

(47) 博多湾におけるマクロベントスを考慮した水質解析

Water Quality Analysis considering macrobenthos in Hakata Bay

熊谷博史*, 山崎惟義**, 渡辺亮一**, 藤田健一***

Hiroshi KUMAGAI*, Koreyoshi YAMASAKI**, Ryoichi WATANABE**, Kenichi FUJITA***

ABSTRACT; In this study we present a new ecosystem model which has a compartment of a macrobenthos *Musculista senhousia* which was mainly dominated in sediment at shallow water area of Hakata Bay. The results of water qualities estimated by this newly developed model were more precise than that estimated by a model which does not have the macrobenthos compartment. This result shows that macrobenthos in the sediment has a great effect on estimating the water concentrations and forecasting the behavior of oxygen-deficient water body.

KEYWORDS; *Musculista senhousia*; macrobenthos, ecosystem model; oxygen-deficient water body.

1 はじめに

本研究の対象域としている博多湾では富栄養化が進行しており、湾内で夏季に発生する貧酸素水塊が問題視されている。

従来から、このような富栄養化水域では、貧酸素水塊の発生・継続・消滅といった挙動を把握し、それに対する施策を講じるために、生態系モデルの構築が行われ貧酸素水塊の挙動の把握に用いられてきた。近年の研究では、貧酸素水塊の挙動を精度良く予測する為には、対象となる水質のみならず底質も併せて予測することが必要であると唱えられ、水質と底質を同時に予測する生態系モデルも開発されてきた。

一方、博多湾の富栄養化域の底質中では富栄養化指標種のホトギスガイ(*Musculista senhousia*)が優占しており、貧酸素水塊の発生に伴いそれらが大量斃死すると、多くの有機物が底質に蓄積するため貧酸素水塊のさらなる助長を招いている。このようにマクロベントスの生活環が水質に与える影響が大きいと考えられる博多湾において貧酸素水塊の挙動を論じるためには、水・底質相の物質循環を考慮すると同時に、底質中に生息するマクロベントスの生活環を生態系モデル中に組み込むことが必要不可欠である。ところが従来型の生態系モデル^{1), 2), 3)}では、底質中に生息するマクロベントスはモデル中には含まれているものの、それら個体群の発生・成長・死亡といった生活環は考慮されていなかった。これはモデル構築の際に必要なマクロベントスの生活環に関する情報が少なく、マクロベントスの挙動の定式化が行えなかったためである。

そこで本研究では、現地観測によって得られたホトギスガイの成長・死滅パラメータを用いて、底泥中に生息するマクロベントスの生活環を考慮した生態系モデルを作成し、貧酸素水塊の挙動の再現を試みた。またその結果を、マクロベントスの生活環を考慮していない従来型の生態系モデルによって得られた結果と比較することで、マクロベントスをモデル中に導入したことによる予測性能向上の効果をみた。

* 福岡県保健環境研究所 (Fukuoka Institute of Health and Environmental Sciences),

** 福岡大学工学部社会デザイン工学科 (Department of Civil Engineering, Fukuoka University),

*** 九州環境管理協会 (Kyushu Environmental Evaluation Association)

2 博多湾の概要

2.1 地形、水質及び底質の概況

博多湾(Fig.1)は九州北部に位置し、東西 20km、南北 10km、表面積 134.2km² の、海の中道と糸島半島により囲まれた袋状の閉鎖性の高い内湾(閉鎖度指数 2.04)である。水深は、湾奥の東部海域で 5m 以下と浅く、中部海域で 5~10m、湾口の西部海域で 10~20m となっている。

同湾の背後には福岡都市圏が存在しており、6 市 9 町 1 村にまたがる流域面積は 691.33km²、流域内人口は平成 8 年度で約 180 万人である。流域内の下水道処理人口普及率は平成 13 年度末において 90.7%であり、約 68 万 t/日の処理水が湾内に流入している。博多湾には 15 の河川が流入しているが、いずれも二級河川あるいは小河川であり、大河川が存在しないため、湾内への流入水は滞留しやすく(滞留日数 15.9 日⁴⁾)、富栄養化が生じやすい状況下にある。

COD75%値では、湾口の外海水の影響を受けやすい西部海域 W-3 で 2mg/l を下回る以外は、2~4mg/l の高い水準で推移している。全窒素の年間平均値については、最近 5 年間で、西部海域において 0.23~0.28 mg/l、中部海域において 0.42~0.45 mg/l、東部海域において 0.56~0.59mg/l で推移している。全リンの年間平均値については、最近 5 年間で、西部海域において 0.018~0.024 mg/l、中部海域において 0.027~0.036 mg/l、東部海域において 0.029~0.044mg/l で推移している⁵⁾。

底質については湾口付近では砂質であるが、湾奥方向に向かうに従いシルト質粘土の占める割合が大きくなる。

2.2 マクロベントスの生息概況

博多湾において過去に行われた貝類調査⁶⁾では、28 種 3102 個体の貝類が確認されており、シズクガイ *Theora lubrica* が最も多く(38.9%)、ついでホトギスガイ(32.8%)、イオスダレガイ *Paphia undulata* (10.8%)、ウメノハナガイ *Pillucina pisidium* (4.3%)、ケントリガイ *Alveolus ojanus* (2.9%)、及びその他(10.3%)であった。また、その際の分布には空間的な特性があり、シズクガイは湾の広域に分布しているが、ホトギスガイは湾奥に多く分布していた。

3 モデル作成に使用した調査データ

博多湾の水質については、福岡市により月 1 回の公共用水域水質監視調査が行われている。本研究では、このうちの 3 地点、すなわち西部海域の W-3、中部海域の C-1、東部海域の E-2 で得られた実測値をモデルの検証に使用した(Fig.1 の黒丸の地点)。

また、同湾のマクロベントスについては、福岡大学により月 1 回のマクロベントス調査が行われている⁷⁾。本研究では、このうちの 3 地点、すなわち東部海域の T-3、T-4、T-5 で得られた実測値を生物パラメータ決定に使用した(Fig.1 の白丸の地点)。なお 2002 年 5 月~2003 年 3 月の調査結果によると、これらの地点で確認されたホトギスガイ・シズクガイ・サルボウの個体数存在率(%)はそれぞれ、T-3 において 94.6~100%・0.0~2.6%・0.8~5.1%であり、T-4 において 92.6~99.7%・0.0~5.5%・0.3~2.0%であり、T-5 において 88.8~99.8%・0.2~10.3%・0.0~2.5%であった。このように湾奥部においてはホトギスガイの優占が認められた。

4 博多湾の生態系モデルの概要

水質計算に用いた生態系モデルは、水-底質相互作用モデル(Sediment-Water Interaction Model, SWIM)

⁸⁾である。計算期間は 2001 年 1 月 1 日から 2002 年 3 月 31 日の 454 日間であるが、潮流と水質が安定する期

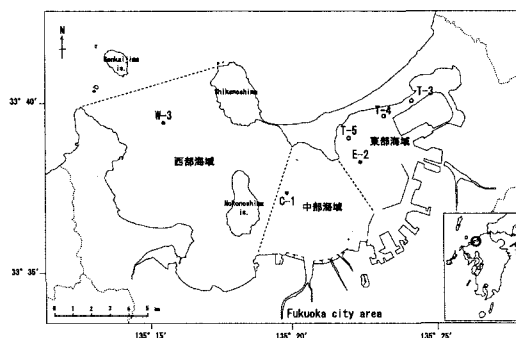


Fig. 1 現地調査地点

間を考慮して、2004年4月1日以降のデータを評価に用いた。このモデルは、流動モデル・水質モデル・底質モデルのサブモデル群から構成されている。本研究では、生態系モデルへのマクロベントスコンパートメント導入の効果を判別するために、底質モデル中において、ホトギスガイの生活環を考慮しない場合と考慮した場合の二つのモデルを用いて計算を行った。

以下において、これらサブモデルの概要を示す。

4.1 流動モデル

流動モデルは湾内の水塊の流動を予測するため、海域の潮流変動とともに、陸域から淡水流入、気温・日射量に応じて形成される密度成層、風による吹送流といった現象を考慮に入れる必要がある。

本研究で使用する流動モデルは、Boussinesq 近似を仮定して層別に鉛直方向積分した運動方程式・連続式・及び圧力計算式によって構成されるものとした。これらの式を Table 1 中の[1]～[10]式に示す。

さらに、流況を規定するものに水塊の密度があるが、これについては塩分濃度と水温の関数として状態方程式⁹⁾で規定されるものとした。なお、塩素イオンの物質収支式については

後述の水質モデル(Table 2 [14]～[16]式)によって規定される。水温は、水温収支式(Table 1 中の[11]～[13]式)と全日射量・気温・湿度・雲量及び風向・風速といった気象要素によって規定される。これら気象要素のデータについては、福岡管区気象台における1時間毎の観測値を用いた。また、上下のボックス間で密度の逆転が起こった際には、その上下間で混合が生じるものとした。

本計算を行うにあたり、三次元のボックスをコントロールボリュームとして調査対象領域を分割した。ボックスのメッシュは水平方向に600m×600mとし、鉛直方向には、平均水面から2m,2m,2m,4m,4m,及び残りの水深の6層に分割した。境界潮位については、主要4分潮(M₂, S₂, O₁, K₁)と長周期(S_{sa}, SS_a)の調和定数¹⁰⁾から算定したものを開境界の水面に与えた。境界条件については、開境界において水平方向に自由流入出が起こるものとし、岸・底面境界では法線・接線方向の流速を0とした。これを初期条件として流速0の状態から時間刻み20秒で陽解法により計算させた。

