

# 大阪湾における水質の季節変動 に関する数値実験

## NUMERICAL EXPERIMENTS OF SEASONAL VARIATION OF WATER QUALITY IN OSAKA BAY

山根伸之<sup>1</sup>・寺口貴康<sup>2</sup>・中辻啓二<sup>3</sup>・村岡浩爾<sup>3</sup>

Nobuyuki YAMANE, Takayasu TERAGUTI, Keiji NAKATSUJI, Kohji MURAOKA

<sup>1</sup>正 会 員 (株)建設技術研究所 大阪支社 (〒540 大阪市中央区大手前 1-2-15)

<sup>2</sup>学生会員 大阪大学大学院 工学研究科 (〒565 吹田市山田丘 2-1)

<sup>3</sup>正 会 員 大阪大学教授 工学部土木工学科 (〒565 吹田市山田丘 2-1)

In examining the seasonal variation of water qualities and ecological characteristics, it is of great importance to establish eco-system numerical modelling accompanied with 3-D baroclinic flow model. The model describes the biological and chemical processes in the estuarine lower trophic eco-system in terms of chlorophyll-a, inorganic nitrogen, inorganic phosphorus, organic nitrogen, organic phosphorus, COD, DO. The model performance in simulating seasonal variation of water qualities in Osaka Bay can be conformed through the field data. In particular, the increase in phyto-plankton in the bay head is dependent of upwelling of nutrients in lower layer transported by the estuarine circulation.

**Key Words:** Osaka Bay, eco-system model, water quality, matter cycle, estuarine circulation

### 1. はじめに

大阪湾の水質は空間的にも季節的にも大きな変動が見られる。このような水質分布の季節変化を理解するには、陸域からの負荷流入、底泥からの負荷溶出、湾内における物質輸送、さらには輸送過程での内部生産、消滅等の各種変化の空間構造、季節変化構造を明らかにする必要がある。著者らはこれまで、大阪湾内の流動構造を数値実験や現地観測により明らかにするとともに<sup>1)</sup>、水質分布の季節変動特性を既往の水質観測結果をもとに明らかにした<sup>2)</sup>。しかしながら、このような湾内の物質循環機構の詳細を定量的に理解するには現地観測に加えて、三次元数値実験を並行に実施することが望ましい。

本研究では、これまでに構築した三次元バロクリニック流れのモデルに加えて一次生産を考慮した生態系モデルを構築し、湾内の夏季、冬季の水質構造に関する数値実験を行い、その再現性を検討するとともに、水質変化の構造について考察を行った。

### 2. 数値解析モデル

本研究で用いた大阪湾水質解析モデルは、三次元バロクリニック流れモデルと一次生産を考慮した生態系モデルから構成されている。生態系モデルの流動および密度場は三次元バロクリニック流れモデルの計算結果を用いている。

#### (1) 三次元バロクリニック流れモデル

流動・密度場の計算はこれまで中辻<sup>3)</sup>が大阪湾で用いてきた三次元バロクリニック流れの数値モデルを用いている。数値モデルは連続式、運動式、水温・塩分の拡散式、海表面での熱収支式および密度の状態方程式で構成される。水平方向の渦動粘性係数ならびに渦動拡散係数にはSGS粘性係数を用い、粘性係数の時空間変化を考慮している。鉛直方向の渦動粘性係数、渦動拡散係数はリチャードソン数の関数とし、湾内の成層状況の違いによる鉛直方向輸送量の時空間変化を考慮している。

## (2) 三次元生態系モデル

生態系モデルは三次元バロクリニック流れモデルで算定された流動場における窒素、リン、COD、溶存酸素の生物化学的な変化過程をモデル化している。計算対象とする物質形態は生物体有機物を代表する植物プランクトン量としてクロロフィル a (PP)、栄養塩として無機態窒素 (IN)、無機態リン (IP)、非生物体の有機態窒素 (ON)、有機態リン (OP)、化学的酸素要求量 (COD)、さらに溶存酸素 (DO) を設定した。湾内の各物質の濃度変化は図-1 に示す変化過程をモデル化した。

