

運輸省港湾技術研究所

# 港湾技術研究所 報告

---

---

REPORT OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH  
INSTITUTE  
MINISTRY OF TRANSPORT

---

VOL. 33      NO. 3      Sept. 1994

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



# 港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I)

第33巻 第3号 (Vol.33, No.3), 1994年9月 (Sept.1994)

## 目次 (CONTENTS)

1. 港湾構造物への生物付着促進のための凸部周辺の流則分布に関する検討  
..... 古川恵太・室 善一郎・細川恭史 ..... 3  
(Velocity Distribution around Uneven Surface for Promotion of Larvae Settlement  
on Coastal Structures)
2. 浅場の窒素収支を考慮した3次元物質循環モデルの構築と計算事例  
..... 古川恵太・細川恭史 ..... 27  
(A Three Dimensional Physical-Biological Modeling and its  
Application to Evaluation of Nitrogen Uptake at Coast)

## 2. 浅場の窒素収支を考慮した3次元物質 循環モデルの構築と計算事例

古川 恵太\*  
細川 恭史\*\*

### 要 旨

内湾域に存在する干潟や藻場といった浅い領域(浅場)での環境改善機構に着目して、窒素循環を含む物質循環モデルを構築した。物質循環を湾内で3次元的に計算するために、多層レベルモデルによる潮流計算を併用した。モデルの適用例として、東京湾を対象として浅場の増加による湾内窒素容量の改善効果の検討を行った。

東京湾を1つのボックスとした予備計算から、内湾全体の窒素容量に支配的な要因を探した。支配的な要因は第一に海水交換率であったが、浅場の面積もある程度の大きさをもつようになると、海水交換率の変化による影響と同等の影響を及ぼすことがわかった。また、地形条件を3通りに変化させた3次元計算を行い、窒素の存在量等の定常解析のほか、非定常解析による滞留時間の比較を行った。その結果、過去の地形条件では、現在より窒素の容量が大きくなった。その原因は海水交換率の増加にあると推定された。一方、現況の地形条件に浅場を増やした場合にも、窒素の容量は大きくなるが、その原因は浅場の増加による海藻への窒素吸収にあることが推定された。

キーワード：海水浄化、物質循環、海藻、数値計算浅場、東京湾、潮流計算、多層ADI法

---

\* 海洋水理部 主任研究官  
\*\* 海洋水理部 海水浄化研究室長

## 2. A Three Dimensional Physical – Biological Modeling and its Application to Evaluation of Nitrogen Uptake at Coast

K. Furukawa\*  
and  
Y. Hosokawa\*\*

### Synopsis

A three dimensional physical-biological model was developed to evaluate the effect of nutrient absorption by seaweeds in coastal shallow region. Numerical calculations were conducted for 3 different cases of geological boundary conditions of Tokyo Bay. For the past condition, tidal exchange rate becomes bigger than that for the present condition. Standing mass of nitrogen inside the bay was estimated smaller for the past condition by this effect. For the tentative condition, seaweeds are vegetated widely in the shallow area, and absorption rate of nitrogen is assigned bigger than that for the present condition. Standing mass of nitrogen was also found to be decreased. By using remnant time analysis, spatial effect of coastal nutrient absorption was discussed.

**Key Words** : Water Purification, Nutrient Capacity, Shallow Water Region, Seaweed,  
Numerical Simulation, Tokyo Bay

---

\* Senior Resercher, Marine Hydrodynamics Division

\*\* Chief of the Purification Hydraulics Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

## 目 次

要旨 .....	27
1. はじめに .....	31
2. 物質循環計算モデル .....	31
2.1 湾域での物質循環 .....	31
2.2 浅場を含む物質循環 .....	32
2.3 コンパートメントの反応式 .....	32
3. 多層潮流計算モデル .....	39
3.1 基礎方程式と解法 .....	39
3.2 境界での取扱いおよび計算条件 .....	42
3.3 物質循環モデルとの連絡 .....	43
4. 東京湾物質循環計算 .....	44
4.1 計算条件 .....	41
4.2 1ボックスモデルによる感度解析 .....	46
4.3 メッシュモデルによる定常解析 .....	46
4.4 メッシュモデルによる非定常解析 .....	51
5. おわりに .....	54
参 考 文 献 .....	54
記 号 表 .....	55

## 1. はじめに

「持続可能な開発」が開発の基本的理念として認識されつつある。開発によるインパクトを正確に把握し、そのインパクトをモニタリングする手法を開発することは、この理念を支える技術として重要である。

一方、東京湾の生態系に関する従来の知見では、栄養塩のなかでリンが制限因子となっており、窒素は過剰に存在することが指摘されている。そのなかで、干潟や藻場といった比較的浅い水深をもつ領域（浅場）は、窒素の吸収源となり得る可能性が示されている。

浅場は、一般に海岸線に近いところに分布し、開発によるインパクトを直接受ける場所である。もし、窒素の吸収源としての役割が、湾域全体に影響を及ぼしているとするならば、浅場での支配的なプロセスを考慮したインパクトの予測手法が必要となる。

そこで、浅場での窒素循環を考慮した物質循環の計算を行うために必要となるモデルを構築し、その適用事例を示すことにより、計算法や検討方法に関する情報を取りまとめた。

本論文の構成は以下の通りである。

2. において、浅場を有する湾域での物質循環に対する一般的知見をとりまとめ、それを再現するための物質循環モデルの定式化を行った。浅場の効果は、浅場に繁茂する海藻による窒素の吸収として取り込んでいる。

3. において、3次元での物質循環モデルを実行させるために必要となる多層レベルモデルによる潮流計算について概要を記述した。潮流計算モデルは、ADI法による離散化および半陽的解法を用いているので、その解法の骨子と境界条件等についてとりまとめた。

最後に 4. において、本モデルを東京湾に適用し、地形条件の違いによる湾内窒素容量の変化とその要因について考察した。計算で用いた地形は、a) 水域面積も大きく沿岸浅場の多い過去の地形と、b) 埋め立てにより水域面積が縮小し浅場の少ない現在の地形、そして、c) 現在の湾内に大規模に浅場を造成した場合の仮想地形の3通りを比較検討した。

## 2. 物質循環計算モデル

### 2.1 湾域での物質循環

物質循環モデルは各物質の収支を追跡することにより、それぞれの物質の存在量を明らかにして、対象領域内でどのように物質が循環しているかを示すモデルである。その基本的な考え方を、湾域を1つの水塊として単純化して説明する。

図-1に示すような、閉鎖性の湾を想定する。湾内への単位時間当たりの負荷重量を  $W$ 、単位時間当たりの淡水流入量を  $g$ 、潮汐による海水交換量を  $Q$ 、湾の水体积を  $V$ 、湾内の水質濃度を  $C$  とすると物質収支は次の式で書き表せる。

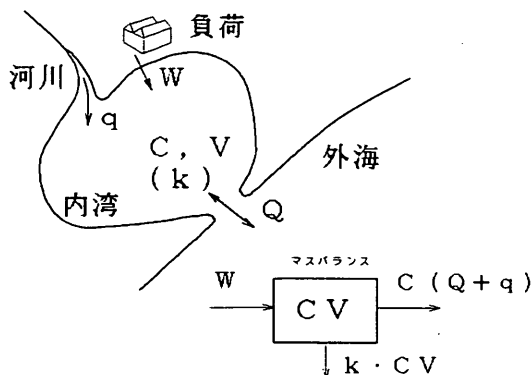


図-1 閉鎖性湾の物質収支

$$\frac{d(CV)}{dt} = W - C(Q+g) - kCV \quad (1)$$

ここに、 $k$  は湾内の自浄作用に関する速度係数であり、自浄作用の大きさは水塊内の濃度  $C$  に比例するとしている。式(1)の定常解  $C_s$  を求めると、

$$C_s = \frac{W/V}{(1/t_0) + k} \quad (2)$$

となる<sup>1)</sup>。ここに  $t_0$  は  $V/(Q+g)$  で定義される湾内の水理学的滞留時間である。

この式(2)から湾内の水質に関する以下の情報が得られる。

- 水質濃度  $C_s$  は負荷量  $W$  に比例し、水体积  $V$  に反比例する
- 水質濃度  $C_s$  は自浄係数  $k$  と水理学的滞留時間  $t_0$  の逆数との和に反比例する

一番目の情報は、湾に流入する負荷源の分布や地形的条件より明示的に与えられる情報である。二番目の情報に含まれる自浄係数とは、その物質が水塊内でどのような反応をするかということを与える係数である。沈降・分解・揮発・吸着等のプロセスは、対象物質濃度が希薄な場合には水塊内の存在濃度に比例した速度で濃度が減少する。こうした濃度減少の諸過程は、物質循環モデルの反応項で記述される。また、水理学的滞留時間は、潮流計算モデルにより計算される。

それぞれのオーダーを比較することにより、何が水質改善に大きく寄与しているのかを判定することができる。例えば、東京湾のような湾でみると、自浄係数が $0.01 \sim 0.1d^{-1}$ であり水理学的滞留時間が $10 \sim 100d$ つまり、 $1/t_0$ が $0.01 \sim 0.1d^{-1}$ となり同等のオーダーをもつ。両者ともに水質に対して同程度重要であることがわかる。

物質の水塊内での反応が複雑であるので、自浄係数に係わる項は非常に複雑な系となる。全てをモデル化することは不可能であるので、何を検討したいのかを明確にして、その検討項目に支配的な現象に係わる項を選択する必要がある。次の節では、対象領域を浅場を含む東京湾を念頭にいれ、物質循環モデルの構築を試みる。

### 2.2 浅場を含む物質循環

佐々木<sup>2)</sup>は、東京湾のプランクトン生態系について以下の指摘をしている。

- 上層では、リンが窒素や珪素に比べて不足している。植物プランクトンの成長の点からみると窒素が過剰である。
- 堆積物の窒素リン比は湾中央部で約5、浅場や湾口部に行くに従い約1まで減少する。その機構としては脱窒素反応により窒素が減少したことが考えられる。
- 水深方向の光の減衰はかなり急激であり、約4m下層では光不足となり、栄養塩が十分利用されない原因と考えられる。
- 植物プランクトンも動物プランクトンも微小なものが卓越している。その結果世代交代が早く、沈降速度も小さいと考えられる。

これらの記述は、東京湾全体を視野にいたれたものである。局所的な場所（特に浅い場所）に着目すると、例えば海藻が生えるような場所や干潟域等について固有の生態系が存在し、物質循環に影響を与えていることが指摘されている。

温帯水域では、水深が3～4mの領域にアマモが生育し、海草原をつくることもある。石巻湾の万石浦に対する観測および試算によれば<sup>4)</sup>、アマモの年間平均生産量は、 $0.17gNm^{-2}d^{-1}$ であり、成長の最盛期にはこの数倍の一次生産が起きていることが推定されている。また、窒素収支の検討から、アマモ場が窒素の吸収源としての機能を果たしていることが指摘されている。

干潟域は、陸と海の接点のひとつであり、生物活性の高い領域としてその物質収支や生態系に関する研究が盛んに行われている。佐々木<sup>3)</sup>は干潟の機能・役割・価値を検討し、その重要性を指摘している。三河湾の一色干潟に関する調査では、窒素に関する循環が示されている。

$2.4tNd^{-1}$ の流入に対して、 $1.4tNd^{-1}$ が干潟内で循環し、その内の大部分がマクロベントスに取り込まれているとされている。年間を通じて干潟が周囲の海域に対して窒素の吸収源として機能していることを推定している。

このように、浅い領域では湾内に過剰に存在する窒素の吸収源としての機能があり、海水の浄化に寄与していることが予察されている。したがって、浅い領域の寄与を判定するための物質循環モデルを構築するためには、窒素循環の評価を行うことが重要となる。

### 2.3 コンパートメントの反応式

本節では、物質循環モデルの中心的内容である、物質反応項の定式化を行う。本物質循環モデルは、植物プランクトン (PHY)、動物プランクトン (ZOO)、懸濁態有機炭素 (POC)、溶存態有機炭素 (DOC)、溶存態無機態リン (DIP)、溶存態全無機態窒素 (DIN)、溶存酸素 (DO)、化学的酸素要求量 (COD) のコンパートメント (状態変数) を含む。諸過程による炭素 (C)・窒素 (N)・リン (P)・酸素 (O) の各元素の循環をそれぞれ計算しているが、植物プランクトン・動物プランクトン・懸濁態有機炭素はC, N, Pを一定の割合で含んだ粒として扱っている。その循環過程を概念的に説明すると、図-2のようになっている。系外から流入する負荷は、有機物と栄養塩として系内に取り込まれ、一次生産者である植物プランクトンと一次消費者である動物プランクトンを媒介にして、系内を循環する。形態を変えながら循環している栄養塩・有機物は、粒状態有機物の沈降や、窒素の吸収作用により、系外に取り出される。溶存酸素は一次生産に付随して生成され、また、各反応

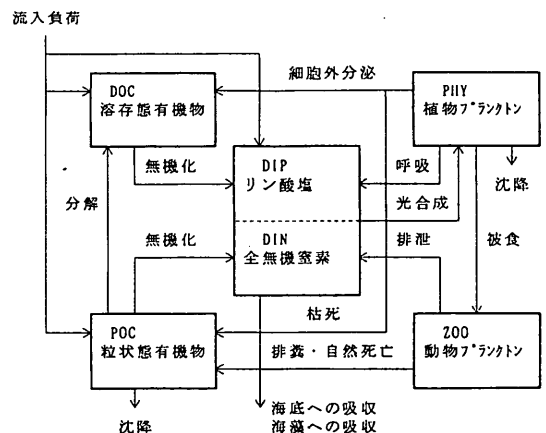


図-2 物質循環モデルの概念図

の制限因子としても働く。化学的酸素要求量は、懸濁態・溶存態の有機物およびリン酸塩、全無機態窒素の存在量から推定する。

以下に、各コンパートメントの反応諸過程の定式化を示す。これらの定式化にあたっては、J. N. Kremerら<sup>19)</sup>、中田<sup>10)</sup>等の物質循環モデルを参考にした

(1) 植物プランクトン (PHY)

植物プランクトン (PHY) としては、単一の優先種に着目し、モデル化を行った。植物プランクトンの生物量を炭素を単位に PHY [mgC/m<sup>3</sup>] と表し、時間当たりの変化量を次式で示した。

$$\frac{d \text{PHY}}{dt} = B01 - B02 - B03 - B04 - B05 - B06 - B07 \quad (3)$$

右辺の各項の意味は

$$\begin{aligned} B01 &= \text{光合成による増殖} \\ &= v_1(T) \cdot \mu_1(\text{DIP}, \text{DIN}) \cdot \mu_2(I) \cdot \text{PHY} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} B02 &= \text{細胞外分泌} \\ &= v_2(\text{PHY}) \cdot B01 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} B03 &= \text{呼吸による消費} \\ &= v_3(T) \cdot \text{PHY} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} B04 &= \text{動物プランクトンによる被食} \\ &= v_4(T, \text{PHY}) \cdot \text{ZOO} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} B05 &= \text{ベントスによる被食} \\ &= v_5(T) \cdot \text{PHY} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} B06 &= \text{枯死} \\ &= v_6(T) \cdot \text{PHY}^2 \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} B07 &= \text{沈降} \\ &= w_{\text{PHY}} \frac{\partial \text{PHY}}{\partial z} \end{aligned} \quad (10)$$

