

大村湾における貧酸素水塊の発生とそれに関わる環境 諸要因の変動について

中村 仁*¹ 古島 靖夫*¹

長崎県と共同研究を進めている流動攪拌システムの開発に必要な基礎データを取得するため、定点および大村湾広域における貧酸素水塊の分布と周辺環境について観測を行い、大村湾の貧酸素水塊発生状況を調べた。最も成層の発達する8月の大村湾底層では、全域に渡って貧酸素水塊が発生しており、水平分布は佐世保湾から南下してくる外洋水により、また、鉛直分布は密度躍層下におけるクロロフィルaのパッチの存在によって、その発達が強く影響されることがわかった。一方、成層期であるにもかかわらず、その発達が弱い場合では、貧酸素水塊は発達の強い時と同じように発生していることがわかった。

キーワード：貧酸素水塊，密度躍層，成層，閉鎖性内湾，大村湾

The variation of the environment factor related to the occurrence of oxygen-deficient water mass in Oomura Bay.

Hitoshi NAKAMURA*² Yasuo FURUSHIMA*²

We have carried out observations about the marine environment and distribution of oxygen-deficient water mass in the fixed point and also Oomura Bay large regions, to acquire the foundation data needed for the development of the flow-mixing system that we are progressing the research and development cooperated with Nagasaki prefecture. In August, the season that the stratification most remarkably progresses, we observed that oxygen-deficient water mass appeared in all area in the Oomura Bay bottom layer. It is influenced strongly by the open sea water that will go south from Sasebo Bay showed by the horizontal distribution and also by the existence of patches of chlorophyll a under the pycnocline showed by the vertical distribution. On the other hand, the oxygen-deficient water mass understood that has occurred as it is same, even if it is in the case that the progress is weak, although it is a stratification period.

Key Words : oxygen-deficient water mass, pycnocline, stratification, enclosed Inland Sea, Oomura Bay

* 1 海洋生態・環境研究部 第1研究グループ

* 2 Marine ecosystems research department

1. はじめに

大村湾は、長崎県中央部に位置し、母湾である佐世保湾と狭小な二つの瀬戸で連結する典型的な袋状海湾である。そのため、海水交換が悪く特に夏季には、貧酸素水塊が海底付近に形成され、赤潮を誘発することが示唆されている¹⁾。この貧酸素水塊は、閉鎖性が強い内湾に特有の現象で、海底近くに一度発生すると、生簀の養殖魚を斃死させ、海底の底棲生物に破壊的な打撃を与えるなど、内湾の生態系に多大な影響を及ぼす²⁾。また、近年夏場の貧酸素化に伴う底質からのリンの溶出によって、大村湾表層のリン濃度が上昇の傾向にあることが示唆されているとともに³⁾、温度成層と底層流中の酸素欠乏水の関係も注目されている⁴⁾。

そこで、海洋科学技術センターと長崎県は、海底に発生する貧酸素水塊を抑制するための装置を開発することを試みた。この開発・研究は、平成9年度より3カ年、「大村湾の貧酸素水塊発生抑制技術の研究開発」(沿岸環境・利用の研究開発)というプロジェクト研究で行われた。本報告では、大村湾全域における躍層の発達および貧酸素水塊の発生を把握するために実施した基礎的な海域調査の結果について報告する。

2. 調査方法

大村湾における貧酸素水塊の発生状況の把握および貧酸素水塊を抑制する装置開発のための基礎調査として、以下の海域調査を実施した。

調査期間は

- ① 1997年 8月24日～ 8月29日
- ② 1997年 11月16日～ 11月21日
- ③ 1998年 6月28日～ 7月3日
- ④ 1998年 8月24日～ 8月29日

1997年は成層の最も発達する8月下旬と非成層期にあたる11月中旬の2回、1998年は成層期初期の6月下旬と最盛期の8月下旬の2回実施した。

調査海域は、大村湾広域(19定点)および尾戸半島沖1.5kmの定点(1点)で実施した。

2.1 広域調査

大村湾における貧酸素水塊の空間的かつ時間的変化の傾向を把握するため、大村湾北部から南部の広域を約3km間隔で格子状に19点(St.0～St.18)の観測点を設けた(図2.1)。シーバード社製のSBE25(CTD環境プロファイラ)を用いて観測を実施した。計測項目は、水温、塩分、DO(溶存酸素)、水中光量子、クロロフィルa、pHおよび透過度である。

2.2 定点調査

貧酸素水塊を抑制するための装置の設置予定海域(以後、St.13と呼ぶ)およびその周辺を調べるため、広域調査と並行してSt.13における定点観測を実施した(表2.1)。海

水流動調査については、アレック社製の電磁流速計およびアンデラー社製の海底設置型ADCPを用いた。調査項目は、流向・流速、水温、塩分、波高である。電磁流速計については、上層(深度3m)、中層(深度10m)、下層(深度19m)の3層に係留した。

また、海中エレベータを使用して、St.13におけるCTDの1時間毎の連続観測を行った。

3. 観測結果

3.1 1997年の観測結果

3.1.1 成層構造と溶存酸素分布

8月下旬の成層発達期に、大村湾広域18点でCTD、DO、クロロフィルaの5日間連続観測を実施した。また、成層期と非成層期の状態を比較するため、完全に成層が消滅した11月中旬に、8月と同様の観測を2日間実施した。成層期(8月)は連日晴天で海の状態も非常に安定したが、非成層期は風が非常に強く海も大荒れの状態であった。観測結果は、西側(測線A)、中央(測線B)、東側(測線C)の3本の南北断面について水温、塩分、密度(sigma-t)、溶存酸素、クロロフィルaの鉛直断面分布図で表した。

水温に関してはあまり明確な躍層が見えてこないが、塩分と密度については非常に安定した躍層がはっきりと

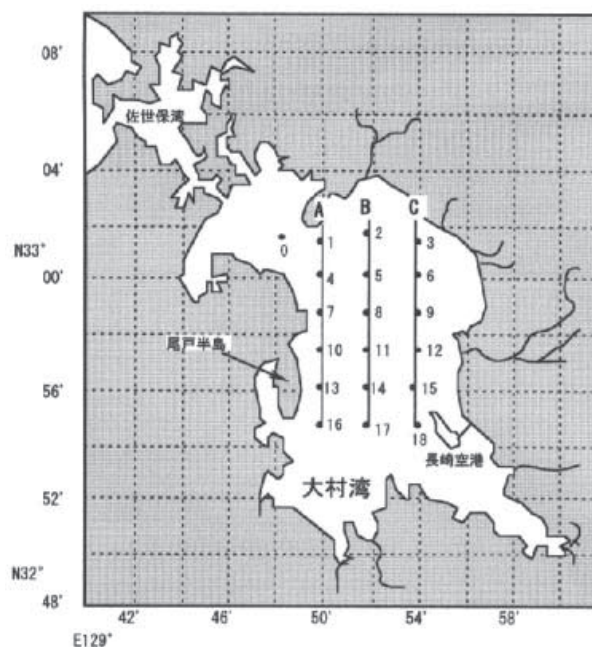


図2.1 大村湾における広域観測点配置図

格子間隔は約3kmで、全部で19点(黒丸印)設けた。

Fig.2.1 Schematic view of Oomura Bay and observation points. Total points are nineteen. Each point (black circle) is far from other point about 3 km.

表2.1 大村湾定点観測調査項目一覧

Table 2.1 Observations list on the fixed points in Oomura Bay.

