

# 横拡散と流量確率現象を考慮した取排水河川の水質管理計画

## CHANCE-CONSTRAINED PROGRAMMING APPROACH TO MANAGING WATER QUALITY IN A RIVER WITH TRANSVERSE DISPERSION

李 適宇\*・盛岡 通\*\*

By LI Shiyu and Tohru MORIOKA

A chance-constrained model is proposed for finding the optimal wastewater treatment level to control the water quality in a river which consists of several upstream tributaries and water intakes throughout its length and where transverse dispersion occurs. The model is applied to Yodo River basin. The results show that the order of priority of enhancing sewerage construction in three sub-basins changes when a stricter water quality standard is imposed. Means for river quality management are proposed based on the analysis of characteristics of transverse dispersion in the river and the distribution of discharges corresponding to water quality standard violations at water intakes.

*Keywords: river quality management, transverse dispersion, chance-constrained programming*

### 1. はじめに

本研究は、水道水源となっている河川の水質管理計画について新しいモデルを作成し、その適用について検討したものである。

河川水質管理計画に関する研究は従来から多くなされてきた。たとえば、末石ら<sup>1),2)</sup>は水系での水質基準設定と下水道計画を結びつける立場から、線形計画の手法を用いて流域都市の汚濁負荷配分の最適化問題を研究した。

また、吉川ら<sup>3)</sup>は1水系流域における水配分問題についての研究において、河川水質環境基準の達成を考慮した非線形計画モデルを用いて、流域の上、下流の合理的な水配分をはかった。また田中ら<sup>4)</sup>は、水質環境基準の達成以外にも、水道取水量の安定確保および下水道建設費用の低減を目標として、多目的計画手法の1つであるSWT法を導入して水質管理を検討した。

しかし、以上の研究は概していえば、数理的手法の適用に重点があつて、河川における水質伝播について断面内の完全混合が仮定されており、分解項等を含む流下方

向のみの一次元水質モデルが扱われているにすぎない。相当な規模の河川の左右両岸に市街地や水道取水口がモザイク状にはりついている大都市圏の河川水質モデルとしては不十分である。すなわち、流入支川の水質濃度差に応じて本川において顕著な横拡散が起こり、その区域に設置されている取水口の水質を表わすのに、横拡散現象をも表現できる二次元水質モデルの導入が必要になる。そこで本研究では、まず第一に河川の水質伝播を二次元問題として取り扱い、水質モデルを計画モデルに取り入れる方法を提案したうえで、横拡散の影響を反映する河川水質管理計画問題を取り上げる。ただし、ここで横拡散は横方向の混合の意味も含んでいる。

一般に、水質環境基準の達成の判定は年間の75%非超過確率水質値と基準値との比較によって行われる。河川水質が1年の間に変化する原因としては、発生・排出源の側の変動のほかには、自浄作用の季節変化および水文現象の変動を挙げることができる。水道水源としての水質評価を75%非超過確率値で行ってもよいのかの検討は別途必要であるが、少なくとも河川の流量変化、さらにいえば、横拡散現象に大きな影響を与える各支川の相対的流量変化を視野に入れた計画モデルを作成することが望ましい。したがって、本研究の第二の重点として、流量の確率的な意味での変動の影響を考慮に入れ、確率

\* 学生会員 工修 大阪大学大学院博士後期課程  
(〒565 吹田市山田丘2-1)

\*\* 正会員 工博 大阪大学助教授 工学部環境工学科(同上)

的水質制約条件のもとでの河川水質管理の最適化問題の定式化を試みる。

### 2. 河川水質管理計画問題のモデル化

#### (1) 横拡散を考慮した河川水質管理計画

従来の完全混合を前提とした計画モデルの場合には、水質モデルと計画モデルとの結びつけの手法として一次元水質モデルの解析解、たとえば Streeter-Phelps の式を直接に計画モデルに代入している<sup>2)~4)</sup>。しかし、河川の二次元水質拡散モデルの場合には、一般的に解析解を求めることが困難であり、直接には代入できない。そこで本研究では、混合率という指標を使って二次元水質モデルと計画モデルを結合させ、混合率を通じて横拡散の影響を計画モデルに組み込む。

##### a) 混合率

$n$ 本の支川が合流した本川河川の両岸に  $m$ か所の取水口が設置されている場合、 $i$ 取水口でとり入れた1単位の水の中に、 $j$ 支川から流下した水の占める比率を  $i$ 取水口における  $j$ 支川の混合率と定義し、 $a_{ij}$ と記す。したがって、支川断面での水質が完全混合状態に達していると仮定すれば、 $i$ 取水口での物質収支を次のように表わすことができる。

$$C_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} \delta_{ij} \bar{C}_j \quad (i=1, \dots, m) \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $C_i, \bar{C}_j$ ： $i$ 取水口、 $j$ 支川の水質濃度、 $\delta_{ij}$ ： $j$ 支川の水質が  $i$ 取水口まで流下するときの保存率である。 $\delta_{ij}$ は分解速度と流下時間に支配され、保存性物質の場合  $\delta_{ij} = 1$ である。このように式(1)は混合率の定義と取水口での物質収支に基づくものである。混合率を求めれば、その表現が成立する。

混合率  $a_{ij}$ は横拡散の効果を反映しており、また流量および支川の流量比の変化によって変わる。一定の流量条件下で、その値は二次元水質拡散モデルを解くことにより得られる<sup>5)</sup>。したがって、取水口の水質濃度が式(1)のように混合率を用いて流入支川の水質濃度の線形結合で表現される。

##### b) 計画問題のモデル化

河川水質管理の1つの場面設定として、本研究では、それぞれの支川流域において下水道施設の建設と運営によって本川に流入する汚濁負荷量を削減し、水源水質を保全することを考える。計画変数、目的関数、制約条件を次のように定義する。

