

調査定点でも確認されなくなった。なお、片上湾で行った 7 月 26 日の別調査では 60 cells/mL となり期間中で最高値を示した。

- ・ 兵庫県海域(播磨灘北部)

6 月上旬に播磨灘北部沿岸域で初認された(最高細胞密度;0.7 cells/mL (6/7) 兵庫県海域, H30, 中層, H31, 底層)。7 月中旬以降細胞密度が増加し, 7 月 19 日には 3 地点で 100 cells/mL を上回り(最高細胞密度:154.7 cells/mL, 本調査外の臨時調査点), 赤潮化した。8 月初旬には低密度化した。

- ・ 大阪府海域(大阪湾)

C. marina, *C. antiqua* よりも 1 週間遅れて 7 月 19 日に初認(最高細胞密度;3 cells/mL, OS2, 5 m 層および 10 m 層, OS3, 5 m 層)された。以後増殖し, 7 月 26 日には 110 cells/mL, 8 月 2 日には 380 cells/mL となり *C. marina*, *C. antiqua* とともに赤潮化した。8 月 11 日には本事業外定点で最高 502 cells/mL となったものの, 以後減少した。なお, 8 月上旬には大阪府沿岸の漁港内等で *Chattonella* spp.による海水の着色が確認され, 畜養業者・海上釣堀からの持ち込みや水産技術センター職員の臨時採水による試水を検鏡した結果, 特に 8 月 3~6 日には局所的に数万 cells/mL の高密度の水塊が確認され, 畜養魚で一部斃死が確認された(表 4)。

Cochlodinium polykrikoides(図 19):6 月中旬に播磨灘南東部で初認された(最高細胞密度;0.04 cells/mL (6/14) 徳島県海域, T4, 1 m 層)。7 月中旬から 8 月下旬にかけて播磨灘北部および大阪湾で出現が確認されたものの, 期間中は低密度で推移した。

Karenia mikimotoi(図 20):6 月中旬に播磨灘北部で初認された(最高細胞密度;0.6 cells/mL (6/14) 兵庫県海域, BZ1, 表層)。8 月下旬に播磨灘南部においても 14.0 cells/mL で確認されたが((8/23) 香川県海域, K7, 表層), その後高密度化することはない, 期間中は低密度で推移した。

本事業の調査対象海域外における本種の出現状況を以下に示す。

- ・ 徳島県海域(播磨灘南東部)

鳴門市ウチノ海で 8 月初旬から増加し始め, 8 月 11 日~16 日にかけて高密度化し赤潮を形成した(最高細胞密度;11,750 cells/mL (8/11), 本調査定点外)。この赤潮により, 着色海域を航行した漁船の活け間の漁獲物が輸送中に斃死した(表 4)。なお, この赤潮が他の海域に波及することはない, 閉鎖的環境下での局所的な発生にとどまった。

- ・ 兵庫県海域(播磨灘北部)

8 月 11 日に紀伊水道の福良湾で, 兵庫県の警戒基準細胞密度には至らなかったものの, 2,326 cells/mL まで増加した。その後の高密度化は確認されなかった。

- ・ 大阪府海域(大阪湾)

1~3 月に少数の遊泳細胞が確認された。春季以降は, 5 月 31 日から確認され始めたものの, 以後 8 月までは数 cells/mL の低密度で推移した。本事業期間中の最高細胞密度は 3 cells/mL であった((6/28) 大阪府海域, St. 2, 表層)。*Chattonella* spp.が減少した後, 9 月に入ると増殖を開始し, 9 月 6 日に 39 cells/mL, 9 月 13 日に 74 cells/mL, 9 月 21 日には注意密度を超過し 179 cells/mL となったが, その後速やかに減少した。漁業被害の報告はなかった。

Heterocapsa circularisquama:期間中における出現は確認されなかった。

その他(図 21): *Skeletonema* spp.や *Chaetoceros* spp.等で構成された珪藻類が優占して出現した。

⑤ まとめ

2021 年 6～8 月の瀬戸内海東部海域における赤潮発生状況を表 4 に示した。発生件数は 10 件で、*Chattonella antiqua* および *C. marina* の 2 種複合によるものが 1 件、*C. antiqua* および *C. ovata* の 2 種複合によるものが 1 件、*C. antiqua*, *C. marina* および *C. ovata* の 3 種複合によるものが 6 件であった。この赤潮による漁業被害は、大阪府海域、兵庫県海域、香川県海域および徳島県海域で確認された。また、徳島県海域では *Heterosigma akashiwo*, *Karenia mikimotoi* による赤潮が確認されたが、その他の有害種については、調査期間中の高密度化は確認されなかった。

2) 冬季海洋モニタリング調査

① 気象

概況: 11 月の近畿地方は、高気圧に覆われて晴れた日が多かったが、上旬や下旬には寒冷前線が通過し、大雨や荒れた天候となった所があった。寒冷前線の通過後は、寒気や気圧の谷の影響で雨となった所があった。12 月は数日の周期で低気圧が通過し、低気圧の通過後は冬型の気圧配置となり、晴れの日が多かった。1 月は冬型の気圧配置となることが多く、強い寒気の影響で荒れた天気の日が多かった。

気象庁観測結果: 11 月から 2 月上旬の気温、日平均風速、降水量および全天日射量の旬平均値・旬合計値と旬平年値の推移を図 22～25 に示した。気温は、1 月上旬まで平年より高いか、平年並みで推移したが、1 月中旬には平年を下回り、その後は平年並みで推移した(図 22)。日平均風速は、11～12 月には概ね平年より多く推移したが、その後は 1 月上旬と下旬は平年より少なく、1 月中旬と 2 月上旬は多かった(図 23)。降水量は、11 月は平年よりかなり多かったものの、12 月は平年並みであり、1～2 月上旬までは平年より少なかった(図 24)。全天日射量は、期間中、概ね平年を上回った(図 25)。

② 海象

水温(図 26): 11 月上旬は 21℃ 前後、12 月上旬は 16～17℃、1 月上旬は 10～12℃、2 月上旬は 8～10℃ であった。大阪湾は、11 月から 2 月にかけて表層より底層の水温が 1～2℃ 程度高く、他の海域と比べて表底差が大きかった。大阪湾北部の定点では河川水の影響が大きく、特に表層で低水温、低塩分であったことにより、この表底差が生じたと推察された。

塩分(図 27): 大阪湾を除く海域では 11 月から 2 月にかけて塩分が緩やかに上昇し、2 月上旬には 32 前後となった。大阪湾では表層の塩分が 30 前後で推移した一方、底層は 32 前後と、期間を通じて他の海域より表底差が大きかった。水温と同様、河川水が影響したと推察された。

透明度(図 28): 11～2 月の大阪湾の透明度は 4～5 m、播磨灘北部で 5～7 m、備讃瀬戸は 4～8 m で推移した。播磨灘南部は 7～11 m と他の海域に比べ高く、これは植物プランクトンの発生が少なかったことが影響したと考えられた。

③ 水質

栄養塩(図 29～31): 播磨灘, 備讃瀬戸ではノリ漁期開始以前～本事業の調査期間を通じて栄養塩濃度が例年に比べて平年並み～低めで推移した。DIN は播磨灘北部で特に低く, 2 μM 以下で推移した。備讃瀬戸における DIN は, 11 月には 6 μM 前後の濃度で推移したものの, 12～2 月にかけて大きく低下し, 2 月には 1 μM 未満となった。PO₄-P は播磨灘, 備讃瀬戸ともに 0.5 μM 前後で推移した。SiO₂-Si は播磨灘では 3～10 μM 前後で, 備讃瀬戸では 3～17 μM 前後で推移した。11 月の降水量が平年に比べて多かったものの, 播磨灘および備讃瀬戸全域で同時期に *Coscinodiscus wailesii* が高密度に発生したこと(後述)が両海域における栄養塩低下の一因となったと考えられた。大阪湾では, DIN は 3～20 μM 前後, PO₄-P は 0.2～1.0 μM 前後, SiO₂-Si は 1～20 μM 前後で推移したが, 表層と底層で濃度差がみられた。