である。ここに、 $T$  は温度、 $I$  は照度、 $v(\ )$  は種々の速度係数を、 $\mu(\ )$  は速度に対する制限の強さを表す関数であり、 $(\ )$  内の因子を持つことを表している。以下に各素過程の定式化の考え方を示す。

a) 光合成による増殖 植物プランクトンの増殖は、2.2 で示されているように光の条件による制限が支配的であることが指摘されているので、温度依存型の最大増殖速度に、栄養塩濃度による制限と、光減衰による制限を付加した。植物プランクトンの最大増殖速度の温度依存性は、古くから知られている。Eppley<sup>5)</sup> は、温度応答曲線として、

$$v_1 = 0.59 \exp(0.0633 T) \quad (11)$$

を得た。これは、1日の細胞分裂速度を計測した実験結果を、群集の成長速度に変換したものである。本モデルでは、式(11)を一般化し、

$$v_1 = \alpha_1 \exp(\beta_1 T) \quad (12)$$

とした。ここで、今後の説明に使われる  $Q_{10}$  という考え方を導入する。これは、温度が10度上昇すると生理学的な速度がどの程度になるかという尺度である。例えば、 $Q_{10} = 2$  であるということは、10度の温度上昇で速度が2倍になることを意味している。一般に生理的な温度応答が判らない場合には、常温では  $Q_{10} = 2$  とすることが多い。式(12)で  $Q_{10} = 2$  であるとする、 $\beta_1 = \ln(Q_{10})/10$  であるので、 $\beta_1 = 0.0693$  となる。

単一の栄養塩による影響は、Monod<sup>6)</sup> により

$$\frac{\mu}{\mu_{\max}} = \frac{N}{K_s + N} \quad (13)$$

の式が提案されている。ここで、 $\mu/\mu_{\max}$  は最大成長速度で無次元化された比成長速度、 $N$  は栄養塩濃度、そして  $K_s$  は半飽和定数 ( $\mu/\mu_{\max} = 0.5$  となるときの栄養塩濃度) である。この式は、単一の栄養塩による影響を良く再現することが経験的に知られている。複数の栄養塩が存在するときの影響を見積もる方法としては、積表現である

$$\frac{\mu}{\mu_{\max}} = \frac{N_1}{K_{s1} + N_1} \cdot \frac{N_2}{K_{s2} + N_2} \cdot \frac{N_3}{K_{s3} + N_3} \cdots \quad (14)$$

を用いることが多い。しかし、ここでは、最大の制限を与える因子 (最小の成長速度を規定する因子) に着目し、

$$\frac{\mu}{\mu_{\max}} = \min \left\{ \frac{N_1}{K_{s1} + N_1}, \frac{N_2}{K_{s2} + N_2}, \frac{N_3}{K_{s3} + N_3}, \dots \right\} \quad (15)$$

として、定式化した。栄養塩バランスの中で「最も欠乏した栄養素が成長を規定する」としたリービッチの最小律により近い表現である。本モデルでは、栄養塩として DIN と DIP を考慮しているので、

$$\mu_1(\text{DIN}, \text{DIP}) = \min \left\{ \frac{\text{DIN}}{K_N + \text{DIN}}, \frac{\text{DIP}}{K_P + \text{DIP}} \right\} \quad (16)$$



となる。ここに、 $K_N$ と $K_P$ はそれぞれDINおよびDIPの摂取に関する半飽和定数である。

光の強さ $I$ に対する植物プランクトンの光合成応答を表す式として、強光条件での阻害を表現したSteele<sup>7)</sup>やVollenweider<sup>8)</sup>の提案式

$$\mu_2 = \frac{I}{I_{opt}} \cdot \exp\left(1 - \frac{I}{I_{opt}}\right) \quad (17)$$

がある。ここに、 $I_{opt}$ は最適照度である。水中の光強度は濁りによって減衰する。この機構は次のLambert-Beerの法則に従う；

$$I_z = I_0 \exp(-\kappa \cdot z) \quad (18)$$

ここに、 $I_z$ は水深 $z$ における、 $I_0$ は海面における光強度であり、 $\kappa$ は消散係数である。この式(18)を式(17)に代入し、水深 $z_1$ から $z_2$ までの水深方向の積分を $z_2 - z_1$ で除すことにより、平均的な阻害の大きさが

$$\begin{aligned} \bar{\mu}_2 = \frac{1}{\kappa(z_2 - z_1)} & \left[ \exp\left\{1 - \frac{I_0}{I_{opt}} e^{-\kappa z_2}\right\} \right. \\ & \left. - \exp\left\{1 - \frac{I_0}{I_{opt}} e^{-\kappa z_1}\right\} \right] \quad (19) \end{aligned}$$

で表される。

海面の光強度 $I_0$ は、日変化をする。経験的に、定式化された式として

$$I_0 = I_{max} \cdot \sin^3\left(\frac{\pi}{DL} \cdot t\right) \quad (20)$$

が提案されている。ここに $DL$ は日射時間の1日当たりの割合である。これを時間積分すると、

$$\bar{I}_0 = I_{max} \cdot \frac{4DL}{3\pi} \quad (21)$$

となる。光合成速度に対し一日の平均速度を与えても、日の出から日没までの正弦的な日射変化を与えても、内湾の物質循環の計算ではほとんど差がでてこないことは、既に確かめられている<sup>9)</sup>。

b) 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質の一部を溶解有機物の形態で細胞外に排出する。この現象は細胞外分泌(extracellular release)、あるいは排泄(excretion)、浸出(exudation)等と呼ばれている。正常な細胞における細胞外分泌量は一般に、固定された全炭素量の15%かそれ以下であることが示されている。

実験的には、

$$v_2 = 0.135 \cdot \exp\{-0.00201 \cdot Chla\} \quad (22)$$

などとされている。ここに、 $Chla$ は細胞中のクロロフィルa量である。植物プランクトン内の $Chla$ と炭素量 $C_{PHY}$ の比を用いると、式(22)は、

$$v_2 = 0.135 \cdot \exp\{-0.00201 \cdot [Chla : C_{PHY}] \cdot PHY\} \quad (23)$$

と書き直せる。この式から、 $0 \sim 50 \text{ mg/m}^3$ の $Chla$ に対して、13.5~12.2%の分泌量が見積もられる。

c) 呼吸による消費 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。しかし、呼吸の詳しいメカニズムは明かでないので、一般的な指数曲線型で、温度依存性を仮定した。

$$v_3(T) = \alpha_2 \cdot \exp(\beta_2 T) \quad (24)$$

の式を用いて表すこととする。

中田<sup>10)</sup>は、定数項として、 $\alpha_2 = 0.03$ 、 $\beta_2 = 0.0519$ ( $Q_{10} = 1.69$ )を得ている。

d) ベントスによる被食 この項は、底生生物(ベントス)による植物プランクトンの濾過捕食を表している。これを見積もるためには、底生生物も系内に取り入れ、底生生物の活性・捕食形態のモデル化が必要である。現在、ベントス量は状態変数としてモデルに組み込んでいない。そこでは、 $v_5$ は単に植物プランクトンの海底へ向けての平均的な消失速度を表していると解釈される。そこで、不確かな消失速度として、枯死の項に含めることとした。

e) 枯死 枯死は、本来、細胞の老朽化による植物プランクトン生物量の減衰過程を表すが、本モデルでは、考慮されていない要因による植物プランクトンの消失量を総合的に表す概念とした。

植物プランクトンの消失量は、現存量に比例するとし、指数曲線型の温度応答を仮定し、

$$v_5(T) = \alpha_3 \cdot \exp(\beta_3 T) \quad (25)$$

とした。ここに、 $\alpha_3$ は温度零度の時の速度係数、 $\beta_3$ は温度応答に関する係数値である。

f) 沈降 植物プランクトンは、自走能力をもたない場合、自らの重さによる沈降が発生する。その速度は明かでないがモデル上は環境条件に左右されない沈降速度 $w_{PHY}$ を与えることとした。赤潮末期の水塊の調査から、プランクトンの沈降速度推定を試みた例もある<sup>11)</sup>。

## (2) 動物プランクトン

動物プランクトン(ZOO)の挙動に関し、植物プラ

ンクトンと同様に、単一の優先種に着目し、モデル化を行った。動物プランクトンの生物量を炭素 (C) で表し、ZOO [mgC/m<sup>3</sup>] とする。時間に関する変化量は、

$$\frac{dZOO}{dt} = B04 - B08 - B09 - B10 \pm B11 \quad (26)$$

で表される。右辺の項の意味は、

$$B04 = \text{摂食による増殖} \\ = v_4(T, \text{PHY}) \cdot \text{ZOO} \quad (27)$$

$$B08 = \text{排糞} \\ = (1-e) \cdot B04 \quad (28)$$

$$B09 = \text{排泄} \\ = (e-g) \cdot B04 \quad (29)$$

$$B10 = \text{自然死亡による減少} \\ = v_7(T) \cdot \text{ZOO}^2 \quad (30)$$

$$B11 = \text{日周垂直運動による増減} \\ = w_{zoo}(t) \frac{\partial \text{ZOO}}{\partial z} \quad (31)$$

(32)

である。ここで、 $e$  は同化効率、 $g$  は総成長効率で、いずれの定義も後述される。また、 $v_4(T, \text{PHY})$  は式(7)と共通である。

a) 摂食による増殖 動物プランクトンによる摂食過程は、数多くのモデルが存在する。一般に被食は、餌料濃度の関数として与えられる。植食性動物プランクトンの摂食に関する Parsons らの研究によれば、餌料濃度がある値以下になると摂食が行われなくなるしきい値が存在し、ある濃度以上になるとそれ以上餌を取り込めなくなる上限値が存在する。これを表現すると、

$$R = R_{max} [1 - \exp\{\lambda(\Pi^* - \Pi)\}] \quad (33)$$

のようになる。ここに、 $R$  は動物プランクトンの摂食速度、 $R_{max}$  は最大摂食速度、 $\lambda$  は Ivlev 定数、 $\Pi^*$  はしきい値、 $\Pi$  は餌料濃度である。上限値である  $R_{max}$  に関しては、指数曲線型の温度応答を仮定し、

$$R_{max} = \alpha_4 \cdot \exp(\beta_4 \cdot T) \quad (34)$$

とした。したがって、摂食速度  $v_4$  は、式(33)、(34)より

$$v_4(T, \text{PHY}) = \alpha_4 \cdot \exp(\beta_4 \cdot T) [1 - \exp\{\lambda(\Pi^* - \Pi)\}] \quad (35)$$

と記述される。 $\Pi$  は餌となり得る植物プランクトン濃度に相当する。

b) 排糞および排泄 摂餌によって動物プランクトンに

取り込まれた栄養塩は、排糞あるいは尿によって生体内から排泄される。前者を排糞量、後者を排泄量として定義する際に、同化効率  $e$  [%] と総成長効率  $g$  [%] を用いて評価すると、

$$\text{摂餌量} \times (1 - \text{同化効率}) = \text{排糞量} \quad (36)$$

$$\frac{\text{摂餌量} - (\text{排糞量} + \text{排泄量})}{\text{摂餌量}} = \text{総成長効率} \quad (37)$$

の関係がある。整理すると、

$$B08 = (1-e) \cdot v_4(T) \cdot \text{ZOO} \quad (38)$$

$$B09 = (e-g) \cdot v_4(T) \cdot \text{ZOO} \quad (39)$$

となる。

c) 自然死亡

植物プランクトンの枯死と同様に、指数曲線型の温度依存を考慮し、

$$v_7(T) = \alpha_5 \cdot \exp(\beta \cdot T) \quad (40)$$

と定義した。ただし、動物プランクトン以上の高次の消費者(魚等の動物)をモデルに組み込んでいないので、被食による減少も自然死亡に含めて評価している。従って自然死亡の項  $B10$  が過小評価にならないよう、ZOO の 2 乗に比例する形で記述している。

d) 日周垂直移動 動物プランクトンは、夜間表層に浮上し、昼間下層に沈降することを繰り返す日周垂直移動と呼ばれる動態を示すことがある。しかし、垂直運動のメカニズム等、詳しいことは判っていないので、本モデルにおいては、 $w_z = 0$  として、考慮していない。

(3) 懸濁態有機物

本モデルでの懸濁態有機物とは、粒状の有機物すなわちデトリタスを、炭素量 POC [mgC/m<sup>3</sup>] で表したものである。懸濁態のリンおよび窒素の量は、懸濁物中の C/P、C/N 構成比を仮定することにより換算される。POC の時間変化は、

$$\frac{d\text{POC}}{dt} = B06 + B08 + B10 - B12 \\ - B13 - B14 + q_{\text{POC}} \quad (41)$$

で表される。右辺の項の意味は、

$$B06 = \text{植物プランクトンの枯死} \\ = v_6(T) \cdot \text{PHY} \quad (42)$$

$$B08 = \text{動物プランクトンの排糞} \\ = v_7(T) \cdot \text{ZOO} \quad (43)$$

浅場の窒素収支を考慮した3次元物質循環モデルの構築と計算事例

$$B10 = \text{動物プランクトンの自然死亡} \\ = (1 - e) \cdot v_4(T, P) \cdot ZOO^2 \quad (44)$$

$$B12 = \text{微生物による分解} \\ = v_4(T, DO) \cdot POC \quad (45)$$

$$B13 = \text{分解余剰物生成} \\ = \kappa \cdot B12 \quad (46)$$

$$B14 = \text{沈降} \\ = w_{POC} \cdot \frac{\partial POC}{\partial z} \quad (47)$$

$$q_{POC} = \text{系外からの流入} \\ = q_{POC} \quad (48)$$

である。

a) 微生物による分解 微生物の作用により、デトリタスが直接無機化される過程の速度の温度応答を

$$v_4 = \alpha_6 \cdot \exp(\beta_6 \cdot T) \quad (49)$$

のように仮定する。次に、溶存酸素濃度に対する応答に関しては、酸素濃度の低下につれて分解速度がゆっくりになる過程を  $DO/(DO_1 + DO)$  として定式化する。ここに  $DO_1$  は、分解速度が半分になる酸素濃度で、半飽和値と呼ばれる。こうして、

$$v_4(T, DO) = \alpha_6 \cdot \exp(\beta_6 T) \cdot \frac{DO}{DO_1 + DO} \quad (50)$$

として、分解速度が定義される。

b) 分解余剰物の生成 デトリタスの大部分は微生物の作用で無機化されるが、難分解性の物質は無機化されず、溶存態の有機物へ移行する。この過程を単純化し、

$$B13 = \kappa \cdot B12 \quad (51)$$

と表した。

(4) 溶存態有機物

本モデルでの溶存態有機物は、炭素量 DOC [mgC/m<sup>3</sup>] で表したものである。POCと同様にリンおよび窒素の量は、溶存有機物中の C/P, C/N 構成比を仮定することにより換算される。DOCの時間変化は、

$$\frac{dDOC}{dt} = B02 + B13 - B15 + q_{DOc} \quad (52)$$

で表される。右辺の項の意味は、

$$B02 = \text{植物プランクトンの細胞外分泌} \\ = v_2(PHY) \cdot v_1(T) \cdot \mu_1(DIP, DIN) \\ \cdot \mu_2(I) \cdot PHY \quad (53)$$

$$B13 = \text{POCの分解余剰物生成} \\ = \kappa v_4(T, DO) \cdot POC \quad (54)$$

$$B15 = \text{無機化} \\ = v_9(T, DO) \cdot DOC \quad (55)$$

$$q_{DOc} = \text{系外からの流入} \\ = q_{DOc} \quad (56)$$

である。

a) 無機化 デトリタスの無機化される過程の取扱いに準じて、DOCの無機化の過程を

$$v_9(T, DO) = \alpha_7 \cdot \exp(\beta_7 T) \cdot \frac{DO}{DO^2 + DO} \quad (57)$$

