

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. 22

NO. 3

SEPT. 1983

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第22巻 第3号 (Vol. 22, No. 3), 1983年9月 (Sept. 1983)

目 次 (CONTENTS)

1. A Unified Nonlinearity Parameter of Water Waves
..... Yoshimi GODA..... 3
(水面波の非線型性パラメーターの統一的表示について.....合田良実)
2. 無反射性造波方式の原理と推力制御式造波装置の特性
..... 谷本勝利・原中祐人・富田英治..... 31
(Principle and Performance of Non-reflective Wave Generator by Thrust Control
..... Katsutoshi TANIMOTO, Suketo HARANAKA and Eiji TOMIDA)
3. マイクロプロセッサ応用によるステップ式波高計の改良について
..... 佐々木 弘・高橋智晴..... 57
(Improvement of step-type recording wave gauge with application of micro-processor
..... Hiroshi SASAKI and Tomoharu TAKAHASHI)
4. 日本沿岸の波浪のスペクトル形について
..... 広瀬宗一・立花祐二・菅原一晃..... 83
(One-dimensional spectra of wind waves in coastal waters
..... Munekazu HIROSE, Yuji TACHIBANA and Kazuteru SUGAHARA)
5. 波力発電ケーソンの空気出力効率の解析
——波エネルギーに関する研究 第1報——
..... 小島朗史・合田良実・鈴木諭司..... 125
(Analysis of Efficiency of Pneumatic-type Wave Power Extractors Utilizing Caisson
Breakwaters—A Study on Development of Wave Power 1st Report—
..... Roushi OJIMA, Yoshimi GODA and Satoshi SUZUMURA)
6. 海域における物質循環数値モデルの水質支配要因について
..... 堀江 毅・細川恭史..... 159
(Water-quality controlling factors in an eutrophication model
..... Takeshi HORIE and Yasushi HOSOKAWA)

7. 深層混合処理工法による壁状改良地盤の耐震性に関する実験的研究
..... 稲富隆昌・風間基樹・今村俊博..... 207
(An Experimental Study on the Earthquake Resistance of Wall Type Improved Ground
by Deep Mixing Method
..... Takamasa INATOMI, Motoki KAZAMA and Toshihiro IMAMURA)
8. 川崎港海底トンネルでの地震応答観測と応答解析
..... 清宮理・西澤英雄・横田弘..... 253
(Field Observation and Response Analysis at Kawasaki Koh Submerged Tunnel
..... Osamu KIYOMIYA, Hideo NISHIZAWA and Hiroshi YOKOTA)
9. 港湾における空間設計手法の開発 (第3報)
——入力方法の容易化と港湾計画への応用——
..... 奥山育英・梅山珠実・佐々木芳寛..... 301
(Development of Space Design of Port and Harbour (3rd Report)—Easy Input Methods
and Application to Port Planning—
..... Yasuhide OKUYAMA, Tamami UMEYAMA and Yoshihiro SASAKI)
10. 港湾経済効果の計測手法 (第2報)
——付加価値モデルの汎用化と原単位の整備——
..... 竹内良夫・米澤朗・稲村肇..... 325
(Development and Application of Synthetic Economic Evaluation Model for Port
Planning (2nd Report)—Value Added Model—
..... Yoshio TAKEUCHI, Akira YONEZAWA and Hajime INAMURA)

6. 海域における物質循環数値モデルの 水質支配要因について

堀 江 毅*・細 川 恭 史**

要 旨

本報告は、海域の富栄養化対策の一環として考えられる底質浄化事業による水質改善効果の予測手段となる物質循環モデルの水質支配要因について数値解析的に検討したものである。解析には2層および3層系で栄養塩、植物プランクトンおよび底質との物質循環を取扱ったモデルを適用し、大阪湾を対象海域としている。本検討の結果、栄養塩、有機物、溶存酸素などの平面分布は水平流れと恒流、境界濃度、交換係数、拡散係数による寄与が大であること、鉛直流または鉛直混合の増大により層間の濃度差は小さくなるが、上層での生産が促進されて上下層とも有機物濃度が大きくなること、沈降速度の濃度に対する影響が大きいこと、さらに3層モデルにより湾奥底層部での低酸素状態の再現が可能であることなどが確認された。

* 海洋水理部 海水浄化研究室長

** 海洋水理部 主任研究官

6. Water-quality Controlling Factors in an Eutrophication Model

Takeshi HORIE*

Yasushi HOSOKAWA**

Synopsis

Some characteristics of the factors sensitive to water-quality are numerically investigated to a mathematical model prepared for the prediction of the effect by bottom sediment improvement works as one of the countermeasures against marine eutrophication.

The nutrient cycle between seawater and sediment is formulated in the two-layer or three-layer model. From the application to the bay of Osaka, the following facts are confirmed: i) the horizontal distribution of I-P (Inorganic Phosphate), O-P (Organic Phosphate), COD (Chemical Oxygen Demand) and DO (Dissolved Oxygen) are closely related with tidal flow, tidal residual flow, open boundary condition, horizontal dispersion coefficients, etc., ii) the increase of vertical flow or vertical mixing causes to act as to homonize between layers and to increase COD and O-P in each layer by the promotion of photosynthesis in upper layer, iii) settling rate is also affective to water-quality, and iv) unaerobic condition in the bottom region of inner bay is successfully reproduced by the three-layer model.

* Chief of the Purification Hydraulics Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

** Senior Research Engineer, Marine Hydrodynamics Division

目 次

要 旨	159
1. ま え が き	163
2. 物質循環過程のモデル化	163
2.1 水質底質および生物間の物質の循環とモデル化	163
2.2 物質循環モデル	166
2.3 流れのモデル	168
3. 物質循環モデルに必要なデータと諸定数	171
3.1 流れのデータ	171
3.2 物質循環に係わるデータ	178
4. 水質を支配する主な要因	180
4.1 解析的手段による検討	180
4.2 数値モデルによる検討	181
5. 水質分布再現性の検討	190
6. ま と め	198
参 考 文 献	199
付録. 1 3層の物質循環モデル	200
付録. 2 3層の流れモデル	201
付録. 3 3層モデルの計算条件と諸定数	202

1. ま え が き

沿岸の有機物による汚染水域の水質改善策としては、陸岸から流入する汚染負荷を抑制することが先決問題である。瀬戸内海においては、48年に瀬戸内海環境保全臨時措置法が施行されて以来 COD 濃度は一時減小したがその後再び漸増の傾向にあり¹⁾、排出負荷量規制の強化に加えて抜本的な対策を講ずることが緊急の課題となっている。

海域の有機汚染の主たる原因は陸上からの有機物負荷によるが、底泥からの有機物の溶出や、海域内の基礎生産による負荷も大きいといわれ、陸域からの有機物や栄養塩の流入負荷規制のほかにこれらの底質からの溶出を制御することが水質の改善に効果的であると思われる。運輸省港湾関係当局では過去数年にわたりこの点に着目した一連の調査が企画され、底泥の浚渫やトレンチ（掘溝）などによる除去、または覆土による溶出制御のための調査が実施されている。それらの調査内容は、対象海域における広域汚染実態の把握調査、底泥からの溶出試験、試験工事による工法開発および改善効果追跡調査に加えて、栄養塩、有機物、溶存酸素量の変化を組込んだ物質循環モデルの開発、および同モデルによる浄化効果のシミュレーションが主なものである。

これらの調査において大きな役割を担っている数値モデルは、東京湾にて適用されたモデル²⁾を基本とし、対象海域の水質特性や個々の目的に応じて改良を加えた2層および3層のレベルモデルである。

底質浄化事業による水質改善効果を精度よく予測するためには、計算に用いられるモデルを構成する各素過程の挙動を十分に把握し数値モデルの再現性を高める必要がある。後述するようにこの種の数値モデルには物質の移動や濃度を規定するパラメータが多いため、モデルの精度を高めるにはそれらの個々のパラメータの各水質に対する影響度、すなわち感度を調べておくことが有利である。富栄養化モデルの感度解析は対象水域を一つの水体とみなした閉鎖水域では解析的に行うことができるが³⁾、一般の水域に対しては数値解析によらざるを得ない。

本研究は、大阪湾をモデル海域とし、2層および3層のレベルモデルとレイヤーモデルを用いて水質の水平および鉛直分布に影響を及ぼす要因のうち主なものを取りあげ、これらの変化による水質分布への影響を明らかにす

ると同時に、それらの適切な取扱い法についての検討を試みたものである。

本文 2. においては、物質循環の機構の概要と本研究で適用した数値モデルへの組み込み、および流れと物質循環モデルについて概説し、3. では物質循環モデルに必要なデータと諸定数について述べた。4. では水質の水平分布に対して影響の大きい流れ(移流)、水平拡散係数および境界濃度(交換係数)、各物質の鉛直移動に関連の深い鉛直流、鉛直混合係数、沈降速度および分解速度の寄与について検討するとともに、層厚による濃度変化および3層モデルによる検討結果をそれぞれ述べた。5. では4. の成果をふまえて2層および3層モデルによる現況再現性の検討を行った。6. では以上の結果を要約し今後の課題を述べた。最後に3層モデルの基本式、計算に用いたデータおよび計算結果の一部を末尾の付録に付した。

2. 物質循環過程のモデル化

2.1 水質底質および生物間の物質の循環とモデル化

有機汚染が著しい海域はほとんど例外なく閉鎖的な水域で外海水との交換が悪く、また人口や産業が臨海部に集中して陸上からの汚染負荷が多いところに限られている。このような海域における有機物の高濃度化は流入する汚染負荷が直接的原因であるが、底泥からの有機物の溶出や、溶出、陸上からの流入あるいは水中での分解などによる栄養塩を利用した海域内部での生産による有機物の増加も大きく寄与している。基礎生産により合成される植物プランクトンは栄養塩の消費による増殖、有機物の細胞外分泌、枯死後の下層への沈降あるいは小型動物プランクトンによる被捕食の過程をたどる。底層に沈積した植物プランクトンは徐々に分解されて再び COD や栄養塩となって水中に回帰し、海水の鉛直混合作用によって有光層内に運ばれる。そこで栄養塩は再び基礎生産に関与する。

COD や栄養塩の溶出は、水温、溶存酸素濃度、底質、沈降堆積物などに依存して変化する。一方植物プランクトンを捕食して増殖する小型動物プランクトンは、排泄による有機物の体外排出、死亡による下層への沈降、さらにより大型の動物プランクトンによる被捕食の過程をたどる。これらのプランクトンは順次小型から大型の魚介類または動物に捕食されいわゆる食物連鎖を形成している。正常な海域においてはこれらの各過程が平

衡状態にあって安定な生態系が形成されるが、負荷、水温、溶存酸素等の急変といったような異状が系内に起こるとバランスが崩れ、それによる影響が連鎖的に波及する。プランクトンの異状増殖、赤潮の発生、貧酸素化、有機物濃度の急昇、富栄養化の進行等、海の生物や環境保全に対して望ましくない現象が誘発される。

こうした弊害を軽減するためには、その原因をいち早く究明してしかるべき対策を早急に打つ必要がある。特にその原因が人為的なものによる場合には適切な手段によって元の安定な生態系に戻すことが急務である。

このためには陸上からの流入負荷を抑制してこれによる有機物自体の濃度を低下させることが最重要である。昭和40年代に施行されたCODの総量規制によって大方の海域で高いCOD上昇率が抑えられ、規制効果が現れた。ところが海域の目標達成率は70%前後と依然として低く⁴⁾、生活排水の多い海域や閉鎖性内湾で堆積汚泥の多い海域については流入負荷の規制のみでは水質改善効果にも限界がある。

また、海水の流れを利用して高濃度汚染水の混合、希釈、拡散および外海水との交換を促す力学的な方法として、湾口部の拡幅増深、ショートカット、航路や濡筋の浚渫などがある。海水の流れの促進は物質の移流効果と拡散効果を増大させることになり、水質の浄化に有効であるが、工費が大となるため、小規模なさくれいを除いてこれまで海水循環の促進を主目的とした実施例はない。

一方、堆積汚泥の処理処分により溶出量を制御する方法は、有機物濃度の高い底泥を浚渫除去するか、あるいは土砂で底泥表面を被覆することである。諏訪湖、霞ヶ浦などの一部淡水域では実施例がある。堆積汚泥の著しい閉鎖性水域においては陸上からの負荷規制と同等に有効な手段と考えられる。そこで以下においては、特にこの第二の方策による効果を予測するために開発調査を進めてきたモデルについて検討を行う。

水質シミュレーションに適用される数値モデルは表-2.1に示すように、保存モデル、非保存モデルに大別できる。

保存モデルは、塩分のような保存性物質、あるいはCODのように本来非保存性であってもこれを近似的に保存性とみなして単一の拡散物質の流れによる移流と拡散とを解析するものである。このモデルは取扱いが容易であり、これまでも東京湾をはじめ多くの海域において適用されているが、溶出などの過程がとり入れられてい

ないため本研究の主旨には不向きである。

一方非保存モデルは、移流と拡散の他に、沈降や舞い上りなどの物理的過程、生産、分解、溶出などの生物化学的過程、さらに捕食-被捕食、排泄、細胞外分泌、枯死、死滅などの生物学的な過程を組込んで解析するものである。簡単なモデルではこれらの諸過程による物質の増減をトータルとして評価し、一つの増加項または減小項として保存モデルに付加するものもある。通常のモデルでは解析の目的と精度に応じて上述諸過程のいくつかを適宜とりこみ組立てている。

徳山湾や周防灘⁹⁾に適用されたモデルでは、COD、全窒素、全リンを対象としたボックスモデルで、移流、拡散、沈降、溶出、生産、分解の各過程がとり込まれ、CODの生産速度は全窒素または全リンに比例する形で与えられている。

エリー湖⁹⁾で適用されたモデルは、植物プランクトン、動物プランクトン、ベントス間の窒素とリンの循環をモデル化したもので、生産速度を窒素、リン、水温、照度の関数で、また呼吸、捕食率は水温の関数で与えられている。移流、拡散効果をもとり入れて数個のボックスで8か月分の計算が行われている。

琵琶湖⁹⁾で適用されたモデルは、植物プランクトンと動物プランクトン間の窒素とリンの循環をモデル化したものであるが、リンは無機態のもののみが取扱われ、プランクトンは生きたものと死んだものとに区別して扱われている。移流効果のみを考慮し数個のブロックについて解析されている。さらに三河湾のモデル¹⁰⁾では、生産層と非生産層に分け、リンを循環物質とした動植物プランクトン間の循環が取扱われている。移流・拡散をとり入れて1時間ステップで3日分の計算が行われている。

以上にみるようにシミュレーションの目的に応じ物質循環の諸過程の扱いが異なることがわかる。そこで本研究に対しては当初の目的、すなわち底泥からの有機物と栄養塩の溶出制御による水質変化を予測できるモデルの構築を考える。このためつぎのような仮定と単純化を行った。

- 1) 物質の循環を栄養塩-植物プランクトンの段階でとどめ、基礎生産量に応じて溶存酸素量と有機物量とを増加させる。
- 2) 水質指標は、有機物濃度を表すものとしてのCOD、有機態および無機態の栄養塩および溶存酸素量とする。栄養塩は制限因子としてのリンのみを対象とする。

海域における物質循環数値モデルの水質支配要因について

- 3) 海域は鉛直的に表層の有光層と底層の無光層とに分かれ、有光層においてのみ生産が起こる。 分解, 沈降, 舞い上等の過程を通して変化させる。
- 4) COD, DO および栄養塩は、生産, 溶出の他、 5) さらに、海域の流れによる移流と拡散の作用を受

表-2.1 水質拡散シミュレーションモデル例

モデル	物質の取扱いまたは物質循環フロー	特徴	適用例
①保存モデル	$(\text{濃度変化}) = (\text{移流}) + (\text{拡散})$	<ul style="list-style-type: none"> ○保存性物質としての取扱い。 ○塩分、保存性物質とみなした拡散物質 	東京湾 大阪湾 伊勢湾, 三河湾 瀬戸内海
②非保存モデル	$(\text{栄養塩濃度変化}) = (\text{移流}) + (\text{拡散}) - (\text{沈降}) + (\text{溶出}) - (\text{生産}) + (\text{分解})$ $(\text{COD濃度変化}) = (\text{移流}) + (\text{拡散}) - (\text{沈降}) - (\text{分解}) + (\text{生産}) + (\text{舞い上り})$	<ul style="list-style-type: none"> ○COD, 全窒素, 全リンを対象としたボックスモデルによる水質解析 ○CODの生産速度は全窒素または全リンに比例する形で与えられている。 	周防灘 ⁵⁾ 徳山湾
	$(\text{温度変化}) = (\text{移流}) + (\text{拡散}) + (\text{海表面熱収支})$	温排水等の拡散解析に適用される。	
	$(\text{濁り濃度変化}) = (\text{移流}) + (\text{拡散}) - (\text{沈降}) + (\text{舞い上り})$	土砂(SS)の拡散解析に適用される。	大阪湾 東京湾
③生態物質循環モデル		<ul style="list-style-type: none"> ○生産速度をP, Nの濃度, 水温, 照度の関数で与えている。 ○呼吸, 捕食率は水温の関数で与えている。 ○数個のボックスで移流, 拡散効果を入れて日単位で8か月分計算している 	エリ一湖 ^{6), 7), 8)}
		<ul style="list-style-type: none"> ○プランクトンを生きたものと死んだものとに区別して取扱っている。 ○リンは無機態のみ扱っている。 ○移流のみ考慮し、数個のブロックで解析している 	琵琶湖 ⁹⁾
		リンを循環物質とし、移流, 拡散を考慮して1時間単位で3日分の解析をしている	三河湾 ¹⁰⁾

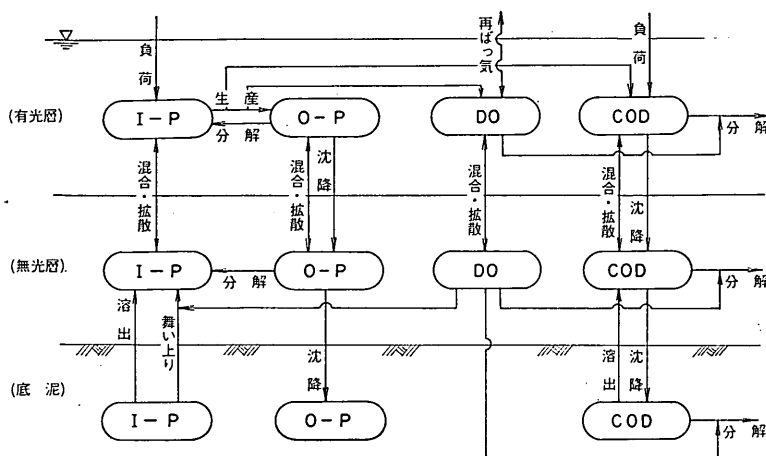


図-2.1 物質循環2層モデル

け水平および鉛直方向に分散する。

1) に関して、現実の海域では既述のように物質の循環は動物プランクトンから魚介類、さらには大型動物へと及ぶものであるが、これらの循環をすべて組みこむことは不可能であり、また必ずしもモデルの精度を上げることにはならない。ここでは簡単のため最も低次の栄養塩—植物プランクトン段階の物質循環を基本に扱うこととした。

2) に関して、まず有機物指標としては水質規制値となっている COD を採用した。栄養塩としては窒素系、リン系が主であるが、大阪湾ではリンが制限因子になっていること、および窒素に比して取扱いが容易であることからリンを採用することとした。

3) に関して、鉛直的に2層または3層に分け、表層(3層の場合一部は表層と中間層)において基礎生産が生ずるように設定する。各層の流れは5)に述べた潮汐流の計算より決定される。

4) に関して、2層の場合をフローで示すと図-2.1のようになる。すなわち、表層有光層において、有機態リンの分解、底層からの鉛直混合または移流、陸上負荷等により供給される無機態リンは光合成によって植物プランクトンに吸収合成され有機態リンとなる。同時に有機物と溶存酸素が生成される。有機態リンは混合、拡散、沈降の作用を受けて底層や海底に移動する一方、分解作用により有機態リンは無機態リンに分解され再び基礎生産に関与する。陸上負荷、基礎生産、底泥からの溶出により供給される COD は溶存酸素を消費して分解し減少す

る。基礎生産および海面から供給される溶存酸素は水中および底泥の有機物分解に消費される。

3層の場合は図-2.1に対して表層と底層との間に中間層を設けるもので、これを有光層にする場合と無光層にする場合とが考えられる。

5) に関して、モデルで扱う物質は海域の流れと拡散による移送と分散を受ける。この流れは本モデルで扱う物質の循環とは無関係に決まるとして、あらかじめ流れの計算を行っておきその結果を水質シミュレーションに利用する。この場合、流れは平均的な潮流として半日周期の M_2 潮流成分を対象にすることが多いが、水温と塩分の分布や季節変化をとり入れた密度流成分も合わせ対象にすることもできる。また多層の数値モデルには、水平2成分と鉛直成分の各流速および水面変化とを計算するレベルモデルと、各層の水平2成分の流速および層間の境界面の変化(水面を含む)とを計算するレイヤーモデルとがある。物質循環モデルもこれらの流れのモデルに対応して組立てられており、物質の鉛直移動は鉛直流、鉛直混合係数、沈降などにより起こることになる。

2.2 物質循環モデル

2.1 で述べた物質循環モデルにおいて、有機態リン、無機態リン、COD、溶存酸素の各時間変化は2層レベルモデルの場合それぞれつぎのような微分方程式で表すことができる。

有機態リン

上層(第1層)

$$\frac{\partial OP_1 \cdot D_1}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} (OP_1 \cdot u_1 D_1) - \frac{\partial}{\partial y} (OP_1 \cdot v_1 \cdot D_1)$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{\partial}{\partial x} \left(KD_1 \frac{\partial OP_1}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(KD_1 \frac{\partial OP_1}{\partial y} \right) \\
 & - K_2(OP_1 - OP_2) + G \cdot OP_1 \cdot D_1 \\
 & - B_1^P \cdot OP_1 - S_1^P \cdot OP_1 + w \cdot OP^* \quad (2.1)
 \end{aligned}$$

下層 (第2層)

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial OP_2 \cdot D_2}{\partial t} = & - \frac{\partial}{\partial x} (OP_2 \cdot u_2 \cdot D_2) - \frac{\partial}{\partial y} (OP_2 \cdot v_2 \cdot D_2) \\
 & + \frac{\partial}{\partial x} \left(KD_2 \frac{\partial OP_2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(KD_2 \frac{\partial OP_2}{\partial y} \right) \\
 & + K_2(OP_1 - OP_2) - B_2^P \cdot OP_2 \cdot D_2 \\
 & - S_2^P \cdot OP_2 + S_1^P \cdot OP_1 - w \cdot OP^* \quad (2.2)
 \end{aligned}$$

無機態リン

上層 (第1層)

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial (IP_1 \cdot D_1)}{\partial t} = & - \frac{\partial}{\partial x} (IP_1 \cdot u_1 \cdot D_1) - \frac{\partial}{\partial y} (IP_1 \cdot v_1 \cdot D_1) \\
 & + \frac{\partial}{\partial x} \left(KD_1 \frac{\partial IP_1}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(KD_1 \frac{\partial IP_1}{\partial y} \right) \\
 & - K_2(IP_1 - IP_2) - G \cdot OP_1 \cdot D_1 \\
 & + B_1^P \cdot OP_1 \cdot D_1 + w \cdot IP^* + L_{IP} \quad (2.3)
 \end{aligned}$$

下層 (第2層)

