

# 水環境における汚濁機構の究明と保全施策効果に関する研究

## (2) 公共用水域の汚濁解析のモデル化

研究期間（平成10年度～14年度）

熊谷博史\*, 志水信弘\*, 中村又善\*

### 要 旨

河川および湖沼における水質管理は、その対象流域内に存在する数多くの汚濁発生源に係わるデータに基づいて行う必要があるが、それらのデータの集計及び解析は複雑かつ膨大なものとなっている。

そこで本研究では、河川の水質予測に用いる「流域水質管理システム」および、ダムの水質予測に用いる「湖沼水質管理システム」の二つの水質予測システムを構築した。その結果、負荷量算定に係わる各種データの集計、及びそれを用いた解析を一元的かつ効率的に行うことが可能となった。また、これらの作成したシステムを用いた数値計算の予測値は、実際に測定された水質濃度をほぼ再現できていた。さらに、本システムを用いて流域の水質予測を行ったところ、予測の際に考慮されていなかった汚染源の存在を明らかにした。このように、本システムは、水質管理を行う上での科学的な判断材料を提供するための有効なツールとなりうることが証明された。

〔キーワード：数値解析、水質モデル、公共用水域、類型指定、負荷量、原単位〕

### 1 はじめに

公共用水域の水質は、隣接する流域から流入する負荷量（流入負荷量）により、強く影響を受ける。また、この流入負荷量は、その流域の状況により大幅に変化する。すなわち、時間的に一定のものではなく、気象・人口流動・土地利用状況・経済活動状況・生活様式といった、様々な因子に応じて変化する動的な量となっている。

一方、行政は、流入負荷量に影響を及ぼすこれらの様々な因子に関わる最新のデータ（気象データ・人口・土地利用状況・事業所排水量・汚水処理量等）に基づいて、流入負荷量を削減するための的確な施策を行う必要がある。しかしその判断を行う際の、関連データの集計、データに基づく負荷量及び水質の予測計算、予測計算値に対しての解析といった一連の作業は、複雑・膨大なものとなる。

そこで、本研究では、これらの一連の作業を一元的かつ効率的に行うために、河川の水質予測に用いる「流域水質管理システム」および、ダムの水質予測に用いる「湖沼水質管理システム」の二つの水質予測システムを構築した。

### 2 研究方法

#### 2. 1 流域水質管理システム

流域水質管理システムの構成を図1に示す。このシステムを用いて、対象流域内に存在する環境基準点における河川水質を予測した。本システムは、主に3つのモデルにより構成される。すなわち、汚濁負荷量予測モデル・流量予測モデル・水質予測モデルである。なお本研究では、対象流入負荷を BOD、対象河川を遠賀川流入河川とした。以下、その計算方法の概要を記述する。

##### 2. 1. 1 負荷量予測モデル

負荷量予測モデルは、対象流域内の生活系・産業系・農業系・自然系の各汚濁源から発生し、河川に流入する負荷量を算定することを目的としている。

対象となる流域を幾つかの小流域に分割し、その中の発生源に対して種別・数・規模を調査して、流域の諸元（フレーム）の集計を行った。このように作成した流域汚濁フレームに、各汚濁負荷量原単位（以下原単位とする）を乗じることで排出負荷量を算定した。各原単位については文献値<sup>1)~11)</sup>を用いた。以上のように算定された排出負荷量は、モデル中に設定された負荷量投入点に達するまでに、吸着・沈殿・有機物の分解等の作用を受けて減少すると考えられる。その減少割合を流達率、負荷量投入点に到達する負荷量を、流達負荷量と定義する。

