八代海海域における水質環境特性

園田 吉弘¹・滝川 清²・川崎 信二³・青山 千春⁴・齋藤 孝⁵

¹正会員 熊本大学特別研究員 沿岸域環境科学教育研究センター (〒860-8555 熊本県熊本市中央区黒髪二丁目39-1)

E-mail:y_sonoda@kumamoto-u.ac.jp

²フェロー会員 熊本大学教授 沿岸域環境科学教育研究センター (〒860-8555 熊本県熊本市中央区黒髪二丁目39-1)

E-mail:taki2328@kumamoto-u.ac.jp

³熊本県 水産研究センター (〒869-3603 熊本県 上天草市 大矢野町 中 2450番地2)

⁴正会員 熊本大学大学院自然科学研究科 (〒860-8555 熊本県熊本市中央区黒髪二丁目39-1)

⁵学生会員 熊本大学大学院自然科学研究科 (〒860-8555 熊本県熊本市中央区黒髪二丁目39-1)

八代海海域における水質、赤潮データ、東シナ海北部海域における海面水温の長期観測データにより、八代海の水質環境特性について検討した。水温、塩分、透明度、DO、ph、DIN、PO₄-P、Dsiの水質実測データによるクラスター分析を行い、八代海海域を5つのグループに区分した。また、DIN、PO₄-P、Dsiの月変動にもとづく分布特性から、八代海の北部、南部、西部の海域における、10～2月の栄養塩濃度が高い状態は、海面養殖との関連性が示唆された。東シナ海北部海域に開口する八代海海域における近年の水温変動は、東シナ海北部海域のそれとの連動が示唆された。近年、八代海海域の全域で、水温の上昇傾向が続いており、これに呼応するように、赤潮が急増していることが明らかになった。

Key Words :cluster analysis, seawater quality, red tide organism, sea temperature variation, northern East China Sea

1. はじめに

九州西部に位置する八代海は、極めて閉鎖性の高い内湾であり、近年、生息する生物の種および個体数の減少、赤潮発生の多発傾向と大規模化など、海域環境の悪化が顕著になっている。八代海では、最近、有害赤潮の頻発による漁業被害の発生に伴い、赤潮生物と水質環境の関係についての調査が行われるようになってきたが、八代海全域を対象にした広域的、長期的な水質環境特性に関する研究は、滝川ら¹⁾によるもの等があるものの、有明海に比べ極めて少ない。滝川ら¹⁾は、八代海の広域的、長期的な水温、塩分、透明度の実測データによるクラスター分析から、八代海を海域区分した。本研究では、滝川ら¹⁾が用いた八代海内湾調査データにおいて、2004年以降、新たに観測が開始された溶存酸素、溶存無機態窒素、リン酸態リン、溶存態ケイ素等の実測データを追加して水質8項目のクラスター分析を行い、物理的・化学的な水質環境特性により、八代海を海域区分した。また、溶存無機態窒素、リン酸態リン、溶存態ケイ素の月変動による栄養塩類の分布特性から、知見に乏しかった水質中の栄養塩濃度と海面養殖との関連性について検討した。

さらに、八代海では、2000年頃以降、赤潮の発生が急増しており、有明海でも極めて類似した傾向であることから、有明海、八代海に共通の赤潮生物の増殖因子²⁾である水温について、従来知見がなかった八代海と東シナ海北部海域の海水温変動³⁾の関連性を検討した。

2. 調査概要

本研究は、熊本県による八代海内湾調査のうち、図-1に示す19点の水質観測データを用いた。クラスター分析には、水温、塩分、透明度の3項目は、1980年4月～2012年3月までの32年間の毎月の観測値を使用し、DO（溶存酸素）、ph、DIN（溶存無機態窒素）、PO₄-P（リン酸態リン）、Dsi（溶存態ケイ素）の5項目は、2004年12月～2012年3月までの7年3ヶ月における毎月の観測値を使用した。クラスター分析の手法は、ユークリッド距離による階層型ward法とし、水質データは0-1に正規化した。クラスター分析には、OriginLab社のOrigin 9.0³⁾を用いた。

