

程度、海洋環境（水温、塩分、水色、透明度等）および有害赤潮プランクトン細胞密度等のモニタリング調査を実施した。プランクトン細胞密度は、フィルター（Whatman Track-Etch Nuclepore Membrane φ47 mm 以上 孔径 3 μm）を使用して 1 L の海水を 10 ml に濃縮し、濃縮サンプルを 1 ml ずつ 3 回以上、もしくは 3 ml 以下に濃縮した場合は全量を検鏡した。また、有害赤潮の発生状況に応じて、臨時調査を実施した。

日本海西部海域におけるモニタリングの高度化として、①調査点を沖合の広範囲に設定しているため低密度な場合や生海水での検鏡の際にコンディションが劣化した細胞があった場合への対応、②形態のよく似た類似種との判別が難しい場合への対応のため、検鏡による確認の補完として迅速かつ正確な種判別を行うために分子生物学的手法（LAMP 法）を導入し、モニタリング精度の向上を図った。検鏡に比べてより高い精度で対象プランクトンの有無を検出することで、日本海西部海域における有害プランクトンの広域化の実態をより詳細に把握した。

過去に検鏡による形態的な特徴と LAMP 法の結果が一致しない事例があった。その原因として、*C. polykrikoides* には異なるリボタイプが存在しているが、現在行っている LAMP 法では東アジアタイプのみを検出し、他のリボタイプは検出されないことが考えられた。対馬暖流上流部の韓国や長崎県沿岸ではフィリピンタイプや笠沙型と呼ばれるリボタイプの出現が報告されていることから、これらを LAMP 法で検出する必要があるため、3 つのリボタイプを共通で検出できる方法について検討中である（次年度以降報告）。

2) 衛星データや数値モデル等を用いた解析による発生シナリオの検証と予察技術の高度化

対馬暖流上流域である韓国沿岸域や九州北部海域における有害赤潮発生情報（韓国水産科学院赤潮情報 <http://www.nifs.go.kr/redtideInfo>, 赤潮ネット <https://akashiwo.jp>, 各県赤潮情報等）、対馬海峡での風向・風速（気象庁メソ数値モデル GPV-MSM）、日本海西部海域の水温分布（日本海漁場海況速報 <http://jsnfri.fra.affrc.go.jp/Physical/sokuho.html>）、衛星画像によるクロロフィル高濃度水塊（Aqua/MODIS: https://www.eorc.jaxa.jp/cgi-bin/adeos/modis_index.cgi, GCOM-C/SGLI: https://www.eorc.jaxa.jp/cgi-bin/jasmes/sgli_nrt/index.cgi）の監視、拡張版日本海海況予測システム（JADE2: <http://jade2.dc.affrc.go.jp/jade2/>）の流動場を用いた赤潮輸送シミュレーション等から、日本海西部海域における有害赤潮分布を推定し、山陰沿岸への赤潮到達可能性を検討した。また、1) で取得したデータや上記解析データをもとに赤潮発生シナリオの検証と予察技術の高度化を行った。

(3) 結果及び考察

本海域では、これまでに得られた成果から、*C. polykrikoides* が山陰沿岸域および隠岐諸島周辺海域で赤潮を形成するシナリオを策定し、それをもとに、①長期予測（～1 ヶ月程度）：7 月以降の韓国沿岸域での *C. polykrikoides* の発生状況とその際の風向風速（特に南西寄りの風）の監視、②中期予察（～1 週間程度）：対馬暖流流路の検討、衛星画像によるクロロフィル高濃度域の時空間変動の監視と赤潮輸送シミュレーションによる赤潮の到達可能性の検討、③短期予察（～数日程度）：調査船等による現場調査（赤潮プランクトン細胞密度等）、衛星画像によるクロロフィル高濃度域の監視、山陰周辺海域の気象・海象条件の検討、という 3 段階の赤潮監視・予察を行ってきた（宮原ら 2011）。また、韓国沿岸域と同様に対馬暖流の上流部にあたる九州北部沿岸域での有害赤潮発生状況等の監視も実施している。今年度も上記の手順に従って赤潮の監視・予察を行うとともに、発生シナリオの検証と予察精度の向上について検討した。

1) 対馬暖流上流部における有害赤潮の発生状況

韓国沿岸域における *C. polykrikoides* の細胞密度の推移を図 2 に示す。今年度は韓国南部沿岸域で 8 月 31 日に *C. polykrikoides* が初めて確認され、9 月 17 日に一度終息した。その後、10 月 6 日に再び確認され、11 月 7 日に終息した。8 月 31 日から 9 月 17 日までの *C. polykrikoides* の最高細胞密度は、8 月 31 日の 56 cells/ml、10 月 6 日から 11 月 7 日まででは、10 月 14 日の 760 cells/ml であった。また、九州北部海域では 11 月 11 日に長崎県薄香湾において *C. polykrikoides* が高密度化し、湾奥の着色域で最高細胞密度 2,590 cells/ml が観測された。一方、例年夏季に *K. mikimotoi* が高密度化する伊万里湾において今年度は、7 月 1 日から 7 月 16 日にかけて *K. mikimotoi* が低密度で推移した。