各物質の収支式はいずれの物質にも共通する移流、拡散過程と生物化学的変化を主体とする内部変化過程に分けて以下のように定式化した。

a) 移流、拡散過程

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_i}{\partial t} = & -\frac{\partial UC_i}{\partial x} - \frac{\partial VC_i}{\partial y} - \frac{\partial WC_i}{\partial z} + K_x \frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2} \\ & + K_y \frac{\partial^2 C_i}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 C_i}{\partial z^2} + \sum Si(C_j) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 $C_i$  は  $i$  なる物質の濃度である。また、 $U, V, W$  は  $x$  (東西)、 $y$  (南北)、 $z$  (鉛直) 各方向の流速成分、 $K_x, K_y, K_z$  は同じく各方向の渦動拡散係数である。これらは三次元バロクリニック流れの計算結果を用いており三次元空間的に、また時間的に変化する物理量である。 $Si(C_j)$  は内部変化過程を示し、 $j$  なる物質の  $i$  なる物質への変化量である。

b) 内部変化過程

$$\frac{\partial PP}{\partial t} = \{G_P - R_P - D_P\} PP + U_{PP} \frac{\partial PP}{\partial z} \quad (2)$$

$$G_P = \mu_{max} \cdot F_N \cdot F_I \cdot F_T \quad (3)$$

$$F_N = \text{Min} \left[ \frac{IP}{K_{IP} + IP}, \frac{IN}{K_{IN} + IN} \right]$$

$$F_I = \frac{I}{I_s} \exp \left[ 1 - \frac{I}{I_s} \right], \quad F_T = \frac{T}{T_s} \exp \left[ 1 - \frac{T}{T_s} \right]$$

$$\frac{\partial IP}{\partial t} = -F_P G_P PP + K_P OP + \frac{W_{IP}}{H_b} \quad (4)$$

$$\frac{\partial IN}{\partial t} = -F_N G_P PP + K_N ON + \frac{W_{IN}}{H_b} \quad (5)$$

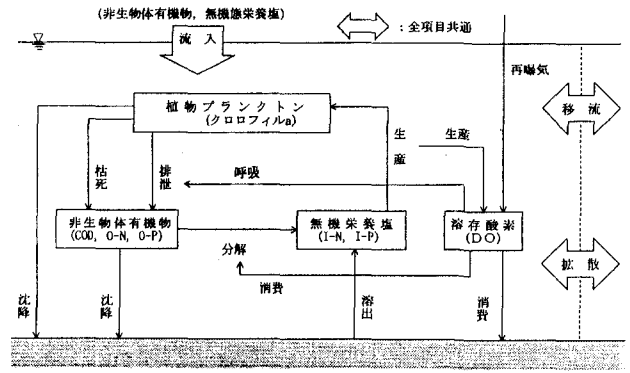


図-1 生態系モデルの物質循環模式図

$$\begin{aligned} \frac{\partial OP}{\partial t} = & F_P \{ R_P + D_P \} PP \\ & - K_P OP + U_{OP} \frac{d OP}{dz} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial ON}{\partial t} = & F_N \{ R_P + D_P \} PP \\ & - K_N ON + U_{ON} \frac{d ON}{dz} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial COD}{\partial t} = & F_C \{ R_P + D_P \} \cdot PP - K_C COD \\ & + U_{COD} \frac{d COD}{dz} + \frac{W_C}{H_b} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial DO}{\partial t} = & F_{PDO} \{ G_P - R_P \} PP - F_{CDO} K_C COD \\ & + K_S (DOS - DO_s) - \frac{W_{DO}}{H_b} \end{aligned} \quad (9)$$

ここで、PP; 植物プランクトン(クロロフィル a) 濃度、 $G_P$ ; 植物プランクトンの増殖速度、 $F_N, F_I, F_T$ ; それぞれ増殖速度の栄養塩、日射量、水温依存項、IP, IN; 無機態リンおよび窒素濃度、OP, ON, COD; 非生物体の有機態リン、有機態窒素および COD 濃度、DO; 溶存酸素濃度、 $H_b$ ; 底層の層厚、DOS; 飽和溶存酸素濃度、 $DO_s$ ; 表層の溶存酸素濃度である。その他の反応速度係数および換算係数の説明は表-1にまとめて示している。ここで、非生物体有機物はデトリタス態と溶存態の有機物の総称としている。

### (3) 計算条件

計算領域は図-2に示す大阪湾を中心とした64km四方を対象とし、水域分割は水平方向に1kmメッシュ、鉛直方向は湾内の流動・密度の鉛直分布をより正確に表現するために、表層から2m×15層位、4m, 6m, 10m×2層位の全19層位とした。計算に用いた境界条

