

流域における水循環の把握と水資源の配分に関する研究

A STUDY ON WATER BUDGET AND
WATER RESOURCES ALLOCATION IN A BASIN

三好逸二*・関 正和**・吉川勝秀***・朴 栄秀****

By Ituji MIYOSHI, Masakazu SEKI, Katsuhide YOSHIKAWA
and Eishu BOKU

1. 序

水資源をめぐる諸問題の深刻化は、新たな水資源の開発やその配分・利用形態などに対する種々の観点からの見直しを促しつつある。従来の水資源の配分・利用に関する計画は、ある限られた利水部門を対象にして立案されたものが多い。ところが、水は流域を流れ去る間に、家庭・工業・農業・業務といった利水部門や、河川・地下等の中で複雑にやりとりされる。したがって、限られた水資源を流域内で合理的に配分・利用するためには、特定の利水部門のみを対象とした計画では不十分であり、流域全体を包含する水システムを考える必要がある。また、水資源の配分を考察する際には、水に対する地域社会のさまざまな要望に十分留意すべきである。

水資源の配分・管理計画を立案する場合には、その前提として、流域内の水循環や水資源の配分現況が総合的に把握されている必要がある。そして、水資源の配分計画が実現されれば、現在の水利用状況がどのように変化し、それが地域社会にどのような影響を及ぼすかを推察することが重要である。ところが、総合的な状況把握はほとんどといってよいほどなされておらず、そのための方法論も十分に研究されているとはいいがたい。そこで、本報告では、まず、流域内の水収支を総合的に把握する方法を提案する。次に、この方法に基づいた水資源の配分・利用モデルを定式化し、流域内の水資源を総合的かつ経済・社会・環境等の多角的な観点から管理する方法を考察する。さらに、提案した流域内の水収支把握方法と水資源の配分・利用モデルを大和川流域の奈良盆

地に適用し、ケース・スタディを行った結果を報告する。

2. 従来の研究と本研究の基本的立場

従来の水資源の配分・利用に関する研究は、ある特定の利水部門（たとえば、都市用水あるいは農業用水）を対象にして行われたものが多い^{1)~9)}。日本における水資源の配分に関する先駆的な研究としては、合田ら¹⁾の研究がある。合田らは工業用水の最適配分問題を線形計画法で取り扱い、問題を定式化する際に導入される諸係数が最適解に及ぼす影響等について考察を行っている。春名ら⁶⁾および吉川ら⁷⁾は、ダム開発水や三次処理水（再利用水）等の都市への配分問題を同じく線形計画法で定式化し、最適解を求める際に分解原理を用いると、種々の計画間の調整過程を理解するうえで都合がよいとしている。また、吉川ら⁸⁾は建設費・維持管理費や水質を厳密に考慮する際に生じる非線形問題についても考察している。外国の研究においても、線形計画法で定式化を行ったものが最も多く^{2)~4), 10), 12)}、ネットワーク手法¹¹⁾や動的画法⁵⁾を用いたものもあるが、全般的にある限られた利水部門を対象としているものが多い。

流域全体の水管理という観点から、従来の水資源の配分・利用に関する研究をながめてみると、次のような問題点が浮かびあがる。

(i) 農業用水の還元利用や都市用水の開放系¹³⁾としての再利用など、流域内でくり返し利用される水（流域の水循環）の取り扱いが十分でない。

(ii) 家庭・工業・農業・河川・地下（水）等が複雑に絡みあって水配分ネットワークを構成しており、その間の水の流動が流下・浸透・蒸発散等の自然の法則と種々の社会・経済的関係の双方によって規定されていることに関する考察が不足している。

(iii) 水資源に対する地域社会の要望を、経済・社

* 正会員 工修 建設省土木研究所企画部システム課建設専門官

** 正会員 工修 建設省土木研究所企画部システム課研究員

*** 正会員 工修 建設省土木研究所企画部システム課研究員

**** 正会員 工修 (株)長大橋設計センターシステム開発部 M.C

会・環境等の多角的な観点からとらえ、それを流域の水配分計画に反映させる努力が不足している。

これらの問題を解明するためには、今までのようにある限られた利水部門を対象とする取り扱いでは不十分であり、流域全体を包含した総合的な水循環システムを考えることが重要である。すなわち、あらゆる利用水、排水および自然水を含めた流域内の水収支を総合的に取り扱う必要がある。また、水資源の配分計画を立案する際には、水資源が地域社会で果た役割を十分に認識しておくことも重要である。

本論文では、上述のことを念頭におき、流域内の水資源の配分問題を考察する方法を提示する。従来の研究においては、水資源の配分方法について多くの方法論が提示されているにもかかわらず、あらゆる水資源問題の検討の前提となる総合的な状況把握に対する方法論は、必ずしも十分に開発されているとはいえない。そこで、まず、その方法として一覧表（「水資源連関表」）による分析法を提案する。この水資源連関表は、経済学の方野で提案された地域間産業連関表と類似の構造をもつものであり、流域内の各地区間でやりとりされる水量と各地区内の水資源に関連する要素間（後述の流域構成要素間）でやりとりされる水量を体系的に示すことができる。これにより流域における水循環と水資源の配分状況が総合的に把握される。

次に、水資源連関表に基づいて、流域内の水資源の配分問題を定式化する。本研究でも、問題の性格、精度、解法の簡便さなどを考慮して、線形計画法を用いることにする。ただし、線形化により生じる問題点は、ケース・スタディの際に感度分析等により明確にし、諸係数の設定には十分注意を払うことにする。定式化にあたっては、物理的な条件として水量の連続条件と運動に関する条件を制約条件として含め、水資源に対する地域社会の要望を、各種の社会的制約条件および目的関数として

記述し、多角的な検討を行う。

以上で述べた方法を大和川流域の奈良盆地に適用し、ケース・スタディを行った。その内容は次のようなものである。

(i) 水資源連関表による奈良盆地の水循環と水資源の配分現況の把握

(ii) 水資源の適正配分に関するシミュレーション

(iii) (i), (ii) をもとにした水資源をめぐる諸問題の検討

(iv) 提案した方法論の (i), (ii), (iii) をもとにした検討

本研究は、地表水・地下水および大気中の水も含めた流域の水循環を取り扱っており、現状の水資源の配分・利用形態の見直しや広域的な水管理などには有益であると考える。

3. 流域における水循環と水資源の配分・利用状況を体系的に表示する方法の提案

ここでは、流域における水循環と水資源の配分・利用状況を体系的に表示する方法を提案する。

(1) 流域構成要素とその特質

水資源の配分・利用には、河川・上水道・下水道・家庭・工業等の特質を異にする要素が関連している。各要素は、水を輸送する機能、利用する機能、汚濁負荷を発生させる機能等の諸機能のうち一つまたは複数をそなえている。これらの要素を「流域構成要素」とよび、ここでは河川・地下・上水道・家庭・業務・工業・農業・下水道・流域の9要素を取り上げる。それぞれの要素がもつ機能を表-1 のようにとらえることにする。

流域はいくつかの地区から構成されており、各地区はそれぞれこれら9要素を含むものとしてとらえられてお

表-1 流域構成要素とその機能

流域構成要素	機能・特質概要	地区間水輸送機能をもつ要素	水利用要素	降水受水機能をもつ要素	蒸発散機能をもつ要素	水質浄化機能をもつ要素	汚濁負荷発生機能をもつ要素
河川	湖沼を含む	○		○*1	○*1	○*2	
地下(水)	深層および浅層地下水帯	○				○*2	
上水道	取水・導水・浄水・配水	○				○	
家庭	住宅		○			○*3	○
業務	主として3次産業		○			○*3	○
工業	工場		○			○*3	○
農業	水田・畑・用排水施設	○	○	○	○	○*2	○
下水道	下水管網と処理施設	○				○	
流域	農地以外の地表面			○	○	○*2	