2) 対馬海峡部における風向・風速

韓国南部沿岸域で *C. polykrikoides* が高密度化した 10 月の対馬海峡における海上風ベクトルの時系列を図 3 に示す。期間を通じて、対馬海峡では北寄りの風が連吹していた。

3) 対馬暖流の流路

10 月上旬の 50 m 深水温分布によると、典型的な接岸流路の場合（例えば 2003 年や 2005 年）に比べて水温フロントは沿岸域で不明瞭であり（図 4）、水温フロント位置から想定される対馬暖流の沖合分枝の流路は離岸傾向にあったと推察された。

4) 衛星画像によるクロロフィル高濃度域

韓国南部沿岸域で *C. polykrikoides* が高密度化していた 10 月下旬に韓国東部沿岸域から日本海西部海域にかけてクロロフィル高濃度域が分布していたが、有害種かどうか不明である（図 5）。

5) 赤潮輸送シミュレーションと赤潮到達リスクの可視化

韓国南部沿岸域および長崎県薄香湾で *C. polykrikoides* 赤潮が発生していた 10 月中旬と 11 月中旬に両海域（韓国南部沿岸域の場合は全羅南道麗水市沖、長崎県薄香湾の場合は長崎県平戸市沖）を始点とする赤潮輸送シミュレーションを実施した。方法は Onitsuka et al. (2010) と同様の粒子追跡計算で、水産研究・教育機構で開発・運用されている JADE2 の流動場再解析値（JADE2.1 の日平均値）を用いて行った。計算では *C. polykrikoides* の日周鉛直移動を考慮し（Park et al. 2001）、赤潮を模した粒子の分布深度を昼間（06:00-18:00）と夜間（18:00-06:00）でそれぞれ 1 m 深と 20 m 深に変化させ、1 日ごとに 400 個の粒子を投入した。計算結果は粒子軌跡を可視化するとともに、昨年度に予察技術高度化として検討した赤潮到達リスク（旬毎）の可視化（鈴木ら 2020）も行った。なお、赤潮到達リスクの可視化にあたっては粒子投入時の細胞密度として、韓国南部沿岸域では 10 月 10 日から 19 日までの最高細胞密度、長崎県薄香湾では 11 月 11 日に観測された 2,590 cells/ml が 11 月 10 日から 14 日の 5 日間継続したと仮定し、1 ヶ月で細胞密度が約 20% に減衰する程度の減衰率（0.05 /day）を与えた。

図 6-1、-2 および図 7-1、-2 に計算結果を示す。韓国全羅南道麗水市沖を始点とした赤潮輸送シミュレーションでは 10 月中旬に投入された粒子の一部が 11 月下旬に隠岐諸島に近付くものの、到達リスクは高くないとの結果が得られた。一方、長崎県平戸市沖を始点とした赤潮輸送シミュレーションでは 11 月中旬に投入された粒子が対馬暖流によって九州北部沿岸域から北上し、山陰沿岸域で赤潮が発生するリスクが比較的高いという結果となった。

6) 漁場モニタリング調査

本海域では、*C. polykrikoides* および *K. mikimotoi* を主要対象種とした。今年度の検鏡結果は、*C. polykrikoides* が低密度で確認され、*K. mikimotoi* は確認されなかった。一方、その他有害種として、*Gonyaulax* sp. , *Gonyaulax polygramma* , *Dinophysis acuminata* , *Dinophysis caudata* , *Dinophysis fortii* , *Alexandrium* sp. , *Akashiwo sanguinea* , *Noctiluca scintillans* , *Karenia digitata* が低密度で確認された。このうち、*Gonyaulax* sp. , *G. polygramma* は例年、本海域で確認されていない有害種であった。

昨年度の漁場モニタリング調査では、兵庫県沖合で *Alexandrium* sp. および *D. acuminata* , 山口県沖合および鳥取県沖合で *Cochlodinium* 属が低密度で確認されていたが、今年度は確認されなかった。

① 沖合調査

ア) 主要対象種

C. polykrikoides および *K. mikimotoi* は確認されなかった。

イ) その他有害種 (図 8-1)

Gonyaulax sp. が、兵庫県沖合で 7 月 28 日に 0.013 cells/ml (St. H1 0 m), 0.007 cells/ml (St. H1 10 m), 0.07 cells/ml (St. H2 0 m), 0.107 cells/ml (St. H2 10 m), 0.03 cells/ml (St. H3 0 m), 0.14 cells/ml (St. H3 10 m), 0.003 cells/ml (St. H4 0 m 10 m), 0.047 cells/ml (St. H5 10 m), 0.127 cells/ml (St. H6 0 m), 0.097 cells/ml (St. H6 10 m) 確認された。

② 沿岸調査

ア) 主要対象種

C. polykrikoides が、兵庫県沿岸で 7 月 31 日に 0.02 cells/ml (St. HS 0 m), 8 月 27 日に 0.02 cells/ml (St. HS 0 m), 鳥取県沿岸で 8 月 24 日に 0.013 cells/ml (St. T7 0 m) 確認された。また、兵庫県貝毒調査定点 (図 8-2 に位置を記載) で 8 月 3 日に 1.39 cells/ml (St. HK 0 m), 0.01 cells/ml (St. HH 0 m) 確認された。

