

— 論文 —

## 諫早湾における貧酸素水塊の形成機構\*

山口 創一<sup>†</sup>・経塚 雄策<sup>‡</sup>

### 要 旨

諫早湾における貧酸素水塊の形成メカニズムの解明を目的として、2004年7月から9月にかけて溶存酸素 (Dissolved Oxygen: DO) および密度場に関する現地観測を週に二回の頻度で実施した。酸素濃度及び密度場は短期間で大きく変動し、貧酸素水塊が形成された場合には最終的に濃度が  $0.1 \text{ mg L}^{-1}$  以下にまで下がる場合があることが判明した。次に、溶存酸素濃度変動に関わる物理 (拡散・移流) 過程と生化学過程をボックスモデルによって分離し、各過程を定量的に評価した。その結果、底層への DO 供給の 77% は鉛直拡散によって、23% は移流によりなされていた。貧酸素化期間の生化学的酸素消費速度は、台風通過時や大潮時に比べ小さくなっており、同時に鉛直拡散及び移流による供給が大きく減少していた。この供給の減少は、小潮時の重力流強化に伴って湾内が成層化し、同時に湾外底層の低 DO 水塊を移流するためである。

キーワード：貧酸素水塊，諫早湾，ボックスモデル，重力循環流

### 1. はじめに

現在、有明海において発生する諸現象のうち、貧酸素水塊は大きな注目を集めるとともに、その環境へ与える負の影響が指摘されている。諫早湾においては夏季にその形成が確認されており (梶原ら, 2003)、タイラギやアサリなど有用二枚貝の減退を招く要因の一つに考えられている。そのため、その形成メカニズムの解明は急務である。海水中の溶存酸素 (Dissolved Oxygen: DO) 濃度は移流・拡散過程や生物化学的な過程に伴う酸素の供給と消費のバランスによって決まる。つまり、物理的過程と生化学的な過程がともに関わる貧酸素水

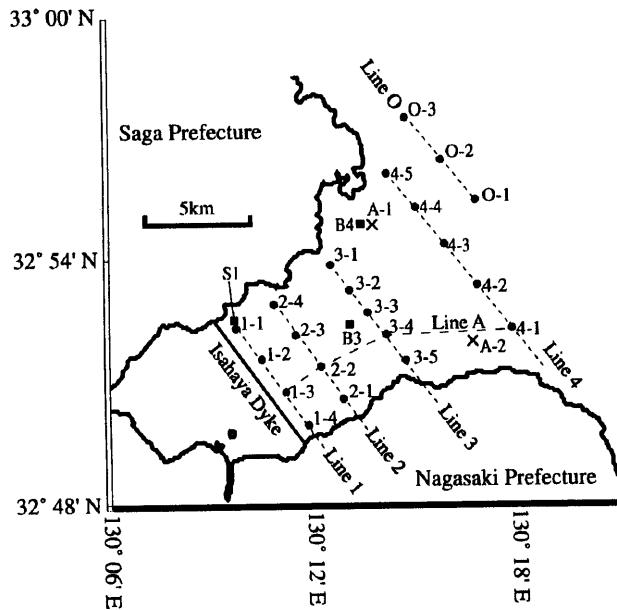
塊の形成機構を明らかにするためには、諸過程の寄与分を分離し、定量化する必要がある。そこで本研究では、諫早湾において発生する貧酸素水塊の形成メカニズムの解明を目的とし、2004年夏季に時空間的に密な連続観測を実施した。そして物理・生化学過程をボックスモデル手法によって分離し、各過程を定量的に評価した。その結果、貧酸素水塊の形成メカニズムに関していくつかの新たな知見が得られた。なお門谷 (1998) は底生生物や魚類の低酸素濃度耐性を基に DO 濃度が  $2\sim 3 \text{ ml L}^{-1}$  ( $\approx 2.9\sim 4.3 \text{ mg L}^{-1}$ ) 以下を貧酸素水としており、Diaz and Rosenberg (1995) はヨーロッパを中心とした各地の現場で得られた底生生物に関する貧酸素耐性の知見を基に  $2.0 \text{ ml L}^{-1}$  ( $\approx 2.9 \text{ mg L}^{-1}$ ) 以下を貧酸素水と定義している。よって、本報告では、その下限値をとり、DO 濃度が  $3.0 \text{ mg L}^{-1}$  以下の水塊を貧酸素水塊と定義した。

\* 2005年6月28日受領；2005年9月22日受理  
著作権：日本海洋学会，2006

<sup>†</sup>九州大学大学院 総合理工学府 大気海洋環境システム学専攻  
〒816-8580 春日市春日公園 6-1

主著者 e-mail address : yamaguti@esst.kyushu-u.ac.jp

<sup>‡</sup>九州大学大学院 総合理工学研究院  
〒816-8580 春日市春日公園 6-1



**Fig. 1.** The observation stations in Isahaya Bay. Solid circles (●) denote CTD observation stations of temperature, salinity, and DO. The bottom-installed ADCP moorings are carried out at two crosses (×). Solid squares (■) represent observation stations of temperature, salinity, DO, Chl-a and turbidity by Kyushu Regional Agricultural Administration Office.

## 2. 観測について

Fig. 1 に観測点を示す。観測は 2004 年 7 月 15 日から 9 月 19 日までの約 2 か月間にわたって行ない、満潮の時間を挟んで前後 1.5 時間、合計 3 時間以内に行なった。観測項目は多項目水質計 (MODEL: MS4a-SE, Hydrolab 社製) を用いて水温 (T)、塩分 (S)、溶存酸素 (DO) を計測し、Line 1 と 2 については鉛直方向に 0.5 m 間隔ごとに、その他については 1.0 m 間隔ごとに計測した。諫早湾内における過去の観測 (中山ら, 2003) によると、ここでは貧酸素水塊が 2 日から 3 日という短期間で形成されることから、週に二回程度の頻度で小潮、中潮、大潮時のそれぞれに観測を行なった。また、諫早湾湾口に近い 2 観測点 (Sta. A-1, Sta. A-2) の海底に ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler: Nortek 社製 ADP と Aquadopp) を設置し、10 分ごとに

層厚 0.5 m 間隔で流速の鉛直プロファイルを計測した。Sta. A-1 海底直上にはメモリー式溶存酸素計 (ADOW: アレック電子製) を設置し、10 分間隔で海底直上の DO 濃度を計測した。Fig. 1 中、Sta. S1, Sta. B3, Sta. B4 には九州農政局の設置した自動昇降機によって T, S, DO, クロロフィル a (Chl-a)、濁度 (Turbidity) が毎正時鉛直方向に 0.5 m 間隔で計測されており、さらに Sta. B3 の観測棟において風向風速が計測されている。本研究では、これらの観測資料も適宜解析に使用した。