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial IP_2 \cdot D_2}{\partial t} = & - \frac{\partial}{\partial x} (IP_2 \cdot u_2 \cdot D_2) - \frac{\partial}{\partial y} (IP_2 \cdot v_2 \cdot D_2) \\
 & + \frac{\partial}{\partial x} \left(KD_2 \frac{\partial IP_2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(KD_2 \frac{\partial IP_2}{\partial y} \right) \\
 & + K_2(IP_1 - IP_2) - B_2^P \cdot OP_2 \cdot D_2 \\
 & + W_{IP} \cdot C_b SS \cdot D_2 - w \cdot IP^* + R_{IP} \cdot C_b \quad (2.4)
 \end{aligned}$$

COD

上層 (第1層)

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial COD_1 \cdot D_1}{\partial t} = & - \frac{\partial}{\partial x} (COD_1 \cdot u_1 \cdot C_1) - \frac{\partial}{\partial y} (COD_1 \cdot v_1 \cdot D_1) \\
 & + \frac{\partial}{\partial x} \left(KD_1 \frac{\partial COD_1}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(KD_1 \frac{\partial COD_1}{\partial y} \right) \\
 & - K_2(COD_1 - COD_2) + \beta \cdot G \cdot OP_1 \cdot D_1 \\
 & - B_1^C \cdot COD_1 \cdot D_1 - S_1^C \cdot COD_1 \\
 & + w \cdot COD^* + L_{COD} \quad (2.5)
 \end{aligned}$$

下層 (第2層)

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial COD_2 \cdot D_2}{\partial t} = & - \frac{\partial}{\partial x} (COD_2 \cdot u_2 \cdot D_2) - \frac{\partial}{\partial y} (COD_2 \cdot v_2 \cdot D_2) \\
 & + \frac{\partial}{\partial x} \left(KD_2 \frac{\partial COD_2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(KD_2 \frac{\partial COD_2}{\partial y} \right)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + K_2(COD_1 - COD_2) - B_2^C \cdot COD_2 \cdot D_2 \\
 & - S_2^C \cdot COD_2 + S_1^C \cdot COD_1 + R_{COD} \cdot M_{COD} \\
 & - w \cdot COD^* \quad (2.6)
 \end{aligned}$$

溶存酸素

上層 (第1層)

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial DO_1 \cdot D_1}{\partial t} = & - \frac{\partial}{\partial x} (DO_1 \cdot u_1 \cdot D_1) - \frac{\partial}{\partial y} (DO_1 \cdot v_1 \cdot D_1) \\
 & + \frac{\partial}{\partial x} \left(KD_1 \frac{\partial DO_1}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(KD_1 \frac{\partial DO_1}{\partial y} \right) \\
 & - K_2(DO_1 - DO_2) + \gamma \cdot G \cdot OP_1 \cdot D_1 \\
 & - B_1^O \cdot COD \cdot D_1 + A(\text{HOWA} \\
 & - DO_1) \cdot D_1 + w \cdot DO^* \quad (2.7)
 \end{aligned}$$

下層 (第2層)

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial DO_2 \cdot D_2}{\partial t} = & - \frac{\partial}{\partial x} (DO_2 \cdot u_2 \cdot D_2) - \frac{\partial}{\partial y} (DO_2 \cdot v_2 \cdot D_2) \\
 & + \frac{\partial}{\partial x} \left(KD_2 \frac{\partial DO_2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(KD_2 \frac{\partial DO_2}{\partial y} \right) \\
 & + K_2(DO_1 - DO_2) - B_2^O \cdot COD_2 \cdot D_2 \\
 & - DB - W_{DO} \cdot M_{COD} \cdot SS \cdot D_2 - w \cdot DO^* \quad (2.8)
 \end{aligned}$$

ここに, t : 時間, (x, y) : 直交直線座標系の水平2軸, (u_i, v_i) : 第 i 層の x および y 方向の流速成分 ($i=1, 2$), w : 第1, 第2層間の鉛直流速, D_i : 第 i 層の層厚, OP_i : 第 i 層の有機態リン (O-P) 濃度, IP_i : 第 i 層の無機態リン (I-P) 濃度, COD_i : 第 i 層の COD 濃度, DO_i : 第 i 層の溶存酸素濃度, K : 水平拡散係数, K_2 : 鉛直混合係数, G : 生産速度 ($G = G_0 \times IP / (0.027 + IP)$), B_i^P : 第 i 層の O-P 分解速度, B_i^C : 第 i 層の COD 分解速度, B_i^O : 第 i 層の分解による酸素消費速度, S_i^P : 第 i 層の O-P の沈降速度, S_i^C : 第 i 層の COD の沈降速度, R_{IP} : リンの溶出速度, R_{COD} : COD の溶出速度, L_{IP} : リンの流入負荷量, L_{COD} : COD の流入負荷量, A : 再びつ気係数, HOWA : 酸素飽和濃度, DB : 底泥の酸素消費速度, β : COD 換算係数, γ : DO 換算係数, W_{IP} : 舞い上りによる I-P 溶出速度, W_{DO} : 舞い上りによる酸素消費速度, C_b : 底泥の T-P 濃度, M_{COD} : 底質の COD 濃度, である。さらに,

$w > 0$ のとき

$$OP^* = OP_2, IP^* = IP_2, COD^* = COD_2, DO^* = DO_2$$

$w < 0$ のとき

$$OP^* = OP_1, IP^* = IP_1, COD^* = COD_1, DO^* = DO_1$$

である。

以上, 式 (2.1)~(2.8) を陽形式で差分化して, OP_i ,

IP_i, COP_i および DO_i (i=1, 2) を時間ステップごとに求めてゆく。

2層レーヤモデルでは式(2.1)~(2.8)においてwを含む項が脱落した式となる。

また3層モデルは上述2層モデルの上層と下層との間に中間層が入ったもので、この基本式は本文末尾の付録1.に示す。

2.3 流れのモデル

一般の海域にみられるように海水の流れが卓越するところでは、海水中の物質は流れによる移流と拡散に強く影響される。したがって2.2で述べた物質の循環を計算する前に海水の流れを決定しておかなければならない。

多層流れのモデルとしてレベルモデルとレーヤモデルとがある。これらの特徴を対比すると表-2.2のようになり、レベルモデルでは鉛直流が物質の鉛直循環に主として作用するのに対し、レーヤモデルでは内部境界面を通じて混合する点異なる。両モデルの特徴から、レベルモデルは混合期の流れに、またレーヤモデルは成層期の流れに適すると思われるが、本研究では両者のモデルについて検討することとした。

多層モデルによる流れの計算例を身近なものについて列挙すると表-2.3のようである。各モデルの特徴と適用例については同表に示すとおりであるが、本研究では同表の⑥および①のモデルをそれぞれレベル、レーヤのモデルとしてとりあげることにした。

まず2層レベルモデルに対しては、連続の式より導かれる次の2式:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u_1 D_1 + u_2 D_2) + \frac{\partial}{\partial y}(v_1 D_1 + v_2 D_2) = 0 \tag{2.9}$$

$$w + \frac{\partial u_2 D_2}{\partial x} + \frac{\partial v_2 D_2}{\partial y} = 0 \tag{2.10}$$

上, 下層の x, y 方向の運動方程式:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} + v_1 \frac{\partial u_1}{\partial y} + w \cdot \frac{\rho_{3/2}(u_1 - u_2)}{2 \rho_1 D_1} \\ = f v_1 - \frac{1}{\rho_1} \frac{\partial p}{\partial x} + A_x \frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2} + A_y \frac{\partial^2 u_1}{\partial y^2} \\ - \gamma_i^2 (u_1 - u_2) \sqrt{(u_1 - u_2)^2 + (v_1 - v_2)^2} / D_1 \end{aligned} \tag{2.11}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial v_1}{\partial x} + v_1 \frac{\partial v_1}{\partial y} + w \cdot \frac{\rho_{3/2}(v_1 - v_2)}{2 \rho_1 D_1} \\ = -f u_1 - \frac{1}{\rho_1} \frac{\partial p}{\partial y} + A_x \frac{\partial^2 v_1}{\partial x^2} + A_y \frac{\partial^2 v_1}{\partial y^2} \\ - \gamma_i^2 (v_1 - v_2) \sqrt{(u_1 - u_2)^2 + (v_1 - v_2)^2} / D_1 \end{aligned} \tag{2.12}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_2}{\partial t} + u_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} + v_2 \frac{\partial u_2}{\partial y} + w \cdot \frac{\rho_{3/2}(u_2 - u_1)}{2 \rho_2 D_2} \\ = f v_2 - \frac{1}{\rho_2} \frac{\partial p}{\partial x} + A_x \frac{\partial^2 u_2}{\partial x^2} + A_y \frac{\partial^2 u_2}{\partial y^2} \\ + \gamma_i^2 (u_1 - u_2) \sqrt{(u_1 - u_2)^2 + (v_1 - v_2)^2} / D_2 \\ - \gamma_b^2 u_2 \sqrt{u_2^2 + v_2^2} / D_2 \end{aligned} \tag{2.13}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_2}{\partial t} + u_2 \frac{\partial v_2}{\partial x} + v_2 \frac{\partial v_2}{\partial y} + w \cdot \frac{\rho_{3/2}(v_2 - v_1)}{2 \rho_2 D_2} \\ = -f u_2 - \frac{1}{\rho_2} \frac{\partial p}{\partial y} + A_x \frac{\partial^2 v_2}{\partial x^2} + A_y \frac{\partial^2 v_2}{\partial y^2} \\ + \gamma_i^2 (v_1 - v_2) \sqrt{(u_1 - u_2)^2 + (v_1 - v_2)^2} / D_2 \\ - \gamma_b^2 v_2 \sqrt{u_2^2 + v_2^2} / D_2 \end{aligned} \tag{2.14}$$

および海水密度の拡散式:

$$\frac{\partial \rho_1 D_1}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x}(u_1 \cdot D_1 \cdot \rho_1) - \frac{\partial}{\partial y}(v_1 \cdot D_1 \cdot \rho_1) - w \cdot \rho^*$$

表-2.2 レベルモデルとレーヤモデル

	レベルモデル	レーヤモデル
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ○内部境界面はない。 ○鉛直流が計算される。 ○層間の物質移動は鉛直流による移流と拡散により決まる。 	<ul style="list-style-type: none"> ○内部境界面は自由に変化する。 ○鉛直流は計算されない。 ○内部境界面における物質の移動は層間の混合係数により決まる。
長所または短所	<ul style="list-style-type: none"> ○層間の物質移動は鉛直流による移流で規定されるところが大きい。 ○水分、塩分等の変化をとり入れた計算が可能である。 ○計算は比較的安定である。 	<ul style="list-style-type: none"> ○内部境界面を境にして生産層、非生産層に対応させることができる。 ○混合係数によって層間の物質移動が制御できる。 ○成層時の流れ等の計算には適するが細かい季節変化までは扱い難い。 ○水深や地形の変化が大きいところでは内部境界面が不安定となり計算の続行が不能になることがある。
適用	混合期の流れ	成層期の流れ

海域における物質循環数値モデルの水質支配要因について

$$+ \frac{\partial}{\partial x} \left(KD_1 \frac{\partial \rho_1}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(KD_2 \frac{\partial \rho_1}{\partial y} \right) - K_z \frac{\partial \rho}{\partial z} \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial \rho_2 D_2}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} (u_2 \cdot D_2 \cdot \rho_2) - \frac{\partial}{\partial y} (v_2 \cdot D_2 \cdot \rho_2) + w \cdot \rho^* + \frac{\partial}{\partial x} \left(KD_2 \frac{\partial \rho_2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(KD_2 \frac{\partial \rho_2}{\partial y} \right) + K_z \frac{\partial \rho}{\partial z} \quad (2.16)$$

の計 8 式を用いてこれらを陰形式 (ADI 法) にて差分化し、流速 $u_i, v_i (i=1, 2)$, w および水位 ζ を順次タイムステップごとに計算する。

ここに、 t : 時間、 (x, y, z) : 平均海面上の一点を原点として水平 2 軸 (x, y) および鉛直上方に z 軸をとった直交直線座標、 (u_i, v_i) : 第 i 層の x および y 方向の流速成分 ($i=1, 2$), w : 第 1, 2 層間の鉛直流速, D_i : 第 i 層の層厚, ζ : 平均海面からの水面の高さ, ρ_i : 第 i 層の海水密度, $\rho_{3/2}$: 第 1, 2 層の境界面の海水密度,

表-2.3 流れのシミュレーションモデル例

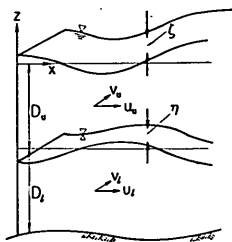
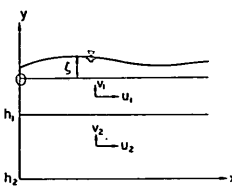
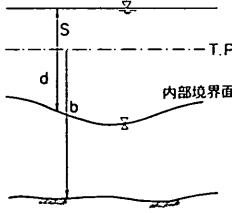
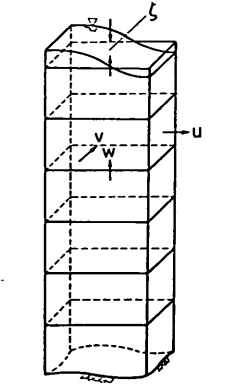
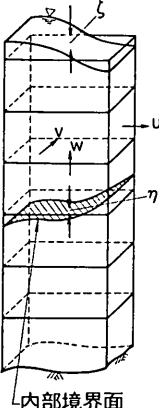
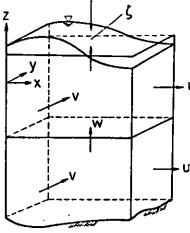
モデル		特 徴	適用例
① 2 層レイヤーモデル		<ul style="list-style-type: none"> ○ 上下層の水平流速成分、海面、内部境界面の高さの計算 ○ 鉛直流成分は計算されない。 ○ 層モデルの内では比較的簡単 ○ 水深、地形の急変するところで計算不安定になりやすい。 ○ 上下層の密度差を固定 ($\Delta\rho = \text{一定}$) 	東京湾 ¹¹⁾
② 温度密度流モデル		<ul style="list-style-type: none"> ○ 鉛直 2 次元 ○ 下層密度を固定 	洞海湾 ¹²⁾
③ 2 層潮流モデル		<ul style="list-style-type: none"> ○ 密度変化を考慮する (塩分による変化) ○ 層間の連行を考慮する。 ○ 上下各層の水平 2 成分流速と海面、内部境界面の高さを計算する。 	東京湾 ¹³⁾
④ 3 次元モデル		<ul style="list-style-type: none"> ○ 多層位 (6 ~ 10 層) ○ 各層の水平 2 成分および鉛直成分の流速水面の高さを計算する。 ○ 密度変化は考慮しない ($\zeta = \text{一定}$) ○ 比較的局所的な流れに適する。 ○ 格子間隔が可変である。 	東京湾 ¹⁴⁾ 大阪湾 ^{15), 16)} の一部海域

表-2.3 つづき

モデル		特徴	適用例
⑤ 3次元成層モデル		<ul style="list-style-type: none"> ○④と①の混成モデル ○上下層間では連行を考慮 ○上下層間の密度差固定 	仮想海域 ^{17), 18)}
⑥ 2層レベルモデル		<ul style="list-style-type: none"> ○上下各層の水平2成分および鉛直成分の流速ならびに水面の高さを計算 ○塩分による密度変化を考慮(水温は一定分布を与えて固定) ($\rho = \rho(S)$, S: 塩分) ○ADI法 	東京湾 ¹⁴⁾
⑦ 海況モデル	⑥に同じ	<ul style="list-style-type: none"> ○上下各層の水平2成分および鉛直成分の流速ならびに水面高さの計算 ○密度変化は塩分と水温とで決まる浮力の拡散で考慮する ($B = g(\rho_0 - \rho) / \rho_0$, $\rho = \alpha T + \beta S + \rho_0$) ○恒流等の長周期流れの計算 ○SOR法 	大阪湾 ¹⁹⁾ 瀬戸内海
⑧ 3次元密度流モデル	④に同じ	<ul style="list-style-type: none"> ○各層の水平2成分および鉛直成分の流速ならびに水面高さの計算 ○密度変化は水温および塩分のそれぞれの拡散より計算する ($\rho = \rho(S, T)$) ○陽解法 	チェサピーク湾 ²⁰⁾ サンフランシスコ湾 他 ²¹⁾

f : コリオリ係数, p : 圧力, (A_x, A_y) : x および y 方向の水平渦動粘性係数, γ_i^2 : 層間摩擦係数, γ_b^2 : 海底摩擦係数, である。さらに,

$$\begin{aligned} w \geq 0 \text{ のとき } \rho^* &= \rho_2 \\ w < 0 \text{ のとき } \rho^* &= \rho_1 \end{aligned}$$

である。

一方, 2層レヤモデルに対しては, 全層および下層の連続の式:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u_1 D_1 + v_1 D) + \frac{\partial}{\partial y}(u_2 D_2 + v_2 D_2) = 0 \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u_2 D_2) + \frac{\partial}{\partial y}(v_2 D_2) = 0 \quad (2.18)$$

および上, 下層の x, y 方向の運動方程式:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} + v_1 \frac{\partial u_1}{\partial y} \\ = f u_1 - g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + A_x \frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2} + A_y \frac{\partial^2 u_1}{\partial y^2} \\ - \gamma_i^2 (u_1 - u_2) \sqrt{(u_1 - u_2)^2 + (v_1 - v_2)^2} / D_1 \end{aligned} \quad (2.19)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial v_1}{\partial x} + v_1 \frac{\partial v_1}{\partial y} \\ = -f u_1 - g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + A_x \frac{\partial^2 v_1}{\partial x^2} + A_y \frac{\partial^2 v_1}{\partial y^2} \\ - \gamma_i^2 (v_1 - v_2) \sqrt{(u_1 - u_2)^2 + (v_1 - v_2)^2} / D_1 \end{aligned} \quad (2.20)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_2}{\partial t} + u_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} + v_2 \frac{\partial u_2}{\partial y} \\ = f v_2 - g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{\Delta \rho}{\rho_2} g \frac{\partial \eta}{\partial x} + A_x \frac{\partial^2 u_2}{\partial x^2} + A_y \frac{\partial^2 u_2}{\partial y^2} \\ + \gamma_i^2 (u_1 - u_2) \sqrt{(u_1 - u_2)^2 + (v_1 - v_2)^2} / D_2 \\ - \gamma_b^2 u_2 \sqrt{u_2^2 + v_2^2} / D_2 \end{aligned} \quad (2.21)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_2}{\partial t} + u_2 \frac{\partial v_2}{\partial x} + v_2 \frac{\partial v_2}{\partial y} \\ = -f u_2 - g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{\Delta \rho}{\rho_2} g \frac{\partial \eta}{\partial y} \\ + A_x \frac{\partial^2 v_2}{\partial x^2} + A_y \frac{\partial^2 v_2}{\partial y^2} \\ + \gamma_i^2 (v_1 - v_2) \sqrt{(u_1 - u_2)^2 + (v_1 - v_2)^2} / D_2 \\ - \gamma_b^2 v_2 \sqrt{u_2^2 + v_2^2} / D_2 \end{aligned} \quad (2.22)$$

を基本式とし, 2層レベルモデルと同様に陰形式 (ADI法) に差分化して上下層の水平流速成分 (u_i, v_j) ($i=1, 2$), 水面の高さ ζ , および内部境界面の高さ η を時間ステップごとに求める。

ここに,

$$\Delta \rho: \text{上, 下層間の海水密度差 } (= \rho_2 - \rho_1)$$

である。

なお, 3層モデルについては付録2. にて述べる。

3. 物質循環モデルに必要なデータと諸定数

3.1 流れのデータ

海域の流れは, 潮汐, 密度差, 風, 地形その他の作用を受けて複雑な挙動をするが, 特に夏場の一般的な水質分布を対象にするとということから, 潮汐の M_2 分潮成分による境界からの潮汐振幅, 夏場の平均的な水温分布と河川水の塩分希釈による密度分布に基づく流れを取扱うこととした。

対象海域には 図-3.1 に示す大阪湾と一部周辺海域を含む領域を選定し, 2. で述べた2層レベルおよび同レヤモデルで流れの計算を行った。同計算に用いた主な

(m ³ /sec)					
番号	流量	番号	流量	番号	流量
1	3.15	8	9.25	15	2.21
2	0.51	9	17.62	16	1.33
3	3.15	10	497.56	17	4.10
4	0.83	11	129.93	18	0.52
5	3.36	12	5.70	19	8.00
6	0.03	13	4.25	20	0.64
7	1.05	14	0.62		

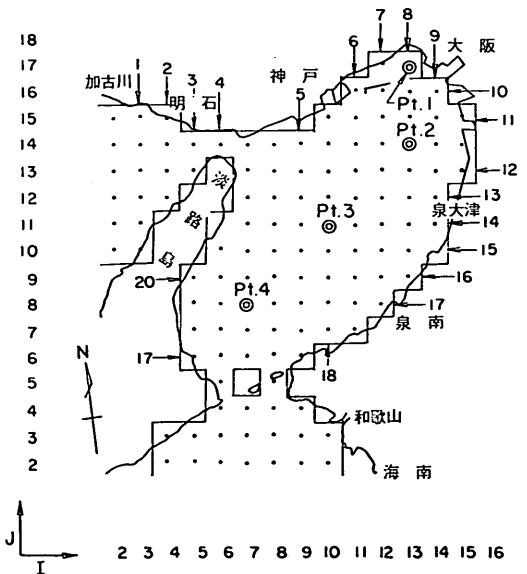


図-3.1 計算対象領域および流入流量

表-3.1 流れの計算における諸定数

	2レベルモデル	2レヤーモデル
水深	図-3.2 参照	
格子間隔	4 km	
上層厚	10m	
境界条件	図-3.3 参照	
内部摩擦係数 (γ_i^2)	0.0013	
海底摩擦係数 (γ_b^2)	0.0026	
水平渦動粘性係数(A_x, A_y)	$5 \times 10^5 \text{cm}^2/\text{秒}$	
上下層密度差 ($\Delta\rho$)		0.005g/cm ³
河川流入量	図-3.1 参照	
タイムステップ	360秒	
計算時間	8 潮汐	4 潮汐
流入水温・塩分	27°C, 0 ‰	
初期密度 (σ_t)	上層20.8g/cm ³ , 下層22.2g/cm ³	

諸元は 表-3.1 に示すとおりである。

このような条件により得られた流れの水平流成分を明石海峡東流最強時付近、同海峡西流最強時付近について示したものが図-3.4および図-3.5である。これらの図において上段はレベルモデルによる結果を、また下段はレヤーモデルによる結果をそれぞれ示している。さらに同図において左側は上層、右側は下層の結果をそれぞれ示している。

水平流成分については流れの比較的大きい両海峡部および淡路島寄りではレベル、レヤーの両モデルによる結果はほぼ同様の傾向である。流れの比較的小さい湾奥部下層においては、明石海峡東流時付近でレベルモデルに

