

## 赤潮総合対策調査事業－Ⅱ (赤潮対策技術高度化事業－1) 赤潮広域モニタリング高度化

高杉朋孝, 宮田翔也

### 【目的】

*Chattonella* 属や *Cochlodinium* 属などの赤潮により漁業被害の発生している八代海や鹿児島湾において、有害赤潮プランクトンの発生状況及び海洋環境を広域的に監視するとともに、赤潮プランクトンの増殖特性等の把握により赤潮発生機構を解明し、漁業被害の防止に資する。

### 【方法】

#### 1 漁場環境のモニタリング調査

鹿児島湾の12定点(図1)及び八代海全域における8定点(図2)において以下の項目を調査した。

調査項目：気象、海象(水温、塩分、透明度、水色)

水質<sup>\*</sup>(DO,pH,NO<sub>2</sub>-N,NO<sub>3</sub>-N,NH<sub>4</sub>-N,PO<sub>4</sub>-P,DIN,DIP,Si,Chl-a)

プランクトン(各層採水)

※水質項目の略号の説明は、別稿「有害・有毒プランクトン情報発信事業」に記載

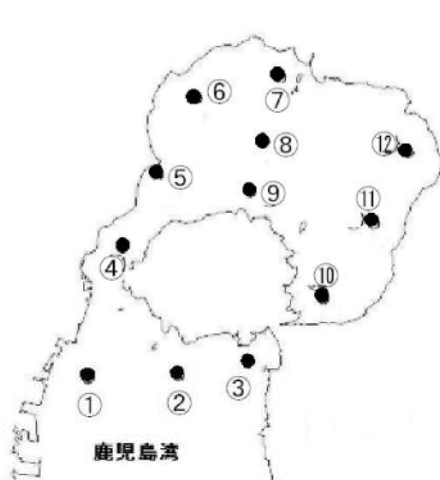


図1 鹿児島湾における調査点

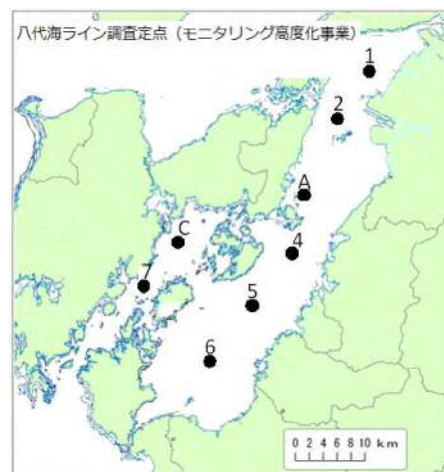


図2 八代海における調査点

#### 2 赤潮発生動向調査

##### (1) プランクトン発生動向調査

鹿児島湾で周年、八代海で5～9月にモニタリングを行った。

##### (2) 赤潮の発生要因・非発生要因の検証

2019年2月下旬から4月上旬に鹿児島湾奥部で発生した *Heterosigma akashiwo* 赤潮について、事業で得られたデータや気象データ等も含めて発生・衰退要因の解析を行った。また、2019年の *Chattonella marina* の動態と環境条件との関係についても同様に解析した。

### (3) 既存データ等を用いた解析

鹿児島湾における調査で得られたデータについて、過去のデータ、既往知見との比較等を行い、有害赤潮発生の特徴を把握するとともに、発生機構の解明に向けて解析を行った。解析においては *C. marina* および *H. akashiwo* の赤潮発生年・非発生年における環境条件の違いを検討した。2000～2019年（過去20年）の Stn.⑪（牛根境沖）で得られた毎月の表層および底層水温、表層塩分、表層 DIN 濃度、珪藻、湾奥部9定点の月別平均透明度、気象庁統計情報による溝辺アメダスにおける毎月の降水量および年間降水量、牧之原アメダスにおける毎月の平均気温、平均風速、最大風速、鹿児島市で観測された月平均全天日射量、鹿児島湾内で河川流量が最も多い天降川の湯田橋観測所における月別流量、鹿児島地方气象台における桜島の月別の噴火回数、降灰量、垂水市牛根麓の降灰量、*C. marina* 初認日、入梅日（計18要素のデータ）を解析に使用した。解析項目は、将来的にも同質なデータの入手が見込めること、海域を代表し得るデータであること、赤潮発生より以前に入手できることを念頭に選択した。なお月別データは、*C. marina* の解析については、赤潮発生時期が5～6月であることから、前年7月から当年6月までのデータを使用した。また、*H. akashiwo* の解析については、赤潮発生時期が主に3月と5月であることから、前者は前年7月から当年3月までを、後者は前年7月から当年5月までのデータを使用した。