として、分解速度を定義した。ここで、 $DO_2$  は半飽和値である。

(5) リン酸塩

本モデルでは、栄養塩のコンパートメントとして、リンと窒素を考慮している。リンはリン酸塩  $PO_4\text{-P}$  を DIP [ $\mu\text{g-atm/l}$ ] とし、窒素はアンモニア態窒素  $NH_4\text{-N}$ 、亜硝酸態窒素  $NO_2\text{-N}$  および硝酸態窒素  $NO_3\text{-N}$  の和として全無機窒素 DIN [ $\mu\text{g-atm/l}$ ] を用いて定式化した。

DIPの時間変化は、

$$\frac{dDIP}{dt} = [P : C_{PHY}] (-B01 + B03) \\ + [P : C_{ZOO}] B09 + [P : C_{POC}] B12 \\ + [P : C_{DOc}] B15 + B16 + q_{DIP} \quad (58)$$

で表される。各項の意味は、

$$B01 = \text{植物プランクトンによる取り込み} \\ = v_1(T) \cdot \mu_1(DIP, DIN) \cdot \mu_2(I) \cdot PHY \quad (59)$$

$$B03 = \text{植物プランクトンの呼吸} \\ = v_3(T) \cdot PHY \quad (60)$$

$$B09 = \text{動物プランクトンの排泄} \\ = (e - g) \cdot v_4(T, PHY) \cdot ZOO \quad (61)$$

$$B12 = \text{懸濁態有機物の無機化} \\ = v_4(T, DO) \cdot POC \quad (62)$$

$$B15 = \text{溶存態有機物の無機化} \\ = v_9(T, DO) \cdot DOC \quad (63)$$

$$B16 = \text{海底からの溶出} \\ = v_{10}(T, DO) \cdot \frac{1}{\delta h} \quad (64)$$

$$q_{DIP} = \text{系外からの流入} \\ = q_{DIP} \quad (65)$$

である。ここに、 $[P : C_{PHY}]$ ,  $[P : C_{ZOO}]$ ,  $[P : C_{POC}]$ ,  $[P : C_{DOc}]$  は、植物プランクトン、動物プランクトン、

デトリタスおよび溶存態有機物中の P/C 元素組成比を表している。

a) 海底からの溶出 栄養塩の海底からの溶出は、海底の粒度構成や堆積状況等といった物理性状のほか、底生生物の分布状況、直上水の溶存酸素濃度等といった生物学的、化学的性状に左右され、その機構は複雑である。堀江<sup>20)</sup>は、底泥を7層に分け、底泥中の物質循環を考慮したモデルを用いて、海底からの溶出過程を再現した計算を行っている。本モデルでは、海底からの溶出過程を

$$v_{10}(T, DO) = \alpha_8 \cdot \exp(\beta_8 \cdot T - \gamma_P \cdot DO) \quad (66)$$

と簡略化して表した。ここに、 $\alpha_8$ は0度における溶出速度 [ $\text{mg P m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ]、 $\beta_8$ は温度係数、 $\gamma_P$ はDO濃度による溶出の抑制効果を表すパラメータ [ $(\text{mg O}_2 \text{ l}^{-1})^{-1}$ ]である。Kremerら<sup>19)</sup>は、溶出速度の温度応答を定式化し、 $\alpha_8 = 0.029$ 、 $\alpha_9 = 0.13$ を得ている。

$\delta h$ は底質と接している最下層の水の層厚。

#### (6) 全無機態窒素 (DIN)

前節で記述したように、全無機態窒素 DIN [ $\mu \text{ g-atm} / \text{l}$ ]は、アンモニア態窒素  $\text{NH}_4\text{-N}$ 、亜硝酸態窒素  $\text{NO}_2\text{-N}$  および硝酸態窒素  $\text{NO}_3\text{-N}$  の和である。

DINの時間変化は、

$$\begin{aligned} \frac{d\text{DIN}}{dt} = & [\text{N:C}_{\text{PHY}}] (-B01 + B03) \\ & + [\text{N:C}_{200}] B09 + [\text{N:C}_{\text{POC}}] B12 \\ & + [\text{N:C}_{\text{DOC}}] B15 + B17 - \text{BD1} \\ & - \text{BD2} - \text{BD3} + q_{\text{DIN}} \end{aligned} \quad (67)$$

で表される。各項の意味は、

$$\begin{aligned} B01 = & \text{植物プランクトンによる取り込み} \\ = & v_1(T) \cdot \mu_1(\text{DIP}, \text{DIN}) \cdot \\ & \mu_2(I) \cdot \text{PHY} \end{aligned} \quad (68)$$

$$\begin{aligned} B03 = & \text{植物プランクトンの呼吸} \\ = & v_3(T) \cdot \text{PHY} \end{aligned} \quad (69)$$

$$\begin{aligned} B09 = & \text{動物プランクトンの排泄} \\ = & (e - g) \cdot v_4(T, \text{PHY}) \cdot \text{ZOO} \end{aligned} \quad (70)$$

$$\begin{aligned} B12 = & \text{懸濁態有機物の無機化} \\ = & v_8(T, \text{DO}) \cdot \text{POC} \end{aligned} \quad (71)$$

$$\begin{aligned} B15 = & \text{溶存態有機物の無機化} \\ = & v_9(T, \text{DO}) \cdot \text{DOC} \end{aligned} \quad (72)$$

$$\begin{aligned} B17 = & \text{海底からの溶出} \\ = & v_{11}(T, \text{DO}) \frac{1}{\delta h} \end{aligned} \quad (73)$$

$$\begin{aligned} \text{BD1} = & \text{海底での脱窒} \\ = & v_{12}(\text{DIN}) \frac{1}{\delta h} \end{aligned} \quad (74)$$

$$\begin{aligned} \text{BD2} = & \text{アマモへの吸収} \\ = & v_{13} \frac{1}{\delta h} \end{aligned} \quad (75)$$

$$\begin{aligned} \text{BD3} = & \text{アラメへの吸収} \\ = & v_{14} \frac{1}{\delta h} \end{aligned} \quad (76)$$

$$\begin{aligned} q_{\text{DIN}} = & \text{系外からの流入} \\ = & q_{\text{DIN}} \end{aligned} \quad (77)$$

である。ここに、 $[\text{N:C}_{\text{PHY}}]$ 、 $[\text{N:C}_{200}]$ 、 $[\text{N:C}_{\text{POC}}]$ 、 $[\text{N:C}_{\text{DOC}}]$ は、植物プランクトン、動物プランクトン、デトリタスおよび溶存態有機物中の N/C 元素組成比を表している。

a) 海底からの溶出 海底からの溶出量  $v_{11}$ は、温度と溶存酸素量に支配されていると考えられるが、本モデルでは定式化せず、溶出量を0とした。

b) 海底・海藻への吸収 本モデルで、比較計算を行う目的は、浅場による窒素吸収作用の影響を調べることにあるので、海底での脱窒および海藻への栄養塩の吸収を考慮する。海底での脱窒は、硝酸態窒素濃度  $\text{NO}_3$  の関数として

$$v_{12} = \frac{0.021}{86400} \text{NO}_3^{1.13} \quad (78)$$

とする。ただし、 $v_{12}$ は [ $\text{m mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ]である。脱窒の過程は、アンモニア態窒素の酸化(硝化)と引き続く嫌気環境での還元反応で構成されている。このため、溶存酸素の十分な供給と嫌気環境の底泥の存在とが満たされる浅い海域で、より活発であるといわれている。式(78)は比較的水深の深いところで求められた値なので、水深10m以浅のところでは、3倍の値を用いる。また、本モデルでは  $\text{NO}_3$  濃度は独立の状態変数としては明示されていない。そこで、便宜的に、 $\text{NO}_3 = \text{DIN} / 2$ とした。

アマモの光合成による窒素の吸収量は、東京湾での測定例より、炭素換算で  $600 [\text{g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}]$ と見積もられている。単位を変換すると、窒素に対し  $20.7 [\text{mg atm m}^{-2} \text{ d}^{-1}]$ となるので、

$$v_{13} = \frac{20.7}{86400} \quad (79)$$

同様に、アラメ・ガラモの光合成による窒素の吸収量は、

$$v_{14} = \frac{29.2}{86400} \quad (80)$$

とした。ただし、アマモの繁茂する領域は、水深が0～5mの領域とし、アラメ・ガラモの繁茂する領域は、水深が5～10mの領域とした。上記の両式とも、吸収速度が水塊中の窒素濃度には関係しない表現となっている。

(7) 溶存酸素 (DO)

溶存酸素 (DO) の変化量は、他の項の計算と同じく消費と生産のバランスにより記述される。溶存酸素量 DO [mg/l] の時間変化は、

$$\frac{dDO}{dt} = [TOD : C_{PHY}] (B01 - B03) - [TOD : C_{ZOO}] B09 - [TOD : C_{POC}] B12 - [TOD : C_{DOC}] B15 - D6 + D7 \quad (81)$$

で表される。各項の意味は、

$$B01 = \text{光合成による供給} \\ = v_1(T) \cdot \mu_1(DIP, DIN) \cdot \mu_2(I) \cdot PHY \quad (82)$$

$$B03 = \text{植物プランクトンの呼吸による消費} \\ = v_3(T) \cdot PHY \quad (83)$$

$$B09 = \text{動物プランクトンの呼吸による消費} \\ = (e - g) \cdot v_4(T, PHY) \cdot ZOO \quad (84)$$

$$B12 = \text{懸濁態有機物の無機化に伴う消費} \\ = v_8(T, DO) \cdot POC \quad (85)$$

$$B01 = \text{懸濁態有機物の無機化に伴う消費} \\ = v_9(T, DO) \cdot DOC \quad (86)$$

$$D6 = \text{底泥による消費} \\ = \frac{k_B}{h_B} \quad (87)$$

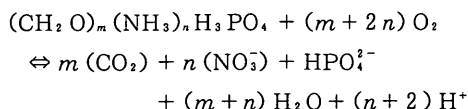
$$D7 = \text{再ばつきによる供給} \\ = k_a(DO_s - DO) \quad (88)$$

(89)

である。

ここに、[TOD : C<sub>PHY</sub>]、[TOD : C<sub>ZOO</sub>]、[TOD : C<sub>POC</sub>]、[TOD : C<sub>DOC</sub>] は、植物プランクトン、動物プランクトン、デトリタス、および溶存態有機物中の酸素要求量と C 元素組成比である。また、k<sub>B</sub> は海底面での単位面積当たりの酸素消費速度、h<sub>B</sub> は海底と接する海水最下層の層厚、k<sub>a</sub> は水面での再ばつき係数である。

a) 酸素要求量と C 組成 本モデルでは、酸素消費量を酸化還元反応の結果と考え次の式を適用する。



$$+ \text{Trace Element} \\ + \text{Energy} \quad (90)$$

ここに m, n は有機物中の C : N : P 元素組成比を m : n : 1 として表した比率である。これを整理すると

$$TOD : C = \frac{32(m + 2n)}{12m} \quad (91)$$

となる。植物プランクトンの体組成としてはレッドフィールド比がよく採用されている。レッドフィールド比は、C : N : P = 106 : 16 : 1 (m = 106, n = 16) なので、[TOD : C<sub>PHY</sub>] = 3.47 が得られる。ただし、炭素量 C が [mg C m<sup>-3</sup>] であり溶存酸素量 DO が [mg l<sup>-1</sup>] で計算するので [TOD : C<sub>PHY</sub>] = 3.47 × 10<sup>-3</sup> となる。

溶存酸素の消費量の算定方法にはここで示された他に、例えば平山ら<sup>13)</sup> のように直接植物プランクトンによる呼吸速度を用いて溶存酸素の消費量を算定する方法もある。しかし、本モデルでは、全ての現象を一旦炭素の変化量に置き換えて与えているために上記のような組成比を用いた定式化となっている。

b) 底泥による酸素消費 海底面での境界条件として、底泥による酸素消費を考慮した。底泥の酸素消費は微生物による海底堆積物の分解や底生生物の呼吸、窒素の酸化反応など様々な要因が関係していると考えられる。本モデルでは、海底系を境界条件として与え底泥内の過程をモデル化していない。ここでは海底面での酸素消費速度を一律に k<sub>B</sub> = 1.5 [μg m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>] として与え、最下層の層厚 h<sub>B</sub> により平均化して濃度に換算している。

c) 再ばつき 水面での境界条件として、再ばつきによる酸素供給を考慮した。再ばつき係数を k<sub>a</sub> とし、飽和酸素濃度を DO<sub>s</sub> とすると

$$D7 = k_a \cdot (DO_s - DO) \quad (92)$$

で表せる。ここでは k<sub>a</sub> = 0.15 [μg m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>] とした。DO<sub>s</sub> は Fox の式を簡略化して、

$$O_2 = 10.291 - 0.2809T + 0.006009T^2 - 0.000063T^3 \\ - Cl(0.1161 - 0.003922T + 0.0000631T^2) \quad (93)$$

$$DO_s = \frac{32 \times O_2}{22.4(1 + T/273)} \quad (94)$$

で与えることができる。ただし、今回は密度計算の際に塩素濃度 Cl を保存していないことと、O<sub>2</sub> の変化量が少ないことを考慮し、O<sub>2</sub> = 6.5 [ml l<sup>-1</sup>] として定数を与えた。

(8) 化学的酸素要求量 (COD)

化学的酸素要求量 (COD) は環境基準に採用されている水質指標である。COD は易分解性の有機物の存在量を示す指標であり、その存在量 COD [mg l<sup>-1</sup>] は、PHY, ZOO, POC, DOC の存在量に構成比 [COD : C] を乗ずることによって

$$\begin{aligned} \text{DOC} = & [\text{COD} : C_{\text{PHY}}] \text{PHY} + [\text{COD} : C_{\text{ZOO}}] \text{ZOO} \\ & + [\text{COD} : C_{\text{POC}}] \text{POC} + [\text{COD} : C_{\text{DOC}}] \text{DOC} \end{aligned} \quad (8)$$

で表される。

ここに、[COD : C<sub>PHY</sub>], [COD : C<sub>ZOO</sub>], [COD : C<sub>POC</sub>], [COD : C<sub>DOC</sub>] は、植物プランクトン、動物プランクトン、デトリタス、および溶存態有機物中の化学的酸素要求量と C 元素組成の比である。

a) 流入負荷量 COD の流入負荷量である q<sub>COD</sub>

$$\begin{aligned} q_{\text{COD}} = & [\text{COD} : C_{\text{POC}}] \cdot q_{\text{POC}} \\ & + [\text{COD} : C_{\text{DOC}}] \cdot q_{\text{DOC}} \end{aligned} \quad (9)$$

