

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

内田唯史*・浮田正夫**・関根雅彦***・
中西 弘**

博多湾を例にとり、集積された水質データ及び流入負荷量の経年変化を基に、流入負荷量と水質の間には、非線形性があることを指摘した。さらに、実用的モデルとして、内部生産の非線形性を考慮した Δ CODモデル、物質循環モデルの改良を行った。また、富栄養化水域の水質の簡易な予測手法として、 Δ COD法の概念を発展拡充した簡易変換法を新たに提案し、本モデルが年平均的水質を評価する場合等、目的によっては有効であることを示した。また、これらモデルを用いて富栄養化海域の水質管理について考察を行った。

Key Words : internal production, COD forecasting model, retention time, water quality control

1. はじめに

大都市を流域に持つ閉鎖性水域では、富栄養化の問題は今なお、解決困難な課題として残されている。最近では、こうした閉鎖性海域の水質が改善されないことから、CODに加えて窒素、リン等についての環境基準が設定され、その類型指定の作業が進められている¹⁾。

このような閉鎖性海域において、水質の適正な管理を実施しようとする場合、比較的容易に将来予測や水質改善の手段が明らかとなるよう富栄養化のメカニズムを反映した簡易で適切なモデルを開発することが重要である。近年、生態系モデル等生物反応を取り入れた複雑なモデルも開発され、現況の汚濁メカニズムの解析にあたって、そのモデルを構成するパラメータの精度や、対象とする事象との適合性が検討されている^{2), 3)}。しかし、モデルが複雑でパラメータの数も多いため、将来予測の妥当性についての十分な検証も困難で、環境アセスメント等における政策判断の材料としては、まだ多くの課題を残している。モデルの選択にあたっては、パラメータの多い複雑なモデルが必ずしも利用できるとは限らず、問題によっては簡易なモデルの方が大局を判断をする上で、有効な場合もある。

本研究では、博多湾を対象として、これまでに集積された豊富な水質データより、閉鎖性海域における富栄養化のメカニズムを検討し、これを踏まえて、著者らが提言した内部生産評価モデルである Δ CODモデル⁴⁾及び生産関数モデル(物質循環法)⁵⁾を用いて、より実際の

な富栄養化水質モデルの改良を行った。また、 Δ COD法の概念を発展拡充し、簡易に水質を予測する簡易変換法を新たに提案し、差分モデルと比較することにより、各モデルの適用性等について検討を加えた。さらに、これらのモデルを用いて、富栄養化海域の水質管理について考察を行った。

2. 内湾水質の非線形特性

(1) 非線形性の要因

富栄養化した海域では、対象海域に流入する物質量と水域内の物質存在量あるいは物質濃度との関係が、物理的、化学的、生物的過程により、非線形的挙動を示すことがある。この閉鎖性水域における水質の非線形性については、武岡らが海水交換の概念から論じているが^{6)~8)}、主な要因としては、生物的過程による個々の物質の滞留時間の変化に起因するところが大きいものと考えられている。この点について上⁹⁾は、富栄養化によるプランクトンサイズの変化によって、鉛直的な物質輸送が影響を受け、Coastal Trapping¹⁰⁾の現象を通して、海域全体の物質滞留時間が変化することを指摘している。すなわち、富栄養化が改善されてくると、動物プランクトンが大型になるため、Coastal Trappingがより効率的に働くようになり、滞留時間が長くなることによって、水質が素直に改善されないことになる。このことは、栄養塩の負荷と水域の栄養塩濃度とに非線形な関係を与えることになる。また、栄養塩濃度と内部生産COD濃度の間の1次生産を介した非線形性にも注目する必要があると考えられる。

これらの機構については、概念的には議論されているが、実測値の経時的、空間的な解析によって実証的に示されたものは少なく、また、その適切なモデル化は行わ

* 正会員 山口大学大学院 システム工学専攻
(〒755 宇部市常盤台2557)

** 正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科

*** 正会員 工博 山口大学講師 工学部社会建設工学科

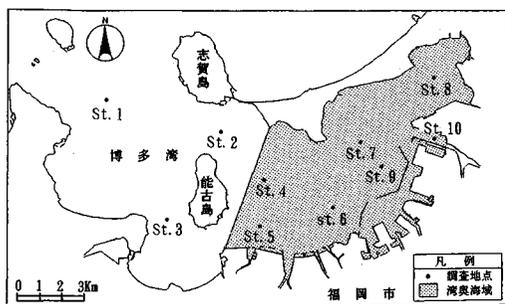


図-1 調査地点

れてない。ここでは、近年、ウォーターフロントの開発が著しい閉鎖性水域の博多湾を対象として、モデル化の基礎となる富栄養化海域の水質データ並びに流入負荷量の経年的動向から、水質の非線形特性について検討を加えた。

(2) 水質項目相互の関係

昭和60年から平成2年にかけて図-1に示す博多湾内の各地点で調査された公共用水質測定結果の年平均の水質データ¹¹⁾を基に、水質相互の関連をみると、次のことがいえる。

① 淡水存在量の指標となる塩素イオン (Cl^-) と、富栄養化の原因物質である栄養塩の総窒素 (TN)、総リン (TP) との関係を見ると、沿岸の低塩分域から外海の高塩分域にいくに従い直線的に濃度が減少している (図-2, 3)。

② これに対して、 Cl^- と COD については、中塩分領域で COD 濃度が比較的高く、両者の間に直線的な関係はみられない (図-4)。

③ TN, TP と COD の関係においても、栄養塩濃度が高くなる沿岸域にいくにしたがい COD の濃度は頭打ちの傾向を示している (図-5, 6)。

④ TN, TP とクロロフィル a との関係を見ると、湾奥の汚濁域ではばらつきが大きくなり、クロロフィル a はむしろ低下の傾向がみられる (図-7, 8)。一方、COD はクロロフィル a に対して、比較的直線的な関係を示している (図-9)。

