

2020年秋季に宇和島湾で発生した *Karenia mikimotoi* 赤潮と急潮の関係三門 哲也,^{1*} 神野 智,¹ 平井真紀子,¹
外丸 裕司,² 鬼塚 剛,² 三宅 陽一²

(2023年11月16日受付, 2024年3月10日受理, 2024年7月5日J-STAGE早期公開)

¹愛媛県農林水産研究所水産研究センター, ²(国研)水産研究・教育機構 水産技術研究所The relationship between *Karenia mikimotoi* red tide and the Kyucho in Uwajima Bay in autumn 2020TETSUYA MIKADO,^{1*} SATORU JINNO,¹ MAKIKO HIRAI,¹ YUJI TOMARU,²
GOH ONITSUKA² AND YOICHI MIYAKE²¹Fisheries Research Center, Ehime Research Institute of Agriculture, Forestry and Fisheries, Uwajima, Ehime 798-0104, ²Fisheries Technology Institute, Japan Fisheries Research and Education Agency, Hatsukaichi, Hiroshima 739-0452, Japan

A red tide of the harmful dinoflagellate *Karenia mikimotoi* occurred in Uwajima Bay from early September to mid-November 2020, the latest occurrence observed in this bay. Although genes of *K. mikimotoi* had been detected since the winter, low water temperatures associated with the offshore shift of the Kuroshio Current and the existence of competing species apparently delayed its bloom. The Kyucho in mid- and late-August potentially promoted the bloom by raising water temperature, dispersing competing species, and supplying nutrients to the bottom layer. In addition, typhoons approaching in early September appeared to have caused plankton to accumulate in the inner parts of Uwajima Bay by the west wind and to have reduced the duration of sunshine, consequently promoting the bloom of *K. mikimotoi*.

キーワード: *Karenia mikimotoi*, 赤潮, 宇和島湾, 栄養塩, 急潮

豊後水道の東岸に位置する愛媛県の宇和海沿岸域では (Fig. 1), 静穏で水深が深く, 海水交換が良好な地形を生かした魚類養殖や真珠養殖が盛んにおこなわれている。愛媛県における2020年の海面魚類養殖は生産量・額ともに全国1位, 1978年から2020年の生産額は43年間のうち41年間で全国1位となっており, その大半が宇和海沿岸域で生産されていることから, 産業規模は全国的にみても大きい (愛媛県漁業の地位: <https://www.pref.ehime.jp/uploaded/attachment/19715.pdf>, 2024年3月13日, 魚類養殖生産の地位: <https://www.pref.ehime.jp/uploaded/attachment/19743.pdf>, 2024年3月13日)。しかし, 宇和海では1978年に有害渦鞭毛藻の *Karenia mikimotoi* (= *Gymnodinium mikimotoi*, *Gymnodinium nagasakiense*, *Gymnodinium* sp. type '65等) の赤潮が初めて確認されて以降, 2020年までに本種の赤潮が45件発生しており,¹⁾ 安定した養殖生産の障壁となっている。*K. mikimotoi* は東アジアやヨーロッ

パを中心に世界各地の熱帯から亜寒帯に分布する有害渦鞭毛藻の一種であり,²⁾ 西日本沿岸域で夏季を中心にしたびたび発生し, 魚介類をへい死させる被害をもたらしている。³⁾ 宇和海では *K. mikimotoi* 以外にも *Cochlodinium polykrikoides* や *Heterosigma akashiwo* 等による赤潮被害が発生するが, その半数以上を *K. mikimotoi* による赤潮が占める。¹⁾ また, その額は2012年に12億円以上にも及ぶなど極めて甚大であることから,¹⁾ 本種赤潮による被害の軽減が重要課題とされてきた。

赤潮被害を軽減する手法の一つとして, 殺藻粘土や殺藻生物のような駆除剤の散布により, 増殖中の *K. mikimotoi* を直接駆除する方法が挙げられる。⁴⁾ しかし, 宇和海のような水深が深く海水交換が盛んな海域において十分な駆除効果を得るためには, 莫大な量の駆除剤を散布する必要がある, また, 生態系への悪影響が懸念されることから, 実用化レベルに達している手法は限られている。^{4,5)} そのため, 魚類養殖の現場で実施可能な対応策

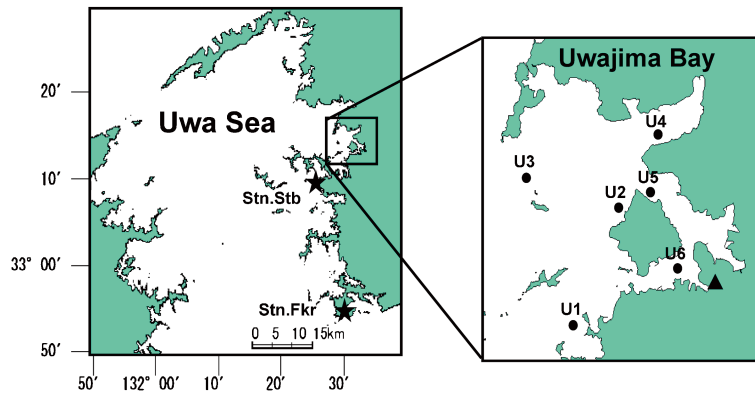


Fig. 1 Map of the study area in Uwajima Bay, Japan. Filled circles and triangle indicate the sampling stations of *Karenia mikimotoi* and the meteorological station of Uwajima, respectively. Water temperature data were obtained by the buoys deployed at Stns. Stb, Fkr (black stars) and U6.

としては、有害種の出現状況を詳細にモニタリングし、餌止めを実施する、あるいは漁場避難等によって赤潮から逃げる以外にないのが現状である。⁶⁾したがって、本種赤潮の被害軽減には、上記の対策を効果的に講じるために本種の発生メカニズムを明らかにし、それに基づいて赤潮の発生を事前に予測することが重要である。

*K. mikimotoi*の増殖と気象・海象条件との関係については、室内での培養実験やモニタリング調査により、徐々に明らかにされつつある。本種は水温10–30°C、塩分10–30の各範囲で増殖可能であり、やや高水温で低塩分な水温25°C、塩分25の組み合わせで特に良好な増殖がみられる。^{3,7)}また、増殖が飽和する光強度は110 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、増殖に最低限必要な光強度は10 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ と、他種より弱い光環境でも増殖可能であることが報告されている。^{3,7)}それと対応するように、本種は“中層増殖性赤潮”の異名を持ち、天候や時間帯によって分布層を変えながら、海面からの観測が困難な中層付近で増殖することが知られている。³⁾また、豊後水道では急潮や底入り潮が赤潮の発生や衰退に関与していることが知られている。^{3,8–13)}急潮は黒潮由来の暖水が表層へ流入する現象であり、沿岸域に急激な水温上昇をもたらすほか、プランクトンが豊富な湾内水を湾外に希釈拡散し、赤潮発生を抑制することが報告されている。^{3,9–11)}底入り潮は陸棚斜面由来の冷水が底層に流入する現象であり、栄養塩供給現象としてプランクトンの増殖に関与する一方、海水交換により赤潮を衰退させた報告事例もある。^{9,11–13)}これらに加え、栄養塩やそれをめぐる他の藻類との競合、さらには風や潮流による集積といった物理的要因等が複雑に相互作用して赤潮の発生が決定づけられていると考えられる。^{3,14–16)}

