

東京湾の富栄養化に関する研究(その4) 生態系モデル内の係数に関する数値実験について

安藤晴夫 曾田京三

1 はじめに

東京湾の富栄養化と水質汚濁を防止するため、化学的酸素要求量(COD)の総量規制、窒素(N)、りん(P)の削減などの対策が実施されてきたが、ここ数年、水質はあまり改善されていない¹⁾。一方、東京湾横断橋の架設、臨海埋立地の住居地域としての利用など、あらたな開発の構想があがっており、今後とも、長期的、総合的な東京湾水質汚濁対策を講じていく必要があるものと考えられる。

このような、東京湾汚濁対策の策定及びその効果判定と見直しに役立てるため、東京湾の水質汚濁機構の定量的解明及び将来水質の予測手法を確立することを目的として、我々は東京湾の富栄養化生態系構造モデルを作成し、その改良、実用化を図ることとしている。

ところで、生態系モデルにおいては、現象に係わる生物的過程や物理化学的過程を記述するため多くの係数が使用されている。しかし、富栄養化に係わる生物現象や気象、流況などの物理的過程は同一海域においても、時間的、空間的変動が大きく、また不確実性をもっているものもあるから、モデル内の諸係数の値を、一義的に定めることは困難な場合が多い。したがって、モデルで用いられる諸係数値を文献値等を参考にして設定し、どのような値を与えた場合に現象が最も良く再現されるか(再現性)を検討すること、あるいは、係数値を変化させ、それがシミュレーション結果にどの程度の影響を与えるか、その応答は鋭敏か鈍感か(感度)を検討することは、モデルを確立するうえで重要なことである。これらのことは、モデルを改良する上での着眼点を明らかにするばかりでなく、複雑な富栄養化機構のうち対象海域では何が支配的なのか、研究の重点をどこに置くべきかについても重要な情報を与えるものである。本報では、我々の作成したモデル内のいくつかの係数について行っ

た数値実験の結果を報告する。

2 モデルと入力条件

(1) モデル

東京湾の富栄養化生態系構造モデルの詳細は、前報²⁾(「東京湾の富栄養化に関する研究(そのⅢ)」)に述べてあるが、表1にその生物過程の部分を示した。

(2) ボックス分割

東京湾を、前報と同じく11ボックスに分割した(図1)。表層の層厚も5mとした。

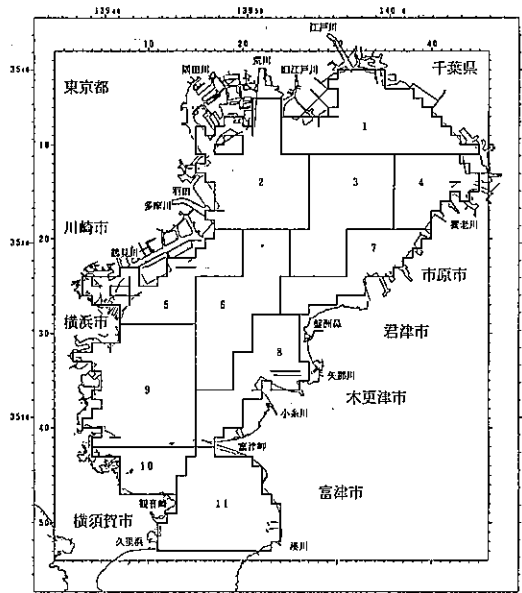


図1 対象海域とそのボックス分割
〔海岸線は日本海洋データセンターの東京湾海岸線データ(提供番号85-079)を使用して作成。〕

表1 生態系モデル(生物過程)

1. [光合成]

$$\frac{[光合成]}{GRA} = \frac{[温度条件]}{t(T)} \times \frac{[照度条件]}{p(I)} \times \frac{[栄養条件]}{n(N,P)} \times [A]$$

$t(T) = a_0 + a_1T + a_2T^2 + a_3 \exp(a_4T + a_5)$: 最大増殖速度の温度関数

- * T : 水温
- * a_i : 係数 ($i = 0 \sim 5$)

$$p(I) = I_j / (I_j + I_0)$$

- * I_0 : 半飽和照度
- * I_j : 各層の平均水中照度 ($j = 1 \sim 2$)

表層: $I_1 = I_s (-\exp(-k_1h_1) + 1) / k_1h_1$

底層: $I_2 = I_s \exp(-k_1h_1) (-\exp(-k_2h_2) + 1) / k_2h_2$

- * h_j : 層厚 ($j = 1 \sim 2$)
- * I_s : 表面照度
- * k_j : 光消散係数 ($j = 1 \sim 2$)

$$k_j = I_k + m_k[A_j] + n_k[Z_j]$$

* I_k (定数項), m_k (植物項), n_k (動物項): 係数

$$n(N,P) = \min \left[\frac{[N]}{[N] + N_s}, \frac{[P]}{[P] + P_s} \right]$$

- * N_s : N半飽和濃度
- * P_s : P半飽和濃度

2. [細胞外分泌]

$$\frac{[細胞外分泌]}{SCA} = \frac{細胞外分泌率}{s} \times \frac{[光合成]}{GRA}$$

3. [枯死]

$$\frac{[枯死]}{MRA} = \frac{[枯死率]}{m(T)} \times [A]$$

$m(T) = b_0 + b_1T + b_2T^2 + b_3 \exp(b_4T + b_5)$

- * T : 水温
- * b_i : 係数 ($i = 0 \sim 5$)

4. [沈降]

(1) 植物プランクトン

表層: $\frac{[沈降A_1]}{SK_{A_1}} = \left(\frac{沈降速度}{sa} / \frac{表層層厚}{h_1} \right) \times [A_1]$

