

— 論 文 —

瀬戸内海における赤潮発生状況の長期変動と 赤潮優占群の海域特性*

石井 大輔^{1**}・柳 哲雄¹・佐々倉 諭²

要 旨

赤潮の発生規模や発生状況を評価できる指標として提案された赤潮指数をはじめとする赤潮基礎データセット (1979–2004 年) をもとに、瀬戸内海における赤潮関連情報の経年的な変動傾向や赤潮優占群の海域特性について検討評価を行った。瀬戸内海 (大阪湾以外) と大阪湾における赤潮指数の時間変動特性を解析した結果、瀬戸内海 (大阪湾以外) における赤潮指数の長期変動は 1990 年付近を極小とした増減傾向を示す一方、大阪湾のそれは約 30 年間顕著な減少傾向を示すことが判明した。また、瀬戸内海 (大阪湾以外) では主に全天日射量、大阪湾では陸域からの寄与が大きい栄養塩濃度が赤潮指数の長期変動を決める要因であることを示唆する結果を得た。さらに、赤潮構成種ごとに整理した分類群別 (珪藻群・非珪藻群・複合群) の赤潮指数から算出した赤潮優占率をもとに、瀬戸内海 (大阪湾以外) および大阪湾における赤潮の卓越群について調べた結果、瀬戸内海 (大阪湾以外) では全般的に非珪藻群が優占する一方、大阪湾では非珪藻群から珪藻群へ長期的に優占群が遷移するパターンが確認された。

キーワード：赤潮指数，長期変動，赤潮優占群，瀬戸内海

1. はじめに

瀬戸内海は、日本列島のほぼ中心に位置し、本州・四国・九州に囲まれた我が国最大の半閉鎖性内湾である。

* 2014 年 1 月 14 日受理；2014 年 7 月 11 日受理
著作権：日本海洋学会，2014

1 九州大学応用力学研究所
〒816–8580 福岡県春日市春日公園 6–1

2 株式会社 Ides
〒105–0011 東京都港区芝公園 1–3–8 松木ビル 3 階

** 連絡著者：石井 大輔
TEL/FAX：092–583–7919
e-mail：dishii@riam.kyushu-u.ac.jp

紀伊水道・豊後水道を通じて太平洋と、関門海峡を通じて日本海と接続し、かつては豊潤な水産資源と景観美を誇ってきた。しかし、瀬戸内海の水質環境は、1960 年代から急速に進展した日本の高度経済成長に伴った人為的環境改変 (人口増加・集中に伴う陸域からの汚濁物質負荷量の増大、沿岸域における過剰な埋め立て工事、直立護岸や人工構造物の建設、海底からの多量な海砂採取など) により一変する。その結果、赤潮や貧酸素／無酸素水塊といった水質機能障害が各地で頻発し、沿岸生態系の攪乱や生物資源持続性の著しい低下をもたらした (例えば、神園ら，1996；柿野，1996；山田・梶原，2004)。富栄養化現象や水質機能障害・漁業被害などを引き起こ

す深刻な水質汚濁は今なお続いており、迅速かつ適切に対応・解決すべき最重要課題となっている。

このような状況に歯止めをかけるべく、1978年、瀬戸内海の実環境保全を目的に、環境省所管の恒久法として瀬戸内海環境保全特別措置法（前身は1973年に時限法として制定された瀬戸内海環境保全臨時措置法）が制定・施行された。瀬戸内海近隣の自治体や沿岸住民は、“瀬死の海”とまで呼ばれた深刻な水質環境を改善するため、様々な水質環境復元活動ならびに水質モニタリング調査を精力的かつ継続的に展開している。その成果として、長年観測された栄養塩濃度や溶存酸素濃度などの水質データをもとに各灘・湾の水質変動傾向を解析した近年の研究から、瀬戸内海および各灘・湾における様相は以前に比べて随分明らかになってきた（例えば、柳, 1997; 武岡ら, 2002; Yanagi and Ishii, 2004; 石井・柳, 2004; 石井・柳, 2005）。

また、漁業被害などを引き起こす赤潮については、近年では栄養塩濃度などのほかに、クロロフィル α 濃度や植物プランクトンの個体数密度／細胞密度などのデータを用いた様々な研究解析（例えば、篠原ら, 1999; 柳ら, 2008; 鬼塚ら, 2011）も精力的に進む中、海域における赤潮の発生状況や被害状況を知るための評価項目の一つとして、赤潮発生件数や漁業被害件数、漁業被害金額などといった、水質データ以外の情報が用いられることは少なくない。特に、瀬戸内海においては30年以上前から赤潮監視体制が整備されていることもあって、これらの長期的推移から得られる知見は赤潮の発生状況ならびに被害状況を把握する上で非常に有意なものである。しかしながら、件数は赤潮の発生規模および被害規模の大小に関係しないので、実際の発生（被害）規模とは必ずしも対応しないことが多く、赤潮発生件数や赤潮被害件数をもとに実際の赤潮発生規模の推移を議論することには限界があった。

堤ら（2003）は、赤潮の発生規模を代表する指標として「赤潮発生規模指数（＝赤潮の発生面積×継続日数）」を提案し、近年社会問題化している九州・有明海における水質環境異変について検討を行っている。その中で、従来のように現場観測で得られた栄養塩濃度やクロロフィル α 濃度などの水質データや赤潮発生件数の推移を解析するだけでは検出できない「赤潮の大規模化」につ

いて、同指標をもとに論じている。今まで瀬戸内海において、各種の水質データや赤潮発生件数の解析は数多く行われてきたが、このようなアプローチで海域評価を試みた研究は存在しなかった。

そこで、Ishii *et al.*（2013）は瀬戸内海において同様の概念を適用し、海域内に発生した全ての赤潮の発生面積と継続日数をもとに指数化した赤潮指数をはじめとする赤潮基礎データセットを構築した。そして、大阪湾は瀬戸内海の中で突出して高い赤潮指数を有すること、単位面積あたりの赤潮指数が高い（低い）ほど、底層の溶存酸素濃度が低い（高い）傾向にあることを指摘した。しかし、瀬戸内海における赤潮指数の長期的な変動特性や海域内に優占する赤潮種の特徴などについては明らかにされていない。

本研究は、瀬戸内海を対象に構築された赤潮基礎データセット（Ishii *et al.*, 2013）をもとに、瀬戸内海における赤潮指数の経年的な変動傾向やその要因について検討する。そして、赤潮構成種ごとに整理した分類群別の赤潮指数から算出した赤潮優占率をもとに瀬戸内海で発生する赤潮の卓越群とその特徴を調べることで、瀬戸内海における赤潮の海域特性について多角的な視点から評価を試みる。

なお、本研究における瀬戸内海は、瀬戸内海環境保全特別措置法で規定される範囲のうち、山口県火ノ山下燈台から福岡県門司崎燈台に至る直線、山口県特牛灯台から同県角島通瀬岬に至る直線、同岬から福岡県妙見崎灯台に至る直線および九州、本州によって囲まれる響灘を含めないものとする。

2. 解析資料

水産庁瀬戸内海漁業調整事務所は、瀬戸内海の深刻な水質汚濁により赤潮が急増した1970年以降、赤潮に関する各種情報について毎年収集・整理し、年報「瀬戸内海の赤潮」（以下、赤潮資料と略す）を刊行している。当該資料の中には、1年間に発生した赤潮の発生海域（灘湾名）・発生分布（面積）・発生件数・赤潮を起こした植物プランクトンの種類・発生／終息日・継続日数・被害の有無などといった、赤潮に関する詳細かつ貴重な情報が克明に記載されており、一部の年では、植物プランクト

ン細胞密度も含まれている。

本研究では、1979年から2004年までの26年分における赤潮資料（水産庁瀬戸内海漁業調整事務所、1980-2005）に記載されている、赤潮発生海域・赤潮発生分布・赤潮発生件数・赤潮を起こした植物プランクトンの種類・赤潮継続日数の各種情報をもとに、瀬戸内海における赤潮に関する諸量の経年変動や諸特性について議論するため、Ishii *et al.* (2013) で構築された赤潮関連情報の時空間的な基礎データセットを使用した。

なお、本研究にて解析評価を行う赤潮基礎データの諸元や各種定義について、本稿の理解を深めることを目的として Ishii *et al.* (2013) の一端を補足する。

2.1 赤潮指数

既往の研究で提案された赤潮発生規模の評価指標は、ある特定した海域内において、分布面積 50 km^2 以上を超えて発生した赤潮を対象に、その発生面積（分布）と継続日数（持続性）の積で表現される（堤ら、2003）。現在に比べて、以前は植物プランクトン（赤潮）の個体数密度や細胞密度などの観測体制が充実していたわけではなかったため、長期的な限られた情報をもとに量的指標として赤潮の発生規模を評価したことは非常に有意である。

しかしながら、発生した赤潮の発生面積が 50 km^2 より小さくても、継続日数が長期化した場合には、発生面積と継続日数の積で算出される同指標の年間累積値は過小評価される懸念がある。そのため、本研究では発生面積が 50 km^2 以上の赤潮だけに限定せず、海域内に発生した全ての赤潮（既存資料に情報がある全赤潮）について解析対象に含めるよう拡張し、それらの発生面積と継続日数をもとに指数化した「赤潮指数」（Red Tide Index; RI, Ishii *et al.*, 2013）を導入した。

2.2 海域区分と水域区分（沿岸域と沖合域）

本研究では、大阪湾を瀬戸内海全体の対象海域に含めず単独海域として取り扱い、瀬戸内海の他の海域とは区別して赤潮指数などの特性評価を試みた。それは、同海域のリン・窒素の負荷量や濃度（柳・原島、2003; 石井・柳、2004; 石井・柳、2005）、赤潮指数（Ishii *et al.*, 2013）が他の海域に比べて突出しているためである。よって、以下において赤潮に関する諸特性を大阪湾と対比させて議論する場合の「瀬戸内海」とは、大阪湾を除く残りの11海域（紀伊水道・播磨灘・備讃瀬戸・備後灘・燧灘・安芸灘・広島湾・伊予灘・別府湾・周防灘・豊後水道; Fig. 1) のことを指すものとし、「瀬戸内海（大阪湾以外）」

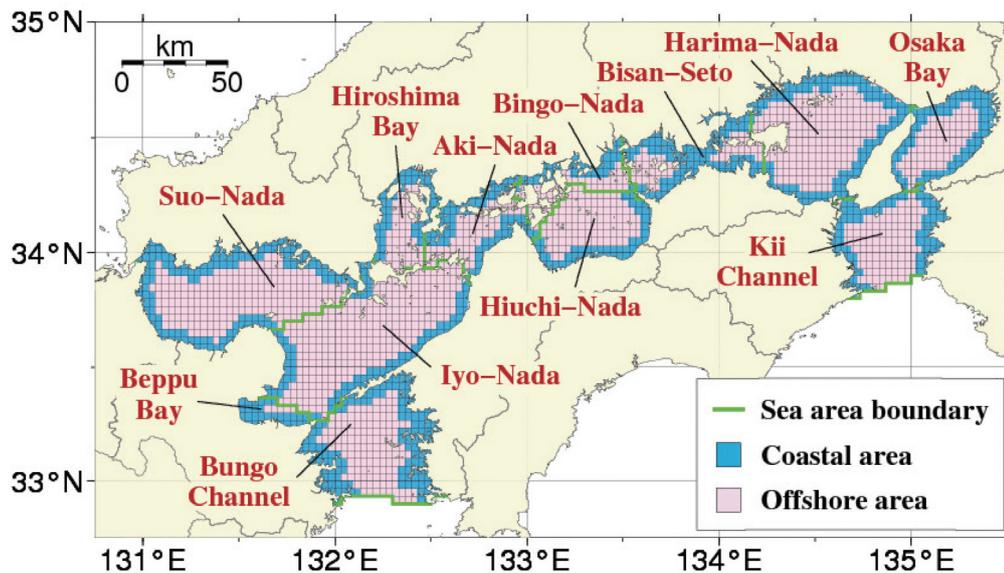


Fig. 1. Classification of sea areas into coastal and offshore for the Seto Inland Sea, Japan.

