

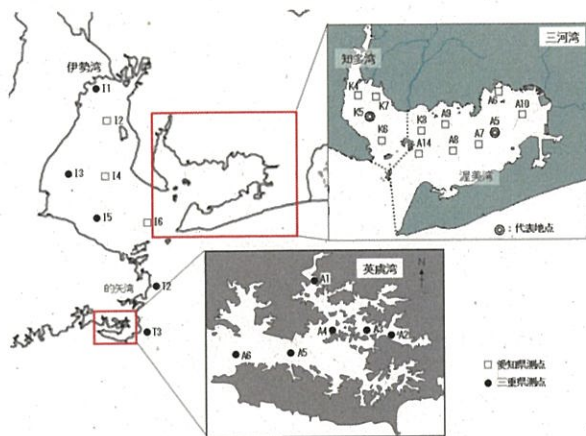


図 1 有害赤潮 調査地点図

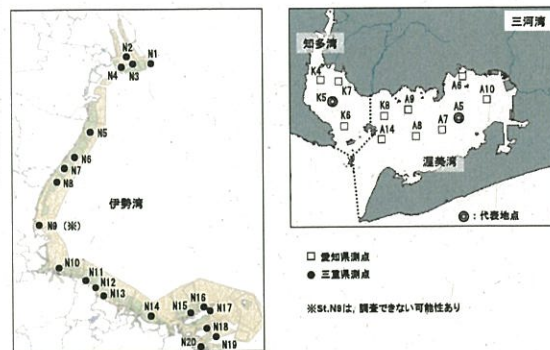


図 2 ノリ色落ち原因珪藻 調査地点図

表 1 有害赤潮 調査項目

		三重県	愛知県
調査項目	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 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
調査項目	調査点数	伊勢湾ノリ漁場 (St. N1~N6, N8~N20) : 19 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	○	○

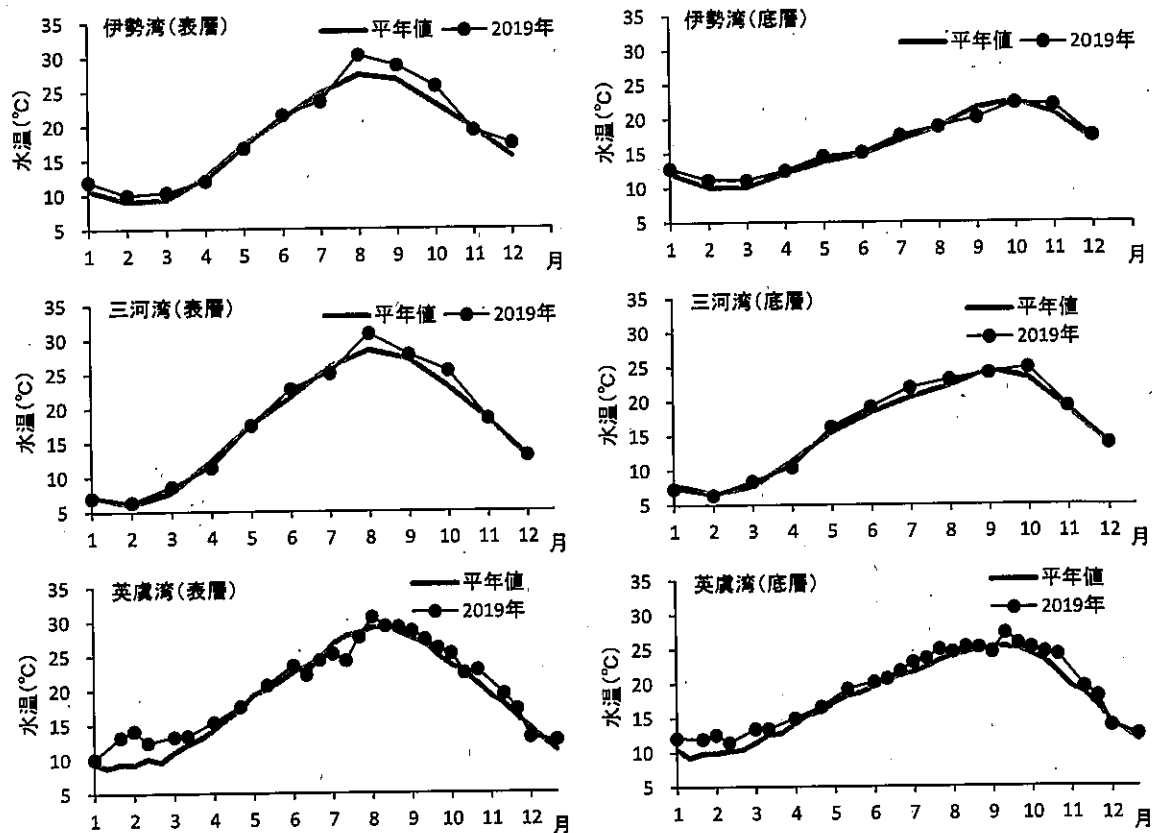


図3 表層と底層における水温の変化 (伊勢湾 St.I4, 三河湾 St.A5, 英虞湾 St.A3)
 ※平年値: 伊勢湾 (2000~2018 年度), 三河湾 (2000~2018 年度), 英虞湾 (1993~2018 年度)
 ※1~3 月は前年度の値。以下同様。

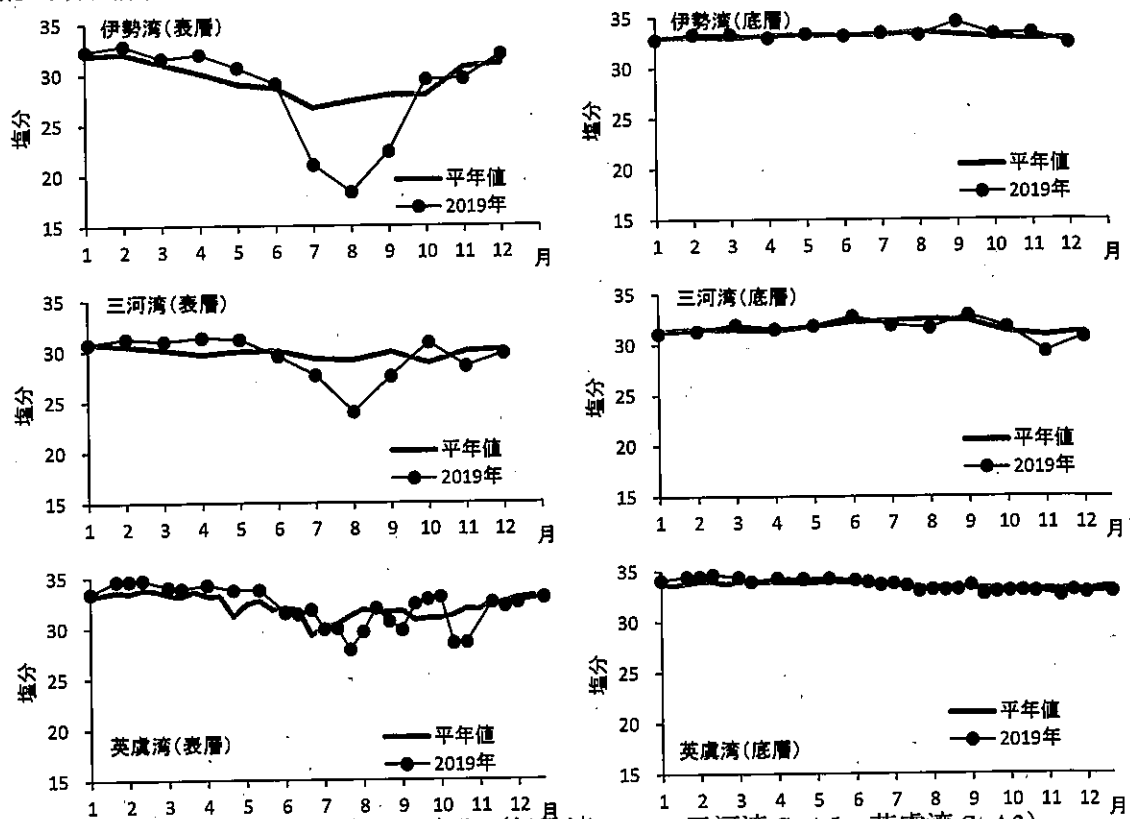


図4 表層と底層における塩分の変化 (伊勢湾 St.I4, 三河湾 St.A5, 英虞湾 St.A3)
 ※平年値: 伊勢湾 (2000~2018 年度), 三河湾 (2000~2018 年度), 英虞湾 (1993~2018 年度)

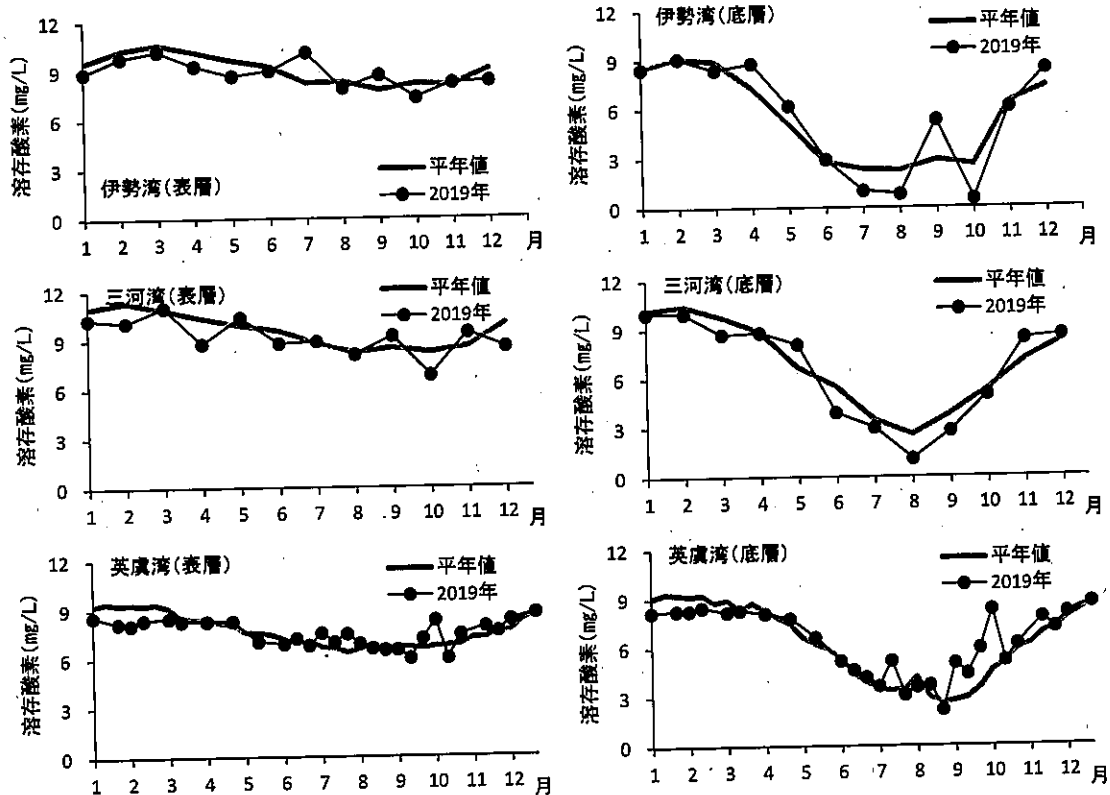


図 5 表層と底層における溶存酸素の変化 (伊勢湾 St.I4, 三河湾 St.A5, 英虞湾 St.A3)
 ※平年値: 伊勢湾 (2000~2018 年度), 三河湾 (2000~2018 年度), 英虞湾 (1993~2018 年度)

