

周防灘における貧酸素水塊の流入河川水に対する応答*

馬込 伸哉**・磯辺 篤彦†・神蘭 真人††

The Response of the Oxygen-Deficient Water Mass to River Discharge in Suo-Nada

Shinya Magome, Atsuhiko Isobe and Masato Kamizono

周防灘における1979年7月の観測データから、表層における河川起源の低塩分水の水平分布が、底層における低酸素水の水平分布と類似していることを示した。また、1989年から1996年までの6、7月の1週間毎の観測データを用いて、周防灘西部における底層の溶存酸素の最小値が、約2週間前の主要河川（山国川）の流量に対して比較的強い負の相関を持つことを見出した。これらの結果は、本海域における貧酸素水塊が、低塩分水の広がる浅海域周辺の底層において、河川流量が増大してから約2週間後に形成されることを示唆する。本研究では、観測された河川流量と塩分分布をもとに、鉛直2次元のボックスモデルを用いて低塩分水周辺の鉛直循環流を算出した。この循環流の中に、河川からの栄養塩の負荷を考慮した簡単な生態系モデルを組み込み、栄養塩の負荷から貧酸素水塊が形成されるまでの過程を検証した。その結果、観測結果と同様に、河川から栄養塩が負荷されてから約2週間後に、岸側下層のボックスにおいて溶存酸素が最低値に達した。さらに、溶存酸素の最低値と貧酸素水塊発生までの時間を決定する要因を重回帰分析により抽出し、これらが鉛直循環流の強さに強く依存することが分かった。

Based on observed data in the western part of Suo-Nada in July 1979, it was found that the horizontal distribution of less saline water at the surface originated from river was similar to that of the oxygen-deficient water mass above the bottom. Moreover, using data observed in June and July during 1989-1996, it was found that the minimum value of the dissolved oxygen above the bottom in the western part of Suo-Nada had a significant correlation with the fresh water discharge from the Yamakuni River of around two weeks before. This suggests that the oxygen-deficient water mass below the less saline surface water is formed two weeks later after the river discharge has significantly increased. In this study, the above process was examined by using a vertical two-dimensional box model with a vertical circulation evaluated from the observed river run-off and salinity data. The model includes a simple ecosystem model with the nutrient load from the river. The calculated results reproduced the observed process, showing that the dissolved oxygen in the lower layer near the coast reaches the minimum two weeks after the nutrient load. Using a multiple regression analysis, factors determining the minimum value of the dissolved oxygen and the time taken for the appearance of the oxygen deficient water mass are identified. As a result, it is found that the minimum value and the time greatly depend on the strength of the vertical circulation.

キーワード：周防灘，貧酸素水塊，河川流量，海洋生態系，鉛直循環流

1. はじめに

瀬戸内海の西部に位置する周防灘（Fig. 1(a)）では、海水中の溶存酸素（DO）濃度が著しく低下した貧酸素水塊が、夏季、主に水深10 m以浅の浅海域底層において頻発している（例えば、磯辺ほか, 1993¹⁾；神蘭ほか, 1995²⁾；Senjyu *et al.*, 2001³⁾）。貧酸素化は、底生魚介類の衰弱・斃死を引き起こし、沿岸漁業や養殖業に

莫大な被害をもたらすなど、特に1980年代以降、深刻な漁業問題を引き起こしている。

一般に、底層の貧酸素水塊は、夏季の密度成層の発達に伴う底層への酸素供給の抑制（物理過程）、及び底層での有機物の分解に伴う酸素消費の増大（生物学的過程）により生じる。このように、貧酸素水塊の進行は物理過程と生物学的過程の複合的な問題であり、現状では観測データも十分ではないことから、その詳細な生成機構には未知の部分も多い。

磯辺ほか（1993）¹⁾は、物理過程と生物学的過程の寄与と分を分離・定量化する試みとして、周防灘西部において1991年6月4日から8月27日にわたって約1週間毎に得られた水温とDOの時系列をもとに、ボックスモデルによる解析を行った。彼らは、底層におけるDOに関し

* 2001年6月8日受領, 2001年11月21日受理

** 九州大学大学院総合理工学府

† 九州大学大学院総合理工学府

†† 福岡県水産海洋技術センター

連絡先：馬込伸哉, 九州大学大学院総合理工学府

〒816-8580 福岡県春日市春日公園6-1

E-mail: magome@esst.kyushu-u.ac.jp

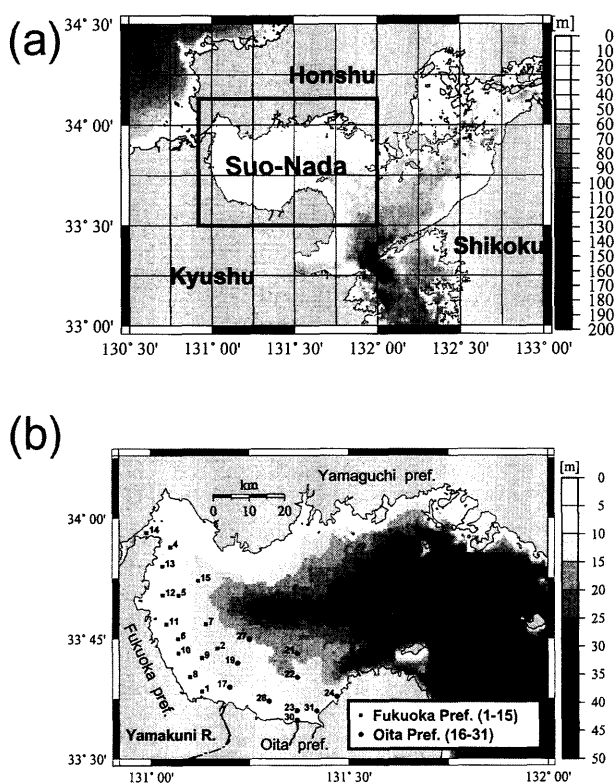


Fig. 1 Location of the study area. The upper panel (a) shows the location of Suo-Nada. The region inside the box of the upper panel is enlarged in the lower panel (b). Observation stations of Fukuoka and Oita prefectures are shown in the lower panel. The bottom topography is shown by tone.

て、水平・鉛直移流、鉛直拡散、生物学的酸素消費の寄与分の時系列を見積もっている。その結果、同海域の底層における生物学的酸素消費速度の急激な増大が、1週間以内という短い時間スケールで貧酸素化を進行させることを示した。この海域における酸素消費速度の急激な増大は、神菌ほか (1995)²⁾の現場観測によっても確認されている。

一方、神菌ほか (1996)⁴⁾は、同海域における貧酸素水塊形成に及ぼす気象変動の影響について調べた。彼らは、1976年から1994年における底層 DO の海域最小値の7, 8月平均値と、同じ年の6, 7, 8月の積算降水量との関係を調べ、両者に負の相関を見出した。また、降

水量の増加に伴う河川流量の増大が、先述した貧酸素水塊生成の物理過程のみならず、生物学的過程を強化する可能性を示唆した。さらに、貧酸素水塊が形成される降水量の目安として、夏季 (6~8月) の積算降水量が600 mm 以上の場合、と推定している。

神菌ほか (1996)⁴⁾が示唆したように、周防灘西部の降水量と貧酸素水塊形成との良い相関は、同海域へ流入する河川流量と貧酸素水塊形成の密接な関係を意味するだろう。そこで本研究では、周防灘における両者の関係を、観測資料を基に定量的に明らかにしていく。まず、周防灘に注ぎ込む主要な河川である山国川の流量と、周防灘西部底層における DO の一週間毎の観測値を比較することで、流入河川水に対する貧酸素水塊の応答について調べる。次に、河口域周辺の鉛直循環流と低次生態系を考慮した簡単なボックスモデルにより、貧酸素水塊の形成過程を検証し、その支配的要因について考察する。

2. 河川流量と貧酸素水塊の関係

2.1 観測資料

周防灘における貧酸素水塊は、主に周防灘南西部に広がる水深10 m 以浅の浅海域 (Fig. 1 (b)) の底層において発生する。同海域には、大小様々な河川が流入している。一級河川の山国川は、過去数十年にわたって日平均流量が観測されており、流量に関する豊富な資料が整備されている。しかし、他の中小河川の流量については観測資料が乏しい。一方、河川からの栄養塩の負荷量については、河川の大小にかかわらず観測例が少ない。

神菌ほか (1988)⁵⁾は、1986年における4回の観測結果から、福岡県より周防灘に流入する、山国川を含む主要16河川の年間流量と栄養塩負荷量を推算した。Table 1に、その推算結果を示す。主要16河川中、山国川の占める割合は、流量については0.41、栄養塩の負荷量については0.32であり、主要16河川中で最も高い (次いで高いのが、流量については城井川の0.12、栄養塩負荷量については今川の0.17)。そこで、本研究で周防灘における貧酸素水塊の形成と河川流量との関係を調べる際には、代表値として山国川の日平均流量⁶⁾を用いる。ただし、後述するボックスモデルにおいて本海域へ淡水・栄

Table 1 Total river discharge from dominant 16 rivers including the Yamakuni-River in 1986 (after Kamizono et al., 1988⁵⁾).