(注) *1 全面積に比して河川・湖沼の面積が小さいときには無視する

*2 自浄作用

*3 当該要素内で循環再利用を行う際の処理機能

り、流域内の水は、これら9要素の中のどれかに必ず含まれる。流域内の各地区内における水のやりとりはこれら9要素相互間で行われ、各地区間の水のやりとりは河川・地下・上水道・農業(用排水施設)・下水道の水輸送機能をもつ5要素を介して行われる。降水や蒸発散等の系外との水の受けわたしは、降水受水機能をもつ要素および蒸発散機能をもつ要素を介して行われることになる。なお、流域構成要素をさらに細かくあるいは大まかに分類することはもちろん可能であり、以下の議論はそのような場合についても同様成立する。

(2) 水資源連関表

流域内の水は、各要素間・各地区間でさまざまな形態でやりとりされている。このような水のやりとりを表示する方法として、表一2に示すような一覧表(「水資源連関表」)を提案する。これは、概念的には地域間産業連関表と似ており、左端にどの地区のどの要素から水が流入しているのか、上端にどの地区のどの要素へ流れて行くのかを示している。したがって、表一2におけるAの部分、地区1の内部における各要素間の水の受けわたし量を示している。また、Bの部分は地区1から地区2へ輸送される水量を示し、Cの部分は地区1から系外への水量、すなわち、対象としている地域外への流出および空中へ蒸発散する量を示している。一方、Dの部分は地区2から地区1へ輸送される水量を示し、Gの部分は系外から地区1への水量、すなわち、分析の対象としている地域外からの流入量および降水量を示している。

表一2 水資源連関表

流出 流入	地区 1							地区 2							系外流出 地 域 外 流 出 蒸 発 散 計					
	河川	地下水	上水道	家庭	業務	工業	農業	下水道	流域	河川	地下水	上水道	家庭	業務		工業	農業	下水道	流域	
地区 1	河川		x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}	x_{16}	x_{17}	x_{18}	x_{21}									g_1	x_{1s}
	地下水	x_{21}		x_{23}	x_{24}	x_{25}	x_{26}	x_{27}	x_{28}		x_{31}								g_2	x_{2s}
	上水道	x_{31}	x_{32}		x_{34}	x_{35}	x_{36}	x_{37}	x_{38}		x_{41}								g_3	x_{3s}
	家庭			x_{42}							x_{51}								g_4	x_{4s}
	業務				x_{52}						x_{61}								g_5	x_{5s}
	工業					x_{62}					x_{71}								g_6	x_{6s}
	農業						x_{72}				x_{81}								g_7	x_{7s}
下水道	x_{81}	x_{82}	x_{83}	x_{84}	x_{85}	x_{86}	x_{87}	x_{88}	x_{89}	x_{91}	x_{92}	x_{93}	x_{94}	x_{95}	x_{96}	x_{97}	x_{98}	x_{99}	g_8	x_{8s}
流域	x_{91}	x_{92}	x_{93}	x_{94}	x_{95}	x_{96}	x_{97}	x_{98}	x_{99}										g_9	x_{9s}
地区 2	河川	x_{21}									x_{31}	x_{32}	x_{33}	x_{34}	x_{35}	x_{36}	x_{37}	x_{38}	g_1	x_{2s}
	地下水	x_{31}								x_{41}	x_{42}	x_{43}	x_{44}	x_{45}	x_{46}	x_{47}	x_{48}	x_{49}	g_2	x_{3s}
	上水道	x_{41}	x_{42}							x_{51}	x_{52}	x_{53}	x_{54}	x_{55}	x_{56}	x_{57}	x_{58}	x_{59}	g_3	x_{4s}
	家庭			x_{52}						x_{61}	x_{62}	x_{63}	x_{64}	x_{65}	x_{66}	x_{67}	x_{68}	x_{69}	g_4	x_{5s}
	業務				x_{62}					x_{71}	x_{72}	x_{73}	x_{74}	x_{75}	x_{76}	x_{77}	x_{78}	x_{79}	g_5	x_{6s}
	工業					x_{72}				x_{81}	x_{82}	x_{83}	x_{84}	x_{85}	x_{86}	x_{87}	x_{88}	x_{89}	g_6	x_{7s}
	農業						x_{82}			x_{91}	x_{92}	x_{93}	x_{94}	x_{95}	x_{96}	x_{97}	x_{98}	x_{99}	g_7	x_{8s}
下水道	x_{91}	x_{92}	x_{93}	x_{94}	x_{95}	x_{96}	x_{97}	x_{98}	x_{99}	x_{101}	x_{102}	x_{103}	x_{104}	x_{105}	x_{106}	x_{107}	x_{108}	x_{109}	g_8	x_{9s}
流域	x_{101}	x_{102}	x_{103}	x_{104}	x_{105}	x_{106}	x_{107}	x_{108}	x_{109}										g_9	x_{10s}
系外流入	地域外流入	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7	v_8	v_9										v
	降水	w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	w_6	w_7	w_8	w_9										u
計	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}	X_{16}	X_{17}	X_{18}	X_{19}	X_{20}

水の受けわたしは、水資源連関表の全マス目で生じるわけではなく、その可能性のあるマス目は限定されている。表一2では、後述するケース・スタディで水の受けわたしがないと考えられるマス目を空白にした。同表よりわかるように、地区内の水のやりとりを示すA、E、…の対角部分は同様のパターンをしており、地区間の水のやりとりを示すB、D、…の部分は水輸送機能をもつ要素の対角成分のみが値をもつ可能性がある。また、対象流域外との水のやりとりを示すC、F、…とG、H、…の部分は、水輸送機能をもつ要素、蒸発散機能をもつ要素および降水受水機能をもつ要素のみが値をもつ可能性がある。

後の理論展開の便宜のために、次のように記号を定める。

x_{ij}^s : r 地区の i 要素から s 地区の j 要素への水輸送量を示す。たとえば、 x_{ij}^s は r 地区内で i 要素から j 要素にわたされる(排水・浸透・湧水・給水等)水量を表わす。

g_i^r : r 地区から i なる水輸送要素を介して分析しようとしている地域の外へ輸送(導水・送水・流下等)される水量

f_i^r : r 地区の i 要素から蒸発散する水量

x_i^{*r} : r 地区の i 要素から他地区や対象地域の外、大気中へ移動する水量の合計 (r 地区内での移動は除く)

X_i^r : r 地区の i 要素から流出・移動する水量の合計

v_j^s : 対象地域の外部から j なる輸送要素を介して s 地区に輸送(導水・送水・流下)される水量

w_j^s : s 地区の j 要素に降水として入ってくる水量

x_{sj}^{*r} : 他地区、対象地域外、大気中から s 地区 j 要素へ移動してくる水量の合計 (s 地域内からの移動は除く)

X_j^s : s 地区の j 要素に入ってくる水量の合計

V: 対象地域外から対象地域内の要素に導水・送水・流下等によって入ってくる水量の合計

U: 降水として対象地域内へ流入する水量の合計

G: 対象地域から地域外へ導水・送水・流下等によ

て出る水量の合計

F ：対象地域から蒸発散する水量の合計

このように記号を定めると次の関係式が成立する。

$$x_i^r = \sum_{s=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij}^{rs} + g_i^r + f_i^r \dots\dots\dots (1)$$

$$X_i^r = \sum_{s=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij}^{rs} + g_i^r + f_i^r \dots\dots\dots (2)$$

$$x_i^s = \sum_{r=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij}^{rs} + v_j^s + u_j^s \dots\dots\dots (3)$$

$$X_i^s = \sum_{r=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij}^{rs} + v_j^s + u_j^s \dots\dots\dots (4)$$

$$V = \sum_{s=1}^n \sum_{j=1}^m v_j^s \dots\dots\dots (5)$$

$$U = \sum_{s=1}^n \sum_{j=1}^m u_j^s \dots\dots\dots (6)$$

$$G = \sum_{r=1}^n \sum_{i=1}^m g_i^r \dots\dots\dots (7)$$

$$F = \sum_{r=1}^n \sum_{i=1}^m f_i^r \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 n ：対象流域内の地区数、 m ：流域構成要素数。