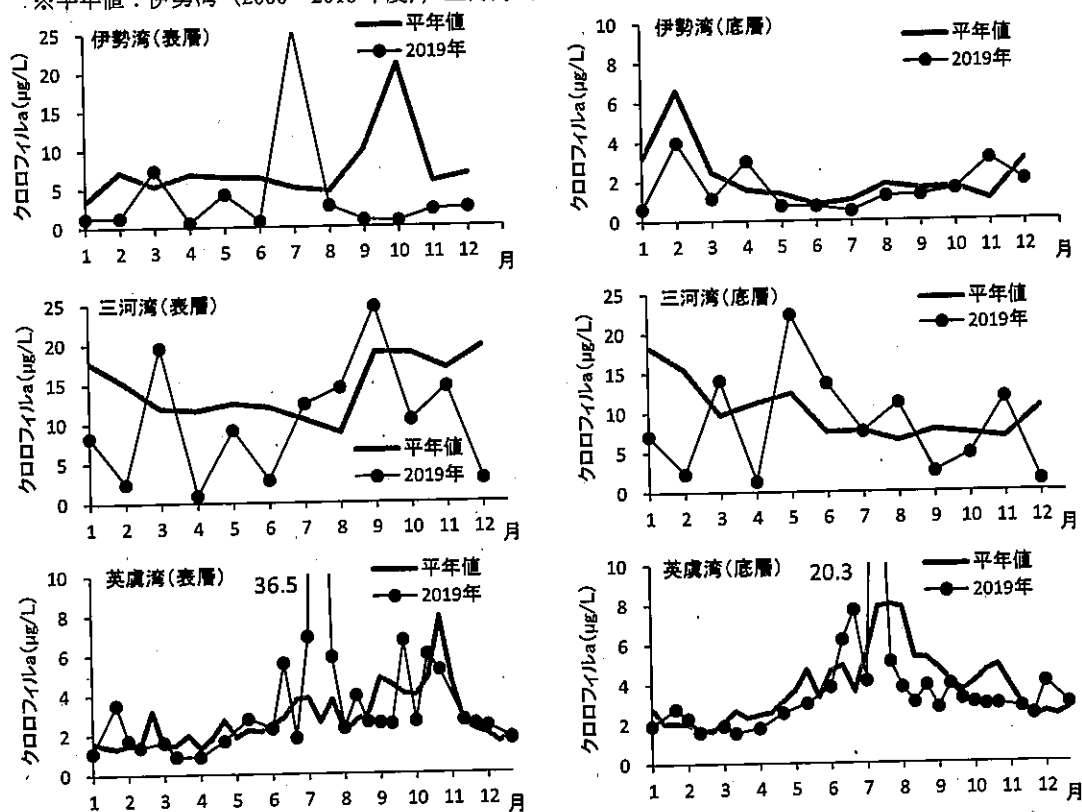


図 6 表層と底層におけるクロロフィル a の変化 (伊勢湾 St.I4, 三河湾 St.A5, 英虞湾 St.A3)
 ※平年値: 伊勢湾 (2000~2018 年度), 三河湾 (2000~2018 年度), 英虞湾 (1993~2018 年度)

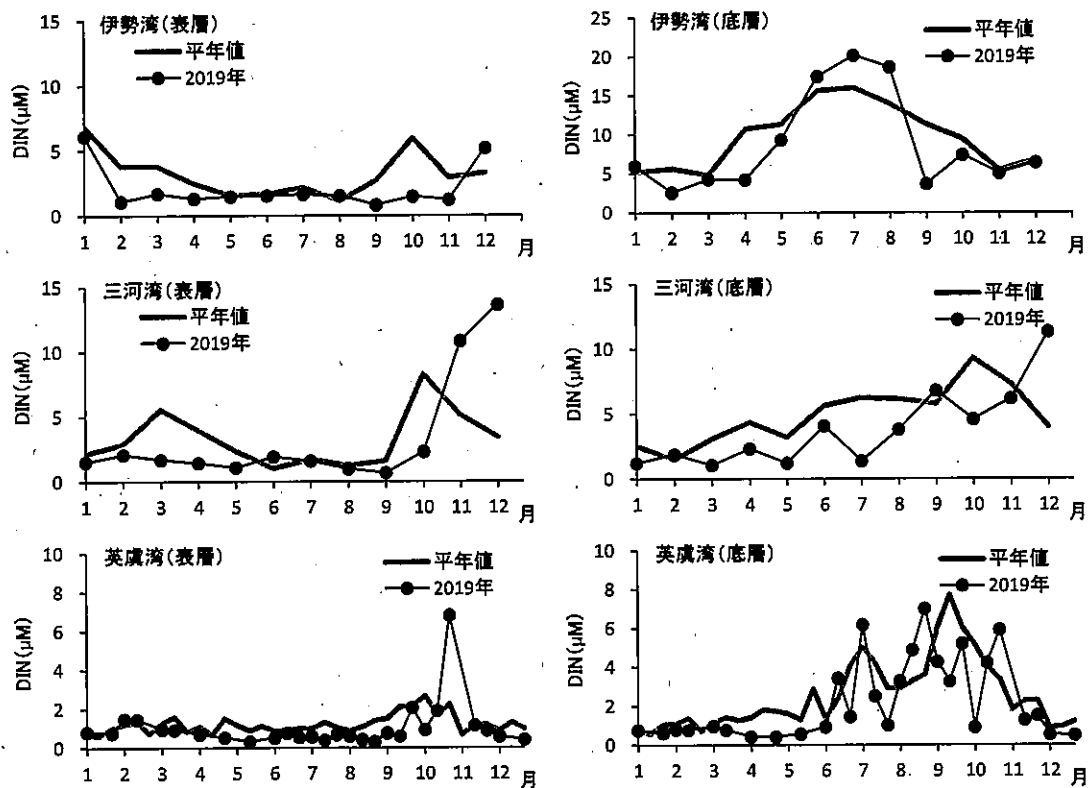


図 7 表層と底層における DIN の変化 (伊勢湾 St.I4, 三河湾 St.A5, 英虞湾 St.A3)
 ※平年値: 伊勢湾 (2009~2018 年度), 三河湾 (2000~2018 年度), 英虞湾 (1999~2018 年度)

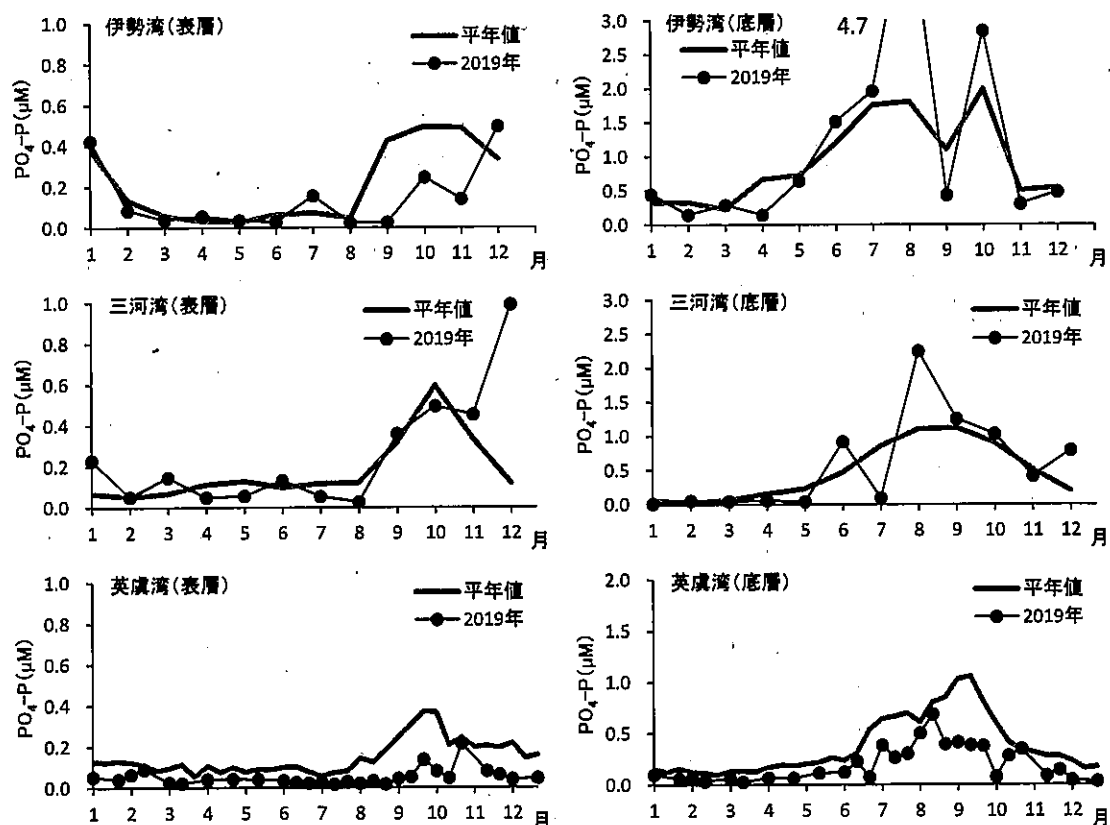


図 8 表層と底層における $\text{PO}_4\text{-P}$ の変化 (伊勢湾 St.I4, 三河湾 St.A5, 英虞湾 St.A3)
 ※平年値: 伊勢湾 (2009~2018 年度), 三河湾 (2000~2018 年度), 英虞湾 (1999~2018 年度)

