

2004 年度 修 士 論 文

諫早湾における貧酸素水塊の動態に関する研究

Study on Isahaya Bay with the Recent Occurrence of Hypoxic
Water

深山 顕寛

Fukayama, Akihiro

東京大学大学院新領域創成科学研究科

環境学専攻 社会文化環境コース

目次

論文要旨	
記号一覧	
第1章 序論	1
1.1 目的	2
1.2 既往の研究	3
第2章 水質に関する現地観測とその結果、考察	6
2.1 現地観測および方法	6
2.1.1 現地観測の概要	6
2.1.2 調査地点と日時	6
2.1.3 観測項目	9
2.1.4 観測機器	10
2.1.5 観測方法	11
2.2 観測結果、考察	14
2.2.1 2001 年 7 月の観測結果	15
2.2.2 2002 年 7 月の観測結果	17
2.2.3 2003 年 7 月の観測結果	25
2.2.4 2004 年 7 月の観測結果	31
2.2.5 成層崩壊の判断について	43
2.2.6 密度成層への水温と塩分の寄与度について	45
2.2.7 湾外からの淡水の影響	47
2.2.8 風と成層崩壊	49
2.2.9 プラント・バイサラ周波数と密度成層の崩壊	52
第3章 流況に関する現地観測とその結果、考察について	54
3.1 現地観測および方法	54
3.1.1 現地観測の概要	54
3.1.2 調査地点と日時	54
3.1.3 調査項目	55
3.1.4 観測機器	55
3.1.5 観測方法	56
3.2 観測結果、考察	58
3.2.1 シアと成層状態の関係	61
第4章 結論と今後の課題	65
4.1 結論	65
4.2 今後の課題	66

参考文献

謝辭

論文要旨

2000 年度の海苔の色あせが社会問題になり、第三者委員会も設置され有明海が注目され始めました。その一方でタイラギやアサリがへい死する被害が多数報告されています。その原因となっているのが、貧酸素化の発生や貧酸素水塊の形成である。しか東京湾や大阪湾に比べると研究事例はまだ少なく、また連続観測の不足から、有明海における貧酸素水塊形成の実体には不明な点が多くあります。そこで本研究では多項目水質の長期連続観測を実施し、過去 4 年間に発生した貧酸素化の過程を把握し、水質変動の支配要因を明らかにすることを目的とする。

まず現地観測を行った。本研究室において 2003 年度 2004 年度は、B6、四本鋼管において水質と流況に関して B5 において流況に関して長期連続観測を行った。そして現地データを分析することで、貧酸素化にともなう現象を探った。

現地データ生データ時系列に並べることで応答関係を見ることは基礎研究にとってとても重要である。まず 1 つずつ挙動を観察し、次に各水質との相互関係を分析した。

結果として夏季において密度成層が貧酸素現象の支配要因であることを 2001 年から 2004 年の観測データから示した。また成層の形成に関して水温と塩分どちらが密度成層形成に影響するか検討した。塩分差の方が水温差に比べて影響する事が明らかになった。そして成層形成時の水塊のかたむきについて風速ベクトルとともに議論した。また成層の解消にともない底層の D0 も上昇するので、成層の崩壊に関してプラント・バイサラ振動数とシアを用いて検討した。結果としてシアと水粒子の振動が影響していることがわかった。

記号一覧

g	重力加速度
H	層厚
h	層厚
i	層番号
N	ブラント・バイサラ角周波数
S	シア
t	時間
u	水平流速
z	z 軸
$\rho_0(z)$	密度の鉛直勾配
ζ	微小距離
Δu	二層流体における上層と下層の 密度差

第 1 章

序論

諫早湾は、九州の有明海の北西部に位置する。有明海は閉鎖性内湾であり、物理、化学、生物の面において微妙なバランスによって形作られた独特な自然環境にある。日本の干潟総面積の約 49%を占める干潟、満潮時最大 5m 以上に達する潮位差による潮流効果、汚濁物質を凝集沈降させる浮遊底泥の効果などもあり、水中で植物プランクトンなどが異常に増殖して、水の色が赤褐色などに変わる現象である赤潮の発生などの現象が抑えられてきた。しかし 1980 年の調査データには既に赤潮発生が認められ、また水中に溶解している酸素の量である溶存酸素（以下 DO とする）の値が、底層において極端に小さくなり水生物が生存できない状態である貧酸素水塊に関しては 1999 年 6 月諫早湾湾口部において底層溶存酸素濃度 30%が観測された（佐藤ら, 2001）。

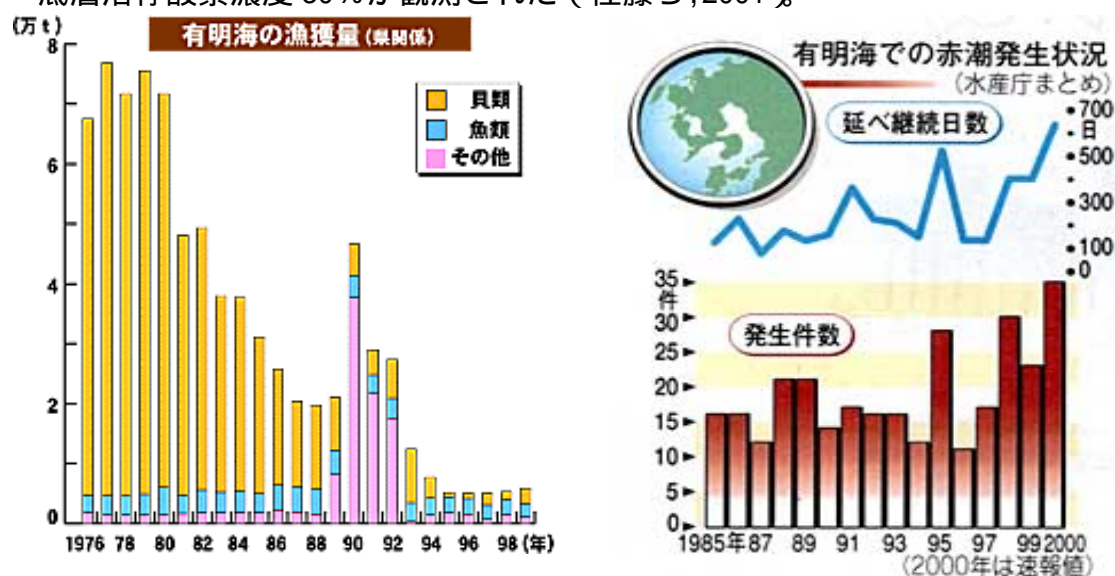


図 1.1：有明海の漁獲高と赤潮の発生頻度

ここ数年有明海の漁獲量が減少し、赤潮の発生回数が増加してきた(図 1.1)。そのような状況の中で有明海中北部を中心に 2000 年 12 月から 2001 年 3 月にかけて、植物プランクトンである浮遊性珪藻 (*Rizolenia imbricata*) を独占種と

する大規模珪藻赤潮によって養殖ノリに著しい色落ちが発生し、養殖ノリ産業に大きな経済的ダメージをあたえた。これを契機として諫早湾も含め有明海に発生する赤潮に関心が向けられるようになり、第三者委員会を設ける事にもなった。以上のことから漁業環境が大きく変化していると思われる。

有明海は周辺に多くの都市部や農村地域を抱える半閉鎖的な海域であり、本来陸域からの負荷により富栄養化や汚染が進行しやすい海域である。その為、赤潮が頻繁に起こり、追隨して、貧酸素水塊も頻繁に形成されるようになってきた。このような現象の発生によって、水中の魚介類特にタイラギやアサリ等の二枚貝が死滅し、大きな漁業被害が起こっている。

以上述べてきたように、貧酸素化現象は漁業だけではなく海の生態系も壊す原因となっており、きわめて重要な問題である。貧酸素化を改善していくための施策を考える上で、貧酸素化の形成、消滅のメカニズムの解明が必要である。

1.1 目的

有明海は東京湾や伊勢湾とは異なり、連続観測の不足から、富栄養現象の実体には不明な点が多く、現在の状況もよくわかっていない。そこで多項目水質の長期連続観測データを行うことで、二枚貝等、底生生物のへい死要因の1つとして指摘されている貧酸素水塊に着目し、その形成、消滅のメカニズムを気象・流動・水質との関係を明らかにすることを目的にする。また対象地域は諫早湾を取り上げた。諫早湾は農林水産省を初め観測積極的に行われ、多くの点で連続観測が現在行われている。本研究室では2001年から有明海において観測をしていて多くの観測データが蓄積され2003年度2004年度も水質観測を続け、2004年度は3点においてADCPを利用した流況観測も行った。そして誰も研究室の全てのデータを、分析していなかった事と研究フィールドとしても先程あげた東京湾等に比べ研究が少なく未解な事が多く調べる事がたくさんあることから研究フィールドとして諫早湾を選択した。そして何よりも諫早湾を含む有明海の魚や貝が食べれなくなってしまう可能性があることである。なんとかしてこの2枚貝のへい死の原因とされている貧酸素水塊の発生原因をつかみたい。

1.2 既往の研究

日本の内湾域のほとんどは河川流入のあるエスチャリー（淡水影響のある沿岸海域）である。エスチャリーでは上層が淡水に覆われるため、強い密度成層が形成されることがおおく、またエスチャリー循環と呼ばれる鉛直循環流が形成され、これらの物理過程はエスチャリーの水質動態を支配する主要な要因となっている。本研究のフィールドである諫早湾の湾口付近もこのような循環が起こっていると考えている。また本研究は貧酸素水塊の形成の過程に関して成層に注目して進めているので、既往の研究に先立って簡単に成層について簡単に述べる。図1.2にエスチャリーの断面の模式図を示す。エスチャリーを特徴付ける河川水は海水に比べて軽いため、上層水は下層水よりも軽い状態になり、水深方向に密度の正の勾配が形成される。この状態を密度成層、あるいは単に「成層」と呼ぶ。夏季になると上層水の水温も上昇するため温度の鉛直勾配によっても成層は強化される。静穏時の比較的定常な状態においては上層は主に風、下層は潮汐の海底摩擦による乱れによって混合され、隠そうのみつどは比較的一様近くなりこれら上下層の境界に密度の急変部である密度躍層が形成される。密度躍層では密度海面を通過する物質輸送が著しく抑制され、あたかも壁のような働きをする。その結果例えば図1に示すように上昇で増殖した植物プランクトンは上層内にとどまって、下層への輸送は抑制され、同時に上層で光合成により生産された酸素も下層への輸送が著しく抑制される。（佐々木、2004）

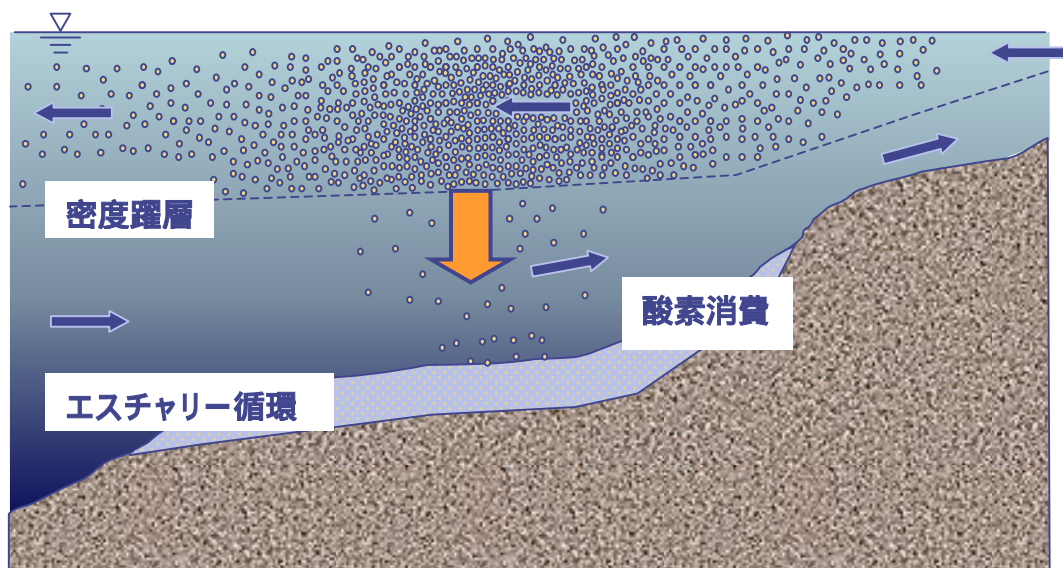


図1.2：エスチャリー断面の模式図

次に本研究でよく出てくる赤潮と貧酸素水塊についても記す。

◆赤潮：プランクトンが一時に急激に異常増殖し、海面が赤色又は赤褐色になる現象のこと。降雨の後日射が強く水温が高く栄養塩類が多い等の条件が重なった時に発生しやすいといわれている。場所によって異なり、有明海ではクロロフィル a 濃度で約 30 $\mu\text{g/l}$ と考えられている。

◆貧酸素水塊：有機物の分解やバクテリア等の微生物の呼吸により酸素濃度が乏しくなり生物が生息できない水塊ができる。この水塊のこと。いろいろ説があるが本研究では溶存酸素濃度で 3mg/l 以下とする（柳）。

諫早湾，有明海における調査は近年数多く行われている。一斉観測，短期的な観測や論文として投稿されているものは、夏季に集中している。これは貧酸素水塊の現象が夏季に発生していることを意味している。貧酸素水塊に関わる既往の研究について紹介する。

鯉淵ら（2002，2003）は諫早湾湾口にある櫓を用いて多項目水質の長期連続観測を実施し，2001 年 7 月から 2002 年 8 月までに発生した赤潮や貧酸素化の過程を把握し，水質変動の支配要因を明らかにした。それによればここで起きた赤潮，貧酸素水塊形成の過程は高水温，低風速で降水のない条件で，高い日射量が続くと、植物プランクトンが増殖して赤潮状態になり，2,3 日すると増殖したプランクトンが沈降し海底で酸化分解される際に，酸素が消費され貧酸素水塊が形成され、降水や高風速によってそれが解消されるというものであった。また諫早湾の水質には，筑後川をはじめとする湾外からの淡水流入が調整池からの排水と同様に大きな影響を与えている。さらに数値シミュレーションにより風に対応した貧酸素水塊の動態など一連の水質動態を明らかにされている。また考察として 2000 年のノリ不作が過去 10 年間できわめて例外的に冬季の日射量が大きく，窒素分も豊富にあったことがその原因であると推察された。

中山らは諫早湾口の北の方において多項目水質と流速ベクトルの長期連続観測を実施し貧酸素水塊の形成過程を調査した。2002 年の夏季には、風が弱く流れが弱い小潮時期に頻繁に貧酸素水塊の発生が見られたが、長期化や著しい DO の低下は見られなかった。貧酸素状態の発生、発達過程では、水温の成層が発達し、貧酸素状態の解消は風速依存しており、5m/s 以上の風が連吹することにより鉛直混合による水温成層の解消とともに、酸素消費を酸素供給量を上回り、溶存酸素濃度が急激に増加することを示唆した。

以上のようにこれまで貧酸素水塊形成原因は底層におけるバクテリアの分解による酸素消費、水温成層の発達によって貧酸素化起り、貧酸素解消要因とし

て 5m/s 以上の風が連吹すると解消される事がそれぞれ報告されている。
本研究ではその他に貧酸素化に関わる要因を検討する。



図 1.3：有明海の生物（左からタイラギ、アゲマキ、ムツゴロウ）

第 2 章

水質に関する現地観測とその結果、考察について

2.1 現地観測および方法

有明海の水質を把握するために現在、水産庁、環境省、農村振興局を中心に連続観測や一斉観測が行われている。また我々の研究室においても水質に関して測っている。以下において現地調査の詳細と得られた結果について説明する。

2.1.1 現地観測の概要

本研究では諫早湾および有明海の貧酸素水塊の形成や消滅に影響を及ぼす、水温、塩分、溶存酸素濃度(DO)、クロロフィル a、濁度の相互関係を把握するため、諫早湾、有明海を対象にして現地観測を行う。諫早湾内で 6 点、有明海で 1 点、各種水質計や多項目水質計を設置し、長期連続観測を行った。

2.1.2 調査地点と日時

本研究で扱ったデータに関して現地調査地点を図 2.1 に、扱ったデータの期間を表 2.1 に示す。有明海北西部には筑後川がある。この川は有明海に流入する河川の中でも約 60% (図 2.2) の流入量を有する。その為筑後川は有明海内へ淡水の影響を大きく与える(満田、1969)。その影響を受ける点として四本鋼管を選んだ。四本鋼管は平均水深 5m あり貧酸素水塊の現象を捉えられと考えられる。諫早湾内において農林水産省は 6 点の観測櫓を所有している。私は最初、有明海の水質動態を知りたかった。6 点の観測櫓の中で一番諫早湾の外側にある平均水深 17m の B6 を有明海の代表点として選んだ。四本鋼管の全期間と B6 の 2001 年から 2003 年 10 月の期間本研究室が中心となり連続観測を実施した。

先程記した農林水産省によって所有されている観測櫓では九州農政局が測定を行いそのデータの提供をうけた。観測点は 6 点である。諫早湾外からの影響を知ることと諫早湾口の貧酸素水塊の状況を知るために北から順に B4(平均水深 8 m)、B6 (平均水深 17m)、B5 (平均水深 15m) で観測を行った。諫早湾中央の貧酸素水塊の状況を知るために諫早湾中央の B3 (平均水深 8m) で観測を行った。諫早湾には潮受け堤防がありその北側と南側に排水門が備え付けられている。その南北排水門の前にある S6 (平均水深 3m)、S1 (平均水深 4m) で排水門の影響を検討することと排水門の前での貧酸素水塊の状況を見るために観測を行った。以上の観測地点により諫早湾内の貧酸素水塊の状況把握する。

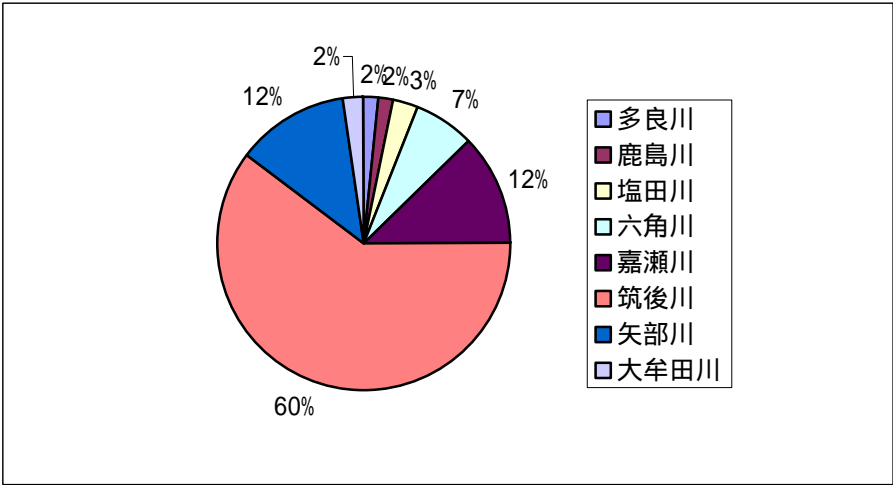


図 2.2：有明海に注ぐ河川流量の割合

表 2 . 1：場所ごとの分析期間

場所	分析期間
B3	2002 年 7 月～2004 年 9 月
B4	2002 年 7 月～2004 年 9 月
B5	2003 年 10 月～2004 年 9 月
B6	2001 年 7 月～2004 年 9 月
S1	2002 年 7 月～2004 年 9 月
S6	2003 年 10 月～2004 年 9 月
四本鋼管	2004 年 5 月～2004 年 8 月



図 2 . 1 現地観測測定地点

2.1.3 調査項目

測定をおこなったのは、貧酸化、貧酸素水塊発生に関わると考えられる、水温、塩分、溶存酸素濃度(DO)、クロロフィル a、濁度である。各測定項目の詳細を以下に示す。

水温 水塊の分布や水の知りうるデータとなる。また水温の鉛直構造は、躍層お状態や安定不安定の指標となる。水質の基本データである。

塩分 溶解している全無機塩類の濃度。水温と同様に水塊の分布や水の特徴を知りうるデータとなる。河口域や沿岸域においては外洋水と河川水の混合の度合いを知る良い指標である。

DO（溶存酸素濃度） 一般の海生生物は陸上生物と同様に酸素なしでは生きていくことができない。そのため生物にとっては海水中の DO がどれだけあるかということが重要になる。夏季の有明海においても貧酸素水塊の発生がしばしばみられるが、その貧酸素状態の程度によって生存が危険となる生物種が変わってくる。柳（1989）によると、正常なベントスの存在を保証するには少なくとも 2.5mg/l の DO が必要であるが、アサリ等の貝類では 1.5mg/l でも生存できる種が存在する。そのうえ、数日といった短期間であれば貧酸素化した状態でも耐えうるということが貧酸素耐性実験等で明らかになった。門谷によって提示されている 3.0mg/l は生物が生きていくのに困難な値とされている。このようなことから DO の詳細な鉛直分布は非常に重要であり、精度の高い測定が望まれる。

クロロフィル a 光合成を行う色素の 1 つであり、植物プランクトンはクロロフィル a を含有することから、植物プランクトンの指標となる。

濁度 水の濁りの指標となる。水中を透過する光は懸濁物により散乱・反射・吸収される。水中の光の透過率から水の濁りを測ったものを濁度という。

2.1.4 觀測機器

本研究で用いた観測機器は以下の通りである。

クロロフィル計：アレック電子（株）製の ACLW-CMP でクロロフィル a，濁度，水温を測定した。

DO 計：アレック電子（株）製の ADOW-CMP で DO（溶存酸素濃度）、水温、酸素飽和度を測定した。

塩分計：アレック電子（株）製の MDS-CT、ACTW-CMP 二種類の測定器を用いて水温、塩分を測定した。

以上の測定器を用いた。各測定器とも測定はバースト測定（図 2.3）を行った。バースト時間は 10 分，測定インターバルは 1 秒でサンプル数 10 個とした。データ回収後、生データの処理としてサンプルである 10 個の平均をとり、10 分間隔のデータを作った。

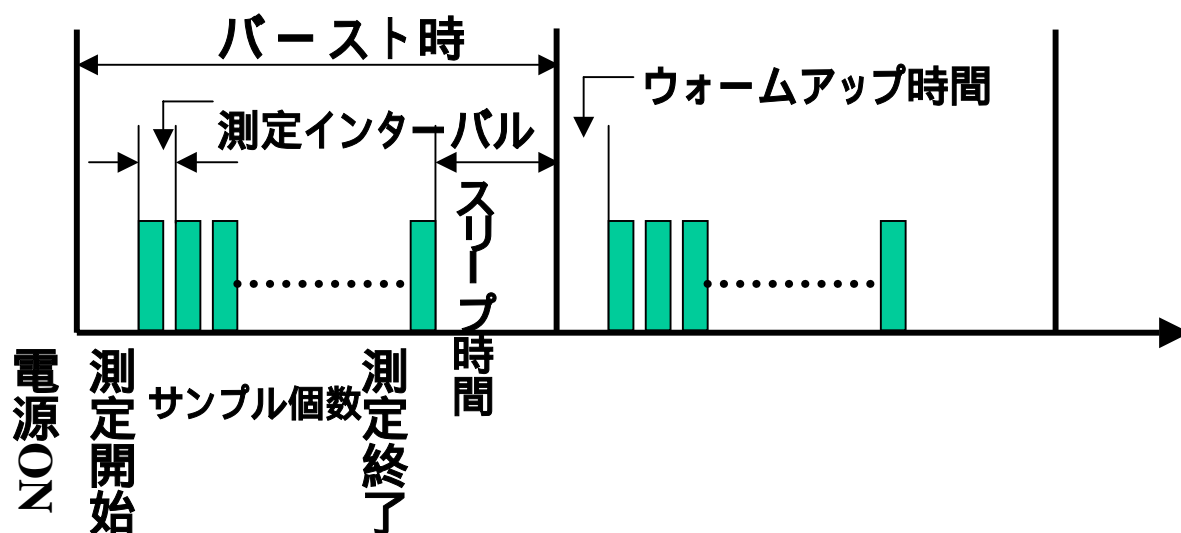


図 2.3: バースト測定

機器は海中に入れておくことで海中で貝や小生物が付着しているので、注意深く丁寧に綺麗に歯ブラシや雑巾により洗った。そして次回使うことになった時、D0 計の D0 センサのみキャリブレーション作業を行う。まずメンブラン/電解液を交換し、D0 センサのキャリブレーションを行い補正する。その他の D0 計の水温、クロロフィル計の水温、濁度、クロロフィル a、塩分計の水温、塩分に関するキャリブレーションはアレック電子（株）に定期的にキャリブレーションを頼んだ。注意としては、手入れの際、当然だが作業場の周りを整理して、丁寧に注意深くやる。そして意外とネジが硬く締められてたり海水に長く入っているため、外れにくい。しかし結構ネジ山がナメリやすいので気をつける。ナメ

