

多目標水資源配分過程に関する研究

㈱日本水道コンサルタント 正員 萩 原 良 巳

同 上 正員 中 川 芳 一

同 上 正員 辻 本 善 博

1. は じ め に

従来の水資源の地域配分は主として経済的評価のもとに行なわれてきた。この結果、下水道のような水環境汚染防止施設が十分にある地域にも、そうでない地域にも、需要がありさえすれば配分していたが、このために公共水域の環境悪化が顕在化してきた。

このような状況に対処するには、需要に応じて水資源の開発・配分を行なうといった図式ではなく、流域の水文、生態、社会、経済および文化などの特性に応じ、利水安全度を十分に考慮した水資源の開発ならびに開発された水資源量の公共水域の環境に与える影響をも考慮した適正配分をはかる利水システムの確立が必要とされる。

本稿では、経済効果による評価と同時に、水環境への影響評価すなわち公共水域への汚濁インパクト評価も加えた多目的評価のもとで、上流貯水池群での水資源開発量を、いつ、どの地域に、どれだけ配分するのが合目的かという適正水資源配分過程問題について考察する。

このため、まず2.では、河川上の基準点（水質環境基準点ならびに代表取水点）の流量および流下（BOD）負荷量を各需要ブロックへの水資源配分量の関数として表わす連続式をもとに、これらの状態量の年次変化を示す状態方程式を作成する。そして、各需要ブロックへの水資源配分量の年増加量を操作変数とし、この操作変数の制約条件について考察するとともに、上述の多目的評価を記述する評価関数を設定する。こうして、水資源配分モデルが制御プロセスとして定式化しうることを明らかにする。ついで3.では、この最適制御問題の解法を最大原理（M.P.）として定式化し、この解法が線形目標計画法の繰り返し計算に帰着できることを示す。最後に3.では、上流に貯水池群をもつ実流域にこのモデルを適用し、各需要ブロックの水資源配分量の年次的変化過程を求めることによりモデルの有効性を検証することとする。

2. 制御プロセスとしてのモデルの定式化

2-1. システム方程式；図-1に示すように本川にいくつかの支川が流入しており、本川上流部のダム群により水資源の開発が行なわれている流域を考察の対象とする。そして、各支流域が1つ（または2つ）の需要ブロックになっており、本川上のいくつかの取水地点において上流ダム群で開発された水資源の取水を行なっているものとする。また、流域内には何ヶ所か下水処理場があり、1つの処理場には1ブロック以上の下水が取り入れられているとする。なお、以下においては、各需要ブロックの水源は表流水取水のみと考え、発生汚水量は近似的に水資源配分量に等しいものと考えることとする。

図-1の需要ブロック*i*に注目すると、このブロックに対応する支川の流量は、そのブロックの発生汚水量のうち下水処理されずに還元する水量および支川の固有流量よりなり、次式で表わされると考える。なお市街地区域外からの還元水量（農水など）は固有流量に含めることとする。

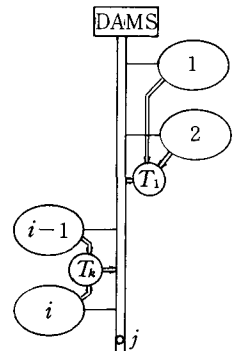
$$q_i(t) = q_i^n(t) + q_i^u \quad (1)$$

ここに、 $q_i(t)$ ；需要ブロック*i*に対応する支川の流量、 $q_i^n(t)$ ；需要ブロック*i*からの還元水量、 q_i^u ；需要ブロック*i*に対応する支川の固有流量 であり、 q_i^n は次式で表わされる。

$$q_i^n = \lambda_i (1 - u_i^a(t)) \cdot X_i(t) \quad (2)$$

ただし、 λ_i ；需要ブロック*i*の（市街地）流出率、 $u_i^a(t)$ ；需要ブロック*i*の下水道整備率、

図-1 流域システム



$X_i(t)$; 需要ブロック i の水資源配分量 である。

また、需要ブロック i に対応する支川から本川へ流出する負荷量は、そのブロックの下水道未整備区域の自然的流達負荷量と、市街地域外からの流達負荷量を含んだ支川の自然的流達負荷量よりなり次式となる。

$$\ell_i(t) = \ell_i^n(t) + g_i(t) \quad (3)$$

ここに、 $\ell_i(t)$; 需要ブロック i に対応する支川の流出負荷量、 $\ell_i^n(t)$; 需要ブロック i の自然的流達負荷量、 $g_i(t)$; 需要ブロック i に対応する支川の自然的流達負荷量 であり、 $\ell_i^n(t)$ は次式で表わされる。

$$\ell_i^n(t) = (1 - u_i^n(t)) \cdot w_i(t) \cdot (1 - u_i^a(t)) \cdot X_i(t) \quad (4)$$