- ① 各支川流域における下水処理の除去負荷量を計画変数とする。
- ② 各支川流域の下水処理費用の和を最小化することを目的関数とする。
- ③ 本川の取水口での水質濃度が環境基準を達成する

ことを計画の制約条件とする。式で表現すれば、次のようになる。

##### 目的関数

$$Z = \sum_{j=1}^n f_j(L_{rj}) \rightarrow \min. \dots\dots\dots (2)$$

##### 制約条件

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} \delta_{ij} \frac{L_j}{Q_j} \leq b_i \quad (i=1, \dots, m) \dots\dots\dots (3)$$

$$L_{rj}^m \leq L_{rj} \leq L_{rj}^M \quad (j=1, \dots, n) \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $L_{rj}$ ： $j$ 支川流域での下水処理除去負荷量、 $f_j, Z$ ： $j$ 支川流域の下水処理費用、費用の和、 $L_j$ ： $j$ 支川の合流直前の流達負荷量、 $Q_j$ ： $j$ 支川の計画対象流量、 $b_i$ ： $i$ 取水口の水質環境基準、 $L_{rj}^m, L_{rj}^M$ ： $j$ 支川流域での除去負荷量の下限、上限値を表わす。

一方、 $L_j$ と  $L_{rj}$ との間には次の関係がある。

$$L_j = (L_j^0 - L_{rj}) R_j \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 $L_j^0, R_j$ は  $j$ 支川流域での発生負荷量、流達率を表わす。

式(5)を式(3)に代入することによって、横拡散の影響を考慮した河川水質管理計画モデルは次の式で示され、以下、モデル1とよぶ。

##### 目的関数

$$Z = \sum_{j=1}^n f_j(L_{rj}) \rightarrow \min. \dots\dots\dots (2)$$

##### 制約条件

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} \delta_{ij} \frac{R_j(L_j^0 - L_{rj})}{Q_j} \leq b_i \dots\dots\dots (6)$$

$$(i=1, \dots, m)$$

$$L_{rj}^m \leq L_{rj} \leq L_{rj}^M \quad (j=1, \dots, n) \dots\dots\dots (4)$$

##### c) 単位処理効果

制約条件式(6)は線形であり、その計画変数  $L_{rj}$ の係数  $a_{ij} \delta_{ij} R_j / Q_j$ が  $j$ 流域において汚濁負荷量を1単位除去するとき、 $i$ 取水口の水質改善効果を意味している。ここではこれを単位処理効果と定義する。単位処理効果は横拡散、分解および流達率の総合的影響を表わす指標であるが、支川が本川と合流した後の水質現象を支配する因子は横拡散と分解であり、また、流下距離が短い場合、分解効果が小さいのに対して、横拡散の影響が著しい。

一般に言えば、取水口の水質を改善するために、単位処理効果の大きい流域で下水処理を行うのが望ましい。しかし、処理費用を含めて考えると、必ずしもそうではない。この場合に、単位除去負荷量でなく、単位処理費用に対して水質改善効果の大きい流域での下水処理を優先させるのが1つの合理的な考え方である。

### (2) 流量変動の確率的特性を考慮した河川水質管理計画

#### a) 流量変動の確率性

前述のモデル1では、河川流量を計画対象流量として定数の形で取り扱った。実際には、計画対象流量はある一定の累積頻度に対応する流量値であり、それは確率的性質をもっている。一方、河川水質が環境基準を達成するか否かを判定する際には、ある一定の累積頻度に対応する水質値と基準値との比較によって決める。したがって、計画目標、水質基準および流量の確率の変動の関連を究明するためには、流量を定数でなく、確率変数として取り扱う必要がある。

b) 計画問題のモデル化

Lohani ら<sup>6),7)</sup>は河川水質管理計画に流量の確率性を導入し、環境基準を超過する水質値の許容発生確率を制約条件として、上、下流の汚濁負荷量配分の最適化問題を解いた。しかしながらそのモデルおよびそれに基づいて改良されたモデル<sup>8)</sup>は、いずれも水質が河川断面内に完全混合に達する仮定のもとで立てられており、横拡散の影響が効く場合には適用できない。

そこで、ここでは前述のモデル1をもとにして、以下の式に示す横拡散および流量の確率性を反映するモデル2を作成した。

目的関数

$$Z = \sum_{j=1}^n f_j(L_{rj}) \rightarrow \min. \dots\dots\dots (2)$$

制約条件

$$P_i \left\{ \sum_{j=1}^n a_{ij} \delta_{ij} \frac{R_j(L_j^0 - L_{rj})}{Q_j} \leq b_i \right\} \geq p_i \dots\dots\dots (7)$$

$$(i=1, \dots, m) \dots\dots\dots (7)$$

$$L_{rj}^m \leq L_{rj} \leq L_{rj}^n \quad (j=1, \dots, n) \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $P_i \{ \}$ 、 $p_i$  :  $i$  取水口における環境基準を超過しない水質濃度の発生確率、環境基準達成の判定指標である非超過確率値を表わす。ただし、ここでの流量  $\bar{Q} = \{Q_1, \dots, Q_j, \dots, Q_n\}$  は、ある既知の発生確率分布をもつ  $n$  次元ベクトルである。

