

夏季有明海干潟前縁域における流動構造と 貧酸素水塊の動態に関する現地観測

八木 宏¹・松村航裕²・井瀬 肇³・木元克則⁴

夏季有明海湾奥部の干潟前縁域(佐賀県福富沖)を対象として, 流動・成層構造・貧酸素水塊の挙動を把握するための現地調査を行った。調査結果より, 潮汐が卓越する有明海の干潟前縁域においても, 残差流には海上風の影響が大きく, ①夏季に卓越する南風によって残差流は表層で湾奥向きになること, ②南風から西風へ変化すると, 沖合下層水が干潟前縁域下層に浸入し, 残差流は下層で湾奥向きに変化することが確認された。特に, 沖合下層水の浸入時には, 中層で湾奥向き流速が最大となる特徴的な鉛直分布が形成され, 沖合から干潟域への植物プランクトン等の輸送に影響を与えることが示唆された。貧酸素水塊については, 観測期間中の干潟前縁域における急激な DO 低下が, 沖合下層水の干潟前縁域への浸入に伴う成層強化と, 低温・低 DO 水の移流が原因であることを指摘し, 貧酸素水塊の湾奥域における平面的構造の変化を示した。

1. はじめに

近年, 有明海では, 大規模赤潮の発生や貧酸素水塊による二枚貝の大量斃死, 養殖ノリの色落ちなど水環境の劣化が顕在化している(例えば, 有明海ノリ不作等対策関係調査検討委員会, 2002; 堤ら, 2003)。このうち貧酸素現象については, 閉鎖性水域でよく見られる沖合底層に発達する貧酸素現象とは別に, これまでは好氣的と考えられてきた水深の浅い干潟域～干潟前縁域においても顕著な DO 低下が発生することが指摘されている(木元ら, 2005)。浅場の貧酸素現象は, 浅海域ベントスなど, 浅場の生物の大量斃死に直結することから(田中ら, 2005), その発生メカニズムの解明や予測が急務とされているが, その詳細については十分に明らかにされているとは言えない。そこで本研究では, 有明海の浅場の貧酸素現象を考える上で重要となる干潟前縁域(干潟沖側の潮下帯)に着目し, そこでの流動構造や成層化の仕組み, 貧酸素水塊の挙動について現地観測に基づく検討を行った。

2. 現地調査の概要

本研究では, 干潟前縁域における流れと成層構造, 貧酸素水塊の挙動を把握するために, 有明海の最奥部に位置する佐賀県福富沖の干潟～干潟前縁域を対象として, ①岸沖方向 4 箇所の固定観測点(図-1, Sta. 1～Sta. 4)における流速(電磁流速計, ADCP), DO, SS, クロロフィル色素量, 水温の連続計測, ②干潟と沖合海域を結ぶ湾軸ライン(図-1, Sta. A～Sta. 4)に沿った流速等の断面構造計測(中潮期, 小潮期に船舶による移動計

測を実施)を行った。観測期間は, 貧酸素化が顕著となる夏季の大潮期末期から小潮期を経て中潮期初期まで(2005 年 8/8～8/18)の 11 日間である。また, 本観測結果に, 同時期に西海区水産研究所によって実施された広域貧酸素水塊連続観測(図-1, 観測点 T1～T14, P1, P6)の結果を加え, 湾奥部全体の貧酸素水塊の挙動を把握することを試みた。

3. 干潟前縁域の流れと成層構造

(1) 残差流の特徴と成層構造

図-2(a)(b)に, 干潟前縁域の代表点 Sta. 2(水深 3 m)の南北流速成分とその 25 時間移動平均流速(残差流)の時空間コンターを示す。ここで残差流は, それぞれの時刻の水深で無次元化した鉛直 σ 座標系(水面 $\sigma=0$, 海底 $\sigma=-1$)上で計算した値を表示している。これを見ると, 南北流速成分には, 潮汐の大きい有明海の特徴を反映して, 潮流による明確な往復流速が現れており, 観測期間中の潮位変化(大潮→小潮→中潮, 図-2(c)参照)に対応して流速も変化している。一方, 残

