## 3 数値解析モデルによる検証

2.2 章の 2000~2006 年の現況再現は、文部科学省「重要課題解決型研究等の推進 有明海生物 生息環境の俯瞰的再生と実証試験」(2009 年度)の成果(以下、「JST モデル」という)を引用した。JST モデルを基本として、新たに取得された 2007~2008 年のデータを用いて、水質・底質の 再現精度の向上を試みた。

#### 3.1 低次生態系モデルの構造と基礎方程式

## 3.1.1 低次生態系モデルの構造と解析内容

## (1) 基本構造

低次生態系モデルのモデル構造を図 3.1-1 に示す。低次生態系モデルは、浮遊系の流動サブモデル、懸濁物輸送サブモデル、水質サブモデル、底生系の底質サブモデル、底生生物サブモデルの合計5つのサブモデルにより構成される。

ここで、水質サブモデルと底質サブモデル、底生生物サブモデルの3つのサブモデルは、各々の 計算項目の相互作用を非定常に解析するものである(結合モデル)のに対して、これら3つのサブ モデルと流動サブモデルと懸濁物輸送サブモデルは、それぞれに独立したモデル(非結合モデル) である。そのため、懸濁輸送サブモデルで計算された SS 量が、流動サブモデルで予測される流れ 場へ密度の効果として影響を与えるなどの相互関係は考慮されない。



図 3.1-1 低次生態系モデルの構造

### (2) 低次生態系モデルの解析内容

各サブモデルの変数を結ぶ物理・化学・生物過程は、主に低次栄養段階で植物プランクトンの発 生や酸素動態にとって重要と考えられるもので構成されている。なお、本モデルで表現した水中の 溶存酸素の生成・消費に関わる生物・化学過程は、①植物プランクトン・付着藻類・ノリの光合成、 ②植物プランクトン・動物プランクトン・付着藻類・懸濁物食者・堆積物食者の呼吸、③有機物(デ トリタス)の好気的無機化、④硝化、⑤酸素消費物質(ODU:Oxygen Demand Unit)の酸化、⑥底泥に よる酸素消費(間隙水中の溶存酸素との分子拡散)、⑦海面での再ばっ気である。

モデルの解析内容と出力項目、および水質・底質・底生生物サブモデルの概念図を図 3.1-2 に示す。

衣 5.11 谷サノモノルの神伊内白と山川境日		
サブモデル	解析内容・出力項目	
流動サブモデル	解析内容:	流動場・水温・塩分場(密度場)、波浪場の予測
	出力項目:	流向・流速、水温・塩分、潮位、
		有義波高・有義波周期
懸濁物輸送サブモデル	解析内容:	SSの動態に関する予測(巻上げ・沈降・移流拡散等)
	出力項目:	水中の SS 濃度、SS の巻上げ量および堆積量
水質サブモデル	解析内容:	低次生態系における物質循環を考慮した水質予測
	出力項目:	植物プランクトン、動物プランクトン、ノリ、
		有機物(デトリタス)、栄養塩類、溶存酸素、
		酸素消費物質(ODU)
		(ただしノリの現存量は境界条件として扱った)
底質サブモデル	解析内容:	初期続成過程を考慮した底質予測
	出力項目:	有機物、栄養塩類、
		マンガン、鉄、硫黄、メタン、溶存酸素
底生生物サブモデル	解析内容:	底生生物現存量と底生生物が及ぼす物質循環量の予測
	出力項目:	付着藻類、懸濁物食者、堆積物食者の現存量
		(ただし懸濁物食者の現存量は境界条件として扱った)

表 3.1-1 各サブモデルの解析内容と出力項目

低次生態系モデルに考慮される計算項目と物質循環過程を図 3.1-2 に示す。



図 3.1-2 低次生態系モデルの物質循環図

#### 3.1.2 基礎方程式

- (1) 流動サブモデル
  - 1) 計算項目

流動サブモデルの計算項目を表 3.1-2 に示す。

表 3.1-2	流動サ	トブモデ	ルの計算項目		
計算項目					
流向・流速、 水温、	塩分、	水位、	有義波高、	有義波周期	

#### 2) 座標系

本検討で用いる流動サブモデルは、Mellor et al.(2002)<sup>1</sup>及び Ezer and Mellor(2004)<sup>2</sup>などを 参考にした一般鉛直座標系を用いた o-座標モデルとした。一般鉛直座標モデルでは図 3.1-3 に 示すように、鉛直分割率を変化させ、水平方向に層数を変化させるなど、非常に自由度に富ん だ鉛直格子の設定が可能となる。なお、懸濁物輸送サブモデルと水質サブモデルも同様の座標 系を用いている。

またモデルの基礎方程式は、連続の式、静水圧近似及びブシネスク近似が施された運動方程 式、水温・塩分の保存式、乱流統計量の保存式となる。詳細な基礎方程式について以降に示す。



図 3.1-3 一般鉛直座標モデルの鉛直格子分割の例

3) 基礎方程式

本検討に用いるモデルの基礎方程式は、連続の式、静水圧近似及びブシネスク近似が施され た運動方程式、水温・塩分の保存式、乱流統計量の保存式となる。また鉛直方向については図 3.1・3 に示すような海面と海底で規格化された σ座標を導入するために、基礎方程式は z 座標 から座標変換が施される。σ座標と z 座標の定義式は次式となる。

$$\sigma = \frac{z - \eta}{H + \eta} \tag{1}$$

ここで、 $\sigma$ :  $\sigma$  座標、z: z 座標、 $\eta$ : 静水面から上向きを正にとった水位、H: 静水面か

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Mellor, G. L., S. Hakkinen, T. Ezer and R<sub>o</sub> Patchen(2002): A generalization of a sigma coordinate ocean model and an intercomparison of model vertical grids, In: Ocean Forecasting: Conceptual Basis and Applications, N. Pinardi and J. D. Woods (Eds.), Springer, Berlin, 55-72.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Ezer、 T. and G. L. Mellor(2004) : A generalized coordinate ocean model and a comparison of the bottom boundary layer dynamics in terrain-following and in z-level grids、 Ocean Modelling、 6、 379-403

ら下向きを正にとった水深である。 $z = \eta$ のとき $\sigma = 0$ であり、Z = -Hのとき $\sigma = -1$ である。

すなわちの座標は海面で $\sigma = 0$ であり、海底で $\sigma = -1$ である。の座標のもとで海水流動の基本 方程式は以下のように書かれる。

<連続の式>

$$\frac{\partial DU}{\partial x} + \frac{\partial DV}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} + \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0$$
<sup>(2)</sup>

<運動方程式>

x 方向

$$\frac{\partial DU}{\partial t} + \frac{\partial U^2 D}{\partial x} + \frac{\partial UVD}{\partial y} + \frac{\partial U\omega}{\partial \sigma} - fVD + gD\frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gD^2}{\rho_0} \int_{\sigma}^{0} \left[\frac{\partial \rho'}{\partial x} - \frac{\sigma'}{D}\frac{\partial D}{\partial x}\frac{\partial \rho'}{\partial \sigma'}\right] d\sigma' = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_M}{D}\frac{\partial U}{\partial \sigma}\right] + F_x \quad (3)$$

y 方向

$$\frac{\partial DV}{\partial t} + \frac{\partial UVD}{\partial x} + \frac{\partial V^2 D}{\partial y} + \frac{\partial V\omega}{\partial \sigma} + fUD + gD\frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gD^2}{\rho_0} \int_{\sigma}^{0} \left[\frac{\partial \rho'}{\partial y} - \frac{\sigma'}{D}\frac{\partial D}{\partial y}\frac{\partial \rho'}{\partial \sigma'}\right] d\sigma' = \frac{\partial}{\partial\sigma} \left[\frac{K_M}{D}\frac{\partial V}{\partial\sigma}\right] + F_y \quad (4)$$

$$\frac{\partial DT}{\partial t} + \frac{\partial TUD}{\partial x} + \frac{\partial TVD}{\partial y} + \frac{\partial T\omega}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ \frac{K_H}{D} \frac{\partial T}{\partial \sigma} \right] + F_T - \frac{\partial R}{\partial z}$$
(5)

$$\frac{\partial DS}{\partial t} + \frac{\partial SUD}{\partial x} + \frac{\partial SVD}{\partial y} + \frac{\partial S\omega}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ \frac{K_H}{D} \frac{\partial S}{\partial \sigma} \right] + F_S \tag{6}$$

<乱流統計量の保存式>

$$\frac{\partial Dq^{2}}{\partial t} + \frac{\partial q^{2}UD}{\partial x} + \frac{\partial q^{2}VD}{\partial y} + \frac{\partial q^{2}\omega}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ \frac{K_{q}}{D} \frac{\partial q^{2}}{\partial \sigma} \right] + \frac{2K_{M}}{D} \left[ \left( \frac{\partial U}{\partial \sigma} \right)^{2} + \left( \frac{\partial V}{\partial \sigma} \right)^{2} \right] + \frac{2g}{\rho_{0}} K_{H} \frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial \sigma} - \frac{2Dq^{3}}{B_{1}l} + F_{q}$$
(7)

$$\frac{\partial Dq^{2}l}{\partial t} + \frac{\partial q^{2}lUD}{\partial x} + \frac{\partial q^{2}lVD}{\partial y} + \frac{\partial q^{2}l\omega}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ \frac{K_{q}}{D} \frac{\partial q^{2}l}{\partial \sigma} \right] + E_{1}l \left( \frac{K_{M}}{D} \left[ \left( \frac{\partial U}{\partial \sigma} \right)^{2} + \left( \frac{\partial V}{\partial \sigma} \right)^{2} \right] + E_{3} \frac{g}{\rho_{0}} K_{H} \frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial \sigma} \widetilde{W} - \frac{Dq^{3}}{B_{1}} \widetilde{W} + F_{l}$$
(8)

ここで、	
D	:全水深 (H+η)
U,V	:x、y 方向の3次元流速成分
$\omega$	: σ-座標系のもとでの鉛直流速成分
$\eta$	:水位
f	: コリオリカ
g	: 重力加速度
ho	:海水密度
$ ho_0$	: 基準海水密度(1025kg/m³)
$K_{M}$	: 鉛直渦動粘性係数
$F_{x}$	: 流速 U 成分に係る水平粘性項
$F_y$	: 流速 V 成分に係る水平粘性項
Т	:水温
S	: 塩分
$F_{T}$	:水温に係る水平拡散項
$F_{S}$	: 塩分に係る水平拡散項
$K_{H}$	:水温、塩分、SS に係る鉛直渦動拡散係数
$\frac{\partial R}{\partial z}$	:水中における鉛直方向の短波放射収支
$q^2$	: 乱流運動エネルギー
$K_q$	: 乱流運動エネルギーに係る鉛直渦動拡散係数
l	: 乱流長さスケール
$F_{q}$	: 乱流運動エネルギーに係る水平拡散項
$F_l$	: 乱流長さスケールに係る水平拡散項
$B_1, E_1, E_3,$	: 乱流モデルに係る経験定数
$\sigma'$	:積分定数
である。	

なお、or座標における鉛直流速とz座標における鉛直流速の関係は以下のとおりであり、W はz座標における鉛直流速である。

$$W = \omega + U\left(\sigma \frac{\partial D}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial x}\right) + V\left(\sigma \frac{\partial D}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial y}\right) + \sigma \frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial \eta}{\partial t}$$
(9)

 $\widetilde{W}$  は近接関数であり、以下のように定義される;  $\widetilde{W} = 1 + E_2(l/kL)$ ここで  $L^{-1} = (\eta - z)^{-1} + (H - z)^{-1}$   $E_2$ : 乱流モデルに係る経験定数

k : カルマン定数

また $\partial \tilde{\rho} / \partial \sigma = \partial \rho / \partial \sigma - c_s^{-2} \partial \rho / \partial \sigma$  であり、 $c_s$  は水中における音速、p は静水圧である。 $\rho'$  は海水密度  $\rho$  から各水深における水平平均密度を引いた偏差である。

水平粘性項や水平拡散項は以下のように定義される。

$$F_{x} = \frac{\partial H\tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial H\tau_{xy}}{\partial y}$$
(10)

$$F_{y} = \frac{\partial H\tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial H\tau_{yy}}{\partial y}$$
(11)

ここで、

$$\tau_{xx} = 2A_M \frac{\partial U}{\partial x}, \tau_{xy} = A_M \left( \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right), \tau_{yy} = 2A_M \frac{\partial V}{\partial y}$$
(12)

また、

$$F_{\phi} = \frac{\partial Hq_x}{\partial x} + \frac{\partial Hq_y}{\partial y}$$
(13)

ここで、

$$q_{x} = A_{H} \frac{\partial \phi}{\partial x}, q_{y} = A_{H} \frac{\partial \phi}{\partial y}$$
(14)

であり、 $\phi$ はT,S, $q^2$ , $q^2l$ 、 $A_M$ は水平渦粘性係数、 $A_H$ は水平渦拡散係数を表す。ここで以下 のことに注意を要する。すなわち上の水平粘性等に関する式では $\sigma$ -座標変換に伴う補正項を含 んでいないことである。この形式に関する正当化は Mellor and Blumberg(1985)<sup>3</sup>を参照されたい。

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Mellor、G.L. and A.F.Blumberg(1985): Modeling vertical and horizontal diffusivities with the sigma coordinate system、Mon. Wea. Rev. 113、pp1380-1383.

4) モード分割

POM と同様に本検討に用いるモデルの特徴の一つとして、その解法にモード分割の手法を 取り入れている。モード分割とは表面水位を計算する部分と流速や水温、塩分等の3次元構造 を計算する部分を分けることである。表面水位はいわゆる重力波の速度 $\sqrt{gH}$ で伝播し、その 速度は流速などに比べ速い。

基本方程式を時間積分する際の時間刻み幅(タイムステップ)はその基本方程式によって記述される物理現象のうち、最も伝播速度の速い現象によって支配されている。静水圧近似に基づく海洋流動現象の場合、普通最も速い現象は上述した表面波の伝播であり、タイムステップ DT は、格子間隔をDS とするとき、DT < DS / \sqrt{gH} で規定される。流速、水温、塩分等の3次元構造を含めてこのタイムステップで計算すると、相当小さいタイムステップとなり、計算機演算時間が多くかかるようになる。そこで表面水位の計算には2次元単層モデルを用いることにより、あまり演算時間がかからないようにしている。このように表面水位の計算を2次元単層モデルで行う部分を外部モードの計算と呼んでいる。一方、流速や水温、塩分等の3次元構造を計算する部分を内部モードの計算と呼んでいる。内部モード計算のタイムステップは外部モードのそれの5~30倍(整数倍)の値が用いられる。すなわち、1回の内部モードの計算が行われると次は5~30ステップの外部モード計算が繰り返され、次に1回の内部モード計算が行われるといった計算シーケンスとなる。

外部モード計算に用いられる単層モデルの基本式は以下に示すとおりであり、内部モードと の相互作用が考慮されている。

<連続の式>

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \overline{U}D}{\partial x} + \frac{\partial \overline{V}D}{\partial y} = 0$$
(15)

<運動方程式>

x 方向

$$\frac{\partial \overline{U}D}{\partial t} + \frac{\partial \overline{U}^{2}D}{\partial x} + \frac{\partial \overline{U}\overline{V}D}{\partial y} - \widetilde{F}_{x} - f\overline{V}D + gD\frac{\partial \eta}{\partial x} = -\langle wu(0) \rangle + \langle wu(-1) \rangle \\ + G_{x} - \frac{gD}{\rho_{0}} \int_{-1}^{0} \int_{\sigma}^{0} \left[ D\frac{\partial \rho'}{\partial x} - \sigma'\frac{\partial D}{\partial x}\frac{\partial \rho'}{\partial \sigma'} \right] d\sigma' d\sigma \quad (16)$$

y 方向

$$\frac{\partial \overline{V}D}{\partial t} + \frac{\partial \overline{U}\overline{V}D}{\partial x} + \frac{\partial \overline{V}^{2}D}{\partial y} - \widetilde{F}_{y} + f\overline{U}D + gD\frac{\partial \eta}{\partial y} = -\langle wv(0) \rangle + \langle wv(-1) \rangle + G_{y} - \frac{gD}{\rho_{0}} \int_{-1}^{0} \int_{\sigma}^{0} \left[ D\frac{\partial \rho'}{\partial y} - \sigma'\frac{\partial D}{\partial y}\frac{\partial \rho'}{\partial \sigma'} \right] d\sigma' d\sigma \quad (17)$$

ここで鉛直平均流速は以下のように定義される。

$$\overline{U} = \int_{-1}^{0} U d\sigma \tag{18}$$

風応力成分は $- < wu(0) > < - < wv(0) > であり、一方海底摩擦成分は<math>- < wu(-1) > < - < wv(-1) > である。 <math>F_x < F_y$ は以下のように定義される。

$$F_{x} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ H 2\overline{A}_{M} \frac{\partial \overline{U}}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ H\overline{A}_{M} \left( \frac{\partial \overline{U}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{V}}{\partial x} \right) \right]$$
(19)

$$F_{y} = \frac{\partial}{\partial y} \left[ H 2\overline{A}_{M} \frac{\partial \overline{V}}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[ H\overline{A}_{M} \left( \frac{\partial \overline{U}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{V}}{\partial x} \right) \right]$$
(20)

いわゆる分散項は以下のように定義される。

$$G_{x} = \frac{\partial \overline{U}^{2} D}{\partial x} + \frac{\partial \overline{U} \overline{V} D}{\partial y} - \widetilde{F}_{x} - \frac{\partial U^{2} D}{\partial x} - \frac{\partial \overline{U} V D}{\partial y} + \overline{F_{x}}$$
(21)

$$G_{y} = \frac{\partial \overline{U}\overline{V}D}{\partial x} + \frac{\partial \overline{V}^{2}D}{\partial y} - \widetilde{F}_{y} - \frac{\partial \overline{U}\overline{V}D}{\partial x} - \frac{\partial \overline{V}^{2}D}{\partial y} + \overline{F}_{y}$$
(22)

式(21)~(22)において、右辺1~3項は鉛直平均流速をもとに構成される量であり、4~6項は 3次元流速から構成したものを鉛直平均したものである。式(16)~(17)の右辺は内部モードのタ イムステップ毎に更新され、外部モード計算中において右辺は一定値に保たれる。外部モード のステップ毎に毎回更新されるのは式(16)~(17)の左辺のみである。

## (2) 懸濁物質輸送サブモデル

## 1) 計算項目

懸濁物輸送サブモデルの計算項目を表 3.1-3 に示す。なお本検討では、SS を表 3.1-4 に示す ように3つの粒径に区分し、それぞれの粒子について移流・拡散、巻上げ・沈降等の物理過程 に伴う濃度分布の変化を解析した。

表 3.1-3	懸濁物輸送サブモデルの計算項目

計算項目	
SS、直上水-底泥間の巻上げ・沈降フラッ	ックス

表 3.1-4 SS の粒径区分		
区分	粒径[µm]	物性
1	$75\sim$	砂
2	$5{\sim}75$	シルト
3	$\sim 5$	粘土

なお、底泥中の各粒径の現存量は日本海洋学会(2005) 4に整理されている有明海全域の中央 粒径値(MdΦ)を参考に設定し、この現存量を境界値として扱った。



図 3.1-4 有明海における中央粒径値(MdΦ)の分布

<sup>4</sup> 出典:有明海の生態系再生をめざして、日本海洋学会編、恒星社厚生閣

2) 基礎方程式

懸濁物輸送サブモデルの座標系は、流動サブモデルに準ずるものとした。

懸濁物輸送サブモデルの基礎方程式は、SSの移流拡散方程式で流動サブモデルにおける乱流統計量の移流拡散方程式にSSの巻上げ項・沈降項を追加したものとなる。

$$\frac{\partial DC}{\partial t} + \frac{\partial CUD}{\partial x} + \frac{\partial CVD}{\partial y} + \frac{\partial C\omega}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ \frac{K_H}{D} \frac{\partial C}{\partial \sigma} \right] - \frac{\partial W_{SS}C}{\partial z} + F_C + Q + R$$
(23)

ここで、CはSS濃度、Wssは沈降速度、QはSS負荷量、Rは巻上げ量、Fcは水平拡散項を示す。また、水平拡散項も流動サブモデルと同様に以下のように定義される。

$$F_{C} = \frac{\partial Hq_{x}}{\partial x} + \frac{\partial Hq_{y}}{\partial y}$$
(24)

ここで、

$$q_x = A_H \frac{\partial C}{\partial x}, q_y = A_H \frac{\partial C}{\partial y}$$
 (25)

である。

#### 3) 底泥からの巻き上げ量の推定式

本検討においては、底質からの SS の巻上げ量の推定には以下の式を用いた。この式は、底 質からの SS の巻き上げ量の推定に際して広く研究等に利用されているものである5。

$$E = \alpha \cdot \left(\frac{\tau_0}{\tau_{ec}} - I\right)^{\beta} \qquad (\tau_0 > \tau_c)$$
(26)

ここで、E は巻き上げ量(g/m<sup>2</sup>/s)、a、 $\beta$  は侵食速度係数(g/m<sup>2</sup>/s)(-)、 $\tau_{ee}$  は限界せん断応力 (Dyn/cm<sup>2</sup>)、 $\tau_0$  は底層のせん断応力(Dyn/cm<sup>2</sup>)である。

式(26)中の底面せん断応力 τοの算定には、波と流れの共存時を想定した推定式を用いた。算 定にあたっては、田中ら6が提案している粗面乱流場での陽形式摩擦係数の近似式を用いた。

まず、波・流れ共存場における摩擦係数f<sub>cw</sub>は次式で定義される。

$$\tau_0 = \rho \cdot \overline{u}_{cw}^{*2} = \rho \frac{f_{cw}}{2} \hat{U}_w^2$$
(27)

ここで、 $\tau_0$ は波・流れ共存時の底面せん断力の最大値、 $\rho$ は流体の密度、 $u^*_{ew}$ 2は波・流れ共存時の摩擦速度の最大値、 $\hat{U}_w$ は微小振幅波理論によって得られる波動流速の境界層外縁での最大値である。以下で、添え字ew、c、wはそれぞれ波・流れ共存場での諸量、定常流成分および波動成分を表し、また添え字L、RおよびSはそれぞれ、層流、粗面乱流および滑面乱流での諸量を示す。

 $\hat{U}_w$ は、流動サブモデルにて算定される有義波高・有義波周期を基に、以下の式により表現される。

$$\hat{U}_{w} = \frac{H_{1/3}}{2} \cdot \frac{2\pi}{T_{1/3}} \cdot \frac{1}{\sinh[kz_{h}]}$$
(28)

ここで、 $H_{L3}$ は有義波高、 $T_{L3}$ は有義波周期、kは波数、 $z_h$ は水深である。またkは以下の式にて推定した。

<sup>5</sup> 例えば、諏訪湖における風波の影響を考慮した底泥の輸送解析(2003):豊田政史・北村聡・富所五郎、水工学論文 集、第47巻、2003年2月

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> すべての flow regime に適用可能な波・流れ共存場抵抗則(1993):田中仁・Aung THU、土木学会論文集、No。467 /II-23、pp。93-102

$$k = \frac{2\pi}{L}, L = \frac{g}{2\pi} \cdot T^2 \cdot tanh \frac{2\pi z_h}{L}$$
(29)

田中らは粗面乱流場の摩擦係数に対して次式の陽形式の近似式を提案している。

$$f_{cw(R)} = f_{c(R)} + 2\sqrt{f_{c(R)} \cdot \beta_{(R)} f_{w(R)}} \cos \phi' + \beta_{(R)} f_{w(R)}$$
(30)

ここに、

$$f_{c(R)} = \frac{2\kappa^2}{\left\{\ln\left(z_h / z_o\right) - 1\right\}^2} \left(\frac{\overline{u}_c}{U}\right)^2$$
(31)

$$f_{w(R)} = \exp\left\{-7.53 + 8.07 \left(\frac{\hat{U}_{w}}{\sigma z_{o}}\right)^{-0.100}\right\}$$
(32)

$$\beta_{(R)} = \frac{1}{1 + 0.769\alpha^{0.830}} \left\{ 1 + 0.863\alpha \exp(-1.43\alpha) \left(\frac{2\phi'}{\pi}\right)^2 \right\}$$
(33)

$$\alpha = \frac{1}{\ln(z_h/z_o) - 1} \frac{\overline{u}_c}{\hat{U}_w}$$
(34)

ここで、 $\bar{u}_c$ は定常流成分の断面平均流速、zhは水深、amは波動による底面水粒子軌道振幅、 v は流体の動粘性係数である。また、 $\phi' = cos^{-1}(cos\phi)$ であり、 $\Phi$ は波の進行方向と定常流の流 下方向がなす角度である。 $\Phi$ の範囲には制限はないが、 $\Phi$ は  $0 \le \Phi \le \pi/2$  とする。さらに、 $\kappa$ はカルマン定数、zoは粗度長さ( $zo: k_s/30, ks: 相当粗度$ )、o は波の角振動数( $o=2\pi/T$ 、T:周期) である。また、 $\Phi'$ の単位はラジアンとする。結局、 $f_{ewak}$ は4つの無次元数、 $\hat{U}_w/\sigma_0$ 、 $z_h/z_0$ 、  $\bar{u}_c/\hat{U}_w$ および  $\Phi$  に支配される。これらのうち、第2、第3番目の変数は式(34)に見られるように新たな1つの変数  $\alpha$  にまとめられる。

式(27)では、波高が無い場合には、摩擦係数がゼロとなるため巻上げは発生しないことになる。一方で、有明海のように強い潮流が存在する海域では、流れによる巻上げも支配的であるため、流れによる底面せん断応力を以下の式にて算定し、式(27)でもとめた波・流れ共存場でのせん断応力と比較し、その最大値を各格子の底面せん断応力として定義するものとした。

- - - - 2

$$u_{*} = \mu \cdot u_{*}$$

$$u_{*} = u \cdot \left(\frac{1}{\kappa} \cdot \ln \frac{z}{k_{s}} + A_{r}\right)^{-1}$$
(35)

ここで、 $\rho$ は海水密度(g/cm<sup>3</sup>)、u\*は摩擦速度(cm/s)、 $\kappa$ はカルマン定数(=0.41)、u は水平流速(cm/s)、z は流速測定高さ(cm)、ksは相当粗度(cm)、A:(=8.5)は定数である。ここで、相当粗度(cm)、現地調査地点における底質表層の中央粒径値(cm)を用いた。

4) 諸係数の設定

湾内の SS の挙動を的確に再現するためには、式(26)中の a、 $\beta$ 、 $\tau_{e}$ の値を適切に設定しなければならない。a、 $\beta$ 、 $\tau_{ee}$ は、文献値の範囲内でパラメータチューニングを行い、既往の SS の調査結果をもっとも良く再現できるように設定した。

また底泥の侵食速度係数は、巻上げの開始直後より、分の時間スケールで急減することが知られている7。そこで、本検討では、一度の巻上げによって再懸濁する SS 量の上限値(一潮汐間)を設定することで、上記の現象を簡易的に表現した。なお、SS 量の上限値は、モデル計算値と実測値の整合性が高まるよう試行計算により設定した。

<sup>7</sup> 海田輝之・楠田哲也・二渡了・粟谷陽一(1988):柔らかい底泥の巻き上げ過程に関する研究、土木学会論文集、 第 393 号/II-9、pp33-42

