

論文

東京湾の富栄養化機構の研究 (その9)

— 富栄養化水質予測モデルの作成とその利用例及び今後の課題 —

曾田 京三 安藤 晴夫

要 旨

東京湾の水質について、海水の富栄養化を考慮した汚濁機構の検討ができ、かつ将来水質の予測計算ができるモデルの開発を目的として富栄養化生態系ボックスモデルを作成した。このモデルを用いて、モデル内のいくつかの係数に関する感度解析及び流入負荷量削減等に関する数値実験を行った。

また、環境管理部の所管する環境情報システムに格納された水質・潮流予測モデルの運用を支援するためのメニュー処理プログラムを作成した。将来、電子計算機の性能が向上し、あるいは、東京湾の水質汚濁機構に関する知見が高まれば、さらにモデルを改良することとする。

1 はじめに

東京湾の集水域は、わが国最大の人口、経済及び産業の集中地域であり、その影響を受け、東京湾の水質汚濁は、現在でも高いレベルで推移している。昭和63年度の東京都内湾の化学的酸素要求量 (COD) の環境基準達成率は、上層で69%、全層で76%に留まっている¹⁾。さらに、ここ数年、再び臨海部や沿岸海域での開発気運が高まり、その影響が危惧されている。今後とも、地域の実状に応じたきめ細かな対策とともに、長期的、総合的な東京湾水質汚濁防止対策を講じていく必要があるものと考えられている。

このような、水質汚濁防止対策の策定及びその効果判定と見直しに役立つため、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、昭和60年度から平成元年度にかけて、筆者らは東京湾の富栄養化生態系構造モデルを作成し、その実用化を図ったので、その概要を述べる。

2 モデルの種類と定式化

沿岸海域の水質予測モデルとしては、統計モデルと構造モデルとがあり、構造モデルは、さらに物質循環モデルと生態系モデルに分類される。これらのモデルは、それぞれ長所、短所があり、目的に応じて使い分けられている。筆者らは、水質予測計算をするうえで、汚濁機構

の解析や富栄養化にかかわる諸過程を個別に検討することができること、及び富栄養化にかかわる新たな知見を組み込み改良することが容易な点などを考慮して、生態系モデルを選択した。モデルの構造を図1に、それを定式化したものを表1及び表2に示した。

このモデルは、

- ① 植物プランクトン
- ② 動物プランクトン
- ③ デトリタス

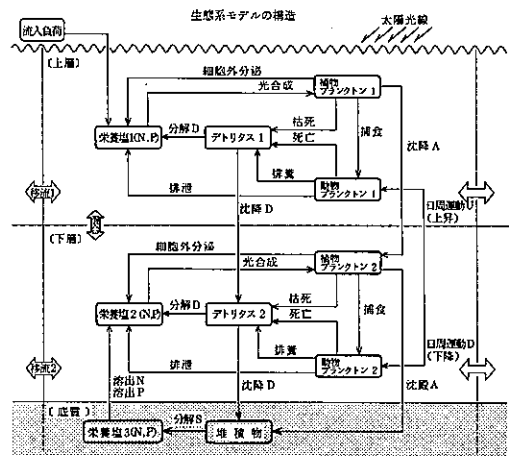


図1 生態系水質予測モデルの概念図

表 1 物質循環諸過程の定式化— 1 (状態変数)

1. 【植物プランクトン】

$$\text{表層: } \frac{d[A_1]}{dt} = [\text{光合成}] - [\text{細胞外分泌}] - [\text{枯死}] - [\text{捕食}] - [\text{沈降}A_1]$$

$$\text{底層: } \frac{d[A_2]}{dt} = [\text{光合成}] - [\text{細胞外分泌}] - [\text{枯死}] - [\text{捕食}] + [\text{沈降}A_1] - [\text{沈降}A_2]$$

2. 【動物プランクトン】

$$\text{表層: } \frac{d[Z_1]}{dt} = [\text{捕食}] - [\text{排糞}] - [\text{排泄}] - [\text{死亡}] + [\text{日周移動}U] - [\text{日周移動}D]$$

$$\text{底層: } \frac{d[Z_2]}{dt} = [\text{捕食}] - [\text{排糞}] - [\text{排泄}] - [\text{死亡}] - [\text{日周移動}U] + [\text{日周移動}D]$$

