

# 1 水系流域における水利用システムの段階的 規模拡張方式に関する研究

## A CAPACITY EXPANSION MODEL FOR INTRO-BASIN WATER UTILIZATION SYSTEM

吉川和広\*・岡田憲夫\*\*・大内忠臣\*\*\*

By Kazuhiro YOSHIKAWA, Norio OKADA and Tadaomi OUCHI

### 1. 結 言

現在、わが国においては、かつての高度成長期のような水需要の急激な増加はみられなくなったものの、都市用水は依然として不足する傾向にある。しかも、天然資源の枯渇に対する関心が次第に高まり、水資源に関してもその高度利用の必要性が強く認識されるようになってきている。一方、都市活動の進展と並行して流域の使用廃水による都市河川の水質汚濁も進み、上水道・工業用水道の水源に対する影響のみならず、流域住民の環境衛生等にも多くの障害を及ぼすなどの深刻な問題を引き起こしている。

本研究ではこれらの水問題を解決していく方策として、河川水を取水源とした広域水道方式および再利用と河川水質の改善を目的とする三次処理方式の両者を統合した水利用システムを取り上げるとともに、1水系流域における合理的・効率的な水利用形態の選定問題を取り扱うことにする。

水不足問題の解決策としては、① ダム建設などによって降水を有効に貯水し、将来の供給水量を新規水源の開発により確保していく方法と、② 需要地において使用水の回収利用や再生利用などを促進させ、水利用形態の合理化を図ることによって、結果的に必要な新規開発水量を低減しようとする方法などが実現性の高い方法として考えられる。実際問題としては、どちらも単独では有効な解決策とはなりえず、むしろこれら2つの方法を合理的に組み合わせた多角的な水利用形態の導入を図る必要があると考えられる。

一方、このような水問題を取り扱う際には対象とする地域規模が問題となる。このとき、多水系を含めた水配

分問題を取り上げる前に、まず単一水系内において、水需要の地域的な分布特性を考慮した河川水の循環利用方式、さらには流域内での開発水量の上限やその効率的な利用方法、および使用水の再利用の可能性などについての検討を加えておくことが重要であると考えられる。吉川・岡田<sup>1)</sup>および大内<sup>2)</sup>は以上のような視点に立ち、1水系流域の水配分問題(施設建設問題)を非線形計画モデルとして定式化し、加古川流域をケーススタディとした実証的分析を行っている。

本研究では、これらの成果をふまえるとともに、さらに次のような観点から水配分問題を取り上げることとする。すなわち、対象地域内の水需要の増加に対して、水道事業体は個々に小規模な水道施設の拡張を繰り返すというきわめて場あたりの対応策に終始してきたのが実情である。しかし、河川の既得水利権による制約や、取水源の水質悪化などの状況下で、各都市の水道事業体では近郊から単独で新たな水源を確保することが困難となってきている。また、各地域で進行している都市化は従来の行政区域を越えて進展しており、水道事業体の運営方式もこれとみあったものに修正していく必要がある。以上要するに、各市町村の水道事業体が個々に水道施設の拡張を行うのは困難であり、投資効率のうえからみてもきわめて非効率であると考えられる。そこで今後においては、従来の運営形態の枠にとらわれない広域水道方式が推進されるとともに、長期的な展望に立った効率的な施設拡張計画の立案が強く望まれていると判断されるのである。

以上のように、流域における合理的な水配分・利用問題を、資金の効果的な運用をも考慮した施設建設問題としてとらえる場合には、単に空間的な施設配置(どこに建設するか)のみならず、時間的な問題(いつ建設・拡張を行うか)についての分析をもあわせて行うことにより、効率的な施設建設・拡張計画の策定方法を検討していく必要がある。本研究では、このような考察をもと

\* 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学科

\*\* 正会員 工博 鳥取大学助教授 工学部土木工学科

\*\*\* 正会員 工修 建設省

に、1水系流域における水供給施設の建設および段階的な規模拡張問題を取り上げ、これを各施設の建設(拡張)時期・場所・規模および各時期における処理量を決定するための数学モデルとして定式化することを試みる。本モデルは非線形の混合整数計画問題として表わされるが、一般にこの種の問題に対する実用的な解法は開発されていない。本研究においては、このような非線形混合整数計画問題が、一般的な非線形最適化手法を援用することにより効率的に解けることを示す。さらには本モデルを兵庫県加古川水系流域に適用し、実証的な分析を行うことにする。

## 2. モデルの定式化

### (1) モデルの概要とモデル化における前提条件

水問題の総合的な解決を図るための計画の策定にあたっては、水資源開発計画および各利水者単位での水利計画等とあわせて、流域(需要地間)における合理的な水配分計画の立案が特に重要になると考えられる。ここでは、考察の対象をこのような水配分問題に限定し、効率的な施設建設・拡張計画策定のための計画モデルの作成を試みることにする。

水道施設を建設する場合、大規模な施設の建設・拡張は、主として建設費に関する規模の経済性の成立により費用の節減を可能にする。すなわち、空間的には個々の水道事業が単独で施設拡張を行うことは決して経済的であるとはいえない。また、時間的にも、各期ごとに小規模の拡張を繰り返すのは不利であると考えられる。その反面、不必要に大規模な施設建設を行えば、いわゆる施設の遊休状態を引き起こし、経済的にも非効率となってしまふ。このため、浄水場・三次処理場および地域間送水管といった水供給施設を、「いつ」「どこに」「どの程度の規模で」建設・拡張すべきかという問題に対する解を見い出すことがきわめて重要となる。従来、このような観点からの研究も少なくない。しかし、これらは浄水場など段階的な規模拡張が可能な施設だけを取り扱ったもの<sup>3)</sup>、あるいは、送水管という経済的に一括建設が望ましい施設もあわせて扱うが、送水管の建設時期は固定し、規模・処理量だけを求めようとする研究<sup>4)</sup>が多いといえる。そこで本研究では、1水系流域における水供給施設の段階的な規模拡張問題を取り上げるが、このとき以上の考察をふまえ、両タイプの施設を同時に取り扱うとともに、各施設の建設時期・場所・規模および各時期の処理量を総括的に決定するための数学モデルとして定式化を行う(図-1参照)。

水道の供給方式としては広域水道方式を想定するが、

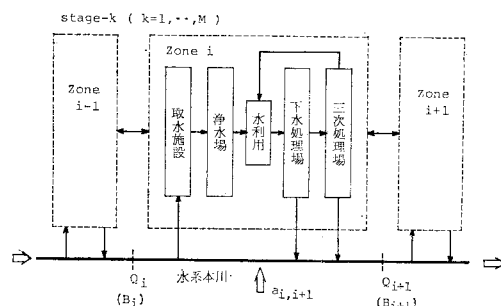


図-1 モデルの概要

その際の望ましい地域規模を把握するために、流域をあらかじめ複数のゾーンに分割しておき、これらを広域水道の供給対象となる地域単位と考えることにする。すなわち、1水系流域を水系本川に沿って直列に  $N$  個のゾーンに分割するとともに、上流から順に  $1, 2, \dots, N$  と番号づけを行う。各ゾーン内においては、上流地点で河川本川より表流水が取水され、浄水処理された後、原則として当該ゾーン内で使用される。使用後の廃水は、下水処理あるいは三次処理された後、ゾーン下流部において本川に還元されるものとする。一方、計画対象期間を  $M$  個のステージ(期)に分け、順に  $1, 2, \dots, M$  と番号をつけることにする。各ゾーンで設定する水利用システムを構成する施設としては、取水施設、上水道および工業用水道の浄水場、下水処理場ならびに三次処理場を取り上げる。各施設は、原則として当該ゾーン内の需要地を対象として1か所に集中的に建設されるものとする。しかし、もし流域全体の総費用の面から有利となるならば、ゾーン間の送水を考え、そのための送水管を建設することにする。これらの施設のうち、浄水場および三次処理場については施設の段階的な規模拡張を考えるが、取水施設は浄水場に付随するものとみなし、取水施設単独の規模拡張は考えない。また、ゾーン間の送水管に関しても、以下のような理由により施設規模の段階的な拡張は考慮しないことにする。すなわち、同一水理条件のもとで、同一水量を送水するならば、大口径送水管のほうがきわめて有利である。かつ材料費に関して規模の経済性が高いことなどから、小規模な送水管の建設を何期かに分けて行うのはかなり不経済である。そこで送水管の建設に関しては、計画期間中の段階的な規模拡張は考えず、もしゾーン間送水が必要となる場合には、計画期間中における最大規模の送水が可能な送水管を、その施設が必要となる最初のステージ(期)において一括して建設するものとする。なお、これらの水供給施設の建設および拡張は、各期の初頭に行われるものとする。

