

2層ボックスモデルによる有明海奥部西岸域における貧酸素水塊発生機構の解析

Analysis of Occurrence Mechanism of Hypoxic Water in the Western Interior Parts of the Ariake Sea Using a Two-layer Box Model

瀬口昌洋¹・郡山益実²・石谷哲寛³

Masahiro SEGUCHI, Masumi KORiyAMA and Tetuhiro ISHITANI

In order to clarify the occurrence mechanism of hypoxic water in the western interior parts of the Ariake Sea, the field observation data collected by Saga Prefecture in 1972-2004 were analyzed using a two-layer box model. Monthly variations of mean values of convective velocity, vertical diffusion coefficient and biochemical oxygen-consumption rate in the study area were evaluated quantitatively, and the influences of these parameters to the occurrence of hypoxic water were clarified. The temporal changes of DO concentration in lower layer during summer season were controlled largely by the vertical diffusion and biochemical oxygen-consumption rates. After 1980's, a big change of biochemical oxygen-consumption rate was seen.

1. はじめに

1970年代後半以降, 底質の泥化が拡大している有明海奥部(農林水産省, 2002)の西岸域を中心に, 夏季の底層DO濃度が数mg/L以下となる貧酸素水塊が広域に頻発し(石谷ら, 2007), 二枚貝類の斃死などの深刻な被害をもたらしてきた。このような状況の中で, 近年, 有明海奥部における貧酸素水塊の発生に関する調査, 研究が盛んに実施されてきた。その結果, 北部海域ほど貧酸素化が著しいこと(梶原ら, 2003)や北西部海域での貧酸素水塊の消長過程に気象, 流動などの要因が密接に関連していること(中山ら, 2003), また貧酸素水塊の発生や回復のプロセスに密度成層の影響が大きいこと(深山ら, 2005)などが明らかにされた。さらには, 湾奥部の干潟前縁域における貧酸素化は, 沖合下層水の侵入に伴う成層強化と低DO水の移流などに起因すること(八木ら, 2006)が指摘された。一方, 西部海域での貧酸素水塊の形成にSSによる酸素消費過程が重要であること(徳永ら, 2005)が明らかにされた。これらの成果は, 湾奥部での貧酸素水塊発生の実態把握とそのメカニズムの解明にとって大きな礎となる重要なものである。しかし, 今後さらに, この海域での貧酸素水塊の発生機構を究明するためには, その発生に関わる物理的, 生化学的過程の定量的評価に基づいた総合的かつ詳細な検討が不可欠である。

本研究は, 既存の観測データから2層ボックスモデルにより奥部西岸域の貧酸素水塊発生に関わる物理的, 生化学的過程に関するパラメータを定量化し, それに基づ

いて発生機構を明らかにすることを目的とする。ここでは, 観測データに基づき奥部西岸域に設定された2層ボックスモデルを用いて1972~2004年の浅海定線調査データより対象海域の移流速度, 鉛直拡散係数, 底層の生化学的DO消費速度及び下層ボックスのDO濃度の時間変動に及ぼす各パラメータの寄与量の月平均値を求め, これらのパラメータと貧酸素水塊発生の関連性を検討した。さらに, 貧酸素水塊発生の主要パラメータである鉛直拡散係数及び底層の生化学的DO消費速度に関しては, 約10年毎の月平均値の経年的推移について考察した。

2. 2層ボックスモデルの概要

(1) 2層ボックスモデル

有明海奥部西岸域では, 夏季の貧酸素水塊発生時には顕著な密度躍層が形成されるため, 密度分布は2層構造となる(郡山ら, 2007)。本研究では, この海域における貧酸素水塊発生に関わる物理的, 生化学的過程のパラメータを定量化するために, 図-1の破線で囲まれた海域(縦断方向: 18.9km, 横断方向: 5.9km, 平均水深: 9m)に, 図-2で示される長期間単位の解析を前提とした2層ボックスモデルを設定した。したがって, 上層, 下層ボックスにおける塩分と水収支式は, それぞれ次式で表される。

