

湾奥水域における水質の時空間変化の解析

松梨史郎¹

¹正会員 工修 (財)電力中央研究所 環境科学部
(〒270-11 我孫子市我孫子1646)

富栄養化した湾の奥部水域として、東京港を対象に水質のシミュレーションを実施し、実測値と照合するとともに、各水質の移流・拡散項および化学・生物学的変化項の時空間変化の比較を行った。その結果、クロロフィル a については、暖候期の増殖と寒候期の減衰が示されるとともに、場所によってプランクトンの増大する要因が異なることが確認された。CODについては、クロロフィル a の変化に類似した時空間変化の特性が再現されており、植物プランクトンの影響を強く受けていることが推察された。また夏季の下層で貧酸素化が進行している場所では、底泥による酸素消費や有機物の分解等により、エスチャリー循環による沖合からの豊酸素の供給では補えないほど、酸素の消費が生じていることが認められた。

Key Words: water quality model, bay head, Tokyo port, chlorophyll-a, COD, dissolved oxygen

1. はじめに

閉鎖性海域の水質は、陸域からの有機物の流入負荷削減が促進されているにもかかわらず、あまり改善されず、環境基準であるCODは横這い状態が続いている。これは陸域から流入する窒素やリンを摂取する植物プランクトンの増殖による海域内部での有機物生産が原因と考えられている。このため環境庁は、平成5年に新たに、海域に流入する窒素・リンの排水基準、環境基準を設定した^{1),2)}。

一方閉鎖性海域の中でも、特に都市河川の流入する湾奥部の狭い水域では、河川からの淡水による影響と潮汐による流動が混在し、かつ流入負荷が多く、きわめて富栄養化しやすい水域である。このような水域において、水質や底質の改善対策の効果の検討に向けて、各水質項目の時空間的な変化特性を把握し、水質の物理・化学・生物学的な挙動を解析することは、富栄養化現象を理解する上で極めて重要である。

岸³⁾も述べているように、近年行政の管理目的に供することを目的としたモデルが多い中、モデルは本来、行政の管理目的に使用することが究極の目的ではなく、現象がどうして起きたのか解明するためのものでもあることを改めて認識しておく必要があると思われる。

従来モデルや解析^{4)~8)}は、実測調査結果の再現性の検討や流入負荷削減の効果の検討のために作ら

れている場合が多い。これに対して、Kawamiyaら⁹⁾は、内湾ではないがStation Papaを対象に鉛直1次元のモデルを用いて、植物プランクトンを中心にその増殖特性とその要因について検討している。また内田ら¹⁰⁾は、窒素、リン、CODについて博多湾を対象に平面2次元モデルを用いて、流入負荷と内部生産との非線形性について検討し、富栄養化現象の実態の把握に努めている。このようなシミュレーション解析は、未だそう多くは無い。特に複雑で変動の大きい湾奥の狭い水域では、水質の変化を空間的にも季節的にも詳細に検討する必要があると思われるが、このようなシミュレーションや解析は見当たらない。

このような状況に鑑み、本研究では、窒素、リン、COD、クロロフィル a、溶存酸素等の予測モデルを作成し、同モデルを富栄養化の著しい東京湾の奥部である東京港に適用することによって、このような水域の水質の物理・化学・生物学的な時空間変動について解析した。東京港は東京湾に流入する都市河川や負荷の大部分が集中しているため、湾全域の水質に及ぼす影響は大きい。

2. モデルの内容

本モデルは、流動予測と水質予測の各サブモデルより成り立つ。

(1)流動モデル

流動予測のサブモデルは、鉛直方向に静水圧近似を用いた準3次元モデルで、河川の流入による密度流効果を考慮した潮汐流を計算するものである。

以下に流動モデルの基礎式を示す。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\rho_0 \partial x} + A_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + A_y \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + A_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + fv \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial vw}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\rho_0 \partial y} + A_x \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + A_y \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + A_z \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} - fv \quad (2)$$

$$0 = -\frac{\partial P}{\rho \partial z} - g \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} + \frac{\partial wT}{\partial z} = K_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\partial Q_{sz}}{Cp \partial z} \quad (5)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial uS}{\partial x} + \frac{\partial vS}{\partial y} + \frac{\partial wS}{\partial z} = K_x \frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} \quad (6)$$

ここに u, v, w : それぞれ x, y, z 方向の流速, P : 圧力, A_x, A_y, A_z : それぞれ x, y, z 方向の渦動粘性係数, K_x, K_y, K_z : それぞれ x, y, z 方向の渦動拡散係数, ρ : 密度, ρ_0 : 基準密度, f : コリオリ係数, T : 水温, S : 塩分で、水温については日射等の熱の授受を、塩分については河川等からの淡水流入の影響を考慮した。密度は水温、塩分から Knudsen 式を用いて計算する。

境界条件として、陸地・海底ではノンスリップの条件を、水面では動力学条件を用いる。

水温の計算には、水面で吸収される熱量、有効逆輻射量、顕熱量、潜熱量を考慮し、残りの熱量は水深とともに指数関数的に減衰しながら水中に吸収されるものとした。

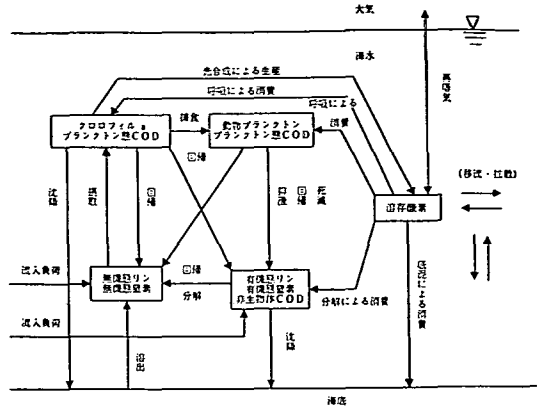


図-1 水質項目の相互関係

水温の計算における熱収支項は次式で計算する¹¹⁾。

$$Q_{sz} = (1 - \beta) Q_{s0} \exp\{-\eta(z_s - z)\} \quad (7)$$

ただし、 z_s を水面の高さとして、 Q_{sz} : 水深 ($z_s - z$) に達する日射量 ($\text{cal/cm}^2 \cdot \text{sec}$)、 Q_{s0} : 水中に吸収される全日射量、 β : Q_{s0} のうち水面部分で吸収されてしまう熱量の割合 ($=0.69$)、 η : 減衰係数で、海面では次式を用いる。

$$CpK_z \frac{\partial T}{\partial z} = \beta Q_{s0} - (Q_b + Q_c + Q_e) \quad (8)$$

ここに、 C : 水の比熱、 ρ : 密度、 Q_{s0} : 水中に吸収される全日射量、 Q_b : 有効逆輻射量、 Q_c : 顕熱量、 Q_e : 潜熱量である。

(2)水質モデル

水質予測のサブモデルは、クロロフィル a (Y)、動物プランクトン (Z)、リン酸態リン (P)、非生物体の有機態リン (D)、無機態窒素 (N)、非生物体の有機態窒素 (E)、非生物体の COD (C)、各態の COD の総量として全 COD ($TCOD$)、溶存酸素 (O)、および各態の窒素・リンの総量として全窒素 (TN)、全リン (TP) を計算するものである。

図-1 にモデルの概念図を示す。本モデルでは、COD について非生物体のみのもとのと生物体を含むものに区別するため、前者は非生物体 COD、後者は全 COD と言う記述を用いた。以下には基礎式を中心に記載し、定式化の詳細については文献12)に譲る。パラメータの説明は表-2にも示す。

a) プランクトン

クロロフィル a (Y), 動物プランクトン (Z) の基礎式を示す. 本モデルでは植物プランクトン指標としてクロロフィル a を対象とした. 中田・田口¹³⁾によれば, (植物プランクトン態炭素)/(クロロフィル a)=50, (植物プランクトン態炭素)/(植物プランクトン態リン)=41 から (植物プランクトン態リン)/(クロロフィル a)=1.22 となるため, クロロフィル a と植物プランクトンに含まれるリン(植物プランクトン態リン)の比は, ほぼ 1対1 であるとした. また動物プランクトンはリンの形態で計算する.

$$\begin{aligned} \frac{\partial Y}{\partial t} &= (\text{増殖}) - (\text{呼吸による自己分解}) \\ &\quad - (\text{動物による捕食}) + (\text{沈降}) + (\text{移流} \cdot \text{拡散}) \\ &= \{G_y - R_{y20} \theta_{RY}^{T-20}\} Y - C_{g20} \theta_{CG}^{T-20} ZY \\ &\quad + \frac{\partial W_y Y}{\partial z} + F(Y) \quad (9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Z}{\partial t} &= (\text{増殖}) - (\text{呼吸による自己分解}) - (\text{死滅}) \\ &\quad + (\text{移流} \cdot \text{拡散}) \\ &= (f_y C_{g20} \theta_{CG}^{T-20} Y - R_{z20} \theta_{RZ}^{T-20} - D_z) Z \\ &\quad + F(Z) \quad (10) \end{aligned}$$

植物プランクトンの増殖は式(11)に示すように, 水温, 照度, 栄養塩の関数とし, 水温は指数関数で, 照度, 栄養塩は Monod 式で表す. また栄養塩による制限は, 栄養塩の関数の小さい方で制限される Liebig 型を用いる.

$$G_y = G_{y\max20} \theta_{GY}^{T-20} \frac{I}{K_I + I} \text{Min}\left(\frac{P}{K_P + P}, \frac{N}{K_N + N}\right) \quad (11)$$

ここに, $G_{y\max20}$, θ_{GY} : それぞれ植物プランクトンの 20℃ における増殖速度, 温度定数, K_I , K_P , K_N : それぞれ照度, リン, 窒素に関する半飽和定数, である.

動物プランクトンの増殖には, 次式のような Michaelis-Menten 型の式を用いる.

$$f_y = \frac{a_s K_Y}{K_Y + Y} \quad (12)$$

ここに, a_s , K_Y : それぞれ植物プランクトン最大同化速度, 半飽和定数, である.

b) 栄養塩

リン酸態リン (P), 非生物体の有機態リン (D), 無機態窒素 (N), 非生物体の有機態窒素 (E), 全窒素 (TN), 全リン (TP) の基礎式を示す.

