

表 2 2018～2022 年における 3 つの予察指標と赤潮輸送計算結果および山陰沿岸域での *C. polykrikoides* 赤潮発生状況

年	韓国での 赤潮発生	南西風 (沖向き輸送)	対馬暖流 (接岸経路)	赤潮輸送 計算結果	山陰での 赤潮発生
2018	△限定的	×	△	×	×
2019	●	△	●	△	×
2020	△限定的	×	×	×	×
2021	△限定的	×	△	×	×
2022	△限定的	×	●	×	×

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 オ. 九州北部海域

長崎県総合水産試験場
遠山陽香, 戸澤隆, 山砥稔文
佐賀県玄海水産振興センター
津城啓子, 川名拓里, 梅田智樹
九州大学総合理工学研究所
山口創一
水産研究・教育機構 水産資源研究所
青木一弘

1 全体計画

(1) 目的

近年、伊万里湾を中心とする九州北部海域においてカレニア等鞭毛藻による有害赤潮が発生し、魚介類がへい死する漁業被害が発生していることから、各機関が連携して広域共同モニタリングを実施することにより、有害赤潮の監視体制の強化、発生機構の解明と、発生予測技術の開発並びに被害防止技術の開発を行い、有害赤潮等による漁業被害の防止と健全な海洋生態系の保全に資することを目的とした。

2 令和4年度計画および結果

(1) 目的

全体計画と同じ。

(2) 方法

1) 長崎県海域における赤潮モニタリング（長崎県総合水産試験場）

【定点調査】

① 調査定点

伊万里湾内8定点。(Stn. 1～8 : 図1と表1参照)

② 調査回数

6月下旬～8月下旬にかけて、原則1回/週。

③ 調査項目

- ・多項目水質計による鉛直観測（水温、塩分、クロロフィル蛍光値）
- ・プランクトン検鏡（0, 5, 10mおよびクロロフィル蛍光極大層）
- ・栄養塩分析（0, 5, 10m層の $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$ ）

【定点連続観測】

図1および表1のStn. 15の養殖筏において実施した。

① テレメーター（水温、クロロフィル蛍光値、濁度）によるリアルタイムモニタリング

- ・設置期間：6月～8月（3ヶ月間）
 - ・設置水深：1.5m層, 5m層
- 30分毎にデータを取得し、関係機関に専用WEBサイト上で自動送信。

2) 佐賀県海域における赤潮モニタリング（佐賀県玄海水産振興センター）

① 調査定点

伊万里湾内6定点程度。(Stn. 9～14 : 図1と表1参照)

② 調査回数

6～8月：週1回程度。

③ 調査項目

(水質) 水温, 塩分, DO, pH, 栄養塩 ($\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$)

クロロフィル蛍光値

(プランクトン) 有害赤潮プランクトンの同定・計数

④ 調査層

0, 5, (10), B-1 m (水温, 塩分, クロロフィル蛍光値, DO については多項目水質計による鉛直測定を実施)

3) 数値モデル等を用いた解析による発生シナリオの検証 (九州大学総合理工学研究院)

九州北部海域における海況が有害赤潮発生に寄与した可能性について検証するために、九州北部 (対馬海峡) における海峡予測実験 (DREAMS-D) の再解析値または有限体積法沿岸海洋モデル (FVCOM) を組み合わせたシミュレーション結果および収集された観測結果等を用いた。

4) 伊万里湾 *K. mikimotoi* 赤潮発生に寄与する外洋海況条件の検討 (水産研究・教育機構)

Aoki et al. (2020) によって、春季東部海域の全窒素濃度と M_2 潮汐振幅および春季済州一仮屋の水位差を用いた直線判別分析による伊万里湾における *Karenia mikimotoi* 赤潮の予察法が提案された。春季済州一仮屋の水位差については、夏季の伊万里湾下層水温と正相関であることが示され、夏季の湾内環境の代替指標であったことが分かっている (山砥ら 2022b)。しかし、水位データはリアルタイムに入手することが困難なため、予察の実運用を行うためには、春季済州一仮屋の水位差に代わる指標が必要となる。よって、春季済州一仮屋の水位差に代わる湾外環境データの探索を実施した。図2に示す佐賀・長崎県海域の2-4月の基準層水温・塩分値と伊万里湾の *K. mikimotoi* 赤潮出現の関係性を見るために、大規模・小規模発生年 (100cells/mL 以上, 15日以上) とその他の年の差を t 検定を用いて解析した。なお、長崎県海域については 2004 年以前のデータは入手できなかった。済州と仮屋の水位は、Permanent Service for Mean Sea level (<https://www.psmsl.org>) からダウンロードした月平均値を解析に使用した。環境省水環境総合情報サイトの海域データのうち、有田・伊万里川合流地点、木須・楠久中間点、久原貯木場、福田・浦ノ崎中間点、湾奥、福島大橋の6測点を湾東部とし、年別春季 (2-4月) 平均値を解析に使用した。

(3) 結果および考察

1) 植物プランクトンの出現状況

令和4年度調査期間中の伊万里湾における赤潮発生件数は1件で、構成種は *K. mikimotoi* であった。なお、本節における *K. mikimotoi* の赤潮の定義については、山砥・石田 (2016) に基づく警戒基準値の 500 cells/mL 以上とする。*K. mikimotoi* の出現状況を、臨時調査の結果を含めて以下に示す。

