

## 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

加藤毅士・柘植朝太郎・二ノ方圭介

(2023 年 12 月 25 日受付, 2024 年 1 月 29 日受理)

### Occurrence and environmental characteristics of harmful dinoflagellate *Karenia mikimotoi* in Mikawa Bay and investigation of factors contributing to develop and disappearance of the red tide in summer 2021

KATO Tsuyoshi<sup>\*1,2</sup>, TSUGE Asataro<sup>\*1</sup>, and NINOKATA Keisuke<sup>\*1</sup>

**Abstract :** We investigate the occurrence of the harmful dinoflagellate *Karenia mikimotoi* and its environmental characteristics in Mikawa bay from 2014 to 2022. During the nine-year, the red tides mainly occurred during the summer (July and August), but from 2016 to 2017 it occurred during the winter. The red tides were found at a water temperature range between 23.8 and 30.1 °C in summer and between 9.2 and 9.8 °C in winter. Focusing on red tide in summer 2021, we considered the factors contributing to develop and disappearance. It is thought that *K.mikimotoi* initially developing in the area between the pycnocline layer and above the hypoxic water mass. Subsequently, the collapse of the stratification caused extensive bloom. The disappearance of the red tide was thought to be related to physical runoff from rainfall and interspecific competition with diatoms. A comparison of stratification between red tide occurrence and non-occurrence years showed that the water temperature difference between the surface and bottom layers was significantly larger in mid-July in the occurrence years. Regarding the develop and disappearance of the red tide in Mikawa Bay, it was confirmed that the development and collapse of stratification and hypoxic water mass are closely related.

**キーワード;** 三河湾, *Karenia mikimotoi*, 赤潮, 貧酸素水塊, 成層構造, 消長要因, 自動観測ブイ

*Karenia mikimotoi* (以下 *K.mikimotoi*) は, 赤潮形成により天然及び養殖魚介類に漁業被害を与える有害渦鞭毛藻である。我が国における *K.mikimotoi* による漁業被害については, 1965 年の長崎県大村湾における報告が最初で,<sup>1)</sup> その後は西日本の沿岸域を中心に発生している。特に漁業被害が大きかった事例としては, 1984 年の熊野灘において 28 億円, 1991 年の安芸灘及び 2012 年の豊後水道においてそれぞれ 15 億円<sup>2)</sup> の被害が挙げられる。

愛知県では 1984 年 8 月に *K.mikimotoi* 赤潮が発生し, アワビに対して被害を与えたと報告されている。<sup>3)</sup> また 2015 年には県内で 31 年ぶりに *K.mikimotoi* 赤潮が発生し,

<sup>4)</sup> その後は 2016, 17, 21, 22 年と頻りに *K.mikimotoi* 赤潮による漁獲物や天然魚介類がへい死する漁業被害が確認された。<sup>5-8)</sup> 他県海域においては, 本種の増殖特性や赤潮の消長要因が報告されているが, 三河湾においては詳細な解析及び報告は行われていない。

そこで, 今回の報告では近年の三河湾における *K.mikimotoi* の出現状況と環境特性の把握, 2021 年の赤潮発生時を例に発生期間中の海況・気象条件の時空間的変化の把握を行い, *K.mikimotoi* 赤潮の消長要因の検討を行った。

\*1 愛知県水産試験場 本場 (Aichi Fisheries Research Institute, Miya, Gamagori, Aichi 443-0021, Japan)

\*2 現所属) 愛知県水産試験場 漁業生産研究所 (Marine Resources Research Center, Aichi Fisheries Research Institute, Toyohama, Minamichita, Aichi 470-3412, Japan)

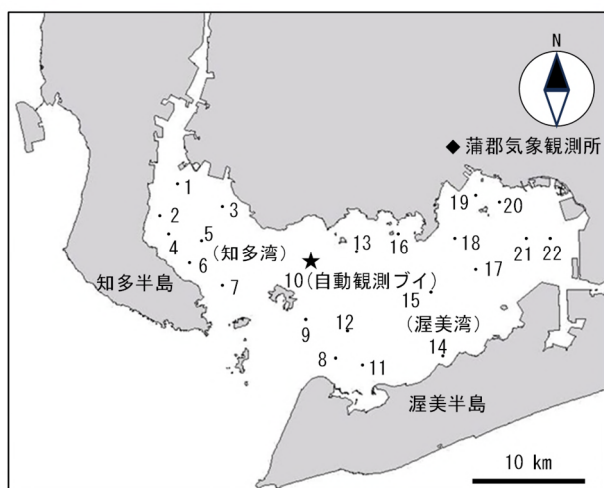


図1 調査点図

### 材料及び方法

#### (1) 2014～2022年の*K.mikimotoi*発生状況、海況特性及び栄養塩濃度

三河湾の22調査点において(図1)、2014～2022年に概ね月2回調査を実施した。なお、*K.mikimotoi*赤潮が発生した場合は調査頻度を増やした。水温、塩分、溶存酸素飽和度(以下DO)については多項目水質計(JFEアドバンテック社製AAQ-RINKO)により、表層(0m層)、中層(5m層)、海底直上1m(B-1m層)を観測した。また、0m層においてはバケツによる採水、5m層、B-1m層においてはバンドーン採水器(10L:離合社製)で採水し、植物プランクトン計数及び栄養塩濃度測定に供した。植物プランクトン計数については250mLのプラスチック瓶に入れ、常温で持ち帰った海水を当日あるいは翌日に固定しない状態で試水1mLをセジウィック・ラフターセル界線入計数板を用いて、光学顕微鏡によりプランクトン種または属ごとに計数し、細胞密度を算出した。栄養塩濃度測定については、12調査点(St.1,3,5,7,9,10,12,13,15,17,19,21)の0m層、2調査点(St.5,17)の5m層、B-1m層で行い、必要に応じて他の調査点でも実施した。栄養塩濃度(DIN:溶存態無機窒素=硝酸態窒素、亜硝酸態窒素、アンモニア態窒素、DIP:溶存態無機リン)はオートアナライザー(ビーエルテック社製QuA Atro)を用いた連続流れ分析法で測定した。上記により得られたデータについて以下のとおり解析に供した。

##### ① 月別発生状況

2014～2022年までの三河湾(0m, 5m, B-1m層)における*K.mikimotoi*の月別最高細胞密度を求めた。*K.mikimotoi*は、1,000 cells/mL以上で魚類のへい死を引き起こす<sup>9)</sup>ことから、1,000 cells/mL以上を赤潮発生と定義した。

##### ② 海況特性(水温、塩分、DO)

2014～2022年までの三河湾(0m, 5m, B-1m層)における*K.mikimotoi*の細胞密度と水温、塩分、DOの関係性を求めた。

##### ③ 栄養塩濃度(DIN, DIP)

2014～2022年までの三河湾(0m, 5m, B-1m層)における*K.mikimotoi*の細胞密度とDIN及びDIP濃度との関係性を求めた。

#### (2) 2021年における*K.mikimotoi*発生時の水平分布と鉛直分布

上記(1)で得られたデータのうち、2021年について以下のとおり解析に供した。

##### ① *K.mikimotoi*細胞密度の水平分布

2021年6月2～3日、7月5～6、12、27日、8月4～5、11、19、24日の三河湾0m層における*K.mikimotoi*細胞密度の水平分布を求めた。

##### ② 0m層塩分の水平分布

上記(2)①と同期間の三河湾0m層における塩分の水平分布を求めた。

##### ③ 自動観測ブイによる鉛直分布(クロロフィル蛍光値、DO)と風向風速及び、*K.mikimotoi*、珪藻類の細胞密度の関係

2021年6～9月のSt.10において、三河湾海況自動観測ブイ2号ブイ(以下、自動観測ブイ)により水温、塩分、DO、クロロフィル蛍光値を毎正時に表層から底層まで0.1m間隔で観測を行い、風向風速については常時観測を行った。2021年7月11日から9月10日のクロロフィル蛍光値及びDOについて時系列分布を求め、同期間の風向風速については1時間あたりの平均値を算出し、時系列データをスティックダイアグラムで示した。また7月12日、8月5、11、19、24日、9月2日に植物プランクトン計数を行い、*K.mikimotoi*及び珪藻類の細胞密度を求めた。

#### (3) 2021年の海況特性と気象条件

##### ① クロロフィル蛍光値の最大値時系列分布

上記(2)③で得られた自動観測ブイのクロロフィル蛍光値のデータについて、毎正時に行われる1観測あたりの最大値を抽出し、2021年7月11日から9月10日までの時系列分布を求めた。

##### ② 水温、塩分、DO、クロロフィル蛍光値鉛直分布の時間変化

上記(2)③で得られた自動観測ブイデータのうち濃密なクロロフィル蛍光値が見られ、かつ上記(3)①で特徴的な傾向が見られた期間(7月25日～8月25日)のうち、7月27日、8月5、11、24日における各0、6、12、

18時の水温、塩分、DO、クロロフィル蛍光値について、鉛直プロファイルを求めた。

### ③ 栄養塩濃度 (DIN, DIP)

上記(1)で得られたデータのうち、St.17においては2021年6月3日、7月5日、8月4日、9月3日、St.5においては2021年6月2日、7月6日、8月5日、9月2日について、0m、5m、B-1m層の栄養塩データの月別推移を求めた。

### ④ 自動観測ブイ表底層間水温格差

上記(2)③で得られた自動観測ブイデータのうち、2021年6～9月の水温データについて、表層及び底層それぞれで日別平均値を算出し、表底層間水温格差の時系列分布について求めた。