3. 調査結果

(1) 水質8項目による海域区分と水質環境特性の月変動
 クラスタ分析の結果、八代海海域は図-1に示すように、A1～A5に5区分することができる。各海域区分と潮汐残差流¹⁾の関係は、図-2に示すように、A1は停滞性の強い湾最北部の海域、A2は球磨川と有明海の影響を直接受け、また、潮汐残差流も停滞性のある湾北部の海域、A3は比較的流速が強い湾中央部の海域、A4は目吹瀬戸および伊唐瀬戸の周辺を除くと、流速が弱い湾南部の海域、A5は目吹瀬戸および伊唐瀬戸の西側の、流速が強い湾西部の海域にあたる。次に、図-3の海域区分ごとの水質項目の月変動についてみると、(a) 透明度は、北部のA1、A2では、年間を通してほぼ3m以下で推移する。南部のA4と西部のA5では、季節変動が大きく、特にA5では7月の6.7mから2月の12.5mまで大きく変化する。(b) 水温は、8～9月に最も高く、1～2月に最も低い。海域区分間の水温差は、4～10月にかけてほとんどないが、11月から次第に大きくなり、1月には、A1とA5の間で、6℃の水温差を生じている。A1は八代海の中で最も水深が浅く、陸水、気温等の影響を受けやすいこと、A5は東シナ海の外洋水の影響を受けることから、湾奥と湾口の間で大きな水温差を生じている。(c) 塩分は、全ての海域区分において、河川水の流入が年間最大になる7月の梅雨時に低下するが、特に、A1と球磨川の影響を直接受けるA2で、塩分の低下が顕著である。A1がA2に比べて塩分低下がやや大きいのは、水深が極めて浅く、幾つかの河川が流入し、球磨川の影響も受けていることが影響していると考えられる。7月の塩分低下は、全ての海域区

分で明瞭に表れており、梅雨時における河川水の流入の影響は、八代海の全域に及ぶ。(d) DOは、1月に最も高く、7月～10月に低下する。特に、A1とA2では、7～8月の低酸素化が、他の海域区分に比べ顕著である。図-4のA1、A2における7～8月のDO月観測値の頻度分布から、4 μ mol/Lを下回る状態が発生していることがわかる。本研究のデータは、5m層の観測値であるので、底層ではさらに強い貧酸素状態になっていた可能性が高い。(e) DINは、A1とA2では、球磨川等からの河川水の流入量が多い6～7月に高い。一方、中央部のA3、南部のA4、西部のA5では、6～7月も高いが、梅雨時の河川水の流入時期ではない10～2月にかけても高くなる。この傾向はA4、A5で明瞭であり、A1、A2と明らかに異なる。このようなDINの季節変動特性は、A1、A2とA3～A5で供給源が異なることを示唆しており、次節の(2) 栄養塩類の分布特性で後述する。(f) PO₄-Pは、A1とA2では、DINと同様に、河川水の流入量が多い6月以降高くなり、高いままの状態が2月まで続く。一方、A3～A5では、PO₄-P濃度の高い時期は、6～7月ではなく、10～2月である。DINと同様に、PO₄-Pの季節変動特性から、A1、A2とA3～A5で供給源が異なることを示唆しており、次節の(2) 栄養塩類の分布特性で後述する。(g) Dsiは、一般的に河川流域において、岩石と水が反応し岩石から元素を溶解する化学的風化作用により、河川水中に供給される。したがって、球磨川等の河川水が流入するA1、A2では、7月の梅雨時に最も高くなる。A1、A2では、梅雨時期前後のDsiの季節変動特性は、DINと類似する。

図-1 クラスタ分析による海域区分 (2004/12～2012/3 の水温、塩分、透明度、DO、ph、DIN、PO₄-P、Dsi の8項目の毎月観測値、海面下5m層)

図-2 海域区分と潮汐残差流¹⁾の関係

図-3 海域区分ごとの水質項目の月変動 (2004/12~2012/3, 海面下5m層)

