

1) 有害赤潮プランクトンの出現動態監視及び予察技術開発並びに赤潮の発生段階に応じた一連の対策（行動計画）の検討・策定  
カ. 有明海・八代海海域 ② 八代海海域

水産研究・教育機構 水産技術研究所（長崎）

中野 善，岡村 和磨，杉松 宏一，山口 聖，邵 花梅

水産研究・教育機構 水産技術研究所（廿日市）

中山 奈津子，湯浅 光貴，手塚 尚明

熊本大学

戸田 真志，河野 友香

熊本県立大学

小森田 智大

熊本県水産研究センター

生嶋 登，阿部 慎一郎，井上 翼

鹿児島県水産技術開発センター

久保 満，中島 広樹

熊本県天草市水産研究センター

糸田 拓馬

熊本県海水養殖漁業協同組合

金棒 昭幸，濱田 裕貴

鹿児島県東町漁業協同組合

立元 伸幸，浦 啓介，首藤 冴哉

## 1 全体計画

### (1) 目的

八代海では毎年 *Chattonella* 赤潮が発生しており，養殖業への被害は甚大である。特に近年では *Karenia mikimotoi* による赤潮も発生しており，2022，2023 年には熊本県海域で大きな被害をもたらした。これらの赤潮被害を低減するためには，次の 4 段階に分けて赤潮に対処することが望ましいと考えられる。

- 発生予察
- 現状把握
- 拡大予察
- 行動計画

これらは時系列になっており，まず今年の赤潮発生の見通しを立て，次に赤潮発生状況を把握し，そして発生した赤潮がどのように広がるかを予測し，最後に漁場に近づくと分かったときに有効な防除策を実施する，ということを基本軸に据えた対処である。本課題では，各段階に関する技術開発を目的とした。本報告書では，まず今年度の海況と赤潮発生状況の把握および赤潮観測の機械化を含む現状把握について述べた後，発生予察手法の

開発，拡大予察手法の開発，行動計画の順に報告する。

## 2 令和 6 年度計画および結果

### (1) 目的

全体計画と同じ。

### (2) 方法

#### 1) 現状把握

本課題では，赤潮被害低減策を講じる上でもっとも重要な情報となる赤潮発生状況の把握を目的とした。手法は大きく分けて次の 3 つとした。

- 高頻度赤潮モニタリング
- 水質連続観測
- 赤潮観測の機械化

まず，確実に赤潮の発生を捉えるために，高頻度赤潮モニタリングを実施した。次に，これに加えて，赤潮が発生した環境の特徴を知るため，八代海に広域に配置した観測機器を運用して水質の連続観測を行った。これら 2 つは，将来的に発生予察や拡大予察（後述）の手法を開発する際に重要なデータとしても使用する。最後に，これまで人力で行ってきた赤潮調査に先端機器を導入して，調査の機械化を図った。

#### ①高頻度赤潮モニタリング（熊本水研，鹿児島水技セ，東町漁協，水技研 [長崎]）

2024 年 5 ～ 9 月，図 1 および表 1 に示す 8 定点（Stn.2, 4 ～ 7, A, D, K）において，週 1 回の頻度で採水（採水器：バンドーン採水器，離合社）および多項目水質計（AAQ-RINKO176, JFE アドバンテック）を用いた環境観測（海面から海底まで）を行った。採水層は Stn.A, K で表層，1.5m 層（Stn.A のみ），クロロフィル極大層（無い場合は 5m 層），10m 層，20m 層とし，その他の定点で表層，5m 層，10m 層とした。全ての海水試料について有害赤潮プランクトン種の細胞密度および栄養塩濃度（NO<sub>2</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>4</sub>-N, PO<sub>4</sub>-P, SiO<sub>2</sub>-Si）の分析に供した。また，代表定点 Stn.2, 4, 6 の表層，5m 層，10m 層，Stn.A, K, D の表層およびクロロフィル極大層（Stn.A, K は不明瞭な場合実施しない。Stn.D は不明瞭な場合 5m 層）で採取した海水試料については植物プランクトン種組成を算出した。植物プランクトンの細胞密度は，光学顕微鏡（IMT-2, BX53, BX51, BH2, オリンパス）下で海水試料 1mL 中に含まれる細胞を計数して算出した。栄養塩分析はオートアナライザー（QuAAtro36, QuAAtro39, ビーエルテック）を用いて分析した。調査期間終了後，得られたデータについて気象データ，過去のデータおよび既往知見との比較等を行い，八代海における赤潮発生シナリオを提案するとともに，短期動態に関与する主たる環境条件を考察した。また，気象観測データは気象庁ホームページ（<https://www.jma.go.jp/jma/index.html>）より得た。

## ②水質連続観測

本課題では、これまでに開発した大型自動観測ブイとテレメータシステムを運用・活用し、八代海で広域に水質環境を常時観測した。得られたデータは迅速に可視化しホームページ上で公表した。

### (1) 大型自動観測ブイ（水技研 [長崎]）

八代海姫戸沖（北緯 32 度 24.683 分，東経 130 度 26.567 分）に設置されている大型観測ブイ（図 2，Stn.H）に自動昇降式多項目水質計（AAQ-170W，JFE アドバンテック），流向流速計（Aquadopp Profiler，Nortek，抽出深度：1.5 m，3 m，以下 1 m 毎に海底まで），風向風速計（CYG-5106，Climatec，海面から高さ 3 m），光量子計（DEFI-L，JFE アドバンテック，海面から高さ 3 m）および硝酸塩センサー（SUNA V2，SEA-BIRD SCIENTIFIC，設置深度：1.5 および 5 m）を装着して各種観測を実施した。観測は 2024 年 6 月 5 日に開始，台風 10 号が来襲する直前の 8 月 28 日まで，1 時間間隔で水温，塩分，クロロフィル蛍光，濁度，溶存酸素飽和度，流向・流速の鉛直観測データ，海上風の風向・風速，1 分間隔で光量子束密度，15 分間隔で硝酸塩濃度のデータを取得した。なお自動昇降装置は，強風時に使用すると機器の破損につながるため，風速 9 m/s 以上で作動を停止し，風速 6 m/s 以下となり強風域を抜けたと判断できた場合に再稼働させた。また光量子束密度以外の観測データは，携帯電話通信網を通してデータ処理サーバーへ送信し，ホームページ（有明海・八代海等の水質観測情報，<http://ariake-yatsushiro.jp/>）上で公開した。さらに，鉛直自動観測ブイの機能維持と観測データの精度向上を図るため，およそ 1 ヶ月に 1 回の頻度で点検を行うとともに，表層，深度 1.5 m，2 m，5 m，および 10 m から採水を行い，塩分（8400B，GUILD LINE），クロロフィル濃度（10AU，TURNER DESIGNS，Holm-Hansen 法 [Holm-Hansen et al., 1965]），懸濁物質濃度（孔径 0.45 μm のミリポアフィルターでろ過・乾燥後に秤量 [植松ら, 1978]）および栄養塩（TRACCS2000，BRAN+LUEBBE）の分析に供した。採水試料の分析結果の一部は，自動観測ブイに搭載した多項目水質計で得られた観測データの校正に用いた。

### (2) テレメータによる水質の常時観測（鹿水技セ，熊本水研，天草水研，海水養殖漁協，東町漁協，水技研 [長崎]）

本課題では，八代海に広域に配置された自動水質監視システムを利用して包括的な水質環境の把握を行い，既存のセンサーの組み合わせを工夫したコストパフォーマンスに優れた水質監視システムにより，効率的な赤潮等の広域監視を実施するための自動観測システムのネットワークを維持管理・活用した。また，構築されたシステムや観測調査によって取得したデータをより迅速・効率的に可視化し，情報を公表するサイトを運用した。

本課題では，水産研究・教育機構水産技術研究所，熊本県水産研究センター，天草市水産研究センター，熊本県海水養殖漁業協同組合，東町漁業協同組合が八代海に所有する 24 時間連続観測が可能な自動観測ブイや自動水質監視テレメータシステム（表 2，図 3）で得られる水質等の観測データを監視システムホームページ上および熊本県水産研究センター（熊本県海域のデータ），鹿児島県水産技術開発センター（鹿児島県海域のデータ）のホームページ上で随時公開することで，有害赤潮の広域的な監視を行った。また，令和 6 年 6

月～10月に、月1回程度の頻度で熊本県水産研究センター、天草市水産研究センター、熊本県海水養殖漁業協同組合および東町漁業協同組合の4機関がテレメータシステム設置場所を中心に定期調査を実施した。調査項目は多項目水質計、有害赤潮プランクトンセンサー等による水質（水温、塩分、溶存酸素飽和度、クロロフィル蛍光値等）の鉛直観測、複数層の採水・検鏡調査とした。

### ③赤潮観測の機械化

本課題では、これまでに開発を続けてきた赤潮カメラと有害赤潮プランクトンセンサーの現場への導入試験、またドローンおよび seaMS（自動採水顕微鏡装置）を現場へ導入する際の障害解消に向けた技術開発を実施した。

#### 〈1〉有害赤潮プランクトンセンサー（熊本水研、天草水研、海水養殖漁協）

##### (i) 有害赤潮プランクトンセンサーを組み込んだテレメータによる定点観測

熊本県水産研究センターおよび熊本県海水養殖漁業協同組合は、熊本県天草市楠浦町（楠浦湾）および熊本県天草市御所浦町（御所浦風口）に、有害赤潮プランクトンセンサー（JFEアドバンテック（株）製 AHIW2；以下、センサーという）を組み込んだテレメータを設置した（図4）。令和6年（2024年）5月23日から9月25日までの約4ヶ月間、水深1.5m、5mおよび10mの3層で、水温、塩分、クロロフィル蛍光、DO、FSI（Fluorescence spectral Shift Index）を30分間隔で自動観測した。また、必要に応じて、現場での採水および有害赤潮プランクトンの検鏡を行い、センサーの効果を検証した。なお、水深5mのFSIが1.95以上となった場合、関係機関へ通知メールが届くように設定を行った。また、観測結果は、リアルタイムで熊本県および「八代海赤潮等広域監視システム」のホームページ（<https://ariake-yatsushiro.jp/yatsushiro/yatsushiro-sea2/top.php>）で公表した。

##### (ii) 有害赤潮プランクトンセンサーおよび多項目水質系による鉛直観測

天草市水産研究センターは、楠浦湾および御所浦風口にて、令和6年（2024年）6月～9月に月1～2回の頻度で、有害赤潮プランクトンセンサー（JFEアドバンテック（株）製 AHI-CAD）および多項目水質計（JFEアドバンテック（株）製 AAQ176）を用いた鉛直観測による定期調査を実施した（図5）。

#### 〈2〉ドローンを用いた赤潮発生範囲の把握（水技研、東町漁協）

赤潮防除で粘土散布を実施する際に、漁業者は目視で赤潮の範囲を確認し、高濃度と思われる場所に移動・散布している。しかし、漁船の船橋からでは高濃度な赤潮範囲の正確な把握には限界がある。そこで本課題では、ドローンを用いた赤潮範囲の推定技術の開発を検討した。

昨年度までの研究で、ドローンで赤潮を空撮し、その画像から高精度に赤潮発生範囲を推定することに成功した。今年度は、昨年度用いた計算方法でアプリを作成し、現場で即座に赤潮発生範囲を検出することを試みた。まず、昨年度取得した画像データおよび作成

した赤潮範囲推定プログラムをベースに、Tcl/Tk<sup>1</sup> で GUI を作成することで、簡易操作でプログラムを実行できるように組み替えた。次に、この簡易操作プログラムで現場の空撮写真から赤潮範囲を推定できるか確認した。最後に、ドローンによる観測および本プログラムの推定結果が漁業者の意思決定の補助になるかを検証した。

### 〈3〉 seaMS の導入と赤潮プランクトン検出（熊本大学，水技研 [長崎]）

八代海において頻発する *Chattonella* 属および *Karenia* 属の有害赤潮に関するデータの迅速な取得を目指して、自動採水顕微鏡装置（seaMS）を現場観測に導入する。しかし、現況では、得られた顕微鏡動画中に存在する赤潮プランクトンの数や状況の確認は目視で行う必要がある。これらの作業の軽量化、迅速化を図るために、顕微鏡動画中から赤潮プランクトンの検出を自動的に行うアルゴリズムの検討を行う。赤潮プランクトンの検出には深層学習の技術を利用する。八代海で出現頻度の高い有害種は何か、など、生物学、環境学的な知見を有効に利用することで、八代海に即したデータセットを構築し、その学習を行うことで、当該海域に適した仕組みの構築を目指す。seaMS で撮影された動画像は、現地での撮影ゆえに、撮影環境の統制が難しい。すなわち、カメラと有害種との距離等に起因した撮影対象のブレやボケ、外来光の影響等により、得られる動画像の性質が安定しないことが想定される。開発するアルゴリズムは、これらの不安定性に対してもロバストに対応できるように設計する。なお、上記の深層学習に用いるデータとして、今年度も赤潮発生時に現場海水の撮影と検鏡を行う。

#### 2) 発生予察手法の開発

これまで赤潮の数ヶ月予察には、気温と梅雨入り日による判別分析手法が用いられてきた。しかし、他海域における同手法による予察では年々精度が低下し、予測が外れてきたとの報告もある。このままでは本海域の予測もいずれ精度が低下し、的中しなくなる可能性がある。そこで本課題では、予測精度の維持・向上のため次の 2 項目を実施した。

1. 判別分析による予察
2. 他の統計的分類手法の適用

前者では、過年度まで開発を続けてきた予察手法を継続して運用した。後者では、昨年度に見出した予察に有効と考えられる変数と手法を用いた予察を試行した。

#### ①判別分析による予察

これまでに開発・運用を続けてきた判別分析モデルを用いて、今年の *Chattonella* 赤潮の発生を予測した。本モデルは八代海の *Chattonella* 赤潮が 2 ～ 4 月の平均気温と九州南部の梅雨入り日（5 月 16 日からの経過日数）と相関が高いことに着目し、判別分析を基盤に開発されたものである。これまで、約 5 年にわたっての運用実績があることから、今年

---

<sup>1</sup> Tcl/Tk とは、スクリプト言語の Tcl と GUI ツールキットの Tk を組み合わせたパッケージである。

GUI による簡易操作でプログラムを制御できるようにするものである。

度も継続して運用し、今年の赤潮発生を予測した。また、判別分析結果から得られる判別得点と赤潮発生日（6月30日からの経過日数）の回帰式から、赤潮発生日を推定した。

## ②他の統計的分類手法の適用

昨年度、*Chattonella* 赤潮の予察精度の維持・向上のために、説明変数とモデルの見直しを行った。その結果、説明変数については、赤潮予察に有効だと考えられるものを6種類見出した。また、モデルについては、ランダムフォレストを使用する方法が赤潮予察に適していると考えられた。そこで今年度は、これらを用いて *Chattonella* 赤潮の発生予察を試行した。

まず、今年度も含め、エルニーニョ監視指数として NINO.3・NINO.WEST・IOBW という3海域の海面水温を、南方振動監視指数として SOI・OLR・U200・U850・SAMOI の値を気象庁 HP より取得した。また、地域的なデータとして八代（アメダス）の気温・降水量・日照時間と球磨川（萩原）の河川水位を取得した。取得したデータを赤潮発生（非発生）の前年6月～当年5月で1年を再定義し、月単位で再整理した。

次に、2023年までのデータを用い、ランダムフォレストで赤潮発生および発生日を学習した。データは月単位で再整理した209項目のデータを30年分使用した。モデル作成では、209項目のうちランダムに14項目を使って5000本の決定木を作成した。決定木に使用する項目数は訓練データの項目数の平方根が推奨されているため（Lantz, 2013）、本研究では14項目とした。また、決定木の数は500本が一般的（Lantz, 2013）であるが、今回は計算資源に余裕があり、精度向上も見込まれるため、10倍の5000本とした。

くわえて、同じデータを用いて、目的変数を赤潮発生日として別途モデルを作成し、発生日の予察を実施した。発生日予測のモデル作成では、上記209項目のうちランダムに69項目を使って5000本の回帰木を作成した。回帰木に使用する項目数は訓練データの項目数の三分の一が推奨されているため（Lantz, 2013）、本研究では69項目とした。

作成した赤潮発生予測および発生日予測のランダムフォレストモデルと2024年のデータから、今年の *Chattonella* 赤潮の発生および発生日を予測した。

## 3) 拡大予察手法の開発

現在、赤潮が発生した場合、モニタリング頻度を一時的に上げることで、拡大する赤潮の把握を試みている。しかし、モニタリングの増強では赤潮の拡大を把握しきれないという現状がある。赤潮の拡大には移送と消長の2要素が関与すると考えられる。そのため、モニタリングだけでは拡大の推測は難しい。赤潮の拡大を知るためには、集積または散逸にくわえ、増殖または終息についても予測しなければならない。そこで本課題では、次の2項目に取り組んだ。

