

## 物質収支モデルの構築について

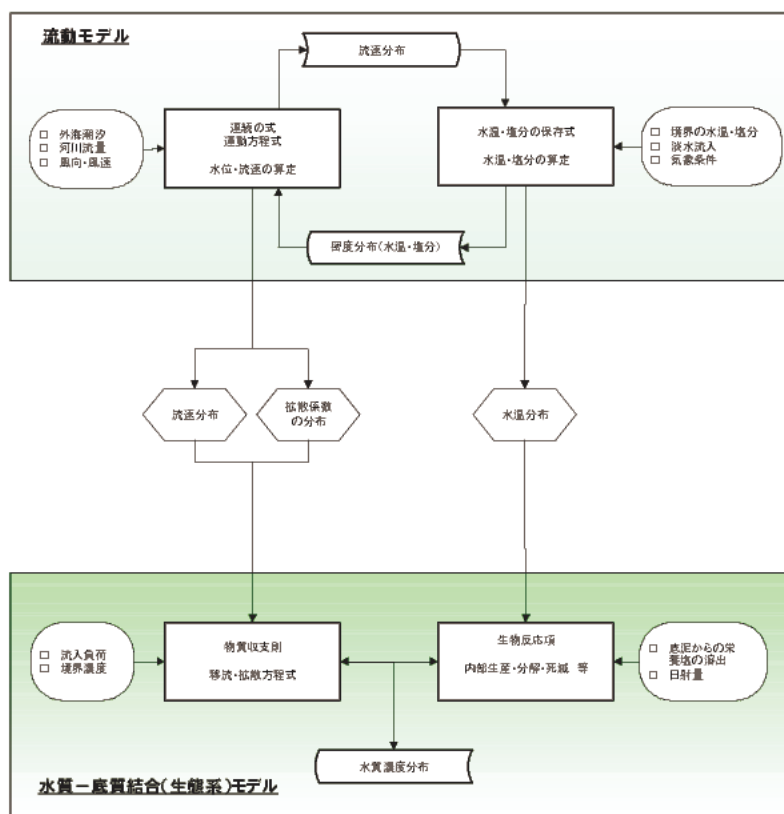
### 1. 物質収支モデルの概要

モデル地域における水質の動向や生物生産量等の物質循環量を踏まえ、その地域の栄養塩類の循環状況を再現する物質収支モデルを構築して、地域ごとに検討した循環を向上させる対策による栄養塩類循環状況、特に溶解性の無機態窒素・りんの循環状況について評価を行う。

物質収支モデルの構築にあたって、1年目となる今年度は、3つのモデル地域を対象に広く利用できるベースとなるモデルを構築する。次年度以降、対象とするモデル地域にあわせて、海域の特徴を考慮し、海域ごとに選定される循環を向上させる対策を検討できるモデルとして改良するとともに、精度の向上を図る。

物質収支モデルの構築及び活用にあたっては、モデル地域において別に進める検討と十分連携を図り、モデル地域における調査結果や検討方針及び以下の事項を踏まえるものとする。

- ① 既存の水質や底質などの物質循環に関するデータや生態系に関するデータから、地域の栄養塩類の循環状況を再現する物質収支の基本モデルを構築する。
- ② 構築する物質収支モデルは、海域内外の物質輸送の基礎となる流れや海水交換を再現し、河川の流入に伴うエスチュアリー循環や湾口を通じた周辺海域との海水交換を表現可能な多層流動モデルと、海域における水質や底質、海域生物の相互作用を再現し、それら相互作用や食物連鎖等の関係を窒素、りん及び炭素の生態元素で表現可能な生態系モデルを構成の基本とする。



- ③ 構築する物質収支の基本モデルは、モデル地域において別に進める栄養塩類の循環バランスを回復・向上させるための管理方策によって、得られる効果を定量的に表現可能なものとする。

