

有明海奥部における貧酸素水塊の形成・解消過程の観測

The Observation of Growth-decay Process of Hypoxic Water Mass in the head of Ariake Bay

濱田孝治¹・速水祐一²・山本浩一¹・吉野健児³・大串浩一郎⁴・平川隆一⁴・山田裕樹⁵

Takaharu HAMADA, Yuichi HAYAMI, Koichi YAMAMOTO, Kenji YOSHINO
Koichiro OHGUSHI, Ryuichi HIRAKAWA and Yuki YAMADA

In summer 2006, a large survey was conducted in the head of Ariake bay to investigate the relationship between growth-decay process of hypoxic water mass and the behavior of river plume after the flood induced by the monsoonal rainfall. After the flood, at first, low salinity water mass was formed along the coast with the coast to the west of its direction of travel. Then a river plume spread from the mouth of the Chikugo River toward offshore to form a bulge. Finally the bulge covered whole the region of the bay head. The formation of the bulge was followed by the development of a hypoxic water mass below the halocline. The stratification induced by the flood gradually weakened by tidal mixing with a neap-spring tidal cycle. Simultaneously, the bottom DO gradually increased. Then, the hypoxic water mass completely disappeared by the coastal upwelling and vertical mixing induced by the strong northerly wind by the typhoon 10.

1. はじめに

有明海は、かつては貧酸素化しない海として知られてきた(佐々木, 2006)が, 近年では有明海奥部に毎年のように貧酸素水塊が形成されており大きな問題となっている。有明海奥部では, 河川流量によって変化する成層強度が貧酸素水塊の形成に支配的な影響を及ぼしていることが指摘されている(瀬口ら, 2006)。しかし, 潮汐振幅が大きいこと1潮汐間に水塊が大きく移動すること(宮原ら, 2007), 河川流量や潮汐振幅, 風などの影響を受けて流れ場や海洋構造が短期間に大きく変動すること

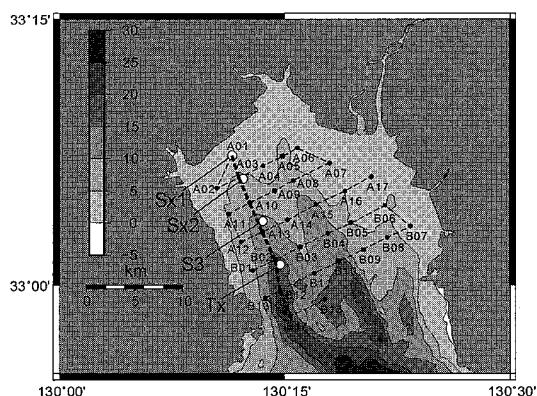


図-1 観測点位置

表-1 観測日程

実施日	月齢	満潮時刻	観測時間	観測点
6/27	1.5	9:43	8:10-12:15	A01-A17, B01-B15
7/3	7.5	13:25	11:45-15:42	A01-A17, B01-B15
7/7	11.5	5:10	8:47-14:22	A01, A03, A10, A13, B02, B12, B14
7/10	14.5	7:59	6:15-8:47	A01, A02, A03, A10, A13, B02, B12, B13, B14, B15
7/13	17.5	10:25	8:44-12:25	A01-A17, B01-B15
7/16	20.5	12:37	11:16-13:08	A01, A03, A10, A13, B02, B12, B14
7/20	24.5	17:16	15:15-19:19	A01-A17, B02, B12, B14
7/23	27.5	7:20	5:41-9:54	A01-A17, B01-B15
7/26	0.9	9:35	7:38-11:38	A01-A17, B02, B12, B14
7/30	4.9	11:36	10:01-12:57	A01-A17, B01-B17
8/5	10.9	4:15	5:13-8:16	A01, A03, A10, B02, B12, B14
8/8	13.9	7:51	6:10-8:59	A01-A17, B01-B15
8/16	21.9	13:56	12:50-15:01	A01, A03, A10, A13, B02, B12, B14
8/20	25.9	6:24	5:28-7:21	A01, A03, A10, A13, B02, B12, B14
8/25	1.3	9:50	8:07-11:45	A01-A17, B02, B12, B14

