

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

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

海の研究



— 論文 —

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*

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^{††}

要 旨

九州西岸の有明海奥部海域において、近年夏季に発生する底層水の貧酸素化現象および頻発する赤潮の発生メカニズムを解明するため、2001年8月より2002年2月まで毎月1回、水質調査を行った。本調査期間中、8月上旬に底層で貧酸素水塊が、11月に珪藻赤潮がいずれも大雨の後に発生し、その発生過程を次のようにまとめた。

1. 夏季の貧酸素水塊

梅雨期の大雨→河川からの大量の淡水の流入→表層の塩分低下による成層構造の発達・夏季の気温上昇に伴う水温の成層構造の発達→底層水の貧酸素化

2. 秋季の珪藻赤潮

秋季の大雨→河川からの大量の淡水の流入・大量の栄養塩の供給→低塩分・高栄養塩濃度の表層水の形成→赤潮の発生

1998年以降、秋季の赤潮は大規模化する傾向が認められる。有明海奥部海域では、塩分や水温による成層構造が発達した時に、海水交換に大きな変化が生じ、海水が滞留しがちになることで赤潮が発生している可能性が指摘される。

キーワード：有明海，赤潮，貧酸素水塊

1. はじめに

九州西岸の長崎県，佐賀県，福岡県，熊本県にまたがる有明海は，海域面積が約1,700 km²に及ぶ日本の代表的な沿岸閉鎖性海域の1つである。有明海には九州で最大の流域面積を誇る筑後川をはじめとして多数

の河川が流入する一方，潮汐による水位の変化が大潮時には奥部で約6 mに達することから，海岸には砂質や泥質の広大な干潟が発達している。日本に現存する干潟の総面積(約51,000 ha)の約4割に相当する分が，有明海沿岸に分布している(環境庁，1994; 高橋，1994)。

有明海では，この干潟ならびに干潟に隣接した浅海部の高い生産性を利用した漁業が盛んに行われてきた。特に，アサリ(*Ruditapes philippinarum*)，アゲマキ(*Sinonovacula constricta*)，タイラギ(*Atrina pectinata*)などの採貝による年間の総漁獲高は，1970～80年代に10万トンを超え，ノリ養殖も全国の年間生産量の約4割に相当する約30億枚前後を生産するまでに

* 2002年9月20日受領；2003年3月8日受理
著作権：日本海洋学会，2003

[†] 熊本県立大学環境共生学部，〒862-8502 熊本市月出3-1-100
e-mail: hiro@pu-kumamoto.ac.jp

[‡] みなまた環境テクノセンター，〒867-0068 水俣市浜松町5-98

^{**} 北海道大学大学院水産科学研究科，〒041-8611 函館市港町3-1-1

^{††} 九州大学大学院工学研究院 〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1

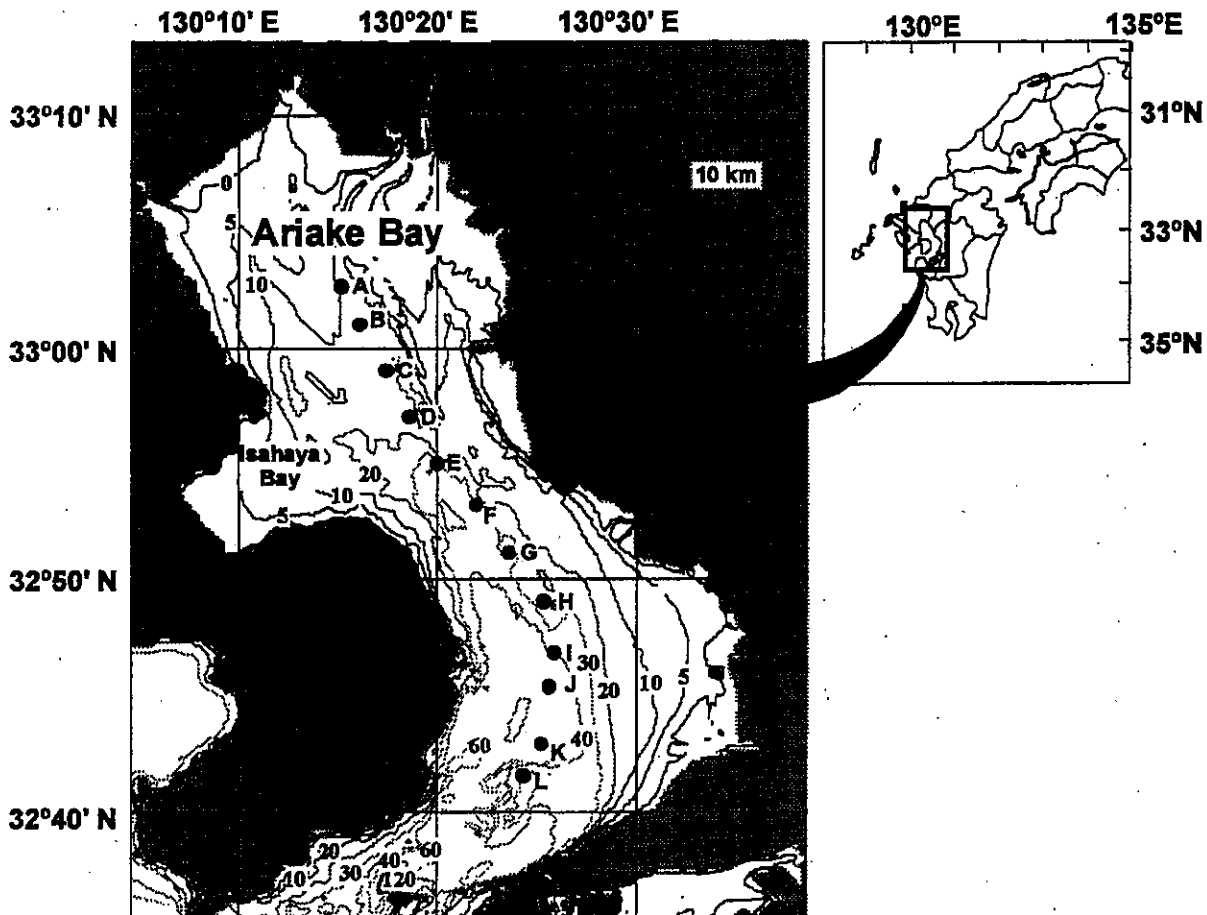


Fig. 1. Study areas and sampling stations.

発展した(水産庁増殖推進部, 2001a)。ところが, 1990年代以降, 魚介類に有害なラフィド藻類や渦鞭毛藻類による赤潮の発生回数が年々増加する傾向が見られ(水産庁九州漁業調整事務所, 1999), 有明海の奥部では夏季に貧酸素水塊の発生も報告されるようになった(東, 2000a)。それに呼応するかのように, 貝類の漁獲高が大幅に減少してきた(菊池, 2000)。また, 2000年の秋季から2001年の冬季にかけては, 低水温期であるにもかかわらず, これまでに例を見ない程大規模な珪藻類 *Rhizosolenia imbricata* による赤潮が有明海全域で発生し(水産庁九州漁業調整事務所, 2001), ノリ養殖漁業に大打撃を与えた(水産庁増殖推進部, 2001a)。

有明海は潮汐による水位の変動が最大で約6 mにも達することに象徴されるように, 潮汐によって生じる潮流が速いことから, 外海の日草灘との海水交換率が高い海域(大潮時に1潮時に出入りする海水量は約6.3 km³に達する)と考えられてきた(井上, 1980)。しかしなが

ら, 近年, 夏季に有明海奥部で貧酸素水塊が発生することや, 季節を問わず赤潮が頻発することは, この有明海の潮汐に伴う激しい海水流動からは予想しえない事態である。

筆者らは, 以上のような近年の有明海における一連の環境変化に注目し, 2001年5月より諫早湾を含めた有明海において, 精密な水質調査ならびに底質調査を行ってきた。この調査は, 有明海における現在の海水流動を精密に調査することを目的として組織された共同研究プロジェクト(有明プロジェクト; 代表, 小松利光)と連携した調査研究でもある。これらの調査研究の成果を通して, 有明海において夏季に貧酸素水塊が発生し, 赤潮が頻発するメカニズムの解明を目指している。

この論文においては, (1) 2001年8月から2002年2月まで, 熊本県熊本市沖から福岡県柳川市沖にかけて, 有明海の中央を縦断する方向に設定した12か所の調査