1. 有害赤潮プランクトンの輸送過程の解明
2. 赤潮発生から衰退に至る栄養塩動態の解明

前者では、赤潮の移送を把握するため、流動モデルおよび粒子追跡モデルを開発する。今年度は、赤潮の輸送に大きく関与すると考えられる流向流速と風向風速を解析し、赤潮

の移動方向の推定を検討した。後者では、ミキシングモデルを用いて、主要な栄養塩の供給源とその貢献の度合いを推定し、採水・採泥および室内実験で栄養塩の再生産速度を推定した。将来的には、両者の技術と知識を融合して物質循環モデルの開発を目指す。

#### ①有害赤潮プランクトンの輸送過程の解明

本課題では、赤潮の輸送を把握するため、流動モデルおよび粒子追跡モデルを開発する。その前段階として、今年度は風向風速から流向流速を推定する簡易式の開発を検討した。解析に用いたデータは、現在までに大型自動観測ブイが設置された大多尾（北緯 32 度 21.108 分，東経 130 度 14.938 分），湯ノ口（北緯 32 度 16.333 分，東経 130 度 17.000 分），姫戸沖の 3 地点（図 2）とし，各地点の流向・流速データ，多項目水質計（AAQ）による鉛直断面観測結果，および風向・風速データを使用した。データの期間は，各地点に大型自動観測ブイが設置され，撤去されるまでの期間とし，大多尾沖が 2011 年から 2017 年まで，湯ノ口沖が 2013 年から 2017 年まで，姫戸沖が 2012 年から現在（2024 年）までとした。

有害赤潮プランクトンの輸送へ最も大きく寄与する流れ場は平均残差流であり，潮汐流などの往復流は輸送への寄与は少ないことが推測されるため，過去の大型自動観測ブイの流向・流速データから平均残差流の推定を試みた。平均残差流は，各 3 地点の流向・流速データの東西成分（ $u$  成分）と南北成分（ $v$  成分）に非線形潮汐周期を含む 67 分潮の調和分解を施し予報潮流を算出した上で，実測流速から予報潮流を差し引き，さらに 24 時間の移動平均を施すことで算出した。算出された平均残差流は，風向・風速の東西成分（ $u$  成分）と南北成分（ $v$  成分）を説明変数とする重回帰分析にかけて予測式を導きだし，予測された平均残差流と実測の平均残差流の誤差を算出することにより評価した。

#### ②赤潮発生から衰退に至る栄養塩動態の解明

##### 〈1〉底層水の供給の長期変換

2014 年から 2023 年にかけて八代海で実施された調査結果の解析を通して，八代海において発生した *K. mikimotoi* と *Chattonella* 赤潮の拡大過程における栄養塩の供給源を考察する。解析の手順としては，まず，流量と *K. mikimotoi* 細胞数の推移および球磨川の河川流量（図 6）と TS ダイアグラムより，同一と見なせる期間を定義した。次に，それぞれの期間において球磨川の横石観測所における水温と溶存無機態窒素（DIN）濃度を取得した（国土交通省水質水文データベース：<http://www1.river.go.jp/>）。各期間において河川水に加えて，表層水（高塩分かつ高水温：主に南部海域の沿岸部）と底層水（最低水温：主に南部海域の代表点周辺の 40m 以深）をエンドメンバーとして定義した。以下の 3 エンドメンバーのミキシングモデルにより各起源水の寄与率を算出した。

$$\begin{aligned}f_{Ri} + f_{Wi} + f_{Bi} &= 1 \\f_{Ri}T_{Ri} + f_{Wi}T_{Wi} + f_{Bi}T_{Bi} &= T_{it} \\f_{Ri}S_{Ri} + f_{Wi}S_{Wi} + f_{Bi}S_{Bi} &= S_{it}\end{aligned}$$

ここで  $f$  は寄与率， $T$  は水温， $S$  は塩分，添字  $R$  は河川水， $W$  は表層水， $B$  は底層

水、 $i$  は任意の期間、 $t$  は各層の測定値を示す。次に、各寄与率に対して、各起源地の DIN 濃度を乗じることで供給 DIN 濃度 ( $DIN_{sup}$ ) を求めた。

$$f_{Xi}DIN_{Xi} = DIN_{supXi}$$

ここで  $X$  は起源地 (河川水、表層水または底層水) を示す。

## (2) 粒状有機物分解による栄養塩の再生産と有機物の供給過程

八代海の北部海域 (Stn.2) と南部海域 (Stn.5) の 2 地点において、2024 年 5 月 1 日、7 月 12 日に調査を実施した (図 7)。さらに、八代海の全域で 8 月 2 ~ 9 日に陽光丸にて調査を実施した (図 7)。調査地点では多項目水質計 (AAQ, JFE アドバンテック) を用いて水深、水温、クロロフィル a (Chl-a) 蛍光を測定した。また、水試料はバンドン採水器およびバケツを用いて Stn.2 で 3 層 (0, 5, 10m), Stn.5 で 6 層 (0, 5, 10, 20, 30, 40m) 採水し、Chl-a 濃度、粒子状有機態炭素 (POC)、栄養塩濃度定量用の試料とした。堆積物試料は内径 4cm の KK 式柱状採泥器を用いて表面を攪拌しないように採泥し、表層から深さ 4cm まで 1cm 間隔で堆積物を採取し、全有機炭素 (TOC)、間隙水中の栄養塩濃度定量用の試料とした。採取した水試料と堆積物試料を用いて、栄養塩の再生産速度を見積もる培養実験を実施した。培養実験において、水試料については各層 2 本ずつ容量約 120mL のポリカーボネート製の培養瓶に分取した。堆積物については採泥試料と同様に KK 式柱状採泥器で各地点 3 本ずつアクリル製円柱コアに採取した。採取後、速やかに直上水を採取し、培養開始前における栄養塩定量用試料とした。これらの水試料と堆積物試料を用いた培養実験は、暗条件で一定の現場水温に維持した培養装置内で約 24 時間おこなった。培養後に栄養塩濃度を測定し、有機物分解による栄養塩フラックスを求めた。

炭素および窒素安定同位体比をトレーサーとした寄与率の推定には、北部海域の代表として Stn.2、養殖海域の代表として Stn.YK4、外洋の代表として Stn.18 をエンドメンバーとし、南部海域 (Stn.5, 7, 9) における各起源の寄与率を推定した。なお、寄与率の推定には、R の `simmr` パッケージを用いた。

## 4) 行動計画 (水技研 [長崎], 東町漁協, 海水養殖漁協, 鹿水技セ, 熊本水研, 天草水研)

現在、赤潮被害の対策は漁業者や漁協が過去の経験をもとに判断・実施している。海域全体として被害拡大を防ぐためには、経験に基づく知識を明文化し、洗練・改良したのち共有する必要がある。そこで本課題では、昨年度に整理した赤潮発生状況と対策について、改善・更新を繰り返し、対策の改善を検討した。具体的にはドラッカーのフィードバック分析を実施した。この手法は、実際の経験を通して行動を修正することで赤潮対策の最適化を検討するものである。赤潮対策用に改変したフィードバック分析の手順は次のとおりである。

1. 昨年度見出した改善点の確認
2. 被害額の目標値を明記
3. 改善点を含めた対策の実施

4. 目標の被害額と実際の被害額の比較
5. 当該年度の対策の良し悪しを協議
6. 次年度に向けた改善点の立案

昨年度に立案された改善点は、東町漁協では深い生簀での養殖、海水養殖漁協では赤潮防除剤の常時設置と赤潮の輸送過程を考慮した生簀避難であった。今年度はこれらを含めた対策を実施した。

### (3) 結果および考察

#### 1) 現状把握

##### ①高頻度赤潮モニタリング

##### 〈1〉プランクトン細胞密度の推移

2024年の八代海では、5月から8月にかけて4種の有害赤潮プランクトンによる赤潮が継続的に発生した。珪藻類も含め、本調査における代表定点でのプランクトン細胞密度の推移を図8に示す。

有害赤潮プランクトン種ごとの発生状況について、他事業での調査結果も含めて整理すると次のとおりであった。

*Chattonella* 属は、5月29日に Stn.2, 4, 5, 6, A, D 他で確認され (1~2 cells/mL)、6月に入ると八代海全域で増加傾向にあることが確認された。

6月中旬以降は更に増加し高密度化した。本調査でも6月25日に Stn.2 および Stn.K で  $1 \times 10^2$  cells/mL を超える細胞密度が検出され、7月1日に、他事業により熊本県天草市御所浦地先で行われた調査で最高細胞密度 ( $6.7 \times 10^3$  cells/mL) を記録したが、7月中旬に減少に転じた。8月以降は低位で推移したことから、本種による赤潮は7月下旬には終息したと考えられる。

*Heterosigma akashiwo* は、5月21日に Stn.K で確認された (1 cell/mL)。その後、6月10日に、他事業により熊本県八代市鏡町地先で行われた調査で本種による赤潮が確認された ( $1.5 \times 10^4$  cells/mL)。6月13日には、他事業による調査において最高細胞密度 ( $1.8 \times 10^4$  cells/mL) を熊本県宇城市地先で記録したが、その後は確認されなかったことから、本種による赤潮は6月中旬には終息したと考えられる。

*Cochlodinium polykrikoides* は、5月29日に Stn.A で確認された (4 cells/mL)。その後、6月に入ると八代海全域で確認されるようになり、6月中旬には、熊本県天草市御所浦地先や鹿児島県長島町地先で局所的に高密度化していることが確認された。6月19日には、他事業による調査において最高細胞密度 ( $8 \times 10^3$  cells/mL) を鹿児島県長島町地先で記録した。その後、6月下旬のまとまった降雨後は減少し、7月以降は再び高密度化することなく低位で推移したことから、本種による赤潮は7月上旬には終息したと考えられる。

*K. mikimotoi* は6月12日に、他事業により熊本県天草市楠浦湾で確認された (3 cells/mL)。その後、7月上旬までは楠浦湾周辺で  $1 \sim 2 \times 10^3$  cells/mL 程度の細胞が確認されていたが、7月中旬以降は、熊本県天草市宮野河内地先や御所浦地先等、楠浦湾以外でも  $2 \times 10^3$  cells/mL 以上に高密度化していることが確認され、7月22日には、他事業による調査において最高細胞密度 ( $1 \times 10^4$  cells/mL) を楠浦湾で記録した。8月上旬は、御所

浦地先で  $3 \times 10^3$  cells/mL 程度の高密度化が確認されたものの、八代海全体では減少に転じ、8 月中旬以降は低位で推移したことから、本種による赤潮は 8 月中旬に終息したと考えられる。

これらの有害赤潮プランクトンの競合種である珪藻類の細胞密度は、調査期間中、最高で  $9.5 \times 10^3$  cells/mL (7 月 23 日, Stn.2, 0m 層) が確認されたが、八代海全体では低調な推移であり、 $1 \times 10^3$  cells/mL を超える細胞数が確認された調査日は、7 月 23 日、8 月 6 日、7 月 14 日および 9 月 19 日のみであった。また、珪藻類の主な優占種は *Skeletonema* spp. および *Chaetoceros* spp. であった。

## (2) 気象条件

八代市の気温は、5 月から 9 月の調査期間中、 $15.9$  (5 月 9 日)  $\sim$   $32.1^\circ\text{C}$  (8 月 4 日) の範囲で推移した。5 月上旬から中旬にかけては「平年並み」から「低め」で推移したが、5 月下旬から 8 月下旬にかけては概ね「高め」、9 月上旬から下旬にかけては概ね「かなり高め」で推移した。

降水量は、まとまった降雨があったものを抽出すると、5 月 12 日から 13 日までで合計  $73.5$  mm, 5 月 26 日から 28 日までで合計  $163$  mm, 6 月 8 日から 6 月 10 日までで合計  $57$  mm, 6 月 17 日から 7 月 2 日までで合計  $501$  mm, 7 月 9 日から 7 月 15 日までで合計  $280.5$  mm, を記録し、台風 6 号が接近・通過した 8 月 28 日から 30 日までの期間にも合計  $163$  mm を記録した。なお、気象庁発表資料によると、八代海が含まれる九州北部地域の梅雨入りは 6 月 17 日ごろで平年より 13 日遅く、梅雨明けは 7 月 17 日ごろで平年より 2 日早かった。

日照時間は 5 月中旬、6 月上旬から中旬、7 月上旬、7 月下旬から 8 月中旬、9 月上旬は「多い」または「かなり多い」であり、その他の期間は「平年並み」から「少ない」または「かなり少ない」で推移した (図 9)。

## (3) 水質

調査期間中、水温は  $18.2$  (5 月 9 日, Stn.5, 5m 層)  $\sim$   $30.9^\circ\text{C}$  (7 月 30 日, Stn.2, 表層) で推移した。なお、熊本県が実施している内湾調査の水深 5m の平均値について平年値と比較したところ、5 月、7 月、9 月は平年並み、6 月はやや低め、8 月はやや高めの評価であった。

塩分は、降雨の影響を受けた 5 月下旬、6 月下旬から 7 月下旬に、主に八代海北部から中部 (Stn.2, 4, A), 楠浦湾 (Stn.K) で低い傾向となった。

DIN, DIP および DSi 濃度は、それぞれ  $0.03$  (8 月 6 日, Stn.6, A, 5m 層)  $\sim$   $33.92$   $\mu\text{M}$  (7 月 16 日, Stn.6, 表層),  $0.00$  (5 月 21 日, 7 月 3 日, 7 月 23 日, 9 月 11 日, 9 月 24 日, Stn.2, 4, A, 表層等)  $\sim$   $0.98$   $\mu\text{M}$  (9 月 24 日, Stn.2, 5m 層),  $0.75$  (9 月 11 日, Stn.D, 表層)  $\sim$   $166.35$   $\mu\text{M}$  (7 月 16 日, Stn.2, 表層) の範囲で推移した。また、調査期間を通して、八代海の北部 (Stn.2, 4, A, D) および楠浦湾 (Stn.K) で栄養塩が高い傾向にあった。

DIN および DIP 濃度は、*K. mikimotoi* の増殖に必要な半飽和定数 (DIN :  $0.78$   $\mu\text{M}$ , DIP :  $0.14$   $\mu\text{M}$ ) を、水深 0  $\sim$  10 m で下回ることが度々あった (図 10)。水深 10 m より

浅い水深において、多くの調査定点 (Stn.2, 4, 5, 6, A, D, K) で DIN, DIP 濃度が 5 月～7 月に上昇したが、同時期に塩分低下と DSi 濃度の上昇がみられていたことから、降雨および球磨川からの供給によるものと考えられた。

以上のように、八代海海域では珪藻類が少ない状態が続き、降雨による栄養の供給もあったことにより、*Chattonella* 属、*H. akashiwo*、*C. polykrikoides*、*K. mikimotoi* の 4 種の有害赤潮プランクトンが優占種を交代しながら増殖した。

## ②水質連続観測

### (1) 大型自動観測ブイ

大型観測ブイは台風通過・時化などによる一時的な停止 (風速 9 m/s 以上を目安に判断) を除き、観測期間を通して稼働した。観測は 2024 年 6 月 5 日に開始し、台風 10 号が来襲する直前の 8 月 28 日まで観測を行った。台風 10 号通過後、西側係留索の一部が破断していることが確認され、安全対策のため観測を中止し、そのまま今期の観測を終了した。

自動昇降式多項目水質計で計測された水温、塩分およびクロロフィル濃度の鉛直プロファイルを図 11 に、各層別の経時変化を図 12 に示す。観測期間中、表層水温 (深度 0.5 m) は 20.3 ～ 33.6°C で推移し、8 月 5 日に最高値を示した。深度 10, 20 および 30 m 層の水温はそれぞれ 19.5 ～ 28.7°C, 19.4 ～ 27.6°C および 19.4 ～ 25.7°C の範囲で推移し、深度 10 m については 8 月 5 日に、深度 20 および 30 m 層についてはそれぞれ 8 月 20 日および 8 月 28 日に最高値を示した。また表層塩分は 3.7 ～ 32.6 で推移し、6 月下旬に塩分低下後、7 月上旬に回復し、7 月中旬に再び塩分低下し、7 月下旬には次第に塩分が回復した。深度 10, 20 および 30 m 層の塩分は、それぞれ 28.2 ～ 33.1, 30.3 ～ 33.2 および 31.3 ～ 33.2 の範囲で推移した。クロロフィル濃度については、表層 (深度 0.5 m)、深度 10, 20 および 30 m 層において、それぞれ 0.0 ～ 31.2, 0.3 ～ 15.5, 0.3 ～ 9.0 および 0.3 ～ 2.4 Chlorophyll fluorescence (センサー値) の範囲で推移した。

