



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	広域定期観測による有明海水環境の現状(シンポジウム:沿岸海洋学からみた有明海問題)
Author(s)	堤, 裕昭; 木村, 千寿子; 永田, 紗矢香 他
Citation	沿岸海洋研究, 42(1), 35-42
Issue Date	2004-08-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/56491
Type	journal article
File Information	105)montani-engankaiyo-42-35.pdf



広域定期観測による有明海水環境の現状*

堤 裕昭**・木村千寿子**・永田紗矢香**・佃 政則**

山口 一岩[†]・高橋 徹^{††}・門谷 茂[†]

Current Water Environment of Ariake Bay Observed from Routine Surveys

Hiroaki Tsutsumi, Chizuko Kimura, Sayaka Nagata, Masanori Tsukuda,

Hitomi Yamaguchi, Tohru Takahashi and Shigeru Montani

1998年以降, 毎年秋季から初冬にかけて大規模な赤潮が発生し, ノリの色落ち被害が起きている有明海で, 縦断方向に約3 km 間隔で設定した13カ所の調査地点で2002年4月から2003年4月に合計10回行った水質調査の結果の概略を示す. 調査期間中, 2002年7月および10月に, 最大面積が600 km²を超える大規模な赤潮が, いずれも最奥部の佐賀県から福岡県および熊本県北部の沿岸域で発生した. その発生過程は, 有明海奥部海域へ流入する河川水で表層が低塩分化して塩分成層が形成され, そこへ大量の栄養塩が流入して栄養塩濃度がDINで40 μmol L⁻¹, DIPで2 μmol L⁻¹を超えるような高濃度に達し, 大規模な赤潮が発生した. つまり, 表層の低塩分化による成層構造が形成された時, その表層に陸域から大量の栄養塩が流入して極端な富栄養化状態が一時的に発生し, 植物プランクトンが急速に増殖して赤潮へと発展した.

Since 1998, large scale red tides have occurred in autumn and early winter. We established 13 sampling stations at intervals of approximately 3 km on a longitudinal line in Ariake Bay, and surveyed the vertical profile of water quality at each station ten times from April, 2002 to April, 2003. In this study, we twice July and November, 2003 observed a large scale red tide that extended for over 600 km² from the coast of Saga Prefecture, at the innermost areas of Ariake Bay, to Fukuoka and Kumamoto Prefectures. From the results of this study, the process of red tide blooms in these areas can be described as follows. First, the water in the innermost areas of Ariake Bay was stratified due to a decrease of salinity in the surface layer of water loaded from rivers. A large amount of nutrient was transported from the rivers to the innermost areas of the bay, and concentrated in the surface layer of the stratified water. The concentration of the nutrients rapidly increased, but only at the surface layer of the water, and temporarily became extremely eutrophic at over 40 μmol L⁻¹ in DIN and 2 μmol L⁻¹ in DIP; resulting in the occurrence of a red tide in just this surface layer. Therefore, the occurrence of the large scale of red tide in the inner areas of Ariake Bay started from the occurrence of the halocline conditions of a well-defined vertical salinity gradient.

キーワード: 有明海, 諫早湾, 赤潮, 成層構造

1. はじめに

九州西岸に位置し, 典型的な沿岸閉鎖性海域の1つである有明海では, 1990年代以降, 赤潮の年間の発生件数が増加傾向にあることが報じられている(水産庁増殖推進部, 2003¹⁾). 夏季には魚介類に有害なラフィド藻類や渦鞭毛藻類による赤潮が発生し, 秋季から冬季にかけては珪藻類を主体とした大規模な赤潮が発生して, 全国

の生産量の約4割を占めるノリ養殖に大きな被害を及ぼしている. 特に, 2000年12月から2001年3月の冬季には, 有明海全域において珪藻類 *Rhizosolenia imbricata* による大規模な赤潮が発生し, 海水中の栄養塩が消費されて, 全国の年間生産量の約4割を占めるノリ養殖は, ノリが栄養塩不足となって色落ちして大被害を受けた(水産庁増殖推進部, 2001 a²⁾). Fig. 1には, 「九州海域の赤潮」(水産庁九州漁業調整事務所, 1991~2003³⁻¹⁵⁾)の記録をもとに, 1990年~2002年の秋季から初冬(10月~12月)に有明海で発生した最大面積が50 km²以上に達した赤潮を対象として, 赤潮規模指標(最大面積×継続日数)の推移を示す. 1990年, 1994年, 1996年には, 最大面積が50 km²以上に達した赤潮は記録されていない. 1991年~1997年には合計5回記録されているが, それらの赤

* 2004年1月13日受領, 2004年4月19日受理

** 熊本県立大学環境共生学部

[†] 北海道大学大学院水産科学研究科

^{††} 熊本保健科学大学保健科学部

連絡先: 堤 裕昭, 熊本県立大学環境共生学部海洋生態学研究室
〒862-8502 熊本県熊本市月出3-1-100

E-mail: hiro@pop.pu-kumamoto.ac.jp

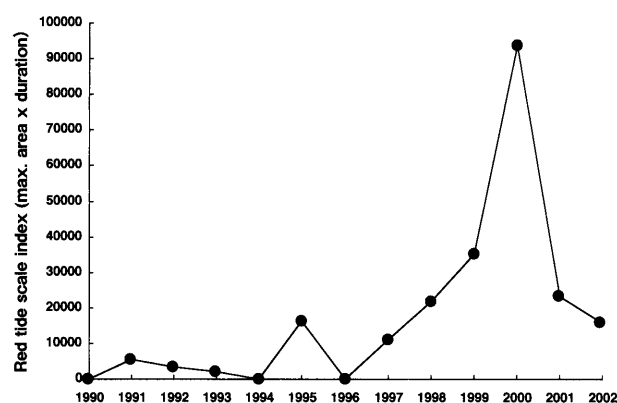


Fig. 1 Red tide scale index with maximum areas of more than 50 km² that occurred in Ariake Bay between October and December from 1990 to 2002. The results of red tides are based on the annual reports from the Kyushu Fishery Coordinate Office (1991 to 2003³⁻¹⁵).