図-4 A1, A2 における 7~8 月の DO 観測値の頻度分布 (縦軸, $\mu\text{mol/L}$)

(2) 栄養塩類の分布特性

前述したように、DINと $\text{PO}_4\text{-P}$ の濃度は、A1とA2では6~7月の河川水の流入増大時に最も高いが、10~2月も高い状態である。一方、A3~A5では、6~7月の河川水の流入増大時にやや高くなるものの、梅雨時に比べ、河川水の流入が少ない10~2月の方が高い。ここで、Dsiは一般に、自然の風化作用を受けて河川から海に供給されるため、DINと $\text{PO}_4\text{-P}$ の濃度をDsi濃度の季節変動に対応させると、10~2月の時期におけるDINと $\text{PO}_4\text{-P}$ の濃度の高い状態は、河川からの流入によらない要因が示唆される。

要因として、(1) 図-2の(a)透明度および(b)水温の月別変動に示すように、秋~冬にかけて、南部のA4と西部のA5では外洋水の影響が強まる。(2)主にA4, A5の海域で営まれている海面養殖との関連性、が考えられる。本論文では、(2)海面養殖との関連性について検討した。

図-5の八代海における海面養殖の概要から、ノリ、ブリ、マダイ、ヒラメ、クルマエビ、アオサ、ワカメなどの海面養殖が盛んに行われている。魚類養殖場の底質中には、養殖魚の排泄物や残餌に由来する窒素、リンが高濃度に含まれるが、八代海南部における魚類養殖場付近の底質からの窒素やリンの溶出速度は、八代海他の地点に比べ比較的高いことが指摘されている²⁾。また、八代海の全体負荷量に対し、陸域からの流入負荷は、T-Nの4割、T-Pの3割程度を占め、魚類養殖の負荷は、近年は減少傾向にあるものの、1995年にT-Nの33%、T-Pの45%に達し、また、底質からの溶出は、T-Nで12~24% (最小値~最大値)、T-Pで14~33%を占めることが報告されている²⁾。さらに、有害赤潮種であるコクロディニウム ポリクリコイデスは、魚類養殖が盛んな海域で

発生頻度が高く、魚類養殖に伴う負荷との関連性が示唆されている²⁾。以上に述べた栄養塩類の分布特性、海面養殖の状況および知見を踏まえると、図-1のA3~A5のDINと $\text{PO}_4\text{-P}$ の濃度が高いのは、A3~A5内に図-5の魚類養殖が盛んなB, Dの海域が含まれていることに起因する可能性が示唆される。一方、ノリ養殖では、ノリの生産過程で生じる落ちノリが出す老廃物や酸処理、施肥により、海水中の窒素やリンの濃度が高まる。ノリ養殖の漁期は10月頃から2月頃までとされている。このような、ノリ養殖の生産過程、漁期を考慮すると、図-1の海域区分A1, A2において、10~2月にDINと $\text{PO}_4\text{-P}$ の濃度が高いのは、ノリ養殖に伴う負荷との関連性が示唆される。

図-5 八代海における海面養殖の概要 (2003~2005年度, 社団法人水産資源保護協会が水産庁の漁場環境評価メッシュ図策定事業をもとにまとめた成果を編集)

(3) 八代海における海水温上昇と赤潮増加の関連性

有明・八代海では、近年、海水温や透明度の上昇が指摘されている²⁾。一方、赤潮の発生回数は、図-6の有明・八代海の赤潮発生回数の推移に示すように、1998年頃から急増しており、その年変動は有明海と八代海で極めて類似する。陸域から輸送される種々の物質負荷や、海域の自然環境条件等が同じではない有明海と八代海において、極めて類似する年変動が表れることから、二つの海域に共通する赤潮生物の増殖要因である海水温について、その上昇と赤潮発生増加の関連性を検討した。

八代海の広域的・長期的な水質環境特性を把握するため、1980年4月～2012年3月の32年間における水温、塩分、透明度の毎月の観測値を用いてクラスター分析を行った