5) 沈降速度の推定式

表 3.1-4 に示した粒径区分のうち、シルト・粘土を粘着性粒子と仮定し、その沈降速度は山本ら(2009)<sup>8</sup>の研究結果を引用した。ここで、沈降速度 W の推定式に用いる SS 濃度(C)は、シルトと粘土の SS 濃度の合計値とした。

$$w = 4.27 \times 10^{-4} \cdot C^{0.768} \tag{36}$$

ここで、wは沈降速度(cm/s)、Cは粘着性粒子濃度(mg/L)である。

また砂の沈降速度は、代表粒径を決定し、式(37)のルディー式(水理公式集)により設定した。ここで、gは重力加速度、 $\rho$ は土粒子密度、 $\rho$ は海水密度、dは粒径、 $\mu$ は粘性係数、vは動粘性係数である。

$$w = \sqrt{\frac{2}{3} \left(\frac{\rho'}{\rho} - 1\right)} g d + \frac{36v^2}{d^2} - \frac{6v}{d}$$
(37)

#### (3) 水質サブモデル

1) 座標系および基礎方程式

水質サブモデルの座標系は、流動サブモデルに準ずるものとした。

水質サブモデルの基礎方程式は、富栄養化関連物質の移流拡散方程式であり、流動サブモデ ルにおける乱流統計量の移流拡散方程式に富栄養化関連物質の反応項を追加したものとなる。

$$\frac{\partial DC}{\partial t} + \frac{\partial CUD}{\partial x} + \frac{\partial CVD}{\partial y} + \frac{\partial C\omega}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ \frac{K_H}{D} \frac{\partial C}{\partial \sigma} \right] + F_C + Q \pm R \tag{38}$$

ここで、*C*は富栄養化関連物質濃度、*Fc*は水平拡散項、*Q*は富栄養化関連物質の負荷量、 *R*は反応項を示す。また、水平拡散項も流動サブモデルと同様に以下のように定義される。

$$F_{C} = \frac{\partial Hq_{x}}{\partial x} + \frac{\partial Hq_{y}}{\partial y}$$
(39)

ここで、

$$q_x = A_H \frac{\partial C}{\partial x}, q_y = A_H \frac{\partial C}{\partial y}$$
(40)

である。

<sup>8</sup> 山本浩一・速水祐一・笠置尚史・濱田孝治・吉野健児・山口創一・片野俊也・吉田誠・大串浩一郎・山田文彦・ 横山勝英(2009):有明海・諌早湾における底泥の再懸濁・沈降に関するマッピング、佐賀大学有明海総合研究プ ロジェクト成果報告集、第5巻

#### 2) 計算項目

水質サブモデルは低次生態系における物質循環を考慮した水質変化を予測するものである。 ここで、流動サブモデルによって計算された物質の交換量および水温・塩分および懸濁物輸送 サブモデルで計算された SS 濃度、巻き上げ・沈降フラックスを入力条件として、水質計算は 行われる。水質サブモデルの解析項目を表 3.1-5 に示す。なお水質サブモデルでは、H<sub>2</sub>S や  $Mn^{2+}$ 、 $Fe^{2+}$ 等の酸化により溶存酸素を消費する物質をひとまとめとし、酸素消費物質(ODU) として解析を行った。ここで、酸素消費物質(ODU)の単位は mgO/L であり、H<sub>2</sub>S や  $Mn^{2+}$ 、 $Fe^{2+}$ 等の還元物質濃度を酸素消費量へ換算したものである。

変数名	独立変数	単位
PHY	植物プランクトン	μg/L
LAVER	ノリ	gC/m <sup>2</sup>
ZOO	動物プランクトン量	mgC/L
POC	懸濁態有機炭素濃度	mgC/L
DOC	溶存態有機炭素濃度	mgC/L
PON	懸濁態有機窒素濃度	mgN/L
DON	溶存態有機窒素濃度	mgN/L
POP	懸濁態有機リン濃度	mgP/L
DOP	溶存態有機リン濃度	mgP/L
NH <sub>4</sub> -N	アンモニア態窒素濃度	mgN/L
NO <sub>x</sub> -N	亜硝酸及び硝酸態窒素の合計濃度	mgN/L
PO <sub>4</sub> -P	リン酸態リン濃度	mgP/L
DO	溶存酸素濃度 mgO/L	
ODU	酸素消費物質 ( $\sum$ H <sub>2</sub> S、 Mn <sup>2+</sup> 、 Fe <sup>2+</sup> 、 CH <sub>4</sub> の合計値)	mgO/L

表 3.1-5 水質サブモデルの解析項目

T-N、T-P、COD 濃度は、以下のように水質サブモデルにおいて独立変数として計算される解析項目の濃度より換算して算出した。

(COD)=(植物プランクトン態 COD)+(動物プランクトン態 COD)+(懸濁態 COD)

- +(溶存態 COD)
- $(T-N) = (TON) + (NH_4-N) + (NO_X-N)$
- $(T P) = (TOP) + (PO_4 P)$
- ここで、(TON)=(植物プランクトン態N)+(動物プランクトン態N)+(PON)+(DON) (TOP)=(植物プランクトン態P)+(動物プランクトン態P)+(POP)+(DOP) とする。

## 3) 水質サブモデルで考慮する過程

水質サブモデルで考慮する過程を表 3.1-6 に示す。

コンパートメント	+	-	±
植物プランクトン(CHL)	光合成	細胞外分泌 呼吸 枯死 ZOO による摂食 沈降 BSF による摂食	_
ノリ(LAVER)	光合成	細胞外分泌 呼吸 枯死 漁獲	_
動物プランクトン(ZOO)	PHY の摂食	排糞 呼吸 死亡	_
溶存酸素(DO)	光合成(PHY)による生産	PHY の呼吸 ZOO の呼吸 POC の好気分解・無機化 DOC の好気分解・無機化 硝化 底泥による消費 ODU の酸化	再ばっ気 底生生物による光合成・呼 吸等 巻上げによる間隙水拡散
懸濁態有機物(POM)	PHY の枯死 ZOO の死亡 ZOO の排糞 流入負荷 巻上げ	分解・無機化 沈降 BSF による摂食	_
溶存態有機物(DOM)	PHY の細胞外分泌 POM の溶存化 流入負荷	分解・無機化	_
アンモニア態窒素 (NH <sub>4</sub> -N)	PHY の呼吸 ZOO の呼吸 POM の分解・無機化 DOM の分解・無機化 流入負荷	PHY の光合成 硝化	底泥からの溶出 底生生物による取り込み・ 排泄等 巻上げによる間隙水拡散
硝酸態窒素(NO <sub>X</sub> -N)	硝化 流入負荷	PHY の光合成	底泥からの溶出 巻上げによる間隙水拡散
リン酸態リン(PO <sub>4</sub> -P)	PHYの呼吸 ZOOの呼吸 POMの分解・無機化 DOMの分解・無機化 流入負荷	PHY の光合成	底泥からの溶出 底生生物による取り込み・ 排泄等 巻上げによる間隙水拡散
酸素消費物質(ODU)	POM の嫌気分解・無機化 DOM の嫌気分解・無機化 底泥からの溶出	DO による酸化	巻上げによる間隙水拡散

表 3.1-6 水質サブモデルで考慮する過程

4) 反応項の基礎方程式

① 植物プランクトン(PHY)

$$\frac{dPHY}{dt} = (光合成) - (細胞外分泌) - (呼吸) - (枯死) - (動物プランクトンによる摂餌) - (沈降) - (底生生物による取り込み) (41)$$

i) 光合成

植物プランクトンの光合成量(gC/m³/day)は以下のように表される。  
(光合成) = 
$$\mu Max_{CHL} \cdot Ft \cdot Fi \cdot Fnp \cdot PHY$$
 (42)

ここで、µMaxcnLは最大成長速度、Ftは光合成に対する水温制限項、Fiは光合成に対する 日射制限項、Fnpは光合成に対する栄養塩制限項である。以下にそれぞれの制限項の表現方法 を示す。

$$Ft(水温制限項) = exp(Q_{10}\mu_{CHL} \times temp)$$
(43)

$$Fi(日射制限項) = \left(\frac{I}{I_{optCHL}}\right)^{0.5} \cdot exp\left(1 - \frac{I}{I_{optCHL}}\right)^{0.5}$$

$$I = I_0 \cdot exp(-KZ_{CHL} \cdot z)$$
(44)

KZ<sub>CHL</sub>は消散係数であるが、有明海特有の底泥の巻上げによる水中のSS濃度の上昇に伴い変化する光環境を表現するため、式(45)に示すようにSS濃度とクロロフィル-a濃度より消散係数を求める推定式を作成した。なお、式(45)は2000~2006年の公共用水域水質調査結果を利用し作成したものである。

$$kz(1/m) = 0.0401 \times SS(mg/L) + 0.01240 * Chl.a(\mu g/L) + 1.0015$$
(45)

$$Fnp(栄養塩制限項) = \frac{2.0}{\left(\left[\frac{1.0}{Fn}\right] + \left[\frac{1.0}{Fp}\right]\right)}$$

$$Fn = \frac{NH_4 - N}{KNH_{CHL} + NH_4 - N} \cdot (1 - Sect_{CHL}) + \frac{NO_X - N}{KNO_{CHL} + NO_X - N} \cdot Sect_{CHL}$$

$$Sect_{CHL} = exp(-\delta_{CHL} \cdot NH_4 - N)$$

$$Fn = \frac{PO_4 - P}{KNO_4 - N}$$

$$Fp = \frac{PO_4 - P}{KPO_{CHL} + PO_4 - P}$$
(46)

ここで、*Qiopichi* は光合成に関する温度係数、*temp* は水温、*I* は水中での日射量、*Ioptchi* は光合成に対する最適日射量、*I*<sub>0</sub>は海水面での日射量、*z* は水深、*Fn* は光合成に対する無機態 窒素の制限項、*Fp* は光合成に対する無機態リンの制限項、*KNHchi* は光合成に対するアンモニア態窒素の半飽和定数、*KNOchi* は光合成に対する硝酸態窒素の半飽和定数、*Sectchi* は光 合成に際する無機態窒素中の硝酸態窒素の利用割合、*Schi* はアンモニア態窒素の選択係数、 *KPOchi* は光合成に対するリン酸態リンの半飽和値である。 ii) 細胞外分泌

植物プランクトンは光合成により固定した有機物の一部を溶存有機物の形態で細胞外に排出する。これを細胞外分泌と呼ぶ。

$$(細胞外分泌) = EXC_{CHL} \cdot (光合成)$$
 (47)

ここで、EXCCHLは光合成に対する分泌の割合である。

iii) 呼吸

光合成によって生産された有機物は呼吸により消費される。  
(呼吸) = 
$$RES_{CHL} \cdot exp(Q_{10}RES_{CHL} \times temp) \cdot PHY$$
 (48)

ここで、RESCHLは呼吸速度、Q10RESCHLは呼吸に関する温度係数、tempは水温である。

iv)枯死

枯死は本来細胞の老化による植物プランクトン生物量の減衰過程であるが、ここでは動物プランクトン以外の高次栄養段階による摂食などモデルには考慮されていない因子を総合的に 表すパラメータとして捉えることとする。

 $(枯死) = MOT_{CHL} \cdot exp(Q_{10}MOT_{CHL} \times temp) \cdot PHY$ (49)

ここで、*MOT*CHLは枯死速度、*Q10MOT*CHLは枯死に関する温度係数、tempは水温である。

v) 沈降

水中での植物プランクトンの沈降を以下のように表す。

$$(沈降) = SetVel_{CHL} \cdot \frac{\partial PHY}{\partial z}$$
 (50)

ここで、Set VelcHLは植物プランクトンの沈降速度である。

vi) 底生生物による取り込み

「底生生物の挙動に係る他項目の増減 (p.329)」において記載する。

② ノリ (LAVER)

ノリの現存量は、以下の式により表される。

$$\frac{dLAVER}{dt} = ([光合成] - [細胞外分泌] - [呼吸] - [枯死] - [漁獲]) - (LAVER - LAVER_{obs}) \cdot \frac{1}{\alpha}$$
(51)

なお、第6項目は観測値と計算値の補正項であり、LAVER<sub>abs</sub>はノリの共販枚数から推定した観測 値、αは補正係数(1/day)である。

i) 光合成

ノリの光合成量(gC/m<sup>3</sup>/day)は以下のように表される。  
(光合成) = 
$$\mu max_{Laver} \cdot FT \cdot FS \cdot FI \cdot FNP$$
 (52)

ここで、µmaxlaverは最大成長速度、FTは光合成に対する水温制限項、FSは光合成に対する 塩分制限項、FIは光合成に対する日射制限項、FNPは光合成に対する栄養塩制限項である。 以下にそれぞれの制限項について示す。ノリのモデル化にあたっては、川口らの研究結果9等を 参考にした。

i-1 水温制限項

光合成に対する水温の制限項は、以下のように表した。

$$FT(水温制限項) = exp(Q_{10}PRO_{laver} \cdot (temp - T_{PROlaver})^{2.0})$$
(53)

`

ここで、*Q10PROlaver*は光合成に関する温度係数、*TPROlaver*は温度係数の基準温度である。 i-2 塩分制限項

光合成に対する塩分の制限項は、以下のように表した。

$$FS( 塩分制限項) = 0.013 + \left( \frac{33.01}{26.73\sqrt{\frac{\pi}{2}}} exp(\frac{-2(S-28.98)^2}{26.73^2}) \right)$$
(54)

ここで、Sは塩分濃度である。

i-3 日射制限項

$$FI(日射制限項) = \frac{I}{I_{opt}} \cdot exp\left(I - \frac{I}{I_{opt}}\right)$$

$$I = I_0 \cdot exp(-kz \cdot z)$$
(55)

ここで、*I*は全天日射量、*I*<sub>opt</sub>は最適日射量、*I*<sub>o</sub>は海表面での日射量、*kz*は消散係数、*z*は水深である。消散係数は、植物プランクトン濃度と懸濁物輸送サブモデルにて計算される SS 濃度の2つの変数を用いて式(45)にて予測した。

<sup>9</sup> 川口修・山本民次・松田治・橋本俊也(2005): 有明海におけるノリと浮遊珪藻の栄養塩競合におよぼす環境諸因子の環境評価、海の研究(Oceanography in Japan)、14(3)、411-427

i-4 栄養塩制限項

ノリの光合成に対する栄養塩の制限項は、以下のように表した。

$$FNP( \# {\baselineskiplimits} {\baselineskiplimits} ENP( {\baselineskiplimits} {\baselineskiplimits} {\baselineskiplimits} = \frac{2.0}{\left(\left[\frac{1.0}{FN}\right] + \left[\frac{1.0}{FP}\right]\right)}$$

$$FN = \frac{\left(DIN\right)}{\left(DIN + KDIN\right)}, \quad DIN = NH_4 - N + NO_X - N \quad (56)$$

$$FP = \frac{\left(DIP\right)}{\left(DIP + KDIP(=0.0)\right)} = 1.0, \quad DIP = PO_4 - P$$

ここで、FNは光合成に対する無機態窒素の制限項、FPは光合成に対する無機態リンの制限 項、KDINは光合成に対する無機態窒素の半飽和定数、KDIPは光合成に対するリン酸態リン の半飽和値である。ここで、ノリの成長に対してリンが制限因子になることはないものと仮定 し、KDIPをゼロ(FP=1。0(一定))とした。

ii) 細胞外分泌

ノリは光合成により固定した有機物の一部を溶存有機物の形態で細胞外に排出するものとした。

(細胞外分泌) = 
$$EXC_{laver} \cdot ($$
光合成) (57)

ここで、EXClaverは光合成に対する分泌の割合である。

iii) 呼吸

光合成によって生産された有機物は呼吸により消費される。  
(呼吸) = 
$$RES_{laver} \cdot exp(Q_{10}RES_{laver} \cdot (temp - T_{RESlaver})) \cdot LAVER$$
 (58)

ここで、*RESlaver*は呼吸速度、*Q10RESlaver*は呼吸に関する温度係数、*TRESlaver*は呼吸速度の 基準温度である。

iv) 枯死

ノリの枯死量は以下の式にて表す。  
(枯死)=
$$MOT_{laver} \cdot exp(Q_{10}MOT_{laver} \cdot (temp - T_{MOT laver})) \cdot LAVER$$
 (59)

ここで、*MOT*<sub>laver</sub> は枯死速度、*Q*<sub>10</sub>*MOT*<sub>laver</sub> は枯死に関する温度係数、*T*<sub>MOTIaver</sub> は枯死速度の基準温度である。

③ 動物プランクトン

$$\frac{dZOO}{dt} = (摂餌) - (排糞) - (呼吸) - (死亡)$$
(60)

i) 摂餌

植食性動物プランクトンの摂食に関する研究によれば、餌料濃度がある値以下になると摂餌が行われなくなるような閾値が存在し、また濾過器の能力にも餌を取り込み消化することが出来なくなる上限値が存在すると考えられている。動物プランクトンの摂餌量(gC/m³/day)は以下のように表される。

$$(I!) = GRA_{ZOO} \cdot exp(Q_{10}GRA_{ZOO} \times temp) \cdot \left[ 1 - exp \left\{ \lambda_{ZOO} \left( \prod^* - \prod \right) \right\} \right] \cdot ZOO$$
(61)

ここで、GRAzooは最大摂餌速度、 $Q_{10}GRAzoo$ は摂餌に関する温度係数、 $\Lambda_{200}$ は Ivlev 定数、  $\Pi$ \*は餌料濃度の閾値、 $\Pi$ は飼料濃度である。ここで、餌料濃度は植物プランクトン濃度とした。

ii) 排糞

排糞は動物プランクトンの同化効率を 
$$Assizoo$$
として、以下のように表される。  
(排糞)= $(I - Assi_{ZOO}) \cdot (摂餌)$  (62)

iii) 呼吸(排泄)

呼吸は基礎代謝量と摂食活動に伴うエネルギーの消費量との和として表現される。  
(呼吸)=(
$$Assi_{ZOO} - GRW_{ZOO}$$
)·(摂餌) (63)

ここで、GRWzooは動物プランクトンの総成長効率である。

iv) 死亡

植物プランクトンの枯死同様に、動物プランクトンの死亡を以下のように表現する。 (死亡) =  $MOT_{ZOO} \cdot exp(Q_{10}MOT_{ZOO} \times temp) \cdot ZOO$  (64)

ここで、*MOTzoo*は動物プランクトンの死亡速度、*QioMOTzoo*は死亡に関する温度係数である。

④ 懸濁態有機物 (POC、PON、POP)

モデルにおける懸濁態有機物のコンパートメントは、懸濁態有機炭素 POC と、窒素 PON、およびリン POP (mg/L)の3 形態である。

$\frac{dPOM}{dt} =$	=(植物プランクトン・ノリの枯死)+(動物プランクトンの死亡)+(動物プランクトンの排糞)
	- (分解・無機化) - (沈降) + (巻上げ) - (底生生物による取り込み) + (流入負荷)

ここで、POM は炭素・窒素・リンの総称である。

i) 植物プランクトン・ノリの枯死による増加

ここで、*rCN<sub>cHL</sub>*は植物プランクトンの CN 比(重量比)、*rCP<sub>cHL</sub>*は植物プランクトンの CP 比(重量比)である。

ノリの枯死についても同様の式形にて表される。

ii) 動物プランクトンの死亡と排糞による増加

動物プランクトンの死亡および排糞によって形成される懸濁態有機物は以下のように表される。

(動物プランクトンの死亡・排糞によるPOC増加)= 
$$\{( \mathcal{R} \stackrel{\cdot}{\leftarrow}) + ( \stackrel{\cdot}{\#} \stackrel{*}{\pm}) \}$$
  
(動物プランクトンの死亡・排糞によるPON増加)=  $\{( \mathcal{R} \stackrel{\cdot}{\leftarrow}) + ( \stackrel{\cdot}{\#} \stackrel{*}{\pm}) \}$ /  
(動物プランクトンの死亡・排糞によるPOP増加)=  $\{( \mathcal{R} \stackrel{\cdot}{\leftarrow}) + ( \stackrel{\cdot}{\#} \stackrel{*}{\pm}) \}$ /  
(67)

ここで、*rCNzoo*は動物プランクトンの CN 比(重量比)、*rCPzoo*は動物プランクトンの CP 比(重量比)である。

iii)分解・無機化による減少

懸濁態有機物の分解・無機化量は、以下のように表される。

(懸濁態有機炭素の分解・無機化) =  $Min_{POC} \cdot exp(Q_{10}Min_{POC} \times temp) \cdot POC$ 

(懸濁態有機窒素の分解・無機化) =  $Min_{PON} \cdot exp(Q_{10}Min_{PON} \times temp) \cdot PON$ 

(懸濁態有機リンの分解・無機化) =  $Min_{POP} \cdot exp(Q_{10}Min_{POP} \times temp) \cdot POP$  (68)

ここで、Minpocは懸濁態有機炭素の分解速度、Minpowは懸濁態有機窒素の分解速度、Minpop は懸濁態有機リンの分解速度、QuaMinpoc、QuaMinpow、QuaMinpopは分解・無機化に関する 温度係数である。 iv) 沈降による減少

懸濁態有機物の水中での沈降を以下のように表す。

ここで、Set Velpomは懸濁態有機物の沈降速度である。

v) 巻上げによる増加

懸濁態有機物の巻上げ量は、懸濁物輸送サブモデルで算定された SS の巻上げフラックスに 底泥の有機物濃度を乗じて算定した。

vi) 底生生物による取り込み 「底生生物の挙動に係る他項目の増減 (p.329)」において記載する。 ⑤ 溶存態有機物 (DOC、DON、DOP)

モデルにおける溶存態有機物のコンパートメントは、溶存態有機炭素 DOC と、窒素 DON、およびリン DOP (mg/L)の3 形態である。

 $\frac{dDOM}{dt} = (植物プランクトン・ノリの分泌) + (懸濁態有機物の溶存化) - (分解・無機化) + (流入負荷)$ 

(70)

ここで、DOM は炭素・窒素・リンの総称である。

i) 植物プランクトン・ノリの分泌による増加

植物プランクトンの細胞外分泌によって形成される溶存態有機物は以下のように表される。 (植物プランクトンの分泌によるDOC増加)=(植物プランクトンの細胞外分泌) (植物プランクトンの分泌によるDON増加)=<sup>(植物プランクトンの細胞外分泌)</sup>/ (植物プランクトンの分泌によるDOP増加)=<sup>(植物プランクトンの細胞外分泌)</sup>/ (植物プランクトンの分泌によるDOP増加)=(植物プランクトンの細胞外分泌)/ (71)

ここで、*rCNcHL*は植物プランクトンの CN 比(重量比)、*rCPcHL*は植物プランクトンの CP 比(重量比)である。ノリの細胞外分泌についでも同様の式形にて表される。

ii) 懸濁物有機物の溶存化による増加

懸濁態有機物の分解・無機化に伴って、その一部は無機化されずに溶存態有機物に移行する もの(溶存化)とした。

(懸濁態有機炭素の溶存化)=(懸濁態有機炭素の分解 無機化)・rPDC (懸濁態有機窒素の溶存化)=(懸濁態有機窒素の分解 無機化)・rPDN (懸濁態有機リンの溶存化)=(懸濁態有機リンの分解 無機化)・rPDP

ここで、*rPDC*は懸濁態有機炭素の分解・無機化量に対する溶存化の割合、*rPDN*は懸濁態 有機窒素の分解・無機化量に対する溶存化の割合、*rPDP*は懸濁態有機リンの分解・無機化量 に対する溶存化の割合である。

iii)分解・無機化による減少

溶存態有機物の分解・無機化量は、以下のように表される。 (溶存態有機炭素の分解・無機化) =  $Min_{DOC} \cdot exp(Q_{10}Min_{DOC} \times temp) \cdot DOC$ 

(溶存態有機窒素の分解・無機化) =  $Min_{DON} \cdot exp(Q_{10}Min_{DON} \times temp) \cdot DON$ 

(溶存態有機リンの分解・無機化)=Min<sub>DOP</sub> · exp(Q<sub>10</sub>Min<sub>DOP</sub> × temp) · DOP

(73)

(72)

ここで、MinDocは溶存態有機炭素の分解速度、MinDowは溶存態有機窒素の分解速度、MinDow は溶存態有機リンの分解速度、QuaMinDoc、QuaMinDow、QuaMinDowは分解・無機化に関する 温度係数である。

⑥ アンモニア態窒素(NH4-N)

$\left  \frac{dNH_4 - N}{dt} \right  = -($ 光合成による消費) + (植物プランクトン・ノリの呼吸) + (動物プランクトンの呼吸)
+ (懸濁態有窒素の分解・無機化)+ (溶存態有機窒素の分解・無機化)
- (硝化)±(底泥からの溶出)±(巻上げに伴う間隙水の拡散)
±(底生生物による取り込み・排泄等)+(流入負荷)

(74)

i) 光合成に伴う消費

植物プランクトンの光合成に伴うアンモニア態窒素の減少量は以下のように表される。 (光合成による減少)=<sup>(植物プランクトンの光合成)</sup>/ /rCN<sub>CHL</sub>·(*I-Sect<sub>CHL</sub>*) (75)

ここで、*rCNcHL*は植物プランクトンのCN比、*SectCHL*は光合成に際する無機態窒素中の硝酸態窒素の利用割合である。またノリについても同様の式形で表される。

ii) 植物プランクトン・ノリの呼吸による増加

植物プランクトンの呼吸によるアンモニア態窒素の増加量は以下のように表される。

(植物プランクトンの呼吸による増加)=(植物プランクトンの呼吸)/  

$$rCN_{CHL}$$
 (76)

ここで、*rCNcHL*は植物プランクトンの CN 比である。またノリについても同様の式形で表 される。

iii)動物プランクトンの呼吸による増加

ここで、rCNzooは動物プランクトンのCN比である。

iv) 懸濁態有機窒素の分解・無機化による増加

懸濁態有機窒素の分解・無機化に伴うアンモニア態窒素の増加量は以下のように表される。 (懸濁態有機窒素の分解・無機化による増加)=

(懸濁態有機窒素の分解・無機化)·(1 - rPDN) (78)

ここで、rPDNは懸濁態有機窒素の分解・無機化量に対する溶存化の割合である。

v) 溶存態有機窒素の分解・無機化による増加

溶存態有機窒素の分解・無機化に伴うアンモニア態窒素の増加量は以下のように表される。 (溶存態有機窒素の分解・無機化による増加)=(溶存態態有機窒素の分解・無機化) (79)

vi) 硝化による減少

硝化菌によるアンモニア態窒素の硝化過程に関しては、1 次反応に従うとして以下のように 表される。

(硝化)=
$$rNif \cdot exp(Q_{10}Nif \times temp) \cdot \frac{DO}{(KNif_{DO} + DO)} \cdot NH_4 - N$$
(80)

ここで、*rNif*は硝化速度、*Q*<sub>10</sub>*Nif*は硝化に関する温度係数、*KNifpo*は硝化に対する溶存酸素の半飽和値である。

vii) 底泥からの溶出

底泥からのアンモニア態窒素の溶出量は、底質サブモデルにて解析される間隙水中濃度と直 上水濃度の交換量から算定される。

viii) 巻上げに伴う間隙水の拡散

巻上げに伴うアンモニア態窒素の拡散量は、懸濁物輸送サブモデルで算定された SS の巻上 げに伴い底泥表層の間隙水も直上水に拡散すると仮定し、巻上げフラックスに底泥の空隙率と 底泥内の間隙水濃度を乗じて算定される。

ix) 底生生物による増減

「底生生物の挙動に係る他項目の増減 (p.329)」において示す。

⑦ 硝酸態窒素と亜硝酸態窒素の合計濃度 (NOx-N)

$$\frac{dNO_{X} - N}{dt} = -(2) + (1)$$

i) 光合成に伴う消費

植物プランクトンの光合成に伴う硝酸態窒素の減少量は以下のように表される。

ここで、*rCNcHL*は植物プランクトンのCN比、*SectcHL*は光合成に際する無機態窒素中の硝酸態窒素の利用割合である。ノリについても同様の式形で表される。

ii) 硝化による増加

「⑥アンモニア態窒素(NH4-N)(p.308)」を参照されたい。

iii) 底泥からの溶出

底泥からの硝酸態窒素の溶出量は、底質サブモデルにて解析される間隙水中濃度と直上水濃 度の交換量から算定される。

iv) 巻上げに伴う間隙水の拡散

巻上げに伴う硝酸態窒素と亜硝酸態窒素の合計濃度の拡散量は、懸濁物輸送サブモデルで算 定された SS の巻上げに伴い底泥表層の間隙水も直上水に拡散すると仮定し、巻上げフラック スに底泥の空隙率と底泥内の間隙水濃度を乗じて算定される。

