



## 瀬戸内海の水環境・生態系を管理する

広島大学環境安全センター長・教授  
西 嶋 渉

### 1. はじめに

瀬戸内海の水環境・生態系は、自然要因と人為要因の変化によって変遷しており、必然的にその管理方策も変わっていかねばならない。高度経済成長期から 20 世紀末にかけては、瀬戸内海をはじめとする閉鎖性水域の水質汚濁、富栄養化が顕著となった時代であり、瀬戸内海の水質に影響を及ぼす全域で栄養塩類を含めた人為的な水質汚濁物質を削減する対策がとられた。現在の瀬戸内海は、総体的には水環境保全が達成されていると見なせるが、地域単位で見ると水環境保全が依然として中心課題である海域もあれば、生物生産の回復、あるいは養殖業との両立が課題の海域もあり、瀬戸内海全域を同一の方法で管理することが適切ではなくなっている。「瀬戸内海における今後の環境保全の方策の在り方」において、特定の水域、湾・灘、瀬戸内海全体といった空間スケールおよび各地域の実情に応じた管理を使い分け、様々な問題を同時解決する「令和の里海づくり」が提唱された背景がここにある。さらに将来を見据えると気候変動に起因する水温上昇により、瀬戸内海の水環境・生態系が大きく変化することはほぼ確実であり、その変化に適応した管理が期待される。ここでは、瀬戸内海を管理する管理制度についてまとめ、最後に気候変動に伴う中長期の瀬戸内海の変化について考えていきたいと思う。

### 2. 瀬戸内海を管理する基盤的制度

環境基本法第 16 条に基づいて設定される環境基準の達成が環境保全政策の目標であり、環境基準は、「人の健康の保護に関する環境基準(健康項目)」と「生活環境の保全に関する環境基準(生活環境項目)」に分けられる。生活環境項目は、河川、湖沼、海域別に、その利用目的に応じた水域類型を設けて設定されている。後述する水質総量削減制度の対象である COD、窒素、りんは生活環境項目であり、これらの環境基準を達成するために各種施策が実施されている。

わが国の水質規制のベースは 1970 年に制定された水質汚濁防止法であり、ここでは公共用水域の水質汚濁を防ぐために排水基準に基づく規制がなされている。全国一律の排水基準では水質汚濁防止が不十分であると認められる水域においては、上乘せ基準を設定することができる。しかし、人口や産業が集中し、閉鎖性が高い水域では、上乘せ基準を設定したとしても、濃度規制だけでは水質汚濁が防止できないとの認識から、昭和 48 年制定の瀬戸内海環境保全臨時措置法において、瀬戸内海に排出される産業排水に関わる COD の汚濁負荷量を昭和 47 年の 1/2 程度に減少させるという汚濁負荷量の総量を削減するという考え方が初めて示された。しかし、この時点では負荷量の総量を削減するための方策は濃度規制の強化であり、現在の水質総量規制制度とは異なる。現在の水質総量規制は昭和 53 年の水質汚濁防止法及び恒久法となった瀬戸内海環境保全特別措置法の改正によって制度化された。

5年1期で実施される水質総量規制は、当初はCODのみが規制対象であったが、第5次総量規制(目標年度平成16年)からは規制対象に窒素・りんが追加された。水質総量削減制度においては、汚濁負荷量の削減目標量を設定し、その達成を目指す、基本的には削減目標量は毎次強化されてきた。しかし、大阪湾を除く瀬戸内海では、窒素及びりんの環境基準の達成率は全ての指定水域において100%に近い水準であり、水質は他の指定水域と比較して良好な状態であることから、第6次総量規制から現状の水質を維持する(悪化させない)こととされ、現在もその方針が維持されている。

### 3. 海域特性に応じた管理

瀬戸内海では、前述した瀬戸内海環境保全特別措置法によって環境保全が図られているが、平成27年に同法の大幅改正がなされ、瀬戸内海の環境保全は、その有する多面的価値及び機能が最大限に発揮された豊かな海とすることを旨として行うこと、湾・灘ごとや季節ごとの課題に対応する必要があることが示された。この背景には、水域によっては窒素、りんといった栄養塩類濃度が低いことによる生態系や水産資源への影響を懸念する声が高まったことがある。令和3年の改正では、さらに一步踏み込み、栄養塩類管理制度が導入された。栄養塩類管理制度では、栄養塩類の不足を一因として生物多様性・生物生産性の確保に支障が生じているおそれのある海域を対象海域として、その周辺海域と周辺陸域を含めた検討区域を設定し、管理が実施される。この制度のもとでは、水質汚濁防止法に規定する水質総量規制の適用除外を受けることが可能であり、自由度の高い栄養塩類管理が可能である。一方で、栄養塩類の供給によって周辺環境を含めて環境保全上の問題が起こらないように、環境に及ぼす影響の調査・予測・評価を行い、順応的管理プロセスを導入することが求められている。