潮の規模指数は、3,436～16,300の範囲にあった。これに対して、1998年頃以降は明瞭な増加傾向を示し、1998年～2001年には4年連続で赤潮規模指数が20,000を超えた（堤ら、2003¹⁶）。また、2002年は夏季から少雨傾向が続く、8月～12月の有明海沿岸域における月間降水量が最高で110 mm程度（気象庁観測データによる）にとどまり、沿岸の陸域からの河川を通しての栄養塩流入量も少なかったと推測されるが、それでも最大面積が55～400 km²以上に達した赤潮が10月中旬より佐賀県から熊本県の海域において発生し、赤潮規模指標は15,550に達した（通報番号 SA-15, FO-14, KM-29；水産庁九州漁業調整事務所、2003¹⁵）。このように、赤潮規模指標で評価すると、1998年以降、毎年、10月～12月に大規模な赤潮の発生が繰り返されてきたことがわかる。

大規模な赤潮が頻発する原因としては、過去の例の多くの場合、陸域から栄養塩負荷量の増大に伴う海域の富栄養化があげられる。特に、大都市近傍の沿岸閉鎖性海域では、現在でも、世界各地でこのような状況にあり、陸域から栄養塩負荷量の増大による赤潮の発生、大量の有機物の海底への沈降と堆積、海底環境の嫌気化と海底生態系の衰退が報じられている（Diaz and Rosenberg, 1995¹⁷）。しかしながら、有明海の場合は、近年、沿岸域で人口の集中が起きたり、農業や工業が活発化して、人間活動の増大に伴うさまざまな排水負荷量が増加し、海域の富栄養化が進行した形跡は見あたらない。有明海に注ぐ一級河川から有明海奥部海域への全窒素および全リンの年間総負荷量¹⁸や有明海沿岸の調査定点における公共用水域水質測定結果（T-N, T-P）^{19,20}に、1980年代以降2001年まで大きな変化は見られていない。また、有明海は、海域の特性として潮汐による水位の変動が大き

く、奥部海域では最大で約6 mにも達する。そのため、潮汐によって生じる潮流が速く、海水がよく混合される海域と考えられてきた。ところが、1997年4月に有明海の内湾である諫早湾で進行している干拓事業の一環として、諫早湾の潮受け堤防が締め切られたことによって、有明海の海水振動の固有周期が小さくなり、外海から入射する潮汐波の周期と有明海の固有周期との違いが大きくなって共振作用が弱まり、潮汐が減少した（宇野木2002 a²¹、2002 b²²）。潮汐振幅の減少は潮汐流の流速の減少をもたらす。諫早湾の潮受け堤防締め切り後に、大潮下げ潮時の水面下2 mにおける最大流速が、潮受け堤防の前面で80～90%、諫早湾湾口およびその沖合で10～30%程度減少したことが観測された（水産庁増殖推進部、2001 c²³、2001 d²⁴）。したがって、有明海で毎年秋季から冬季に大規模な赤潮が発生するようになった時期と、諫早湾の潮受け堤防の締めきりによって潮汐流の流速に変化が生じた時期がほぼ一致しており、両者の関連性が強く示唆される。

筆者らの研究グループでは、このような潮汐流の変化によって有明海の海洋構造に何らかの変化が生じ、そのことによって大規模な赤潮が誘発されているのではないかという点に注目し、2001年8月より、現状の有明海の水質ならびに底質環境を精密に調査してきた。本編においては、有明海最奥部の佐賀県佐賀郡地先の干潟沖合から熊本県宇土郡沖合にかけて有明海の中央を縦断する方向に約3 km間隔で設定した合計13カ所の調査地点において（Fig. 2）、2002年4月から8月まではStn KからStn Aまで、2002年9月から2003年4月まではStn IからStn S1までの、各11地点において合計10回行った水質調査の結果の概略を紹介し、どのような水質条件下において、有明海のどこで赤潮が発生しているのかを明ら

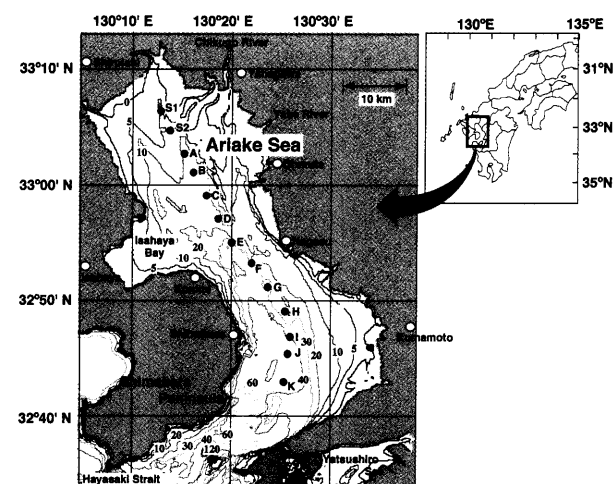


Fig. 2 Ariake Bay study areas and sampling stations.