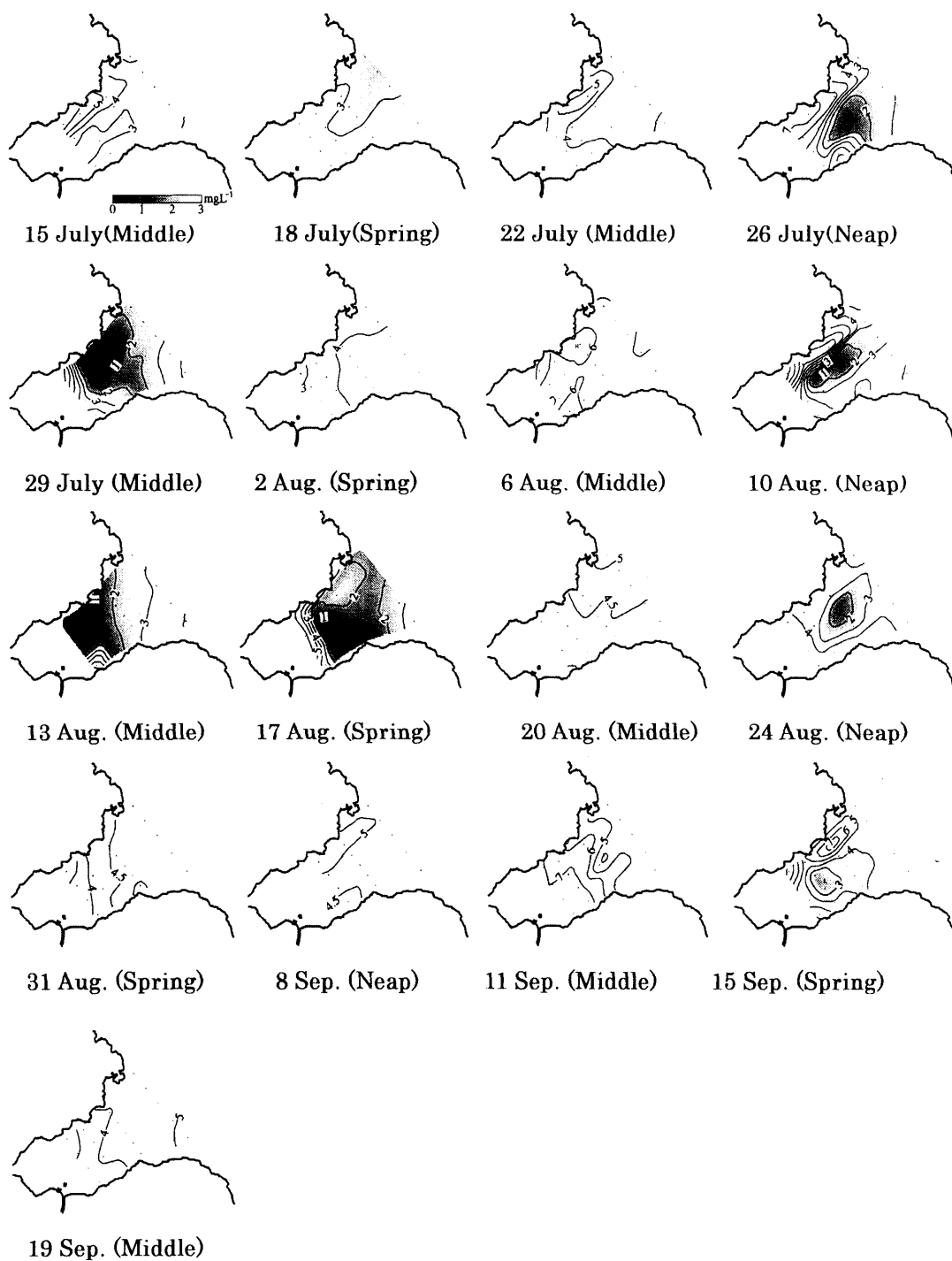
**Table 1.** Typhoons during the observation period.

Name of Typhoon	Arrival Date
T0410	31 July to 1 August 2004
T0415	18 to 19 August 2004
T0416	30 to 31 August 2004
T0418	7 September 2004

## 3. 観測結果

Fig. 2 に海底直上 (海底上 0.5 m) の DO 濃度水平分布、Fig. 3 に Sta. B3 における風速と風ベクトル、25 時間移動平均を施した風ベクトルの時系列、Fig. 4 に Sta. A-1 における海底直上 DO 濃度の連続観測結果、水位、鉛直平均した水平流速の絶対値を示す。また、観測期間中の主だった台風の接近もしくは通過期間を Table 1 に示す。

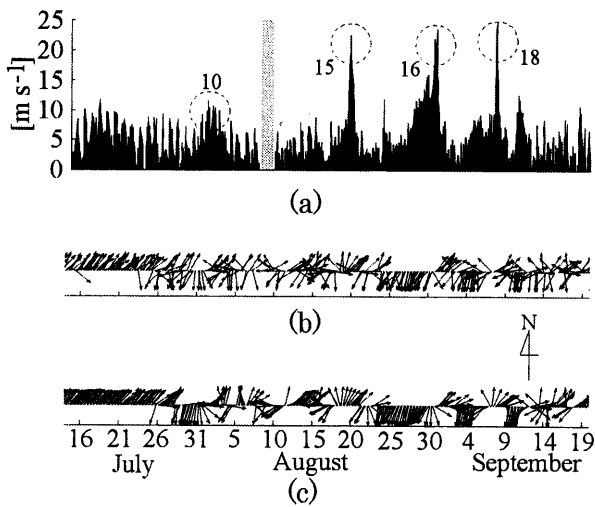
Fig. 2 の DO 濃度分布図において、濃度が  $3.0 \text{ mg L}^{-1}$  以下の海域には濃度に応じてトーンをつけている。なお、7 月 26 日と 9 月 8 日は観測時間に他との若干のずれが生じていることに注意されたい。貧酸素水塊が観測されたのは 7 月 15 日、7 月 18 日、7 月 26 日、7 月 29 日、8 月 10 日、8 月 13 日、8 月 17 日、8 月 24 日、9 月 15 日であり、3 日から 4 日という短期間で形成されていた (Fig. 2)。また、諫早湾湾口側よりも湾内で濃度が低く、初期に湾中央の海域で見られ、数日後に DO 濃度の最低を示す領域が移動 (7 月 26 日から 7 月 29 日、8 月 10 日から 8 月 17 日) していた。このうち、いずれも小潮から中潮期であった 7 月 29 日お



**Fig. 2.** Horizontal distribution of DO concentration [ $\text{mg L}^{-1}$ ] at 0.5 m above the bottom in 2004. Areas with tones indicate a value less than  $3.0 \text{ mg L}^{-1}$ .

よび 8 月 13 日は、それぞれ最低 DO 濃度が  $0.15 \text{ mg L}^{-1}$  および  $0.07 \text{ mg L}^{-1}$  と深刻な状態を示していた。

一方、大潮期の 8 月 17 日にも貧酸素水塊は形成されており、Line 2 を中心に無酸素状態に近かった (Sta. 2-3



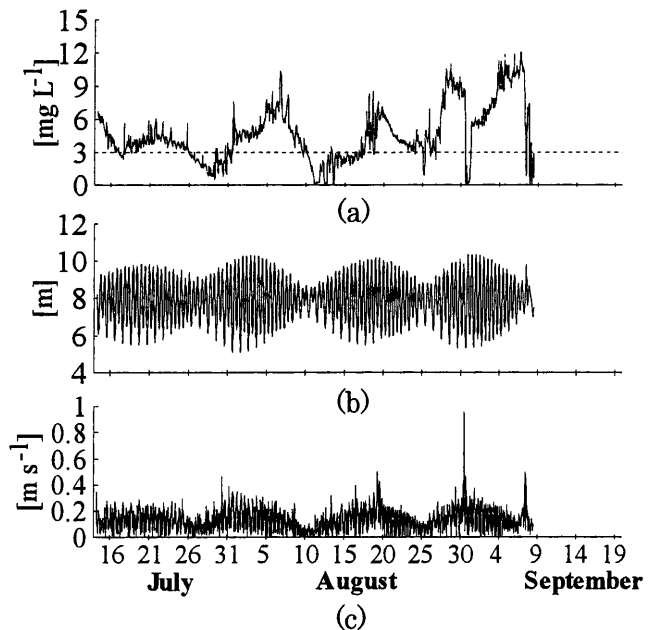
**Fig. 3.** Wind speed (a) and wind direction (b) at Sta. B3, and smoothed wind direction with 25-h running mean (c). The grey bar represents missing data.

で  $0.09 \text{ mg L}^{-1}$ 。7月22日の貧酸素水塊の消滅については大潮時の混合で、また8月2日や20日、および31日の消滅は、それぞれ台風10号、15号、そして16号の接近 (Table 1) に伴う風の強化 (Fig. 3) により、また同時期大潮であったことも重なり、混合され解消したものと考えられる。

Fig. 4(a) のメモリー式 DO 計の連続観測結果によると、Fig. 2 と同時期において DO 濃度の低下が見られ、水位や鉛直平均流と比較すると明らかのように、小潮時の流れの弱い時期に対応して DO 濃度が低下していた。その他に台風16号及び台風18号 (Table 1) の接近に伴い、DO 濃度が一時的に急激な低下を示した。これは一時的に海底泥が巻き上げられ、急激に酸素が消費されたためと考えられる。

Fig. 5 に貧酸素水塊の形成された湾内の代表点として Sta. 3-3 および非形成の Sta. 4-1 における DO 濃度、密度 ( $\sigma_t$ )、塩分、水温のイソプレットダイアグラムを示す。DO 濃度の図には濃度が  $3.0 \text{ mg L}^{-1}$  以下の場所にトーンをつけている。

Sta. 3-3 において7月18日、7月26日から7月29日、8月10日から8月13日にかけて比較的深い水深



**Fig. 4.** Time-series of bottom DO concentration (a), depth (b) including sea surface elevation, and vertically-averaged current speed (c) at Sta. A-1. The dashed line in (a) means the value of  $3.0 \text{ mg L}^{-1}$  which is the criterion of hypoxia in this study.