*C. marina* については、2000年以降の鹿児島湾の年別赤潮発生状況から「大規模発生年」、「小規模発生年」、「非発生年」の3つに類型化し、それぞれ環境条件データとの関連性を解析した。なお、「大規模発生」は、最高細胞密度  $100 \text{ cells mL}^{-1}$  以上、赤潮継続日数10日以上を満たすものとした。パターン1では「大規模発生年」と「小規模発生年」に対する「非発生年」、パターン2では「大規模発生年」に対する「小規模発生年」と「非発生年」の2群に分けた。次に、比較する群それぞれの環境条件の特徴を把握するため、それぞれの要素について Shapiro-Wilk 検定により正規性を、F 検定により分散について検定し、正規性を示し、かつ等分散であると判定された場合は Student の t 検定を、正規性を示すが、等分散でない場合は Welch の t 検定を、正規性を示さない場合は Mann-Whitney の U 検定を行い、その後、抽出された要素を用いて、線形判別分析及び非線形判別分析を行った。また、線形判別分析で得られた結果については、妥当性の検証を行うため、Leave-one-out cross validation を行った。

*H. akashiwo* については、発生年と非発生年の2群に分け、それぞれの要素について、*C. marina* の解析と同様の手法で行った。

なお、*H. akashiwo* について「大規模発生年」に対する「小規模発生年」と「非発生年」の2群の比較、「3月発生年」と「3月非発生年」との比較、「5月発生年」と「5月非発生年」の比較も試みたが、サンプル数不足により検定が行えなかったため、これについては結果には記載しないこととする。

## 【結果及び考察】

### 1 漁場環境のモニタリング調査

鹿児島湾、八代海の家象及び水質については、別稿「有害・有毒プランクトン情報発信事業」及び平成31年度水産庁委託 漁場環境改善推進事業「赤潮被害防止対策技術の開発」報告書に記載

## 2 赤潮発生動向調査

### (1) プランクトン発生動向調査

鹿児島湾，八代海のプランクトンの発生状況については，別稿「有害・有毒プランクトン情報発信事業」及び平成31年度水産庁委託 漁場環境改善推進事業「赤潮被害防止対策技術の開発」報告書に記載

### (2) 赤潮の発生要因・非発生要因の検証

#### ア. *H. akashiwo* 赤潮の水平分布の経時変化

*H. akashiwo* 赤潮の発生状況を図3に，*H. akashiwo* 赤潮の最高細胞密度の推移を図4に示す。2019年2月26日に実施された地元漁協の調査結果によると，桜島西側で100 cells mL<sup>-1</sup>が確認された。翌27日の調査において，Stn.⑥で最高7,775 cells mL<sup>-1</sup>を記録したほか，湾奥部東部を含む複数の地点で1000 cells mL<sup>-1</sup>以上を確認した。28日には牛根辺田地先で12,916 cells mL<sup>-1</sup>，29日にはStn.⑩及び牛根境地先でそれぞれ14,900 cells mL<sup>-1</sup>を確認した。3月2日は10,000 cells mL<sup>-1</sup>以上は確認されなかったものの，3月4日は始良市白浜地先で51,666 cells mL<sup>-1</sup>，牛根境で22,500 cells mL<sup>-1</sup>確認され，本赤潮のピークとなった。その後，10,000 cells mL<sup>-1</sup>以上が確認されたのは3月8日（Stn.⑧，12,400 cells mL<sup>-1</sup>）のみであったが，3月12日～29日にかけて1,000 cells mL<sup>-1</sup>以上（1,000～7,000 cells mL<sup>-1</sup>）の赤潮が継続した。4月3日には最高細胞密度が35 cells mL<sup>-1</sup>（Stn. ④）まで減少し，36日間に及んだ赤潮は終息と判断した。