かにするとともに、1998年以降、秋季から冬季にかけて大規模な赤潮が発生するメカニズムについて考察する。

2. 調査方法

各調査地点において、船上から多項目水質計 (YSI, Model 6600) を海中に降ろして、水温、塩分、DO、蛍光値を、水面下10 m までは1 m ごとに、それ以深の層では2 m ごとに測定した。また、バンドン型採水器を用いて、水面下2 m および5 m 層の海水を採水し、500 mL をクロロフィル a 濃度測定用サンプル、250 mL を栄養塩測定用サンプルとして、それぞれプラスチックボトルに入れ、クーラーボックスに保管して、研究室に持ち帰った。調査は毎回5時間以内に終了した。なお、多項目水質計のDOの測定値は調査直前に空気補正を行った。塩分の測定値は調査期間中に2回、標準海水 (離合

社) を測定することによって補正した。

研究室において、海水のクロロフィル a 濃度は500 mL のサンプル水をポンプで吸引しながらグラスファイバーフィルター (Whatman, GF/F) で濾過した後、フィルターに残った植物プランクトンのクロロフィルをアセトンで抽出し、約24時間後に、クロロフィル測定装置 (ターナー, 10-AU) を用いてクロロフィル a 濃度を求めた。このようにして求めた各調査地点における水面下2 m および5 m 層のクロロフィル a 濃度と、同じ層で多項目水質計を用いて測定した蛍光値との相関関係を求め、各層のクロロフィル a 濃度を算出して、クロロフィル a 濃度の鉛直プロファイルを求めた。

海水の栄養塩濃度は、250 mL のサンプル容器から注射器を用いて吸い出した海水をディスクフィルター (0.45 μm) で濾過し、濾液中の硝酸態および亜硝酸態

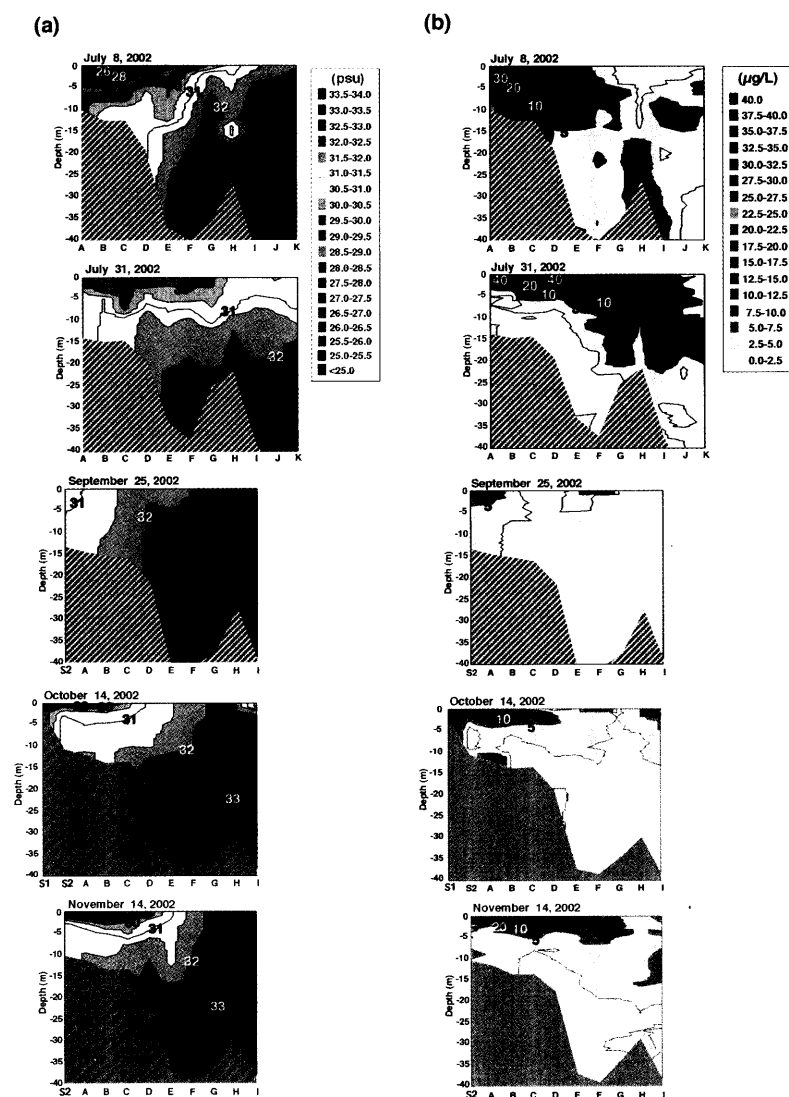


Fig. 3 Cross section of (a) salinity and (b) chlorophyll-a of water in Ariake Sea from July to November, 2002 (unpublished data).

窒素, リン酸態リンの濃度について, 水質自動分析装置 (Bran+Luebbe, AACS-II) を用いて測定した。

3. 結 果

2002年4月から2003年4月までの調査期間中に, 佐賀県の有明海最奥部から熊本県の海域にかけて2回の大規模な赤潮の発生を観察した。第1回目は, 2002年7月8日および2002年7月31日の珪藻類の *Skeletonema costatum* および渦鞭毛藻類の *Heterosigma akashiwo*, *Ceratium furca* などによる赤潮であり, 第2回目は2002年10月14日および11月14日の渦鞭毛藻類の *Akashiwo sanguinea* (*Gymnodinium sanguineum*), 珪藻類の *S. costatum* などによるものである。それぞれ, 「九州海域の赤潮」(水産庁九州漁業調整事務所, 2003¹⁵⁾) にも, 7月: 通報番号 SA-05, FO-06, KM-15, 10月: 通報番号 SA-15, FO-14, KM-29と記録された。7月の赤潮では発生期間が28~52日に及び, 合計の最大面積は約750 km²に達した。また, 10月の赤潮の場合も, 発生期間がSA-15で36日間と記録され, 最大面積は約400 km²に達した。Fig. 3には, これらの赤潮発生時における有明海の海水縦断面の塩分の鉛直プロファイルおよびクロロフィル濃度を示した。

