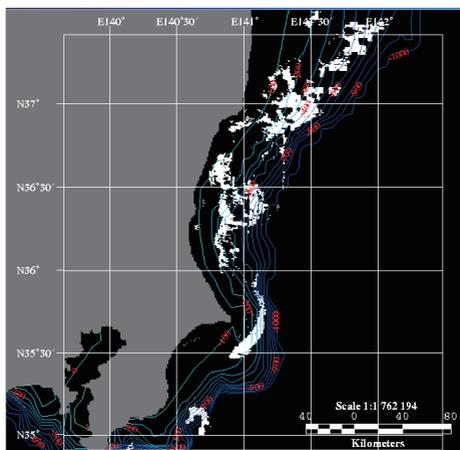


図 25 好漁場環境マップ

この事例で、漁場ができる好条件をすべて重ね合わせて合致した場所を白くしています。

4.2 海洋数値モデルと高度な統計解析を用いた漁場予測

最近の漁場予測手法では、**機械学習**などより高度な解析手法を使ったものが多数みられます（五十嵐他、2014）。また入力となる海洋環境データは衛星画像ではなく、コンピュータで海を再現した**海洋数値モデル**の計算結果が使われる場合が多くなっています。

このような解析でよく使われるのが HSI（ハビタット適正指数）という数値です。魚が分布しやすい場所をこの HSI という数値によって客観的に示すものです。4.1 で示したような適水温や適植物プランクトン量といったシンプルなものから一歩進んだ手法です。元々この HSI は、野生動物の生育場所の状態を様々な質の違うデータをすべて取り込んで、一つの指標で表すというものでした。これは「ハビタット評価手続き」という陸上生物の環境アセスメントのためのアプローチで、1970 年代にアメリカで提案されています。

JAFIC では 2006 年という非常に早い時期から HSI を取り入れた技術開発を進め、実際にメバチマグロ・メカジキの漁場予測に応用しています。また最近では齊藤らがアカイカ漁場の予測（「気候変動適応研究推進プログラム（RECCA）」2010～2014 年）や、スルメイカ漁場の予測（「地域イノベーション戦略支援プログラム」2009～2013 年）に、高度な統計処理や機械学習を応用した手法で実際に漁場予測情報の配信を行いました。図 26 は RECCA で得られた成果のアカイカ漁場予測です。

これら新しい手法による漁場予測のポイントは、実は「如何に精度よく海を予測するか」です。計算で得られた予測海水温や予測海流などから、HSI の高いエリアを見つけ出して、それを予測漁場とするのです。また、正しい HSI を導出するためには、過去の海を如何に精度よく再現し、漁場データと比較解

析をするかも重要なポイントです。衛星データは未来予測ができませんから、コンピュータ上に海を再現する海洋数値モデルがどうしても必要となります。海洋数値モデルは2000年代に入って地球シミュレーターなどにより高度化が急速に進みました。齊藤（2017）が、海洋循環数値モデルの一般化、データ同化手法の高度化、スーパーコンピュータの発展、ARGOなど全球観測網の整備、などで高度化の理由を説明しています。

コンピュータ内に海を再現する海洋数値モデルは最先端の研究分野であり、さらに高精度化が進められると予想されます。しかし近年、2017年に九州で記録的豪雨を引き起こした線状降水帯や、本年7月の梅雨前線豪雨など異常気象が頻発していますが、海洋数値モデルはこのような短期的な大気・海洋の擾乱には対応できていません。このような擾乱もリアルタイムで直接観測する衛星リモートセンシングは、海洋数値モデルの弱点を補って漁場予測精度を向上してくれることから、高精度な漁場予測モデルが動き出してもなお必要不可欠な情報といえます。

数値モデルと高度な統計解析を使った漁場予測はまだ始まったばかりですから、今後その動向が注目されます。



図26 アカイカ漁場予測（RECCAのHPより）

🗝️ キーワードの説明

機械学習

ここでいう機械とはコンピュータのことです。コンピュータに色々勉強させることを機械学習といいます。AIは非常に広範囲の技術や研究をまとめた呼称ですが、その一部が機械学習です。

HSI

Habitat Suitability Index。何か旅行会社のようなのですが、人間世界でいうと「住みやすい街ランキング!」です。最近水産分野でもよく利用されています。HSIが高いと、その魚が分布しやすい、逆に低いと魚が分布しない、となるわけです。この分析のポイントは、大量のデータを処理して法則性を見出すことです。大量のデータをコンピュータに入力して結果を導出するもので、ビッグデータ時代にマッチした手法といえます。

海洋数値モデル

計算物理学の一つの応用で、簡単に言うと「コンピュータで海を再現する」というものです。精度向上の技術開発や研究がいろいろな大学や研究所で行われていて、活気のある分野です。

5. GIS とリモートセンシングと漁業

衛星リモートセンシングの能力を最大限に発揮させる技術の一つが冒頭でも述べた GIS、地理情報システムです。パソコンを使う方のほとんどが **Google Map** を使ったことがあると思いますが、昨今の GIS 技術の進歩により、特に GIS を知らなくても色々な情報を重ね合わせて視覚的に表示したり、条件が重なった場所を抽出したりすることが可能となっています。また、インターネットで簡単に利用できる Web-GIS という機能が実現しています。Google Map はその代表例です。以前は GIS というと、専用ソフトウェアが必要だったり、難しかったりと、衛星と同様に扱いにくい技術でした。

海の GIS は陸の GIS に比べてまだ遅れています。海の GIS の利用者は陸に

5.1 赤潮と人工衛星と GIS

衛星から赤潮を検知する技術開発も過去から試みられてきました。特に安定的に衛星植物プランクトン画像を提供した Aqua/MODIS、Terra/MODIS の 2 つの衛星センサーによって大きく技術開発が進みました（新井他、2011、Siswanto、2013 など）。

JAFIC では、水産庁からの委託を受けて平成 27 年度～29 年度に、昨年 12 月打ち上げが成功した GCOM-C/SGLI の利用を前提として、衛星から赤潮を検知する技術開発を実施してきました。その概要について説明します。