宇和海における本種の赤潮は、中央部に位置する宇和島湾において低密度で確認されたのち、周辺海域へ分布を広げる傾向が認められていることから、宇和島湾が初

期発生海域であると推測されている。¹⁷⁾そのため、宇和島湾では本種の初期増殖をいち早くとらえることを目的に、定期的なモニタリング調査が実施されてきた。これまでの調査により、宇和島湾における*K. mikimotoi*赤潮は、梅雨時期である6月から7月ごろに発達することが報告されており、^{17,18)}これは伊万里湾や筑前海など、他の海域の出現時期と比べても相違ない。^{19,20)}また、梅雨時期には当湾の水温が概ね20°C以上に上昇し、雨天や曇天の増加に伴う光強度の低下がみられることから、室内実験に基づく本種の増殖至適環境に近い環境下で赤潮が形成されているといえる。⁷⁾しかし、2020年には本種の赤潮が9月10日に発生し、その後約2か月にわたって継続した。これは愛媛県での観測史上最も遅い稀有な事例であり、赤潮発生を予察する上で重要な知見になると考えられるため、本論文では赤潮発生時の環境について記すとともに、当赤潮の発生メカニズムについて明らかにすることを目的とする。

材料と方法

宇和島湾における海水の採取及び分析 *K. mikimotoi*の初期発生域と考えられている宇和島湾奥部の定点Stn. U6（水深約24 m）において（Fig. 1）、¹⁷⁾2020年の5月から9月にかけて週に1回、10月から11月にかけて月に1–2回の頻度で10時から14時ごろに採水（離合社製、北原式採水器）するとともに、多項目水質計（JFEアドバンテック製、AAQ-RINKO）を用いて水温、塩分、クロロフィル、濁度等の鉛直分布を測定した。採水は0, 5, 10, 海底上1 m及びクロロフィル極大層で行い、愛媛県農林水産研究所水産研究センターに帰所後、速やかに検鏡及びサンプル処理を行った。また、その周辺海域においても愛媛県漁業協同組合の各支所の協力のもと、定期的に表層あるいはクロロフィル極大層で採水ならびに検鏡を実施した。検鏡は、十分に攪拌した試水

1 mLをプランクトン計数板（離合社製，界線入計数板5608）に乗せ，光学顕微鏡（Nikon製，Eclipse E200；Leica製，DM750）を用いて各種植物プランクトンの細胞密度を計数した。また，試水約10 mLをガラス繊維ろ紙（Whatman製，GF/F ϕ 25 mm）でろ過し，懸濁物を除去した海水を -30°C で冷凍保存し，後日解凍したものをオートアナライザー（BLTEC製，QuAAtro 2-HR）による分析に供し，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，DSi：溶存態ケイ素）を測定した。

Real-time PCR法による推定細胞密度の分析 宇和島湾内の定点Stn. U1-5（Fig. 1）において1 m刻みで0-10 m層の等量混合海水を採水し，Onitsuka *et al.*¹⁷⁾を参考にreal-time PCR法に供し，*K. mikimotoi*の推定細胞密度を算出した。まず海水1 Lを孔径5 μm のメンブレンフィルター（Millipore製，JMWP04700）でろ過し， -30°C で冷凍保存した。フィルターを解凍後，ビーズ破碎によりホモジナイズし，DNA抽出キット（QIAGEN製，DNeasy Plant Mini Kit）を用いてカラム上にDNAを抽出した。抽出したDNAは100 μL の溶出バッファーに溶出させ，蒸留水で10分の1に希釈した液をサンプル抽出液とした。*K. mikimotoi*を特異的に識別するプライマーと蛍光プローブは，Onitsuka *et al.*¹⁷⁾により，GenBankから入手したリボソームRNA遺伝子（rDNA 18S-28S領域；アクセッション番号KU314866，KT733615，LC055222，KF998563）の情報を基に，Internal Transcribed Spacer 2（ITS2）領域上にある*K. mikimotoi*に特異的な配列を標的として設計されたものを使用した。¹⁷⁾ 分析に供する反応液は1サンプル当たり20 μL とし，組成は5 μM に調製したフォワードプライマーとリバースプライマーの混合液を1 μL ，5 μM に調製した蛍光プローブを1 μL ，東洋紡製のTHUNDERBIRD Probe qPCR Mixを10 μL ，蒸留水を3 μL ，サンプル抽出液を5 μL となるよう調製した。分析にはreal-time PCR装置（タカラバイオ製：Thermal Cycler Dice Real Time System II）を用い，初期変性のため 95°C ，60秒加熱した後， 95°C ，15秒間の熱変性及び 60°C ，45秒間の伸長反応を45サイクル繰り返し，得られたThreshold Cycle（CT）値を既知濃度の4段階のスタンダードDNA（20-20,000 cells mL^{-1} ）の反応結果から作成した検量線に当てはめることで抽出DNAの*K. mikimotoi* DNAコピー数を算出した。得られたコピー数は，既知細胞密度の*K. mikimotoi*を添加した1 Lの海水試料から抽出したDNAの分析結果より得られた関係式¹⁷⁾により細胞密度へと変換した。

気象・海象情報の収集 Stn. U6，Stb及びFkr（Fig. 1）における水温データについては，宇和海海況情報

サービス「You see U-sea」で取得された連続観測データを用いた（<http://akashio.jp/kaisuion/>，2023年11月8日）。また，都井岬及び足摺岬と黒潮流軸の距離については，海上保安庁海洋情報部のホームページで公表されている黒潮流軸数値情報を用いた（<https://www1.kaiho.mlit.go.jp/KANKYO/KAIYO/qboc/kurosio-num.html>，2023年11月8日）。さらに，宇和島市の気象データとして，宇和島特別地域気象観測所で観測された気温，降水量，日照時間ならびに風向・風速のデータを用いた（https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php?prec_no=73&block_no=47892&year=&month=&day=&view=，2023年11月8日）。

結 果

***Karenia mikimotoi*の発生状況** 宇和島湾における*K. mikimotoi*細胞密度の経時変化をFig. 2に示す。本種遊泳細胞の1 cell mL^{-1} 初認日は例年より遅く，7月13日に宇和島湾南部で1 cell mL^{-1} が確認され，7月20日には湾奥部で14 cells mL^{-1} まで密度を高めたが，以降8月下旬まで0-3 cells mL^{-1} で停滞した。しかしその後，宇和島湾奥部で9月4日に162 cells mL^{-1} ，9月10日に1,680 cells mL^{-1} まで急激に高密度化し，湾奥部を中心に周辺の細胞密度が上昇した。宇和島湾北部に位置する吉田湾では特に高密度になり，9月21日から5日連続で10,000 cells mL^{-1} を上回った。直後に数十 cells mL^{-1} まで減少したものの，10月上旬には再び1,000 cells mL^{-1} を上回り，その後は緩やかに減少し，11月中旬にはほとんど確認されなくなった。なお，赤潮は宇和島湾内での発生にとどまり，漁業被害は発生しなかった。¹⁾