これらの2回の赤潮発生時における海洋構造に1つの共通点が見られる。季節が異なるので, 当然のことながら水温は大きく異なるが, いずれの場合も有明海的最奥部海域 (Stn S1~Stn EないしF) で, 塩分による成層構造が見られることである。2002年7月の1回目の大規模な赤潮が発生した時は, 梅雨期にあたり, Stn AおよびStn Cにもっとも近い福岡県柳川市および大牟田市の7月の降水量は, それぞれ307 mmおよび220 mmを記録した (気象庁観測結果より)。この大雨によって, 筑後川, 矢部川, 六角川, 嘉瀬川などの一級河川の河口が集中する有明海奥部海域では, 大量の河川水が流入して, 表層が低塩分化したと考えられる。7月8日には, 最奥部のStn A~Stn Cの表面では塩分が12.3~21.9に低下し, 水面下8 mでも29.6~29.9に低下していた。珪藻類 *S. costatum*, 渦鞭毛藻類 *C. furca* などによる赤潮は, この低塩分化した表層で発生し, Stn A~Stn Eにおけるクロロフィル a 濃度の最高値は15.8~37.3 $\mu\text{g L}^{-1}$ に達した。

9月には, 九州地方への台風の接近によって, 有明海では強風の日が続き, 全域で海水の鉛直混合が起きて, 全調査地点の全層で塩分はほぼ均質となり, クロロフィル濃度も10 $\mu\text{g L}^{-1}$ を超える地点はまったく見られなかった。しかしながら, 10月には再び有明海奥部海域で表層が低塩分化し, その層で渦鞭毛藻類の *A. sanguinea*, 珪

藻類の *S. costatum* などによる2回目の赤潮が発生した。低塩分化した表層水は, 11月14日にはStn S2~Stn Dの水面下2 mまでの層で塩分25.7~30.6に低下し, この層におけるクロロフィル a 濃度の最高値は15.4~82.3 $\mu\text{g L}^{-1}$ に達した。ここで1回目の赤潮発生時と水温以外に異なる条件がみられた。それは大量の降雨がなかったにもかかわらず, 表層水が低塩分化したことである。福岡県柳川市および大牟田市の10月および11月の降水量は, それぞれ10月は65 mm および71 mm, 11月は69 mm および85 mmと平年値の半分程度にすぎない少雨傾向を示していた (気象庁観測結果より)。にもかかわらず, 9月に台風の影響を受けて鉛直混合が起きた後に, 再び, 表層の低塩分化による成層構造が形成されて, 赤潮が発生していた。

赤潮の発生には植物プランクトンの増殖を支える栄養塩の供給が不可欠である。Fig. 4には, Stn Aにおける海水表面の栄養塩濃度 (DIN, DIP) の変化を示した。栄養塩濃度は, 2002年7月8日および10月14日の2回, DIN および DIP ともにピークが観測された。7月8日には, それぞれ62.3 $\mu\text{mol L}^{-1}$ および2.5 $\mu\text{mol L}^{-1}$ を記録し, 10月14日にも44.5 $\mu\text{mol L}^{-1}$ および2.3 $\mu\text{mol L}^{-1}$ を記録した。これらの栄養塩濃度のピークは, いずれも有明海奥部海域で大規模な赤潮が発生した直前または発生期前半に当たっていた。したがって, 有明海奥部海域で大規模な赤潮が発生するにあたっては, まず表層の低塩分化による成層構造の形成と大量の栄養塩の流入により, 表層において栄養塩濃度が赤潮を誘発するに十分なレベルに上昇していたことがわかった。2002年7月の場合は梅雨期に当たるので, 大雨によって陸域から大量の栄養塩が流入したことは容易に説明できるが, 10月の場合はそれに相当するような降雨がみられない。しかしながら, 河川からの淡水の流入と鉛直混合が弱いことによ

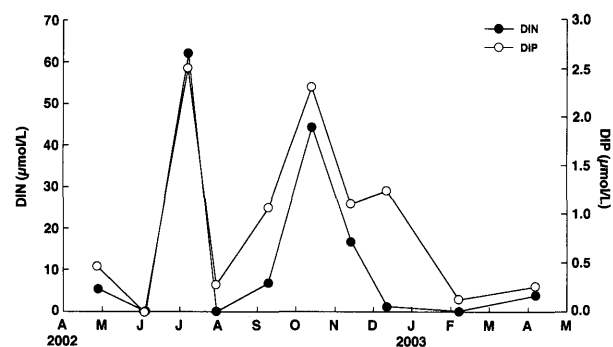


Fig. 4 Fluctuations of nutrients (DIN, DIP) in surface water (0 m in depth) at Stn A (one of the stations located in the innermost areas of Ariake Bay) from April 2002 to April 2003 (unpublished data).