図 28 は、2012 年 8 月 20 日の有明海で、植物プランクトン画像、現場観測データを重ね合わせて表示した例です。各県の協力で情報を提供していただいたものを、GIS で統合できるようにしました。これで衛星データと現場データを簡単に結合することが可能となります。このデータセットで衛星データと現場観測データの比較解析を行い、4.2 で説明したような機械学習を用いて赤潮を自動的に検知する手法についても検討しています。図 29 は AI の手法であるニューラルネットワーク手法によって赤潮域を検知した画像です。この例では珪藻類の赤潮検知を試みています。さらに表層の流れを観測することができる HF レーダーのデータを重ね合わせた例を図 30 に示します。HF レーダーのデータを重ね合わせることで、赤潮移動予測のサポートになることが期待されます。

赤潮への衛星リモートセンシングの応用には頻度、解像度、感度の 3 つポイントがあります。赤潮は時間との勝負なので、衛星が当該エリアを撮影する頻度が重要です。また解像度も重要で、漁場探索以上の高解像度でモニタリングする必要があります。そしてもう一つが感度です。赤潮は種類や濃度によって色が異なります。これを効率的に検知できるかは重要なポイントです。

赤潮のモニタリングについては、地域によっては試験研究機関の最重要業務になっており、迅速に調査船を現場に派遣する体制ができている場合

がありますが、衛星データを有効活用して現場観測を補完することでより高度なモニタリングが可能になると考えられます。

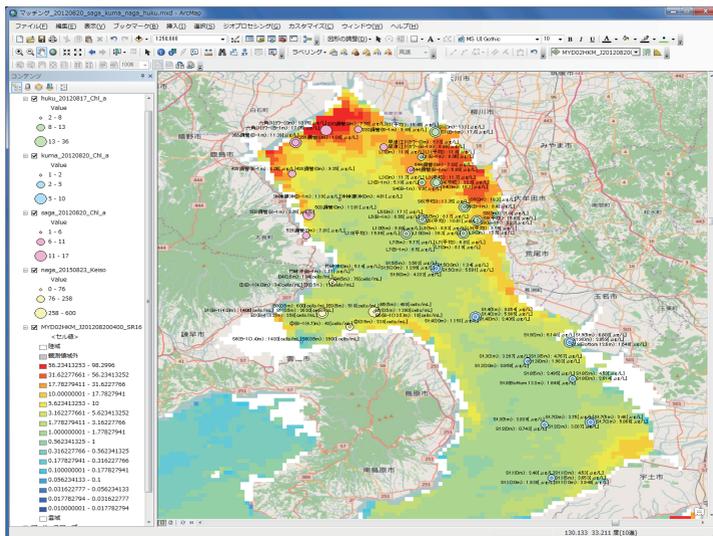


図28 衛星情報と現場調査船情報をGISで結合した例

衛星で得られた植物プランクトン濃度画像と各県の現場観測データを重ね合わせた。

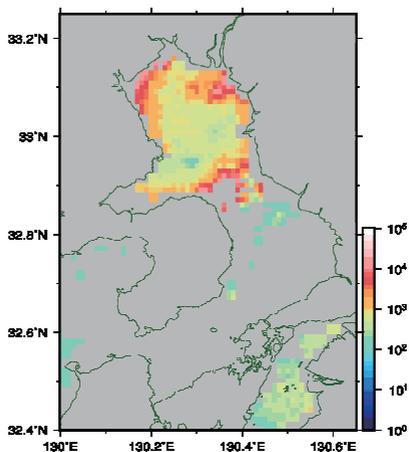


図 29 ニューラルネットワークを利用した有明海珪藻赤潮の検知例
赤潮細胞数を算出している。

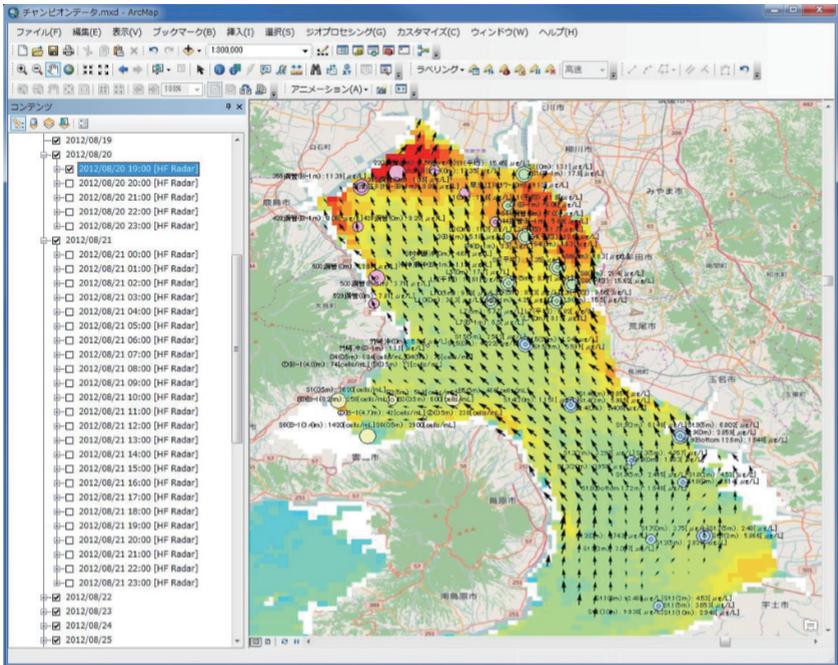


図30 HFレーダー(表層の流れ)と衛星画像(クロロフィル濃度画像)の重ね合わせ表示例
(HFレーダーのデータは国土交通省九州地方整備局熊本港湾・空港整備事務所提供)

5.2 大型クラゲとGIS

2009年に日本周辺海域に大型クラゲ(エチゼンクラゲ)が大量に回遊して、定置網などの漁業に大損害を与えました。図31は、2009年に岩手県で筆者が船に乗せてもらい撮影した画像です。定置網の中は大型クラゲだらけで、実際に目の当たりにすると言葉をなくすほどの衝撃でした。



図31 2009年の岩手県久慈の定置網に入網した大型クラゲ
大型クラゲの影響で死んでいる魚も多数入網している。

逐次集まってくる全国の最新の出現情報と、海面水温や海流などの環境情報を効率的に分析するには、GISが必要不可欠な技術です。また、高価なソフトを持っていなくても誰でもが使えるGISを実現するには、Web-GISの技術が必要です。JAFICでは2006年から大型クラゲ等の有害生物に関する情報収集および情報配信事業を請け負ってきました。ここでは大型クラゲ等有害生物情報提供のGISについて説明します。

