

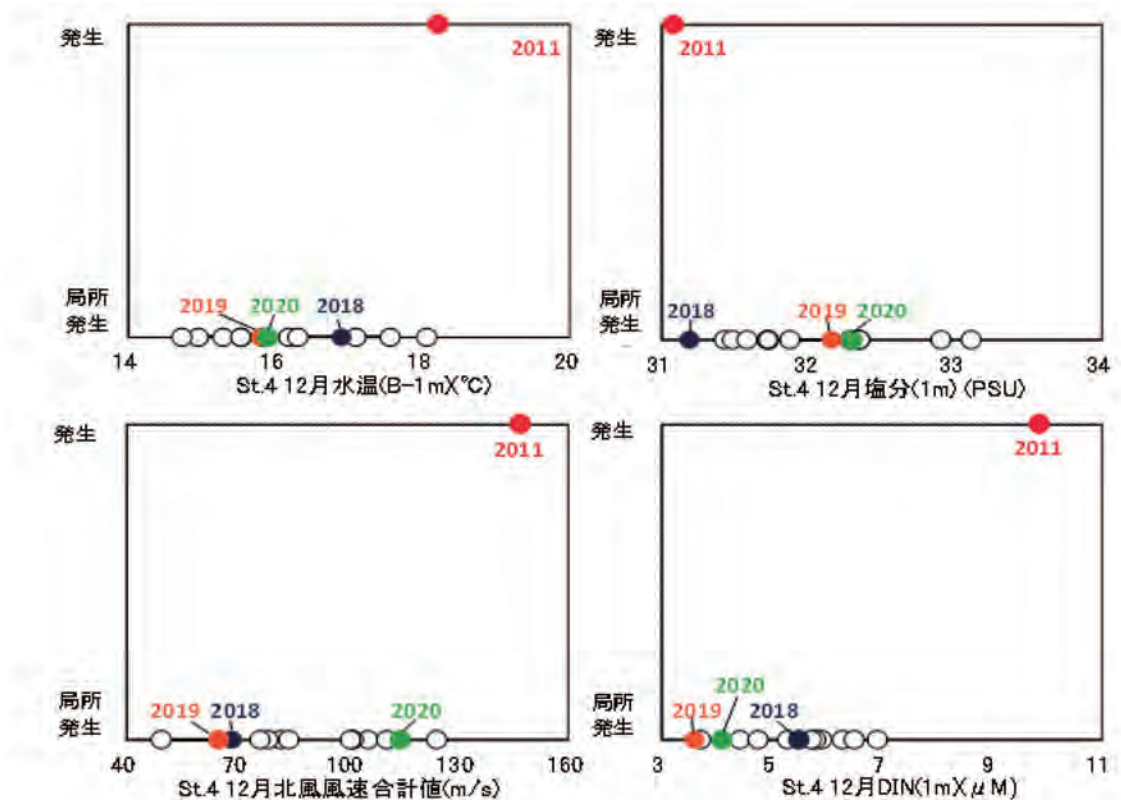


図 57 徳島県海域におけるユーカンピア赤潮発生年（1 月発生）の特徴解析例。赤丸が 1 月発生年，1 月に赤潮が発生した年は 12 月に水温が高く，塩分が低く，北風風速合計値が高く，栄養塩濃度が高いという特徴を有する可能性が示唆された。

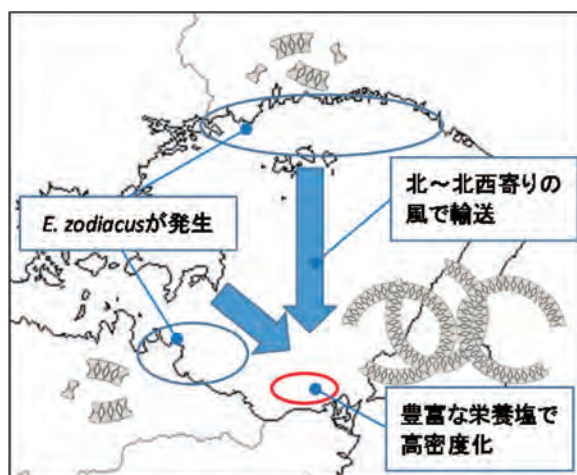


図 58 徳島県海域におけるユーカンピア赤潮の発生シナリオ（1 月発生）。他海域で発生した *E. zodiacus* が北～北西寄りの風で輸送され，徳島県海域に存在する豊富な栄養塩で高密度化すると考えられる。