① *K. mikimotoi*

令和4年5月2日から9月2日までの *K. mikimotoi* の水平分布図を図3に示す。また、同期間における海域別 (西部, 中部, 東部) の *K. mikimotoi* の細胞密度の推移を図4に示す。ここで示す細胞密度は、各層及びクロロフィル極大層で採水・検鏡された最高値である。*K. mikimotoi* は5月24日に鷹島南部海域で確認 (1 cell/mL) された。6月に福島南東部海域で増殖し (2-16 cells/mL), 7月7日には同海域で着色域が確認され (今回の調査期間における最高細胞密度 27,000 cells/mL), 赤潮を形成した。8月初めには福島北部海域で 2,820 cells/mL, 福島南部海域で 3,030 cells/mL が確認されたものの、8月8日には湾全体で最高細胞密度 32

cells/mL まで減少した。その後、8 月中旬から湾全体で再度増殖がみられ、8 月 17 日には福島北東部海域で 4,900 cells/mL、8 月 19 日には鷹島南西部海域で 1,970 cells/mL が確認される等、湾全域で赤潮化した。8 月 22 日には福島南部海域で 8,300 cells/mL と高密度化した。8 月 24 日には湾全域で 1-22 cells/mL まで減少し、8 月 29 日には衰退した。

2) 水質

① 水温

Stn. 1, 7, 10 及び 14 における令和 4 年 6 月 6 日から 8 月 29 日までの表層及び底層 (B-1 m) の水温の推移を図 5 に示す。表層水温は 22.2~30.5℃、底層水温は 20.3~29.7℃の範囲で推移した。

② 塩分

Stn. 1, 7, 10 及び 14 における令和 4 年 6 月 6 日から 8 月 29 日までの表層及び底層 (B-1 m) の塩分の推移を図 6 に示す。表層塩分は 23.3~34.0、底層塩分は 31.3~34.4、の範囲で推移した。

③ DO

Stn. 1, 7, 10 及び 14 における令和 4 年 6 月 6 日から 8 月 29 日までの表層及び底層 (B-1 m) の DO の推移を図 7 に示す。表層 DO は 56.9~136.2%, 底層 DO は 43.6~102.9% の範囲で推移した。

④ DIN

Stn. 1, 7, 10 及び 14 における令和 4 年 6 月 6 日から 8 月 29 日までの表層及び 10 m 層の DIN の推移を図 8 に示す。表層 DIN は 0.00~59.20 μ M, 10 m 層 DIN は 0.00~10.17 μ M の範囲で推移した。

⑤ PO₄-P

Stn. 1, 7, 10 及び 14 における令和 4 年 6 月 6 日から 8 月 29 日までの表層及び 10 m 層の PO₄-P の推移を図 9 に示す。表層 PO₄-P は 0.00~1.25 μ M, 10 m 層 PO₄-P は 0.00~0.40 μ M の範囲で推移した。

⑥ 水温 (定点連続水温)

Stn. 15 の水深 1.5 m 層, 5 m 層における令和 4 年 6 月 27 日から 8 月 31 日までの水温連続観測結果と、令和 2 年 (赤潮非発生年) の日平均水温を図 10 に示す。本年の観測結果は、1.5 m 層は 24.5~29.9℃ (令和 2 年: 23.3~30.1℃), 5 m 層は 24.1~29.7℃ (令和 2 年: 22.7~28.7℃) の範囲で推移した。

3) *K. mikimotoi* 赤潮と環境要因の関係

① 気象, 海象

令和 4 年 3 月上旬から 9 月下旬までの伊万里の平均気温、降水量及び日照時間の旬別の推移を図 11 に示す。令和 4 年の旬別平均気温は、7.8~29.5℃ (平年値 8.2~27.9℃) で推移し、3 月中下旬, 4 月下旬, 5 月下旬, 6 月下旬, 7 月上旬, 8 月上旬, 9 月中旬は平年値を 1℃以上上回った。旬別降水量は、0~270 mm (平年値 54.9~192.7 mm) で推移し、平年値を大きく下回る旬が半数以上あった。旬別日照時間は、29.4~109.2 時間 (平年値 26.9~77 時間) で推移し、3 月上旬, 4 月上旬, 6 月下旬, 7 月上旬に平年値を大きく上回った。

K. mikimotoi 赤潮の発生要因としては、小潮期である 7 月初旬に降水 (松浦: 7 月 5 日: 24.5 mm) があったことで栄養塩が供給されたことに加え、連吹していた北向きの風が弱まり、南向きに変ったことで、湾奥側で増殖・集積する環境が整ったと考えられた (図 12)。また、8 月中旬以降の赤潮の高密度化の要因としては、8 月中旬のまとまった降雨により低塩分化し、栄養塩が供給されたことが一因と考えられた。

② 水温, 塩分

K. mikimotoi 赤潮の発生要因としては、7月初旬に底層までの水温が 23℃を超え、*K. mikimotoi* の好適増殖範囲（23-27℃）に達したことが考えられた（図 5, 図 13）。また、8月中旬以降の赤潮の高密度化の要因としては、*K. mikimotoi* の増殖に適した環境から外れつつあった環境が、8月中旬のまとまった降雨により、低塩分化したことで、再度 *K. mikimotoi* の増殖に適した環境になったことが一因と考えられた（図 6, 図 13）。