ただし、 $1 - u_i^n(t)$; 需要ブロック i の (市街地) 流達率、 $w_i(t)$; 需要ブロック i の負荷強度 である。

つぎに、処理場 k の放流量と放流負荷量は、それぞれ次式で表わされる。

$$q_k^p = \sum_{i \in F_k} u_i^a(t) \cdot X_i(t) \quad (5)$$

$$\ell_k^p = e_k(t) \cdot \sum_{i \in F_k} u_i^a(t) \cdot X_i(t) \quad (6)$$

ここに、 $q_k^p(t)$; 処理場 k からの放流量、 $\ell_k^p(t)$; 処理場 k からの放流負荷量、 $e_k(t)$; 処理場 k の放流水質であり、 F_k は処理場 k に下水が取り入れられるブロックの集合とする。

また、取水点 j よりの取水量は、農水取水量を B_j として次式のように表わす。

$$q_j^d(t) = \sum_{i \in G_j} X_i(t) + B_j \quad (7)$$

ここに、 $q_j^d(t)$; 取水点 j での取水量 であり、この農水は前述したように支川の固有流量 q_i^u の一部として本川に還元しているものと考えている。なお、 G_j は取水点 j より取水しているブロックの集合とする。

本川上の環境基準点、取水点を総称して基準点と呼ぶことにする。基準点 m での流量および流下負荷量は基準点 m の上流最近接基準点 ($m-1$) での流量、流下負荷量、取水量および ($m-1$) 点と m 点の間に流入(放流)する支川、処理場の流出(放流)流量、負荷量により、次式のように表わされる。

$$Q_m(t) = \gamma_{m-1, m} \cdot (Q_{m-1}(t) - q_{m-1}^d(t)) + \sum_{i \in I_{m-1, m}} q_i(t) \cdot \gamma_{i, m} + \sum_{k \in K_{m-1, m}} q_k^p(t) \cdot \gamma_{k, m} \quad (8)$$

$$L_m(t) = L_{m-1}(t) \cdot \{1 - (q_{m-1}^d(t)/Q_{m-1}(t))\} \cdot \delta_{m-1, m} + \sum_{i \in I_{m-1, m}} \ell_i(t) \cdot \delta_{i, m} + \sum_{k \in K_{m-1, m}} \ell_k^p(t) \cdot \delta_{k, m} \quad (9)$$

ここに、 $Q_m(t)$; 基準点 m の流量、 $L_m(t)$; 基準点 m の流下負荷量、 $\gamma_{m, n}$; 地点 m と地点 n 間の流量到達率、 $\delta_{m, n}$; 地点 m と地点 n 間の負荷量到達率 であり、 $I_{m-1, m}$ 、 $K_{m-1, m}$ は、それぞれ基準点 ($m-1$) と m の間に流入している支川の集合、基準点 ($m-1$) と m の間に放流している処理場の集合を示す。なお、基準点 m が取水点である場合には、流量 $Q_m(t)$ 、流下負荷量 $L_m(t)$ としては取水前の流量、流下負荷量を用いることとし、基準点 m が環境基準点である場合には、その地点の取水量 $q_m^d(t)$ は 0 とする。また $Q_0(t)$ は上流ダム群の水資源量を、 $L_0(t)$ は上流ダム群からの自然的流達負荷量を表わすものとする。

本川上の各基準点での流量 $Q_m(t)$ 、流下負荷量 $L_m(t)$ を各需要ブロックへの水資源配分量 $X_i(t)$ の関数として表わす連続式は、(8)(9)式に(1)~(6)式を代入することにより、次式となる。

$$Q_m(t) = Q_0(t) + \sum_{i \in I_m} \{q_i^u + a_i^a(t) \cdot X_i(t)\} + \sum_{k \in K_m} \{ \sum_{i \in F_k} u_i^a(t) \cdot X_i(t) \} - \sum_{j \in J_m} \{ \sum_{i \in G_j} X_i(t) + B_j \} \quad (10)$$

$$L_m(t) = L_0(t) \cdot \delta_{0, m} + \sum_{i \in I_m} \{g_i(t) + a_i^l(t) \cdot X_i(t)\} \cdot \delta_{i, m} + \sum_{k \in K_m} \{e_k(t) \cdot \sum_{i \in F_k} u_i^a(t) \cdot X_i(t)\} \cdot \delta_{k, m} \quad (11)$$