播磨灘および備讃瀬戸における冬季の栄養塩低下の一因として, 西方海域からの貧栄養水塊の影響が考えられている(阿保ら 2006)。本年度の燧灘(弓削)の DIN 濃度は, 12 月上旬から中旬にかけては概ね 4～5 μM 以上で推移したものの, その後は徐々に低下し, 1 月上旬には 1 μM 未満の調査定点もみられた(愛媛県令和 3 年度ノリ養殖情報, <https://www.pref.ehime.jp/h35149/norijyouhou/r03noritop.html>)。12 月以降は冬型の気圧配置になることが多く(前述), 高松市および姫路市における西風成分(図 34)も同時期に卓越したことから瀬戸内海における西から東方向への通過流量は大きかったと予想される。岡山県および香川県海域における栄養塩濃度の低下に対する貧栄養水塊の影響については, 後述の *C. wailesii* の発生状況と併せて述べる。

クロロフィル *a*(図 32): 大阪湾を除いて期間中の変動が小さかった。播磨灘北部では 1 月に一部定点においてクロロフィル *a* 濃度の増加がみられたが, これはこの時期に高密度化していた *Chaetoceros* spp. や *Skeletonema* spp. 等の小型珪藻類を反映していたと考えられた。大阪湾では, 11 月と 1 月にクロロフィル *a* 濃度が大きく増加した。これらは 11 月に高密度化していた *C. wailesii*(後述)や *Skeletonema* spp. 等の影響を受けていたと考えられた。

DO(図 33): 大阪湾を除いて表層, 底層ともに大きな変動がみられなかった。大阪湾では *Skeletonema* spp. 等の小型珪藻の大量発生に起因すると思われる高い値や大きな変動がみられた。また, 大阪湾は表底差が他の海域と比べ大きい傾向があった。

④ ノリ色落ち原因種

Coscinodiscus wailesii(図 35): 播磨灘, 備讃瀬戸および大阪湾で高密度に発生した。増殖のピークは, 備讃瀬戸および大阪湾では 11 月, 播磨灘北部では 11～12 月, 播磨灘南部では 12 月にみられたが, 1 月には全海域で 100 cells/L 未満となり, その後は低密度で推移した。本種の生態として, 比較的栄養要求性が高いこと(西川 2011), 沈降速度が大きいことブルームの形成に鉛直混合が重要であることや日射量の減少によって増殖が顕著に阻害されること(長井 2000)が報告されている。11 月上旬以降, 播磨灘と備讃瀬戸では鉛直混合が発生していた(図 26, 27)。また, 播磨灘北部を除く 11～12 月の栄養塩レベル(DIN)は概ね 2 μM 以上の濃度で推移しており, 加えて全天日射量が平年より多く, 11～12 月の透明度も播磨灘では約 6～11 m, 備讃瀬戸では約 5～8 m, 大阪湾では約 4～5 m と高かった(図 28)ことが, 本種の増殖に適していたと考えられた。その後, 12 月上旬から1月中旬の光

条件の悪化(日射量の減少, 図 25)と水温の低下に伴い(図 26), ブルームが衰退したものと推察された。なお, 本種は, 本事業調査に先行する 10 月には播磨灘および備讃瀬戸において底層を中心に大量発生が確認され, これに伴う栄養塩濃度の急激な低下があった。これは, 2020 年漁期と同様の傾向であるが, 播磨灘で本種が夏季から 9 月上旬に大量発生することは過去の報告(長井 2000 等)では希な現象であり, 今後の出現動向に注意する必要がある。各府県海域における本種の出現状況は以下の通り。

- ・ 徳島県海域(播磨灘南部)

徳島県海域では, 10 月初旬に高密度に確認され(最高細胞密度; 1,790 cells/L (10/7) 徳島県海域, St. 4, 底層), 11 月初旬に一旦減少したものの, 11 月中旬には再び高密度化した(最高細胞密度; 1,160 cells/L (11/18), 徳島県海域, St. 4, 中層)。12 月初旬には再び減少し, 以降は低密度で推移した。また, 調査地点 St. 4 の各層における DIN の平均値は, *C. wailesii* が高密度化していた 10 月初旬～11 月中旬は概ね 2 μM 未満で推移していたが, *C. wailesii* が減少した 12 月初旬以降は 1 月上旬にかけて約 3.5 μM まで増加した(図 29, 35)。このことから, *C. wailesii* の高密度化による栄養塩の消費が DIN 減少の一因となっている可能性が示唆された。

- ・ 香川県海域(播磨灘南部・備讃瀬戸)

C. wailesii は, 本事業による調査開始の 11 月には播磨灘南部, 備讃瀬戸ともに高密度に出現していた(最高細胞密度; 2,765 cells/L (11/4) 香川県海域, KA21, 底層)。12 月の調査では細胞密度の低下が確認され, 1 月にはすべての調査定点で 100 cells/L 未満となり, その後は低密度で推移した。11～12 月の DIN は, 播磨灘南部では 3 μM 前後, 備讃瀬戸では 4～6 μM 前後と例年より低い濃度で推移した。この要因の一つには, 同期間に高密度化していた本種の消費による影響が考えられた。

香川県では毎年 10～2 月に週 1 回の頻度でノリ養殖漁場調査を行っている(本事業以外の調査)。当該事業の備讃瀬戸における結果によると, *C. wailesii* は 10 月上旬に 100 cells/L を超える細胞密度で初認され, 同月下旬に最高細胞密度 6,500 cells/L まで増殖した後に減少し, 12 月上旬以降は低密度で推移した。今漁期の *C. wailesii* の発生規模は例年より大きく, ノリの色落ち被害が発生した 2020 年漁期と同程度であった。備讃瀬戸(高松沖)のノリ養殖漁場における DIN は, 10 月下旬には平年並み(8 μM 前後)の濃度で推移したが, 11 月上旬に平年を下回る 3 μM 程度まで低下した。これは, 同期間に高密度化していた本種の消費によるものと推察された。その後, DIN は平年よりやや低め(3～5 μM 程度)の濃度で推移したが, 12 月下旬から 1 月中旬にかけて 1 μM 未満まで大きく低下した。これは, 12～1 月の高松市では偏西風が卓越していたこと(図 34), 12 月下旬から 1 月中旬にかけて備讃瀬戸西部では急激な塩分の上昇がみられたことから, 同期間に出現していた *Chaetoceros* spp.等の小型珪藻類による消費と併せて, 西方からの水塊移動による影響(阿保ら 2006)もあったものと推察される。2022 年 1 月末時点で, 備讃瀬戸を中心とした県内多くの漁場で養殖ノリの色落ち被害が発生している。

- ・ 岡山県海域(播磨灘北部・備讃瀬戸)

本事業の調査に先行する 10 月の調査時には岡山県海域全域で本種が確認され(最高細胞密度 690 cells/L (10/6), OY2, 表層), 11 月上旬には 1,000 cells/L を超えた定点が全域でみられた(最高細胞密度; 1,440 cells/L (11/5), OY5 表層)。11 月下旬においても播磨

灘北西部で 1,000 cells/L を超える定点がみられた(最高細胞密度; 1,560 cells/L (11/30), OY3, 底層)。1 月上旬には本調査定点全域で 10 cells/L 以下となった。

同時期の DIN の推移を見ると、本事業調査定点における DIN の平均値は 11 月上旬で 2.1 μM , 11 月下旬で 3.2 μM であり、本県海域の DIN の平年値(11 月 9.1 μM , 12 月 7.8 μM) (高木ら 2021) を大きく下回っていた。その後、本種が低密度化した 12 月中旬は、DIN の平均値は 5.9 μM に増加したが、1 月下旬には 1.0 μM を下回った(本調査外定点)。以上のことから、本県海域では 11 月上旬から 12 月中旬にかけて本種の高密度化により DIN が消費されたと考えられた。また、本種が低密度化した 12 月下旬以降の DIN の下降は、偏西風が卓越していたこと(図 34)、播磨灘北部および備讃瀬戸で塩分の上昇がみられたことから(図 27)、西方からの貧栄養水塊による影響(阿保ら 2006)の可能性が考えられた。

・ 兵庫県海域(播磨灘北部)

9 月 1 日、2 日の調査において播磨灘全域で大規模な発生が確認された(本調査外の調査、最高細胞密度; 3,000 cells/L, 兵庫県海域, H9)。10 月 4 日、5 日の調査でも継続して発生が確認された(本調査外の調査、最高細胞密度; 9,150 cells/L, 兵庫県海域, H10)。11 月 1 日、2 日の観測では発生が中心が灘の北部に移った(最高細胞密度; 1,460 cells/L, 兵庫県海域, H4)。11 月 29 日、30 日の調査では減少傾向となり(最高細胞密度; 1,280 cells/L, 兵庫県海域, H4)、翌週には低密度化した(最高細胞密度; 10 cells/L (12/9) 兵庫県海域, H28)。