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial t} &= -(\text{植物プランクトンによる摂取}) \\ &\quad + (\text{植物プランクトンの自己分解による回帰}) \\ &\quad + (\text{動物プランクトンの自己分解による回帰}) \\ &\quad + (\text{非生物体有機態リンの分解}) \\ &\quad + (\text{底泥からの溶出}) + (\text{移流} \cdot \text{拡散}) \\ &= -\{G_y - \gamma_y R_{y20} \theta_{RY}^{T-20}\} Y + \gamma_z R_{z20} \theta_{RZ}^{T-20} Z \\ &\quad + K_{D20} \theta_{KD}^{T-20} D + \frac{W_P}{H_b} + F(P) \quad (13) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial D}{\partial t} &= (\text{植物プランクトンの自己分解による回帰}) \\ &\quad + (\text{動物プランクトンの排泄}) \\ &\quad + (\text{動物プランクトンの自己分解による回帰}) \\ &\quad + (\text{動物プランクトンの死滅}) - (\text{バクテリアによる分解}) + (\text{沈降}) + (\text{移流} \cdot \text{拡散}) \\ &= (1 - \gamma_y) R_{y20} \theta_{RY}^{T-20} Y + (1 - f_y) C_{g20} \theta_{CG}^{T-20} ZY \\ &\quad + (1 - \gamma_z) R_{z20} \theta_{RZ}^{T-20} Z + D_z Z \\ &\quad - K_{D20} \theta_{KD}^{T-20} D + \frac{dW_D D}{dz} + F(D) \quad (14) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} TP &= (\text{植物プランクトン態リン}) \\ &\quad + (\text{動物プランクトン態リン}) \\ &\quad + (\text{リン酸態リン}) + (\text{非生物体有機態リン}) \\ &= Y + Z + P + D \quad (15) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial t} &= -(\text{植物プランクトンによる摂取}) \\ &\quad + (\text{植物プランクトンの自己分解による回帰}) \\ &\quad + (\text{動物プランクトンの自己分解による回帰}) \\ &\quad + (\text{非生物体有機態窒素の分解}) \\ &\quad + (\text{底泥からの溶出}) + (\text{移流} \cdot \text{拡散}) \\ &= -\sigma_{Ny} \{G_y - \gamma_y R_{y20} \theta_{RY}^{T-20}\} Y \\ &\quad + \sigma_{Nz} \gamma_z R_{z20} \theta_{RZ}^{T-20} Z \\ &\quad + K_{E20} \theta_{KE}^{T-20} E + \frac{W_N}{H_b} + F(N) \quad (16) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial t} &= (\text{植物プランクトンの自己分解による回帰}) \\ &\quad + (\text{動物プランクトンの排泄}) \end{aligned}$$

+ (動物プランクトンの自己分解による回帰)
 + (動物プランクトンの死滅)
 - (バクテリアによる分解)+(沈降)
 + (移流・拡散)

$$= \sigma_{Ny} \{ (1 - \gamma_y) R_{y20} \theta_{RY}^{T-20} Y + (1 - f_y) C_{g20} \theta_{CG}^{T-20} ZY \} + \sigma_{Nz} \{ (1 - \gamma_z) R_{z20} \theta_{RZ}^{T-20} Z + D_z Z \} - K_{E20} \theta_{KE}^{T-20} E + \frac{dW_E E}{dz} + F(E) \quad (17)$$

$$TN = (\text{植物プランクトン態窒素}) + (\text{動物プランクトン態窒素}) + (\text{無機態窒素}) + (\text{非生物体有機態窒素}) = \sigma_{Ny} Y + \sigma_{Nz} Z + N + E \quad (18)$$

ここに、 σ_{Xx} : 水質 X から水質 X' への単位換算係数、である。

有機態の窒素・リンの定式化には、生物体を含める場合と含めない場合があるが、本モデルでは、プランクトンの死骸や排泄物等を非生物体の有機物とし、動・植物プランクトン態と分離した。このことにより、何が有機物の生産や分解に関与するかが明確になる。

感潮河川の河口域では、淡水と塩水の接触により無機イオンが懸濁物に吸着される現象があるが、東京港の実測では汽水域における塩分濃度とリン酸態リンとの相関をとると塩分の増加とともに単調に減少する保存性を示しており、上記のようなスキヤベンジング効果は認められなかったため、同モデルではこのような過程は考慮していない。

c) COD

非生物体COD(C)、全COD($TCOD$)の基礎式を示す。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = (\text{植物プランクトンの自己分解による回帰}) + (\text{動物プランクトンの排泄}) + (\text{動物プランクトンの自己分解による回帰}) + (\text{動物プランクトンの死滅}) - (\text{バクテリアによる分解}) + (\text{沈降}) + (\text{移流・拡散}) = \sigma_{Cy} \{ (1 - \gamma_y) R_{y20} \theta_{RY}^{T-20} Y + (1 - f_y) C_{g20} \theta_{CG}^{T-20} ZY \} + \sigma_{Cz} \{ (1 - \gamma_z) R_{z20} \theta_{RZ}^{T-20} Z + D_z Z \} - K_{C20} \theta_{KC}^{T-20} C + \frac{dW_C C}{dz} + F(C) \quad (19)$$

$$TCOD = (\text{植物プランクトン態COD}) + (\text{動物プランクトン態COD}) + (\text{非生物体COD}) = \sigma_{Cy} Y + \sigma_{Cz} Z + C \quad (20)$$

本モデルでは、CODを生物体と非生物体に分離して計算する方法を採った。すなわち本モデルにおけるCODの算出は、まず陸域から流入するCODは非生物体であるとして、デトリタス等によって生産される非生物体CODを微分方程式によって計算する。次に海域内での全CODは、式(20)に示すように、この非生物体と別途計算される動植物プランクトンによって生産される生物体との合計で構成されるとした。以上のようなモデル化により、CODが生物体と非生物体の両方の有機物を含むことによる有機物生産を、合理的に計算することが可能である。

d) 溶存酸素

溶存酸素(O)の基礎式を示す。

$$\frac{\partial O}{\partial t} = (\text{植物プランクトンによる生産}) - (\text{植物プランクトンの呼吸}) - (\text{動物プランクトンの呼吸}) - (\text{非生物体有機態リンの分解}) + (\text{再曝気}) - (\text{底泥による消費}) + (\text{移流・拡散}) = \sigma_{oy} \{ G_y - R_{y20} \theta_{RY}^{T-20} \} Y - \sigma_{oz} R_{z20} \theta_{RY}^{T-20} Z - \sigma_{od} K_{D20} \theta_{KD}^{T-20} D + K_S (O_S - O) - \frac{W_o}{H_b} + F(O) \quad (21)$$

なお、各式の最右辺の $F(X)$ は、移流・拡散項を表し、以下で与えられる。

$$F(X) = - \frac{\partial uX}{\partial x} - \frac{\partial vX}{\partial y} - \frac{\partial wX}{\partial z} + K_x \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 X}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 X}{\partial z^2} \quad (22)$$

基礎式に含まれるパラメーターは、その数値とともに表-2に示す。

以上、本モデルは生態系の中の重要な化学・生物変化過程を定式化している。

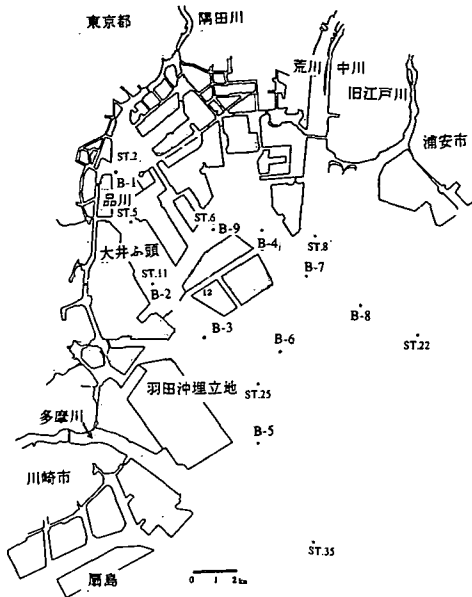
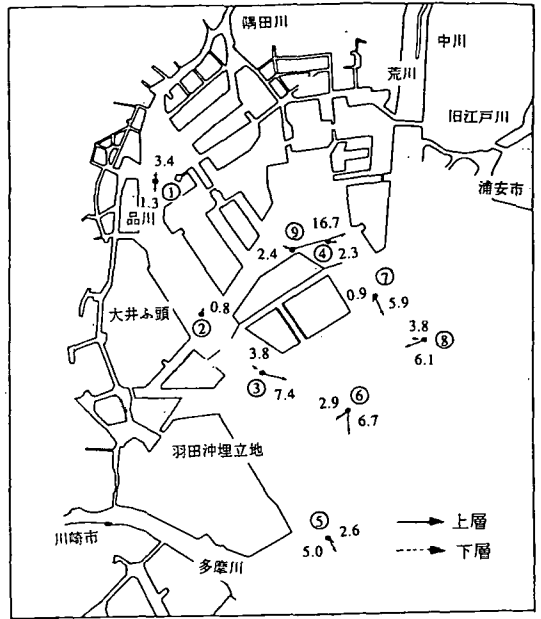
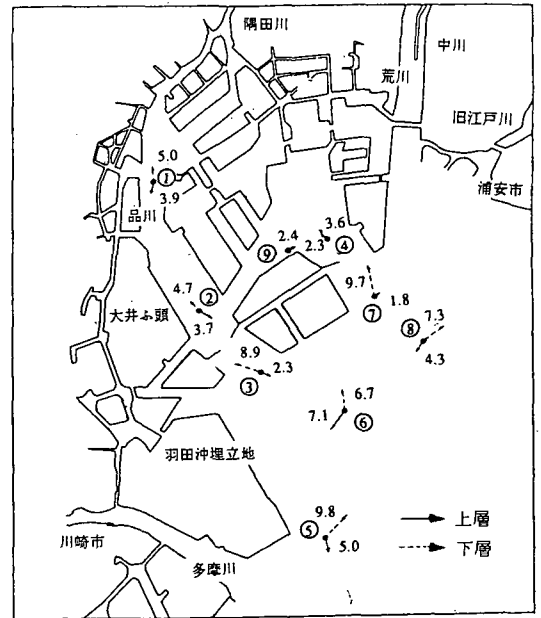


図-2 東京港 (ST.は公共用水域水質測定点
B-1~B-9は流動観測点)



(a) 夏季



(b) 冬季

図-3 実測値の平均流

3. 東京港における流動の特性とシミュレーション

富栄養化した湾・河口部として、図-2に示すような東京湾の奥部である東京港(扇島以北、江戸川放水路河口以西)を対象に、その既往の調査結果から流動・水質の特性について検討した。

(1) 流動の特性

東京都は、図-2に示す観測点においてベルゲン型流速計により、1989年夏季および冬季における15日間の流動観測を行っている。観測層は水深2mおよび海底上2mである^{14),15)}。

