

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, 谷川万寿夫, 松村貴晴, 柘植朝太郎, 大澤 博

三重県水産研究所

坂下奨悟, 渥美貴史, 程川和宏, 伊藤光毅, 大田幹司

三重県水産研究所鈴鹿水産研究室

久世紘聖

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7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対する貧酸素の影響を評価するため，天然の *Heterocapsa circularisquama* 赤潮海水を溶存酸素濃度 4 mg/L 条件下で 1 週間培養し，生残を確認した。酸素調整には低酸素培養キット BIONIX を用い，パウチ袋に O₂ メーター，培養プレート，ガス調節剤を封入してマニュアルに従い濃度を設定した。

培養には 24 穴プレートを使用し，天然海水に滅菌 IMK 培地を 1/10 量となるよう添加した。細胞密度は 5,000 cells/mL に調製し，パウチ袋ごとインキュベータ内で培養した。条件は水温 20℃，光強度 130–150 μmol photons/m²/s，明暗周期 12 h: 12 h，酸素条件は 4 mg/L と自然通気（対照区）とした。1 週間後にプレートを取り出し，生残の有無，細胞の形態や遊泳状態を観察した。

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，2025 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，4 月と 6 月を除いて平年並みから高めとなり，7 月から 9 月にかけて 2.4℃から 2.8℃高くなった。底層は，4～7 月，9 月，10 月に平年より低めとなり，10 月は 2.2℃低くなった。他の月は概ね平年並からやや高めとなっていた。

三河湾の表層は，2～3 月，6 月，11 月に平年より低めとなり，他の月は平年並みから高めとなった。特に夏季には表層水温が 30℃を超えることがあった。底層について，2～3 月，9 月，11 月に平年より低めとなり，他の月は平年並みから高めとなった。

英虞湾の表層は 6 月中旬～8 月上旬までは平年並から高めで推移し，8 月中旬に平年を下回った後，9 月中旬まで高めで推移した。それ以降は平年並であった。底層については，6 月下旬から高めであったが，8 月中旬～9 月中旬にかけては平年を下回った。なお，それ以降は平年並であった。

塩分 (図 4)

伊勢湾の表層は、7月と8月に平年より低め、他の月は平年並みから高めとなった。底層は、8月を除いて概ね平年並みから高めとなっていた。

三河湾の表層は、7月を除いて平年並みから高めとなった。7月は降雨の影響で塩分は低下した。底層は、6月と8月を除いて概ね平年並みから高めとなっていた。

英虞湾の表層は、6月下旬～10月下旬に、高め傾向であった。底層においても、8月中旬～10月下旬に、平年並みから高めで推移した。

溶存酸素 (図 5)

伊勢湾の表層は、年間を通して概ね平年並みから低めとなっていた。底層は平年に比べて低めで推移し、特に7～8月、10～11月は0.0～0.1mg/Lと大きく低下した。

三河湾の表層は、年間を通して概ね平年並みから低めで推移した。底層も5～10月にかけて低めで推移し、7～10月は0.0～0.6mg/Lと大きく低下した。

英虞湾の表層は、概ね平年並みから低めで推移した。底層は、7月上旬から低下が見られ、7月下旬には0.9 mg/Lとなった。しかし、8月上旬には平年並みに回復し、8月中旬～9月上旬には平年を大きく上回った。

クロロフィル *a* (図 6)

伊勢湾の表層は、12月を除いて平年並みから低めとなっていた。12月は *Chaetoceros* spp.が多く確認された。底層は、4月、6月、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3月、7月を除いて平年並みから低めとなっていた。底層は、3月、5月、12月を除き低めで推移した。表層で高くなった3月には *Chaetoceros* spp.が、7月には *Chaetoceros* spp.と *Skeletonema* spp.が多く確認された。

英虞湾の表層は、平年並みから低めで推移した。なお、7月中旬のピークは *Karenia mikimotoi* 赤潮によるものである。底層については、平年並みから低めで推移したが、6月下旬に珪藻類の増加に伴い15.6 µg/L (蛍光値) と高くなった。

栄養塩 (DIN 図 7)

伊勢湾の表層は、3月、5月、8月、11月に平年に比べて高めとなったが、他の月は平年並みから低めとなっていた。底層は7月、11月を除いて平年より低めとなっていた。

三河湾の表層は、2月、11月を除いて平年より低めとなっていた。底層は、2月、3月、7月、11月に平年に比べて高めとなったが、他の月は平年並みから低めとなっていた。

英虞湾の表層は、4月中旬および10月上旬は平年を上回ったが、概ね年間を通して平年より低く推移した。底層では7月下旬～8月上旬に増加し、8月中旬～9月上旬には減少したものの、9月中旬～10月中旬には大きく平年を上回った。

栄養塩 (PO₄-P 図 8)

伊勢湾の表層は、年間を通じて平年並みから低めとなっていた。底層は、8月、10月、11月に平年に比べて高めとなったが、他の月は平年並みから低めとなっていた。

三河湾の表層は、2月、10～11月を除いて平年並みから低めとなっていた。底層は、2月、7月、10月を除いて平年並みから低めとなっていた。

英虞湾の表層は、平年より低めで推移した。底層は、概ね平年並みであったが、5月中旬、7月上旬、7月下旬～8月上旬、9月中旬～10月中旬には平年を上回った。

栄養塩 (SiO₂-Si 図 9)

伊勢湾の表層は、2月、4月、6月、10月に平年より低め、他の月は平年に比べて高めとなった。底層は、2月、4～5月に平年に比べて低めとなったが、他の月は平年より高めとなっていた。

三河湾の表層は、3月、5～6月、9月に平年より低めとなり、他の月は平年並みから高めとなった。底層は、3月、5月を除いて平年並みから高めとなっていた。

英虞湾の表層は、5月中旬～10月上旬に概ね平年を上回ったが、6月下旬および7月上旬に珪藻類の増加による減少が見られた。底層は、4月下旬～7月上旬に平年より高めであった。それ以外は、平年並みから低めで推移した。

②プランクトン（図 10）

Heterocapsa circularisquama

伊勢湾、三河湾で確認された。伊勢湾では10月下旬から11月中旬に確認され、最高密度は1cells/mLであった。三河湾では10月上旬から11月下旬に確認され、最高密度は32cells/mLであった。英虞湾では確認されなかった。

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

伊勢湾、三河湾、英虞湾の3海域で確認された。伊勢湾では11月上旬と12月上旬に確認され、最高密度は2cells/mLであった。三河湾では7月上旬と9月上旬、10月上旬、11月上旬に確認され、最高密度は5cells/mLであった。英虞湾では8月上旬～8月下旬に確認された。最高密度は196 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、8月上旬と10月上旬に確認され、最高密度は9 cells/mLであった。三河湾では7月上旬から11月中旬に確認され、最高密度は8月下旬に26,000 cells/mLが確認され赤潮となった。特記事項として、三河湾において2022年以来3年ぶりに*K. mikimotoi* 赤潮による漁業被害が発生した。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13,980 cells/mLであった。

Heterosigma akashiwo

伊勢湾、三河湾で確認された。伊勢湾では5月中旬から7月上旬と9月上旬から10月上旬、11月上旬から1月上旬に確認され、最高密度は6月上旬に38,000 cells/mLが確認され赤潮となった。三河湾では8月上旬と10月下旬を除き、5月中旬から1月上旬までの期間に確認され、最高密度は6月中旬に42,300 cells/mLが確認され赤潮となった。英虞湾では、大規模な発生はなかった。

Vicicitus globosus（旧種名：*Chattonella globosa*）

伊勢湾、三河湾で確認された。伊勢湾では6月上旬と11月中旬、12月上旬に確認され、最高密度は98cells/mLであった。三河湾では6月上旬と8月上旬、10月上旬、11月中旬、12月上旬、1月上旬に確認され、最高密度は2 cells/mLであった。

・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* 赤潮の発生環境に関する考察

英虞湾における *K. mikimotoi* の水平分布の変化と、鳥羽のタイドグラフ（気象庁 HP より）を図 11 に示した。本種は 6 月 9 日に湾奥の A1, A2, A3 で初認した後、徐々に細胞密度を増加させ、7 月 7 日に赤潮を形成した。その後、湾全域への拡散および高密度化が繰り返し確認された。本種の水平分布とタイドグラフを照合させた結果、本種は小潮の際に高密度化し（図中 3, 5, 7, 9）、大潮の際に拡散する（図中 4, 6, 8, 10）傾向が見られた。このような英虞湾における *K. mikimotoi* 赤潮の動態と潮回りとの関係は過去にも確認されており、2025 年度においても同様の関係が見られた。なお、本種による赤潮での漁業被害は確認されなかった。

三河湾における *K. mikimotoi* の発生環境に関する考察

三河湾では 2022 年以来、3 年ぶりに *K. mikimotoi* による赤潮が発生した。*K. mikimotoi* は 7 月上旬に初認され、8 月下旬に最高密度 26,000cells/mL となり赤潮となった。その後、9 月上旬には 1,000cells/mL を下回り 12 月上旬には確認されなくなった。赤潮発生時にはアカエイやカサゴ、ウナギ等の天然魚介類のへい死が確認された。2015 年以降、夏季に *K. mikimotoi* 赤潮が確認される際には多くの年で 6 月に *K. mikimotoi* が初認されるが 2025 年度は初認が 7 月上旬と約 1 ヶ月遅く、赤潮の形成時期についても例年に比べて遅くなっていた。

昨年度までの解析結果より *K. mikimotoi* は発生初期である 6 月に降水量が多く、表層の塩分濃度が低いことや競合する珪藻類が多く *K. mikimotoi* の増殖が抑制された場合、赤潮に至らないことが示唆されている。これを踏まえて 2025 年 6 月および *K. mikimotoi* が初認された 7 月について、豊田、岡崎、新城および豊橋の各気象観測所（気象庁アメダス）で観測された降水量（4 地点の月合計降水量の平均）と、三河湾における珪藻類細胞密度（月平均）を整理し、比較を行った。6 月には降水量は過去 10 年（2015～2024 年）と比較してやや多く（2025 年:222.5 mm, 過去 10 年平均:218.7mm）、珪藻類の平均細胞密度は低くなっていた（2025 年:3,240cells/mL, 過去 10 年平均:7,429 cells/mL）。7 月には降水量は少なく（2025 年:160.5 mm, 過去 10 年平均:265.8mm）、珪藻類の平均細胞密度も低くなっており（2025 年:7,837 cells/mL, 過去 10 年平均:13,986cells/mL）、6 月は降水量が赤潮の発生条件からやや外れていたが、7 月は *K. mikimotoi* 赤潮の発生条件である少雨と低い珪藻類細胞密度が揃っていたことが *K. mikimotoi* 赤潮が発生した要因として挙げられる。

広域的な有害赤潮の発生に関する考察

本年度は、*K. mikimotoi* による赤潮が三重県沿岸の複数の海域から三河湾で確認された（図 12）。これらの海域のうち、*K. mikimotoi* 赤潮が初認されたのは 7 月 7 日の英虞湾（図 12①）である。次に赤潮が確認されたのは、7 月 8 日の尾鷲湾および引本浦（図 12②）であった。それ以降は、7 月 28 日の五ヶ所湾（図 12③）、阿曽浦（図 12④）、方座浦（図 12⑤）、8 月 6 日の神前浦（図 12⑥）および伊勢湾口（図 12⑦）、8 月 7 日の的矢湾（図 12⑧）、8 月 12 日の鳥羽海域（図 12⑨）、8 月 21 日の三河湾（図 12⑩）であった。

8 月 6 日に確認された伊勢湾口での赤潮は、局所的に高密度化したパッチ状であり、8 月 12 日の鳥羽海域での赤潮も時間帯によって海水の着色域が移動していた。このことから、8 月 21 日

に確認された三河湾での赤潮は、三重県沿岸での高密度な *K. mikimotoi* が流入したことによって発生した可能性がある。

b. ノリ色落ち原因珪藻調査

①海洋環境（図 13, 14）

水温

伊勢湾の三重県側におけるノリ漁場では、概ね平年並みからやや高めで推移したが、12 月中旬には 12.6℃と平年値より 0.8℃低かった。

三河湾では 11 月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、概ね平年より高めで推移し、10 月中旬には 22.6 と平年値より 3.1 高かった。

三河湾では平年より高めで推移した。

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 は平年より低い水準で推移した。しかしながら、11 月中旬には PO₄-P が 1.0 μM、12 月中旬には DIN が 14.6 μM と平年より高い値を示した。

三河湾では DIN は 11 月に平年より高くなったが、他の期間は平年を下回った。PO₄-P は 10 月上旬から 11 月上旬に平年を上回ったが、以降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 15）

Skeletonema spp.