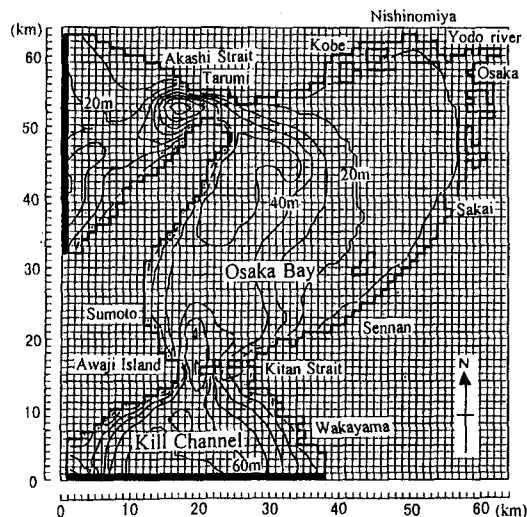


図-2 大阪湾の計算領域と空間分割

件を表-2に示す。流動計算については海側の境界条件は明石海峡、紀淡海峡において平均潮（ $M_2$ ）の潮位変動と水温・塩分の鉛直分布を与え、陸側境界は淀川・大和川をはじめとする主要21河川からの流入水量と水温・塩分を与えた。これら境界の河川流入量や水温・塩分条件および海表面の熱収支条件は既往の月別の観測データから夏季は7、8月、冬季は1、2月の平均値を設定した。ただし、淀川、大和川を除くその他の19河川の流入水量は夏季、冬季で同じとした。流動計算は50潮汐の繰り返し計算を行い、最終の50潮汐目の流動・密度場の時間変化を最終計算結果とした。水質計算については海側境界に各物質濃度、陸側境界に各物質流入負荷量を夏季、冬季別に与えた。なお、各河川のクロロフィルa濃度は $10\mu\text{g}/\ell$ 、DO濃度は飽和濃度とした。各河川の流入水質は夏季、冬季で変化はないものとした。また、各種内部変化過程におけるモデルパラメータについては既往の大阪湾における設定事例を参考に表-1に示すように設定した。底泥における $IN_{IP}$ 負荷溶出、溶存酸素消費の各速度は既往報告値を参考に地区別に設定した。水質計算に用いた各空間要素の水位、流速、水温、渦動拡散係数は流動計算における30分毎のデータを計算時間間隔毎に線形補間して与え、30潮汐の繰り返し計算を行った。

### 3. 数値実験結果と考察

#### (1) 大阪湾の流動、密度構造の季節変動

図-3は夏季と冬季の1潮汐平均の流速場と密度場の表層水平分布と東西方向鉛直分布を示す。夏季の大阪湾の密度分布の計算結果から、湾西部では水深

表-1 水質モデルパラメータ

| 記号                 | 名 称                                              | 設 定 値                                |
|--------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------|
| $\mu_{\text{MAX}}$ | 最大増殖率 ( $\text{day}^{-1}$ )                      | 2.4                                  |
| $T_s$              | 最適水温 ( $^{\circ}\text{C}$ )                      | 25                                   |
| $I_s$              | 最適日射量 ( $\text{cal}/\text{cm}^2/\text{day}$ )    | 200                                  |
| $K_{IP}$           | リン半飽和定数 ( $\text{g}/\text{m}^3$ )                | 0.005                                |
| $K_{IN}$           | 窒素半飽和定数 ( $\text{g}/\text{m}^3$ )                | 0.025                                |
| $R_p$              | 植物プランクトン呼吸速度 ( $\text{day}^{-1}$ )               | $0.13 \cdot 1.07^{T-20}$             |
| $D_p$              | 植物プランクトン枯死速度 ( $\text{day}^{-1}$ )               | $0.10 \cdot 1.07^{T-20}$             |
| $U_{PP}$           | 植物プランクトン沈降速度 ( $\text{m}/\text{day}$ )           | 0.0                                  |
| $K_P$              | 有機態リン分解速度 ( $\text{day}^{-1}$ )                  | $0.02 \cdot 1.09^{T-20}$             |
| $U_{OP}$           | 有機態リン沈降速度 ( $\text{m}/\text{day}$ )              | 0.3                                  |
| $W_{IP}$           | リン溶出速度 ( $\text{gP}/\text{m}^2/\text{day}$ )     | $0.007 \sim 0.025 \cdot 1.05^{T-20}$ |
| $K_N$              | 有機態窒素分解速度 ( $\text{day}^{-1}$ )                  | $0.02 \cdot 1.09^{T-20}$             |
| $U_{ON}$           | 有機態窒素沈降速度 ( $\text{m}/\text{day}$ )              | 0.3                                  |
| $W_{IN}$           | 窒素溶出速度 ( $\text{gN}/\text{m}^2/\text{day}$ )     | $0.03 \sim 0.05 \cdot 1.05^{T-20}$   |
| $K_C$              | COD 分解速度 ( $\text{day}^{-1}$ )                   | $0.02 \cdot 1.09^{T-20}$             |
| $U_{COD}$          | COD 沈降速度 ( $\text{m}/\text{day}$ )               | 0.3                                  |
| $W_C$              | COD 溶出速度 ( $\text{gCOD}/\text{m}^2/\text{day}$ ) | $0.10 \sim 0.15 \cdot 1.05^{T-20}$   |
| $K_a$              | 再曝気係数 ( $\text{day}^{-1}$ )                      | 0.1                                  |
| $W_{DO}$           | 底泥酸素消費速度 ( $\text{gO}/\text{m}^2/\text{day}$ )   | $1.3 \sim 5.0 \cdot 1.05^{T-20}$     |
| $F_P$              | 換算係数 ( $\text{gP}/\text{gChla}$ )                | 1.8                                  |
| $F_N$              | 換算係数 ( $\text{gN}/\text{gChla}$ )                | 36.0                                 |
| $F_C$              | 換算係数 ( $\text{gCOD}/\text{gChla}$ )              | 129.0                                |
| $F_{DO}$           | 換算係数 ( $\text{gO}_2/\text{gChla}$ )              | 113.0                                |
| $F_{CDO}$          | 換算係数 ( $\text{gO}_2/\text{gCOD}$ )               | 0.88                                 |