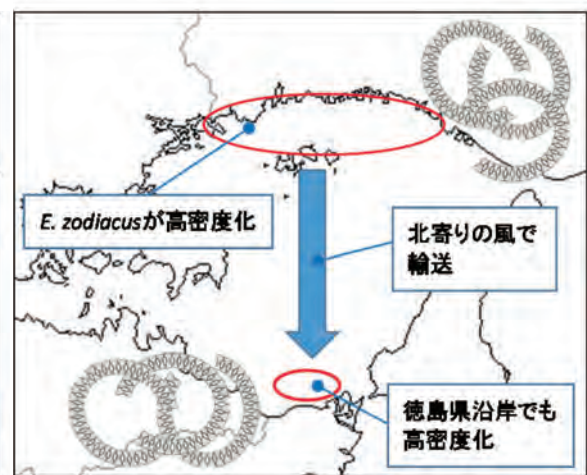


図 59 徳島県海域におけるユーカンピア赤潮の発生シナリオ（2 月または 3 月発生）。他海域で高密度化した *E. zodiacus* が北寄りの風で輸送され，徳島県海域でも高密度化する可能性が示唆された。

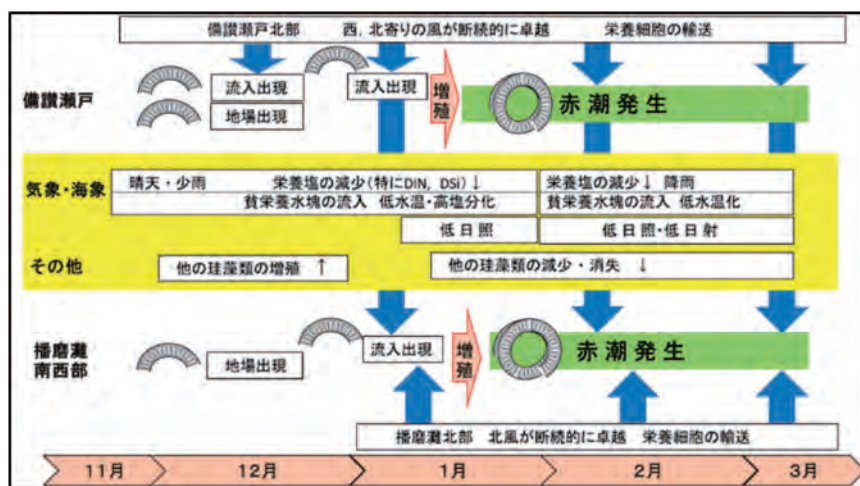


図 60 香川県海域におけるユーカンピア赤潮の発生シナリオ模式図

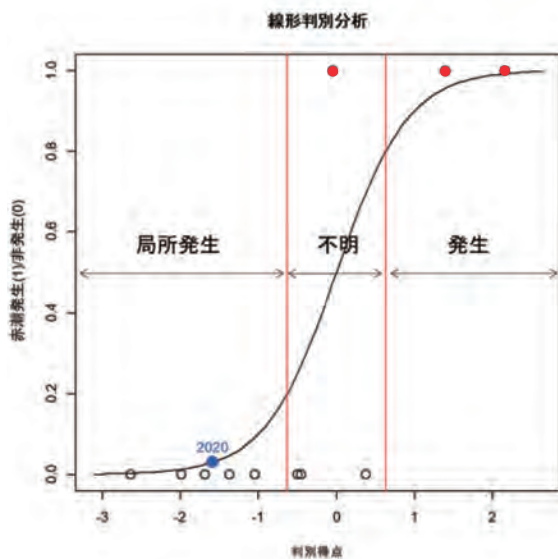


図 61 香川県海域（播磨灘）におけるユーカンピア赤潮発生予察結果。説明変数は 12 月の北風と表層珪藻密度。赤丸が発生年，白丸が局所発生年，青丸が 2020 年（局所発生年），赤線内は「Δ」の予察範囲を表す。