ここに、

$$a_i^q(t) = \lambda_i \cdot (1 - u_i^a(t)) \quad (12)$$

$$a_i^l(t) = (1 - u_i^n(t)) \cdot w_i(t) \cdot (1 - u_i^a(t)) \quad (13)$$

I_m ; m 基準点よりも上流で流入する支川 i の集合、 K_m ; m 基準点よりも上流に放流する処理場 k の集合、 J_m ; m 基準点よりも上流に位置する取水点 j の集合 である。ただし、(10)式においては、地点 m と地点 n 間の流量到達率 $\gamma_{m, n}$ は 1.0 とし、(11)式においては取水による流下負荷量の減少は無視している。

基準点 m ($m=1, 2, \dots, M$) での流量および流下負荷量の年次変化を状態方程式として定義する。

$$dQ_m(t)/dt = dQ_0(t)/dt + \sum_{i \in I_m} \{dq_i^u/dt + da_i^q(t)/dt \cdot X_i(t) + a_i^q \cdot dX_i(t)/dt\} + \sum_{k \in K_m} \sum_{i \in F_k} \{d u_i^a(t)/dt \cdot X_i(t) + u_i^a(t) \cdot dX_i(t)/dt\} - \sum_{j \in J_m} \{ \sum_{i \in G_j} dX_i(t)/dt + dB_j/dt \} \quad (14)$$

$$dL_m(t)/dt = dL_0(t)/dt \cdot \delta_{0, m} + \sum_{i \in I_m} \{dg_i(t)/dt + da_i^l(t)/dt \cdot X_i(t) + a_i^l(t) \cdot dX_i(t)/dt\} \cdot \delta_{i, m} + \sum_{k \in K_m} \{e_k(t) \cdot \sum_{i \in F_k} d u_i^a(t)/dt \cdot X_i(t) + u_i^a(t) \cdot dX_i(t)/dt\} \cdot \delta_{k, m} + \sum_{k \in K_m} de_k(t)/dt \cdot \sum_{i \in F_k} u_i^a(t) \cdot X_i(t) \cdot \delta_{k, m} \quad (15)$$

2-2. 操作変数、制約条件、評価関数；本稿の目的は、前述したように、社会・経済効果と環境保全効果を同時に評価とした多目的評価のもとで、いつ、どの需要ブロックに、どれだけの水資源の配分を行なうのが合目的かという適正水資源配分過程を求めることである。そこで、各需要ブロックへの水資源配分量 $X_i(t)$ の年次変化 $dX_i(t)/dt$ を操作変数とする。すなわち、操作変数を θ_i とすると次式と表わされる。

$$\theta_i = dX_i(t)/dt \quad (i=1,2,\dots,N) \quad (16)$$

ところで、状態方程式(14)(15)式には操作変数の積分形が入っている。それで新たな状態変数

$$v_i = X_i(t) \quad (i=1,2,\dots,N) \quad (17)$$

を導入する。こうして、状態変数の初期値 $Q_m(0)$, $L_m(0)$ ($m=1,2,\dots,M$), $v_i(0)=X_i(0)$ ($i=1,2,\dots,N$) は、河川の流量、水質調査と水使用実態調査より求められる。

つぎに、制約条件としては、つぎの2種を考える。すなわち、各年度 t ごとに、非負の $\theta_i(t)$ ($i=1,2,\dots,N$) に対して、

$$\textcircled{1} \quad \sum_i \theta_i(t) \leq W(t), \quad W(t) = Q_0(t) - \sum_i X_i(t-1) \quad (18)$$

$$\textcircled{2} \quad \theta_i(t) \leq \mu_i(t), \quad \mu_i(t) = X_i^{\max}(t) - X_i(t-1) \quad (19)$$

とする。(18)式は、 t 年度における流域全体の水資源配分量の増分が、その年度での新規水資源開発量より小であることを示しており、(19)式は各需要ブロックへの水資源配分量が、そのブロックでの需要量の上限を越えないことを示している。

