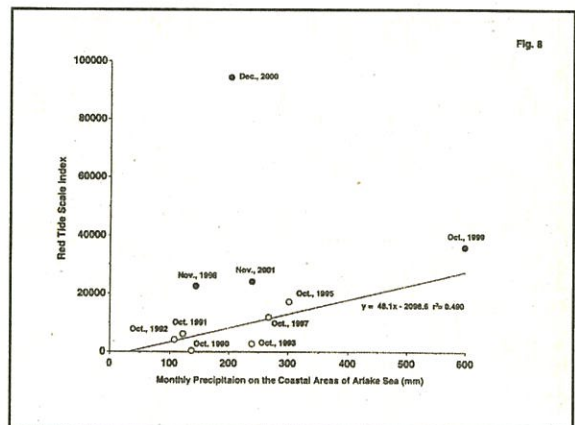
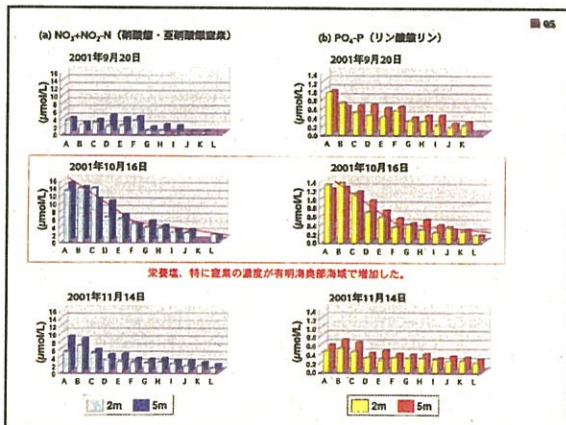
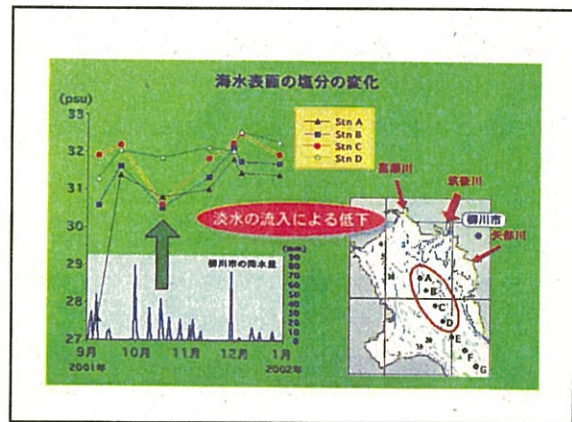
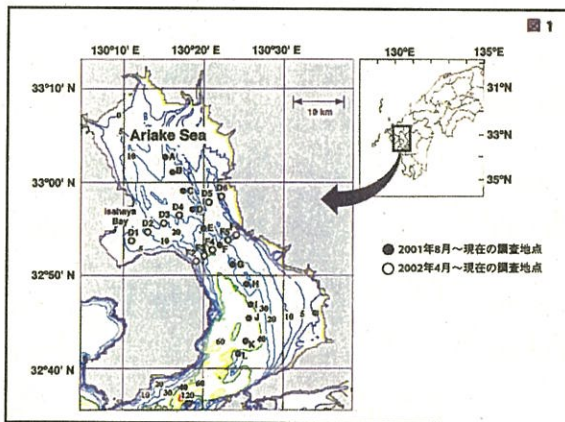


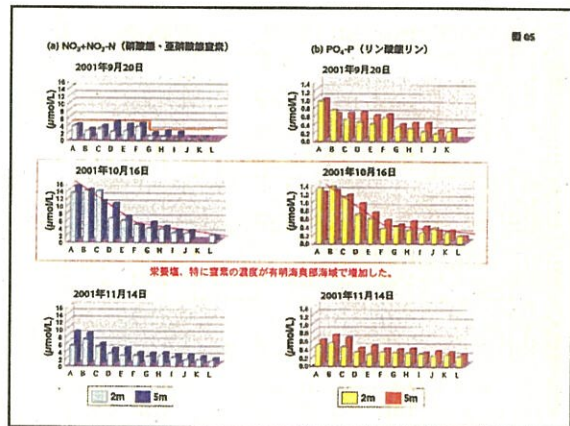
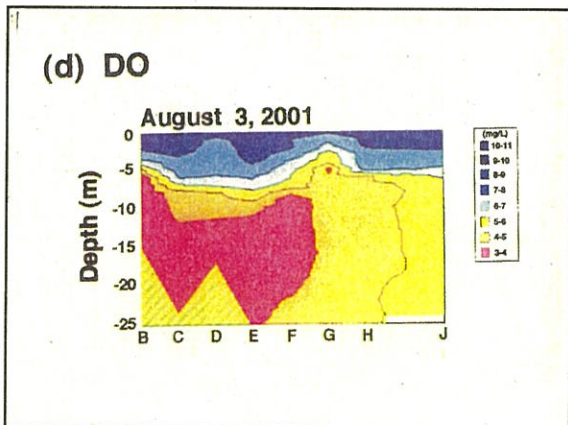
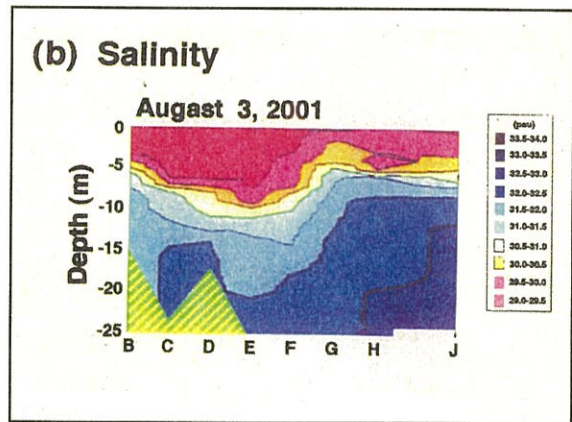
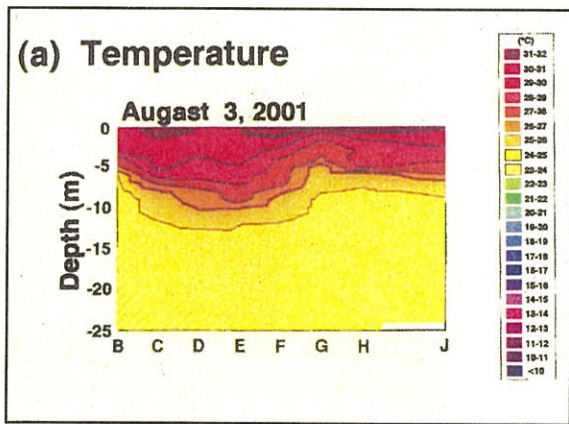
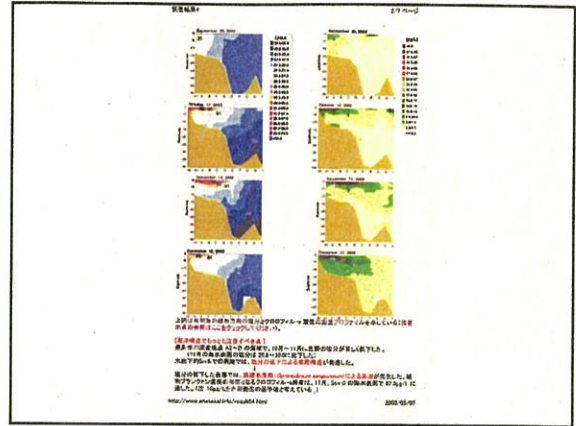
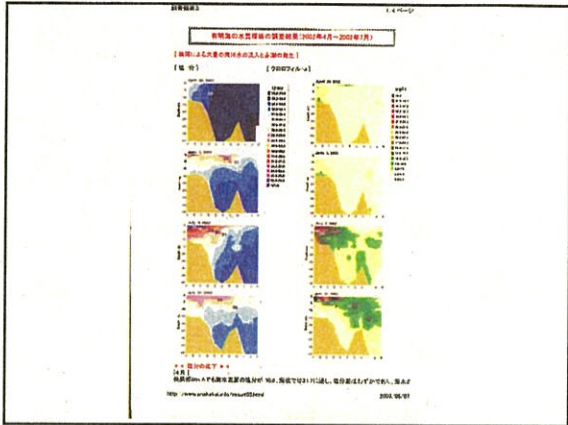
有明海において諫早湾が果たす
水理学的役割

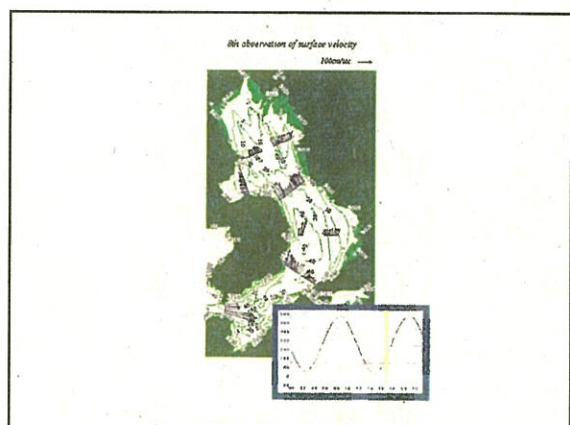
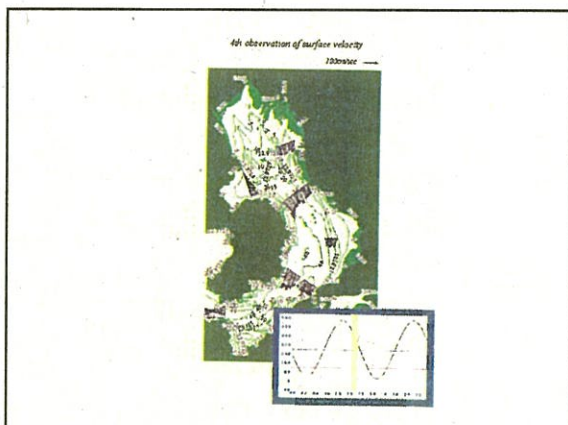
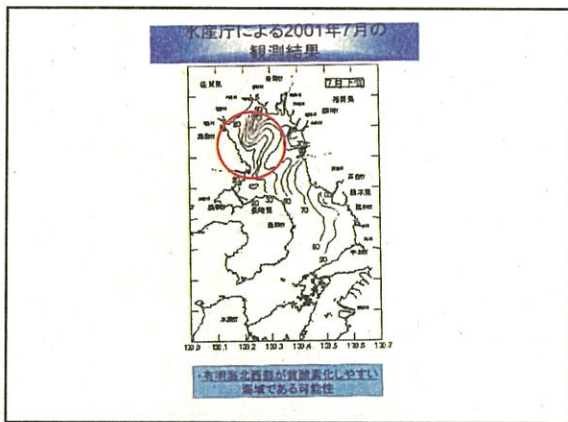
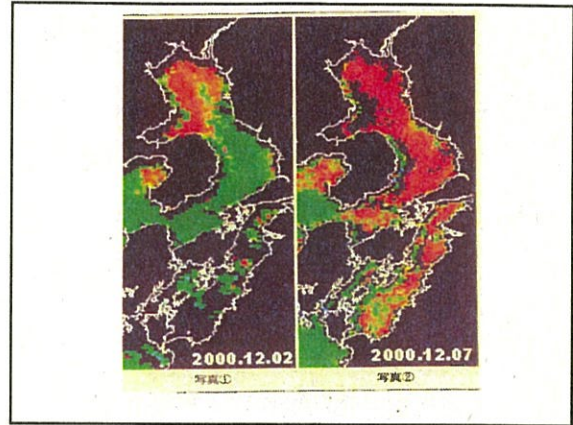
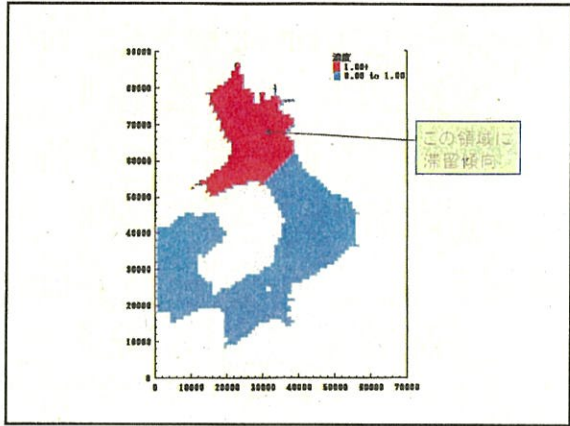


