

三津湾地域における物質循環の解析（物質収支モデルの構築）について（案）

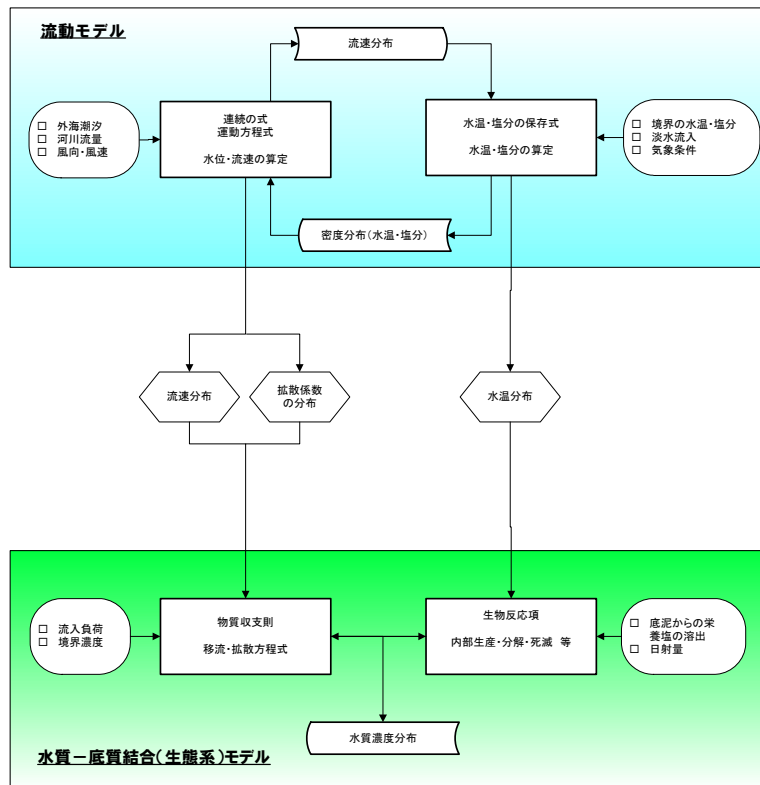
1. 物質収支モデルの概要

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・リン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ベースとなるモデルを構築する。次年度以降、モデル地域の特徴を考慮し、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、精度の向上を図る予定である。

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途進められる調査結果や検討方針等と十分連携を図るとともに、以下の事項を踏まえるものとする。

- 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、底生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、リン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。



- 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針によって、得られる効果を定量的に表現可能なものとする。

1-1 計算範囲および水平格子サイズ

計算範囲は外海との海水交換等を考慮して設定する。また、水平格子サイズは、モデル上での地形表現を考慮して外海側から検討海域にかけて徐々に計算格子を細かくするネスティング（入れ子格子）を行う予定である。図 1.1 に三津湾地域の計算範囲およびネスティングの案を示す。