と表記する。

また、瀬戸内海各灘・湾内を「沿岸域」・「沖合域」と呼称する二つの特徴的な水域に区分して、沿岸域と沖合域における赤潮に関する諸特性を解析および評価した。一般に、沿岸域は具体的な海域の範囲が設定されているわけではなく、時と場合によって様々に定義される(例えば、海岸から X km までの範囲、排他的経済水域(200 海里)など)。本稿では、陸域からの水質汚濁負荷流入による影響把握を目的に、瀬戸内海近隣の地方自治体によって実施されている公共用水域水質調査(瀬戸内海環境保全協会, 2004)の観測点を含む範囲(岸から概ね 10 km 程度内で、大半の観測点が岸から約 3 km 以内に集中)を「沿岸域」と想定する。また、灘・湾全体のことを「全域」、全域から沿岸域を除いた残りの水域のことを「沖合域」と想定する。なお、本稿における沖合域は、瀬戸内海における水質汚濁防止対策の全体的な効果を把握するために環境省が実施している、広域総合水質調査(瀬戸内海環境保全協会, 2004)の観測水域(沿岸直近を除く)と概ね対応する。

上記を前提として、本研究において各種の赤潮情報を解析する際の「沿岸域」と「沖合域」の具体的な水域区分は、Ishii *et al.* (2013) で定義された瀬戸内海全域を緯度・経度方向に 2 分メッシュの矩形水域(東西方向に約 3.1 km, 南北方向に約 3.7 km のサイズに対応)に空間分割した範囲のうち、陸域から 1 もしくは 2 メッシュ分に対応する水域範囲を「沿岸域」、各灘・湾における沿岸域以外の水域範囲を「沖合域」とした (Fig. 1)。

2.3 赤潮構成種の分類

赤潮を起こした植物プランクトン分類ごとの特徴や海域における卓越群の変遷などについて概観し、時空間特性を含めた検討・評価を行うために、瀬戸内海において多数発生する赤潮構成種の分類を「珪藻群」・「非珪藻群」・「複合群」の三種類に単純化した (Ishii *et al.*, 2013)。

「珪藻群」とは赤潮を起こした植物プランクトンの種類が全て珪藻類から形成されるもの、「非珪藻群」とは渦鞭毛藻類やラフィド藻類など、赤潮を起こした植物プランクトンの種類が全て珪藻類以外で形成されるものとする。また「複合群」とは珪藻類と非珪藻類の赤潮が複合的に

形成され、赤潮資料に記載の情報だけでは特定・分類できない群とするが、その理由は個々の植物プランクトン細胞密度などに関するデータがほとんどの年で収集・整理されていないためである。

2.4 赤潮基礎データセットの構築

赤潮資料に記載されている赤潮関連情報をもとに赤潮指数を導出するために、赤潮関連情報の時空間的な基礎データセットを構築するための過程 (Ishii *et al.*, 2013) を説明する。

解析資料に用いた赤潮資料に記載されている赤潮関連情報は、一部を除き電子データ化されておらず、特に赤潮発生分布(面積)については数値化すらされていない場合があった。そこでまず、ある年の赤潮資料に記載されている赤潮発生分布図をトレースした後、それら情報を地理情報システム (Geographic Information System; GIS) に取り込むことで数値化し、地図情報とともに赤潮関連情報(赤潮を起こした植物プランクトンの種類・赤潮発生面積・赤潮継続日数・赤潮指数・赤潮発生件数)を属性に持つ空間的なデジタルデータに変換する。その後、瀬戸内海全域を緯度・経度方向に 2 分メッシュの矩形領域に空間分割することで、2 分メッシュごとに区分・集約された赤潮関連情報を属性に持つ 1 年ごとの基礎データセットを構築することが一連のフローである。なお、解析に用いた赤潮資料に記載の情報だけでは各種の赤潮関連情報を十分に収集・整理できない場合があった。その際は、水産庁瀬戸内海漁業調整事務所・指導課が所有する関連資料、および、いであ株式会社が瀬戸内海で発生した赤潮の各種情報を独自で集約した「月報」資料を参照し、赤潮資料の記載データとの整合を確認しながら補足資料として利用した。

既述の作業を 1979 年から 2004 年までの 26 年分について年単位で実施し、各メッシュで数値化された赤潮関連情報を属性に持つ各年の基礎データセットを構築した。なお、赤潮継続日数および赤潮発生件数に関しては、GIS 上のメッシュ単位による海域内での重複集計を避けるために、同一海域および灘・湾を跨いで発生した赤潮については、パッチ単位で植物プランクトン分類ごと(珪藻群・非珪藻群・複合群)にそれぞれを集計した。

3. 赤潮指数の時間変動特性

2分メッシュごとに区分・集約した瀬戸内海の赤潮関連情報を属性に持つ赤潮基礎データセットをもとに、瀬戸内海（大阪湾以外）と大阪湾を対比させながら赤潮指数や関連諸量の時間変動特性について言及し、赤潮指数の長期変動の特徴やその要因について評価および考察を行った。なお、本章では赤潮指数の全体的な特徴と傾向を明らかにするために、赤潮を起こした植物プランクトンの全種を累計した値で評価および考察を進めた。

Fig. 2 に、瀬戸内海（大阪湾以外）(a) と大阪湾 (b) における赤潮指数 (1979–2004) ならびに赤潮発生件数 (1975–2004) の経年変動を示す。

3.1 瀬戸内海（大阪湾以外）と大阪湾における時間変動特性

3.1.1 瀬戸内海（大阪湾以外）における赤潮指数と赤潮発生件数の特徴

瀬戸内海（大阪湾以外）における赤潮発生件数は、1976年の272件を最大に、近年ではその約1/3にまで減少しているが、1976年および1986年以降に赤潮発生件数が大きく減少した時期を除けば、その後は段階的にほぼ横ばい状態にある (Fig. 2 (a))。特に1987年以降から近年に至るまで、発生件数は約100件前後で下げ止まっており、その傾向から近年における水質改善の兆しを見出すことは難しい。

また、赤潮指数は Fig. 2 (a) に示すように 31,100–240,000 km² day の幅で変動し、特に1980年代中頃までは1983年の240,000 km² day、1986年の228,900 km² day を極大ピークとして比較的高い値で推移していた。なお、両年において赤潮指数が高かった理由は、他の年に比べて赤潮が多発した（赤潮発生件数が多かった）ためではなく (Fig. 2 (a))、おもに播磨灘や周防灘などで赤潮が広範囲に発生し (Ishii *et al.*, 2013)、それが長期化した影響によるものである。直近の2004年では、赤潮指数最大時 (1983年) に比べて赤潮の発生規模が半減している (125,800 km² day) もの、赤潮指数が急減した1987年以降から近年 (1989年を除く) まで赤潮指数は経年的な漸増傾向にあった。

1987年から赤潮発生件数は横ばいであるにもかかわらず、赤潮の発生規模を表わす赤潮指数が増加傾向にあるということは、発生する1件あたりの赤潮がここ15年から20年の間で大規模化していることを示唆している。このことは、赤潮発生件数をもとにした従来評価では判別できなかった新たな知見である。

3.1.2 大阪湾における赤潮指数と赤潮発生件数の特徴

大阪湾における赤潮発生件数は約30年間で顕著な減少傾向にあり、1970年代には年間50件を越えていた発生件数も現在では20件程度で推移している (Fig. 2 (b))。また、赤潮指数 (17,500–173,100 km² day) は1990年代中頃まで比較的高い値で推移しており、1980年代後半から低調に推移した瀬戸内海（大阪湾以外）全域における赤潮指数の経年変動とは殆ど対応関係が見られない (Fig. 2 (b))。2004年は赤潮指数が比較的高い年であったが、1990年代後半から2000年代 (2004年を除く) においては、最盛期 (1982年、1992年) の約1/5にまで赤潮指数が激減している。

さらに、同湾は本研究における解析期間 (1979–2004) の半数の年において、瀬戸内海（大阪湾以外）よりも全域赤潮指数が高い一方、赤潮発生件数は瀬戸内海の1/5–1/3程度と少ない特徴を持つ (Fig. 2)。このことは、大阪湾における1件あたりの赤潮発生規模が他の海域に比べて明らかに突出していることを意味しており、実際、大阪湾における1件あたりの赤潮指数は、瀬戸内海（大阪湾以外）におけるその数倍から、年によっては数十倍に相当する。

3.1.3 赤潮指数と赤潮発生件数の関係

既述した赤潮指数と赤潮発生件数の対応関係を明らかにするために、瀬戸内海（大阪湾以外）および大阪湾の赤潮発生件数に対する全域赤潮指数の散布図を Fig. 3 に示す。同図から分かるように、瀬戸内海（大阪湾以外）における赤潮指数と赤潮発生件数は $r = 0.47$ ($p < 0.05$) で有意であったが相関が高いとはいえず、大阪湾においては両者に有意な相関関係は認められない ($r = 0.28$, $p > 0.05$)。

