

図 21 瀬戸内海西部海域における 2018 年 1 月～2021 年 10 月までの *K. mikimotoi* 遺伝子検出状況. 図中の網掛け箇所および日付は赤潮発生期間を示す (一部本事業以外の各県調査データを含む: O9, E9)

表9 瀬戸内海西部海域における2018年1月～2021年10月までの月別*K. mikimotoi* 遺伝子検出状況。図中の網掛け箇所は赤潮発生期間を示す。- : N.D., + : 0.01 cells/mL 未満, ++ : 0.01 cells/mL 以上・1 cell/mL 未満, +++ : 1 cell/mL 以上 (一部本事業以外の各県調査データを含む : O9)

広島湾												
調査地点	調査年	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
広島県, H3	2018	発生	+	-		+	-	+	++			
	2019	非発生	-	-	-	-	-	-	+	+	++	
	2020	非発生		-		-	-	-				
	2021	非発生		-		+	+	-				
徳山湾, 周防灘												
調査地点	調査年	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
山口県, Y4	2018	発生					++	++				
	2019	発生		-		-	-	+				
	2020	発生		+		-	-	-				
	2021	発生		++		++	++	+++				
福岡県, F11	2018	非発生	-				-	++				
	2019	発生		-		-	++	-				
	2020	非発生		+		-	-	-				
	2021	非発生		+		++	++	++				
大分県, O13	2018	非発生	+	-	-	-	+	+	++	++	+	-
	2019	発生	-	-	-	-	-	+	++	++	-	+
	2020	発生	+	+	-	-	-	-				
	2021	非発生	+	-	+	++	++	++	+++	++	++	
別府湾												
調査地点	調査年	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
大分県, O3	2018	非発生	+			-	-	++	+++	++		
	2019	非発生	+	-	-	-	+	++	++	+++		
	2020	発生		-		-	-	-	+	-		
	2021	非発生		-		+	++	++	++	++		
豊後水道, 宿毛湾												
調査地点	調査年	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
大分県, O9	2018	発生	++			++	-	++		+++		
	2019	発生	-	+	+	+	-	+	+	++		
	2020	非発生	+			-	-	-	-	-	-	
	2021	非発生		+		+	-	+	++	++		
愛媛県, E4	2018	発生	+	++		++	++	++	+++		-	
	2019	非発生	+	+	+	-	-	-	++	++	+++	
	2020	発生	++	++	++	+	+	+	++	++	++	++
	2021	非発生	-	+	-	-	+	-	++	++		
高知県, KS	2019	非発生			-	+	+	-				
	2020	非発生	-	+	+	-						
	2021	非発生	-	+	-	++	++	++				
浦ノ内湾												
調査地点	調査年	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
高知県, KU	2019	発生			+	++	++	++				
	2020	発生	-	-	-	++						
	2021	発生	++	+++	++	+++						

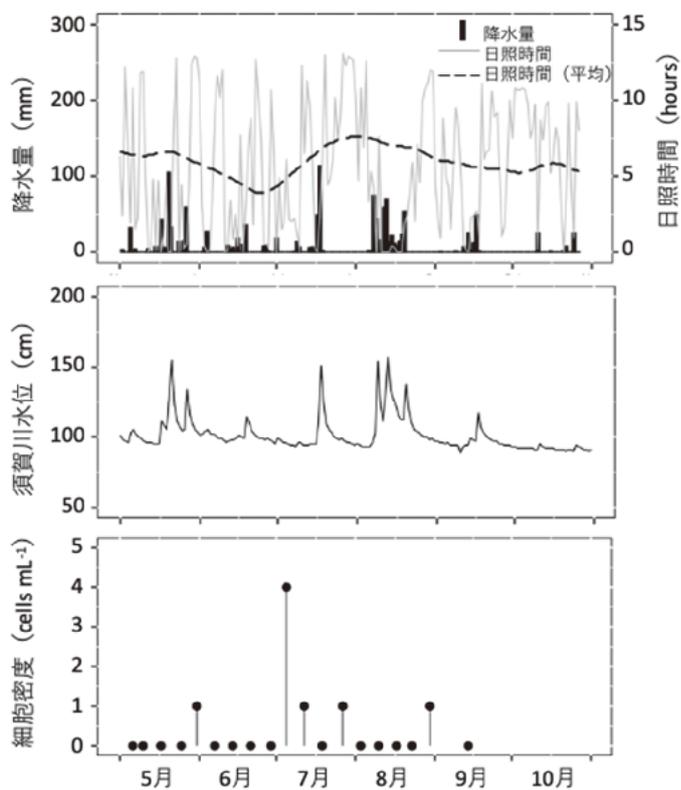


図 22 日照時間(日・平均値), 降水量, 須賀川水位(和霊), 重点調査点 U6 のクロロフィル極大層における *Karenia mikimotoi* の細胞密度の時間変化

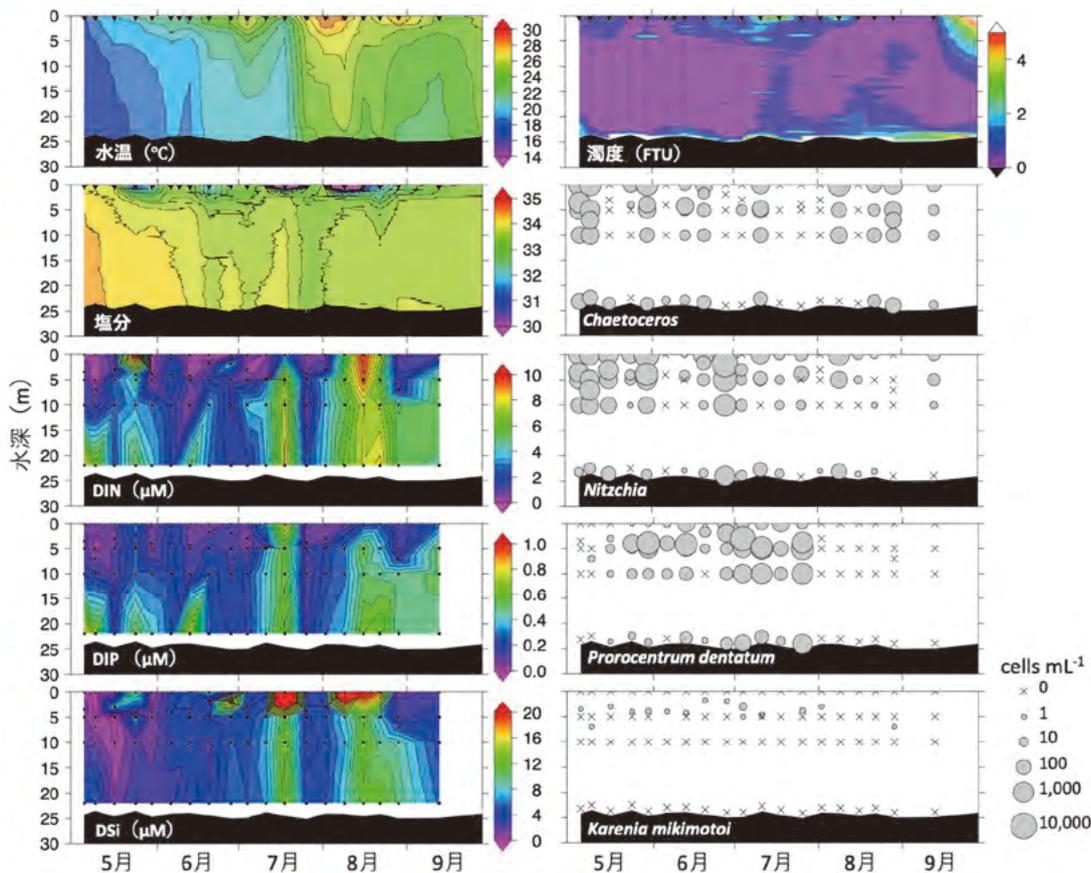


図 23 宇和島湾の重点調査点 U6 における 2021 年 5 月から 9 月の水質および植物プランクトン細胞密度の鉛直分布時間変化

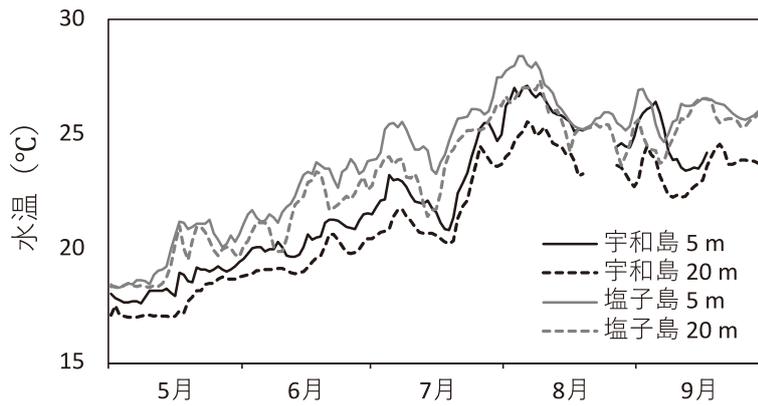


図 24 宇和島湾および塩子島における水温の推移

表 10 サポートベクトルマシンを用いたモデルによる 7 日後の *Karenia mikimotoi* 赤潮発生・非発生予測の評価

説明変数	正解率	<i>p</i>
<i>K. mikimotoi</i> 細胞密度	0.74	0.01
<i>K. mikimotoi</i> 細胞密度, 珪藻細胞密度	0.65	0.28
<i>K. mikimotoi</i> 細胞密度, 珪藻細胞密度, ダム放流量	0.65	0.42