に密度躍層が形成され、それ以深で貧酸素水塊の形成が確認できる。また、8月24日を除く貧酸素水塊形成時の底層水温及び塩分が、非形成時に比べてそれぞれ低下・上昇しており、結果として底層密度が上昇している。この特徴は同時期に貧酸素が観測された他の観測点においても同様であった。一方で Sta. 4-1 では貧酸素水塊は観測されなかったが、諫早湾内で貧酸素化が確認された期間は湾内と同じように底層が低温高塩分化する傾向を示していた。

8月24日の貧酸素水塊形成時には、上記したような密度構造は見られなかった。Fig. 2 や Fig. 4 のメモリー式 DO 計の連続観測結果によると、この貧酸素化は7月29日や8月13日、8月17日に形成されたものに比べると深刻なものではない。また、Sta. B3 (Fig. 1) に設置された農林水産省による自動昇降装置を用いた観測では、DO 濃度はその後速やかに上昇しており、一時的なものであったと考えられる。よって以下では、7月22日から8月20日にかけて形成・消滅した二回の

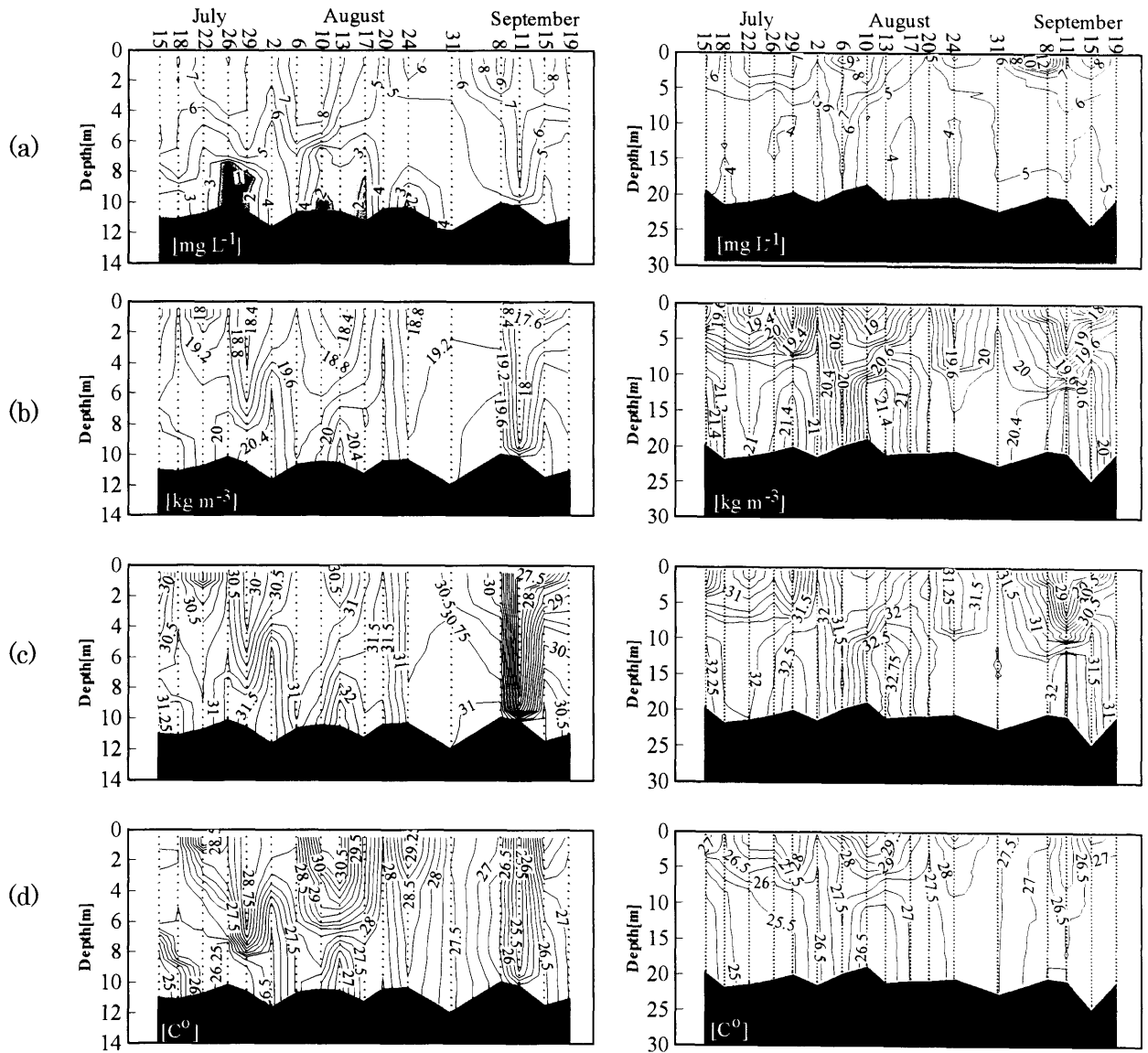


Fig. 5. Isopleth diagrams of DO (a), density in  $\sigma_t$  (b), salinity (c), temperature (d) at Sta. 3-3 (left panels) and Sta. 4-1 (right panels).

貧酸素水塊に言及して議論を進めることとした。

密度躍層と DO 濃度との位置関係をより詳細に見るために、Fig. 6 に観測線 Line 3 における各観測日の DO 濃度及び密度 ( $\sigma_t$ ) の鉛直断面分布を示す。これらは、7月22日から8月20日の特に深刻な状態を示した2回の貧酸素水塊の発生から消滅までの鉛直断面分布である。DO濃度が  $3.0 \text{ mg L}^{-1}$  以下の場合には、これまでの図と同様に濃度に応じてトーンをつけている。この結果によれば、7月22日から26日にかけて Sta. 3-3

から Sta. 3-5 の底層の密度が上昇し、弱い密度躍層が形成されていた。29日には躍層が Line 3 全体にわたって形成され等密度線の間隔が密になり、はっきりとした成層構造が確認できる。このように躍層は底層に形成され、これを境界として DO 濃度が急激に減少していた。8月6日から13日にかけても同様に底層が高密度化するとともに、形成された躍層を境に DO 濃度が低下していた。これらのことより、この底層に形成される躍層が諫早湾内の貧酸素水塊形成には密接に関連

しており、また、躍層形成には低温・高塩分の高密度水塊の底層への流入が大きな役割を果たしていることが分かる。

底層の水温・塩分分布では、この低温・高塩分水塊は湾口中央付近から南部にかけての底層から侵入している様子が見られた (Fig. 5 の Sta. 4-1 を参照)。そこで、Fig. 1 の Line A における Fig. 6 と同期間の密度の鉛直断面分布を Fig. 7 に示す。この分布より、等密度線が湾口から水深を下げながら湾内へ延びており、湾口底層の高密度水塊が湾内底層へ侵入している様子が見てとれる。8月17日の大潮期にも貧酸素水塊が見られ、Line 2 南部を中心に無酸素状態に近かったが (Fig. 2)、Fig. 7 の結果を見ると、Sta. 2-2 の底層には13日と比べ弱くなってはいるものの、躍層の存在が確認できる。8月17日は8月13日に見られた成層構造が崩壊しつつある状態をとらえたものと考えられる。

これらの観測結果より、諫早湾における水温、塩分および密度構造は短期間で大きく変動し、それに伴い DO 濃度も大きな変動を示すことが判明した。また、貧酸素水塊の形成は底層における密度躍層の強化と連動していた。密度の鉛直断面分布より、この密度躍層の形成は諫早湾外底層からの高密度水塊の流入に起因することが明らかとなった。

