



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	栄養塩濃度が大幅に減少した洞海湾の貧酸素水塊と低次生産過程について(シンポジウム:沿岸海域の貧酸素化)
Author(s)	濱田, 建一郎; 上田, 直子; 山田, 真知子 他
Citation	沿岸海洋研究, 48(1), 29-36
Issue Date	2010-08-30
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/56488
Type	journal article
File Information	137)montani-engankaiyo-48-29.pdf



栄養塩濃度が大幅に減少した洞海湾の貧酸素水塊と低次生産過程について*

濱田建一郎^{*,†}・上田 直子^{**}・山田真知子^{††}・多田 邦尚[#]・門谷 茂[†]

Oxygen-deficient Water Volume and Marine Lower Trophic Processes in Dokai Bay after Large Decreases in Nutrient Concentrations

Kenichiro Hamada, Naoko Ueda, Machiko Yamada, Kuninao Tada and Shigeru Montani

九州北部に位置する閉鎖性の強い洞海湾は、窒素・リンが過剰に存在する過栄養状態であったが、1997年に全窒素・全リンの環境基準Ⅳ類型が適用され、2001年には窒素負荷量の削減により基準をクリアした。本研究では環境基準の達成前後における栄養塩濃度の減少と貧酸素水塊や植物プランクトン量の変化について報告する。窒素負荷量の削減により $\text{NH}_4\text{-N}$ は $0.97\sim1,590\ \mu\text{M}$ から $0.120\sim63.0\ \mu\text{M}$ へ大幅に減少した。しかし $\text{Chl } a$ 濃度は環境基準の達成前 $1.5\sim146\ \mu\text{g L}^{-1}$ 、達成後 $1.4\sim218\ \mu\text{g L}^{-1}$ で変化していなかった。また、粒子状有機物の質や量にも変化は見られなかった。この結果から栄養塩濃度の減少が植物プランクトンの成長を抑制していないことが判った。貧酸素水塊の規模は達成前 $521\times10^4\ \text{m}^3$ 、達成後 $508\times10^4\ \text{m}^3$ で変化していないが、形成期間は短くなっていると考えられた。また、洞海湾における貧酸素水塊の形成要因としては海底堆積物の影響が大きいと考えられた。これらの結果から、環境基準の達成前後で湾内の貧酸素水塊の規模や低次生産過程は大きく変化していないことが判った。

Dokai Bay is a small enclosed bay, located in the northern part of Kyushu Island, Japan. This bay is hypertrophic, as evidenced by extraordinarily high total N and P concentrations (TN & TP). TN and TP environmental quality standards (EQSs, TN: less than $1.0\ \text{mg L}^{-1}$, TP: less than $0.09\ \text{mg L}^{-1}$) were applied to Dokai Bay in 1997. Through reductions in nitrogen loading, TN and TP concentrations had declined to below the EQSs by 2001. In this study, we report the decrease of nutrients and change in phytoplankton biomass in an oxygen-deficient water mass in Dokai Bay. After the reduction of nitrogen loading, the annual range of $\text{NH}_4\text{-N}$ concentrations remarkably decreased from $4.97\sim1,590\ \mu\text{M}$ to $0.120\sim63.0\ \mu\text{M}$. However, $\text{Chl } a$ concentrations remained relatively unchanged, from $1.5\sim146\ \mu\text{g L}^{-1}$ before the implementation of EQSs to $1.4\sim218\ \mu\text{g L}^{-1}$ afterward. Furthermore, the quality and quantity of particulate organic matter did not change. This result shows that even such a remarkable decrease in nutrient concentrations did not inhibit phytoplankton growth in a hypertrophic bay. The oxygen-deficient water mass volume was approximately the same: $521\times10^4\ \text{m}^3$ before the implementation of EQSs and $508\times10^4\ \text{m}^3$ after. However, we presume that the duration of the oxygen-deficient water mass was shorter after EQS-implementation. Moreover, we think that the oxygen-deficient water mass in Dokai Bay was affected by the bay sediment. These findings show that the oxygen-deficient water mass volume and marine lower trophic process did not change after the implementation of EQSs.

キーワード：貧酸素水塊, 低次生産, 洞海湾, 環境基準

1. はじめに

九州北部に位置する洞海湾は全長約13 km, 湾幅は湾口部約1.2 km, 湾奥部0.3 km, 航路域の平均水深約7 mの細長く小さな内湾である (Fig. 1). 1960年代高度成

長期の洞海湾は汚濁が進行し「死の海」と呼ばれる無生物状態であった。その後、排水規制等の対策により1980年代にはクルマエビ漁が再開されるまで水質は改善された。しかし、当時の湾内は極端に富栄養化しており、夏季には赤潮や貧酸素水塊の発生が確認された (北九州市環境衛生研究所, 1989¹⁾; 北九州市環境衛生研究所, 1992²⁾; 北九州市環境衛生研究所, 1994³⁾; 山田ほか, 1991⁴⁾; Ueda *et al.*, 1994⁵⁾)。赤潮や貧酸素水塊は漁業被害や内湾の生態系に重大な悪影響を及ぼすため、対策は急務である。そのため1997年に富栄養化対策として環境基準Ⅳ類型 (全窒素, $1.0\ \text{mg L}^{-1}$; 全リン, $0.09\ \text{mg L}^{-1}$) が適用され、2001年には基準値をクリアするまで