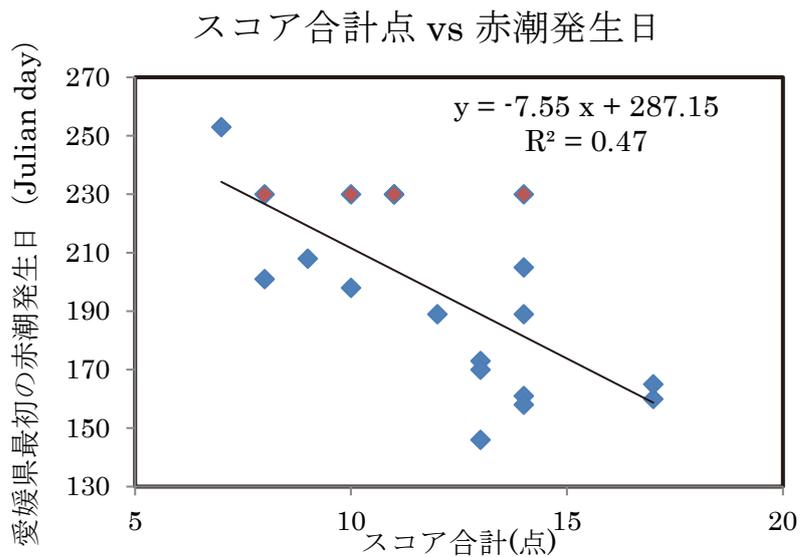


図 25 5つの環境要因からのスコア合計と愛媛県最初の赤潮発生日の相関解析

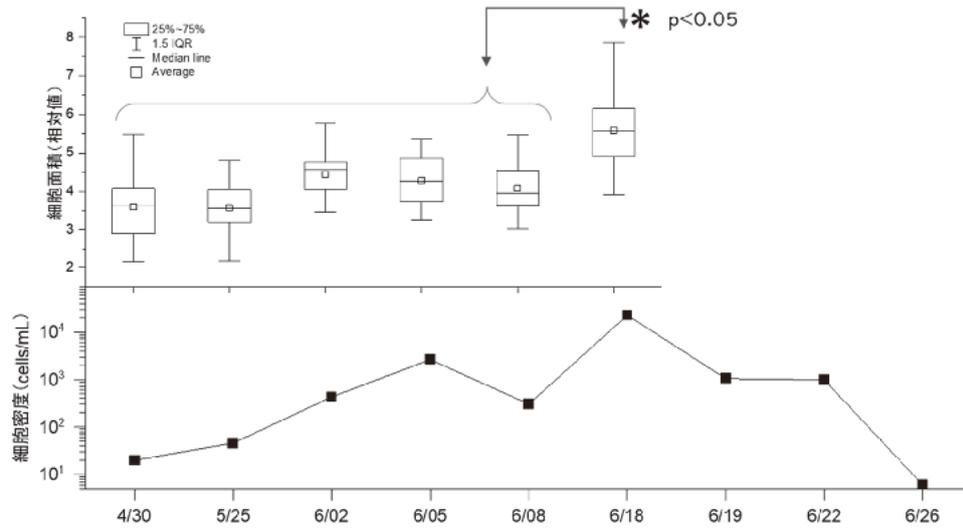


図 26 2020 年，高知県浦ノ内湾における *K. mikimotoi* 赤潮の挙動と細胞サイズ変化。高知水試・占部主任研究員による細胞測定データを解析

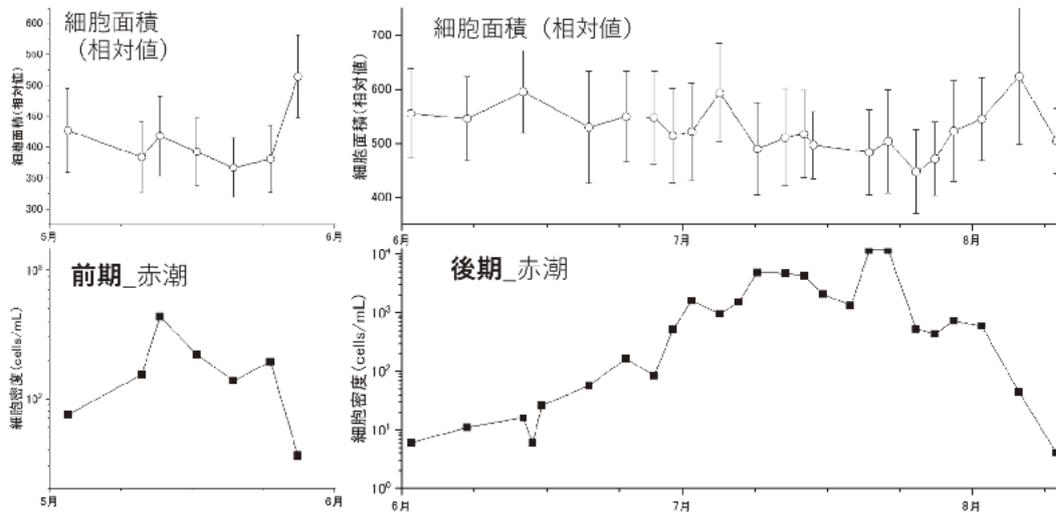


図 27 2021 年，高知県浦ノ内湾における *K. mikimotoi* 赤潮の挙動と細胞サイズ変化。高知水試・上村研究員による撮影画像データを解析

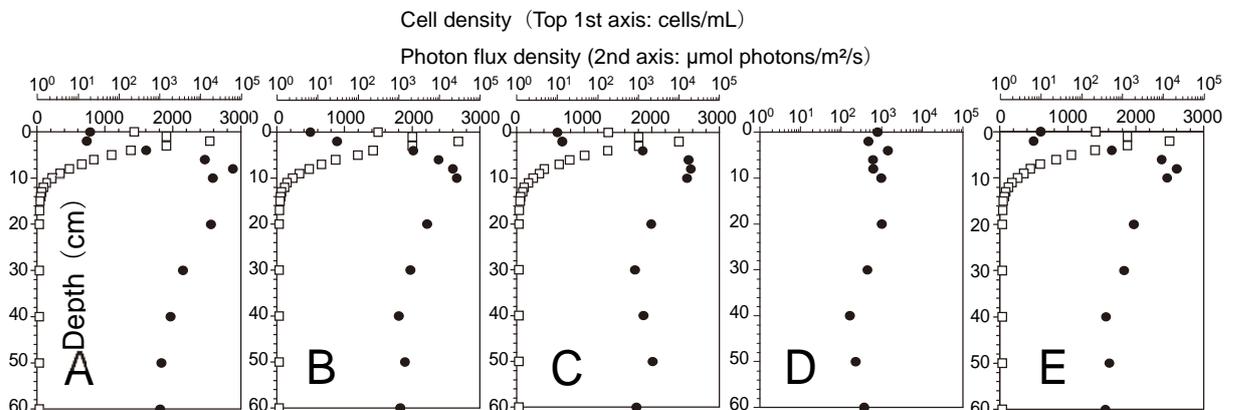


図 28 新規開発した培養装置における *K. mikimotoi* 細胞密度 (●) および推定光強度 (□) の鉛直的経時変動 (A, 4 日目 ; B, 6 日目 ; C, 8 日目 ; D, 9 日目 (暗期) ; E, 10 日目)

表 11 各県海域における *K. mikimotoi* 細胞密度が 100 cells/mL から 1,000 cells/mL に到達した確率 (%) と 100 cells/mL 確認日から 1,000 cells/mL 確認日に要した日数

	広島県広島湾海域	福岡県周防灘海域	大分県周防灘海域	大分県佐伯湾海域	愛媛県岩松湾海域	高知県浦ノ内湾海域
赤潮発生に至る確率	83%(15年/18年)	80%(8年/10年)	65%(13件/20年)	100%(11年/11年)	83%(10年/12年)	90%(19年/21年)
赤潮発生までに要した日数	13.1日(5~32日)	16.0日(5~33日)	29.6日(2~64日)	8.8日(3~22日)	6.4日(1~19日)	22.0日(2~80日)