## 2. 流動モデル

### 2-1 概要

流動モデルは流体力学の基礎方程式（運動方程式、連続の式および水温・塩分の保存式）を差分化することにより解く数値モデルで、鉛直方向を多層に分割した多層レベルモデルを用いた。多層レベルモデルの概念図および各変数（流速・水位）の定義点位置を図 2.1 に示す。

基本式は、回転系の非圧縮流体を仮定した運動方程式、連続の式および水温・塩分の保存式であり、ブシネスク近似および静水圧近似が施されている。ブシネスク近似とは、密度の分布が流動に影響するのは密度の空間分布を通して圧力に影響することを通してのみであるとする考え方であり、他に密度が関係するところでは基準密度を用いる。一方、静水圧近似とは鉛直方向の運動方程式における力の釣り合いにおいて、重力と圧力が常に釣り合っていると考えるもので、鉛直方向の加速度は生じないとするものである。どちらの近似も鉛直方向の運動に比べて水平方向の運動が卓越する海域および河川下流部においてよく成立している。

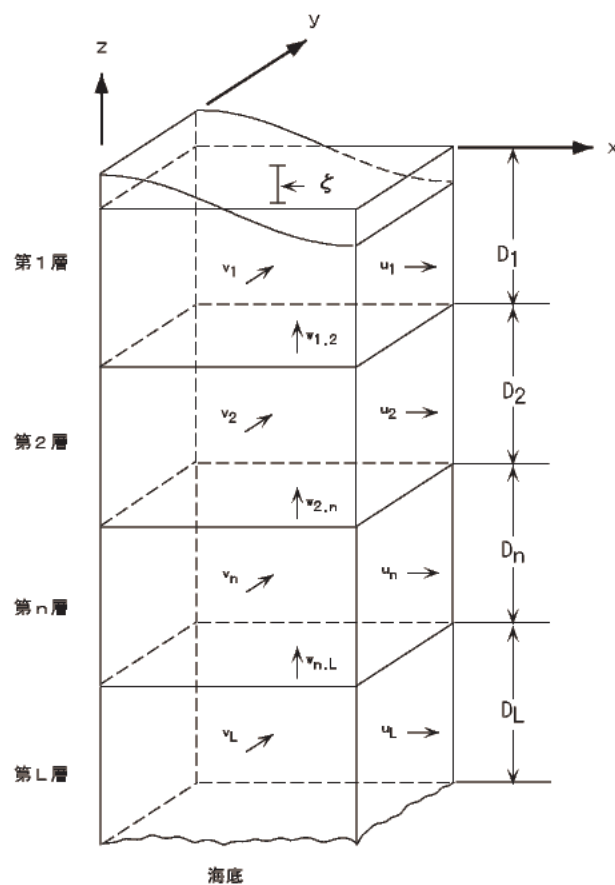


図 2.1 多層レベルモデルの概念と各変数の定義点

## 2-1 基本方程式

流動モデルの基本方程式は、以下のような連続の式、運動方程式、水温・塩分の拡散方程式からなる。

<連続の式>

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

<運動方程式>

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - fv = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_M \frac{\partial u}{\partial z} \right) + F_x$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + fu = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_M \frac{\partial v}{\partial z} \right) + F_y$$

$$\rho g = -\frac{\partial p}{\partial z}$$

<水温・塩分の保存式>

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} + w \frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K_H \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + F_\theta$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} + w \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K_H \frac{\partial S}{\partial z} \right) + F_S$$

右辺の  $F$  は平均的な流れと別に短時間の流れの強弱、方向の変化によって海水が混合され、運動、水温、塩分が一様化される効果で、以下の式で表される。

$$F_x = \frac{\partial}{\partial x} \left[ A_M \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ A_M \frac{\partial u}{\partial y} \right]$$

$$F_y = \frac{\partial}{\partial y} \left[ A_M \frac{\partial v}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[ A_M \frac{\partial v}{\partial x} \right]$$

$$F_{\theta,S} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ A_H \frac{\partial(\theta,S)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ A_H \frac{\partial(\theta,S)}{\partial y} \right]$$