Symbols	Definitions	Unit	Values
R_Y	Total run-off of Yamakuni-River in 1986	[m ³ /year]	422×10^6
R_F	Total run-off of 16 rivers of Fukuoka in 1986	[m ³ /year]	$1,036 \times 10^6$
N_Y	Total TN load of Yamakuni-River in 1986	[mg/year]	467×10^9
N_F	Total TN load of 16 rivers of Fukuoka in 1986	[mg/year]	$1,476 \times 10^9$

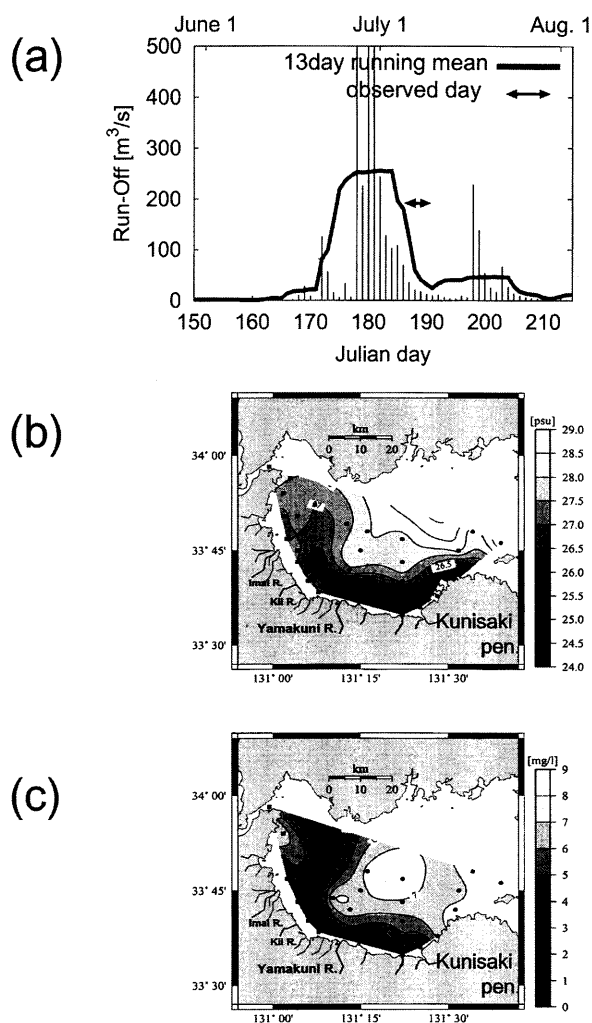


Fig. 2 Temporal variation of (a) the Yamakuni River run-off and number of observed from June to July in 1979, (b) horizontal distribution of the sea surface salinity in July 1979, and (c) horizontal distribution of DO at 1 m above the bottom in July 1979.

養塩の負荷を与える際には、山国川の流量に上述の比0.41の逆数を乗じた主要16河川の推定流量を用いて評価した。

また、河川起源の低塩分水と貧酸素水塊の空間分布を見るため、福岡県水産海洋技術センター、及び大分県海洋水産研究センターが実施した浅海定線調査の資料（各層水温、塩分、そしてDO）⁷⁾を用いた。Fig. 1(b)にその観測点を示す。本研究では、山国川の流量が増大しピークを示した後、両県で5日以内のほぼ同時期に観測された1979年7月の観測資料を用いた。

福岡県の水産海洋技術センターでは月に一度の浅海定線調査とは別に、1989年から1996年（1992年を除く）の7年間、夏季（6～8月）において一週間毎に、周防灘西部における表層と底層の水温、塩分、そしてDOを観

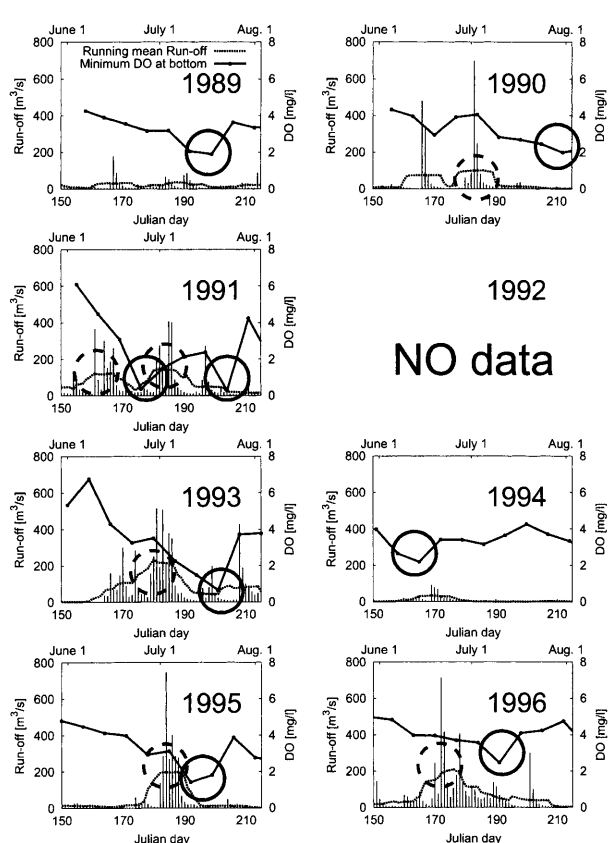


Fig. 3 Temporal variations of the Yamakuni River run-off and the minimum DO at 1 m above the bottom in the western part of Suo-Nada during June and July, 1989–1996.

測している。本研究では、この資料を用いて、流入河川水に対する貧酸素水塊の応答について調べた。

2.2 観測結果

まず、河川起源の低塩分水と貧酸素水塊の空間分布を比較する。Fig. 2(a)は、1979年6～7月の山国川流量の時系列、及び水温、塩分、DOの観測期間を示す。6月下旬から7月上旬にかけて、山国川流量の著しい増大が見られ、その直後、5日以内のほぼ同時期に福岡・大分両県で浅海定線調査が行われている。観測結果をFig. 2(b), (c)に示す。(b)が表層の塩分分布、(c)が底層のDO分布である。図はスプライン補間により内挿された結果であるが、多量の流入河川水によるものと推測される、浅海域表層の低塩分水の広がり確認できる。低塩分水塊は、岸沖方向に約10 km、汀線方向に約30 kmのスケールで分布しており、また、岸沖方向の水平勾配は汀線方向に比べ著しく大きい。その分布は、例えば26.5 psu以下に着目すると、特に国東半島以西の浅海域において底層DOが3 mg/l以下を示す海域と重なっている。このことは、河川水の流入と貧酸素水塊との密接な関係を窺わせる。