で与えられる。

3. 多層潮流計算モデル

物質の循環は、前章で述べたような各コンパートメント間の相互依存諸過程の他に、隣接水塊間での流れによる移流と拡散の影響を受けている。したがって物質の3次元的な分布を検討するためには、あらかじめ流れ場の計算を行っておく必要がある。本論文では、ADI法 (Alternating Direction Implicit Method, 交互陰解法) による多層の潮流計算プログラムを用いて流れ場の計算を行った。以下にその概要を示す。

3.1 基礎方程式と解法

(1) 基礎方程式の導出

基礎方程式は、基本的には Navie-Stokes の運動方程式と連続の式を各層で積分したものである。図-3 に示した座標系における Navie-Stokes 方程式を以下に示す。

$$\frac{du}{dt} + \frac{1}{\rho} \nabla P - g - \nu \Delta u = F \quad (10)$$

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla \cdot u = 0 \quad (11)$$

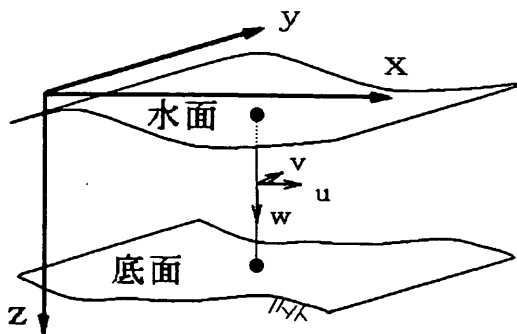


図-3 潮流計算の座標系

式(10)と式(11)は、ベクトル表示された運動方程式と連続方程式である。ここに、ρ は流体の密度、u は流体の速度ベクトル、t は時間、P は圧力、g は重力加速度ベクトル、ν は流体の粘性係数、F は強制外力のベクトルである。なお、∇ は微分演算子ナブラであり、Δ = ∇ · ∇ である。

これを u = (u, v, w) として成分表示すると、

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} \\ = uf - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} \\ + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial vw}{\partial z} \\ = -uf - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} \\ + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (100)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial uw}{\partial x} + \frac{\partial vw}{\partial y} + \frac{\partial w^2}{\partial z} \\ = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} \\ + \nu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (101)$$

$$\frac{d\rho}{dt} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (102)$$

となる。ここに f はコリオリの力である。

これらの式に、エントロピーの保存則および流体の状

状態方程式

$$C_p \frac{dT}{dt} + \frac{T}{\rho^2} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_P \frac{dP}{dt} - C_p \kappa \Delta T = Q \quad (103)$$

$$\rho = \rho(P, T) \quad (104)$$

を付加することにより、3次元の密度勾配を考慮した潮流計算の基礎式とすることができる。ここに、 $T$ は温度、 $\kappa$ は温度電導率、 $C_p$ は定圧比熱であり、 $Q$ は熱量の強制外力である。

なるべく簡略に潮流計算を行うために、以下の仮定及び近似を行った。

- 水平方向のスケールに対して、鉛直方向のスケールが小さく、鉛直方向の運動は小さい
- 空間的な密度差もあまり大きくない
- 浮力の効果は、Boussinesq 近似で考慮する
- 非圧縮である
- 圧力は、静水圧近似とする
- 温度変化は少なく、時間的には一定値で近似する
- 密度変化は塩分と水温の状態方程式より求める
- 時間平均からの変動量に関する項は拡散係数により評価する

これらの条件を考慮して運動方程式、連続式を書き直したものをベクトル表示すると、

$$\frac{du}{dt} + \nabla \left( \frac{P}{\rho} \right) - g \frac{\rho_x - \rho}{\rho} - \nu \Delta u = F \quad (105)$$

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (106)$$

となる。ここに  $\rho$  は流体の平均密度、 $\rho_x$  はその場の密度である。これらを成分毎に分けると、

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \\ = uf - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} \\ + \nu_h \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \nu_v \left( \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (107)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \\ = vf - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} \\ + \nu_h \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \nu_v \left( \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (108)$$

$$0 = -g \frac{\rho_x - \rho}{\rho} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} \quad (109)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (110)$$

となる。ここに、 $\nu_h$ は水平方向の拡散係数、 $\nu_v$ は鉛直方向の拡散係数である。一方、状態方程式は、一気圧のもとでの塩分  $S$ 、水温  $T$  における海水密度  $\rho$  として、

$$\begin{aligned} (\rho - 1.0) \times 10^3 = 28.14 - 0.0735T - 0.00469T^2 \\ + (0.0802 - 0.002T)(S - 35) \end{aligned} \quad (111)$$

のように記述される。ここに、 $S$ 、 $T$ は別の拡散式から求めることが必要であるが、本計算では簡略化して以下のような  $\rho$  のものの拡散式を解くことにより密度分布を計算している。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (u\rho)}{\partial x} + \frac{\partial (v\rho)}{\partial y} + \frac{\partial (w\rho)}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial x} (\nu_{hx} \frac{\partial \rho}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\nu_{hy} \frac{\partial \rho}{\partial y}) \\ + \frac{\partial}{\partial z} (\nu_{vz} \frac{\partial \rho}{\partial z}) \end{aligned} \quad (112)$$

ここに、 $\nu_{hx}$ 、 $\nu_{hy}$ 、 $\nu_{vz}$ は乱流拡散係数である。

(2) レベルモデルの構築

上記の手順で得られた基礎方程式 (107) ~ (110) は、微小体積における極限值である。実際に差分法で解く場合には、空間的に分割されたメッシュ上での平均量に関する式に変換する必要がある。本論文では、鉛直方向に固定幅の層に分割し、上下層の交換を鉛直流速で評価する方法であるレベルモデル<sup>16)</sup>を採用した。また、水平方向の拡散項については混合係数  $A_h$  で代表させ、鉛直方向の拡散項は境界におけるせん断力により評価する。

いま、図-4に示されるような座標と各変数の定義を用いると、運動方程式、連続方程式を層厚で積分した結果は以下のような式となる。ただし、添え字の1は表面層、 $k$ は中間層を、 $n$ は底層を表す。 $x$ 方向には、

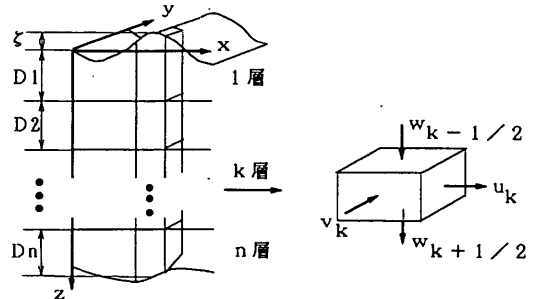


図-4 レベルモデルの座標系

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} + v_1 \frac{\partial u_1}{\partial y} - \frac{u_1 - u_2}{2(D_1 + \zeta)} w_{3/2}$$

$$= v_1 f - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P_1}{\partial x} + A_h \left( \frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_1}{\partial y^2} \right) + \gamma_{3/2} \frac{u_1 - u_2}{D_1 + \zeta} \sqrt{(u_1 - u_2)^2 + (v_1 - v_2)^2} \quad (113)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u_k}{\partial t} + u_k \frac{\partial u_k}{\partial x} + v_k \frac{\partial u_k}{\partial y} \\ & - \frac{u_k - u_{k+1}}{2 D_k} \omega_{k+1/2} - \frac{u_{k-1} - u_k}{2 D_k} \omega_{k-1/2} \\ & = v_k f - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P_k}{\partial x} + A_h \left( \frac{\partial^2 u_k}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_k}{\partial y^2} \right) \\ & + \gamma_{k-1/2} \frac{u_{k-1} - u_k}{D_k} \sqrt{(u_{k-1} - u_k)^2 + (v_{k-1} - v_k)^2} \\ & - \gamma_{k+1/2} \frac{u_k - u_{k+1}}{D_k} \sqrt{(u_k - u_{k+1})^2 + (v_k - v_{k+1})^2} \end{aligned} \quad (114)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u_n}{\partial t} + u_n \frac{\partial u_n}{\partial x} + v_n \frac{\partial u_n}{\partial y} - \frac{u_n - u_{n+1}}{2 D_k} \omega_{n-1/2} \\ & = v_n f - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P_n}{\partial x} + A_h \left( \frac{\partial^2 u_n}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_n}{\partial y^2} \right) \\ & + \gamma_{n-1/2} \frac{u_{n-1} - u_n}{D_n} \sqrt{(u_{n-1} - u_n)^2 + (v_{n-1} - v_n)^2} \\ & - \gamma b \frac{u_n}{D_n} \sqrt{u_n^2 + v_n^2} \end{aligned} \quad (115)$$

また、y 方向には、

$$\begin{aligned} & \frac{\partial v_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial v_1}{\partial x} + v_1 \frac{\partial v_1}{\partial y} - \frac{v_1 - v_2}{2 (D_1 + \zeta)} \omega_{3/2} \\ & = u_1 f - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P_1}{\partial x} + A_h \left( \frac{\partial^2 v_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_1}{\partial y^2} \right) \\ & + \gamma_{3/2} \frac{v_1 - v_2}{D_1 + \zeta} \sqrt{(u_1 - u_2)^2 + (v_1 - v_2)^2} \end{aligned} \quad (116)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial v_k}{\partial t} + v_k \frac{\partial v_k}{\partial x} + u_k \frac{\partial v_k}{\partial y} \\ & - \frac{v_k - v_{k+1}}{2 D_k} \omega_{k+1/2} - \frac{v_{k-1} - v_k}{2 D_k} \omega_{k-1/2} \\ & = - u_k f - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P_k}{\partial y} + A_h \left( \frac{\partial^2 v_k}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_k}{\partial y^2} \right) \\ & + \gamma_{k-1/2} \frac{v_{k-1} - v_k}{D_k} \sqrt{(u_{k-1} - u_k)^2 + (v_{k-1} - v_k)^2} \\ & - \gamma_{k+1/2} \frac{v_k - v_{k+1}}{D_k} \sqrt{(u_k - u_{k+1})^2 + (v_k - v_{k+1})^2} \end{aligned} \quad (117)$$

$$\frac{\partial v_n}{\partial t} + u_n \frac{\partial v_n}{\partial x} + v_n \frac{\partial v_n}{\partial y} - \frac{v_n - v_{n+1}}{2 D_k} \omega_{n-1/2}$$

$$\begin{aligned} & = - u_n f - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P_n}{\partial y} + A_h \left( \frac{\partial^2 v_n}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_n}{\partial y^2} \right) \\ & + \gamma_{n-1/2} \frac{v_{n-1} - v_n}{D_n} \sqrt{(u_{n-1} - u_n)^2 + (v_{n-1} - v_n)^2} \\ & - \gamma b \frac{v_n}{D_n} \sqrt{u_n^2 + v_n^2} \end{aligned} \quad (118)$$

z 方向には、

$$P_1 = \rho_1 g (D_1 + \zeta) \quad (119)$$

$$P_k = P_1 + g \sum_{i=2}^k (\rho_i D_i) \quad (120)$$

$$P_n = P_1 + g \sum_{i=2}^N (\rho_i D_i). \quad (121)$$

ここに、 $\gamma_{k+1/2}$  は  $k$  層と  $k+1$  層の間の境界摩擦係数、 $\gamma_b$  は底面摩擦係数である。

連続方程式も同様に、各層毎の積分を実施すると以下の式となる。

$$\begin{aligned} 0 &= \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (D_1 + \zeta) u_1 + \frac{\partial}{\partial y} (D_1 + \zeta) v_1 \\ & - \omega_{3/2} \end{aligned} \quad (122)$$

$$\begin{aligned} 0 &= \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} D_k u_k + \frac{\partial}{\partial y} D_k v_k \\ & + \omega_{k-1/2} - \omega_{k+1/2} \end{aligned} \quad (123)$$

$$0 = \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} D_n u_n + \frac{\partial}{\partial y} D_n v_n + \omega_{n-1/2} \quad (124)$$

拡散方程式についても、同様に各層毎の式が得られる。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} [\rho_1 (D_1 + \zeta)] + \frac{\partial}{\partial x} [u_1 \rho_1 (D_1 + \zeta)] \\ & + \frac{\partial}{\partial y} [v_1 \rho_1 (D_1 + \zeta)] \\ & - \omega_{3/2} \rho_{3/2} \\ & = \frac{\partial}{\partial x} [K_h (D_1 + \zeta) \frac{\partial \rho_1}{\partial x}] \\ & + \frac{\partial}{\partial x} [K_h (D_1 + \zeta) \frac{\partial \rho_1}{\partial y}] \\ & - \left| K_z \frac{\partial \rho}{\partial z} \right|_{z=3/2} \end{aligned} \quad (125)$$



$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\rho_k D_k) + \frac{\partial}{\partial k} (u_k \rho_k D_k) + \frac{\partial}{\partial y} (v_k \rho_k D_k) \\ & + w_{k-1/2} \rho_{k-1/2} - w_{k+1/2} \rho_{k+1/2} \\ & = \frac{\partial}{\partial k} (K_h D_k \frac{\partial \rho_k}{\partial x}) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} (K_h D_k \frac{\partial \rho_k}{\partial y}) \\ & + \left[ K_v \frac{\partial \rho}{\partial z} \Big|_{z=k-1/2} - K_v \frac{\partial \rho}{\partial z} \Big|_{z=k+1/2} \right] \end{aligned} \quad (126)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\rho_n D_n) + \frac{\partial}{\partial x} (u_n \rho_n D_n) + \frac{\partial}{\partial y} (v_n \rho_n D_n) \\ & + w_{n-1/2} \rho_{n-1/2} \\ & = \frac{\partial}{\partial x} (K_h D_n \frac{\partial \rho_n}{\partial x}) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} (K_h D_n \frac{\partial \rho_n}{\partial y}) \\ & + \left[ K_v \frac{\partial \rho}{\partial z} \Big|_{z=n-k-1/2} \right] \end{aligned} \quad (127)$$

ここに、 $K_h$ 、 $K_v$ はそれぞれ水平および鉛直方向の拡散係数である。

(3) 基礎方程式の離散化および解法

こうして得られた基礎方程式を、ADI法を用いて解く。ADI法は、Leendertse, J. J.<sup>10)</sup>により潮流および拡散方程式の差分化に応用され、金子ら<sup>10)</sup>によって境界条件の取扱いなどが検討されてきた。本論文では、解法の骨子を示すのみにとどめる。

ADI法はその命名からも判るとおり、差分化するときスタガードメッシュを用いて implicit な差分表現と explicit な差分表現を  $x$  軸、 $y$  軸交互に用いることにより高速かつ安定に解く方法である。

第1のスキームは、まず  $x$  軸方向  $i$  行に implicit、 $y$  軸方向  $j$  列に explicit な差分を基礎方程式 (113) ~ (124) に対して行う。ある  $i$  行に着目して連続方程式 (122) ~ (124) を鉛直方向に足し合わせると、

$$\begin{aligned} \zeta_{i,j}^{n+1} &= Q_{i,j} - \frac{dt}{dx} \sum_{l=1}^n (u_{l,i+1,j}^{n+1} \cdot \\ & D_{l,i+1,j}^n - u_{l,i,j}^{n+1} \cdot D_{l,i,j}^n) \end{aligned} \quad (128)$$