底層: $\frac{[沈降A_1]}{SK_{A_1}} = \left(\frac{沈降速度}{sa} / \frac{底層層厚}{h_2} \right) \times [A_1]$

$\frac{[沈降A_2]}{SK_{A_2}} = \left(\frac{沈降速度}{sa} / \frac{底層層厚}{h_2} \right) \times [A_2]$

(2) デトリタス

表層: $\frac{[沈降D_1]}{SK_{D_1}} = \left(\frac{沈降速度}{sd} / \frac{表層層厚}{h_1} \right) \times [D_1]$

底層: $\frac{[沈降D_1]}{SK_{D_1}} = \left(\frac{沈降速度}{sd} / \frac{底層層厚}{h_2} \right) \times [D_1]$

$\frac{[沈降D_2]}{SK_{D_2}} = \left(\frac{沈降速度}{sd} / \frac{底層層厚}{h_2} \right) \times [D_2]$

5. [捕食]

$$\left[\frac{\text{捕食}}{\text{FDz}} \right] = \frac{\text{最大捕食率}}{\text{fm}} \times \frac{\text{捕食効率}}{\text{fe(A)}} \times \text{【Z】}$$

$$\text{fe(A)} = 1 - \exp(\lambda(A^* - [A]))$$

* λ : IVLEVの定数
* A* : 捕食効率の閾値

6. [排糞]

$$\left[\frac{\text{排糞}}{\text{EGz}} \right] = (1 - \frac{\text{同化効率}}{\text{as}}) \times \left[\frac{\text{捕食}}{\text{FDz}} \right]$$

7. [排泄]

$$\begin{aligned} \left[\frac{\text{排泄}}{\text{EXz}} \right] &= (1 - \frac{\text{総成長効率}}{\text{ge}}) \times \left[\frac{\text{捕食}}{\text{FDz}} \right] - \left[\frac{\text{排糞}}{\text{EGz}} \right] \\ &= (\frac{\text{同化効率}}{\text{as}} - \frac{\text{総成長効率}}{\text{ge}}) \times \left[\frac{\text{捕食}}{\text{FDz}} \right] \end{aligned}$$

8. [死亡]

$$\left[\frac{\text{死亡}}{\text{DIz}} \right] = \left[\frac{\text{死亡率}}{\text{dr(T)}} \right] \times \text{【Z】}$$

$$\text{dr(T)} = c_0 + c_1T + c_2T^2 + c_3 \exp(c_4T + c_5)$$

* T : 水温
* c_i : 係数 (i=0~5)

9. [日周移動]

1) 上昇

$$\text{表層: } \left[\frac{\text{日周移動U}}{\text{MUz}_1} \right] = \left(\frac{\text{上昇速度}}{\text{vu}} \times \frac{\text{層境界面積}}{\text{ar}_2} \right) / \frac{\text{表層容積}}{\text{V}_1} \times \text{【Z}_2\text{】}$$

$$\text{底層: } \left[\frac{\text{日周移動U}}{\text{MUz}_2} \right] = \left(\frac{\text{上昇速度}}{\text{vu}} \times \frac{\text{層境界面積}}{\text{ar}_2} \right) / \frac{\text{底層容積}}{\text{V}_2} \times \text{【Z}_2\text{】}$$

2) 下降

$$\text{表層: } \left[\frac{\text{日周移動D}}{\text{MDz}_1} \right] = \left(\frac{\text{下降速度}}{\text{vd}} \times \frac{\text{層境界面積}}{\text{ar}_2} \right) / \frac{\text{表層容積}}{\text{V}_1} \times \text{【Z}_1\text{】}$$

$$\text{底層: } \left[\frac{\text{日周移動D}}{\text{MDz}_2} \right] = \left(\frac{\text{下降速度}}{\text{vd}} \times \frac{\text{層境界面積}}{\text{ar}_2} \right) / \frac{\text{底層容積}}{\text{V}_2} \times \text{【Z}_1\text{】}$$

10. [分解D]

$$\left[\frac{\text{分解D}}{\text{DCD}} \right] = \left[\frac{\text{温度分解率}}{\text{dd(T)}} \right] \times \text{【D】}$$

$$\text{dd(T)} = d_0 + d_1T + d_2T^2 + d_3 \exp(d_4T + d_5)$$

* T : 水温
* d_i : 係数 (i=0~5)

11. [溶出]

1) 溶存性無機態窒素

$$\text{表層: } \left[\frac{\text{溶出N}}{\text{RSN}_1} \right] = \left[\frac{\text{溶出速度N}}{\text{rn(I)}} \right] \times \frac{\text{表層底面積}}{\text{bm}_1} / \frac{\text{表層容積}}{\text{V}_1}$$

$$\text{下層: } \left[\frac{\text{溶出N}}{\text{RSN}_2} \right] = \left[\frac{\text{溶出速度N}}{\text{rn(I)}} \right] \times \frac{\text{底層底面積}}{\text{bm}_2} / \frac{\text{底層容積}}{\text{V}_2}$$

2) 溶存性無機態りん

$$\text{表層: } \left[\frac{\text{溶出P}}{\text{RSP}_1} \right] = \left[\frac{\text{溶出速度P}}{\text{rp(I)}} \right] \times \frac{\text{表層底面積}}{\text{bm}_1} / \frac{\text{表層容積}}{\text{V}_1}$$

$$\text{下層: } \left[\frac{\text{溶出P}}{\text{RSP}_2} \right] = \left[\frac{\text{溶出速度P}}{\text{rp(I)}} \right] \times \frac{\text{底層底面積}}{\text{bm}_2} / \frac{\text{底層容積}}{\text{V}_2}$$

$$\text{rn(I)} = e_0 + e_1I + e_2I^2 + e_3 \exp(e_4I + e_5)$$

$$\text{rp(I)} = f_0 + f_1I + f_2I^2 + f_3 \exp(f_4I + f_5)$$

* T : 水温
* e_i, f_i : 係数 (i=0~5)

