

漁場環境改善推進事業

増養殖環境課 上村 海斗

1 背景・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いる。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にのぼる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に防止又は軽減するためには、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。本事業では、瀬戸内海西部、豊後水道海域及び土佐湾海域において関係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及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を行うこと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。

なお、本事業は水産庁の委託事業であり、その成果については別途報告している（水産庁2022）。本稿ではその内容を抜粋して記載する。

2 方法

(1) モニタリング調査

本県では浦ノ内湾及び宿毛湾を調査海域とし、両海域でそれぞれ5及び6点を調査定点とした（図1）。調査期間及び回数は、浦ノ内湾が2021年5～9月で、赤潮発生時期（6～8月）に月4回、その他の時期に月1回の計14回、宿毛湾が2021年5～9月で、月1回の計5回であった。調査項目は、海洋環境（水温、塩分、溶存酸素量（DO）、栄養塩及びクロロフィルa量）並びに有害プランクトン及び珪藻類の細胞密度とした。

(2) *K. mikimotoi* 高感度監視調査

浦ノ内湾及び宿毛湾のそれぞれ1点を調査定点とし（図1）、海水中の *K. mikimotoi* の高感度調査を行った。浦ノ内湾では2021年1～4月、宿毛湾では2021年1～6月に月1回の頻度で採水を行った。表層と10m層の海水1Lずつを孔径5µmのメンブレンフィルターで濾過し、そのフィルターを-30℃で凍結保存して、愛媛大学南予水産研究センターに送付した。同センターでは、*K. mikimotoi*、*Cochlodinium polykrikoides*、*Heterocapsa circularisquama*、*Chattonella* spp. (*antiqua*、*marina*、*ovata*)、*Heterosigma akashiwo* の遺伝子を標的にして、リアルタイムPCRで遺伝子量を測定した。得られた遺伝子量は、既知の細胞数の遺伝子量を基に細胞数に換算した。また、調査サンプルと同一の海水100mLを濃縮検鏡し、比較対象とした。

(3) 赤潮発生シナリオと予察技術の検証と改良

1) *K. mikimotoi* 赤潮発生に至る初期細胞密度について

K. mikimotoi が初期細胞密度（100 cells/mL）から赤潮発生（1,000 cells/mL）に至った確率および日数について解析した。浦ノ内湾では解析対象期間を1992～2021年（過去30年

間)とした。なお、宿毛湾ではこれまでの赤潮発生年数が少ないため、解析から除外した。

2) *K. mikimotoi* 赤潮の終息要因

K. mikimotoi 赤潮の短期的な動態予測として、連続観測データを用いて終息要因の検証を行った。1998～2021年(過去24年間)について、6～9月の最高細胞密度を基に赤潮発生をパターン1(1,000 cells/mL以上)とパターン2(10,000 cells/mL以上)に区分した。赤潮発生年について、*K. mikimotoi* 細胞密度のピークとなる日(最高細胞密度が確認された日以降で、初めて1日当たり500 cells/mL以上の減少速度が確認され始めた日)を求め、ピーク前後の7日間の気象庁気象統計情報による須崎市の降水量、最大風速、日照時間、気象庁潮汐観測資料による高知市の潮位差及び我々の観測による浦ノ内湾の表層水温の計5要素のデータを用いた。

3) 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、2018～2020年までの結果の検証がなされている(平井ら2021)。本年度は、この解析手法に2021年の結果を追加し、再度検証を行った。また、*K. mikimotoi* の最高細胞密度が1,000 cells/mL以上の年を「発生年」として解析を行った。

3 結果と考察

(1) モニタリング調査

浦ノ内湾及び宿毛湾の海域におけるデータは、赤潮発生監視調査事業に記載しているため、本稿では割愛する。

(2) *K. mikimotoi* 高感度監視調査

遺伝子調査の結果を図2に示す。浦ノ内湾では本種の遺伝子が1～4月に検出されたものの、検鏡では1月には検出されず、2～4月にのみ検出された。特に、4月はPCR、検鏡ともに10 cells/mLを超える細胞数が検出された。宿毛湾では2月及び4～6月に遺伝子調査で検出されたものの、検鏡では確認されなかった。このことから、当該海域において本種は低密度で存在しているものの、増殖には適さない環境であることがうかがわれた。

(3) 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* 赤潮発生に至る初期細胞密度について)

浦ノ内湾では、1992～2021年の過去30年間のうち100 cells/mLに到達した年数は24年、1,000 cells/mLに到達した年数は21年であった。そのうち初認日に1,000 cells/mLに到達した3年を除くと、100 cells/mL確認後に1,000 cells/mLに到達した年数は21年のうち19年であり、その確率は90%となった。また100 cells/mLから1,000 cells/mLに到達するまでの日数は平均22.0日(2～80日)であった。本県では、*K. mikimotoi* 細胞密度の注意基準を100 cells/mLをとし、本海域でこの細胞密度を確認した場合、概ね3週間には90%の確率

