

# 赤潮早期予測早期対策実証事業－1

## 漁場環境改善推進事業「赤潮被害防止対策技術の開発」 (国庫委託)

井口大輝・中里礼大

本事業の詳細は、令和2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 2-1)-イ.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(瀬戸内海西部・豊後水道・土佐湾海域)(以後、赤潮モニタリング)に記載し、本報告はその概要である。

### 事業の目的

大分県沿岸では有害プランクトンが原因とされる赤潮や二枚貝の毒化(貝毒)が度々発生し、水産業に与える被害が問題となっている。両問題とも、有害プランクトンの現場監視による発生予報、現地指導によって、迅速な対応(給餌制限や避難など)が可能になっている。しかしながら近年の環境変化によって、発生件数、出現密度とも増加傾向にあり、より中長期の発生予測体制の構築や赤潮プランクトン増殖抑制装置の開発・導入が現場生産者から望まれている。このような要望に対応するため、これまで定量PCR法を用いた赤潮高感度監視技術の実用化が行われてきた。本課題では、これまで検討、開発された技術を利用し、赤潮中長期予測の現場導入を図ることが目的である。

### 事業の方法

#### ①*K. mikimotoi*高感度監視調査

瀬戸内海西部、豊後水道、土佐湾海域において、4～6月および冬季の2～3月に、関係する6県が共同で有害プランクトンのモニタリングや、海況、水質調査等を実施するとともに、当該海域での有害プランクトンの監視体制強化のため、遺伝子検出法を用いた高感度監視調査を実施した。

#### ②赤潮発生シナリオと予察技術の検証と改良

##### (1) 既存データの解析(*K. mikimotoi*とその他

##### のプランクトンの動態について)

*K. mikimotoi*による赤潮発生以前に、*Prorocentrum* spp. および*H. akashiwo*による赤潮が発生していた割合を各々求めることで、それらによる赤潮の出現が*K. mikimotoi*による赤潮の出現に関連しているか検討した。

##### (2) 既存データの解析(*K. mikimotoi*赤潮と梅雨との関係について)

梅雨の環境と*K. mikimotoi*増殖の関係が報告されている(山口 2000)。そこで、本種の100 cells/mLおよび1,000 cells/mL以上の細胞密度の初認日と、梅雨の開始時期や期間との関連を検証した。なお、梅雨の期間は気象庁HP気象統計情報を参照した。

##### (3) 既存データの解析(赤潮予察技術の検証)

2017年度までに実施した統計解析により、*K. mikimotoi*赤潮の発生シナリオの構築および判別分析による予察技術を開発し、2018～2019年までの結果の検証がなされている(岩野ら2020)。本年度は、それに2020年の結果を追加し、再度検証を行った。

## 結果

#### ①*K. mikimotoi*高感度監視調査

別府湾・豊後水道では、2018年6～7月に大分県および愛媛県、2019年8～9月に大分県豊後水道海域、2020年9月に愛媛県で赤潮が発生した。本海域はいずれの年においても、1月から本種の遺伝子が検出されており、冬季でも海域内に分布している可能性が示唆された。その後も海域内では継続して検出されたが、大分県のみ赤潮であった2019年や、9月に赤潮が発生した2020年では、3～5月に検出量が減少する傾向が見られた。その後赤潮発生に向かい、増加する傾向が見られた。

#### ②赤潮発生シナリオと予察技術の検証と改良

##### (1) 既存データの解析(*K. mikimotoi*とその他のプランクトンの動態について)

*K. mikimotoi*赤潮が発生した年を対象として、*K. mikimotoi*赤潮基準密度初認日(以下赤潮初認日)以

形成していた割合を算出した。

大分県佐伯湾において、解析対象期間を1998～2020年とし、赤潮基準密度は*K. mikimotoi* が1,000 cells/ml、*H. akashiwo* が5,000 cells/mlとした。また、*Prorocentrum* spp. は、瀬戸内海の赤潮に報告されている着色域が確認された場合を赤潮と定義した。*K. mikimotoi*赤潮の発生が確認された年の*K. mikimotoi*赤潮初認日以前に、*Prorocentrum* spp. および*H. akashiwo*が赤潮を形成していた割合を表1に示す。*Prorocentrum* spp. および*H. akashiwo*が*K. mikimotoi*赤潮初認日以前に赤潮を形成していた割合は海域により大きな差が認められた(0～86.7%)。このことから、*Prorocentrum* spp. および*H. akashiwo*赤潮発生の有無を基準とした*K. mikimotoi*赤潮の発生予察を、西部瀬戸内海全域に一般化することは困難であると推察された。

一方、愛媛県岩松湾において*Prorocentrum* spp. が*K. mikimotoi*赤潮初認日以前に高頻度で赤潮を形成していたことは、特徴的な現象と思われた。今回は各県で異なる赤潮基準を用いた解析を実施しているため、結果の解釈には十分な注意が必要である。しかしながら、各海域独自の基準として、他プランクトンの動態を*K. mikimotoi*赤潮の予兆指標として使える可能性は残されているものと推察された。

表1 *K. mikimotoi* 赤潮の発生が確認された年を対象として、*K. mikimotoi* 赤潮初認日以前に

*Prorocentrum* spp. および*H. akashiwo* が赤潮を形成していた割合(%)。nは各海域において解析対象期間中に*K. mikimotoi*が赤潮となった回数を示す

		<i>Prorocentrum</i> spp.	<i>H. akashiwo</i>
広島湾	( <i>Prorocentrum</i> spp. n=15) ( <i>H. akashiwo</i> n=21)	73.3	42.9
山口県周防灘	(n=19)	42.1	84.2
福岡県周防灘	(n=12)	25.0	66.7
大分県周防灘	(n=11)	0.0	54.5
大分県佐伯湾	(n=16)	18.8	25.0
愛媛県岩松湾	(n=15)	86.7	40.0
高知県宿毛湾	(n=3)	33.3	0.0
高知県浦ノ内湾	(n=19)	5.3	73.7

## (2) 既存データの解析 (*K. mikimotoi*赤潮と梅雨との関係について)

佐伯湾の1989～2020年における梅雨入り日と梅雨明け日(気象庁過去の梅雨入りと梅雨明け<https://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/baiu/index.html>)、*K. mikimotoi*の100 cells/ml以上の細胞密度(以下、100 cells/ml)および1,000 cells/ml以上の細胞密度(以下、1,000 cells/ml)を確認した日について、図1に示した。なお、海域や年によっては、定期的なモニタリングを行っておらず、着色域が出現してからの調査であるため、初認日に数千cells/mlといった事例もあり、その場合は100 cells/ml初認日かつ1,000 cells/ml初認日として扱った。

概ね梅雨明け日前後に100 cells/mlに達していた。梅雨明け日と100 cells/mlに達した日を比較すると、

梅雨明け日の10.5日前に100 cells/mlに達していた。瀬戸内海西部・豊後水道海域では、2012年や2018年など梅雨末期の豪雨直後に*K. mikimotoi*赤潮が大規模化しており(宮村2016, 鬼塚ら2021)、今回の解析結果と整合する。ただし、梅雨明け日と100 cells/mlに達した日の間に有意な相関は認められなかった。また、100 cells/ml確認日から1,000 cells/ml確認日まで要した日数は、初認日に1,000 cells/ml以上の細胞密度であった場合を除いて、佐伯湾で13.9日だった。次に経年変化に注目すると、佐伯湾や愛媛県岩松湾、高知県浦ノ内湾といった地理的に南に位置する海域では、2010年ごろを境に100 cells/ml到達日が早まっているように見える。周防灘でも一部早まっている年があるが、相対的に北に位置する海域では早期化の傾向は認められない。このような海域によって異なる経年変化の要因は現時点で不明であり、要因を探るためには海洋環境のデータも含めて解析していく必要がある。

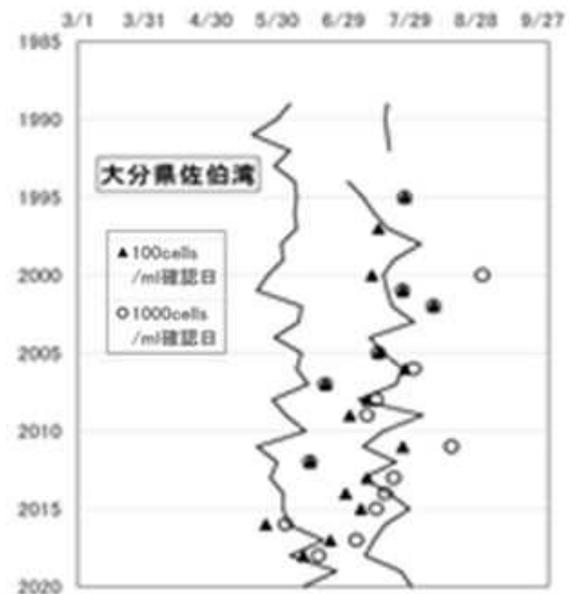


図1 梅雨と*K. mikimotoi*赤潮初認日との関連

## (3) 既存データの解析 (赤潮予察技術の検証)

2017年度までに実施した統計解析により、赤潮発生に関与する環境因子(海象・気象)を抽出し、有害赤潮発生シナリオを構築するとともに、抽出された環境因子を用いた判別分析や判別得点のロジスティック回帰による予察技術を開発した(岩野ら2020)。この予察技術を本年度取得したデータで検証を行った(データ期間は2002年から2017年)。

佐伯湾では、最高細胞密度が1,000 cells/ml以上の年を「発生年」として解析を行った。本年の*K. mikimotoi*赤潮は、これまでに作成した予察モデルの全てで「発生年」と予察されたが、実際には非発生となり、予察的中しなかった(表2)。

*mikimotoi*赤潮は、これまでに作成した予察モデルの全てで「発生年」と予察されたが、実際には非発生となり、予察は的中しなかった(表 2)。

例年、*K. mikimotoi*が豊後水道沿岸の各湾の中層で増殖し、赤潮に至る地場発生型赤潮により漁業被害を発生させるが、本年度は佐伯湾以外でも地場発生型の赤潮は確認されなかった。佐伯湾において*K. mikimotoi*は、9月下旬に最高細胞密度3 cells/mlが確認され、期間を通して遊泳細胞は数細胞と低密度でしか確認されなかった。また、2月の調査では、PCR法による遺伝子検査により、本種の遺伝子が少量であるものの検出されたが4~6月の調査では全く検出されなかった。本年度は暖冬の影響もあり、冬季水温は高めであったため、冬季はシードポピュレーションとなる遊泳細胞が生存しやすい環境であったと推察される。しかし、2020年は4月の気温が例年より1.5℃低く推移し、佐伯湾では4月から7月まで1℃程度水温が低かったことが特徴的であり、これらの気象・海象条件が、本種の増殖に影響したと考えられた。また、梅雨入り後は*Gonyaulax polygramma*等の他のプランクトンが常に優占していたことも本種の増殖を制限した可能性がある。昨年度取り組んだ本海域における赤潮の規模に関する解析によると、4・5月に晴天が続く条件は、シストを形成しない本種にとって遊泳細胞が物理的・生物的に個体群密度を維持しやすく、個体群密度が高いほど本種赤潮が大規模発生に繋がると考えられる。2020年は、4・5月の日照時間は平年より多く、本種の遊泳細胞にとって好適環境であったと考えられるが、前述の通り非発生年となった。2020年の場合、判別分析の変数として抽出されていない4月以降の水温が本種動態に影響した可能性があるが、今回の解析では確認できず、今後の課題である。

表 2 大分県佐伯湾における判別予測・結果

判別手法	判別要素	判別回数	判別結果(%)	2017年の判別結果(%)		2018年		2019年		2020年	
				判別結果	判別結果	判別結果	判別結果	判別結果	判別結果		
線形判別	1日水温	2	92.3	×	×	×	○	○	×		
	2日水温			×	×	×	○	○	×		
線形判別	1日水温	2	96.2	×	×	×	○	○	×		
	2日水温			×	×	×	○	○	×		
マハラノビス距離	1日水温	2	100.0	○	○	×	○	○	×		
	2日水温			○	○	×	○	○	×		
線形判別	1日日照時間	2	96.2	○	○	○	×	○	×		
	2日日照時間			○	○	○	×	○	×		
マハラノビス距離	1日水温	2	96.2	○	○	○	×	○	×		
	2日水温			○	○	○	×	○	×		
線形判別	1日日照時間	2	100.0	○	○	○	×	○	×		
	2日日照時間			○	○	○	×	○	×		
マハラノビス距離	1日水温	2	100.0	○	○	○	×	○	×		
	2日水温			○	○	○	×	○	×		
マハラノビス距離	1日水温	2	96.2	○	○	○	×	○	×		
	2日水温			○	○	○	×	○	×		
マハラノビス距離	1日水温	2	96.2	○	○	○	×	○	×		
	2日水温			○	○	○	×	○	×		
マハラノビス距離	1日水温	2	83.3	○	○	○	×	○	×		
	2日水温			○	○	○	×	○	×		
マハラノビス距離	1日水温	2	83.3	○	○	○	×	○	×		
	2日水温			○	○	○	×	○	×		

参考文献

長谷川尋士, 本田恵二, 山下泰司, 濱崎正明, 宮原一隆, 原田和弘, 秋山諭, 山本圭吾, 田中咲絵,

住友寿明, 池脇義弘. 魚介類の斃死原因となる有害赤潮等分布拡大防止のための発生モニタリングと発生シナリオの構築①瀬戸内海東部海域. 平成29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報告書「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」, 水産庁, 東京. 2018 ; 9-38.

