

閉鎖性海域の窒素・リン・溶存酸素の予測モデル

松 梨 史 郎*

1. はじめに

閉鎖性海域の富栄養化問題として、窒素・リンの重要性が指摘されて久しいが、環境影響評価のための予測項目として、窒素・リンおよび溶存酸素の3要素について、季節的な変化を予測できるモデルは、意外に少ない。

従来の海域の水質予測モデルは、環境基準であるCODを中心とした、夏季のみの平面分布を求めることに主眼がおかれている。しかし水質は空間的にも季節的にも変化し、特に生物の生息にとって重要な溶存酸素は、湾奥下層での季節変化が著しい。

本研究は、生態系モデルを基礎に、閉鎖性海域の窒素・リン・溶存酸素の季節変化を予測できるモデルを作成し、東京湾に適用してその適合性を検討したものである。

2. モデルの内容

モデルは、流動予測モデルと水質予測モデルより成る。

東京湾や大阪湾等の、湾全域の水質の季節的な変化を取り扱うにあたっては、潮汐流は渦とみなし、恒流成分が計算の対象となる。恒流成分には、潮汐残差流、密度流、吹送流が存在するが、本モデルでは、恒流成分として年間を通じて存在すると考えられる潮汐残差流と、河川の流入による流れのみを取り上げる。ただし上層と下層で水質が異なることを考慮して、潮汐残差流の計算は2層位モデルとした。

水質予測モデルは、Kishiらのモデル(1981)と、宮永のモデル(1987)を基礎とした窒素・リンの循環に溶存酸素を加えたモデルで、閉鎖性海域の水質の季節的な変化を予測することを主目的としている。

しかし流動・水質について、ともに差分メッシュのモデルによって季節的な変化を計算することは、計算量が膨大となり、現段階では実用的でないため、本モデルでは、流動については差分メッシュのモデルを、水質についてはボックスモデルを用いた。また水質を計算するボックス間の移流は、流動計算の結果を用いて設定した。その際、河川流量には季節変化を考慮した。

水質項目としては、水温、塩分、クロロフィルa、動物

プランクトン、無機態リン、非生物体の有機態リン、無機態窒素、非生物体の有機態窒素、溶存酸素を取り上げた。また同時に、生物体(クロロフィルa、動物プランクトン)と非生物体(無機態、非生物体の有機態)の、それぞれのリンの形態の合計から全リンを計算し、窒素の形態の合計から全窒素を計算する。これによって、水質として全窒素、全リンの予測も可能となる。本モデルでは、有機物を生物体の有機態(クロロフィルa、動物プランクトン)と非生物体の有機態に分けることによって、何が有機物の生産や分解に関与し、何が溶存酸素の生産や消費に関与するかを明確にした。

(1) 流動予測モデル

本計算に用いた流動モデルは、鉛直方向に静水圧分布を仮定し、2層に分けて各層で積分した2層位モデルである。上層の連続式およびx方向の運動方程式は以下のとおりである。

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial [U_1(\xi + D_1)]}{\partial x} + \frac{\partial [V_1(\xi + D_1)]}{\partial y} - W_{12} = 0 \quad \cdots \cdots (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial U_1}{\partial t} + U_1 \frac{\partial U_1}{\partial x} + V_1 \frac{\partial U_1}{\partial y} \\ & + W_{12}(U_1 - U_2)/2(\xi + D_1) \\ & = fV_1 - g\frac{\partial \xi}{\partial x} + A_H(\frac{\partial^2 U_1}{\partial x^2} \\ & + \frac{\partial^2 U_1}{\partial y^2}) - \gamma_i^2(U_1 - U_2) \times [(U_1 - U_2)^2 \\ & + (V_1 - V_2)^2]^{1/2}/(\xi + D_1) \quad \cdots \cdots (2) \end{aligned}$$

ただし、 U, V : それぞれ x, y 方向の流速、 W_{12} : 界面における鉛直方向の流速、 D : 層厚、 ξ : 水位、 A_H : 水平渦動粘性係数、 f : コリオリ係数、 γ_i : 界面での摩擦係数で、添え字は1が上層、2が下層である。

(2) 水質予測モデル

水温・塩分以外の水質モデルの基礎式を以下に示す。

a) クロロフィルa (Y)