秋季の本種の大量発生は 2019 年にも発生したが、本年度はより発生期間が長期化した。この時期は鉛直混合で表層の栄養塩濃度が増加するが、近年は平年に比べて低いレベルにとどまることが多くなっており、同時期に発生する本種の増殖の影響を受けることが多くなっていると考えられる。本年においても 9 月 1 日、2 日の調査では表層の DIN の平均値は 0.23 μM , 10 月 4 日、5 日の調査では表層の DIN の平均値は 0.35 μM と低濃度で推移し、同種が低密度化した 12 月初旬の 12 月 9 日に表層の DIN が 1.4~4.4 μM に回復するまで、低濃度が続いた。

・ 大阪府海域(大阪湾)

大阪府海域では、計数は実施していないものの *Coscinodiscus* spp. は 10 月からプランクトンネットサンプルに大量に混入しており、*C. wailesii* は 11 月の調査時には OS3(最南部の定点)の中底層(5 m 層, 10 m 層, 底層)で 2,977~3,800 cells/L と高密度に分布していた。同月には、OS1(最北部の定点)では 12~302 cells/L, OS2 では 17~110 cells/L であった。OS3 では 12 月になると 248~604 cells/L に、1 月には 43~87 cells/L に減少した。なお、OS1 の DIN は 11 月には 2.4~3.4 μM , 12 月には 6.5~6.8 μM , 1 月には 6.0~7.0 μM となっており、11 月の *C. wailesii* 高密度化の際に栄養塩が消費されている様子が見てとれた。

近年 11 月に *C. wailesii* が高密度化する傾向が続いており、特に 1,500 cells/L を超えて高密度となった 2019 年の OS2, 2020 年, 2021 年の OS3 では、その後の 12 月と比較して DIN が低濃度となっていた。この様に、*C. wailesii* の増殖は湾内の栄養塩の減少に寄与することが示唆されるものの、大阪湾では *C. wailesii* (やその他の珪藻) が減衰すると比較的速やかに栄養塩濃度は回復する。

Eucampia zodiacus (図 36): 11 月は備讃瀬戸において 6 cells/mL ((11/4) 香川県海域, KA19,

表層)の最高細胞密度で確認されたが、それ以外の調査定点では確認されなかった。12月および1月の調査では、播磨灘北部においてそれぞれ 2.7 cells/mL ((11/30)兵庫県海域, H32, 底層)および 6.0 cells/mL ((1/4)兵庫県海域, H32, 表層)の最高細胞密度で確認されたが、それ以外の調査定点では不検出または 1 cell/mL 以下の細胞密度で推移した。本年漁期は、2021 年 2 月上旬現在までの暫定的な発生状況について、平成 25 年度の報告書(高木ら 2014b)に基づく発生基準をあてはめると、各海域ともに B(局所発生年)となる見込みである。

その他の種類:

- ・ 播磨灘南部(徳島県海域)では、*Chaetoceros* spp.等の小型珪藻が低密度にみられた程度で、期間を通してプランクトンが少なかった。
- ・ 播磨灘南部および備讃瀬戸(香川県海域)では期間を通してプランクトンは少なく、*Chaetoceros* spp.や *Leptocylindrus* spp.を中心とした小型珪藻が低密度にみられた程度であった。
- ・ 播磨灘北部(兵庫県海域)では、1 月上旬以降、*Skeletonema* spp., *Chaetoceros* spp.を中心とした小型珪藻が多く出現し、2 月上旬はそれらに加えて *Rhizosolenia* spp., *Leptocylindrus danicus* も確認された。
- ・ 1 月以降、播磨灘北部および備讃瀬戸(岡山県西部海域)で *Rhizosolenia* spp.や *Chaetoceros* spp.を中心とした小型珪藻が発生していた。
- ・ 大阪湾(大阪府海域)では、湾奥部で 11 月上旬に *Skeletonema* spp. (最高細胞密度; 2.10×10^4 cells/mL) が赤潮を形成した。

⑤ まとめ

今年度は 10~12 月に瀬戸内海東部の広い範囲で *C. wailesii* が大量発生したこと、調査期間を通じて *E. zodiacus* は各海域ともに低密度発生であったことが特徴的な事象であった。播磨灘および備讃瀬戸(兵庫県, 香川県海域)の一部漁場では、*C. wailesii* の消費による栄養塩濃度の低下から、養殖ノリの育苗や本張り開始時期に影響が生じた。漁期の前半(11~1 月上旬)は播磨灘北部では DIN が 2 μ M を下回ったが、他の海域では 2 μ M 以上を維持しており、全体的に栄養塩濃度の極度な低下はみられず、ノリ養殖現場においても甚大な色落ち被害は確認されなかった。しかし、1 月中旬以降は備讃瀬戸および播磨灘南部を中心に栄養塩の急激な低下によるノリの色落ち被害が確認され、色調の大幅な低下が報告されている海域もあることから、今後の動向に注視する必要がある。

3) 有害赤潮発生シナリオおよび発生予察技術の検証

① シャットネラ赤潮

- ・ 発生予察の検証

近年の局所的なシャットネラ赤潮は過去の発生シナリオと適合しなかった(高木ら 2014a)ことから、1999~2014 年までの環境条件データセットを用いた判別解析により毎年の発生状況を予察するモデルを構築し、抽出された要素に基づく発生シナリオを作成した(長谷川ら 2018a)。各府県海域における本年度取得したデータによる予察結果およびシナリオ適合状況を以下に示す。なお、本予察モデルは *Chattonella antiqua* および *C. marina* の 2 種による赤潮を対象と

し、生理生態学的特性の異なる *C. ovata* の発生履歴は勘案されていない(秋山ら 2021)。

- ・ 予察モデルの高精度化

現在、各府県が運用している予察モデルは構築後 6 年以上が経過することから、各モデルの予察精度を検証し、モデルの高精度化に取り組んだ。予察精度の検証は、全てのモデル(教師データ期間:1999~2014 年)について、2015~2021 年の的中率と判断保留(△)予察の含有率を調べた。予察モデルの高精度化は、長谷川ら(2018a)の方法に準じ、説明変数の再選択や教師データ期間の変更等により行った。新たに構築・改良されたモデルの予察精度(汎化性能)は、時系列データに対する交差検証により確認した。ここでは、予察モデルごとに 1999~2021 年の環境条件データセットを教師データ(学習データ)とテストデータに区分した。

表 5 に現在運用中の各モデルにおける予察精度の検証結果を示した。2015~2021 年の各モデルにおける予察精度は、大部分は高い精度で運用可能なモデルを構築できていたものの、一部分の的中率の低いモデルや判断保留(△)予察の含有率が高いモデルもみられた。各モデルにおける高精度化の取り組み状況(高精度化の検証結果)を表 6 に示した。今回の新たなモデルの構築・改良によりの中率の向上や判断保留(△)予察含有率の改善が認められたモデルがある一方、既存のモデルにより高い予察性能が見込まれるモデルもあった。次年度以降、各府県が運用を予定している予察モデルの一覧を表 7 に示した。今後は、モデルの予察精度について定期的な確認を行いながら運用し、本予察モデルによる予察結果を漁業現場に実装させる仕組みについても検討する。以下に、各府県海域における予察モデル高精度化の取り組み結果を示す。

1. 徳島県海域(播磨灘南東部)

- ・ 発生予察の検証

赤潮発生予察モデルの構築には 1999~2014 年までの環境条件(水温(6 月, St. 4, 1 m 層), DIN(6 月, St. 4, 10 m 層), 珪藻の細胞数(7 月上旬, St. 4, 0-5 層), 降水量(徳島市 5 月))を使用している。2021 年に適用した結果、降水量を説明変数とするモデルで「×(非発生)」, 水温と DIN を説明変数とするモデルおよび珪藻の細胞密度を説明変数とするモデルで「△(判断保留)」となった(表 5, 図 37)。2021 年夏季, シャットネラ赤潮は発生し、いずれの予察モデルも予察を的中させることができなかった。