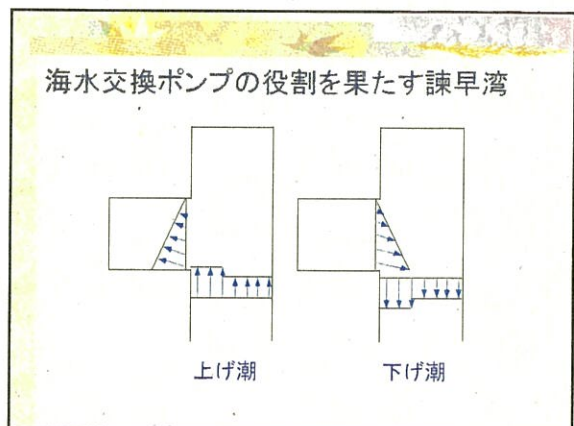
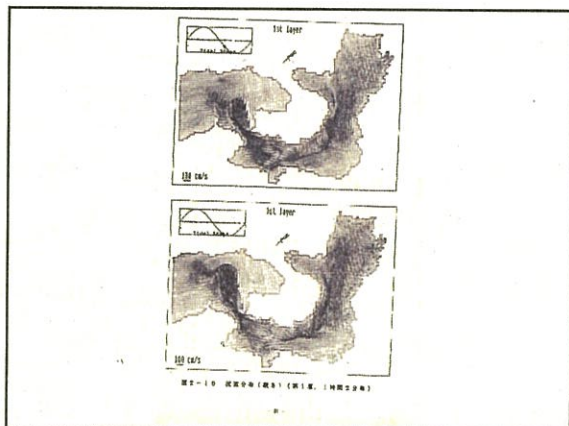
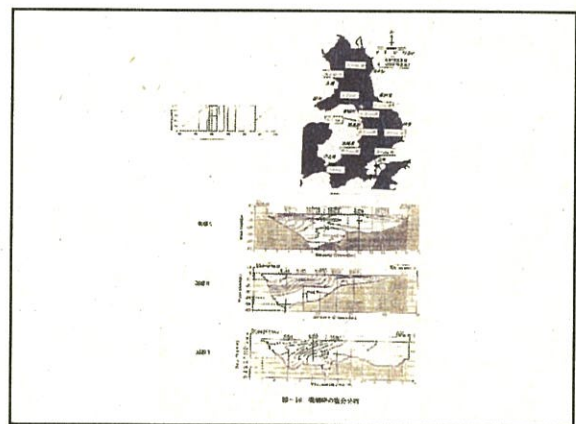
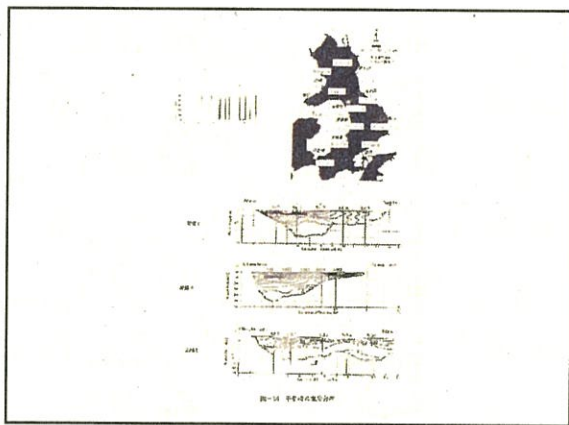
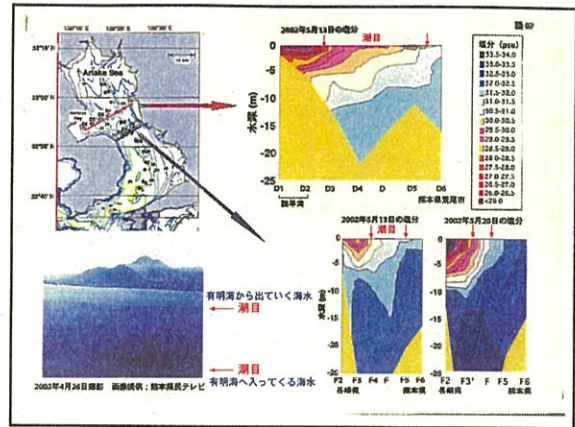
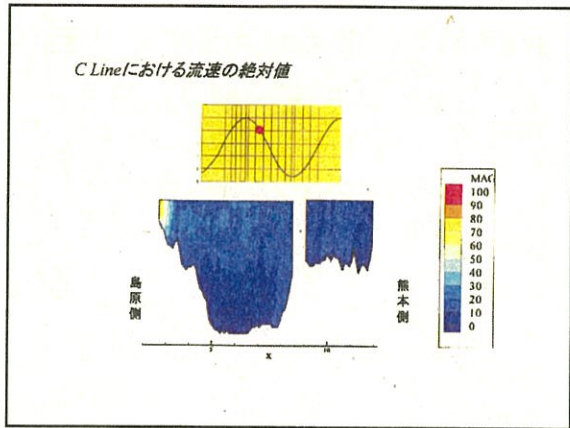
九州大学大学院工学研究院

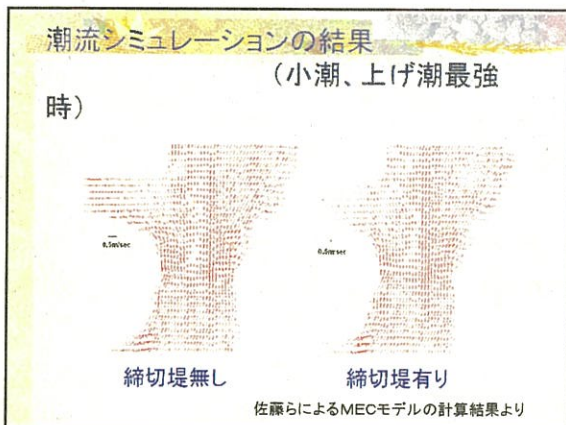
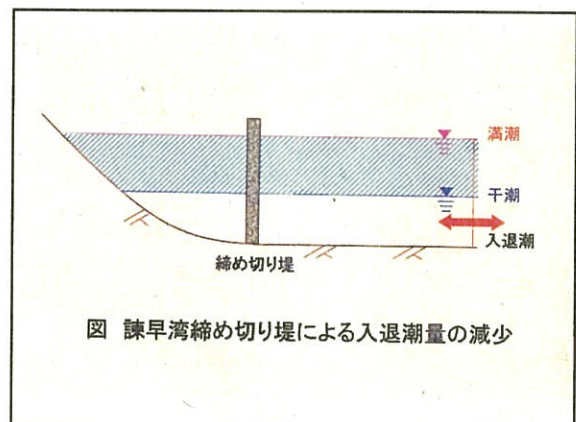
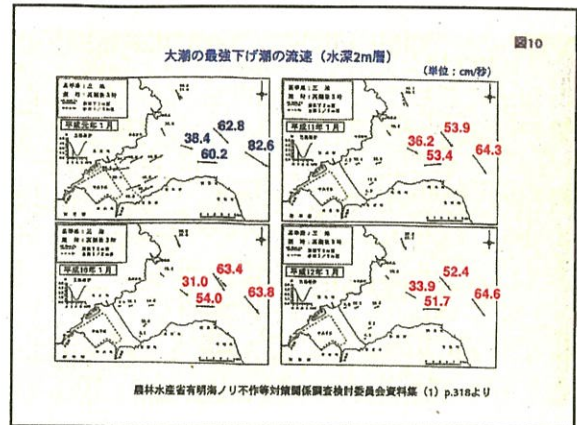
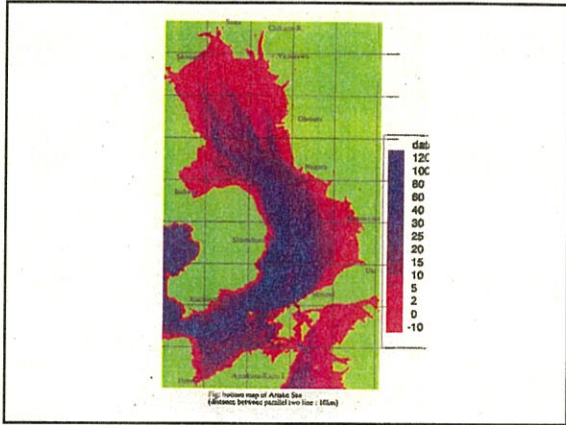
小松 利光

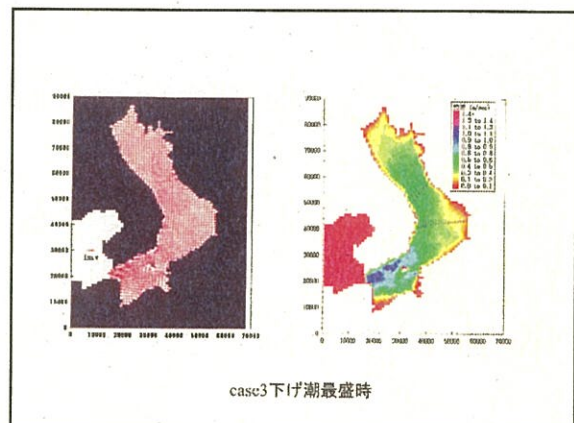
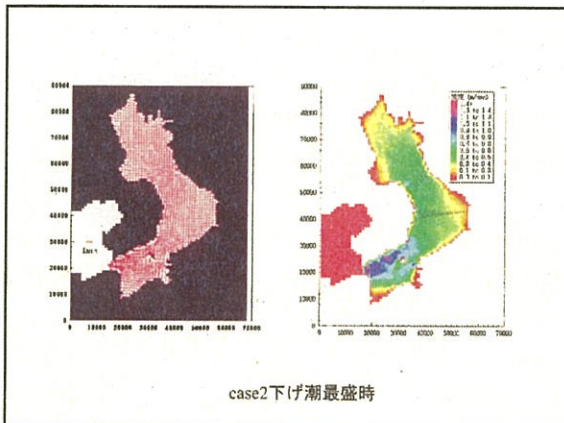
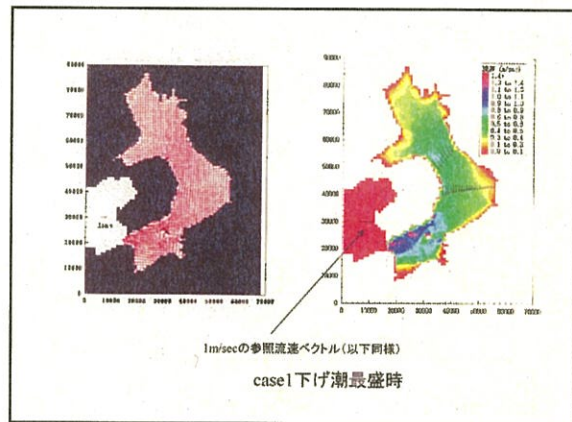
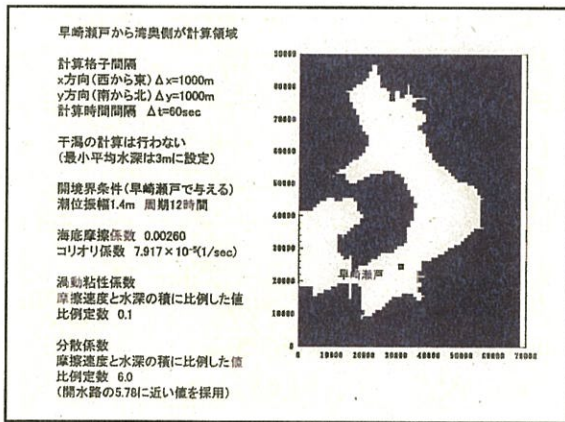
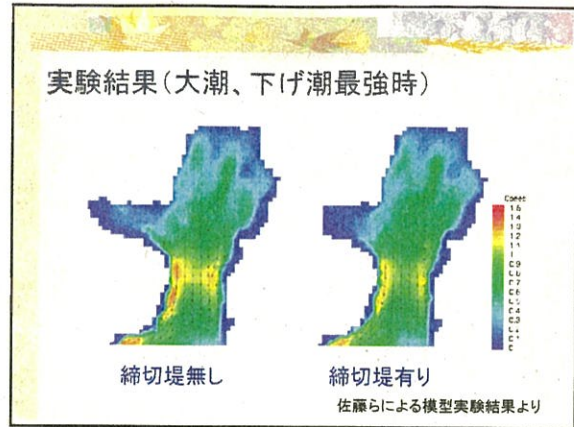
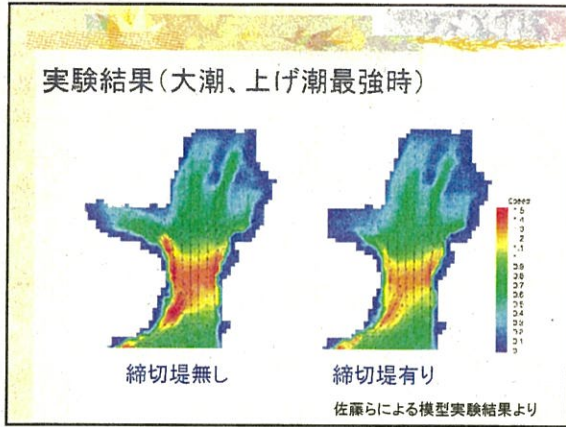


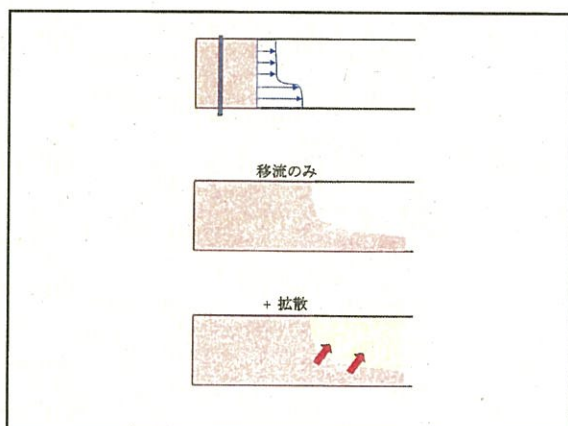
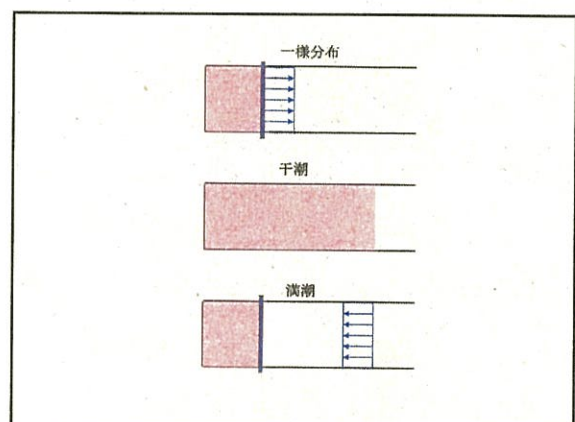
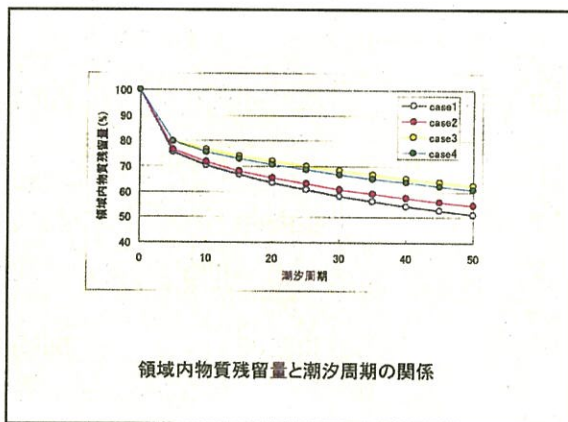
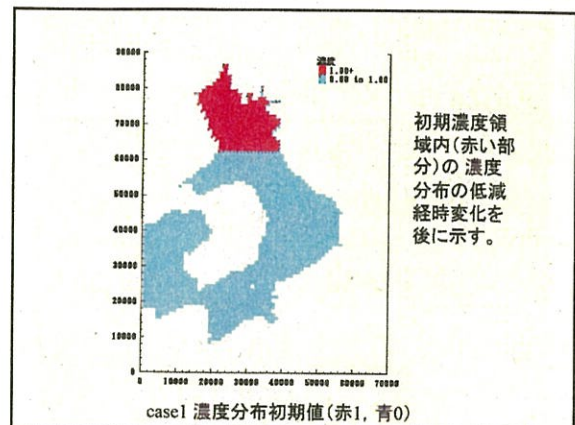
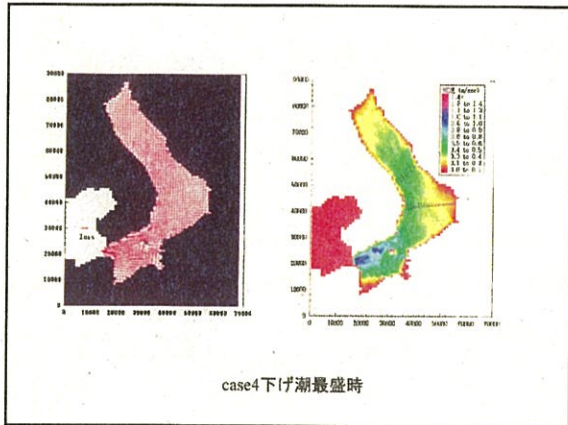