ここで、

$x, y, z$  : 右手系の直交座標系、上向きを正

$u, v, w$  :  $x, y, z$  方向の流速成分

$p$  : 圧力

$\theta$  : 水温

$S$  : 塩分

$\rho_0$  : 代表密度

$\rho$  : 密度

$f$  : コリオリ係数

$K_M$  : 鉛直渦動粘性係数

$K_H$  : 鉛直渦動拡散係数

$A_M$  : 水平渦動粘性係数

$A_H$  : 水平渦動拡散係数

$G$  : 重力加速度

$T$  : 時間

である。

## 2-2 計算範囲および水平格子サイズの取り扱い

流動モデルは、対象とする海域によって異なる空間スケールや周辺海域との接し方に対応して効率的かつ詳細に計算できるように、外海との海水交換等を考慮した計算範囲を設定するものとし、また、図 2.2 に示すように外海から検討海域へ段階的に格子サイズを変化（ネスティング）させて検討海域では実証試験のスケールに応じた詳細な検討を行うことが可能なモデルとする。

図 2.3 に各モデル地域の地形および想定される計算範囲の案を示す。



図 2.2 水平格子設定の模式

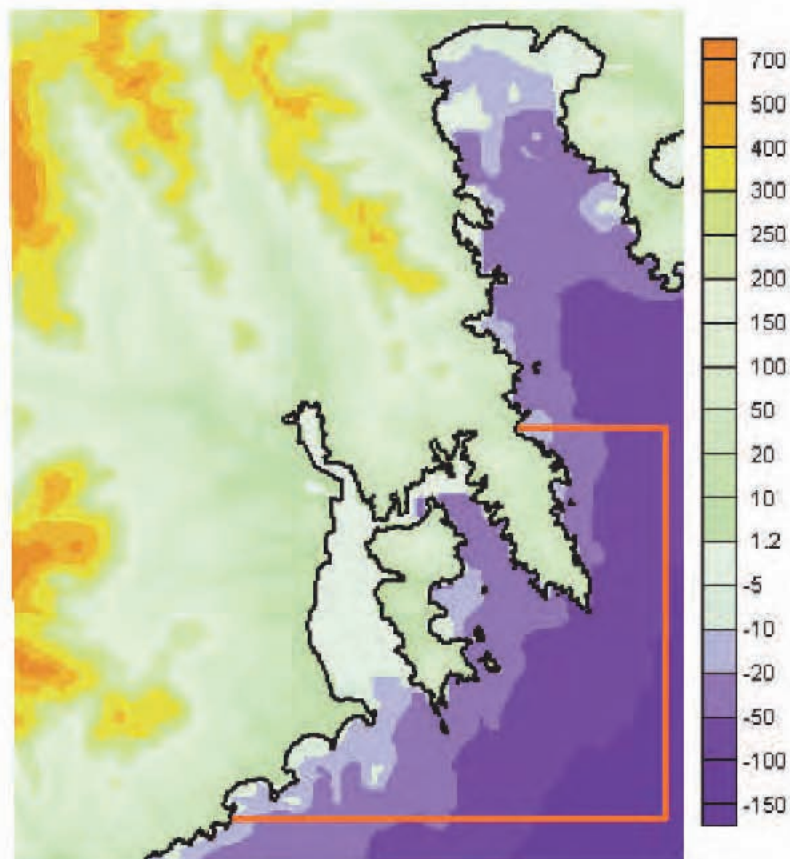


図 2.3(1) 気仙沼湾およびその周辺海域の水深および計算範囲の案