岩野英樹, 畦地和久, 井口大輝, 中里礼大, 内海訓弘, 加川真行, 黒田麻美, 村田憲一, 工藤孝也, 本田宇聖, 吉村栄一, 馬場俊典, 國森拓也, 後川龍男, 恵崎撰, 竹中彰一, 平井真紀子, 鈴木健二, 谷口越則, 吉江直樹, 郭新宇, 清水園子, 松原孝博, 武岡英隆, 山口晴生, 外丸裕司, 坂本節子, 鬼塚 剛, 山口聖. 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②瀬戸内海西部・豊後水道海域・土佐湾海域. 平成31年度漁場環境改善推進事業「赤潮被害防止対策技術の開発」報告書, 水産庁, 東京. 2020 ; 57-116.

黒田麻美, 村田憲一, 加川真行, 工藤孝也, 吉村栄一, 和西昭仁, 馬場俊典, 國森拓也, 俵積田貴彦, 恵崎撰, 井口大輝, 中里礼大, 木村聡一郎, 岩野英樹, 菅沼倫美, 平井真紀子, 谷口越則, 吉江直樹, 郭新宇, 清水園子, 松原孝博, 武岡英隆, 山口晴生, 外丸裕司, 坂本節子, 鬼塚 剛. 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②瀬戸内海西部・豊後水道海域・土佐湾海域. 平成30年度漁場環境改善推進事業「赤潮被害防止対策技術の開発」報告書, 水産庁, 東京. 2019 ; 50-99.

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.

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. 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, 2021; <https://doi.org/10.2331/suisan.20-00055>

鬼塚剛, 鈴木健二, 吉江直樹, 平井真紀子, 外丸裕司, 坂本節子. 有害渦鞭毛藻カレンニア・ミキモトイの日周鉛直移動調査. 2019年度愛媛大学沿岸環境科学研究センター共同利用・共同研究拠点「化学汚染・沿岸環境研究拠点」共同研究報告書, 2020; <http://amer-cmes.jp/performance/1910>

山口峰生. 有害・有毒赤潮の発生と予知・防除. 「水産増養殖叢書48」社団法人日本水産資源保護協会, 東京. 2000 ; 101-136.

# 赤潮防除・被害軽減手法の開発— 1

## 漁場環境改善推進事業「赤潮被害防止対策技術の開発」 (国庫委託)

井口大輝・中里礼大・内海訓弘

本事業の詳細は、令和2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 2.-2) -イ.-② 既存の赤潮防除技術の高度化とマニュアル作成に記載し、本報告はその概要である。なお本事業は国立研究開発法人水産研究・教育機構瀬戸内海区水産研究所 (瀬水研)、東町漁業協同組合との共同調査として実施した。以下に概要のみを記載した。

### 事業の目的

近年、豊後水道など西日本の沿岸域においてカレンア等鞭毛藻による有害赤潮が頻発しており、その対策が強く求められている。一方で、各現場では長年の経験に基づいて構築された被害軽減技術 (餌止め, 生簀避難など) が実用されている。本課題では、既存の技術を対象として科学的な検証と基礎情報の収集を行い、高度化を図ること、そして技術普及を円滑に推進するためのマニュアルを作成することを目的とする。まずは、海面養殖における足し網および生簀浮沈法について検討する。

### 事業の方法

#### 1) 赤潮鞭毛藻類の日周鉛直移動の観測

*K. mikimotoi* などの有害赤潮鞭毛藻類において、環境条件や発達段階によって鉛直移動パターンが変わることが知られている (Shikata et al. 2017, Shikata et al. 2020)。そのため、現場データを蓄積して鉛直移動パターンを環境条件等と関連づけて体系化する必要がある。2020年6月1日～8月31日、佐伯湾の鶴見ポンツーン (32° 57' 3'' N, 131° 57' 28'' E、水深: 約 12 m) で、自動昇降式多項目水質計 (AWQP13\_30、環境システム社製) を用いて、水温、

塩分、溶存酸素濃度 (DO)、クロロフィル蛍光値を約 30 分～1 時間に一回の頻度で連続観測した。また、観測期間中、週 1 回、多項目水質計による水温、塩分、DO、クロロフィル蛍光値および光量子量の観測を行うとともに、表層、6 m 層、海底 (B) -1.5 m 層およびクロロフィル蛍光値の極大層より採水を行った。海水試料については、当日中に検鏡を行い (ECLIPSE Ni, Nikon 社製)、*K. mikimotoi* を含む有害赤潮鞭毛藻類、珪藻類およびその他の優占種の細胞密度を算出した。また、鶴見ポンツーンのすぐ近隣の沖松浦 (32° 56' 54'' N, 131° 57' 47'' E、水深: 約 10 m) にて、週 1 回、表層、2 m 層、5 m 層、B-1 m 層。B より採取した海水の栄養塩分析を行った。さらに、過去の同様の観測により得られたデータを解析し、*K. mikimotoi* の鉛直移動パターンと環境条件の関連性についても検討した。本種が発生した 2018 年 6 月 12 日～6 月 23 日にかけて、同条件下で取得した自動昇降式多項目水質計および週 1 回の現場調査データを用いた。

### 事業の結果・考察

#### 1) 赤潮鞭毛藻類の日周鉛直移動の観測

##### ①. *Prorocentrum dentatum* および *Gonyaulax polygramma* の日周鉛直移動

2020 年の佐伯湾における自動昇降式多項目水質計による観測結果を図 1 に示した。観測期間中、水温、塩分および DO はそれぞれ 18.2 ～ 28.7°C、16.7 ～ 35.9 および 3.8 ～ 15.7 mg L<sup>-1</sup> の範囲で推移した。

2020 年 6 月 29 日～7 月 21 日にかけて *P. dentatum* の赤潮が確認された (最高細胞密度 31,000 cells/ml)。検鏡において、7 月 1 日に *P. dentatum* が 6 m 層で 325 cells/ml の細胞密度で確認され、その後、7 月 16 日には 2 m 層で 31,000 cells/ml の最高細胞密度が記録された。

また、同時期に自動昇降式多項目水質計では時間帯によってクロロフィル蛍光値のピーク深度が変化する様子を捉えており、そのクロロフィル蛍光値のピークは *P. dentatum* によるものと推察された (図 2)。そこで、クロロフィル蛍光値から *P. dentatum* の鉛直移動パラメータ (上昇・下降開始時刻、最高・最低到達深度およびそれらが記録された時刻) を抽出し、表 1 にまとめた。多くの場合、上昇開始は夜半過ぎ～夜明け前、下降開始は夕方に観察された。本種はほぼ毎日夜間海底まで下降したが、昼間の最高到達深度は日ごとに変化した。いくつかの渦鞭毛藻類で知られているように (Shikata et al. 2017)、最高到達深度は日照時間と有意な正の相関が認められ、本種は高日照の日は深い層に、低日照の日は浅い層に集積した (図 3)。しかしながら、その相関は 7 月 16 日まで高かったが、それ以降急激に低下し、本種は高日照の日においても昼間表層付近に達した。採水調査日の水中光量子量から消散係数と海面光量子量を算出し、日照時間と採水調査日の海面光量子量との関係式から各日の海面光量子量を推算した。その後、それらのパラメータを用いて最高到達深度に達した時の *P. dentatum* の受光量を推定したところ、*P. dentatum* の受光量は 7 月 16 日までは概ね  $200 \sim 300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  であったが、それ以降は  $700 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  以上となった。また、7 月 14 日辺りから本種の鉛直分布はスミアになり、日周鉛直移動が不明瞭になった。室内マイクロゾムを用いた回分培養により、本種は、栄養塩濃度が低下すると昼間の上層での集積能力が低下し、沈降しやすくなることが知られている (高見ら 2016)。7 月 16 日以降、*P. dentatum* の細胞密度が極めて高かったのに対して、DIN あるいは DIP 濃度は低かったので (図 4)、栄養塩枯渇により鉛直移動能が低下した可能性が考えられた。

一方で、2020 年 8 月 6 日～8 月 31 日にかけて *G. polygramma* が優占した (最高細胞密度  $600 \text{ cells mL}^{-1}$ )。また、8 月 14 日以降、自動昇降式多項目水質計においてもクロロフィル蛍光値のピーク深度が明確に時間変化の様子が捉えられ、*G. polygramma* の日周鉛直移動によるものと推察された (図 2)。多くの場合、上昇開始は夜半過ぎ～夜明け前、下降開始は夕方に観察された (表 1)。このパターンは、17:00 ごろ～1:00 ごろに下降し、2:00 ごろから上昇を

開始したという既往の昼夜連続鉛直移動観測の結果 (小泉ら 2004) と一致している。*G. polygramma* は *P. dentatum* とは異なり、毎日規則正しい鉛直移動パターンを示し、天候に関わらず昼間は表層付近まで上昇し、夜間は海底まで達した (表 2)。昼間の最高到達深度と日照時間間の相関は弱かった (図 3)。

## ②. *K. mikimotoi* の日周鉛直移動パターン

解析対象とした期間中、*K. mikimotoi* は最高  $650 \text{ cells /ml}$  の細胞密度で優占しており、自動昇降式多項目水質計のクロロフィル蛍光値から明確な本種の日周鉛直移動が観察された (図 2)。本種の最高到達深度は、*P. dentatum* と同様、日ごとに変化した (表 3)。既往知見と同様に (Aoki et al. 2017、Shikata et al. 2017)、最高到達深度は日照時間と有意な正の相関が認められ、本種は高日照の日は深い層に、低日照の日は浅い層に集積した (図 3)。

自動昇降式多項目水質計を用いた観測により、鉛直移動パターンについて有害赤潮鞭毛藻種間の共通点および相違点が見出された。今後も、引き続き様々な赤潮鞭毛藻類の鉛直移動パラメータを取得し、各種の日周鉛直移動シミュレーションモデルの開発などに活用していく予定である。

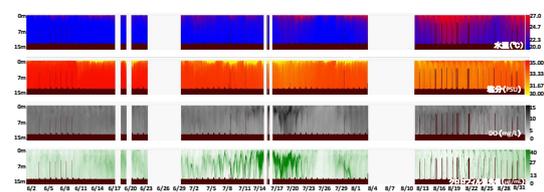


図1. 2020年佐伯湾 (鶴見ポンツーン) における自動昇降式多項目水質計による観測結果

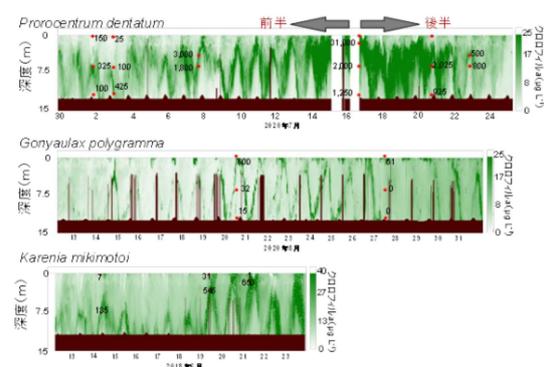


図2. 佐伯湾 (鶴見ポンツーン) における自動昇降式多項目水質計によるクロロフィル蛍光値の観測結果. 図中の数値は赤点で示す深度層における各種赤潮藻類の細胞密度.