これらの観測された貧酸素水塊は、移流・拡散過程と生化学的酸素消費過程によって形成されたものである。そこで次章では、各過程をボックスモデル手法で分離し定量化することによって、貧酸素水塊の形成にかかわる各過程の変動を評価した。

## 4. ボックス モデル解析

### 4.1. ボックス モデル

Fig. 8 に、本研究に適用したボックスモデルの形状を示す。観測結果より、貧酸素水塊が諫早湾規模のスケールで発生していたことや、密度の鉛直分布が二層構造を示していたため、図に示すように同湾を上下層の2ボックスに分け、さらに Line 3 と Line 4 の中間にボックスの水平境界を設けた。モデルの鉛直軸は海表面を原点とし上向きを正、水平軸は潮受け堤防を原点とし、諫早湾湾口方向を正とした。上下のボックス

の境界深さは底層に形成された躍層の水深 ( $H_1$ ) にあわせている。 $H_1$  はより現実を反映させるため Fig. 7 の8月20日の図中に点線で示したように、躍層に沿うように傾けている (Line 2 で 5.75 m, Line 3 と Line 4 で 8.0 m, その間は線形補間)。上下層の密度差に対する水温と塩分の寄与を算出すると、概ね塩分による寄与が水温を上回っており、さらには等密度線と等塩分線がほぼ一致 (Fig. 5) していたため、塩分の観測値を用いてモデルを構築した。上層には各観測日の Line 2 及び Line 3 の全観測点における水深 0 m ~  $H_1$  までの塩分平均値 ( $S_1$ ) を、下層には  $H_1$  以深の塩分平均値 ( $S_2$ ) を与えた。Sos は Line 4 における全観測点の水深 0 m ~  $H_1$  までの平均塩分、Sob は  $H_1$  以深の平均塩分値である。各ボックスにおける塩分の時間変動を支配する物理量は、上層の水平流速  $U_1$ 、下層の水平流速  $U_2$ 、上下層間の鉛直流速  $W_{12}$  と鉛直拡散係数  $K_{V12}$  の四つである。水平拡散による寄与については、九州農政局諫早湾干拓事務所 (2002) が算出した拡散係数を用いて解析したところ、移流による寄与に比べ1オーダーから2オーダー低いと推定されたために無視することにした。上下ボックスの塩分の時間変化を支配する方程式はそれぞれ次式で表される。

BOX1

$$\begin{aligned} V_1 \frac{\partial S_1}{\partial t} &= -A_{10} U_1 \frac{S_1 + S_{os}}{2} \\ &+ A_{12} W_{12} \frac{S_1 + S_2}{2} \\ &+ A_{12} K_{V12} \frac{S_2 - S_1}{Z_{12}} \end{aligned} \quad (1)$$

$$A_{10} U_1 = A_{12} W_{12} Q_{w1} \quad (2)$$

BOX2

$$\begin{aligned} V_2 \frac{\partial S_2}{\partial t} &= -A_{20} U_2 \frac{S_2 + S_{ob}}{2} \\ &+ A_{12} W_{12} \frac{S_1 + S_2}{2} \\ &- A_{12} K_{V12} \frac{S_2 - S_1}{Z_{12}} \end{aligned} \quad (3)$$

$$A_{20} U_2 = -A_{12} W_{12} \quad (4)$$

$V_1$ ,  $V_2$  はそれぞれ上層下層ボックス体積,  $A_{12}$ ,  $A_{10}$ ,  $A_{20}$  はそれぞれ、上下ボックスの水平断面積, 上層ボッ

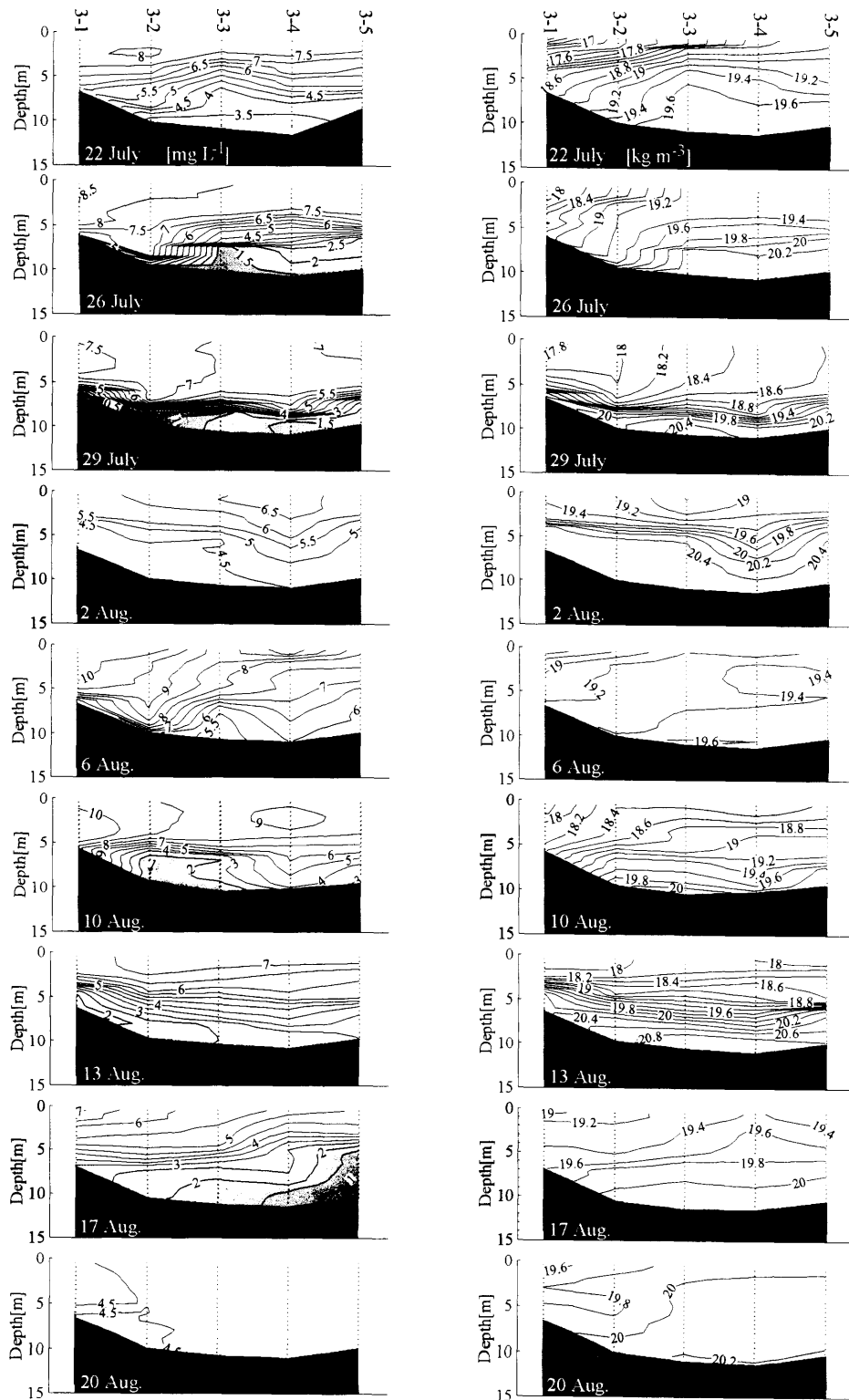


Fig. 6. Vertical distributions of DO (left panels) and density in  $\sigma_t$  (right panels) along line 3 from 22 July to 20 August 2004.