モデル化にあたっては、さらに多くの具体的な前提条件が必要となる。以下ではこれらのうち主なものを列挙することにする。

① 本研究においては、三次処理は下水処理施設が整備された後にその導入が検討されるものと考え、下水処理に関しては、全ゾーン・全ステージにおいて、当該ゾーン内に発生した使用済の廃水はすべて下水処理されるものとする。この仮定により下水処理施設に関する費用は定数となるため評価項目の中には含めない。

② 三次処理の導入は、① 処理水の再利用による新規開発水源の実質的な低減と、② 河川放流水の水質向上による河川水質保全効果の両面をねらって行う。このとき三次処理の水源としては、当該ゾーン内で処理された下水処理水を用いる。三次処理水再利用の対象となるのは工業用水に限るものとし、その際の供給は既設の工業用水道の配水管網を利用し、工業用水道浄水と混合されて供給されるものとする。

③ 本モデルにおいては、生活用水および工業用水のみを取り上げ、また、各水供給施設の建設は新規需要量だけを充足するために行われる。なお、この場合、家庭用水と業務用水および高質な水質が要求される工業用水は（以下生活用水とよぶ）上水道より供給され、他の工業用水は工業用水道あるいは三次処理水に依存するものとする。

④ 各ゾーンで1か所に建設された浄水場あるいは三次処理場から、ゾーン内の小区域の配水池に送水が行われ、そこから地区内の需要者に末端配水されるものとするが、これらの過程はモデル化の対象としては取り扱わない。

⑤ 河川流量は年間を通じて一定ではないが、ここでは各年における平均的な流量（いわゆる低水量あるいは高水量に相当するものとみなす）を前提として水配分を考えることにする。なお、モデル化にあたっては、将来の河川では、現在の低水あるいは高水流量に、新規開発水量が上積みされた流量が全流量として流れているものと仮定する。しかし、河川上流部における水源開発の方法や開発量は与件とし、これに関してもモデルでは直接取り扱わない。

⑥ 河川には、その機能維持などの目的から一定量以上の流量（維持流量）が必要であると、河川から取水できる水量には制限があるものとする。

⑦ 各ゾーンにおいては、本川に流入する流量およびその水質を考慮するとともに、取水地点（隣接上流ゾーンの最下流地点）において、それぞれ水質基準値を設定し、その規制を満たすことを条件とする。しかし、取水された原水の水質が水質基準値を満足しているならば、これを浄化するための費用は浄水量のみに依存し、水質には無関係とする。

⑧ 水質の指標としては BOD 値だけを採用し、下水処理水・三次処理水および支川より新たに本川に流入す

る河川水（これを下水処理水・三次処理水と区別するために自然水とよぶことにする）の BOD 値はすべて定数として取り扱う。また、わが国では急流河川が多く、河口までの流下時間が短いことなどから、河川の自浄作用や BOD 値の時間的変化についてはこれを考慮せず、本川の水質は外部より新たな流入がない限り変化しないものとする。

⑨ 各ゾーンの水需要量ならびに施設処理量などは、各ステージ間においては直線的に変化すると仮定する。

⑩ 評価関数としては、規模の経済性および機会費用の損失を考慮するために、計画対象期間全体にわたっての建設費の償還額ならびに維持管理費の支払い額の総和を取り上げ、その最小化を図る方法をモデル化する。

以上、おもな前提条件を記述したが、そのほかの詳細な仮定については、モデルの定式化の際に必要なに応じて付記することにする。

## （2）記号の定義

### a) 変数

各施設の規模ならびに処理量を示す変数については以下のように定義する。 $x_k^i$ =ステージ  $k$  におけるゾーン  $i$  の施設拡張規模（ $x_k^i$ =上水道浄水場、 $\bar{x}_k^i$ =工業用水道浄水場、 $x_k^i$ =三次処理場）。 $z_k^i$ =ステージ  $k$  の期末におけるゾーン  $i$  の施設処理量（ $z_k^i$ =上水道浄水量、 $\bar{z}_k^i$ =工業用水道浄水量、 $z_k^i$ =三次処理量、ここで  $z_k^i$  を次の2つに分けて考える。 $z_{in}^i$ =再利用される三次処理水量、 $z_{out}^i$ =河川へ放流される三次処理量）。 $w_{ij}$ ( $\bar{w}_{ij}$ )=ゾーン  $i$  からゾーン  $j$  の上水（工業用水）の送水管の建設規模。 $y_{ij}^k$ ( $\bar{y}_{ij}^k$ )=ステージ  $k$  におけるゾーン  $i$  からゾーン  $j$  への上水（工業用水）の送水量。 $p_{ij}^k$ ( $\bar{p}_{ij}^k$ )=ゾーン間送水管の建設時期を示す 0-1 型決定変数（整数）、すなわち、

$$p_{ij}^k(\bar{p}_{ij}^k) = \begin{cases} 1: \text{ステージ } k \text{ においてゾーン } i \text{ から } j \text{ ゾーンへの上水（工業用水）の送水管が建設される場合,} \\ 0: \text{その他の場合} \end{cases}$$

このほかに次のような変数を定義する。 $u_k^i$ ( $\bar{u}_k^i$ )=ステージ  $k$  においてゾーン  $i$  から他ゾーンへ送水される上水（工業用水）量。 $v_k^i$ ( $\bar{v}_k^i$ )=ステージ  $k$  において他ゾーンからゾーン  $i$  へ送水されてくる上水（工業用水）量。 $Q_k^i$ =ステージ  $k$  におけるゾーン  $i$  の取水地点での河川流量。 $B_k^i$ =ステージ  $k$  におけるゾーン  $i$  の取水地点での河川水の BOD 値。

### b) 定数

$N$ =ゾーン数。 $M$ =ステージ数。 $T$ =計画対象期間の長さ。 $\tau_d$ =各ステージの長さ（全ステージにおいて等しいとする）。このとき次式が成立する。

$$T = M \cdot \tau_d \dots\dots\dots (1)$$

$D_i^k(\bar{D}_i^k)$  = ステージ  $k$  の期末におけるゾーン  $i$  の上水 (工業用水) の新規需要量, すなわち, 計画対象期間初年度からの増加量.  $T_i^k$  = ステージ  $k$  の期末におけるゾーン  $i$  の下水処理量.  $S_i$  = ゾーン  $i$  の計画対象期間初頭における既存の水使用量 (旧施設からの浄水供給量). ここで  $T_i^k$  は次式で表わされるものと仮定する.

$$T_i^k = S_i + D_i^k + \bar{D}_i^k \dots\dots\dots (2)$$

$\hat{B}_i^k$  = ステージ  $k$  におけるゾーン  $i$  の取水地点での水質基準値 (BOD 値).  $A_i$  = ゾーン  $i$  の取水地点における河川流量のうち取水できない流量.  $a_{i,i+1}^k$  = ステージ  $k$  においてゾーン  $i$  の取水地点からゾーン  $(i+1)$  の取水地点の間に, 新たに本川に流入する自然水の流量. なお,  $a_{k,1}^k$  は対象流域の最上流ゾーン取水地点における河川流量にほかならない.  $b_{i,i+1}^k = a_{i,i+1}^k$  の BOD 値.  $b_s$  = 下水処理水の BOD 値.  $b_t$  = 三次処理水の BOD 値. さらにゾーン  $i$  に隣接するゾーンの番号 (添字) の集合を  $I_i = \{i-1, i+1\}$  と定義する.

(3) 制約条件の定式化

(2) で定義した記号を用いて, モデルの制約条件を定式化すれば以下のとおりとなる.

$$z_{ij}^k + \bar{z}_{ij}^k \leq Q_i^k - A_i \dots\dots\dots (3)$$

$$z_{ij}^k \leq \sum_{l=1}^k x_{li}^k \dots\dots\dots (4)$$

$$\bar{z}_{ij}^k \leq \sum_{l=1}^k \bar{x}_{li}^k \dots\dots\dots (5)$$

$$z_{ij}^k = D_{ij}^k + u_{ij}^k - v_{ij}^k \dots\dots\dots (6)$$

$$\bar{z}_{ij}^k = \bar{D}_{ij}^k + \bar{u}_{ij}^k - \bar{v}_{ij}^k - z_{uh}^k \dots\dots\dots (7)$$

$$T_i^k \geq z_{hi}^k \dots\dots\dots (8)$$

$$z_{hi}^k = z_{ui}^k + z_{ti}^k \dots\dots\dots (9)$$

$$z_{hi}^k \leq \sum_{l=1}^k x_{li}^k \dots\dots\dots (10)$$

$$z_{hi}^k \leq \bar{D}_i^k \dots\dots\dots (11)$$

$$\hat{B}_{i+1}^k \geq B_{i+1}^k \dots\dots\dots (12)$$

$$\left. \begin{aligned} u_{ij}^k &= \sum_{l \in I_i} \left( \sum_{m=1}^k p_{lm}^k \right) \cdot y_{lj}^k, \quad \bar{u}_{ij}^k = \sum_{l \in I_i} \left( \sum_{m=1}^k \bar{p}_{lm}^k \right) \cdot \bar{y}_{lj}^k \\ v_{ij}^k &= \sum_{l \in I_i} \left( \sum_{m=1}^k p_{li}^k \right) \cdot y_{ji}^k, \quad \bar{v}_{ij}^k = \sum_{l \in I_i} \left( \sum_{m=1}^k \bar{p}_{li}^k \right) \cdot \bar{y}_{ji}^k \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (13)$$

$$\left. \begin{aligned} w_{ij} &= \max_k \left\{ \left( \sum_{l=1}^k \bar{p}_{li}^k \right) \cdot \bar{y}_{lj}^k \right\} \\ \bar{w}_{ij} &= \max_k \left\{ \left( \sum_{l=1}^k \bar{p}_{li}^k \right) \cdot \bar{y}_{lj}^k \right\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (14)$$