③ DIN, PO₄-P

K. mikimotoi 赤潮の発生要因としては、7月初旬の降雨により栄養塩が供給されたことが考えられた。また、8月中旬以降の赤潮の高密度化の要因としては、8月中旬のまとまった降雨により、栄養塩が供給されたことが一因と考えられた（図 8, 図 9）。

④ 有害種と珪藻類の競合

令和 4 年 6 月 27 日から 8 月 29 日までの *K. mikimotoi* と珪藻類の細胞密度（全地点平均値）の推移を図 14 に示す。*K. mikimotoi* が高密度に存在していると、珪藻類が少ない傾向にあり、*K. mikimotoi* と珪藻類は競合関係にあると考えられた。

4) 漁業被害

令和 4 年 7 月上旬から 8 月下旬まで伊万里湾で赤潮が発生し、佐賀県海域で養殖トラフグ、マサバ等に約 32,174 千円、長崎県海域で養殖クロマグロ、トラフグ等に約 3,527 千円の漁業被害が発生した。

5) 数値モデル等を用いた解析による発生シナリオの検証（九州大学総合理工学研究院）

K. mikimotoi 赤潮の挙動を再現するには背景場となる物理環境の再現が必要不可欠であり、発生前には河川流量の増大も見られている。したがって数値シミュレーションで赤潮挙動を再現・予測するには淡水流入量の高精度推定が必要となる。そこで高解像度沿岸海洋モデル（FVCOM; Chen et al. 2006）に陸域の淡水挙動を再現する降雨流出氾濫モデル（Rainfall-Runoff-Inundation model: RRI, 佐山ら 2013）を組み合わせた領域一体型数値モデル（FVCOM-RRI）を開発し、*K. mikimotoi* 赤潮の日周鉛直移動を組み込んだ粒子追跡モデルによる動態再現を試みた。

2012 年に発生した移流型赤潮（山砥ら 2016）を対象として FVCOM-RRI を適用した結果、湾内の水温・塩分・密度環境の再現性に改善が確認され、特に河川出水に伴う変動をより高精度に再現することに成功した。再現された物理環境を基に *K. mikimotoi* による能動的日周鉛直移動を組み込んだ粒子追跡実験を行った。図 15 は高島南部に位置する Sta. A および Sta. B における細胞数と粒子数変動を示した。粒子数は細胞数と直接比較できるものではないが、その変動から鷹島南部において 7 月中旬に確認された赤潮の移流に伴う細胞数の急激な上昇の再現に成功した。

6) 伊万里湾 *K. mikimotoi* 赤潮発生に寄与する外洋海況条件の検討（水産研究・教育機構）

2-4 月における佐賀県海域各測点・各水深における水温・塩分値が、大規模・小規模発生年（100 cell/mL 以上、15 日以上）とその他の年で異なるか検定（t 検定）した結果（危険率 p 値）を図 16 に示す。p 値が 0.1 以下であったのは、伊万里湾から遠い測点 8-11 であった。長崎県海域の 2-3 月では五島灘で p 値が 0.1 以下になり、4 月では伊万里湾に近い測点 7 と 8 の表層水温で p 値 0.1 以下となった（図 17）。4 月以降の 5 月および 6 月でも、測点 7-12 で 0.1 以下となる測点・水深が多く見つかった。特に 6 月が顕著で、五島北沖の測点 8-12 において、0-20m 深水温の殆どが 0.1 以下であった（図 18）。春季済州一仮屋の水位差と本解析で用いた長崎県海域水温の関係を確認するために、長崎県海域の測点 7 と 8 における 4 月平均表層水温と春季済州一仮屋の水位差の相関関係を確かめたところ、正の相関関係が認められ（図 19）、春季済州一仮屋の水位差が九州西岸域の水温場を決める一因になっていることが再確認された。

本解析で見出された 4 月表層水温（長崎県測点 7&8）、5 月 0-10m 深水温（長崎県測点 8）、6

月 0-10 m 深水温（長崎県測点 8-12）と春季東部海域の全窒素濃度を用いて、赤潮の小・大規模発生年とその他の年の直線判別分析を行った（図 20）結果、いずれの判別式も高水温および高全窒素という条件で赤潮が発生しやすい傾向にあった。また、4 月から 6 月にかけて赤潮期に近づくにつれ、誤判別数が徐々に少なくなっていることが確認された。

3 5 年間のまとめ

伊万里湾における *K. mikimotoi* 赤潮の発生機序について整理した（山砥ら 2022a）。

2012 年に発生した移流型赤潮（山砥ら 2016）を対象に FVCOM-RR1 を適用した結果、湾内の水温・塩分・密度環境の再現性に改善が確認され、さらに能動的日周鉛直移動を組み込んだ粒子追跡実験では、*K. mikimotoi* 赤潮の挙動を再現することができた。