よる流れは明石海峡より流入後東流成分がやや強く、湾奥部で反時計回りの流れがレヤーモデルによる結果よりも強調されている。

移流による物質の平面分布に影響が大きいと考えられる潮汐1周期間の水平流の平均流れ、すなわち残差流について両モデルによる結果を比較したものが図-3.6で

点	振幅 (cm)	位相(度)
A	43.0	0
B	43.0	0
C	28.7	152.1
D	22.0	65

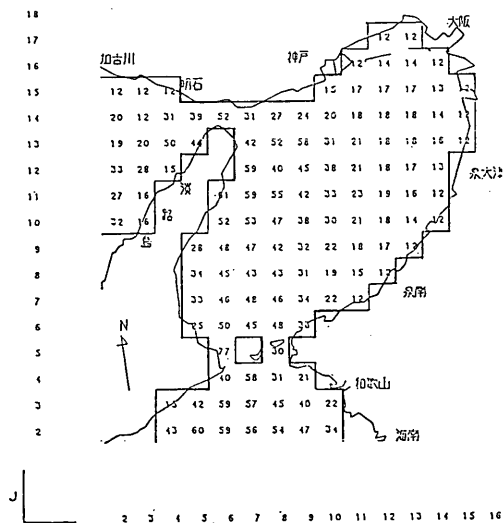


図-3.2 水深 (単位: m)

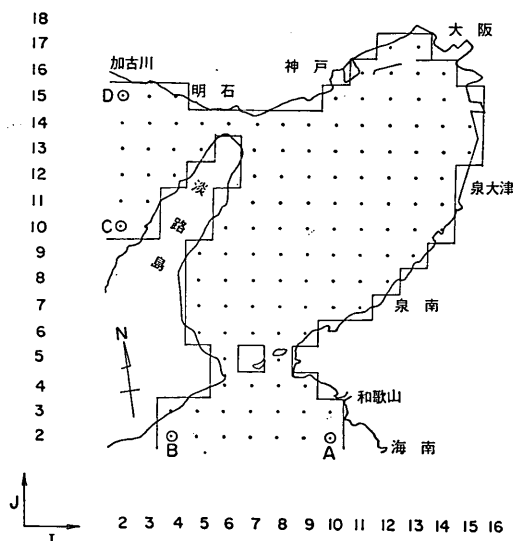
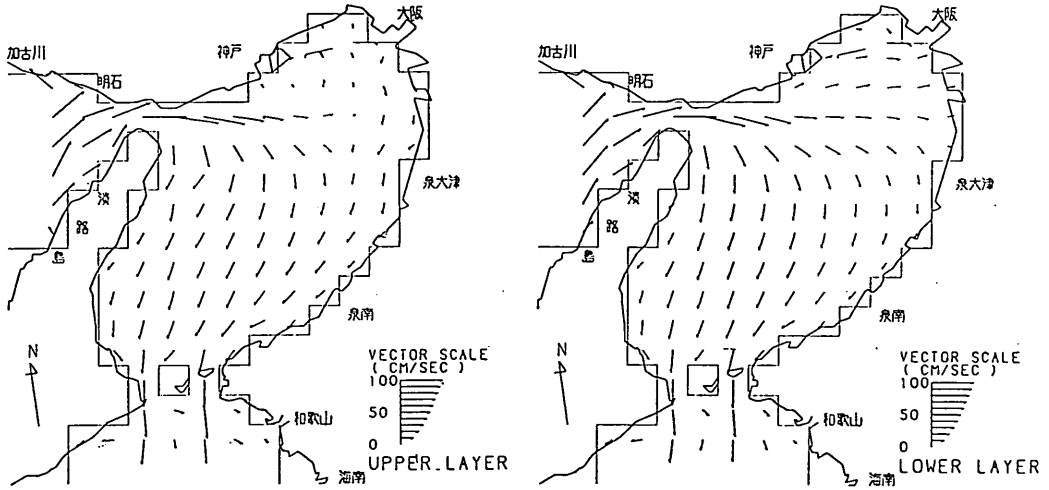


図-3.3 境界条件

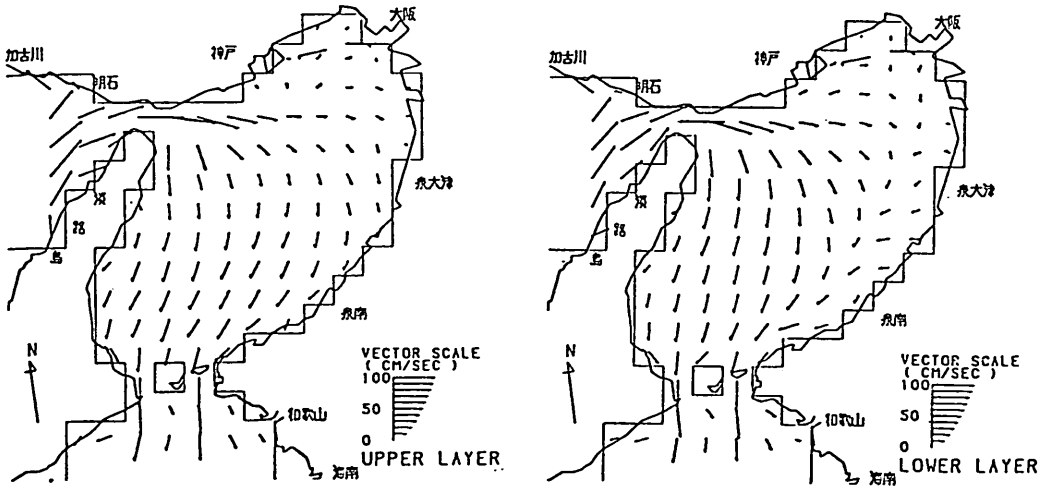
海域における物質循環数値モデルの水質支配要因について

ある。残差流についても同様の傾向がみられ、流れの大きい領域では両モデルによる結果に大差ないが、湾奥部では密度流の影響でレベルモデルによる結果のほうが大きくなっている。

一方、以上の数値シミュレーションによる流れの結果を実測値の潮流槽円²¹⁾と代表点について比較したものが図-3.7である。同図において実線はレベルモデルによるシミュレーション結果の、破線は実測により得られた



(1) レベルモデル



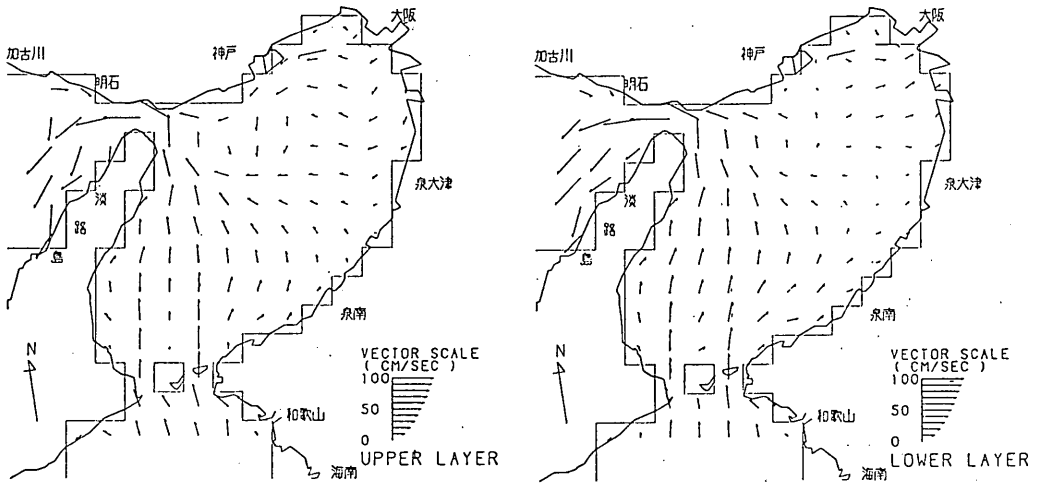
(2) レヤーモデル

図-3.4 明石海峡東流最強時(計算値)

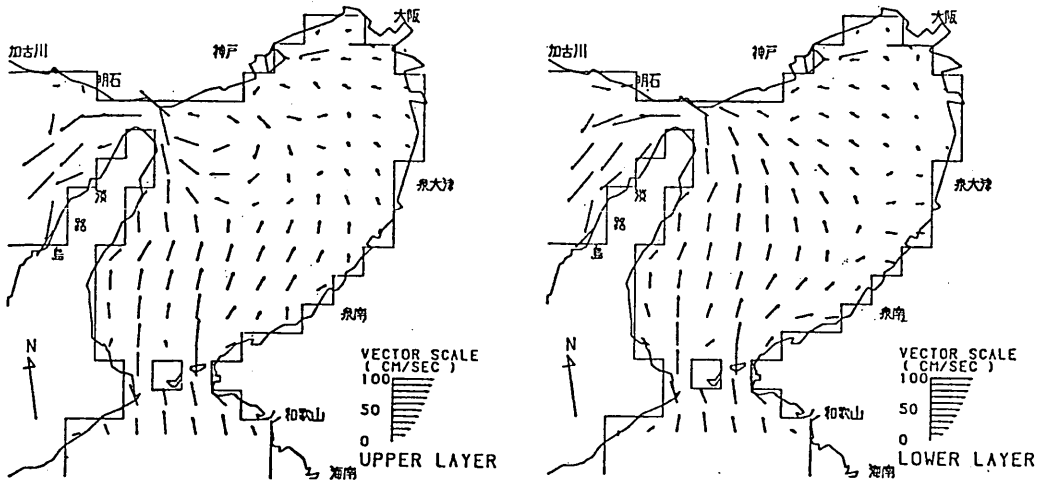
時間周期の潮流楕円である。これらの結果によると、測点 No. S-1 と S-2 で計算値は実測値の 0.6~0.7 倍と過小になっているが、その他の測点では長軸方向とその大きさからみてほぼ満足できる流れが再現できていると

いえよう。

なお、図-3.8 はレベルモデルによる代表点の鉛直流の経時変化を、また 図-3.9 および 図-3.10 は、レベルモデルによる鉛直流を明石海峡西流最強時付近、同海峡



(1) レベルモデル



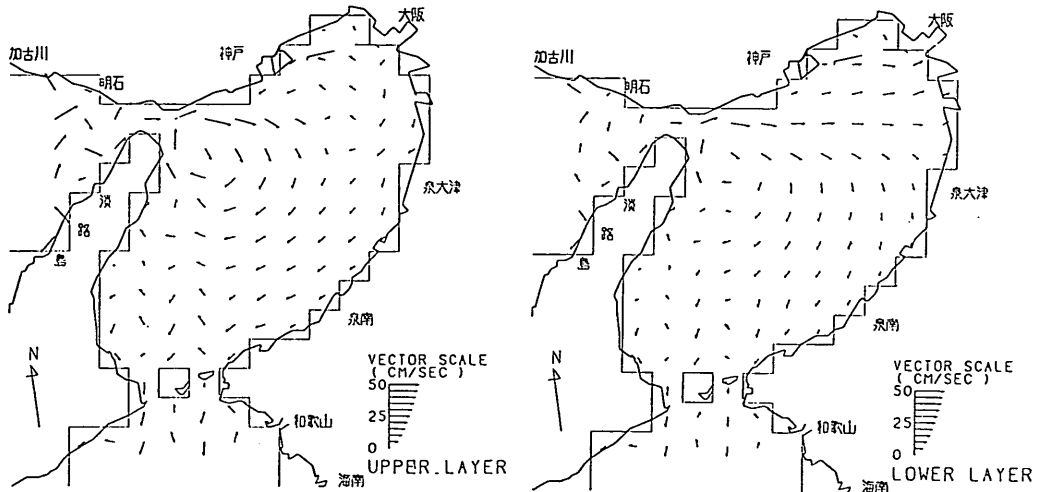
(2) レヤーモデル

図-3.5 明石海峡西流最強時 (計算値)

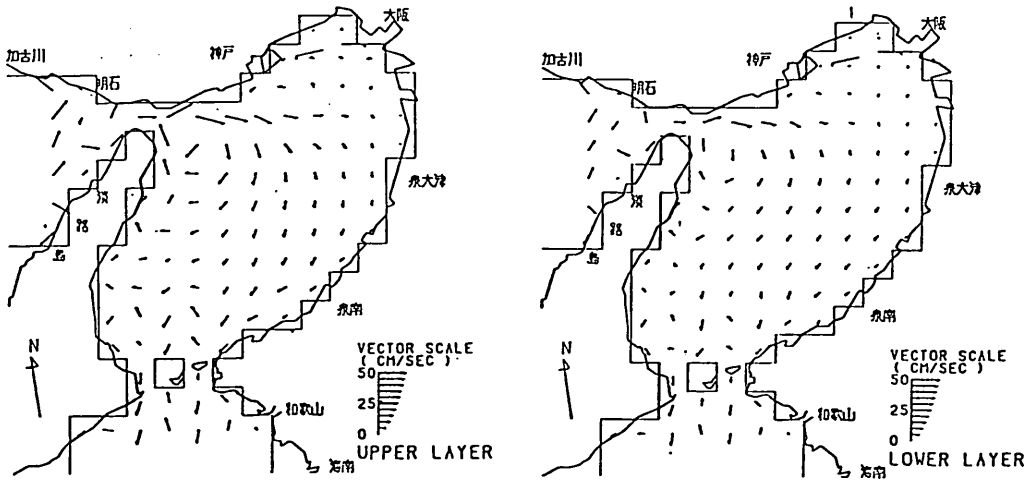
海域における物質循環数値モデルの水質支配要因について

東流最強時付近および1潮汐平均流（すなわち残差流）をそれぞれ示したものである。これらの図において数字は1/1000 cm/s 単位の流速を表し，正符号は鉛直上向き，負符号は同下向きであることを示している。海峡部

周辺の流れの大きい領域で鉛直流も大きくなる傾向を示し，0.1 cm/s 程度の鉛直流も周期的に発生している。また鉛直流の残差流においても0.02 cm/s 程度の下降流や上昇流が部分的にみられる。この鉛直流の大きさは1



(1) レベルモデル



(2) レヤーモデル

図-3.6 残差流（計算値）

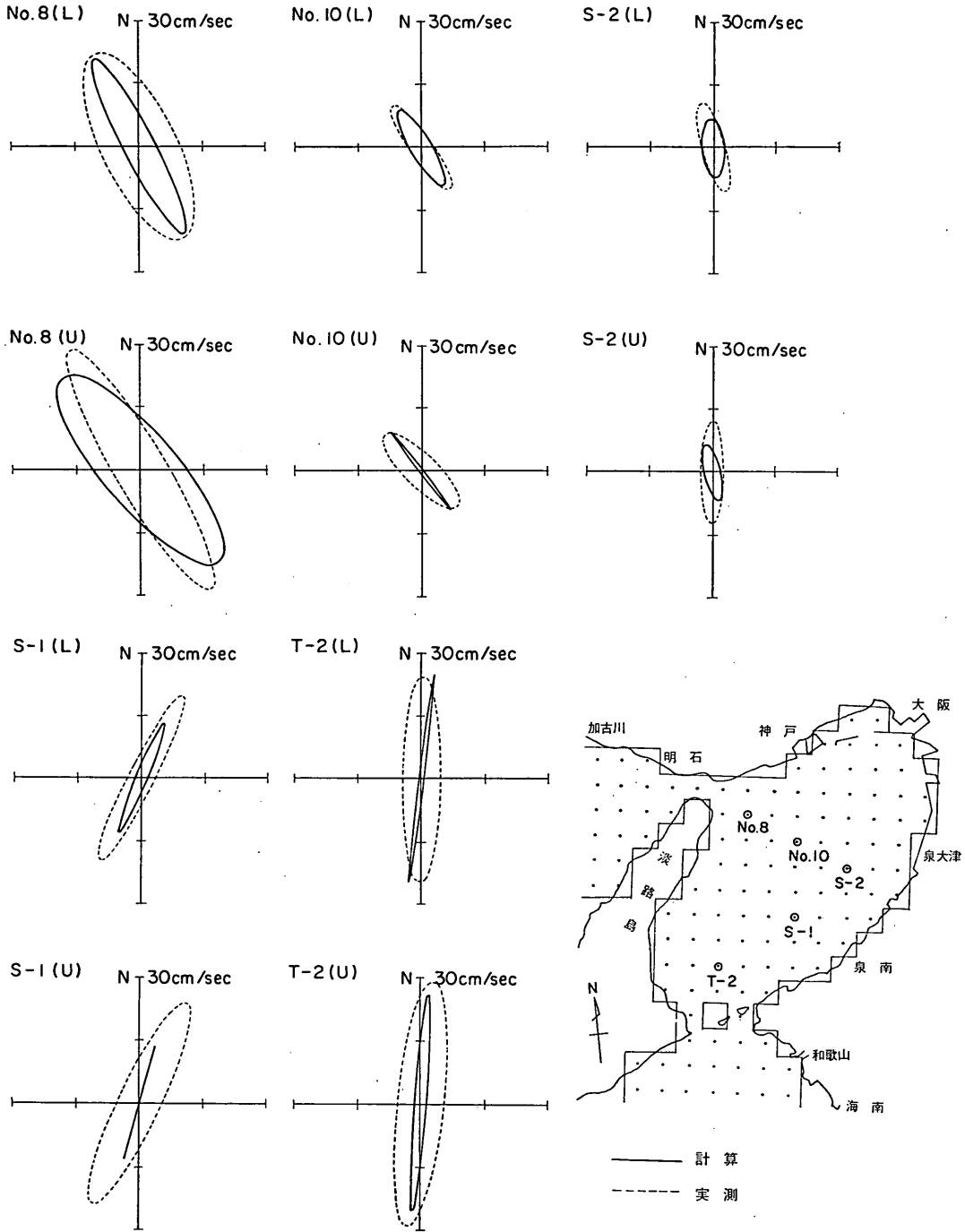


図-3.7 潮流楕円による実測値との対比

海域における物質循環数値モデルの水質支配要因について

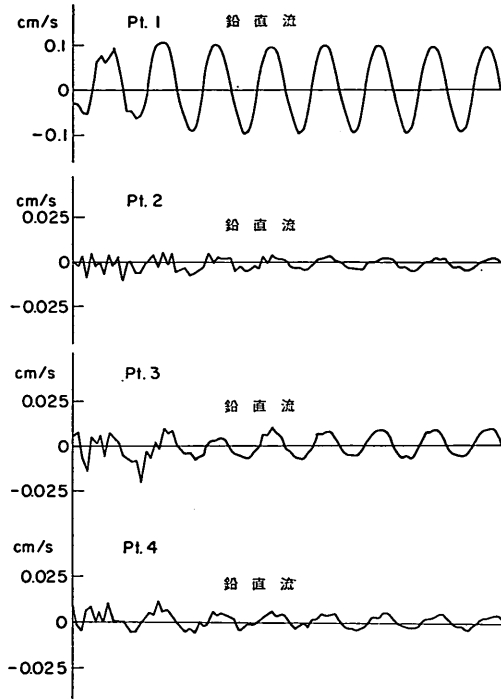
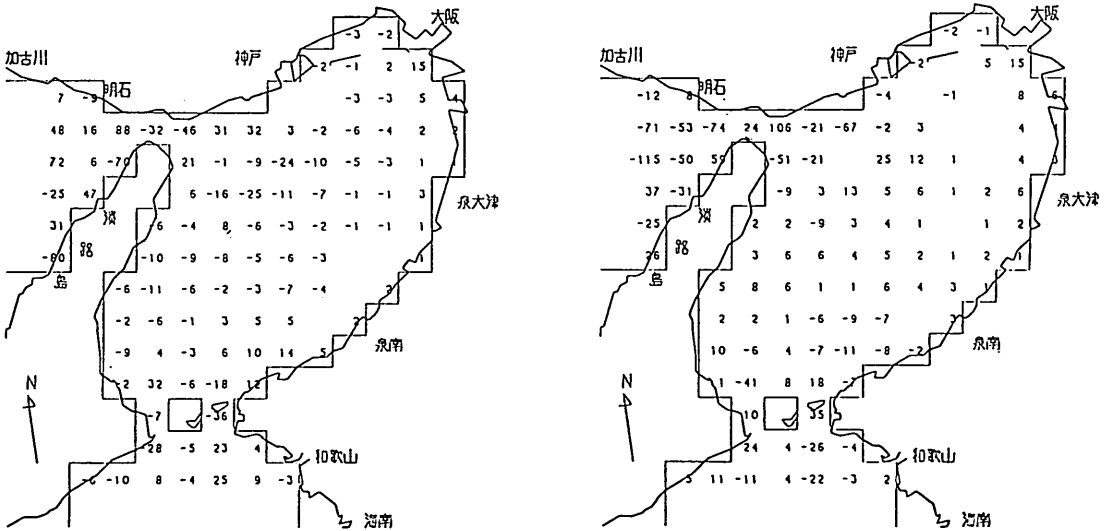


図-3.8 レベルモデルによる鉛直流経時変化



(1) 明石海峡西流最強時

(2) 明石海峡東流最強時

図3.9 鉛直流 (単位: 1/1000 cm/s)

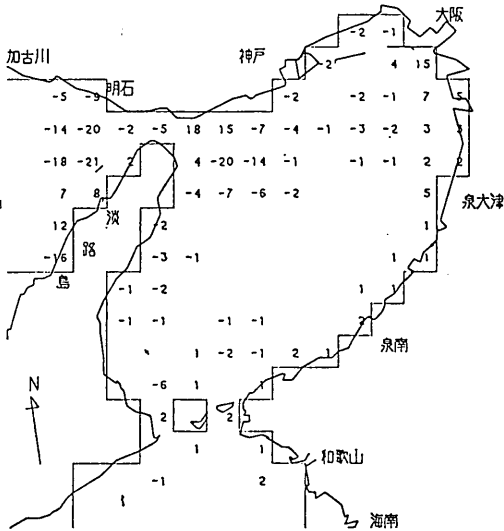


図-3.10 鉛直残差流 (単位: 1/1000 cm/s)

日で約 17m 上昇または下降することを意味し、物質循環からみて鉛直移動に大きな意味をもつものと考えられる。

以上、2 レベルモデルおよび2 レヤーモデルにより得られた流れの安定した1 潮汐分を以後の物質循環モデルの流れのデータとして繰返し用いる。

3.2 物質循環に係わるデータ

2.2 で述べた物質循環モデルに含まれる生産速度、分解速度、沈降速度、溶出速度およびその他のパラメータに対しては、実験値、実測値²²⁾、理論値またはそれらより得られた値を補正した 表-3.2 に示す値を基準値として採用することとした。

生産速度 (G) は、大阪湾海水を用いた AGP 試験により得られた関係式:

$$G = 0.463 \exp\{0.07(T-18)\} \frac{I}{2100+I} \times \frac{IP}{0.027+IP} \quad (3.1)$$

T: 水温 (°C), I: 照度 (Lux),
IP: 無機栄養塩濃度

表-3.2 物質循環の計算における諸定数

諸 元		採用した値	
物質消費諸係数	生産速度 (G)	(1/日)	$G = 0.513 \times C_b / (0.027 + C_b)$
	O-P分解速度 (B_1^p)	(1/日)	0.02
	COD分解速度 (B_2^c)	(1/日)	0.016
	DO消費速度 (B_2^d)	(1/日)	0.016
	O-P沈降速度 (S_1^p)	(m/日)	0.528
	COD沈降速度 (S_2^c)	(m/日)	0.650
	O-P分解速度 (B_2^p)	(1/日)	0.020
	COD分解速度 (B_2^c)	(1/日)	0.016
	DO消費速度 (B_2^d)	(1/日)	0.016
	O-P沈降速度 (S_2^p)	(m/日)	1.04
	COD沈降速度 (S_2^c)	(m/日)	0.65
	I-P溶出速度 (R_{IP})	(mg/m ² /日)	対象領域を4ブロックに分けて与える
	COD溶出速度 (R_{COD})	(mg/m ² /日)	"
	DO消費速度 (D_B)	(mg/m ² /日)	"
舞い上がりによるI-P溶出速度 (W_{IP})	(mg/g-ss, 日)	"	
諸係数	COD/O-P比 (β)		93
	DO/O-P比 (γ)		143
	再曝気係数 (A)	(1/日)	0.1
	拡散係数 (K)	(cm ² /s)	2.5×10^5
	鉛直混合係数 (K_z)	(cm/s)	レイヤー: 0.0013, レベル: 0.0
初期値	O-P	(ppm)	(H) 0.04 (F) 0.04
	I-P	(ppm)	0.0 0.0
	COD	(ppm)	1.4 1.0
	DO	(ppm)	8.0 6.62
湾口境界条件		表-4.1 参照	
タイムステップ		(秒)	1080
計算時間		(潮汐)	60