これらの制約条件の意味するところは次のとおりである. 式 (3) は各ゾーンの取水量と河川からの取水可能量の関係を, 式 (4), (5) はそれぞれ上水道・工業用水道の浄水場における総建設規模と浄水量との関係を表わしている. また, 式 (6), (7) は上水・工業用水需要量と各施設からの供給量との間に成立すべき条件である.

式 (8)~(11) は三次処理場の規模ならびに処理量に関する制約条件を示している. 式 (12) は各ゾーン内の河川最下流部における水質規制条件である. さらに式 (13) はゾーン間送水に関する条件を示し, 式 (14) は, ゾーン  $i$  からゾーン  $j$  への送水管の建設規模は, 計画期間中の最大送水量に等しいことを意味している. これらの制約条件のうち, 式 (3)~(13) は各ステージ・各ゾーンにおいて, また, 式 (14) は隣接する2ゾーン間において満たされるべき条件となっている.

なお, これらの制約条件を構成する変数はすべて非負であるとともに, 0-1 型変数  $p_{ij}^k, \bar{p}_{ij}^k$  については次式が成立しなければならない.

$$\sum_{i=1}^M p_{ij}^k \left( \sum_{l=1}^M \bar{p}_{li}^k \right) \in \{0, 1\}, \quad p_{ij}^k (\bar{p}_{ij}^k) \in \{0, 1\} \dots (15)$$

ところで, ゾーン  $i$  の取水地点におけるステージ  $k$  での河川流量  $Q_i^k$  は, 上流のゾーン  $(i-1)$  までの各ゾーンの水利利用形態によってきまる. すなわち,

$$\left. \begin{aligned} Q_1^k &= a_{k,1}^k && (k=1, \dots, M) \\ Q_i^k &= \sum_{h=1}^i a_{h-1,h}^k + \sum_{h=1}^{i-1} (T_h^k - z_{fh}^k - \bar{z}_{fh}^k - z_{uh}^k) && (i=2, \dots, N+1) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (16)$$

ここで,  $i=N+1$  は対象流域の最下流地点を意味する. また,  $Q_i^k$  の水質  $B_i^k$  は, 河川水あるいは流域からの流入水の汚濁負荷量を考慮して次式で表わされる.

$$B_i^k = \{ B_{i-1}^k \cdot (Q_{i-1}^k - z_{f,i-1}^k - \bar{z}_{f,i-1}^k) + b_{i-1,i}^k \cdot a_{i-1,i}^k + b_s \cdot (T_{i-1}^k - z_{ti-1}^k) + b_t \cdot z_{ti-1}^k \} / Q_i^k \dots\dots (17)$$

式 (16), (17) を式 (3) および (12) に代入することにより,

$$\sum_{h=1}^i a_{h-1,h}^k + \sum_{h=1}^{i-1} T_h^k - A_i \geq \sum_{h=1}^i (z_{fh}^k + \bar{z}_{fh}^k + z_{uh}^k) - z_{ui}^k \dots\dots\dots (3)'$$

$$\hat{B}_{i+1}^k \cdot Q_{i+1}^k \geq B_i^k \cdot (Q_i^k - z_{fi}^k - \bar{z}_{fi}^k) + b_{i,i+1}^k \cdot a_{i,i+1}^k + b_s \cdot (T_i^k - z_{ti}^k) + b_t \cdot z_{ti}^k \dots\dots (12)'$$

と変形される.

(4) 評価関数の定式化

施設の段階的な規模拡張を考える場合, 次の2つが重要な検討項目となる.

㉔ 施設の容量不足 (過少規模) をいかに評価するか.

㉕ 施設の遊休状態をどのように計量化するか.

本研究では, これら2つの事項については以下のように取り扱うことにする.

㉔ 一般の在庫問題では品切れ状態の存在も認め, それをなんらかのペナルティという形で取り上げ評価しようとする. しかし, 本モデルでは, 施設の容量不足は認めず, 処理量 (=供給量) は需要量を満たすべきことを必要条件として取り扱うことにする.

① 一度に大規模な施設を建設することは、建設費などにおける規模の経済性の成立からみて、一般的には有利であると考えられる。しかしながら、建設初期における実際の処理量が小さい場合には、施設の大部分を遊ばせておくことになり決して合理的とはいえない。そこで、このような施設遊休に対する機会損失費用をなんらかの形で評価関数中に組み込む必要がある。本研究では、建設・拡張された施設の建設費の計画期間中における償還額と、毎年の維持管理費の総和をもってモデルを評価する判断基準とし、評価関数の定式化を行うことにする。

① 建設費 水道事業体の運営方式および水の供給価格の算定のうえからも、水道事業体ならびに水受給者にとっては、水道施設の建設費そのものよりもむしろ計画期間中の全減価償却額が大きな関心となる。さらに、評価項目としてこのような計画期間中の償還額を用いた場合には、施設が計画期間の初期に建設されるほど、その建設費用が評価関数中に占める割合は大きくなり、結局は施設の遊休に対する機会損失費用を評価することにつながると考えられ合理的である。以上のような理由から、施設の規模拡張のための建設費用は、減価償却額として計算された計画期間中の全支払い金額を用いて表わすことにする。なお、償還方法としては、公共事業体においても一般に用いられている定額法を採用する。すなわち、ステージ  $k$  で建設・拡張された施設の建設費に関する計画期間中の全支払い金額  $R(k)$  は次式で表わされる。

$$R(k) = (M - k + 1) \cdot \tau_d \cdot C^k \cdot g(r) \quad \dots\dots\dots (18)$$

ここで、 $g(r)$  は資本回収係数であり次式で与えられる。

$$g(r) = \frac{r \cdot (1+r)^m}{(1+r)^m - 1} \quad \left( \begin{array}{l} r: \text{借入財の年利率} \\ m: \text{償却期間} \end{array} \right) \quad \dots\dots\dots (19)$$

また、 $C^k$  はステージ  $k$  における施設の建設費を表わし、計画期間初頭(ステージ1)における建設費  $C$  を用いて次式(20)で定義する。

$$C^k = (1+r)^{\tau_d \cdot (k-1)} \cdot C \quad \dots\dots\dots (20)$$

さて、各施設の計画期間初頭における建設費および計画期間中の全支払い金額を示す費用関数を表-1のように定義すれば、各施設に関して式(21)が成立する。

$$R(x_i^k, k) = (M - k + 1) \cdot \tau_d \cdot (1+r)^{\tau_d \cdot (k-1)} \cdot C(x_i^k) \cdot g(r) \quad \dots\dots\dots (21)$$

② 維持管理費 維持管理費については、計画期間中において必要となる総維持管理費の形で考えることにする。そこで表-1のように費用関数を定義すれば、各施設の計画期間中の総維持管理費は次式で表わされる。

$$Q_i = \frac{\tau_d}{2} \sum_{k=1}^M \{O^{k-1}(x_i^{k-1}) + O^k(x_i^k)\} \quad \dots\dots\dots (22)$$

ただし  $x_i^0 = 0$  である。また、計画期間初頭における施設維持管理費  $O^0$  と各ステージ期末の維持管理費  $O^k$  の間にも式(20)と同様な形のもので成り立つものとする。なお、以上で定義された費用関数は、各施設の規模の経済性の成立を示す非線形関数となっている。

さて、これらの費用関数を用いて、本モデルの評価関数は式(23)で与えられる。

$$G = \sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^N [R_s(x_i^k + \bar{x}_{ij}^k, k) + R_f(x_{ij}^k, k) + \bar{R}_f(\bar{x}_{ij}^k, k) + R_l(x_{li}^k, k) + \sum_{j \neq i} \{RD_{ij}(w_{ij}, k) \cdot p_{ij}^k + \bar{R}D_{ij}(\bar{w}_{ij}, k) \cdot \bar{p}_{ij}^k\}] + \sum_{i=1}^N [Q_{si} + Q_{fi} + \bar{Q}_{fi} + Q_{li} + \sum_{j \neq i} \{QD_{ij} + \bar{Q}D_{ij}\}] \rightarrow \text{Min} \quad \dots\dots\dots (23)$$

