

1) 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 ウ. 伊勢湾・三河湾・英虞湾海域

愛知県水産試験場

河住大雅, 中嶋康生, 松村貴晴, 柘植朝太郎, 大澤 博

三重県水産研究所

竹内泰介, 渥美貴史, 坂下奨悟, 岡野健次, 大田幹司

三重県水産研究所鈴鹿水産研究室

岩出将英

水産研究・教育機構 水産技術研究所

中山奈津子

福井県立大学

浜口昌己

1 全体計画

(1) 目的

近年, 伊勢湾・三河湾・英虞湾海域では, 有害赤潮プランクトンやノリ色落ち原因珪藻による漁業被害が生じている。赤潮による漁業被害を未然に防止および軽減するためには, 赤潮発生海域を網羅した広域連携調査を実施する必要がある。

本課題では, 伊勢湾・三河湾・英虞湾海域において各機関が連携して広範な調査を実施し, 有害赤潮プランクトンやノリ色落ち原因珪藻の発生状況および海洋環境を監視するとともに, 既存データも含めたデータ解析によって当該海域における有害赤潮プランクトンおよびノリ色落ち原因珪藻の発生シナリオを構築・改良し, 赤潮発生予察により漁業被害軽減に資することを目的とする。また, 貧酸素など環境要因が与えるヘテロカプサ等有害赤潮プランクトンの生理生態への影響を評価し, より精緻なシナリオ構築への貢献を図る。また, 赤潮の発生段階に応じた行動計画の検討を行う。

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

有害赤潮プランクトンおよび珪藻類の赤潮が発生する契約月から翌3月まで共同提案機関がそれぞれに有する海洋観測調査船または傭船を用いて広域的な海洋調査を実施し, 伊勢湾・三河湾・英虞湾海域における有害赤潮プランクトンの出現特性, および伊勢湾・三河湾におけるノリ色落ち原因珪藻の出現特性を明らかにする。また, ヘテロカプサ等有害赤潮プランクトンの増殖に与える貧酸素の影響について知見を得る。行動計画を検討するため, 情報収集や課題の抽出を行う。

1) モニタリング調査

a. 有害赤潮プランクトン調査

図1に示す海域に計26点の調査定点を配置し, 4月から翌3月まで週1回~月1

回程度、海洋環境（水温、塩分、栄養塩、クロロフィル *a*、溶存酸素）およびプランクトン細胞密度等のモニタリング調査を実施する（表 1）。

b. ノリ色落ち原因珪藻調査

図 2 に示す海域に計 29 点の調査定点を配置し、10 月から翌 3 月まで週 1 回～月 1 回程度、海洋環境（水温、塩分、栄養塩、クロロフィル *a*、溶存酸素）およびプランクトン細胞密度等のモニタリング調査を実施する（表 2）。

2) 有害赤潮およびノリ色落ち被害の発生シナリオ構築

1) で取得したデータおよび既存データ等に基づいて、当該海域における有害赤潮プランクトンおよびノリ色落ち原因珪藻の発生と気象条件・海洋環境との関係を解析し、有害赤潮およびノリ色落ち被害の発生シナリオを構築・検証する。

3) 有害赤潮プランクトンの増殖に与える貧酸素の影響評価

有害赤潮プランクトンの増殖に与える貧酸素の影響を評価するため、*Heterocapsa circularisquama* を始めとする有害種や珪藻類について試験を行ってきた。これまで水温 20℃における増殖試験を実施してきたため、今年度は異なる水温（15℃、25℃）で試験を実施した。試験に用いた株は、*H. circularisquama* 培養株：HU9433-P（浦の内湾）、HCLG1（五ヶ所湾 1999）、*Karenia mikimotoi* 培養株：Km13TG09（英虞湾）、KmUW5（宇和島湾）である。酸素濃度の調製は、がん細胞の細胞培養に用いる低酸素培養キット BIONIX（株式会社スギヤマゲン）を使用して、次の通り行った。同キットに付属の透明ガスバリア性パウチ袋に、O₂メーター、上述の培養株のいずれかを入れた培養プレート、ガス濃度調節剤を入れて密閉し、マニュアルに従って酸素濃度を調節した。培養プレートは 24 穴プレート、培地はフィルター滅菌した IMK ダイゴ培地を用いた。培養株は細胞初期密度を約 1,000 cells/mL および約 5,000 cells/mL に調製した。セットしたパウチ袋ごとインキュベータに入れ培養した。培養条件は、水温 15℃及び 25℃、光強度 130～150 μmol photons/m²/s、明暗周期 12h:12h L:D で、酸素濃度は、4 mg/L、6 mg/L 及び自然通気（対照区）とした。培養開始から毎日パウチ袋からプレートを取り出して計数及び形態や遊泳状態を観察し、パウチ袋内に戻して酸素濃度を調製し培養を続けた。

4) 行動計画の検討

行動計画を検討するために必要な情報収集や課題の整理を行う。

(3) 結果および考察

1) モニタリング調査

a. 有害赤潮調査

①海洋環境

図 3～9 に、2024 年 1 月～12 月の海洋環境データを示した。

水温（図 3）：

伊勢湾の表層は、6 月から 8 月は平年より低めとなり、8 月は平年に比べて 2.2℃低くなった。その他の月は平年並から高めで推移し、10 月は 3.5℃高かった。底層は、3～4、6、9、11 月に平年より 1℃以上高めとなり、11 月は 2.2℃高かった。一方で 10 月は 1.3℃低かった。他の月は概ね平年並で推移した。

三河湾の表層は、年間を通して平年並から高めで推移し、4 月は 3.0℃、8 月は 2.9℃、

9月は3.3℃、10月は3.8℃高くなった。また、8、9月は気温が高く表層水温が30℃を上回ることがあった。底層についても、年間を通して平年並から高めで推移し、9月は2.3℃高かった。

英虞湾の表層および底層は11月上旬までは平年並から高めで推移したが、11月中旬以降には平年並、12月下旬には平年を下回った。

塩分(図4)：

伊勢湾の表層は、4月と6月に平年より低めとなり、特に6月が低かった。7～8月と10月は平年より高めとなり、特に8月は高かった。底層は、年間を通して概ね平年並みで推移した。

三河湾の表層は、4月、6～7月、9月、11月に平年より低めとなり、特に7月は降雨の影響もあり著しく低下した。底層でも6月に特に平年より低かった。

英虞湾の表層は、6月下旬～7月中旬に梅雨の降雨の影響で、平年より低い値となった。また、9月中旬には長期間にわたった台風の停滞による降雨の影響を受け低下した。底層は、概ね平年並で推移した。

溶存酸素(図5)：

伊勢湾の表層は、年間を通して平年並から低めで推移した。底層は、平年より高めとなった10月を除き平年並から低めで推移し、7～9月は0.0～0.1mg/Lであった。

三河湾の表層は、4、7、9～10月に平年よりも高くなったが、他の月は平年並から低めで推移した。底層は、概ね平年並から低めで推移し、7～9月は0.0～0.4mg/Lであった。

英虞湾の表層は、7月下旬～8月下旬には6.0～6.3 mg/Lと低めで推移した。底層は、7月中旬には2.5 mg/L、9月上旬には1.6 mg/Lと一時的な低下が見られた。なお、伊勢、三河湾は観測方法の変更のため、昨年度からやや低めの観測値を示している。

クロロフィルa(図6)：

伊勢湾の表層は、1、4、10、12月に平年よりも高く、他の月は平年並みから低めで推移した。表層で特に高かった10月は*Mesodinium rubrum*の赤潮が発生していた。底層は、1、12月に平年よりも高くなったが、他の月は低めで推移した。

三河湾の表層は4～5、7、12月に平年より高く、他の月は低く推移した。底層は、4月に高かった以外は平年並から低めで推移した。表層で特に高かった4月は、クリプト藻類と*Leptocylindrus danicus*の複合赤潮が発生していた。

英虞湾の表層は、6月上旬～11月中旬には0.8～2.7 μg/Lと平年と比較し低めで推移し、特に7月下旬～9月上旬には0.8～1.5 μg/Lと低かった。底層は、6月下旬および7月上旬にはそれぞれ8.4 μg/L、7.1 μg/Lと高くなった。また、7月下旬には珪藻類が増加し8.2 μg/Lとなり、9月上旬においても*Chattonella*属の増加により6.8 μg/Lと高くなった。

栄養塩(DIN 図7)：

伊勢湾の表層は、3～4、6、11～12月に平年より高く、1～2、7、9～10月は低かった。底層は、5、7、9、11月は高かったが、他の月は平年並から低めで推移した。

三河湾の表層は、3、8、11～12月が平年より高かったが、他の月は平年並から低く推移した。底層は1、5、8月に低かったが、他の月は平年並から高めで推移した。

英虞湾の表層は、年間を通して平年より低く推移した。底層では6月中旬～9月下旬には低い傾向があったが、8月下旬に平年値を超える高い値が確認され、10月上旬以降は平年並みとなった。

栄養塩 (PO₄-P 図8) :

伊勢湾の表層は、11月は高かった以外は、年間を通じて平年並から低めで推移した。底層は8～9、11月に高かったが、他の月は平年並から低めで推移した。

三河湾の表層は、年間を通じて平年並で推移した。底層は、5、7～9、11～12月に高かったが、他の月は平年並から低く推移した。

英虞湾の表層は1月上旬から10月中旬は低く推移した。底層では、おおむね平年並みとなったが、7月上旬、9月下旬には低い値が見られた。

栄養塩 (SiO₂-Si 図9) :

伊勢湾の表層は、1～2、5、7、9～10月に平年より低く、他の月は平年並から高くなり、特に6月に高かった。底層は、5～6、8～9、11～12月に高かったが、他の月は平年並から低めで推移した。

三河湾の表層は、8～9月に平年より低く、他の月は平年並から高くなり、特に6、12月に高くなった。底層は、年間を通して平年並から高めで推移し、特に6～10、12月に高かった。

英虞湾の表層および底層は1月上旬から11月中旬は2023年より低く推移した。表層では6月中旬から7月下旬に低下した。底層では6月下旬以降10月下旬まで2023年の半分程度であった。

②プランクトン (図10)

Heterocapsa circularisquama

英虞湾で、10月下旬に確認され、最高密度は106 cells/mLであった。伊勢湾、三河湾は確認されなかった。

Chattonella spp. (*C. marina*, *C. antiqua* および *C. ovata*)

三河湾、英虞湾で確認された。三河湾では、7月上旬、11月中旬に確認され、最高密度は2 cells/mLであった。英虞湾では7月上旬～10月上旬に確認され、最高密度は492 cells/mLであった。

Karenia mikimotoi

伊勢湾、三河湾、英虞湾の3海域で確認された。伊勢湾の愛知県側では、10月上旬に確認され、最高密度は2 cells/mLであった。三河湾では9月中旬に確認され、最高密度は1 cell/mLであった。英虞湾では7月上旬から9月上旬に確認され、最高密度は1,090 cells/mLと赤潮となった。このほか三重県内では、五ヶ所湾で確認された。五ヶ所湾では8月上旬から9月中旬に確認され、最高密度8,700 cells/mLとなり赤潮となった。

Heterosigma akashiwo

伊勢湾、三河湾および熊野灘で確認された。伊勢湾では5月上旬から8月上旬、10月上旬から11月上旬、12月上旬に確認され、最高密度は112 cells/mLであった。三河湾では4月中旬から7月上旬、9月中旬から12月上旬、1月上旬に確認され、最高密度は5月中旬の5100 cells/mLで、赤潮となった。三重県内では、熊野灘尾鷲湾で6月上旬に最

高密度 8,150cells/mL が確認された。

Vicicitus globosus (旧種名 : *Chattonella globosa*)

伊勢湾, 三河湾で確認された。伊勢湾では7月上旬に確認され, 最高密度は 5cells/mL であった。三河湾では, 4, 6, 7, 9月に確認され, 最高密度は 2 cells/mL であった。

特記事項として, 伊勢湾, 三河湾では, 2021, 2022 年は *K. mikimotoi* 赤潮による漁業被害が発生していたが, 2024 年は 2023 年に引き続き *K. mikimotoi* は年間を通じてほとんど確認されなかった。

英虞湾では, 7月上旬から9月上旬にかけて *K. mikimotoi* による赤潮が発生し, 8月上旬に五ヶ所湾でも同種の赤潮が発生した。黒ノリ養殖では, 2023 年漁期および 2024 年漁期に色落ちが確認されている。

・有害赤潮プランクトンの発生に関する特記事項 (考察)

英虞湾における *K. mikimotoi*, *Chattonella* 属, *H. circularisquama* の発生環境に関する考察 :

英虞湾において *K. mikimotoi* による赤潮は湾奥の A3 (立神) および湾最奥の A2 (大明神前) において, 7/1 に初認され, A3 では 82 cells/mL, A2 では 105 cells/mL と三重県における赤潮基準値である 100 cells/mL を上回る密度となり, 9/9 に終息した。A2 では 7/1 以降 7/4 に 163cells/mL, 7/8 に 185 cells/mL, 7/10 に 210 cells/mL といずれも B-1m において徐々に増加した。7/12 に 19 cells/mL と一旦減少したものの 7/22 には 353 cells/mL と再び増加, 7/25 に一旦 29 cells/mL となったが 7/29 に B-1m で 160 cells/mL に増加, 8/5 以降湾最奥では終息した。A3 では, 7/1 に B-1 m で 82 cells/mL 発生。7/4 に 80 cells/mL であったがその後減少し 7/8, 7/10 には 19 cells/mL, 14 cells/mL となった。7/12 に 175 cells/mL と増加した後徐々に減少し, 8月上旬に一旦見られなくなった。9月上旬に 32~50 cells/mL で再び見られた。

Chattonella 属は, A2 (湾最奥) で 7/1 に B-1m で 159 cells/mL が発生した。7/4 に 355 cells/mL でピークとなり 7/8 に 143 cells/mL, 7/10 に 25 cells/mL と減少したものの 8/16 に 107 cells/mL, 9/3 に 320 cells/mL, 9/24 に 33 cells/mL と 8~9 月中に数回のピークを生じながら長く継続し, 終息したのは 10/3 であった。

6 月下旬~7 月上旬に A3 (湾奥) の栄養塩類は減少傾向であったが, 7 月上旬以降増加した。7/1 の *K. mikimotoi* 赤潮および *Chattonella* 属赤潮発生の直前には赤潮発生の直前に DIN は低濃度であった一方で PO₄-P は増加傾向であったため, PO₄-P の増加が赤潮発生の引き金となった可能性がある。6 月下旬に, 梅雨の降雨のため日照時間が減少し, 6/24 には 910 cells/mL であった珪藻類が 7/1 には 0 cells/mL に減少。日照時間の減少による珪藻類の減少が *K. mikimotoi* および *Chattonella* 属の増加原因となったと考えられた。

7 月中下旬~8 月中旬に晴天が続き, 湾奥で珪藻類が増加した際に *K. mikimotoi* および *Chattonella* 属は減少した。また, 8 月下旬の台風の影響により日照時間が減少したことにより珪藻類が減少した。底層の溶存酸素は 7 月以降低い水準で推移し, 台風通過の際にも増加が見られなかった。このことにより, 湾奥では 9 月以降には *K. mikimotoi* が増加せず, 低酸素に耐性のある *Chattonella* 属の増加が見られたと考えられた。

英虞湾において *H. circularisquama* による赤潮は, 2023 年には 2016 年 9~10 月以来,

7年ぶりに発生し、2024年にも2年連続で発生が見られた。湾奥のA3（立神）および湾最奥のA2（大明神前）において、10/25に初認され、A3では17 cells/mL、A2では106 cells/mLと三重県における赤潮基準値である100 cells/mLを上回る密度となった。10/28にはA3では7 cells/mL、A2では8 cells/mLと減少したほか、湾央（A5：タコノボリ）および湾央と湾奥の中間に位置するA4（間崎）においても1~2 cells/mL見られた。10/31時点ではA3で0 cells/mL、A2で10 cells/mLとなり、その後はすべての地点で見られなくなった。赤潮発生時のA3地点での海況として、栄養塩類はDIN濃度が6~7月以降に高まっていた一方でPO₄-Pの濃度は10月以降低下していた。赤潮発生前の底層のクロロフィルa濃度は1.8~3.0 μg/Lで推移した。10月中旬以降に日照時間は少ない状況で推移したものの珪藻類は210~650 cells/mLで推移した。このため、競合種である珪藻類がある程度存在していたことにより、*H. circularisquama*の最高密度がA3で17 cells/mL、A2でも106 cells/mLと低く推移したと考えられた。

三河湾における*K. mikimotoi*の発生環境に関する考察：

三河湾において*K. mikimotoi*は6月頃から確認されることが多いことが分かっている（加藤ら 2024）。今年度は*K. mikimotoi*の発生初期と考えられる6月下旬に平年を上回る降雨があり、大幅な塩分の低下、降雨後の*Pseudo-nitzschia*や*Skeletonema spp.*、*Thalassiosira spp.*による大規模な赤潮が確認された。2023年においても6月上旬の豪雨による塩分低下、珪藻類との競合によって*K. mikimotoi*の増殖が抑制されたことが示唆されており、これらのことから2024年についても2023年と同様に低塩分や珪藻類などとの競合によって、*K. mikimotoi*の増殖が抑制されたと考えられた。

b. ノリ色落ち原因珪藻調査

①海洋環境（図11, 12）

水温：

伊勢湾の三重県側におけるノリ漁場では、10月上旬以降2月上旬まで平年値を上回り、10月上旬には平年値より2.5°C、2月上旬には1.4°C高かった。

三河湾では12月下旬に平年より低くなったが、他の期間は平年並から高めで推移した。

塩分（比重）：

伊勢湾の三重県側におけるノリ漁場では、概ね平年並みから高めで推移したが、11月上旬には18.2と低かった。

三河湾では10月の下旬を除き平年並から平年より低くなった。

栄養塩：

伊勢湾の三重県側におけるノリ漁場では、DINおよびPO₄-Pはおおむね低い水準で推移した。しかしながら、DINおよびPO₄-Pでは11月上旬には降雨の影響と考えられる上昇が見られた。また、12月上旬には、PO₄-Pが1.0 μMと高い値を示したが、その際にはDINは特に高くなかった。三河湾ではDINは11月から12月上旬、1月中下旬に平年を上回り、他の期間は平年を下回った。PO₄-Pは11月上旬、12月上旬、1月中下旬に平年を上回り、他の期間は平年並みから平年を下回った。

クロロフィルa：

三河湾では調査期間のすべてで平年を下回った。

②プランクトン (図 13)

Skeletonema spp.

伊勢湾の三重県側におけるノリ漁場では、11月中旬に 16,150 cells/mL、1月下旬に最高密度として 39,150 cells/mL を確認した。

三河湾では10月上旬 12,800 cells/mL 確認された。その後は減少し、12月上旬には一度確認されなくなった。12月中旬に再度確認され、1月の中旬に 680 cells/mL が確認された。

Chaetoceros spp.

伊勢湾の三重県側におけるノリ漁場では、10月上旬に 19,300 cells/mL を記録した後、10月下旬から1月中旬までは数十から数百 cells/mL 程度で推移した。

三河湾では10月上旬、10月中旬の最高密度はそれぞれ 4,700 cells/mL、8,100 cells/mL となったが、11月上旬から12月中旬までは低密度で推移した。その後、1月上旬から増加した。

Eucampia zodiacus

伊勢湾の三重県側におけるノリ漁場では、12月中旬まで 0 cells/mL で推移したが、その後12月下旬に 320 cells/mL が確認された。

三河湾では1月上旬以降に確認されており、1月上旬に最高密度が 500 cells/mL となった。

・ノリ色落ち原因珪藻の発生に関する特記事項 (考察)

伊勢湾:

伊勢湾の三重県側におけるノリ漁場では、12月中は12月上旬に一時的に上昇した $PO_4\text{-P}$ を除き、 DIN 、 $PO_4\text{-P}$ とともに平年を下回る濃度で推移し、1月中旬までは重篤な色落ちは見られなかった。1月中旬以降には、*Skeletonema* spp. が高密度となり、栄養塩の減少がみられ、鈴鹿以南の地区で色落ちが発生した。

三河湾:

DIN 、 $PO_4\text{-P}$ とともに11月上旬まで増加し、以降は、1月上旬まで減少傾向となった。クロロフィル *a* については期間を通して平年を下回り、赤潮についても10月上旬に三河湾の複数海域で *Skeletonema* spp., *L. danicus* の赤潮が確認されたが、それ以降、赤潮は確認されなかった。1月にノリの色落ちが一部の海域で確認されたが、珪藻類の細胞密度は赤潮を形成するほどの値ではなかった。

2) 有害赤潮およびノリ色落ち被害の発生シナリオ構築

a. 有害赤潮の発生シナリオ構築

・三河湾 (*K. mikimotoi* の発生シナリオ構築)

三河湾では2021、2022年ともに *K. mikimotoi* 赤潮が発生し、2021年は漁業被害が発生した。一方、2023年と2024年は *K. mikimotoi* の赤潮は確認されず、2024年の最高細胞数は 1 cell/mL とほとんど確認されなかった。そこで、これまでの *K. mikimotoi* 赤潮の発生状況と、発生年と非発生年の海況や珪藻密度を比較整理することで *K. mikimotoi* 赤潮

の発生シナリオの構築に向けた諸要素の検討を行った。過去 10 年の *K. mikimotoi* の発生状況について表 3 に示した。2015 年に三河湾にて 31 年ぶりに *K. mikimotoi* による赤潮が確認された後、2024 年までの 10 年間のうちの 6 年で赤潮が発生した。

K. mikimotoi は中層発生型と言われており、降水量や密度差、貧酸素水塊と関係が深いと考えられている（加藤ら 2024）。加えて、夏季に発生するため水温躍層や一般的に鞭毛藻類の変動を左右する珪藻密度と関連があると考えられる。また、鉛直運動が可能であり、栄養塩枯渇にも強いとされている。そこで、これらの諸要素について解析を実施した。

過去 10 年の豊田、岡崎、新城、豊橋気象観測所（気象庁アメダス）の降水量と三河湾の水温、塩分、密度差、珪藻密度、栄養塩の分布を *K. mikimotoi* 赤潮発生年と非発生年ごとにまとめたものを図 14 から 20 に示した。

はじめに降水量をみると、5 月下旬から 6 月の期間で発生年と非発生年で大きな差異が見られ、発生年に比べ、非発生年の降水量が多い結果となった。同様に塩分と密度差にも同時期に差異が見られた。発生年の 6 月中には三河湾の広い範囲で塩分が 30 以上、密度差は 3 以下、湾奥部でも塩分 29 以上、密度差 4 以下となっていた。一方、非発生年では湾の全域で塩分は 30 以下となっており、密度差もほぼ全域で 3 以上となっており、湾奥部では塩分は 26 以下、密度差が 6 以上ある海域も確認された。両者間の差異は 7 月上旬まで確認されたが、その後は差が縮まり、確認されなくなった。（図 14, 16, 17）