海域における物質循環数値モデルの水質支配要因について

に対し、昭和 52~53 年の浅海定線調査による大阪湾の 20 測定の平均値から、夏場の水温 (T) として 25.5°C、照度として 4030 Lux を代入して求めた。

O-P 分解速度 (B_1^P, B_2^P) は、大阪湾の上層水および下層水を恒温暗所に静置して O-P が OP₄-P に変化する速度から得られた関数型:

$$\left. \begin{aligned} B_1^P &= 0.006 \exp\{0.16(T_1 - 18)\} \\ B_2^P &= 0.010 \exp\{0.13(T_2 - 18)\} \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

に対し、 $T_1 = 25.5^\circ\text{C}$ 、 $T_2 = 23.5^\circ\text{C}$ を代入して求めた。

上層 COD の分解速度 (B_1^C) は、O-P の分解試験と同様の試験より得られた関係式:

$$B_1^C = 0.008 \exp\{0.09(T_1 - 18)\} \quad (3.3)$$

に対し、 $T_1 = 25.5^\circ\text{C}$ を代入して求めた。下層 COD の分解速度 (B_2^C) は上層の値と同一とした。

DO の消費速度 (B_1^O, B_2^O) は COD の分解速度と同一とした。

O-P および COD の沈降速度については、海水中にサンプラーを設置して捕集された堆積物量を水質で除す

ことにより測定された。両者ともばらつきは大きく、O-P 沈降速度 0.3~4.0m/日、COD 沈降速度 0.33~0.59m/日の範囲であったが、ボックスモデルによる試算から表-3.2 の値を基本ケースに用いた。

IP 溶出速度 (R_{IP}) については、水温 ($T(^{\circ}\text{C})$)、直上水 DO (DOM (ppm))、および底泥 T-P 濃度 (C_b (mg/kg)) の関係が実験よりつぎの形で得られている。

$$R_{IP} = 10 \times (1.09)^{T-25} / 510 \times C_b \quad (\text{DOM} > 5 \text{ ppm})$$

$$R_{IP} = (40 - 6 \times \text{DOM}) (1.09)^{T-25} / 510 \times C_b \quad (\text{DOM} \leq 5 \text{ ppm}) \quad (3.4)$$

本例では、大阪湾を 4 つのブロックに分け DOM, C_b , T を与えて I-P 溶出速度を求めた。

COD 溶出速度 (R_{COD}) についても、水温 ($T(^{\circ}\text{C})$) および底泥の COD 濃度 (M_{COD} (mg/g)) との関係を示した実験式:

$$R_{COD} = 48.6 (1.04)^{T-8} / 22.6 \times M_{COD} \quad (3.5)$$

に対し、同じく 4 つにブロック分けされた T および

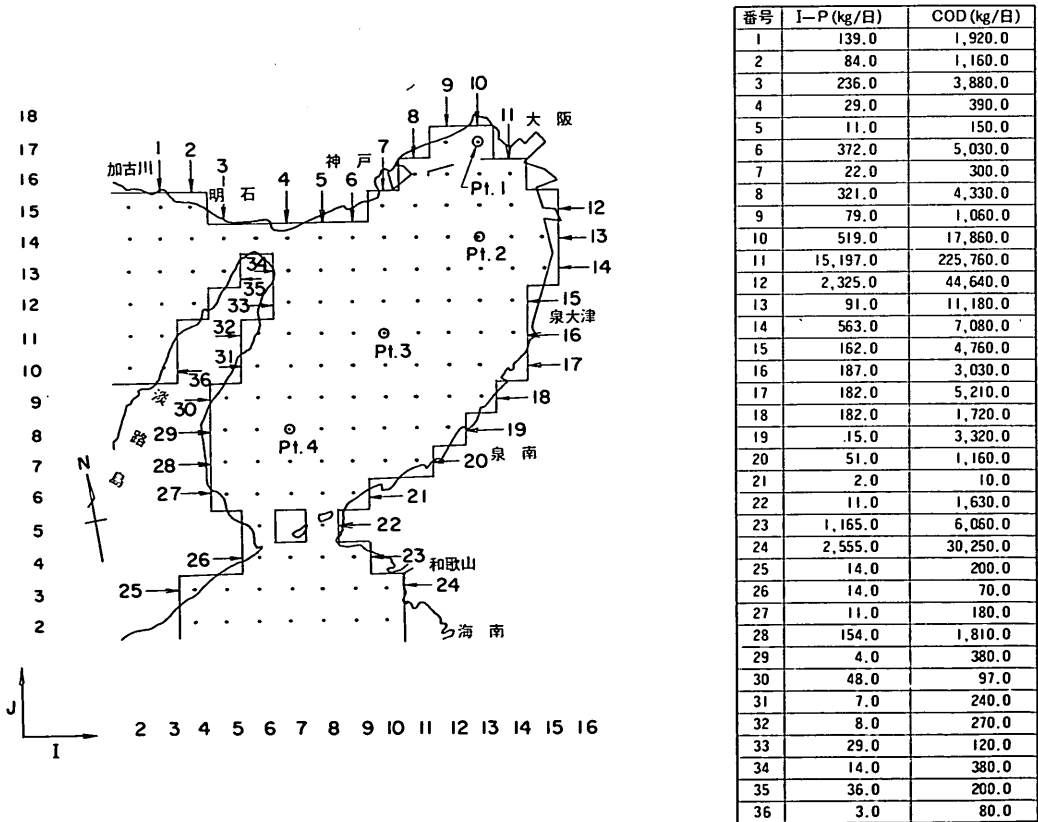


図-3.11 COD および I-P 流入負荷量

M_{COD} を与えて求めた。

底泥の DO 消費については、実験式：

$$DB = 480 \exp\{0.046(T-18)\} 22.6 \times M_{COD} \quad (3.6)$$

に対し、湾内を4ブロックに分けて与えた底泥 COD 濃度 (M_{COD}) より求めた。

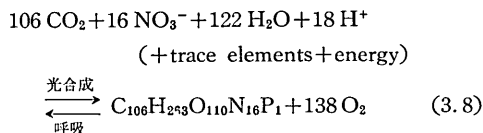
底泥の舞い上りに関し、舞い上り量 (SS (m/l)) は 0.02 を与えた、また舞い上りによる I-P 溶出速度 ($W_{IP}(\text{mg-P/g} \cdot \text{SS} \cdot \text{d})$) は実験式：

$$\left. \begin{aligned} W_{IP} \times C_b &= 0 & (\text{DOM} > 2) \\ W_{IP} \times C_b &= 0.12(1.09)^{T-18} / 520 \times C_b & (\text{DOM} \leq 2) \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

に対して、湾奥部のみ $\text{DOM} \leq 2$ ppm, $C_b = 569$ mg/kg, $T = 25.5^\circ\text{C}$ を与えて求めた。

COD/O-P 比 (β) については AGP 試験から求められた。

DO/O-P 比 (γ) については Stumm²³⁾ の式：



より $143 (= 138 \text{O}_2 / \text{P}_1)$ として与えた。

鉛直混合係数 (K_2) については他海域での試算例から $0.0013 (\text{cm}^2/\text{s})$ とした。これは鉛直拡散係数に換算すると水深 30m に対して約 $2 \text{cm}^2/\text{s}$ に相当する。レベルモデルでは、物質の鉛直移動は鉛直流の大きさに依存するため、鉛直混合係数は 0 とした。

COD 流入負荷および I-P 流入負荷については 図-3.11 に示す値を与えた。

その他計算の初期水質については実測結果または適宜値を設定して与えた。

4. 水質を支配する主な要因

4.1 解析的手段による検討

数値モデルの良否は、それによって計算される結果がいかによく実態を再現し得ているかということが重要な点となる。この場合、実態が精度よく把握されているということが前提であるが、海域の水質に関してはほとんどの海域において十分とはいえない現状である。これは海域の水質水理現象が複雑である上に、観測に多大の経費と長期の時間を要するためである。したがって、モデルの精度を高めるためには、一方では当該海域の観測試験を通じて水質水理特性の把握に最大の努力をする傍

ら、他方では構築された数値モデルに内在する各過程とパラメータの水質に対する感度を調べ、鋭敏なものについてさらに追究してゆくというのが当面の方法かと思われる。

このような趣旨から先に同じ大阪湾に対し、これを一つの水塊とみなして簡単な解析モデル³⁾を構築し、定常解析から分解、流入 I-P 濃度、鉛直拡散係数、交換率、沈降速度、生産速度、溶出速度等による生産層の有機リン濃度の感度を調べている。図-4.1 はその結果の一部を示したものである。図-4.1 により、流入無機態リン (L_{IP}) および溶出 (R) の増大による上層有機態リンの増大、交換率および沈降速度 (S) による上層有機態リンの減少が顕著に示されている。一方生産速度 (G_0) の増大による上層有機態リンの変化は小さいが、生産速度が $1/2$ 以下になると急激に減少する。分解速度 (B) および鉛直拡散係数 (K_2) の感度は本結果によると小さい。

このように簡単な解析的手法により物質循環モデルで計算される水質に対する感度の概要を容易に知ることができるが、この種の解析では、地形、流れの影響を無視しせざるを得ないため一般の海域については必ずしも十分な情報を提供しない。複雑な地形、流れのもとでの解析には上述のような解析的手法を適用することは不可能で、数値モデルによってはじめて可能となる。そこで

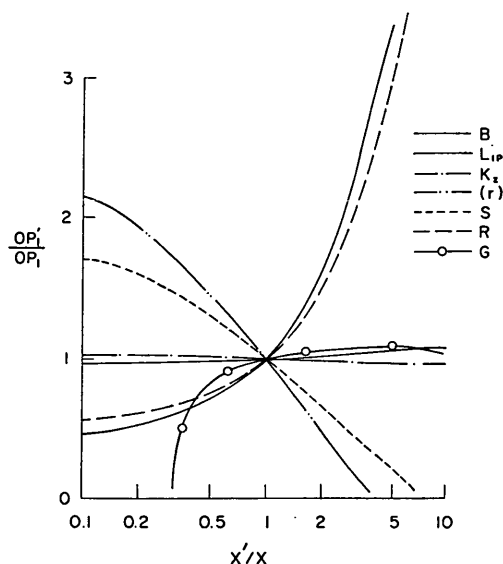


図-4.1 解析的手法による物質循環諸定数の感度³⁾

海域における物質循環数値モデルの水質支配要因について

表-4.1 計算ケース

ケース	モデル	層数	境界条件 (?)	鉛直混合 係数(K_z)	拡散係数 (K)	下層COD 沈降速度(S_2^c)	下層COD 分解速度(B_2^c)
1	レベル	2層	注1)	cm/s —	cm ² /s 2.5×10^6	S_2^c	B_2^c
2	レベル	2層	注1)	—	ブロック 分け	S_2^c	B_2^c
3	レベル	2層	注2)	—	2.5×10^6	S_2^c	B_2^c
4	レベル	2層	注3)	—	2.5×10^6	S_2^c	B_2^c
5	レベル	2層	注5)	—	2.5×10^6	S_2^c	B_2^c
6	レヤー	2層	注1)	0.0013	2.5×10^6	S_2^c	B_2^c
7	レベル	2層	注2)	0.0013	2.5×10^6	S_2^c	B_2^c
8	レヤー	2層	注1)	0.013	2.5×10^6	S_2^c	B_2^c
9	レヤー	2層	注1)	0.00013	2.5×10^6	S_2^c	B_2^c
10	レベル	2層	注6)	—	2.5×10^6	$S_2^c \times 2$	B_2^c
11	レベル	2層	注6)	—	2.5×10^6	$S_2^c \times 3$	B_2^c
12	レヤー	2層	注4)	0.0013	2.5×10^6	S_2^c	B_2^c
13	レヤー	2層	注4)	0.0013	2.5×10^6	S_2^c	B_2^c
14	レヤー	2層	注4)	0.0013	2.5×10^6	$S_2^c \times 2$	B_2^c
15	レヤー	2層	注4)	0.0013	2.5×10^6	$S_2^c \times 2$	$B_2^c \times 2$
16	レベル	2層 (生産層10m)	注6)	—	10^5	$S_2^c \times 3$	B_2^c
17	レベル	2層 (生産層5m)	注6)	—	10^5	$S_2^c \times 3$	B_2^c
18	レベル	3層 (生産層5m)	注7)	—	10^5	$S_2^c \times 3$	B_2^c
19	レベル	3層 (生産層10m)	注7)	—	10^5	$S_2^c \times 3$	B_2^c

注1) 播磨側全項目1.0, 紀伊側O-P, I-P, CODは0.9, DOは1.1

注2) 播磨側全項目0.99, 紀伊側O-P, I-P, CODは0.9, DOは1.0

注3) 両側ともO-P, I-P, CODは0.9, DOは1.0

注4) 播磨側O-P, I-P, CODは1.0, 紀伊側O-P, I-P, CODは0.9, DOは両側で上層8ppm, 下層6ppm

注5) 播磨側O-P, I-P, CODは0.9, 紀伊側O-P, I-P, CODは0.85, DOは両側で上層8ppm, 下層6ppm

注6) 両側ともO-P, I-P, CODは0.9, DOは上層8ppm, 下層6ppm

注7) 両側ともO-P, I-P, CODは0.9, DOは上・中層8ppm, 下層6ppm

4. において, 流れ, 拡散係数, 希釈係数, 鉛直流または鉛直混合係数, 沈降速度, 分解速度, 層厚と多層化による水質分布の寄与について 表-4.1 に示した条件による19ケースの試算より検討する。

4.2 数値モデルによる検討

(1) 水平流れと水平拡散係数

計算の対象とした大阪湾は 既述のように, 湾全域の70%以上のCODおよびI-P負荷が湾奥部(図-3.11の負荷投入点10, 11, 12および13)に集中している。一方, 同海域の流れは水深が比較的大きい淡路島寄りを

通り明石海峡, 紀淡海峡を流入出するのが主流となり, 湾奥部ではそれより派生する0.5cm/s以下の流れが大部分を占める。特に和田岬から泉大津を結ぶ線より湾奥側では微弱な潮汐流と流入河川水による密度流とが混在して湧昇流と表層での湾外側への流れが生じている。さらに 図-3.6 の残差流に示されるように湾央西寄りの大きな右回りの環流と泉大津から泉南方向への流れが顕著であり, 上述の湾奥の流況とともに湾内の物質循環および水質底質分布に大きな影響を与えているものと思われる。

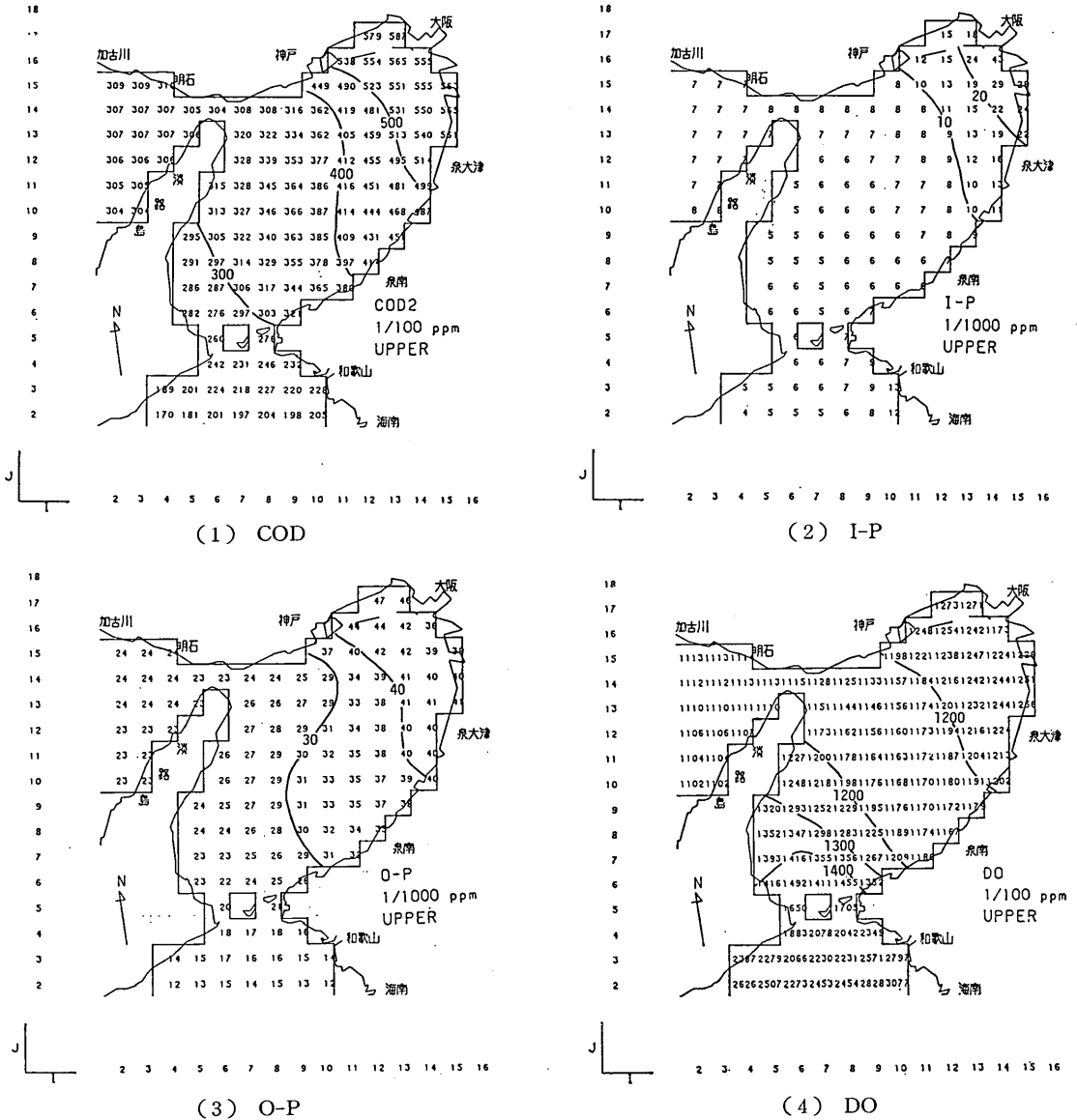


図-4.2 上層濃度分布(ケース1)

図-4.2 はケース1による上層 COD, 同 I-P および同 O-P の60 潮汐*の分布を示したものである。水質3 項目とも大阪付近に高濃度領域があってそれより西方の神戸寄りおよび東側から南西の泉南に向かって海岸線に

沿うように分布している。このような分布形は先に述べた湾内の流れ、特に残差流の分布と強い関連があり、環流により物質は湾の東側に押し出されさらに東海岸沿いに南西方向に移送される形となっている。一方、水質計算においては3.2で述べたように COD と I-P の底質よりの溶出速度、DO 消費速度についても平面的な分布を与えられているため、これによる影響が水質分布に及んでいることは事実である。しかし、こうした底質の分

* 水質計算においては COD, I-P, O-P, DO とも計算開始後60 潮汐時点で濃度はほぼ一定値に達しているとみなし得ることから、以後はすべて60 潮汐時点での濃度について議論することとする。

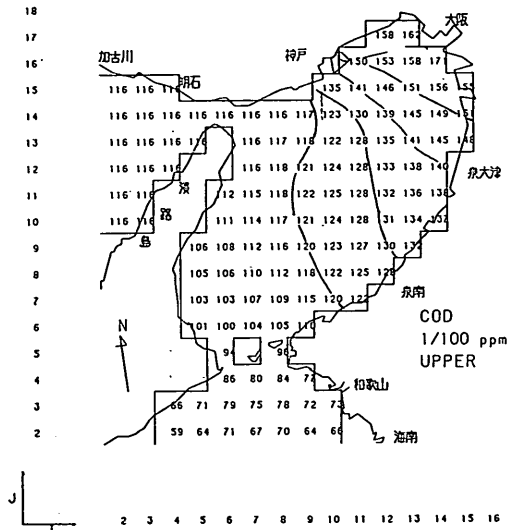


図-4.3 保存モデルによる上層 COD

布も元は流れの特性に応じて形成されたと考えるならば水質分布はいずれにしても流れの影響を強く受けているといえる。このことは、上と同じケース1において移流と拡散のみを扱った保存系モデルにより計算されるCODの平面分布(図-4.3)によって実証できる。

水質の平面分布に対して水平拡散係数(K)も流れと同様に大きな意味をもっている。

水質の平面分布が流れによる移流と拡散のどちらにより支配されるかは大略次の関係式²⁴⁾より見積もることができる。

$$\frac{\text{拡散項}}{\text{移流項}} \approx \frac{K}{U\Delta S} \begin{cases} \geq 1 \\ < 1 \end{cases} \quad (4.1)$$

ここに、K: 水平拡散係数, U: 水平流速, ΔS: 格子間隔である。

本例の場合、ΔS=4 kmであるから、流速 U=5 cm/sであれば式(4.1)より $K=2 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{s}$ のとき拡散項と移流項とが同じオーダーになり、 $K > 2 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{s}$ または $U < 5 \text{ cm/s}$ では拡散項が移流項より大きくなって、水質の平面分布は拡散係数により決まることになる。 $K=2.5 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{s}$ を全域一律に与えて求めた図-4.2の結果においては、湾奥では拡散項が支配的であり、逆に湾中央から両海峡にかけては移流項が支配的と考えられる。こうした水平拡散係数による水質の平面分布形状の変化を調べるため、拡散係数を3段階に分け、湾奥26格子については $10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$ 、流れの大きい両海峡部の11～

13格子については $10^6 \text{ cm}^2/\text{s}$ 、その他の領域は $10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$ と拡散係数に分布を与えて計算した(ケース2)。このようにして求められた上層のCOD、O-PおよびI-Pの平面分布を示したものが図-4.4である。前述のケース1と比較すると明らかなように、拡散係数を全体的に小さくして求めた本ケースの水質分布形はより流れの分布との関連が強くなり、各水質項目の等濃度線は環流と湾東岸沿いの南下流の影響を受けて、曲率の高い逆S字形となっている。流入負荷をもつCODとI-Pについては負荷点近傍に高濃度領域が現れ、湾奥から湾口に向かっての濃度の場所的勾配は本ケースのほうが大となって、逆に負荷点から隔った湾口近傍では低濃度となる。この傾向は図-4.5に示す代表3点(位置は図-3.1に示すPt. 2, Pt. 3およびPt. 4)における濃度対比図によっても確認できる。

このように水平拡散係数が水質の水平分布に与える影響は流れの大きさとの関連において決まると同時に、水質分布の場所的な勾配を決定する一つの要因であることが確認される。