表-2 流動、水質計算の境界条件

| モデル   | 境界条件 |                          |        | 夏季           | 冬季                      |  |
|-------|------|--------------------------|--------|--------------|-------------------------|--|
| 流動モデル | 海面境界 | 気温 ℃                     |        | 26.7         | 5.5                     |  |
|       |      | 雲量                       |        | 6.7          | 6.1                     |  |
|       |      | 風速 m/s                   |        | 3.0          | 3.5                     |  |
|       |      | 水蒸気圧 hPa                 |        | 25.8         | 5.8                     |  |
|       |      | 日射量 W/m <sup>2</sup>     |        | 193.5        | 76.4                    |  |
|       | 陸側境界 | 流入量<br>m <sup>3</sup> /s | 淀川     | 367.9        | 142.1                   |  |
|       |      |                          | 大和川    | 27.2         | 16.1                    |  |
|       |      | 流入水温 ℃                   |        | 28.9         | 7.0                     |  |
|       |      | 流入塩分 psu                 |        | 20.0         | 23.0                    |  |
|       | 海側境界 | 潮汐変動                     |        |              | M <sub>2</sub> 分潮 (平均潮) |  |
|       |      | 水温 ℃                     |        | 22.0         | 11.2                    |  |
|       |      | 塩分 psu                   |        | 32.0         | 32.0                    |  |
| 水質モデル | 陸側境界 | 流入<br>負荷量<br>t/日         | COD    | 423          | 326                     |  |
|       |      |                          | T-N    | 253          | 220                     |  |
|       |      |                          | T-P    | 17           | 14                      |  |
|       | 海側境界 | 外海水質<br>(mg/ℓ)           | COD    | 明 2.6, 紀 1.9 | 明 1.3, 紀 1.1            |  |
|       |      |                          | T-N    | 0.38, 0.38   | 0.34, 0.34              |  |
|       |      |                          | T-P    | 0.039, 0.031 | 0.029, 0.029            |  |
|       |      |                          | クロロフィル | 0.005, 0.005 | 0.004, 0.004            |  |
|       |      |                          | DO     | 8.1, 8.1     | 9.0, 9.0                |  |

方向に密度がほぼ一様な強混合域となっており、湾東部は淀川系河川水に影響された成層海域となっている。大阪湾でみられる代表的な残差流は湾西部の沖ノ瀬環流と湾東部の西宮沖環流である。沖ノ瀬環流は湾西部強混合域に発達する潮汐残差流である。西宮沖環流は湾北東部の成層域の上層に発達する時計回りの水平循環流である。また、この成層海域では上層では湾口に、下層では湾奥に向かうエスチュアリー循環が卓越していることがわかる。一方、冬