2017 年や 2019 年の大規模 *K. mikimotoi* 赤潮発生に流れ場による拡散が寄与している事が、流動モデルを用いた計算結果から示された（Aoki et al. 2019）。その発生機序は、湾東部にある福島や鷹島の周辺海域で発生した赤潮が、西向きの風等により駆動された表層西向流によって、湾西部まで移流されたというものであった。また、赤潮を含む表層水が西に移流した際に、下層では東向きの補償流が形成され、湾外の低温・高栄養塩水が湾内に流入していることも示され、その外洋起源栄養塩が赤潮の維持・長期化に貢献したと考えられた。

湾内外の環境因子による伊万里湾の *K. mikimotoi* 赤潮発生の中長期予察技術を提案した。春季東部海域の全窒素濃度・ M_2 潮汐振幅・春季済州－飯屋の水位差・春夏季湾外水温を用いた直線判別式により、赤潮期前にその発生を予察できることが分かった（Aoki et al. 2020）。

本事業を実施した平成 30 年から令和 4 年において、*K. mikimotoi* 赤潮が発生しなかったのは令和 2 年のみであった（表 2）。令和 2 年の赤潮非発生の要因については、*K. mikimotoi* が増殖を始める 4 月の気温が例年より低く推移しており、水温が低く推移したことで増殖が抑制された可能性がある（図 10）。

平成 29 年の *K. mikimotoi* 赤潮による甚大な漁業被害（約 6.1 億円）を受けたことで、伊万里湾では、関係者が密に連携する広域共同モニタリング調査が本事業等により強化され、調査結果は web 等で有機的かつ即時に共有されるようになった。このことが有害赤潮の防除等対策の効率的実施を促しており、結果として、平成 30 年以降、*K. mikimotoi* 赤潮は頻繁に発生しているものの、億レベルの大きな漁業被害額は記録されていない。今後も本事業等の取組を継続実施することが漁業被害の抑制に資するものと考えられる。

引用文献

- Aoki K, Kuroda H, Setou T, Okazaki M, Yamatogi T, Ishida N, Hirae S, Yoshida K, Mitoya Y. Exceptional red-tide of fish-killing dinoflagellate *Karenia mikimotoi* promoted by typhoon-induced upwelling. *Estuar. Coast Shelf Sci.* 2019; **219**:14-23.
- Aoki K, Yamatogi T, Hirae S, Yamamoto K, Yoshida K, Muta K. Increased occurrence of red-tides of fish-killing dinoflagellate *Karenia mikimotoi* and related environmental conditions in Imari Bay, Japan. *Regional Studies in Mar. Sci.* 2020; **39**:101470.
- Chen C, Beardsley RC, Cowles G. An unstructured-grid finite-volume coastal ocean model (FVCOM) system. *Oceanogr.* 2006; **19**: 78-89.
- 佐山敬洋, 建部祐哉, 藤岡 奨, 牛山朋来, 田中茂信. 大規模洪水氾濫の時空間資源分析に関する研究. 水工学論文集 2013 ; **57** : I_463-I_468.
- 山砥稔文. 九州沿岸に分布する有害渦鞭毛藻 *Cochlodinium polykrikoides* の生理生態学的研究. 長崎県総合水産試験場研究報告 2006 ; **32** : 23-90.
- 山砥稔文, 石田直也. 島嶼海域での低密度赤潮による新たな漁業被害の発生. 「有害有毒プランク

- トンの科学」(今井一郎・山口峰生・松岡數充編) 恒星社厚生閣, 東京. 2016 ; 131-138.
- 山砥稔文, 石田直也, 平江 想, 杉原志貴, 鎌田正幸, 西山嘉乃, 青木一弘. 2012 年伊万里湾で発生した有害渦鞭毛藻 *Karenia mikimotoi* 赤潮の環境特性と養殖トラフグの大量斃死. 藻類 2016 ; **64** : 94-101.
- 山砥稔文, 津城啓子, 山口創一, 青木一弘. 赤潮の発生シナリオと予察 九州北部海域 (伊万里湾). 月刊養殖ビジネス 2022a ; **13** : 34-40.
- 山砥稔文, 山本佳奈, 中島吉洋, 梅田智樹, 津城啓子, 川名拓里, 山口創一, 青木一弘. 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 オ. 九州北部海域. 令和3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, 赤潮共同研究機関, 2022b; 155-165.