て発生したと考えられるので、この場合の栄養塩も底層からではなく、陸域から河川を通して供給されたと考えられる。

Stn Aにおける栄養塩濃度は、11月14日にはDINで $16.9 \mu\text{molL}^{-1}$ に、DIPで $1.1 \mu\text{molL}^{-1}$ に減少したが、この時のN/P比(15.4)はレッドフィールド比(16:1)に近い値となっていた。12月12日には、DINはさらに $1.3 \mu\text{molL}^{-1}$ に減少したのに対して、DIPは $1.3 \mu\text{molL}^{-1}$ と濃度に大きな変化が見られなかった。そのため、N/P比は1.0となり、あきらかに植物プランクトンの増殖にはDINが不足する状態となっていた。このDINの減少は、N/P比の推移を考慮すると、表層で増殖した植物プランクトンによって消費されたものと考えられる。有明海沿岸の佐賀県および福岡県のノリ養殖漁場では、12月頃より養殖ノリの色落ちが発生したが、これは10月～11月にかけて有明海奥部海域に発生した大規模な赤潮によって、このように表層で栄養塩が、特にDINが枯渇したためと考えられる。

4. 考 察

本編に示した調査結果をまとめると、2002年7月および10月に有明海で発生した最大面積が 600 km^2 を超える大規模な赤潮は、海域面積 $1,700 \text{ km}^2$ とされる有明海の中で、最奥部の佐賀県から福岡県および熊本県北部の沿岸域で発生したものであった。その発生過程は、有明海奥部海域へ流入する河川水によって、表層の低塩分化による塩分層の形成と大量の栄養塩の流入が起きて、一時的に栄養塩濃度がDINで $40 \mu\text{molL}^{-1}$ を超え、DIPで $2 \mu\text{molL}^{-1}$ を超えるような高濃度に達して、その直後に表層で植物プランクトンが増殖し、有明海の縦断方向において少なくとも長さ 20 km 以上に及ぶ大規模な赤潮に発展していた。つまり、表層の低塩分化による成層構造が形成された時に、その表層に陸域から流入する大量の栄養塩が集中することによって、表層にかぎっては極端な富栄養化状態が一時的に発生し、その表層で植物プランクトンが急速に増殖して赤潮に発展していた。本編の冒頭でも述べたように、有明海に注ぐ一級河川から有明海奥部海域への全窒素および全リンの年間総負荷量¹⁸⁾や有明海沿岸の調査定点における公共用水域水質測定結果(T-N, T-P)^{19, 20)}に、1980年代以降2001年まで大きな変化は見られていない。しかしながら、本編に示した調査結果は、陸域からの栄養塩負荷量が増加しなくても、成層構造が強化されることによって、有明海奥部海域が大規模な赤潮の発生する海域へと変化しうること示している。

有明海では、その内湾である諫早湾において1997年4

月に潮受け堤防が締め切られた。このことは、有明海奥部海域において、成層構造の発達を助長する新たな要因として挙げることができる。1980年代後半以降、有明海では潮汐振幅の減少が観測されている。一例を挙げると、有明海奥部海域に面する佐賀県大浦では、1987年から2000年の間に、 M_2 分潮に S_2 分潮を加えた大潮差で、振幅が 13.1 cm 減少した(宇野木, 2003²⁵⁾)。潮汐振幅が減少すると潮流の流速が減少し、海水の鉛直混合が弱まって成層構造が発達しやすくなる。Fig. 3に示したように、有明海奥部海域での大規模な赤潮は、この成層化した海水の表層で発生していたものであり、本編の調査結果は、その表層における赤潮発生のメカニズムを示した。したがって、潮汐振幅が減少傾向にある有明海は、海洋構造として以前よりも赤潮が発生しやすい海域となりつつあることを意味している。

有明海の潮汐振幅を弱める要因として、灘岡(2003)²⁶⁾は次の3つの要因があることを指摘している。1. 有明海内の海水面積の減少、2. 平均水位の上昇、3. 外洋潮汐振幅の減少。諫早湾において潮受け堤防が締め切られて以来、その締めきりが有明海の潮汐に及ぼす影響が議論されてきた。潮汐振幅に及ぼす影響については、数値シミュレーションの結果、塚本・柳(2002)²⁷⁾は、「3. 外洋潮汐振幅の減少」が、潮汐振幅が減少してきた要因の86%を占めるとした。これに対して、宇野木(2002²²⁾, 2003²³⁾は「1. 有明海内の海水面積の減少」の要因、つまり諫早湾潮受け堤防の締めきりや干拓事業の影響が全体の約6割を占めていることを示し、磯部(2001)²⁸⁾も潮受け堤防の締めきりの寄与が大きいことを指摘している。灘岡・花田(2003)²⁹⁾は、有明海の共振現象が過大評価されることを避けるために潮汐の数値シミュレーションの計算領域を有明海の外の東シナ海へ拡大し、精度の高い計算を行うことから、諫早湾潮受け堤防の締めきりが有明海の潮汐振幅の減少要因として40～50%程度寄与していることを示した。

潮流の流速に関しては、1997年4月に諫早湾で潮受け堤防が締め切られて以来、諫早湾内だけではなく、諫早湾口やその沖合の有明海においても、潮汐流の最大流速が10～20%程度低下したことが実測されている(水産庁増殖推進部, 2001c²³⁾)。塚本・柳(2002)²⁷⁾も潮汐振幅が減少してきた要因としては外海の影響を強調しているものの、1985年および1999年の有明海における $\text{Log}_{10}(H/U^3)$ (H :水深(m), U : M_2 潮流振幅(m/sec))の値を求め、潮流によって生じる潮汐振幅の3乗に比例する鉛直混合エネルギーが1999年には弱まって成層化しやすい海域となっている場所が、諫早湾および有明海奥部海域で拡大していることを指摘した。