硝酸塩センサーにより得られた NO<sub>3</sub> 濃度の、補正を施す前の経時変化を図 13 に示す。7 月上旬は機器トラブルのため欠測である。硝酸塩センサーの観測頻度については、昨年度は 30 分間隔としていたが、毎週行われる高頻度赤潮調査の採水による測定結果と合わせることを考慮し、採水時間により近い時刻のデータを拾いやすくするため、今年度は 15 分間隔に計測した。硝酸塩センサーによる値と、採水による実測値と比較すると (図 14)、現場海域の硝酸塩濃度はほぼ 0.5 μmol/L を下回っており、硝酸塩センサーの精度 2 μmol/L よりもはるかに小さい。ただし、センサー値と実測値ともに 2 μmol/L を超えた値が水深 1.5 m, 5 m とともに 1 点だけ取ることができ、少々強引ではあるが検量線を引くことができたため、これを補正值とした (図 15)。梅雨期の 6 月から 7 月にかけて硝酸塩センサーの振れ幅が水深 1.5 m, 5 m とともに大きく、河川由来の栄養塩の供給に反応しているものと推測された。

海上風を図 16 上段に示す。6 月下旬から 7 月上旬にかけて、梅雨前線の影響による強い南西寄りの風が連吹していることが大きな特徴である。同期間中、水深 1.5 m の平均残差流 (図 16 内、上から 2 段目) は北東に向かう流れが顕著であり、有害赤潮プランクトンの輸送・拡散過程に大きく寄与していたものと推測される。

水温、塩分を過去の平均値 (2012 ～ 2021 年) と比較すると (図 17)、水温は 7 月以降、

かなり高めで推移していた。また塩分は 6 月から 7 月上旬までの表層を除くと低めで推移し、8 月中旬以降は表層付近を中心にやや高めであった。

## 〈2〉テレメータによる水質の常時観測

各観測システムにより得られたデータを効率的に収集して公表し、データをデータベース化して管理するために、過年度に開発・拡張した「八代海赤潮等広域監視システム」を水産研究・教育機構水産技術研究所のホームページ (<https://ariake-yatsushiro.jp/yatsushiro/yatsushiro-sea2/top.php>) において公表した (図 18)。これにより、他機関が管理する観測機器のデータも一元的に表示され、即時確認できるようになった。

## ③赤潮観測の機械化

### 〈1〉有害赤潮プランクトンセンサー

#### (i) 有害赤潮プランクトンセンサーを組み込んだテレメータによる定点観測

今年度の八代海では、*Chattonella* 属、*H. akashiwo*、*C. polykrikoides* および *K. mikimotoi* の 4 種類の有害赤潮プランクトンによる赤潮が発生した。熊本県では、5 月 30 日に *Chattonella* 属 (警報発令基準 10 cells/mL)、6 月 10 日に *H. akashiwo* (警報発令基準 10000 cells/mL)、6 月 17 日に *C. polykrikoides* (警報発令基準 500 cells/mL)、6 月 24 日に *K. mikimotoi* (警報発令基準 1000 cells/mL) の警報を発令し、8 月 20 日に一括して警報を解除した。ここでは、楠浦湾における *Chattonella* 属および *K. mikimotoi* の赤潮発生時の結果を報告する。

今年度の観測期間におけるクロロフィル蛍光および FSI の推移を図 19 に示す。今年度、楠浦湾においては 6 月 10 日から 6 月 18 日まで *Chattonella* 属、6 月 19 日から 7 月 7 日まで *Chattonella* 属と *K. mikimotoi*、7 月 8 日から 8 月 7 日まで *K. mikimotoi* による赤潮がそれぞれ発生した。

まず、*Chattonella* 属の早期探知について報告する。6 月 13 日、天草市水産研究センターによる調査にて *Chattonella* 属が本属の赤潮警報基準値 (10 cells/mL) を超える 19 cells/mL が確認されたが、この時 FSI に反応はみられなかった。また、6 月 14 日の漁業者による検鏡結果では *Chattonella* 属の細胞密度が 9 cells/mL であり、この時 FSI に反応がみられたが、*K. mikimotoi* も同時に 7 cells/mL 確認されたため、*Chattonella* 属以外の *K. mikimotoi* または、両者の合計値に FSI が反応した可能性があると考えられた。なお、熊本県では *Chattonella* 属について、警報基準値を 10 cells/mL としているが、今回の結果では *Chattonella* 属が警報基準値以上の細胞数で発生していても FSI が反応しない可能性があるため、*Chattonella* 属の早期探知は困難であると考えられた。

続いて、*K. mikimotoi* の探知について報告する。*K. mikimotoi* の発生初期のセンサー観測値の推移を図 20 に示す。6 月 17 日に、水深 5 m 層で FSI が 1.95 を超えたことを示す通知メールが届いたため、天草市水産研究センターが調査したところ、水深 1.5 m 層で *K. mikimotoi* が 15 cells/mL 確認された。また、翌日 18 日、漁業者の検鏡により水深 5 m 層で *K. mikimotoi* が 42 cells/mL 確認され、同日、通知メールが届いた。また、翌日 19 日、熊本県の調査で *K. mikimotoi* が水深 10 m 層で 103 cells/mL 確認され、同日、熊本県は八代海に *K. mikimotoi* の赤潮注意報を発令した。これは、初期発生時に中層で増殖する *K.*

*mikimotoi* (Honjou, 1990) をセンサーが捉えたものと考えられた。このように、センサーの設置により、*K. mikimotoi* を早期発見することができた。

続いて、*K. mikimotoi* 赤潮の発達期のセンサー観測値の推移を図 21 に示す。*K. mikimotoi* 赤潮の発達期では、FSI およびクロロフィル蛍光の変位に周期性がみられた。これは *K. mikimotoi* が増殖期に行う日周鉛直移動 (Honjou, 1990) を捉えていると考えられ、昨年同様に観察することができた。

最後に、*K. mikimotoi* 赤潮の終息期のセンサー観測値の推移を図 22 に示す。衰退期になると、*K. mikimotoi* は運動能力を消失させ、表層に集積して消滅していくが (Honjou, 1990)、今年度の楠浦湾では 8 月 8 日に水深 10 m、水深 5 m の順番で FSI が 1.95 を下回るようになり、水深 1.5 m では 8 月 10 日を最後に FSI が 1.95 を下回るようになり、*K. mikimotoi* による赤潮が終息した。このような傾向は昨年度の観測においても確認されており、*K. mikimotoi* 赤潮において、水深 10 m から 1.5 m にかけて、FSI が 1.95 を下回るようになることが終息の判断指標になると考えられた。

また、水深 10 m で FSI の値が 1.95 を下回るようになってから終息までの期間として、昨年度は約 3 日、今年度は約 2 日であった。このことから、*K. mikimotoi* 赤潮は、底層での FSI が 1.95 を下回るようになってから 2 ~ 3 日程度で終息する可能性が示唆された。

このように、今年度の観測においても、センサーを活用したモニタリングにより *K. mikimotoi* の初期発生や終息期について、昨年度の観測と同様の傾向を確認できた。*K. mikimotoi* の早期発見や終息時期の推定について、今年度示された有効性が来年度以降も再現性があるか、引き続き検証が必要である。

## (ii) 有害赤潮プランクトンセンサーおよび多項目水質系による鉛直観測

*Chattonella* 属の赤潮時 (6 月 13 日)、*K. mikimotoi* の赤潮時 (7 月 26 日) の天草市水産研究センターによる鉛直観測結果を図 23 に示す。

*Chattonella* 属の赤潮時について、FSI に反応がみられた水深 7 m にて *Chattonella* 属が 17 cells/mL 確認されたが、同時に *K. mikimotoi* も 29 cells/mL 確認された。この結果から、テレメータ観測同様、FSI が反応した場合においても、FSI が *Chattonella* 属以外の *K. mikimotoi* または、両者の合計値に反応した可能性があるため、*Chattonella* 属の早期探知への活用は困難であると考えられた。

また、*K. mikimotoi* の赤潮時について、*K. mikimotoi* がそれぞれ 1040 cells/mL と 620 cells/mL ずつ確認された水深 4 m および 5 m で、FSI に反応がみられた。しかし、水深 10 m にて *K. mikimotoi* が 180 cells/mL 確認されたが、FSI に反応はみられなかった。これは、水深 10 m では *Skeletonema* 属も同時に確認されており、*K. mikimotoi* の優占割合が 50% 未満であったため、FSI に反応しなかったと考えられた。

今年度の観測において、有害赤潮プランクトンセンサーが *K. mikimotoi* の発生動向を捉えており、定点観測ではセンサーを異なる水深の 3 層に設置することで、昨年度観測同様 *K. mikimotoi* 赤潮の発生初期から終息期までを観測することができた。これらのことから、*K. mikimotoi* 赤潮の早期発見および終息時期の推定にセンサーを活用可能と考えられるが、これらのセンサーの有効性については、来年度以降も再現性があるか確認する必要がある。

一方、センサーの *Chattonella* 属への有効性については、*Chattonella* 属が 10 cells/mL で熊

本県の赤潮警報レベルとなること、他プランクトンとの優占割合により FSI の反応状況が変わること等から、センサーによる *Chattonella* 属赤潮の早期感知は難しいと考えられた。

今後は、センサーを *K. mikimotoi* 赤潮の発生動向モニタリングに活用しながら、今年度成果の再現性を確認するとともに、更なるデータの蓄積および検証を進める必要がある。

## 〈2〉ドローンを用いた赤潮発生範囲の把握

*Chattonella* 赤潮が発生していた 2024 年 7 月 5 日に八代海へ急行し、ドローンによる現場観測を実施した。八代海の姫戸と楠浦および大築島南側でそれぞれ 295, 110, 630 cells/mL の *Chattonella* spp. が確認された。

姫戸と楠浦でドローンによる空撮を行い、船上でプログラムを実行した。しかし、両海域ともに着色を確認できず (図 24)、赤潮範囲を推定できなかった (図 25)。また、大築島南側では風速が 7.4 m/s もあったため、ドローンを離陸させることができなかった。

以上の結果から、ドローンを赤潮観測に活用すること効果的ではないと考えられた。以下では、この結論に至った考察を 2 つ述べる。

第一に、今回の細胞密度を検出できなかったことから、ドローンの使用は有効ではないと考えられる。本課題の背景には、赤潮が低濃度のときに粘土散布をして赤潮を縮小させたいという狙いがあった。しかし、本調査では約 100 cells/mL という低濃度の赤潮を検出できなかった。さらに、今回の赤潮はこの濃度でも十分に魚毒性を持つ *Chattonella* spp. であった。すなわち本調査の結果は、大きな被害をもたらしかねない 100 cells/mL 程度の *Chattonella* 赤潮を検出できず、そのため粘土散布による赤潮の縮小も図れないことを示している。

第二に、天候に左右されるドローンは監視調査で常用できそうにないと考えられる。本調査では、八代海湾奥に吹き寄せられたと考えられる赤潮 (大築島南側 : 630 cells/mL) が確認された。しかし、その風 (7.4 m/s) が原因でドローン进行操作することができなかった。吹き寄せによる赤潮発生海域で使用できないというのは調査するうえで致命的であると考えられる。

これらのことを考慮すると、低濃度赤潮を発見するためにドローンを監視調査で常用することは効果的ではないと考えられた。

## 〈3〉seaMS の導入と赤潮プランクトン検出

本課題では、八代海で採水し、海上設置型の自動顕微鏡システム seaMS で撮影された映像から、深層学習の物体検出手法のひとつである DINO (DETR with Improved denoising anchor boxes) (Zhang et al., 2022) を用いて、有害な赤潮プランクトンの自動検知および計数の精度を検証した。

### (i) 深層学習フレームワーク

今回採用した DINO は、DETR (Detection Transformer) を拡張、改良したものを位置付けられる。DETR (Carion et al., 2020) は Transformer を機構に取り入れた関係抽出型の物体検出手法である。これは自然言語処理分野で大きな成功を収めた Transformer を物体検

出に応用した新しい戦略であり、全ての物体を一度に予測し、推論と正解の二部マッチング問題として捉えることで End-to-End を実現し、高い精度や高速処理を達成している。Faster R-CNN (Ren et al., 2016) や RetinaNet (Lin et al., 2020) などではすべての検出結果はそれぞれで推論されているが、この手法では画像内に存在する関係性を Transformer の注意機構を利用して捉える技術である。そのため、RetinaNet などでは頻発する対象物体に対して複数の検出結果が重畳されてしまうような結果も、DETR であれば解決し、顕微鏡画像に写る植物プランクトンを識別し、種判別できる可能性がある。入力画像を ResNet などの CNN に入力し、特徴マップを生成した後に Transformer を利用する。このとき、Transformer のエンコーダーには位置情報を付与した positional encoding を入力に、デコーダーは object queries を入力としている。そして、この出力を FFN(Feed Forward Network) に通して物体の位置座標とクラスラベルをデコードする。このように DETR はデコーダーを通して画像内の物体の推論結果を出力する。

DINO は DETR と同様に関係抽出型の物体検出手法である。DINO ではさらに Contrastive DeNoising Training という機構を追加しており、ラベルに少しノイズを加えたポジティブサンプルとラベルに大きなノイズを加えたネガティブサンプルの両方を使用し、モデルがより識別力のある特徴を学習できるようにしている。さらに、query を位置情報と物体情報に分けて学習し、位置情報を考慮して学習する Mixed Query Selection という機構を追加することでそれまでであった 1 つの物体に対して重複して検出してしまう問題の解決に測っている。このように Transformer に基づくアーキテクチャにより、従来の CNN ベースの物体検出手法とは異なり、提案された物体の位置を直接予測する。この手法は、特に複雑な背景や多様なサイズの物体を含むシーンに対して有効であり、プランクトンの自動検出にも適用できる可能性がある。上記を踏まえ、本課題では DINO を採用することにした。DINO の概要を図 26 に示す。

## (ii) データセット

本課題で用いるデータセットは、seaMS で撮影された動画をもとに作成した。seaMS は現場設置型の採水から撮影、洗浄までの一連の流れを自動で行うことができる。撮影の流れは、一つの試料の一部を流し、水の流れを一度止めて 30 秒間の撮影を行う。そして、また同じサンプルの一部が流れ、撮影を行う。この流れを約 10 回行っている。1 つの動画は 1280 × 720 pixel, 30 fps であり、映像の長さは約 30 秒である。動画の種類は培養された赤潮プランクトンの映像と、実際に八代海で採水された現場データの 2 種類がある。培養データについては、*Chattonella antiqua* と *Chattonella marina* そして *K. mikimotoi* の 3 種の培養された有害赤潮プランクトンがそれぞれ動画に存在する。また、現場データには上記 3 種の赤潮プランクトンの他に、*Ceratium* 属という植物プランクトンが混在した映像である。学習用データセットには培養株データを用い、上述した 3 種の赤潮プランクトンからそれぞれ 1 つ動画を選び、アノテーションを行った。アノテーション作業では、1 つの 30 秒動画から 2 秒ごとに画像を切り取り、アノテーションツールの LabelImg を用いて教師画像を作成した。教室画像作成の様子を図 27 に示す。この教師データに対して、水平・上下・水平上下反転のデータ拡張を行い、学習用に 145 枚、検証用に 35 枚を用いた。

### (iii) 学習

前述の通り、本課題では、DINO を用いて赤潮プランクトンの検出を試みた。なお比較対象として、二段階検出器である Faster R-CNN と一段階検出器である RetinaNet についても赤潮プランクトンの検出を試み、その検出精度を比較した。すべて COCO データセットで事前トレーニングを行なっている。そして、CNN の backbone には ResNet50 を選択し、ImageNet で事前トレーニングを行なっている。また、エポック数は 100 epoch と設定し学習をおこなった。

### (iv) 実験と考察

DINO を用いた赤潮プランクトンの検出例を図 28, 図 29 に示す。図 28 は *C. antiqua*, 図 29 は *C. marina* の検出例である。室内実験で撮影された培養株データを元にテストした結果、全ての手法で 90% を超える高い精度を得た。その中でも DINO は 98.5% の最も高い AP を達成した。Faster R-CNN, RetinaNet および DINO について検出性能を表 3 にまとめる。以上より、赤潮プランクトンの検出と種判別に対して DINO が有効に機能することを示した。

## 2) 発生予察手法の開発

### ①判別分析による予察

過年度に *Chattonella* 赤潮の中長期動態予測技術として開発された判別分析による赤潮発生予察を行った。その結果、赤潮発生は的中したが発生日は的中しなかった。