宇和島市における気象条件 宇和島市における5月から9月の各日における平均気温，合計降水量及び日照時間（3日間の中央移動平均）の推移をFig. 3に示す。宇和島市の気温は，6月中旬から7月中旬にかけて平年を下回る日が散見されたが，その後は9月上旬まで上回ることが多かった（Fig. 3a）。7月上中旬には停滞した梅雨前線の影響で平年を大きく上回る降水量があり，日照時間が平年より短くなった（Fig. 3b-c）。8月上旬から下旬には降雨がほとんどなく，日照時間が平年より長くなった。9月上旬には台風9号や10号が接近し，中下旬にかけて秋雨前線が停滞したため，再び日照時間が平年より短くなった。

宇和島湾における海象と植物プランクトンの鉛直組成 Stn. U6における5月から10月の水温，塩分，濁度，栄養塩濃度及び各種プランクトンの鉛直分布をFigs. 4-5に示す。6月頃から水温躍層が発達し始め，7月頃までは0 m層で $22-26^{\circ}\text{C}$ ，5 m層では $19-21^{\circ}\text{C}$ で推移していたが，8月中旬から9月上旬にかけて2回，水温の急上

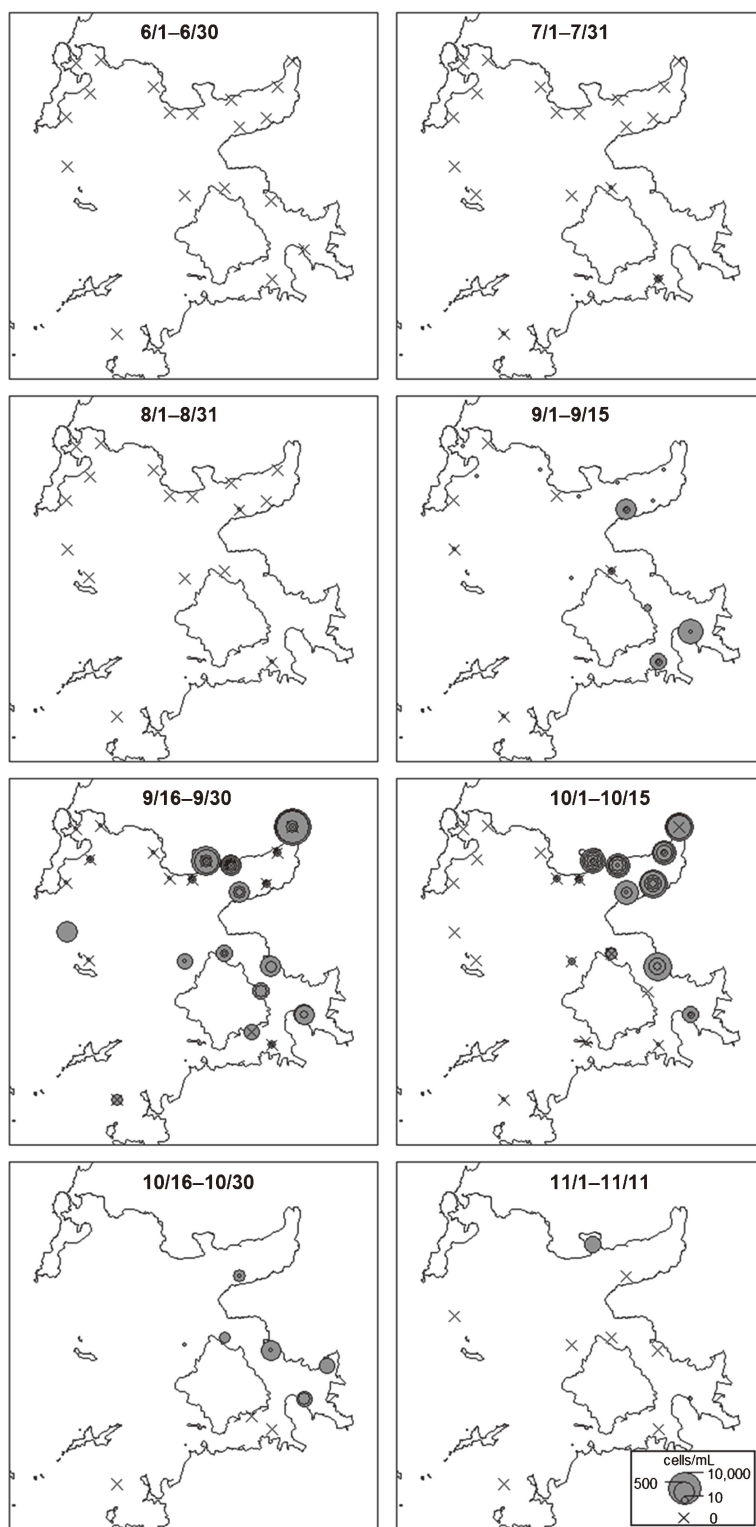


Fig. 2 Spatio-temporal variations in cell density of *Karenia mikimotoi* in Uwajima Bay. Sizes of circles indicate maximum cell densities of water columns at sampling stations in each period.

昇が確認された (Fig. 4a)。0 m から海底上 1 m 層の塩分は 14.3–34.2 の範囲で推移し、まとまった降水があった 6 月から 7 月及び 9 月上旬中に 0 m 層付近で低くなっ

た (Fig. 4b)。0 m から海底上 1 m 層の栄養塩濃度は DIN が $<18.6 \mu\text{M}$, DIP が $<1.2 \mu\text{M}$, DSi が $<38.3 \mu\text{M}$ の範囲で推移し、特に 7 月中旬の 0 m 層, 8 月上旬の海底上 1 m

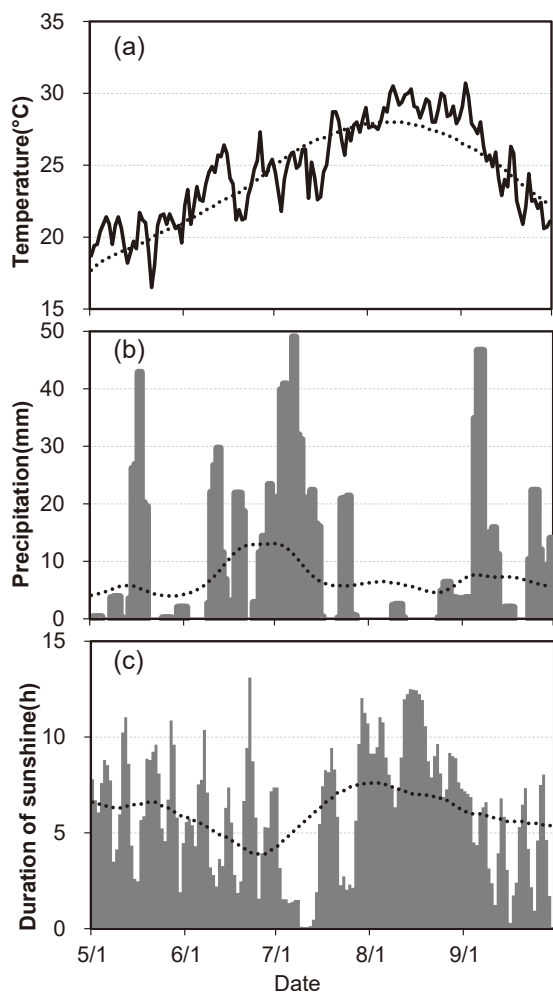


Fig. 3 Temporal changes in (a) daily average temperature (black solid line) and 30-year average (black broken line), (b) daily precipitation (gray bars, 3-day running mean) and 30-year average (black broken line), and (c) daily duration of sunshine (gray bars, 3-day running mean) and 30-year average (black broken line) at the meteorological station of Uwajima, respectively.