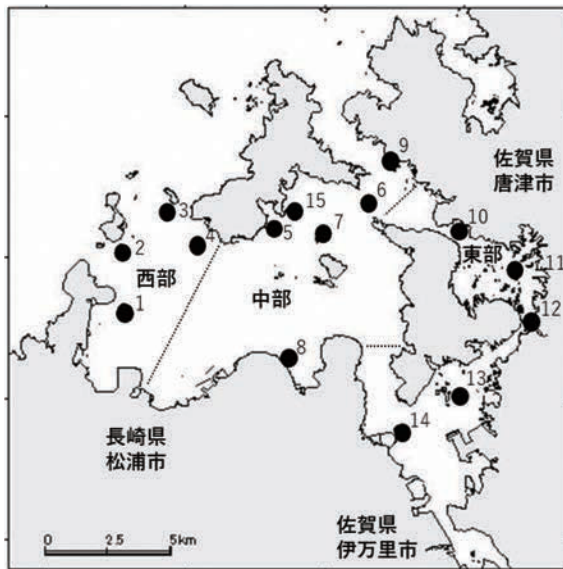


表 1 伊万里湾における調査定点座標

定点番号	緯度経度	
	北緯	東経
1 (城山下)	33°22' 56.64"	129°41' 22.92"
2 (青島南)	33°24' 13.68"	129°41' 18.24"
3 (魚固島南)	33°25' 04.08"	129°42' 32.04"
4 (船唐津沖)	33°24' 18.36"	129°43' 15.24"
5 (浦下沖)	33°24' 42.12"	129°45' 15.48"
6 (初崎沖)	33°25' 13.80"	129°47' 35.52"
7 (山島東)	33°24' 31.32"	129°46' 27.48"
8 (今福沖)	33°21' 51.12"	129°45' 40.32"
9 (晴気)	33°26' 03.00"	129°48' 16.80"
10 (阿漕)	33°24' 34.80"	129°49' 55.80"
11 (大浦浜)	33°23' 47.40"	129°51' 24.60"
12 (波多津)	33°22' 38.40"	129°51' 49.20"
13 (福島南)	33°21' 03.60"	129°50' 00.60"
14 (伊万里港入口)	33°20' 21.60"	129°48' 26.40"
15 (南ヶ崎)	33°25' 02.00"	129°45' 39.00"

図 1 伊万里湾における調査定点 (Stn. 15 は連続観測定点)