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = G_Y Y - R_Y Y - D_Y Y + \frac{\partial W_Y Y}{\partial z} + F(Y) \quad \cdots \cdots (3)$$

b) 動物プランクトン (Z)

$$\frac{\partial Z}{\partial t} = G_Z Z - R_Z Z - D_Z Z + F(Z) \quad \cdots \cdots (4)$$

c) リン酸態リン (P)

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial t} = & -G_P Y + \gamma_P R_Y Y + \gamma_Z R_Z Z + K_P D \\ & + W_P \cdot dA_b/A_b dz + F(P) \quad \cdots \cdots (5) \end{aligned}$$

d) 非生物体の有機態リン (D)

* 正会員 工修 (財)電力中央研究所 海洋科学グループ

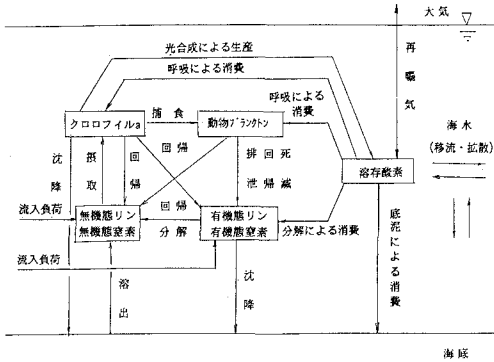


図-1 水質項目の相互関係

$$\begin{aligned} \partial D / \partial t = & (1 - \gamma_y) R_y Y + (1 - f_y) D_y Y \\ & + (1 - \gamma_z) R_z Z + D_z Z - K_D D \\ & + \partial W_D D / \partial z + F(D) \quad \cdots \cdots (6) \end{aligned}$$

e) 全リン (TP)

$$TP = Y + Z + P + D \quad \cdots \cdots (7)$$

f) 無機態窒素 (N)

$$\begin{aligned} \partial N / \partial t = & \sigma_{Ny} (-G_y Y + \gamma_y R_y Y) \\ & + \sigma_{Nz} (\gamma_z R_z Z) + K_E E \\ & + W_N \cdot dA_b / A_b dz + F(N) \quad \cdots \cdots (8) \end{aligned}$$

g) 非生物体の有機態窒素 (E)

$$\begin{aligned} \partial E / \partial t = & \sigma_{Ny} ((1 - \gamma_y) R_y Y + (1 - f_y) D_y Y) \\ & + \sigma_{Nz} ((1 - \gamma_z) R_z Z + D_z Z)) \\ & - K_E E + \partial W_E E / \partial z + F(E) \quad \cdots \cdots (9) \end{aligned}$$

h) 全窒素 (TN)

$$TN = \sigma_{Ny} Y + \sigma_{Nz} Z + N + E \quad \cdots \cdots (10)$$

i) 溶存酸素 (O)

$$\begin{aligned} \partial O / \partial t = & \sigma_{Oy} G_y Y \\ & - \sigma_{Oy} R_y Y \\ & - \sigma_{Oz} R_z Z - \sigma_{OD} K_D D + K_S (O_S - O) \\ & - W_O \cdot dA_b / A_b dz + F(O) \quad \cdots \cdots (11) \end{aligned}$$

ここに、式(3)～(11)の最右辺の関数 $F(X)$ は、水質 X の移流・拡散を表わす。

植物プランクトンは、クロロフィル a で表し、その時間変化には栄養塩の摂取による増殖、呼吸による自己分解、動物プランクトンによる捕食、沈降を考慮する。また、植物プランクトン態リンとの比率は1対1とする。

動物プランクトンは、リンとして計算し、植物プランクトンの捕食による増殖、呼吸による自己分解、死滅を考慮する。

植物プランクトンの増殖は、水温 (T)、照度 (I)、栄養塩 (N 、 P) の関数とし、栄養塩による制限は、Liebig型を用いる。

$$\begin{aligned} G_y &= G_{y\max} f_T f_I \text{Min}(f_P, f_N) \\ f_T &= 1.07^{T-20}, \quad f_I = I / (K_I + I) \end{aligned}$$