次に、河川流量と底層DO最小値の時系列を比較す

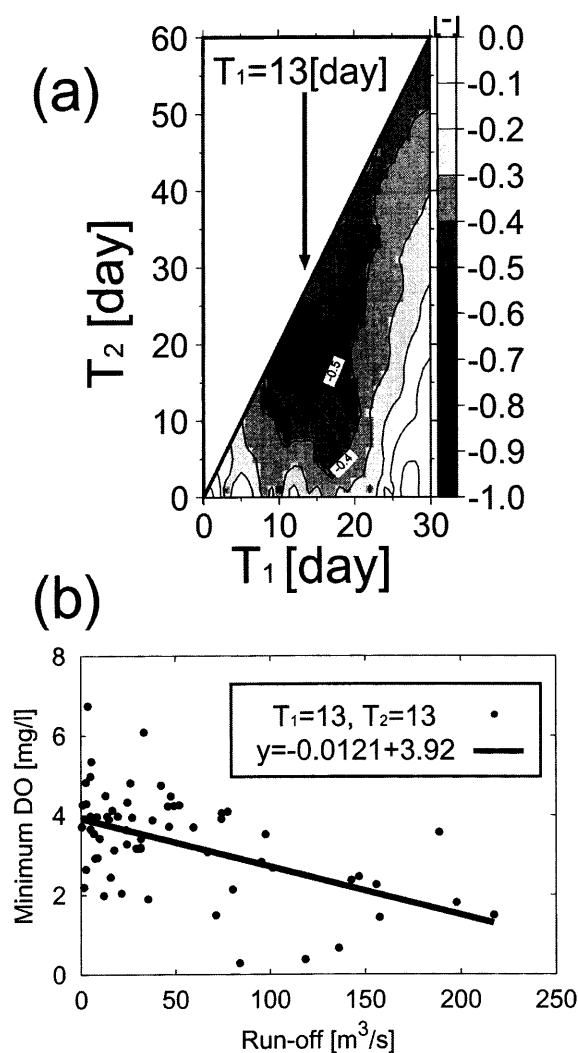


Fig. 4 The relationship between the Yamakuni River run-off and the minimum DO at 1 m above the bottom in the western part of Suo-Nada. The upper panel (a) shows the correlation coefficient between the minimum DO and the river run-off. The correlation coefficient is evaluated using the time series of the river run-off delayed to T_1 day. The time series of the river run-off is smoothed through the running mean of T_2 day. The upper left in the panel is omitted because values in the area would be contaminated by future values of the river run-off. An example of the scatter plot between the river run-off and the minimum DO at $T_1=13$ and $T_2=13$. Data obtained during June and July in 1989–1996 are used.

る。Fig. 3 は、1989年から1996年の6、7月における山国川流量と周防灘西部における底層 DO 最小値の時系列である。8月についても観測は行われているが、ほぼ毎年、台風の接近⁸⁾により密度成層が破壊され、貧酸素水塊が消失する傾向にあるため省いている。7年間の6、7月に観測された計63回中、海域最小値となった回数を0–10 m、10–15 m、15–25 mの3つの水深帯別に比較すると、それぞれ32、22、9回であり、その最小値

の平均はそれぞれ2.96、3.58、4.32 mg/lであった。このことから、河口に近い水深10 m以浅の浅海域で貧酸素化が著しいことが確認された。しかし、河口以外の点で最小値となる場合もあることから、河口近くの点だけでなく、全測点中の最小値を解析の対象とした。河川流量と DO の時系列を比較すると、1989年と1994年に例外が見られるものの、8例中6例において、河川流量が最大(点線丸印)となった後、何日か経過して底層の DO が最低値(実線丸印)を示す傾向にある。そこで、河川流量が最大となってから底層の DO が最低値を示すまでのタイムラグを定量化するため、1989年から1996年の全データを用いて、底層の DO とその観測日から T_1 日前の河川流量の相関を調べた。ただし河川流量には、日々の大きな変動を平滑化するため、 T_2 日幅の移動平均を施した。Fig. 4(a)に、その相関係数を示す。いずれの移動平均の幅(T_2)をとっていても、 $T_1=13$ 日で最も強い負の相関を持つことが分かる。例えば Fig. 4(b)は、13日で移動平均をとった場合($T_2=13$)に最も負の相関が強かった13日前($T_1=13$)の河川流量と、海域底層 DO 最小値のプロットである。相関係数は -0.52 (データ数63)であり、これは、危険率1%で有意な負の相関を示す。この結果は、貧酸素水塊が、河川流量の最大時から約2週間のタイムラグを経て形成されることを示唆している。

DO の増減は、酸素供給と酸素消費のバランスで決定される。一般的に、底層における貧酸素水塊の形成は、密度成層の発達に伴う表層から底層への酸素供給の抑制、及び底層での有機物の分解に伴う酸素消費の増大により説明できる。河川から多量の淡水が流入すると、特に日射の強い夏季に密度成層が発達しやすい。密度成層が発達すると、鉛直拡散が低下し、豊富な酸素が含まれる表層から底層への酸素供給が抑制される。一方、河川水の流入は、生物学的過程において、主に栄養塩の流入として影響を及ぼす。沿岸域に流入した多量の栄養塩は、表層での一次生産を活性化させ、植物プランクトンの増殖を促す。増殖した植物プランクトンの死骸の多くは、デトリタスとして底層へと沈降する。底層に沈降した有機物は、バクテリアに分解され、酸素消費を増大させる。

このように、河川水の流入は物理過程により酸素供給を抑制し、生物学的過程により酸素消費を増大させる効果を持ち、両過程において貧酸素水塊の発生を促すと考えられる。しかし周防灘西部の場合には、鉛直2次元のボックスモデル解析(磯辺ほか、1993¹⁾)や現場での酸素消費速度の観測(神菌ほか、1995²⁾)によって、当海域の貧酸素水塊の形成は、鉛直拡散過程の弱化的みでは

説明できず、特に生物学的過程の活性化が重要であることが指摘されている。

観測結果によって、河川流量の最大時から約2週間後に貧酸素水塊が形成されることが示された。次節では、タイムラグ及び貧酸素化の程度を決定する要因を調べるために、河口域周辺の鉛直循環と生物学的過程を取り入れた鉛直2次元の数値生態系モデルにより、河川水の流入から貧酸素水塊生成までのプロセスを検証する。

3. ボックスモデルによる検証

3.1 方 法

Fig. 2(b), (c)において示したように、流入河川水の増大後、表層の低塩分水と底層の低酸素水は類似した水平分布を呈しており、貧酸素水塊は主に低塩分水の広がった浅海域内で形成されることがわかる。モデルは、低塩分水の広がった浅海域周辺を対象として構築した。また、水深、塩分、そしてDOの汀線方向変化を無視することで、岸沖方向の鉛直2次元（岸沖方向3ボックス、鉛直2層）で解析した。

まず、ボックス内にFig. 2に示した1979年7月の塩分場を与え、これを定常と仮定し、ボックス間の流量と鉛直拡散係数を算出した。厳密には、河川流量が大きく変動する時期であり、定常という仮定は適切ではないかもしれない。しかし、1979年7月の観測は河川流量のピーク時から平常時の流量に戻るまでの中間で実施されており、本研究ではこの期間の塩分の観測値を用いて算出した上述の物理場を、対象期間の平均的な流れ場と見なしている。その流れ場の中に生態系を組み込み、生態系の各コンパートメントに対し一旦定常解を得た後、岸側上層のボックスに栄養塩を供給し、その応答を調べた。

以下、本モデルにおける流量と鉛直拡散係数の計算、生態系、栄養塩の負荷方法について具体的に記述する。

3.1.1 流量と鉛直拡散係数の算出

河川水の流入後、貧酸素水塊が形成されるまでの、各ボックス間の水平流量 V 、鉛直流量 W 、鉛直拡散係数 k を塩分保存式と連続の式により算出する。なお水平拡散については、各ボックスにおける収支を見た場合、他の項に比べオーダーが小さいと考え無視した（付録1参照）。

Fig. 5に座標軸の定義と計算格子を示す。なおFig. 5には、計算結果として得られた水平・鉛直流の向きも示している。

座標軸は、岸沖方向(y)を沖向き正、鉛直方向(z)を上向き正とする。また計算格子数は、観測データの解像度を考慮し、岸沖(y)方向を各6 kmの3段階に、鉛直(z)方向を上層5 m、下層を岸側からそれぞれ5 m、10 m、15