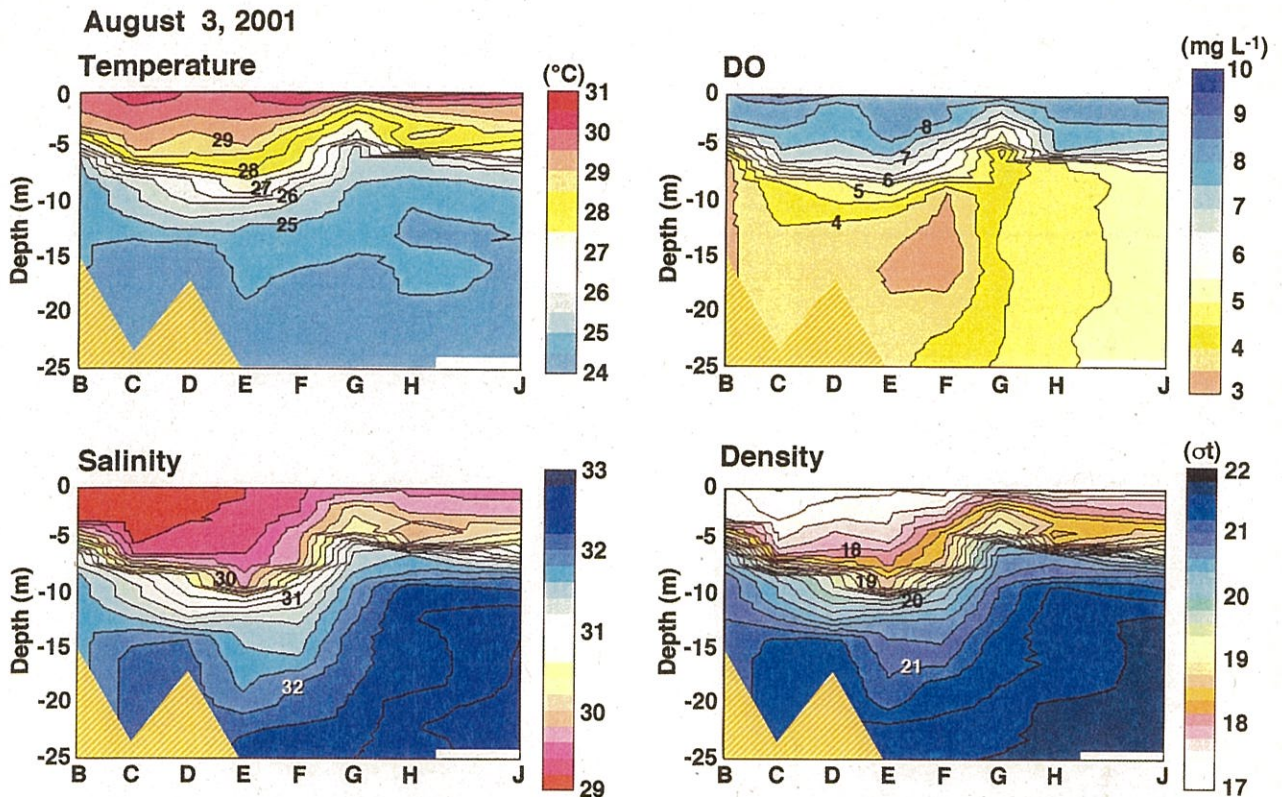


Fig. 2. Cross section of water (temperature, salinity, density, DO) in Ariake Bay in August 2001.

地点において行った水質 (水温, 塩分, DO ならびにクロロフィル a 濃度の鉛直プロファイル, 表層水の栄養塩濃度) に関する調査結果を報告する。(2) この水質調査結果から, 有明海奥部における夏季の貧酸素水塊と, 秋季から冬季にかけての赤潮の発生メカニズムについて考察する。

2. 調査内容と方法

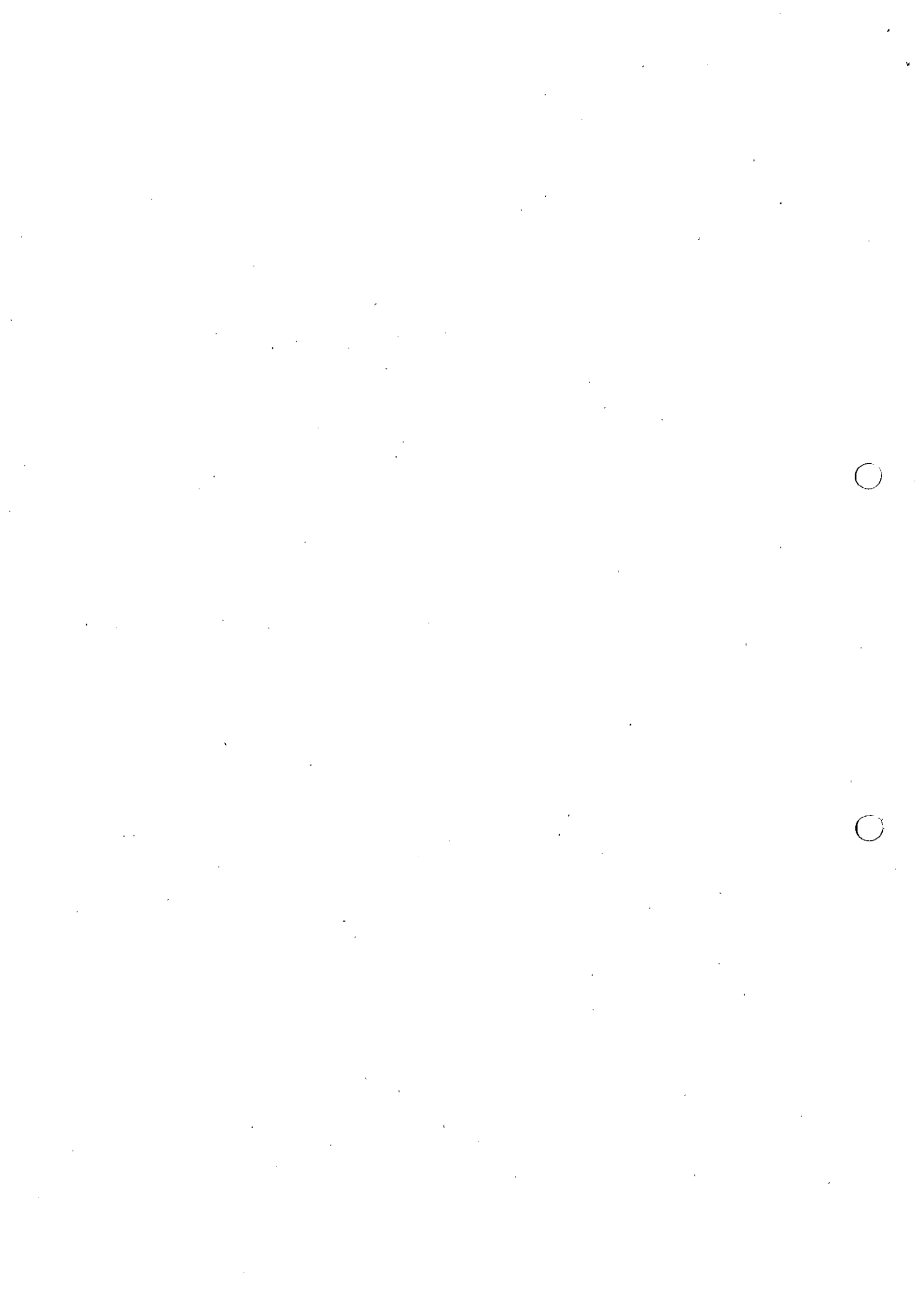
本研究では, 九州西岸の有明海において, 福岡県柳川市沖から熊本県熊本市沖の海域のほぼ中央を縦断する方向に, 約 3 km 間隔で 12 調査地点 (A~L) を設置した (Fig. 1)。

2001 年 8 月 3 日, 9 月 20 日, 10 月 16 日, 11 月 14 日, 12 月 28 日および 2002 年 2 月 2 日に, 合計 6 回, 漁船をチャーターして, 調査地点における水質調査 (Sta. A~L) を行った。ただし, 8 月 3 日は Sta. I, K および L, 9 月 20 日は Sta. L が欠測となった。観測は 2001 年 8 月 3 日は有明海奥部の Sta. B から Sta. J の順に,

他の調査では逆に Sta. L から Sta. A の順に行った。また, 有明海奥部の調査地点 Sta. A~D については, 2001 年 9 月 7 日, 11 月 29 日, 12 月 4 日に追加して水質調査を行った。

水質調査は, 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校正を行った。塩分の測定値は標準海水 (離合社) を測定することによって校正した。