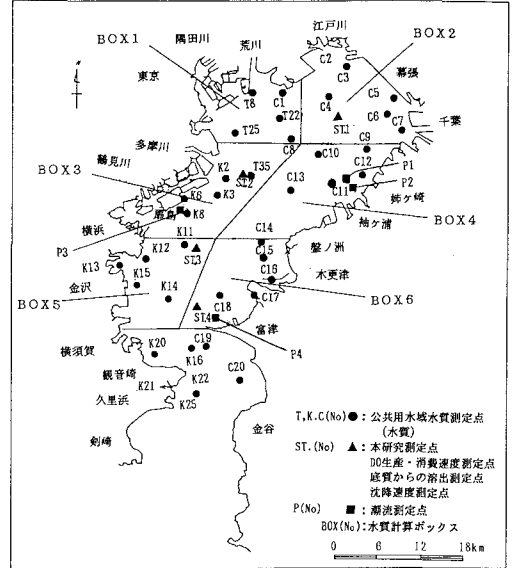


図-2 東京湾における水質測点

$$f_P = P / (K_P + P), \quad f_N = N / (K_N + N)$$

動物プランクトンの呼吸による自己分解は、水温の関数で与える。添え字の20は20°Cにおける値を意味する。

$$R_y = R_{y20} f_T, \quad R_z = R_{z20} f_T$$

動物プランクトンによる植物プランクトンの捕食と動物プランクトンの増殖は、次式で与える。

$$\begin{aligned} D_y Y &= C_{g20} f_T \cdot Y \\ G_z Z &= f_y C_{g20} f_T \cdot Y \cdot Z = f_y D_y Y \\ f_y &= a_s K_y / (K_y + Y) \end{aligned}$$

リン酸態リンおよび無機態窒素には、植物プランクトンによる摂取、植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自己分解による回帰、有機態リン・窒素の分解、底泥からの溶出を考慮する。ただし底泥からの溶出は、リンは溶存酸素の、窒素は水温の関数で与える。無機態窒素には、アンモニア態、硝酸態、亜硝酸態の三つの形態があるが、ここではこれら三態の和として扱い、硝化は考えないものとする。また脱窒は、還元条件下で主として底泥中で生じ、水中での脱窒は、底泥でのそれに比べて2オーダー低いとの報告(服部ら(1983))もあるため無視した。

有機態リン・窒素は、プランクトンの死骸や排せつ物等の非生物体の有機物で、その変化には植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排泄、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、沈降を考慮する。

分解速度は、次式のように水温の関数として与える。

$$K_D = K_{D20} f_T, \quad K_E = K_{E20} f_T$$

全リンは、クロロフィル a、動物プランクトン態リン、リン酸態リン、有機態リンの和で、全窒素は、植物プランクトン態窒素、動物プランクトン態窒素、無機能窒素、有機態窒素の和で算出する。またバクテリアの現存量は、小倉 (1979) によると動物プランクトン量と同じオーダーであるが、未解明な点が多いため、全窒素・全リンの計算には含まない。

溶存酸素の計算には、植物プランクトンによる生産、動植物プランクトンによる呼吸、有機態リンの分解、海面からの再曝気、底泥による消費を考慮する。底泥による消費は、水温の関数として与えた。

これらの水質項目の相互関係を、図-1 に示す。

3. 東京湾への適用

(1) 流動のシミュレーション

図-2 に東京湾における流動・水質測定点および水質のボックス分割を示す。計算メッシュは水平方向に 800 m×800 m、鉛直方向には 2 層とした。上下層の境界面は、図-3 に示すような水質実測値の鉛直分布から決定し、水深 4 m 以浅を上層、それ以深を下層とした。潮流流は湾口での潮位条件を、潮位振幅 0.373 m (M2 潮のみを考慮)、周期 12 時間として 5 サイクル計算し、最後の 1 サイクル間の平均流速を潮流残差流とした。また河川流は密度効果によって上層 4 m のみを流れるものとした。

潮流流は、図-2 の潮流流実測点での潮流楕円の实測値と計算値の比較から、楕円の短軸方向がやや扁平であるものの、長軸方向の値や方向がほぼ再現された。

潮流残差流は、湾内の恒流成分の各季節に共通する流動パターンとして、上層では袖ヶ浦の 4~7 cm/s の南下流、富津沖の 10~20 cm/s の西流が再現された。

(2) 水質のシミュレーション

水質の計算期間は、1984 年 4 月から 85 年 3 月までの一年間とした。計算対象領域は、湾奥から富津までの狭義の東京湾とし、同湾が東京側・千葉側・神奈川側によって負荷がかなり異なること、大川が西側に偏っていること、および地形、水深、夏季の全リンの平面分布形状等を考慮して、図-2 に示すように平面的に 6 分割、鉛直的に 2 層の合計 12 のボックスに分割した。