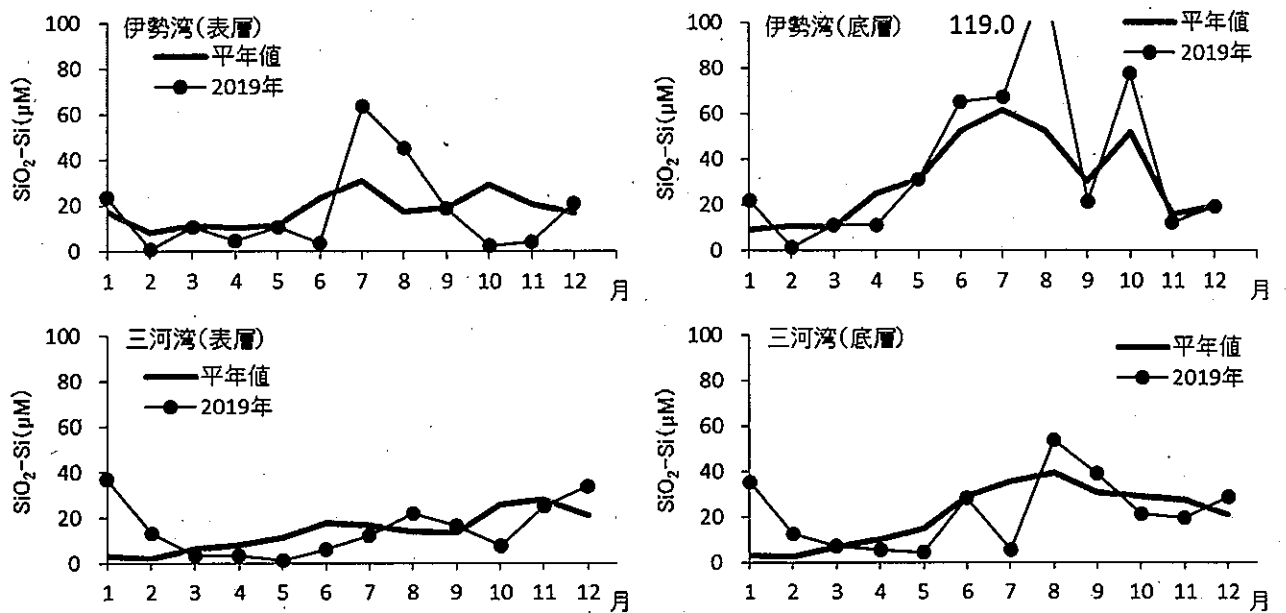


図 9 表層と底層における $\text{SiO}_2\text{-Si}$ の変化 (伊勢湾 St.I4, 三河湾 St.A5)

※平年値：伊勢湾 (2010～2018 年度), 三河湾 (2010～2018 年度)