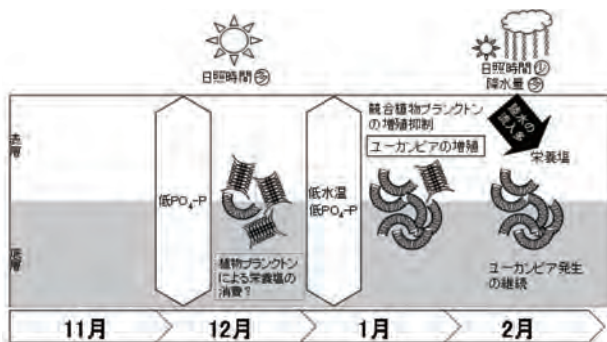


図 62 岡山県海域（播磨灘）におけるユーカンピア赤潮の発生シナリオ模式図

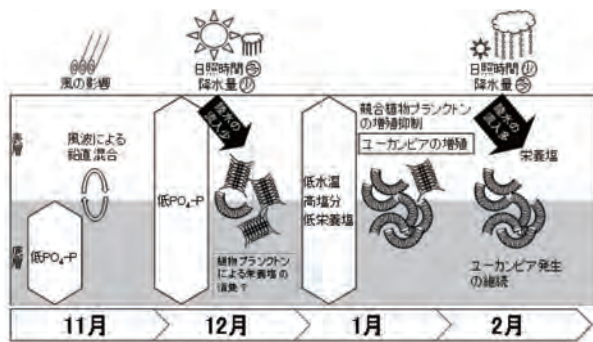


図 63 岡山県海域（備讃瀬戸）におけるユーカンピア赤潮の発生シナリオ模式図

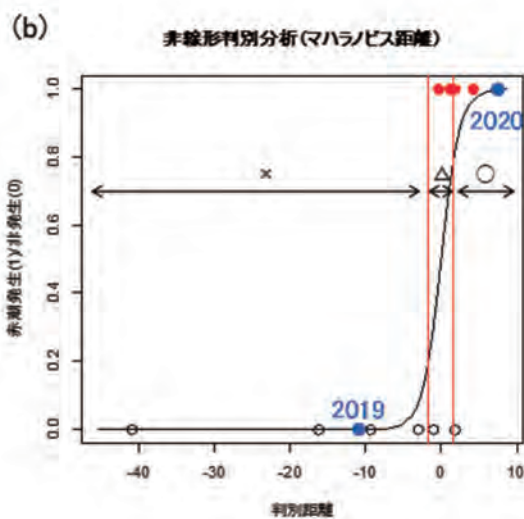
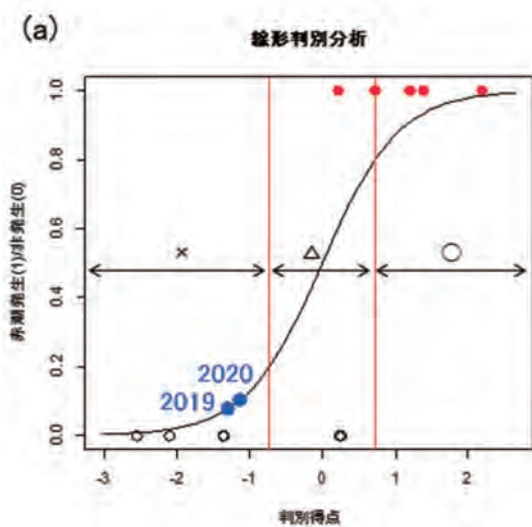


図 64 岡山県海域（播磨灘）におけるユーカンピア赤潮の発生予察。使用データは、(a)が11月西風，1月底層 $\text{PO}_4\text{-P}$ ，(b)が12月日照時間，1月底層 $\text{PO}_4\text{-P}$ 。赤丸が発生年，白丸が局所発生年，青丸が2019，2020年の予察を表す。

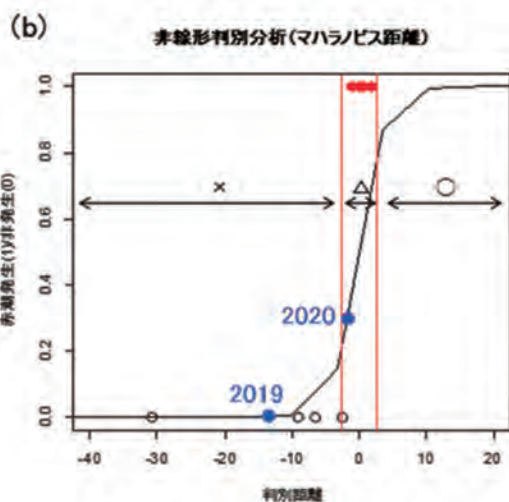
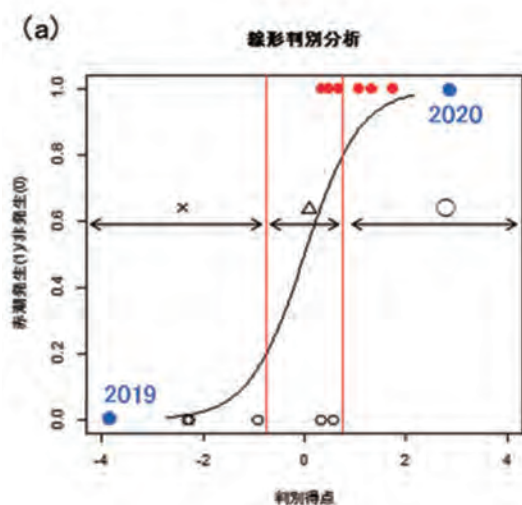


図 65 岡山県海域（備讃瀬戸）におけるユーカンピア赤潮の発生予察。使用データは、(a)が12月日照時間，12月底層 $\text{PO}_4\text{-P}$ ，1月底層水温，(b)が底層 $\text{SiO}_2\text{-Si}$ ，1月底層水温。赤丸が発生年，白丸が局所発生年，青丸が2019，2020年の予察を表す。