瀬戸内海のような閉鎖性海域では、人為負荷による栄養塩類の供給が全くなかったとしても、河川や地下水を經由して供給される自然由来の栄養塩類によって、高い生物生産が得られる。栄養塩類管理の背景には、人為負荷の栄養塩類を適切に管理した上で、海域に供給することで、自然由来の生物生産よりさらに高い生物生産を目指そうという里海の発想がある。しかし、適切な管理がなされなければ、再び富栄養化が進み、環境保全上の問題を引き起こすリスクがある。富栄養化が顕著であった21世紀後半に漁業生産がピークであった事実から類推しても、環境保全と生物生産の両立は容易ではない。そのため、栄養塩類管理制度を導入するにあたっては、慎重に水環境への影響を評価し、導入後も水環境を監視し、その結果を確認しながら順応的に施策を実施する必要があることは自明であろう。

瀬戸内海の栄養塩類管理を瀬戸内海全体や湾灘よりも小さな空間スケールで行うことの妥当性は、陸域からの栄養塩類負荷の影響の強さが海域によって異なることから説明される。瀬戸内海の栄養塩類の約6割は接続する太平洋から流入すると推定されており<sup>1)</sup>、人為負荷が卓越する陸域からの栄養塩類の流入負荷より大きい。そのため河川水や地下水の影響を受ける沿岸部や内湾では、人為負荷の影響を強く受け、他方沖合部や水道部では陸域影響は限定的となる<sup>2)</sup>。また、沿岸部や内湾においても陸域からの負荷の大きさは、流入河川や特定施設の立地状況によって大きく異なる。

### 4. 水環境および生物生産の監視

水質汚濁防止法に基づく測定計画に従って実施される公共用水域水質調査は、環境基準の達成状況を確認する重要な行政ツールであり、瀬戸内海全体では301地点の測定地点がある。これらの測定地点が代表する水域面積は平均では77km<sup>2</sup>となり、比較的狭い特定の海域での管理が想定される栄養塩類管理制度における現状把握などにおいては明らかに測定地点の空間密度が不十分である。

人為的な栄養塩類負荷低下の影響を強く受ける沿岸部で営まれるノリ養殖において、近年色落ちなどの栄養塩不足の影響が表れていることは理解できる。一方で、魚類等を中心とした漁獲の減少と栄養塩類の関係については慎重に考える必要がある。漁獲が生物量を表さないことはひとまずおいておくとしても、陸域からの

栄養塩類負荷の減少が漁獲の減少を引き起こしたとすると、食物連鎖の出発点である栄養塩類の減少によって魚類等水産生物の餌不足が起こり、魚類等が減少したということになる。つまり、陸域からの栄養塩類負荷の減少が植物プランクトン、付着微細藻類などの基礎生産、それにつながる動物プランクトンや底生動物などの二次生産を減少させて、その結果として魚類等高次生物の生物生産の減少を引き起こしたというボトムアップ効果が働いたということになるが、それを証明する科学的な知見はない。植物プランクトンによる基礎生産の解析からは、人為的な栄養塩類負荷低下の影響を強く受けた海域では、栄養塩類濃度の低下とともに基礎生産の減少が顕著に起こったことが示されているが、基礎生産の減少が明確な海域は瀬戸内海全体のほんのわずかであり<sup>3)</sup>、ここでの減少が瀬戸内海全体の漁獲を半減させるほどの影響があったかどうかは不明である。さらに、多くの魚類の直接の餌となる動物プランクトンや底生動物などに関する情報は少なく、これらの生物は定期的なモニタリングの対象にもなっていない。改正された瀬戸内海環境保全特別措置法が豊かな海を目指す以上、栄養塩類だけでなく、豊かな海の基礎となる低次生態系を支える動物プランクトンや底生動物等のモニタリングを体系的に進め、海域の生態系の理解の上で栄養塩類の管理が図られることが望まれる。