(3) モデルの考察

以上に作成したモデル1とモデル2は、 $n$  本の合流支川および本川の両岸沿いに  $m$  か所の取水口があるような一般の河川流域の水質管理計画に適用できる。水質の横拡散および流量の確率的性質の影響が考慮されるので、従来の河川水質管理計画モデルに比べて、水質基準、計画目標および実際の水質現象間の関連をより正確に反映することができる。ただし、本モデルを適用する際に、入力条件に対する要求も高くなる。すなわち、モデル1の場合に、計画対象流量の条件下で二次元拡散解析を先行させ、それにより求めた混合率を計画モデルの入力データとする。モデル2の場合には、混合率のほかに流量の発生確率分布を事前に知ることが必要とされており、本川の流量および各支川の流量比が変わると、横拡

散の状況も変わるので、異なる流量ケースに対して拡散解析を行わなければならない。

以上の場合、対象流域の各合流支川をそれぞれ独立した汚濁負荷発生・排除系として取り扱っているが、実際の河川水質管理問題はしばしばもっと複雑な状況になっている。たとえば、1つの支川流域を上、下流または左、右岸によって複数の小流域に分けて分散の下水処理を行うことや、支川流域の間または同一支川の上、下流地域の間には下水管きょを建設することによって放流先を変えることなどが考えられる。このような場合に、モデル1とモデル2に対して目的関数および負荷量の流達状況の表現式に若干の修正を加えれば、同様に適用できる。しかし、支川流域に設置されている取水口と環境基準点も計画の対象になると、本モデルの対応できる限界を超える。この場合には、まず支川流域を対象とする管理計画のサブモデルを作成し、それと本モデルとを結びつけて2レベルの構造をもつ管理計画モデルで対応する必要がある。

3. モデルの適用

(1) 対象流域

ここでは、モデル1とモデル2の適用対象を淀川流域に選ぶ。淀川には木津川、宇治川、桂川の三川が合流し、それぞれの支川が異なった水文・水質特性を備えている。合流後の淀川では水質濃度の差により横拡散が起こる。一方、淀川の中・下流は阪神地区の重要な水道水源であり、両岸に多数の取水口が設置されている。

Fig. 1 に示すように、木津川、宇治川、桂川の3つの支川流域をそれぞれ加茂、瀬田洗堰、渡月橋を境界として上、下流の2つのブロックに分け、下流にあるブロックA、B、Cを計画対象地域とする。対象外の上流ブロック群がその下流ブロックに与える影響を上、下流の境界とされる河川断面での流達負荷量で代表する。

また、水道水源としての水質濃度の制約条件をかける

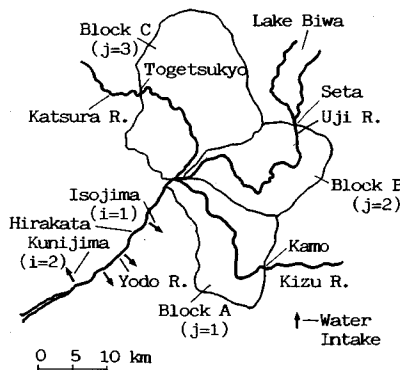


Fig. 1 Study Area.

地点として、主要な取水口が設置されている磯島と柴島の2か所を選定する。磯島取水口は三川合流部より約6 km 下流の淀川左岸に位置し、その河川断面では濃度分布が均一に達していないので、横拡散がなお続く。すなわち、京都市域などから大量の排水および処理放流水を含んでいる桂川が、比較的清浄な水の流れている宇治川および木津川と合流し、その後汚濁物質濃度の高い桂川の水が右岸から左岸へ拡がっていく。他方、柴島取水口は合流点より約24 km 下流の淀川右岸にあり、そこで水質はほぼ完全混合の状態になっている。

## (2) 下水処理の費用

下水処理費用は多くの項目があるが、ここで考えに入れるのは処理施設の建設費と維持管理費の2項目である。また処理方法については、BOD 物質の除去を中心とする標準活性汚泥法とする。その費用関数は次式で与える<sup>9)</sup>。

$$Z_c = 352.45 q^{0.7175}, Z_r = 7.403 q^{0.7093} \dots \dots \dots (8)$$

ここに、 $Z_c$ 、 $Z_r$ ：処理施設の建設費(百万円)、維持管理費(百万円/年)、 $q$ ：処理水量( $10^3 \text{ m}^3/\text{日}$ )を表わす。

なお、簡単のために割引率を考慮しなく、処理施設の耐用年数を30年とし、それをもって $Z_c$ を割って1年当たりの建設費を求め、それと $Z_r$ との和の形で表わす1つの下水処理場の費用関数は次式になる。

$$Z = 11.748 q^{0.7175} + 7.403 q^{0.7093} \\ = 11.748 \left( \frac{L_r}{s r} \right)^{0.7175} + 7.403 \left( \frac{L_r}{s r} \right)^{0.7093} \dots \dots \dots (9)$$

ここに、 $q \cdot s \cdot r = L_r$ 、 $s$ ：処理場流入水のBOD濃度(mg/l)、 $r$ ：除去率(%)である。また、 $L_r$ の単位はkg/日である。

## (3) 負荷量の推定

ここでは計画期間を1980年から2000年までの20年間とし、負荷量は人口増加に比例する家庭排水負荷量を例として解析してみる。すなわち、現在の未処理分と将来増加分の家庭排水負荷量を計画対象とする。ただし、1980年の負荷量の中に、処理場で除去する工場排水負荷量をバックグラウンドとして考慮する。

### a) 1980年の負荷量

発生負荷量 $L^0$ と除去負荷量 $L_r$ を以下のように推定する。

$$L^0 = \text{人口} \times \text{負荷量原単位} + \text{処理場での工場排水負荷除去量 } L_{rj}$$

$$L_r = \text{処理人口} \times \text{負荷量原単位} \times \text{除去率} + L_{rj}$$

処理場に混入している工場排水の実態を把握しにくいので、 $L_{rj}$ を処理場の実際除去負荷量から家庭下水負荷除去量を引いたものとする。ただし、流入下水のBOD濃度 $s = 170 \text{ mg/l}$ 、除去率 $r = 90\%$ とする。また家庭排水の水量原単位を $400 \text{ l/人} \cdot \text{日}$ 、負荷量原単位を $60 \text{ g/}$

Table 1 Pollutant Loads (in 1980).