* 2009年12月25日受領, 2010年5月2日受理

** 北九州市立大学アクア研究センター

† 北海道大学大学院環境科学院

†† 福岡女子大学人間環境学部

香川大学農学部

連絡先: 濱田建一郎, 北九州市立大学アクア研究センター

〒808-0135 福岡県北九州市若松区ひびきの1-1

E-mail: k-hamada@env.kitakyu-u.ac.jp

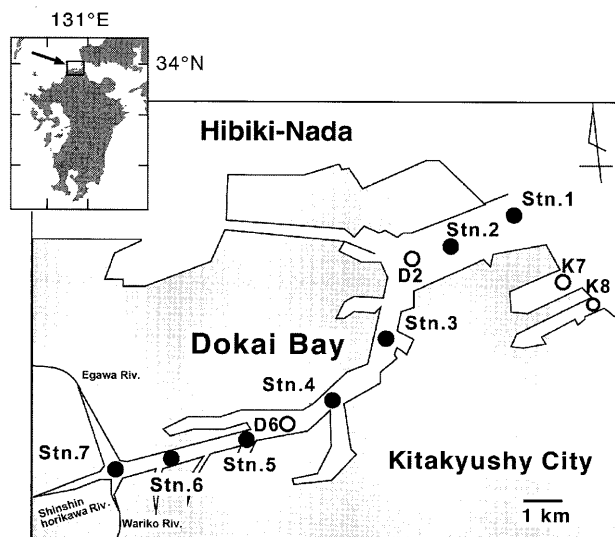


Fig. 1 Study area and location of observation stations. Closed circles represent observation stations. The open circles represent environmental standard points.

全窒素・全リン濃度は低下した。

東ほか (1998)⁶⁾は1994年に実施した3ヶ月間の連続観測結果から、水深の浅い洞海湾の貧酸素水塊形成要因として栄養塩濃度が高く、赤潮生物などの懸濁物質過多を指摘している。しかし、現在の洞海湾は、環境基準の達成により1994年当時と比較して栄養塩環境が大きく異なる。本研究では、このような栄養塩濃度の大幅な減少が湾内の植物プランクトン量や貧酸素水塊の形成状況にどのような変化をもたらしているのかについて、洞海湾中央部に設定された環境基準点 D6 と湾内7箇所に設定した調査定点 (Fig. 1) の観測結果から考察を試みた。本研究では溶存酸素濃度 (以降は DO とする) 3 mg L^{-1} 以下の水塊を貧酸素水塊とした。この値は、柳 (1989)⁷⁾が貧酸素水塊の定義として示した DO 濃度 0.036 mg L^{-1} 以上、 3.6 mg L^{-1} 以下の範囲内である。

2. 栄養塩濃度の変化について

環境基準点 D6 における全窒素・全リン (表層海水) の年平均値の変化を見ると、環境基準が適用された1997年以降に全窒素濃度が減少していることがわかる (Fig. 2)。この結果は、湾岸の事業所からの窒素負荷量が約40%削減 (鬼塚ほか, 2004⁸⁾)された効果をよく表していた。ここで注意が必要なのは、環境基準達成後2001年以降の D6 の平均値が基準 (全窒素, 1.0 mg L^{-1} ; 全リン, 0.09 mg L^{-1}) より高いのは洞海湾の全窒素・全リン濃度が湾内の2環境基準点 (D2, D6) と湾外の2基準点 (K7, K8) の平均値で求められることである。

栄養塩濃度の変化については、湾内の7調査定点で採

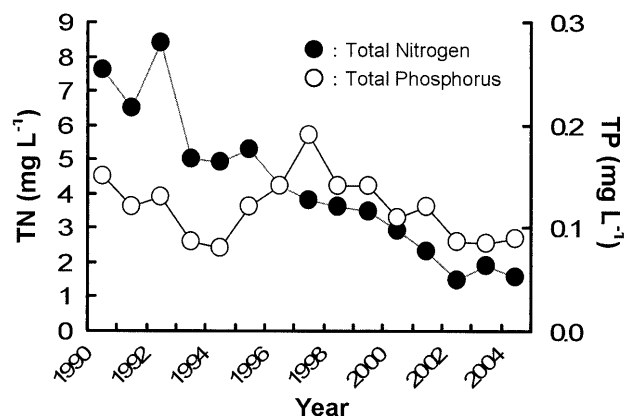


Fig. 2 Time course of Total Nitrogen (TN) and Total Phosphorus (TP) at the environmental standard point (D6) in Dokai Bay.

取した海水の DIN: $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3 + \text{NO}_2\text{-N}$ と DIP: $\text{PO}_4\text{-P}$ について検討した。データは環境基準達成前の1995年8月・9月, 1996年8月 (2回), 1997年5月・8月・11月, 1998年8月の8回と達成後の2006年5月・7月・11月, 2007年1月の4回の表層 (0m) のみを使用した。1995~1998年の栄養塩濃度は, $\text{NH}_4\text{-N}$ が $4.97 \sim 1,590 \mu\text{M}$, $\text{NO}_3 + \text{NO}_2\text{-N}$ が $3.63 \sim 812 \mu\text{M}$, $\text{PO}_4\text{-P}$ が $0.066 \sim 11.3 \mu\text{M}$, $\text{Si(OH)}_4\text{-Si}$ が $0.750 \sim 98.6 \mu\text{M}$ であった。2006~2007年の栄養塩濃度は $\text{NH}_4\text{-N}$ が $0.120 \sim 63.0 \mu\text{M}$, $\text{NO}_3 + \text{NO}_2\text{-N}$ が $0.140 \sim 157 \mu\text{M}$, $\text{PO}_4\text{-P}$ が $0.105 \sim 5.08 \mu\text{M}$, $\text{Si(OH)}_4\text{-Si}$ が $0.720 \sim 115 \mu\text{M}$ であった。 $\text{Si(OH)}_4\text{-Si}$ を除く栄養塩濃度をみると、2006~2007年は1995~1998年より低い値を示し、なかでも $\text{NH}_4\text{-N}$ と $\text{PO}_4\text{-P}$ は各調査定点で大きく減少していた (Fig. 3)。これらの