<上層ボックス>

$$V_1 \frac{dS_1}{dt} = -u_1 A_1 S_{13} + w A_{12} S_{12} + u_3 B_1 S_{15} + \frac{K_z (S_2 - S_1) A_{12}}{H_{12}} \quad (1)$$

$$u_1 A_1 = Q + w A_{12} + u_3 B_1 \quad (2)$$

$$Q = Q_r + (P_r - E) A \quad (3)$$

1 正 会 員 農博 佐賀大学教授農学部生物環境科学科
2 正 会 員 農博 佐賀大学助教農学部生物環境科学科
3 農 修 鹿児島大学大学院連合農学研究科

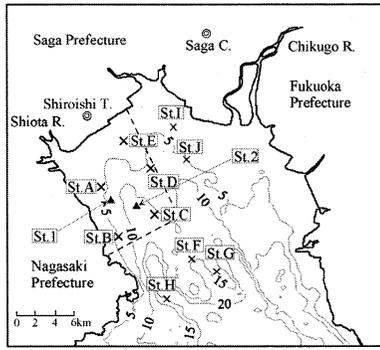


図-1 有明海奥部における解析対象海域(破線海域), 浅海定線調査地点 (St.A~J) 及び試料採取地点 (St.1~2) の位置

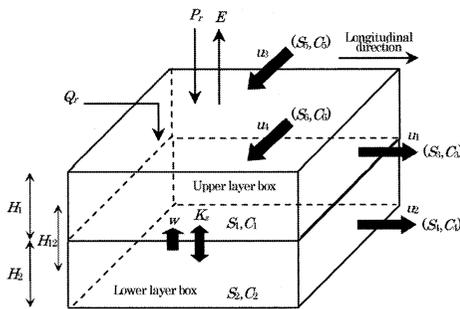


図-2 2層ボックスモデルの概要

<下層ボックス>

$$V_2 \frac{dS_2}{dt} = -u_2 A_2 S_{24} - w A_{12} S_{12} + u_4 B_2 S_{26} + \frac{K_z (S_1 - S_2) A_{12}}{H_{12}} \quad (4)$$

$$u_2 A_2 = -w A_{12} + u_4 B_2 \quad (5)$$

ここに V_1, V_2 : 上, 下層ボックスの容積, A_1, A_2 : 上, 下層ボックスの縦断方向鉛直断面積, A_{12} : 上, 下層ボックス間の水平断面積, B_1, B_2 : 上, 下層ボックスの横断方向鉛直断面積, H_{12} : 上, 下層ボックスの中心間距離, S_1, S_2 : 上, 下層ボックスの塩分, S_3, S_4 : 上, 下層ボックス外側縦断方向の塩分, S_5, S_6 : 上, 下層ボックス外側横断方向の塩分, $S_j = (S_i + S_j)/2$, u_1, u_2 : 上, 下層ボックスの縦断方向鉛直断面積の水平移流速度, u_3, u_4 : 上, 下層ボックスの横断方向鉛直断面積の水平移流速度, w, K_z : 上, 下層ボックス間の鉛直移流速度と鉛直拡散係数, Q, Q_r, P : 上層ボックスへの淡水流入量, 河川流量及び降雨量, A : 上層ボックスの海域面積, E : 上層ボックスからの蒸発量で, 次式より推算される (柳・下村, 2006).

$$E = \kappa (E_s - E_a) W \quad (6)$$

ここに, κ : 蒸発係数 ($=0.17 \text{mm} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{sm}^{-1}$), E_s : 海面水温の観測値より推算された飽和蒸気圧, E_a : 大気

蒸気圧, W : 風速である.

一方, 貧酸素水塊が発生する下層ボックスにおける DO 収支式は, 次式で表される.

$$V_2 \frac{dC_2}{dt} = -u_2 A_2 C_{24} - w A_{12} C_{12} + u_4 B_2 C_{26} + \frac{K_z (C_1 - C_2) A_{12}}{H_{12}} - V_2 R \quad (7)$$

ここに, C_1, C_2 : 上, 下層ボックスの DO 濃度, C_3, C_4 : 上, 下層ボックス外側の縦断方向の DO 濃度, C_5, C_6 : 上, 下層ボックス外側の横断方向の DO 濃度, $C_{ij} = (C_i + C_j)/2$, R : 下層ボックスの DO 消費速度である. 表-1 に上, 下層ボックスの緒元を一覧する.

