

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

梶原 義範¹・富田 友幸²・中野 拓治³・磯部 雅彦⁴

¹正会員 農林水産省農村振興局農地整備課（〒100-8950 東京都千代田区霞ヶ関1-2-1）

E-mail: yoshinori_kajiwara@nm.maff.go.jp

²農林水産省農村振興局資源課（〒100-8950 東京都千代田区霞ヶ関1-2-1）

³正会員 工博 農林水産省農村振興局農地整備課（〒100-8950 東京都千代田区霞ヶ関 1-2-1）

⁴正会員 工博 東京大学教授 大学院新領域創成科学研究所（〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1）

2002年夏季に有明海湾奥西側の海域において貧酸素水塊の現地観測を実施し、得られたデータから貧酸素水塊の発生状況を把握するとともに、当該海域での貧酸素水塊の形成・解消要因等について考察した。佐賀沖の底層においては、観測期間を通じてほぼ継続して貧酸素状況となっており、湾奥北部海域ほど貧酸素化の程度が著しいことが確認された。また、諫早湾においては7月初旬と8月初旬の2回、貧酸素水塊が確認され、これに関与する密度成層の形成要因として、7月初旬は主に塩分が関与するとともに8月初旬には水温と塩分が同程度に関与していることが示唆された。さらに、貧酸素水塊の解消には海域表層の風速増加による水域での上下混合の促進が関与していることが示唆された。

Key Words : hypoxic water, density, salinity, stratification, inner area of Ariake Bay

1. はじめに

貧酸素水塊は、海底及び底層付近での有機物の好気的分解によって底層水中の溶存酸素が消費されると同時に、密度成層によって海水の鉛直混合が阻害され、下層への酸素の供給が減少することによって形成される。これは、特に夏季に特徴的な現象である。貧酸素水塊が形成されると二枚貝等の底生生物の生息環境を悪化させることから、水産資源の保護や水域生態系の保全といった観点からその対策が求められている。

このような現象は、東京湾、瀬戸内海等の内湾域で報告されており、その形成の実態やメカニズムについて調査研究がなされてきた^{1,2,3,4)}。有明海においても、水産省が行った1980年代の有明海浅海定線観測調査で湾奥西部の佐賀沖において夏季の底層の低酸素化が観測されているが⁵⁾、最近では2000年秋から冬にかけてのノリの不作に端を発して、同海域の環境悪化が問題となっており、そのひとつとして貧酸素水塊の発生が指摘されている。

本報では、以上のような背景を踏まえ、長崎県諫早湾から佐賀県太良・鹿島沖へかけての有明海湾奥西部海域における貧酸素水塊の動態を明らかにするための現地観測を実施したので、その結果を報告するとともに、貧酸素水塊の挙動や形成要因について考察を行った。

なお、貧酸素の定義については、溶存酸素濃度による場合と酸素飽和度による場合があり、その基準値も必ずしも定まっていないが、本報においては、水産用水基準に示された内湾漁場の夏季底層における最低限度維持量とされている4.3mg/L(3.0mL/L)を下回った場合を貧酸素として扱う⁶⁾。

2. 有明海の概要

有明海は九州西岸に位置し、福岡、佐賀、長崎、熊本の4県に面した、面積約1,700km²、容積約340億m³、平均水深約20mの九州最大の内湾である。形状は、湾奥から湾央にかけては北西-南東方向に細長く、湾央から湾口へは南北方向へ大きく屈曲して口之津付近が狭窄部となって、東シナ海へつながっている。

図-1には、有明海の底質分布状況を示すが、有明海湾東側の熊本県沖と湾奥部西側の諫早湾から佐賀県太良・鹿島沖が粘土・シルトを主体とする泥質(Md $\phi > 4$)の底質を有する海域となっている⁷⁾。今回の調査海域はこのうち湾奥部西側の泥質域にほぼあたっている。

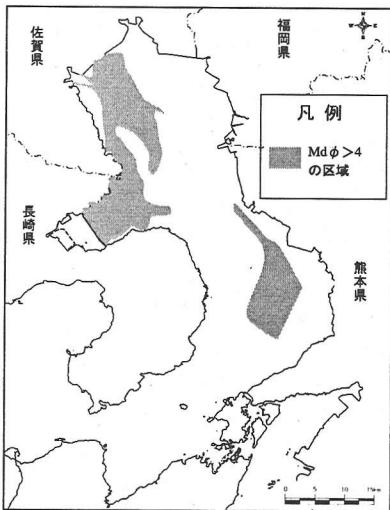


図-1 有明海の底質分布状況

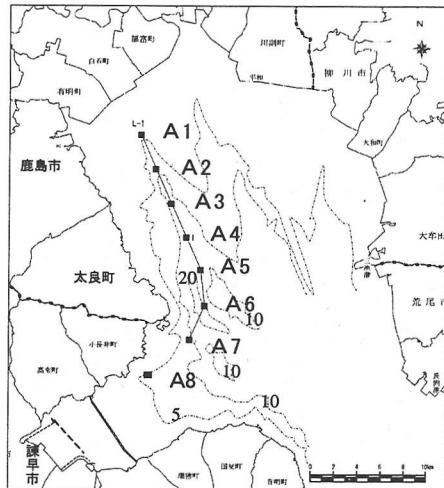


図-2 有明海西部海域での調査位置

表-1 貧酸素水塊に関する現地観測

調査名	観測地点	観測頻度	観測期間
佐賀沖定期鉛直観測	A1,A2,A3,A4 A5,A6,A7	1回／週	6/27～8/22
	A3,A6,A8	12時間連続 (毎正時)	7/21,8/2, 8/9
		連続観測 (10分毎)	7/13～8/22
諫早湾定期鉛直観測	S1,B3,B4	連続観測 (毎正時)	6/27～ 観測中※
	S1,S4,S6,S7 S8,S10,S12 S13,B3,B4 B5,B6	2回／週	5/27～8/22