(濱田・経塚, 2007) などから, 河川からの淡水の挙動と成層状態を正確に把握し, 貧酸素水塊形成との関係を明らかにするためには, 潮時に考慮しつつ時間的に密な観測を広範囲にわたって行うことが必要であると考えられる。そこで本研究では, 有明海奥部(竹崎島-三池港以北)を対象海域として船舶による水質観測(以下, 船舶観測)と係留観測からなる大規模観測を行い, その結果をもとに筑後川からの淡水供給に伴う河川ブリューム

- 1 正会員 工博 佐賀大学有明海総合研究プロジェクト
- 2 非会員 農博 佐賀大学有明海総合研究プロジェクト
- 3 非会員 水博 佐賀大学有明海総合研究プロジェクト
- 4 正会員 工博 佐賀大学理工学部
- 5 学生員 佐賀大学理工学部

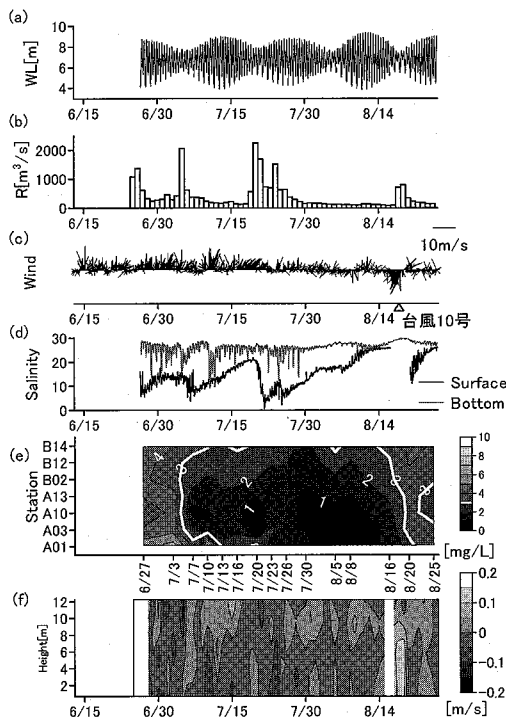


図-2 観測期間中の (a) Sx2 潮位, (b) 筑後川(瀬の下) 日平均流量, (c) 佐賀(地上気象観測)の風, (d) Sx2 表層・底層塩分, (e) 定線上底層 DO, (f) Sx2 残差流鉛直 M₂ 長軸方向成分プロファイル(湾奥向き正, 縦軸は海底からの距離)。

の発達・消失と貧酸素水塊の消長の関係を考察した。なお、貧酸素の定義は研究者によって幅があるが、本研究では 3 mg/L 以下を貧酸素とする。

2. 観 測

図-1 に示す A01-A17, B01-B15 の計 32 点について、表-1 に示す日程で船舶観測を実施した。1 隻ないし 2 隻の漁船を使用し、図-1 の太点線 (以下、定線) 上の 7 点 (A01, A03, A10, A13, B02, B12, B14) についてのみ行う定線観測と、横断方向の点も含めた広域観測を組み合わせ、各点について 3 日～1 週間程度の間隔で観測が行われるようにした。1 回の観測は極力満潮をはさんだ 3 時間程度に収まるようにしたが必ずしも条件を満たしていない観測もある。観測項目は水温、塩分、溶存酸素濃度 (DO)、クロロフィル-a 蛍光、濁度である (本論文ではそのうち塩分、DO のデータを紹介する)。観測にはアレック電子製 AAQ-1183, YSI ナノテック製 YSI-600QS, アレック電子製 Compact-CTD を使用した。AAQ-1183 は単体で使用し、YSI-600QS, Compact-CTD は単体では全項目をカバーしていないので結束して同時に使用した。

AAQ-1183 は 20 cm/s, YSI-600QS/Compact-CTD は 10 cm/s で降下させ、着底後 30 cm 程度海底から離して安定するのを待ち、同じ速度で引き揚げた。水温、塩分、クロロフィル-a 蛍光、濁度については下降時の値を採用した。溶存酸素についてはセンサの応答時間が長いことを考慮し、鈴木ら (1998) の方法によって下降・上昇時のデータから各水深の値を決定した。以上を整理し最終的に水深 50 cm ごとのプロファイルデータとした。