(3) 水資源連関表による現状把握

水資源連関表を用いて水循環や水資源の配分・利用現状を把握しようとするれば、まずはじめに次の2つの事項を決定しておく必要がある。1つは分析対象期間の決定であり、あと1つは分析対象地域とその内部の地区分割の決定である。

a) 分析対象期間

分析対象期間は分析目的に応じて決定すべきものであり、後述する現状把握や適正水配分シミュレーションなどにおいて重要な意味をもってくる。分析対象期間を長く(たとえば1年間)とれば、流域における巨視的かつ平均的な水の流動が把握でき、この場合には、水量に関する連続条件および水の運動(蒸発散・地下水の湧水・浸透等)に関する条件を単純な形で与えることができよう。たとえば、水量の連続条件式は、分析対象期間が長ければ、貯留量の変化が相殺されるので、流入量と流出量が等しいとにおいてよい¹⁴⁾。すなわち、 t 地区の k 要素について

$$\sum_{s=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij}^{ts} + g_k^t + f_k^t = \sum_{r=1}^n \sum_{i=1}^m x_{ik}^{tr} + v_k^t + u_k^t \dots\dots\dots (9)$$

i.e. $X_k^t = X_k^t \dots\dots\dots (10)$

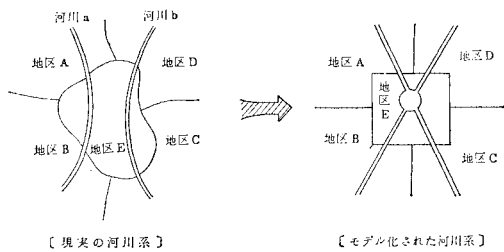
なる関係式が成立する。また、運動を表わす式は、後述のように蒸発散率・湧出率・浸透率・河川水や地下水の分流比等を用いて与えることができよう。もちろん、このような連続および運動条件式の単純化により分析結果の利用範囲が限定されることはいうまでもない。たとえば、渇水期における水配分計画においては、貯留量の変

化は一つの考察対象であり、上述のような取り扱いをするわけにはいかない。また、揚水量が流入量に比べて大きい地下水層を含む地域においては問題が残る。

b) 分析対象地域と地区分割

分析対象地域の設定においては、その地域への流出入量が把握しやすいような境界を選ぶ必要がある。

対象地域内の地区分割にあたっては、いくつかの点に留意する必要がある。1つはデータのとりやすさである。上・下水道関係資料は行政区画によって収集されているものが多いが、河川関係資料は水文界によって収集されている場合が多く、資料収集上都合のよい地区分割を行う必要がある。また、1地区の中に特性の異なる複数の河川が含まれると困難な問題が生じる。水資源連関表では、1地区内の河川は1個のものとして取り扱う(集中系として扱う)ことから、たとえば、水質の非常に異なる2本の河川が合流することなくその地区を通して流下するような場合には、その下流における水質解析は無意味となる(図一1参照)。そのような場合には、河川を分離するような地区割りをすることが望ましい。複数河川を含む地区を考える場合には、水質および流況の似た場所を統合すべきである。現実の問題に対しては、以上のことがらに注意しながら、分析目的に応じて都合のよい地区分割を行うことになる。



図一1 水資源連関表での河川の取り扱い

以上のような特徴をもつ水資源連関表を用いて、流域内を複雑にやりとりされる水の有機的な結びつきを把握しておくことは、流域における水問題を検討するうえで重要であると考える。

4. 流域における水資源の配分・利用のモデル化

(1) モデル作成の目的

以下で述べる水資源の配分・利用モデル作成の目的は次のようなものである。

(i) 水資源の利用に関連して地域社会が望むことがらは多種多様である。これら種々の要求に照らして適正な水資源の配分計画を探し出すことがモデル作成の第一

の目的である。

(ii) 水資源の配分計画案の作成にあたっては、物理的に実現可能であること、また、社会・財政・環境等の面からもそれが受け入れられることが必須の条件である。以下で述べるモデルにより得られる解は、数多くの実現可能解のうち、ある観点からみた最適性が保証されているにすぎない。多角的な観点から水資源計画の検討を行うためには、どのような領域（範囲）の計画案が実現可能であるかを把握することが重要であり、これがモデル作成の第二の目的である。

(iii) われわれが記述（シミュレーション）できるのは、現実の世界をなんらかの形で抽象化して把握したものでしかない。したがって、われわれが記述したものが現実の世界をうまく説明できるか否かを検討することはきわめて重要である。同時に、目的やモデルを少し変更させた場合にどのような結果が得られるかを把握しておくことも重要である。種々のパラメーターや制約条件の変更に伴う感度分析はこの一例であり、得られた結果の信頼性と安定性の把握はモデル作成の第三の目的である。

(2) 線形計画法による水資源の配分・利用モデルの定式化

ここでは流域における水資源の配分・利用問題を、水資源連関表に示される水のやりとり量を変数として、線形計画法で定式化する。

前述のように、適正水配分計画とは、物理・社会・経済・環境等の面からの要求をすべて満たしたうえで実現可能な計画が考えられる場合に、ある観点からみた最適性が保証されているものである。したがって、適正配分計画を論じる場合には、必ず満たしていなければならない制約と計画がめざすことがらが正しく記述されている

必要がある。以下では、分析対象期間を1年程度の長期にとった場合の、各種制約条件と目的関数について考察する。

a) 制約条件

制約条件には大別して2種類のものがある。1つは物理的な条件（自然法則）であり、必ず満たさなければならない。あと1つは財政、社会・経済、環境、技術・施設等の面から要求される社会的な制約条件であり、社会の進展とともに変化するものが多く、不等式で表わされるものが多い。

(i) 物理的な制約条件

① 水量の連続条件

水量の連続条件は線形であり、*t* 地区 *k* 要素について式 (9) あるいは式 (10) で与えられる。

② 運動に関する条件

水の蒸発散や流れ方を支配する条件は一般に線形ではないが、係数の決定を行った状態からのかい離が小さい領域では、これらの条件を線形化して近似することが可能であり、ここでは表-3 に示すような線形化した運動に関する条件式を考える。

(ii) 財政面からの制約条件

③ 建設・運営費

水資源関連施設の建設・運営費用はその地域または各地区の可能投資額によって制約をうける、いま、建設・運営費が各要素間の水輸送量（送水量・浄水量・取水量等を含む）と一単位の水を輸送（送水・浄水・取水等）するのに必要な施設の建設・運営費用との積で表わすことにすると、地区 *r* の総建設・運営費 *C^r* は、

$$C^r = \sum_{s=1}^n \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m C_{ij}^r x_{ij}^r + \sum_{i=1}^m C_{i0}^r g_i^r + \sum_{i=1}^m C_{0i}^r v_i^r \dots \dots \dots (11)$$

表-3 水の運動に関する条件式

始端	末端要素	運動条件式	α の意味	始端	末端要素	運動条件式	α の意味
河川	他地域の河川	$x_{11}^r = \alpha_{11}^r \cdot x_{11}^{r*}$	分流比	家庭	蒸発散	$f_1^r = \alpha_{11}^r \cdot X_1^r$	家庭からの率
	対象地域外の河	$g_1^r = \alpha_{12}^r \cdot x_{11}^{r*}$	分流比	業務	蒸発散	$f_2^r = \alpha_{12}^r \cdot X_1^r$	業務からの率
	蒸発散	$f_1^r = \alpha_{13}^r \cdot x_{11}^{r*}$	河川からの率	工業	蒸発散	$f_3^r = \alpha_{13}^r \cdot X_1^r$	工業からの率
ただし、 $\sum_{s=1}^n \alpha_{1s}^r + \alpha_{10}^r + \alpha_{11}^r = 1$				農業	地区内の地下水	$x_{22}^r = \alpha_{22}^r \cdot X_2^r$	地下への浸透率
地下水	地区内の河川	$x_{21}^r = \alpha_{21}^r (X_2^r - \sum_{j=3}^m x_{2j}^r)$	地下水湧出率		蒸発散	$f_4^r = \alpha_{24}^r \cdot X_2^r$	農業からの率
	他地区の地下水	$x_{22}^r = \alpha_{22}^r (X_2^r - \sum_{j=3}^m x_{2j}^r)$	他地区への率	流域	地区内の河川	$x_{31}^r = \alpha_{31}^r (X_3^r - x_{32}^r)$	直接流出率
	対象地域外の地下水	$g_2^r = \alpha_{23}^r (X_2^r - \sum_{j=3}^m x_{2j}^r)$	地域外への率		地区内の地下水	$x_{32}^r = \alpha_{32}^r (X_3^r - x_{32}^r)$	地下への率
ただし、 $\alpha_{21}^r + \sum_{s=1}^n \alpha_{2s}^r + \alpha_{20}^r = 1$					蒸発散	$f_5^r = \alpha_{33}^r (X_3^r - x_{32}^r)$	流域からの率
上水道	地区内の地下水	$x_{32}^r = \alpha_{32}^r \cdot X_3^r$	漏水率	ただし、 $\alpha_{31}^r + \alpha_{32}^r + \alpha_{33}^r = 1$			