Period	observation term	station	water depth (m)	mooring depth (m)	sampling interval (min.)
24 Aug. - 29 Aug., 1997	cur., T,S	St. 13	20	18	5
	cur., T,S	St. 13	20	5	5
16 Nov. - 21 Nov., 1997	cur., T	St. 13	20	3	5
	cur., T,S	St. 13	20	15	5
28 Jun. - 3 Jun., 1998	cur., T	St. 14	21	3	5
	cur., T,S	St. 14	21	11	5
	cur., T,S	St. 14	21	20	5
23 Aug. - 28 Aug., 1998	cur., T	St. 13	20	2	5
	cur., T,S	St. 13	20	11	5
	cur., T,S	St. 13	20	19	5
	CTD	St. 13	20	1 to 20	60
24 Aug. - 28 Aug., 1998	multi-level cur.	St. 16	20	bottom	10

現れた。躍層の上下端は平行移動していないことから、躍層の厚さが場所によって変動している様子がわかる。下端は、およそ水深10mを中心に2 m前後上下動していた。躍層の厚さは一定ではなく(4~11m)、平均約8 mであった。溶存酸素分布は、2 mg/l以下の貧酸素水塊が中央と東側断面の10m以深に、全期間全域に渡ってみられた。また、海底付近はほぼ無酸素状態であった。西側断面では、南側(St.13,16)の海底付近に貧酸素水塊が停滞していた。クロロフィル a 分布は、ほとんどの断面の水深10m以深に高濃度のパッチがみられた。これらのパッチは、いずれも密度躍層の下側に分布していた。これらのパッチが存在する位置では2 mg/l以下の貧酸素水塊はみられなかった(図3.1, 図3.2)。

平成9年度の非成層期(11月)については、8月よりも3~5倍のコンターで分布図を描いた。西側測線のみ非常に弱い成層が見られたが、中央および東側測線では、どの項目も海面から海底までほぼ一様な分布であった(図3.3)。

3.1.2 流動場

大村湾の流動系については、北部では反時計回りの還流の存在が明らかにされているが^{(8),(9)}、それ以外の海域でははっきりとした恒流は確認されていない。本調査では、流動特性が明確でない湾中央部および西岸部において流れの鉛直分布を計測し、吹送流や潮流の影響を調べた。

躍層の最も発達する成層期(夏場)は、風は弱く穏やかな海況であったにも関わらず、上層と底層の流れは一致せず、上層では吹送流、底層では潮流の影響が強く現れた(図3.4)。この結果は、福本ら⁷⁾の調査結果とも一致している。

一方、非成層期は非常に風が強く海もかなり荒れていたためもあり、上層、中層ともにほぼ同様な流れをであった。また、風の影響を強く受けているようであるが、流向は風向とは逆であった(図3.5)。これは、観測地点が大村湾の西端だったので、湾の水平流が中央から東側にかけては風向きに流れ西側にその反流が起こったか、もしくは、湾全体の極表層流が風向きに流れ、それより下層が反流となって逆に流れたのではないかの2通りの原因が考えられる。

3.2 1998年の観測結果

成層のでき始める6月下旬および成層の最も強くなる8月下旬に広域SBE25計測を実施した。観測点は、1997年に実施した18点に加え、外海からの影響参照点として大村湾北東部の針尾瀬戸沖に1測点(St.0)追加し合計19点で実施した。

3.2.1 成層構造と溶存酸素分布

佐世保湾からの影響を比較するため、針尾瀬戸に近い水深30m付近にSt.0を設けた。解析は1997年と同様に西側、中央、東側の南北断面について行った。

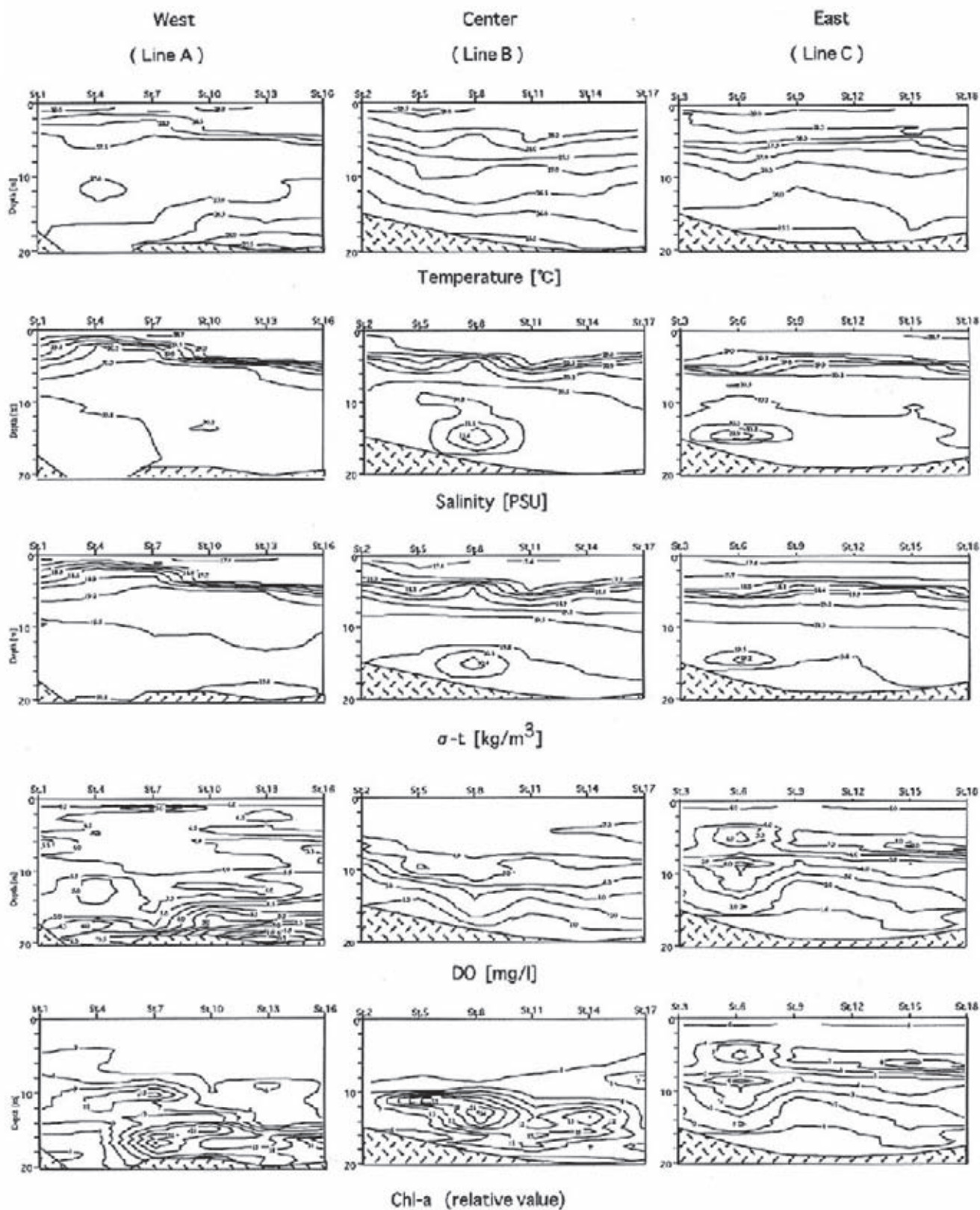


図3.1 大村湾における成層期の水温、塩分、密度($\sigma-t$)溶存酸素(DO)、クロロフィルa(相対値)分布の南北鉛直断面(1997/8/25)
 Fig.3.1 Vertical sections of temperature, salinity, density ($\sigma-t$), dissolved oxygen (DO) and chlorophyll-a on the observational lines A, B and C among the period of stratification in Oomura Bay on 25 August, 1997.