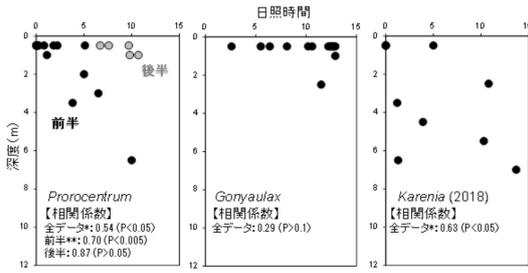


図3. 各種赤潮鞭毛藻における昼間の最高到達深度と日照時間との関係. 相関関係はスピアマンの順位相関係数を算出して分析した.

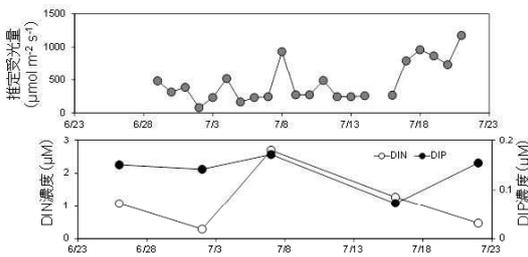


図4. 2020年佐伯湾における*Prorocentrum dentatum*の推定受光量と栄養塩濃度(全層の平均値)の経時変化.

表1. 佐伯湾における*Prorocentrum dentatum*の鉛直移動パラメータ(2020年).

月日	上昇開始時刻	最高到達深度 (m)	最高到達時刻	下降開始時刻	最低到達深度 (m)	最低到達時刻
6月29日	不明	2	14:40	15:30	12	17:10
6月30日	4:00	1	15:40	16:30	12	18:10
7月1日	5:00	3	14:50	13:10	12	19:00
7月2日	1:40	6.5	6:40	14:00	12	15:40
7月3日	4:20	0.5	15:00	15:00	11	21:40
7月4日	1:50	0.5	9:10	-	-	-
7月5日	6:10	3.5	13:30	0:20	10.5	2:50
7月6日	-	0.5	11:00	14:20	12	18:30
7月7日	3:40	0.5	11:00	16:00	8.5	21:00
7月8日	不明	0.5	16:50	15:10	12	19:20
7月9日	1:10	0.5	14:20	15:10	12	20:10
7月10日	0:20	0.5	13:30	17:40	12	21:50
7月11日	2:50	0.5	16:40	16:40	12	21:40
7月12日	23:30	0.5	10:00	16:50	12	21:50
7月13日	-	0.5	10:10	17:40	12	21:50
7月14日	1:10	0.5	5:20	不明	不明	不明
7月15日	不明	不明	不明	不明	不明	不明
7月16日	不明	0.5	9:10	18:20	12	21:40
7月17日	不明	1	7:40	不明	12	18:20
7月18日	不明	0.5	13:30	不明	12	21:00
7月19日	2:00	0.5	16:50	16:50	-	-
7月20日	2:40	1	12:30	13:20	12	16:40
7月21日	0:10	0.5	15:50	12:50	12	16:40

表2. 佐伯湾における*Gonyaulax polygramma*の鉛直移動パラメータ(2020年).

月日	上昇開始時刻	最高到達深		下降開始時刻	最低到達深	
		度 (m)	最高到達時刻		(m)	最低到達時刻
8月14日	4:20	1	16:30	17:20	12	20:40
8月15日	0:50	0.5	9:00	不明	12	20:40
8月16日	不明	0.5	9:00	不明	不明	不明
8月17日	4:50	0.5	9:00	不明	12	20:30
8月18日	不明	0.5	9:00	13:50	12	20:40
8月19日	0:50	2.5	12:40	15:50	12	20:20
8月20日	0:30	0.5	9:10	16:30	12	21:30
8月21日	1:40	0.5	9:50	不明	11	21:20
8月22日	不明	0.5	11:30	16:30	12	22:20
8月23日	0:50	0.5	9:50	16:30	12	20:40
8月24日	10:40	0.5	10:40	17:20	12	20:40
8月25日	1:40	0.5	16:30	18:10	12	21:30
8月26日	不明	0.5	10:50	16:10	12	19:30

表3. 佐伯湾における*Karenia mikimotoi*の鉛直移動パラメータ(2018年).

月日	上昇開始時刻	最高到達深		下降開始時刻	最低到達深	
		度 (m)	最高到達時刻		(m)	最低到達時刻
6月12日	不明	不明	不明	不明	不明	不明
6月13日	8:00	7	10:00	14:00	11.5	17:30
6月14日	7:00	3.5	15:30	16:00	11.5	17:30
6月15日	7:00	5.5	15:00	14:30	11.5	15:30
6月16日	不明	不明	不明	不明	不明	不明
6月17日	9:10	4.5	14:40	15:10	11.5	16:10
6月18日	7:10	6.5	15:20	15:50	11.5	16:50
6月19日	6:50	0.5	15:20	16:50	11.5	20:20
6月20日	6:30	0.5	12:40	15:10	11.5	21:40
6月21日	4:40	0.5	9:00	16:10	11.5	21:50
6月22日	3:20	2.5	10:40	12:40	11.5	13:10
6月23日	4:40	0.5	11:00	14:00	11.5	18:30

引用文献

小泉喜嗣, 市川衛, 田村成男, 長友聖代, 内田卓志. 愛媛県下波湾で観察された *Gonyaulax polygramma* Stein の日周鉛直移動. 水産海洋研究, 2004; **65**: 131-134.

Shikata T, Kitatsuji S, Abe K, Onitsuka G, Matsubara T, Nakayama N, Yuasa K, Nishiyama Y, Mizuno K, Masuda K, Nagai K. Vertical distribution of a harmful red-tide dinoflagellate, *Karenia mikimotoi*, at the decline stage of blooms. *J. Sea Res.* 2020; **165**: 101960.

Shikata T, Onitsuka G, Abe K, Kitatsuji S, Yufu K, Yoshikawa Y, Honjo T, Miyamura, K. Relationships between light environment and subsurface accumulation during the daytime in the red-tide dinoflagellate *Karenia mikimotoi*. *Mar. Biol.* 2017; **164**: 18.

紫加田知幸, 北辻さほ, 鬼塚剛, 高山剛, 井口大輝, 中里礼大, 都留久美子, 木藪仁和, 石田

- 幸生, 浦啓介, 古川新平, 上野翼. 既存の赤潮防除技術の高度化とマニュアル作成. 平成 30 年度漁場環境改善推進事業「赤潮被害防止対策技術の開発」報告書, 赤潮共同研究機関, 水産庁, 東京. 2019 ; 263-243.
- 紫加田知幸, 北辻さほ, 鬼塚剛, 井口大輝, 中里礼大, 内海訓弘, 浦啓介, 古川新平, 立元伸幸. 既存の赤潮防除技術の高度化とマニュアル作成. 平成 30 年度漁場環境改善推進事業「赤潮被害防止対策技術の開発」報告書, 赤潮共同研究機関, 水産庁, 東京. 2020 ; 302-317.
- 高見昭憲, 佐藤圭, 清水厚, 上田佳代, 吉野彩子, 谷本浩志, 猪俣敏, 岡本祥子, 池田恒平永島達也, 清水英幸, 青野光子, 越川海, 東博紀, 王勤学, 水落元之, 岡寺智大, 秋山千亜紀, 古市尚基. 渦鞭毛藻 *P. dentatum* の鉛直分布動態の実験的再現. 重要研究プログラム「東アジア広域環境研究プログラム」(期間: 平成 23 ~ 27 年度), 国立環境研究所研究プロジェクト報告 第 115 号, 国立環境研究所. 2016 ; 49-50.
- 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.

## 赤潮防除・被害軽減手法の開発—2

### 漁場環境改善推進事業「赤潮被害防止対策技術の開発」

(国庫委託)

中里礼大・井口大輝

本事業の詳細は、令和2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2-2)-イ.③ 改良粘土散布の実証試験および新たなマグネシウム製剤の開発、対策実施マニュアルの作成に記載し、本報告はその概要である。なお本事業は国立研究開発法人水産研究・教育機構西海区水産研究所(西水研)、長崎県総合水産試験場、鹿児島県水産技術開発センター、宇部マテリアルズ株式会社との共同調査として実施した。以下に概要のみを記載した。

#### 事業の目的

近年駆除が困難だった *Karenia mikimotoi* (以下、*K.mikimotoi*) に対して、5分間で100%の駆除効果を示すマグネシウム剤(以下、改良マグネシウム剤)が開発された。この新規防除剤について、室内試験で効果を検証し、高い駆除効果と安全性が確認され次第、改良マグネシウム剤を用いた現場実証試験を実施し、その結果、経済性についても検証したうえで対策実施マニュアルを作成することを目的とする。

#### 事業の方法

これまでの試験により本マグネシウム製剤が赤潮生物への効果およびコストの両面から、有用であると判断された。しかしながら、同時に100L容の小型水槽を用いた魚毒性試験において、赤潮生物殺滅有効濃度(200ppm)付近で供試魚が3時間以内に全滅する結果となった(松山ら2019, 2020)。この魚毒性の原因として、マグネシウム製剤の粒子が供試魚の鰓を物理的に閉塞することが考えられた。それ故、飼育水槽の

ような閉鎖的な空間内では、底に沈降したマグネシウム製剤がエアレーションなどの攪拌によって再懸濁し、粒子が水中に浮遊する状態が長く継続するため、現場海域での状況と比較して魚類への影響が過大に評価される可能性があるかと推察された。

そこで、より現場環境に近い状況での散布を実施し、マグネシウム製剤散布後の水質環境の調査および魚類への影響について調べた。大分県佐伯湾にてマグネシウム製剤散布後1週間ほどの長期的な水質環境を調査した。

試験海域は大分県農林水産研究指導センター水産研究部地先の筏(水深15m)において図1に示す試験を実施した。試験海域にポリエチレン製のブルーシートと1m四方の硬質ポリ塩化ビニル管で作製した枠を2m間隔で6個配置したメソコズム(縦×横×高さ、1m×1m×10m)を2基配置し、1基はマグネシウム製剤を溶解した海水を散布した試験区、もう1基は散布なしの対照区とした。マグネシウム製剤の散布量については、メソコズム内全体が有効濃度200ppmになるように計算した量2kgを100L容器内にて海水とよく攪拌後、2時間静置したのち投入した。

水質環境(濁度、クロロフィルa濃度およびpH)の観測は、試験区および対照区ともに散布前、散布直後、5min、15min、30min、1h、3h、5h、1d、2d、3d、4d、5d、6d後の計14回実施した。水質環境の観測項目について、濁度とクロロフィルa濃度は各試験区のメソコズム内に多項目水質計(AAQ RINKO, JFE アドバンテック社製)を投下して観測し、pHは各メソコズム内の表層から10m層までを1m間隔で採水し、研究室に持ち帰り測定を行った。