層, 9月から10月の10 mから海底上1 m層で高くなった (Fig. 4d-f)。5月上旬から7月上旬は*K. mikimotoi*が確認されず, *Pseudo-nitzschia* spp.を主体とする珪藻類のほか, *Prorocentrum shikokuense*や*H. akashiwo*をはじめとした鞭毛藻類が優占していた (Fig. 5a-c)。7月13日に珪藻類が数百 cells mL⁻¹以下に減少し, 7月20日には*K. mikimotoi*が14 cells mL⁻¹確認されたが, その後再び珪藻類や鞭毛藻類が高密度化し, 8月18日まで*K. mikimotoi*は1 cell mL⁻¹以下で推移した。8月24日には*K. mikimotoi*が3 cells mL⁻¹確認され, 10 mから海底上1 m層の珪藻類や鞭毛藻類が数十 cells mL⁻¹に減少した。直後の9月4日に162 cells mL⁻¹の*K. mikimotoi*が確認されたが, 珪藻類も再び数千 cells mL⁻¹

以上に高密度化した。

宇和島湾における*K. mikimotoi*初期個体群の動態 Stn. U1-5においてreal-time PCR法で検出された*K. mikimotoi*の5点平均の推定細胞密度をFig. 6に示す。本種遺伝子は3月6日に0.015 cells mL⁻¹確認されて以降, 5月中旬に一時的に未検出になったのを除いて継続して検出された。4月から7月までの遺伝子量は概ね1 cell mL⁻¹以下で横ばいであったが, 8月24日から急激に増加し始め, 赤潮が発生した9月10日には27.8 cells mL⁻¹となった。

宇和島沿岸における急潮の発生 都井岬及び足摺岬から黒潮流軸までの距離の推移をFig. 7に, Stn. U6及びStbにおける1日平均水温の推移をFig. 8に示す。なお, 本論文では小泉²¹⁾を参考に, 「数日以内の2°C以上の昇温」を急潮と定義する。豊後水道における急潮は黒潮系暖水の流入現象であることから, 黒潮流軸が足摺岬に接岸傾向のときに発生しやすく,⁹⁾ その基準は43マイル未満とされている。²²⁾ 2020年の足摺岬における黒潮流軸距離は1月から3月にかけて接岸傾向で推移した後, 5月上旬に一時的に接岸傾向になったのを除くと8月上旬まで離岸傾向で推移し続けた (Fig. 7)。その後, 8月中旬から9月上旬に一時的に接岸傾向になったほかは離岸傾向で推移していた。それと対応するように, Stn. Stbの5 m層水温は4月下旬から平年を下回り, 8月上旬まで平年より1-2°C低く推移した (Fig. 8a)。その後, 黒潮が足摺岬に近づいた8月中旬に3.6°C, 下旬に4.5°C急上昇する急潮が発生し, 平年を大きく上回った。急潮はStn. U6でも確認され, 8月10日から17日にかけて5 m層で約3.4°C, 20 m層で約1.5°C, 8月25日から29日にかけて5 m層と20 m層ともに4°C以上の水温上昇が確認された (Fig. 8b)。

考 察

宇和島湾で発生する*K. mikimotoi*は5月から6月に湾奥部で初認され, 分布を拡大しながら高密度化することが報告されている。¹⁷⁾ また, 同湾では, real-time PCR法やLAMP法によって冬季にも本種遺伝子が検出されており,¹⁸⁾ 湾内に定着しているシードポピュレーションが好適環境の形成とともに増殖すると考えられている。2020年は宇和島湾奥部で本種が初認されたものの, 1 cell mL⁻¹確認された日は例年より1か月程度遅い7月中旬であり, 直近10年で最も遅かった。一方で, 宇和島湾内における本種の遺伝子は冬季から初夏にかけて概ね期間を通じて検出され続けていた (Fig. 6)。本湾における*K. mikimotoi*の1 cell mL⁻¹初認日と1月から4月の環境 (降水量・気温・風速・日照時間) の相関解析を実施した研究では有意な相関関係が認められておらず,²³⁾ 本種初認日に影響を及ぼす冬季の環境要因は明らかに

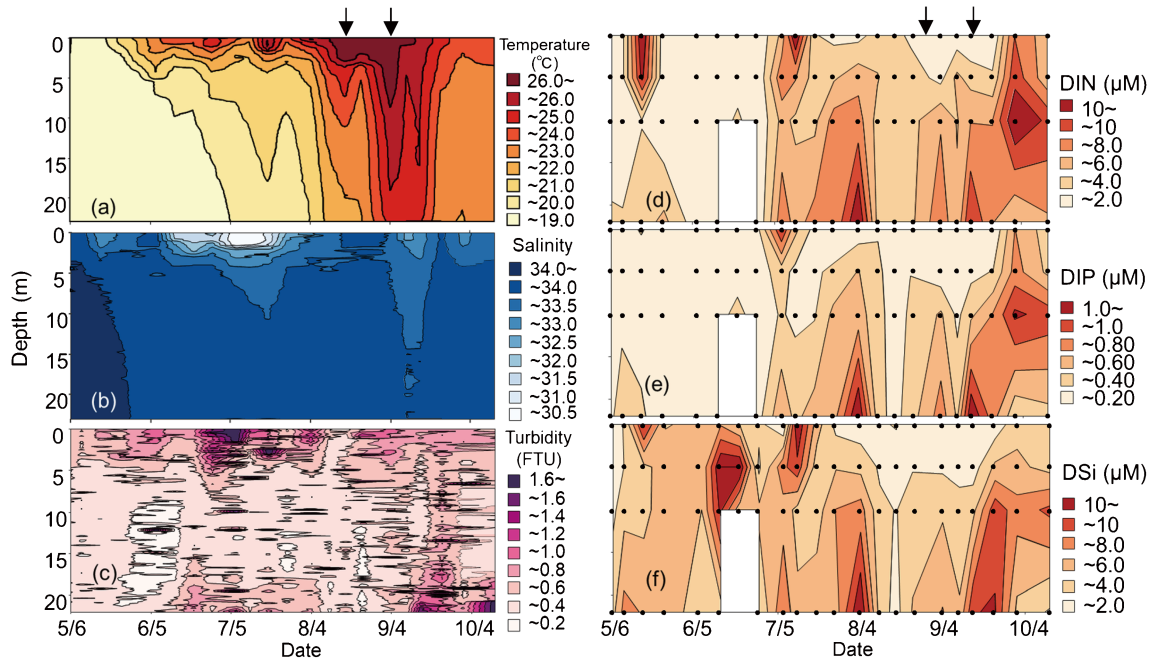


Fig. 4 Temporal changes in vertical distributions of (a) water temperature, (b) salinity, (c) turbidity, (d) DIN, (e) DIP, and (f) DSi concentrations at Stn. U6 from May to October 2020. The blanks and black circles of (d)–(f) indicate missing data and sampling depths, respectively. Arrows indicate the timing of the Kyucho.