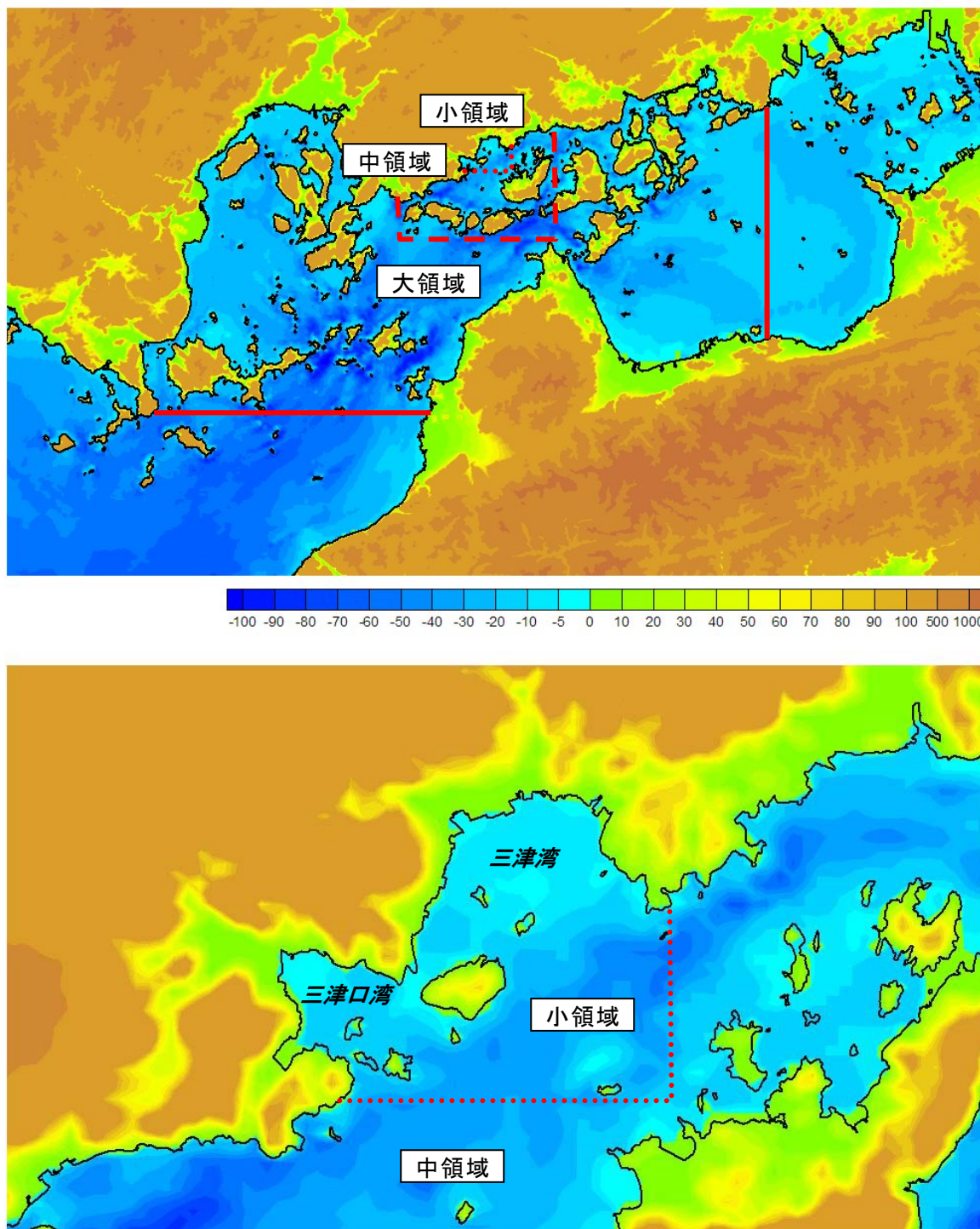


図 1.1 三津湾海域の計算範囲案

1-2 鉛直層分割

水深の層分割は、三津湾海域の水塊構造等を考慮した上で 10 層程度とする予定である。

1-3 計算期間

各海域における不健全な事象の解消又は軽減化のための管理方策に基づいて、それらを適切に検討できる計算期間（数ヶ月～最大 1 年間）を設定することとし、計算期間においてはその間の外力条件を時間変化させる非定常計算を行う予定である。

