

漁場環境改善推進事業

増養殖環境課 谷口 越則

1 背景・目的

豊後水道を含む瀬戸内海西部海域や本県中部の浦ノ内湾では、*Karenia mikimotoi* 赤潮による被害が頻発している。瀬戸内海西部海域では、平成 24 年に本種による広範囲の赤潮が発生し、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。このような赤潮による漁業被害を未然に防止、あるい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、瀬戸内海西部海域の沿岸県（福岡県、大分県、山口県、広島県、愛媛県及び高知県）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、赤潮発生シナリオ及び環境要因を基にした予察技術等の改良と更新を行うことにより、漁業被害の軽減に資することを目的とする。

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、それぞれの海域で 5 及び 6 地点を調査定点とした。調査期間と頻度は、浦ノ内湾は 5 月～1 月までとし、赤潮発生時期（6～8 月）は月 4 回、その他の時期は月 1 回とした。宿毛湾は 5 月～11 月を調査期間とし、月 1 回の調査を行った。調査項目は、海洋環境（水温、塩分、溶存酸素量、栄養塩、クロロフィル量）、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 か所を調査定点とし、海水中の *K. mikimotoi* の高感度調査を行った。採水は 3～6 月の間に月 1 回の頻度で行い、表層と 10m 層の海水 1 L を孔径 5 μ m のメンブレンフィルターで濃縮濾過し、 -30°C 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、試料を解凍後、速やかにビーズ破碎によりホモジナイズし、DNeasy Plant Mini Kit (QIAGEN) を用いて DNA 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 (Taqman プローブ) を作製し、マルチプレックス検出が可能なリアルタイム PCR 機 (BIO RAD、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換算した。また、調査サンプルと同一の海水 1 L 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) 初認日と冬季水温の関係

平成 30 年度に実施した統計解析により、当該海域における *K. mikimotoi* の初認日が発生規模や冬季水温と関連があるか検討した (黒田ら 2019)。その結果、初認日と発生規模については相関が確認できたが、初認日と冬季水温との相関は認められなかった。しかし

この解析は、瀬戸内海西部、豊後水道及び土佐湾海域の複数海域において、年代の異なるデータを統合して行ったため、年代や海域ごとの特徴を適切に抽出できていなかった可能性がある。そこで本年度は、昨年度と同じデータを用いて解析期間や海域別に関係性がどうか再度検討した。

2) 赤潮予察技術の検証及び発生規模に関与する環境要因の抽出

平成30年度までに実施した統計解析により、浦ノ内湾における *K. mikimotoi* 赤潮の発生、非発生を反映する環境要因（気象・海象）を見出し、判別分析による予察技術を開発した。また、宿毛湾においても *K. mikimotoi* 赤潮の発生、非発生を反映する環境要因（気象・海象）を判別分析により見出してきた（谷口 2018、黒田ら 2019）。本年度は、これまでに作成した赤潮予察技術の結果を検証した。また、赤潮の発生・非発生の判別だけでなく、発生規模に影響を与える環境条件を検討した。なお解析期間は2002年～2017年とした。

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、赤潮発生等監視調査事業に記載しているため、本稿では割愛した。

(2) *K. mikimotoi* 高感度監視調査

遺伝子調査の結果を図1に示した。浦ノ内湾では3月から本種が検鏡、PCR法ともに検出され、4～6月の期間で継続的に高密度で確認された。宿毛湾では4～5月にPCR法で検出されたものの、検鏡では確認されず、6月には双方で確認されなくなった。

(3) 赤潮発生シナリオと予察技術の検証と改良

1) 初認日と冬季水温の関係について

①既存データの解析（初認日と冬季水温の関係について）

Honjo et al. (1991) では、冬季（12月～3月）の水温が高いほど *K. mikimotoi* を1 cell/mL以上確認する日が早く、1,000 cells/mLに達する日も早くなることが報告されている。本年度は、初認日と冬季水温について、データ期間・海域別に解析を行い、関連性を検討した。広島湾、周防灘、豊後水道及び土佐湾海域におけるそれぞれの冬季水温（原則12月～3月）と初認日（*K. mikimotoi* 遊泳細胞を1 cell/mL確認した日の3月1日からの経過日数）を図2に示した。冬季水温は、例えば豊後水道では平均15.3℃であったのに対し、周防灘では平均8.9℃と海域ごとに大きく異なったが、冬季水温が高い海域ほど初認日が早くなる傾向は認められなかった。