図32は2014年の大型クラゲ出現情報のGISマップです。大型クラゲの出現位置、波浪情報、水温線、海底地形を重ね合わせて表示した例です。さらに図33は大量出現の2009年と直近の2017年の比較図です。GISならばこのような比較も非常に簡単にできます。図34はスマートフォンで表示した例です。最近のGISサーバはマルチデバイス対応が多く、パソコンでもタブレットでも接続デバイスに応じて対応ができるようになっています。

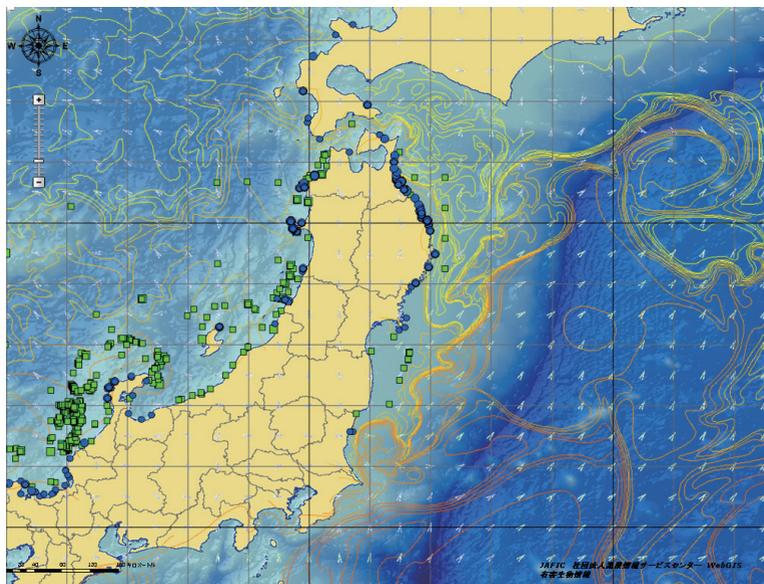


図32 Web-GIS化された大型クラゲ等有害生物情報配信システム
大型クラゲの出現位置、海底地形、表面水温などを一覧表示している。

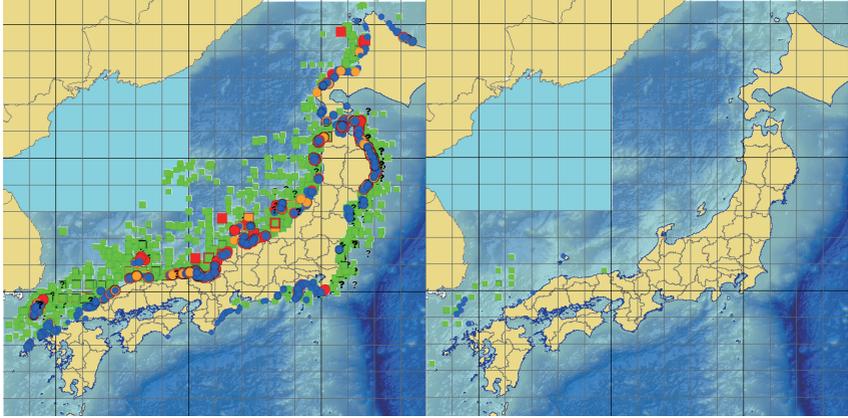


図33 GISによる2009年と2017年の大型クラゲ出現状況の比較例

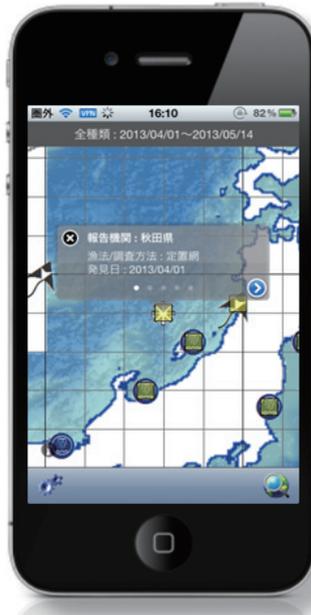


図34 スマートフォンGISによる大型クラゲの情報配信

🔑 キーワードの説明

Google Earth(Map)

現在考えられる究極の地図情報サービスです。まだGoogleが検索サイトだった時代に、今後Googleは地図に力を入れると発表し、世界を驚かせました。今では世界で利用される地図GISサービスになっています。ポイントは「あらゆる検索結果は場所の情報を持っていることが多い」ことです。

エビスくん

JAFICが2010年にサービスをスタートした洋上の漁船に情報を配信するサービスです。日本周辺の水温に関しては、衛星データ、現場観測のデータを組み合わせたハイブリッド処理で高精度化を実現しています。現在、700隻以上の漁船が漁場探索などに活用しています。恵比寿天から名前を取っていますが、恵比寿様は釣りの神様です。ちなみに七福神では唯一、日本古来の神様です。

HFレーダー

海岸にアンテナを何個か設置して、各アンテナから発するレーダーの反射波を各アンテナで受信、その反射具合から表面の流れを測定します。原理的には3.5で説明したマイクロ波散乱計と似ています。夢のようなシステムですが設置費と維持費が高いことが悩みの種です。

ニューラルネットワーク

AIの核をなす技術の一つです。神経細胞のように大量のデータ同士を結びつけて、どの結びつきが強いかを見極めて、答えを出すものです。話題のディープラーニングはこのニューラルネットワークをたくさん重ね合わせたもので、より人間の脳に近い動きをされると言われています。

大型クラゲ

2005年、2006年、2007年、2009年と大量出現で日本の漁業者を泣かせました。漁師さんに話を聞くと3重苦と言われます。漁具が破損する、作業負担が増える、魚が傷む、の3つです。水産庁では大型クラゲの動向を把握するための事業を継続して実施しています。

6. エビスくんの利用実証について

色々な衛星が漁業の現場で利用されていること説明してきましたが、それらのデータの効果がどれほどのものなののかについて説明します。

JAFIC では1980年代から衛星データを漁業者に向けて配信してきました。1980年代の情報配信スタート当初はカラーの衛星画像を白黒の水温線画に直して漁業者にFAXするなど、かなりアナログな手法でした。これが1997年頃からインターネットが国内に広がったことで、「衛星画像をカラーで配信できる」という新しい段階に入りました。洋上でのデータ通信が徐々に普及しだしたのもこの頃で、漁師さんが洋上でパソコンを使って水温を見る、というのが徐々に浸透してきます。図35にJAFICの情報を利用する洋上FAXユーザーと洋上パソコンユーザーの推移を示します。緩やかに増加したパソコンユーザー数は、洋上通信環境の改善もあって2010年頃に、FAXユーザーを逆転します。JAFICでは、2000年代から漁業者が現場で使える衛星情報サービスとして、漁場webナビゲーターというサービスを開始します。更にそれを発展させて2010年から「エビスくん」という情報サービスをスタートしました。現在では棒受けや竿釣、イカ釣りを中心に、700隻以上の漁船がこのサービスを利用しています。