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



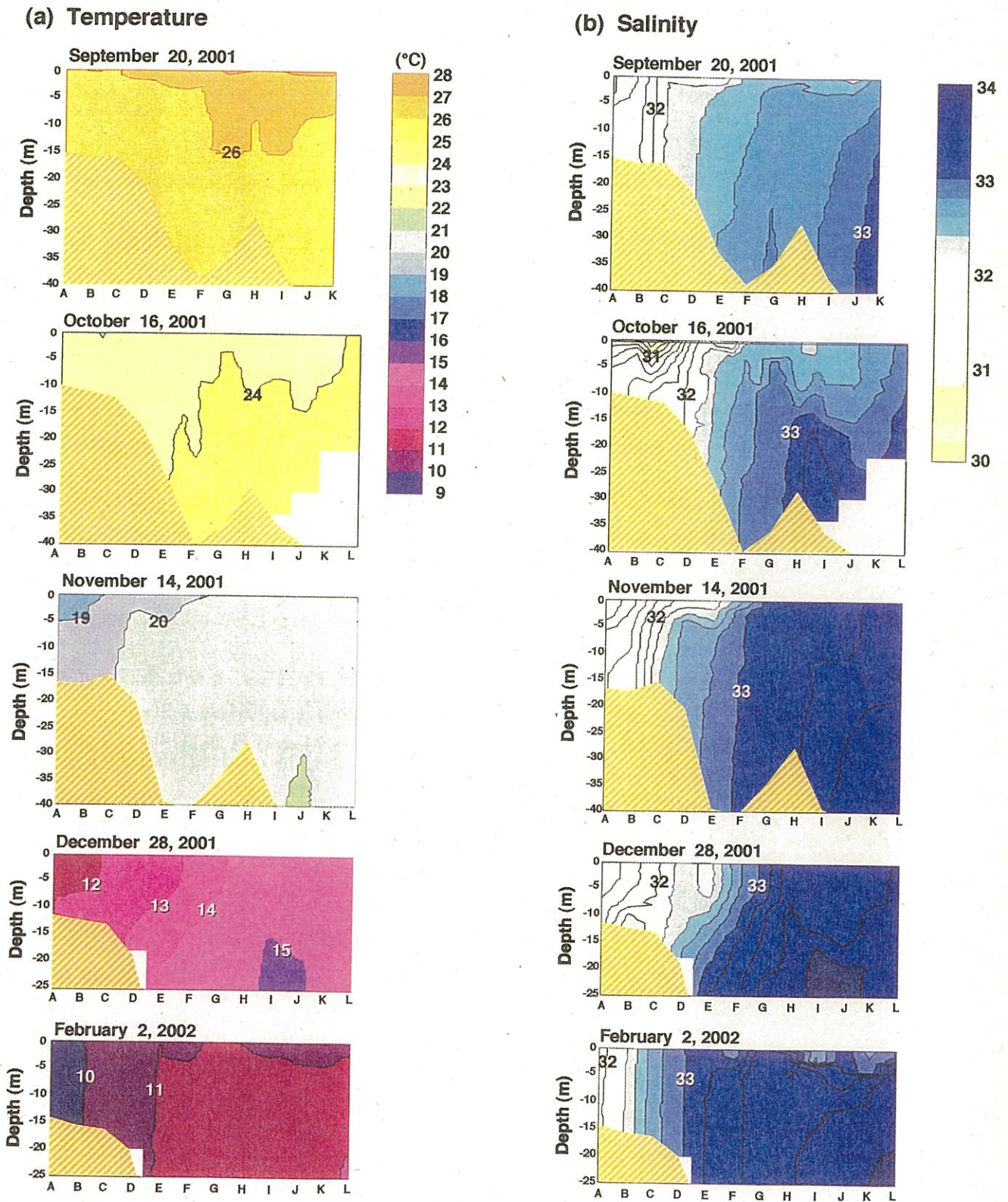
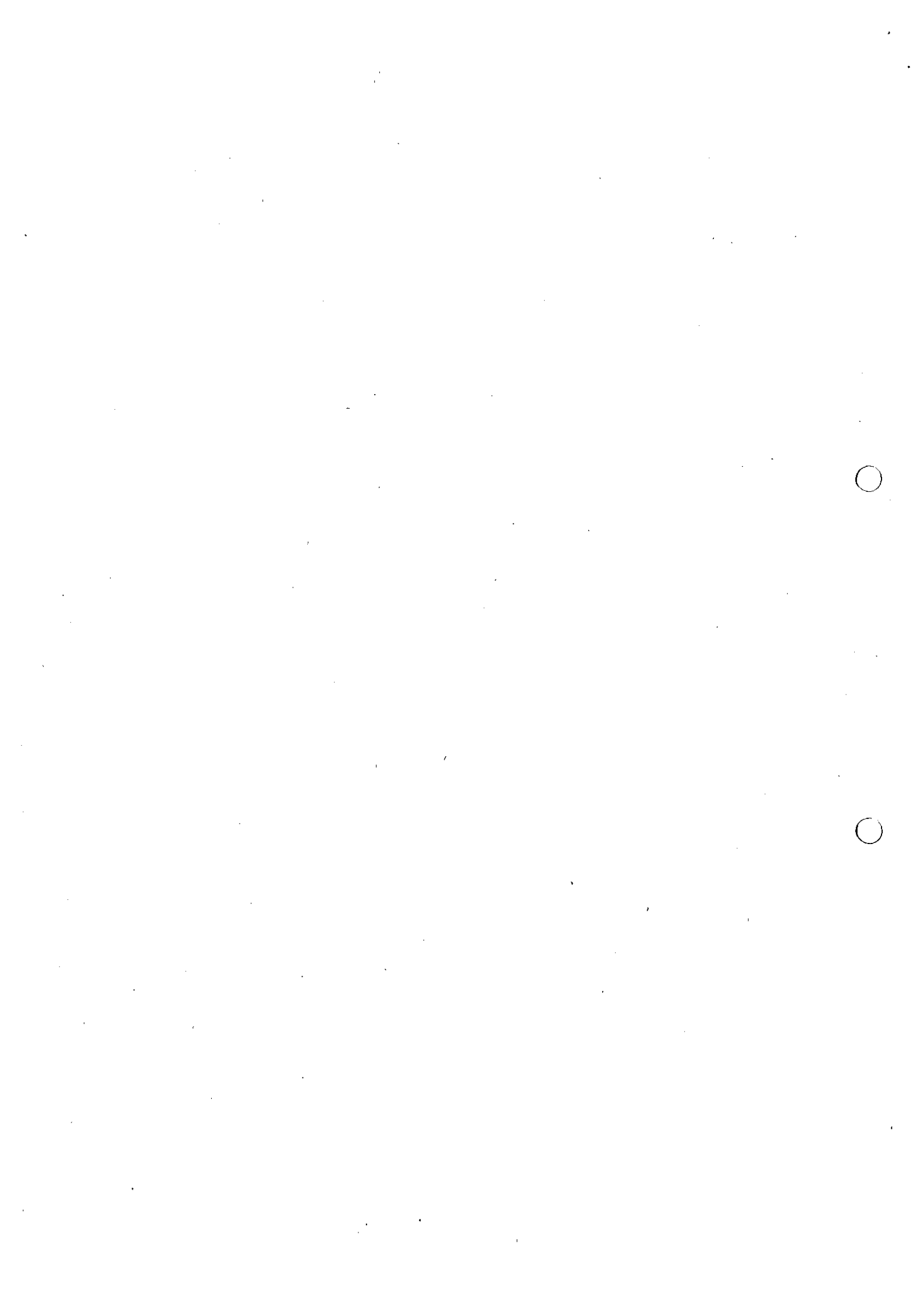


Fig. 3. Variations of cross section of water in Ariake Bay from September 2001 to February 2002. (a) temperature, (b) salinity.