伊勢湾の三重県側におけるノリ漁場では、10 月上旬に 8,775 cells/mL を記録した後、数百 cells/mL 程度で推移し、12 月下旬には一度確認されなくなった。その後、1 月上旬から増加した。

三河湾では 10 月上旬に 5,225 cells/mL が確認された。その後は減少し、11 月上旬以降は 300cells/mL 以下の低密度で推移した。

Chaetoceros spp.

伊勢湾の三重県側におけるノリ漁場では、10 月上旬から 11 月下旬まで数百 cells/mL 程度で推移した後、12 月上旬には 1,290cells/mL が確認された。12 月中旬には一度確認されなくなったが、12 月下旬から再度確認され、1 月下旬には 6,615cells/mL を記録した。

三河湾では 10 月下旬、1 月中旬の最高密度がそれぞれ 3,590 cells/mL、3,017 cells/mL となった。そのほかの期間は、100～1,000 cells/mL 前後で推移した。

Eucampia zodiacus

伊勢湾の三重県側におけるノリ漁場では、10 月下旬まで確認されなかったが、11 月上旬に 10 cells/mL、12 月上旬に 200 cells/mL 確認された。1 月上旬～下旬にかけては 200 cells/mL 程度で推移した。

三河湾では 11 月中旬から 12 月上旬及び 1 月以降に確認されており、1 月中旬に最高密度が 187 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月中旬に一時的に上昇したDINを除き、DIN、PO₄-Pともに平年を下回る濃度で推移したが、12月下旬までは重篤な色落ちは見られなかった。1月上旬以降には、*Chaetoceros* 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。なお、三重県の黒ノリ養殖では、2024年漁期および2025年漁期に色落ちが確認されている。

三河湾

DIN、PO₄-Pともに11月上旬に最大となり平年を大きく上回ったが、以降は減少傾向となり、平年を下回って推移した。クロロフィルaについては期間を通して平年を下回り、赤潮は確認されなかった。1月上旬には*Chaetoceros socialis*が多くの海域で確認されているが赤潮を形成するほどの細胞密度ではなかった。1月下旬以降、ノリの色落ちが一部の海域で確認されている。

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）

これまでの三河湾における*K. mikimotoi*の発生状況を表3に示した。*K. mikimotoi*の細胞密度が1,000cells/mL以上になる場合を*K. mikimotoi*赤潮発生年と整理しており、2025年は3年ぶりに*K. mikimotoi*による赤潮が発生した。

昨年度までの解析結果では*K. mikimotoi*の増殖には*K. mikimotoi*の発生初期に当たる6月の海洋環境が増殖に大きな影響を与えている可能性や、6月に降水量が多く、表層の塩分濃度が低いことや競合する珪藻類が多いことで*K. mikimotoi*の増殖が抑制された場合、赤潮に至らないことが示唆された。

そこで今年度は、昨年度に引き続き、6月の発生年と非発生年の海況や珪藻密度から発生シナリオの構築および予察技術の検討を行うとともに、2025年の発生要因の検討を行った。

過去10年間の6月における豊田、岡崎、新城および豊橋の各気象観測所（気象庁アメダス）で観測された降水量（各地点ごとの月合計降水量）ならびに三河湾の水温、塩分、表底層密度差、珪藻密度および栄養塩（各観測点の観測値）について（図16）、*K. mikimotoi*赤潮の発生年と非発生年の値を比較した結果および*t*検定の結果を図17に示した。赤潮発生年では非発生年と比較して降水量が少ない（ $p < 0.01$ ）、水温が低い（ $p < 0.01$ ）、塩分が高い（ $p < 0.01$ ）、表底層密度差が小さい（ $p < 0.01$ ）、珪藻類の細胞密度が低い（ $p < 0.05$ ）という特徴が見られ、発生年と非発生年の間に有意差が確認された。

また、*t*検定で、有意差が認められた項目（6月の降水量、水温、塩分、表底層密度差、珪藻類細胞密度）と*K. mikimotoi*赤潮の発生の有無を対象としてロジスティック回帰分析を実施し、*K. mikimotoi*赤潮の発生・非発生を判別するための閾値について検討した（表4）。設定した閾値について当てはまりを検証した結果、降水量、水温、表底層密度差の項目において特に高い当てはまりが認められ、三河湾における*K. mikimotoi*赤潮の発生予察において、これらの3項目を指標として活用することが有効である可能性が示唆された。そこで、これら3項目の指標を用いて予察案を作成し、2025年の海況に適用して予察の実証を行ったところ、降水量を除く項目で

は予察との不一致が見られた。この要因として、2025 年における *K. mikimotoi* の初認時期が 7 月であり、赤潮発生も 8 月後半と例年より遅かったことに加え、*K. mikimotoi* 赤潮が広域で発生したことによる影響や 2017 年から継続していた黒潮大蛇行の終息に伴い、*K. mikimotoi* の流入時期などが変化したことにより発生パターンが変化した可能性などが考えられ、これらを踏まえた予察手法の検証が今後必要であると考えられる。

・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 5 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 5)、2025 年は 2021 年から 5 年続けて赤潮発生年となった。

表 5 のとおり、三重県は過去から英虞湾においてモニタリング調査を継続的に実施している。今年度においては、これまでのモニタリング調査によって蓄積してきた *K. mikimotoi* 赤潮発生年と非発生年の環境データ等を比較および解析し、赤潮の発生予察技術の開発を試みた。

今回は、英虞湾の St.A3 の 0.5m, 2m, 5m, B-1m における 2000~2024 年の計 25 年間のモニタリング調査データを使用して統計解析を実施し、*K. mikimotoi* 赤潮発生予測式を作成した。この過去 25 年間のデータについて、St.A3 において *K. mikimotoi* が 100 cells/mL を超えた年を赤潮発生年とし、それ以外の年を非発生年とした。発生年は、2000 年、2006 年、2012~2015 年、2017 年、2022~2024 年の計 10 年であり、非発生年は、2001~2005 年、2007~2011 年、2016 年、2018~2021 年の計 15 年であった。解析に使用した調査データの項目は、水温、塩分、溶存酸素量 (以下、DO)、クロロフィル *a* 量、珪藻類細胞密度、DIN、PO₄、SiO₂ である。各項目の数値は、発生年と非発生年で各月の旬ごとに平均し、図 18~25 に示した。

次に、発生年と非発生年の 2 標本について、統計的な比較を行った。水温、塩分、DO については Welch の *t* 検定、クロロフィル *a* 量、珪藻類細胞密度、DIN、PO₄、SiO₂ については Mann-Whitney の *U* 検定により、有意差検定を実施した。水温は、発生年が 8 月下旬の表層で高かった ($p<0.05$)。塩分は、発生年が 7 月上旬の全層で高く、8 月上旬の 5~B-1m でも高かった ($p<0.05$)。DO は、発生年が 6~8 月の表層で高く、2~B-1m で低かった ($p<0.05$)。クロロフィル *a* 量は、発生年が 12~2 月の全層で低かった ($p<0.05$)。珪藻類細胞密度は、発生年が 5 月に少ないが、6~7 月には多く、10 月は少なかった ($p<0.05$)。DIN は、発生年が 6~8 月の 5~B-1m で低かった ($p<0.05$)。PO₄ は、発生年が 7 月上旬の表層で高く、8 月上旬の B-1m で低かった ($p<0.05$)。SiO₂ は、発生年が時期によらず全層で低かった ($p<0.01\sim0.05$)。上記をまとめると、主に夏 (6~8 月) の表層と B-1m で有意差がある項目が多かった。

夏 (6~8 月) の表層と B-1m のデータを使用し、LASSO (L1 正則化) 付きロジスティック回帰モデル解析を実施した。これにより発生確率 p を推定するための、赤潮発生予測式を作成した。説明変数は、水温、塩分、DO、DIN、PO₄、SiO₂ とした。なお、珪藻類細胞密度は、増減が激しくモニタリング調査日によって数値差が大きいこと、クロロフィル *a* 量は、*K. mikimotoi* を含めた渦鞭毛藻類を表現している場合があるため、解析から除外した。加えて、珪藻類細胞密度およびクロロフィル *a* 量は、栄養塩指標 (DIN、PO₄、SiO₂) との共線性が高いと判断した。各説明変数 (x_i) は、平均値 (μ_i) と標準偏差 (σ_i) により標準化し、標準化変数 $z_i=(x_i-\mu_i)/\sigma_i$ とした。線形予測子は、 $\text{logit}(p)=\beta_0+\sum\beta_iz_i$ とし、発生確率 p は $p=1/(1+\exp\{-\text{logit}(p)\})$ として算出した。なお、正則化強度 (逆正則化パラメータ C) は、5-fold stratified cross-validation (5-fold CV) により

最適化した。欠測値は中央値補完を行い、標準化は夏（6～8月）の表層と B-1m のデータのみに基づいて実施した。モデルの予測性能は、ROC 曲線下面積（AUC）を用いて評価し、5-fold CV における平均値±標準偏差（mean±SD）とした（表 6）。

算出した線形予測式は次のとおりである。

表層：

$$\text{logit}(p) = -0.401 + 0.012 \text{ 水温} + 0.192 \text{ 塩分} + 0.419 \text{ DO} - 0.077 \text{ DIN} + 0.432 \text{ PO}_4 \\ - 0.545 \text{ SiO}_2 \quad (\text{AUC} \pm \text{SD} = 0.696 \pm 0.112)$$

B-1m：

$$\text{logit}(p) = -0.498 - 0.174 \text{ 水温} + 0.160 \text{ 塩分} - 0.608 \text{ DO} - 0.302 \text{ DIN} + 0.325 \text{ PO}_4 \\ - 1.047 \text{ SiO}_2 \quad (\text{AUC} \pm \text{SD} = 0.715 \pm 0.065)$$

英虞湾において、*K.mikimotoi* 赤潮は主に 7～8 月に発生するため、赤潮発生前の時期の各年 6 月のデータを使用して、線形予測式により算出される発生確率 p の精度を検証した。今回は、赤潮発生前の 6 月時点での注意喚起を目的とした運用を想定しているため、発生確率 p の正誤判定値を 0.4 と設定した（図 26）。従って、実測が発生年であった場合は $p \geq 0.4$ で正答、実測が非発生年であった場合は $p \leq 0.4$ で正答としている（表 7）。6 月上旬での正答率は、表層で発生年 80%、非発生年 57%、B-1m で発生年 70%、非発生年 71%であり、中旬は表層で発生年 80%、非発生年 60%、B-1m で発生年 80%、非発生年 80%、下旬は表層で発生年 80%、非発生年 87%、B-1m で発生年 60%、非発生年 73%であった。2025 年（発生年）の数値での発生確率 p は、6 月上旬の表層で 0.23、B-1m で 0.48、中旬の表層で 0.19、B-1m で 0.35、下旬の表層で 0.36、B-1m で 0.08 であった。2025 年については、6 月上旬の B-1m では正答していたが、それ以外では正答できなかった。今回の解析では、調査データを旬ごとに平均しており、年によっては赤潮発生が 7 月の場合や 8 月の場合があるため、今回の線形予測式は赤潮発生直前の急激な環境変化を表現できていない可能性がある。

より高精度な予測式を構築するためには、モニタリング調査を継続し、精度検証および改良をすることが重要である。加えて、赤潮発生前後での環境条件の比較等、より詳細にデータを解析する必要がある。これにより、精緻な *K.mikimotoi* 赤潮発生シナリオの構築が可能であると考えられる。

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

伊勢湾北中部に位置する鈴鹿地先では、ノリの本養殖期間中（11 月下旬～）、珪藻密度が 100～8,000 cells/mL、DIN が 0.5～8 μM 程度で推移した（図 27）。12 月中旬以降は *Chaetoceros* spp. を主体とした珪藻類の細胞密度が増加し（図 28）、DIN が減少した。DIN は、1 月上旬に 2.6 μM となり、ノリ葉体の色調低下が見られるようになった。その後、珪藻類の細胞密度は 1 月下旬に 8,145 cells/mL まで増加し、DIN は 0.7 μM まで減少したことで、色落ちが深刻化した。

これまでの検討により、鈴鹿地先では珪藻類の細胞密度が 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 μM 以下となり、ノリが色落ちしやすくなる傾向にあることが認められている（二ノ方ほか、2022）。また、三重県でノリの色落ちが危惧される DIN は 4.3 μM (60 $\mu\text{g/L}$) とされている（坂口、2005）。今年度のノリの本養殖期間中、珪藻類の細胞密度が 9,000 cells/mL 以上または *Eucampia* spp. が 500 cells/mL 以上になることはな

かったが、多くの期間で DIN は $7.1\mu\text{M}$ を下回った。一方で、珪藻類の細胞密度が増加し DIN が $4.3\mu\text{M}$ を下回った後に、ノリの色落ちが認められたことから、今期の鈴鹿地先におけるノリの色落ちの発生状況と DIN の関係は、坂口（2005）の知見を支持するものであり、これまで考えられていた色落ち被害の発生シナリオとは一致しなかった。