K. mikimotoi は確認されなかった。

イ) その他有害種 (図 8-2)

G. polygramma が、山口県沿岸で 8 月 6 日に 18 cells/ml (St. Y5 0m), 41 cells/ml (St. Y5 2.5 m), 9 月 1 日に 1 cell/ml (St. Y5 0 m), 26 cells/ml (St. Y5 2.1 m) 確認された。

D. acuminata が、島根県沿岸で 7 月 6 日に 0.007 cells/ml (St. S6 0 m), 0.003 cells/ml (St. S6 5 m), 7 月 7 日に 0.003 cells/ml (St. S3 3 m), 8 月 4 日に 0.003 cells/ml (St. S2 0 m) 確認された。

D. caudata が、島根県沿岸で 7 月 6 日に 0.007 cells/ml (St. S1 0 m), 8 月 4 日に 0.003 cells/ml (St. S1 0 m) 確認された。また、鳥取県の定点にて 6 月 25 日に 0.004 cells/ml (St. 浜村② 20 m) 確認された。

D. fortii が、鳥取県沿岸で 6 月 25 日に 0.002 cells/ml (St. 浜村① 5 m), 0.024 cells/ml (St. 浜村② 20 m), 7 月 29 日に 0.004 cells/ml (St. 浜村② 20 m) 確認された。

Alexandrium sp. が、島根県沿岸で 8 月 4 日に 0.007 cells/ml (St. S2 0 m) 確認された。

A. sanguinea が、島根県沿岸で 7 月 7 日に 0.003 cells/ml (St. S3 0 m) 確認された。

N. scintillans が、島根県沿岸で 7 月 6 日に 0.017 cells/ml (St. S1 0 m), 0.007 cells/ml (St. S6 0 m), 7 月 7 日に 0.007 cells/ml (St. S3 0 m) 確認された。

K. digitata が、山口県沿岸で 8 月 24 日に 1 cell/ml (St. 大浦漁港 0 m) 確認された。

③ 臨時調査 (図 8-2)

10月中旬に韓国南部沿岸域で高密度化した *C. polykrikoides* の山陰沿岸への赤潮輸送計算結果をうけて、島根県の定点 S1 で 11 月 11 日に臨時調査を実施した。*C. polykrikoides* は、確認されず、*Alexandrium* sp. が 0.023 cells/ml (5 m), *D. caudata* が 0.017 cells/ml (5 m) 確認された。

11月中旬に長崎県薄香湾で高密度化した *C. polykrikoides* の山陰沿岸への赤潮輸送計算結果をうけて、山口県の定点 Y4 から Y7 で 11 月 20 日, 11 月 27 日に臨時調査を実施した。*C. polykrikoides* は確認されず, 11 月 27 日に *G. polygramma* が 1 cell/ml (0 m) 確認された。

7) 赤潮発生シナリオの検証

C. polykrikoides 赤潮が山陰沿岸域や隠岐諸島周辺海域で出現する条件として, ①韓国沿岸域で大規模な赤潮が発生すること, ②南西風により韓国沿岸域から *C. polykrikoides* の赤潮水塊が沖合域へ輸送されること, ③対馬暖流沖合分枝が接岸傾向であること, この 3 つの条件が全て揃う必要があることが示されている (Onitsuka et al. 2010)。そこで今年度もこれら 3 つの条件を検証した。まず, 条件①について, 韓国南部沿岸域で *C. polykrikoides* が確認されたものの, 最高細胞密度は 760 cells/ml に留まっており, 大規模発生には至らなかった (図 2)。次に条件②について, 韓国南部沿岸で *C. polykrikoides* が高密度化した 10 月に対馬海峡部では北寄りの風が連吹していた (図 3)。また, 条件③について, 10 月上旬の対馬暖流の沖合分枝の流路は離岸傾向であったと推察された (図 4)。以上のように, 今年度は 3 つの条件いずれも満たしておらず, *C. polykrikoides* が韓国南部沿岸域から隠岐諸島や山陰沿岸域へ輸送される可能性は低かったと考えられた。韓国全羅南道麗水市沖を始点とした赤潮輸送シミュレーション結果 (図 6-1, -2) やモニタリング調査で得られたサンプルの顕微鏡観察や LAMP 法の結果でも上記を裏付けており, 今年度の結果はこれまで構築してきた *C. polykrikoides* 赤潮発生シナリオを支持する結果となった。一方で, 薄香湾から沖合域へ高密度水塊が流出することを前提とした赤潮輸送シミュレーションでは, 長崎県平戸市沖を始点に投入された粒子が対馬暖流によって九州北部沿岸域から北上し, 山陰沿岸域で赤潮が発生するリスクが比較的高い結果となった (図 7-2)。しかし, モニタリング調査では 11 月以降に九州北部海域から山陰沿岸域において本種は確認されなかったことから, 懸念された薄香湾から沖合域への高密度水塊の流出はなく, 山陰沿岸域には到達しなかったものと考えられた。