で赤潮化の危険性があることが確認された。

2) *K. mikimotoi* 赤潮の終息要因

各要素のピーク前とピーク後のそれぞれで Shapiro-Wilk 検定により正規性を確認した上で、正規分布である場合 ($p \geq 0.05$) は Welch の t 検定、正規分布でない場合 ($p < 0.05$) は Mann-Whitney の U 検定によって統計処理したところ、パターン 1、パターン 2 とともに水温、潮差 ($p < 0.001$) の 2 要素で有意な差が認められた (表 1)。

潮差ではピーク後はピーク前に比べて大きく、表層水温でもピーク後はピーク前よりも高い傾向があった。

3) 赤潮予察技術の検証

① 浦ノ内湾

2021 年は発生年であったが、予察モデルでは 12 通りの組み合わせのうち、6 通りで「発生年」、6 通りで「発生年・非発生年のどちらとも区別できない」と予測され、予察は半数的中した (表 2)。

2002~2017 年の解析期間で抽出された赤潮発生に関する環境因子の組み合わせのうち、2018~2021 年の 4 年間にわたって予測と発生状況 (結果) が的中「◎」した組み合わせは 2 通りで、それらに含まれる環境因子は「1 月下旬降水量」、「3 月中旬日照時間」、「6 月下旬日照時間」、「5 月表層 D0」の 4 項目であった。また、3 年間及び 2 年間での中「◎」した組み合わせはそれぞれ 7 通り及び 1 通りであった。残りの 2 通りの組み合わせは 4 年間をとおして区別できない「△」と予測され、予察として機能しなかった。

2018~2021 年の 4 年間において、この予察モデルでは「発生年」または「発生年・非発生年のどちらとも区別できない」のどちらかに予測された。本年度も半数以上の組み合わせが「発生年」と予測され、予測が発生に偏っていた。また、予察モデルを構築した 2002~2017 年のデータは本種赤潮の「非発生年」が 3 か年と少ないため、この予察モデルから「非発生年」を予測することは困難と考えられた。さらに、浦ノ内湾では 2008 年以降、本種の赤潮が毎年発生しており、発生・非発生を予察する必要性は低い。そのため、当該海域では本種の赤潮が毎年発生するものと仮定し、その規模や短期的動態についての予察モデルを構築していくことが必要であると考えられた。

② 宿毛湾

本年度は *K. mikimotoi* 赤潮の非発生年となり、遊泳細胞は 1 mL の海水を用いた検鏡で全く確認されなかった。2002~2021 年に本種の赤潮が発生した年は 3 回であり、当該海域における本種の予察モデルが構築できておらず、検証には至っていない。過去の本種赤潮の少数発生事例からは、隣接する海域での発生後に当該海域で発生する傾向がみられており、隣接海域からの移入・集積が当該海域での発生の一因と考えられている。今後も、当該海域と隣接海域の発生状況の関連性を検証していくことが必要である。

4 引用文献

茅野昌大，吉村栄一，馬場俊典，畑中俊弘，加川真行，相田聡，村田憲一，後川達男，恵崎撰，宮村和良，野田誠，内海訓弘，徳丸泰久，都留勝徳，平井真紀子，三門哲也，関信一朗，上村海斗，占部敦史，吉江直樹，郭新宇，清水園子，松原孝博，竹内久登，山口晴生，外丸裕司，三宅陽一，坂本節子，鬼塚剛．有害プランクトンの出現動態監視及び予察技術開発 イ．瀬戸内海西部・豊後水道海域・土佐湾海域（重点海域）．令和3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，東京．2022；57-118.

平井真紀子，三門哲也，渡邊昭生，加川真行，黒田麻美，村田憲一，本田宇聖，吉村栄一，馬場俊典，國森拓也，後川龍男，恵崎撰，井口大輝，中里礼大，内海訓弘，徳丸泰久，都留勝則，占部敦史，吉江直樹，郭新宇，清水園子，松原孝博，竹内久登，山口晴生，外丸裕司，三宅陽一，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．令和2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，東京．2021；59-117.