JAFICではこの「エビスくん」を利用しているユーザーを対象に2014年に大規模な利用者アンケートを実施しています。その結果をここで紹介します。詳細はJAFICのHPをご覧ください。

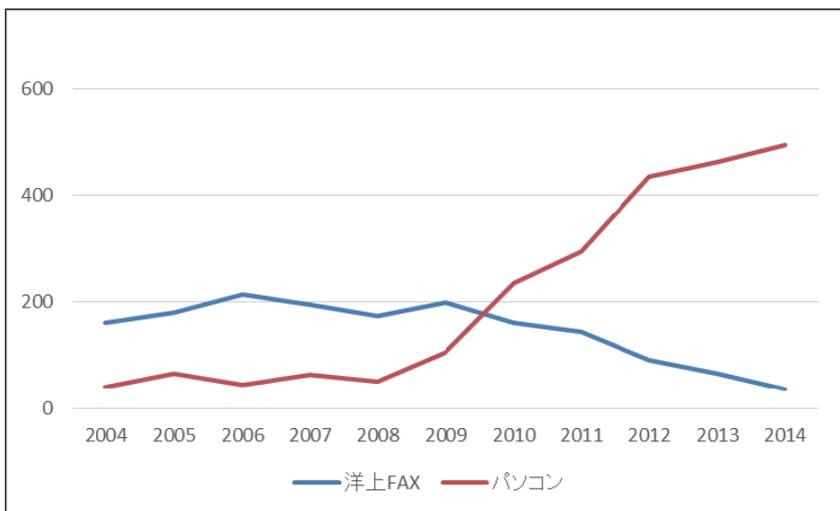


図35 洋上FAXユーザー数と洋上パソコンユーザー数の推移(JAFICの情報)

6.1 海況情報の評価

アンケート調査は主要な漁業種類で「エビスくん」を利用する漁船のうち452隻を対象に実施しました。回答率は33.8%でした。

表1にどの情報を見ているかという質問の回答を示します。「エビスくん」は色々な情報を配信していますが、やはり水温情報は最も良く利用されており、中でも日報水温（衛星データを現場観測データ等で補正し1日1回更新）は全利用者の94%が利用するなど全漁業種類で利用されています。この他、潮流情報や集魚灯位置もよく利用されていました。

表1 どの情報を見ているか？

項目	回答数(実数)						構成比(%)					
	近海カッオ	近海マグロ	サンマ棒受網	中型イカ釣	大中型まき網	合計	近海カッオ	近海マグロ	サンマ棒受網	中型イカ釣	大中型まき網	合計
① 日報水温 (注1)	19	26	56	33	10	144	100.0	96.3	98.2	94.3	66.7	94.0
② 解析水温 (注2)	16	9	26	13	4	68	84.2	33.3	45.6	37.1	26.7	44.0
③ 最新水温 (注3)	9	7	44	20	9	89	47.4	25.9	77.2	57.1	60.0	57.3
④ 合成水色 (注4)	1	1	11	1	1	15	5.3	3.7	19.3	2.9	6.7	9.3
⑤ 最新水色 (注5)	2	2	8	3	1	16	10.5	7.4	14.0	8.6	6.7	10.0
⑥ .50m水温	9	9	17	18	2	55	47.4	33.3	29.8	51.4	13.3	35.3
⑦ 100m水温	5	8	8	16	3	40	26.3	29.6	14.0	45.7	20.0	25.3
⑧ 200m水温	1	8	3	12	1	25	5.3	29.6	5.3	34.3	6.7	16.0
⑨ 300m水温	0	2	3	10	1	16	0.0	7.4	5.3	28.6	6.7	10.0
10.潮流	14	20	35	16	4	89	73.7	74.1	61.4	45.7	26.7	57.3
11.灯火位置	2	2	38	25	2	69	10.5	7.4	66.7	71.4	13.3	45.3
12.スルメイカ漁場予測	0	2	2	10	1	15	0.0	7.4	3.5	28.6	6.7	9.3
回答数	19	27	57	35	15	153	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

注1: 日報水温とは、様々な衛星観測データや現場観測データを解析し、1日1回更新している水温図。休日は更新できない。

注2: 解析水温とは、衛星GOOM-W(しずく)のマイクロ波水温センサーにより観測し、1日1回更新している水温図。雲を避けて観測可能だが、空間分解能が粗い。

注3: 最新水温とは、METOP衛星の赤外水温センサーにより観測し、1バスごとに1日4~6回更新している水温図。雲域は観測できない。

注4: 合成水色とは、衛星(AQUA/TERRA)のMODISセンサーにより植物プランクトンの色素量を観測し、3日間の合成図として1日1回更新している。

注5: 最新水色とは、衛星(AQUA/TERRA)のMODISセンサーにより植物プランクトンの色素量を観測し、1日分の合成図として1日1回更新している。

海況情報で魚群探索時間は何割短縮できたか、という質問に対する回答を表2に示します。サンマ棒受網と中型イカ釣では、「短縮できなかった」と回答した漁業者が約1割程度いましたが、その他の多くの漁業者からは、1割以上の短縮があったと回答しています。他方、近海マグロ延縄や大中型まき網では、無回答が8割前後占めており、これらの業種では、漁場探索時間の短縮という視点での評価がしにくいと考えられます。一方で、ごく一部の船は5割以上という、非常に効果があったという回答も見られます。