なお、鉛直流、鉛直混合係数については(3)にて述べる。

(2) 境界交換係数

水質の計算において計算領域の境界(外海との境界)における濃度をどのように設定するかは全領域の水質分布および境界を通じての物質の流出入量を定める重要な

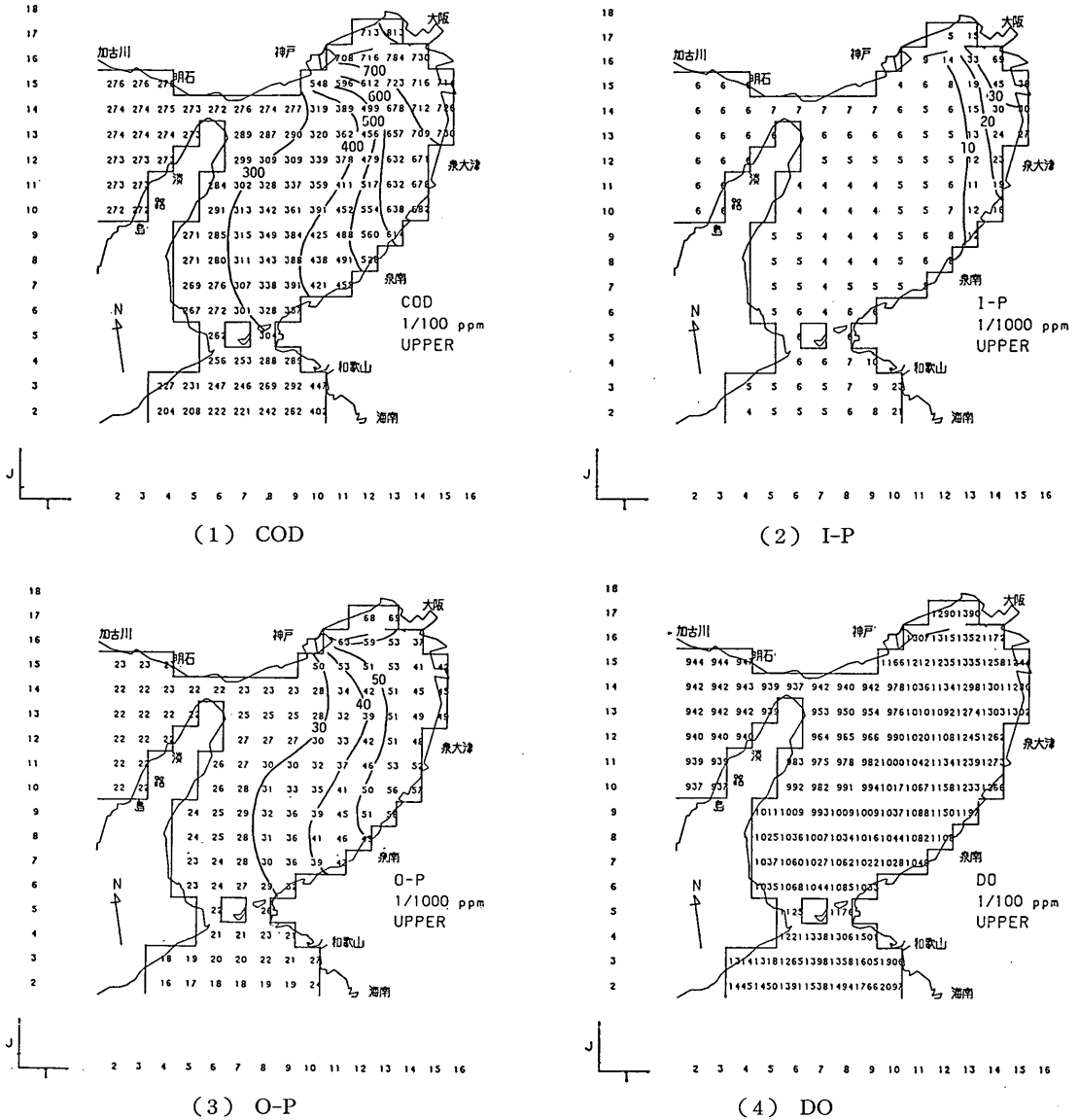


図-4.4 上層濃度分布 (ケース2)

要因である。

境界濃度の設定法は、定濃度型、定濃度勾配型、定濃度変化率型、その他多種あるが、本モデルでは定濃度勾配型(ただしDOについては一部定濃度型)をとって検討した。これは、境界濃度を C_{bound} 、境界に隣近する計算領域内格子上的濃度を C_{inter} とするとき、

$$C_{bound} = r \cdot C_{inter} \quad (4.2)$$

ここに、 r : 境界交換係数

で定義される境界条件を付して解く方法である。

式(4.2)で定義される r の値は、対象となる水質と領域外の水質との関係で決まるものであるが、定まった設定法がある訳ではなく、多くは経験にたよらざるを得ない。

いま播磨灘側境界および紀伊水道側境界における境界交換率 r の水質分布に対する影響を調べるため、表-4.2に示す4ケース(ケース1, 3, 4および5)について試

海域における物質循環数値モデルの水質支配要因について

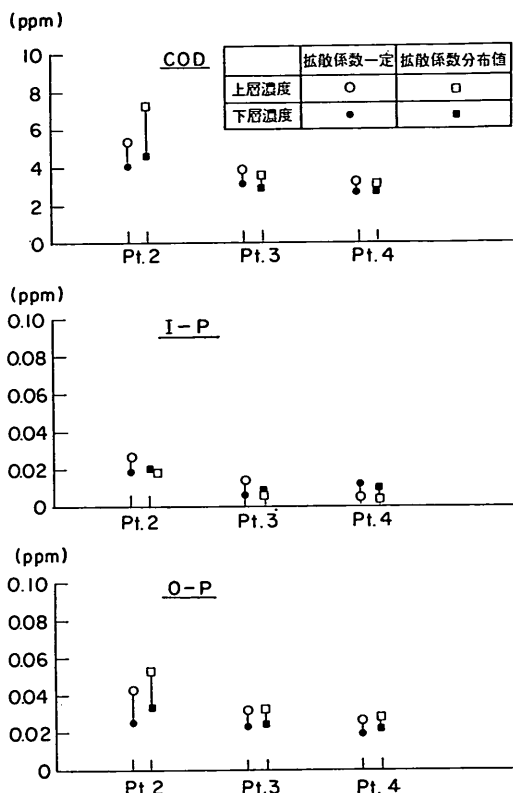


図-4.5 水平拡散係数と水質分布 (ケース1とケース2)

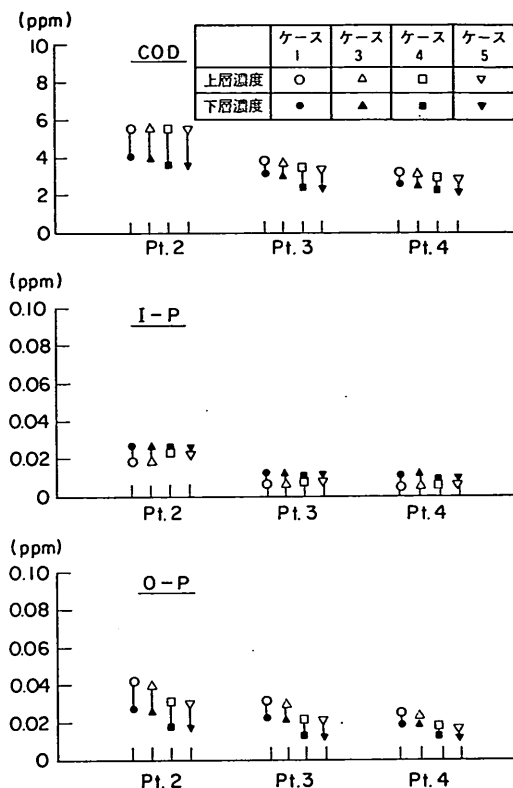


図-4.6 境界交換係数と水質分布

表-4.2 境界交換係数

	播磨灘側				紀伊水道側			
	O-P	I-P	COD	DO	O-P	I-P	COP	DO
ケース1	1.0	1.0	1.0	1.1	0.9	0.9	0.9	1.1
ケース3	0.99	0.99	0.99	1.0	0.9	0.9	0.9	1.0
ケース4	0.9	0.9	0.9	1.0	0.9	0.9	0.9	1.0
ケース5	0.9	0.9	0.9	上層 8 ppm 下層 6 ppm	0.85	0.85	0.85	上層 8 ppm 下層 6 ppm

算した。

これらの結果を COD, I-P, O-P に対して代表3点で比較したものが図-4.6 である。図-4.6 によると、湾奥 Pt. 2 の上層 COD はいずれのケースともほとんど変化なく一定の値となっている。これは、境界交換係数の変化する両境界に最も遠いため境界の影響を受けにくいこと、COD 流入負荷点に近いことと考えられる。一方、流入負荷のない O-P においてはケース4、ケー

ス5とも Pt. 2, Pt. 3, Pt. 4 のすべての点で濃度が下がり、境界交換率の影響がそのまま現れている。COD や O-P に比べ I-P は境界の影響を受ける度合いが少なく、各点上下層とも変化は小さい。逆に、Pt. 2 の上層 I-P はケース4、5で上昇する。これは Pt. 2 が I-P の流入負荷点に近いこと、O-P の低下により生産に消費される I-P 量が減少することによって考えられる。

以上のように境界交換係数は、O-P のように流入負荷をもたない物質に対しては影響は大きいですが、COD や I-P のように流入負荷をもつ物質に対しては流入点近傍ではその影響は小さく境界近傍では大きくなる。

(3) 鉛直流または鉛直混合係数

水質の鉛直分布と鉛直流、鉛直拡散係数または鉛直混合係数とが密接な関係にあることは容易に想像がつく。

一般に、上層と下層との間で水質の差が大となるのは夏場の成層期、すなわち鉛直混合が小さいときであり、逆に上下層の水質がほぼ一樣になるのは冬場の混合期とされている。このことから、上下層間の交換を抑制することが濃度差を増大させる要因と考えられる。

そこでまずレイヤーモデルとレベルモデルによる計算結果を比べてみた。図-4.7 はケース6のレイヤーモデルおよびケース1のレベルモデルによる結果の代表3点における上下層のCOD, I-P および O-P を比較したものである。この結果によると、I-P は下層が上層より高

く、上下層の差はレイヤーモデルのほうがレベルモデルより2~3倍大きい。特に下層におけるI-P はレイヤーモデルによる値のほうが大きくなっている。一方、O-P とCOD は逆にレベルモデルによる結果のほうが上・下層ともレイヤーモデルより高くなっている。また上下層の濃度差はI-P の場合ほど顕著でないが、湾奥部ではレベルモデルのほうがやや大きく、湾口側ではレイヤーモデルのほうがいくぶん大となっている。

溶出または分解により下層に供給されたI-P が鉛直流または鉛直混合係数により上層に運搬されて基礎生産に利用されO-P とCOD を生産する。したがって鉛直流または鉛直混合係数が大きければ、下層のI-P が上層にもたらされる量も大となり、上層における生産が促進されてO-P とCOD が上昇する。このことは図-4.7 のレベルモデルの結果において顕著である。すなわちここではレベルモデルによる鉛直流または鉛直拡散係数が下層からの溶出や分解による栄養塩の供給に寄与していることが示されている。

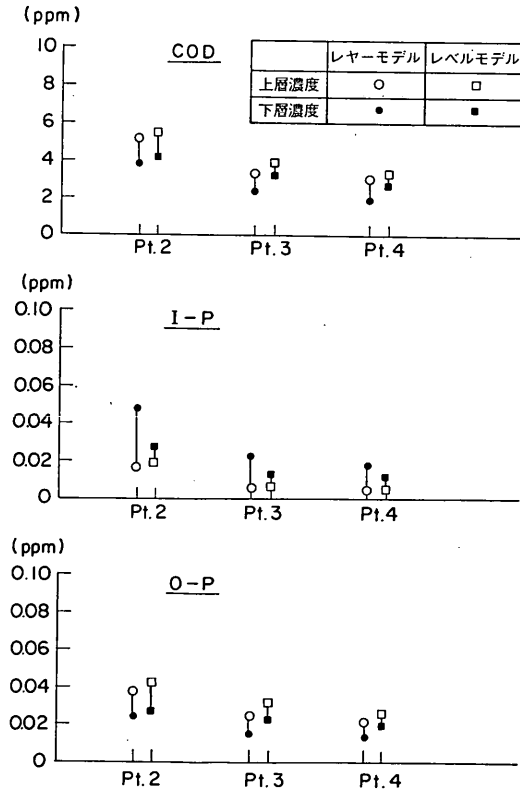


図-4.7 レイヤーモデルとレベルモデルによる水質分布

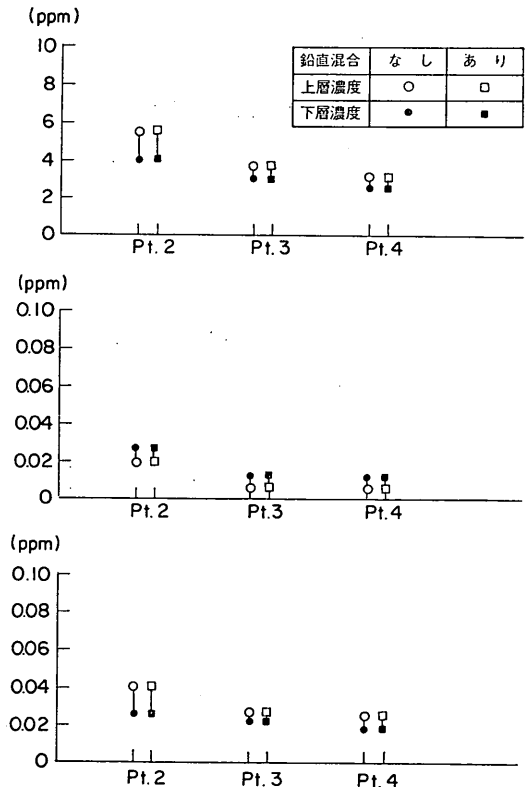


図-4.8 レベルモデルにおける鉛直混合係数と水質分布

なお、レベルモデルにおける上述のような下層から上層への I-P 供給は 0~0.1 mm/秒 の鉛直流が主因であることが図-3.8より想定される。すなわち図-4.8はレベルモデルで鉛直混合係数を考慮しないケース3と考慮したケース7とを代表3点について比較したものである。両者でほとんど差はなく $K_z=0.0013 \text{ cm/s}$ 程度の鉛直混合係数では計算結果にほとんど影響していないことがわかる。

一方レーヤモデルにおいて、鉛直混合係数を表-4.1の10倍にしたケース8、および同係数を1/10にしたケース9をケース6と対比したものが図-4.9である。この結果によれば、鉛直混合係数を10倍にした、すなわち鉛直の物質交換を増大させた場合に、COD, I-P, O-Pともに上・下層間の濃度は一様化の傾向となり、逆に鉛直混合係数を減少させると濃度差は大となる。また鉛直混合係数の増大により下層から上層へのI-P補給が促進され(したがって下層のI-P濃度が減小し)、上層CODは高くなる。一方、鉛直混合係数を1/10にし

た場合には全く逆の現象が生じている。これは先に図-4.7に示されたレベルモデルとレーヤモデルとの比較において見られたと同様の傾向を意味するもので、レベルモデルにおける鉛直流とレーヤモデルにおける鉛直混合係数とが同作用を物質循環に及ぼしているものと解釈することができる。

このように、上下層間の混合を促進させると層間の濃度は一様化するが、上層での生産は活性化され、CODやO-Pの濃度は上がり、上下層の濃度は大となる。この意味からレーヤモデルでは鉛直混合係数が大となると、生産や上下層の濃度が高まり、またレーヤモデルよりもレベルモデルにおいてこの傾向が強い。

(4) 沈降速度と分解速度

沈降および分解はそのものの物質量を減少させる方向に作用する。

まず沈降速度の影響を調べるため、下層のCODに対して基準の沈降速度を与えたケース4、2倍にしたケース10および3倍にしたケース11について代表3点にお

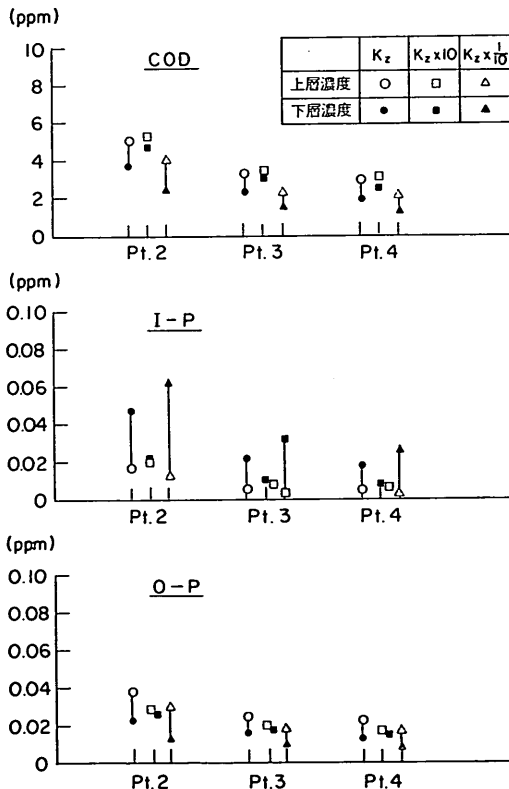


図-4.9 レーヤモデルにおける鉛直混合係数と水質分布

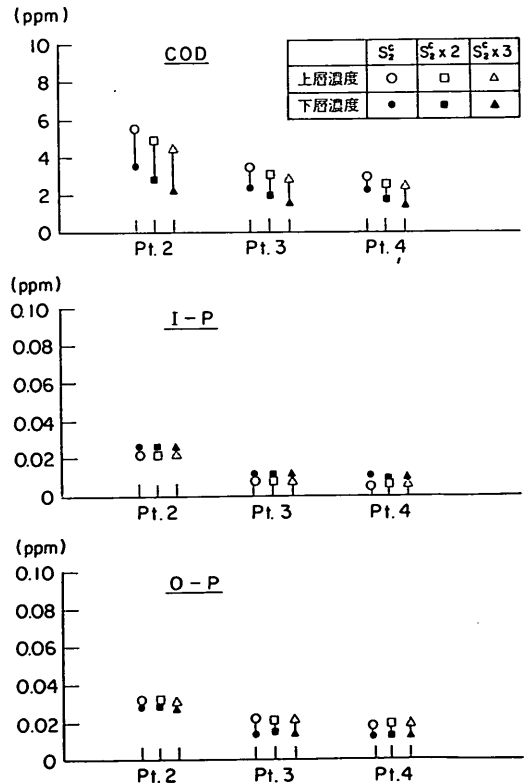


図-4.10 下層沈降速度と水質分布

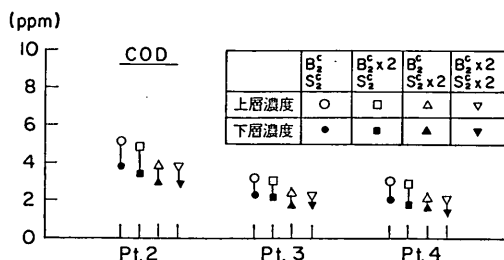


図-4.11 下層沈降速度，同分解速度と水質分布

ける COD, I-P および O-P を比較してみた。この結果が図-4.10 に示されている。図-4.10 によると、COD は上下層とも沈降速度が大きくなれば減小し、上下層の差も大きくなることからわかる。ケース 8 で COD 下層の沈降速度 (S_2^c) は 0.65m/日 を与えているが、大阪湾の実測では 0.1m/日~1.0m/日 範囲に広く分布する上に測定も容易でないことから、モデルにおいては COD の再現性その他から決めざるを得ない。なお、I-P, O-P については、これらの物質循環が直接には COD の沈降速度と関連づけられていないため、一部の下層を除いてほとんど変化しないといえる。

次に分解速度の COD に対する影響、さらには沈降速度との関係を調べるため、レーヤモデルにおいて、表-4.1 に示す分解速度と沈降速度を与えたケース 12, COD 下層の分解速度 (B_2^c) を 2 倍にしたケース 13, COD 下層の沈降速度 (S_2^c) を 2 倍にしたケース 14, および COD 下層の分解速度 (B_2^c) と沈降速度 (S_2^c) をともに 2 倍にしたケース 15 について代表 3 点の COD を比較してみた。図-4.11 はこの結果を示したものである。図-4.11 によると、分解速度よりも沈降速度による影響が大で、COD の低下要因としては沈降速度の大きさが特に重要であることがわかる。

なお、I-P および O-P に対しては先の図-4.10 の例と同様に COD の沈降速度や分解速度の影響は極めて小さい。

(5) 層厚と多層化

2. において述べたモデルは層厚を固定(レーヤモデルでは内部境界面が時間的に変化するが平均面は固定)して各層に対して諸係数を設定しているため、層厚や層数の大きさも物質の循環、水質の分布を規定しているであろうことは容易に想像できる。このため、上層厚を基本の 10m に対し 1/2 とした 5m の場合と 3 層についてレベルモデルにて検討した。

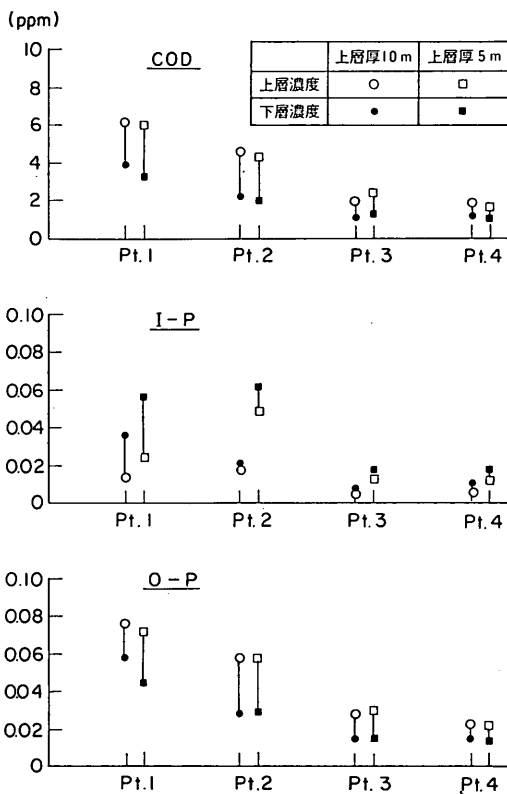


図-4.12 上層厚と水質分布

まず上層厚を 1/2 にして他の条件は同一として 2 レベルモデルにより得られた流れを用いて計算されたケース 17 の COD, I-P, O-P を代表 3 点で基準の上層厚 10m のケース 16*) と比較したものが図-4.12 である。全般的には上層厚を 1/2 としたケース 17 のほうが COD, O-P とも上下層で低くなっている。一方、I-P はいずれの点でも上層厚 5m の場合が高くなっている。

これは上層の生産層が薄いため COD, O-P の生産量が小さく、したがって生産に消費される I-P が少なくなつて I-P 濃度が高くなるためと考えられる。

次に 2 層から 3 層に層数を増した場合の水質に対する影響を検討した。

3 層モデルとしては、本文末尾の付録 2. に記した 3 層レベルモデルを適用し、同じく付録 3. に付した条件(表-A.1)で計算される 3 層流れをまず求めた。図-A.1~A.2 は上層、中層および下層の水平流残差成分と第

*) ケース 16, 17, 18 および 19 については水平拡散係数 K を 10^5 cm/s として計算している。その他の諸定数は付録の表-A.2 はまとめて示す。

海域における物質循環数値モデルの水質支配要因について

1～第2層および第2～第3層間の鉛直流残差成分をそれぞれ示したものである。つぎにこのようにして求められた流れの場に対して本文末尾の付録 1. に記した物質循環の3層レベルモデルを適用し、付録 3. の表-A.2 に示す条件にて第1層と第2層とを生産層としたケース 19 と第1層のみを生産層としたケース 18 についてそれぞれ計算した。