ったとしてもあせらずペンチ等ネジを外し、スペアのネジを付ける。スペアがあるか確認することを進める。観測機器の一部を図 2.4 に載せた。



図 2.4：観測機器

農林水産省で使われている測定器はアレック電子（株）製の多項目水質計（クロロテック）である。この機器により水温、塩分、D0、クロロフィル a、濁度を測定した。

2.1.5 観測方法

本研究室で行った諫早湾沖に設置された観測櫓 B6、湾外の代表点としての四本鋼管におけるものから説明し続いて B3、B4、B5、B6（2003 年 10 月末から）S1、S6 の九州農政局にて行われた自動昇降装置の説明する。本研究室で行われた観測の設置状況は図 2.5 に示した通りである。図に赤、青、白の計測器が取り付けられているがそれぞれクロロフィル計、D0 計、塩分計である。B6 の測定には先節示した自記式の水質計を使用し、海底から櫓に立ち上げたワイヤ - にセンサーを固定する方法で海底上 0.5m、5m、10m において、また浮体（図 2.6）を用いて水面下 0.5m の深度で測定を行った。測定間隔は 10 分である。四本鋼管でも同様の観測方法で、海底上 0.5m、3m 水面下 0.5m で D0、クロロフィル a、水温、塩分、濁度を計測した。測定間隔は 10 分である。また自動昇降装置を利用した多項目水質計（図 2.7）を用いて水面から 0.5m 間隔で 1 時間おきに D0、クロロフィル a、水温、塩分、濁度を計測した。一日一回の頻度で戦場バケツ中の装置でエアーを発生して、D0 センサーのキャリブレーションを行った。

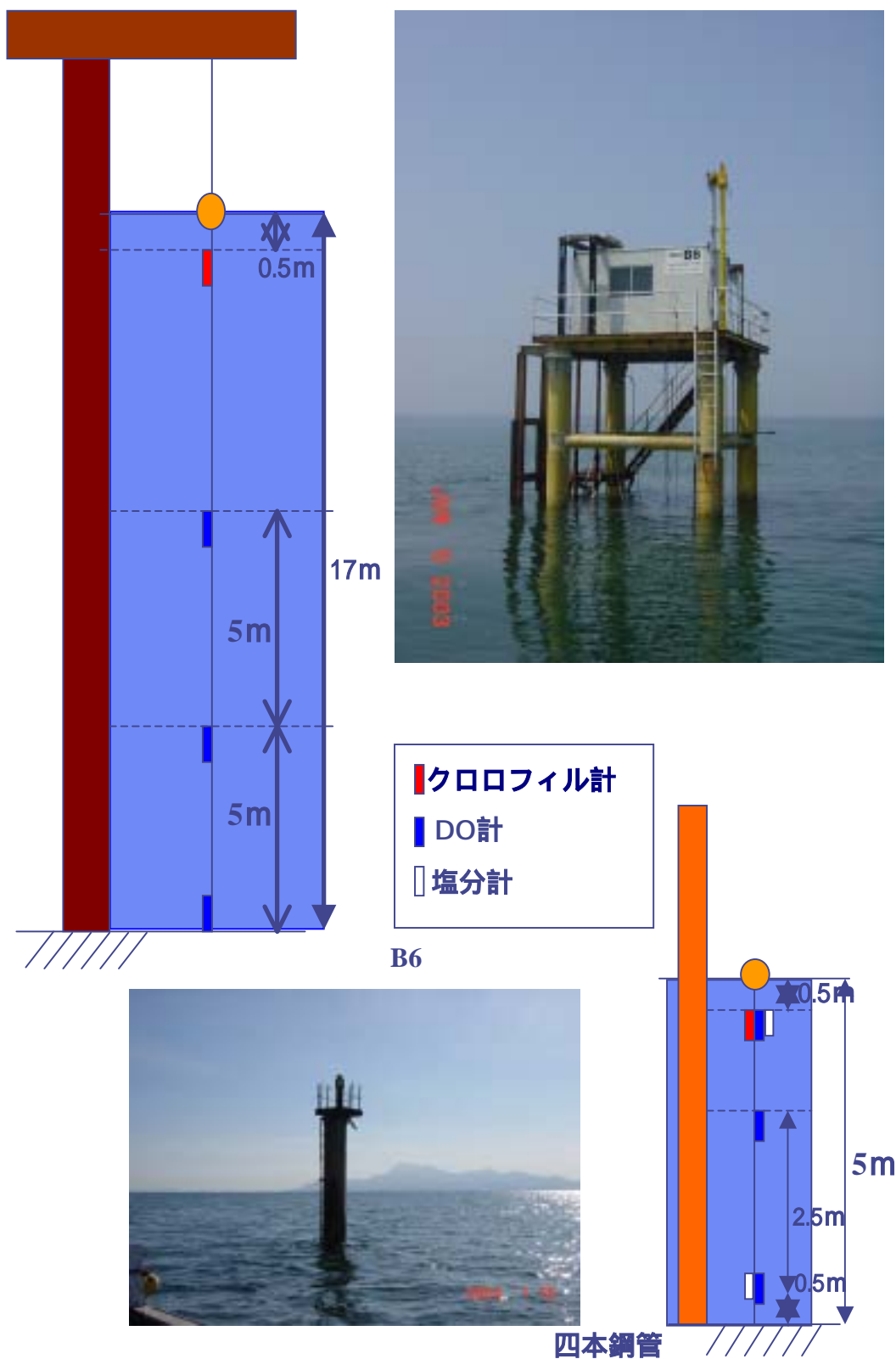


図2.5：観測設置状況と観測地点の写真



図 2.6：浮体（ブイ）の状況

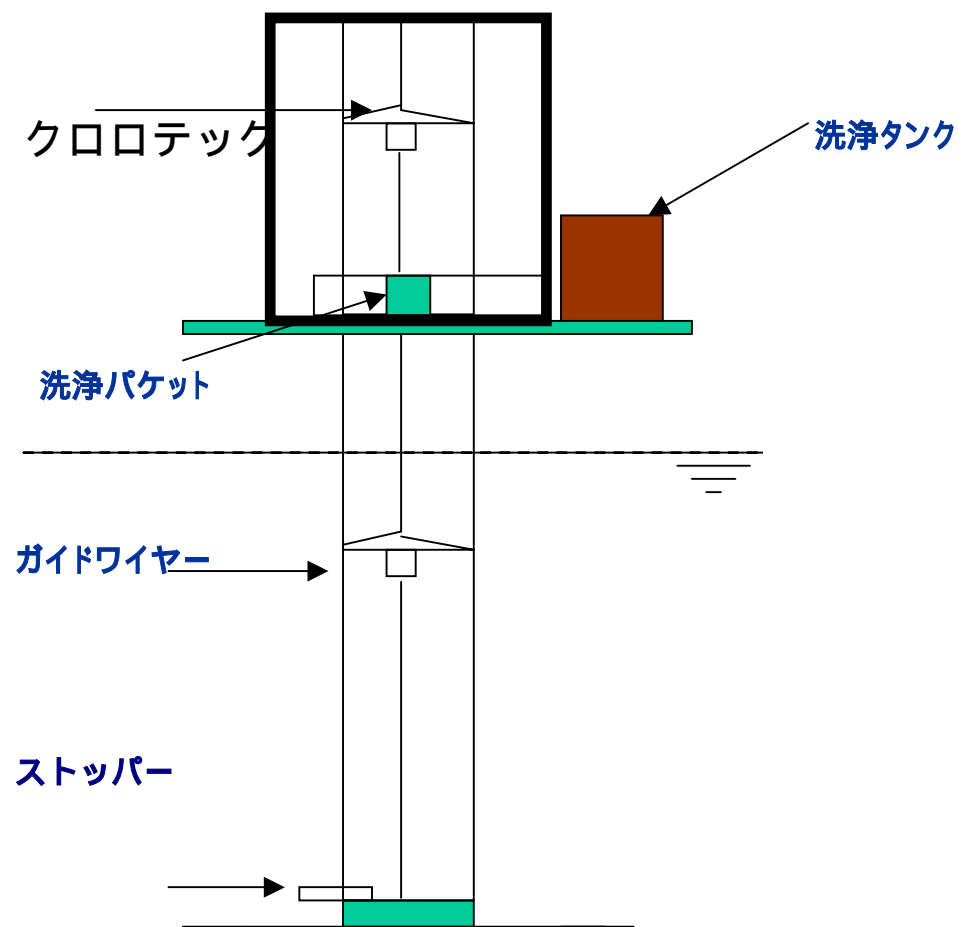


図 2.7：自動昇降装置を利用した多項目水質計

2.2 観測結果、考察

夏を中心に全部でのべ約10年分のデータを私が全て時系列に並べ図にし分析した。本研究は貧酸素化の形成や消滅に関わる原因を目的にしている。貧酸素水塊の年毎の特徴を分析し、比較することで貧酸素化ならびに貧酸素水塊形成について検討する。2001年から2004年の7月のデータを中心に結果を解説する。対象要素として水質データ以外に風速ベクトル、全天日射量、降水量、潮位を加えた。風速ベクトル、全天日射量、降水量に関しては佐賀気象台のデータを利用した。潮位は大浦のデータを利用した。佐賀気象台と大浦は図2.9に示してある。

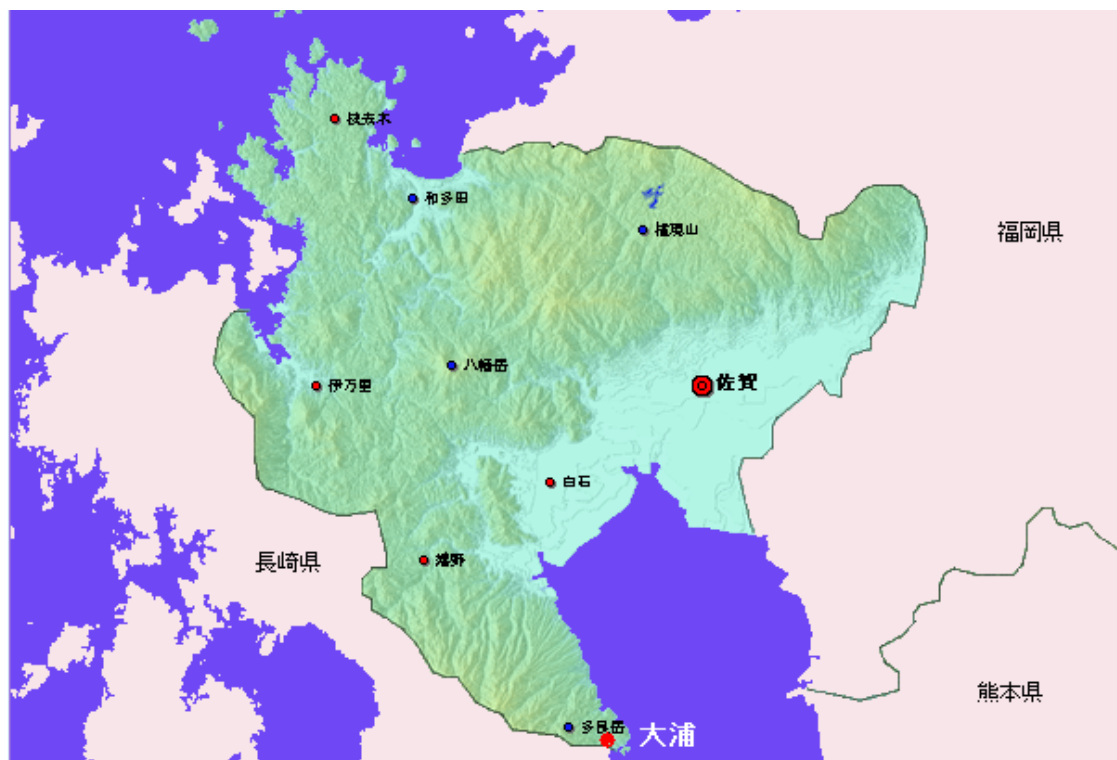


図 2.8 : 大浦、佐賀気象台（表示名は佐賀）の位置

2.2.1 2001 年 7 月の観測結果

図 2.9 は B6 における各水質の観測データの時系列である。この図の期間は 2001 年 7 月 1 日から 8 月 1 日である。本研究室が行った有明海観測データの中でも最も古いものである。上から順に風速ベクトル、密度、水温、塩分、全天日射量、クロロフィル a、DO、濁度、潮位である。密度は水温と塩分の関数としてクヌーセンの式によって導いた。クヌーセンの式については「水圏の環境」(pp112-115) に詳しく説明が書いてあるのでそちらを参照。

図が示すように貧酸素化が数回起きた。また貧酸素水塊として 7 月 14 日、7 月 22 日、7 月 26 日、7 月 30 日、7 月 31 日の 5 期間 3.0mg/l 以下の値を記録した。7 月の前半に集中して降雨(7 月の総降水量、444.5mm)があった。筑後川等の河川に降ると、有明海に淡水が流入する。この淡水には多くの栄養塩を含み、塩分が小さい水である。この淡水は有明海を南下しコリオリの力を受け諫早湾に流入していると思われる。それは降雨があるとその後上層の塩分が低下している事からも示唆される。その流入の影響により、塩分が表層において最大で 7‰まで低下し、塩分躍層を形成した。上層の水温は 7 月 15 日までは約 27 だった。15 日以降、降雨もなく、晴れの日が続いた為(2001 年 7 月の全天日射量平均 $19.5 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{day})$)、水温は上昇し、最大で 30 を上回る時もあった。上層と底層の水温差は 3 から 6 位で水温成層が形成していた。塩分と水温の成層形成のため、7 月全期間通して上層と底層の密度差(5~20)が大きかった。安定した密度成層が形成されていたと考えられる。成層の形成により物質循環が抑制されるため海面や上層からの酸素の供給量よりも底層における酸素消費量が大きいくにより貧酸素化が起こり、貧酸素水塊が発生した。北風が吹くと DO が上昇し南風が吹くと DO が下降した。その為貧酸素水塊は長期間続くことはなかった。また河川水が諫早湾内に流入し、全天日射量があるために植物プランクトンの光合成が活発になり、クロロフィル a が 7 月 18 日から増加した。そして植物プランクトンが沈降し、底層でバクテリアに分解されることにより酸素消費が普段より大きくなり、成層が形成されている状況下、貧酸素化の原因の 1 つになった。

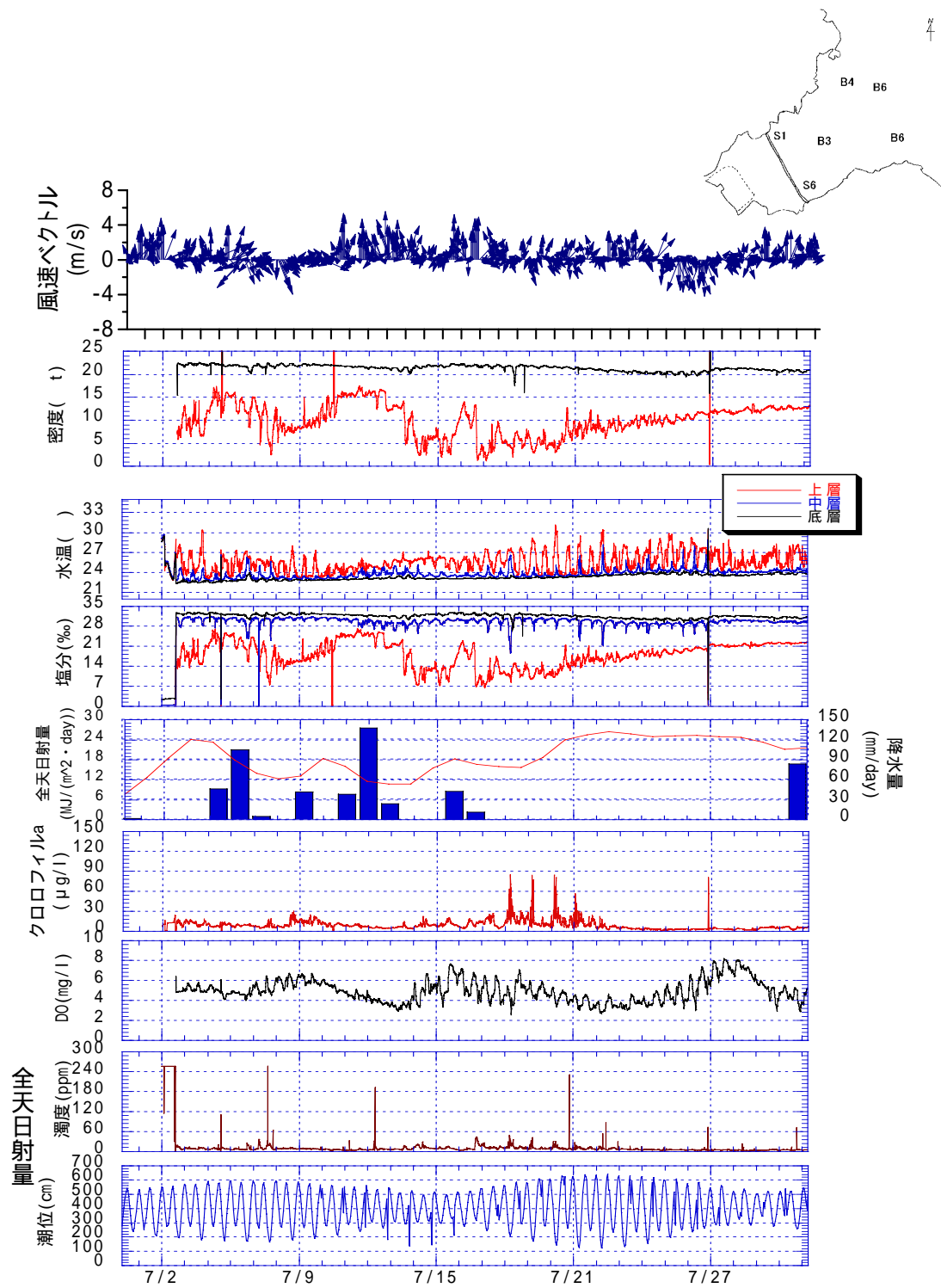


図 2.9 : 2001 年 7 月の B6 の水質観測結果

2.2.2 2002 年 7 月の観測結果

図 2.10、図 2.11 は B3、S1 における各水質の観測データの時系列である。これらの図の期間は 2002 年 7 月 1 日から 8 月 1 日である。上から順に風速ベクトル、密度、水温、塩分、全天日射量、クロロフィル a、DO、濁度、潮位である。

B3 の観測結果（図 2.10）を示す。2002 年は貧酸素化が数回起きた。また貧酸素水塊として 7 月 3 日から 7 月 6 日、7 月 9 日、7 月 11 日、7 月 25 日、7 月 27 日から 7 月 31 日の 5 期間、 3.0mg/l 以下の値を記録した。7 月は一週間に一日は降雨があり、総降水量は 218mm あった。2001 年と同様に筑後川等の河川に降雨があると、有明海に淡水が流入し諫早湾に流入する。そして上層の塩分が最大で 10‰ まで低下し、塩分躍層を形成した。7 月全天日射量平均は 2001 年に比べて小さく $16.5\text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{day})$ だった。淡水の流入や太陽からの日射により上層の水温は上昇した。上層と底層の水温差は最大で 7 位の水温差があり水温成層が形成していた。塩分と水温の成層形成のため、7 月全期間通して上層と底層の密度差 ($0 \sim 10$) があり、安定した密度成層が形成されていたと考えられる。2001 年と比べると小さかった。成層の形成により貧酸素化が起こり、貧酸素水塊が発生した。7 月 6 日から 7 月 8 日、7 月 25 日から 7 月 27 日に 8m/s 以上の強風が連吹しているのが観測された。その連水にともなって水塊の密度が一様になる傾向が観測され、同時に底層の DO が上昇した。

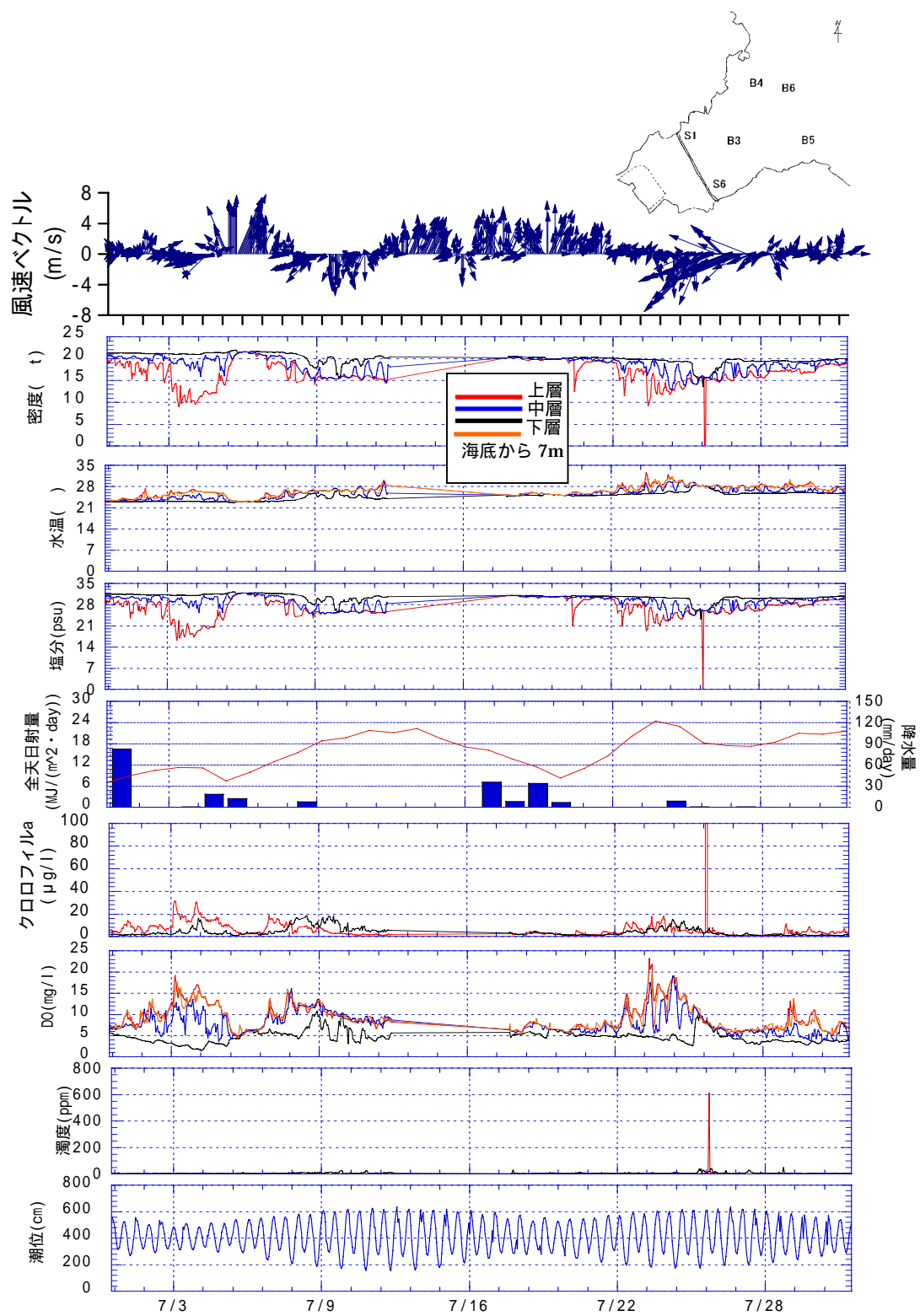


図 2.10 : 2002 年 7 月の B3 の水質観測結果

S1 の観測結果（図 2.10）を示す。S1 は諫早湾の奥部で潮受け堤防の近くにある。そして平均水深が 4m で他の観測地点に比べてとても浅い。貧酸素化は S1 においても何回か起こっている。そして貧酸素水塊は 7 月 4 日から 7 月 5 日、7 月 26 日に観測された。B3 と同様に降雨があると筑後川等から塩水が諫早湾に流入し表層塩分を最大で 19‰ 低下させる。淡水の流入と太陽からの日射により上層水温は上昇した。B3 地点との大きな違い水温差と塩分差が小さいことである。そのため安定した密度成層は形成されていないようである。植物プランクトンが上下層で増殖していた。