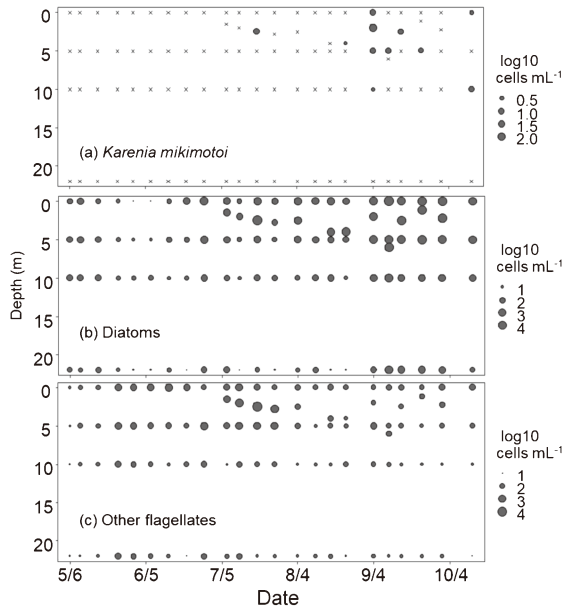


Fig. 5 Temporal changes in vertical distributions of cell densities of (a) *Karenia mikimotoi*, (b) diatoms, and (c) other flagellates at Stn. U6 from May to October 2020.

なっていないものの、本種の増殖が例年より遅れた要因の一つとして、初夏の水温が例年より低かったことが考えられる。宇和島の沿岸水温に影響を及ぼす因子としては、急潮等の外洋系水の侵入や気象条件が挙げられる

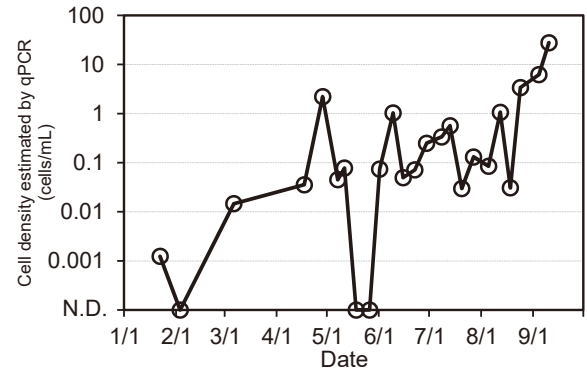


Fig. 6 Temporal changes in cell density of *Karenia mikimotoi* estimated by real-time PCR at Stn. U1-5. "N.D." on the vertical axis means not detected.

が、²⁴⁾ 2020年は5月から8月上旬にかけて黒潮が足摺岬沖から離岸し続けたことから、同期間に急潮の発生が無かった。さらに、宇和島市の気温は6月中旬から7月中旬にかけて平年を下回る日が多かったことから、宇和島市沿岸の水温は4月下旬から8月上旬にかけて平年より1–2°C低く推移し続け、本種の増殖が遅れる要因となったと考えられる。さらに、7月上中旬に本種の増殖に適した低日照で雨が多い気象条件が整ったものの、6月下旬から *Pseudo-nitzschia* spp. や *P. shikokuense* をはじめとする競合種が優占し続けたことにより、増殖が抑制されたと考えられる。*P. shikokuense* の増殖至適水温は

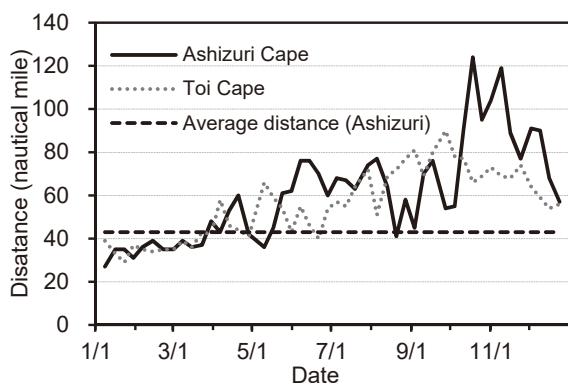


Fig. 7 Temporal changes in distances between the Kuroshio Current axis and Cape Ashizuri (black solid line) and Cape Toi (gray broken line). The black broken line indicates the average distance between the Kuroshio Current axis and Cape Ashizuri (43 nautical miles).

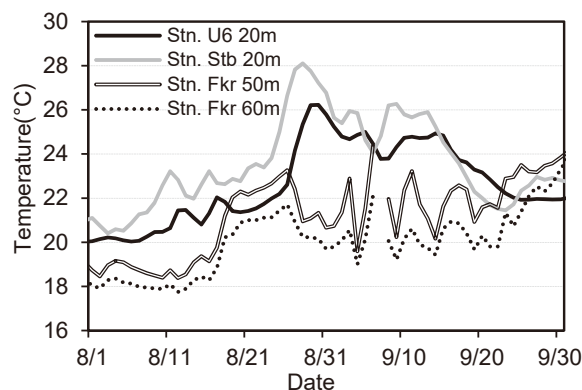


Fig. 9 Temporal changes in water temperature at 20 m depth (black solid line) at Stn. U6, at 20 m depth (gray solid line) at Stn. Stb and 50 m (black double line) and 60 m (black broken line) depths at Stn. Fkr.

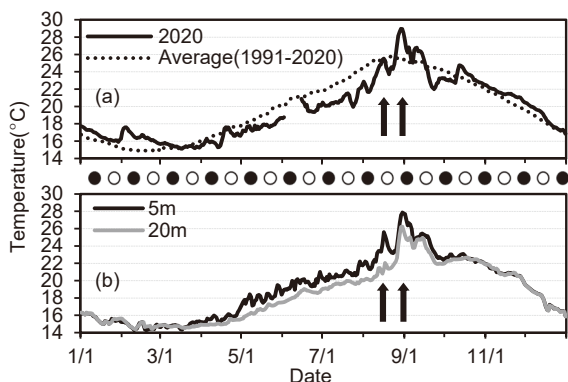


Fig. 8 Temporal changes in average daily water temperature (a) at 5 m (black solid line) depth and its 30-year average (black broken line) at Stn. Stb and (b) at 5 m (black solid line) and 20 m (gray solid line) depths at Stn. U6. Arrows indicate the timings of water temperature increase. The empty and filled circles indicate full and new Moon, respectively.