### ⑤ 日照時間と降水量

2021年6～9月の蒲州市における日別日照時間、日別降水量の推移について、アメダス観測データのうち蒲郡気象観測所のデータを使用し求めた。(気象庁HP過去の気象データ検索；<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>, 2023年1月29日)。

## 結 果

### (1) 2014～2022年の*K.mikimotoi*発生状況、海況特性及び栄養塩濃度

#### ① 月別発生状況

2014～2022年までの三河湾(0m、5m、B-1m層)における*K.mikimotoi*の月別最高細胞密度を表1に示した。2015、2016、2017、2018、2021、2022年に赤潮が発生し、時期は夏季(7、8月)が中心であった。一方で、2016年12月から2017年1月にかけては冬季にも赤潮が発生した。

#### ② 海況特性(水温、塩分、DO)

*K.mikimotoi*の細胞密度と水温の関係を図2-aに示した。

2016、2017年は冬季に赤潮が発生したことから、2016年11月～2017年4月までと、その他期間を区別して図示した。*K.mikimotoi*が確認された年の水温は5.4～32.2℃であった。1,000 cells/mL以上となった時期の水温は夏季では23.8～30.1℃、冬季では9.2～9.8℃であった。

*K.mikimotoi*の細胞密度と塩分の関係を図2-bに示した。*K.mikimotoi*が確認された年の塩分は8.8～33.6であった。1,000 cells/mL以上となった時期の塩分は13.4～32.6であったが、ほとんどは塩分25以上であった。

*K.mikimotoi*の細胞密度とDOの関係を図2-cに示した。*K.mikimotoi*が確認された年のDOは0～268.2%であった。1,000 cells/mL以上となった時期のDOは50.8～268.2%であった。また全1,103検体のうち、DOが30%以下は49検体であった。

### ③ 栄養塩濃度 (DIN, DIP)

*K.mikimotoi*の細胞密度とDIN濃度の関係を図3-aに示した。1,000 cells/mL以上の時期のDIN濃度は0.21～0.97 μMであった。*K.mikimotoi*の半飽和定数はDINで0.78 μMで、<sup>10)</sup>赤潮時の8検体中1検体がこれを上回り、それ以外は半飽和定数以下となっていた。

*K.mikimotoi*の細胞密度とDIP濃度の関係を図3-bに示した。1,000 cells/mL以上の時期のDIP濃度は0.01～0.12 μMであった。*K.mikimotoi*の半飽和定数はDIPで0.14 μMで、<sup>10)</sup>赤潮時には半飽和定数以下となっていた。

### (2) 2021年における*K.mikimotoi*発生時の水平分布と鉛直分布

#### ① *K.mikimotoi*細胞密度の水平分布

2021年6～8月の三河湾0m層における*K.mikimotoi*細胞密度を図4に示した。6月3日に渥美湾湾奥(St.17)で1 cell/mLが確認された。7月中旬までは1～7 cells/mLと散見される程度であったが、7月27日には田原市福江町沖(St.8)で2,250 cells/mL、8月4～5日には同調査点

表1 2014～2022年の三河湾(0m、5m、B-1m層)における*K.mikimotoi*月別最高細胞密度

年	(cells/mL)											
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
2014										64	2	
2015							270	17,583	44	45		1
2016							2	2,483	8	15	500	2,850
2017	1,750	104	47	26	18	52	10,000	30,750	10	14	23	1
2018						1	6	1,600	250	89	10	
2019						1	1	2	3	1		
2020									4			
2021						7	2,250	21,000	1		1	
2022						1	5,275	55	8	1	1	1

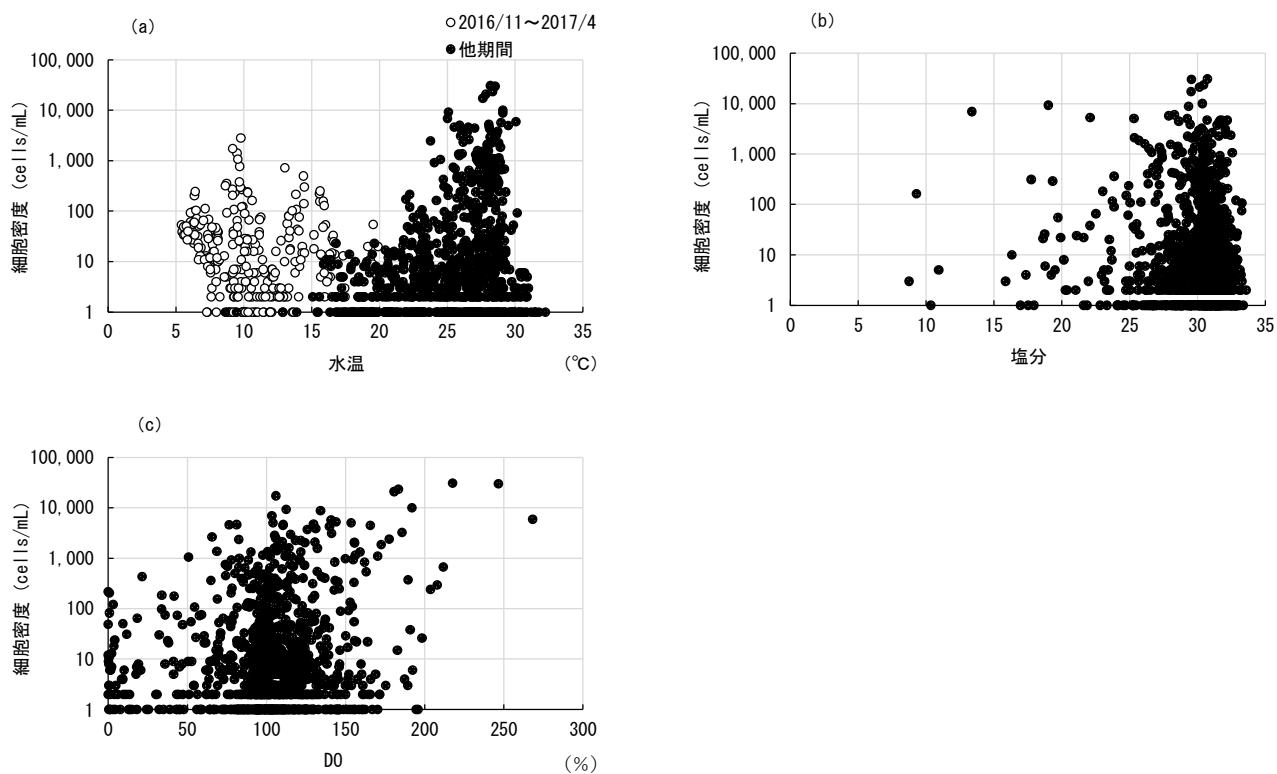


図2 *K.mikimotoi* 細胞密度と水質の関係 (a : 水温, b : 塩分, c : DO)

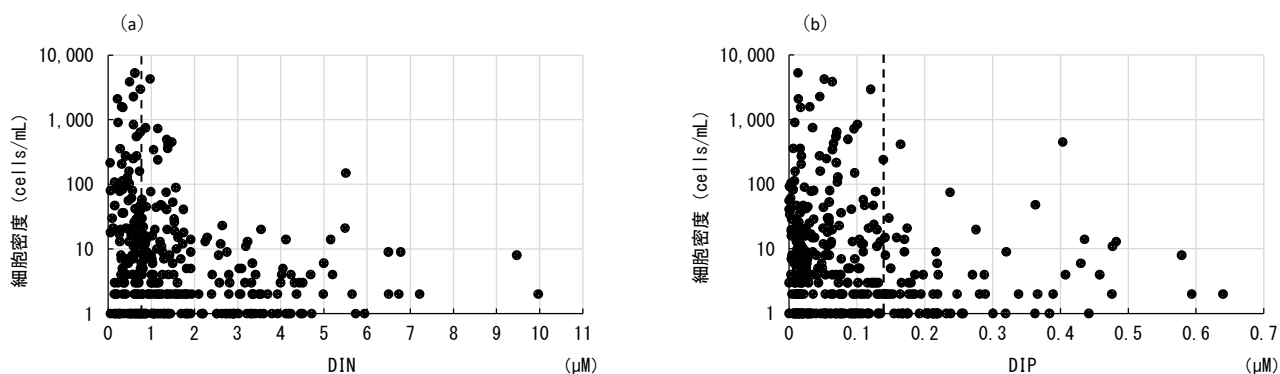


図3 *K.mikimotoi* 細胞密度と栄養塩濃度の関係 (a : DIN, b : DIP, 図中の破線は *K.mikimotoi* の半飽和定数)

で 17,300 cells/mL が確認され、渥美湾湾奥においても細胞密度の増加が見られた。8月11日には三河湾のほぼ全域で 1,000 cells/mL 以上となり、佐久島南東部 (St.9) で年間最高細胞密度となる 21,000 cells/mL となった。8月19日には渥美湾、知多湾の湾奥から細胞密度の減少が始まり、8月24日には三河湾全域で細胞密度が減少し、その後は増加が見られなかった。

### ② 0 m 層塩分の水平分布

2021年6~8月の三河湾0m層における塩分の水平分布を図5に示した。6月上旬には三河湾全域で塩分26以上であったが、7月上旬には渥美湾湾奥から北部、知多湾湾

奥にかけて塩分20以下となっていた。7月中旬も引き続き塩分20以下の水域が、渥美湾湾奥及び知多湾湾奥に見られ、三河湾全域で塩分26未満であった。7月下旬、8月上旬には三河湾の概ね全域で塩分が上昇しており、8月11日には渥美湾で塩分30、知多湾で塩分25~30となっていた。8月19日の観測では、渥美湾湾奥から北部、知多湾湾奥にかけて塩分20以下となっており、8月下旬には湾口部においても塩分20以下の水域が確認された。