(3) 諸係数, 変換係数

表2にモデルの係数及び変換係数の設定値を示した。

表2 諸係数の設定値(基本ケース)

名 称	単 位	設 定 値	備 考
最大増殖速度	day ⁻¹	0.59exp(0.063t)	t:水温
半飽和照度	cal·cm ⁻² ·day ⁻¹	17.2	
光消散係数	m ⁻¹	1.1	
窒素半飽和濃度	g·m ⁻³	0.025	
りん半飽和濃度	g·m ⁻³	0.016	
細胞外分泌率	day ⁻¹	0.1	
植物枯死率	day ⁻¹	0.50	
植物沈降速度	m·day ⁻¹	0.1	
最大捕食率	day ⁻¹	1.6	
I V L E V定数		5.0	
捕食の閾値	g·m ⁻³	0.016	
同化効率		0.7	
総成長効率		0.3	
動物死亡率	day ⁻¹	0.30	
動物上昇速度	m·day ⁻¹	0.2	
動物下降速度	m·day ⁻¹	0.2	
デトリタス分解率	day	0.1	
デトリタス沈降速度	m·day ⁻¹	0.2	
窒素溶出速度	g·m·day	0.01	
りん溶出速度	g·m ⁻² ·day ⁻¹	0.0004+0.00005t	t:水温
{A} {Z} → {N} {D}	mgN/mgC	0.11	{A}:植物プランクトン {Z}:動物プランクトン {D}:デトリタス {N}:溶存性無機態窒素 {P}:溶存性無機態りん
{A} {Z} → {P} {D}	mgP/mgC	0.016	
{A} {Z} → {COD} {D}	mgCOD/mgA mgCOD/mgZ mgCOD/mgD	1.5	

(4) 流入負荷量

前報と同じく表3に示す流量, 汚濁負荷量を与えた。

ただし, 汚濁負荷量(COD, 窒素, りん)については, 図2に例示したように降雨量等を考慮した季節変動を与えた。

表3 ボックス別流入汚濁負荷量

ボックス番号	流量 万m ³ /日	COD t/日	窒素 t/日	りん t/日
1	1623	14.16	889	0.78
2	2,235.3	243.77	219.26	21.19
3	0.0	0.0	0.0	0.0
4	113.9	9.94	6.24	0.55
5	185.4	45.92	17.97	2.39
6	0.0	0.0	0.0	0.0
7	15.0	1.32	0.82	0.07
8	133.8	11.67	7.33	0.65
9	35.2	8.73	2.36	0.39
10	7.3	1.81	0.40	0.08
11	78.0	10.78	4.23	0.52

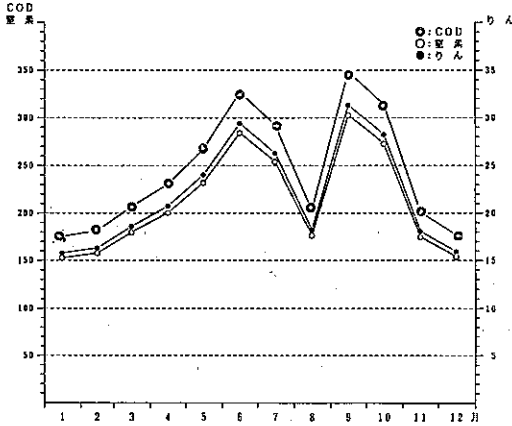


図2 東京湾の流入負荷量年間変動 (t / 日)
—ボックスNo.2—

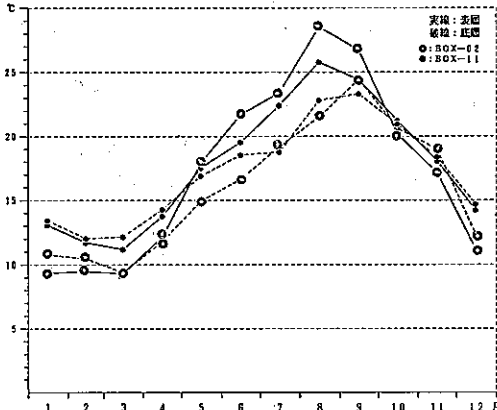


図3 東京湾の水温年間変動

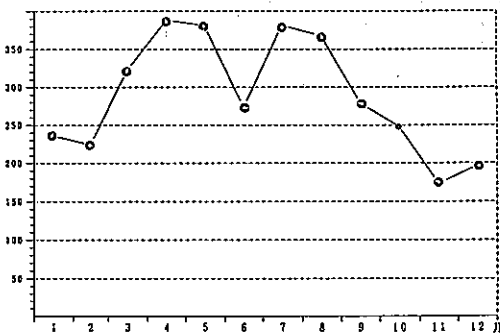


図4 東京湾の海面日射量年間変動 (cal·cm⁻²·day⁻¹)