観測年は2002年
※2003.1.17時点で観測継続中

3. 調査方法

今回（2002年）の調査対象とした有明海湾奥西部海域は、佐賀県鹿島市から同県太良町の沿岸域（以下、「佐賀沖」）から諫早湾にかけての海域である。調査内容の全体を表-1にまとめた。

（1）佐賀沖を中心とした調査

佐賀沖を中心とした調査としては、図-2に示す7地点（A1～A7）で6月27日から8月22日まで、原則として週1回の頻度で多項目水質計（クロロテック及びADR1000：アレック電子社製）を用いて、海面から海底まで0.5m毎に水温、塩分、溶存酸素、濁度及びクロロフィル-aを測定した。また、A3、A6及びA8の3地点では

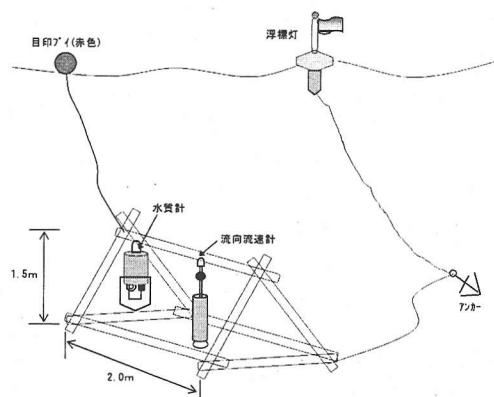


図-3 海底連続観測装置の概要

7月21日（中潮時）、8月2日（小潮時）及び8月9日（大潮時）に7:00～19:00の間の毎正時に多項目水質計（前記と同じ機種）により、海面から海底まで0.5m毎に前記7地点と同じ水質項目を測定するとともに、7月13日から8月22日まで図-3に示すように海上1.0mに、濁度計付き電磁流速計（ACM16：アレック電子社製）とメモリー付多項目水質計（MWQ-III：三洋測器社製）を設置して、水温、塩分、溶存酸素、濁度、潮流（流向、流速）及び水压を、10分毎（0.5秒間隔で30秒間測定した平均値）に観測した。なお、観測期間中4回（7月18日、22日、8月13日、17日）ダイバーによるセンサー部分の清掃を行った。

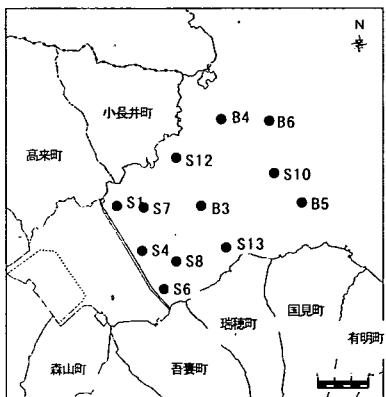


図-4 謙早湾の調査位置

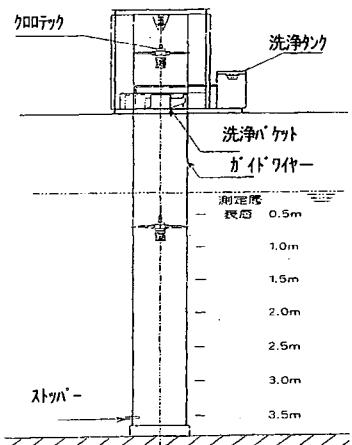


図-5 自動昇降装置を利用した多項目水質計の概要

(2) 謙早湾を中心とした調査

謙早湾内においては、図-4に示す12地点で5月27日から8月22日まで、原則として週2回の頻度で多項目水質計（クロロテック：アレック電子社製）を用いて、海面から海底まで0.1m毎に水温、塩分、溶存酸素、濁度及びクロロフィル-aを測定した。また、このうち、S1（平均水深4m）、B3（平均水深8m）及びB4（平均水深8m）の3地点では6月27日以降、図-5に示す自動昇降装置を利用した多項目水質計（クロロテック：アレック電子社製）により毎正時に、海面から海底まで0.5m毎に前記12地点と同じ水質項目を測定した。なお、1日に1回の頻度で洗浄パケット中の装置でエアを発生して、DOセンサーのキャリブレーションを実施した。

4. 観測結果と考察

(1) 佐賀沖

a) 底層の連続観測

佐賀沖の2地点（A3及びA6）における7月13日から8月22日までの底層（海底上1.0m）の連続観測により得られた溶存酸素及び潮流流速の時系列変化を図-6に示した。両地点の溶存酸素は、観測期間を通じて1~2mg/L程度の変化幅で数時間から十数時間周期の変動を繰り返しながら長期的にゆるやかに変化している。

まず、北側のA3では、7月13日から22日までは4mg/L前後の値で推移した後、溶存酸素濃度は徐々に低下し始め、8月1日頃には3mg/L程度まで低下し、8月3日には1mg/L程度に低下するとともに、その後は8月7日まで1~2mg/Lの貧酸素状態が継続している。その後、8月8日から10日の3日間には2~3mg/L程度の変化幅の数時間から十数時間周期の大きな変動を繰り返しながら、4mg/L程度の水準にまで回復し、その後8月13日まで、4mg/L程度の値で推移している。続く8月13日と14日の両日には2mg/L程度まで急激に低下するとともに、その後は細かい変動を繰り返しながら、観測終了日（8月22日）まで2mg/L程度の貧酸素状態が続いた。