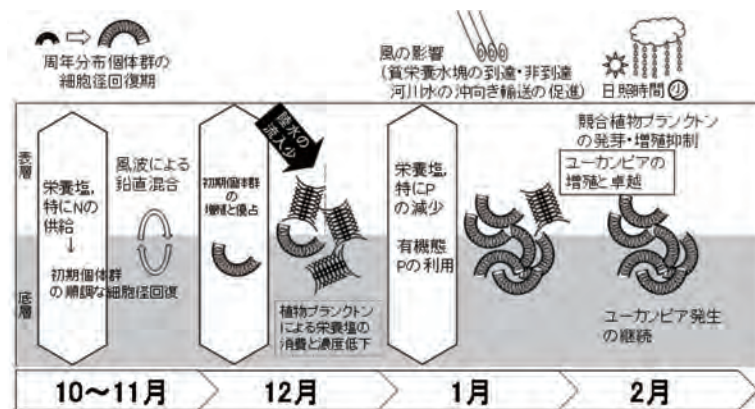


図 66 兵庫県海域（播磨灘）におけるユーカンピア赤潮の発生シナリオ模式図

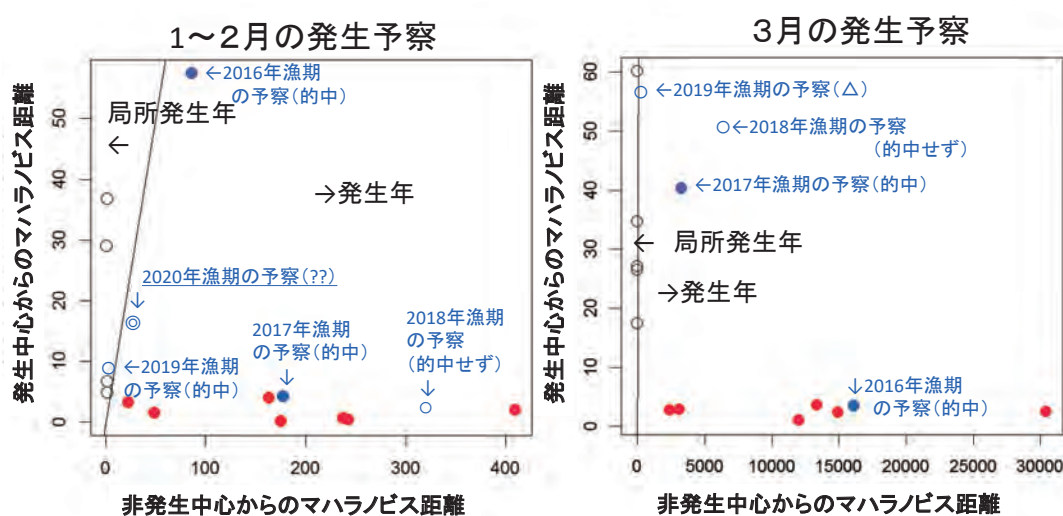


図 67 兵庫県海域（播磨灘）におけるユーカンピア赤潮発生予察結果。解析に用いた説明変数は、左：11月のN/P比と1月の $\text{PO}_4\text{-P}$ ，右：2月の最高細胞数と2月の日照時間と2月の $\text{PO}_4\text{-P}$ 。赤丸が発生年，白丸が局所発生，青丸が2016～2019年，青二重丸が2020年の予察を表す。

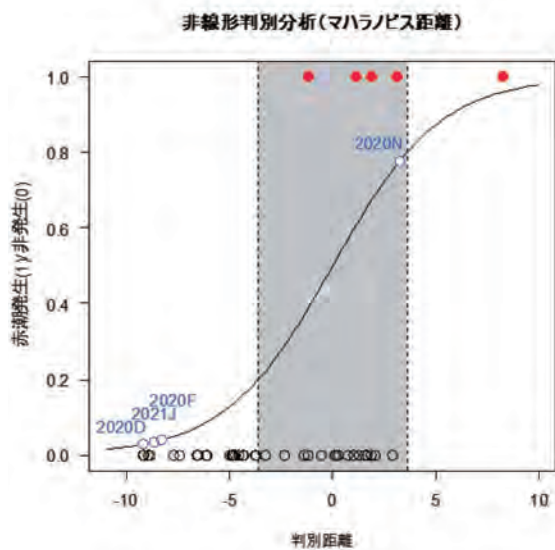


図 68 大阪府海域における 2005-2015 年データを用いたユーカンピア赤潮発生予察結果。●：赤潮発生月，○：非発生月，○・青字：予察結果（2020.2, 2020.11-2021.1 はいずれも赤潮非発生月）。網掛けは「△」予察範囲。



図 69 大阪府海域におけるユーカンピア流入赤潮の発生シナリオ図

2020 年夏季シャットネラ赤潮発生予察結果（大阪府海城）

（2020 年 7 月 1 日時点）

(1) 予察概況

- ① 6 月の *Chattonella* 細胞密度による予察では ×（非発生）
- ② 水温（7 月上旬, 10m 層）と降水量（5-6 月, 大阪）の組合せによる予察は未実施
- ③ 降水量と日照時間（6 月下旬-7 月上旬, 大阪）の組合せによる予察は未実施
- ④ 日照時間と水温の組合せによる予察は未実施