例えば、瀬戸内海（大阪湾以外）における1982年と1983年の赤潮発生件数はほぼ同値 (年間170件前後) で

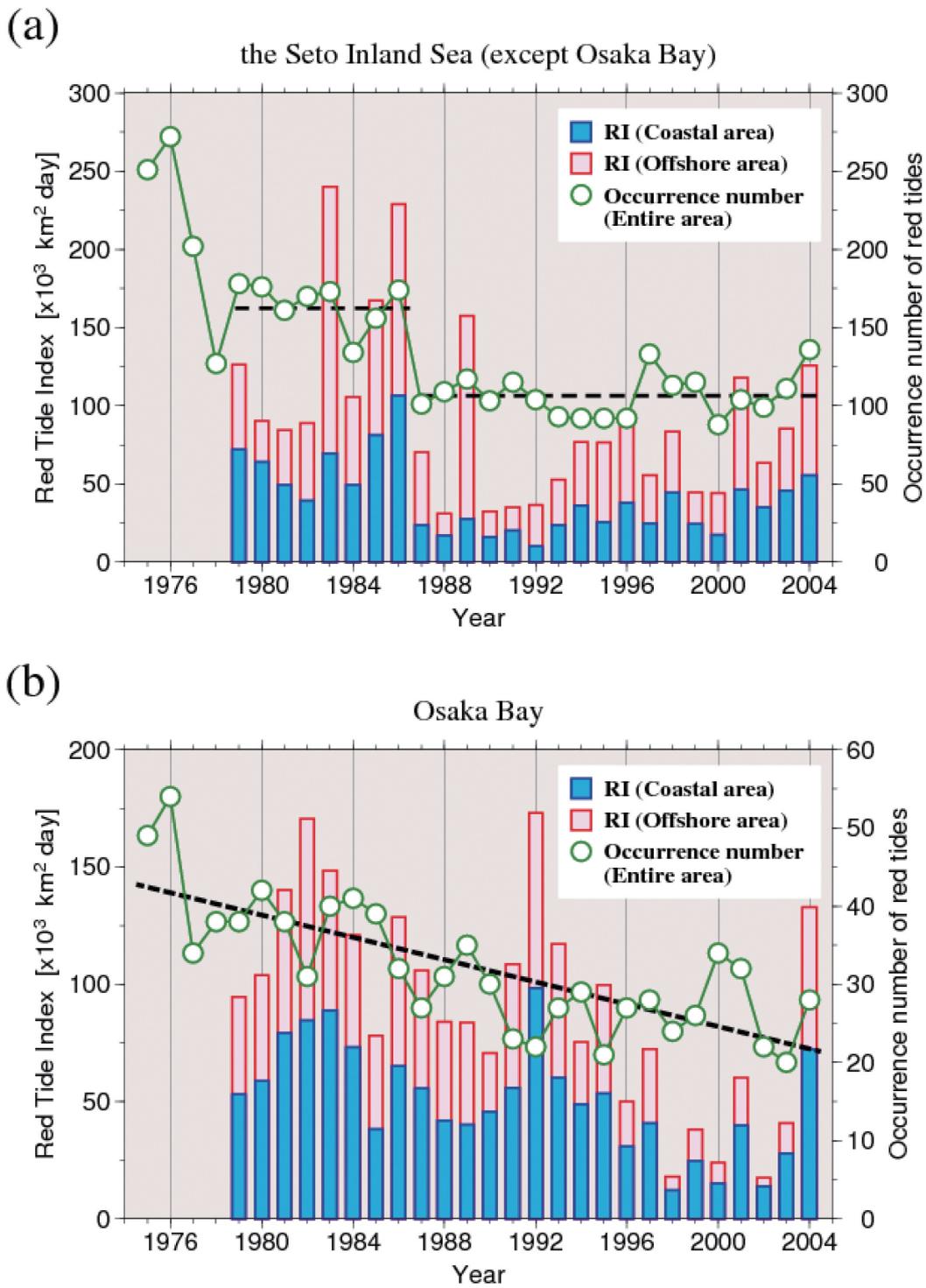


Fig. 2. Year-to-year variations in Red Tide Index and the occurrence number of red tides in the Seto Inland Sea, except Osaka Bay (a) and Osaka Bay (b). Broken line shows the characteristic trend of the number of red tide occurrences.

あるにもかかわらず、1983年の赤潮指数 ($240,000 \text{ km}^2 \text{ day}$) は1982年のそれ ($88,800 \text{ km}^2 \text{ day}$) に比べて2.5倍以上を示す (Fig. 2 (a), Fig. 3)。このことは、1982年に比べて1983年は大規模な赤潮が発生したことを意味しており、事実、1983年は大阪湾を含む瀬戸内海の中で赤潮被害件数が最多であった播磨灘において、非珪藻群に属するラフィド藻類の *Chattonella antiqua* が大発生している (水産庁瀬戸内海漁業調整事務所, 1984)。逆に、赤潮の発生規模 (赤潮指数) が同等の場合であったとしても、赤潮発生件数で見れば年によっては最大で80-90件近くも異なることがある (例えば、1980年と1996年を比較した場合)。

以上の結果は、赤潮発生件数の推移から年々において発生する赤潮の変動規模を評価するには限界があることを示唆している。

3.2 赤潮指数の長期変動

3.2.1 瀬戸内海・大阪湾における長期変動

前節では、赤潮指数と赤潮発生件数の推移ならびに両者の関係について論じたが、本節では瀬戸内海 (大阪湾

以外) と大阪湾における赤潮指数の長期変動 (1979-2004) に着目した。

大阪湾の沿岸域・沖合域・全域における赤潮指数は、26年間に於いて統計的に有意な減少傾向が認められた ($p < 0.05$; Fig. 2 (b))。一方、瀬戸内海 (大阪湾以外) における赤潮指数は、1980年代における変動がかなり大きく、大阪湾で確認されたような明瞭な長期変動は見出せなかった (Fig. 2 (a))。そこで、1980年代の瀬戸内海 (大阪湾以外) において赤潮指数が平年に比べて高かった1983年・1985年・1986年・1989年について、その詳細を調査した。その結果、1983年と1989年は播磨灘の沖合域における非珪藻赤潮 (*Chattonella antiqua*, *Gymnodinium nagasakiense*) の大発生により赤潮指数が突出し、同海域平年値 (1983年と1989年を除く24年分の沖合赤潮指数平均値; $22,800 \text{ km}^2 \text{ day}$) に対して、5.3-7.0倍の赤潮指数が検出された。また、1985年と1986年は周防灘の沿岸域と沖合域における非珪藻赤潮 (*Gymnodinium nagasakiense*) の大発生により赤潮指数が突出し、同海域平年値 (1985年と1986年を除く24年分の赤潮指数平均値; 沿岸域: $5,800 \text{ km}^2 \text{ day}$, 沖合域: $3,800 \text{ km}^2 \text{ day}$) に対し

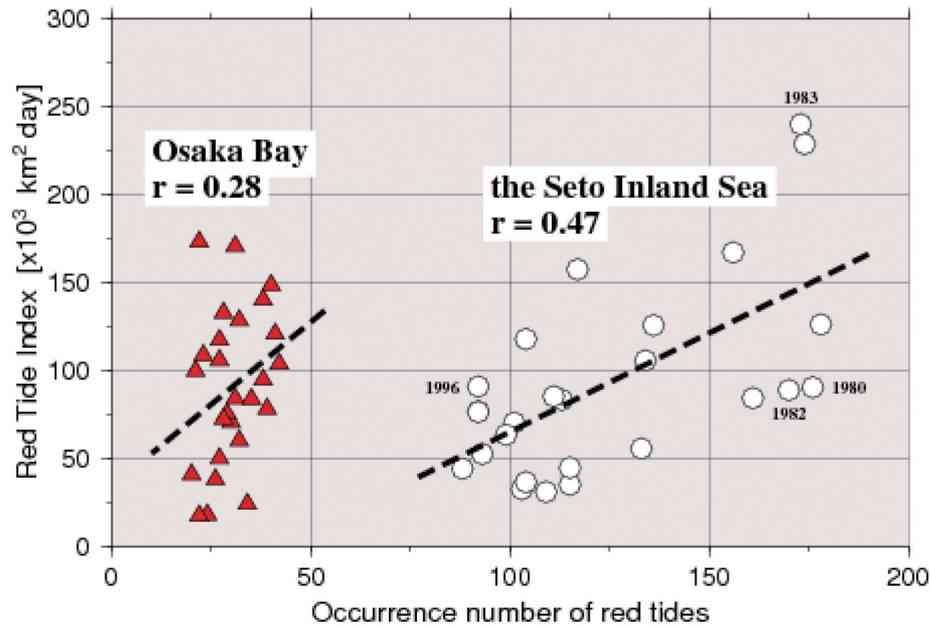


Fig. 3. Relationship between Red Tide Index and the occurrence number of red tides in the Seto Inland Sea (\circ), except Osaka Bay and Osaka Bay (\blacktriangle).