鉛直方向の拡散係数は、水温・塩分から計算される、バイサラ振動数の関数とすることによって、湾内の物質輸送における密度成層による影響を考慮した。ただしその値には上限 (5 cm²/s) および下限 (0.5 cm²/s) を設けた。

表-1 に計算に用いた水質パラメーターを示す。

図-4~9 に実測値と計算結果の比較を示す。

クロロフィル a は、BOX 1 上層では暖候期に増大し寒候期に減少している。極端な spring bloom は存在しない

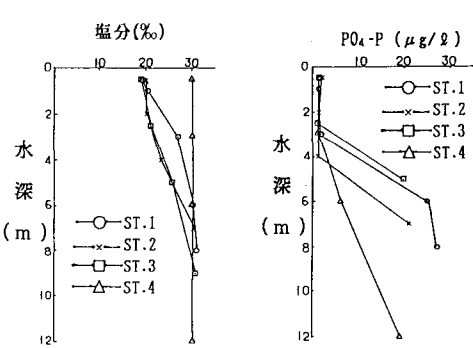


図-3 水質の鉛直分布 (1988 年 8 月)

表-1 水質パラメーター

パラメーター	本計算での値
最大増殖率 $G_{y\max20}$ (day ⁻¹)	3.0
温度係数 θ (-)	1.07
日射量半飽和定数 K_I (cal/cm ² day)	30
リン半飽和定数 K_P (g/m ³)	0.03
植物プランクトン呼吸定数 R_{g20} (day ⁻¹)	0.09
動物プランクトン濾水速度 C_{g20} (m ³ /gPday)	8.3
植物プランクトン沈降速度 W_g (m/day)	0.5
植物プランクトン最大同化効率 a_s (-)	0.6
植物プランクトン同化半飽和定数 K_y (gP/m ³)	0.051
動物プランクトン呼吸速度 R_{z20} (day ⁻¹)	0.04
動物プランクトン死滅速度 D_z (day ⁻¹)	0.075
植物プランクトン回帰率 γ_y (-)	0.5
動物プランクトン回帰率 γ_z (-)	0.5
有機態リン分解速度 K_{D20} (day ⁻¹)	0.02
有機態リン沈降速度 W_D (m/day)	0.5
換算係数 σ_{O_2} (gO ₂ /gP)	142
換算係数 σ_{O_2} (gO ₂ /gP)	142
換算係数 σ_{O_2} (gO ₂ /gP)	142
再曝気係数 K_s (day ⁻¹)	0.6
底泥による酸素消費速度 W_0 (gO/m ² /day)	0.1(T-10)
底泥からのリンの溶出 W_p (gP/m ² /day)	0.033-0.011 DO
窒素半飽和定数 K_N (g/m ³)	0.1
有機態窒素分解速度 K_{E20} (day ⁻¹)	0.02
有機態窒素沈降速度 W_E (m/day)	0.5
換算係数 σ_{N_2} (gN/gP)	10
換算係数 σ_{N_2} (gN/gP)	10
底泥からの窒素の溶出 W_N (gN/m ² /day)	$0.030\theta^{T-20}$

が、夏季には 0.1 g/m³ 程度の赤潮状態となっている。12 月になると 0.02 g/m³ 程度まで減少している。BOX 3 上層では BOX 1 上層ほど高くないが、やはり暖候期に