次に、各海域の解析期間を2000年～2018年に揃えて、*K. mikimotoi* の最高細胞密度が1,000 cells/mL以上の年を発生年、1,000 cells/mL未満を非発生年と定義し、発生年のみ、若しくは非発生年を含む期間で解析を行った。解析は初認日と冬季水温について、Spearmanの無相関検定により相関の有無を確認した（表1）。その結果、山口県、福岡県

及び大分県を含む周防灘海域の非発生年を除いたケースで冬季水温が高ければ初認日が早くなる傾向が確認された（表1、図3）。また、大分県及び愛媛県を含む豊後水道海域の非発生年を含む・除いたケースでは、冬季水温が高ければ初認日が遅くなるという周防灘とは逆の傾向が確認された（表1、図3）。*K. mikimotoi* は、培養試験において10℃以上で増殖することが確認されており（山口・本城 1989）、周防灘や博多湾では10℃、11℃以上で遊泳細胞が確認されていることから（馬場ら 1994、佐藤ら 1996）、水温約10℃が個体群密度を維持するために必要な水温だと推測される。周防灘海域における冬季平均水温は8.8℃であり、10℃という本種の個体群維持の水温閾値付近である。そのため、周防灘海域では冬季水温が高い年ほど越冬細胞の生存確率が高くなり、初認日が早くなる可能性が考えられた。また、豊後水道海域において逆の関係が確認された一つの要因として、黒潮等の影響により海水交換が活発に行われると、シードポピュレーションとなる遊泳細胞の個体群密度が低下することが考えられた。つまり冬季水温が高い時は、黒潮からの暖水波及が多かったと推測されることから、海水交換による個体群密度の低下が起こり、初認日が遅くなる可能性が考えられた。一方、各県海域で相関が認められなかった理由の一つとして、初認され始める冬季～初夏の調査頻度および方法が1つの原因だと考えられた。Honjo et al. (1991) は、週1回の濃縮検鏡を行った結果であったが、本研究でデータを用いた各県の調査頻度は月1、2回程度であり、濃縮検鏡を行っていない年もあるため、正確な初認日をとらえられていない可能性が考えられた（表2）。

以上の結果より、周防灘及び豊後水道海域で冬季水温と初認日との間に相関が認められたものの、各県海域では相関は認められなかった。しかし今後、*K. mikimotoi* 赤潮がいつ起きるか、またはその年の *K. mikimotoi* 赤潮が大規模化するかどうかを推察するうえでも、低密度期のモニタリングが重要であり、高感度に *K. mikimotoi* を検出できる遺伝子量調査と検鏡データの蓄積により、*K. mikimotoi* 赤潮の発生の有無や規模の大小に関する予察精度向上が期待される。

2) 赤潮予察技術の検証及び発生規模に関与する環境要因の抽出

①浦ノ内湾

本年は *K. mikimotoi* 赤潮の発生年となったが、これまで作成した予察モデルの多くでは「非発生年」となり、十分に的中したとは言えなかった（表3）。作成した予察モデルが十分的中しなかった要因として、本年の *K. mikimotoi* 赤潮の発生が非常に早期であったことが考えられた。作成した予察モデルは、主に当該海域で赤潮を形成する梅雨時期（6、7月）を対象としたものであるが、本年は赤潮の確認日が5月1日であり、1か月以上早かった。予察モデルの中での的中率の高い環境要因は5月以降のものが多くことから、本年における発生を十分に予測できなかったと考えられた。高感度調査では、本種遺伝子が冬季～春季において常に検出されており、濃縮検鏡においても遊泳細胞が確認されていたことから、赤潮のシードポピュレーションは存在していたと考えられる。また、本年は暖冬の影響で浦ノ内湾内の海水温が比較的高く保たれていたことや、冬季～春季にかけて競合する珪藻類の生育が不調であり、*K. mikimotoi* が増殖しやすい条件が