リン酸態リン(PO<sub>4</sub>-P)

$\left  \frac{dPO_4 - P}{dt} \right  = -($ 光合成による消費)+(植物プランクトン・ノリの呼吸)+(動物プランクトンの呼吸)
+(懸濁態有機リンの分解・無機化)+(溶存態有機リンの分解・無機化)
±(底泥からの溶出)±(巻上げに伴う間隙水の拡散)
±(底生生物による取り込み・排泄等)+(流入負荷)

(83)

i) 光合成に伴う消費

植物プランクトンの光合成に伴うリン酸態リンの減少量は以下のように表される。 (光合成による減少)=<sup>(植物プランクトンの光合成)</sup>/ /rCP<sub>CHL</sub> (84)

ここで、rCPCHLは植物プランクトンのCP比である。またノリについても同様の式形で表さ れる。

ii) 植物プランクトン・ノリの呼吸による増加

植物プランクトンの呼吸によるリン酸態リンの増加量は以下のように表される。

(植物プランクトンの呼吸による増加)=(植物プランクトンの呼吸)/  

$$rCP_{CHL}$$
 (85)

ここで、rCPcHLは植物プランクトンのCP比である。またノリについても同様の式形で表さ れる。

iii) 動物プランクトンの呼吸による増加

動物プランクトンの呼吸によるリン酸態リンの増加量は以下のように表される。 (動物プランクトンの呼吸による増加)=(動物プランクトンの呼吸)/ rCP<sub>ZOO</sub> (86)

ここで、rCPzooは動物プランクトンの CP 比である。

iv) 懸濁態有機リンの分解・無機化による増加

懸濁態有機リンの分解・無機化に伴うリン酸態リンの増加量は以下のように表される。 (懸濁態有機リンの分解・無機化による増加)=

(懸濁態有機リンの分解・無機化)・(1 – rPDP)

(87)

ここで、rPDPは懸濁態有機リンの分解・無機化量に対する溶存化の割合である。

v)底泥からの溶出

底泥からのリン酸熊リンの溶出量は、底質サブモデルにて解析される間隙水中濃度と直上水 濃度の交換量から算定される。

vi) 巻上げに伴う間隙水の拡散

巻上げに伴うリン酸態リン濃度の拡散量は、懸濁物輸送サブモデルで算定された SS の巻上 げに伴い底泥表層の間隙水も直上水に拡散すると仮定し、巻上げフラックスに底泥の空隙率と 底泥内の間隙水濃度を乗じて算定される。

vii) 底生生物による増減

「底生生物の挙動に係る他項目の増減 (p.329)」において示す。

寥 溶存酸素 (DO)

i) 光合成による生産

植物プランクトンの光合成に伴う溶存酸素の生産量は以下のように表される。 (光合成による生産)=(植物プランクトンの光合成)・rOC<sub>CHL</sub>

ここで、*rOC*cHLは植物プランクトンの OC 比(酸素/炭素比)である。またノリについても同様の式形で表される。

(89)

ii) 植物プランクトン・ノリの呼吸による消費

植物プランクトンの呼吸による溶存酸素の消費量は以下のように表される。 (植物プランクトンの呼吸による消費)=(植物プランクトンの呼吸)· $rOC_{CHL}$  (90)

ここで、*rOC*cHLは植物プランクトンの OC 比(酸素/炭素比)である。またノリについても 同様の式形で表される。

iii) 動物プランクトンの呼吸による消費

動物プランクトンの呼吸による溶存酸素の消費量は以下のように表される。 (動物プランクトンの呼吸による消費)=(動物プランクトンの呼吸)・rOC<sub>zoo</sub> (91)

ここで、rOCzooは動物プランクトンのOC比(酸素/炭素比)である。

iv) 懸濁態有機物の好気的分解・無機化による消費

懸濁態有機物の好気的分解・無機化に伴う酸素消費量は以下のように表される。 (懸濁態有機物の好気分解・無機化による消費)=

(懸濁態有機炭素の分解・無機化)  $rOC_{POM} \cdot \frac{DO}{KMinP_{DO} + DO}$ 

$rOC_{POM} = \frac{32.0 \cdot PM + 2.0 \cdot PN}{12.0 \cdot PM}$	
$PM = \frac{POC/12.0}{POP/31.0}$ , $PN = \frac{PON/14.0}{POP/31.0}$	(92)

ここで、*KMinPpo*は懸濁態有機物の好気的分解・無機化に対する溶存酸素の半飽和値である。

v) 溶存態有機物の好気的分解・無機化による消費 溶存態有機物の好気的分解・無機化に伴う酸素消費量は以下のように表される。 (溶存態有機物の好気分解・無機化による消費)=

(溶存態有機炭素の分解・無機化)·
$$rOC_{DOM}$$
· $\frac{DO}{KMinD_{DO} + DO}$ 

$$rOC_{DOM} = \frac{32.0 \cdot PM + 2.0 \cdot PN}{12.0 \cdot PM}$$
$$PM = \frac{DOC/12.0}{DOP/31.0} , PN = \frac{DON/14.0}{DOP/31.0}$$
(93)

ここで、KMinDooは溶存態有機物の好気的分解・無機化に対する溶存酸素の半飽和値である。

vi) 硝化による消費

硝化に伴う酸素消費量は化学反応式に基づき、以下のように表される。  $(NH_4^+ + 2O_2 + 2HCO_3^- \rightarrow NO_3^- + 2CO_2 + 3H_2O)$ (硝化による消費)= $\frac{64.0}{14.0}$ ·(硝化) (94)

vii) 底泥による直接的な酸素消費

底泥による酸素消費量は、底質サブモデルにて解析される間隙水中の溶存酸素濃度と直上水 中の溶存酸素濃度の交換量から算定される。

viii)酸素消費物質(ODU)の酸化に伴う消費

水中において酸素消費物質(ODU)が溶存酸素によって酸化される過程を考慮する。水質サブ モデルでは、底質サブモデルで計算される Mn<sup>2+</sup>、Fe<sup>2+</sup>、H<sub>2</sub>S、CH<sub>4</sub>+が底泥から溶出し、水中 に存在する場合には、これらを酸素消費量に換算し合計した ODU(Oxigen Demand Unit)とし て解析をおこなっている。そのため、ODU の酸化速度はそれぞれの還元物質の存在量によっ て少なからず変化するものと考えられるが、本モデルでは還元物質の大部分が H<sub>2</sub>S であると仮 定し、H<sub>2</sub>S の酸化速度を ODU の酸化速度として用いた。以下のモデル式によって ODU の酸 化にともなう酸素消費量は表現される。

$$(ODUの酸化に伴う消費) = Oxi_{ODU} \cdot DO \cdot ODU$$
 (95)

ここで、Oxiopuは水中でのODUの酸化速度である。

ix) 巻上げに伴う間隙水の拡散

巻上げに伴う溶存酸素濃度の拡散量は、懸濁物輸送サブモデルで算定された SS の巻上げに 伴い底泥表層の間隙水も直上水に拡散すると仮定し、巻上げフラックスに底泥の空隙率と底泥 内の間隙水濃度を乗じて算定される。

x) 底生生物による増減

「底生生物の挙動に係る他項目の増減 (p.329)」において記載する。

xi) 再ばっ気

海表面における大気と海水間の酸素濃度の交換量(再ばっ気)は以下のように表される。

(再ばっ気による増減) = 
$$Rair \cdot (DO_{sat} - DO)$$
  
 $ln DO_{sat} = A_1 + A_2(100/temp) + A_3 ln(temp / 100) + A_4(temp / 100)$   
 $+ sali \cdot \{B_1 + B_2(temp / 100) + B_3(temp / 100)^2\}$ 
(96)

ここで、*Rair*は再ばっ気係数、*DOsat*は酸素飽和濃度、*temp*は水温、*sali*は塩分であり、本 モデルでは酸素飽和濃度(*DOsat*)の算定には Weiss の式<sup>10</sup>を用いた。

係数	単位	
	ml/l	ml/kg
A <sub>1</sub>	-173.4292	-177.7888
$A_2$	249.6339	255.5907
A <sub>3</sub>	143.3483	146.4813
$A_4$	-21.8492	-22.2040
$B_1$	-0.033096	-0.037362
$\mathbf{B}_2$	0.014259	0.016504
$B_3$	-0.0017000	-0.0020564

表 3.1-7 Weiss の式による酸素飽和度算定の係数

<sup>10</sup> 海洋観測指針(第1部)、編集 気象庁、気象業務支援センター、1999

⑩ 酸素消費物質(ODU)

$\frac{dODU}{dt} = ($ 懸濁態有機物の嫌気的分解・無機化による生産)	
+ (溶存態有機物の嫌気的分解・無機化による生産)	
+(底泥からの溶出)-(溶存酸素による酸化)	
±(巻上げに伴う間隙水の拡散)	

(97)

(98)

i) 懸濁態有機物の嫌気的分解・無機化による生産

懸濁態有機物の嫌気的分解・無機化に伴う ODU の生産量は以下のように表される。 (懸濁態有機物の嫌気的分解・無機化による生産)=

(懸濁態有機炭素の分解・無機化)·
$$rOC_{POM}$$
· $\left(1 - \frac{DO}{KMinP_{DO} + DO}\right)$ 

$$rOC_{POM} = \frac{32.0 \cdot PM + 2.0 \cdot PN}{12.0 \cdot PM}$$
$$PM = \frac{POC/12.0}{POP/31.0} \quad , \quad PN = \frac{PON/14.0}{POP/31.0}$$

ここで、KMinPooは懸濁態有機物の好気的分解・無機化に対する溶存酸素の半飽和値である。

ii) 溶存態有機物の好気的分解・無機化による消費

溶存態有機物の嫌気的分解・無機化に伴う ODU の生産量は以下のように表される。 (溶存態有機物の嫌気分解・無機化による生産)=

(溶存態有機炭素の分解・無機化)・
$$rOC_{DOM} \cdot \left(1 - \frac{DO}{KMinD_{DO} + DO}\right)$$
  
 $rOC_{DOM} = \frac{32.0 \cdot PM + 2.0 \cdot PN}{1 - \frac{32.0 \cdot PM}{1 - \frac{1}{200} + \frac{1}{200}}$ 

$$PM = \frac{DOC/12.0}{DOP/31.0} , PN = \frac{DON/14.0}{DOP/31.0}$$
(99)

ここで、KMinDooは溶存態有機物の好気的分解・無機化に対する溶存酸素の半飽和値である。

iii) 底泥からの溶出

底泥からの酸素消費物質(ODU)の溶出量は、底質サブモデルにて解析される間隙水中の酸素 消費物質(ODU)濃度と直上水中の酸素消費物質(ODU)濃度の交換量から算定される。

iv) 溶存酸素による酸化

「⑨溶存酸素 (DO) (p.311)」を参照されたい。

v) 巻上げに伴う間隙水の拡散

巻上げに伴う酸素消費物質(ODU)の拡散量は、懸濁物輸送サブモデルで算定された SS の巻上げに伴い底泥表層の間隙水も直上水に拡散すると仮定し、巻上げフラックスに底泥の空隙率と底泥内の間隙水中の酸素消費物質濃度(ODU)を乗じて算定される。

# (4) 底質サブモデル

1) 計算項目

底質サブモデルにて、計算する項目を表 3.1-8 に示す。

変数名		独立変数	単位
TOC		底泥中の全有機炭素	mgC/g-dry
TON	固相+ 液相	底泥中の全有機窒素	mgN/g-dry
TOP		底泥中の全有機リン	mgP/g-dry
NH4-N	液相	間隙水中のアンモニア態窒素	mgN/L
NO <sub>x</sub> -N		間隙水中の亜硝酸および硝酸態窒素	mgN/L
PO <sub>4</sub> -P		間隙水中のリン酸態リン	mgP/L
DO		間隙水中の溶存酸素	mgO/L
SO42-		間隙水中の硫酸イオン	mgS/L
Mn <sup>2+</sup>		間隙水中の Mn(II) イオン	mgMn/L
<i>Fe</i> <sup>2+</sup>		間隙水中の Fe(II)イオン	mgFe/L
$\Sigma H_2 S$		間隙水中のΣH <sub>2</sub> S(=H <sub>2</sub> S+HS <sup>-</sup> )	mgS/L
CH4		間隙水中のメタン	mgC/L
MnO <sub>2</sub>	固相	底泥中の二酸化マンガン	mgMn/g-dry
Fe(OH)3		底泥中の水酸化鉄	mgFe/g-dry
FeS		底泥中の硫化鉄	mgS/g-dry
FeS <sub>2</sub>		底泥中の黄鉄鉱	mgS/g-dry
S <sup>0</sup>		元素状硫黄	mgS/g-dry
$DNH_{4^{+}}$		吸着態のアンモニア態窒素	mgN/g-dry
DPO4		吸着態のリン酸態リン	mgP/g-dry

表 3.1-8 底質サブモデルの計算項目

## 2) 底質サブモデルで考慮する過程

底質サブモデルで考慮する過程を表 3.1-9 に示す。

コンパートメント	+		±
有機態炭素(TOC)	水中からの沈降	分解・無機化 巻上げ、堆積	_
有機態窒素(TON)	水中からの沈降	- 分解・無機化 巻上げ、堆積	_
有機態リン(TOP)	水中からの沈降	分解・無機化 巻上げ、堆積	
アンモニア態窒素(NH <sub>4</sub> -N)	有機物の無機化 硝酸還元	硝化	分子拡散、巻上げ 吸脱着
硝酸態窒素(NO <sub>X</sub> -N)	硝化	硝酸還元 脱窒	分子拡散、巻上げ
リン酸態リン(PO <sub>4</sub> -P)	有機物の無機化	-	吸脱着、巻上げ
溶存酸素(DO)	_	有機物の無機化 硝化 還元物質の酸化 (Mn <sup>2+</sup> 、Fe <sup>2+</sup> 、H <sub>2</sub> S、CH <sub>4</sub> 、FeS、 FeS <sub>2</sub> )	分子拡散、巻上げ
硫酸イオン(SO <sub>4</sub> <sup>2</sup> )	O <sub>2</sub> による H <sub>2</sub> S の酸化 O <sub>2</sub> による FeS の酸化 S <sup>0</sup> の水和反応	有機物の無機化 SO <sub>4</sub> <sup>2</sup> による CH <sub>4</sub> の酸化	分子拡散
マンガン(Ⅱ)イオン(Mn <sup>2+</sup> )	有機物の無機化 Fe <sup>2+</sup> による MnO <sub>2</sub> の還元 H <sub>2</sub> S による MnO <sub>2</sub> の還元	O <sub>2</sub> による Mn <sup>2+</sup> の酸化	分子拡散
鉄(II)イオン(Fe <sup>2+</sup> )	有機物の無機化 H <sub>2</sub> SによるFe(OH) <sub>3</sub> の還元 O <sub>2</sub> によるFeSの酸化 O <sub>2</sub> によるFeS <sub>2</sub> の酸化	O <sub>2</sub> による Fe <sup>2+</sup> の酸化 Fe <sup>2+</sup> による MnO <sub>2</sub> の還元	分子拡散 HS <sup>-</sup> と Fe <sup>2+</sup> の沈殿作用
二酸化マンガン(MnO <sub>2</sub> )	<b>O</b> <sub>2</sub> による <b>Mn<sup>2+</sup>の酸化</b> 水中からの沈降	有機物の無機化 Fe <sup>2+</sup> による MnO <sub>2</sub> の還元 H <sub>2</sub> S による MnO <sub>2</sub> の還元	_
水酸化鉄(Fe(OH) <sub>3</sub> )	O <sub>2</sub> による Fe <sup>2+</sup> の酸化 Fe <sup>2+</sup> による MnO <sub>2</sub> の還元 水中からの沈降	有機物の無機化 H <sub>2</sub> SによるFe(OH) <sub>3</sub> の還元	_
硫化鉄(FeS)	水中からの沈降	O <sub>2</sub> によるFeSの酸化 FeS とH <sub>2</sub> Sの沈殿作用 FeS とS <sup>0</sup> の沈殿作用	HS <sup>-</sup> と Fe <sup>2+</sup> の沈殿作用
黄鉄鉱(FeS2)	FeS と H <sub>2</sub> S の沈殿作用 FeS と S <sup>0</sup> の沈殿作用 水中からの沈降	O <sub>2</sub> による FeS <sub>2</sub> の酸化	_
元素状硫黄(S <sup>0</sup> )	H <sub>2</sub> S による MnO <sub>2</sub> の還元 H <sub>2</sub> S による Fe(OH) <sub>3</sub> の還元 水中からの沈降	FeS と S <sup>0</sup> の沈殿作用 S <sup>0</sup> の水和反応	
硫化水素(ΣH <sub>2</sub> S)*	有機物の無機化 SO4 <sup>2</sup> によるCH4の酸化 S <sup>0</sup> の水和反応	O <sub>2</sub> による H <sub>2</sub> S の酸化 H <sub>2</sub> S による MnO <sub>2</sub> の還元 H <sub>2</sub> S による Fe(OH) <sub>3</sub> の還元 FeS と H <sub>2</sub> S の沈殿作用	分子拡散 HS <sup>-</sup> と Fe <sup>2+</sup> の沈殿作用
吸着態アンモニア態窒素 (DNH₄-N)	-	**	吸脱着
	_	**	吸脱着

表 3.1-9 底質サブモデルで考慮する過程

\* 硫化水素は、硫化水素(H<sub>2</sub>S)と硫化水素イオン(HS)の合計値(ΣH<sub>2</sub>S)として算出され、pH と酸解離定数によってそれ ぞれの存在比が決定される

\*\* 吸着態の栄養塩類に対する生物作用に関しては、知見が乏しいため考慮していない

\*\*\*マンガン・鉄・硫黄の巻上げによる増減は、これら物質の水中での知見が乏しいため考慮していない

3) 底質サブモデルで考慮する生物化学反応式 底質サブモデルで考慮する化学反応式を表 3.1-10 に示す。



ここで x/y は有機物の C/N 比を表す

2 3.1 10 (2) 広員サンモノルC 与思する「七子(文化)+(X)(行(法(初の))力)件・無(後)(1) 、	
<u>1) 酸素による還元物質の酸化</u>	
$NH_4^+ + 2O_2 + 2HCO_3^- \rightarrow NO_3^- + 2CO_2 + 3H_2O$	(106)
$Mn^{2+} + \frac{1}{2}O_2 + 2HCO_3^- \rightarrow MnO_2 + 2CO_2 + H_2O$	(107)
$Fe^{2+} + \frac{1}{4}O_2 + 2HCO_3^- + \frac{1}{2}H_2O \rightarrow Fe(OH)_3 + 2CO_2$	(108)
$\sum H_2 S + 2O_2 + 2HCO_3^- \rightarrow SO_4^{2-} + 2CO_2 + 2H_2O$	(109)
$FeS + 2O_2 \rightarrow Fe^{2+} + SO_4^{2-}$	(110)
$FeS_2 + \frac{7}{2}O_2 + H_2O \rightarrow Fe^{2+} + 2SO_4^{2-} + 2H^+$	(111)
$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$	(112)
2) マンガン・鉄酸化物による還元物質の酸化	_
$MnO_2 + 2Fe^{2+} + HCO_3^- + H_2O \rightarrow Mn^{2+} + 2Fe(OH)_3 + 2CO_2$	(113)
$MnO_2 + \sum H_2S + 2CO_2 \rightarrow Mn^{2+} + S^0 + 2HCO_3^-$	(114)
$2Fe(OH)_3 + H_2S + 4CO_2 \rightarrow 2Fe + S^0 + 4HCO_3^- + 2H_2O$	(115)
3) 硫酸イオンによる還元物質の酸化	
$CH_4 + SO_4^{2-} + CO_2 \rightarrow 2HCO_3^- + \sum H_2S$	(116)
<u>4</u> ) 沈殿作用	
$Fe^{2+} + HS^- + HCO_3^- \leftrightarrow FeS \downarrow + CO_2 + H_2O$	(117)
$FeS + H_2S \rightarrow FeS_2 \downarrow + H_2$	(118)
$FeS + S^0 \rightarrow FeS_2 \downarrow$	(119)
$S^{0} + H_{2}O \rightarrow \frac{3}{4}H_{2}S + \frac{1}{4}SO_{4}^{2-} + \frac{1}{2}H^{+}$	(120)

表 3.1-10(2) 底質サブモデルで考慮する化学反応式(有機物の分解・無機化) 11、12

<sup>&</sup>lt;sup>11</sup> J.W.M.Wijsman , P.M.J.Herman , J.J.Middelburg and K.Soetaert (2002): A model for Earl Diagenetic Processes in Sediments of the Continental Shelf of the Black Sea, *EStnuarine*, *CoaStnal and Shelf Science*, Vol.54, pp.403-421.

<sup>&</sup>lt;sup>12</sup> NERI Technical Report(2004): A model set-up for an oxygen and nutrient flux model for Aarhus Bay(Denmark), No.483, pp.1-67

- 4) 生化学過程を表現するモデル式
- ① 底泥内の有機物(mg/g-dry) (TOC、TON、TOP)

$\frac{d(TOM_{i})}{dt} = -( 酸素還元_{i} + 硝酸還元_{i} + マンガン還元_{i} + 鉄還元_{i} + 硫酸還元_{i}$	
+ メタン発酵 i)	
+ $(沈降_i) - (堆積_i) - (巻上げ_i) (i = 1 \sim 3)$	
(12	21)

ここで、TOM は全有機態炭素、窒素、リンの総称である。

底質サブモデルでは、有機物を分解速度の異なる3つの分画(*i*=1 易分解性、*i*=2 難分解性、 *i*=3 不活性物質)に区分している。また有機態の炭素・窒素・リンの分解速度は個々に与えて おり、マンガン・鉄・硫黄、溶存酸素の循環は炭素の循環と共役させて解析を行っている。

$$\frac{d(NH_4 - N)}{dt} = \sum_{i=1}^{3} (TONの酸素還元_i + TONの硝酸還元_i + TONのマンガン還元_i 
+ TONの鉄還元_i + TONの硫酸還元_i + TONのメタン発酵_i) \cdot \frac{(1 - \phi)}{\phi} \cdot \gamma_s 
-(硝化) + (硝酸還元) \pm (吸脱着) \pm (分子拡散) \pm (巻上げによる拡散)$$
(122)

底泥において NH4-N は、TON の分解・無機化過程において生成される。好気条件下においては、生成された NH4-N は硝化菌により NO3-N に酸化される (硝化)。逆に嫌気条件下では、NO3-N が NH4-N へと一部還元される (硝酸還元)。また NH4-N はイオン交換部位として土粒子に吸着されやすく、底泥内における吸脱着現象による濃度変動も無視できない。

③ 硝酸態窒素と亜硝酸態窒素の合計濃度(mgN/L)

$$\frac{d(NO_X - N)}{dt} = (硝化) - (硝酸還元) - (脱窒) \pm (分子拡散) \pm (卷上げによる拡散)$$
(123)

底泥内において NO<sub>x</sub>-N (ここでは NO<sub>3</sub>-N と NO<sub>2</sub>-N の合計値を示す)は、好気条件下において NH<sub>4</sub>-N の酸化(硝化)により生成される。また底泥内の溶存酸素が枯渇した環境下では有機物の無機化に伴う硝酸還元により、一部は NH<sub>4</sub>-N へ還元され、残りは N<sub>2</sub> として大気中に放出される(脱窒)。

④ リン酸態リン(mgP/L)

$$\frac{d(PO_4 - P)}{dt} = \sum_{i=1}^{3} (TOPの酸素還元_i + TOPの硝酸還元_i + TOPのマンガン還元_i + TOPの鉄還元_i + TOPの鉄還元_i + TOPの水タン発酵_i) \cdot \frac{(1 - \phi)}{\phi} \cdot \gamma_S \\
\pm (分子拡散) \pm (巻上げによる拡散)$$

(124)

底泥内において PO<sub>4</sub>-P は、TOP の分解・無機化過程において生成される。PO<sub>4</sub>-P はコロイド状の Fe(OH)<sub>3</sub>が存在する条件下では、底泥微細粒子表面への吸着により間隙水から除去される。

⑤ 二酸化マンガン(mgMn/g-dry)

(125)

 $MnO_2$ の存在は底泥内における溶存酸素の存在の証となり、底泥内における $MnO_2$ の供給源 は浮遊系からの $MnO_2$ の沈降と間隙水中 $Mn^{2+}$ の再酸化である。一方、 $MnO_2$ の消費は、有機 物の無機化に伴うマンガン還元、 $Fe^{2+}$ による還元、 $\Sigma H_2S$ による還元である。

⑥ マンガン(Ⅱ)イオン(mgMn/L)

$$\frac{dMn^{2+}}{dt} = \sum_{i=1}^{3} \left( TOC \mathcal{O} \forall \forall \forall \forall \forall \exists \exists d_i ) \cdot \frac{(1-\phi)}{\phi} \cdot \gamma_s - \left( DO (\exists \exists Mn^{2+} \mathcal{O} \otimes \mathbb{C}) + \left( Fe^{2+} (\exists \exists MnO_2 \mathcal{O} \otimes \exists d_i) + \left( \sum H_2 S (\exists \exists MnO_2 \mathcal{O} \otimes \exists d_i) + \left( \bigotimes H_2 S (\exists d_i) + (i \otimes d_i) + (i$$

Mn<sup>2+</sup>は、酸化的な海水中では安定ではないが、Fe<sup>2+</sup>とは異なり溶存酸素による酸化速度が遅いため海水中に拡散しやすい。また好気条件下での底泥表層においては、マンガン酸化細菌やマンガン酸化物自身の自己触媒作用によって速やかに酸化される。本モデルでは、Mn<sup>2+</sup>の生成項として有機物の無機化に伴うマンガン還元、Fe<sup>2+</sup>によるMnO<sub>2</sub>の還元、EH<sub>2</sub>SによるMnO<sub>2</sub>の還元を、消滅項として溶存酸素によるMn<sup>2+</sup>の酸化を考慮している。

⑦ 水酸化鉄 (mgFe/g-dry)

$$\frac{dFe(OH)_{3}}{dt} = -\sum_{i=1}^{3} \left( TOC \mathcal{O} \oplus \mathbb{G} \overline{\mathbb{G}}_{i} \right) + \left( DO \mathbb{C} \mathbb{L} \Im Fe^{2+} \mathcal{O} \oplus \mathbb{C} \right) + \left( Fe^{2+} \mathbb{C} \mathbb{L} \Im MnO_{2} \mathcal{O} \ \mathbb{G} \overline{\mathbb{G}} \right) \\ - \left( \sum H_{2} S \mathbb{C} \mathbb{L} \Im Fe(OH)_{3} \mathcal{O} \ \mathbb{G} \overline{\mathbb{G}} \right) + \left( \mathrm{tr} \mathbb{R} \right) - \left( \mathrm{tr} \mathbb{R} \right)$$
(127)

Fe(OH)<sub>3</sub>は、コロイド状で存在し、溶解度は極めて低い。底泥内では有機物の無機化に伴う 鉄還元および硫化水素による還元によって消費される。一方、浮遊系からの沈降、Fe<sup>2+</sup>の再酸 化(EA=DO、MnO<sub>2</sub>)によって生成される。