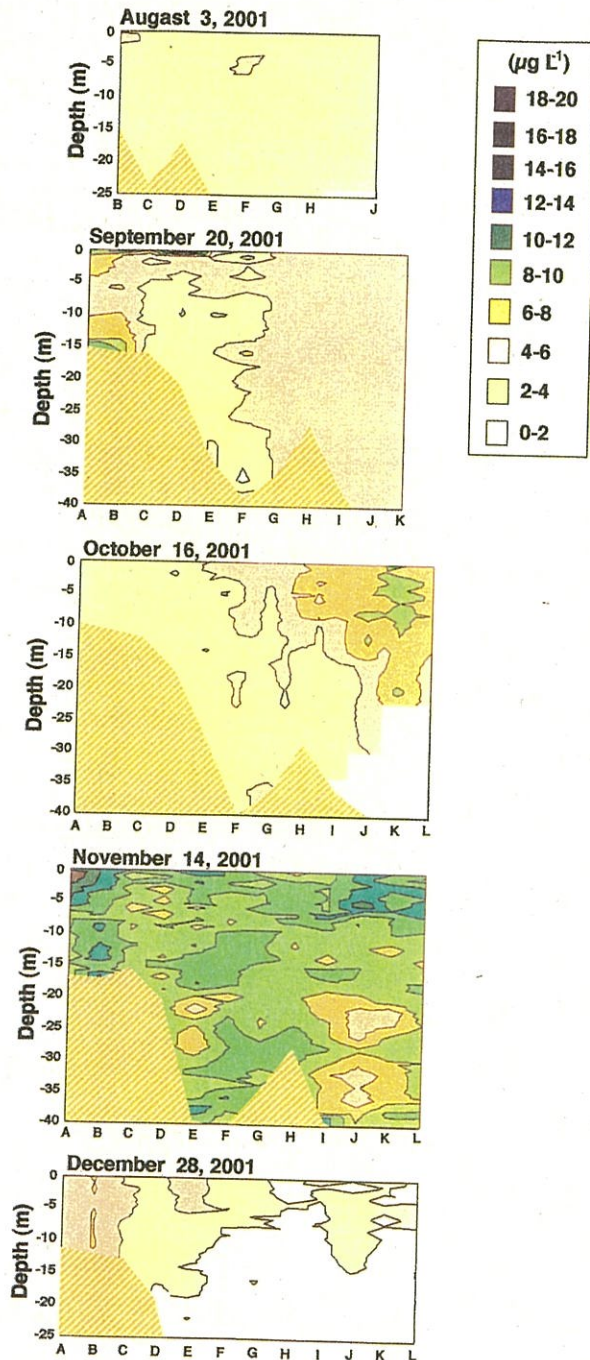


Fig. 5. Variations of cross section of chlorophyll a in the water in Ariake Bay from August to December, 2001.

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、蛍光光度計 (ターナーデザイン, 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

3.1. 夏季の成層構造の発達と溶存酸素濃度の低下

2001 年 8 月 3 日における、全調査地点の海水の水温、塩分、密度 (σ_t)、DO の鉛直プロファイルを図 2 に示す。全調査地点において、水温および塩分による強い成層構造が見られ、特に、奥部の Sta. B~E において、高水温および低塩分の層が厚くなる傾向が認められた。

海水表面の水温は全調査地点で 29.7~31.1°C に達し、Sta. B~E では水温 29.0°C 以上の層が水面下 3.1~5.0 m まで達していた。一方、底層の水温は全調査地点において 24.1~24.6°C であったので、表層との温度差は 5.0~6.7°C に達していた。

塩分は、Sta. B~F において 29.1~30.0 の値が海水表面から水面下 4.9~9.6 m までの層で記録された。一方、Sta. G ではこの低塩分の層の厚さが海水表面から水面下 1.5 m までの層に限られ、Sta. H および J においても水面下 3.0 m までの層にとどまっていた。外海からは有明海奥部へと 32.0 を越える高塩分の海水が底層を侵入していた。しかしながら、Sta. H~J では塩分 32.0 を上回る海水が水面下 8.0~8.3 m 以深の層に見られたのに対して、Sta. E および F においてはそれぞれ水面下約 21 m および 18 m 以深の底層に限られていた。Sta. E より奥部の海域では水深が約 15~25 m と浅くなるが、海水の塩分は海底付近でも 31.7~32.2 の範囲にあり、この海域では水塊のほぼ全体で低塩分化する傾向が認められた。その結果、奥部の Sta. B~E では海水表面の密度 (σ_t) が 17.2~17.4 の範囲に低下し



て海底付近の層との密度差が3.6~4.2に達した。一方、密度21.0の線がSta. G~Jでは水面下8.0~9.3 mにあったのに対して、奥部のSta. B~Eでは水面下12.0~17.5 mまでの層に降下し、底層付近でも密度の低下が認められた。そのため、Sta. EおよびHの間で水平方向にも密度差が水面下3.0~14.0 mの層で0.7~2.8に、水面下15.0~21.0 mの層でも0.4~0.6に達した。

DOは全調査地点の表層1.5~6.3 mにおいて、7 mg L⁻¹を越え、飽和または過飽和状態にあった。一方、水温および塩分による成層構造が発達したSta. B~Fにおいては、水面下5.3~11.0 mより海底に至る層で、DOが3.4~4.0 mg L⁻¹に低下した。



Fig. 6. Numerous particles suspended in the water like nuta. This photo was taken at Sta. G on August 3, 2001.

3.2. 3.2 秋季から冬季の海水の鉛直混合

2001年9月~2002年2月における全調査地点の海水の水温、塩分、密度(σ_t)、DOの鉛直プロファイルを図3(a)~図4(d)に示す。有明海では、2001年8月中旬より台風の影響による強風と高い波浪が約1か月間続いた。その間に水温は約3~4°C低下し、塩分も増加した。2001年9月20日には、塩分が表層でも31.4~32.7に増加し、水温および塩分による成層構造は解消し、これらの鉛直プロファイルは表面から海底までほぼ均質な分布を示した。DOも全調査地点において5 mg L⁻¹を越えるレベルに回復した。

2001年10月16日には、有明海奥部のSta. A~Cにおいて、再び表層の塩分が30.5~30.8まで低下し、成層構造が形成された。これは10月に有明海沿岸地域で降雨量約230 mmの大雨が発生したので、この大雨によって大量の河川水が奥部の海域へ流入し、一時的に形成されたものと考えられる。

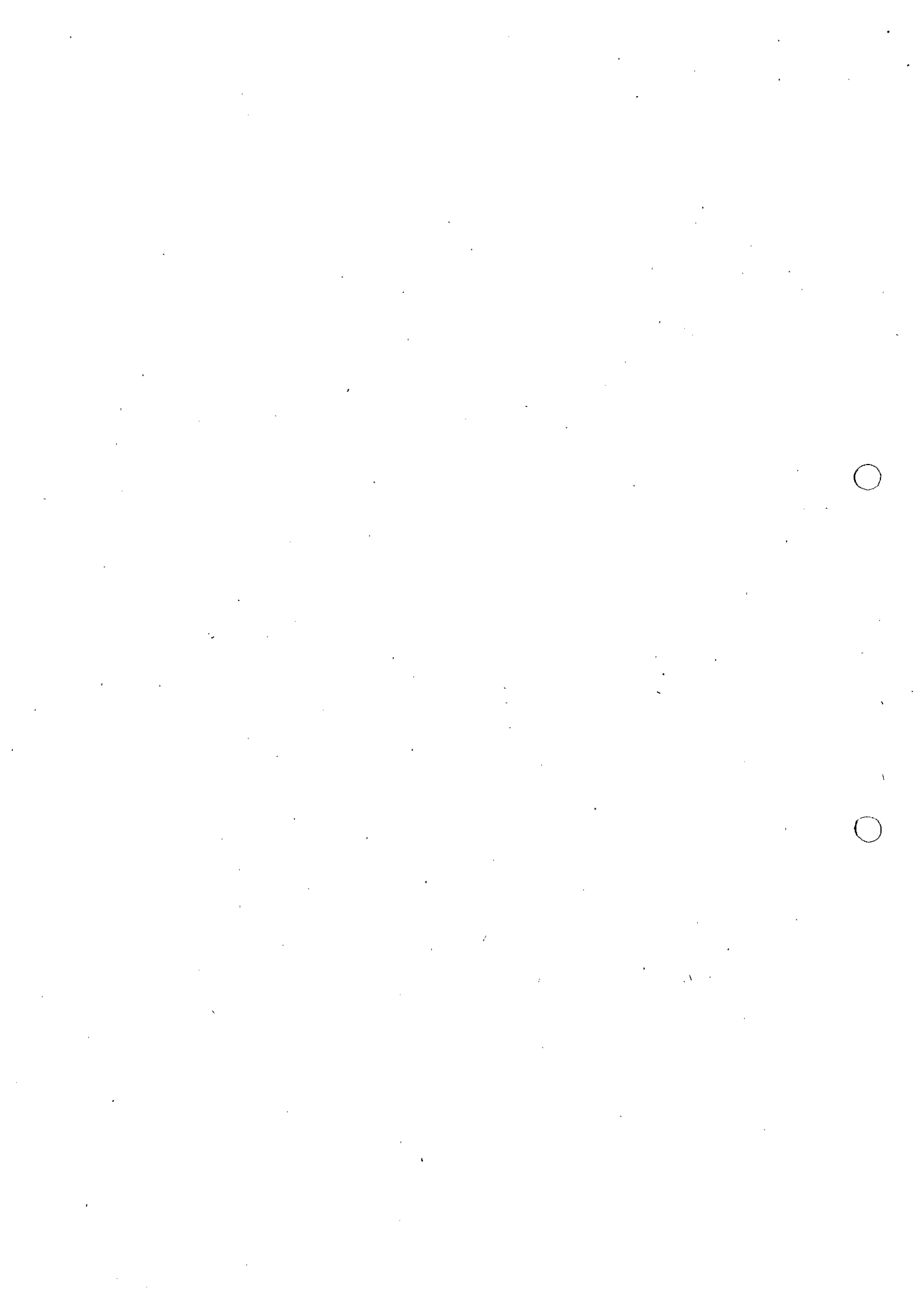
2001年11月14日以降は海水の鉛直混合によって、表面から海底まで、水温、塩分、DO、密度がほぼ均質な海水構造が形成された。この時期の海水構造の特徴として、次の2点が挙げられる。