また、珪藻類についても 6 月に差異が見られ、特に湾西部において発生年に比べて非発生年の方が、珪藻類密度が高くなっていた。一方で、栄養塩については月による差異は見られなかったが、DIN においては夏季を通じて湾西部において発生年に高くなっていた。（図 18~20）

これらのことから *K. mikimotoi* の増殖には *K. mikimotoi* の発生初期に当たる 6 月の海洋環境が大きな影響を与えている可能性が示唆された。6 月に降雨量が多く塩分濃度が低いこと、三河湾において *K. mikimotoi* が増殖する湾西部において珪藻類が多いことで低塩分下・競合により *K. mikimotoi* の増殖が抑制され、赤潮に至らないと考えられた。

2024 年についても 6 月の下旬にまとまった降雨による塩分低下、6 月中旬から 7 月上旬にかけて *Pseudo-nitzschia* や *Skeletonema spp.*, *Thalassiosira spp.* による赤潮が確認されており、*K. mikimotoi* 初期発生時に塩分低下と珪藻との競合が発生した結果、赤潮が発生しなかったと考えられた。

・英虞湾 (*K. mikimotoi* 赤潮の発生シナリオ構築)

英虞湾における *K. mikimotoi* の発生状況を表 4 に示した。三重県では、*K. mikimotoi* の細胞密度が 100 cells/mL を超えた場合を赤潮発生年としている。2011 年以降、三重県内における *K. mikimotoi* 赤潮の発生頻度は増加しており（表 4）、2024 年は 2021 年から 4 年続けて赤潮発生年となった。

2024 年、三重県内で *K. mikimotoi* が初認されたのは、7/1 の英虞湾湾奥（A3）および湾最奥のいずれも B-1m 層で、82~105 cells/mL が確認された後、9 月上旬に終息まで複数回のピークを示しながら低密度で推移した。英虞湾内の他の地点においては、A2 および A3 から 1 週間遅れて 7 月中旬以降に表層から中層まで広く数 10 cells/mL で見られ、

湾最奥で発生したカレニア赤潮が湾最奥から外側に広がっていったと考えられた。また、湾口付近の田杭で 8/13 に 625 cells/mL, 8/16 に 1,090 cells/mL (いずれも B-1m) で確認された。これについては、8/13 に全湾調査を実施し、通常の調査に加えて湾全体の各地で検鏡実施したため、湾口の田杭において *K. mikimotoi* が発見され、その後の動向を追跡したものである。このため、8/13 以前の状況は不明である。その他の地点として湾口付近迫子 B-1m では 8/13 に 6 cells/mL, 8/16 に 20 cells/mL と低密度で推移したが、9/3 には 161 cells/mL (5m), 9/6 には 211 cells/mL (8m) で確認された。9/9 には終息した。

2022 年までの英虞湾における *K. mikimotoi* 赤潮の発生シナリオについて、夏季、黒潮系外洋水の英虞湾内への侵入時、一時的に栄養塩濃度が増加し、その栄養塩をめぐる競合を制して珪藻類が優占種となるが、日照時間の減少に伴って衰退し、*K. mikimotoi* が優占種になり赤潮を形成すると検討した(二ノ方ほか 2022)。2023 年には、黒潮系外洋水の侵入が認められず、この際の栄養塩増加の影響は考えられなかった。台風と降雨の影響により栄養塩は増加した。*K. mikimotoi* の増加に遡る 3 日間程度の日照時間の減少に伴い、珪藻類が衰退、代わりに *K. mikimotoi* が増加して優占種となり、細胞密度を顕著に増加させたものと考えられた。このため、2022 年までのシナリオについて、栄養塩類増加の要因に、黒潮系外洋水によるものに加えて、台風等による攪拌、降雨の影響を加えることで、シナリオに沿った *K. mikimotoi* の増殖があったと判断された。

2024 年は、栄養塩類は 6 月下旬～7 月上旬に A3 (湾奥) には減少傾向であり、7/1 の *K. mikimotoi* 赤潮発生の直前に DIN は低濃度であった一方で、PO₄-P は増加傾向であったため、赤潮の発生原因は PO₄-P の増加が引き金となった可能性がある。2024 年における赤潮発生の直前の PO₄-P の増加には、黒潮系外洋水の侵入の影響はなかったと考えられた。これまでのシナリオでは、栄養塩類を DIN や PO₄-P に分けた検討を行っていなかったが、2024 年の結果から、それぞれを分けて検討していく必要があると考えられた。

6 月下旬に、梅雨の降雨のため日照時間が減少し、6/24 には 910 cells/mL であった珪藻類が 7/1 には 0 cells/mL に減少したことから、珪藻類の減少が *K. mikimotoi* の増加原因となったと考えられた。7 月上旬以降には *K. mikimotoi* に加えて *Chattonella* 属も同時に発生した。このため *K. mikimotoi* と *Chattonella* 属の間で競合が起こったことが、今年の最高密度 (10,260 cells/mL) と比較し低密度で推移した原因ではないかと考えられた。7 月中下旬～8 月中旬に晴天が続き、湾奥で珪藻類が増加した際に *K. mikimotoi* および *Chattonella* 属は減少した。8 月下旬には台風の影響により日照時間が減少したことにより珪藻類が減少した。底層の溶存酸素は 7 月以降低い水準で推移し、台風通過の際にも増加が見られなかった。このため、湾奥では 9 月以降に *K. mikimotoi* が増加しなかったのは低酸素のためと考えられた。一方で、*Chattonella* 属が増加した要因は、*Chattonella* 属は低酸素に耐性のあるため同時期の低酸素環境下でも増殖が可能であったと考えられた。

2024 年の *K. mikimotoi* 赤潮は最高密度が 1,090 cells/mL と今年の 10,260 cells/mL と比較して低密度で、さらに約 2 か月間と長期に渡って継続した。このため、通常のカレニア赤潮の発生状況と異なっている可能性があるものの、日照時間の減少による珪藻衰退時に代わって *K. mikimotoi* が増殖するというシナリオの部分は一致していた。2024 年には *K. mikimotoi* 赤潮と同時に *Chattonella* 属赤潮が発生したため、今後は *Chattonella* 属等

の競合関係についても検討していく必要があると考えられた。

b. ノリ色落ち被害の発生シナリオ構築

・伊勢湾の三重県側におけるノリ漁場

これまでの解析により、伊勢湾北中部に位置する鈴鹿地先においては、珪藻類の合計密度が 9,000 cells/mL 以上の場合や *Eucampia* spp. が 500 cells/mL 以上の場合には、DIN が 7.1 μ M 以下となる傾向があることが認められている（二ノ方ほか 2022）。

2024 年は、DIN は 12 月上旬以降継続して DIN が 7.1 を下回っていたものの、1 月中旬までは顕著な黒ノリの色落ちを確認されなかった。しかしながら、1 月 21 日に珪藻類 *Skeletonema* 属の密度は 39,150 細胞と増加し、DIN および PO₄-P も急激に減少し、それと伴い 1 月中旬以降に色落ちが発生した。このことは、これまで考えられていた色落ちのシナリオと一致していた。

三重県側のノリ漁場における主な色落ち原因珪藻類は、小型珪藻（*Skeletonema* 属、*Chaetoceros* 属）であったが、2024 年の桑名地域の珪藻類の種組成（図 26）のように、近年では *Rhizosolenia* 属など、これまであまり見られなかった種が増加している。また、桑名地区と外洋域の影響を受けると考えられる鳥羽地区の種組成を見ると *Rhizosolenia* 属の割合は高く、種組成は異なっていた。今後は、他の珪藻種に関しても冬季間の増殖と栄養塩類の減少に関するデータを蓄積し、色落ちにつながる栄養塩類の減少との関係を示すシナリオを構築していくことが必要と考えられた。

・三河湾

これまでの解析結果から、三河湾における主要なノリ色落ち原因珪藻類である *E. zodiacus* 赤潮の発生条件について、11 月の南知多の気温および三河湾自動観測ブイ 2 号（吉田港沖）の 11 月の底層水温が高く、12 月上旬の *Chaetoceros* spp. と *Skeletonema* spp. の細胞密度の合計が少ない場合、1 月以降に *E. zodiacus* による赤潮発生の可能性が高くなることが明らかになっている（柴田・中嶋 2016）。この 3 条件を *E. zodiacus* 赤潮発生予測の指標とし、2015 年度から赤潮発生予察を行っている。そこで、観測結果からこれら 3 つの指標による *E. zodiacus* 赤潮の発生予察手法を検証した。

2024 年度の検証結果を図 27 に示した。11 月の気温および水温が高く、12 月の *Skeletonema* spp. と *Cheatoceros* spp. の細胞密度の合計も低かったことからすべての条件に当てはまった。このため、1 月以降 *E. zodiacus* 赤潮によるノリの色落ち被害が発生する可能性は高いと予測した。1 月末時点で *E. zodiacus* の最高細胞密度は、500 cells/mL で *E. zodiacus* が原因とみられるノリの色落ち被害は発生しておらず（1 月末現在）、予測が外れる形となっている。

今年度は 1 月以降に三河湾の広い範囲で *C. sociale* によるノリの色落ちが確認されており、*E. zodiacus* 赤潮によるノリの色落ちは発生しなかったと考えられる。

3) 有害赤潮プランクトンの増殖に与える貧酸素の影響評価

水温 15°C 及び 25°C における各溶存酸素濃度に調製された培地中で、*H. circularisquama* 培養株は、試験区、対照区ともに、いずれも生残り増殖した。*K. mikimotoi* 培養株は、試験区、対照区ともに試験開始後 1 日以内に死滅した。形態観察では、*H. circularisquama*

は変化がなく、運動性にも変化が認められなかった。*K. mikimotoi* 培養株は数時間後に円形になり、その後破裂した。

これまで英虞湾や三河湾、加茂湖において、海水中の酸素濃度が減少傾向にある際、*H. circularisquama* の増殖が認められてきたため、本事業課題において、酸素濃度が *H. circularisquama* など有害藻類の増殖に与える影響について評価してきた。これまでの試験では、*H. circularisquama* や *Chattonella* 属は、海水培地中の酸素濃度が低い場合に増殖速度が高くなり、酸素濃度が高い場合では増殖速度が低くなるという結果が得られた。一方、*K. mikimotoi* は逆の傾向を示した。具体的には、*H. circularisquama* 培養株 (HcKam06 他) は、温度 20°C、0, 2, 4, 6 mg/L の低酸素濃度下に 5 日間置かれた場合でも生残し、*K. mikimotoi* 培養株 (KmUW3 他) は、6 mg/L 以下では 24 時間以内に死滅することが明らかになった (ニノ方ほか 2022)。今年度は両種の培養株について、異なる酸素濃度 (4 または 6 mg/L) で 15°C や 25°C の条件で培養し、20°C の結果と比較した。その結果、これまでの 20°C における実験と同様の結果が得られた。ただし、*H. circularisquama* 培養株の試験区では、25°C で培養した方が 20°C で培養するより増殖が良好であり、動きやキツツキ運動も活発であった。

自然環境下では、貧酸素状態になると、*H. circularisquama* のような低酸素に強い種は生残し、鉛直運動によって至適溶存酸素濃度の深度で酸素を得ることができれば、増殖すると推察される。一方、貧酸素下では増殖が困難な *K. mikimotoi* や珪藻類などは、低酸素濃度下では増殖が抑制されるか、あるいは、至適溶存酸素濃度の深度内で鉛直運動することが考えられる。三河湾における 2021 年 6~9 月の自動観測ブイによる溶存酸素濃度と *K. mikimotoi* の鉛直分布データによると、*K. mikimotoi* は貧酸素水塊を避けて鉛直運動をしていることが明らかになっている (加藤ほか 2024)。したがって、環境中には低酸素が好適である種や低酸素を避けて鉛直移動する種などが存在し、溶存酸素濃度が種の優占や共存・競合関係に少なからず影響を与えていることが推察された。

過年度の結果より、異なる水温下においても *K. mikimotoi* が低酸素に弱いことが認められたが、その要因については現在のところ不明である。貧酸素状況下における *K. mikimotoi* の現場海水中での生残や増殖について知見を得ることが、今後の課題である。

4) 行動計画の検討

漁業被害の軽減に向けて、伊勢湾の三重県側におけるノリ漁場では、近年、ノリ色落ち原因珪藻類の種組成に変化が見られることから、珪藻類の発生状況についてデータ解析を行い、新たな評価指標の設定など、発生シナリオの改良を進める。

漁業被害の軽減に向けて、三河湾では、*K. mikimotoi* と *E. zodiacus* の赤潮発生シナリオについて検討した。*K. mikimotoi* については、降水量と三河湾の水温、塩分、密度差、珪藻密度、栄養塩の分布状況から解析した。今後、シナリオ構築に向けて *K. mikimotoi* と貧酸素水塊の形成状況との関連や諸要素の検討についても解析を進める。*E. zodiacus* については、これまでの解析結果から得られた予察手法の検証を行った。引き続き検証を進める。

英虞湾では、2024 年の *K. mikimotoi* 赤潮の発生パターンを解析し、*K. mikimotoi* 赤潮発生シナリオの評価を行った。栄養塩類が、英虞湾内へ流入する黒潮系外洋水に制限され

ているとのシナリオについて、2023年には黒潮系外洋水の影響だけでなく台風などによる攪拌により増加するシナリオがあることが示された。2024年の赤潮では、栄養塩類の増加と *K. mikimotoi* との関連は見られず、*K. mikimotoi* の増殖過程において、これまでに作成した珪藻類との競合関係により増殖が制限を受けるとする発生シナリオと一部一致したものの、*Chattonella* 等のこれまでの発生シナリオ内に含めていなかった競合種の存在により影響を受ける可能性があることが示唆された。今後は、英虞湾における栄養塩増加時の環境および過去の競合種の発生状況について解析を進めることで、発生シナリオをより精緻なものに改良していく。

漁業被害の軽減に向けて、赤潮の発生予察は今後ますます重要になってくる。このため、赤潮発生シナリオについて検証を進め、予察精度の向上を図りつつ、漁業者などの関係機関への周知や活用に関して、引き続き行動計画の作成を検討していく。

引用文献

加藤毅士，柘植朝太郎，二ノ方圭介．三河湾における有害渦鞭毛藻 *Karenia mikimotoi* の出現状況と環境特性及び 2021 年夏季赤潮の消長要因の検討．愛知県水産試験場研究報告，2024；29：15-29.

柴田晋作，中嶋康夫．三河湾における養殖ノリ色落ち原因珪藻 *Eucampia zodiacus* 赤潮の発生予察．愛知県水産試験場研究報告，2016；21：1-3.

二ノ方圭介，加藤毅士，石田俊朗，柘植朝太郎，大澤 博，奥村宏征，渥美貴史，今井絵美，出口竣悟，西川次寿，舘 洋，中山奈津子，浜口昌己．3) ヘテロカプサ・サーキュラリスカーマの増殖に与える貧酸素の影響評価．1) 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 ウ．伊勢湾・三河湾・英虞湾海域．令和4年度漁場環境改善推進事業のうち栄養塩，赤潮・貧酸素水塊に対する被害軽減技術等の開発．(2) 赤潮被害防止対策技術の開発報告書 赤潮共同研究機関 広島．2022；109-133.

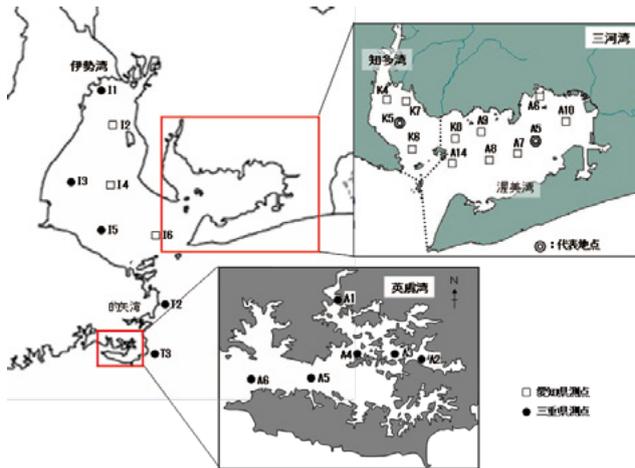


図1 有害赤潮 調査地点図

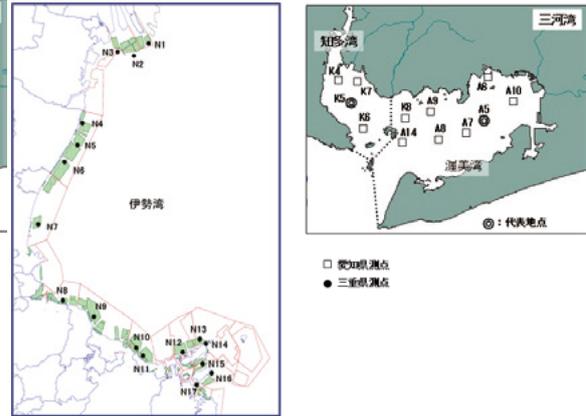


図2 ノリ色落ち原因珪藻 調査地点図

表1 有害赤潮 調査項目

		三重県	愛知県
調査点数	伊勢湾	伊勢湾(St.I1,I3,I5) : 3点 伊勢湾口(St. T2,T3) : 2点 英虞湾(St.A1~A6) : 6点	伊勢湾(St.I2,I4,I6) : 3点 三河湾(St.A5~A10,A14,K4~K8) : 12点
	調査期間	4月~翌3月	4月~翌3月
調査頻度	月1回~週1回	月1~2回	
観測層	伊勢湾 : 0m 伊勢湾口 : 0m 英虞湾 : 0, 5, 10, 20, B-1m	伊勢湾 : 0m 三河湾 : 0m, 5m(A5,K5のみ), B-1m(A5,K5のみ)	
調査項目	水温	○	○
	塩分	○	○
	DIN	△ (英虞湾のみ)	○
	PO ₄ -P	△ (英虞湾のみ)	○
	SiO ₂ -Si	—	○
	クロロフィル a	△ (英虞湾のみ)	○
	溶存酸素	△ (英虞湾のみ)	○
有害種細胞密度	○	○	

表2 ノリ色落ち原因珪藻 調査項目

		三重県	愛知県
調査点数	伊勢湾ノリ漁場	伊勢湾ノリ漁場(St.N1~N17) : 17点	三河湾(St.A5~A10,A14,K4~K8) : 12点
	調査期間	10月~翌3月	10月~翌2月
調査頻度	週1回	月2回	
観測層	0m	0m, 5m(A5,K5のみ), B-1m(A5,K5のみ)	
調査項目	水温	○	○
	塩分	○	○
	DIN	○	○
	PO ₄ -P	○	○
	SiO ₂ -Si	—	○
	クロロフィル a	—	○
	溶存酸素	—	○
珪藻細胞密度	○	○	

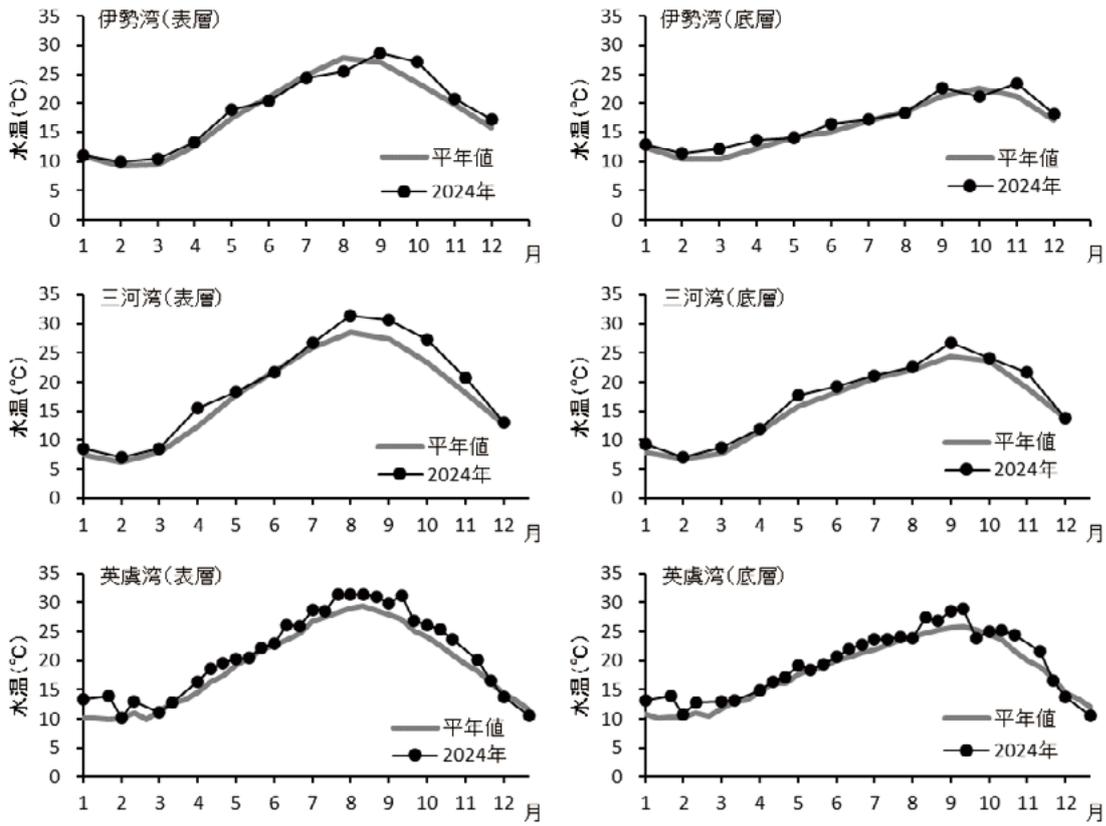


図3 表層と底層における水温の変化 (伊勢湾 St.4, 三河湾 St.A5, 英虞湾 St.A3)

※平年値：伊勢湾 (2004～2023年), 三河湾 (2004～2023年), 英虞湾 (2004～2023年)