(8) 鉄(II) イオン(mgFe/L)  

$$\frac{dFe^{2+}}{dt} = \sum_{i=1}^{3} (TOC \mathcal{O} \oplus \mathbb{R} \mathbb{R} \mathbb{L}_{i}) \cdot \frac{(1-\phi)}{\phi} \cdot \gamma_{S} - (DO \mathbb{C} \mathbb{L} \mathbb{C} \mathbb{S} Fe^{2+} \mathcal{O} \oplus \mathbb{R} \mathbb{L}) \\
- (Fe^{2+} \mathbb{C} \mathbb{L} \mathbb{C} \mathbb{S} \mathbb{M} nO_{2} \mathcal{O} \mathbb{Z} \mathbb{L}) + (\sum H_{2} \mathbb{S} \mathbb{C} \mathbb{L} \mathbb{C} \mathbb{S} Fe(OH)_{3} \mathcal{O} \mathbb{Z} \mathbb{L}) \\
+ (DO \mathbb{C} \mathbb{L} \mathbb{C} \mathbb{S} FeS \mathcal{O} \oplus \mathbb{R} \mathbb{L}) + (DO \mathbb{C} \mathbb{L} \mathbb{C} \mathbb{S} FeS_{2} \mathcal{O} \oplus \mathbb{R} \mathbb{L}) \\
+ (HS^{-} \mathbb{E} Fe^{2+} \mathcal{O} \mathbb{K} \oplus \mathbb{R} \mathbb{L}) \pm (\mathcal{O} \mathbb{E} \operatorname{I} \mathbb{K} \mathbb{T})$$
(128)

Fe<sup>2+</sup>は、pH8付近の海水中では水酸化物を形成するため極めて難溶性であり、河川や大気を 通じて供給された Fe<sup>2+</sup>は速やかに底泥へ沈降する。底泥に沈降した Fe(OH)<sub>3</sub>は、有機物の無機 化に伴う鉄還元、硫化水素による還元の作用を受け、還元環境下において Fe<sup>2+</sup>となる。一方で、 溶存酸素による FeS、FeS2の酸化過程においても Fe<sup>2+</sup>は生成される。また、HS<sup>-</sup>が存在する場 合には、HS<sup>-</sup>は Fe<sup>2+</sup>と反応して FeS を生成する。
⑨ 硫化鉄(mgFe/g-dry)

$$\frac{dFeS}{dt} = -(DOによるFeSの酸化) \pm (HS^{-} \geq Fe^{2+} の沈殿作用) - (FeS \geq H_2S の沈殿作用) - (FeS \geq S^{0} の沈殿作用) + (沈降) - (堆積)$$
(129)

底泥内において FeS は、浮遊系からの沈降と HS と Fe<sup>2+</sup>の沈殿作用によって生成される。また FeS は溶存酸素により酸化され H<sub>2</sub>S を発生させる特性をもつ。さらに FeS は H<sub>2</sub>S や S<sup>0</sup> と反応して FeS<sub>2</sub>を生成すると考えられている。

⑩ 黄鉄鋼 (mgFe/g-dry)

 $\frac{dFeS_2}{dt} = -(DOによるFeS_2の酸化) + (FeS \ge H_2Sの沈殿作用) + (FeS \ge S^0の沈殿作用) + (\chi降) - (堆積)$ (130)

FeS2は底泥内で、最も多量に見出される硫化鉄の一種である。還元環境下では極めて速やかに FeS2 は形成される。

硫酸イオン(mgS/L)

$$\frac{dSO_4}{dt} = -\sum_{i=1}^{3} \left( TOC O 硫酸還元_i \right) + \left( DO C L S \sum H_2 S O 酸 \ell \right) + \left( DO C L S Fe S O 酸 \ell \right) \\
- \left( SO_4 C L S C H_4 O 酸 \ell \right) + \left( S^0 O \pi \pi D C \overline{L} \right) \pm \left( G - \overline{L} \right)$$
(131)

海域において硫黄は好気的な環境下では  $SO_4^2$ として存在するが、嫌気的な環境下では硫酸 還元菌の働きにより  $SO_4^2$ は硫化物イオン( $S^2$ )まで還元される。 $S^2$ は難溶性硫化物として除去 され、沿岸域など浅い海域においては、気体の  $H_2S$  として放出される。本モデルでは、硫酸イ オンの消費として有機物の無機化に伴う硫酸還元および  $SO_4^2$ による  $CH_4$ の酸化を、生成とし ては $\Sigma H_2S$ の溶存酸素による酸化、FeSの溶存酸素による酸化、 $S^0$ の水和反応を考慮している。

12 硫化水素(mgS/L)

本モデルにおいて硫化水素は硫化水素イオン(HS)と硫化水素(H<sub>2</sub>S)の合計値 (ΣH<sub>2</sub>S=HS+H<sub>2</sub>S)として解析を行い、既定関数として与えられる pH と以下の酸解離式<sup>13</sup>に よってそれぞれの存在比を決定している。

$$pK_{a1} = \frac{\left[HS^{-}\right] \cdot \left[H^{+}\right]}{\left[H_{2}S\right]} \tag{133}$$

ここで pKa1は酸解離定数である。

H<sub>2</sub>S は生物に対して強い毒性を有する物質であり、有機物の無機化に伴う硫酸還元によって 主に生成され、底泥表面を通じて底層水へ拡散する。硫酸還元以外にも SO<sub>4</sub><sup>2</sup>による CH<sub>4</sub>の酸 化、S<sup>0</sup>の水和反応等によって H<sub>2</sub>S は生成される。

 $<sup>^{13}</sup>$  H<sub>2</sub>Sの酸解離定数は pK<sub>a1</sub>=7.07、 pK<sub>a2</sub>=12.2 であるので、 pH8 前後の海域では HS-と H<sub>2</sub>S が主な溶存種となる。

13 元素状硫黄 (mgS/L)

$$\frac{dS^{o}}{dt} = \left(\sum H_{2}S \text{による} MnO_{2} \text{の還元}\right) + \left(\sum H_{2}S \text{による} Fe(OH)_{3} \text{の還元}\right) - \left(FeS \text{c}S^{o} \text{の沈殿作用}\right) \\ - \left(S^{o} \text{の水和反応}\right) + (沈降) - (堆積)$$

(134)

S<sup>0</sup>は、還元環境下で生成された  $\Sigma H_2S$  が MnO<sub>2</sub>および Fe(OH)<sub>3</sub>に酸化されて生成される。 S<sup>0</sup>は海中ではコロイドとして漂い、太陽光を反射して海水を乳青色や乳白色に変色させる(いわゆる青潮)。

溶存酸素(mgO/L)

$$\frac{d(DO)}{dt} = -\sum_{i=1}^{3} (TOC \oplus k \oplus k \oplus k) - (\tilde{m}(\ell)) - (DO(\ell) \oplus k \oplus k) + (DO(\ell) \oplus k \oplus k) - (DO(\ell) \oplus k \oplus k) - (DO(\ell) \oplus k \oplus k) + (DO(\ell) \oplus k) + (DO(\ell)$$

水中とは異なり底泥内では溶存酸素の供給量は非常に少ない。底泥への溶存酸素の供給源は、 直上水からの分子拡散と付着藻類による光合成のみに依存していると考えられる。底泥内に供 給された溶存酸素は、有機物の無機化に伴う酸素還元および NH4の酸化(硝化)、Mn<sup>2+</sup>の酸化、 Fe<sup>2+</sup>の酸化、ΣH<sub>2</sub>Sの酸化、CH4の酸化、FeSの酸化、FeS2の酸化に利用される。

5) 底泥内の物理過程に関するモデル式

分子拡散

底泥内および水・底泥界面における溶存物質の濃度変動は下式の鉛直一次元の拡散方程式に よって表現する。

$$\phi \cdot \frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} \left( -\phi D \frac{\partial C}{\partial z} \right)$$
(136)

ここで Cは溶存物質濃度、Dは溶存物質の拡散係数、φは空隙率、zは層厚である。 各溶存物質の分子拡散係数は水温と空隙率の関数として与えられる。

$$D = D^{T} \cdot \phi^{n-1}$$
$$D^{T} = D^{0^{\circ \mathbb{C}}} + a \cdot Temp$$
(137)

ここで、Dは底泥内の分子拡散係数、Tempは泥温、aは拡散係数の温度係数、指数nは砂 質層堆積物では2、泥質堆積物では3(藤永、2005)<sup>14</sup>をとる定数である。

なお、アサリなどの底生生物による底泥のかく乱に関するモデル式は、「④生物かく乱(バイ ターベーション)に関するパラメータ(p.328)」に示す。

<sup>14</sup> 藤永太一郎・監修:海と湖の化学 -- 微量元素で探る・、京都大学出版

## (5) 底生生物サブモデル

# 1) 計算項目

底生生物サブモデルの計算項目を表 3.1-11 に示す。懸濁物食者については、有明海での優先 種であるアサリとサルボウとカキを考慮し、コケガラスやアゲマキなどのそれ以外の懸濁物食 者は、その他の懸濁物食者としてモデルに組み込んだ。

変数名	独立変数	単位
DIA	付着藻類	gC/m <sup>2</sup>
BSF(Clam)	アサリ	gC/m <sup>2</sup>
BSF(Ark Shell)	サルボウ	gC/m <sup>2</sup>
BSF(Oyster)	カキ	gC/m <sup>2</sup>
BSF(others)	その他の懸濁物食者	gC/m <sup>2</sup>
BDF	堆積物食者	gC/m <sup>2</sup>

表 3.1-11 底生生物サブモデルの構成要素

2) 底生生物サブモデルで考慮する過程

底生生物サブモデルで考慮する過程を表 3.1-12 に示す。

コンパートメント	+	—	±
	光合成	細胞外分泌	—
		呼吸	
付着藻類(DIA)		枯死	
		BDF による被食	
		巻上げ	
	濾水による摂食	排糞	
膨脹的在大DCD		呼吸	
恋倒彻艮伯(BSF)		死亡	
		漁獲	
	DIA の摂食	排糞	
堆積物食者(BDF)	有機物の摂食	呼吸	
	BDFの摂食(共食い)	死亡	

表 3.1-12 底生生物サブモデルの構成要素

① 付着藻類(DIA)

$$\frac{dDIA}{dt} = (\text{光合成}) - (細胞外分泌) - (呼吸) - (枯死) - (堆積物食者による被食) - (巻上げによる減少)$$
(138)

i) 光合成

付着藻類の光合成量(gC/m<sup>3</sup>/day)は以下のように表される。  
(光合成) = 
$$\mu Max_{DIA} \cdot Ft \cdot Fi \cdot Fnp \cdot DIA$$
 (139)

ここで、*µMaxpiA*は最大成長速度、*Ft*は光合成に対する泥温制限項、*Fi*は光合成に対する日射制限項、*Fnp*は光合成に対する栄養塩制限項である。下式にそれぞれの制限項の表現方法を示す。

$$Ft(泥温制限項) = exp\left\{-0.004 \cdot (temp - Topt_{DIA})^{2}\right\}$$
(140)

$$Fi(日 射制限項) = I \cdot exp\left\{\frac{-\gamma_{DIA} \cdot depth}{I_{optDIA} + I \cdot exp(-\gamma_{DIA} \cdot depth)}\right\} \cdot \frac{KI_{DIA}}{KI_{DIA} + DIA}$$
(141)

 $I = I_{bottom}$ 

$$Fnp(栄養塩制限項) = min(Fn, Fp)$$

$$Fn = \frac{NH_4 - N}{KNH_{DIA} + NH_4 - N} \cdot Sect_{DIA} + \frac{NH_4 - N}{KNH_{DIA} + NH_4 - N} \cdot (1 - Sect_{DIA}) \quad (142)$$

$$Fp = \frac{PO_4 - P}{KPO_{DIA} + PO_4} \cdot Sect_{DIA} + \frac{PO_4 - P}{KPO_{DIA} + PO_4 - P} \cdot (1 - Sect_{DIA})$$

ここで、YDLAは底泥内の光の減衰係数、tempは泥温、ToptDLAは最適水温、depthは 計算層の泥深、IoptDLAは最適日射量、KIDLAは日射に対する自己遮蔽係数、Ibottomは底 泥表層での日射量、KNHDLAは光合成に対するアンモニア態窒素の半飽和値、KPODLA は光合成に対するリン酸態リンの半飽和値、SectDLAは全栄養塩利用形態(間隙水中、 直上水)に占める直上水中の栄養塩利用量の割合である。

ii) 細胞外分泌

細胞外分泌は光合成生産量に対する割合として表される。  
(細胞外分泌) = 
$$Re xc_{DIA} \cdot ($$
光合成) (143)

ここで、RexcDIAは光合成量に対する細胞外分泌の割合である。

iii) 呼吸

付着藻類の呼吸による減耗は、光合成量に依存するものと現存量に依存するものとを 区別し、以下のように表される。

(呼吸) = Re sl<sub>DIA</sub> · (光合成)

+ 
$$Re s2_{DIA} \cdot exp\{Q_{10} Re s_{DIA} \cdot (temp - Tb Re s_{DIA})\} \cdot DIA$$
 (144)

ここで、*Res1*DIA は光合成に対する呼吸の割合、*Res2*DIA は相対静止呼吸速度、 *Q10ResDIA*は相対静止呼吸に関する温度係数、*temp*は泥温、*TbResDIA*は相対静止呼吸 に対する基準温度である。 iv) 枯死

付着藻類の枯死は、以下のように表される。 (枯死)= $MOT_{DIA} \cdot exp\{Q_{I0}MOT_{DIA} \cdot (temp - TbMOT_{DIA})\} \cdot DIA$  (145)

ここで、*MOT*<sub>DIA</sub> は基準温度での枯死速度、*Q*<sub>10</sub>*MOT*<sub>DIA</sub> は枯死に関する温度係数、 *temp* は泥温、*TbMOT*<sub>DIA</sub> は枯死に対する基準温度である。

v) 堆積物食者による被食

「③堆積物食者(BDF) (p.327)」にて示す。

② 懸濁物食者(BSF)

$$\frac{dBSF}{dt} = ( 濾水による摂食 ) - ( 排糞 ) - ( 呼吸 ) - ( 死亡 ) - ( 漁獲 )$$
(146)

i) 濾水による摂食

懸濁物食者の濾水による摂食は以下のように表される。  
(濾水による摂食)=
$$Conc_{BSF} \cdot Filt_{BSF} \cdot MaxConc_{BSF} \cdot BSF$$
 (147)

ここで、*ConcBsF* は直上水中の飼料濃度(mgC/L)、*FiltBsF* は濾水水量(m<sup>3</sup>/gC/day)、 *MaxConcBsF*は最大日間摂食係数(-)である。懸濁物食者は直上水中の植物プランクトン と懸濁態有機物を濾水するものとした。以下にそれぞれのモデル式を示す。

 $Conc_{BSF} = (CHL + POC) \times 濾水有機物中の易分解成分の割合$  (148)

$$Filt_{BSF} = \frac{Fv_{BSF}}{BaseC_{BSF}} \cdot exp\{Q_{10}Filt_{BSF} \cdot (temp - TbFilt_{bsf})\} \cdot \frac{KD_{BSF}}{KD_{BSF} + BSF}$$
(149)

$$MaxConc_{BSF} = min \left[ 1.0, \quad 2.0 \times \frac{MaxBSF}{Filt_{BSF} + MaxBSF} \right]$$
$$MaxBSF = pup \cdot \left( \frac{temp + 3.0}{13.0} \right) \cdot BSF$$
(150)

ここで、FvBSFは基準温度に対する濾水速度(m<sup>3</sup>/gC/day)、Q10FiltBSFは濾水に対する 温度係数、tempは泥温、TbFiltbsfは濾水に対する基準温度、KDBSFは生息密度に対す る半飽和値、pupは最大濾水係数(1/day)、MaxBSFは日最大摂食係数であり、季節性 を考慮して泥温で補正される。

ii) 排糞および偽糞

本モデルでは、懸濁物食者による有機物の排糞を、「排糞」と「偽糞」に区分し解析 を行う。定義として、「排糞」は濾水後、懸濁物食者に一度取り込まれた有機物が同化 されずに体外に排出されるものとし、「偽糞」は濾水後、体内に取り込まれずに系外に 排出されるものとする。

ii-1 排糞

排糞は、濾水による摂食量に依存するものとし、以下のように表される。なお排糞は、 底泥表層に排出されるものとした。

ここで、AssiBSFは懸濁物食者の同化効率である。

ii-2 偽糞

偽糞は、濾水物中に含まれる難分解成分および不活性成分の有機物が体内に取り込ま れることなく、底泥表層に排出される現象を表す。なお偽糞による懸濁物食者の減耗は 生じない。

> (偽糞)=(濾水による摂食)・ 濾水有機物中の難分解・不活性成分の割合 濾水有機物中の易分解成分の割合

(152)

iii) 呼吸

懸濁物食者の呼吸・排泄による減耗は、摂食量に依存するものと現存量に依存するものとを区別し、以下のように表される。

(呼吸) =  $Resl_{BSF}$  · (濾水による摂食)

$$+ \operatorname{Res2}_{BSF} \cdot \exp\{Q_{10} \operatorname{Res}_{BSF} \cdot (\operatorname{temp} - \operatorname{Tb} \operatorname{Res}_{BSF})\} \cdot BSF$$
(153)

ここで、*Res1*<sub>BSF</sub>は濾水に対する呼吸の割合、*Res2*<sub>BSF</sub>は相対静止呼吸速度、*Q*<sub>10</sub>*Res*<sub>BSF</sub> は相対静止呼吸に関する温度係数、*temp*は泥温、*TbRes*<sub>BSF</sub>は相対静止呼吸に対する基 準温度である。

iv) 死亡

懸濁物食者の死亡は、自然死亡と貧酸素水塊への暴露による死亡を考慮し、以下のように表される。

(死亡 $) = MOT_{BSF} \cdot exp(Q_{10}MOT_{BSF} \cdot TempMOT_{BSF}) \cdot BSF$ 

$$+ AnOixcMOT_{BSF} \cdot \left\{ 1.0 - min \left( 1.0, \frac{DO}{KDO_{BSF}} \right) \right\} \cdot BSF$$

$$temp > tbMOT_{BSF} \quad : \quad TempMOT_{BSF} = temp - TbMOT_{BSF}$$

$$temp < tbMOT_{BSF} \quad : \quad TempMOT_{BSF} = TbMOT_{BSF} - temp$$
(154)

ここで、MOT<sub>BSF</sub>は自然死亡速度、Q<sub>10</sub>MOT<sub>BSF</sub>は自然死亡に関する温度係数、 AnOxicMOT<sub>BSF</sub>は貧酸素水塊への暴露に伴う死亡速度、KDO<sub>BSF</sub>は貧酸素水塊への暴 露による死亡に対する溶存酸素の閾値(必須溶存酸素量)、TbMOT<sub>BSF</sub>は自然死亡に対 する基準温度である。

v) 漁獲

懸濁物食者の漁獲にとる減耗(とりあげ)は、漁獲量などから推測される漁獲速度を 条件として任意に設定することにより表現される。

(漁獲)=漁獲速度(
$$gC/m^2/day$$
) (155)

③ 堆積物食者(BDF)

$$\frac{dBDF}{dt} = (摂餌) - (排糞) - (呼吸) - (死亡) - (被食(鳥類))$$
(156)

i) 摂餌

堆積物食者による底泥内の有機物の摂餌は、以下のように表される。  
(摂餌)=
$$G \max_{BDF} \cdot exp\{Q_{10}Fed_{BDF}(temp - TbFed_{BDF})\} \cdot \frac{KD_{BDF}}{KD_{BDF} + BDF} \cdot \frac{Conc_{BDF}}{Conc_{BDF} + KC_{BDF}} \cdot BDF$$
  
(157)

ここで、*GmaxBDF*は最大摂餌速度、*Q10FedBDF*は摂餌に関する温度係数、*temp*は泥 温、*TbFedBDF*は摂餌に対する基準温度、*KDBDF*は生息密度に対する半飽和値、*ConcBDF* は堆積物食者が利用可能な全飼料濃度、*KCBDF*は摂餌に対する飼料の半飽和値である。 なお、堆積物食者は、底泥内の付着藻類と有機物(デトリタス)および堆積物食者(共

なわ、堆積物長有は、底化内の竹有燥頬と有機物(ノトリクヘ)わよい堆積物長有(共 食い)を捕食するものとし、*Concept*を以下のように設定した。

$$Conc_{BDF} = rLib_{DIA} \cdot DIA + TOC_{1} + rLib_{BDF} \cdot Gust_{BDF} \cdot BDF$$
(158)

ここで、*rLibDIA*は付着藻類中の易分解成分の割合、*TOC*1は易分解性有機炭素濃度、 *rLibBDF*は堆積物食者中の易分解成分の割合、*GustBDF*は共食いに対する嗜好係数であ る。

ii) 排糞

排糞は、摂食量に依存するものとし、以下のように表される。  
(排糞)=
$$(I - Assi_{BDF})$$
·(摂食) (159)

ここで、AssiBDFは同化効率である。

iii) 呼吸

堆積物食者の呼吸・排泄による減耗は、摂食量に依存するものと現存量に依存するも のとを区別し、以下のように表される。

 $(呼吸) = Re \, sI_{RDF} \cdot (摂食)$ 

$$+ \operatorname{Res2}_{BDF} \cdot \exp\{Q_{10} \operatorname{Res}_{BDF} \cdot (\operatorname{temp} - \operatorname{Tb} \operatorname{Res}_{BDF})\} \cdot BDF$$
(160)

ここで、Res1BDFは摂食に対する呼吸の割合、Res2BDFは相対静止呼吸速度、Q10ResBDF は相対静止呼吸に関する温度係数、temp は泥温、TbResBDF は相対静止呼吸に対する 基準温度である。

iv) 死亡

堆積物食者の死亡は、自然死亡と貧酸素水塊への暴露による死亡を考慮し、以下のよ うに表される。

死亡) = 
$$MOT_{BDF} \cdot exp(Q_{10}MOT_{BDF} \cdot (temp - TbMOT_{BDF})) \cdot BDF$$
  
+  $AnOixcMOT_{BDF} \cdot \left\{ 1.0 - min \left( 1.0, \frac{DO}{KDO_{BDF}} \right) \right\} \cdot BDF$  (161)

ここで、*MOT*<sub>BDF</sub>は自然死亡速度、*Q*<sub>10</sub>*MOT*<sub>BDF</sub>は自然死亡に関する温度係数、 *AnOxicMOT*<sub>BDF</sub>は貧酸素水塊への暴露に伴う死亡速度、*KDO*<sub>BDF</sub>は貧酸素水塊への暴 露による死亡に対する溶存酸素の閾値(必須溶存酸素量)、*TbMOT*<sub>BDF</sub>は自然死亡に対 する基準温度である。 ④ 生物かく乱(バイターベーション)に関するパラメータ
 懸濁物食者(BSF)、堆積物食者(BSF)による底泥の撹乱は、以下の考え方で考慮する。
 固相のかく乱速度(*D*<sub>BS</sub>)

$$D_{BS} = \frac{(BSF + BDF)}{(BSF + BDF) + K_{BS}} \times D_{BSMAX}$$
(162)

ここで、D<sub>BSMAX</sub>: 固相の最大撹乱速度K<sub>BS</sub>: 固相の撹乱に係わる生物量の半飽和定数

液相のかく乱速度(DBC)

$$D_{BC} = \frac{(BSF + BDF)}{(BSF + BDF) + K_{BC}} \times D_{BCMAX}$$
(163)

ここで、D<sub>BCMAX</sub>:液相の最大かく乱速度
 K<sub>BC</sub>:液相のかく乱に係わる生物量の半飽和定数

- 3) 底生生物の挙動に係る他項目の増減
- ① 水質項目の増減
- i) 植物プランクトン(PHY)

底生生物が及ぼす水中の植物プランクトンの変動として、植物プランクトンは懸濁物 食者の濾水により水中から除去される。



(164)

### ii) 懸濁態有機物(POC、PON、POP)

底生生物が及ぼす水中の懸濁態有機物の変動として、懸濁態有機物は懸濁物食者の濾 水により水中から除去される。

$$(底生生物によるPOCの増減) = -(懸濁物食者の濾水による摂食) \times \frac{POC}{CHL + POC}$$

$$(底生生物によるPONの増減) = -(懸濁物食者の濾水による摂食) \times \frac{POC}{CHL + POC} / rCN_{BSF}$$

$$(底生生物によるPOPの増減) = -(懸濁物食者の濾水による摂食) \times \frac{POC}{CHL + POC} / rCP_{BSF}$$

(165)

# iii) 溶存態有機物(DOC、DON、DOP)

底生生物が及ぼす水中の溶存態有機物の変動として、溶存態有機物は付着藻類および 海藻類の細胞外分泌により増加する。

(底生生物によるDOCの増減)=(付着藻類の細胞外分泌)・Sect <sub>DIA</sub>	
(底生生物による $DON$ の増減)=(付着藻類の細胞外分泌)·Sect <sub>DIA</sub> /rCN <sub>DIA</sub>	(166)
(底生生物によるDOPの増減)=(付着藻類の細胞外分泌)・Sect <sub>DIA</sub> /rCP <sub>DIA</sub>	

ここで、SectDIA は付着藻類の全細胞外分泌の排出形態(直上水と間隙水)に対する 直上水への排出割合である。

iv) アンモニア態窒素(NH<sub>4</sub>-N)

底生生物が及ぼす水中のアンモニア態窒素の変動として、アンモニア態窒素は以下の 現象により増減する。

(底生生物による $NH_4 - N$ の増減)= -(付着藻類の光合成)·Sect<sub>DIA</sub>/rCN<sub>DIA</sub> + (付着藻類の呼吸・排泄)·Sect<sub>DIA</sub>/rCN<sub>DIA</sub> + (懸濁物食者の排泄)/rCN<sub>BSF</sub>

(167)

ここで、Sect<sub>DIA</sub>は付着藻類の栄養塩利用形態(直上水と間隙水)に対する直上水の利用割合である。

v) リン酸態リン(PO<sub>4</sub>-P)

底生生物が及ぼす水中のリン酸態リンの変動として、リン酸態リンは以下の現象によ り増減する。

(底生生物によるPO <sub>4</sub> – Pの増減)=
– (付着藻類の光合成)・ <i>Sect<sub>DIA</sub> / rCP<sub>DIA</sub></i> + (付着藻類の呼吸・排泄)・ <i>Sect<sub>DIA</sub> / rCP<sub>DIA</sub></i>
+ (懸濁物食者の排泄)/rCP <sub>BSF</sub>

## (168)

ここで、Sect<sub>DIA</sub>は付着藻類の栄養塩利用形態(直上水と間隙水)に対する直上水の利用割合である。

vi) 溶存酸素(DO)

底生生物が及ぼす水中の溶存酸素の変動として、水中の溶存酸素は以下の現象により 増減する。

(底生生物による <i>DO</i> の増減)=
+ (付着藻類の光合成)・Sect <sub>DIA</sub> · rOC <sub>DIA</sub> – (付着藻類の呼吸)・Sect <sub>DIA</sub> · rOC <sub>DIA</sub>
- (懸濁物食者の呼吸)・rOC <sub>BSF</sub>
- (堆積物食者の呼吸)・rOC <sub>BDF</sub>

(169)

ここで、SectDIA は付着藻類の溶存酸素利用形態(直上水と間隙水)に対する直上水の利用割合である。

② 底質項目の増減

i) 総有機物(TOC、TON、TOP)