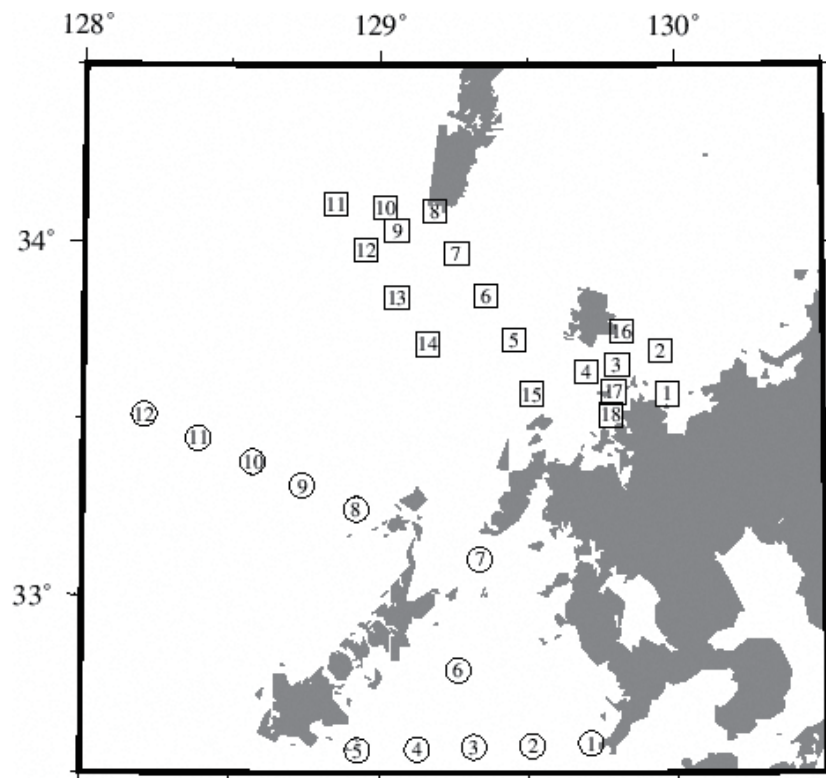


図 2 佐賀県 (□)・長崎県 (○) の沿岸定線調査点

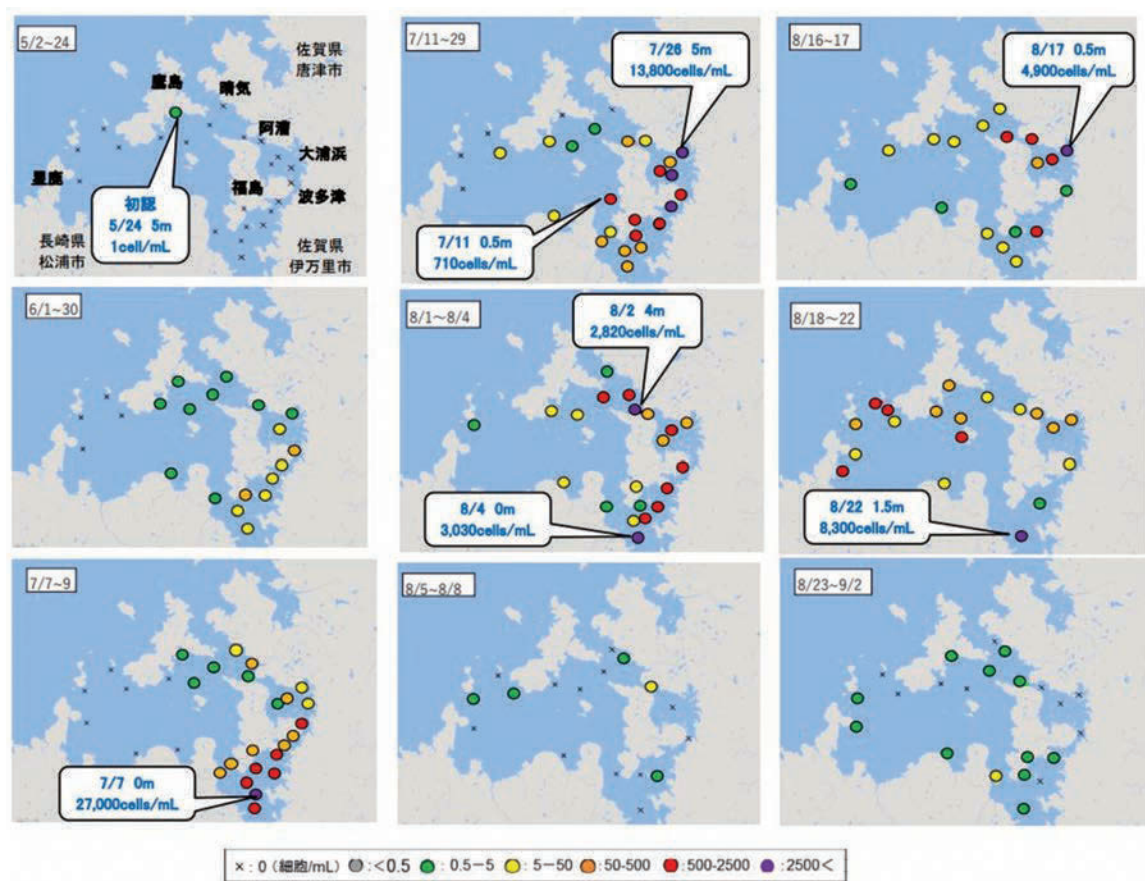


図3 *K. mikimotoi* の水平分布（複数層採水による最高細胞密度）

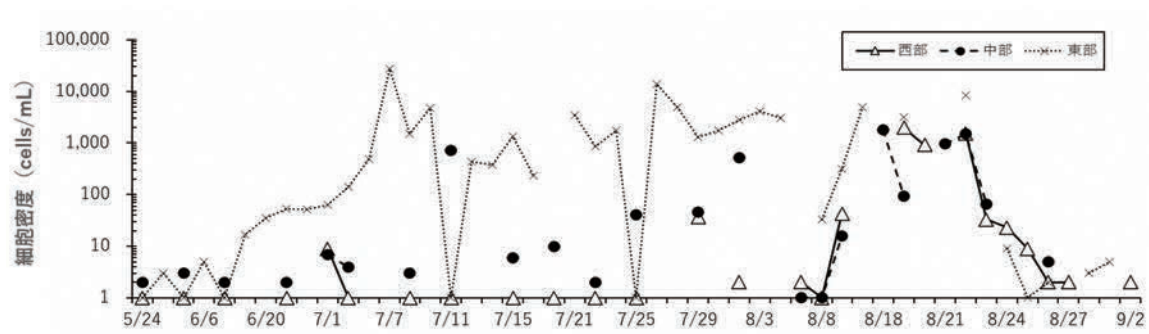


図4 海域別の最高細胞密度の推移

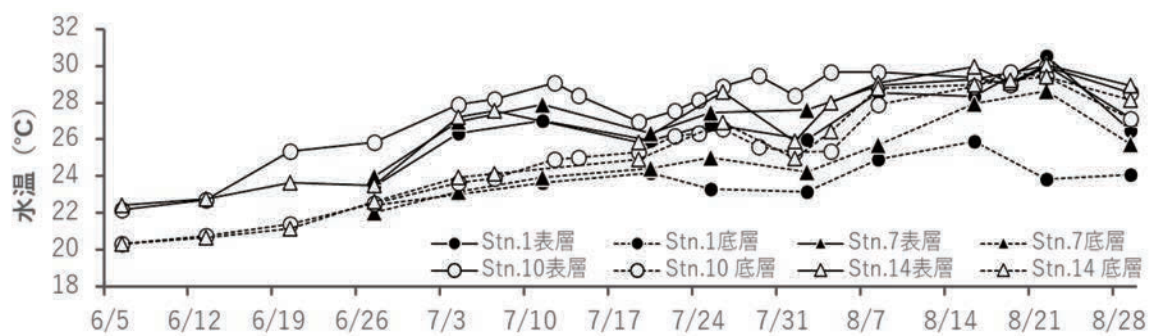