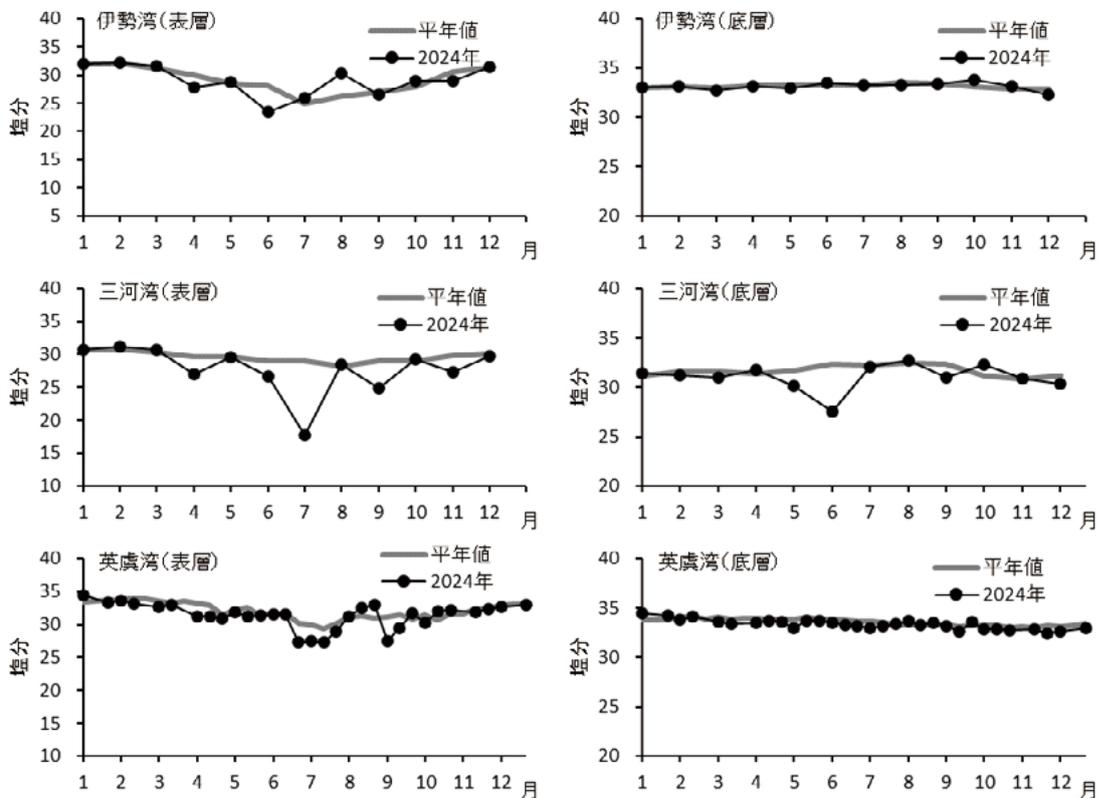


図4 表層と底層における塩分の変化 (伊勢湾 St.4, 三河湾 St.A5, 英虞湾 St.A3)

※平年値：伊勢湾 (2004～2023年), 三河湾 (2004～2023年), 英虞湾 (2004～2023年)

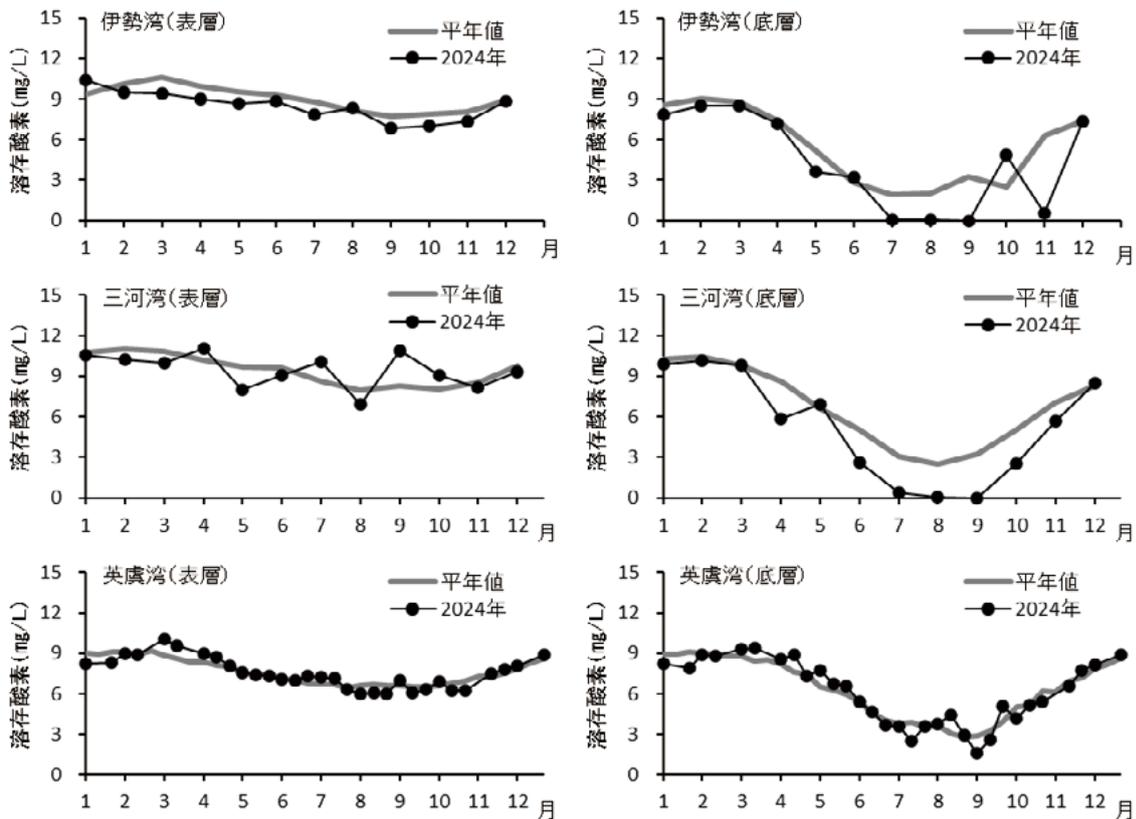


図5 表層と底層における溶存酸素濃度の変化（伊勢湾 St.4, 三河湾 St.A5, 英虞湾 St.A3）
 ※平年値：伊勢湾（2004～2023年），三河湾（2004～2023年），英虞湾（2004～2023年）

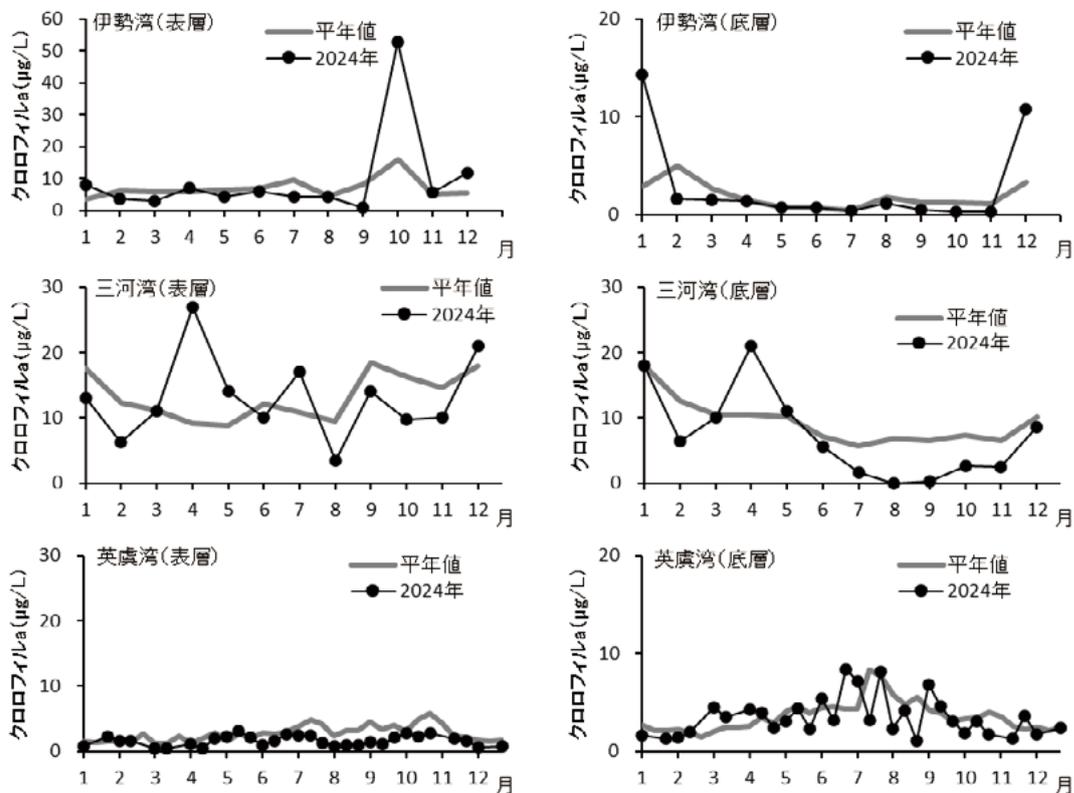


図6 表層と底層におけるクロロフィルaの変化（伊勢湾 St.4, 三河湾 St.A5, 英虞湾 St.A3）※
 平年値：伊勢湾（2004～2023年），三河湾（2004～2023年），英虞湾（2004～2023年）

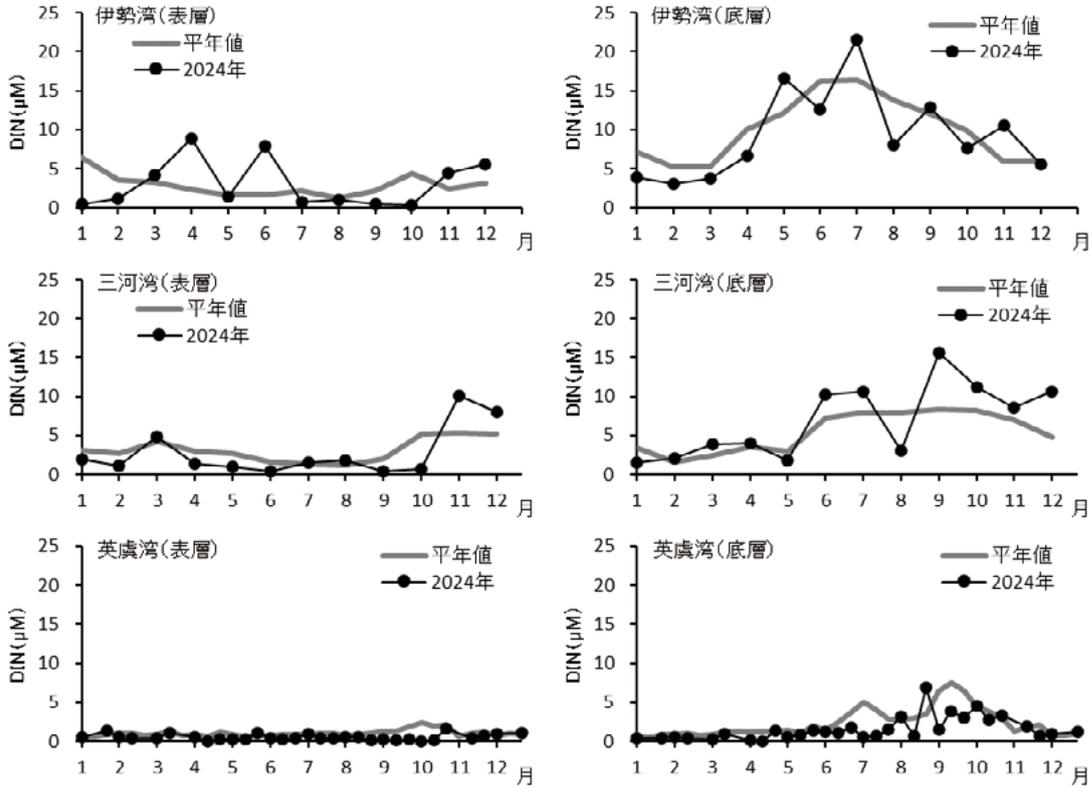


図7 表層と底層における DIN の変化 (伊勢湾 St.4, 三河湾 St.A5, 英虞湾 St.A3)
 ※平年値: 伊勢湾 (2004~2023 年), 三河湾 (2004~2023 年), 英虞湾 (2004~2023 年)

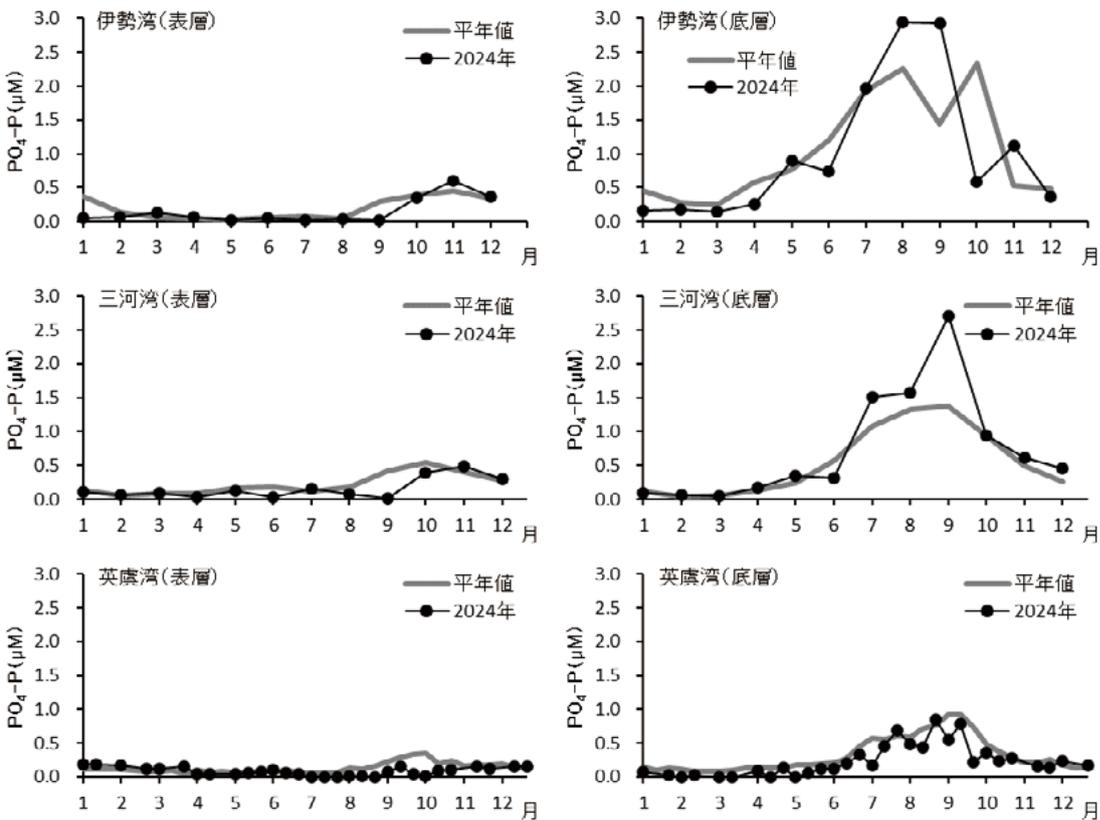


図8 表層と底層における PO₄-P の変化 (伊勢湾 St.4, 三河湾 St.A5, 英虞湾 St.A3)
 ※平年値: 伊勢湾 (2004~2023 年), 三河湾 (2004~2023 年), 英虞湾 (2004~2023 年)

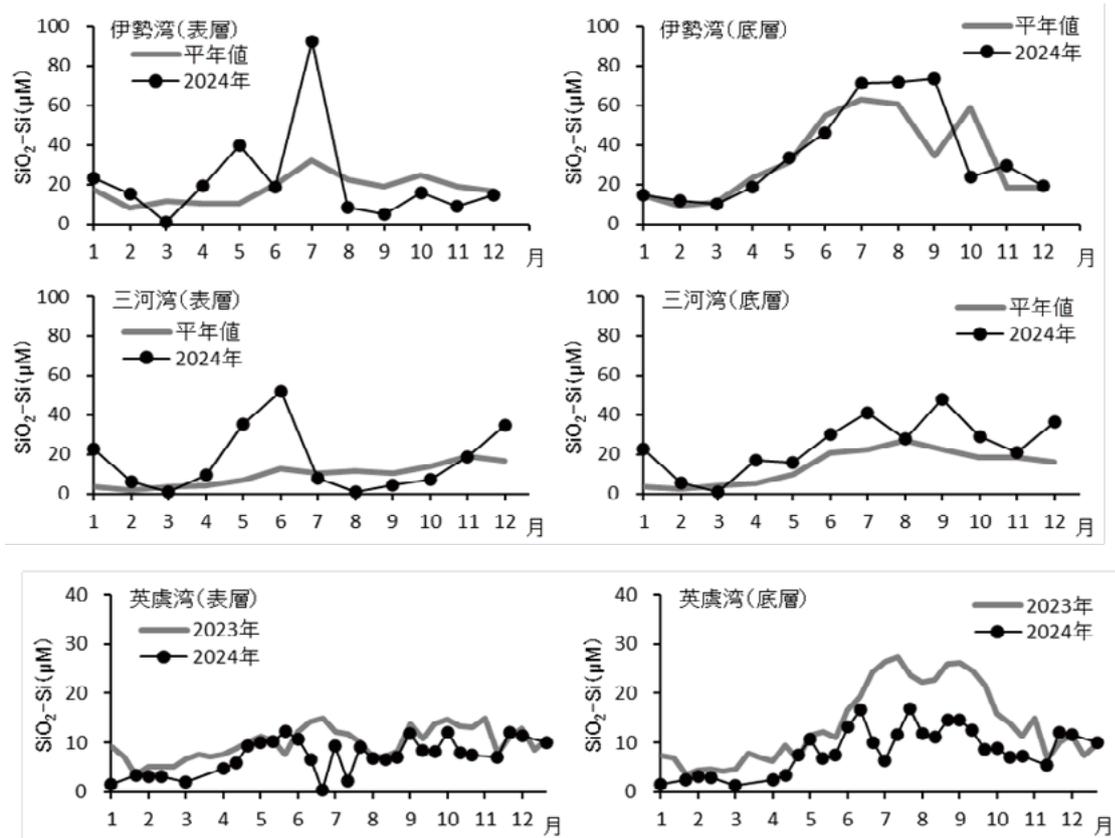


図9 表層と底層における $\text{SiO}_2\text{-Si}$ の変化 (伊勢湾 St.4, 三河湾 St.A5, 英虞湾 St.A3)
 ※平年値: 伊勢湾 (2004~2023年), 三河湾 (2004~2023年), 英虞湾 (2023年)

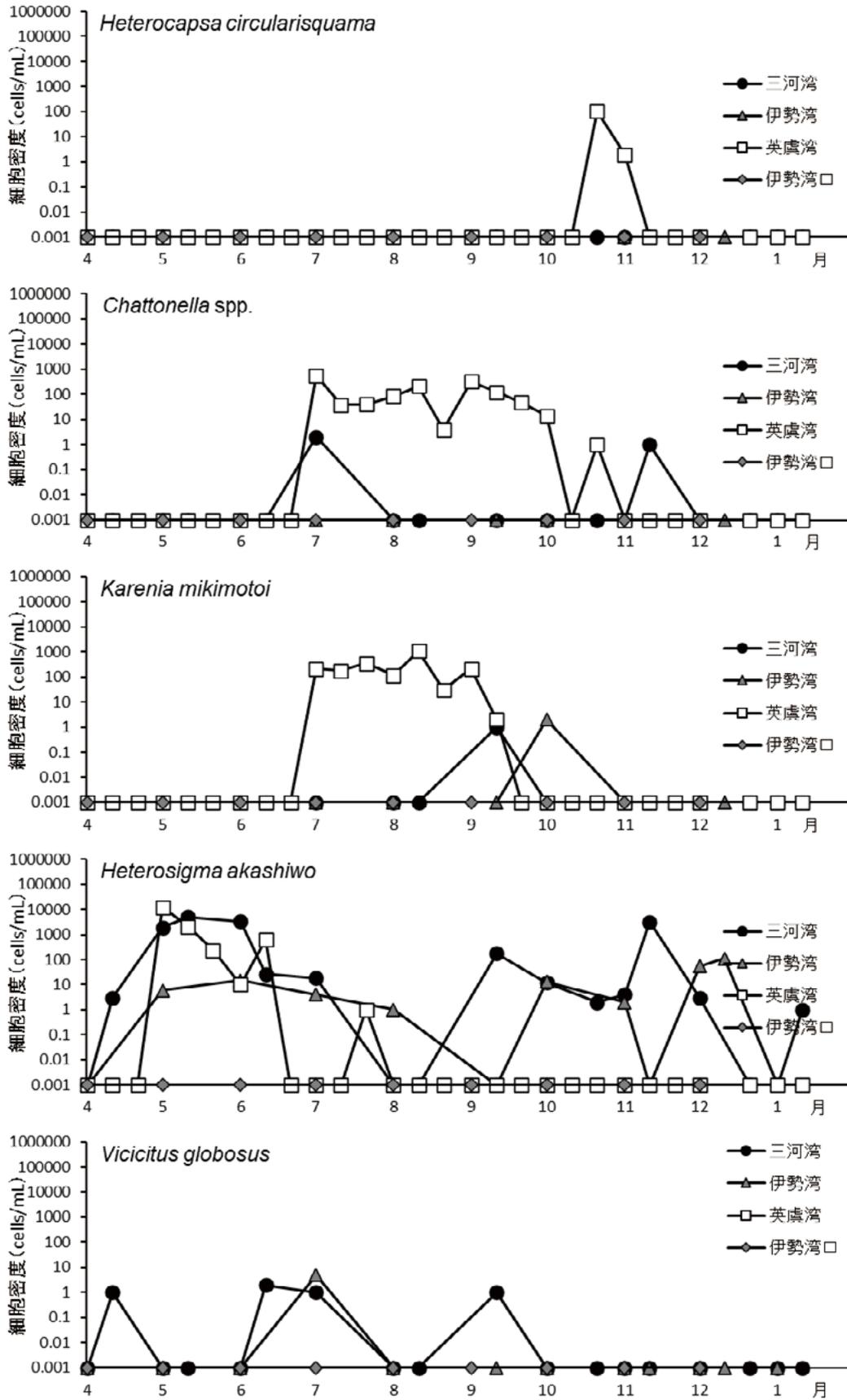


図 10 伊勢湾，三河湾，伊勢湾口，英虞湾（調査点）における有害赤潮種の最高密度の変化（2024 年度）

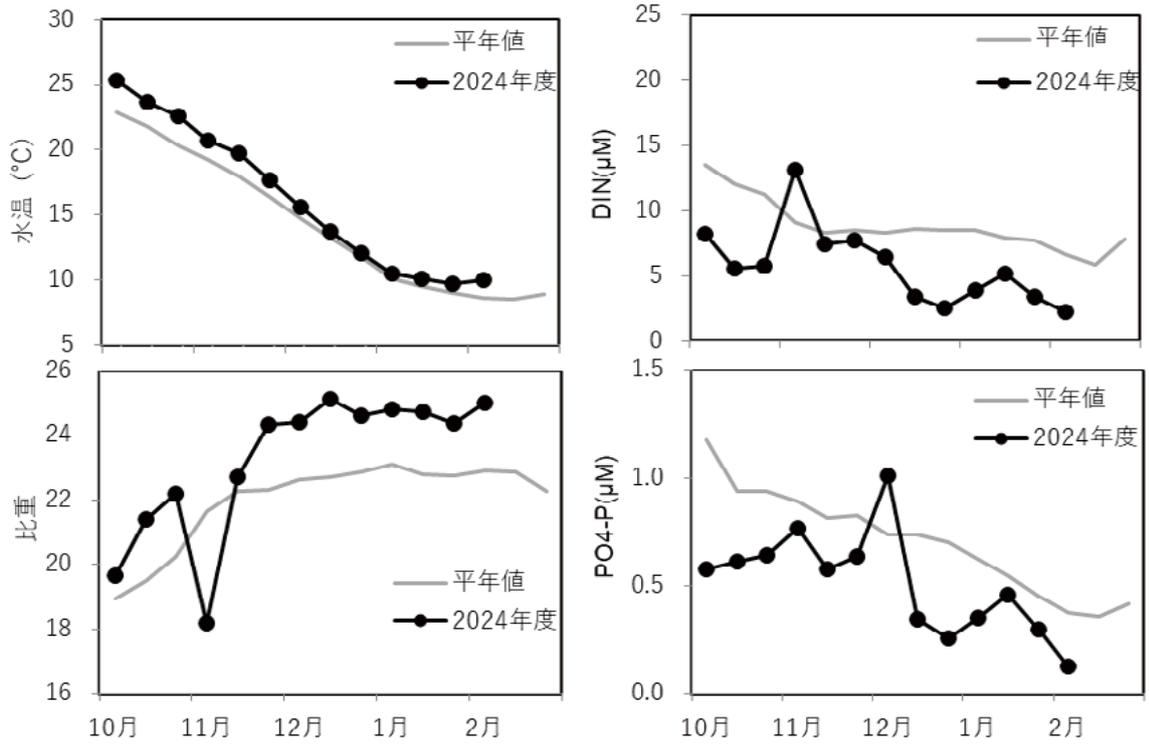


図 11 伊勢湾の表層における水温、比重、DIN、PO₄-P の変化
 ※平年値 (2005~2023 年度)