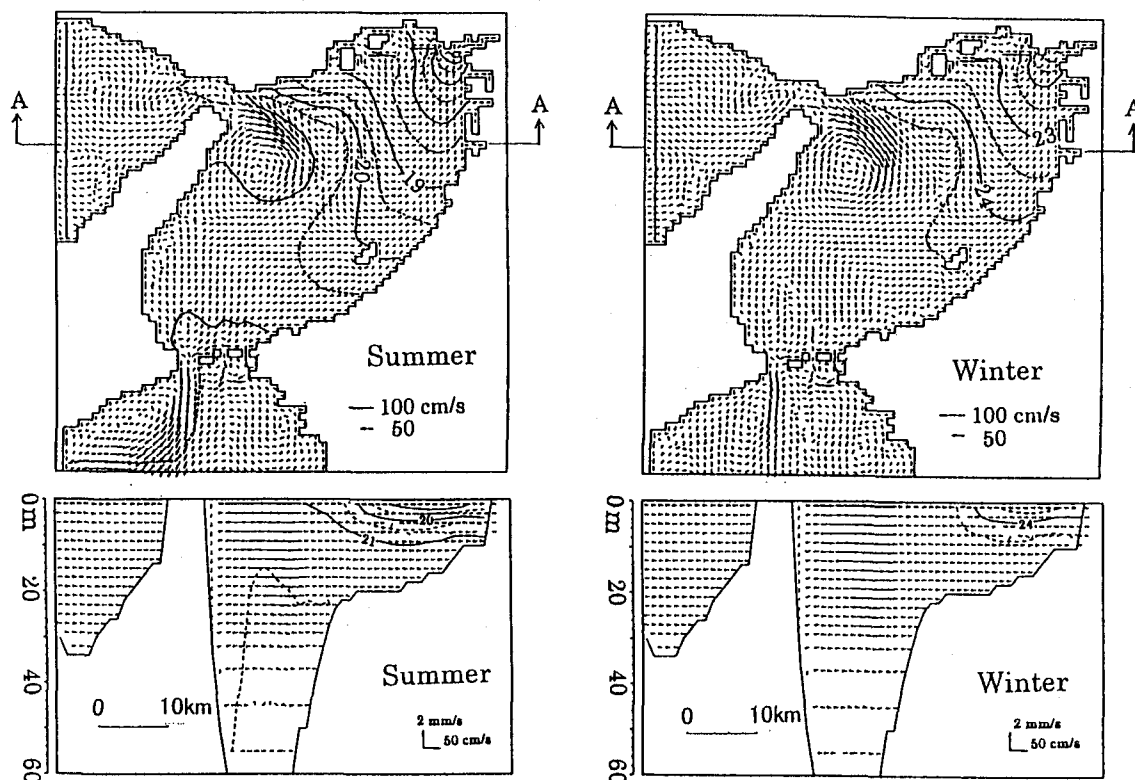


図-3 大阪湾における表層とA-A鉛直断面の残差流と密度( $\sigma_t$ )分布(左;夏季,右;冬季)

季の大阪湾の密度分布は、東部成層海域は夏季に比べて若干規模が小さくなっているものの、湾西部の強混合域と湾東部の成層海域の形成は夏季とほぼ同様の傾向を示している。東部成層海域の規模の若干の縮小は冬季の淀川系河川水の流入の減少に起因しているものと考えられる。冬季の流速場については、成層水域の縮小に伴い同水域に形成される西宮沖環流も規模を小さくしている。しかしながら、湾西部の沖ノ瀬環流、湾東部の西宮沖環流やエスチュアリー循環構造は冬季においても維持されている。

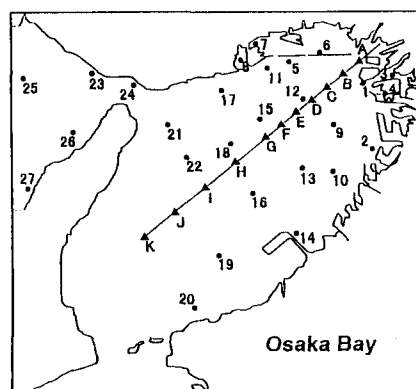


図-4 大阪湾内の水質測定(●)と物質収支算定(▲)地点

## (2) 大阪湾の夏季、冬季の水質構造

大阪湾における夏季、冬季の1潮汐平均の水質を算定した。水質の計算結果と測定結果を比較するために、図-4に示す27地点の1984～1992年の公共用水域水質測定結果<sup>43)</sup>を収集し、9カ年平均の夏季7月、冬季1月の水質を算定した。図-5にはクロロフィルa及び総リン濃度の各測定地点別の計算値と測定値の比較図を示す。図-6は同様に冬季の比較を示している。また、図-7,8は夏季と冬季のクロロフィルa、総リン及び無機態リン濃度の表層水平分布と東西鉛直断面(A-A)分布を示す。