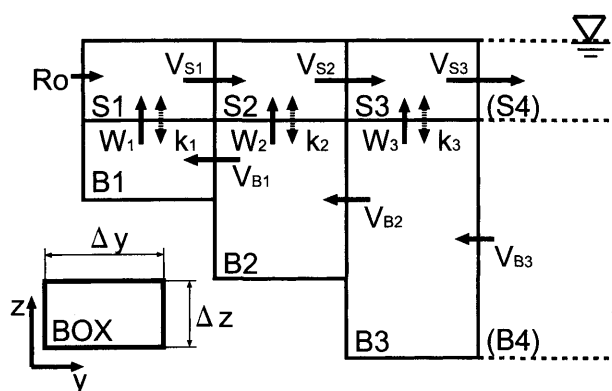


Fig. 5 Two-layer box model for the estimate of the flow pattern in the less saline region. Arrows between boxes indicate the direction of the calculated volume transports.

mとし、2層に分割した。図中の各ボックス内の左下に記す通り、便宜上、ボックス名を上層の岸側からS1, S2, S3, S4, 下層の岸側からB1, B2, B3, B4とする。計算対象海域のボックスは、S1, S2, S3, B1, B2, B3の6ボックスで、S4とB4には境界値を与える。ボックスS1とB1には、Fig. 1(b)に示すSta. 9, 17, 23, 28における1979年7月の表層(0 m)と下層(海底上1 m)の塩分平均値を与え、S2とB2にはSta. 2, 19, 22の塩分平均値、S3とB3にはSta. 21, 27の塩分平均値、そしてS4とB4にはSta. 25, 26の塩分平均値を与えた。

各ボックスの塩分保存式は中央差分で離散化し、それぞれ以下のように表される。

$$S1; -\left(\frac{S_{S1}+S_{S2}}{2}\right)V_{S1} + \left(\frac{S_{S1}+S_{B1}}{2}\right)W_1 = k_1 \frac{S_{S1}-S_{B1}}{(\Delta z_{S1}+\Delta z_{B1})/2} \Delta y_1 \quad (1)$$

$$S2; \left(\frac{S_{S1}+S_{S2}}{2}\right)V_{S1} - \left(\frac{S_{S2}+S_{S3}}{2}\right)V_{S2} + \left(\frac{S_{S2}+S_{B2}}{2}\right)W_2 = k_2 \frac{S_{S2}-S_{B2}}{(\Delta z_{S2}+\Delta z_{B2})/2} \Delta y_2 \quad (2)$$

$$S3; \left(\frac{S_{S2}+S_{S3}}{2}\right)V_{S2} - \left(\frac{S_{S3}+S_{S4}}{2}\right)V_{S3} + \left(\frac{S_{S3}+S_{B3}}{2}\right)W_3 = k_3 \frac{S_{S3}-S_{B3}}{(\Delta z_{S3}+\Delta z_{B3})/2} \Delta y_3 \quad (3)$$

$$B1; -\left(\frac{S_{B1}+S_{B2}}{2}\right)V_{B1} - \left(\frac{S_{S1}+S_{B1}}{2}\right)W_1 = k_1 \frac{S_{B1}-S_{S1}}{(\Delta z_{S1}+\Delta z_{B1})/2} \Delta y_1 \quad (4)$$

$$B2; \left(\frac{S_{B1}+S_{B2}}{2}\right)V_{B1} - \left(\frac{S_{B2}+S_{B3}}{2}\right)V_{B2} - \left(\frac{S_{S2}+S_{B2}}{2}\right)W_2 = k_2 \frac{S_{B2}-S_{S2}}{(\Delta z_{S2}+\Delta z_{B2})/2} \Delta y_2 \quad (5)$$

$$B3; \left(\frac{S_{B2}+S_{B3}}{2}\right)V_{B2} - \left(\frac{S_{B3}+S_{B4}}{2}\right)V_{B3} - \left(\frac{S_{S3}+S_{B3}}{2}\right)W_3$$

Table 2 Grid scales, salinity, volume transports and vertical diffusivity used and obtained in a box model analysis.

Symbols	Definitions	Unit	S1	S2	S3	S4	B1	B2	B3	B4
Δy	Horizontal grid size	[km]	6.0	6.0	6.0	—	6.0	6.0	6.0	—
Δz	Vertical grid size	[m]	5.0	5.0	5.0	—	5.0	10.0	15.0	—
S	Salinity	[psu]	25.27	27.16	27.81	27.90	32.25	32.60	33.06	33.08
R_0	River run-off/ Δx	[m ² /day]	994	—	—	—	—	—	—	—
V	Horizontal volume transport	[m ² /day]	5,189	6,101	6,300	—	-4,196	-5,108	-5,307	—
W	Vertical volume transport	[m ² /day]	4,196	912	199	—	4,196	912	199	—
k	Vertical diffusivity	[cm ² /s]	0.4	0.2	0.1	—	0.4	0.2	0.1	—

$$=k_3 \frac{S_{B3}-S_{S3}}{(\Delta z_{S3}+\Delta z_{B3})/2} \Delta y_3 \quad (6)$$

ここで、 Δy , Δz はボックスの水平方向、及び鉛直方向の大きさ、は塩分を示し、添字はボックス名を表す。

連続の式は、各ボックスでそれぞれ以下のように表される。

$$S1 ; W_1 + R_0 = V_{S1} \quad (7)$$

$$S2 ; V_{S1} + W_2 = V_{S2} \quad (8)$$

$$S3 ; V_{S2} + W_3 = V_{S3} \quad (9)$$

$$B1 ; -V_{B1} = W_1 \quad (10)$$

$$B2 ; -V_{B2} = -V_{B1} + W_2 \quad (11)$$

$$B3 ; -V_{B3} = -V_{B2} + W_3 \quad (12)$$

式(7)中の R_0 は、計算対象海域に流入する河川の、汀線方向の単位長さ当たりの流量である。ここでは、Table 1 に示した、福岡県より周防灘に注がれる主要な16河川の年間流量 R_F に占める山国川の年間流量 R_Y の割合 $\alpha = 0.41$ の逆数に、Fig. 2(a)に示した、対象期間の山国川の平均的な流量 R を乗じて、それを低塩分水の汀線方向代表スケール Δx で割ったものを R_0 とした。すなわち、

$$R_0 = \frac{R}{\alpha} \cdot \frac{1}{\Delta x} \quad (13)$$

である。Fig. 2(a)を見ると、13日で移動平均をとった山国川流量は一週間程度ピークが持続している。流量増大時の平均的な流量として、このピーク値を R とし、 $R = 256$ [m³/s] とした。また、Fig. 2(b)(c)から、汀線方向の代表スケールを $\Delta x = 30$ [km] とした。

Δy , Δz , そして塩分の観測値 S と河川流量 R_0 , さらに、それらを連続の式と塩分保存式に代入して得られた、各ボックスの水平流量 V , 鉛直流量 W , 鉛直拡散係数 k を Table 2 に示す。

3.1.2 生態系モデル

本研究の生態系モデルでは、栄養塩の流入、表層での植物プランクトンの増殖、枯死・沈降、下層におけるデトリタスの分解、そして分解に伴う酸素消費といった、栄養塩流入から貧酸素水塊形成までの一連のプロセスを表現するために必要な最低限のコンパートメントを考える。なお、周防灘における基礎生産から二次生産への転送効率は、瀬戸内海の他の海域と比べて低い(上, 1996⁹⁾)。そこで、計算結果の解釈を容易にするため、動物プランクトンより高次の栄養段階を無視した。また本研究では、周防灘における一次生産の制限要因を窒素と考え(林ほか, 2000¹⁰⁾)、瀬戸内海の一次生産速度を簡易なモデルで再現した Hashimoto and Takeoka (1998)¹¹⁾ と同様に、栄養塩は DIN のみを対象とした。さらに、通常周防灘における有光層は10 m 以深まで達すると言われているが(山口・安楽, 1984¹²⁾)、本モデルでは、河川からの栄養塩の流入に伴う一次生産が、特に上層において活発であると考え、下層における一次生産を無視した。実際、1991年6, 7月に観測された周防灘西部のクロロフィル濃度(図は略す)は、表層において著しく上昇しているが、底層においては顕著な上昇は見られなかった。