③ 自動観測ブイによる鉛直分布(クロロフィル蛍光値、DO)と風向風速及び、*K.mikimotoi*、珪藻類の細胞密度の関係

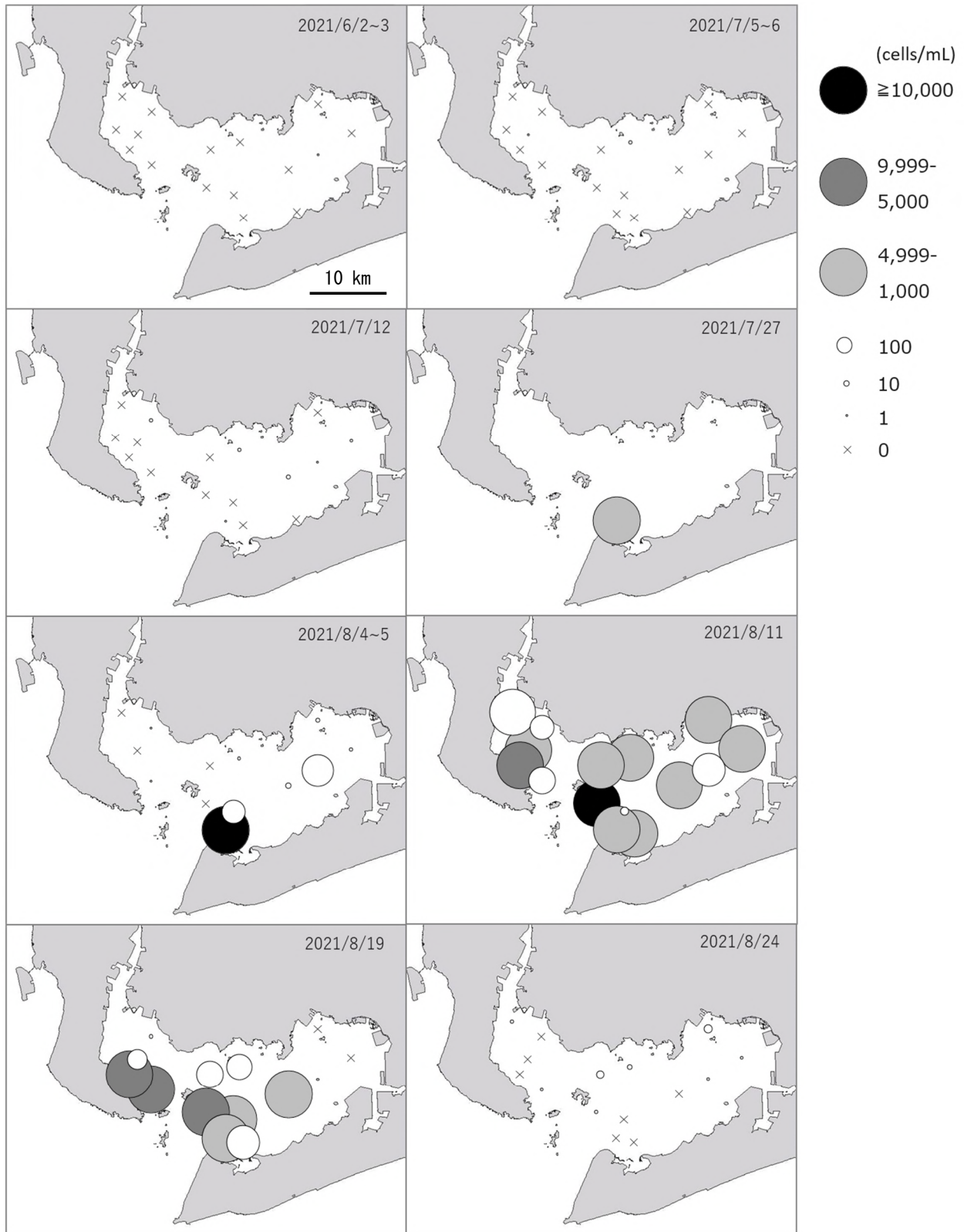


図4 2021年6~8月の三河湾0m層における *K.mikimotoi* 細胞密度の水平分布

2021年7月11日~9月10日の自動観測ブイのクロロフィル蛍光値及びDOの鉛直分布と風向風速, *K.mikimotoi* 細胞密度を図6に示した。また St.10 における *K.mikimotoi* 及び珪藻類の細胞密度を図7に示した。

7月12日の調査では *K.mikimotoi* は確認されず、全層で珪藻類（主に *Skeletonema* spp.）が優占していた。7月18日以降、クロロフィル極大層が中層付近で見られるようになり、その直下には DO が 30 %以下の貧酸素水塊

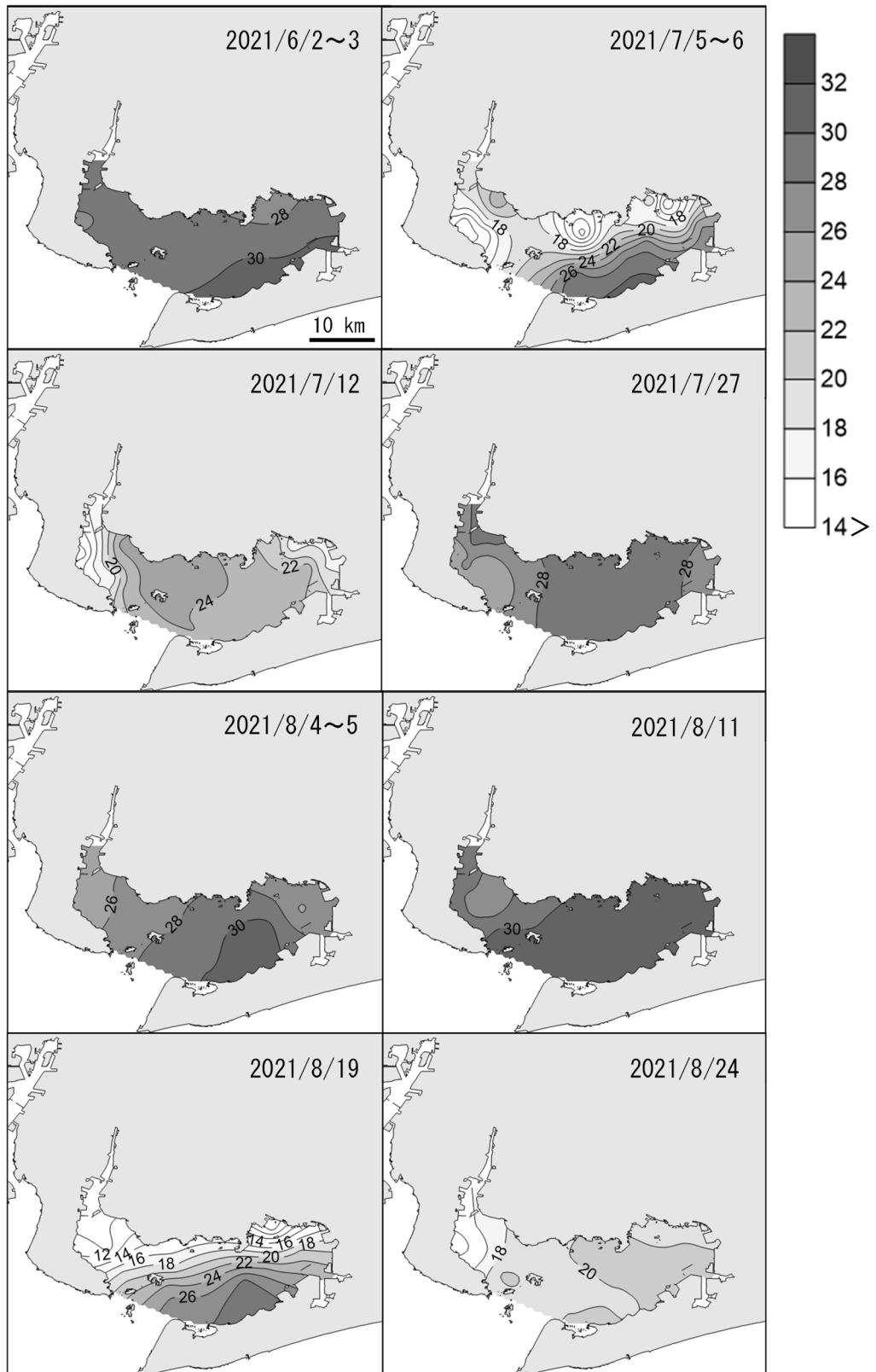


図5 2021年6~8月の三河湾0m層における塩分水平分布

が見られた。7月25日以降はクロロフィル極大層中のごく薄い層にクロロフィル蛍光値のピークが見られ始め、8月1~2日には中層付近で鉛直移動が見られた。7月17日~8月1日までは平均風速10 m/s以上の風は観測され