⑤ TP と TN の関係は、図-10にみられるようにほぼ直線的であり、Redfield 比からみると、本海域はリン制限であることがわかる。

このように、内部生産を含む COD は、1次生産の機構を反映して、栄養塩の濃度に対しては非直線的な関係を示している。

(3) 流入負荷量と湾内水質の間の非線形性

博多湾への流入汚濁負荷量及び湾内水質の経年変化を把握することにより、水域の汚濁の経緯並びに水質汚濁の状況が理解できる。そこで、著者らは、情報のない過去の博多湾における流入負荷量を昭和30年より5年毎に

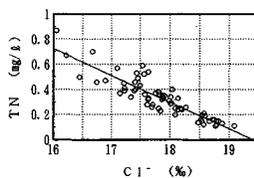


図-2 Cl^- と TN の関係

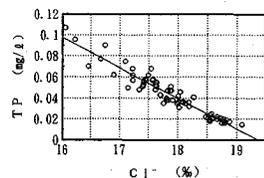


図-3 Cl^- と TP の関係

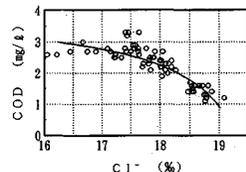


図-4 Cl^- と COD の関係

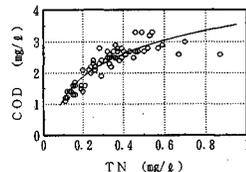


図-5 TN と COD の関係

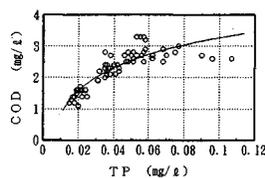


図-6 TP と COD の関係

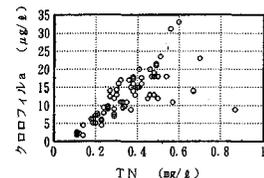


図-7 TN とクロロフィル a の関係

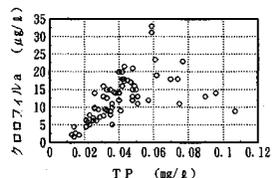


図-8 TP とクロロフィル a の関係

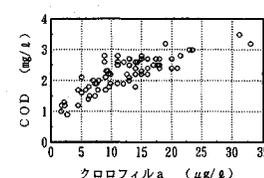


図-9 クロロフィル a と COD の関係

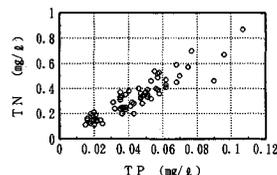


図-10 TP と TN の関係

原単位法により求め、流入汚濁負荷量¹²⁾から図-1に示す博多湾奥海域の容積負荷量を算定した (図-11~13)。容積負荷量の推移をみると、高度成長期の昭和40年代までは増加の一途をたどっているが、昭和50年以降は下水道の普及、及び合成洗剤の無リン化等が効を奏して、COD, TPともに横這い状態となっている。これら容積負荷量と、図-1に示す博多湾奥海域の平均水質^{11), 13)}との関係を図-14~18に示した。y軸切片をバックグランド濃度として考えた場合、TP容積負荷量とTP濃度、TN容積負荷量とTN濃度の関係については若干非線形の関係がみられるが、あまり顕著ではなく、博多湾では前述した Coastal Trapping の影響がそれほど強くないことが推察される。一方、TP容積負荷量とCOD濃度、TN容積負荷量とCOD濃度については非線形の関係がみられる。

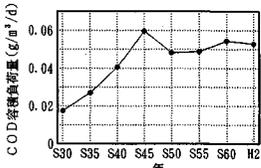


図-11 COD容積負荷量の経年変化

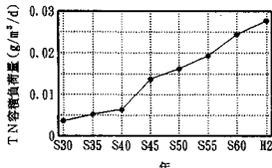


図-12 TN容積負荷量の経年変化

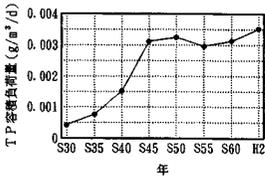


図-13 TP容積負荷量の経年変化

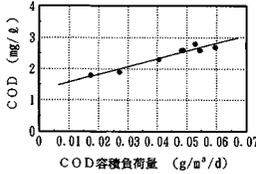


図-14 COD容積負荷量と水質の関係

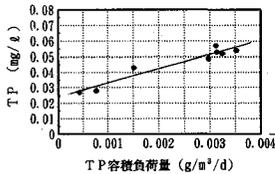


図-15 TP容積負荷量と水質の関係

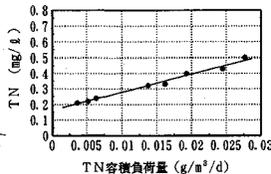


図-16 TN容積負荷量と水質の関係

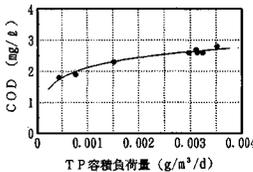


図-17 TP容積負荷量とCOD濃度の関係

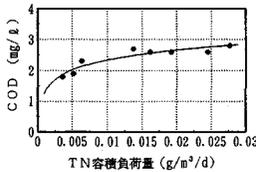


図-18 TN容積負荷量とCOD濃度の関係

3. 非線形富栄養化水質モデル

(1) モデル概要

閉鎖性海域では、従来、海域環境基準の評価項目であるCODが有機汚濁物質の指標として用いられてきた。富栄養化の進んだ水域では、このCODを陸域から流入する1次CODと海域内で生産される2次COD(内部生産)に分けてCODを非保存物質として取り扱っている。この内部生産の評価については、生態系モデルや物質循環モデル等、様々なモデルがあるが、簡易で実用的モデルは少ない。ここでは、図-19に示す内部生産を簡易的に表したΔCODモデルと物質循環を考慮した生産関数モデルを用いて、内部生産の非線形性を表現することを試みた。さらに、ΔCODモデルを発展拡充した簡易変換法の手法を提案した。

また、通常、水質モデルは、水質環境管理やマクロな政策を論じる場合、あるいはアセスメントにおける評価をおこなう場合等、年平均水質をシミュレートするモデルが用いられているため、本研究においても年平均モデルでの議論とした。