が得られる。各層の運動方程式 (113) ~ (115) により

$$u_{l,i,j}^{n+1} = -R_{l,i,j} (\zeta_{i-1,j}^{n+1} - \zeta_{i-1,j}^{n+1}) + S_{l,i,j} \quad (129)$$

が得られる。ここに、上付きの添え字は時間ステップを表し、下付きの添え字は層番号、行番号、列番号を表している。また、 $Q, R, S$  は explicit に求まる変数である。

式 (129) を式 (128) に代入することにより、水位  $\zeta$  を変数とする3重対角行列となる。これを解いて、求めた水位  $\zeta$  を式 (129) に代入して  $x$  方向の流速  $u$  が判る。

$u$  と  $\zeta$  が既知となるので、式 (116) ~ (118) より  $y$  方向の流速  $v$  が求められる。そこで、これらの結果を連続式 (119) ~ (121) に代入して鉛直流速  $w$  を得ることができる。

第2のスキームにおいては、 $x$  軸に対して explicit、 $y$  軸に対して implicit な差分表現を用い、上記と同様の手順で、 $\zeta \rightarrow v \rightarrow u \rightarrow w$  が得られる。また、第2のスキームを行った時点において、拡散方程式 (125) ~ (127) により密度  $\rho$  計算を explicit に行う。

ADI法の利点は、implicit な差分表現を交互に用いながら、計算としては全て explicit な手順に置き換えることができる点にある。

3.2 境界での取扱いおよび計算条件

(1) 開境界と閉境界の取扱い

陸地と海の境界が閉境界であり、計算の都合上設定する境界が開境界である。スタガードメッシュ (図-5) を利用しているために、各変数の設定してある点に注意しながら境界条件を設定する必要がある。図に示されているとおり、あるメッシュ ( $i, j$ ) に着目した場合に、添え字 ( $i, j$ ) をもつ流速  $u, v, w$ 、水位  $\zeta$ 、水深  $D$  は、点線で囲った部分に配置される。

閉境界においては、図-6の実線  $A-A'$  を境界とすると、境界内のメッシュ ( $i, j$ ) に対して

$$\begin{cases} u_{i,j} = 0 \\ D_{i,j} = 0 \\ D_{i,j+1} = 0 \end{cases} \quad (130)$$

の条件を設定する。これは、閉境界を横切る流れが無いことを反映させた条件である。

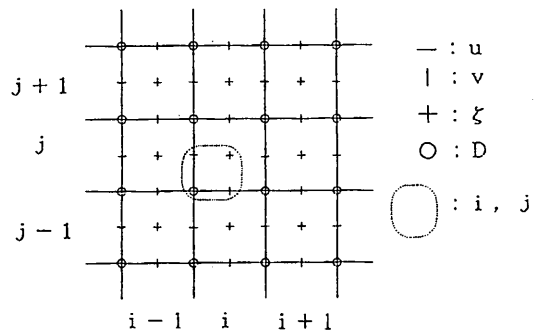


図-5 スタガードメッシュ上の変数の定義点

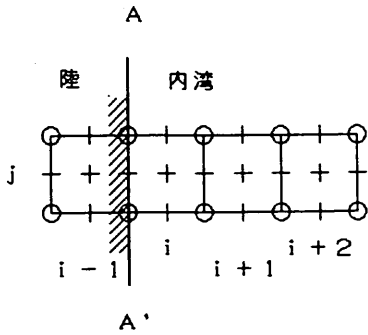


図-6 左側閉境界の条件設定 (x軸方向)

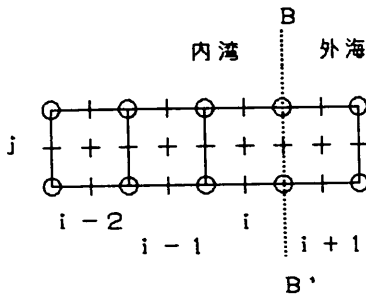


図-7 右側開境界の条件設定 (x軸方向)

開境界においては、図-7の点線B-B'を境界とすると、境界内のメッシュ (i, j) に対して

$$\begin{cases} u_{i+1, j+1} = 0 \\ u_{i+1, j} = 0 \\ u_{i+1, j} = u_{i, j} \\ \zeta_{i+1, j} = \text{Input Value} \end{cases} \quad (131)$$

の条件を設定する。これは、開境界上で強制的に水位を与えるとともに、開境界を横切る流れは境界に垂直かつ速度変化が無いことを反映させている。

もし、開境界を斜めに海水が流入入することを許す境界とするならば、

$$\begin{cases} u_{i+1, j+1} = u_{i, j+1} \\ u_{i+1, j} = u_{i, j} \\ u_{i+1, j} = u_{i, j} \\ \zeta_{i+1, j} = \text{Input Value} \end{cases} \quad (132)$$

と変更することによって対応できる。しかし、海水が斜めに境界を横切るということは、境界に接線方向の流速が存在し、それによる水位勾配が発生する。開境界を水位で制御するために与える強制水位にあらかじめその分

を見積もっておかなくてはならないので、条件設定が複雑になる恐れがあり、本計算では開境界を式 (131) で示される条件を採用した。

なお、線境界については、線境界に沿った計算をする際に逐次閉境界の条件を用いて計算すれば良い。

(2) 流入河川の取扱い

湾域の潮流計算をする際に、大河川からの淡水流入が無視できない場合がある。例えば、河川域への塩水遡上や河口ブリュームを再現するためには、内陸部まで切れ込んだ計算格子を設定し、河川の上流端からの流入をモデル化する必要がある。しかし、河川からの流出速度が十分に小さく、河川への塩水遡上が無視できるとするならば、式 (122)～(124) の連続式に、河川流量を足し合わせることによって、近似的に計算ができる。本計算では、この近似的な取扱いをしている。

(3) 解の安定条件 空間的にも時間的にも差分化するので、その差分の幅が大きいと解が発散する恐れがある。空間的な差分の幅は、格子の間隔  $dx$  として設定され、時間的な差分の幅は計算時間ステップ  $dt$  として設定される。

ADI法においては、リーブ・フログ法の場合のようなきびしい安定条件はなく、かなり緩い条件でも解が得られることが堀江ら<sup>17)</sup>の検討によっても示されている。経験的に  $dt$  の条件として

$$\frac{dt}{2} \leq \frac{\alpha dx}{\sqrt{qD_{max}}}, \quad \alpha = 1 \sim 3 \quad (133)$$

が示されている。

3.3 物質循環モデルとの連絡

潮流計算を実施すると、設定した境界条件に対する流速場が計算時間ステップ  $dt$  毎に得られる。物質循環モデルでこの結果を利用するためには、以下のことに留意して流速場の記憶ファイルを作成しなければならない。

ひとつは、安定した流速場を得ることである。

潮流は潮汐により決定されているので、流れ場は潮汐周期に対応した変動を示す。厳密には、潮流計算を  $n$  周期計算した結果と  $n+1$  周期計算した結果が一致することが安定した解の条件となる。実際には、潮汐周期の間隔で流速場の比較を行い、その差の最大値がしきい値以下であるかどうかを判定条件とし、1周期分の流速データを保存する。

もうひとつは、物質循環計算をする計算時間ステップとの整合性をとることである。それが潮流計算の計算時間ステップの整数倍となるような時間であれば、移動平均をとることによって容易に変換できる。こうして変換

された流速データを繰り返し用いることによって、物質循環計算を進めていくことができる。また、1潮汐以上の計算時間ステップで物質循環計算をするのであれば、潮汐残差流を計算し、そのデータを利用すれば良い。ただし、移動平均をとる際に水位の変化の取扱いに注意する。表層では、水位の変化に伴い層厚が時間的に変化しているの、流量に対して移動平均をしてから、平均層厚で除することによって流速値を求めるべきである。

#### 4. 東京湾物質循環計算

構築した物質循環モデルと潮流計算モデルを用いて、東京湾における浅場の環境改善効果についての検討を行った。ここで言う浅場とは、干潟域や浅瀬等を含めた生物活性の高い領域を総称している。

浅場の環境改善効果のうち、浅場に生息する海藻の窒素吸収効果に着目した。物質循環計算を行うことによって、沿岸部での水質改善努力が湾域全体にどのような水質改善効果を与えるのか検討した。

湾域全体での水質改善効果を検討するための手段として、

- 1ボックスモデルによる定常解の解析
- メッシュモデルによる定常解の解析

● メッシュモデルによる非定常解の解析を行った。

##### 4.1 計算条件

###### (1) 地形条件

計算に用いた地形は、東京湾を対象とした。浅場の大さきの変化による水質改善効果を比較するために、

1. 昭和59年当時地形
2. 昭和11年当時の地形
3. 昭和59年当時の地形に浅場を増やした仮想の地形の3通りについて計算を行った。以後、これら3つの地形をそれぞれ現況地形、過去地形、仮想地形と呼ぶ。

図-8は、それぞれの地形を1kmメッシュで再現し、等深線を記入したものである。

観音崎と富津岬を結ぶ線より湾内側を内湾域とする。現況地形では、内湾域の面積が900km<sup>2</sup>で、そのうち水深10m以浅の浅場域が180km<sup>2</sup>である。過去地形においては、それぞれ1140km<sup>2</sup>と450km<sup>2</sup>である。仮想地形は、現況地形の海岸線の形を残し、海岸線近傍に浅場域を造ることによって、過去地形の浅場域と内湾域との比(0.4)に近づけるように設定した。すなわち、内湾域は900km<sup>2</sup>、浅場の領域は341km<sup>2</sup>となる。

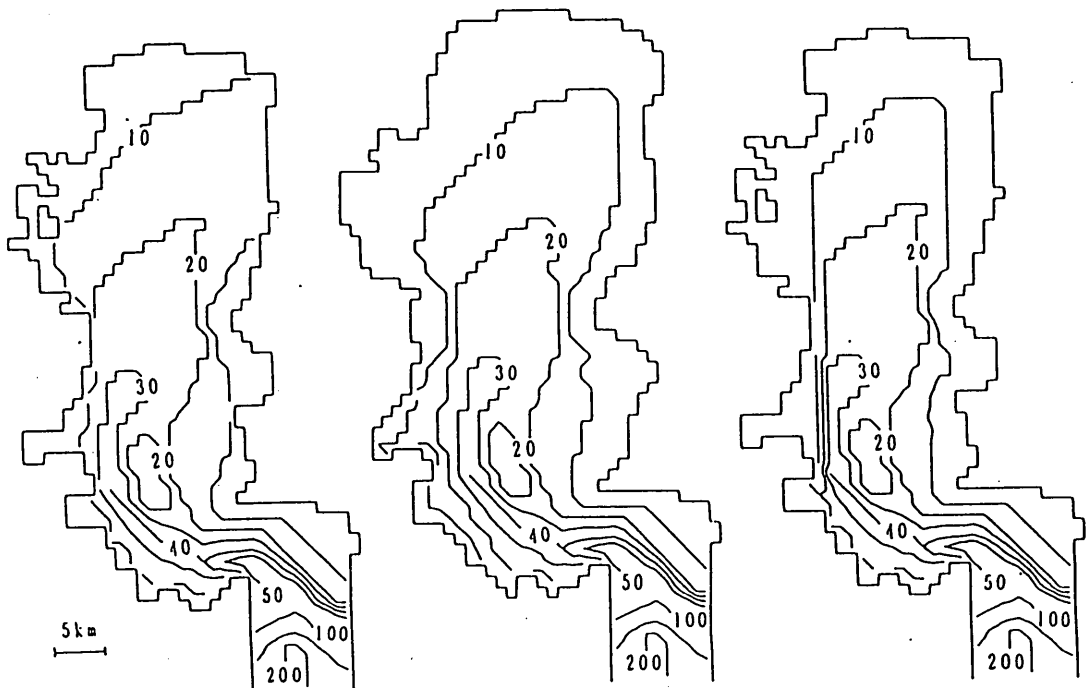


図-8 計算に用いた地形条件

(左：現況地形、中央：過去地形、右：仮想地形)

## (2) 栄養塩の負荷量

栄養塩の負荷は、河川からの流入、下水処理場からの排水、工業排水およびその他の小規模な排水を沿岸部からの負荷として足し合わせた。昭和62年夏期のデータを表-1のように各ケース共通で用いた。ただし、負荷量は、COD・T-P・T-Nのデータで与えられていたので、以下の換算係数を用いて、DOC・POC・DIN・DIPの負荷量に変換した。

$$q_{\text{DOC}} = 0.392 q_{\text{COD}} \quad (134)$$

$$q_{\text{POC}} = 0.314 q_{\text{COD}} \quad (135)$$

$$q_{\text{DIN}} = 0.778 q_{\text{T-N}} \quad (136)$$

$$q_{\text{DIP}} = 0.202 q_{\text{T-P}} \quad (137)$$

これらの係数は、[DOC:POC]、[DIN:T-N]、[DIP:T-P]等を仮定することにより求めている。

表-1 東京湾への負荷量のまとめ

(昭和62年夏期)			
淡水流入量	COD	T-N	T-P
m <sup>3</sup> /d	t/d	t/d	t/d
2.83×10 <sup>7</sup>	259.6	258.1	24.60
(推定値)			
COD	POC	DIN	DIP
t-C/d	t-C/d	t-atm/d	t-atm/d
101.8	81.5	14.3	0.17

## (3) 物質循環モデルの係数

また、各反応項は、表-2に示すように、代表的と思われるパラメータを用いて計算した<sup>10)</sup>。速度は、いずれも一日を単位時間として表記している。本計算は、同一のモデルによる比較計算であるので、各パラメータの詳細なチューニングは行っていない。海底境界でのDINのやりとりは、

● 海底での脱窒

● 海藻への窒素の吸収

のみを考慮し、再溶出や巻き上がりは考慮していない。

海藻による窒素の吸収は水深による海藻の住み分けを考慮している。水深が0~5mの領域では、アマモによる吸収を想定して20 [mg-atm m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>]の吸収量