なかった。

8月3日には平均風速10 m/s以上の南東風による鉛直混合により貧酸素水塊が一時的に解消し、クロロフィル極大層も一時的に全層に拡散した。8月4日にはクロロ

フィル極大層は中底層付近に見られ、8月5日には *K.mikimotoi* が5 m層で2,350 cells/mL、B-1 m層で23 cells/mL 確認され、0 m層では確認されなかった。この時、5 m層では *K.mikimotoi* が優占種であった。8月5~6日はクロロフィル極大層は中底層付近で鉛直移動が見られ、6日午後には一時的に表層から中層に拡散していた。6日午後には平均風速10 m/s 前後の南東風が確認された。また、8月7日にはクロロフィル極大層は表層から底層にかけて一時的な拡散が見られ、この時、平均風速9 m/s 前後の南東風が確認された。8月8日午前中には、クロロフィル極大層は表層から中層にかけて見られ、午後には表層から底層に拡散していた。8日昼には平均風速7 m/s 前後の北西風が、8日深夜には平均風速8 m/s 前後の南西風が確認された。

8月9日には台風第9号の接近に伴う平均風速15 m/s 以上の南風により鉛直混合が進み、貧酸素水塊が解消した。この時、クロロフィル極大層は全層に拡散した後、夜間は中層から底層に見られた。8月11日は *K.mikimotoi* が0 m層で3,250 cells/mL、5 m層で2,650 cells/mL、B-1 m層で183 cells/mLとなっていた。各層で *K.mikimotoi* が優占種であり、クロロフィル蛍光値の濃淡と *K.mikimotoi* の細胞密度は一致していた。8月10~13日にはクロロフィル極大層が夜間は中層から底層、日中に表層で見られ、表底層間で鉛直移動していた。8月13日の夕方からの平均風速10 m/s 以上の南風による鉛直混合により、クロロフィル極大層は再び全層に拡散した。

8月18日以降はクロロフィル極大層が表層付近に見られ、8月19日の *K.mikimotoi* 細胞密度は0 m層で311 cells/mL、5 m層で361 cells/mLであった (B-1 m層は未観測)。8月22日以降、底層では貧酸素水塊が再形成された。8月24日には *K.mikimotoi* の細胞密度は0 m層で22 cells/mL、5 m層で4 cells/mLであった (B-1 m層は未観測)。

9月2日には *K.mikimotoi* は確認されず、表層では珪藻類 (主に *Leptocylindrus danicus*) が優占していた。

### (3) 2021年の海況特性と気象条件

#### ① クロロフィル蛍光値の最大値時系列分布

2021年7月11日~9月10日までの自動観測ブイのクロロフィル蛍光値の1観測あたりの最大値の時系列分布を図8に示した。

7月11日以降クロロフィル蛍光値の最大値は10 ppb 付近で収束していたが、7月25日頃から発散傾向となり、8月20日頃まで続いた。その後、クロロフィル蛍光値の最大値は収束傾向であった。

#### ② 水温、塩分、DO、クロロフィル蛍光値鉛直分布の時

#### 間変化

7月27日の鉛直図では、クロロフィル極大層は0時に水深6~7 m付近、12時に水深4 m付近、18時に水深7 m付近に見られた。水深4 m付近には水温塩分躍層が見られ、水深7 m以深ではDOが30%以下の貧酸素水塊が見られた。

8月5日の鉛直図では、クロロフィル極大層は水温塩分躍層から底層付近に見られ、0時に水深6 m付近と水深12 m (底層) 付近、12時に水深4 m付近、18時に水深8 m付近に見られた。また、18時のクロロフィル極大層直下の水深9 mにおけるDOは50.2%であった。

8月11日の鉛直図では、クロロフィル極大層は0時に中底層 (7 m以深)、12時には表層、18時には中層 (4~8 m付近) で見られた。水温塩分躍層は発達しておらず、表底層間で鉛直混合していた。0、6、12、18時の底層DOは30%以上で貧酸素水塊が見られなかった。

8月24日の鉛直図では、1日を通してクロロフィル極大層は表層付近に見られた。水温塩分躍層が水深4 m付近にあり、底層では貧酸素水塊が見られたことから、成層構造が再発達していた。

#### ③ 栄養塩濃度 (DIN, DIP)

2021年6~9月の渥美湾 (St.17) 及び知多湾 (St.5) の0 m、5 m、B-1 m層のDIN, DIP濃度を図10に示した。DIN, DIP濃度ともに6~9月では、概ねB-1 m層が高くなっていた。

DIN濃度については、6~8月は概ね全層で *K.mikimotoi* の半飽和定数である0.78  $\mu\text{M}$  を超えていた。 *K.mikimotoi* が見られなくなった9月上旬には渥美湾では0 m層、知多湾では0 m、5 m層で半飽和定数以下となっていた。

DIP濃度については、渥美湾において7、8月は0 m、5 m、B-1 m層で *K.mikimotoi* の半飽和定数である0.14  $\mu\text{M}$  以上であったが、9月は0 m層で半飽和定数以下となっていた。知多湾では7月は5 m、B-1 m層、8月はB-1 m層で半飽和定数以上であったが、9月は0 m、5 m層で半飽和定数以下であった。

#### ④ 自動観測ブイ表底層間水温格差

2021年6~9月までの自動観測ブイ (St.10) 表底層間の水温格差を図11に示した。7月上旬以降、水温格差が拡大し、7月中旬~8月初旬にかけては水温格差がピークとなっており、成層構造が発達していた。同時期に成層構造が崩壊するような風は確認されなかった (図6)。8月上旬~中旬にかけて水温格差が縮小し、成層構造が崩壊していた。8月下旬~9月上旬には再び水温格差が拡大して、成層構造が再発達した。

#### ⑤ 日照時間と降水量

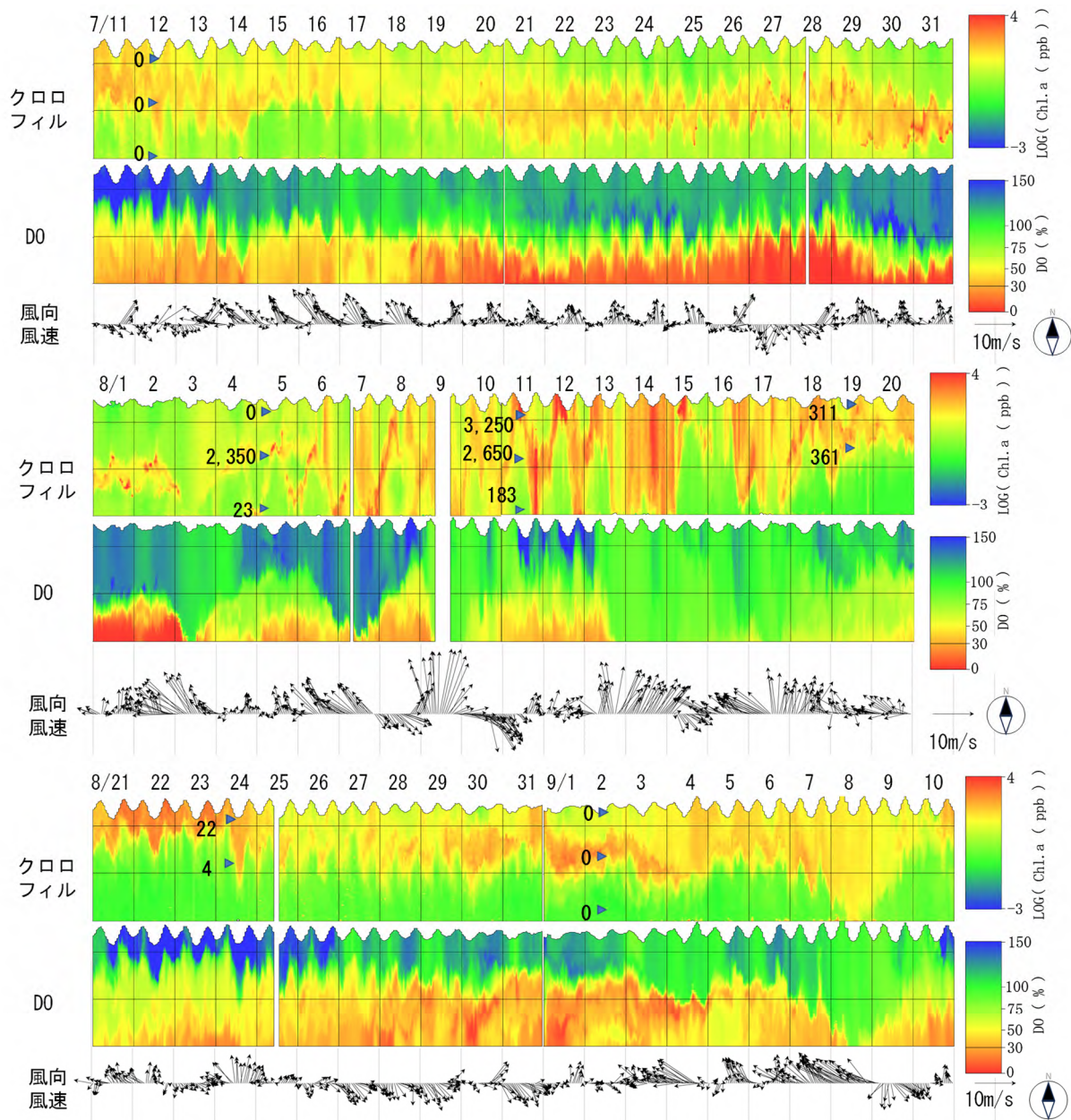


図6 三河湾湾央部 (St.10) 自動観測ブイ鉛直図 (クロロフィル蛍光値, DO) と風向風速及び *K.mikimotoi* 細胞密度鉛直図中の数字は *K.mikimotoi* の細胞密度 (cells/mL) を示す。