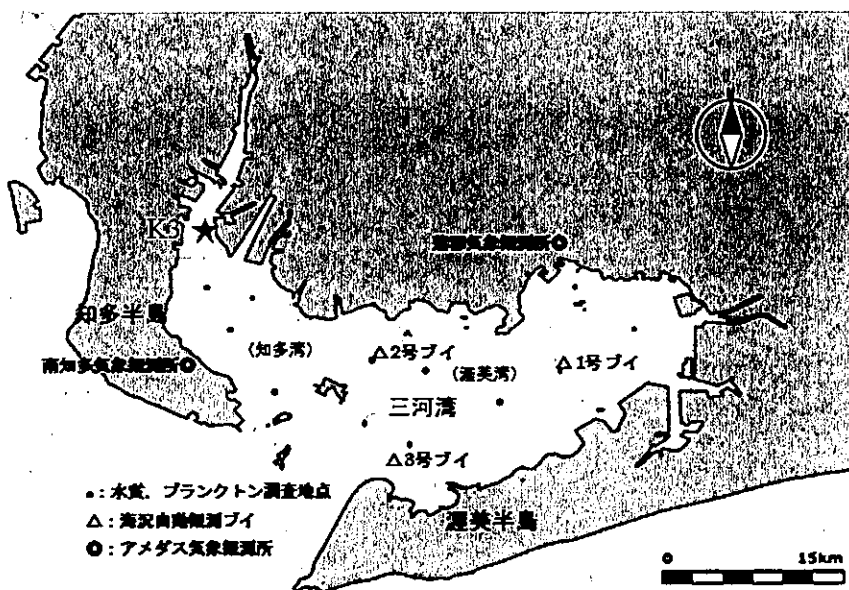


図 10 各項目の調査地点

※ ブイの観測深度は表層 3.5 m, 底層 B-2 m

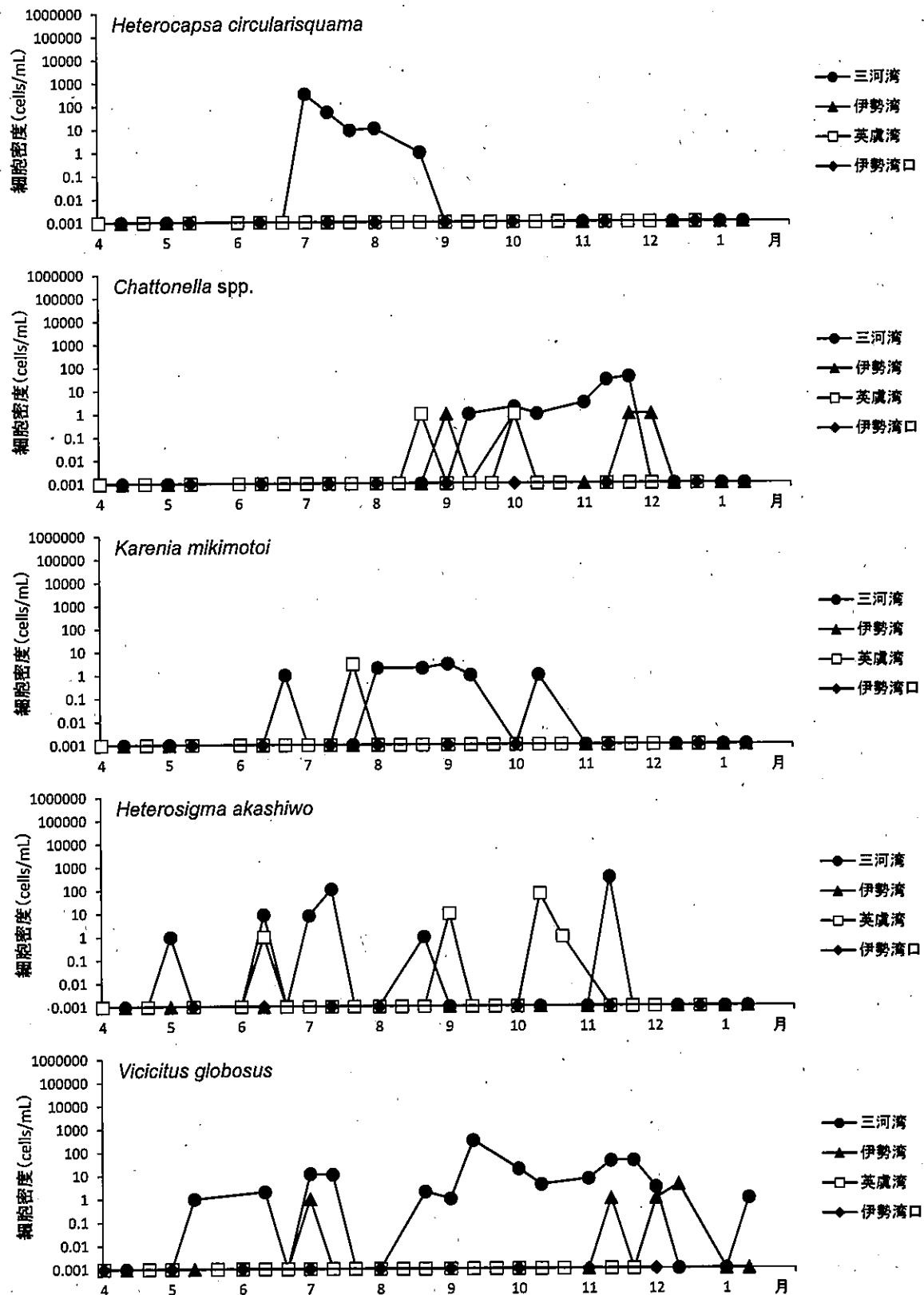


図 11 伊勢湾, 三河湾, 伊勢湾口, 英虞湾 (調査点) における有害赤潮種の最高密度の変化

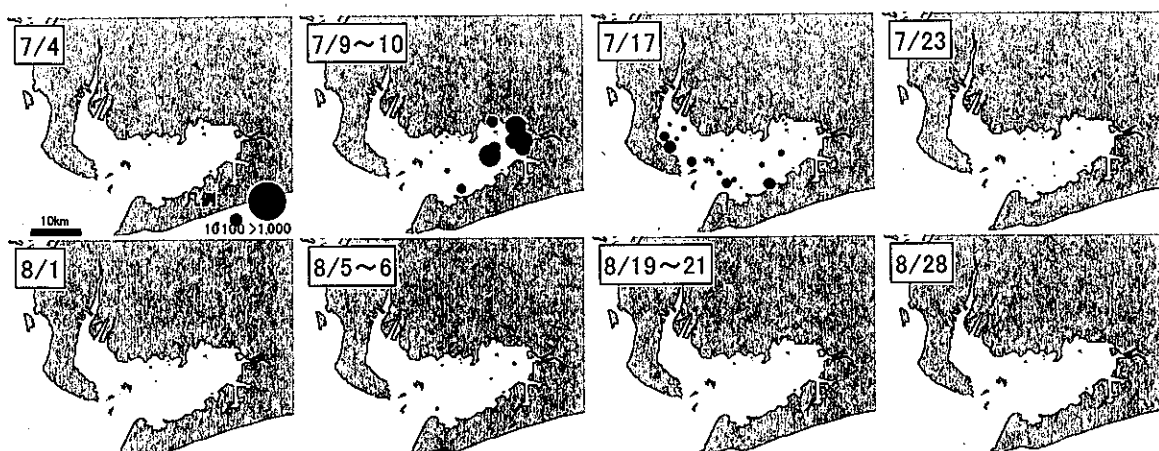


図 12 三河湾における *H. circularisquama* 出現状況

※ 各観測点における 0 m, 5 m, B-1 m 層と場合により 10 m 層のうちの最高密度

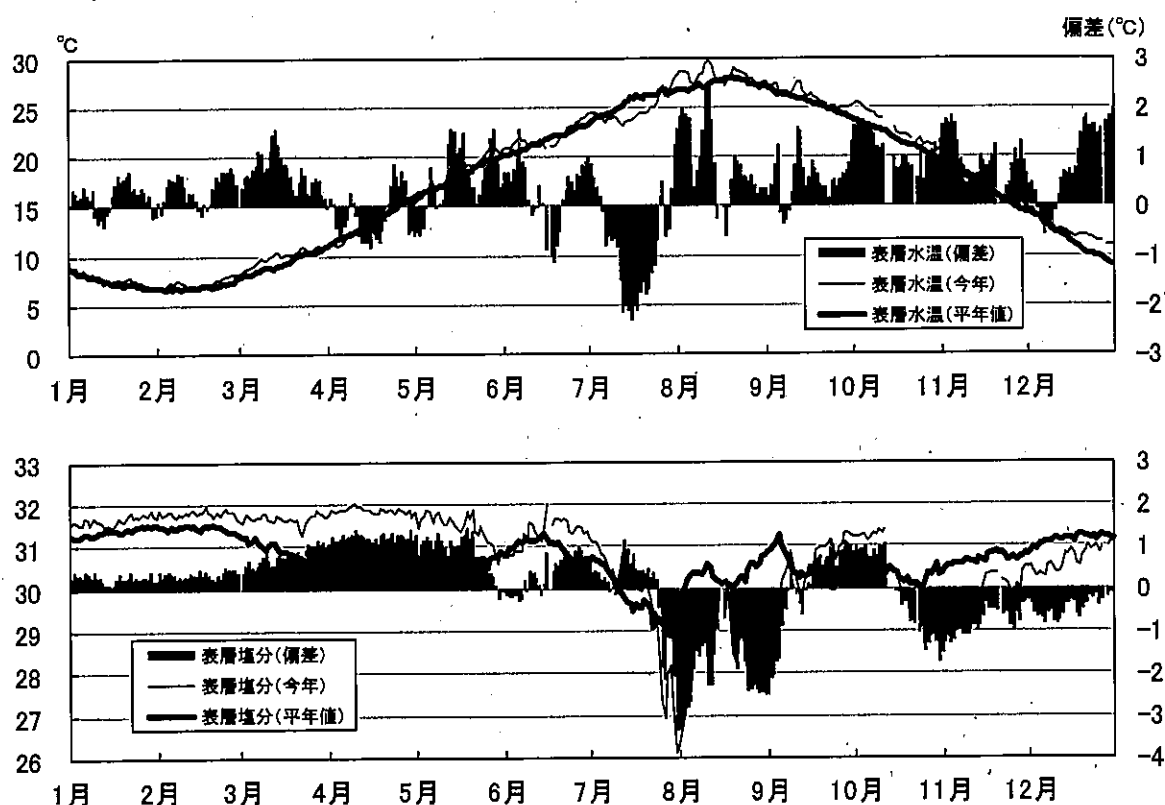


図 13 自動観測ブイにおける水温及び塩分の推移

※ 値は三河湾に設置された海況自動観測ブイ 3 基の平均

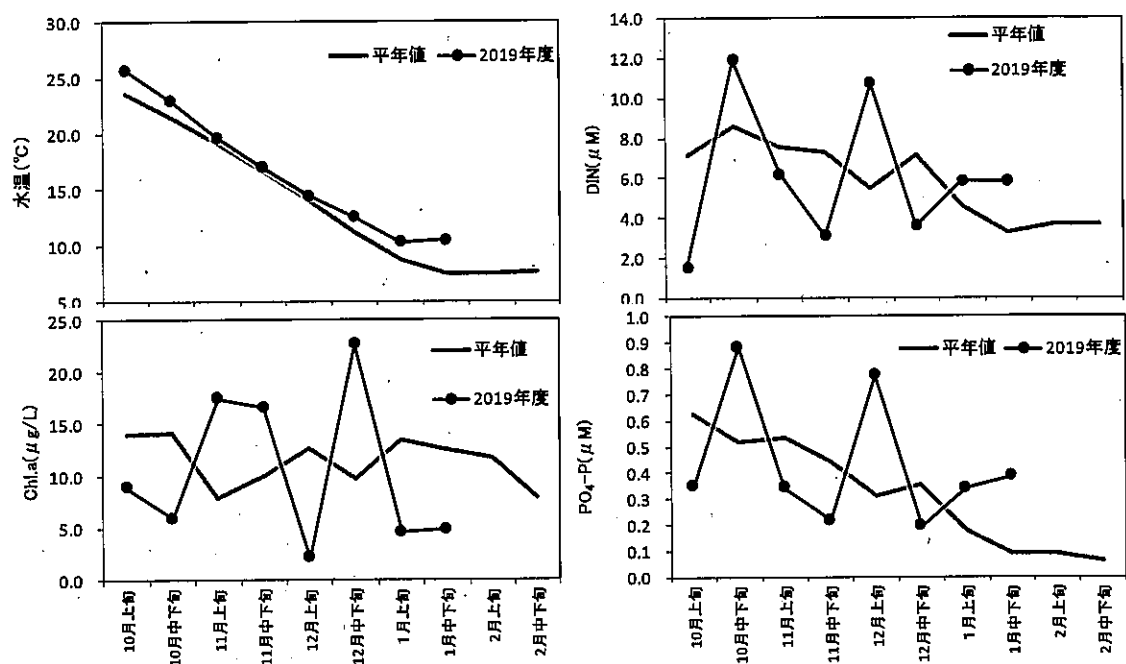


図 14 三河湾の表層における水温、クロロフィル *a*, DIN, PO₄-P の変化
※ 平年値 (2005~2018 年度)

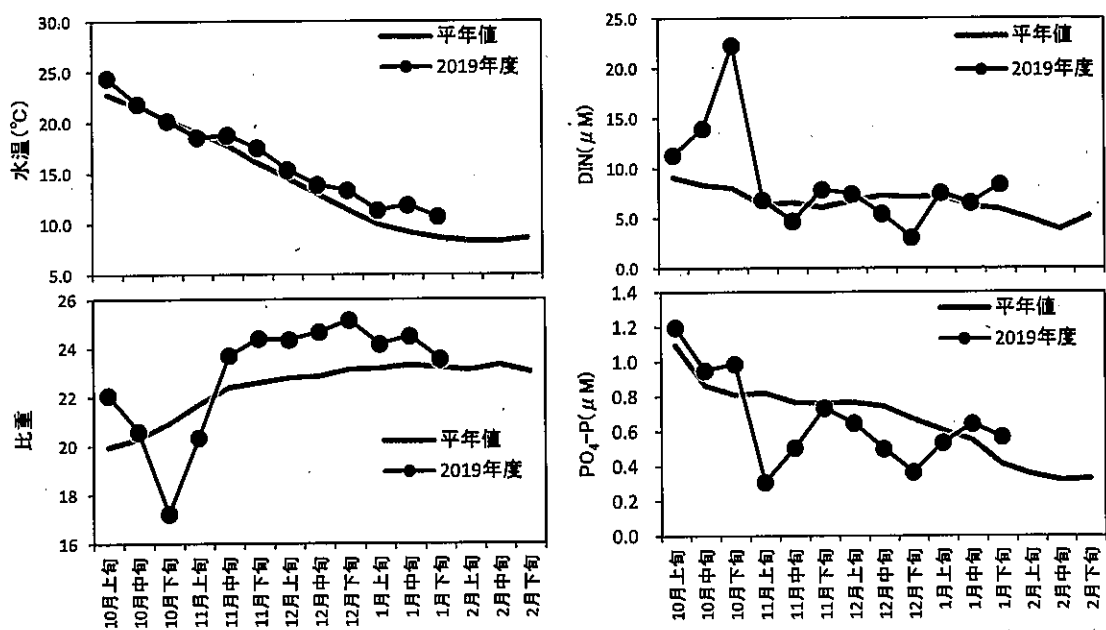


図 15 伊勢湾の表層における水温、DIN, PO₄-P の変化
※ 平年値 (2006~2018 年度)

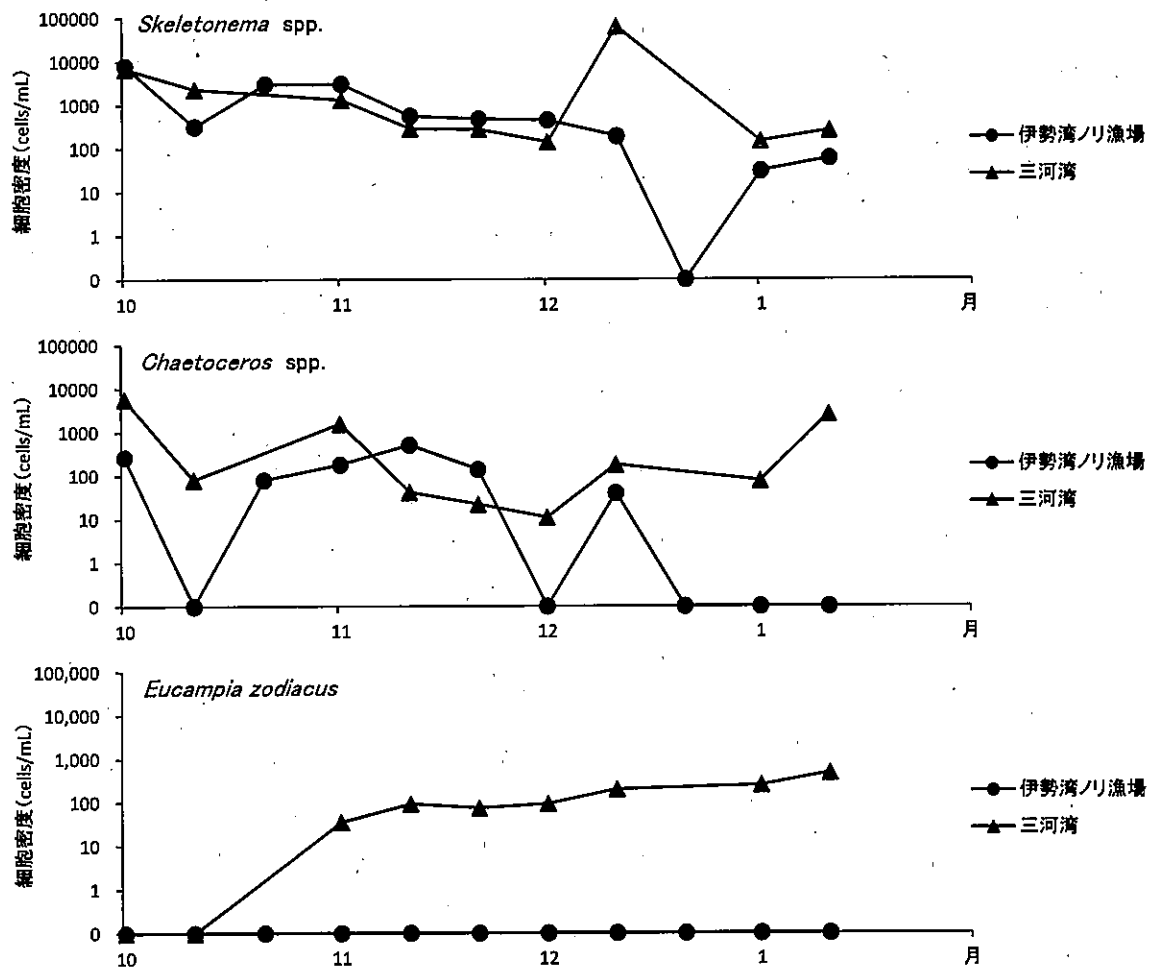


図 16 伊勢湾ノリ漁場及び三河湾（調査点）における珪藻主要種の最高密度の変化

表 3 三河湾における *H. circularisquama* の発生状況(cells/mL)