陸地境界からの淡水流入については、15の河川流入と21の沿岸流入からなる36の流入地点を考慮した。

Table 1 水相の流動モデル式と水温収支式

【運動方程式】 【表層】 $\frac{\partial u_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} + v_1 \frac{\partial u_1}{\partial y} - \frac{(u_{1+1} - u_1) \cdot u_1}{h_1 + \zeta_1}$ $= f_{x1} - \frac{1}{\rho_1} \frac{\partial p_1}{\partial x} + A_1 \frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2} + A_1 \frac{\partial^2 u_1}{\partial y^2} - \frac{\gamma_1 (u_1 - u_2) \sqrt{(u_1 - u_2)^2 + (v_1 - v_2)^2}}{h_1 + \zeta_1} + \frac{\rho_2 \gamma_2 W_2 \sqrt{W_2^2 + W_1^2}}{\rho_1 (h_1 + \zeta_1)}$ $\frac{\partial v_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial v_1}{\partial x} + v_1 \frac{\partial v_1}{\partial y} - \frac{(v_{1+1} - v_1) \cdot v_1}{h_1 + \zeta_1}$ $= -f_{y1} - \frac{1}{\rho_1} \frac{\partial p_1}{\partial y} + A_1 \frac{\partial^2 v_1}{\partial x^2} + A_1 \frac{\partial^2 v_1}{\partial y^2} - \frac{\gamma_1 (v_1 - v_2) \sqrt{(u_1 - u_2)^2 + (v_1 - v_2)^2}}{h_1 + \zeta_1} + \frac{\rho_2 \gamma_2 W_2 \sqrt{W_2^2 + W_1^2}}{\rho_1 (h_1 + \zeta_1)}$		[1]
【中層】 $\frac{\partial u_2}{\partial t} + u_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} + v_2 \frac{\partial u_2}{\partial y} - \frac{(u_{2+1} - u_2) \cdot u_2}{h_2} - \frac{(u_{2-1} - u_2) \cdot u_2}{h_2}$ $= f_{x2} - \frac{1}{\rho_2} \frac{\partial p_2}{\partial x} + A_2 \frac{\partial^2 u_2}{\partial x^2} + A_2 \frac{\partial^2 u_2}{\partial y^2} - \frac{\gamma_2 (u_2 - u_3) \sqrt{(u_2 - u_3)^2 + (v_2 - v_3)^2}}{h_2} - \frac{\gamma_2 (u_2 - u_1) \sqrt{(u_2 - u_1)^2 + (v_2 - v_1)^2}}{h_2}$ $\frac{\partial v_2}{\partial t} + u_2 \frac{\partial v_2}{\partial x} + v_2 \frac{\partial v_2}{\partial y} - \frac{(v_{2+1} - v_2) \cdot v_2}{h_2} - \frac{(v_{2-1} - v_2) \cdot v_2}{h_2}$ $= -f_{y2} - \frac{1}{\rho_2} \frac{\partial p_2}{\partial y} + A_2 \frac{\partial^2 v_2}{\partial x^2} + A_2 \frac{\partial^2 v_2}{\partial y^2} - \frac{\gamma_2 (v_2 - v_3) \sqrt{(u_2 - u_3)^2 + (v_2 - v_3)^2}}{h_2} - \frac{\gamma_2 (v_2 - v_1) \sqrt{(u_2 - u_1)^2 + (v_2 - v_1)^2}}{h_2}$		[2]
【最下層】 $\frac{\partial u_3}{\partial t} + u_3 \frac{\partial u_3}{\partial x} + v_3 \frac{\partial u_3}{\partial y} - \frac{(u_{3+1} - u_3) \cdot u_3}{h_3}$ $= f_{x3} - \frac{1}{\rho_3} \frac{\partial p_3}{\partial x} + A_3 \frac{\partial^2 u_3}{\partial x^2} + A_3 \frac{\partial^2 u_3}{\partial y^2} - \frac{\gamma_3 (u_3 - u_4) \sqrt{(u_3 - u_4)^2 + (v_3 - v_4)^2}}{h_3} - \frac{\gamma_3 (u_3 - u_2) \sqrt{(u_3 - u_2)^2 + (v_3 - v_2)^2}}{h_3}$ $\frac{\partial v_3}{\partial t} + u_3 \frac{\partial v_3}{\partial x} + v_3 \frac{\partial v_3}{\partial y} - \frac{(v_{3+1} - v_3) \cdot v_3}{h_3}$ $= -f_{y3} - \frac{1}{\rho_3} \frac{\partial p_3}{\partial y} + A_3 \frac{\partial^2 v_3}{\partial x^2} + A_3 \frac{\partial^2 v_3}{\partial y^2} - \frac{\gamma_3 (v_3 - v_4) \sqrt{(u_3 - u_4)^2 + (v_3 - v_4)^2}}{h_3} - \frac{\gamma_3 (v_3 - v_2) \sqrt{(u_3 - u_2)^2 + (v_3 - v_2)^2}}{h_3}$		[3]
【圧力計算式】 $p_3 = \rho_3 g \zeta_3 + \sum_{i=1}^3 \rho_i g h_i - 0.5 \rho_1 g h_1$		[4]
【連続式】 【表層】 $\frac{\partial \zeta_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (u_1 (h_1 + \zeta_1)) + \frac{\partial}{\partial y} (v_1 (h_1 + \zeta_1)) - w_1 = 0$		[5]
【中層】 $\frac{\partial}{\partial t} (u_2 h_2 + \frac{\partial}{\partial x} (u_2 h_2) + \frac{\partial}{\partial y} (v_2 h_2) - w_{2-1} - w_2 = 0$		[6]
【最下層】 $\frac{\partial}{\partial t} (u_3 h_3 + \frac{\partial}{\partial x} (u_3 h_3) + \frac{\partial}{\partial y} (v_3 h_3) - w_{3-1} = 0$		[7]
【水温収支式】 【表層】 $\frac{\partial T_1}{\partial t} (h_1 + \zeta_1) = - \frac{\partial}{\partial x} (M_{x1} T_1) - \frac{\partial}{\partial y} (M_{y1} T_1) + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{x1} (h_1 + \zeta_1) \frac{\partial T_1}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{y1} (h_1 + \zeta_1) \frac{\partial T_1}{\partial y} \right) + K_1 (T_2 - T_1) + w_1 T_2 + \frac{1}{\rho_1 c_p} (q_1 - q_2) - \frac{1}{\rho_1 c_p} (q_2 + q_3)$		[8]
【中層】 $\frac{\partial T_2}{\partial t} h_2 = - \frac{\partial}{\partial x} (M_{x2} T_2) - \frac{\partial}{\partial y} (M_{y2} T_2) + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{x2} h_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{y2} h_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} \right) + K_2 (T_3 - T_2) - K_2 (T_2 - T_1) - w_{2-1} T_2 + w_1 T_2 + \frac{1}{\rho_2 c_p} (q_2 - q_3)$		[9]
【最下層】 $\frac{\partial T_3}{\partial t} h_3 = - \frac{\partial}{\partial x} (M_{x3} T_3) - \frac{\partial}{\partial y} (M_{y3} T_3) + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{x3} h_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{y3} h_3 \frac{\partial T_3}{\partial y} \right) + K_3 (T_4 - T_3) - w_{3-1} T_3 + \frac{1}{\rho_3 c_p} (q_3 - q_4)$		[10]
A_{x1}, A_{y1} : x方向及びy方向の運動粘性係数 (m ² /s) ρ_1 : 水の比重 (kg/m ³) γ : コリオリ係数 (1/s) g : 重力加速度 (m/s ²) h_1 : 第1層の厚さ (m) M_{x1}, M_{y1} : 第1層におけるx方向及びy方向の輸送量 (m ³ /s) p_1 : 第1層における海水圧 (Pa) q_1 : 水面における水面反射を除く日射量 (kcal/m ² ・s) q_2 : 熱伝導による損失熱量 (kcal/m ² ・s) q_3 : 蒸発による損失熱量 (kcal/m ² ・s) q_4 : 第4層と第5層の内部境界面における日射量 (kcal/m ² ・s) q_5 : 熱伝導による損失熱量 (kcal/m ² ・s) T_1 : 第1層の水温 (℃) u_1, v_1 : 第1層におけるx方向及びy方向の平均流速 (m/s) w_1 : 第1層と第2層の内部境界面における鉛直流速 (m/s) u_2, v_2, w_2 : 第2層と第3層の内部境界面におけるx方向及びy方向の平均流速 (m/s) W_x, W_y : x方向及びy方向の平均流速 (m/s) γ_1^2 : 海面摩擦係数 (-) γ_2^2 : 海床摩擦係数 (-) γ_3^2 : 内部境界面摩擦係数 (-) ζ : 平均水面からの水位 (m) ρ : 基準海水密度 (kg/m ³) ρ_a : 空気密度 (kg/m ³) ρ_i : 第i層における海水密度 (kg/m ³) ρ_w : 水の密度 (kg/m ³)		[11]

そのうち 15 の河川流入は 8 主要河川と 7 小河川からなるとし、21 沿岸流入は 17 沿岸流域流入と 4 処理場からなるとした。8 主要河川については、過去作成されたタンクモデルを用いて日流量を算定した。これからタンクモデル作成当時の生活系及び事業場系排水量からなる都市排水量を、求めた日流量から減じた後、流量を流域面積で除して基底比流量を求めた。この基底比流量に流域面積を乗じ、計算対象年次の都市排水量・ダム放流量・取水施設における取水量を加減して河川流量とした。7 小河川及び 17 沿岸流域流入については、8 主要河川の平均基底比流量を使用し、主要河川と同様の方法で算出した。4 処理場については放流実績をもとに平均放流量を算定した。以上のように算定した流量をタイムステップ毎に陸地境界から流入させた。

4.2 水質モデル

水質モデルは、流動に伴う各種物質の移流・拡散や生物・化学過程にもとづく水質変化を計算するもので、Table 2 中の[14]～[16]式に示す水相の質量収支式によって支配される。また、この式に含まれる各物質生成速度については、Table 3 に示す。