	Block A	Block B	Block C
Population ( $10^3$ )	103.0	515.8	1222.2
SSPR (%)	0	26	64
$L_j^0$ (kg/day)	6180	34867	139033
$L_{ij}$ (kg/day)	0	11155	101538
$L_j$ (kg/day)	4567	26867	1867
$L_j$ (kg/day)	3000	23000	20000
$R_j$	0.279	0.455	0.508

SSPR—sewerage-served population ratio

Table 2 Pollutant Loads Increase (in 2000).

	Block	Case 1	Case 2	Case 3
Population	A	110.0	110.0	9.5
Increase	B	47.4	113.6	47.4
( $10^3$ )	C	112.2	269.1	112.2
Load	A	6600	6600	567
Increase	B	2840	6814	2840
(kg/day)	C	6730	16147	6730

人・日として与える。

以上に説明した方法によって、ブロックA、B、Cの発生、除去負荷量をそれぞれ推定し、その結果をTable 1に示す。

なお、流域を上、下流の2つのブロックに分けたので、上流ブロックから流下した負荷量を考慮すると、流達率 $R_j$ は式(5)と少し異なる下式で推定する。

$$R_j = L_j / (L_j^0 + L_j^0 - L_{rj}) \dots \dots \dots (10)$$

ここに、 $L_j^0$ は上、下流ブロックの境界の河川断面を流下する流達負荷量を表わす。

$L_j$ 、 $L_j^0$ の実測値およびTable 1の $L_j^0$ 、 $L_{rj}$ の値を用いて $R_j$ を求めた。その結果を合わせてTable 1に示す。また、 $R_j$ の値は将来も一定と仮定したが、本来は下水道整備率の関数とする方が望ましい。

### b) 2000年の発生負荷増加量

将来の人口増加状況を以下の3つのケースに分けて予測する。

ケース1：ブロックBとCの人口は1980~2000年の20年間の近畿圏人口伸び率<sup>10)</sup>の平均値0.44%と同じ速度で増えるが、ブロックAの木津川流域においては、現在建設中の関西文化学術研究都市の完成によって人口が11万人増えるとする。

ケース2：ブロックBとCの人口は年平均伸び率1.0%で増加し、ブロックAは11万人増とする。

ケース3：新都市を建設しないと仮定し、各ブロックの人口は同じ0.44%の伸び率で増加するとする。

以上の人口予測をもとにして2000年の発生負荷量の増加を推定し、その結果をTable 2に示す。ただし、将来の負荷量原単位が現在のそれと同じ値をもつと仮定した。

Table 3 Design Discharge and Volumetric Share of Tributaries.

River	Q <sub>j</sub> (m <sup>3</sup> /s)	a <sub>ij</sub> (%)	
		Isojima	Kunijima
Kizu R.	20	23.12	12.74
Uji R.	104	68.86	66.24
Katsura R.	33	8.02	21.02

(4) 計画モデルの淀川流域への適用

a) モデル1の適用

モデル1を適用する前に、あらかじめ計画対象流量を決める必要がある。ここでは、1952~1983年の32年間の淀川低水流量(枚方地点)の平均値157 m<sup>3</sup>/sを計画流量として採用する。また、そのときの木津川、宇治川、桂川三川のそれぞれの流量としては、淀川本川について150~160 m<sup>3</sup>/sのような平均低水流量に近い流れが発生した日と同時に観測した各支川流量の1979~1983年の5年間の平均値を採用する。なお、その流量条件下での各取水口における支川の混合率を横拡散を表わす累積流量モデル<sup>5)</sup>を解くことによって求めた。その結果をTable 3に示す。

したがって、淀川流域についての計画モデル1は、以下のような形に定式化される。

目的関数

$$Z = \sum_{j=1}^3 (0.3180 \Delta L_{rj}^{0.7175} + 0.2088 \Delta L_{rj}^{0.7093}) \rightarrow \min. \dots\dots\dots (11)$$

制約条件

$$\sum_{j=1}^3 [a_{ij} \delta_{ij} R_j (L_j^y + L_j^0 + \Delta L_j^0 - L_{rj} - \Delta L_{rj}) / Q_j] \leq b_i \quad (i=1, 2) \dots\dots\dots (12)$$

$$0 \leq \Delta L_{rj} \leq L_{rj}^M \quad (j=1, 2, 3) \dots\dots\dots (13)$$

ここに、 $\Delta L_j^0$ ,  $\Delta L_{rj}$ : 計画年度の発生負荷増加量, 計画の新規除去負荷量,  $i=1, 2$ : それぞれ磯島, 柴島取水口,  $j=1, 2, 3$ : それぞれブロック A, B, C を表わす。ただし、計画変数  $\Delta L_{rj}$  の上限値  $L_{rj}^M$  は現在未処理人口分の負荷量と  $\Delta L_j^0$  の和を意味する。なお、合流後の流下過程における分解の効果が小さいため、保存率  $\delta_{ij}=1$  とする。

b) モデル2の適用

モデル2を淀川流域に適用する場合、式の形は次のようになる。

目的関数

$$Z = \sum_{j=1}^3 (0.3180 \Delta L_{rj}^{0.7175} + 0.2088 \Delta L_{rj}^{0.7093}) \rightarrow \min. \dots\dots\dots (11)$$