8) LAMP法を併用したモニタリング体制の高度化

今年度, 各県で実施した *C. polykrikoides* および *K. mikimotoi* の検鏡結果と LAMP 法による検出結果の比較を表 1 および 2 に示す。

C. polykrikoides が検鏡で確認された兵庫県の 4 サンプル, 鳥取県の 1 サンプルは, いずれも LAMP 法で陽性を示した。一方, 検鏡で確認されなかった兵庫県の 6 サンプル, 山口県の 3 サンプルも LAMP 法で陽性を示した。

兵庫県のサンプルのうち H4 (8 月 25 日 0 m), H6 (8 月 25 日 29 m), HS (2019 年 12 月 11 日 0 m) の 3 サンプルは, 蛍光目視判定で 2 回とも陰性を示しており, さらに濁度計による判定では, その反応時間が Positive Control 区 (22 分間) の倍以上を要していることから, 最終的な判定として陰性とするのが妥当であると考えられた。

K. mikimotoi については, 検鏡で確認されなかったが, 兵庫県の 2 サンプル, 山口県の 1 サンプルが LAMP 法で陽性を示した。

C. polykrikoides または *K. mikimotoi* が検鏡で確認されなかったサンプルが, LAMP 法で陽性を示したことに関して, 海水 1 L を濃縮して検鏡するため, 多くの珪藻類等に紛れ, 極めて低密度で当該種が存在していた場合, または, その細胞のコンディションが悪化し, 外部形

態が変化していた場合、もしくはその両方の場合の可能性のある*C. polykrikoides*または*K. mikimotoi*を検鏡で確認できなかったことが考えられた。

今年度は、新たに山口県沿岸（Y4～Y7）および鳥取県沿岸（T7）で、*K. mikimotoi*を対象としたLAMP法を実施することができ、有害赤潮プランクトンの広域化に対する監視体制がより強化された。

LAMP法の実施時期について、昨年度は各機関のモニタリング実施状況や検査体制に応じて11月末までに実施していたが、今年度は広域での赤潮発生を想定して採水検鏡後の分析実施時期の短縮を図った。兵庫県、鳥取県、山口県は蛍光目視判定、島根県は濁度計判定により、採水検鏡後の翌日から遅くとも約2週間以内には検査し、結果を共有することができた。より迅速な検査体制が構築され、ひいては、モニタリング体制の高度化に繋がったと考えられた。

引用文献

宮原一隆, 鬼塚剛, 渡辺秀洋, 野々村卓美, 勢村均, 堀玲子, 西川哲也, 宮地邦明, 山口峰生.

日本海における *Cochlodinium polykrikoides* 赤潮. 日本水産学会誌 2011 ; 77 : 440.

Onitsuka G, Miyahara K, Hirose N, Watanabe S, Semura H, Hori R, Nishikawa T, Miyaji K, Yamaguchi M. Large-scale transport of *Cochlodinium polykrikoides* blooms by the Tsushima Warm Current in the southwest Sea of Japan. *Harmful Algae* 2010; 9: 390-397.

Park JG, Jeong MK, Lee JA, Cho KJ, Kwon OS. Diurnal vertical migration of a harmful dinoflagellate, *Cochlodinium polykrikoides* (Dinophyceae), during a red tide in coastal waters of Namhae Island, Korea. *Phycologia* 2001; 40: 292-297.

鈴木雅巳, 門脇慧史, 渡辺秀洋, 松本洋典, 安原豪, 木原浩志, 南部智秀, 鬼塚剛, 坂本節子. 有害赤潮プランクトンの出現動態監視および予察技術開発 エ. 日本海西部海域. 平成31年度漁場環境改善推進事業「赤潮被害防止対策技術の開発」報告書. 水産庁, 東京. 2020; 144-161.