表-1 各ボックスの諸元

Volume (km ³)	V_1	0.426
	V_2	0.533
Interface Area (km ²)	A_{12}	106.56
Cross Section Area (km ²) (Longitudinal)	A_1	0.029
	A_2	0.037
Cross Section Area (km ²) (Lateral)	B_1	0.058
	B_2	0.072

(2) 使用データと解析方法

解析に使用した海水温 (T), 塩分 (S), DO 濃度 (C) のデータは, St.A~J (図-1) で 33 年間 (1972~2004 年) にわたって毎月大潮時に海面下 0, 5, 10, 20, 40, 50m で水温計, サリノメーターあるいは CTD (アレック電子) 及びウインクラ変法 (DO 濃度) により測定された浅海定線調査データ (佐賀県, 1972-2005) である. このデータは, 夏季に C の値が大きく低下し, 大規模な貧酸素水塊が頻発する小潮時に収集されたデータでないため, 必ずしも貧酸素水塊の解析に適したデータとは言えない. しかし, 図-3 に示されるように, 解析対象海域における底層の C の平均値は, 表底層密度差 ($\sigma_n - \sigma_n$) の平均値の増大する夏季に大きく低下し, 逆に ($\sigma_n - \sigma_n$) の平均値の減少する冬季, 春季に大きく増加する経時変化を呈しており, この海域での貧酸素水塊消長の一般的性状を表している. さらに, このデータには, 過去 33 年間の貧酸素水塊に関する多くの有用情報が蓄積されていると考えられる. 解析では, St.A~J の T, S, C の浅海定線調査データを水深 1m 間隔で線形補間して用いた. また, 解析対象海域に流入する塩田川の河川流量は, 集水面積と佐賀県白石町で観測された月降雨量から推算された.

この解析は, 過去 33 年間の浅海定線調査データから対象海域における水平及び鉛直移流速度, 鉛直拡散係数及

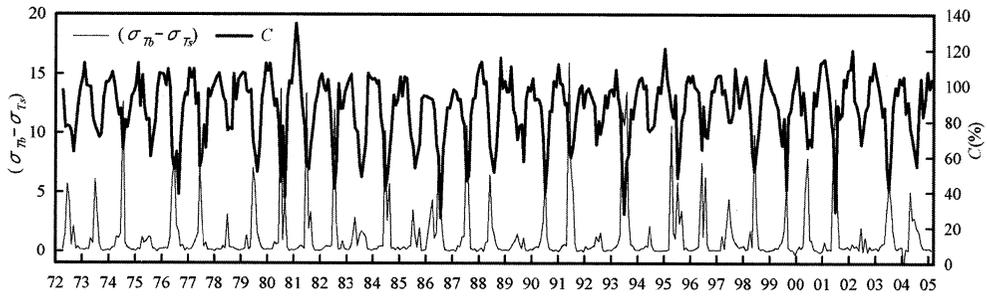


図-3 解析対象海域における $(\sigma_{nb} - \sigma_{rs})$ と底層の C の平均値の経年変化

び底層DO消費速度の各月平均値を推算することを目的とする。したがって、(1)~(5)式から算出しなければならないパラメータ(未知数)は、 $u_1 \sim u_4, w, K_z$ の6個である。しかし、これら4式より、6個の未知数を解析的に算定することは出来ない。そこで、ここでは柳・下村(2006)の方法に従って1972~2004年までの33年間の浅海定線調査データから算出した各月33個の $S_1, S_2, S_{13}, S_{15}, S_{24}, S_{26}, Q$ のデータについて最小二乗法を適用し、以下のように各月の未知数を求めた。

まず、(2)、(5)式を(1)、(4)式に代入し整理すると、(8)式が得られる。

$$m_i = u_2 a_i + u_3 b_i + u_4 c_i \quad (8)$$

ここに、 $m_i = V_1 \frac{dS_1}{dt} + V_2 \frac{dS_2}{dt} + QS_{13}$ 、 $a_i = A_2(S_{13} - S_{24})$ 、 $b_i = B_1(S_{15} - S_{13})$ 、 $c_i = B_2(S_{26} - S_{13})$ である。1972~2004年の33年間分の各月における(8)式($i=1 \sim 33$)を行列で表すと、次式となる。

$$A = \begin{pmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ a_{33} & b_{33} & c_{33} \end{pmatrix}, \quad X = \begin{pmatrix} u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{pmatrix}, \quad L = \begin{pmatrix} m_1 \\ m_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ m_{33} \end{pmatrix} \quad (9)$$