・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 11 月の底層の水温が高く、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測を行っている。そこで、観測結果からこれら 3 つの指標による *E. zodiacus* 赤潮の発生予測手法を検証した。

2025 年度の検証結果を図 29 に示した。11 月の気温および底層の水温が低く、12 月の *Skeletonema* spp. と *Cheateoceros* spp. の細胞密度の合計も条件から外れたことからすべての条件から外れていた。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低いと予測した。1 月末時点で *E. zodiacus* の最高細胞密度は、 187cells/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、予測通りとなっている。

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

本試験では、天然海水由来の群集に対して低酸素処理を行った結果、*H. circularisquama* は $\text{DO } 4\text{ mg/L}$ でも形態・運動性に变化がなく生残した一方、同じ海水中的珪藻類や微細藻類は死滅した。これは昨年度までの知見（*H. circularisquama* は低酸素に強く、*K. mikimotoi* や珪藻類は低酸素に弱い）と一致している。したがって、貧酸素化した沿岸域では、低酸素耐性をもつ *H. circularisquama* が優占しやすく、逆に低酸素に弱い種は生残が困難になる、という種間差が群集構造に影響することが示唆された。

4) 行動計画の検討

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、*K. mikimotoi* の発生初期である 6 月に焦点を当て、 t 検定およびロジスティック回帰分析を行い、*K. mikimotoi* 赤潮の発生シナリオおよび発生予測技術の検討を行った。*K. mikimotoi* 赤潮の発生予測において降水量、水温、表底層密度差の 3 項目を指標として活用することが有効である可能性が示唆された。今後も引き続き解析を進めることで赤潮発生予測技術の精緻化を目指す。*E. zodiacus* については、これまでの解析結果から得られた予測手法の検証を行った。引き続き検証を進める。

英虞湾では、過去 25 年間の St.A3 における調査データを使用し、統計解析を実施した。これにより、St.A3 の 6~8 月における赤潮発生予測式の作成を試みた。線形予測式で予測した発生確率 p は、実測が発生年であった場合を $p \geq 0.4$ で正答、実測が非発生年であった場合を $p \leq 0.4$ で正答とすると、正答率はおおよそ 70~80%であった。今後は、モニタリング調査を継続し、線形予測式の精度検証および改良に取り組むとともに、より詳細にデータを解析し、赤潮発生シナリオの精緻化を目指す。

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.

坂口研一．伊勢湾の養殖ノリにおける病障害発生の原因究明と軽減法に関する研究，三重科学技術振興センター水産研究部研究報告．2005；13，1-55.

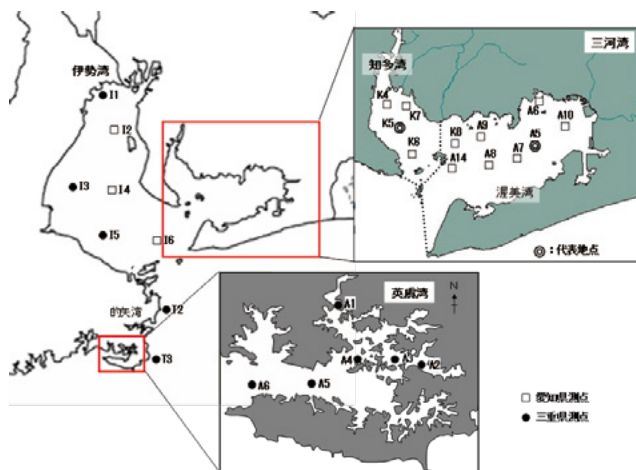


図1 有害赤潮 調査地点図

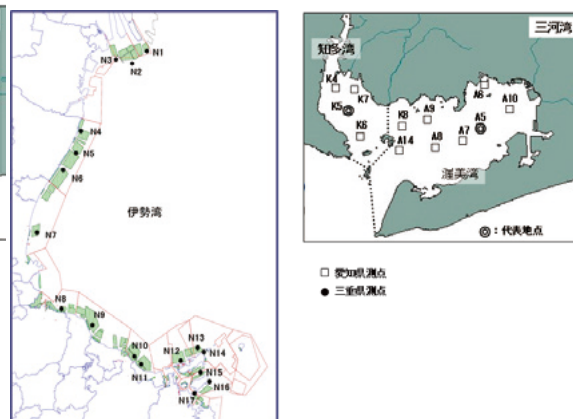


図2 ノリ色落ち原因珪藻 調査地点図

表1 有害赤潮 調査項目

		三重県	愛知県
調査点数		伊勢湾(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	△ (英虞湾のみ)	○
	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(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		○	○

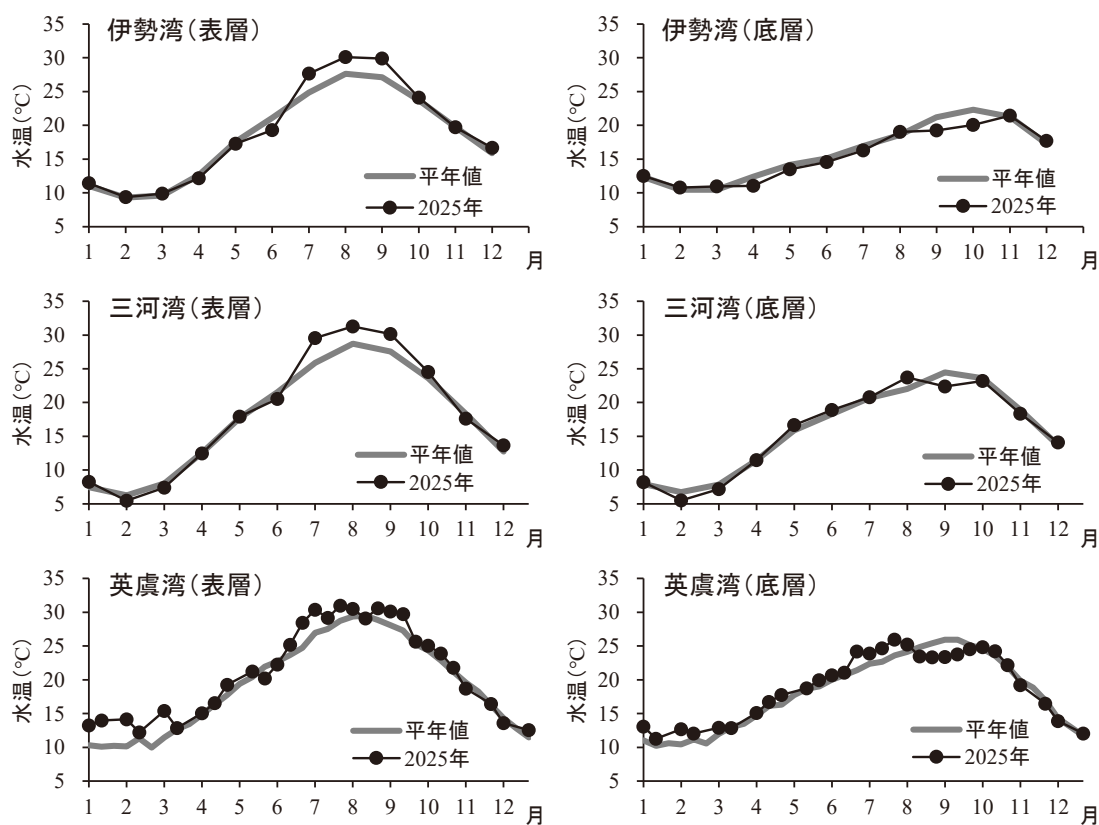


図3 表層と底層における水温の変化(伊勢湾 St.4, 三河湾 St.A5, 英虞湾 St.A3)
※平年値: 伊勢湾 (2005~2024年), 三河湾 (2005~2024年), 英虞湾 (2005~2024年)

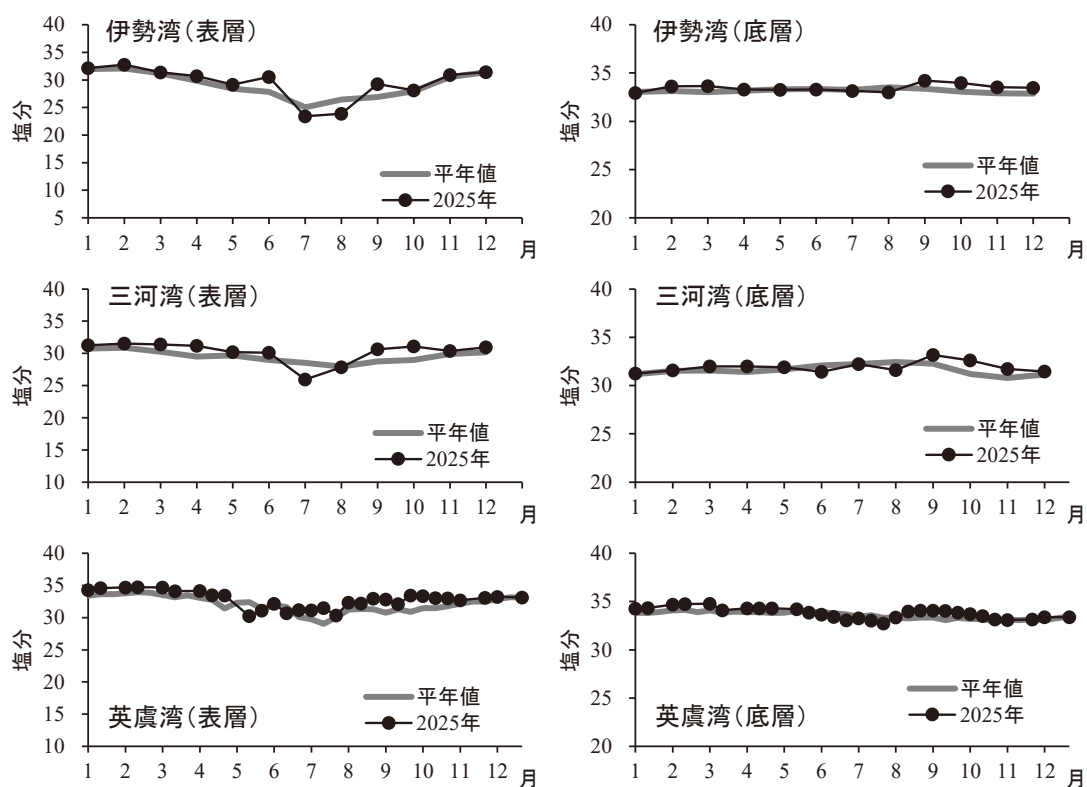


図4 表層と底層における塩分の変化(伊勢湾 St.4, 三河湾 St.A5, 英虞湾 St.A3)
※平年値: 伊勢湾 (2005~2024年), 三河湾 (2005~2024年), 英虞湾 (2005~2024年)

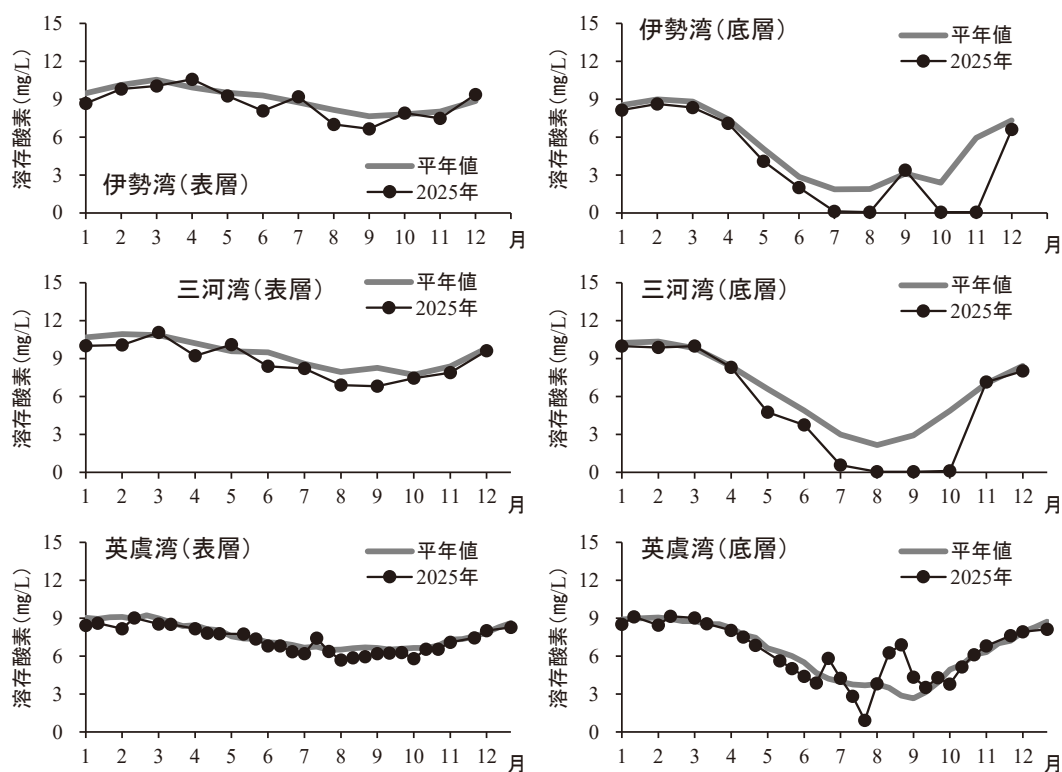


図5 表層と底層における溶存酸素濃度の変化（伊勢湾 St.4, 三河湾 St.A5, 英虞湾 St.A3）
 ※平年値：伊勢湾（2005～2024 年），三河湾（2005～2024 年），英虞湾（2005～2024 年）