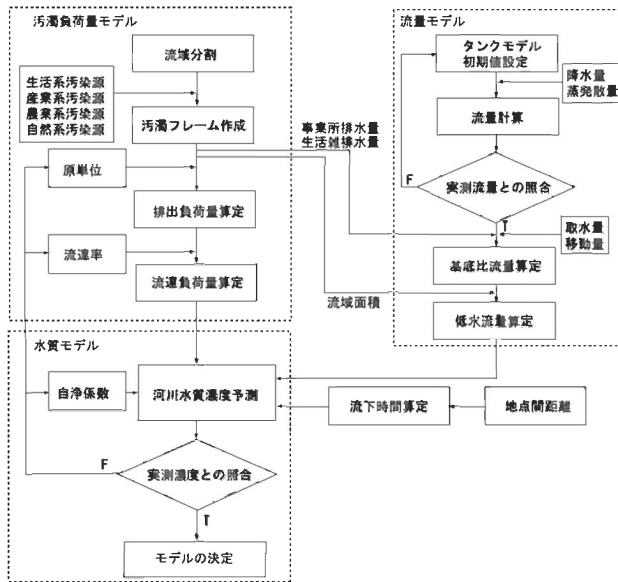


図1 河川水質予測システム概要

ここでは、先に求められた排出負荷量に流達率を乗じて、流達負荷量を算定した。流達率については、過去の調査結果の値を参考にして与えた。

### 2. 1. 2 流量モデル

このモデルは、対象河川における河川流量を算定することを目的としている。ここでは、タンクモデルを用いて低水流量の算定を行った。モデル中に用いる降水量および蒸発散量については、対象地域の近隣における観測データを使用した。以上により算定された低水流量に対し、ダム放流量・各用途取水量および都市排水量を加減することで、河川流量を算定した。なお、算定した河川流量は実測流量を用いて検証した。

### 2. 1. 3 水質予測モデル

このモデルは、負荷量予測モデルから算定された流達負荷量・流量モデルから算定された河川流量・流下時間を考慮して、河川水質濃度の予測計算を行うことを目的としている。一般に水域内での負荷量は、移流・拡散・分解といった作用により変化するが、これは次式で表現される。

$$\frac{\partial L}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 L}{\partial x^2} - U \frac{\partial L}{\partial x} - (k_1 + k_3) L \quad (1)$$

ここで、 $L$ ：負荷濃度 (mg/l)、 $U$ ：平均流速 (m/日)、 $D_x$ ：縦断方向の拡散係数 (m<sup>2</sup>/日)、 $k_1$ ：脱酸素係数、 $k_3$ ：沈殿や吸着による有機物除去係数 (1/日)である。上式において、定常状態を仮定し、拡散項を無視し、自浄係数  $k=k_1+k_3$  として積分すると次式になる。

$$L = L_0 \exp(-k_r t) \quad (2)$$

ここで、 $L_0$ ： $t=0$ での負荷濃度である。区間  $n$  において  $m$  地点の負荷量投入を考慮すると、到達点での負荷濃度は次式で与えられる。

$$L_n = L_{n-1} \exp(-k_r t_n) + \sum_{i=1}^m L_{n,i} \exp(-k_r t_{n,i}) \quad (3)$$

ここで、 $L_{n-1}$ ：上流区間  $n-1$ から流入する負荷濃度、 $t_n$ ：区間  $n$ の流下時間、 $L_{n,i}$ ：区間  $n$ において投入される  $i$  番目の負荷濃度、 $t_{n,i}$ ：区間  $n$ において投入される  $i$  番目の負荷量投入位置から下流の評価地点までの流下時間である。すなわち、(3)式を用いて環境基準点における水質を予測することになる。予測値については、過去3年間の現地観測値のBOD75%値を用いて検証した。

### 2. 1. 4 将来予測の方法

将来水質濃度の予測については、将来予測される汚濁フレーム（将来汚濁フレーム）に対して、現況予測で確定した負荷量原単位・流達率・自浄係数・流下時間を用いて算定した。将来汚濁フレームについては、環境改善に係わる施策を行う場合の「施策時」と、現況のままで環境改善に係わる施策を行わない場合の「無施策時」の、二つの場合についての算定を行った。

### 2. 1. 5 結果および考察

遠賀川水系25地点の現況水質に対して行った水質再現計算結果を図2に示す。実測値と計算値の相関係数は0.979であり、かなりの高精度で予測が出来ているものと考えられる。また、一地点で再現性の悪い地点が存在し、計算値よりも観測値のほうが高くなっている。これは泌川泌大橋における結果であるが、その流域内に考慮していない負荷量が存在していることを示唆していた。

