

周防灘南西部における貧酸素水塊の数値的研究

九州大学・総理工○学生員 万田敦昌

九州大学・総理工 磯辺篤彦

1.はじめに

周防灘南西部海域(図1)の底層には、夏季にしばしば貧酸素水塊が発生し、これによる漁業被害が深刻な問題となっている。本海域における貧酸素水塊は、水深10m以下の浅海域の底層に形成され、その発生及び消滅の時間スケールは1週間程度である¹⁾。本海域における急激な貧酸素化の進行は、鉛直拡散や水平移流といった物理的な条件による酸素供給量の低下だけでは説明がつかず、生物学的・化学的な酸素消費量の一時的・局所的な増加現象がその要因であると考えられている¹⁾。また、底層水中の酸素消費速度は底層水中のPOC(懸濁態有機炭素)量に依存しており、底層水中のPOCは、潮流によって底泥から再懸濁されたものであると推察されている²⁾。本研究では、この底泥からの懸濁態有機物質の再懸濁過程を取り入れた数値シミュレーションを行うことによって、本海域の貧酸素水塊の形成機構を検証した。

2.シミュレーションの手法と数値モデル

海域の溶存酸素(DO)を決める過程としては移流・拡散といった物理過程の他に植物プランクトンによる一次生産と好気性菌による分解過程を考慮した。シミュレーションはまず物質輸送に関わる残差流(密度流、吹送流)を3次元レベルモデルを用いて計算した(潮汐残差流については水平2次元モデルによる潮流計算の結果、流速が1cm/sec以下と小さかったので無視した)。そしてそれをもとに栄養塩(リン)と溶存酸素(DO)の収支式を解いて海域のDOを算定する、という手法をとった。モデルの基礎方程式を以下に示す。

1)残差流を求める式

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - f v = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + A_h \nabla^2 u + A_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + f u = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + A_h \nabla^2 v + A_v \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial B}{\partial t} + u \frac{\partial B}{\partial x} + v \frac{\partial B}{\partial y} + w \frac{\partial B}{\partial z} = K_v \frac{\partial^2 B}{\partial z^2} + K_h \nabla^2 B \quad (4)$$

$$p = \rho_0 g \zeta - \rho_0 \int_0^z B dz \quad (5)$$

$$B = \frac{\rho_0 - \rho}{\rho_0} g \quad (6)$$

$$K_v = K_b + \frac{8k\rho U^3 e}{3\pi g \Delta \rho H} \Delta z \quad (7)$$

2)リンとDOの収支式

$$\frac{\partial(\text{DIP})}{\partial t} = \text{Phy.} - P(\text{DIP}) + d \frac{(\text{DO})}{K_s + (\text{DO})} (\text{PP}) + q \quad (8)$$

$$\frac{\partial(\text{PP})}{\partial t} = \text{Phy.} - W_s(\text{PP})/\Delta z + P(\text{DIP}) \quad (9)$$

$$- d \frac{(\text{DO})}{K_s + (\text{DO})} (\text{PP}) + r U^2 (\text{PP}_b) / \Delta z$$

$$\frac{\partial(\text{DO})}{\partial t} = \text{Phy.} + K_1(\text{DO}_s - (\text{DO})) \quad (10)$$

$$- R d \frac{(\text{DO})}{K_s + (\text{DO})} (\text{PP}) + R P(\text{DIP})$$

$$\frac{\partial(\text{PP}_b)}{\partial t} = W_s(\text{PP})/\delta - r U^2 (\text{PP}_b) / \delta \quad (11)$$

1)において、 u, v, w はそれぞれ x, y, z 方向の流速、 B は(6)式で定義される浮力、 ζ は水位、 p は圧力、 ρ は密度、 ρ_0 は基準密度、 A_h, A_v はそれぞれ水平粘性係数と鉛直粘性係数、 K_b, K_v はそれぞれ鉛直粘性係数と鉛直拡散係数、 f はコリオリ係数を表している。鉛直拡散係数 K_v はSimpson and Hunter³⁾の潮汐フロントの考え方に従い(7)式のように与えた⁴⁾。ここで、 K_b はバックグラウンドの鉛直拡散係数、 U は潮流流速、 e は潮流の運動エネルギーの散逸率、 k は海底の摩擦係数、 $\Delta \rho$ は上下層の密度差、 H は水深、 Δz は上下層の定義点間の距離をあらわしている。2)において、 $(\text{DIP}), (\text{PP})$ はそれぞれ水中の溶存態及び懸濁態のリンの濃度、 (DO) はDOの濃度、 (PP_b) は底泥中の懸濁態リンの濃度、 Phy. は移流・拡散過程、 P は一次生産速度、 W_s は沈降速度、 d は分解速度、 K_s は半飽和定数、 K_1 は再ばう気定数、 R は酸素とリンの質量比(C:N:P:O₂比を質量比に換算)、 r は再懸濁係数、 Δz は各層の厚さ、 δ は再懸濁層の厚さをあらわしている。