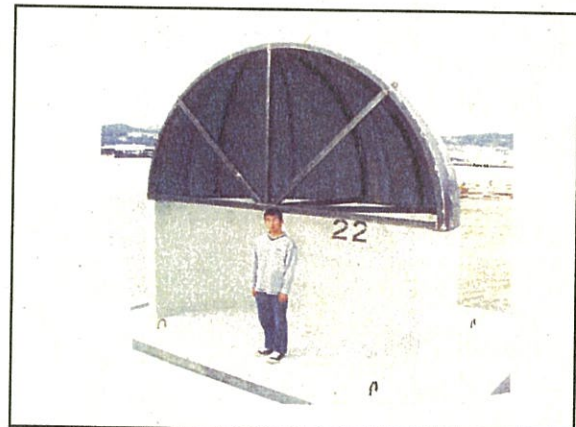
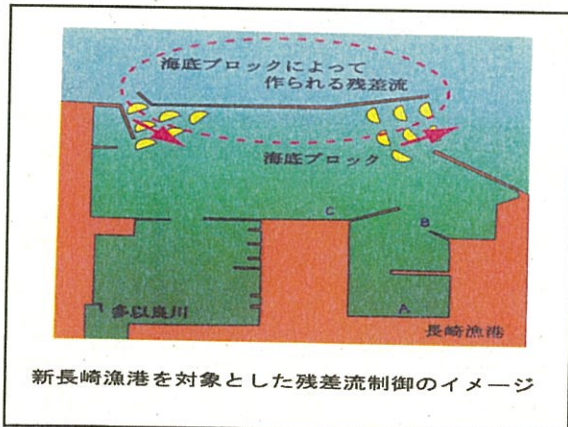
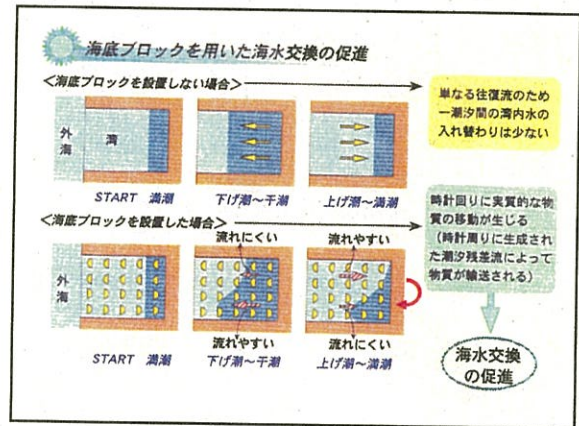
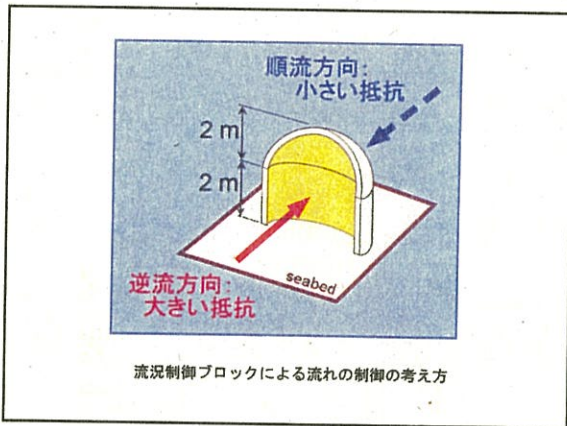
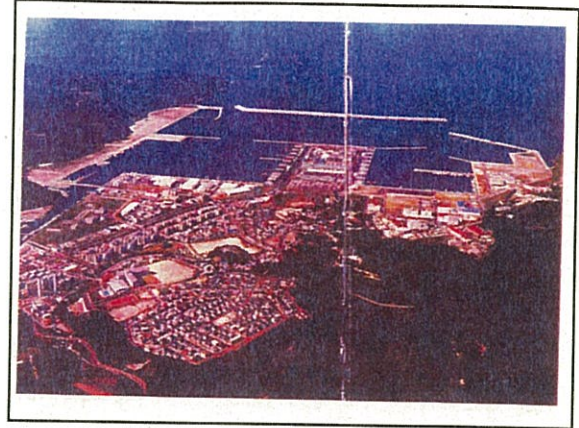
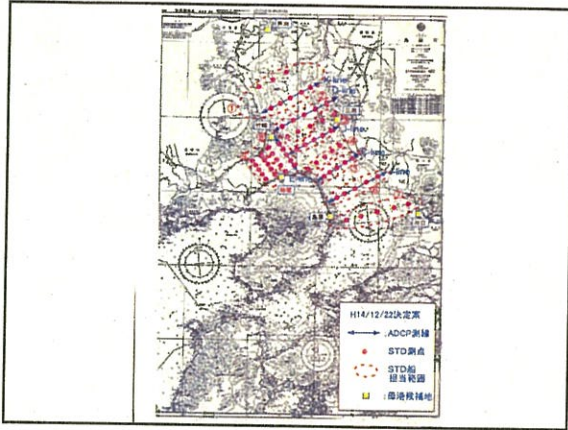


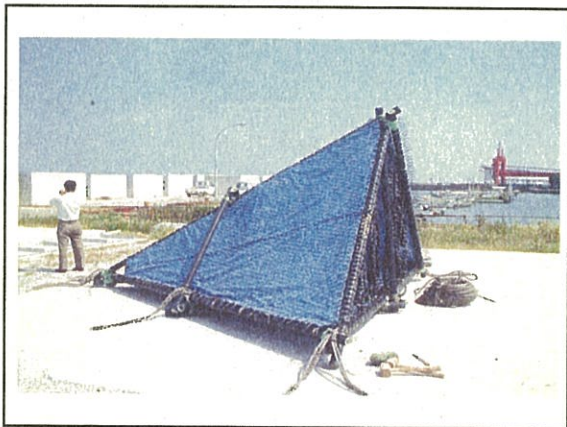
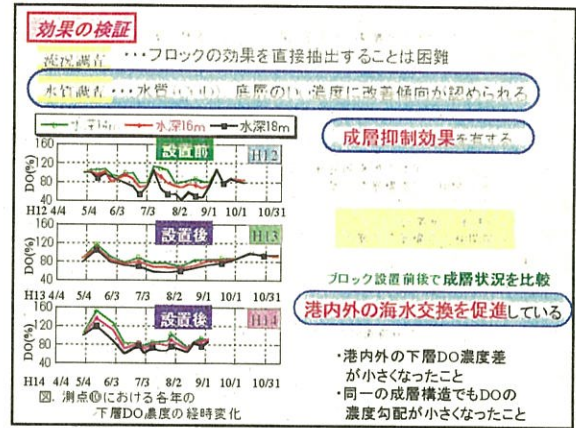
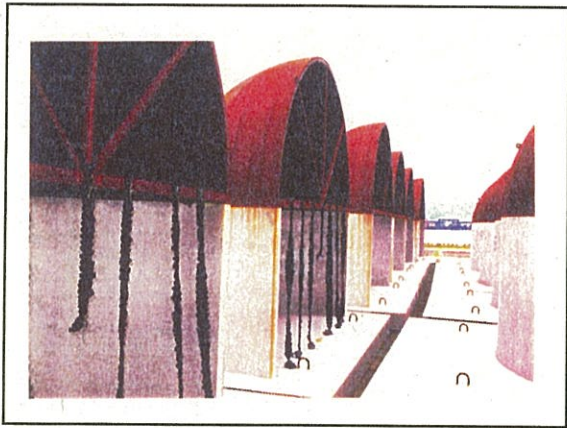




結論

- (1) まどまつた降雷による河川水の流出により有明海側に大量の栄養塩が供給される。
- (2) 地形的阻害性により有明海一帯沖域を基本ラインを境界としてその奥側に海水や流出した河川水の滞留傾向が見られる。
- (3) 地形的・密度関的な阻害により有明海に滞留の遅い領域が形成されるが、この滞留分布の水平方向の非一様性や滞留の滞留として沖に海水の大量流入後の海水交換や物質輸送に大きな役割を果たしている。
- (4) しかしながら、このラインのすぐ北側西部に広がる有明海への入流経路の存在が、有明海の滞留突出部の生成に大きく寄与しており、夏季干拓の跡の引き起こす、有明海の底層部の有明海への入流経路が閉鎖したことにより、有明海の底層部の滞留の減少を引き起こしている。このことと同様に、栄養塩が大量流入した後の有明海での滞留時間を長くし、季節や有明海全体の滞留・大量交換に寄与している。





2001年夏季から冬季にかけての有明海の水塊構造と 貧酸素水塊・赤潮の発生の関係

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^{††}

- † 熊本県立大学環境共生学部
〒862-8502 熊本市月出3-1-100
- * 〒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

要 旨

九州西岸の有明海では、近年赤潮が頻発し、奥部海域では夏季に貧酸素水塊の発生も報告されている。近年の有明海におけるこれらの環境変化のメカニズムを解明するために、2001年より精密な水質調査（水温、塩分、D₀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の測定）を行ってきた。これらの調査結果を通して、夏季の有明海奥部における貧酸素水塊の発生と秋季の珪藻類による赤潮の発生に関しては、いずれも大雨の後に起きていた。これらの現象の発生過程は、次のようにまとめられる。

1. 貧酸素化現象の発生：

梅雨の大雨→河川からの大量の淡水の流入→塩分の低下による成層構造の発達+水温による成層構造の発達→底層水と表層水の混合の停滞→貧酸素化現象

2. 秋季における珪藻類の赤潮の発生：

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→塩分の低下による成層構造の発達+表層水における栄養塩濃度の上昇→赤潮の発生

はじめに

有明海は潮汐による水位の変動が最大で約6m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く、外海の天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6.3km³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よる激しい海水流動からは予想しえない事態であり、実際には有明海奥部の海水は停滞しやすくなっているのではないかということが示唆される。

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、共同研究グループを結成して、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いる。また、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開始された共同研究プロジェクト(有明プロジェクト)と連携した調査研究でもある。これらの調査研究の成果の中から、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。

この報告書においては、2001年8月から2002年2月まで、熊本市沖から柳川市沖にかけて、有明海の中央を縦断する方向に設置した調査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。また、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のメカニズムについて考察する。

調査内容と方法

調査地点

本研究では、九州西岸の有明海において、東岸および西岸からほぼ等距離となる熊本市沖から柳川市沖の海域に、有明海を縦断する方向に約3km間隔で12調査地点(A~L)、有明プロジェクトの調査を行った2001年10月16日の調査のみ19調査地点を設定した(Fig. 1)。

調査方法

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日の、合計6回、漁船をチャーターして、通常は有明海に設定した12カ所(2001年10月の調査のみ19カ所)の調査地点(A~L)において水質調査を行った。調査は2001年8月3

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

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、水深 10 m までは 1 m ごとに、それ以深の層では水深 2 m ごとに測定した。また、バンドン型採水器を用いて、水深 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。

研究室において、海水のクロロフィル a 濃度は 500 mL のサンプルをポンプで吸引しながらガラスフィルター (GF/F, Whatman) 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深 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、クロロフィル a 濃度の鉛直プロファイルを求めた。また、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 ($0.45 \mu\text{m}$) で濾過し、濾液中の硝酸塩態および亜硝酸塩態窒素、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。

結 果

2001 年 8 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 2(a)～(d) に示した。

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 日の調査では、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た。表層の水温は $29.7 \sim 31.1 \text{ }^\circ\text{C}$ に達していた。Stn C～E の海域ではこの高水温の表層が厚くなっていて、水温 29°C 以上の層が水深約 4～5 m まで達していた。一方、Stn C～E で水深 13 m 以深、他の調査地点では水深 7 m 以深の層で、水温が $24 \text{ }^\circ\text{C}$ 台を保っており、表層との温度差は約 $5 \sim 7 \text{ }^\circ\text{C}$ に達していた。