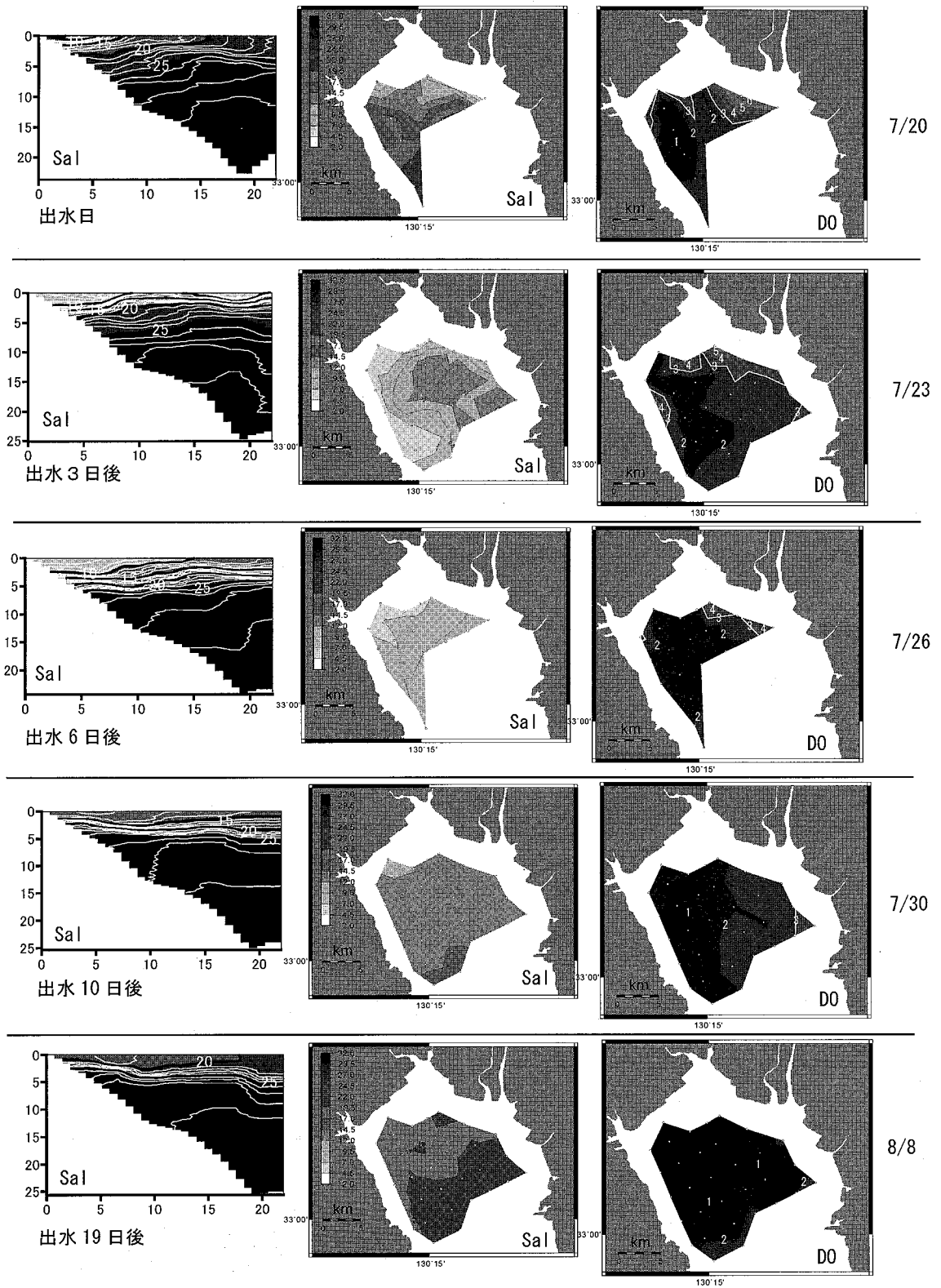
係留観測は図-1 に示す Sx1, Sx2, S3, Tx の 4 点で 6 月 26 日より 8 月 30 日までの間行った。Sx1 は干潟前縁であり、大潮干潮時に干出するかしないかの点である。Sx2, S3 は浅海域であり、Sx2 はノリ漁場の沖側の端、S3 は沖神瀬の 500 m 以内にある。Tx は有明海奥部の入り口に近い沖合の観測点である。観測項目は水位、流速鉛直プロファイル、表層・底層水温・塩分である。水位・流速観測には Nortek 製 Aquadop Profiler (Sx1, Sx2, S3) および RDI 製 Workhorse Sentinel (Tx) の 2 種類の超音波流速計を使用した。海底を 0, 海面を 1 とする鉛直座標系 σ を考え、等 σ 面上で流速データを 25 時間移動平均したものを残差流とみなし、調和解析により得られた M₂ 潮流楕円の長軸・短軸方向に分けて整理した。M₂ 潮流楕円の長軸方向はおおむね湾軸方向に一致していた。水温・塩分の観測にはアレック電子製 Compact-CTW および Compact-CT (Tx 底層のみ) を使用した。データ取得間隔は 10 分とした。