前事業で作成した赤潮発生シナリオを図 38 に示した。2021 年 5 月の降水量は、解析に用いた期間(1999~2014 年)における赤潮発生時(2003, 2011)の平均値である 311.8 mm に対して 141.5 mm と少なく、6 月の表層の DIN も発生年の平均値である 1.97 μM に対して、0.81 μM と小さかった。しかし、7 月上旬の珪藻細胞密度は 7 月 5 日以降 10 cells/mL 未満と極端に低密度で推移しており、これがシャットネラ赤潮の発生に寄与したと考えられた。

- ・ 予察モデルの高精度化

前事業までに構築した 3 つのモデルについて、教師データ(1999~2014 年)における判別率と判断保留(△)予察含有率および 2015~2021 年の 7 年間のデータを用いた精度検証結果を表 5 に示す。検証期間における的中率は「降水量(徳島市 5 月)」の 1 変数のモデルで 85.7%(6/7), 「水温(6 月, St. 4, 1 m 層)」と「DIN(6 月, St. 4, 10 m 層)」の 2 変数のモデルで 100%(6/6), 「珪藻細胞密度(7 月上旬, St. 4, 0-5 m 層)」の 1 変数のモデルで 100%(6/6)となり、いずれのモデルも概ね高い精度で運用できているものの、「水温, DIN」および「珪藻細胞密度」のモデルについては教師データにおける判断保留(△)予察含有率がそれぞれ

37.5% (6/16), 31.3% (5/16)と高い。特に「珪藻細胞密度」のモデルでは教師データにおける赤潮発生年を一度も的中できていない。以上の検証結果を踏まえ、「水温, DIN」および「珪藻細胞密度」の2つのモデルについて改良(新たな予察モデルの構築)を試みた。

モデルの高精度化は、教師データの拡充および長谷川ら(2018a)図 37の方法に準じた説明変数の再選択や解析方法の変更により行った。なお、教師データに含まれる赤潮発生回数が少なれば選択できる説明変数や解析手法が限定されてしまい、モデルの改良が見込めない可能性があるため、2015年以降で唯一の発生年である2021年を教師データに加えた場合も含めて検証を行った。

まず、「水温, DIN」のモデルでは、教師データを拡充すると、各要素の分布形状や等分散が変化したため、非線形判別分析を行う必要が生じた。しかし、2変数の非線形判別分析を行うためには赤潮発生年が3年以上必要であるため、2021年を教師データに含めたところ、教師データ(1999～2021年)における判別率が100% (19/19), 判断保留(△)予察含有率が17.4% (4/23)となり、従来のモデルよりも判断保留(△)予察含有率を減少させることができた。

次に、「珪藻細胞密度」のモデルでは、2021年を教師データに加えることで2変数の非線形判別分析を行うことが可能になることがわかった。そこで、環境条件の中から、要素間の多重共線性を考慮しつつ、徳島県の赤潮発生シナリオに沿うものを抽出し、「水温(6月, St. 4, 5 m 層)」を組み合わせたモデルを構築した。このモデルでは、教師データ(1999～2021年)における判別率が100% (23/23), 判断保留(△)予察含有率が0%となり、従来のモデルよりも判断保留(△)予察含有率を減少させることができた。

今回2つの予察モデルについて改良を行ったところ、両モデルとも教師データにおける判断保留(△)予察含有率を減少させることができ、予察精度の向上が期待された。2変数による改良モデルを構築する上で、1999～2021年を教師データとして解析に供したため、時系列分割交差検証は行えなかった。そのため、モデルの有効性については来年度以降のデータを用いて検証していく必要がある。

2. 香川県海域(播磨灘南西部)

・発生予察の検証

前事業では、1999～2014年のデータセットを用いてシャットネラ赤潮発生予察モデルを構築した。図 39 に香川県海域のシャットネラ赤潮発生シナリオを示す。香川県海域では、5月の降水量, 塩分, $\text{PO}_4\text{-P}$ を説明変数とする判別分析を適用して5つのモデルによる予察を実施している。2021年の結果を表 5 に、代表的な予察モデル(説明変数;5月塩分)の解析例を図 40 に示した。

本年は、シャットネラ赤潮の非発生年であったが、2つのモデル(「5月塩分」の1変数, 「5月の降水量, $\text{PO}_4\text{-P}$ 」の2変数)による予察は的中したもの、他3つのモデルでは判断保留(△)と予察された(表 5)。香川県海域の発生シナリオでは5月降水量の多い年にシャットネラ赤潮が発生しやすいとされ、予察に用いる説明変数にも降水量の影響を受けやすいパラメータが選択されている。本年は5月にまとまった降雨(月合計 124 mm)があったものの、これまでの赤潮発生年と比較して若干少ない降水量であったことが判断保留(△)予察の増加に影響したものと推察される。

・予察モデルの高精度化

前事業までに構築した 5 つのモデルの予察精度を検証したところ、全てのモデルでの中率は 100% (判断保留 (△) 予察年を除いた値) となった一方、判断保留 (△) 予察の含有率が 40% を超えるモデルもみられた (表 5)。また、近年のシャットネラ赤潮発生年 (2018 年) における中状況を見ると、「5 月 $\text{PO}_4\text{-P}$ 」の 1 変数によるモデルを除く他 4 つのモデルで判断保留 (△) 予察となり、実際の赤潮発生年を上手く表現しきれていないことが分かった。以上の検証結果を踏まえ、一定の精度で運用可能と思われる「5 月の降水量, $\text{PO}_4\text{-P}$ 」の 2 変数によるモデルを除く他 4 つのモデルについて、説明変数の再選択や教師データ期間の変更による改良 (新たな予察モデルの構築) を試みた。

新たな予察モデルは、長谷川ら (2018a) の方法に準じ、1999～2018 年の環境条件データセットより「5 月降水量, 6 月 $\text{PO}_4\text{-P}$, 7 月珪藻細胞密度」の 3 変数を抽出し、非線形判別分析により構築した (表 6)。本モデルの予察精度を時系列分割交差検証 (前事業で使用した 1999～2014 年データに対して、予察年の前年までを判別データとして加えて精度検証を行う方法) により確認したところ、2019, 2020 年の予察は的中した一方、2021 年は発生 (○) 予察に対して実際の海域では赤潮非発生年であったことから、予察は非的中 (×) の結果となった。2021 年の香川県海域は *C. ovata* を優占種としたシャットネラ 3 種複合赤潮の発生年であり、本モデルの予察対象としている *C. antiqua* および *C. marina* にとって至適環境条件にあったものの、*C. ovata* の高密度化により他 2 種の増殖が抑制されたものと推察される。また、判別期間における判断保留 (△) 予察の含有率は、改良対象とした前事業の 4 つのモデルでは 37.5～62.5% であったのに対し、新たなモデルでは最大 9.1% (教師データ期間; 1999～2020 年) と低下した (表 6) ことから、今回新たに構築した予察モデルは高い精度で運用可能と思われる。

次年度以降は、前事業までに構築した「5 月の降水量, $\text{PO}_4\text{-P}$ 」の 2 変数によるモデルを早期予察、今回の「5 月降水量, 6 月 $\text{PO}_4\text{-P}$, 7 月珪藻細胞密度」の 3 変数によるモデルを直前予察として試行的に運用を行う (表 7)。それぞれの予察モデルにおける教師データ期間は、的中率および判断保留 (△) 予察含有率の観点より検討したところ、早期予察では 1999～2014 年、直前予察では 1999 年～予察対象年の前年までのデータによる運用とする。ただし、近年の本海域におけるシャットネラ赤潮の発生パターンには、*C. ovata* 増殖規模拡大などの変化がみられることから、引き続き予察精度の検証と高精度化に取り組む必要がある。

3. 岡山県海域 (播磨灘北西部)

・ 発生予察の検証

前事業で岡山県海域の 1999～2014 年の 5 月表層水温, 表層塩分, 6 月降水量を説明変数とする 3 つのシャットネラ赤潮発生モデルを作成した。図 41 に岡山県海域のシャットネラ赤潮発生シナリオを示す。