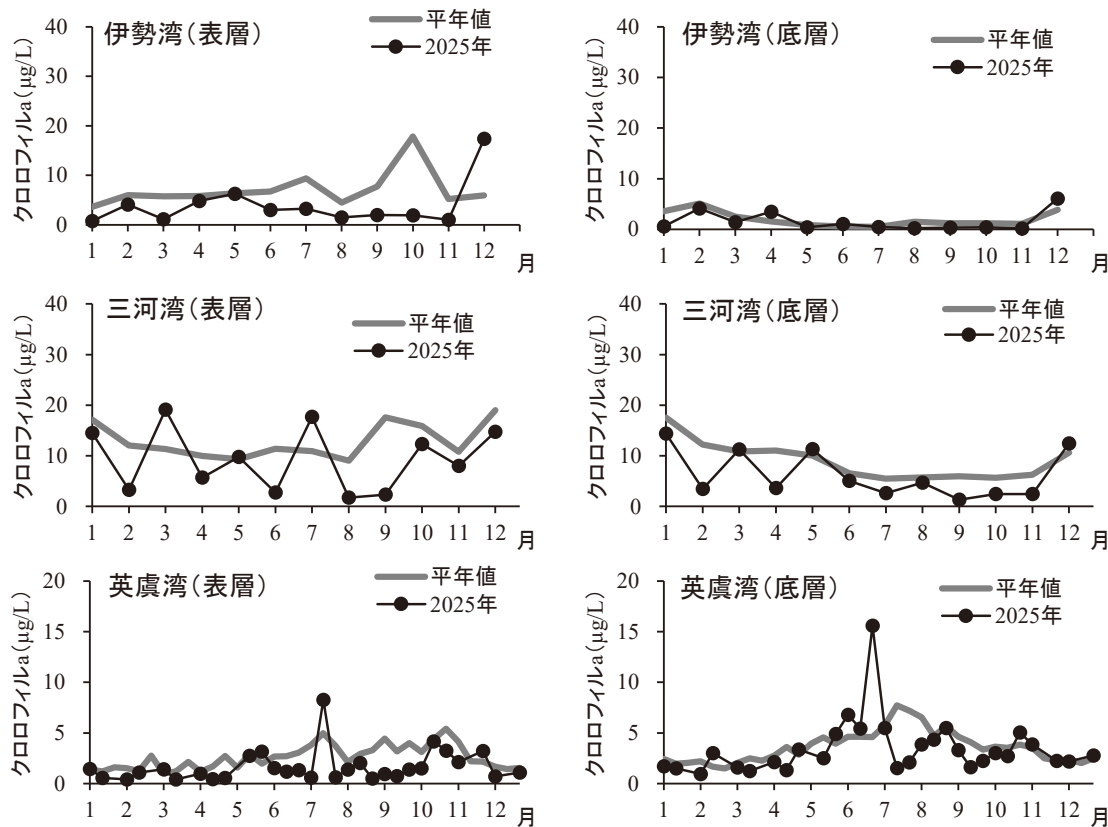


図6 表層と底層におけるクロロフィルaの変化（伊勢湾 St.4, 三河湾 St.A5, 英虞湾 St.A3）
 ※平年値：伊勢湾（2005～2024 年），三河湾（2005～2024 年），英虞湾（2005～2024 年）

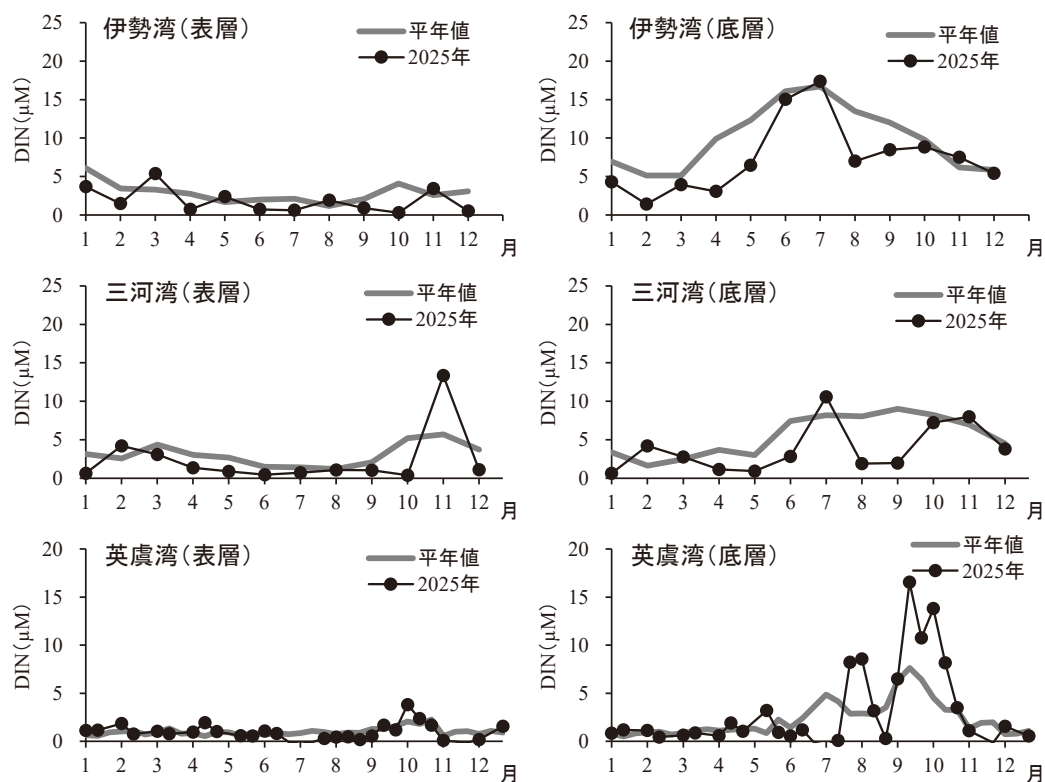


図7 表層と底層における DIN の変化 (伊勢湾 St.4, 三河湾 St.A5, 英虞湾 St.A3)
 ※平年値：伊勢湾 (2005～2024 年)，三河湾 (2005～2024 年)，英虞湾 (2005～2024 年)

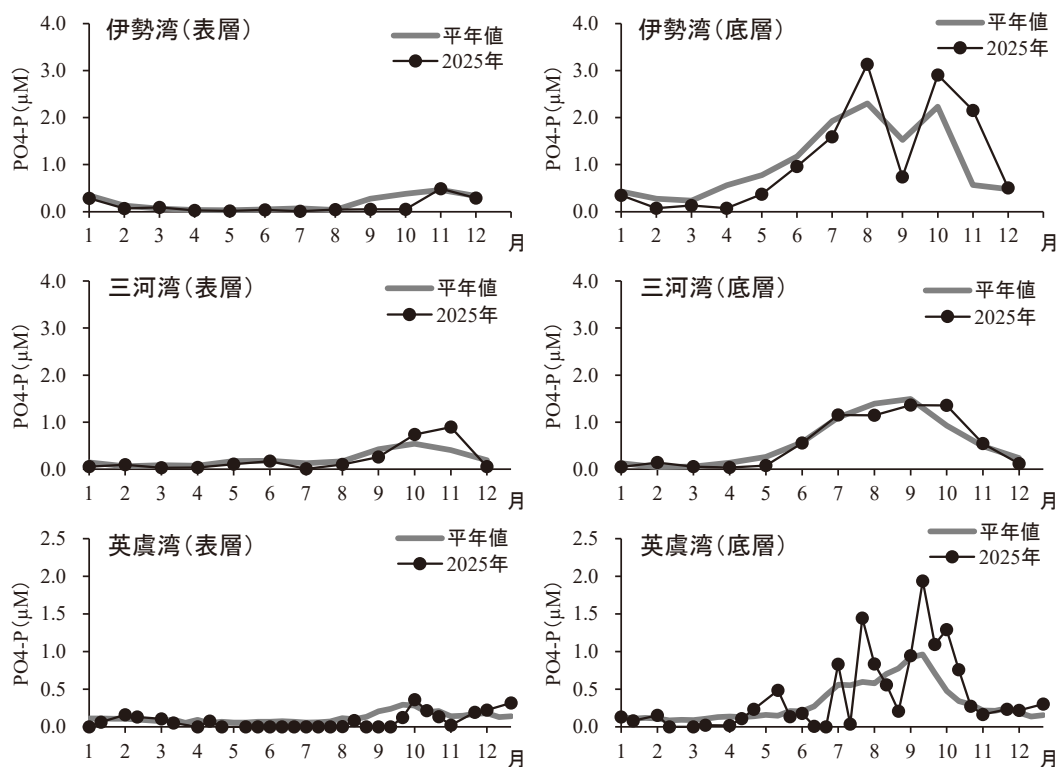


図8 表層と底層における PO₄-P₄ の変化 (伊勢湾 St.4, 三河湾 St.A5, 英虞湾 St.A3)
 ※平年値：伊勢湾 (2005～2024 年)，三河湾 (2005～2024 年)，英虞湾 (2005～2024 年)

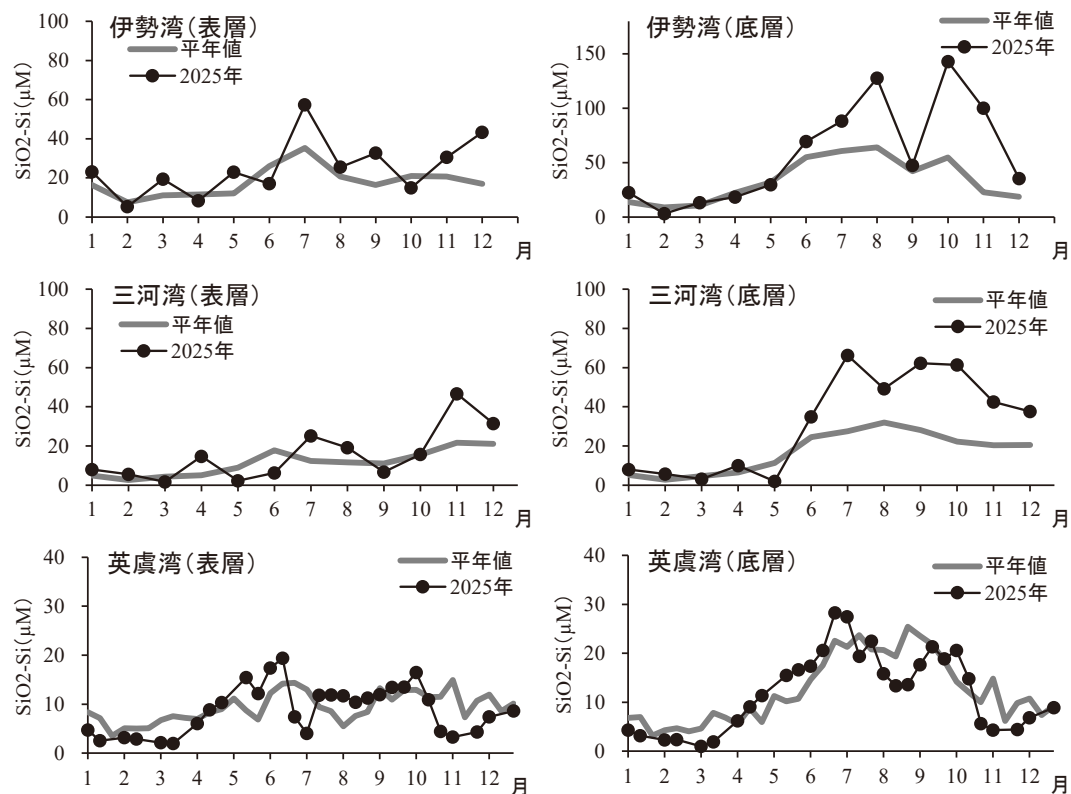


図9 表層と底層における $\text{SiO}_2\text{-Si}$ の変化 (伊勢湾 St.4, 三河湾 St.A5, 英虞湾 St.A3)
 ※平年値：伊勢湾 (2005～2024 年)，三河湾 (2005～2024 年)，英虞湾 (2005～2024 年)