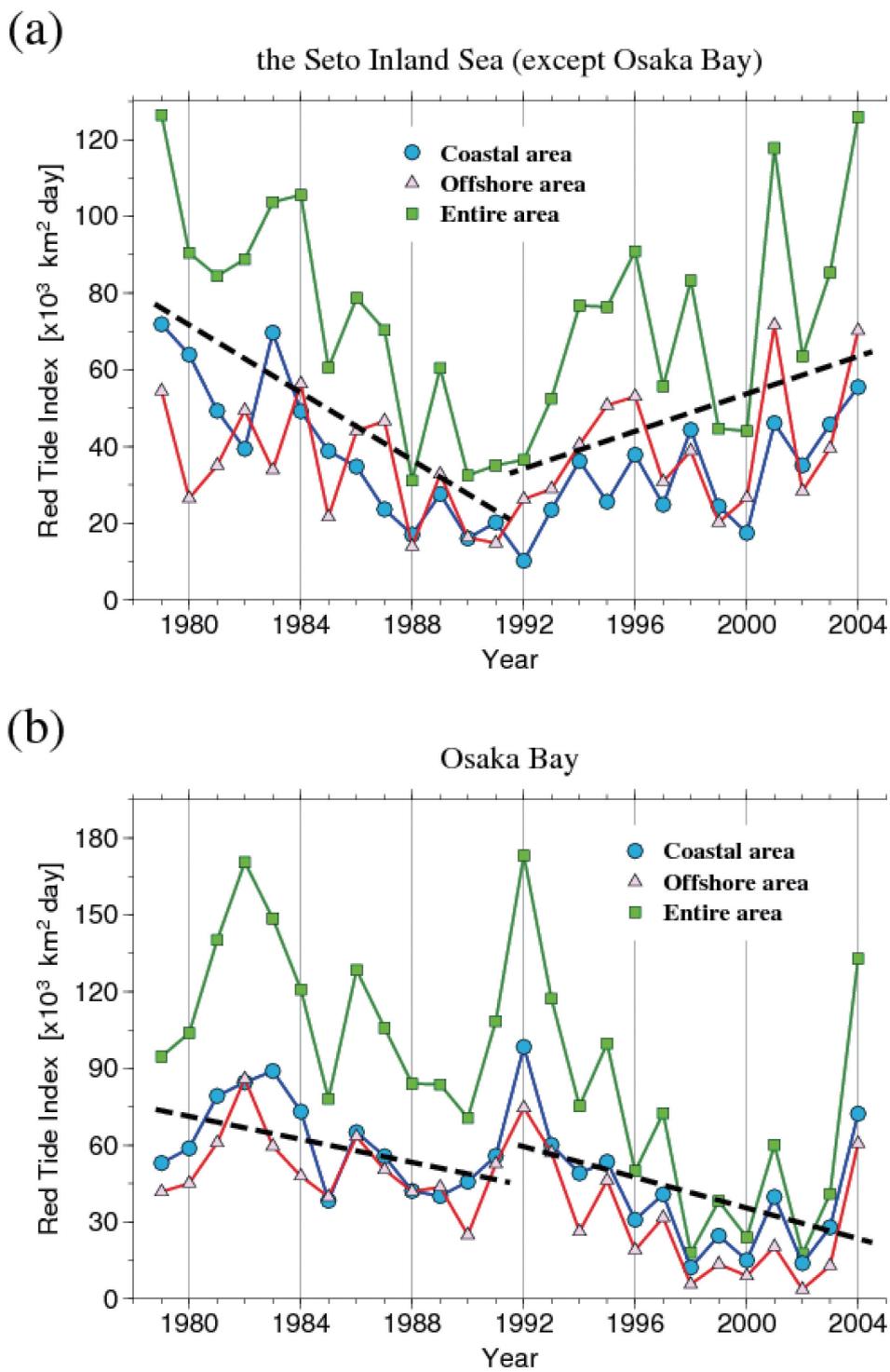


Fig. 4. Year-to-year variations in Red Tide Index reformed figure 2 (a) by Red Tide Index, averaged over analyzed periods in case of the huge occurrence of red tides in the Seto Inland Sea, except Osaka Bay (a) and Osaka Bay (b).

て、沿岸域では8.3-13.3倍、沖合域では17.9-21.7倍の赤潮指数が検出された。

これらは、突発的な赤潮の大発生（平年に比べて10-20倍前後の発生規模）に起因した特異なものであり、数十年間の長期的な経年トレンドを明らかにする場合において、これらのデータをそのまま用いると、高い赤潮指数が影響して誤った変動傾向を導き出す可能性が懸念される。そこで、播磨灘の沖合域における1983年と1989年の赤潮指数は、これらの年を除く24年分の沖合赤潮指数平均値（22,800 km² day）を、周防灘の沿岸域および沖合域における1985年と1986年の赤潮指数は、これらの年を除く24年分の赤潮指数平均値（沿岸域：5,800 km² day、沖合域：3,800 km² day）を代用した。そして、既述の年（1983, 1985, 1986, 1989）における瀬戸内海（大阪湾以外）の全域赤潮指数を再計算し、Fig. 2 (a) に示した瀬戸内海（大阪湾以外）における赤潮指数の経年変動図をFig. 4 (a) のように改変した。また、Fig. 2 (b) に示す大阪湾における赤潮指数の経年変動図についても、Fig. 4 (a) と対比できるように、各年の赤潮指数を用いて、同様な折れ線グラフに図を改変した（Fig. 4 (b)）。なお、同図中にはIshii *et al.* (2013) で分類した期間別（1979-1991年、1992-2004年）に見られる特徴的な傾向を抽出し、それらを破線で図示している。

同図を概観すると、本節冒頭でも記した通り、瀬戸内海（大阪湾以外）の沿岸域・沖合域・全域において、大阪湾のように1979年から2004年までの26年間における長期的な減少傾向（Fig. 4 (b)）は明瞭に確認できないものの、1990年付近を境として、それ以前までは統計的に有意な減少傾向（ $p < 0.05$ ）、それ以降は増加傾向（ $p < 0.05$ ）が認められた（Fig. 4 (a)）。

3.2.2 長期変動を決める要因

前項では、瀬戸内海（大阪湾以外）および大阪湾における赤潮指数の長期変動を明らかにし、両海域でそれら特徴が異なることを指摘した。本項では、これらの海域における赤潮指数の長期変動を決める要因について、検討および考察を行った。

一般に、赤潮発生の主な要因として海域の富栄養化（栄養塩の過剰流入による水質汚濁）がよく挙げられるが、海洋生態系の低次生産過程において、赤潮発生（植

物プランクトンの光合成による産物）に起因する要素は、栄養塩のほかにも水温・光量（全天日射量）がある（例えば、Kawamiya *et al.*, 1995）。このうち、人為的に制御可能なものは栄養塩（おもにDIP・DIN）であり、実際、環境省は富栄養化対策の一環として、1979年から水質汚濁物質負荷（COD・TP・TN）の削減指導ならびに総量規制を継続的に実施してきた。そして、それら削減対策効果を確認するために、同省および地方自治体による精力的な水質調査が長年行われてきた。

Fig. 5は、地方自治体による公共用水域水質調査（1983-1998年）ならびに環境省による広域総合水質調査（1979-2000年）で観測されたTP濃度およびTN濃度の経年変動（瀬戸内海環境保全協会, 2004）であり、前項までと同様、瀬戸内海（大阪湾以外）と大阪湾に分けてデータを整理し議論する。なお、2.2節でも記したように、前者の調査結果を沿岸域における濃度データ、後者の調査結果を沖合域における濃度データとして取り扱った。

同図より、瀬戸内海（大阪湾以外）におけるTP濃度（Fig. 5 (a)）ならびにTN濃度（Fig. 5 (c)）の長期変動は、沿岸域で減少傾向にある一方、沖合域では逆に増加傾向にあり、その増減率はTN濃度の方がTP濃度に比べて大きかった。同様に大阪湾を概観すると、沿岸域（Fig. 5 (b)）・沖合域（Fig. 5 (d)）ともにTP・TN濃度の長期変動は有意な減少傾向を示すとともに、沿岸域における濃度減少勾配は瀬戸内海（大阪湾以外）に比べて急峻であった。既述の傾向（Fig. 5）と赤潮指数の長期変動（Fig. 4）の特徴を比較すると、瀬戸内海（大阪湾以外）では赤潮指数とTP・TN濃度の長期変動に明瞭な対応関係は見られない一方、大阪湾においては沿岸域・沖合域ともによく一致していた。

上記の理由には、瀬戸内海（大阪湾以外）全域におけるリン・窒素の大部分は太平洋起源である反面、大阪湾に現存するリン・窒素の6割以上は陸域起源であることが要因の一つとして考えられる（石井・柳, 2004；石井・柳, 2006）。すなわち、陸域からのリン・窒素流入負荷量が瀬戸内海全体の約1/3を占める大阪湾（瀬戸内海環境保全協会, 2004）において、沿岸域および沖合域における赤潮指数の顕著な減少（発生する赤潮規模の縮小；Fig. 2 (b)）は、陸域からの総量規制による栄養物質負荷量の削減（富栄養化対策）が海域内のリン・窒素濃度の顕著

な低下 (Fig. 5 (b, d)) へ波及したことに他ならない。

一方、瀬戸内海 (大阪湾以外) の沿岸域では、流入負荷量の減少が同水域のリン・窒素濃度の有意な低下に繋がるが (石井・柳, 2005; Fig. 5 (a, c)), 沖合域を含む海域全体で概観すると、太平洋起源のリン・窒素の影響

が支配的である瀬戸内海 (大阪湾以外) では陸域からの負荷削減対策による効果が顕著に反映されにくい (Yanagi and Ishii, 2004; 石井・柳, 2004; Fig. 5 (a, c))。このことが、瀬戸内海 (大阪湾以外) において赤潮指数と TP・TN 濃度の長期変動に顕著な対応関係が見られない

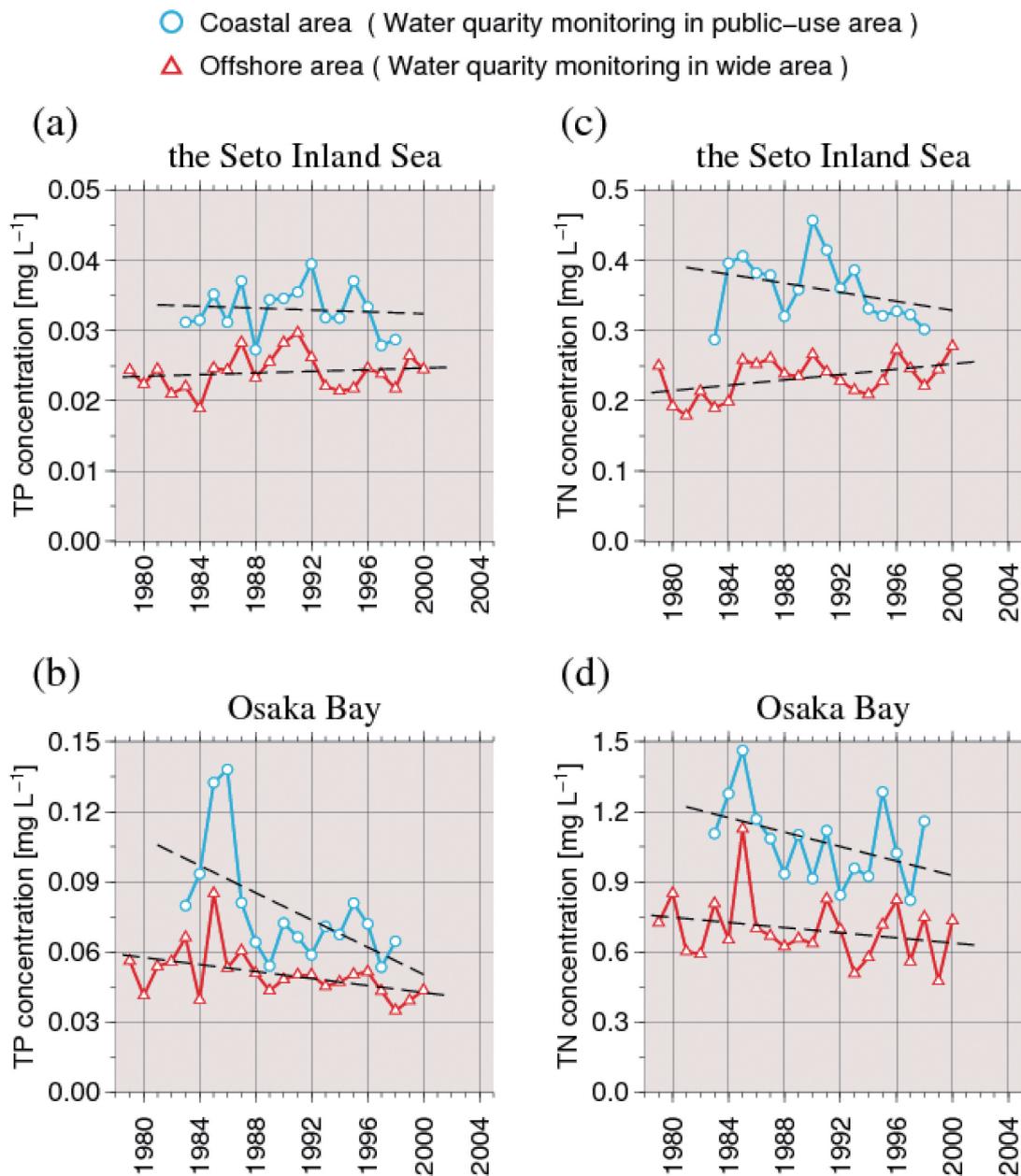


Fig. 5. Year-to-year variations in TP and TN concentrations of the Seto Inland Sea, except Osaka Bay (a, c) and Osaka Bay (b, d). Broken line shows the long-term trend of each concentration.