と書くことができる。ここに、 $C_{ij}^r(C_{ij}^{r0}, C_{ij}^{r\infty})$ は、 $r(r, 0)$ 地区 $i(i, 0)$ 要素から $s(0, r)$ 地区 $j(0, i)$ 要素へ単位水量を輸送（送水・浄水・取水等）する間に必要な年間費用であり、施設の建設費と資本回収係数との積に年間運営費を加えたものとして与えることができる。ただし、0 は対象地域外を示す。

さて、各地区ごとに定められる年間可能投資額を \bar{C}^r 、対象地域について定められる年間可能投資額を \bar{C} で表わすと財政面からの制約条件は次のように表わされる。

$$C^r \leq \bar{C}^r \quad (r=1, \dots, n) \quad \text{または} \quad \sum_{r=1}^n C^r \leq \bar{C} \quad \dots\dots\dots (12)$$

以上は建設費と運営費を一緒に考えた場合の取り扱いであるが、これらを分離して考えることもできる。すなわち、施設建設費の減価償却費用がその施設による水の輸送量（送水量・浄水量・取水量等を含む）に比例すると考えれば、建設費（毎年等価価格）の算定は式（11）と同様に行える。また、施設の運営費がそれによる水の輸送量（送水量・浄水量・取水量等を含む）に比例すると考えた場合にも同様に、運営費の算定は式（11）と同じ形のものを用いることにより可能となる。そして、これら建設費および運営費のそれぞれに対して式（12）と同様な制約条件が課されることになる。

ここでは費用を水量に関して線形で表現したが、現実には規模の経済性等によって非線形の特性を示すことがあり、設定した係数の適用範囲については注意が必要である¹⁾。

(iii) 社会・経済面からの制約条件

④ 水資源からみた収容可能人口

r 地区の収容可能人口 P^r は、地域計画等によりある人数 \bar{P}^r 以上であることが要請されることが多い。

$$P^r = X_i^r / d_i^r \geq \bar{P}^r \quad \dots\dots\dots (13)$$

ここに、 d_i^r は1人あたりの使用水量である。

⑤ 水資源からみた生産可能額

r 地区における工業・農業・業務の生産可能高も、あ

る一定額以上を求められることが多い。 i 産業において一単位の生産を行うのに必要な水量を d_i^r とすれば、次の制約条件式を得る。

$$O_i^r = X_i^r / d_i^r \geq \bar{O}_i^r \quad \dots\dots\dots (14)$$

($i=5, 6, 7, r=1, \dots, n$)

ここに、 \bar{O}_i^r は必要生産額である。

また、特に農業用水において見られるように制度または慣行によってその取水量が定められている場合にはその取水量の上・下限値等を与える方が都合がよいことも多い。

⑥ 供給水量比

家庭・工業・業務・農業への供給水量比を定めることによりこれら相互の均衡ある発展を期すこともできる。

$$X_i^r = \beta_i^r \left(\sum_{k=4}^7 X_k^r \right) \quad (r=1, \dots, n) \quad \dots\dots\dots (15)$$

($i=4, \dots, 7$)

ただし、 $\sum_{i=4}^7 \beta_i^r = 1$ である。

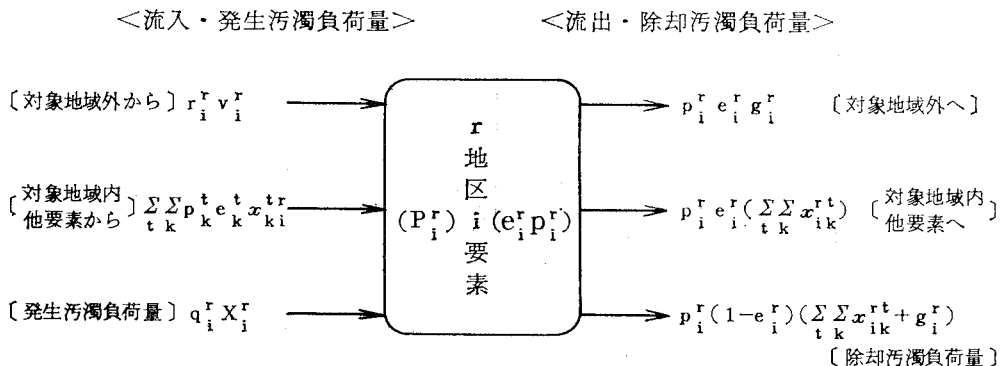
(iv) 環境面からの制約条件

⑦ 水質の規制

r 地区 i 要素における汚濁負荷量の収支を考える（図—2 参照）。 r 地区 i 要素に流入し、利用された直後の水質（汚濁負荷濃度）を p_i^r とすると、これは対象地域外からと対象地域内のほかの要素からの汚濁量および発生汚濁負荷量に支配される。いま、発生汚濁負荷量が使用水量に比例すると仮定すれば、水質浄化作用を考慮した汚濁負荷の連続式は次のように表わされる。

$$\begin{aligned} r_i^r v_i^r + \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m p_{ke}^r x_{ki}^r + q_i^r X_i^r &= p_i^r e_i^r g_i^r + p_i^r e_i^r \left(\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m x_{ik}^r \right) \\ &+ p_i^r (1 - e_i^r) \left(\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m x_{ik}^r + g_i^r \right) \\ &= p_i^r (X_i^r - f_i^r) \quad \dots\dots\dots (16) \end{aligned}$$

ここに、 r_i^r ：対象地域外からの流入水の水質、 q_i^r ：発生汚濁負荷濃度、 e_i^r ：汚濁負荷流達率（流出汚濁負荷を流入・発生汚濁負荷量の和で割った値と定義する）。た



図—2 r 地区 i 要素の汚濁負荷の収支

だし、降水および蒸発散水の水質（汚濁負荷濃度）は 0 と考えてよいものとする。

このような式は $n \times m$ 個あり、水質 p_i^r は、水資源連関表の各値 $x_{ij}^r \cdot v_j^r \cdot g_i^r \cdot X_i^r$ 、対象地域外からの流入水質 r_i^r 、汚濁負荷流達率 e_i^r および発生汚濁負荷濃度 q_i^r が与えられると、これらの連立方程式の解として求められる。これを行列表示すると、

$$p = (X - f - e \cdot X) \cdot (vr + Xq) \dots\dots\dots (17)$$

となる。ここに、

$$\begin{aligned}
 x &= \begin{bmatrix} x_{11}^1 & x_{12}^1 & \dots & x_{1n}^1 \\ x_{21}^1 & x_{22}^1 & & \\ \vdots & \vdots & & \\ x_{n1}^1 & & & \end{bmatrix}, & v &= \begin{bmatrix} v_1^1 & & & \\ & v_2^1 & 0 & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & v_n^1 \end{bmatrix}, & g &= \begin{bmatrix} g_1^1 & & & 0 \\ & g_2^1 & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & g_n^1 \end{bmatrix} \\
 X &= \begin{bmatrix} X_1^1 & & & 0 \\ & X_2^1 & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & X_n^1 \end{bmatrix}, & f &= \begin{bmatrix} f_1^1 & & & 0 \\ & f_2^1 & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & f_n^1 \end{bmatrix} \\
 e &= \begin{bmatrix} e_1^1 & & & 0 \\ & e_2^1 & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & e_n^1 \end{bmatrix}, & q &= \begin{bmatrix} q_1^1 \\ q_2^1 \\ \vdots \\ q_n^1 \end{bmatrix} \\
 r &= \begin{bmatrix} r_1^1 \\ r_2^1 \\ r_3^1 \\ \vdots \\ r_n^1 \end{bmatrix}, & p &= \begin{bmatrix} p_1^1 \\ p_2^1 \\ p_3^1 \\ \vdots \\ p_n^1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