表 12 広島県広島湾海域における判別予察・結果

解析手法	説明変数	説明変数の数	判別期間(年)	2002~2017年の的中率(%)	2018年		2019年		2020年		2021年	
					予察	的中	予察	的中	予察	的中	予察	的中
マハラノビス	5月表層DIP	2	2002~2017	90.9	○	◎	△	△	△	△	△	△
	2月降水量											
マハラノビス	4月鉛直安定度	2	2002~2017	90.9	○	◎	×	◎	△	△	×	◎
	5月表層DIP											
マハラノビス	5月表層DIP	2	2002~2017	90	○	◎	×	◎	×	◎	○	×
	5月底層Chla											
マハラノビス	4月表層塩分	2	2002~2017	85.5	○	◎	×	◎	△	△	×	◎
	5月表層DIP											
マハラノビス	4月気温	2	2002~2017	80.9	○	◎	×	◎	×	◎	△	△
	5月表層DIP											
マハラノビス	2月降水量	2	2002~2017	100	○	◎	○	×	○	×	○	×
	2月表層Chla											
マハラノビス	4月気温	2	2002~2017	100	○	◎	○	×	○	×	○	×
	4月底層DO											
マハラノビス	4月底層DO	2	2002~2017	96.5	○	◎	○	×	○	×	○	×
	5月表層DIP											
線形判別	4月表層塩分	2	2002~2017	90.9	○	◎	△	△	○	×	○	×
	2月降水量											
マハラノビス	4月鉛直安定度	2	2002~2017	90	○	◎	○	×	○	×	○	×
	4月底層DO											
マハラノビス	4月底層DO	2	2002~2017	85.5	○	◎	○	×	○	×	○	×
	2月表層Chla											
線形判別	4月気温	2	2002~2017	90.9	○	◎	△	△	×	◎	○	×
	2月降水量											
マハラノビス	4月鉛直安定度	2	2002~2017	90.9	○	◎	△	△	○	×	○	×
	2月降水量											
マハラノビス	4月気温	2	2002~2017	85.5	○	◎	△	△	△	△	○	×
	4月鉛直安定度											
線形判別	4月気温	2	2002~2017	85.5	○	◎	△	○	×	◎	○	×
	4月表層塩分											
マハラノビス	4月底層DO	2	2002~2017	85.5	○	◎	○	×	○	×	○	×
	2月降水量											
マハラノビス	4月表層塩分	2	2002~2017	85.5	○	◎	○	×	○	×	○	×
	4月底層DO											
マハラノビス	4月底層DO	2	2002~2017	95.5	△	○	○	×	○	×	○	×
	5月底層Chla											
線形判別	2月降水量	2	2002~2017	95.5	△	○	○	×	○	×	○	×
	5月底層Chla											
マハラノビス	4月鉛直安定度	2	2002~2017	85.5	△	○	△	△	○	×	○	×
	5月底層Chla											
マハラノビス	4月鉛直安定度	2	2002~2017	80	△	○	△	△	○	×	○	×
	2月表層Chla											
マハラノビス	4月表層塩分	2	2002~2017	80	△	○	△	△	○	×	○	×
	2月表層Chla											

表 13 山口県徳山湾海域における判別予察・結果

解析手法	説明変量	説明変数の数	判別期間(年)	2002～2017年の的中率(%)	2018年		2019年		2020年		2021年	
					予察	的中	予察	的中	予察	的中	予察	的中
線形判別	前年11月表層塩分	2	2002～2017	81.7	×	◎	△	△	△	○	△	△
	5月中旬表層DO											
線形判別	前年11月表層塩分	2	2002～2017	91.7	×	◎	△	△	○	◎	×	◎
	6月中旬底層DO											
線形判別	前年11月表層塩分 1月中旬日照時間	2	2002～2017	76.7	×	◎	△	△	○	◎	×	◎
線形判別	前年11月中層塩分	2	2002～2017	86.7	×	◎	×	◎	△	○	△	△
	5月中旬表層DO											
線形判別	前年11月中層塩分	2	2002～2017	86.7	△	△	△	△	○	◎	×	◎
	6月中旬底層DO											
線形判別	前年11月中層塩分 1月中旬日照時間	2	2002～2017	76.7	×	◎	△	△	○	◎	×	◎
線形判別	前年10月底層塩分	2	2002～2017	86.7	△	△	×	◎	△	○	×	◎
	6月中旬底層DO											
線形判別	前年10月底層塩分	2	2002～2017	71.7	△	△	×	◎	△	○	×	◎
	1月中旬日照時間											
線形判別	5月中旬表層DO	2	2002～2017	86.7	×	◎	△	△	△	○	△	△
	6月中旬底層DO											
マハラノビス	6月中旬底層DO	2	2002～2017	91.7	○	×	○	×	○	◎	○	×
	1月中旬日照時間											

表 14 福岡県周防灘海域における判別予察・結果

解析手法	説明変数	説明変数の数	判別期間(年)	2002～2017年の的中率(%)	2018年		2019年		2020年		2021年	
					予察	的中	予察	的中	予察	的中	予察	的中
線形判別	7月5m層水温	2	2002～2017	87.5%	△	△	△	○	△	△	×	◎
	5月5m層塩分											
線形判別	7月5m層水温	2	2002～2017	87.5%	△	△	△	○	△	△	×	◎
	5月底層塩分											
線形判別	7月5m層水温 4月表層DIP	2	2002～2017	87.5%	×	◎	○	◎	○	×	×	◎
線形判別	7月5m層水温	2	2002～2017	93.8%	×	◎	○	◎	△	△	×	◎
	6月5m層DIP											
マハラノビス	7月5m層水温	2	2002～2017	87.5%	△	△	△	○	○	×	×	◎
	4月底層DIP											
マハラノビス	7月5m層水温	2	2002～2017	87.5%	○	×	○	◎	○	×	○	×
	4月上旬気温											
線形判別	7月5m層水温	2	2002～2017	87.5%	△	△	△	○	△	△	×	◎
	5月中旬気温											
マハラノビス	5月5m層塩分	2	2002～2017	87.5%	○	×	○	◎	○	×	○	×
	4月上旬気温											
線形判別	5月5m層塩分	2	2002～2017	87.5%	×	◎	×	×	×	◎	×	◎
	4月上旬日照時間											
マハラノビス	5月底層塩分	2	2002～2017	87.5%	○	×	○	◎	○	×	○	×
	4月上旬気温											
マハラノビス	4月表層DIP	2	2002～2017	87.5%	○	×	○	◎	○	×	○	×
	4月上旬気温											
マハラノビス	6月5m層DIP	2	2002～2017	87.5%	○	×	○	◎	○	×	○	×
	4月上旬気温											
線形判別	6月5m層DIP	2	2002～2017	87.5%	×	◎	×	×	×	◎	×	◎
	5月中旬気温											
線形判別	6月5m層DIP	2	2002～2017	87.5%	×	◎	×	×	×	◎	×	◎
	4月上旬日照時間											
マハラノビス	4月底層DIP	2	2002～2017	87.5%	△	△	○	◎	○	×	○	×
	4月上旬気温											
マハラノビス	4月底層DIP	2	2002～2017	87.5%	△	△	△	○	○	×	×	◎
	4月上旬日照時間											
マハラノビス	6月底層DIP	2	2002～2017	87.5%	○	×	○	◎	○	×	○	×
	4月上旬気温											
マハラノビス	6月底層DIP	2	2002～2017	87.5%	△	△	○	◎	×	◎	×	◎
	4月上旬日照時間											
マハラノビス	4月上旬気温	2	2002～2017	87.5%	○	×	○	◎	△	△	○	×
	5月中旬気温											
マハラノビス	4月上旬気温	2	2002～2017	87.5%	○	×	○	◎	○	×	○	×
	4月上旬日照時間											
線形判別	5月中旬気温	2	2002～2017	93.8%	×	◎	×	×	×	◎	×	◎
	4月上旬日照時間											