※②~④は 7 月上旬以降に実施予定

(2) 予察フローチャート

赤枠が今回実施範囲

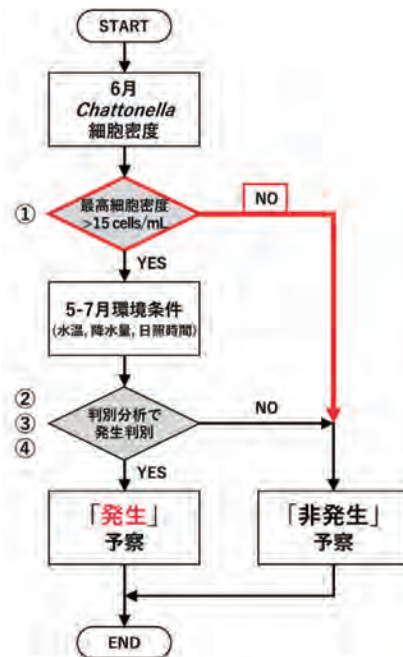


図 70 赤潮ネット機関ログイン後ページにおけるシャットネラ赤潮発生予察結果共有画面の一例

1) 有害赤潮プランクトンの出現動態監視および予察技術開発

イ. 瀬戸内海西部・豊後水道・土佐湾海域

愛媛県農林水産研究所水産研究センター

平井真紀子，三門哲也，渡邊昭生

広島県水産海洋技術センター

加川真行，黒田麻美，村田憲一

山口県水産研究センター内海研究部

本田宇聖，吉村栄一，馬場俊典，國森拓也

福岡県水産海洋技術センター豊前海研究所

後川龍男，恵崎 撰

大分県農林水産研究指導センター水産研究部

井口大輝，中里礼大，内海訓弘

大分県農林水産研究指導センター水産研究部北部水産グループ

徳丸泰久，都留勝徳

高知県水産試験場

占部敦史

愛媛大学沿岸環境科学研究センター

吉江直樹，郭 新宇

愛媛大学南予水産研究センター

清水園子，松原孝博，竹内久登

高知大学教育研究部自然科学系農学部門

山口晴生

水産研究・教育機構水産技術研究所

外丸裕司，三宅陽一，坂本節子，鬼塚 剛

1 全体計画

(1) 目的

瀬戸内海西部海域では有害赤潮プランクトンによる漁業被害が頻繁に発生しており，2012年夏季には，当該海域で広範囲に *Karenia mikimotoi* 赤潮が発生し，県によっては，十数億円の過去最大の漁業被害が発生した。赤潮による漁業被害を未然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，瀬戸内海西部・豊後水道海域・土佐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の発生状況および海洋環境を監視するとともに，既存のモニタリングデータの解析，数値モデルを用いた解析等によって当該海域における有害赤潮の発生シナリオを構築し，赤潮発生予察や漁業被害軽減に資することを目的とする。

2 令和2年度計画および結果

(1) 目的

全体計画と同じ

(2) 試験等の方法

1) モニタリング調査

当該海域に計 58 点の調査定点を設置し（図 1），原則，有害赤潮が発生する 5 月から 9 月までに計 4 回以上，海洋環境（水温，塩分，栄養塩等）およ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，表 2）。なお，調査時に多項目 CTD にクロロフィル極大層の反応が確認された場合は，その層を採水し，プランクトン細胞密度の検鏡計数を行った。調査実施日を表 3 に示す。

周防灘西部の各県海域，広島湾および浦ノ内湾については，水塊の成層強度を示す鉛直安定度を以下の式（1）により求めた。

$$\text{上層と下層の海水密度差} \div \text{水深差} \times 10^{-3} \quad (\text{Sverdrup et al. 1942}) \quad (1)$$

また，気象データとして気象庁 HP 気象統計情報から広島，豊後高田，宇和島，須崎における降水量，気温，日照時間および風速の観測値と平年値（1981 年から 2010 年の 30 年平均値）を解析に用いた。

2) *K. mikimotoi* 高感度監視調査

① 瀬戸内海西部海域における *K.mikimotoi* 遺伝子量の挙動

1) のモニタリング調査定点 58 点のうち，8 点を調査定点に設置し（図 1），モニタリング調査前の 4～6 月，および冬季の 2～3 月に，PCR 法による高感度調査を実施した（表 3）。調査実施日を表 4 に示す。

各県の共同提案機関は，各調査点で採水した海水 1 L を孔径 5 μm のメンブレンフィルター（Millipore JMWP04700）で濃縮濾過し，凍結保存して，愛媛大学南予水産研究センターに送付した。同センターは，送付された凍結試料を解凍後，速やかにビーズ粉砕によりホモジナイズし，DNeasy Plant Mini Kit（QIAGEN, 69106）を用いて DNA を抽出した。DNA の検出・定量は，PCR 法を用いて行った。*K. mikimotoi*，*Cochlodinium polykrikoides*，*Heterocapsa circularisquama*，*Chattonella* spp. (*antiqua* + *marina* + *ovata*)，*Heterosigma akashiwo* の遺伝子をそれぞれ特異的に識別するプライマーと蛍光プローブを作製し，マルチプレックス検出可能なリアルタイム PCR 機（バイオ・ラッド, CFX96）を用いて解析した。得られた数値は，既知の細胞数を測定して得られた値を基に細胞数へと変換した。