こうして定式化されたモデルは、制約条件(3)', (4)~(11), (12)', (13), (14)のもとで、非線形評価関数(23)を最小とするような非負の連続変数  $x_i^k, \dots, w_{ij}$  および 0-1 型決定変数  $p_{ij}, \bar{p}_{ij}$  を求める問題であり、一種の非線形混合整数計画問題であるといえる。

### 3. 非線形最適化手法を援用したモデルの解法

前章で定式化されたモデルは、多段階型(multi-stage type)でしかも混合整数型(mixed-integer type)であるという2つの特性を有している。したがって、解法としては多段階型の問題に有効な①動的計画法と、混合整数型によく適用される②分岐限定法との、両者の手法を組み合わせたものを考えればよいが、これは実際問題としてきわめて困難である。その理由は、本モデルの変数が  $12MN + 4(2M + 1)(N - 1)$  個、制約条件の数が  $14MN + 8(N - 1)$  個であり、ゾーン数  $(N)$  および

表-1 費用関数の定義

費用関数	記号			
	取水施設	上水道浄水場	三次処理場	ゾーン間送水管(上水)
計画期間初頭における施設の建設費	$C_s(x_i^k + \bar{x}_{ij}^k)$	$C_f(x_{fi}^k)$	$C_l(x_{li}^k)$	$CD_{ij}(w_{ij})$
ステージ $k$ に拡張された施設の建設費の計画期間中の支払い金額	$R_s(x_i^k + \bar{x}_{ij}^k, k)$	$R_f(x_{fi}^k, k)$	$R_l(x_{li}^k, k)$	$RD_{ij}(w_{ij}, k)$
ステージ $k$ の期末における施設の年間維持管理費	$O_s^k(x_i^k + \bar{x}_{ij}^k)$	$O_f^k(x_{fi}^k)$	$O_l(Z_{li}^k)$	$OD_{ij}^k (\sum_{l=1}^k P_{ij}^l \cdot y_{ij}^k)$
計画期間中の施設の総維持管理費	$Q_{si}$	$Q_{fi}$	$Q_{li}$	$QD_{ij}$

注) 工業用水道浄水場およびゾーン間送水管(工業用水)に関する費用関数は、上水関連費用関数の記号の上部に“一”をつけて表わす(たとえば、 $\bar{C}_f(\bar{x}_{ij}^k)$ )。

ステージ数 ( $M$ ) が大きくなればモデルの規模は多大なものとなるという点にある。そこで本研究では、以下のような観点から実用的な解法を開発することにする。

㊸ まず、等式制約条件を消去することにより変数・制約条件の数を削減する。また、非線形制約条件のうち式 (12)', (14) は、モデルの特性を考慮すれば線形式に変換しうることが示される。これらの変換過程の詳細については省略し、変換後の最終的な式を後に列記する。

㊹ 0-1 型決定変数を用いず、整数条件を近似的に満たす形で、本モデルを試行錯誤的に解くことを試みる。このアプローチは次のような利点を有している。

① 制約条件の中には整数型変数を用いる必要がなく、普通の線形制約条件に変換することができる。

② 評価関数は多少複雑になるが一般の非線形関数として近似されるので、数多く開発されている効率的な非線形最適化手法を用いてモデルを解くことが可能となる。以下では、この解法について具体的に述べていく。

まず、ゾーン  $i$  からゾーン  $j$  への送水管の建設が必要となる時期、すなわち、 $p_{ij}^{k*} = 1$  (工業用水についても同様であるので、以下では上水の送水に関してのみ説明する) となるステージ  $k^*$  は、計画期間中に初めて当該ゾーン間の送水が行われる時期であるとする。すなわち、

$$\xi_{ij}^k = \sum_{l=1}^{k-1} y_{ij}^l \quad (k=2, \dots, M), \quad \xi_{ij}^1 = 0 \dots \dots \dots (24)$$

と新たな変数を定義すれば、送水管建設が必要となるステージ  $k^*$  においては次式が成立する。

$$y_{ij}^{k*} > 0 \text{ かつ } \xi_{ij}^{k*} = 0 \dots \dots \dots (25)$$

ここで、次のような 0-1 型の階段関数を定義する。

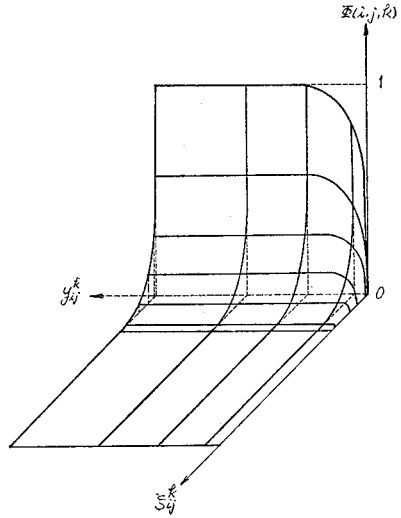
$$\phi(i, j, k) = \begin{cases} 1, & y_{ij}^k > 0 \text{ かつ } \xi_{ij}^k = 0 \\ 0, & \text{その他の場合} \end{cases} \dots \dots \dots (26)$$

この  $\phi(i, j, k)$  は、ステージ  $k^*$  において初めてゾーン  $i$  からゾーン  $j$  への送水が行われる場合に限り  $\phi(i, j, k^*) = 1$  となり、ゾーン間送水管の建設が必要となることを意味している。そこで、当該ステージでの送水管の建設費用関数に  $\phi(i, j, k)$  を乗ずることにより、評価関数中においてゾーン間送水管の建設時期と建設に伴う費用を自動的に評価することができる。ところで、この  $\phi(i, j, k)$  は階段関数となっているが、これを 0-1 型両端固定連続関数で近似することを考える。このような近似ができれば、評価関数は非線形連続関数となりモデルの解法として一般の非線形最適化手法の適用が可能になるものと考えられる。すなわち、

$$f(x) = \begin{cases} 1, & x = 0 \\ 0, & x > \varepsilon \quad (\varepsilon \text{ は十分小さな正数}) \end{cases} \dots \dots \dots (27)$$

なる連続微分可能な関数を用いて  $\phi(i, j, k)$  を近似すれば、

$$\phi(i, j, k) = \{1 - f(y_{ij}^k)\} \cdot f(\xi_{ij}^k) \dots \dots \dots (28)$$



$$\phi(i, j, k) = \begin{cases} =1, & y_{ij}^k > \varepsilon \text{ かつ } \xi_{ij}^k = 0 \text{ の場合 (施設建設)} \\ =0, & \text{その他の場合} \end{cases}$$

ただし、 $\xi_{ij}^k = \sum_{l=1}^{k-1} y_{ij}^l$ ,  $\varepsilon$  は十分小さな正数

図-2 0-1 型近似関数の概念図

となる。この 0-1 型近似関数  $\phi(i, j, k)$  の概念図を図-2 に示した。

以上㊸, ㊹ の変換によりモデルは以下のように修正される。

① 評価関数

$$G = \sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^N [R_s(x_{ij}^k + \bar{x}_{ij}^k, k) + R_f(x_{ij}^k, k) + \bar{R}_f(\bar{x}_{ij}^k, k) + R_t(x_{ii}^k, k) + \sum_{j \in I_i} \{RD_{ij}(w_{ij}, k) \cdot \phi(i, j, k) + \bar{R}\bar{D}_{ij}(\bar{w}_{ij}, k) \cdot \bar{\phi}(i, j, k)\}] + \sum_{i=1}^N [Q_{s_i} + Q_{f_i} + \bar{Q}_{f_i} + Q_{t_i} + \sum_{j \in I_i} \{QD_{ij} + \bar{Q}\bar{D}_{ij}\}] \rightarrow \text{Min} \dots \dots \dots (29)$$