予察モデルを 2021 年に適応したところ、5 月表層水温, 表層塩分は平年並み, 6 月降水量は平年より多めであったため、「△ (判断保留)」または「× (非発生)」と予測されたが (図 42), 2021 年は *C. antiqua* および *C. marina* が本県基準 (100 cells/mL 以上を発生年) を超えたため「発生年」となり予察は的中しなかった。これは、*Chattonella* spp. 栄養細胞の初認時期が発生予察をする以前の 6 月中旬であったことや、予察後の 7 月上旬のまとまった降雨が *Chattonella* spp. 発生のきっかけになったことから、予察が困難であった可能性が考えられた。

・ 予察モデルの高精度化

前事業で構築した 1999～2014 年のデータを用いた予察モデルについて、2015～2021 年の 7 年間のデータを用いて精度検証を行った。「5 月塩分 (St. 2, 0.5 m 層)」、5 月水温 (St. 2, 0.5 m 層)」および「5 月塩分 (St. 2, 0.5 m 層)」、5 月水温 (St. 2, 0.5 m 層)」、6 月降水量 (姫路)」を指標とした予察モデルにおいて、判断保留 (△) 予察含有率が 70%を超え、明確な予察ができなかった。また、「5 月塩分 (St. 2, 0.5 m 層)」、6 月降水量 (姫路)」を指標とした予察モデルは、判断保留 (△) 予察含有率は 0%であったが、的中率 (判断保留 (△) 予察年を除いた値) は 57%であり、実用化するためには予察精度の向上が必要と考えられた (表 5)。

次に、2015 年以降のデータを教師データとして追加し、的中率が向上するかを検証した。今回は予察年の前年までを判別データとする時系列分割交差検証を実施した。すなわち、2016 年が予察 (検証) 年の場合は 1999～2015 年を教師データ、2017 年が予察年の場合は 1999～2016 年を教師データという形で 1 年ずつデータを追加し、2021 年を予察する場合には 1999～2020 年を教師データとして使用した。なお、使用した説明変数は前事業と同じ「5 月塩分 (St. 2, 0.5 m 層)」、「5 月水温 (St. 2, 0.5 m 層)」、「6 月降水量 (姫路)」を使用し、判別手法 (線形・非線形) も同じものを使用した。これらの結果、いずれの予察モデルにおいても的中率が 40%以下もしくは判断保留 (△) 予察含有率が 70%以上となった。また、教師データ期間を最も長期 (1999～2020 年) にした場合では、教師データ期間中の判断保留 (△) 予察含有率はいずれのモデルでも 82%以上となり、予察精度は向上していなかった。これらのことから、近年のシャットネラ赤潮の発生・非発生と説明変数の関係性が、現モデルの教師データ期間 (1999～2014 年) から変化している可能性が考えられた。

予察モデルの説明変数を再検討するため、長谷川ら (2018a) 図 37 の方法に準じ解析を行った。まず、現モデルの教師データ期間 (1999～2014 年) と直近 16 年間 (2006～2021 年) のデータセットについて、5～7 月の水質および気象等の 39 の環境指標をそれぞれシャットネラ赤潮の発生・非発生年に分けてマン・ホイットニーの U 検定を行った。その結果、1999～2014 年のデータセットでは「5 月塩分 (St. 2, 0.5 m 層)」、「5 月 DIN (St. 2, 0.5 m 層)」、「6 月降水量 (姫路)」、「6 月 $\text{PO}_4\text{-P}$ (St. 2, 0.5 m 層)」に有意差 ($p < 0.1$) がみられ、2006～2021 年のデータセットでは「5 月塩分 (St. 2, 0.5 m 層)」、「5 月水温 (St. 2, 0.5 m 層)」、「5 月 $\text{PO}_4\text{-P}$ (St. 2, 0.5 m 層)」、「6 月 DIN (St. 2, 0.5 m 層)」、「6 月 DSi (St. 2, 0.5 m 層)」、「7 月水温 (St. 2, B-1 m 層)」で有意な差 ($p < 0.1$) がみられた。このように、両データセットにおいて有意差がみられた項目に違いがみられたが、本県のシナリオでは 6 月の降水量が少ないと陸水の流入が少なく、海域への DIN 供給が不足することで (競合となる) 珪藻の増殖が抑制されることが *C. antiqua* および *C. marina* の増殖の一因としており (西岡ら 2017)、概ねそれらに沿った指標が有意であったと考えられた。一方、底層水温は *C. antiqua* および *C. marina* のシスト発芽の重要な因子 (今井 2012) であることから、「7 月水温 (St. 2, B-1 m 層)」は有効な説明変数になる可能性がある。以上を踏まえ、多重共線性を考慮した上で「5 月塩分 (St. 2, 0.5 m 層)」、5 月水温 (St. 2, 0.5 m 層)」、6 月 DIN (St. 2, 0.5 m 層)」および「5 月塩分 (St. 2, 0.5 m 層)」、5 月水温 (St. 2, 0.5 m 層)」、7 月水温 (St. 2, B-1 m 層)」を説明変数とした予察モデルを構築した。そして、2019～2021 年の 3 か年を検証データ、2006 年から予察の前年までを教師データとして時系列分割交差検証を行った。その結果、2019, 2020 年での的中したもの、2021 年では的中しなかった。一方、判断保留 (△) 予察率はいずれも 0%であった (表 6)。発生年の的中率については今後も検証が必要である。

次年度以降は、「5月塩分(St. 2, 0.5 m層), 5月水温(St. 2, 0.5 m層), 6月DIN(St. 2, 0.5 m層)」を早期予察, 「5月塩分(St. 2, 0.5 m層), 5月水温(St. 2, 0.5 m層), 7月水温(St. 2, B-1 m層)」を直前予察とした新たな予察モデルを試行運用する(表 7)。それぞれの予察モデルにおける教師データ期間は, 長期変動の影響を考慮し, 予察対象年の前年から 16 年間のデータで運用し, 精度を検証する。

4. 兵庫県海域(播磨灘北東部)

・ 発生予察の検証

前事業では, 1999~2014 年のデータを用いて赤潮発生予察モデルを構築した。図 43 に兵庫県海域のシャットネラ赤潮発生シナリオを示した。兵庫県海域では, 5 月の表層水温, 底層水温, 6 月または 7 月の珪藻密度を説明変数とする判別分析を適用して予察を実施している。2021 年の予察結果を図 44 に示した。なお, ここでは, 長谷川ら(2018a)で示されたとおり, 珪藻密度のデータ獲得時期別に, 6 月上旬時点での予察を早期予察, 7 月上旬時点での予察を直前予察とした。

本年の予測結果では底層水温が高く, 6 月, 7 月の珪藻密度が高かったことから非発生年と予察されたが, 両モデルで予察は的中しなかった。海域の成層化が進行し, 底層の栄養塩濃度が上昇したこと, 海域の珪藻密度が大きくなっているにもかかわらず *Chattonella* spp.の増加が続いたことが, 予察の的中しなかった要因と考えられる。本年のように珪藻が一定の密度で発生している場合に *Chattonella* spp.が赤潮化するかどうかを左右する説明変数を探し出す必要がある。

・ 予察モデルの高精度化

兵庫県海域では, 5 月の表層水温, 底層水温, 6 月の珪藻密度を説明変数とする早期, 5 月の表層水温, 底層水温, 7 月の珪藻密度を説明変数とする直前, として予察を実施している。これは, シャットネラ赤潮の発生年は播磨灘代表地点(H2)の 5 月の表層水温が高く, 底層水温が低く, 珪藻密度が低い, との特徴をモデル化したものである。1999~2014 年のデータを用いて構築したこの赤潮発生予察モデルは構築後 6 年となり, この間的中しなかった年もあったことから, モデルの高精度化に取り組んだ。

高精度化にあたっては, まず赤潮発生より以前に入手可能であることを念頭に整理した 1999~2020 年の 65 種の観測・調査データ種から発生・非発生の類型別に統計的に有意な差, または分布形式に差異があるものの説明変数としての抽出を検討した。検討にあたっては, 説明変数の多重共線性の確認を行った。これと並行して, 現状の予察モデルに, 各説明変数の 2015 年から 2019 年まで 1 年ごとのデータを 1999~2014 年の教師データに追加して, 各説明変数について発生年と非発生年の差があるかマン・ホイットニーの *U* 検定を行ったうえで, 翌年の予察を行い, 予察状況を検証した。