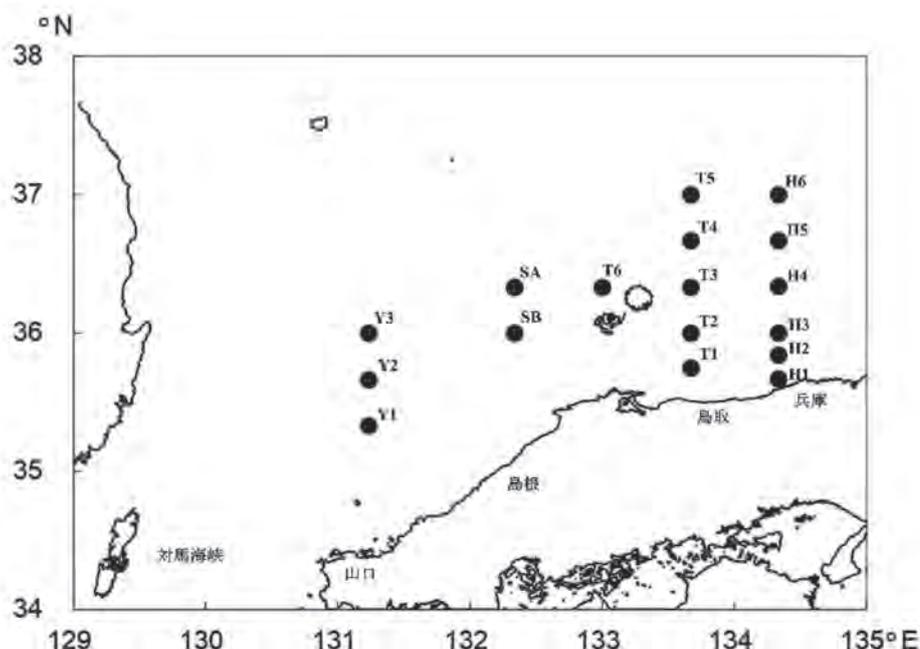


図1-1 日本海西部海域における沖合調査定点位置図

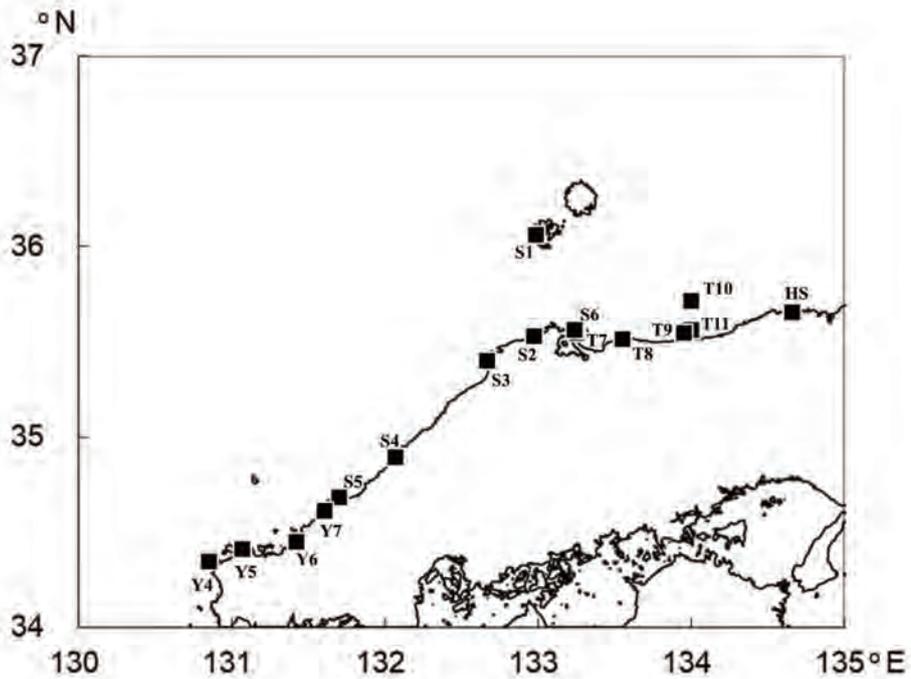


図1-2 日本海西部海域における沿岸調査定点位置図

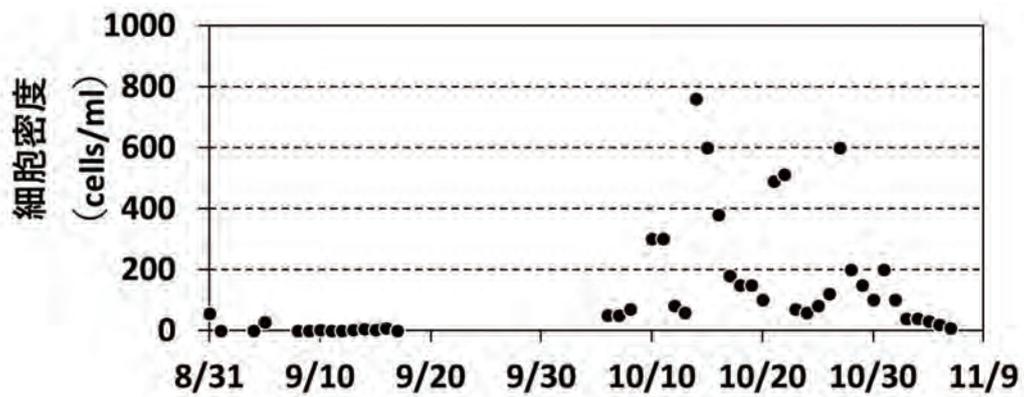


図2 韓国沿岸域における *C. polykrikoides* 細胞密度の推移（韓国水産科学院赤潮情報の日々の速報値に基づく）