水質モデルとして考慮した生態系要素(コンパートメント)は、2 種類の植物プランクトン、動物プランクトン、デトリス、溶存態有機態リン(DOP)、溶存態無機態リン(DIP)、溶存態無機態窒素(DIN)、アンモニア態窒素(NH₄-N)、硝酸態窒素(NO₃-N)、化学的酸素要求量(COD)、溶存酸素、(DO)の 11 項目である。これに加え、塩分濃度についても同様の計算を行った。そして各コンパートメント間の物質循環は、Fig.2 中の水相に示すように行われるものとし、時間刻み 20 秒で計算した。

水質モデル中のパラメータの設定には、文献値^{11), 12)} および海域調査結果¹³⁾を参考にした。

陸地境界からの汚濁流入負荷量については COD・NH₄-N・NO₃-N・DIP・DON・DOP を考慮した。これらの量の算定に際し、まず COD・T-N・T-P の流入負荷量を算定した。負荷量の流入地点は、上述の淡水流入 36 地点から流入するものとした。このうち処理場を除くブロックについては、流域内の流域人口・家庭排水処理区分人口・処理場放流水・事業場排水・家畜飼育頭数・農地面積・山林面積・市街地面積を算定し汚濁フレームを作成した後に、汚濁排出原単位を乗じ、さらに流出率を乗じて流域毎の年間総汚濁流入負荷量を算定した。これを流域毎の年間総淡水流入量で除して平均流入濃度を求め、これに 1 日ごとの淡水流入量に乗じて 1 日ごとの汚濁流入負荷量とした。処理場については、実績値をもとに月ごとに流入負荷量を設定した。

Table 2 水相・底泥相の質量収支式

【水・底泥相の質量収支式】	
【水相表層】	
$\frac{\partial C_1(A_1 + \Omega)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}(M_{11}C_1) - \frac{\partial}{\partial y}(M_{12}C_1) + \frac{\partial}{\partial z}(K_{11}(A_1 + \Omega)\frac{\partial C_1}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial x}[K_{12}(C_2 - C_1) + w_1C_2' + R_1(A_1 + \Omega)]$	[14]
【水相中層】	
$\frac{\partial C_2A_2}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(M_{21}C_1) - \frac{\partial}{\partial y}(M_{22}C_1) + \frac{\partial}{\partial z}(K_{21}A_2\frac{\partial C_1}{\partial z}) - \frac{\partial}{\partial x}(K_{22}A_2\frac{\partial C_2}{\partial x}) + K_{23}(C_3 - C_2) - K_{24}(C_4 - C_2) - w_2C_2' + R_2A_2$	[15]
【水相底層】	
$\frac{\partial C_3A_3}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(M_{31}C_1) - \frac{\partial}{\partial y}(M_{32}C_2) + \frac{\partial}{\partial z}(K_{31}A_3\frac{\partial C_2}{\partial z}) - \frac{\partial}{\partial x}(K_{32}A_3\frac{\partial C_3}{\partial x}) + K_{33}(C_{3+1} - C_3) - w_3C_3' + R_3A_3$	[16]
【底泥相】	
$\frac{\partial C_4}{\partial t} = R_4$	[17]

K_{11}, K_{12} : 水相第1層におけるx方向及びy方向の縦断拡散係数 (m^2/s) K_{21} : 水相の鉛直混合係数 (m/s)
 h_1 : 第1層の層厚 (m) M_{21}, M_{22} : 第2層におけるx方向及びy方向の縦断係数 (m^2/s) K_{22} : 水相第2層の層厚 (m)
 C_1 : 水相第1層の物質濃度 (mg/l) C_2 : 水相第2層の物質濃度 (mg/l) C_3 : 水相第3層の物質濃度 (mg/l) C_4 : 底泥相の物質濃度 (mg/l)
 R_1 : 水相第1層における対象物質に固有の鉛直方向フラックスを含んだ正味の物質生成速度 ($g/m^2 \cdot s$)
 R_4 : 底泥相第4層における対象物質に固有の鉛直方向フラックスを含んだ正味の物質生成速度 ($g/m^2 \cdot s$)

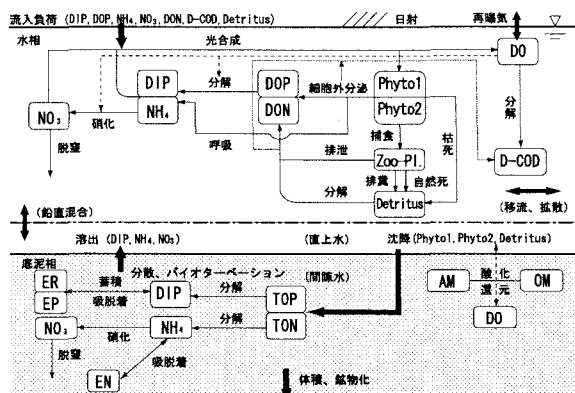


Fig. 2 水相・底泥相の物質交換 (Case 1)

Table 3 水相の各物質生成速度

【水相の植物プランクトン1 (P1)】

【水相の炭素】

$$R_1 = \frac{\partial P_1}{\partial t} = (P_1 \cdot P_1 \text{の増殖}) - (P_1 \cdot P_1 \text{の呼吸}) - (P_1 \cdot P_1 \text{の枯死}) - (P_1 \cdot P_1 \text{の沈降}) - (P_1 \cdot P_1 \text{の埋蔵})$$

$$= G_{P1} \cdot P_1 - E_{P1} \cdot P_1 - D_{P1} \cdot \exp(\theta_{P1} \cdot T_1) \cdot P_1 - R_{P1} \cdot T_1 \cdot P_1 - G_{P1} \cdot ZP_1 - \frac{w}{h_1} \cdot P_1$$

【水相の中間・最下層】

$$R_1 = \frac{\partial P_1}{\partial t} = (P_1 \cdot P_1 \text{の増殖}) - (P_1 \cdot P_1 \text{の呼吸}) - (P_1 \cdot P_1 \text{の枯死}) - (P_1 \cdot P_1 \text{の沈降}) - (P_1 \cdot P_1 \text{の埋蔵})$$

$$= G_{P1} \cdot P_1 - E_{P1} \cdot P_1 - D_{P1} \cdot \exp(\theta_{P1} \cdot T_1) \cdot P_1 - R_{P1} \cdot T_1 \cdot P_1 - G_{P1} \cdot ZP_1 - \frac{w}{h_1} \cdot (P_1 - P_{A1})$$

【水相の植物プランクトン2 (P2)】

【水相の炭素】

$$R_2 = \frac{\partial P_2}{\partial t} = (P_2 \cdot P_2 \text{の増殖}) - (P_2 \cdot P_2 \text{の呼吸}) - (P_2 \cdot P_2 \text{の枯死}) - (P_2 \cdot P_2 \text{の沈降}) - (P_2 \cdot P_2 \text{の埋蔵})$$

$$= G_{P2} \cdot P_2 - E_{P2} \cdot P_2 - D_{P2} \cdot \exp(\theta_{P2} \cdot T_2) \cdot P_2 - R_{P2} \cdot T_2 \cdot P_2 - G_{P2} \cdot ZP_2 - \frac{w}{h_2} \cdot P_2$$

【水相の中間・最下層】

$$R_2 = \frac{\partial P_2}{\partial t} = (P_2 \cdot P_2 \text{の増殖}) - (P_2 \cdot P_2 \text{の呼吸}) - (P_2 \cdot P_2 \text{の枯死}) - (P_2 \cdot P_2 \text{の沈降}) - (P_2 \cdot P_2 \text{の埋蔵})$$

$$= G_{P2} \cdot P_2 - E_{P2} \cdot P_2 - D_{P2} \cdot \exp(\theta_{P2} \cdot T_2) \cdot P_2 - R_{P2} \cdot T_2 \cdot P_2 - G_{P2} \cdot ZP_2 - \frac{w}{h_2} \cdot (P_2 - P_{B1})$$

【水相の動物プランクトン (ZP)】

【水相の炭素】

$$R_3 = \frac{\partial ZP}{\partial t} = (ZP \cdot ZP \text{の増殖}) - (ZP \cdot ZP \text{の呼吸}) - (ZP \cdot ZP \text{の枯死}) - (ZP \cdot ZP \text{の沈降}) - (ZP \cdot ZP \text{の埋蔵})$$

$$= f_{ZP} \cdot (G_{ZP} + G_{ZP}) \cdot ZP - (ZP \cdot ZP \text{の呼吸}) - (ZP \cdot ZP \text{の枯死}) - (ZP \cdot ZP \text{の沈降}) - (ZP \cdot ZP \text{の埋蔵})$$

【水相のデトリタス (Det)】

【水相の炭素】

$$R_4 = \frac{\partial Det}{\partial t} = (Det \cdot Det \text{の増殖}) - (Det \cdot Det \text{の呼吸}) - (Det \cdot Det \text{の枯死}) - (Det \cdot Det \text{の沈降}) - (Det \cdot Det \text{の埋蔵})$$

$$= f_{Det} \cdot (G_{Det} \cdot \exp(\theta_{Det} \cdot T_1) \cdot P_1 + D_{Det} \cdot \exp(\theta_{Det} \cdot T_1) \cdot P_2) + (Det \cdot Det \text{の呼吸}) - (Det \cdot Det \text{の枯死}) - (Det \cdot Det \text{の沈降}) - (Det \cdot Det \text{の埋蔵})$$

【水相の中間・最下層】

$$R_4 = \frac{\partial Det}{\partial t} = (Det \cdot Det \text{の増殖}) - (Det \cdot Det \text{の呼吸}) - (Det \cdot Det \text{の枯死}) - (Det \cdot Det \text{の沈降}) - (Det \cdot Det \text{の埋蔵})$$

$$= f_{Det} \cdot (G_{Det} \cdot \exp(\theta_{Det} \cdot T_1) \cdot P_1 + D_{Det} \cdot \exp(\theta_{Det} \cdot T_1) \cdot P_2) + (Det \cdot Det \text{の呼吸}) - (Det \cdot Det \text{の枯死}) - (Det \cdot Det \text{の沈降}) - (Det \cdot Det \text{の埋蔵})$$