K. mikimotoi よりも低い 22°C と報告されており,²⁵⁾ 長期間にわたる低水温が *P. shikokuense* の増殖に有利に働いたと考えられる。

続いて、秋季の赤潮発生と環境要因の関係について考察する。8月5日のStn. U6における0 mから海底上1 m層のDIN及びDIPは、それぞれ $1.3\text{--}12.6\ \mu\text{M}$ 及び $0.10\text{--}1.2\ \mu\text{M}$ であったが、8月12日には $2.9\text{--}4.2\ \mu\text{M}$ 及び $0.18\text{--}0.30\ \mu\text{M}$ 、8月18日には $2.1\text{--}2.8\ \mu\text{M}$ 及び $0.08\text{--}0.18\ \mu\text{M}$ まで減少した (Fig. 4d-f)。急潮により湾内水の一部が貧栄養な黒潮系暖水に入れ替わったことや、8月は日照時間が長く、まとまった降水がなかったため、河川由来の栄養塩の供給が減少したことにより、一時的に珪藻の増

殖に不利な貧栄養環境となったと考えられる。実際に、8月12日から18日における0-5 m層の珪藻類は $479\text{--}3,624\ \text{cells mL}^{-1}$ 、8月24日は $191\text{--}6,888\ \text{cells mL}^{-1}$ と高密度の分布が継続して確認された一方、10 m層では $304\text{--}423\ \text{cells mL}^{-1}$ から $24\ \text{cells mL}^{-1}$ まで減少していた。*K. mikimotoi* は8月5日から18日まで1 mLの検鏡で確認されていなかったが、珪藻類の減少と対応するように、8月24日にStn. U6の4 m層で $3\ \text{cells mL}^{-1}$ 確認された。急潮によって5 m層の水温が *K. mikimotoi* の増殖至適水温である 25°C まで上昇するとともに、⁷⁾ 一時的に10 m層の珪藻類が減少したことが、*K. mikimotoi* の増殖に有利に働いたと考えられる。

その後、8月25日から29日にかけて再び急潮が発生した。この急潮では、5 m層のみならず20 m層でも 4°C 以上の水温上昇がみられており、8月中旬の急潮より規模が大きいものであったと推測される。このとき、8月24日の0-5 m層のDINは $1.5\text{--}3.1\ \mu\text{M}$ 、DIPは $0.07\text{--}0.20\ \mu\text{M}$ 、10 mから海底上1 m層ではそれぞれ $3.3\text{--}3.5\ \mu\text{M}$ 、 $0.23\text{--}0.31\ \mu\text{M}$ であったが、9月4日には0-5 m層のDINは $0.5\text{--}1.4\ \mu\text{M}$ 、DIPは $0.08\ \mu\text{M}$ 、10 mから海底上1 m層ではそれぞれ $5.8\text{--}7.4\ \mu\text{M}$ 、 $0.43\text{--}0.69\ \mu\text{M}$ と、栄養塩濃度は0-5 m層で減少するとともに10 mから海底上1 m層で上昇した。宇和島湾の一部である遊子湾では、急潮発生直後に底層以外の栄養塩濃度が低下し、底層では底泥の攪拌によるとみられる栄養塩濃度の上昇が報告されている。¹⁰⁾ Stn. U6における濁度の鉛直推移については急潮発生から数日経った後のデータしかないが、20-22 m層の濁度は8月24日は $0\text{--}0.2\ \text{FTU}$ であったが、9月4日には $0.4\text{--}0.6\ \text{FTU}$ に上昇した (Fig. 4c)。また、宇和海各地の底層水温は、急潮によって最高水温に達してから2-3日後にかけて、Stn. Fkrで $1.5\text{--}2.0^{\circ}\text{C}$ 、Stn. Stb

で 2.5°C , Stn. U6で 1.5°C , 南部から順に低下しており, 底入り潮が発生したことも考えられる (Fig. 9)。ここで, 底泥から溶出するDINの大半はアンモニア態窒素であるが,^{11,26)} 底入り潮ではアンモニア態窒素の増加は確認されないことが報告されている。^{9,11,21)} 10 mから海底上1 m層のアンモニア態窒素は8月24日に $2.4\text{--}2.5\text{ }\mu\text{M}$ であったが, 9月4日には $4.9\text{--}6.3\text{ }\mu\text{M}$ に増加していることから, 栄養塩の増加は底泥からの溶出によるものと考えられる。9月4日の10 mから海底上1 m層の栄養塩濃度は*K. mikimotoi*の増殖の半飽和定数($\text{NH}_4\text{-N}$ $0.58\text{ }\mu\text{M}$, $\text{PO}_4\text{-P}$ $0.14\text{ }\mu\text{M}$)を大きく上回っており,⁷⁾ 本種は1日20 m以上の日周鉛直移動をすることが報告されていることから,²⁷⁾ これらの栄養塩を利用して増殖することが可能であったと考えられる。

しかしここで, 急潮は湾内の海水の大部分を黒潮由来のプランクトンの少ない海水に交換する現象であることから,⁹⁾ 急潮発生後の9月4日に高密度の*K. mikimotoi*と珪藻類が確認されたことに矛盾が生じる。なお, 近隣海域において急潮発生前に*K. mikimotoi*はほとんど確認されておらず(赤潮ネット: <https://akashiwo.jp/>, 2024年1月30日), 高密度の本種を含む海水が宇和島湾に侵入した可能性は低い。*K. mikimotoi*と珪藻類が同時に高密度化した要因として, 二つの要因が考えられる。一つ目は, 湾奥部のプランクトンの一部が急潮発生後も湾内に残留していた可能性である。8月下旬の急潮はStn. U6の0–20 m層水温が 4°C 以上上昇するほど規模が大きかったことから, 大半のプランクトンは湾外に流出したと考えられる。しかし, 宇和島湾奥部ではU字型に入り組んだ複雑な地形が認められ, その海水交換は悪いと考えられることから, 一部のプランクトンは急潮によって流されきらなかった可能性がある。8月24日にはStn. U6で 3 cells mL^{-1} の*K. mikimotoi*が確認されていたが, 急潮によって流出しなかったと仮定すると, 9月4日までのみかけの増殖速度は $0.37\text{ cells mL}^{-1}$ となり, 宇和島湾で報告された $0.45\text{ divisions d}^{-1}$ や広島湾での $0.27\text{--}0.59\text{ divisions d}^{-1}$ と比較しても妥当な速

度である。^{7,17)} また, 9月4日の*K. mikimotoi*と珪藻類の最高密度はいずれも湾奥部で確認されているという点でも矛盾点はない。二つ目の要因は, 台風の接近に伴う強風により, プランクトンが湾奥部へ吹き寄せられた可能性である。宇和島市では9月上旬に四国に接近した台風9号及び10号の影響で強い南風が吹いており, 特に9月3日の7:00–19:00には南から南西の風が卓越して吹いていた (Fig. 10)。ここで, 風向については周辺地形の傾斜によって吹き込みやすい方向が変化し, 谷状の地形では谷と同一方向の風向になりやすいことが知られている。^{28,29)} 宇和島湾は北を吉田地区, 南を九島や三浦半島, 東を四国山地により三方を囲まれ, 湾口が西向きに開いた谷状の地形となっているため, 南から南西の風は風向が変化し, 西風となりやすいと考えられる。鹿児島湾や伊万里湾では風によるプランクトンの集積が報告されていることから,^{15,16)} 宇和島湾においても, 急潮によって湾内外に分散していた珪藻や*K. mikimotoi*が西風によって湾奥部に吹き寄せられることで, 両種が同時に急激に高密度化した可能性が考えられる。これらの要因によって両種が湾奥部で高密度化したのが, 台風通過後に秋雨前線が本州上空に停滞したことにより, *K. mikimotoi*の増殖に好適な日照時間が少なく降水量が多い環境となり, 赤潮の形成に至ったことが考えられる。