整っていたことから、赤潮の発生につながったと考えられた。

次に、これまでの赤潮発生・非発生に関わる環境条件に加え、大規模発生・小規模発生に関する環境条件の抽出を行った。赤潮大規模発生基準は、最高細胞密度 10,000 cells/mL を目安とした。その結果、浦ノ内湾における *K. mikimotoi* 赤潮の大規模発生年に関わる環境条件は 11 項目得られた (表 4)。特に、4 月に中層の溶存態窒素 (DIN) が高い条件、5 月に中層から底層にかけて塩分が低い条件、6 月の降水量が多い条件が *K. mikimotoi* の赤潮発生規模に関わっていることが示唆された。これらを基にすると、図 4 に示すような浦ノ内湾における *K. mikimotoi* 赤潮発生シナリオが考えられる。

一方、当該海域において、*K. mikimotoi* 遊泳細胞の確認が早い年は赤潮が大規模・長期化し、確認が遅い年は赤潮を形成しても小規模・短期化する傾向があった (表 5)。近年における本種の遊泳細胞の確認は、これまでの発生時期と比べ早い傾向にあり、赤潮の形成時期も早期化している。従前の発生時期と異なることから、これまで作成した予察モデルが的中しない事例が発生している。また、前述した発生シナリオの作成に用いたデータは早期化する以前のものが多いことから、早期化する赤潮を発生シナリオから予測することは難しいと考えられる。さらに、このように早期化する赤潮に関するデータは数年分しかなく、予察や発生シナリオの改良に用いるには十分とはいえない。一方で、短期予察によって発生を予測できる事例もあることから、新たな予察手法について検討する必要があると考えられる。

②宿毛湾

本年は *K. mikimotoi* 赤潮の非発生年となり、遊泳細胞も最高で 3 cells/mL を確認するにとどまった。当該海域において本種についての予察モデルは構築されておらず、検証には至っていない。過去の発生事例から、隣接する愛媛県海域における *K. mikimotoi* 赤潮の発生後に当該海域で赤潮が発生する傾向がみられており、隣接海域からの移入・集積が当該海域における一因と考えられている。本年度は、隣接海域においても *K. mikimotoi* 赤潮が確認されておらず、当該海域においても低密度であったことから、当該海域と隣接海域の発生状況は密接に関わりあっていると考えられた。高感度調査では、本種遺伝子が 4 月から 5 月にかけて検出されたが、遊泳細胞の初認は 8 月であった。当該海域は増殖条件が整い難い環境であると考えられるが、詳細は不明であり、今後の課題である。

4 引用文献

谷口越則 (2018) 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瀬戸内海西部・豊後水道海域. 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」, 水産庁, 東京, 98-116.

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・恵崎摂・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・武岡英隆・松原孝博・山口晴生・鬼塚 剛 (2019) 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①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」事業報告書, 水産庁, 東京. 50-99.

Honjo T, Yamaguchi M, Nakamura O, Yamamoto S, Ouchi A, Ohwada K (1991) A relationship between winter water temperature and the timing of summer *Gymnodinium nagasakiense* red tides in Gokasho Bay. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 57 (9), 1679-1682.

山口峰生・本城凡夫 (1989) 有害渦鞭毛藻 *Gymnodinium nagasakiense* の増殖におよぼす水温、塩分および光強度の影響. 日本水産学会誌, 55(11), 2029-2036

馬場俊典・檜山節久・神菌真人・江藤拓也・岩尾昂・樋下雄一・小泉喜嗣・高島景・内田卓志・本城凡夫 (1994) 西部瀬戸内海における赤潮渦鞭毛藻 *Gymnodinium mikimotoi* 遊泳細胞の越冬について. 日本プランクトン学会誌, 41, 69-71

佐藤利幸・本田清一郎・池内仁 (1996) 福岡湾における *Gymnodinium mikimotoi* 栄養細胞の季節変化. 福岡水技研報, 5, 51-58

宮川博妃・茅野昌大・和西昭仁・馬場俊典・俵積田貴彦・恵崎摂・井口大輝・大竹周作・岩野英樹・木村聡一郎・菅沼倫美・山田英俊・久米洋・村田憲一・黒田麻美・東谷福太郎・吉江直樹・郭 新宇・清水園子・武岡英隆・松原孝博・鬼塚 剛 (2018) 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瀬戸内海西部・豊後水道海域. 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」, 水産庁, 東京. 39-97.