また、評価として、利水の目的である流域での社会・経済活動の増進と、河川環境の保全の2種類を考える。そして、水資源の配分量の増大による社会・経済活動の増進を表わす指標（用水配分効果）としては、生活用水に関しては受水人口の増分を、工業用水に関しては工業出荷額の増分を考え、これらの用水配分効果の最大化を目指す。すなわち、以下の2式である。

$$J_1 = \sum_i \beta_i^1 \cdot \theta_i / \omega_i^1 \longrightarrow \max \quad (20)$$

$$J_2 = \sum_i \beta_i^2 \cdot \theta_i / \omega_i^2 \longrightarrow \max \quad (21)$$

ここに、 β_i^j ($j=1,2$), ω_i^1 , ω_i^2 はそれぞれ都市用水構成比率、生活用水原単位、工業用水原単位である。また、河川環境を表わす指標としては、各基準点の流下負荷量を採用し、その最小化を目指す。

$$J_{2+m} = L_m(t) \longrightarrow \min \quad (m=1,2,\dots,M) \quad (22)$$

この社会・経済活動の増進と河川環境の保全の2種類の目的は、ある水使用構造、水環境汚染防止施設整備状況のもとでは、互いにトレードオフの関係にある。このため、これらの目的を同時に満足させるような操作変数 θ_i は存在しない。そこで、これらの複数個の目的の達成度にある均衡を保ちながら増大させることを考え、各目的の望ましい達成方向を示す目標ベクトルを導入し、このベクトル上で各目的の不達成度を示す関数として不効用関数を次式で定義する。¹⁾

$$V(\mathbf{L}(t), \boldsymbol{\theta}(t)) = \max \left\{ \frac{|J_1^s - J_1|}{|J_1^s - J_1^p|}, \frac{|J_2^s - J_2|}{|J_2^s - J_2^p|}, \frac{|J_{2+1}^s - J_{2+1}|}{|J_{2+1}^s - J_{2+1}^p|}, \dots, \frac{|J_{2+M}^s - J_{2+M}|}{|J_{2+M}^s - J_{2+M}^p|} \right\} \quad (23)$$

ここに、 J_i^p , J_i^s はそれぞれ、各評価値の許容水準、満足水準である。

ここで、(20)(21)(22)式で表わされる各評価は、各年度毎の水資源配分量の増加量 $\boldsymbol{\theta}(t) = (\theta_1(t), \dots, \theta_N(t))$ およびその結果として得られる状態量 $\mathbf{L}(t) = (L_1(t), \dots, L_M(t))$ に対する評価であり、そのため、(23)式の不効用関数も各年度毎に得られる。そこで、ここで問題とする水資源配分過程の評価関数として、不効用関数の計画対象期間での積分値を採用し、その最小化を目指すこととする。

$$S = \int_0^T V(\mathbf{L}(t), \boldsymbol{\theta}(t)) dt \longrightarrow \min \quad (24)$$

以上のことから、経年的な水資源配分モデルが、(14)(15)(17)式を状態方程式とし、(24)式の評価関数のもとで、(16)式で表わされる $\theta_i(t)$ ($i=1,\dots,N$) を操作変数とする制御プロセスとして定式化できた。

3. 最大原理による解法

ここでは、2.で定式化した経年的水資源配分モデルをポントリャーギンの最大原理²⁾により定式化し、その解法について述べる。このモデルの状態変数ベクトル $\mathbf{x}(t)$ 、操作変数ベクトル $\boldsymbol{\theta}(t)$ は以下となる。

$$\mathbf{x}(t) = (Q_1, \dots, Q_M, L_1, \dots, L_M, v_1, \dots, v_N, v_{N+1}), \quad \boldsymbol{\theta}(t) = (\theta_1, \dots, \theta_N) \quad (25)$$