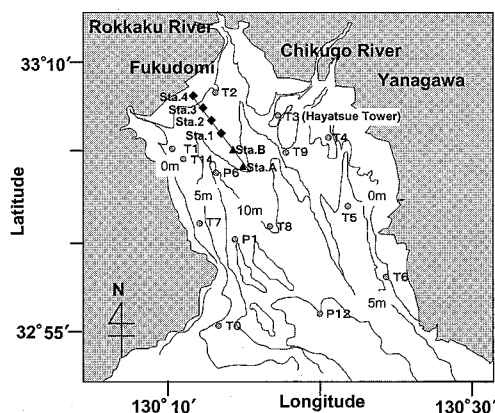


図-1 観測対象海域と観測点位置

1 正会員 博(工) 東京工業大学大学院助教授 情報理工学研究所
2 学生会員 東京工業大学大学院 情報理工学研究所
3 学生会員 東京工業大学大学院 情報理工学研究所
4 非会員 (独法)水産研究センター西海区水産研究所

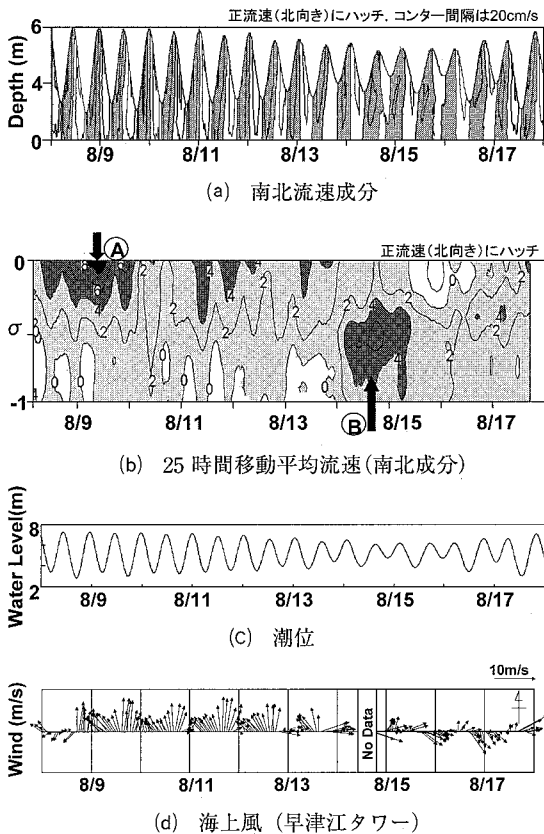


図-2 流速の時空間コンター (sta. 2)

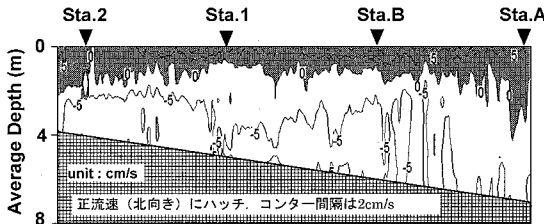


図-3 残差流の湾軸ライン断面分布 (中潮期: 8/9)

差流には、潮汐に対応した明確な変化は見られず、むしろ観測期間の前半と後半で性質が大きく異なっている。観測期間前半では、表層で北向き（湾奥向き）に 10 cm/s 程度の残差流が発生しており（図-2(b)①），観測期間後半にはそれが下層で湾奥向きへと変化している（②）。図-2(d)の風速ベクトルを見ると、観測期間中の海上風は、前半の比較的強い南風が連吹した状態から後半には西風へ変化しており、観測期間前半と後半で大きく変化する傾向は、残差流と海上風で良く対応している。