3. 【デトリタス】

$$\text{表層: } \frac{d[D_1]}{dt} = [\text{枯死}] + [\text{死亡}] + [\text{排糞}] - [\text{分解}D] - [\text{沈降}D_1]$$

$$\text{表層: } \frac{d[D_2]}{dt} = [\text{枯死}] + [\text{死亡}] + [\text{排糞}] - [\text{分解}D] + [\text{沈降}D_1] - [\text{沈降}D_2]$$

4. 【溶存性無機態窒素】

$$\text{表層: } \frac{d[N_1]}{dt} = \gamma_{NA} \cdot [\text{細胞外分泌}] + \gamma_{NZ} \cdot [\text{排泄}] + \gamma_{ND} \cdot [\text{分解}D] - \gamma_{NA} \cdot [\text{光合成}] + [\text{流入}]$$

$$\text{底層: } \frac{d[N_2]}{dt} = \gamma_{NA} \cdot [\text{細胞外分泌}] + \gamma_{NZ} \cdot [\text{排泄}] + \gamma_{ND} \cdot [\text{分解}D] - \gamma_{NA} \cdot [\text{光合成}] + [\text{溶出}N]$$

5. 【溶存性無機能りん】

$$\text{表層: } \frac{d[P_1]}{dt} = \gamma_{PA} \cdot [\text{細胞外分泌}] + \gamma_{PZ} \cdot [\text{排泄}] + \gamma_{PD} \cdot [\text{分解}D] - \gamma_{PA} \cdot [\text{光合成}] + [\text{流入}]$$

$$\text{底層: } \frac{d[P_2]}{dt} = \gamma_{PA} \cdot [\text{細胞外分泌}] + \gamma_{PZ} \cdot [\text{排泄}] + \gamma_{PD} \cdot [\text{分解}D] - \gamma_{PA} \cdot [\text{光合成}] + [\text{溶出}P]$$

6. 【総COD】

$$\text{表層: } \frac{d[T-COD_1]}{dt} = \phi_{CA} \cdot \frac{d[A_1]}{dt} + \phi_{CZ} \cdot \frac{d[Z_1]}{dt} + \phi_{CD} \cdot \frac{d[D_1]}{dt} + \frac{d[L-COD_1]}{dt}$$

$$\text{底層: } \frac{d[T-COD_2]}{dt} = \phi_{CA} \cdot \frac{d[A_2]}{dt} + \phi_{CZ} \cdot \frac{d[Z_2]}{dt} + \phi_{CD} \cdot \frac{d[D_2]}{dt} + \frac{d[L-COD_2]}{dt}$$

表2 移流・拡散過程の定式化

$$\begin{aligned} \frac{dC_i}{dt} &= [\text{移流}] + [\text{拡散}] + [\text{負荷流入}] + [\text{水量変化}] \\ &= \frac{1}{V_i} \sum_{j=1}^m (-a_{ij} C_i Q_{ij} + a_{ji} C_j Q_{ji}) \\ &\quad + \frac{1}{V_i} \sum_{j=1}^m (-K_{ij} (C_i - C_j) - D_{ij} (C_i - C_j)) \\ &\quad + \frac{1}{V_i} \cdot F_i \\ &\quad + \frac{C_i}{V_i} \cdot \frac{dV_i}{dt} \end{aligned}$$

- * C_i : i ボックスの水質(濃度) ($g/m^3 = mg/l$)
- * Q_{ij} : i ボックスから j ボックスへの流量 (m^3/day)
- * a_{ij} : 流向スイッチ $\begin{cases} Q_{ij} > 0 \rightarrow a_{ij} = 1 \\ Q_{ij} \leq 0 \rightarrow a_{ij} = 0 \end{cases}$
- * K_{ij} : i, j ボックス間の交換量 (m^3/day)
- * D_{ij} : i, j ボックス間の拡散量 (m^3/day)
- * F_i : i ボックスへの外部負荷流入量 (g/day)
- * V_i : i ボックスの容量 (m^3)
- * m : i ボックスの接続ボックス数

④ 栄養塩(窒素(N),りん(P))

⑤ 総COD

を予測の対象項目としており、「陸上から流入した有機性汚濁物質(COD)と栄養塩(N,P)は潮流や鉛直流によって湾内に拡散する。栄養塩は、植物プランクトンに吸収され光合成により生物体を構成する有機物に転換される。植物プランクトンは、動物プランクトンに捕食されるほか、枯死してデトリタスとなる。動物プランクトンの死骸や糞は、デトリタスとなり、植物プランクトン由来のそれとともに、一部は生物化学的に分解され栄養塩が水中に回帰し、一部は海底に沈澱する。海底に沈澱したデトリタスは、分解され栄養塩が水中に溶出する。動、植物プランクトン及びデトリタスは、内部生産汚濁物質としてCODに換算される。」という東京湾の富栄養化とそれによる水質汚濁の過程を数式化したものである。なお、このモデルは、空間分割のうえからは、海水が夏季に成層することを考慮して、水深方向には上層、下層に分割した2層ボックスモデルとなっている。