年／月	5	6	7	8	9	10	11
2000			1	4,000	700		
2005				168			
2006				1			
2007					11	18	
2010						86	3
2012					2		
2013							8
2014					38	3	
2015				183	28	1	
2016			43	2,800	1,538	15	2
2017				3,350	33		
2018			58	1,340	17	4	2
2019				332	11		

※2001～2004, 2008, 2009, 2011 年は *H. circularisquama* が確認されなかった。

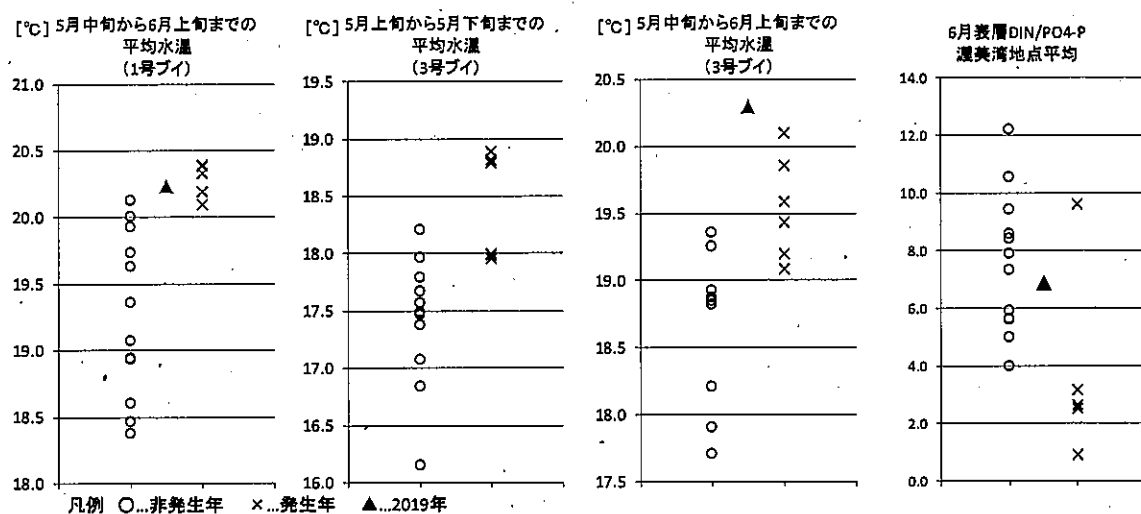


図 17 三河湾における *H. circularisquama* 発生予測指標となる項目と 2019 年の値

表 4 三河湾における *K. mikimotoi* の発生状況(cells/mL)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2001										1		
2005					5			17				
2006						3			79	3	10	8
2007									5	1		
2008										1		
2009							10	4			1	
2010								4	1	2	1	
2011								1				
2014										64	2	
2015							270	17,583	44	45		1
2016							2	2,483	12	15	500	2,850
2017	1,750	104	47	26	18	105	10,000	30,750	10	14	23	1
2018						1	6	1,600	250	89	10	
2019						1	1	2	4	1	1	

※2000, 2002～2004, 2012, 2013 年は *K. mikimotoi* が確認されなかった。

表5 2014年以降の海洋環境の変化の解析に用いた項目

データ出典	項目	期間
プランクトン調査結果	三河湾, 知多湾, 渥美湾 珪藻類, <i>Chaetoceros</i> spp., <i>Skeletonema</i> spp.*1	1~12月
赤潮発生状況	三河湾, 知多湾, 渥美湾 件数, 延日数	1~12月
気象庁 過去の地点気象データ*2	蒲郡, 名古屋 気温, 降水量, 風速, 日照時間, 全天日射量	1~12月
三河湾海況自動観測ブイ データ*3	1~3号ブイ (表層, B-2m層) 水温, 気温, 塩分	1~12月
海洋観測結果*4	三河湾, 知多湾, 渥美湾 (表層, B-1m層) 栄養塩(NH ₄ -N, NO ₂ -N, NO ₃ -N, DIN, PO ₄ -P), クロロフィル a, DO, 透明度	1~12月

*1: *Skeletonema* spp., *Chaetoceros* spp., *Skeletonema* spp.及び *Chaetoceros* spp.の細胞密度の合計, 全珪藻類

*2: 3カ所に設置している海況自動観測ブイのうち, 2号ブイ(西尾市沖)及び3号ブイ(田原市沖)のデータを用い, 表層及びB-2m層の毎時1回の観測値を日平均とし, 各月の上旬, 中旬, 下旬からの1カ月(30日間)平均を用いた。

*3: 各月の上旬, 中旬, 下旬からの1カ月(30日間)平均を用いた。

*4: 毎月上旬の調査のうちの表層(0.5m)の調査結果を用いた。

表6 三河湾における2014年以降について統計的に有意($P < 0.05$)な項目

調査	期間	項目	集計方法	測点	2014年以降の値
プランクトン 調査結果	3月	スケルトネマ, スケルトネマ+キートセロス	合計・平均・最大	三河湾	少ない
	4月	珪藻類	平均・合計	三河湾	少ない
	5月	スケルトネマ+キートセロス	平均	三河湾	少ない
	8月	珪藻類, キートセロス, スケルトネマ+キートセロス	合計・平均・最大	三河湾	少ない
	10月	キートセロス	最高密度	三河湾	高い
	年間	鞭毛藻類/珪藻類	最高密度	知多湾	高い
赤潮発生状況	8月		件数・延日数	三河湾・知多湾	多い
気象庁過去の 地点気象データ	1月	日照時間・全天日射量	移動平均・合計	名古屋	高い
	2月	全天日射量	合計	名古屋	高い
	4月	気温	移動平均	蒲郡	高い
	4・5・6月	日照時間, 全天日射量	移動平均・合計	名古屋	高い
	2・5・6・7・ 8・10月	風速	移動平均	蒲郡	強い
	年間	日照時間, 全天日射量	平均・最高値	名古屋	高い
三河湾海況 自動観測ブイ	4・5月	水温(表層)・気温	移動平均	1~3号ブイ	高い
	4・5月	水温表底層間較差 (表層, B-2m層の差, 以下同様)	移動平均	1~3号ブイ	大きい
	4月	塩分表底層間較差	移動平均	1・3号ブイ	大きい
	6月	気温	移動平均	3号ブイ	低い
	6月	塩分表底層間較差	移動平均	3号ブイ	小さい
	8月	水温表底層間較差	移動平均	1号ブイ	大きい
	12月	水温表底層間較差	移動平均	1号ブイ	小さい
	年間	水温(表層, B-2m層)	平均	2号ブイ	高い
	年間	塩分表底層間較差	平均	2号ブイ	高い

表 6 三河湾における 2014 年以降について統計的に有意 ($P < 0.05$) な項目 (続き)

海洋観測結果	3 月	NO ₂ -N	平均	三河湾・知多湾・渥美湾	高い
	4 月	DO(底層)		三河湾	低い
	6・7 月	クロロフィル <i>a</i> (表層)	平均	三河湾・知多湾・渥美湾	低い
	7 月	NH ₄ -N(表層)	平均	三河湾・渥美湾	高い
	7 月	NO ₂ -N, NO ₃ -N, PO ₄ -P(底層)	平均	三河湾・知多湾	低い
	8 月	PO ₄ -P(底層)	平均	三河湾・渥美湾	低い
	9 月	NH ₄ -N(底層)	平均	三河湾・知多湾	低い
	10 月	透明度		知多湾	低い
		NO ₂ -N, PO ₄ -P(表層)	平均	三河湾・知多湾	低い
	12 月	NH ₄ -N, PO ₄ -P(表層)	平均	三河湾・知多湾	低い
	年間	PO ₄ -P(表層)	平均	三河湾・知多湾	低い

表 7 英虞湾における経年変化の確認および *K. mikimotoi* 赤潮の出現状況との比較を行った項目

項目	測点	測点, 層	データの由来
水温, 塩分, 比重, 溶存酸素	St.A1, St.A3~6	表層, 2m 層, 5m 層, 10m 層, 底層	三重県 水産研究所
NO ₃ -N, NO ₂ -N, NH ₄ -N, DIN, PO ₄ -P, 透明度, 珪藻細胞密度, 渦鞭毛藻細胞密度	St.A1, St.A3~6	表層, 2m 層, 5m 層, 底層	三重県 水産研究所
表層と底層の水温の差, 表層と底層の塩分の差, 表層と底層の比重の差	St.A1, St.A3~6	—	三重県 水産研究所
平均気温, 最低気温, 最高気温, 降雨量, 日照時間, 最大風速, 平均風速, 風向	—	—	南伊勢町 アメダス

表 8 英虞湾における *K. mikimotoi* 赤潮出現状況

年	年	年	年	年	年
1994	90	2004	1	2014	5,025
1995	5	2005	2	2015	3,290
1996	15	2006	9,163	2016	10
1997	10	2007	1	2017	9,300
1998	0	2008	2	2018	2
1999	1	2009	25	2019	3
2000	125	2010	3		
2001	0	2011	1,170		
2002	9	2012	1,705		
2003	1	2013	205,000		