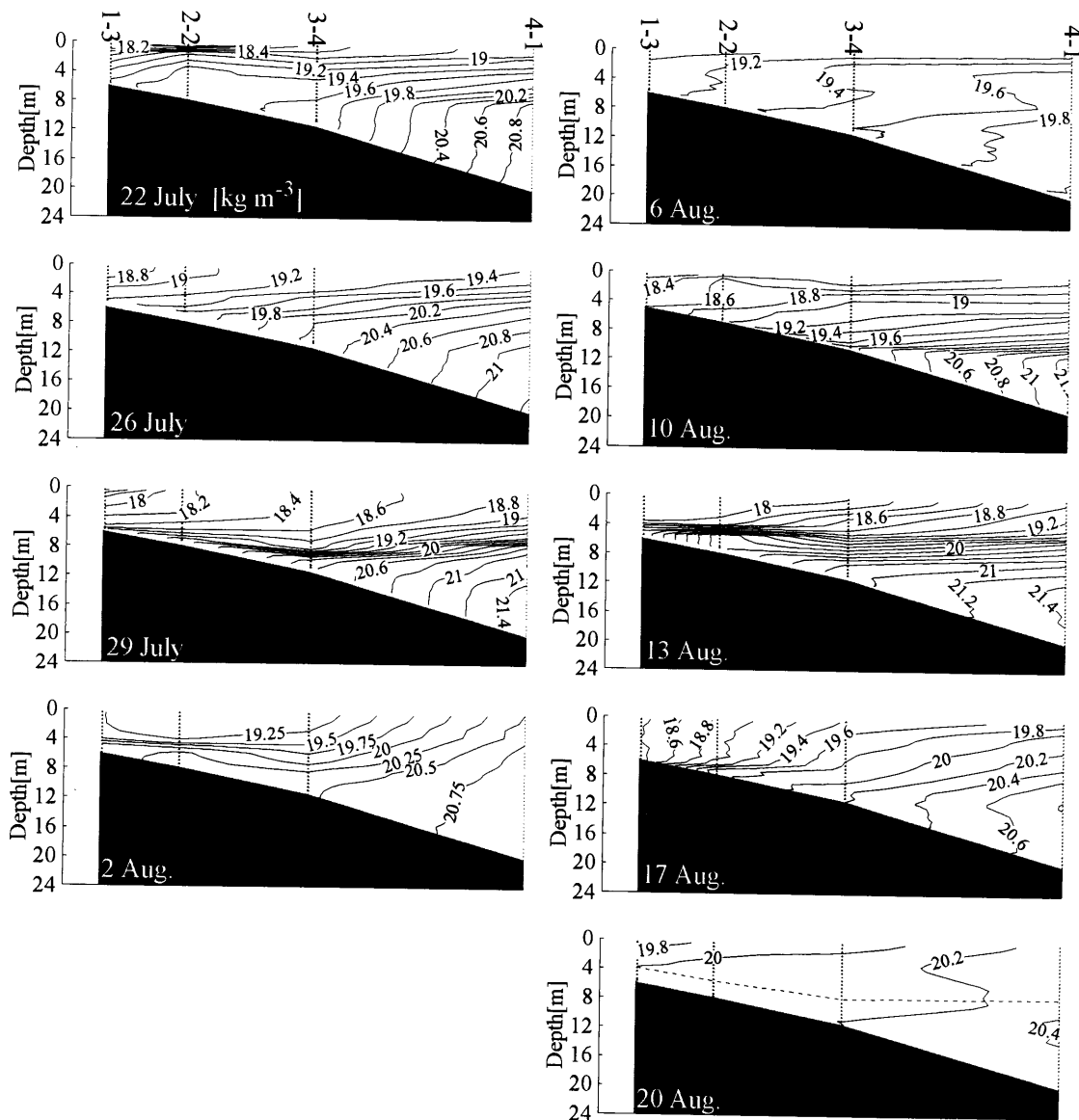


Fig. 7. Vertical distributions of density in  $\sigma_t$  along line A (in Fig. 1) from 22 July to 20 August. Dashed line in the figure of 20 August indicates the box model interface.

クス鉛直断面積，下層ボックスの鉛直断面積， $Z_{12}$ は上下ボックスの中央点間距離， $Q_{W1}$ は上層ボックスへの淡水流入量で，潮受け堤防及び二級河川からの流量と蒸発や降雨を考慮した正味の値を示す。体積や面積などの算出は日本水路協会が発行する海底地形データJ-BIRDによった。各ボックスの緒元はTable 2に示す。S1, S2, Sos, Sobに各観測で得られた塩分値を代入して，前掲四つの物理量を求めた。

下層のDO濃度(C2)の時間変化を支配する方程式は次式となる。

$$\begin{aligned}
 V_2 \frac{\partial C_2}{\partial t} = & -A_{2o} U_2 \frac{C_2 + C_{ob}}{2} \\
 & - A_{12} W_{12} \frac{C_1 + C_2}{2} \\
 & + A_{12} K_{V12} \frac{C_1 - C_2}{Z_{12}} - V_2 R_2 \quad (5)
 \end{aligned}$$

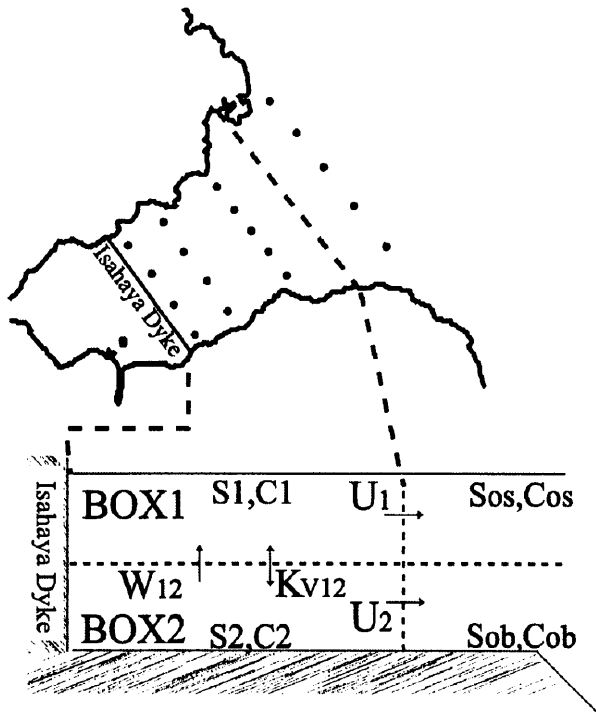
$C_1$ は上層ボックスの平均DO濃度で，各観測日のLine 2とLine 3の全観測点における $H_1$ 以浅の空間平



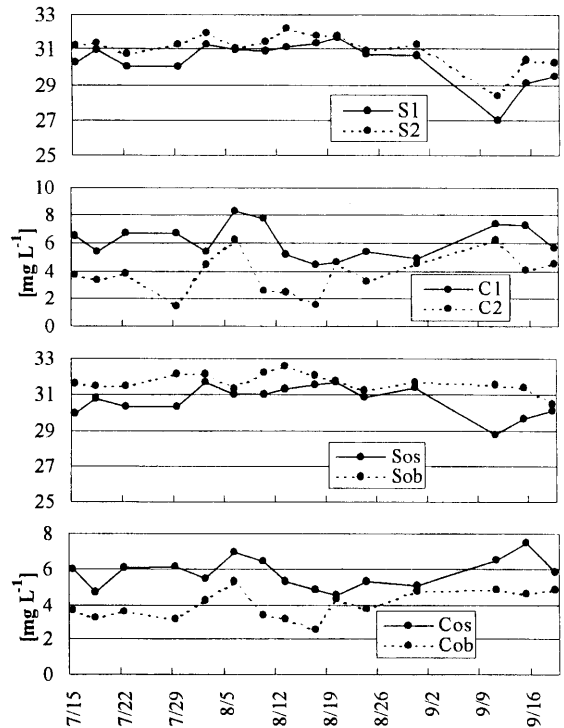
**Table 2.** Dimensions of boxes in Isahaya Bay.