表-2 物質循環計算の反応項のパラメータ

パラメータ	値 [単位]
PHYの増殖速度	$\alpha_1=0.59, \beta_1=0.0693$
PHYの制限因子	$K_N=3.0 [\mu\text{g-atm/l}]$ $K_P=0.1 [\mu\text{g-atm/l}]$ $I_{opt}=200 [\text{ly d}^{-1}]$ $I_{max}=856 [\text{ly d}^{-1}]$ $DL=0.587$ $\kappa=0.1+0.0179[\text{Chla:C}_{\text{PHY}}]$ PHY
PHYの呼吸	$\alpha_2=0.03, \beta_2=0.0519$
PHYの枯死	$\alpha_3=0.0001, \beta_3=0.0693$
ZOOの摂食	$\pi^*=50.0 [\text{mg-C m}^{-2}]$ $\alpha_4=0.18, \beta_4=0.0693$
ZOOの成長	$e=0.7, g=0.5$
ZOOの自然死亡	$\alpha_5=0.0005, \beta_5=0.0693$
POCの分解	$\alpha_6=0.1, \beta_6=0.0693$ $\text{DO}_1=1.0 [\text{mg/l}]$
POCの余剰物生成	$\kappa=0.25$
DOCの無機化	$\alpha_7=0.02, \beta_7=0.0693$ $\text{DO}_2=1.0 [\text{mg/l}]$
DIPの溶出	$\alpha_{pha8}=0.0, \beta_8=0.0$
DINの溶出	$\alpha_{pha9}=0.0, \beta_9=0.0$
DINの吸収	$v_{12}=0.021 \text{NO}_3^{1,13} [\text{mg-atm m}^{-2} \text{d}^{-1}]$ $v_{13}=20.7 [\text{mg-atm m}^{-2} \text{d}^{-1}]$ $v_{14}=29.2 [\text{mg-atm m}^{-2} \text{d}^{-1}]$
DOの消費	$k_B=1.5 [\mu\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}]$
再ばつき係数	$k_a=0.15 [\mu\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}]$
構成比	$[\text{Chla:C}_{\text{PHY}}]=1:50$ $[\text{P:C}_{\text{PHY}}]=1:3510, [\text{P:C}_{\text{ZOO}}]=1:3720$ $[\text{P:C}_{\text{POC}}]=1:5160, [\text{P:C}_{\text{DOC}}]=1:10110$ $[\text{N:C}_{\text{PHY}}]=1:99, [\text{N:C}_{\text{ZOO}}]=1:89$ $[\text{N:C}_{\text{POC}}]=1:118, [\text{N:C}_{\text{DOC}}]=1:157$ $[\text{TOD:C}_{\text{PHY}}]=1:288, [\text{TOD:C}_{\text{ZOO}}]=1:288$ $[\text{TOD:C}_{\text{POC}}]=1:288, [\text{TOD:C}_{\text{DOC}}]=1:288$ $[\text{COD:C}_{\text{PHY}}]=1:662, [\text{COD:C}_{\text{ZOO}}]=1:645$ $[\text{COD:C}_{\text{POC}}]=1:685, [\text{COD:C}_{\text{DOC}}]=1:879$

を仮定した。水深が5~10mの領域では、アラメ・ガラモによる吸収を想定して29.2 [mg-atm m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>]の吸収量を仮定した。

## 4.2 1ボックスモデルによる感度解析

東京湾を1つの水塊とし、現況地形に対して2.で示した物質循環計算を行った。この計算の目的は、メッシュモデルによる物質循環計算の予備計算として反応項のパラメータを確認する事と、海藻の繁茂する領域の大きさが内湾域全体のDINの存在量に与える影響の感度解析をする事にある。

計算で用いた基本ケースの境界条件を、表-3にまとめてある。表中の海水交換率は、後述するメッシュモデルによる潮流計算結果を参考にして与えている。負荷は各計算ステップ毎に連続的に投入し、反応項の計算後、仮定された海水交換率により順次外海水と交換していくものとした。

表-3 感度解析用基礎データ

条 件	設 定 値
海水量	13.8 km <sup>3</sup>
平均水深	13.8 m
浅い場の比率	
水深 0~ 5m	90 km <sup>2</sup>
水深 5~10m	91 km <sup>2</sup>
海水交換率	0.4 % /d
河川からの負荷	
POC	81.6 t-C/d
DOC	101.9 t-C/d
DIP	0.17 t-atm/d
DIN	14.3 t-atm/d

(1) 海水交換率の変化による各コンパートメントの変化

海水交換率を変化させた場合の計算結果を図-9に示す。

横軸は設定した海水交換量の基本ケースに対する比であり、縦軸はPHY, ZOO, DIP, DINの基本ケースでの存在量に対する比である。

海水交換率に対してもっとも感度の高いコンパートメント(状態変数)はDINであった。DINの存在量は、海水交換率のほぼ1乗に反比例している。一方、もっとも感度の低いコンパートメントはPHYであった。ただし、収束値はほぼ一定であったが、海水交換量が大きくなるほど一定値への収束速度が早くなっていた。

ZOOの存在量は、海水交換量の変化に対して非線形の応答を示している。これは、以下のようなPHY, ZOO, DIPの相互作用を考えることで説明できる。

● 海水交換量が少ない場合

1. 海水交換量の変化に対して、DIPが湾内に滞留するので変化が小さく、DIPに支配されているPHYの変動も少ない

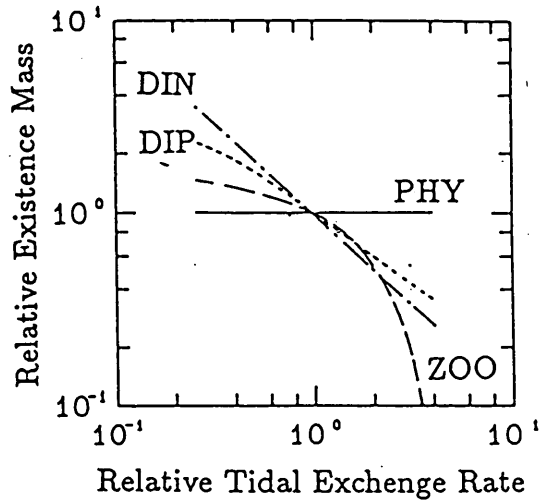


図-9 海水交換率の変化による各コンパートメントの変化

2. PHYの変動が少ないならば、ZOOの変動も小さい
3. また、ZOOによるDIPの生産が行われるので系全体として安定である

● 海水交換量が多い場合

1. 海水交換量の変化に対して、DIPが湾外に流出して減少するので、PHYが急速に減少する
2. PHYの減少により、ZOOも急速な減少を示す
3. 系としてはDIN支配型となり、DIPの減少は緩やかになる
4. しかし、PHYの内部生産が追いつかず、ZOOの急速な減少を示す系となる

(2) DINの存在量の支配要因

DINの存在量の支配要因を抽出するために、各条件(海水交換率、海水温、海藻への吸収率、海底での脱窒率)を変化させた場合の計算を行った。図-10の横軸は、表-3の基本ケースに対する各条件の比であり、縦軸は基本ケースに対するDINの存在量の比を示している。海底での脱窒率や海水温の変化に対してDINの存在量はほとんど変化しない。全体的に支配的なパラメータは海水交換率である。しかし、海藻の吸収率が高くなると、その効果は海水交換量の変化と同等の支配要因となることがわかる。

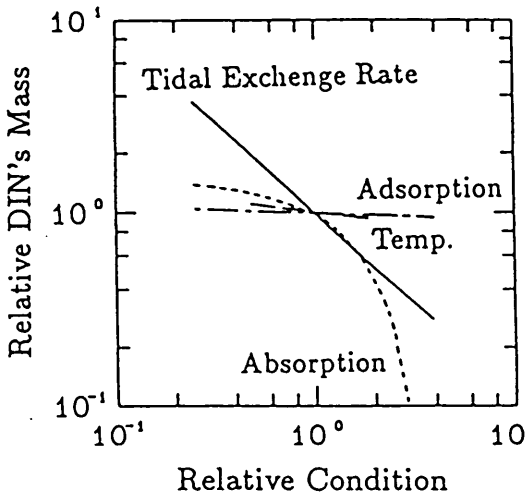


図-10 DINの存在量の支配要因

この図から、もっとも確実に湾内のDIN存在量を減少させるための方策としては、海水交換量を増加させることが効果的であるといえる。それと同時に、海藻を増やすことによって、同等の効果を期待できることが推定できる。

海藻による窒素吸収の効果は、浅場の空間的分布により効果の発現の仕方に違いが生ずると考えられる。そこで、浅場の分布による水質改善効果の違いを明らかにするため、メッシュモデルによる検討を行った。

#### 4.3 メッシュモデルによる定常解析

浅場の空間的な分布を考慮するため、現況地形、仮想地形、仮想地形に対してメッシュモデルによる計算を行った。メッシュは水平方向に1 km × 1 km、鉛直方向には3層(0~5 m, 5~10 m, 10 m~)に分割した。

##### (1) 計算条件

計算には、図-8で示した3つの地形を用い、湾口部で片振幅36 cm、周期12 hの潮汐を外力として与えることにより潮流を起こした。潮流計算に用いた諸条件を、表-4に示す。物質循環モデルの各係数は、表-2の値を用いている。また、表-1で示されている負荷量は、海岸線に沿って配置されている河川や処理場の位置から時間平均値で連続投入した。

表-4 潮流計算の計算条件

条 件		値
境 界 潮 位	潮位振幅	: 36cm
格 子 間 隔		1 km
タ イ ム ス テ ッ プ		30s
計 算 時 間		5 tides
層 数		3層レベルモデル
層 厚	表 層	: 水深 0~5m
	中間層	: 水深 5~10m
	底 層	: 水深 10~
初 期 密 度 ( 境 界 密 度 )	表 層	: $\sigma_t = 21.9$
	中間層	: $\sigma_t = 22.2$
	底 層	: $\sigma_t = 23.4$
底 面 摩 擦 係 数		$\gamma_b = 0.0026$
境 界 摩 擦 係 数		$\gamma_{k+1/2} = 0.0013$
水 平 混 合 係 数		$A_b = 2.0 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$
水 平 拡 散 係 数		$K_b = 5.0 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$
鉛 直 拡 散 係 数		$K_v = 0.0$
境 界 潮 位	潮位振幅	: 36cm
	周期	: 12h

計算結果比較のために計算ケースの番号を表-5のように設定した。

表-5 計算ケース一覧

ケース番号	地形	水体積 ( $\text{km}^3$ )	平均水深 (m)	浅場の大きさ* ( $\text{km}^2$ )
1	現況地形	13.6	15.2	181
2	過去地形	14.6	12.8	447
3	仮想地形	12.1	13.5	341

\*): 水深0~10 mの領域面積

(2) 流れ場の様相

図-11は、ケース1の表面流速について下げ潮時、上げ潮時、残差流を示したものである。下げ潮時の方が上げ潮時より流速が早く、湾口部東側の富津岬の近傍に時計回りの循環流が生成されている。また、上げ潮時には東側沿岸に沿って湾奥部に流入する流れが、西側沿岸に沿って流入する流れより早くなっている。上下層の違いによる流れの違いはあまり顕著ではなかった。流況の概況は、ケース2、ケース3ともケース1と類似であった。

ケース2とケース3での流れをケース1を比較対象として示したものが図-12である。この図は、流速の絶

対値の差をとりケース1の流速値で割ることにより、境界が変化することによる加速域や減速域を相対的に示すために作成した。下げ潮時の表層流速値を比較している。

ケース2では、ほとんど全ての領域で加速されており、湾央部で+0.5一部の湾奥部海岸沿いではさらに大きく加速されている。ケース3では、湾奥部と西側の海岸沿いで加速されており、湾央部では+0.2加速されている。定性的にみると、ケース1に比べてケース2やケース3では海水交換率が増加していることが流速値の比較により推定される。

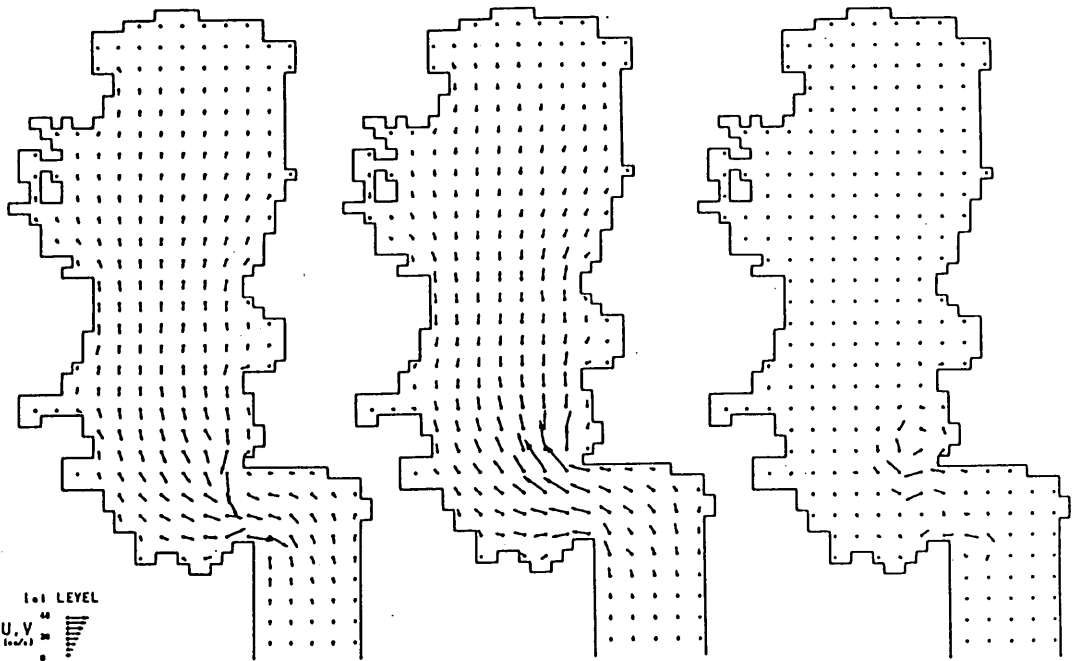


図-11 ケース1（現況地形）の表層流速ベクトル  
 (左：下げ潮時 中央：上げ潮時 右：残差流)

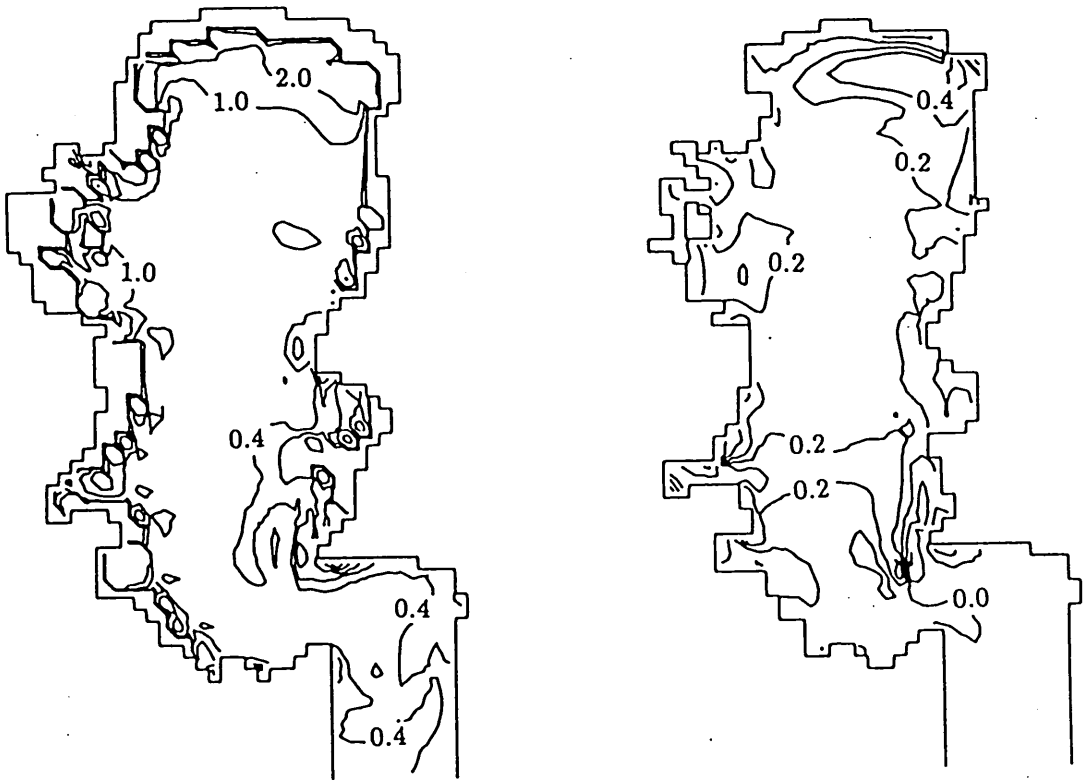


図-12 下げ潮時表層流速ベクトルの比較

(左: ケース2・ケース1 右: ケース3・ケース1)