表 15 大分県周防灘海域における判別予察・結果

解析手法	説明変量	説明変数の数	判別期間(年)	2002～2017年の的中率(%)	2018年		2019年		2020年		2021年	
					予察	的中	予察	的中	予察	的中	予察	的中
線形判別	5月表層水温	2	2002～2017	81	△	△	△	○	○	◎	○	×
	7月最大風速											
線形判別	5月5m水温	2	2002～2017	81	△	△	○	◎	○	◎	○	×
	7月最大風速											
線形判別	1月表層塩分	2	2002～2017	81	△	△	△	○	△	○	○	×
	7月最大風速											
マハラノビス	7月分布指標(10cells/mL)	2	2002～2017	81	×	◎	△	○	×	×	×	◎
	7月最大風速											
マハラノビス	5月表層水温	2	2002～2017	94	×	◎	△	○	○	◎	△	△
	7月分布指標(10cells/mL)											
マハラノビス	5月5m水温	2	2002～2017	81	×	◎	△	○	×	×	×	◎
	7月分布指標(10cells/mL)											
マハラノビス	1月表層塩分	2	2002～2017	75	×	◎	×	×	×	×	×	◎
	7月分布指標(10cells/mL)											
線形判別	5月表層水温	2	2002～2017	69	○	×	△	○	○	◎	△	△
	1月表層塩分											
線形判別	5月5m水温	2	2002～2017	69	△	△	△	○	△	○	△	△
	1月表層塩分											

表 16 大分県佐伯湾海域における判別予察・結果

解析手法	説明変量	説明変数の数	判別期間(年)	2002～2017年の的中率(%)	2018年		2019年		2020年		2021年	
					予察	的中	予察	的中	予察	的中	予察	的中
線形判別	3月降水量	2	2002～2017	92.3	×	×	×	◎	○	×	×	◎
	2月気温											
線形判別	3月降水量	2	2002～2017	96.2	×	×	×	◎	○	×	×	◎
	1月表層塩分											
マハラノビス	3月降水量	2	2002～2017	100.0	○	◎	×	◎	○	×	×	◎
	2月表層塩分											
線形判別	3月日照時間	2	2002～2017	96.2	○	◎	○	×	○	×	×	◎
	2月気温											
マハラノビス	3月日照時間	2	2002～2017	96.2	○	◎	○	×	○	×	○	×
	1月表層水温											
線形判別	3月日照時間	2	2002～2017	100.0	○	◎	○	×	○	×	×	◎
	1月表層塩分											
マハラノビス	3月日照時間	2	2002～2017	100.0	○	◎	○	×	○	×	×	◎
	2月表層塩分											
マハラノビス	2月気温	2	2002～2017	96.2	○	◎	○	×	○	×	○	×
	1月表層塩分											
マハラノビス	2月気温	2	2002～2017	96.2	○	◎	○	×	○	×	△	○
	2月表層塩分											
マハラノビス	1月表層水温	2	2002～2017	83.3	○	◎	○	×	○	×	○	×
	1月表層塩分											
マハラノビス	1月表層水温	2	2002～2017	83.3	○	◎	○	×	○	×	○	×
	2月表層塩分											

表 17 愛媛県岩松湾海域における判別予察・結果

解析手法	説明変数	説明変数の数	判別期間(年)	2002～2017年の的中率(%)	2018年		2019年		2020年		2021年	
					予察	的中	予察	的中	予察	的中	予察	的中
線形判別	1月下旬5m水温	2	2002～2017	92.3	○	◎	×	◎	○	×	○	×
	4月下旬5m水温											
線形判別	1月下旬5m水温	2	2002～2017	92.3	×	×	×	◎	○	×	○	×
	7月日照時間											
線形判別	1月下旬5m水温	2	2002～2017	96.2	×	×	×	◎	○	×	○	×
	2月平均風速											
線形判別	1月下旬5m水温	2	2002～2017	96.2	×	×	△	△	○	×	○	×
	5月平均風速											
線形判別	1月下旬5m水温	2	2002～2017	100.0	×	×	○	×	○	×	○	×
	5月下旬日照時間											
線形判別	1月下旬5m水温	2	2002～2017	92.3	△	○	○	×	○	×	○	×
	6月中旬日照時間											
線形判別	1月下旬5m水温	2	2002～2017	88.5	×	×	×	◎	○	×	○	×
	7月中旬日照時間											
線形判別	1月下旬5m水温	2	2002～2017	96.2	○	◎	○	×	○	×	○	×
	5月下旬平均風速											
線形判別	2月上旬5m水温	2	2002～2017	92.3	○	◎	△	△	○	×	○	×
	4月下旬5m水温											
線形判別	2月上旬5m水温	2	2002～2017	88.5	×	×	×	◎	○	×	○	×
	7月日照時間											
線形判別	2月上旬5m水温	2	2002～2017	92.3	△	○	×	◎	○	×	○	×
	2月平均風速											
線形判別	2月上旬5m水温	2	2002～2017	100.0	×	×	○	×	○	×	○	×
	5月平均風速											
線形判別	2月上旬5m水温	2	2002～2017	100.0	×	×	○	×	○	×	○	×
	5月下旬日照時間											
線形判別	2月上旬5m水温	2	2002～2017	95.8	△	○	○	×	○	×	○	×
	6月中旬日照時間											
線形判別	2月上旬5m水温	2	2002～2017	92.3	×	×	×	◎	○	×	○	×
	7月中旬日照時間											
線形判別	2月上旬5m水温	2	2002～2017	100.0	○	◎	○	×	○	×	○	×
	5月下旬平均風速											
線形判別	4月下旬5m水温	2	2002～2017	88.5	○	◎	×	◎	△	△	△	△
	7月日照時間											
線形判別	4月下旬5m水温	2	2002～2017	100.0	○	◎	○	×	○	×	○	×
	5月下旬日照時間											
線形判別	4月下旬5m水温	2	2002～2017	96.2	○	◎	○	×	×	◎	×	◎
	6月中旬日照時間											
線形判別	4月下旬5m水温	2	2002～2017	96.2	○	◎	×	◎	×	◎	○	×
	7月中旬日照時間											
線形判別	7月日照時間	2	2002～2017	92.3	△	○	△	△	○	×	○	×
	5月平均風速											
線形判別	7月日照時間	2	2002～2017	100.0	×	×	○	×	○	×	○	×
	5月下旬日照時間											
線形判別	7月日照時間	2	2002～2017	88.5	△	○	△	×	△	○	△	△
	6月中旬日照時間											
マハラノビス	2月平均風速	2	2002～2017	100.0	○	◎	○	×	*	×	○	×
	5月下旬日照時間											
線形判別	2月平均風速	2	2002～2017	88.5	○	◎	△	×	△	△	△	△
	6月中旬日照時間											
線形判別	5月平均風速	2	2002～2017	100.0	×	×	○	×	○	×	○	×
	5月下旬日照時間											
線形判別	5月平均風速	2	2002～2017	92.3	△	○	○	×	○	×	△	△
	6月中旬日照時間											
線形判別	5月下旬日照時間	2	2002～2017	96.2	×	×	○	×	○	×	○	×
	7月中旬日照時間											
線形判別	5月下旬日照時間	2	2002～2017	100.0	○	◎	○	×	○	×	○	×
	5月下旬平均風速											
線形判別	6月中旬日照時間	2	2002～2017	100.0	○	◎	○	×	○	×	○	×
	5月下旬平均風速											
線形判別	7月中旬日照時間	2	2002～2017	96.2	○	◎	○	×	○	×	○	×
	5月下旬平均風速											

\*ロジスティック回帰による確立算出ができなかったため、判別分析結果をもとに判定

表 18 高知県浦ノ内湾海域における判別予察・結果

解析手法	説明変量	説明変数の数	判別期間(年)	2002～2017年の的中率(%)	2018年		2019年		2020年		2021年	
					予察	的中	予察	的中	予察	的中	予察	的中
マハラノビス	6月下旬平均気温	2	2002～2017	93.8	△	○	△	○	△	○	△	○
	6月降水量											
マハラノビス	6月下旬平均気温	2	2002～2017	100.0	△	○	△	○	△	○	△	○
	4月底層DIN											
マハラノビス	1月中旬降水量	2	2002～2017	87.5	○	◎	○	◎	○	◎	○	◎
	3月中旬日照時間											
マハラノビス	1月中旬降水量	2	2002～2017	87.5	○	◎	○	◎	○	◎	△	○
	5月表層DO											
マハラノビス	4月降水量	2	2002～2017	81.3	△	○	○	◎	○	◎	○	◎
	3月中旬日照時間											
マハラノビス	6月降水量	2	2002～2017	87.5	○	◎	○	◎	○	◎	△	○
	4月底層DIN											
マハラノビス	3月中旬日照時間	2	2002～2017	87.5	△	○	○	◎	○	◎	○	◎
	5月10m層DO											
マハラノビス	3月中旬日照時間	2	2002～2017	93.8	△	○	○	◎	○	◎	○	◎
	5月底層DO											
マハラノビス	6月下旬日照時間	2	2002～2017	87.5	○	◎	○	◎	○	◎	○	◎
	5月表層DO											
マハラノビス	6月下旬日照時間	2	2002～2017	87.5	○	◎	○	◎	○	◎	△	○
	4月5m層DIN											
マハラノビス	5月表層DO	2	2002～2017	87.5	△	○	○	◎	○	◎	△	○
	5月底層DO											
マハラノビス	5月底層DO	2	2002～2017	87.5	○	◎	○	◎	△	○	○	◎
	4月底層DIN											