一方、南側のA6では、A3と同様に細かい変動はあるものの7月13日から30日まではほぼ4mg/L前後の値で推移した後、A3より遅れて溶存酸素濃度のゆるやかな低下が認められ、8月7日には2mg/L以下の値と、観測期間中の最低値を記録している。その後、A3と同様に8月8日から10日の3日間には2~3mg/L程度の大きな変動を繰り返しながら、4mg/L程度の水準にまで回復し、その後も観測終了日（8月22日）まで4mg/L程度の値で推移した。

A3とA6の溶存酸素濃度の観測期間中の平均値は、それぞれ3.0mg/L、3.9mg/Lであり、観測期間を通じてほとんど4.3mg/L以下となっていることから、この時期、両地点の底層はほぼ貧酸素化した状態にあったと考えられる。

また、A3とA6における8月2日以降の溶存酸素の挙動を潮流流速との関係でみると、両地点底層の最大流速が20cm/s程度に低下する小潮期には両地点ともに溶存酸素に大きな変動はないが、最大流速が20cm/sを超えると1~3mg/L程度の変化幅でほぼ潮位に対応した変動を繰り返し、8月7日~12日の間に詳細に見ると、A3とA6で干満による溶存酸素濃度の変化が逆位相で推移する観測結果が得られた。

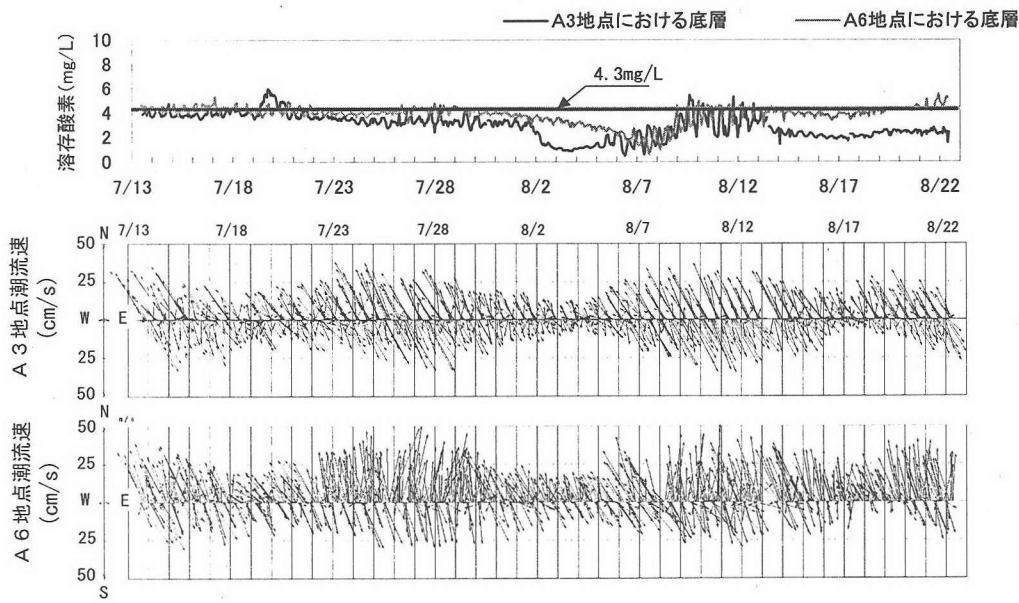
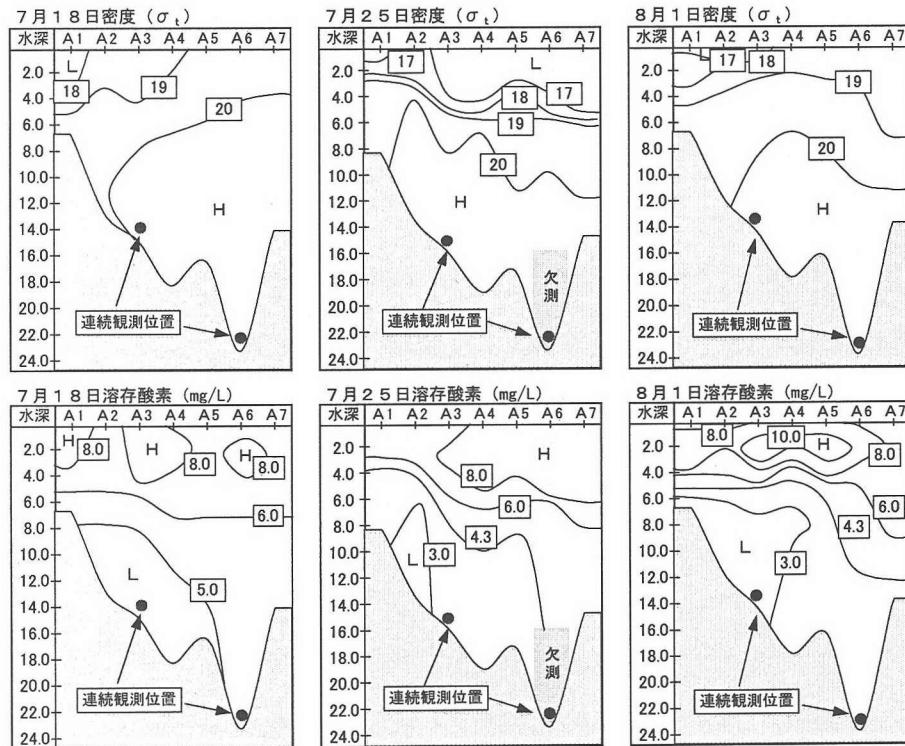