要因であると推察する。

次に、赤潮指数の長期変動に対する光量の関連を調べるため、気象庁官署の各気象台で観測されている毎月の全天日射量データを同庁ウェブサイトから入手し、以下の比較を行った。Fig. 6に、上記の月間データに対する60ヶ月移動平均処理により季節変動と数年スケールの短周期変動の大部分が除去された、瀬戸内海(大阪湾以外)(a)と大阪湾(b)における全天日射量の変動特性を示す。なお、瀬戸内海(大阪湾以外)の代表データとして高松ならびに大分、大阪湾の代表データとして大阪ならびに奈良の観測資料を用いた。

同図を概観すると、抽出された全天日射量の長期変動は、概ね1990年付近を極小とした数十年周期の変動が生じており、特に高松における全天日射量は約20-25年周期の変動が明瞭であった。この変動を決める主要因は、天体の歳差運動(章動)と太陽磁場の極性反転の影響に伴う約22年周期(ハールの法則)を持つ太陽活動の影響である。この長周期変動は、太陽活動の中で最も顕著な変動として知られる黒点相対数の変動(約11年周期; シュワーベ周期)よりも強制力が数倍大きく、前後2年程のラグを持って気象場に対して応答するとされている(Scafetta and West, 2005)。国立天文台太陽観測所が公開している1978年から2005年までの年間黒点相対数に対して、磁場極性を考慮して符号を付加した値をFig. 6(a)に併記するが、各地点における全天日射量の長期変動はこれとほぼ同期していることが見て取れる。なお、大阪は他の地点と比べて、全天日射量の極小年(1993年)が数年ずれていて、1980年代前半にも極小値を持つが、理由は不明である。

以上に示した傾向(Fig. 6)と赤潮指数の長期変動(Fig. 4)の特徴を対比させると、大阪湾では両者に明瞭な対応関係は見られないが、瀬戸内海(大阪湾以外)における赤潮指数の1990年付近を境とした増減傾向は、全天日射量の長期変動に符合することが判明した。すなわち、瀬戸内海(大阪湾以外)における赤潮の発生規模(赤潮指数)の長期的な変動は、主として地球が受け取る太陽エネルギー量(全天日射量)の長期的な変動に起因することを示唆している。なお、長期的な赤潮の消長に対する水温(図省略)の関連性を調べたが、特筆すべき点は確認されなかった。

以上の結果をまとめると、大阪湾における赤潮指数の長期変動は、栄養塩濃度(TP・TN)の長期変動に符合することが判明した。陸域からの汚濁物質負荷の影響が強く、瀬戸内海の中では未だに海域内のリン・窒素濃度が突出している同湾においては、現在も継続して実施されている水質総量規制による栄養塩濃度の更なる低下(水質改善)が予想されるため、その効果として赤潮指数の減少すなわち赤潮の発生規模縮小ならびに発生抑止(生態系回復)に繋がることを期待される。

また、瀬戸内海(大阪湾以外)では植物プランクトンの増殖に寄与する全天日射量の長期変動が、1990年付近を境とした赤潮指数の長期変動を決める要因であることを示唆する結果を得た。現在、リン・窒素の総量規制対象外となっている瀬戸内海(大阪湾以外)では、今後において大幅な栄養塩濃度の変動は予見されない。そのため、本解析期間以降における赤潮指数(赤潮発生規模)の変動は、天文学的に予測可能な太陽活動に伴う全天日射量の長期変動に追従する可能性が考えられる。本件の更なる究明は、瀬戸内海における赤潮発生予測や漁業被害低減の一助に繋がるであろう。

4. 赤潮分類群別の海域特性

過去30年近くにおける赤潮指数をはじめとした赤潮関連情報の時空間変動特性から全体的な特徴と傾向を明らかにするために、前章まで赤潮を起こした植物プランクトンの全種を集約して議論を進めてきた。本章では、赤潮構成種の分類ごと(珪藻群・非珪藻群・複合群)に赤潮関連情報を整理して、瀬戸内海(大阪湾以外)および大阪湾における赤潮分類群別の海域特性(赤潮指数・赤潮発生件数)について、評価および考察を行った。そして、海域内において群別の赤潮指数が占める割合(優占率)を灘・湾ごと、ならびに年ごとに算出し、各海域の諸特性とともに、瀬戸内海(大阪湾以外)および大阪湾における赤潮優占群について言及した。

4.1 瀬戸内海(大阪湾以外)と大阪湾における赤潮分類群の諸特性

4.1.1 瀬戸内海(大阪湾以外)における群別の赤潮指数と赤潮発生件数

Fig. 7は、瀬戸内海(大阪湾以外)における全域を対象として赤潮構成種ごとに整理した分類群別(珪藻群(a)・非珪藻群(b)・複合群(c))の赤潮指数ならびに赤潮発生件数の経年変動を示す。なお、赤潮指数については特定水域ごとの特徴を鮮明にするため沿岸域と沖合域に分

けて図示していること、Fig. 7(b)に示す非珪藻群の赤潮指数(左軸)ならびに赤潮発生件数(右軸)の軸目盛最大値は、同図内において類似する他の図と比較して数倍異なることを注記しておく。

同図を概観すると、赤潮指数および赤潮発生件数から

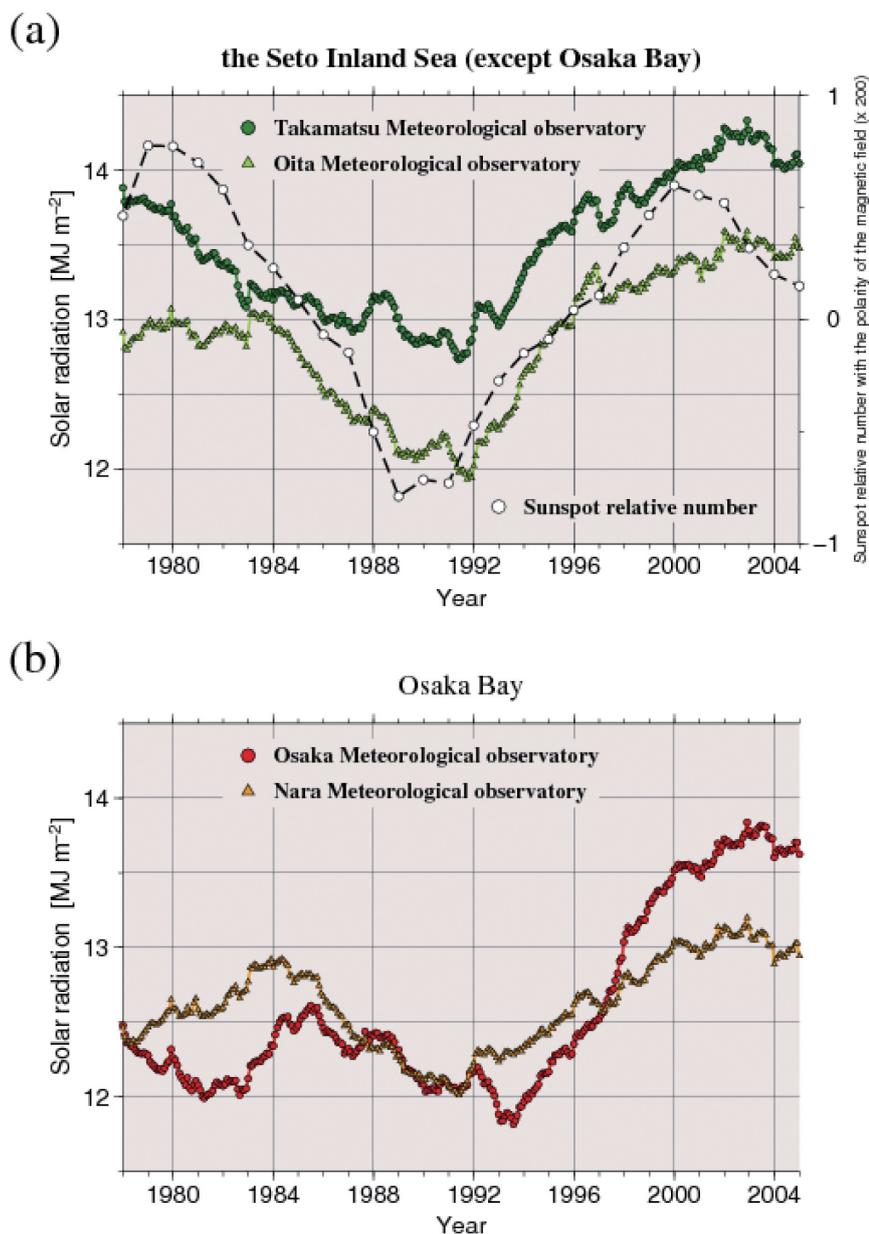


Fig. 6. Year-to-year variations in solar radiation in the coastal and offshore areas of the Seto Inland Sea, except Osaka Bay (a) and Osaka Bay (b). Full line shows the 60 months running mean of solar radiation. Open circle shows the sunspot relative number with the polarity of the magnetic field.