計算にはセミインプリシット法を使い、非定常項と粘性・拡散項にはDufort-Frankel法を用いたリープ

フロッグスキームを採用した。計算は解が安定となるまで行った。潮流流速については水平2次元モデルを用いて行った潮流計算の結果を用いた。計算条件と各パラメーターの値を表1に示す。

水平方向格子間隔	$\Delta x = \Delta y = 2(\text{km})$	潮流エネルギー散逸率	$\varepsilon = 0.05$
鉛直方向格子間隔 (1層)	$\Delta z = 5(\text{m})$	海底摩擦係数	$k = 0.0026$
鉛直方向格子間隔 (2層)	$\Delta z = H - 5(\text{m})$	一次生産速度	$P = 0.3 (\text{/day})$
時間ステップ	$\Delta t = 300(\text{sec})$	分解速度	$d = 0.04 (\text{/day})$
コリオリ係数	$f = 8.3 \times 10^{-5} (\text{/sec})$	沈降速度	$w_s = 2.0 (\text{m/day})$
基準密度	$\rho_0 = 1.0 (\text{g/cm}^3)$	半飽和定数	$K_s = 1.0 (\text{ml/l})$
水平粘性係数	$1.0 \times 10^5 (\text{cm}^2/\text{sec})$	再ばっ気定数	$K_1 = 4.0 \times 10^{-6} (\text{/sec})$
鉛直粘性係数	$5.0 (\text{cm}^2/\text{sec})$	酸素とリンの質量比	$R = 142.5$
水平拡散係数	$1.0 \times 10^5 (\text{cm}^2/\text{sec})$	再懸濁係数	$r = 2.0 \times 10^{-7}$
バックランドの鉛直拡散係数	0.01	再懸濁層の厚さ	$\delta = 1 (\text{cm})$

表 1.計算条件と各パラメーターの値

3.計算結果及び考察

図2と図3はそれぞれ再懸濁項がある場合となない場合における第2層におけるDOの水平分布を示している。再懸濁項がある場合のみ岸近くの浅海域にDOの濃度の低い領域が見られる(図2のハッチ掛けした部分)。また図1の1の点における再懸濁項がある場合となない場合についての第2層におけるDOの時系列を図4に示すが、これを見ると、再懸濁項がある場合のみDOの濃度が約8日で大きく上下しているのが分かる。以上より本海域における貧酸素水塊の形成における支配因子は潮流による再懸濁過程である事が確認できた。

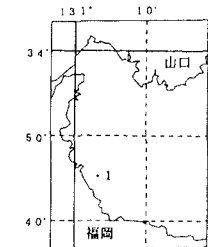


図1.周防灘南西部
(1の点は図4の時系列をとった位置)

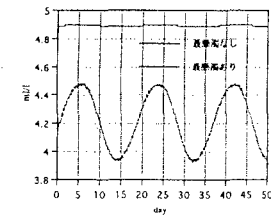


図4.図1の1.の点における第2層のDOの時系列

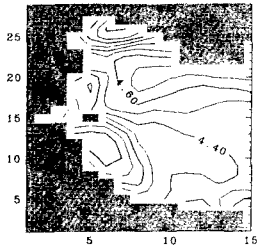


図2.第2層のDOの水平分布(再懸濁あり)

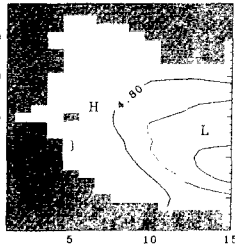


図3.第2層のDOの水平分布(再懸濁無し)

参考文献

- 磯辺・神蘭・俵(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,31,113-118.
- 神蘭・磯辺・江藤・俵・小泉(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,32,172-173.
- SIMPSON,J.H. and J.R.Hunter(1974): Fronts in the Irish Sea. Nature,250,404-406.
- 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,26,102-105.