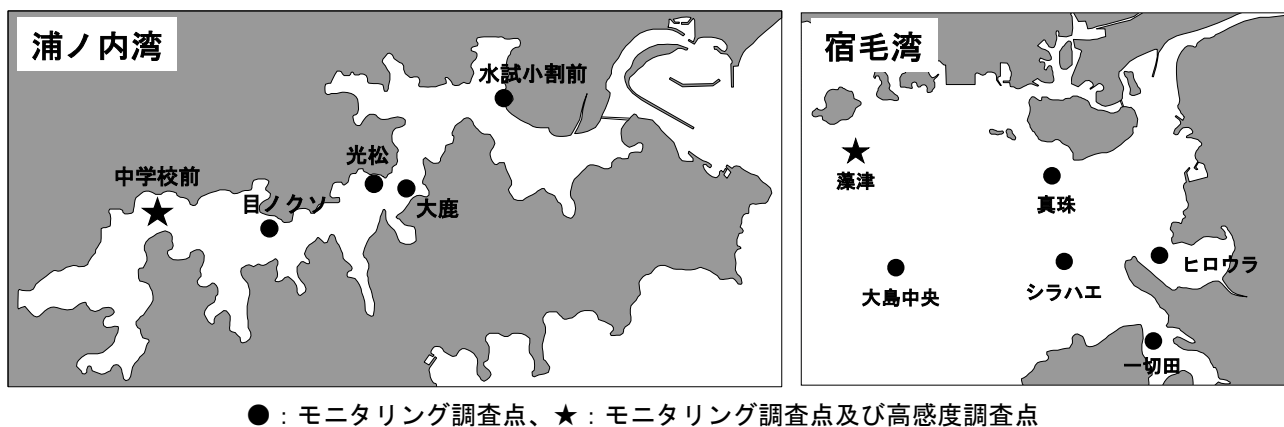


図1 浦ノ内湾及び宿毛湾の調査点

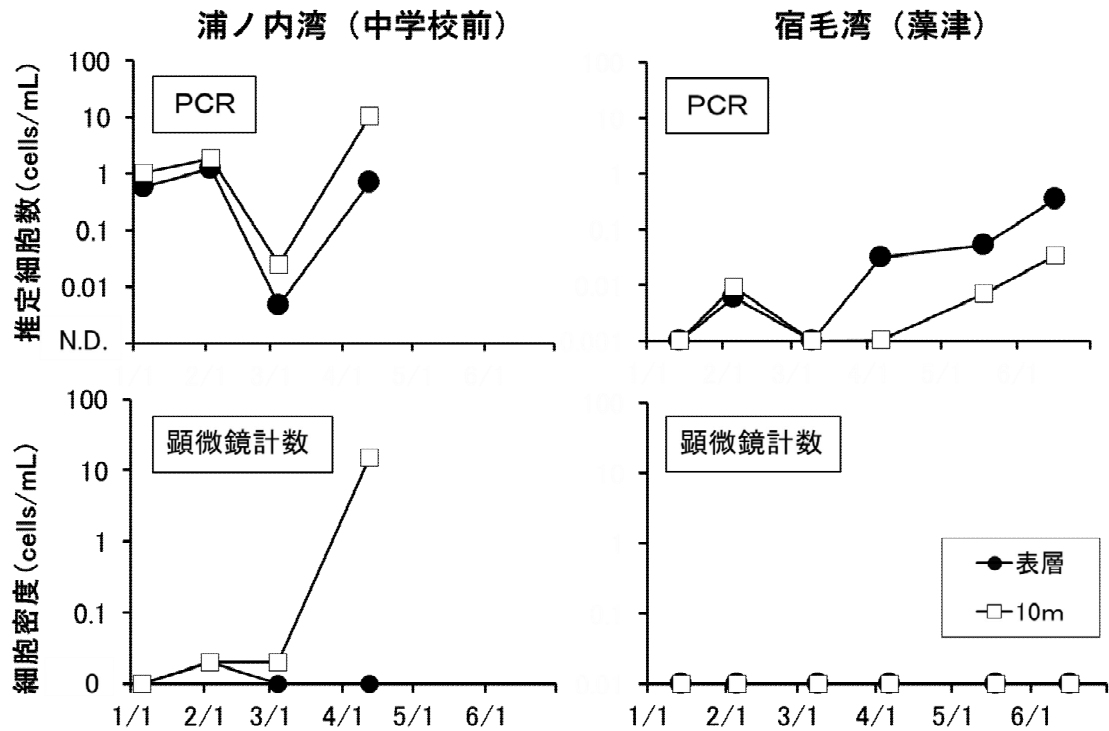


図2 2021年における *K. mikimotoi* の遺伝子調査結果（上：遺伝子調査、下：検鏡）

表1 *K. mikimotoi* 細胞密度のピーク前後7日間における気象・海象の比較
（表中の n. s は有意差無し、*は有意差有り（有意水準； $p < 0.05$ ））