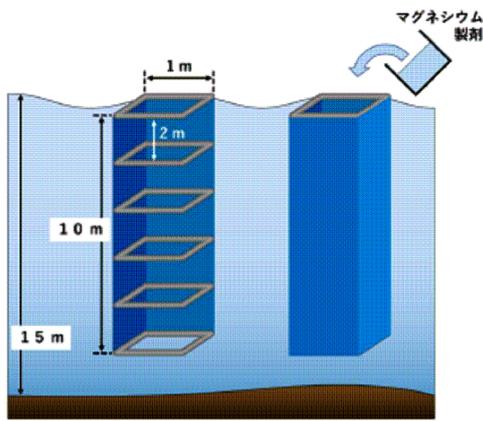


図 1 マグネシウム製剤散布試験の概要

### 事業の結果・考察

まず、本課題では、天然の赤潮生物、特に *Karenia mikimotoi* に対する効果についても調べる計画であったが、残念ながら、本年度（令和 2 年度）は赤潮非発生となり、その評価はできなかった。

マグネシウム製剤散布直後から 2 d 後までの状況を図 2 に示す。また、この試験期間中 6 日間の水質環境に関するプロファイルについて、特にクロロフィル a 濃度の観測データを見ると、散布直後から 1 h 後まで対照区に対して数値が上昇する状況が観測された

（図 3）。マグネシウム製剤散布後に、植物プランクトンが急激に増殖することは考えにくい。そのため、この数値の上昇は、マグネシウム製剤の懸濁粒子が強く影響していると考えられ、クロロフィル a 濃度の測定が十分にできていないと考えられた。そこで、水質環境に関するプロファイルの経時的変化を、散布開始から 1 h 後まで（図 3）と散布後 1 h～6 d まで

（図 4）に分けて図示した。各環境項目に関して以下に説明する。

#### ・濁度

散布直後、水深 8～9 m 付近まで速やかに観測値の上昇が確認され、最大で 245 FTU 程度まで上昇したが、15 min 後までに極大値が 45 FTU に急激に減少し、同様に 1 h 後には 22 FTU にまで減少した（図 3）。これは、散布したマグネシウム製剤のうち、沈みやすい粒子が沈降したためと考えられる。ただし、水深 10 m における濁度の上昇は殆ど観測されなかった。本試験に用いたメソコズムは全長 10 m であり、10 m 以深は解放された状態であった。そのため、横方向への拡散

の影響があると考えられる。散布後 3 h 以降、散布区における急激な濁度の減少は観測されなかったが、水深 6 m までの濁度は対照区と比べ高い状況が継続した（図 4）。散布後 4 d 後には散布区と対照区の差が認められなくなった。

#### ・クロロフィル a 濃度

前述したように、散布直後から 1 h 後まで対照区に対して数値が上昇する状況が観測された（図 3）。この数値の上昇は、マグネシウム製剤の懸濁粒子が強く影響していると考えられ、クロロフィル a を測定できていないと判断された。

散布後 3 h 以降、水深 6 m 以浅のクロロフィル a に関して、対照区と比べ散布区の濃度の低下が 4 d 後まで継続した（図 4）。特に、散布後 4 d におけるクロロフィル a 濃度は、水深 8 m 付近までの低下していた

（図 4）。散布後 5 d 以降、散布区と対照区の差が認められなくなった（図 4）。なお、今回の試験では、海水の顕微鏡観察は行っておらず、クロロフィル a に由来する植物プランクトン種組成については不明である。

#### ・pH

pH に関して、散布直後に最大で 9.5 付近まで上昇する水深帯が観測された（図 3, 4）。pH については、散布後 1 日経過後までに極大値が 9.0 まで減少したものの、対照区と差が認められない程度になるには相当数の時間経過が必要であり、本試験においては 5 日を要した（図 4）。

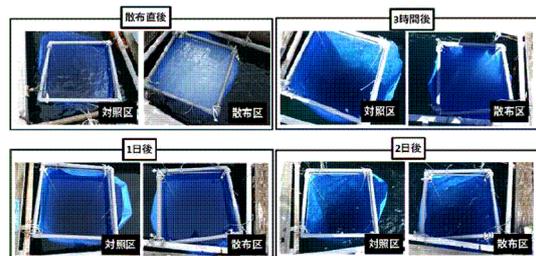


図 2 マグネシウム製剤散布直後から散布 2 日後までの経過

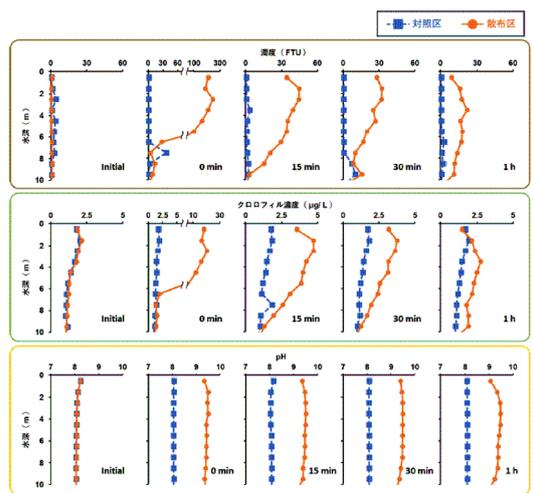


図 3 マグネシウム製剤散布後の水質環境に関する鉛直プロファイルの経時的変化 (散布後0~1 hまで)

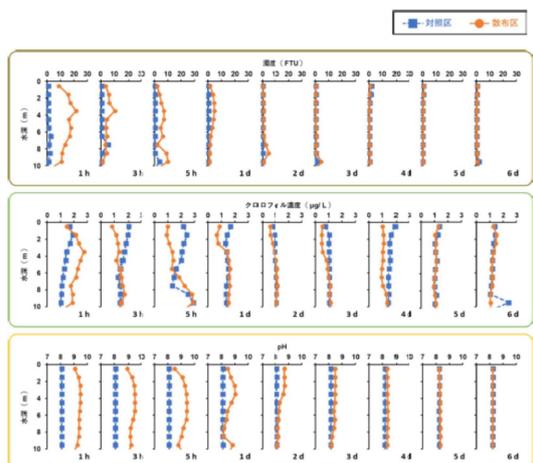


図 4 マグネシウム製剤散布後の水質環境に関する鉛直プロファイルの経時変化 (散布後1 h~6 dまで)

### 引用文献

松山幸彦, 長副 聡, 井口大輝, 中里礼大, 都留久美子, 山本佳奈, 平江 想, 山砥稔文, 宮田翔也, 高杉朋孝, 森島義明, 西 広海, 田中俊也, 渡辺国男. 2) 有害赤潮の防除および漁業被害軽減のための技術開発 ②生簀等の魚介類を守る技術開発と実証 ウ. 改良粘土散布の実証試験および新たなマグネシウム剤の開発, 対策マニュアルの作成. 平成 30 年度漁場環境改善推進事業「赤潮被害防止対策技術の開発」報告書, 赤潮共同研究機関, 2019; 285-303.

松山幸彦, 長副 聡, 井口大輝, 中里礼大, 都留久美子, 山本佳奈, 平江 想, 山砥稔文, 宮田翔也, 高杉朋孝, 吉満 敏, 田中俊也, 小田康太, 渡辺国男. 2) 有害赤潮の防除および漁業被害軽減のための技術開発 イ. 生簀等の魚介類を守る技術開発と実証 ③改良粘土散布の実証試験および新たなマグネシウム剤の開発, 対策マニュアルの作成. 平成 31 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, 赤潮共同研究機関, 2020; 318-336.

## 養殖マグロ成長産業化推進事業

### 漁場環境改善推進事業「赤潮・貧酸素水塊の広域自動モニタリング技術の開発」

#### 九州東部海域のマグロ漁場における有害赤潮監視システムの開発

(一部国庫補助)

井口大輝・中里礼大・内海訓弘

本事業の一部は、令和2年度漁場環境改善推進事業のうち赤潮・貧酸素水塊の広域自動モニタリング技術の開発(赤潮・貧酸素観測技術開発共同研究機関) II. -2) 赤潮・貧酸素等による被害防止のための広域観測・監視ネットワークシステムの構築 ③九州東部海域のマグロ漁場における有害赤潮監視システムの開発で実施した。なお本事業は国立研究開発法人水産研究・教育機構水産技術研究所、古野電気株式会社、株式会社アイコックとの共同調査として実施した。各研究の詳細は、令和2年度漁場環境改善推進事業のうち赤潮・貧酸素水塊の広域自動モニタリング技術の開発報告書に記載した。

#### 事業の目的

平成29、30年夏季、佐伯湾においてカレニア・ミキモトイ赤潮が発生し、養殖マグロに甚大な漁業被害が発生した。他の魚種と比べて養殖マグロに対する赤潮被害は大きい傾向にあると言われているが、その原因の一つはマグロ養殖に対して餌止めや生簀避難といった既存の赤潮防除技術を適用できないことにある。また、マグロは物理的な刺激にきわめて敏感であるため、赤潮発生時に生簀へ近付くことができないので、へい死状況やへい死時の赤潮の状況を調査することが困難である。そのため、マグロの赤潮に対する応答や感受性など基本的な情報が少なく、対策を考案することすら難しい状況にある。そこで、本課題では、有害赤潮による被害軽減技術の開発を目指し、マグロ養殖場における赤潮の初期発生及び状況、赤潮に対するマグロの行動パターンを自動監視するシステムの構築に資する技術基盤を確立することを目的とする。

また、近年世界的な牡蠣需要の高まりに伴い、大分県内でもシングルシード方式のカキ養殖が盛んに行われており、更なる生産拡大を目指した地域振興が取り組まれている。カキ類は主に浮遊している植物プランクトンを摂餌するとともに、バスケットを用いた養殖方法となることから、海底への脱落がなく、最終的にほとんどのカ

キが海域から水揚げされることで、窒素・リンが海域から回収できると考えられる。

そこで、佐伯湾におけるカキ類養殖によってどの程度の植物プランクトン及び窒素・リンが除去可能かを試算するとともに、赤潮の発生が抑制されるカキ類養殖数量を試算することを最終目的とする。

今年度は、牡蠣の赤潮原因プランクトンの除去効果および海域中の総窒素(TN)及び総リン(TP)の季節変動について調査を行った。

#### 事業の方法

##### ア. 魚群探知機による赤潮モニタリング技術の開発

赤潮に対するマグロの行動パターン及び有害赤潮プランクトンの発生状況を自動監視するシステム(図1)の構築を目指し、大分県佐伯湾のマグロ養殖漁場において、魚群探知機(図2)及び自動昇降式多項目水質計(図3)を設置した。

大分県佐伯湾のマグロ養殖用深層型生簀(直径40mの円形PEパイプ生簀、網の深さ40m、以下試験用生簀)で試験を実施した。試験開始時、試験用生簀には3歳魚マグロ960尾が収容されていた。試験生簀内に、観測筏を設置し、その上に太陽光パネルと接続したテレメーター式魚群探知機及びトランスデューサーを設置した(図2)。それらを用いて、2020年6月17日より周波数50/200 kHzで24時間連続観測を行い、得られた観測データはメール形式により観測データ収集局に送信した。取得したデータは、オフライン処理で可視化(画像化)し、魚群の鉛直分布を抽出した。

また、赤潮の発生状況を把握するため、佐伯湾内に調査点11点(精密調査点2点を含む)を設定し(図4)、4月～3月に調査を行った。赤潮発生時期である5月～9月の期間は週1回、それ以外は月1回以上調査を行った。各調査ではCTD(JFEアドバンテック社製AAQ-RINKO)による水温、塩分、クロロフィル蛍光値の表層から海底までの鉛直測定を実施した後、バケツによる表層採水および採

水器（リゴ-B号）によるクロロフィル極大層（確認されない場合は5m層）の採水を行った。得られた試料海水は当日中に光学顕微鏡を用いて、濃縮せずに有害プランクトンの同定・計数に用いた。精密調査点では上記の採水層、調査項目に加え、2m層、5m層、10m層、15m層、25m層、35m層、底上1m層、底上層の採水も行い、各層の溶存酸素（ウインクラ法）、栄養塩濃度（DIN、 $PO_4\text{-P}$ 、DSi）の試料とした。

また、マグロ試験生簀において植物プランクトンの発生状況を把握する目的で、5m層、15m層、25m層、35m層にクロロフィル濁度計（JFEアドバンテック社製 INFINITY-CLW）を設置し、クロロフィル濃度を測定した。