そこで、海上風との関係に着目して、観測期間前半と後半の残差流の特徴をさらに検討した。図-3 は、観測期間前半の 8/9（中潮期）に行った湾軸ライン断面観測

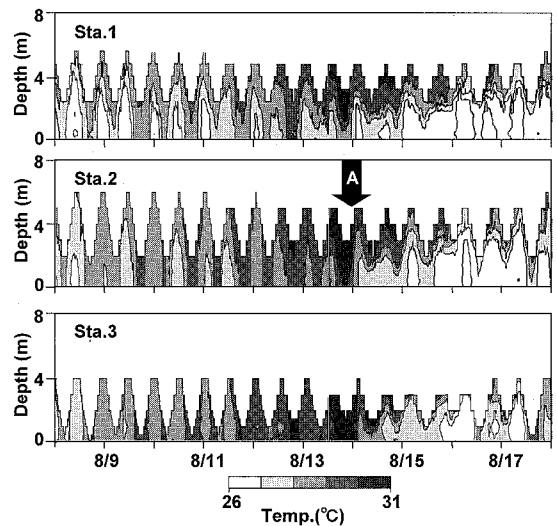


図-4 干潟前縁域における水温の時空間コンター

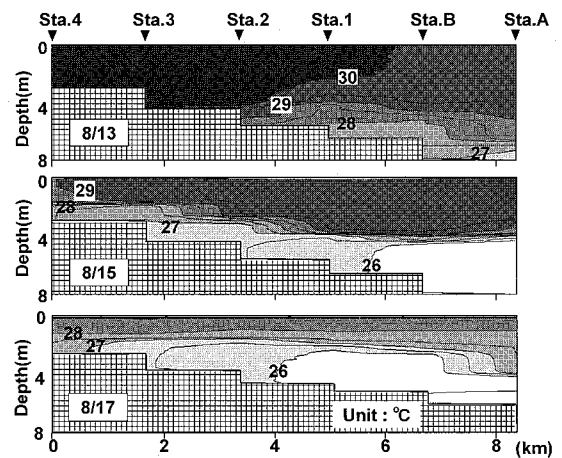


図-5 水温の湾軸断面分布

の残差流成分（南北成分）の鉛直断面分布を表示したものである。ここで残差流は、杉山ら（1995）の方法に従い、1 潮汐間に 4 回行った断面計測結果から、最小自乗法によって流速を潮流成分と残差流成分に分離することで算出した。これを見ると先述の Sta. 2 だけでなく海域全体にわたって、表層で北向き（湾奥向き）の残差流となっており、中層以深ではこれとは逆の南向き（湾口向き）の流れとなっている。海上風及びこのような残差流の鉛直構造から、本観測期間前半については、比較的強い南風の連吹によって表層で北向き（湾奥向き）の残差流が干潟前縁域からその沖合海域において発達したものと考えられる。

一方、観測期間後半については、残差流と水温変化の

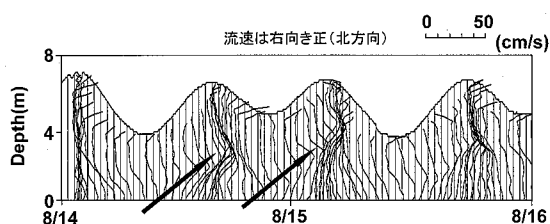
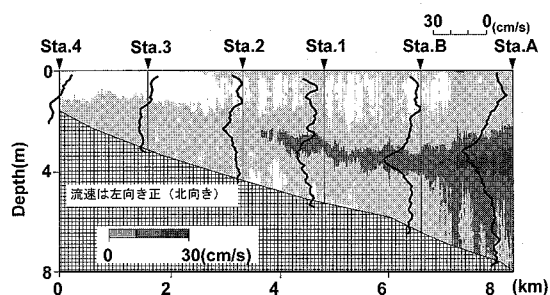
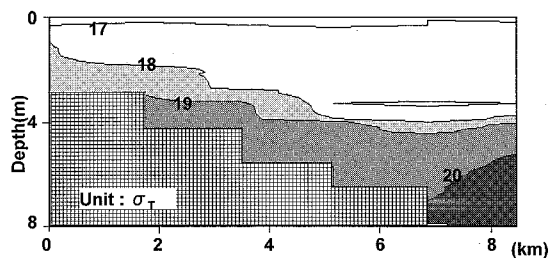


図-6 小潮期の流速鉛直構造 (Sta. 2 南北成分)



(a) 南北流速成分 (観測点は鉛直分布も表示)



(b) 密度

図-7 小潮期の断面構造 (8/15)