である。

各要素の水質は上記のようにして求めるが、特に河川水質のみを問題にする場合には、次の制約条件式を考えればよい。

$$\begin{aligned}
 r_1^r v_1^r + \sum_{s=1}^n p_s^r e_s^r x_{1s}^r + p_2^r e_2^r x_{2s}^r + p_3^r e_3^r x_{3s}^r + p_4^r e_4^r x_{4s}^r \\
 + p_5^r e_5^r x_{5s}^r \leq \bar{p}_1^r (x_{1s}^r + x_{2s}^r + x_{3s}^r \\
 + \sum_{s=1}^n x_{1s}^r + g_1^r) \quad (r=1, \dots, n) \dots\dots\dots (18)
 \end{aligned}$$

ここに、 \bar{p}_1^r は地区 r の河川に対する水質基準である。この制約条件を用いる際には水質値 r_i^r 、 p_i^r 、 e_i^r 、 q_i^r 、 v_i^r 、および p_i^r 、および汚濁負荷流達率 e_i^r を前もって評価しておかなければならない。ところが、上流からの河川水質 p_i^r がその流量 x_{ij}^r とともに未知数であり、式(18)は非線形となる。そこで、本研究では全体的な精度のバランスや解析上の簡便さを考慮して、式(18)の p_i^r (上

流から流入する河川水の水質) を \bar{p}_i^r あるいは想定水質でおきかえることにより線形化する方法、②最適化計算においては、この制約を除外し、得られた結果を用いて式(17)（非線形式）により水質を計算して水質基準値を満しているかどうかをチェックする方法を併用する。なお、後述のケース・スタディーでは BOD についてのみ考慮し、水質汚濁問題が激しい場合には①の方法でまずシミュレートし、②の方法でチェックを行うことにした。

⑧ 地下水取水量に関する制約

地盤沈下や地下水保全の観点から、地下水取水量は制限されることがある。

$$\begin{aligned}
 x_{ij}^r \leq \bar{x}_{ij}^r \text{ または } \sum_{i=3}^7 x_{ij}^r \leq \bar{x}_j^r \dots\dots\dots (19) \\
 (i=3, 4, 5, 6, 7; r=1, \dots, n)
 \end{aligned}$$

ここに、 \bar{x}_{ij}^r および \bar{x}_j^r は、それぞれ各地区の各要素および各地区全体に対して定められた許容地下水取水量である。

⑨ 維持流量

河川流量は、環境保全等の面からある一定量 (\bar{x}_{1s}^r および \bar{g}_1^r) を越えることが望まれている。

$$\begin{aligned}
 x_{1s}^r \geq \bar{x}_{1s}^r \text{ および } g_1^r \geq \bar{g}_1^r \dots\dots\dots (20) \\
 (r, s=1, \dots, n \text{ ただし } r \neq s)
 \end{aligned}$$

ところで一年間のトータル量を取り扱う場合には \bar{x}_{1s}^r および \bar{g}_1^r としては、通常の意味での維持流量に洪水時に利用されることなく流下する量を加えた値を与える必要がある。

(v) 技術・施設面からの制約条件

⑩ 再利用水に関する制約

工業・家庭・業務の内部において循環再利用に回しうる水量は、技術的な制約等から全使用水量のうちの一部に限定される。 z_j を循環再利用率の上限とすれば、

$$\begin{aligned}
 x_{jj}^r / (x_{1j}^r + x_{2j}^r + x_{3j}^r + x_{4j}^r + x_{5j}^r) \leq z_j \\
 (j=4, 5, 6; r=1, \dots, n) \dots\dots\dots (21)
 \end{aligned}$$

となる。また、再生水の使用用途には衛生上その他の理由により制限されることが多い。 g_j を全使用水に対する再生利用率の上限とすれば、次式を得る。

$$\begin{aligned}
 (x_{jj}^r + x_{6j}^r) / (x_{1j}^r + x_{2j}^r + x_{3j}^r \\
 + x_{4j}^r + x_{5j}^r) \leq g_j \dots\dots\dots (22) \\
 (j=4, 5, 6; r=1, \dots, n)
 \end{aligned}$$

⑪ 利水施設により定まる河川取水可能量の上限

ダム等の利水施設の状態により、河川から取水しうる水量の上限が決定される。これは、洪水時等に利用されることなく河川を通過する水量を除いた利用可能水量の上限を示す式であり、物理的な制約と考えてもよい。

$$x_{1s}^r + x_{6s}^r + x_{7s}^r \leq \bar{x}_s^r \dots\dots\dots (23)$$

ここに、 \bar{x}_s^r は河川からの取水可能量の上限値である。

⑫ その他

その他の制約も必要に応じて考慮する必要があり、線形表示されてモデルに組み込まれる。現実の問題に即応した制約条件を多く設定すれば、得られる解は現実的であり、実現の容易なものとなることが多い。一方、一部の制約条件を取り上げなかったりするとその実現は容易でない反面、問題の特性を把握する上で都合のよい場合もある。

b) 目的関数

上述したような制約条件式を用いていえることは、すべての制約を満たす解が存在するか否か、存在するとすればどの範囲であるかということである。ここでいう目的関数は、これらすべての制約を満たす計画案のうち、なんらかの目的を定めることにより、その目的を最も満たすものを採用するために用いられる。

目的関数としては種々のものが考えられる。

① 建設費および運営費を最小にする。

$$\min \left\{ \sum_{r=1}^n C^r \right\} \dots \dots \dots (24)$$

② 水資源からみた対象地域への収容可能人口を最大にする。

$$\max \sum_{r=1}^n P^r \dots \dots \dots (25)$$

③ 水資源からみた対象地域における生産可能高を最大にする。

$$\max \sum_{i=1}^n O_i^r \quad (i=5, 6, 7) \dots \dots \dots (26)$$

④ ウェイトづけした目的関数を最大にする。

$$\max \left[W_1 \cdot \left(\sum_{r=1}^n P^r \right) + W_2 \cdot \left(\sum_{i=1}^n O_i^r \right) - W_3 \cdot \left\{ \sum_{r=1}^n (C^r + M^r) \right\} \right] \dots \dots \dots (27)$$

⑤ その他

その他、目的に応じて関数（線形表示された関数）が設定される。

線形計画モデルの目的関数としては、分析目的に応じてこれらの中から適切なもの一つ選ぶことになる。このうち①は水資源の利用による効用などを制約条件により規定しておき、それに必要な費用を最小とする計画を求めようとするものである。また、②と③は水資源の計画・管理のために支出しうる費用や他の効用などを制約条件によって規定したうえで、特定の効果を最大化しようとするものである。その際、各目的（効用、不効用）間のトレード・オフの関係は、制約条件として示される効用の必要水準や限界値を変化させた場合の目的関数の値（目的達成度）の変化として把握される。また、目的関数④のように多目的に対して適正な水配分を考える場合には、トレード・オフの関係にある複数の目的

の達成水準を考慮する目標計画法 (Goal Programming) や SWT (Surrogate Worth Trade-off)¹⁹⁾ 法等を用いることが可能であり、これについては次の機会に報告したい。

(3) 分解原理の適用による解法

水資源問題の一つに（地区間特に上・下流地区間）の利害関係に関するものがある。この問題へのアプローチのために、本研究では分解原理の適用による解法²²⁾を採用した。上述した水資源の配分問題に分解原理を適用すると、全体としての最適化の過程を、各地区内部の最適化をめざす複数の副問題と、各地区相互間の調整により流域全体としての最適化をめざす主問題に分けて把握することができ、後述のように地区間の調整過程を明示的に把握することが可能となる。分解原理を水配分問題に適用した場合の数学的構成と、その意義や利点については参考文献 23) に詳述した。