図3 自動昇降式多項目水質計

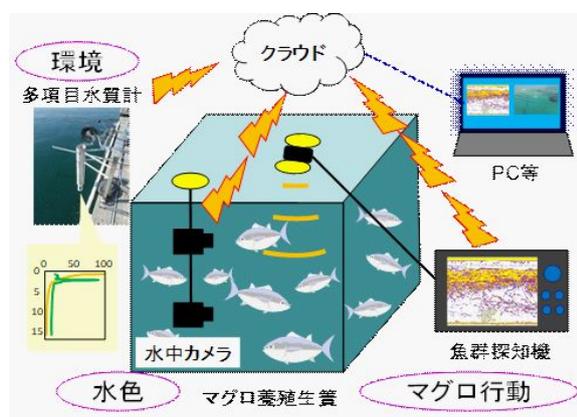


図1 「マグロ養殖場赤潮監視システム」の構成



図2 観測筏及びテレメーター式魚群探知機



図4 佐伯湾調査定点および自動昇降式観測機

(●：通常調査点、★：精密調査点、▲：自動昇降式観測機)

#### イ. 魚群探知機観測データの閲覧ソフトウェアの開発

赤潮に対するマグロの行動パターンをリアルタイムで自動監視するシステム構築を目的とし、ア) のテレメーター式魚群探知機で得られたデータをテキストファイルとして送信し、送信されたデータを画像化することにより、Web及びスマートフォンで閲覧できるアプリを開発した(図5)。

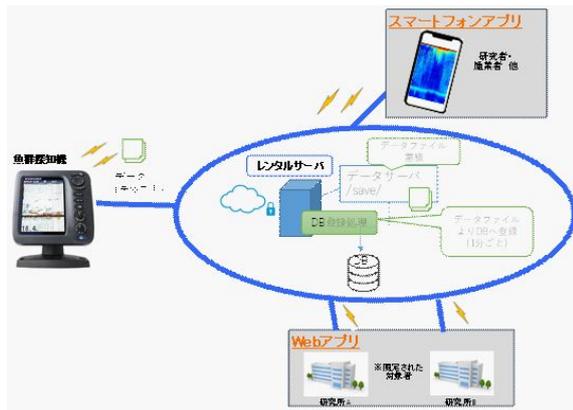


図 5 魚探データ蓄積・閲覧システム

ウ. マガキによるプランクトン除去実験

1) 天然赤潮海水を用いた曝露試験

マガキに天然赤潮海水を曝露し、プランクトンの除去効果や牡蠣への影響を明らかにするため、以下の実験を行った。今回試験に供した天然赤潮海水の採取情報を表1に示した。得られた海水は、採取後すぐに実験室内に搬入し、当日もしくは次の日に試験に供した。30 L容バンライト水槽もしくは2Lビーカーに赤潮海水を1L~20Lを注入し、マガキ(約60~80 g)を1個~10個ずつ収容し、エアレーションより通気した。また、赤潮海水のみの区を対照区とした。曝露時間は最大24時間とし、経時的に水温の測定、マガキの行動や生死の観察および採水・検鏡によるプランクトン細胞密度の計測を行った。

表 1 天然赤潮海水の採取情報

実験日	採水日	優占種	試験開始細胞数 (cells/ml)
6月22日	6月22日	<i>Heterosigma akashivo</i>	50,000
7月1日	7月1日	<i>Prorocentrum dentatum</i>	700
7月8日	7月8日	<i>Prorocentrum dentatum</i>	40,000
7月15日	7月15日	<i>Ceratium furca</i>	500
8月6日	8月6日	<i>Gonyaulax polygramma</i>	34,000
8月18日	8月17日	<i>Mesodinium rubrum</i>	7,000
10月1日	9月30日	<i>Karenia mikimotoi</i>	100

2) *Karenia mikimotoi*培養株を用いた曝露試験

大分県において、例年漁業被害を発生させている *K. mikimotoi*だが、今年度は赤潮が発生しなかったため培養株を用いてマガキの除去効果を検証した。培養株は、国立研究開発法人水産研究・教育機構水産技術研究所より提供して頂いたマダイ・アワビに対して毒性を有するIMR 4株(強毒株)及びアワビに対しては毒性はないが、マダイに対して魚毒性を示す69-9ax株(弱毒株)を用いた。培養株は、SWM-3培地で25℃、150 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> (12hL:12hD)の条件下で培養した。培養した *K. mikimotoi*強毒株及び弱毒株を含む培養液を砂濾過海水で600、1,000、9,000 cells/mlに希釈したものを、2Lビーカーに1L

ずつ収容し、牡蠣を1個入れた試験区と、赤潮海水のみの対照区を試験に供した。各試験のビーカーを25℃、150 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> (12hL:12hD)の条件下でエアレーションで通気しつつ、経時的にマガキの行動や生死の観察および採水・検鏡によるプランクトン細胞密度の計測を行った。

3) マガキ偽糞に含まれる *K. mikimotoi*培養実験

カキ等の二枚貝は、餌にならない有機物や必要以上の有機物がある場合、それらを粘液で固めて偽糞として出水管から排出することが知られている。カレニア培養株を用いた除去実験においても、偽糞と思われる粘液の排出が確認され、それに *K. mikimotoi*培養株が多く付着していたため(図6)、偽糞に含まれるカレニアを培養することにより、マガキによって除去されたカレニア赤潮が復活するかの検証を行った。

前述で用いた培養株(69-9ax、細胞密度 2,000 cells/ml)を含む培養液500 mLを、2Lビーカーに収容し、そこへマガキを2個入れた試験区と、赤潮海水のみの対照区を試験に供した。試験開始24時間後に、マガキを入れた試験区の *K. mikimotoi*遊泳細胞が検鏡によって確認されなくなつてから、マガキを取りだし、偽糞を含む培養液をそのまま72時間後まで培養し、*K. mikimotoi*が増殖するか観察した。

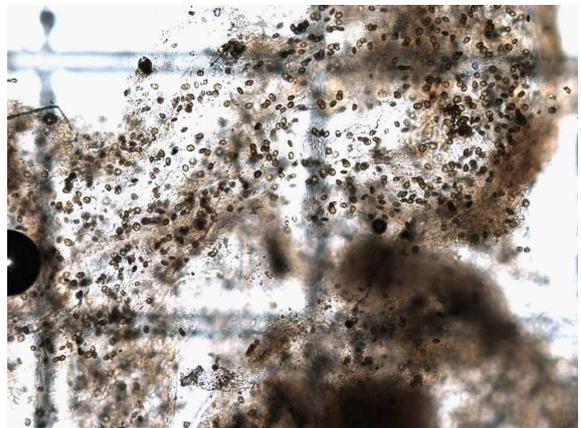


図 6 偽糞に絡まった *K. mikimotoi*

エ. TN及びTPの季節変動

佐伯湾に計5点の調査点を設け(図7)、4月から3月の期間中、月1~5回の頻度で調査を実施した。

調査内容は、表層、2 m、5 m、10 m、底層1 m、底層の6層を採水し、QuAAtro39(ビーエルテック社製)により分析を行った。

なお、今回は各定点に共通する表層、5 m、底上1 m、底層の4層において比較を行った。

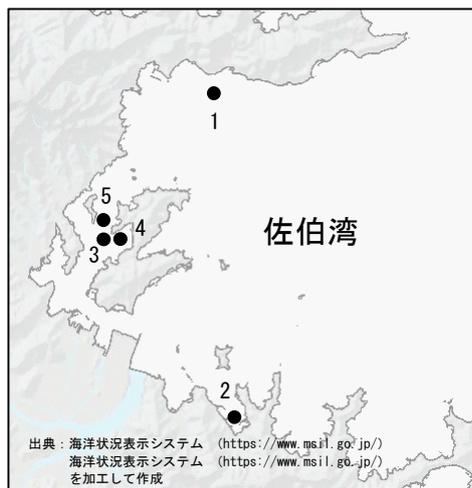


図 7 TN・TP調査点

(1 上浦、2 沖松浦、3 久保浦、4 片神、5 彦島)

## 事業の結果・考察

### ア. 魚群探知機による赤潮モニタリング技術の開発

#### 1) 自動昇降式多項目水質計を用いた赤潮監視

2020年4月から佐伯湾マクロ養殖漁場内で自動昇降式多項目水質計による水質の監視を行った。また、2020年5月～9月、生簀横に船を係留し、週1回の赤潮調査を行った。赤潮調査では多項目水質計(AAQ-RINKO, JFEアドバンテック社製)による水温、塩分、クロロフィル蛍光値について表層から海底までの鉛直プロファイルを観測した後、バケツによる表層採水及び採水器(リゴ- B号)による5 m、15 m、25 m、35 m、B-1 m、B m及びクロロフィル極大層の採水を行った。得られた海水試料は、各種赤潮プランクトンの同定・計数及び栄養塩分析(DIN、DIP、DSi)に供した。赤潮プランクトンの検鏡は採水当日に実施した。

2020年6月～9月の自動昇降式多項目水質計による観測結果を図 8に示す。水温は17.8～26.1 °Cで推移した。塩分は概ね33.0～35.0で推移したが、6月中下旬及び8月上・中旬においてセンサー部分の付着物によるものと思われる異常値が確認された(図 8)。DOは4.95～13.03 mg/Lで推移したが、7月下旬等に付着物によるものと思われる異常値が確認された。一方で、別途試験用生簀に設置していたワイパー式メモリーDO計の観測結果によると、DOは5 m層において6.87～13.96 mg/L、35 m層においては5.98～10.82 mg/Lで推移し、クロロフィル蛍光値が高い時期に上昇傾向が確認された(図 8、9、10)。2020年度は、佐伯湾において*K. mikimotoi*赤潮は発生せず、マクロ試験生簀での最高細胞密度は9月29日の3 cells/mLであった(図 11)。また、自動昇降式多項

目水質計及びワイパー式クロロフィル濁度計の観測結果によると、8月～9月において比較的高濃度のクロロフィル蛍光値が観測された(図 8、10)。8月26日に採水及び検鏡した結果、*Mesodinium rubrum*が優占しており(最高細胞密度2,000 cells/ml、図 11)、別途生簀内表層に設置していた水中カメラの映像を確認すると、真っ赤に着色する時間帯もあった。*M. rubrum*の終息後、9月中旬から*Gonyaulax polygramma*が優占した(最高細胞密度690 cells/ml、図 11)。両種が高密度化した時期、光合成によるものと思われるDOの上昇が確認され、8月24日には最高13.96 mg/Lが観測された。

栄養塩濃度の推移を図 12に示す。2020年6月～9月において、DIN濃度は0.08～7.36 μM(平均2.29 μM)、DIP濃度は0.01～1.13 μM(平均0.25 μM)、DSi濃度は1.15～23.54 μM(平均7.06 μM)の範囲で推移した。DIN及びDIPの濃度は、*K. mikimotoi*が活発に増殖するために必要な濃度(半飽和定数、DIN : 0.78 μM、DIP : 0.14 μM、山口 1994)以下であった時期や深度層があり、6月は比較的低濃度であった。また、調査期間中、海底付近に比較的高い濃度のDINやDIPが連続的に検出されたため、本海域において海底は栄養塩の供給源の一つである可能性が示唆された。一方で、前述した*M. rubrum*及び*G. polygramma*が増殖した時期は表層から底層まで、DIN及びDIP濃度が低下した(図 12)。DSi濃度は一部期間を除き、調査期間中一貫して珪藻の増殖を制限しないレベル(>2 μM)で推移した。