結果、図-7に示すように3海域に区分できた。図-7の海域区分のB1、B2、B3は、B2に含まれる1地点を除き、図-2のA1～A2、A3、A4～A5にそれぞれ対応する。図-9は、上段に赤潮の発生回数、中段に図-7の海域区分ごとの水温、下段に図-8の東シナ海北部海域の海面水温の変動⁴⁾を、通年と赤潮発生回数が最も多い夏の二つのケースについて示した。図-9から、赤潮の発生が最も少なかった1995年と、赤潮の発生が増加しピークに近づいた2004年について、赤潮の発生回数、海域区分ごとの水温、東シナ海の海面水温の対応を比較すると、比較的良好な対応がとれており、東シナ海北部海域の水温上昇・八代海の水温上昇・八代海の赤潮発生回数の増加の三者について、関連性が示唆される。

図-6 有明・八代海の年間赤潮発生回数(縦軸)の推移

図-7 クラスター分析による海域区分(1980/4～2012/3の水温、塩分、透明度の毎月観測値、海面下5m層)

図-8 東シナ海北部海域⁴⁾

図-9 赤潮発生回数・海域区分ごとの水温・東シナ海北部海域の海面水温の関係(1985～2010)

上段: 赤潮発生回数(縦軸: 年間発生回数)

中段: 海域区分(図-8)ごとの水深5m層の水温(縦軸: 水温)

下段: 東シナ海北部海域の海面水温(縦軸: 水温)

(4) 海域区分ごとの水質環境特性と赤潮発生の関連性

透明度、水温、塩分の水質環境特性によって区分した海域ごとの特徴と赤潮生物種の関連性を検討するため、1985年～2010年において、発生回数が30回以上の種の年変動を既往資料⁹⁾により整理し、図-10に示した。出現回数が多い赤潮生物6種は、スケルトネマ コスタータム、クロロディニウム ポリクリコイデス、ギムノディニウム属、シャットネラ アンティーカ、ヘテロシグマ アカシオ、ミリオネクタ ルブラであった。このうち、クロロディニウム ポリクリコイデス、シャットネラ アンティーカ、ヘテロシグマ アカシオの3種は、養殖魚類に被害を与える有毒種として知られている。また、赤潮生物6種の季節出現特性を、図-11に示した。この図から、クロロディニウム ポリクリコイデスとシャットネラ アンティーカは夏に、ヘテロシグマ アカシオは秋に、それぞれ出現頻度が高い。また、ミリオネクタ ルブラは、春、夏、秋に恒常的に出現する。図-10から、海域区分別の赤潮生物6種合計の発生回数は、B1では1996年以降、B2では1999年以降、B3では2000年以降に急増しており、北部海域が南部海域に比べ4年程度早く、赤潮発生の増加を生じている。種別に見ると、スケルトネマ コスタータム赤潮は、北部のB1ほど多くなる。ギムノディニウム属は、いずれの海域区分においても減少傾向である。ヘテロシグマ アカシオは、中部のB2では出現が少ない。

ミリオネクタ ルブラは、どの海域区分にも出現するが、特にB3で多い。シャットネラ アンティーカとクロロディニウム ポリクリコイデスは、いずれの海域区分でも恒常的に出現する。次に、6種合計の発生回数が急増する前後の期間(aとb)に分けて、透明度、水温、塩分の月変動を整理し、表-1に示した。この表から、水温は、全ての海域区分のほとんどの月で上昇しており、夏～秋には0.6℃以上、上昇した。透明度も上昇傾向であり、B2、B3では冬に1m以上、上昇した。透明度の上昇は、植物プランクトンの増殖速度を速めることが指摘されている²⁾。今回の赤潮データの整理結果からは、冬期の赤潮発生回数は増加傾向にあるものの、他の季節ほど顕著ではなかった。塩分は、どの海域区分においても顕著な上昇あるいは低下の傾向は見られなかった。以上の、海域区分における水質環境特性の変動状況および赤潮生物6種の季節出現特性から、夏～秋の水温上昇は、クロロディニウム ポリクリコイデス、シャットネラ アンティーカ、ヘテロシグマ アカシオ、スケルトネマ コスタータムの赤潮発生の増大に関与している可能性が示唆される。しかし、今回の検討では、水温、透明度、透明度の変動が赤潮生物種ごとに与える影響の違いは、確認できなかった。赤潮生物の増殖は、富栄養化、日照量、水温・塩分躍層など、さまざまな要因が作用しているので、詳細な検討が必要である。