特徴が対応している。図-4 に、干潟前縁域の観測点 (Sta. 1~Sta. 3) の水温時空間コンターを示す。これを見ると、観測期間前半は水温が比較的高い状態が継続しているが、観測期間中盤の小潮期に下層水温が低下することで成層が強化され (図-4, 矢印 A), その後水温が大きく低下している。下層で北向き (湾奥向き) の残差流が発生した時期 (図-2(b)⑧) は、この干潟前縁域下層で水温が低下する時期 (8/14, 15) にほぼ対応している。一方、図-5 は、この時期の水温の湾軸ライン断面分布を示している。干潟前縁域下層で水温が低下する前 (8/13) には、表層及び浅海域において水温 30℃ 以上の高温水が分布しており、その後干潟前縁域下層に低水温水が浸入し (8/15), さらに浅海域全体で水温が低下していることがわかる (8/17)。このような水温構造の変化や海上風の特徴、それに対応した残差流の傾向から、下層の北向き残差流 (図-2(b)⑧) は、風系が南風から西風に変わることによって、沖合下層水が干潟前縁域へ密度流的に浸入することによって生じたものと考えられる。

(2) 流速鉛直構造の特徴

図-6 は、先に示した Sta. 2 の南北流速成分のうち小潮期 (8/14, 15) について、鉛直分布を示したものである。これを見ると、上げ潮時に北向き (湾奥向き) 流速が中層で最大となる (図中矢印) 特徴的な分布構造を持っていることがわかる。図-7(a) (b) に、この時の湾軸ライン断面観測 (8/15) の南北流速成分と密度の鉛直断面分布 (満潮時付近) を示す。Sta. 2 の鉛直分布の傾向に対応して、中層で北向き (湾奥向き) 流速が最大となる構造が沖合海域まで広がっており、この流速が最大となる位置は密度躍層にほぼ対応していることがわかる。このような岸向き流速が中層で最大を示す流速分布構造については、①発生時期が、小潮期の下層で湾奥向きの残差流が発達する期間 (図-2(b)⑧) にほぼ対応していること、②流速分布構造が密度構造に密接に関係していることから、沖合下層水の干潟前縁域下層への浸入に伴って発生した現象と推測される。なお、著者ら (八木ら, 2006) の検討によれば、この期間に干潟沖合において密度躍層付近にクロロフィル極大層が形成されていたこと、また干潟前縁域では湾奥向きのクロロフィル色素量フラックスが生じていたことがわかっており、湾奥向きの中層流速極大層の存在は、沖側海域で生産された植物プランクトン等の干潟域への輸送に重要な働きを果している可能性が示唆される。

4. 干潟前縁域及び有明海湾奥域の貧酸素水の挙動

図-8 は、干潟前縁域から干潟域 (Sta. 1~Sta. 4) における底層 DO (酸素飽和度) の時系列を示している。いずれの地点においても観測期間前半は比較的高い DO を示すが、観測期間中盤の 8/14 から急激に低下し、8/15, 16 には干潟域の Sta. 4 でも 20% 以下になるなど、干潟前縁域から干潟域わたる浅海域全体で DO が大きく低下しており、その傾向は水温変化 (図-4) と良く対応している。図-9 は、この時の水温と底層 DO の相関関係を干潟前縁域の観測点 Sta. 1 とその沖合の観測点 P6 (水深 10 m, 図-1 参照), 及び塩田川沖の観測点 P14 (水深 2 m, 図-1 参照) について比較したものである。これを見ると、干潟前縁域の Sta. 1 では、観測期間前半の DO 及び水温が高い状態から、観測期間後半には DO, 水温ともに低下し、徐々に沖合観測点 P6 の底層における水温と DO 関係に近づいている。一方、同じ干潟前縁域でも観測点 P14 (水深 2 m, 図-1 参照) では、DO 低下時に水温は沖合観測点 P6 底層と同程度であるものの、DO は P6 よりさらに低いレベルになっている。このことは、沖合底層からの貧酸素水塊の移流に加え、浅海域の成層強化に伴う干潟前縁域での酸素消費