図-6 A3 及び A6 地点の溶存酸素及び潮流流速の経時変化



注) 7月25日のA6地点の観測は水深16m以下は測定できなかった。

図-7 佐賀沖における密度と溶存酸素飽和度の鉛直分布

b) 佐賀沖 7 地点の鉛直観測

この時期の貧酸素水塊の広がりを検討するため、諫早湾北部から佐賀県鹿島市沖までの海域 7 地点 (A1～A7) で 7 月 18 日, 25 日, 8 月 1 日の満潮時に実施した観測結果から作成した密度 (水温と塩分の観測値を基に算定⁸⁾) と溶存酸素飽和度の鉛直分布を図-7 に示す。この図から 7 月 25 日と 8 月 1 日には有明海湾奥西部に広く密度成層が形成され、貧酸素水塊が形成されていたことが読みとれる。特に、8 月 1 日には北側の A1 から A4 に溶存酸素濃度 3mg/L 以下の水塊が分布しており、この海域の底層で溶存酸素の著しい低下が生じていることが確認された。

(2) 諫早湾

a) 鉛直連続観測

諫早湾内 3 地点 (S1, B3, B4) で行った連続鉛直観測結果の内、表層 (海面下 0.5m) と底層 (海底上 1.0m) における塩分と溶存酸素の経時変化を図-8 に、B3 における潮位 (T P) と海上 9.85m の風速 (毎正時 10 分間の平均) を図-9 に示した。

諫早湾湾央 B3 及び湾口北部 B4 における底層の溶存酸素は、数時間から十数時間の周期で 1mg/L 程度の変化幅の変動を繰り返しながら、観測開始 3 日後の 6 月 30 日から 7 月 5 日に低下傾向を示し、7 月 3 日から 7 月 5 日には両地点で貧酸素状態の目安である 4.3mg/L 以下に低下したもの、7 月 6 日には 6mg/L 程度まで上昇し、その後は 7 月 31 日までほぼ 4.3mg/L を上回る水準で推移している。両地点表層の溶存酸素については、欠測期間はあるものの、表層の塩分低下に伴って上昇し、塩分が 25psu を下回るような塩分低下が見られた 7 月 3 日から 7 月 5 日と 7 月 23 日から 7 月 25 日には過飽和となる急激な溶存酸素の上昇が観測されている。

8 月に入ると B3 及び B4 における底層の溶存酸素は徐々に低下し始め、8 月 4 日には 2mg/L 程度の値を示す今夏 2 回目の貧酸素状況が見られたが、8 月 7 日には 4mg/L 程度の水準まで回復している。その後、欠測期間はあるものの、両地点の溶存酸素濃度は 8 月 15 日には 6mg/L 程度まで上昇し、その後、8 月 16 日と 17 日の両日で 4mg/L 程度まで低下 (B4 は欠測) した後、変動を繰り返しながら、8 月 31 日まで 6mg/L 程度の溶存酸素が維持されている。一方、8 月の表層の溶存酸素濃度は、大きな塩分低下が生じていない中で、変動を繰り返しながらも、8 月 31 日まで 6～8mg/L 程度の水準で推移している。

両地点底層の貧酸素状態は 7 月初旬 (7 月 3 日～6 日)、8 月初旬 (8 月 2 日～6 日) とも小潮期に生じていることが図-8 と図-9 から読みとれる。

一方、諫早湾湾奥 S1 の溶存酸素は、表層、底層とも B3, B4 の表層と同じような傾向の経時変化を示してお

り、欠測期間はあるものの、表層の塩分低下に伴って上昇し、塩分が 25psu を下回るような塩分低下がみられた 7 月 3 日から 7 月 5 日と 7 月 23 日から 7 月 25 日には溶存酸素が過飽和となる急激な上昇現象が観測された。観測期間中の溶存酸素濃度の平均値は、表層が 7.97mg/L、底層が 6.99mg/L であり、観測期間中 4.3mg/L 以下まで低下した期間はわずかであった。

b) 一斉観測

諫早湾内 12 地点で実施した定期鉛直観測結果から、7 月 4 日、8 月 1 日の満潮時に北部沿岸 5 地点 (S1, S7, S12, B4, B6) で得られた密度と溶存酸素濃度の鉛直分布を図-10 に示した。7 月 4 日には湾口付近の B4, B6 で、8 月 1 日には湾内北部沿岸全域で貧酸素水塊が形成されている。いずれも湾奥より湾口で溶存酸素が大きく低下している。この両日について密度との関係でみると、7 月 4 日には強い密度成層がみられるのに対し、8 月 1 日は上下層の密度に大きな差はみられなかった。

(3) 諫早湾における貧酸素水塊の特徴

a) 密度成層への水温と塩分の寄与

諫早湾内では 2002 年夏季 (6 月 27 日～8 月 31 日) に継続的な貧酸素化現象は観測されず、7 月 3 日～7 月 6 日と 8 月 2 日～8 月 6 日のいずれも小潮期に底層の貧酸素化が観測された。諫早湾湾口と湾央でこれら 2 回の貧酸素化現象について形成要因を検討した。まず、密度成層の形成要因を把握するため、B3 について表層と底層との密度差に対する塩分と水温の寄与を図-11 に示す。

ここで、塩分・水温の寄与度は

- ① 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
- ② 塩分の影響を算定するため、水温は表層と底層の平均値、塩分は観測値を用いて密度差を算定
- ③ 水温の影響を算定するため、水温は観測値、塩分は表層と底層の平均値を用いて密度差を算定

上記①～③の計算値を基に

$$\text{塩分の寄与度} = \text{②} / \text{①} \times 100$$

$$\text{水温の寄与度} = \text{③} / \text{①} \times 100 \quad \text{として求めた}$$

この図から、7 月 3 日～7 月 6 日の密度差と塩分差の間には高い相関が得られ、塩分と水温の密度差への寄与はほぼ 9 : 1 であることがわかる。同様にして、8 月 2 日～8 月 6 日の密度差への塩分と水温の寄与はほぼ 1 : 1 であることがわかる。つまり 7 月初旬に観測された密度成層の形成には表層と底層間の塩分差が大きく影響しているのに対し、8 月初旬の密度成層は塩分差と水温差が同程度で影響して形成されたものと考えられる。