Fig. 6 に使用した生態系の概念図を示す。状態変数は、栄養塩 N [$\mu\text{mol/l}$], 植物プランクトン P [$\mu\text{g-C/l}$], デトリタス D [$\mu\text{g-C/l}$], 溶存酸素 O [mg/l] の4つから構成され、図中に示す9つの生物学的過程を考慮した。定式化においては、各状態変数が移流拡散方程式により記述される力学的なパッシブトレーサーであるとし、その付加項として生物・化学過程を導入する。対象海域の任意のボックスにおける状態変数の時間変化は、以下の式で表される。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + v \frac{\partial A}{\partial y} + w \frac{\partial A}{\partial z} = k \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} + \sum_i E_i \quad (14)$$

ここで、 v は水平流速、 w は鉛直流速であり、先に求めた水平・鉛直流量 V , W を用いて、 $v = V/\Delta z$, $w = W/\Delta y$ で表される。また、 E_i は、生物・化学過程による状

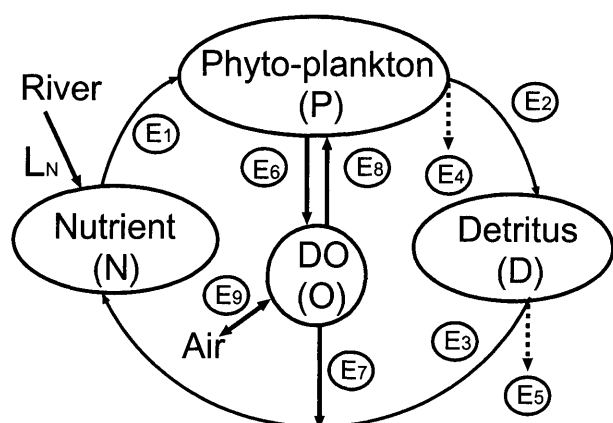


Fig. 6 Compartments and processes assumed in the pelagic ecosystem model. Processes associated with each compartment are (E_1) primary production, (E_2) natural mortality of phytoplankton, (E_3) bacterial decomposition, (E_4) sinking of phytoplankton, (E_5) sinking of detritus, (E_6) oxygen evolution by photosynthesis, (E_7) oxygen consumption by bacterial decomposition, (E_8) respiration of phytoplankton, (E_9) reaeration, and (L_N) load of nutrient, respectively.

態変数 A の増減項を示す。上層と下層における各コンパートメントの E_i については付録2を参照されたい。

3.1.3 栄養塩の負荷

一般に、河川水の溶存成分濃度は流量と負の相関があるとされている（例えば、小林, 1979¹³⁾）。しかし、神菌ほか（1988）⁵⁾の福岡県主要16河川の観測では、河川流量と栄養塩濃度の間に明確な関係が見られなかった。そこで本モデルでは、栄養塩濃度は流量に依らず時間的に一定であると仮定し、式(13)に示した R_0 に、一定の栄養塩濃度を乗じたものを栄養塩負荷量とした。従って本モデルでは、栄養塩負荷量は河川流量に比例して増減する。河川水の栄養塩濃度は、Table 1 に示した年間栄養塩供給量 N_F を、同表に示した主要16河川の年間流量 R_F で割ることによって算出する。ただし、観測された栄養塩濃度は全窒素であるため、堀口・中田（1993）¹⁴⁾が報告している山口県西部5河川における7月の観測結果を参考に、 $\gamma = \text{DIN}/\text{TN} = 0.63$ （濃度比）として、DIN濃度に変換したものを使用した。以下に、その栄養塩濃度 nut [$\mu\text{mol}/\text{l}$] の式を示す。

$$nut = \frac{N_F}{R_F} \frac{\gamma}{N_{atm}} \quad (15)$$

ここで N_{atm} ($=14.01$) は窒素の原子量である。

この栄養塩濃度 nut に R_0 を乗じた栄養塩負荷量 L_N [$\mu\text{mol}/\text{l}/\text{day}$] を、最も岸側の上層のボックス S1 にのみ与えた。 L_N [$\mu\text{mol}/\text{l}/\text{day}$] の時系列を Fig. 7 に示す。栄養塩の負荷量は、河川水の増大が見られる前後の平常時と、河川水増大時で異なった値を与える。平常時の栄

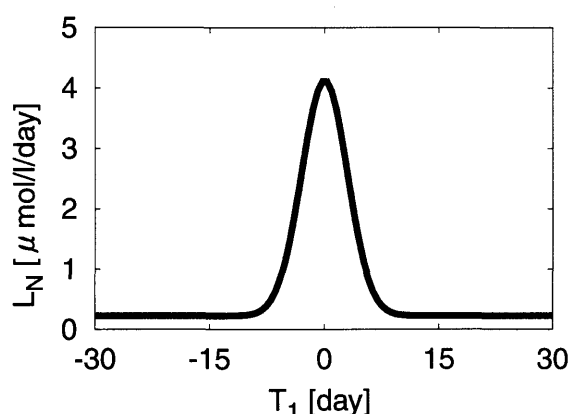


Fig. 7 Time series of the nutrient load in the model.

養塩負荷量については、河川流量増大時（1979年7月のピーク時）の1/10と見積もり、バックグラウンドとして常に供給した。平常時の栄養塩負荷量を与えた場合の定常解を求めた後、河川流量増大時の栄養塩を、実際の河川流量の時系列（Fig. 2 (a)）に似せて標準偏差 $\sigma = 2$ [day] の正規分布で負荷した。そして、正規分布の中心 $T_1 = 0$ [day] から下層のDOが最低値に達するまでの経過日数をタイムラグと定義した。

計算では移流項を上流差分で離散化し、タイムステップを600 [s] とした。ここで、計算に使用した各パラメータ、及び生態系のパラメータの算出に必要な水温 T と酸素飽和濃度 O_s （付録2参照）をTable 3に示す。これらは観測から推定された値、あるいは、周防灘や九州沿岸域の海洋生態系モデルで使用されている式や値を参考に決定した。

3.2 計算結果

3.2.1 各コンパートメントの時系列

Fig. 8に、計算対象の6つのボックスにおける生態系の各コンパートメントの時系列を示す。ただし、植物プランクトンについては、山本ほか（1999）¹⁹⁾によって見積もられた夏季における瀬戸内海の植物プランクトン中のクロロフィルaと炭素の重量比（85.6）を用いて、クロロフィルa濃度 [$\mu\text{g-chl}/\text{l}$] に換算している。詳細は略すが、計算結果を本海域での既往の観測データと比較すると、各コンパートメントの計算結果が現実的な値となっていることが確認できた。この計算結果から、栄養塩負荷後の貧酸素水塊生成までのプロセスを見てみる。

まず、栄養塩が負荷されたボックス S1 における時系列を見ると、多量に供給された栄養塩が植物プランクトンの増殖を引き起こしている。そして、植物プランクトンの一次生産により、DO濃度が上昇し、同時に植物プランクトンの枯死によりデトリタス濃度が上昇している様子が見られる。これらの変化は一方で上層の沖側へ

Table 3 Parameters used in an ecosystem model and their references. Values with the asterisk are modified so that resultant values of each compartment take realistic values.

Symbols	Definitions	Unit	Values	References
T	Temperature (S1, S2, S3, B1, B2, B3)	[deg.]	25.2, 22.4, 18.9, 19.9, 18.9, 18.3	Observed in July 1979
O _s	Saturated DO (S1, S2, S3, B1, B2, B3)	[mg/l]	7.11, 7.13, 7.17, 7.18, 7.49, 7.62	Observed in July 1979, Weiss equation
K _N	Half saturation constant for DIN	[μmol/l]	1.0	Horiguchi and Nakata (1993) ⁽¹⁴⁾
K _O	Half saturation constant for DO	[mg/l]	0.1	Nakata (1993) ⁽¹⁵⁾
pri	Photosynthetic rate	[l/day]	$0.189e^{0.0633T} \frac{N}{N+K_N}$	Nakata (1993) ^{(15)*}
die	Natural mortality rate of phytoplankton	[l/day]	$0.030e^{0.0693T}$	Horiguchi and Nakata (1993) ^{(14)*}
dec	Bacterial decomposition rate of detritus	[l/day]	$0.042e^{0.0700T} \frac{O}{O+K_O}$	Nakata (1993) ⁽¹⁵⁾ Kamizono <i>et al.</i> (1996) ⁽¹⁶⁾
res	Respiration coefficient of phytoplankton	[l/day]	$0.030e^{0.0524T}$	Horiguchi and Nakata (1993) ⁽¹⁴⁾
vsc	Sinking velocity of phytoplankton	[m/day]	0.20	Yanagi <i>et al.</i> (1997) ⁽¹⁷⁾
vsd	Sinking velocity of detritus	[m/day]	2.0	Yanagi <i>et al.</i> (1997) ^{(17)*}
rea	Reaeration coefficient at the surface	[l/day]	0.3456	Kishi <i>et al.</i> (1994) ⁽¹⁸⁾
σ	Standard deviation of the nutrient load	[day]	2.0	Kamizono <i>et al.</i> (1988) ⁽⁵⁾
nut	River discharge nutrient concentration	[μmol/l]	68.1	Kamizono <i>et al.</i> (1988) ⁽⁵⁾