ここで v_{N+1} は(24)式で示したような評価関数の t までの積分量であり、次式で表わされるものである。

$$v_{N+1}(t) = \int_0^t V(\mathbf{L}(t), \boldsymbol{\theta}(t)) dt \quad (26)$$

また、支川の固有流量 q_i^u 、流出率 λ_i 、下水道整備率 $u_i^a(t)$ 、上流ダム群および支川の自然的流達負荷量 $L^0(t)$ 、 $g_i(t)$ 、流達率 $(1 - u_i^n(t))$ 、負荷強度 $w_i(t)$ 、処理場放流水質 $e_k(t)$ および農水取水量 B_i を定数もしくは区分的に定数と仮定すると、状態方程式系は、(14)(15)(17)(26)式より、つぎのようになる。

$$dQ_m(t)/dt = \sum_i \alpha_{mi}(t) \cdot \theta_i(t) + dQ_0(t)/dt \quad (m=1, 2, \dots, M) \quad (27)$$

$$dL_m(t)/dt = \sum_i \beta_{mi}(t) \cdot \theta_i(t) \quad (m=1, 2, \dots, M) \quad (28)$$

$$dv_i(t)/dt = \theta_i(t) \quad (i=1, 2, \dots, N) \quad (29)$$

$$dv_{N+1}(t)/dt = V(\mathbf{L}(t), \boldsymbol{\theta}(t)) \quad (30)$$

ただし、(27)(28)式中の $\alpha_{mi}(t)$ 、 $\beta_{mi}(t)$ は、それぞれ(14)、(15)式を i に関して展開したときの θ_i の係数である。

つぎに、補助変数ベクトル $\mathbf{z} = (z_1, \dots, z_M, z_{M+1}, \dots, z_{2M}, z_{2M+1}, \dots, z_{2M+N}, z_{2M+N+1})$ およびハミルトン関数 $H(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \boldsymbol{\theta})$ を導入して、随伴方程式系およびハミルトン関数を整理すると以下のようになる。

$$z_m(t) \equiv 0 \quad (m=1, 2, \dots, M)$$

$$dz_{M+m}(t)/dt = -\partial V(\mathbf{L}(t), \boldsymbol{\theta}(t))/\partial L_m, \quad z_{M+m}(T) = 0 \quad (m=1, 2, \dots, M)$$

$$z_{2M+i}(t) \equiv 0 \quad (i=1, 2, \dots, N), \quad z_{2M+N+1}(t) \equiv 1 \quad (31)$$

$$H(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \boldsymbol{\theta}) = \sum_{i=1}^N h_i(t) \cdot \theta_i(t) + V(\mathbf{L}(t), \boldsymbol{\theta}(t)) \quad (32)$$

ただし、ハミルトン関数(32)式中の $h_i(t)$ は以下のように書ける。

$$h_i(t) = \sum_{m=1}^M z_{M+m}(t) \cdot \beta_{mi}(t) \quad (33)$$

こうして、2.で定式化した経年的水資源配分モデルの最大原理による解法は、図-2に示したようになる。

ここで、ハミルトン関数 H を最小とする操作ベクトル $\boldsymbol{\theta}(t)$ を求めるとき、目的関数 H (32式)は、互いにトレードオフの関係にある複数目的の不達成度を示す不効用関数 V (23式参照) を含んでいる。そこでこの問題を目標計画法 (G・P)¹⁾ により解くこととする。

以上のようにして、ハミルトン関数 H をすべての $t (0 \leq t \leq T)$ に対して最小とする操作ベクトル $\boldsymbol{\theta}(t)$ を求める問題は、結局、線形目標計画法を、 M 個の未知パラメータ $(z_{M+1}(0), \dots, z_{2M}(0))$ に対して T 回解く繰り返し計算に帰着する。

4. 水資源配分モデルの実流域への適用

4-1. 流域システムおよび演算入力データ；ここでは図-3に示すように、本川に13の支川が流入し、各支流域に1ないし2の需要ブロックが対応し、都合15の需要ブロックよりなる流域を対象とする。本川上には基準点が6ヶ所存在し、そのうち3ヶ所は取水点(図-3の $m=1, 2, 5$)、残りの3ヶ所は環境基準点(図-3の $m=3, 4, 6$)である。また流域内には処理場が6ヶ所設置されており(図-3の $T_1 \sim T_6$)、各処理場には複数個の地区からの汚水が流入している。