5. 大和川流域奈良盆地における ケース・スタディ

ここでは 3., 4. で示した方法論を具体化するために、まず表 2 の水資源連関表に沿って昭和 47 年度における奈良盆地の水量収支を把握した。データは主として昭和 47 年度のものを用いたが、一部昭和 45 年度のものも含まれている。

次に、地域内に入る降水量と導水量が与えられた場合に、各種観点からみてどのように水を配分するのが合理的であるかを検討するための最適配分モデルを作成し、奈良盆地に適用した。ここでは現況（昭和 47 年度）の水配分と適正な水配分とを比較するために昭和 47 年度の諸状態を前提として最適化を行った。

対象とした奈良県内の大和川流域を図 3 に示す。この地域は県内の都市活動、工業活動および農業活動の中心地であり、25 の市町村から構成されている。このうち、奈良市、天理市、御所市および吉野郡大淀町の面積のうちそれぞれ 42.1%, 19.1%, 7.5%, 76.8% は対象地域外にある。

この地域では地表水と地下水の水文流域がほぼ一致しており、大体王寺町藤井の 1 か所から対象地域外への流出があるとみることができる。したがって、水量収支の把握がなされやすい地域とされている。

水利用現況の特徴としては、河川取水量の大半が農業用水として使われていることがあげられる。また、下水道施設は奈良市と橿原市の一部で整備されているだけであり、河川水質は悪く、上・工水はその多くを地下水に依存している。

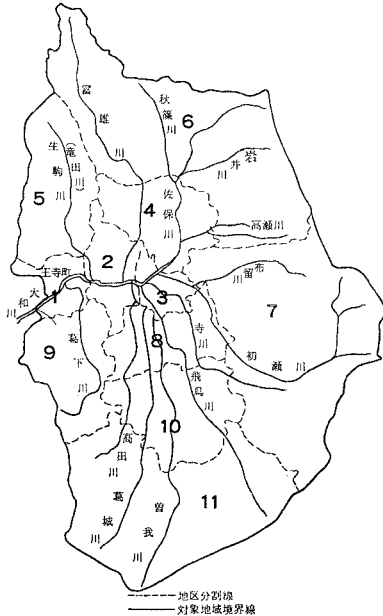


図-3 対象地域（大和川流域奈良盆地）と地区分割

諸活動の発展が著しいこの地域では、水資源開発計画や流域下水道整備計画が進められている。

(1) 流域構成要素

流域構成要素としては、3. で示したものを考慮した。なお、他地域から導水する場合には、それぞれの要素（上水道・農業）を直接介して行われるとして取り扱った。

(2) 地区分割

本研究では、3.(3)b) で述べたことに注意し、図-3

のように地区割りをを行った。

(3) 水資源連関表による現状把握

3. で述べた水資源連関表を奈良盆地で作成するにあたり、次のようなこの地域の特徴を考慮した。まず、この地域は地下水も含めて水文学的に閉じているとみることができるために、図-3 で決定した地区のうち第1地区からの河川流出を除いて地域外への流出はない。すなわち、すべての地区で対象地域外からの河川水・地下水の流入(v_1^r, v_2^r)、および地域外への地下水の流出(g_1^r)はないと考えてよい。農水は主として吉野川水系から分水を受けており、流域外への分水(g_1^r)は行っていないと考えられる。奈良市と橿原市を除けば下水道施設はなく、対象流域外との水のやりとり(v_2^r, g_1^r)はもろくない。なお、降水の河川への流入(u_1^r)および河川水の蒸発(f_1^r)は、「流域」要素を介して行われるとして取り扱った。

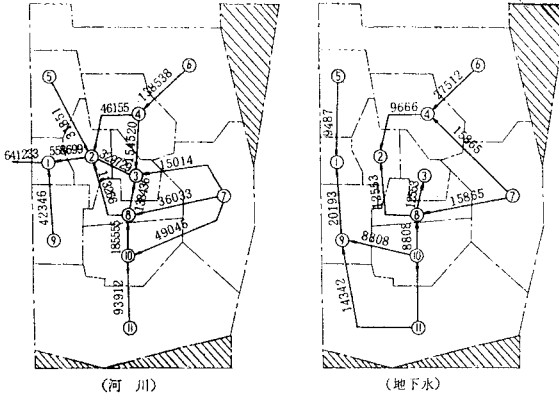
水資源連関表による現状把握作業は、データの都合により、2つのグループに分けて行った。すなわち、市町村別に収集されている上下水道関係の資料については、まず市町村別の連関表を作成し、その後、先の地区割りに組みかえた。河川水・地下水の地区間移動量や河川水・地下水の地区内でのやりとり量等の水流量については、地区分割に沿って現状を把握した。表-4 に昭和47年度の水資源連関表の1部分（地区1について）を示す。また、図-4 は、作成した連関表をもとにして、地区間を移動する水量を輸送機能をもつ要素別に表示したものの例である。なお、水資源連関表は、地区数を n とすれば、 $n \times n$ 個の部分行列からなるが、地区間の水のやりとりを 図-4 のように表示すれば、必要な部分

表-4 水資源連関表による地区内水収支状況の表示例（地区1について）

(単位：1 000 m³/年)

流出 流入	1 河川	2 地下	3 上水道	4 家庭	5 業務	6 工業	7 農業	8 下水道	9 流域	他地区同 要素へ	系 外	
											g 地域外	f 蒸発散
1 河 川	—	—	—	—	—	—	2 209	—	—	—	641 233	—
2 地 下	31 498	—	2 423	10	1	821	116	—	—	0	—	—
3 上 水 道	—	590	—	1 639	218	141	—	—	—	—	—	—
4 家 庭	—	—	—	—	—	—	—	—	1 451	—	—	198
5 業 務	—	—	—	—	—	—	—	—	193	—	—	26
6 工 業	—	—	—	—	—	60	—	—	817	—	—	145
7 農 業	1 760	1 737	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1 737
8 下 水 道	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
9 流 域	9 139	2 862	165	—	—	—	—	—	—	—	—	9 540
他地区同 要素から	(2)から 558 699 (9)から 42 346	(5)から 9 487 (9)から 20 193	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
系 外	v 地域外	—	—	—	—	—	184	—	—	—	—	—
	u 降水	—	—	—	—	—	2 725	—	19 245	—	—	—

(注) 横線は、この地区では水のやりとりが考えられないルートを示す。



図一四 地区間を移動する水の収支現況（河川水および地下水についての表示例）

行列は n 個となる。

現況把握を行う際に、統計資料によっては入手が容易でないものもあり、特に「農業」・「流域」要素に対しては困難を伴い、種々の仮定を設けることにより、その値を推定した²³⁾。

(4) 大和川流域奈良盆地における水資源の配分・利用モデルの基本構造

前述の水資源配分・利用モデルは次のようにして現実の問題に適用される。まず、地区内（同一地区内の要素間）および地区間の水配分ルートを設定する必要がある。これは、現状把握の結果および将来の施設計画からモデル化した。各地区内部の配分ルートは、表一2のA、D等で示されているとおりである。地区間の水のやりとりは、流域を構成する9要素のうちの5要素（河川・地下・上水道・農業・下水道）を通じて行われるが、奈良盆地では、図一5にマトリックス表示したルートで水の地区間移動が起こりうるとして、各要素の地区間ルートを設定した。また、今回のシミュレーションでは、表一3に示される諸係数および河川水・地下水の分

流出地区	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	0	
流入地区													
1	○												○
2	×	○											
3	×	×	○										
4	×	×	×	○									
5	×	×	×	×	○								
6	×	×	×	×	×	○							
7	×	×	×	×	×	×	○						
8	×	×	×	×	×	×	×	○					
9	×	×	×	×	×	×	×	×	○				
10	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○			
11	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○		