【水相の溶解有機炭素 (DOC)】

【水相の炭素】

$$R_5 = \frac{\partial DOC}{\partial t} = (DOC \cdot DOC \text{の増殖}) - (DOC \cdot DOC \text{の呼吸}) - (DOC \cdot DOC \text{の枯死}) - (DOC \cdot DOC \text{の沈降}) - (DOC \cdot DOC \text{の埋蔵})$$

$$= f_{DOC} \cdot (G_{DOC} \cdot P_1 + G_{DOC} \cdot P_2) + f_{DOC} \cdot (G_{DOC} \cdot P_1 + G_{DOC} \cdot P_2) - (DOC \cdot DOC \text{の呼吸}) - (DOC \cdot DOC \text{の枯死}) - (DOC \cdot DOC \text{の沈降}) - (DOC \cdot DOC \text{の埋蔵})$$

【水相の溶解無機炭素 (DIP)】

【水相の炭素】

$$R_6 = \frac{\partial DIP}{\partial t} = (DIP \cdot DIP \text{の増殖}) - (DIP \cdot DIP \text{の呼吸}) - (DIP \cdot DIP \text{の枯死}) - (DIP \cdot DIP \text{の沈降}) - (DIP \cdot DIP \text{の埋蔵})$$

$$= f_{DIP} \cdot (G_{DIP} \cdot P_1 + G_{DIP} \cdot P_2) + f_{DIP} \cdot (G_{DIP} \cdot P_1 + G_{DIP} \cdot P_2) - (DIP \cdot DIP \text{の呼吸}) - (DIP \cdot DIP \text{の枯死}) - (DIP \cdot DIP \text{の沈降}) - (DIP \cdot DIP \text{の埋蔵})$$

【水相の中間・最下層】

$$R_6 = \frac{\partial DIP}{\partial t} = (DIP \cdot DIP \text{の増殖}) - (DIP \cdot DIP \text{の呼吸}) - (DIP \cdot DIP \text{の枯死}) - (DIP \cdot DIP \text{の沈降}) - (DIP \cdot DIP \text{の埋蔵})$$

$$= f_{DIP} \cdot (G_{DIP} \cdot P_1 + G_{DIP} \cdot P_2) + f_{DIP} \cdot (G_{DIP} \cdot P_1 + G_{DIP} \cdot P_2) - (DIP \cdot DIP \text{の呼吸}) - (DIP \cdot DIP \text{の枯死}) - (DIP \cdot DIP \text{の沈降}) - (DIP \cdot DIP \text{の埋蔵})$$

【水相の溶解無機窒素 (DON)】

【水相の炭素】

$$R_7 = \frac{\partial DON}{\partial t} = (DON \cdot DON \text{の増殖}) - (DON \cdot DON \text{の呼吸}) - (DON \cdot DON \text{の枯死}) - (DON \cdot DON \text{の沈降}) - (DON \cdot DON \text{の埋蔵})$$

$$= f_{DON} \cdot (G_{DON} \cdot P_1 + G_{DON} \cdot P_2) + f_{DON} \cdot (G_{DON} \cdot P_1 + G_{DON} \cdot P_2) - (DON \cdot DON \text{の呼吸}) - (DON \cdot DON \text{の枯死}) - (DON \cdot DON \text{の沈降}) - (DON \cdot DON \text{の埋蔵})$$

【水相のアンモニア態窒素 (NH3)】

【水相の窒素・中間層】

$$R_8 = \frac{\partial NH_3}{\partial t} = (NH_3 \cdot NH_3 \text{の増殖}) - (NH_3 \cdot NH_3 \text{の呼吸}) - (NH_3 \cdot NH_3 \text{の枯死}) - (NH_3 \cdot NH_3 \text{の沈降}) - (NH_3 \cdot NH_3 \text{の埋蔵})$$

$$= -f_{NH_3} \cdot (G_{NH_3} \cdot P_1 + G_{NH_3} \cdot P_2) - f_{NH_3} \cdot (G_{NH_3} \cdot P_1 + G_{NH_3} \cdot P_2) - (NH_3 \cdot NH_3 \text{の呼吸}) - (NH_3 \cdot NH_3 \text{の枯死}) - (NH_3 \cdot NH_3 \text{の沈降}) - (NH_3 \cdot NH_3 \text{の埋蔵})$$

【水相の最下層】

$$R_8 = \frac{\partial NH_3}{\partial t} = (NH_3 \cdot NH_3 \text{の増殖}) - (NH_3 \cdot NH_3 \text{の呼吸}) - (NH_3 \cdot NH_3 \text{の枯死}) - (NH_3 \cdot NH_3 \text{の沈降}) - (NH_3 \cdot NH_3 \text{の埋蔵})$$

$$= -f_{NH_3} \cdot (G_{NH_3} \cdot P_1 + G_{NH_3} \cdot P_2) - f_{NH_3} \cdot (G_{NH_3} \cdot P_1 + G_{NH_3} \cdot P_2) - (NH_3 \cdot NH_3 \text{の呼吸}) - (NH_3 \cdot NH_3 \text{の枯死}) - (NH_3 \cdot NH_3 \text{の沈降}) - (NH_3 \cdot NH_3 \text{の埋蔵})$$

【水相のアンモニア態窒素 (NH4)】

【水相の窒素・中間層】

$$R_9 = \frac{\partial NH_4}{\partial t} = (NH_4 \cdot NH_4 \text{の増殖}) - (NH_4 \cdot NH_4 \text{の呼吸}) - (NH_4 \cdot NH_4 \text{の枯死}) - (NH_4 \cdot NH_4 \text{の沈降}) - (NH_4 \cdot NH_4 \text{の埋蔵})$$

$$= -f_{NH_4} \cdot (G_{NH_4} \cdot P_1 + G_{NH_4} \cdot P_2) - f_{NH_4} \cdot (G_{NH_4} \cdot P_1 + G_{NH_4} \cdot P_2) - (NH_4 \cdot NH_4 \text{の呼吸}) - (NH_4 \cdot NH_4 \text{の枯死}) - (NH_4 \cdot NH_4 \text{の沈降}) - (NH_4 \cdot NH_4 \text{の埋蔵})$$

【水相の最下層】

$$R_9 = \frac{\partial NH_4}{\partial t} = (NH_4 \cdot NH_4 \text{の増殖}) - (NH_4 \cdot NH_4 \text{の呼吸}) - (NH_4 \cdot NH_4 \text{の枯死}) - (NH_4 \cdot NH_4 \text{の沈降}) - (NH_4 \cdot NH_4 \text{の埋蔵})$$

$$= -f_{NH_4} \cdot (G_{NH_4} \cdot P_1 + G_{NH_4} \cdot P_2) - f_{NH_4} \cdot (G_{NH_4} \cdot P_1 + G_{NH_4} \cdot P_2) - (NH_4 \cdot NH_4 \text{の呼吸}) - (NH_4 \cdot NH_4 \text{の枯死}) - (NH_4 \cdot NH_4 \text{の沈降}) - (NH_4 \cdot NH_4 \text{の埋蔵})$$

【水相の化学的酸素要求量 (COD)】

【水相の炭素】

$$R_{10} = \frac{\partial COD}{\partial t} = (COD \cdot COD \text{の増殖}) - (COD \cdot COD \text{の呼吸}) - (COD \cdot COD \text{の枯死}) - (COD \cdot COD \text{の沈降}) - (COD \cdot COD \text{の埋蔵})$$

$$= f_{COD} \cdot (G_{COD} \cdot P_1 + G_{COD} \cdot P_2) + f_{COD} \cdot (G_{COD} \cdot P_1 + G_{COD} \cdot P_2) - (COD \cdot COD \text{の呼吸}) - (COD \cdot COD \text{の枯死}) - (COD \cdot COD \text{の沈降}) - (COD \cdot COD \text{の埋蔵})$$

【水相の溶解酸素量 (DO)】

【水相の炭素】

$$R_{11} = \frac{\partial DO}{\partial t} = (DO \cdot DO \text{の増殖}) - (DO \cdot DO \text{の呼吸}) - (DO \cdot DO \text{の枯死}) - (DO \cdot DO \text{の沈降}) - (DO \cdot DO \text{の埋蔵})$$

$$= f_{DO} \cdot (G_{DO} \cdot P_1 + G_{DO} \cdot P_2) + f_{DO} \cdot (G_{DO} \cdot P_1 + G_{DO} \cdot P_2) - (DO \cdot DO \text{の呼吸}) - (DO \cdot DO \text{の枯死}) - (DO \cdot DO \text{の沈降}) - (DO \cdot DO \text{の埋蔵})$$

【水相の中間層】

$$R_{11} = \frac{\partial DO}{\partial t} = (DO \cdot DO \text{の増殖}) - (DO \cdot DO \text{の呼吸}) - (DO \cdot DO \text{の枯死}) - (DO \cdot DO \text{の沈降}) - (DO \cdot DO \text{の埋蔵})$$

$$= f_{DO} \cdot (G_{DO} \cdot P_1 + G_{DO} \cdot P_2) + f_{DO} \cdot (G_{DO} \cdot P_1 + G_{DO} \cdot P_2) - (DO \cdot DO \text{の呼吸}) - (DO \cdot DO \text{の枯死}) - (DO \cdot DO \text{の沈降}) - (DO \cdot DO \text{の埋蔵})$$