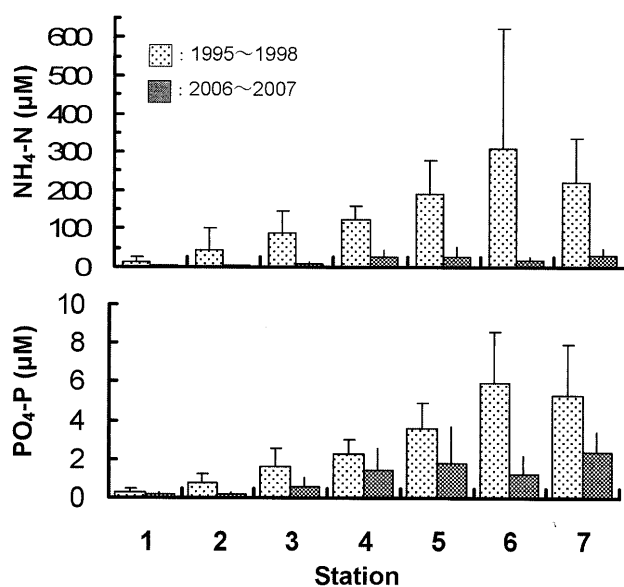


Fig. 3 $\text{NH}_4\text{-N}$ and $\text{PO}_4\text{-P}$ concentrations of the surface for each station. Error bars show the standard deviation.

結果は、窒素負荷量の削減が栄養塩濃度の低下に反映しているものと考えられた。一方、 $\text{Si}(\text{OH})_4\text{-Si}$ は1995～1998年と2006～2007年の間で平均値に差がなかったことから、負荷源は事業所排水ではなく、湾奥に流入している河川由来と考えられた。

3. 植物プランクトン量の変化

植物プランクトンの指標となる Chlorophyll *a* (以降は Chl *a* とする) 濃度は、前述の栄養塩濃度と同一の表層 (0 m) のデータセットを使用した。Chl *a* 濃度を見ると、1995～1998年 が $1.5 \sim 146 \mu\text{g L}^{-1}$ 、2006～2007年 が $1.4 \sim 218 \mu\text{g L}^{-1}$ であった (Fig. 4)。環境基準達成前後で Stn. 1～5 の Chl *a* 濃度は低下傾向が見られたが、湾奥の Stn. 6, Stn. 7 に差は無かった。次に植物プランクトン量を比較するため、水柱中の Chl *a* 現存量 (0～8 m 層積算値) を求めた。1995～1998年の Chl *a* 現存量は $10.2 \sim 429 \text{ mg m}^{-2}$ 、2006～2007年 は $10.9 \sim 250 \text{ mg m}^{-2}$ で、全体的に減少傾向だが湾奥部は差が無いことが判る (Fig. 4)。以上の結果や Chl *a* 濃度が最も低い湾口 Stn. 1 の平均値が $9.3 \mu\text{g L}^{-1}$ もあることから判断して、依然として洞海湾の植物プランクトン量が多いと考えられた。

粒子状物質の有機物濃度を見ると、粒子状有機態炭素 (以降は POC とする) は1995～1998年が $0.317 \sim 2.83 \text{ mg}$

L^{-1} 、粒子状有機態窒素 (以降は PON とする) が $0.042 \sim 0.599 \text{ mg L}^{-1}$ 、2006～2007年は POC が $0.150 \sim 3.05 \text{ mg L}^{-1}$ 、PON が $0.030 \sim 0.694 \text{ mg L}^{-1}$ であった (Fig. 5)。POC, PON 共に環境基準達成前後で Stn. 1～5 にかけて低下傾向が見られたが、湾奥の Stn. 6, Stn. 7 に差は無かった。各調査定点の POC, PON の平均値から求めた C:N 比は、1995～1998年が 5.7～8.1、2006～2007年が 5.5～6.3 で粒子状物質の質的变化は見られず、レッドフィールド比 6.6 (Redfield *et al.*, 1963⁹⁾) に近いことから、その主な起源は植物プランクトンであると考えられた。次に水柱中の POC 現存量 (0～8 m 層積算値) を求め有機物量の比較を試みた。1995～1998年の POC 現存量は $1.99 \sim 11.7 \text{ g m}^{-2}$ 、2006～2007年 は $1.57 \sim 18.2 \text{ g m}^{-2}$ で、環境基準の達成前後で量的変化の無いことが判った (Fig. 6)。

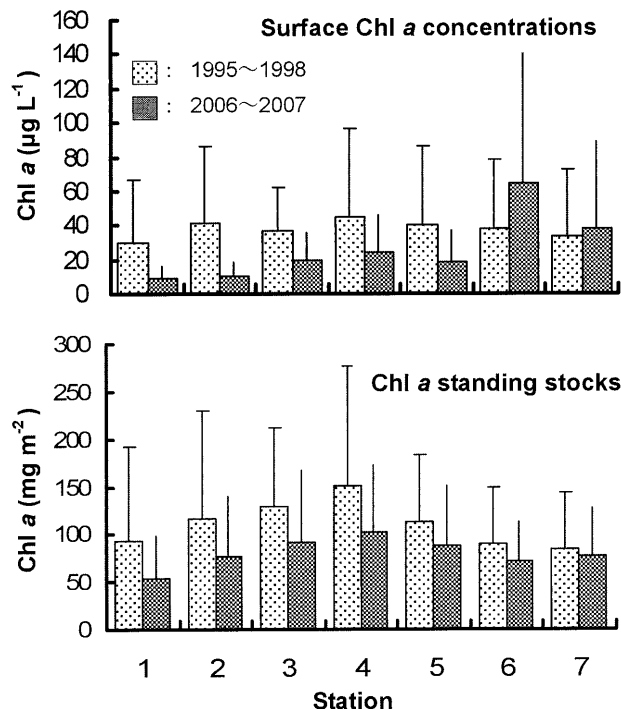


Fig. 4 Chlorophyll *a* (Chl *a*) concentrations of the surface and Chl *a* standing stocks (0～8 m) for each station. Error bars show the standard deviation.