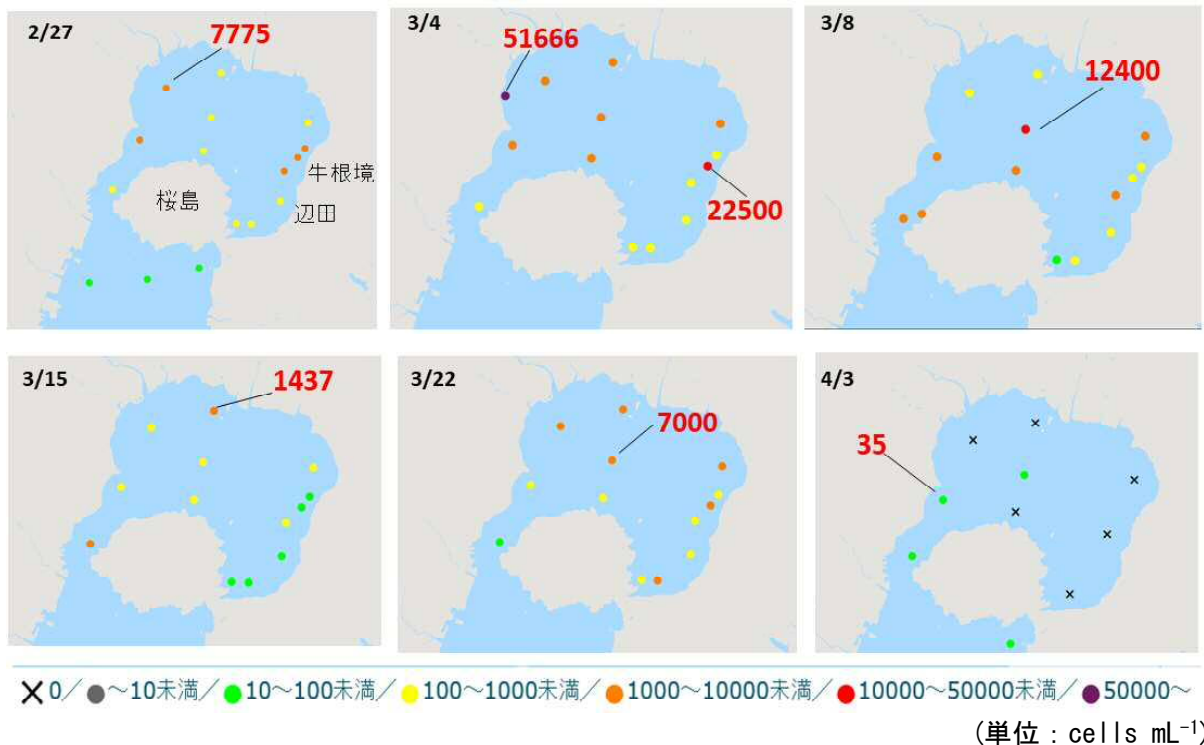


図3. *Heterosigma akashiwo*赤潮の水平分布の推移

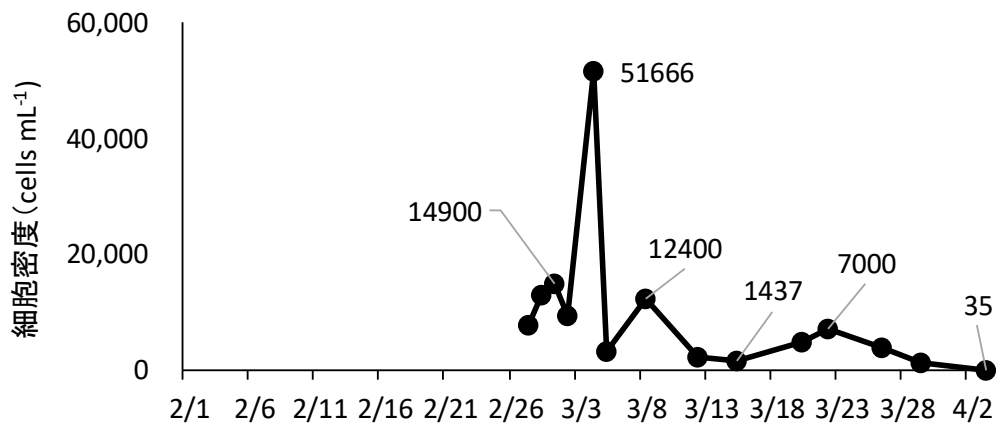


図4. *Heterosigma akashiwo*の最高細胞密度の推移（全調査点）

#### イ. *H. akashiwo* 赤潮の発生・衰退要因

図5に降水量および日照時間の推移を示す。降水量については、2月中旬～下旬は平年並みであったが、3月上旬に平年を大きく上回る降水量が観測された。3月中旬から赤潮が終息する4月上旬までは平年より降水量が少なかった。日照時間は2月下旬～3月上旬に平年より少なかったが、3月中旬～4月中旬においては平年より多かった。

図6に水温、塩分、DINおよびDIP濃度の推移について示す。赤潮発生期間の水温は2月上旬以降、表層では15.6～17.0°C、10m層では15.9～16.8°Cと*H. akashiwo*の増殖至適水温15～25°C（Shikata 2009）の範囲内であった。塩分は2月上旬以降、表層は33.1～34.1、10m層は33.6～34.4で推移した。DIN濃度は、赤潮発生時の2月27日において、表層、10m層とも、1,000 cells mL<sup>-1</sup>の個体群が維持されるために最低限必要となるN濃度1.7 μM（紫加田・本城 2016, 以降基準値）を大きく上回っていた。その後、表層は3月4日まで概ね基準値未満となったが、3月5日に上昇して15日までは基準値以上、20日以降は基準値未満となった。10m層は15日まで基準値以上で、20日以降は概ね基準値未満となった。DIP濃度はDINと同様、赤潮発生時は1,000 cells mL<sup>-1</sup>の個体群が維持されるために最低限必要となるP濃度0.1 μM（紫加田・本城 2016, 以降基準値）大きく上回っており、3月22日までは基準値以上だったが、衰退直前の3月26日には大きく低下した。競合種の珪藻は赤潮発生直前の2月5日において少なく（最高細胞密度：12 cells mL<sup>-1</sup>）、赤潮発生期間中も低密度で推移した（最高細胞密度：33 cells mL<sup>-1</sup>, 3月12日, Stn.⑩）。