② 制約条件 ( $i=1, \dots, N; j \in I_i; k=1, \dots, M$ )

$$\sum_{h=1}^i a_{h-1, h}^k + \sum_{h=1}^i S_h - T_i^k - A_i \geq \sum_{h=1}^i \sum_{j \in I_h} (y_{hj}^k - y_{jh}^k + \bar{y}_{hj}^k - \bar{y}_{jh}^k) - z_{ii}^k \dots \dots \dots (30)$$

$$D_i^k \geq - \sum_{j \in I_i} (y_{ij}^k - y_{ji}^k) \dots \dots \dots (31)$$

$$\bar{D}_i^k \geq - \sum_{j \in I_i} (\bar{y}_{ij}^k - \bar{y}_{ji}^k) + z_{ii}^k \dots \dots \dots (32)$$

$$D_i^k \leq \sum_{i=1}^k x_{f_i}^k - \sum_{j \in I_i} (y_{ij}^k - y_{ji}^k) \dots \dots \dots (33)$$

$$\bar{D}_i^k \leq \sum_{i=1}^k \bar{x}_{f_i}^k - \sum_{j \in I_i} (\bar{y}_{ij}^k - \bar{y}_{ji}^k) + z_{ii}^k \dots \dots \dots (34)$$

$$T_i^k \geq z_{ii}^k + z_{ii}^k \dots \dots \dots (35)$$

$$0 \geq - \sum_{i=1}^k x_{t_i}^k + z_{ii}^k + z_{ii}^k \dots \dots \dots (36)$$

$$\bar{D}_i^k \geq z_{ii}^k \dots \dots \dots (37)$$

$$\begin{aligned}
 & (\hat{B}_{i+1}^k - \hat{B}_i^k) \left( \sum_{h=1}^i a_{h-1,h}^k + S_h \right) + (\hat{B}_{i+1}^k - b_{i,i+1}^k) a_{i,i+1}^k \\
 & + (\hat{B}_i^k - b_s) T_i^k \geq (\hat{B}_{i+1}^k - \hat{B}_i^k) \left\{ \sum_{h=1}^i \sum_{j \in I_h} (y_{h_j}^k - \bar{y}_{j_h}^k) \right. \\
 & \left. + \bar{y}_{h_j}^k - \bar{y}_{j_h}^k \right\} + (b_i - b_s) z_{ri}^k + (\hat{B}_i^k - b_s) z_{ui}^k \\
 & \dots\dots\dots (38)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & w_{ij} \geq y_{ij}^k \\
 & \bar{w}_{ij} \geq \bar{y}_{ij}^k \\
 & \dots\dots\dots (39)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & x_{ji}^k, \bar{x}_{ji}^k, x_{ii}^k, z_{ui}^k, z_{ri}^k, y_{ij}^k, \bar{y}_{ij}^k, w_{ij}, \bar{w}_{ij} \geq 0 \\
 & \dots\dots\dots (40)
 \end{aligned}$$

以上でモデルの修正は完了した。上記の問題においては、制約条件はすべて線形不等式であり、評価関数は非線形連続関数となっている。本研究では、このようなモデルの構造に着目することにより、モデルの解法としては G. Zoutendijk によって開発された実行可能方向法を用いることにする<sup>1), 2), 20)</sup>。なお、ここでは 0-1 型両端固定連続関数としては次式を用いる。

$$f(x) = \exp[-100\{1 - \exp(-x)\}] \dots\dots\dots (41)$$

また、本研究で提案した解法のアルゴリズムの妥当性・有効性については、後にくわしく検討することにする。

#### 4. 加古川流域における実証的分析

##### (1) 加古川水系の概要

本研究では、本モデルを兵庫県加古川水系に適用し実証的な分析を行うことにする。本水系を取り上げた理由は以下のとおりである。

① 本流域は、阪神都市圏の外延部として臨海・内陸ともに産業ならびに住宅の立地が活発であり、将来の水需要の急増が予想されている。そのため、今後はよりいっそう加古川を取水源とした水道施設の拡張が必要になり、それと同時に、上流部での水源開発ばかりでなく、流域内の水利用の合理化が大きな課題となってきている。

② 流域の開発の進展に伴って、水質の悪化が憂慮されている。このため、下水道の整備など水質保全の動きが活発になってきているが、さらには三次処理方式を処理水の再利用のみならず、河川水質の改善の目的からもその導入を検討していく必要があると考えられる。

③ また、現在においても、本流域内の加古川市と高砂市の間には、行政の枠を越えた水供給方式が一部で採られており、今後このような方式を発展させて広域水道化が図られる可能性が高いと思われる。

以上のような理由から、本研究では加古川流域を対象として実証的な分析を試みることにする。このとき将来の水不足発生の可能性などを考慮して、対象地域として

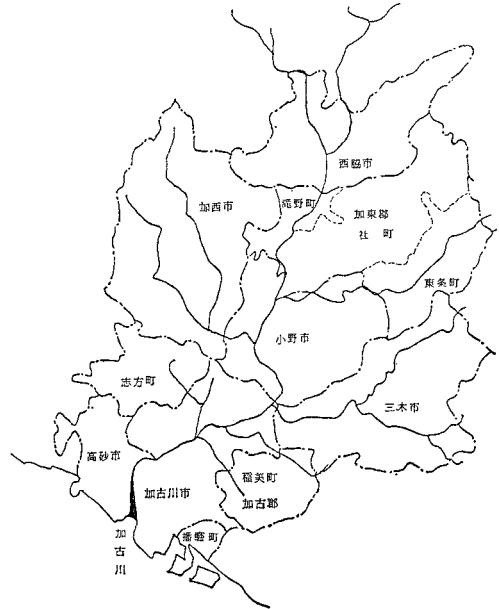


図-3 対象地域

は西脇市以南の西脇市、加東郡(滝野町、社町、東条町)、加西市、小野市、三木市、加古郡(稲美町、播磨町)、加古川市、印南郡志方町、高砂市の6市6町を取り上げて分析を行うことにする(図-3 参照)。

##### (2) インプットデータ作成と計算ケースの設定

###### a) 計画対象期間

広域利水調査などの建設省の水資源計画に準拠し、昭和 60 年度を計画目標年度とする。また、計画対象期間を昭和 48 年度から 60 年度までの 12 年間とし、これを過去の水道施設拡張例<sup>4)</sup>などを参考にして、各期の長さが 4 年間であるような 3 期に分けて施設規模の拡張を考えていくことにする。

###### b) 水需要量の予測

水需要の予測方法としては、従来から広く用いられてきている原単位法を用いる。すなわち、生活用水と工業用水に分けて各市郡別に予測を行い、昭和 60 年度までの需要量を算定した。なお、原単位としては、生活用水では 1 人 1 日あたりの給水量、工業用水においては単位製造品出荷額あたりの用水使用量を採用した<sup>10), 11)</sup>。

###### c) 河川流量

河川流量は、上水道・工業用水道の水源として取水可能な流量と、水質保全・河川機能維持などのために不可欠とみなされる維持流量とに大別される。しかし、少なくとも加古川水系においては、維持用水の明確な設定は行われていないといえる<sup>6)</sup>。そこで本研究では、流量年表<sup>9)</sup>をもとに代表的な渇水流量を算出し、これを維持流量として用いる。開発可能量については、資料 6) を参

考にし加古川上流部における昭和 60 年度までの開発水量を 50 万 m<sup>3</sup>/日 と設定するとともに、河川の各地点においては、これら維持用水と開発水量の和が河川流量として流下しているものとした。

d) 水質の設定

下水処理水の水質 (BOD 値) としては、処理水を三次処理に用いることを考慮して、現時点における一般的な値である  $b_s=20$  ppm を用いる。また、三次処理としては、三次処理水を再利用する目的から高級処理プロセス (表-2 参照) を想定して、その処理水質を  $b_i=4$  ppm とする。次に河川水質については、支川より流入する自然水の水質は環境基準値 A を満たしているものと仮定して  $b_{i,i+1}^0=2$  ppm ( $i=0, 1, \dots, N-1$ )、さらに対象流域の最上流地点における水質は、日本河川水質年鑑<sup>9)</sup>をもとに  $b_{k,1}^0=\hat{B}_k=3$  ppm ( $k=1, \dots, M$ ) とした。

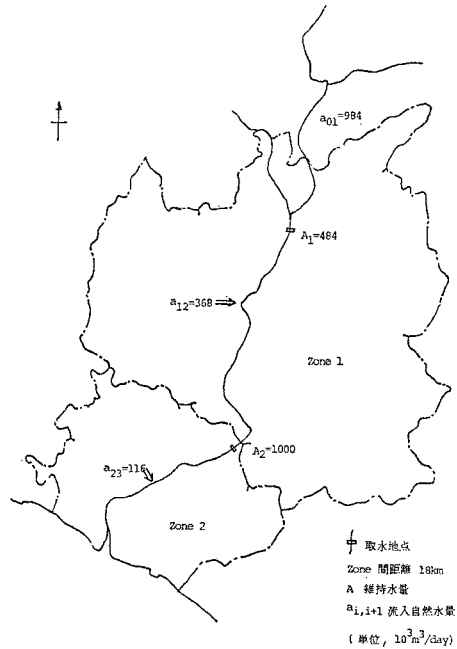
e) 各施設の費用関数形の算出

浄水場、三次処理場、送水管などの建設費、維持管理費については、設計基準や実際の施工例<sup>13)~19)</sup>をもとにその関数形を算出した。その際の各施設の想定処理プロセスならびに費用関数形を表-2 に示した。なお、施設の建設資金は企業債によってまかなうものとし、そのときの年利率を  $r=0.07$ 、償還期間は施設の物理的耐用年数に等しいと仮定し  $m=30$  年とした。

f) ゾーン分割と計算ケースの分類

対象地域の分割にあたっては、各ゾーンが加古川本川に沿って直列に配置されること、ならびに流域の地理的条件などを考慮する。その結果分割方法としては、対象地域を大きく 2 つのゾーンに分割した場合 (ケース I) と、ケース I の下流ゾーンのみを対象としてこれを 2 つのゾーンに分割した場合 (ケース II) の 2 つのパターンを考えた (図-4, 5 参照)。