この流域に、2.で述べた経年的水資源配分モデルを適用し、3.で示した最大原理による解法を用いて、適正水配分過程を求めることとする。

本流域の場合、図-2に示した解法を用いることとすると、基準

図-2 最大原理によるモデルの解法

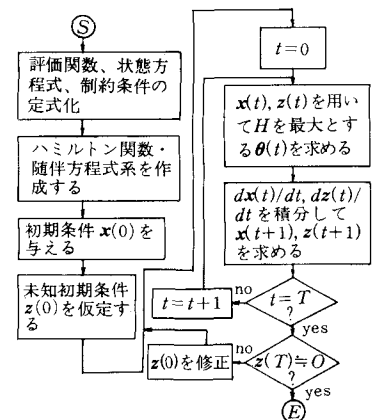
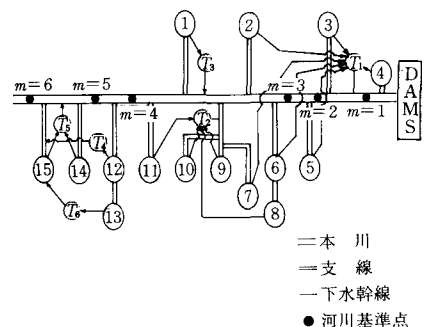


図-3 モデル化のための研究対象流域システム



点の数が $M=6$ であるから、6 個の補助変数の初期値を仮定し、 $t=T$ でこのすべての補助変数が 0 となることが必要となる。しかし、このような問題を厳密に解くことはほとんど不可能に近い。

そこで、河川環境の保全を示す評価は、流域全体での発生負荷量を集約して、最も大きな流下負荷量が予測される最下流の基準点 ($m=6$) でのみ考えることとする。こうすると未知初期条件の補助変数は z_{12} のみとなり、このとき、ハミルトン関数(32)式は以下の式のように書ける。

$$H = \sum_{i=1}^{15} z_{12} \cdot \beta_{6i} \cdot \theta_i(t) + V(L_6(t), \theta(t)) \quad (33)$$

また、制約条件としては、(18)、(19)式の計16個を使用することとする。なお、計画対象期間は20年、すなわち、 $T=20$ とする。以下に、演算のための入力データのうち主要なものを整理して示す。

上流ダム群での水資源開発量 $Q_0(t)$ を表-1に示す。このように水資源開発量 $Q_0(t)$ は、開発施設の整備により段階的に増大していくものとしている。また、ここで設定した各需要ブロックの都市用水需要量の上限 $X_i^{\max}(t)$ を表-2に示す。これらは、原単位方式による各需要ブロックでの都市用水需要量の予測値を2.0~2.5倍したものである。

つぎに、下水道整備率の年次的増加を示すパターンとして、表-3に示す3つのパターンを考え、各需要ブロックの性格特性により、そのブロックの下水道整備パターンを設定した。すなわち、図-3の15の需要ブロックを対象として主成分分析法を適用することにより、流域内各ブロックの性格特性を求めることとした。この結果、人間活動の強さを示す主成分が第1主成分として抽出され、この主成分により15の需要ブロックはつぎの3グループに分類できた。³⁾

グループ1 (人間活動が活発なグループ) $i=3, 10, 14, 15$

グループ2 (人間活動がやや活発なグループ) $i=2, 5, 6, 7, 8, 9, 11$

グループ3 (人間活動が低調なグループ) $i=1, 4, 12, 13$

そこで、人間活動の活発なブロックほど下水道整備が急激になされるとして、グループ1, 2, 3の各需要ブロックに、それぞれパターンI, II, IIIの整備パターンを対応させた。

処理場放流水質 $e_k(t)$ は表-4に示したように、普通生物処理と言われる20ppmから、高度処理による5ppmまで、段階的に下

がるものとした。流出率 λ_i および流量致達率 $\gamma_{m,n}$ は1とし、流達率 $1-u_i^n(t)$ は0.8、また負荷量致達率 $\delta_{m,n}$ は、地点 m, n 間の流下時間 $\tau_{m,n}$ と自浄係数 $K=4.8 \times 10^{-6}$ をもとに、 $\delta_{m,n} = \exp(-K \cdot \tau_{m,n})$ として計算した。上流ダム群からの自然的流達負荷量 $L_0(t)$ は、 $g_4(t)$ に含まれているものとして、0(g/sec)とした。

つぎに、(20)、(21)、(22)式の各目的の年度 t での許容水準 J_1^p 、満足水準 J_1^s は以下のように設定した。

$$J_1^p = 0, \quad J_2^p = 0, \quad J_3^p = L_0(0) \\ J_1^s = \sum_i \beta_i' \cdot \mu_i(t) / \omega_i^1(t), \quad J_2^s = \sum_i \beta_i^2 \cdot \mu_i(t) / \omega_i^2(t), \quad J_3^s = 0 \quad (34)$$