も明らかなように (Fig. 7 (b)), 瀬戸内海 (大阪湾以外) において優占して出現する赤潮種の分類は, 一般的に非珪藻群であることが特徴として挙げられる。非珪藻赤潮の発生件数は, 1970年代後半の110件前後から1980年代後半にかけて急減し, 以降は平均60-70件台をほぼ横ばいに推移した。また, 赤潮指数は1980年代中頃を中心に一時的に高い時期が続き, その後は上述した発生件数の減少に同調するかのように低調に推移した。しかし, 1990年代に入ると一転して赤潮指数は近年まで徐々に増加し, 単位件数あたりの赤潮発生規模が拡大する傾向を示した。なお, 解析期間における大半の年では海域内に発生した赤潮の9割以上が非珪藻群であったため, 赤潮を起こした植物プランクトンの全種を集計した赤潮指数の経年変動 (Fig. 2 (a)) は, 非珪藻群の赤潮指数の経年変動 (Fig. 7 (b)) と酷似している。

一方, 珪藻類と非珪藻類が混在して発生する複合群は, 1980年前後を中心として主に沿岸域での発生が目立ったが, その後は発生頻度も少なく (概ね5件以下), 赤潮指数は低調であった (Fig. 7 (c))。さらに, 赤潮発生件数が1980年 (26件) をピークにその後は減少し, 近年では発生頻度が10件を下回ることが多かった珪藻群は, 複合群に比べると赤潮指数が比較的高い年も見られたが, 一般的に沿岸域を主とした散発的な出現に留まる程度であった (Fig. 7 (a))。

以上の結果より, 瀬戸内海 (大阪湾以外) は非珪藻群の赤潮の発生が卓越しており, 海域全体における赤潮の発生規模やその推移は, 非珪藻赤潮の変動でほぼ説明できることが判明した。

4.1.2 大阪湾における群別の赤潮指数と赤潮発生件数

続いて, 大阪湾における種類区分ごとの赤潮関連情報の変動特性について調べるため, Fig. 8に同湾全域を対象として赤潮構成種ごとに整理した分類群別 (珪藻群 (a)・非珪藻群 (b)・複合群 (c)) の赤潮指数ならびに赤潮発生件数の経年変動を示す。なお, 前項の瀬戸内海 (大阪湾以外) と同様, 赤潮指数については沿岸域と沖合域に分けて図示し, 特定水域ごとの特徴を鮮明にした。

まず, 珪藻群の赤潮指数を見てみると, 散発的な出現に留まっていた瀬戸内海 (大阪湾以外) における珪藻群の傾向とは異なり, 解析期間を通じて大小様々な規模の

赤潮が頻発している。特に, 2004年の全域赤潮指数 ($132,200 \text{ km}^2 \text{ day}$) は前年までの値に比べて異常に高く, それまでの最高値の約2倍, 平年値の4倍以上であった。このことから, 3.1.2項でも触れた赤潮指数 (全種累計値) が近年において例外的に高かった同年は, 珪藻群の特異な大発生に起因したものであることが判明した。また, 平均10-15件ほどで推移していた赤潮発生件数は一時期2件にまで落ちたが, その後は多少変動しながらも徐々に増加していき, 近年では15-20件ほどの珪藻赤潮が発生していた。ちなみに, 近年における赤潮発生件数は, 1980年代に比べて若干増加気味であるものの, 赤潮指数は上述した2004年を除けば比較的 low, 赤潮の発生規模は以前に比べて明らかに縮小したことが分かる。

次に, 平均的な発生件数が珪藻群とほぼ変わらない非珪藻群は, その長期変動が珪藻群と対照的で, 一時は25件ほどあった発生件数が経年的な減少を辿り, 近年では5件前後にまで低落した (Fig. 8 (b))。発生件数が24件と最多であった1983年と1990年は, 件数増加に呼応するかのように赤潮指数がそれぞれ $87,000 \text{ km}^2 \text{ day}$, $66,300 \text{ km}^2 \text{ day}$ と突出して高かったが, それ以外の年では両者の間に明瞭な相関はあまり見られなかった。また, 赤潮指数は1987年までほぼ単調に増加する傾向にあったが, それ以降は突如として値が急減した (1990年を除く)。発生件数自体は10件前後を有する中, この時期を境として大阪湾における非珪藻群の赤潮指数 (発生規模) が極端に変化したことは, 発生件数の推移からでは検出できない特徴である。

同様の傾向は複合群にも見られ, 発生件数は近年まで減少傾向にあると同時に, 赤潮指数は1994年まで珪藻群や非珪藻群と同等に高い値で推移していたが, 翌年以降, その値が急落した (1997年を除く)。ただし, 複合群はもともと珪藻群・非珪藻群に比べて発生頻度が少なく, 同年以降は複合群の赤潮自体がほとんど発生しなかったことが主な要因として考えられ, これは既述した非珪藻群の特徴と異なる点である。

以上の結果より, 瀬戸内海 (大阪湾以外) の赤潮指数と比較して同等もしくはそれ以上の赤潮規模を持つ大阪湾は, 特定の種類区分 (非珪藻群) が長期的に優占し続ける瀬戸内海 (大阪湾以外) とは異なり, 経年的に海域内で卓越する赤潮の種類区分が遷移する海域であることが

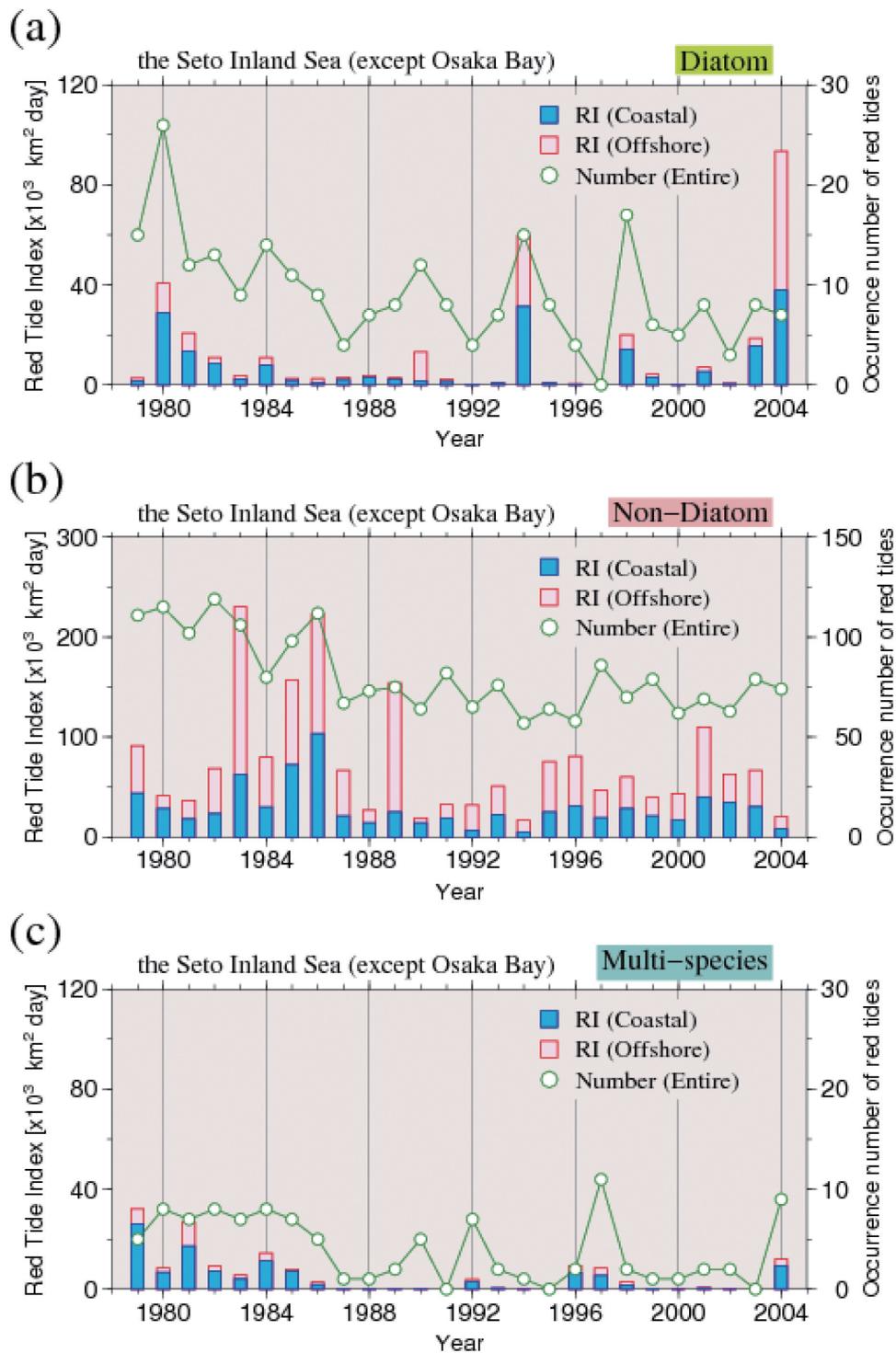


Fig. 7. Year-to-year variations in Red Tide Index and the occurrence number of red tides simplified the classification into three types - diatom (a), non-diatom (b) and multi-species (c) in the Seto Inland Sea, except Osaka Bay.

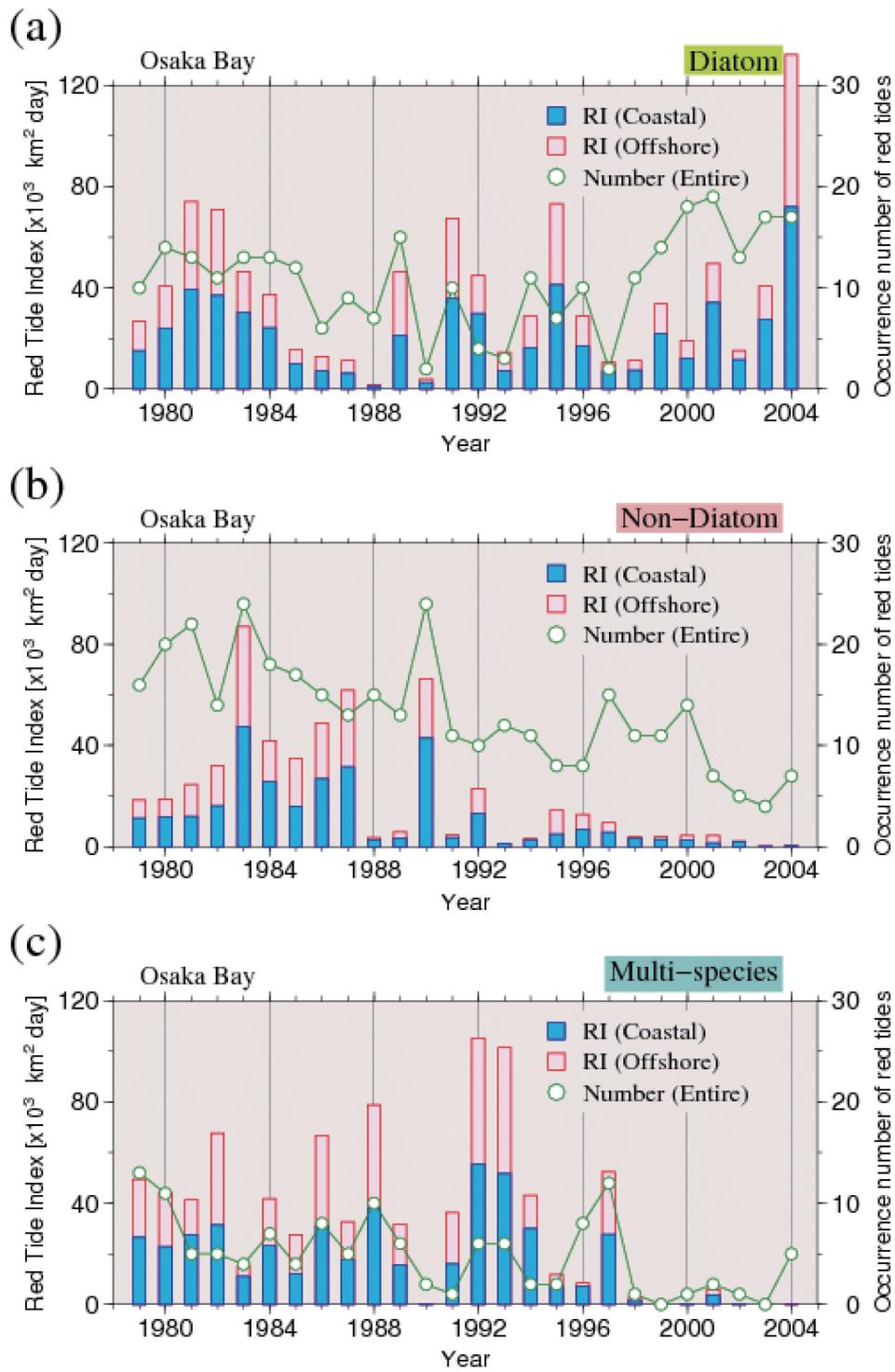


Fig. 8. Year-to-year variations in Red Tide Index and the occurrence number of red tides simplified the classification into three types - diatom (a), non-diatom (b) and multi-species (c) in Osaka Bay.