2021年6~9月までの蒲郡市における日別の日照時間と降水量を図12に示した。6月上中旬は散発的に降雨が見られたが、6月下旬は降雨が少なかった。7月1~3日には合計で277mmの降雨があった。7月中旬から8月初旬にかけては日照時間が多く、降水量が少なかった。*K.mikimotoi* 赤潮が発生していた8月上旬~中旬にかけては日照時間が少なく、降水量が増加していた。特に8月12~22日までは降雨が続き、その間の降水量は384mmに達した。8月下旬は再び日照時間が増加していた。9月上旬以降は散発的に降雨が見られた。

## 考 察

### (1) 2014~2022年の *K.mikimotoi* 発生状況, 海況特性

2014年に三河湾において *K.mikimotoi* の発生が確認されて以降、9年間で赤潮が発生した年は6カ年、非発生年は3カ年であった(表1)。初認から赤潮終息までの経過については、概ね6、7月に初認され、7、8月に赤潮発生、8、9月に赤潮が終息していた。

*K.mikimotoi* の増殖特性については、培養株では水温10~30℃、塩分15~30の範囲で増殖可能であり、水温25℃、塩分25が最も増殖速度が大きいことが報告されている。

<sup>1)</sup> また天然海域において高密度化した際の水温、塩分は、



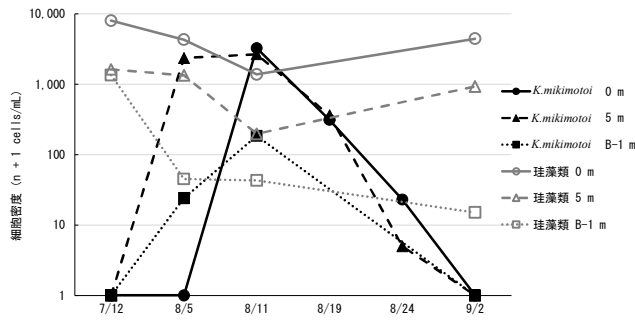


図7 2021年7~9月のSt.10における *K.mikimotoi* 及び珪藻類の細胞密度

なお、5 m, B-1 m 層について珪藻類は優占種のみ計数し、8/19, 24 は *K.mikimotoi* のみ計数した。

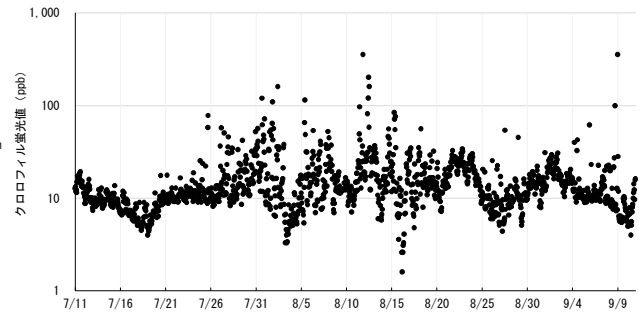


図8 自動観測ピクロフィル蛍光値の最大値時系列分布

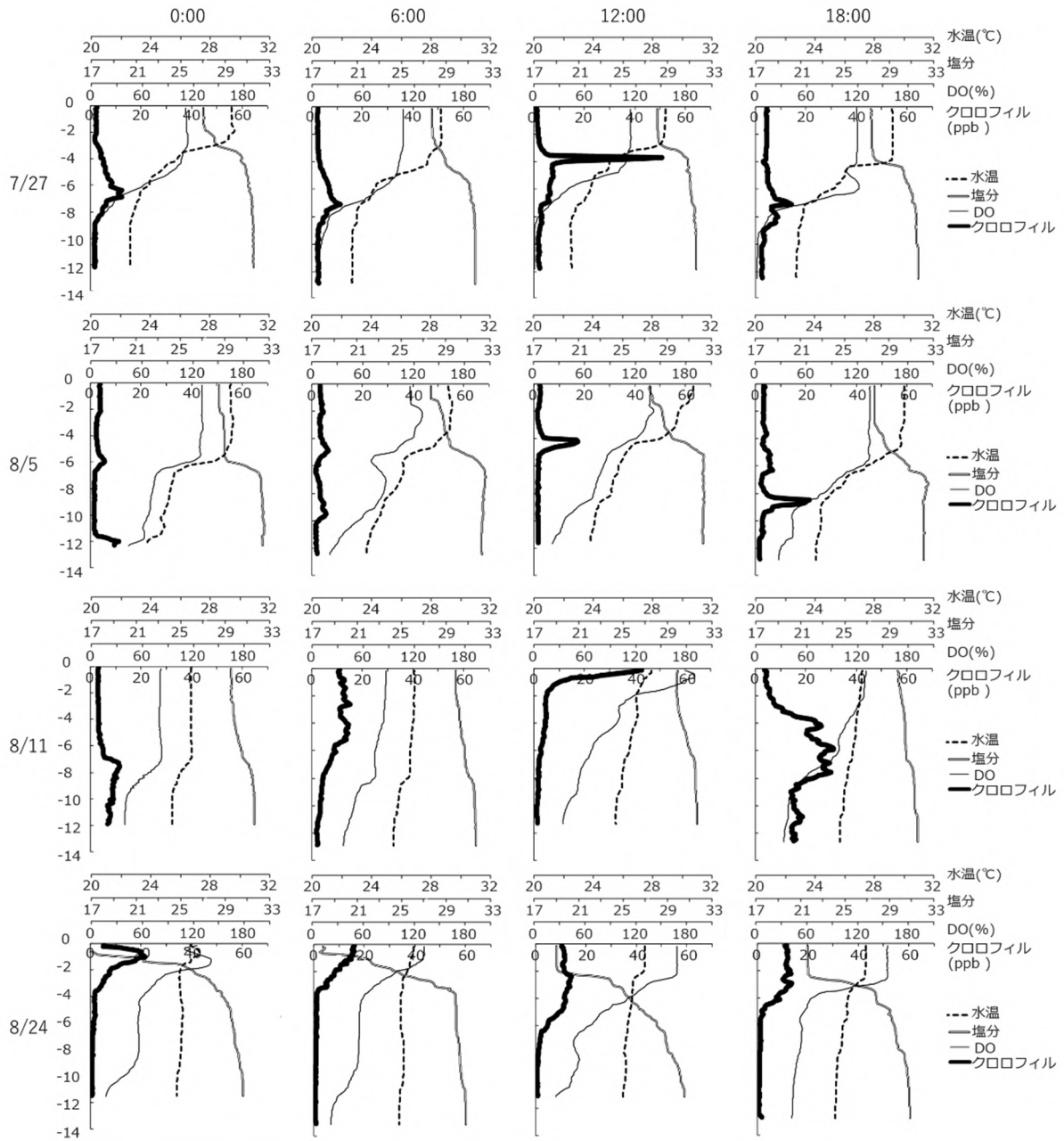


図9 自動観測ピの鉛直プロファイル (水温, 塩分, DO, クロロフィル蛍光値)

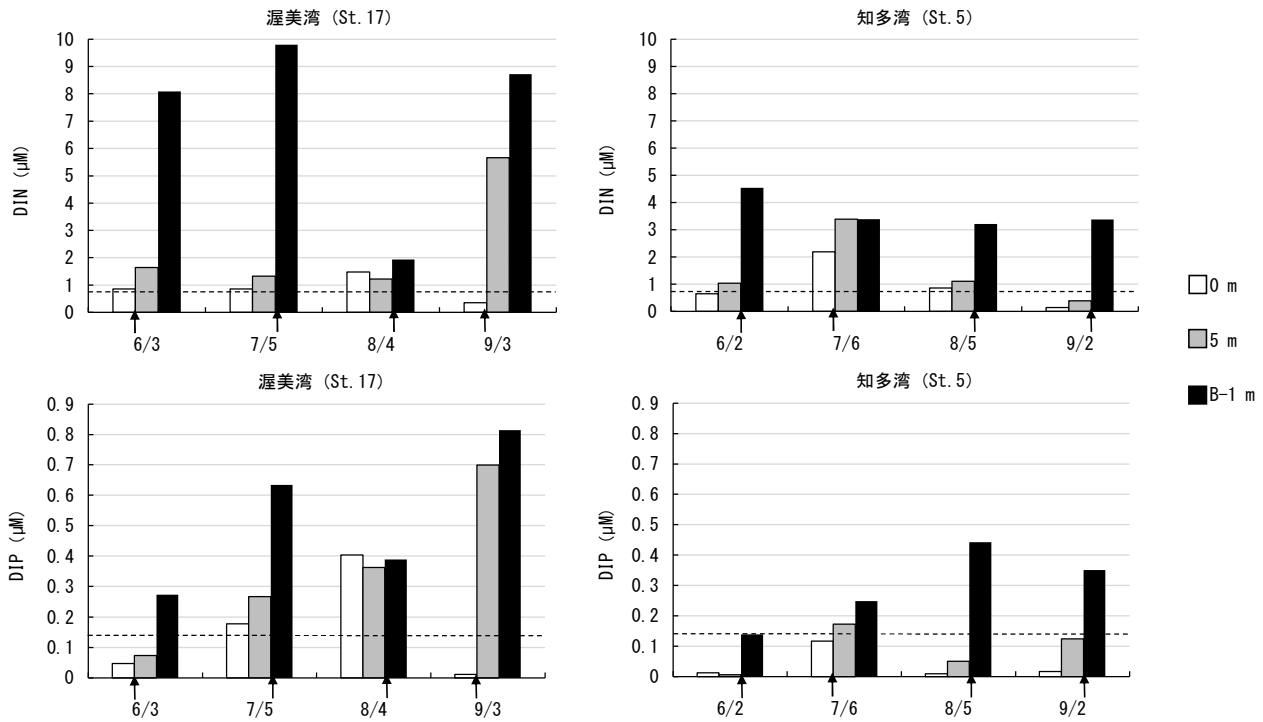


図 10 2021 年 6～9 月の渥美湾 (St.17), 知多湾 (St.5) の 0 m, 5 m, B-1 m 層における DIN, DIP 濃度の変化  
破線は *K.mikimotoi* の半飽和定数, 矢印は水温塩分躍層の位置を示す。