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。

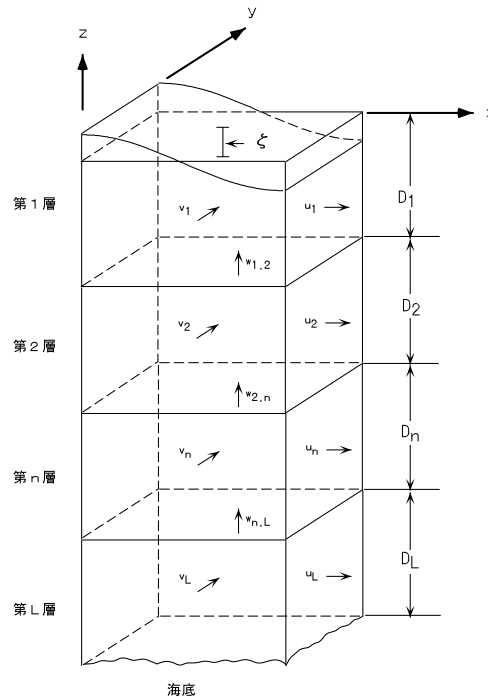


図 2.1 多層レベルモデルの概念と各変数の定義点

2-2 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 : 右手系の直角座標系、上向きを正

u, v, w : x, y, z 方向の流速成分

p : 圧力

θ : 水温

S : 塩分

ρ_0 : 代表密度

ρ : 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。

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、底生生物の相互作用を窒素、リン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（底質及び底生生物）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。