その結果, 説明変数の抽出では現状用いている 5 月の表層水温, 底層水温, 6 月の珪藻密度, 5 月の表層水温, 底層水温, 7 月の珪藻密度, 以外の発生・非発生に関連する説明変数を見出すことができなかった。現状の予察モデルへの教師データ追加については, *U* 検定の結果 5 月の表層水温と 7 月の珪藻密度は発生・非発生で差があったが($p < 0.05$), 5 月の底層水温と 6 月の珪藻密度は差がなかった($p > 0.05$)。このことからデータを追加し教師データ期間を延長した場合, 5 月の表層水温, 7 月の珪藻密度は引き続き説明能力を持っているが, 6

月の珪藻密度の説明能力は低下することが分かった。予察においては表 6 のとおり、直前予察では的中が 2 年で非的中が 2 年となり 3 年が中間年、早期予察では的中が 3 年で非的中が 3 年で、1 年が中間年となった。このことから、データを追加して行った予察は現行の予察モデルに比べ中間年が増え、的中が減少する結果となった。これは、2015 年から 2019 年のデータ追加で一部の説明変数の説明能力が低下したためであり、この点の改善が今後の課題であると考えられた。

兵庫県での近年のシャットネラ赤潮の発生は、珪藻の出現に定点によるばらつきがありシャットネラ赤潮の初期段階が珪藻との混合状態であった平成 29 年、前年からの黒潮の大蛇行や平成 30 年 7 月豪雨のあった平成 30 年、現行モデルでは非発生での中したが *C. ovata* が赤潮化した令和 2 年、など現行モデル構築時にはなかった気候および海象、赤潮種の出現状況の変化もしくは、海洋レジームの変化に影響を受けていると考えられた。現時点では現行モデルでの予察は引き続き有効であるが、今後もモニタリングを継続し、気象と海象の変化、赤潮種の出現状況に関する科学的データを蓄積し赤潮予察モデルの高精度化を進める必要がある。

5. 大阪府海域(大阪湾)

・ 発生予察の検証

令和元年度に作成したフローチャートに基づいて予察を実施した。フローチャートでは、第 1 段階として 6 月の *Chattonella* 細胞密度、第 2 段階として環境条件(7 月上旬の水温平年偏差、5~6 月の降水量、6 月下旬~7 月上旬の日照時間)を説明変数とする線形判別により判別基準を設けている。本年は、第 1 段階の *Chattonella* 細胞密度で「×(非発生)」となった。また、第 2 段階の判別式では「水温・日照時間」の組み合わせで「×」、「水温・降水量」「降水量・日照時間」の組み合わせで「△(判断保留)」となった(表 5, 図 46)。本年夏季にはシャットネラ赤潮が発生していることから、第 1 段階で予察と結果が一致せず、第 2 段階でも 1 件で不一致、2 件で判断保留となった。

これまでの予察では 6 月の *Chattonella* 細胞をシードポピュレーションとし、5~7 月の環境が *Chattonella* spp.にとって好適であれば(近年の赤潮発生時期として多い 7 月頃に)赤潮化するとシナリオ化(図 45)してきたが、本年は栄養細胞の初認が 7 月に入ってからで、赤潮となったのも 8 月と想定よりもやや遅かった。そのため、6 月にはシードとなる細胞がまだ確認できておらず、予察に使用した環境条件も実際の増殖時期と一致していなかったことが赤潮発生予察が的中しなかった原因となったと考えられる。特定の時期の環境条件だけで予察するのではなく、栄養細胞が初認されてからの環境条件を踏まえた時間的に流動性のある予察も求められる。

・ 予察モデルの高精度化

前事業で構築した判別分析による予察モデル(1999~2014 年データを使用)について、2015~2021 年の 7 年間のデータを用いて精度検証を行ったところ、判断保留(△)予察の含有率が「水温(7 月上旬の水温平年偏差)・日照時間(6 月下旬~7 月上旬の日照時間)」で 57%(4/7)、「水温・降水量(5~6 月の降水量)」で 71%(5/7)、「降水量・日照時間」で 29%(2/7)となり、2 つの組み合わせで 50%を超えていた。ただし、モデル構築時の判断保留(△)予察の含有率が「水温・日照時間」で 38%(6/16)、「水温・降水量」で 31%(5/16)、「降水量・日照時間」で 38%(6/16)であり、モデル構築時と精度検証データによるフィッシャーの正確確率検定を実

施したところ、それぞれ $p = 0.65, 0.17, 1.00$ となり、いずれの組み合わせでもモデル構築時と精度検証時で判断保留(Δ)予察の含有率に変化があるとは言えなかった。また、判断保留(Δ)予察年を除いた判別率・的中率は、それぞれモデル構築時と精度検証時で「水温・日照時間」で 100%(10/10), 67%(2/3), 「水温・降水量」で 100%(11/11), 100%(2/2), 「降水量・日照時間」で 100%(10/10), 80%(4/5)となり、フィッシャーの正確確率検定では $p = 0.23, 1.00, 0.33$ といずれも差があるとは言えなかった。以上のことから、モデル構築後の 2015~2021 年の 7 年間については、モデル構築時とほぼ同等の精度を維持した状態で赤潮の発生予察ができていると考えられるが、判断保留(Δ)予察の含有率が高いことが課題として残った。

前事業では、海洋環境の変動等によりそれ以前の予察モデルの的中率が低下したことから、新しい予察モデルを構築した。新しいモデルも構築後 7 年が経過したことから、2015 年以降のより新しいデータを教師データとして追加することで、的中率が上昇するのかを検証した。今回は前事業で使用した 1999~2014 年データに対して、予察年の前年までを判別データとして加えて精度検証を行う時系列分割交差検証を実施した。すなわち、2016 年が予察(検証)年の場合は 1999~2015 年を教師データ、2017 年が予察年の場合は 1999~2016 年を教師データという形で 1 年ずつデータを追加し、2021 年を予察する場合には 1999~2020 年を教師データで使用した(表 6)。なお、使用した説明変数は前事業と同じ「水温」「降水量」「日照時間」を使用し、判別手法(線形・非線形)も同じものを使用した。その結果、「水温・日照時間」による検証では、2015~2021 年の 7 年間で判断保留(Δ)含有率が 71%(5/7)、判断保留(Δ)を除いた的中率は 50%(1/2)となり、判断保留(Δ)が多く、的中率も高くなかった(表 6)。また、「水温・降水量」では、判断保留(Δ)含有率が 71%(5/7)、判断保留(Δ)を除いた的中率は 100%(2/2)となり、的中率は高いものの、判断保留(Δ)が多く、実用的とは言えなかった(表 6)。「降水量・日照時間」では、判断保留(Δ)含有率が 29%(5/7)、判断保留(Δ)を除いた的中率は 80%(4/5)となり、3 つの組み合わせの中では、判断保留(Δ)が最も少なく、的中率も高かった(表 6)。「降水量・日照時間」はデータを拡充しない現行モデルでも、判断保留(Δ)が少なく、的中率も高いことから、現段階では最も実用的な組み合わせであると言える。なお、予察が的中しなかった 2016 年は 6 月の *Chattonella* 最高細胞密度が 0 cell/mL であることから、フローチャートを組み合わせることで概ね的中できている。しかし、現行モデルおよび今回のデータ拡充による検証のいずれでも、7 年間で唯一の赤潮発生年である 2021 年を発生($\bigcirc$)と予察できた組み合わせはなかった。大阪湾では近年シャットネラ赤潮の発生は稀で、発生年の教師データが十分ではないことが主要因であると考えられるが、新しい変数の探索や予察上の赤潮基準の見直し、赤潮には至らない程度の中程度の発生の扱いなどを踏まえながら、今後も高精度化に取り組む必要がある。

② ユーカンピア赤潮

シャットネラ赤潮と同様に、2005~2015 年までの環境条件データセットを用いた判別解析により毎年の発生状況を予察するモデルを構築した。また、これまでの海洋環境データの解析や数値計算から地場発生と海流依存発生の二種類の存在が明らかとなり、これを考慮した発生シナリオを作成した(長谷川ら 2018b)。本検証では昨年度漁期(2020 年 11 月~2021 年 3 月)の予察結果(表 8)とシナリオ適合状況を確認するとともに、本年度の予察状況について各府県海域別に以下に示す。

1. 徳島県海域(播磨灘南東部)