## 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

### ウ. 伊勢湾・三河湾・英虞湾海域

愛知県水産試験場

二ノ方圭介, 松村貴晴, 青山裕晃, 加藤毅士, 大澤 博

三重県水産研究所

田中真二, 奥村宏征, 栗山 功, 出口竣悟, 西川次寿

三重県水産研究所鈴鹿水産研究室

館 洋

水産研究・教育機構 水産技術研究所

中山奈津子, 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、ヘテロカプサ等の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ならびに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によるヘテロカプサ等有害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。

## 2 令和3年度計画及び結果

### (1) 目的

全体計画と同じ

### (2) 方法

有害赤潮及び珪藻赤潮が発生する4月～翌3月に共同提案機関が有する海洋観測調査船または傭船により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種の出現特性、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把握する。また、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について知見を蓄積する。

#### 1) モニタリング調査

有害赤潮調査として、図1に示す海域に計26点の調査定点を配置し、4月～翌3月まで月1回～週1回の頻度で、海洋環境（水温、塩分、栄養塩、クロロフィル*a*、溶存酸素）及び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（表1）。

ノリ色落ち原因珪藻調査として、図2に示す海域に計31点の調査定点を配置し、10月～翌3月まで月2回～週1回の頻度で、海洋環境（水温、塩分、栄養塩、クロロフィル*a*、溶存酸素）及び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（表2）。

#### 2) 有害赤潮及びノリ色落ち被害の発生シナリオ構築・改良

1) で取得したデータ及び既存データ等に基づいて、当該海域における有害赤潮種及びノリ色落ち原因珪藻の発生と気象条件（気象庁ホームページより「過去の気象及び潮位データ」<https://www.jma.go.jp/jma/menu/menureport.html>）・海洋環境との関係を解析し、有害赤潮及びノリ色落ち被害の発生シナリオを検討した。

### 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

ヘテロカプサ・サーキュラリスカーマ (*Heterocapsa circularisquama*) 及びカレニア・ミキモトイ (*Karenia mikimotoi*) の増殖に与える酸素濃度の影響を評価するために、異なる海域から分離した培養細胞及び天然赤潮海水を用いて、増殖試験を行った。*H. circularisquama* 培養株は、Hu9433-P(浦ノ内湾, 高知県), HCLG-1(五ヶ所湾, 三重県), 05HC06(英虞湾, 三重県), *K. mikimotoi* 培養株は、KmHam(浜名湖, 静岡県), KmTG09(英虞湾, 三重県), GmSB4(佐世保湾, 長崎県), KmUR(浦ノ内湾, 高知県), KmUW5(宇和島湾, 愛媛県)を用いた。天然赤潮海水は、2021年8月に愛知県三河湾から得られた *K. mikimotoi* 赤潮海水を供試した。*K. mikimotoi* が 1ml あたり約 20,000 細胞存在する赤潮海水にダイゴ IMK 培地を加えて(最終濃度  $0.5 \times$  IMK), 同種細胞密度を約 500 細胞/mL に調製した。酸素濃度の調節には、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) を使用した。同キットに付属の透明ガスバリア性パウチ袋に、 $O_2$  メーター, *H. circularisquama* 培養株または *K. mikimotoi* 培養株, および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。藻類の培養容器には 24 穴プレートを用い、培養株を用いた試験では、細胞初期密度は約 1,000 cells/mL に調製した。温度 20 °C, 光強度 130~150  $\mu\text{mol photons/m}^2/\text{s}$ , 明暗周期 12h:12h L:D の培養条件で、パウチ袋ごとインキュベータに入れ培養した。酸素濃度は、*H. circularisquama* 培養株区は 2 mg/L 及び自然通気, *K. mikimotoi* 培養株は 4 mg/L 及び自然通気, 天然赤潮海水は 4, 6 mg/L 及び自然通気とした。培養開始から 5 日間毎日パウチ袋からプレートを取り出して計数し、パウチ袋内に戻して酸素濃度を調整し培養を続けた。

## (3) 結果及び考察

### 1) モニタリング調査

#### a. 有害赤潮調査

##### ①海洋環境

水温 (図 3) : 伊勢湾の表層は年間を通じて平年並みから高めで推移し、平年に比べて 4 月は 2.2 °C, 10 月は 1.3 °C 高くなった。底層は 2 月を除き平年並みから高めで推移した。平年に比べて 5 月は 3.0 °C, 10 月は 1.4 °C 高くなった。5 月は底層に外海由来の海水が進入し、平年よりも高くなったと考えられた。三河湾の表層は 4 月に平年より 2.3 °C 高くなり、その後 5 月以降、低めで推移し、8 月は平年より 2.8 °C 低くなった。9,10 月は高くなったが、11, 12 月は低くなった。底層では 1~5 月まで平年並みから高めで推移し、4 月は気温が高めで推移したことにより平年より 2.6 °C 高くなった。6, 7 月は平年並みとなったが、8 月は高めとなった。また、表層と同様に 11, 12 月は平年より低くなった。また、8 月は強風による海水の上下混合が生じたことから、表層では平年より低め、底層では高めとなったと考えられた。英虞湾の表層水温は、平年に比べ、2020 年 12 月中旬から 2021 年 4 月中旬まで概ね高い状態が継続し、1 月中旬には 5.3 °C, 2 月中旬には 4.2 °C 高くなった。その後は 8 月中旬にやや低くなったが、概ね平年並みから平年よりも高い状態であった。黒潮は 2017 年 8 月下旬から A

型流路（大蛇行）が継続しており，2021年1月には，黒潮から切離した暖水渦が熊野灘沖で約3週間続けて観測されるなど，熊野灘沿岸は断続的に黒潮系暖水の影響を強く受け，高水温傾向であった。気温の推移では，2020年12月中旬から2021年1月中旬までは平年よりも低かったが，その後は4月中旬まで平年を上回った。以上のことから英虞湾の水温が高くなった要因として，黒潮の大蛇行に伴う暖水波及の影響が大きく，時期によっては気温も影響したことが考えられた。

塩分（図4）：表層は伊勢湾が4～7，9月，三河湾では5～7，9月に平年より低めで推移した。特に伊勢湾の4月と三河湾の9月が顕著で，降雨の影響と考えられた。底層は伊勢湾では5月に高めとなり，底層へ外海由来の海水が進入した影響と考えられた。三河湾では8月に表底層の差が小さくなっており，強風による海水の上下混合の影響と考えられた。英虞湾の表層は，7月上旬および8月中下旬に平年よりも低下した。8月は直近5年で最も降水量が多く，降雨による影響が考えられた。底層では5月中旬以降は平年を下回る状態が継続した。

溶存酸素（図5）：表層は伊勢湾で6月に赤潮によって高くなった以外は，平年並みか低く推移した。三河湾は年間を通じて平年並みから低めで推移し，4月は平年より特に低くなった。底層は伊勢湾では7～10月に，三河湾では8月を除き6～10月に平年より低く推移した。8月は三河湾では強風による海水の上下混合が生じ，表層では低下，底層では上昇したと考えられた。英虞湾の表層では，平年並みか若干低い状態で推移した。底層では7月上旬から9月下旬まで1.1 mg/Lから4.0 mg/Lで推移したが，3 mg/Lを下回ったのは9月上旬から中旬に留まった。

クロロフィル $a$ （図6）：伊勢湾の表層は7月に平年よりも高くなったが，8～11月は低めで推移した。底層は3月が高かったが，4～11月までは低く推移した。三河湾の表層は7月に高くなった以外は平年並みか低く推移した。底層は3，4月に高かったが5月以降低く推移した。表層で高くなった7月は伊勢湾，三河湾ともに *Thalassiosira* spp. と *Skeletonema* spp. の複合赤潮が発生しており，その影響と考えられた。英虞湾の表層では，*K. mikimotoi* の赤潮が発生した8月中旬を除き，平年並みか低く推移した。底層では，8月下旬に *Skeletonema* spp. が発生し，平年を上回った。

栄養塩（DIN 図7）：DIN は伊勢湾の表層では8月が平年並みとなった以外は低く推移した。底層は4月が平年より高くなった以外は平年並みから低く推移した。三河湾の表層は，8月が平年より高くなった以外は平年並みから低く推移した。底層は6，7，9月で高くなった以外は平年並みから低く推移した。英虞湾の表層では1月上旬～8月上旬まで，平年並みか低く推移した。底層では7月下旬に平年値を超える非常に高い値が確認された。