判明した。

4.2 優占率に基づく赤潮優占群の海域特性

4.2.1 瀬戸内海（大阪湾以外）における赤潮優占群

前節までに、瀬戸内海（大阪湾以外）および大阪湾における分類群別の赤潮指数と赤潮発生件数の特徴について論じ、両海域の諸特性を明らかにした。本節ではさらに議論を深めるため、瀬戸内海（大阪湾以外）および大阪湾における分類群別（珪藻群・非珪藻群・複合群）の全域赤潮指数をもとに海域内において群別の赤潮指数が占める割合（優占率）を算出し、両海域における赤潮優占群の特徴について詳述する。

Fig. 9 に、瀬戸内海（大阪湾以外）(a) および大阪湾 (b) における赤潮優占率の経年変動を示す。同図を概観すると、単年や複数年にわたる珪藻群や複合群の散発的な出現が確認されるものの、全般的には解析期間のほとんどの年において瀬戸内海（大阪湾以外）では非珪藻群の赤潮が卓越しており、全解析期間を通じた非珪藻赤潮の優占率は約8割にも上ることが判明した (Fig. 9 (a))。

ちなみに、1980年・1981年・1994年および2004年は、瀬戸内海（大阪湾以外）の中で非珪藻群の赤潮優占率が過半数を超えなかった年であったが、この詳細を調べるために瀬戸内海各灘・湾における赤潮優占率（大阪湾は Fig. 9 (b) と同一）を年ごとに算出し、灘・湾ごとの特徴を見てみた。その結果を Fig. 10 に示すが、他の海域でも単年もしくは複数年にわたって非珪藻群以外の赤潮が散発的に出現しており、中でも大阪湾に隣接する紀伊水道・播磨灘や周防灘では主に珪藻群、西部に位置する広島湾・安芸灘では珪藻群と複合群の優占が確認できる。1980年および1981年の両年には、伊予灘・別府湾を除くすべての海域で非珪藻群以外の赤潮が出現しており、特に広島湾を中心として隣接する安芸灘・備後灘の海域間では赤潮優占群の特性が同期しているように見て取れる (1980-1983年)。しかし、赤潮の発生規模を表す赤潮指数の大小を考慮すると、瀬戸内海（大阪湾以外）で両年 (1980, 1981) において赤潮優占群の変動に大きく影響したと考えられる海域は播磨灘と広島湾である (Ishii *et al.*, 2013)。また、1994年と2004年は非珪藻赤潮の優占率が非常に低く（それぞれ22%, 16%）、珪藻赤潮の発生が最も卓越した年であった（それぞれ78%, 74%）。これ

は播磨灘 (2004年) と周防灘 (1994年) において、赤潮発生件数はさほど多くなかったものの、珪藻赤潮が例年に比べて数十倍の規模で突発した影響によるものであったが、両年において珪藻群が優占した理由については現在のところ定かではない。

4.2.2 大阪湾における赤潮優占群

大阪湾における赤潮優占率の様相は瀬戸内海（大阪湾以外）と対照的で、経年的な時間経過とともにある時間幅（期間）を持って海域内の赤潮優占群とその優占率が変化している様が見て取れる (Fig. 9 (b))。ただし、年ごとにおける赤潮優占率の変動も大きいため、前項で述べた知見をもとに、特徴的な3つの期間に分類して赤潮優占群の遷移パターンを注目した。その期間とは、非珪藻群の赤潮指数が急減した1980年代中頃まで（前期）と、非珪藻群が概ね低調に推移し始めた頃から複合群が急減し始めた1980年代中頃から1990年代中頃まで（中期）、非珪藻群も複合群も低調な一方、珪藻群が海域内に単独で卓越する1990年中頃以降（後期）の3期である。

Fig. 9 (b) より大阪湾における赤潮優占群の特徴をまとめると、前期は珪藻群・非珪藻群・複合群の3種がほぼ同等に発生し、単独群による優占支配は見られなかった。中期に入ると、珪藻類以外で形成される非珪藻群の赤潮発生が鈍化する中、多少の年変動はあるものの、珪藻群と複合群の赤潮が勢力を伸ばし海域内で支配的となった。しかし、後期に移行すると、それまで活発であった複合群の増殖も衰退した。複合群という形態で珪藻類と共存し生残していた非珪藻類の赤潮であったが、最終的には珪藻群の赤潮が海域内に単独で卓越するようになり、2000年以降は海域内に発生する赤潮の8-9割以上が珪藻群となる独占（優占）環境に変貌した。この背景には、大阪湾の海洋環境が、非珪藻群の赤潮よりも珪藻群の赤潮が有利に増殖しやすい系へと変化した可能性が考えられるが、その具体的な要因に関しては今後の検討が必要である。

5. おわりに

本研究では、赤潮発生件数や赤潮被害件数をもとに赤

潮発生規模の推移や水質データとの関係を解析評価してきた従来研究に対して、実際の赤潮発生規模をより正確に評価できる指標として提案された赤潮指数（赤潮発生面積と継続日数の積）を用いて、瀬戸内海の海域評価を行った。

瀬戸内海における地図情報と26年分の赤潮関連情報（植物プランクトン種、発生面積、継続日数など）が統合された「赤潮基礎データセット」（Ishii *et al.*, 2013）を利用することにより、赤潮発生の経年的な変動傾向とその傾向を決める可能性のある要因、海域内に優占する赤潮

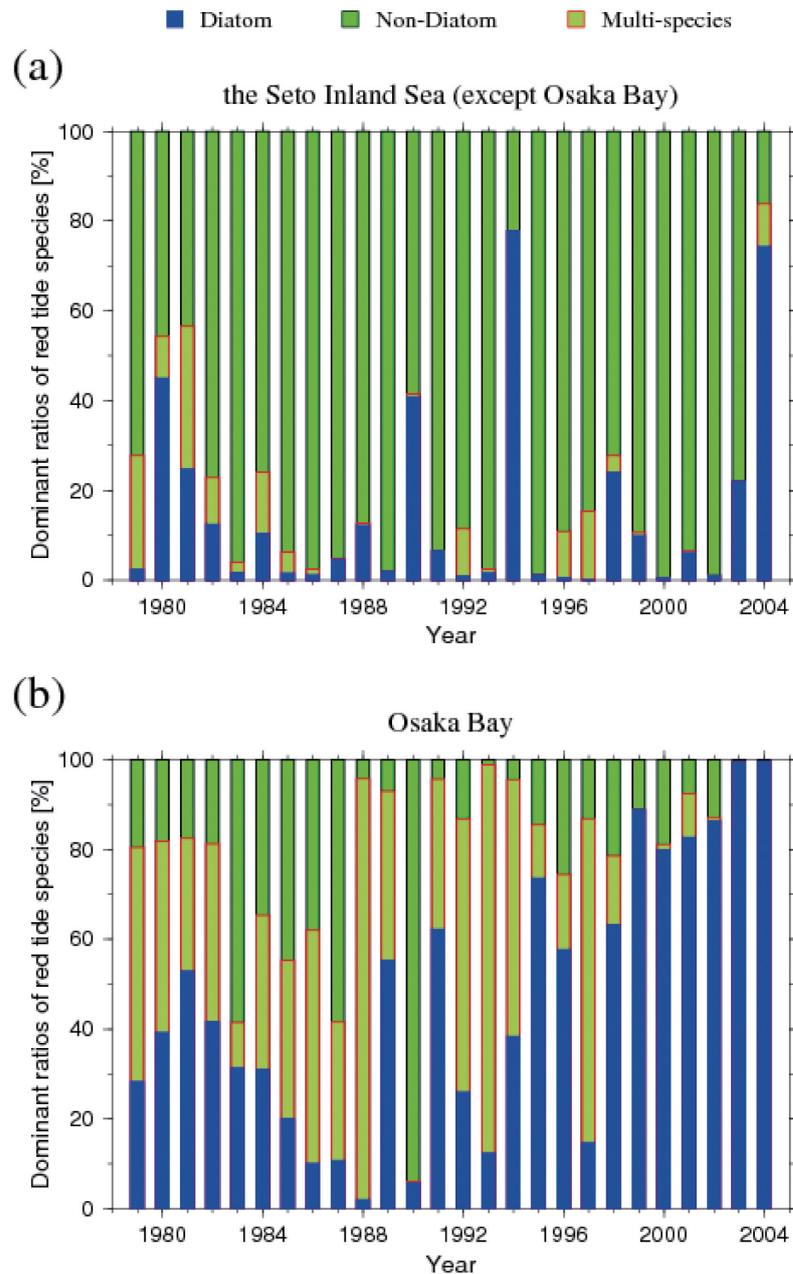


Fig. 9. Year-to-year variations in dominant ratios of red tide species in the entire area of the Seto Inland Sea, except Osaka Bay (a) and Osaka Bay (b).