(8)式についての右辺と左辺の誤差方程式は、

$$V = L - AX, \quad V = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \varepsilon_{33} \end{pmatrix} \quad (10)$$

となり、誤差(ε)の二乗和 S は、次式で表される。

$$S = V^T V = (L - AX)^T (L - AX) \\ = L^T L - 2X^T A^T L + X^T A^T A X \quad (11)$$

S が最小となる条件は(12)式で表されるため、対象海域の塩分及び水収支を最も良く再現する u_2, u_3, u_4 は、(13)式により求められる。

$$\frac{\partial V^T V}{\partial X} = -2A^T L + 2A^T A X = 0 \quad (12)$$

$$X = (A^T A)^{-1} A^T L \quad (13)$$

このように求めた u_2, u_3, u_4 を(1)、(2)、(4)式に代入し、残りの未知数 u_1, w, K_z を算出する。さらに、得られた u_2, u_3, w 及び K_z と1972~2004年までの浅海定線調査データから算出した各月の $C_1 \sim C_6$ を(7)式に代入することにより、各月の R が算出される。

なお、解析の際に用いた S_1, S_2, C_1, C_2 は、解析対象海域内のSt.A~E(図-1)における浅海定線調査データ S, C の各ボックスにおける平均値であり、また S_3, S_4, C_3, C_4 及び S_5, S_6, C_5, C_6 は、それぞれSt.F, H及びSt.I, J(図-1)における浅海定線調査データ S, C の海面から密度躍層中心までの平均深さ($H_1=4m$)と密度躍層中心から海底までの平均深さ($H_2=5m$)の平均値である。さらに、 E_a, W は、佐賀地方気象台で観測された大気蒸気圧と風速の各月の平均値である。

3. 結果及び考察

(1) 物理的、生化学的パラメータと貧酸素水塊の発生

図-4に $u_1 \sim u_4$ の月変動を示した。なお、正の u_1, u_2 は、それぞれ上、下層ボックスからの流出を、また負の u_1, u_2 は、上、下層ボックスへの流入を示す。一方、正の u_3, u_4 は、それぞれ上、下層ボックスへの流入を、また負の u_3, u_4 は、上、下層ボックスからの流出を示す。夏季から冬季にかけて縦断方向では表層流出と底層流入が次第に増大し、エスチャリ-循環流の形成が伺われる。この結果は、大串ら(2007)の同海域での測定値とほぼ同様な傾向を示す。

図-5に w, K_z 及び密度成層度(P)の月変動を示した。なお、 P は次式で定義された。

$$P = \int_0^H [\rho(z) - \bar{\rho}] g dz \quad (14)$$

$$\bar{\rho} = \frac{1}{H} \int_0^H \rho(z) dz \quad (15)$$

ここに、 H ：水深、 z ：海底からの高さ、 g ：重力加速度である。 w は、2月から3月にかけて急減した後、8月頃まで低い値となった。また、 w は、 $u_1 \sim u_4$ に比べて全般的に小さく、上、下層間の移流作用は皆無に等しいと考えられる。 K_2 は、 P の低い冬季～春季で高く、 P の高い夏季で低かった。すなわち、密度躍層が発達する夏季では、鉛直混合が大きく抑制されると推察される。