その後, *K. mikimotoi*は吉田湾にも分布を拡大しながら数千から数万 cells mL^{-1} で推移したが, 9月23日には0 m層のDINが $0.03\text{ }\mu\text{M}$, DIPが $0.02\text{ }\mu\text{M}$ と*K. mikimotoi*の増殖半飽和定数以下まで低下し,⁷⁾ 9月26日には最高細胞密度は 50 cells mL^{-1} 以下まで減少した。しかし, 10月1日になると0 m層のDINが $7.95\text{ }\mu\text{M}$, DIPが $0.60\text{ }\mu\text{M}$ にまで上昇し, 10月6日には再び $1,000\text{ cells mL}^{-1}$ 以上の密度で確認された。5 m層と20 m層の水温差は9月24日に 1.3°C あったが, 10月1日には 0.3°C となっており, 水温躍層の崩壊に伴う鉛直混合により, 9月15日や9月24日に高濃度であった海底付近の栄養塩が0–10 m層に供給されたと考えられる。また, 10月1日のDIN及びDIPは10 m層で最も高く, 死

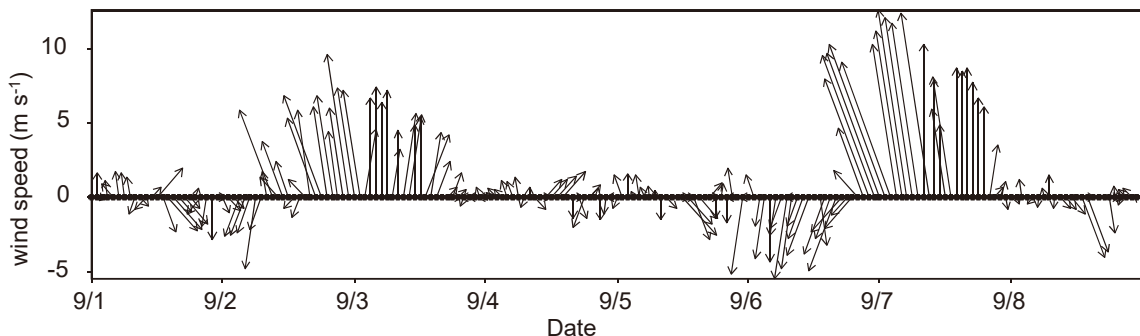


Fig. 10 Temporal changes in wind vectors at the meteorological station of Uwajima from September 1 to 8.

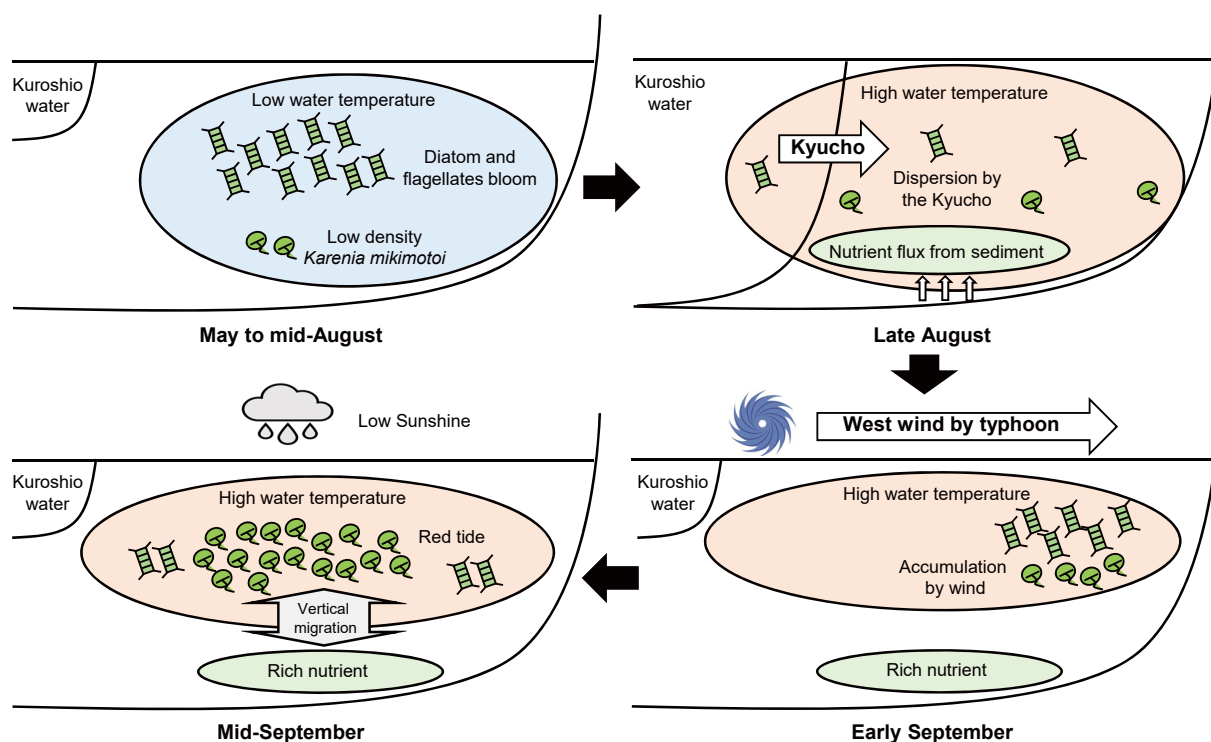


Fig. 11 Schematic diagram of mechanisms of the *Karenia mikimotoi* red tide development in Uwajima Bay in 2020.

減した *K. mikimotoi* が中層でバクテリアに分解され、栄養塩が水平移流した可能性も考えられる。*K. mikimotoi* は栄養塩欠乏時に鉛直移動のリズムが崩れ、特に窒素欠乏時には表層にとどまり続けることが報告されている。³⁰⁾ このため、本種は9月下旬に一時的に運動能力が低下して低密度化したものの、0-10 m 層への栄養塩供給により、増殖に十分な濃度となったことから10月上旬に再び増殖し、赤潮発生期間が長期化したと考えられる。

以上の結果を踏まえ、2020年に宇和島湾で発生した *K. mikimotoi* 赤潮の発生メカニズムを Fig. 11 のとおり整理した。この図の通り、従来赤潮の発生を抑制させると考えられていた急潮が、*K. mikimotoi* の増殖に適した水温まで上昇させ、急激な流れによって競合種を湾内外に拡散させるとともに、底泥の攪拌による中底層への栄養塩溶出をもたらし、*K. mikimotoi* の増殖を促進したことが示唆された。また、その直後に、台風の接近に伴う西風により、急潮によって湾内外に拡散していた *K. mikimotoi* と珪藻類が湾奥部へ吹き寄せられるとともに、秋雨前線の発達に伴う日照時間の低下が *K. mikimotoi* の増殖に有利に働き、赤潮の発生に至ったものと考えられる。当海域における *K. mikimotoi* の赤潮発生時期はこれまで初夏が主体であったが、それ以外の時期でも気象・海象条件によって赤潮になる事例が確認されたことから、定期的なモニタリングはますます重要になると考えられる。

謝 辞

本研究の実施にあたり、宇和島湾での調査にご協力いただいた愛媛県漁業協同組合宇和島支所の氏原大介様、その周辺海域において採水や検鏡にご協力いただいた愛媛県漁業協同組合各支所のご担当者様に御礼申し上げます。Stn. U6, Stb 及び Fkr の水温は、愛媛県、伊方町、八幡浜市、西予市、宇和島市、愛南町、愛媛大学、愛媛県漁業協同組合、宇和海漁業協議会、愛媛県魚類養殖協議会、愛媛県真珠養殖漁業協議会、愛媛県真珠貝養殖漁業協議会において構築されている、宇和海海況情報サービス「You see U-Sea」のデータを利用した。なお、本研究の一部は水産庁委託事業「漁場環境改善推進事業」として行われた。

文 献

- 1) 愛媛県水産試験場事業報告 昭和53年度～令和2年度. 愛媛県農林水産研究所水産研究センター, 宇和島. 1980-2022.
- 2) Li X, Yan T, Yu R, Zhou M. A review of *Karenia mikimotoi*: Bloom events, physiology, toxicity and toxic mechanism. *Harmful Algae* 2019; **90**: 101702. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2019.101702>.
- 3) 宮村和良. *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」(今井一郎, 山口峰生, 松岡数充編) 恒星社厚生閣, 東京. 2016; 191-200.
- 4) 紫加田知幸. 国内における有害赤潮対策の高度化と課題. *アクアネット* 2021; **7**: 44-48.