3 モデル内諸係数の感度解析と実測

東京湾を図2のように11ボックスに分割し、モデル内諸係数の値、流入負荷量、水温、日射量を表3、表4、図3、図4のように設定した場合の計算結果を基本ケースとして、以下の検討を行った。

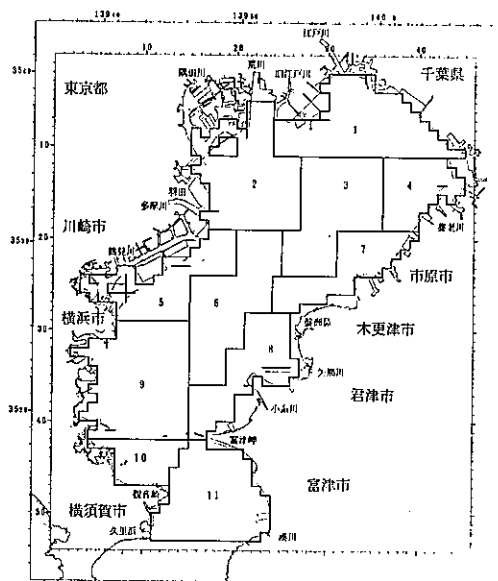


図2 対象海域とそのボックス分割

[海岸線は日本海洋データセンタの東京湾海岸線データ(提供番号85-079)を使用して作成。]

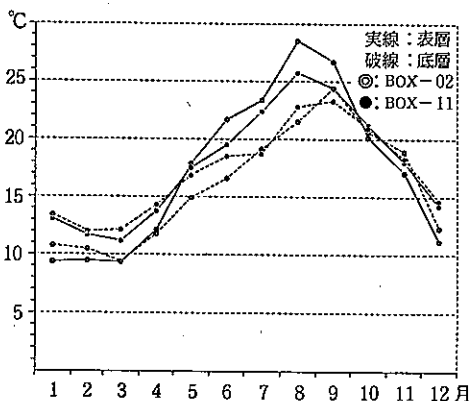


図3 東京湾の水温年間変動

表3 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 ⁻¹	0.1	
デトリタス沈降速度	m・day ⁻¹	0.2	
窒素溶出速度	g・m ⁻² ・day ⁻¹	0.04	
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
[A] [Z] → [P] [D]	mgP/mgC	0.016	[N]: 溶存性無機態窒素 [P]: 溶存性無機態りん
[A] [Z] → [COD] [D]	mgCOD/mgA mgCOD/mgZ mgCOD/mgD	1.5	

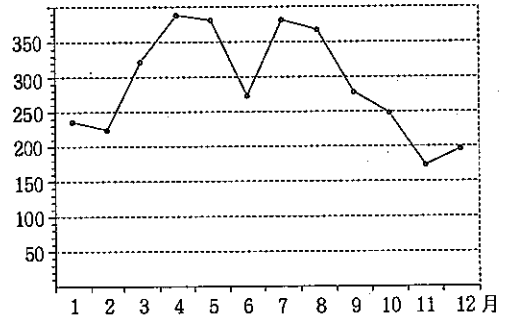


図4 東京湾の海面日射量年間変動 (Cal・cm⁻²・day⁻¹)

表4 流入汚濁負荷量

	COD (ton/日)	T-N (ton/日)	T-P (ton/日)
夏期	217	234	16.5
冬期	183	223	15.4

注1: 夏期は5~7月及び9~10月、冬期は12月及び1~3月。

注2: 4, 8, 11月の負荷量は夏期と冬期の平均値とした。

(1) モデル内諸係数の感度解析

一般に、生態系モデルにおいては、現象にかか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。この種のモデルを実際に運用していく場合の問題点は、用いる係数に関する情報が少なく、また、それらの値を実測により求めることが容易ではないことである。したがって、モデルで用いられる諸係数値を文献値や実施例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を検討し、あるいは、係数値を変化させ、その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。そのような観点から、このモデルで用いられる係数のうち重要と考えられる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感度解析を行った。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鈍かった。りんの半飽和濃度に対する感度は鈍かったが、これは、東京湾