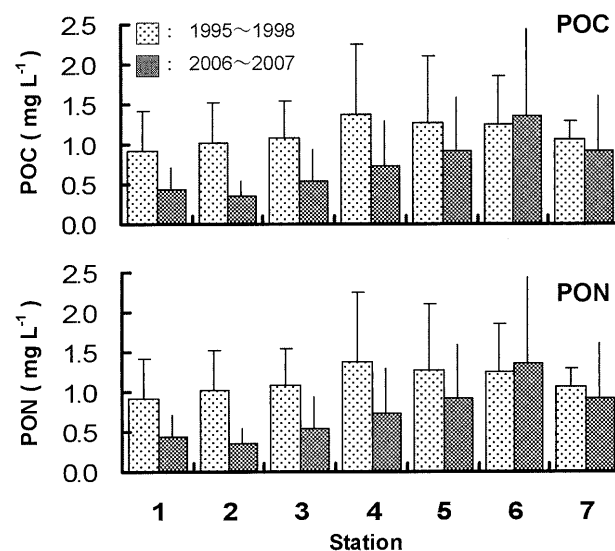


Fig. 5 Particulate organic carbon (POC) and particulate organic nitrogen (PON) concentrations for each station. Error bars show the standard deviation.

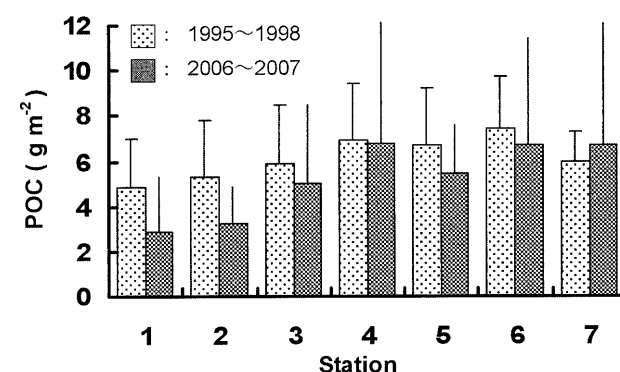


Fig. 6 Particulate organic carbon (POC) standing stocks (8 m) for each station. Error bars show the standard deviation.

以上のように、栄養塩濃度が大幅に低下した後も湾内の Chl *a* 濃度は依然として高いままで、粒子状物質の質や量について大きな変化が無かったことから、湾内における低次生産過程は変化していないと判断された。環境基準達成により栄養塩濃度の減少は確認されたが、その濃度は植物プランクトンの増殖が低下するレベルまで達していなかったと考えられる。多田ほか (2007)¹⁰⁾ は 1996～1997 年の洞海湾では、大過剰の栄養塩が常に存在し、この栄養塩濃度に植物プランクトンが応答して増殖しない状況を「富栄養」よりは「過栄養」とするほうが適切であると指摘している。今回の結果から判断すると、洞海湾は現在も栄養塩が過剰に存在する「過栄養状態」にあると考えられた。

4. 環境基準点 D6 における DO 濃度と透明度の経年変化

環境基準点 D6 下層（水深 7 m, 午前の観測値）における DO 濃度と透明度の経年変化を Fig. 7 に示した。DO 濃度についてみると、環境基準施行前（1997 年以前）は 3 mg L^{-1} 以下の貧酸素状態が夏季に度々観測されているが、2001 年以降は観測されていない。後述するが、この要因の一つとして、近年は貧酸素水塊の形成期間が短くなったために月 1 回の定期観測ではその挙動を把握できないのではないかと考えている。透明度の経年

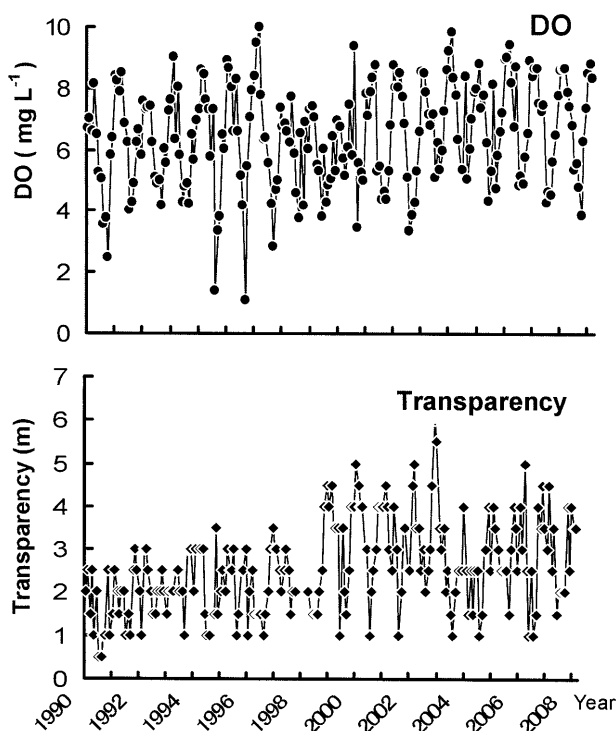


Fig. 7 Dissolved oxygen (DO) concentration and transparency at environmental standard point (D6) in Dokai Bay between 1990 and 2008.