表2 海況情報で漁場探索時間は何割ぐらい短縮できたか？

項目	回答数(実数)						構成比(%)					
	近海カッオ	近海マグロ	サンマ棒受網	中型イカ釣	大中型まき網	合計	近海カッオ	近海マグロ	サンマ棒受網	中型イカ釣	大中型まき網	合計
0割	0	0	4	3	0	7	0.0	0.0	11.8	10.7	0.0	8.5
1割	2	2	2	5	1	11	14.3	33.3	5.9	17.9	50.0	13.4
2割	4	0	4	7	1	15	28.6	0.0	11.8	25.0	50.0	18.3
3割	5	1	12	6	0	24	35.7	16.7	35.3	21.4	0.0	29.3
4割	0	0	1	3	0	4	0.0	0.0	2.9	10.7	0.0	4.9
5割以上	3	3	11	4	0	21	21.4	50.0	32.4	14.3	0.0	25.6
回答数小計	14	6	34	28	2	82	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
探索時間短縮率	29%	33%	31%	25%	15%	29%						
無回答	5	21	23	7	13	68	26.3	77.8	40.4	20.0	86.7	45.3
回答数	19	27	57	35	15	150	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

注: 探索時間短縮率=Σ(短縮割合×回答数)÷回答数小計。但し、「5割以上」は5割として計算したため、過小評価となっている。

エビスくんによる漁獲量の増加の有無についての質問の回答を表3に示します。1割以上の増加があったとする漁業者は回答者の70～80%を占めており、漁獲量増加への効果が認識されています。

表3 海況情報で漁獲量は何割増加したか？

項目	回答数(実数)						構成比(%)					
	近海カッオ	近海マグロ	サンマ樺受網	中型イカ釣	大中型まき網	合計	近海カッオ	近海マグロ	サンマ樺受網	中型イカ釣	大中型まき網	合計
0割	1	2	8	6	0	18	8.3	22.2	25.0	26.1	0.0	22.8
1割	4	3	2	5	1	15	33.3	33.3	6.3	21.7	100.0	19.0
2割	2	1	4	5	0	13	16.7	11.1	12.5	21.7	0.0	16.5
3割	3	0	8	6	0	17	25.0	0.0	25.0	26.1	0.0	21.5
4割	1	0	4	1	0	6	8.3	0.0	12.5	4.3	0.0	7.6
5割以上	1	3	6	0	0	10	8.3	33.3	18.8	0.0	0.0	12.7
回答数小計	12	9	32	23	1	78	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
漁獲増加率	22%	22%	25%	16%	10%	21%						
無回答	7	18	25	12	14	73	36.8	66.7	43.9	34.3	93.3	48.0
回答数	19	27	57	35	15	152	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

注：漁獲増加率=Σ(増加割合×回答数)÷回答数小計。但し、「5割以上」は5割として計算したため、過小評価となっている。

燃油消費を抑える省エネ効果についての質問の回答を表4に示します。漁業種類間で差が大きく、最も高い評価をしている近海マグロ延縄では58%が削減効果を実感、逆に大中型まき網は、削減効果を実感している漁業者は皆無でした。「変わらない」と回答したもののうち、探索範囲は拡大したという回答が27%ありました。探索範囲が増えたにも関わらず、燃油の消費量が変化らなかったということで、間接的に省エネ効果があったとみることができます。一方、無回答が36%、「わからない」の回答も多いことから、実感できる効果が出にくいと考えられます。

表4 海況情報で1回の給油量は減ったか？

項目	回答数(実数)						構成比(%)					
	近海カッオ	近海マグロ	サンマ樺受網	中型イカ釣	大中型まき網	合計	近海カッオ	近海マグロ	サンマ樺受網	中型イカ釣	大中型まき網	合計
減った(効果あり)	2	14	8	7	0	31	14.3	58.3	38.1	28.0	0.0	31.6
変らない(探索範囲拡大)	8	7	3	6	3	27	57.1	29.2	14.3	24.0	21.4	27.6
変わない(探索範囲変らず)	3	3	3	5	9	23	21.4	12.5	14.3	20.0	64.3	23.5
解らない	1	0	7	7	2	17	7.1	0.0	33.3	28.0	14.3	17.3
回答数小計	14	24	21	25	14	98	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
無回答	5	3	36	10	1	55	26.3	11.1	63.2	28.6	6.7	35.9
回答数	19	27	57	35	15	153	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

燃油の削減効果に関しては、平成 21 ～ 22 年に用船した近海マグロはえ縄船 7 隻に限定した調査で、平均削減率が 16.1% であったことも確認されています（平成 23 年度衛星利用漁場探索技術実用化事業報告書）。

漁業者からの直接ヒアリング調査では、燃油代の高騰により省エネ航行に気遣うことが多くなり、潮流情報を参考に経済航路を選定しているという声が多々聞かれました。具体的な例としては、千葉県銚子港を水揚港とする近海マグロ延縄船が東沖の漁場に向かう時に、黒潮本流に乗って沖出しすると約 2 ノット程度速度が上がるとのことでした（図 36 事例 1）。また、宮城県気仙沼港を水揚港とする近海カツオ竿釣船では、暖水塊の渦流を利用しているとのことでした。港から沖出しする時は、時計回りの暖水渦の北側を航行し、逆に漁場から港へ向かうときは暖水渦の南側を航行することで、約 1 ノット程度船速が稼げたということです（図 36 事例 2）。このように、潮流にのせることにより船速をあげ、航行時間の短縮や燃油の節減に活用できます。具体的な数字を当てはめた試算では、マグロはえ縄船の場合で、銚子東方約 900 海里の漁場に向かう時、主機関の回転数を下げた航行（10 ノット程度）で通常 90 時間かかるが、2 ノットの黒潮統流に乗れば最短で 75 時間に短縮でき、燃油消費量では 17% の節減となります。カツオ竿釣船の場合では、直径約 100 海里の暖水塊で平均 1 ノットの渦流を利用し船速 12 ノットで航行したところ、通常 7 時間 30 分かかるところ、約 40 分の短縮ができ、8% の節減となります。また、漁場探索時も適水帯を探しながらの直角（ジグザク）航路ではなく水温図等の情報に基づき直線航路をとることにより、直角航路との比較では、最大 30% の節減となっています（図 36 事例 3）。