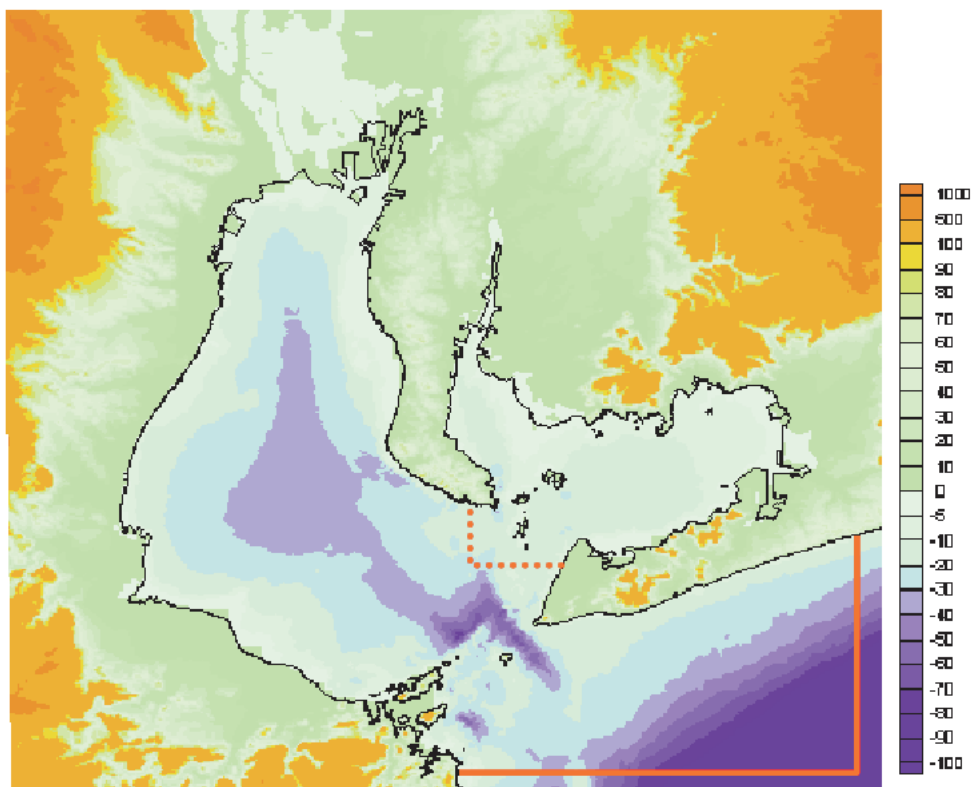


図 2.3(2) 三河湾およびその周辺海域の水深および計算範囲の案

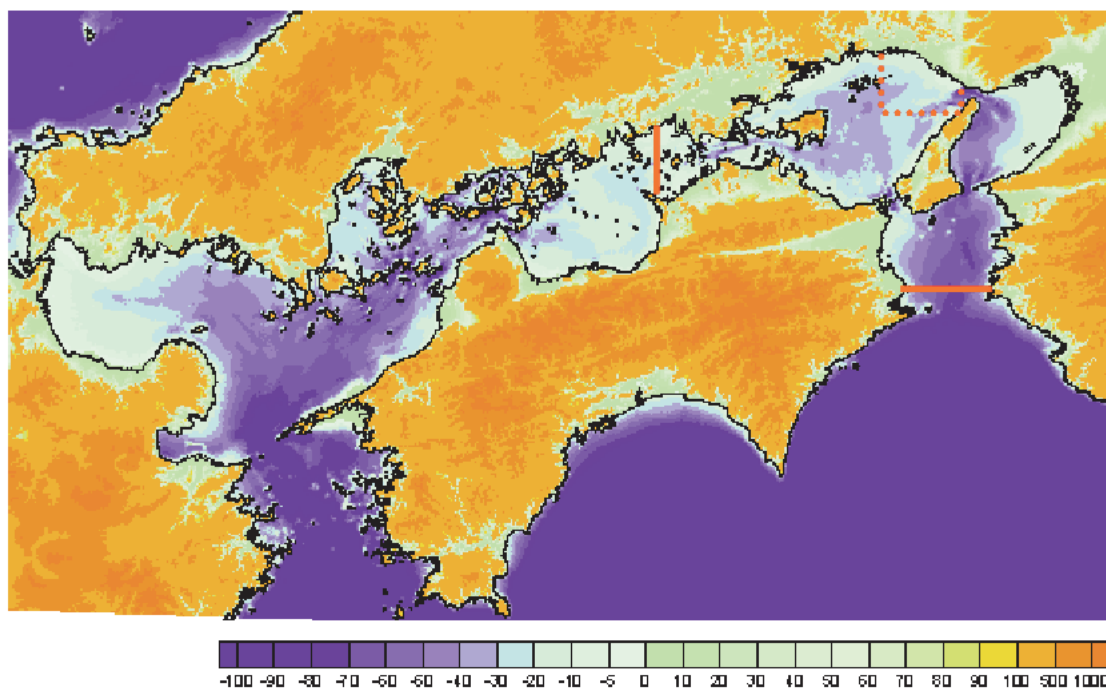


図 2.3(3) 播磨灘およびその周辺海域の水深および計算範囲の案

### 3. 水質-底質結合生態系モデル

#### 3-1 生態系モデルの概要

モデル海域における栄養塩類の循環バランスを回復・向上させるための管理方策によって得られる効果の定量的評価にあたっては、検討する管理方策によって生じる水質濃度の変化、それに応答する底質浄化や底生生物相の回復、これらの相互作用が及ぼすさらなる水質浄化といった相乗効果についても考慮できることが重要と考えられる。

そのため、構築するモデルは、プランクトンや底生生物、有機物、無機栄養塩、溶存酸素など閉鎖性海域における物質循環を考える上で主要な役割を担っている要素で構成し、海域における水質や底質、海棲生物の相互作用を窒素、りん及び炭素の生態元素で表現可能なものとし、図 3.1 に示すような浮遊生態系（水質）と底生生態系（底質および底生生物）を同時に解析できるモデル構造を有する水質-底質結合生態系モデル（以下、生態系モデルという）を構築する。