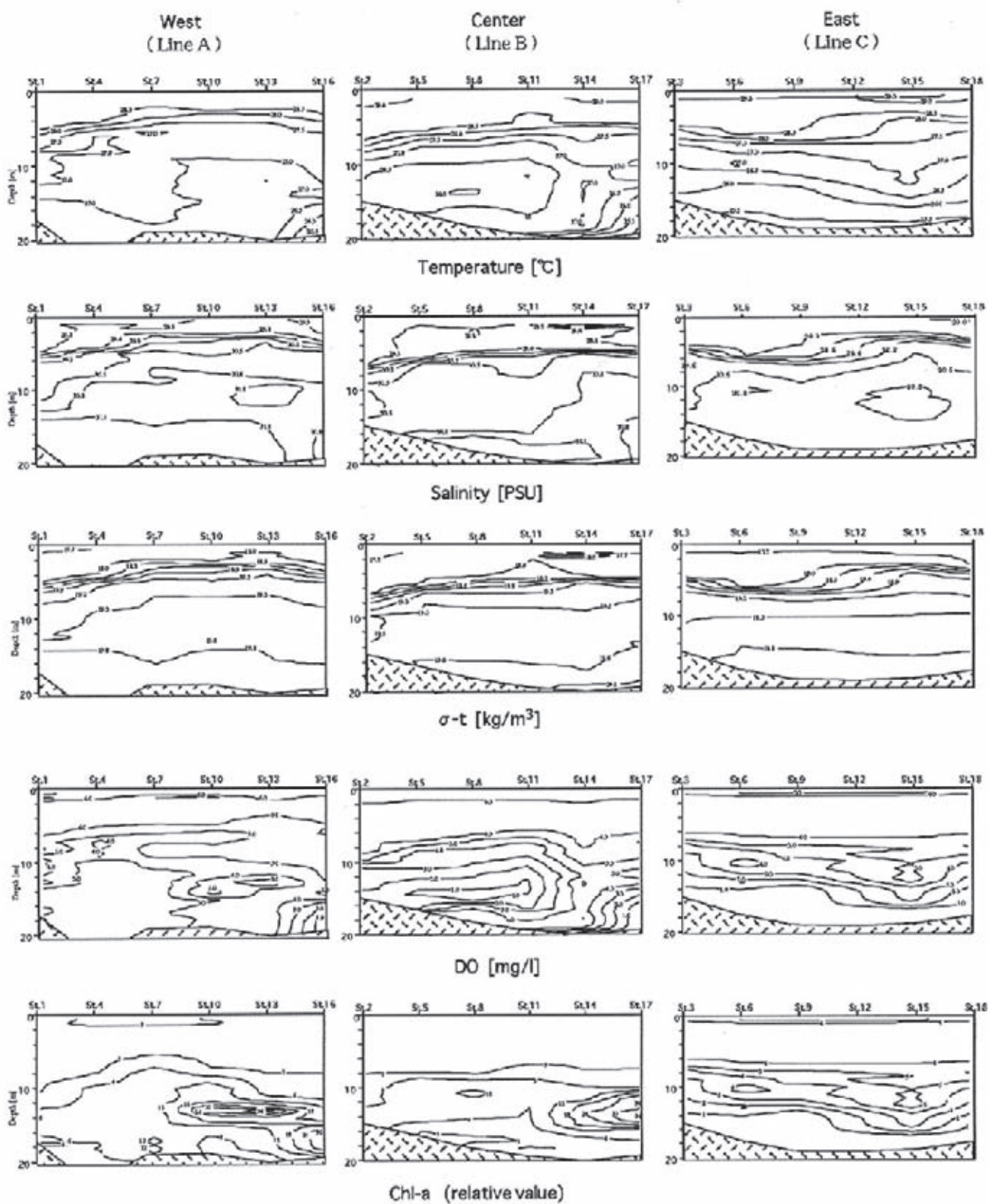


図3.2 大村湾における成層期の水温、塩分、密度(σ -t)溶存酸素(DO)、クロロフィルa(相対値)分布の南北鉛直断面(1997/8/29)
 Fig.3.2 Vertical sections of temperature, salinity, density (σ -t), dissolved oxygen (DO) and chlorophyll-a on the observational lines A, B and C among the period of stratification in Oomura Bay on 29 August, 1997.

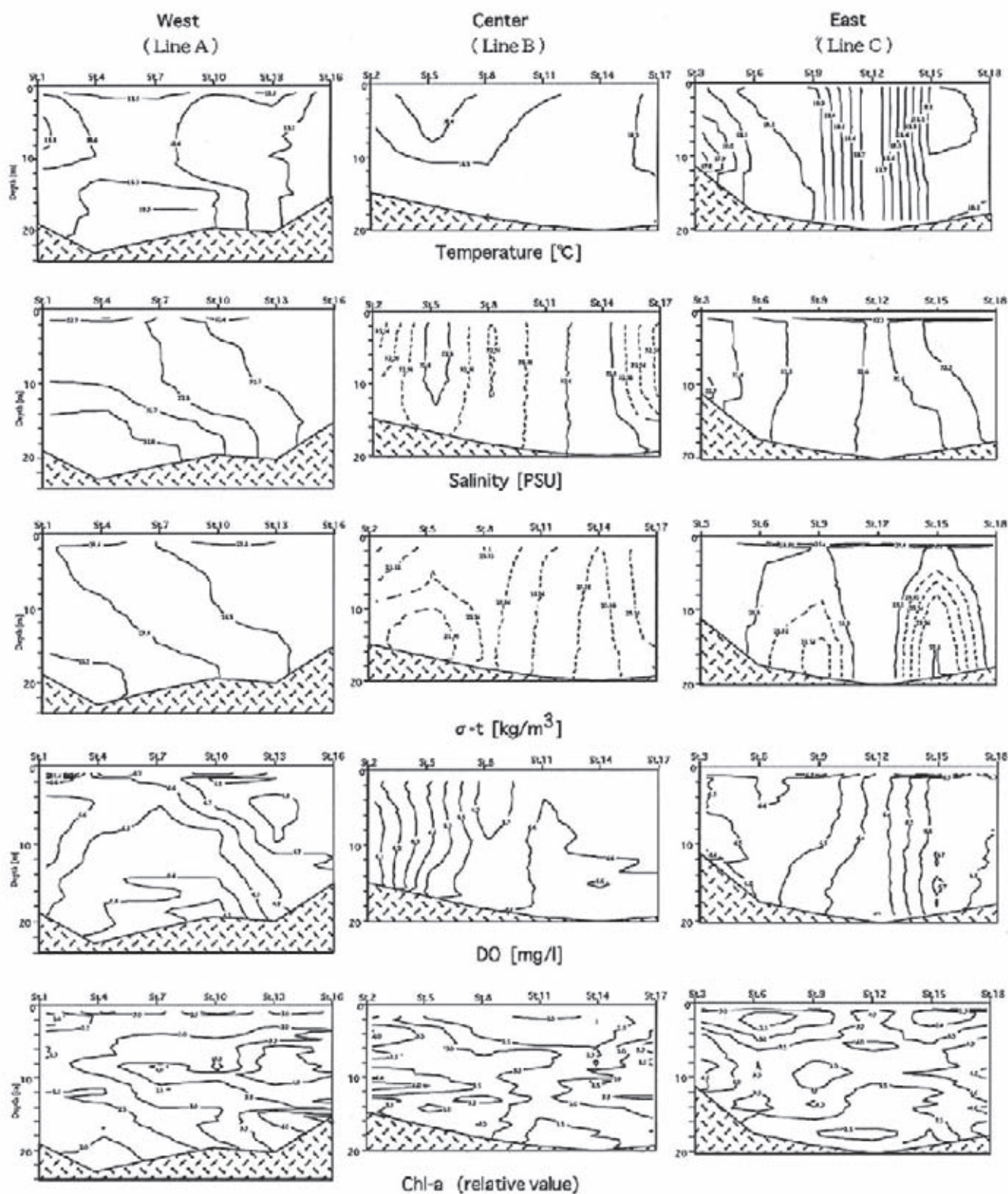


図3.3 大村湾における非成層期の水温，塩分，密度(σ -t)溶存酸素(DO)，クロロフィル a (相対値)分布の南北鉛直断面(1997/11/19)
 Fig.3.3 Vertical sections of temperature, salinity, density (σ -t), dissolved oxygen (DO) and chlorophyll-a on the observational lines A, B and C among the period of non-stratification in Oomura Bay on 19 November, 1997.

6月下旬から7月上旬にかけては強風による悪天候のため、水温躍層はあまり強く発達せず、西側測線で南部の上層から北部へ向かって躍層が崩れていく様子が見られた(図3.6)。塩分躍層は水温躍層よりも明確に見られたが、これは降雨により塩分差が大きくなったためと思われる。また、シーバード社製のSBE16(CTD)を用いて湾中央部の海底上50cmで水温、塩分、溶存酸素(DO)を計測した。この時期すでに海底の貧酸素化は進んでおり、計測開始直後のDO値は、1.3ml/lであった。時間の経過とともに水温はわずかに上昇の傾向にあったが、塩分、密度、溶存酸素には明確な下降傾向がみられた(図3.7)。

8月下旬は、1997年の顕著に表れていた上層近くの躍層が明確ではなく8月24日の時点で、10m以浅はほぼ一様であった。しかし、それ以深から海底にかけて躍層が

発達していた。1997年の同時期とは躍層の発達する深度は異なるが、貧酸素水塊の発達は著しく、特に中央から東側にかけて発達していた(図3.8)。

また、Q I製のミニ海中エレベータを用いたCTD連続観測から次のようなことがわかった。初めは水温躍層が明確で、底層に低温水塊が存在していたが、8月25日にその水塊が消えると水温躍層は弱まった。8月24日から25日にかけてのみ表層の水温が低下しているのは、24日の降雨のためと思われる。塩分は、8月24日頃までは塩分躍層が明確ではなかったが、それ以降深度10m付近に躍層が形成されていく様子が見える。