図-4.13 は、ケース 19 と2層レベルの上層 10m のケース 16 とを代表 4 点について比較したものである。この結果によると、上層 COD と上層 O-P とはほとんどの点で3層の場合が若干高くなっているのに対し下層では湾奥側の Pt. 1, Pt. 2 で3層の場合が低く、したがって上下層間の濃度差は3層の場合のほうが大となっている。I-P については3層モデルと2層モデルで大差ないが、湾奥 Pt. 1 では下層が特に高く、生産による消費が小さいためと思われる。

一方、図-4.14 は3層モデルにおいて第1層の5m層

のみを生産層としたケース 18 と2層モデルの上層厚が5mのケース 17 とを比較したものである。この場合、3層モデルの COD, O-P は上下層とも Pt. 1, Pt. 2, Pt. 3 において2層モデルの場合よりも小さくなっている。これは3層および2層のモデルで生産層厚はいずれも5mであるが、上層の生産に必要な I-P の下層からの補給が3層モデルでは中間層を通じて間接的になるためと推定される。

さらに図-4.15 は3層モデルにおいて第1層の5m層のみを生産層としたケース 17 と、第1, 2層の10m層を生産層としたケース 19 との比較をしたものである。この場合は第1層のみを生産層としたケース 18 のほうが生産総量が小さいため COD, O-P の濃度は Pt. 1～Pt. 4 のいずれの点においても低く、したがって I-P はいずれの点においても第1, 2層が生産層のケース 19 より大となっている。生産を行わない中間層を通じての下層からの I-P 補給の抑制効果もケース 18 では卓越して

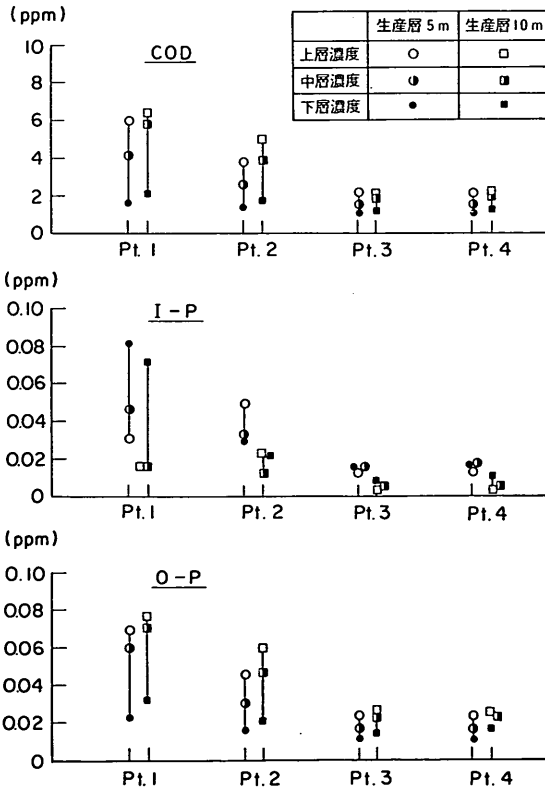


図-4.13 2層モデル(上層厚 10m)と3層モデル(第1, 2層計 10m 厚)による水質分布

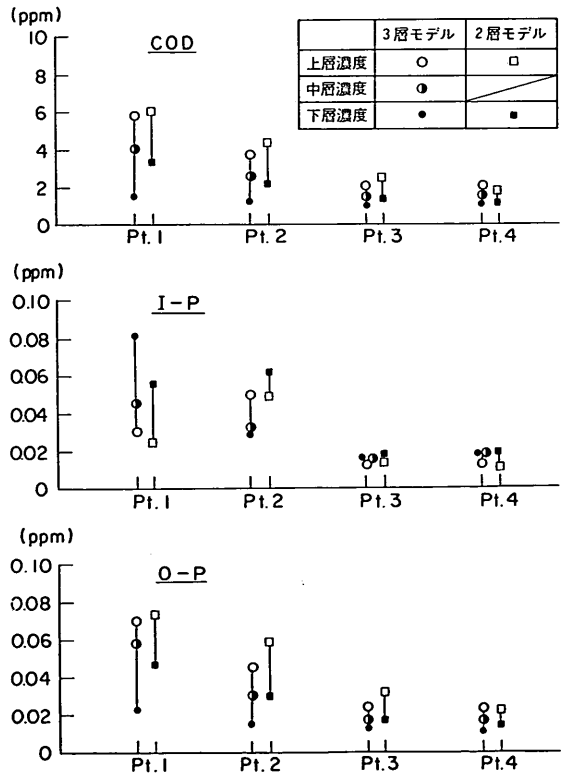


図-4.14 2層モデル(上層厚 5m 生産層)と3層モデル(第1層 5m のみ生産層)による水質分布

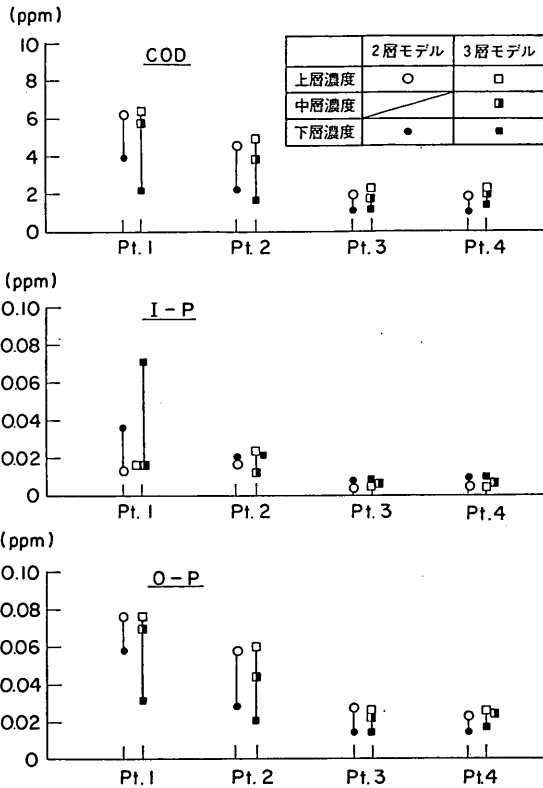


図-4.15 3層モデル(上層 5m 生産層)と2層モデル(上・中層計 10m 生産層)による水質分布

いるものと推定される。ケース 16 における I-P は、生産に消費されるのが少ない分だけ濃度も全般的に高く、流入負荷点近傍の Pt. 2 では表層が最も高くなっている。

このように、COD と IP の流入負荷および生産を上層に限定したモデルでは、上層厚が小さくなれば、生産層が減少するため全体的には COD、O-P の生産総量が小さくなり、生産に消費される I-P が少なくなって I-P 濃度は高くなる。

さらに 2 層から 3 層に層数を増やした場合、海面からの第 1、第 2 層を生産層にすれば同じ層厚の 2 層モデルの場合よりも上層 COD、同 O-P は高く、下層 COD、O-P は低くなって上下層間の濃度差は大となるが、第 1 層のみを生産層にすると COD、O-P は上下層とも同じ層厚の 2 層モデルの場合より小さくなる。これは上層の生産に必要な底層からの I-P の補給が中間層によって抑制されるためと考えられる。

5. 水質分布再現性の検討

数値モデルを扱う上で実態との対応関係に留意することは最重要項目の一つである。このため、4. で検討した諸過程の水質分布に対する特性をもとに、実測例の水質分布の再現をめざしたシミュレーションを行った。

実測例としては、定期的を実施されている公共水域水質データ²⁵⁾のうち COD (表層)(昭和 51 年~53 年実施、

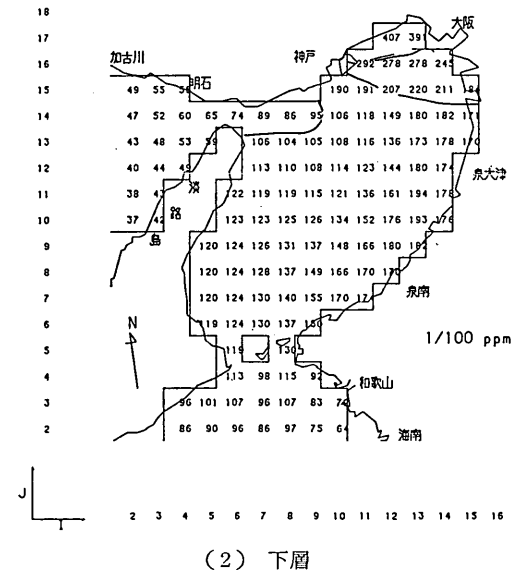
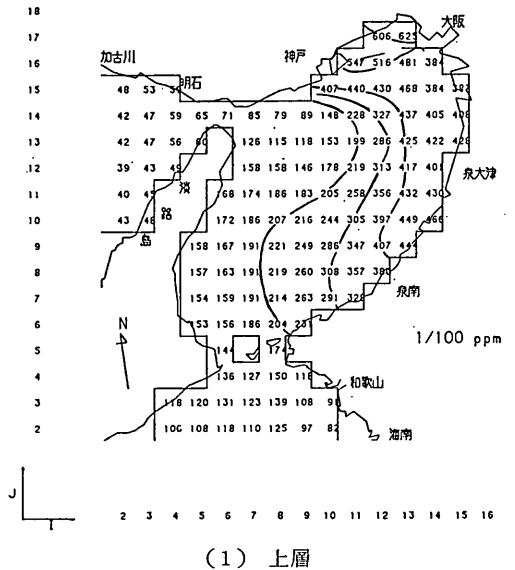


図-5.1 2層モデルによる COD

海域における物質循環数値モデルの水質支配要因について

7月～8月平均), 同データの DO (表層) (昭和53年9月実施), および第三港湾建設局の広域実態調査データ²⁸⁾の PO₄-P, O-P (いずれも海面下2m および海底上2m) (昭和57年7, 8月平均) を利用した。

数値モデルはレベルモデルに限定し, 2層および3層について検討した。

2層レベルモデルでは上層厚10mのケース16, 3層レベルモデルでは第1層5m, 第2層5mのケース19に

ついて比較した。

2層の水質計算において, 境界交換係数 (r) は播磨灘側, 紀伊水道側ともに O-P, I-P, COD は 0.9 とし, DO は上層 8 ppm, 下層 6 ppm に固定している。水平拡散係数 (K) は $10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$ とした。底泥の DO 消費は, DO の夏場の貧酸素状態を再現するため湾奥側3ブロックについては前述の式 (3.6) より算出される値を使用せず, それぞれ 5000, 3000, 3000 $\text{mg}/\text{m}^2/\text{日}$ とか

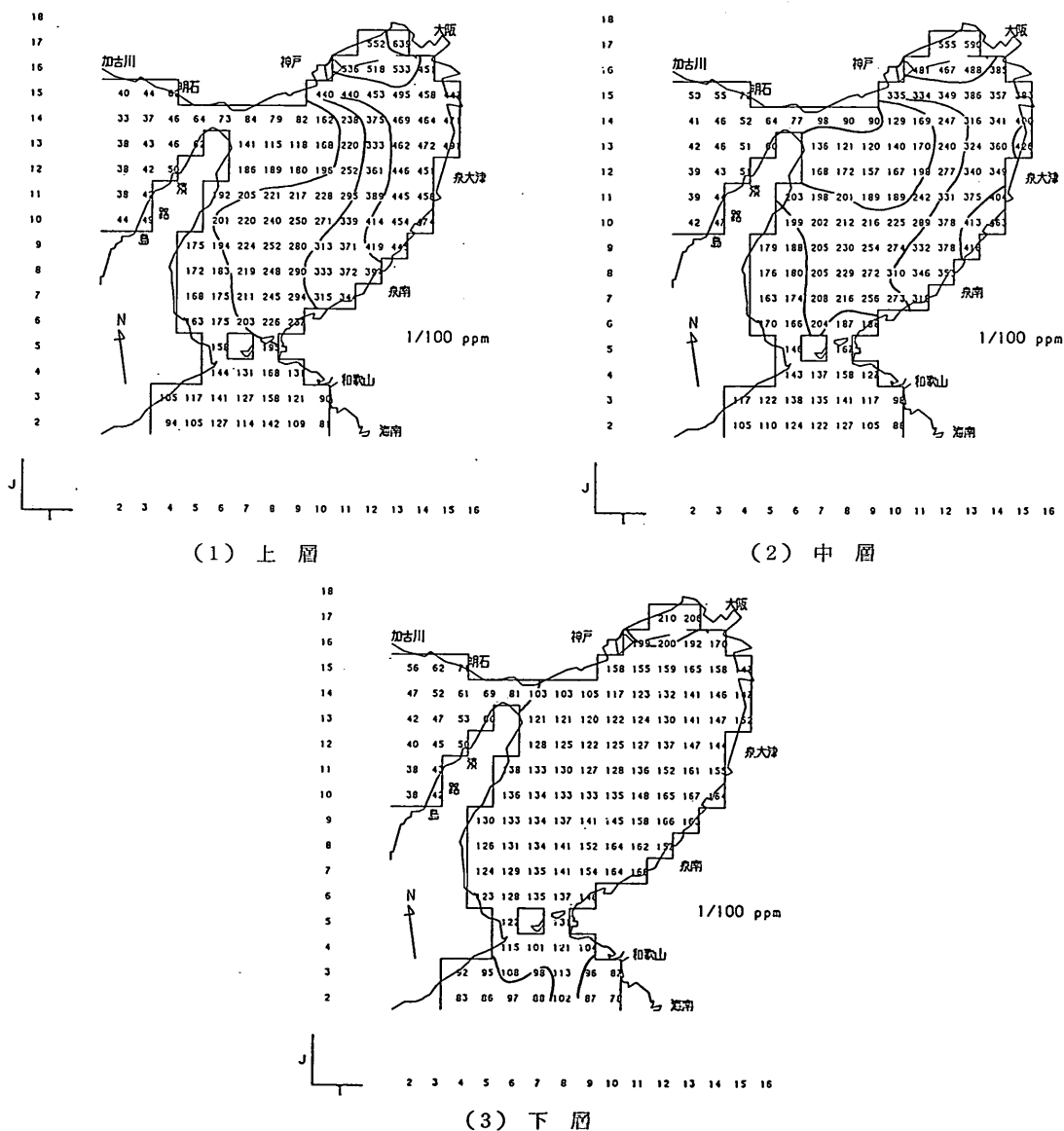


図-5.2 3層モデルによる COD

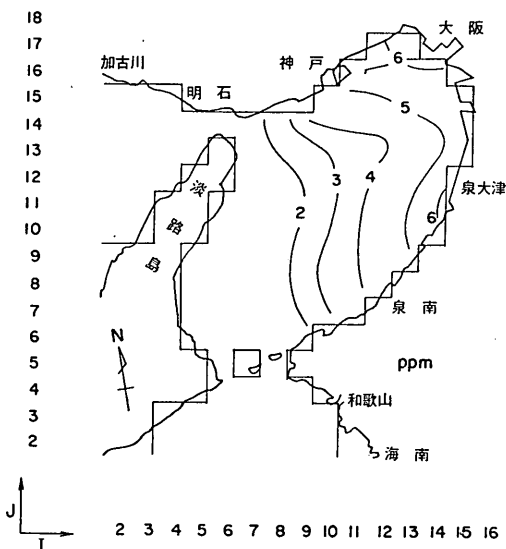


図-5-3 実測 COD(昭和51年~53年7月~8月平均, 表層)

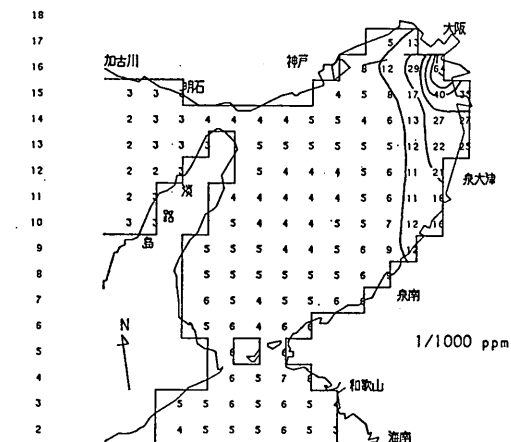
なり大きめの値を用いている。また CDO 下層の沈降速度 (S_2^c) は 表-3.2 の 3 倍すなわち 1.95 m/日 を用いた。その他の諸定数については 表-3.2 と同一である。

一方, 3 層モデルの水質計算において, COD 下層の沈降速度 (S_3^c) を 2 層モデルと同様 1.95 m/日 とした。その他の諸定数については 付録 3, 表-A.2 に示すとおりである。

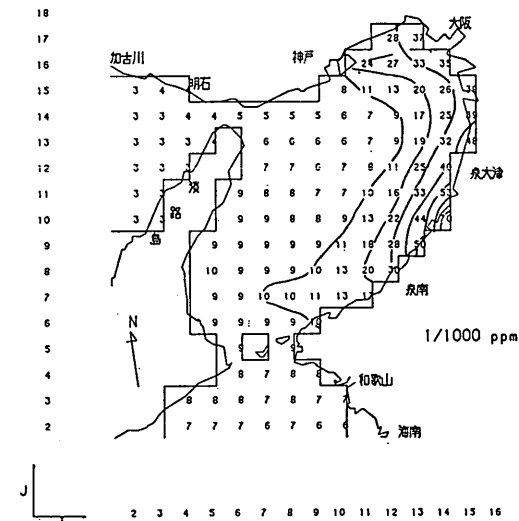
図-5.1 は 2 層モデルによる上層および下層の COD を, また 図-5.2 は 3 層モデルによる上, 中, 下層の COD 分布を示したものである。これに対し 図-5.3 は 実測による表層の COD 分布を示したものである。図-5.3 の実測による分布と 2 層モデルによる上層 COD (図-5.1(1)) とを比較すると, 計算値のほうがやや小さめである。下層の COD については比較できる適当な実測値はないが, 2 ppm 以上の領域は神戸, 大阪等の湾奥側となっている。これに対し 図-5.3 の 3 層モデルによる COD は, 2 層モデルによる結果と比較すると全般的に高めとなっている。上層 COD の分布形状は 2 層モデルの場合に近いが, 5 ppm 以上の領域は湾奥の数メッシュに限られている。下層でも 2 ppm 以上の領域は湾奥の 5 メッシュになり, 湾内はほぼ 1 ppm 台となる。なお, 両モデルとも明石海峡から播磨灘にわたっては境界交換係数の影響で全層 1 ppm 以下となり, 実態より低めと思われる。

つぎに, 2 層モデルによる I-P の分布, 3 層モデルによる I-P の分布, および実測による I-P の分布をそれぞれ 図-5-4, 図-5.5 および 図-5.6 に示す。実測値は単年度の成果であることと分布の起伏を考慮すれば, 両モデルとも実測値とほぼ同様の分布となり, オーダー的には満足できる結果といえよう。

さらに, 2 層モデルによる O-P の分布, 3 層モデルによる O-P の分布, および実測による O-P の分布を



(1) 上層



(2) 下層

図-5.4 2層モデルによる I-P

海域における物質循環数値モデルの水質支配要因について

それぞれ 図-5.7, 図-5.8 および 図-5.9 に示す。

両モデルの結果を比較すると、3層モデルの上層値は2層モデルのそれよりやや高く、逆に下層では3層モデルのほうが低くなる。実測値との対応では淡路島寄りでは

計算値が低めとなるが、3層モデルの結果のほうがより実測に近い分布となっている。

最後に、2層モデルによる DO 分布、3層モデルによる DO 分布、および実測による表層の DO 分布を図-

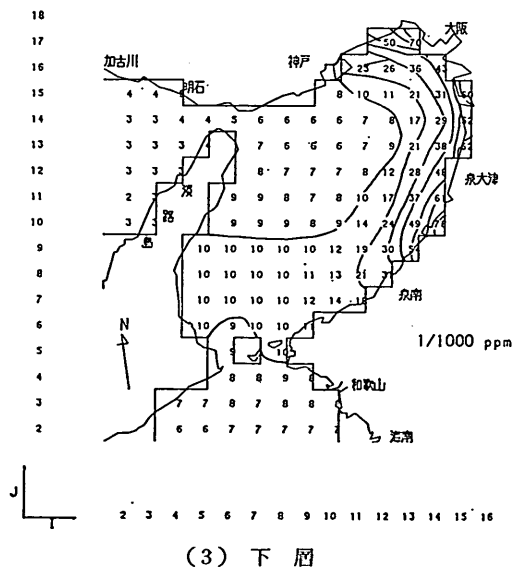
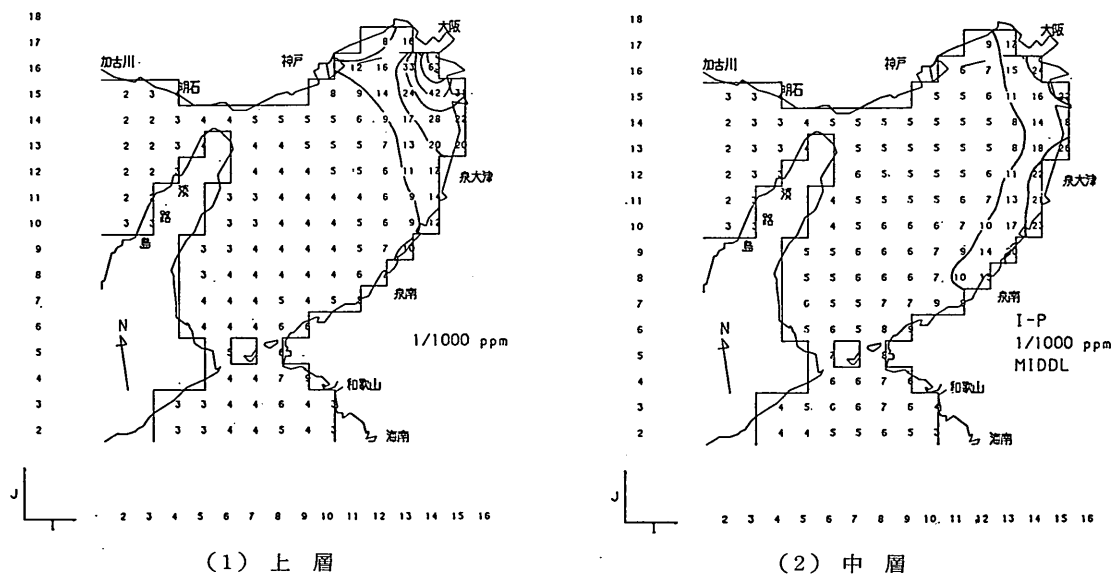


図-5.5 3層モデルによる I-P

5.10, 図-5.11 および 図-5.12 にそれぞれ示す。実測例は単年度の9月で測点も少ないが、湾奥表層では計算値が1~2 ppm 高くなっている。底層については比較で