(5) 水温, 日射量

水温は, ボックスごとに月別の日平均値を与えた(図3)。日射量は全ボックスに同じ月別の日平均値を与えた(図4)。

(6) 計算のタイム・ステップ

水質計算のタイム・ステップは8時間とした。

3 数値実験の結果と考察

(1) 基本ケースにおける現場の再現性

図5に, モデルの係数値を表2のとおりに設定した場合の数値実験結果を示した。植物プランクトン濃度は, おおむね妥当な季節変動パターンを示している。動物プランクトン濃度の植物プランクトン濃度に対する割合は10%弱となっているが, 小倉が東京湾のそれを約1割と推定しているのと, ほぼ一致している。植物プランクトンの増殖期には, デトリタス, 全CODの値は増加し, 無機態窒素, りんの値は減少している。数値的にも, ボックス2表層でみると, 植物プランクトン3.1~0.0mg C/l, 動物プランクトン0.22~0.0mg C/l, 全COD 1.3~2mg/l, 無機態窒素1.4~0.7mg/l, 同りん0.12~0.01mg/lと, 観測値と比較してほぼ妥当な値を示している。これらのことから, このケースを基本ケースとして, 次に, モデル内のいくつかの係数について感度解析を行った。

(2) 感度解析

東京都地先海域であるボックスNo.2の表層を例として, 感度解析の結果を述べる。

植物プランクトンの光合成は, 海域の富栄養化にとって最も重要な過程であるので, まず, これにかかわる因子(水温, 照度及び栄養条件)のうち, 水温, 栄養条件に関する係数について感度解析を試みた(CASE1, 2)。また, 動物プランクトンの死亡率, 植物プランクトンの枯死率は, このモデルでは, 計算結果の調整, 補正係数としても機能しているように考えられたので, これらの係数についても, その変動の影響を検討した(CASE3, 4)。

図6は, 最大増殖速度係数すなわち標準水温(ここでは0℃)における植物プランクトンの最大増殖速度を変化させた結果(CASE1)である。基本ケースでは値を0.59に設定してあり, 5月から10月までの植物プランクトンの増殖期の変動パターンは高原状を呈しているのに対して, 値をこれより小さくするにしがって植物プランクトンの突発的な増殖の開始時期が遅れ, 一方, 増

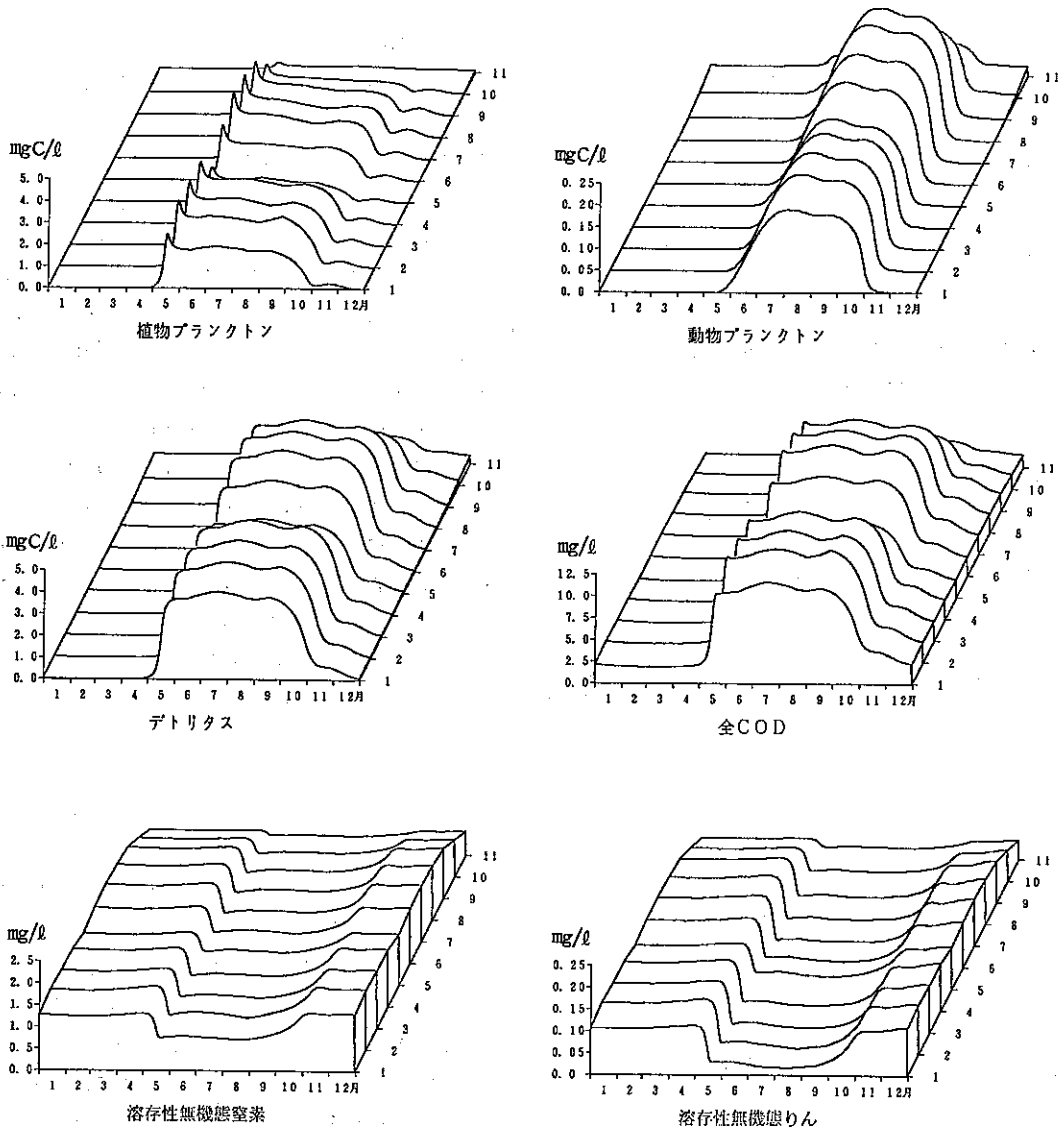


図5 基本ケースにおける各水質項目の年間変動(全ボックス/表層)
(縦軸:濃度, 横軸:時間, 奥行:ボックス番号)