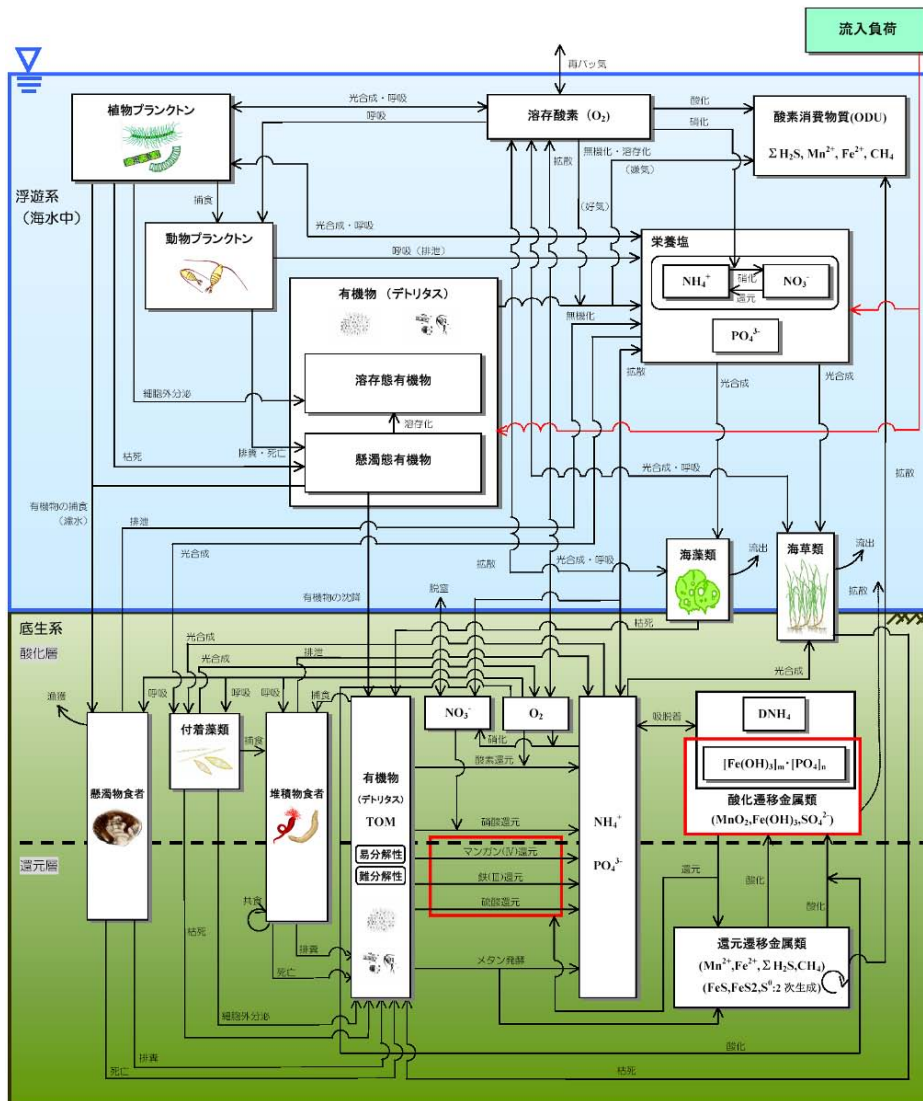


図 3.1 水質-底質結合生態系モデルで考慮予定の計算項目案とそれらの相互関係の模式

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

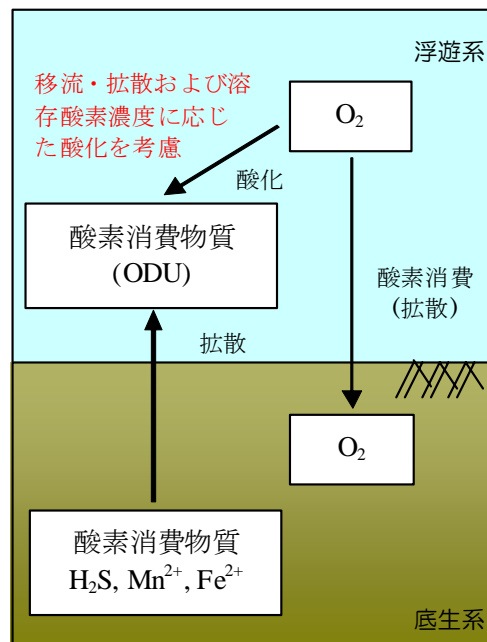


図 3.2 酸素消費物質(ODU)の考え方

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	μ g/L
ZOO	動物プランクトン量	mgC/L
DO	溶存酸素濃度	mgO/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 ₄ -N	アンモニア態窒素濃度	mgN/L
NO _x -N	亜硝酸及び硝酸態窒素の合計濃度	mgN/L
PO ₄ -P	無機態リン濃度	mgP/L
ODU	酸素消費物質 (H ₂ S, Mn ²⁺ , Fe ²⁺ , CH ₄ の合計)	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	mgC/g-dry
TON		底泥中の総有機窒素	mgN/g-dry
TOP		底泥中の総有機リン	mgP/g-dry
NH ₄ ⁺	液相	間隙水中のアンモニア態窒素	mgN/L
NO ₃ ⁻		間隙水中の亜硝酸及び硝酸態窒素	mgN/L
PO ₄ ⁻		間隙水中のリン酸態リン	mgP/L
O ₂		間隙水中の溶存酸素	mgO/L
SO ₄ ²⁻		間隙水中の硫酸イオン	mgS/L
Mn ²⁺		間隙水中の Mn(II)イオン	mgMn/L
Fe ²⁺		間隙水中の Fe(II)イオン	mgFe/L
ΣH ₂ S		間隙水中の ΣH ₂ S (=H ₂ S+HS ⁻)	mgS/L
CH ₄		間隙水中のメタン	mgC/L
MnO ₂		固相	底泥中の二酸化マンガン
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 ₂	底泥中の黄鉄鉱		mgS/g-dry
S ⁰	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
DPO ₄ ⁻	吸着態のリン酸態リン		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 (底生生物項)

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 ²
BDF	堆積物食者	mgC/m ²
SWD	海藻類	mgC/m ²
SGS	海草類	mgC/m ²

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

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基本とし、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を基本方針とする。三津湾海域において想定される生物種の場合として表 3.3 に示す生物が考えられる。

表 3.3 三津湾海域において想定される生物種の場合および考えられる主な生息制限因子

構成要素	生態系モデルで考慮する生物種の場合
植物プランクトン	大型、小型珪藻
動物プランクトン	カイアシ類
海草類 (SGS)	アマモ
海藻類 (SWD)	ガラモ
付着藻類(DIA)	付着藻類
懸濁物食者(BSF)	カキ、アサリ
堆積物食者(BDF)	メイオベントス、マクロベントス

4. 物質収支モデルの構築に必要な情報

物質収支モデルの構築に必要な情報は各地域 WG において収集・整理され、統括検討委員会ではそれらの提供をうけてモデルの構築を行う。

以下に項目別に地域 WG において収集・整理される情報について示すとともに、それらの一覧を表 4.1 に示す。なお、その他に気象条件が必要となるが、これについてはモデル構築者により、地域 WG で決定された計算対象年の気象データを入手する。