密度は、前半は低温水塊、後半は塩分躍層影響を強く反映していた(図3.9)。

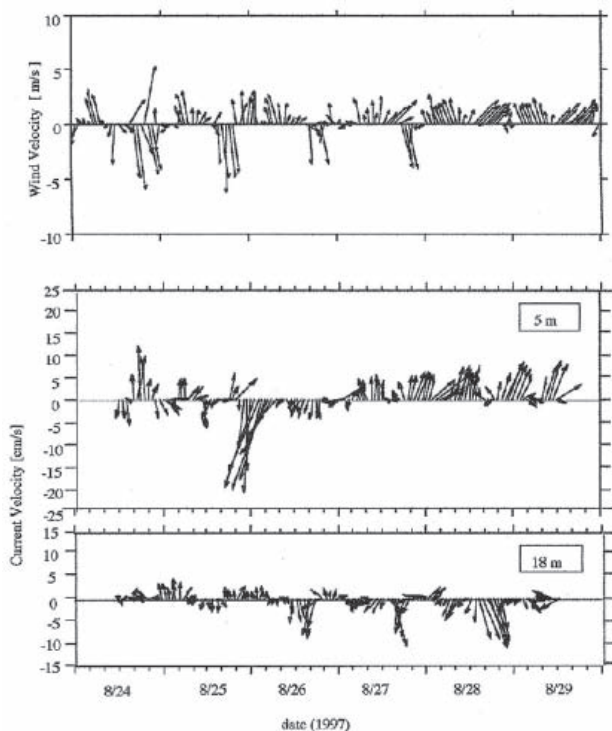


図3.4 大村湾定点モニタ海域(St.13)における流れのスティックダイアグラムと風ベクトルの比較。上から風ベクトル、上層(深度約5m)の流れ、底層(深度約18m)の流れ。1997年8月24日から8月29日の1時間毎のデータ。

Fig.3.4 Stick diagrams of the current velocity and wind vector at the fixed observation point (St.13) of upper layer (5m depth) and bottom layer (18m depth) on Oomura Bay. Data interval is one hour from 24 to 29 August, 1997.

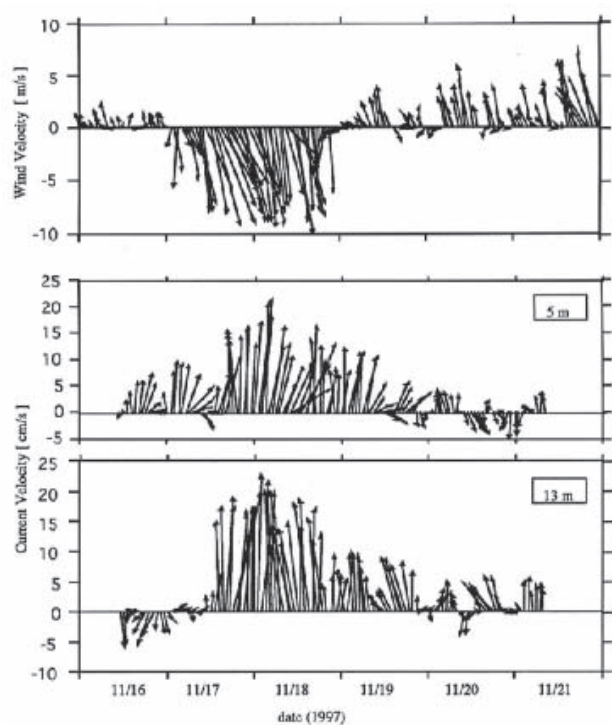


図3.5 大村湾定点モニタ海域(St.13)における流れのスティックダイアグラムと風ベクトルの比較。上から風ベクトル、上層(深度約5m)の流れ、中層(深度約15m)の流れ。1997年11月16日から11月21日の1時間毎のデータ。

Fig.3.5 Stick diagrams of the current velocity and wind vector at the fixed observation point (St.13) of upper layer (5m depth) and middle layer (15m depth) on Oomura Bay. Data interval is one hour from 16 to 21 November, 1997.

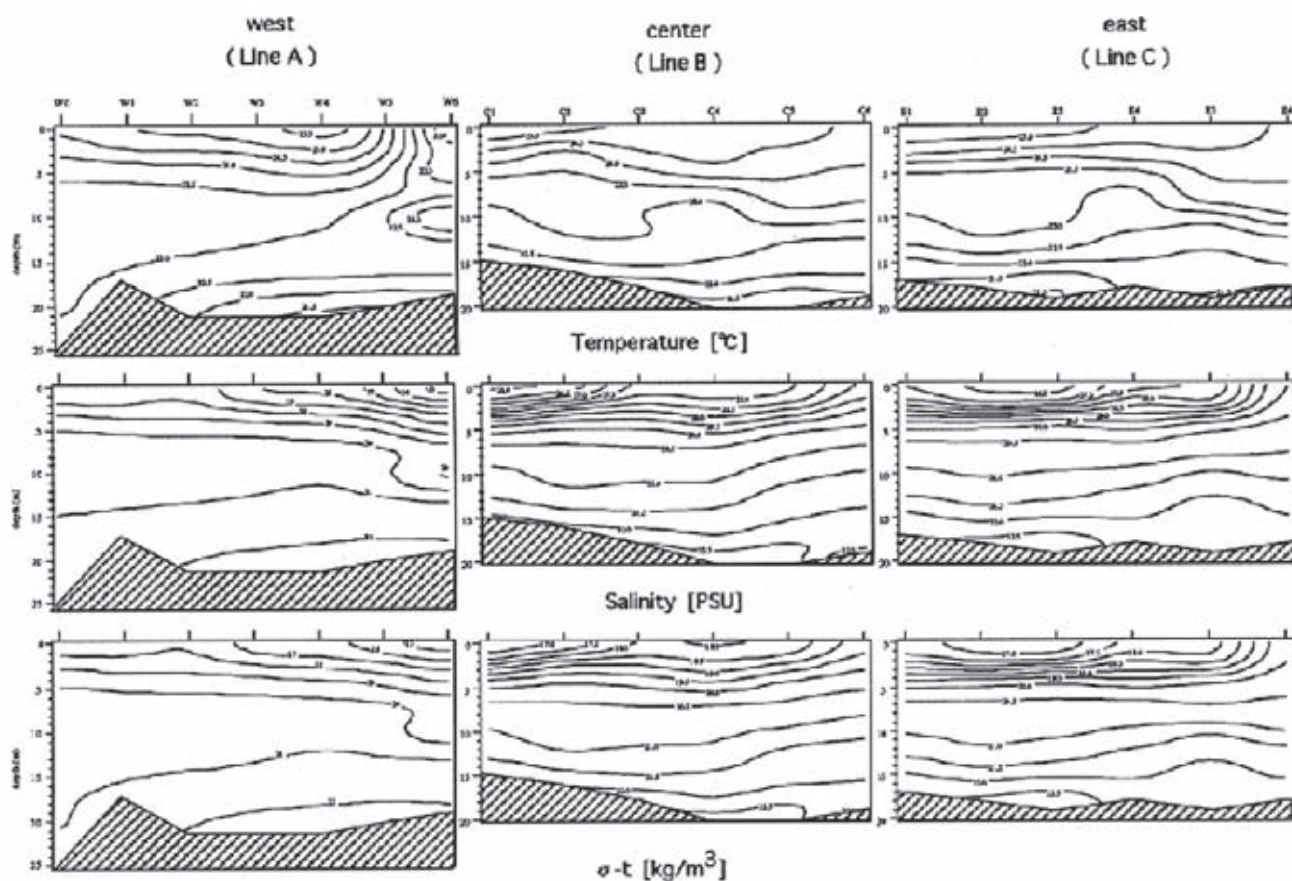


図3.6 大村湾における水温、塩分、密度(σ -t)の南北鉛直断面分布 (SBE25による計測) 1998/6/29

Fig.3.6 Meridional vertical sections of temperature, salinity and density (σ -t) on the observational lines A, B and C in Oomura Bay on 29 June, 1998.