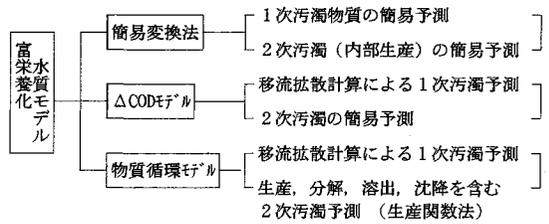


図-19 富栄養化モデルの概要

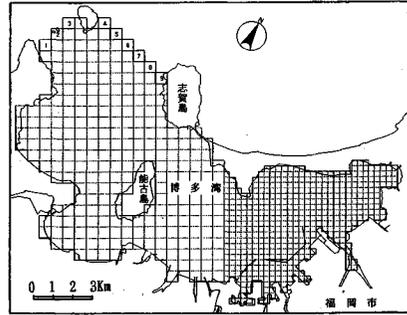


図-20 メッシュ区分図

(2) 差分形モデル

a) 潮流モデル

以下に示すΔCOD法、物質循環法の2つの差分モデルは、いずれも2次元単層の定常解モデルであり、拡散計算は有機物指標のCODと博多湾の内部生産の制限因子であるTPとした。また、潮流の計算は、ナビエ-ストークスの方程式及び連続方程式を水深方向に平均化した2次元単層の差分法モデルによる。本モデルは、境界条件として、開境界線上に中潮期(M2分潮)の潮汐振動を与え、潮位勾配によって発生する流れを5潮汐間計算し、水質の拡散計算には各格子断面において5潮汐目の流量を正負それぞれの方向毎に合計した断面流量を用いた。差分格子は図-20に示すとおり、湾の西半分を600m、東半分を300mのメッシュに分割した。

b) ΔCODモデル

7. 基礎式 1次汚濁の計算の基礎式は、次の式(1)、(2)による。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x}(Mx C) + \frac{\partial}{\partial y}(My C) \\ &= \frac{\partial}{\partial x}(Kx h \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(Ky h \frac{\partial C}{\partial y}) + Qc \end{aligned} \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x}(Mx P) + \frac{\partial}{\partial y}(My P) \\ &= \frac{\partial}{\partial x}(Kx h \frac{\partial P}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(Ky h \frac{\partial P}{\partial y}) + Qp \\ & \quad - Sp \cdot S Sp \cdot P \dots \dots \dots (2) \end{aligned}$$

ただし

- C : 1次COD(COD_b)の平均濃度 x, y : 水平方向の座標
- P : TP平均濃度 M_x, M_y : x, y方向の線流量
- S_p : TPの正味の沈降速度 K_x, K_y : 水平渦動拡散係数
- S S_p : TPの懸濁態の割合 h : 平均水深
- Q_j : 流入負荷量 (j=c:COD, j=p:TP)

内部生産COD(ΔCOD)については、式(3)により求め、式(4)によりCODの値を計算した。

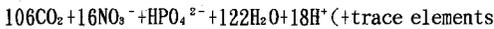
ここで

$$\Delta \text{COD} = \alpha_p \cdot \text{COD}_p \dots \dots \dots (3)$$

$$\text{COD} = \text{COD}_b + \Delta \text{COD} \dots \dots \dots (4)$$

ただし

- COD : 海域内でのCOD濃度の年平均値
- COD_b : 1次COD濃度(陸域由来のCOD流入負荷の拡散計算値)
- ΔCOD : 2次COD濃度(内部生産COD濃度の年平均値)
- COD_p : 植物プランクトンの生産反応式(5)より求めたTPから内部生産可能なCODの理論的最大濃度¹⁴⁾
 $\text{TOD}_p = 143 \cdot P$ $\text{COD}_p = \text{TOD}_p / 2.26$
- P : TP濃度の年平均値
- α_p : 変換率(実際に内部生産されるCOD濃度のCOD_pに対する割合)



なお、本モデルでは、ΔCOD中に内部生産以外の諸過程が含まれるものとして、1次CODの拡散計算には沈降の項は設定していない。

4. α_pの関数化 ここで、α_pは、内部生産の非線形性を表すため、次のとおりTP濃度の関数として表わした。拡散計算によって求めた1次COD及び実測のTP、COD濃度より、式(3)におけるα_pを各地点ごとに求め、TP濃度との関係を見ると図-21のとおりとなる。これによると、TP濃度が上昇すると生産されるCODの割合α_pも増加するが、あるレベルで飽和に達すると、それ以降はTP濃度が増加するとともに減少してくる。このようなα_pとTP濃度の関係を関数化することにより、内部生産CODの非線形性が表現できる。

このα_pとTP濃度の関係は、次の式(6)のΔCODの生産速度式を定常状態と仮定して得られた式(7)により説明できる。すなわち、植物プランクトンの増殖速度がTP濃度に比例する領域では、生産量の割合α_pも比例的に増加するが、基質濃度が高くなり、増殖速度が飽和に近づくとα_pが減少しはじめる。図-22は、TP濃度の増加に応じて植物プランクトン濃度(X)も増加するが、k/(K_m+P)が減少するので、結果として、その積α_pはみかけ上減少してくることを概念的に示したものである。

$$\frac{d \Delta \text{COD}}{d t} = \frac{\mu_{\max} P}{K_m + P} \cdot X \cdot \beta - D_c \cdot \Delta \text{COD} \dots (6)$$

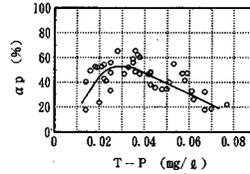


図-21 α_pとTPの関係

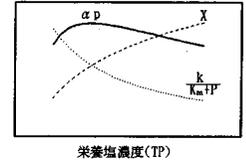


図-22 栄養塩量と物質濃度の概念図

$$\frac{d \Delta \text{COD}}{d t} = 0 \quad \text{とする}$$

$$D_c \cdot \Delta \text{COD} = \mu_{\max} \cdot \frac{P}{K_m + P} \cdot X \cdot \beta$$

$$\frac{\Delta \text{COD}}{\beta \cdot P} = \frac{\mu_{\max}}{D_c (K_m + P)} \cdot X$$

$$\frac{\mu_{\max}}{D_c} = k \quad \text{とおく}$$

$$\beta \cdot P = \text{COD}_p \quad \text{であるから}$$

$$\alpha_p = \frac{\Delta \text{COD}}{\text{COD}_p} = \frac{k \cdot X}{K_m + P} \dots \dots \dots (7)$$