塩分については、有明海奥部に位置する Stn B～F において、表層の塩分の低下が著し

く、29.0～29.5 psuの層が水深約3～7 mに、29.5～30.0 psuの層が水深約4.5～9 mにまで達していた。一方、外海から有明海へ流入してきた塩分の高い海水は、河口域に形成される塩水くさびのように、底層を奥部へと流入していた。しかしながら、Stn Fより奥部で、海底から直上約5～10 mで観測されたのは、塩分31.5～32.0 psuまたは32.0～32.5 psuの海水であった。塩分32.5～33.0 psuの海水は、海底付近でもStn Gにまで達していなかった。

8月3日は、梅雨明け(7月19日)直後から晴天の続いた時期であった。そのため、真夏の日射しによって表層が急速に暖められる一方、梅雨末期の大雨が有明海奥部に注ぐ筑後川をはじめとするいくつかの河川を通して大量に流入したことによって、このような水温と塩分の両方による成層構造が形成されたと考えられる。D0の鉛直プロファイルは、有明海奥部に位置するStn B～F(少なくとも長さ約12 km)において、このような水温と塩分の成層構造が発達した時に、水深約5～10 m以深海底に至る層で、溶存酸素が3.0～4.0 mg L⁻¹に低下した水塊が形成されたことを示している。

秋季からの海水の鉛直混合

有明海では、2001年8月15日以降、台風の影響による強風と高い波浪が続き、9月20日まで一部の海域を除いて漁船による調査は困難であった。その間に水温は約3～4℃低下し、塩分も増加してStn Aの表層を除き全地点で30.5 psuを越え、鉛直プロファイルもそれぞれ表面から海底まで均質な分布を示した。その結果、D0についても、全調査地点において、底層に十分なD0が供給されて5 mg/Lを越える値にまで回復していた。このように、9月20日にはすでに海水の成層構造が解消され、鉛直混合が起き、有明海奥部の底層において8月に見られたD0の低下も解消されていた。以後、2002年2月2日に至るまで、10月16日のStn A～Cにおいて弱い塩分の成層構造が形成されたことを除き、海水の鉛直混合が起きて、表面から海底まで、水温、塩分、D0がほぼ均質な海水構造が形成された。

さらに、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) 河口の強混合域で見られるような(参照 奥田 1996)、鉛直方向には均質であるが、有明海の奥部から出口の方への水平方向には徐々に塩分が増加する塩分勾配が見られた。有明海奥部のStn Aでは塩分が約31～32 psuであるが、Stn Jでは約33～34 psu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有明海奥部においてより低下する傾向が見られ、2002年2月のStn AおよびBでは9.7～9.8℃まで低下していた。これに対して、外海から有明海に流入する海水は、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、Stn KおよびLでは、奥部の水温よりも約1~3℃高い値が観測された。

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濃度の鉛直プロフィールをFig. 3に示した。

本研究の調査を開始した2002年8月3日における海水のクロロフィルa濃度は、Stn Bの表層2 mおよびStn Fの水深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濃度の値が示す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. 4)。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*、*Prorocentrum minimum*)による赤潮が見られた(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約29~30℃に達したことによって、この珪藻類が死滅し、その死骸が無数のヌタ(参照 三島ら 1990, Montani 1991)状の懸濁粒子を形成して漂っていたものである。

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。発生域は有明海の奥部のStn CおよびDの表層(水深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8.1~16.7 $\mu\text{g L}^{-1}$ を記録した。この時、海面の水温は25.9~26.4℃まで低下していた。2回目は11月に発生し、規模の大きな珪藻類(*Chaetoceros* spp.、*Skeletonema costatum*)による赤潮に発展した(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5 mで10 $\mu\text{g L}^{-1}$ を越える値が観測され、奥部のStn AおよびStn Bでは特に値が高く、それぞれ13.9~18.1 $\mu\text{g L}^{-1}$ 、10.1~13.6 $\mu\text{g L}^{-1}$ に達していた。また、Stn Jを除いて、水表面から海底直上層に至るまでほぼ全層で7 $\mu\text{g L}^{-1}$ を越えていた。この赤潮は12月下旬には終息し、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Stn A~Dにおいて、さらに追加調査の結果を加えて、海水表面のクロロフィルa濃度と塩分の時間的変化を比較するために、Fig. 5(a)およびFig. 5(b)に示した。塩分が31.0 psu以下のレベルに低下したのが8月3日(Stn E, F)~9月7日(Stn A, B)、10月16日(Stn 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 濃度の急速な増加が見られた。

Fig. 6 には、全調査地点における水深 2m および 5 m の層における硝酸態窒素 (硝酸態窒素 + 亜硝酸態窒素) およびリン酸態リンの 2001 年 9 ~ 12 月における濃度を示し、11 月の珪藻類の赤潮の発生との関係を検討した。同一地点の水深 2m 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 日には有明海湾奥の Stn A ~ F で高くなる傾向が見られ、硝酸態窒素濃度は $2.23 \sim 4.15 \mu\text{mol L}^{-1}$ 、リン酸態リン濃度は $0.40 \sim 0.95 \mu\text{mol L}^{-1}$ の範囲にあった。10 月 16 日になると、これらの地点の中で Stn F を除く 5 地点においては、栄養塩の濃度が大幅に増加して、硝酸態窒素は $6.35 \sim 15.10 \mu\text{mol L}^{-1}$ 、リン酸態リンは $0.59 \sim 1.36 \mu\text{mol L}^{-1}$ の範囲に達した。10 月 16 日は Stn A ~ C において海水表面の塩分が $30.5 \sim 30.8 \text{ psu}$ に低下し、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る (Fig. 2(b))。有明海で広範囲にわたって珪藻類による赤潮が発生したのはこの後のことであった (Fig. 3, Fig. 5(a))。

11 月 14 日の赤潮の発生時には、栄養塩濃度が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 psu を下回ることもなく (Fig. 2(b), Fig. 5(b))、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 $0.37 \sim 0.61 \mu\text{mol L}^{-1}$ の狭い範囲にあり、赤潮も終息していた。

考 察

本調査において、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、水深約 5 ~ 10 m より海底に至る層での溶存酸素の低下である。もう一つは、2001 年 11 月 14 日における全調査地点における珪藻類の赤潮の発生である。

底層水の溶存酸素の低下に関しては、日本自然保護協会が諫早湾より有明海奥部の海域において、2001 年 8 月 5 日 ~ 7 日に 41 カ所において調査を行い、海底直上水の溶存酸素濃度の分布を報告している (日本自然保護協会 2001)。諫早湾内においては溶存酸素濃度が $1 \sim 2 \text{ mg L}^{-1}$ まで低下した海域が見られ、諫早湾の湾口から有明海奥部西側より東側の海域にかけて、 2 mg L^{-1} から 4 mg L^{-1} へと変化する分布パターンが見られた。底層水の溶存酸素濃度の低下が海産生物の生存に及ぼす影響について、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するとともに、このような海水を貧酸

素水と呼んでいる。したがって、この諫早湾から有明海奥部西側および中央部に至る広範囲の海域で発生した底層水における溶存酸素濃度の低下は、貧酸素水と呼ぶべき状態に至っていた。この調査結果とその2日前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 (Stn B~E) は、この底層水の貧酸素水域の西側に位置していたことがわかる。

貧酸素水の発生メカニズムとしては、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による成層構造が発達したことで、梅雨明けに伴って真夏の炎天下に表層水の水温が急速に上昇したことで水温成層が加わり、表層水と底層水の密度差がきわめて大きくなったことが指摘される (Fig. 2(c))。また、塩分の成層構造をみると、水深が20 m前後の有明海奥部において最大水深約11 mまで塩分が31 psu未滿に低下した表層が形成され、31.0~31.5 psuの層は水深約15~20 mに達している。そのため、外海から有明海へ流入してきた高塩分の海水は、低塩分の海水が滞留しているために奥部への侵入を制限され (Fig. 2(b))、そのことによって有明海奥部および諫早湾の底層水も停滞し、貧酸素化現象を生じたと考えられる。ただし、このような貧酸素水の発生は、東 (2000a) が1997年6月に発生したことを報じたのが最初である。その後、1999年6月 (東 2000b)、2001年7~8月 (水産庁増殖推進部 2001d, 日本自然保護協会 2001) にも発生が確認されている。

赤潮の発生メカニズムについても、大雨によって大量の淡水が有明海奥部へ流入することとの関連性が指摘される。有明海奥部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10月の降水量の平年値の約1.9~2.5倍に達している (Fig. 7)。この大雨によって、有明海奥部の筑後川や六角川などの河川から、栄養塩を豊富に含んだ淡水が大量に流入して栄養塩濃度を上昇させ (Fig. 6)、引き続いて植物プランクトンの急速な増殖を引き起こし (Fig. 3, Fig. 4(a))、有明海の広範囲におよぶ珪藻類の赤潮を発生させたと推断することができる。

同様な観点から、2000年12月に有明海全域で発生した *Rhizosolenia imbricata*、*Chaetoceros* spp. をはじめとする大規模な珪藻類による赤潮 (水産庁九州漁業調整事務所 2001) の場合についても、その直前の11月に、降水量が上述の観測点で151~242 mm、平年値の2.3~3.0倍に達した。また、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、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)。

以上のように、この研究における調査結果を通して導き出された有明海奥部の海域で起きている2つの一連の現象は、いずれも大雨の発生に端を発していると考えられ、その発生過程を次のようにまとめることができる。

1. 貧酸素化現象の発生

梅雨の大雨→大量の淡水の流入→塩分の低下による成層構造の発達+水温による成層構造の発達→底層水の停滞→貧酸素化現象

2. 秋季における珪藻類の赤潮の発生

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→塩分の低下による成層構造の発達+表層水における栄養塩濃度の上昇→赤潮の発生

ただし、有明海奥部に流入する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への窒素およびリンの負荷量は、1980年代より大きな変化は見られない。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る(水産庁増殖推進部2001e)。

梅雨期および秋季に大雨が降るという気象現象は、九州地方では普通に見られる現象である。確かに、1999年9月、2000年11月、2001年10月には、平年を2~3倍上回る降水量が記録されているが、このような大雨が発生する度に、有明海奥部の海域において底層水の貧酸素化現象や赤潮が発生するようになったことには、さらに別の要因が近年関与するようになったことが示唆される。

Fig. 8には、1990~2001年の9~12月の期間に、有明海で発生した最大面積50 km²以上の赤潮について、それが発生した時点の前月の月間降水量(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観測結果の平均値)と、赤潮発生指標(赤潮の継続日数 x 最大面積、水産庁九州漁業調整事務所 1993~2001)との関係を示した。1994年および1996年は、9~12月の月間降水量がいずれも100 mmを越えておらず、最大面積50km²を越える赤潮は、有明海で1件も発生していない。また、1990年9月には、月間降水量が134mmに達しているが、最大面積50km²を越える赤潮は発生していない。

1997年以前のデータでは、「赤潮発生指標」と「赤潮発生時の前月の月間降水量」との間に有意な正の相関関係が見られる($r^2=0.387$)。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、その前月の月間降水量は236~266 mmに達したが、赤潮発生指標は1995年10月の17,536が最大であった。一方、1998年以降のデータでは、1998年11月ならびに2000年12月に発生した赤潮の場合、その前月の月間降水量は180 mm

程度であるにもかかわらず、赤潮発生指標がそれぞれ21,760、45,982に達する大規模な赤潮となった。また、1999年10月および2001年11月に発生した赤潮の場合も、1997年以前のデータを用いて算出した「赤潮発生指標」と「赤潮発生時の前月の月間雨量」との間の回帰直線と比較して、「赤潮発生指標」の値が大きく、この回帰直線の上方に位置している。つまり、1998年以降、秋季に発生した赤潮は、それまでの降水量の観測結果から予想される規模よりも大きな規模の赤潮が発生してきたことを示している。

近年、有明海奥部で夏季に底層水の貧酸素化現象が発生し、秋季に発生する赤潮の規模が大きくなっているが、これは、諫早湾干拓事業の一環として、1997年5月に潮受け堤防を締め切ったことが有明海奥部の潮流に影響を与え、そのことに連鎖して発生している可能性をここで指摘する。この潮受け堤防締め切り後、大潮下げ潮時の表層における最大流速が、諫早湾内の潮受け堤防の前面で80～90%、諫早湾の湾口およびその沖合で10～20%程度、減少したことが報告されている(水産庁増殖推進部 2001b, 2001c)。有明プロジェクトで得られた潮流や水質の観測結果では、島原半島の岸沿いに塩分の低い表層水が見られ、熊本県の岸沿いの海域では同じ表層水でも、外海から流入した海水に近い塩分が記録されていた。したがって、大雨の後、有明海奥部で発生した低塩分の表層水は、下げ潮時に諫早湾の湾口およびその沖合から島原半島を岸沿いに南下し、有明海の出口・外海へと流出していると考えられる。ここで、諫早湾の湾口およびその沖合における下げ潮時の流速が、諫早湾における潮受け堤防の締め切り後減少していることから、この低塩分の表層水は潮汐に伴う移動距離が減少し、その結果有明海奥部の海域から流出しにくくなり、滞留時間が以前よりも長くなっていることが予想される。そのことは、この海域における塩分成層の発達、底層水の停滞、表層水における植物プランクトンの増殖を招く原因となりうる。

今後の研究では、大雨の後に有明海の奥部海域で発生する低塩分・高栄養塩濃度の表層水に着目し、その挙動と、諫早湾干拓事業がその挙動に及ぼす影響について、さらに詳細な調査を行う必要がある。

References

- 東 幹夫 (2000a): 諫早湾干拓事業の影響, p.320-337. in 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, 291pp.
- 菊池泰二 (2000): 干潟浅海系の保全の意義, p.306-317. in 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. (1991): Some characteristic features of large amorphous particles (NUTA) in the Seto Inland Sea, Japan. *J. Oceanogr. Soc. Jap.*, 47, 276-285.
- 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. in 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. in 河川感潮域, 西條八東・奥田節夫編, 名古屋大学出版会, 名古屋
- 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. in 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. in 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. in 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. in 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. in 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. in 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. in 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. in 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 in 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. in 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11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.6-15.