同水域では半日潮流成分であるM2分潮流が卓越しており、流速値は、港内の最奥部で5cm/s、東京港の境界水域で10cm/s程度である。

図-3に長期の水質予測において重要な観測期間中の平均流を示す。夏季は感潮域特有の性質として、上層では湾奥から沖合に向かって流出し、下層では沖合から湾奥に向かって流入するエスチャリー循環が生じている。上層の水平方向の流速値は、港内の最奥部で1~4cm/s、東京港の境界水域で5cm/s程度である。また若干値は異なるものの、冬季も上層で湾奥から沖合に向かって流出し、下層で沖合から湾奥に向かって流入するエスチャリー循環が生じている。細かい違いを除けば、夏季・冬季とも基本的にエス

チャリー循環が卓越し、ほぼ同程度の流速値であるため、第一近似としては潮流とともに、このエスチャリー循環が再現されれば、それを場の流動として水質計算に用いればよいものと考えられる。

(2)計算条件

前述の流動モデルを東京湾の奥部の東京港に適用した。図-4に計算領域を示す。計算領域は、検討対象の領域よりも広くとり、外海の境界条件は木更津沖に設定した。流動計算のためのメッシュ分割は、同水域を平面的には200m~800mの変可メッシュで、隅田川の河口からそれに続く領域を細かく、湾口部を粗く取っている。また鉛直方向のメッシュ分割は、最大8層で水面から2m×6層,3m,5mである。

流動は、河川からの淡水による密度流効果を考慮した潮汐流を計算した。ただし湾奥部での密度変化には、淡水の流入に基づく塩分低下の影響が、水温による影響よりも大きく、また水温はその年間のシミュレーションを流動計算とは別途に水質計算と同時にを行うため、流動計算と連立させる密度の計算には塩分の変化のみを考慮し、その際に必要な水温は20℃で一定とした。

計算に用いた河川等からの流入流量^{16),17)}は、後述の表-1に流入負荷量と併せて示す。水平方向の渦動粘性係数および渦動拡散係数は $5 \times 10^4 \text{cm}^2/\text{s}$ を用いた。また鉛直方向の渦動粘性係数 A_z および渦動拡散係数 K_z は、中辻¹⁸⁾が定式化した以下の式を用いた。

$$\frac{A_z}{A_{z0}} = (1 + 5.2R_i)^{-1} \quad (23)$$

$$\frac{K_z}{A_z} = \frac{(1 + 10R_i/3)^{-3/2}}{(1 + 10R_i)^{-1/2}} \quad (24)$$

ただし R_i は勾配型リチャードソン数、 A_{z0} は中立状態における鉛直粘性係数で、 $50 \text{cm}^2/\text{s}$ とした。

外海の境界条件として、M2潮の潮位条件(横浜沖で46cm, 木更津沖で48cmで位相差0)を設定し、周期は12時間とした。外海の境界条件としての塩分は、流入時には水深1m層で31, 水深17.5m層で34とし、線形補間して与え、流出時には一次微分=0とした。なお流出時に二次微分=0としても計算結果はほとんど変わらなかった。後述の水質計算の対象年(1984年)が渇水年で、夏季のごく一時期を除いて塩分の変動は小さく、特に境界条件に設定した外海は塩分成層の変動が年間を通じて小さかったため、外海の塩分設定値は、年間を通じて一定とした。また河口部においては実測の年間の平均塩分値12から算出される密度を与え、初期値は流動は0, 塩分は水深1m層で

31, 水深17.5m層で34として、線形補間して与え、 $\Delta t=10$ 秒として解が定常な周期解に達するまで計算した。計算は37サイクルまで行い、ほぼ定常周期解が得られた。

(3)流動のシミュレーション

流動測定点におけるM2潮の潮流楕円の計算値と実測値との照合により、M2潮流はほぼ再現された。

図-5に計算された1サイクル間の平均流の結果を示す。平均流については、隅田川の河口から東京湾の湾央部に向かって上層では流出し、下層では流入するエスチャリー循環が形成された。同図には冬季における平均流の実測値を併せて載せている。同図より、平均流の計算結果は潮流観測点における15日間の期間平均流の流向・流速をほぼ再現しており、エスチャリー循環がほぼ再現されたと考えられる。また鉛直流速の値は最大でも0.01cm/s程度であった。

東京湾の平均流については種々の議論があり、湾内の環流が時計回りか反時計回りかについても未だ明確ではない¹⁹⁾。本研究での計算結果は、平面的に強い環流の傾向は示してはいないが、計算の対象領域である湾奥から湾央までの水域全体に亘って、時計回りに近い結果となっていた。

本論文ではエスチャリー循環の季節変化ではなく、水質変動の季節変化を見るのが主目的であるため、循環流の季節変化は無いと仮定して解析を進めることとした。また水質計算の対象とした1984年は渇水年であり、例年に比較して淡水流量の季節変化がきわめて小さかったため、このような仮定に基づいて水質計算を実施した。

4. 東京港における水質の特性とシミュレーション

水質については、流動計算と同様の差分メッシュ分割とし、年間の季節変化を対象としたシミュレーションを行った。移流項には、上記で求めた流動計算結果を用いた。各水質項目の実測データの特性は、計算結果と併せて考察するものとする。

(1)計算条件

a)対象とする水質データ

対象とする水質データは、図-2に示す測点で毎月上下2層(水深0.5m, 海底上1m)で測定されている公共用水域水質データで、富栄養化指標の特徴的な性質について季節的な変化と空間的な分布の両面から検討した。

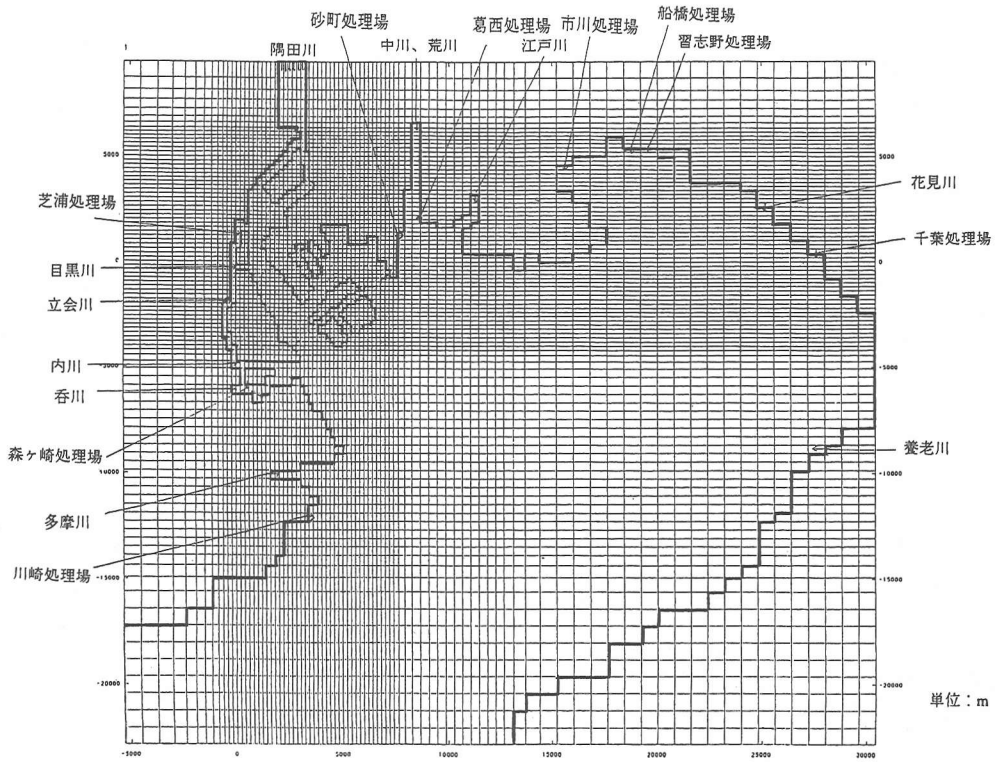


図-4 計算領域

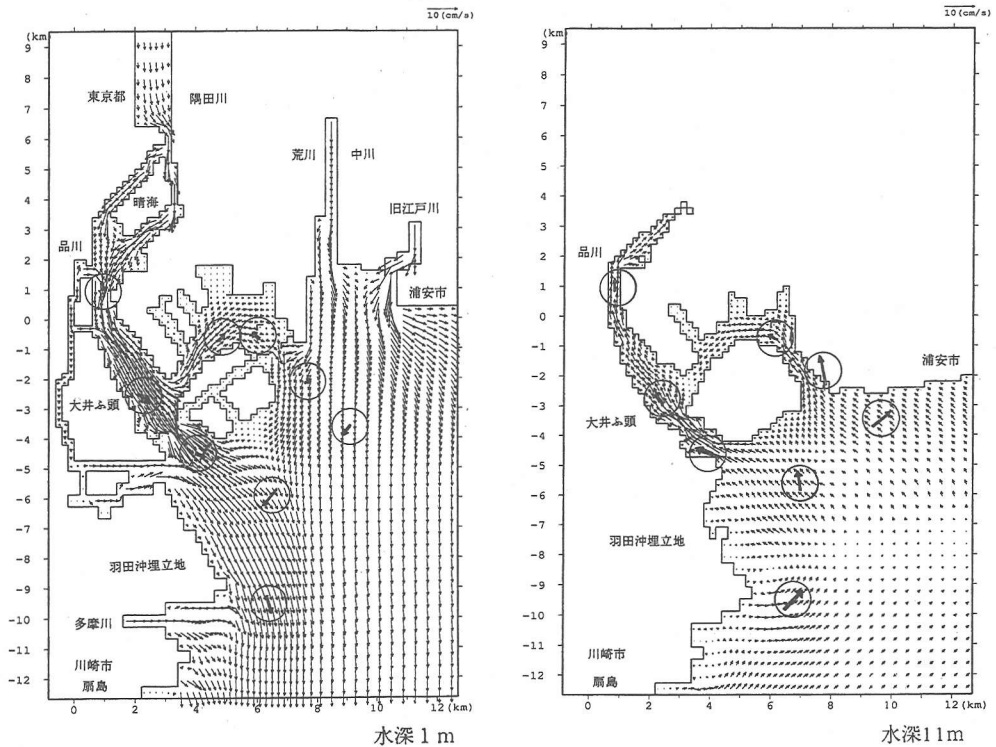


図-5 平均流の計算結果 (円内のベクトルは冬季の実測値)