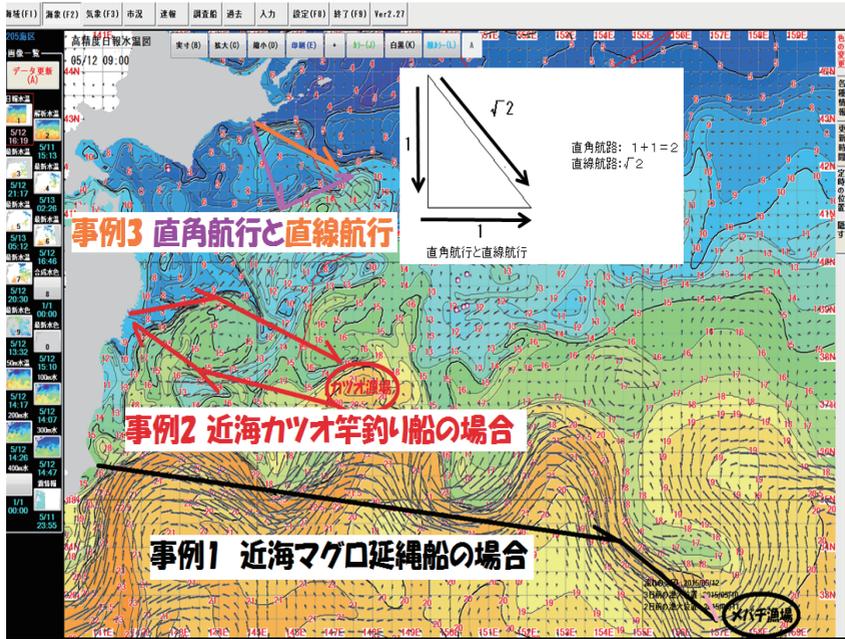


図36 潮流情報を利用した省エネ航法(事例1,2)と漁場探索における航走距離の短縮(事例3)
 燃油削減率(計算値)は、①事例1:17%、②事例2:8%、③事例3:30%。

6.2 アンケートのまとめ

このアンケートでは、最終的に以下のようにまとめています。

- 1) 各漁業種類について効果を数値でまとめると、以下の通り概ねプラスの評価となっている
 - 漁場探索時間が29% (15～33%) 短縮
 - 漁場探索範囲が28% (16～30%) 拡大
 - 漁獲量が21% (10～25%) 増加
 - 給油量が補正後の値で13% (4～23%) 削減
- 2) 実際に訪船したヒアリング調査では、多くの漁労長等はずでに「エビスくん」は「操業になくてはならない」ものになっていると評価しており、「経

「従来型に頼る漁業」から「IT 漁業」への移行に大きく貢献している実態が改めて確認された。

- 3) 漁業経営にとって厳しい環境が続く中で、操業の効率化に加え、担い手確保が喫緊の課題となっている我が国の水産業において、新規就業者の確保や経験の浅い漁労長の支援という面でも効果を発揮することが期待される。

7. ユーザーからの意見とユーザーから期待される衛星情報

2016年3月に、全国水産試験場長会、全国漁業協同組合連合会、大日本水産会、漁業情報サービスセンター、水産総合研究センター、水産大学校、水産庁らで構成される勉強会が「水産分野における人工衛星（GCOM-W）利用に関する報告書」を作成しました。この報告書は、3.4で説明したマイクロ波放射計の利用に関する報告書で、都道府県やJAFIC、水研機構での利用事例を網羅的に説明しています。この中で、研究者、漁業者両方から、将来の衛星に期待する性能に関するアンケートがとられています。アンケート結果のダイジェストを紹介し、そこから見えてくる漁業者が必要とする衛星の姿、将来像について説明します。

7.1 研究者のアンケート結果

研究者はマイクロ波放射計の雲の影響を受けにくいという点について高く評価しており、GCOM-W/AMSR2 データについては、6割以上の水産試験場等から使っている、または試験・検討中との回答がありました。実際にGCOM-W/AMSR2 データを使っている研究者から見た改善点については、沿岸域が欠測になること、解像度が悪いことへの改善要望が多く出されました（図37）。

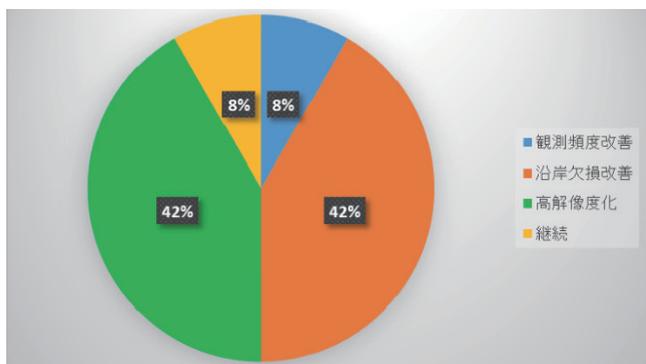


図37 GCOM-W/AMSR2への改善要望(研究者要望)

GCOM-W/AMSR2データの将来の利活用については、すでに多くの水産試験場等が県内漁業者向けにHPなどで情報配信しており、今後も情報サービスにGCOM-W/AMSR2を積極的に活用したいとの回答が多くありました。また、県海面のモニタリングに活用したいという意見も多く、調査船の維持に苦勞している各県水産試験場等が衛星データに期待していることを反映していると思われます。また水産試験場等の本来業務である研究面に使いたいと考えている回答も多数ありました(図38)。

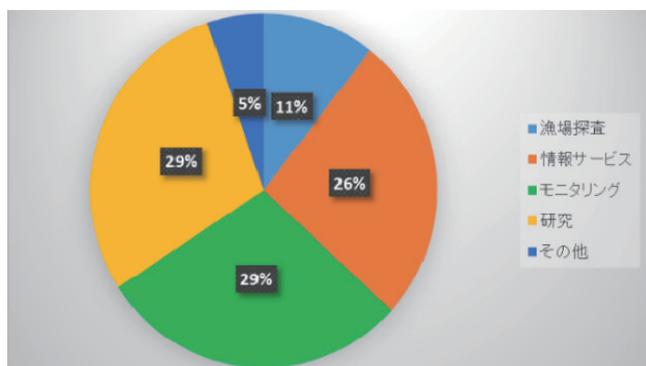


図38 GCOM-W/AMSR2データの利活用の方向性(研究者)

AMSR2 後継の将来のマイクロ波センサーの解像度の要望を聞いたところ、やはりより高解像度化を望む声が多く聞かれました。水産試験場等では 1km 解像度が標準となっており、なるべく 1km に近い解像度を期待しているようです。感度の要望については、平均すると 0.2℃ 程度の感度が必要との回答が多く得られました。また沿岸域では更に高精度化に期待する意見も出されていました。