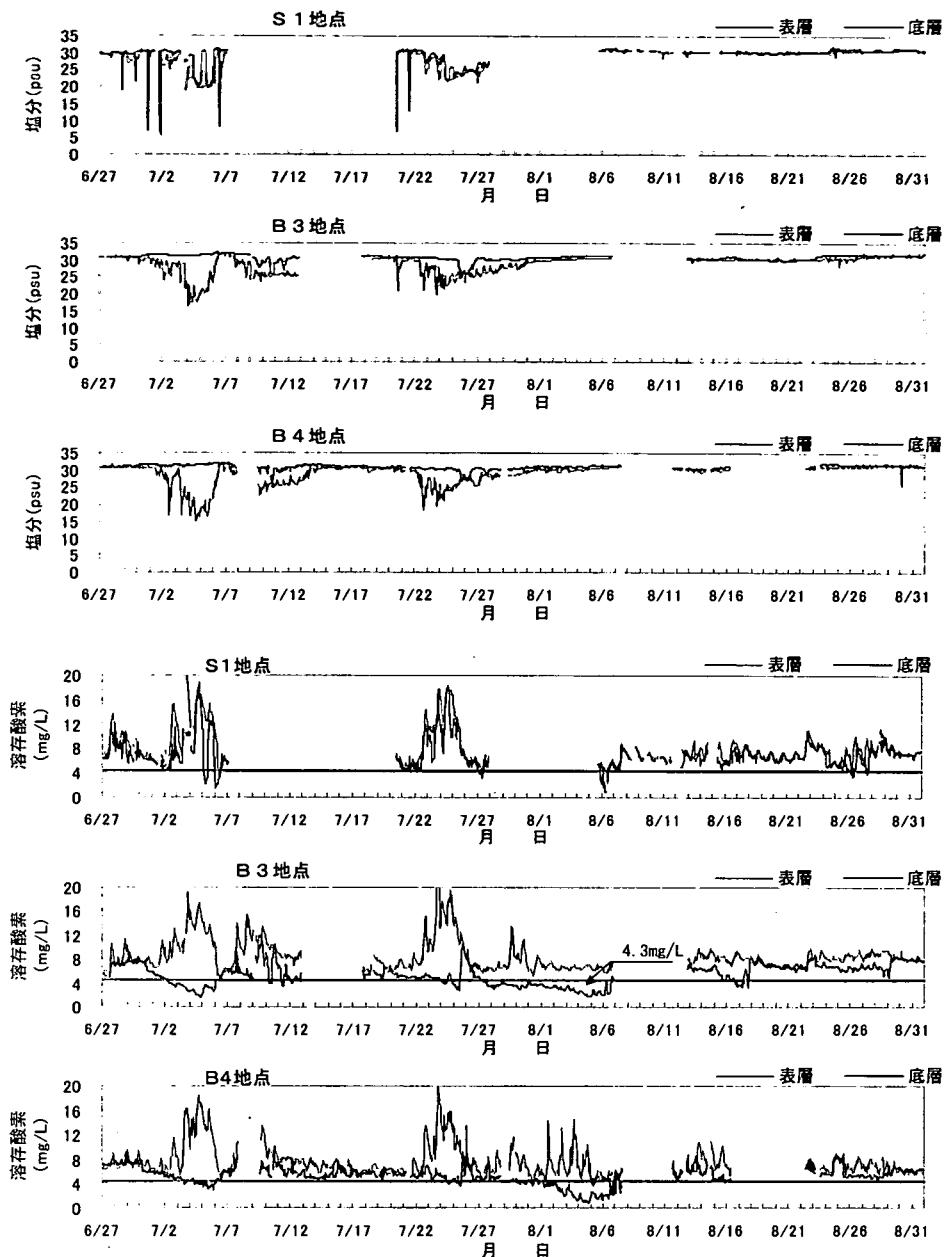


図-8 諸早湾北部海域における塩分と溶存酸素濃度の経時変化

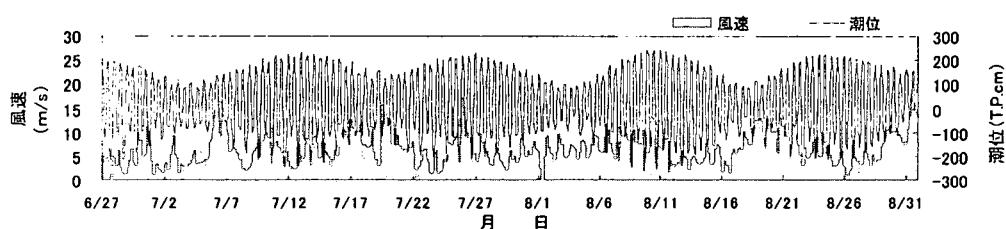


図-9 B3地点における潮位と時間風速