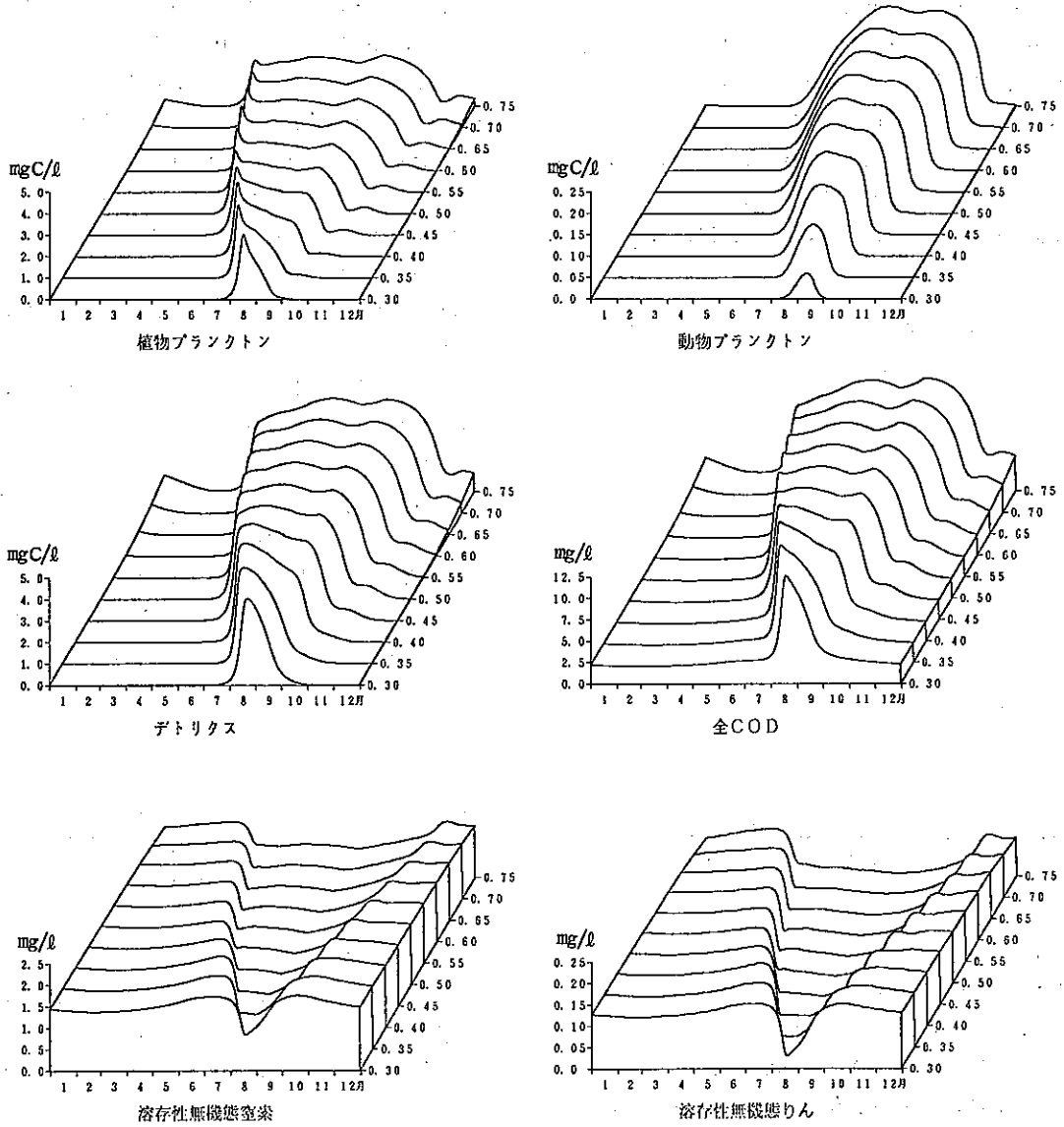


図6 植物プランクトン最大増殖速度係数の変化と水質の年間変動(ボックス№2/表層)
(縦軸:濃度, 横軸:時間, 奥行:最大増殖速度係数)

殖終息期が早まり山型の変動パターンに近づくことがわかる。値を大きくすると、逆に増殖開始時期は早まり、終息時期は遅れるようになる。

図7は、基本ケース(ボックスNo.2)について窒素、りん濃度の計算結果をそれぞれミカエリス・メンテン基本式に代入し、その値の変動を図示したものである。

このモデルでは、表1の光合成に係わる栄養条件に示したように、窒素とりに関するこの値の小さい方が制限項として効くようになっているが、図7では、りに

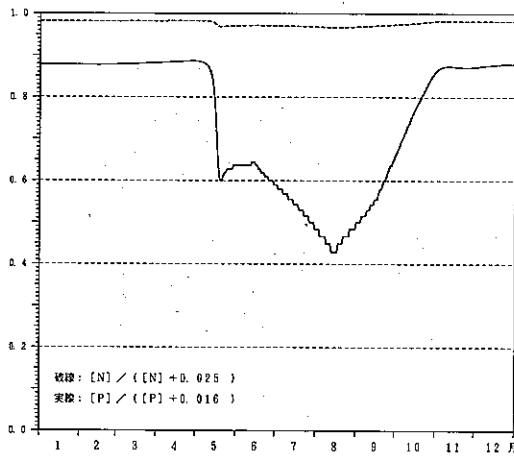


図7 N:P濃度による光合成速度制限項の年間変動比較 (ボックスNo.2/表層)