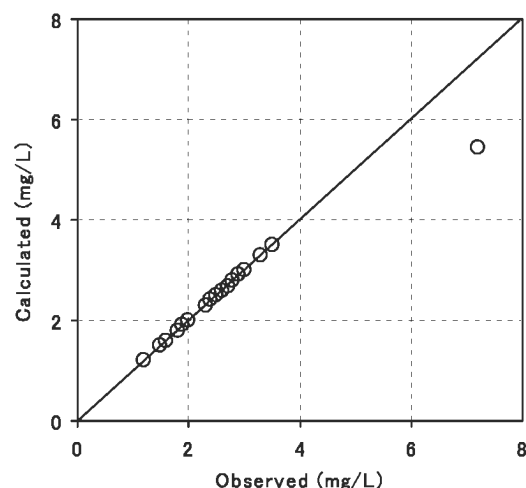


図2 河川水質再現結果

### 2. 2 ダム水質予測システム

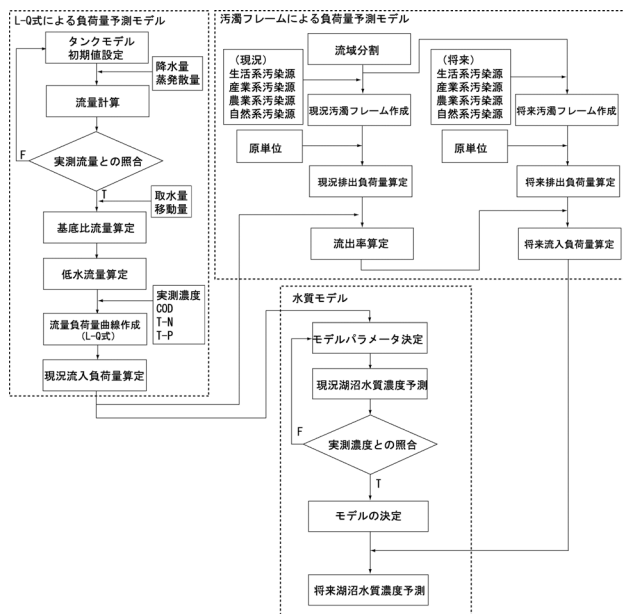


図3 湖沼水質予測システム概要

湖沼の水質予測システムの構成を図3に示す。このシステムを用いて湖沼の表層・中層・底層における水質を予測した。本システムは、3つのモデルからなる。すなわち、L-Q式による負荷量予測モデル・汚濁フレームによる負荷量予測モデル・水質予測モデルである。なおここでは、対象流入負荷をCOD・T-N・T-P、対象水域をます湖・油木ダムとした。以下、その計算方法の概要を記述する。

## 2. 2. 1 L-Q式による負荷量予測モデル

このモデルは、現況の湖沼へ流入する負荷量を算定することを目的としている。まず、タンクモデルを用いて一日ごとの河川流量を算定した。一方で、実測流量と実測負荷濃度から、負荷量－流量関係をべき乗式の形で決定した(L-Q式)。この式と計算した河川流量を用いて、現況における流入負荷量を算定した。

## 2. 2. 2 汚濁フレームによる負荷量予測モデル

このモデルは、対象となる流域から排出される汚濁負荷の量(排出負荷量)を算定することを目的としている。システム中においては、まず、河川水質予測システムの負荷量予測モデルと同様の方法に従い、現況及び将来の汚濁フレームを用いて現況及び将来排出負荷量の算定を行った。汚濁原単位については、文献値<sup>6), 12)~14)</sup>を使用した。次にL-Q式によって求めた現況流入負荷量を現況排出負荷量で除することで、実際に負荷量が湖沼に流入する割合(流出率)を算定した。この流出率を将来排出負荷量に乗じることで、将来流入負荷量を算定した。

## 2. 2. 3 水質予測モデル

このモデルは、上述の二つの負荷量予測モデルにより算定された現況及び将来流入負荷量が湖沼内に流入した

ときの水質変化を予測することを目的としている。本システムで水質予測に用いたのは、鉛直一次元生態系モデルである。その際、貯留池内の流動現象を支配する方程式は以下になる。

・非圧縮性流体の連続式

$$q_{in} - q_{out} + \frac{\partial wA}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