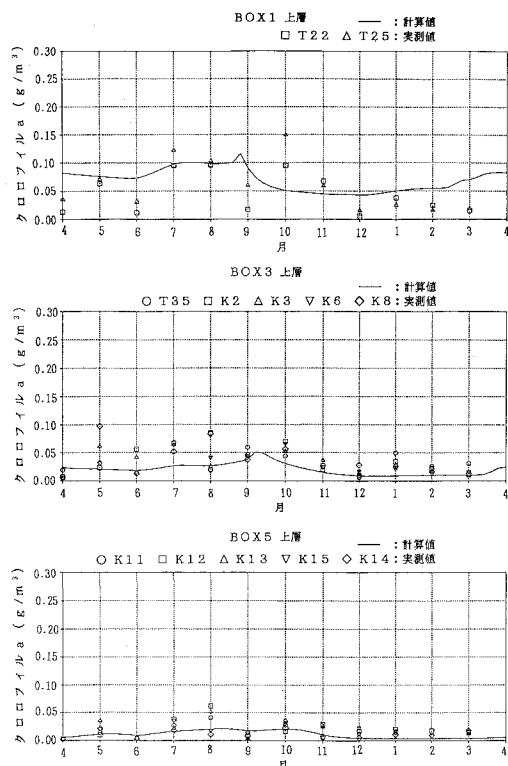


図-4 クロロフィルaの実測値と計算値の比較

は高い。BOX 5 上層では $0.02 \sim 0.03 \text{ g/m}^3$ 程度となっており、計算値はこれらの季節変化の傾向と値をほぼ再現している。

無機態リン・窒素については、窒素の実測値に上層で 9 月頃に低下し、寒候期に増大する傾向が見られる。これは藻類の増殖によるものと考えられる。計算値は、リンは実測値に比べて小さいが、窒素は実測値の季節変化の傾向と値を、ほぼ再現している。

全リンは、BOX 1 上層では実測値に大きなばらつきがあるが、夏季に増大し冬季に減少する傾向が現れている。計算値は、実測値の値や季節変化を、ほぼ再現している。

全窒素も、BOX 1 上層では実測値に大きなばらつきがある。年間を通じて卓越した季節変化は示さないが、秋季に若干低下する傾向が見られ、計算値も同様の傾向を示している。

溶存酸素は、BOX 1 下層では夏季に著しく低下し、貧酸素水塊の形成される傾向が見られ、冬季に 10 g/m^3 程度であるのに対して夏季は 2 g/m^3 以下になる場合もある。BOX 3 も BOX 1 と同様の傾向となっている。BOX 5 の下層も夏季に低下するが、最低でも 4 g/m^3 程度であり、貧酸素水塊形成の度合は低い。計算値は各 BOX の季節変化や、湾奥～湾口の傾向と値をほぼ再現している。