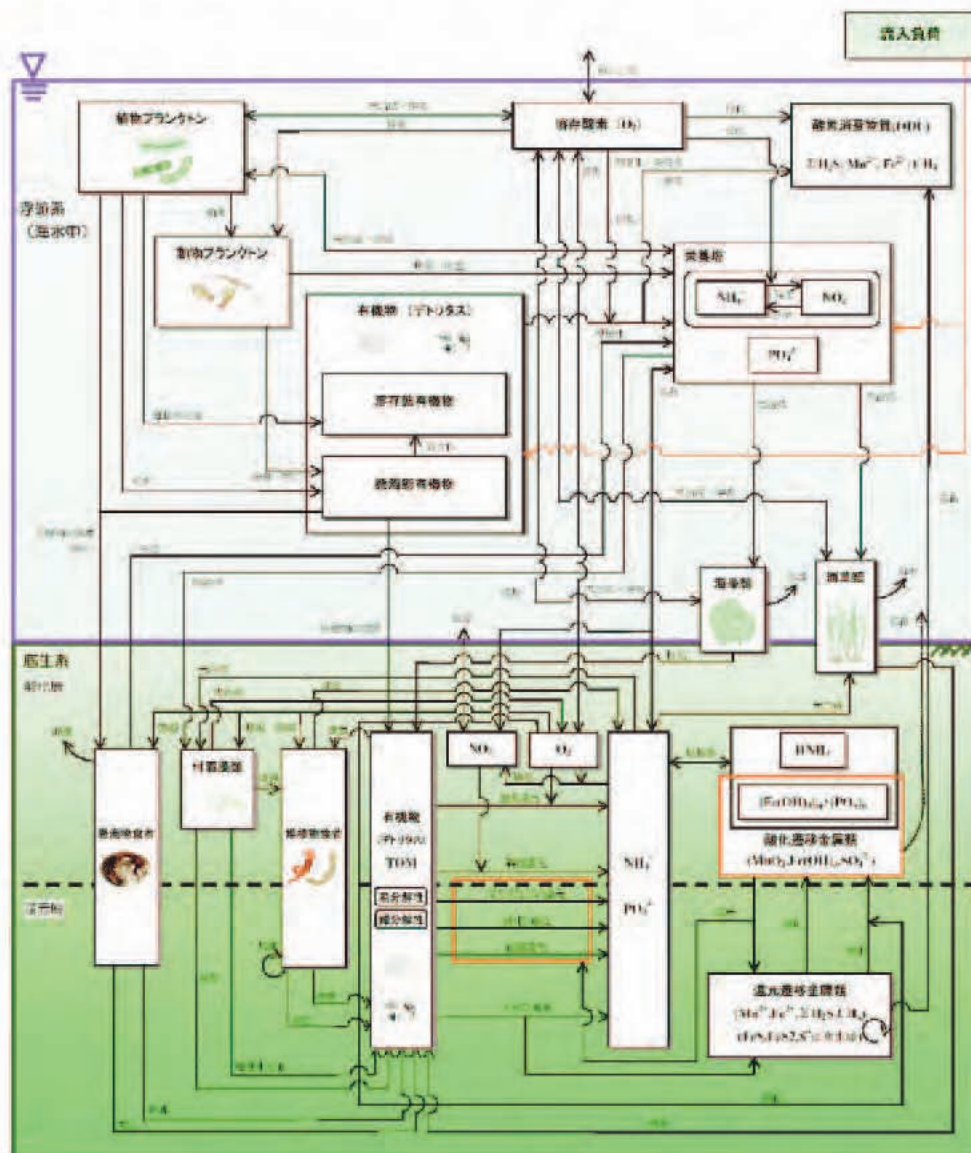


図 3.1 水質-底質結合生態系モデルの物質循環模式図

構築する生態系モデルは、浮遊生態系と底生生態系を水質・底質・底生生物の各サブモデルによって表現するものであり、表 3.1 に各サブモデルで検討する解析内容と出力項目（構成要素）の大枠を示す。

なお、酸素消費物質（ODU:Oxygen Demand Unit）とは、図 3.2 に示すとおり、水中において  $H_2S$  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り、貧酸素化に伴う青潮の発生等の目安となるものである。

表 3.1 各サブモデルの解析内容と出力項目