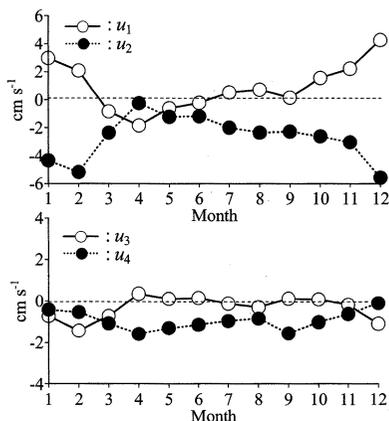


図-4 u_1 , u_2 , u_3 及び u_4 の月変動

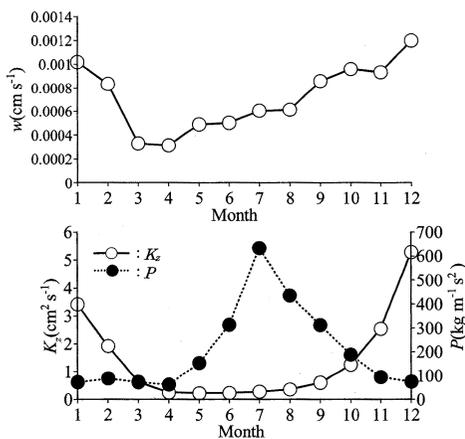


図-5 w , K_2 及び P の月変動

図-6に R の月変動を示した。 R は春季～夏季に正(消費)、秋季～冬季に負(生産)となった。特に5～8月の R は高く(0.30～0.46mgL⁻¹d⁻¹)、2地点St.1, St.2(図-1)での採取試料(底泥+底層水)による実験値(St.1:0.62～2.36mgL⁻¹d⁻¹, St.2:0.16～2.32mgL⁻¹d⁻¹) (郡山ら, 2007)とオーダー的にほぼ等しかった。すなわち、底層では、特に海水温の上昇する夏季に有機物の好氣的分解による大きなDO消費が起こっていると推察される。

図-7に(7)式左辺の移流項(1, 2, 3項の総和/ V_2)、鉛直拡散項(4項/ V_2)、DO消費・生産項(5項/ V_2)の月変動を示した。図示されるように、貧酸素水塊の発生する5

～8月においては、平均して移流項0.0003mgL⁻¹d⁻¹、鉛直拡散項0.37mgL⁻¹d⁻¹、DO消費・生産項-0.42mgL⁻¹d⁻¹となり、鉛直拡散項とDO消費・生産項の底層Cの時間変動に及ぼす影響が非常に大きい。また、夏季における底層へのDO供給は、約99%が鉛直拡散項による。したがって、対象海域における貧酸素水塊の発生は、基本的には密度躍層の形成に伴い、底層での生化学的DO消費量が鉛直拡散による表層から底層へのDO供給量より多くなることに起因すると考えられる。

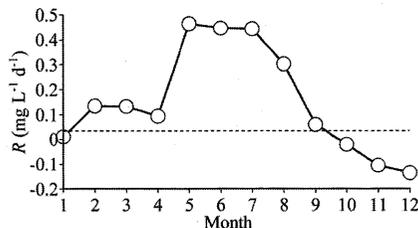


図-6 R の月変動

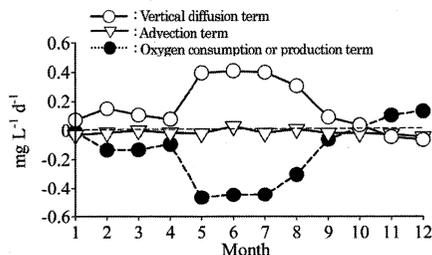


図-7 (7)式のDO消費・生産項、移流項及び鉛直拡散項の月変動

(2) 生化学的DO消費量及び鉛直拡散係数の経年推移

図-8に、それぞれ2層ボックスモデルを用いて浅海定線調査データより推算された1970年代(1972～1980年)、1980年代(1981～1990年)、1990年代～2000年代初頭(1991～2004年)の P , K_2 及び R の平均値の月変動を示した。 P については各年代間に大きな差異は見られない。また、 K_2 については、冬季に各年代間の差異が見られるものの、春季～夏季では非常に小さな値で、その差異はほとんど無い。しかし、 R については、1970年代と1980年代以降の間に大きな変化が見られる。すなわち、 R の大きな正(消費)の期間は、1970年代では8, 9月であるが、1980年代以降では5～8月へと移行すると同時に長期化している。これは、底層DO消費量の70～80%の消費を左右する懸濁態有機物量(郡山ら, 2007)の増加を示唆する。底層中の懸濁態有機物量は内部生産量(植物プランクトンの増殖)と消費量(貝類の摂食やバクテリアによる好氣的分解など)の収支によって大きく左右される。有明海の貝類の漁獲量と対象海域におけるプランクトン沈殿量の経年変化を示す図-9から明らかなように、プラ

ンクトン沈殿量については2002年を除いて大きな経年的変化は見られない。しかし、貝類の漁獲量は1980年頃に境に激減している(九州農政局, 1970-2005)。したがって、高い濾過機能を有する貝類の激減は底層中の懸濁態有機物量の増加をもたらし、さらには1980年代以降のRの大きな変化を生み出した要因の1つではないかと推察される。今後、この点について詳細な検討が必要である。