変化をみると、2001 年以降は冬季の透明度の向上が窺える。そこで環境基準達成前（1990 年 3 月～1997 年 3 月）と達成後（2001 年 3 月～2008 年 3 月）の透明度の月別平均値を比較すると、夏季 8 月は達成前 1.3 m と達成後 1.7 m, 冬季 1 月は達成前 1.9 m と達成後 3.6 m で、冬季の透明度の改善が著しいことが判った。冬季の透明度の向上は窒素負荷量の削減による効果と考えられるが、十分なデータが無いため予想の範囲を出ない。

5. 夏季の湾奥部における貧酸素水塊規模の変化

貧酸素水塊の規模の変化は、湾内の 7 調査定点で実施している 1994～2009 年までの夏季の海洋観測結果を使用した（2001～2003 年と 2005 年は欠測）。観測例として、環境基準達成前の 1994 年 8 月 31 日と環境基準達成後の 2006 年 9 月 5 日の DO 濃度の鉛直分布を Fig. 8 に示した。いずれの観測日も晴天が数日続いた後に実施している。DO 濃度が 2 mg L^{-1} 以下の水塊の規模を環境基準達成前後で比較すると、達成前は Stn. 4～7 の 2 m 以深と広範囲に形成されていたが、達成後は Stn. 5～7 の 3 m 以深と規模が縮小していた。しかし、DO 濃度 3 mg L^{-1} 以下の水塊で比較すると、いずれも Stn. 4 の 3 m 以深から湾奥部に向かって形成されており、環境基準達成前後で差は見られない。そこで、貧酸素が形成されやすい夏季（7～9 月）の湾奥部 Stn. 5～7 における貧酸素水塊の体積を求め経年変化を比較検討した (Fig. 9)。

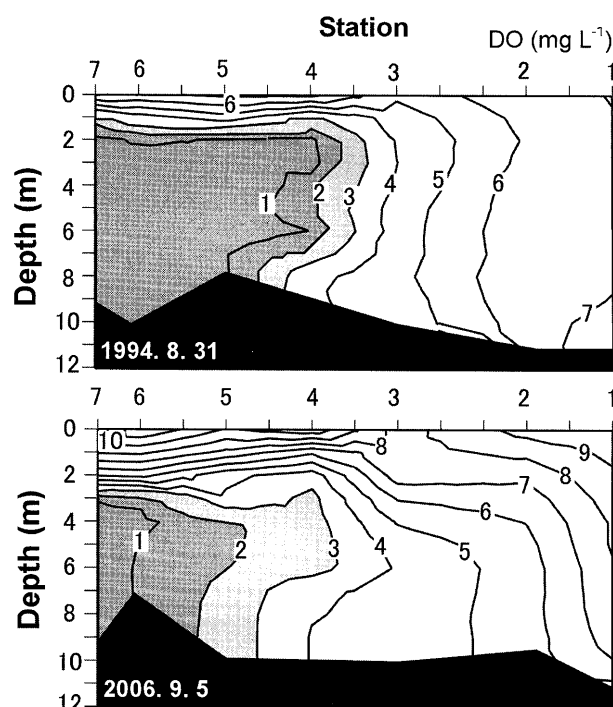


Fig. 8 Vertical sections of dissolved oxygen in Dokai Bay.

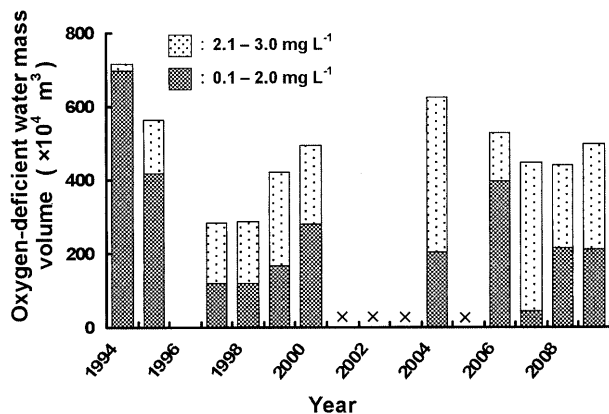


Fig. 9 Summer oxygen-deficient water mass volume in Dokai Bay between 1994 and 2009.

×: No data available.

環境基準達成前の1994～1997年と達成後の2004～2009年における 2 mg L^{-1} 以下の水塊規模の平均値を比較すると、それぞれ $411 \times 10^4 \text{ m}^3$, $213 \times 10^4 \text{ m}^3$ であり、達成後は縮小傾向にあった。しかし、 3 mg L^{-1} 以下の水塊規模は達成前 $521 \times 10^4 \text{ m}^3$ と達成後 $508 \times 10^4 \text{ m}^3$ で差は見られず貧酸素水塊の大きさは変化していないことが判った。

6. 貧酸素水塊形成要因推定の試み

東ほか (1998)⁶⁾は洞海湾における貧酸素水塊の形成要因として、赤潮生物の自己遮蔽により有光層が浅くなるため、それ以深では一方的に酸素が消費される可能性を指摘している。そこで、植物プランクトン量の指標である Chl *a* 濃度と DO 濃度の関係について、各調査定点の水深 8 m まで 1 m 毎 (全 63 地点、各地点のサンプル数は 7～17) に 1994 年から 2009 年の夏季 (7～9 月) の午前中の観測値を使用して回帰分析を行い、回帰直線を求めて貧酸素水塊の形成要因についての検討を試みた。このとき *y*, DO 濃度; *x*, Chl *a* 濃度; *A*, 回帰係数; *B*, 切片とするなら各調査定点の水深毎に求められる回帰直線式は $y = Ax + B$ で表される。赤潮を形成するほど植物プランクトンが多量に存在する夏季の洞海湾において、有光層以深 (約 4～5 m 以深) では植物プランクトンが酸素の生産者でなく消費者と仮定すると、Chl *a* 濃度が高くなるに従い DO 濃度の低下が予想される。そのため、下層の回帰係数 *A* は表層に比べ小さくなり最終的には負の値になると考えられる。なお、相関係数 *r* は 0.1 以下を示した Stn. 7 の 7 m と 8 m を除けば $r = 0.190 \sim 0.949$ の範囲で、平均は 0.646 であった。また、相関係数 *r* が 0.7 以上の地点は全体の 69% を占めることから、回帰係数 *A* や切片 *B* の値を使用して湾内における DO の分布や挙動の概要を把握することは可能だ