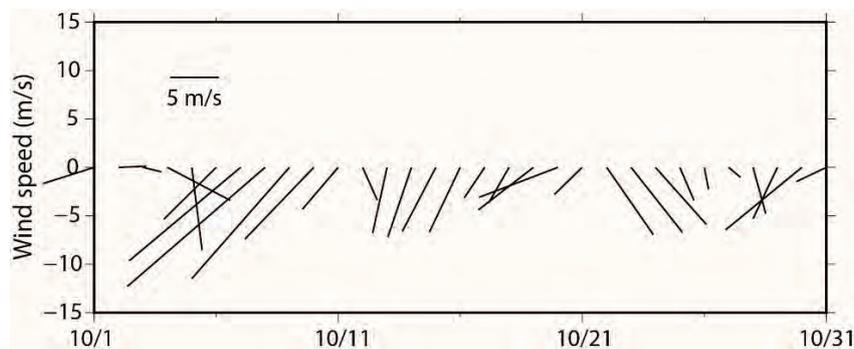


図3 対馬海峡部（34.4°N，128.5°E）における日平均海上風ベクトル（気象庁メソ数値予報モデル GPM-MSM）

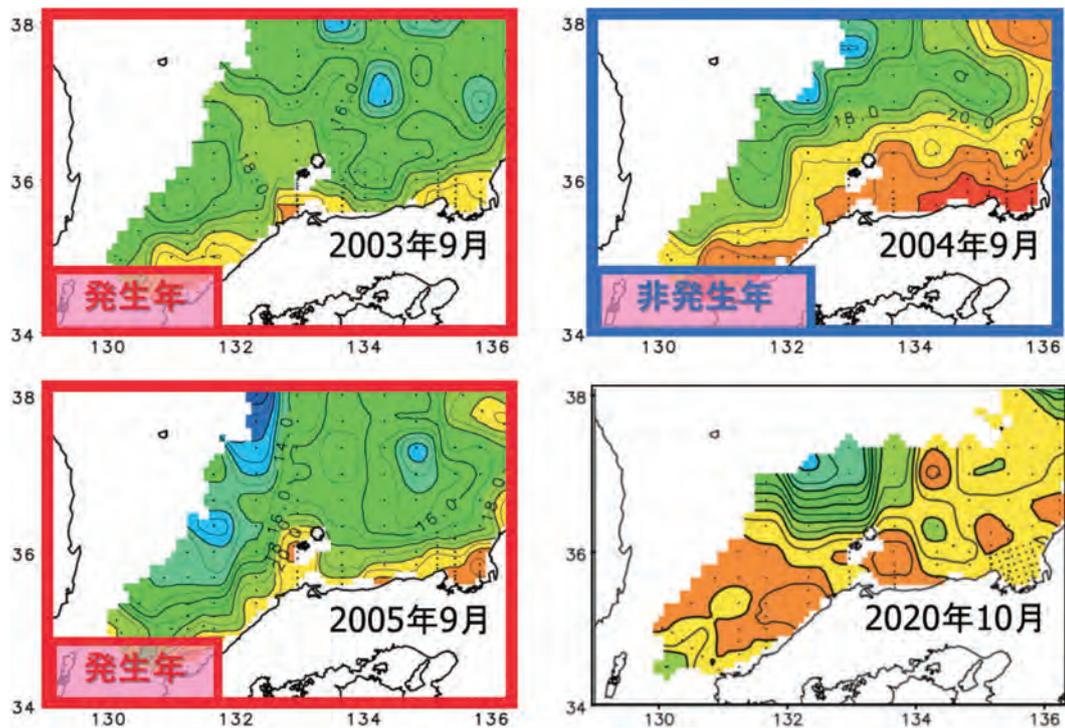


図4 2003～2005年9月上旬および2020年10月上旬の日本海南西部水温分布図（50 m 深）（水産研究・教育機構が発行している日本海漁場海況速報を基に一部改変）