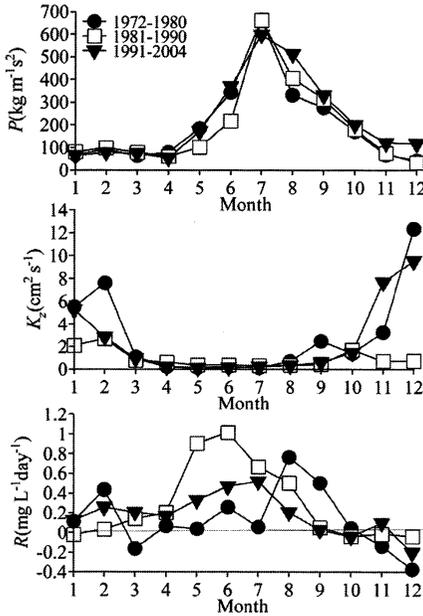


図-8 各年代におけるP, K₂及びRの月変動

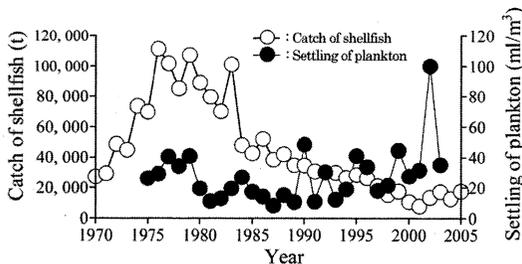


図-9 有明海の貝類の漁獲量と対象海域におけるプランクトン沈殿量の経年変化

4. まとめ

本研究によって得られた主な知見は、以下のように要約される。

(1) 密度躍層の発達する夏季では、鉛直混合や移流が大きく抑制され、逆に底層の生化学的DO消費速度が

大きく増大した。さらに、夏季の底層Cの時間変化には、鉛直拡散フラックスと生化学的DO消費量が大きく影響することが示された。したがって、対象海域における貧酸素水塊の発生は、基本的には密度躍層の形成に伴い、底層での生化学的DO消費量が鉛直拡散による表層から底層へのDO供給量より多くなることに起因すると推察された。

(2) 夏季の貧酸素水塊の発生に大きな影響を及ぼすP, K₂については、約10年毎の経年推移に伴う大きな変化は見られなかった。しかし、Rについては、1980年代以降、生化学的DO消費の期間の早期化と長期化が見られた。その要因の1つとして、高い濾過機能を有する貝類の激減に伴う底層中の懸濁態有機物量の増加が推察された。

謝辞：本研究を実施するに際し、佐賀大学有明海総合研究プロジェクトより、多大な支援を受けた。

参考文献

石谷哲寛, 瀬口昌洋, 郡山益実, 加藤治 (2007): 有明海奥部西岸域における貧酸素水塊の発生と密度躍層, 農業土木学会論文集, 第247号, pp.65-72.
 大串浩一郎, 速水祐一, 濱田孝治, 山本浩一, 平川隆一 (2007): 有明海湾奥部における残差流の分布について, 水工学論文集, 第51巻, pp.1469-1474.
 梶原義範, 富田友幸, 中野拓治, 磯辺雅彦 (2003): 有明海湾奥部海域における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, II-65, pp.187-196.
 九州農政局 (1970-2005): 農林水産統計年報, 有明海等環境情報・研究ネットワーク, all-data.zip
 郡山益実, 瀬口昌洋, 石谷哲寛, 加藤治 (2007): 有明海奥部西岸域における貧酸素水塊発生時の鉛直拡散係数及び酸素消費速度について, 水工学論文集, 第51巻, pp.1463-1468.
 佐賀県 (1972-2005): 浅海定線調査データ, 有明海等環境情報・研究ネットワーク, s-060927db.zip
 徳永貴久, 松永信博, 阿部淳, 児玉真史, 安田秀一 (2005): 有明海西部海域における高濁度層の観測と懸濁物質による酸素消費の実験, 土木学会論文集, NO.782, II-70, pp.117-129.
 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.
 農林水産省有明海の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-, 26p.
 深山顕寛, 磯部雅彦, 鯉淵幸生 (2005): 有明海奥部における貧酸素水塊の動態に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第52巻, pp.951-955.
 八木宏, 松村航裕, 井瀬肇, 木元克則 (2006): 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, 海岸工学論文集, 第53巻, pp.986-990.
 柳哲雄, 下村真由美 (2006): 有明海における鉛直循環流の経年変動, 九州大学大学院総合理工学報告, 第27巻, 第4号, pp.367-371.