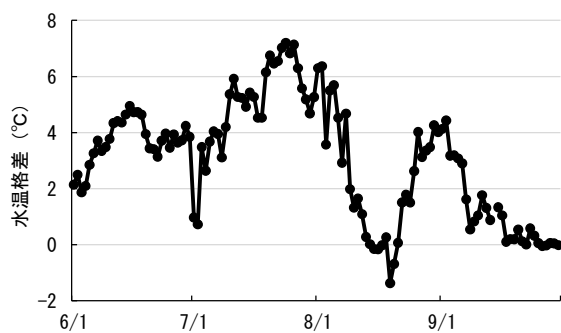


図 11 自動観測ブイにおける 2021 年 6～9 月の表底層の水温格差

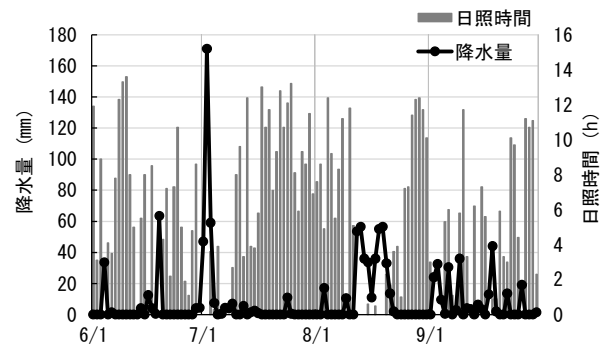


図 12 蒲郡市における 2021 年 6～9 月の日照時間と日別降水量

大村湾においては水温 26～30 °C, <sup>1)</sup> 周防灘においては水温 22～27 °C, 塩分 26～30, <sup>10)</sup> 英虞湾においては水温 26～28 °C, 塩分 32.1～32.8, <sup>12)</sup> 宇和島湾においては水温 19.2～26.4 °C, 塩分 22.6～34.3 <sup>13)</sup> と報告されている。今回の調査結果から、三河湾における夏季の *K.mikimotoi* 赤潮時の水温は 23.8～30.1 °C, 塩分は 13.4～32.6 であり、ほとんどは塩分 25 以上であったことから (図 2-a,b), 増殖時の水温, 塩分は他海域と概ね一致していた。

一方で、2016 年冬季から 2017 年春季には継続的に *K.mikimotoi* が確認され、2016 年 12 月, 2017 年 1 月には冬季の赤潮発生が確認された。この期間に最低水温 5.4 °C で 54 cells/mL が確認され、赤潮時の水温は 9.2～9.8 °C で

あった (図 2-a)。培養株での増殖試験によると水温 10～30 °C が増殖可能とされているが, <sup>11)</sup> 天然海域では周防灘において水温 6.4 °C <sup>14)</sup>, 函館湾において水温 7.8 °C <sup>15)</sup> で遊泳細胞が確認されている。今回、三河湾では水温 5.4 °C で遊泳細胞が確認されたことから、三河湾においても遊泳細胞のまま越冬している可能性が示されるとともに、10 °C 以下でも赤潮を引き起こすことが明らかとなった。*K.mikimotoi* と同じ渦鞭毛藻類の *Heterocapsa cirularisquama* についても、広島湾<sup>16)</sup>や佐渡島加茂湖<sup>17)</sup>において、培養条件下の増殖適水温以下で赤潮発生が確認されている。このように、天然海域においては培養条件下とは異なる増殖特性が確認される場合があり、冬季

の赤潮発生や越冬についても今後解析が必要と考えられる。

なお、*K.mikimotoi* 赤潮時に塩分 25 以下であったのは 2021 年 8 月 19 日の St.6, 7, 2022 年 7 月 12 日の St.3 のみであった。いずれも調査日以前の降水量が多かったことから、河川水の流入により海域の塩分が低下していたことが要因として考えられた。

*K.mikimotoi* 赤潮時の DO は、50.8~268.2 %であった。また、検体数は少ないながらも、DO が 30 %以下において *K.mikimotoi* が確認された。一方、室内実験において、三河湾で発生した *K.mikimotoi* 赤潮海水を用い、低酸素濃度で培養したところ 24 時間以内に全滅した<sup>1,2)</sup>ことが報告されている。今回の解析結果と室内実験の知見から、*K.mikimotoi* は貧酸素水塊中に一時的に侵入することはあるものの、長時間貧酸素水塊中に存在することができないと考えられる。*K.mikimotoi* と貧酸素水塊の関係については、今後、現場海域での詳細な観測や室内実験での解析が期待される。

*K.mikimotoi* 赤潮時の栄養塩濃度 (DIN, DIP) については、*K.mikimotoi* の半飽和定数 (DIN : 0.78  $\mu\text{M}$ , DIP : 0.14  $\mu\text{M}$ ) を概ね下回っており、赤潮が確認される段階には、すでにその海域において *K.mikimotoi* の増殖により、栄養塩が消費されている可能性が示された。

## (2) 2021 年赤潮の消長要因の検討

2021 年は 7 月 25 日頃から自動観測ブイ鉛直図 (図 6) において、ごく薄い層にクロロフィル蛍光値のピークが見られ始め、かつクロロフィル蛍光値の最大値時系列分布 (図 8) が発散傾向となった。これは後述するように移動能を持つ植物プランクトンの増殖の動態を表している可能性が考えられた。この時期に採水及び検鏡を行っていないため断定することはできないが、これらの観測結果及びその後の *K.mikimotoi* 赤潮の発生から、7 月下旬から *K.mikimotoi* の増殖が始まっていたと推測された。

そこで、次のとおり *K.mikimotoi* の消長段階について、増殖期 (7 月 25 日~8 月 2 日)、赤潮前期 (8 月 3~8 日)、赤潮後期 (8 月 9~17 日)、終息期 (8 月 18 日~9 月 2 日) の 4 期に分けた。増殖期については、自動観測ブイのクロロフィル蛍光値の極大層が中層に見られ (図 6)、クロロフィル蛍光値の最大値が発散傾向となった期間 (7 月 25 日~8 月 2 日) とした。赤潮前期については、底層の貧酸素水塊が解消した後、再発達するまでの期間 (8 月 3~8 日) とした。赤潮後期については、台風第 9 号の接近に伴う鉛直混合により貧酸素水塊が解消し、クロロフィル極大層が表層から底層まで見られた期間 (8 月 9~17 日) とした。終息期については、クロロフィル極大層が

表層から中層付近に見られた期間 (8 月 18 日~9 月 2 日) とした。

### ① 増殖期 (7 月 25 日~8 月 2 日)

この期間、クロロフィル極大層は中層付近の貧酸素水塊の直上に見られた (図 6)。また、7 月 25 日以降、クロロフィル極大層の中のごく薄い層においてクロロフィル蛍光値のピークが見られ、8 月 1~2 日には中層付近で鉛直移動が見られた (図 6)。珪藻類が優占していた 7 月中旬のクロロフィル蛍光値の最大値は収束しており、*K.mikimotoi* の細胞密度が最も多くなった 8 月上旬~中旬においては、クロロフィル蛍光値の最大値が発散していた (図 8)。クロロフィル蛍光値の最大値の発散の要因として、移動能を持つ植物プランクトンにより、クロロフィル極大層の厚さが短時間で変化したことが考えられる。また 8 月 5 日の観測においてクロロフィル蛍光値の濃淡と *K.mikimotoi* 細胞密度が一致していた (図 6)。以上のことから、クロロフィル最大値の発散が見られ始めた 7 月 25 日以降、中層に見られたクロロフィル極大層は *K.mikimotoi* の動態を表していたと考えられた。

また、鉛直プロファイルのクロロフィル極大層の分布域から、*K.mikimotoi* は貧酸素水塊と水温塩分躍層間 (7 月 27 日の場合 : 水深 4~7 m 付近) で増殖していた可能性が示された。*K.mikimotoi* の分布水深は初期段階には中層域にあることから「中層増殖性赤潮」と呼ばれており、<sup>18)</sup> 瀬戸内海引田湾、<sup>19)</sup> 函館湾<sup>20)</sup> において発生初期に中層で細胞密度が増加することが報告されている。また大村湾では海底無酸素化が本種赤潮発生に先行したことや、<sup>1, 21)</sup> 周防灘では降雨による陸上からの栄養塩類の供給に加え、貧酸素水塊の形成と底泥からの栄養塩類の供給が *K.mikimotoi* の増殖を促進した可能性が指摘されている。<sup>22)</sup> 2021 年の三河湾における *K.mikimotoi* 赤潮発生前の海況は、7 月上旬のまとまった降雨 (図 12) により、表層塩分が低下し (図 5 : 7 月 5~6 日, 7 月 12 日)、7 月下旬~8 月初旬は平均風速が弱く (図 6)、日照時間が長く、降水量が少なかった (図 12)。この期間、表底層間水温格差は最大となっており (図 11)、成層構造が発達・安定化し、底層は貧酸素化していた。また栄養塩濃度については、7 月上旬は知多湾 0m 層の DIP を除き、全層が半飽和定数以上で、特に水温塩分躍層以深では高くなっていた (図 10)。7 月中旬から 8 月初旬の表層における栄養塩環境については、前述のとおり降雨が少なかったこと (図 12) と成層構造が発達していた (図 11) ことから、陸域及び底層からの栄養塩供給は少なかったことが考えられる。St.10 における珪藻類の細胞密度は 7 月 12 日には 7,959 cells/mL、8 月 5 日には 4,276 cells/mL と減少して