関する値が年間を通じて窒素より小さく、したがってりんが光合成の栄養条件を制限していることがわかる。そこで、りんの半飽和濃度を変化させて(CASE2)、モデルの感度を検討した結果が図8である。この値を増加させるにしたがって、植物プランクトンの増殖開始時期が遅れ、山型の変動パターンに近くなるが、その程度は緩慢で、系全体の感度は鈍い。これは、東京湾ではりんの流入負荷が大きく、海水のりん濃度が半飽和濃度の設定値よりも1桁以上大きくなっているためと考えられる。

ところで、基本ケースにおける係数値のなかで、動物プランクトンの死亡率は0.30に、植物プランクトンの枯死率は0.50に設定されている。これを文字どおり動、植物プランクトンの自然死亡率とみなすと、過大に設定さ

れているように考えられる。そこで、これらの係数を変化させた場合の系の挙動を調べたのがCASE3とCASE4である。図9は、動物プランクトン死亡率を変化させた場合(CASE3)で、系全体の挙動に著しい影響を与えていることがわかる。すなわち、値を0.2以下にすると、5月から10月まで全項目とも1ヶ月程度の周期で激しく振動する。一方、値を0.35以上にすると、植物プランクトンの増殖に対する影響は少ないが、動物プランクトン濃度はほとんど増加しなくなり、かたわら、デトリタス、全CODの値はどんどん増加するようになる。これらのことから、この係数は、動、植物プランクトン間の捕食、被食関係を調節し、両プランクトンの現存量の変動に影響を及ぼすとともに、モデルの抽象化や記述の不完全性からくる計算上の歪などを吸収して、補正係数的な機能をはたしているのではないかと考えられる。

図10は、植物プランクトン枯死率を変化させた場合(CASE4)で、値を0.40以下にすると、植物プランクトン増殖期の前後に振動が現れ、それが系全体におよぶことが窺われる。値を0.45以上にした場合は、植物プランクトンの変動パターンにはあまり影響しないが、デトリタス、全CODの値は増加する。植物プランクトン枯死率の変化に対する系全体の感度は、動物プランクトン死亡率に対するそれより鈍いようにみうけられる。なお、一般に植物プランクトンの自然枯死率は10%以下と言はれている⁴⁾ので、値を0.10に設定して数値実験を行ったところ、系の挙動が不安定になり計算不能になった。

4 おわりに

我々の作成した富栄養化生態系構造モデルで使われている係数のうち、植物プランクトンの最大増殖速度係数及び枯死率、りんの半飽和濃度、動物プランクトンの死亡率について、いわゆる感度解析を試みた。

植物プランクトンの最大増殖速度係数に対するモデルの感度はかなり鋭かった。栄養塩類の半飽和濃度に対する感度は鈍かったが、これは、東京湾では栄養塩の外部負荷が大きく、それらの環境濃度が半飽和濃度の値をはるかに越えているためと考えられた。動物プランクトンの死亡率及び植物プランクトンの枯死率については、他の生態系モデルでも大きめに設定されている場合があり、モデルの補正係数として機能しているのではないかと考えられたが、このモデルでも同じように機能しているこ