では栄養塩の流入負荷が大きくそれらの水中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。動物植物プランクトンの死亡率及び枯死率の値は、自然値と考えられる値³⁾よりかなり高い値に設定されているが、それぞれモデルの補正係数としても機能していることをうかがわせた。特に、動物プランクトンの死亡率を設定値(0.35)よりも小さくしたときの系の反応は著しく、夏季の増殖期に系全体が増減を繰り返して激しく震動した⁴⁾。

(2) 溶出速度と元素組成の測定

先に述べたように、モデルに用いられる係数の値は、文献値等を参考にして設定されることが多いが、可能な限り、観測や実験により実測し、設定値の妥当性を確認しておくことが望ましい。そこで、底泥からの栄養塩と有機物の溶出速度の測定及び動物植物プランクトンとデトリタスの元素組成の測定を行った。

COD, 溶存性全窒素(DTN), 溶存性全りん(DTP)の

溶出速度 (単位, mg/nf/日) は, 循環期 (好気状態) では15~62, 10~25, 0~0.4, 成層期 (嫌気状態) では491~592, 69~111, 9.8~19.5であった。⁵⁾

赤潮状態であった8月に現場で採取した植物プランクトンのC:N:P元素組成比は重量比で40:7.3:1でRedfield比 (41:7.2:1) とほぼ一致した値を示した。しかし, 動物プランクトンとデトリタスのそれは文献値⁶⁾⁷⁾とかなり相違していた。⁸⁾

4 負荷量削減等に関する数値実験

沿岸海域の水質浄化対策や汚濁機構を検討するうえで, 電子計算機を用いた数値実験は, 有効な手段の一つと考えられる。そこで, 水質の外的支配要因の一つと考えら

れる流入負荷量を削減した場合と海底からの栄養塩の溶出が無いものとした場合を想定して数値実験を行った。結果を図5、図6に示した。

PとCODの負荷量を個別に削減した場合, NとPとCODの負荷量を同時に同率で削減した場合 (図5のAll) は, それぞれのケースとも削減率に比例して海水のCOD値は減少し, 100%削減時には, COD値は, 基本ケースと比較して, それぞれ年間平均値では55%, 19%, 74%減少し, 夏期平均値では60%, 12%, 71%減少した。Nの負荷量を削減した場合は, 削減率が60%を越えてはじめてCOD値が減少し, 100%削減時には, COD値は, 年間平均値では40%, 夏期平均値では53%減少した (図5)。