4-1 計算対象年

構築するモデルの再現性を確認する上では、現地調査を実施する今年度をモデルで再現することが望ましいと考えられるが、モデルの構築に必要なデータとして今年度のデータを入手することは現実的ではない。そのため計算対象年は、モデルの構築に必要なデータが入手でき、かつ異常気象等の特異な年でない、なるべく最新の 1 年間とし、必要とする各種情報の収集可能性を踏まえて各地域 WG で決定されるものとする。

なお、実際には対象海域への流入量データが計算対象年を決定する上で制限となる場合が多い。また、特異な年かどうかについては、気温や日射、降水量および河川流量等について平年値との比較や複数年同士の比較によって判断するものとする。

4-2 地形条件

地形条件に関する基本的な情報は、モデル構築者により海上保安庁海洋情報部海洋情報課・日本海洋データセンターの J-BIRD (JODC 統合水深データセット) や (財) 日本水路協会の海底地形デジタルデータ、海図等の一般に入手できる資料を入手し作成する。

なお、実証試験を適切に表現するために、地域ごとに実証試験計画に関する検討を行うにあたっては、対象地域における既往の深淺測量結果等を各地域 WG で収集し、提供頂きたい。

提供時期は今年度末までとする。

- ・実証試験規模を適切に表現するための深淺測量結果等地形情報

4-3 流動場を表現するための情報

4-3-1 流入条件

計算対象海域に流入する河川および工場・事業場・下水処理場等からの淡水流入量および事業場等による海水の取排水量を各地域 WG で収集し、提供頂きたい。淡水流入量データは、計算対象海域における計算対象年の 1 年間の日別流入量と流入水温および流入位置を取排水量データは、計算対象海域における計算対象年の 1 年間の日別取排水量と水温変化および流入位置を必要とする。

提供時期は、来年 1 月末までとする。

- ・淡水流入の計算対象年 1 年間の日別流入量、流入水温および流入位置
- ・取排水の計算対象年 1 年間の日別取排水量、水温変化および流入位置

4-3-2 初期条件および境界条件

流動モデルの初期条件および境界条件として、計算対象海域における計算対象年の水温、塩分データを各地域 WG で収集し、提供頂きたい。

提供時期は、来年 1 月末までとする。

- ・ 初期条件：計算対象海域における計算スタート時の鉛直多層の水温、塩分データ
- ・ 境界条件：計算対象海域の境界付近における鉛直多層の計算対象年 1 年間の水温、塩分の時系列データ

4-3-3 再現性の検証データ

流動モデルの再現性の検証データとして、計算対象海域における計算対象年の流況データを各地域 WG で収集し、提供頂きたい。

提供時期は、来年 1 月末までとする。

- ・ 計算対象海域における計算対象年（またはその代替となる）の流況（調和分解して得られた潮流調査定数、平均流）、潮位および鉛直多層の水温、塩分の時系列データ

4-4 物質循環系を表現するための情報

4-4-1 流入負荷条件

各対象地域に流入する河川および工場・事業場・下水処理場等からの流入負荷量を各地域 WG で収集し、提供頂きたい。流入負荷量データとして、計算対象海域における計算対象年の 1 年間の日別流入負荷量およびそれらを分画するための比率、換算係数を必要とする。

提供時期は、来年 1 月末までとする。

- ・ 計算対象年 1 年間の日別流入負荷量（COD、総窒素、総リン）
- ・ 窒素、リンの分画比（無機態／総量、懸濁有機態／全有機態）
- ・ COD から炭素への換算係数（POC／COD、DOC／COD）

4-4-2 初期条件および境界条件

水質－底質結合（生態系）モデルの初期条件および境界条件として、計算対象海域における計算対象年（あるいはそれに近い年）の水質、底質、生物等のデータを各地域 WG で収集し、提供頂きたい。