測定値との比較では、夏季のクロロフィルaは神戸沖から泉南沖にかけての湾奥部で  $20 \mu\text{g}/\ell$  以上の高い値がみられ、湾口に向かうにしたがい  $10 \mu\text{g}/\ell$

$\ell$  以下となる。このような湾内の水質分布の傾向は概ね再現されている。しかしながら、No.6,7地点の神戸沿岸やNo.9,10の泉南沖に見られる  $30 \mu\text{g}/\ell$  以上のクロロフィルaについては計算値は測定値に比べやや低めの値となっている。夏季の総リンは同様に湾内の分布傾向は測定値を概ね再現しているが、湾奥沿岸の高濃度域については計算値が低めになっている。再現性の向上には、沿岸域の負荷流入や溶出条件の精度を上げる必要がある。一方、冬季のクロロフィルaや総リンは夏季ほど湾奥と湾口の水質差は小さくなく、計算値は概ね測定値を再現している。

図-7に示す夏季のクロロフィルa、総リン濃度の表層分布は20m等深線上に発達する潮汐フロント

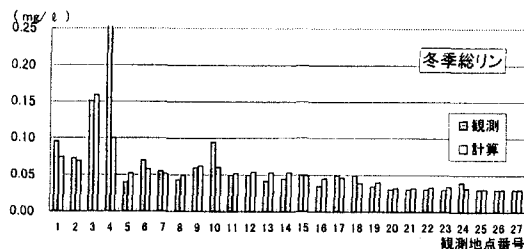
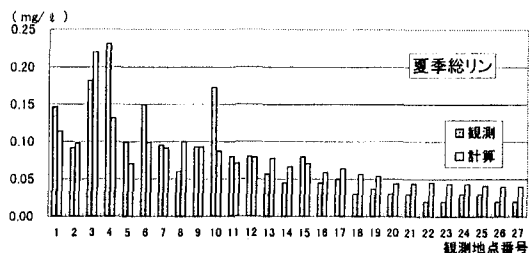
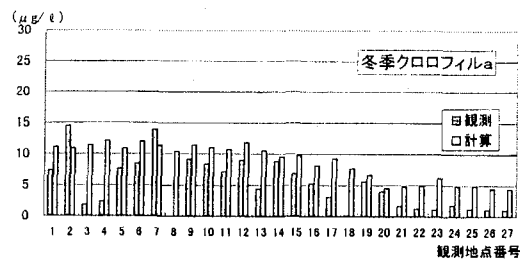
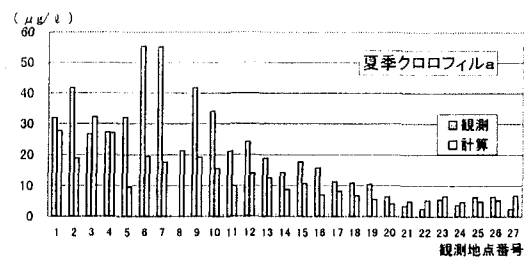