今年度の 2 ~ 4 月の平均気温は 13.6°C, 梅雨入りは 6 月 8 日で 5 月 16 日からの経過日数は 23 日であった。これを図 30 にプロットすると、判別直線より右上、すなわち「今年度は赤潮発生年である」と予測された。現実においても、前述の通り、*Chattonella* 赤潮が発生しており、予測は的中したと認められた。

この判別分析結果から判別得点を算出したところ、今年度は 3.75 であった。これを判別得点と赤潮発生日の回帰式に代入して赤潮発生日を算出したところ、6 月 30 日から約 5 日前、すなわち「6 月 25 日頃に赤潮が発生する」と推定された(図 31)。しかし実際は、5 月末日に *Chattonella* 赤潮が八代海に発生・拡大したことが確認された。そのため、発生日については的中しなかったと判断した。

### ②他の統計的分類手法の適用

ランダムフォレストで今年度の赤潮発生予察を行った。その結果、赤潮発生は的中したが、発生日は的中しなかった。

赤潮発生予察のランダムフォレストモデルにおける混同行列を表 4 に記す。本モデルの正解率は 0.67, 適合率は 0.7, 再現率は 0.9, F 値は 0.79 であった。正解率は低い、適合率・再現率・F 値が高いことから、本モデルは昨年度検討した各モデルと比較しても十分な予測性能を有していると考えられた。この 5000 本の決定木全体をランダムフォレストモデルとして発生予察を実施したところ、今年度は「赤潮発生」と判定された。現実においても、前述の通り、*Chattonella* 赤潮が発生しており、予測は的中したと認められた。

発生日予測のモデルでは、上記 209 項目のうちランダムに 69 項目を使って 5000 本の回帰木を作成した。この 5000 本の回帰木全体をランダムフォレストモデルとして発生日予測を実施したところ、今年度は 7 月 30 日に赤潮が発生すると予測された。しかし、実際には 5 月 30 日に *Chattonella* 赤潮が発生したため、発生日については的中しなかったと判断した。

### 3) 拡大予察手法の開発

#### ①有害赤潮プランクトンの輸送過程の解明

有害赤潮プランクトンの輸送過程に最も寄与するものと考えられる平均残差流の算出に先駆けて、姫戸沖大型自動観測ブイの観測点における流向・流速観測結果に 67 分潮の調和分解を施した。主要 4 分潮の潮流楕円を図 32 に示すが、潮流は半日周潮の  $M_2$  と  $S_2$  分潮が卓越しており、潮流楕円は主に等深線に沿う方向で、両分潮を合わせると 30cm/s 程度の潮流があることが示された。

調和分解により得られた調和定数を用いて予報潮流を算出し、実測の流向流速から予報潮流を差し引くことで潮汐残差流を求めた (図 33)。潮汐残差流には八代海の固有振動と見られる数時間周期の変動成分が残っており、その大きさは潮流に匹敵し 30cm/s を超える場合も認められた (図 34 内、細い実線)。これら数時間周期の変動成分の発生要因については不明であるが、輸送への寄与は小さいものと判断し、ここでは 24 時間の移動平均をかけることで平均残差流と定義した (図 33 内、太い実線)。

次に、算出された平均残差流も目的変数とし、風向・風速データに 24 時間の移動平均を施した東西成分 (u 成分) と南北成分 (v 成分) を説明変数とした重回帰分析により平均残差流の予測式を作成した。しかしながら予測された平均残差流の大きさは東西・南北成分とも数 cm/s 程度であり、二乗平均平方根誤差 (RMSE) も同程度であったことから、平均残差流を予測するためには不十分で、平均残差流の説明変数として風向・風速だけでは不足であることが推測された (図 34)。

平均残差流の予測には風向・風速だけでは不十分であることが示されたため、精度向上を目指し、説明変数に密度の効果を入れることを検討した。多項目水質計の水温と塩分の観測結果から、状態方程式による海水密度の計算を行ったところ、夏季の八代海の海水密度はほぼ塩分で説明できたことから、塩分と、密度成層の発達・衰退を表す指標として塩分の時間変化を説明変数に追加することとした。風と塩分による予報式は、塩分を入れる前の予報式よりも精度向上が認められたが、塩分の変化の乏しい期間にも平均残差流は南北に激しく変化している (図 35) ことから、まだ足りていない説明変数が存在するものと推測された。今後、大潮・小潮周期を示す月齢や気圧変化等を入れてさらなる予測精度の向上を検討する必要がある。

#### ②赤潮発生から衰退に至る栄養塩動態の解明

##### 〈1〉底層水の供給の長期変換

図 6 には球磨川の流量と *K. mikimotoi* および *Chattonella* spp. の日最大細胞数の推移を示す。河川流量はそれぞれの年の最大で約 1250 m<sup>3</sup>/s から約 2500 m<sup>3</sup>/s の範囲であった。*K. mikimotoi* の細胞数は 2022 年 8 月 4 日から 23 日にかけて 51000 cells/mL から

220000 cells/mL と高密度な状態を維持していた。このとき、直前の出水は 7 月 20 日の 1319 m<sup>3</sup>/s とその流量は中程度であった。一方、2014 年の流量も 6 月 22 日から 7 月 10 日にかけて複数回 1000 m<sup>3</sup>/s 程度の出水があったものの *K. mikimotoi* の赤潮が発生せず、2017 年には赤潮発生前の流量が 1000 m<sup>3</sup>/s に満たなかったが最大細胞数は 20000 cells/mL を上回った。*Chattonella* spp. についても同様で、2021 年 7 月 10 日に 1 日だけ 1095 m<sup>3</sup>/s を超える中規模な出水の後、7 月 14 日から 21 日にかけて最大で 110000 cells/mL に達する赤潮を形成・維持した。これらの発生状況から、出水の規模やタイミングのみで *K. mikimotoi* や *Chattonella* spp. の赤潮の規模拡大を説明できないことが分かる。

図 36 には南部海域 (Stn.5, 6, 7) の表層から水深 10 m においてミキシングモデルで求めた底層由来 DIN 濃度を示す。全ての年において 5 月から夏・秋に向けて上昇する傾向を示した。2022 年と 2023 年を除く大規模な赤潮が発生した年に共通する特徴としては、表層であっても底層由来 DIN 濃度が比較的高濃度 (1 ~ 10 μM 程度) 含まれていたことである。この現象を言い換えると、表層に底層由来 DIN が含まれていない場合には赤潮が大規模化しないということになる。ただし、例外としてあげた 2022 年および 2023 年においては赤潮が大規模化した時のみ、底層由来 DIN 濃度は 1 μM 以下にまで低下しており底層からの栄養塩供給が確認されなかった。

## 〈2〉粒状有機物分解による栄養塩の再生産と有機物の供給過程

5 月と 7 月に実施した有機物分解実験において両月において南部の Stn.5 の水柱における再生産量が多く、5 月には 5.1 mmol/m<sup>2</sup>/d であり、7 月には 34.2 mmol/m<sup>2</sup>/d に達した (図 37)。一方、Stn.5 において 5 月から 7 月にかけての水柱の DIN 増加量は 1.44 mmol/m<sup>2</sup>/d と水柱における再生産量と比べて著しく低い値を示した。このことから、水柱における有機物分解が南部海域における栄養塩増加量を支えている可能性が高いことが示された。2024 年 8 月上旬に実施した調査より得られた結果より、南部海域において水温は 25.5–26°C、塩分は 31–31.5 と養殖海域に近い値を示した (図 38)。また懸濁態有機炭素 (POC) 濃度については養殖海域が最も高く最大で 200 μg/L に達した一方、南部海域では 75–100mg/L の範囲で比較的低濃度であった。炭素安定同位体比は南部海域において高く -20‰ から -20.5‰ の範囲内であった。これに次いで養殖海域でも -22‰ から -20‰ と高い傾向を示した。得られた炭素および窒素安定同位体比について各エンドメンバーと南部海域のデータをプロットしたところ、多くの点が養殖海域と近い値を取る傾向を示した (図 39)。これらのデータを用いて南部海域に対する寄与率を計算したところ、その中央値は養殖海域で約 50% と高く、次いで北部海域が約 30% となった。これらのことを総合すると、養殖海域から南部海域へと供給される有機物が分解されることが赤潮の維持拡大に対して重要な役割を担う可能性が示された。

## 4) 行動計画

今年度は昨年度見出した改善案を含めた形でフィードバック分析を行った。以下では熊本県海域と鹿児島県海域に分けてフィードバック分析の項目順に報告を行う。

### ①熊本県海域

1. 赤潮発生時の対応表は昨年度作成したのと同じである（表 5, 図 40）。今年度はこの表に、赤潮防除剤の常時設置および拡大予察結果を考慮した対策が追記された。2. 被害額の目標値を 0 円に設定した。3. 対策表に準じて赤潮対策を実施した。また、赤潮防除剤の常時設置および拡大予察結果の共有も実施した。4. 実際の被害額は 14.8 億円であった。5. 赤潮防除剤常時設置の効果は不明とされた。なぜなら、設置時に 3 分の 1 が流出し、徐々に溶け出すという期待した効果が得られなかったからである。今年度は *Chattonella* spp. が全層にわたって発生したため、生簀を深くしていたにもかかわらず養殖魚が斃死した。これを受けて、いつ赤潮が生簀に接近するか知りたいとの要望が上がった。一方で、楠浦の大型生簀はほとんど被害が出なかったという良い情報が得られた。6. 「生簀の大型化」が最も有効そうであるが、本事業では対応できない。そのため、次年度の対策は足し網を増やすことと、流向流速および赤潮発生の短期予測を実施することになった。

### ②鹿児島県海域

1. 赤潮発生時の対応表は昨年度作成したのと同じである（表 6, 図 41）。今年度はこの表に、赤潮前に深い生簀に養殖魚を移すことおよび最初から深い生簀で養殖することが追記された。2. 被害額の目標値を 0 円に設定した。3. 対策表に準じて赤潮対策を実施した。また、足し網の実施を漁業者に周知した。4. 実際の被害額は 1.05 億円であった。5. 足し網を実施する漁業者は増えたが、熊本県海域同様、*Chattonella* spp. が全層にわたって発生したため、生簀を深くしていたにもかかわらず養殖魚が斃死した。また、例年より当歳魚が多く斃死したことも今年度の特徴であった。考えられる原因としては、ワクチン接種と給餌をする時期が赤潮と重なったこと、また慣習で当歳魚の生簀を深くしていなかったことが挙げられた。6. 以上のことから、次年度は足し網を徹底して実施することになった。

### 引用文献

- Carion N, Massa F, Synnaeve G, Usunier N, Kirillov A, Zagoruyko S. End-to-end object detection with transformers. In: *European conference on computer vision: 2020*; 213-229.
- Holm-Hansen O, Lorenzen CJ, Holmes R W, Strickland JD. Fluorometric determination of chlorophyll. *IJMS* 1965; **30**: 3-15.
- Honjou T. Annual cycle of motile cell of *Gymnodinium nagasakiense* and ecological features during the period of red tide development. In: *Toxic Marine Phytoplankton*. 1990; 165-170.
- Lantz B. *Machine Learning with R*. Packt Publishing. 2013. (訳者 長尾高弘. 「R による機械学習」翔泳社, 東京. 2017)
- Lin T-Y, Goyal P, Girshick R, He K, Dollar P. Focal loss for dense object detection. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence* 2020; **42**: 318-327.
- Ren S, He K, Girshick R, Sun J. Faster r-cnn: Towards real-time object detection with region proposal networks. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence* 2016; **39**: 1137-1149.
- 植松光夫, 南川雅男, 有田英之, 角皆静男. 海水中の懸濁粒子量の測定法. 北海道大學水

産學部研究彙報 1978 ; 29 : 164-172.

Zhang H, Li F, Liu S, Zhang L, Su H, Zhu J, Ni LM, Shum H-Y. Dino: Detr with improved denoising anchor boxes for end-to-end object detection. *arXiv preprint arXiv:2203.03605* 2022.

表 1. 調査地点

測点番号	測点名	北緯	東経
2	大築島北	32°30.40′	130°29.70′
4	田浦沖	32°20.20′	130°25.26′
5	津奈木沖	32°16.20′	130°21.46′
6	米ノ津沖	32°11.80′	130°17.65′
7	獅子島西	32°17.60′	130°11.65′
A	姫戸ブイ	32°24.68′	130°26.57′
D	嵐口	32°21.39′	130°21.72′
K	楠浦湾	32°23.61′	130°13.67′

表 2. 機器設置一覧

定点名	管理機関名	観測項目				
		水温	塩分	DO	クロロフィル・濁度	FSI
田浦	熊本県	0.5m	-	-	-	-
楠浦	熊本県, 海水養殖漁協 (天草市)	1.5m, 5m	1.5m, 5m	1.5m, 5m	1.5m, 5m	1.5m, 5m
嵐口	海水養殖漁協 (天草市)	1.5m	1.5m	1.5m	1.5m	1.5m
宮野河内	海水養殖漁協	1.5m	1.5m	1.5m	1.5m	-
深海湾		1.5m	1.5m	1.5m	1.5m	-
久玉湾		1.5m	1.5m	1.5m	1.5m	-
葛輪黒崎	東町漁協	1m, 3m, 10m	-	-	-	-
薄井竹島		1m, 3m, 5m, 10m	1m	1m, 5m, 10m	5m	-
宮ノ浦		1m, 3m, 5m, 10m	1m	1m, 5m, 10m	5m	-
脇崎		1m, 3m, 10m	-	-	-	-
多々羅		1m, 3m, 10m	-	-	-	-
柏栗		1m, 3m, 10m	-	-	-	-
福ノ浦		1m, 3m, 10m	-	-	-	-
御所浦		1m, 3m, 10m	-	-	-	-

表 3. 赤潮プランクトンの検出率まとめ

	Average Precision (%)		
	Faster R-CNN	RetinaNet	DINO
<i>C. antiqua</i>	96.0	93.1	98.7
<i>C. matina</i>	98.0	98.7	99.9
<i>K. mikimotoi</i>	96.7	96.1	97.0
総計	96.9	95.9	98.5

表 4. 赤潮発生予測のランダムフォレストモデルにおける混同行列

		予測	
		赤潮	非赤潮
実測	赤潮	19	2
	非赤潮	8	1

表 5. 海水養殖漁協における赤潮発生状況と対応

漁場	海域	<i>Chattonella</i> 属の細胞密度	対策
楠浦湾	楠浦湾内	10 cells/mL 以上	餌止めと足し網を実施
龍ヶ岳・樋島	姫戸沖	着色・警報・10 cells/mL 以上	餌止めを実施

※ *K. mikimotoi* の場合は 100 倍の細胞密度を基準とする

表 6. 東町漁協における赤潮発生状況と対応

		<i>Chattonella</i> 属の細胞密度	
		1~5 cells/mL	5~10 cells/mL
御所浦島	北側	漁協による自主調査	沈下・足し網の準備
	南側	漁業者による検鏡	沈下・足し網の実施