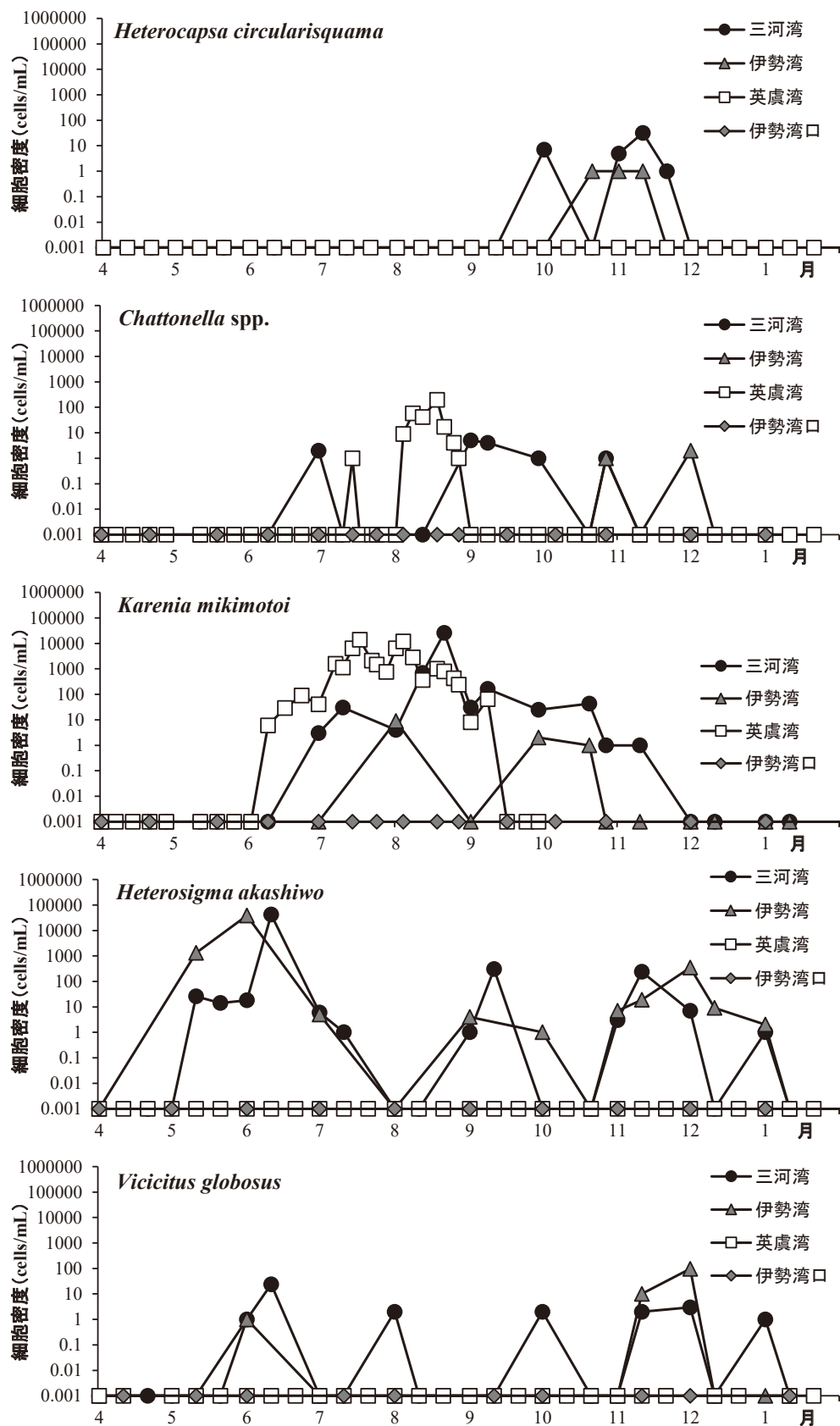


図 10 伊勢湾，三河湾，伊勢湾口，英虞湾（調査点）における有害赤潮種の最高密度の変化

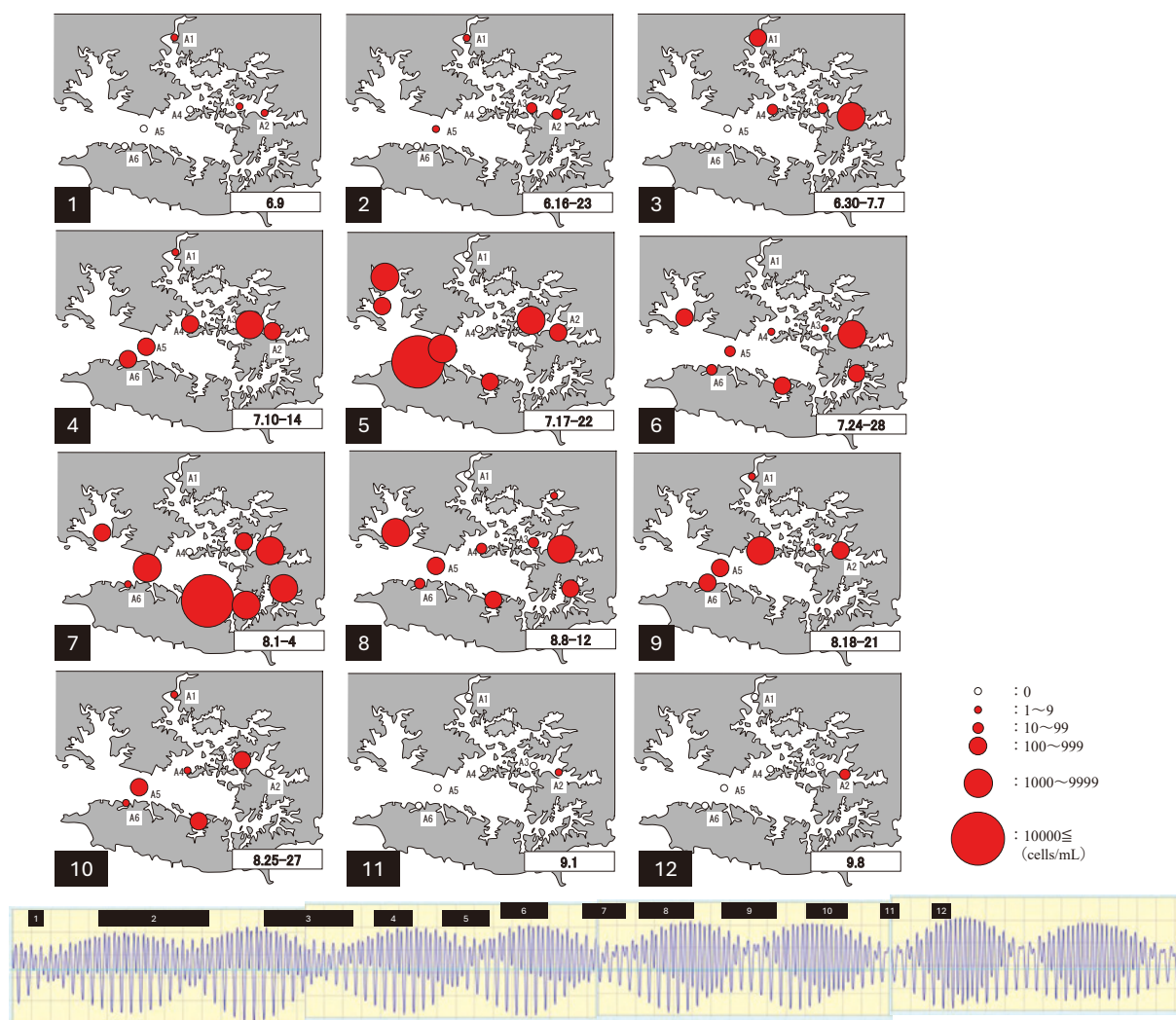


図 11 2025 年の英真湾における *K.mikimotoi* の水平分布とタイドグラフ

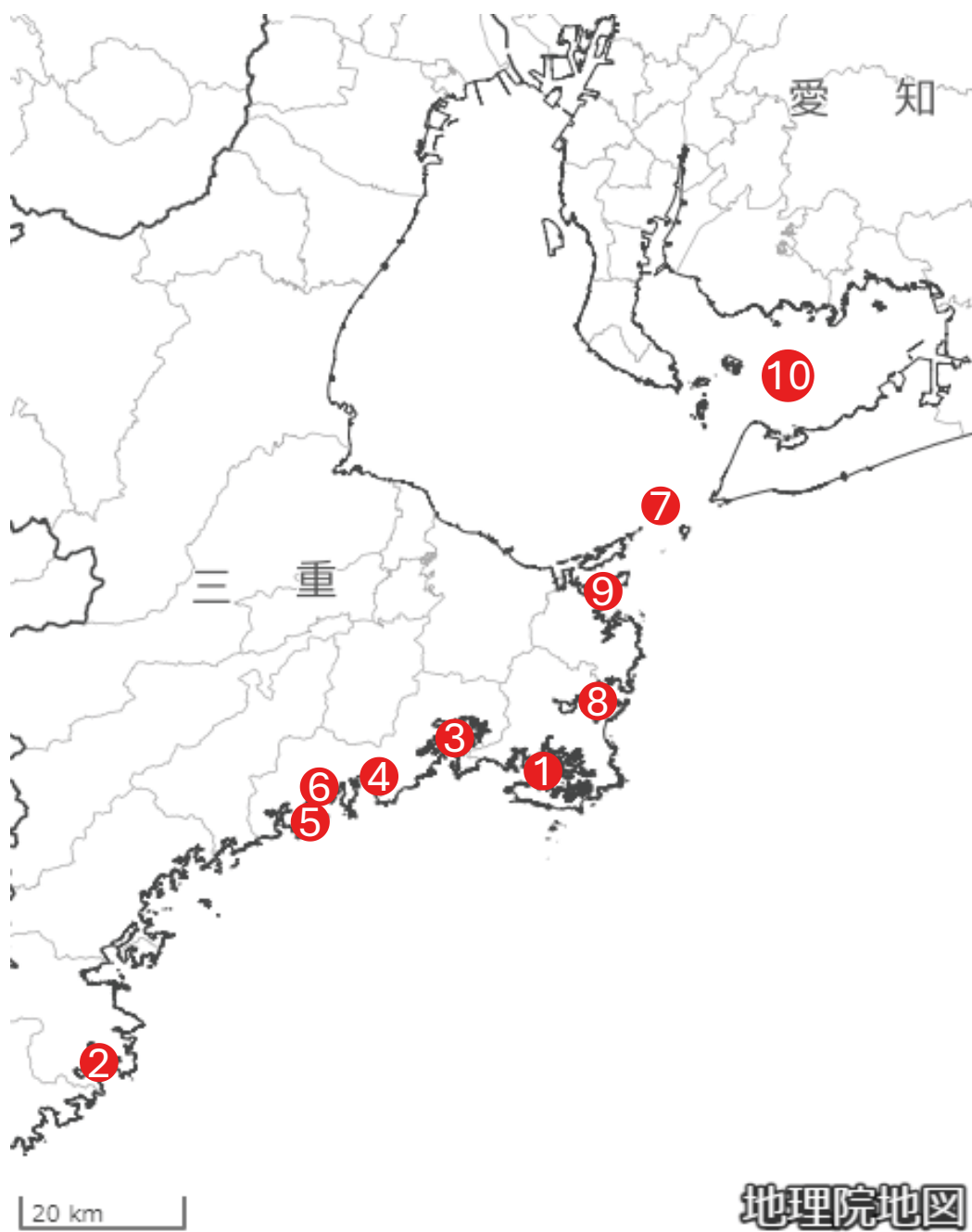


図 12 2025 年の三重県および愛知県沿岸における *K.mikimotoi* 赤潮の発生状況

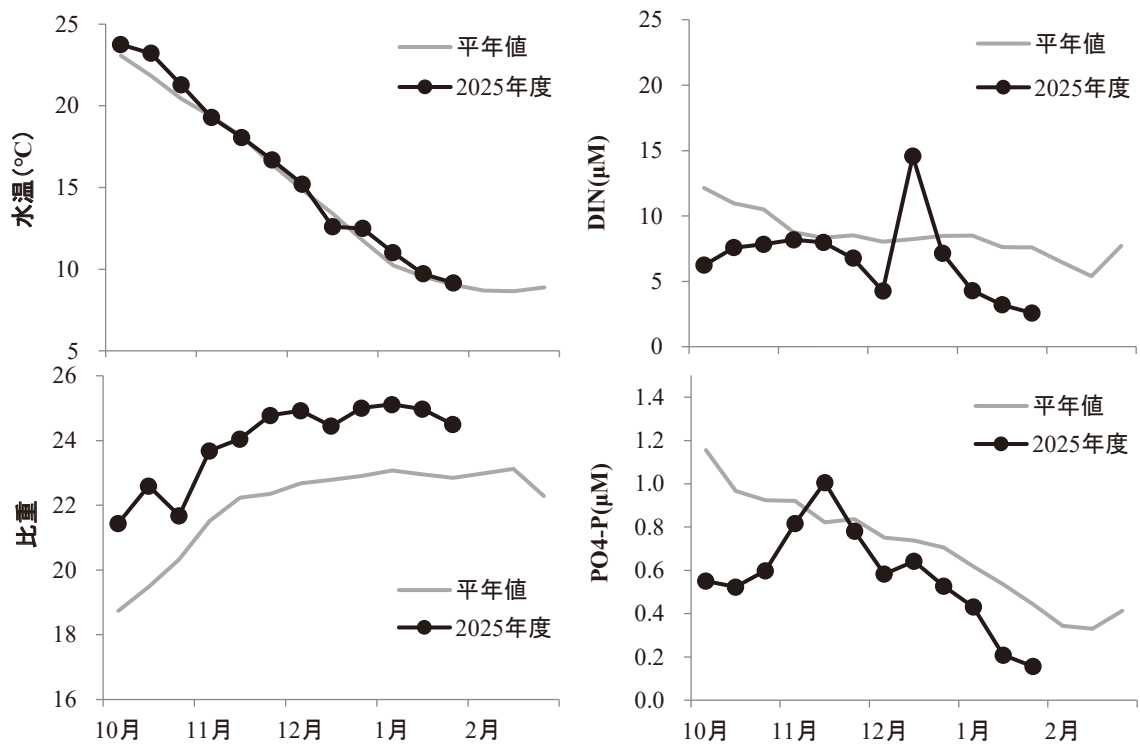


図 13 伊勢湾の表層における水温、比重、DIN、PO₄-P の変化
※平年値 (2005～2024 年度)