柳・阿部 (2003)³⁰⁾は、1990年～2000年における有明海沿岸4県（長崎県、佐賀県、福岡県、熊本県）の水産関係の研究機関による有明海全域における浅海定線調査の水質調査結果、国土交通省が測定した河川流量データ、気象庁が観測した気象データなどから、有明海では、近年表層の低塩分化によって成層構造が発達しやすくなっていることを示すとともに、エスチュアリ循環が促進され、流入した河川水の平均滞留時間（2～2.5ヶ月程度）が短くなる傾向にあり、海水交換率そのものは近年むしろ高くなる傾向にあることを示した。海水交換率については後述するとして、Fig. 3に示したように本編の観測例として大規模な赤潮は低塩分化した表層で発生しており、このように長期的な海洋構造の解析結果でも、その赤潮発生の起点となる成層構造の発達が指摘されている。ただし、ここで解析に用いられた浅海定線調査の水質調査結果は、毎月1回、大潮満潮時の前後約2時間程の間に行われた調査結果である。潮汐周期の中で潮汐流がもっとも速くなり、しかも外海水がもっとも奥部へ侵入して、河川水の影響を受けた表層の低塩分化によって発生する成層構造がもっとも観測しにくくなる期間および時間帯の調査結果であるので、有明海の水環境の現状を正確に反映したものではない。筑後川をはじめとする主要河川の河口が集中する諫早湾から有明海奥部海域における近年の海洋構造は、この解析結果よりもさらに成層構造が発達しやすい海域となっていることが考えられる。

柳・阿部 (2003)³⁰⁾が示した有明海における海水交換率については、有明海の入り口となる島原半島と天草下島間の早崎海峡付近における交換率を意味している。つまり海域面積1,700 km²の有明海全域における海水交換で、本編の調査結果が示した実際に有明海奥部の大規模な赤潮の発生海域とはかなり離れた場所である。その間に有明海は約130度反時計回りに湾曲した形状を呈し、八代海とも一部海水の交流があり、島原市から熊本県熊本市を結ぶ線上では約22 kmに広がり、その北側約10 kmに位置する長崎県有明町から熊本県長洲町を結ぶ線上では約13 km程度に狭められ、それより北側の有明海奥部では水深が20 m以下に急激に浅くなるという複雑な地形を有している (Fig. 2)。求められた海水交換率の変化が、大規模な赤潮が発生する有明海奥部海域の潮汐・潮流の変化とどのように関連しているかについては評価が難しい。また、流入した河川水の平均滞留時間が短くなる傾向にあることを指摘しているが、2000年の平均滞留時間は1990年の約2.5ヶ月を若干上回る値となっており、1990年～2000年の11年間で傾向を評価すれば、この結論に統計的な有意性があるとは思われない。さらに、

本編の調査結果が示すように、有明海奥部海域で大規模な赤潮が発生する原因は、塩分による成層構造の発達とその低塩分化した表層における栄養塩濃度の上昇にある。成層強度の強化は、たとえそのことが海水交換率を微妙に上昇させていたとしても、赤潮の発生を抑制する方向へ作用しているのではなく、成層化した表層における大規模な赤潮の発生に寄与していることを示している。

本編に示した筆者らの2002年度の有明海における10回の調査では、8回は小潮時に調査を行い、成層構造が発生した有明海の中央部から奥部海域の海洋構造を可能な限り精密に観測してきた。大規模な赤潮の発生といっても、特に秋季の赤潮の場合、有明海奥部海域において、その表層のわずか水面下数 m 内で起きている現象である (Fig. 3)。この海域のごく表層における微妙な水質の変化をとらえる調査を行わないかぎり、有明海で問題とされる赤潮の発生過程を追跡し、発生メカニズムを解明することは不可能である。ところが、柳・阿部 (2003)³⁰⁾にも用いられた有明海沿岸4県の水産関係の研究機関による浅海定線調査では、各調査地点において、水深が大きく異なるにもかかわらず、表層、水面下5 m層、海底直上1 m層のわずか3層の調査結果しか、記録としては残されてこなかった。4県の研究機関によって調査日も数日程度異なる場合が少なくないし、成層構造がもっとも観測しにくい大潮満潮時の調査結果である。したがって、各地点の3層の塩分の平均値を求めても、それがその地点の塩分の現状を適切に反映している値とは言い難い。この浅海定線調査の調査結果は、現状の有明海奥部海域で発生する大規模な赤潮の発生原因を見いだすための解析に用いるだけの調査精度を有したものではない。

本編に示した筆者らの有明海における調査結果の詳細については別紙に譲ることにするが、筆者らの研究グループの調査結果は、既存の潮汐や潮流に関する研究例からの情報と照合すると、諫早湾の潮受け堤防締めきりに端を発し、有明海奥部海域における潮汐振幅および潮流振幅の減少、鉛直混合エネルギーの減少、表層の低塩分化による塩分成層の強化、成層した表層における大規模な赤潮の発生が、一連の因果関係で結ばれた連鎖した現象として発生している可能性を強く示唆している。

残念なことに、諫早湾潮受け堤防締めきり以前に、本編で示したような有明海の水質環境を現状で求められる精度で観測した調査結果がないことから、現在、有明海の奥部海域で発生している成層構造が、諫早湾潮受け堤防締めきりによってどの程度助長されたのかということ を正しく評価することが難しい。その点を明確にするた

めには、唯一の方法として、諫早湾の潮受け堤防をある程度開門した状態で、精密な水質観測や潮汐・潮流についての調査を、特に大規模な赤潮が発生している有明海奥部海域に焦点を当てて行う必要がある。また、その期間は、梅雨期と秋季から冬季にかけて大規模な赤潮が発生する2つの時期を含める必要があり、結果として周年に及ぶ開門操作と、有明海の広範囲におよぶ精度の高い水質調査が求められる。