図-10 海域区分 (図-8) 別の赤潮生物 6種の年変動 (縦軸: 年間あたり出現回数, 1985/1～2010/12)

図-11 赤潮生物 6種の季節出現特性 (縦軸: 年間あたり出現回数, 1985/1～2010/12)

表-1 赤潮生物6種合計の発生回数が急増する前後の期間における、水質環境特性の比較 (1985/1~2010/12)

(a) 海域区分 B1 a : 1985~1995, b : 1996~2010										(b) 海域区分 B2 a : 1985~1998, b : 1999~2010										(c) 海域区分 B3 a : 1985~1999, b : 2000~2010									
月	透明度			水温			塩分			月	透明度			水温			塩分			月	透明度			水温			塩分		
	a	b	b-a	a	b	b-a	a	b	b-a		a	b	b-a	a	b	b-a	a	b	b-a		a	b	b-a	a	b	b-a	a	b	b-a
1月	2.5	3.0	0.4	11.2	11.3	0.1	32.5	32.3	-0.2	1月	5.6	7.7	2.1	12.8	13.2	0.5	33.5	33.3	-0.2	1月	10.5	10.9	0.4	14.4	14.6	0.3	34.1	33.9	-0.2
2月	2.8	3.1	0.2	11.0	11.3	0.3	32.6	32.5	0.0	2月	5.5	6.7	1.2	12.1	12.3	0.2	33.4	33.2	-0.2	2月	10.3	11.4	1.1	13.5	13.4	0.0	34.0	33.8	-0.2
3月	2.6	3.0	0.4	12.6	12.9	0.3	32.3	32.6	0.2	3月	5.2	6.6	1.4	12.8	13.3	0.5	33.2	33.3	0.1	3月	8.9	10.6	1.7	14.1	14.3	0.3	33.9	33.8	-0.2
4月	2.3	2.9	0.6	15.4	15.4	0.0	32.1	32.5	0.4	4月	6.4	6.0	-0.3	15.4	15.4	0.0	33.2	33.1	-0.1	4月	10.3	10.0	-0.3	16.0	15.9	-0.2	33.7	33.6	-0.1
5月	2.3	2.6	0.3	18.7	18.8	0.1	31.8	32.0	0.2	5月	5.5	5.2	-0.2	18.7	18.6	-0.1	32.7	32.7	0.0	5月	9.9	9.0	-1.0	18.9	18.8	-0.1	33.4	33.3	-0.1
6月	2.1	2.1	0.0	21.7	22.1	0.3	31.2	31.6	0.4	6月	4.6	4.9	0.3	21.5	21.9	0.4	32.1	32.4	0.3	6月	7.0	7.3	0.3	21.4	21.9	0.5	32.9	33.1	0.3
7月	2.0	2.2	0.2	24.7	24.9	0.2	27.9	29.0	1.1	7月	4.8	5.0	0.1	24.6	24.7	0.1	29.9	29.9	0.0	7月	7.0	6.7	-0.3	24.3	24.3	0.0	31.4	30.9	-0.5
8月	2.3	2.5	0.2	26.3	26.8	0.5	30.2	30.4	0.2	8月	5.4	5.7	0.3	26.3	26.9	0.6	31.0	31.1	0.1	8月	7.3	7.2	-0.1	26.0	26.7	0.6	31.6	31.9	0.2
9月	2.1	2.6	0.6	26.3	26.6	0.3	31.3	31.1	-0.3	9月	5.3	5.4	0.1	26.4	26.6	0.2	31.9	31.5	-0.4	9月	7.8	7.5	-0.3	26.4	26.6	0.2	32.2	32.0	-0.2
10月	2.0	2.3	0.3	22.5	23.7	1.2	31.8	31.6	-0.2	10月	4.2	4.9	0.8	23.5	24.5	1.1	32.5	32.4	-0.1	10月	7.1	8.2	1.0	23.8	24.5	0.8	33.0	33.0	0.0
11月	2.7	2.9	0.2	18.1	19.0	0.9	31.8	31.7	-0.1	11月	5.6	6.5	0.9	20.4	20.8	0.4	33.1	32.8	-0.3	11月	8.9	9.4	0.5	20.9	21.1	0.2	33.5	33.4	-0.1
12月	2.9	2.9	0.0	14.3	15.0	0.7	32.3	31.9	-0.4	12月	6.2	6.7	0.5	16.7	17.3	0.6	33.3	32.9	-0.4	12月	9.4	9.3	-0.1	17.6	18.3	0.7	33.9	33.6	-0.3