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. in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. in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. in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）：諫早湾の底層の低酸素化について，p.527-528. in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（2001e）：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. in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 欄播p・内海とその現状D海洋と生物，16，2-5.

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.

宇野木早苗（印刷中）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.

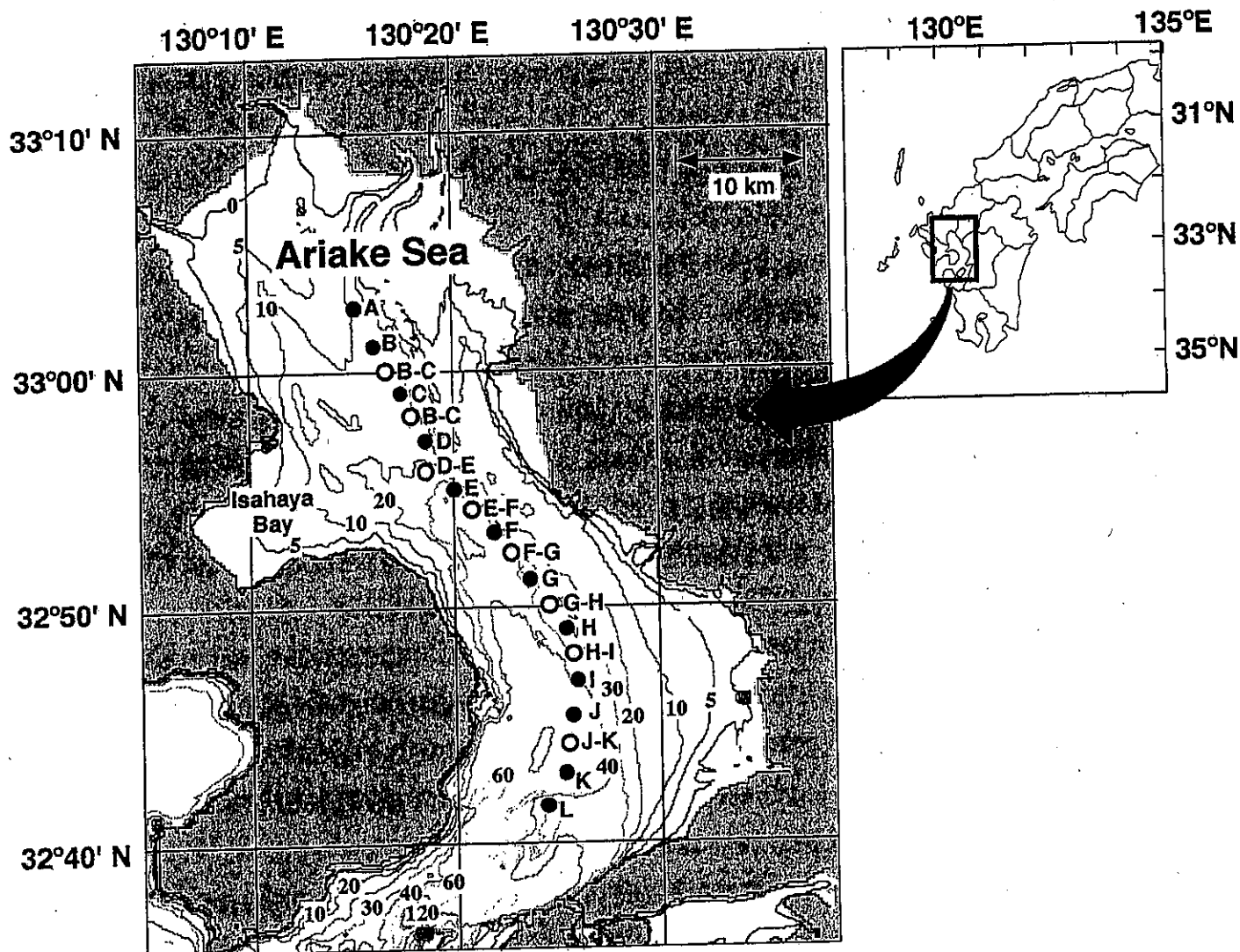
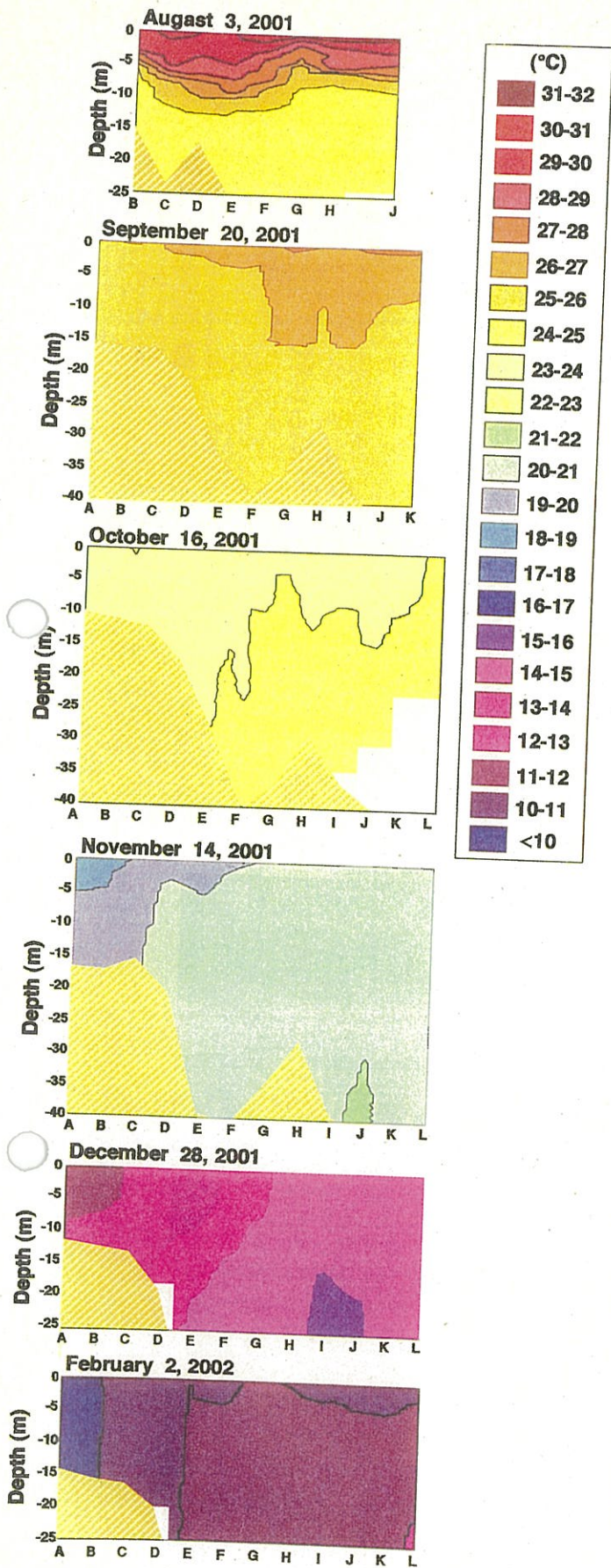


Fig.1 Study areas, Ariake Sea.
 Closed circles: regular sampling stations; Open circles: additional sampling station on Oct. 16, 2001.

(a) Temperature



(b) Salinity

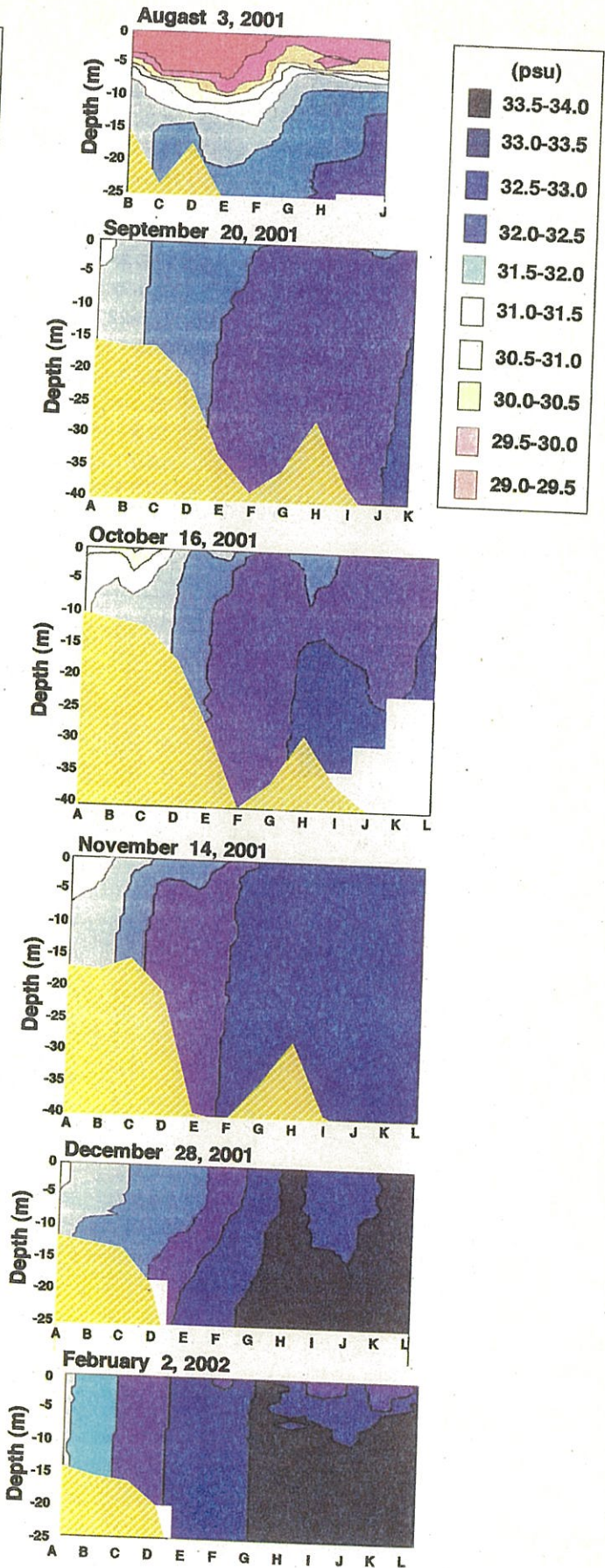


Fig.2 Vertical profiles of the water in Ariake Sea. (a) temperature. (b) salinity. (c) density. (d) D.O.

(c) Density

(d) D.O.

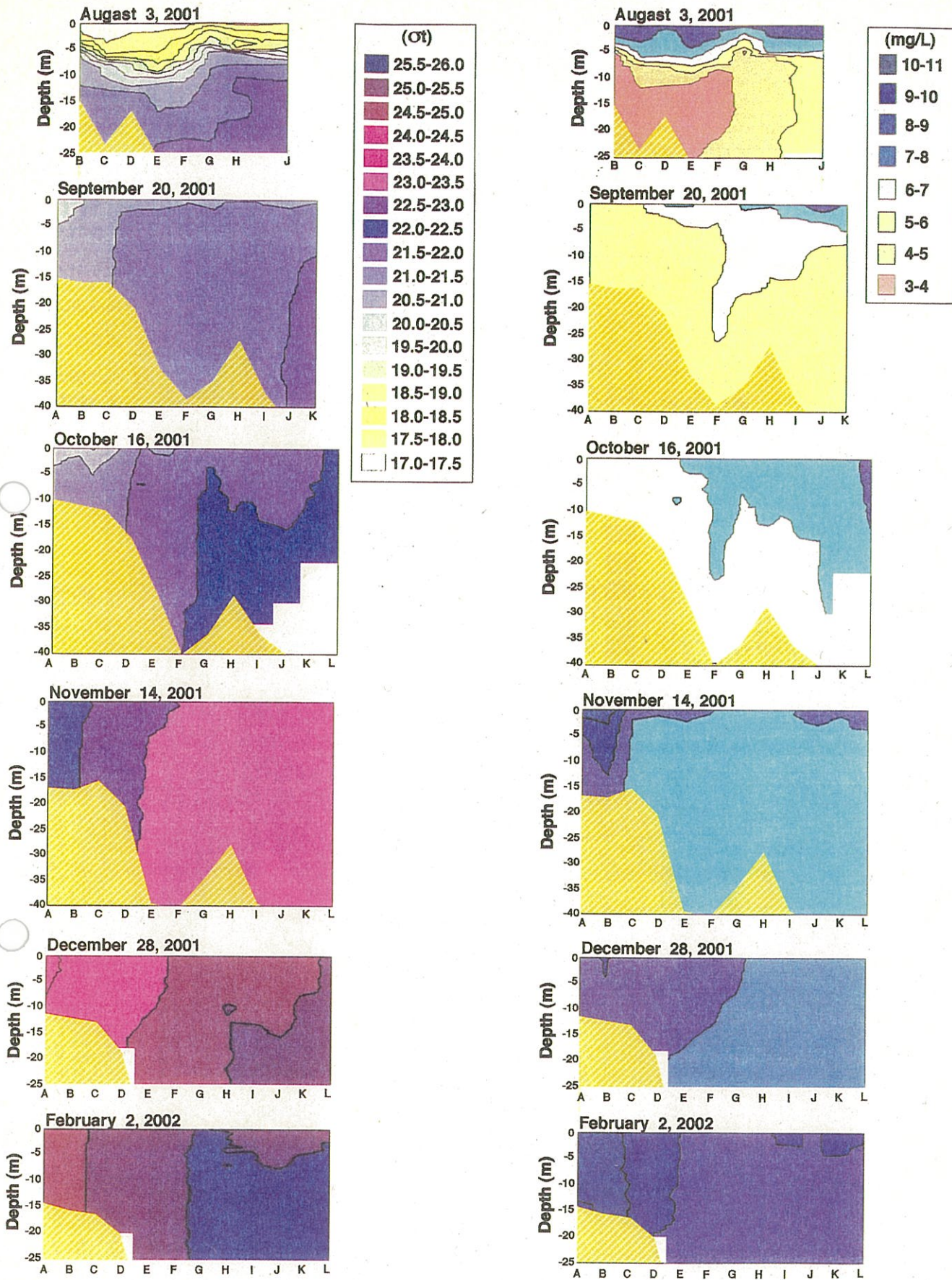


Fig.2 Vertical profiles of the water in Ariake Sea. (a) temperature. (b) salinity. (c) density. (d) D.O.