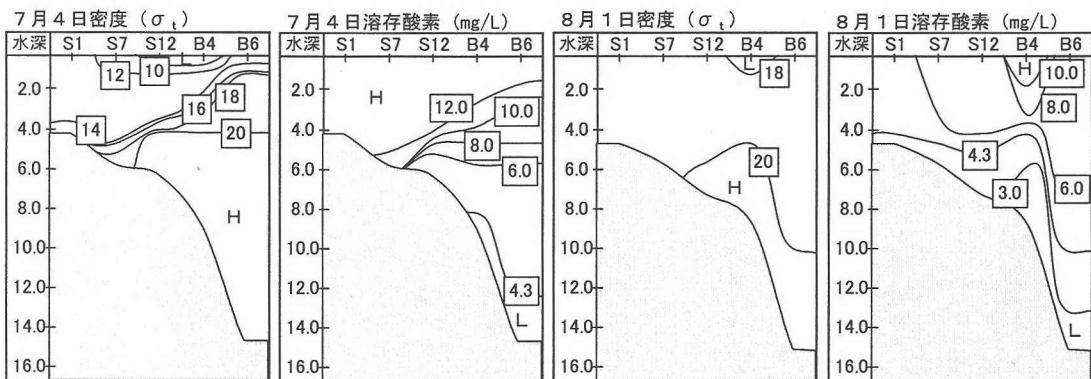


図-10 諫早湾北部海域における密度と溶存酸素の鉛直分布

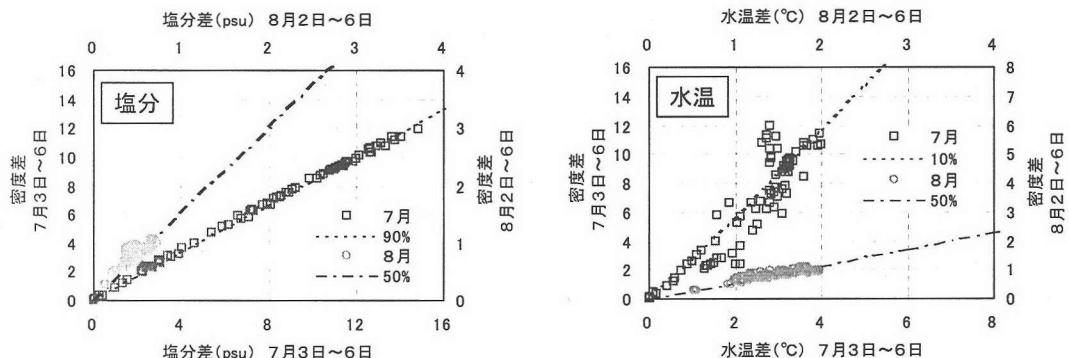


図-11 B3 地点表層と底層における密度差に対する塩分及び水温の寄与