【水相の最下層】

$$R_{11} = \frac{\partial DO}{\partial t} = (DO \cdot DO \text{の増殖}) - (DO \cdot DO \text{の呼吸}) - (DO \cdot DO \text{の枯死}) - (DO \cdot DO \text{の沈降}) - (DO \cdot DO \text{の埋蔵})$$

$$= f_{DO} \cdot (G_{DO} \cdot P_1 + G_{DO} \cdot P_2) + f_{DO} \cdot (G_{DO} \cdot P_1 + G_{DO} \cdot P_2) - (DO \cdot DO \text{の呼吸}) - (DO \cdot DO \text{の枯死}) - (DO \cdot DO \text{の沈降}) - (DO \cdot DO \text{の埋蔵})$$

【水相の中間層】

$$R_{11} = \frac{\partial DO}{\partial t} = (DO \cdot DO \text{の増殖}) - (DO \cdot DO \text{の呼吸}) - (DO \cdot DO \text{の枯死}) - (DO \cdot DO \text{の沈降}) - (DO \cdot DO \text{の埋蔵})$$

$$= f_{DO} \cdot (G_{DO} \cdot P_1 + G_{DO} \cdot P_2) + f_{DO} \cdot (G_{DO} \cdot P_1 + G_{DO} \cdot P_2) - (DO \cdot DO \text{の呼吸}) - (DO \cdot DO \text{の枯死}) - (DO \cdot DO \text{の沈降}) - (DO \cdot DO \text{の埋蔵})$$

A_{10} : DIP 排出に関する補正係数 (-) COD_0 : 水相第1層における溶解有機COD (mg/L) D_{10}, D_{20} : 水相第1層における植物プランクトン1及び2の枯死速度 (1/day)
 D_1 : 水相第1層における動物プランクトンの自然死速度 (1/day) Det_1 : 水相第1層におけるデトリタス濃度 (mg-DW/L) DIP_1 : 水相第1層におけるDIP濃度 (mg/L)
 DO_1 : 水相第1層におけるDO濃度 (mg/L) DO_{10} : 飽和DO濃度 (mg/L) DON_1 : 水相第1層におけるDON濃度 (mg/L) DOP_1 : 水相第1層におけるDOP濃度 (mg/L)
 E_{P1}, E_{P2} : 植物プランクトン1及び2の排泄率 (-) f_{COD} : CODからDONへの換算係数 (-) f_{DOC} : DOCからDONへの換算係数 (-) f_{DON} : DONからDONへの換算係数 (-)
 f_{DIP} : DIP反応にかかわる窒素単位量あたりの酸素消費量 (-) f_{NH_3} : クロロフィルa濃度からCODへの換算係数 (-) f_{NH_4} : クロロフィルa濃度から窒素濃度への換算係数 (-)
 f_{NH_4} : クロロフィルa濃度からリン濃度への換算係数 (-) f_{NH_4} : クロロフィルa濃度から動物プランクトン (デトリタス) 乾重量への換算係数 (-)
 f_{NH_4} : 動物プランクトン (デトリタス) 乾重量からCODへの換算係数 (-) f_{NH_4} : 動物プランクトン (デトリタス) 乾重量から窒素濃度への換算係数 (-)
 f_{NH_4} : 動物プランクトン (デトリタス) 乾重量からリン濃度への換算係数 (-) G_{P1}, G_{P2} : 植物プランクトン1及び2の増殖速度 (1/day)
 G_{NH_3}, G_{NH_4} : 動物プランクトンによる植物プランクトン1及び2の捕食速度 (1/day) K_1 : 再曝気係数 (1/day) K_2 : 水相第1層における溶解有機CODの分解速度 (1/day)
 K_{NH_3} : 水相第1層におけるNH₃-Nの硝化速度 (1/day) K_{NH_4} : 水相第1層におけるデトリタスの分解速度 (1/day) K_{DIP} : 水相第1層におけるDIPの分解速度 (1/day)
 K_{DOP} : 動物プランクトンの捕食にかかわる植物プランクトン (クロロフィルa) 濃度の半飽和定数 (mg/L) NH_4 : 水相第1層におけるNH₄-N濃度 (mg/L) NO_3 : 水相第1層におけるNO₃-N濃度 (mg/L)
 P_1, P_2 : 水相第1層における植物プランクトン1及び2の濃度 (クロロフィルa濃度) (mg/L) R_{P1}, R_{P2} : 植物プランクトン1及び2の呼吸速度 (1/day) T_1 : 水相第1層の温度 (°C)
 R_{COD} : 植物プランクトンの増殖にかかわるNO₃-Nの摂取効率 (-) w_1 : デトリタスの沈降速度 (m/day) w_2 : 植物プランクトンの沈降速度 (m/day)
 ZP_1 : 水相第1層における動物プランクトン濃度 (mg-DW/L) α_1 : 動物プランクトンの同化率 (-) θ_{NH_3} : NH₃-Nの硝化に係る温度係数 (1/°C) θ_{NH_4} : CODの分解に係る温度係数 (1/°C)
 θ_{DIP} : DIPの分解に係る温度係数 (1/°C) θ_{DOP} : DOPの分解に係る温度係数 (1/°C) θ_{DON} : DONの分解に係る温度係数 (1/°C) θ_{DOC} : DOCの分解に係る温度係数 (1/°C)
 θ_{NH_3} : 植物プランクトン1及び2の枯死に係る温度係数 (1/°C) θ_{NH_4} : 動物プランクトンの自然死に係る温度係数 (1/°C) θ_{NO_3} : NO₃-Nの脱窒に係る温度係数 (1/°C)
 v : 動物プランクトンの成長効率 (-)

Table 4 底泥相の各物質生成速度 (Case 1)