- (1) 塩分は強混合型の河口(奥田, 1996)で見られるような鉛直方向には均質であるが、奥部から出口の方へ水平方向に漸次増加する勾配が見られた。有明海奥部のSta. Aにおける塩分は31.0~32.0の範囲を推移したが、Sta. KおよびLでは33.0~33.9に増加した。
- (2) 水温は、冬季には陸上の影響をより強く受ける奥部において低下する傾向が見られ、2002年2月のSta. AおよびBでは9.7~9.8°Cまで低下していた。一方、外海から侵入する海水は、対馬暖流の影響を受けているので、冬季の2001年12月、2002年2月の調査でも、Sta. KおよびLでは奥部よりも約1~3°C高い水温が観測された。

3.3. 夏季の植物プランクトンの死滅と秋季の赤潮の発生

2001年8月~2002年2月における、全調査地点の海水のクロロフィルa濃度の鉛直プロファイルを図5に示す。

本研究の調査を開始した2001年8月3日における海水のクロロフィルa濃度は、Sta. Bの表層約2 mおよびSta. Fの水面下約4~6 mの層で、4.1~5.5 $\mu\text{g L}^{-1}$ の値が記録された他は、全調査地点の全層において2.3~3.9 $\mu\text{g L}^{-1}$ の範囲にとどまり、植物プランクトンの乏しい海域となっていた。しかしながら、これらの海水のクロロフィルa濃度の値から想定されるような澄んだ海水が広がる海域ではなく、海水表層には無数の懸濁粒子が漂っていた(Fig. 6)。2001年7月には有明海で広範囲にわたって珪藻類(*Chaetoceros* spp., *Skeletonema costatum*)や渦鞭毛藻類(*Prorocentrum minimum*)に



よる赤潮が見られていた(水産庁九州漁業調整事務所, 2002)。この無数の懸濁粒子は、梅雨明けに伴って急速に水温が上昇して8月2日には表層の水温が全調査地点で29.7~31.1°Cに達したことによって、この赤潮を形成した植物プランクトンが死滅し、その死骸が無数のヌタ(参照三島ら, 1990; Montani and Mishima, 1991)状の懸濁粒子を形成して漂っていたものと考えられる。

2001年9~12月にかけて、有明海では2回の植物プランクトンの増殖が見られた。1回目は9月後半に発生した。発生域は有明海奥部のSta. A~Dの表層(水面下1 mまで)に限られていて、9月20日に海水表面のクロロフィルa濃度は7.7~16.7 $\mu\text{g L}^{-1}$ を記録した。この時、海面の水温は25.9~26.4°Cまで低下していた。2回目は11月に発生し、有明海の沿岸部全域に及ぶ大規模な珪藻類(*Chaetoceros* spp., *Skeletonema costatum*)の赤潮に発展した(水産庁九州漁業調整事務所, 2002)。11月14日には全調査地点の表層約5 mで10 $\mu\text{g L}^{-1}$ を超える値が観測され、奥部のSta. AおよびSta. Bではそれぞれ13.9~18.1 $\mu\text{g L}^{-1}$, 10.1~13.6 $\mu\text{g L}^{-1}$ に達した。また、Sta. Jを除き、海底直上に至るまでほぼ全層で7 $\mu\text{g L}^{-1}$ を超えた。この赤潮は12月下旬にはすでに終息し、全調査地点の海水のクロロフィルa濃度は、海水表面でも1.6~6.2 $\mu\text{g L}^{-1}$ に減少した。

有明海奥部のSta. A~Dについては、さらに追加調査の結果を加えて、海水表面(水面下0 m)の塩分とクロロフィルa濃度の時間的変化を比較し、それぞれFig. 7(a)およびFig. 7(b)に示す。塩分が31.0以下のレベルに低下したのが9月7日(Sta. A, B)と10月16日(Sta. A~C)に見られ、それぞれその次の調査時(9月20日, 11月14日)にクロロフィルa濃度の急激な増加が見られた。

Fig. 8には、全調査地点における水面下2 mおよび5 mの層における硝酸態窒素(ここでは硝酸態窒素+亜硝酸態窒素)およびリン酸態リン濃度の2001年9~12月の変化を示し、11月の珪藻類の赤潮の発生との因果関係を検討した。同一地点の水面下2 m層と5 m層の栄養塩濃度には大きな差が認められず、9月20日には有明海奥部のSta. A~Fで高くなる傾向が見られ、硝酸態窒素濃度は2.23~4.15 $\mu\text{mol L}^{-1}$, リン酸態リン濃度は0.40~0.95 $\mu\text{mol L}^{-1}$ の範囲にあった。10月16日

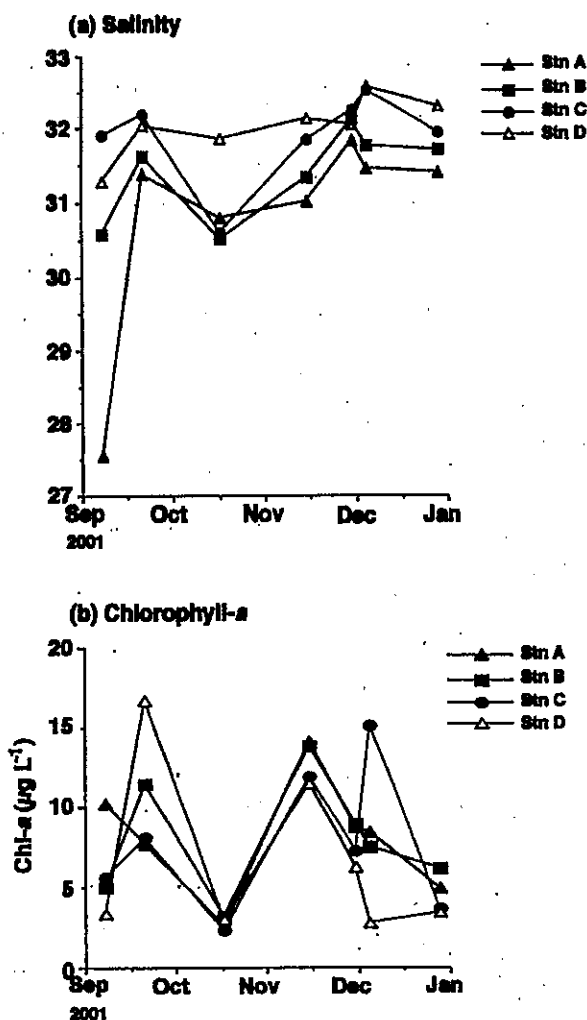


Fig. 7. Fluctuations of (a) salinity and (b) chlorophyll a concentration of the surface water (0 m in depth) at the innermost areas of Ariake Bay from September to December 2001.