S1 の DO の挙動は今まで説明してきた成層が形成されている時、底層 DO が低下するという説明が図 2.11 からではつかない。まず S1 において密度成層を形成しているかどうかに関して密度プロファイルの時系列（図 2.12）から検討する。参考までに B3（図 2.13）の時系列も載せた。図 2.11 の 7 月 4 日から 7 月 6 日、7 月 22 日から 7 月 24 日の期間に成層が見られる。これらの期間に底層の DO が低下しているが上昇もしている。植物プランクトンの光合成による酸素供給も影響していると思われるが理由はそれだけではないと思われる。また 7 月 25 日に底層の濁度が上昇していることから、巻上げがあると思われる。この巻上げによって底層に沈殿していた有機物が浮上しその際、その有機物によって酸素を消費された可能性もある。

また参考に 2002 年 7 月に観測された B4 の水質の観測結果、B6 の水質の観測結果と B4 の密度プロファイルを図 2.14、図 2.15、図 2.15 に示す。概ね両方とも B3 と同様の挙動を示す。

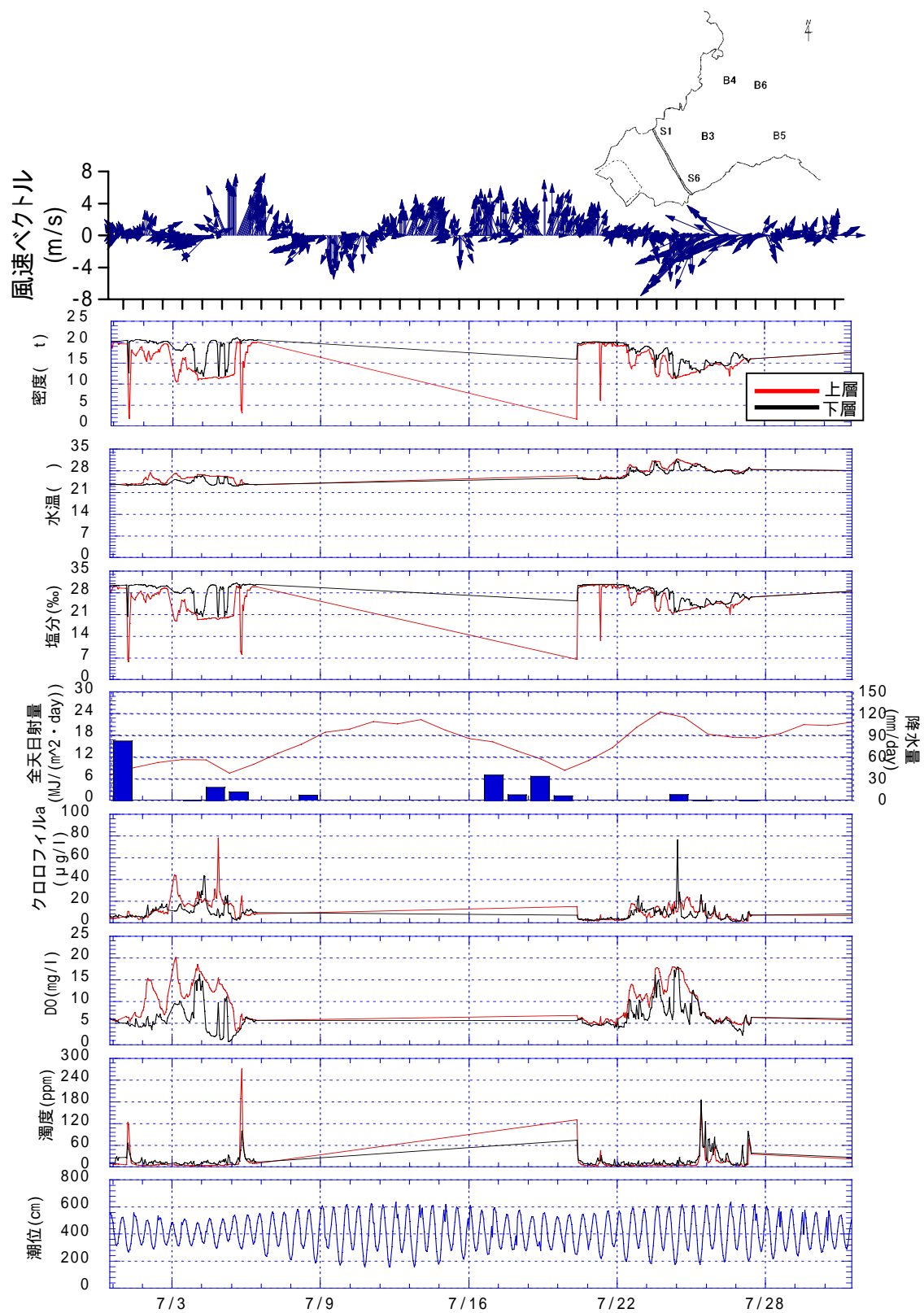


図 2.11 : 2002 年 7 月の S1 の水質観測結果

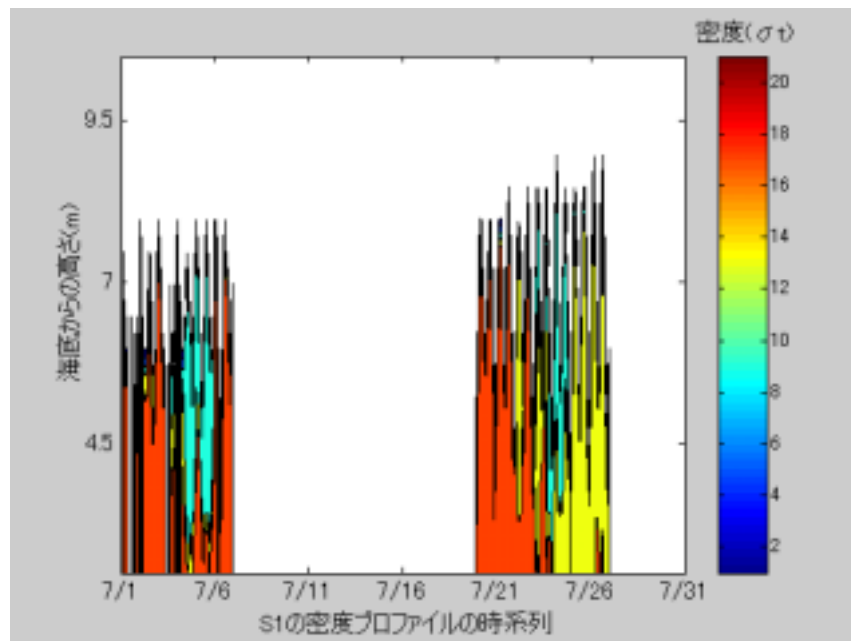


図 2.12 : 2002 年 7 月 S1 の密度プロファイルの時系列

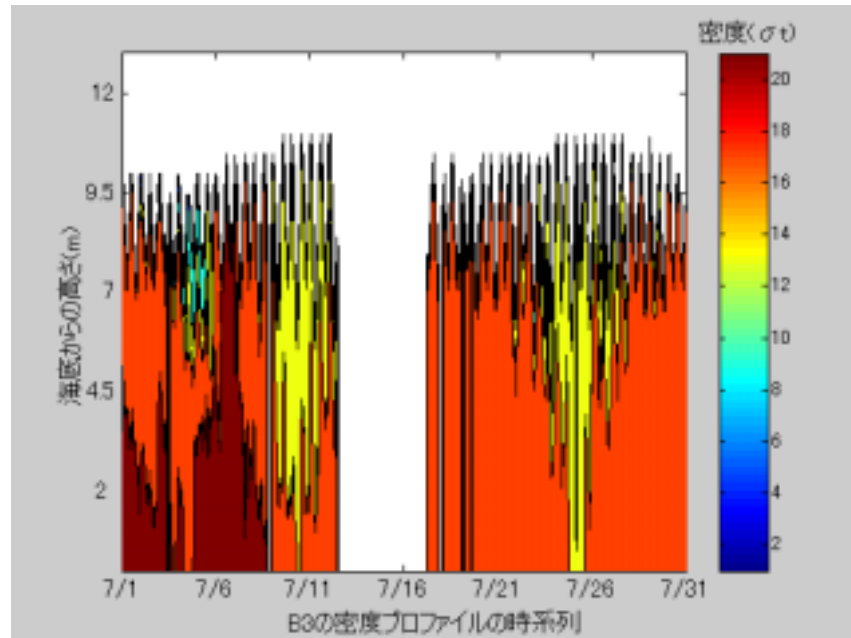


図 2.13 : 2002 年 7 月 B3 の密度プロファイルの時系列

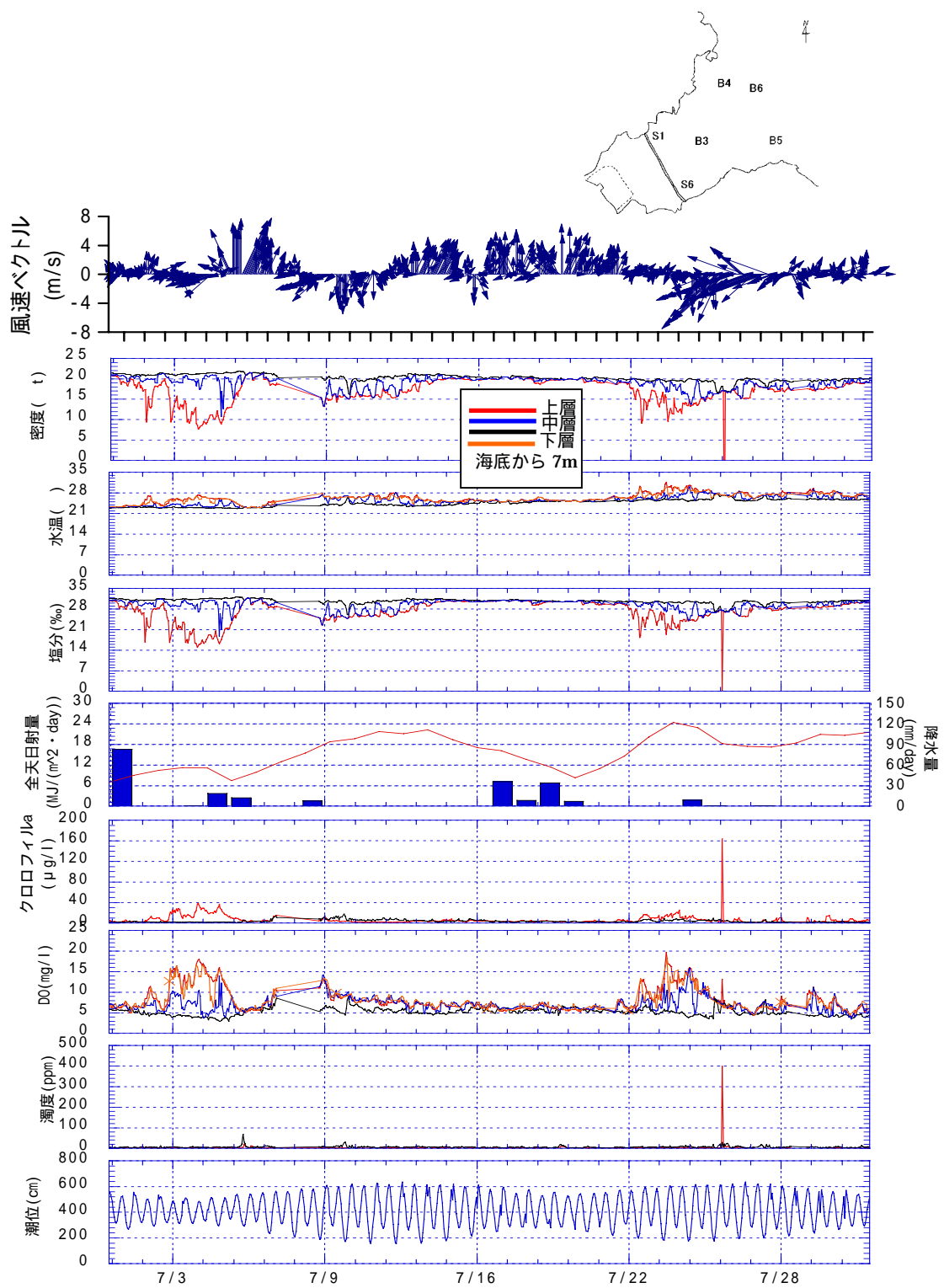


図 2.14 : 2002 年 7 月の B4 の水質観測結果

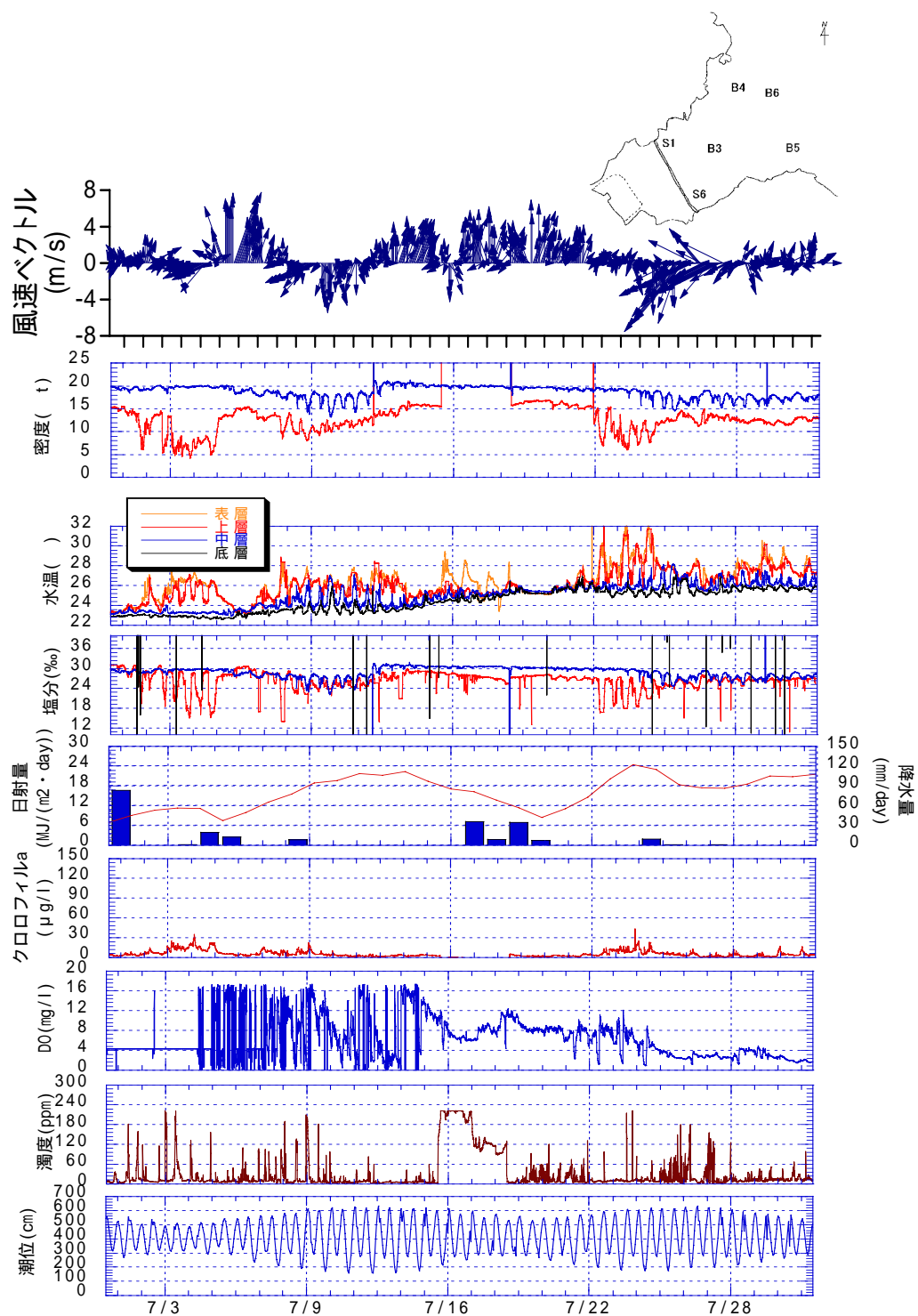


図 2.15 : 2002 年 7 月 B6 の水質観測結果

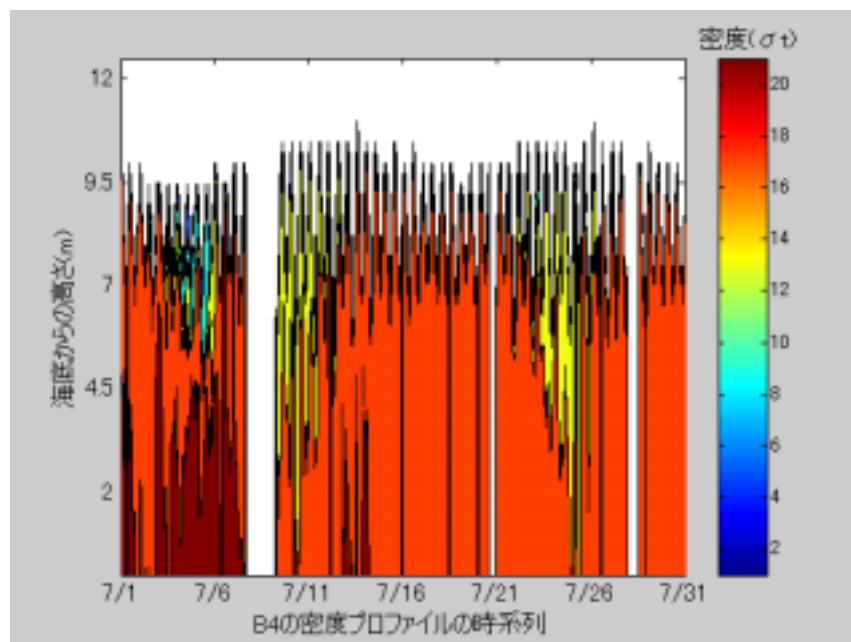


図 2.16 : 2002 年 7 月 B4 の密度プロファイルの時系列

2.2.3 2003 年 7 月の観測結果

図 2.17 は B4 における各水質の観測データの時系列である。これらの図の期間は 2003 年 7 月 1 日から 8 月 1 日である。上から順に風速ベクトル、密度、水温、塩分、全天日射量、クロロフィル a、DO、濁度、潮位である。2003 年は貧酸素化が数回起きた。また貧酸素水塊として 7 月 17 日から 7 月 27 日の間 3.0mg/l 以下の値を記録した。7 月は降雨のない日はのべ 9 日で、総降水量は 415mm あった。2001 年、2002 年と同様に降雨があると、筑後川等の淡水が諫早湾に流入する。そして上層の塩分が最大で 13‰まで低下した。上層と下層の塩分差は最大で 14‰あり、7 月中塩分の差が記録された。塩分躍層を形成していた。ほとんど毎日降雨があったため、7 月全天日射量平均は 2001 年、2002 年に比べて小さく $11.5 \text{ MJ} / (\text{m}^2 \cdot \text{day})$ だった。全天日射量が小さかったので上層の水温は 2001 年、2002 年に比べて小さく、最大で 28 を記録した。上層と底層の水温差は最大で 5 位の水温差があり水温成層が形成していた。塩分と水温の成層形成のため（特に上層と下層の塩分差が大きかったため）、7 月全期間通して上層と底層の密度差（0～15）があり、安定した密度成層が形成されていたと考えられる。成層の形成により貧酸素化が起こり、貧酸素水塊が発生した。密度プロファイルの時系列（図 2.18）に示される通り 7 月 6 日から 7 月 8 日を除き、密度成層が形成されている事が観測された。また参考に 2003 年 7 月に観測された B3 の水質の観測結果、S1 の観測結果と B3 の密度プロファイル、S1 の密度プロファイルを図 2.19、図 2.20、図 2.21、図 2.22 に示す。概ね B3 は B4 と同様の挙動を示した。S1 に関して 2003 年の底層 DO の動態に関しては成層の形成しているところで、底層 DO が低下しているのが観測された。S1 の密度プロファイル（図 2.22）から検討すると、DO が低下しているところでは成層が形成している。密度の大きさは日によって大きく違うが鉛直方向に一様の傾向が見られる。また S1 の特徴として水深が小さいため、上層と下層における各水質の動きは、似た動きを 2002 年の観測結果と同様、見出された。