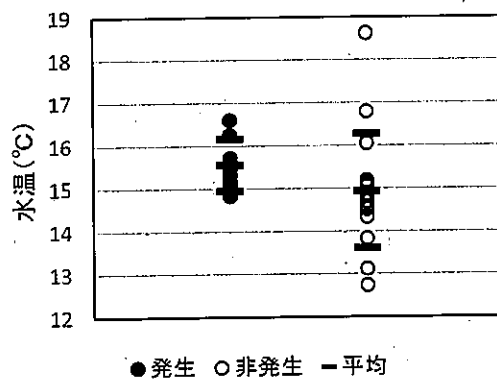


図 18 *K. mikimotoi* 赤潮発生年及び非発生年の 4 月上旬～4 月下旬における St.A3, 5m 層水温平均値

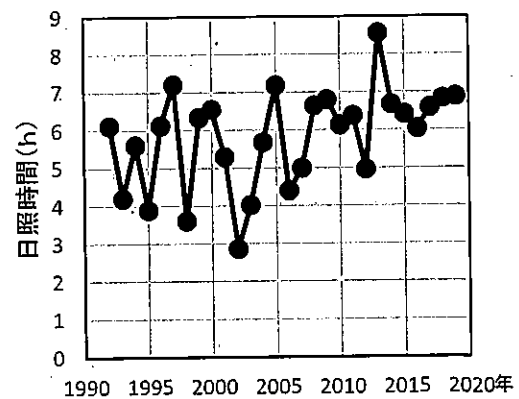


図 19 4 月中旬～5 月上旬における日照時間の経年変化

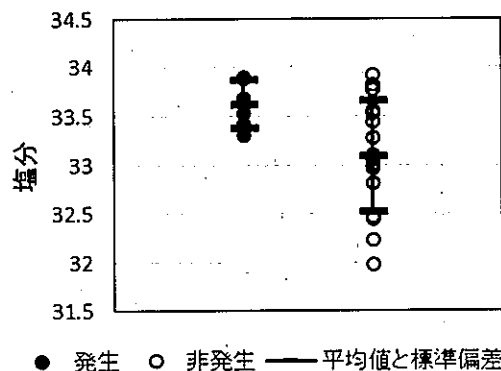


図 20 *K. mikimotoi* 赤潮発生年及び非発生年の6月上旬～7月上旬における St.A3 5m層塩分平均値

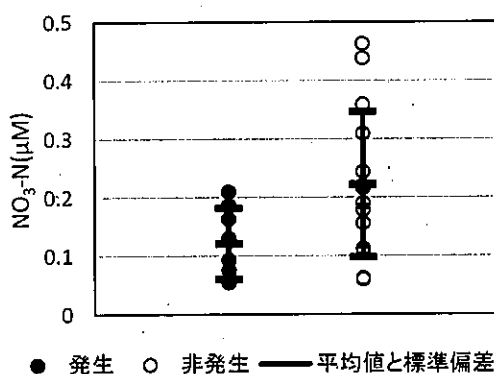


図 21 *K. mikimotoi* 赤潮発生年及び非発生年の7月下旬～8月中旬における St.A3 5層の NO₃-N

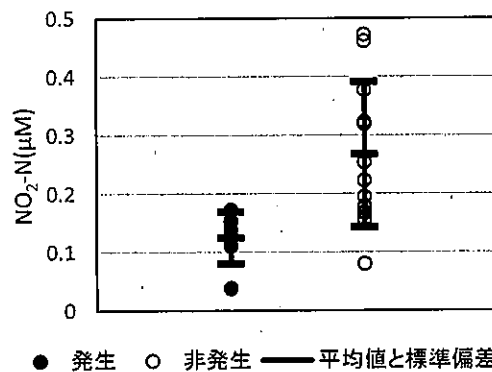


図 22 *K. mikimotoi* 赤潮発生年及び非発生年の6月下旬～7月下旬における St.A3 5層の NO₃-N

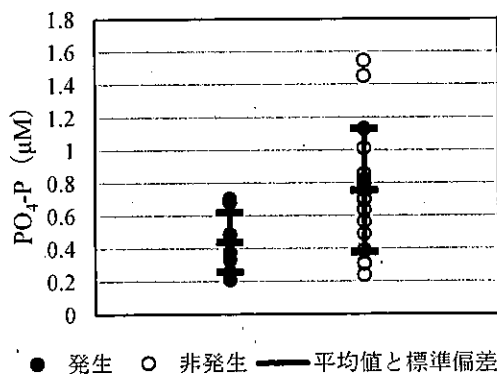


図 23 *K. mikimotoi* 赤潮発生年及び非発生年の6月中旬～7月中旬における St.A3 B-1m層の PO₄-P

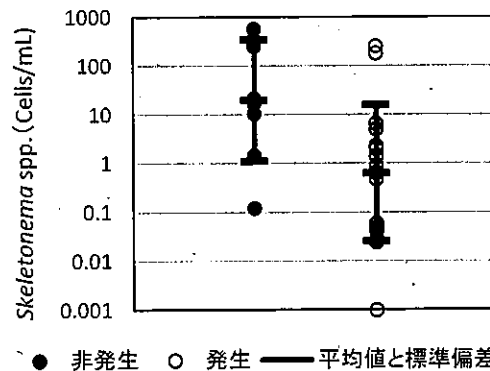


図 24 *K. mikimotoi* 赤潮発生年及び非発生年の6月上旬～6月下旬における St.A3 5層の *Skeletonema* spp.細胞密度

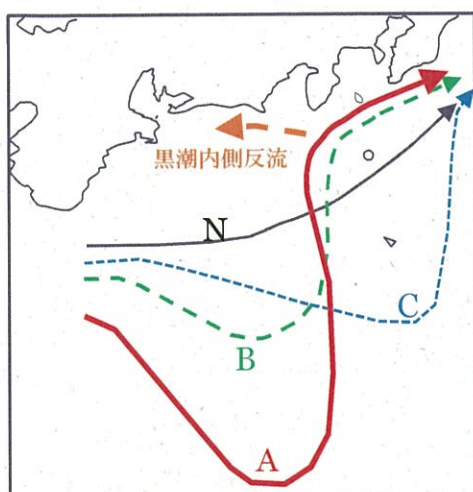


図 25 黒潮流路の例

表 9 伊勢・三河湾から熊野灘沿岸における 1994 年以降の *K. mikimotoi* 赤潮発生型と黒潮流路

年	赤潮発生型	黒潮流路
1994	地場発生	N
2000	地場発生	C
2006	広域発生	N
2011	地場発生	N
2012	地場発生	N
2013	地場発生	B,C
2014	広域発生	N
2015	広域発生	N,B
2016	地場発生	B,C
2017	広域発生	B,C
2018	広域発生	A

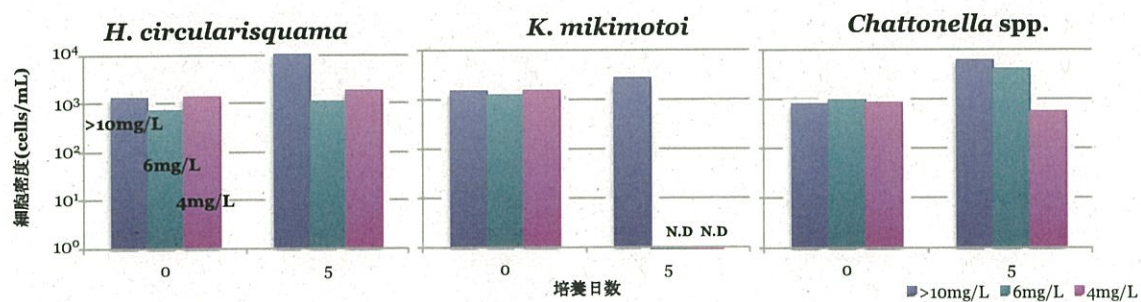


図 26 *H.circularisquama* 等有害藻類の増殖に与える貧酸素の影響評価試験
グラフ左から, *H.circularisquama*, *K. mikimotoi*, *Chattonella* spp.

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

エ. 日本海西部海域

兵庫県立農林水産技術総合センター但馬水産技術センター

鈴木雅巳

鳥取県栽培漁業センター

門脇慧史

鳥取県水産試験場

渡辺秀洋

島根県水産技術センター内水面浅海部

松本洋典

島根県水産技術センター漁業生産部

安原 豪

山口県水産研究センター外海研究部

木原浩志, 南部智秀

水産研究・教育機構 瀬戸内海区水産研究所

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* 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。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, 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の検証および赤潮発生予察の高精度化を進め, 漁業被害軽減に資することを目的とした。

2 平成31年度計画及び結果

(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, 分子同定技術の効率化

Cochlodinium polykrikoides および *Karenia* 属等の有害赤潮が発生する主に7月から9月末ま

でを中心に、共同提案機関がそれぞれに有する調査船（または傭船）、陸上からの採水調査等により、広域的な海洋調査を実施した。図 1-1 および 1-2 に示す海域にそれぞれ計 20 点程度の調査定点を配置し、主に 7 月から 9 月末までに、沖合調査定点では計 8 回程度、そして沿岸調査定点では、計 30 回程度、海洋環境（水温、塩分、水色、透明度等）および有害赤潮プランクトン細胞密度等のモニタリング調査を実施した。プランクトン細胞密度は、フィルター（Whatman Track-Etch Nucleopore Membrane ϕ 47mm 以上 孔径 $3\mu\text{m}$ ）を使用して 1L の海水を 10ml に濃縮し、濃縮サンプルを 1ml ずつ 3 回以上、もしくは 3ml 以下に濃縮した場合は全量を検鏡した。また、有害赤潮の発生状況に応じて、臨時調査を行った。

日本海西部海域におけるモニタリングの高度化として、①調査点を沖合の広範囲に設定しているため低密度な場合や生海水での検鏡の際にコンディションが劣化した細胞があった場合への対応、②形態のよく似た類似種との判別が難しい場合への対応のため、検鏡による確認の補完として迅速かつ正確な種判別を行うために分子生物学的手法（LAMP 法）を導入し、モニタリング精度の向上を図った。検鏡に比べてより高い精度で対象プランクトンの有無を検出することで、日本海西部海域における有害プランクトンの広域化の実態をより詳細に把握した。さらに、検鏡による形態的な特徴と LAMP 法の結果とが一致しない事例の要因として、*C. polykrikoides* には異なるリボタイプが存在すること、現在用いている LAMP 法では東アジアタイプのみを検出し、他のリボタイプは検出されないことが考えられる。対馬暖流上流部の韓国や長崎県沿岸ではフィリピンタイプや笠沙型と呼ばれる *C. polykrikoides* のリボタイプの出現が報告されていることから、これまで用いてきた東アジアタイプを対象としたプライマーに加えて、フィリピンタイプおよび笠沙型を検出可能な LAMP 法を用いて日本海西部海域におけるリボタイプの出現の有無を確認した。フィリピンタイプおよび笠沙型検出に用いたプライマー配列を表 1 に示す。