② 高感度遺伝子モニタリングのマニュアル作成および予備的検討

定量 PCR 法による高感度遺伝子モニタリング技術を用いて *K.mikimotoi* の挙動を早期に把握するためには，サンプル採水後に近傍の機関で直ちに測定できる体制の確立が望ましい。そこで，現在愛媛大学南予水産研究センターで実施している測定系を基に，各試験機関で利用できる遺伝子検出マニュアルの作成に取り組んでいる。本年度はマニュアル作成にあたり，各機関で異なると想定される DNA 抽出方法，および使用する PCR 反応試薬の差異が遺伝子検出結果に及ぼす影響について検討を行った。

3) 高頻度観測とデータ解析・モデル構築等

図 2 に示す宇和島湾 6 定点にて 5～9 月に週一回の頻度で採水および多項目水質計（JFE アドバンテック社製 AAQ-RINKO）を用いた観測を行った。重点観測点の U6 では表層，5 m，

10 m, 海底上 1 m, クロロフィル極大層で採水を行い、海水試料は植物プランクトン種組成・細胞密度の分析に供するとともに、オートアナライザー（ビーエルテック社製 QuAAtro）で栄養塩濃度（DIN: $\text{NO}_2\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N} + \text{NH}_4\text{-N}$, DIP: $\text{PO}_4\text{-P}$, DSi: $\text{SiO}_2\text{-Si}$ ）を測定した。さらに、気象庁の宇和島特別地域気象観測所の日照時間と降水量、宇和島湾奥に流入する須賀川水位（愛媛県南予地方局須賀川ダム管理事務所提供）をそれぞれ用いた。

また、モデル解析として、平成 30 年度（2018 年度）に本課題で開発した生物モデルを用いて、平成 30 年 7 月豪雨後の宇和島湾における *K. mikimotoi* の急減の要因について検討した。モデルは窒素循環を考慮した鉛直次元のオイラー型を採用し、コンパートメントは *K. mikimotoi* と珪藻、DIN が組み込まれている。モデルの式やパラメーターの詳細は平成 30 年度の報告書（黒田ら 2019）を参照されたい。表 5 に示すように、淡水流入に伴う希釈、豪雨前後の鉛直移動や増殖、強光の影響を変えたケース実験を行った。

その他に、豊後水道東部海域（宇和海）における *K. mikimotoi* 赤潮発生時期・最大細胞密度と黒潮系外洋水の宇和海への進入現象（急潮・底入り潮）と気象・海象条件との関連性を調べた。具体的には、外洋水の進入強度については、宇和海中央部に位置する愛媛県塩子島における 1997 年～2020 年の海水温（水深 5 m・60 m）の日平均値を用いて、Takeoka et al. (2000) の手法により、5～8 月にかけて 10 日毎の「急潮強度」・「底入り潮強度」を算出した。気象条件については、気象庁宇和島特別地域気象観測所の「降水量」・「日照時間」の日平均値を用いた。海象条件としては、塩子島 5 m 深における「表層海水温」の日平均値を用いた。*K. mikimotoi* 赤潮については、水産庁瀬戸内海漁業調整事務所発行の「瀬戸内海の赤潮」、および愛媛県農林水産研究所水産研究センターから提供された赤潮関連観測データをもとに、宇和海における「年最初の *K. mikimotoi* 赤潮発生日」・「*K. mikimotoi* 年最高細胞密度」を抽出して解析に用いた。

4) 有害鞭毛藻類の培養試験

① *K. mikimotoi* の培養試験（細胞サイズの変化、画像解析アプリによる解析）

K. mikimotoi Km6Y 株の細胞サイズ（直径）と培養条件の関係を明らかにするため、以下の実験を行った。通常の SWM-3 完全培地（対照区）に対して、窒素源を 1/10 量に制限した N 制限_SWM-3 培地、ならびにリン源 1/30 量に制限した P 制限_SWM-3 培地を作製した。SWM-3 培地で培養して定常期に達した当該株培養（ $1.34 \times 10^4 \text{ cells/mL}$ ）11 mL を各培養液 1,100 mL に接種し、最終濃度 132 cells/mL になるように調整した。培養は 25°C, 12h:12h 明暗周期、 $600 \mu\text{mol/m}^2/\text{s}$ で実施した。実験は 4 本立てで実施した。数日間隔で培地から 0.1 mL を採取し、グルタルアルデヒド最終濃度 0.01% にて固定後、直ちに自動細胞測定器 Tali イメージベースサイトメーターにて細胞密度、細胞サイズ（直径）を機械測定した。また同時に顕微鏡カメラで細胞を撮影し、取得した画像に対して画像解析ソフト Touch De Measure（提供：熊本大学 戸田真志 教授）を用いて細胞面積の測定を行った。