- μ_{max} : 比増殖速度の最大値 β : COD換算係数
- ΔCOD : 内部生産COD (mg/l) P : TP (mg/l)
- D_c : 分解速度(d⁻¹) K_m : 飽和定数
- k : 定数 X : 植物プランクトン濃度(mg/l)

4. 1次CODの検証 富栄養化海域において、数値シミュレーションを実施する場合、海域水質の評価指標として用いられているCODのうち、内部生産CODを直接測定することは困難である。このため、本モデルでは塩素イオン濃度の拡散計算結果により、モデルの再現性を確認した後、このモデルにより陸域から供給されるCOD濃度の拡散計算を行い、その計算結果をもって1次CODと定義している。そこで、この拡散計算によって得られた1次CODが実際の海域水質とどの程度整合しているか、次の方法により検証した。

① クロロフィルaとCODの関係による推定(A法) : 各地点ごとに年間のCODとクロロフィルaの調査結果をプロットし、内部生産以外の1次COD濃度を回帰線のY軸切片の値より近似的に求める¹⁵⁾。

② 培養実験による換算係数を用いた推定(B法) : 著者らが行った藻類培養実験によって、明らかにしたCODとクロロフィルaの相互関係¹⁶⁾により、クロロフィルaと生産されたCODとの関係を式(8)のとおり求めた。この関係を用いて現場より得られたクロロフィルaのデータを基に1次CODを推算する(図-23)。

$$\Delta \text{COD} = 0.0663 \times \text{クロロフィルa} + 0.778 \dots (8)$$

③ 年間最小値を用いた推定(C法) : 年間データのうち、内部生産が最小となるCODの年間最小値を1次

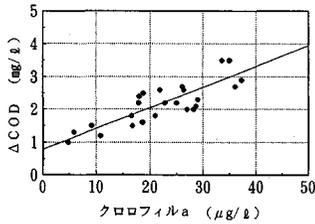


図-23 培養実験によるクロロフィルaとCODの関係

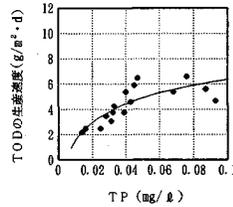


図-24 1次生産速度とTPの関係

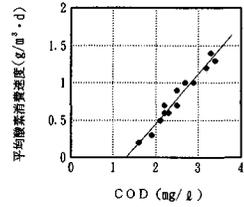


図-25 平均酸素消費速度とCODの関係

表-1 1次CODの推計値

地点St.	[単位:mg/L]			
	A法	B法	C法	拡散計算値
1	1.0	1.0	0.7	0.8
2	1.0	1.4	1.0	1.0
3	0.7	1.3	1.0	0.9
4	1.3	1.4	1.2	1.1
5	1.7	1.1	1.1	1.1
6	1.8	1.7	1.5	1.4
7	1.7	1.3	1.4	1.5
8	1.8	1.5	1.7	1.7
9	1.4	1.4	1.6	1.5

CODとする^{4), 15)}.

以上の方法により、平成2年度データについて推定した1次CODの値を、先に示した1次CODの拡散計算と比較し、表-1に示した。これによると、拡散計算により求めた1次CODの値は、①～③他の推定方法により求めた1次CODの値と比較的よく一致しており、この拡散計算結果をもって1次COD濃度とすることに問題は無いと思われる。

1. 計算パラメータの決定 拡散計算の基礎式において、拡散係数については各計算メッシュ断面ごとに、潮流計算によって求めた平均流速の関数として与えているが、その係数については準ニュートン法¹⁷⁾を用いた数値最適化のプログラムADS¹⁸⁾により、塩素イオン濃度の現況再現が最もよくなるよう係数探索を行い決定した。また、TPの正味の沈降速度(溶出-沈降)についても拡散係数と同様に未定係数として、TPの再現が最もよくなるよう既存の実測値を参考にして値を決定した。

c) 生産関数法

7. 基礎式

$$\frac{\partial}{\partial x}(M_x C) + \frac{\partial}{\partial y}(M_y C) = \frac{\partial}{\partial x}(K_x h \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_y h \frac{\partial C}{\partial y}) + Q_c + P_c \cdot P - D_c \cdot C - S_c \cdot S S c \cdot C \dots \dots (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(M_x P) + \frac{\partial}{\partial y}(M_y P) = \frac{\partial}{\partial x}(K_x h \frac{\partial P}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_y h \frac{\partial P}{\partial y}) + Q_p - S_p \cdot S S p \cdot P \dots \dots (10)$$

ただし

- C : COD平均濃度
- P : TP平均濃度
- S_c : CODの正味の沈降速度
- S S c : CODの懸濁態の割合
- S_p : TPの正味の沈降速度
- S S p : TPの懸濁態の割合
- Q_j : 流入負荷量 (j=c:COD, j=p:T-P)
- x, y : 水平方向の座標
- M_x, M_y : x, y方向の線流量
- K_x, K_y : 水平渦動拡散係数
- h : 平均水深
- P_c : CODの生産速度
- D_c : CODの分解速度

4. 生産速度、分解速度の関数化 疑似現場法により得られた酸素の生産速度及び消費速度を、酸素量から有機物量(TOD)、有機物量からCODに換算することでCODの生産速度並びに分解速度を求めた^{5), 19)}。ここで、生産速度はTP濃度、分解速度はCOD濃度自身の関数として表現している。また、植物プランクトンの生産反応式は、式(5)のRedfieldの式²⁰⁾にしたがい、酸素の生産量はそのままTOD生産を表している。図-24及び25は、博多湾内で年4回にわたって調査された²¹⁾1次生産速度とTOD_pとの関係、酸素消費速度とCODの関係を示したものである。ここでは、内部生産の非線形性を表すためCODの生産速度P_cは図-24から指数式として式(11)で、またCODの分解速度D_cは式(12)で表現した。