### (3) DIN の分布

物質循環計算は、タイムステップ1440sで60潮汐分計算し、最終時間の物質濃度分布を定常解とした。東京湾内の栄養塩濃度やプランクトンの分布を再現することは今回の計算の目的ではないので、パラメータのチューニング等の操作はしていない。分布形や湾内存在量等の相対比較を試みる。本節ではDINの分布のみを議論することとする。

ケース1におけるDINの分布図を図-13に示す。栄養塩の沿岸部からの負荷が、湾奥沿岸から西岸にかけて集中しているので、湾中央部西側に極大値をもつ分布が得られた。絶対値での差はあるものの、現地観測により得られる分布のパターンに近似している。

図-14, 15は、それぞれケース2, 3におけるDIN濃度の分布図である。ケース1との比較のために、各図ともケース1でのDIN濃度を引いた値で示している。

ケース2, 3ともに、湾中央部西側でのDIN濃度がケース1と比べて少ないことがわかる。しかし、水深方向の

分布に着目すると、ケース2では全層において同等のDIN濃度の減少があるのに対して、ケース3では底層におけるDIN濃度の減少が顕著である。これは、ケース3では浅場を増やし底層での窒素吸収能力を向上させたことに対応していると考えられる。

内湾域全体でのDIN存在量を比較すると、図-6のようになる。表中の比率はケース1を1とした場合の存在量の比率を表している。この表から、地形変化により3割くらいの窒素の存在量が減少していることがわかる。つまり、沿岸部で浅場が増加したことが湾全体の窒素存在量に影響しており、浅場の役割の重要性がこれらの結果からも裏付けられた。



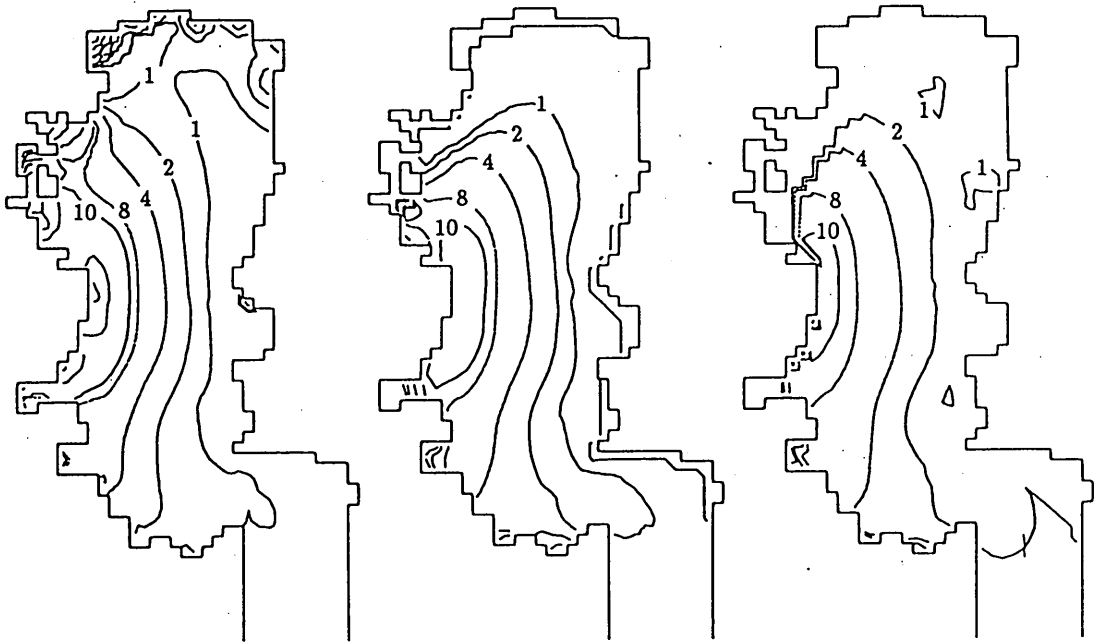


図-13 ケース1におけるDIN濃度の分布  
(左:表層, 中央:中間層, 右:底層 [ $\mu\text{g-ATM/l}$ ])

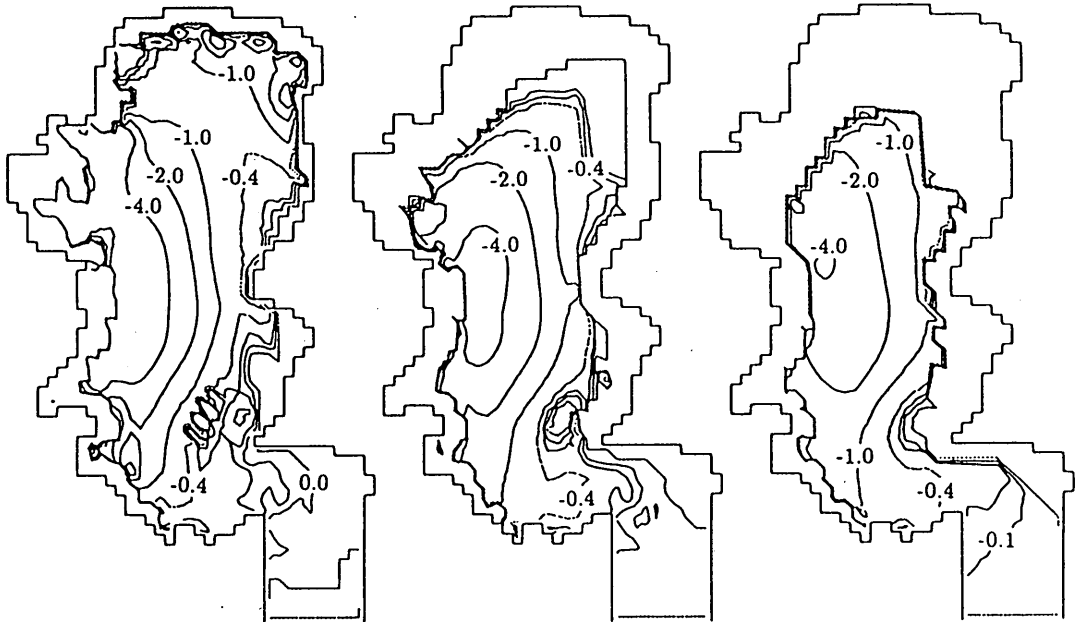


図-14 ケース2におけるDIN濃度の分布  
(ケース1との差)  
(左:表層, 中央:中間層, 右:底層 [ $\mu\text{g-atm/l}$ ])

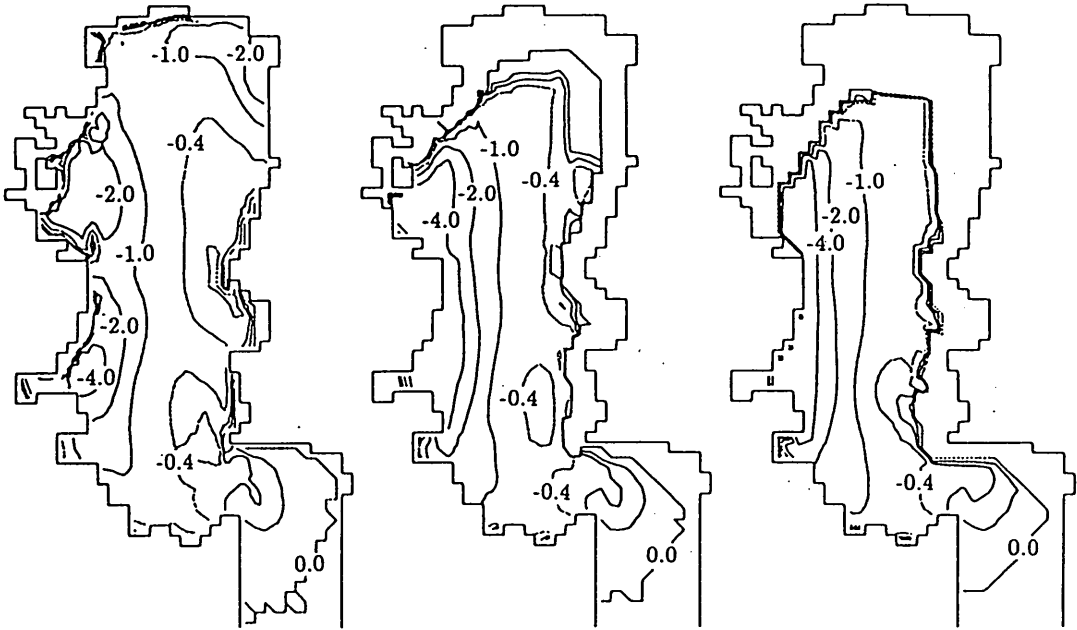


図-15 ケース3における DIN 濃度の分布

(ケース1との差)

(左: 表層, 中央: 中間層, 右: 底層 [ $\mu\text{g-atm/l}$ ])

表-6 内湾域 DIN の存在量

ケース番号	存在量 (t-atm)	比率
1	66.2	1.0
2	48.0	0.73
3	42.0	0.63

となる(図-16)。ここに、 $r(t)$ は初期値で無次元化された対象物質の領域内での濃度の変化を示し、残余関数と呼ばれる。つまり、ある物質がある領域内に留まる平均的な時間を評価する方法である。滞留時間が短いと、その物質は速やかに減少し、滞留時間が長いと、その物質は緩やかに減少する。これは、その物質に対するその領域の容量に対応すると考えられる。滞留時間が短いということは、多量の物質が流入してきても速やかに減少させるので、容量が大きいことに対応し、滞留時間が長

#### 4.4 メッシュモデルによる非定常解析

##### (1) 平均滞留時間

ここで、DINの存在量の変化を示す指標として、滞留時間の概念を導入する。この滞留時間の比較により、窒素容量の変化とその要因について検討する。

平均滞留時間 $\tau_r$ は様々な定義ができるが、武岡<sup>10)</sup>の記述に従うと、

$$\tau_r = \int_0^{\infty} r(t) dt \quad (138)$$

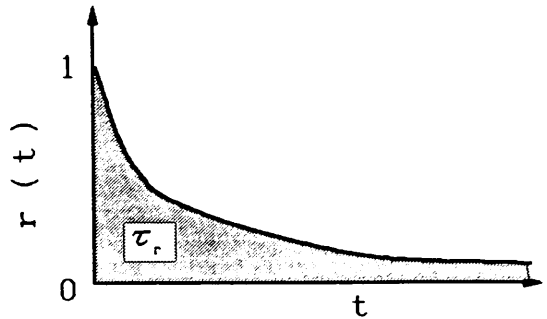


図-16 平均滞留時間の定義

ということ、容量が小さいことに対応する。また、滞留時間で整理すると、物質の負荷濃度で基準化することになり、場所的な違いを比較するのに良い指標となる。

もし、ある $r(t)$ が係数 $a$ の一次反応式の解で記述できるとすると、

$$r(t) = \exp(-at) \quad (139)$$

となり、式(138)に代入して計算すると、 $\gamma_r = 1/a$ となり簡単に滞留時間が評価できる。多くの浄化作用や栄養吸収過程は、自身の濃度に比例する一次反応式もしくは一次反応式に近い形で定式化できることは既に見てきた。汚染に対する浄化作用や栄養塩の吸収過程の大きさが大きくなれば、見かけ上汚染物質や栄養塩の滞留時間が短くなったことに相当する。水理的な効果と水塊内の作用による効果とが同じような大きさで物質濃度の減少に寄与する場合、滞留時間の考え方は両者の効果を共通にはかれる指標としても便利である。

(2) 内湾域全域での平均滞留時間

内湾域での水塊とDINの平均滞留時間を比較するために、ここでは以下の手順で計算した。

1. 各コンパートメントの定常解を得る
2. 内湾域の水塊とDINに対して印をつける
3. 系外からの負荷を止める
4. 時刻 $t$ を $t=0$ とする
5. 物質循環計算を継続し各時刻の残余関数 $r(t)$ を求める
6.  $r(t)$ を式(139)で近似する
7. 滞留時間 $\gamma_r$ を推定する

こうして求められた内湾域全体に対する残余関数と滞留時間を図-17, 18と表-7に示す。

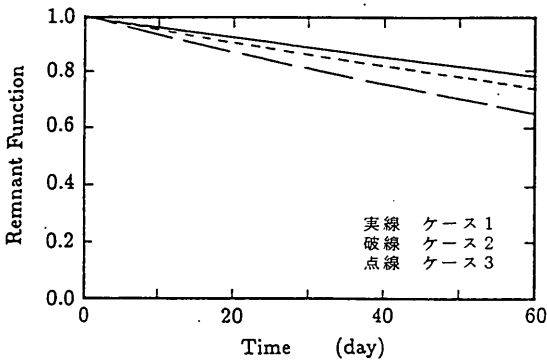


図-17 内湾域の水塊の残余関数

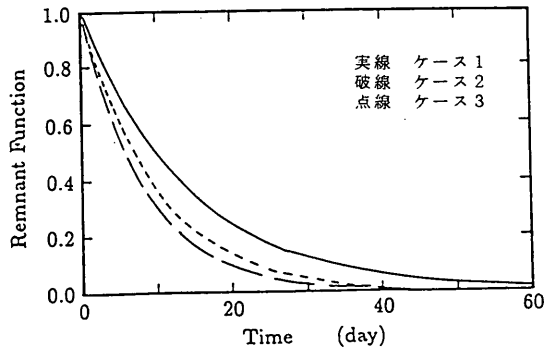


図-18 内湾域 DIN の残余関数

表-7 内湾域の平均滞留時間

ケース番号	水塊の滞留時間(日)	DINの滞留時間(日)
1	250	14
2	143	8
3	200	10

水塊の滞留時間の違いに着目すると、以下のことが言える。ケース1と比較すると、ケース3よりケース2の滞留時間が短くなっていることがわかる。これは、ケース2でのDINの減少は、海水交換率の増加に大きく支配されていたことを裏付ける結果である。

一方、DINの滞留時間の違いに着目すると、ケース2, 3ともにケース1に比較して滞留時間が短い。しかし、両者間の違いは水塊の滞留時間の差異より隔たりが少ない。これは、ケース3においては、海水交換率の増加以外の原因が卓越したことを示唆している。4.2(2)の感度解析の結果から推定すると、浅場の海藻による吸収効果が寄与したものと考えられる。

つまり、ケース2とケース3の窒素に対する容量の変化は、水塊の海水交換率の増加と海藻による吸収効果の増加という異なった機構により起こされていたことが示された。

(3) 空間的な滞留時間の分布

次に、内湾域を図-19のようにI~VIIの7つの領域に分け、空間的な滞留時間の比較をケース1に対して行った。領域の区分は、海藻の繁茂する領域や負荷の大きさによって恣意的に設定した。各領域区分内の水質の一樣