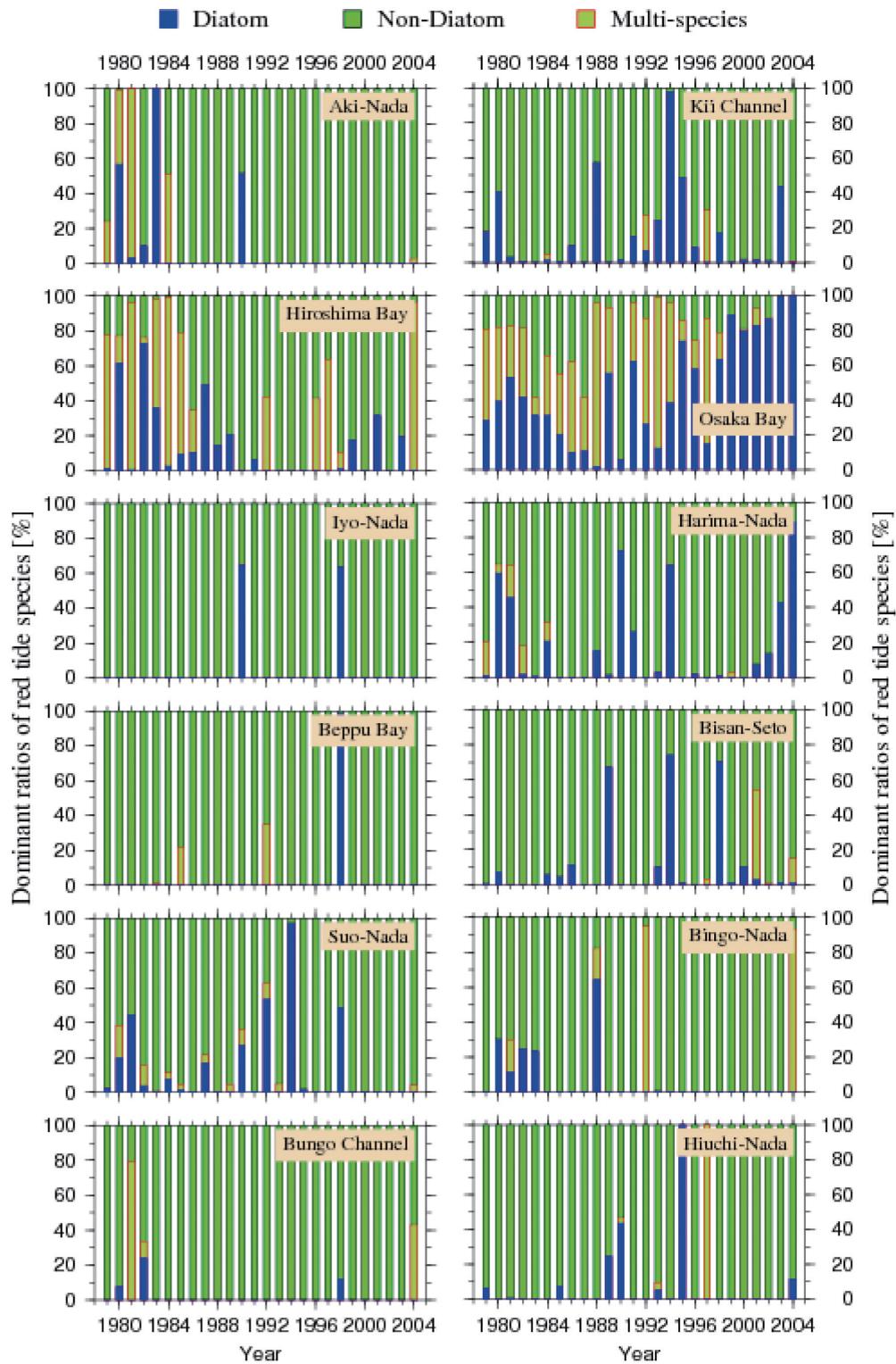


Fig. 10. Year-to-year variations in dominant ratios of red tide species in each region of the Seto Inland Sea. The Figure for Osaka Bay is same as Fig. 9 (b).

の種類区分の特徴を明らかにすることができた。まず、瀬戸内海（大阪湾以外）における赤潮指数の長期変動は、1990年付近を極小とした増減傾向を示す一方、大阪湾における赤潮指数の長期変動は約30年間において顕著な減少傾向を示すことが分かった。次に、両海域における赤潮指数の長期変動を決める可能性の高い要因として、瀬戸内海（大阪湾以外）では主に全天日射量、大阪湾では陸域からの寄与が大きい栄養塩濃度が見出された。さらに、瀬戸内海（大阪湾以外）では全般的に非珪藻群が優占する一方、大阪湾では有害な非珪藻群を含む赤潮から比較的無害とされる珪藻群の赤潮へ長期的に優占群が遷移していることが明らかとなった。

以上本研究によって、赤潮の発生状況や被害状況を知るための指標として従来から利用されている赤潮発生件数に基づく評価では見出せなかった新しい知見が得られ、赤潮発生の長期変動評価における赤潮指数と赤潮基礎データセットの有用性が示された。今後は、瀬戸内海における赤潮発生の長期変動機構に関する更なる究明や、大阪湾において赤潮優占群の変遷を引き起こした要因の解明、海洋生態系モデルを用いた低次生産過程の量的評価といった研究を進めていく必要がある。また、赤潮指数を用いた本評価手法を日本周辺における他の沿岸海域に適用することにより、沿岸海域が顕在的に抱えている地域環境問題（赤潮や貧酸素水塊の発生など）を解決するための鍵となる知見が得られるものと期待される。

謝 辞

本稿の改訂にあたり、懇切丁寧な査読と有益で適切なお助言を頂きました編集委員と二名の査読者の皆様に厚く御礼申し上げます。

本研究は、環境省環境研究総合推進費による戦略的研究開発領域 S-13「持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発」（研究代表者：柳哲雄）の一部であることを付記する。

References

- 水産庁瀬戸内海漁業調整事務所（1980-2005）：瀬戸内海の赤潮（年報），水産庁瀬戸内海漁業調整事務所
- 石井大輔，柳哲雄（2004）：瀬戸内海各灘・湾における全リン・全窒素の起源と濃度変動機構，*海の研究*，**13**，389-401.
- 石井大輔，柳哲雄（2005）：瀬戸内海の沿岸域と全域における TP・TN 濃度変動，*海の研究*，**14**，35-45.
- 石井大輔，柳哲雄（2006）：瀬戸内海に存在する太平洋起源のリン・窒素，*沿岸海洋研究*，**43**，119-127.
- Ishii, D., T. Yanagi and S. Sasakura (2013): Proposal of new indicator "Red Tide Index" for the Seto Inland Sea, Japan. Reports of Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, **144**, 1-11.
- 柿野純（1996）：東京湾における貝類のへい死事例 特に貧酸素水塊の影響について，*水産土木*，**22**，41-47.
- 神園真人，江藤拓也，佐藤博之（1996）：周防灘南西部における貧酸素水塊形成と気象変動の関係，*沿岸海洋研究ノート*，**33**，179-190.
- Kawamiya, M., M. Kishi, Y. Yamanaka and N. Suginoara (1995) : An ecological-physical coupled model applied to Station Papa, *J. Oceanogr.*, **51**, 635-664.
- 鬼塚剛，滝川哲太郎，小針統，杵雅利，森本昭彦，渡辺敦，吉川裕，柳哲雄（2011）：2007年11月に対馬東部海域で観測された低気圧性渦周辺の栄養塩・プランクトン分布，*海と空*，**87**，11-19.
- Scafetta, N. and B. J. West (2005) : Estimated solar contribution to the global surface warming using the ACRIM TSI satellite composite. *Geophysical Research Letters*, **32**, L18713, doi: 10.1029/2005GL023849.
- 瀬戸内海環境保全協会（2004）：瀬戸内海水域の地域特性を踏まえた有機汚濁機構の解明に関する研究，瀬戸内海環境保全協会，120pp.
- 篠原満寿美，杉野浩二郎，佐藤利幸，池内仁，吉田幹英，本田清一郎，神園真人（1999）：福岡湾における植物プランクトン群集の季節変動，福岡県水産技術海洋センター研究報告，**9**，33-38.
- 武岡英隆，菊池隆展，速水祐一，榊原哲郎（2002）：瀬戸内海における外洋起源の栄養物質，*月刊海洋*，**34**，406-411.
- 堤裕昭，岡村絵美子，小川満代，高橋徹，山口一岩，門谷茂，小橋乃子，安達貴浩，小松利光（2003）：有明海奥部海域における近年の貧酸素水塊および赤潮発生と海洋構造の関係，*海の研究*，**12**，291-305.
- 山田真知子，梶原葉子（2004）：著しく富栄養化の進行した洞海湾の植物プランクトン出現特性，*海の研究*，**13**，281-293.
- 柳哲雄（1997）：瀬戸内海の淡水・窒素・リン収支，*海の研究*，**6**，157-161.
- 柳哲雄，原島省（2003）：瀬戸内海における溶存態無機リン・窒素・珪素分布の特徴とその要因，*海の研究*，**12**，565-572.
- Yanagi, T. and D. Ishii (2004) : Open ocean originated phosphorus and nitrogen in the Seto Inland Sea. *J. Oceanogr.*, **60**, 1001-1005.
- 柳哲雄，石井大輔，屋良由美子，日向博文，石坂丞二（2008）：有明海湾奥部における表層低塩分水の水平収束・発散とクロロフィルα濃度との関係，*海の研究*，**17**，39-48.

Long-term trends in the occurrence of red tides in the Seto Inland Sea, Japan

Daisuke Ishii^{1**}, Tetsuo Yanagi¹ and Satoshi Sasakura²

Abstract

We studied the temporal variation and changes in red tide occurrences and the dominant species composing red tides in the Seto Inland Sea based on the red tide basic dataset for the 26 years from 1979 to 2004. This included the “Red Tide Index” (RI), which is capable of assessing the spatiotemporal scale and impacts of a red tide. We analyzed the temporal changes in the RI in the Seto Inland Sea and Osaka Bay separately. The long-term trend in the RI in the Seto Inland Sea showed both increasing and decreasing trends with a minimum value around 1990. The trend in Osaka Bay has declined markedly for about 30 years. We found that the long-term trends in the RI in both the Seto Inland Sea and Osaka Bay corresponded with the long-term trends in solar radiation and nutrient concentration. The dominant species of red tide were derived using the RI in both the Seto Inland Sea and Osaka Bay. We found that non-diatom species were dominant mainly in the Seto Inland Sea, while in Osaka Bay the dominant species has changed from non-diatom species to diatom species during the past 30 years.

Key words : Red Tide Index, long-term trend, dominant species of red tide, the Seto Inland Sea

(Corresponding author’s e-mail address : dishii@riam.kyushu-u.ac.jp)

(Received 14 January 2014 ; accepted 11 July 2014)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2014)

1 Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University,

6-1 Kasuga-Kouen, Kasuga, Fukuoka, 816-8580, Japan

2 Ides Incorporated, 1-3-8 Shiba-Kouen, Minato, Tokyo, 105-0011, Japan

** Corresponding author : Daisuke Ishii

TEL/FAX +81925837919

e-mail: dishii@riam.kyushu-u.ac.jp