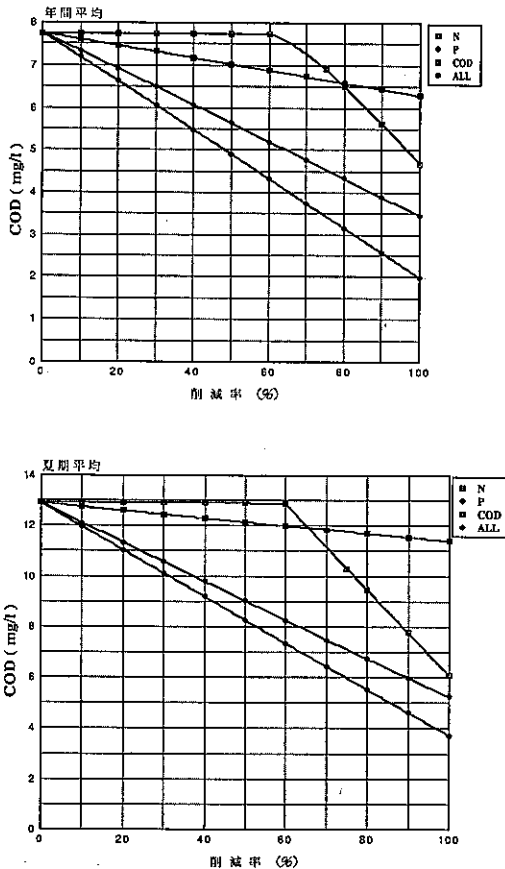


図5 基本ケースの計算で与えた流入負荷量を段階的に削減した場合の水質平均値の変化

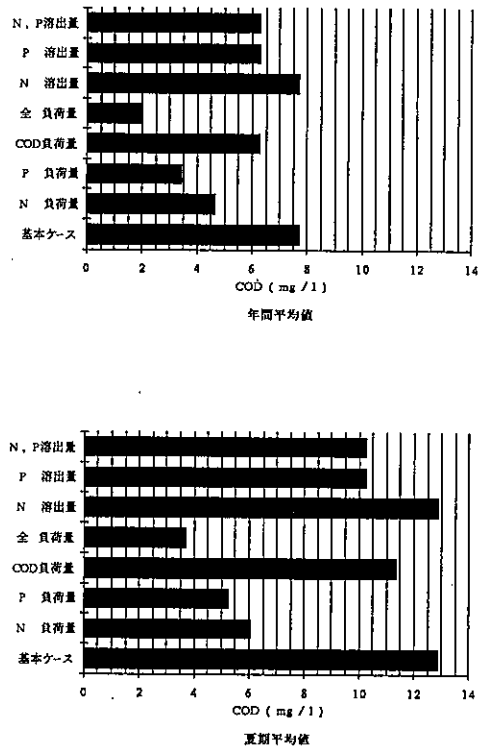


図6 溶出量及び流入負荷量が無いものとした場合のCOD平均値 (縦軸: 無いものとした項目)

海底からのPの溶出が無いものとした場合は、年間平均値では19%、夏期平均値では20%COD値が減少したが、Nの溶出を100%抑制してもCOD値に変化は見られなかった(図6)。

5 今後の課題

ボックスモデルは、対象海域を幾つかのボックスに分割し、ボックスごとの平均水質を計算するものであり、計算時間が短く、年間の季節変動や数年間にわたる長期間の予測計算も容易である。反面、特定地点例えば環境基準点ごとの水質を求めたり、水質の濃度分布を等濃度線で描かせたりすることはできない。また、地形の改変などで流況が大きく変わる場合などには、何らかの方法(例えば、メッシュモデルによる潮流計算結果)で、新たにボックス間の移流・交換量を推定し直さなければならぬ。そこで、筆者らは、当初、モデル開発の第二段階として、ボックスモデルをメッシュモデルに改造するとともに、潮流予測モデルを作成し、それらを統合した水質・潮流予測システムを構築することを計画していた。その後、環境保全局において環境情報システムの一部として水質・潮流を予測するメッシュモデルを購入整備することになり、それが筆者らが目標としていたものとほぼ同じ性能を備えるものであったことから計画を変更して、それらモデルの運用を容易にするための支援システムを作成することとした。それにしたがって、予測対象領域の地形・水深データの自動作成、予測目的に応じた計算手法(差分法、有限要素法)の選択、係数値の設定や変更、計算処理の実行、計算結果の出力、境界データや検証データの検索・作成など予測に伴う一連の操作をメニュー画面にしたがって容易に実行できるプログラムを作成した。

予測モデルの作成に当たっては、抽象化、単純化を行いながらも、東京湾の中で起こっている現象をできるだけ忠実に記述するように努めている。しかし、富栄養化や水質汚濁の機構は複雑で、それにかかわる個々のプロセスやその変動の態様については、いまだ十分に定量的

な把握がされていないものも多い。そのため、予測結果についても、現状では、色々な判断の絶対的なよりどころとなり得るものではなく、参考データの一つとして扱うべきものと考えられる。今後、電子計算機の性能の向上や東京湾の汚濁機構の解明がいつそう進捗するにあわせてモデルを改良し、予測結果の精度の向上を図ることとしたい。

参考文献

- 1) 東京都環境保全局：昭和63年度公共用水域水質測定結果の概要、(1989)。
- 2) 安藤晴夫ら：東京湾の富栄養化に関する研究(その3)、東京都環境科学研究所年報1986、p.69。
- 3) (財)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モデル等調査—、(1985)。
- 4) 安藤晴夫、曾田京三：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、東京都環境科学研究所年報1987、p.101。
- 5) 曾田京三、安藤晴夫：東京湾の富栄養化に関する研究(その5)底質からの栄養塩類等の溶出実験の結果について、東京都環境科学研究所年報1988、p.81。
- 6) 中田喜三郎、中根徹：三河湾における懸濁態有機物、プランクトン、マクロベントスの化学組成と環境水質の栄養素比、公害資源研究所彙報、16、1、(1986)。
- 7) 岡市友利：プランクトンをめぐる窒素、リンの循環、水域の自浄作用と浄化、恒星社厚生閣、p.70~83(1979)。
- 8) 曾田京三、安藤晴夫：東京湾における植物プランクトン等の元素組成の測定結果について、東京都環境科学研究所年報1989、p.149。
- 9) 安藤晴夫、曾田京三：東京湾の富栄養化機構の研究(その6)負荷量削減等に関する数値実験、東京都環境科学研究所年報1989、p.115。
- 10) 富士通㈱：東京湾潮流・水質予測支援システム(TIDAL)操作手引書、(1990)。