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・恵崎摂・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・武岡英隆・松原孝博・山口晴生・鬼塚 剛 (2019). 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①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」事業報告書, 水産庁, 東京. 50-99.

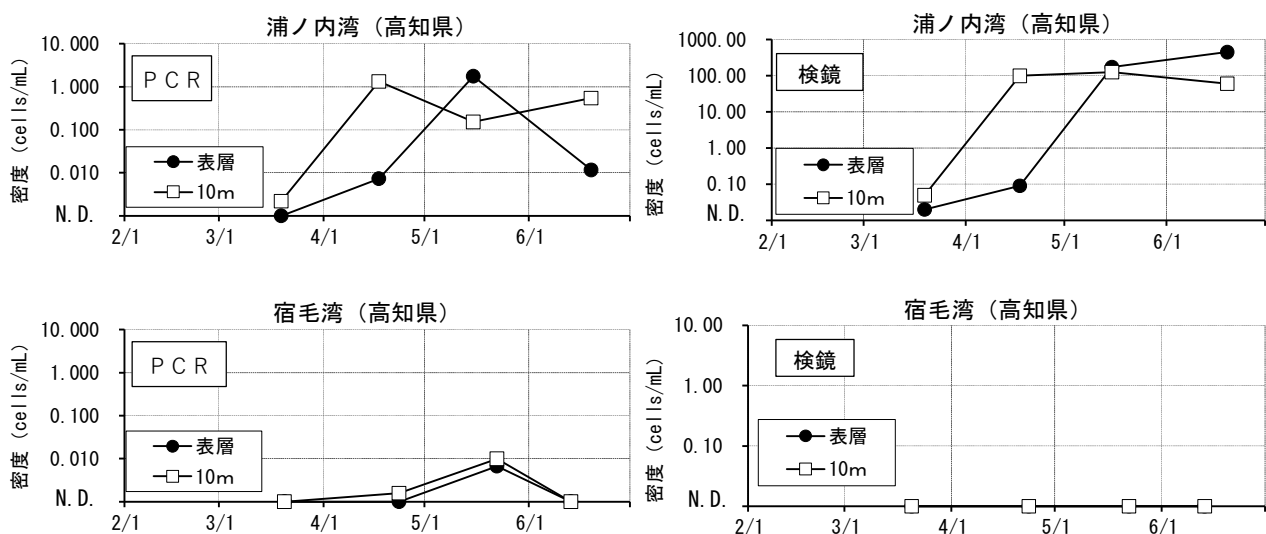


図 1 2019 年の *K. mikimotoi* の遺伝子調査結果 (左 PCR 法、右検鏡法の結果)