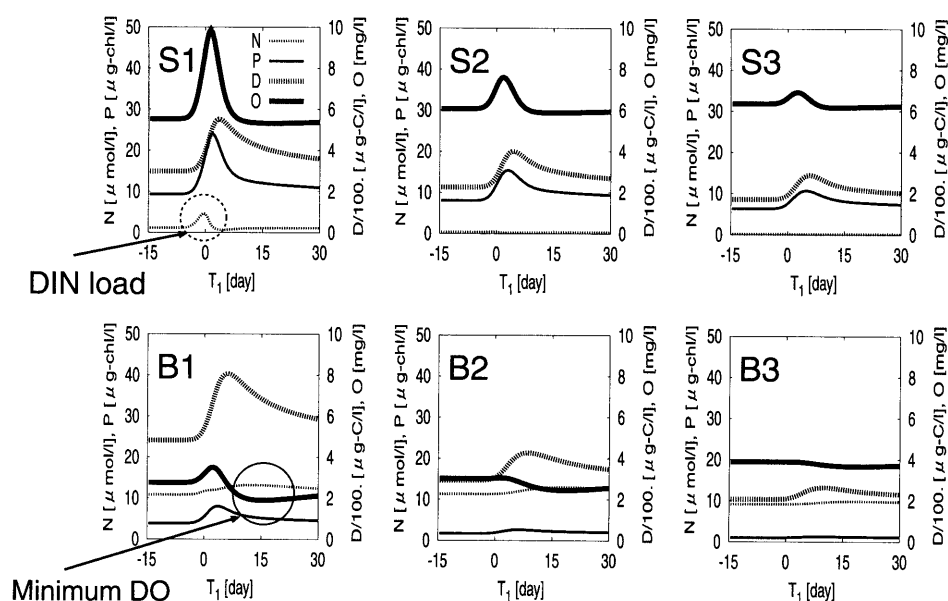


Fig. 8 Temporal variation of compartments in the ecosystem model.

と伝わり、一方は鉛直拡散と沈降により下層へと伝わっている。

ボックス B1 は上層 S1 から大きな影響を受けており、デトリタス濃度の上昇、DO 濃度の上昇が他の下層に比べ顕著である。ただし、B1 における DO 濃度の上昇は、河川流量の増大から数日後に終了し、その後、増大したデトリタスの分解に伴う酸素消費が支配的となり、下層における DO 濃度の著しい低下を引き起こす。その後、河川流量の増大時から約 2 週間後まで酸素低下が持続している。

このように、最も貧酸素化が進行するのは岸側の下層（ボックス B1）であり、河川流量の最大時から約 2 週間後に DO が最低値に達するという、観測結果と同様の計算結果が得られた。このことは、河川から負荷された多量の栄養塩が、一次生産や酸素消費を伴う分解過程を経て、周防灘の浅海域に貧酸素水塊を形成するまで、約 2 週間かかることを示している。

3.2.2 パラメータ依存性

DO の最低値、及び約 2 週間というタイムラグを決定する要因を調べるため、重回帰分析を行った。DO の最

低値とタイムラグを従属変数とし、10個のパラメータ（水平・鉛直流量 Q 、鉛直拡散係数 k 、栄養塩負荷の標準偏差 σ 、河川水の栄養塩濃度 nut 、枯死速度 die 、分解速度 dec 、一次生産速度 pri 、植物プランクトンの沈降速度 vsc 、デトリタスの沈降速度 vsd 、呼吸速度 res ）を、Table 2、Table 3 で示した流量と鉛直拡散係数の計算結果、そして生態系モデルで用いた上記のパラメータの値で割った無次元量を独立変数とした。ここで、各独立変数を0.75, 1.5, 2.25の3通りで計算し（この範囲では従属変数が各独立変数に対して概ね線形）、それぞれについて DO の最低値、及びタイムラグを調べた。例えば、水平・鉛直流量の無次元量が1.5の場合とは、Table 2 に示す各ボックス間の水平・鉛直流量を全て1.5倍して、Fig. 8 と同様の計算を行う。算出された DO の最低値 DO_{min} [mg/l]、及びタイムラグ TL [day] の回帰式は以下の通りである。

$$DO_{min} = 3.08 + 1.94\hat{Q} + 0.4\hat{k} + 0.05\hat{\sigma} - 0.50\hat{nut} - 0.37\hat{die} - 0.23\hat{dec} - 0.49\hat{pri} - 0.34\hat{vsc} - 0.64\hat{vsd} - 0.67\hat{res} \quad (16)$$

$$TL = 23.6 - 2.94\hat{Q} + 0.73\hat{k} + 1.73\hat{\sigma} - 0.17\hat{nut} - 0.04\hat{die} - 1.01\hat{dec} - 3.29\hat{pri} + 0.15\hat{vsc} + 0.08\hat{vsd} - 1.12\hat{res} \quad (17)$$

ここで $\hat{}$ は、それぞれの変数の無次元量を示す。Table 4 に DO の最低値、及びタイムラグに関する標準化偏回帰係数を示す。(a)が DO の最低値、(b)がタイムラグに関する計算結果である。

DO の最低値は、水平・鉛直流量 Q の無次元量 $\hat{Q}$ に最も強く依存し、流量が少ないほど、つまり循環が弱いほど DO の低下が著しい。一方タイムラグは、一次生産速度 pri と水平・鉛直流量 Q の2つのパラメータに強く依

存しており、一次生産速度 pri 、及び水平・鉛直流量 Q が大きい程タイムラグが短くなり、より早く最低値に達するという結果を得た。

これらのことから、計算されたパラメータの範囲内では、水平・鉛直循環流量 Q 、つまり鉛直循環流の強さが貧酸素化の程度を、そして一次生産速度 pri と鉛直循環流の強さが河川流量増大から貧酸素水塊形成に至るタイムラグを決定する最も重要な要因であることが示唆される。

3.3 考 察

前節で述べたように、貧酸素化の程度は循環流の強さに非常に強く依存していた。また、河川流量が増大してから貧酸素化がピークとなるまでのタイムラグは、一次生産速度と循環流の強さに強く依存していた。本節ではこれらの理由について考察する。

まず、貧酸素化の程度について考察する。貧酸素化の条件は、生物学的な酸素消費が物理的な酸素供給を上回ることであり、本モデルで貧酸素化の著しかった岸側下層のボックス B1 における物理的な酸素供給は、上層ボックス S1 からの鉛直拡散、沖合いボックス B2 からの循環流によるものである。一方、生物学的な酸素消費は、デトリタス D の分解と植物プランクトン P の呼吸が活性化する事により生じる。 D と P のソースは河川からボックス S1 に負荷される表層の栄養塩 N である。

循環流が強くなると、酸素消費を引き起こすボックス S1 の N , P , D が沖合いのボックスや系外へと流されるため、ボックス B1 での生物学的な酸素消費は低下する。その一方、沖合いからのボックス B1 への物理的な酸素供給は増大する。つまり、循環流が強くなると栄養塩等の系内の平均滞留時間が短くなるために生物学的な酸素消費が低下し、さらに物理的な酸素供給も増大するため貧酸素化の程度は弱くなる。逆に循環流が弱くなると栄養塩等の系内の平均滞留時間は長くなり生物学的な

Table 4 Results of multiple regression analysis for the minimum DO (a) and for the time lag (b). Values represent standardised partial regression coefficients for the non-dimensionalized variables.