## 5. 浅場の役割

瀬戸内海の水環境・生態系に影響を及ぼす人間活動は、栄養塩類の人為負荷だけではない。土地造成や護岸整備などの沿岸域の改変も浅場の消失を通じて瀬戸内海の水環境・生態系に大きな影響を及ぼしたと考えられる。藻場や干潟といった沿岸生態系が存在する浅場は、瀬戸内海全体の面積からするとわずかではあるが、生物の生息場、再生産場として重要な位置を占めている。瀬戸内海沿岸府県における人工海岸(潮間帯に人工構造物がある海岸)の割合(図1:第4回自然環境保全基礎調査海岸調査報告書<sup>4)</sup>に基づき著者作図)をみると浅場の消失が顕著であることがわかる。大阪府の人工海岸比率 91.2%は特別としても、その他の県の人工海岸の割合も平均 41.8%であり、島しょ部が多い瀬戸内海においてこれだけ高い人工海岸比率となっていることは、広範囲で浅場が消失していることを意味する。変化の乏しい砂泥質の海底が主体の瀬戸内海では、立体的な景観を作り出し、葉上動物の生息場となっている藻場は貴重な生態系である。

栄養塩類管理だけで豊かな海が再生とは限らず、生物生産が低下した要因を解析し、生物資源管理の徹底や浅場生態系の再生などを含めた総合的な対策を講じることが必要である。

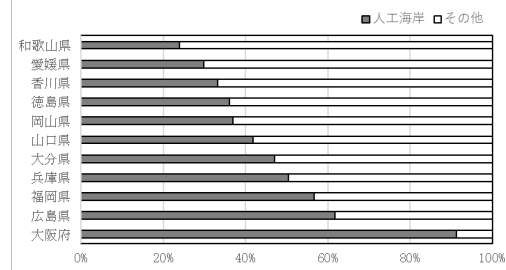


図1 瀬戸内海沿岸府県における人工海岸の割合

## 6. 気候変動の影響

国連気候変動に関する政府間パネル(Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC)の第一作業部会第六次評価報告書(WGI AR6, 2021)によれば、1850~1900年から2010~2019年までの人為的な要因による世界平均気温の上昇は1.07°Cである。今後の気候変動の予測において示されている4つのシナリオでは、向こう数十年の間に二酸化炭素及びその他の温室効果ガスの排出を大幅に削減し、21世紀後半にCO<sub>2</sub>排出量の正味ゼロを見込んだ最も気温上昇の低いシナリオであるRCP2.6においては2°C前後、化石燃料依存型を続け、気候政策を導入しない最も気温上昇が高いシナリオであるRCP8.5では4°C前後の気温上昇が予測されている。日本をはじめ世界各国が2050年カーボンニュートラルに向けた取り組みを始めてはいるが、過去に排出された温室効果ガスが大気中に蓄積されており、ある程度の気候変動は避けられない状況にある。そのため、温室効果ガスの排出量削減を中心とした緩和策とともに気候変動への適応も進める必要があることから、2018年に気候変動適応法が策定された。

長期的な視点で見ると、気候変動は瀬戸内海の水環境・生態系を大きく変える可能性がある。すでに瀬戸内海では冬季の暖化傾向がみられ、冷水系起源のサケ目が絶滅あるいは絶滅危惧種となっている一方で、暖海魚のチダイの急増と分布域の拡大、温帯・暖海性魚類であるナルトビエイの大量出現、同じく暖海魚であるアイゴによるアマモの食害などがすでに報告されている<sup>5)</sup>。暖海性魚類にはアイゴの他イヌズミ類、ブダイ類等藻食魚が多く存在し、将来これら藻食魚類の瀬戸内海への侵入と定着が起こり、食害による藻場の衰退が起こる可能性もある<sup>6)</sup>。

RCP8.5 シナリオに基づく解析では、瀬戸内海的全湾灘で表層水温が 3~4℃上昇することが予想されており、冬季の基礎生産が水温の上昇に伴って増加する一方で、夏から秋の高水温期には月平均水温が 30℃を超える海域も表れ、高温阻害によって基礎生産が大幅に低下するという予測もある<sup>7)</sup>。