きる実測値はないが、3層モデル底層では湾奥の一部に2 ppm 以下の貧酸素領域も現れ上下層でかなり濃度差のついたDO濃度が算出される。

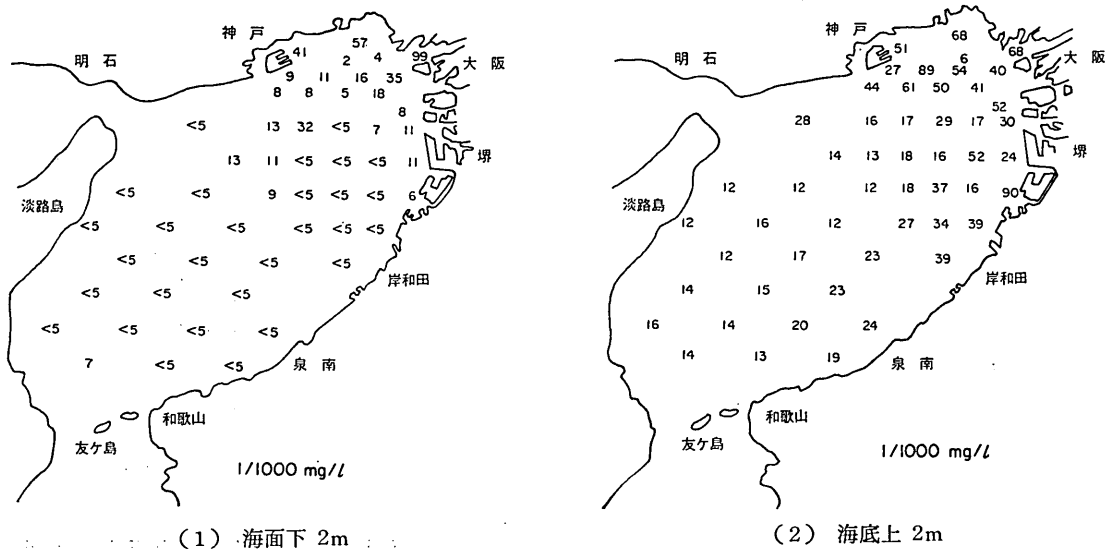


図-5.6 実測 I-P

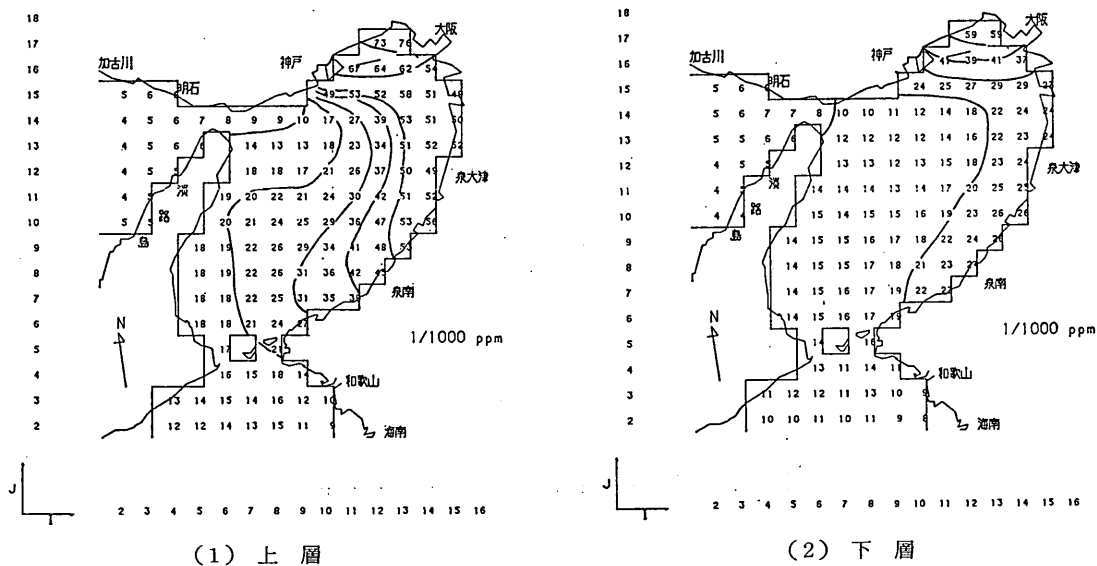
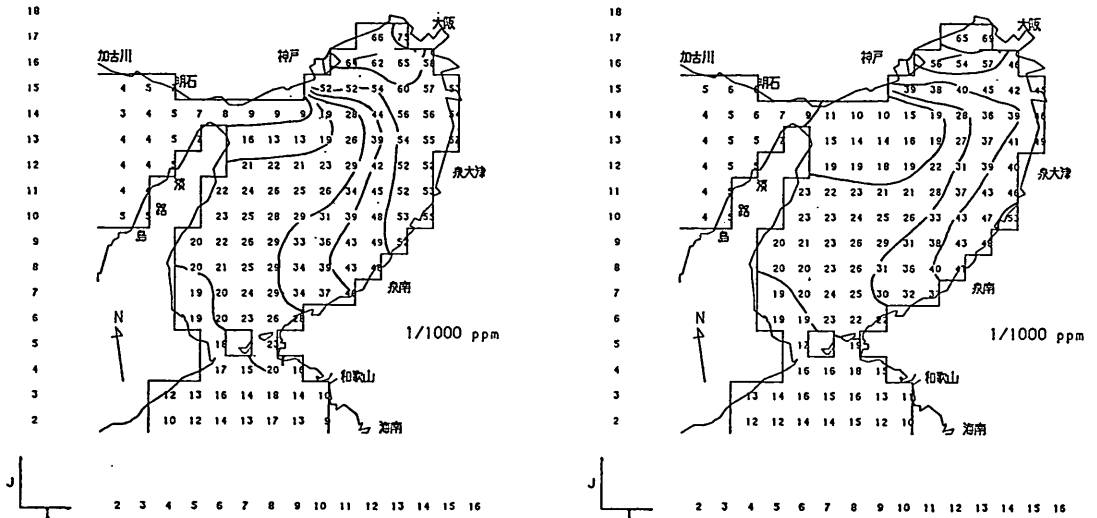


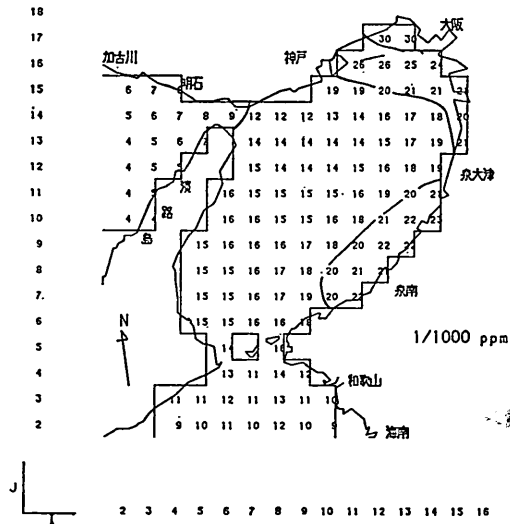
図-5.7 2層モデルによる I-P

海域における物質循環数値モデルの水質支配要因について



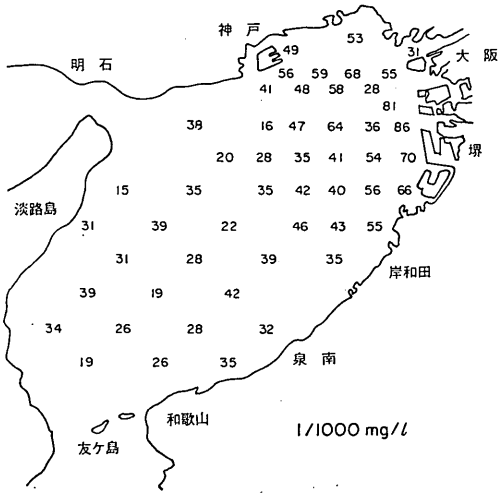
(1) 上層

(2) 中層

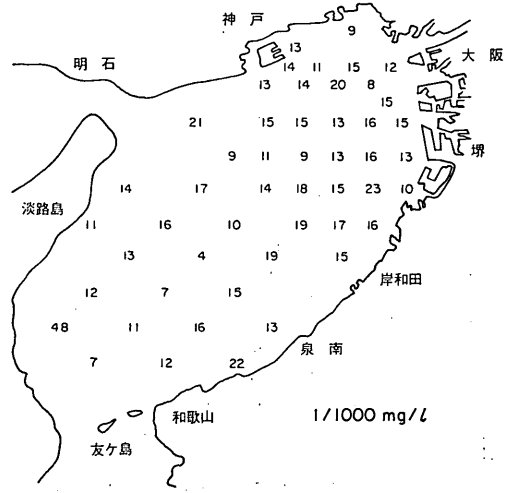


(3) 下層

図-5.8 3層モデルによる I-P

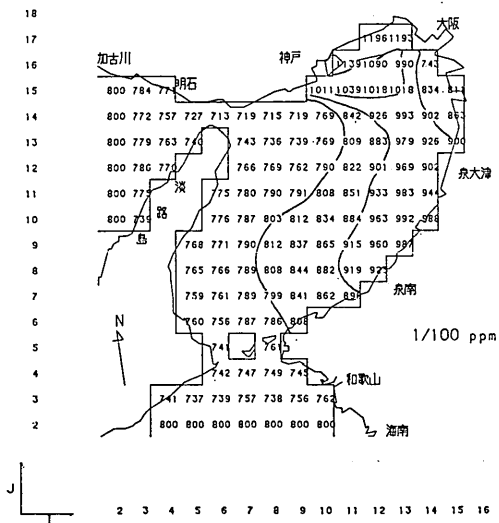


(1) 海面下 2m

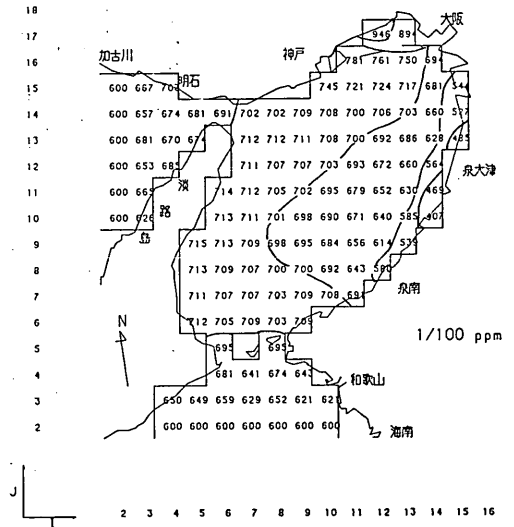


(2) 海底上 2m

図-5.9 実測 I-P



(1) 上層



(2) 下層

図-5.10 2層モデルによる DO

海域における物質循環数値モデルの水質支配要因について

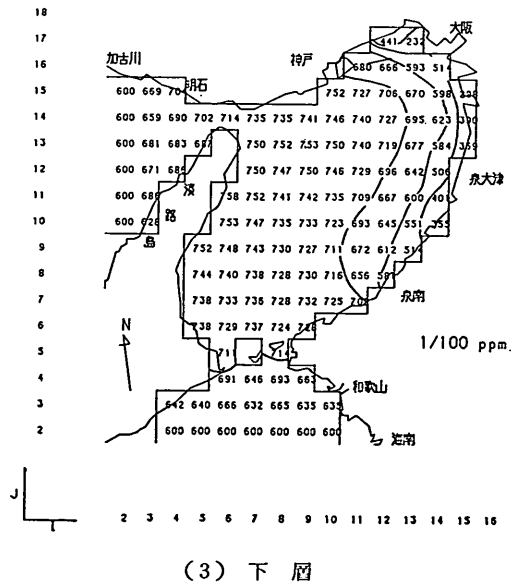
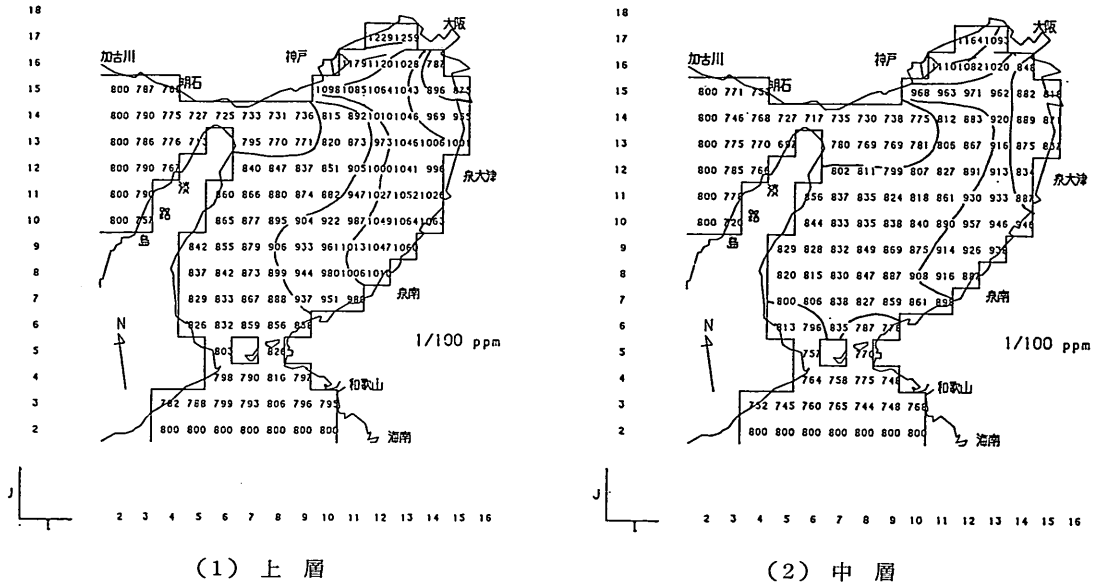


図-5.11 3層モデルによる DO

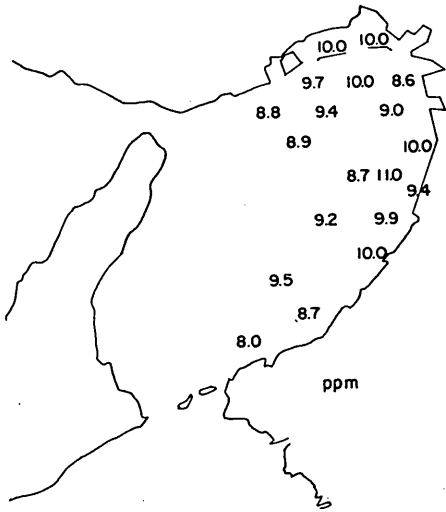


図-5.12 実測 DO

6. まとめ

以上、海域の物質循環モデルの組立ておよびそれに必要なデータと諸定数の取扱いについて述べ、このモデルにより計算される水質を支配する要因について数値解析的に検討した。それらの結果を要約するとつぎのとおりである。

- i) 水平流れ成分、残差流成分および水平拡散係数は水質の分布を決定する重要な要因である。水質分布の場所的な勾配は水平拡散係数の大きさに関係する。
- ii) 境界交換係数は、O-P のように流入負荷をもたない物質に対しては水質への影響は大であるが、COD や I-P のように流入負荷をもつ物質に対しては流入点近傍では影響は小さく境界近傍では大きくなる。
- iii) 鉛直流や鉛直混合係数の増大は、下層から上層への I-P 補給が大となって上層での生産を活性化し、COD や O-P を高め上下層の濃度はともに大となる。一般にレベルモデルよりもレイヤーモデルのほうが上下層間の濃度差は大となる。
- iv) 濃度の低下要因として作用する沈降速度は重要であり、特に COD 下層においては沈降速度の影響は大である。COD の分解速度または沈降速度の変化による I-P、O-P への影響は小さい。

- v) COD と I-P の流入負荷および生産を上層に限定したモデルでは、上層厚が小さくなれば生産層が減少するため全体的には、COD、O-P の生産総量が小さくなり、生産に消費される I-P が少なくなって I-P 濃度は高くなる。
- vi) 2層から3層に層数が増加した場合、第1、第2層を生産層にすれば同じ上層厚の2層モデルの場合よりも上層 COD、同 O-P は高くなり、上下層間の濃度差も大となる。第1層のみを生産層にすれば同じ上層厚の2層モデルの場合に比べ COD、O-P は上下層とも小さくなる。これは上層の生産に必要な底層からの I-P の補給が中間層によって抑制されるためと考えられる。

また2層モデルおよび3層モデルによる大阪湾の水質現況実態の再現シミュレーションより明らかになった結果を要約するとつぎのとおりである。

- vii) 表層 COD については2層モデルによっても3層モデルによってもほぼ実測に近い分布形状が得られるが、3層モデルでのほうがやや高く、実測分布により近くなっている。
- viii) I-P については実測値の分布の起伏をならして考えれば両モデルともオーダー的には満足できる結果である。
- ix) O-P については両モデルによる結果は大差なく、実測値との対比では淡路島寄り表層で計算値が低めになる以外総じて満足し得る結果である。
- x) DO については湾奥表層で計算値がやや高くなるが、3層モデルの底層では湾奥の一部に 2 ppm 以下の貧酸素領域が現れ、上下層の濃度差も大きく算出される。

なお、以上の結果については、ここで取扱ったモデルの設定に際する仮定、モデルの特性に依存することはいうまでもない。はじめにも述べたとおり、海域での物質循環過程はあまりにも複雑であり、これを総合的にモデルに組込むことができるほどには実態についても機構についても十分に把握されていない。したがって数値モデルの構築に際して物質循環の内部機構をどこまで取込むかはシミュレーションの目的と要求される精度によって適宜定められるべきである。こうして組立てられたモデルに対して、物質循環に支配的な要因をみつけること、あるいはその程度がどれ程かを感度解析的に追跡しモデル

の再現性を高めてゆくことは可能である。本研究ではこうしたことを目的に行ったものであるが、なおいくつかの課題が残されている。今後は、生産速度、溶出速度および流入負荷等に関する感度解析、さらには、水質の長期変動に関するシミュレーション手法についての検討を本研究に対する延長として実施してゆく予定である。

最後に、本研究は昭和54年以来運輸省第三港湾建設局が実施してきた瀬戸内海海洋環境整備パイロット事業に係わる調査の一環であり、東京都立大学工学部堀口孝男教授、山口大学工学部中西弘教授、港湾技術研究所佐藤昭二所長他の指導と、新日本気象海洋株式会社所属蔵本武明、細田昌宏両氏等の協力により実施したものである。

以上の諸氏および第三港湾建設局関係諸氏に対し深甚なる謝意を表する次第である。(1983年6月27日受付)

参考文献

- 1) 社団法人瀬戸内海環境保全協会：瀬戸内海の環境保全，昭和57年，106 p.
- 2) 運輸省第二港湾建設局：東京湾底質浄化調査，昭和53年3月。
- 3) Hosokawa, Yasushi and Takeshi Horie: Water quality improvement by retardation of nutrient release—estimation and analysis by a simplified model—, 6th. US-Japan Experts Meeting on Mangement of Bottom Sediments Containing Toxic Substance, Feb. 1981.
- 4) 環境庁編：昭和57年版環境白書，大蔵省印刷局発行，昭和57年6月。
- 5) 中西 弘・浮田正夫・河合泰治・加納正道・松本毅：周防灘における富栄養化シミュレーション解析，第17回衛生工学研究討論会講演論文集，1981，pp. 67-75.
- 6) Di Toro et al: Phytoplakton-zooplankton-nutrient interaction model for Western Lake Erie., *Systems Analysis and Simulation in Ecology*, III. 1975.
- 7) 松村 晃：二次汚濁の影響予測実例，環境創造，'77/7, 1977, pp. 60-64.
- 8) 中西 弘・浮田正夫：二次汚濁の影響予測手法，環境創造，'77/7, 1977, pp. 26-29.
- 9) 土木学会：琵琶湖の将来水質に関する調査報告書，昭和50. 51年度版。
- 10) 中田喜三郎ほか：沿岸海洋生態系の研究—2層モデルによる数値シミュレーションと解析—報告書，公害資源研究所第一部第二課，1978，255 p.
- 11) 堀口孝男：非保存系物質拡散の数値解法について，第19回海岸工学講演会論文集，1972，pp. 271-276.
- 12) 堀口孝男・平出友信・川上善久：温度密度流による拡散の数値解法について，第19回海岸工学講演会論文集，1972，pp. 259-264.
- 13) 橋本 宏・宇多高明：二層潮流の計算法，第22回海岸工学講演会論文集，1975，pp. 155-160.
- 14) 市原正史・福代倫男・柳島慎一：三次元モデルによる東京湾の局所的な流況シミュレーション，第27回海岸工学講演会論文集，1980，pp. 443-447.
- 15) 堀口孝男・富田 勇・堀江 毅：三次元モデルによる流れと拡散の数値解法について，第24回海岸工学講演会論文集，1977，pp. 443-447.
- 16) 堀口孝男・富田 勇・堀江 毅：三次元モデルによる流れと拡散の数値解法について，第25回海岸工学講演会論文集，1978，pp. 508-512.
- 17) 堀口孝男・曾我部隆久・堀江 毅：三次元モデルによる流れと拡散の数値解法について，第26回海岸工学講演会論文集，1979，pp. 600-604.
- 18) 森平倫生・笹島 博・久保省吾・西田寿夫・川原陸人：有限要素法を用いた三次元流れ・拡散解析，第26回海岸工学講演会論文集，1979，pp. 595-599.
- 19) 運輸省第三港湾建設局関西国際空港調査室・CRC センチュリリサーチセンタ株式会社：大阪湾流動・拡散数値シミュレーション調査報告書，1979，296 p.
- 20) Leendertse, J.J.: A three-dimensional model for estuaries and coastal seas: *Volume I, Principles of computation, The Rand Corporation*, R-1417-OWRR, 1973.
- 21) 運輸省第三港湾建設局関西国際空港調査室・CRC センチュリリサーチセンタ株式会社：潮流および水質調査資料の整理解析調査—潮流資料編—，昭和55年3月。
- 22) 運輸省第三港湾建設局：水質改善予測調査報告書，昭和56年3月。
- 23) Stumm, W., Leckie, J. O.: Phosphate Exchange with Sediments, It's Role in the Productivity of Surface Waters, *Proc. of the 5th International Water Pollution Reseach Conference III-26/1~15 (1971)*, Pergamon Press LTD.
- 24) 堀江 毅：沿岸海域の水の流れと物質の拡散に関する水理学的研究，港湾技研資料 No. 360, 1980. 12, 222 p.
- 25) 大阪府：大阪府下河川等水質調査結果報告書，昭和51, 52, 53年度。
- 26) 運輸省第三港湾建設局：大阪湾全域汚染実態調査報告書，昭和58年3月。

付録 1. 3層の物質循環モデル

2.1 で述べた物質循環モデルにおいて、有機態リン、無機態リン、COD、溶存酸素の時間変化は3層レベルモデルの場合それぞれつぎのような微分方程式で表すことができる。

有機態リン

上層(第1層)

$$\begin{aligned} \frac{\partial OP_1 \cdot D_1}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x}(OP_1 \cdot u_1 \cdot D_1) - \frac{\partial}{\partial y}(OP_1 \cdot v_1 \cdot D_1) \\ & + \frac{\partial}{\partial x}\left(KD_1 \frac{\partial OP_1}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(KD_1 \frac{\partial OP_1}{\partial y}\right) \\ & - K_2(OP_1 - OP_2) + G \cdot OP_1 \cdot D_1 \\ & - B_1^P \cdot OP_1 \cdot D_1 - S_1^P \cdot OP_1 + w_{3/2} \cdot OP^* \end{aligned} \quad (A.1)$$

中層(第2層)

$$\begin{aligned} \frac{\partial OP_2 \cdot D_2}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x}(OP_2 \cdot u_2 \cdot D_2) - \frac{\partial}{\partial y}(OP_2 \cdot v_2 \cdot D_2) \\ & + \frac{\partial}{\partial x}\left(KD_2 \frac{\partial OP_2}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(KD_2 \frac{\partial OP_2}{\partial y}\right) \\ & + K_2(OP_1 - OP_2) - K_2(OP_2 - OP_3) \\ & + G \cdot OP_2 \cdot D_2 - B_2^P \cdot OP_2 \cdot D_2 + S_1^P \cdot OP_1 \\ & - S_2^P \cdot OP_2 - w_{3/2} \cdot OP^* + w_{5/2} \cdot OP^{**} \end{aligned} \quad (A.2)$$