以上のことから、*H. akashiwo* 発生期間中の水温、塩分は至適レベルであり、競合種である珪藻類が少なく、赤潮発生時には栄養塩が豊富に存在していたことが発生要因として考えられた。また、赤潮のピークであった3月4日（51,666 cells mL<sup>-1</sup>, 始良市白浜沖）以降は、3月8日を最後に10,000 cells mL<sup>-1</sup>以上の*H. akashiwo*は確認されなくなった。その後、3月10日～21日にかけて20 mm/日以上降水量が3回（10日：54mm/日、19日：20mm/日、21日：36mm/日）観測され、栄養塩が供給された。それにより、3月29日まで1,000 cells mL<sup>-1</sup>以上の細胞密度が維持され、赤潮が長期化したと考えられた。しかし、3月29日以降はDINが枯渇状態となり、赤潮は衰退したと推察された。

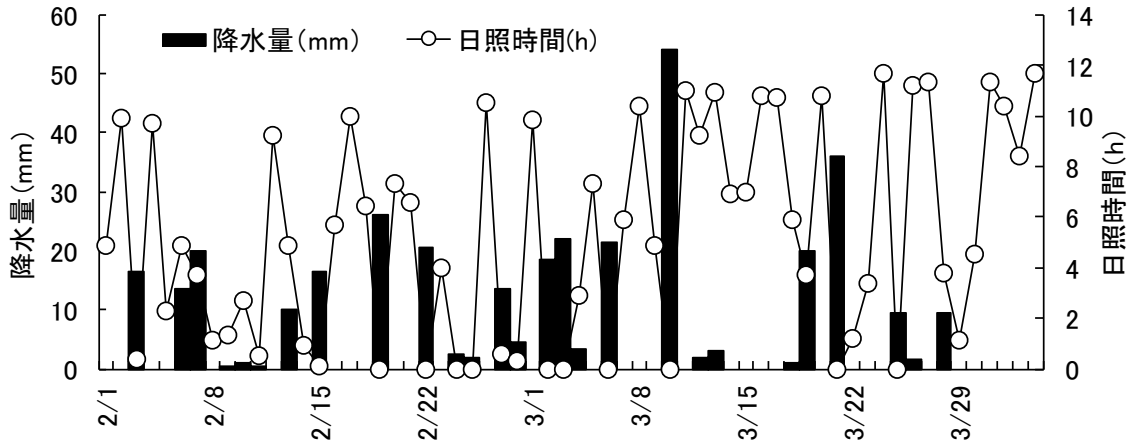


図5. 降水量及び日照時間の推移(降水量：溝辺アメダス、日照時間：牧ノ原アメダス)