と考えた。

回帰直線を求めた例として Stn. 7 における Chl *a* 濃度と DO 濃度の関係を Fig. 10 に示した。湾全体で見ると、負の値を示した回帰係数 *A* は湾奥部 Stn. 7 の 8 m (-0.004) のみで、それ以外は $0.015 \sim 0.759$ (平均値, 0.121) の範囲で、表層 (0～2 m; 平均値, 0.075) より下層 (7～8 m; 平均値, 0.196) の値が大きくなった。そのため、少なくとも有光層以深の植物プランクトンが貧酸素水塊の形成を積極的に促すような酸素消費者には成りえないと考えられた。次に、回帰直線の切片 *B* は植物プランクトンが存在しない状態での各水深の DO 濃度を示すことから、その値を比較することで、植物プランクトンの影響を除いた湾内の DO 濃度分布について推定を試みた。回帰直線の切片 *B* の一覧 (Table 1) を見ると、湾口から湾央 Stn. 1～4 にかけては全層で 3.5 mg L^{-1} 以上あるが、湾奥部 Stn. 5～7 の表層 (0～1 m) 以深は 3.0 mg L^{-1} 以下の貧酸素状態で、湾口表層から湾奥下層に向かって値が低くなる傾向が確認できる。

ここでは午前中の観測値を用いて切片 *B* の値を検討

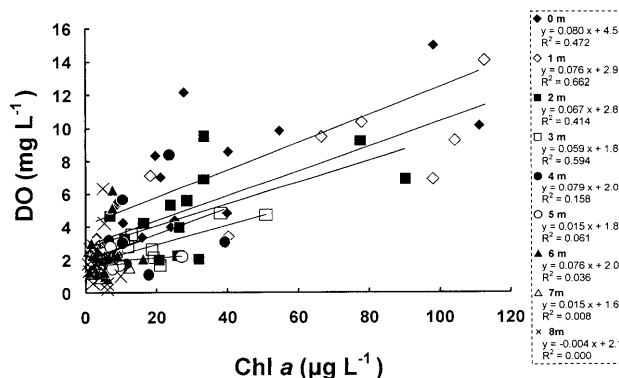


Fig. 10 An example of linear regressions between dissolved oxygen (DO) and chlorophyll *a* (Chl *a*) concentrations at station 7 in Dokai Bay. A line shows the regression line for each water depth.

Table 1 A list of the section *B* of regression lines at every station and depth in Dokai Bay.

Depth (m)	Station						
	7	6	5	4	3	2	1
0	4.5	4.6	6.5	5.7	5.8	7.0	6.6
1	2.9	3.0	4.0	4.7	5.7	6.2	6.1
2	2.8	2.4	2.9	4.1	4.2	5.5	6.2
3	1.8	1.2	2.7	3.5	4.8	5.3	5.4
4	2.0	2.7	2.8	5.4	4.5	5.7	5.9
5	1.8	2.1	2.9	4.3	4.6	5.6	5.2
6	2.0	2.2	3.0	4.1	4.3	5.4	5.7
7	1.6	1.7	2.9	4.3	4.5	5.3	5.4
8	2.1	1.3	2.3	4.3	3.7	5.3	5.1

■: 0.1-2.0 mg L^{-1} □: 2.1-3.0 mg L^{-1}

しているが、昼間と夜間で水中の DO 濃度は変化するので、観測時間の違いによる影響を検討した。1998年8月20日10時～8月21日8時までの湾奥 Stn. 6 における水深 2 m 毎の DO 濃度の時系列変化 (Fig. 11) を見ると、DO 濃度は午前から午後にかけて高くなり18～20時に最高値を示した。その後、DO 濃度は減少に転じ、0～8時までは昼間ほどの大きな変化は無く、ほぼ一定濃度のまま推移していた。この結果から、2 m 以浅の DO 濃度の日変化は大きい、水深 4 m 以深の日変化は小さいことが判った。次に潮汐の影響について検討した。観測時は大潮で、8月20日の21時26分と8月21日の9時20分が満潮であった。水深 6 m と水深 8 m の DO 濃度を見ると上げ潮時に若干の上昇傾向は見られるが 3 mg L^{-1} 以下であった。以上のことから DO 濃度の日変化の小さい 4 m 以深の切片 B の値は、湾奥部の貧酸素水塊形成要因の推定には使用可能だと考えた。

洞海湾の水塊の流動パターンは典型的なエスチャリー循環であり、表層では湾口に向かう流れが、底層では湾口から湾奥に向かう流れが年間を通して卓越していることが判っている (柳ほか, 1996¹¹⁾)。Table 1 は湾口下層から進入した外海水は湾奥への移動過程で酸素が消費され、湾奥に到達する時には貧酸素状態になっていることを示すと考えられる。洞海湾では夏季の表層 2～3 m に密度成層 (濱田ほか, 2007¹²⁾) が形成され上層からの酸素供給が阻害されるため、貧酸素水塊の主な形成要因として水柱中の懸濁物質や堆積物による酸素消費が考えられる。濱田ほか (2007)¹²⁾によると夏季の洞海湾における懸濁物質の多くが植物プランクトン由来であることが判っている。そのため、前述したように植物プランクトンは主たる酸素消費者ではないことから、懸濁物質による酸素消費が主な貧酸素水塊の形成要因とは考え難い。従って、洞海湾における貧酸素水塊の形成は、海底堆積物による酸素消費の影響が大きいと考えられた。