になると、これらの地点の中でSta. Fを除く5地点においては、栄養塩の濃度、特に硝酸態窒素の濃度が急速に増加して6.35~15.10 $\mu\text{mol L}^{-1}$ に達した。リン酸態リンの濃度も0.59~1.36 $\mu\text{mol L}^{-1}$ に増加した。10月16日はSta. A~Cにおいて海水表面の塩分が30.5~30.8に低下し(Fig. 7(a)), 塩分による弱い成層構造の発生が鉛直プロファイルに見いだされた(Fig. 3(b))。約1か月後の11月14日には珪藻類の赤潮が調査地域の全域に発生していた(Fig. 5, Fig. 7(b))。

11月14日の赤潮の発生時には、栄養塩濃度がすでに

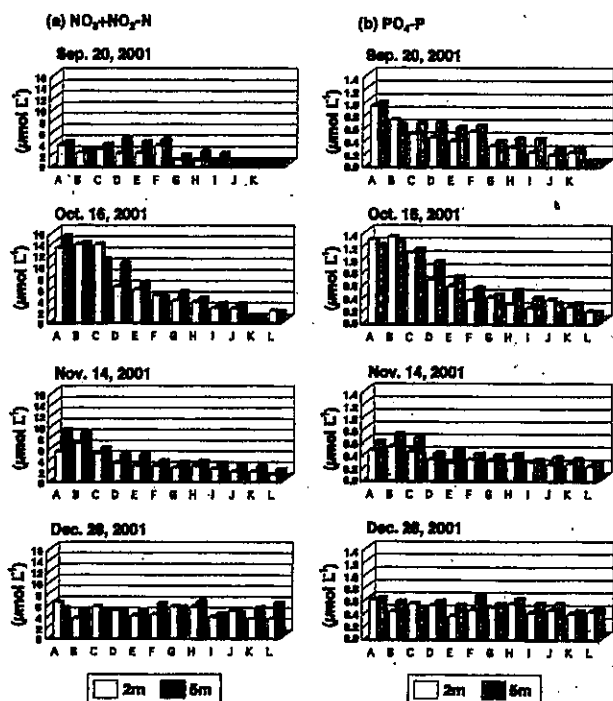


Fig. 8. Fluctuations of the nutrient concentrations of the water in Ariake Bay from September to December 2001. (a) nitrite and nitrate (b) dissolved inorganic phosphate

全調査地点において硝酸態窒素濃度で $1.18 \sim 8.54 \mu\text{mol L}^{-1}$ 、リン酸態リンの濃度で $0.22 \sim 0.60 \mu\text{mol L}^{-1}$ に減少していた。その後、全調査地点の表層において塩分が 31.0 を下回ることもなく (Fig. 3(b), Fig. 7(a)), 12月28日の栄養塩濃度も硝酸態窒素濃度で $3.46 \sim 6.51 \mu\text{mol L}^{-1}$ 、リン酸態リン濃度で $0.37 \sim 0.61 \mu\text{mol L}^{-1}$ の低い範囲にあり、赤潮も終息していた。

4. 考察

本研究の調査において、2つの特徴的な現象が観測された。1つは2001年8月3日の有明海奥部における水温と塩分の成層構造の発達と、水面下約5~11mより海底に至る層での貧酸素水塊の発生である。もう一つは、2001年11月14日に全調査地点において珪藻類の赤潮が発生したことである。

門谷(1998)は国内で得られた底生生物や魚類の低酸素濃度耐性に関する知見をもとに、 $2 \sim 3 \text{ mL L}^{-1}$ ($= 2.8 \sim 4.2 \text{ mg L}^{-1}$) 以下の溶存酸素濃度で呼吸障害が生じ

ることを指摘し、このような海水を貧酸素水と呼んでいる。2001年夏季の有明海におけるこのような貧酸素水塊の発生については、日本自然保護協会が諫早湾および有明海奥部の海域の41か所で2001年8月5日~7日に調査を行い、諫早湾内で溶存酸素濃度が $1 \sim 2 \text{ mg L}^{-1}$ まで低下し、諫早湾の湾口から有明海奥部西側から中央部にかけて $2 \sim 4 \text{ mg L}^{-1}$ に低下したことを報告している(日本自然保護協会, 2001)。その2日前の2001年8月3日に行った本研究の調査結果を対比すると、本研究の調査地点(Sta. B~E)はこの底層水の貧酸素化域の東側の部分に位置し、少なくとも長さ約20km、幅10~15km、深さ海底から上方へ10~15mに及ぶ大規模なものとなっていたと推測される。

このような有明海奥部における大規模な貧酸素水塊の発生は、東(2000a)が1997年6月に発生したことを報じたのが最初であり、1999年6月(東, 2000b)にも報告されている。また、諫早湾湾口部から有明海中央部にかけての海域では、1997年以降、底生生物の生物量が大幅に減少したことも報告されている(東, 2000a)。有明海奥部における大規模な貧酸素水塊の発生は、最近5年間に顕著化した現象であると考えられる。

2001年夏季の有明海奥部の貧酸素水塊は、梅雨期の降雨によって大量の淡水が有明海奥部に流入して塩分成層が発達し(Fig. 3(b))、梅雨明け(2001年7月19日)後の真夏の強い日射しによって表層水の水温が上昇し、水温成層(Fig. 3(a))が加わって表層と底層間の密度差が拡大し(Fig. 4(c))、海水の鉛直混合が大きく制限された時に発生したものであった。このような気象条件に由来する水塊構造の形成は毎年発生することであるので、近年、大規模な貧酸素水塊が発生するようになったことには、別の要因が加わっていることが指摘される。

その要因については、有明海奥部海域の海水の停滞や海底における溶存酸素消費量の増加などが可能性として考えられるが、明確な調査結果を得るには至っていない。しかしながら、宇野木(2002a, 2002b)は、諫早湾の堤防締め切りによって、有明海における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、潮汐が減少している可能性を示し、実

測値で大潮時の潮汐の振幅が2000年には約8.5 cm減少したことを指摘している。塚本・柳(2002)も同様に潮受け堤防の締め切りによって、有明海のM₂潮流振幅が湾口部(早崎海峡)で約5%減少し、貧酸素水塊の発生する有明海奥部で成層が発達しやすくなったことを指摘している。梅雨明け直後に、有明海奥部では水温と塩分の両方による水塊の成層構造が最も発達する時期を迎えるが、この時期の成層構造が上述の原因によって近年強化され、表層から底層への鉛直方向の溶存酸素の供給が以前よりもさらに制限されるようになってきている可能性が強く示唆される。一方、柳・阿部(2002)は、この潮汐振幅の減少に伴う奥部海域の成層構造の発達によって河口循環流が強化され、有明海全域における河川水の平均滞留時間は減少傾向を示し、近年、有明海における海水交換がむしろ促進されていることを示唆している。しかしながら、有明海の奥部で貧酸素水塊が発生した2001年8月の水質の鉛直プロファイルは、梅雨期における大量の河川水の流入によって塩分による成層構造の発達とともに、貧酸素水塊が発生する奥部の水深10~20 mの海域では水塊のほぼ全体で塩分が低下していたことを示している(Fig. 2)。そのため、有明海の奥部では成層構造の発達した底層でも水平方向に密度差が生じていた。梅雨期およびその直後の有明海の奥部では、成層構造が発達しても河口循環流の強化によって海水交換が促進されるような状況は発生せず、むしろ密度の高い外海水が奥部海域の底層へ侵入することも制限され、貧酸素水塊の発生が助長されていた可能性が考えられる。

秋季の赤潮の発生に関しても、貧酸素水塊の発生と同様に、大雨による大量の河川水の有明海奥部への流入に端を発していることが指摘される。有明海奥部海域に面する福岡県大牟田市、柳川市、佐賀県白石町、長崎県諫早市における気象庁の気象観測結果では、2001年10月に162~269 mmの降雨があり、これらの地域における年平均降水量の約1.9~2.5倍に達した(Fig. 9)。この10月の大雨によって、有明海奥部へ河川水が大量に流入して一時的に塩分が低下し(Fig. 7(a))、同時に河川水の流入によって栄養塩濃度が上昇した(Fig. 8)。その約1か月後の11月に、有明海全域で珪藻類の赤潮が発生した(Fig. 5, Fig. 7(b))。

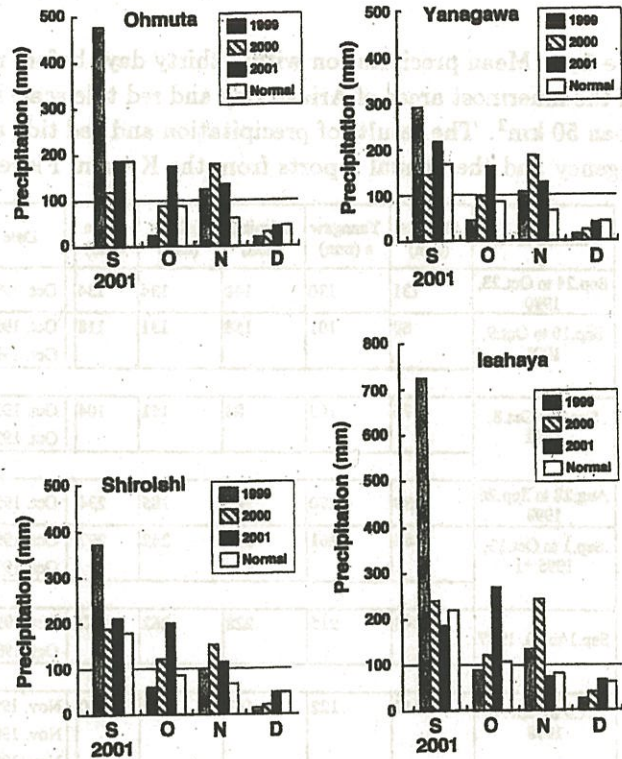


Fig. 9. Monthly precipitation at four different places on the coast of the innermost areas of Ariake Bay in autumn from 1999 to 2001.