【底泥相の全有機態リン (TOP)】 【底泥相の第1層】 $R_1' = \frac{\partial TOP_1}{\partial t}$ $= (PA \cdot PB \text{ の沈降}) - (Det \text{ の沈降}) - (ベントスによる分解) - (埋埋) \quad [37]$ $= f_{pa} \frac{w_p}{\gamma \cdot h_1} (PA_{1m} + PB_{1m}) + f_{det} \frac{w_{det}}{\gamma \cdot h_1} Det_{1m} - K_{top} \exp(\theta_{top} T_{1m}) TOP_1' - K_{top} \frac{w_{top}}{h_1} TOP_1'$	【底泥相の硝酸態窒素 (NO₃-N)】 【底泥相の第1層】 $R_1' = \frac{\partial NO_3}{\partial t}$ $= \pm (\text{拡散}) - (\text{溶出}) + (NH_4' \text{ の硝化}) - (脱窒)$ $= D_{no} \frac{NO_3 - NO_3' - D_{no}}{0.5 \cdot h_1' (h_1' + h_2')} - D_{no} \frac{NO_3 - NO_3'}{0.5 \cdot h_1' \cdot h_1'} \quad [48]$ $+ K_{cn} \cdot \theta_{cn} \cdot T_{1m}^{-10} \frac{DO_1'}{DO_1' + 1.0} \cdot NH_4' - K_{d} \cdot \theta_{d} \cdot T_{1m}^{-10} \frac{2.0 - DO_1'}{2.0 + DO_1'} \cdot NO_3'$
【底泥相の第2層】 $R_2' = \frac{\partial TOP_2}{\partial t}$ $= - (\text{分解}) - (\text{埋埋}) - (\text{腐食化}) \quad [38]$ $= - K_{top} \exp(\theta_{top} T_{2m}) TOP_2' - \frac{w_{top}}{h_2} (TOP_2' - TOP_1') - K_{top} TOP_2'$	【底泥相の第2層】 $R_2' = \frac{\partial NO_3}{\partial t}$ $= \pm (\text{拡散}) + (NH_4' \text{ の硝化}) - (脱窒)$ $= D_{no} \frac{NO_3 - NO_3' + K_{cn} \cdot \theta_{cn} \cdot T_{2m}^{-10} \frac{DO_2'}{DO_2' + 1.0} \cdot NH_4' - K_{d} \cdot \theta_{d} \cdot T_{2m}^{-10} \frac{2.0 - DO_2'}{2.0 + DO_2'} \cdot NO_3'}{0.5 \cdot h_2' (h_2' + h_3')} \quad [49]$
【底泥相の溶解態無機態リン (DIP)】 【底泥相の第1層】 $R_1' = \frac{\partial DIP_1}{\partial t}$ $= \pm (\text{拡散}) \pm (\text{吸脱着}) - (\text{溶出}) - (TOP' \text{ の分解}) \pm (\text{化学反応的吸脱着})$ $= D_{ip} \frac{DIP_1 - DIP_1'}{0.5 \cdot h_1' (h_1' + h_2')} + \frac{K_{ad}}{\omega} \left(EP_1' - \frac{DIP_1'}{\alpha} \right) - A_{top} \cdot D_{top} \frac{DIP_1' - DIP_{1m}}{0.5 \cdot h_1' \cdot h_1'} \quad [50]$ $+ K_{top} \exp(\theta_{top} T_{1m}) TOP_1' = \frac{K_{ad}}{\omega} (ER_1' - 1.3 \cdot \beta \cdot \omega \cdot OM') \frac{DIP_1'}{DIP_1' + DIP_{1m}}$	【底泥相の有機態窒素 (EN)】 【底泥相の第1層】 $R_1' = \frac{\partial EN_1}{\partial t}$ $= \pm (\text{吸脱着})$ $= - K_{ex} \left(EN_1' - \frac{NH_4'}{\alpha} \right) \quad [51]$
【底泥相の第2層】 $R_2' = \frac{\partial DIP_2}{\partial t}$ $= \pm (\text{拡散}) + (TOP' \text{ の分解}) \pm (\text{吸脱着})$ $= D_{ip} \frac{DIP_2 - DIP_2'}{0.5 \cdot h_2' (h_2' + h_3')} + K_{top} \exp(\theta_{top} T_{2m}) TOP_2' + \frac{K_{ad}}{\omega} \left(EP_2' - \frac{DIP_2'}{\alpha} \right) \quad [40]$	【底泥相の第2層】 $R_2' = \frac{\partial EN_2}{\partial t}$ $= \pm (\text{吸脱着})$ $= - K_{ex} \left(EN_2' - \frac{NH_4'}{\alpha} \right) \quad [51]$
【底泥相の第1層の化学反応型吸脱着態リン (ER)】 $R_1' = \frac{\partial ER_1}{\partial t}$ $= \pm (\text{化学反応的吸脱着})$ $= - K_{ad} (ER_1' - 1.3 \cdot \beta \cdot \omega \cdot OM') \frac{DIP_1'}{DIP_1' + DIP_{1m}} \quad [41]$	【底泥相の溶解態酸素 (DO)】 【底泥相の第1層】 $R_1' = \frac{\partial DO_1}{\partial t}$ $= \pm (\text{拡散}) - (\text{水相からの供給}) - (TOP' \text{ の分解}) - (NH_4' \text{ の硝化}) + (NO_3' \text{ の脱窒})$ $= R_{do} \cdot D_{no} \frac{DO_1 - DO_1' - f_{do} \cdot DO_1' + R_{cn} \cdot D_{no} \frac{DO_1 - DO_1'}{0.5 \cdot h_1' (h_1' + h_2')} - f_{pa} \cdot K_{top} \exp(\theta_{top} T_{1m}) TOP_1'}{0.5 \cdot h_1' (h_1' + h_2')} \quad [52]$ $+ f_{pa} \cdot K_{cn} \cdot \theta_{cn} \cdot T_{1m}^{-10} \frac{DO_1'}{DO_1' + 1.0} \cdot NH_4' + f_{do} \cdot K_{d} \cdot \theta_{d} \cdot T_{1m}^{-10} \frac{2.0 - DO_1'}{2.0 + DO_1'} \cdot NO_3'$
【底泥相の吸着態リン (EP)】 【底泥相の第1層】 $R_1' = \frac{\partial EP_1}{\partial t}$ $= \pm (\text{吸脱着})$ $= - K_{ex} \left(EP_1' - \frac{DIP_1'}{\omega} \right) \quad [42]$	【底泥相の第2層】 $R_2' = \frac{\partial DO_2}{\partial t}$ $= \pm (\text{拡散}) - (TOP' \text{ の分解}) - (NH_4' \text{ の硝化}) + (NO_3' \text{ の脱窒})$ $= R_{do} \cdot D_{no} \frac{DO_2 - DO_2' - f_{do} \cdot DO_2' + R_{cn} \cdot D_{no} \frac{DO_2 - DO_2'}{0.5 \cdot h_2' (h_2' + h_3')} - f_{pa} \cdot K_{top} \exp(\theta_{top} T_{2m}) TOP_2'}{0.5 \cdot h_2' (h_2' + h_3')} \quad [53]$ $- f_{pa} \cdot K_{cn} \cdot \theta_{cn} \cdot T_{2m}^{-10} \frac{DO_2'}{DO_2' + 1.0} \cdot NH_4' + f_{do} \cdot K_{d} \cdot \theta_{d} \cdot T_{2m}^{-10} \frac{2.0 - DO_2'}{2.0 + DO_2'} \cdot NO_3'$
【底泥相の第2層】 $R_2' = \frac{\partial EP_2}{\partial t}$ $= \pm (\text{吸脱着}) - (\text{脱物化})$ $= - K_{ex} \left(EP_2' - \frac{DIP_2'}{\omega} \right) - K_{ex} \cdot EP_2' \quad [43]$	【底泥相の酸化鉄 (OM'), 還元鉄 (AM')】
【底泥相の全有機態窒素 (TON)】 【底泥相の第1層】 $TON_1' = R_{top} \cdot TOP_1'$	【底泥相の第1層】 $R_1' = \frac{\partial OM_1}{\partial t}$ $= - (AM' \text{ の生成}) + (OM' \text{ の生成}) \quad [44]$
【底泥相の第2層】 $TON_2' = R_{top} \cdot TOP_2'$	【底泥相の第2層】 $R_2' = \frac{\partial AM_2}{\partial t}$ $= (AM' \text{ の生成}) - (OM' \text{ の生成}) \quad [54]$
【底泥相のアンモニウム態窒素 (NH₄-N)】 【底泥相の第1層】 $R_1' = \frac{\partial NH_4}{\partial t}$ $= \pm (\text{拡散}) - (\text{溶出}) + (TON' \text{ の分解}) \pm (\text{吸脱着}) - (\text{硝化})$ $= D_{no} \frac{NH_4 - NH_4'}{0.5 \cdot h_1' (h_1' + h_2')} - D_{no} \frac{NH_4 - NH_4'}{0.5 \cdot h_1' \cdot h_1'} + K_{top} \exp(\theta_{top} T_{1m}) TON_1' \quad [45]$ $- \frac{K_{ad}}{\omega} \left(EN_1' - \frac{NH_4'}{\alpha} \right) - K_{cn} \cdot \theta_{cn} \cdot T_{1m}^{-10} \frac{DO_1'}{DO_1' + 1.0} \cdot NH_4'$	【底泥相の第2層】 $R_2' = \frac{\partial AM_2}{\partial t}$ $= (AM' \text{ の生成}) - (OM' \text{ の生成}) \quad [55]$
【底泥相の第2層】 $R_2' = \frac{\partial NH_4}{\partial t}$ $= \pm (\text{拡散}) + (TON' \text{ の分解}) \pm (\text{吸脱着}) - (\text{硝化})$ $= D_{no} \frac{NH_4 - NH_4'}{0.5 \cdot h_2' (h_2' + h_3')} + K_{top} \exp(\theta_{top} T_{2m}) TON_2' \quad [47]$ $- \frac{K_{ad}}{\omega} \left(EN_2' - \frac{NH_4'}{\alpha} \right) - K_{cn} \cdot \theta_{cn} \cdot T_{2m}^{-10} \frac{DO_2'}{DO_2' + 1.0} \cdot NH_4'$	

AM': 間隙水単位容積あたりの還元鉄濃度 (mg/L) DIP': 底泥相におけるDIPの拡散係数 (m²/day) Dno: 底泥相におけるNH₄-Nの拡散係数 (m²/day)
Dno: 底泥相におけるNO₃-Nの拡散係数 (m²/day) DIP': 底泥相第k層における間隙水中のDIP濃度 (mg/L) DO w: 酸化層の生成に係わる直上水中のDO濃度の半飽和定数 (mg/L)
DO': 底泥相第k層における間隙水中のDO濃度 (mg/L) DO' w: 還元層の生成に係わる間隙水中のDO濃度の半飽和定数 (mg/L) EN': 底泥相第k層における吸着態窒素濃度 (mg/kg-dry)
EP': 底泥相第k層における吸着態リン濃度 (mg/kg-dry) ER': 底泥相第k層における化学反応型吸着態リン濃度 (mg/kg-dry)
f_{pa}: 底泥相のTOP分解にともなうTOP単位質量当たりの酸素消費量 (-) h': 底泥相第k層の厚さ (m) K_{top}: ベントスによる間隙水中のTOPの分解速度 (1/day)
K_{top}: 酸化層生成速度 (1/day) K_{ex}: 化学反応型吸着態リンの可溶化・不可溶化速度定数 (1/day) K_{top}, K_{top}: 水温0℃における底泥相第1層及び第2層でのTON分解速度 (1/day)
K_{top}, K_{top}: 水温10℃における底泥相第1層及び第2層でのTOP分解速度 (1/day) NH₄': 底泥相第k層における間隙水中のNH₄-N濃度 (mg/L)
NO₃': 底泥相第k層における間隙水中のNO₃-N濃度 (mg/L) f_{do}, f_{do}: 底泥中のDO拡散に關し、底泥相第1層及び第2層のDO濃度に關する補正係数 (-)
R_{do}: 底泥相中のDIP拡散係数に係わる、底泥相DO濃度に関する補正係数 (-) TON': 底泥相第k層における間隙水中のTON濃度 (mg/L)
TOP': 底泥相第k層における間隙水中のTOP濃度 (mg/L) w_{top}: 間隙水中のTOP及びTONの沈降速度 (m/day) α: 吸着平衡定数 (kg/L)
β: DIPの化学反応型吸着に寄与する酸化鉄の比率 (-) γ: 底泥の間隙率 (-) θ_{cn}: CODの分解に係わる温度係数 (1/℃)
θ_{ad}: フライタスの分解に係わる温度係数 (1/℃) θ_{don}: DONの分解に係わる温度係数 (1/℃) θ_{top}: 間隙水中のTONの分解に係わる温度係数 (1/℃)
θ_{top}: 間隙水中のTOPの分解に係わる温度係数 (1/℃) ω: 底泥の単位乾燥重量あたりの間隙水の容量 (L/kg-dry)

以上から得られた T-N・T-P の流入負荷量に、実績にもとづく年間一定の構成割合を乗じること
でNH₄-N・NO₃-N・NO₂-N・DIP・DON・DOPの流
入負荷量を決定した。なおこれらの割合は、窒
素分については NH₄-N(61%)・NO₃-N(22%)・
NO₂-N(4%)・DON(13%)とし、リン分について
は DIP(65%)・DOP(35%)とした。

また流入水の水温については、福岡管区気
象台における日平均気温と、福岡市による河川
水温の実測値をから作成した多項式により算出
した。境界条件となる開境界メッシュにおける水
質濃度は、既存資料¹⁴⁾や現況水質の再現結果
を参考に設定し、年間を通じて一定とした。

4.3 底質モデル

底質モデルは、Table 2 中の[17]式に示す底
泥相の質量方程式に基づくとし、この式に含ま
れる各物質生成速度については Table 4 に示す
[37]～[55]式からなるとした。この物質循環に
ついて模式的に表したものを Fig.2 中の底泥相
に示した。なお、底泥相は上層と下層に 2 分割
した。