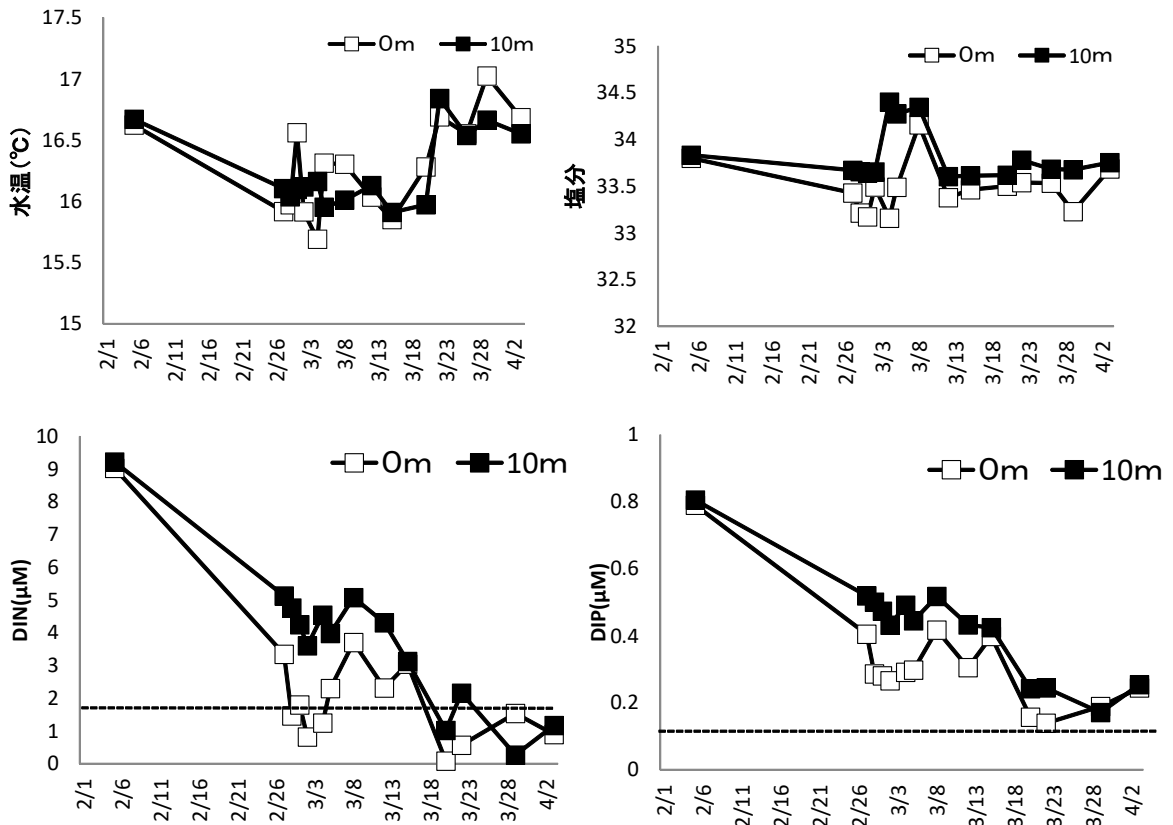


図6. 水温, 塩分, DIN, DIPの推移(湾奥部9定点平均). 横線は*Heterosigma akashiwo*が生存するために最低限必要な濃度

ウ. *Chattonella marina* 赤潮の発生・非発生要因

*Chattonella* spp.は例年の発生時期である5～6月に発生しなかったが、10月中旬に湾奥部東部で比較的高密度（最高 22 cells mL<sup>-1</sup>）で検出された（図7）。5～6月の競合種である珪藻類は11～575 cells mL<sup>-1</sup>と少なかった（図8, 9）。鹿児島湾奥部の水温、塩分の推移を図10に示す。水温は、表層および10 m層においてそれぞれ19.6～24.5℃および20.1～22.9℃で、概ね、過去のデータから推定した鹿児島県の海域における増殖好適水温範囲内（23～26℃）にあった。塩分は表層および10 m層でそれぞれ32.8～33.2および33.5～33.7で、鹿児島県の海域における好適塩分範囲（30以下、西広海ら 2009）より高かった。栄養塩濃度は5～7月にかけて低濃度で推移し（図11）、概ね、*C. antiqua*の半飽和定数（硝酸塩で1.0 μM, リン酸塩で0.11 μM, Nakamura et al. 1988）以下であった。

以上のことより、5～6月は競合種である珪藻類は少なく、水温は概ね好適範囲内だったものの、塩分が高く、栄養塩が少なかったことにより、通常の発生時期である5～6月に*C. marina*赤潮が発生しなかったと考えられた。

一方で、細胞密度の増加がみられた10月中旬の水温は表層および10 m層ともに25.6℃、塩分は表層で31.6、10 m層で32.2であった。競合種である珪藻類はやや少ない～多い状況で、栄養塩は概ね少ない状況だった。このことから、8月下旬をピーク（表層：27.5℃、10 m層：26.0℃）に下がり始めた水温が、10月中旬に適水温となり、珪藻類はやや少ない～多い状況で、湾奥部の東側で増殖したが、塩分は好適範囲より高く、栄養塩が概ね少なかったことから、高密度化せず、局所的な増殖となったと考えられた。