制約条件

$$P_i \left\{ \sum_{j=1}^3 [a_{ij} \delta_{ij} R_j (L_j^y + L_j^0 + \Delta L_j^0 - L_{rj} - \Delta L_{rj}) / Q_j] \leq b_i \right\}$$

$$\geq p_i \quad (i=1, 2) \dots\dots\dots (14)$$

$$0 \leq \Delta L_{rj} \leq L_{rj}^M \quad (j=1, 2, 3) \dots\dots\dots (13)$$

以上の計画問題を解くためには、流量ベクトル  $\vec{Q} = \{Q_1, Q_2, Q_3\}$  の発生確率を知ることが必要である。しかし、 $\vec{Q}$  の確率分布の関数形を求めるのは困難なことである。そこで、本研究では1979~1983年の過去5年間、木津川、宇治川、桂川の日平均流量観測データを非階層的クラスター分析によって、三川流量の組合せケースのうち性質の近いものを同じグループに納め、合計50個のクラスターに分けた。そして、各クラスターごとの平均値を代表値として、その年間発生頻度を求め、それを用いて  $\vec{Q}$  の発生確率を近似的に表わした。その結果をTable 4に示す。それらの流量グループの条件下での取水口混合率を求め、それと流量をモデル2の入力データとして使う。

(5) モデルの解法

本研究で提案した2つのモデルはともに凹的目的関数をもち、非線形計画問題に属する。モデル1の制約条件が線形的であるので、目的関数のみを線形化して近似的に線形計画問題(LP)としてとらえ、シンプレックス

Table 4 Results of River Discharge Grouping by Cluster Analysis.

Group No.	Frequency (%)	River Discharge Q (m <sup>3</sup> /s)			
		Yodo R.	Kizu R.	Uji R.	Katsura R.
1	4.44	139.12	22.84	86.21	30.07
2	6.63	155.28	16.53	110.93	27.82
3	3.01	167.24	31.33	104.73	31.18
4	1.86	135.95	20.29	78.60	37.06
5	1.81	90.51	6.33	60.67	23.51
6	6.19	140.96	19.26	97.51	24.19
7	4.27	158.10	18.95	101.10	38.05
8	0.82	123.59	10.59	65.75	47.05
9	2.46	182.58	28.62	107.75	46.21
10	3.78	179.91	26.14	120.10	33.67
11	2.52	212.16	32.38	125.04	54.74
12	1.10	201.32	54.18	111.14	36.00
13	1.97	162.81	29.78	86.07	46.96
14	5.31	182.47	18.35	134.95	29.17
15	0.71	253.58	89.35	127.89	36.34
16	1.20	162.22	16.94	92.38	52.90
17	3.56	214.42	26.14	145.08	43.20
18	3.56	254.27	43.34	169.60	41.33
19	3.23	225.36	19.45	175.74	30.17
20	2.41	214.36	41.34	137.29	35.73
21	1.15	241.60	35.12	124.98	81.50
22	1.48	186.47	41.39	96.30	48.78
23	2.90	202.98	19.64	153.11	30.23
24	1.53	252.30	59.37	146.66	46.27
25	0.77	339.09	68.16	159.67	111.26
26	2.19	308.41	62.36	191.23	54.82
27	3.45	259.73	26.00	191.22	42.51
28	4.05	309.25	38.15	224.71	46.39
29	1.20	362.26	52.35	221.85	88.06
30	1.37	240.75	53.53	121.97	65.25
31	0.66	329.80	120.30	156.82	52.68
32	0.88	443.83	118.61	198.38	126.84
33	2.35	393.82	70.04	264.56	59.22
34	0.82	454.46	146.48	224.88	53.10
35	1.53	275.60	52.44	153.24	69.92
36	1.97	387.11	36.27	299.31	51.53
37	1.48	595.91	65.51	464.38	66.02
38	1.31	827.05	112.18	582.06	132.81
39	0.88	512.04	90.43	272.82	148.79
40	0.55	527.16	233.36	213.81	79.99
41	0.27	943.97	533.60	319.57	90.80
42	0.49	652.82	65.53	358.18	229.11
43	2.96	500.71	73.56	355.57	71.58
44	0.77	676.78	177.14	384.27	115.37
45	0.60	831.25	308.76	363.58	158.91
46	0.49	1674.01	795.85	526.06	352.10
47	0.16	964.43	208.60	313.03	442.80
48	0.05	5170.31	3051.95	732.43	1385.93
49	0.66	1123.92	304.70	615.01	204.21
50	0.16	3096.54	1411.06	651.98	1033.50

法で解くのが便利である。そこで本研究では、GriffithとStewart<sup>11)</sup>によって開発された近似計画法(MAP)をモデル1の解法として採用した。これは近似制約法の一つである。その考え方としては、ある初期値のまわりで非線形の目的関数をテーラー展開し、その1次の項をとって線形化したうえでLPのシンプレックス法で解き、得られた解を次の初期値として、計算を収束するまで繰り返すのである。

一方、モデル2の制約条件は確率的に表現されており、しかもその分布の関数形がわからないので、前述の近似制約法またはいわゆる傾斜法のような微分可能性が要求される手法は適用できない。そこで、本研究では単純な発見的方法のコンプレックス法<sup>12),13)</sup>を採用することにした。この手法の特徴としては目的関数と制約条件の導関数を必要としないといわれる。

#### 4. 計算結果と考察

##### (1) モデル1の計算結果

将来の人口予測の3つのケースに対し、取水口での環境基準  $b$  を変化させて、モデル1を用いて計算を行い、その結果を Table 5 に示す。

本研究では、各ブロックの下水処理費用が同じ関数形のもので表わされているので、Table 6 に示す単位処理効果を用いて、Table 5 の結果を説明することができる。

##### a) ケース1

Table 5 Calculated Results of Model 1.