底質モデルとして考慮したコンパートメントは、
間隙水中の栄養塩としての DIP・NH₄-N・NO₃-N、
間隙水の DO、酸化層(酸化鉄:OM)、還元層
(還元鉄:AM)、水相から供給される全有機態リ
ン(TOP)及び全有機態窒素(TON)、化学的反
応型吸着態リン(ER)、吸着態リン(EP)、吸着態
窒素(EN)の 11 項目である。これがマクロベント
スの効果は考えるがコンパートメントとしては含
まないケース(Case 1)であり、さらにマクロベント
スを含む総コンパートメント数 12 のケース(Case
2)を考えた(Fig.3)。

Case 1 で考慮したベントスの効果は、マクロベ
ントスによる底泥相の TOP・TON の分解と、バイ
オターベーションによる水相への DIP・NH₄-N の
供給である。

一方、Case 2 では対象マクロベントスとしてホ
トギスガイを選択し、生態系モデル中にコンパ
ートメントとして導入した。本研究では調査結果
に基づきホトギスガイのみを優占種として考慮
し、他のマクロベントスについては考慮しなかつ

Table 5 マクロベントス関連式 (Case 2)

【マクロベントス (ホトギスガイ) 関連式】	
【個体数変動】	$\frac{dN}{dt} = -\frac{d}{dt} \left[g(x) \cdot x \right] - u(x) \quad [56]$
【成長速度式】	$g(x) = r(T) \cdot x \left(1 - \frac{x}{K} \right) \quad [57]$
【死亡速度】	$u(x) = m_x \cdot x \cdot \exp(-\alpha x + \beta T) \quad [58]$
【成長-死亡質量換算式】	$\ln W_g = -4.13 + 2.54 \ln x \quad [59]$
【水相最下層デトリタス】	
	$R_{dt} = \frac{dD_{dt}}{dt} = (PA \cdot PB \text{の枯死}) - (ZP \text{の排泄}) - (ZP \text{の自然死}) - (分解) - (沈降) - (\text{マクロベントスの捕食})$
	$= f_{pa} (D_{pa} \exp(\theta_{pa} T_{dt}) P_{dt} + D_{pa} \exp(\theta_{pa} T_{dt}) P_{dt}) + f_{zp} (R_{zp} T_{dt} P_{dt} + R_{zp} T_{dt} P_{dt}) + f_{zp} (R_{zp} T_{dt} P_{dt} + R_{zp} T_{dt} P_{dt})$
	$+ D_{dt} \exp(\theta_{dt} T_{dt}) Z_{dt} - K_{dt} \exp(\theta_{dt} T_{dt}) D_{dt} - \frac{D_{dt}}{K_{dt}} (D_{dt} - D_{dt,eq}) - \frac{D_{dt}}{K_{dt}} \quad [24]$
【水相最下層DIP】	
	$R_{di} = \frac{dDIP}{dt} = - (PA \cdot PB \text{の増殖}) + (PA \cdot PB \text{の呼吸}) + (DOP \text{の分解})$
	$+ (\text{ベントスによる TOP の分解}) + (\text{抽出}) + (\text{マクロベントスの排泄})$
	$= -f_{pa} (C_{pa} P_{dt} + G_{pa} P_{dt}) + f_{pa} (C_{pa} P_{dt} + G_{pa} P_{dt}) + f_{pa} (C_{pa} P_{dt} + G_{pa} P_{dt}) + f_{pa} (C_{pa} P_{dt} + G_{pa} P_{dt}) + f_{pa} (C_{pa} P_{dt} + G_{pa} P_{dt})$
	$+ K_{di} \exp(\theta_{di} T_{dt}) \frac{DIP}{K_{di}} + \gamma A_{di} D_{di} \frac{DIP}{0.5 K_{di}} + E_{di} \quad [27]$
【水相最下層NH ₄ -N】	
	$R_{n} = \frac{dNH_4-N}{dt} = - (PA \cdot PB \text{の増殖}) + (PA \cdot PB \text{の呼吸}) + (DOP \text{の分解}) - (硝化)$
	$+ (\text{ベントスによる TOP の分解}) + (\text{抽出}) + (\text{マクロベントスの排泄})$
	$= -f_{pa} (C_{pa} P_{dt} + G_{pa} P_{dt}) + f_{pa} (C_{pa} P_{dt} + G_{pa} P_{dt}) + f_{pa} (C_{pa} P_{dt} + G_{pa} P_{dt}) + f_{pa} (C_{pa} P_{dt} + G_{pa} P_{dt}) + f_{pa} (C_{pa} P_{dt} + G_{pa} P_{dt})$
	$+ K_{n} \exp(\theta_{n} T_{dt}) \frac{NH_4-N}{K_{n}} - K_{n} \exp(\theta_{n} T_{dt}) \frac{NH_4-N}{K_{n}} - \frac{DO}{DO_{sat} + 1.0} \frac{NH_4-N}{K_{n}} + E_{n} \quad [30]$
【水相最下層DO】	
	$R_{do} = \frac{dDO}{dt} = (PA \cdot PB \text{の増殖}) - (PA \cdot PB \text{の呼吸}) - (COD \text{の分解}) - (硝化) + (脱窒)$
	$+ (\text{ベントスによる底泥層 TOP の分解}) - (\text{底泥の酸素消費}) - (\text{マクロベントス呼吸による酸素消費})$
	$= f_{pa} f_{pa} (C_{pa} P_{dt} + G_{pa} P_{dt}) - f_{pa} f_{pa} (C_{pa} P_{dt} + G_{pa} P_{dt}) + f_{pa} (C_{pa} P_{dt} + G_{pa} P_{dt}) + f_{pa} (C_{pa} P_{dt} + G_{pa} P_{dt})$
	$- f_{do} K_{do} \exp(\theta_{do} T_{dt}) \frac{DO}{DO_{sat}} - f_{do} K_{do} \exp(\theta_{do} T_{dt}) \frac{DO}{DO_{sat}} - \frac{DO}{DO_{sat} + 1.0} \frac{NH_4-N}{K_{n}} + E_{do} \quad [36]$
【底泥最上層TOP】	
	$R_{t} = \frac{dTOP}{dt} = (PA \cdot PB \text{の沈降}) - (DIP \text{の沈降}) - (分解) - (\text{ベントスによる分解}) - (\text{増殖}) + (\text{マクロベントスの死亡})$
	$= f_{pa} f_{pa} (C_{pa} P_{dt} + G_{pa} P_{dt}) + f_{pa} f_{pa} (C_{pa} P_{dt} + G_{pa} P_{dt}) + f_{pa} f_{pa} (C_{pa} P_{dt} + G_{pa} P_{dt}) + f_{pa} f_{pa} (C_{pa} P_{dt} + G_{pa} P_{dt}) + f_{pa} f_{pa} (C_{pa} P_{dt} + G_{pa} P_{dt})$

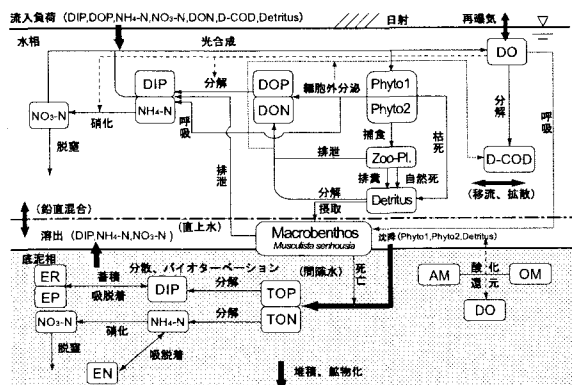


Fig. 3 水相・底泥相の物質変換 (Case 2)

た。

Table 6 マクロベントス関連パラメータ

マクロベントスの生活環を表現する関連式については、Table 5 中の[56]～[59]式に示す。現地調査結果によれば、ホトギスガイは着床後にコホートを形成しながら、時間とともに成長・死滅(自然死)をする。この時間変動は[56]式を用いて表さ

r_0 : ホトギスガイの成長速度係数	day ⁻¹	0.1
K : ホトギスガイの最大殻長	mm	3.0
v_d : 殻長0m, 泥温0°Cでの死亡速度	day ⁻¹	3.0
a : 死亡速度に関わる係数	-	0.09
β : 死亡速度に関わる温度係数	-	0.0693
M_{me} : 貧酸素水塊による死亡率	day ⁻¹	0.000417

れるものとした。また、同式内の成長速度についてはロジスティック成長方程式([57]式)、死亡速度についてはゴンバーツ曲線([58]式)で表現した。これらのホトギスガイの成長・死滅速度は泥温に依存したものとなっているが、本研究では泥温が水相最下層の温度に等しいと仮定して計算した。ホトギスガイは大型甲殻類によって捕食される可能性や、水平方向に移動することにより個体数が変動する可能性もあるが、[56]式に示すようにこれらの効果については考慮しなかった。乾燥身重量の算定については殻長の関数として[59]式のアロメトリー式¹⁵⁾を用いた。

ホトギスガイ分布の初期条件については、計算開始の2001年1月1日において、現地調査に基づきながら正規分布を重畳させて表現した分布形をコホートとして与えた。また稚貝の着床についても、2001年8月25日に新規加入が起こるものとして同様の方法で加入するコホートを設定した。

また、このマクロベントスコンパートメントについては、他の水相・底泥相のコンパートメントと相互に関連を持つものとした。本モデルにおいては、底質存在するベントスによる酸素消費、酸素濃度によるベントスの死亡、ベントスの死亡量のTOPへの加算といった作用を考慮に入れた。これに併せて、水相最下層DO生成速度の[36]式(Table 3)、マクロベントス個体数変動の[56]式(Table 5)、底泥相第1相TOP生成速度の[37]式に修正を加えた。