表-1 流入負荷量

河川・下水処理場	流量 (m ³ /s)	COD 負荷量 (ton/day)	リン酸態リン 負荷量 (ton/day)	有機態リン 負荷量 (ton/day)	無機態窒素 負荷量 (ton/day)	有機態窒素 負荷量 (ton/day)
江戸川	70.00	33.878	0.815	0.319	11.665	4.999
中川・荒川	55.60	49.056	1.925	0.529	20.196	9.707
隅田川	46.10	46.558	3.580	0.398	51.318	0.000
多摩川	20.60	6.721	0.406	0.102	4.656	0.822
目黒川・立会川・ 内川・呑川	1.26	9.185	0.398	0.054	2.891	0.898
養老川・花見川	5.94	3.396	0.164	0.077	2.506	0.818
東京港内の処理場	25.99	29.131	4.317	0.000	43.511	9.033
東京港外の処理場	4.70	4.39	0.604	0.000	10.146	2.153

b) 流入負荷量および水質パラメータ

表-1に河川等からの流入負荷量^{16),17)}を示す。湾奥の狭い領域を扱う関係上、流入流量および流入負荷量として詳細なデータが必要であるが、入手したデータは1984年度のものであるため、モデルによる計算結果の検討も1984年度の実測値を対象に行った。

表-2に計算に用いた水質パラメータを示す。水質パラメータは、実験によって求められているものや、他の文献で設定されているものを参考に設定した。

c) 入力データの特性

水質を支配する外的要因として、流動、水温、日射量、成層強度、外海水質濃度、流入負荷量、底泥からの溶出量等が考えられる。これらの内、季節変化の著しいものは、水温、日射量、成層強度、底泥からの栄養塩の溶出量、底泥による溶存酸素の消費量である。

本計算ではこれらの内、日射量は東京都の観測値を与え、水温については東京都の気温、日射量等の気象観測値に基づいて水質と同時に計算している。また底泥からの栄養塩の溶出量および底泥による溶存酸素の消費量については、実測値に基づいて水温（窒素の溶出速度、酸素の消費速度）や溶存酸素（リンの溶出速度）の変化に基づく季節変化を与えている。その他に、他と比較すると年間を通じてあまり大きな変化は無いが、外海水質濃度についても公共用水域水質の実測値を補間して与えている。

これに対して、流動については、流動の計算で述べたように、夏季および冬季の観測結果から見ると淡水流入量や塩分値、風速等の平均流を生成する要因は異なると考えられるものの、上層流出、下層流入のエスチャリー循環の特性については著しい差は無い。

成層強度については、鉛直拡散係数の算出を中辻の定式化したRichardson数の関数で設定し、空間的な

表-2 水質パラメータ

パラメータ	本計算での値
最大増殖率 $G_{max}(day^{-1})$	2.0
温度定数 $\theta_{cr}(-)$	1.07
日射量半飽和定数 $K_1(cal/cm^2/day)$	30
リン半飽和定数 $K_2(g/m^3)$	0.03
植物プランクトン呼吸速度 $R_{20}(day^{-1})$	0.09
温度定数 $\theta_{cr}(-)$	1.045
動物プランクトン濾水速度 $C_{20}(m^3/gPday)$	8.3
温度定数 $\theta_{cc}(-)$	1.045
植物プランクトン沈降速度 $W_p(m/day)$	0.5
植物プランクトン最大同化効率 $a_1(-)$	0.6
植物プランクトン同化半飽和定数 $K_p(gP/m^3)$	0.051
動物プランクトン呼吸速度 $R_{20}(day^{-1})$	0.04
温度定数 $\theta_{az}(-)$	1.045
動物プランクトン死滅速度 $D_1(day^{-1})$	0.075
植物プランクトン回帰率 $\gamma_1(-)$	0.5
動物プランクトン回帰率 $\gamma_2(-)$	0.5
有機態リン分解速度 $K_{20}(day^{-1})$	0.02
温度定数 $\theta_{kd}(-)$	1.08
有機態リン沈降速度 $W_0(m/day)$	0.5
換算係数 $\sigma_{O_2}(gO_2/gP)$	142
換算係数 $\sigma_{NO_3}(gO_2/gP)$	142
換算係数 $\sigma_{NH_4}(gO_2/gP)$	142
再曝気係数 $K_3(day^{-1})$	0.6
底泥からの酸素消費速度 $W_0(gO_2/m^2/day)$	0.1(T-10)
底泥からのリンの溶出速度 $W_p(gP/m^2/day)$	0.033-0.011DO
窒素半飽和定数 $K_3(g/m^3)$	0.1
有機態窒素分解速度 $K_{20}(day^{-1})$	0.02
温度定数 $\theta_{ks}(-)$	1.08
有機態窒素沈降速度 $W_0(m/day)$	0.5
換算係数 $\sigma_{N_2}(gN/gP)$	10
換算係数 $\sigma_{NH_4}(gN/gP)$	10
底泥からの窒素の溶出速度 $W_0(gN/m^2/day)$	0.03 · 1.07 ²⁰
換算係数 $\sigma_{CO_2}(gC/gP)$	50
換算係数 $\sigma_{CH_4}(gC/gP)$	50
COD分解速度 $K_{20}(day^{-1})$	0.02
温度定数 $\theta_{kc}(-)$	1.08
COD沈降速度 $W_0(m/day)$	0.5

分布については考慮したが、季節的な変化については考慮していない。これは成層強度の年間の変化を追跡するためには、塩分の計算を年間に亘って実施する必要があり、同時に計算しなければならない流動の計算量が膨大になるためである。また同計算には風の影響も考慮していない。しかし流動の観測結

果から、当該海域においては基本的にエスチャリー循環が卓越し、成層強度の異なる夏季と冬季で平均流があまり変わらないことから、少なくとも水平方向の平均流については年間を通じて同一の値としても、対象水域の水質計算の入力条件として妥当と考える。従って、水質の年間の計算において、鉛直方向の拡散係数の季節変化が考慮されていないことのみについては、結果を検討する上で配慮する必要がある。

また流入負荷量は、河川流量が平水時と洪水時とで異なると想定されるが、湾は湖沼と異なり、流入負荷量に対する緩衝能力が大きく、負荷量の変動が湖沼ほどには強く現れないと考えられるため、本計算では夏季の平均的な流量および負荷量で実施した。

以上、本水質計算においては、水質、特に植物プランクトンの消長に直接影響を及ぼす水温と日射量の季節変化が、最も大きな要因として影響することになる。

水温については、後述の他の水質と同時に年間のシミュレーションを実施した。図-6にST.25における水温の計算結果（一潮汐間の平均値の経時変化）を示す。水温の計算結果は、水深1mでは8月、9月で計算値の方が低くなっている。この原因としては実測の時刻が正午近いこと、実測の水深が0.5mであるのに対して計算が1m層での値であること等が考えられる。一方水深13.5m層ではよい一致を見た。

日射強度は鉛直方向に指数関数的に減衰していくものとし、その減衰係数については、 $0.633(m^{-1})$ （透明度が3mに相当する値）を用いた。日射強度の減衰係数は、植物プランクトン自身による自己遮蔽効果をも考慮して、植物プランクトン自身の濃度の関数とする方法もあるが、ここではそこまでの考慮はしていない。

(2)水質の特性とシミュレーション

水質については、年間の季節変化を対象としたシミュレーションを行い、特に季節変化の顕著な水質項目について検討した。計算は4月の実測値に基づいた初期値から開始し、 $\Delta t=10$ 分として2年間実施した。1年目の結果と2年目の結果を比較すると、初期条件の影響の及ぶ期間は、最初の2ヶ月間程度であった。また2年目の計算結果の最終値と2年目の初期値には差が無く、計算結果の定常性が十分であると判断された。従って、今後の議論はすべて2年目の計算結果に基づいて行うことにする。

堀口・中田²⁰⁾は、東京湾の水質解析においてモデルに含まれるパラメーターのいくつかについて検討している。たとえば植物プランクトンのN/P比は、

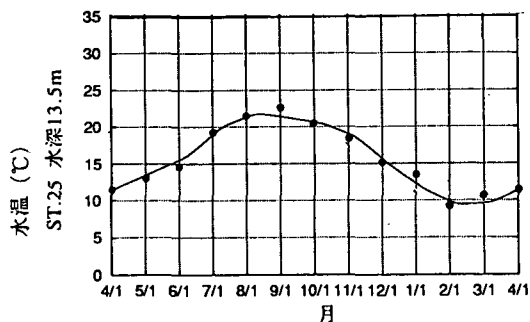
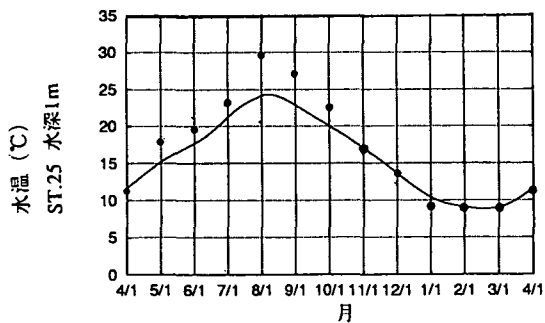


図-6 水温のシミュレーション結果
(プロットは実測値、実線は計算値)

Redfield比よりも高い値を設定すると計算結果が実測値に近づくことを示しているが、本研究においてもRedfield比よりもやや高い値である10を設定することにより精度が向上している。

以下の計算結果のうち、水質の年間の経時変化の図面においては、東京港のほぼ中央に当たるST.25および荒川・中川・旧江戸川の河口のすぐ沖合に当たるST.8における結果を示す。これら2点の結果から、内湾性の水域の特性と河川の影響を直接受ける水域の特性を比較することがある程度可能である。また公共用水質測定は必ずしも各月の1日に実施されていないが、ほとんどのデータが月初めであるため、経時変化の図面では実測値は各月1日の位置にプロットした。また上層の測定層は水深0.5mであるが、水深1mの計算結果の図に併せてプロットした。

ST.25は水深が15~16mで、実測値の測定水深が14~15mであるため、経時変化の図では水深13.5m層での計算結果と比較した。またST.8は水深が6~7mで、実測値の測定水深が5~6mであるため、水深5m層での計算結果と比較した。ただし後述の溶存酸素の下層の平面図において、ST.11、ST.25およびST.22の下

層は、測定水深がそれぞれ12m, 14~15m, 12~14mで若干異なるが、湾奥の2点 (ST.5, 6 (ともに10~11m)) のみではデータが少ないため、同じ水深11m層の図面に実測値を併せて載せることとした。

なお計算結果は、各水質濃度、各フラックス項ともにすべて一潮汐間での平均値を計算し、図化した。

a) プラントン

図-7に、ST.25およびST.8におけるクロロフィル a の年間の経時変化の結果を示す。また図-8に5月、8月、11月、2月の水深1mにおける平面分布を示す。同図にも実測値を併せて示している。