(注) ○; 河川 ▲; 地下 ■; 上水道 ×; 農業 ●; 下水道

図一五 地区間を移動する水のルート

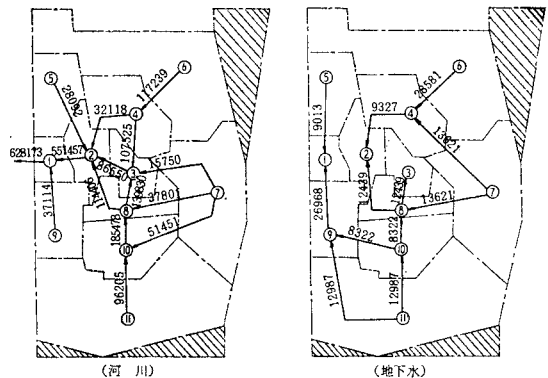
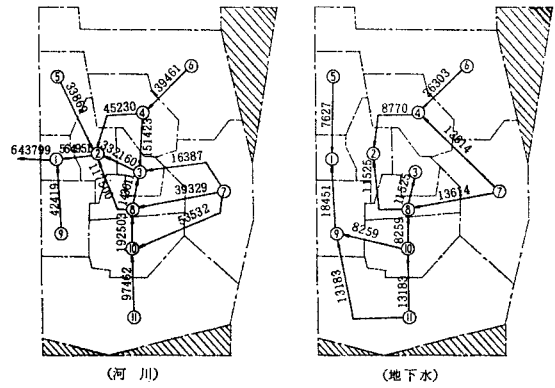
流比は現状の値を用いた。河川水・地下水の移動方向は、河床勾配、等地下水線からそれぞれ決定した。

本モデルは、対象地域外および系外から受けとる水を対象地域内の各地区各要素へ適正配分するためのものであり、地域の降水量および他の地域とのやりとり量（流出・入量）は外生的に与えられる。ここでは昭和47年度の値をそのまま与えた。本モデルでは、多数の係数や制限値（定数）を設定する必要があるが設定の際の考え方や採用した値については参考文献23)を参照されたい。

なお、本モデルは変数529、制約条件式489（地区内変数のみからなる制約条件式374、地区間変数を含む制約条件式115）から構成される²³⁾。

(5) 計算結果および考察

適正水配分シミュレーションは、3つの目的関数に対して行った。目的関数の第1（ケースI）は流域全体の水資源配分に関する総経費式(24)を最小にするものであり、第2（ケースII）は水資源から見た収容可能人口式(25)を最大にする、また、第3（ケースIII）は同じく工業産出可能高式(26)で $i=6$ を最大にするものである。



(注) 上段はケースI、下段はケースIIの場合

図一六 地区間を移動する水の適正配分状況（河川水および地下水についての表示例）

表—5 地区内を移動する水の適正配分状況の表示例 (地区1について)

(単位: 1000m³/年)

流出 流入	1河川	2地下	3上水道	4家庭	5業務	6工業	7農業	8下水道	9流域	他地区同 要素へ	系外	
											g地域外	f蒸発散
1河川	—	—	0 (19812)	—	—	201 (201)	2209 (2209)	—	—	(—)	643799 (628173)	—
2地下	27214 (36154)	—	2423 (2423)	49 (472)	7 (63)	821 (821)	0 (0)	—	—	(—)	—	—
3上水道	—	590 (5100)	—	1600 (15263)	213 (2030)	0 (0)	—	—	—	(9)へ 186 (0)	* 0 0	—
4家庭	—	—	—	0 (0)	—	—	—	726 (6923)	726 (6923)	—	—	198 (1888)
5業務	—	—	—	—	0 (0)	—	—	97 (921)	97 (921)	—	—	26 (251)
6工業	—	—	—	—	—	0 (0)	—	434 (434)	434 (434)	—	—	153 (153)
7農業	1720 (1719)	1699 (1699)	—	—	—	—	—	—	—	(—)	—	1699 (1699)
8下水道	3641 (10663)	—	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	—	—	(—)	—	—
9流域	6265 (13287)	2147 (2147)	165 (165)	—	—	—	—	2385 (2385)	—	—	—	9540 (9540)
他地区同 要素から	(2)から 564951 (9)から 42419	(5)から 7627 (9)から 18451	0 (0)	—	—	—	0 (0)	0 (0)	—	—	—	—
	(2)から 551457 (9)から 37114	(5)から 9013 (9)から 26968	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
系外												
g地域外	—	—	* 0 (0)	—	—	—	* 184 (184)	—	—	—	—	—
u降水	—	—	—	—	—	—	* 2725 (2725)	—	* 19245 (19245)	—	—	—

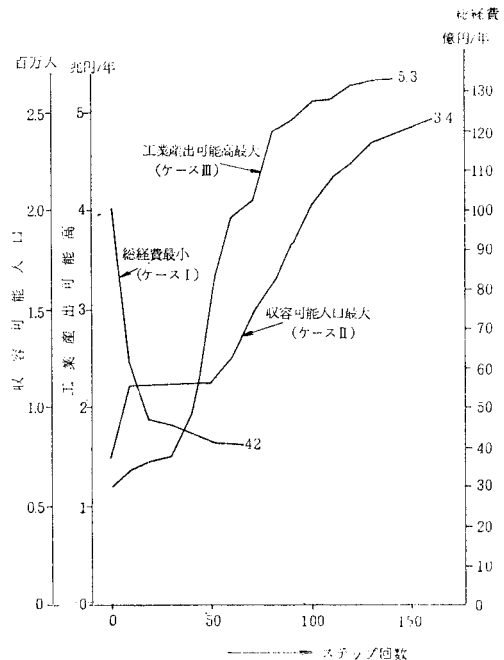
(注) *印は外生変数を示す。表中で()なしはケースⅠ, ()内はケースⅡについての値である。横線は図-4と同じ

その結果の一部を、現状把握に関する表—4、図—4と同様の形式で表—5、図—6に示す。現状の水資源連関表とここで得られた結果を比較することにより、流域に内在する水資源をめぐる諸問題を検討することが可能である。

今回のシミュレーションから得られたおもな結論は次のとおりである。

(1) 最適化計算において分解原理を用いることにより、実行可能領域内での流域全体の最適化を、地区内部の最適化と地区間の調整過程としてとらえることができる。解の改良を行うステップ回数にしたがって、目的関数がいかに変化していくかを図—7に示す。同図で目的関数が急変するところは地区間変数が基底に取り込まれ、解の改良が行われたところであり、ここで考えているような水配分計画では、地区間の調整が結果に大きな影響をもたらすことを意味している。

(2) 総経費を最小にする目的関数のもとでは、制約を満たす際に最も経費のかからない方法がとられる。シミュレーションの結果は、現状把握で得られたものと類似している。したがって、従来の利水方式が総経費最小の方向性をもっていたと考えることもできよう。なお、計算の結果得られた総経費は現状の約3割減であり、費



図—7 目的関数値の変化

用の面からも水配分合理化の余地があると考えられる。

(3) 第2の目的関数のもとでは、1人あたりの水使用量が少ない地区の人口収容能力が相対的に増大する。シミュレーションの結果は、この地域では水資源に関する投資可能限度額を増すと、水資源からみた収容可能人口が急増することを示している。

(4) 第3の目的関数のもとでは、(3)と同様に、すべての制約をみたしてまだ残っている水が、まず工業生産に対する水量原単位の小さな地区に与えられ、その地区の負担可能な費用の上限に達するまで水を使うと、次に原単位の小さな地区に水が割りあてられる。この場合には、上水・農水・下水の地区間移動が活発になる。これは、主として水量原単位の小さな地区での生産を増すことにより、地域全体としてより大きな利益を得ようとするためである。ケースⅡと同様に、投資可能限度額の増加とともに産出可能高は急増する。

(5) さらに感度分析の一例(図-8参照)でみるように、ケースⅢでは各地区が負担しうる水資源に関連した費用が増加するほど、ますます原単位の小さな地区に水が集中する。その結果、原単位の小さな地区と大きな地区の産出可能高の格差が増大する。このことは、第2の目的関数の場合にも同様である。