栄養塩（ $PO_4\text{-P}$  図8）： $PO_4\text{-P}$  は，伊勢湾の表層では11月を除き低く推移し，底層では7，8月が高くなった。三河湾の表層では1，7，8月が高く，特に8月が高くなったが9月以降は低く推移した。底層では7，9月に高くなった。伊勢湾，三河湾の底層で高かった8月前後は海底からの溶出の影響が考えられた。また，三河湾の表層では，海水の上下混合による底層からの供給が考えられた。英虞湾の表層及び底層では平年並みか低く推移した。

栄養塩（ $SiO_2\text{-Si}$  図9）： $SiO_2\text{-Si}$  は伊勢湾の表層では9，11月が高めとなった以外は平年並みか低く推移し，底層は7～10月に高く推移した。三河湾では，表層は6～8，11，12月に高くなった。底層は1～4月まで平年並みから低く推移し，5月以降は高く推移した。

特記事項として，7月下旬から8月中旬まで三河湾で *K. mikimotoi* の赤潮が発生し，8月に

は三河湾に接する伊勢湾の一部にも波及した。この赤潮により、魚貝類のへい死が確認された。7月上旬と8月中旬はまとまった降雨があり、三河湾に面する愛知県蒲郡市の気象観測所(図10)のデータでは、平年に比べて7月上旬が3.5倍、8月中旬が10倍の降水量であった。9月上旬に伊勢湾の愛知県側と三河湾に外海水が流入し、貧酸素水塊の移動が観測された。

伊勢湾の三重県側では、浅海定線観測において貧酸素水塊が6月から湾中央部で確認され、7月には湾内の広い範囲で確認された。8月にはさらに規模が拡大し、9、10月には三重県側の沿岸域でも広い範囲で貧酸素水塊が形成された。鈴鹿市白子地先では8月中旬に顕著な低水温となった。雨天や曇天が継続した影響と思われる。10月中旬には顕著な高水温となった。気温が高かったことに加え、黒潮大蛇行に伴う暖水の影響によるものと思われる。黒ノリ養殖では、12月初旬に色落ちが見られたが、12月中旬以降、色調は回復している。

英虞湾では、2019年以降、毎年6月あるいは7月頃からアコヤガイの稚貝、母貝、挿殻貝にへい死や外套膜が萎縮する症状が確認されている。2021年も、6月頃から稚貝のへい死や外套膜萎縮症状が確認されたが、へい死率は前年を下回った。こうしたへい死の原因として、英虞湾における近年の高水温や餌料プランクトン不足が関与している可能性が考えられる。*K. mikimotoi*による赤潮が、8月10日から12日に発生した。英虞湾での同種による赤潮の発生は2017年以来であった。8月12日から20日まで降雨が連続し、同期間の降水量は394mmであった。8月の降水量(446mm)は直近5年で最も多かった。

## ②プランクトン(図11)

### *Heterocapsa circularisquama*

伊勢湾、伊勢湾口、三河湾、英虞湾のいずれの海域でも確認されなかった。

### *Chattonella* spp. (*C. marina*, *C. antiqua* 及び *C. ovata*)

三河湾で10月下旬から11月中旬に確認され、最高密度は19 cells/mLであった。

### *Karenia mikimotoi*

伊勢湾、伊勢湾口、三河湾、英虞湾の4海域で確認された。伊勢湾では7月から9月上旬および12月下旬に確認され、最高密度は4 cells/mLであった。伊勢湾口では8月上旬、9月上旬および11月上旬に確認され、最高密度は10 cells/mLであった。三河湾では6月中旬、7月から9月の上中旬に確認され、最高密度は21,000 cells/mLであった。英虞湾では6月上旬および7月中旬から8月中旬に確認され、最高密度は420 cells/mLであった。

### *Heterosigma akashiwo*

伊勢湾、伊勢湾口、三河湾、英虞湾の4海域で確認された。伊勢湾では6月上旬のみ確認され、密度は27 cells/mLであった。伊勢湾口では4月から8月および11月、12月に確認され、最高密度は210 cells/mLであった。三河湾では5月下旬から6月中旬に確認され、最高密度は65,000 cells/mLであった。英虞湾では5月上旬から下旬、6月中下旬、8月上旬、10月および11月の中旬に確認され、最高密度は170 cells/mLであった。

### *Vicicitus globosus* (旧種名: *Chattonella globosa*)

伊勢湾、三河湾の2海域で確認された。伊勢湾では5月中旬および6月上旬に確認され、最高密度は16 cells/mLであった。三河湾では5月上旬、6月上旬、7月上旬、10月および11月中旬、12月上旬に確認され、最高密度は13 cells/mLであった。

・三河湾における *H. circularisquama* の発生環境に関する考察

近年では、2015～2019年に100 cells/mL以上の最高密度が毎年確認されていた。*H. circularisquama*の増殖は高水温、高塩分が好適条件となり2015～2019年の最高密度も7、8月に確認されている(表3)。しかし、今年度は昨年度同様に1月まで確認されなかった。三河湾に面する蒲郡市の気象観測所の7、8月の降水量をみると、7月上旬と8月中旬にまとまった降雨があり、塩分に影響していたと考えられた。また、三河湾では7、8月に *Skeletonema* spp.や *Thalassiosira* spp.などの珪藻赤潮が確認されており、珪藻類との競合も増殖を抑制した要因と考えられた。

・英虞湾における *H. circularisquama* の発生環境に関する考察

昨年度に引き続き、本年度も *H. circularisquama* は確認されなかった。例外はあるものの、DIN および  $PO_4\text{-P}$  の値が表層及び底層とも平年並みか下回ったこと、底層における貧酸素状態が短期間であったことなどが、同種が確認されなかった理由と考えられた。なお、英虞湾における同種の赤潮は、2016年9～10月に発生して以降、確認されていない。

・広域的な有害赤潮の発生に関する考察

本年度は、*K. mikimotoi*による広域的な有害赤潮が発生した。渥美湾の一部で7月に初認されたが、他の海域における確認時期が2週間程度経過後であり、各海域で細胞密度が最大となったのが8月11日から13日であったこと、熊野灘北部の沿岸域で7月末から8月上旬まで北上する海流が確認されていることなどから、2018年に広域発生した *H. akashiwo* 赤潮のように、赤潮発生海域から他海域へ赤潮プランクトンが拡散したのではなく、各海域の細胞が同期して赤潮を形成したものと考えられた。

b. ノリ色落ち原因珪藻調査

①海洋環境(図12, 13)

水温：三河湾では気温の影響により10月上旬は平年より高め、10月下旬は低めとなったが、それ以降は概ね平年並みで推移した。伊勢湾の三重県側では、気温や黒潮大蛇行による暖水の影響により10月上旬から中旬にかけて高めとなった。その後は概ね平年並みで推移したが、12月中旬から1月中旬までやや高めで推移した。

塩分(比重)：三河湾では10月は降雨が少なく下旬が平年より高め、12月は降雨がやや多く上下旬はやや低めとなった。伊勢湾の三重県側では、10～11月に降雨が少ない状況が継続したため、10月上旬から平年を大きく上回り、1月下旬まで概ね高い値で推移した。

栄養塩：三河湾ではDINは12月下旬に平年を上回った以外は平年を下回った。 $PO_4\text{-P}$ は10月下旬と12月下旬に平年並みとなった以外は平年を下回った。降雨が少なかったことや11、1月のプランクトンの増殖の影響と考えられた。伊勢湾の三重県側では、DIN、 $PO_4\text{-P}$ ともに10月上旬は平年を大きく下回った。10月下旬には、降雨により一時的に平年並みまで回復したが、その後は平年より低い値で推移した。

クロロフィル *a* は、三河湾では、1月上旬に *Eucampia zodiacus* と *Skeletonema* spp.の複合赤潮が発生し、特に値が高くなっていた。

②プランクトン(図14)

*Skeletonema* spp.