7.2 漁業者・漁業団体のアンケート結果

アンケートについては、業種別漁業団体（主に沖合漁船）及び全国漁業協同組合連合会（主に沿岸漁船）を通じて 224 隻の漁船から回答を得ました。研究者向けのアンケートでは特定の衛星センサー名を示していましたが、漁業者向けのアンケートでは、衛星データを利用して作られる水温図について回答してもらいました。

衛星データを利用して作られる現在の水温図について、何に活用しているのか質問した結果、当然ながら漁場探索に活用しているという回答が最多でした。操業場所を変えるために他海域も見ているとの回答も多くありました（図 39）。

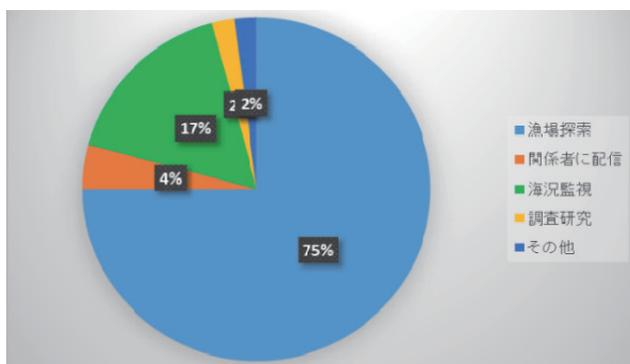


図39 水温図の利活用の用途(漁業者)

水温図の改善点を質問したところ、データの更新頻度をあげてほしい、より微細な水温分布を見たい、といった意見が多数を占めました(図40)。特に、情報更新頻度については、漁船向け漁業情報サービスの標準的データ更新頻度の1日1回ではなく、何度も最新の水温図等を見たいという意見が多くありました。漁業者が情報の鮮度を大切にしていることがわかります。

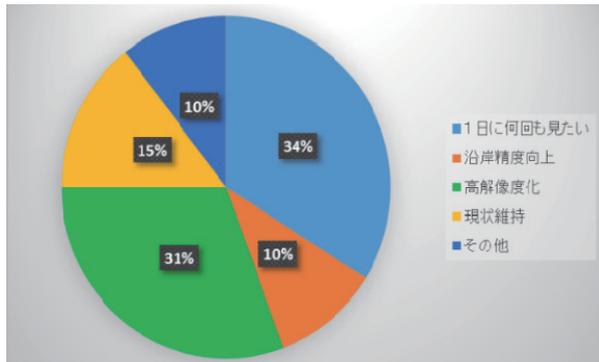


図40 GCOM-W/AMSR2データなどの情報に対する改善要望(漁業者)

解像度については、沖合で操業する漁船でのスタンダードとなっている解像度1km程度と、それより小さい500m程度という回答が多数を占めました(図41)。

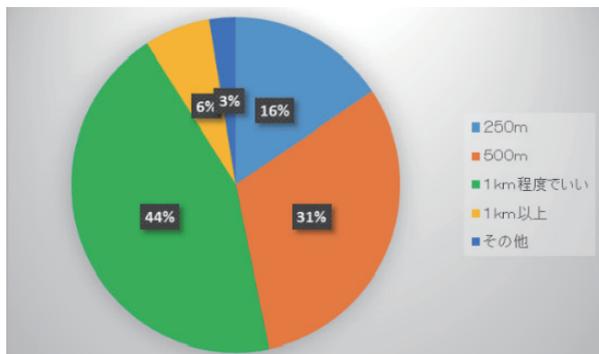


図41 将来の衛星データに期待する空間分解能(漁業者)

精度については概ね 0.5℃程度の水温の差異を捉えることが必要との意見が多くありました。逆に 0.1℃程度の感度だと細かすぎて見づらいとの意見もありました。水産試験場等とは異なり、漁業者視点では 0.5℃は妥当な感度と考えられます。

衛星観測全般への期待として、塩分の分布や流況などの新しい情報を見たいという意見が多く見られました。漁業者は常に新しい情報を探していると想像されます。また、操業直前に最新データが見たい、操業エリアだけは詳細な水温変化が見たいなどの意見もありました（図 42）。

将来、衛星を含む高性能な海洋環境情報が整備された場合に、それらのデータを何に使うかについてアンケートしたところ、漁場探索での活用が最も多く、この他に、航路選定に活用したいといった意見も多くみられました（図 42）。

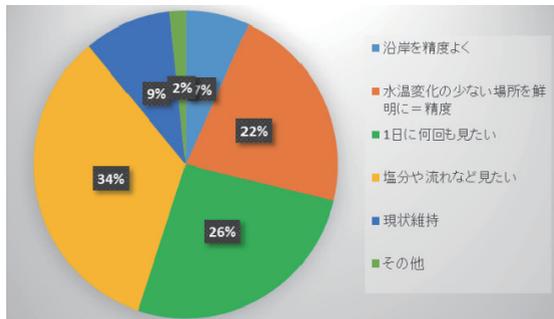


図42 GCOM-W/AMSR2後継を含む将来の衛星観測に期待するもの(漁業者)

水温図など情報の高度化の波及効果については、省エネが期待される、操業時間短縮が期待される、という意見がほぼ全ての回答に中で見られました。他方、情報通信料が高いという意見もほとんど全員から出されており、情報の高度化によって通信料が高くなることは歓迎されておらず、陸上通信が安価となった現在、洋上通信の低コスト化が求められています。

7.3 まとめ

GCOM-W/AMSR2 を含め衛星データは、漁業者、水産加工業者、及び都道府県の水産試験研究機関、水産庁などが各々有する多様なニーズに応じ、幅広く活用されており、我が国水産業の振興、水産研究の推進に大きく貢献しているといえます。

特に、漁業者が衛星データを活用して作られる水温図を漁場探索に高いレベルで活用していることが改めて認識され、漁業者が高精度の海水温図を継続的に取得できない事態が生じれば、日々の操業に大きな制約を受けることが懸念される結果となりました。

近年、地球的規模の海水温の変動に伴って魚介類の回遊経路や漁場形成が変化しており、過去にない海域環境の変動に対応して効率的な操業を行っていくには、マイクロ波放射計の特性を生かした海域観測の重要性が一層高まっていくものと考えられます。このため、水産分野での利活用の現状と将来的なニーズの高まりを踏まえれば、切れ目のない形でデータ提供されるよう、GCOM-W の後継機がタイムリーに打ち上げられることが極めて重要です。また、アンケート結果からもわかるとおり、マイクロ波放射計で沿岸域への観測域の拡大、高解像度化等の技術開発が強く望まれています。