徳島県海域では、*Eucampia zodiacus* の大発生(250 cells/mL 以上)は 2011 年の 1 度のみであり、予察技術を確立するためのデータ数が十分ではない。徳島県海域における *E. zodiacus* は、最高細胞密度に達する時期が 1 月(2011 年度)、2 月(2016 年度)、3 月(2012、2015 年度)の 3 パターンに分かれることから、それらパターンと水温、塩分、風速、栄養塩濃度などの環境パラメータとの関連性を解析し、それぞれの発生シナリオを構築している。2020 年漁期は、2 月に最高細胞密度が 100 cells/mL 近くまで達した地点があったものの局所発生に留まったことから、シナリオとの適合状況を検証した結果を以下に示す。

ア) 1 月の発生シナリオ(流入発生)の検討

前事業において、1 月にユーカンピア赤潮が大発生した年(2011 年のみ)は「12 月に北寄りの風(徳島地方気象台における北寄りの最大風速のベクトル成分合計)が強い」、「表層塩分が低い」、「底層水温が高い」、「DIN が 12 月に高く、1 月に低い」という特徴を示した(図 48)。これらのことから、1 月のユーカンピア赤潮は、「他海域の *E. zodiacus* が北～北西寄りの吹送流によって流入し、地先の栄養塩を利用して増殖する」というシナリオが考えられた(図 49)。2020 年 12 月の徳島県の北風風速合計値は平年値(2000～2019 年)より高かったが、兵庫および香川県海域では同月に *E. zodiacus* がほとんど出現していなかったため、他海域からの流入はほぼなかったと考えられた。また、塩分は平年値よりやや低かったものの、底層水温および DIN 濃度が平年値よりやや低く発生シナリオと適合していなかったため、流入したとしても増殖しなかったと考えられた。

イ) 2、3 月の発生シナリオ(流入発生)の検討

2、3 月の発生については、発生年と局所発生年との間で統計的に有意な環境条件を見いだせていないものの、発生年で「1 月に北寄りの風が強い」という傾向がみられた。このことから、2、3 月の発生シナリオも地場発生ではなく、他海域からの高密度水塊の流入を想定している(図 50)。2020 年漁期は局所発生に留まったものの、2 月に最高細胞密度が 100 cells/mL 近くまで達した。徳島県の 1 月の北風風速合計値は平年値よりやや高く、他海域で発生した *E. zodiacus* が流入しやすい環境にあった。また、兵庫県海域では 1 月に一部の地点で *E. zodiacus* が高密度で発生していた(最高細胞密度;250 cells/mL 以上)。しかし、その発生は局所的であったために流入量は限定的であり、赤潮発生には至らなかったと考えられた。

2. 香川県海域(播磨灘南西部・備讃瀬戸南部)

前事業では、2005～2015 年漁期のデータを用いてユーカンピア赤潮発生予察モデルを構築した。図 51 に香川県海域のユーカンピア赤潮発生シナリオを示す。香川県海域では播磨灘と備讃瀬戸について、11～12 月の環境条件データセットより、その漁期(1～3 月)に「大発生(○)」、「局所発生(×)」または「判断保留(△)」を予察するモデルを作成しており、その検証を行った。

ア) 播磨灘

2020 年漁期のユーカンピア赤潮は局所発生であり、「12 月の北風、表層珪藻細胞密度」の 2 変数による判別分析の結果は「局所発生(×)」となったことから予察は的中した(表 8、図 52)。

2021 年漁期の予察については「局所発生(×)」と予察されているが、本年度の最終調査結果の判明後、予察結果の検証を進める。この他、本海域では「11～12 月の珪藻細胞密度、北

および西風成分」を説明変数とした予察モデルの検証を進めている。前述の予察モデルは構築後6年以上が経過することから、的中状況の検証や予察精度向上の取り組みが今後の課題となる。

イ) 備讃瀬戸

2020年漁期のユーカンピア赤潮は局所発生となり、「11月西風、12月降水量」の2変数による判別分析では「大発生(○)」と予察され的中しなかった。香川県備讃瀬戸における本種の発生シナリオでは、11～12月の西から北西寄りの風が強く、降水量の低い年ほど赤潮が発生しやすいとされている(図51)。2020年は、11月の北西風が強く、12月に一定の降雨があったものの、11月には大型珪藻の *Coscinodiscus wailesii* が多く発生していたこと、1～2月には低密度ながら小型珪藻類(*Chaetoceros* spp., *Skeletonema* spp.等)が発生していたことにより、本種の増殖が抑制された可能性が考えられた。

2021年漁期の予察については「大発生(○)」と予察されているが、本年度の最終調査結果の判明後、予察結果の検証を進める。

3. 岡山県海域(播磨灘北西部・備讃瀬戸北部)

2005～2015年漁期のデータを用いて播磨灘と備讃瀬戸の2海域で発生シナリオと1～2月発生の予察モデルを構築している。いずれのシナリオも良好な光環境で競合する小型珪藻の増殖後、栄養塩が制限要因となり、有機態リンの利用能で優位な *E. zodiacus* が優占化としている(図53, 54)。本検証では、2020年漁期を中心に予察モデルの的中結果やシナリオの適合状況を確認した。なお、各海域20%以上の調査点で細胞密度が100 cells/mLとなった場合を発生年としているが、教師データによる判別分析で誤判別があったため、予察を「不明」とする「△」の範囲を設定している。

ア) 播磨灘

2020年漁期は *E. zodiacus* の非発生年であった。予察は11月西風(姫路、気象庁データ)、1月底層 $\text{PO}_4\text{-P}$ (OY2) のモデルで「×(局所発生)」、12月日照時間、1月底層 $\text{PO}_4\text{-P}$ のモデルで「○(発生)」であり(図55)、前者のモデルで的中したが、後者モデルで的中しなかった(表8)。12月は日照時間が「例年よりかなり多く」(姫路、気象庁データ)、良好な光環境により小型珪藻が増殖したが、その後も栄養塩が制限要因にならず、継続して小型珪藻が優占したため *E. zodiacus* が増殖できなかったと考えられた。

2021年漁期の予察は、両モデルで局所発生の「×」となった(図55)。なお、1月時点で局所発生であるものの、2月の調査をもって結果を確認する。

イ) 備讃瀬戸

2020年漁期は *E. zodiacus* の局所発生年であった。予察は12月日照時間(岡山、気象庁データ)、12月底層 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、1月底層水温のモデルで「○(発生)」、1月底層 $\text{SiO}_2\text{-Si}$ 、1月底層水温のモデルで「△(判断保留)」となり(図56)、前者のモデルで「×」、後者のモデルで「△」となった。(表8)。同海域でも1月上旬以降、小型珪藻が増殖していたことから、本種の競合種である小型珪藻にとっても好適な環境で、予察はこのような海況を反映していたと考えられた。

2021年漁期の予察は、12月日照時間(岡山、気象庁データ)、12月底層 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、1月底層水温のモデルで「○」、1月底層 $\text{SiO}_2\text{-Si}$ 、1月底層水温のモデルで「×」となった(図56)。なお、1月時点で局所発生であるものの、2月の調査をもって結果を確認する。

4. 兵庫県海域(播磨灘北東部)

前事業では、2005～2015 年漁期のデータを用いてユーカンピア赤潮発生予察モデルを構築した。図 57 に兵庫県海域のユーカンピア赤潮発生シナリオを示す。本海域（播磨灘北部）はユーカンピア赤潮の初期発生海域であり、地場発生のみが想定されている。前事業での検討から、本海域については、①1～2 月の発生と、②3 月の継続性について、区別して検討することが妥当と考えられ、それぞれの期間毎に発生を予察した。また、本海域では、程度判断が困難な中間的な発生がこれまで確認されていないため、大量発生・局所発生の二区分のみとして予察を運用している。

2020 年漁期においては、兵庫県海域では 1 月 25 日に *E. zodiacus* の最高細胞密度が 395 cells/mL に達し 2 月 1 日には 255 cells/mL の発生があったが低下し、高密度化は短期間で局所的であった。また、2 月以降では 3 月 1 日に最高細胞密度 423 cells/mL、3 月 22 日に最高細胞密度 274 cells/mL の高密度化（ともに本調査外の調査）が確認されたが継続せず局所的であった。したがって、2020 年漁期の発生状況判断としては「局所発生年」とであると判断した。