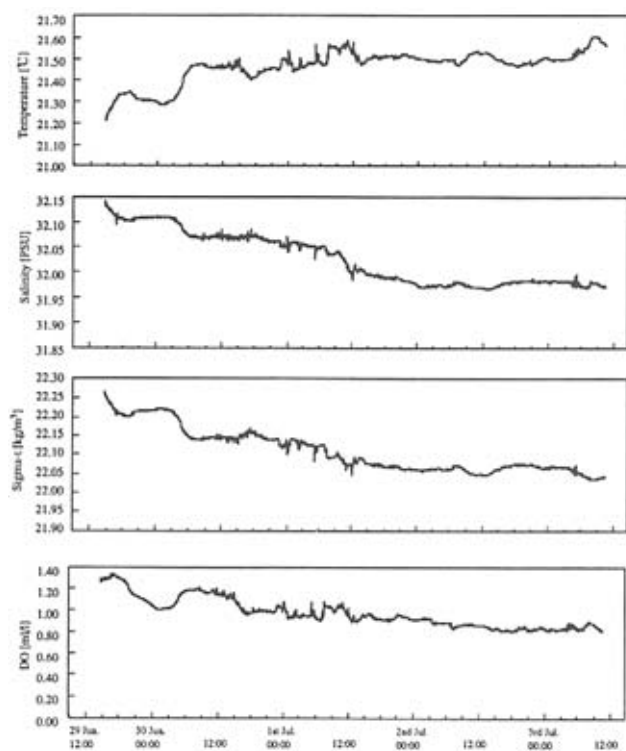


図3.7 大村湾中央 (St.14: 水深21m) の海底直上50cmにおける水温、塩分、密度および溶存酸素の時系列。3分毎のSBE16による計測。1998/6/29-7/3

Fig.3.7 Time series of temperature, salinity, density and dissolved oxygen (DO) at the St.14 of bottom in Oomura Bay. They were measured by SBE-16 (CTD with DO) from 29 June to 3rd July, 1998.

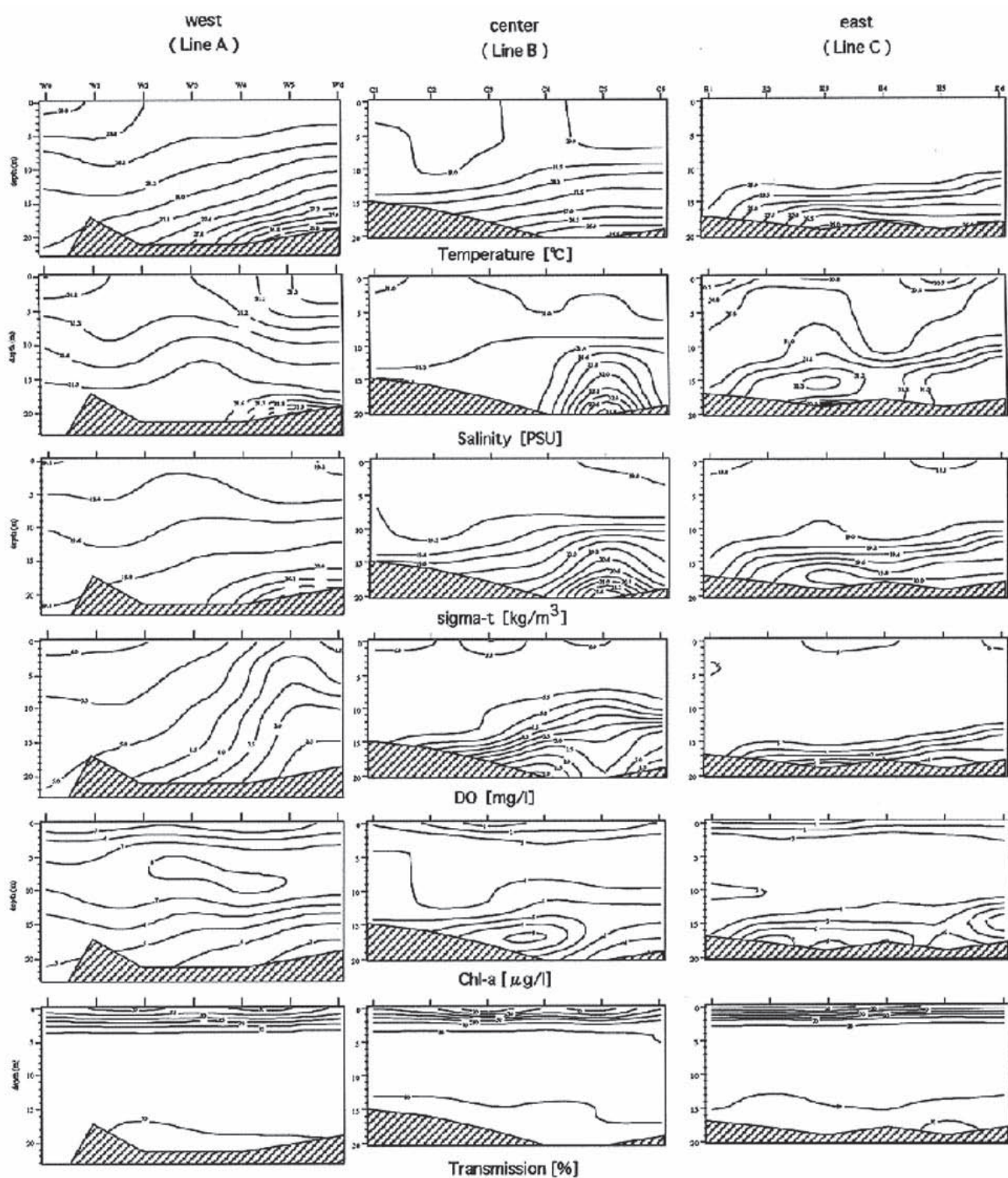


図3.8 大村湾における水温、塩分、密度(σ -t)、溶存酸素、クロロフィル a、透過度の南北鉛直断面分布 (SBE25による計測) 1998/8/24
 Fig.3.8 Meridional vertical sections of temperature, salinity, density (σ -t), dissolved oxygen, chlorophyll-a and transmission on the observational lines A, B and C in Oomura Bay on 24 August, 1998.

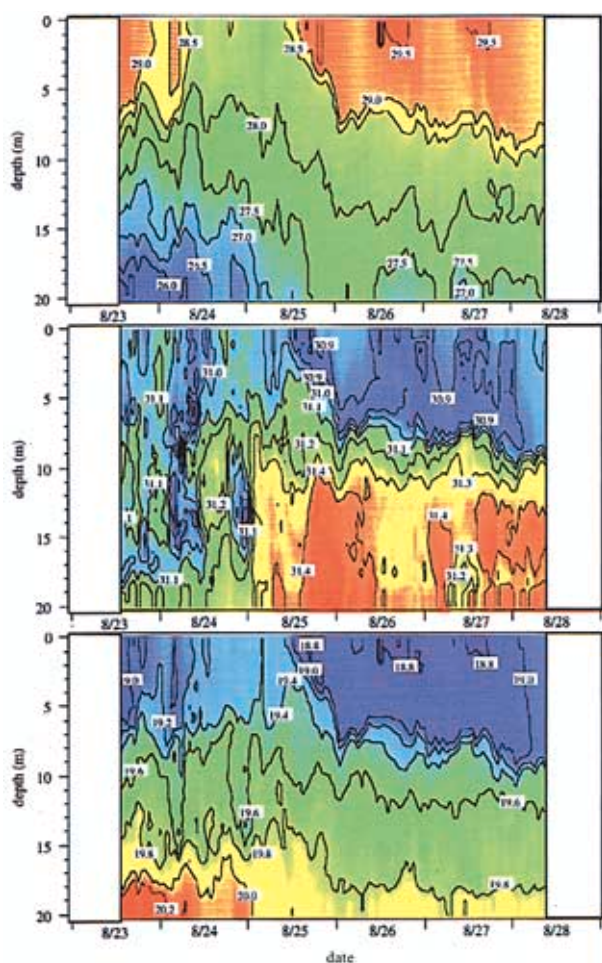


図3.9 大村湾定点観測地点(St.13：水深20m)における水温，塩分，密度のイソプレット。Q I ミニ海中エレベータによる1時間毎の計測(1998/8/23-8/28)。

Fig.3.9 Isopleths of temperature, salinity and density at the fixed observational point in Oomura bay (St.13). They are measured by QI mini underwater elevator system at each one hour from 23 to 28 August, 1998.