クロロフィル a の実測値は、経時変化を見ると夏季に高濃度となる季節変化が著しい。空間分布を見ると2月は空間的にあまり分布は認められないのに対して、5月、8月は湾奥で高く、8月は港内の奥部で港外の3倍程度の値となっている。11月は分布が複雑で特徴が認められない。

計算値は、経時変化を見ると暖候期の増大と寒候期の減少が認められる。空間分布を見ると各季節とも港内の奥部で高濃度で、冬季のみが全体的に低い結果となっている。また5月には淡水流量の変化を考慮していない等のために、浦安沖で若干はずれているが、全体的には実測値をほぼ再現している。

また各水質の時間変化項である移流・拡散項と化学・生物学的変化項 (基礎式の右辺の各項) の変化の比較を行った。図-9に結果を示す。同図は単位体積当たりのフラックスとして、計算点の濃度変化に対してプラス側に働くものについては正、マイナス側に働くものについては負として示している。また同図の移流成分および拡散成分には、それぞれ水平成分と鉛直成分の両方が含まれている。

ST.25では、より湾奥で増殖した植物プランクトンが移流によって運ばれ、またそれらが沈降していることがわかる。一方荒川の河口に近いST.8ではST.25とは対照的に、プランクトンは河川から運ばれてくるのではなく同地点で増殖し、それが下流に運ばれていく様子が認められる。このようにプランクトンの変化の構成を検討することによって、夏季において同程度の濃度を示しても、場所によってプランクトンの増大する要因が異なることがわかる。

ST.25における表層では栄養塩の欠乏により、植物プランクトンの増殖が押さえられていると考えられ、春季・秋季に比較して夏季の増殖が押さえられることは不自然ではない。また窒素・リンの制限栄養塩に関する関数 (式(11)の右辺) の変化を見ると、制限栄養塩は年間を通じてリンであり、制限栄養塩については変化していなかった。

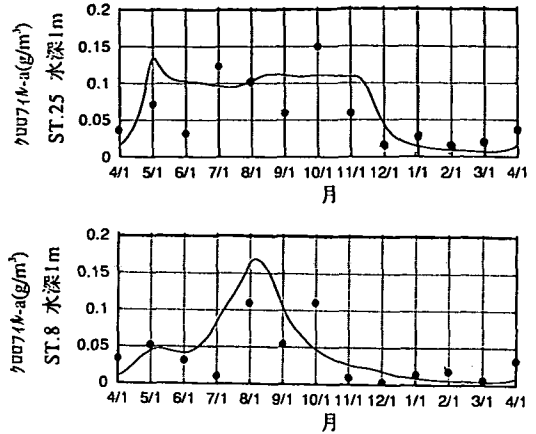


図-7 クロロフィル a のシミュレーション結果 (プロットは実測値、実線は計算値)

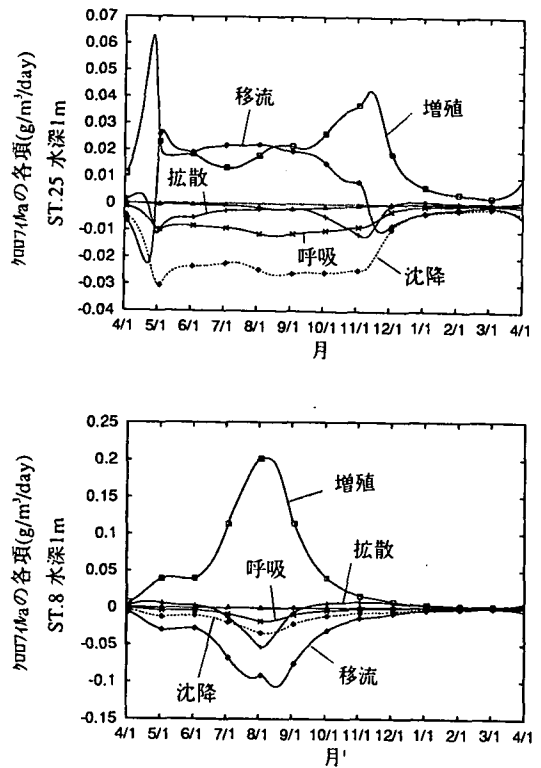


図-9 クロロフィル a の各時間変化項

b) 栄養塩

図-10にST.8におけるリン酸態リンの上下層の経時変化を、図-12にST.25のリン酸態リンの下層の経時変化を示す。また図-14にST.25における全リンの上

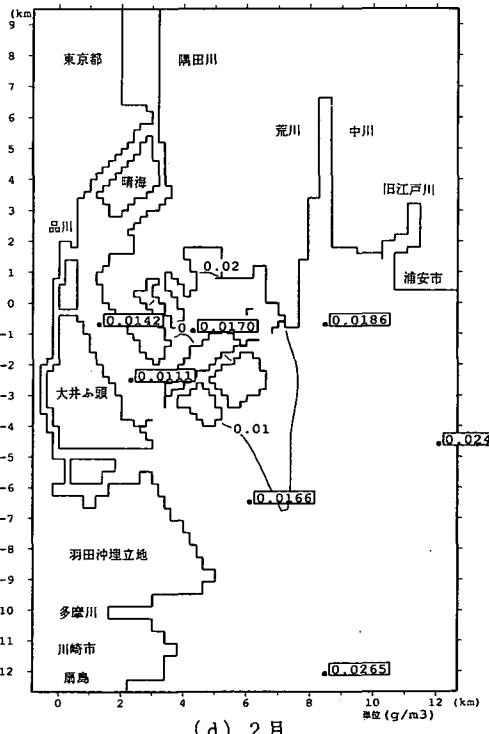
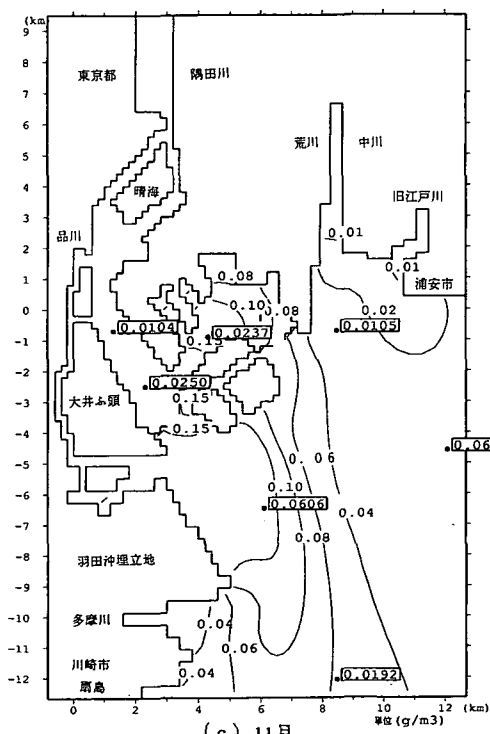
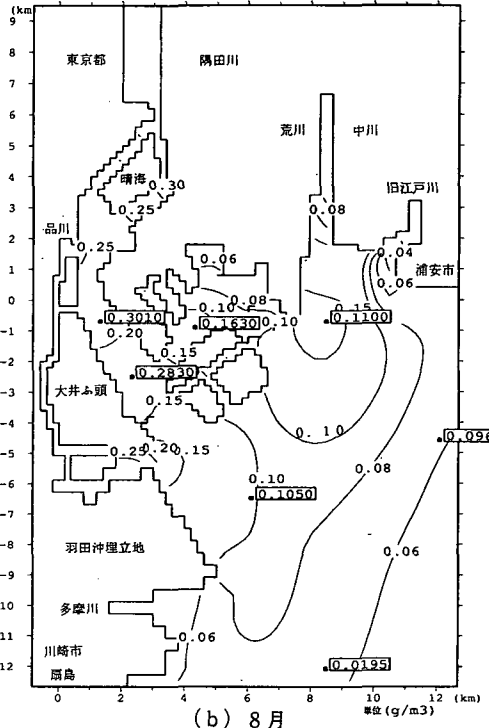
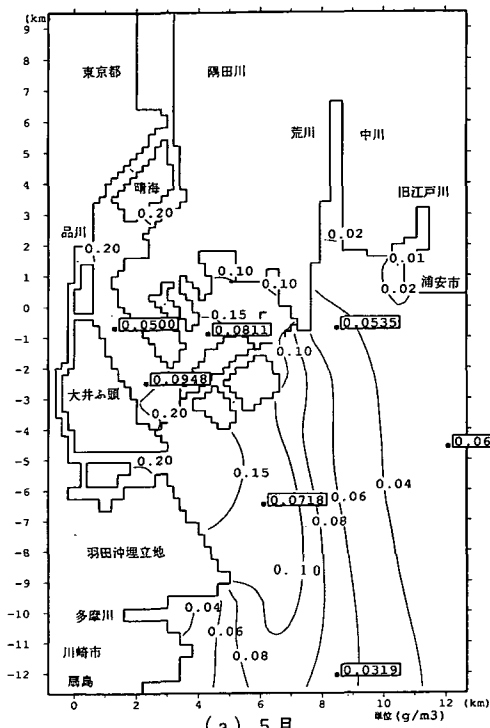


図-8 クロロフィルaのシミュレーション結果
 (水深1m, □で囲まれた数値は実測値, コンターは計算値)

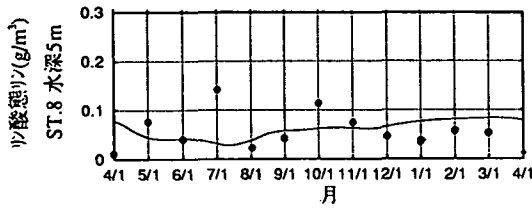
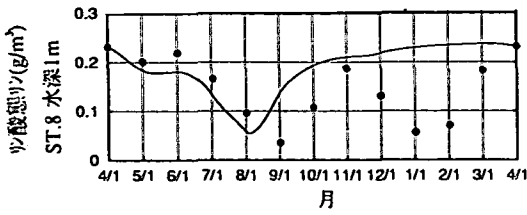


図-10 リン酸態リンのシミュレーション結果
(プロットは実測値, 実線は計算値)