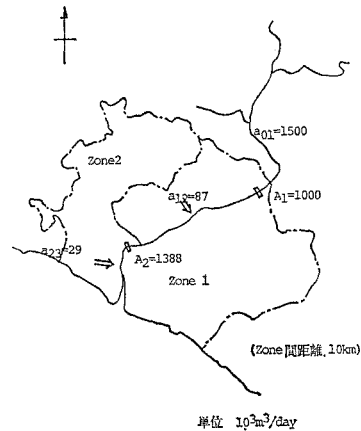
計算パターンについては、上述の分割パターンの相違による 2 種類のケース (I, II) において、水質基準値



Zone 1 西脇市, 加東郡, 加西市, 小野市, 三木市

Zone 2 加古川市, 高砂市, 加古郡, 志方町

図-4 ゾーン分割, ケース I



単位 10<sup>3</sup>m<sup>3</sup>/day

Zone 1 加古川市, 加古郡

Zone 2 高砂市, 志方町

図-5 ゾーン分割, ケース II

表-2 費用関数の算出

(C: 建設費, N: 維持管理費)

施設	費用関数形	処理プロセスほか
上水道 浄水場	$C=104.74 Q^{0.773}$ (10 <sup>6</sup> 円) $M=14.103 Q^{0.472}$ (10 <sup>6</sup> 円/年)	着水井→凝集沈殿池→急速ろ過池→消毒→浄水池
工業用水道 浄水場	$C=101.15 Q^{0.773}$ (10 <sup>6</sup> 円) $M=14.073 Q^{0.470}$ (10 <sup>6</sup> 円/年)	上水道の処理プロセスから消毒処理過程を除く
三次処理場	$C=326.11 Q^{0.716}$ (10 <sup>6</sup> 円) $M=25.264 Q^{0.711}$ (10 <sup>6</sup> 円/年)	急速混和池→ブロック形成池→沈殿池→急速ろ過池→活性炭吸着
送水管	$C=7.248 Q^{0.598}$ (10 <sup>9</sup> 円/km) $M=0.0687 Q^{0.734}$ (10 <sup>6</sup> 円/年・km)	ポンプ圧送式

注) Q は建設規模あるいは処理量を示し、単位は 10<sup>3</sup> m<sup>3</sup>/day である。

の設定方法を変化させることにより、各ケースをさらに次のように細分類した。

(a) 水質規制が計画期間を通じ比較的緩い場合 (以下、「常緩規制型」と略称する)。

(b) 水質規制が初期には比較的緩く、計画期間中に次第に厳しくなる場合 (漸厳規制型)。

(c) 水質規制が全期間を通じ比較的厳しい場合 (常厳規制型)。

そして、個々のケースをたとえば ケース I (a), ケー



表-3 計算ケース, 需要量

Case	Zone	市町村名	1旧施設からの供給量 10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /day	新規需要量 10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /day			
				Stage (昭和年)	Stage 1 (52)	Stage 2 (56)	Stage 3 (60)
I	1	西脇市, 加東郡, 加西市 小野市, 三木市	147	生活用水 工業用水	13 39	24 79	32 120
	2	加古川市, 高砂市 加古郡, 志方町	595	生活用水 工業用水	29 133	52 199	72 228
II	1	加古川市 加古郡	301	生活用水 工業用水	21 76	39 108	55 121
	2	高砂市 志方町	294	生活用水 工業用水	7 57	13 91	17 106

スII (b) というような形で表わすことにする。各ケースにおける需要量・水質基準値その他のパラメーター値を図-4, 5, 表-3, 4 に示した。

(3) 計算結果とその考察

各ケースにおける計算結果は表-5, 6 に示したとおりである。以下ではおもな結果とその特徴について考察を加える。

a) ケース I

① 本計算ケースでは、水質規制方式 (a)~(c) のいかにかわらず、ステージ 1・2 において下流のゾーン 2 から上流のゾーン 1 へ上水の送水が行われるという結果が得られている。すなわち、ゾーン 1 では、ステージ 1・2 においては生活用水の供給はゾーン 2 からの送水に依存し、ステージ 3 になって初めて自ゾ

表-4 計算ケース, 水質規制方式

Zone 分割パ ターン	水質規制 方式	水質基準値 BOD (ppm)			
		Stage 1	Stage 2	Stage 3	
I	(a) 常 緩	$\hat{B}_1$	3	3	3
		$\hat{B}_2$	5	5	5
		$\hat{B}_3$	10	10	10
	(b) 漸 厳	$\hat{B}_1$	3	3	3
		$\hat{B}_2$	5	4.5	4
		$\hat{B}_3$	10	8.5	7
(c) 常 厳	$\hat{B}_1$	3	3	3	
	$\hat{B}_2$	4	4	4	
	$\hat{B}_3$	7	7	7	
II	(a) 常 緩	$\hat{B}_1$	5	5	5
		$\hat{B}_2$	7.5	7.5	7.5
		$\hat{B}_3$	10	10	10
	(b) 漸 厳	$\hat{B}_1$	5	5	5
		$\hat{B}_2$	7.5	7	6
		$\hat{B}_3$	10	9	7
(c) 常 厳	$\hat{B}_1$	5	5	5	
	$\hat{B}_2$	6	6	6	
	$\hat{B}_3$	7	7	7	

注)  $\hat{B}_1$ : ゾーン 1 の上流地点での河川水質  
 $\hat{B}_2, \hat{B}_3$ : それぞれゾーン 1, ゾーン 2 の下流地点での水質基準値を示す。

ン内でその需要を満たす規模の浄水場が建設される。また、ゾーン 2 では、ステージ 1 の段階ですでに計画目標年度における自ゾーンの生活用水需要量よりもわずかに大きい規模の浄水場 (この施設規模は、ステージ 2 におけるゾーン 1・2 の両者の需要量の総和に一致している) が建設されるという結果となっている。つまり、この浄水場はステージ 3 では自ゾーンの需要を満たすだけの処理を行っても施設規模いっ

ぱいの稼働にはならず、また、ゾーン 1 への送水も行われない。この結果は最終段階 (ステージ 3) における若干の遊休状態による機会費用の損失よりも、規模の経済性から生じる利益のほうが大きいことを示唆している。本計算ケースにおいては、各期を通じてゾーン 2 の上水需要量はゾーン 1 の 2~3 倍程度であることを考えあわせると、このような水利用方式が結局は浄水場の有効利用につながるものと判断される。また、上流ゾーンにおいては、下流ゾーンからの送水により水質保全に必要な三次処理量の低減が可能となることから、上記の方式

表-5 計算結果, ケース I

(a) 各施設の拡張規模 (単位 10<sup>3</sup> m<sup>3</sup>/day)

水質規制	総費用 (10 <sup>6</sup> 円)	stage	上水道浄水場		工業用水道場		三次処理場		Zone 2 から Zone 1 への 上水送水管
			Zone 1	Zone 2	Zone 1	Zone 2	Zone 1	Zone 2	
(a) 常 緩	460.5 (1.00)	1		76.0	39.0	133.0			24.0
		2					101.0	131.1	
		3	32.0						
		total	32.0	76.0	39.0	133.0	101.0	131.1	24.0
(b) 漸 厳	753.2 (1.63)	1		76.0	39.0	133.0			24.0
		2					193.5	464.8	
		3	32.0						
		total	32.0	76.0	39.0	133.0	193.5	464.8	24.0
(c) 常 厳	898.5 (1.94)	1		76.0					24.0
		2					193.5	464.8	
		3	32.0						
		total	32.0	76.0			193.5	464.8	24.0

(b) 各施設の処理量 (単位 10<sup>3</sup> m<sup>3</sup>/day)

水質規制	stage	上水道浄水場		工業用水道場		三次処理場								
		Zone 1	Zone 2		Zone 1	Zone 2	Zone 1			Zone 2				
			全処理量	Zone 1 への送水量			全処理量	再利用量	放流量	全処理量	再利用量	放流量		
(a) 常 緩	1		41.0	13.0	39.0	133.0								
	2		76.0	24.0	29.8	133.0	49.2	49.2		76.9	66.0	10.9		
	3	32.0	72.0		19.0	133.0	101.0	101.0		131.1	94.0	37.1		
(b) 漸 厳	1		41.0	13.0	39.0	133.0								
	2		76.0	24.0			94.9	79.0	15.9	254.8	199.0	55.8		
	3	32.0	72.0				193.5	120.0	73.5	464.8	227.0	237.8		
(c) 常 厳	1		41.0	13.0			91.5	39.0	52.5	327.1	133.0	194.1		
	2		76.0	24.0			145.3	79.0	66.3	414.4	199.0	215.4		
	3	32.0	72.0				193.5	120.0	73.5	464.8	227.0	237.8		