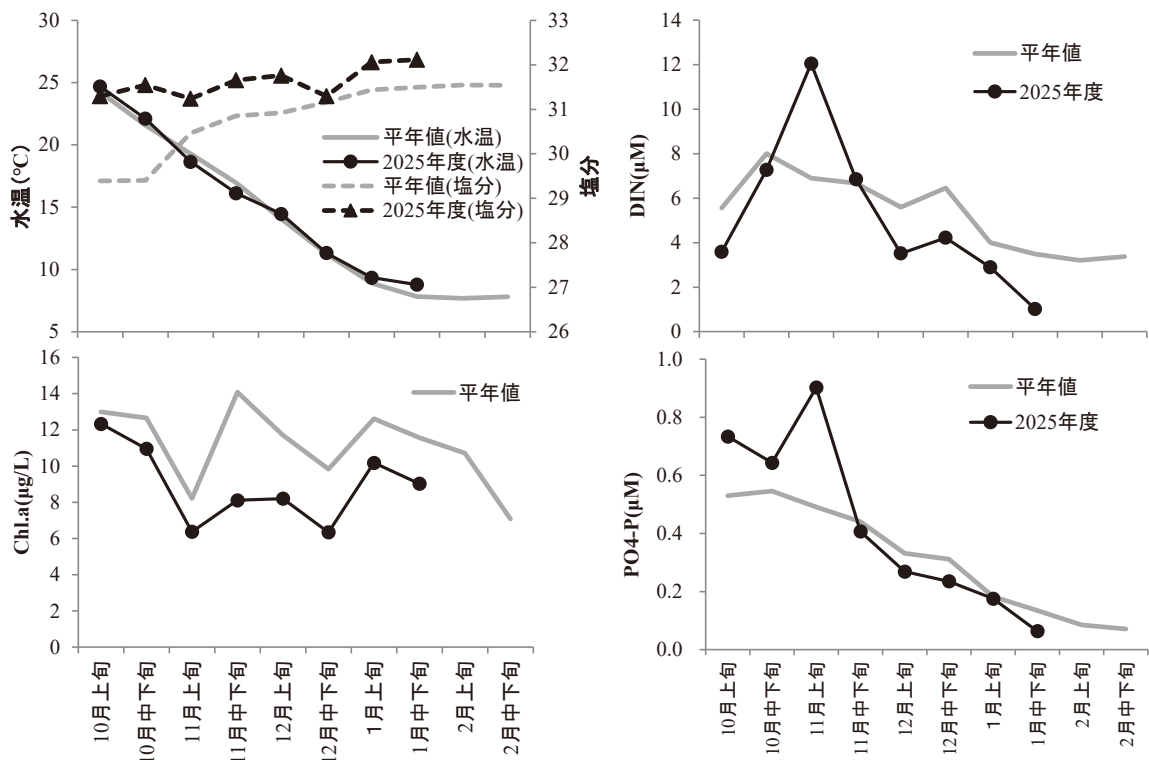


図 14 三河湾の表層における水温・塩分、クロロフィル *a*、DIN、PO₄-P の変化
※平年値 (2005～2024 年度)

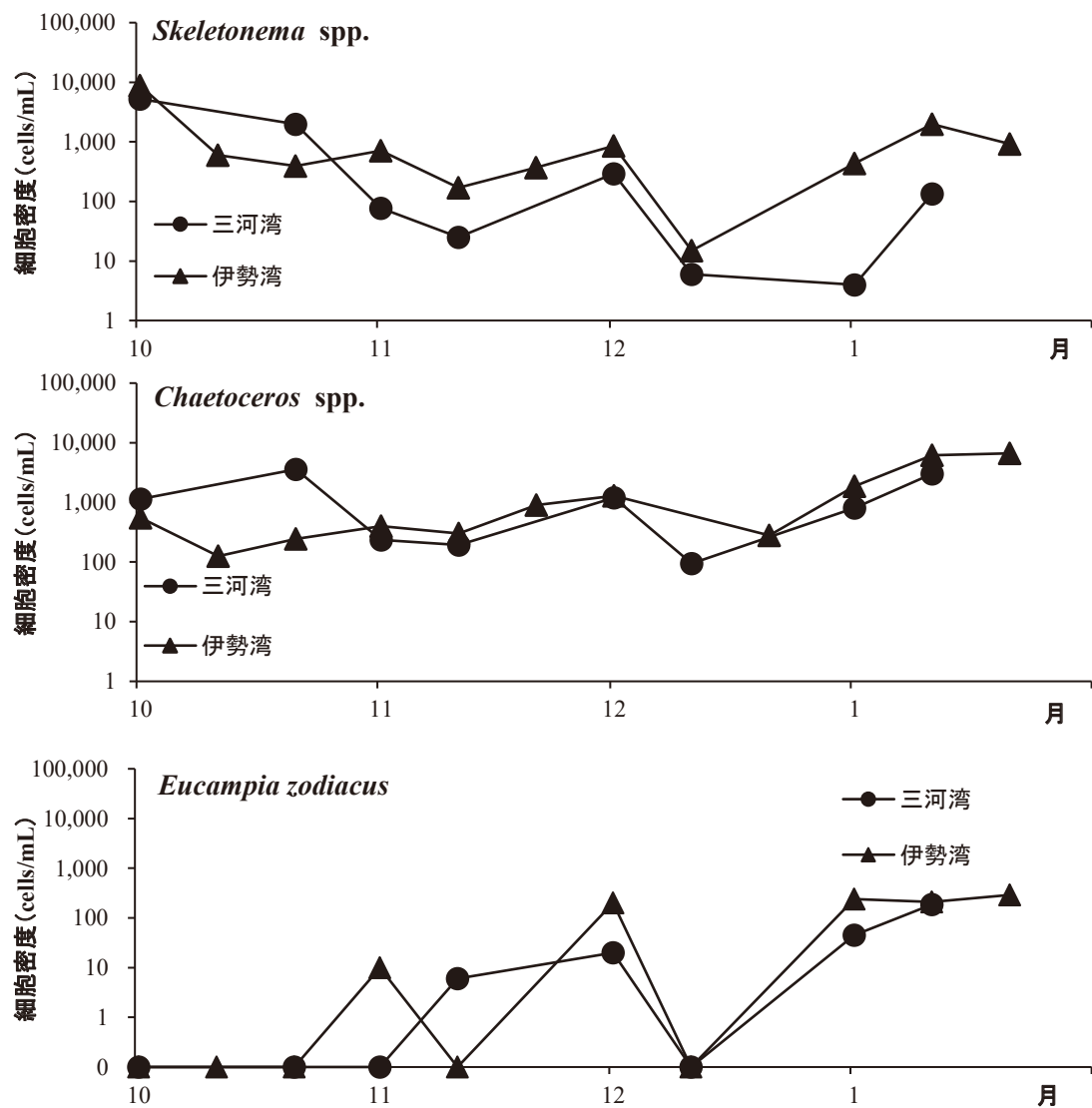


図 15 三河湾（調査点）および伊勢湾（三重県側）における珪藻主要種の最高密度の変化（2025 年度）

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

過去11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							270	17583	44	45		1	○
2016							2	2483	8	15	500	2850	○
2017	1750	104	47	26	18	52	10000	30750	10	14	23	1	○
2018						1	6	1600	250	89	3		○
2019						1	1	2	3	1			×
2020									4				×
2021						7	2250	21000	1		1		○
2022						1	5275	55	8	1	1	1	○
2023									4	1			×
2024									1				×
2025							30	26000	8	43	1		○



図16 各調査点

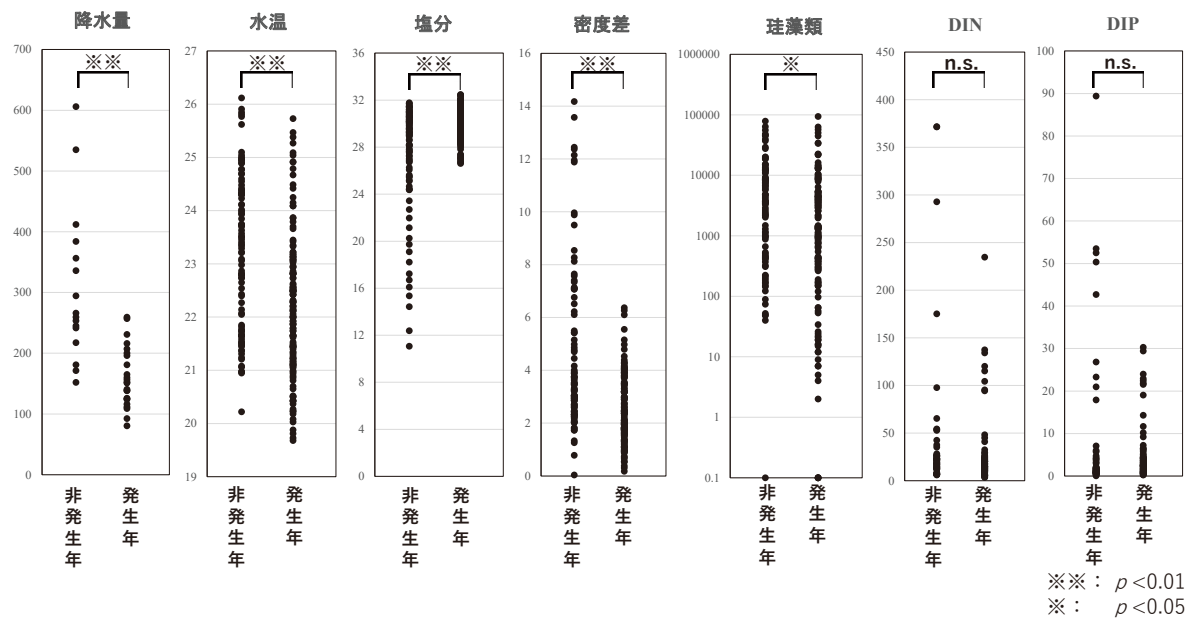


図 17 *K. mikimotoi* 赤潮発生/非発生時の 6 月の海況の比較及び t 検定の結果

表 4 ロジスティック回帰分析から得られた *K. mikimotoi* 赤潮発生/非発生の閾値の検討結果

年		2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	正答率 (2015~24)	2025
<i>K. mikimotoi</i> 赤潮発生 (+)/非発生 (-)		+	+	+	+	-	-	+	+	-	-		+
降水量	$p > 0.8$ PA < 176.3	○	×	×	×	○	○	○	○	○	○	70%	×
	$p > 0.7$ PA < 195.4	○	○	○	×	×	○	○	○	○	○	80%	×
	$p > 0.6$ PA < 211.1	○	○	○	○	×	○	○	○	○	○	90%	×
	$p > 0.5$ PA < 225.4	○	○	○	○	×	○	○	○	○	○	90%	○
水温	$p > 0.8$ temp < 20.82	×	×	×	×	○	○	×	×	○	○	40%	×
	$p > 0.7$ temp < 21.86	○	×	×	○	○	○	×	×	○	○	60%	×
	$p > 0.6$ temp < 22.71	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	90%	×
	$p > 0.5$ temp < 23.50	○	○	○	○	×	○	○	○	×	×	70%	○
塩分	$p > 0.8$ sal > 31.67	×	×	×	×	○	○	×	×	○	○	40%	×
	$p > 0.7$ sal > 30.37	○	○	○	×	○	×	×	×	○	○	60%	×
	$p > 0.6$ sal > 29.31	○	○	○	○	×	×	×	○	○	○	70%	○
	$p > 0.5$ sal > 28.34	○	○	○	○	×	×	○	○	○	×	70%	○
表底層 密度差	$p > 0.8$ den < 1.41	×	×	×	×	○	○	×	×	○	○	40%	×
	$p > 0.7$ den < 2.42	○	○	○	○	○	○	×	×	○	○	80%	×
	$p > 0.6$ den < 3.26	○	○	○	○	×	×	×	○	○	○	70%	×
	$p > 0.5$ den < 4.02	○	○	○	○	×	×	○	○	○	×	70%	○
珥藻類 細胞密度	$p > 0.8$ diatom < -(マイナスとなる)	×	×	×	×	○	○	×	×	○	○	40%	×
	$p > 0.7$ diatom < -(マイナスとなる)	×	×	×	×	○	○	×	×	○	○	40%	×
	$p > 0.6$ diatom = 7268	×	×	×	×	○	○	○	×	×	○	40%	×
	$p > 0.5$ diatom = 27316	○	○	○	○	×	×	○	○	×	×	60%	○