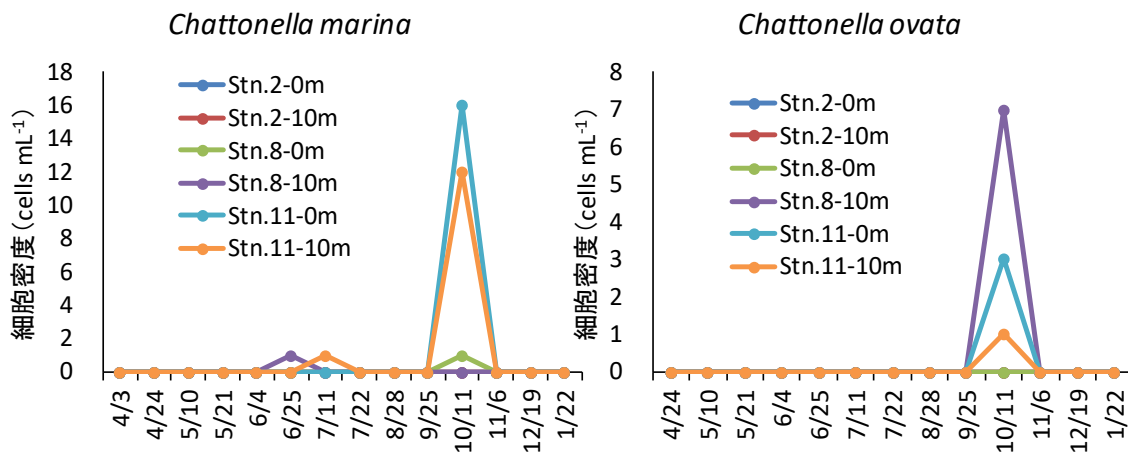


図7. *Chattonella marina*, *Chattonella ovata* の細胞密度の推移

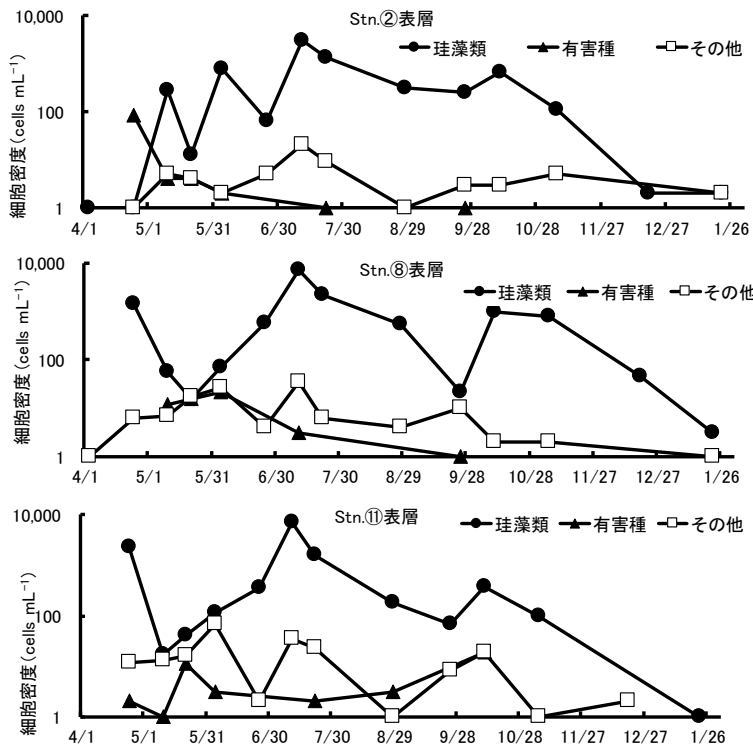


図8. 鹿児島湾における植物プランクトンの組成変化 (Stn. ②, ⑧, ⑪ 表層)

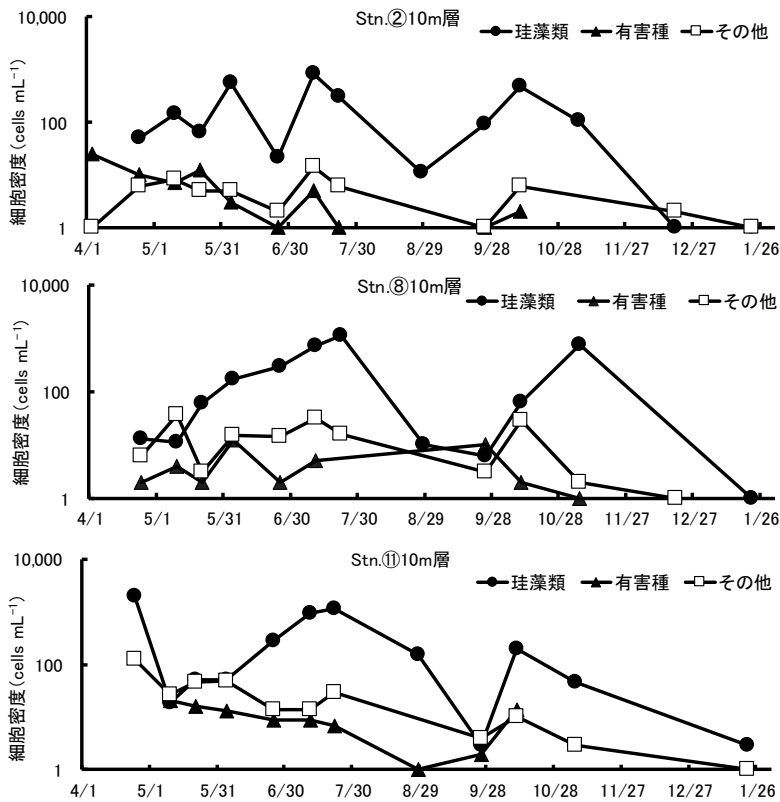


図9. 鹿児島湾における植物プランクトンの組成変化 (Stn. ②, ⑧, ⑪ 10m層)