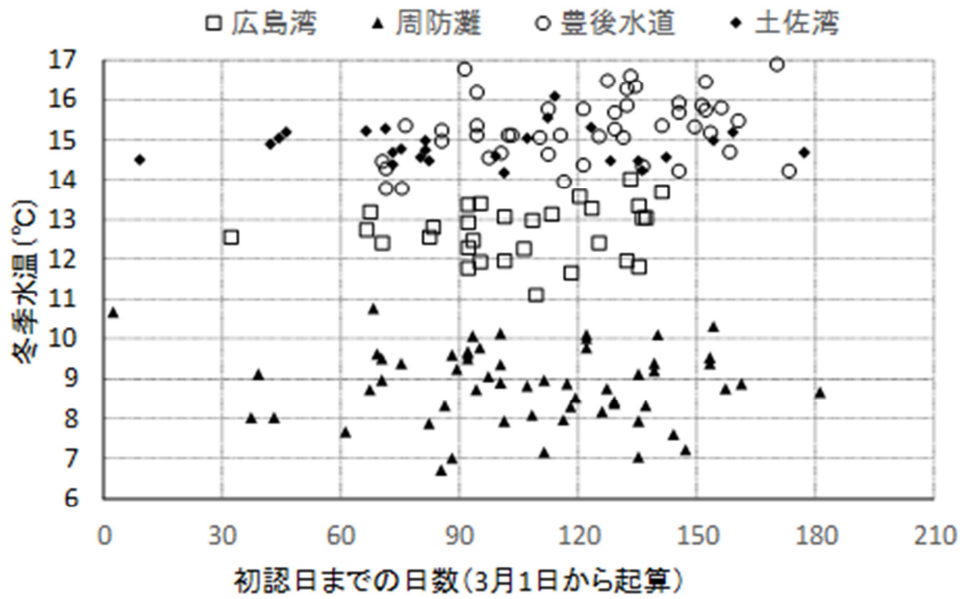


図2 各海域における冬季水温と初認確認日との関係解析期間（広島湾：1986年～2018年、周防灘：1991年～2018年、豊後水道：1990年～2018年、土佐湾：1985年～2014年）

表1 使用した冬季水温の解析期間と冬季水温と初認日の無相関検定結果

No.	海域	赤潮非発生年 (1,000 cells/ml) の有無	解析期間	ρ 値	相関係数	検定方法
1	周防灘(山口湾:山口県)	非発生年含む	2000～2017(18年間)	0.3491	-0.2224	Spearman's
		非発生年除く	2000～2016(13年間)	0.7329	-0.0200	
2	周防灘(西部海域:福岡県)	非発生年含む	2004～2017(14年間)	0.4591	-0.2695	
		非発生年除く	2005～2017(9年間)	0.2298	-0.6051	
3	周防灘(南部海域:大分県)	非発生年含む	2000～2018(19年間)	0.6548	-0.1691	
		非発生年除く	2000～2016(8年間)	0.5821	-0.2935	
4	周防灘(No.1～3全て含む)	非発生年含む	2000～2018(19年間)	0.1059	-0.2951	
		非発生年除く	2000～2017(14年間)	0.0893	-0.4446	
5	広島湾(北部海域:広島県)	非発生年含む	2000～2018(19年間)	0.9801	0.0212	
		非発生年除く	2000～2018(14年間)	0.2431	0.2352	
6	豊後水道(佐伯湾:大分県)	非発生年含む	2000～2018(19年間)	0.267	0.3262	
		非発生年除く	2000～2018(16年間)	0.6238	0.2317	
7	豊後水道(岩松湾:愛媛県)	非発生年含む	2000～2018(18年間)	0.9449	0.0666	
		非発生年除く	2000～2018(15年間)	0.8525	-0.0220	
8	豊後水道(No.6と7全て含む)	非発生年含む	2000～2018(19年間)	0.0518	0.3744	
		非発生年除く	2000～2018(17年間)	0.0572	0.3552	
9	土佐湾(浦ノ内湾:高知県)	非発生年含む	2000～2017(18年間)	0.8434	0.0334	
		非発生年除く	2000～2015(13年間)	0.5279	0.2864	