サブモデル	解析内容・出力項目
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、有機物（デトリタス）、栄養塩類、溶存酸素、酸素消費物質（ODU）
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、海草類、海藻類の現存量

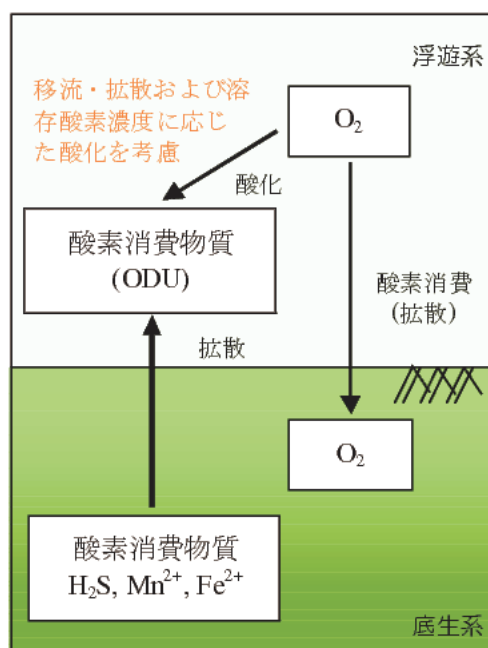


図 3.2 酸素消費物質(ODU)の考え方

### 3-2 生態系モデルの構成要素案

生態系モデルを構築するにあたって、その構成要素と考えられる項目の案を表 3.2 に示す。

表 3.2(1) 水質-底質結合生態系モデルの構成要素案 (水質)