3.2.2 流動場

大村湾中央部(St.14)の3層(3 m, 10m, 19m)の流れを比較すると，上層の流れは，北への流れが卓越し，風向きと一致する部分が多く見られた。不規則に南向きの流れに転向する部分が見られるが，潮汐周期とは一致しなかった。中層の流れは，上層，下層のどちらの流れとも一致せず，風や潮汐パターンとも一致していなかった。下層は，一部(6月29日と7月1日)中層と逆向きの流れが見られるが，それ以外は中層の流れと一致する部分が多く見られた(図3.10)。

この時期は成層がまだ顕著に発達していない6月下旬であるため，明確な流動特性が現れなかったと思われる。

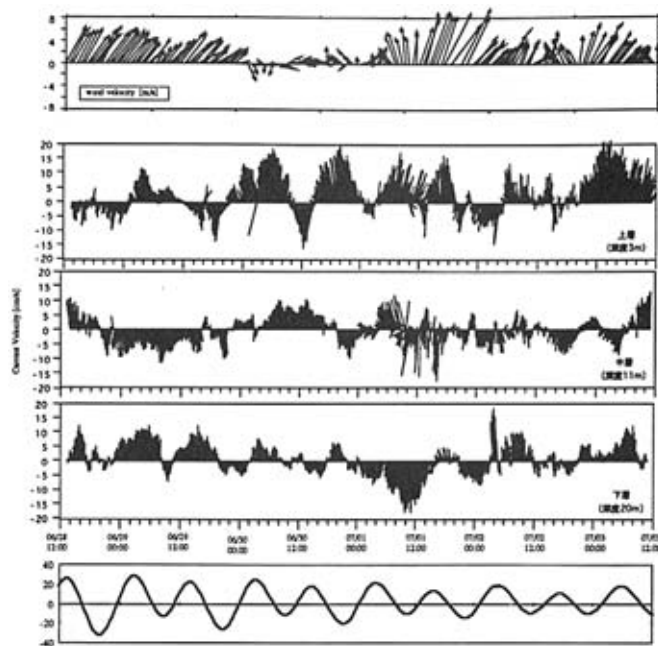


図3.10 大村湾中央(St.14：水深21m)における上層(深度3 m)，中層(深度11m)，下層(深度20m)での流れのスティックダイアグラムと風向風速(最上段)，潮位変動(最下段)との比較。1998年6月28日から7月3日の期間，5分間隔で計測。

Fig.3.10 Stick diagrams of the current velocity at the fixed observational point (St.14) of upper (3m depth), middle (11m depth) and lower layer (20m depth) on Oomura Bay. They were compared with wind vector (top figure) and tide (bottom figure). Data interval is five minutes from 29 June to 3rd July, 1998.

大村湾西岸南部(St.16)の海底に設置した超音波多層流速計によって，5層の流速分布を得た。第1層はほぼ風と同様の流れとなっているが，それ以深の層では細かい変動が大きくはっきりとした傾向はみられなかった。下層へ向かっての流速の減少は少なく，第5層(深度14m)においても20cm/s以上の流れが見られた(図3.11)。そこで，25時間移動平均をとってみると吹送流の影響があるのは第1層だけで，第2，3層ではほとんど流れないことがわかった。また，第4，5層では10cm/s未満の弱い南向きの流れが卓越しており，風向とほぼ一致することがわかった(図3.12)。

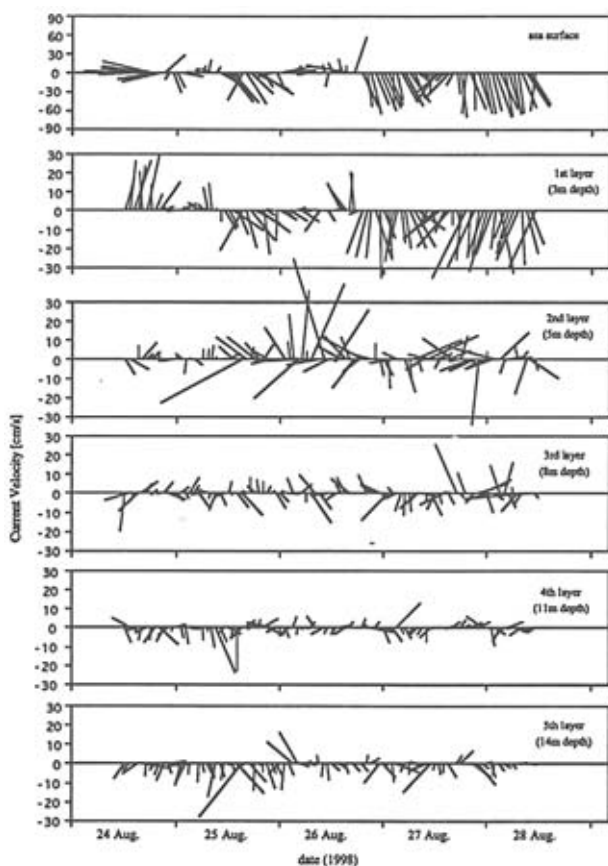


図3.11 大村湾西岸南部(St.16：水深20m)における超音波多層流速計による流れのスティックダイアグラムの鉛直分布。1998年8月24日から8月28日の期間、1時間毎のデータ。海面以外の5層の流速は、層厚約5mの平均値。

Fig.3.11 Vertical distribution of stick diagrams of the current velocity at the west part of Oomura Bay (St.16: 20m water depth). They are measured by ADCP. Data interval is one hour from 24 to 28 August, 1998.

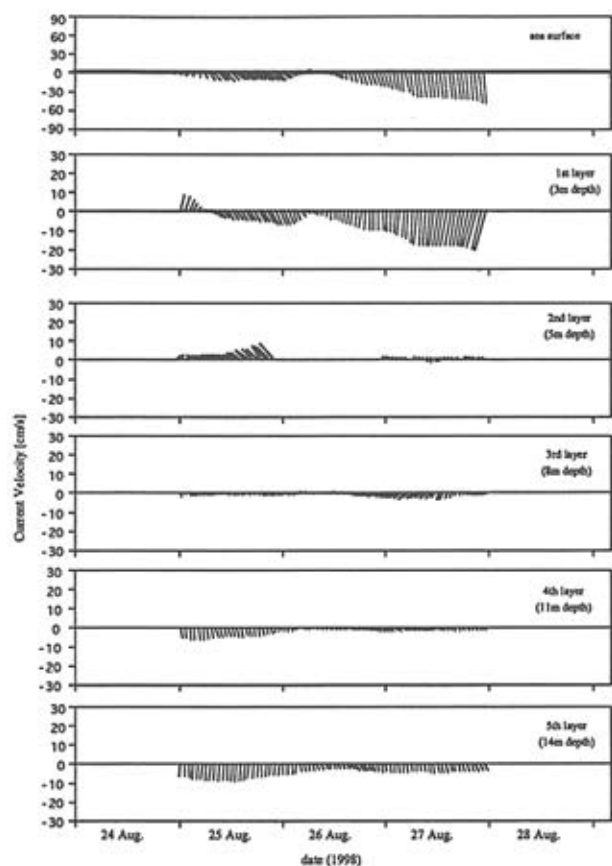


図3.12 大村湾西岸南部(St.16：水深20m)における超音波多層流速計による流れのスティックダイアグラムの鉛直分布。1998年8月24日から8月28日の期間、25時間移動平均データ。

Fig.3.12 Vertical distribution of stick diagrams of the current velocity at the west part of Oomura Bay (St.16: 20m water depth). They are measured by ADCP. These data are processed by twenty-five hours running mean.

4. 考察

4.1 DOの水平分布変動

大村湾の海底地形は、ほぼ20m前後の平坦な海底が湾中央部に広がっている(図4.1)。貧酸素水塊の空間的分布変動を調べるため、広域調査を実施した18個の定点で得られたSBE25のデータから、水温、塩分、DOの海底直上の水平分布図を作成した。また、DO鉛直断面図を時間順に並べ鉛直断面の時間変化を比較するとともに、クロロフィルaの鉛直断面図とも比較検討した。

1997年8月に実施した5日間の連続観測から初日(25日)の海底直上のDO分布を見ると、北西部の佐世保湾からの影響の強い部分を除いて、ほぼ全域が貧酸素状態で特に東側(空港側)は無酸素状態に近かった。時間の経過

とともに、北西部にあったDO値のやや高い領域(4mg/l)が南下しながら広がり、北緯32度57分30秒あたりから東へも広がっていく様子がわかる。5日後には貧酸素域が2分の1以下に減少している。この分布の変化は、高温低塩分水の分布と非常によく一致している。また、このときの海底付近の流れは5~10cm/sの南下流が卓越している。これらのことから、佐世保湾からの外洋水と海底地形が貧酸素水塊の発達に大きく影響していることがわかった(図4.2)。

4.2 DOの鉛直分布変動

大村湾を南北の断面で切って、西側、中央、東側の3つの断面におけるDOの鉛直分布図を作成した(図4.3)。

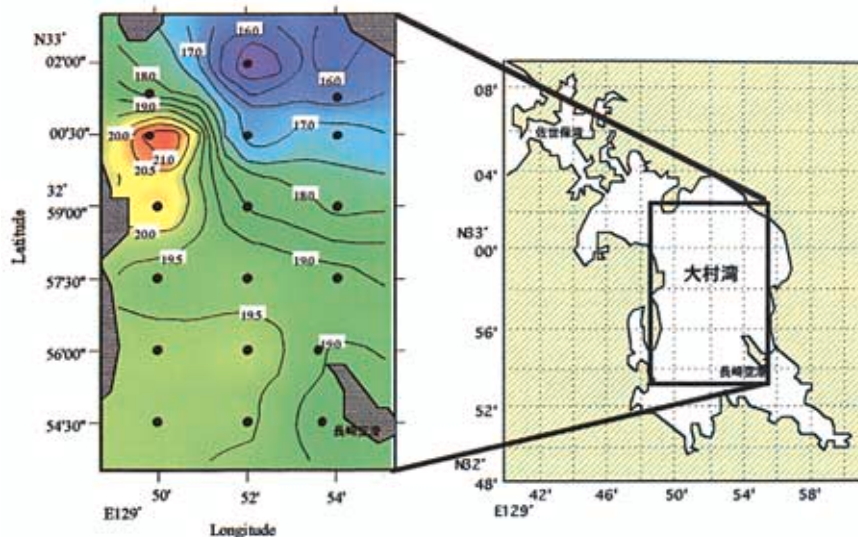


図4.1 大村湾でのC T D広域観測から得られた水深図。黒丸は観測点を示す。

Fig.4.1 Water depth map measured by CTD observation in Oomura Bay. These contours are interpolated from 18 points of observation stations (black circle).