※ *K. mikimotoi* の場合は 100 倍の細胞密度を基準とする





図 3. 自動水質監視テレメータと自動観測ブイ等の設置場所および観測・管理担当機関



図 4. 楠浦湾設置のテレメータ



図 5. 有害赤潮プランクトンセンサーと多項目水質計および採水器

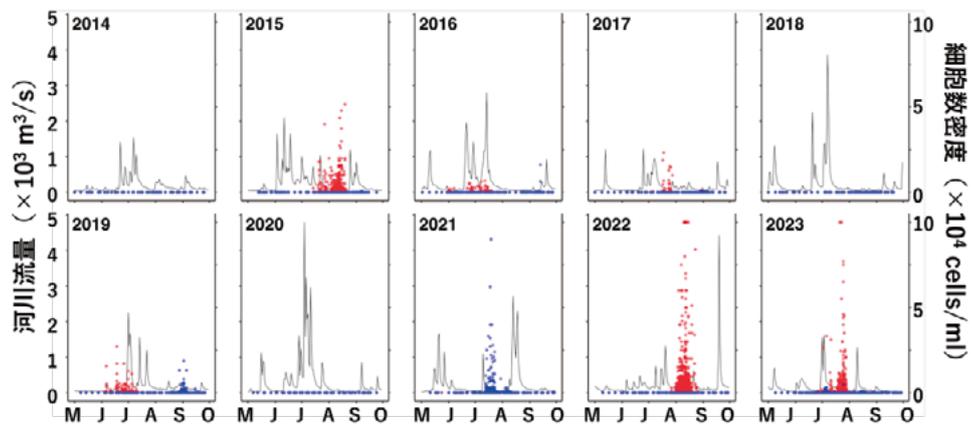


図 6. 球磨川の流量（実線）と *K. mikimotoi* (●) および *Chattonella* spp. (●) の日最大細胞数の時系列変化。

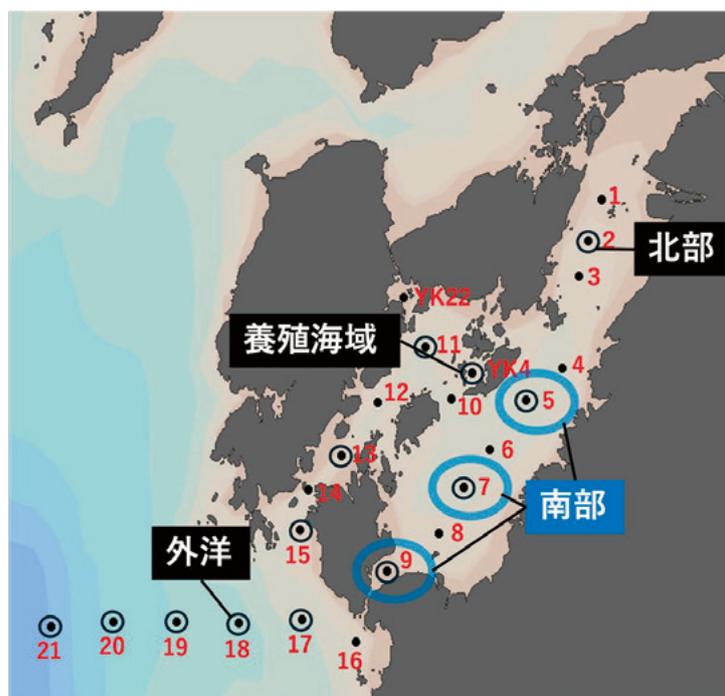


図 7. 調査地点図. 図中の◎は陽光丸観測において粒状有機物を採取した地点を示す。

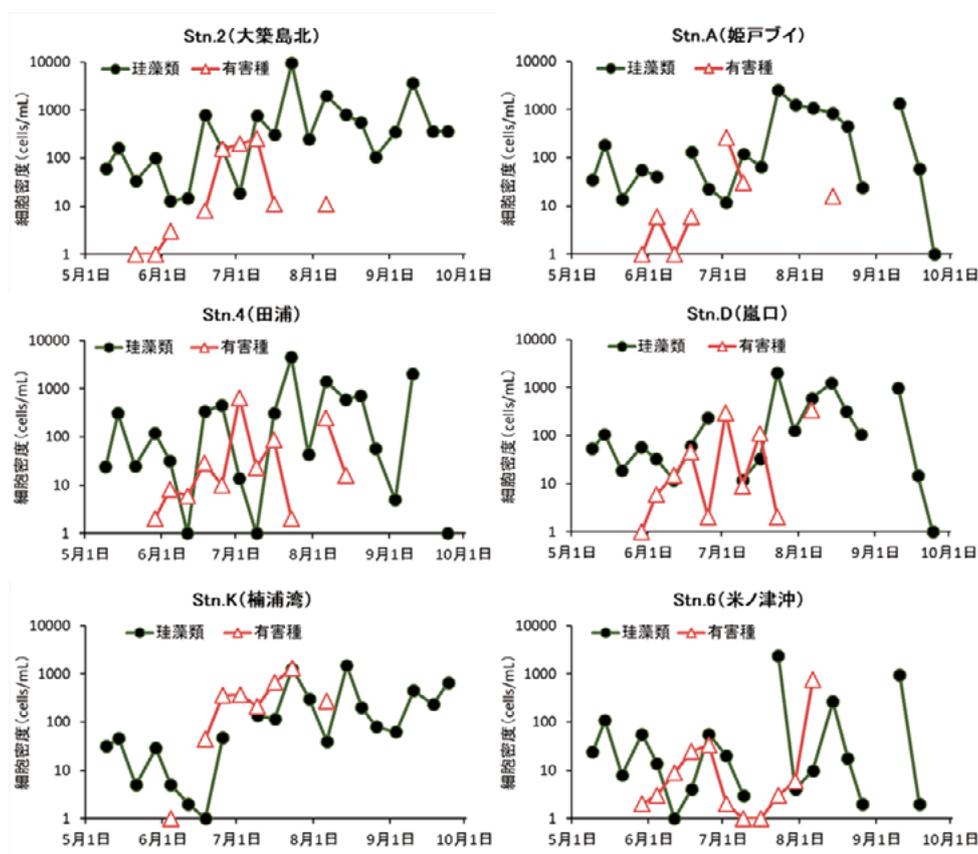


図 8. 八代海 6 定点の水深 0 ~ 10 m のクロロフィル極大値におけるプランクトン細胞密度の推移

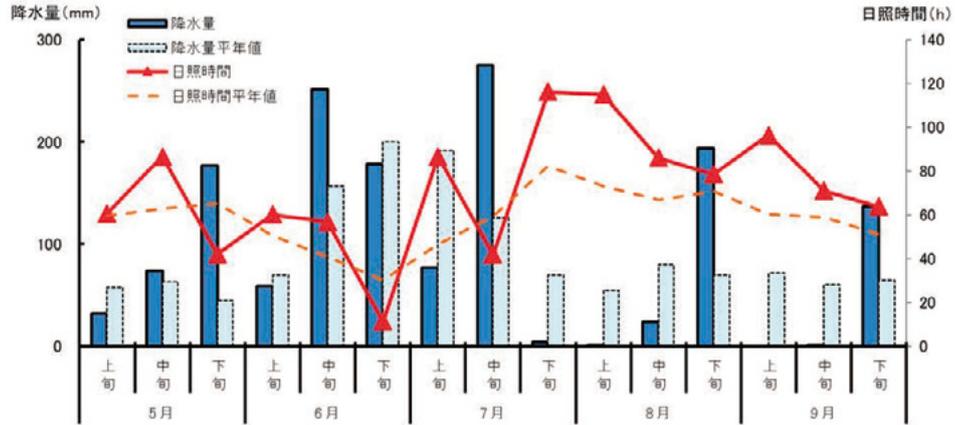


図 9. 調査期間中の降水量と日照時間の推移 (八代アメダス)