なお、生産関数法もΔCOD法同様の拡散係数、正味の沈降(溶出-沈降)を与えた。

$$P_c = K_p \cdot P^n / 2.26 \dots \dots (11)$$

$$D_c = K_d(C-1.0) / 2.26 \dots \dots (12)$$

- P_c : CODの生産速度
- K_p : 生産速度係数
- D_c : CODの分解速度
- K_d : 分解速度係数
- (C-1.0)で1.0はバックグラウンド濃度

d) 計算結果

過去の水質データが全海域について存在する昭和50年以降の流入負荷量積算年について、平成2年度の現況水質で再現したΔCODモデルと生産関数法モデルを用いてそれぞれ計算し、図-26～30に示すとおり各年の計算値と実測値の再現性について検討した。塩素イオンの再現性は、いずれの年もほぼ十分であり、水質拡散モデルとして問題ない。TPについても昭和55年で計算値がやや高め、昭和60年でやや低めであるものの、平均的にみれば概ね再現性は良好である。

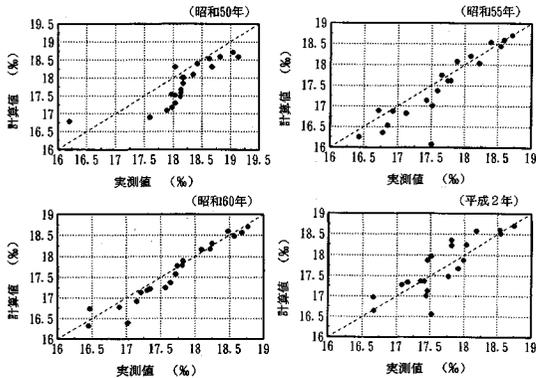


図-26 CIの実測値と計算値の関係

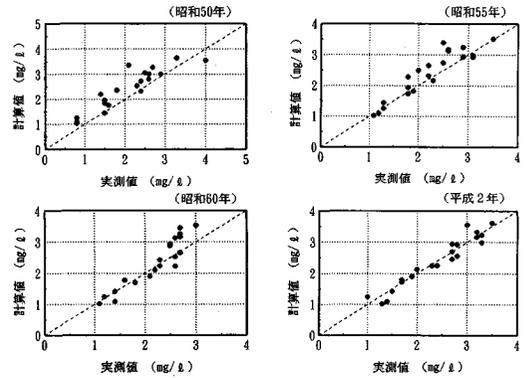


図-29 生産関数の実測値と計算値の関係

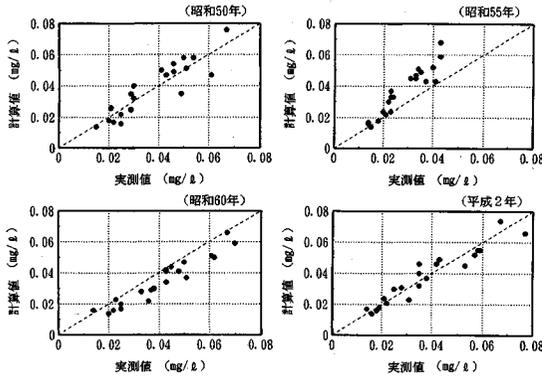


図-27 TPの実測値と計算値の関係

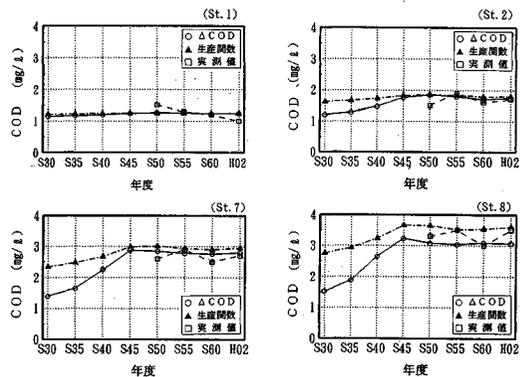


図-30 地点別経年変化

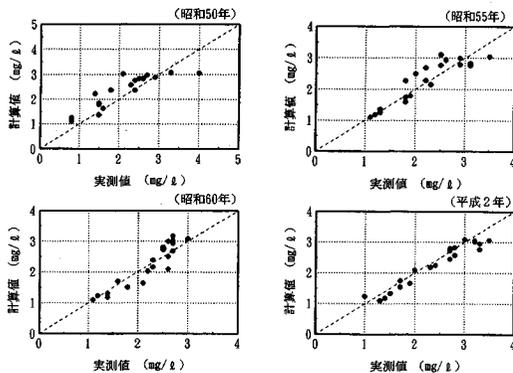


図-28 ΔCODの実測値と計算値の関係

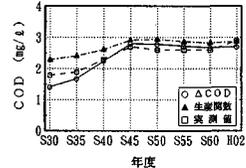


図-31 平均水質の経年変化

CODは、昭和50年以降の博多湾へのCOD、TPの容積負荷量の変動が小さいため、生産関数法モデルの方が若干高めではあるが、負荷量に対する応答はあまり変わらず両モデルとも実測値をよく再現している。しかし、湾奥の流入負荷点近傍のSt. 7, St. 8では、湾中央から湾口のSt. 1, St. 2に比べると、両モデルの差は大きくなり、 Δ CODの方が生産関数法より低くなっている。

博多湾奥海域の平均水質と、計算結果とを比較してみると、図-31に示すとおり、昭和45年以前の負荷量が現在より少ない時期は Δ CODの方が再現性が良い。生産関数法は、負荷量の大きい変化に対する応答が Δ COD

に比べて、十分ではないようである。パラメータの数が多くなるようなモデルは、単年度のしかも4季程度の調査では変動の大きな実際の海域の諸現象を正確に把握するには十分とはいえず、また、現象を的確に記述できているかどうかということも問題である。この点については、いくつかの報告もなされており^{22), 23)}、場合によってはむしろ Δ COD法のような生産部分を積分的に評価する簡易モデルの方が、年平均水質を議論する場合、有効であることを示している。