$b_1$ (mg/l)	Case	Block	$\Delta Lr_j$ (kg/d)	SSPR (%)	Z (yen/yr)		
3.0	1	A	0	0.0	$696 \times 10^6$		
		B	0	23.8			
		C	23350	87.9			
	2	A	0	0.0		$954 \times 10^6$	
		B	0	21.3			
		C	36340	93.2			
	3	A	0	0.0			$623 \times 10^6$
		B	0	23.8			
		C	20040	83.8			
2.5	1	A	0	0.0	$781 \times 10^6$		
		B	25748	100.0			
		C	356	59.2			
	2	A	0	0.0		$1208 \times 10^6$	
		B	19120	71.9			
		C	19260	74.1			
	3	A	0	0.0			$676 \times 10^6$
		B	0	23.8			
		C	22440	86.8			
2.0	1	A	7264	56.8	$1047 \times 10^6$		
		B	25748	100.0			
		C	0	58.8			
	2	A	9013	70.5		$1404 \times 10^6$	
		B	29722	100.0			
		C	4839	60.0			
	3	A	1229	18.2			$830 \times 10^6$
		B	25748	100.0			
		C	0	58.8			

Table 6 Effect to Water Quality Improvement by Removing Unit Pollutant Load.

Intake	Block A	Block B	Block C
Isojima	0.3733	0.3487	0.1429
Kunijima	0.2057	0.3354	0.3745

ケース1では磯島と柴島取水口の環境基準  $b_1, b_2$  をともに  $3 \text{ mg/l}$  に設定するとき、ブロックCだけで下水処理をさらに進め、ほかのブロックを現状のままにするのが有利という結果となっている。本来、 $b_1$  を達成するためには、ブロックAでの負荷量除去が最も効果的であるが、磯島よりも、柴島の水質と環境基準との乖離が大きいので、ブロックAだけで下水処理をしても、柴島の水質は依然として基準値を超過しており、ブロックCまたはBでさらに負荷量を削減しなければならない。その結果としてかえってトータルの処理費用が高くなるので、望ましい解にはならない。逆にいえば、柴島の水質に対して単位処理効果の高いブロックCにおいて下水処理を行えば、柴島の水質が基準値に近づいていくとともに、磯島の水質も基準値を達成する。この場合の結果として、費用が最も安い解を得る。

他方、下流の柴島地点の環境基準  $b_2$  を  $3 \text{ mg/l}$  に固定し、水質の比較的良好な上流の磯島地点の基準値  $b_1$  を  $2.5 \text{ mg/l}$  に下げると、ブロックCの負荷量削減だけでは磯島の基準を満たさなくなる。この場合の折衷案として、まずブロックBで最大限の努力を払って負荷量の削減を行い、その時点でまだ満足しない柴島の水質の改善のために、ブロックCで補足的な下水処理を行うという実態の解に応じて、費用最小の解を解釈することができる。

$b_1$  をさらに引き下げ、 $2.0 \text{ mg/l}$  まで厳しく規制すると、ブロックBにおける下水処理が100%まで普及しても、磯島と柴島地点の水質はいずれも基準を達成しないが、柴島よりも、磯島の制約状況が厳しいので、ブロックAの下水処理を優先させるべきとなる。結局、今まで下水処理が導入されていないブロックAで処理人口比率を57%まで普及するという結果になる。

##### b) ケース2

ケース2の場合には、発生負荷量がケース1より大きいので、新規除去負荷量も多くなる。Table 5 に示すように、 $b_1 = b_2 = 3 \text{ mg/l}$  のときの計算結果がケース1のそれに似ており、また  $b_1 = 2.5 \text{ mg/l}$  のときはケース1と違ってブロックBでの下水処理のみを優先するのではなく、ブロックBとCの処理を同時に推進すべきである。 $b_1 = 2.0 \text{ mg/l}$  となると、ブロックAとBの普及率を100%にすれば、磯島の水質は満足するが、柴島の水質はまだ  $3 \text{ mg/l}$  の基準値を上回っている。したがって、ブロックCでも下水処理のレベルを高める必要がある。そこでの負荷量削減が磯島の水質改善にある程度の効果を与えるため、ブロックAにかかっている下水処理の圧力が緩和され、ブロックAの普及率は71%にとどまっている。

##### c) ケース3

ケース3の場合には、ブロックAの発生負荷量が小さいため、 $b_1=3\text{ mg/l}$ のとき、各ブロックに新規下水処理を導入しなくても、磯島の水質が基準値を超えない。このとき、柴島の水質基準を達成するために、ブロックCにおいて下水処理を推進することが効果的である。 $b_1=2.5\text{ mg/l}$ に設定すると、磯島の水質も基準の制約条件に抵触してくるが、ブロックCの削減効果に隠れてしまう領域に入っている。 $b_1=2.0\text{ mg/l}$ になると、ケース1の場合と同じように磯島での基準達成が柴島より難しくなっており、計算結果としてはブロックB、Aの順に下水処理の優先順位を示している。

Table 7 Calculated Results of Model 2.