表一6 計算結果、ケース II

(a) 各施設の拡張規模 (単位 10<sup>3</sup>m<sup>3</sup>/day)

水質規制	総費用 10 <sup>8</sup> 円	stage	上水道浄水場		工業用水道浄水場		三次処理場		
			Zone 1	Zone 2	Zone 1	Zone 2	Zone 1	Zone 2	
			(a)	335.6	1	39	13		106
常 緩	(1.00)	2							
		3	16	4					
		total	55	17		106	143.4		
(b)	642.1	1	39	13		57	174.4	44.3	
漸 厳	(1.91)	2							181.3
		3	16	4			57	146.0	225.6
		total	55	17			57	320.4	225.6
(c)	823.0	1	39	13			320.4	232.7	
常 厳	(2.45)	2							
		3	16	4					
		total	55	17				320.4	232.7

(b) 各施設の処理量 (単位 10<sup>3</sup>m<sup>3</sup>/day)

水質規制	Stage	上水道浄水場		工業用水道浄水場		三次処理場						
		Zone 1	Zone 2	Zone 1	Zone 2	Zone 1			Zone 2			
						全処理量	再利用量	放流量	全処理量	再利用量	放流量	
(a)	1	21	7		57	76	76					
	2	39	13		91	115.4	108	7.4				
	3	55	17		106	143.4	121	22.4				
(b)	1	21	7		57	76	76					
	2	39	13		57	174.4	108	66.4	44.3	34	10.3	
	3	55	17		57	320.4	121	199.4	225.6	49	176.6	
(c)	1	21	7			243.6	76	167.6	174.9	57	117.9	
	2	39	13			292.4	108	184.4	214.2	91	123.2	
	3	55	17			320.4	121	199.4	232.7	106	126.7	

が有利になると考えられる (図一6 参照)。

② 一方、工業用水道浄水場・三次処理場の建設パターンおよび施設利用形態は水系の水質規制方式によって変化する。つまり、水質規制方式が全期を通じて緩い場

合(ケース I (a))には、各ゾーンの工業用水道浄水場は、ともにステージ1においてステージ1の期末に発生する需要を満たすだけの規模しか建設されず、ステージ2以降の規模拡張も行われぬ。三次処理場は、両ゾーンともステージ2から必要となり、ステージ2において一括して建設される。これらの三次処理水は、主として工業用水の水源として利用され、すなわち、ステージ2・3では工業用水道浄水と三次処理水の混合供給が行われる。なお、このとき、ゾーン1では浄水場の建設規模を下まわる浄水処理しか行われぬのに対して、ゾーン2では浄水場が最大限に利用されている点が注目される。ところで、このような水利用形態は、流域の水質規制方式が厳しくなるにつれて変化し、常厳規制型の水質規制がとられた場合(ケース I (c))には、両ゾーンとも工業用水道浄水場はまったく建設されず、工業用水需要は全期間を通してすべて三次処理水の再利用によってまかなわれる。

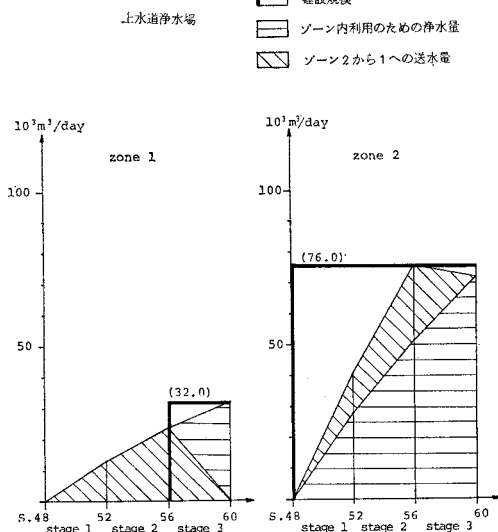
b) ケース II

① 上水道浄水場は、ゾーン1・2ともステージ1・3に分割して段階的に建設される。すなわち、ステージ1では各ゾーンのステージ1・2の2期にわたる需要量に相当する規模の施設が建設され、その後ステージ3において計画目標年度の需要量に合致するような規模拡張が行われる。この結果は、本モデルの評価関数においてはステージ1・2の建設費用に比較して、ステージ3での費用がかなり安価に評価されることに起因していると推定される。

② 本ケースにおいては、ゾーン間送水は行われぬ。

③ しかし、工業用水道浄水場および三次処理場の建設パターンは、ケース I と同様、水域の水質規制方式によって大きく変化する。すなわち、常緩規制型の場合(ケース II (a))には工業用水はおもに浄水場から供給されるが、規制が厳しくなるにつれて三次処理水の再利用量の占める割合が増加し、ついには工業用水道浄水場が建設されなくなる。たとえば、漸厳規制型の水質規制方式が採られた場合(ケース II (b))についてみると、ゾーン1では工業用水道浄水場は建設されず、全期間を通じて三次処理水の再利用が実施される。また、ゾーン2ではステージ1の工業用水需要を満たす規模の浄水場が建設されるにすぎない。一方、三次処理場は、図一7に示すように、ゾーン1ではステージ1・3に分けて建設され、それぞれの拡張規模はほぼ同程度である。ゾーン2では、ステージ2で初めて三次処理場が必要となり、ステージ2・3において段階的に建設される。特に

Case I (a) 常緩規制型



図一6 建設規模と処理量との関係

その拡張規模はステージ3で 18.1 万 m<sup>3</sup>/日 であり、ステージ2での拡張規模 (4.4 万 m<sup>3</sup>/日) をはるかに上まわっている。この結果は、両ゾーンとも三次処理が必要となる最初のステージで大規模な施設を一括して建設したときには、機会費用の損失が大きいことを意味している。

(4) 解法の妥当性についての検討

本研究では、非線形混合整数計画問題を解くにあたって、0-1 型整数変数に代えて、評価関数の中に 0-1 型近似関数を導入することにより、非線形最適化問題として取り扱う方法を提案した。以下では本解法の有効性・妥当性について検討していくことにする。

評価関数中に 0-1 型近似関数を組み込んだアルゴリズムの適用により、制約領域の凸性は保証されるが、評価関数はきわめて複雑な非線形挙動を示すことになる。このような非線形計画問題を解く場合には、種々の初期点を与えて解の探索を行い、その結果を比較・検討することによって全域的最適解の近似解とする必要がある。