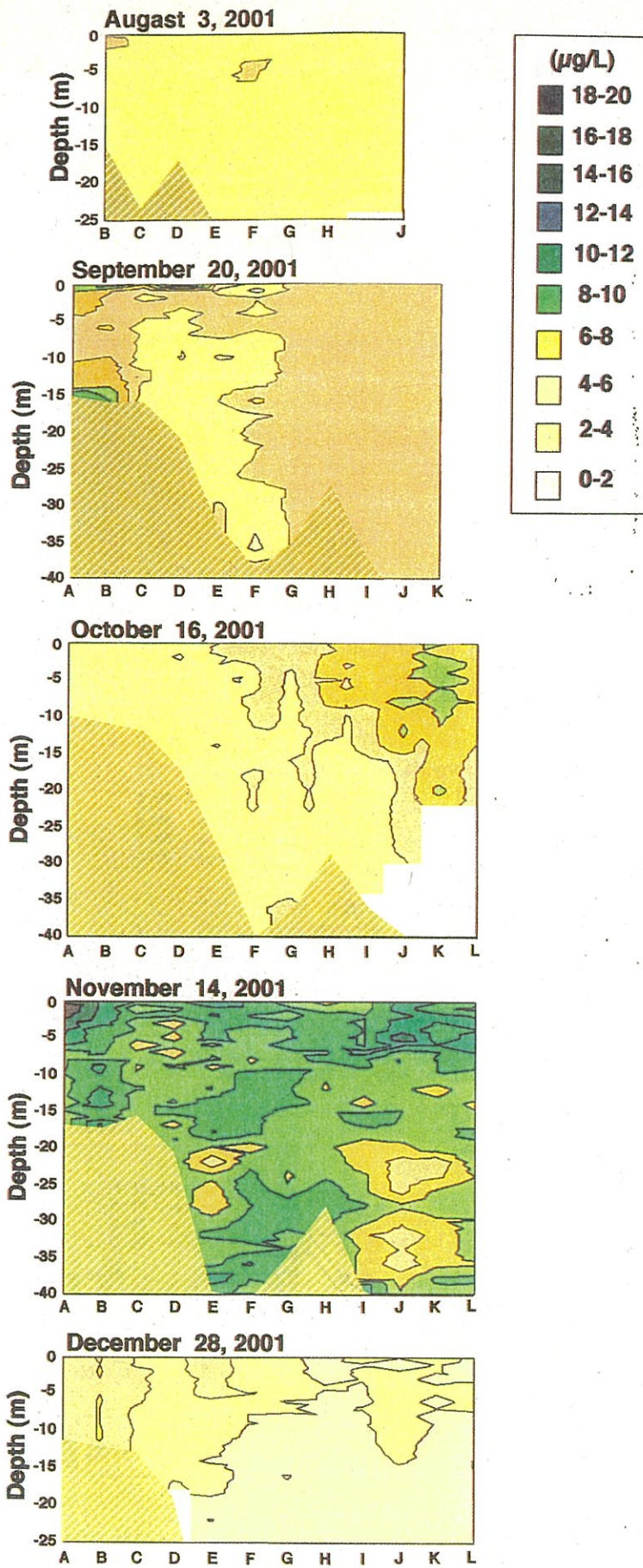


Fig.3 Vertical profiles of the concentration of chlorophyll-a of the water in Ariake Sea.

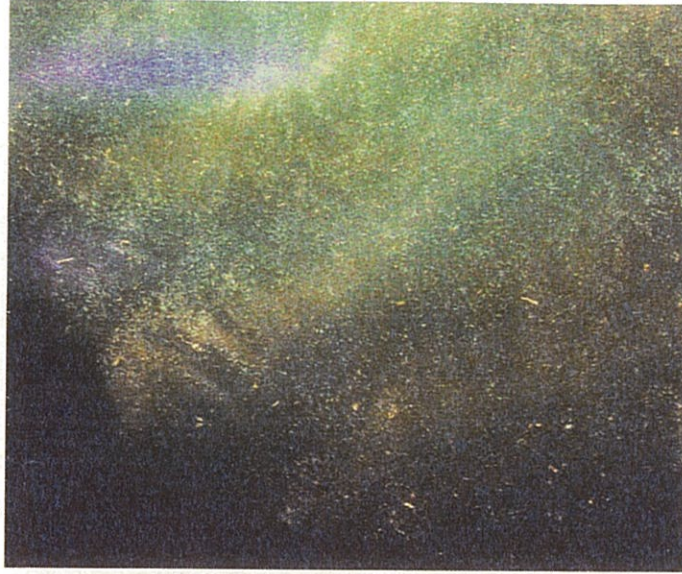


Fig.4 Numerous NUTA floating in the water in their innermost areas of Ariake Sea on Aug. 3, 1991.

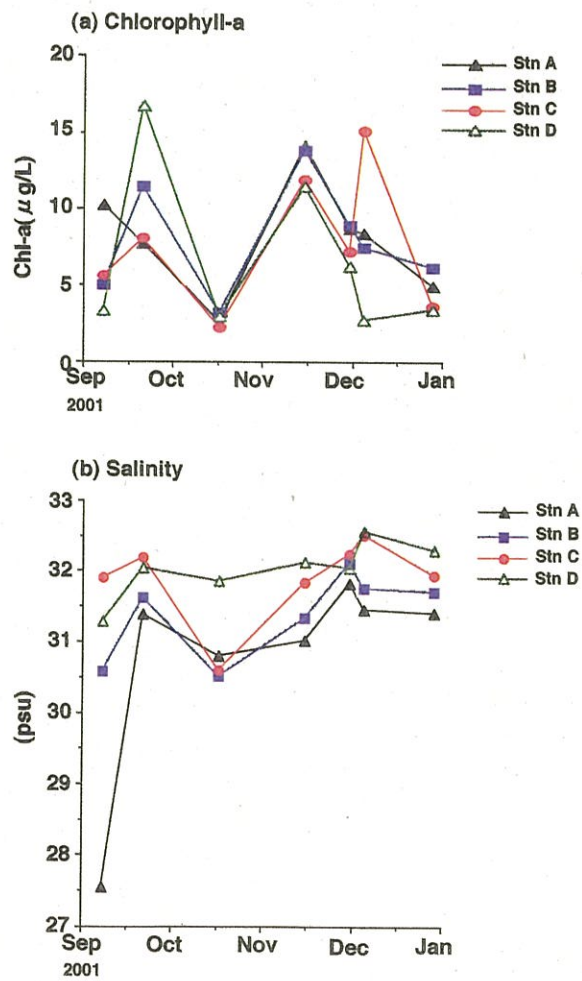


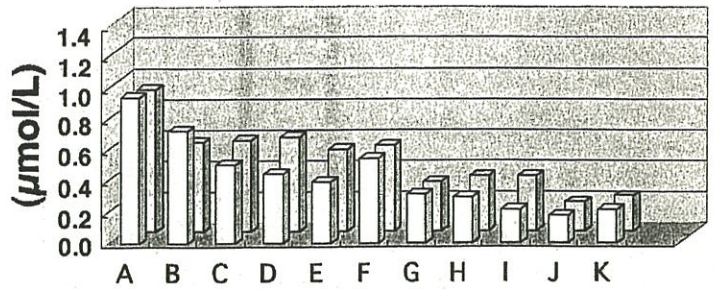
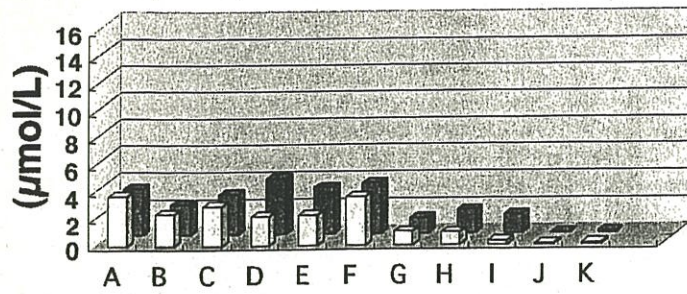
Fig.5 Variation of the concentration of chlorophyll-a of the water at four sampling stations (Stn A to D) in the innermost areas of Ariake Sea.

(a) $\text{NO}_3+\text{NO}_2\text{-N}$

(b) $\text{PO}_4\text{-P}$

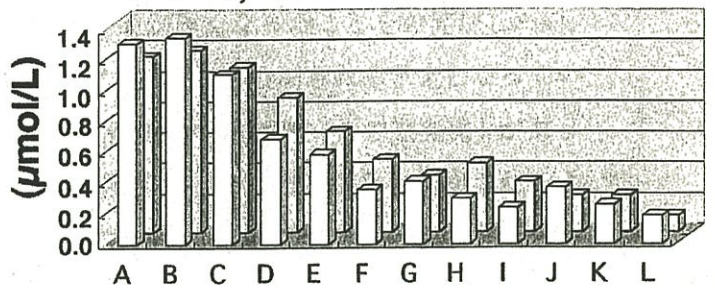
Sep. 20, 2001

Sep. 20, 2001



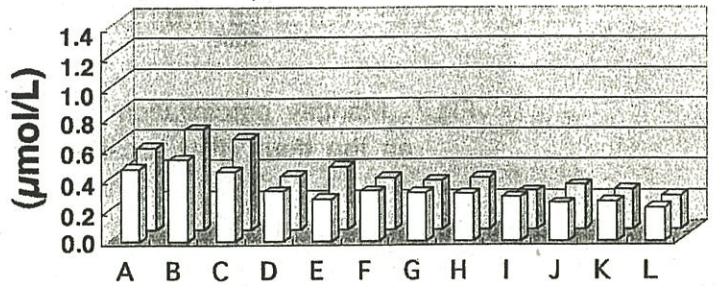
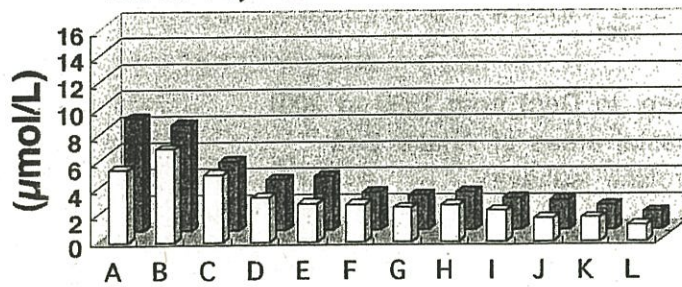
Oct. 16, 2001

Oct. 16, 2001



Nov. 14, 2001

Nov. 14, 2001



Dec. 28, 2001

Dec. 28, 2001

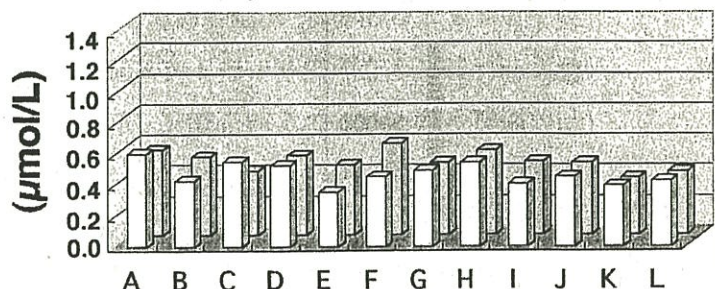
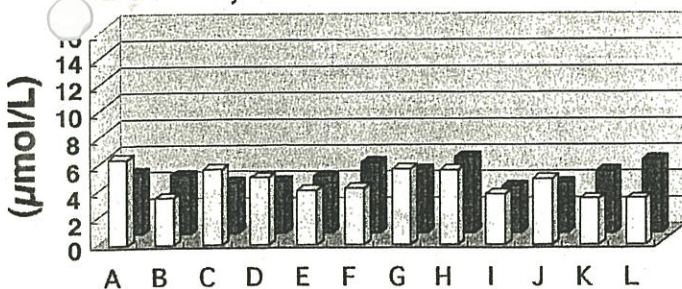


Fig.6 The nutrient-concentrations of the water at the layres of 2m and 5m in depth.

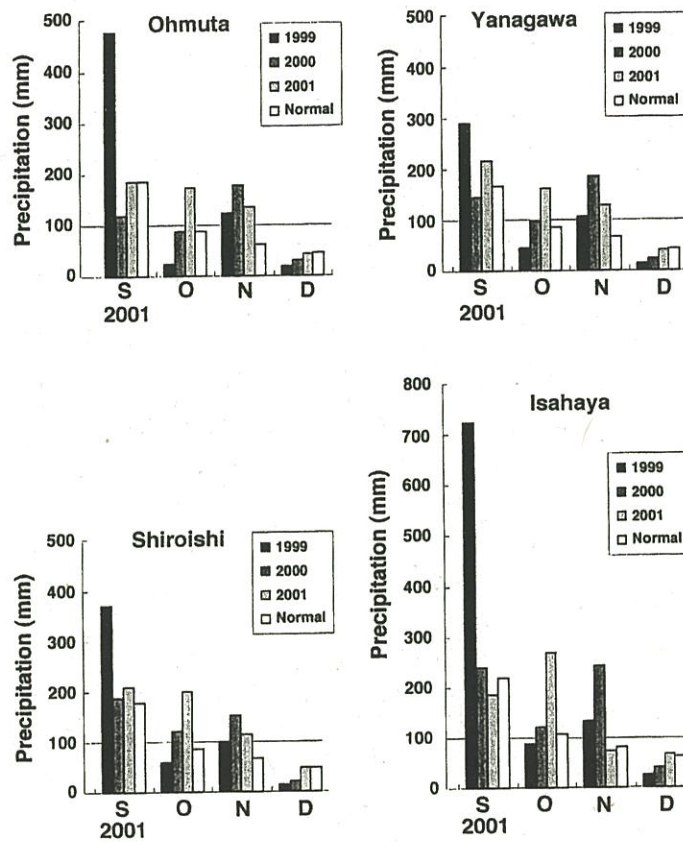


Fig.7 Monthly precipitation in autumn (Sep. to Dec) from 1999 to 2001 an the tfour cities located at the coastal areas of Ariake Sea (Ohmuta, Yanagawa, Shiroishi, Isahaya).