○: 的中
×: 非的中

表 5 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)	年	最高密度 (cells/mL)	年	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	13,980
2002	9	2010	3	2018	2	2026	

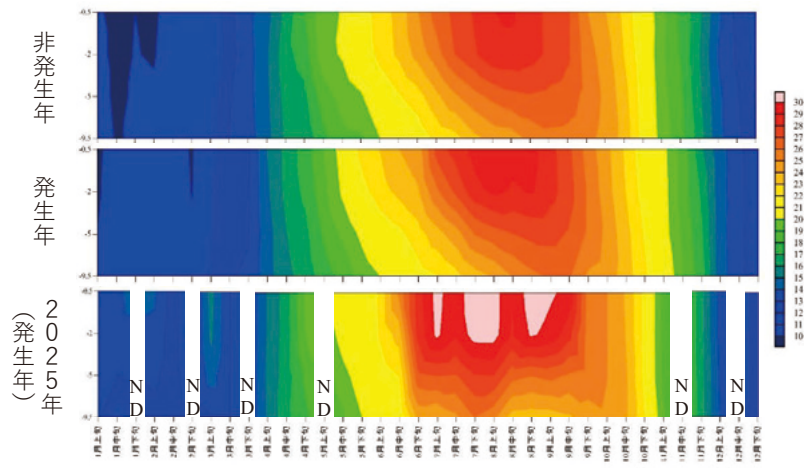


図 18 英虞湾における赤潮発生年と非発生年，2025 年の水温

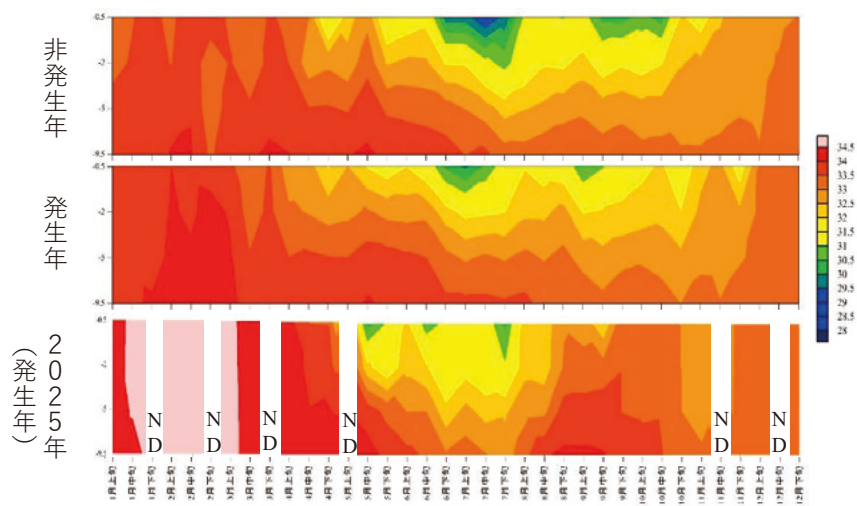


図 19 英虞湾における赤潮発生年と非発生年，2025 年の塩分

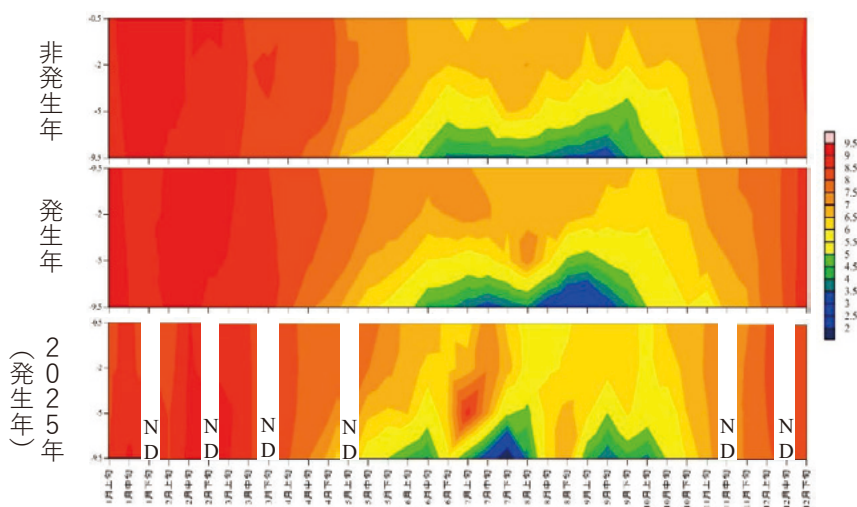


図 20 英虞湾における赤潮発生年と非発生年，2025 年の DO

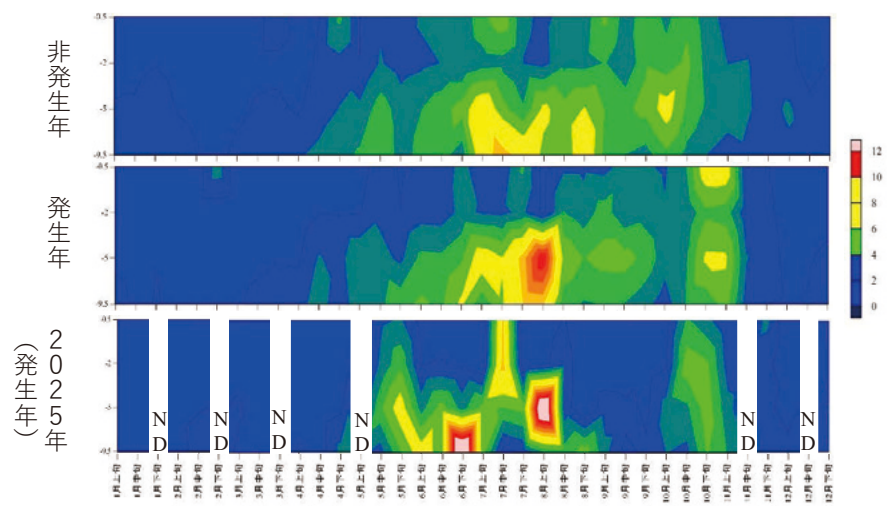


図 21 英虞湾における赤潮発生年と非発生年，2025 年のクロロフィル a 量

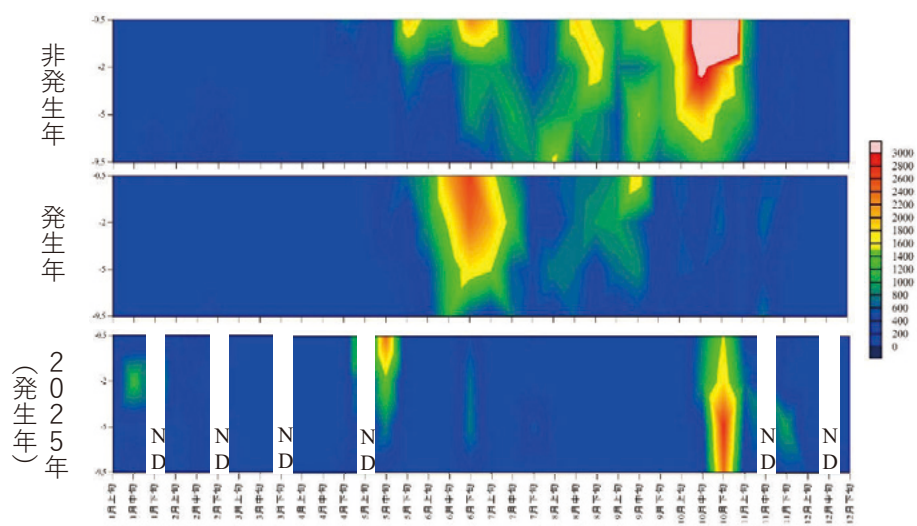


図 22 英虞湾における赤潮発生年と非発生年，2025 年の珪藻類細胞密度

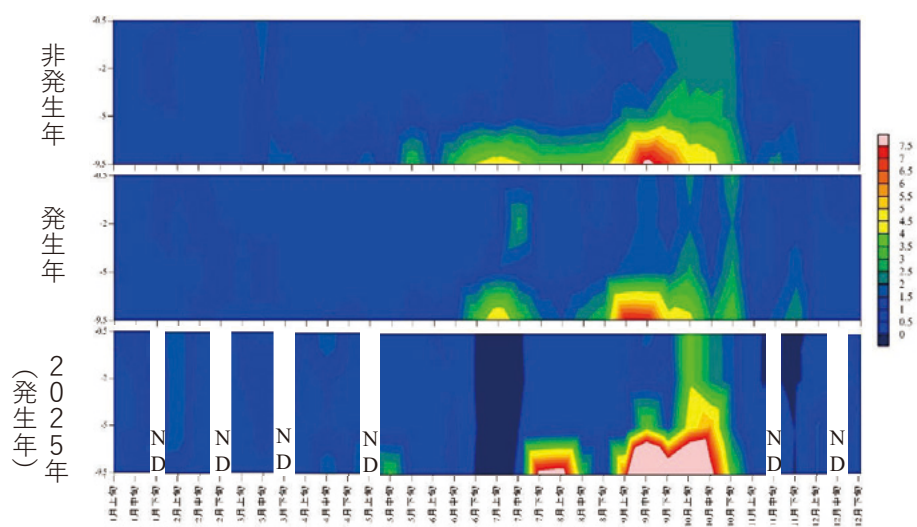


図 23 英虞湾における赤潮発生年と非発生年，2025 年の DIN

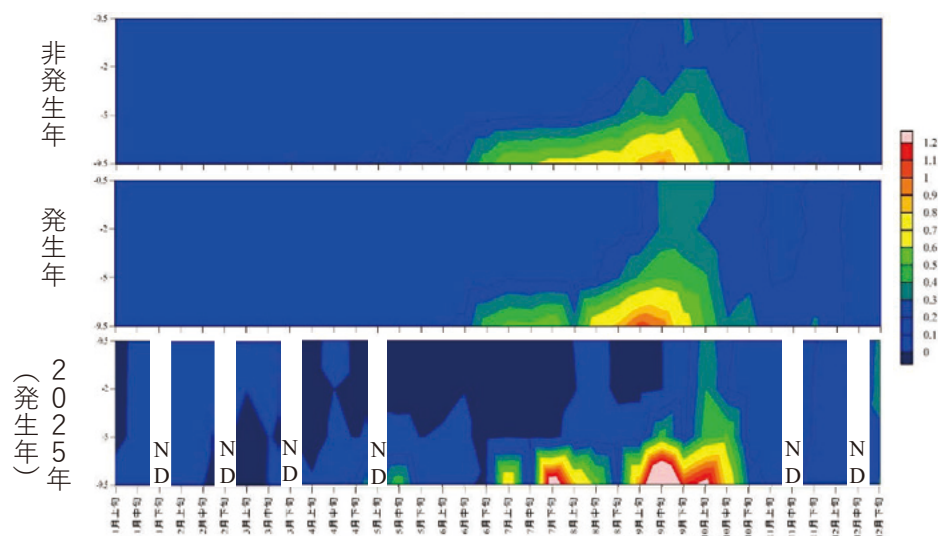


図 24 英虞湾における赤潮発生年と非発生年，2025 年の PO_4

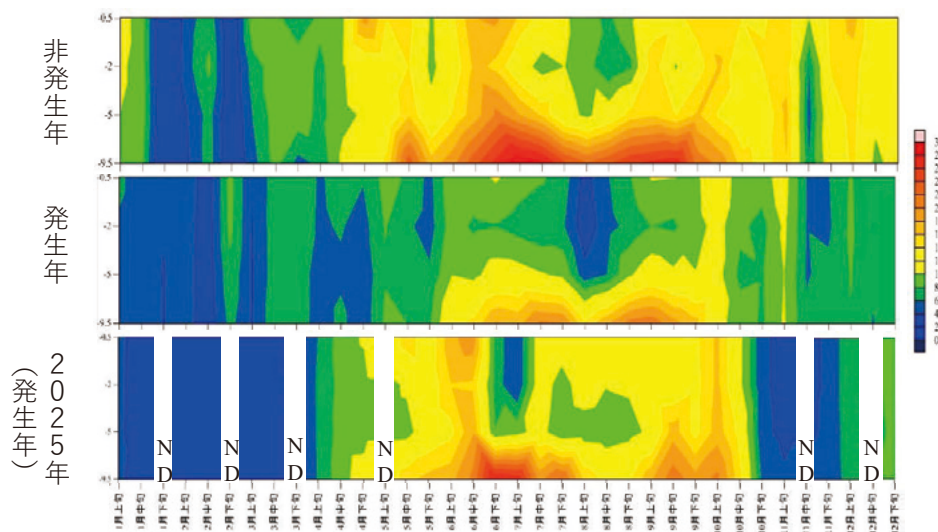


図 25 英虞湾における赤潮発生年と非発生年，2025 年の SiO_2

表 6 LASSO (L1 正則化) 付きロジスティック回帰モデル解析結果

	選択変数 (標準化係数)	変数選択頻度 (5-fold CV)	AUC (mean $\pm$ SD, 5-fold CV)