4. おわりに

本研究で明らかになった主要な結果を、以下に示す。

- (1) 2004年12月~2012年3月までの7年3ヶ月における水温、塩分、透明度、DO、ph、DIN、PO₄-P、Dsiの水質実測データによるクラスター分析の結果、八代海海域は、5つのグループに区分することができる。
- (2) 従来、八代海海域の富栄養化は、主に、球磨川等の河川流入負荷との関連性により検討されていた。本研究では、DIN、PO₄-P、Dsiの月変動にもとづく分布特性から、八代海の北部、南部、西部の海域における10~2月の栄養塩濃度が高い状態は、八代海で盛んに行われている魚類養殖、ノリ養殖等の海面養殖との関連性があることが示唆された。
- (3) 水温データの5ヵ年移動平均により、八代海海域における近年の水温変動傾向と東シナ海北部海域の海面水温の変動傾向を比較し、両者の間に、変動傾向の類似性があることが示唆された。
- (4) 八代海海域の、水温の上昇傾向に対応して、赤潮が急増した。水温の変動は、赤潮発生の年変動に影響することが示唆された。

謝辞：本研究は、「文部科学省特別経費（プロジェクト分）研究生物多様性のある八代海沿岸海域環境の俯瞰型再生研究プロジェクト⁶⁾」の研究の一部であることを記し、謝意を表する。

参考文献

- 1) 滝川清，田中健路，森英次，渡辺枢，外村隆臣，青山千春：八代海の環境変動の要因分析に関する研究，海岸工学論文集，51巻，pp.916-920，2004。
- 2) 環境省，有明海・八代海等総合調査評価委員会：委員会報告，2006。
- 3) OriginLab Corporation：ORIGIN 9.0，data analysis and graphing software，Massachusetts，2012。
- 4) 気象庁ホームページ：
http://www.data.kishou.go.jp/shindan/e_4/nagasaki_warm/nagasaki_warm.html，参照 2013-3-17。
- 5) 水産庁九州漁業調整事務所：九州海域の赤潮，昭和60年~平成22年。
- 6) 文部科学省特別経費（プロジェクト分）研究「生物多様性のある八代海沿岸海域環境の俯瞰型再生研究プロジェクト」ホームページ：
http://accafe.jp/kumamoto_u_yatsushiro/，参照 2013-3-7。

CHARACTERISTICS OF WATER QUALITY ENVIRONMENT IN THE YATSUSHIRO SEA AREA

Yoshihiro SONODA, Kiyoshi TAKIKAWA, Shinji KAWASAKI, Chiharu AOYAMA, and Takashi SAITO

This paper examines the characteristics of water quality environment in the Yatsushiro Sea with water quality data and red tide data of the Yatsushiro Sea, and sea surface temperature data of the northern East China Sea. Cluster analysis by the water temperature, salinity, transparency, dissolved oxygen, ph, DIN (dissolved inorganic nitrogen), PO₄-P, and Dsi (dissolved silicate) was conducted, and it divided into five groups. Distribution characteristic based on monthly change of PO₄-P, DIN and Dsi, is suggested the relevance marine culture. It was suggested that water temperature variation of the Yatsushiro Sea is being interlocked with water temperature variation of the northern East China Sea, and became clear that red tide is increasing rapidly in response to the rise of water temperature.