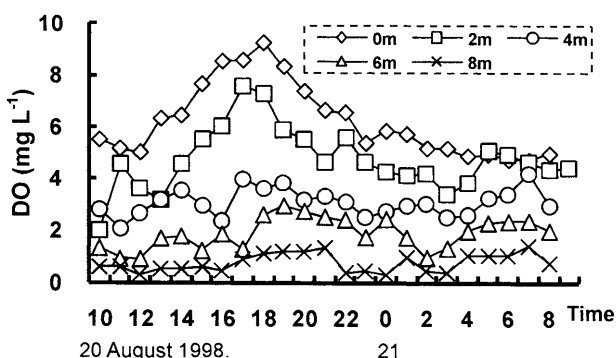


Fig. 11 Time course of dissolved oxygen at Stn. 6 between 20 and 21 August 1998.

7. 貧酸素水塊形成期間の変化

1994年の6～9月にかけて、湾奥部 Stn. 6 の水深 6 m で DO 濃度の長期観測を実施した東ほか (1998)⁶⁾の結果によると、観測中に短期間 (約 1 週間) での貧酸素水塊の形成や約 3 週間の長期にわたる貧酸素水塊の維持と瞬時的 (2～3 日) な解消現象を観測している。環境基準達成後は北九州市環境科学研究所の田中・東田 (未発表) が2004年9月に1994年と同一の地点、水深で1週間の観測を実施している (Fig. 12)。その結果を見ると、DO 濃度は観測開始時から低下傾向が見られ、9月15日に 2.6 mg L^{-1} の最低値を示したが、以降は増加に転じていた (Fig. 11)。また、 3 mg L^{-1} 以下の貧酸素状態は約26時間しか観測されていない。以上より、データ不足は否めないが、2004年は1994年の結果と比較して短期間 (1 週間単位) では貧酸素水塊が形成され難くっており、近年の貧酸素水塊形成期間は短くなっていると推測される。

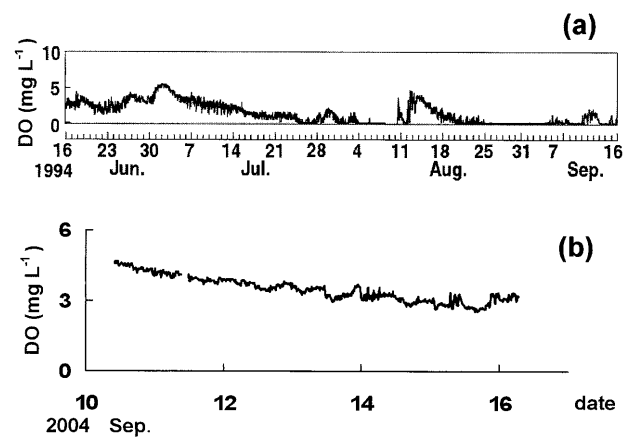


Fig. 12 Time course of dissolved oxygen 6 m below the surface of Stn. 6.

(a): Between 16 June and 16 September 1994 (from Higashi et al., 1998⁶⁾).

(b): Between 10 and 16 September 2004.

8. まとめ

洞海湾では全窒素および全リンの環境基準の達成による栄養塩濃度の低下は確認されたが、粒子状物質の質や量についての変化は見られなかったため、低次生産を主体とする物質循環についても変化が無かったと判断された。このような状態は、栄養塩が植物プランクトンの増殖を低下させる濃度まで減少していないことが要因と考えられた。また、環境基準を達成したものの栄養塩濃度は他の内湾と比べて依然として高く、いまだ洞海湾は栄養塩が過剰に存在する過栄養状態にあることが判った。貧酸素水塊に注目してみると、環境基準達成後も3

mg L⁻¹ 以下の水塊規模は縮小していないことが確認され、その形成要因として海底堆積物による影響が大きいと考えられた。貧酸素水塊の形成期間については、まだ調査不足なため明確には断言できないが、幾つかのデータから期間の短縮が示されている。近年、夏季の湾奥部でシャコが大量に採捕されるようになったことを上田 (2008)¹³⁾ が報告しており、その要因の一つとして貧酸素水塊形成期間の短縮が寄与しているのではないかと考えている。鬼塚ほか (2004)⁸⁾ は生態系モデルを用いた計算結果から、環境基準達成のために実施された窒素負荷量40%削減では湾奥部の赤潮や貧酸素水塊の発生を抑制できないことを指摘している。さらに、湾奥部の赤潮や貧酸素水塊発生を抑制するには95%以上の窒素負荷量削減が必要だと述べている。現状の調査結果が生態系モデルの計算結果とよく一致することから、洞海湾の環境改善のためには、さらなる負荷量削減により、湾中央部の環境基準点D6での環境基準Ⅳ類型(全窒素, 1.0 mg L⁻¹; 全リン, 0.09 mg L⁻¹)の達成を目指すとともに、現場水域で浄化を行う生物的修復法(堤ほか, 1998¹⁴⁾; 門谷ほか, 1998¹⁵⁾)や海底堆積物の覆砂・浚渫除去など複数の対策を組み合わせる必要があるだろう。