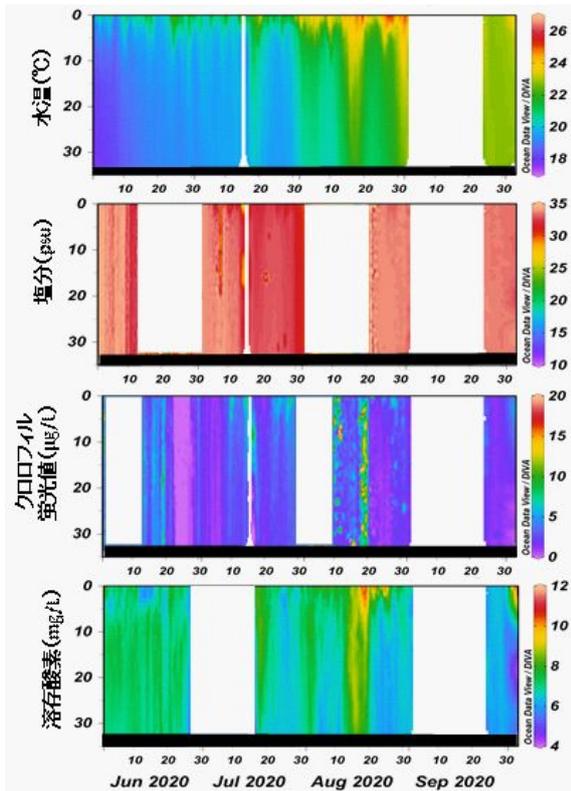


図 8 自動昇降式多項目水質計の観測結果

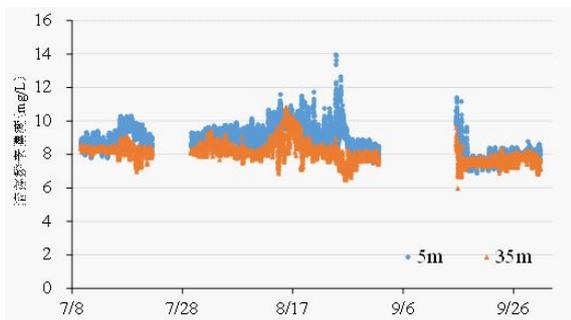


図 9 マグロ試験生簀内におけるワイパー式メモリーD0計の観測結果

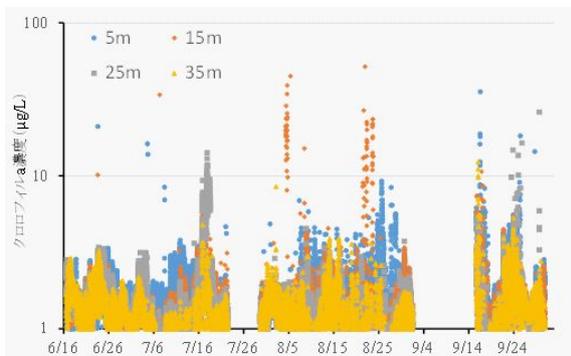


図 10 マグロ試験生簀内におけるワイパー式クロロフィル濁度計の観測結果

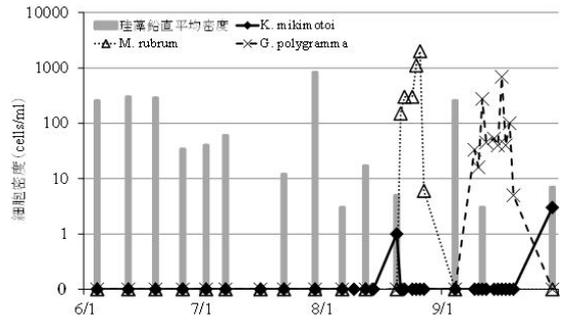


図 11 佐伯湾マグロ試験生簀横における *K. mikimotoi* 及びその他の優占種の推移

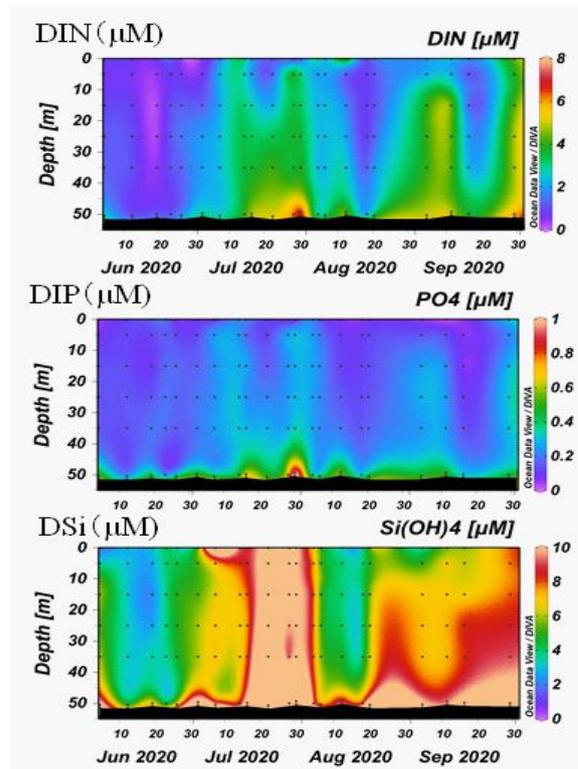


図 12 佐伯湾マグロ試験生簀における栄養塩濃度の推移

2) 自動昇降式多項目水質計を用いた *M. rubrum* の日周鉛直移動の現場観測

2020年8月下旬にかけて *M. rubrum* の赤潮が確認され、その時の自動昇降式多項目水質計によるクロロフィル a 濃度の鉛直分布図を図 13 に示した。検鏡において、8月22日に *M. rubrum* が表層で 1,000 cells/ml の細胞密度で確認され、その後、8月25日には表層～10 m 層で 209～380 cells/ml が確認された。また、同時期に自動昇降式多項目水質計では時間帯によってクロロフィル蛍光値のピーク深度が変化する様子を捉えており、そのクロロフィル蛍光値のピークは *M. rubrum* によるものと推察され

た(図13)。そこで、クロロフィル蛍光値から*M. rubrum*の鉛直移動パラメータ(上昇・下降開始時刻、最高・最低到達深度およびそれらが記録された時刻)を抽出し、表2にまとめた。多くの場合、上昇開始は日の出後の6時~8時頃、下降開始は日の入り後の17時~21時頃に観察された。本種は観測期間中、夜間海底(33 m)まで下降・集積し、昼間は表層に集積する日周鉛直移動パターンが観測された。また8月25日では、一部下降する群集が確認されたが、多くが表層に停滞し、下降しない群集も確認された。これまでの現場調査により、本種は正の走光性を示し、昼間は表層に集積し、夜間は集積することなく各層に均一に分布することが報告されている(Passow 1991)。今回の観測結果でも、昼間は表層に集積する傾向は一致したが、夜間は均一に分布するのではなく、底層に集積する鉛直移動パターンが観測された。本研究により、本種が夜間積極的に降下すること、細胞密度等の状態によっては鉛直移動パターンが変化することが見出された。

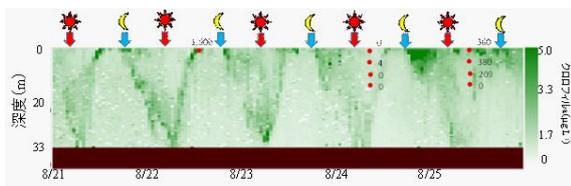


図13 佐伯湾マグロ試験生簀における自動昇降式多項目水質計によるクロロフィル蛍光値の観測結果。図中の数値は赤点で示す深度層における*M. rubrum*の細胞密度、赤矢印は日の出時刻、青矢印は日の入り時刻を示す

表2 佐伯湾マグロ養殖漁場における*M. rubrum*の鉛直移動パラメータ

月日	上昇開始時刻	最小到達深度(m)	最大到達時刻	上昇に要した時間	下降開始時刻	最大到達深度(m)	最大到達時刻	下降に要した時間
8月21日	7:50	0.5	12:00	4:10	17:50	-	-	-
8月22日	8:00	0.5	12:10	4:10	21:20	33	5:30	11:40
8月23日	6:30	0.5	9:00	2:30	19:50	33	5:40	8:20
8月24日	7:30	0.5	12:30	5:00	17:30	33	4:10	8:20
8月25日	10:10	0.5	不明	-	不明	33	5:10	11:40

### 3) 魚群探知機を用いたマグロの行動監視

2020年6月から佐伯湾マグロ試験生簀内に魚群探知機による連続観測を行った。令和元年度は日照不足によるバッテリー切れが原因で、夜間を中心に欠測が生じたが、今年度は太陽パネルの増設及びソーラーパネル等のコネクタレス化により電流の安定性が増し、台風等による観測筏を避難させた期間を除き、連続運転ができた(図14~17)。今年度、K.

*mikimotoi*を含む有害種の赤潮は発生しなかったが、繊毛虫の*M. rubrum*及び渦鞭毛藻類の*G. polygramma*による赤潮が発生したため、2種赤潮とマグロの鉛直分布の関係について解析した。赤潮非発生時において、マグロ魚群は給餌中ごく表層に集積するほか、日中は上層から下層まで幅広く分布し、夜間は上層に多く分布する行動パターンが観察され、令和元年度と同様の結果が得られた(図14~17、紫加田ら2020)。また、紫加田ら(2015)は、ブリ養殖場で同様の観察を行い、給餌日には明瞭な日周パターンが観察されたのに対し、無給餌日にはそのリズムが不明瞭となることを報告している。しかしながら、本研究においても最大で8月25日~26日の3日間無給餌の期間があったが、マグロは明瞭な行動変化を示さなかった。

赤潮非発生時及び8月中下旬に発生した*M. rubrum*赤潮時のマグロ鉛直分布を図17に示す。別途生簀内表層に設置していた水中カメラの映像より、8月22日の12時前や17時前、8月24日の13時頃に濃い着色が確認された。それらの時間帯の魚群探知機のデータを確認すると、他の時間帯と比べて表層~亜表層の反射強度が明確に低下していたことが判明し、マグロが赤潮に対して忌避行動を示したと考えられた(図18)。

9月中旬に発生した*G. polygramma*赤潮時のマグロ鉛直分布を図19に示す。9月16日の正午以降、表層付近の反射強度が低下していたことが確認された。赤潮発生時、水中カメラ映像は故障のため記録できていなかったが、現場観測により、正午~夕方は表層に*G. polygramma*が集積していたことは確認しており、表層の着色域を避けてマグロが分布していた可能性が示唆された。

過去には、ダイバーが目視により、表層のシャットネラ赤潮から逃避するブリの行動が観測されている(水産庁1978)。本研究では、無害種による赤潮であったが、マグロが赤潮を避ける行動を捉えることに成功した。養殖現場において、マグロ類は濁りを嫌う傾向があるとされており、今回もマグロが視覚により濁りを認識して、忌避行動を示した可能性がある。今後、どの程度の着色をマグロが認識できるかなど、定量的な解析を進めたい。