ここに、社会・経済効果に関する評価値を表わす J_1 および J_2 の許容水準 J_1^p および J_2^p は0、すなわち、各需要ブロックへの新規水資源配分量 θ_i を0としたときの値とした。また、満足水準 J_1^s 、 J_2^s は、各需要ブロックで、需要量の上限まで新規水資源配分を行なったと仮定したときの J_1 、 J_2 の値とした。

一方、河川環境保全効果に対する評価値を表わす最下流基準点 ($m=6$) での流下負荷量 J_3 の許容水準 J_3^p は、初期 ($t=0$) での流下負荷量 $L_0(0)$ とし、満足水準 J_3^s は0とした。

表-1 水資源開発量 $Q_0(t)$ (m^3/sec)

t	0	5	10	15	20
$Q_0(t)$	2.74	9.4	11.2	15.3	17.7

表-2 都市用水需要量の上限 $X_i^{\max}(t)$ (m^3/sec)

年度 ブロック	0	5	10	15	20
1	0.2074	0.5258	0.9101	1.3795	1.7810
2	0.3540	0.5880	0.7536	0.9576	1.1740
3	1.8632	2.7643	3.4946	4.4460	5.3735
4	0.3918	0.6623	0.8489	1.1522	1.4180
5	0.3924	0.7578	0.9842	1.2538	1.3120
6	0.4048	0.7378	0.9062	1.1765	1.4533
7	0.6156	0.9495	1.1239	1.3726	1.6035
8	0.0076	0.0448	0.0662	0.0888	0.1080
9	0.4242	0.5618	0.6974	1.1158	1.6445
10	0.4550	0.6618	0.8501	1.0433	1.2848
11	0.4026	0.6768	1.1369	1.7549	2.2223
12	0.7010	2.1133	2.6978	3.3322	4.4515
13	0.1506	0.3693	0.4714	0.5820	0.7775
14	1.8348	3.3490	3.8114	3.8446	4.9060
15	1.9382	2.6978	3.0674	3.8878	4.9745
$\sum X_i^{\max}$	10.1632	17.4601	21.8201	27.3876	34.4844

表-3 下水道整備率 $u_i^n(t)$ の年次的増加パターン

t	0	5	10	15	20
パターンI	0.0	0.10	0.90	0.98	1.00
パターンII	0.0	0.10	0.75	0.90	1.00
パターンIII	0.0	0.10	0.40	0.70	1.00

表-4 下水処理レベル変化パターン

年度 t	0	5	10	15	20
処理水質 (ppm)	20	20	10	5	5

4-2. 演算結果とその考察；表-1に示した水資源開発パターンのもとで、3.で示した解法により、適正水資源配分過程の算定を行なった。以下にその演算結果を示し、考察を加える。

まず、表-5に、新規水資源配分量 $\theta_i(t)$ を需要ブロックごとに示す。これをみると、 $t=1\sim 5$ では配分量 θ_i は小さく、下水道整備が急速に進む $t=6$ 以降に配分が集中する。とくに整備率が前年度の10%から一挙に40~90%となる $t=6$ で大きな水資源が配分されることが多い。

表-5に示した新規水資源配分の結果得られる流域全体での水資源配分量 $\sum_{i=1}^{15} X_i(t)$ の年次変化を、図-4に示す。

図-4より、 $t=1\sim 5$ において、流域全体での水資源配分量は増加しているものの、その増加量、すなわち新規水資源配分量 $\sum_{i=1}^5 \theta_i$ は、経年的に減少していることがわかる。これは、下水道整備率がこれらの年度では10%と低く、水資源の配分を行なうとそれだけ河川への流出負荷量は増加し、許容水準 $J_0^* = L_0(0)$ に近づくためと考えられる。

そして前述したように、 $t=6$ で整備率が一挙に40~90%となるため、水資源配分量は、 $t=6$ で急増している。しかし、 $t=5$ までは、水資源配分量は、水資源開発量 $Q_0(t)$ よりも小さい。これは、水資源開発量を全て配分してしまうと、社会・経済効果に関する目的の達成度は増大するが、河川環境保全に関する評価値がその許容水準 $J_0^* = L_0(0)$ をみたくなくなってしまうため、水資源の配分をさしひかえたものと考えられる。

このように、水資源の配分に当って、社会・経済効果による評価と同時に、河川環境に与える影響も評価に加えることにより、下水道整備が十分に行なわれない間は、水資源の配分をひかえるべきであるという結果が得られた。このことは、水資源開発施設と水環境汚染防止施設の整備のバランスの必要性を示唆する。