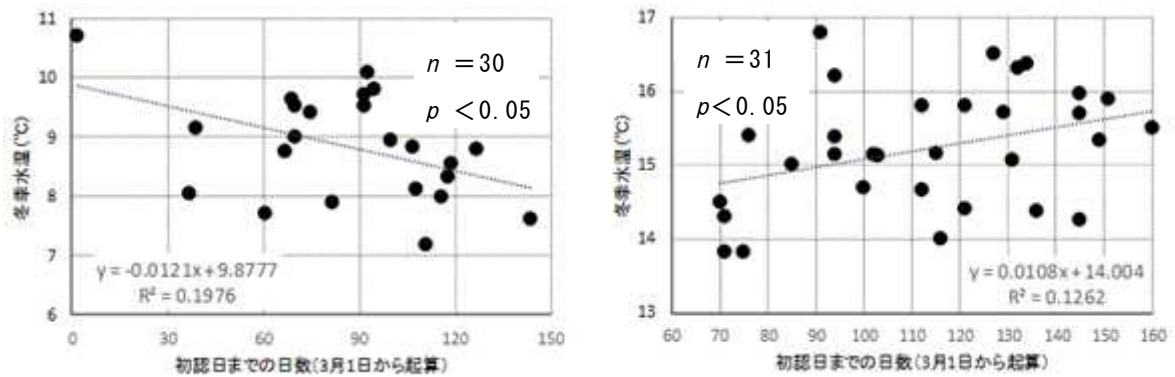


図3 冬季水温と初認日の関係（非発生年を除く）

左：周防灘海域（山口県+福岡県+大分県）、右：豊後水道海域（大分県+愛媛県）

表2 2000年～2017年における冬季～初夏の赤潮調査について

海域	担当県	調査頻度	濃縮検鏡
広島湾	広島	月1回～月3回	2001年～
周防灘	山口(徳山湾)	月1～3回	2001年～
	福岡	月1～2回	2013年～
	大分北部	月1～2回	2012年～
豊後水道	大分上浦(佐伯湾)	週1回～月1回	×
	愛媛	月1～4回	2007年～
	高知(宿毛湾)	月1回	×
土佐湾	高知(浦ノ内湾)	月1～4回	×

表3 浦ノ内湾（高知県海域）における判別予測・結果

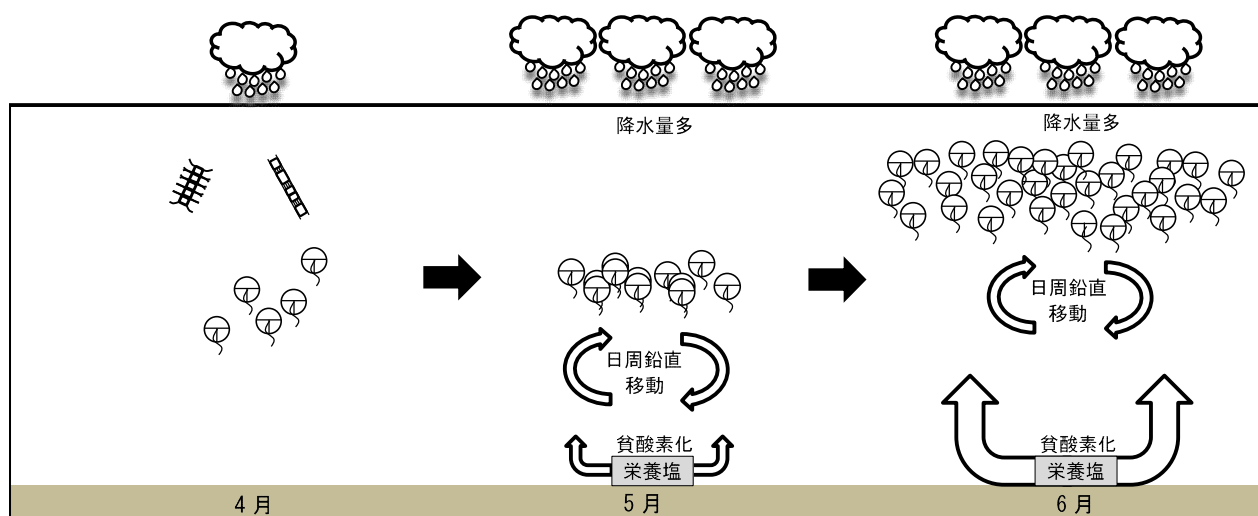
海域	解析手法	説明変数	説明変数の数	判別期間(年)	的中率(%)	2018年	2018年	2019年	2019年
						予測	的中	予測	的中
浦ノ内湾(高知県)	マハラノビス距離	6月下旬平均気温 6月降水量	2	2002～2017	93.8	×	◎	×	×
浦ノ内湾(高知県)	マハラノビス距離	6月下旬平均気温 4月底層DIN	2	2002～2017	100.0	×	◎	×	×
浦ノ内湾(高知県)	マハラノビス距離	1月中旬降水量 3月中旬日照時間	2	2002～2017	87.5	×	◎	○	◎
浦ノ内湾(高知県)	マハラノビス距離	1月中旬降水量 5月表層DO	2	2002～2017	87.5	○	×	○	◎
浦ノ内湾(高知県)	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	×	◎	○	◎
浦ノ内湾(高知県)	マハラノビス距離	6月降水量 4月底層DIN	2	2002～2017	87.5	×	◎	×	×
浦ノ内湾(高知県)	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	×	◎	×	×
浦ノ内湾(高知県)	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	×	◎	×	×
浦ノ内湾(高知県)	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	○	×	○	◎
浦ノ内湾(高知県)	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	×	◎	○	◎
浦ノ内湾(高知県)	マハラノビス距離	5月表層DO 5月底層DO	2	2002～2017	87.5	×	×	×	×
浦ノ内湾(高知県)	マハラノビス距離	5月底層DO 4月底層DIN	2	2002～2017	87.5	×	◎	×	×