Variables	Definitions	Values for the minimum DO	Values for the time lag
$\hat{Q}$	Volume transports	0.380	-0.053
$\hat{k}$	Vertical diffusion	0.109	0.018
$\hat{\sigma}$	Standard deviation of the nutrient load	0.014	0.043
$\hat{nut}$	Concentration of nutrient	-0.136	-0.004
$\hat{die}$	Natural mortality rate of the phytoplankton	-0.098	-0.001
$\hat{dec}$	Bacterial decomposition rate of the detritus	-0.064	-0.025
$\hat{pri}$	Photosynthetic rate	-0.107	-0.066
$\hat{vsc}$	Sinking Velocity of the phytoplankton	-0.093	0.004
$\hat{vsd}$	Sinking Velocity of the detritus	-0.175	0.002
$\hat{res}$	Respiration coefficient of the phytoplankton	-0.182	-0.028

酸素消費が増大し、物理的な酸素供給も減少するために貧酸素化は著しくなる。このため、貧酸素化の程度が循環流の強さに強く依存したものと考えられる。

次に、タイムラグについて考察する。武岡 (1989)²⁰⁾ は、簡単な物理モデルにより湾内底層の酸素収支の式から、湾内底層における貧酸素化の時間スケールの尺度を導出し、それが湾外底層及び湾内表層との海水交換に関係するパラメータに強く依存することを示した。いま、本モデルにおけるボックス B1, S1, B2 をそれぞれ湾内底層、湾内表層、湾外底層と考えると、ボックス B1 の酸素収支は以下のように表される。

$$\begin{aligned} dy_1 dz_{B1} \frac{dO}{dt} - O_{B2} V_{B1} - OW_1 k_1 \frac{O_{S1} - O}{(\Delta z_{S1} + \Delta z_{B1})/2} \Delta y_1 \\ - dy_1 dz_{B1} (dec \cdot D + res \cdot P) \eta_o \\ = W_1 (O_{B2} - O) + k_1 \frac{\Delta y_1}{\Delta z_{B1}} (O_{S1} - O) - dy_1 dz_{B1} OB \end{aligned} \quad (18)$$

ここで右辺の第1項は鉛直循環による水平方向の交換、第2項は鉛直拡散による鉛直方向の交換、第3項は生物学的酸素消費を示す。また、

$$B = (dec \cdot D + res \cdot P) \eta_o / O \quad (19)$$

は底層水の生物学的酸素消費速度に相当し、ボックス B1 における酸素濃度 O についての消費速度である。

いま、武岡 (1989)²⁰⁾ と同様に、 O_{S1} , O_{S2} , B を定数とし、 $t=0$ のときの O を O_i , $t=\infty$ のときの O を O_o という条件で式(18)を解くと、

$$O = O_o + (O_i - O_o) e^{-t/t_a} \quad (20)$$

$$t_a = \frac{1}{W_1/dy_1 dz_{B1} + k_1/dz_{B1}^2 + B} \quad (21)$$

となる。ここで t_a が貧酸素化の進行に要する時間の尺度を示す。これをタイムラグ TL の指標として、前節で述べた本モデルの計算結果と比較する。

式(21)において、鉛直循環流量 W_1 が大きいほど水平方向の交換が促進され、 t_a は短くなる。本モデルにおいても、鉛直循環流量が大きいほど TL が短くなり、式(21)と矛盾しない。

また、本モデルでは一次生産速度が大きいほど TL が短くなった。これは、一次生産速度が増大することによって岸側底層のボックス B1 で植物プランクトン P 、ひいてはデトリタス D が増加し、さらに酸素濃度 O が低下することで、式(21)の B が著しく増大したためと説明できる。

式(21)で指摘されている鉛直方向の交換による依存性は、本モデルにおいては見られなかった。むしろ、鉛直

拡散係数が大きいほど TL が長くなる傾向にあり、式(21)と矛盾する。これは、鉛直拡散による交換が促進されて、表層の豊富な酸素が底層に供給され O は上昇し、結果として B が低下したためであると説明できる。

以上のタイムラグについての考察は、 O_{S1} , O_{B2} , B が定数の場合に成立する。しかし、本モデルにおいてこれらは定数ではなく、特に貧酸素化が進行する際の B の変動は大きい。そのため、タイムラグ TL についての定式化は難しい。しかし定性的には、武岡 (1989)²⁰⁾ と同様の t_a の式(21)により、本モデルにおける一次生産速度と鉛直循環流量のタイムラグ TL に対する依存性は説明できる。

4. おわりに

周防灘における貧酸素水塊は主に浅海域底層において形成され、河川流量が最大となつてから約2週間後に溶存酸素の最低値に達する傾向にあった。このことは、河川流量増大時に多量の栄養塩が流入し（神菌ほか、1988⁵⁾）、一次生産や酸素消費を伴う分解過程を経て、周防灘の浅海域底層に貧酸素水塊が形成されるまでに約2週間かかることを示唆している。貧酸素水塊の形成は鉛直循環流に大きく依存し、流れが弱いほど酸素低下が著しく、また栄養塩負荷から DO が最低値を示すまでのタイムラグは長くなる傾向にあった。

本研究で示したように、周防灘の貧酸素水塊は、河川起源の低塩分水が広がる浅海域に形成され、その強さや形成時期は低塩分水周辺の循環構造に強く依存する。今後は、このような循環構造や低塩分水の分布状況、あるいはそれらの時間変動を決定する力学過程を中心に研究を進める必要がある。

福岡県、大分県の浅海定線調査を長年実施してこれら関係者の方々、また河川流量の資料を長年蓄積してこれら旧建設省の関係者の方々、さらに編集担当者と2名の査読者に感謝いたします。

付 録 1

塩分等の水平濃度勾配の最も大きなボックス S1 における、水平・鉛直拡散による塩分の時間変化を算出する。

水平拡散係数 K_H は、リチャードソンの4/3乗則を考慮すると、ボックスの水平スケール $\Delta x = 6 \times 10^5$ [cm] より、以下のように算出される。

$$K_H = 0.01 \times \Delta x^{4/3} \cong 5 \times 10^5 \text{ [cm}^2/\text{s]} \quad (22)$$

一方、鉛直拡散係数 K_z は、沿岸域における一般的な

値として,

$$K_z = 1 \sim 10 \text{ [cm}^2/\text{s]} \quad (23)$$

とされているが, ここでは成層化している点を考慮し, 低めの $K_z = 1 \text{ [cm}^2/\text{s]}$ とする.

水平・鉛直拡散による塩分の時間変動 $[\text{psu/s}]$ は, それぞれ以下の通りである (ただし, 壁や底を通しての拡散を無視している).

$$\begin{aligned} K_H \frac{S_{S2} - S_{S1}}{\Delta x^2} &= 5 \times 10^5 \times \frac{27.16 - 25.27}{(6 \times 10^5)^2} \\ &\cong 3 \times 10^{-6} [\text{psu/s}] \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} K_z \frac{S_{B1} - S_{S1}}{\Delta z^2} &= 1 \times \frac{32.25 - 25.27}{(5 \times 10^2)^2} \\ &\cong 3 \times 10^{-5} [\text{psu/s}] \end{aligned} \quad (25)$$

従って, 低めの値で評価した鉛直拡散と比べても, 水平拡散の影響は小さいと考えられる.