底生生物が及ぼす底泥内の有機物濃度の変動として、底泥内の有機物濃度は以下の現 象により増減する。

(底生生物による*TOC*の増減)=

+(付着藻類の細胞外分泌)+(付着藻類の枯死)

+ (懸濁物食者の排糞・偽糞)+ (懸濁物食者の死亡)

+ (堆積物食者の排糞)+ (堆積物食者の死亡)- (堆積物食者の摂餌)

(底生生物によるTONの増減)=

- + {(付着藻類の細胞外分泌)+(付着藻類の枯死)}/rCN<sub>DIA</sub>
- |+ {(懸濁物食者の排糞・偽糞)+ (懸濁物食者の死亡)}/rCN<sub>BSF</sub>

+ {(堆積物食者の排糞)+(堆積物食者の死亡)-(堆積物食者の摂餌)}/rCN BDF

(底生生物によるTONの増減)=

|+ {(付着藻類の細胞外分泌)+(付着藻類の枯死)}/rCP<sub>DIA</sub>

+ {(懸濁物食者の排糞・偽糞)+ (懸濁物食者の死亡)}/rCP<sub>BSE</sub>

(170)

+ (堆積物食者の排糞)+ (堆積物食者の死亡) – (堆積物食者の摂餌 $)/rCP_{BDF}$ 

ii) アンモニア態窒素(NH<sub>4</sub>-N)

底生生物が及ぼす底泥内のアンモニア態窒素の変動として、底泥内のアンモニア態窒素は以下の現象により増減する。

(底生生物によるNH<sub>4</sub> – Nの増減)=

 $-(付着藻類の光合成) \cdot (I - Sect_{DIA})/rCN_{DIA} + (付着藻類の呼吸 · 排泄) \cdot (I - Sect_{DIA})/rCN_{DIA} + (堆積物食者の排泄)/rCN_{BSF}$ 

ここで、Sect<sub>DIA</sub>は付着藻類の栄養塩利用形態(直上水と間隙水)に対する直上水の利用割合である。

iii) リン酸態リン(PO<sub>4</sub>-P)

底生生物が及ぼす底泥内のリン酸態リンの変動として、底泥内のリン酸態リンは以下 の現象により増減する。

(底生生物による $PO_4 - P$ の増減)= -(付着藻類の光合成)·( $l - Sect_{DIA}$ )/ $rCP_{DIA}$ +(付着藻類の呼吸・排泄)·( $l - Sect_{DIA}$ )/ $rCP_{DIA}$ +(堆積物食者の排泄)/ $rCP_{BSF}$ 

(172)

(171)

## iv) 溶存酸素(DO)

底生生物が及ぼす底泥内の溶存酸素の変動として、底泥内の溶存酸素は以下の現象に より増減する。

(底生生物による $DO$ の増減) = +(付着藻類の光合成)·( $l - Sect_{DIA}$ )·r $OC_{DIA}$	(172)
$-(付着藻類の呼吸) \cdot (1 - Sect_{DIA}) \cdot rOC_{DIA}$	(175)

ここで、Sect<sub>DIA</sub>は付着藻類の溶存酸素利用形態(直上水と間隙水)に対する直上水の利用割合である。

## 3.2 現況再現計算(2000~2006年および2007~2008年)

2000~2008年の通年計算を行った。なお、2000~2006年の計算結果は、文部科学省「重要課題解決型研究等の推進有明海生物生息環境の俯瞰的再生と実証試験」(2009年度)の成果であり、検討結果の一部を本報告書に引用した。

また、2007~2008年の計算結果は、新たに取得された観測データを貸与いただき、水質・ 底質サブモデルのモデル式やモデルパラメータの設定について検討を行ったものである。

### 3.2.1 計算条件の設定

### (1) 計算期間とタイムステップ

長期間の積分期間において検証を行うことにより、境界条件の変化に伴うモデルの応答性 を複数の環境条件にて検証・考察することができ、モデルの信頼性をより高いものとするこ とができると考えられる。そのため、JSTモデルの検証にあたっては、2000年1月~2006年 12月までの7年間の非定常計算を実施した。境界条件となる潮汐、陸域からの淡水・負荷流 入、気象条件などの外力条件は観測値をもとに時々刻々と設定した。なお、この7年間の計 算中、すべてのサブモデルの計算パラメータは変更していない。

新たに実施した2007~2008年の観測データを用いた水質・底質モデルの検証にあたっては 2006年1月~2008年12月までの3年間の非定常計算を実施した。

各サブモデルのタイムステップは、サブモデルで考慮する外力やスケールの違いを勘案し、 モデルが安定に稼働する値を採用した。(流動サブモデル:外部モード=2秒、内部モード=20 ~30秒、懸濁物輸送サブモデル=20秒、水質サブモデル=30秒、底質サブモデル=3秒、底生 生物サブモデル=3秒とした)。なお、非結合のサブモデル間でのデータのやり取りは、1時間 ごとに処理した平均量を利用した。

### (2) 水深条件および空間分解能

計算範囲と水平方向の計算格子を図 3.2-1に示す。水平方向の計算格子は900~2700mの 可変長格子とし、有明海内はすべて900mの正方格子とした。この格子分割は、懸濁物輸送 サブモデルおよび水質サブモデルについても同一であるが、両モデルでは口之津(早崎瀬戸) よりも内側の有明海のみを計算領域とした。また、底質および底生生物サブモデルについて は、図 3.2-1の太線で示すように、計算時間軽減の観点から、流動サブモデルで採用した水 平格子を任意に連結させた格子にて解析を行った。なお、底泥内の水平方向の交換は無視し た。水深条件は国調費モデルと同一の水深データを用いた。この水深データは海上保安庁の デジタル水深データベースJ-birdおよび各県等による深浅測量結果から構成されたものであ る(農林水産省ら、2002、2003)。

浮遊系における鉛直方向の層分割は、図 3.2・2に示すように、一般座標系による最大15 層の層分割を多重o座標系によって実現した。一般鉛直座標系の利点を活かして、表層近く は水平に、海底近くは海底地形に沿った座標系とした。また、底泥内は泥深10cmまでを計 算の対象とし、鉛直方向に10層に分割した。分割幅は0.02~3.50cmとし、特に底泥表層付近 は濃度勾配が生じやすいことから、分割幅を小さくした。



図 3.2-1 計算範囲と水平方向の計算格子図(計算格子は 900m 正方格子)



## (3) 湾口における境界条件

1) 潮位

湾口での潮汐境界条件は、13分潮の調和定数から、境界格子における予測潮位を推算する ことにより設定した。境界位置における調和定数として、長周期潮は外海に面する五島列島 (福江)における潮汐調和定数を用い、日周潮・半日周潮については日本周辺海洋潮汐モデ ル(短周期16分潮、解像度5分)の解析結果(Matsumoto et al.、2000)をもとに有明海湾口部の 口之津検潮所での潮位の再現性を考慮して設定した。図 3.2-3には口之津検潮所での観測値 と計算値の比較図を示す。



水温・塩分

湾口での水温・塩分の境界値は、熊本県実施の浅海定線(地点:熊本A)および沿岸定線 (地点:18)による観測値をもとに設定した。

3) 水質

湾口での水質濃度の境界値は、公共用水域水質調査における瀬詰崎沖での観測値をもとに設定した。

## (4) 陸域からの淡水流入量・負荷量条件

1) 淡水流入量

国調費モデルと同様に、一級河川の順流域最下流の流量観測所(本明川:裏山、六角川: 妙見橋、嘉瀬川:川上、筑後川:瀬ノ下、矢部川:船小屋、菊池川:玉名、白川:代継橋、 緑川:城南)の時別値から順流域の淡水流入量を算出し、この順流域の淡水流入量に感潮域 で発生する淡水流入量を加算したものを各一級河川からの淡水流入量とした。なお、感潮域 からの淡水流入量の年間の総量は年間降水量に感潮域面積を乗じた値とし、その時間変動は 順流域での変動と同一とした。また塩田川は六角川の比流量から設定した。上記の一級河川 以外の淡水流入として、14 の直接流入域を考慮した。各直接流入域からの淡水流入量の時 別値は、感潮域と同じく年間の総量を年間降水量に流域面積を乗じて算定し、その時間変動 は周辺の一級河川の時間変動を参考に設定した。全ての淡水流入量は時間ごとの値として整 理し計算条件とした。

2) 流入水温·塩分

境界条件として入力する河川水の水温は、順流末端の公共用水域水質調査結果の水温の観 測値をもとに設定した。また塩分は0とした。

3) 流入負荷量

順流域における流入負荷量の算定にあたっては、国調費モデルにおいて算定された、本明 川、六角川、嘉瀬川、筑後川、矢部川、菊池川、白川、緑川、塩田川のCOD、TN、TPのL-Q 式を用いた。つぎに各河川感潮域および直接流入域の負荷量は、原単位法(フレーム×原単 位×流達率)により算出し、その負荷量の時間変化は近傍の流入河川の時間負荷量の変動と 同じとした。COD、TN、TPの負荷量は、流入河川ごとに農林水産省ら(2002、2003)により 整理されている分画比を乗じることで、懸濁態/溶存態および有機態/無機態等の形態別濃 度に分画した。

#### (5) 気象条件

本モデルに境界値として与える気象条件は、流動サブモデルに対して、風応力の入力およ び海面での熱収支の算定に用いられる風向・風速、気温、全天日射量、雲量、相対湿度、降 水量を設定した。また、植物プランクトン・ノリの生産量の算定のため、同様の全天日射量 を水質サブモデルに設定した。気象条件の設定値は、有明海沿岸の観測データを空間内挿し、 すべてのデータを時別値として設定した。風向・風速に関しては16地点、その他の気象要素 に関しては最大で15地点のデータを用いた。用いた気象観測地点のデータは、気象官署およ びアメダスの時別データであり、風向・風速については熊本新港(国土交通省)での観測デ ータも用いた。

一般に、陸上では植生や構造物などの影響により地表面近くで風速が減衰し、海上に比べて風速が小さくなる。したがって風速を空間内挿する際には、この影響を考慮する必要がある。そこで本研究においては、梶原ら(2005)と同様に、陸上の影響を考慮した空間内挿の手法を採用した。まず、陸上での観測高度と観測地点の土地利用に応じた陸面粗度から対数則を用い、陸面の影響が小さい100m上空での風速を推定する。その後、計算領域全体において空間補間を行い、さらに海面の粗度で海面上10mでの風速を面的に推定し、これをモデルの設定値とした。風向・風速を除く気象条件については、海上での情報が得られていないことから、陸上での観測値を空間内挿したものをモデルの設定値とした。

また、本モデルでは降水および蒸発の双方を海面の淡水フラックスとして考慮している。 降水量は上述の観測値を空間内挿し設定し、蒸発量(E)は以下に示すようにバルク式から 得られる潜熱フラックス(Q<sub>e</sub>)から算定した。  $Q_e = \beta \cdot C_E \cdot (0.98 \cdot e_s(T_w) - e(T_a)) \cdot w$ 

 $Q_e$ :潜熱フラックス[W/m<sup>2</sup>]  $\beta$ :1.829×10<sup>3</sup>  $C_E$ :潜熱フラックス係数(田中ら(2004)による風速の関数)  $e_s(T_w)$ :水温 $T_w$ (°C)における飽和水蒸気圧[hPa]  $e(T_a)$ :水温 $T_a$ (°C)における水蒸気圧[hPa] w:風速[m/s]

 $E = -Q_e / hLv(T_w) / \rho_w$ 

(175)

(174)

E: 蒸発量[m/s] $hLv(T_w): 水温T_w(^{\circ}C)の単位重量あたりの蒸発潜熱[W·s/kg]$  $\rho_w: 海水の密度[kg/m<sup>3</sup>]$ 

### (6) 初期値の設定

流動サブモデルの初期値は有明海内部の水温・塩分の観測値(浅海定線データ)の平均的 な成層状態を設定し、静止状態から計算を開始した。計算開始は、前年(1999年)の10月1日 からとし、3ヶ月の予備計算期間を設けた。

懸濁物輸送サブモデルおよび水質サブモデルについても流動サブモデルと同様に、観測値 を与えた上で、助走計算を実施した。

一方、底質サブモデルについては、計算項目が多岐に亘るため、観測値からの設定が困難 である。そのため、計算期間中の計算条件において複数年、繰り返し計算を実施し、計算値 が周期定常になった値を底質サブモデルの初期値として設定するものとした。底生生物サブ モデルで扱う底生生物の現存量は固定値(境界値)として扱うものとした。

(7) 物理パラメータ等

1) 海面摩擦係数

本多・光易(1980)の経験式を用い、風速に比例した摩擦係数を設定した。

2) 海底摩擦係数

海底近傍での流速分布を粗度高さを用いた対数分布則により仮定し得られる値を設定した。なお、粗度高さは海域で一般的に用いられる1cmを有明海全域に適用した。

3) 水平渦粘性係数·水平渦拡散係数

Smagorinsky(1963)の経験式を用いて設定した。また、この経験式の中で用いられる比例係数は0.1とした。ただし、経験式により求められる粘性/拡散係数に対して背景値として 0.2m<sup>2</sup>/sの値を加算したものを計算に用いた。

## 4) 鉛直渦粘性係数·鉛直渦拡散係数

Mellor and Yamada(1982)による2方程式乱流クロージャーモデルにより算定した。ただし、 乱流モデルにより算定される粘性/拡散係数に対して背景値として1.0×10<sup>-6</sup>m<sup>2</sup>/sの値を加算 したものを計算に用いた。

### 5) ノリ網による流れの抵抗

本モデルで考慮したノリひびによる流体抵抗は、浮流し式および支柱式による海面近くで のノリ網自体による抵抗と、支柱式の支柱の存在による全層に関与する抵抗の2種類とした。 表面のノリ網の抵抗に関しては、水底摩擦と同様のせん断応力が表面の層に作用するとし、 その時の摩擦係数は戸原ら(1974)に従い0.05とした。一方、支柱の抵抗については、開水路 に樹木が繁茂している場合の抵抗の導入と同様の扱いとした。開水路に樹木が繁茂している 場合の等価摩擦損失係数 f は式175で表される。

$$f = \frac{1}{2}Cd \cdot a_w \cdot h \tag{176}$$

ここで、Cdは幹や枝についての抵抗係数(-)、awは投影面積密生度(1/m)であり、単位体積

の流体塊中にある幹と枝の総投影面積(単位河床面積当たりの円柱の本数×円柱の直径)、h は水深(m)である。

2001年の4県の施設面積および支柱の本数からa<sub>w</sub>を設定し、Cdは1.2とした。なお、典型的な支柱本数から算定される抵抗の値は、水底摩擦に比べ10倍オーダーの抵抗に相当する。一方で、計算格子間隔は900mであり、900m×900mの領域に隙間なくノリ網が存在していれば上述の抵抗をそのまま計算に考慮すればよいが、現実には漁業権設定区域全域にノリ網が敷設されている訳ではないので、計算格子に考慮するノリ網による表面抵抗および支柱による流体抵抗を、実際の敷設面積と該当計算格子(図 3.2・4)の総面積の比で補正した。なお、ノリひびの抵抗を考慮した期間は、ノリ養殖期間を想定した10月1日~3月15日までとした。



図 3.2-4 ノリ網の設置海域

## (8) 生物化学パラメータ

水質サブモデルにおいて設定した主要なパラメータを表 3.2-1(1)に示す。底質サブモデル において設定したパラメータは永尾ら(2008)に準じた。また底生生物サブモデルの計算パラ メータを表 3.2-1(2)に示す。これらのパラメータは既存に知見を参考に、計算値と観測値の 整合性を高めるよう試行計算により設定した。

パラメータ	単位	値	タイプ	参考文献	
「「「「」「」「」「」「」「」「」」「」」「」「」」「」」「」」「」」「」」「					
光合成に関する温度係数	-	0.0633	I	(2)	
呼吸速度(基準温度: 20°C)	1/day	0.05	п	(3)	
呼吸に関する温度係数	-	0.0534	I	(3)	
枯死速度(基準温度・20℃)	1/dav	0.05	п	(3)	
お死に関する温度係数	-	0.0693	I	(3)	
半合成に対するリン酸能リンの半的和値	mg/l	0.0031	T	(4)	
光台成に対するアンモーア能容表の半的和値	mg/l	0.0200	ш	-	
光台成に対する硝酸能容素の半鉤和値	mg/l	0.0200	ш	-	
光合成量に対する細胞外分泌の割合	8	0.12	I	(5)	
光合成に関する最適光量	MJ/m <sup>2</sup> /day	8.56	T	(4)	
植物プランクトンの沈降速度	m/day	0.1	п	(4)	
枯死後の有機物中の易分解性物質の存在割合	-	0.7	Ш	-	
動物プラン	/クトン		ш		
	1/dav	0.28	Π		
摂甸に関する温度係数	-	0.0693	I	(4)	
摂甸の閾値	mgC/L	0.1	T	(1)	
Ivlev定数	L/mgC	5.0	T	(6)	
同化体数		0.70	I	(0)	
问 L 示 效	_	0.70	T	(4)	
応戊戌効平 死亡速度(其淮沮度・0℃)	1/dav	0.054	T	(4)	
死亡还没(盔牛値及・000)	-	0.0693	T	(4)	
2010日日9日に関リる価度休報 右継枷の八角	2. 無比約12	0.0075	1	(4)	
	<sup>半・</sup> 無機化 1/day	0.0180	Π	(3)(7)	
の力併住の恐阖患有機灰系の力併还反(左中値反・0℃) 見公報州の懸濁能右拗空妻の公報油産(其進退産・0℃)	1/day	0.0180	ш	(3)(7)	
の力併住の恐囲患有機至於の力併还反(左中値及・0℃) 見公報州の縣澤能右継川ンの公解油産(其進退産・0℃)	1/day	0.0100	ш	(3)(7)	
勿刀併住の恐潤思有機リンの刀件还及(茎半値及・0C) 離八韶州の販売能力燃出素の八韶末度(其進温度・0°C)	1/day	0.0400	Ш Т	(3)(7)	
難力解注の恐潤思有機灰糸の力解还及(茎半値及・0℃) 離公報州の懸濁能右燃空麦の公報油産(其準担産・0℃)	1/day	0.0004	1	(8)	
難力解団の恐囲思有機至於の力解述及(左中価及・0℃) 離公報州の販還能右継川ンの公報店産(其準担産・0℃)	1/day	0.0004	1	(8)	
※万府区の恋園窓市協うマの万府还及(盔牛値及・0℃) 不活性物質の懸濁能右機農素の分解滞産(其進退産・0℃)	1/day	0.0004	I	(8)	
不行性物質の認識感行機成系の方所述及(盔牛値及・0℃) 不行性物質の懸濁能右機容素の分解速度(基準値及・0℃)	1/day	0.0000	I	(8)	
不行性物質の認識感行機呈示の方所述及(盔牛値及・0℃) 不行性物質の懸濁能右機Ⅱンの分解速度(基準値及・0℃)	1/day	0.0000	I	(8)	
深存能有機農業の分解連座(其進沮産・0℃)	1/day	0.000	п	(3)	
※左能右機突表の分解速度(基準通及:0℃)	1/day	0.006	п	(3)	
※左能右機Ⅱンの分解速度(基準通及:0℃)	1/day	0.020	п	(3)	
谷田忠市城ノンジカ府丞及(本中価及:00)	-	0.0693	I I	(3)	
方所に因うる温及い数 底泥に沈降すろ前の易分解性有機物の沈降速度	m/dav	0.3	ш	-	
たいにいた中 う 前 い 多 万 介 正 日 彼 内 い し 中 述 反 その	曲		ш		
	1/dav	0.003	Π	(9)	
硝化に関する温度係数	-	0.0693	I	(9)	
硝化に対する湿皮小数 硝化に対する茨克酸素の半的和値	mg/l	0.5	ш	())	
再代っき 体粉	m/day	2.0	п	(10)	
酸素消費物質(ODU)の酸化速度	l/mg/dav	135.0	I	(11)	
11 ANN 11 A 11 A 11 A 11 A 11 A 11 A 11			1	(11)	
光合成速度(基準温度・14℃)	1/dav	0.15	Π	(12)	
光合成に関する温度係数	-	-0.0139	I	(12)	
光合成に対する無機能窒素の半飽和値	mg/l	0.054	I	(13)	
光合成に対するリン酸能リンの半飽和値	mg/l	0.0	Ī	(13)	
光合成に対する最適光量	MJ/m <sup>2</sup> /day	0.912	п	(14)	
	<u>ルロルスに入り、③取過ル単</u> WD/III /Udy 0.912 II (14) ※ 演産完整-a × evn( R × (T-T. ))				
△ <sup></sup>					
タイプⅡ:任意の文献値を参考にチューニングにより決定した					
タイプⅢ:チューニングにより決定した					
(1)山本潤・林田健志・峰寛明・牧田佳巳・山下彰司・田中仁(2008)、(2) Ennley、 R、 W。(1972)、(3)					
堀口文男・中田喜三郎(1993)、(4)堀口文男・中田喜三郎(1995)、(5)Watt、W。D。(1966)、(6)国土交通省					
関東地方整備局・国土交通省東京航空局(2005)、(7)児玉真史・徳永貴久・木元克則・柴原芳一(2009)、					
(8)永尾謙太郎・日比野忠史・松本英雄(2005)、(9)相思	馬明郎・関口泰	ミン・垣尾忠	秀(2005)、(10	))平山公明・	
松尾友矩・今岡正美・平山けい子(1995)、(11) Henrik H	Fossing • Peter	Berg • Bo tha	amdrup • Sore	n Rysgaard •	
Helene Munk Sorensen · Kurt Nielsen(2004)、(12)馬場浴	文・宮崎征男	(1983), (13)	)川口修・山本	~ 民次・松田	
治・橋本俊也(2005)、(14)松本文夫(1959)					

表 3.2-1(1) 生物化学パラメータ

パラメータ	単位	値	タイプ	参考文献	
単位 値 クイク 参考文献 付差珪藻					
最大成長速度(基準温度・16℃)	上保 1/dav	1.3	I	(1)	
成長に対する温度係数	-	-0.004	I	(1)	
最適日射量	MJ/m <sup>2</sup> /day	2.89	I	(1)	
学養恒の取り込みに対すス容素の半的和値	mg/l	0.042	T	(2)	
学義権の取り込みに対する主衆の干絶相値	mg/l	0.004	T	(2)	
本後温の取り込みに入りるリンの干起相直 相対静止呕吸速度(其進退度・22℃)	1/day	0.001	I	(1)	
扣対静止可及还及(盔牛) [[] 之之()] 扣対義止呕吸に関する泪度接粉	1/day	0.0693	I	(1)	
11月前山 中ツに 男り る 価度 休 数 来 合 武 に 上 み る 細 防 ぬ 人 泣 の 割 合		0.0075	I	(1)	
九口以に口のる神心小刀(200)割口 杜死油度(其進沮度・22℃)	1/day	0.004	I	(1)	
伯兄丞及(盔半価及・220) 壮巫に開まる泪度反粉	1/day	0.0693	I	(1)	
伯死に関リる価度体数	1- 1-	0.0075	1	(1)	
[濾水庫産(其進退産・20℃)	m <sup>3</sup> /gC/day	0.18	T	(3)	
徳小述及(盔牛価及・50℃) 遠水に開去る泪度反粉(水泪/20℃)	iii/gC/uay	0.10	I	(3)	
徳小に関     りつ     価     反     「     叙( $ $	-	0.082	I	(3)	
應小に関する価度休数(小価/300)		0.191	I	(3)	
同化が学	-	0.45	I	(4)	
偲小に仕り守奴の割百 由対義止呕吸声度(其進沮度・26 2℃)	1/day	0.214	1 1	(5)	
和対静止呼吸速度(盔竿値及:20。2℃) 相対熱止咳吸に開ナて温度反散(水温~26~2℃)	1/uay	0.009	Ш	(3)	
相対靜止呼吸に関する値及体数(水値/20。2℃)	-	0.1155	I	(2)	
相対靜止呼吸に関する温度係数(水温≤20。2℃)	- 1/day	-0.1370	I	(2)	
日 ※ 死 し 速 皮 ( 奉 準 価 皮 : 20 し )	1/uay	0.001	I	(2)	
自然死しに関する温度係数	-	0.0095	1	(2)	
貧酸素による死し速度	1/day	0.2	ш	-	
必須浴仔酸素量	mg/1	2.0	I	(5)	
サル	·ホワ - m <sup>3</sup> /mC/day	0.16	-		
適不述度(基準温度:25し) 速点に対応する。	m/gC/day	0.10	1	(3)	
適水に対する温度係数(水温<25°C) 遠しにもたる温度係数(小温、25°C)	-	0.132	I	(3)	
適水に対する温度係数(水温≥25℃) 国化共志	-	0.187	1	(3)	
同化効率	-	0.45	1	(4)	
濾水に伴う呼吸の割合 ねれれば野野(古)(基)(第)(1)(1)(1)(1)(1)(1)(1)(1)(1)(1)(1)(1)(1)	- 1/1-	0.214	I	(5)	
相对静止呼吸速度(基準温度:20℃)	1/day	0.007	I	(1)	
相対静止呼吸に関する温度係数(水温>20°C)	-	-0.080	l	(1)	
相対静止呼吸に関する温度係数(水温<20℃)	- 1/1-	0.150	1	(1)	
自然死亡速度(基準温度:20℃)	1/day	0.001	1	(2)	
自然死亡に関する温度係数	- 1/1-	0.0093	1	(2)	
資酸素による死亡速度	1/day	0.05	Ш	-	
必須浴仔酸素量	mg/I	2.0	11	(5)	
堆積物	勿食者	0.10	_		
最大摂食速度(基準温度:20°C)	1/day	0.10	I	(1)	
摂餌の関する温度係数	-	0.0093	I	(1)	
同化効率	-	0.55	I	(1)	
摂食に伴う呼吸の割合 ねまれ、「STER」また(ま)#お店店 20%の)	- 1/1-	0.31	I	(1)	
相对静止呼吸速度(基準温度:20°C)	1/day	0.003	I	(1)	
相対静止呼吸に関する温度係数	- 1/1-	0.0742	l	(1)	
自然死亡速度(基準温度:20℃)	1/day	0.008	1	(1)	
目然死亡に関する温度係数	-	0.0693	1	(1)	
貧酸素による死亡速度	1/day	0.10	Ш	-	
必須俗仔酸素重	mg/I	2.0		(5)	
※速度定数= $\alpha \times \exp(\beta \times (T-T_{base}))$					
タイノ II: 仕意の又献値を参考にチューニングに	より決定した				
<u>ダイフШ</u> : チューニングにより決定した	4 <u>+</u> _+	R (BOODS)			
(1) 安岡澄人・畑恭子・芳川忍・甲野拓冶・白谷栄(2) 文部 利益学(2010) (小) 、 本 株式会社 (2000)	作・甲出喜三関 (5)愛知県北京	時(2005)、(2)	) 「「「「「「「「「」」 (小)	哀現部(2000)、	
(3)文部科学省(2010)、(4)いであ株式会社(2008)、(5)愛知県水産試験場(2004)					