図5 Stn.1, 7, 10, 14における水温の推移

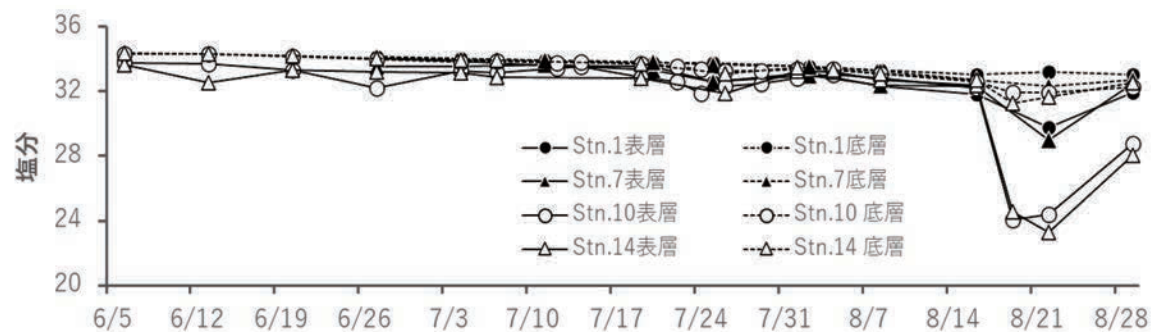


図6 Stn.1, 7, 10, 14における塩分の推移

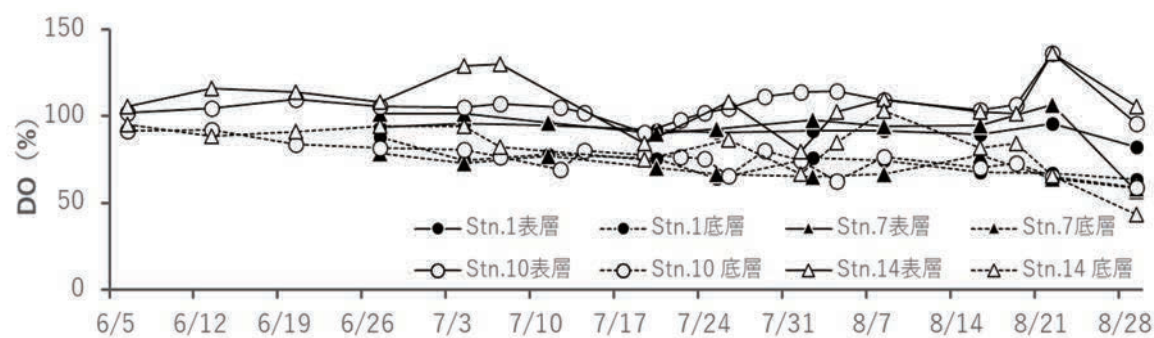


図7 Stn.1, 7, 10, 14におけるDOの推移

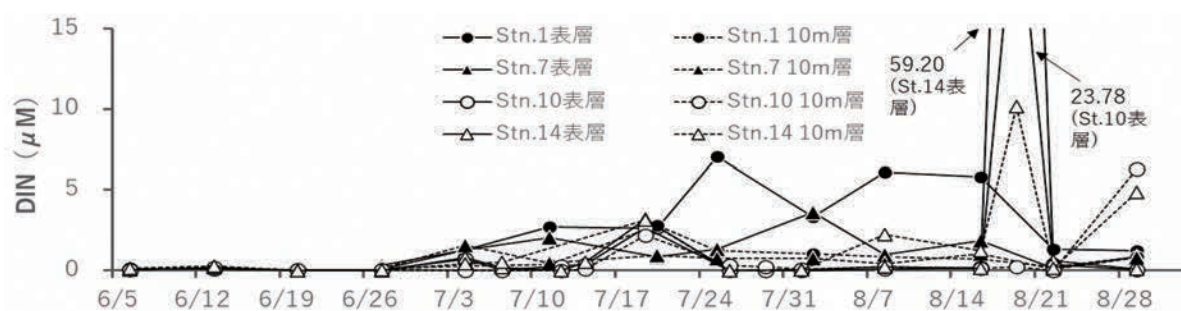


図8 Stn.1, 7, 10, 14におけるDINの推移

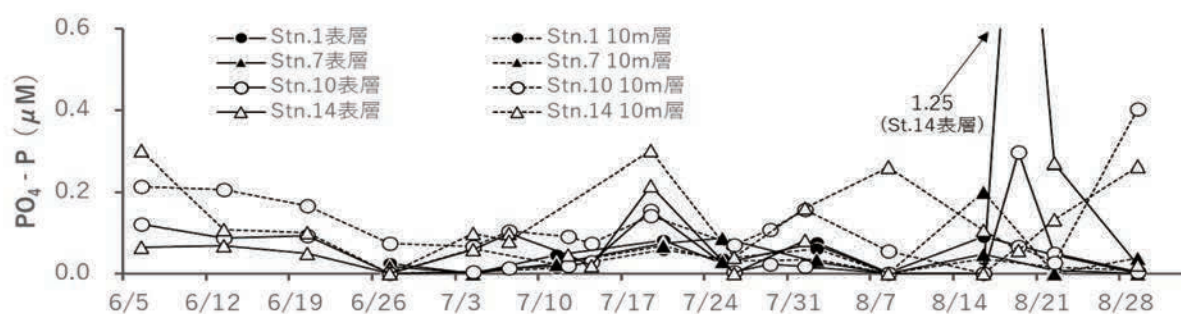