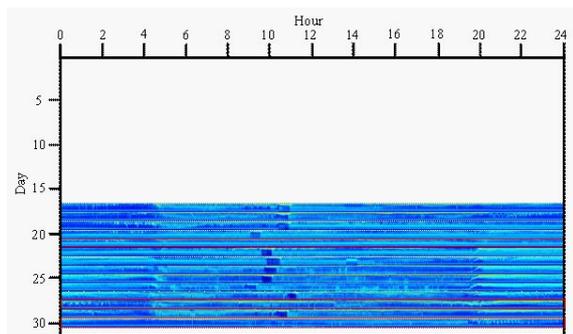


図 14 佐伯湾マグロ試験生簀における魚群鉛直分布の経時変化（2020年6月）。暖色になる程反射強度が高いことを示す。赤枠は餌止め日

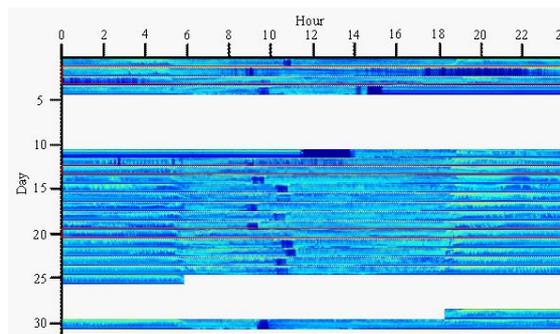


図 17 佐伯湾マグロ試験生簀における魚群鉛直分布の経時変化（2020年9月）。暖色になる程魚群が濃いことを示す。赤枠は餌止め日

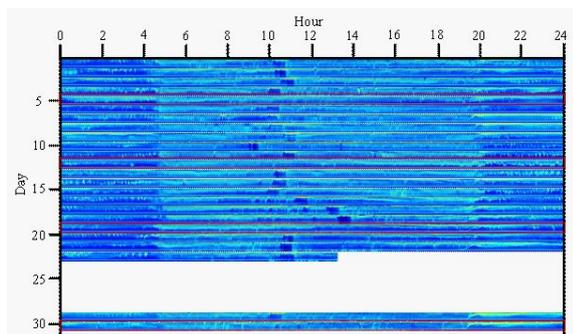


図 15 佐伯湾マグロ試験生簀における魚群鉛直分布の経時変化（2020年7月）。暖色になる程反射強度が高いことを示す。赤枠は餌止め日

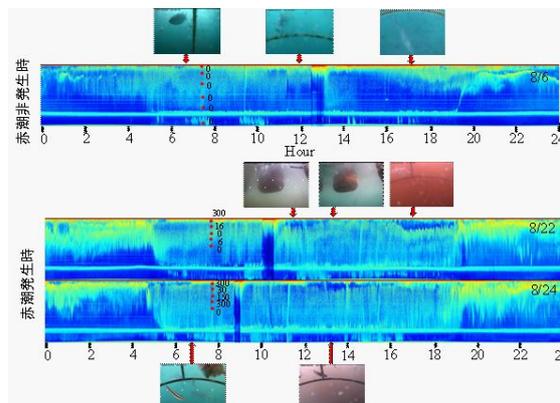


図 18 佐伯湾マグロ試験生簀における *M. rubrum* 赤潮発生時の魚群鉛直分布の経時変化。赤丸横の数値は各深度における *M. rubrum* の細胞密度 (cells/ml)。写真は表層～亜表層で撮影された水中カメラの映像

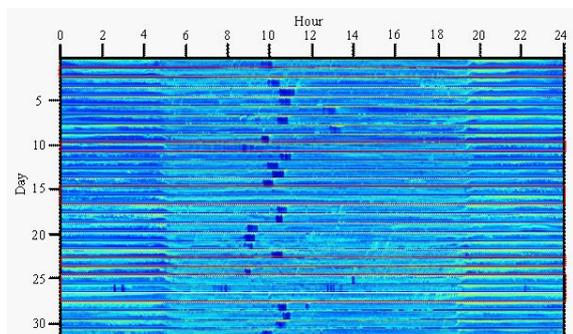


図 16 佐伯湾マグロ試験生簀における魚群鉛直分布の経時変化（2020年8月）。暖色になる程反射強度が高いことを示す。赤枠は餌止め日

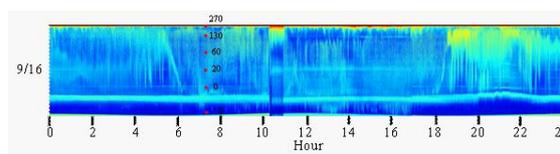


図 19 佐伯湾マグロ試験生簀における *G. polygramma* 赤潮発生時の魚群鉛直分布の経時変化。赤丸横の数値は各深度における *G. polygramma* の細胞密度 (cells/ml)

#### イ) 魚群探知機観測データの閲覧アプリの現場実証試験

Web及びスマートフォンにて、最大7日間以内の魚群データを検索・閲覧する機能を有する閲覧アプリのプロトタイプを作成した(図 20)。6月17日から9月24日の期間に魚群探知機から送信されたファイルを定期的にデータベースに登録処理した後、佐伯湾の養殖業者、大分県や佐伯市などの関係者にユーザー名及びパスワードを配布し、プロトタイプを実際に使用してもらい、意見集約した。その結果、シンプルで漁業者等にとっても使用しやすいとの意見

があったのに対し、魚群行動をより詳細に表示できるようにするため、描画に用いるデータの増加や配色コントロール機能の追加等が必要という指摘もあった。

また2021年2月12日において、リアルタイム閲覧の実証試験を行った。大分県農林水産研究指導センター水産研究部の筏（水深約12m）に魚群探知機を設置し観測を行った。その結果、約3分間データが収録できていなかった以外は、30分毎の最新データがリアルタイムで閲覧可能ということが明らかとなった。

上述の*M. rubrum*や*G. polygramma*による赤潮の例をみても、赤潮に対するマガキの行動変化を監視するためには、可能な限り鮮明かつ高頻度の魚群データを閲覧できることが望まれる。そのために、今後、引き続き本アプリの機能追加・改良を行っていく予定である。

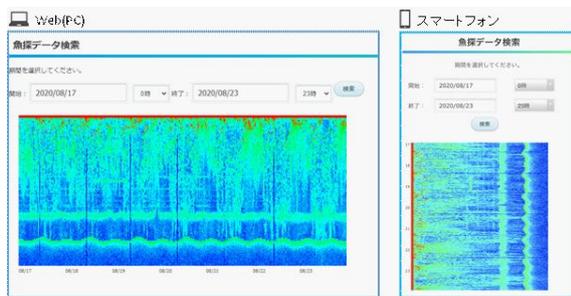


図 20 Web及びスマートフォンでの魚探データ表示画面。8月17日～8月23日の魚探データの例。暖色になる程魚群が濃いことを示す

#### ウ. マガキによるプランクトン除去実験

##### 1) 天然赤潮海水を用いた曝露試験

マガキによる天然赤潮海水の除去効果を表 3に示す。現場海域において、有害種である*H. akashiwo*及び*K. mikimotoi*、有害種ではない*P. dentatum*、*C. furca*、*G. polygramma*及び*M. rubrum*による赤潮が発生したため、実験に供した。その結果、有害種を含むどの種の赤潮を用いた場合でも、マガキを入れた試験区では観測終了の24時間後以内には遊泳細胞がほとんど見られなくなり、マガキによる赤潮除去効果が確認された（表 3）。また、有害種である*H. akashiwo*（細胞密度50,000 cells/ml）および*K. mikimotoi*（細胞密度100 cells/ml）にマガキを曝露させた場合においても、時間経過と共に、細胞密度の減少が確認され、マガキも斃死することはなく、異常行動も確認されなかった（図 21、22）。

*K. mikimotoi*は、マガキを含む二枚貝を斃死させることが報告されており、約5,000細胞を暴露させた場合、ろ水速度を減少させることが報告されて

いる（黒田ら、2018）。今回の場合、低密度であったこともあり、特に異常行動も確認されず、問題なく有害プランクトンを除去する効果があることが示唆された。しかし、二枚貝への被害が報告されていない*G. polygramma*（細胞密度 34,000 cells/ml）及び*M. rubrum*（細胞密度 7,000 cells/ml）では、他の赤潮海水と比較すると、減少率が低く、マガキ10個のうち1個が斃死した。これは、採水後の水温上昇と高密度であったことから、プランクトンが死亡したことによる水質悪化が影響したと考えられた。

以上のことより、本実験で用いたどの天然赤潮でも、マガキによる除去効果があることが確認された。引き続き、他の有害種の場合においても除去効果があるか検証する予定である。

表 3 マガキへの天然赤潮海水曝露試験結果

優占種	試験に供した牡蠣(匹)	開始細胞数 (cells/ml)	実験区最終細胞数 (cells/ml)
<i>Heterosigma akashiwo</i>	10	10,000	0
	10	50,000	0
<i>Prorocentrum dentatum</i>	10	700	0
	1	40,000	0
<i>Ceratium furca</i>	10	40,000	0
	1	500	0
<i>Gonyaulax polygramma</i>	1	500	0
	10	34,000	17,500
<i>Mesodinium rubrum</i>	1	34,000	0 <sup>※1</sup>
	10	7,000	400
<i>Karenia mikimotoi</i>	1	7,000	0 <sup>※1</sup>
	1	100	0

※1 水温上昇・プランクトン死滅の影響で水質が悪化し、カキ死亡(10匹中1匹)

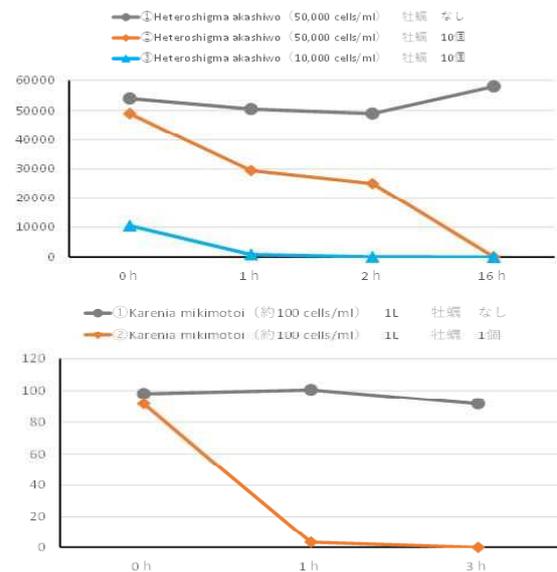


図 21 有害赤潮をマガキに曝露した際の細胞密度の推移（上：*H. akashiwo*、下：*K. mikimotoi*）



図 22 *H. akashiwo* (50,000 cells/ml) をマガキに曝露20時間後 (左: 対照区 マガキなし、右: 実験区 マガキ10個)

2) *K. mikimotoi*培養株を用いた曝露試験

今年度は*K. mikimotoi*赤潮が発生しなかったため、培養株を用いて曝露試験を行った結果を表 4 に示す。また、強毒株 (IMR4: 細胞密度 1,000 cells/ml) および弱毒株 (69-9ax: 細胞密度 1,000 cells/ml) をマガキに曝露した結果を図 23 に示す。両株の試験区とも、時間経過と共に細胞密度が減少していき、20時間後には遊泳細胞はほとんど確認されなくなり、マガキによる除去効果が確認された。また、強毒株の試験区と比較して、弱毒株の試験区の方が細胞密度の減少速度が早い傾向が確認された。試験期間中、マガキ自体には特に変化は観察されなかった。次に強毒株 (IMR4: 細胞密度 9,000 cells/ml) および弱毒株 (69-9ax: 細胞密度 9,000 cells/ml) をマガキに曝露した結果を図 24 に示す。こちらも同様に、時間経過と共に細胞密度が減少していき、マガキによる除去効果が確認された。また1,000 cells/mlの試験時と同様に、弱毒株の試験区の方が減少速度が早い傾向が確認された。黒田ら (2018) では、生残には影響ないが、500~5,000 cells/mlでろ水率が低下することが報告されている。本結果も同様に、強毒株区では、弱毒株区と比較して、ろ水率が低下し、結果減少効果も低かったことが推察された。

以上の結果をまとめると、どの細胞密度でも、マガキによる除去効果が確認された。しかし、株の毒力や細胞密度によっては、マガキによる減少効果が低くなる傾向が確認された。これはろ水率低下に伴い、マガキのプランクトン回収率が低くなったことが原因であると推察された。

表 4 マガキへの*K. mikimotoi*培養株を用いた曝露試験結果

供試株名	試験に供した牡蠣 (匹)	開始細胞数 (cells/ml)	実験区最終細胞数 (cells/ml)
<i>Karenia mikimotoi</i> (IMR4)	1	1,000	1.5
<i>Karenia mikimotoi</i> (69-9ax)	1	1,000	0.5
<i>Karenia mikimotoi</i> (IMR4)	1	600	2
<i>Karenia mikimotoi</i> (69-9ax)	1	600	0
<i>Karenia mikimotoi</i> (IMR4)	1	9,000	2667
<i>Karenia mikimotoi</i> (69-9ax)	1	9,000	1667