また、上記のデータとあわせて、佐賀地方気象台により取得された佐賀における風と気圧 (地上気象観測データ)、筑後川河川事務所により取得された筑後川瀬の下観測所における日平均流量データ、また気象庁により取得された大浦における潮位データを解析に用いた。

3. 結果と考察

(1) 経過概要

観測期間中は約 4 回の大潮・小潮サイクルがあった (図-2(a))。6 月下旬から 7 月下旬にかけて、梅雨明けの豪雨による約 3 回の大出水があり (図-2(b))、出水のたびに表層の塩分は著しく低下し強い塩分成層が形成された (図-2(d))。表層の塩分は急激に低下した後徐々に上昇していったが、7 月下旬まで大出水が続いたため成層は長期間持続し、8 月中旬の大潮で解消するまで維持された。風は観測期間前半には南よりでその後弱かったが、台風 10 号の通過時には 10 m/s を超える強風が連吹した (図-2(c))。貧酸素水塊は本観測においては 7 月 7 日に初めて見出された (図-2(e))。特に 3 回目の出水以降貧酸素状態は深刻化し、8 月 5 日には A01 底層の DO は 0.1 mg/L まで低下した。8 月中旬の大潮



Sal. (vertical)

Sal. (surface)

DO (bottom)

図-3 7/20 から 8/8 までの定線上塩分鉛直断面分布, 表層塩分分布, 底層 DO (mg/L) 分布の推移。

で塩分成分が解消すると貧酸素状態は解消に向かい、台風10号の通過に伴いほぼ完全に解消したが、DOレベル自体は依然低く、8月25日の観測ではA10, A13付近で再び貧酸素水塊の発生が認められた。

(2) 河川プリズム発達と貧酸素水塊の形成・拡大

図-3に、大出水のあった7月20日以降の定線塩分断面分布、表層塩分分布および底層DO分布を示す。低塩分水は出水直後には筑後川河口から湾奥部に分布したが、3日後には岸を右に見るように西岸表層に沿って沖合に広がり、その後湾奥表層全体に広がった(6日後以降)。これは、最初に地球自転の影響を受けた密度流が岸に沿って形成され、その後河口沖の低塩分水塊、いわゆるバルジ(たとえば Fennel and Mutzke, 1997; Isobe, 2005 など)が湾奥全域を覆ったものと考えられる。

図-4に各係留点の表層塩分の時系列(満潮時のみ)およびM2潮流槽円長軸方向の残差流を示す。23日までに全点で急激な塩分の低下が起こり、それに対応してSx2, S3, Tx 表層で沖向きの残差流が強化された。塩分はその後やや上昇した後安定した。これは、出水後数日