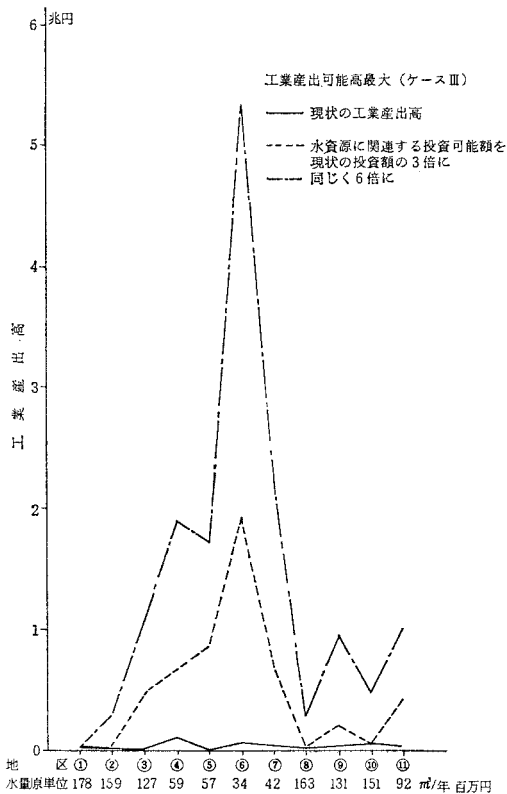


図-8 水配分に関する負担可能な費用を変化させたときの感度分析

(6) 第2, 3の目的関数を設定して行ったシミュレーション結果より、今回対象とした大和川流域では、水資源からみた地域の開発・発展の可能性は十分大きいと考えられる。

(7) 今回用いたような線形モデルでは、諸係数(定数)のうちあるもの(たとえば投資可能限度額)は結果に大きな影響を及ぼすことがある。同様に、制約条件の与え方により結果が大きく変化することもある。一般に、このような最適化問題において現実的な解が得られるかどうかは、制約式の設定と諸係数(定数)の与え方いかんによる。

(8) 今回のシミュレーションは、あくまで水資源の面からみたものであり、結果の解釈においては、この前提を忘れてはならない。水配分計画立案の際には、シミュレーション結果と地域社会の関係等を多角的に検討し、土地や経済・制度等の面からの制約をはじめとする多くのフィージビリティ・チェックとそれに伴うモデルの修正を行う必要がある。

6. 結 論

本研究の成果と今後の課題は次のとおりである。

(1) 流域における水収支の総合的な把握方法として、水資源連関表を提案した。現状ではデータの入手の困難さからいくつかの仮式を必要とするが、このような水量収支のとらえ方は可能であり、各地区の総流入量、総流出量、水利用量、水利用率、河川取水量などを把握することができる。

(2) 水資源の配分・利用問題を、上記の水量収支のとらえ方に基づいて定式化した。解法の手段として分解原理を用い、最適化の過程を地区間と各地区内部の調整としてとらえた。

(3) 大和川流域奈良盆地でケース・スタディを行い、(1)、(2)の方法を具体化した。

(4) 今回のケース・スタディにおける現状把握では、水資源連関表の適用性の検討を行うとともに、現存する資料や解析法により、流域の水収支を現在やりうる精度で総合的に把握して、今後の水資源に関する調査・研究のあり方を明確にすることも一つの目的とした。その結果として、大和川流域奈良盆地に関しては「農水」や「流域」要素に関する資料が不足しているように思われた。また、直接測定されていないデータは解析法等を用いて推定する必要があるが、その手法も水水量によって精度がまちまちである。総合的な流水の管理を行うためには、全体としてバランスのとれた観測や解析法の開発を行うべきであると考えられる。

(5) 本研究では水収支を年間のトータル量でとらえ

たが、今後は流域に入ってくる水量や水利用状況の季節変動を考慮した任意の期間を対象にした手法の開発が必要である。そのような場合の状況把握では、前述のように流域構成要素における貯留（ストック）を考慮する必要があり、今回示したやりとり量（フロー量）に対する水資源連関表を拡張して用いることが可能である。

(6) 今回提案した方法を有効に用いるためには、従来、河川に関して収集されてきた情報（資料）のみでなく、広く経済・社会・環境等の地域社会の情報を必要とする。したがって、流域の水管理を総合的に行うためにも、地域データ・バンク・システム²¹⁾の整備が望まれる。

謝 辞：本研究を進めるにあたっては、建設省近畿地方建設局企画部から資料の提供をうけ、本論文をまとめる際には東京工業大学 吉川教授・森地助教授をはじめ多くの方々から有益な情報を提供していただいた。また、土木研究所 岩松システム課長から多くの助言を得たことを記して、感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 合田 健・末石富太郎・住友 恒：工業用水計画における水量・水質配分について，土木学会論文報告集，No. 134，1966年10月。
- 2) Heady, E.O. et al. : National and Interregional Models of Water Demand, Land Use and Agricultural Policies, Water Resources Research, Vol. 9, No. 4, August, 1973.
- 3) Reynolds, J.E. : Allocating Water among Alternative Uses, Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE, Vol. 97, No. 1, March, 1971.
- 4) Меунтов, И.И., Гершковни, М.И. : Оптимизация использования водных ресурсов в дефицитных ло воде бассейнах, Гидротех и Мелиорация, 19-12, 1967.
- 5) Фельдман, М.Л. : Оптимальное распределение водных ресурсов между водопользователями и водолотребителями, Гидротехническое Строительство, No. 4, 1969.
- 6) 春名 攻・岡田憲夫：広域利水における水配分計画モデルに関する一考察，土木学会論文報告集，No. 211，1973年3月。
- 7) 吉川和広・岡田憲夫：広域的，多角的な水配分問題に関するシステム分析，土木学会論文報告集，No. 239，1975年7月。
- 8) 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，多角的水配分に関する一分析，土木学会論文報告集，No. 247，1976年3月。
- 9) 末石富太郎：用途別給水計画の研究，水道協会雑誌，No. 436，1971年1月。
- 10) Clyde, C.G. et al. : Optimal Allocation of Water Resources in Utah, Journal of the Hydraulic Division, ASCE, Vol. 99, No. 10, October, 1973.
- 11) Swanson, H.S. et al. : Optimization of Water Allocation Decisions Affecting Estuarine Ecology, Water Resources Bulletin, Vol. 7, No. 4, August, 1971.
- 12) Bargur, J. : Dynamic Multisector Programming Approach to Regional Water Resource Management, Water Resources Research, Vol. 8, No. 4, August, 1972.
- 13) 丹保憲仁：都市・地域水代謝システムの構造と容量一都市用排水系の再評価のための研究（I），水道協会雑誌，No. 497，1976年2月。
- 14) 本間 仁・石原藤次郎編：応用水理学下Ⅱ（p. 67），丸善，1971年。
- 15) 建設省土木研究所：水資源の利用配分に関するシステム分析，土木研究所資料，No. 1125，1976年3月。
- 16) 高橋 綱・池田喜代治：奈良県大和盆地の地下水，地質調査月報，Vol. 16, No. 7, 1965年6月。
- 17) 窪田 博：カンガイ用水が地下水に及ぼす影響について（その1）—大和平野における地下水の実態，農業土木学会誌，Vol. 33, No. 7, 1965年10月。
- 18) Dantzig, G.B. et al. : The Decomposition Algorithm for Linear Programming, Econometrica, Vol. 29, No. 4, October, 1961.
- 19) Haimes, Y.Y., et al. : Multiobjectives in Water Resource Systems Analysis; The Surrogate Worth Trade Off Method, Water Resources Research, Vol. 10, No. 4, August, 1974.
- 20) 建設省近畿地方建設局企画部：都市排水の質的制御システムに関する調査報告書，1975年3月。
- 21) 小池長春・関 正和：電子計算機を活用した地域情報システムの構想，土木技術資料，Vol. 18, No. 8, 1976年8月。
- 22) 古瀬大六：数理計画法Ⅰ—線型計画Ⅰ—，情報科学講座A・3・2，共立出版，1971年6月。
- 23) 岩松・関・吉川・三好：流域における水循環の把握と水資源の配分に関する研究（I），土木研究所報告，第149号，1977年9月。

(1977.2.22・受付)