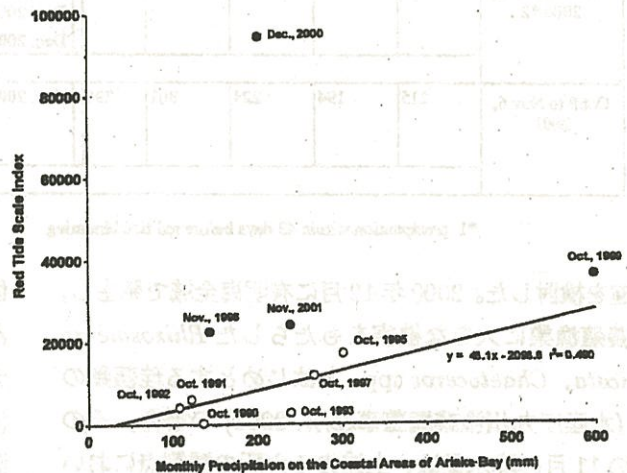


Fig. 10. The relationship between mean precipitation within thirty days before red tide blooming at four different places in the coast of the innermost areas of Ariake Bay and red tide scale index.

そこで、過去に有明海で発生した大規模な赤潮についても、同様な観点から赤潮が発生した月の前月の雨量と

Table 1. Mean precipitation within thirty days before red tide blooming at four different places on the coast of the innermost areas of Ariake Bay and red tide scale index of the red tide with the maximum areas of more than 50 km². The results of precipitation and red tide are based on the weather report of the Meteorological Agency and the annual reports from the Kyushu Fishery Coordinate Office (1991 to 2002).

Duration of rain	Ohmura (mm)	Yanagawa (mm)	Shiroishi (mm)	Isahaya (mm)	Mean (mm)	Date	Red tide No.	Duration	Max. area (km ²)	Red tide scale index	Red tide by diatom	Red tide by dinoflagellate	
Sep.24 to Oct.23, 1990	131	130	140	134	134	Oct. 1990	SA-11	8	10	80		○	
Sep.10 to Oct.9, 1991	80	101	158	131	118	Oct. 1991	FO-18	12	*1		○		
						Oct. 1991	SA-11	27	200	5,400	○		
										Total	5,400		
Sep.9 to Oct.8, 1992	76	103	84	151	104	Oct. 1992	FO-12	4	59	236	○		
						Oct. 1992	SA-12	16	200	3,200	○		
										Total	3,436		
Aug.28 to Sep.26, 1993	239	270	242	185	234	Oct. 1993	SA-09	40	50	2,000	○	○	
Sep.1 to Oct.13, 1995 *1	384	261	300	242	297	Oct. 1995	KM-18	2	50	100	○		
						Oct. 1995	SA-07	81	200	16,200		○	
										Total	16,300		
Sep.1 to 30, 1997	343	215	228	262	262	Oct. 1997	KM-12	43	200	8,600	○	○	
						Oct. 1997	SA-06	23	108	2,484	○	○	
										Total	11,084		
Oct.9 to Nov. 8, 1998	142	122	143	152	140	Nov. 1998	KM-24	22	800	17,600	○		
						Nov. 1998	FO-09	23	120	2,760	○		
						Nov. 1998	SA-09	28	50	1,400	○		
										Total	21,760		
Aug.24 to Sep.22, 1999	615	411	417	937	595	Oct. 1999	KM-14	6	400	2,400	○		
						Oct. 1999	KM-15	4	300	1,200	○		
						Oct. 1999	KM-16	63	500	31,500	○		
										Total	35,100		
Nov.1 to Dec.6, 2000 *2	189	194	155	255	198	Dec. 2000	KM-24	126	400	50,400	○		
						Dec. 2000	FO-16	110	171	18,810	○		
						Dec. 2000	SA-17	122	200	24,400	○		
										Total	93,610		
Oct.8 to Nov.6, 2001	215	194	224	301	234	Nov. 2000	KM-25	39	400	15,600	○		
							FO-17	19	171	3,249	○		
							SA-10	22	200	4,400	○		
										Total	23,249		

*1 precipitation within 43 days before red tide blooming

*2 precipitation within 36 days before red tide blooming

の関連を検討した。2000年12月に有明海全域で発生し、ノリ養殖漁業に大きな被害をもたらした *Rhizosolenia imbricata*, *Chaetoceros* spp. をはじめとする珪藻類の赤潮 (水産庁九州漁業調整事務所, 2001) の場合、その前月の11月の降水量は、上述の4カ所の観測点において151~242 mm, 平年値の2.3~3.0倍に達した。1999年には、9月の降水量が289~725 mmに達しており、9月後半~11月にかけて、目立った漁業被害は起きていないが、*Skeletonema costatum*, *Chaetoceros* spp. などの珪藻類による赤潮が有明海全域で発生した (水産庁九州漁業調整事務所, 2000)。

1990~2001年の9~12月の期間に、熊本県、福岡県、

佐賀県の有明海で報告された最大面積50 km²以上の赤潮について (水産庁九州漁業調整事務所, 1991~2002), 赤潮の発生規模を表現する指数として「赤潮発生指数」(赤潮の最大面積×継続日数)を求め、赤潮の発生が確認された日からその30日前までの有明海奥部沿岸域の降水量との関係を調べた (Table 1, Fig. 10)。なお、有明海奥部沿岸域の降水量は、福岡県大牟田市、柳川市、佐賀県白石町、長崎県諫早市における気象庁の雨量観測結果の平均値で代表した。ただし、1995年10月および2000年12月に発生した赤潮については、それぞれ発生の43日前および36日前より大雨が観測されたことから、その影響は無視できないと考え赤潮の発生

から43日前および36日前までの降水量を求めた。また、「赤潮発生指数」の計算にあたり、熊本県、福岡県、佐賀県でそれぞれ同時期に報告された赤潮については、計算値を合算して同一の赤潮の発生とみなした。

1997年以前のデータでは、「赤潮発生指数」と「赤潮発生前約1か月間の降水量」との間に強い正の相関関係が見られる($r^2=0.490$)。これらの赤潮の中で、1993年10月、1995年10月、1997年10月に発生した合計3回の赤潮の場合、「赤潮発生前約1か月間の降水量」は234~297 mmで、「赤潮発生指数」は1995年10月の16,300が最大であった。また、1994年および1996年には、9月~11月の有明海奥部沿岸域の月間降水量がいずれの月も100 mmに達しておらず、最大面積50 km²以上に達する赤潮発生の報告例は1件もなかったため、「赤潮発生指数」は計算できなかった。一方、1998年以降のデータでは、1998年11月、2000年12月、2001年11月に発生した赤潮の場合、「赤潮発生前の降水量」が140~234 mmで、1993年~1997年の3回の赤潮の場合と比較してほぼ同じか、それよりも少ない降水量であるにもかかわらず、「赤潮発生指数」は21,760~93,610に達した。また、1999年10月の赤潮の場合は「赤潮発生前約1か月間の降水量」が595 mmに達した。それでも1997年以前のデータから求めた「赤潮発生指数」と「赤潮発生前約1か月間の降水量」の相関関係における「赤潮発生指数」の値(26,521)より、1999年10月の「赤潮発生指数」の値(35,100)の方が上回っている。

このように、1998年以降、秋季に発生した赤潮は、それ以前の「赤潮発生前約1か月間の降水量」から予想される規模よりもはるかに大規模なものとなっていることがわかる。この赤潮の大規模化の要因に関して、第1に考えられる可能性が海域の富栄養化の進行である。しかしながら、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において、河川の年間総流量および河川水の総窒素・総リン濃度から算出される河川から有明海奥部海域への窒素およびリンの総負荷量は、1980年代以降大きな変化が見られない。総リンの負荷量については減少傾向すら見ることができ(水産庁増殖推進部, 2001d)。したがって、近年の赤潮の規模が拡大する傾向にあることを、海域の富栄養化の進行で説明することはできない。