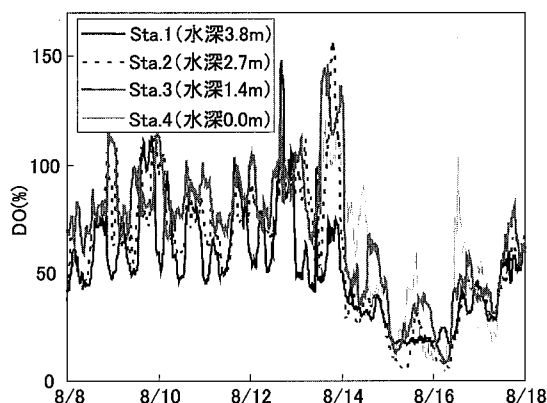


図-8 干潟前縁域及び干潟域における底層 DO (酸素飽和度) の時系列

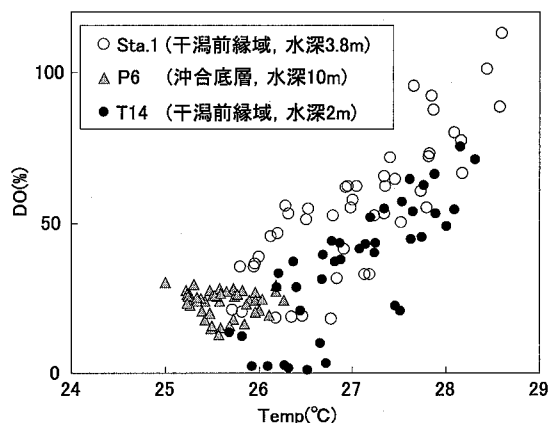


図-9 干潟前縁域 (Sta.1, T14) 及び沖合海域底層 (P6) の水温と DO の相関関係

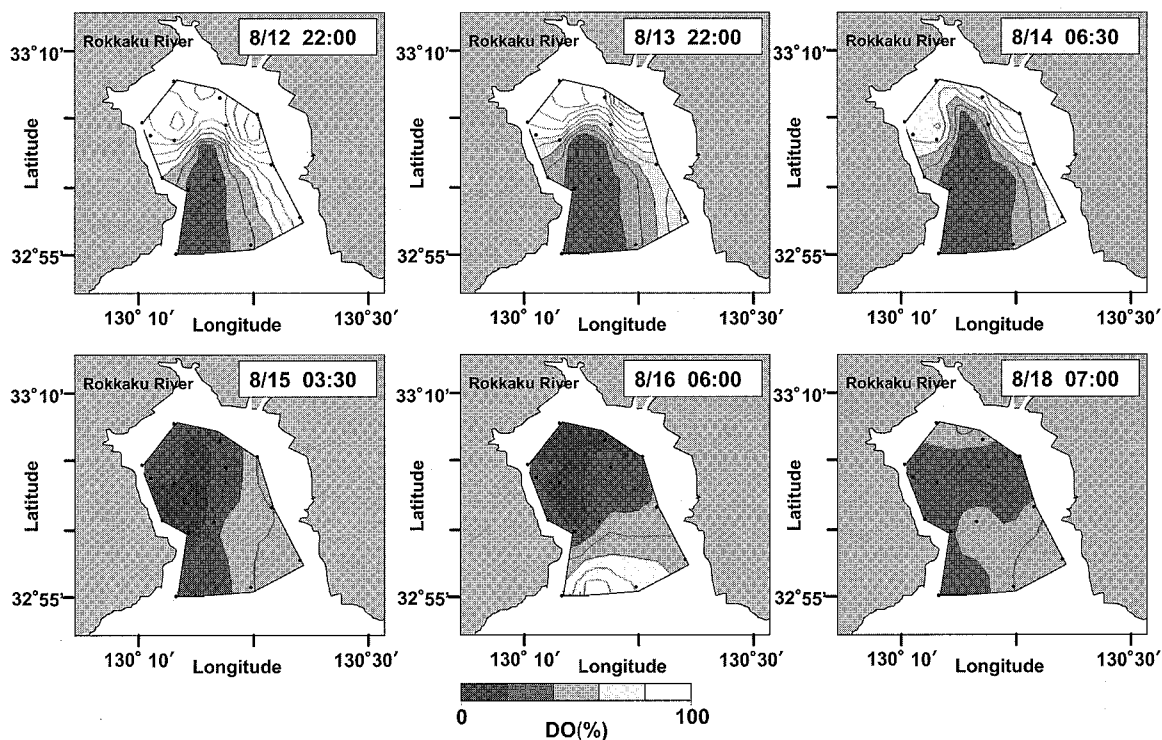


図-10 有明海湾奥域における底層 DO (酸素飽和度) の平面分布

が DO 低下に重要な役割を果たしてことを示している。

次に、湾奥部浅海域における貧酸素水塊の平面構造を把握するために、湾奥部観測点の DO 変化の特徴を検討した。その結果、六角川沖の観測点 T2 を境界として、その西側と東側で DO の変動パターンに違いがあり、観測期間中盤の急激な DO 低下については、東側海域は西側海域よりも遅れて DO 低下が生じ、低下のレベルも小さい傾向があることがわかった。図-10 は、その