8. おわりに

衛星リモートセンシングの現在を、出来るだけ分かりやすい形で紹介してきました。我が国の漁業は、経験と知識に基づく漁業から、それに加えて衛星リモートセンシングなどの情報を加味した新しい漁業、高度な漁業へと変わりつつあります。しかし、漁船数や漁業経営体数の減少に歯止めがかかっているわけではなく、我が国の漁業は依然厳しい状況であります。更に最近では、急速に漁獲能力を向上させている近隣諸国の動向、IUU 漁船

なども無視できなくなっています。利益確保・恒久的水産資源利用には漁船の競争力をさらに高めなければなりません。また、常に日本周辺の海の状態をモニタリングする体制を整備しなければなりません。そのためには衛星リモートセンシングや GIS 等の ICT は必要不可欠です。

さて、平成6年の「衛星・航空リモートセンシングの水産への応用」から24年、現在の衛星リモートセンシングについて書いてきましたが、さらに24年後にもし同じテーマで特集が組まれたらどんな記事になるでしょう。漁船は自動操舵、漁場はAIが決定、漁労も自動、船主さんや市場には自動的に漁獲物の鮮度や漁獲量の情報が配信される、乗組員は漁師さんではなくコンピュータエンジニアが一人…。ちょっと見てみたい気もしますが、漁場は魚と漁師さんの真剣勝負の場です。最後は漁師さんの腕がモノを言うようにあって欲しいと個人的には思います。

参考文献

Chelton,D.B.,M.G.Schlax,R.M.Samelson, and R.A.deSzoeke (2007) Global observations of large oceanic eddies. *Geophys.Res.Lett.* 34,doi : 10.1029/2007GL 030812.

CIA,The World Factbook (<https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/>)

ELVIDGE Christopher D. (1997) Mapping City Lights with Nighttime Data from the DMSP Operational Linescan System, *Photogramm Eng. & Remote Sens. Eng. & Remote Sens.* 63 (6) , 727-734,

Kiyofuji, H. and Saitoh, S. (2004) Use of nighttime visible images to detect Japanese common squid *todarodes pacificus* fishing areas and potential migration routes in the Sea of Japan. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 276, 173–186.

Laurs, R.M. and J. J. Polovina (2002) : Satellite remote sensing: an important tool in fisheries oceanography. *Fisheries Oceanography*, Paul J. Harrison and Timothy R. Parsons, eds., Blackwell Science, 146-160.

Laurs, R. M., P. C. Fiedler and D. R. Montgomery. (1984) : Albacore tuna catch distributions relative to environmental features observed from satellites. *Deep-Sea Research.* 31, 9, 1085-1099.

Rouse, J.W., R.H. Haas, J.A. Schell, and D.W. Deering. (1974) Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS, In: S.C. Freden, E.P. Mercanti, and M. Becker (eds) *Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium. Volume I: Technical Presentations*, NASA SP-351, NASA, Washington, D.C., pp. 309-317.

Saitoh, S., S. Kosaka and J. Iisaka (1986) 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.

Siswanto, E., Ishizaka, J., Tripathy, S. C., Miyamura, K. (2013) Detection of harmful algal blooms of *Karenia mikimotoi* using MODIS measurements: A case study of Seto-Inland Sea, Japan. *Remote Sensing of Environment*, 129, 185– 196.

Sugimoto, T. and H. Tameishi (1992) Warm-core rings, streamers and their role on the fishing ground formation around Japan, Deep-Sea Research, 39, 1, 183-201.

University of Colorado, Colorado Center for Astrodynamics Research (<https://ccar.colorado.edu/altimetry/>)

新井康平、寺山康教 (2011) 衛星、船舶及び地上赤潮モニタシステムによる赤潮早期発見及び赤潮種の識別、日本写真測量学会誌、50, 6, 339-346, 2011.

五十嵐弘道 淡路俊之、石川洋一、蒲池政文、碓氷典久、酒井光夫、加藤慶樹、齊藤誠一、清藤真樹 (2014) 海洋再解析データを用いたアカイカ好適生息域モデルの構築とその応用、JAMSTEC Report of Research and Development, 18 (0), 89-101.

石坂丞二 (2001) 沿岸域での海色リモートセンシングの現状と将来 沿岸海洋研究 第39巻, 第1号, 21-26

宇田道隆 (1940a) 魚群集散の原理について 植物及動物 8 (8) pp.1379-1386.

宇田道隆 (1940b) 魚群集散の原理について 植物及動物 8 (9) pp.1523-1532.

落合明 田中克 (1986) 新版魚類学 (下) 恒星社厚生閣

北原多作 (1921) 海洋研究漁村夜話 大日本水産会 pp.303-310.

気象庁（2013） 海洋の健康診断表 総合診断表 第2版

功刀正行（2009） 海の色が語る地球環境 海洋汚染と水の未来 PHP 研究所

香西克俊 浦田真人（1996） LANDSAT TMによる大阪湾海面水温の推定と検証 Proceedings of the Japanese Conference on Remote Sensing 21, 89-90, 1996-11-01

斎藤克弥（2016） 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 63-68

齊藤誠一（2017） 衛星リモートセンシングで海洋空間を知る 水産資源の持続可能な利用のためのアプローチ 情報管理 Vol.60 no.9 641-650

笹川平和財団海洋政策研究所（2018） 海洋白書 2018

作野裕司（2016） 沿岸環境評価のための衛星リモートセンシングの現状と課題 沿岸海洋研究 第54巻 第1号 69-74

社団法人漁業情報サービスセンター（1977） 昭和51年度人工衛星利用調査検討事業報告書

水産庁（2014） 平成26年度水産白書

松原喜代松 落合明 岩井保（1979） 新版魚類学（上） 恒星社厚生閣

平成30年9月1日 発行（非売品）

「水産振興」 第609号

編集兼発行人 渥美雅也

発行所 〒104-0055 東京都中央区豊海町5-1

豊海センタービル7階

電話 (03) 3533-8111

FAX (03) 3533-8116

一般財団法人 東京水産振興会

印刷所 株式会社 創基

（本稿記事の無断転載を禁じます）

ご意見・ご感想をホームページよりお寄せ下さい。

URL <http://www.suisan-shinkou.or.jp/>

平成三十年九月一日発行（毎月一回一日発行）六〇九号（第五十二卷九号）