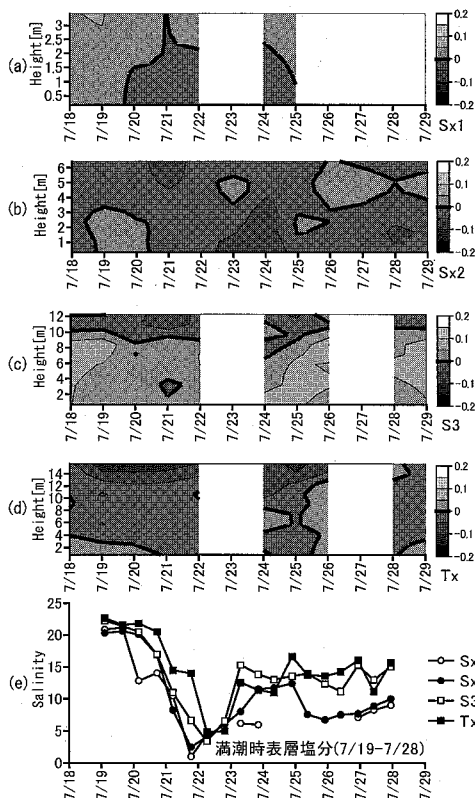


図-4 (a-d) 係留各点の残差流のM2長軸方向成分の時間変動(湾奥向き正。縦軸は海底からの距離)および(e) 各点の満潮時表層塩分の時間変動。

以内に低塩分水が岸を右に見るように輸送されたこと、その後バルジに入る過程で塩分が上昇したが、観測点がバルジの内側に入ってから塩分変動が小さくなったものと考えられる。

このような低塩分水塊の挙動に対応し、貧酸素水塊が広域にわたって深刻化した。すなわち、7月20日の時点では貧酸素水塊は海底谷に沿って偏在していたが、その後拡大し、26日には筑後川河口付近までほぼ全域にわたり貧酸素化した。図-3から、低塩分水塊が26日以降も表層を覆い続け、その下で貧酸素水塊が発達したことがわかる。

(3) 潮汐による成層の解消と底層溶存酸素の上昇

表層の塩分は河川流入が元に戻った後徐々に上昇し成層解消に向かったが、その速度は一定ではなく、大潮、小潮周期の変動が見られた。図-2(d)でみると、大潮時に表層の塩分は大きく上昇しており、小潮期にはほとんど上昇していない。他の観測点においてもほぼ同様の結

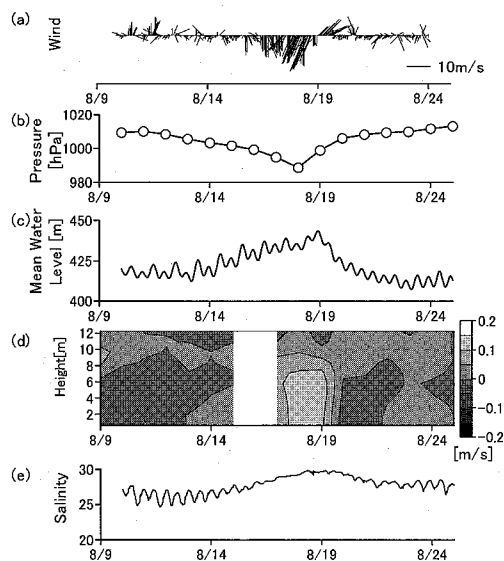


図-5 台風通過時の(a)佐賀(地上気象観測)の風および(b)気圧。(c)大浦の平均潮位、(d)Sx2の残差流M2長軸方向成分(湾奥向き正、縦軸は海底からの距離)、(e)Sx2の底層塩分。

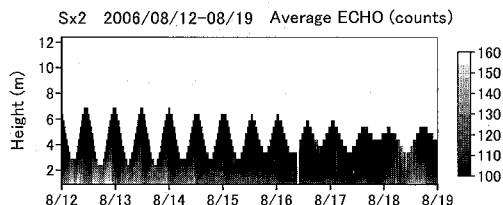


図-6 Sx2における超音波流速計の反射強度の時間変化。縦軸は海底からの距離。

果が得られている(図は省略)。これは、大潮期の潮汐による鉛直混合の促進が成層の解消に大きく寄与していることを示唆するものと考えられる。

大潮期には貧酸素水塊も徐々に解消に向かっていくことが図-2(d),(e)よりわかる。これは、やはり鉛直混合によって表層から底層に酸素が供給されたためと考えられる。

(4) 台風による貧酸素水塊の消失

台風10号の通過に伴い、最大10 m/sを超える強い北風が連吹した(図-5(a))。また、気圧も8月18日を中心に大きく低下し(図-5(b))、平均水位が上昇した(図-5(c))。これらに伴って底層側で強い岸向きの残差流が観測され、同時に底層塩分が急激に上昇した(図-5(d),(e))。これは底層に沖側の海水が供給されたことを示している。このような強い岸向きの流れは観測期間中このとき以外には観測されていない(図-2(f))。