(3) 簡易変換法

富栄養化海域において、流入物質の挙動及び水質予測を厳密に行うためには、3次元の生態モデルによればよいが、これらのパラメータに対し、現実即した値を得ることは容易なことではない。経年的データが整っている海域では、統計的モデルによっても、水質予測は可能である。富栄養化海域におけるCODは、陸域等から流入する外部負荷CODと海域内で生産される内部生産

表-2 COD, TN, TPの滞留日数

年度	容積負荷 (g/m ³ /d)				平均水質 (mg/ℓ)				滞留日数 (d)			
	COD	TP	TN	淡水	COD	TP	TN	Cl ⁻	COD	TP	TN	淡水
昭和30	0.0174	0.00043	0.0036	3334	1.8	0.027	0.21	17.56	46.0	30.39	8.45	18.3
昭和35	0.0270	0.00076	0.0052	3468	1.9	0.028	0.22	17.53	33.3	18.46	7.69	18.0
昭和40	0.0407	0.00152	0.0084	3578	2.3	0.043	0.24	17.85	31.9	19.14	9.42	12.7
昭和45	0.0597	0.00312	0.0138	3811	2.7	0.057	0.32	17.67	28.5	13.80	10.15	14.5
昭和50	0.0483	0.00325	0.0162	4034	2.6	0.052	0.33	17.83	33.1	11.69	9.27	11.5
昭和55	0.0489	0.00297	0.0193	6731	2.6	0.049	0.40	17.27	32.8	11.77	11.39	11.4
昭和60	0.0545	0.00314	0.0245	5804	2.6	0.053	0.43	17.39	29.4	12.42	10.20	12.1
平成2	0.0530	0.00352	0.0277	4763	2.8	0.054	0.50	17.46	34.0	11.37	11.55	13.9

注) バックグラウンド値は, COD: 1.0mg/ℓ, TP: 0.014mg/ℓ, TN: 0.18mg/ℓとした。

CODに分けられることは先の式(4)に示したとおりである。ここで、海域の1次CODを表わす方法として、新たに提案した簡易変換法について考える。海域における1次CODの平均濃度は、式(13)に示すとおり汚濁負荷供給量と滞留時間の積にバックグラウンド濃度を加えたものとして表すことができる。また、同様に内部生産CODについても式(14)、(15)のとおり、栄養塩の供給量とその滞留時間の積にバックグラウンド濃度を加えた後、実際に生産される割合を表す変換率 α_p を用いて求めることができる。なお、1次CODの滞留日数は淡水と同様とした。

$$COD_b = COD_0 + L_{COD} \times \theta_{tw} \dots \dots \dots (13)$$

$$\Delta COD = (N_0 + L_N \times \theta_N) \times \alpha_n \dots \dots \dots (14)$$

または

$$\Delta COD = (P_0 + L_P \times \theta_P) \times \alpha_p \dots \dots \dots (15)$$

ここで

$$\theta_{tw} = (C_{10} - C_1) / C_{10} / L_{tw} \times 10^9$$

$$\theta_N = N / L_N \quad \theta_P = P / L_P$$

COD₀: CODバックグラウンド濃度 (g/m³)

N₀: TNバックグラウンド濃度 (g/m³)

P₀: TPバックグラウンド濃度 (g/m³)

C₁₀: Cl⁻のバックグラウンド濃度 (g/m³)

θ_{tw} : 淡水滞留日数 (d) θ_N : TN滞留日数 (d)

θ_P : TP滞留日数 (d) L_{COD}: COD容積負荷量 (g/m³/d)

N: TNの平均濃度 (g/m³) L_N: TN容積負荷量 (g/m³/d)

P: TPの平均濃度 (g/m³) L_P: TP容積負荷量 (g/m³/d)

C₁: 塩素イオン濃度 (g/m³) L_{tw}: 淡水容積負荷量 (m³/m³/d)

α_n, α_p : 変換率 (栄養塩 (N,P) から生産されるCODの割合)

ここで、滞留時間 θ は、海域全体の輸送力を表現するものであり、海域での物質濃度を決定する大きな要因となる。博多湾奥海域の淡水、COD、TN、TPの平均水質データからバックグラウンド濃度を差し引いた値を容積負荷量で除して求めた各年の滞留日数は表-2、図-32~35のとおりである。これによると、昭和40年以降のTP、TNの滞留日数は約10~12日と変化は小さく、淡水の滞留日数とほぼ等しくなっている。これに対して、CODは内部生産という生物過程が加わり、滞留日数は約30日と、TN、TPに比べて大きくなっており、非線形的挙動を示す原因となっていることがわかる。また、図-34でTPの滞留日数を詳細にみると、容積負荷量の

表-3 簡易変換法より求めたCOD_b, 変換率

年度	COD _b	ΔCOD	変換率	
			α_p	α_n
昭和30	1.07	0.73	0.428	0.399
昭和35	1.24	0.66	0.374	0.346
昭和40	1.28	1.02	0.375	0.487
昭和45	1.62	1.08	0.300	0.388
昭和50	1.32	1.28	0.389	0.445
昭和55	1.29	1.31	0.421	0.375
昭和60	1.40	1.20	0.357	0.320
平成2	1.48	1.32	0.385	0.302

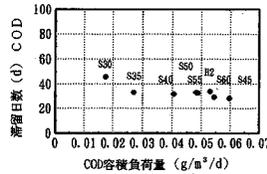


図-32 COD容積負荷量と滞留日数の関係

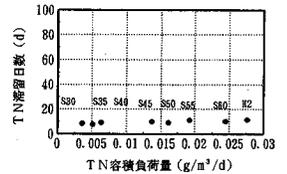


図-33 TN容積負荷量と滞留日数の関係

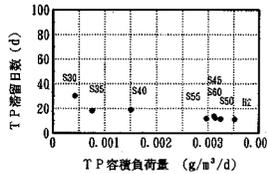


図-34 TP容積負荷量と滞留日数の関係

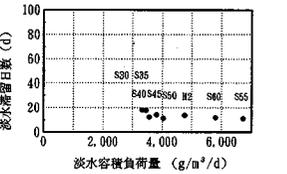


図-35 淡水容積負荷量と滞留日数の関係

小さかった年度は滞留時間が大きいという傾向も読みとれる。これは先に述べたCoastal Trappingによる負荷と水質の非線形性を反映したものととも考えられるが、この点については今後の課題とした。