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

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

(3) 結果及び考察

本海域では、これまでに得られた成果から、*C. polykrikoides* が山陰沿岸域および隠岐諸島周辺海域で赤潮を形成するシナリオを策定し、それをもとに、①長期予測（～1 ヶ月程度）：7 月以降の韓国沿岸域での *C. polykrikoides* の発生状況とその際の風向風速（特に南西寄りの風）の監視、②中期予察（～1 週間程度）：対馬暖流流路の検討、衛星画像によるクロロフィ

ル高濃度域の時空間変動の監視と赤潮輸送シミュレーションによる赤潮の到達可能性の検討、
③短期予察（～数日程度）：調査船等による現場調査（赤潮プランクトン細胞密度等）、衛星画像によるクロロフィル高濃度域の監視、山陰周辺海域の気象・海象条件の検討、という3段階の赤潮監視・予察を行ってきた（宮原ら 2011）。また、韓国沿岸域と同様に対馬暖流の上流部にあたる九州北部沿岸域での有害赤潮発生状況等の監視も実施している。今年度も上記の手順に従って赤潮の監視・予察を行うとともに、発生シナリオの検証と予察精度の向上について検討した。

1) 対馬暖流上流部における有害赤潮の発生状況

今年度は韓国南部沿岸域で9月中旬に *C. polykrikoides* が高密度化した（図2）。8月20日に全羅南道麗水市で初確認（最高細胞密度 30 cells/ml）された。台風13号が接近した9月7日以降細胞密度が急増し、9月10日に 5,000 cells/ml を超えたが、9月20日以降急激に減少した。発生期間は39日間（8月20日～9月27日）、期間中の最高細胞密度は9月11日の 12,000 cells/ml だった。一方、九州北部海域では伊万里湾において6月下旬から7月下旬にかけて *K. mikimotoi* が高密度化し（最高細胞密度 210,500 cells/ml, 7月19日）、養殖魚への漁業被害も報告されたが、周辺海域への分布拡大は確認されなかった。

2) 対馬海峡部における風向・風速

8月から9月にかけての対馬海峡における海上風ベクトルの時系列を図3に示す。期間中の8月12日ごろ、9月7日ごろ、9月22日ごろに台風接近による強風が観測された。韓国南部沿岸域での *C. polykrikoides* 赤潮発生期間中、前半の8月下旬から9月上旬には時折南寄りの風が観測されたが、後半の9月中旬以降は強い北東風が連吹していた。

3) 対馬暖流の流路

9月上旬の50m深水温分布によると、典型的な接岸流路の場合（例えば2003年や2005年）に比べて水温フロントは沿岸域で不明瞭だったものの、隠岐諸島の東西に冷水が存在し、水温フロントは沿岸寄りだった（図4）。水温フロント位置から想定される対馬暖流の沖合分枝の流路は接岸傾向にあったと推察された。

4) 衛星画像によるクロロフィル高濃度域

韓国南部沿岸域で *C. polykrikoides* が高密度化していた9月中旬に韓国東部沿岸域から山陰沖にかけてクロロフィル高濃度域が分布していたが、有害種かどうか不明である（図5）。Aqua/MODIS（水平解像度 1 km）と GCOM-C/SGLI（水平解像度 250 m）を比較すると、GCOM-C/SGLI のほうがより細かな構造を確認できる。GCOM-C/SGLI については、今後沿岸域で発生するような比較的小規模な赤潮の監視への活用も期待される。

5) 赤潮輸送シミュレーション

韓国南部沿岸域で *C. polykrikoides* 赤潮が発生していた8月20日から9月21日を計算開始日とする赤潮輸送シミュレーションを実施した。方法は Onitsuka et al. (2010) と同様の粒子追跡計算で、水産研究・教育機構日本海区水産研究所で開発・運用されている JADE2 の流動

場再解析値 (JADE2.1 の日平均値) を用いて行った。計算では *C. polykrikoides* の日周鉛直移動を考慮し (Park et al. 2001), 赤潮を模した粒子の分布深度を昼間 (06:00-18:00) と夜間 (18:00-06:00) でそれぞれ 1 m 深と 20 m 深に変化させた。粒子の初期投入位置は韓国南部沿岸域で、8 月 20 日から 9 月 21 日まで一日ごとに 400 個の粒子を投入した。

図 6 に計算結果を示す。8 月下旬に投入された粒子の一部が 9 月下旬に隠岐諸島や山陰沿岸域に到達するものの、*C. polykrikoides* が高密度に観測された 9 月に投入された粒子は多くは韓国沿岸域に留まるか韓国沿岸に沿って北上し、9 月末までに隠岐諸島や山陰沿岸に近づく粒子はなかった。

6) 漁場モニタリング調査

C. polykrikoides および *K. mikimotoi* をモニタリングの主要対象主とした、図 1-1 および 1-2 の調査定点における試料の検鏡結果、鳥取県の沖合定点 T5 において 7 月 25 日に 0 m から *C. polykrikoides* と類似する細胞が 0.01 cells/ml (図 7-1), *Cochlodinium* 属が山口県の沖合定点 Y1 において 8 月 8 日に 0 m および 20 m から 0.001 cells/ml が確認されたが (図 7-5), 後述のとおり *C. polykrikoides* を対象とした LAMP 法の結果は陰性であった (表 2)。T5 で確認された細胞は形態から *Cochlodinium fulvescens* 等の類似種ではないかと推察された。また、8 月 8 日に山口県の沖合定点 Y2 の水深 20 m から *K. mikimotoi* と類似する細胞が 0.001 cells/ml の密度で確認されたが (図 7-3), 後述のとおり *K. mikimotoi* を対象とした LAMP 法の結果は陰性であった (表 3)。その他の山口県から兵庫県の沿岸域および沖合域に設けた定点からは検鏡では両種は確認されなかった (図 7-1~4)。

その他の有害種の出現状況として、*Karenia digitata* による赤潮が山口県長門市で 4 月 19 日に確認されたほか (4/19 に最高細胞密度 12,000 cells/ml, 5/8 に終息), 山口県の沿岸定点 Y6 において 8 月 9 日に 0 m から 0.053 cells/ml が確認された。*Alexandrium* sp. が島根県の沿岸定点 S1 において 8 月 23 日に 0 m から 0.001 cells/ml が確認された。*Alexandrium* sp. (*A. fraterculus* 様) が兵庫県の沖合定点 H1 において 7 月 30 日に 58 m から 0.037 cells/ml, 8 月 27 日に 43 m から 0.013 cells/ml, 沖合定点 H2 において 7 月 30 日に 0 m から 0.010 cells/ml, 沖合定点 H3 において 8 月 27 日に 46 m から 0.020 cells/ml, 沖合定点 H4 において 8 月 27 日に 20 m から 0.077 cells/ml, 沖合定点 H5 において 8 月 27 日に 39 m から 0.090 cells/ml, 9 月 26 日に 0 m から 0.017 cells/ml, 沖合定点 H6 において 8 月 27 日に 0 m から 0.013 cells/ml が確認された。*Dinophysis caudata* が島根県の沿岸定点 S1 において 8 月 23 日に 0 m から 0.050 cells/ml, 沿岸定点 S3 において 8 月 22 日に 0 m から 0.003 cells/ml, 9 月 19 日に 0 m から 0.040 cells/ml, 兵庫県の沖合定点 H1 において 7 月 30 日に 58 m から 0.002 cells/ml, 沖合定点 H4 において 9 月 26 日に 0 m から 0.003 cells/ml が確認された。*Dinophysis acuminata* が島根県の沿岸定点 S3 において 7 月 24 日に 0 m から 0.007 cells/ml が確認された。*Dinophysis rotundata* と *Phalacroma mitra* (*Dinophysis mitra*) が島根県の沿岸定点 S6 において 7 月 23 日に 0 m からそれぞれ 0.030 cells/ml と 0.020 cells/ml が確認された。*Akashiwo sanguinea* が島根県の沿岸定点 S3 において 7 月 24 日に 0 m と 3 m からそれぞれ 0.027 cells/ml と 0.020 cells/ml が確認された。*Noctiluca scintillans* が島根県の沿岸定点 S1 において 7 月 24 日に 0 m と 5 m からそれぞれ 0.010 cells/ml と 0.010 cells/ml, 8 月 23 日に 5 m に 0.013 cells/ml, 沿岸定点 S3 において 8 月 22 日に 0 m と 3 m からそれぞれ 0.003 cells/ml と 0.017 cells/ml が確認された。今年度は、*K. digitata* の赤潮を除くと

いずれの種もごく低密度の出現であり散発的であった（図 7-5, -6）。

7) 赤潮発生シナリオの検証

C. polykrikoides 赤潮が山陰沿岸域や隠岐諸島周辺海域で出現する条件として、①韓国沿岸域で大規模な赤潮が発生すること、②南西風により韓国沿岸域から *C. polykrikoides* の赤潮水塊が沖合域へ輸送されること、③対馬暖流沖合分枝が接岸傾向であること、この 3 つの条件が全て揃う必要があることが示されている（Onitsuka et al. 2010）。そこで今年度もこれら 3 つの条件を検証した。まず、条件①については 8 月下旬から 9 月下旬に韓国南部沿岸域で *C. polykrikoides* が確認され、9 月中旬には 5,000 cells/ml を超えて高密度化しており、比較的規模の大きい赤潮となった（図 2）。次に条件②について、8 月下旬から 9 月上旬には時折南寄りの風が観測されていたが、韓国南部沿岸で *C. polykrikoides* が高密度化した 9 月中旬は対馬海峡部では強い北東風が連吹していた（図 3）。また、条件③について、9 月上旬の対馬暖流の沖合分枝の流路は接岸傾向であったと推察された（図 4）。以上のことから、今年度は、8 月下旬から 9 月上旬に低密度で存在した *C. polykrikoides* が韓国南部沿岸域から沖合域へ輸送され、その後、対馬暖流によって隠岐諸島や山陰沿岸域へ輸送される可能性があったと考えられた。図 6 の赤潮輸送シミュレーション結果も上記を裏付けており、8 月下旬に韓国南部沿岸域に投入した粒子の一部が隠岐諸島や山陰沿岸域に接近する計算結果となった。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 法では、鳥取県と兵庫県の沖合定点において *C. polykrikoides* がごく低密度でのみ確認されており、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。