有明海奥部は南東側に向かって開いた形状をしているため、北風の連吹は沿岸湧昇を引き起こし、底層側に岸向きの流れが生じる。また、気圧低下により海水は吸い上げられ、全層で湾奥向きの流れが生じる。底層側の岸向き残差流はこれらの重ね合わせによって生じたものと考えられる。

また、台風通過時に表層側でADCP信号強度の顕著な増大が見られた(図-6)。信号強度は海水中の微粒子の量に応じて増大するので、これは風波の碎波によって海面付近で気泡が大量に生じたことを示している。このことはまた、碎波によって乱れのエネルギーが供給されていることを示唆しており、台風通過に伴い鉛直混合が盛んになっていたと考えられる。

以上から、台風10号の通過に伴う貧酸素水塊の消滅は、沿岸湧昇と気圧低下による海水の吸い上げにより底層に沖側から新鮮な海水が供給されたこと、風によって鉛直混合が盛んになったことによるものと考えられる。

4. おわりに

本研究では有明海奥部を対象とした大規模観測の結果を元に貧酸素水塊の形成・解消過程について考察を行った。得られた結論は以下の通りである。

- (1) 出水によって筑後川から流入した淡水塊は、まず岸を右に見るように淡水プルームを形成した。
- (2) その後有明海奥部全域の表層が低塩分水に覆われ、貧酸素水塊が発達した。

- (3) 鉛直混合によって成層が解消するのに伴って貧酸素水塊も徐々に解消に向かった。
- (4) 台風通過にともなって沿岸湧昇が生じて湾内水は急速に交換され、風による鉛直混合も加わって、貧酸素水塊は一気に解消された。

謝辞：観測実施にあたって、藤井一文氏(白石北明漁業協同組合)にご協力をいただいた。ここに深く感謝する。

係留観測にあたっては、いであ株式会社にご協力いただいた。また、愛媛大学沿岸環境科学研究センター 環境動態解析分野、九州大学工学研究院 環境都市部門 沿岸域環境学講座、水産総合研究センター養殖研究所より観測機材を使用させていただいた。関係者各位に深く感謝する。

船舶観測にあたっては、佐賀大学の多くの方々にご協力いただいた。有明海総合研究プロジェクト加玲美研究員、理工学部都市工学科 野口剛史技官ならびに大串研究室の学生の皆様、理工学部機能物質化学科田端正明教授ならびに田端研究室の学生の皆様、農学部応用生物学科瀬口研究室の学生の皆様に深く感謝する。

参 考 文 献

- 佐々木克之(2006):水底質変化—ノリ漁場栄養塩・調整池水質と諫早湾水底質・有明海奥部貧酸素—。「有明海の生態系再生をめざして」,日本海洋学会編,恒星社厚生閣,pp. 69-94.
- 鈴木伴征,鶴田泰士,石川忠晴(1998):河川・湖沼等におけるDO空間分布の高速計測。水環境学会誌 Vol. 21, No.7, pp. 455-459.
- 瀬口昌洋,郡山益実,石谷哲寛,古賀あかね(2006):有明海奥部における干潟域の脱窒と西岸域の貧酸素水塊の発生について。有明海総合研究プロジェクト成果報告集, Vol. 2, pp. 47-54.
- 濱田孝治,経塚雄策(2007):有明海湾奥における循環流とその変動について。海の研究, Vol. 16, No. 3, pp. 203-221.
- 宮原明子,田井明,重田真一,齋田倫範,矢野真一郎,小松利光(2007):筑後川から有明海に流入した河川水の挙動に関する現地観測,土木学会西部支部研究発表会講演概要集, 287-288.
- Fennel, W. and A. Mutzke(1997):The initial evolution of a buoyant plume, Journal of Marine Systems, Vol. 12, pp. 53-68.
- Isobe, A. (2005):Ballooning of river-plume bulge and its stabilization by tidal currents, Journal of Physical Oceanography, Vol. 35, No. 12, 2337-2351.