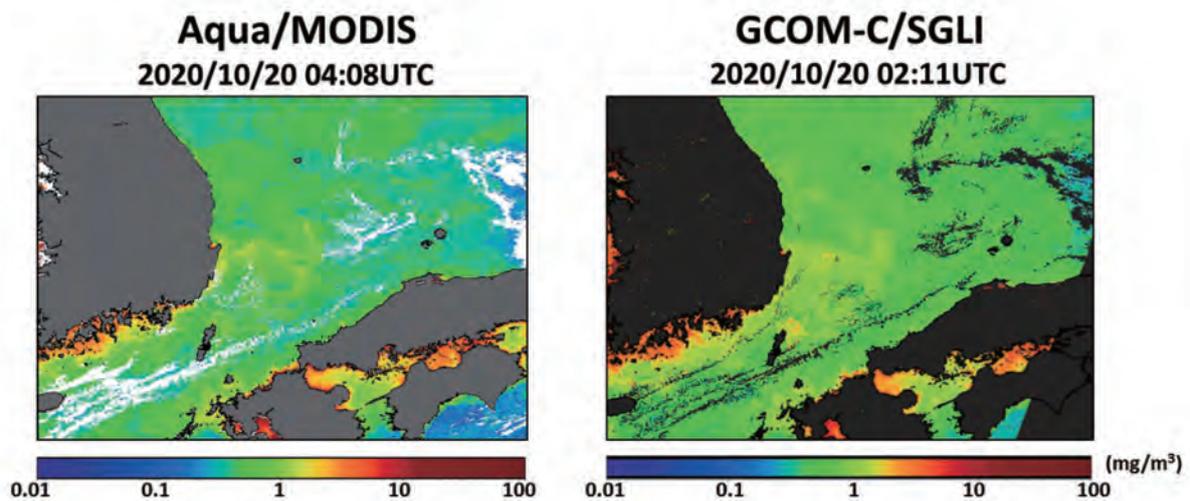


図5 2020年10月20日の衛星クロロフィル画像（宇宙航空研究開発機構（JAXA）／東海大学（TSIC/TRIC）提供の Aqua/MODIS 画像, http://kuroshio.eorc.jaxa.jp/ADEOS/mod_nrt/index.html と宇宙航空研究開発機構（JAXA）提供の G-COMC/SGLI 画像, https://www.eorc.jaxa.jp/cgi-bin/jasmes/sgli_nrt/index.cgi）