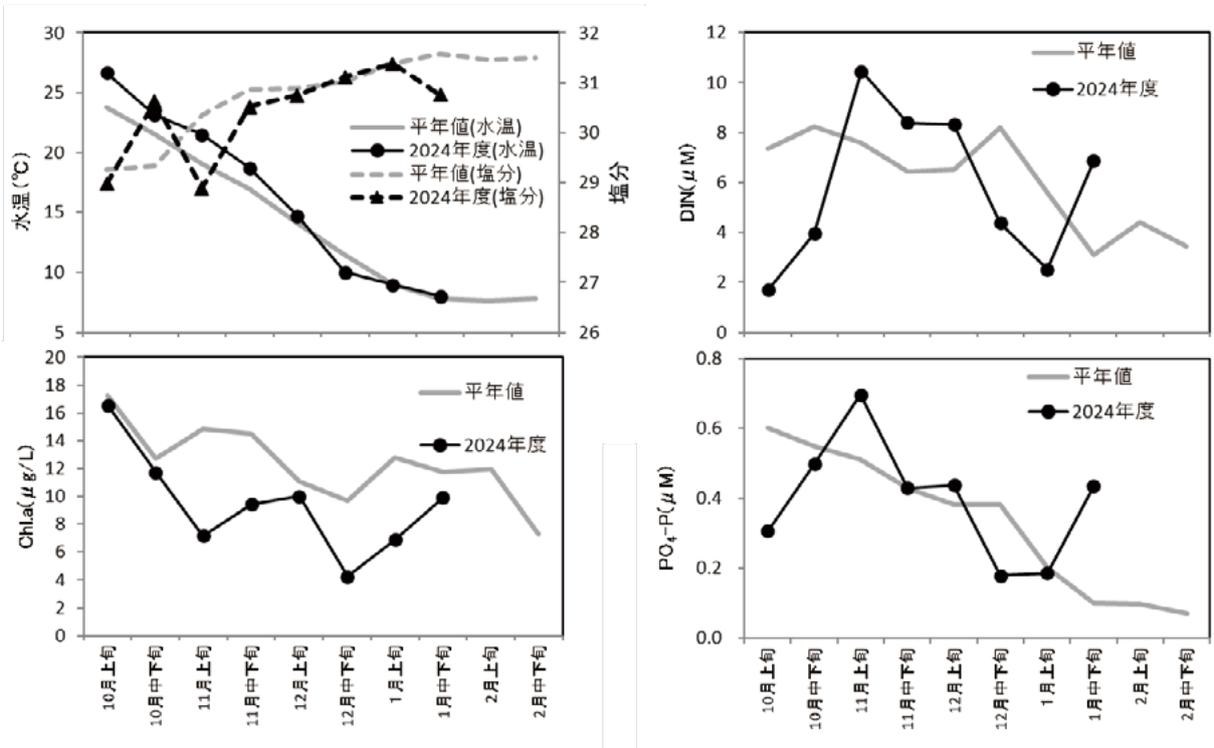


図 12 三河湾の表層における水温・塩分、クロロフィルa、DIN、PO₄-P の変化
 ※平年値 (2005~2023 年度)

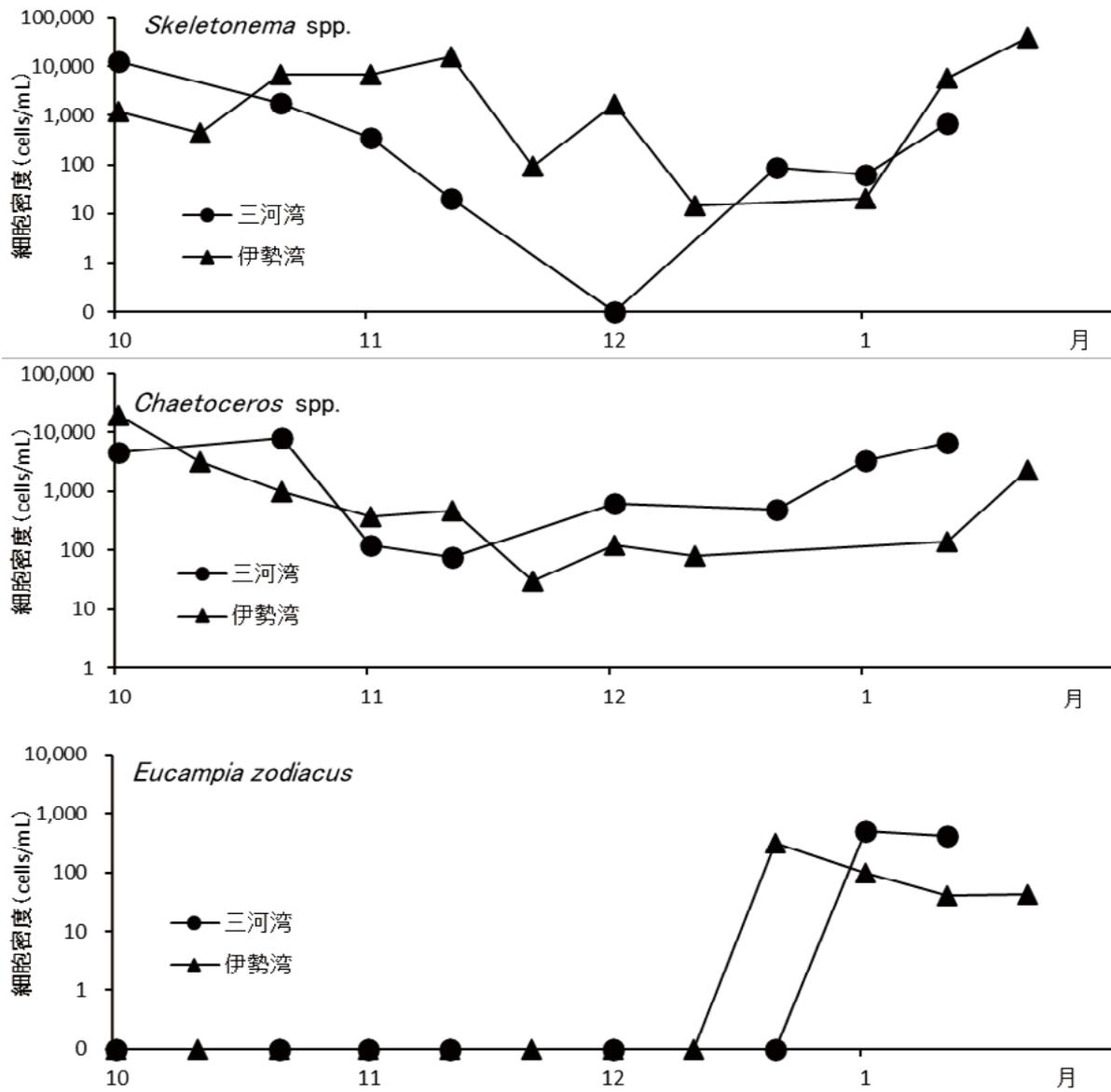


図 13 三河湾（調査点）における珪藻主要種の最高密度の変化（2024 年度）

表3 三河湾における *K. mikimotoi* 発生状況 (最高密度 cells/mL)

過去10年のカレニアミキモトイ赤潮発生状況

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	赤潮発生の有無
2015							173	3730	44	45		1	○
2016							2	53	8	15	500	2850	○
2017	357	104	47	26	18	47	1146	30750	10	14	23	1	○
2018						1	6	1600	250	89	3		○
2019						1		2	3	1			×
2020									4				×
2021						7	5	21000	1		1		○
2022						1	5275	55	1	1	1	1	○
2023									4	1			×
2024									1				×

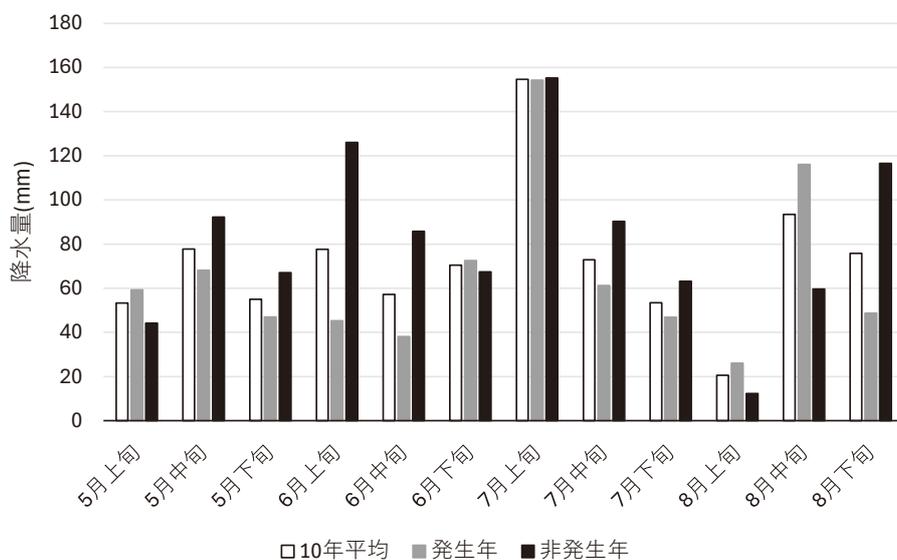


図14 降水量 (豊田, 岡崎, 新城, 豊橋気象観測所の平均値)