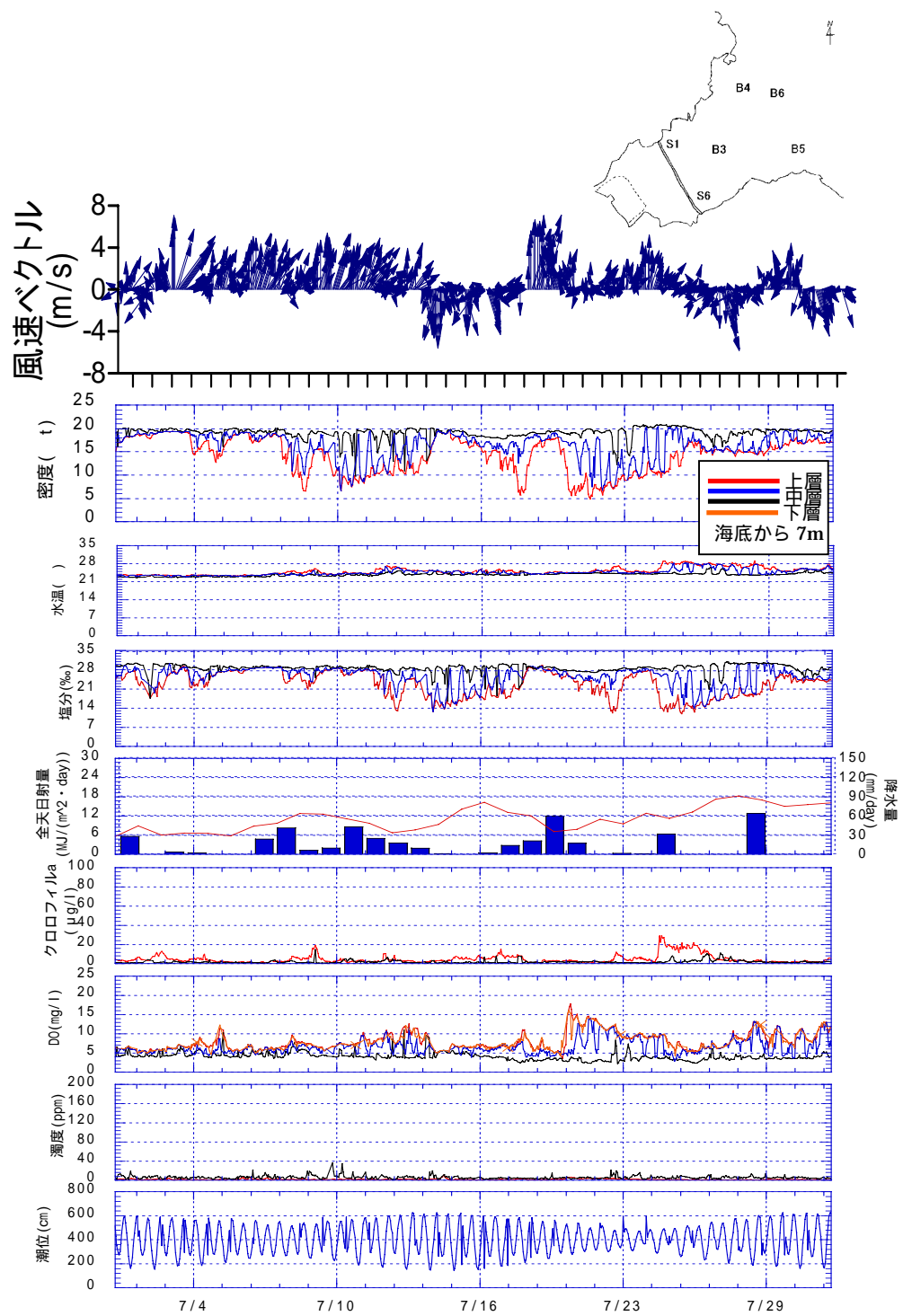


図 2.17 : 2003 年 7 月 B4 の水質観測結果

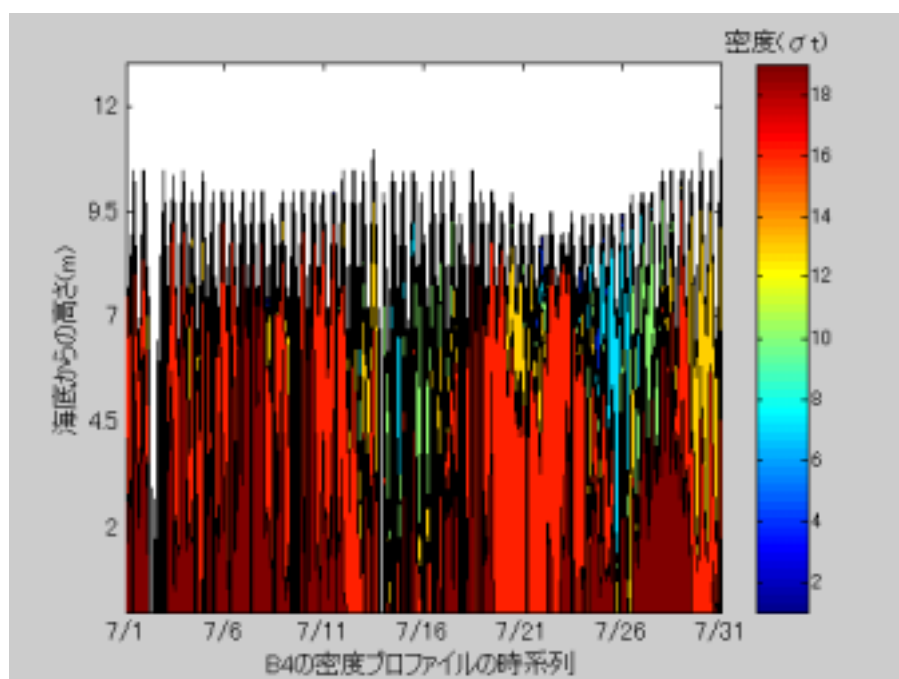


図 2.18 : 2003 年 7 月 B4 の密度プロファイルの時系列

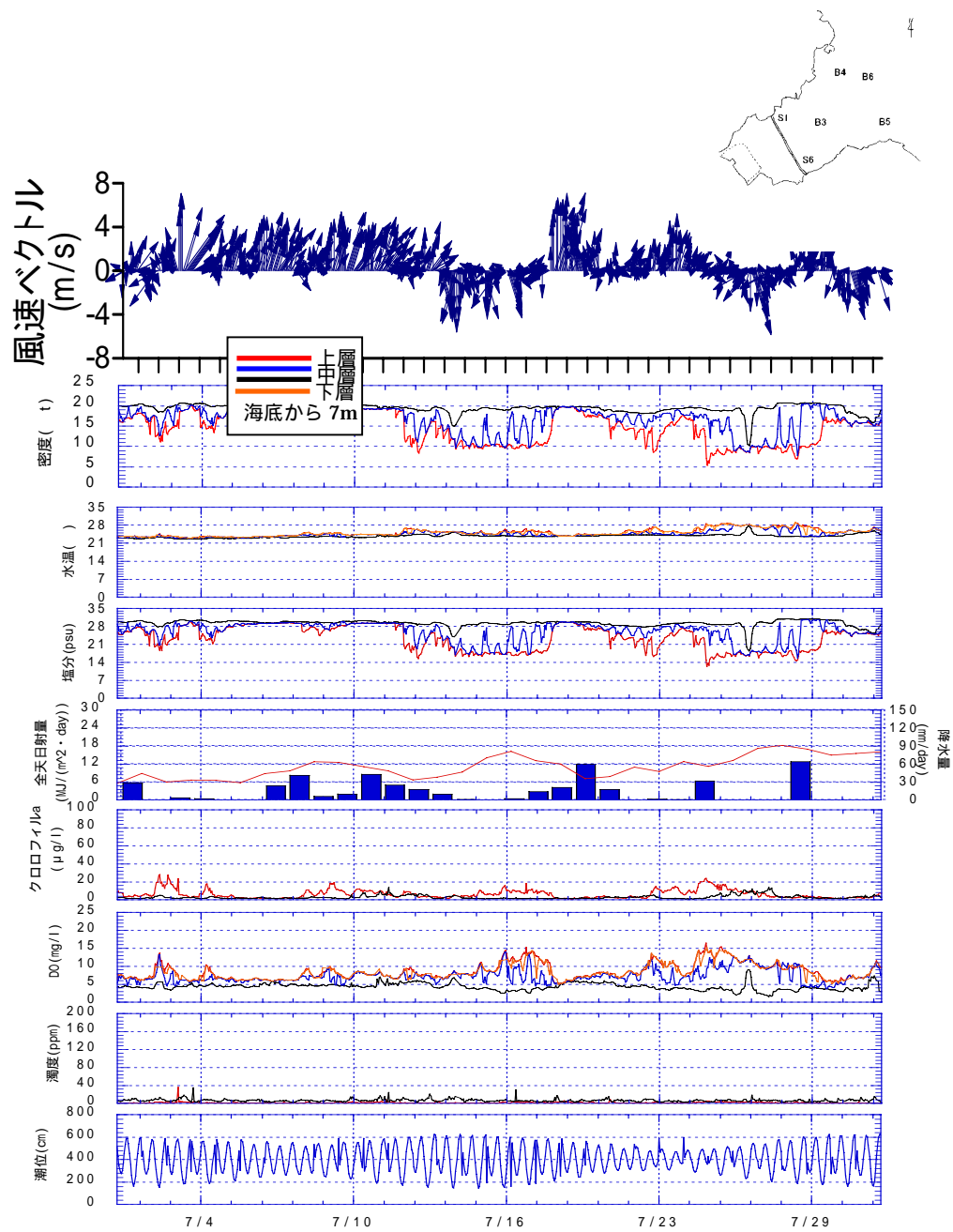


図 2.19 : 2003 年 7 月 B3 の水質観測結果

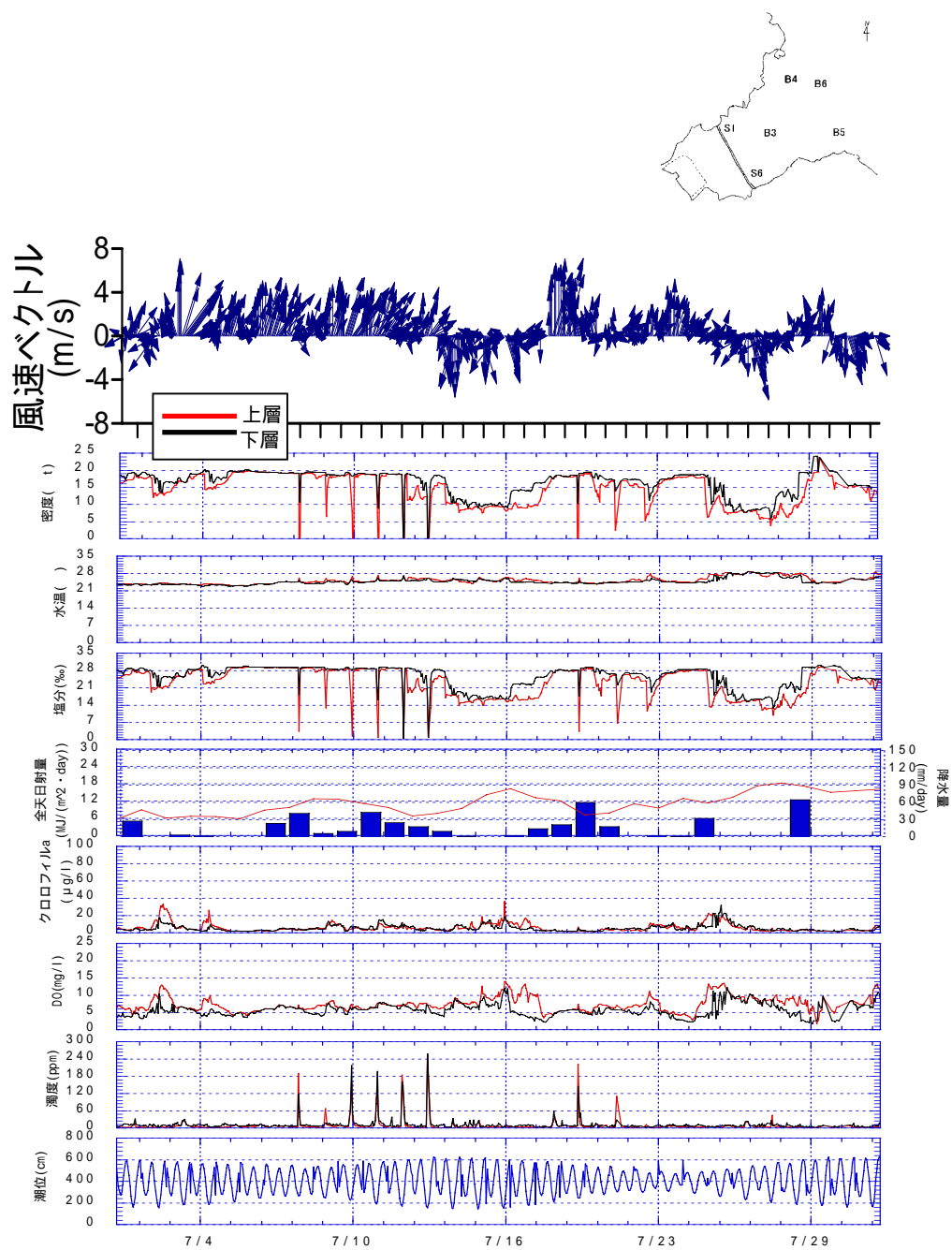


図 2.20 : 2003 年 7 月 S1 の水質観測結果

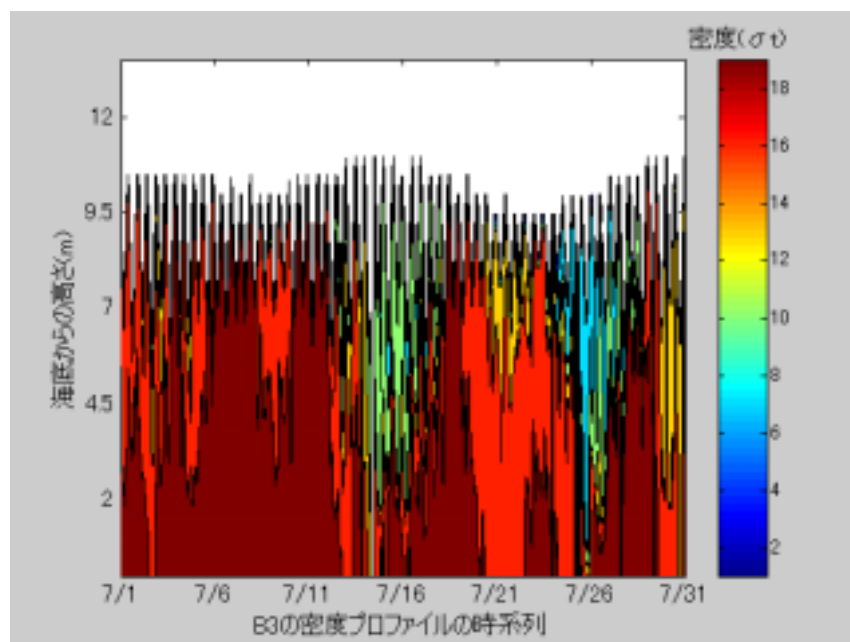


図 2.21 : 2003 年 7 月 B3 の密度プロファイルの時系列

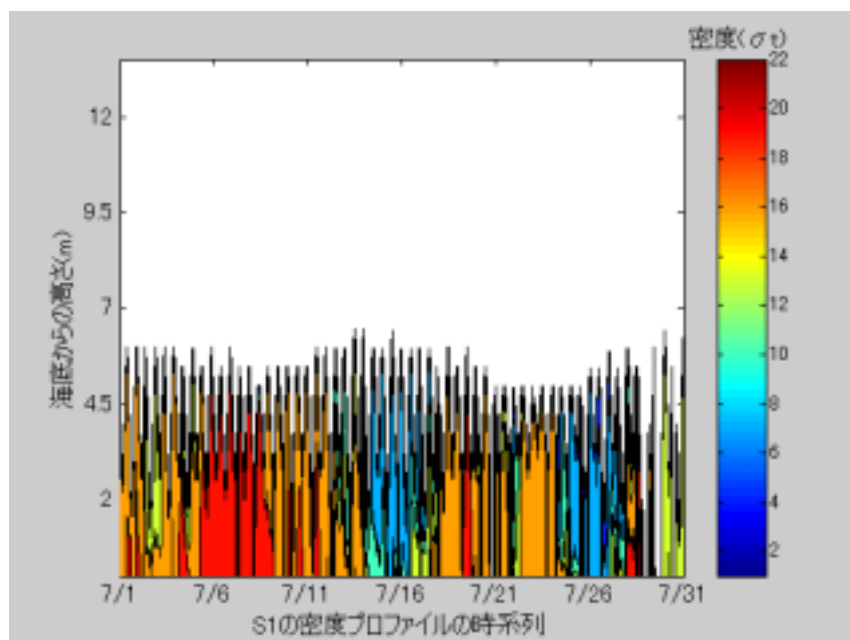


図 2.22 : 2003 年 7 月 S1 の密度プロファイルの時系列

2.2.4 2004 年 7 月の観測結果

図 2.23 は B3 における各水質の観測データの時系列である。これらの図の期間は 2004 年 7 月 1 日から 8 月 1 日である。上から順に佐賀気象台での風速ベクトル、B3 での風速ベクトル、密度、水温、塩分、全天日射量、クロロフィル a、DO、濁度、潮位である。2004 年は水質データに加え農水省により B3 での風速ベクトルデータの提供を受けた。2004 年は貧酸素化が数回起きた。また貧酸素水塊として 7 月 11 日から 7 月 18 日、7 月 24 日から 7 月 30 日の 2 期間 3.0mg/l 以下の値を記録した。7 月は降雨が少なく、総降水量は 176mm だった。2001 年、2002 年、2003 年と比べても一番値が小さい。2004 年は台風が 7 月中旬に観測され、強い南風が連吹した。そのために降水があっても、諫早湾に流入するのを強い南風が妨げ、表層の塩分の顕著な低下が見られなかった。際立った成層の形成もなかった。7 月全天日射量平均は 2001 年、2002 年、2003 年に比べて大きく $19 MJ / (m^2 \cdot day)$ だった。全天日射量が大きかったので上層の水温は最大で 33 を記録した。上層と底層の水温差は最大で 7 位の水温差があり水温成層が形成していた。風速の値が大きく水塊が乱され、大きな密度差はできてはいないが図 2.24 を見ると形成されているのが、見出された。上層と下層の密度差は小さいがこの成層の形成により貧酸素化が起こり、貧酸素水塊が発生した。

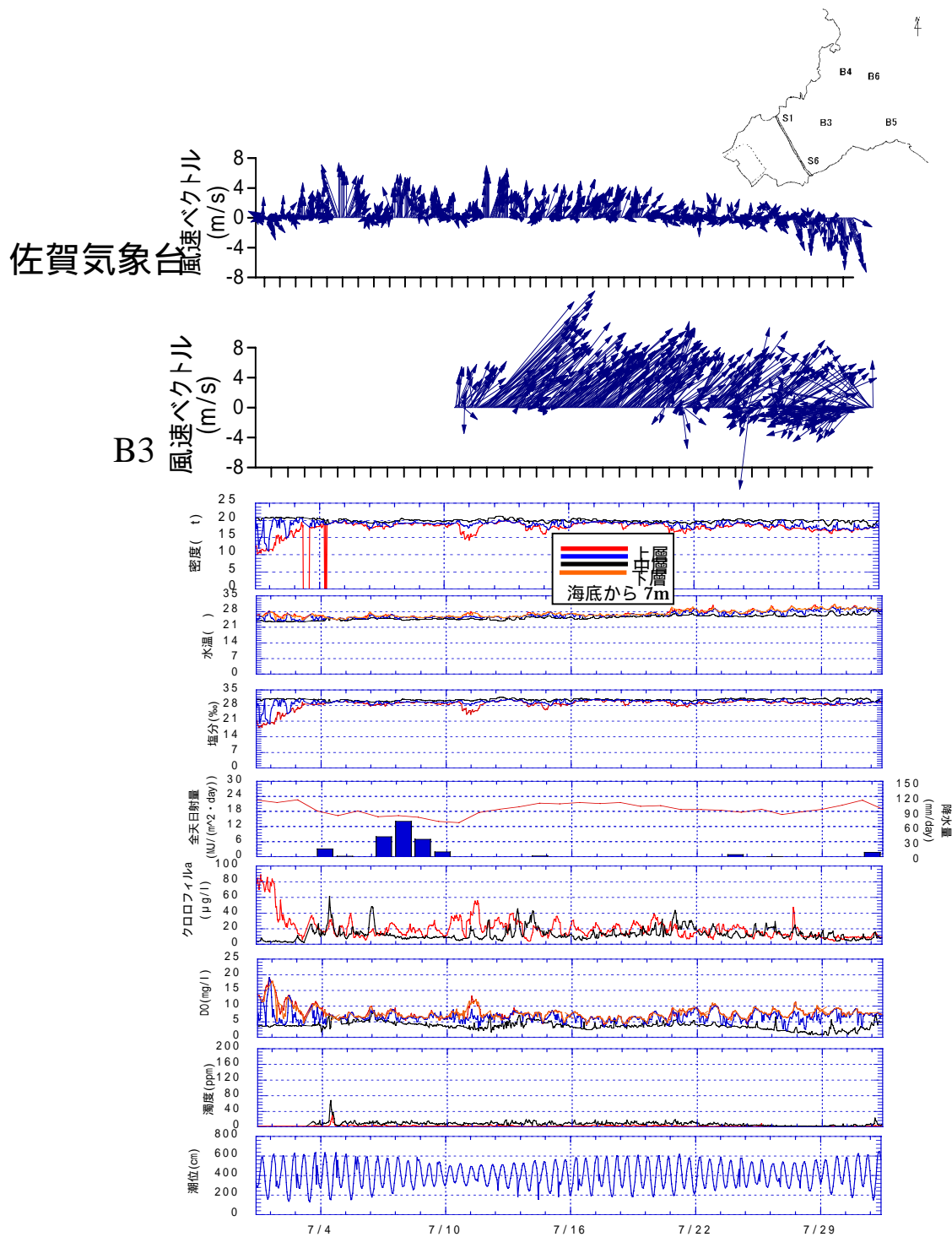


図 2.23 : 2004 年 7 月 B3 の水質観測結果

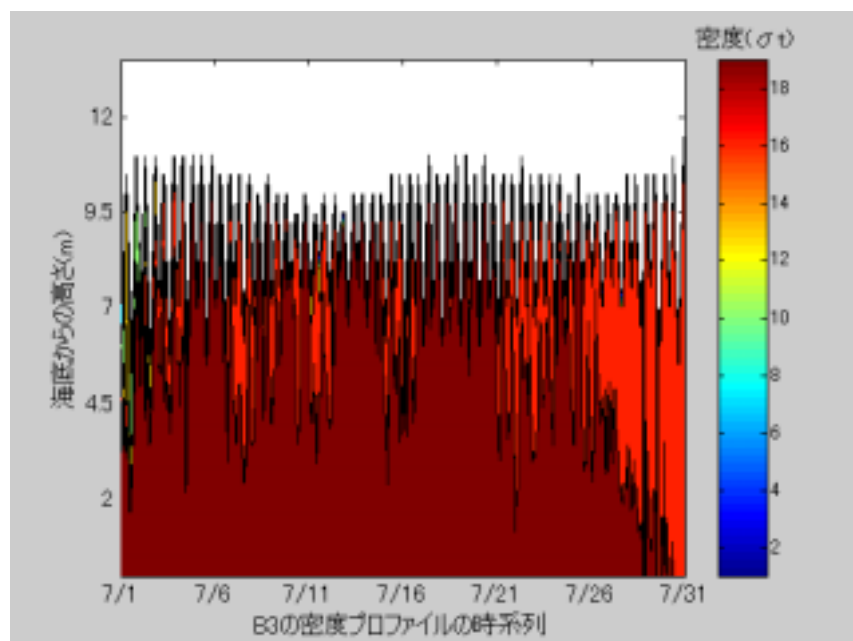


図 2.24 : 2004 年 7 月 B3 の密度プロファイルの時系列

図 2.25 は S6 における各水質の観測データの時系列である。これらの図の期間は 2004 年 7 月 1 日から 8 月 1 日である。図中の図中の水質や気象データに関して南部排出門の排出量の時系列を水温の時系列と一緒に載せた。貧酸素化は数回観測された。貧酸素水塊として 7 月 2 日、7 月 3 日、7 月 4 日、7 月 10 日から 7 月 12 日、7 月 13 日、7 月 16 日、7 月 24 日から 7 月 25 日、7 月 27 日の 8 期間記録した。S6 も台風の影響を受けて降水があっても淡水が諫早湾湾奥まで来ていない。そのため塩分成層も形成されない。南部排水門の排水が行われると塩分が急激に一瞬低下しているのを観測した。そしてすぐに拡散または移流する。またこの排水に応じて濁度も上昇している。これは底層の巻き上がりによって再浮遊した有機物や排水している水の中の有機物が水中に浮遊していることを示す。この浮遊した有機物等が酸素を消費し貧酸素化が起こったとも考えられる。上層、下層の水温は最大で両層とも 32 を記録した。底層も高温になったため、バクテリアの有機物の分解も活発に行われたと考えられ貧酸素化の原因になったと思われる。S6 の密度プロファイル（図 2.26）によると、7 月 1 日から 7 月 2 日、7 月 7 日から 7 月 8 日、7 月 12 日、7 月 23 日から 7 月 24 日、7 月 25 日、7 月 26 日、7 月 27 日に成層が形成されている。この期間と DO の下がる期間が概ね対応している。

また参考に 2004 年 7 月に観測された B4、B5、B6、S1 の水質の観測結果、と B4、B6、S1 の密度プロファイルをそれぞれ図 2.27、図 2.28、図 2.29、図 2.30、図 2.31、図 2.32 に示す。概ね B3 は B4 と同様の挙動を示した。B5、B6 における密度差は小さいが密度成層を形成し底層 DO が徐々に低下するのが見出された。S1 に関して 2003 年の底層 DO の動態に関しては成層の形成しているところで、底層 DO が低下しているのが観測された。S1 の密度プロファイル（図 2.32）から検討すると、DO が低下しているところでは成層が形成している。密度の大きさは日によって大きく違うが鉛直方向に一樣の傾向が見られる。また S1 の特徴として水深が小さいため、上層と下層における各水質の動きは、似た動きを 2002 年の観測結果と同様、観測された。