$p_1$ (%)	Case	Block	$\Delta L_{rj}$ (kg/d)	Z (yen/yr)	Q-groups Corresponding to Water Quality Violations Isojima Int. Kuniijima Int.
75	1	A	0	$684 \times 10^6$	1. 4. 5. 6. 8. 16.
		B	0		
		C	22805		
	2	A	0	$944 \times 10^6$	1. 4. 5. 6. 8. 16.
		B	0		
		C	35807		
3	A	0	$612 \times 10^6$	4. 5. 8.	
	B	0			
	C	19528			
85	1	A	0	$740 \times 10^6$	5. 8.
		B	25463		
		C	0		
	2	A	0	$1123 \times 10^6$	1. 4. 5. 8.
		B	7598		
		C	28980		
3	A	0	$612 \times 10^6$	4. 5. 8.	
	B	0			
	C	19528			
95	1	A	0	$740 \times 10^6$	5. 8.
		B	25463		
		C	0		
	2	A	0	$1155 \times 10^6$	4. 5. 8.
		B	10939		
		C	25984		
3	A	0	$612 \times 10^6$	4. 5. 8.	
	B	0			
	C	19528			
98	1	A	0	$1146 \times 10^6$	5.
		B	10854		
		C	25686		
	2	A	0	$1573 \times 10^6$	5. 8.
		B	29640		
		C	25931		
3	A	4750	$968 \times 10^6$	5.	
	B	25748			
	C	0			
100	1	A	12780	$1857 \times 10^6$	5.
		B	25748		
		C	21715		
	2	A	4447	$2102 \times 10^6$	
		B	29722		
		C	42376		
3	A	0	$1593 \times 10^6$	5.	
	B	25748			
	C	30820			

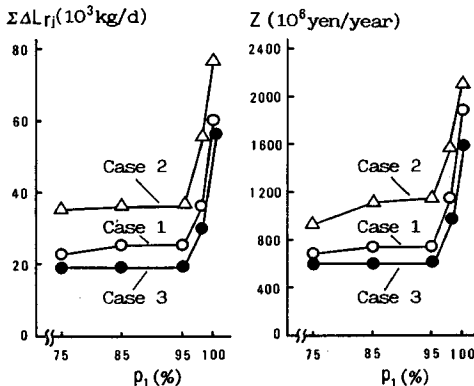


Fig. 2 Calculated Results of Model 2.

(2) モデル2の計算結果

モデル2の適用結果をTable 7, Fig.2に示す。この場合、 $b_1$ と $b_2$ を $3\text{ mg/l}$ に固定し、また柴島地点の基準達成の判定指標 $p_2$ を75%と一定として、磯島地点の $p_1$ を75%から100%まで変化させて計算を行った。

a) 全体的な傾向

計算結果は、 $p_1$ を厳しくするにつれて、新規下水処理の要求される地域が桂川のブロックCから宇治川のブロックBへ、さらに木津川のブロックAへ移り変わることを示している。これはモデル1の場合と同じ傾向である。

b) 除去負荷量と費用

新規除去負荷量と処理費用の値をみると、3つのケースにおいても $p_1=p_2=75\%$ の場合のモデル2の解と $b_1=b_2=3\text{ mg/l}$ の場合のモデル1の解はよく一致している。このことは、その判定指標と環境基準の論理的基礎をみれば、当然である。また、モデル1の $b_1=2.5\text{ mg/l}$ 、 $b_1=2.0\text{ mg/l}$ の場合の計算結果はモデル2の $p_1=90\sim 95\%$ 、 $p_1=95\sim 98\%$ の場合の計算結果とそれぞれおおむね対応している様子が理解できた。

除去負荷量と処理費用は $p_1$ の引き上げによって増加するが、その増加率がFig.2に示すように $p_1=95\%$ を転換点として大きく分かれていることが明らかになった。すなわち、 $p_1$ の値が75%から95%まで増加しても、除去負荷量と費用の増加がそれほど大きくないのに対して、 $p_1$ の値が95%を超過すると、除去負荷量と費用が急激に増えてくる。したがって、より良好な水道水源を求めるために、 $p_1$ を現在の75%から90%程度まで引き上げ、あるいは環境基準 $b_1$ を現在の $3\text{ mg/l}$ から $2.5\text{ mg/l}$ に設定しなおすことはそれだけの負荷量削減すなわち費用を必要とするといえる。ただし、モデル2の計算結果はクラスター分析の仕方にある程度依存するので、より正確な結果が必要のとき、その影響の大きさに対する調べを行うことが望ましい。

c) 水質不満足流量条件

各種の $p$ の値に対して水質基準を満たさない場合の流量グループ(以下、水質不満足流量)を調べ、その番

Table 8 Discharges Corresponding to Water Quality Standard Violations.

Group No.	Frequency (%)	Q (m³/s)	Ratio of Discharge (%)		
			Kizu R.	Uji R.	Kat. R.
1	4.44	139	16.4	62.0	21.6
2	6.63	155	10.6	71.4	18.0
4	1.86	136	14.9	57.8	27.3
5	1.81	91	7.0	67.0	26.0
6	6.19	141	13.6	69.2	17.2
8	0.82	123	8.6	53.3	38.1
16	1.20	162	10.5	56.9	32.6
Low Water		157	12.7	66.3	21.0
Drought Water		113	11.5	73.7	14.8

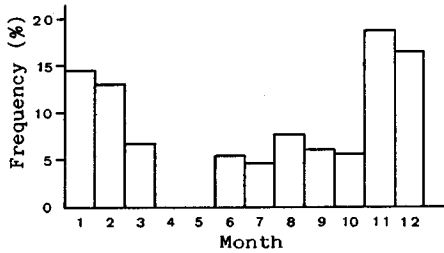


Fig. 3 Distribution of Discharges Corresponding to Water Quality Standard Violations.