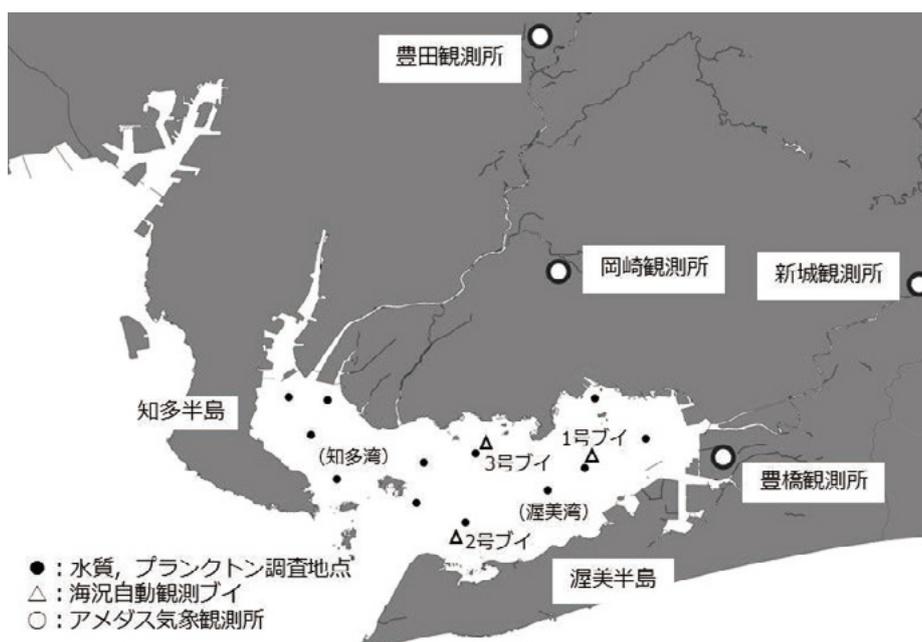


図15 各調査点

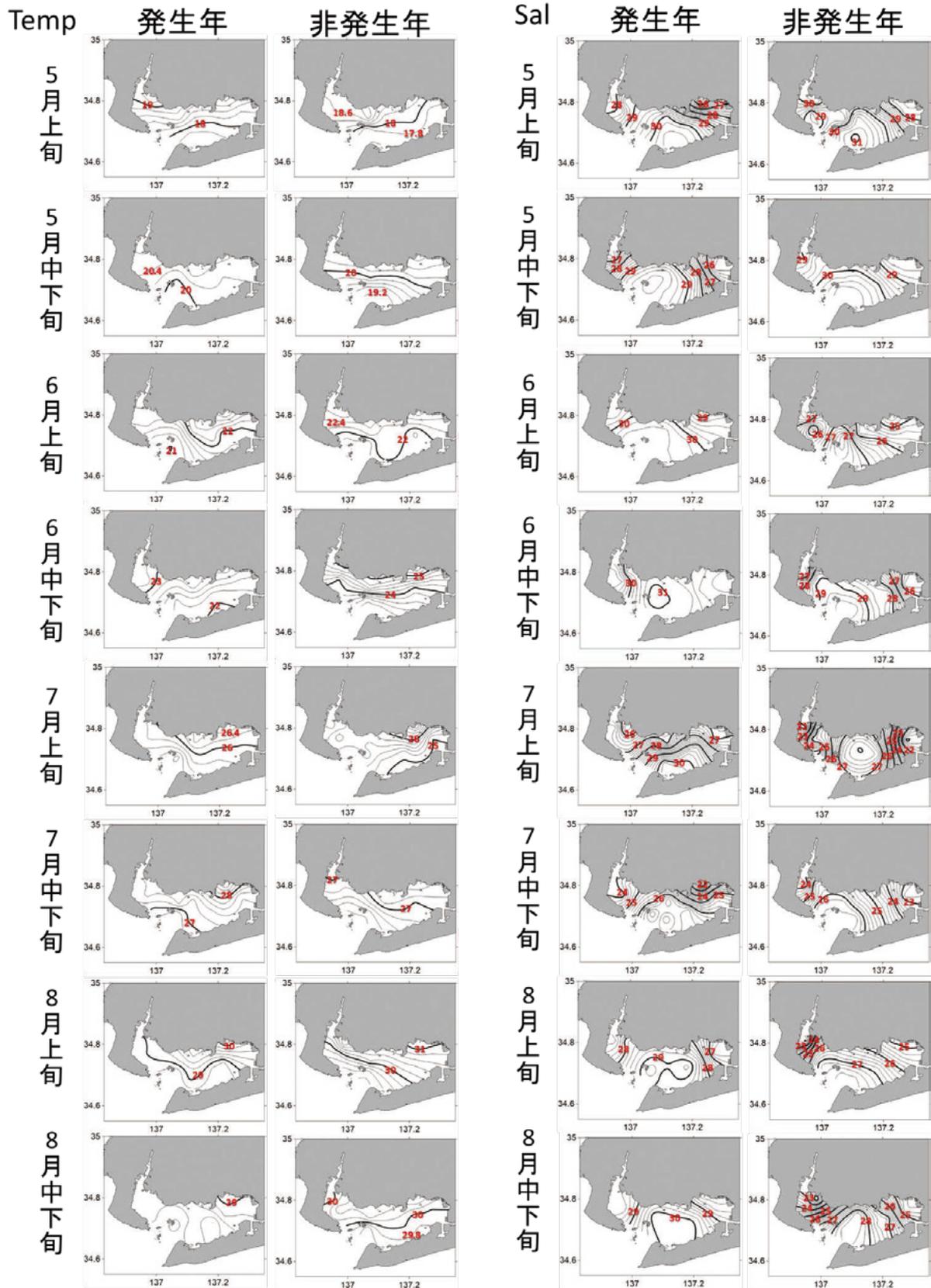


図 16 赤潮発生年と非発生年における夏季表層水温と表層塩分の分布比較

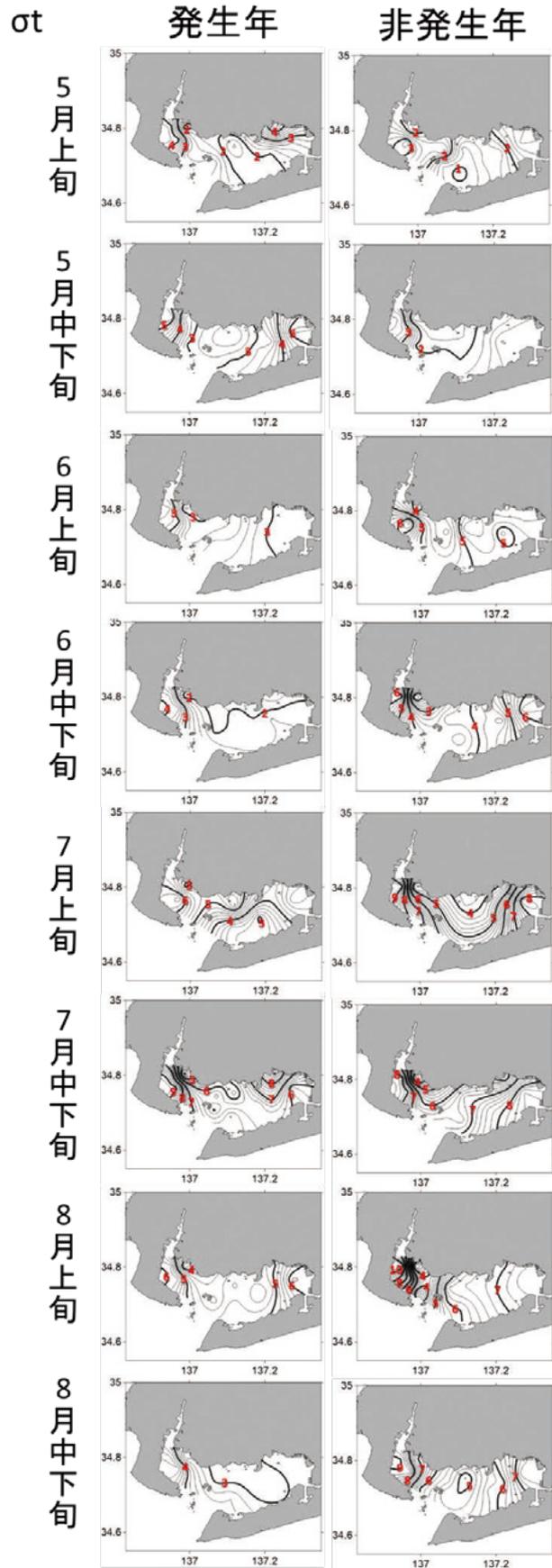


図 17 赤潮発生年と非発生年における表底層密度差の分布比較

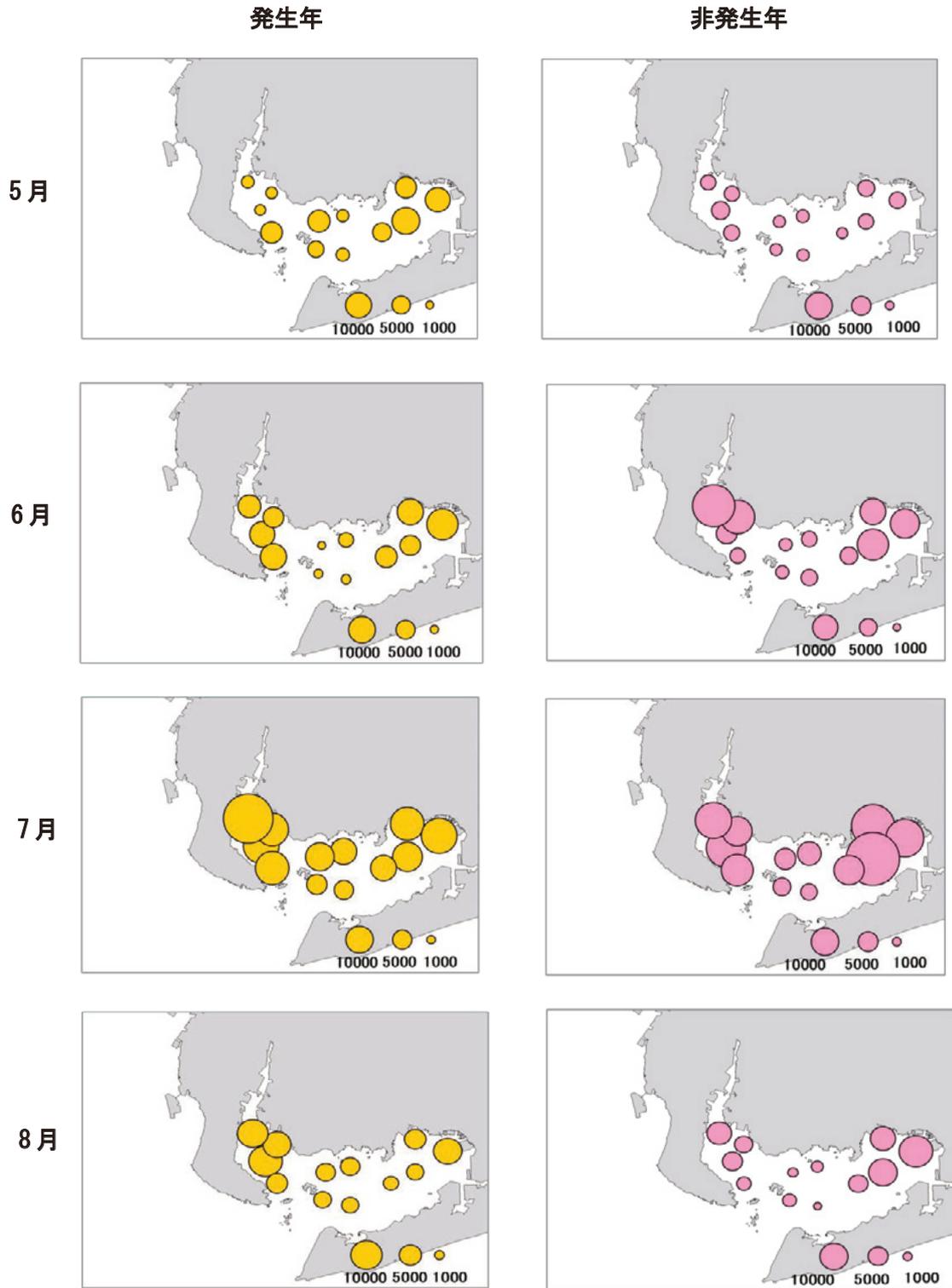


図 18 赤潮発生年と非発生年における珪藻類の分布比較

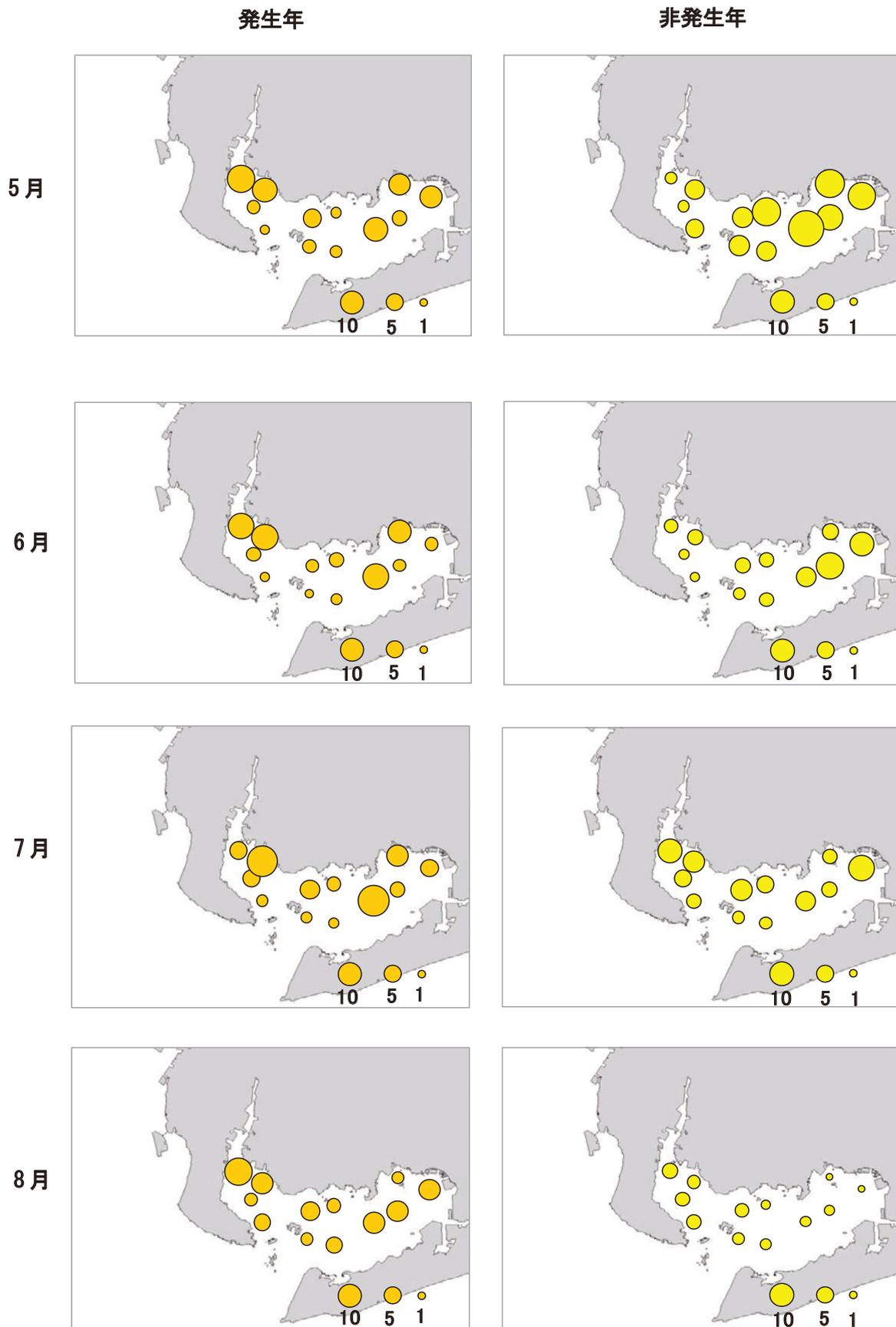


図 19 赤潮発生年と非発生年における DIP の分布比較



図 20 赤潮発生年と非発生年における DIN の分布比較

表4 英虞湾における *K. mikimotoi* 発生状況 (最高密度 cells/mL)

年	最高密度 (cells/mL)						
1995	5	2003	1	2011	1,170	2019	3
1996	15	2004	1	2012	1,705	2020	6
1997	10	2005	2	2013	205,000	2021	420
1998	0	2006	9,163	2014	5,025	2022	1,670
1999	1	2007	1	2015	3,290	2023	10,260
2000	125	2008	2	2016	10	2024	1,090
2001	0	2009	25	2017	9,300	2025	
2002	9	2010	3	2018	2	2026	

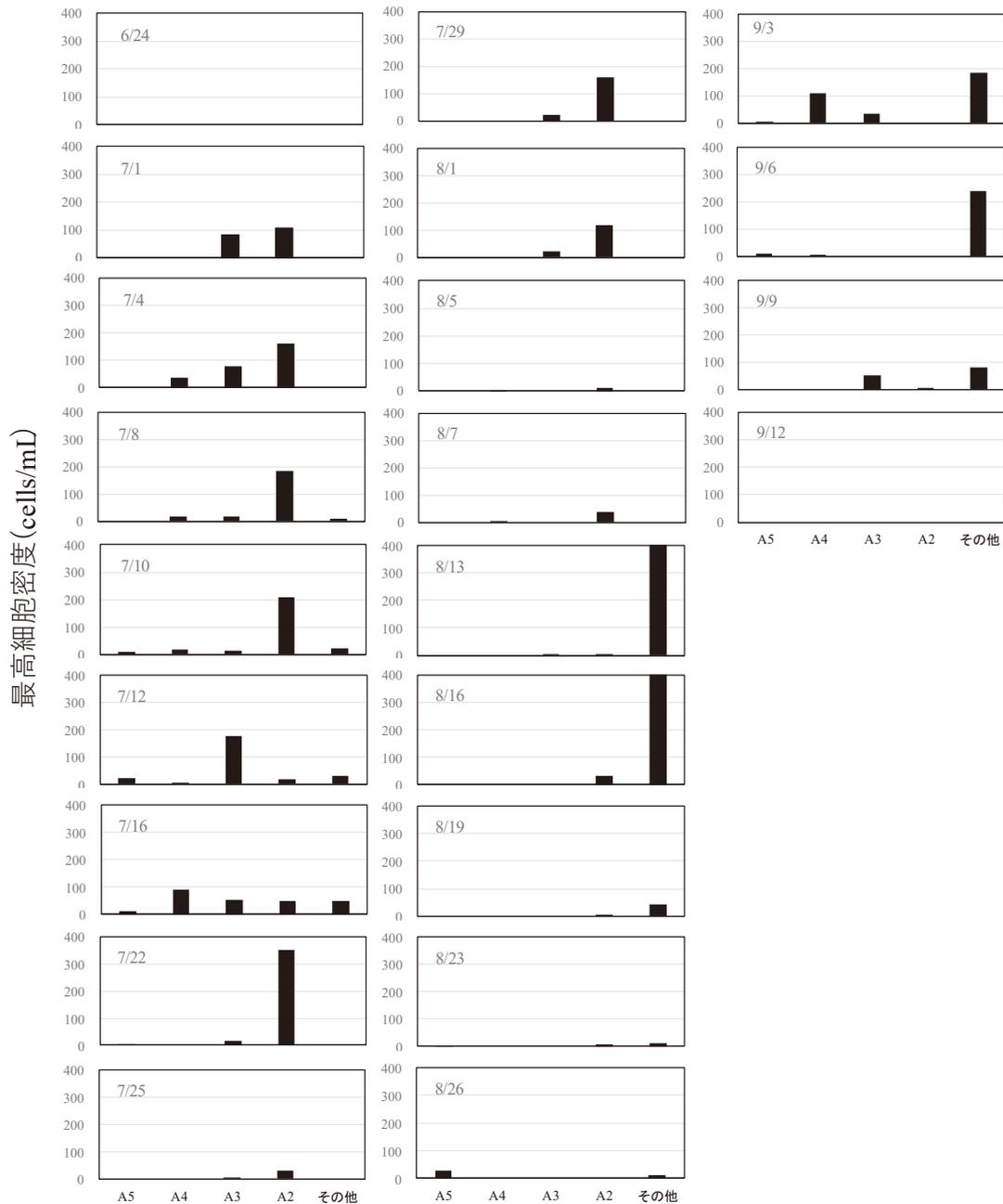


図21 英虞湾における *K. mikimotoi* 細胞密度 (2024年6月24日~9月12日)

※各地点の最高細胞数, その他は, 臨時調査を含めたすべての測点における最高細胞数の合計

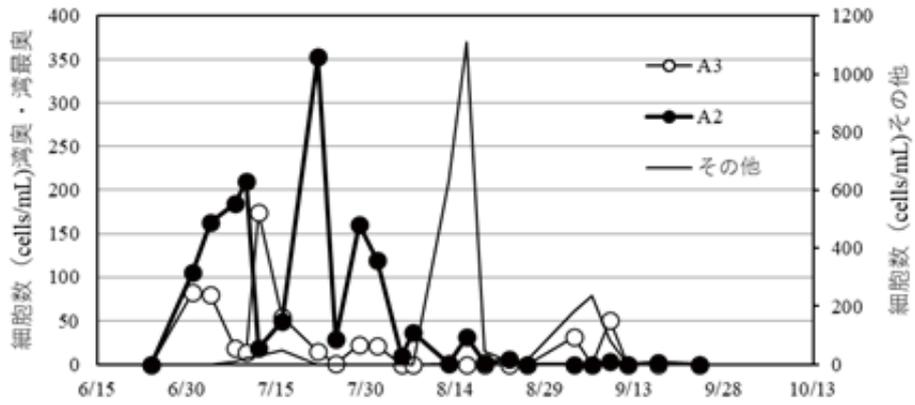


図 22 英虞湾湾奥 (A3:立神), 湾最奥 (A2:大明神前) およびその他 (A1,A4~5 および臨時調査で採水を行った地点全ての合算) の B-1m における *K. mikimotoi* の出現状況

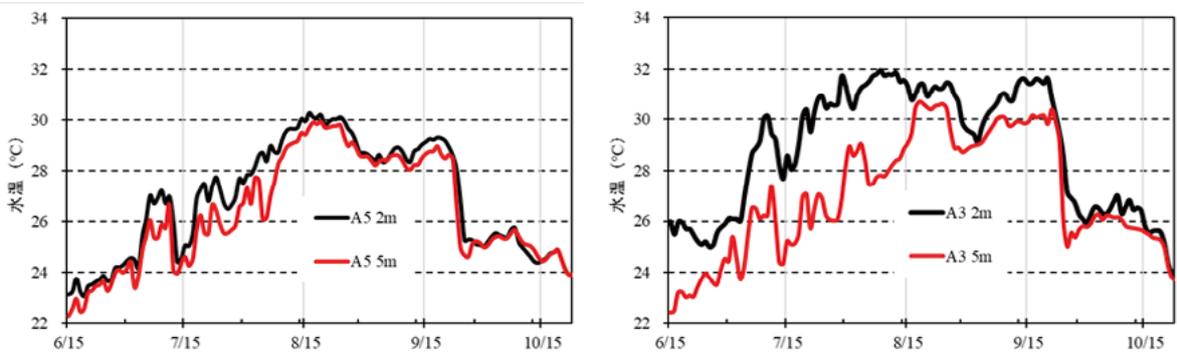


図 23 英虞湾湾央 (A5:タコノボリ) および湾奥 (A3:立神) における自動観測装置による水温データ

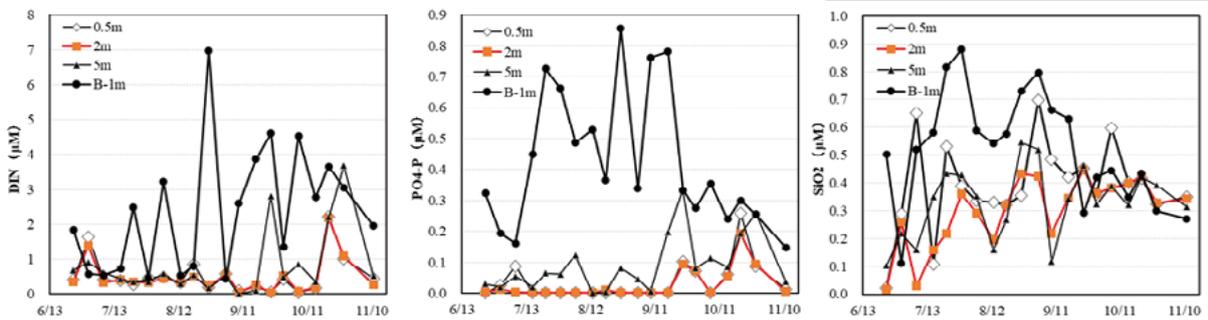


図 24 英虞湾湾奥 (A3:立神) における栄養塩類の濃度

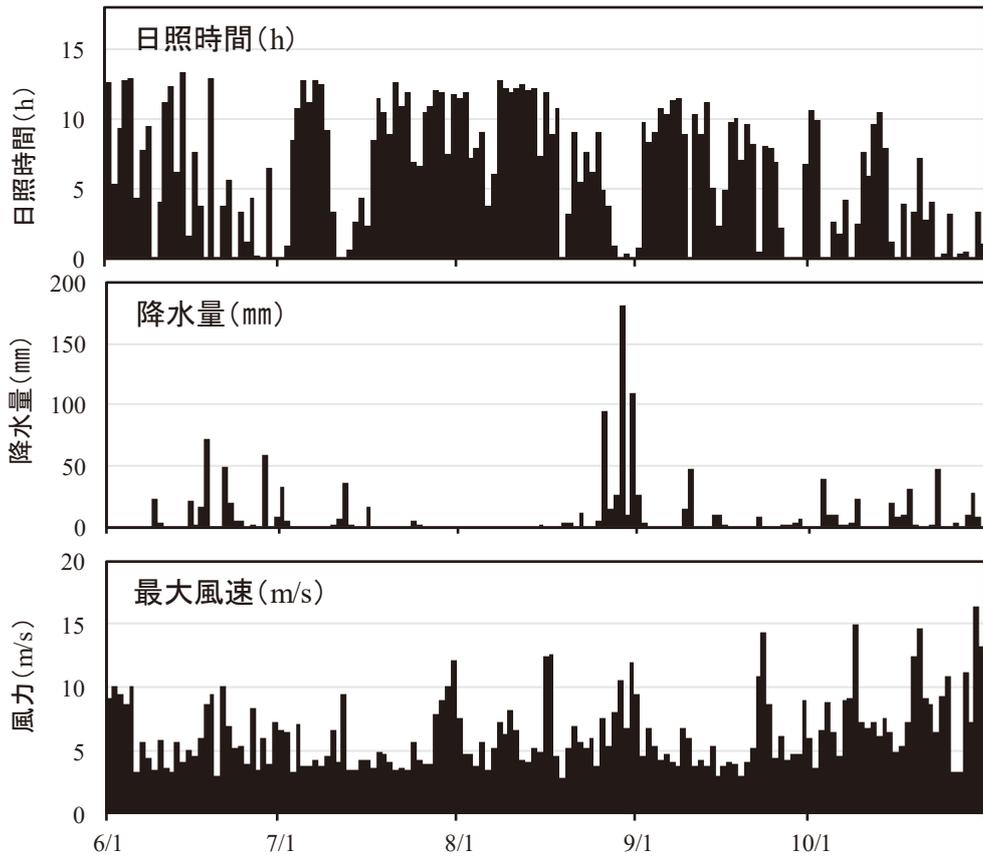


図 25 英虞湾における赤潮発生期間中の降水量，日照時間および風速

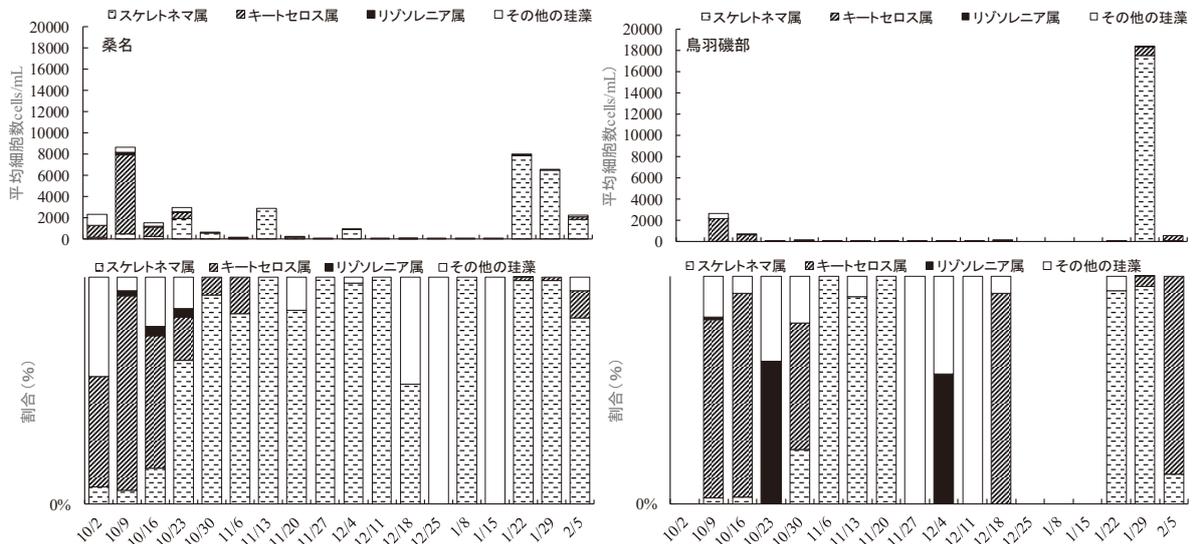


図 26 伊勢湾の三重県側ノリ漁場における珪藻類の種組成

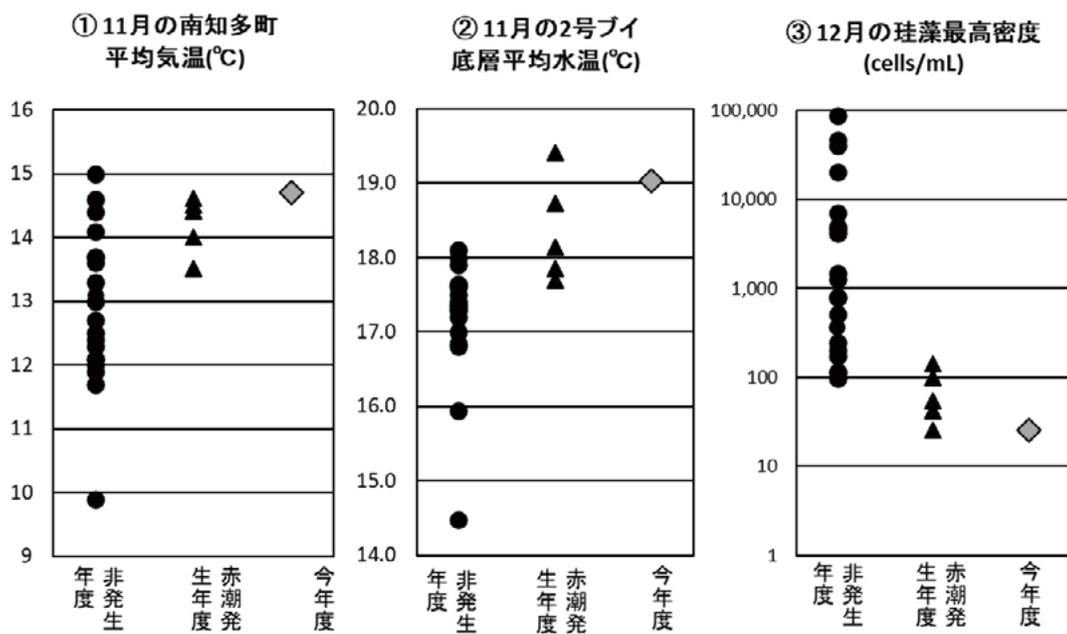


図 27 *E. zodiacus* 赤潮被害の発生予察 (2024 年度)

表 5 貧酸素が有害プランクトンの増殖に与える影響 (25°Cで培養)

プランクトン	培養/天然	溶存酸素濃度 (mg/L)				
		0	2	4	6	通常濃度
<i>H. circularisquama</i>	過去の結果 (培養)	+	++	++	+	+
Hu	培養株		++	++		+
HCLG1	培養株		++	++		+
<i>K. mikimotoi</i>	過去の結果 (培養)		×	×	×	++
Km13TG09	培養株			×	×	++
Kmhama	培養株			×	×	++

× ; 死滅, + ; 生残又はわずかに増殖, ++ ; 良く増殖, 空欄 ; 実験無し

表 6 貧酸素が有害プランクトンの増殖に与える影響 (15°Cで培養)

プランクトン	培養/天然	溶存酸素濃度 (mg/L)				
		0	2	4	6	通常濃度
<i>H. circularisquama</i>	過去の結果 (培養)	+	++	++	+	+
Hu	培養株		++	++		+
HCLG1	培養株		++	++		+
<i>K. mikimotoi</i>	過去の結果 (培養)		×	×	×	++
Km13TG09	培養株			×	×	++
KmUW3	培養株			×	×	++

× ; 死滅, + ; 生残又はわずかに増殖, ++ ; 良く増殖, 空欄 ; 実験無し

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

エ. 日本海西部海域

島根県水産技術センター内水面浅海部
清川智之, 古谷尚大
島根県水産技術センター漁業生産部
井口隆暉
兵庫県水産技術センター但馬水産技術センター
中村 匠
鳥取県栽培漁業センター
武坂 亮
鳥取県水産試験場
前田啓助, 渡辺秀洋
山口県水産研究センター外海研究部
三好博之, 白木信彦
水産機構水産技術研究所
鬼塚 剛, 坂本節子

1 全体計画

(1) 目的

2000年代以降、日本海西部海域では有害赤潮プランクトン *Cochlodinium polykrikoides* (= *Margalefidinium polykrikoides*) による赤潮がたびたび発生しており、本種による赤潮は魚類に加えて貝類などの磯根資源にも被害が及ぶため、その発生状況の監視と予察の精度向上が求められている（鬼塚ら 2022）。対馬暖流上流部に位置する中国や韓国沿岸では、1990年代以降、*C. polykrikoides* を含む有害渦鞭毛藻による赤潮が頻発しており、今後もそれら有害赤潮の山陰沿岸への漂着や将来的には新奇有害赤潮種の定着が懸念される。また、九州北部海域ではほぼ毎年本種赤潮が発生していることから、山陰沿岸域への輸送には今後も注意が必要である。さらに、2015年には北海道函館湾で *Karenia mikimotoi* による漁業被害を伴う赤潮が発生し、この由来として対馬暖流上流域が推察されるなど、我が国沿岸域における有害赤潮プランクトンの広域化も懸念されている。

このような赤潮による漁業被害を軽減するために、赤潮発生海域を網羅した広域連携調査を実施する必要がある。本課題では、日本海西部海域において各機関が連携して広範な海域を調査し、有害赤潮プランクトンの発生状況および海洋環境を監視するとともに、衛星データや数値モデル等を用いた解析を組み合わせることによって、当該海域における有害赤潮発生シナリオおよび赤潮発生予察の検証を図る。あわせて、赤潮が発生した際の一連の対策方法（行動計画）について現状を把握するとともに、他の海域等で活用されている各種漁業被害軽減対策技術に関する情報を収集し、今後の改良に資することを目的とする。