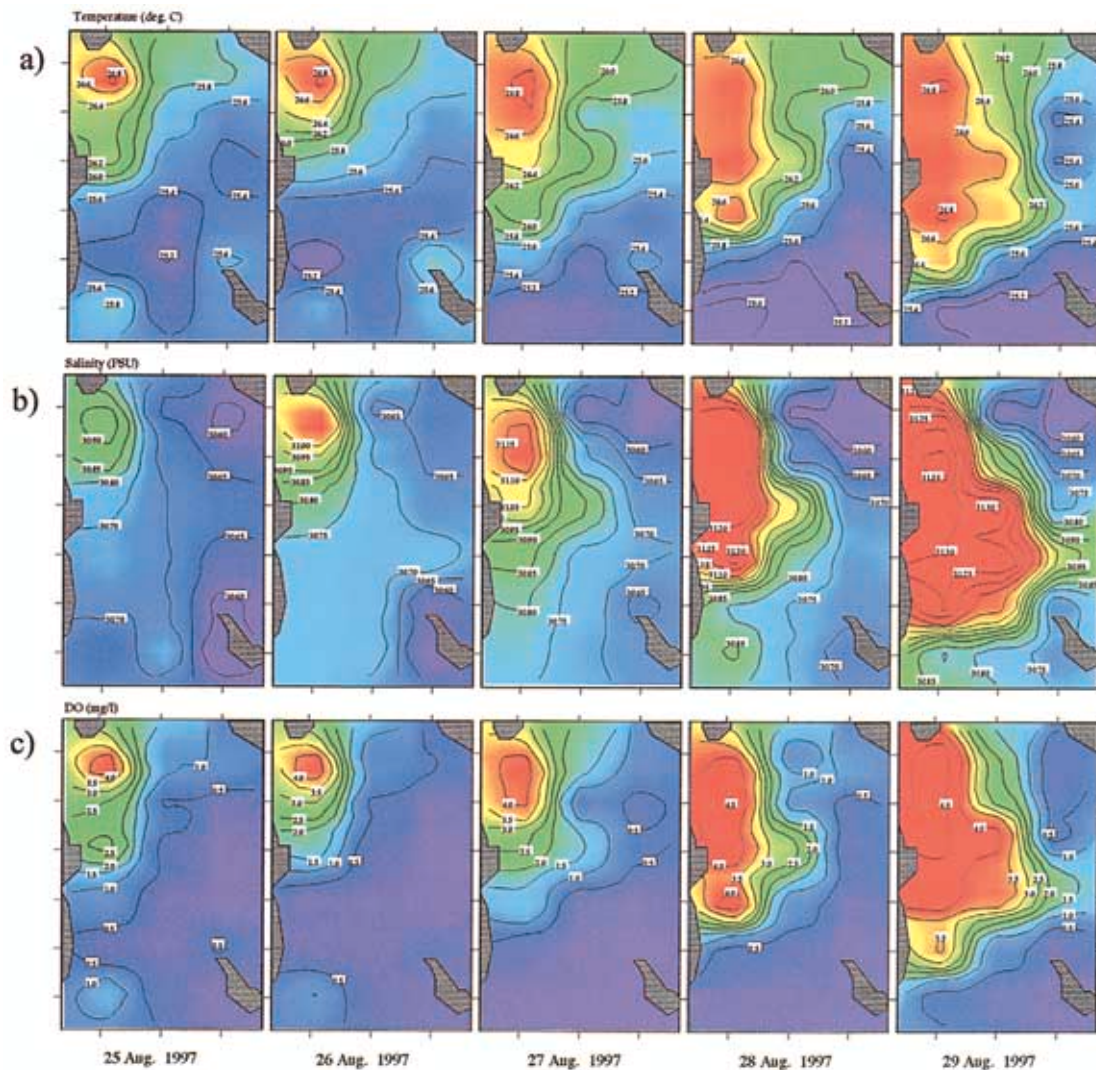


図4.2 海底直上における水温 (a), 塩分 (b) および溶存酸素 (c) の空間分布の時間変化の様子。1997年8月25日から8月29日の連続観測。

Fig.4.2 Time variation of horizontal distribution of temperature (a), salinity (b) and dissolved oxygen (c) from 25 to 29 August, 1997.

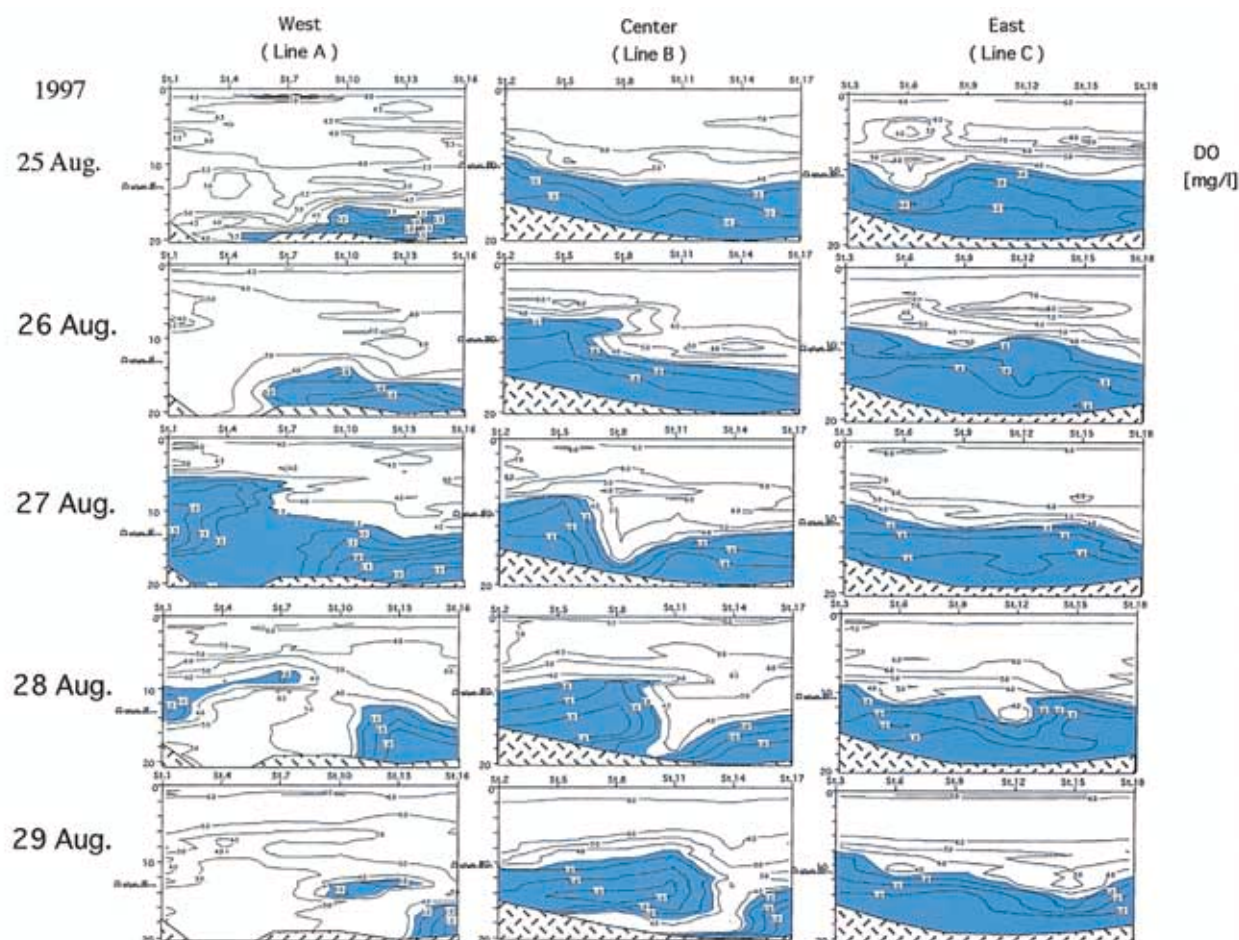


図4.3 大村湾の南北方向断面における貧酸素水塊 ($DO \leq 3.5 \text{ mg/l}$: 青色部分)の時間変化。1997年8月25日から8月29日の連続観測。

Fig.4.3 Time variation of three vertical sections of oxygen-deficient water mass (part of blue color) in Oomura Bay from 25 to 29 August, 1997.