	Name	Value
Volume ( $\times 10^7 \text{ m}^3$ )	$V_1$	39.98
	$V_2$	6.308
Interface Area ( $\text{km}^2$ )	$A_{12}$	45.27
Cross Section Area ( $\text{km}^2$ )	$A_{10}$	0.08
	$A_{20}$	0.02
Vertical Distance (m)	$Z_{12}$	3.16

均値を用いた。また Cob は Line 4 における水深  $H_1$  以深の全観測点における空間平均 DO 濃度である。さらに、 $R_2$  は生化学的な酸素消費速度を表す。(5) 式の右辺第一項が水平移流、第二項が鉛直移流、第三項が鉛直拡散、第四項が生化学的酸素消費を表す。先に求めた四つの物理量と、観測日ごとの DO 濃度を (5) 式に代入することにより、物理・生化学過程 (すなわち  $R_2$  の時系列) を定量的に分離することが出来る。



**Fig. 8.** Box model and its boundaries.

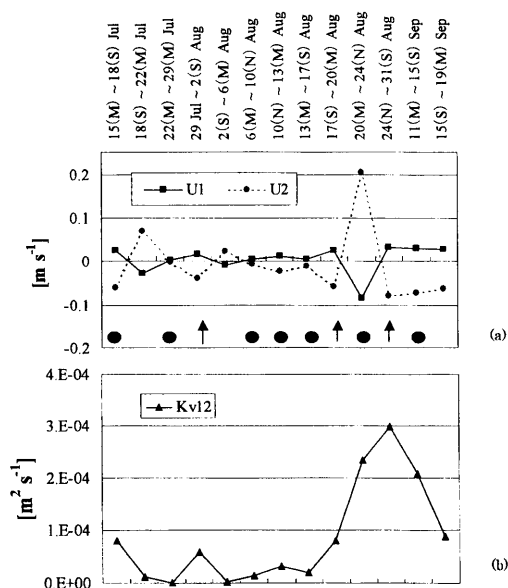


**Fig. 9.** Time-series of DO concentration and salinity used for each box.

**4.2. 適用結果**

上下層ボックスの平均塩分 ( $S_1, S_2$ ), 平均 DO 濃度 ( $C_1, C_2$ ) 及び Line 4 における上層下層の平均塩分 ( $S_{os}, S_{ob}$ ), 平均 DO 濃度 ( $C_{os}, C_{ob}$ ) を Fig. 9 に、ボックスモデル解析によって得られた上下層の水平流速、鉛直拡散係数の時系列を Fig. 10 に示す。流速の正值は諫早湾外への流出を、負値は流入を意味する。なお、前述したように 7 月 26 日、9 月 8 日は観測時間に他とのずれが生じたためボックスモデル解析には使用していない。

Fig. 10(a) によると、8 月 24 日を除く諫早湾内に貧酸素水塊が形成された期間 (図中の●) は表層流出、下層流入となっており、観測で見られた底層への湾口外域からの流入を支持する結果となっている。拡散係数も同時期低い値を示し、躍層の影響を受けている様子が見て取れる。7 月 29 日から 8 月 2 日、8 月 17 日から 8 月 24 日、8 月 24 日から 8 月 31 日の鉛直拡散係数の増加は、それぞれ台風 10 号、15 号、16 号の接近



**Fig. 10.** Horizontal velocities (a) and vertical diffusivities (b) obtained by the box model analysis. Arrows show the arrival of typhoons and solid circles (●) show the period of the hypoxia occurrence.

(Table 1, Fig. 10(b) 中の矢印) に伴う混合を表していたと考えられる。

これらの物理量を式 (5) に代入し、DO 濃度の時間変動に対する (5) 式の右辺各項の寄与を Fig. 11 に示した。図中にはそれぞれの観測日の潮時も示した (S: 大潮, M: 中潮, N: 小潮)。

各項の全観測にわたる平均値は、移流項が  $0.85 \text{ mg L}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 、鉛直拡散項が  $2.78 \text{ mg L}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 、そして生化学的な酸素消費項が  $-3.60 \text{ mg L}^{-1} \text{ d}^{-1}$  であり、底層での DO の供給は全体の約 77% が鉛直拡散過程によって、約 23% が移流過程によってなされていることが判明した。また、求められた酸素消費項は台風の接近した期間や大潮から中潮への期間で大きな値を示していた。

ここで、貧酸素水塊が形成された期間、特に貧酸素化が深刻な状態を示した 7 月 22 日から 7 月 29 日 (以後、期間 A) 及び 8 月 6 日から 8 月 17 日 (期間 B) に着目する。Fig. 11 によると、生化学的な酸素消費速度は他の期間に比べ小さくなり、移流や拡散による供給が減少していた。両期間の平均値は、移流項が  $-0.31 \text{ mg L}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 、鉛直拡散項が  $1.28 \text{ mg L}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 、生化学的

な酸素消費項が  $-1.35 \text{ mg L}^{-1} \text{ d}^{-1}$  となった。全期間平均に比べ、移流項、鉛直拡散項が小さく、生化学的酸素消費も小さくなっている。これらの結果より、諫早湾における貧酸素水塊は、生化学的な酸素消費は減少するが、同時に移流及び拡散による供給が大きく減少するため形成されたことが分かる。

#### 4.3. ボックスモデルの妥当性検証

ボックスモデルの適用の結果、生化学的な DO 消費速度は小潮期周辺で小さく、台風接近時や大潮時に大きな値を示していた。この DO 消費を担う現象には、海底堆積物の再懸濁した物質 (SS) による DO 消費 (徳永ら, 2005) や、植物プランクトンの枯死体が海底へ沈降し分解される際の DO 消費があると考えられる。そこで、Fig. 12 に Sta. B3, Sta. B4 において九州農政局により計測された底層濁度 (海底から 1.0 m の平均値) および表層クロロフィル a (海面から 2.0 m の平均値) の観測期間中の変化を示す。

底層濁度は矢印で示した台風通過時や大潮時の流れの強い時期 (Fig. 4(c)) に対応して大きな値を示していた。したがって、ボックスモデルで求めた DO 消費速度のこうした期間における増大は、この SS による DO 消費の変動を反映したものと考えられる。期間 A と期間 B は共に小潮時に近く、流れが弱く濁度は小さかった。そのために DO 消費速度は上記した台風や大潮時に比べ小さくなったものと思われる。

中山ら (2003) は 2002 年夏季の小潮時と小潮に近い中潮時に、諫早湾において底泥と底層水による DO 消費速度の現場実験を行なっている。この結果を用いて、底層の厚さを本観測結果 (Fig. 6 や Fig. 7) から 2 m として換算したところ、酸素消費速度は  $1.62$  と  $0.44 \text{ mg L}^{-1} \text{ d}^{-1}$  となった。これらの値は本研究のボックスモデルにより求めた値 (期間 A:  $0.31$ , 期間 B:  $1.67 \text{ mg L}^{-1} \text{ d}^{-1}$ ) に非常に近かった。また、期間 B における消費速度の方が期間 A のものより大きかった。Fig. 12 のクロロフィル a の変動から明らかのように、8 月 5 日頃から植物プランクトンの増殖が見られた。そのために大量の有機物が海底へ供給されるとともに分解されたと推測され、期間 B の DO 消費速度が期間 A に比べ

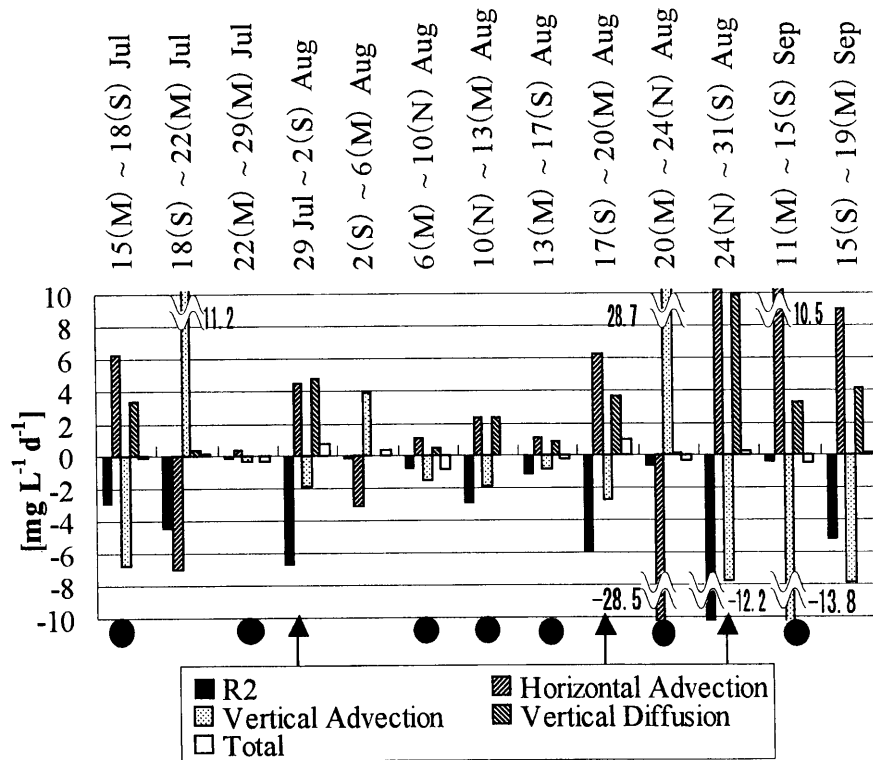


Fig. 11. Contribution to temporal variations of DO in eq.(5).  $R_2$  denotes the DO consumption rate. Arrows show the arrival of typhoons and solid circles (●) show the period of the hypoxia occurrence. S, M and N mean spring, middle and neap tide respectively.