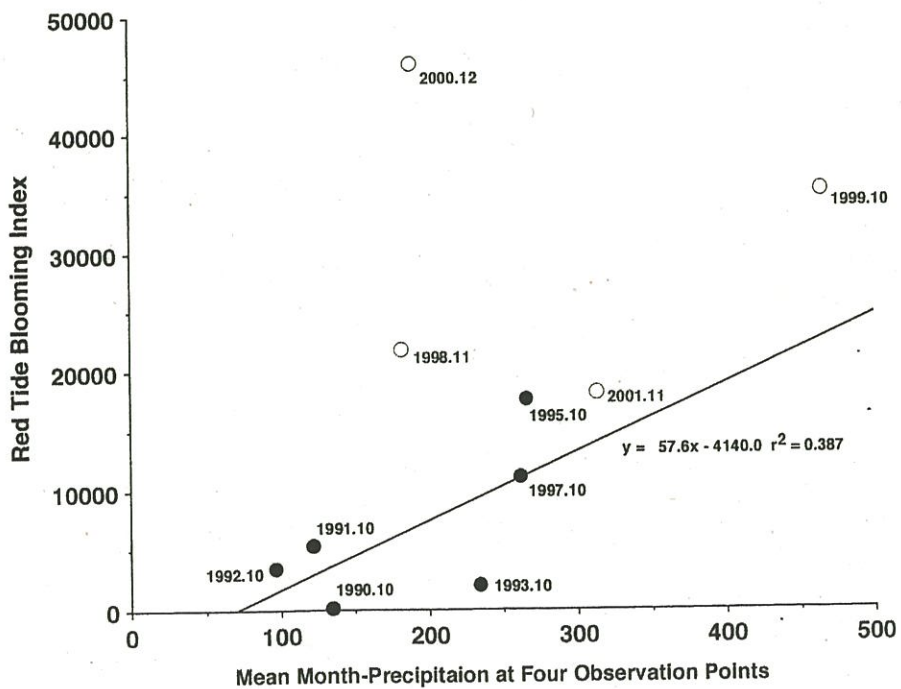


Fig.8 Relationship between maen monthly precipitation at the four cities red tide booming index.

有明海における流れと物質輸送に関する現地観測

小松利光* ・安達貴浩** ・金納聡***
矢野真一郎**** ・小橋乃子***** ・藤田和夫*****

2001年10月16日に有明海全域において、ADCP12台とSTD8台を用いた流動構造と成層の一斉観測が実施された。観測日として混合期の日潮不等の小さい大潮時が選ばれ、一朝夕間に渡って観測が行われた。得られた主要な結果は、(1)島原半島に沿った狭い領域に強い表層流が存在し、塩淡水成層が形成されており、この流れが物質輸送に大きな役割を果たしている、(2)諫早湾湾口では両端部から流出し、中央部から流入する残差流パターンが形成される、(3)有明町と長洲を結ぶ有明海の狭窄部を挟んで混合形態が変化しており、この断面の海水交換特性が有明海の水質構造を規定している、などである。

1. はじめに

2000年冬の珪藻赤潮の大発生によるノリの色落ちに端を発した有明海問題は、1989年着工、1997年4月に潮受け堤防が完成した諫早湾干拓事業との関連が取り沙汰され、大きな社会問題へと発展した。事業を実施してきた農林水産省は、有明海ノリ不作等対策関係調査検討委員会、いわゆる第三者委員会を発足させ、干拓とノリ不作との因果関係についても議論してきたが、明確な結論は出ていない(農林水産省有明海ノリ不作等対策関係調査検討委員会、2003)。2002年末には、「有明海及び八代海再生特別措置法」が施行され、有明海における総合的な環境調査の重要性が一般にも認識されるようになった。

これまでに、国・地方自治体・大学・市民団体など多くの機関により有明海で現地調査が実施されてきたが、その多くは小規模な調査に留まっており、東京湾にも匹敵する広大な有明海における包括的かつ高い精度の調査はあまり行われていなかった。比較的規模が大きな調査として、水質や成層については(財)日本自然保護協会(2002)による貧酸素水塊調査や福岡・佐賀・熊本・長崎の周辺4県が継続的に実施してきた浅海定線調査などが、また流れも含んだものとしては海上保安庁水路部(1974)が第3水俣病の発生に伴い実施したものがある。これまで、流れに関する有明海全体の情報は、海上保安庁のものがほとんど唯一であったため数値シミュレーションなどの再現性の検証には、この結果が利用されてきた。しかしながら、この観測結果は有明海内の6地点で15日間連続設置と、13地点で1日設置の電磁流速計のデータをもとにしたものであり、これから空間的な流速分布を推定するのは容易ではない。また、鉛直方向の流速分布が得られていないため、3次元の流動構造の把握はできない。

そこで、有明海の水環境を調べる上で最も基本的な情報

*フェロー 工博 九州大学大学院教授 工学研究院環境都市部門
**正会員 博(工) 九州大学大学院助教授 工学研究院環境都市部門
*** 修(工) 国土交通省
****正会員 博(工) 九州大学大学院学術研究員 工学研究院環境都市部門
*****正会員 博(工) Loughborough大学 Academic Visitor
*****正会員 九州大学大学院技官 工学研究院環境都市部門

である流動構造を把握するために、超音波ドップラー流速計(以下ADCP)を多数用いた有明海全体における流れの一斉観測が試みられた。また、同時に密度の鉛直・空間構造を把握するためのSTD観測も実施された。観測は、冬季の珪藻赤潮がノリ色落ちの直接原因であったことや、観測体制の整備などの兼ね合いから混合期である10月に実施された。本論文では、この一斉観測により明らかとなった有明海全体の流動と物質輸送の構造について紹介する。

2. 現地観測の概要

(1)ADCPによる流動観測について

2001年10月16日に、ADCP曳航観測を計11艘の観測船を用いて実施した。観測断面は有明海の湾口部である早崎瀬戸から奥へ向けて5横断面(うち4断面は2艘で分担)、諫早湾口1横断面、有明海湾軸に沿って1縦断面の計7断面11測線が設定された(図-1参照)。観測に使用したADCPは観測船の対地速度を計測して流速を補正できるポトムトラック機能の付いたRD-Instruments社製Work Horse ADCP 600kHzが4台、1200kHzが3台、BroadBand ADCP 300kHzが1台、600kHzが2台、1200kHzが1台であり、各測線の水深分布に対応した機種をそれぞれ使用した。ADCPは、層厚:1m、ブランク:2.56m、サンプリング間隔:3sに設定され、航行速度は5~6knotで、DGPSによる測線の確認を行いつつ測定された。

また、観測当日の潮汐は比較の日潮不等の小さい大潮期であり、06:00の上げ潮最強時から18:00の上げ潮最強時までの一朝夕間に渡り1時間半毎に計9回の走行を行い、潮流の断面流速分布を測定した。なお、当日の三池での予報潮位は、干潮:53cm(02:33)、満潮:524cm(08:39)、干潮:32cm(14:51)、満潮:529cm(21:00)であった。

(2)STD観測について

ADCP曳航観測と同時に、6横断面上に各々5地点ずつ(早崎瀬戸のAライン上のみ3地点)設定した測点と、有明海の外海である橋湾内に3地点の計31地点(図-2参照)において多項目水質計によるSTD観測と表層水の採水を7艘の観測船を用いて実施し、塩分と水温の鉛直分布と表層栄



図-1 流速観測の測線



図-2 成層観測の測点

養塩($\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$, T-N, $\text{SiO}_2\text{-Si}$)を測定した。なお、栄養塩分布の観測結果については、有明プロジェクト研究チーム(2002)に詳述したので、本報告では取り扱わない。

測定は、ADCP曳航観測と同じ一潮汐間に測線の長さに応じて、A, Eライン上は1時間半毎に計9回、その他のライン上では2時間毎に計6回行われた。測点位置は、GPSによる測位で確認された。今回使用した観測機器は、メーカーや機種が統一できなかったので、機器間でのデータ補正が重要となる。そこで、塩分については採水した表層水のサリノメータ測定値と観測値から一点補正し、水温に関しては基準温度計を用いた検定を後日実施し補正した。本報告では、補正後のデータのみを用いている。

(3) その他の観測と観測当日の状況について

ADCP曳航観測とSTD観測の他に、潮位観測を三池港、瑞穂漁港、島原港、口之津の4カ所で、気象観測を三池港で実施した。また、大浦沖で塩分・水温の連続観測(アレック電子社製Compact-CT)と有明町沖でADCPの海底設置による1ヶ月程度の連続観測も併せて実施した。

一斉観測日前後の気象条件は、前日の10月15日は晴天、16, 17日は台風21号の接近により降雨があり、日射は少なかった。気温は、16日はほぼ一定で観測中は20~22℃程度だった。風は、島原で3m/s程度、その他は2m/s程度の弱い南~南東風が吹いていた。

有明海の流況に強い影響を与える河川流量については、16日の主要8河川(筑後川・菊池川・緑川・嘉瀬川・六角川・本明川・矢部川・白川)の平均総流量は約150m³/sであった。うち、筑後川が半分、本明川が2%程度の割合を占めていた。諫早干拓調整池の南北排水門からは、16日

の15:00~18:00の3時間に平均170m³/s(総排水量:184万m³)が排出されていた。

3. 観測結果について

(1) 流動構造について

得られた多数の観測結果のうち代表的なものとして、下げ潮最強時(第4回目観測, 10:30~11:30)と上げ潮最強時(第8回目観測, 16:30~17:30)における水深平均流速の平面分布をそれぞれ図-3, 4に示す(図中の右下に、観測の時間帯を潮汐と併せて示した)。なお、ADCP曳航観測では測線の始点から終点まで行くのにおよそ1時間程度の航行時間が必要であり、同一の観測時間帯でも時間のズレが生じる。したがって、ある時刻の流況パターンを得るには、本来ならば時間的な補間を行い修正する必要があるが、ここではそのような時間補正は行っていない。

得られた結果より、以下のような特徴的な流動構造が見て取れた。

1) 諫早湾口(Eライン)において表層流速の振幅を調べると、STDの測点(図-5参照)であるSE1で60cm/s, SE3で40cm/s, SE5で20cm/s程度となっており、諫早湾口の南岸側と北岸側とでは潮流流速の絶対値に大きな違いが見られる。測線上で潮流の振幅が最大となる地点は諫早湾口の南岸から測線に沿って2~3km離れた位置に出現する。また、SE1では潮流の主軸がほぼ東西方向であるのに対し、SE5では北西から南東に向かっており、流向にも違いが見られる。なお、諫早湾口に関しては、中村ら(2002)により詳細な検討が行われているので参照されたい。