西側断面をみると、南部の海底から貧酸素水塊が海底をほうよう北部(佐世保湾側)へ広がっていくように見える。28日以降大きく広がった貧酸素水塊が縮小し、逆に南方に押し戻されたように見えるが、これは海底直上の水平分布で見られた佐世保湾からの富酸素の外洋水が侵入してきたためと考えられる。

また、中央と東側の断面においては、貧酸素水塊が海底側にくびれて、上層の富酸素水が沈み込んできているように見える部分が存在する。同じ断面におけるクロロフィル a の分布(図4.4)と比較してみると、前述の貧酸素水塊のくぼみ付近には高濃度のクロロフィル a のパッチが存在していた。つまり、植物プランクトンのパッチによって貧酸素水塊の発達を抑えられていることがわかった。しかし、植物プランクトンのパッチは、時間とともに規模や水深が変化していくので、貧酸素水塊の時間変化を複雑にしている。

5. おわりに

大村湾における物理環境については、流動攪拌装置設置予定地点周辺において、主に海水流動調査を中心に解析を行った。また、貧酸素水塊の挙動については、大村湾全域の水温、塩分、密度、溶存酸素、クロロフィル a の水平および鉛直分布について解析した。そのため、湾全体の海水流動と貧酸素水塊の挙動との関係が十分に把握できなかった。湾全体の3次元的海水流動を観測によって捉えることは物理的に困難である。そこで、有効な手段となるのが数値モデルの利用である。今回は貧酸素水塊の現状把握に留まったが、今後は、数値モデルを用いて、観測された流動場を再現するとともに、貧酸素水塊の挙動をシミュレーションすることによって、その発生、発達、消失過程について議論していく予定である。

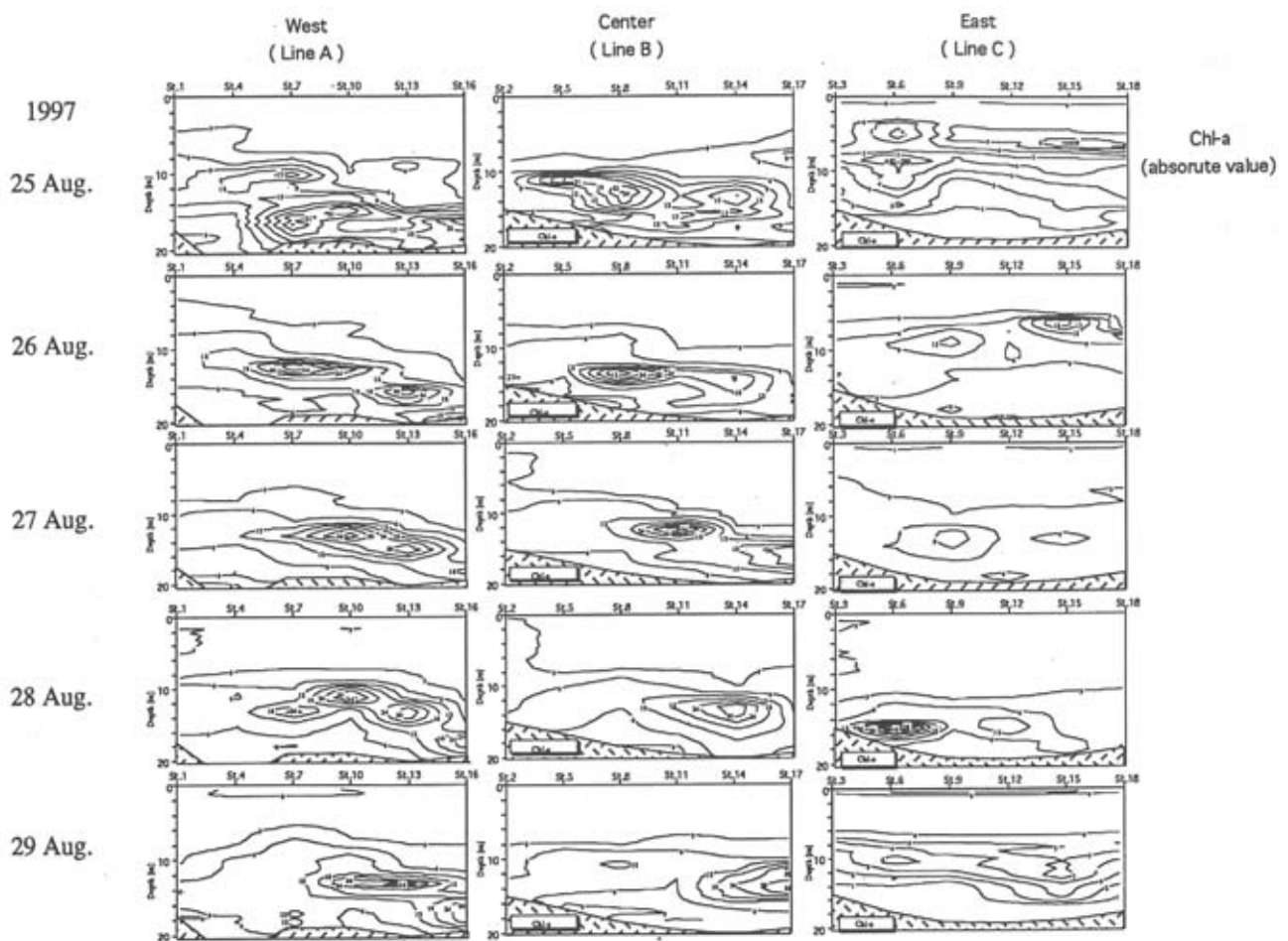


図4.4 大村湾の南北方向断面におけるクロロフィル a の鉛直断面分布の時間変化。1997年8月25日から8月29日の連続観測。
Fig.4.4 Time variation of three vertical sections of chlorophyll-a in Oomura Bay from 25 to 29 August, 1997.

謝辞

最後に、大村湾における海洋観測全般に渡ってご協力頂いた大村湾南部漁業共同組合長浦支所の方々に感謝する。また、CTD観測時にご協力頂いた長崎大学水産学部 of 学生諸氏にも合わせて感謝する。

参考文献

- 1) 飯塚昭二：“大村湾。”p.879-900. In：日本全国沿岸海洋誌，日本海洋学会・沿岸海洋研究部会編，東海大学出版会，東京，pp. (1985)
- 2) 柳 哲雄：沿岸海洋学－海の中でのものはどう動くか－。恒星社厚生閣，東京，154pp. (1989)
- 3) 香月幸一郎・本多邦隆・松尾征吾：大村湾におけるリン濃度の変動，水環境学会誌，20，9，p.616 - 621 (1997)
- 4) 中辻啓二・石塚正秀・金種仁：大阪湾の流れと密度場の鉛直構造，海と空，73(2)。(1997)
- 5) 宇野木早苗：沿岸の海洋物理学。東海大学出版会，東京，672pp. (1993)
- 6) 野上真子：大村湾の底層における貧酸素水の形成機構について，長崎大学水産学研究科修士論文，46pp. (1997)
- 7) 福本正・多田彰秀・中村武弘・富樫宏由，海岸工学論文集，43，1，p.396-400(1996)
- 8) 福本正・中村武弘・富樫宏由・三厨晋也：大村湾の潮流の数値シミュレーション解析，土木学会西部支部研究発表会講演概要集，1989，p.164-165(1990)
- 9) 中村武弘・富樫宏由・加藤重一・飯塚昭二：大村湾の潮流に関する研究 I，長崎大学工学部研究報告，19，33，p.69-75(1989)

(原稿受理：2000年1月25日)