図-5 夏季の計算水質と測定水質(7月)の比較

図-6 冬季の計算水質と測定水質(1月)の比較

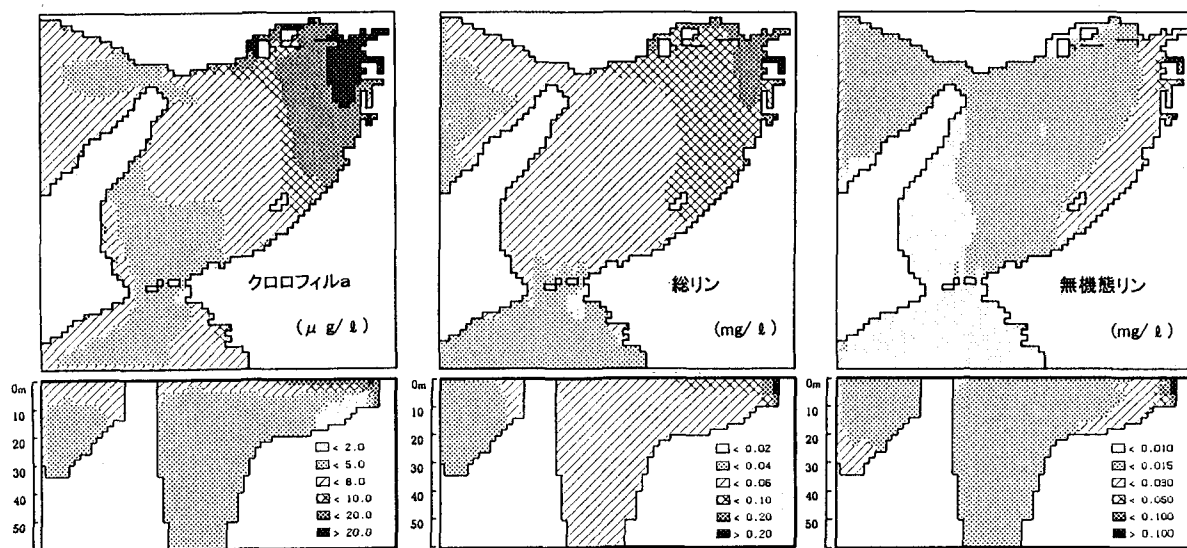


図-7 大阪湾夏季のクロロフィルa(左), 総リン(中央)および無機態リン(右)の濃度分布

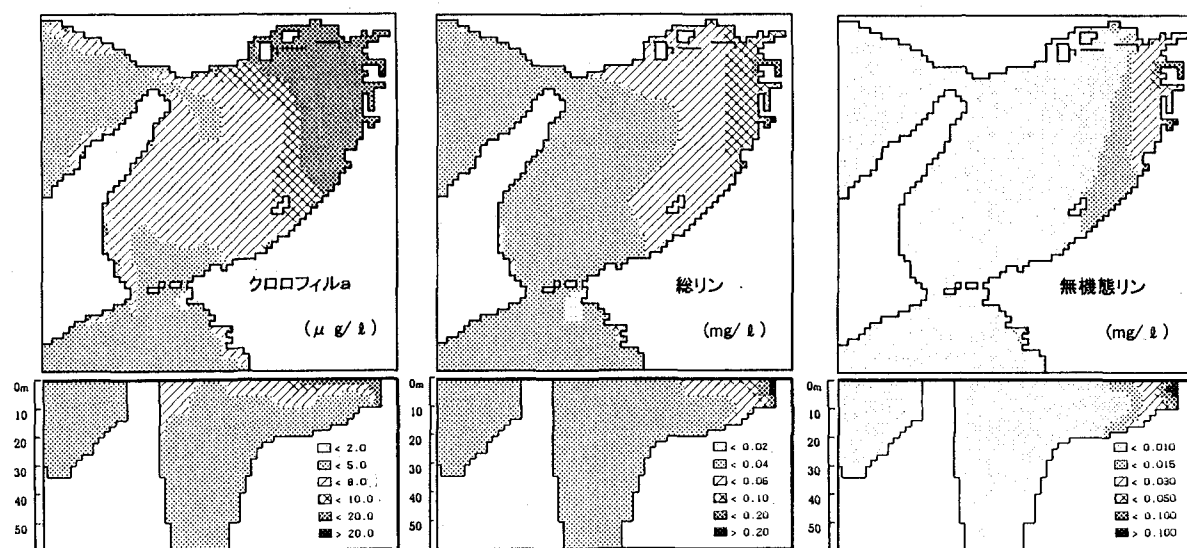


図-8 大阪湾冬季のクロロフィルa(左), 総リン(中央)および無機態リン(右)の濃度分布

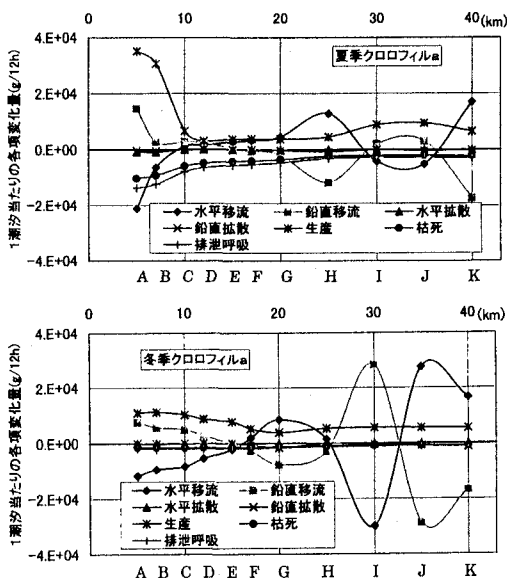


図-9 表層クロロフィルa 収支の各項寄与度の地点変化

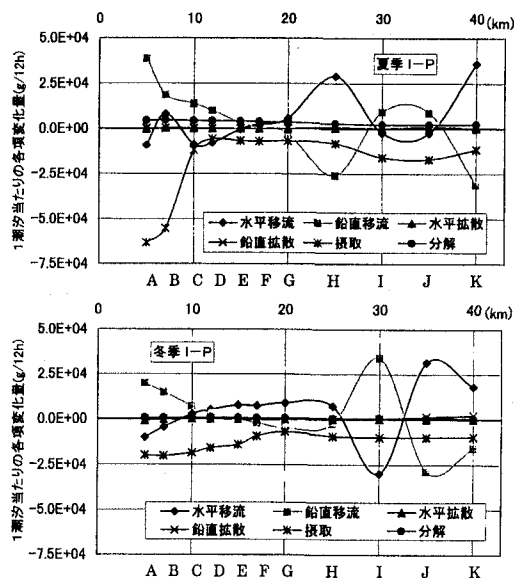


図-10 表層無機態リン収支の各項寄与度の地点変化

を境に東西で大きく変化しており、東部成層海域の表層では湾奥諸河川より流入した負荷が滞留し、内部生産が活発に行われているのがうかがわれる。東部海域の5 m以深ではエスチュアリー循環による西部海域からの水塊の進入の影響を受け、CODや総リンは表層に比べ濃度が低下している。しかしながら、無機態リン濃度は表層で低く、水深5 m以深で高濃度域が広範に広がっている。底層近傍の高濃度は底泥からのリン溶出により、表層の低濃度はプランクトンの摂取によるものである。図-8に示す冬季のクロロフィルa、総リン濃度の表層分布は夏季と同様に潮汐フロントを境に東西で変化しており、湾内の密度構造が水質分布に影響を及ぼしている。各項目とも夏季に比べ全域において濃度は低くなっており、淀川、大和川からの流入負荷の減少に加え、明石海峡での境界水質濃度の低下が影響している。

大阪湾の水質分布に及ぼす各種物質変化過程の影響を評価するため、水質計算における物質収支式各項の1潮汐間合計変化量を求めた。物質収支の算定は図-4に示すA～K地点であり、各地点の表層3層(約6m)の物質変化量を集計した。夏季、冬季のクロロフィルaの各項変化量を図-9に示す。