② 内湾環境を室内再現可能な培養装置の新規構築

この課題の目的は、赤潮発生域において観察される様々な環境変動を室内にて再現可能な新しい培養システムを開発し、それを用いて有害赤潮原因藻の鉛直挙動を明らかにすることにある。その目的を達成するために、沿岸域で観られる光の鉛直変動をスケールダウンで再現可能な培養装置を開発すると共に、試験環境下における *K. mikimotoi* の鉛直挙動を光と共

に水温・塩分とも関連付けて解析することを視野に入れ、当該藻の増殖に及ぼす水温・塩分の影響を増殖試験によって精査しようとした。

光量子束密度（光強度） $2,000 \mu\text{mol photons/m}^2/\text{s}$ 近い強光を照射するために、新たな光源として高輝度白色 LED を導入した。培養系プロトタイプの最適な位置に光源を設置し、その上で各水位における光量子束密度（光強度）を 4π 型水中光量子センサー（LI-COR 社）により測定した。ここで、光強度が鉛直的に変動することを確認した上で、 2π 型光量子センサー（LI-COR 社）を用いて各水位における光強度を系外から測定した。得られた両光強度の相関関係を解析することで、培養系外から系内の光強度を推定可能な関数を得ようとした。

本年度の培養試験には、浦ノ内湾より分離した *K. mikimotoi* KmURN1Y 無菌株（Yamaguchi et al. 2016）を供試藻として用い、培地としては塩分 20, 25, 30, 35 および 40 の Daigo-IMK 培地を用いた。試験水温・塩分における供試株の馴致ならびに各試験区への移行についてはステップワイズ法にしたがって行った。光強度 $240\text{--}250 \mu\text{mol photons/m}^2/\text{s}$ （明暗周期 12hL:12hD）の条件下で供試藻を培養、Turner 10-AU Fluorometer（TURNER DESINGS 社製）を用いてクロロフィル（Chl.）*a* 蛍光量を経時的に測定した。接種時を上回る Chl. *a* 量が得られた場合、当該量を $\ln$ 値に変換した上で、その経時変動を示す増殖曲線を作成した。最小二乗法により対数増殖期における 3 点プロットの傾きを計算し、培養期間を通して最大の増殖速度（ μ : division/day）を算出した。各水温・各塩分区での増殖速度を対象に Bonferroni の多重比較検定を行い（ $\alpha = 0.05$ ），試験区間における *K. mikimotoi* の（平均化した）増殖速度の有意性を調べた。この結果に基づいて、大きい増殖速度を与える水温・塩分条件を増殖至適条件とした。

5) 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。

（3）結果および考察

1) モニタリング調査

① 気象

【概況】

本年度の梅雨入りは、中国地方（山口県を除く）、九州北部地方（山口県を含む）、および四国地方では 6 月 10 日頃（平年 6 月 5～7 日頃）、梅雨明けは 7 月 30 日頃（平年 7 月 18～21 日

頃)で、梅雨入りは、平年より3~6日遅く、梅雨明けは、平年より10~11日遅かった。4月から梅雨入りまでの降水量は少なめか平年並みだったが、梅雨入り後は前線の停滞により降雨が多く(平年比157~195%)、梅雨明けは少雨で、9月上旬又は中旬に台風10号や前線の影響を受けて、地域によっては降水量が多かったが、それ以降は平年並みであった。

【広島、豊後高田、宇和島、須崎の観測結果】

各観測所における4~9月の降水量、日照時間、平均気温および平均風速の旬別気象データと平年値の推移を図3に示した。

降水量(図3a):梅雨入り前までは、平年並み若しくは平年より低い旬が続いた。梅雨入り後は、7月3日からの令和2年7月豪雨により、7月上旬に平年の3~4倍の300~490mm/旬の降雨があった。梅雨明け後は各地で少雨となり、台風10号や全線の停滞によって宇和島市では9月上旬、須崎市では9月上旬および中旬に平年より多めの降水量となった他は、平年並みか平年より少ない降水量であった。

平均気温(図3b):4月、7月は平年より低め、5月、6月、8月および9月上旬は高めであった。

日照時間(図3c):4~6月までは平年並みか長めで、前線が停滞した7月は平年より短めになった。また、梅雨明け後の8月は長めとなったが、前線の停滞により9月中旬は平年より短めから平年並みであった。

平均風速(図3d):広島市と豊後高田市は平年より低めで、宇和島市は平年並み、須崎市は平年より高めで推移した。

② 海象

各県海域の海象データの推移を図4~11、平年偏差を表6、平年偏差の算出に用いたデータ期間、対象調査点、対象水深を表7に示す。

水温(図4):広島湾(5m, 5~9月)は14.7~25.4℃、山口県徳山湾(5m, 5~9月)は14.6~26.4℃、福岡県周防灘(5m, 5~8月)は17.0~26.1℃、大分県周防灘(5m, 5~8月)は16.9~28.0℃、大分県別府湾・豊後水道海域(10m, 5~8月)は16.1~21.9℃、愛媛県豊後水道海域(10m, 5~8月)は17.0~20.9℃、高知県宿毛湾(5m, 5~9月)は20.6~27.5℃、高知県浦ノ内湾(5m, 5~9月)は20.6~29.2℃で推移した。平年に比べ、広島湾や周防灘では8月の水温が低めであり、別府湾は6月の水温が低く、愛媛県豊後水道海域は6~8月の水温が低く、宿毛湾では7月の水温が低かった。