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) 海洋観測調査・サンプル分析・当該年度調査結果の解析および考察

1. 漁場モニタリング調査

C. polykrikoides や *Karenia* 属等の有害赤潮が発生する主に7月から9月まで、共同提案機関がそれぞれに有する調査船（または傭船）および、陸上からの採水調査により、広域的な海洋調査を実

施し、これら有害赤潮種の日本海西部海域における発生状況を監視した。図 1-1（沖合調査定点位置図）と図 1-2（沿岸調査定点位置図）に示す海域にそれぞれ計 15 点程度の調査定点を配置し、沖合調査定点では 8、9 月の 2 回、そして沿岸調査定点では 7、8、9 月の 3 回、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。また、上流域での発生状況などから西部日本海への侵入経路上および山陰沿岸域へ輸送される可能性が高い場合や、*C. polykrikoides* や *Karenia* 属以外の有害赤潮が発生した際には、必要に応じて随時、臨時調査を行うこととしている。なお今年度は 7 月 9 日に兵庫県の沿岸調査において対象種（*C. polykrikoides*）が 0.18cells/ml 確認されたため、現在の調査地点付近に 3 定点（HS1-2~4）を設け臨時調査を実施した（図 1-2）。

2. LAMP 法による *C. polykrikoides* および *K. mikimotoi* の検出

日本海西部海域では、沖合の調査点が広範囲であるため、検鏡までに時間がかかり、細胞のコンディションが悪化する場合がある。また、細胞がごく低密度に存在する場合や混雑物が多い場合でも、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ている。採水した海水サンプルの一部で LAMP 法を実施し、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把握を行った。具体的には 3.0 μm 孔のヌクリポアフィルターで海水をろ過して水中のプランクトンを回収、5% Chelex (BioRad) 中で加熱抽出して、DNA 粗抽出液を得た。得られた DNA を *C. polykrikoides* および *K. mikimotoi* を種特異的に検出する LAMP 法に供した。*C. polykrikoides* の LAMP 法には以下の 6 本のプライマーを用いた；CPLAMP-FIP；5'-TATCCTCggCCACCAATCACCAAgTgTgAgTTCTggTCgTCT-3'，CPLAMP-BIP；5'-CCTgCAAAGgCATggTAgCCCACACCACTCACATgATCAgC-3'，CPLAMP-F3；5'-gTTgCACTTTCAACgCAAgT-3'，CPLAMP-B3；5'-AAgTCgTTCgCCggTTAC-3'，CPLAMP-LF；5'-CCCACggCAAgAACCAC-3'，CPLAMP-LB；5'-ggTgAACgCgTTTgTTAgTACTCg-3'。反応試薬には Loopamp DNA 増幅キット（栄研化学）および Loopamp 蛍光・目視試薬（栄研化学）を用い、試薬のプロトコールに従い検出を実施した。また、*K. mikimotoi* の LAMP 法には赤潮原因プランクトン検出キット 1 - カレニアミキモトイ - (ニッポンジーン) を用い、キットのプロトコールに従い検出を実施した。

3. 九州北部から日本海西部海域における *K. mikimotoi* の定量 PCR 法 (qPCR) による広域分布実態の把握

特に日本海沿岸対馬暖流域での分布域の拡大、広域化が懸念される *K. mikimotoi* を対象に、九州北部海域から日本海西部海域における *K. mikimotoi* の分布実態調査を行った。なお、本広域調査は九州北部海域の課題の一部でもあるが、調査研究は共同で実施し、成果の報告は日本海西部海域の報告書の中で行うこととする。

調査は 2024 年 4 月から 2025 年 1 月に九州北部海域（壱岐および対馬南部の対馬暖流域および玄界灘）の 4 定点（図 2）で月 1 回、表層および 20 m 層の海水を採水した。プランクトンの回収および DNA 抽出は前述の LAMP 法分析用試料と同じ方法で行った。また、山口県から鳥取県の沖合調査（7~9 月、表層および 20 m 層）で得られた LAMP 法分析試料を用いて qPCR による高感度検出を実施した。沖合での分布と沿岸での本種の出現との関係を検討するため、これまでの調査で LAMP 法により比較的頻度高く本種が検出された境港周辺の七類（St. S6）および境港（St. T7）において 2024 年 6 月から月 1 回、表層および底層（B-1m または 5 m）の海水を採水し、九州北部海域と同様の方法で DNA を抽出し、qPCR による分析を実施した。qPCR には *K. mikimotoi* の rDNA LSU D1-D2 領域上の種特異的配列を標的とした以下のプライマーおよびプローブを用いた：フォワードプライマー KM-MGB-F1：5' -CTCATTTTTgAACTgCTCTCTgTgT-3'，リバープライマー KM-MGB-R1：5' -CTCCTggCACCAACAACCTT-3'，プローブ KM-MGB-Taql：5' -ATgTgCTTgCCTgCgAT-MGB-3'。また、反応試薬には TaqMan Gene Expression Master Mix (Thermo

Fisher Scientific), 検出器に StepOnePlus (Applied Biosystems) を用いた。反応液の組成は反応試薬のプロトコールに従い調製した。PCR 反応はプレヒート 95°C, 10 分の後, PCR サイクル 95°C, 15 秒と 60°C, 1 分 (定量検出) とを 40 サイクル実施した。得られた抽出液中の標的遺伝子コピー数を Yarimizu et al. (2021) が報告している *K. mikimotoi* の細胞当たりの rDNA コピー数の値 6,710~8,420 copies/cell をもとに約 7,000 copies/cell として細胞密度に換算し, 海水 1 L 中における *K. mikimotoi* の細胞密度を算出した。

九州北部海域および境港周辺海域の調査では, 海水の一部 (75~100 mL) を 10 µm の篩で濃縮し, 全量を顕微鏡下で観察して, 有害プランクトンおよび主要な珪藻種を計数した。また, 海水の一部を 0.45 µm フィルターでろ過して凍結保存し, 後日, 栄養塩分析 (無機態窒素; DIN および無機態リン; DIP, および溶存態ケイ素; DSi) に供した。

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と予察技術の検証および赤潮が発生した際の一連の対策方法 (行動計画) の検討

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 (GCOM-C/SGLI: https://www.eorc.jaxa.jp/JASMES/SGLI_NRT/index_j.html) の監視を行った。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を行った。なお, 例年行っている日本海の流動場を用いた赤潮輸送シミュレーションは, 後述するように初期発生海域である韓国沿岸域で有害種が低密度で推移したことから, 今年度の実施を見送った。

赤潮が発生した際の一連の対策方法 (行動計画) の検討として, 水産庁九州漁業調整事務所が発行する「九州海域の赤潮」と毎年実施されている「漁場環境保全推進会議 赤潮・貝毒部会」資料を参照し, 九州西部海域から山陰沿岸海域までの過去の *K. mikimotoi* 赤潮発生状況を整理するとともに, 本種赤潮の発生リスクについて検討した。

(3) 結果および考察

1) 海洋観測調査・サンプル分析・当該年度調査結果の解析および考察

1. 漁場モニタリング調査

本海域では *C. polykrikoides* および *K. mikimotoi* を主要対象種としており, 今年度の検鏡結果は *C. polykrikoides* および *K. mikimotoi* はいずれもごく低密度でのみ確認された。

① 沖合調査

ア) 主要対象種 (表 1-1)

本年度調査において, *C. polykrikoides*, *K. mikimotoi* はともに検鏡では確認されなかった。

イ) その他有害種

Dinophysis 属は兵庫県沖合で *D. mitra*, *D. caudata*, および *D. rotundata* が, また *Karenia digitata* が島根県沖合で散見されたが, いずれも低密度であった。

② 沿岸調査 (兵庫県沿岸における臨時調査も含む)

ア) 主要対象種 (表 1-2)

C. polykrikoides は, 島根県沿岸では, 7月3日の S1(0m)と S6(5m)で 0.013 cells/ml, 兵庫県沿岸では, 7月9日の HS1 で 0.18 cells/ml, 7月17日の HS1 で 0.1 cells/ml, HS1-2 で 5.2 cells/ml, 7月26日の HS1, HS1-2 および HS1-3 で 0.01 cells/ml, 8月1日の HS1 および HS1-2 で 0.01 cells/ml, HS1-3 で 0.23 cells/ml, HS1-4 で 0.00 cells/mL 確認された。山口県および鳥取県沿岸では確認されなかった。

K. mikimotoi は、山口県沿岸では、7月9日のY4(底層)で0.004cells/ml, およびY5(0m)で0.001cells/ml, 9月10日のY7(0m)で0.001cells/ml 確認された。兵庫県沿岸では、7月26日にHS1-3, 8月1日にHS1-2 およびHS1-4, 9月3日にHS1-4で0.00 cells/ml (1ℓを10mlに濃縮し, うち1mlを3回検鏡して1細胞と極めて低密度) 確認された。島根県および鳥取県沿岸では確認されなかった。

イ) その他有害種

その他有害種についても一部で確認されたものの, その量は極めて低密度であった。*Dinophysis* 属は山口県沿岸で *D. caudata*, および *D. sp.* が, 島根県沿岸で *D. caudata*, *D. acuminata*, および *D. mitra* が, 兵庫県沿岸で *D. caudata*, *D. acuminata*, *D. mitra*, および *D. rotundata* が確認された。その他の有害種については, 山口県沿岸で *Alexandrium sp.* および *Akasiwo sanguinea* が, 鳥取県沿岸で *Chattonella sp.* が, 兵庫県沿岸で *Karenia papilionacea* が確認された。

2. LAMP 法による *C. polykrikoides* および *K. mikimotoi* の検出

本年度, 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 1-1, 1-2 に示す。なお, 兵庫県の臨時調査結果については沿岸調査に含めた。

C. polykrikoides については, 沖合調査のサンプルは山口県 (12 サンプル), 島根県 (8 サンプル), 鳥取県 (20 サンプル), 兵庫県 (18 サンプル) のすべてが陰性であった。沿岸調査のサンプルは山口県では 24 サンプルすべてで陰性, 島根県では 39 サンプルのうち 4 サンプルが陽性, 鳥取県では 12 サンプルすべてで陰性, 兵庫県では 27 サンプルのうち 10 サンプルが陽性であった。これらのうち, 検鏡で確認されたにもかかわらず LAMP 法が陰性となったサンプルが, 島根県で 1 サンプル, 兵庫県で 5 サンプル確認された。

K. mikimotoi については, 沖合調査のサンプルは山口県 (12 サンプル), 島根県 (8 サンプル) はすべて陰性, 鳥取県では 20 サンプルのうち 3 サンプルが陽性, 兵庫県では 18 サンプルのうち 5 サンプルが陽性であった。沿岸調査のサンプルは山口県では 24 サンプルのうち 4 サンプルが陽性, 島根県では 39 サンプルすべてで陰性, 鳥取県では 20 サンプルすべてで陰性, 兵庫県では 27 サンプルのうち 10 サンプルが陽性であった。これらのうち, 検鏡で確認されたにもかかわらず LAMP 法が陰性となったサンプルが, 山口県で 1 サンプル, 兵庫県で 3 サンプル確認された。

3. 定量 PCR 法による九州北部から日本海西部海域における *K. mikimotoi* の広域分布実態の把握

ア) 九州北部海域

前年度 2~3 月の調査を含む 2024 年 2 月~2025 年 1 月の九州北部海域沖合における *K. mikimotoi* の qPCR による出現動態を図 3 に示す。2 月および時化の影響により調査ができなかった 11 月を除き, *K. mikimotoi* はほぼ周年検出された。検出された細胞密度の範囲は 0.06~8,035 cells/L であった。細胞密度が 1 cell/L 以上で検出されたのは 2024 年 5 月以降で, 7 月に伊万里湾に最も近い定点である St. 18 の 20 m 層で最高細胞密度 8,035 cells/L が検出された。8 月以降は qPCR でも細胞密度が減少したものの, 2025 年 1 月の時点においても極低密度で *K. mikimotoi* が検出されている。また, 今年度は表層と 20 m 層の 2 層で調査を実施したが, 20 m 層のみで検出されることはほとんどなかった。濃縮検鏡でも 6, 7, 9 月に 10~290 cells/mL の範囲で *K. mikimotoi* の出現を確認した。これらの結果は, 九州北部海域では *K. mikimotoi* が周年, 水中に存在しており, 本種の赤潮のシードとなりうることを示唆する。同じ状況は昨年度の調査でも認められ, 本年のみの特異的な状況ではないことが明らかとなった。また, 今年度は 7~10 月の濃縮検鏡試料中に *Chattonella* 属や *C. polykrikoides* を極低密度で確認した。本調査結果は, これらの有害プランクトンの動態にも注意する必要があることを示唆する。

調査期間中 (2024 年 2~10 月) の栄養塩濃度は DIN が 0.36~3.48 μM , DIP が 0.002~0.26 μM , および DSi が 1.88~7.52 μM の範囲で変動した。N/P 比は 3.0~314 で変動し, 2~4 月に低く, *K. mikimotoi* や他の有害プランクトンが出現していた 6~8 月に高い傾向が認められた。N/P 比が高い

ということは栄養塩として無機態リンが不足している環境であることを示しており、有機態リンを利用できる *K. mikimotoi* にとっては増殖や生残に有利な環境となっていた可能性がある。

イ) 日本海西部海域

定量 PCR による 2024 年 7~9 月の日本海西部沖合海域（山口県～鳥取県）における *K. mikimotoi* の分布を図 4 に示す。今年度は 8 月の山口県沖 St. Y2' および 9 月の St. Y3 の 20 m のみで *K. mikimotoi* が極低密度（0.10~0.13 cells/L）で検出されたが、これら以外の定点では非検出であった。7 月には九州北部海域で *K. mikimotoi* が比較的高密度に発生していたが、日本海西部海域の沖合調査定点ではその発生と関連すると考えられる本種の出現はなかった。

一方、2024 年 6 月以降に月 1 回の頻度で実施した境港周辺海域の調査では、7~8 月の St. S6 において qPCR での *K. mikimotoi* の細胞密度（2.17~8.68 cells/L）の増加が認められた（図 5）。また、濃縮検鏡では *K. mikimotoi* は確認できなかったが、九州北部海域と同様に 6~10 月に *Chattonella* 属や *C. polykrikoides* が極低密度で共存していたことが確認された。これらの有害種についても赤潮のシードとして注意する必要がある。

調査期間中の（2024 年 6~12 月）の栄養塩濃度は DIN が 1.51~6.67 μM 、DIP が 0.03~0.57 μM 、および DSi が 3.21~18.19 μM の範囲で変動した。N/P 比は 3.9~57 で変動したが、季節的な傾向は認められなかった。

九州北部海域における *K. mikimotoi* の発生との関連は不明であるが、ほぼ同時期に日本海西部沿岸でも本種の発生ピークが認められた。この結果から赤潮の移流により九州北部から日本海西部へ分布が広がっているというよりは、周年沖合や沿岸に広く極低密度で存在する *K. mikimotoi* のシードポピュレーションが、本種の増殖が活発になる 6~9 月に閉鎖的な内湾に入り込むことにより、増殖して赤潮を形成しているという発生シナリオが推察される。また、沖合ではなく沿岸域に沿って分布が拡大している可能性もまだ否定できないことから、日本海西部沿岸域での出現動態をより詳細に把握することは今後の課題である。

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と予察技術の検証

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（図 6（左））、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（図 6（右））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を行った。

1. 対馬暖流上流部における有害赤潮の発生状況

2024 年は 8 月 2 日に韓国南部全羅南道で *C. polykrikoides* が 700 cells/ml 確認された。その後、8 月 9 日に注意報が発令されたが、その後も数十~数百 cells/ml の低密度で推移し、9 月 5 日に解除された（図 7）。最高細胞密度は 8 月 2 日に確認された 700 cells/ml だった。また、表 2 に示すように、*C. polykrikoides* 以外の有害種として、*K. mikimotoi* や *Chattonella* spp. の発生も確認されていた。一方、九州北部海域では、7 月に九十九島や大村湾などで 10,000 cells/ml を超える細胞密度が観測されたが、対馬暖流に面する伊万里湾や五島列島で 100 cells/ml を超える細胞密度は確認されなかった。

2. 対馬海峡における風向風速

8月の対馬海峡における海上風ベクトルの時系列を図8に示す。8月上旬と下旬に南寄りの風が数日間みられ、低密度ながら、*C. polykrikoides* が沖合へ輸送された可能性がある。

3. 対馬暖流流路の検討

対馬暖流の沖合分枝の流路の目安として50 m深の水温フロントを確認した(図9)。9月上旬の50 m深水温分布によると、水温フロントは山陰沿岸近くに確認されず、隠岐諸島の西から北側に分布しており、対馬暖流の沖合分枝の流路は離岸傾向だったと推察された。

4. 衛星クロロフィル画像

韓国沿岸で*C. polykrikoides* が確認された8月の日本海西部海域のクロロフィル画像を確認したところ、九州西方沖の東シナ海から韓国東岸にかけてクロロフィル濃度が高かったが、広範囲での有害種の出現は報告されておらず、珪藻類などの無害種だったと考えられる。

5. 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)。今年度は条件①の韓国沿岸で*C. polykrikoides* が確認されなかったことから、山陰沿岸域や隠岐諸島周辺海域に出現しなかったと考えられた。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。

6. 行動計画検討のためのロードマップの作成

検討項目を整理し、段階的に検討を行うためのロードマップを作成した(表3, 図10)。このロードマップに沿って対策方法(行動計画)の検討を進めていく予定である。

7. 過去の*K. mikimotoi* 赤潮発生状況の整理と発生リスクの検討

2022年9月に隠岐諸島の西郷湾で*K. mikimotoi* 赤潮が発生した。近年、*K. mikimotoi* 赤潮は北海道函館湾で確認されるなど、日本海西部海域でも発生リスクが高まっている恐れがある。今後の対策方法(行動計画)の検討のためにも、昨年度に続き*K. mikimotoi* 赤潮発生状況の整理を行うとともに、本種赤潮の発生リスクについて検討した。

図11は1980年代~2020年代の九州西部海域から山陰沿岸海域における*K. mikimotoi* 赤潮の発生海域である。本種赤潮は7~8月を中心に特に九州西部から北部ではほぼ毎年発生していた。山口県以東での発生は1989, 1994, 1995, 2000, 2005, 2006, 2008, 2014, 2015, 2016, 2021年の11か年で、広域発生した2000, 2006, 2015年を除いて漁港内もしくは閉鎖的な内湾で発生していた。図12に九州北部海域(長崎県五島列島以東)から山陰沿岸域(京都府以西)における年代ごとの発生件数を示す。発生件数の長期的な増減は明瞭ではなく、2020年代を除いて、1,000 cells/ml以上の赤潮が10年間で30~40件発生していた。また、本種赤潮による漁業被害は1,000 cells/mL以上で確認され、近年被害ありの割合が増加傾向となっていた。

日本海西部における本種赤潮の発生海域は山口県の油谷湾や島根県隠岐諸島の西郷湾など閉鎖

性の強い内湾が主である。嶋田ら (2016) がまとめた過去の本種赤潮発生海域でも、日本海側では函館湾や舞鶴湾など閉鎖性の強い海域での発生が報告されている。そこで、環境省が公表している日本の閉鎖性海域 (https://www.env.go.jp/water/heisa/heisa_net/) のうち九州西部から北海道にかけての対馬暖流流域の 33 ヶ所について *K. mikimotoi* 赤潮発生有無を調べた (表 4)。ここで用いる閉鎖性海域とは、海域の閉鎖性の強弱を表す指標 (閉鎖度指標) 1 以上の海域で、水質環境基準を確保する目的で環境省によって指定されている海域である。九州西部から北部 (離島含む) の閉鎖性海域 15 ヶ所のうち 11 ヶ所で過去に赤潮が発生していた。非発生だった 4 ヶ所のうち 3 ヶ所は長崎県壱岐島であり、九州本島ではほぼすべての海域で発生となった。山口県以東では閉鎖性海域 18 ヶ所中 5 ヶ所で発生しており、油谷湾や函館湾はこの中に含まれる。一方、過去に *K. mikimotoi* 赤潮が発生した西郷湾や島根県の浜田港は閉鎖性海域に指定されていないが、その湾形状から閉鎖性が強く閉鎖度指標 1 以上の基準に合致している。本種赤潮はときに突発的に発生し、*C. polykrikoides* のような発生シナリオが構築されていないため、対策を立てづらい状況となっているが、閉鎖性の強い海域で発生リスクが相対的に高いことは間違いなさそうである。今後これらの情報を参考に対策方法 (行動計画) の検討を行っていく予定である。

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.
- 鬼塚剛, 清川智之, 鈴木雅巳, 福本一彦, 柿並宏明, 坂本節子. 日本海西部海域. 養殖ビジネス 2022; 59: 28-32.
- 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.
- 嶋田宏, 金森誠, 吉田秀嗣, 今井一郎. 2015 年秋季北海道函館湾における渦鞭毛藻 *Karenia mikimotoi* による有害赤潮の初記録. 日本水産学会誌 2016; 82: 934-938.
- 鈴木雅巳, 福本一彦, 前田啓助, 清川智之, 古谷尚大, 井口隆暉, 白木信彦, 鬼塚剛, 坂本節子. 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 エ. 日本海西部海域. 令和 5 年度豊かな漁場環境推進事業「(1) 赤潮等による漁業被害への対策技術の開発・実証・高度化報告書」. 水産庁, 東京. 2024 ; 126-142.
- Yarimizu K, Sildever S, Hamamoto Y, Tazawa S, Oikawa H, Yamaguchi H, Basti L, Mardones JI, Paredes-Mella J, Nagai S. Development of an absolute quantification method for ribosomal RNA gene copy numbers per eukaryotic single cell by digital PCR. Harmful Algae 2021; 103, 102008.