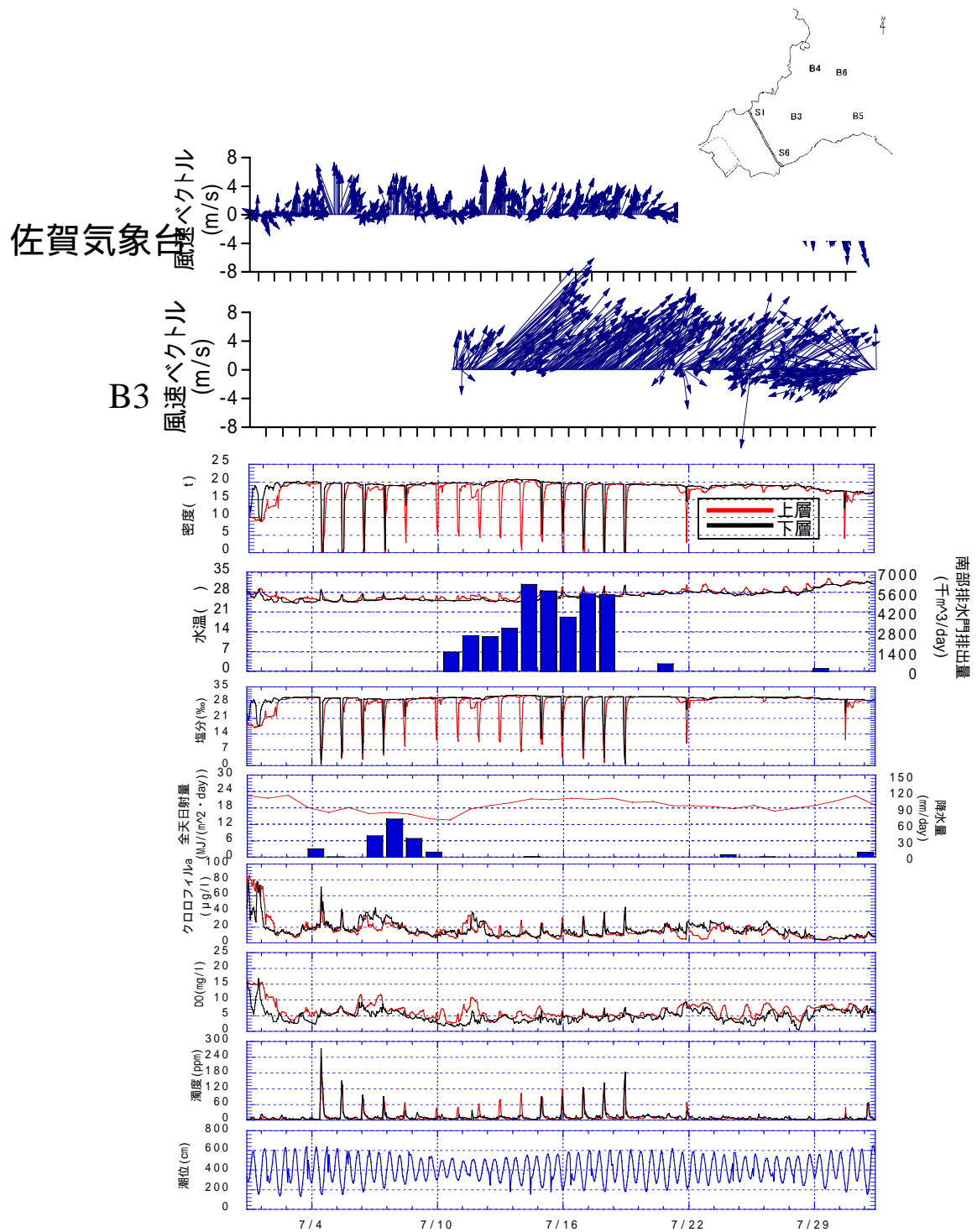


図 2.25 : 2004 年 7 月 S6 の水質観測結果

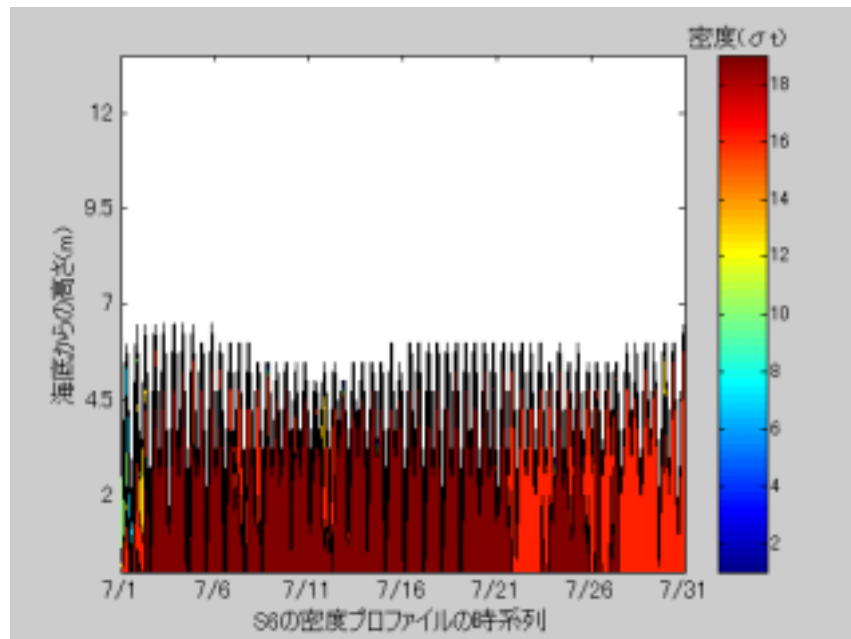


図 2.26 : 2004 年 7 月 S6 の密度プロファイルの時系列

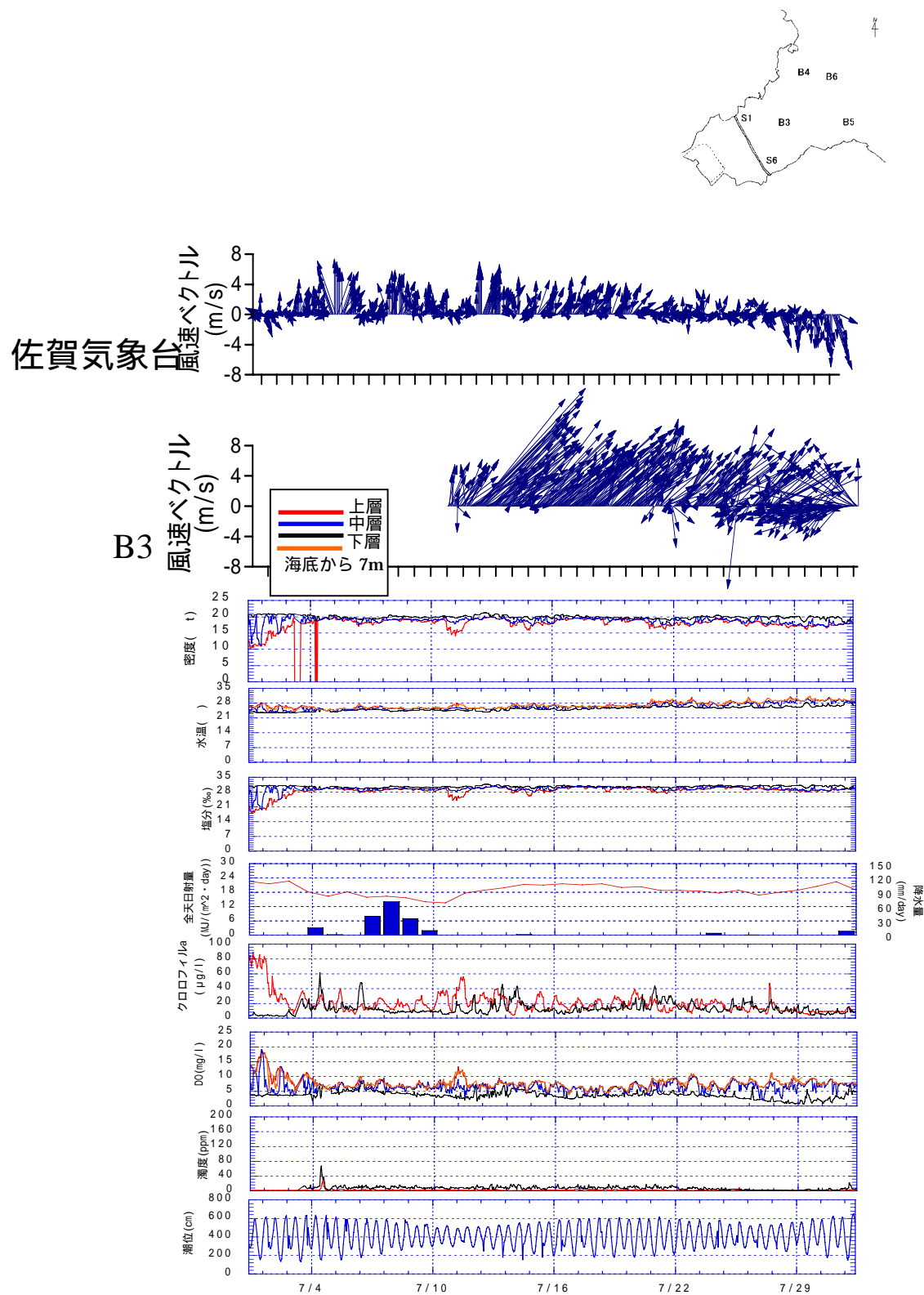


図 2.25 : 2004 年 7 月 B4 の水質観測結果

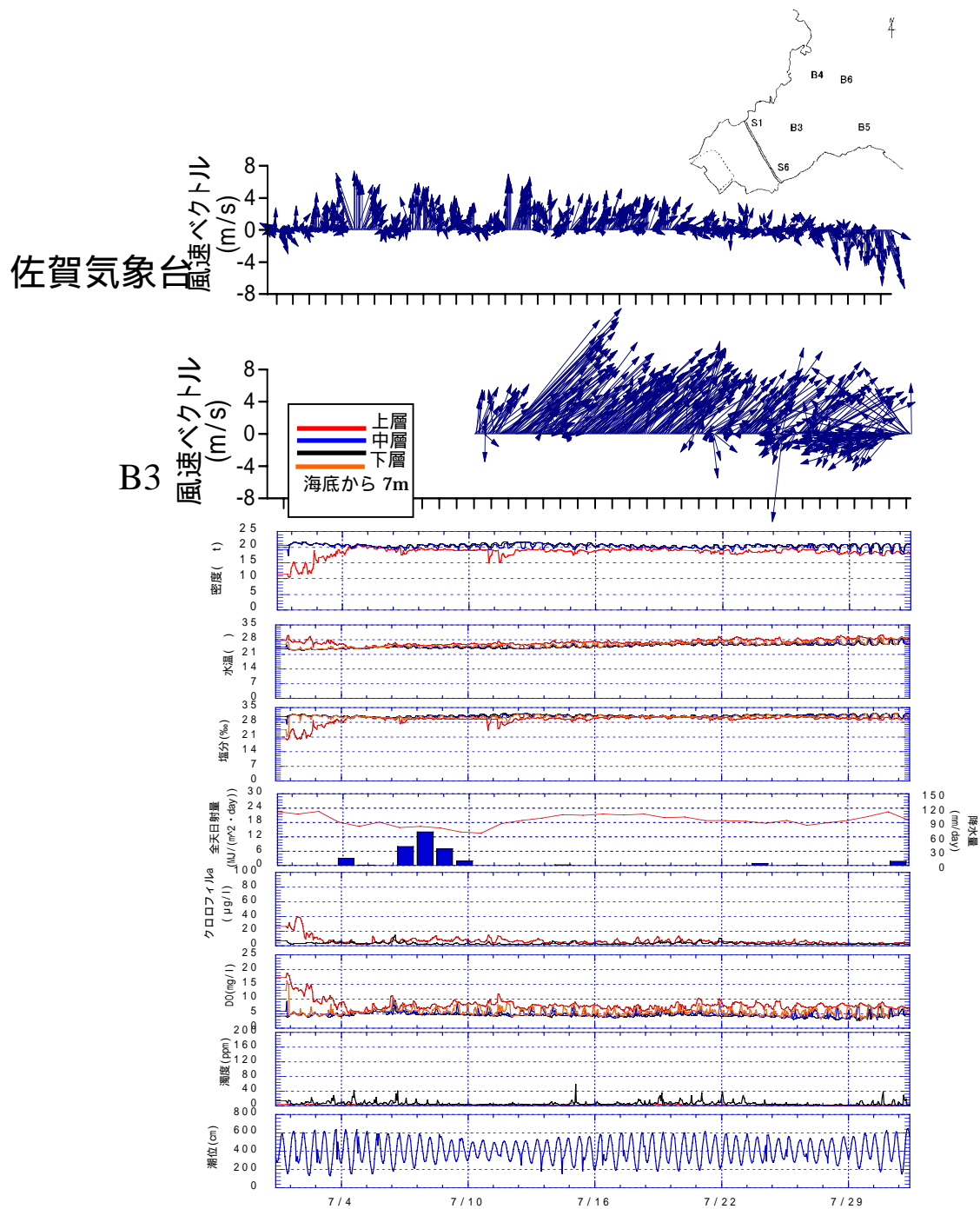


図 2.26 : 2004 年 7 月 B5 の水質観測結果

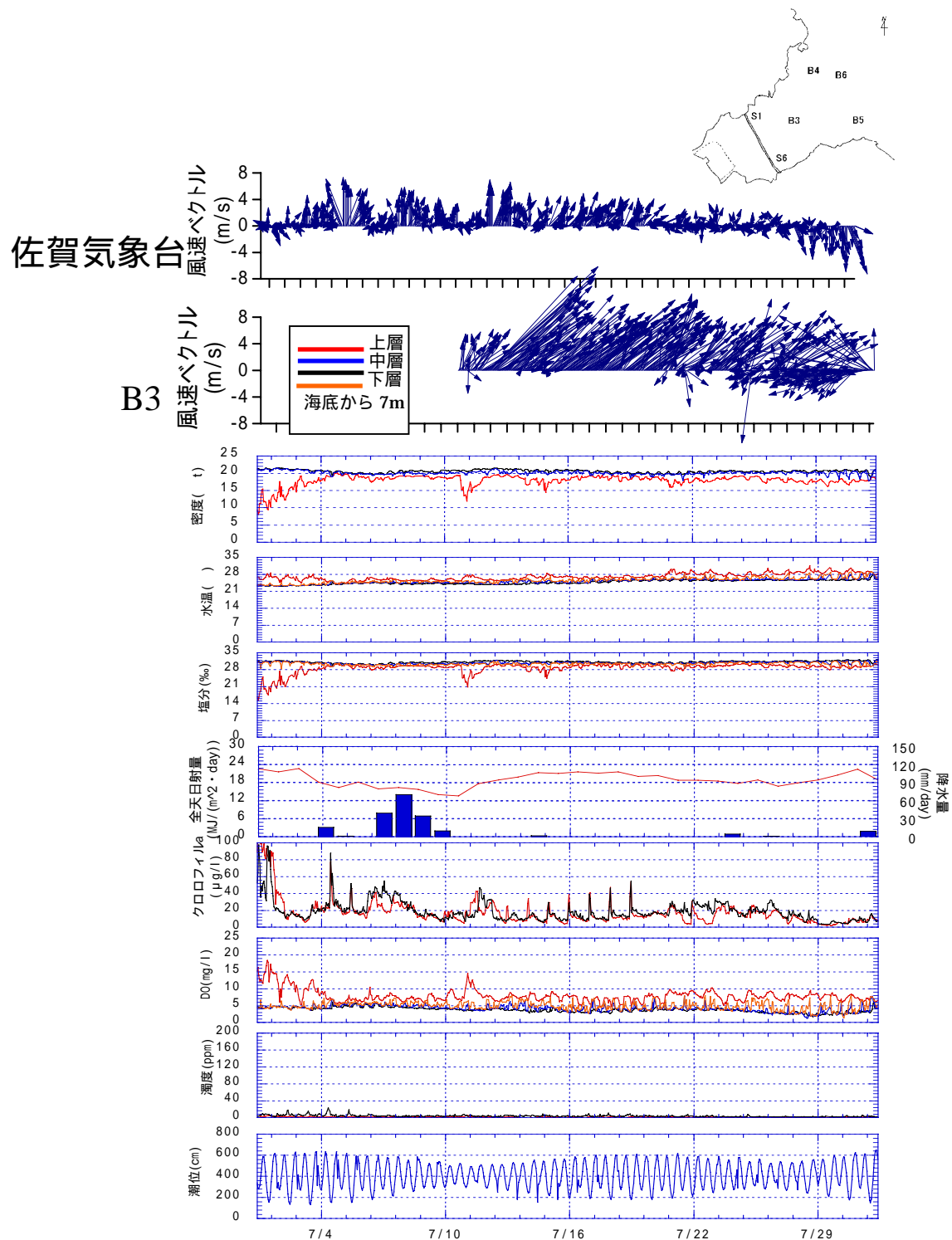


図 2.27 : 2004 年 7 月 B6 の水質観測結果

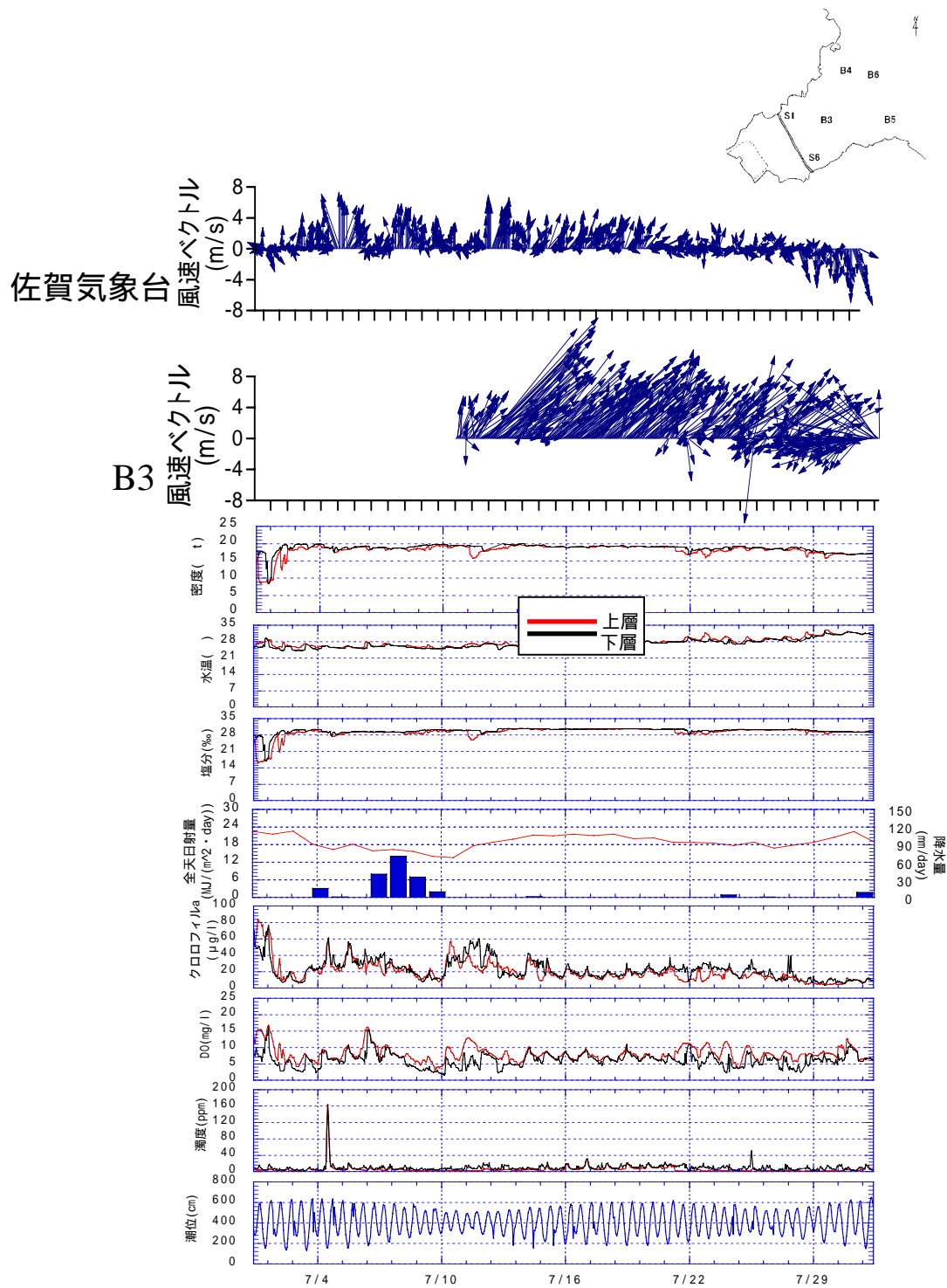


図 2.28 : 2004 年 7 月 S1 の水質観測結果

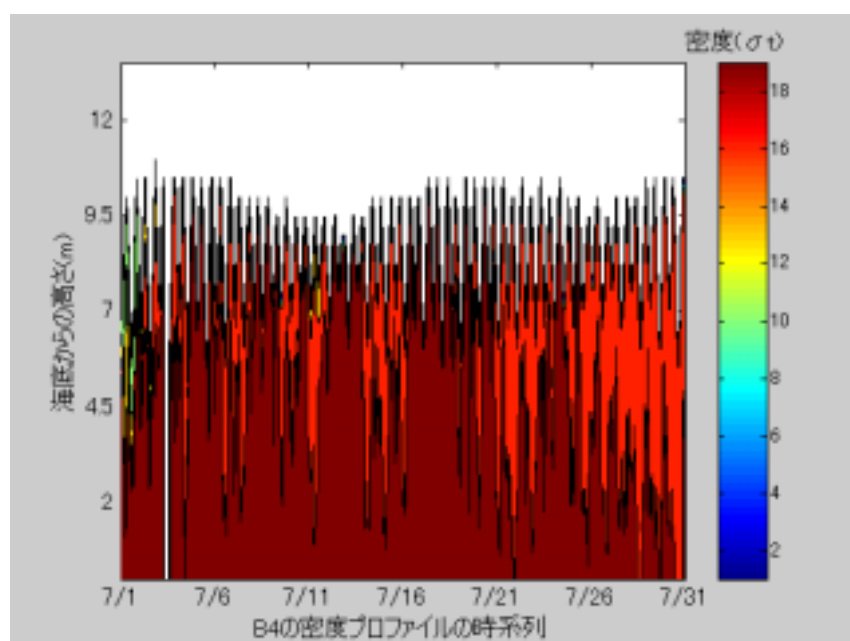


図 2.29 : 2004 年 7 月 B4 の密度プロファイルの時系列

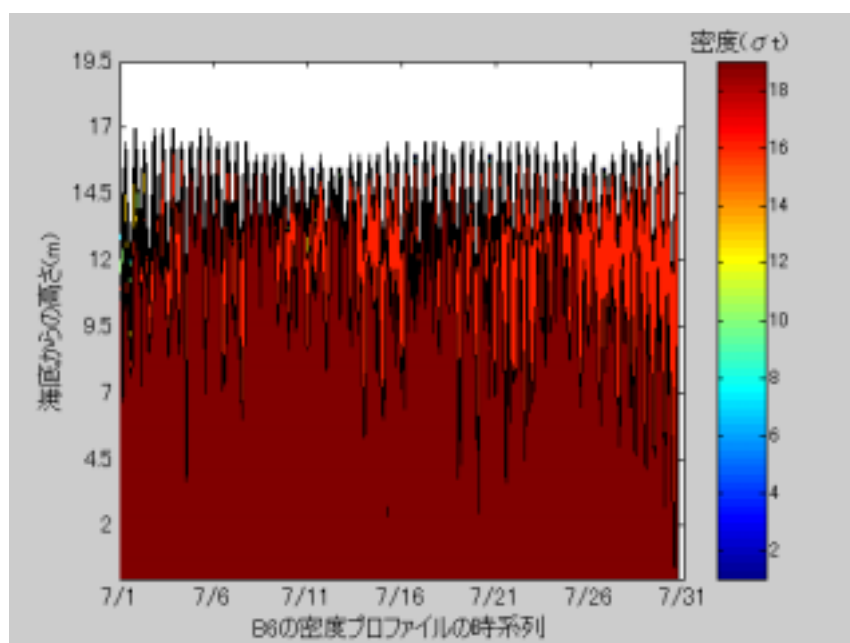


図 2.30 : 2004 年 7 月 B6 の密度プロファイルの時系列

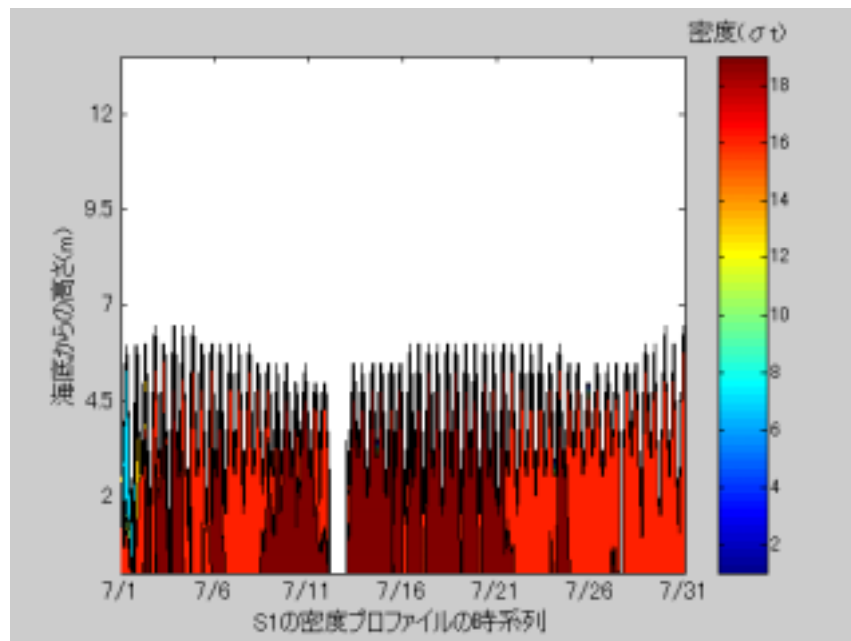


図 2.31 : 2004 年 7 月 S1 の密度プロファイルの時系列

2.2.5 成層崩壊の判断について

図 2.32 は 2003 年 8 月 14 日から 9 月 15 日の各水質の観測データの時系列である。ポイントとして図に番号をつけて 4 つ丸で囲ってある。

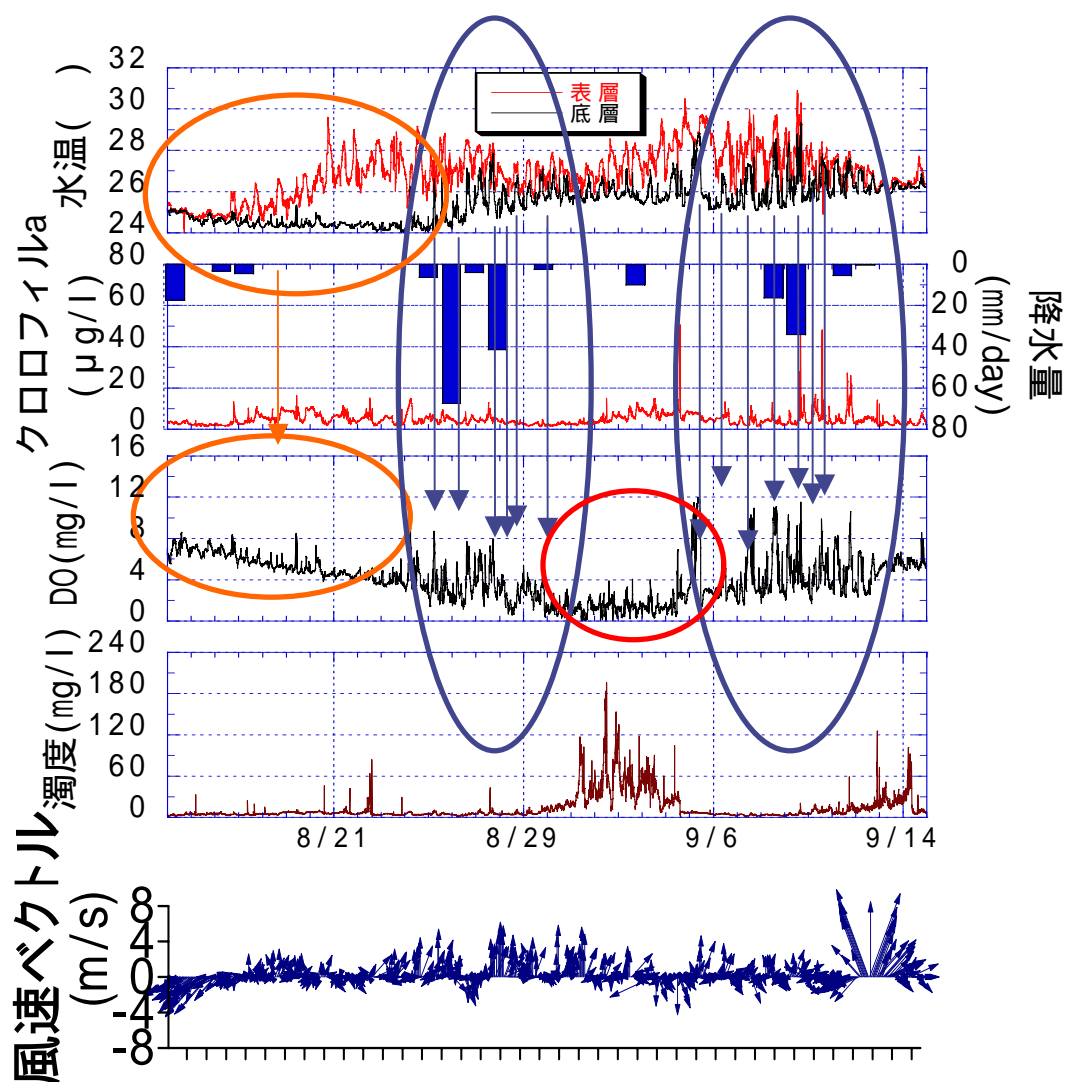


図 2.32 : 2003 年 7 月 B6 の 8 月 14 日から 9 月 15 日の水質観測結果

は DO 濃度の値が時間と共に下がっていく様子がとらえられている。水温の成層が形成されている。この成層により底層の貧酸素化が進行している。

次に成層が壊れたと誤解しやすい現象を説明する。成層の崩壊は強い流れや強風などにより水塊が鉛直にかき乱され、鉛直的に混合することを意味する。図 2.33 にあるように例えば密度成層が形成されている水塊があつて、そこに風

が吹いたときを考える。風が吹くと上層の軽い水塊は右の方に押し寄せられる。そうすると風に押し流された上層の海水の分だけ、補償流として下層の重い海水が左から上昇する。この密度を保ったまま水塊が傾いたとき図の右のようになる。図のような状況で水質計がデータを測定すると、成層が崩壊したかのように誤解する。この実際の例が である。そして密度境界面で摩擦やその他の外力の状況によって水塊が混ざると左図のように混合する。図 2.32 の 8 月 25 日の水温において上層と下層の水温が同温になっている。しかしこれは成層が崩壊したわけではない。このとき底層の DO は上昇するが上層と下層の水温に差ができると底層 DO は低下する。これを の矢印で記した箇所で繰り返している事がわかる。

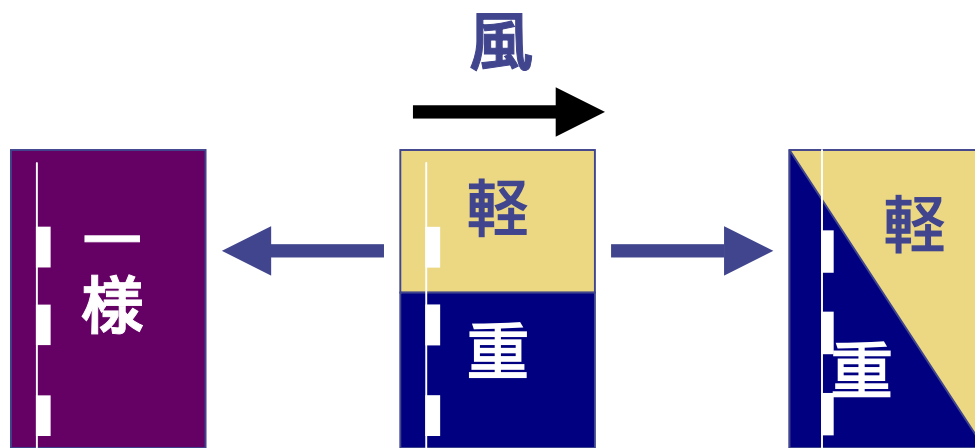


図 2.33：成層の崩壊について

の期間は濁度の値が高いことから巻き上げの影響も考えられるが、一番影響があるのは水温の成層による貧酸素化である。先程示したように の区間では成層が壊れていません。そのため水温の低い水塊では DO は徐々に低下していると考えられます。その傾いていた水塊がやってきて、このような貧酸素水塊が形成されたと考えられます。底層 DO と風との対応を検討する。7 月 24 日から 7 月 27 日は南風が卓越し、このとき底層 DO は下降傾向にあり、7 月 27 日に北風が吹き、底層 DO は上昇傾向になる。7 月 28 日から 9 月 4 日まで南風が卓越し、底層 DO は下降傾向に進行し長期間貧酸素水塊を形成する。9 月 4 日から 9 月 6 日にかけて北風が吹き底層 DO は上昇傾向になる。9 月 6 日以降様々な方向に吹き並行線をだどり、9 月 14 日強い南風により成層が崩壊している様子がわかる。まとめると北風が吹くと底層 DO は上昇し、南風が吹くと底

層 DO は下降する。これは北風が吹くと上層が有明海の湾外に押しやられ、底ではその補償流として B6 の南の方から DO が大きい海水が来たことを意味し、逆に南風が吹くと上層が有明海の湾奥に押しやられ、底ではその補償流として B6 の北、有明海の湾奥から DO が小さい海水が来たことを意味する。夏場有明海湾奥では貧酸素化が顕著であることから、水塊が図 2.33 の右図のように傾いて、風向によって底層 DO の大きさが変動した。