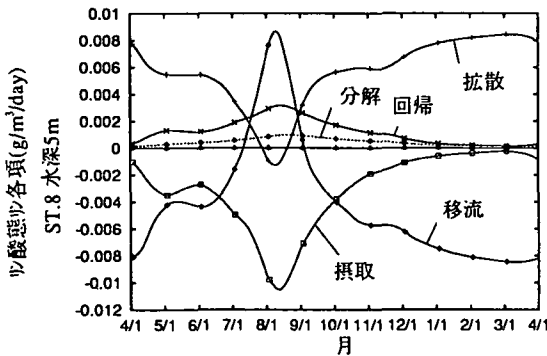
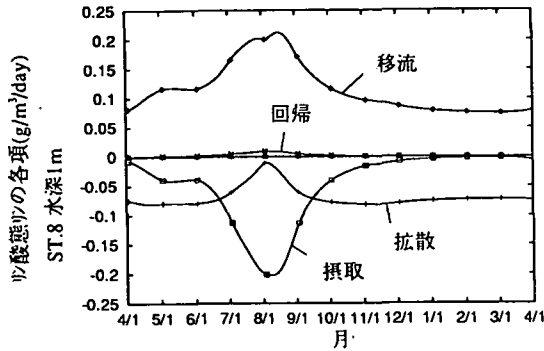


図-11 リン酸態リンの各時間変化項

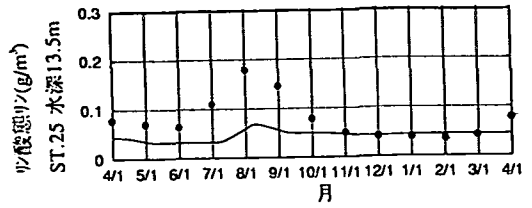


図-12 リン酸態リンのシミュレーション結果
(プロットは実測値, 実線は計算値)

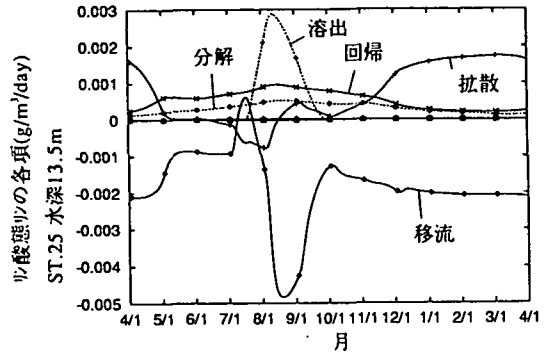


図-13 リン酸態リンの各時間変化項

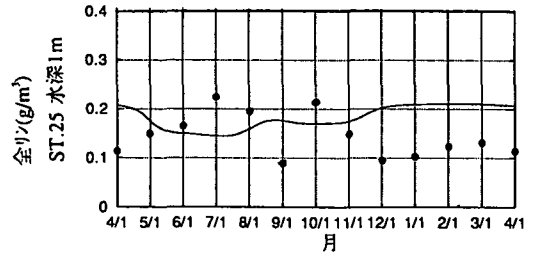


図-14 全リンのシミュレーション結果
(プロットは実測値, 実線は計算値)

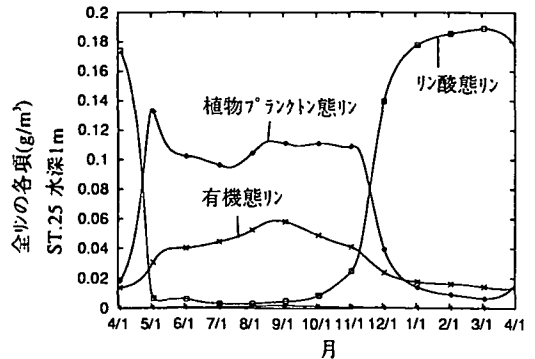


図-15 全リンの各項

層の経時変化の結果を示す。

本研究では下層での溶存酸素濃度が 3g/m^3 以下になる場合を貧酸素化と定義し、溶存酸素濃度が 3g/m^3 以下になった場合に底泥からリンが溶出してくるもの

とした。またその溶出速度は溶存酸素濃度の関数とした。後述のように下層の溶存酸素はST.25では貧酸素化し、ST.8では貧酸素化しない結果となったため、ST.25では底泥からリンが溶出し、ST.8では溶出して

いない。

全リンの時空間変化は、基本的に流入負荷量とその流入位置で決定されると考えられ、ST.25では夏季の下層において底泥からの溶出による増加が見られる他は、顕著な季節変化は認められなかった。またリン酸態リンは、表層では暖候期に著しく減少し、寒候期に増大した。一方下層では、ST.25においてリン酸態リンは夏季に底泥からの溶出により多少増加するのに対して、図には示していないが無機態窒素はほとんど変化しないか、または若干減少していた。

リン酸態リンの計算値が実測値に比べて低いのは、表層では植物プランクトンによる摂取が若干大きめであることが起因している。また下層では鉛直拡散係数の季節変化を考慮していないこと等により、溶存酸素の夏季の下層における低下が実測値に比べて鈍く、底泥からの溶出量が少なかったためと考えられる。ただしこれが結果的に上層のプランクトンの増殖の低下にも影響しているかどうかについては、この時期には本来鉛直拡散が抑えられているため、どちらとも言えない。

図-11, 13, 15に、それぞれ図-10, 図-12, 図-14に対応する移流・拡散項と化学・生物学的変化項の変化の比較を示す。

リン酸態リンは、表層ではST.25, ST.8ともにプランクトンに摂取され、それをほとんどが湾奥からの移流によって補われているのがわかる。また下層では図-13に示すように、ST.25ではST.8と異なり、夏季に貧酸素状態となるため、底泥からの栄養塩の溶出が認められる。

全リンは、夏季はプランクトン態が大半を占めるのに対して、冬季はリン酸態リンが大半を占めている。また非生物体有機態リンは、他のリンに比べて年間の変化が小さい。

c)COD

図-16, 18に非生物体のCOD, および全CODの経時変化を、図-20に平面図を示す。全CODの実測値を見ると、植物プランクトンによる影響を強く受け、クロロフィルaの変化に類似した変化傾向を示している。すなわち5月、8月は港内の奥部で高く、港外で低くなっているのに対し、11月、2月は顕著な空間分布が認められない。また計算値は、クロロフィルaの計算結果が春季、秋季に港内の奥部でやや高いため、全CODも同様となっている。クロロフィルaと同様、5月の浦安沖で若干はずれているが、夏季には著しく奥部で高い等、季節的にも空間的にも実測値の変化をほぼ再現しているものと思われる。

東京港の全CODの実測値の分布が、平面的な変化よりも夏冬の季節的な変化の方が大きくなっている

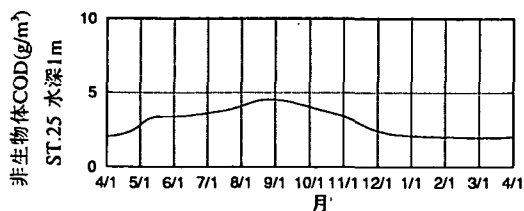


図-16 非生物体CODのシミュレーション結果

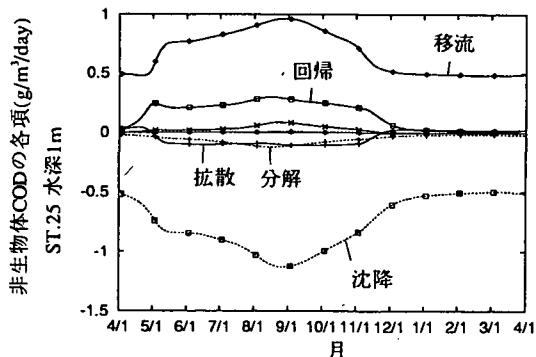


図-17 非生物体CODの各時間変化項

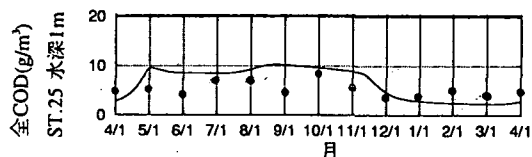


図-18 全CODのシミュレーション結果
(プロットは実測値, 実線は計算値)

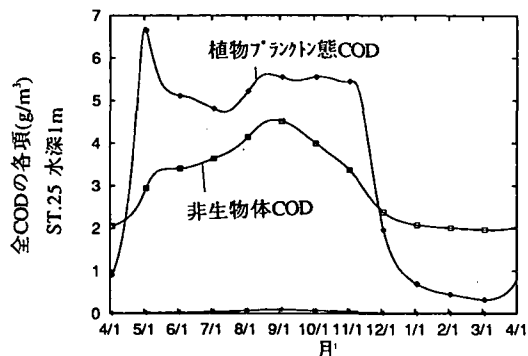


図-19 全CODの各項

のは、同領域での内部生産の影響が顕著であるためと考えられる。また2月の計算結果が若干低いのは、クロロフィルの計算結果が低く、その影響で冬季の2次汚濁が小さくなっていることが原因であると考