表 1-1 *C. polykrikoides* および *K. mikimotoi* の検鏡結果と LAMP 法による検出結果 (沖合調査)

山口県

月日	調査点 (水深)	<i>C. polykrikoides</i> (cells/ml)	LAMP	<i>K. mikimotoi</i> (cells/ml)	LAMP	水温 (°C)	塩分	Chl-a (µg/L)
8月1日	Y1 (0m)	ND	-	ND	-	27.4	31.61	—
	Y2 (0m)	ND	-	ND	-	26.9	31.47	—
	Y3 (0m)	ND	-	ND	-	28.6	29.74	—
	Y1 (20m)	ND	-	ND	-	23.2	32.65	—
	Y2 (20m)	ND	-	ND	-	22.7	32.34	—
9月5日	Y3 (20m)	ND	-	ND	-	25.0	31.30	—
	Y1 (0m)	ND	-	ND	-	27.8	31.20	—
	Y2 (0m)	ND	-	ND	-	27.8	31.06	—
	Y3 (0m)	ND	-	ND	-	27.8	31.30	—
	Y1 (20m)	ND	-	ND	-	28.0	31.24	—
9月5日	Y2 (20m)	ND	-	ND	-	28.0	31.17	—
	Y3 (20m)	ND	-	ND	-	27.8	31.59	—

島根県

月日	調査点 (水深)	<i>C. polykrikoides</i> (cells/ml)	LAMP	<i>K. mikimotoi</i> (cells/ml)	LAMP	水温 (°C)	塩分	Chl-a (µg/L)
7月25日	SA (0m)	ND	-	ND	-	24.6	33.60	—
	SB (0m)	ND	-	ND	-	23.4	33.40	—
	SA (20m)	ND	-	ND	-	25.2	33.40	—
9月5日	SB (20m)	ND	-	ND	-	22.5	33.90	—
	SA (0m)	ND	-	ND	-	27.7	32.40	—
	SB (0m)	ND	-	ND	-	25.4	33.70	—
	SA (20m)	ND	-	ND	-	27.7	32.40	—
9月5日	SB (20m)	ND	-	ND	-	23.9	33.80	—

鳥取県

月日	調査点 (水深)	<i>C. polykrikoides</i> (cells/ml)	LAMP	<i>K. mikimotoi</i> (cells/ml)	LAMP	水温 (°C)	塩分	Chl-a (µg/L)
7月29日	T3 (1m)	ND	-	ND	-	26.3	31.90	—
	T4 (1m)	ND	-	ND	-	26.5	31.70	—
	T6 (1m)	ND	-	ND	-	26.3	32.30	—
	T3 (20m)	ND	-	ND	-	26.2	31.90	—
	T4 (20m)	ND	-	ND	-	24.3	32.70	—
7月30日	T6 (20m)	ND	-	ND	-	24	32.50	—
	T2 (1m)	ND	-	ND	-	26.6	32.00	—
	T5 (1m)	ND	-	ND	-	26.2	32.30	—
	T2 (20m)	ND	-	ND	-	24.8	32.90	—
	T5 (20m)	ND	-	ND	-	23.3	33.00	—
9月3日	T4 (1m)	ND	-	ND	+	28.8	31.20	—
	T6 (1m)	ND	-	ND	-	28.0	31.90	—
	T4 (20m)	ND	-	ND	-	25.0	33.60	—
9月4日	T6 (20m)	ND	-	ND	-	25.0	32.80	—
	T5 (1m)	ND	-	ND	+	28.0	31.40	—
9月5日	T5 (20m)	ND	-	ND	-	27.8	31.60	—
	T2 (1m)	ND	-	ND	+	27.9	32.00	—
	T3 (1m)	ND	-	ND	-	28.0	32.00	—
	T2 (20m)	ND	-	ND	-	26.0	32.90	—
9月5日	T3 (20m)	ND	-	ND	-	27.8	32.50	—

兵庫県

月日	調査点 (水深)	<i>C. polykrikoides</i> (cells/ml)	LAMP	<i>K. mikimotoi</i> (cells/ml)	LAMP	水温 (°C)	塩分	Chl-a (µg/L)
7月24日	H1 (0m)	ND	-	ND	-	26.5	32.00	—
	H2 (0m)	ND	-	ND	+	26.6	32.58	—
	H3 (0m)	ND	-	ND	+	25.6	32.56	—
	H4 (0m)	ND	-	ND	+	25.4	33.52	—
	H5 (0m)	ND	-	ND	-	25.9	33.62	—
	H6 (0m)	ND	-	ND	-	25.7	33.21	—
	H1 (20m)	ND	-	ND	-	25.7	32.24	—
	H2 (20m)	ND	-	ND	-	24.5	32.70	—
	H3 (20m)	ND	-	ND	+	23.8	33.20	—
	H4 (20m)	ND	-	ND	-	24.8	33.62	—
	H5 (20m)	ND	-	ND	-	23.9	34.08	—
9月6日	H6 (20m)	ND	-	ND	+	23.6	34.04	—
	H1 (0m)	ND	-	ND	-	27.4	31.77	—
	H2 (0m)	ND	-	ND	-	27.7	31.97	—
	H3 (0m)	ND	-	ND	-	27.8	32.39	—
	H4 (0m)	ND	-	ND	-	27.7	32.32	—
	H5 (0m)	ND	-	ND	-	27.8	32.39	—
	H6 (0m)	ND	-	ND	-	27.8	32.34	—
	H1 (20m)	No Data	No Data	No Data	No Data	24.1	33.20	—
	H2 (20m)	No Data	No Data	No Data	No Data	23.6	33.31	—
	H3 (20m)	No Data	No Data	No Data	No Data	25.5	33.23	—
	H4 (20m)	No Data	No Data	No Data	No Data	26.1	33.27	—
H5 (20m)	No Data	No Data	No Data	No Data	26.7	32.99	—	
H6 (20m)	No Data	No Data	No Data	No Data	25.1	33.28	—	

表 1-2 *C. polykrikoides* および *K. mikimotoi* の検鏡結果と LAMP 法による検出結果 (沿岸調査)

山口県

月日	調査点 (水深)	<i>C. polykrikoides</i> (cells/ml)	LAMP	<i>K. mikimotoi</i> (cells/ml)	LAMP	水温 (°C)	塩分	Chl-a (µg/L)
7月9日	Y4(0m)	ND	-	ND	-	26.7	32.49	—
	Y5(0m)	ND	-	0.001	+	26.1	32.41	—
	Y6(0m)	ND	-	ND	-	26.0	32.86	—
	Y7(0m)	ND	-	ND	-	27.0	31.52	—
	Y4(底層)	ND	-	0.004	+	26.8	32.43	—
	Y5(底層)	ND	-	ND	+	25.8	32.41	—
	Y6(底層)	ND	-	ND	-	26.0	32.92	—
Y7(底層)	ND	-	ND	-	27.0	32.45	—	
8月14日	Y4(0m)	ND	-	ND	-	28.5	32.20	—
	Y5(0m)	ND	-	ND	-	27.7	32.18	—
	Y6(0m)	ND	-	ND	-	29.5	31.16	—
	Y7(0m)	ND	-	ND	-	28.3	32.05	—
	Y4(底層)	ND	-	ND	-	26.3	32.56	—
	Y5(底層)	ND	-	ND	-	26.6	32.53	—
	Y6(底層)	ND	-	ND	-	29.0	31.69	—
Y7(底層)	ND	-	ND	+	26.6	32.32	—	
9月10日	Y4(0m)	ND	-	ND	-	29.7	32.31	—
	Y5(0m)	ND	-	ND	-	30.3	31.78	—
	Y6(0m)	ND	-	ND	-	28.7	31.86	—
	Y7(0m)	ND	-	0.001	-	28.3	32.09	—
	Y4(底層)	ND	-	ND	-	29.1	32.34	—
	Y5(底層)	ND	-	ND	-	29.4	32.14	—
	Y6(底層)	ND	-	ND	-	27.2	32.11	—
Y7(底層)	ND	-	ND	-	28.1	32.15	—	

島根県

月日	調査点 (水深)	<i>C. polykrikoides</i> (cells/ml)	LAMP	<i>K. mikimotoi</i> (cells/ml)	LAMP	水温 (°C)	塩分	Chl-a (µg/L)	
7月3日	S1(0m)	0.013	-	ND	-	24.2	—	—	
	S1(5m)	ND	+	ND	-	23.9	—	—	
	S1(9m)	ND	+	ND	-	23.8	—	—	
	S2(0m)	ND	-	ND	-	25.5	14.1	—	
	S2(5m)	ND	-	ND	-	23.9	33.7	—	
	S3(0m)	ND	-	ND	-	24.4	29.2	—	
	S3(2m)	ND	-	ND	-	24.6	30.8	—	
	S4(0m)	ND	-	ND	-	25.4	29.3	—	
	S4(9m)	ND	-	ND	-	25	29.5	—	
	S5(0m)	ND	-	ND	-	25.8	30.3	—	
7月6日	S5(2m)	ND	-	ND	-	25.3	30.3	—	
	S6(0m)	ND	-	ND	-	24.7	34.0	—	
7月3日	S6(5m)	0.013	+	ND	-	24.1	34.1	—	
	S1(0m)	ND	-	ND	-	29.4	31.3	—	
8月7日	S1(5m)	ND	-	ND	-	29.4	31.3	—	
	S1(9m)	ND	+	ND	-	29.4	31.3	—	
	S2(0m)	ND	-	ND	-	29.2	16.4	—	
	S2(5m)	ND	-	ND	-	27.6	31.1	—	
	S3(0m)	ND	-	ND	-	29.2	30.8	—	
	S3(2m)	ND	-	ND	-	28.8	31.0	—	
	S4(0m)	ND	-	ND	-	30.6	28.4	—	
	S4(9m)	ND	-	ND	-	29.3	28.5	—	
	S5(0m)	ND	-	ND	-	30.2	28.2	—	
	S5(2m)	ND	-	ND	-	29.4	28.5	—	
	S6(0m)	ND	-	ND	-	30.7	30.6	—	
	S6(5m)	ND	-	ND	-	29	31.3	—	
	9月3日	S1(0m)	ND	-	ND	-	28.1	30.8	—
		S1(5m)	ND	-	ND	-	27.9	30.9	—
S1(9m)		ND	-	ND	-	27.7	31.0	—	
S2(0m)		ND	-	ND	-	26.4	16.0	—	
S2(5m)		ND	-	ND	-	23.8	32.5	—	
S3(0m)		ND	-	ND	-	24.6	30.7	—	
S3(2m)		ND	-	ND	-	24.7	32.0	—	
9月5日	S4(0m)	ND	-	ND	-	26.7	33.1	—	
	S4(9m)	ND	-	ND	-	24.9	33.3	—	
	S5(0m)	ND	-	ND	-	26.5	32.2	—	
	S5(2m)	ND	-	ND	-	26.3	32.9	—	
	S6(0m)	ND	-	ND	-	26.7	31.3	—	
9月3日	S6(5m)	ND	-	ND	-	25.3	32.1	—	

鳥取県

月日	調査点 (水深)	<i>C. polykrikoides</i> (cells/ml)	LAMP	<i>K. mikimotoi</i> (cells/ml)	LAMP	水温 (°C)	塩分	Chl-a (µg/L)
7月30日	T7(0m)	ND	-	ND	-	27.0	30.9	—
7月31日	T8(0m)	ND	-	ND	-	28.3	31.0	—
	T11(1m)	ND	-	ND	-	27.2	31.3	—
	T11(10m)	ND	-	ND	-	27.2	31.3	—
9月4日	T7(0m)	ND	-	ND	-	28.5	29.1	—
	T8(0m)	ND	-	ND	-	27.5	30.5	—
9月3日	T11(1m)	ND	-	ND	-	27.2	31.3	0.003
	T11(10m)	ND	-	ND	-	27.2	31.3	0.013
9月26日	T7(0m)	ND	-	ND	-	26.6	29.6	—
	T8(0m)	ND	-	ND	-	27.5	31.0	—
	T11(1m)	ND	-	ND	-	27.1	31.8	0.000
	T11(10m)	ND	-	ND	-	27.0	31.9	0.000

兵庫県

月日	調査点 (水深)	<i>C. polykrikoides</i> (cells/ml)	LAMP	<i>K. mikimotoi</i> (cells/ml)	LAMP	水温 (°C)	塩分	Chl-a (µg/L)
3月28日	HS1(0m)	ND	-	ND	+	11.3	31.54	—
4月12日	HS1(0m)	ND	-	ND	+	14.5	—	—
5月14日	HS1(0m)	ND	+	ND	-	16.7	33.70	—
6月11日	HS1(0m)	ND	+	ND	-	21.9	34.33	—
7月9日	HS1(0m)	0.18	+	ND	-	26.6	30.91	—
	HS1(0m)	0.1	+	ND	-	24.5	25.65	—
7月17日	HS1-2(0m)	5.2	+	ND	+	25.1	30.40	—
	HS1(0m)	0.01	-	ND	-	28.6	31.49	—
	HS1-2(0m)	0.01	-	ND	+	28.4	31.44	—
	HS1-3(0m)	0.01	-	0.00	-	30	31.20	—
7月26日	HS1-4(0m)	ND	-	ND	-	29.2	31.39	—
	HS1(0m)	0.01	+	ND	+	28	30.90	—
	HS1-2(0m)	0.01	-	0.00	-	28.5	31.32	—
	HS1-3(0m)	0.23	+	ND	-	28.4	30.92	—
8月1日	HS1-4(0m)	0.00	-	0.00	-	28.6	31.24	—
	HS1(0m)	ND	-	ND	+	27.8	31.87	—
	HS1-2(0m)	ND	-	ND	-	27.5	31.94	—
	HS1-3(0m)	ND	-	ND	+	27.6	31.88	—
9月3日	HS1-4(0m)	ND	-	0.00	+	27.2	31.86	—
	HS1(0m)	ND	-	ND	-	24.1	32.81	—
	HS1-2(0m)	ND	-	ND	-	24.6	32.75	—
	HS1-3(0m)	ND	-	ND	+	24.4	32.73	—
10月1日	HS1-4(0m)	ND	-	ND	-	24.5	32.86	—
	HS1(0m)	ND	-	ND	-	15.6	28.12	—
	HS1-2(0m)	ND	-	ND	-	16.9	30.65	—
	HS1-3(0m)	ND	-	ND	-	18.5	31.55	—
11月8日	HS1-4(0m)	ND	-	ND	+	16.6	29.61	—

表2 韓国沿岸域における7月以降の赤潮発生状況（韓国水産科学院赤潮情報）
 （*C. polykrikoides* 以外で比較的密度が高かった有害種を中心に抜粋）

Date	Red tide organisms	Density(Population/ml)	Water temperature(°C)	Salinity(psu)	発生地域
2024/7/1	<i>Ceratium furca</i>	50.0 ~ 200.0	0.0 ~ 0.0	0.0 ~ 0.0	江原道
2024/7/4	<i>Skeletonema costatum</i>	300.0 ~ 1000.0	24.6 ~ 25.4	26.3 ~ 26.9	慶尚南道
2024/7/7	<i>Karenia mikimotoi</i>	700.0 ~ 800.0	0.0 ~ 0.0	0.0 ~ 0.0	慶尚北道
2024/7/9	<i>Karenia mikimotoi</i>	500.0 ~ 600.0	19.0 ~ 19.0	0.0 ~ 0.0	慶尚北道
2024/7/10	<i>Karenia mikimotoi</i>	300.0 ~ 400.0	18.3 ~ 18.3	0.0 ~ 0.0	慶尚北道
2024/7/11	<i>Karenia mikimotoi</i>	900.0 ~ 1000.0	18.4 ~ 18.4	0.0 ~ 0.0	慶尚北道
2024/7/16	<i>Ceratium furca</i>	80.0 ~ 100.0	22.9 ~ 22.9	27.6 ~ 27.6	慶尚南道
2024/7/16	<i>Skeletonema costatum</i>	12000.0 ~ 12000.0	23.2 ~ 23.2	28.3 ~ 28.3	慶尚南道
2024/7/25	<i>Chattonella</i> spp.	813.0 ~ 813.0	26.0 ~ 28.0	0.0 ~ 0.0	忠清南道
2024/7/28	<i>Chattonella</i> spp.	50.0 ~ 1200.0	27.1 ~ 28.0	27.2 ~ 30.3	忠清南道
2024/7/29	<i>Chattonella</i> spp.	50.0 ~ 3345.0	27.0 ~ 28.4	23.7 ~ 26.4	忠清南道
2024/7/30	<i>Chattonella</i> spp.	400.0 ~ 1500.0	26.6 ~ 28.3	23.7 ~ 26.4	忠清南道

表3 行動計画検討のロードマップにおける検討項目

年度	項目
令和5年度	<input type="checkbox"/> 行動計画検討のロードマップ作成 ・各県の赤潮が発生した際の一連の対策（行動計画）の現状整理 ・赤潮情報収集方法の確認と整理
令和6年度	<input type="checkbox"/> 斃死密度の情報収集 <input type="checkbox"/> 赤潮発生段階の整理：いつ（発生時期）、どこで（海域）、何が（種）、どれくらい（密度、規模） <input type="checkbox"/> 他海域で活用されている漁業被害軽減対策技術に関する情報収集
令和7年度	<input type="checkbox"/> 斃死密度の情報収集 <input type="checkbox"/> 赤潮発生段階の整理：いつ（発生時期）、どこで（海域）、何が（種）、どれくらい（密度、規模） <input type="checkbox"/> 他海域で活用されている漁業被害軽減対策技術に関する情報収集
令和8年度	<input type="checkbox"/> 他海域で活用されている漁業被害軽減対策技術に関する情報収集 <input type="checkbox"/> 発生段階に応じた技術導入の可能性の検討： いつ（発生段階ごとに）、どこで、だれが（行動する主体）、どうする（対策・対応）
令和9年度	<input type="checkbox"/> 他海域で活用されている漁業被害軽減対策技術に関する情報収集 <input type="checkbox"/> 発生段階に応じた技術導入の可能性の検討： いつ（発生段階ごとに）、どこで、だれが（行動する主体）、どうする（対策・対応）

表4 日本の閉鎖性海域のうち九州西部から北海道にかけての対馬暖流流域における閉鎖性海域
33ヶ所の *K. mikimotoi* 赤潮発生状況 (赤太字は過去に *K. mikimotoi* 赤潮発生 の報告があった
海域, 赤字は過去に *K. mikimotoi* 細胞出現の報告があった海域)

山口県以東 (18ヶ所)

1. 函館湾	10. 世久見湾
2. 噴火湾	11. 小浜湾
3. 陸奥湾	12. 内浦湾
4. 両津港	13. 舞鶴湾
5. 加茂湖	14. 阿蘇海及び宮津湾
6. 真野湾	15. 久美浜湾
7. 七尾湾	16. 仙崎湾
8. 敦賀湾	17. 深川湾
9. 矢代湾	18. 油谷湾

Km赤潮発生報告
Km細胞出現報告

九州西部～北部 (離島含む, 15ヶ所)

19. 博多湾	27. 志々伎湾
20. 唐津湾	28. 郷ノ浦
21. 伊万里湾	29. 半城湾
22. 仮屋湾	30. 内海
23. 長崎湾	31. 三浦湾
24. 大村湾	32. 浅茅湾
25. 佐世保湾	33. 羊角湾
26. 橘湾	

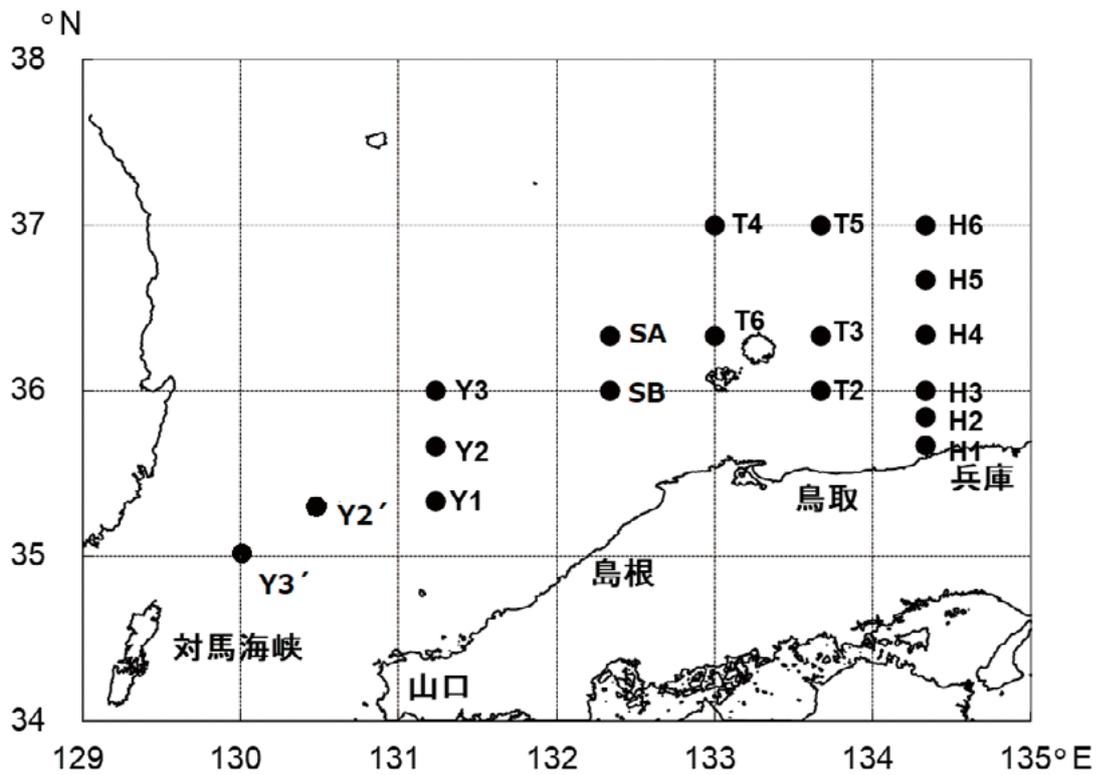


図 1-1 日本海西部海域における沖合調査定点位置図
 (8月の調査のみ, Y2の代わりにY2', Y3の代わりにY3'で調査を実施)

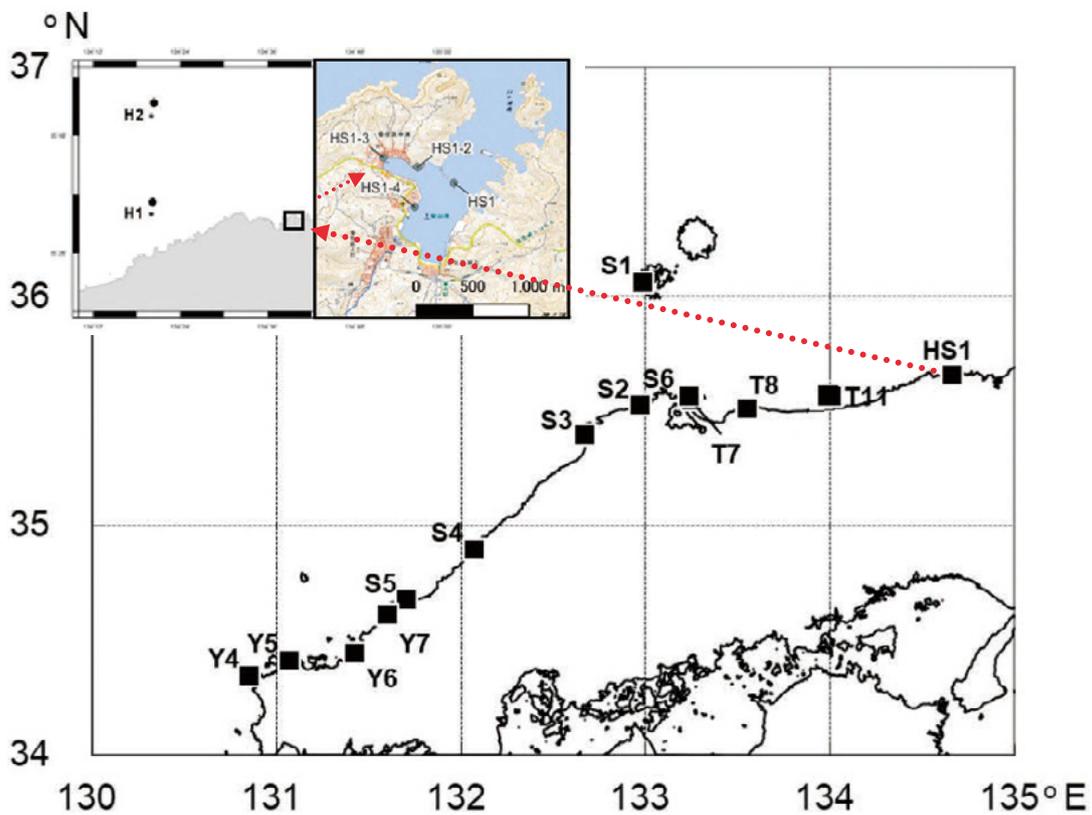


図 1-2 日本海西部海域における沿岸調査定点位置図 (左上: 兵庫県の臨時調査の実施場所)