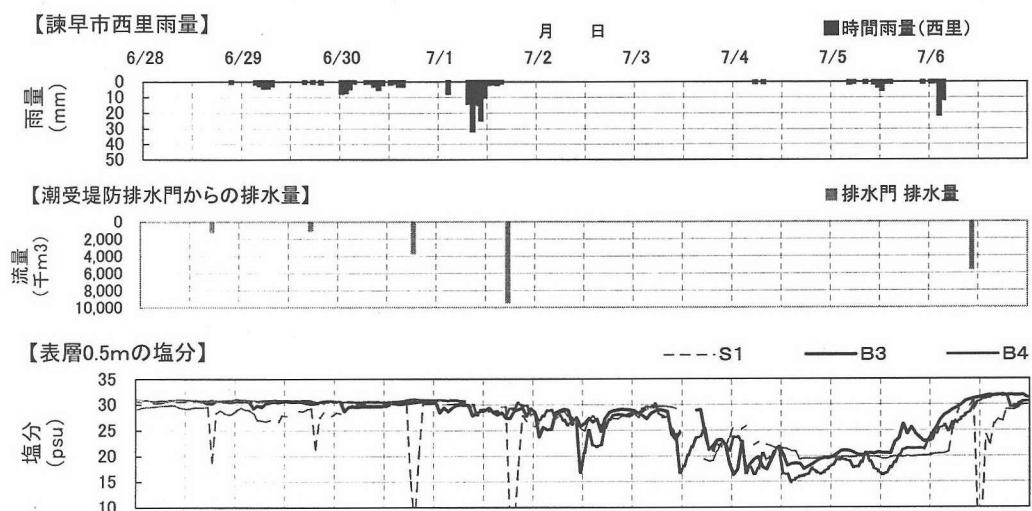
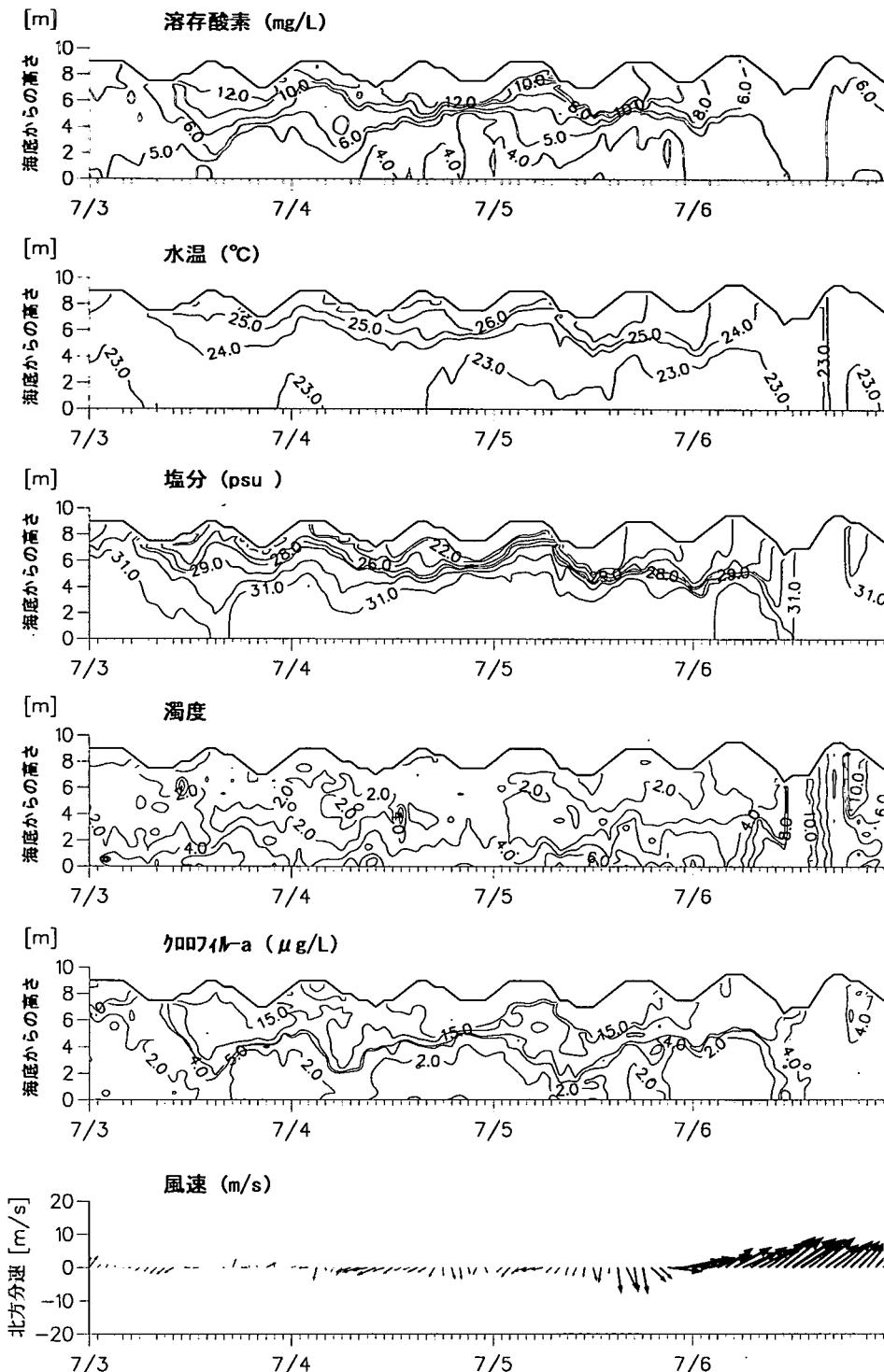
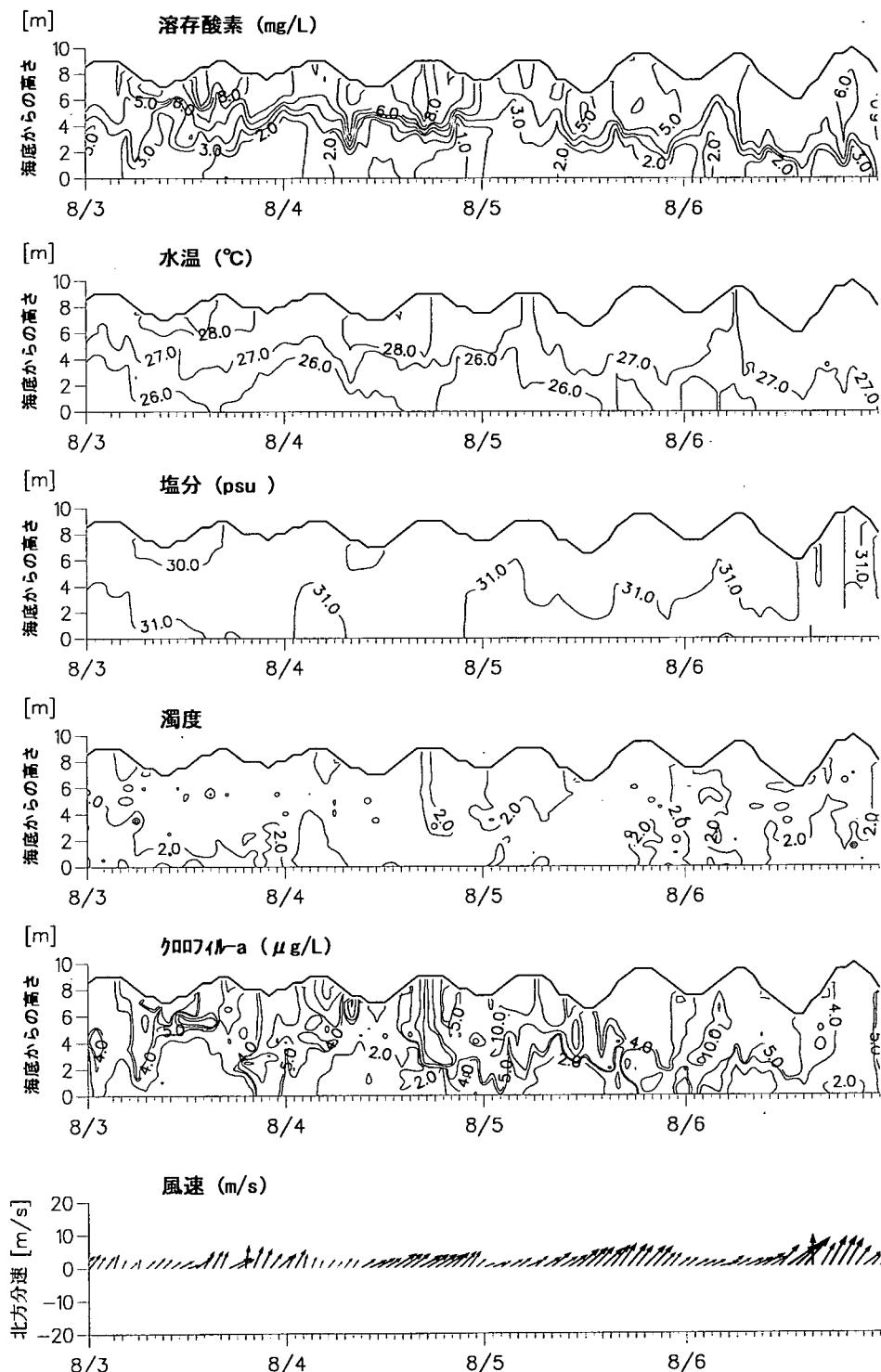