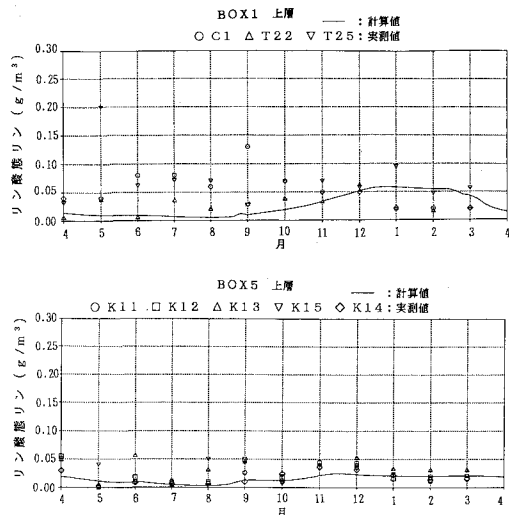


図-5 リン酸態リンの実測値と計算値の比較

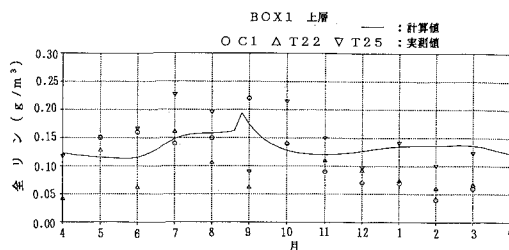


図-6 全リンの実測値と計算値の比較

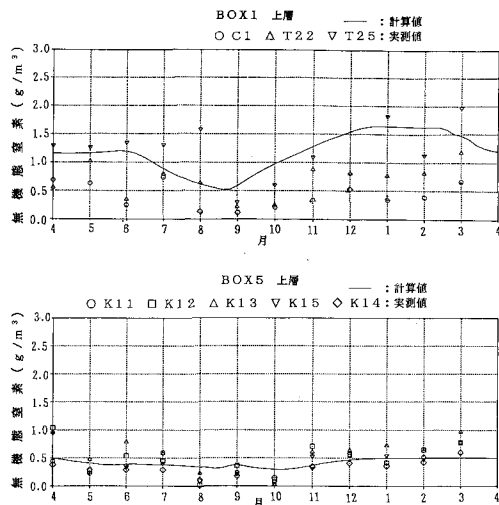


図-7 無機態窒素の実測値と計算値の比較

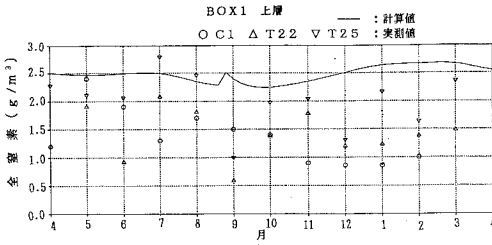


図-8 全窒素の実測値と計算値の比較

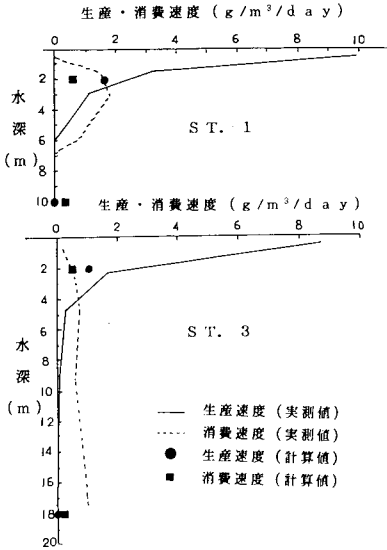


図-9 溶存酸素の実測値と計算値の比較

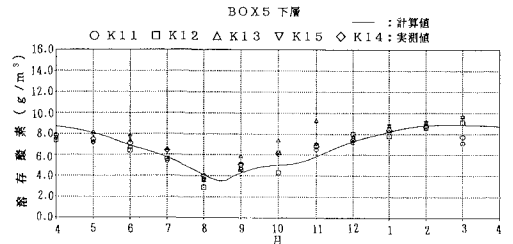
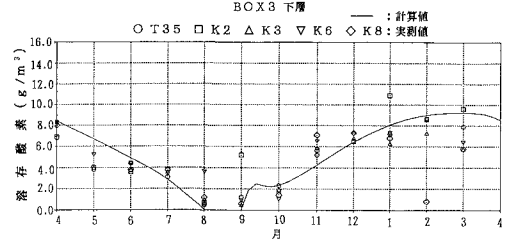
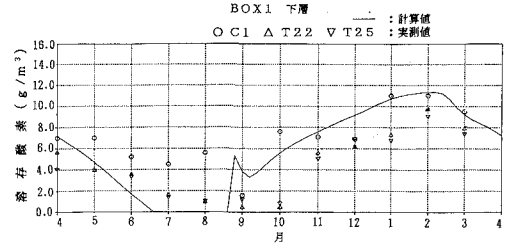


図-10 溶存酸素の生産・消費速度 (1988年8月)

図-10に、同モデルで計算された溶存酸素の生産・消費項と、今回新たに明暗ビンによる現場法によって測定された、溶存酸素の生産・消費速度の実測値との比較を示す。ただし実測の生産速度と消費速度は、それぞれ現場法による総光合成速度と呼吸速度であり、計算値の生産速度は植物プランクトンによる生産速度、消費速度は動・植物プランクトンによる呼吸速度と有機態リンによる分解速度の和である。同図より、計算値は上下層での生産・消費速度のオーダーと傾向を概ね表現していることが認められる。

また本計算における、湾全体の夏季における物質循環の流れとして、窒素・リンともに、無機態→植物プランクトン態→有機態→無機態のサイクルが卓越していることが認められた。

4. 結 語

閉鎖性海域における、窒素・リン・溶存酸素についての季節変化を予測するモデルを作成し、東京湾に適用した結果、各水質項目の特徴的な季節変化や、溶存酸素の生産・消費量を概ね再現することができた。本水質モデルは計算が比較的簡便であるため、水質の長期的な変化の予測に有用と考えられる。

参 考 文 献

- 小倉紀雄 (1979): 東京湾における有機物循環, 沿岸海洋研究ノート, 第16巻, 第2号, pp. 92-100.
- 服部明彦・大津正恵・小池勲夫 (1983): 東京湾における窒素の分布, 代謝と収支, 地球科学 17, pp. 33-41.
- 宮永洋一 (1987): 貯水池富栄養化予測の汎用モデル, 電力中央研究所報告, U 86015, 28 p.
- Kishi, M., K. Nakata and K. Ishikawa (1981): Sensitive Analysis of a Coastal Marine Ecosystem, Journal of the Oceanographical Society of Japan, Vol. 37, pp. 120-134.