* 予測の○×は発生・非発生の判定結果。的中の◎×は予測の的中結果を表す。

表4 浦ノ内湾（高知県海域）において抽出された赤潮大規模発生に関する環境要因

(** : $p < 0.01$, * : $p < 0.05$, + : $p < 0.1$)

環境要因	t検定		U検定	
	p値	結果	p値	結果
5月下旬平均気温	0.090	+	0.089	+
6月下旬平均気温	0.006	**	0.015	*
5月下旬降水量	0.049	*	0.023	*
6月降水量	0.052	+	0.055	+
7月表層水温	0.057	+	0.034	*
5月10m層塩分	0.075	+	0.071	+
5月底層塩分	0.018	*	0.034	*
5月表層DO	0.030	*	0.044	*
3月5m層クロロフィル	0.052	+	0.026	*
4月5m層DIN	0.042	*	0.008	**
4月底層DIN	0.065	+	0.091	+



1. 低密度期
 - 遊泳細胞で周年存在
 - 降雨と鉛直混合による中底層の塩分低下が生残に有利
 - 表層の珪藻類が増殖不調
 - 中層のDINが高いと大規模発生する可能性
2. 増殖期
 - 貧酸素化で、底泥の栄養塩溶出
 - 日周鉛直移動で栄養塩を利用
 - 降水量多(他種減少)で増殖に有利かつ、大規模発生する可能性
3. 赤潮盛期
 - 表層に浮上
 - 最高密度に到達
 - 貧酸素化が進み、中層まで栄養塩溶出
 - 日周鉛直移動で栄養塩を利用
 - 分布域拡大
 - 降水量多で大規模発生する可能性

図4 浦ノ内湾における *K. mikimotoi* 赤潮発生シナリオ

表5 浦ノ内湾（高知県海域）における旬毎の*K. mikimotoi*の最高細胞密度

西暦	4月			5月			6月			7月			8月		
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
2000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20,000	88	0	0
2001	0	0	0	0	0	0	0	510	8,300	1,620	54	36	152	0	0
2002	0	0	0	0	2	0	0	2	8	100	190	256	283	116	0
2003	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	84	116
2004	0	0	0	0	0	0	0	1,441	16,060	8,180	0	0	16,560	2	0
2005	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
2006	0	0	0	0	0	0	0	2	54	11,700	52,200	22,600	32,200	16	58
2007	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0
2008	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	4,400	0
2009	0	0	0	0	0	0	0	0	13	24	30	14	89	1,960	22
2010	0	0	0	6	68	68	434	4,675	3,490	1,640	1,400	188	2	0	0
2011	0	0	0	0	1	0	15	3	20	276	1,390	1,760	82	1,840	1,170
2012	0	0	0	0	0	2	92	1,210	3,120	520	1,860	1,990	27,300	18	1
2013	3	10	50	32	455	2,780	8,700	7,300	23,700	4,380	30	34	32	18	2
2014	30	20	90	130	270	7,400	30,500	61,000	171,200	1,433	2,250	9,300	0	0	0
2015	1	2	8	180	2,050	4,900	2,700	170,000	67,000	11,100	5,600	10,600	4,900	1,500	150
2016	330	130	23	16	15	17	26,500	19,400	19,400	160	120	16	3	0	0
2017	0	0	0	22	45	212	1,370	18,000	19,000	22,750	22,750	1,350	14	0	0
2018	0	0	25	5	1	77	114	75	79	66	0	1	7	750	3,500
2019	8	100	750	4,300	18,000	3,100	1,400	18,000	47,000	28,000	5,600	4,000	22,000	850	0

* 赤の部分赤潮発生時(≥1,000cells/ml)

<1,000cells/ml ≥1,000cells/ml