5. おわりに

従来の水資源の地域配分が、社会・経済活動の発展を主眼とした都市政策、地域計画の結果生じた水需要に応じてなされてきたため、公共水域の環境悪化が著しく促進された。このため、近年、公共水域の環境を考慮した水資源の地域配分法の研究が行なわれるようになったが、公共水域の環境は水質環境基準を制約に加えることにより考慮し、経済効果といったような単一の評価のもとでの最適配分を数理計画法で求めているものが多いようである。これに対し、本稿では、社会・経済効果による評価と同時に、公共水域の水環境に与える影響も評価とした多目的評価のもとで、上流貯水池群での水資源開発量の各需要ブロックへの適正配分をはかる経年的水資源配分モデルを策定し、その実流域への適用を行なった。

この事例研究の結果、上述の多目的評価のもとで、いつ、どの需要ブロックに、どれだけの水資源の配分を行なうのが合目的かという適正水資源配分過程が把握でき、また、水資源開発施設と水環境汚染防止施設の整備がバランスを保って行なわれることの必要性が示唆できたと考える。

【参考文献】

- 1) 伏見多美雄ほか；複数の目標をバランスよく達成するための数理計画法、経営科学第19巻第2号、1975。
- 2) たとえばヴェ・ゲ・ボルチャンスキー；最適制御の数学的方法、総合図書、1969。
- 3) 萩原良巳・中川芳一；水環境からみた地域分析、土木学会第30回年次学術講演会、第II部、1975。
- 4) たとえばNathan Buras；Scientific Allocation of Water Resource, American Elsevier, 1972。

表-5 新規水資源配分量 θ_i (m^3/sec) (*は制約限度値であることを示す)

ブロック	年度	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	0.199*	0.064*	0.064*	0.040	0.038	0.003	0.077*	0.077*	0.077*	0.077*
2	1	---	0.020*	0.047*	0.047*	0.047*	---	---	---	---	---
3	1	---	0.009	0.189	0.047	---	2.052*	0.130	0.131	0.132	0.133
4	1	0.320	---	---	---	---	0.289*	---	---	---	---
5	1	---	0.447*	0.073*	0.073*	0.012	0.106*	---	---	---	---
6	1	---	---	---	---	---	0.221	---	---	---	---
7	1	0.026*	0.111	0.066	---	---	0.018*	0.004*	0.004*	0.004*	0.004*
8	1	0.253	---	---	---	---	0.288*	0.027*	0.027*	0.027*	0.027*
9	1	---	---	---	---	---	0.573*	---	---	---	---
10	1	0.384*	---	---	---	---	0.092*	0.092*	0.092*	0.092*	0.092*
11	1	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
12	1	0.150*	---	---	---	---	---	0.030	0.029	0.028	0.027
13	1	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
14	1	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
15	1	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Σ	1	1.332*	0.951	0.439	0.207	0.097	3.995*	0.360*	0.360*	0.360*	0.360*
ブロック	年度	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	2	0.094*	0.094*	0.094*	0.094*	0.094*	0.080*	0.080*	0.080*	0.080*	0.080*
2	2	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
3	2	0.233	0.206*	0.190*	0.190*	0.190*	0.087	0.086	0.085	0.084	0.207
4	2	---	0.238	0.094*	0.061*	0.061*	0.053*	0.053*	0.053*	0.053*	0.053*
5	2	0.235*	0.054*	0.054*	0.054*	0.054*	0.012*	0.012*	0.012*	0.012*	---
6	2	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
7	2	---	---	---	---	---	0.101	---	---	---	---
8	2	0.005*	0.005*	0.005*	0.005*	0.005*	0.005*	0.004*	0.004*	0.004*	0.004*
9	2	0.084*	0.084*	0.084*	0.084*	0.084*	0.106*	0.106*	0.106*	0.106*	0.042*
10	2	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
11	2	0.124*	0.124*	0.124*	0.124*	0.124*	0.093*	0.093*	0.093*	0.093*	0.093*
12	2	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
13	2	0.046	0.017	0.048	0.053	0.048	0.045	0.046	0.047	0.048	---
14	2	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
15	2	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Σ	2	0.820*	0.820*	0.820*	0.820*	0.820*	0.480*	0.480*	0.480*	0.480*	0.480*

図-4 流域全体での水配分量 $\sum X_i(t)$