2) 有明町と長洲を結ぶCラインの表層流速は、測線上の各点において潮流の主軸の向きは概ね一致しており、上

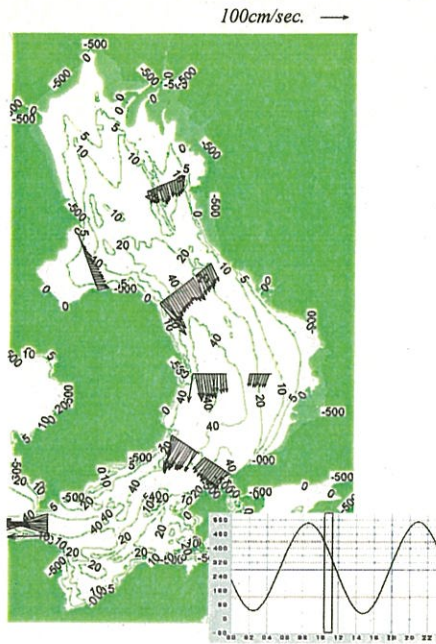


図-3 下げ潮最強時の水深平均流速分布図

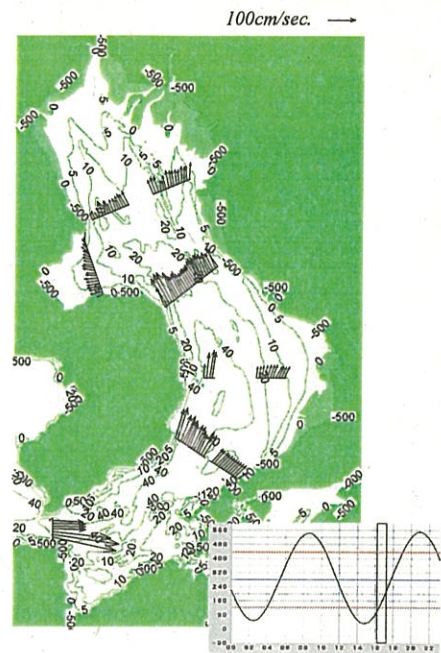


図-4 上げ潮最強時の水深平均流速分布図

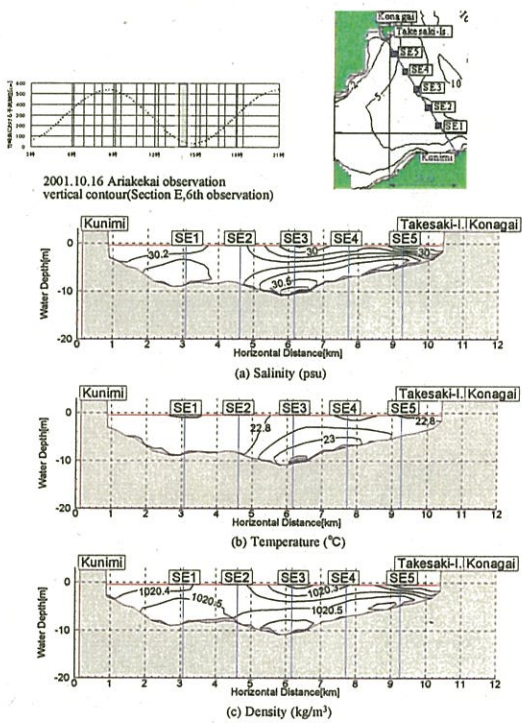


図-5 Eラインにおける干潮時の塩分・水温・密度分布

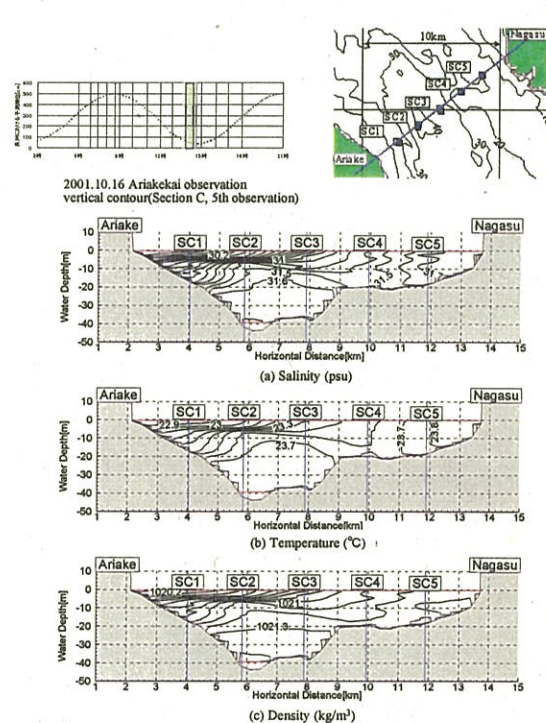


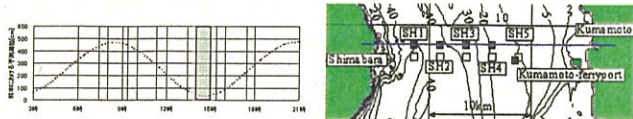
図-6 Cラインにおける干潮時の塩分・水温・密度分布

げ潮最強時、下げ潮最強時のいずれにおいても、島原半島の沿岸において最大流速(150cm/s程度)が出現している。これは、島原半島に沿った領域の表層において、そのすぐ北側に諫早湾が存在して比較的大きな入退潮が生じるなどの湾地形の影響により潮流の振幅そのものが大きいこと、ならびに振動流境界層の特性により島原半島に沿った区間では他の区間よりも最大流速の出現する時刻が早くなっていること、等が原因となっているものと考えられる。特に第4回目や第8回目の観測時には、西岸より4~6km離れた海域に、比較的流速の遅い領域(100cm/s以下)が存在

するため、表面流速の空間勾配が測線に沿って大きな値を示していた。なお、Cライン上では下げ潮時に表層において流速が最大になり、上げ潮時には表層よりも水深10m付近の流速が最大となるような鉛直分布が得られており、一潮汐平均的に見て鉛直方向のエクステンジ・フローの存在が示唆された。

3) 海底近傍では深い海底地形に沿った流速が見られるが、その影響は上層にまで伝わっており、上層と海底近傍の流れの方向とは概ね一致している。

4) 有明海湾奥部にある比較的水深の浅い峰の州を境に



2001.10.16 Ariakekai observation vertical contour(Section H, 5th observation)

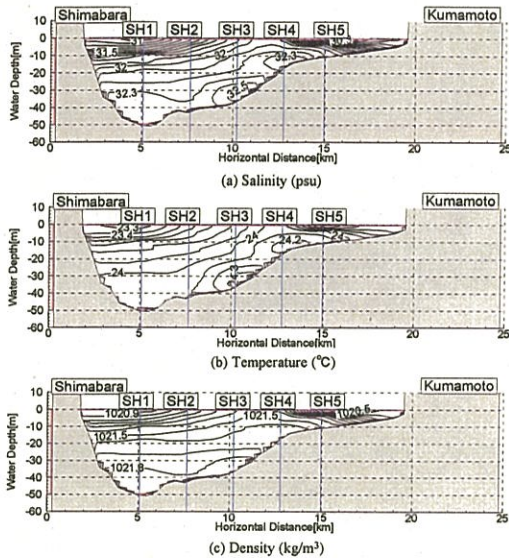
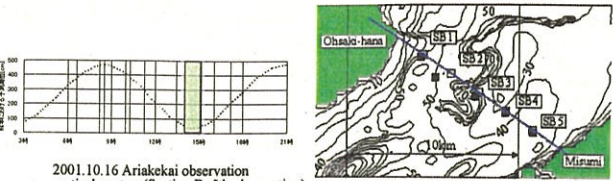


図-7 Hラインにおける干潮時の塩分・水温・密度分布



2001.10.16 Ariakekai observation vertical contour(Section B, 5th observation)

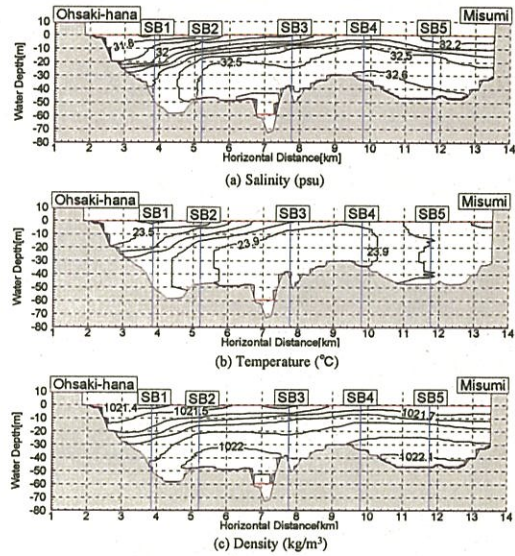


図-8 Bラインにおける干潮時の塩分・水温・密度分布

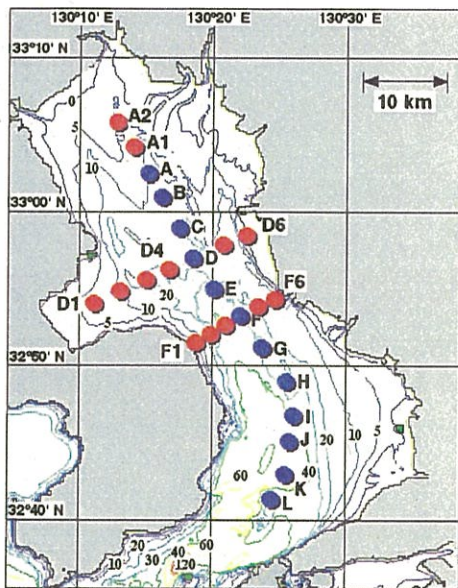


図-9 堤ら(2003)による成層調査測点配置

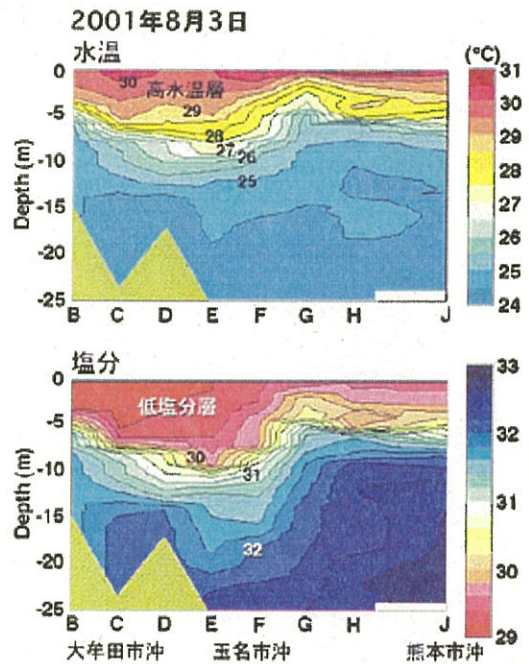


図-10 夏季の水温と塩分の縦断面分布(堤ら, 2003)

して、流れの特性が大きく異なっている。

(2) 諫早湾から島原半島沖にかけての淡水の挙動

次に、諫早湾周辺領域を対象に淡水の挙動について考察を行う。諫早湾口(Eライン)における塩分(図-5参照)と残差流の分布(結果省略)から、諫早湾内では、締切堤の南北排水門より排出された淡水が、南北両岸に沿った残差流(中村ら(2002)により、諫早湾口の両岸付近では流出方向、中央部では湾内に流入する方向の残差流が形成されている)によって湾口まで輸送されており、その結果、南

北両岸では総じて塩分が比較的薄くなっていることが明らかとなった。

次に、C、H、Bラインにおける塩分の横断面分布(図-6, 7, 8参照)を調べると、これらの測線でも一潮汐間を通じて東西両岸に沿って塩分が薄くなっていること、調整池からの排水が放出された干潮直後において、CラインやHラインの島原半島に沿った地点の上層水(水深10m程度まで)だけが急激に希釈され、特に安定した成層が形成されていることが観測された。2002年4月より約1ヶ月間実施

された締切堤排水門の短期開門調査において、島原半島沿いに安定した塩淡成層が形成されていたという事実や本一斉観測において得られた流速分布から判断すると、諫早湾内に存在する低塩分水は島原半島に沿った狭い領域を通じて流出しているものと推定される。島原半島に沿った領域では比較的大きな流速が発生しているにもかかわらず、一潮汐間にわたって比較的安定した成層が形成されていたことから、諫早湾や湾奥に供給される淡水は、島原半島に沿って偏って分布し流出していることが示唆される。

最後に、今回の一斉観測とは別に堤ら(2003)により実施された成層調査の結果を示す。図-9に測点の配置を、図-10に2001年8月3日の水温と塩分の縦断面分布を示す。測点F~Gの間、すなわち有明町と長洲を結ぶ断面を挟んで成層構造が急激に変化していることが分かる。つまり、この断面より奥部では混合形態が弱混合から緩混合的であり、筑後川からの大量の淡水流入に起因する河口密度流を形成している。それに対し、南側では強混合型に近づいている。狭隘部である有明一長洲の断面が境界となって湾奥部で淡水の滞留傾向が見られる。したがって、この断面を介した海水交換特性が有明海全体の水質構造を規定しているものと考えられる。

4. まとめ

有明海全域において2001年10月16日に実施されたADCPとSTDを用いた一斉観測より得られた結果をまとめると、以下ようになる。

- 1) STD観測の結果より、島原半島に沿ったBラインまでの沿岸域で干潮時に水面から約10mまでの表層が希釈されていた。
- 2) 島原半島に沿った海域の表層10m層では、表層流出の残差流パターンが確認されることから、湾奥や諫早湾で淡水により希釈された水が同領域に集中して流入しているものと考えられる。このため、河川からの直接的な淡水の供給がなく、潮流の強い有明海西側においても、成層が形成されやすくなっている。
- 3) 有明町と長洲町を結ぶ線(湾口以外では、有明海的最狭部)は地形上からも湾奥部と湾中央部を分離する境界となっている。この線上では、島原半島沿いの領域で潮流の水平流速のピーク値を持ち、この最強流速が湾奥に供給される河川水を効率的に湾中央から湾口へ向けて輸送している。この水平流速分布の非一様性が移流分散効果により湾奥部の海水交換や物質輸送に大きな役割を果たしているものと考えられる。
- 4) 湾奥の流動構造については、峰の州を境にパターンが大幅に変化している。

今回の観測は、比較的混合している秋の大潮期に実施されたが、有明海全体の流動構造を把握するには夏季成層期

の大規模な観測や、大潮期と小潮期の混合能力の違いに起因する成層構造がエスチャリ循環などの流動構造に与える影響に着目した観測なども行う必要がある。これらの観測が実施されることにより、有明海内部の物質輸送構造が明らかとなり、赤潮発生のメカニズム等が解明できることが期待される。

謝辞: 今回の有明海一斉調査は、「有明プロジェクト」と名付けられ、大学の研究者と学生、ならびに民間企業有志のボランティアで実施された。九州大学大学院総合理工学研究院・経塚雄策教授、松永信博教授、濱田孝治助手、熊本県立大学環境共生学部・堤裕昭教授、長崎大学水産学部・西ノ首英之教授、長崎大学環境科学部・中村武弘教授、長崎大学工学部・多田彰秀助教授、佐賀大学理工学部・大串浩一郎助教授、中部大学工学部・武田誠講師、東京大学大学院新領域創成科学研究科・磯部雅彦教授、大阪大学大学院工学研究科・西田修三助教授と各大学の学生諸君、株式会社東京久栄、五洋建設株式会社技術研究所、株式会社エス・イー・エーの下田力氏には一斉観測に参加を頂いた。また、早米ヶ浦漁協、三井鉱山株式会社には観測本部設営に、芦刈・荒尾市・川口・口之津・島原半島南部・島原・瑞穂の各漁協には観測船の備船に多大な協力を頂いた。ここに記し、深甚なる感謝の意を表する。

参考文献

- 有明プロジェクト研究チーム(2002):有明プロジェクト中間報告書(その1), 161p.
- 海上保安庁水路部(1974):有明海・八代海海象調査報告書, 39p.
- 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巻, 3号, pp. 291-305.
- 中村武弘・矢野真一郎・多田彰秀・野中寛之・亀井雄一(2002):諫早湾湾口部における流況の現地観測, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 396-400.
- 日本自然保護協会(2002):ありあけ大調査, 日本自然保護協会HP, <http://www.nacsj.or.jp/>.
- 農林水産省有明海ノリ不作等対策関係調査検討委員会(2003):最終報告書一有明海の漁業と環境の再生を願って, <http://www.jfa.maff.go.jp/ariakenori/negai/index.html>.