三河湾では10月上旬と11月上旬にそれぞれ最高密度10,500 cells/mL, 26,750 cells/mLの赤

潮が確認された。また、1月には *E. zodiacus* との複合赤潮が確認され最高密度 4,575 cells/mL となった。伊勢湾における三重県側のノリ漁場では、11月上旬には最高密度 7,910 cells/mL を確認したが、11月中旬には減少した。その後、12月上旬に再び増加し、最高密度 6,960 cells/mL を確認したが、すぐに減少し、12月中旬には確認されなかった。全体的には昨年より少なめで推移した。

#### *Chaetoceros* spp.

三河湾では10月上旬に最高密度は 2,517 cells/mL となったが、その後減少し、数百 cells/mL で推移した。伊勢湾における三重県側のノリ漁場では、10月中旬に最高密度 1,560 cells/mL、11月上旬に 1,320 cells/mL を確認したが、その後減少し、11月中旬から12月下旬まで顕著な増加は確認されなかった。

#### *Eucampia zodiacus*

三河湾では12月上旬以降に確認されており、1月上旬に最高密度が 1,516 cells/mL となり、先述のとおり *Skeletonema* spp. との複合赤潮が発生した。伊勢湾における三重県側のノリ漁場では、1月中旬に鈴鹿、桑名地区で 50~65 cells/mL が確認された以外は確認されなかった。

##### ・伊勢湾におけるノリ色落ち原因珪藻の発生に関する考察

伊勢湾における三重県側のノリ漁場では、10月上旬から中旬にかけて、DIN、PO<sub>4</sub>-Pともに平年を大きく下回った。10月下旬には、降雨により一時的に平年並みまで回復したが、11月上旬には *Skeletonema* spp. が 7,910 cells/mL、*Chaetoceros* spp. が 1,320 cells/mL 確認され、栄養塩が減少した。12月初旬には桑名地区を除く全てのノリ漁場で色落ちが発生したが、12月7日の降雨以降、DINは平年並みまで回復し、12月中旬以降はプランクトン密度も低密度で推移したため、一部のノリ漁場を除いて色調は回復、生育も順調となった。1月中旬から大型珪藻の *Rhizosolenia* spp. が発生した。最高密度は 200 cells/mL 程度であったが、ノリ漁場の広範囲で見られ、桑名地区を除く多くの漁場で色落ちが発生した。

##### ・三河湾におけるノリ色落ち原因珪藻の発生に関する考察

DINは12月下旬に平年を上回った以外は平年を下回った。PO<sub>4</sub>-Pは10月下旬と12月下旬に平年並みとなった以外は平年を下回った。10月上旬と11月上旬に *Skeletonema* spp. などの珪藻類の赤潮が発生した。10月下旬には躍層の解消による供給があり、DINは10月上旬よりは増加したが、平年より少なかった。PO<sub>4</sub>-Pは平年並みに回復した。

ノリの色落ちは一部の海域で確認されたが、赤潮を形成するほどの細胞密度ではなかった。10,11,1月は平年より降雨が少なかったことから栄養塩の供給が少なく、珪藻類の増殖が抑制されたと考えられた。12~1月の *E. zodiacus* と *Skeletonema* spp. の細胞密度の推移をみると、いずれも12月下旬から1月上旬にかけて増殖がみられ、1月の栄養塩低下後の細胞密度の低下は *Skeletonema* spp. に比べて *E. zodiacus* のほうが緩やかであった(図15)。*E. zodiacus* が有機態のリソも利用して増殖することが可能であることが優位に働いたと考えられた。

## 2) 有害赤潮及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(散発的に発生する *H. circularisquama* の発生シナリオ構築)

これまでの三河湾における *H. circularisquama* の発生状況を表3に示した。三河湾における *H. circularisquama* の細胞密度が 100 cells/mL 以上となる場合を *H. circularisquama* 発生年とし

て、その年の海象及び気象等について解析を行った結果、発生年は5月上旬～下旬、5月中旬～6月上旬の3号ブイの表層平均水温、5月中旬～6月上旬の1号ブイの表層平均水温が高く、6月の渥美湾のDIN/PO<sub>4</sub>-Pの値が低い傾向がみられ（湯口ら 2019）、2017年度から上記の項目を用いて発生予察を行っている。

2021年度の予測結果は図16のとおりであった。表層平均水温に関する項目については、海況自動観測ブイのメンテナンスのため、1項目のみ予測に利用したが、水温は低く発生条件から外れていた。一方、6月の渥美湾のDIN/PO<sub>4</sub>-Pの値は低く発生条件にあてはまっていた。以上から水温が外れていたため、2021年は夏季に*H. circularisquama*の細胞密度が100 cells/mL以上にならないと予測し、期間を通じて*H. circularisquama*は確認されず予測通りとなった。

2021年度は予測通りとなったが、2020年度は発生条件に当てはまり、発生すると予測したが夏季にまとまった降雨があり、競合する珪藻類の増殖が*H. circularisquama*の増殖が抑制され発生しなかった。このため予測結果をベースとして、直近の気象条件や競合種の動態なども考慮したうえで予測することが望ましいと考えられた。

#### ・英虞湾 (*K. mikimotoi* 赤潮の発生シナリオの構築)

英虞湾における*K. mikimotoi*の発生状況を表4に示した。細胞密度が100 cells/mLを超える同種の赤潮は2018年以降3年続けて確認されなかったが、2021年は最高密度が420 cells/mLで赤潮発生年となった。そこで*K. mikimotoi*赤潮発生前後である2021年7月1日～8月31日の英虞湾における同種の発生状況や海況を検討した（図17）。同種は8月10日に湾口の御座からタコノボリ、和具、湾奥の立神で確認され、翌11日に和具で最高細胞数420 cells/mLとなった。細胞数はその後減少傾向となり、8月30日のタコノボリにおける10細胞を最後に確認されなくなった。タコノボリに設置されたICTブイが1時間間隔で測定する水深2 m（以下、表層）と26 m（以下、底層）の水温および塩分データによれば、赤潮発生時、表層は水温26～28℃、塩分32.1～32.8であった。天候では、8月12日～20日は雨天が継続した。アメダス（阿児）のデータでは、同期間の降水量は394 mmであった。この降雨により、表層の水温は8月12日以降、塩分は8月14日以降、それぞれ低下傾向となったが、*K. mikimotoi*赤潮発生時において降雨はなかったことから、降雨をきっかけとした赤潮発生の可能性は低いと考えられた。タコノボリでの定期観測の結果、8月10日に溶存酸素量の低下が確認されたが、底層で3.15 mg/L、水深20mで3.52 mg/Lであり、極端な貧酸素状態ではないことから、低酸素化をきっかけとした赤潮発生の可能性は低いと考えられた。一方、7月中旬～8月上旬に底層と水深20 mのDINおよびPO<sub>4</sub>-Pの濃度が高くなる傾向が確認された。タコノボリの底層における水温と塩分のデータ変化から、7月11日と8月11日および15日に英虞湾へ外洋水流入があったと考えられた。外洋水は塩分濃度が高く、湾内の海水に比べ重いため、底層から湾内に流入する。その際、底層では攪拌が引き起こされると考えられる。また、湾外の深い水深から栄養塩濃度が高い海水が沿岸湧昇により湾内へ外洋水として流入することも考えられる。これらの間接的な海底表面の攪拌の影響あるいは直接的な栄養塩供給等により、底層の栄養塩濃度が高まった可能性が考えられた。

Honjo et al. (1991) は、三重県五ヶ所湾において1984年から1989年に発生した*K. mikimotoi*赤潮について、春の増殖開始時期と冬の平均水温との間に密接な相関があり、冬季の水温が高いほど越冬する細胞密度が高いことを報告している。そこで、英虞湾における12月から3月の平均水温と*K. mikimotoi*赤潮の発生状況について整理した。冬季の平均水温が高い年以

外に、12°Cを下回る低い年でも赤潮が発生しており、英虞湾では冬季の平均水温と赤潮発生に相関は見られなかった（図 18）。五ヶ所湾を含む熊野灘全域と英虞湾では、地形的な面から海況に相違が生じることが考えられたため、熊野灘の海況に大きな影響を与える黒潮流型と英虞湾の海況や *K. mikimotoi* 赤潮の発生状況等を整理した。

英虞湾は、湾口部の水深が浅く狭い閉鎖性内湾であり、外洋水の流入により水温や塩分が変化する。そこで、英虞湾内への外洋水の流入状況について検討した。外洋水は塩分濃度が高く、湾内の海水と比較して重いため、底層から湾内に流入する。また、水温差も大きい。そこで、タコノボリで 2003 年 10 月～2007 年 9 月および 2020 年 3 月～2021 年 12 月に 1 時間間隔で測定した水温および塩分データから、底層で塩分が 0.2 psu 以上急上昇し、同時に水温変化が発生した場合を外洋水流入と判断することとした。結果は黒潮流型別の外洋水流入回数として図 19 に示した。黒潮流型が A 型の場合、N 型や C,B 型に比べ、英虞湾内への外洋水流入頻度がやや高い傾向にあると考えられた。

黒潮は、水温や塩分濃度が高い反面、栄養塩濃度は低い傾向がある。そのため、黒潮流型による熊野灘全域への中長期的な影響として、N 型の場合は黒潮からの暖水波及の影響が少ないために水温は低く、栄養塩濃度は一定程度維持され、A 型の場合は黒潮からの暖水波及により、水温は高く、栄養塩濃度は低くなりやすいと考えられる。ただし英虞湾においては、A 型の場合は湾内への黒潮系暖水の流入頻度が増えるという短期的な影響を考慮する必要がある。すなわち、2021 年の赤潮発生前後には外洋水流入と底層の栄養塩濃度の増加の関連が伺われた。外洋水が流入する際、栄養塩豊富な海水が湧昇によって英虞湾の底層から流入し、底層水の攪拌効果も加わった可能性が考えられた。英虞湾の海況は、熊野灘の他の湾と中長期的には等しいものの短期的には異なるのではないかと考えられた。