8) 赤潮発生リスクの可視化の検討

赤潮輸送シミュレーションの目的のひとつは、対馬暖流上流部から隠岐諸島や山陰沿岸域に赤潮が到達する可能性を事前に情報提供することである。これまで粒子追跡計算結果は粒子軌跡から到達可能性を診断していたが、今年度はいつごろ・どの海域に発生リスクがあるかを視覚的に理解しやすくするための検討を行った。図 8 に一例を示す。図 8a は 5) の赤潮輸送シミュレーション結果について、9 月 30 日時点での位置を粒子の投入日ごとに色分けして表示したものであり、これを 0.5° 格子ごとの粒子数で表示したものが Case 1（図 8b）である。Case 1 では単純に韓国南部沿岸域から輸送される粒子の多少を表しており、8 月下旬に投入された粒子が隠岐諸島・山陰沿岸域に比較的多く輸送されるため、見かけ上の発生リスクが高くなってしまう。実際には 8 月下旬は韓国南部沿岸域では細胞密度がごく低密度だったため（図 2）、Case 1 では隠岐諸島・山陰沿岸域での発生リスクを過大評価してしまっている。そこで Case 2 として、粒子に各投入日の韓国南部沿岸域の *C. polykrikoides* 最高細胞密度の情報を持たせ、その 0.5° 格子ごとの和を対数スケールで表示した（図 8c）。Case 2 の場合、隠岐諸島・山陰沿岸域での発生リスクは Case 1 に比べて低下するが、10 月以降も粒子が対馬暖流の下流域に輸送されるにつれてリスク範囲は拡大する一方となる非現実性を孕んでいる。Case 2 では細胞密度の情報が維持されたままであるが、過去の韓国南部沿岸域と隠岐諸島・山陰沿岸域での発生状況を比較すると、隠岐諸島・山陰沿岸域で観測された最高細胞密度は韓国南部沿岸域の 2~26%であり、貧栄養な沖合域での輸送中には赤潮水塊中では増殖できずに減衰していたと推察される。そこで、韓国沿岸域から隠岐諸島・山陰沿岸域への輸送に 2 週

間から1ヶ月かかるとの既往知見(Onitsuka et al. 2010)を基に、Case 2に1ヶ月で細胞密度が約20%に減衰する程度の減衰率(0.05 day^{-1})を与えたものをCase 3とした(図8d)。Case 3では、韓国沿岸域では高い値を示す一方で、減衰率を考慮したことにより沿岸域から距離が離れるにつれて値が小さくなっており、リスク範囲が一方的に拡大していたものが改善された。今回はこの手法を採用することとし、9月中旬から10月中旬の旬ごとに海域ごとの発生リスクを可視化した。

Case 3で可視化した9月中旬から10月中旬の発生リスクを図9に示す。粒子投入位置に近い韓国南岸沿岸域や多くの粒子が通過する韓国東部沿岸域で高い値を示した。一方で隠岐諸島・山陰沿岸域では9月中旬から10月中旬を通して相対的に低い値となっており、韓国沿岸域に比べて高密度での発生リスクは低いと判定された。これまでの隠岐諸島・山陰沿岸域で一括りにした赤潮水塊の到達可能性の診断から、Case 3では予測時期や海域ごとの発生リスクが視覚的に示された。可視化された発生リスクは、実際の発生状況にある程度反映していると考えられるが、細胞密度が低く粒子数が多い場合と細胞密度が高く粒子数が少ない場合を区別していないため、発生リスクの絶対値の曖昧さという課題を残している。今後は他の年での検証を行いながら必要に応じて改良を加えていく予定である。

9) LAMP法を併用したモニタリング体制の高度化

今年度、各県で実施した*C. polykrikoides*(東アジアタイプ)および*K. mikimotoi*のLAMP法による分析結果と検鏡結果の比較を表2および表3に示した。

*C. polykrikoides*は各県の沖合定点および沿岸定点の全サンプルから検鏡では確認されなかったが、LAMP法では兵庫県の沖合定点の計42サンプル中10サンプルで、沿岸定点の計12サンプル中1サンプルで陽性を示した。その他、沖合定点サンプルのうち分析に供した山口県の計12サンプル、島根県の計8サンプル、鳥取県の計22サンプル、沿岸定点サンプルのうち分析に供した山口県の計24サンプル、島根県の計36サンプル、鳥取県の計21サンプルは全て陰性であった。

*K. mikimotoi*は前述のとおり山口県の1サンプルで類似する細胞が検鏡により確認されたがLAMP法の結果は陰性であった。分析に供した鳥取県の沖合定点の計22サンプル中3サンプル、兵庫県の沖合定点の計24サンプル中3サンプルで陽性を示した。その他、沖合定点サンプルのうち分析に供した山口県の計12サンプル、島根県の計8サンプル、沿岸定点のうち分析に供した島根県の計36サンプルは全て陰性であった。

検鏡では確認できなかったサンプルがLAMP法で陽性を示したものが、*C. polykrikoides*(東アジアタイプ)では11例、*K. mikimotoi*では6例あり、顕微鏡観察に比べて高い頻度で対象プランクトンが検出され、日本海西部海域における有害プランクトン広域化の実態をより詳細に把握する一助となった。また、LAMP法は対象とする細胞がごく低密度であっても顕微鏡観察と比較してより迅速かつ客観的な判別が可能である。そのため、有害赤潮発生時に広範囲での臨時調査が必要となった場合に、赤潮水塊輸送の最前線の一次スクリーニングとしてLAMP法を活用することで、検鏡による確認の補完としてより迅速な情報提供が可能になると考えられた。

C. polykrikoides フィリピンタイプおよび笠沙型を検出するLAMP法を用いて、今年度の沖合調査点の全サンプルについて分析した結果、全て陰性であり両タイプの出現は確認できな

かった (表 4)。調査海域ではこれまでこれらのリボタイプの出現は確認されていないが、対馬暖流上流部の韓国ではフィリピンタイプ、長崎県伊万里湾では笠沙型の出現が確認されており (Park et al. 2014, 山砥ら 2010)、これらの移入にも注意を払う必要があると考えられる。

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.
- Onitsuka G, Miyahara K, Hirose N, Watanabe S, Semura H, Hori R, Nishikawa T, Miyaji K, Yamaguchi M. Large-scale transport of *Cochlodinium polykrikoides* blooms by the Tsushima Warm Current in the southwest Sea of Japan. *Harmful Algae* 2010; 9: 390-397.
- Park BS, Wanga P, Kim JH, Kim J-H, Gobler CJ, Han M-S. Resolving the intra-specific succession within *Cochlodinium polykrikoides* populations in southern Korean coastal waters via use of quantitative PCR assays. *Harmful Algae* 2014; 37: 133-141.
- Park JG, Jeong MK, Lee JA, Cho KJ, Kwon OS. Diurnal vertical migration of a harmful dinoflagellate, *Cochlodinium polykrikoides* (Dinophyceae), during a red tide in coastal waters of Namhae Island, Korea. *Phycologia* 2001; 40: 292-297.
- 山砥稔文, 坂本節子, 山口峰生, 村田圭助, 櫻田清成, 高野義人, 岩滝光儀, 松岡敷充. 西九州沿岸における有害無殻渦鞭毛藻 *Cochlodinium* sp. type-Kasasa の分布と増殖特性. 藻類 2010 ; 58 : 167-172.

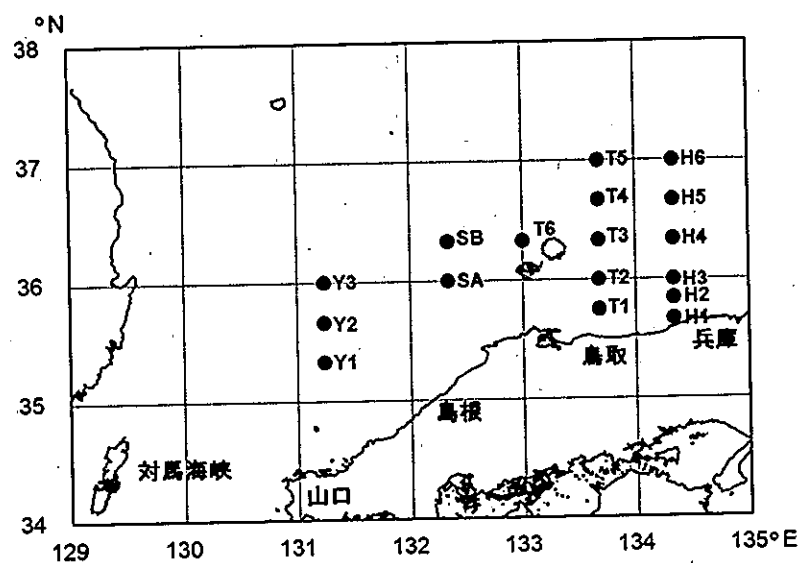


図 1-1 日本海西部海域における沖合調査定点位置図

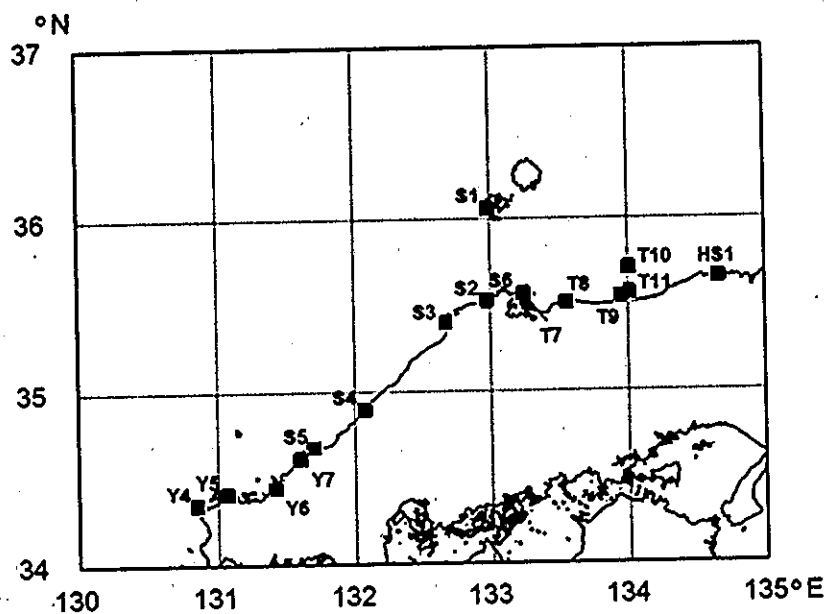


図 1-2 日本海西部海域における沿岸調査定点位置図