## 7. おわりに

瀬戸内海環境保全特別措置法の 2 度にわたる改正によって、栄養塩類管理の制度的基盤が整った。この制度を活用して生物生産を回復させるためには、対象とする海域の水環境の状況、生物生産の減少要因等に関する科学的な知見の蓄積が必要不可欠であるが、現状ではいずれも不十分と言わざるを得ない。栄養塩類管理制度の創設を契機に、地先海域の水環境・生態系に対する科学的な知見が蓄積され、その理解のもとで、きれいで豊かな海を実現する様々な取り組みがなされることを期待する。

## 参考文献

- 1) 武岡英隆 (2006). 沿岸域における外洋起源栄養物質の見積もり法とその問題点, 沿岸海洋研究, 43, 105-111.
- 2) 西嶋渉 (2018). 瀬戸内海における栄養塩濃度管理法, 沿岸海洋研究, 56, 13-19.
- 3) Nishijima et al., (2021). Temporal distribution of primary and secondary production estimated from water quality data in the Seto Inland Sea, Japan. Ecological Indicators, 124, 107405.
- 4) 環境庁自然保護局、アジア航測株式会社(1994). 第 4 回自然環境保全基礎調査海岸調査報告書.
- 5) 重田利拓(2008). 瀬戸内海の魚類に見られる異変と諸問題, 日本水産学会誌, 74, 868-872.
- 6) 地域適応コンソーシアム中国四国地域事業最終報告書(2020).
- 7) 東 博紀ら(2020).RCP8.5 シナリオに基づく瀬戸内海の一次生産および水質への気候変動影響予測, 土木学会論文集(海岸工学), 76, I1147-I1152.

# 有毒プランクトンの防除に向けた微生物農薬の開発

東北大学大学院農学研究科 准教授

**西谷 豪**

大阪府立環境農林水産総合研究所

**山本 圭吾, 中嶋 昌紀**

元北里大学海洋生命科学部

**山口 峰生**

## 1. はじめに

近年の急激な人口増加に伴い、世界の水産物需要は増加し続けている。マガキやホタテガイ等の二枚貝養殖は、魚類養殖とは異なり給餌が不要であるため、環境に優しい持続可能な水産業として注目されている。しかし、餌となる植物プランクトンのうち、有毒種が海水中に増加すると、二枚貝がその毒を蓄積し、貝毒の原因となる。貝毒はヒトの健康被害のみならず、出荷規制によって水産業にも重大な被害を及ぼしている。日本沿岸域では、2012年頃から全国的に麻痺性貝毒の発生件数が右肩上がり増加している。

大阪湾では、2002年に初めて麻痺性貝毒が確認されて以降、ほぼ毎年のように発生している。特に2018年には大阪湾を含めた東部瀬戸内海で麻痺性貝毒が大規模に発生し、長期にわたる二枚貝の出荷停止のため、漁業に大きな被害を与えた。大阪湾での貝毒原因種は、アレキサンドリウム (*Alexandrium catenella*, group1) という渦鞭毛藻であるが、その発生を制御する手段は得られていない。そのような状況のなか、2019年に私たちの研究グループは、麻痺性貝毒の原因プランクトンに寄生して殺滅する寄生生物 (*Amoebophrya* sp.) を日本で初めて大阪湾から発見し、研究室で維持・培養することに成功した。

本研究では、(1) この寄生生物の分類学的位置を DNA で精査し、その正体が寄生性渦鞭毛藻の一種 *Amoebophrya* であること、(2) 室内培養において、最大 98% のアレキサンドリウムに感染し、その後、数日以内に死滅させること、(3) 室内培養において、様々な宿主に対する感染実験を行ない、この寄生生物が他の無害なプランクトンには寄生しないこと、(4) 室内培養において、塩分が寄生率に大きく影響を与えていること、(5) 大阪湾現場調査において、最大時には 7 割以上のアレキサンドリウムが寄生生物に感染していること、(6) 大阪湾現場調査において、寄生生物がアレキサンドリウムのシスト内にも存在していること等を明らかにした。今後さらに寄生生物の生態や増殖生理、宿主との関係性を明らかにすることによって、現場海域でのアレキサンドリウムのブルームの規模や収束時期を予測することに貢献できる可能性がある。以下、本研究で得られた成果の一部について、記載する。

## 2. 材料と方法

### 2.1 室内培養実験

培養条件下において、アレキサンドリウムが寄生生物によって寄生される様子を顕微鏡下にて観察した。また、宿主範囲を調べるため、13種の渦鞭毛藻と1種のラフィド藻を宿主として寄生生物との二者培養を行い、寄生の有無を確認した。