いることから、7月中旬から8月初旬は、移動能をもつ *K.mikimotoi* の方が中底層の栄養塩を利用することができ、珪藻類に比べて増殖に有利な栄養塩環境であったと考えられた。これらのことから、2021年の三河湾においては貧酸素水塊の直上から水温塩分躍層間において *K.mikimotoi* が増殖するいわゆる「中層増殖性」が確認された。さらに *K.mikimotoi* は硫化物耐性を持つ<sup>2,3)</sup> ことから、耐性の範囲内で、栄養塩が豊富な貧酸素水塊直上に集積し増殖していたと考えられた。

#### ② 赤潮前期 (8月3~8日)

8月3日には、平均風速 10 m/s 以上のやや強い風による貧酸素水塊の解消が見られた (図6)。その後、8月5、6日にはクロロフィル極大層が水温塩分躍層から底層(水深 4~12 m 付近)で鉛直移動していた (図6, 10)。このことから、*K.mikimotoi* は水温塩分躍層以深から底層付近で日周鉛直移動していたと考えられた。また8月4日の渥美湾の栄養塩濃度については 0 m, 5 m, B-1 m 層の差が小さいことから (図10)、底層に豊富に存在していた栄養塩が全層に拡散されたと考えられた。*K.mikimotoi* は貧酸素耐性が低い、貧酸素水塊が一時的に解消したため、底層付近まで鉛直移動することができるようになったと考えられ、増殖期と比べ水域中の *K.mikimotoi* の好適環境が広がり、躍層以深から底層付近で日周鉛直移動を行うようになったのではないかと考えられた。また、8月6日午後には表層から中層にかけて、7、8日には表層から底層にかけてクロロフィル極大層が一時的に拡散していた。各日とも風による鉛直混合により *K.mikimotoi* が拡散されたと考えられた。

#### ③ 赤潮後期 (8月9~17日)

8月9日の台風第9号接近による平均風速 15 m/s 以上の強い風に伴い、鉛直混合によって成層構造が崩壊し、*K.mikimotoi* が全層に拡散された (図6)。その後、8月10~13日にかけては表層から底層にかけて日周鉛直移動しており、赤潮が顕在化したと考えられた。*K.mikimotoi* の大規模な赤潮形成が成層崩壊に関係していることは周防灘において報告されており、<sup>2,2,24)</sup> 三河湾においても同様であった。

#### ④ 終息期 (8月18日~9月2日)

*K.mikimotoi* の水平分布においては、8月19日に渥美湾、知多湾の両湾奥で細胞密度が減少し、8月24日には三河湾全域で細胞密度が減少していた (図4)。宇和島湾周辺海域において、*K.mikimotoi* は細胞密度が高いと分布深度が浅い傾向がある。<sup>1,3)</sup> また、赤潮終息期には鉛直移動しなくなる<sup>2,5)</sup> といった報告がされている。クロロフィル蛍光値の最大値は8月20日頃に収束していることや (図

8)、鉛直分布においては、*K.mikimotoi* と考えられるクロロフィル極大層が表層に集積 (図6:8月18日以降, 図9:8月24日) していたことから、この時期に鉛直移動が不活発になった可能性が考えられ、赤潮終息期には鉛直移動を停止し、表層に集積していたと考えられた。8月12~22日まで降雨が継続しており (図12)、8月19日には渥美湾湾奥から北部及び知多湾湾奥にかけて塩分 20 以下となっていた。8月24日には三河湾全域で塩分 22 以下であったことから (図5)、三河湾全域で降雨により河川水が流入していたことが確認された。このことから、表層に集積し移動能がなくなった *K.mikimotoi* は、降雨による河川水の流入により、物理的に湾口方向へ流出していた可能性が考えられた。また、8月23日~9月1日まで降雨がなく、日照時間が増加していた (図12)。さらに9月2、3日の St.5, 17の 0 m 層 DIN, DIP 濃度はいずれも *K.mikimotoi* の半飽和定数以下であった (図10)。*K.mikimotoi* については室内実験において、窒素欠乏の場合表層に集積し、強光に曝されると光合成が阻害され死滅することが報告されていることから、<sup>2,6)</sup> 貧栄養下での日照時間の増加による死滅の可能性も考えられた。さらに、*K.mikimotoi* の減少と同時期に珪藻類 (主に *Leptocylindrus danicus*) が増加していたことから (図7:9月2日)、種間競合により *K.mikimotoi* が駆逐された可能性も併せて考えられた。このように *K.mikimotoi* 赤潮の終息には複数の要因が考えられ、今後のより詳細な調査、解析が必要と思われる。

#### (3) 2014~2022年の *K.mikimotoi* 赤潮発生年・非発生年の海況条件比較

本報告において、2021年 *K.mikimotoi* 赤潮の消長には成層構造の発達、崩壊が影響している可能性が示された。そこで、*K.mikimotoi* 赤潮発生年と非発生年の成層構造を比較するため、発生年 (2015, 2016, 2017, 2018, 2021, 2022年) と非発生年 (2014, 2019, 2020年) の5~9月における表底層間水温格差の旬別平均値を比較した (図13)。自動観測ブイにおける表底層間水温格差は、7月中旬に発生年の方が有意に大きかった (Welch *t*-test,  $p < 0.05$ )。8月以降、有意差は見られなかったが、赤潮発生年の平均値の方が小さかった。このことから、7月の成層構造の発達と、8月以降の成層構造崩壊が *K.mikimotoi* 赤潮の発生に関連している可能性が考えられた。このことは、三河湾においては8月に *K.mikimotoi* 細胞密度が最高値に達することが多いことに矛盾しない (表1)。また、発生年の7月中旬の表底層間水温格差が有意に大きかった要因については、気象の影響が考えられ、有意差は見られなかったが、発生年の7月中旬の蒲郡市における気温は非発

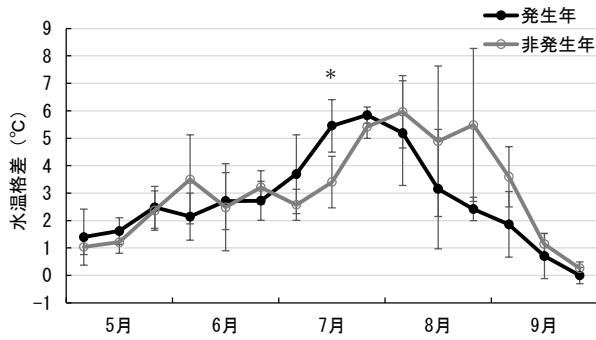


図 13 自動観測ブイにおける表底層間の水温格差の発生年・非発生年比較 (2014~2022 年 5~9 月の旬平均)  
 図中のエラーバーは標準偏差を示す。図中のアスタリスクは発生年及び非発生年に有意差があることを示す。(Welch  $t$ -test,  $p<0.05$ )

生年より高く、日照時間は長く、降水量は少なかった。以上のことから三河湾においては、本報告でも述べたように、成層構造の発達、崩壊や貧酸素水塊との関係が非常に深いことが考えられ、今後のより詳細な観測と解析が必要と思われる。

一方、三河湾においては夏季に恒常的に成層構造が発達し貧酸素水塊が発生するが、*K.mikimotoi* 赤潮が発生しない年がある。このことから、三河湾における *K.mikimotoi* 赤潮の発生については、貧酸素水塊の発達以外に他の要因が関係していることが考えられる。植物プランクトンの消長には種間競合が大きく影響することや、*K.mikimotoi* は中層増殖性であるため、*K.mikimotoi* 赤潮発生年、非発生年の 5~9 月における底層クロロフィル蛍光値の旬別平均値を比較した (図 14)。自動観測ブイにおける底層クロロフィル蛍光値は、非発生年の方が、5、6 月の旬別平均値が高く、5 月中旬は有意に高かった (Welch  $t$ -test,  $p<0.05$ )。直近の赤潮非発生年であった 2019、2020 年の 5、6 月に三河湾底層で見られた主な植物プランクトンについては、*Leptocylindrus* sp(p), *Skeletonema* spp, *Eucampia zodiacus*, *Pseudo-nitzschia* sp(p), *Rhizosolenia indica* などであった。*Eucampia zodiacus* (407 cells/mL, 2019/6/4, St.17, B-1 m 層) や *Rhizosolenia indica* (211 cells/mL, 2020/6/10, St.17, B-1 m 層) といった、大型珪藻が確認されており、近年の同時期では特徴的であった。今回検討した 2021 年 *K.mikimotoi* 赤潮において中底層で初期増殖の可能性が示されていた。このことから 2019、2020 年については、中底層において他植物プランクトンとの種間競合により、*K.mikimotoi* が増殖できず、赤潮に至らなかった可能性が考えられた。