表 3.2-1(2) 生物化学パラメータ

## 3.2.2 流動サブモデル・懸濁物輸送サブモデルの再現精度の検証

モデルの再現性の検証結果を以降に示す。

(1) 潮位

図 3.2-5 には潮位に関する M2 分潮調和定数の振幅の観測値と計算値の比較を示す。 有明海の 3 つの検潮所(ロ之津、三角、大浦)において、計算期間の 7 年間の毎月の 値(30 日ごとに調和解析を実施)について整理した。三角検潮所では計算値がやや高 い傾向があるが、ロ之津、大浦ともに観測値と計算値の潮位振幅はよく再現されている。 また、季節変動の特徴と 2000 年からから 2006 年にかけての長期的な振幅の減少傾向 もよく表現されている。一般に調和解析を実施する際には、月の昇交点の変動に伴う 18.6 年周期の変動が補正されるが、本研究においては実際の水位変動の特徴を表現す るため、F 値による補正を実施せずに調和解析を行っている。計算期間の 2000 年から 2006 年の期間は年平均で F 値が 1.005 から 0.963 に低下しており、これを反映して計 算された M2 分潮の振幅も 4%程度の減少となっている。また、有明海は共振潮汐によ り M2 分潮が効果的に増幅されるが、湾ロー湾奥間(大浦/ロ之津で定義)での増幅率 が湾内潮汐の物理特性として重要な要素となる。2000 年から 2006 年の増幅率の 7 年 間の平均値は計算値が 1.517、観測値が 1.515 となっており、両者はほぼ一致している。 なお、本業務であらたに実施した 2007~2008 年の計算結果も 2000~2006 年の結果



と同様の結果であることを確認した。

図 3.2-5 M2 分潮の調和定数の振幅の比較図

## (2) 流動

2001年において潮流調査は以下の2期間に実施されている。ここでは、そのぞれぞれについて観測値と計算値を比較検証した。

● 2001 年 5 月 11 日~5 月 27 日 (有明海全体)

● 2001 年 7 月 10 日~7 月 25 日 (諫早湾周辺)

1) 2001年5月11日~5月27日(有明海全体)の調査結果

2001 年 5 月の 15 昼夜連続観測結果1の調査位置を図 3.2-6 に、各観測点の観測層および観測期間を表 3.2-2 に示した。本調査は有明海の 12 地点で行うとともに、この内 3 地点では上中下の 3 層での測定であった。潮流楕円の比較図を図 3.2-7 に、平均流の比較図を図 3.2-8 に示す。

調査地点	上層	中 層	下層	観測期間	
Stn.1	海面下 3m	_	—	5月11日~26日	
Stn.2	海面下 3m	—		5月11日~26日	
Stn.3	海面下 3m	—	_	5月11日~26日	
Stn.4	海面下 3m	海面下 5m	海面下 10m	5月12日~27日	
Stn.5	海面下 3m	—	_	5月11日~26日	
Stn.6	海面下 3m	—	—	5月11日~26日	
Stn.7	海面下 3m	海面下 5m	海面下 10m	5月12日~27日	
Stn.8	海面下 3m	—	_	5月12日~27日	
Stn.9	海面下 3m	—	_	5月12日~27日	
Stn.10	海面下 3m	海面下 5m	海面下 10m	5月12日~27日	
Stn.11	海面下 3m	_		5月12日~27日	
Stn.12	海面下 3m	_		5月12日~27日	

表 3.2-2 2001 年5月調査の観測層および観測機関



図 3.2-6 2001 年 5 月の潮流調査地点図

<sup>1</sup>平成13年度国土総合開発事業調整費有明海海域環境調査のうち、潮流観測調査結果(国土交通省海上保 安庁)



図 3.2-7(1) 潮流楕円の比較図







図 3.2-7 (3) 潮流楕円の比較図



図 3.2-8 平均流の比較図(海面下 3m、5m、10m)

2) 2001 年 7 月 10 日~7 月 25 日 (諌早湾周辺)の調査結果

2001 年 7 月の 15 昼夜連続観測結果1の調査位置を図 3.2-9、各観測点の観測層を表 3.2-3 に示した。潮流楕円の比較図を図 3.2-10 に、平均流の比較図を図 3.2-11 に示す。

		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	
調査地点	上層	下層	設置時水深
Stn.1	海面下 2m	—	5.0 m
Stn.2	海面下 2m	—	6.0 m
Stn.3	海面下 2m	—	4.0 m
Stn.4	海面下 2m	—	4.0 m
Stn.5	海面下 2m	—	8.0 m
Stn.6	海面下 2m	—	8.0 m
Stn.7	海面下 2m	—	16.0 m
Stn.10	海面下 2m	—	16.0 m
Stn.12	海面下 2m	1/2 水深	20.0 m
Stn.13	海面下 2m	1/2 水深	23.0 m
Stn.14	海面下 2m	1/2 水深	33.0 m

表 3.2-3 2001 年7月調査の観測層



図 3.2-9 2001 年 7 月の潮流調査地点図

<sup>1</sup>平成14年度諫早湾干拓事業潮流調查業務報告書、九州農政局諫早湾干拓事務所



図 3.2-10(1) 潮流楕円の比較図





図 3.2-10 (3) 潮流楕円の比較図



図 3.2-11 平均流の比較図(海面下 2m、1/2 水深)

## (3) 水温·塩分

## 1) 浅海定線データとの比較

有明海において福岡県、熊本県、佐賀県および長崎県が、概ね月に1回程度実施している浅海 定線調査により得られる水温・塩分の観測値と計算値との比較を行った。図 3.2-12 には、浅海 定線のうち 2001 年に1月~12 月の12 回調査が実施された地点を示す。これらの地点について のみ観測値と計算値の比較を行った。なお、調査日および調査時刻は地点により異なるが、概ね 大潮の満潮時に調査が実施されている。また、図 3.2-12 に示す地点のうち代表的なものとして 図中に□で施した地点について水温・塩分の比較図を図 3.2-13 に示す。



図 3.2-12 浅海定線調査地点図(2001 年の 12 回調査を実施した地点)









## 2) 浅海定線の観測値との比較(長期間での比較)

2001年の予測に加え、同様の計算パラメータを用いて、各年での境界条件の変化を考慮した 2000年~2008年までの連続計算を実施した。有明海において福岡県、熊本県、佐賀県および長 崎県が、概ね月に1回程度実施している浅海定線調査により得られる水温・塩分の観測値とその 計算値との比較を行った。特に、浅海定線の調査地点のうち、代表的な6地点(図 3.2-14の中 の□)について計算を実施したすべての期間(2000年~2008年の9年間)について、水温・塩 分の比較を行った結果を図 3.2-15に示す。



図 3.2-14 浅海定線調査地点図




図 3.2-16 には水温・塩分の表層および底層における観測値と計算値の関係を示す。水温の比較 図より、水温の季節変化傾向が明瞭に再現されており、夏季においては湾中央部で水温成層が発 達する特徴が表現されている。観測値と計算値の相関図からも両者はほぼ一致している。

一方、塩分の比較図からは底層において計算塩分は過小評価している傾向がある。この傾向が 顕著なのは湾奥部の浅海域であり、陸域から流入した淡水の影響がこの海域で過大に表現されて いる可能性がある。その理由としては、陸域からの淡水流入量が過大である点や、直接流入域か らの淡水流入を全海岸線から流入させており、淡水が全域に拡大・滞留しやすくなっている可能 性も考えられる。しかしながら、その他の海域においては、再現性は良好であり、出水期に対応 して表層の低塩分化が生じ、塩分成層が形成される特徴が表現されている。また、成層期におけ る鉛直プロファイルをみると比較的浅い地点(水深 5m 程度)においても再現性が良好であった。



図 3.2-16 水温・塩分に関する計算値と観測値の相関

#### (4) **懸濁物(SS)**

SS 濃度の計算値と観測値の比較を行うにあたって、「平成 14 年度国土総合開発事業調整費 有明海海域環境調査」<sup>1</sup>内の SS の連続観測結果を引用した。SS の観測位置を図 3.2-17 に示す。

計算値は、各観測地点において観測値の濃度レベルを良く再現しているものと考えられるが、観測 値に見られる細かな濃度変動を、特に底層において再現できていないことがわかる。これは、巻き上 げフラックスや沈降フラックスの再現性に一部、課題があることを示唆するものである。今後、現在 試行計算で設定している巻上げ係数(参照:図 3.2-18)の設定方法を見直すなどの検討が必要であ るものと考えられる。



<sup>1</sup> 平成14年度国土総合開発事業調整費 有明海海域環境調査 報告書、平成15年3月、農林水産省、水産庁、農林水 産省 農村振興局、経済産業省 資源エネルギー庁、国土交通省 河川局、国土交通省 港湾局、環境省 環境管理局



図 3.2-18 水中 SS 濃度の計算値と観測値の比較(-:観測値、-:計算値)

## 3.2.3 水質・底質サブモデルの検証(JST モデルとの比較)

水質・底質サブモデルの検証にあたり、まず JST モデルでの計算結値と観測値の比較結果を以降 に示す。



(1) 公共用水域水質調査結果および浅海定線調査結果との比較(JST モデルとの比較) 図 3.2-19 に示す調査地点において、観測値と計算値の比較を実施した。

## 公共用水域水質調査結果および浅海定線調査結果との比較(計算結果は時間平均値) 比較項目:表層クロロフィル a



公共用水域水質調査結果および浅海定線調査結果との比較(計算結果は時間平均値) 比較項目:表層リン酸態リン





# 水中リン酸態リン濃度の JST モデル計算値と観測値の比較結果

湾奥部の地点で計算値が観測値よりも過小となっている。

公共用水域水質調査結果および浅海定線調査結果との比較(計算結果は時間平均値) 比較項目:表層アンモニア態窒素



**水中アンモニア態窒素濃度の JST モデル計算値と観測値の比較結果** 計算値が観測値よりも過大となっている。とくに湾央部でその傾向が顕著である。

公共用水域水質調査結果および浅海定線調査結果との比較(計算結果は時間平均値) 比較項目:表層硝酸態窒素





## **水中硝酸態窒素濃度の JST モデル計算値と観測値の比較結果** 概ね計算値と観測値の濃度の変動傾向は一致しているが、3~5月頃(春季)に計算値が観測値よりも 過大になる傾向にある。

公共用水域水質調査結果および浅海定線調査結果との比較(計算結果は時間平均値) 比較項目:表層溶存酸素





水中表層溶存酸素濃度のJSTモデル計算値と観測値の比較結果 湾奥部において計算値が観測値よりも過大になる傾向にある。とくに湾奥部で顕著である。 公共用水域水質調査結果および浅海定線調査結果との比較(計算結果は時間平均値) 比較項目:底層溶存酸素



底層表層溶存酸素濃度のJST モデル計算値と観測値の比較結果 概ね一致しているが、4~7月頃には計算値が観測値よりも過大になる傾向にある

公共用水域水質調査結果および浅海定線調査結果との比較(計算結果は日平均値) 比較項目:表層 **T**-N



表層 T-N の JST モデル計算値と観測値の比較結果 全般的に計算値が観測値よりも過大となっている。

公共用水域水質調査結果および浅海定線調査結果との比較 比較項目:表層 **T**-P



表層 TPの JST モデル計算値と観測値の比較結果
濃度のオーダーは概ね一致している。

## (2) 佐賀大学提供データとの比較(JST モデルとの比較)

JSTモデルの計算格子内での佐賀大学より提供を受けた観測データの調査地点の位置を図 3.2-21 に示す。ST.AとST.Bは、JSTモデルでは同一格子内に位置していることに留意する。



図 3.2-21 佐賀大学提供データの調査地点と JST モデルの計算格子位置の対応

佐賀大学より提供された観測データのうち、表 3.2-4 に示す観測項目について計算値との比較を行った。

水質観測データ		
調査名	計算値と観測値の比較項目	
1.水質調査結果(分析)	クロロフィル a、硝酸態窒素、アンモニア態窒素、リン酸態リン、 懸濁態有機炭素(POC)、溶存態有機炭素(DOC)、懸濁態有機窒素 (PON)、総りん(T-P)、溶存態総りん(D·T-P)、SS	
2.CTD 観測結果(機器観測)	溶存酸素、クロロフィル a	
3.係留データ	クロロフィルa	

表 3.2-4 佐賀大学提供データとの比較項目

」 底質観測データ		
調査名	計算値と観測値の比較項目	
4.底質調査	間隙水中のアンモニア態窒素、硝酸態窒素、リン酸態リン	
	総有機炭素、総有機窒素、総有機リン(溶存態+懸濁態)	

1) 水質調査結果(分析)に関する比較

2007年8月15日と2008年2月9日を例に、各調査地点での計算値と観測値の比較を図 3.2-22 に示す。





水質調査結果(分析)について JST モデル計算値と観測値の比較結果
●クロロフィル a 観測値にみられる夏季のクロロフィル a 濃度の上昇を、計算値は再現できていない。計算値でも夏 季にクロロフィル a 濃度は観測値と同程度まで上昇しているが、この上昇の時期が観測値と一致し ていない。(参照:図 3.2-20(1))
●リン酸態リン 湾奥では夏場に計算値が観測値よりも過小となっている。
●アンモニア態窒素 計算値が観測値よりも常に過大となっている。
●硝酸態窒素および亜硝酸態窒素 計算値と観測値は概ね一致している。
●SS 計算値が観測値より過大になっている。
●懸濁態有機炭素 計算値が観測値よりも過大になっている。 SS の計算値が過大となっている影響によるものと考えら れる。
●懸濁態有機窒素 計算値が観測値よりも過大となっている。 SS の計算値が過大となっている影響によるものと考えら れる。
●総リンおよび溶存態総リン リンの懸濁態と溶存態の内訳については、計算値と観測値は概ね一致している。
●懸濁態有機炭素 計算値と観測値の濃度レベルは一致している。

2) CTD 観測結果(機器観測)に関する比較

CTD 観測結果(機器観測)は、図 3.2-23の赤線で示すように、調査地点における計算値および観 測値を断面分布図として整理し、比較した。



#### CTD 観測結果(機器観測)について JST モデル計算値と観測値の比較結果

●水温

計算値と観測値は比較的一致している。

●塩分

計算値が全体的に過小となっている。また観測値に見られる夏季の成層の再現性についても計算 値には課題が残る。空間解像度の問題(900m格子の限界)、河川流量の過大評価等が要因として 考えられる。

#### $\bullet$ SS

観測値は大潮満潮時にはSSが沈降しているが、計算値は沈降していない。この点が観測値と計 算値で整合がとれていない。

#### ●クロロフィル a

10 月~12 月にかけて、クロロフィル a 濃度の計算値が観測値より過大となっている。また観測 値は成層上にクロロフィル a 濃度が高濃度に分布しているものと推測されるが、計算値は水深方 向に一様に高濃度のクロロフィル a が分布している。この点が計算値と観測値の相違点として挙 げられる。

#### ●溶存酸素

計算値と観測値の季節的な濃度変化の傾向は一致している。しかしながら、観測値では干潟上の 水深 5m 付近まで溶存酸素が 4mg/L 以下の水塊が移流している様子がわかるが、計算値ではこの 水塊が確認できない。干潟部での貧酸素水塊の発生(移流もしくは生成)について計算値と観測 値に相違が見られた。塩分の再現性として、観測値で見られた干潟部での成層構造が計算値では 見られなかったため、干潟部での移流の再現性がこの相違をもたらす一要因となっているものと 推測される。



図 3.2-24(1) 水温の機器観測結果との比較



図 3.2-24(2) 水温の機器観測結果との比較



図 3.2-24(3) 塩分の機器観測結果との比較



図 3.2-24(4) 塩分の機器観測結果との比較



図 3.2-24(5) 濁度・SSの機器観測結果との比較



図 3.2-24(6) 濁度・SSの機器観測結果との比較



図 3.2-24 (7) クロロフィル a の機器観測結果との比較



図 3.2-24 (8) クロロフィル a の機器観測結果との比較



図 3.2-24 (9) 溶存酸素の機器観測結果との比較



図 3.2-24 (10) 溶存酸素の機器観測結果との比較

3) 係留データに関する比較

係留観測により得られたデータとして、ST.F における水温、濁度、クロロフィル a の計算値と観 測値の比較を図 3.2-25 に示す。



#### 4) 底質調査結果に関する比較

JST モデルでは、浮遊系の 900m 格子を任意に連結させたボックス格子にて、底質の解析を行っている。図 3.2-26 は、底質調査地点と JST モデルのボックス分割図の対応を示している。この対応 関係を踏まえた上で、図 3.2-27 に計算結果と観測結果の比較を示す。



図 3.2-26 底質調査地点と JST モデルのボックス分割図の対応

#### 底質調査結果について JST モデル計算値と観測値の比較結果

- ●間隙水中のリン酸態リン 計算値と観測値は比較的一致している。しかしながら、観測値は干潟上の Stn.A および Stn.B 付 近で濃度が高くなる傾向にあるが、計算値はこれを再現できていない。
- ●間隙水中のアンモニア態窒素

計算値は観測値の濃度レベルや季節変動を概ね再現できている。しかしながらリン酸態リンと同様に、干潟上の Stn.A および Stn.B 付近で観測値は濃度が高くなる傾向にあるが、計算値はこれを再現できていない。

#### ●間隙水中の硝酸態窒素

計算値は観測値の濃度レベルを再現しているが、硝酸濃度が上昇する時期やその深度までは再現 できていない。

●底泥中の粒子状有機炭素(P·TOC) 計算値と観測値は濃度レベルが異なっている。また季節的な底泥の濃度変化傾向についても再現 できていない。

- ●底泥中の粒子状窒素(P・TN) 粒子状有機炭素と同様である。
- ●底泥中の粒子状リン(P·TP) 計算値と観測値の平均的な濃度レベルは一致しているものの、季節的な底泥の濃度変化傾向についても再現できていない。

●酸化層厚(酸化還元電位) 計算値は観測値よりも、酸化層厚は過小となっているものと考えられる。

●底泥中の硫化物濃度

計算値の硫化物濃度は観測値よりも過大となっている。酸化層厚が過小評価となっていることが 要因であると推測される。

## ③ 間隙水中のリン酸態リン



386

### ④ 間隙水中のアンモニア態窒素



387

### ⑤ 間隙水中の硝酸態窒素



図 3.2-27(3) 底泥間隙水中の硝酸態窒素の比較

## ⑥ 粒子状有機炭素(P.TOC)



389

## ⑦ 粒子状窒素(P.TN)



390

## ⑧ 粒子状リン(P.TP)



図 3.2-27(6) 底泥中の粒子状リンの比較

## ⑨ 酸化層厚



※計算値は、有機物分解に占める酸素還元および硝酸還元の割合を示している
⑩ 硫化物濃度

底泥内の硫化物濃度の計算値と観測値を比較し、図 3.2-28 に示す。



## 3.2.4 2007~2008 年のデータを用いたモデル再現精度の向上に関する検討

2007 年、2008 年の現況再現にあたって、流動サブモデルは JST モデルでも十分に再現性が高い ものとして、チューニングの対象としていない。、懸濁物輸送サブモデルの再現精度については、課 題はあるものの、計算値を検証する十分なデータが現状ではないことから、流動サブモデルと同様に チューニングの対象としなかった。すなわち、水質・底質サブモデルのチューニングに重きを置くこ ととした。

またチューニングにあたっては、有明海北西部の佐賀沖の再現性の向上に重きを置くものとした。 また、計算条件として、2008年の河川流量は速報値を用いていることに留意する必要がある。なお、 この再現精度の検証にあたって、積分期間は 2006年1月~2008年12月とした。

観測値と計算値の比較により明らかとなった主な問題点は表 3.2-5 のとおりである。

## 表 3.2-5 JST モデルでの再現精度に関する主な課題

- 1. 水中のアンモニア態窒素濃度の過大表現
- 2. 水中のリン酸態リンの過小表現
- 3. 鉛直方向のクロロフィル a 濃度分布の再現性
- 4. 表層溶存酸素濃度の過大表現
- 5. 底泥内の粒子状炭素と窒素濃度レベルおよび炭素/窒素比の実測値との乖離
- 6. 底泥内の酸化層の過小評価
- 7. 底泥内の硫化物濃度の計算値が過大

## (1) モデルの改良にあたっての作業方針

表 3.2-5 に示した課題を改善することを目的として、主に表 3.2-6 に示すようにモデルの改良お よび計算パラメータの変更を実施した。流動モデル・懸濁物輸送モデルについては変更を加えていな い。

表 3.2-6 モデルの改良および計算パラメータの変更点
① 巻き上げによる底泥間隙水の水中への拡散に伴う濃度変動の表現方法を変更
(変更前):水中と間隙水の濃度差に輸送量を乗じることにより、水中から底泥へのフラッ
クスを表現していた。
$Flux\_liquid = \frac{RF \cdot w/100}{v} \times (C_L - C_{L0}) \times 10^{-3}$
/w ( <b>亦再 ( 亦 万 )</b> ・ 閉踏 水 濃
(友父役). 间原小康及に軸込重を木しるように友父した。 RF w/100
$Flux\_liquid = \frac{12}{\gamma_w} \times C_L \times 10^{-3}$
② 干潟上での干出の取り扱い
(変更前):干出時において、底泥間隙水は、計算上の問題から存在する10cm(最低水深)
の直上水と常時濃度拡散する。
(変更後):干出時は、底泥間隙水と直上水の物質交換はしないように変更した。ただし、
溶存酸素については、間隙水と大気との交換を疑似的に表現するため、従来通り底泥間隙水
と 追上水の物質交換は存在するものとした。このとき、 追上水の 再はっ気係数は、 通常の 10
倍の値(20m/day)を与えている。
③
(変更則): 定吊訂昇 (設定した広負の初期値)) 観測値 いら北離していた (亦再強), 計算 パラメータでなる CC POC 比か上だ バイナターベーション 低粉な目声した
(変更後): 計算ハノメータ じめる SS-FOC 比ねよいハイオターパーション係数を見直した う う で 完党計算を 再度 宇協し 細測値 ととり 軟合性の 真い 知期値を設定した
の 水山の右燃炭表の分解凍産の恋雨( 計算パラメータの恋雨)
(変更前)・見分解性の懸濁能有機炭素の分解速度(其進退度:0℃)・0.018 (1/day)
次 定能有機 炭素の分解 速度(基準温度 $\cdot 0^{\circ}$ )・0.006 (1/day)
(変更後)・易分解性の懸濁能有機炭素の分解速度(基準温度:0℃):0.000(1/day)
深存態有機炭素の分解速度(基準温度:0°C): 0.007 (1/day)
⑤ 底泥内の分解速度の変更(計算パラメータの変更)
(変更前):底泥内の難分解性有機リンの分解速度(基準温度:0℃):0.0005(1/day)
(変更後): 底泥内の難分解性有機リンの分解速度(基準温度:0℃): 0.0125 (1/day)
⑥ 沈降有機物の SS-POC 比の変更(計算パラメータの変更)
(変更前):SS/POC 比:0.053 (g/mg)
⑦ バイオターベーション速度の変更(計算パラメータの変更)
(変更前):液相のバイオターベーション最大速度:0.500 (cm <sup>2</sup> /day)
固相のバイオターベーション最大速度: 0.001 (cm <sup>2</sup> /day)
(変更後):液相のバイオターベーション最大速度:0.400 (cm <sup>2</sup> /day)
固相のバイオターベーション最大速度: 0.400 (cm <sup>2</sup> /day)

## (2) 精度向上の検討結果

1) 公共用水域水質調査結果および浅海定線調査結果との比較

図 3.2-29 に示す調査地点において、従来ケースと精度向上を図ったケース(以降、精度向上ケースとする)とを比較した。なお、計算値は時間平均値として整理した。



## 公共用水域水質調査結果および浅海定線調査結果との比較 比較項目:表層クロロフィル a



## 表層クロロフィル a 濃度の精度向上を図った計算値と観測値の比較結果

再現精度は大きく変化していない。

公共用水域水質調査結果および浅海定線調査結果との比較 比較項目:表層リン酸態リン





## リン酸態リン濃度の精度向上を図った計算値と観測値の比較結果

湾奥部でのリン酸態リンの過小評価が改善された。

公共用水域水質調査結果および浅海定線調査結果との比較 比較項目:表層アンモニア態窒素



## アンモニア態窒素濃度の精度向上を図った計算値と観測値の比較結果

アンモニア態窒素の過大評価は改善されていない。

## 公共用水域水質調査結果および浅海定線調査結果との比較 比較項目:表層硝酸態窒素





# **硝酸態窒素濃度の精度向上を図った計算値と観測値の比較結果**

3~5月頃(春季)の過大評価は改善されていない。

公共用水域水質調査結果および浅海定線調査結果との比較 比較項目:表層溶存酸素





## 表層溶存酸素濃度の精度向上を図った計算値と観測値の比較結果 表層溶存酸素の再現性が向上した。

公共用水域水質調査結果および浅海定線調査結果との比較 比較項目:底層溶存酸素



底層溶存酸素濃度の精度向上を図った計算値と観測値の比較結果 再現性 4~7 月頃の過大評価は改善されていないが、概ね再現精度は良い。 公共用水域水質調査結果および浅海定線調査結果との比較 比較項目:表層 **T**·N



表層 T-N の精度向上を図った計算値と観測値の比較結果 計算値の過大評価は一部改善されたが、依然として計算値が観測値よりも過大となっている点が多い。

公共用水域水質調査結果および浅海定線調査結果との比較 比較項目:表層 **T**-P



## 表層 **T-P**の精度向上を図った計算値と観測値の比較結果 再現精度は大きく変化していない。

2) 水質調査結果(分析)に関する比較

2007年8月15日と2008年2月9日を例に、各調査地点での精度向上ケースと観測値の比較を図 3.2-31 に示す。





## 水質調査結果(分析)について精度向上を図った計算値と観測値の比較結果

●アンモニア態窒素および懸濁態有機窒素の過大評価について、わずかに再現性が改善した。
 ●全般的に再現精度は大きく変化していない。

3) 係留データに関する比較

係留観測により得られたデータとして、ST。F におけるクロロフィル a の精度向上ケース(計算値)と観測値の比較を図 3.2-32 に示す。



係留データについて精度向上を図った計算値と観測値の比較結果
●冬季の過大評価については改善されていない。

4) 底質調査結果に関する比較

図 3.2-26 に示す地点で行われた底質調査結果について、精度向上ケースと観測値の比較を図 3.2-33 に示す。



図 3.2-26(再掲) 底質調査地点と JST モデルのボックス分割図の対応

底質調査結果について精度向上を図った計算値と観測値の比較結果
●底泥中の粒子状有機炭素(P.TOC)および粒子状窒素(P.TN)、粒子状リン(P.TP)
計算値と観測値の濃度レベルは一致した。しかし、観測値の季節変動は再現できていない。
●酸化層および硫化物濃度
底泥のバイオターベーション係数を変更することにより、酸化層厚の過小評価が改善し、硫化物
濃度レベルが一致した。ただし、夏季における硫化物の上昇量の再現精度には課題が残っている。







# iii) 間隙水中の硝酸態窒素













vii) 底泥中の粒子状リン



viii) 酸化層厚





## 5) 溶存酸素の連続データとの比較

「貧酸素水塊漁業被害防止対策事業」(水産庁増殖推進部漁場資源課)並びに「有明海・八代海再 生重点課題対策調査」(環境省水・大気環境局水環境課閉鎖性海域対策室)による溶存酸素濃度の観 測結果と本計算値の比較を行った。溶存酸素の観測地点は、図 3.2-35 に示す。



溶存酸素の連続データについて精度向上を図った計算値と観測値の比較結果
●2006 年~2008 年にかけての貧酸素水塊の挙動を、計算値は概ね再現できているものと考えられる
課題として、7月上旬の貧酸素化が過小評価となっていることが挙げられる。





(-:精度向上ケース、-:従来ケース、-:観測値)