夏季のクロロフィルaは湾奥のA,B地点で生産による増加が卓越しており、当該水域で生産されたクロロフィルaは水平移流、排泄、枯死により消滅している。C地点から沖合では生産による増加は急激に減衰している。植物プランクトンの増殖を支配する無機態リンの夏季、冬季の各項変化量を図-10に示す。夏季の無機態リンはクロロフィルaの生産が大きいA,B地点で摂取による減少が大きくなっている。こ

の無機態リンの減少を最も多く補っているのが鉛直移流、つまり下層からの栄養塩の湧昇である。このことから湾奥部の植物プランクトンの増殖にエスチュアリー循環が重要な役割を果たしていることがわかった。一方、冬季の無機態リンでも同様の傾向にはあるが、プランクトンによる摂取、鉛直移流とも規模は小さくなっている。

#### 4. まとめ

本研究で得られた結果を次に示す。

- (1) 大阪湾の水質分布の季節変化構造は一次生産を考慮した生態系モデルで概ね再現可能と考えられる。ただし、湾奥沿岸部の水質再現についてはよりきめ細かい条件設定が必要である。
- (2) 大阪湾の水質分布は夏季、冬季とも湾内の流動および密度場に強く支配されている。
- (3) 湾奥の植物プランクトンの増殖にはエスチュアリー循環に起因する下層からの栄養塩の湧昇が大きく寄与している。

#### 参考文献

- 1) 中辻啓二, 藤原建紀: 大阪湾におけるエスチュアリー循環構造, 海岸工学論文集, 第42巻, pp.396-400, 1995
- 2) 山根伸之, 寺口貴康, 中辻啓二, 村岡浩爾: 浅海定線調査に基づく大阪湾の水質・密度構造の季節変化, 海岸工学論文集, 第43巻(1), pp.331-335, 1996
- 3) 中辻啓二: 大阪湾における残差流系と物質輸送, 水工学シリーズ94-A-9, 土木学会水理委員, pp.A9.1-28, 1994
- 4) 大阪府: 公共用水域水質測定結果報告, 1984～1992
- 5) 兵庫県: 公共用水域水質測定結果報告, 1984～1992

(1997. 9. 30受付)