式(13)~(15)にしたがって求めた博多湾奥海域の1次COD、ΔCOD並びに α_n, α_p は表-3に示すとおりである。TP及び1次CODの滞留日数を12日とし、博多湾奥海域における各年のCOD、TPの実測平均水質を用いて計算した α_n, α_p は、図-21のTPと α_p の関係において示した曲線に沿っており、簡易変換法における変換率 α_p についても図-21の関係を利用すればよいことがわかる。

また、この簡易変換法を用いて、海域の目標水質を維持するための削減負荷量を式(16)、(17)より求めることができる。

$$L_{\Delta P} = L_P - L_{bP} = (P - P_b) / \theta_P \dots \dots \dots (16)$$

または

$$L_{\Delta N} = L_N - L_{bN} = (N - N_b) / \theta_N \dots \dots \dots (17)$$

L_{ΔN}, L_{ΔP}: TN, TPの削減容積負荷量

L_{bN}, L_{bP}: 水質目標値に対するTN, TP容積負荷量

P, N: TP, TNの現況水質

P_b, N_b: TN, TPの水質目標値

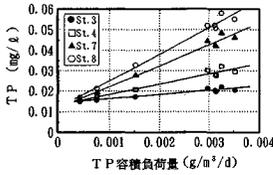


図-36 TP容積負荷量とTPの関係

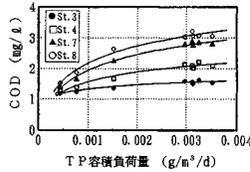


図-37 TP容積負荷量と滞留日数の関係

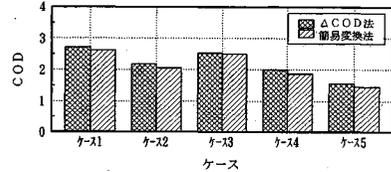


図-38 ケーススタディの計算結果

このように簡易変換法は、現在までに蓄積されたデータから水域の水質を簡易に予測することができるとともに、削減負荷量あるいは許容負荷量を容易に求めることができるので、実際の運用においては非常に有用である。

4. 富栄養化海域の水質制御

閉鎖性水域の富栄養化対策としては、結局のところ、その水域に流入する負荷量を削減するしかない。どの程度削減するかが問題である。制限因子論では、律速となっている栄養塩を削減することにより、内部生産量を抑制することができるとしており、水質の保全対策上はこの栄養塩の削減に力点が置かれている。しかし、博多湾の代表的な調査地点について、先の ΔCOD モデルにより計算されたCODの拡散計算結果とTPの容積負荷量の関係を見ると、図-37に示すとおり非線形性を示すため、栄養塩類を単に削減するだけでは期待するほど水質が改善されない場合があることを示している。

そこで、簡易変換法により、目標水質を満足するための削減負荷量を式(16)、(17)より試算した。博多湾奥海域の目標水質を仮にCOD 2.5mg/Lと仮定すると、図-17、18のTP、TNの容積負荷量とCODの関係から、COD 2.5mg/Lに相当する L_{bP} 、 L_{bN} はTP 0.0023g/m³/d、TN 0.0141g/m³/dとなり、削減容積負荷量 L_{dP} 、 L_{dN} はそれぞれTP 0.0012g/m³/d、TN 0.0136g/m³/dとなる。これは、現況の容積負荷量のTP 35%、TN 49%の削減量である。また、同様にCOD 2mg/Lを目標水質とすると、現況容積負荷量に対する削減割合は、それぞれTP 78%、TN 83%になり、現実的にはかなり困難な目標であることが判る。

ここで、これら水質保全目標を満足する保全対策としてどのようなものがあるのか、水質保全対策の実例として、次に示すケーススタディを簡易変換法、並びに負荷量の変動に対する応答のよい ΔCOD モデルにより実施した。博多湾奥の平均水質の予測結果は、図-38に示すとおりであり、両モデルの計算結果は概ね一致している。水質の保全基準を仮に環境基準AタイプのCOD 2mg/Lとすると、ケース4の下水道の3次処理やケース5の湾外放流が必要となり、富栄養化の改善策としては相当思い

- ケース1：平成2年現在
- ケース2：現況で下水処理水を湾外放流した場合
- ケース3：将来下水道整備が完了し2次処理まで実施した場合
- ケース4：将来下水道整備が完了し3次処理まで実施した場合
- ケース5：将来、下水処理水を湾外放流した場合

切った対策をとらねばならないことが判る。特に、処理コスト等を考えると、著者らの試算では3次処理は膨大な費用が必要であり¹²⁾、生物生産に有用な栄養塩等は、その過剰が問題とならない湾外へ放流することも一つの手段として検討に値すると考えられる。

5. おわりに

本研究で得られた主な成果は、次のとおりである。

① 実測水質並びに流入負荷量の経年的変化を解析し、内部生産等、主として生物過程の介在によりCODと栄養塩との間には非線形性があること、また博多湾ではCoastal Trappingの影響は小さいことを示した。

② 従来モデルの改良法として、 ΔCOD 法モデルでは変換率、生産関数法モデルではCODの生産速度により、内部生産の非線形性を取り入れたモデルを提案した。両モデルの比較では、 ΔCOD 法の方が実測水質との整合が比較的良好という結果が得られた。生物過程を数多く取り込んだ複雑なモデルでは、各パラメータの妥当性について十分検討する必要があるものと思われる。

③ 富栄養化海域の水質の簡易予測手法として、水域に流入する物質の平均滞留時間を用いて、流入負荷供給量から物質濃度を求める簡易変換法を提案した。公共用水域の水質測定も約20年にわたって実施されてきており、海域毎に相応のデータが蓄積されている。簡易変換法は、これら蓄積されたデータを用いて解析することにより、比較的容易に水質を予測することができ、政策手段の大略を検討する場合等、非常に有効であると思われる。

④ 富栄養化海域では、流入物質と内部生産の間非線形性があるため、制限物質となる栄養塩の流入負荷量を削減しても線形的に水質改善に寄与するとは限らず、下水道整備による水処理のみの対策ではかなり困難な状況にあることを示した。