塩分(図5):広島湾(5m, 5~9月)は28.45~31.96、山口県徳山湾(5m, 5~9月)は、30.43~33.16、福岡県周防灘(5m, 5~8月)は29.02~32.57、大分県周防灘(5m, 5~8月)は28.48~32.51、大分県別府湾・豊後水道海域(10m, 5~8月)は32.07~33.60、愛媛県豊後水道海

域（10m, 5～8月）は33.24～34.08, 高知県宿毛湾（5m, 5～9月）は33.21～34.24, 高知県浦ノ内湾（5m, 5～9月）は27.12～33.36で推移した。豊後水道を除いた地域では7月の塩分濃度が平年より低く推移した。

透明度（図6）： 広島湾（5～9月）は1.4～6.9 m, 山口県徳山湾（5～9月）は2.8～6.3 m, 福岡県周防灘（5～8月）は2.8～5.6 m, 大分県周防灘（5～8月）は3.8～8.3 m, 大分県別府湾・豊後水道海域（5～8月）は8.8～12.1 m, 愛媛県豊後水道海域（5～8月）は9.7～15.9 m, 高知県宿毛湾（5～9月）は4.1～7.8 m, 高知県浦ノ内湾（5～9月）は1.2～4.3 mで推移した。

鉛直安定度（図7）： 広島湾（5～9月）は 24.9×10^{-5} ～ 107.1×10^{-5} , 山口県徳山湾（5～9月）は 8.2×10^{-5} ～ 49.4×10^{-5} , 福岡県周防灘（5～8月）は 3.7×10^{-5} ～ 38.2×10^{-5} , 大分県周防灘（5～8月）は 3.7×10^{-5} ～ 48.5×10^{-5} , 高知県浦ノ内湾（5～9月）は 10.4×10^{-5} ～ 115.0×10^{-5} で推移した。広島湾および浦ノ内湾では、7月のまとまった降雨の影響を受けて、鉛直安定度の著しい増大がみられた。

③ 水質

各県海域の水質データの推移を図8～11, 平年偏差を表6, 平年差の算出に用いたデータ期間, 対象調査点, 対象水深を表7に示す。

クロロフィル *a* 濃度（図8）： 広島湾（5m, 5～9月）は1.26～7.47 $\mu\text{g/L}$, 山口県徳山湾（5m, 5～9月）は1.57～5.13 $\mu\text{g/L}$, 福岡県周防灘（5m, 5～8月）は0.23～3.51 $\mu\text{g/L}$, 大分県周防灘（5m, 5～8月）は1.04～9.15 $\mu\text{g/L}$, 大分県別府湾・豊後水道海域（10m, 5～8月）は1.52～3.57 $\mu\text{g/L}$, 愛媛県豊後水道海域（10m, 5～8月）は0.30～1.12 $\mu\text{g/L}$, 高知県宿毛湾（10m, 5～9月）は0.42～3.41 $\mu\text{g/L}$, 高知県浦ノ内湾（5m, 5～9月）は0.71～14.75 $\mu\text{g/L}$ で推移した。

DO（最低値）（図9）： 広島湾（B-1 m, 5～9月）は18.1～83.0 %, 山口県徳山湾（B-1 m, 5～9月）は48.1～93.3 %, 福岡県周防灘（B-1 m, 5～8月）は51.6～99.4 %, 大分県周防灘（B-1 m, 5～8月）は37.4～98.8%, 大分県別府湾・豊後水道海域（10m, 5～8月）は85.1～101.4 %, 愛媛県豊後水道海域（10m, 5～8月）は83.3～98.9 %, 高知県宿毛湾（20m, 5～9月）は64.8～78.4 %, 高知県浦ノ内湾（B-1 m, 5～9月）は0.0～49.7 %で推移した。広島湾では8～9月に35 %以下に低下し, 高知県浦ノ内湾では6月以降著しく低かった。

DIN（図10）： 広島湾（5m, 5～9月）は0.24～4.08 μM , 山口県徳山湾（5m, 5～9月）は0.02～1.27 μM , 福岡県周防灘（5m, 5～8月）は0.70～1.80 μM , 大分県周防灘（5m, 5～8月）は0.02～4.74 μM , 大分県別府湾・豊後水道海域（10m, 5～8月）は0.33～1.95 μM , 愛媛県豊後水道海域（10m, 5～8月）は0.48～2.62 μM , 高知県宿毛湾（10m, 5～9月）は1.20～6.25 μM , 高知県浦ノ内湾（5m, 5～9月）は0.24～10.88 μM で推移した。広島湾, 周防灘, 浦ノ内湾の表層では7月上旬のまとまった降雨の影響を受けて, DINの増加がみられた。