| パターン1 (1,000 cells/mL) | 平均値 | | T検定 (Welch) | | U検定 | |
|------------------------|---------|---------|-------------|----|-------|------|
| | ピーク前7日間 | ピーク後7日間 | p値 | 結果 | p値 | 結果 |
| 降水量 (mm) | 10.3 | 16.1 | | | 0.965 | n. s |
| 最大風速 (m/s) | 4.0 | 4.0 | | | 0.718 | n. s |
| 日照時間 (h) | 4.8 | 5.4 | | | 0.392 | n. s |
| 表層水温 (°C) ピーク時との差 | 0.3 | 0.9 | 0.000 | * | | |
| 潮差 (cm) | 124.3 | 148.3 | | | 0.000 | * |

| パターン1 (10,000 cells/mL) | 平均値 | | U検定 | |
|-------------------------|---------|---------|-------|------|
| | ピーク前7日間 | ピーク後7日間 | p値 | 結果 |
| 降水量 (mm) | 13.5 | 16.2 | 0.583 | n. s |
| 最大風速 (m/s) | 3.9 | 4.0 | 0.940 | n. s |
| 日照時間 (h) | 4.1 | 4.9 | 0.252 | n. s |
| 表層水温 (°C) ピーク時との差 | 0.4 | 1.2 | 0.000 | * |
| 潮差 (cm) | 120.1 | 149.1 | 0.000 | * |

表2 浦ノ内湾（土佐湾海域）における *K. mikimotoi* 赤潮の発生・非発生の
マハラノビス距離による判別予測・結果

| 解析手法 | 説明変量 | 説明変数の数 | 判別期間 (年) | 的中率 (%) | 2018年 | | 2019年 | | 2020年 | | 2021年 | |
|----------|----------------------|--------|---------------|------------|-------|----|-------|----|-------|----|-------|----|
| | | | | | 予測 | 的中 | 予測 | 的中 | 予測 | 的中 | 予測 | 的中 |
| マハラノビス距離 | 6月下旬平均気温 6月降水量 | 2 | 2002～ 2017 | 93.8 | △ | ○ | △ | ○ | △ | ○ | △ | ○ |
| マハラノビス距離 | 6月下旬平均気温 4月底層DIN | 2 | 2002～ 2017 | 100.0 | △ | ○ | △ | ○ | △ | ○ | △ | ○ |
| マハラノビス距離 | 1月中旬降水量 3月中旬日照時間 | 2 | 2002～ 2017 | 87.5 | ○ | ◎ | ○ | ◎ | ○ | ◎ | ○ | ◎ |
| マハラノビス距離 | 1月中旬降水量 5月表層DO | 2 | 2002～ 2017 | 87.5 | ○ | ◎ | ○ | ◎ | ○ | ◎ | △ | ○ |
| マハラノビス距離 | 4月降水量 3月中旬日照時間 | 2 | 2002～ 2017 | 81.3 | △ | ○ | ○ | ◎ | ○ | ◎ | ○ | ◎ |
| マハラノビス距離 | 6月降水量 4月底層DIN | 2 | 2002～ 2017 | 87.5 | ○ | ◎ | ○ | ◎ | ○ | ◎ | △ | ○ |
| マハラノビス距離 | 3月中旬日照時間 5月10m層DO | 2 | 2002～ 2017 | 87.5 | △ | ○ | ○ | ◎ | ○ | ◎ | ○ | ◎ |
| マハラノビス距離 | 3月中旬日照時間 5月底層DO | 2 | 2002～ 2017 | 93.8 | △ | ○ | ○ | ◎ | ○ | ◎ | ○ | ◎ |
| マハラノビス距離 | 6月下旬日照時間 5月表層DO | 2 | 2002～ 2017 | 87.5 | ○ | ◎ | ○ | ◎ | ○ | ◎ | ○ | ◎ |
| マハラノビス距離 | 6月下旬日照時間 4月5m層DIN | 2 | 2002～ 2017 | 87.5 | ○ | ◎ | ○ | ◎ | ○ | ◎ | △ | ○ |
| マハラノビス距離 | 5月表層DO 5月底層DO | 2 | 2002～ 2017 | 87.5 | △ | ○ | ○ | ◎ | ○ | ◎ | △ | ○ |
| マハラノビス距離 | 5月底層DO 4月底層DIN | 2 | 2002～ 2017 | 87.5 | ○ | ◎ | ○ | ◎ | △ | ○ | ○ | ◎ |

※予察と結果が一致した場合を「◎」、「△」と予察して発生した場合を「○」、「△」と予察して非発生の場合を「△」、
予察と結果が一致しなかった場合を「×」と表す。

※赤潮発生は 1000cells/mLとした