変数名	独立変数	単位
CHL	植物プランクトン濃度	$\mu\text{g/L}$
ZOO	動物プランクトン量	$\text{mgC/L}$
DO	溶存酸素濃度	$\text{mgO/L}$
POC	懸濁態有機炭素濃度	$\text{mgC/L}$
DOC	溶存態有機炭素濃度	$\text{mgC/L}$
PON	懸濁態有機窒素濃度	$\text{mgN/L}$
DON	溶存態有機窒素濃度	$\text{mgN/L}$
POP	懸濁態有機リン濃度	$\text{mgP/L}$
DOP	溶存態有機リン濃度	$\text{mgP/L}$
$\text{NH}_4\text{-N}$	アンモニア態窒素濃度	$\text{mgN/L}$
$\text{NO}_x\text{-N}$	亜硝酸及び硝酸態窒素の合計濃度	$\text{mgN/L}$
$\text{PO}_4\text{-P}$	無機態リン濃度	$\text{mgP/L}$
ODU	酸素消費物質 ( $\text{H}_2\text{S}$ , $\text{Mn}^{2+}$ , $\text{Fe}^{2+}$ , $\text{CH}_4$ の合計)	$\text{mgO/L}$

表 3.2(2) 水質-底質結合生態系モデルの構成要素案 (底質・非生物項)

変数名	独立変数	単位	
TOC	固相+ 液相	底泥中の総有機炭素	$\text{mgC/g-dry}$
TON		底泥中の総有機窒素	$\text{mgN/g-dry}$
TOP		底泥中の総有機リン	$\text{mgP/g-dry}$
$\text{NH}_4^+$	液相	間隙水中のアンモニア態窒素	$\text{mgN/L}$
$\text{NO}_3^-$		間隙水中の亜硝酸及び硝酸態窒素	$\text{mgN/L}$
$\text{PO}_4^-$		間隙水中のリン酸態リン	$\text{mgP/L}$
$\text{O}_2$		間隙水中の溶存酸素	$\text{mgO/L}$
$\text{SO}_4^{2-}$		間隙水中の硫酸イオン	$\text{mgS/L}$
$\text{Mn}^{2+}$		間隙水中の $\text{Mn(II)}$ イオン	$\text{mgMn/L}$
$\text{Fe}^{2+}$		間隙水中の $\text{Fe(II)}$ イオン	$\text{mgFe/L}$
$\Sigma\text{H}_2\text{S}$		間隙水中の $\Sigma\text{H}_2\text{S}$ ( $=\text{H}_2\text{S}+\text{HS}^-$ )	$\text{mgS/L}$
$\text{CH}_4$		間隙水中のメタン	$\text{mgC/L}$
$\text{MnO}_2$		固相	底泥中の二酸化マンガン
$\text{Fe(OH)}_3$	底泥中の水酸化鉄		$\text{mgFe/g-dry}$
$\text{FeS}$	底泥中の硫化鉄		$\text{mgS/g-dry}$
$\text{FeS}_2$	底泥中の黄鉄鉱		$\text{mgS/g-dry}$
$\text{S}^0$	元素状硫黄		$\text{mgS/g-dry}$
$\text{DNH}_4^+$	吸着態のアンモニア態窒素		$\text{mgN/g-dry}$
$\text{DPO}_4^-$	吸着態のリン酸態リン		$\text{mgP/g-dry}$



表 3.2(3) 水質-底質結合生態系モデルの構成要素案（底質・生物項）

変数名	独立変数	単位
DIA	付着藻類	mgC/g-dry
BSF	懸濁物食者	mgC/m <sup>2</sup>
BDF	堆積物食者	mgC/m <sup>2</sup>
SWD	海藻類	mgC/m <sup>2</sup>
SGS	海草類	mgC/m <sup>2</sup>