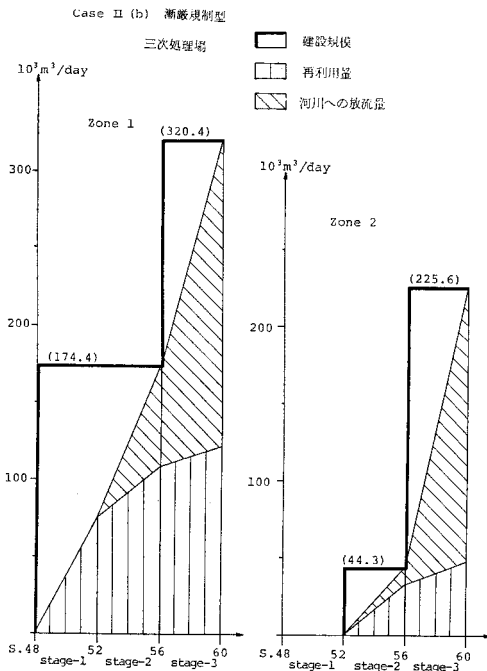


図-7 建設規模と処理量との関係

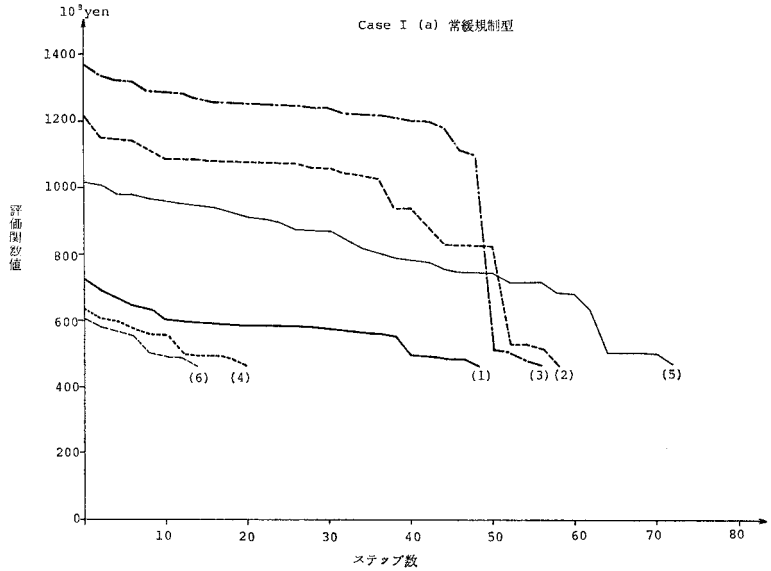
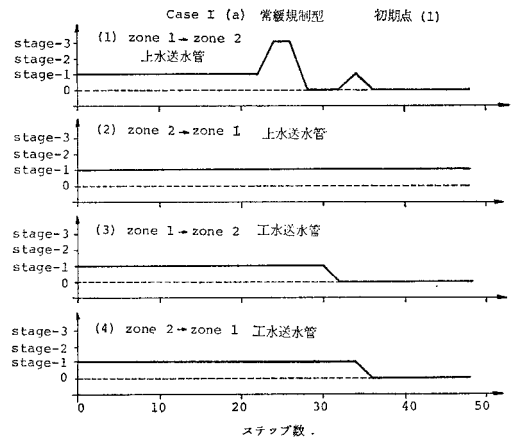


図-8 評価関数値の変化

図-8 にはケース I (a) においていくつかの初期点を与え、計算を行ったときの評価関数値の変化を示している。これらの解の探索の結果は、2 種類の局所最適解に収束していることがわかる。このうち初期点 (1)~(4) から得られた解は、ゾーン2からゾーン1への上水の送水を行うという水利利用形態を表わし、評価関数値は 460.5 億円である。一方、初期点 (5), (6) より得られた解の示す水利利用方式では、ゾーン間送水は行われず、総費用は 464.9 億円となっている。以上の結果から、先に示した解を全域的な解に相当するものとみなしても妥当であろう。ところで、これらの解 (水利利用形態) の評価にあたっては、最適解のみならず、同時に得られた次善的な解についてもあわせて検討する必要があると考



0, 建設されない  
stage 1, 2, 3 は建設されるステージを示す

図-9 ゾーン間送水管に関する 0-1 型近似関数値の変化

えられる。たとえば、ゾーン間送水を行わないような水利用方式は、総費用のうえからみても1つの有力な代替案であり、土地利用など他の評価基準についても勘案した場合には、むしろこのような水利用形態が望ましいものとして取り上げられる可能性もあるといえよう。

次に、図-9は初期点(1)からの解の探索過程においてゾーン間送水管の建設時期(すなわち0-1型近似関数の値)の変化を示したものである。すべての送水管がステージ1で建設されるという初期解に対して、解の改善途中ではその建設時期に変化がみられ、最終的に得られた解の示す水利用形態は、ゾーン2からゾーン1への上水の送水管だけをステージ1において建設するというものである。このことは解の改善に伴って0-1型近似関数の値も変化し、送水管の建設時期の違いによる総費用の変化も正確に評価されていることを意味している。なお、ちなみに計算時間についても40~100秒程度(京都大学大型計算機センターのM-190による)であり、この点からも本手法の実用性が保証されると考えられる。

以上のことから、本研究で提案した解法のアルゴリズムは、この種の非線形混合整数計画問題の解法として、少なくとも本研究で取り扱っている程度の規模の問題に対しては簡便かつ有効な手法であり、その際あわせて実行可能方向法を用いれば実用性に十分耐え得る解が求められるといえよう。

## 5. 結 言

本研究では、1水系流域における水配分問題を取り上げ、その際広域水道方式および三次処理方式の2方式を統合した水利用システムの有効性に着目し、これを水供給施設の段階的建設問題として取り扱った。このとき本モデルが非線形混合整数計画問題として定式化されることを示すとともに、これに対する有効な解法の開発を提示した。さらに、本モデルを加古川水系の水利用問題に適用することにより実証的な分析を行った。これらの分析結果は、ここで設定した多くの前提条件の成立する範囲内でのみいえる事項であるが、以下のように要約できよう。

① 流域の水需要の分布状況あるいはゾーンの分割方法によっては、ゾーン間送水が有利となる場合が生じるが、特に下流域から上流ゾーンへの送水が行われる可能性が高い。このようなゾーン間送水方式は、浄水場の規模の経済性による効果のみならず、水域の水質保全のために必要とされる三次処理量の低減、あるいは施設の遊休による機会損失費用の節減などの効果が強く作用する場合に、その合理性が保証されるものと判断される。

② 工業用水道浄水場および三次処理場の建設・処理パターンは、水系の水質規制方式ならびに河川水質と三次処理水質の相対的關係によって変化する。つまり、取水地点の河川水質が三次処理水質より良好な場合には、取水量(工業用水道浄水量)を抑制することにより、また、その逆の場合には河川からの取水を促進することによって、三次処理場の建設規模・処理量は減少し、その結果、高価な三次処理関連費用の節減を図ることが可能となる。このため場合によっては、計画期間初期には工業用水道浄水の供給が行われていても、末期にはこれに代って三次処理水の再利用が推進されるようになるケースも生じる。

③ また、これらの水供給施設(特に三次処理場)は、流域の水需要、水利用および水質規制方式の変化形態によっては、段階的な規模拡張が有利となることがある。

④ 非線形混合整数計画問題に対するアプローチとして提案した手法は、本研究で定式化したようなモデルの解法として適切な方法であるといえる。

しかしながら、本研究では1水系流域の水利用形態を流域全体の総費用の最小化という面から検討したにすぎないことに留意する必要がある。すなわち、ここで得られた解(代替案)は、本モデルの全般的な最適解あるいは次善解と考えられるが、これをもって最適な水利用方式を表わすものと断定するのは妥当でない。今後の課題としては、各前提条件の妥当性等の吟味をはじめ、さらには流域を構成する各市町村単位の水利用・土地利用形態などについてもきめ細かな分析を加えるとともに、環境問題など他の多くの面からのアプローチもあわせて行っていく必要があると考えられる。また、本研究でその有効性が実証された非線形混合整数計画問題の解法のアルゴリズムを、今後はさらに問題の規模(変数・制約条件の数)が大きくなった場合や、他の段階的拡張問題に適用することによって、その汎用性についての検討も行うことが重要であろう。

以上、述べたように今後に残された問題は あるものの、本研究で得られた知見により、1水系流域の水配分問題についての有効な計画情報が提示されたと考える。

## 参 考 文 献

- 1) 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・多角的水配分問題に関する一分析，土木学会論文報告集，No. 247，pp. 83~95，1976.3.
- 2) 大内忠臣：一水系流域における多角的水配分問題に関するシステム分析—非線形最適化手法によるアプローチ—，京都大学卒業論文，昭和50年2月。
- 3) 大内忠臣：1水系流域における広域的・多角的水利用方式に関するシステム分析，京都大学修士論文，昭和52年2月。
- 4) Haruna M. and N. Okada : A Mathematical Model

- for the Capacity Expansion Problem of Inter-regional Water Supply Facilities, the Memoirs of the Faculty of Engineering Kyoto University, Vol. XXXVI, Part 3, pp. 262~277, 1974.7.
- 5) Mulvihill M.E. and J.A. Dracup : Optimal Timing and Sizing of a Conjunctive Urban Water Supply and Waste Water System with Nonlinear Programming, Water Resources Research Vol. 10, No. 2, pp. 170~175, 1974.
  - 6) 建設省近畿地方建設局：広域利水調査中間報告書，昭和45年3月。
  - 7) 建設省河川局：広域利水調査第2次報告書，昭和48年。
  - 8) 建設省河川局：流量年表，昭和43年~47年。
  - 9) 建設省河川局：日本河川水質年鑑，昭和48年。
  - 10) 兵庫県：兵庫県統計書，昭和40年~47年。
  - 11) 通産省：工業統計表（用地・用水編），昭和39~46年。
  - 12) 厚生省環境衛生局：水道統計，昭和45~47年。
  - 13) 日本下水道協会：東京湾汚濁防止調査報告書，昭和47年3月。
  - 14) 工業用水協会：工業用水，125，126号（浄水場維持管理特集号），昭和44年。
  - 15) 松田暢夫：上水道送配水管の設計法と計算例，現代社，昭和47年。
  - 16) 日本水道協会：水道施設基準解説，1966。
  - 17) 吉岡栄夫・北村新藏：浄水施設一計画管理編一，一実地設計編一，地人書館，昭和49年。
  - 18) 日本工業用水協会：工業用水実務必携，1976。
  - 19) 日本工業用水協会：工業用水便覧。
  - 20) Zoutendijk, G. : Methods of Feasible Directions, Elsevier Publishing Company.

(1977.9.28・受付)