謝 辞

本研究は財団法人日産科学振興財団および文部科学省科学研究費補助金基盤Bによる研究助成を得て行われた。赤潮のデータに関しては、九州漁業調整事務所より資料の提供を受けた。有明海沿岸4県の水産関係の研究機関（長崎県総合水産試験場、佐賀県有明水産振興センター、福岡県水産海洋技術センター有明海研究所、熊本県水産研究センター）による浅海定線調査の結果については、独立行政法人水産総合研究センター西海区水産研究所より資料の提供をうけた。また、有明海における水質調査にあたっては、熊本市の川口漁業協同組合の協力を得た。末筆ながら感謝の意を表したい。

参 考 文 献

- 1) 水産庁九州漁業調整事務所 (2003): 6. 資料 年次別赤潮発生件数. p. 9, 平成14年九州海域の赤潮, 水産庁九州漁業調整事務所.
- 2) 水産庁増殖推進部 (2001 a): 全国のノリ共販状況 (H 12. 11. 1~H 13. 2. 26). p. 106-107, 平成13年度農林水産省有明海ノリ不作等対策関係調査委員会資料集(1), 水産庁増殖推進部.
- 3) 水産庁九州漁業調整事務所 (1991): 別表-4 平成2年赤潮発生状況. p. 24-29, 平成2年九州海域の赤潮, 水産庁九州漁業調整事務所.
- 4) 水産庁九州漁業調整事務所 (1992): 別表-4 平成3年赤潮発生状況. p. 24-31, 平成3年九州海域の赤潮, 水産庁九州漁業調整事務所.
- 5) 水産庁九州漁業調整事務所 (1993): 別表-4 平成4年赤潮発生状況. p. 26-31, 平成4年九州海域の赤潮, 水産庁九州漁業調整事務所.
- 6) 水産庁九州漁業調整事務所 (1994): 別表-4 平成5年赤潮発生状況. p. 21-25, 平成5年九州海域の赤潮, 水産庁九州漁業調整事務所.
- 7) 水産庁九州漁業調整事務所 (1995): 別表-4 平成6年赤潮発生状況. p. 21-25, 平成6年九州海域の赤潮, 水産庁九州漁業調整事務所.
- 8) 水産庁九州漁業調整事務所 (1996): 別表-4 平成7年赤潮発生状況. p. 21-25, 平成7年九州海域の赤潮, 水産庁九州漁業調整事務所.
- 9) 水産庁九州漁業調整事務所 (1997): 別表-4 平成8年赤潮発生状況. p. 21-25, 平成8年九州海域の赤潮, 水産庁九州漁業調整事務所.
- 10) 水産庁九州漁業調整事務所 (1998): 別表-4 平成9年赤潮発生状況. p. 22-25, 平成9年九州海域の赤潮, 水産庁九州漁業調整事務所.
- 11) 水産庁九州漁業調整事務所 (1999): 別表-4 平成10年赤潮発生状況. p. 26-31, 平成10年九州海域の赤潮, 水産庁九州漁業調整事務所.
- 12) 水産庁九州漁業調整事務所 (2000): 別表-4 平成11年赤潮発生状況. p. 34-39, 平成11年九州海域の赤潮, 水産庁九州漁業調整事務所.
- 13) 水産庁九州漁業調整事務所 (2001): 平成12年12月分九州海域における赤潮発生状況. 水産庁九州漁業調整事務所, 12-13.
- 14) 水産庁九州漁業調整事務所 (2002): 別表-4 平成13年赤潮発生状況. p. 26-33, 平成13年九州海域の赤潮, 水産庁九州漁業調整事務所.
- 15) 水産庁九州漁業調整事務所 (2003): 別表-4 平成14年赤潮発生状況. p. 22-30, 平成14年九州海域の赤潮, 水産庁九州漁業調整事務所.
- 16) 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.
- 17) Diaz, R. J. and R. Rosenberg (1995): Marine benthic hypoxia: A review of its ecological effects and the behavioural responses of benthic macrofauna. Oceanography and Marine Biology: an Annual Review, 33, 245-303.
- 18) 水産庁増殖推進部 (2001 b): 資料5-1 主要河川の流量・水質の状況 平成13年3月13日 (国土交通省河川局). p. 463-485, 平成13年度農林水産省有明海ノリ不作等対策関係調査委員会資料集(1), 水産庁増殖推進部.
- 19) 九州農政局 (2003): はじめに-有明海の概要-. p. 1-2, 諫早湾干拓事業開門総合調査報告書 (概要版), 九州農政局.
- 20) 農林水産省有明海ノリ不作等対策関係調査検討委員会 (2002): 有明海の30年の推移のとりまとめ結果. p. 73-200, 有明海の現状について-13年度調査と過去の資料の解析をふまえて, 農林水産省.
- 21) 宇野木早苗 (2002 a): 諫早湾干拓事業は有明海の環境をいかに変えたか-潮汐・潮流を中心に-. p. 14-21, 干潟を守る日2002 in 諫早&東京シンポ資料集, いさはやひがたネット.
- 22) 宇野木早苗 (2002 b): 有明海における潮汐と流れの変化-諫早湾干拓事業の影響を中心に-. 海と空, 78, 19-30.
- 23) 水産庁増殖推進部 (2001 c): 環境影響評価の予測結果. イ. 潮流調和分解結果に基づく平均大潮時における流況再現結果. p. 317-318, 平成13年度農林水産省有明海ノリ不作等対策関係調査委員会資料集(1), 水産庁増殖推進部.
- 24) 水産庁増殖推進部 (2001 d): 潮流調査結果. p. 531-532, 平成13年度農林水産省有明海ノリ不作等対策関係調査委員会資料集(2), 水産庁増殖推進部.
- 25) 宇野木早苗 (2003): 有明海の潮汐と潮流はなぜ減少したか. 海の研究, 12, 85-96.
- 26) 灘岡和夫 (2003): 潮汐・流れを中心とした有明海の物理環境に関する論点整理. p. 20-23, 第10回ジョイント・シンポジウム有明海生態系異変原因解明の到達点要旨集.
- 27) 塚本秀史・柳哲雄 (2002): 有明海の潮汐・潮流. 海と空, 78, 31-38.
- 28) 磯部雅彦 (2001): 有明海における水環境の現状. 水環境学会誌, 24, 659-664.
- 29) 灘岡和夫・花田岳 (2002): 有明海における潮汐振幅減少要因の解明と諫早湾堤防締めきりの影響. 海岸工学論文集, 49,