大きくなったものと考えられる。

これらの研究結果から、本ボックスモデルは諫早湾における生化学的な DO 消費速度変動を再現していると考えられる。

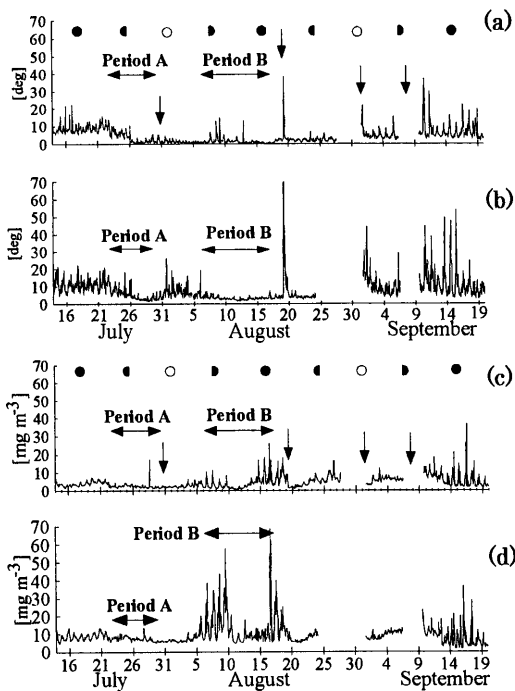
## 5. 考察

ボックスモデルの適用の結果、貧酸素化が著しく進行した期間の各項の寄与は、鉛直拡散項が  $1.28 \text{ mg L}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 、移流項が  $-0.31 \text{ mg L}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 、生化学的な酸素消費項が  $-1.35 \text{ mg L}^{-1} \text{ d}^{-1}$ であった。これらの数値より、この期間においては、生化学的な酸素消費が貧酸素化へ至る主要因であることは間違いない。しかし、先述したように、台風通過時や大潮時の値に比べ、むしろ生化学的な酸素消費 ( $R_2$ ) は減少していた (全期間平均:  $-3.60 \rightarrow$  貧酸素化時:  $-1.35 \text{ mg L}^{-1} \text{ d}^{-1}$ )。この小さい  $R_2$  でも著しい貧酸素化へ至ったのは、鉛直拡散及び水平移流による供給量が減少したためである (鉛

直拡散:  $2.78 \rightarrow 1.28 \text{ mg L}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 、移流:  $0.85 \rightarrow -0.31 \text{ mg L}^{-1} \text{ d}^{-1}$ )。そこで、以下では、その減少を引き起こす要因について考察した。

### 5.1. 移流による DO 供給の減少

ここでは、特に無酸素に近い貧酸素化が観測された上記の期間 A および B を対象とした。4.2. で貧酸素水塊形成時の移流による供給量の平均は負の値となった。これは形成時の表層流出、下層流入という流動構造を考慮すると、水平移流によって低酸素水が流入したためと考えられる。Line 4 底層の DO 濃度 (Cob; Fig. 9) は期間 A, B を含む諫早湾内に貧酸素水塊が形成された同時期に低下していた。この低 DO 水塊が湾内に流入したため、移流による供給が減少したと考えられる。このことから、諫早湾外底層の溶存酸素濃度が湾内の貧酸素化に影響していたことが分かる。



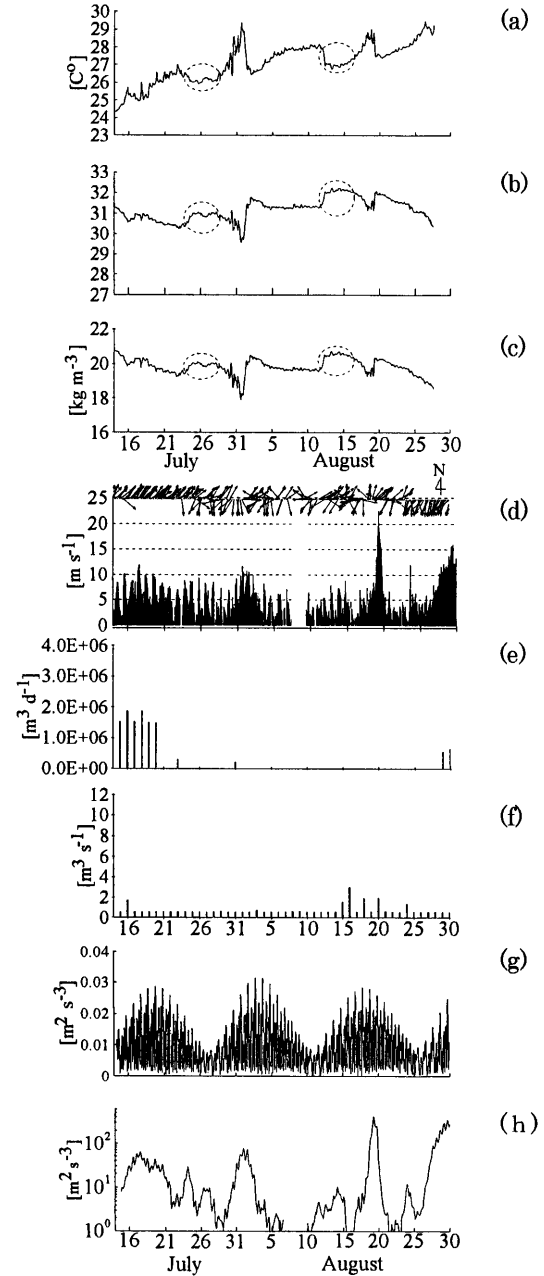
**Fig. 12.** Time-series of bottom turbidity at Sta. B3 (a) and Sta. B4 (b), chlorophyll-a at Sta. B3 (c) and Sta. B4 (d). Grey bars show missing data. Arrows show the arrival of typhoons, circles (● and ○) indicate mean spring tide, and half circles (◐ and ◑) mean neap tide.

## 5.2. 鉛直拡散による DO 供給の減少

Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7 の観測結果に見られたように、底層に高密度水塊が流入することで形成される密度躍層を境界として貧酸素水塊が形成されていたことから、この躍層が鉛直拡散による DO 供給の減少に重要な役割を果たしていることも明らかとなった。この底層の高密度水塊は、観測結果 (Fig. 7) 及びボックスモデルの結果より表層流出、下層流入という循環によって諫早湾外より流入していることが分かった。そこで、この高密度水塊流入のメカニズムについて考察した。

諫早湾におけるこうした循環を駆動する機構として以下の三つの要因が主に考えられる。すなわち、吹送流による表層流出に伴う補償流としての底層への流入 (以後、要因①)、そして潮受け堤防や河川からの淡水による浮力負荷に伴う循環流 (要因②)、さらに流れや風による鉛直混合の低下時に水平密度差によって駆動さ

れる重力循環流 (要因③; Nunes and Lennon, 1987) である。



**Fig. 13.** Time-series of bottom temperature (a), salinity (b), density in  $\sigma_t$  (c), wind speed and direction at Sta. B3 (d), discharge from Isahaya dyke (e), estimated river discharge (f),  $Ut^3/H$  (g) and 24-h running mean  $W^3/H$  (h). Dashed circles in (a), (b) and (c) indicate the high-density water intrusion into the bottom layer.