下層(第3層)

$$\begin{aligned} \frac{\partial OP_3 \cdot D_3}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x}(OP_3 \cdot u_3 \cdot D_3) - \frac{\partial}{\partial y}(OP_3 \cdot v_3 \cdot D_3) \\ & + \frac{\partial}{\partial x}\left(KD_3 \frac{\partial OP_3}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(KD_3 \frac{\partial OP_3}{\partial y}\right) \\ & + K_2(OP_2 - OP_3) - B_3^P \cdot OP_3 \cdot D_3 \\ & + S_2^P \cdot OP_2 - S_3^P \cdot OP_3 - w_{5/2} \cdot OP^{**} \end{aligned} \quad (A.3)$$

無機態リン

上層(第1層)

$$\begin{aligned} \frac{\partial IP_1 \cdot D_1}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x}(IP_1 \cdot u_1 \cdot D_1) - \frac{\partial}{\partial y}(IP_1 \cdot v_1 \cdot D_1) \\ & + \frac{\partial}{\partial x}\left(KD_1 \frac{\partial IP_1}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(KD_1 \frac{\partial IP_1}{\partial y}\right) \\ & - K_2(IP_1 - IP_2) - G \cdot OP_1 \cdot D_1 \\ & + B_1^P \cdot OP_1 \cdot D_1 + w_{3/2} \cdot IP^* + L_{IP} \end{aligned} \quad (A.4)$$

中層(第2層)

$$\frac{\partial IP_2 \cdot D_2}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(IP_2 \cdot u_2 \cdot D_2) - \frac{\partial}{\partial y}(IP_2 \cdot v_2 \cdot D_2)$$

$$\begin{aligned} & + \frac{\partial}{\partial x}\left(KD_2 \frac{\partial IP_2}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(KD_2 \frac{\partial IP_2}{\partial y}\right) \\ & + K_2(IP_1 - IP_2) - K_2(IP_2 - IP_3) \\ & - G \cdot OP_2 \cdot D_2 + B_2^P \cdot OP_2 \cdot D_2 \\ & - w_{3/2} \cdot IP^* + w_{5/2} \cdot IP^{**} \end{aligned} \quad (A.5)$$

下層(第3層)

$$\begin{aligned} \frac{\partial IP_3 \cdot D_3}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x}(IP_3 \cdot u_3 \cdot D_3) - \frac{\partial}{\partial y}(IP_3 \cdot v_3 \cdot D_3) \\ & + \frac{\partial}{\partial x}\left(KD_3 \frac{\partial IP_3}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(KD_3 \frac{\partial IP_3}{\partial y}\right) \\ & + K_2(IP_2 - IP_3) + B_3^P \cdot OP_3 \cdot D_3 \\ & - w_{5/2} \cdot IP^{**} + R_{IP} \end{aligned} \quad (A.6)$$

COD

上層(第1層)

$$\begin{aligned} \frac{\partial COD_1 \cdot D_1}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x}(COD_1 \cdot u_1 \cdot D_1) - \frac{\partial}{\partial y}(COD_1 \cdot v_1 \cdot D_1) \\ & + \frac{\partial}{\partial x}\left(KD_1 \frac{\partial COD_1}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(KD_1 \frac{\partial COD_1}{\partial y}\right) \\ & - K_2(COD_1 - COD_2) + \beta \cdot G \cdot OP_1 \cdot D_1 \\ & - B_1^C \cdot COD_1 \cdot D_1 - S_1^C \cdot COD_1 \\ & + w_{2/3} \cdot COD^* + L_{COD} \end{aligned} \quad (A.7)$$

中層(第2層)

$$\begin{aligned} \frac{\partial COD_2 \cdot D_2}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x}(COD_2 \cdot u_2 \cdot D_2) - \frac{\partial}{\partial y}(COD_2 \cdot v_2 \cdot D_2) \\ & + \frac{\partial}{\partial x}\left(KD_2 \frac{\partial COD_2}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(KD_2 \frac{\partial COD_2}{\partial y}\right) \\ & + K_2(COD_1 - COD_2) - K_2(COD_2 - COD_3) \\ & + \beta \cdot G \cdot OP_2 \cdot D_2 - B_2^C \cdot COD_2 \cdot D_2 \\ & + S_1^C \cdot COD_1 - S_2^C \cdot COD_2 \\ & - w_{3/2} \cdot COD^* + w_{5/2} \cdot COD^{**} \end{aligned} \quad (A.8)$$

下層(第3層)

$$\begin{aligned} \frac{\partial COD_3 \cdot D_3}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x}(COD_3 \cdot u_3 \cdot D_3) - \frac{\partial}{\partial y}(COD_3 \cdot v_3 \cdot D_3) \\ & + \frac{\partial}{\partial x}\left(KD_3 \frac{\partial COD_3}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(KD_3 \frac{\partial COD_3}{\partial y}\right) \\ & + K_2(COD_2 - COD_3) - B_3^C \cdot COD_3 \cdot D_3 \\ & + S_2^C \cdot COD_2 - S_3^C \cdot COD_3 \\ & + R_{COD} - w_{5/2} \cdot COD^{**} \end{aligned} \quad (A.9)$$

溶存酸素

上層 (第1層)

$$\begin{aligned} & \frac{\partial DO_1 \cdot D_1}{\partial t} \\ &= -\frac{\partial}{\partial x}(DO_1 \cdot u_1 \cdot D_1) - \frac{\partial}{\partial y}(DO_1 \cdot v_1 \cdot D_1) \\ &+ \frac{\partial}{\partial x}\left(KD_1 \frac{\partial DO_1}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(KD_1 \frac{\partial DO_1}{\partial y}\right) \\ &- K_2(DO_1 - DO_2) + \gamma \cdot G \cdot OP_1 \cdot D_1 \\ &- B_1^O \cdot COD_1 \cdot D_1 + A \cdot (HOWA - DO_1) \\ &+ w_{3/2} \cdot DO^* \end{aligned} \quad (A \cdot 10)$$

中層 (第2層)

$$\begin{aligned} & \frac{\partial DO_2 \cdot D_2}{\partial t} \\ &= -\frac{\partial}{\partial x}(DO_2 \cdot u_2 \cdot D_2) - \frac{\partial}{\partial y}(DO_2 \cdot v_2 \cdot D_2) \\ &+ \frac{\partial}{\partial x}\left(KD_2 \frac{\partial DO_2}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(KD_2 \frac{\partial DO_2}{\partial y}\right) \\ &+ K_2(DO_1 - DO_2) - K_2(DO_2 - DO_3) \\ &+ \gamma \cdot G \cdot OP_2 \cdot D_2 - B_2^O \cdot COD_2 \cdot D_2 \\ &- w_{3/2} \cdot DO^* + w_{5/2} DO^{**} \end{aligned} \quad (A \cdot 11)$$

下層 (第3層)

$$\begin{aligned} & \frac{\partial DO_3 \cdot D_3}{\partial t} \\ &= -\frac{\partial}{\partial x}(DO_3 \cdot u_3 \cdot D_3) - \frac{\partial}{\partial y}(DO_3 \cdot v_3 \cdot D_3) \\ &+ \frac{\partial}{\partial x}\left(KD_3 \frac{\partial DO_3}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(KD_3 \frac{\partial DO_3}{\partial y}\right) \\ &+ K_2(DO_2 - DO_3) - B_3^O \cdot COD_3 \cdot D_3 \\ &- (DB) - w_{5/2} \cdot DO^{**} \end{aligned} \quad (A \cdot 12)$$

ここに、

t : 時間, (x, y) : 直交直線座標系の水平2成分, (u_i, v_i) : 第 i 層の x および y 方向の流速, $w_{3/2}, w_{5/2}$: 第1~2層間および第2~3層間の鉛直流速, D_i : 第 i 層の層厚, OP_i : 第 i 層の有機態リン (O-P) 濃度, IP_i : 第 i 層の無機態リン (I-P) 濃度, COD_i : 第 i 層の COD 濃度, DO_i : 第 i 層の溶存酸素濃度, K : 水平拡散係数, K_2 : 鉛直混合係数, G : 生産速度 ($G = G_0 \times IP / (0.027 + IP)$), B_i^P : 第 i 層の O-P 分解速度, B_i^C : 第 i 層の COD 分解速度, B_i^O : 第 i 層の分解による酸素消費速度, S_i^P : 第 i 層の O-P の沈降速度, S_i^C : 第 i 層の COD 沈降速度, R_{IP} : リンの溶出速度, R_{COD} : COD の溶出速度, L_{IP} : リン流入負荷量, L_{COD} : COD の流入負荷量, A : 再曝気係数, $HOWA$: 酸素飽和濃度,

DB : 底泥の酸素消費速度, β : COD 換算係数, γ : DO 換算係数, である。さらに、

$w_{3/2} > 0$ のとき

$$OP^* = OP_2, IP^* = IP_2, COD^* = COD_2, DO^* = DO_2$$

$w_{3/2} < 0$ のとき

$$OP^* = OP_1, IP^* = IP_1, COD^* = COD_1, DO^* = DO_1$$

$w_{5/2} > 0$ のとき

$$OP^{**} = OP_3, IP^{**} = IP_3, COD^{**} = COD_3,$$

$$DO^{**} = DO_3$$

$w_{5/2} < 0$ のとき

$$OP^{**} = OP_2, IP^{**} = IP_2, COD^{**} = COD_2,$$

$$DO^{**} = DO_2$$

以上, 式 (A, 1)~(A. 12) を陽形式で差分化して, OP_i, IP_i, COD_i および DO_i ($i=1, 2, 3$) を時間ステップごとに求めてゆく。

一方3層レイヤーモデルでは, 式 (A. 1)~(A. 12) において $w_{3/2}$ および $w_{5/2}$ を含む項が脱落した式となる。

付録 2. 3層の流れモデル

流れの3層レベルモデルに対しては, 全層, 第2層と第3層, および第3層の連続式:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u_1 D_1 + u_2 D_2 + u_3 D_3) \\ &+ \frac{\partial}{\partial y}(v_1 D_1 + v_2 D_2 + v_3 D_3) = 0 \end{aligned} \quad (A \cdot 13)$$

$$\begin{aligned} & w_{3/2} + \frac{\partial}{\partial x}(u_2 D_2 + u_3 D_3) \\ &+ \frac{\partial}{\partial y}(v_2 D_2 + v_3 D_3) = 0 \end{aligned} \quad (A \cdot 14)$$

$$w_{5/2} + \frac{\partial}{\partial x} u_3 D_3 + \frac{\partial}{\partial y} v_3 D_3 = 0 \quad (A \cdot 15)$$

第1, 第2および第3層の x, y 方向の運動方程式:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} + v_1 \frac{\partial u_1}{\partial y} + w_{3/2} \frac{\rho_{3/2}(u_1 - u_2)}{2\rho_1 D_1} \\ &= f v_1 - \frac{1}{\rho_1} \frac{\partial p_1}{\partial x} + A_x \frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2} + A_y \frac{\partial^2 u_1}{\partial y^2} \\ &- \gamma_i^2 (u_1 - u_2) \sqrt{(u_1 - u_2)^2 + (v_1 - v_2)^2} / D_1 \end{aligned} \quad (A \cdot 16)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial v_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial v_1}{\partial x} + v_1 \frac{\partial v_1}{\partial y} + w_{3/2} \frac{\rho_{3/2}(v_1 - v_2)}{2\rho_1 D_1} \\ &= -f u_1 - \frac{1}{\rho_1} \frac{\partial p_1}{\partial y} + A_x \frac{\partial^2 v_1}{\partial x^2} + A_y \frac{\partial^2 v_1}{\partial y^2} \\ &- \gamma_i^2 (v_1 - v_2) \sqrt{(u_1 - u_2)^2 + (v_1 - v_2)^2} / D_1 \end{aligned} \quad (A \cdot 17)$$

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial u_2}{\partial t} + u_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} + v_2 \frac{\partial u_2}{\partial y} - w_{3/2} \frac{\rho_{3/2}(u_1 - u_2)}{2 \rho_2 D_2} \\
& + w_{5/2} \frac{\rho_{5/2}(u_2 - u_3)}{2 \rho_2 D_2} \\
& = f v_2 - \frac{1}{\rho_2} \frac{\partial p_2}{\partial x} + A_x \frac{\partial^2 u_2}{\partial x^2} + A_y \frac{\partial^2 u_2}{\partial y^2} \\
& + \gamma_i^2 (u_1 - u_2) \sqrt{(u_1 - u_2)^2 + (v_1 - v_2)^2} / D_2 \\
& - \gamma_i^2 (u_2 - u_3) \sqrt{(u_2 - u_3)^2 + (v_2 - v_3)^2} / D_2
\end{aligned} \tag{A.18}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial v_2}{\partial t} + u_2 \frac{\partial v_2}{\partial x} + v_2 \frac{\partial v_2}{\partial y} - w_{3/2} \frac{\rho_{3/2}(v_1 - v_2)}{2 \rho_2 D_2} \\
& + w_{5/2} \frac{\rho_{5/2}(v_2 - v_3)}{2 \rho_2 D_2} \\
& = -f u_2 - \frac{1}{\rho_2} \frac{\partial p_2}{\partial y} + A_x \frac{\partial^2 v_2}{\partial x^2} + A_y \frac{\partial^2 v_2}{\partial y^2} \\
& + \gamma_i^2 (v_1 - v_2) \sqrt{(u_1 - u_2)^2 + (v_1 - v_2)^2} / D_2 \\
& - \gamma_i^2 (v_2 - v_3) \sqrt{(u_2 - u_3)^2 + (v_2 - v_3)^2} / D_2
\end{aligned} \tag{A.19}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial u_3}{\partial t} + u_3 \frac{\partial u_3}{\partial x} + v_3 \frac{\partial u_3}{\partial y} - w_{5/2} \frac{\rho_{5/2}(u_2 - u_3)}{2 \rho_3 D_3} \\
& = f v_3 - \frac{1}{\rho_3} \frac{\partial p_3}{\partial x} + A_x \frac{\partial^2 u_3}{\partial x^2} + A_y \frac{\partial^2 u_3}{\partial y^2} \\
& + \gamma_i^2 (u_2 - u_3) \sqrt{(u_2 - u_3)^2 + (v_2 - v_3)^2} / D_3 \\
& - \gamma_i^2 u_3 \sqrt{u_3^2 + v_3^2} / D_3
\end{aligned} \tag{A.20}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial v_3}{\partial t} + u_3 \frac{\partial v_3}{\partial x} + v_3 \frac{\partial v_3}{\partial y} - w_{5/2} \frac{\rho_{5/2}(v_2 - v_3)}{2 \rho_3 D_3} \\
& = -f u_3 - \frac{1}{\rho_3} \frac{\partial p_3}{\partial y} + A_x \frac{\partial^2 v_3}{\partial x^2} + A_y \frac{\partial^2 v_3}{\partial y^2} \\
& + \gamma_i^2 (v_2 - v_3) \sqrt{(u_2 - u_3)^2 + (v_2 - v_3)^2} / D_3 \\
& - \gamma_i^2 v_3 \sqrt{u_3^2 + v_3^2} / D_3
\end{aligned} \tag{A.21}$$

および第1, 第2, 第3層の密度拡散式:

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial [\rho_1(D_1 + \zeta)]}{\partial t} \\
& = - \frac{\partial}{\partial x} [u_1 \rho_1(D_1 + \zeta)] - \frac{\partial}{\partial y} [v_1 \rho_1(D_1 + \zeta)]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - w_{3/2} \rho_{3/2} + \frac{\partial}{\partial x} [K_x(D_1 + \zeta) \frac{\partial \rho_1}{\partial x}] \\
& + \frac{\partial}{\partial x} [K_y(D_1 + \zeta) \frac{\partial \rho_1}{\partial y}] - \left(K_z \frac{\partial \rho_1}{\partial z} \right)_{3/2}
\end{aligned} \tag{A.22}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial (\rho_2 D_2)}{\partial t} & = - \frac{\partial}{\partial x} (u_2 \rho_2 D_2) - \frac{\partial}{\partial y} (v_2 \rho_2 D_2) \\
& + w_{3/2} \rho_{3/2} - w_{5/2} \rho_{5/2} \\
& + \frac{\partial}{\partial x} (K_x D_2 \frac{\partial \rho_2}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_y D_2 \frac{\partial \rho_2}{\partial y}) \\
& + \left(K_z \frac{\partial \rho_2}{\partial z} \right)_{3/2} - \left(K_z \frac{\partial \rho_2}{\partial z} \right)_{5/2}
\end{aligned} \tag{A.23}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial (\rho_3 D_3)}{\partial t} & = - \frac{\partial}{\partial x} (u_3 \rho_3 D_3) - \frac{\partial}{\partial y} (v_3 \rho_3 D_3) - w_{5/2} \rho_{5/2} \\
& + \frac{\partial}{\partial x} (K_x D_3 \frac{\partial \rho_3}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_y D_3 \frac{\partial \rho_3}{\partial y}) \\
& + \left(K_z \frac{\partial \rho_3}{\partial z} \right)_{5/2}
\end{aligned} \tag{A.24}$$

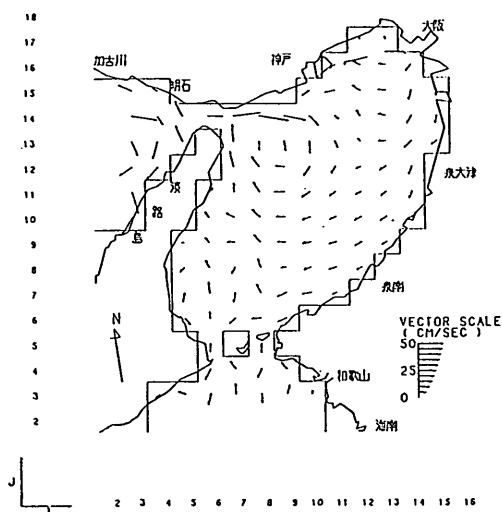
の計12式を基本式とし陰形式(ただし式(A.22)~(A.24)は陽形式)に差分化して $(u_i, v_i) (i=1, 2, 3)$, $w_{3/2}$, $w_{5/2}$ および ζ を時間ステップごとに計算する。

付録 3. 3層モデルの計算条件と諸定数

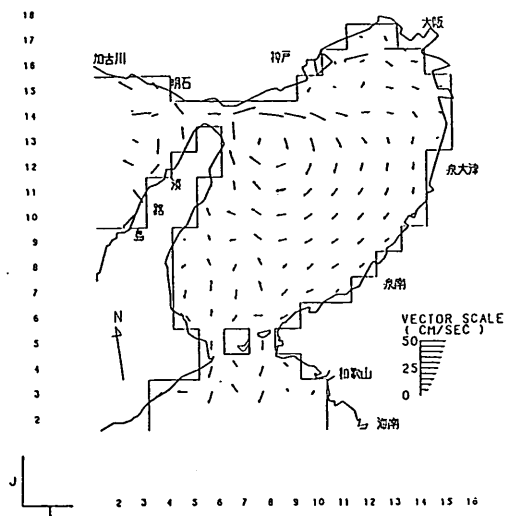
表-A.1 3層流れの計算条件

諸元	採用した値
水深及び格子間隔	図-3.2参照, 4 km
層厚	第1層: 5 m, 第2層 5 m
境界条件	図-3.3参照
淡水流入量	図-3.1参照
内部摩擦係数	0.0013
海底摩擦係数	0.0026
水平渦動粘性係数	$5 \times 10^9 \text{ cm}^2/\text{s}$
初期密度 (σ_t)	第1層 20.8g/cm ³ , 第2層 20.8g/cm ³ , 第3層 22.2g/cm ³
タイムステップ	360秒
計算時間	8潮汐

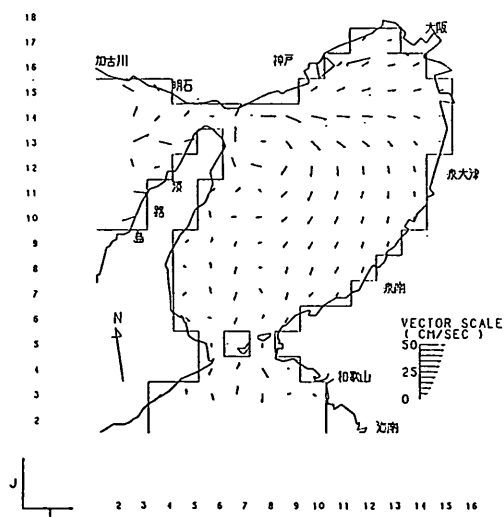
海域における物質循環数値モデルの水質支配要因について



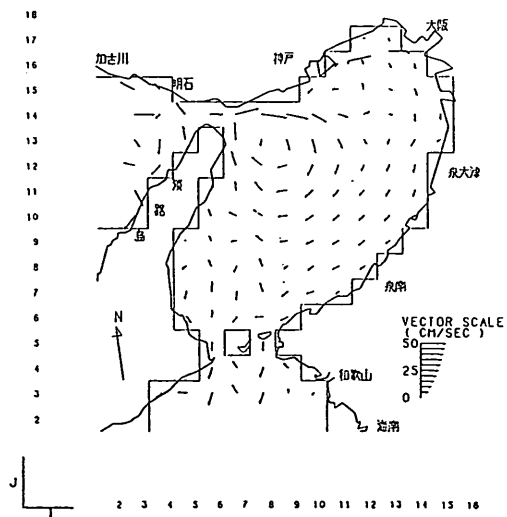
(1) 上層



(2) 中層



(3) 下層



(4) 全層平均

図-A.1 3層レベルモデルによる水平残差流

海域における物質循環数値モデルの水質支配要因について

表-A.2 3層物質循環の計算条件

諸元		ケース	16, 17	18	19
生産速度 (1/日)			0.488	上層のみ0.488	上層・中層0.488
O-P分解 (1/日)	上層		0.0198	0.0198	
	中層			0.0198	
	下層			0.0201	
COD分解 (1/日)	上		0.0155	0.0155	
	中			0.0155	
	下			0.0160	
分解によるDO消費 (1/日)	上		0.0239	0.0239	
	中			0.0239	
	下			0.0147	
O-P沈降 (m/日)	上		0.53	0.53	
	中			0.53	
	下			1.04	
COD沈降 (m/日)	上		0.65	0.65	
	中			0.65	
	下			1.95	
底泥のDO消費 (mg/m ² /日)	ブロッカー-1		5000	5000	
	" -2		3000	3000	
	" -3		3000	3000	
	" -4		459	459	
I-P溶出 (mg/m ² /日)	ブロッカー-1		29.41	29.41	同左
	" -2		21.30	21.30	
	" -3		7.21	7.21	
	" -4		6.42	6.42	
COD溶出 (mg/m ² /日)	ブロッカー-1		211.0	211.0	
	" -2		105.5	105.5	
	" -3		93.8	93.8	
	" -4		66.4	66.4	
境界条件			希釈係数0.90 DOは上8.0, 下6.0 ppmに固定	希釈係数0.90 DOは上8.0, 中8.0 下6.0ppmに固定	
COD換算係数			93	93	
DO換算係数			143	143	
再曝気係数 (1/日)			0.1	0.1	
拡散係数 (cm ² /s)			10 ⁵	10 ⁵	
初期値 (ppm)	O-P		(上)0.04, (下)0.04	(上)0.04, (中)0.04, (下)0.04	
	I-P		0 0	0 0 0	
	COD		1.4 1.0	1.4 1.4 1.0	
	DO		8 6	8 8 6	
タイムステップ (秒)			720	720	
計算時間 (潮汐)			60	60	