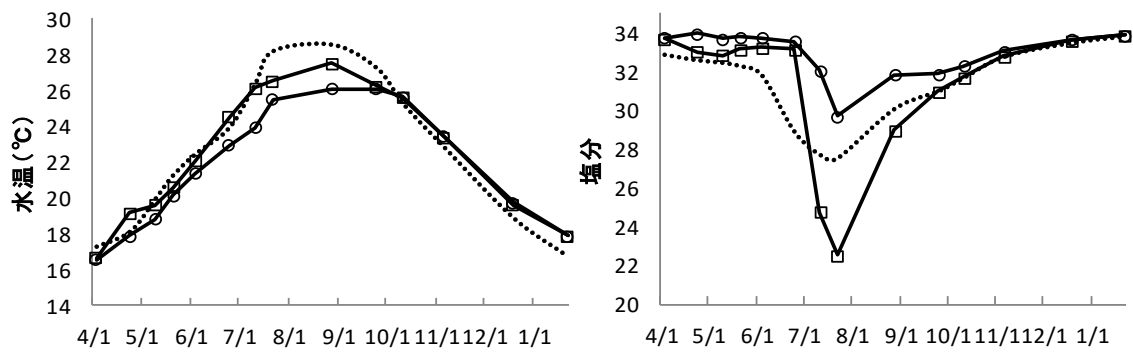


図10. 鹿児島湾奥部の水温と塩分の推移

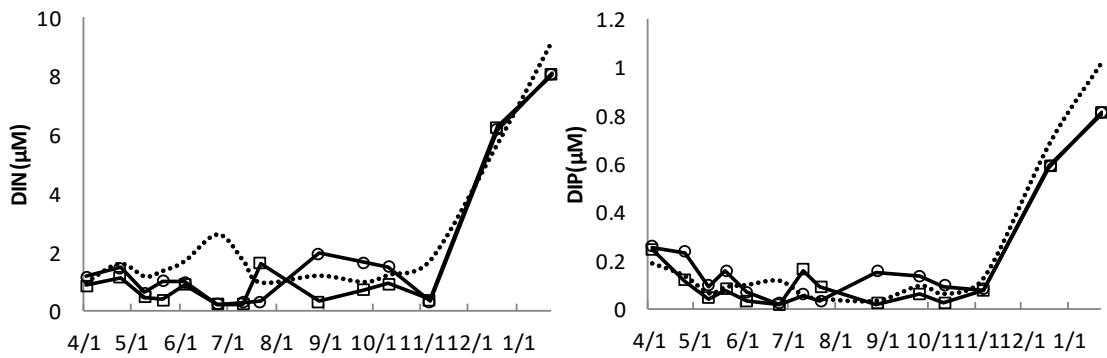


図11. 鹿児島湾奥部の栄養塩の推移



(3) 既存データ等を用いた解析

*C. marina* の検定において、前年の7月から当年の6月までで、有意差があったのは、パターン1では12要素(図12)、パターン2では11要素だった。パターン2で有意差があった11要素は全てパターン1と共通していた。5月の透明度についてはパターン2では有意差がなかったが、パターン1では有意差があった。

有意差があった要素のうち、5、6月に関する要素については赤潮の発生時期であり、赤潮発生の予察に使用できないため、それを除いた要素の中から線形判別分析及び非線形判別分析を行った。その結果、9月の底層水温と12月の日照量の組み合わせが正判別率100%と最も高かった(図13)。しかし、Leave-one-out cross validationにより妥当性を検証したところ、予測精度は69%となり、赤潮発生予察に使用するには精度が低いと考えられた。これについては、サンプル数が追加されることで、予測精度が改善されるか、今後も検証していきたいと考えている。

*H. akashiwo* の赤潮発生-非発生間で統計的に有意な差が認められたのは、3月の透明度のみであった。3月は*H. akashiwo*による赤潮の発生時期となっており、赤潮発生予察に使用することはできないことから、今後もデータを取得し、サンプル数を増やしていくことが必要である。