謝 辞

本研究を行うにあたり、観測データの提供や調査の実施にご協力いただいた北九州市環境科学研究所の皆様にご感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 北九州市環境衛生研究所 (1989): 洞海湾総合調査報告書Ⅰ 魚・エビ・カニ類, 89pp.
- 2) 北九州市環境衛生研究所 (1992): 洞海湾総合調査報告書Ⅱ 底質と底生動物, 98pp.
- 3) 北九州市環境衛生研究所 (1994): 洞海湾総合調査報告書Ⅲ 生態系の主要生物群, 263pp.
- 4) 山田真知子・末田新太郎・花田喜文・竹内良治・城戸浩三・藪本美孝・吉田陽一 (1991): 水質回復途上の洞海湾における海産動物の出現状況. 日本水産学会誌, **58**, 1029-1036.
- 5) Ueda, N., H. Tsutsumi, M. Yamada, R. Takeuchi and K. Kido (1994): Recovery of the Marine Bottom Environment of a Japanese Bay. Marine Pollution Bulletin, **28**, 676-682.
- 6) 東輝明・山田真知子・門谷茂・広谷純・柳哲雄 (1998): 過栄養な内湾洞海湾における貧酸素水塊の形成過程とその特性について. 日本水産学会誌, **64**, 204-210.
- 7) 柳哲雄 (1989): シンポジウム「貧酸素水塊」まとめ. 沿岸海洋研究ノート, **26**, 141-145.
- 8) 鬼塚剛・柳哲雄・井上康一 (2004): 富栄養化した洞海湾における水質管理のための生態系モデルの適用. 海と空, **80**, 68-75.
- 9) Redfield, A. C., B. H. Ketchum and F. A. Richards, (1963): The influence of organisms on the composition of sea water. p. 26-77. In, The Sea, Vol. 2, edited by M. N. Hill. Wiley-Interscience, New York.
- 10) 多田邦尚・一見和彦・濱田建一郎・上田直子・山田真知子・門谷茂 (2007): 洞海湾の河口循環流と赤潮形成. 沿岸海洋研究, **44**, 147-155.
- 11) 柳哲雄・井上康一・門谷茂・山田真知子 (1996): 洞海湾の潮流と残差流. 愛媛大学工学部紀要, **15**, 141-148.
- 12) 濱田建一郎・上田直子・山田真知子・多田邦尚・門谷茂 (2008): 夏季の過栄養内湾における生化学的キャラクターから見た粒子状物質の起源と低次生産過程. 海の研究, **17**, 179-191.
- 13) 上田直子 (2008): 洞海湾再生の取り組み. 水環境学会誌, **31**, 242-243.
- 14) 堤裕昭・濱田建一郎・上田直子・山田真知子・藤木智子・中村仁美・和田育子・徳田貴子・門谷茂 (1998): *Capitella* sp. 1 (イトゴカイ, 多毛類)を用いた洞海湾湾奥部の底質環境の修復. 環境科学会誌, **11**, 421-429.
- 15) 門谷茂・小濱剛・徳永保範・山田真知子 (1998): 濾過食性二枚貝の生態特性を利用した海洋環境修復技術の開発. 環境科学会誌, **11**, 407-420.

質 疑 応 答

問: 90年代後半に比べて2000年代の貧酸素水塊の規模の縮小は顕著でないとのことだが、何故、底生生物は回復したのか?

(国立環境研究所, 牧 秀明)

答: 貧酸素水塊の形成期間が短くなったためではないかと考えている。

問: 底質の AVS (酸揮発性硫化物) の増減はどうか?

(国立環境研究所, 牧 秀明)

答: 洞海湾の AVS は冬季に低下し夏季に上昇することが知られている(堤ほか, 1998¹⁴⁾)。湾奥部 Stn. 7 における 8 月の AVS を 1996 年と 2009 年で比較すると、それぞれ約 3.0 mg g⁻¹ D. W. と 2.5 mg g⁻¹ D. W. であった。今後は、AVS の経年変化についても詳細な検討が必要だと考えている。

問: 海域における窒素・リンの環境基準の利用目的の適応性に底生生物が周年生息可能であることが記されているが、洞海湾の事例はそれに合致する唯一の例として大変興味深い。

(国立環境研究所, 牧 秀明)

答: 今回の報告だけでは環境基準と底生生物の生息環境の関連性について上手く説明できない。そのため、今後とも調査を継続し、環境変化を定量的に把握するためのデータ収集に努めたい。

問: 環境改善、航路確保のため、当エリアで浚渫が行わ

れたのか否か。

(大阪工業大学, 村松 和夫)

答：港湾管理者である北九州市から、航路確保のための部分的な浚渫が行われていると聞いている。本文中の Fig. 8 で調査毎に海底地形が異なるのは浚渫の影響ではなく、調査日の潮による水深の違いや調査船が観測時に航路外（約50 m）に流されるため、同じ調査定点であっても観測毎に若干水深が異なる結果を反映している。

問：DO と Chl *a* との比較、昼間と夜間では関係が異なるし、天候にも左右されるが。

(大阪工業大学, 村松 和夫)

答：本研究では午前中の観測結果を使用して検討した。また、観測時の天候は数日を除きほとんどが晴天であった。

問：Stns 6, 7 と Stn. 5 より沖では DIN, DIP の半飽和定数との関係が違うのではないか。

(九大, 柳 哲雄)

答：地点による半飽和定数の関係は不明である。

問：Chl *a* と DO の相関の断面図を環境基準達成前と達成後で比較すればどうか。

(九大, 柳 哲雄)

答：湾口 (Stn. 2)・湾央 (Stn. 4)・湾奥 (Stn. 6) の表層 (0 m)・中層 (4 m)・下層 (8 m) について検討した。その結果、湾奥部下層 (Stn. 6, 8 m) におけるバックグラウンドの溶存酸素濃度は環境基準達成前の -0.3 mg L^{-1} から達成後は 1.1 mg L^{-1} と上昇していたが、その他の地点で差は見られなかった。