2.2.6 密度成層への水温と塩分の寄与度について

観測結果で示したように諫早湾の貧酸素水塊形成の必須条件は密度成層の形成である。密度は塩分や水温に依存している。そこで貧酸素水塊が観測された期間における密度躍層の形成要因について水温差と塩分差から検討した。表 2.2 に調べた期間、計測点を示した。表層と底層との密度差に対する塩分と水温の寄与度を図 2.34 に示した。

ここで塩分・水温の寄与度は

観測で得られた、水温と塩分のデータを用いて表層と底層の密度差を算定

塩分の影響を算定するため、水温は表層と底層平均値、塩分は観測値を用いて密度差を算定

水温の影響を算定するため、水温は観測値、塩分は表層と底層平均値を用いて密度差を算定

上記の ~ の計算値を基に

塩分の寄与度 = $\frac{\text{塩分差}}{\text{密度差}} \times 100$

水温の寄与度 = $\frac{\text{水温差}}{\text{密度差}} \times 100$ として求めた。

この図と表から基本的に密度差への寄与は塩分差の方が大きいことがわかる。

密度を求める際にはクヌーセンの式を用いた。

この結果からほとんどの、塩分の寄与分と水温の寄与分の比は 7 : 3 , 1 : 1 であることがわかり塩分差の影響が大きいことがわかった。

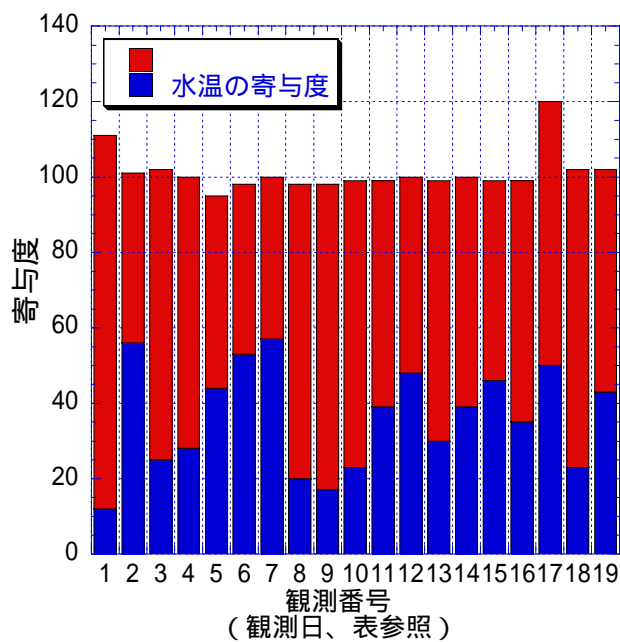


図 2.34：密度成層への塩分と水温の寄与度

表 2.2 図 2.34 の観測番号との対応表

測点	観測年	観測月日	観測番号(図の番号)
B3	2002	7/3-7/6	1
		8/2-8/6	2
	2003	8/23-8/31	3
		9/3-9/6	4
	2004	7/27-7/29	5
		8/13-8/16	6
B4	2002	8/2-8/7	7
	2003	8/16-8/23	8
		8/25-8/31	9
		9/1-9/7	10
	2004	7/27-7/30	11
		8/10-8/16	12
B6	2004	7/12-7/18	13
		7/22-7/31	14
		8/10-8/18	15
		8/22-8/26	16
S1	2003	8/22-8/23	17
S6	2004	7/10-7/11	18
		8/15-8/15	19

2.2.7 湾外からの淡水の影響

前節で諫早湾においては水温差よりも塩分差が密度成層に影響する事明らかになった。淡水の流入は理論的には有明海湾奥の流れは下げ潮の際コリオリの力を受けて潮流は諫早湾内流入する。また既往の観測結果の流速ベクトルデータから見られているように夏季は、平均流として表層では湾内に流れが流入、湾外に流出の傾向が見られる（中山ら，2002）。それ故河川流量や諫早湾より北部で降水等がある時湾内に流入してくる。そこで湾外からの淡水の流入の確認を行う。下にある図（図 2.35、図 2.36、図 2.37）は湾外の河川の代表として筑後川の河川流量と各地点における 2002 年から 2004 年に観測された塩分の夏季における時系列を並べたものである。河川流量が $600\text{m}^3/\text{s}$ 位あると約 2 日後、 $1200\text{m}^3/\text{s}$ 位あると約 1 日後には B6 や B4 に流れてきている。また表層の塩分の場所的なタイムラグを考慮に入れると変化からみて外から淡水が入り込んでい

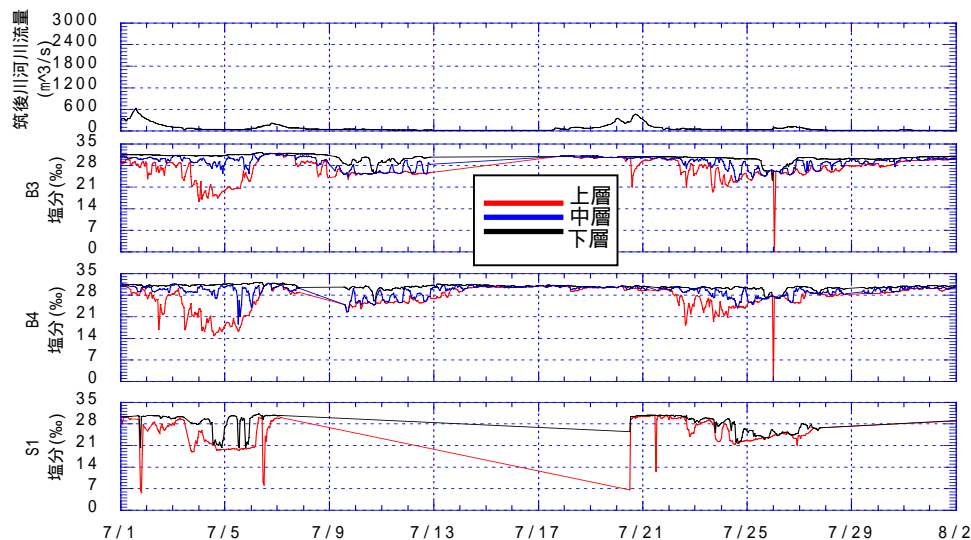


図 3.35 2002 年夏季の塩分の時系列と筑後川河川流量の時系列

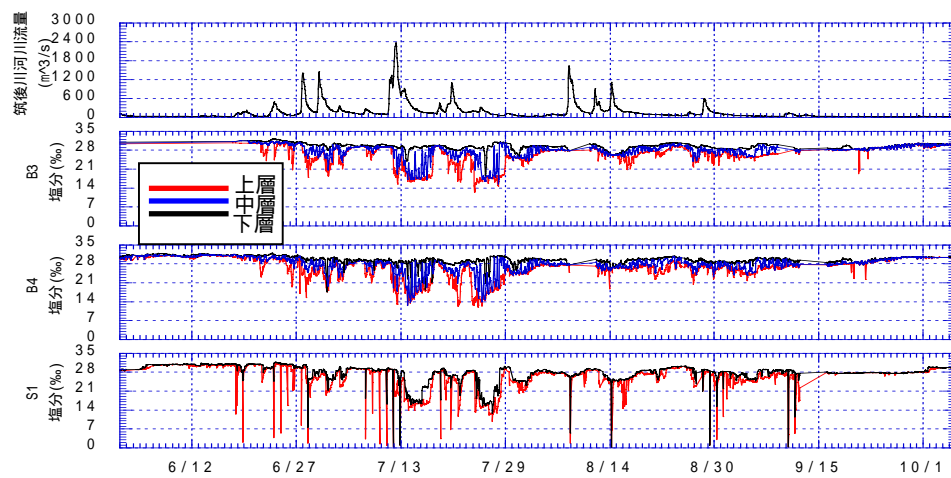


図 3.36 2003 年夏季の塩分の時系列と筑後川河川流量の時系列

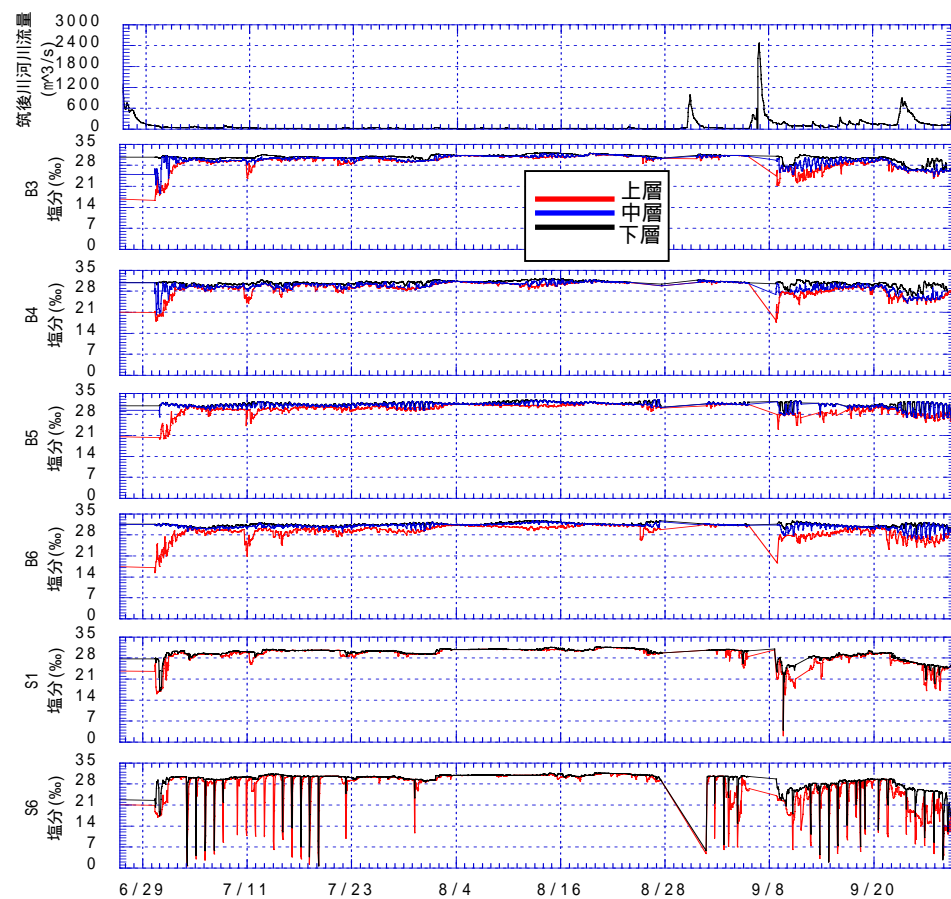


図 3.37 2004 年夏季の塩分の時系列と筑後川河川流量の時系列

2.2.8 風と成層崩壊

2004 年度の夏季（7 月, 8 月, 9 月）の時系列では佐賀気象台の風向ベクトルと B3 の風向ベクトルは概ね方角はあっているが流速が大きく異なっている（図 2.38）。今回は諫早湾を分析する上では B3 の風のデータ用いるのが妥当だと考えられる。

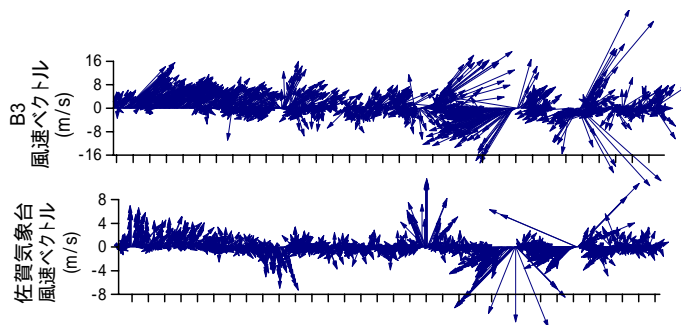


図2.38：B3と佐賀気象台の風速ベクトルの比較

次に成層の崩壊に関して風と対応させる。まず風向は成層の崩壊に関して、多種多様であり関係ないと考えられる。風速に関して検討する。図 2.39、図 2.40、図 2.40 はそれぞれ風速と密度差、塩分差、水温差の関係を示している。3 つの要素共に 10 m/s を超す風が吹くと密度差、塩分差、水温差が 0 に近づく傾向があり、上下混合が促されていることが示唆された。