前後の底層 DO (酸素飽和度) の平面分布を示したものである。これを見ると、観測期間前半にあたる 8/12, 13 では DO 値が高い領域が湾奥部の六角川河口沖から東側海域に広がっており、これは南風によって高温・高 DO の表層水が湾奥部に吹き寄せられたことに対応している。その後、小潮期に入ると湾奥部の西側海域を中心として DO 低下が進み、その範囲が東側海域へ拡大している。これは先述の海上風の変化による沖合下層水の

浸入, 成層強化が湾奥部西側海域から始まり, それが湾東側へと移動したことを示している。

5. ま と め

有明海湾奥部干潟前縁域における流れと成層構造, 貧酸素水塊の挙動に関する現地調査から以下のことを示した。

(1) 潮汐が卓越する有明海湾奥部浅海域においても, 残差流には海上風の影響が大きい。本観測期間中は, 夏季に卓越する南風によって表層で湾奥向きの残差流が発生し, 小潮期に風向変化(西風)が生じると, 沖合底層水が干潟前縁域に浸入, 下層で湾奥向きの残差流となり, 干潟前縁域では成層が急速に強化される。

(2) 風向変化によって, 下層で湾奥向きの残差流が生じる場合, 流速鉛直分布は密度躍層付近に湾奥向きの極大層を持つ特徴的な構造となる。密度躍層付近には, クロロフィル極大層が形成されることがあり, 中層の流速極大層は, 沖合から干潟域への植物プランクトン等の輸送に影響を与える可能性がある。

(3) 本観測期間中に観測された干潟前縁域～干潟域における小潮期の急激な DO 低下は, 海上風の変化に起因した沖合下層水の干潟前縁域への浸入に伴う浅海域の成層強化と, 低温・低 DO 水の移流が原因であることを指摘し, 貧酸素水塊の湾奥域における平面的構造の変化を示した。

謝辞: 現地調査を行う上で, 計測機器を提供して頂いた

独立行政法人水産総合研究センター水産工学研究所中山哲蔵氏, 西海区水産研究所岡村和磨氏, 気象データの提供並びに現地調査についてご助言を頂いた佐賀県有明水産振興センター川村嘉明氏, また現地調査に多大な協力を頂いた西村商会柴原芳一氏に対してここに記して謝意を表します。また本研究の一部は, 科学研究費基盤研究(c) (課題番号: 17560454, 代表者: 八木 宏) の補助を受けて行われたものである。

参 考 文 献

- 有明海ノリ不作等対策関係調査検討委員会 (2002): 有明海の現状について, —13 年度調査と過去の資料の解析を踏まえて—, 農林水産省, 200p.
- 木元克則・田中勝久・児玉真央・山本憲一・那須博史 (2005): 有明海奥部における貧酸素水塊の動態, 2005 年度日本海洋学会春季大会講演要旨集, p. 196.
- 杉山陽一・藤原建紀・中辻啓二・福井真吾 (1995): ADCP による伊勢湾の流動構造調査, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 1096-1100.
- 田中勝久・児玉真央・藤田孝康・木元克則・岡村和磨・森勇一郎 (2005): 有明海湾奥西部域における貧酸素水塊と底質環境の変動過程, 2005 年度日本海洋学会春季大会講演要旨集, p. 197.
- 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): 有明海湾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, 第 12 巻, pp. 291-305.
- 八木宏・井瀬肇・松村航裕・木元克則 (2006): 有明海湾奥部干潟前縁域における流れと懸濁物質の時空間変動特性に関する現地観測, 水工学論文集, 第 50 巻, pp. 1465-1470.