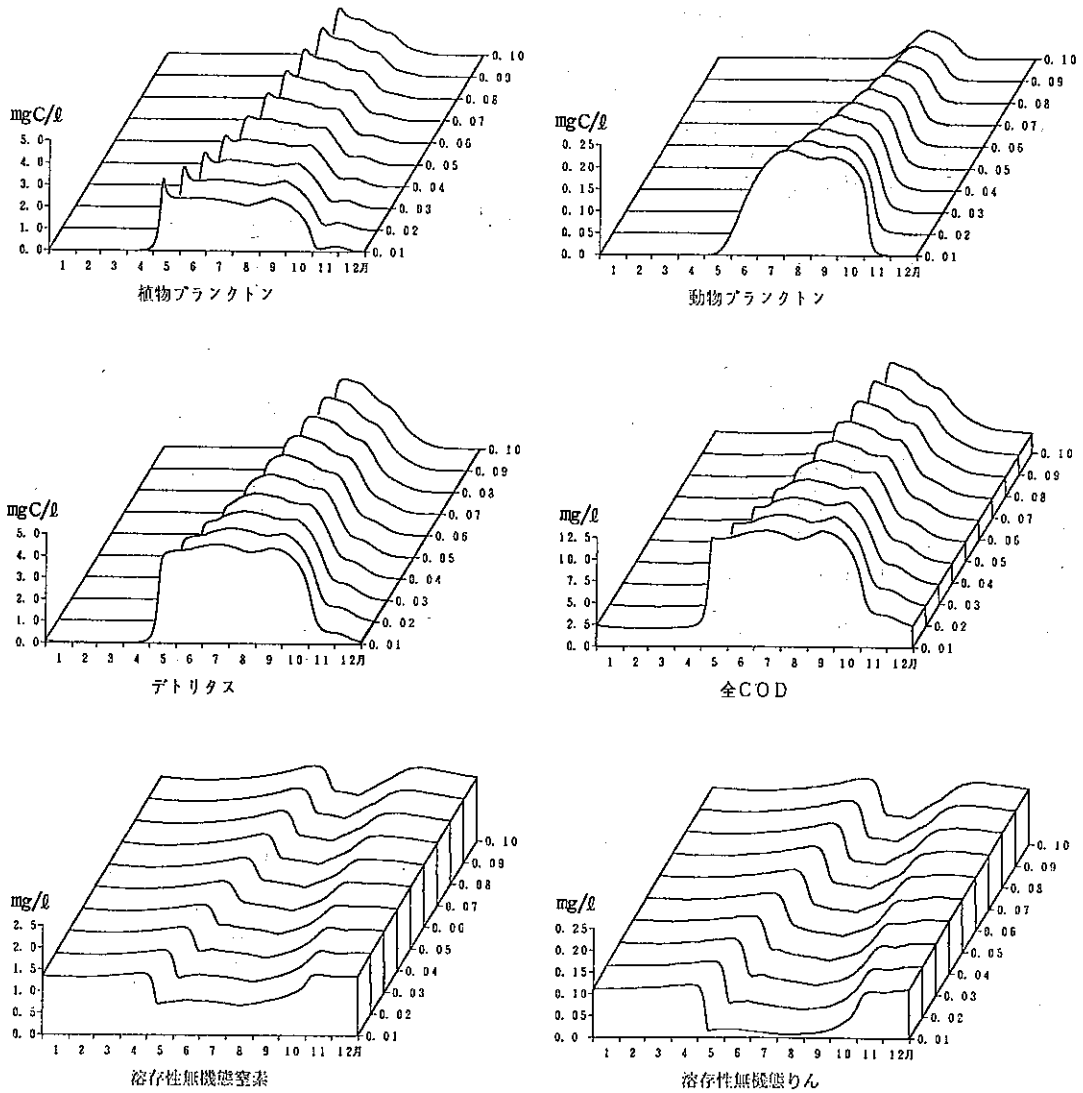


図8 リン半飽和濃度の変化と水質の年間変動(ボックスNo.2/表層)
(縦軸:濃度, 横軸:時間, 奥行:りん半飽和濃度(mg/l))

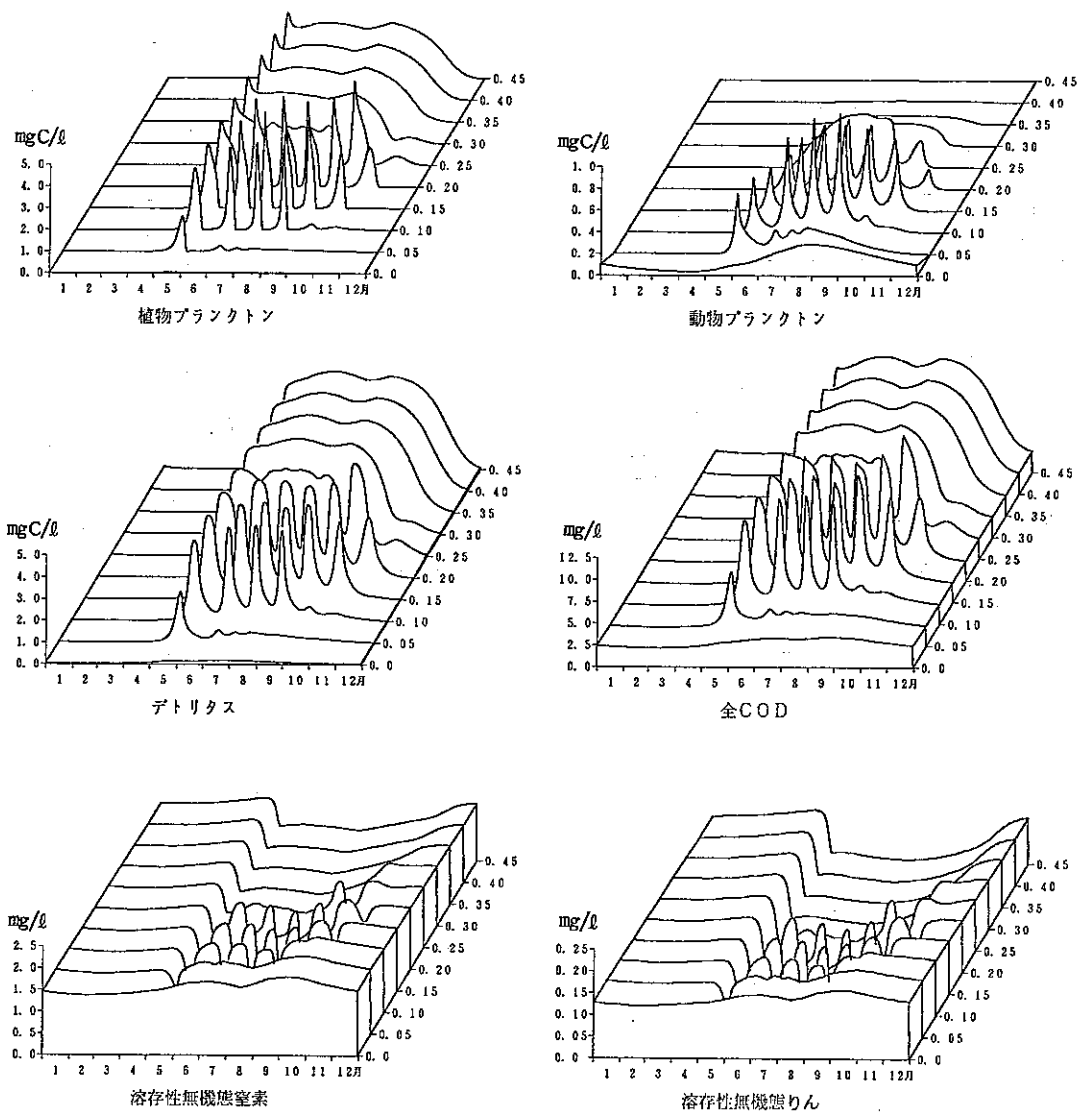


図9 動物プランクトン死亡率の変化と水質の年間変動(ボックスNo.2/表層)
 (縦軸:濃度, 横軸:時間, 奥行:動物プランクトン死亡率)