・水温収支式

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{B}{A} (u_n T_n - u_{out} T) - \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial z} (wAT) + \frac{k_m + k_e}{A} \frac{\partial}{\partial z} \left( A \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{1}{\rho C_w A} \frac{\partial}{\partial z} (\phi A) \quad (5)$$

・物質収支式

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{B}{A} (u_n C_n - u_{out} C) - \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial z} (wAC) + \frac{D_m + D_e}{A} \frac{\partial}{\partial z} \left( A \frac{\partial C}{\partial z} \right) + S_c \quad (6)$$

ここで、 $z$ ：鉛直方向距離、 $w$ ：鉛直方向流速、 $q_{in}$ ：流入水量、 $q_{out}$ ：放流水量、 $A$ ：貯水池面積、 $u_i$ ：流入速度、 $u_o$ ：放流水速度、 $T$ ：水温、 $T_i$ ：流入水温、 $\rho$ ：水の密度、 $C_w$ ：水の比熱、 $\phi$ ：輻射熱、 $k_m$ ：分子熱伝導係数、 $k_e$ ：渦動熱伝導係数、 $D_m$ ：分子拡散係数、 $D_e$ ：渦動拡散係数、 $C$ ：物質濃度、 $C_i$ ：流入物質濃度、 $S_c$ ：物質Cの生成項、 $t$ ：時間である。これらの式を陽解法に基づき差分化し、時間刻みを1日として、数値計算を行った。生態系モデル中の構成要素(コンパートメント)については図4に示すとおりとし、図中に示したようなコンパートメント間の物質変換を考慮した。物質変換に関するパラメータの値については、文献値<sup>13)~16)</sup>を参考に与えた。そしてこれらの値を用いて数値計算を行い、計算結果の値と実測値を比較することで、それらの調整を行った。その後、現況計算と同じパラメータを用いて将来水質計算を行った。

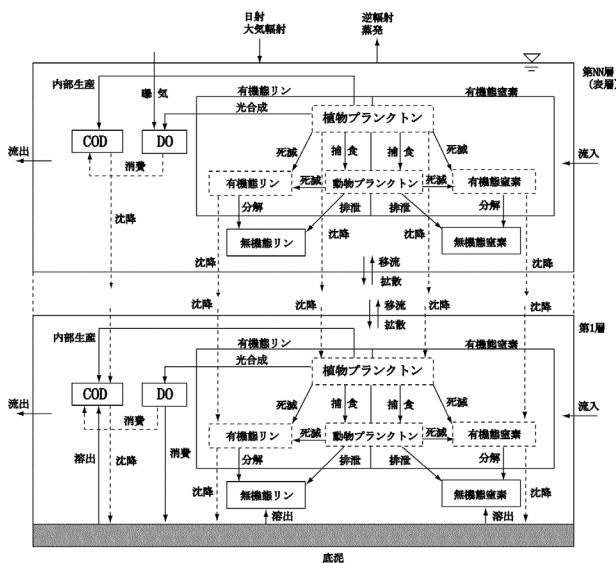


図4 生態系モデルの概要

## 2. 2. 4 結果および考察

数値計算結果の一部を図5に示す。陸域からの負荷量に応じて、水質濃度が変動していることが解る。このように、今回行った水質予測は、ダム内の水質変動の傾向を捉えていた。