図9 Stn.1, 7, 10, 14における $\text{PO}_4\text{-P}$ の推移

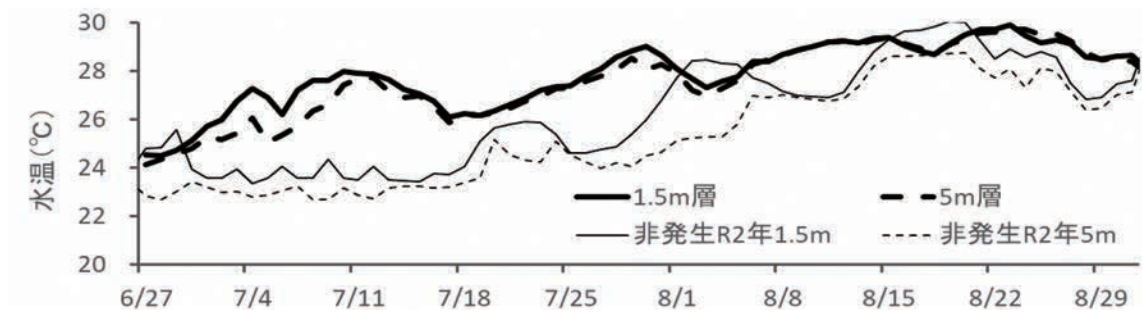


図 10 Stn. 15における水温の推移

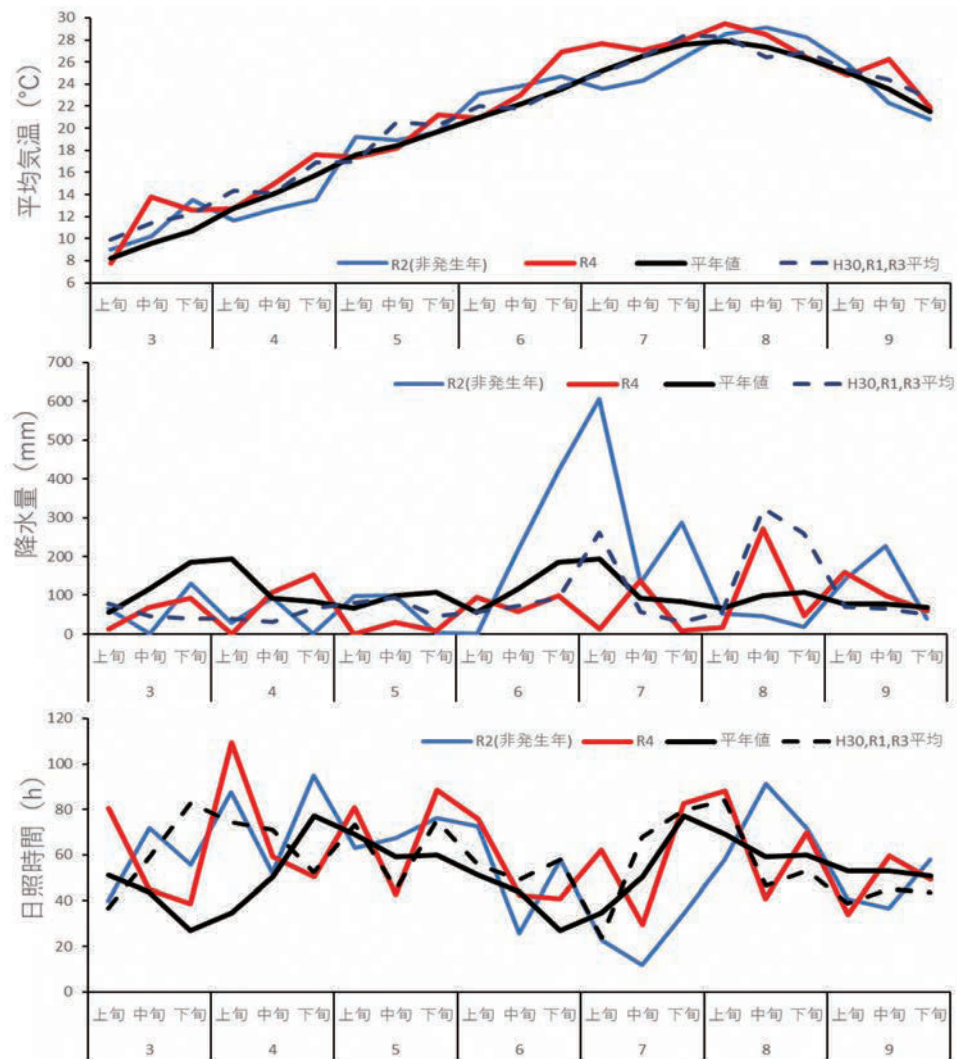


図 11 伊万里における旬別平均気温、降水量、日照時間の推移

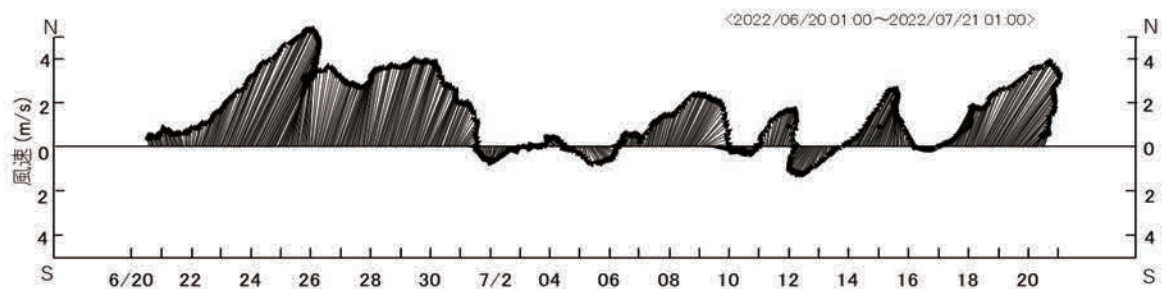


図 12 松浦における風ベクトルの推移