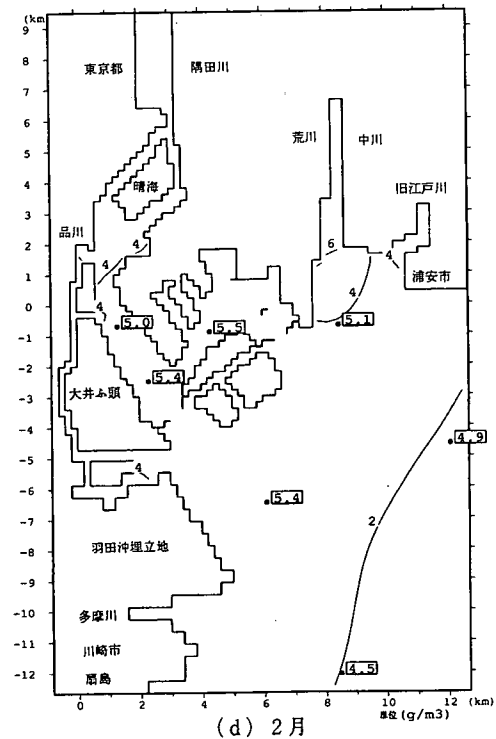
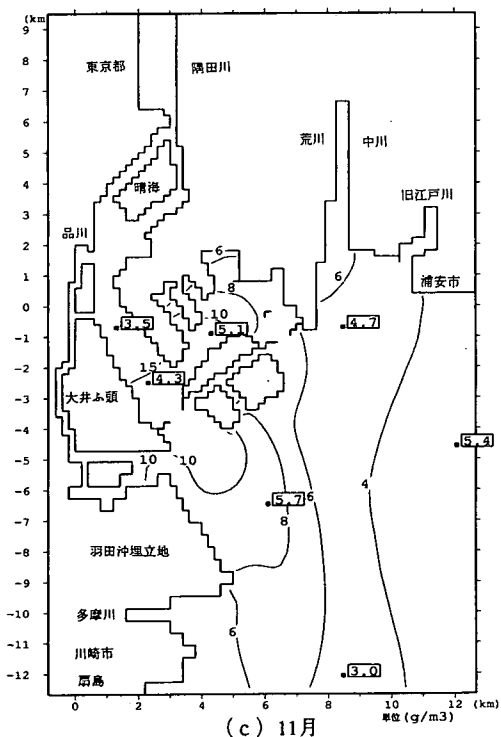
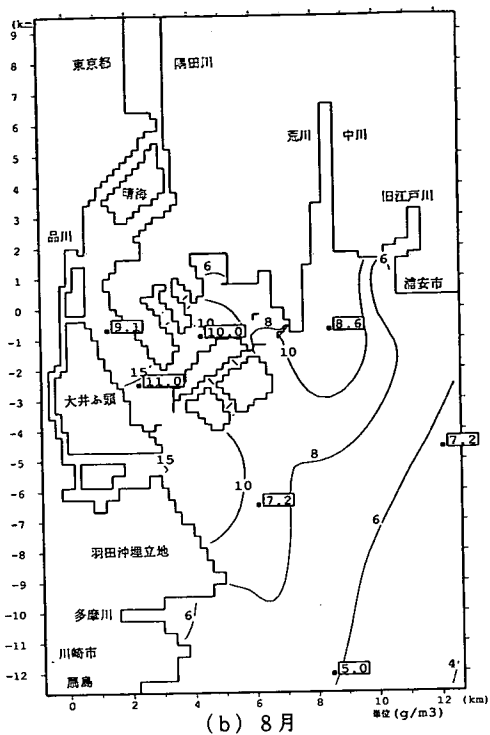
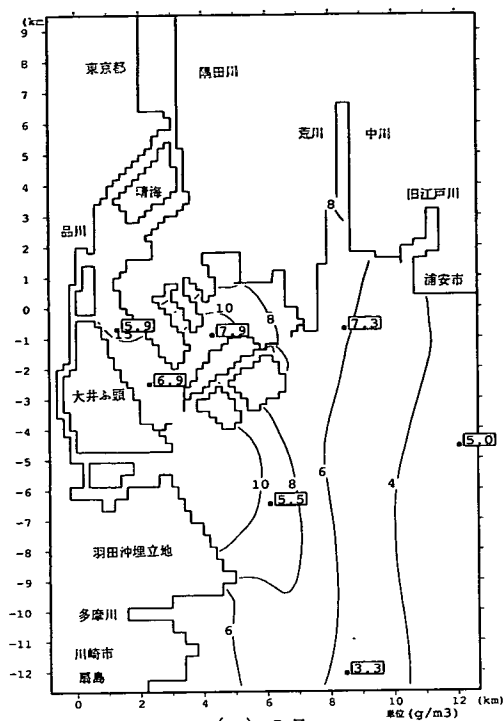


図-20 全CODのシミュレーション結果

(水深1m, □で囲まれた数値は実測値, コンターは計算値)

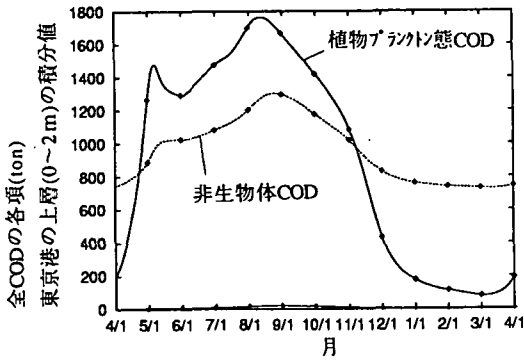


図-21 全CODの各項の東京港の上層(0~2m)の積分値

えられる。

図-17, 19に、それぞれ非生物体CODと全CODの移流・拡散項と化学・生物学的変化項の変化の比較を示す。

全CODについては、構成する要素が季節によって異なり、暖候期の藻類の増殖が著しい時期には植物プランクトンの寄与度が、寒候期は非生物体CODの寄与度が大きい。また後者は前者に比べて年間の変化が小さいことが確認された。図-17の非生物体のCODの各項のオーダーが示すように、収支はプラス側が移流項と回帰項、マイナス側が沈降項と分解項でバランスしている。

図-21に東京港全域の上層（水深0m~2m）の空間積分値を算出し、その経時変化を示した。冬季は、植物プランクトンの増殖に伴う回帰がなくなるため、この非生物体CODが陸域からの負荷に伴う一次汚濁に匹敵していると見なすことができる。同図から植物プランクトン態のCODを二次汚濁とし、一次汚濁をこの非生物体CODの冬季に見られる最小値とすると、東京港の上層における夏季の二次汚濁の寄与度は、一次汚濁の2倍程度となっているのがわかる。

d) 溶存酸素

図-22にST.25およびST.8の下層における経時変化の結果を示す。また図-23に5月、8月、11月、2月の下層の平面分布を示す。

図-22から同じ下層でも水深が異なると実測値の変化傾向が異なり、ST.8では著しい貧酸素化は見られない。計算値は若干高いが、こうした変化傾向と値をほぼ再現している。

図-23の平面分布図については、水深11m層の計算値と、対応する水深における実測値を示す。図-23から水深11mでは実測値は、東京港全域において空間分布よりも季節変化が著しく、8月にはほぼ全水域で貧酸素状態になる。また5月、11月も4~5g/m³で、決

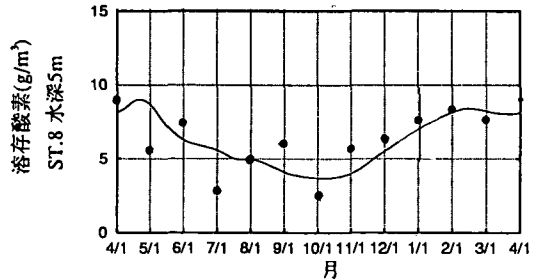
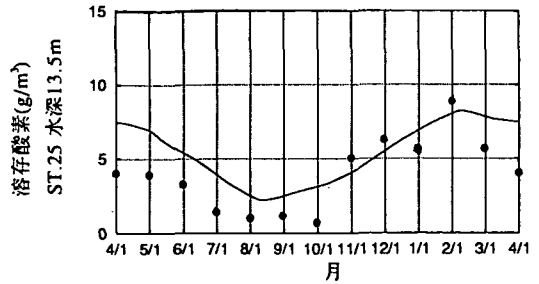


図-22 溶存酸素のシミュレーション結果 (プロットは実測値、実線は計算値)

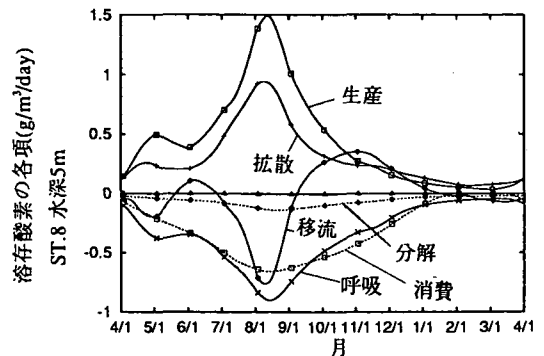
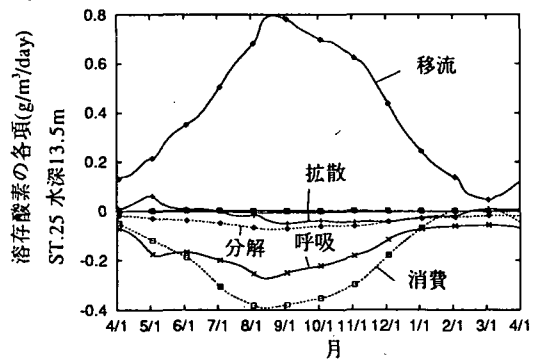


図-24 溶存酸素の各時間変化項

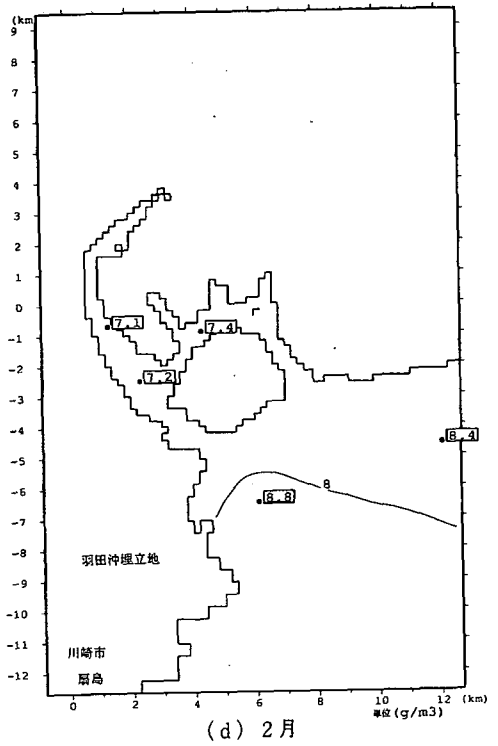
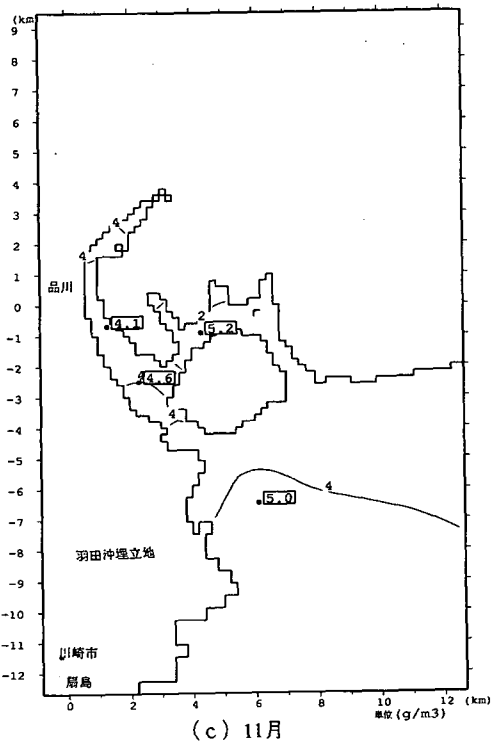
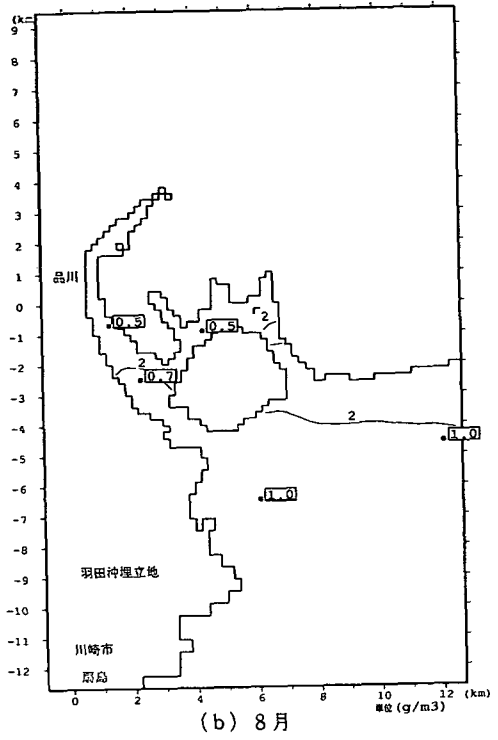
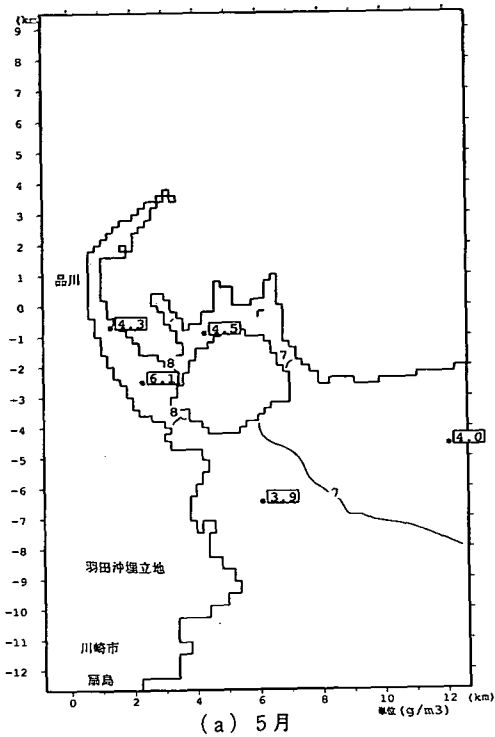