モデルにおいて変数として計算される構成要素以外の項目である全窒素（T-N）、全リン（T-P）及び COD は、構成要素の濃度より換算して算出する。

- 全窒素（T-N）、全リン（T-P）

$$(T-N) = (TON) + (NH_4-N) + (NO_x-N)$$

$$(T-P) = (TOP) + (PO_4-P)$$

ここで、 $(TON) = (\text{植物プランクトン態 } N) + (\text{動物プランクトン態 } N) + (PON) + (DON)$

$(TOP) = (\text{植物プランクトン態 } P) + (\text{動物プランクトン態 } P) + (POP) + (DOP)$  とする。

- COD

$$(COD) = (\text{植物プランクトン態 } COD) + (\text{動物プランクトン態 } COD) + (\text{懸濁態 } COD) + (\text{溶存態 } COD)$$

### 3-3 構築する生態系モデルでの生物の取り扱い

生態系モデルで取り扱う生物の構成要素は表 3.3 に示す通りとし、ベースとなるモデルの構築にあたってはそれらの構成要素として以下の生物種を想定する。

表 3.3 モデルで考慮する生物の構成要素と想定する生物種および主な生息制限因子

構成要素	想定する生物種	主な生息制限因子
植物プランクトン	大型、小型珪藻	日射量 栄養塩濃度
動物プランクトン	カイアシ類	水温
海草類（SGS）	アマモ	日射量 栄養塩濃度
海藻類（SWD）	アオサ	
付着藻類(DIA)	付着藻類	
懸濁物食者(BSF)	アサリ	底層水有機物濃度 底層水溶存酸素濃度 硫化物濃度 溶存酸素濃度
堆積物食者(BDF)	メイオベントス、 マクロベントス	

また、各モデル地域に適用する生態系モデルについては、既往の調査結果等を参考に主要な物質循環過程を担っていると考えられる生物種を考慮することとし、それらのパラメータについても可能な限り、各モデル地域あるいはその近傍で得られた知見に基づいて設定することとする。

現時点で想定される各モデル地域において想定される構成要素の生物種の案を表 3.4 に示す。

表 3.4 各モデル地域で構築する生態系モデルで考慮する生物種の案

構成要素	気仙沼湾	三河湾	播磨灘北東部
植物プランクトン	大型、小型珪藻	大型、小型珪藻	大型、小型珪藻
動物プランクトン	カイアシ類	カイアシ類	カイアシ類
海草類 (SGS)	アマモ	アマモ	アマモ
海藻類 (SWD)	コンブ、ワカメ等	ノリ、アオサ	ノリ等
付着藻類 (DIA)	付着藻類	付着藻類	付着藻類
懸濁物食者 (BSF)	カキ、ホタテ、ホヤ等	アサリ、バカガイ等	ウチムラサキ等
堆積物食者 (BDF)	メイオベントス、マクロベントス	メイオベントス、マクロベントス	メイオベントス、マクロベントス

#### 4. WG へのアウトプットイメージ

物質収支モデルは、①各モデル地域の物質循環のフローとストックを可視化、②実証試験の効果の程度を把握するために用いる。

物質収支モデルの構築及び計算は本検討委員会で行い、その計算結果を各 WG に提供し、実証試験内容の検討、試験結果の評価、各モデル地域のヘルシープランを作成する上での基礎資料として活用可能なものとする。

計算結果のアウトプットとしては、COD、TN、TP といった濃度指標だけではなく、以下のような物質循環の指標となる項目を想定している。

- ・栄養塩類、特に溶解性の無機態窒素・リンの循環状況
- ・「物質循環の円滑さ」の観点から、『植物プランクトンから動物プランクトンへの転換効率』や魚類等高次の生物への物質循環の指標である『動物プランクトン現存量』、『堆積物食者現存量』の変化
- ・「生態系の安定性」の観点から、『貧酸素状態の継続時間』や『貧酸素水塊の容積』の変化 等