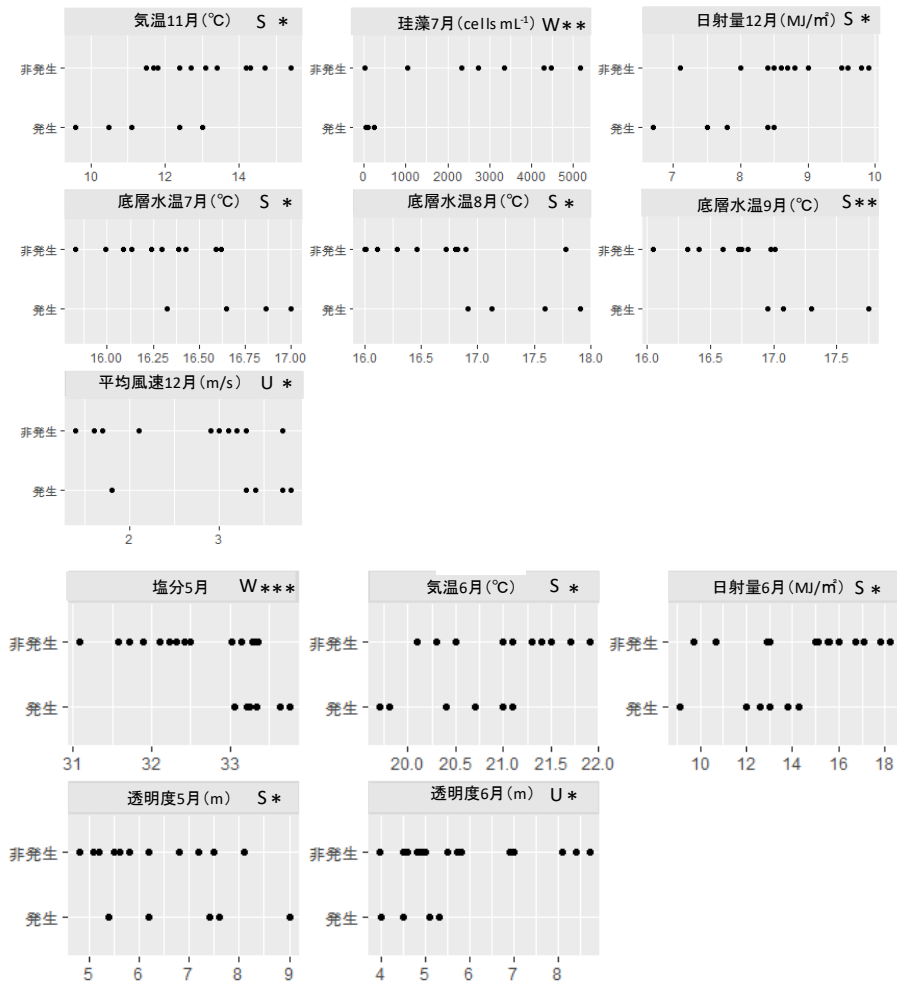


図12. 鹿児島湾における*C. marina*赤潮発生年の特徴解析例。SはStudentのt検定、WはWelchのt検定、UはMann-WhitneyのU検定を表す。\*は $p < 0.05$ 、\*\*は $p < 0.01$ 、\*\*\*は $p < 0.005$ 。

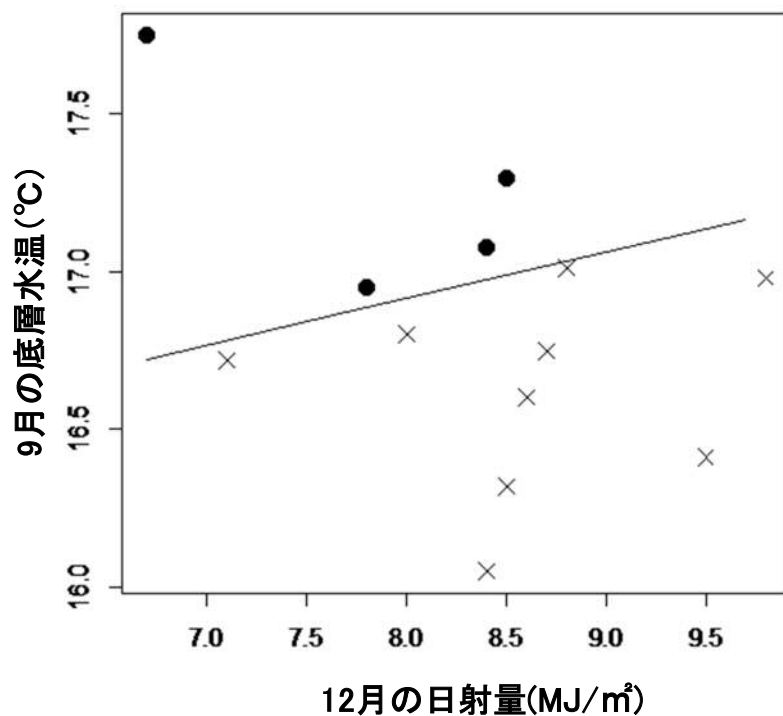


図13. 鹿児島湾における *C. marina* 赤潮の線形判別分析結果例 (2007~2019年). ●発生年, ×非発生年.

### 引用文献

Shikata T. Studies on the mechanisms of bloom development in the raphidophyte *Heterosigma akashiwo*.  
PhD thesis, Kyushu University, Fukuoka. 2009.

紫加田知幸, 本城凡夫. 赤潮ラフィド藻 *Heterosigma akashiwo* の生理生態. 「有害有毒プランクトンの科学」 (今井一郎, 山口峰生, 松岡數充編) 恒星社厚生閣, 東京. 2016 ; 232-240.

西広海, 田原義雄. 赤潮総合対策調査事業-II (有害赤潮発生に関する生態学的研究). 平成 21 年度鹿水技セ事報. 2010 ; 103-106.

Nakamura Y, Takashima J, Watanabe M. Chemical environment for red tides due to *Chattonella antiqua* in the Seto Inland Sea, Japan Part 1. Growth bioassay of the seawater and dependence of growth rate on nutrient concentrations. *J. Oceanogr. Soc. Jpn.* 1988; **44**: 113-124.