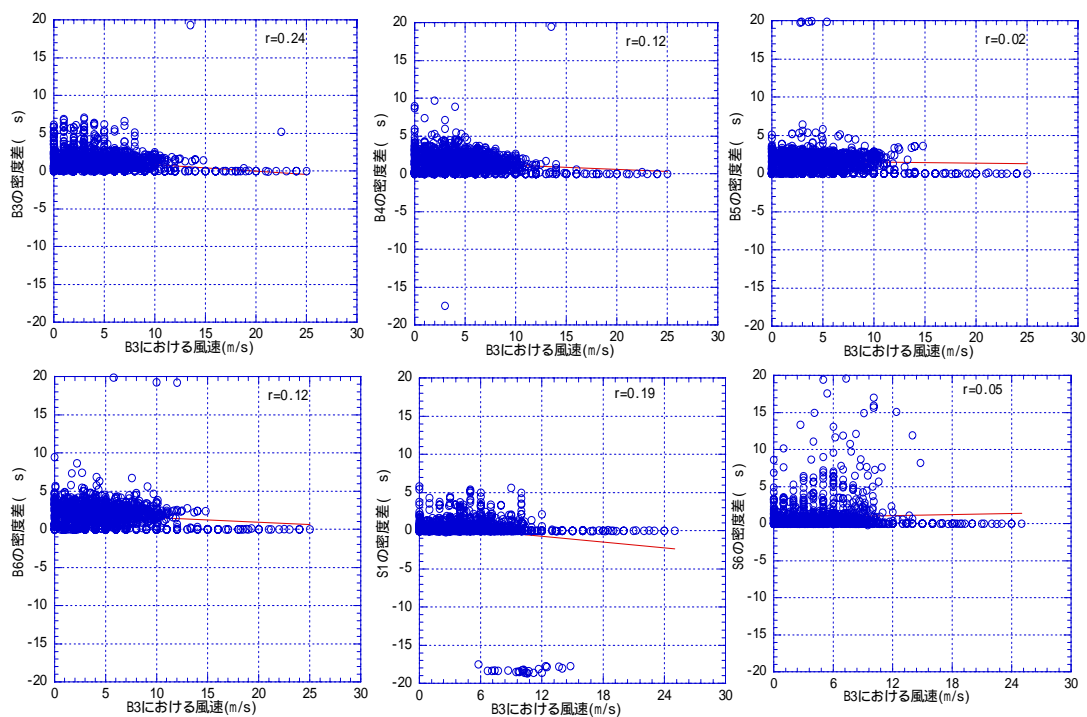


図 2.39: 密度差と風速の関係

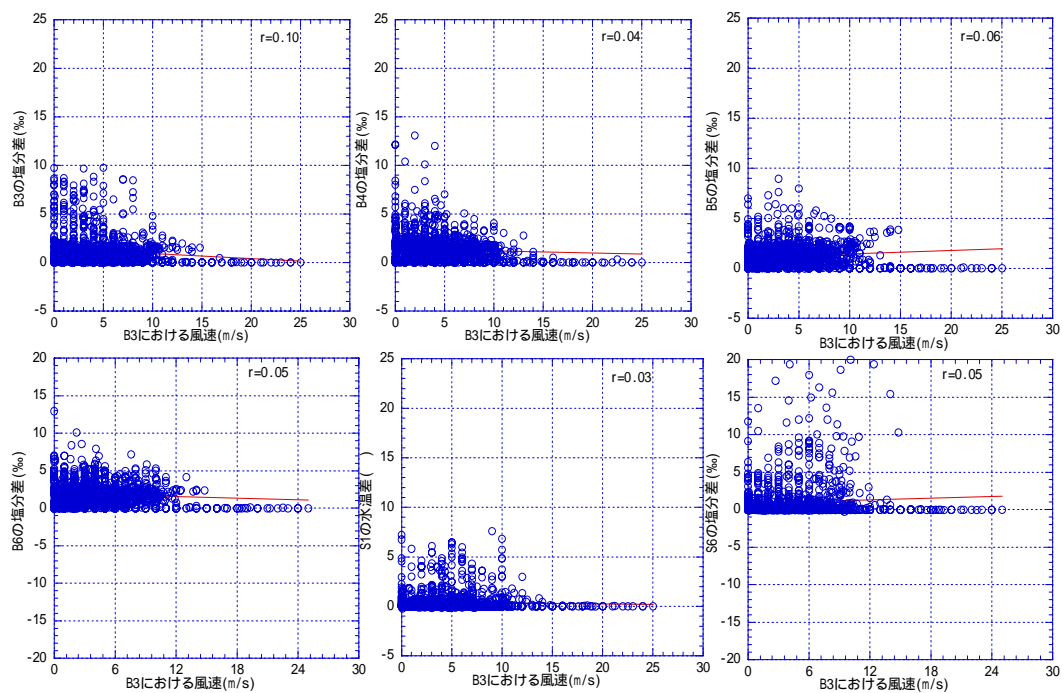


図 2.40: 塩分差と風速の関係

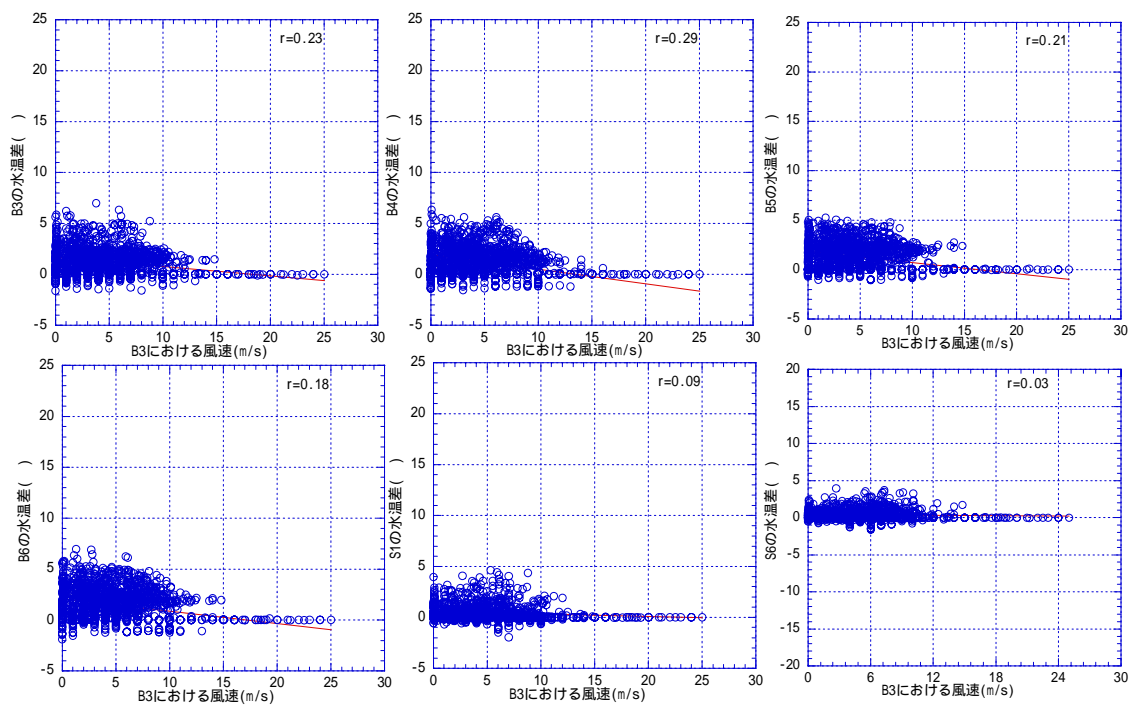


図 2.41: 水温差と風速の関係

2.2.9 プラント・バイサラ周波数と密度成層の崩壊

安定成層の密度場を $\rho_0(z)$ で表せば、 z 軸を鉛直上方にとる時 $\frac{\partial \rho_0}{\partial z} < 0$ である。今 z にあった単位体積の水粒子が、非圧縮性ため密度一定に保って、微小距離 ζ だけ上方に動かされた場合を考える。水粒子は周囲より重いので、元に戻ろうとして振動を開始する。水粒子が周囲を乱さないと仮定すると、浮力を考慮して運動の式は $\rho_0(z) \frac{d^2 \zeta}{dt^2} = \rho_0(z + \zeta) \cdot g - \rho_0(z) \cdot g = \left(\frac{\partial \rho_0}{\partial z} \right) \zeta \cdot g$ になる。今 (2.1) 式で定義される N を用いると、 $\frac{d^2 \zeta}{dt^2} + N^2 \zeta = 0$ を得る。これは単振動の式で、 N は水粒子の上下振動の角周波数を表す。この N はプラント・バイサラ (角) 周波数、または単にバイサラ (角) 周波数と呼ばれ、振動周期は $2\pi/N$ である。 N はまた成層の安定度を示すパラメータである。

$$N = \sqrt{-\frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \rho_0}{\partial z}} \quad (2.1)$$

このパラメータと密度成層の崩壊について検討する。

図 4.42 の期間は 2004 年 7 月 1 日から 7 月 7 日である。上から密度プロファイルの時系列、風速ベクトルの時系列、プラント・バイサラ周波数の時系列である。プラント・バイサラ周波数は計算を簡単にするため

$$N = \sqrt{-\frac{g}{\rho_i} \frac{(\rho_i - \rho_{i+1})}{h}} \quad (2.2)$$

とした。添え字の i は層番号で海底から 1, 2, 3, ... と数える。そのため下層の方が上層よりも密度が小さいときは成層を形成するのに不安定な水塊であり、 N は求めることはできない。

プラント・バイサラ周波数は値が大きい程安定であり、図では茶色が安定で青が不安定である。ピンクの丸はコンターの色が白くなっている所である。ここは密度の逆転がおき下層の方が上層よりも小さい値をとっていることを示す。そのため白いところでは不安定な海域になっている。密度成層の崩壊も同時期に見られることから、影響を与えたと思われる。赤丸以前は茶色の安定した水塊であったが 8m/s 以上の強風が連吹し続けることで、表層の水塊は揺らされ、水塊が不安定になり、上下層で一様になったと考えられる。

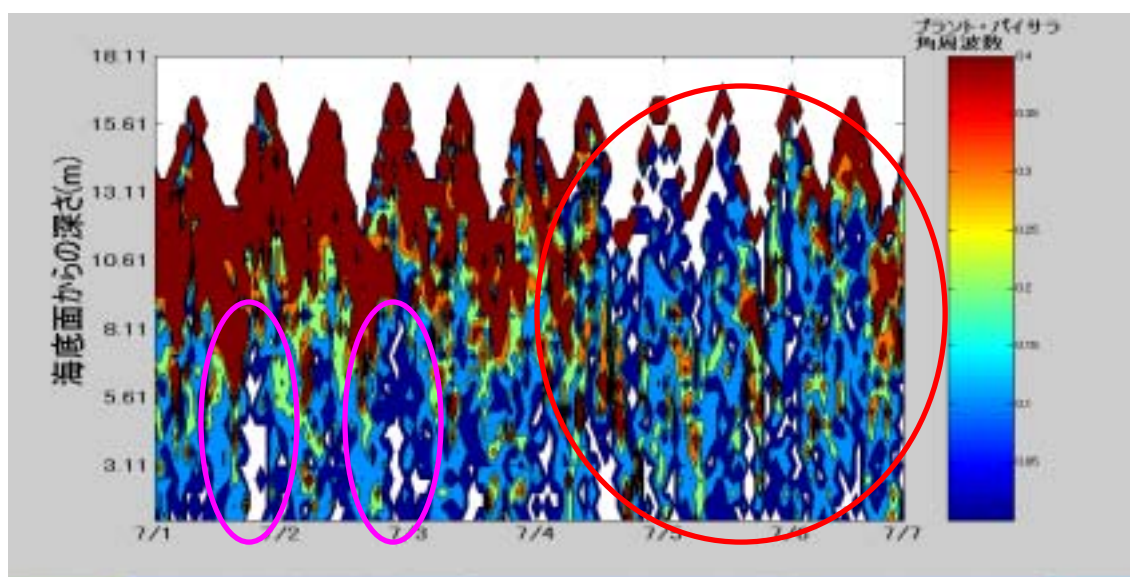
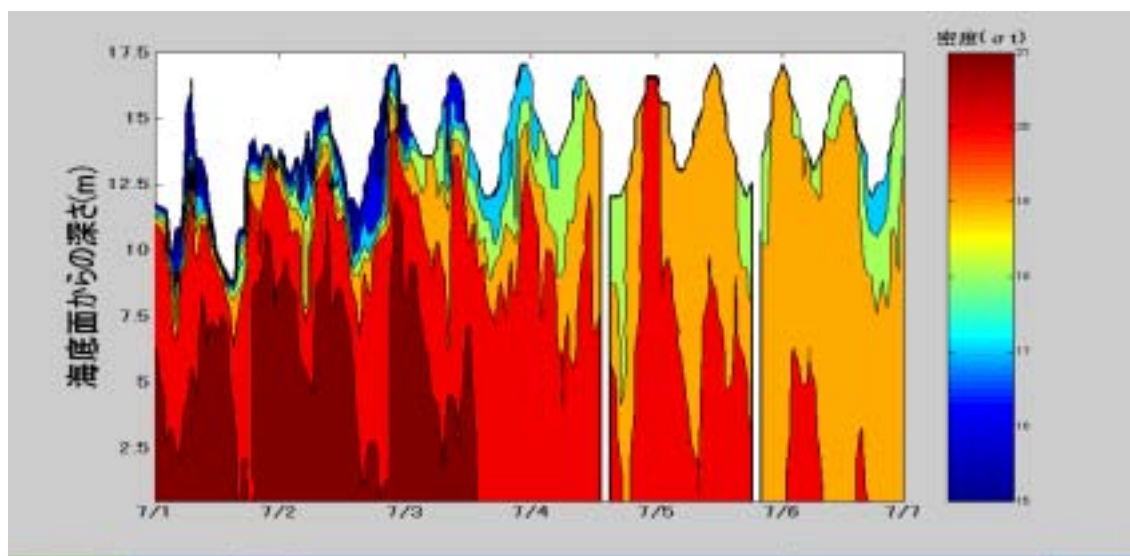


図 4.42：密度プロファイル(上)とプラント・バイサラ振動数(下)の時系列

第 3 章

流況に関する現地観測とその結果、考察について

3.1 現地観測および方法

有明海の流況を把握するために現在、水産庁、環境省、農村振興局を中心に連続観測や一斉観測が水質観測と同様に数多く行われている。また我々の研究室においても流況に関してに 2004 年から測り始めた。以下において現地調査の詳細と得られた結果について説明する。

3.1.1 現地観測の概要

本研究では諫早湾および有明海の貧酸素水塊の形成や消滅に影響を及ぼす、流れの影響を把握するため、諫早湾、有明海を対象にして現地観測を行う。諫早湾口で 2 点、有明海で 1 点、に ADCP（超音波ドップラー流速計）を海底に設置し、定点長期鉛直連続観測を行った。

3.1.2 調査地点と日時

本研究で扱ったデータに関して現地調査地点を図 2.1 に、扱ったデータの期間を表 2.2 に示す。観測の設置や点検は鯉淵幸生講師を中心とする本研究室、日本ミクニヤ株式会社、潜水土で行った。調査点の設定に関しては、湾口において流れが一番大きいと言われて B5。2.2.1 でも説明したが、有明海の代表点として B6、筑後川の影響をうける四本鋼管を選んだ。

表 3.1：流れに関する観測の分析期間

場所	分析期間
B5	2004 年 1 月 14 日 ~ 2004 年 3 月 30 日
B6	2004 年 5 月 14 日 ~ 2004 年 8 月 25 日
四本鋼管	2004 年 5 月 14 日 ~ 2004 年 12 月 1 日

3.1.3 調査項目

流速ベクトルに関する,東西方向の流速,南北方向の流速,流速の絶対値,流れの方向である。

3.1.4 観測機器

RD Instruments 社の Workhorse という ADCP を利用した。超音波ドップラー流向流速計 (ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler)) は流速を超音波を使って遠隔的に測定する流速計で、海域の流向・流速を水深別に 3 次元方向のベクトル量で計測することができる。観測する前にこの ADCP のためのセットアップするソフト WinSC と WinPLAN というを使って観測前に観測について設定する。我々がやることを示す。WinSC により時間を設定し、観測条件の設定をしなくてはならないが、詳細は WinPLAN で行う。WinPLAN では主に観測フィールド、観測方法、観測距離、層厚、1 時間に取得するアンサンプル数、観測期



図 3.1：観測終了後の ADCP

間である。観測終了後、水質計と同様に貝がセンサーの部分も含めて付いてくる（図 3.1）。外側や裏側は傷つかないように、タワシ、歯ブラシ、スポンジや雑巾を使って汚れや生物を落とす。センサー部は敏感な部分なので他の部分以上に注意深く洗う。しかし貝類はこぶりついて取れないので、無理してとらずに酢等の弱酸性の液に 3、4 日つけてきれいに溶かす。収納箱も臭いがきついので、洗剤等を使い臭いが薄まるまで洗う。

3.1.5 観測方法

B5 や B6 のある観測櫓や四本鋼管のある鋼管付近の 1 地点の海底に設置し、海底面上から海面までの鉛直的な多層の流向流速を、10 分間の昼夜連続観測を行った。設置に関しては、櫓や鋼管が測定に影響しないように観測地点から約 10m 離れた場所で、潜水土により設置を行った。また、観測期間中、一ヶ月ごとに一回の計二回、流向流速計及び設置系の点検を行った。図 3.2 に示すように海底面に単管パイプを打ち込み、装置を取り付けた架台を固定した。また架台から流出防止用のアンカーを 2 方向に設置し、ロープ（約 10m）で櫓や鋼管で係留した。ADCP から超音波を送り海底から鉛直方向に流速ベクトルを測定した。測定期間や測定時間間隔、層厚に関しては表 3.2 に示すとおりである。

表 3.2：観測測定時間、層厚

観測地点	観測期間	層厚	測定時間間隔
B5	2004 年 1 月 14 日～2004 年 3 月 30 日	0.5m	10min
B6	2004 年 5 月 14 日～2004 年 8 月 25 日	0.5m	5min
	2004 年 8 月 25 日～12 月 1 日	0.5m	10min
四本鋼管	2004 年 5 月 14 日～2004 年 8 月 18 日	0.25m	5min

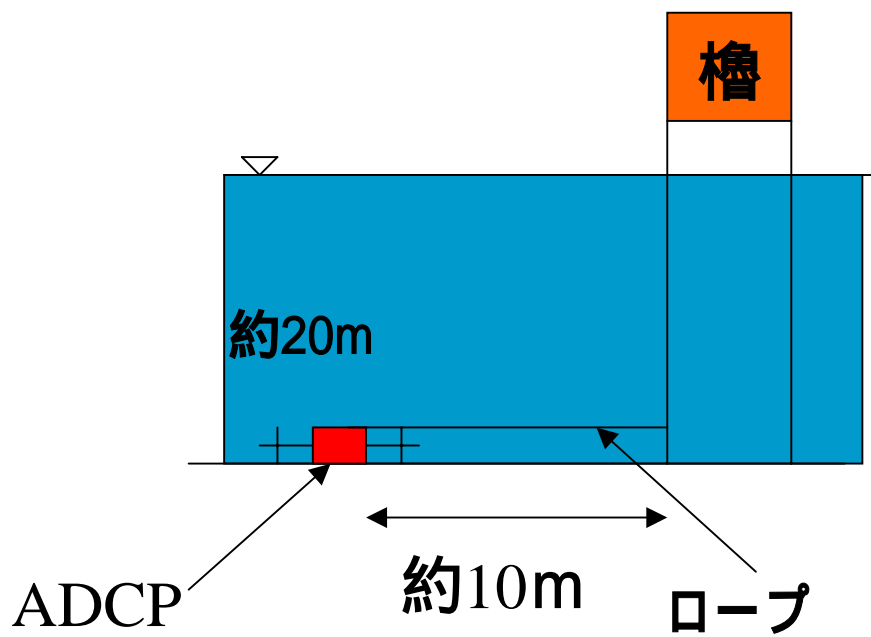


図 3.2 B5 を例にした ADCP 流向流速設置状況(上) , ADCP , B5 地点の観測櫓

3.2 観測結果、考察

データを私が全て時系列に並べ図にし分析した。データとして東西方向流速、北南方向流速、水平流速、鉛直流速、水平流向のデータを使って潮流の時系列や潮流の 25 時間移動の時系列を観察した（例として図 2.4）。また WorkHorse 専用の図化ソフトも用いて図 2.5 のようにして観察もした。本研究は貧酸素化の形成や消滅に関わる原因を目的にしている。この流速ベクトルデータを利用することにより貧酸素化、貧酸素水塊の発生原因である密度成層の崩壊について検討する。B6 において 2004 年 7 月に水質と流速ベクトルデータがそろっている。また 7 月 1 日から 7 月 7 日の間に密度成層が発達し崩壊まで観測されている。この期間のデータを中心に結果を解説する。

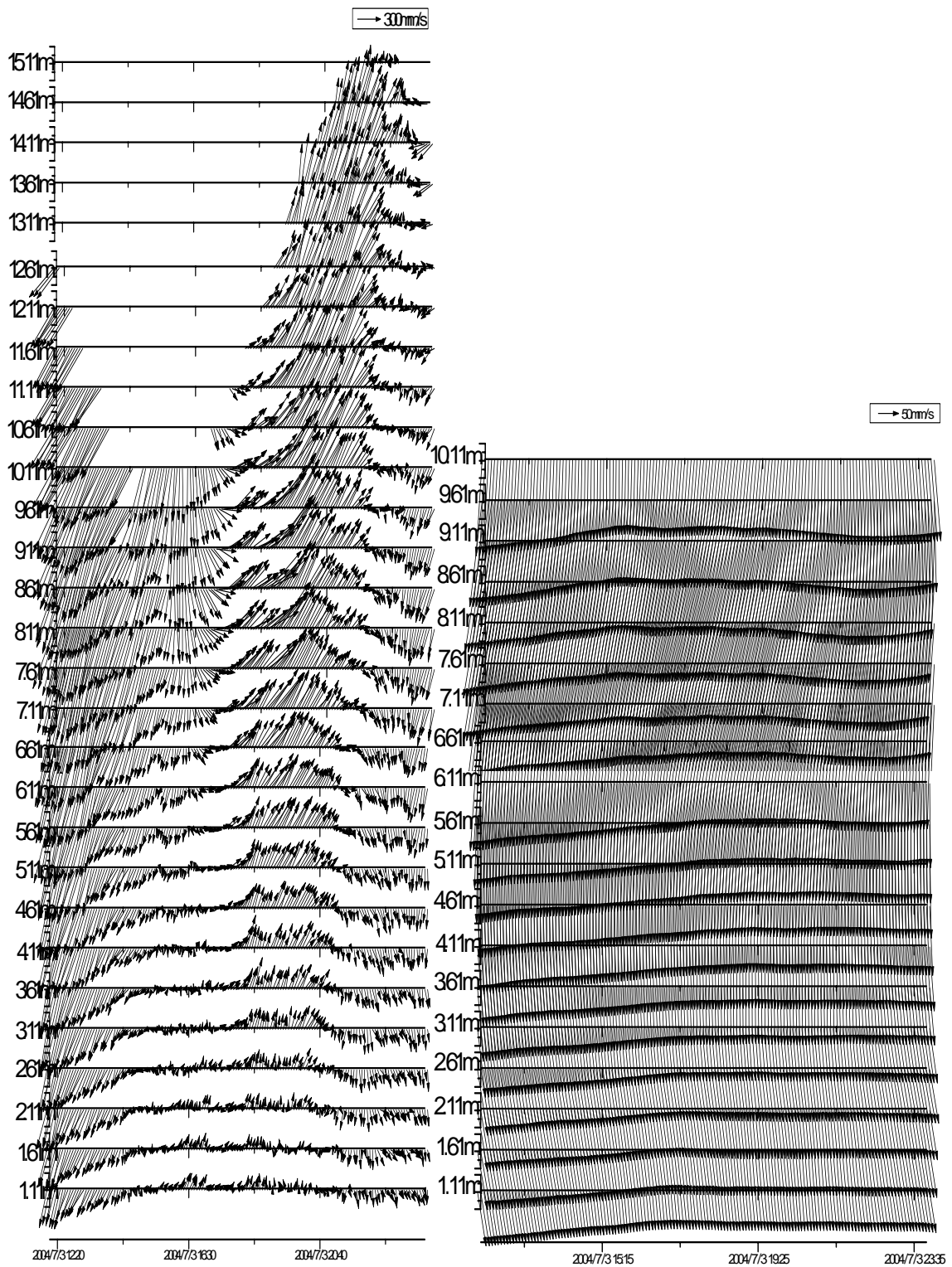


図 3.3 : B6 における 7 月 3 日 12 時から 24 時の潮流 (左) と潮流の 25 時間移動平均 (右)

風速ベクトル

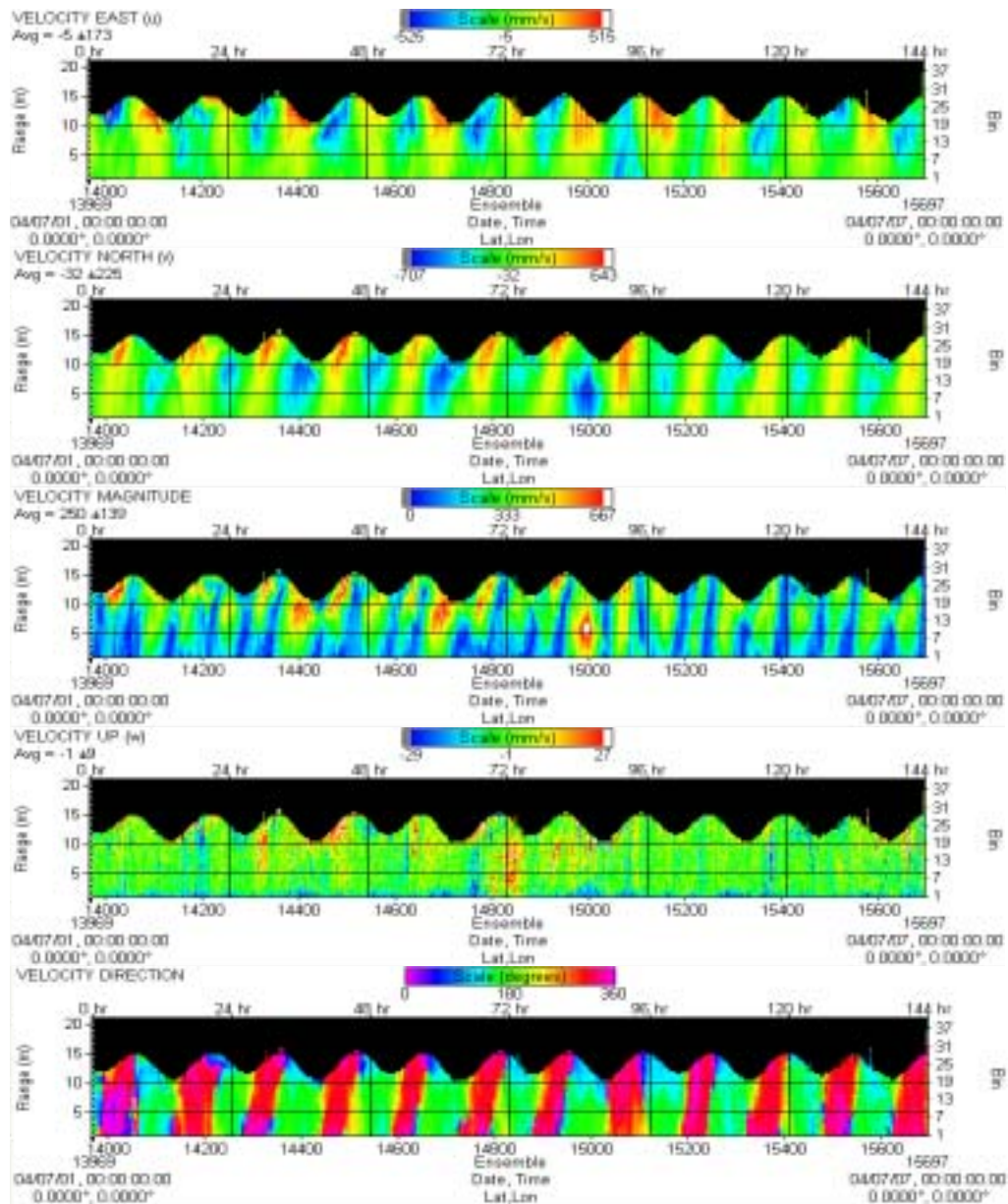
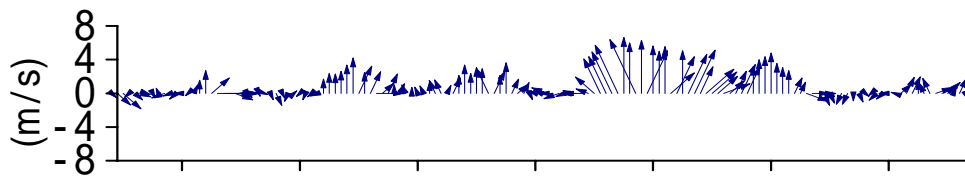