### 2.2 現場調査

アレキサンドリウムと寄生生物との寄生関係が、実際の現場海域においても生じていることを確かめるため、2020年2月から4月にかけて、大阪湾内の調査定点において柱状採水を実施した。水温や塩分等の

環境項目を測定し、試水中のアレキサンドリウム細胞密度を計数した。また、蛍光顕微鏡観察により、寄生生物による寄生率(%)を測定した。

### 3. 結果と考察

図 1 は培養下において、寄生生物がアレキサンドリウムに寄生する様子を撮影したものである。通常光による写真(明るい背景)と特殊な励起光をあてた際の蛍光写真(黒い背景)を示す。蛍光写真で赤く見えるのは宿主(アレキサンドリウム)の葉緑体、緑が寄生生物の自家蛍光を示す。A・Bは寄生が起こっていないアレキサンドリウムであり、C・Dでは、宿主の周りに1細胞の寄生生物が付着しているのが分かる。この1細胞の寄生生物が、宿主の細胞内に侵入し、宿主の栄養を利用して爆発的に増殖する。E・Fは感染初期を示し、寄生生物が宿主の細胞内で数十細胞にまで増殖したことにより、緑色の蛍光部分が拡大している。G・Hは感染中期、I・Jは感染後期を示す。宿主の細胞内で数百細胞まで増殖した寄生生物は、最終的に宿主の細胞を突き破り、細胞外へと出ていく(K・L)。その後、数百細胞の寄生生物が水中に分散し、次の宿主を求めて泳ぎ出す。この一連のサイクルが、2-3日で完結することが明らかとなった。

寄生率は培養条件によって異なるが、最大 98%のアレキサンドリウムに寄生することが可能であり、高い殺藻能力を示した(図 2)。図 2 の右のフラスコは、アレキサンドリウムを単独で培養し、2週間が経過したものを示す。アレキサンドリウムの大量増殖によって、培養液が茶色く濁っている。一方、左のフラスコは、右と同時期・同条件下でアレキサンドリウムを培養し、さらにごく少量の寄生生物を添加したものである。寄生生物によって、ほとんどのアレキサンドリウムが死滅していることが、培養液の透明色からうかがえる。このように、寄生生物に新しい宿主を定期的に与え、植え継いでいくことによって、研究室内で長期にわたり寄生生物を維持することが可能になった。

また、実際の現場海域において調査した例を図 3 に示す。2020年、大阪湾では3月23日にアレキサンドリウムの密度が最大になった。その翌週、寄生生物による感染率が急上昇し(最大 73%)、アレキサンドリウムの密度は急速に減少した。感染したアレキサンドリ

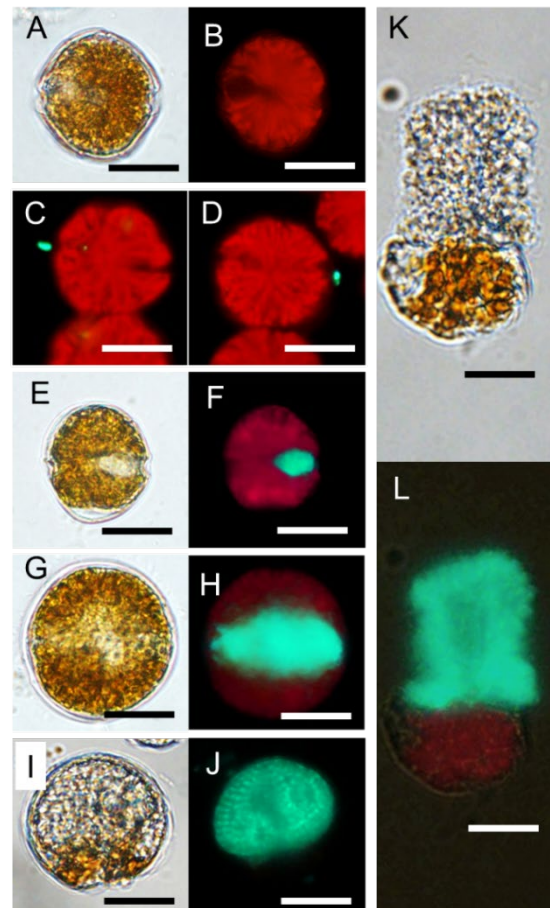


図 1 アレキサンドリウムへの寄生の様子



図 2 寄生生物の添加あり(左)となし(右)