(3) まとめ

●塩分の過小評価
●水中のアンモニア態窒素濃度の過大評価
●水中のリン酸態リンの過小評価
●鉛直方向のクロロフィル a 濃度分布の再現性
●表層溶存酸素濃度の過大評価
●初夏(6~7月)における底層溶存酸素濃度の過大評価
●底泥内の粒子状炭素と窒素濃度レベルおよび炭素/窒素比の実測値との乖離
●底泥内の酸化層の過小評価
●底泥内の硫化物濃度の過大評価
2. 課題を解決するべく検討した事項
●巻き上げによる底泥間隙水の水中への拡散に伴う濃度変動の表現方法を変更
●干潟上での干出の取り扱い(干出時の底泥と水中の物質交換の評価方法の変更
●底泥の計算初期値を変更
●有機炭素の分解速度の変更(計算パラメータの変更)
●底泥内の分解速度の変更(計算パラメータの変更)
●沈降有機物の SS-POC 比の変更(計算パラメータの変更)
●バイオターベーション速度の変更(計算パラメータの変更)
3. 再現精度が高まった事項
●底泥中の粒子状有機物質の濃度レベルおよび炭素/窒素比
●硫化物濃度の再現性(底泥の酸化層の評価)
●水中のリン酸態リンの再現性(窒素制限の評価)
●水中の総窒素(T-N)濃度の再現性
●表層溶存酸素濃度の過大評価
※流動モデル、懸濁物輸送モデルについて、再現精度の向上に関する検討は実施していない。
4. 再現精度の向上に課題が残った事項
●冬季のアンモニア態窒素の過大評価
●鉛直方向のクロロフィル a 濃度分布の再現性
●底泥中の粒子状有機物質の季節変動
●夏季における硫化物濃度の上昇量
●干潟上での炭素・窒素・リン等の物質循環(底生生物との相互作用)
●初夏(6~7月)における底層溶存酸素濃度の過大評価





そのため、アンモニア態窒素の過大評価の要因は、ここで挙げた影響以外によるものであると推測 される。考えられる要因としては、ノリ養殖によるアンモニア態窒素の系外除去量の過小評価、冬季 の植物プランクトンによる取り込み量の過小評価、懸濁態有機窒素の無機化量の過大評価などであ る。

## 6. 今後の精度向上が必要な事象とそのために必要な観測データ

●懸濁物輸送モデルの高精度化

底泥中の粒子状有機物質の季節変動が再現できなかったことに関しては、底質変動は底泥の侵 食・堆積量の再現性(懸濁物輸送サブモデル)に課題があるものと推測される。底質の季節変動と して、観測値では TOC を指標とすると約 10mg/g の変動量が底泥表層から泥深 10 cm層全体でみら れた。この変動量を説明するためには、底泥の土粒子密度を 2.5g/cm<sup>3</sup>、空隙率を 0.7 と仮定すると、 750gC/m<sup>2</sup> の有機物の供給がなくてはならない。一方で、一次生産による有機炭素の沈降フラック スは多く見積もっても 1gC/m<sup>2</sup>/day 程度であり、一次生産によるデトリタスの沈降だけでは、底泥 濃度の季節変動を説明することはできない。すなわち、観測地点外で侵食された底泥が、観測地点 に堆積することにより、この濃度変動が生じているものと推測される。とくに観測値で濃度が上昇 していたのは冬季であり、ノリ網の設置によって懸濁物が観測地点周辺に堆積していることも想定 される。

これらの底泥の侵食・堆積量は懸濁物輸送モデルにて予測を行っている。懸濁物輸送モデルの再 現データとして、有明海内の侵食量・堆積量の実測データは乏しく、再現性の向上を図れないのが 現状である。また底泥の巻き上げの予測に関しては、巻き上げ係数の設定が必要となる。懸濁物輸 送モデルの再現精度の向上には、これらのデータを現地観測により取得するが必要がある。

●植物プランクトン・動物プランクトンの成長・死亡に関するパラメータの取得

有明海の物質循環を評価するうえで最も重要な植物・動物プランクトンの成長・死亡に関するパ ラメータは、他の海域で行われた既存のパラメータを参考に設定している。既存のパラメータには 値の幅があるととも、このパラメータの設定が計算結果に大きく影響するため、有明海でのこれら の実態を把握する現地調査が必要である。

●有機物の分解性に関するパラメータの取得

貧酸素水塊の再現にあたって最も重要なパラメータである有機物の分解性については、有益な現 地データが乏しいのが現状である。一次生産起源の有機物や河川からの供給される有機物、底泥内 の有機物等の分解性について、現地および室内試験等を通じてパラメータを取得する必要がある。

●底生生物を通じた物質循環の高精度化

干潟上での栄養塩等の再現性に課題が残った要因としては、底生生物を通じた物質循環の再現性 に課題があるためであると考えられる。また現状では生物量は境界条件として設定しているため、 貧酸素水塊や硫化物への暴露による生物の死亡、生物死骸の腐敗、さらなる硫化物の発生といった 機構を表現していない。これを表現することにって、底泥の硫化物濃度や貧酸素水塊の挙動の評価 はより高精度なものとなると考えられる。

## 3.3 過去の物質収支推定(1930~2000年代)

有明海の干潟・浅海域における物質収支の変化要因を解明するために、数値解析モデルによる感度解析を行った。2001年の現況に対して、過去のエポックを考慮して、

- 1 諫早干拓潮受堤防締め切り前の 1990 年代前半(1990 年)
- 2 透明度上昇前の1980年代前半(1983年)
- 3 ノリの生産が拡大した 1970 年代後半(1977年)
- 4 湾奥部大規模干拓前でノリの生産が少なかった 1950 年代
- 5 流入負荷量がより小さかった太平洋戦争前の 1930 年代

の5ケースを設定した。

## 3.3.1 計算条件

## (1) 地形 (海域面積)

地形は、現況の 2000 年代に対して、諫早干拓と熊本新港のなかった 1970~1990 年代、湾 奥部の大規模干拓がなかった 1930~1950 年代の 3 ケースとした。各年代の地形を図 3.3-1 に 示す。



図 3.3-1 2000 年代の地形との比較

## (2) 気象条件、淡水流入量

すべての計算ケースの気象条件、河川水温、河川流量は2001年と同じにした。

(3) 潮汐

月の昇交点の変動に伴う 18.6 年周期の潮位振幅 F 値(M2 分潮)については、2001 年比で 1977 年では+3%、1983 年では±0%、1990 年では-3%であった。1930 年代および 1950 年代 は 2001 年と同じにした。1930 年代と 1950 年代で 2001 年に F 値が近い年は、1937 年、1955 年である。

平均水面は大浦の平均潮位(時間潮位の年平均値)をもとに2001年との差を用いた(4章参照)。1930年代および1950年代は観測データがないため、1970年以降の最低値とした。

## (4) 流入負荷量

1) 1977年、1983年、1990年

一級河川(塩田川を含む)順流域では、時間流量と国調費モデルのL-Q式により時間負荷量 を計算し、表 3.3-1の係数を乗じた。表 3.3-1は原単位法による排出負荷量の 2001 年に対する 変化率である。

一級河川(塩田川を含む)感潮域および直接流入域では、原単位法による排出負荷量と流達 率から年間の流入負荷量を算出し、近傍河川の時間負荷量と同様の時間変動を与えた。

No 河川流城		COD			TN		TP		IN				SS			
INU	何刀们加坡	1977	1983	1990	1977	1983	1990	1977	1983	1990	1977	1983	1990	1977	1983	1990
1	本明川順流域	1.629	1.629	2.299	1.504	2.244	2.542	1.929	2.809	2.912	1.504	2.244	2.542	0.419	4.472	4.472
2	六角川順流域	1.327	1.327	1.137	1.604	1.689	1.523	1.177	1.349	1.625	1.604	1.689	1.523	3.774	1.600	2.841
3	嘉瀬川順流域	1.832	1.832	1.810	2.835	2.900	2.751	3.221	3.457	3.382	2.835	2.900	2.751	1.051	0.702	1.043
4	筑後川順流域	1.301	1.301	1.353	1.526	1.645	1.661	1.303	1.539	1.522	1.526	1.645	1.661	0.486	1.264	1.387
5	矢部川順流域	1.222	1.222	1.078	1.254	1.275	1.174	1.242	1.300	1.260	1.254	1.275	1.174	1.061	1.058	1.061
6	菊池川順流域	1.058	1.058	1.260	0.947	1.202	1.231	0.793	1.130	1.172	0.947	1.202	1.231	0.659	0.917	0.804
7	白川順流域	1.012	1.012	1.066	1.067	1.192	1.163	0.873	1.113	1.119	1.067	1.192	1.163	0.892	1.000	1.000
8	緑川順流域	1.165	1.165	1.149	1.402	1.382	1.351	1.716	1.764	1.600	1.402	1.382	1.351	0.245	0.617	0.565
9	塩田川順流域	1.194	1.194	1.123	1.392	1.477	1.409	1.313	1.527	1.535	1.392	1.477	1.409	1.000	1.000	1.000

表 3.3-1 1977 年、1983 年、1990 年の負荷量の 2001 年対比

2) 1930年代、1950年代

1930~1950年代の有明海流入負荷量に関する情報がないため、大阪湾の流入負荷量のトレンドを参考にした。中西(1993) 1をもとに 1926~1987年の大阪湾の流入負荷量の推移を図 3.3・2 に示す。これより、1977年対比の負荷量を求め、有明海の 1977年/2001年より 2001年対比にしたのが表 3.3・2 である。ただし、COD は 1977年対比では 1930年代、1950年代ともわずかに小さいだけであり、有明海での 1970年前後からの COD の減少を再現できないので、有明海排出負荷量のトレンドから推定した。IN は TN と同じにした。SS は、現況より土砂発生量が大きく、河川からの持ち出し量が小さいと予想され、2000~2007年の変動幅を参考にして推定した。全流域とも 2001年の時間負荷量に表 3.3・2の係数を乗じた。



図 3.3-2 大阪湾の流入負荷量の推移(1977年対比) 小倉編「東京湾」(1993)より作成

表 3.3-2 1930 年代, 1950 年代の負荷量の 2001 年対比(全流域)

	COD	TN	TP	IN	SS
1930年代	0.63	0.46	0.49	0.48	2.00
1950年代	0.80	0.59	0.63	0.63	1.50

1 中西 弘 (1993) 流入負荷量 (小倉紀雄 (編) 東京湾) 恒星社厚生閣, 東京.

## (5) ノリ養殖

1) 1977年、1983年、1990年

1970~1990年代のノリ共販数量は佐賀県では実績値、他県では佐賀県の共販数量(枚数) に福岡県 0.734、熊本県 0.660、長崎県 0.014 を乗じて推定した(図 3.3-3)。これらの換算率 は 2000~2006年の佐賀県対比である。炭素、窒素、リンへの換算率は各年とも 0.857g C/枚、 0.197g N/枚、0.0167g P/枚とした。

酸処理剤は 1984 年に福岡県と熊本県、1993 年に佐賀県、1994 年に長崎県が使用し始めた (図 3.3-4)。酸処理剤の TN、TP 含有率および COD 換算率は 1999 年と同じにし、表 3.3-3 を用いた。



施肥は佐賀県だけで行われており、佐賀県の実績値とした。

図 3.3-3 ノリ共販数量の推移



図 3.3-4 酸処理剤使用量の推移

資料:佐賀県,福岡県,熊本県,長崎県

表 3.3-3	1999年の	)酸処理剤含す	有率の推定値	
項目	長崎県	佐賀県	福岡県	熊本県
TN 含有率 [%]	1.9	3.3	3.2	1.2
TP 含有率 [%]	6.2	5.0	4.9	6.6
COD 換算率 [%]	31.3	31.3	31.3	31.3
			次約1.1日間	囲曲エデル

資料:国調費モデル

2) 1930年代、1950年代

ノリ共販数量は施設免許面積も推移から推定し(4 章参照)、1930年代では50百万枚/年、 1950年代では500百万枚/年とした。施肥は未使用とした。

## (6) 懸濁物食者現存量初期値

懸濁物食者の内訳は、アサリ、サルボウ、タイラギ、アゲマキ、カキ、カキ養殖およびその 他の7種類とした。その他の懸濁物食者以外は水産生物であり年間漁獲量から現存量を推定し た。推定にあたっては、表 3.3-4 のようにした。なお、堆積物食者、微小藻類の現存量初期値 は現況と同じにした。

計算にあたって、底生生物の現存量は境界値(現存量の季節変動なし)として扱い、底生生物が水中および底質へ与えるフラックスを考慮した。

		· 人口:> 2011 至10.991 图:> 段/C	<b>77</b> 五
種類	1930年代	1950年代	1977年、1983年、1990年
アサリ	1950 年代と同じ	1950年代の平均漁獲量	対象年をはさむ5ヵ年平均
		×10(漁獲率 0.1)	漁獲量×5(漁獲率0.2)
サルボウ	計算ケースの最大値	1950年代の平均漁獲量	対象年をはさむ5ヵ年平均
	(1990年)	×5(漁獲率0.2)	漁獲量×5(漁獲率 0.2)
タイラギ	計算ケースの最大値	1950 年代の平均漁獲量	対象年をはさむ5ヵ年平均
	(1977年)	×10(漁獲率 0.1)	漁獲量×5(漁獲率 0.2)
アゲマキ	計算ケースの最大値	1950 年代の平均漁獲量	対象年をはさむ5ヵ年平均
	(1977年)	×10(漁獲率 0.1)	漁獲量×5(漁獲率 0.2)
カキ	計算ケースの最大値	計算ケースの最大値	対象年をはさむ5ヵ年平均
	(1977年)	(1977年)	漁獲量×5(漁獲率0.2)
カキ養殖	計算ケースの最大値	計算ケースの最大値	対象年をはさむ5ヵ年平均
	(1983年)	(1983年)	漁獲量×1.3(漁獲率0.77)
その他	現況と同じ	現況と同じ	現況と同じ

表 3.3-4 懸濁物食者の現存量初期値の設定方法

## (7) 湾口水質(境界条件)

湾口の水温、塩分は現況と同じ方法に準じて設定した。

水質条件は、1977年、1983年、1990年は公共用水域水質調査結果を引用して設定した。ただし、1930年代、1950年代は実測データが存在しないため、2001年と同様の値を設定した。

### (8) 初期値

計算に用いる水質の初期値は、上記の計算条件において、非定常の1年間の助走計算を実施 し設定した。底質の初期値の作成にあたっては、まず2001年(現況)の計算ケースにおいて、 約30年の助走計算(2001年の環境条件にて30年間の繰り返し計算)を実施し、底質濃度や 底泥からの物質輸送量(溶出速度等)が周期定常になる底質濃度を作成する。次にこの底質濃 度を初期値として、各計算ケースの境界条件において非定常の2年間の助走計算を実施する。 この助走計算の最終的な底質濃度を初期値として設定した。

以上により設定した計算条件を図 3.3-5、表 3.3-5 に示す。


図 3.3-5 計算条件 注) 2000~2008 年は通年計算, 1930 年代・1950 年代の F 値, 2000 年以前の淡水流入量は 2001 年と同じにした.

(2001年対比)	
計算条件	
表 3.3-5	

計算条件	1930s	1950s	1977	1983	1990	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
2001年対比														
海域面積	1.043	1.043	1.024	1.024	1.024	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
F値(M2分潮)	1.000	1.000	1.030	0.992	0.972	1.012	1.000	0.988	0.976	0.967	0.961	0.959	0.961	0.967
淡水流入量	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.883	1.000	0.817	1.184	1.070	0.849	1.425	0.929	1.095
COD 負荷量	0.630	0.800	1.040	1.052	1.035	0.785	1.000	0.703	0.947	0.879	0.851	1.325	1.041	0.889
TN 負荷量	0.460	0.590	1.209	1.248	1.215	0.904	1.000	0.894	1.093	1.025	0.952	1.240	0.987	1.015
TP 負荷量	0.490	0.630	1.164	1.284	1.268	0.857	1.000	0.723	0.883	0.824	0.812	1.113	0.915	0.826
IN 負荷量	0.480	0.630	1.206	1.247	1.215	1.011	1.000	1.011	1.189	1.113	0.968	1.249	0.932	1.101
SS 負荷量	2.000	1.500	1.021	1.130	1.198	0.364	1.000	0.340	0.762	0.640	0.659	1.735	1.298	0.685
ノリ生産量(N)	0.011	0.108	0.521	0.664	0.568	0.503	1.000	0.858	0.812	0.987	1.071	1.010	1.087	0.925
酸処理剤使用量(P)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.268	0.787	1.000	0.780	1.093	0.973	0.932	1.174	1.148	1.111
施肥量(N)	0.000	0.000	6.123	2.809	0.096	2.909	1.000	3.893	3.334	2.854	1.764	0.318	0.000	1.381
懸濁物食者(C)	3.016	2.886	4.354	3.762	1.445	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
アサリ	2.010	1.846	1.635	1.151	1.441	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
その色	6.834	6.834	14.678	13.674	1.461	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2001年との差														
平均水面 [cm]	-9.1	-9.1	-8.1	-8.9	-5.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

注) 2000~2008年は通年計算、1930~1990年代の気象条件、河川水温および淡水流入量、1930~1950年代のF値は 2001年と同じにした.

## 3.3.2 計算結果の整理

## (1) 計算結果の整理・解析方法

各年代を想定した感度解析結果の整理・解析方法を図3.3-6に示す。



図 3.3-6 計算結果の整理・解析方法

#### (2) 貧酸素水塊の発生状況の整理

1) 貧酸素水塊の累積時間

貧酸素水塊の発生量の整理にあたって、本調査では水産用水基準での貝類への影響を参考に、 表 3.3-6 に示すように貧酸素水塊を 2 つの視点により定義した。

表 3.3-6 本調査における貧酸素水塊の定義

定義	濃度範囲	設定根拠
定義1	DO < 2.1mg/L	貝類の致死濃度
定義2	DO < 4.3mg/L	貝類に影響を与える濃度

表3.3-6に示した定義に基づき、年間における貧酸素水塊への累積暴露時間を図3.3-7に示す。

■1930、1950年代には貧酸素水塊の発生はほとんどみられなかったと推測される。

■現況とする2001年に貧酸素化が進行する場所は、湾奥北西部と諌早湾である。

■1977 年、1983 年、1990 年での貧酸素水塊の発生として、諌早湾での発生はなかったものと推測される。一方で、湾奥北西部では2001 年に比べると発生規模は小さいものの、貧酸素水塊は存在していたものと推測される。



図 3.3-7(1) 溶存酸素濃度 2.1mg/L 以下の累積時間



図 3.3-7(2) 溶存酸素濃度 4.3mg/L 以下の累積時間

2) 貧酸素水塊の容積

貧酸素水塊の有明海内での容積を年間で積算し、各年代で比較したものを図3.3-8に示す。

- 溶存酸素 2.1mg/L 以下の水塊の容積は 2001 年との存在比として、1930・1950 年 代で 0.00、1977 年で 0.08、1983 年で 0.24、1990 年で 0.33 であったと推測された。
- 溶存酸素 4.3mg/L 以下の水塊の容積は 2001 年との存在比として、1930 年代で 0.01、1950 年代で 0.04、1977 年で 0.31、1983 年で 0.51、1990 年で 0.60 であっ たと推測された。













3) 貧酸素水塊の面積

最下層格子での貧酸素水塊の面積を年間で積算し、各年代で比較したものを図 3.3-10 に示す。

■ 溶存酸素 2.1mg/L 以下の水塊の面積は 2001 年との存在比として、1930・1950 年 代で 0.00、1977 年で 0.11、1983 年で 0.28、1990 年で 0.36 であったと推測された。

■ 溶存酸素 4.3mg/L 以下の水塊の面積は 2001 年との存在比として、1930 年代で 0.01、1950 年代で 0.05、1977 年で 0.44、1983 年で 0.62、1990 年で 0.63 であっ たと推測された。



<sup>※</sup>枠内の数値は、現況(2001 年)からの比 図 3.3-10(1) 溶存酸素濃度 2.1mg/L 以下の面積の年間累積値





図 3.3-11 (1) 溶存酸素 2.1mg/L 以下の貧酸素水塊の面積の年間累積のエリア別の比較

※枠内の数値は、現況(2001年)からの比





Y. Y

## (3) 湾内の物質収支の整理

#### 1) 有明海の海域区分

図 3.3-12 に示すように有明海を任意に 12 領域に区分し、それぞれの領域での物質(炭素・ 窒素・リン・溶存酸素等)の存在量(ストック)と領域間の物質の輸送量(フロー)の変化を 年代ごとに整理した。



図 3.3-12 有明海の海域区分

2) 整理方法

総有機炭素(以降、TOC とする)、総窒素(以降、TN とする)および総りん(以降、TP とする)は各領域での水柱、溶存酸素については各領域および3つの水深区分に分け、それぞれ存在量と輸送量および水中での濃度変化量を整理した。

また、計算結果は各年代での夏季と冬季における存在量と輸送量の変化に着目し整理した。 具体的には、日別値として出力した計算結果を、夏季平均値:8月平均値、冬季平均値:2月 平均値として整理した。 3) TOC・T-N・T-Pの存在量と輸送量

各年代における TOC、T-N、T-P の存在量および輸送量を、図 3.3-13~図 3.3-15 に示す。













# 4) TOC・T-N・T-Pの水柱内の濃度変化量

各年代における TOC、T-N、T-P の水柱内濃度変化量を、図 3.3-16~図 3.3-18 に示す。いずれも、正の値は該当領域における正の濃度変化に対応する。なお図中の内部生産は、水中の DIC を取り込み、植物プランクトンが増殖する 量を指すが、本調査では、(内部生産量)=(植物プランクトンの総生産量)-(植物プランクトンの呼吸による減耗量)と定義した。



図 3.3-16(1) TOC の水柱内濃度変化量(8月平均値)



図 3.3-16(2) TOC の水柱内濃度変化量(2月平均値)



図 3.3-17(1) T-N の水柱内濃度変化量(8月平均値)



図 3.3-17(2) T-N の水柱内濃度変化量(2月平均値)



図 3.3-18(1) T-P の水柱内濃度変化量(8月平均値)



図 3.3-18(2) T-P の水柱内濃度変化量(2月平均値)

5) 溶存酸素の存在量と水平輸送量

各年代における溶存酸素の存在量および水平輸送量を、図 3.3-19~図 3.3-20 に示す。なお、水深 3m および 15m を境とし、3 段に分けて整理した。白いメッシュは該当の水深より浅いメッシュを表す。













6) 溶存酸素の水柱内の鉛直輸送量および濃度変化量 各年代における、8月の溶存酸素の鉛直輸送量および濃度変化量を図 3.3-19に示す。いずれも、正の値は該当領域における溶存酸素の正味の流入または正の濃度変化に対応する。白いメッシュは該当の水深より浅いメッシュを表す。



図 3.3-21(1) 溶存酸素の鉛直輸送量および濃度変化量(8月平均値)





図 3.3-19(2) 溶存酸素の鉛直輸送量および濃度変化量(8月平均値)



図 3.3-19(3) 溶存酸素の鉛直輸送量および濃度変化量(8月平均値)



図 3.3-22(1) 溶存酸素の鉛直輸送量および濃度変化量(2月平均値)



図 3.3-22(2) 溶存酸素の鉛直輸送量および濃度変化量(2月平均値)



図 3.3-22(3) 溶存酸素の鉛直輸送量および濃度変化量(2月平均値)
# (4) A2 エリアと B エリアでの TOC・T-N・T-P の物質収支の変化について

2001年の計算結果において、貧酸素水塊の発生が顕著なエリアは、佐賀沖のA2エリアと諌早湾のBエリアであった。この2つのエリアでの物質収支の変化に着目し、上記の結果に基づき、計算を再整理した。それぞれ、TOC・T-N・T-Pの存在量と物質収支の変化について、2月、5月、8月、11月、年間平均値を調べた。

# 1) A2 エリア

図 3.3-23 に、A2 エリアにおける TOC・T-N・T-P 存在量の変化を示す。

#### TOC

- ・2月、5月、11月と年間平均値では、2001年の存在量が最も多かった。いずれも、他の年代は2001年比で0.90を下回り、2001年とそれ以外の年代の差が大きかった。
- ・2月、5月は1977年が最も存在量が少なく、2001年比でそれぞれ0.60、0.53で あった。また、1977年と1983年、1990年と2001年の間の差が大きかった。
- ・8 月は 1983 年の存在量が最も多く、2001 年比で 1.03 であった。1977 年以降は、 2001 年比±3%の変化で推移していた。
- ・年間平均値では、存在量は年代とともに徐々に上昇しており、1930年代は 0.57 であった。

### ∎T-N

- ・2月、5月は1977年の存在量が最も多く、それぞれ2001年比1.02、1.32であった。1930年代と1950年代の存在量は他の年代に比べて少なかった。
- ・8 月は年代とともに存在量が増加し、1950年代までは 2001年比 0.54~0.62 で あったのに対し、1977年は 0.90と増加した。
- ・11月は1950年代までが2001年比0.8程度、1977~1990年が0.9程度で推移していた。
- ・年間平均値は 1930 年代・1950 年代は存在量が少なく 2001 年比 0.70・0.76、1977 年以降は 2001 年から±3%の変化であった。

#### ■T-P

- ・2月、5月、11月と年間平均値では、2001年の存在量が最も多かった。
- ・2月、11月は、1930年代~1990年では2001年比0.76~0.88で推移し、2001 年と他の年代との差が顕著であった。
- ・8月は年代とともに存在量が増加した。1930年代・1950年代(2001年比 0.52、 0.61)と1977年(0.85)の差が大きかった。1983年以降は2001年比 0.97~1.00 で推移していた。

図 3.3-24 に、A2 エリアにおける物質収支の変化を示す。なお、図中の内部生産は、 水中の DIC を取り込み、植物プランクトンが増殖する量を指すが、本調査では、(内部 生産量)=(植物プランクトンの総生産量)-(植物プランクトンの呼吸による減耗量) と定義した。

#### TOC

- ・どの月も、内部生産は年代とともに顕著に増加する傾向にあった。特に8月は、 1930年代から2001年にかけて4700ton/月供給が増加した。
- ・沈降量と巻上げ量を比較すると、全ての月、全ての年代で沈降量の方が多かった。
  その量は5月を除き、1983年・1990年で最も多く、1930年代・1950年代で最も少なかった。
- ・水平移流・拡散フラックスは、8月では1930年代・1950年代が流入であったのに対し、1977年以降は流出に転じ、1983年が流出最多となった。5月、11月は1930年代から1983年にかけて減少し、1983年で流入が最少となった。
- ・底生生物による除去量は他の項目に比べ変化量は小さいものの、年代とともに減 少する傾向にあった。
- ・各年代において季節間の比較をすると、存在量は8月よりも2月、11月の方が 多かった。1977年以降は、8月が最大であった。

# T-N

- ・沈降量、水平移流・拡散フラックス、底生生物は、TOC と同様の変化傾向であった。
- ・底泥からの供給は、8月を除き、年代とともに増加していた。8月は1977~1990 年が多く、2001年比1.13~1.14であった。

∎T-P

・いずれの項目も、T-Nと同様の変化傾向であった。







3.3-23(2) A2 エリアにおける TOC、T-N、T-P の存在量









正がボックス内の物質の増加、負が減少を表す。以下の図も同様。

2) B エリア

図 3.3-25 に、Bエリアにおける TOC・T-N・T-P 存在量の変化を示す。

# ■TOC

- ・2月は1930年代~1977年は2001年比0.68~0.70で、1983年が0.88、1990年が0.92で、2001年の存在量が最大であった。
- •5月、11月は1983年の存在量が最も多く、それぞれ2001年比で1.05、1.03で あった。1990年は、5月、11月ともに2001年を下回っていた。
- ・8月は1930年代が最小で2001年比0.66、1950年代と1977年の差が大きく、1983年が最大で1.07であった。
- ・2 月、5 月、11 月と年間平均値では、2001 年の存在量が最も多かった。いずれ も、他の年代は 2001 年比で 0.90 を下回り、2001 年とそれ以外の年代の差が大き かった。
- ・年間平均値では、1983年まで存在量は年代とともに増加し、1983年以降は横ばいであった。