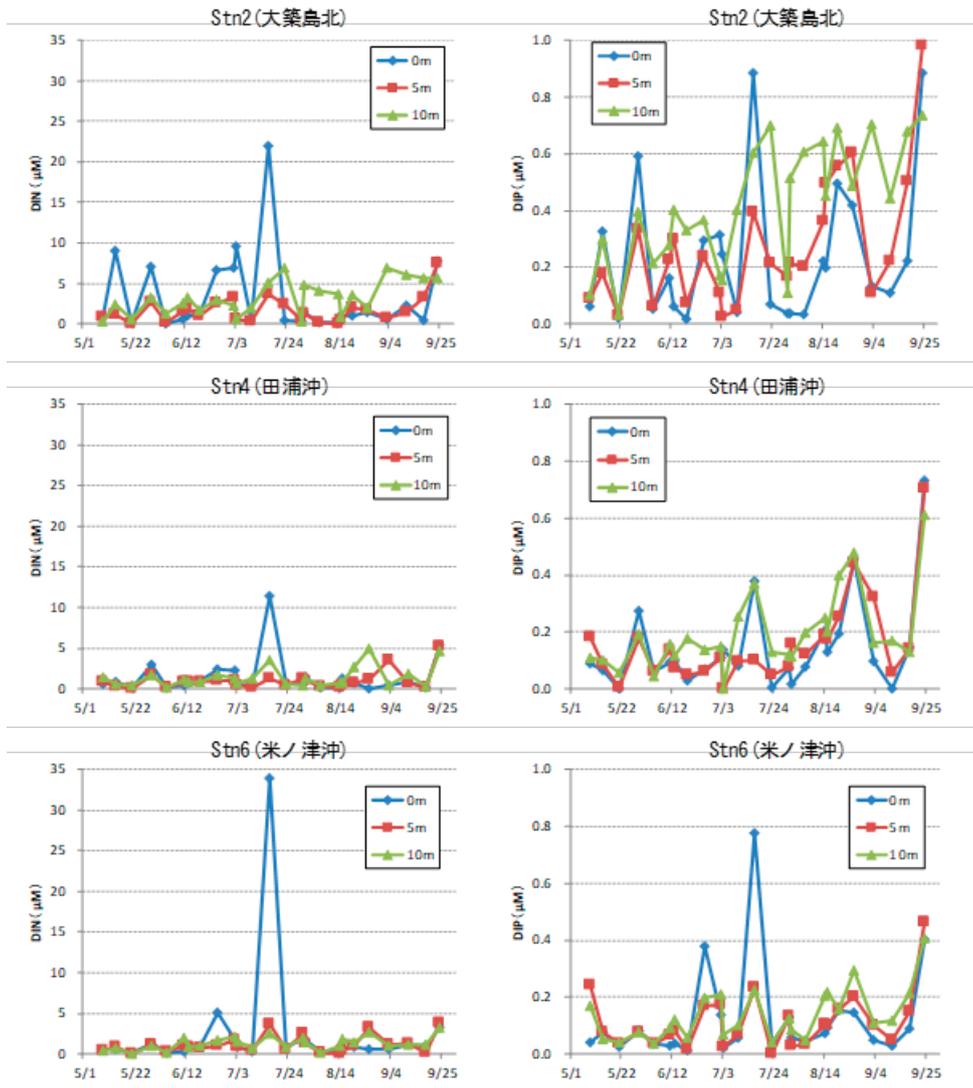


図 10. 八代海 3 定点 (北部 : Stn.2, 中部 : Stn.4, 南部 : Stn.6) における DIN, DIP の推移

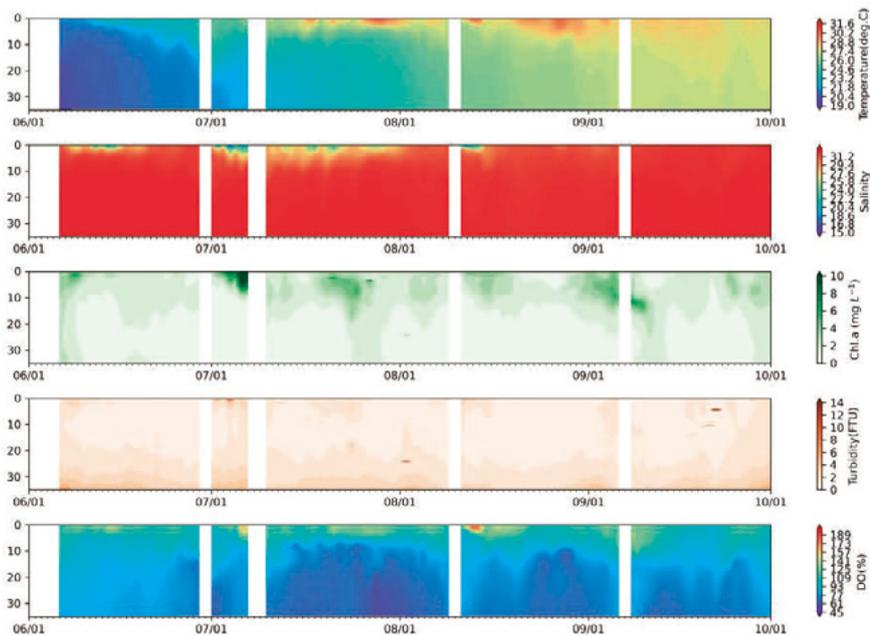


図 11. 大型観測ブイ（姫戸沖）における 2024 年夏季の水溫，塩分，クロロフィル a 濃度，濁度および溶存酸素飽和度の鉛直プロファイルの経時変化。

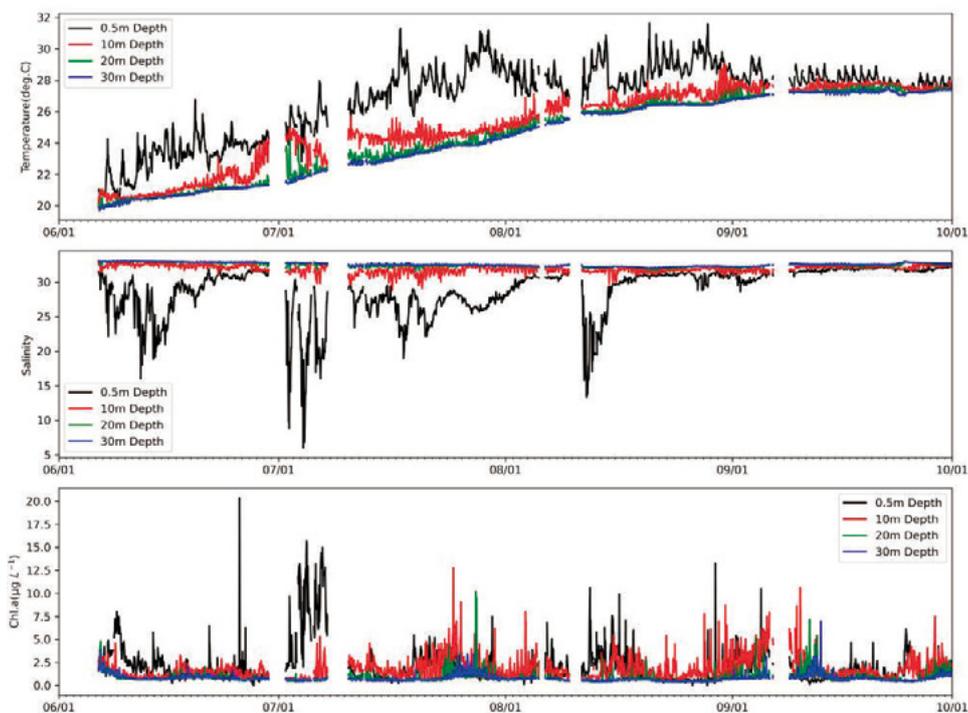


図 12. 大型観測ブイ（姫戸沖）における深度層別の水溫（上段），塩分（中段），クロロフィル a 濃度（下段）の経時変化（2024 年夏季）。

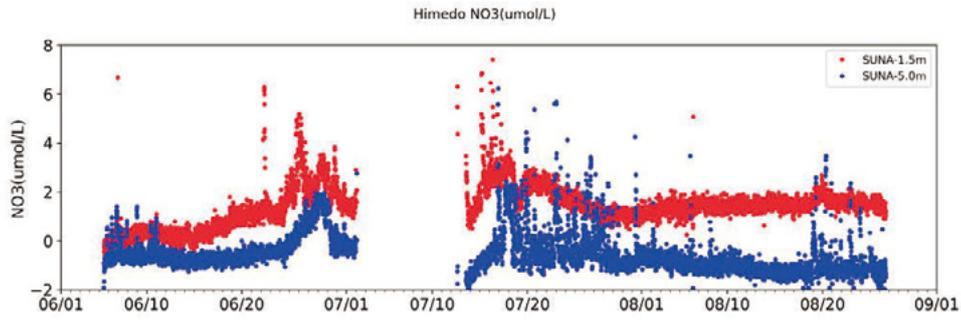


図 13. 硝酸塩センサーによって計測された硝酸塩濃度の経時変化（2024 年夏季，補正なし）

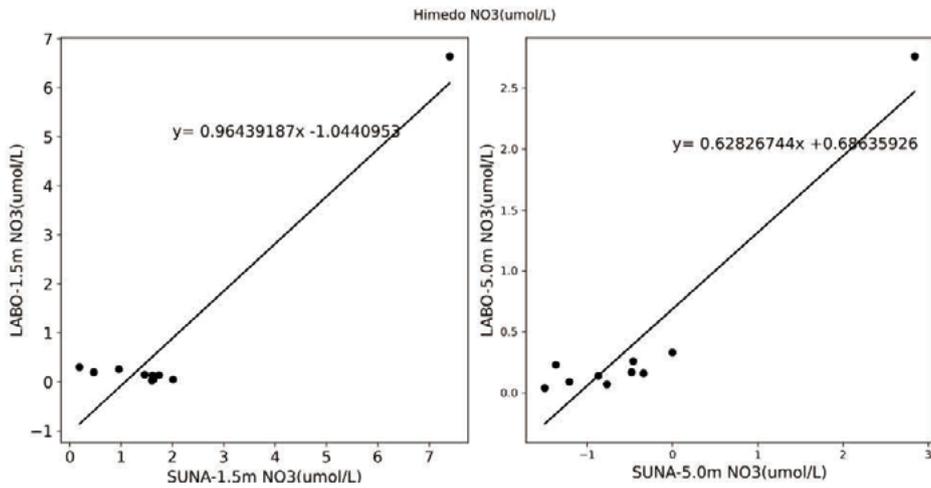


図 14. 硝酸塩センサーによる硝酸塩濃度と採水による分析結果の比較（2024 年夏季）

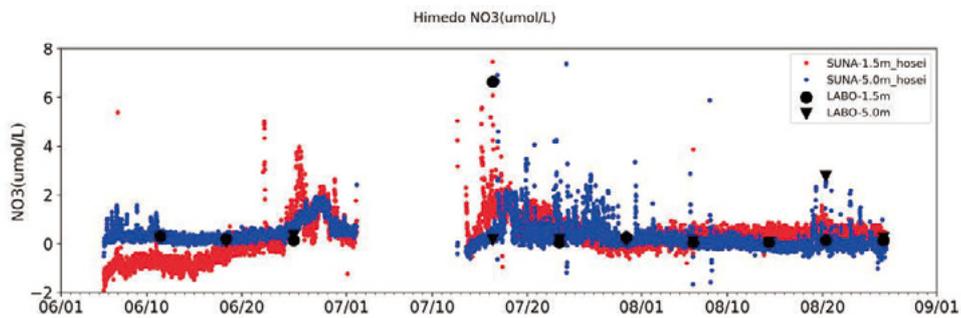


図 15. 硝酸塩センサーによって計測された硝酸塩濃度の経時変化（2024 年夏季，検量線による補正あり）

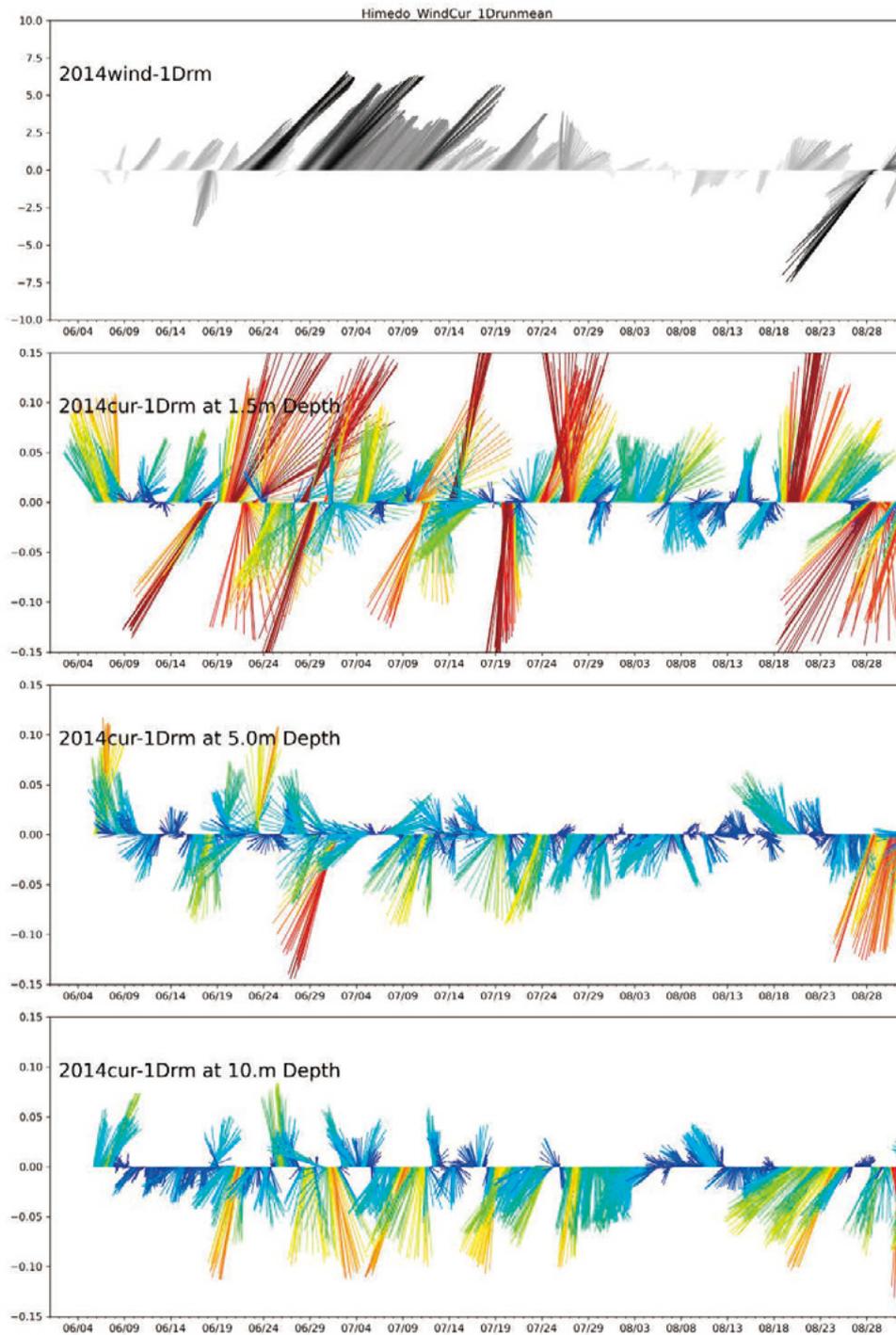


図 16. 大型観測ブイ（姫戸沖）における風向風速の経時変化（上から 1 段目：海上風に 24 時間移動平均を施したもの，上から 2 段目：水深 1.5 m 深の平均残差流，上から 3 段目：水深 5 m 深の平均残差流，上から 4 段目：水深 10 m 深の平均残差流）



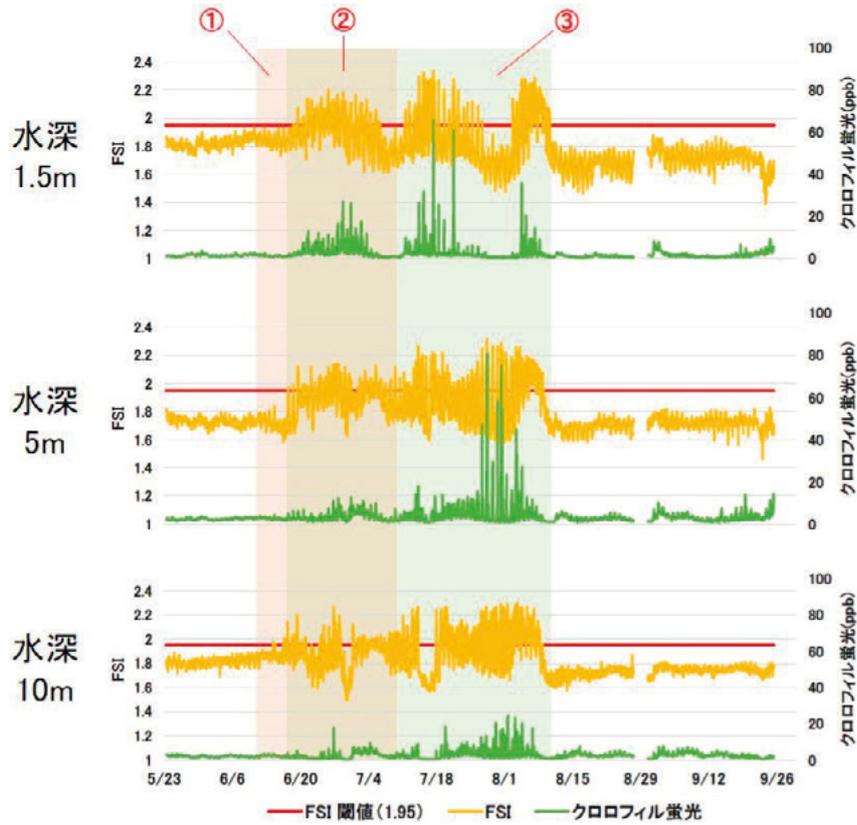


図 19. 令和 6 年度（2024 年度）観測における水深 1.5 m, 5 m, 10 m のクロロフィル蛍光および FSI の推移. ① *Chattonella* 属赤潮, ② *Chattonella* 属と *K. mikimotoi* の混合赤潮, ③ *K. mikimotoi* 赤潮が発生していた期間をそれぞれ示す。

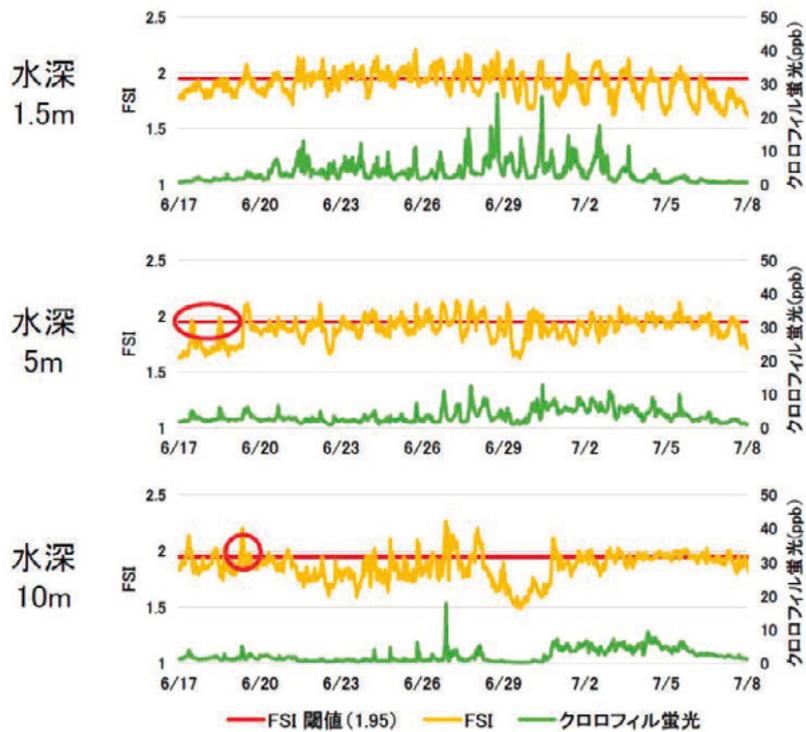


図 20. *K. mikimotoi* 発生初期の観測値の推移

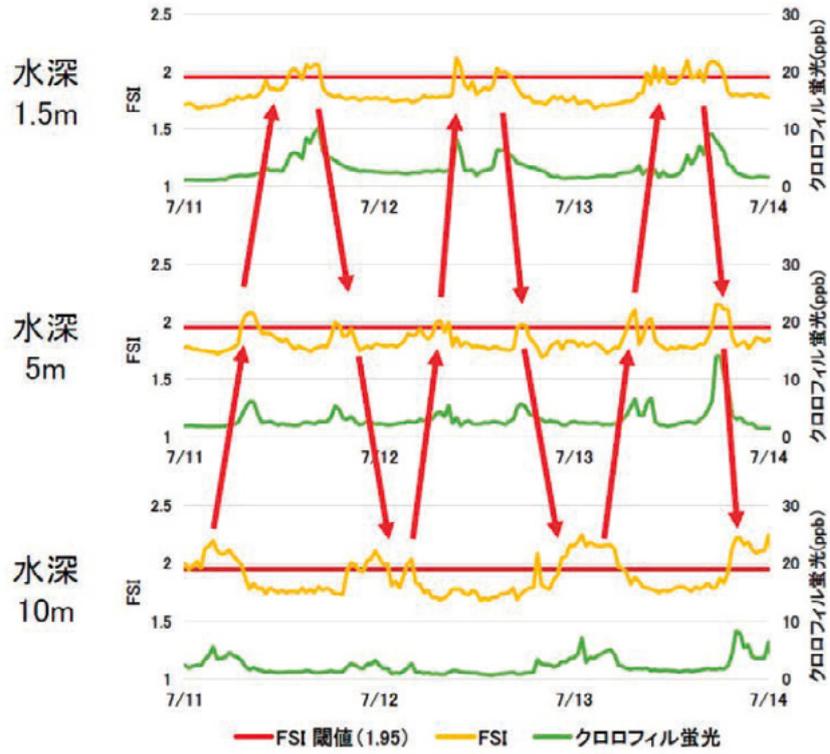


図 21. *K. mikimotoi* 発達期の観測値の推移 (変位の周期性の観察)

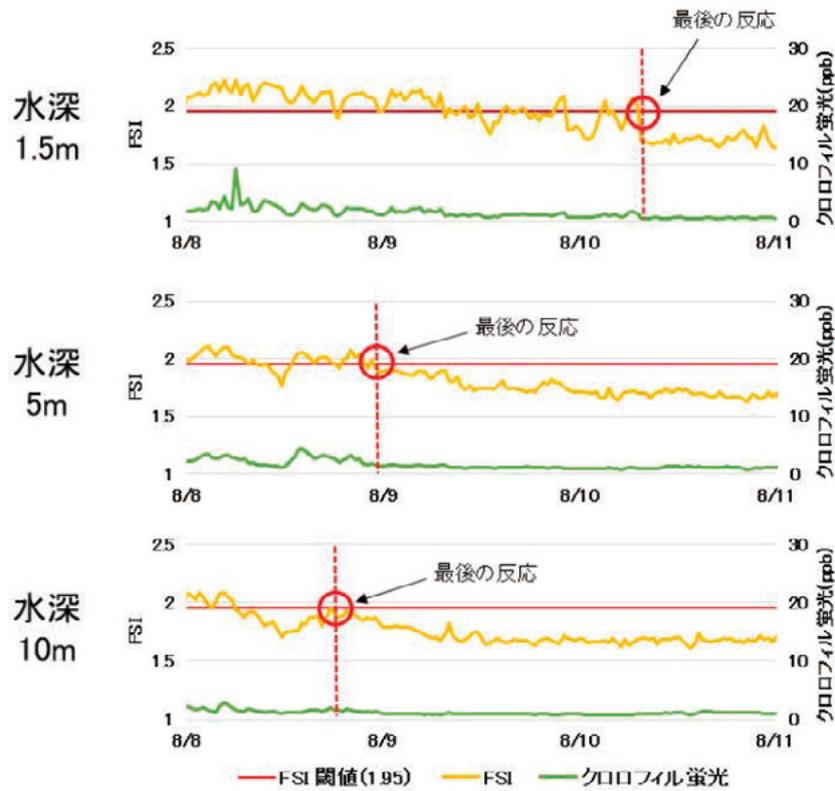
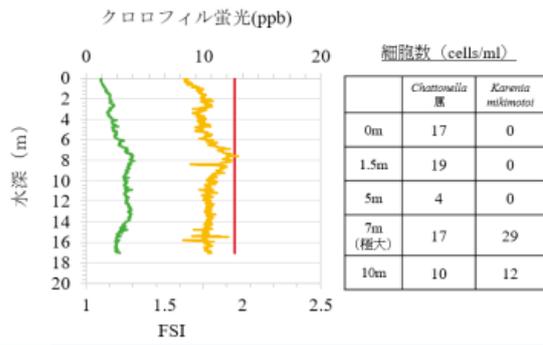
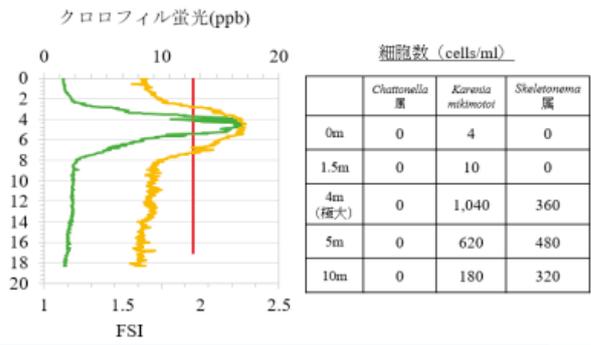


図 22. *K. mikimotoi* の終息期の観測値の推移

シャットネラ属赤潮時 (6/13)



カレニア ミキモトイ赤潮時 (7/26)



— FSI 閾値(1.95) — FSI — クロロフィル蛍光

図 23. 楠浦湾におけるクロロフィル蛍光および FSI の鉛直分布およびプランクトン細胞数左: *Chattonella* 属の赤潮時 (6 月 13 日), 右: *K. mikimotoi* の赤潮時 (7 月 26 日) をそれぞれ示す。