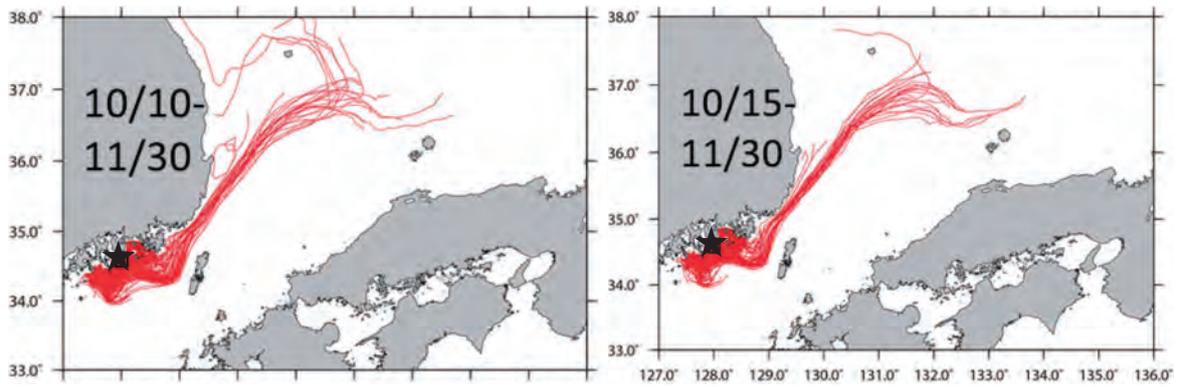


図 6-1 韓国全羅南道麗水市沖を初期位置 (★) として実施した赤潮輸送シミュレーションによる粒子軌跡

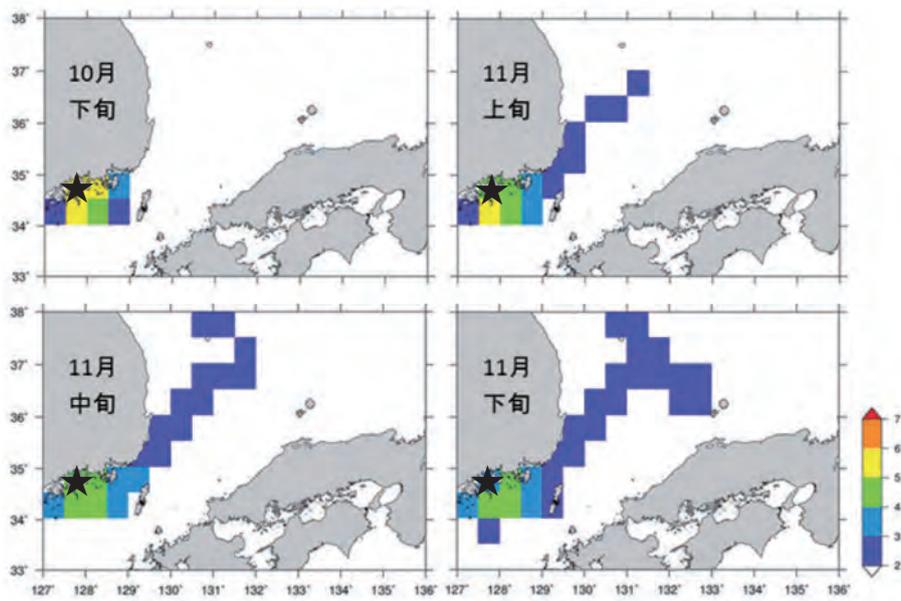


図 6-2 韓国全羅南道麗水市沖を初期位置 (★) として実施した赤潮輸送シミュレーションによる赤潮到達リスク

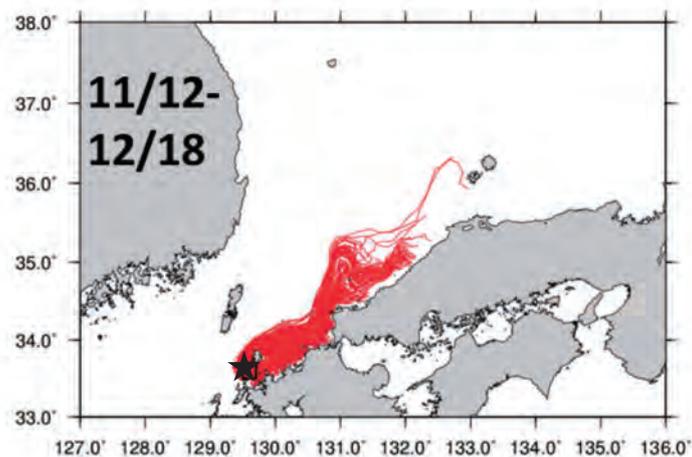


図 7-1 長崎県平戸市沖を初期位置 (★) として実施した赤潮輸送シミュレーションによる粒子軌跡

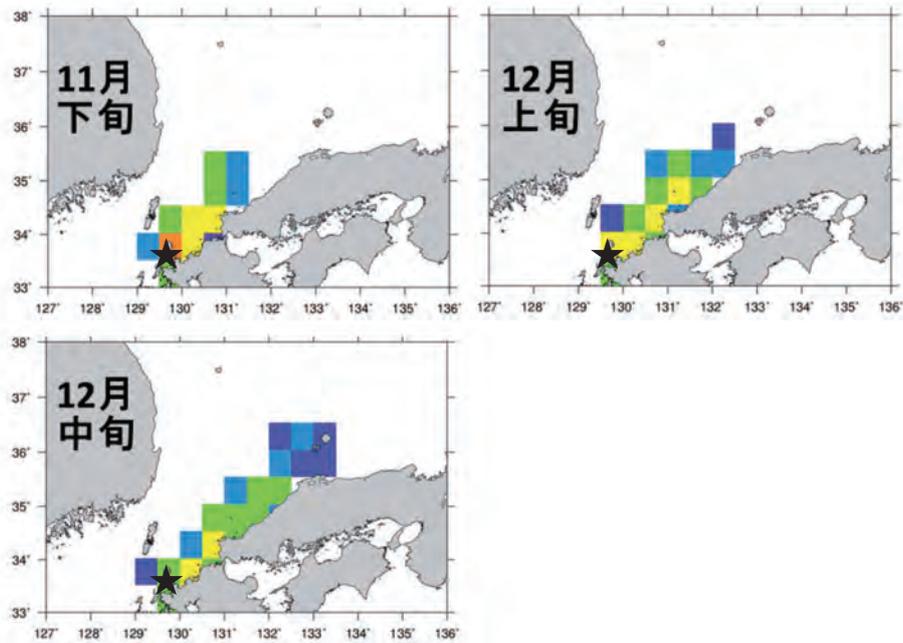


図 7-2 長崎県平戸市沖を初期位置 (★) として実施した赤潮輸送シミュレーションによる赤潮到達リスク

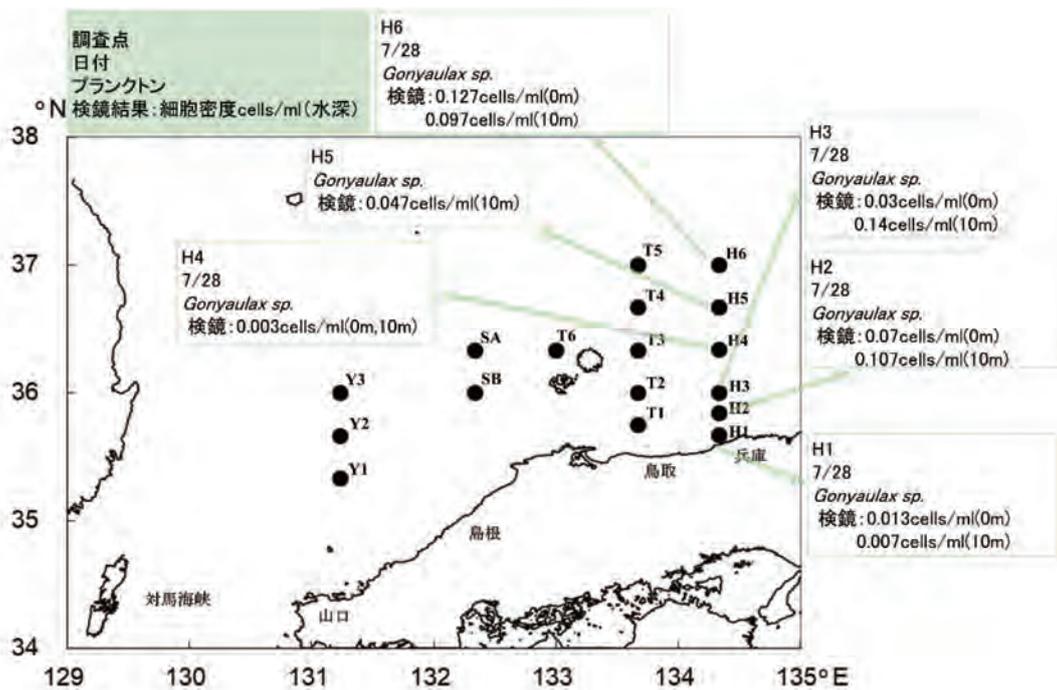


図 8-1 沖合調査におけるその他有害種の出現状況