提供時期は、来年 1 月末までとする。

- ・ 境界条件：計算対象海域の境界付近における計算対象年 1 年間の鉛直多層の水質データ（表 3.2(1)の項目）
- ・ 初期条件：計算対象海域における計算スタート時（あるいはそれに最も近い時期）の鉛直多層の水質データおよび生物データ（底質データ）
- ・ 底面条件：計算対象海域における計算対象年（あるいはそれに近い年）の底泥からの溶出速度および底泥による酸素消費速度のデータ

4-4-3 再現性の検証データ

水質－底質結合（生態系）モデルの再現性の検証データとして、計算対象海域における計算対象年（あるいはそれに近い年）の水質、底質、生物等のデータを各地域 WG で収集し、提供頂きたい。

なお、底質および底生生物に関わる物質循環を簡略化する場合には、底質データは収集不要である。

提供時期は、来年 1 月末までとする。

- ・ 計算対象海域における計算対象年（あるいは本調査で取得する）1 年間の鉛直多層の水質（表 3.2(1)の項目）および生物データ（底質データ）

4-4-4 その他

各モデル地域に適用する生態系モデルで考慮する、主要な物質循環過程を担っていると考えられる生物種の生物学的なパラメータについて、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を各地域 WG で収集し、提供頂きたい。

また、検討対象海域における主要な漁獲による物質の取り上げ等、物質循環上重要と考えられる知見を各地域 WG で収集し、提供頂きたい。

提供時期は、今年度末までとする。

- ・ 計算対象海域のモデルで考慮する生物種に関する、生物学的なパラメータ
- ・ 計算対象海域における、漁獲による取り上げなど物質循環上の重要な知見

表 4.1 地域 WG において収集・整理される情報の一覧

項目	詳細項目	内容	備考
1) 流動・物質循環に共通の情報			
①計算対象年次		必要とする各種情報の収集可能性を踏まえて各地域 WG で決定	平年値との比較や複数年同士の比較等により特異年で無いかを検討
②地形		実証試験計画に関する検討にあたって、検討する施策の内容に応じてそれらを精度良く表現するために既往の深淺測量結果等を各地域 WG で収集	計算対象海域全体の基本的な地形情報についてはモデル構築者にて収集・整理
2) 流動場を表現するための情報			
①計算対象海域における淡水流入量	主要河川	流量、位置、水温	日別値
	工場、事業場、下水処理場等からの流入	流量、位置、水温	日別値あるいは月別値、年間値
	海水の取排水	流量、位置、温度変化	
②計算対象海域における流況、水温・塩分、潮位	流況	潮流調和定数、平均流(調査時期、位置)	計算対象年次あるいはそれに準じるもの
	水温・塩分	平面分布、鉛直分布、時間的変動等	計算対象年次のもの
	潮位	潮位、基準面高さ	計算対象年次のもの
3) 物質循環系を表現するための情報			
①流入負荷量	主要河川	COD、総窒素、総リン 総窒素、総リンの分画比 COD から炭素への換算係数	日別値
	工場、事業場、下水処理場等からの負荷		日別値あるいは月別値、年間値
②水質、底質、生物量等の存在量に関する情報	水質	表 3.2(1)の項目(時期、測定位置、測定層)	再現対象年次のもの
	生物量	底生生物およびプランクトンの構成種、存在量	再現対象年次と同じかなるべく近い時期のもの
	生物パラメータ	底生生物およびプランクトンの生長速度、その他生態特性	計算対象海域あるいは類似した海域のもの
	底質	栄養塩類、有機物量、硫化物量(時期、測定位置)	再現対象年次と同じかなるべく近い時期のもの
	物質循環パラメータ	底泥からの栄養塩類溶出速度、底泥による酸素消費速度	計算対象海域のもので、再現対象年次と同じかなるべく近い時期のもの
③上記以外に必要な情報	漁獲による窒素・リンの取り上げ量	漁獲・収穫の時期	再現対象年次と同じかなるべく近い時期のもの

5. 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の定量化、②実証試験の効果の程度の把握、等を目的として利用する。

物質収支モデルの構築及び計算は総括検討委員会で行い、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。

その際、計算結果のアウトプットとしては、COD、T-N、T-P といった水質濃度だけではなく、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