図-23 溶存酸素のシミュレーション結果
 (水深11m, □で囲まれた数値は実測値, コンターは計算値)

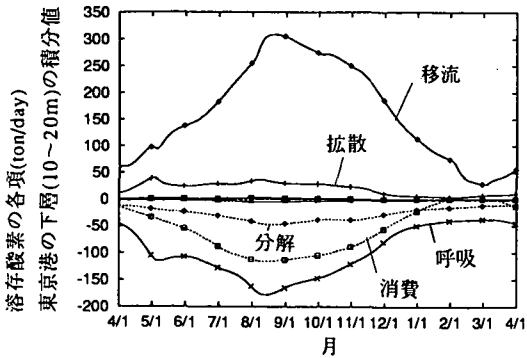
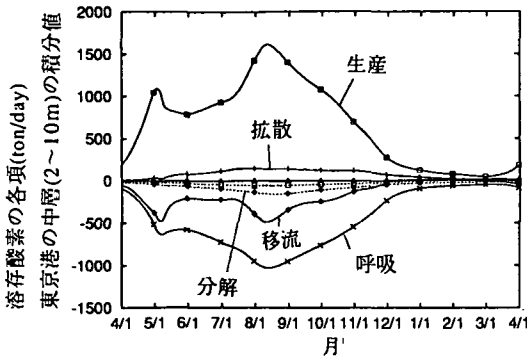


図-25 溶存酸素の各項の東京港の中層(2~10m)および下層(10~20m)の積分値

して高い値とは言えない。2月は全域に亘ってほぼ $7 \sim 8 \text{g/m}^3$ で、豊酸素状態であることが認められた。

計算結果は、上記の実測値の時空間分布の傾向と値を良く再現している。

次に図-24に移流・拡散項と化学・生物学的変化項の変化の比較を示す。同図から、港内の中央であるST.25ではプラス側として移流項が、マイナス側として底泥による消費項、呼吸項、分解項の寄与度が大きいことがわかる。再曝気は表層のみについて考慮しているため、下層の計算結果には現れない。一方荒川の河口に近いST.8では夏季には逆にマイナス側として移流項が、プラス側として拡散項および生産項が働いており、同じ東京港内でも場所による違いが認められる。すなわちST.25では夏季の酸素を補給するものとして外海からの移流が寄与している。一方河口に近いST.8では、ST.25に比べて浅く、下層とはいえ東京港としては中層に位置している。そのため、夏季には上層からの拡散やプランクトンによる生産による酸素の補給があるため、逆に移流項として、より貧酸素化の進行している領域へ酸素を補給

していることが定性的にうかがえる。

上記の内容を定量的に検討するために、東京港全域の中層(水深 $2\text{m} \sim 10\text{m}$)および下層(水深 $10\text{m} \sim 20\text{m}$)での各フラックスの空間積分を行った。図-25に同領域における各フラックスの経時変化を示す。同図から中層における積分値では、同水深に対応するST.8の夏季の下層とはほぼ同様の变化傾向となっていることが認められる。また下層における積分値は、それに対応するST.25の下層とはほぼ同様の变化傾向となっていることが認められる。このことから、夏季の下層で貧酸素化の進行している場所では、有機物の分解等により、エスチャリー循環による沖合からの豊酸素の供給では補えないほど、酸素の消費が生じていることが認められる。

5. 結語

閉鎖的な湾の奥部水域として、東京港を対象に水質のシミュレーションを実施し、実測値と照合するとともに、各水質の移流・拡散項および化学・生物学的変化項の時空間変化の比較を行った。その結果、以下に示すようなことが明らかとなった。

(1)物質の長期的な輸送に大きな影響を及ぼす平均流は、観測結果から上層で港奥から流出し、下層で沖合から港奥に流入するエスチャリー循環が卓越することが認められ、これは淡水の流入に基づく密度変化を考慮した流動の計算によって再現された。

(2)水質計算において季節変化に係わる強制関数は、水質と同時に計算された水温と照度(日射量)、底泥からの栄養塩溶出、酸素消費である。シミュレーションの結果、各水質項目によって、時空間変化が異なり、クロロフィルaの暖候期の増殖と寒候期の減衰が再現された。またプランクトンの変化の構成を検討することによって、夏季において同程度の濃度を示しても、場所によってプランクトンの増大する要因が異なることが確認された。全リンの上層では実測値・計算値ともに季節的に顕著な変化は認められなかった。全CODについては、クロロフィルaの変化に類似した時空間変化の特性が再現されており、植物プランクトンの影響を強く受けていること、すなわち一次汚濁に対する二次汚濁の寄与度の大きいことが推察された。また溶存酸素については、夏季の下層で貧酸素化が進行している場所では、底泥による酸素消費や有機物の分解等により、エスチャリー循環による沖合からの豊酸素の供給では補えないほど、酸素の消費が生じていることが認められた。

参考文献

- 1) 柳下正治：海域の窒素および磷に係る環境基準等の設定について（中公審答申），水環境学会誌，Vol. 16, No.8, pp.534-539, 1993.
- 2) 斉藤照夫：東京湾および大阪湾の全窒素および全リンに係る環境基準の水域類型の指定について，水環境学会誌，Vol.18, No.7, pp.538-542, 1995.
- 3) 岸 道郎：水産資源評価における数値モデルの役割，月刊海洋，pp.236-238, 1995.
- 4) 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，pp.57-123, 1987.
- 5) EPA：A Steady-State Computed Hydrodynamic / Water Quality Model of the Eutrophication and Anoxia Process in Chesapeake Bay, Hydroqual, Inc., 1987.
- 6) 堀口文男，中田喜三郎：沿岸生態系モデルの実海域への適用 - 山口県西部海域の場合 -，資源と環境，Vol. 2, No.1, pp.61-92, 1993.
- 7) 浮田正夫，山原康嗣，中西 弘：大阪湾における流入負荷量の推移と内部生産，沿岸海洋研究ノート，第29巻，第1号，pp.51-59, 1990.
- 8) Cerco, C.F. and Cole, T. : Three - Dimensional Eutrophication Model of Chesapeake Bay, Journal of Environmental Engineering, Vol.119, No.6, pp.1006-1025, 1993.
- 9) Kawamiya, K., Kishi, M.J., Yamanaka, Y. and Sugino, N. : An Ecological-Physical Coupled Model Applied to Station Papa, Journal of Oceanography, Vol.51, pp. 635-664, 1995.
- 10) 内田唯史，浮田正夫，関根雅彦，中西 弘：富栄養化海域の水質の非線形特性とそのモデリングに関する研究，土木学会論文集，No.503/II-29, pp.187-195, 1994.
- 11) 和田 明，宮池克人：熱収支からみた内湾の水環境変化，電力中央研究所報告，No.382045, 1983.
- 12) 松梨史郎：都市河川の流入する湾奥部における流動・水質モデルの開発，電力中央研究所報告，No.U96009, 1996.
- 13) 中田，田口：生態-流体力学モデルを用いた内湾の富栄養化過程に関する数値実験 その2，内湾の生態系モデル，公害資源研究所い報第11巻，第4号，pp.47-68, 1982.
- 14) 東京都：東京臨海道路建設事業，環境影響評価書，pp.225-235, 1993.
- 15) 東京都：新海面処分場建設事業，環境影響評価書案，資料編，pp.208-211, 1993.
- 16) 田尻宗昭編：提言 東京湾の保全と再生，日本評論社，1988.
- 17) 東京都環境保全局水質保全部：東京湾の水質予測調査報告書，1987.
- 18) 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，土木学会水理委員会，pp. A-9-7, 1994.
- 19) 田中昌宏，Guus S. Stelling, Arjen Markus：東京湾の残差流のシミュレーションとそれが水質解析に及ぼす影響について，海岸工学論文集，第43巻，pp.1121-1125, 1996.
- 20) 堀口，中田：東京湾の水質のモデル解析，Journal of Advanced Marine Science and Technology Society, Vol.1, No.1, pp.71-93, 1995.

(1996. 11. 26 受付)

ANALYSIS OF SEASONAL AND SPATIAL VARIATION OF WATER QUALITY AT BAY HEAD AREA

Shiro MATSUNASHI

The numerical simulation was carried out for the analysis of seasonal and spatial variation of water quality at Tokyo port which is located at bay head area of Tokyo bay by the water quality model which could calculate concentrations of chlorophyll-a, zooplankton, nitrogen, phosphorus, COD and dissolved oxygen. As the results of the simulation, it was confirmed that chlorophyll-a increased on spring and summer and decreased on autumn and winter, the factors of increase of chlorophyll-a spatially differed, the change of COD was similar to that of chlorophyll-a, and at the area where oxygen-deficient water was formed in summer, dissolved oxygen was consumed remarkably by decomposition of organic matter, consumption by sediment and so on.