図 3.4 : WinADCP を用いて作成した図 (上から東西方向成分、北南成分、水平流速、鉛直速度、水平流向、である)

3.2.1 シアと成層状態の関係

図 3.5 と図 3.6 は B6 における大潮期の平均流速の鉛直分布を示したものである。

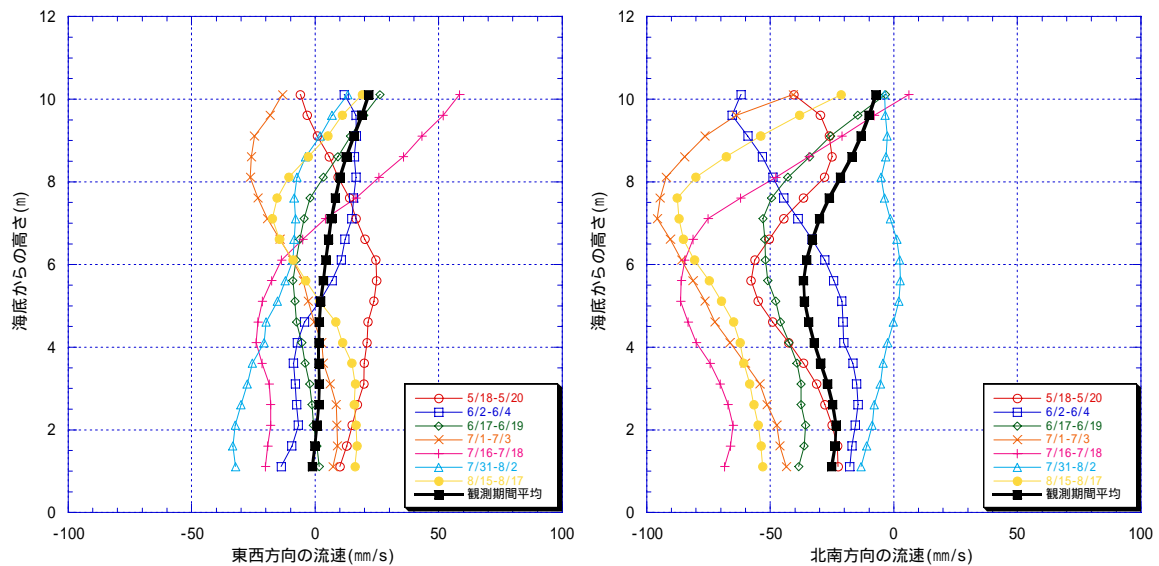


図 3.5 : B6 における大潮期の平均流速分布(前半)

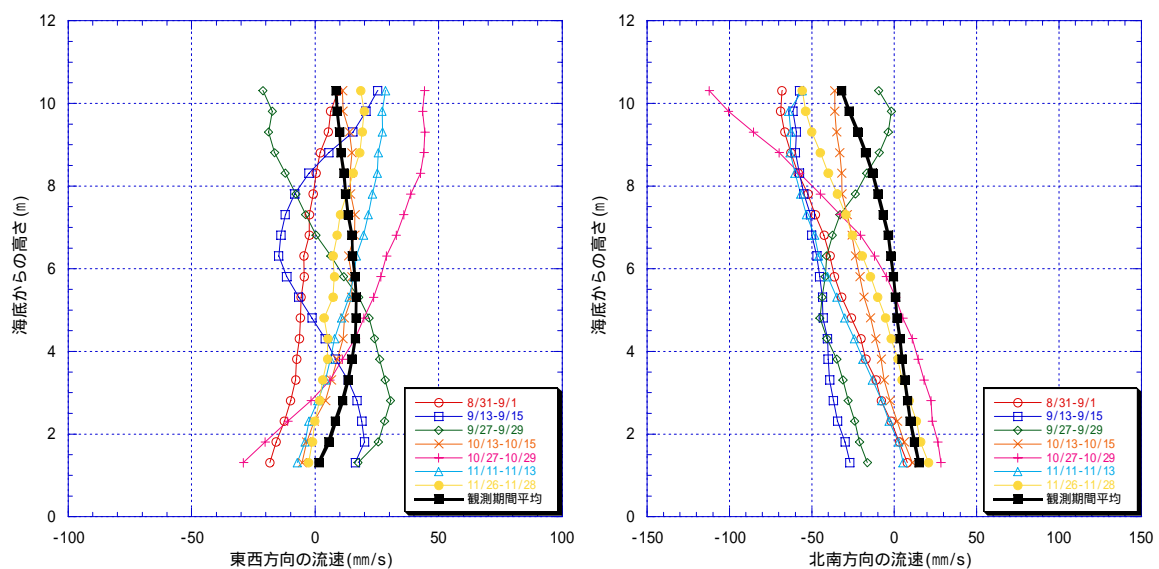


図 3.6 : B6 における大潮期の平均流速分布 (後半)

図 3.7、図 3.8 は B 6 における小潮期の平均流速の鉛直分布を示したものである。

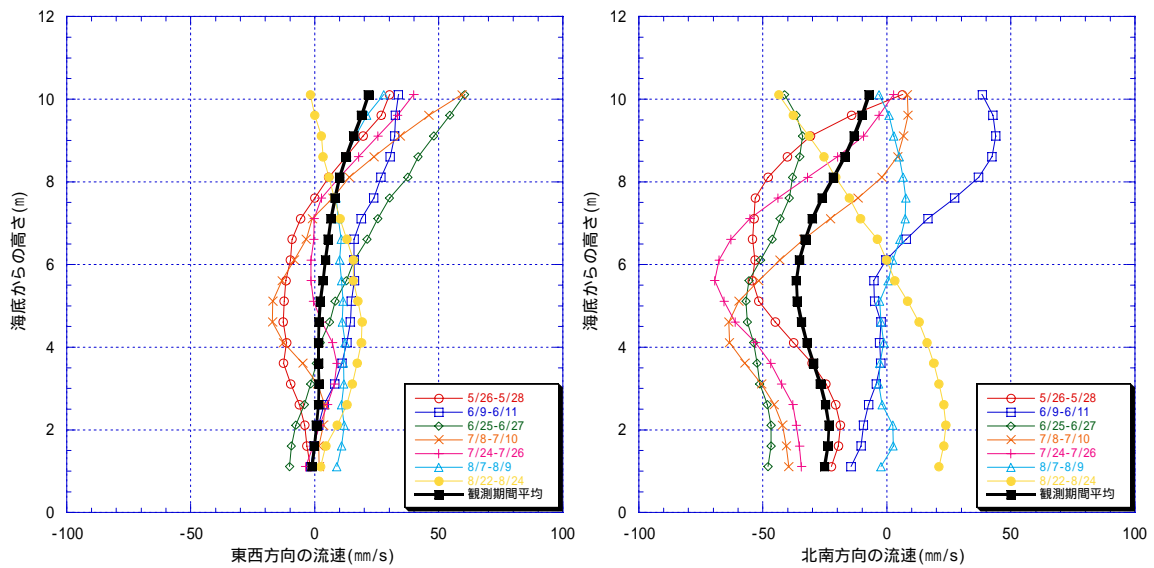


図 3.7 : B 6 における小潮期の平均流速分布 (前半)

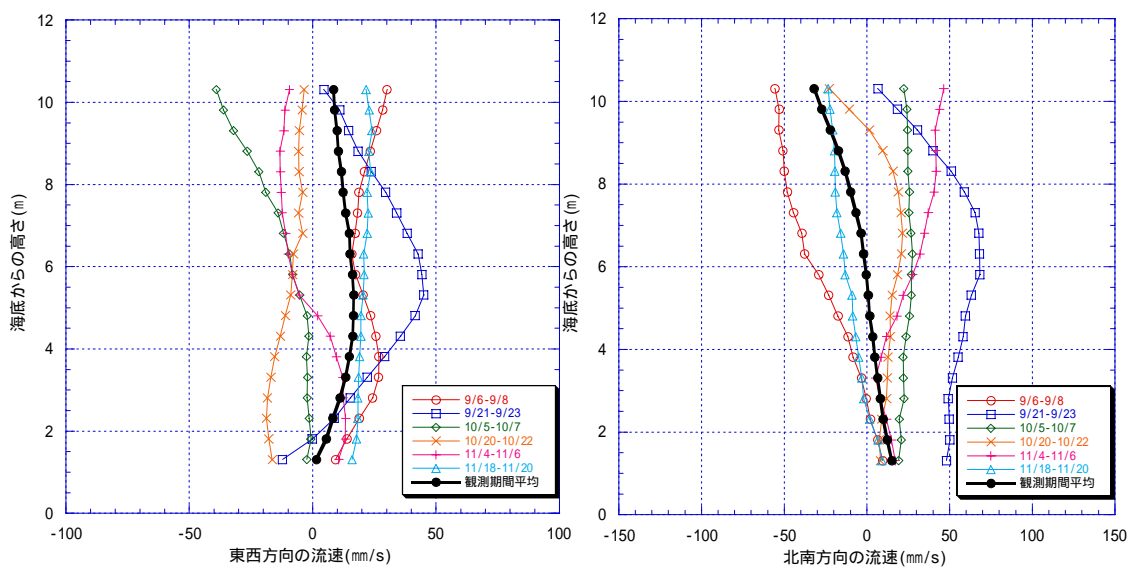


図 3.8 : B 6 における小潮の平均流速分布

平均流速は気象庁において発表されている大潮、小潮の日の前後 1 日、計 3 日の平均を取った流速である。大潮期は上層で諫早湾内に流入し、下層で湾外流出する傾向が記録された。小潮期は上下層で湾内に流入する傾向が観測され、11 月頃から上下層ともに湾外に流出する傾向が観測された。そして大潮期、小潮期ともに上層と下層では流速の大きさに差はなくても、中層の流速の大きさと差があるときが多く観測された。現実の海では成層していても海水が静止していることは少なく強弱のある一般流があり、これがシアを持つ事がある。シアとは鉛直方向の速度勾配であり、水平流速を u として鉛直上向き正として

$$S = \frac{du}{dz} \quad (1.1)$$

で表される。単純な例として上下で 2 つの層がある場合を考える。上下層の流速差が大きいと、この水塊にできる内部波に対する境界面の強いシア（局所的に渦面を形成）により境界面の波は不安定になり碎波する。本来安定と思われる成層流体において、鉛直方向に混合を生じる機構として重要である。

そこで 2004 年 7 月 1 日から 7 月 7 日における密度プロファイルの時系列とシアの鉛直プロファイルの時系列の応答関係を検討する。シアに関しては議論を簡単にするため

$$S = \frac{\Delta u}{H} \quad (1.2)$$

とした。観測データとして海底からやく 1m から層厚 0.5m 間隔で表層までのデータが、5 分間隔であるので、 $H=0.5\text{m}$ とし $u=0.5\text{m}$ 上の層との流速差の絶対値とした。

上から密度、B3 における風速ベクトル、シアである。シアは白いほど水塊が不安定であることを示している。大きいシアが赤い丸で記したところで観測された。この 4 期に共通しているのは干潮から上げ潮時にかけて強いシアができていく。この時の風向ベクトルはいずれも南風だった。特に 7 月 2 日辺りは大潮にあたり、この日の平均流向は図 2.6 の 7 月 1 日から 7 月 3 日の平均流速の分布で示されるように、南向きであり、上げ潮かつ南風で吹寄せられ有明海の奥部に向かう北向きの流れとは反対向きなので大きなシアがあると推測できる。風速ベクトルの緑丸の部分でも南風で上げ潮だがシアが大きくなる。これは長い時間南風に吹寄せられたため層間の流速差が小さくなったからである。図 2.7 の 7 月 8 日から 7 月 10 日の平均流速の分布において、表層の流向が北向きになっていることから、流速差が小さくなっていることが観測されている。

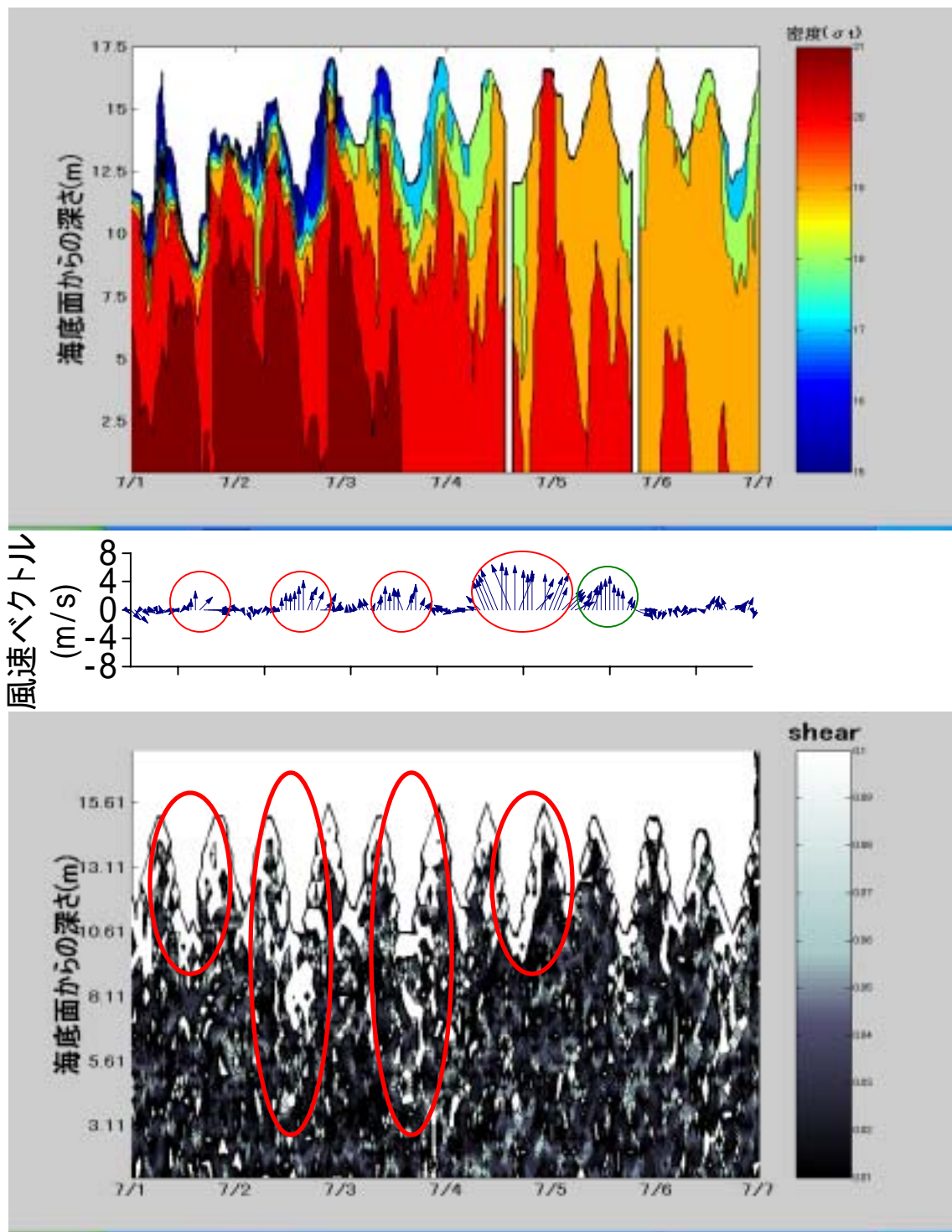


図 3.9 : 密度(上)とシア(下)の鉛直プロファイル時系列

第 4 章

結論と今後の課題

4.1 結論

本研究では、最近、漁業環境が悪化して言われている諫早湾内での 2 枚貝を中心とした死滅は大きな問題であり、対策が必要である。この原因は底層の水塊の貧酸素化の発生、貧酸素水塊の形成が原因となっている。しかしこの貧酸素化の発生や貧酸素水塊形成の機構がわかっていない。既往の研究も少なく貧酸素水塊の形成に関する原因も何が支配要因かが明らかにされていない。諫早湾の夏の水質の動態や流況などの観測結果を分析も交えて、貧酸素化の発生や貧酸素水塊の形成の支配要因を明らかにすることを目指した。

原因究明のために水質、流況観測した諫早湾を中心とした観測地点総 7 点のべ 10 年分の水質データを分析した。方法は気象、水質、流況に関するデータを時系列に並べ 1 つずつ検討し、その後、各要素同士の相互関係について調べた。既往の研究なども参考にしながら自分の持っているデータと照らし合わせながら現象を追った。その結果、以下のような結論が得られた。

- 貧酸素水塊形成には支配要因として密度成層形成が必須条件であることが明らかになった。密度成層が形成されると、底層の D0 は下降する。上層の水塊と混じり合うことで上層の D0 が上昇する。この 2 つの現象が 2001 年から 2004 年の 7 月において全観測地点で観測され密度プロファイルの時系列等を用いて本論分で示した。
- 密度成層の崩壊に関して、水塊の傾きについて議論し、南風により底層の D0 が減少し北風により底層の D0 が上昇する事が観測された。これは成層が形成されている状況下で風が吹くことによって上層の水塊が吹寄せられ、風向きの方に押しやられ、その補償流として底層の水塊が上昇する仕組みである。この原理により南風が吹くときは有明海の湾奥の D0 が低いと思われる底層水が進入し、北風が吹くときは、底層に外海からの海水が進入している事が明らかになった。
- また本文では検討はしていないが、バクテリアの分解のために起きる貧酸

素化、貧酸素水塊について考えた。2001 年から 2004 年の観測データからは密度成層の方が影響が大きい。なぜなら底層の水温と底層の DO の下降勾配に関して、水温が大きい時にその大きさに比例してバクテリアによる分解が活発に行われ貧酸素化、貧酸素水塊ができた例がなかったからである。

- 密度成層形成の塩分差と水温差の寄与度は塩分対水温で 7 : 3 から 1 : 1 である事が明らかになり、塩分の影響が水温の影響よりも大きいことが明らかになった。
- 塩分差が大きくなる要因の 1 つとして淡水の流入が考えられる。筑後川の河川流量と上層塩分の低下の応答を比べることによって諫早湾外の淡水の影響が大きいことが明らかになった。潮受け堤防の南部排水門からの排水の影響も検討した。排水時は大きく塩分は低下するがすぐに拡散または移流により、密度成層は長期間形成されない。しかしこの塩分の低下によって密度成層ができ、短期間で貧酸素化が発生し貧酸素水塊もできることもあることから軽視できないことが明らかになった。
- B3 において風速が 10m/s 以上吹くと密度成層が消滅する事が明らかになった。
- プラント・バイサラ周波数を用いて密度成層の安定性について検討した。穂水面は比較的安定しているが、8m/s 以上の南風が連吹すると、乱され鉛直混合が起こり、成層が崩壊することが観測され、水粒子の振動が関係することがわかった。
- B6 の流れに関して、海底から 6m から 8m あたりに内部波のような流速が大きい水塊が観測された。
- シアを用いて密度成層の安定性に関して検討した。上げ潮と南風が重なりとシアが大きくなり鉛直混合する傾向が観測された。

4.2 今後の課題

本研究の手法は観測データの時系列を観察することが主である。数多くのデータを分析したので、私自身今回の結果には自身を持っている。しかし定性的な結果にすぎないので、統計的な処理を行い定量化することで知見の信頼性をあげる事が大事である。しかし今回詳しく記載しなかったが巻き上げによる再懸濁による酸素消費や底泥の酸素消費など未解な問題が多くあるので、定性的な知見を増やすことも大事なので、連続観測や定期観測を通じて水質データ流況データを観測機器や採水、採泥を数多く行う必要がある。また物理生物化学の現象が海では同時に起こるので、見えない現象多くその現象を明らかにするた

めにも数値シミュレーション等が必要になってくる。

参考文献

- (1)有田正光 編著(1998):水圏の環境, 電気大出版局, pp. 14-15, pp.112-115
- (2)磯部雅彦(2001):有明海における水環境の現状, 水環境学会誌, Vol.24 No.10, pp.659-664
- (3)梶原義範・富田友幸・中野拓治・磯部雅彦(2003):有明海湾奥西部海域における2002年夏季の貧酸素水塊の発生状況について, 土木学会論文集 No. 747/ -65, pp.187-196
- (4)鯉淵幸生・佐々木淳・磯部雅彦(2002):2001年の有明海における水質の動態解明, 海岸工学論文集第49巻, pp.1056-1060
- (5)鯉淵幸生・佐々木淳・有田正光・磯部雅彦(2003):有明海における水質変動の支配要因, 海岸工学論文集第50巻, pp.971-975
- (6)佐々木淳(2004):内湾における水質変動特性, 2004年度(第40回)水工学に関する夏期研修会論議集 Bコース, 土木学会水工学委員会・海岸工学委員会, pp.B-7-2
- (7)佐藤正典・東幹夫・佐藤慎一・加藤夏絵・市川敏弘(2001):諫早湾・有明海で何がおこっているのか?, 化学, 第71巻, No. 7, pp. 882-894
- (8)滝川清・田中健路・外村隆臣・西岡律恵・青山千春(2003):有明海の過去25年間における海域環境の変動特性, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 1001-1005.
- (9)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.
- (10)中山哲巖, 佐伯信哉, 時吉学, 木元克則(2003):有明海北西部で発生する貧酸素水塊に着目した現地調査, 海岸工学論文集, 第50巻, pp.976-980.
- (11)中山哲巖, 佐伯信哉, 木元克則(2004):諫早湾での夏季における流動, 成層安定性と底層の溶存酸素の関係, 海岸工学論文集, 第51巻, pp.906-910.
- (12)柳哲雄(1989):シンポジウム「貧酸素化」のまとめ、沿岸域海洋研究ノート、Vol. 26, No. 2, pp. 141-145.

謝辞

修士課程が終わろうとしています。2年間本当に楽しかったです。大学院になり新しい環境ではじめることになり、とても新鮮でした。研究室以外でも新しいコミュニティで友人を作る事ができました。沿岸域環境研究室に行こうと思った志望動機は、海のお医者さんになりたかったからです。沿岸域では環境悪化が激しく、その影響で有明海をはじめ東京湾の水環境が劇的に変化しています。今回の研究結果がピヨフェルミン位の効き目があればいいと思います。

研究活動に関しては東京湾観測に月に2回行き、‘きよすみ’という千葉県の船にのり千葉県の職員の方々と一緒に観測行った。時には船酔いに耐えながら、頑張りました。有明海にも2回行きました。潮受け堤防を実際に見たり、諫早湾、有明海を実際に船で横断でき、とてもいい経験となっています。

研究に関してはゼミ等で先生方や仲間からアドバイスを多々いただきました。磯部先生には最後の最後まで迷惑をかけてしまった。本当にすいません。先生の所に行くと、私はいつも研究のことだけでなく、社会に出て行く人間としての生き方を大変多く教わった。いつも相手の立場にたって優しい言葉でかつ的確な厳しいアドバイスをしてくれどうもありがとうございました。鯉淵先生には現地観測での気の配り方や、手際の良さはいつも勉強になりました。精神面についても、メール等でアドバイスを頂ありがとうございました。佐藤先生には大学時代も中央大学において基礎水理学でお世話になり、あの時は先生がこんなに明るい先生だとは思いませんでした。ゼミ等で素朴な質問から、答えられない鋭い質問まで、コメントくださりありがとうございました。都司先生には海の物理的現象について深い質問や知らない多くの現象を聞くことができとてもためになりました。どうもありがとうございます。昨年退官されましたが、渡邊先生には研究だけでなく、日本語から指導を受けました。就職相談にものってくれ、1年という短い間でしたがどうもありがとうございました。助手の本田さんには公私ともに仲良くさせてもらいました。飲みに行ったり、焼肉いったり、とても楽しかったです。修論の締め切り日にはページをふってもらったり、製本してもらったり、お世話になりました。副指導教官の崔先生には中間発表の時アドバイスをいただいたのですが、いい結果が出せなく定性的なものになってしまいました。しかしアドバイスのおかげで統計について少し勉強できました。ありがとうございました。秘書の山上さん児玉さんにも事務的な処理や、くだらない話に付き合ってくださいありがとうございました。先輩たちには研究室での生活の仕方や分からないことを多く教えてもらいました。どうもありがとうございました。後輩たちにもいろいろ気持的な面で学ぶところ多々あり、楽しかったです。研究室での私の生活にかまってくれどうもありがとう。2年間一緒に勉強、研究した同期のメンバーにはいろいろ質問したり、無駄話をしたけど、とても楽しかったです。ありがとう。そして長々と学生生活をさせてくれ、私を全面的にバックアップしてくれた家族に感謝の意を示したい。 2004/02/21 深山 顕寛