表層	水温 (+0.012), 塩分 (+0.192), 溶存酸素 (+0.419), DIN (-0.077), PO_4 (+0.432), SiO_2 (-0.545)	水温:0.60, 塩分:1.00, 溶存酸素:1.00, DIN:0.80, PO_4 :1.00, SiO_2 :1.00	0.696 $\pm$ 0.112
B-1m	水温 (-0.174), 塩分 (+0.160), 溶存酸素 (-0.608), DIN (-0.302), PO_4 (+0.325), SiO_2 (-1.047)	水温:1.00, 塩分:1.00, 溶存酸素:1.00, DIN:1.00, PO_4 :1.00, SiO_2 :1.00	0.715 $\pm$ 0.065

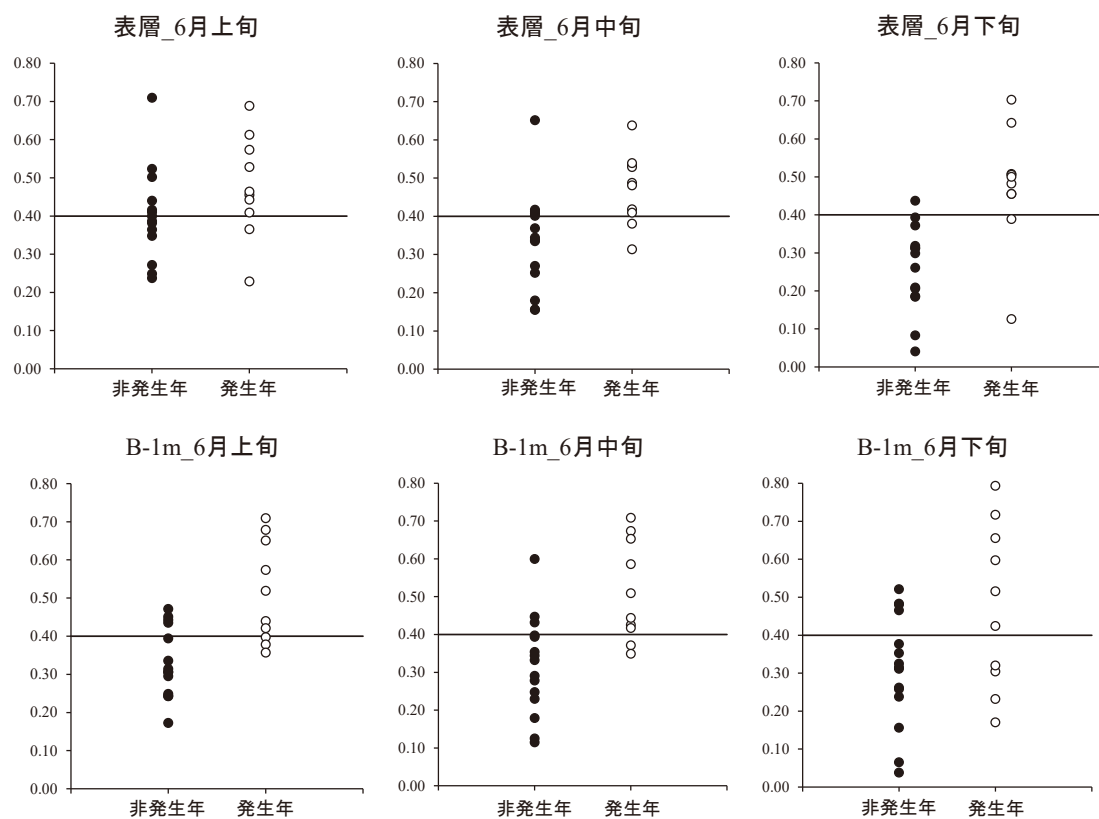


図 26 表層および B-1m の線形予測式による各年の発生確率 p

表 7 表層および B-1m の線形予測式による予測の正誤と正答率

表層 6月上旬	○	×	正答率	表層 6月中旬	○	×	正答率	表層 6月下旬	○	×	正答率
発生	8	2	80	発生	8	2	80	発生	8	2	80
非発生	8	6	57	非発生	9	6	60	非発生	13	2	87
B-1m 6月上旬	○	×	正答率	B-1m 6月中旬	○	×	正答率	B-1m 6月下旬	○	×	正答率
発生	7	3	70	発生	8	2	80	発生	6	4	60
非発生	10	4	71	非発生	12	3	80	非発生	11	4	73

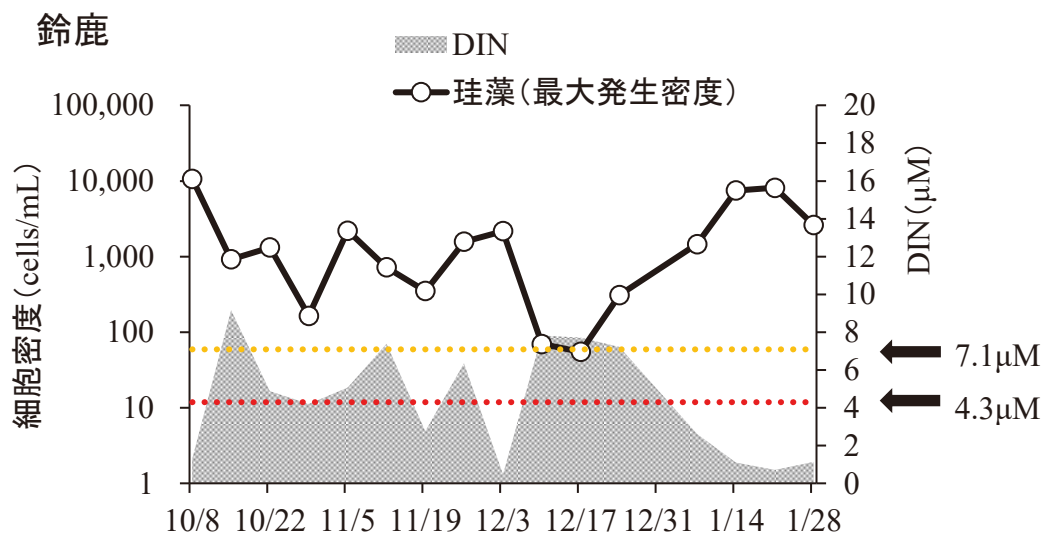


図 27 三重県鈴鹿地先のノリ漁場における珪藻類細胞密度と DIN

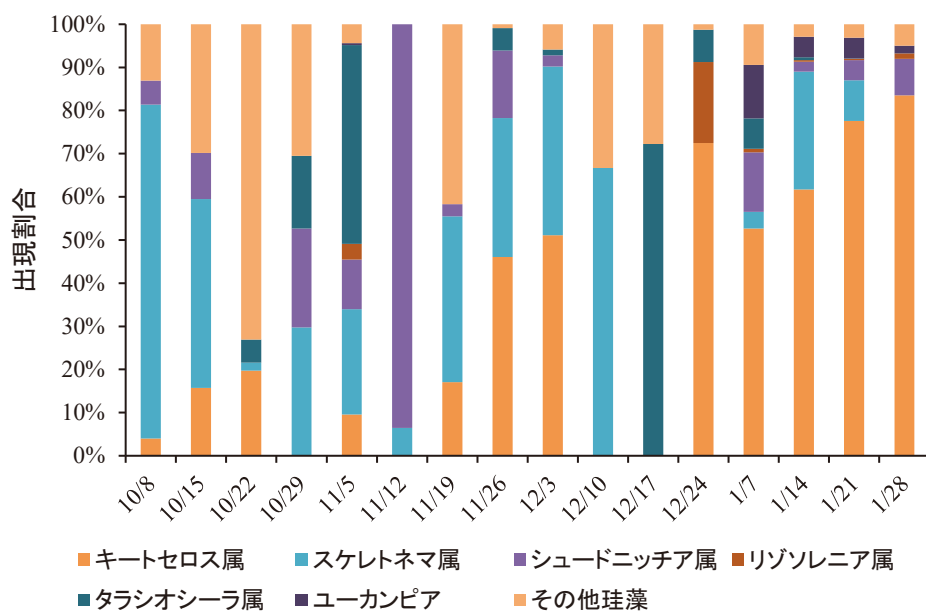


図 28 伊勢湾の三重県側ノリ漁場における珪藻類の種組成

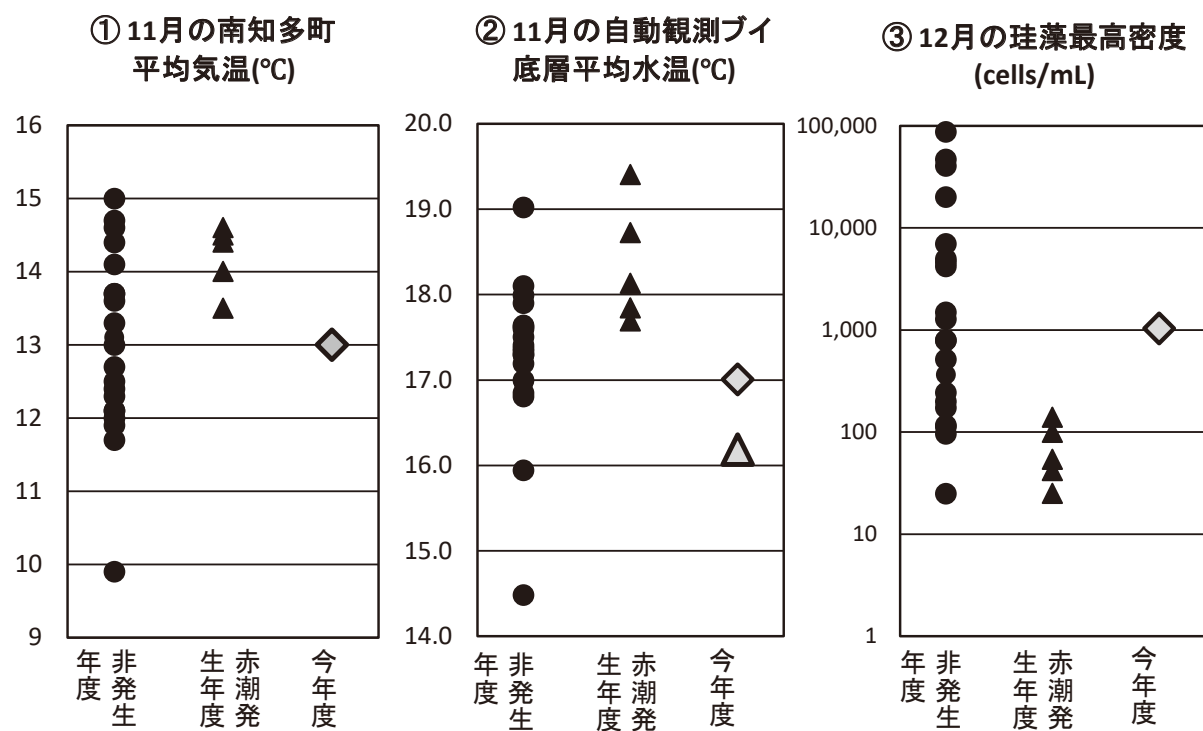


図 29 *E.zodiacus* 赤潮によるノリ色落ち被害予察(2025 年度)