これらの要因を検討するため、Fig. 13に九州農政局によるSta. B3 (Fig. 1)の底層(海底から約1.0 mの平均値)の水温、塩分及び密度( $\sigma_t$ )の時系列、Sta. B3における風速、風向(再載)、潮受け堤防からの排水流量、本明川の流域面積との比を用いて推定した諫早湾に流入する全二級河川からの推定流量、さらに潮流及び風による混合を表す指標としてそれぞれ $Ut^3/H$ 及び $W^3/H$  (Simpson and Bowers, 1981)の時系列を示す。二つの指標は、値が小さい時に鉛直混合が低下し、成層が発達することを意味する。ここで $Ut$ と $H$ はそれぞれ海底直上の潮流流速と水深、 $W$ は風速を意味する。 $Ut$ はSta. A-1に設置したADCPで計測された測流結果(海底上1.6 m)を主要4分潮( $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$ )に調和分解し、再合成したものである。 $H$ はSta. A-1のADCP付属の水圧計によって得られた水深を用いた。 $W$ には九州農政局によってSta. B3で計測されたものを用い、海陸風などの短期変動を取り除くため24時間移動平均値を片対数グラフで示している。

Fig. 13の水温、塩分及び密度( $\sigma_t$ )の時系列を見ると、7月21日から7月26日(以後、流入A)及び8月10日から8月15日(流入B)にかけてTの低下、Sの上昇、 $\sigma_t$ の上昇が見られ、数日の間維持されていた。そして、徐々に水温は上昇、塩分は下降し、密度が低下していた。

まず、要因①について検討した。流入Aの期間、あるいはその以前には、風速 $10 \text{ m s}^{-1}$ 弱の比較的強い南西風が卓越していた。一方、流入Bの期間では、風自体弱く、風向も一定していなかった。このように、二回の底層流入時に共通した特徴は見られなかった。したがって要因①によって底層への流入を解析することは難しく、その影響は小さいものと考えられる。

次に要因②であるが、底層流入に対応するような潮受け堤防からの排水や河川流量の変動は見られなかったことより、要因②によって底層流入を説明することは出来ない。

最後に要因③について検討した。二回の顕著な密度上昇時と $Ut^3/H$ 及び $W^3/H$ の低い時期とが一致しており(8月7日から8月10日にかけての風速・風向の欠測期間も、佐賀県地上気象観測資料によると風が弱かったことを確認している)、特に $Ut^3/H$ が低下する

時期と底層流入時期がよく一致していたことが分かる。すなわち諫早湾において観測された底層への高密度水塊の流入は、要因③の重力循環流によって駆動されたものと考えられる。また、流入Bに関してみると、風は5日頃より弱い状態が続いているが底層への流入が見られなかったことから、潮流による混合力の低下が底層流入のトリガーの役割を担っており、重力循環を支配する鉛直混合を潮流が単独で引き起こすことが示唆された。このような現象は、他の海域においても観測されている(Nunes and Lennon, 1987; Czitrom and Simpson, 1998)。

諫早湾において大潮期は潮流による鉛直混合が大きくなり、底層流入と表層流出との重力循環流は形成されなかったが、小潮に近づき鉛直混合が弱まると重力循環流が形成され、底層へ高密度水塊が進入するとともに底層に躍層を形成した。そのために、躍層によって周辺水塊と隔離されDO供給量が大きく減少し、貧酸素水塊が形成されたと考えられる。

## 6. 結論

諫早湾に形成される貧酸素水塊の形成メカニズムの解明を目的として、2004年夏季に時間および空間的に密な現地観測を実施し、以下の結論を得た。

諫早湾の貧酸素水塊は、中央部において3日から4日というタイムスケールで形成された後、さらにDO濃度を下げつつ領域を拡大した。最低DO濃度は最終的に $0.1 \text{ mg L}^{-1}$ を下回った。

次にボックスモデルを本研究に適用した結果、諫早湾における貧酸素水塊の形成メカニズムとして以下のことが考えられる。すなわち、貧酸素化が進行する小潮時には、生化学的な酸素消費( $R$ )は台風通過期間や大潮の期間に比べ減少していた( $-3.60 \rightarrow -1.35 \text{ mg L}^{-1} \text{ d}^{-1}$ )。この小さい $R$ でも、小潮時には重力流強化に伴う成層化がDO供給の77%の寄与を持つ鉛直拡散過程を弱め( $2.78 \rightarrow 1.28 \text{ mg L}^{-1} \text{ d}^{-1}$ )、短期間に貧酸素化が進行する。この重力流は同時に湾外底層の低DO水塊を移流するので、湾内の貧酸素化はさらに進行する。現在、諫早湾の潮流は弱く(藤原ら, 2004)、重力循環が発達しやすくなっている。そのため諫早湾は

貧酸素水塊が形成されやすい環境にあると考えられる。

今後は、このメカニズムに普遍性があるのかどうかを確かめる必要があり、また8月24日の貧酸素化時(Fig. 2)に見られたようなその他の形成メカニズムについても調査する必要がある。今後も継続して詳細な現地観測を行ない、今回得たような資料の蓄積が必要であるとする。

## 謝 辞

本観測を行なうにあたり、佐賀県大浦漁業協同組合宣栄丸船長の平方 宣清氏には全観測のご助力を賜った。九州大学大学院 総合理工学研究院の磯辺 篤彦助教授には有益なご助言を数多く賜った。農林水産省九州農政局からは貴重な資料の提供を受けた。ここに深く謝意を表す。

## References

- Czitrom S. P. R. and J. H. Simpson (1998): Intermittent stability and frontogenesis in an area influenced by land runoff. *J. Geophys. Res.*, **103**, 10,369–10,376.
- Diaz, R. J. and R. Rosenberg (1995): Marine benthic hypoxia: A review of its ecological effects and the behavioral responses of benthic macrofauna. *Oceanogr. Mar. Biol.: Ann. Rev.*, **33**, 245–303.
- 藤原 孝道・経塚 雄策・濱田 孝治 (2004): 有明海における潮汐・潮流減少の原因について. *海の研究*, **13**, 403–411.
- 梶原 義範・富田 友幸・中野 拓治・磯部 雅彦 (2003): 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. *土木学会論文集*, **747**, 187–196.
- 九州農政局諫早湾干拓事務所 (2002): 平成13年度諫早湾干拓事業 海域水質予測モデル検討業務報告書.
- 門谷 茂 (1998): 瀬戸内海の水質, 瀬戸内海の自然と環境, 100–129.
- 中山 哲殿・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*, **50**, 976–980.
- Nunes R. A. and G. W. Lennon (1987): Episodic stratification and gravity currents in a marine environment of modulated turbulence. *J. Geophys. Res.*, **92**, 5,465–5,480.
- Simpson J. H. and D. Bowers (1981): Models of stratification and frontal movement in shelf seas. *Deep-Sea Res.*, **28A**, 727–738.
- 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*, **783**, 117–129.

## Generation Mechanism of Hypoxia in Isahaya Bay

Soichi Yamaguchi <sup>†</sup> and Yusaku Kyojuka <sup>†</sup>

### Abstract

The generation mechanism of hypoxia in Isahaya Bay was investigated based on field observations conducted twice a week during summer, 2004. Using a two-layer box model with the observed dataset, temporal variations of both physical (i.e. advection and diffusion) and biochemical oxygen-consumption processes were evaluated in the bottom layer where hypoxia was detected. Field observations showed that hypoxia develops within a few days (3 to 4 days) especially around the neap tide, and that the oxygen concentration decreases to values less than  $0.1 \text{ mg L}^{-1}$ . The box model results showed that the decrease of oxygen supply by advection and diffusion processes contributes greatly to the generation of hypoxia in Isahaya Bay. 77% of oxygen was supplied by vertical diffusion, while horizontal advection accounted for 23% of the oxygen supply. The decrease in the diffusion results from the density stratification strengthened in the bottom layer. This density stratification was accompanied by cold and saline water intrusion into the bottom layer, which was caused by the gravity current being intensified especially around neap tide. The decrease in the advection results mainly from the advection of a water mass with low oxygen concentration by this gravity current. This current was intensified when the tidal stirring decreased around neap tide. In Isahaya Bay where tidal current amplitude has decreased historically, it is likely that such a gravity current is enhanced at fortnightly intervals, and that hypoxia is easily generated in summer.

**Key words:** Hypoxia, Isahaya Bay, box model, gravity current

(Corresponding author's e-mail address: yamaguti@esst.kyushu-u.ac.jp)

(Received 28 June 2005; accepted 22 September 2005)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2006)

---

<sup>†</sup> Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University  
6-1 Kasugakoen, Kasuga, Fukuoka 816-8580, Japan