マクロベントスの水質への影響は、浅海域では大きいが深海域では無視できると仮定した。すなわち、ホトギスガイは水深10m以上では生息していないとして、浅海域にのみで計算を行った。また、ホトギスガイは底質の嗜好性があるといわれているが、このような底質環境についても今回のモデル化においては考慮しなかった。

以上の仮定の下に文献値^{16), 17)}を参考にTable 6のパラメータを採用しながら、上・下層毎に初期条件として水平方向に一律の値を与え、時間刻み5分として陽解法で計算した。

5 数値計算結果及び考察

以上の条件で数値解析を行った。W-3, C-1, E-2の各地点におけるクロロフィル・COD・DOの数値計算結果をCase 1についてはFig.4に、Case2についてはFig.5に示す。これらに記載した計算値については、上層は最上ボックス計算値、下層は最下ボックス計算値である。また実測値については、上層は水表面下50cmの値、下層は底面上1mでの値である。

これによると、作成した両モデルは実測濃度の動向をほぼ再現していた。すなわち上層クロロフィルについては夏季の増加、上層CODについてはそれに伴う夏季の増加、下層DOの夏季の低下と冬季の回復といった現象を再現できていた。両モデル間で各地点・各濃度の再現結果を比較すると、Case 1の再現濃度よりもCase 2の再現濃度の方がピークの値が若干大きいことがわかる。この理由として、Case2のモデル中に、マクロベントスによる栄養塩排出を加えたことによるクロロフィルの増加に起因していると考えられる。さらに、Fig.5のE-2におけるDOの再現結果が示すように、DO濃度の上層・下層間の濃度差もCase 1の再現濃度よりもCase 2の方が大きくなっており、博多湾湾奥における夏季の貧酸素水塊を詳細に再現することができていた。この理由として、Case2のモデル中に、マクロベントスの生息数に応じた酸素消費速度、及び貧酸素水塊によるマクロベントスの死亡の効果を加えたことに起因していると考えられる。

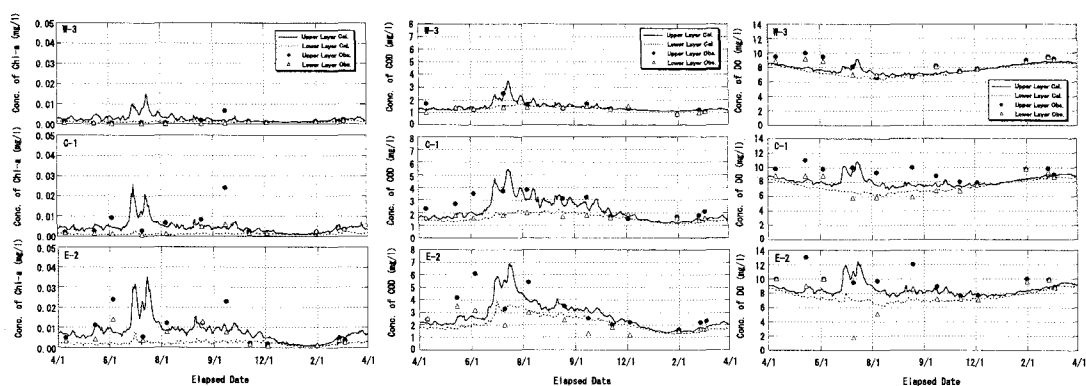


Fig. 4 各地点におけるクロロフィル・COD・DO の数値計算結果 (Case 1)

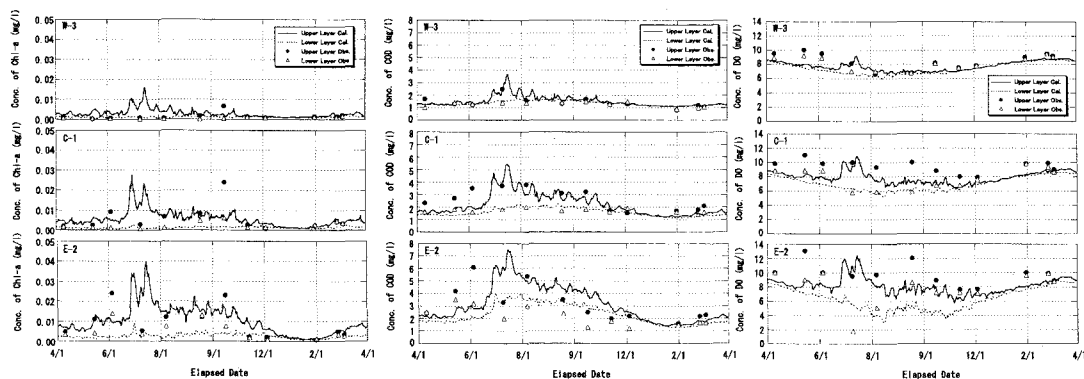


Fig. 5 各地点におけるクロロフィル・COD・DO の数値計算結果 (Case 2)

以上のように Case 1 よりも Case 2 の方において水質濃度の再現性が向上したことは、モデル中へのマクロベントスのコンパートメント導入の効果であると考えられる。すなわち、マクロベントスコンパートメントを加えた Case 2 のモデルは、マクロベントスを関数のみとして扱っている Case 1 のような従来型のモデルよりも、貧酸素水塊の挙動を詳細に予測することが可能である。また、同時にこのことは、底質中に生息しているマクロベントスは、貧酸素水塊の挙動を予測する生態系モデルを構築する際に、無視のできない重要な因子であることを示唆していると考えられる。

本研究では、ホトギスガイが当海域の底質中におけるマクロベントス優占種であることから、この種に対してモデル化を行い生態系モデル中に導入した。他の海域において本モデルを適用させる際には、その海域において詳細なマクロベントスの調査を行い、先ずその海域において優占しているマクロベントス種の生活環を明らかにする必要がある。そしてその調査から得られた結果に対して定式化を行いモデル中に組み込めば同様の結果が得られると考えられる。しかし調査の結果、その海域において幾つかのマクロベントスが共生をしているような場合、それらの種間関係が水質に対してどのような効果をもつかについては、不明の点が多いためそれらを定式化することは困難であると予想される。また、博多湾湾奥のホトギスガイのように、底質中において一種のマクロベントスがほとんどを優占しているような場合でも、実際の底質中には様々なマイクロベントスやメイオベントスが生息している。そのような生物群が最下層水質に対してどの程度の寄与があるのか、あるいはマクロベントスの生活環に対してどの程度の影響があるのかを定量化した例はなく、こちらについては今後の研究課題であると考えられる。

6 まとめ

本研究では、博多湾湾奥で優占種であるホトギスガイをマクロベントスとしてコンパートメントとして組み込んだ生態系モデルを作成した。その結果、本モデルはマクロベントスを関数のみとして扱っている従来のモデルよりも、貧酸素水塊の挙動を詳細に予測することが可能であった。このことは、底質中に生息しているマクロベントスは、貧酸素水塊の挙動を予測する生態系モデルを構築する際の無視できない重要な因子であることを示唆していた。

参考文献

- 1) 藤田健一, 李寅鐵, 楠田哲也(2001) 水-底質相互作用モデルによる博多湾のリン循環の数値予測, 水環境学会誌, 第24巻, 第1号, 48-57
- 2) AKIO SOHMA, YASUYUKI SEKIGUCHI, HIROSHI YAMADA, TATSUAKI SATO and KISABURO NAKATA(2001) A New Coastal Marine Ecosystem Model Study Coupled with Hydrodynamics and Tidal Flat Ecosystem Effect, Marine Pollution Bulletin, Vol.43, Nos.7-12, pp.187-208
- 3) Kisaburo Nakata, Fumio Horiguchi, Masumi Yamamuro(2000) Model study of Lakes Shinji and Nakamumi-a coupled coastal lagoon system, Journal of Marine Systems, Vol.26, pp.145-169
- 4) 中尾徹, 松崎加奈恵(1995) 地形形状による富栄養化の可能性, 海の研究, 4(1), 19-28
- 5) 福岡県環境部環境政策課(2003) 平成15年度版福岡県環境白書
- 6) 濱野龍夫, 神谷崇, 下山正一, 松浦修平(1986) 博多湾における底生貝類群集の動態—特に夏季成層期を中心として—, 日本ベントス研究会誌, No.29, 1-8
- 7) 兼子由起子(2003) 博多湾におけるホトギスガイとシズクガイの変動に関する研究, 福岡大学学士論文
- 8) 藤田健一(2001) 水-底質予測モデルの開発と気象要素が底層の溶存酸素濃度に及ぼす影響に関する研究, 九州大学工学部学位論文
- 9) 気象庁編, 海洋観測指針, 1999
- 10) 海上保安庁(1992) 日本沿岸潮汐調和定数表
- 11) 李寅鐵, 浮田正夫, 関根雅彦, 中西弘(1996) 水・底質モデルによる瀬戸内海の水質管理に関する研究, 土木学会論文集1, 545, II-36, 101-112.
- 12) Kremer, J. N. and Nixon, S. W.(1987) 沿岸生態系の解析, 中田喜三郎監訳, 生物研究社編, 22-169.
- 13) 福岡市港湾局(1991) 水質モデル定数調査委託報告書
- 14) 福岡市港湾局, 博多港港湾計画の実施に伴う昭和57年度環境調査報告書
- 15) Jeffrey A. Crooks *et al.* (1996) The Population Ecology of an Exotic Mussel, *Musculista senhousia*, in a Southern California Bay, Estuaries, Vol.19, No.1, 42-50
- 16) 熊谷博史, 山崎惟義, 渡辺亮一, 藤田健一, 博多湾におけるホトギスガイが貧酸素水塊に与える影響, 環境工学研究論文集, 第40巻, 2003, pp.595-606
- 17) Tetsunori Inoue, Masumi Yamamuro(2000), Respiration and ingestion rates of the filter-feeding bivalve *Musculista senhousia*: implications for water-quality control, Journal of Marine Systems, 26, 183-192