本報告では、近年の赤潮発生時の海況特性、特に 2021

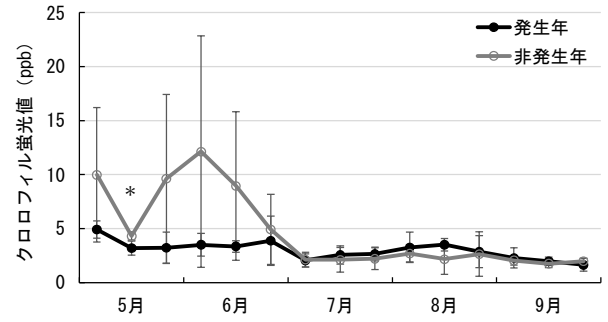


図 14 自動観測ブイにおける底層クロロフィル蛍光値の発生年・非発生年比較 (2014~2022 年 5~9 月の旬平均)  
 図中のエラーバーは標準偏差を示す。図中のアスタリスクは発生年及び非発生年に有意差があることを示す。(Welch  $t$ -test,  $p<0.05$ )

年赤潮について注目して検討をおこなったが、三河湾において *K.mikimotoi* が頻繁に観察されるようになったのは、2014 年以降であり、消長要因を検討するためには発生事例やデータが少ないため、今後も継続的な観測が必要と考えられる。

## 要 約

有害渦鞭毛藻 *Karenia mikimotoi* について、2014~2022 年の三河湾における出現状況と環境特性の把握を行った。9 年間の調査のうち、*K.mikimotoi* 赤潮は夏季 (7、8 月) を中心に発生したが、2016~17 年にかけては冬季に発生した。赤潮発生時の水温は夏季では 23.8~30.1 °C、冬季では 9.2~9.8 °C であった。2021 年夏季の赤潮に着目し、消長要因をさらに考察したところ、貧酸素水塊直上から躍層付近において初期増殖し、成層構造の崩壊とともに大規模化したと考えられた。また、赤潮の終息には降雨による物理的な湾外への流出や珪藻類との種間競合が関係していると考えられた。*K.mikimotoi* 赤潮発生年と非発生年の成層構造を比較したところ、発生年では表底層間の水温格差が 7 月中旬に有意に大きかった。三河湾における *K.mikimotoi* 赤潮の消長については、成層構造の発達・崩壊と貧酸素水塊が密接に関係していることが確認された。

## 謝 辞

長年にわたる観測や分析などに従事された愛知県水産試験場漁場保全グループの歴代の研究員の皆様および、愛知県漁業取締水質調査兼用船「へいわ」の乗組員の皆様に心よりお礼申し上げます。

## 文 献

- 1) 飯塚昭二・入江春彦 (1966) 1965 年夏季大村湾赤潮時の海況とその被害-II. 長崎大学水産学部研究報告, 21, 67-101.
- 2) 宮村和良 (2016) *Karenia mikimotoi* の赤潮動態と発生予察・対策. 有害有毒プランクトンの科学, 191-200.
- 3) 土屋晴彦・鈴木 裕 (1985) 赤潮防除対策事業 (情報交換・赤潮等). 愛知県水産試験場業務報告書, 173-175.
- 4) 柴田晋作・湯口真実・二ノ方圭介 (2016) 平成 27 年伊勢湾・三河湾の赤潮発生状況. 愛知水試研究業績, C-211.
- 5) 湯口真実・高須雄二・二ノ方圭介 (2017) 平成 28 年伊勢湾・三河湾の赤潮・苦潮発生状況. 愛知水試研究業績, C-214.
- 6) 湯口真実・高須雄二・美馬紀子 (2018) 平成 29 年伊勢湾・三河湾の赤潮・苦潮発生状況. 愛知水試研究業績, C-218.
- 7) 二ノ方圭介・松村貴晴・加藤毅士・大澤 博 (2022) 令和 3 年伊勢湾・三河湾の赤潮・苦潮発生状況. 愛知水試研究業績, C-247.
- 8) 二ノ方圭介・柘植朝太郎・加藤毅士・大澤 博 (2023) 令和 4 年伊勢湾・三河湾の赤潮・苦潮発生状況. 愛知水試研究業績, C-256.
- 9) 松山幸彦・永江 彬・栗原健夫・橋本和正・山田雅勝・島 康洋・堀田卓朗・吉田一範・西川 智・太田耕平・松原孝博 (2014) 有害プランクトンによる魚介類へい死機構解明. 平成 25 年度漁場環境・生物多様性保全総合対策委託事業 赤潮・貧酸素水塊対策推進事業—九州海域での有害赤潮・貧酸素水塊発生機構解明と予察・被害防止等技術開発—「(5) シャトネラ等の魚介類への影響, 毒性発現機構の解明」報告書, 4-15.
- 10) 山口峰生 (1994) *Gymnodinium nagasakiense* の赤潮発生機構と発生予知に関する生理生態学的研究. 南西海区水産研究所研究報告, 27, 251-394.
- 11) 山口峰生・本城凡夫 (1989) 有害赤潮鞭毛藻 *Gymnodinium nagasakiense* の増殖におよぼす水温, 塩分および光強度の影響. 日本水産学会誌, 55 (11), 2029-2036.
- 12) 二ノ方圭介・松村貴晴・青山裕晃・加藤毅士・大澤博・田中真二・奥村宏征・栗山 功・出口竣悟・西川次寿・館 洋・中山奈津子・浜口昌己 (2022) 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. 伊勢湾・三河湾・英虞湾海域. 令和 3 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, 119-140.
- 13) 鬼塚 剛・鈴木健二・吉江直樹・平井真紀子・竹中彰一・吉原勇作・大西秀次郎・清水園子・竹内久登・太田耕平・外丸裕司・坂本節子・阿部和雄・山口 聖・紫加田知幸・山口一岩・武岡英隆 (2021) 宇和島湾およびその周辺海域における有害渦鞭毛藻 *Karenia mikimotoi* の出現特性: 赤潮発生年と非発生年の比較. 日本水産学会誌, 87 (2), 144-159.
- 14) 寺田和夫・池内 仁・高山晴義 (1987) 冬季の周防灘沿岸で観察された *Gymnodinium nagasakiense*. 日本プランクトン学会報, 34 (2), 201-204.
- 15) 嶋田 宏・金森 誠・吉田秀嗣・今井一郎 (2016) 2015 年秋期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, 82 (6), 934-938.
- 16) 松山幸彦・木村 淳・藤井 齊・高山晴義・内田卓志 (1997) 1995 年広島湾西部で発生した *Heterocapsa circularisquama* 赤潮の発生状況と漁業被害の概要. 南西水研研報, 30, 189-207.
- 17) 近藤伸一・中尾令子・岩滝光儀・坂本節子・板倉 茂・松山幸彦・長崎慶三 (2012) 有害赤潮藻 *Heterocapsa circularisquama* の分布域北上現象—佐渡島加茂湖での赤潮によるマガキの大量死—. 日水誌, 78 (4), 719-725.
- 18) 山口峰生 (2000) 有害赤潮渦鞭毛藻 *Gymnodinium mikimotoi* の生理・生態学的特性と赤潮発生機構及び発生予察の現状. 水産研究叢書 有害・有毒赤潮の発生と予知・防除, 46, 101-136.
- 19) 一見和彦・宮尾和宏・門谷 茂 (2007) 瀬戸内海引田湾における有害赤潮鞭毛藻 *Karenia mikimotoi* (渦鞭毛藻) の赤潮発生年と非発生年の海域環境の比較. 日本プランクトン学会報, 54 (1), 9-15.
- 20) 各務彰記・森田航也・嶋田 宏・山口 篤・今井一郎 (2018) 2015 年夏季北海道函館湾における有害渦鞭毛藻 *Karenia mikimotoi* の初検出および 2015-2016 年の出現動態. 日本プランクトン学会報, 65 (1), 1-11.
- 21) 飯塚昭二・入江春彦 (1969) 大村湾における *Gymnodinium* 赤潮発生と海底水無酸素化現象との関連. 日本プランクトン学会報, 16, 99-115.
- 22) 江藤拓也・俵積田貴彦 (2008) 2006 年夏季に周防灘西部海域で発生した *Karenia mikimotoi* 赤潮. 福岡県水産海洋技術センター研究報告, 18, 107-112.
- 23) 飯塚昭二・中島敏光 (1975) 赤潮鞭毛藻の硫化物に対する反応. 日本プランクトン学会報, 22 (1/2), 27-32.
- 24) 小泉喜嗣・高島 景・神菌真人・江藤拓也・馬場俊典・檜山節久・池田武彦・岩男 昂・樋下雄一・内間

満明・矢沼 隆・内田卓志・本城凡夫 (1994) 西部瀬戸内海における *Gymnodinium mikimotoi* の増殖域の環境特性と分布拡大機構. 海の研究, 3, 99-110.

- 25) Shikata T, Kitatsuji S, Abe K, Onitsuka G, Matsubara T, Nakayama N, Yusasa K, Nishiyama Y, Mizuno K, Msasuda T, Nagai K (2020) Vertical distribution of a harmful red-tide dinoflagellate, *Karenia mikimotoi*, at the decline

stage of blooms. Journal of Sea Research, 165:101960.

- 26) Yuasa K, Shikata T, Kuwahara Y, Nishiyama Y (2018) Adverse effects of strong light and nitrogen deficiency on cell viability, photosynthesis, and motility of the red-tide dinoflagellate *Karenia mikimotoi*. Phycologia, 57 (5), 525-533.