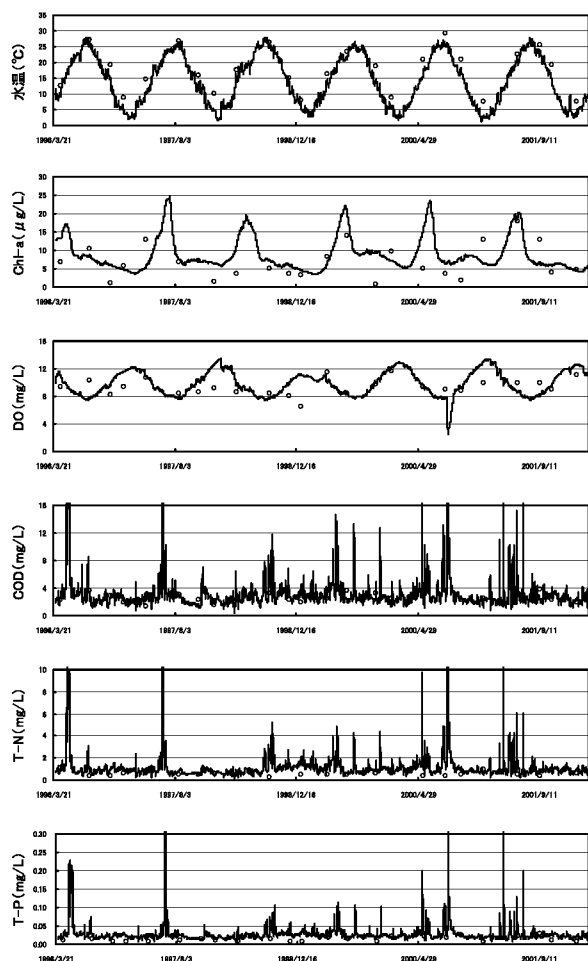


図5 数値計算結果（油木ダム表層5年間）

## 3 まとめ

本研究において、河川の水質予測に用いる「流域水質予測システム」および、ダムの水質予測に用いる「湖沼水質管理システム」の二つの水質予測システムを構築した。その結果、負荷量算定に係わる各種データの集計、及びそれを用いた解析を一元的かつ効率的に行うことが可能となった。また、これらの作成したシステムを用いた数値計算の予測値は、実際に測定された水質濃度を再現できていた。

## 4 行政的意義、貢献

本システムを用いて流域の水質予測を行ったところ、予測の際に考慮されていなかった汚染源の存在を明らか

にすることができた<sup>19)</sup>。このように、本研究において開発したシステムは、流域の水質管理を行う上での科学的な判断材料を提供するための有効なツールとなりうることが証明された。

## 文献

- 1) 環境庁：生活排水対策促進計画資料，1991.
- 2) 福岡県保健環境部：博多湾の窒素及び燐の環境基準の類型指定並びに博多湾流入河川の水質環境基準の類型見直しによる調査業務報告書，1995.
- 3) 溝呂木昇：水質予測計算入門，(I～X)，公害と対策，Vol. 15，1979.
- 4) 福岡県：釣川水系生活排水対策総合計画報告書，1991.
- 5) (社) 日本下水道協会：流域別下水道整備総合計画調査・指針と解説，1993.
- 6) 和田安彦：ノンポイント汚染源のモデル解析，技報堂出版，1990.
- 7) 藤本千鶴：印旛沼，手賀沼流入河川の汚濁負荷量に関する調査研究（Ⅱ）—生活排水発生負荷量原単位について，千葉県水保研年報，1987.
- 8) 國松孝男・村岡浩爾：河川汚濁のモデル解析，技報堂出版，1990.
- 9) 菱田昌孝：水質変化予測（シミュレーション）の現状と動向—第Ⅱ節 負荷量算定と予測各論，用水と廃水，Vol. 20, No. 11，1978.
- 10) 筒井剛毅他：特定汚染源地域の水質に関する研究（Ⅱ）—山林地域から流出する汚濁物質の原単位について，京都府衛公研年報30号，1985.
- 11) 福岡県：河川浄化対策基礎調査報告書（釣川流域の水質保全），1983.
- 12) 日本下水道協会：流域別下水道整備総合計画調査指針と解説，1999.
- 13) 増田貴則・市川新：GISを用いた琵琶湖流域のノンポイント汚染源の評価とその限界，第1回日本水環境学会シンポジウム講演集，pp. 182-183，1998.
- 14) 福岡県環境整備局公害課：寺内ダムに係わる水質環境基準の類型指定，1994.
- 15) 建設省土木研究所：貯水池の冷濁水ならびに富栄養化現象の数値解析，土木研究資料第2443号，1986.
- 16) 土木学会：水理公式集，1986.
- 17) 環境庁国立公害研究所：陸水域の富栄養化防止に関する総合研究（Ⅴ），国立公害研究所報告第54号，1985.
- 18) 岩佐義朗：湖沼工学，1990.
- 19) 志水信弘他：泌川で観察されるBODの急激な変動について，福岡県保健環境研究所年報29号，2002.