本研究では、富栄養化海域の水質の非線形特性を取り入れたモデルの改良、並びに簡易変換法の有効性について述べたが、内部生産の非線形性やCoastal trappingの

影響については他の海域についても、さらに実証的データを集積していくことが重要であると考えられる。また、本論で述べたモデルは、年平均のモデルであり、大局を判断する上では非常に有効であるが、洪水時、赤潮時等季節的に特殊な時期の適用にあたっては今後の課題としたい。富栄養化の問題解決のためには、技術的ブレークスルーと共に、社会システムの変革が求められている。社会システムのあり方等を考える場合には、水質モデルも現象の細部を検討する生態系モデルによる必要はなく、ケーススタディに示したとおり、簡易型のモデルでも十分判断し得るものであり、両者の使い分けが重要と思われる。また、都市沿岸の閉鎖性海域には、環境容量論的にいっても、すでに述べたとおり許容負荷量をかなり超えており、水質保全のためには抜本的な対策が必要であることを認識しなければならない。

謝辞 本研究の遂行に協力頂いた河本靖浩氏（エイトコンサルタント）、並びに江島賢一氏（鉄建建設）に心より謝意を表します。

参考文献

- 1) 合田 健：沿岸海域のN, P環境基準, 水環境学会誌, Vol. 16, No. 8, p. 533, 1993年.
- 2) 岸 道郎・池田三郎：赤潮生態系の数値モデル, 沿岸海洋研究ノート, 第22巻, pp. 109~118, 1985年8月.
- 3) Masahiko Sekine and Hiroshi Nakanishi: A Shallow - Sea ecological model using an object-oriented programming language, Ecological Modelling, 57, pp. 221~236, 1991.
- 4) 中西 弘・浮田正夫：海域におけるCOD生産について, 用水と廃水, Vol. 17, No. 6, pp. 725~735, 1975年.
- 5) 内田唯史・中西 弘・浮田正夫：内湾におけるCODの予測手法に関する研究, 水質汚濁研究, Vol. 6, No. 6, pp. 427~437, 1983年.
- 6) 武岡英隆：沿岸海域の海水交換, 沿岸海洋研究ノート, 第20巻, 第2号, pp. 169~182, 1984年.
- 7) 武岡英隆：海水交換の調査法と問題点, 沿岸海洋研究ノート, 第24巻, 第2号, pp. 145~155, 1987年.
- 8) 武岡英隆：今後の物理学的沿岸海洋研究の展望, 沿岸海洋研究ノート, 30周年記念特別号, pp. 63~72, 1993年10月.
- 9) 上 真一：低次栄養段階における生物過程の時間的変動, 沿岸海洋研究ノート, 第30巻, 第2号, pp. 165~176, 1993年2月.
- 10) 武岡英隆・村尾 肇：栄養物質負荷の変化に対する大阪湾の応答, - Coastal Trapping による物質輸送の非線形性-, 1992年度日本海洋学会春季大会講演要旨集, pp. 213~244.
- 11) 福岡市環境局環境保全部, 福岡市水質測定結果報告, pp. 159~170, 1985年度~1990年度.
- 12) 内田唯史・浮田正夫・中西 弘：閉鎖性海域の水質管理システムに関する研究, 環境システム研究, Vol. 21, pp. 428~435, 1993年8月.
- 13) 福岡県福岡水産試験場, 福岡県福岡水産試験場事業報告, 昭和34年度~44年度.
- 14) 中西 弘・浮田正夫：環境における窒素, リンの収支, および水域の受容能力と対策, 1982日本河川水質年鑑, pp. 863~880, 1983年11月.
- 15) Nakanishi, H., Ukita, M. and Sekine, M.: Evaluation of Primary Production Loads and Their Control in Enclosed Seas, Marine pollution Bulletin, Vol. 23, pp. 25~29, 1991.
- 16) 中西 弘：瀬戸内海水質汚濁の経緯と富栄養化対策, 沿岸海洋研究ノート, 第20巻, 第1号, pp. 71~82, 1982年.
- 17) 今野 浩・山下 浩：非線形計画法, 日科技連出版, p. 193, 1978年.
- 18) G. N. Vanderpaaats: ADS-A Fortran program for automated design synthesis, Naval Postgraduate School, 1984.
- 19) 浮田 正夫：わが国における窒素・リンの発生源構造と富栄養化の機構に関する基礎的研究, pp. 151~168, 1982年3月.
- 20) Redfield, A. C.: The influence of organisms on the composition of sea-water, vol. 2, In The sea, pp. 26~77, 1963.
- 21) アイランドシティ整備事業環境影響評価書, 福岡市, pp. 431~432, 1993年4月.
- 22) 河原長美・山下尚之：誤差を含む流入汚濁負荷量を用いて同定された生態学的水質評価モデルの予測誤差, 環境工学研究論文集, 第29巻, pp. 135~145, 1992年.
- 23) Michio J. Kishi and Kisaburo Nakata: Sensitivity Analysis of a Coastal Marine Ecosystem, Journal of the Oceanographical Society of Japan, vol. 37, pp. 120~134, 1981.

(1994. 4. 20 受付)

THE STUDY ON THE NONLINEAR CHARACTERISTICS OF WATER QUALITY IN EUTROPHIC SEA AREAS AND THEIR MODELING

Tadashi UCHIDA, Masao UKITA, Masahiko SEKINE and Hiroshi NAKANISHI

By taking Hakata Bay as the example, and on the basis of the accumulated data on the water quality and the secular change of in flow load, it was pointed out that there is the nonlinearity between the inflow load and the water quality. Further, as the practical models, the improvement of the Δ COD model taking the nonlinearity of internal production in consideration and the mass circulation model was carried out. Besides, as the simple forecasting technique for the water quality in eutrophic water areas, the simple conversion method by developing and expanding the concept of Δ COD method was newly proposed, and it was shown that this model is useful as the purpose needs it, for example the case of evaluating the water quality on yearly average and so on. Moreover, by using these models, examination was carried out on the water quality control for eutrophic sea areas.