性や水塊としてのまとまりについては検討していない。

空間的な滞留時間は、前節で計算した残余関数を場所毎に表示し、それぞれの場所での $\alpha$ を推定したものである。つまり、内湾域全体に存在する物質を起源として、ある領域内に滞留する時間を推定していることになる。言い換えると、この解析で水塊の滞留時間が長いということは、その領域の海水交換量が少ないということの他、湾内の水塊が循環して、その領域にたどりつく割合が高いということも反映している。

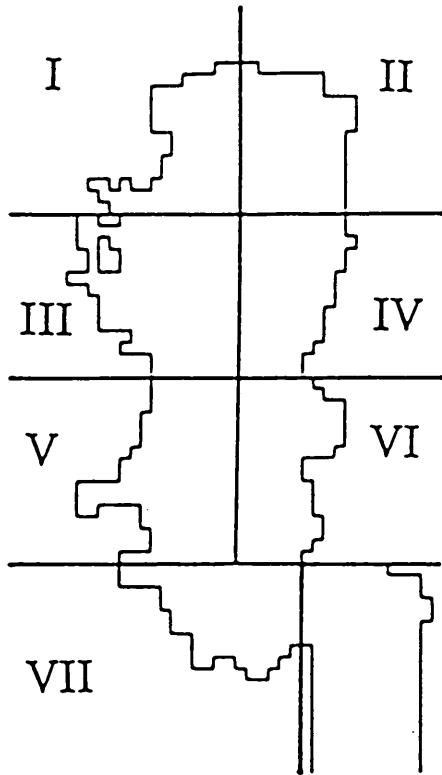


図-19 内湾域の分割

図-20, 21は、水塊とDINの残余関数を領域I, II, III, Vについて示したものである。滞留時間に変換すると表-8となる。表中には、沿岸からのT-N負荷量の目安を記入してある。

水塊の滞留時間は領域I, II, IIIで長く、領域Vで短くなっている。一方、DINの滞留時間は、領域Vでいちばん長く、領域II, IIIがそれに続き、領域Iで短くなっている。領域IとIIを比較すると、水塊の滞留時間がほぼ同じであるので、領域IでDINが速やかに減少してい

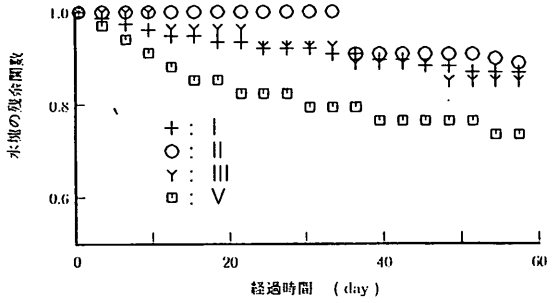


図-20 水塊の残余関数の分布(ケース1)

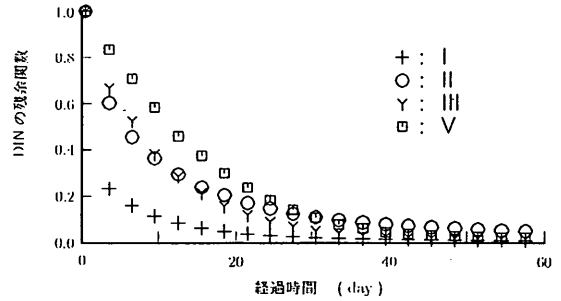


図-21 DINの残余関数の分布(ケース1)

表-8 ケース1における負荷量と滞留時間の空間分布

領域番号	沿岸からの T-N 負荷量 (t/d)	水塊の 滞留時間 (d)	DINの 滞留時間 (d)
I	77	333	2
II	10	333	25
III	118	333	5
IV	0	250	17
V	41	143	10
VI	2	100	17
VII	10	500	17

るのは、負荷量そのものが多く元々多くのDINが存在することや、海藻の繁茂する領域が多いこと、が原因であることが推測される。また、領域Vでは、海藻の繁茂する領域と、水塊の滞留時間が共に少ないことが、他に比べてDINの減少が緩やかに起こっている原因と考えられる。

ケース2, 3についても同様の解析をした結果, 同じ傾向が見られ, 海藻の繁茂する領域の大きさと水塊の滞留時間の分布によって, DINの減少の割合が影響されることが判った。つまり, ケース2の方が海藻の繁茂する領域が広いにも係わらず, ケース3と同様の窒素存在量を示したのは, 水塊の滞留時間がケース3に比べて短かったためであると言える。従って, 効果的に浅場の効果を引き出すためには,

1. その物質が多く存在する領域であること
  2. 水塊の滞留時間の長い領域であること
- 等が条件となりそうである。

しかし, 空間的な滞留時間に関する議論には,

- 領域の区分方法
- 他の領域との相互作用の評価方法
- 一旦領域外にでてから再び戻ってくる物質の取扱い等に問題が残されている。本計算では, 内湾域全域での物質を滞留時間を推定する際の起源とする事によって問題を回避しているが, その分, 物理的意味がはっきりしなくなっている。今後検討を進めていく必要がある。

また, 空間的な滞留時間の分布という考え方を応用して, 今後, 環境容量の改善方策の比較, 局所的な開発の影響評価などに適用する余地があると考えている。

## 5. おわりに

本論文で得られた主な結論を列挙する。

1. 本論文で提示した物質循環モデルは, 定性的に東京湾の物質循環を再現している
2. 沿岸域に存在する浅場の影響は, 湾域全体の物質循環に影響を及ぼす
3. 湾内の窒素容量の変化を説明するために, 存在量の分布や滞留時間の分布を検討することは有効な手段となる

物質循環モデルは, 生態系に関する現地観測結果や研究室における検討結果を積み上げて構築されている。その中で使用されるパラメータの同定は, 他のパラメータの精度と整合性がとれていなければならない。例えば, 不明確なパラメータが全体の系を支配するプロセスに関与している場合には, パラメータの与え方によっては計算結果の有効性を損なうことも有り得る。実際に, 開発によるインパクトを予測するモデルを構築するにあたっては, 現象を支配するプロセスの抽出や, 与えるパラメータ値の妥当性の検討は不可欠である。内湾域では移流・拡散の効果が大きいので, 潮流計算の精度向上も今後の課題である。

なお, 本論文で用いた物質循環モデルの構築にあつ

ては, 岸道郎博士(東大海洋研助手)の多大なる情報提供と御指導を受けた。また, 堀江毅海洋水理部長, 村上和男海域環境研究室長には, 本研究を進めるにあたり有益な指導を受けた。ここに記して感謝いたします。

昭和11年当時の地形条件は, 海上保安庁水路部より提供された旧版海図を利用したことを付記すると共に, 感謝いたします。

## 参 考 文 献

- 1) 細川恭史: 浅海域での生物による水質浄化作用, 沿岸海洋研究ノート, 第29巻, 第1号, 1991
- 2) 佐々木克之: プランクトン生態系と窒素・リン循環, 沿岸海洋研究ノート, 第28巻, 第2号, 1991
- 3) 佐々木克之: 干潟域の物質循環, 沿岸海洋研究ノート, 第26巻, 第2号, 1989
- 4) 堀部純男編: 「環境科学としての海洋学3」4.5 海藻生態系, 東大出版会, 1979
- 5) Eppley, R. W.: Temperature and phytoplankton growth in the sea. Fish. Bull. Vol. 70, 1972
- 6) Monod, J.: Reseaches sur la croissance des cultures bacteriennes. Paris: Herman et Cie, 1942
- 7) Steele, J. H.: Environmental control of photosynthesis in the sea. Limnol. Oceanogr. Vol. 7, 1962
- 8) Vollenweider, R. A.: Calculation models of photosynthesis depth curves and some implications regarding day rate estimates in primary production measurements. In: Goldman, C. R. (ed.). Primary Productivity in Aquatic Environments. Mem. Ist. Ital. Idrobiol., 18 Suppl., Berkely: Univ. Calif., 1965
- 9) 堀江 毅: 水質予測計算における変動量の時間的平均スケールについて, 土木学会第13回環境問題シンポジウム, 1985
- 10) 中田喜三郎: 物理過程の変動と沿岸と外洋の物質フラックスの推定, 沿岸海洋研究ノート, Vol. 30, No. 2, 1993
- 11) 細川恭史・三好英一・関根好幸・堀江 毅: マイクロコズムとセジメントトラップとを用いた沿岸域での浮遊粒子挙動の観測, 港湾技術研究所報告, 第26巻, 第2号, 1987
- 12) James N. Kremer, Scott W. Nixon: A Coastal Marine Ecosystem, Ecological studies, Vol. 24, 1978, (日本語版) 中田喜三郎監訳: 沿岸生態系の解析, 生物研究社, 1987
- 13) Joseph Hun-wei Lee, 平山彰彦, Lee Hok-shing: 富栄養化した閉鎖性海域の短期的 DO 変動モデル, 海岸工学講演会, Vol.38, 1991
- 14) Leendertse, J. J.: A water-quality simulation model for well-mixed estuaries and coastal sea, Vol. 2, Rand Corporation, 1971
- 15) 金子安雄・堀江毅・村上和男: ADI法による潮流汚染拡散の数値計算, 港湾技術研究所報告, 第14

- 卷, 第1号, 1975
- 16) 村上和男: 海水密度の分布を考慮した流れの数値計算法, 港湾技研資料, No.665, 1990
- 17) 堀江毅・金子安雄・村上和男: 潮流の数値シミュレーションについて, 昭和50年度港湾技術研究所講演会講演集, 1975
- 18) 武岡英隆: 沿岸海域の海水交換, 沿岸海洋研究ノート, 第20巻, 第2号, 1984
- 19) 柳哲雄・高橋暁: 大阪湾の淡水応答特性, 海と空, 64巻, 1988
- 20) 堀江毅: 海域の物質循環過程のモデル化と浄化対策効果の予測手法について, 港湾技術研究所報告, 第26巻, 第4号, 1987

## 記号表

B01	植物プランクトンの光合成による増殖
B02	植物プランクトンの細胞外分泌
B03	植物プランクトンの呼吸による消費
B04	植物プランクトンの動物プランクトンによる被食
B05	植物プランクトンのベントスによる被食
B06	植物プランクトンの枯死
B07	植物プランクトンの沈降
B08	動物プランクトンの排糞
B09	動物プランクトンの排泄
B10	動物プランクトンの自然死亡による減少
B11	動物プランクトンの日周垂直運動による増減
B12	POCの細菌による分解
B13	POCの分解余剰物生成
B14	POCの沈降
B15	DOCの無機化
B16	DIPの海底からの溶出
B17	DINの海底からの溶出
BD1	DINの海底への吸収
BD2	DINのアマモへの吸収
BD3	DINのアラメへの吸収
COD	化学的酸素要求量 [mg l <sup>-1</sup> ]
D6	DOの底泥による消費
D7	DOの再ばっきによる供給
DIN	溶存態無機窒素 [ $\mu$ g-atm/l]
DIP	PO <sub>4</sub> -P (リン酸塩) で代表された溶存態無機リン [ $\mu$ g-atm/l]
DO	溶存酸素量 [mg/l]
DO <sub>s</sub>	飽和酸素濃度
DO <sub>1/2</sub>	POCの分解速度が半分になる酸素濃度
DOC	炭素量で換算した溶存態有機物量 [mgC/m <sup>3</sup> ]
PHY	植物プランクトンの生物量 [mgC/m <sup>3</sup> ]

POC	炭素量で換算した懸濁態有機物量 [mgC/m <sup>3</sup> ]
ZOO	動物プランクトンの生物量 [mgC/m <sup>3</sup> ]
A <sub>h</sub>	混合係数
C	湾内の水質濃度
C <sub>s</sub>	式(1)の定常解
Chla	細胞中のクロロフィル a 量
Cl	塩素濃度
C <sub>F</sub>	定圧比熱
D	水深
dt	計算時間ステップ
dx	格子の間隔
DL	日射時間の1日当たりの割合
e	動物プランクトンの同化効率
f	コリオリの力
F	強制外力のベクトル
g	動物プランクトンの総成長効率
g	重力加速度ベクトル
h <sub>B</sub>	最下層の層厚
I	光の強さ
I <sub>0</sub>	海面での光強度
I <sub>z</sub>	水深zにおける光強度
k	湾内の自浄作用に関する速度係数
k <sub>a</sub>	再ばっき係数
k <sub>B</sub>	DOの底泥での消費
K <sub>h</sub>	水平方向の拡散係数
K <sub>N</sub>	DINの摂取に関する半飽和定数
K <sub>P</sub>	DIPの摂取に関する半飽和定数
K <sub>s</sub>	半飽和定数
K <sub>v</sub>	鉛直方向の拡散係数
N	栄養塩濃度
P	圧力
q	単位時間当たりの淡水流入量
q <sub>COD</sub>	CODの系外からの流入量
q <sub>DIP</sub>	DIPの系外からの流入量
q <sub>DOC</sub>	DOCの系外からの流入量
q <sub>POC</sub>	POCの系外からの流入量
q <sub>DIN</sub>	DINの系外からの流入量
Q	潮汐による海水交換量
Q	熱量の強制外力
Q, R, S	ADIの解法中に使用する変数
Q <sub>10</sub>	温度の10度上昇による生理学的な速度の変化量
r(t)	残余関数
R	動物プランクトンの摂食速度
R <sub>max</sub>	動物プランクトンの最大摂食速度

浅場の窒素収支を考慮した3次元物質循環モデルの構築と計算事例

$S$	塩分
$t$	時間
$t_0$	$V/(Q+q)$ で定義される完全混合型湾内の 水理学的滞留時間
$T$	温度
$\mathbf{u}$	流体の速度ベクトル( $u, v, w$ )
$V$	湾の水体积
$v(\ )$	種々の速度係数
$W$	湾内への単位時間当たりの負荷重量
$z$	水深
$\alpha$	一次反応式の定数項
$\alpha_n$	速度係数を決める定数
$\beta_n$	速度係数を決める定数
$\gamma_0$	底面摩擦係数
$\gamma_{k+1/2}$	$k$ 層と $k+1$ 層の間の境界摩擦係数
$\gamma_p$	DO 濃度による溶出の抑制効果を表すパラメータ
$\Delta$	$\nabla \cdot \nabla$
$\zeta$	水位
$\kappa$	デトリタスの無機化に対する余剰物生成の割合
$\kappa$	消散係数
$\kappa$	温度電導率
$\lambda$	動物プランクトンの Ivelv 定数
$\mu(\ )$	速度に対する制限の強さを表す関数
$\mu / \mu_{max}$	最大成長速度で無次元化された比成長速度
$\nu$	流体の粘性係数
$\nu_h$	水平方向の拡散係数
$\nu_v$	鉛直方向の拡散係数
$\nu_{\rho x}$	$x$ 方向の密度に関する乱流拡散係数
$\nu_{\rho y}$	$y$ 方向の密度に関する乱流拡散係数
$\nu_{\rho z}$	$z$ 方向の密度に関する乱流拡散係数
$\Pi$	動物プランクトンの摂食飼料濃度
$\Pi^*$	動物プランクトンの摂食濃度のしきい値
$\rho$	流体の密度
$\tau_r$	平均滞留時間
$\nabla$	微分演算子ナブラ