付 録 2

(1) 植物プランクトン P [$\mu\text{g-C/l}$]

植物プランクトンは, 光合成により栄養塩を取り込みながら増殖し, 枯死してデトリタスとなり, 沈降して上層から下層へ運ばれる. 一次生産による増加 E_1 , 枯死による減少 E_2 , 沈降による鉛直輸送 E_3 を炭素量 [$\mu\text{g-C/l/day}$] に換算し, 以下に示す.

$$E_1 = \text{pri} \cdot P \quad (26)$$

$$E_2 = \text{die} \cdot P \quad (27)$$

$$E_3 = \text{usc} \cdot P / \Delta z \quad (28)$$

ここで, pri は植物プランクトンの一次生産速度, die は植物プランクトンの枯死速度, usc は植物プランクトンの沈降速度である. E_i の和は, 上層と下層においてそれぞれ以下のように表される.

$$\sum_i E_i = E_1 - E_2 - E_3 \text{ (上層)} \quad (29)$$

$$\sum_i E_i = -E_2 - E_3 \text{ (下層)} \quad (30)$$

(2) デトリタス D [$\mu\text{g-C/l}$]

懸濁態有機物であるデトリタスは, 植物プランクトンの枯死により増加し, 表層から下層へ沈降する. また, バクテリアによって分解され, 栄養塩となる. 枯死による増加 E_2 , 分解による減少 E_4 , 沈降による鉛直輸送 E_5 を炭素量 [$\mu\text{g-C/l/day}$] に換算し, 以下に示す.

$$E_2 = \text{die} \cdot P \quad (31)$$

$$E_4 = \text{dec} \cdot D \quad (32)$$

$$E_5 = \text{vsd} \cdot D / \Delta z \quad (33)$$

ここで, dec はデトリタスの分解速度, vsd はデトリタスの沈降速度を表す. E_i の和は, 上層と下層において以下のように表される.

$$\sum_i E_i = E_2 - E_4 - E_5 \text{ (上層)} \quad (34)$$

$$\sum_i E_i = E_2 - E_4 + E_5 \text{ (下層)} \quad (35)$$

(3) 栄養塩 N [$\mu\text{mol/l}$]

栄養塩は, 植物プランクトンに取り込まれ減少し, デトリタスの分解により増加する. また, 岸側の上層には, 河川から栄養塩が流入する. 一次生産による減少 E_1 , 分解による増加 E_4 を窒素量 [$\mu\text{mol/l/day}$] に換算し, 以下に示す.

$$E_1 = \text{pri} \cdot P \cdot \eta_N / \text{Natm} \quad (36)$$

$$E_4 = \text{dec} \cdot D \cdot \eta_N / \text{Natm} \quad (37)$$

ここで η_N は, 植物プランクトンあるいはデトリタス中に含まれる窒素と炭素の重量比を表す. 本モデルでは, 有機物中の原子比を, レッドフィールド比から $C:N:P = 106:16:1$ とし, $\eta_N = 16 \text{ Natm} / 106 \text{ Catm}$ とする. $\text{Natm} (= 14.01)$, $\text{Catm} (= 12.01)$ は窒素, 及び炭素の原子量である. E_i の和は, 上層と下層においてそれぞれ以下のように表される.

$$\sum_i E_i = E_4 - E_1 + L_N \text{ (上層)} \quad (38)$$

$$\sum_i E_i = E_4 \text{ (下層)} \quad (39)$$

ここで, 上層に負荷した L_N は, 河川流入による栄養塩の負荷量を示し, ボックス S1 にのみ与える. なお, L_N を DIN のみで評価したことは, 残りの 37% に当たる河川中の DON, PON を無視したことになり過小評価であると考えられる. また, 本モデルでは窒素の大気との交換を無視している.

(4) 溶存酸素 O [mg/l]

溶存酸素 DO は, 光合成により供給され, バクテリアによるデトリタスの分解, 及び植物プランクトンによる呼吸に伴い消費される. また DO は, 海面を通じて, 再ばっ気により増減する.

一次生産に伴う供給 E_6 , 呼吸に伴う消費 E_7 , 分解に伴う消費 E_8 , 再ばっ気に伴う増減 E_9 を酸素量 [mg/l]

day] に換算し、以下に示す。

$$E_6 = pri \cdot P \cdot \eta_o \quad (40)$$

$$E_7 = res \cdot P \cdot \eta_o \quad (41)$$

$$E_8 = dec \cdot D \cdot \eta_o \quad (42)$$

$$E_9 = rea \cdot (O_s - O) \quad (43)$$

η_o は、酸化・還元反応に伴う植物プランクトンあるいはデトリタス中の炭素量と全酸素量の重量比である。有機物中の原子比をレッドフィールド比で仮定し、酸化・還元反応式より算出した。 res は植物プランクトンの呼吸速度、 rea は再ばっ気係数を表す。また、 O_s は飽和酸素濃度を示し、1979年7月の水温と塩分の観測値を用いて、Weiss の式 (Weiss, 1970²¹⁾) より算出した。

E_i の和は、上層と下層においてそれぞれ以下のように表される。

$$\sum_i E_i = E_6 - E_7 - E_8 - E_9 \quad (\text{上層}) \quad (44)$$

$$\sum_i E_i = -E_7 - E_8 \quad (\text{下層}) \quad (45)$$

参 考 文 献

- 1) 磯辺篤彦・神菌真人・俵 悟 (1993): 周防灘南西部における貧酸素水塊。沿岸海洋研究ノート, 31, 109-119.
- 2) 神菌真人・磯辺篤彦・江藤拓也・俵 悟・小泉喜嗣 (1995): 周防灘南西部における貧酸素水塊形成機構—酸素消費速度の変動要因—. 沿岸海洋研究ノート, 32, 167-175.
- 3) Senjyu, T., H. Yasuda, S. Sugihara and M. Kamizono (2001): Current and turbidity variations in the western part of Suo-Nada, the Seto Inland Sea, Japan; its relation to the oxygen-deficient water mass formation. J. Oceanogr., 57, 15-28.
- 4) 神菌真人・江藤拓也・佐藤博之 (1996): 周防灘南西部における貧酸素水塊形成と気象変動の関係。沿岸海洋研究, 33, 179-190.
- 5) 神菌真人・池内 仁・寺田和夫 (1988): 周防灘西部海域への流入河川からの栄養塩負荷量。福岡県豊前水試研報第1号, 131-135.
- 6) 建設省河川局 (1981-1998): 山国川水系下唐原流量観測所 (1979-1996年)。流量年表, 32-49.
- 7) 水産庁南西海区水産研究所 (1987): 大分県浅海漁業試験場周防灘, 昭和54年6・7月。瀬戸内海浅海定線調査特殊項目測定資料, 昭和52~56年度, 302-303.
- 8) 福岡管区気象台 (1989-1996): 福岡県気象月報 (1989-1996年6-8月)。
- 9) 上 真一 (1996): 瀬戸内海の生物資源と環境—その将来のために, pp. 57-67.
- 10) 林 美鶴・柳 哲雄・橋本俊也 (2000): 瀬戸内海における窒素・リンの現存量比率。海の研究, 9, 83-90.
- 11) Hashimoto, T. and H. Takeoka (1998): Analysis of primary production in the Seto Inland Sea, Japan, using a simple ecosystem model, J. Oceanogr., 54, 123-132.
- 12) 山口峰生・安楽正照 (1984): 瀬戸内海西部周防灘における基礎生産について, 南西水研報, 17, 135-149.
- 13) 小林正雄 (1979): 猪名川流域の流量変化による溶存成分濃度の変化について。用水と廃水, 21, 79-85.
- 14) 堀口文男・中田喜三郎 (1993): 沿岸生態系モデルの実海域への適用—山口県西部海域の場合—. 資源と環境, 2, 61-91.
- 15) 中田喜三郎 (1993): 生態系モデル—定式化と未知のパラメータの推定法—. J. Adv. Mar. Tech. Conf., 8, 99-138.
- 16) 神菌真人・江藤拓也・佐藤博之 (1996): 周防灘南西部の浅海域下層における酸素収支。海の研究, 5, 87-95.
- 17) Yanagi, T., K. Inoue, S. Montani and M. Yamada (1997): Ecological modeling as a tool for coastal zone management in Dokai Bay, Japan, J. Mar. Sys., 13, 123-136.
- 18) Kishi, M. J., M. Uchiyama and Y. Iwata (1994): Numerical simulation model for quantitative management of aquaculture, Ecological Modeling, 72, 21-40.
- 19) 山本民次・橋本俊也・松田 治・多田邦尚 (1999): 瀬戸内海における植物プランクトン態N:P比とその変動要因。水産海洋研究, 63, 6-13.
- 20) 武岡英隆 (1989): 貧酸素水塊の物理モデル, 沿岸海洋研究ノート, 26, 101-108.
- 21) Weiss, R. (1970): The solubility of nitrogen, oxygen and argon in water and seawater, Deep Sea Res., 17, 721-735.