筆者らは、大規模な赤潮が近年発生する原因として、本研究における2001年10月の水質の調査結果に注目した。Fig. 8に示した有明海の海水の栄養塩濃度の測定結果から判断すると、植物プランクトンの増殖にはリン酸態リンが過剰で、この海域における植物プランクトンの増殖は溶存態無機窒素の濃度で制御されていたと見なされる。ところが、2001年10月に大雨が発生した直後は、有明海奥部の海域では大量の河川水の流入によって硝酸態窒素の濃度が急速に増加し、溶存態無機窒素とリン酸態リンとの分子比がレッドフィールド比(N:P=16:1)(門谷, 1991参照)に近い値になったと考えられる。したがって、有明海の奥部海域では、大雨の発生した直後に、大量の河川水の流入によって植物プランクトンの増殖に不足していた溶存態無機窒素が供給され、赤潮の発生しやすい条件が一時的に作り出されることが指摘される。

さらに、有明海の奥部海域における貧酸素水塊の発生に関連して言及したように、諫早湾の潮受け堤防が締め切りに伴って、有明海における潮汐振動の振幅が減少している。宇野木(2002a, 2002b)は、実測値で大潮時の潮汐の振幅が2000年には約8.5 cm減少したことを指摘している。潮汐振動の振幅の減少は、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、大潮下げ潮時の表層2 mにおける最大流速は、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ている(水産庁増殖推進部, 2001b, 2001c)。

有明海における海水流動に関しては、反時計回りの循環流の存在が推測されている(井上, 1980)。有明海に流入した外海水は、熊本県の沿岸部を奥部へと北上する。一方、奥部の海水は、長崎県の島原半島側を南下して、有明海の出口(早崎海峡)の方へ流れる。諫早湾の湾口およびその沖合の海域は、下げ潮時に有明海奥部から表層水が流出する経路にあっている。したがって、諫早湾口およびその沖合における下げ潮時の表層水の流速の減少は、大雨によって有明海奥部海域に赤潮が発生しやすい低塩分・高栄養塩濃度の表層水が形成された時、その表層水が奥部海域から有明海の出口方向へ流出したり、外海から侵入した高塩分・低栄養塩濃度の海水と混合するのを遅らせることにつなが

る。このような表層水の奥部海域における滞留が、結果的に、植物プランクトンに増殖する機会をもたらしている可能性が考えられる。

今後の研究では、大雨の直後に有明海奥部海域で発生する低塩分・高栄養塩濃度の表層水について、下げ潮時における挙動と、諫早湾干拓事業がその挙動に及ぼす影響に注目し、海水流動、水質、プランクトンの増殖などについて、さらに詳細な調査を行う必要があることを強く示唆している。

謝辞

本研究は日産科学振興財団からの研究助成を得て行われた。また、調査にあたっては、熊本県荒尾市の荒尾漁業協同組合ならびに熊本市の川口漁業協同組合の協力を得た。英文アブストラクトおよびキャプションは Mr. Jay Melton および Mr. Richard Lavin に表現を修正していただいた。末筆ながら感謝の意を表したい。

References

- 東 幹夫 (2000a) : 諫早湾干拓事業の影響, p.320-337. 有明海の生きものたち, 佐藤 正典編, 海游舎, 東京.
- 東 幹夫 (2000b) : 諫早湾潮止め後の水域環境の変化. 日本の科学者, 35, 37-41.
- 井上 尚文 (1980) : 有明海の物理環境. 月刊海洋, 12, 116-126.
- 環境庁 (1994) : 第4回自然環境保全基礎調査. 海域生物環境調査報告書(干潟, 藻場, サンゴ礁調査) 第1巻 干潟. 環境庁自然保護局, 291 pp.
- 菊池 泰二 (2000) : 干潟浅海系の保全の意義, p. 306-317. 有明海の生きものたち, 佐藤 正典編, 海游舎, 東京.
- 三島 康史, 門谷 茂, 岡市 友利 (1990) : 巨視的浮遊性大型粒子 (NUTA) : 採取装置の開発と懸濁粒子・沈降粒子との関係. *La mer*, 28, 123-130.
- Montani, S. and S. Mishima (1991) : Some characteristic features of large amorphous particles (NUTA) in the Seto Inland Sea, Japan. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 47, 276-285.
- 門谷 茂 (1991) : 海の生物を支える化学物質, p. 209-215. 海と地球環境, 日本海洋学会 (編), 東京大学出版会, 東京.
- 門谷 茂 (1998) : 第2部化学的・生物的自然. 二 瀬戸内海の水質, p. 100-129. 瀬戸内海の自然と環境, 柳 哲雄, 合田 健編, 社団法人瀬戸内海環境保全協会, 神戸.
- 日本自然保護協会 (2001) : 有明海奥部における底層の溶存酸素濃度 (速報). 日本自然保護協会ホームページ (諫早湾の環境保全, 調査報告).
- 奥田 節夫 (1996) : 第2章 感潮河川における流れと塩分分布, p. 47-83. 河川感潮域, 西條 八束, 奥田 節夫編, 名古屋大学出版会, 名古屋.
- 佐藤 正典, 東 幹夫, 佐藤 慎一, 加藤 夏絵, 市川 俊弘 (2001) : 諫早湾・有明海で何がおこっているのか? *科学*, 71, 882-894.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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, p. 12-13.
- 水産庁九州漁業調整事務所 (2002) : 平成13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, p. 6-13.
- 水産庁増殖推進部 (2001a) : 全国のノリ共販状況 (H12.11.1~H13.2.26), 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.
- 水産庁増殖推進部 (2001b) : 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.

水産庁増殖推進部 (2001c) : 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.

水産庁増殖推進部 (2001d) : 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.

高橋 正征 (1994) : 海洋と生物と人類. 7 - 内湾・内海とその現状-. 海洋と生物, 16, 2-5.

塚本 秀史, 柳 哲雄 (2002) : 有明海の潮汐・潮流. 海と空, 78, 31-38.

宇野木 早苗 (2002a) : 諫早湾干拓事業は有明海の環境をいかに変えたか—潮汐・潮流を中心にして—. p. 14-21. 平干潟を守る日 2002. 諫早&東京シンポ資料集, いさはやひがたネット.

宇野木 早苗 (2002b) 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して. 海と空, 78, 19-30.

柳 哲雄, 阿部 良平 (2002) : 有明海の海水交換の経年変動. 平成14年度応用力学研究所共同研究集会 14AO-S1 講演要旨集, p. 4.

Studies of the Cross Section of Water in the Innermost Areas of Ariake Bay with the Recent Occurrence of Hypoxic Water and Red Tide.

Hiroaki Tsutsumi*, Emiko Okamura*, Mitsuyo Ogawa*, Tohru Takahashi†, Hitomi Yamaguchi‡, Shigeru Montani‡, Naoko Kohashi§, Takahiro Adachi§, and Toshimitsu Komatsu§

Abstract

In the innermost areas of Ariake Bay, on the west coast of Kyushu, hypoxia of the bottom has occurred during the summer since 1997 and red tides have occurred more frequently since the 1990s. We monitored water conditions in Ariake Bay monthly from August 2001 to February 2002 (i.e. vertical profiles of salinity, temperature, DO and chlorophyll a, and nutrient concentrations in the surface layers). The results of our studies indicate that both the hypoxic water in the summer and the large scale of red tides of diatoms in the autumn, occurred after heavy rain fall.

The processes appear to be as follows:

1. Occurrence of hypoxia of the bottom water during the summer: Heavy rain during the rainy season results in an inflow of a large amount of fresh water from rivers causing stratification of the water column to develop. Lower salinity and higher temperature at the surface from the heavy rain and strong solar radiation during the summer then causes hypoxia due to a lack of mixing.

2. Large scale diatom blooms in the autumn:

Heavy autumn rains cause the inflow of a large amounts of fresh water from the rivers which contain a high concentration of nutrients. The stabilization of the surface layer of water with low salinity and high nutrient concentration results in the diatom blooms.

We further suspect that the water in the innermost areas of Ariake Bay has become more stagnant than before due to the construction of a dike in Isahaya Bay, which is located in the inner bay of Ariake Bay. The restriction of water exchange in the innermost areas of Ariake Bay may have caused these two phenomena.

Key words: Ariake Bay, red tide, hypoxic water

(Corresponding author's e-mail address: hiro@pu-kumamoto.ac.jp)
(Received September 20, 2002; accepted March 8, 2003)
(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2003)

* Faculty of Environmental and Symbiotic Sciences, Prefectural University of Kumamoto, 3-1-100 Tsukide, Kumamoto 863-8502, Japan

† Minamata Environmental Techno-Center, 5-98 Hamamatsu-cho, Minamata 867-0068, Japan

‡ Graduate School of Fisheries Sciences, Hokkaido University, 3-1-1 Minatomachi, Hakodate 041-8611, Japan

§ Faculty of Engineering, Kyushu University, 6-10-1 Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka 812-8581, Japan