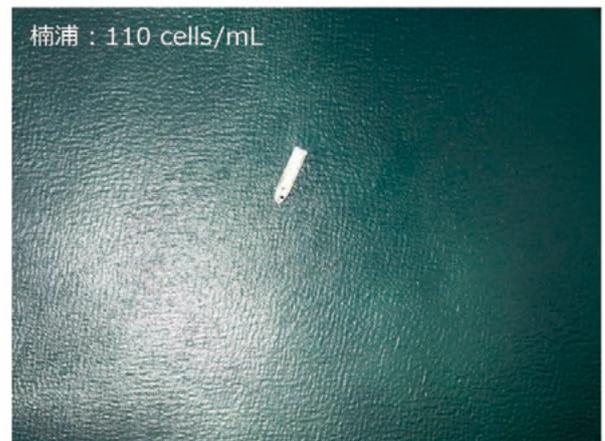


図 24. ドローンによる空撮写真

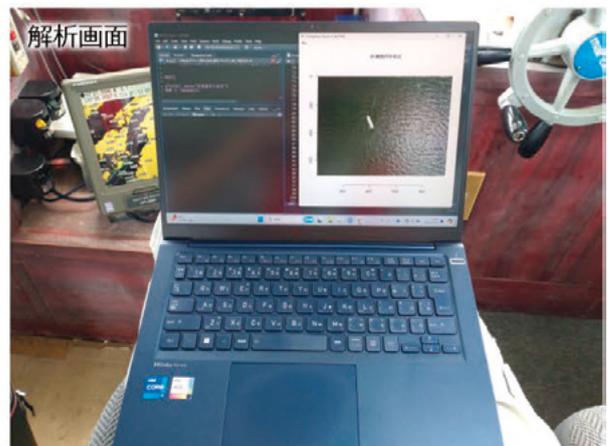


図 25. 船上での空撮画像解析

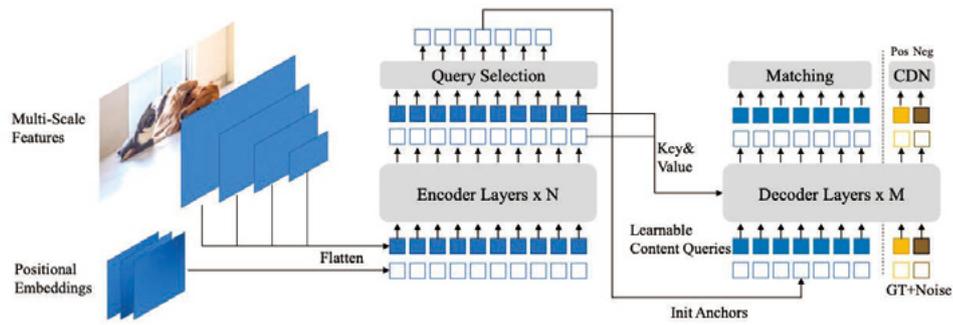


図 26. DINO の概要 (Zhang et al., 2022)

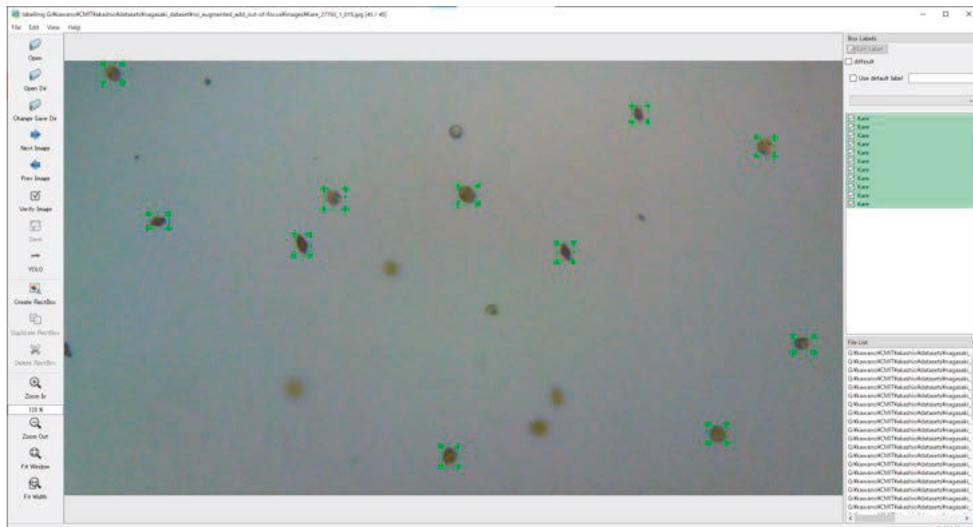


図 27. 教師画像作成の様子

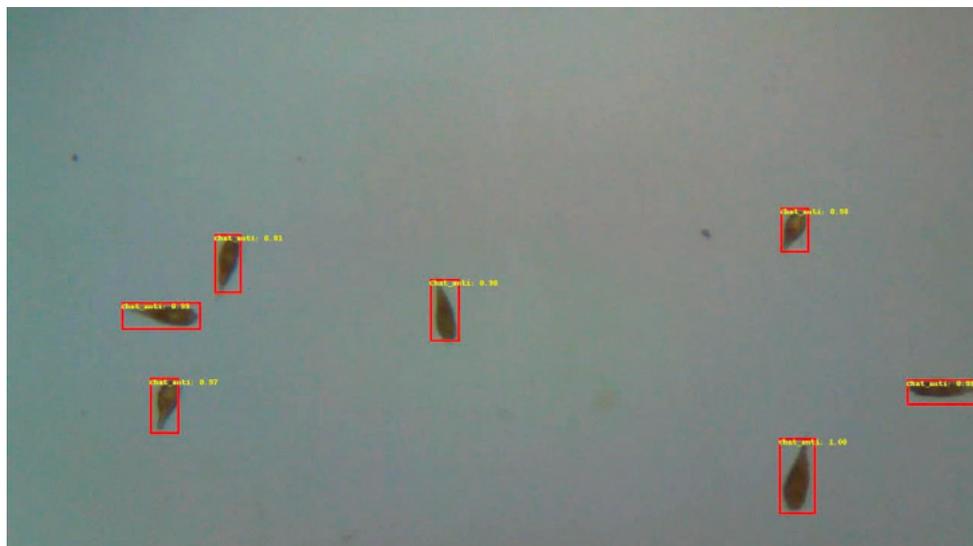


図 28. *C. antiqua* の検知例

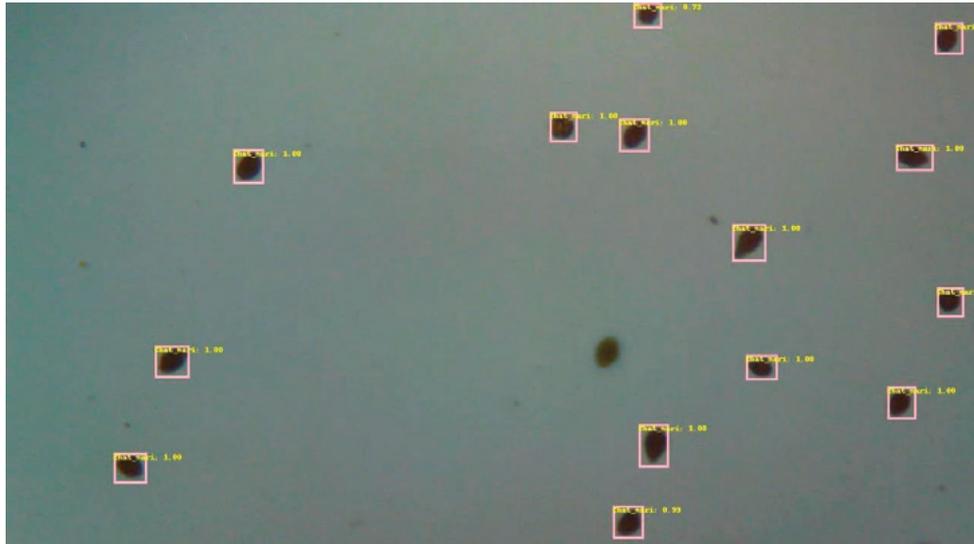


図 29. *C. marina* の検知例

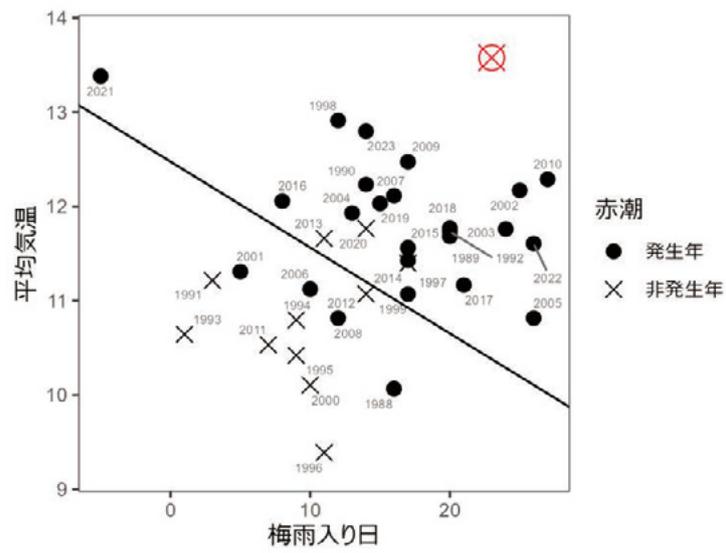


図 30. 梅雨入り日と平均気温の関係. 赤印は今年度のプロットを, 実線は判別直線を表す。

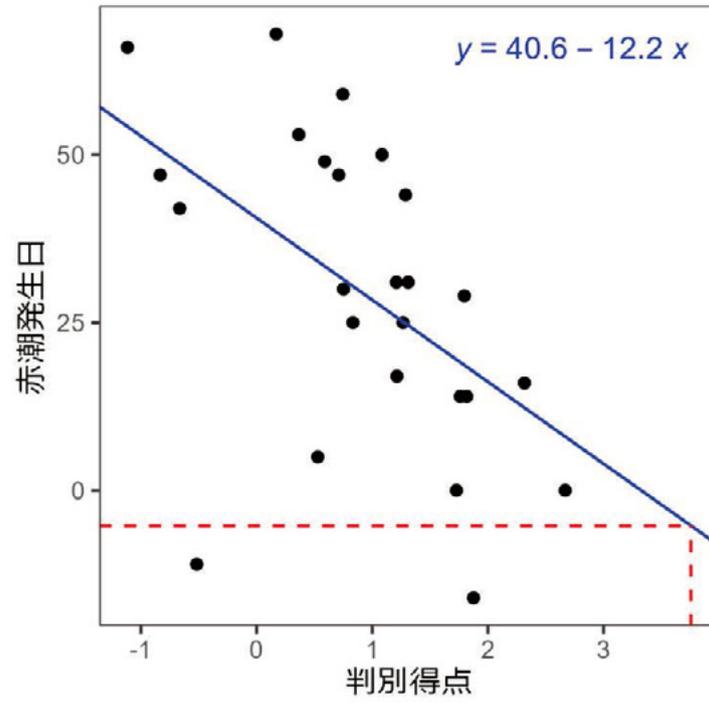


図 31. 判別得点と赤潮発生日の関係. 青線が回帰直線, 赤破線が推定結果を表す。

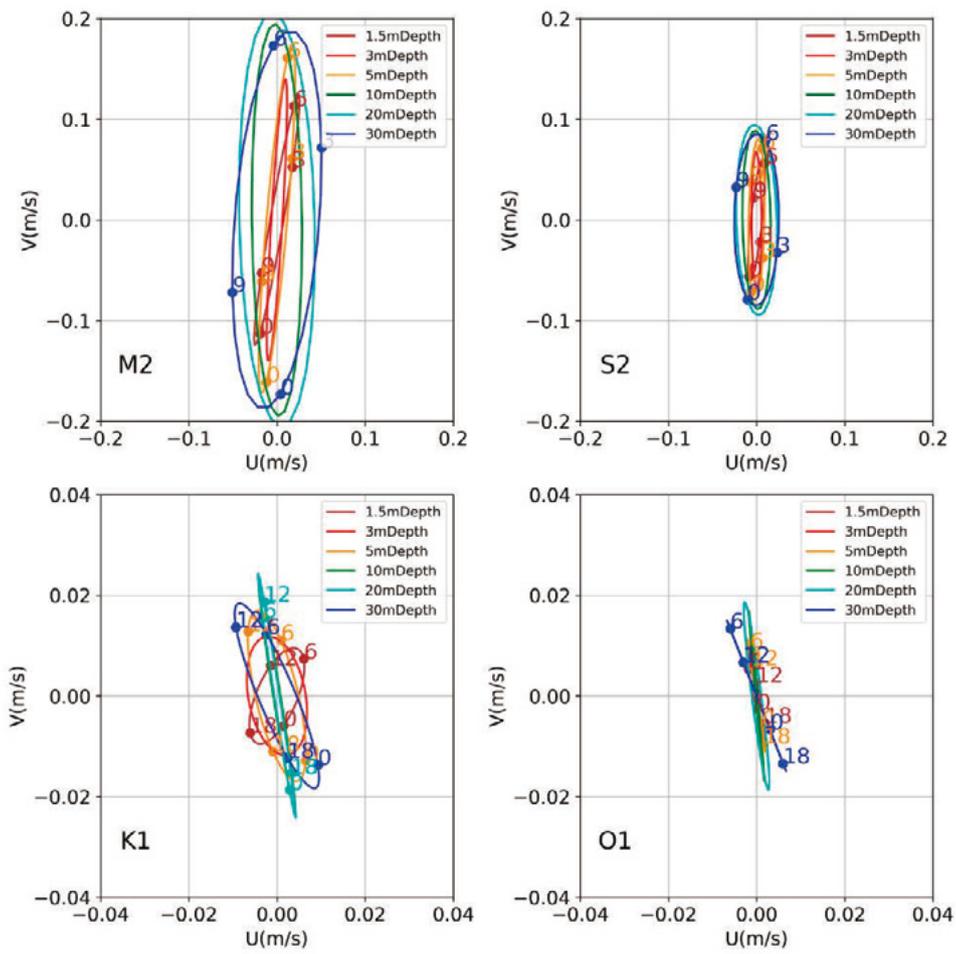


図 32. 姫戸沖ブイ観測点における主要 4 分潮の潮流楕円 (2012 年から 2024 年までのデータを使用)

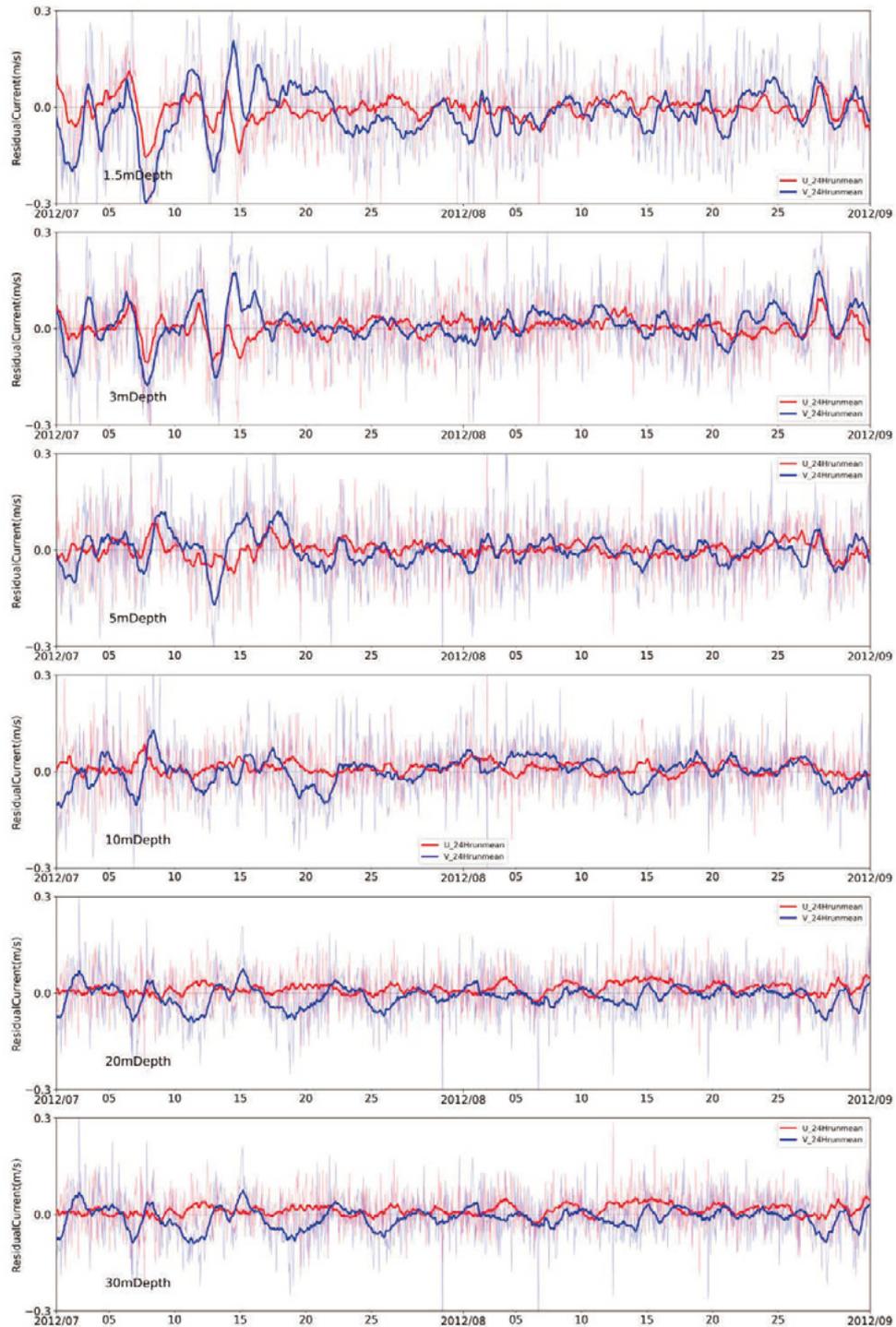


図 33. 姫戸沖ブイ観測点における水深 1.5 m (上段), 3 m (中段), および 5 m (下段) の潮汐残差流。図内, 赤線は東西 (u) 成分, 青線は南北 (v) 成分を示す。また細かい実線は潮汐残差流を, 太い実線は 24 時間移動平均を施した平均残差流を示す。