堤 裕昭・木村千寿子・永田紗矢香・佃

政則・山口 一岩・高橋 徹・門谷 茂

401-405.

- 30) 柳哲雄・阿部良平 (2003): 有明海の塩分と河川流量から見た海水交換率の経年変動. 海の研究, 12, 269-275.

質 疑 応 答

問: 2002年11月に湾奥で見られる低塩分水は, 降雨がなかったとのことであるが, 筑後川上流でのダムからの緊急放流と一致しているか.

(財WAVE, 大島 巖)

答: 塩分成層は10月から形成され始めたので, 筑後川上流のダムの緊急放水とは一致しない.

問: 1. 2002年7月8日の赤潮を含み, 低塩分水が東寄りになっている現象は, 南西風に伴う東寄りのエクマン輸送の影響と思われる.

2. 2002年11月11日~14日のより強い成層と赤潮, および2001年10月のより弱い成層と赤潮について, その直前の河川流量と潮差, 風速をお示しく下さい.

(東大海洋研, 杉本 隆成)

答: シンポジウムでの発表時には, 調査時の風向・風速について, 有明海沿岸域の気象データを使っでの解析を行っていなかったもので, 明確な回答はできなかった. ご指摘に従って, 風向・風速について調べたところ, 調査日より2日前までの有明海奥部に面した大牟田市の平均風速は2.1 m で, 主に南, 南南西の風が吹いていた. この程度の風でこのような海洋構造が発生するとは考えにくい. 当方の研究グループによる調査は, 漁船をチャーターして行うため, 少なくとも数日間風波とも弱い時にしか行っていないし, 風速で4 m を超える状況では調査が困難となる.

2. の質問で, 2001年10月には, 有明海沿岸域で230 mm 程度の降雨があったが, 強い成層が見られた2002年11月の降雨量は110 mm 程度である. 河川流量もこの降雨量に対応したものと考えられる.

問: 2001年と2002年の秋の赤潮発生のメカニズムの違いは, 2001年は河川からかなり大量に供給された栄養塩が鉛直方向にある程度混合していたが, 2002年は混合せず, 従って河川水が少流量にもかかわらず, 栄養塩が高濃度に表層に滞留して, 赤潮発生につながったということでしょうか? 結局2002年は鉛直混合の弱さが大きな要因となっていたということでしょうか?

(九大工学研究院, 小松 利光)

答: 2002年度は, 有明海奥部海域で低塩分の表層水が約3~5 m 程度形成され, そこで赤潮が発生しました. 鉛直混合が晩秋期に十分に起きるかいなか, 赤潮の発生を決めているのではないのでしょうか.

問: 2002年7月8日の横断観測結果(低塩分分布中心が東側にあったこと)について, 翌7月9日の西水研の横断観測では低塩分水の分布の中心が諫早湾口~諫早湾内にやや入ったところにあった. また, 干満との関連から, これは有明海湾奥起源と考えられている. 7月8日には南風であったのに対し9日には北風になったことが磯部先生の観測で明らかになっているので, その影響や潮汐等のタイミングで, たまたまこのような結果になったのではないかと? 7月8日の状態が開門調査終了後に継続して定常的であったと考えるのは危険ではないかと?

(水研センター西海水研, 清本 容子)

答: 1ヶ月に1回程度の調査で見える赤潮の発生機構を調べているので, さらに細かな潮の動きによって発生する現象についてはわからない. しかしながら, ちょっとした風で, 今回示したような成層構造が崩れ, 日々海洋構造が変わるのであれば, 成層化した表層で発生している赤潮が長期に継続するとは考えられない. 2002年7月には, 有明海沿岸で約30~50日におよぶ赤潮が九州漁業調整事務所の赤潮記録にあることから, 7月8日のような成層構造は, その強度に変化はあってもある程度の期間継続していたと考えられる.

問: 赤潮発生の時間スケールは1週間程度なので, 1ヶ月に1回の調査結果の解釈は気をつけないといけないのではないかと?

(九大応力研, 柳 哲雄)

答: 1ヶ月1回程度の海洋観測でも, 2002年4月から2003年4月までの調査期間中に2回の赤潮の発生が観測された. 継続性の長い赤潮について, 発生メカニズムを調査している. 短期間で終了する赤潮は研究の対象としていない.

問: 有明海湾奥に低塩分水が1998年以降集まりやすくなっているのは, どのような理由によるのか.

(三重大学, 関根 義彦)

答: 諫早湾の潮受け堤防締めきりに伴う潮流の変化によって, 有明海奥部海域に筑後川から流入した河川水が滞留しやすくなっているためと考えている.