- 5) Shikata T. Effects of light on develop and decline of the red-tide. *Nippon Suisan Gakkaishi* 2018; **84**: 622-625 (in Japanese).
- 6) 今井一郎. 環境にやさしい実効的な赤潮対策を求めて. *Nippon Suisan Gakkaishi* 2021; **87**: 313.
- 7) 山口峰生. *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. 南海海区水産研究所研究報告 1994; **27**: 251-394.
- 8) 小泉喜嗣, 西川 智, 薬師寺房憲, 内田卓志. 急潮による珪藻類休眠細胞の発芽と増殖. 水産海洋研究 1997; **61**: 275-287.
- 9) 武岡英隆. 豊後水道の急潮と底入り潮. 沿岸海洋研究 2020; **58**: 19-43.
- 10) 川端善一郎, 佐竹宗徳. 急潮による湾内の物理構造・栄養塩・植物プランクトンの変化. 沿岸海洋研究ノート 1992; **30**: 27-36.
- 11) 小泉喜嗣, 河野芳巳. 夏季の下波湾の珪藻プランクトン増殖機構に対する急潮の影響. 沿岸海洋研究ノート 1994; **32**: 81-89.
- 12) 兼田淳史, 小泉喜嗣, 高橋大介, 福森香代子, 郭 新宇, 武岡英隆. 2007年宇和海上波湾における有害渦鞭毛藻 *Karenia mikimotoi* 赤潮の底入り潮の発生による消滅. 水産海洋研究 2010; **74**: 167-175.
- 13) 速水祐一, 扇山 舟, 山田正徳, 山田政彦, 武村公宏, 武岡英隆. 宇和海・北灘湾におけるクロロフィルa濃度の季節・経年変化. 沿岸海洋研究 2005; **69**: 1-9.
- 14) 安田秀一. 赤潮プランクトンの発生・消滅に関する物理的考察—表層物質に及ぼす海洋乱流拡散と吹送流による初期分散の解析—. *Journal of National Fisheries University* 2003; **51**: 165-175.
- 15) 吉田陽一, 沼田克己. 鹿児島湾および周防灘における *Chattonella* sp. の集積と移動. *Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries* 1982; **48**: 1401-1405.
- 16) 西田 渉, 鈴木誠二. 赤潮発生要因の1つである伊万里湾の流動構造に及ぼす風の影響に関する研究. 長崎大学工学部研究報告 2008; **38**: 46-51.
- 17) Onitsuka G, Suzukawa K, Yoshie N, Hirai M, Takenaka S, Yoshihara Y, Ohnishi H, Shimizu S, Takeuchi H, Ohta K, Tomaru Y, Sakamoto S, Abe K, Yamaguchi A, Shikata T, Yamaguchi H, Takeoka H. Spatio-temporal dynamics of the harmful dinoflagellate *Karenia mikimotoi* in Uwajima Bay and its adjacent waters: Comparison between a bloom occurrence year and a non-occurrence year. *Nippon Suisan Gakkaishi* 2021; **87**: 144-159 (in Japanese with English abstract).
- 18) 紫加田知幸, 鬼塚 剛, 北辻さほ, 中山奈津子, 坂本節子, 阿部和雄, 松原 賢, 大竹周作, 井口大輝, 西山佳孝. 現場マイクロコズムを用いたカレンニア等有害赤潮鞭毛藻の動態と環境条件との関係の解明. 平成29年度赤潮・貧酸素水塊対策推進事業「瀬戸内海等での有害赤潮発生機構解明と予察・被害防止等技術開発」報告書, 水産庁, 東京. 2018; 211-224.
- 19) 西山嘉乃, 河口真弓, 吉田幸史, 野口浩介, 寺田雅彦, 明田川貴子, 江口泰蔵. 2012年夏季に伊万里湾佐賀県海域で発生した *Karenia mikimotoi* 赤潮. 佐賀県玄海水産振興センター研究報告 2013; **6**: 31-62.
- 20) 里道菜穂子, 恵崎 撰, 杉野浩二郎, 片山幸恵. 2015年夏季に筑前海で発生した *Karenia mikimotoi* 赤潮. 福岡県水産海洋技術センター研究報告 2016; **26**: 83-91.
- 21) 小泉喜嗣. 豊後水道東岸域における急潮と植物プランクトンの増殖機構に関する研究. 愛媛県水産試験場報告 2002; **10**: 1-91.
- 22) 川合英夫. 黒潮と親潮の海況学. 「海洋科学基礎講座2巻 海洋物理II」東海大学出版会, 神奈川. 1972; 129-321.
- 23) Shikata T, Onitsuka G, Shono H, Hirai M, Inokuchi D, Miyamura K. Meteorological Factors Influencing the Timing and Magnitude of Bloom by the Noxious Dinoflagellate *Karenia mikimotoi* in Two Bays of the Bungo Channel. *JARQ* 2022; **56**: 189-198.
- 24) 兼田淳史, 乗松桂輔, 渡辺浩三, 小泉喜嗣, 武岡英隆. 黒潮の離接岸が豊後水道の水温に与える影響. 沿岸海洋研究 2005; **69**: 1-9.
- 25) Chen B, Wang Z, Zhu M, Li R. Effects of temperature and salinity on growth of *Prorocentrum dentatum* and comparisons between growths of *Prorocentrum dentatum* and *Skeletonema costatum*. *Advances in Marine Science* 2005; **23**: 60-64.
- 26) 細見正明, 須藤隆一. 底泥からの窒素の溶出について. 衛生工学研究論文集 1983; **19**: 100-108.
- 27) Koizumi Y, Uchida T, Honjo T. Diurnal vertical migration of *Gymnodinium mikimotoi* during a red tide in Hoketsu Bay, Japan. *J. Plankton Res.* 1996; **18**: 289-294.
- 28) 大塚尚寛, 関本善則, 千葉 新. 地形改変に伴う周辺地域の風向変化予測法の検討. 安全工学 1995; **34**: 254-261.
- 29) 須田芳彦. 山間部において夜間の風向を決定している地形スケール. 天気 1990; **37**: 343-350.
- 30) Yuasa K, Shikata T, Kuwahara Y, Nishiyama Y. Adverse effects of strong light and nitrogen deficiency on cell viability, photosynthesis, and motility of the red-tide dinoflagellate *Karenia mikimotoi*. *Phycologia* 2018; **57**: 525-533.