号を Table 7 に示しているが、それに対応する流量値、各支川の流量比およびその発生頻度を Table 8 に示す。これによると、 $p_1 = p_2 = 75\%$  のケース 1 の場合、ともに低水流量にきわめて近い流量グループ No. 2, No. 16 がそれぞれ柴島、磯島地点で超過水質を引き起こしている。この現象は横拡散の効果を語っている。No. 2 の場合には、宇治川の流量が大きいと、汚濁度の高い桂川の水質が左岸まで拡散しにくく、磯島取水口付近の水質に与える影響が小さい。これに比べて、No. 16 の宇治川の流量が低くなる一方、桂川の流量が増え、その悪い水質が拡散によって磯島取水口に及んでいる。したがって、横拡散の特徴を利用して、No. 16 のような流量ケースが発生するとき、桂川流域の下水処理場で一時的な特別措置を取ることに、磯島の水質をコントロールすることも検討に値する。

#### d) 水質不満足流量の発生頻度分布

水質不満足流量の発生頻度の年間分布を調べてみると、Fig. 3 に示すように冬期にあたる 11, 12, 1, 2 月に集中的に発生し、それぞれ全体の 15% 前後の発生頻度をもつことがわかった。すなわち、75% の非超過確率を用いて環境基準の達成を判定するとき、残る 25% の不満足水質の発生日の 60% 以上が冬期に現われており、春期における発生頻度が非常に低く、またそのほかの時期の発生頻度は月数パーセントとなっている。したがって、以上のような水質不満足流量日の分布の特徴を利用して水質管理を行うことが考えられる。たとえば、冬期に限って初期施設建設費用の安い高度処理を導入して、処理場放流水質濃度を低減することによって冬期の河川水質の改善をはかるのが一法である。もしこれによって冬期の取水口水質がすべて環境基準を達成すれば、年間の達成度が 75% から 90% までに上がることが期待できる。また、1 年間を通じて高度処理を行う場合に比べてより費用効果が高いと思われる。

## 5. 結 論

本研究では、二次元の水質拡散および流量の確率的性質を考慮した河川水質管理計画モデル 1 とモデル 2 を作

成したうえで、淀川流域の水道水源保全問題に適用し、将来の 3 つの発生負荷量ケースについて、各合流支川流域の下水処理規模およびその整備順序の優先度について有利な解を求めてみた。得られた結果をまとめて述べると、次のとおりである。

(1) 河川水質の二次元拡散現象を混合率の導入によって計画モデルの中に取り込むことができた。

(2) モデル適用の結果の全体的な傾向をいえば、磯島地点の水質基準を厳しくすると、下水処理地域の優先順位が桂川流域から宇治川流域へ、さらに木津川流域へ移り変わる傾向がみられる。これは磯島ではまだ横方向の混合が十分きいていないことと、桂川の現在の負荷が大きくなるものと考えられる。横拡散の効果を含んでいないこれまでのモデルは、このような性質を明らかにすることができない。

(3) 下水道整備の優先順位の地域間変化を単位処理効果を用いて説明することができる。

(4) モデル適用例の条件のもとで得られた計算結果によれば、磯島の環境基準値を 3 mg/l から 2.5 mg/l に、あるいは基準達成の判定指標を 75% から 90% に高めることは、下水処理費用の顕著な増加を招かないと推定される。しかし、これ以上厳しく規制すれば、処理費用の急激な増加を必要とする。

(5) 取水口の水質基準を満たさない流量ケースが冬期に集中して発生することがわかった。この現象は経験上の知見とも一致しており、これに対して、冬期の下水処理を特別に高度化し、不満足水質の年間発生頻度を低減するのが費用効果上で優れている。

最後に、本研究の遂行にあたり、貴重な指導、助言を賜った大阪大学工学部 末石富太郎教授に感謝の意を表す。

## 参 考 文 献

- 1) 末石富太郎：水質汚濁防止と下水処理計画の最適化に関する研究，第 2 回衛生工学研究討論会講演論文集，pp. 86~98, 1965.
- 2) 末石富太郎・南本禎亮：流域都市の汚濁負荷配分について，第 4 回衛生工学研究討論会講演論文集，pp. 60~67, 1967.
- 3) 吉川和広・岡田憲夫：非線形計画モデルによる 1 水系流域における広域的・多角的配分問題に関する一分析，土木学会論文報告集，No. 247, pp. 83~95, 1976.
- 4) 田中 寛・盛岡 通・末石富太郎：流域水環境管理のための多目的計画手法の適用，第 8 回環境問題シンポジウム講演論文集，pp. 1~6, 1980.
- 5) 李 適宇・八木俊策・末石富太郎：淀川の水質拡散およびその水道水源に対する影響，第 31 回水理講演会論文集，pp. 311~316, 1987.
- 6) Lohani, B. N. and Thanh, N. C. : Stochastic programming model for water quality management in a river, J.



- Water Pollut. Control Fed., Vol. 50, pp. 2175~2182, 1978.
- 7) Lohani, B.N. and Thanh, N.C. : Probabilistic water quality control policies, J. Environ. Eng. Div., Proc. ASCE, Vol. 104, No. EE 4, pp. 713~725, 1979.
  - 8) Fujiwara, O. et al. : River quality management under stochastic streamflow, J. Environ. Eng., ASCE, Vol. 112, No. 2, pp. 185~198, 1986.
  - 9) 建設省：流域別下水道整備総合計画調査指針と解説，日本下水道協会，pp. 67~75, 1977.
  - 10) 国土庁大都市圏整備局・近畿開発促進協議会：昭和 58 年度新しい近畿の創生計画策定調査概要，pp. 49~52, 1984.
  - 11) Griffith, R. E. and Stewart, R. A. : Nonlinear programming technique for the optimization of continuous processing systems, Management Science, Vol. 7, pp. 379~392, 1961.
  - 12) Box, M. J. : A new method of constrained optimization and a comparison with other methods, Computer Journal, Vol. 8, pp. 42~52, 1965.
  - 13) Guin, J. A. : Modification of the complex method of constrained optimization, Computer Journal, Vol. 10, pp. 416~418, 1968.

(1988. 4. 18・受付)

---