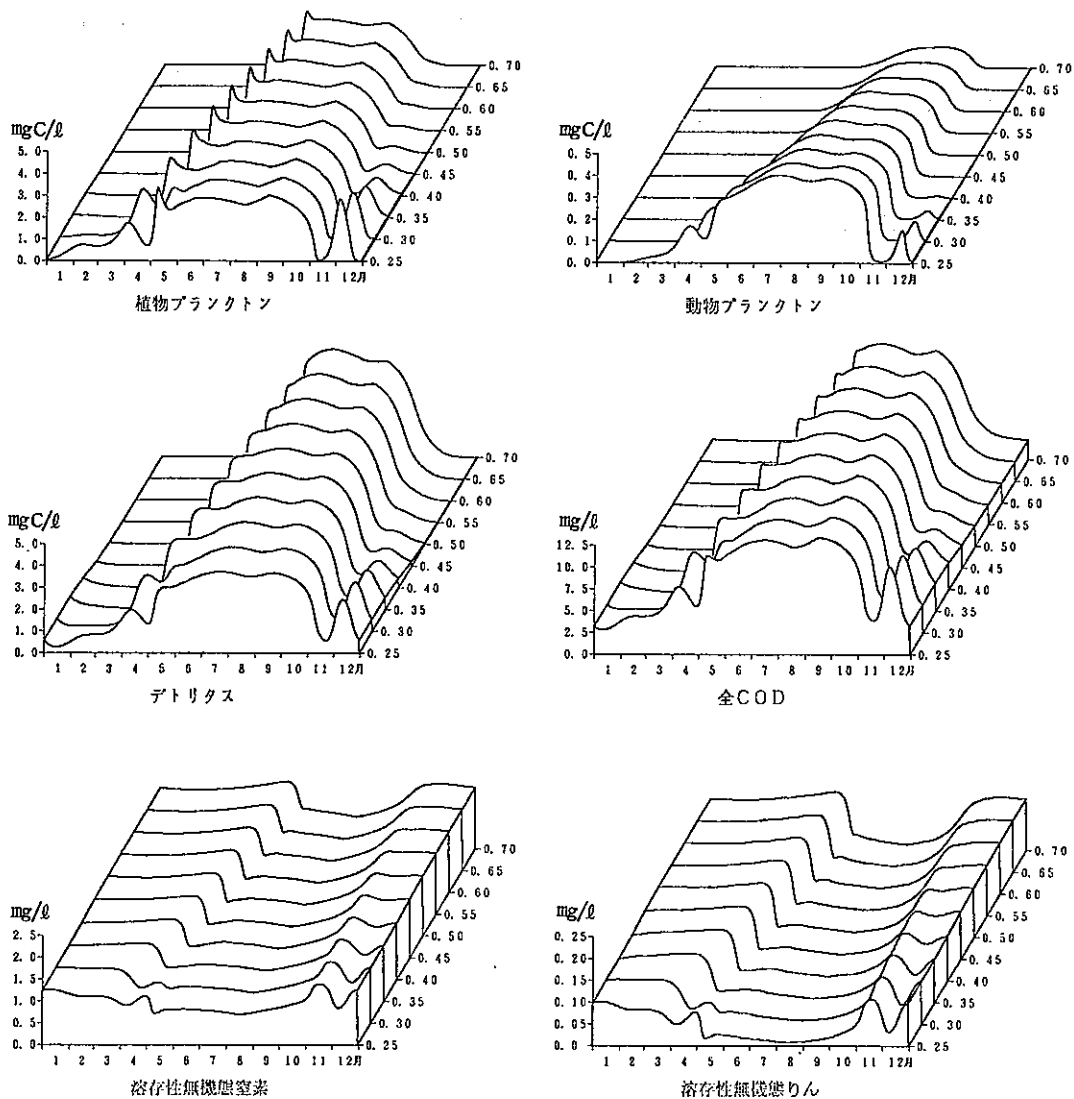


図10 植物プランクトン枯死率の変化と水質の年間変動(ボックスNo.2/表層)
 (縦軸：濃度, 横軸：時間, 奥行：植物プランクトン枯死率)

とがわかった。とくに、動物プランクトン死亡率に対する感度は鋭敏で、系の安定化に重要な役目を果たしていることが確認された。

今後は、光の半飽和照度等ほかの係数に対する感度解析を続け、モデルの改良、実用化を図るとともに、日照、水温、流入汚濁負荷量等の強制変数の変化に対するモデルの応答について検討し、東京湾の汚濁機構の解明、防止対策の効果予測に役立てて行きたい。

参 考 文 献

- 1) 東京都環境保全局：昭和60年度公共用水域水質測定結果の概要，（1986）
- 2) 安藤晴夫他：東京湾の富栄養化に関する研究（そのⅢ），東京都環境科学研究所年報，69～80，（1986）
- 3) 小倉紀雄：東京湾における有機物循環，沿岸海洋研究ノート，16(2)，92～100，（1979）
- 4) (社)日本水質汚濁研究協会：水質総量規制推進検討調査—海域富栄養化シミュレーション等調査—，（1985）