※IMR4: マダイ及びアワビに強毒、69-9ax: マダイに弱毒

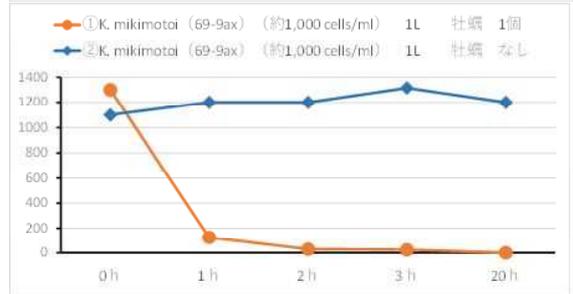
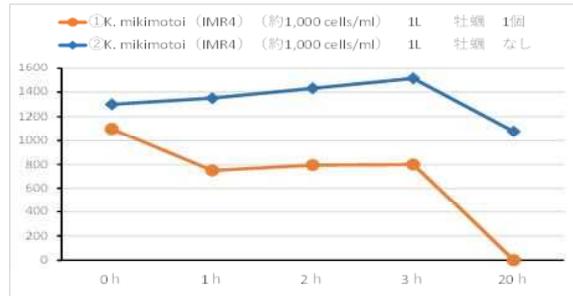


図 23 *K. mikimotoi*培養株 (約1,000 cells/ml) を牡蠣に曝露した際の細胞密度の推移 (上: IMR4、下: 69-9ax)

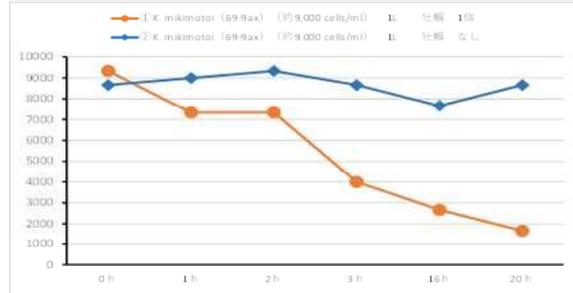


図 24 *K. mikimotoi*培養株 (約9,000 cells/ml) を牡蠣に曝露した際の細胞密度の推移 (上: IMR4、下: 69-9ax)

3) マガキ偽糞に含まれる*K. mikimotoi*培養実験

マガキの偽糞に含まれる*K. mikimotoi*が復活するかを確認するため、*K. mikimotoi*が含まれる偽糞を培養液中で培養した結果を図 25 に示す。試験開始24時間後にマガキを入れた試験区では遊泳細胞は確認されなくなり、偽糞に*K. mikimotoi*が含まれることを顕微鏡で確認した後にマガキを取り出し、培養を開始した。その後、試験開始72時間後まで検鏡による観察を続けた結果、対照区では増殖し

ていった一方で、偽糞に含まれる*K. mikimotoi*は増殖せず、遊泳細胞は確認されなかった。また実験終了時には偽糞に含まれる*K. mikimotoi*は原型がなくなっていた。

以上のことより、偽糞に含まれる*K. mikimotoi*は再び増殖する可能性はないことが示唆された。



図 25 マガキ偽糞に含まれる*K. mikimotoi*培養実験の細胞密度の推移

### エ. TN及びTPの季節変動

各層における総窒素の推移を図26～29に示す。表層については、上浦では0.07～0.38 mg/L、沖松浦では0.08～0.69 mg/L、久保浦では0.08～1.03 mg/L、片神では0.08～0.29 mg/L、彦島では0.07～0.40 mg/Lで推移した。5 m層については、上浦では0.08～0.29 mg/L、沖松浦では0.08～0.34 mg/L、久保浦では0.08～0.36 mg/L、片神では0.08～0.42 mg/L、彦島では0.09～0.31 mg/Lで推移した。底上1 m層については、上浦では0.08～0.38 mg/L、沖松浦では0.08～0.35 mg/L、久保浦では0.07～0.33 mg/L、片神では0.08～0.34 mg/L、彦島では0.09～0.30 mg/Lで推移した。底層については、上浦では0.10～0.35 mg/L、沖松浦では0.08～0.38 mg/L、久保浦では0.08～0.31 mg/L、片神では0.07～0.39 mg/L、彦島では0.08～0.30 mg/Lで推移した。

表層については、上浦では6月上旬、片神では5月下旬に最も高い濃度となったが、その他の定点では9月上旬～中旬に最も高い濃度となった。5 m層、底上1 m層、底層については、全調査点において5月下旬～6月上旬に最も高い濃度となった。

次に、各層における総リンの推移を図30～33に示す。表層については、上浦では0.01～0.08 mg/L、沖松浦では0.02～0.14 mg/L、久保浦では0.01～0.24 mg/L、片神では0.01～0.08 mg/L、彦島では0.01～0.11 mg/Lで推移した。5 m層については、全調査点で0.01～0.08 mg/Lで推移した。底上1 m層については、片神では0.01～0.09 mg/Lで推移し、その他の定点では0.01～0.08 mg/Lで推移した。底層につ

いては、上浦では0.02～0.10 mg/L、沖松浦では0.01～0.09 mg/L、久保浦では0.02～0.10 mg/L、片神ではN.D～0.09 mg/L、彦島では0.01～0.09 mg/Lで推移した。

表層については、上浦では6月下旬、沖松浦では9月上旬、久保浦及び彦島では9月中旬、片神では6月中旬～下旬に最も高い濃度となった。5 m層、底上1 m層、底層については、全調査点において6月中旬～下旬に最も高い濃度となった。

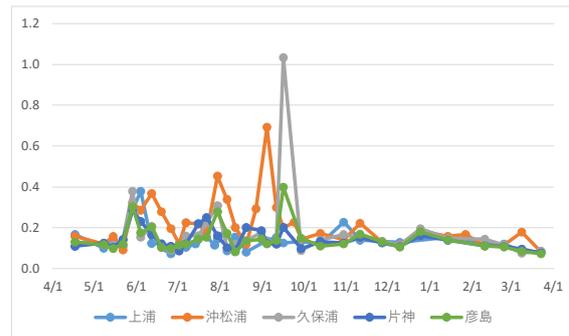


図 26 表層における総窒素(TN)の推移

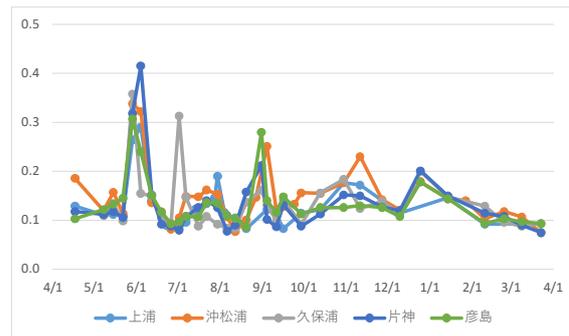


図 27 5 m層における総窒素(TN)の推移

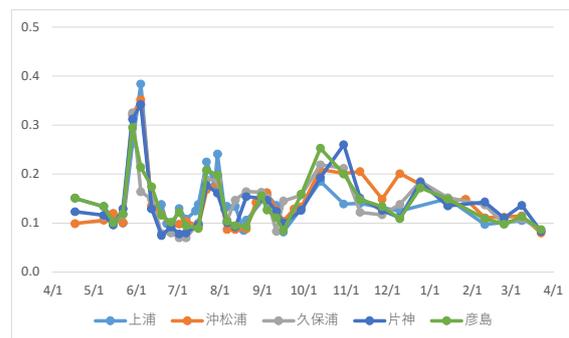


図 28 底上1 m層における総窒素(TN)の推移

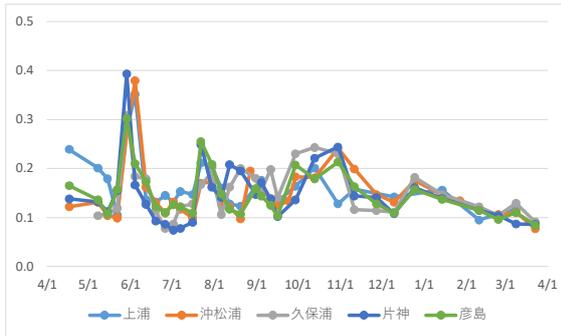


図 29 底層における総窒素(TN)の推移

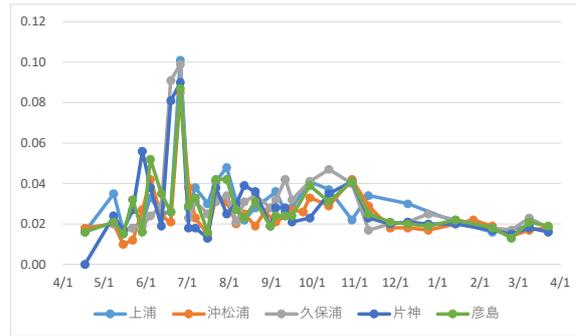


図 33 底層における総リン(TP)の推移

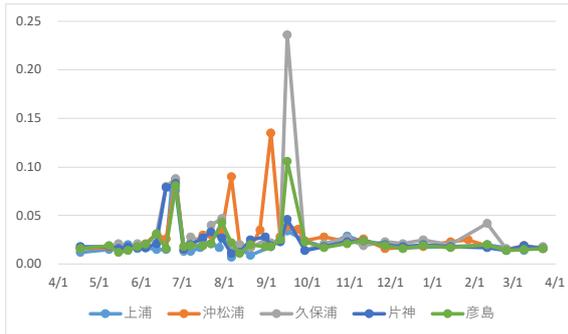


図 30 表層における総リン(TP)の推移

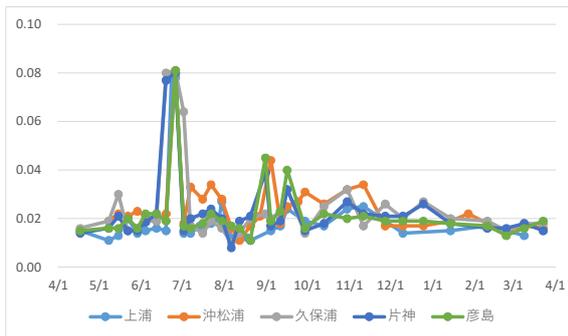


図 31 5 m層における総リン(TP)の推移

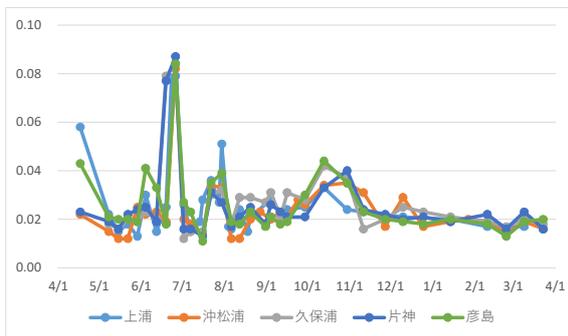


図 32 底上1 m層における総リン(TP)の推移

文献

紫加田知幸, 鬼塚剛, 山口峰生, 高山剛, 伏屋玲子, 宮村和良, 梶川和武. 平成26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 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. 「有害赤潮鞭毛藻類の遊泳特性を利用した新規赤潮防除技術の開発」報告書, 瀬戸内海赤潮共同研究機関, 2015 ; 168-183.

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的研究. 南海海区水産研究所研究報告 1994 ; 27 : 251-394.

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.

Itoh T, Tsuji S, Nitta A. Migration patterns of young Pacific bluefin tuna (*Thunnus orientalis*) determined with archival tags. *Fish. Bull.* 2003; 101: 514-534.

紫加田知幸, 鬼塚剛, 中野善, 井口大輝, 中里礼大, 内海訓弘, 今坂尚志. 平成31年度漁場環境改善推進事業のうち赤潮及び貧酸素水塊の広域自動モニタリング技術の開発. 「九州東部海域のマグロ漁場における有害赤潮監視システムの開発」報告書, 赤潮・貧酸素観測技術開発共同研究機関, 2020 ; 53-62.

水産庁. 鹿児島湾赤潮発生原因調査研究報告書-昭和52年6月発生 of *Hornellia*赤潮, 1978; 81p.

U Passow. Vertical migration of *Gonyaulax catenata* and *Mesodinium rubrum*. *Marine Biology.* 1991; 110: 455-463.

黒田麻美, 茅野昌大, 大竹周作, 福田穰, 松山幸彦, 永江彬. 平成29年年度漁場環境・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」報告書，九州海域赤潮・貧酸素共同  
研究機関，2018；227-242.