#### ∎T-N

- ・存在量が最大だったのは、2月と5月が1977年、8月が1990年、11月と年間 平均値が1983年であった。
- ・どの月も、1930年代と1950年代に対し、1977年、1983年、1990年は存在量 が顕著に大きかった。
- ・どの月も、2001年は1990年に比べて小さく、5月では6つの年代のうち存在量が最少であった。
- ・各年代において季節間の比較をすると、存在量は8月よりも2月、11月の方が 多かった。1977年以降は、8月が最大であった。

### ■ T-P

- ・存在量が最大だったのは、2月と5月が1977年、8月と11月、年間平均値が1983 年であった。
- ・2月、5月においては、6年代のうち2001年の存在量が最少であった。
- ・8月では、1930年代、1950年代と1977年以降の差が大きかった。
- ・年間平均値では、1977年~1990年の存在量は2001年より多かった。

図 3.3-26 に、B エリアにおける物質収支の変化を示す。なお、図中の内部生産は、 水中の DIC を取り込み、植物プランクトンが増殖する量を指すが、本調査では、(内部 生産量)=(植物プランクトンの総生産量)-(植物プランクトンの呼吸による減耗量) と定義した。

# ■ TOC

- ・どの月も、内部生産は年代とともに顕著に増加する傾向にあった。特に8月は、 1930年代から2001年にかけて3500ton/月供給が増加した。
- ・沈降量と巻上げ量を比較すると、全ての月、全ての年代で沈降量の方が多かった。
  その量は1930年代から1990年にかけて増加したが、2001年は1990年の10~40%に激減した。
- ・水平移流・拡散フラックスは、1930年代から1990年まではいずれも正味で流入 しており、その量は年代とともに減少する傾向にあったが、2001年は正味で流出 に転じた。
- ・底生生物による除去量は、2月、5月では1983年が最大、それ以外は1977年が 最大であった。また、いずれの月も2001年が最小であった。ただし、他の項目 に比べ変化量は小さかった。

## T-N

- ・沈降量、水平移流・拡散フラックス、底生生物は、TOC と同様の変化傾向であった。
- ・底泥からの供給は、8月を除き、年代とともに増加していた。8月は1977年が最 大で、2001年比1.12であった。なお、沈降量や水平移流・拡散フラックスにみ られたような、1990年-2001年間の急激な変化はなかった。

### ∎T-P

・いずれの項目も、T-Nと同様の変化傾向であった。















# 3.3.3 計算結果の考察

#### (1) 貧酸素水塊の発生要因の考察

図 3.3-8(p.434)に示した貧酸素水塊の容積からわかるように、貧酸素水塊の発生規模は、 2001年が最も大きいという計算結果であった。また、1930年代・1950年代には貧酸素水塊 の発生が認められない結果であり、1977~1983年は2001年比で8~33%の存在量であった。 本章では、この年代ごとに異なる貧酸素水塊の発生規模に着目して、その変化要因について 考察を行った。



図 3.3-8(1) 溶存酸素濃度 2.1mg/L 以下の容積の年間累積値(再掲)

一般に、海域の物質循環過程は、図 3.3-27 に示すとおりである。底層での酸素消費量が底 層に供給される供給量を上回ることにより、溶存酸素濃度の低下ひいては貧酸素水塊の発生 が生じる。この溶存酸素の供給面と消費面を担う現象としては、表 3.3-7 に示すものが挙げ られる。これら供給面と消費面の変化に着目し、図 3.3-8 に示した貧酸素水塊の発生規模の変 化に対して考察を行った。

	現象
供給面	水平移流、水平拡散による供給
	鉛直移流、鉛直拡散による供給
	植物プランクトンの光合成による供給
	再ばっ気による供給
	底生生物(付着珪藻)による光合成
消費面	植物プランクトンの呼吸
	動物プランクトンの呼吸
	アンモニア態窒素の硝化
	懸濁態有機物の分解・無機化
	溶存態有機物の分解・無機化
	底泥間隙水との拡散
	底生生物(堆積物食者・ろ過食者)の呼吸
	還元物質の酸化による消費

表 3.3-7 溶存酸素の供給面と消費面を担う主な現象

<sup>1)</sup> 貧酸素水塊の発生メカニズム(一般論)



図 3.3-27 海の環境構成図<sup>2</sup>

- 2) 溶存酸素の供給量の変化について
- 鉛直拡散係数と流入出流量の変化

溶存酸素の供給量を支配する直接的な物理指標である鉛直拡散係数と水平方向の流入出流量(エリアに流入する流量と流出する流量の合計値)を、A2とBエリアにおいて各年代で比較し、図 3.3-28 に示す。ここで、1950年代の計算結果は、流動場に関しては 1930年代と1950年代の計算条件・結果が同一であるため省略した。

■A2 エリアでは、1977 年以降、両指標ともに数%の変化がみられる。一方で、B エリ アでの 2001 年(現況)は、その他のケースと比較し、8 月平均値として鉛直拡散係数 で約 50%、流入出流量として約 20%、それぞれ低下していた。

■A2 エリアを対象に、両指標の 2001 年対比と外海潮位振幅の自然変動を表す指標とし て有明海でもっとも増幅率の大きい M2 分潮の F 値の関係を図 3.3-29 に示す。また図 中には 2001 年(現況)の計算ケースから、外海潮位振幅の境界条件のみを自然変動で の最大時と最小時(M2 分潮の最大・最小時における各分潮の F 値を採用)に変更し たケースの結果も併記している(図中の F 値最大・F 値最小に相当)。2001 年の地形 条件での M2 分潮の F 値の変化に対応する両指標の変化幅が、同一の F 値を想定した 場合における 1977~1990 年の地形条件と 2001 年での地形条件の違いによる両指標の 変化幅よりも大きいことがわかる。

つまり、湾奥西部エリアでの1977年以降の両指標の変化は、地形改変等の影響より も外海潮位振幅の自然変動の影響を強く受けていると推測された。

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> 海の健康診断 考え方と方法、海洋政策研究財団(財団法人シップ・アンド・オーシャン財団、2006年出版)



※図内の数値は 2001 年比を示す。





図 3.3-28(2) 水柱での流入出流量の変化



図 3.3-29 A2 エリアにおける M2 分潮の F 値の変化と 水柱での鉛直拡散係数および流入出流量の関係 ② 鉛直拡散フラックスと移流フラックスの変化

図 3.3-30 には、A2 エリアと B エリアにおける溶存酸素の移流拡散フラックスによる物質 変化量を示す。ここで示した変化量は8月平均値である。

- A2 エリアでは、下層から流入し、上層から流出するというエスチャリー循環に沿った溶存酸素の循環となっているが、1930年代から2001年にかけて底層から流入する溶存酸素の量が減少していた。
- ■上層~中層間の鉛直移流・拡散フラックスは、1930・1950年代は中層から上層~ 向かう輸送(上向きの輸送)であったのに対して、1977年から1983年にかけて、 上層から中層に向かう輸送(下向きの輸送)に変化していた。これは、1977年以 降、下層の溶存酸素濃度が低下したことにより鉛直移流による上向きの輸送量が減 少し、さらに鉛直方向の濃度勾配が強くなり、表層の再ばっ気と光合成を起源とし た溶存酸素の下向きの輸送が増加したことによるものと考えられる。
- 1977年・1983年・1990年の3ケースに見られるフラックスの変化は、図 3.3-29 に示した外海の潮位振幅(F値)の影響を受けているものと考えられる。



※ +: 増加フラックス、-: 減少フラックス。鉛直移流・拡散フラックスは上向きを正とする ※左から順に1930年代、1950年代、1977年、1983年、1990年、2001年、単位は(ton/month) 図 3.3-30(1) A2エリアでの溶存酸素の移流・拡散フラックスの変化(8月平均)



※ +: 増加フラックス、-: 減少フラックス。鉛直移流・拡散フラックスは上向きを正とする ※左から順に1930年代、1950年代、1977年、1983年、1990年、2001年、単位は(ton/month) 図 3.3-30(2) Bエリアでの溶存酸素の移流・拡散フラックスの変化(8月平均)

3) 溶存酸素の消費面の変化について

各年代での水中における生化学的な効果が及ぼす溶存酸素の変化量(8月平均値)を図 3.3-31に示す。またその変化量の内訳を図 3.3-32に示す。

- ■上層(水深 0-3m)での生化学的な効果による溶存酸素の変化量は、植物プラン クトンの生産による供給量が、分解・無機化などによる酸素消費量を上回り、 各年代ともにプラス(供給されている)であった。
- この植物プランクトンの光合成による供給量は、1930年代から 2001年にかけて上昇する傾向にあった。
- ■一方で、中層(3~15m)での生化学的な効果による溶存酸素の変化量はマイナス (消費されている)であり、1930年代から 2001年にかけて、その消費量は上 昇する傾向にあった。
- 1930 年代から 2001 年にかけての下層での酸素消費量の上昇に寄与している現象として、POC および DOC の分解・無機化量の増加、植物プランクトンの呼吸量の増加が挙げられる。特に、1950 年代から 1977 年の間に、消費量の大きな上昇がみられた。
- 1930 年代から 2001 年にかけて、底泥間隙水との拡散による消費は、他の項目 と比較すると、あまり変化していない結果であった。
- 底生生物の呼吸による消費は、2001年よりもその他のケースの方が大きい結果 であったが、その変化量は分解・無機化などによる酸素消費量の変化量と比較 すると小さかった。



図 3.3-31 各年代でのエリア内における溶存酸素の変化量(8月平均値) (正:生産、負:消費)

底生生物による生 産・消費の合計値	1500 500 -500 -1000 -1500	1500 500 -500 -1000 -1000	1500 1000 -500 -1000 -1000	※単位は ton/month 底生生物による生	産・消費の合計値 1500 500 500 1000	2000 1000 -1000 -2000	2000 1000 -1000 -2000
底泥間隙水との拡散	1500 500 500 -500 -1500	1500 500 -500 -1000 -1500	1500 500 -500 -1000 -1500	が異なることに注意。 		2000 1000 -1000 -2000	2000 1000 -1000 -2000
還元物質の酸化	0 -100 -200 -300 -400 -600	-1000 -2000 -4000	0 -100 -200 -300 -400 -500 -500	※それぞれスケール)各年代での変化 湯元物質の酸化		-1000 -1000	-50 -100 -150
DOC の分解・無機化	-500 - -500 - -1000 - -1500 - -2500 -	0 -2000 -4000 -6000 -8000	-500 -1000 -1500 -2000	年、2001年である。 供給量と消費量の DOCの分解・無機化		0 -500 - -1000 - -2000 - -2500	0 
POC の分解・無機化	- 2000	-5000 -5000 -15000 -20000	0 -1000 -2000 -3000 -5000	7年、1983年、1990 こおける溶存酸素の 2的のの解・無機化		0 -2000 -4000 -6000 -8000	
硝化	-20 -20 -60 -80 -100 -100	-100 -200 -300 -400	0 -20 -40 -60 -60 -60 -100	i代、1950 年代、197 32(1) A2 エリアは 福化	-10 -10 -20 -30 -40	0 -20 - -40 - -60 - -80 - -100 -	0 -10 -20 -30 -40
動植物プランクトン の呼吸	0 - 1000 - - 2000 - 2000 - 4000 - 5000 - 5000	0 -2000 -4000 -6000 -8000 -10000		は全て左から 1930 年 図 3.3-5 動植物プランクトン	の 	0 -1000 - -2000 -3000 -4000 -5000	- 20 - 40 - 60 - 100
植物プランクトンの 光合成	30000 25000 20000 15000 5000 0	12000 10000 8000 4000 2000 0 0		** グラフ 植物プランクトンの	光合成 19000 19000 10000 10000	8000 6000 2000 2000 0	00 80 60 20 0 0
	上層 (0~3m)	中層 (3~15m)	底層 (15m~)		上層 (0~3m)	中層 (3~15m)	底層 (15m~)

- ルか巣なる ら 1930 年代、1950 年代、1977 年、1983 年、1990 年、2001 年である。※それそれスケー、図 3.3-32(2) B エリアにおける溶存酸素の供給量と消費量の各年代での変化 ① TOCの存在量の変化

図 3.3-32 に示した溶存酸素の消費量のうち、1930 年代から 2001 年にかけて、その変化量 が大きかった POC の分解・無機化に伴う消費、DOC の分解・無機化に伴う消費に着目し、 その変化要因について考察を行った。

分解量は POC・DOC の濃度の上昇に伴って増加するため、まず TOC(=POC+DOC)の存在 量の変化について整理を行った。図 3.3·12 に示した <u>A0・A1・A2 エリアを統合したエリアを</u> 湾奥部と定義し、このエリアにおける水柱での TOC の存在量の変化を図 3.3·33 に示す。1950 年代と 1977 年の間に大きく存在量が上昇しており、1977 年以降は 2001 年を基準として± 4%程度の変化であった。



<sup>※</sup>枠内の数値は、2001年との比

図 3.3-33 湾奥部における水柱での TOC の存在量(8月平均値)

つぎに、この TOC の発生要因について整理を行った。海域において水中の TOC 存在量は、 大きく区分すると図 3.3-34 に示す 5 つの項目により変化している。この 5 項目について、図 3.3-35 に基づき考察を行い、表 3.3-8 に示す。





※左から順に1930年代、1950年代、1977年、1983年、1990年、2001年。
 ※正がボックス内の物質の増加、負が減少を表す。以下の図も同様。
 図 3.3-35 湾奥部における TOC の物質収支の変化(8月平均値)

項目	変化
水平移流・	湾奥部から湾中央部へ流出する TOC の量は、1930 年か
拡散フラックス	ら2001年にかけて上昇する傾向にある。一方で、同時期
	の内部生産の上昇量は 10000 ton/月以上であるのに対し
	て、流出する TOC 量の上昇量は 5000 ton/月であった。
内部生産	内部生産量の年代変化は、TOCの存在量の変化傾向と一
	致している。さらに内部生産による TOC 生産量は、他の
	要因と比較し、存在量の上昇要因としての寄与が最も大き
	۷ <sup>۱</sup> ۰
流入負荷量	TOC の河川からの流入負荷量は、内部生産量と比較する
	と小さい。
沈降・巻上げ	湾奥部にて8月平均値でみると、1930年・1950年・1977
	年は、沈降・巻き上げの収支として、TOC は底泥から水
	中へ供給される傾向にあり、1990年・2001年は、逆に水
	中から底泥へ蓄積される傾向にある結果であった。
底生生物による摂食	湾奥部での底生生物による TOC の除去量は、1977 年に
	最大値をとり、その後 1983 年・1990 年・2001 年と除々
	に減少していた。1977年は内部生産量の約5分の1が底
	生生物に除去される結果であったが、2001 年では約 10
	分の1であった。

表 3.3-8 TOC の存在量に変化に関係する要因ごとの考察

表 3.3-8 より、図 3.3-33 に示した TOC の存在量の変動要因としては、内部生産量の増加 と底生生物による除去能の低下の影響が大きいものと推測された。

- 4) 溶存酸素の供給面と消費面の変化の量的関係
- ① A2エリア

図 3.3-37 に、A2 エリアにおける溶存酸素の物質収支の変化(8 月平均値)を示す。また水中での生産・消費について、項目ごとの物質収支の変化を図 3.3-38 に示す。

貧酸素化が進行する密度躍層下の 3m 以深に着目し、1930 年代と 2001 年の比較を 以下に示す。(参照:図 3.3-36)

- 水中での酸素消費量は 1930 年代から 2001 年にかけて約 2.7 倍増加していた。
- 底泥による消費は 1930 年代から 2001 年にかけてあまり変化していなかった。 2001 年は貧酸素化が進行していたため、底泥による酸素消費量は 1930 年代と比 べて小さかったものと考えられる(消費されるべき酸素が欠乏しているため)。 その代わりに、底泥内で嫌気分解が進行することにより還元物質の生成量が増大 し、図中に示すように、水中での酸素消費のうち約 15%が還元物質の酸化に利 用されていた結果であった。
- 底泥による消費量は、水中での酸素消費量より1オーダー小さい。
- 底生生物の呼吸による消費は、1930年代から2001年にかけて約5分の1となっていたが、その消費量は水中での酸素消費量より1オーダー小さい。
- 水平方向の移流・拡散による供給量は、1930年代から 2001年にかけて 10%減 少しており、その減少量は 1930年代から 2001年にかけての水中での酸素消費 の増加量の約2分の1であった。
- 鉛直方向の移流・拡散による供給量は、1930年代は中層以深から上層へ向かう 供給であったのに対して、2001年は上層から中層以深へ向かう供給となっていた。







※底生生物、底泥とその他はスケールが異なることに注意。

※グラフは全て左から1930年代、1950年代、1977年、1983年、1990年、2001年である。 図 3.3-37 A2 エリアにおける溶存酸素の物質収支の変化(8月平均値)



 ※単位:ton/month。グラフは全て左から1930年代、1950年代、1977年、1983年、1990年、2001年である。
 図 3.3-38 A2エリアにおける溶存酸素の物質収支の変化 (水中での生産・消費に関する項目、8月平均値)

② Bエリア

図 3.3-40 に、B エリアにおける溶存酸素の物質収支の変化(8 月平均値)を示す。また水中での生産・消費について、項目ごとの物質収支の変化を図 3.3-41 に示す。

貧酸素化が進行する密度躍層下の 3m 以深に着目し、1930 年代と 2001 年の比較 以下に示す。(参照:図 3.3-39)

- 水中での酸素消費量は 1930 年代から 2001 年にかけて約 4.0 倍増加していた。
- 底泥による消費は 1930 年代から 2001 年にかけて約 1.5 倍増加していた。また、2001 年において、底泥による消費量消費量は水中での酸素消費量の約 4 分の 1 であったが、1930 年代では約 2 分の 1 であった。
- 底生生物の呼吸による消費は、1930年代から 2001年にかけて約3分の1と なっていたが、その消費量は水中での酸素消費量より1オーダー小さい。
- 水平方向の移流・拡散による供給量は、1930年代から 2001年にかけて約 4500ton/月減少しており、その減少量は 1930年代から 2001年にかけての 水中での酸素消費の増加量と同等であった。
- 鉛直方向の移流・拡散による供給量は、1930年代と2001年ともに上層から 中層以深へ向かう供給となっていたが、その量は1930年代から2001年に 約6倍に増加している。これは2001年に貧酸素化の発生により鉛直方向の 濃度勾配が強くなったことに起因している。



(Bエリア、8月平均値)



※底生生物、底泥とその他はスケールが異なることに注意。

※グラフは全て左から1930年代、1950年代、1977年、1983年、1990年、2001年である。 図 3.3-40 B エリアにおける溶存酸素の物質収支の変化(8月平均値)



 ※単位:ton/month。グラフは全て左から1930年代、1950年代、1977年、1983年、1990年、2001年である。
 図 3.3-41 Bエリアにおける溶存酸素の物質収支の変化 (水中での生産・消費に関する項目、8月平均値)

5) 貧酸素水塊の発生要因の考察に関するまとめ

貧酸素水塊の発生が顕著な湾奥西部エリア(A2エリア)と諫早湾エリア(Bエリア)に着 目し、計算結果に基づき考察を行った。以下に主要な結果を記した。

- (1) 貧酸素化の発生に関して、1930 年代から 2001 年までのある単年を抽出した計 6 ケ ース(1930 年代・1950 年代・1977 年・1983 年・1990 年・2001 年)の計算結果で は、貧酸素化の発生は 1977 年以降に確認された。
- (2)流れ場の変化を表す指標である流入出流量と鉛直拡散係数について、湾奥西部エリア(A2エリア)において、2001年と1930年代・1950年代を比較すると、湾奥部の地形改変の影響を受けて、鉛直拡散係数(8月平均値)は13%、流入出流量(8月平均値)は6%それぞれ減少する傾向にあった。一方で、1977年以降の両指標の変化は地形改変の影響よりも自然変動である外海潮位振幅の影響を強く受けていると推測された。すなわち、1977年以降の湾奥西部エリア(A2エリア)の貧酸素化に対して、流れ場の変化の影響は地形改変等の影響よりも外海の潮位振幅の自然変動の影響を受けていると考えられた。
- (3) 諌早湾エリア(Bエリア)での、流れ場の変化を表す指標である流入出流量と鉛直 拡散係数は、1990年と2001年のケース間に大きな変化(地形の変化によると考え られる)があり、2001年は1990年に比較して、鉛直拡散係数(8月平均値)で45%、 流入出流量(8月平均値)で20%減少したものと推測された。
- (4) 生化学的な要因による溶存酸素の水中での消費量は、1930年代から2001年にかけて上昇する傾向にあった。3m以深の水塊でみると、この消費量の増加の内訳として寄与が大きかったのは水中でのPOC・DOCの分解・無機化に伴う消費、動植物プランクトンの呼吸による消費の増加であり、底生生物による消費・底泥による消費の変動量は小さかった。
- (5) POC・DOC の分解・無機化に伴う消費、動植物プランクトンの呼吸による消費の増加は、内部生産量の増加に依存したものと考えられた。
- (6) 1977年・1983年・1990年では、湾奥部(A0・A1・A2エリア)に発生する内部生産量が、ろ過食者により、2001年の2~5倍程度、系外に除去されており、この効果が溶存酸素の消費量を変動させる一要因であると推測された。

# (2) 1950年代から 1977年にかけての水質変化に関する考察

1950年代から1977年にかけての湾奥部で顕著な水質変化について、物質収支および流量の変化の観点から考察を行った。

存在量の変化

図 3.3・42 に、各エリアにおける TOC、T-N、T-P の存在量の変化(8 月平均値)を示す。 年代ごとの変化に着目すると、1950 年代から 1977 年にかけて各存在量が顕著に増加してい るブロックがあり、特に湾奥部でその傾向が顕著であった。

そこで、湾奥部における、1950年代と1977年の物質収支の違いについて、考察を行った。 湾奥部の定義は、前節と同じくA0、A1、A2エリアを統合したエリアとした。



※左から1930年代、1950年代、1977年、1983年、1990年、2001年 ※単位はton

図 3.3-42 各エリアにおける TOC、T-N、T-P の存在量の変化(8月平均値)

2) 湾奥部における物質収支の変化

湾奥部における、1950年代と1977年のTOC・T·N・T·Pの物質収支を図 3.3-43 に示す。 ここでは、夏季の状況の変化に着目し、計算結果を整理した。ただし、7月に出水に伴う大き な流入負荷量が存在し8月にはその影響が含まれるため、計算結果は7、8月の平均として整 理した。

さらに、図 3.3・44に湾奥部と湾央部の境界(A1-A2エリアとC1-C2エリアの境界、図 3.3・42 の断面 1)における断面通過流量の変化を示す。

1950年代から 1977年にかけてのケース間の変化として以下が挙げられる。

■河川からの流入負荷は TOC で 33%、T-N と T-P では 110% 増加した。

- ■湾奥部から湾央部に向かう水平方向の移流・拡散フラックスは TOC で 70%、 120%増加した。
- ■TOC の内部生産量は、68%増加した。増加量は約+15000 ton/月で、河川から の流入負荷の増加量約+2500 ton/月の約6倍であった。
- ■いずれの物質も、1950年代の正味の沈降量は負(底泥がソース)、1977年は正 (底泥にシンク)であった。ただし、沈降と巻上げの合計は河川からの流入負 荷や水平方向の移流・拡散に比べ1オーダー小さい。

■底生生物による物質の除去量の変化は小さい。

- ■図 3.3-44 において、1977 年~1990 年は同一の地形であること、1950 年代に 設定した F 値は、1983 年の F 値に最も近いことに留意して、1950 年代と 1983 年で比較すると、断面通過流量はおよそ 5%減少していた。すなわち、1950 年 代から 1977 年のケース間に生じた湾奥部の地形改変の影響により、この減少 が生じたものと推測された。
- ■5%の断面通過流量の減少により、湾奥部では物質が滞留しやすくなったが、湾 奥部の物質の存在量が多いため、湾奥部から湾央部へ向かう TOC、T-N、T-P の移流・拡散量は増加していた。

以上の結果から、1950 年から 1977 年にかけての湾奥部における TOC・T-N・T-P の存在 量の増加は、主に流入負荷の増大、内部生産量の増大および湾奥部の地形改変の影響により もたらされたと考えられる。





図 3.3-44(1) 断面1 (A1-A2 エリアと C1-C2 エリアの境界断面) における流量の変化

3) 1950 年代から 1977 年にかけての水質変化の考察に関するまとめ

1950年代から1977年にかけての湾奥部で顕著な水質変化について、物質収支および流量の変化の観点から考察を行った。以下に主要な結果を記した。

- (1) 1950 年代から 1977 年にかけて、Fエリア、E2 エリアを除く全エリアで TOC、T-N、 T-P の存在量が増加した。特に、湾奥部での増加が顕著であった。
- (2) 河川からの流入負荷量、湾奥部から湾央部への移流・拡散量、底泥からの溶出量、底生生物による物質除去量、いずれも 1950 年代から 1977 年にかけて増加した。
- (3) 1950 年代から 1977 年にかけて、TOC の内部生産量は 68% 増加した。
- (4) 1970年代の地形条件では、1950年代の地形条件に比べ、湾奥部から湾央部へ向かう断 面通過流量が 5%減少した。
- (5) 移流・拡散による湾奥部から湾央部への流出が増加したのは、湾奥部の存在量(濃度) が増加しているためと考えられる。
- (6) TOC・T-N・T-P の存在量の増加は、主に河川からの流入負荷量の増大および内部 生産量の増加、湾奥部の地形改変による海水交換量の減少の影響を受けていると考えら れた。

#### (3) 底泥間の物質輸送の変遷(SS)

次に、底泥との間の物質輸送の変遷を明らかにするために、SSの堆積、浸食傾向を調べた。 図 3.3-45 に、2 月、5 月、8 月、11 月、年間平均における SS のボックス別単位面積あたり 正味堆積量を示す。

- ■各ボックスの堆積/浸食傾向は、各月で概ね一致していた。
- 湾奥の干潟を含むボックス(A0、A1、B2)、熊本沖(D1、E1)では正味で堆 積傾向を示し、過去の方が堆積量が多い傾向にあった。
- 干潟全面の水深の深いボックス(A2、D2、E2)では正味で浸食傾向を示し、 過去の方が浸食量が多い傾向にあった。
- 最も堆積傾向が大きいのは湾奥の A0 ボックスであった。

このうち、A2、Bボックスの年代変化について注目した。図 3.3-46 に堆積量、浸食量および正味の堆積量のフラックスの年代変化を示す。

- ■A2、B ボックスともに、堆積、浸食の方向のフラックスの大きさは、年代とと もに減少していた。すなわち、過去の方が底泥-水質間での SS のやりとりが過 去の方が大きかったことが伺える。
- A2 は、1977 年~1990 年は堆積傾向であったが、2001 年に再び浸食傾向を示した。
- B では、諫早干潟(B2)存在時は浸食傾向であったが、2001 年は堆積傾向に 転じた。

さらに、底泥へ沈降する物質における栄養塩とSSの含有状況を明らかにするため、A2、B ボックスにおける、栄養塩とSSの年間平均沈降フラックスの比を求めた(図 3.3-47)。

- ■A2、B ボックスともに、比が年代とともに増加している。したがって、底泥へ 沈降する物質の中の有機物含有量が増加傾向にあると言える。
- SS および栄養塩の沈降フラックスはともに減少傾向にあるが、その減少率は SS の 方が顕著であると解釈できる。



図 3.3-45(1) SS の正味堆積量(2月平均値)※正が正味の堆積、負が正味の浸食を示す。










図 3.3-46 A2、B ボックスにおける単位面積あたり年間堆積量、 浸食量、正味堆積量の年代変化(単位:kg/m<sup>2</sup>/year)



図 3.3-47 A2、B ボックスにおける、栄養塩と SS の沈降フラックスの比(単位:mg/g)