図2 定量PCRによる *K. mikimotoi* の広域分布調査定点
 (8月の調査のみ、Y2の代わりにY2', Y3の代わりにY3'で調査を実施)

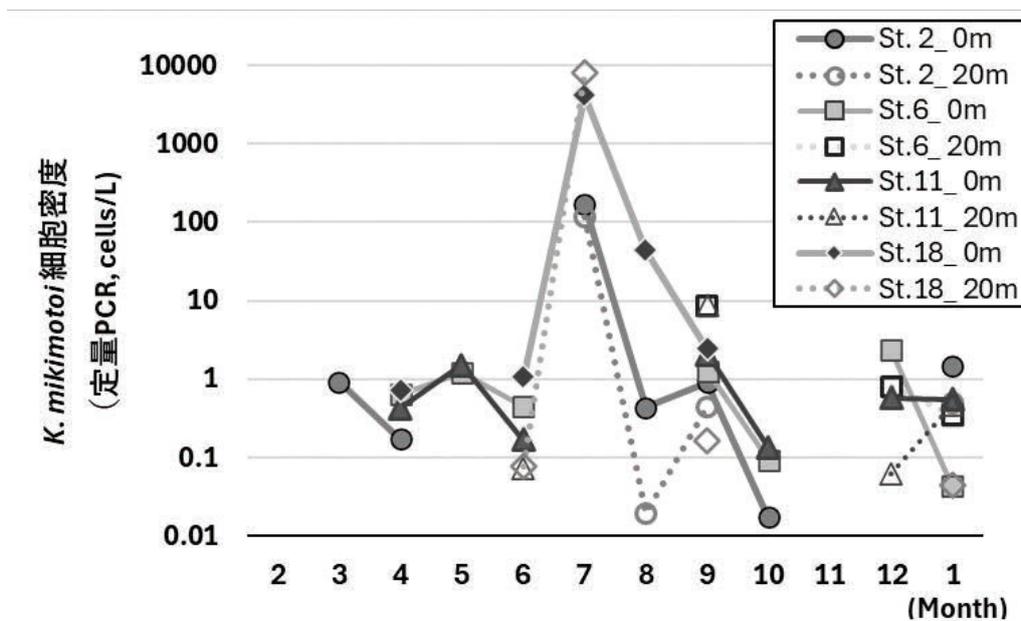


図3 2024年2月から2025年1月の九州北部海域(玄界灘, 対馬暖流域)における *K. mikimotoi* の出現動態(検出は定量PCRによる)。20m層の調査は6月以降に開始。7,8月のSt. 6, St. 11, および11月の全定点は調査欠測

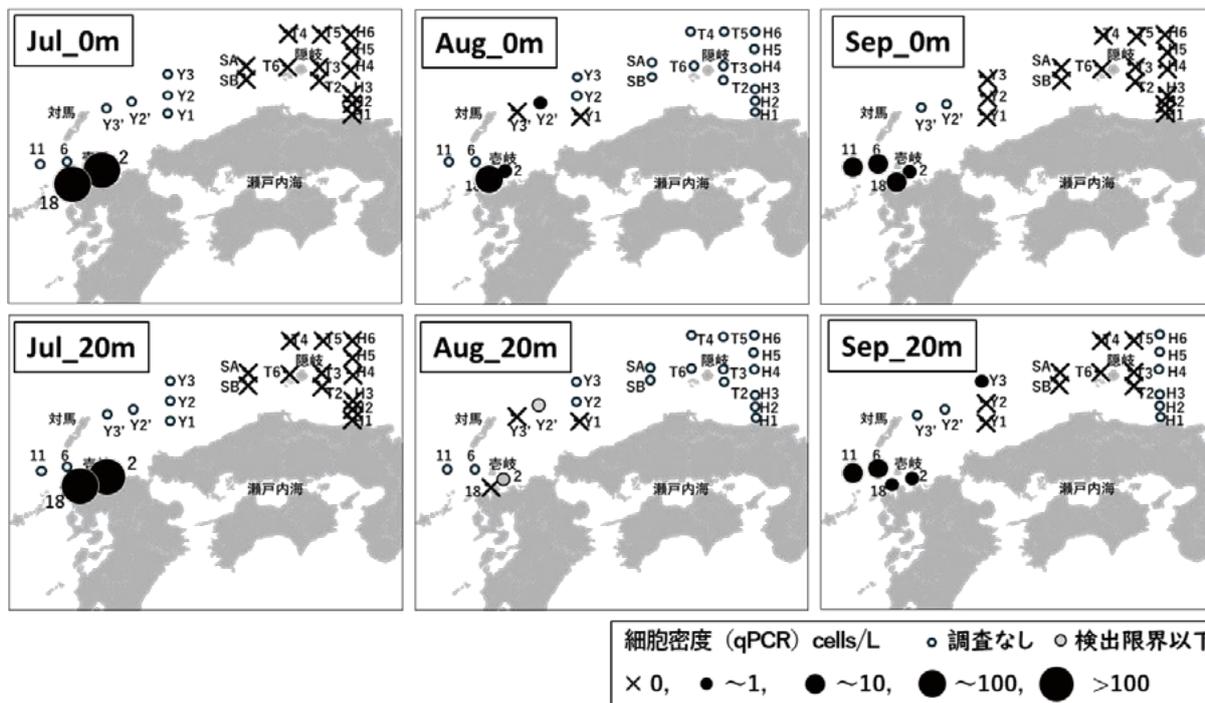


図4 2024年7～9月の九州北部および日本海西部海域（山口県～鳥取県沖合，0-1 m=0 m，および20 m）における *K. mikimotoi* の分布（検出は定量PCRによる）。

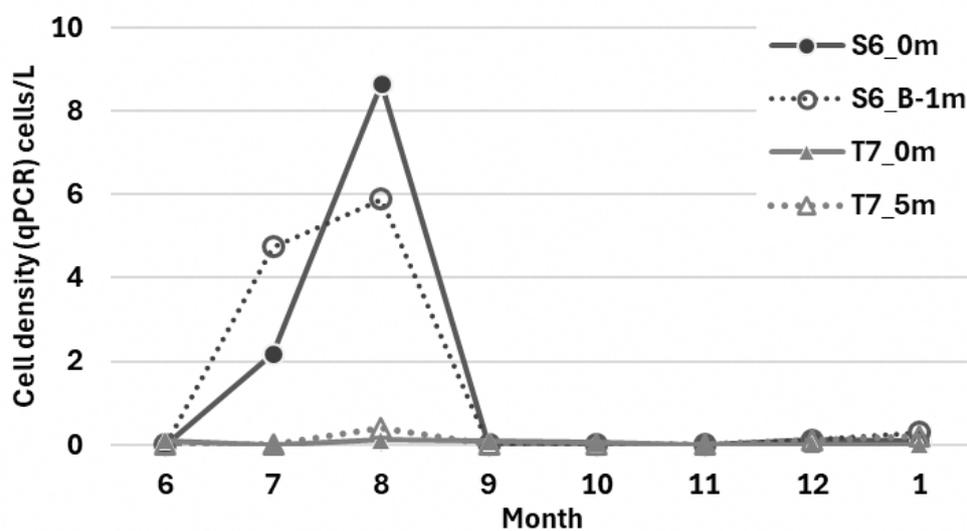


図5 2024年6月～2025年1月の境港周辺海域（St. S6 および St. T7）における *K. mikimotoi* の出現動態（検出は定量PCRによる）。

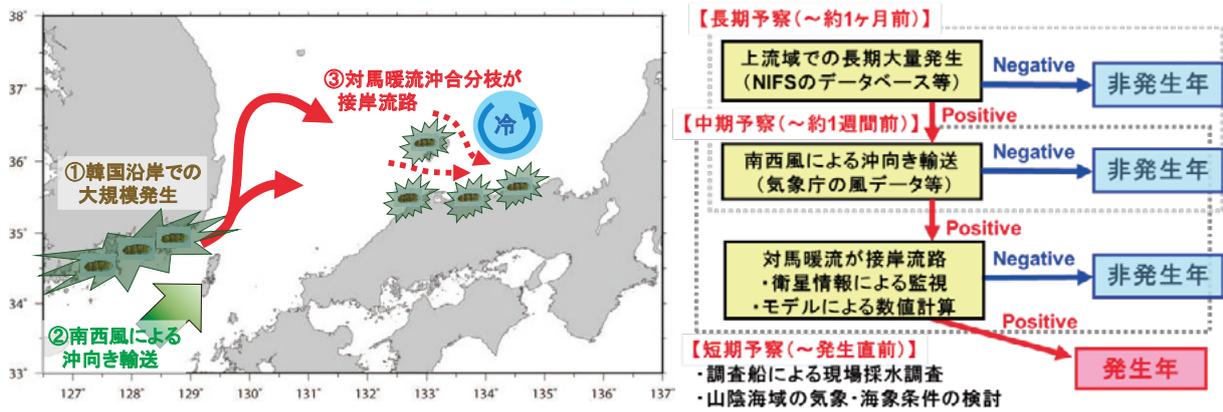


図6 山陰沿岸での *C. polykrikoides* 赤潮発生シナリオ (左) と予察フロー図 (右)

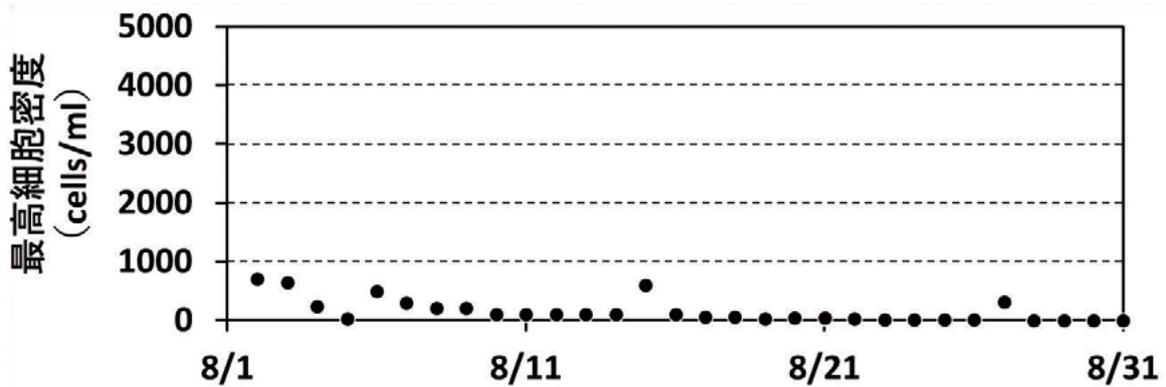


図7 韓国沿岸域における *C. polykrikoides* 細胞密度の推移

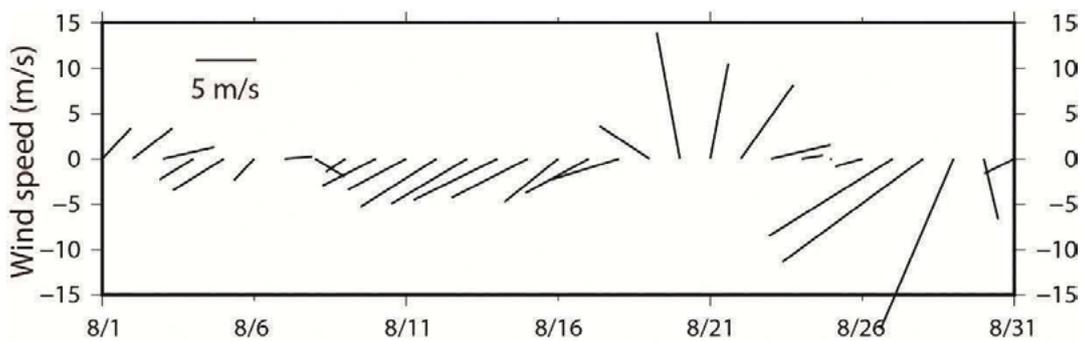


図8 対馬海峡部 (34.4°N, 128.5°E) における日平均海上風ベクトル (気象庁メソ数値予報モデル GPV-MSM)

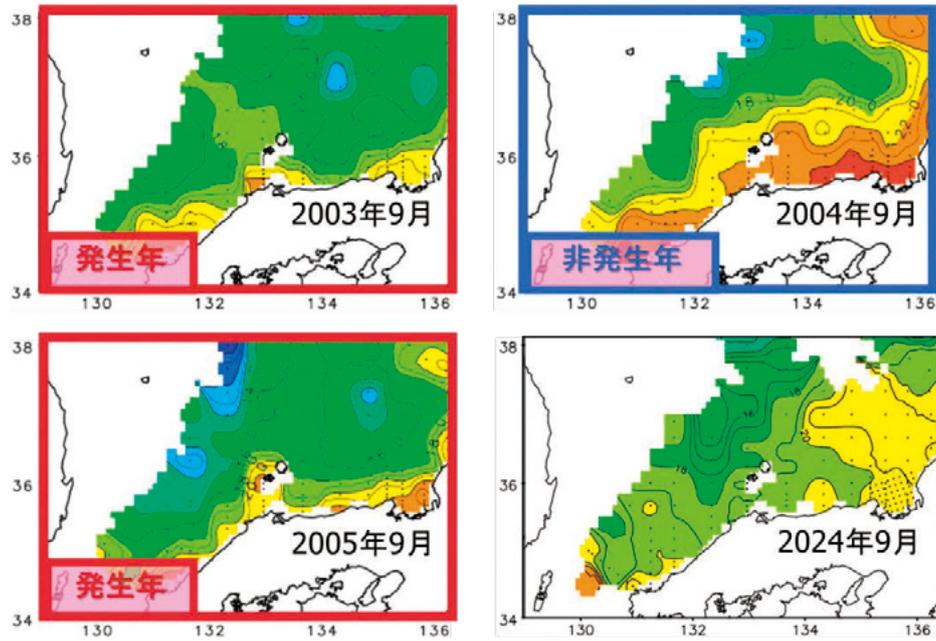


図9 2003～2005年9月上旬および2024年9月上旬の日本海南西部水温分布図（50 m 深）水産研究・教育機構が発行している日本海漁場海況速報を基に一部改変

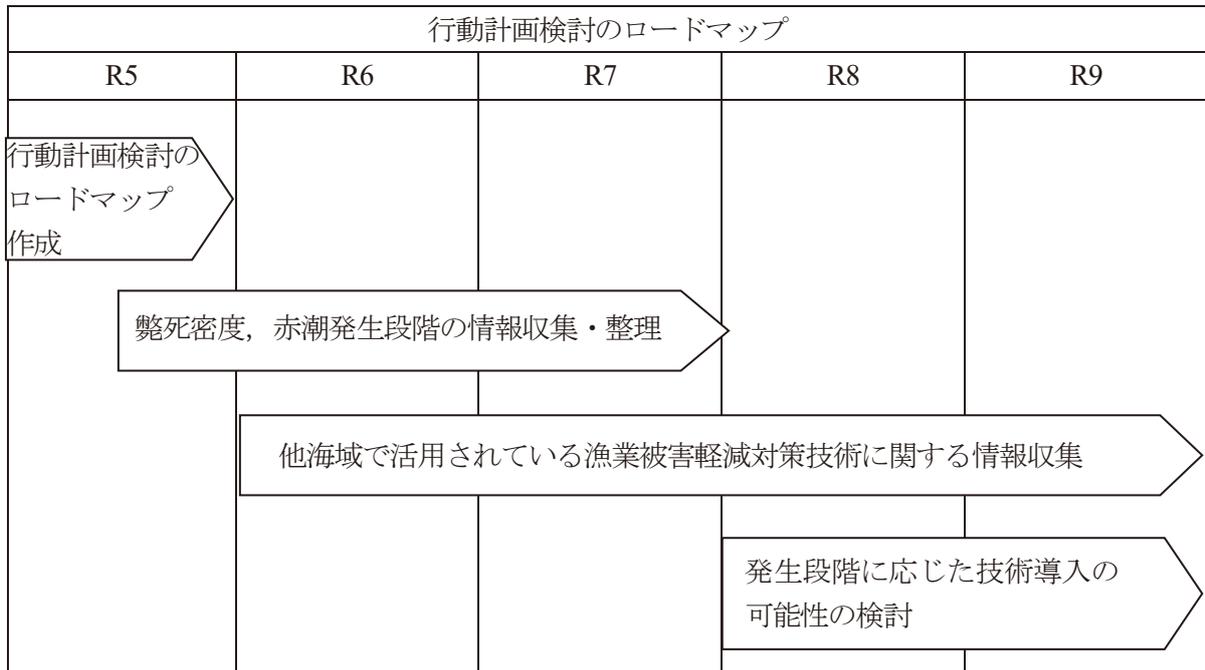


図10 行動計画検討のためのロードマップ

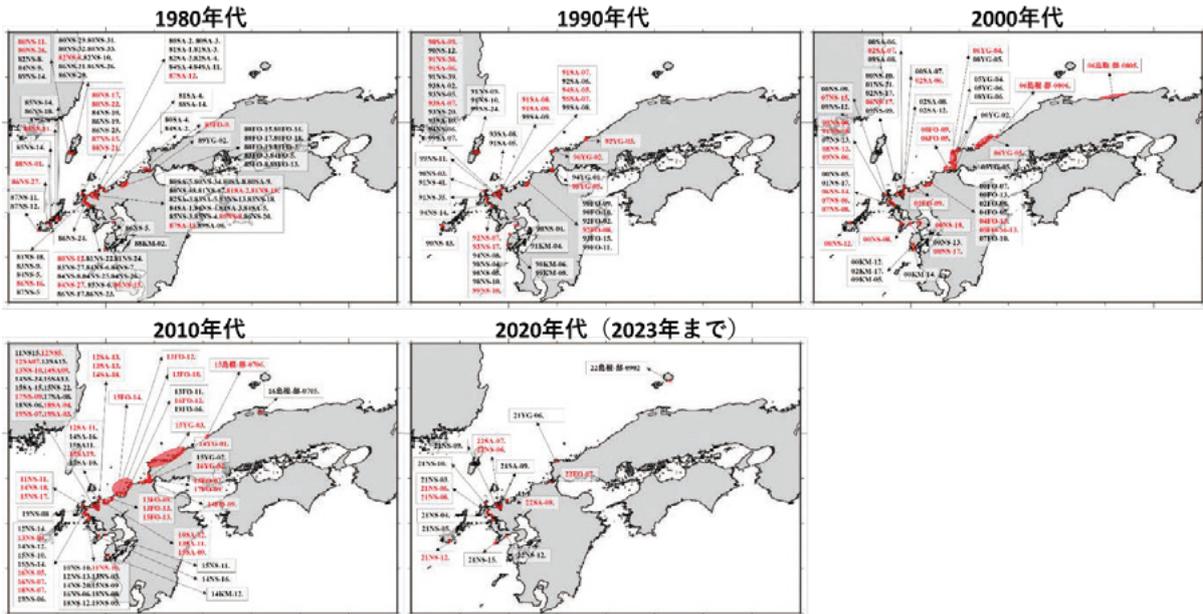


図11 九州西部から山陰沿岸域における *K. mikimotoi* 赤潮発生状況（赤字は被害有，九州から山口県までは「九州海域の赤潮」の西暦の下二桁と整理番号を記載，島根県以东は西暦の下二桁と赤潮発生日を記載）

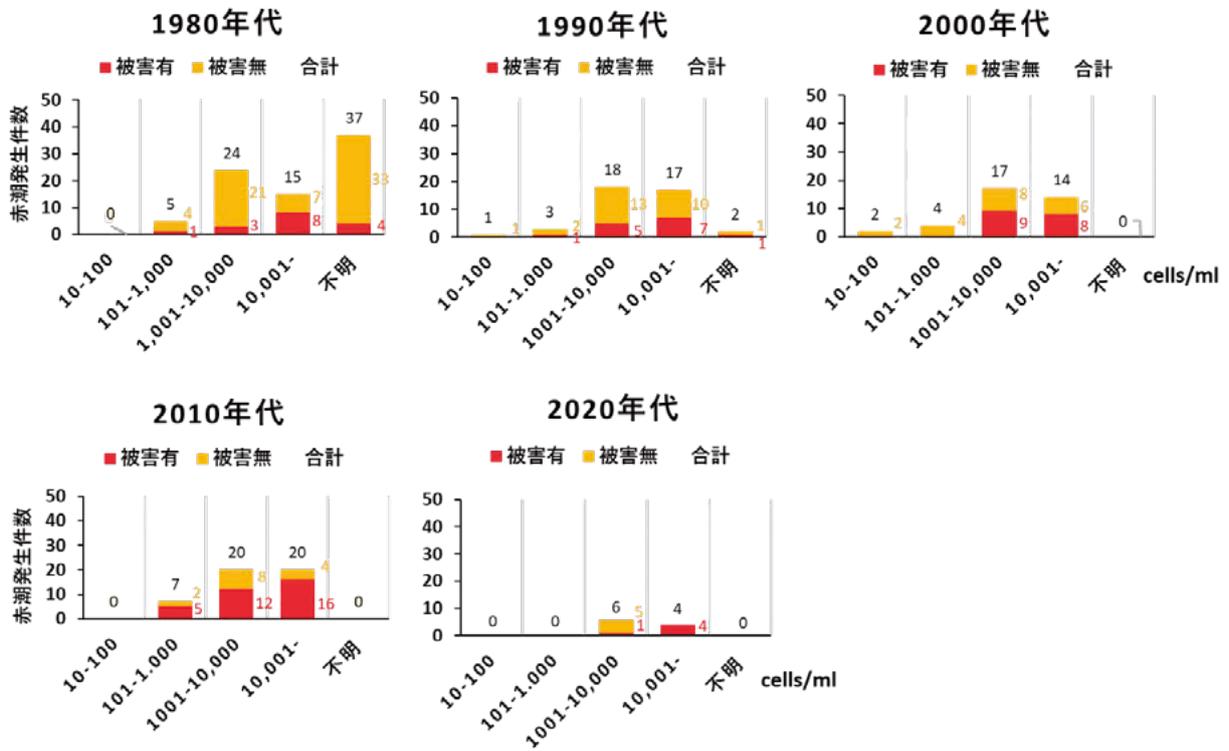


図12 九州北部（長崎県五島列島以东）から山陰沿岸域（京都府以西）における *K. mikimotoi* 赤潮発生状況（年代別・最高細胞密度別の発生件数）