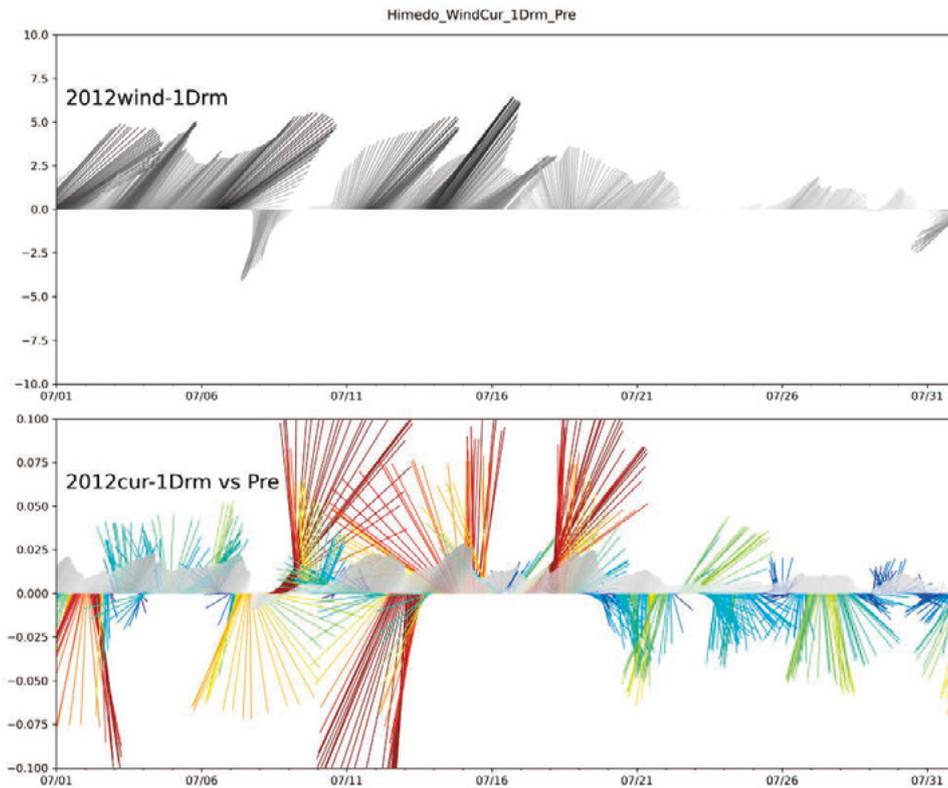


図 34. 姫戸沖ブイ観測点における風向・風速（上段，24 時間移動平均）と水深 5 m の平均残差流（下段）のスティックダイアグラム（2012 年）。下段図内，色付きのスティックは実測の平均残差流，グレースケールのスティックは予測された平均残差流を示す。

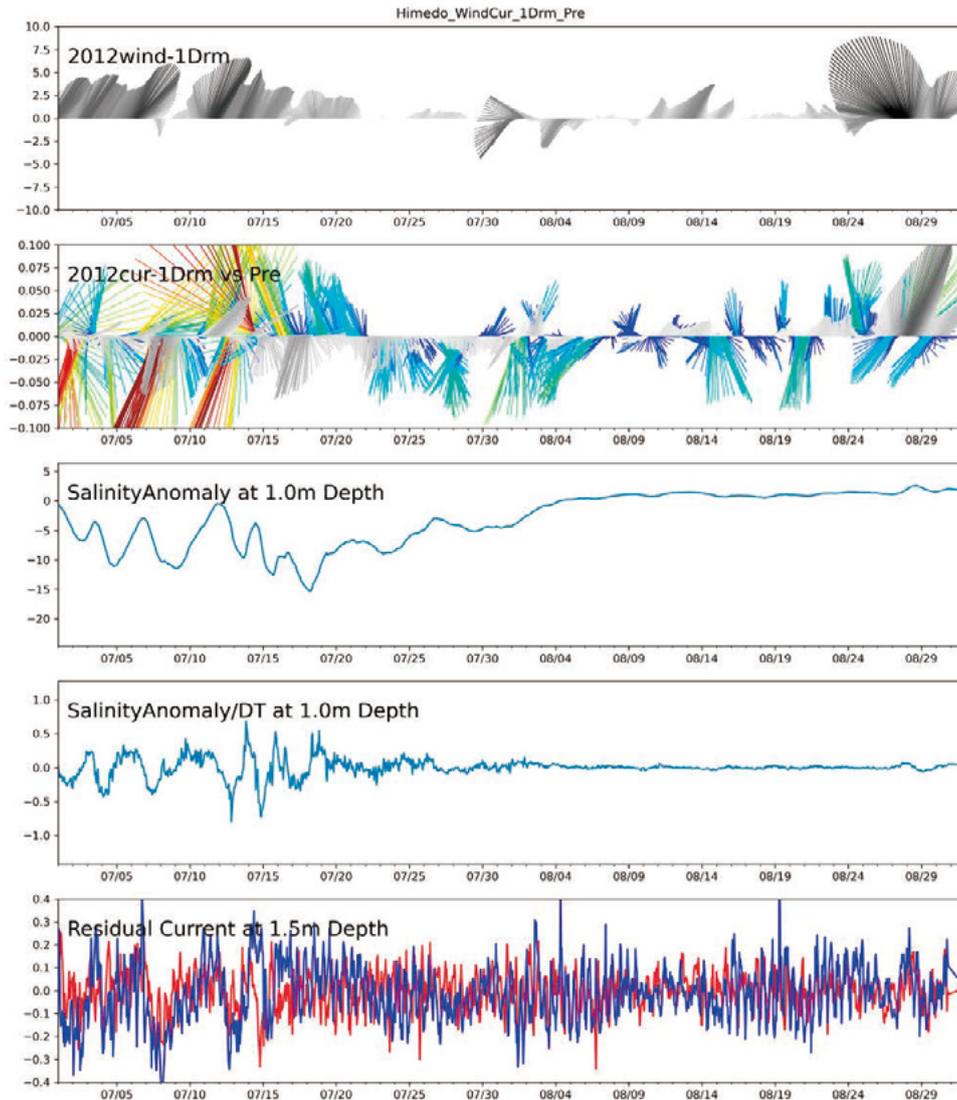


図 35. 姫戸沖ブイ観測点における風向・風速（上から 1 段目，24 時間移動平均），水深 1.5m における平均残差流のスティックダイアグラム（2 段目），水深 1.0m における塩分偏差（3 段目），水深 1.0m における塩分の時間変化（4 段目），および水深 1.5m における潮汐残差流（5 段目）。2 段図内，色付きのスティックは実測の平均残差流，グレースケールのスティックは予測された平均残差流を示す。

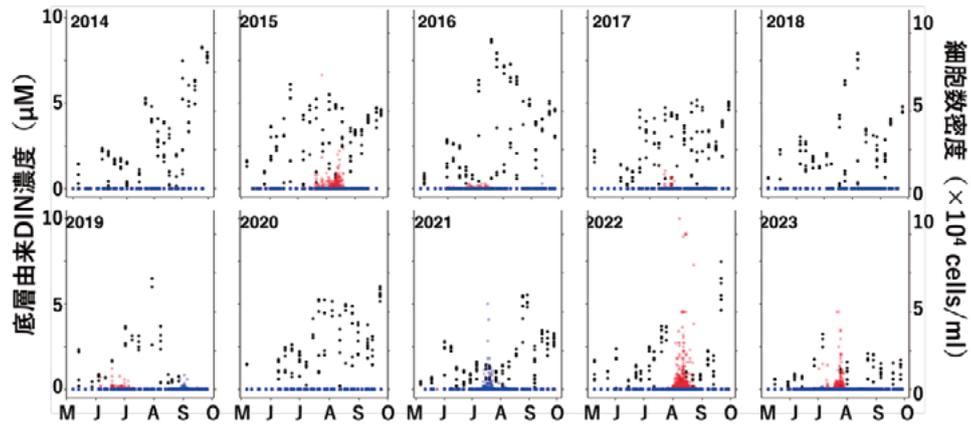


図 36. 底層由来 DIN 濃度 (●) と *K. mikimotoi* (●) および *Chattonella* spp. (●) の日最大細胞数の時系列変化

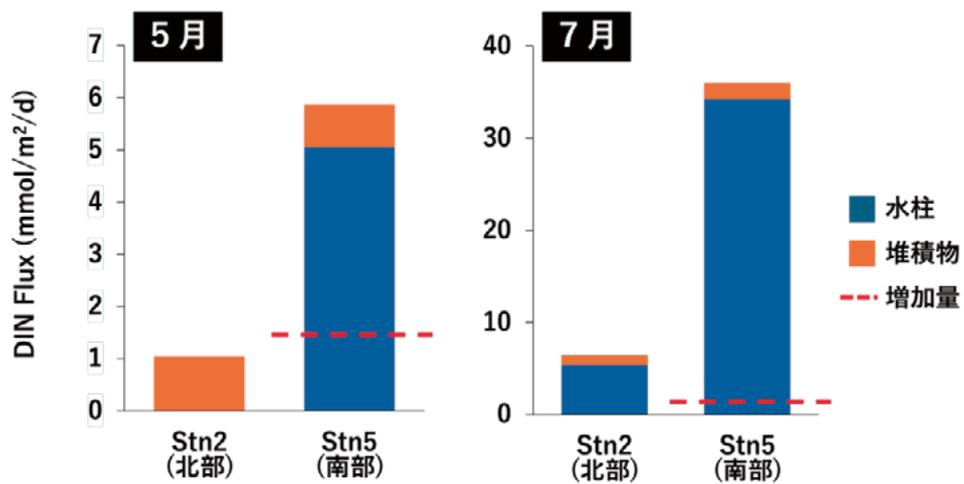


図 37. 有機物分解実験における栄養塩フラックス。なお、「増加量」は Stn.5 の 5 月から 7 月にかけての水柱の DIN 現存量の増加量を示す。

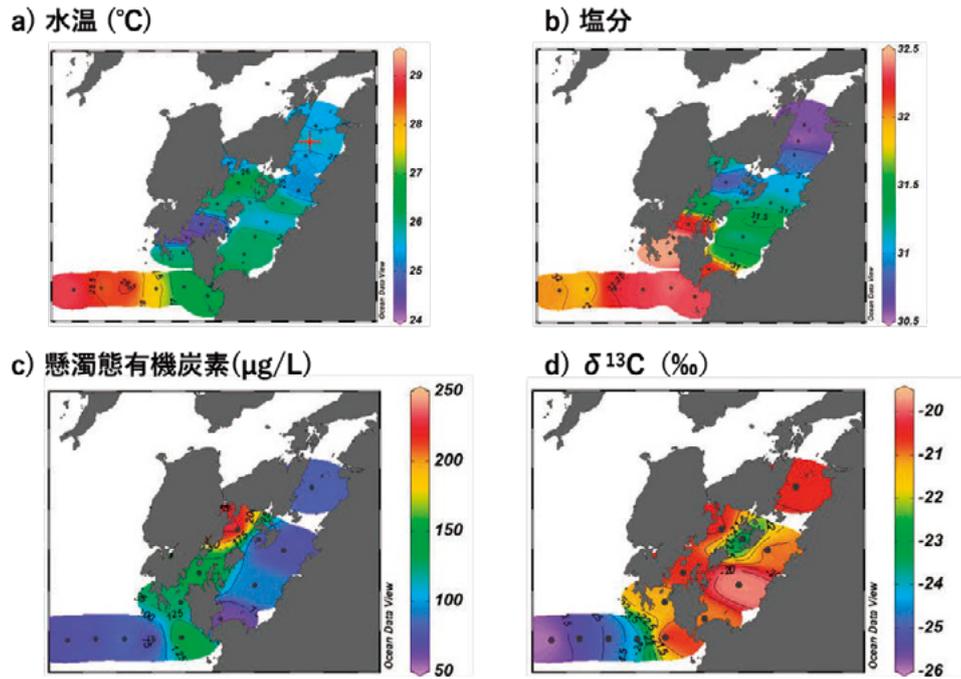


図 38. 2024 年 8 月上旬の八代海の水深 10 m における (a) 水温, (b) 塩分, (c) 懸濁態有機炭素, (d) 炭素安定同位体比 ( $\delta^{13}\text{C}$ ) の分布。

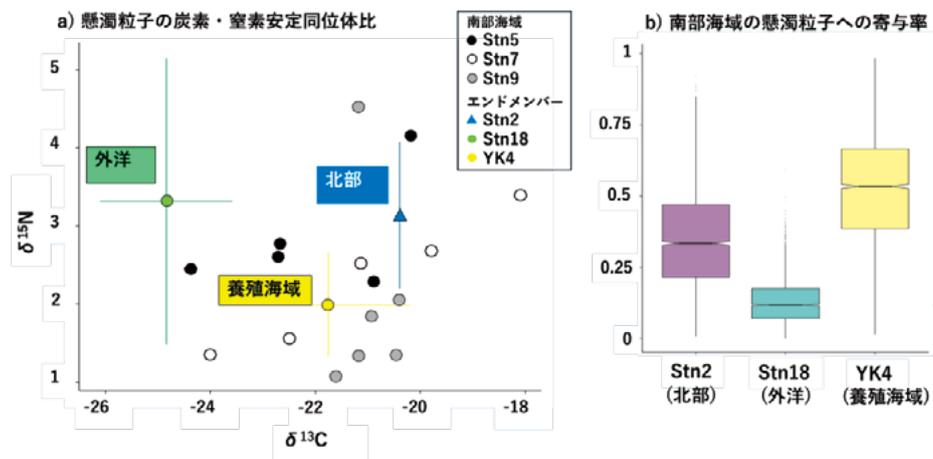


図 39. 南部海域 (Stn.5, 7, 9) および北部海域 (Stn.2), 養殖海域 (Stn.YK4), 外洋 (Stn.18) における (a) 粒状有機物の炭素および窒素安定同位体比および (b) 各海域由来の有機物の寄与率。

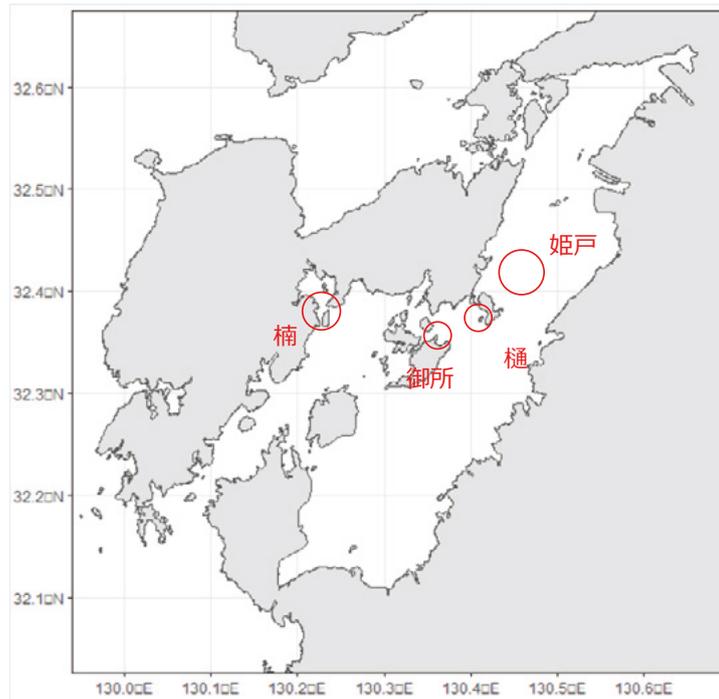


図 40. 対応表 5 における海域名とその場所



図 41. 対応表 6 における海域名とその場所