これらのことから、これまで検討対象としてきた 1990 年台以降の英虞湾内における *K. mikimotoi* 赤潮発生状況に加え、熊野灘の他の湾における発生状況についても検討範囲を拡大した。1984 年には五ヶ所湾を中心に *K. mikimotoi* 赤潮の大規模な広域発生があった（竹内ら 1986、河合ら 1986、本城 1997）ことから、1980 年台の赤潮発生状況についても検討に加えることとした。まず、五ヶ所湾と英虞湾における *K. mikimotoi* 赤潮の発生状況と黒潮流型について検討した（図 20）。12 月から 3 月の黒潮流型のうち N 型が占める割合が高い場合、五ヶ所湾と英虞湾では赤潮非発生となる傾向が高く、次に五ヶ所湾のみで赤潮発生の傾向が高く、五ヶ所湾、英虞湾ともに赤潮発生となる傾向は最も低くなった。黒潮流型が N 型の場合、冬季水温は低い傾向にあり、*K. mikimotoi* の増殖が抑制されることが考えられた。しかし、黒潮流型が A 型で冬季水温が高いと考えられる場合でも赤潮が未発生の年がある。また、事例は 3 件と少ないが、英虞湾のみで赤潮発生する場合は前述の 3 者とは異なる傾向であった。他の環境項目や珪藻など競合種の発生状況などが発生要因となっている可能性がある。英虞湾における *K. mikimotoi* 赤潮の発生について、五ヶ所湾での発生や黒潮流型との関連を中心に検討したが、不明な点も残った。英虞湾での赤潮発生シナリオの構築に向けて、引き続き検討を行っていく。

#### b. ノリ色落ち被害の発生シナリオ構築

##### ・伊勢湾ノリ漁場

これまでの分析により、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、すべての事例において

DIN が 7.1  $\mu\text{M}$  以下となることが確認されている。今年度はこれらの条件に合致した状況が、12 月 1 日に確認され (*Skeletonema* spp. 主体に最高密度 9,670 cells/mL, DIN は 0.5  $\mu\text{M}$ )、ノリの色落ちが発生した。その後は上記条件に合致したプランクトンの発生は見られず、色落ちも解消された。11 月は降雨が少なく栄養塩濃度も少ない状態が続いたが、11 月下旬に強風が続き、一時的に栄養塩が回復したことが珪藻の増殖をもたらしたものと思われた。今後もデータを蓄積、検証するとともに、季節風等の気象条件や外洋水の湾内への波及による影響等も踏まえて、原因種の発生及び増減要因の解析を進める。

#### ・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 月の南知多の気温及び 11 月の水温が高く、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察を行っている。そこで、昨年度の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。

昨年度、2020 年 11 月の水温は高く条件に当てはまっていた。しかし、気温は低く、12 月の *Chaetoceros* spp. と *Skeletonema* spp. の細胞密度の合計は多く条件から外れていたため、*E. zodiacus* 赤潮による被害は発生する可能性が低いと予測した。*E. zodiacus* は 12 月上旬以降に確認されたが、最高細胞密度は 64 cells/mL と少なく赤潮は発生しなかった。

2021 年度は 11 月の気温がやや高く条件に当てはまったが、水温はやや低く、12 月の *Skeletonema* spp. と *Cheatoceros* spp. の細胞密度の合計はやや高くなり条件から外れた。このため、予測に使用する 2 つの項目が発生年の値の範囲から外れたことから、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 月上旬に *E. zodiacus* の最高細胞密度は、1,516 cells/mL となり *Skeletonema* spp. との複合赤潮が発生したが、その後、細胞密度は低下し、赤潮は解消され、ノリの色落ち被害が発生するには至っていない (1 月末現在)。一方で、一部の海域では栄養塩の供給が少なくプランクトンの増殖が抑えられ、赤潮は発生していないがノリの色落ちは発生しており注視していく必要がある。

2018~2021 年度の予測と結果 (表 5) をみると、赤潮被害発生予測に関する 3 条件とも当てはまっていた 2019 年度は赤潮によるノリ色落ち被害が発生し、予測と一致した。また、他の年度については、被害は発生しておらず、予測と一致した。このことから予測項目の好条件下では *E. zodiacus* の増殖で赤潮が発生し栄養塩が減少することでノリの色落ち被害が発生するシナリオが考えられる。引き続き検証を進める。

### 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

これまで英虞湾や三河湾、加茂湖において、海水中の溶存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、溶存酸素濃度が *H. circularisquama* の増殖に与える影響について評価することとした。過去に室内で実施した予備試験では、*H. circularisquama* は海水培地中の溶存酸素濃度 (以下、酸素濃度) が低いところで増殖速度が高くなり、酸素濃度が高いところでは増殖速度が低くなった。*K. mikimotoi* は逆の傾向を示した。しかしながら、この試験では、供試株を一定の酸素濃度に曝すことが困難であったため、酸素濃度をより一定に保つことができる細胞の低酸素培養に特化したキット BIONIX を使用し

て試験を実施した。その結果、*H. circularisquama* (HCKam06) は 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* (KmUW3) 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。

以上の予備試験による結果を検証するために、今年度は異なる海域から分離された培養株および天然赤潮海水を用いて試験を行った。まず、*H. circularisquama* 培養株では、2 mg/L の酸素濃度に調整されたパウチ内で、浦ノ内湾、五ヶ所湾、英虞湾から分離された 3 株をそれぞれ培養したところ、いずれも増殖は認められなかったが、生残した (図 21)。細胞形態については、サイズが若干大きくなり、運動性がないなどの変化は認められたが、元の形態を維持した。また、5 日目の計数後に培養液を通常通気に戻すと、全ての株が 6 日目から増殖を開始した。これらの結果は、昨年度までの実験株 Kam06 (加茂湖) の結果と同様であり、*H. circularisquama* は貧酸素状況下でも生残することができ、鉛直運動によって溶存酸素濃度の高い深度で少しでも酸素を得ることができれば増殖可能と推察できる。したがって、現場では酸素濃度の低下に伴い、貧酸素下では増殖困難な渦鞭毛藻類や珪藻類など競合種の増殖は抑制され、低酸素下で生残または増殖できる *H. circularisquama* が優占すると考えられる。一方、*K. mikimotoi* 培養株は、浜名湖、英虞湾、佐世保湾、浦ノ内湾、宇和島湾から分離された 5 株を 4mg/L の酸素濃度に調整されたパウチ内で培養したところ、全株とも 24 時間以内に全滅した (図 22)。これらの結果は、昨年度までの実験株 KmUW3 (宇和島湾) の結果と同様であった。次に、2021 年 8 月に三河湾で発生した *K. mikimotoi* 赤潮海水を用いて、4, 6 mg/L の酸素濃度に調整されたパウチ内で培養したところ、*K. mikimotoi* は 24 時間以内に全滅した。対照区である通常通気下で培養した天然細胞は増殖した (図 23)。

以上の結果、*K. mikimotoi* が溶存酸素濃度の低い環境下で生残できないという可能性や要因については現在のところ不明であり、原因究明もさることながら、貧酸素状況下における *K. mikimotoi* の現場海中での生残や増殖について解明することは、今後の課題であると考えている。

## 引用文献

- Honjo T, M Yamaguchi, O Nakamura, S Yamamoto, A Ouchi K Ohwada. A relationship between winter water temperature and the timing of summer *Gymnodinium nagasakiense* red tides in Gokasyo Bay. *Nippon Suisan Gakkaishi*. 1991; **57**: 1679-1682.
- 本城凡夫. ギムノディニウム. 「赤潮の科学第二版」(岡市友利編) 恒星社厚生閣, 東京. 1997 ; 264-273.
- 河合博, 朝倉章夫, 遠藤晃平. 熊野灘沿岸域における *Gymnodinium nagasakiense* 赤潮に関する総合的研究. 昭和 60 年度三重県水産技術センター事業報告, 1986 ; 103-106.
- 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.
- 竹内照文, 芳養晴雄, 中西一. 赤潮予察調査事業. 昭和 59 年度和歌山県水産試験場事業報告, 1986 ; 53-111.
- 湯口真実, 蒲原聡, 高須雄二, 美馬紀子, 天野禎也. 三河湾における有害渦鞭毛藻 *Heterocapsa circularisquama* の発生状況及び予察技術の開発に向けて. 愛知県水産試験場研究報告, 2019; **24** : 14-21.