ウムは、数日以内に死滅するため、実験室内だけでなく、実際の現場海域においても、この寄生生物がアレキサンドリウムのブルーム規模や収束に大きく影響していることが示唆された。

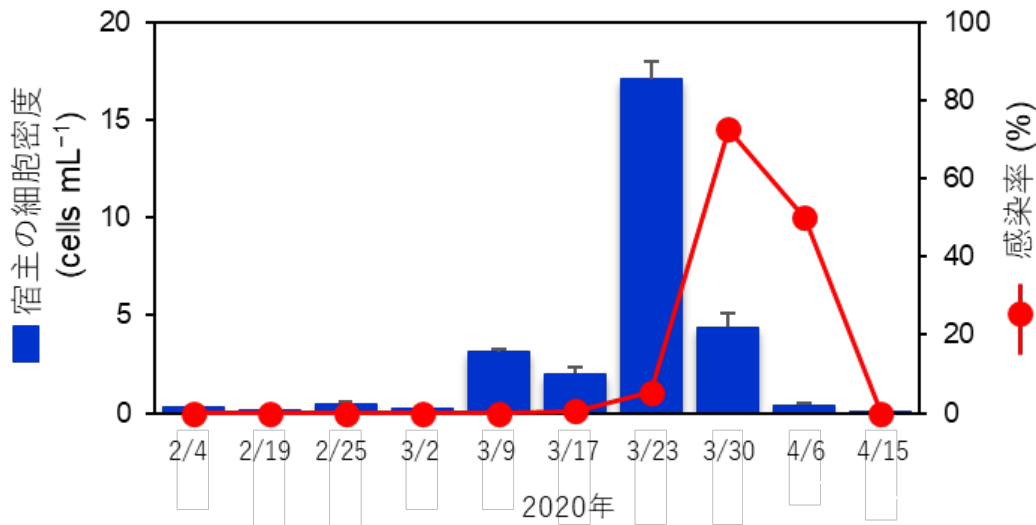


図 3 大阪湾調査定点におけるアレキサンドリウムの細胞密度(左軸:棒グラフ)と寄生生物による感染率(右軸:折れ線グラフ)の推移

#### 4. 今後の展望

室内培養および現場観察によって、この寄生生物の宿主範囲を詳しく調べたところ、この寄生生物は特定の有毒プランクトンだけに寄生し、珪藻など他の無害なプランクトンには一切寄生しないことが判明した。このことは、水中の生態系に重大な影響を及ぼさない安全な「微生物農薬」として、この寄生生物を他の海域に導入できる可能性を示している。そのため、我々は現在、この寄生生物を安定的に長期保存する方法の開発に着手している。実際の現場海域へ導入することを想定し、寄生生物の大量生産と保存に関する技術は、重要な検討事項の一つである。

また、麻痺性貝毒は全国で発生しているが、我々が発見した寄生生物は今のところ、大阪湾でのみ見つかっている。同じく麻痺性貝毒が頻発する宮城県沿岸でも寄生生物の調査を行っているが、まだその存在は確認されていない。この寄生生物がなぜ大阪湾だけに存在するのか、そしていつから大阪湾に存在していたのかは、学術的に興味深い内容である。我々は最近、海水や底泥中から寄生生物の DNA を検出する手法を確立した。大阪湾で過去に採取された底泥サンプルや、日本全国の沿岸域から採取された底泥サンプルを解析することによって、寄生生物の多様性や分布実態が明らかになると期待される。

最終的には、大阪湾から発見されたこの寄生生物を「微生物農薬」として、麻痺性貝毒によって深刻な被害を受けている全国の海域に導入し、貝毒の低減や抑制を目指す。また本成果は、有毒種による貝毒の被害低減といった水産養殖業への貢献のみならず、安心安全な潮干狩り等の観光業の発展にも波及していくものと思われる。

成果論文

Nishitani G, Yamamoto K, Nakajima M, Shibata Y, Sato-Okoshi W, Yamaguchi M. A novel parasite strain of *Amoebophrya* sp. infecting the toxic dinoflagellate *Alexandrium catenella* (Group I) and its effect on the host bloom in Osaka Bay, Japan. Harmful Algae 110, 102123 (2021)