図-12 6月28日～7月6日の降水量、排水量、表層塩分の経時変化



注) クロロフィル-a の測定値は現場蛍光法による測定値であり、抽出蛍光法の測定結果による補正は実施していない。

図-13 B4 地点の溶存酸素、水温、塩分、濁度、クロロフィル-a 及び時間平均風速の経時変化
(7月3日～7月6日)



注) クロロフィル-a の測定値は現場蛍光法による測定値であり、抽出蛍光法の測定結果による補正是実施していない。

図-14 B4 地点の溶存酸素、水温、塩分、濁度、クロロフィル-a 及び時間平均風速の経時変化
(8月3日～8月6日)

b) 密度成層の形成と解消の要因

7月初旬の貧酸素化に関係してくると考えられる密度成層の要因を検討するため、6月28日～7月6日の雨量、排水門からの排水量、湾内3地点の塩分の経時変化を図-12に示した。貧酸素水塊が観測された7月初旬(7月2日～5日)の表層塩分は諫早湾湾口北部B4で他の地点と比較して相対的に低い値を示している。一方、潮受堤防排水門からの間欠排水は湾奥S1での表層塩分を低下させるものの、数時間のうちに塩分は回復しており、湾口や湾央では排水に伴う塩分の顕著な低下は見られていない。また、諫早湾海域での塩分の低下が認められる7月4日～7月5日には排水門からの排水は2日前の7月2日から行われておらず、両者について因果関係は認められなかった。

さらに、7月3日～7月6日と8月3日～8月6日における諫早湾口北部B4地点の溶存酸素、水温、塩分、濁度、クロロフィル-a及び時間平均風速を図-13及び図-14に示す。図-13から、7月6日の昼頃に鉛直方向に水質が均一化するとともに全層で濁度が急上昇しており、同時に15m/sを超す風速が観測されていることから、貧酸素水の解消には海域表層風速の増加による海水の上下混合の促進が関与していることが示唆された。なお、図-14に示す8月初旬の貧酸素化については、徐々に解消する様子がみられ、7月のような強風は観測されていない。

5. おわりに

2002年夏季に有明海湾奥西側の海域において貧酸素水塊の現地観測を実施し、得られた結果を検討するとともに密度成層や貧酸素水塊の形成要因等について考察したところ、以下のような点が明らかとなった。

まず、佐賀沖の底層においては、観測期間(7月13日～8月22日)を通じてほぼ継続的に貧酸素状態にあり、北部海域ほど貧酸素化の程度が著しいことが示唆された。

一方、諫早湾においては、観測期間(6月27日～8月31日)中に7月初旬と8月初旬の2回、小潮期に貧酸素水塊の形成が認められ、この時の底層の溶存酸素濃度を諫早湾湾央部と湾口部で比較すると、7月初旬は湾央

部が低く、8月初旬は湾口部が低かった。これら2回の貧酸素水塊に関する密度成層の形成において、7月初旬は塩分が主要因であり、8月初旬は温度と塩分が同程度に関与していた。また、上下層の密度差が小さかった8月初旬の方が貧酸素化の程度が激しかったことから、貧酸素化的程度は必ずしも密度差に依存しないことが推定された。さらに、貧酸素水の解消には海域表層風速の増加による海水の上下混合の促進が関与していることが示唆された。

なお、今回報告した観測データについて研究目的で使用したいという希望があれば、著者宛に連絡して頂ければ提供できるよう便宜を図りたいと考えている。その際、電子メディアによる提供も可能である。

謝辞：本報をまとめるにあたって、九州農政局諫早湾干拓事務所には、観測データを提供していただき、九州大学戸原義男名誉教授には調査のとりまとめにあたって貴重なご助言をいただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 鈴木慎也、梶原康之：東京湾の貧酸素水塊について、港湾、12月号, pp.42-49, 1983.
- 2) 風呂田利夫：東京湾における青潮の発生、水質汚濁研究, Vol.10, No.8, pp.470-474, 1987.
- 3) 佐々木淳、磯部雅彦、渡辺晃、五明美智男：東京湾における貧酸素化現象および水温・溶存酸素の季節変動モデル、海岸工学論文集, Vol.40, pp.1051-1055, 1993.
- 4) 高杉由夫、肥後竹彦、安田秀一：貧酸素水塊の発生に係る底層流の役割、海の研究, Vol.5, No.1, pp.1-11, 1996.
- 5) 水産庁：有明海の30年の推移の取りまとめ結果、第8回農林水産省有明海ノリ不作等対策関係調査検討委員会資料
- 6) (社)日本水産資源保護協会：水産用水基準(2000年版), p.4, 2000.
- 7) 鎌田泰彦：有明海の海底堆積物、長崎大学教育学部自然科学研究報告18, 1967.
- 8) 日本海洋学会：海洋観測指針(気象編), p.93, 1970.

(2003.1.17 受付)

OCCURRENCE OF HYPOXIC WATER IN THE INNER AREA OF ARIAKE BAY IN THE SUMMER OF 2002

Yoshinori KAJIHARA, Tomoyuki TOMITA, Takuji NAKANO and Masahiko ISOBE

We have carried out field measurement on water quality in the inner area of Ariake Bay in the summer of 2002 in order to investigate the occurrence of hypoxic water. It was observed that hypoxic water widely appeared in the bottom layer along the coastal area of Saga Prefecture during the observation period. It also appeared two times in Isahaya Bay in early July and August. Formation of the hypoxic water is influenced by stratification caused by temperature and salinity distribution. It was also found that the hypoxic water disappeared when wind broke the stratification of the sea water.