モデルによる予察結果は 1～2 月は局所発生との境界領域のごく近傍の大量発生が予察され、3 月期については大量発生が予察された（表 8、図 58）。しかしながら、これらの予察はともに的中しなかった。なお、海域の栄養塩濃度は小型珪藻類の発生により低く推移し、ノリ養殖では製品品質が低下し生産枚数も低下、生産金額は前年から大幅に低下した。

1～3 月の播磨灘の兵庫県海域では小型珪藻類との競合により、*E. zodiacus* が増殖できなかった可能性が考えられた。先行または同時発生する珪藻類構成種が *E. zodiacus* の大量発生にどのように影響するかは不明な点が多いが、本種の大量発生は、日照・栄養塩・水温等の環境要因が他の珪藻類に不適となるタイミングを契機とすることが多い。今後は、他の珪藻類との競合・共存関係にも着目し、予察技術の高度化を検討する必要がある。

2021 年漁期の予察については、1～2 月の判別領域としては局所発生が予察されたが、大量発生との境界領域のごく近傍となった。本年度の最終調査結果の判明後、予察結果の検証を進める（3 月期については、2 月に獲得されるデータを用いるため未実施）。

5. 大阪府海域（大阪湾）

大阪府海域のユーカンピア赤潮は、類型化により大阪湾内における地場発生と明石海峡を経由した播磨灘北部からの流入発生を想定している。ただし、2005 年以降の赤潮発生年が 2005、2007、2011 年の 3 回のみで地場／流入発生のそれぞれについて統計解析に堪えなかったために、1997 年漁期にまで遡って再解析を行った結果を採用している。なお、2020 年および 2021 年漁期については、2021 年 2 月は地場発生、2021 年 11 月～2022 年 1 月は局所発生（非発生）となっている。

ア) 地場発生赤潮

浅海定線調査 20 定点のうち、明石海峡に近い St. 6 および St. 7 を除いた 18 定点のうち 3 点以上で 100 cells/mL を超過した調査年月を地場赤潮発生と定義している。これまでに作成した予察モデルでは、調査実施旬および 1 旬前の降水量を説明変数とする判別分析と補足情報として *E. zodiacus* を除いた珪藻細胞密度を使用している。判別分析による予察では、2021 年 12 月は発生、2021 年 2 月および 11 月は発生確率 20～80% の「△」、2022 年 1 月は非発生と判別され（図 59）、2021 年 12 月を除いて概ね的中したと言える。2021 年 11 月下旬～12 月上旬には比較的まとまった降水があったが、その他の期間は全体的に降水量が少なく、陸域からの栄養塩供給は少なかった。一方で、定期的に強風が吹き、大阪湾水質定点自動観

測データ配信システム(<http://teiten.pa.kkr.mlit.go.jp/obweb/index.aspx>)によると 11 月 10 日頃、11 月 23 日頃、12 月 1 日頃、12 月 17 日頃、12 月 26 日頃、1 月 12 日頃に鉛直混合が生じている。11 月から 12 月にかけては、大阪湾内の広い範囲で *C. wailesii* が増殖しており、12 月の予察が的中しなかったのは、*C. wailesii* との栄養塩競合が働いたためであると考えられる。なお、1 月中旬以降は *Skeletonema* spp.をはじめとした小型珪藻類が増殖していた。2021 年 2 月の赤潮発生については、1 月下旬以降は平年以上の降水があり、1 月 29 日には一時的に強風が吹いたことにより 1 月下旬に湾内で *E. zodiacus* が増殖し、2 月上旬まで高密度が継続した。

イ) 流入発生赤潮

浅海定線調査時に明石海峡に近い St. 6 または St. 7 で 100 cells/mL で超えた場合を流入発生の可能性が高いとしている。解析には調査月上旬の兵庫県海域 (St. H1 と St. H28 の平均) の細胞密度および西風成分 (毎時データの平均値) を使用し、明石海峡付近への吹き寄せが流入へ寄与しているとしている (図 60)。解析結果は、2021 年 2 月および 2021 年漁期には非発生と予察され、流入発生の予察は的中したと言える。2021 年 1 月下旬～2 月上旬および 2021 年 12 月中旬以降には東風に対して西風が卓越していたものの、播磨灘北部、特に明石海峡に近い海域では *E. zodiacus* は高密度化しなかったことから、明石海峡付近には本種がほとんど吹き寄せられず、潮流によって大阪湾に進入した *E. zodiacus* も少なかったものと考えられる。

4) 新たな情報発信方法の検討

(国研)水産研究・教育機構水産技術研究所が管理運営している赤潮ネットとの連携を図り、夏季および冬季海洋モニタリング調査結果の網羅的な確認手法と予察情報の発信手法を検討した。

赤潮ネットの「赤潮分布情報」(https://akashiwo.jp/public/kaikuInit.php?qkaiku_id=2&sid=1)における表示海域で「瀬戸内海東部」が設定されるとともに (図 61)、漁業者に馴染みのある日付ごとのタブからプランクトン情報を網羅的に確認できるようなサイトも設定された。

引用文献

阿保勝之, 杜多哲, 藤原建紀. 冬季の東部瀬戸内海における残差流と栄養塩環境. 海洋工学論文集 2006; **53**: 1096–1100.

秋山諭, 辻村裕紀, 田中咲絵, 近藤健, 中嶋昌紀, 宮原一隆, 高倉良太, 山下泰司, 高木秀蔵, 乾元気, 越智洋雅, 小川健太, 吉田和貴, 朝田健斗, 加藤慎治. 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ア. 瀬戸内海東部. 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, 水産庁, 東京. 2021; 7–58.

今井一郎. シャットネラ赤潮の発生予知. シャットネラ赤潮の生物学, 生物研究者, 東京. 2012; 134–144.

高木秀蔵, 石黒貴裕, 宮原一隆, 原田和弘, 山本圭吾, 秋山諭, 斎浦耕二, 西岡智哉, 吉松定昭, 大山憲一. 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 25 年度漁場環境・生物多様性保全総合対策委託事業赤潮・貧酸素水塊漁業被害防止対策事業報告書「瀬戸内海等

- 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，東京．2014a；9-22.
- 高木秀蔵，石黒貴裕，宮原一隆，原田和弘，山本圭吾，秋山諭，斎浦耕二，西岡智哉，吉松定昭，大山憲一，鬼塚剛，阿保勝之．ノリ色落ち珪藻のモニタリング，発生機構解明，予察技術開発①瀬戸内海東部海域におけるノリ色落ち原因珪藻の出現諸特性の解明と発生予察技術の開発．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・貧酸素水塊漁業被害防止対策事業報告書「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」報告書，水産庁，東京．2014b；196-209.
- 高木秀蔵，古村振一，乾元気，山下泰司．岡山県海域における年代ごとの水質変化と平年値の設定．岡山県農林水産総合センター水産研究所報告，2021；36: 59-69.
- 長井敏．播磨灘における有害大型珪藻 *Coscinodiscus wailesii* の大量発生機構とその予知．有害・有毒赤潮の発生と予知・防除，日本水産資源保護協会，東京．2000；71-100.
- 西岡智哉，池脇義弘，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．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 28 年度漁場環境・生物多様性保全総合対策委託事業赤潮・貧酸素水塊漁業被害防止対策事業報告書「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」報告書，水産庁，東京．2017；9-36.
- 西川哲也．養殖ノリ色落ち原因珪藻 *Eucampia zodiacus* の大量発生機構に関する生理生態的研究．兵庫県立農林水産技術総合センター研究報告(水産編)，2011；42: 1-82.
- 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「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，東京．2018a；9-38.
- 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，鬼塚剛，阿保勝之，松原賢．ノリ色落ち珪藻の発生モニタリング，発生機構解明，予察技術開発①瀬戸内海東部海域におけるノリ色落ち原因珪藻の出現諸特性の解明と発生予察．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「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，東京．2018b；282-321.
- Yamaguchi, H., Sakamoto S. & Yamaguchi M. Nutrition and growth kinetics in nitrogen and phosphorus limited cultures of the novel red tide flagellate *Chattonella ovata* (Raphidophyceae). *Harmful Algae*, 2008; 7: 26-32.
- Yamaguchi, H., Mizushima K., Sakamoto S. & Yamaguchi M. Effects of temperature, salinity, and irradiance on growth of the novel red tide flagellate *Chattonella ovata* (Raphidophyceae). *Harmful Algae*, 2010; 9: 398-401.