

土木研究所資料

第1229号

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

昭和52年3月

建設省土木研究所
企画部システム課

は じ め に

水資源をめぐる諸問題の深刻化は、新たな水資源の開発のみでなく、その配分・利用方法の新たな観点からの見直しを促しつつある。そして、水資源が地域社会とますます密接な関係をもつようになった今日では、その配分は総合的かつ経済・社会・環境等の多角的な観点からみて合理的になされる必要がある。

流域の限られた水資源を合理的に配分するためには、

- (1) 流域における水循環と水資源の配分・利用状況の総合的な把握方法
 - (2) 経済・社会・環境等の多角的な観点からみて合理的に水資源を配分する方法
- を確立する必要がある。

本報告書は上述の2点および奈良盆地大和川流域におけるケース・スタディの結果を記したものであり、土木研究所資料第1029号「水配分モデル作成のための要因分析に関する調査」(1975年3月)、同1125号「水資源の利用配分に関するシステム分析報告書」(1976年3月)をさらに発展・改良させたものである。

なお、資料の整理や作業は(株)長大橋設計センターが担当した。

昭和52年3月

土木研究所企画部システム課長

岩 松 幸 雄

(研究担当者)	三	好	逸	二
	関		正	和
	吉	川	勝	秀

目 次

1. 序	1
2. 従来の研究と本研究の基本的立場	2
3. 流域における水循環と水資源の配分・利用状況を統一的に表示する方法の提案	4
(1) 流域構成要素とその特質	4
(2) 水資源連関表	4
(3) 水資源連関表による現状把握	7
a) 分析対象期間	7
b) 分析対象地域と地区分割	7
4. 流域における水資源の配分・利用のモデル化	9
(1) モデル作成の目的	9
(2) 線形計画法による水資源の配分・利用モデルの定式化	9
a) 制約条件	9
b) 目的関数	13
5. 大和川流域におけるケース・スタディ	15
(1) 流域構成要素	16
(2) 地区分割	16
(3) 水資源連関表による現状把握	16
(4) 大和川流域における水資源の配分・利用モデルの基本構造	19
(5) 計算結果および考察	20
6. 結 論	26
参考文献	27

＜補足＞ ケース・スタディの詳細

1 記号説明	(29)
2 モデルの詳細	(31)
(i) 制約条件	(32)
(ii) 目的関数	(33)
3 入力データ及びパラメーター	(34)

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と、その配分・利用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・地下等の間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、少数の利水部門に対する配分計画では不十分であり、流域全体を包含するトータル・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、水資源と地域社会の相互関係に留意すべきである。

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、現在の水配分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程なされておらず、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、この方法にもと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・利用モデルを奈良盆地大和川流域に適用し、ケース・スタディを行った結果を報告する。

本論文の構成を図-1に示す。

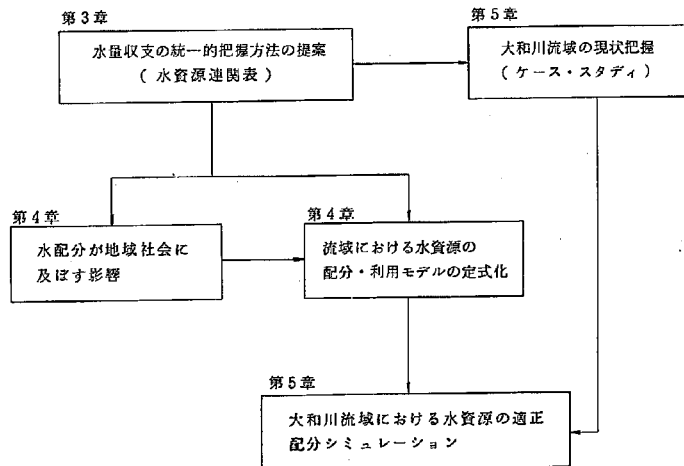


図-1 本論文の構成

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・管理に関する研究は、ある限られた利水部門（例えば工業用水と上水、あるいは農業用水単独）を対象に行なわれたものが多い。^{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¹⁾の研究がある。合田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なっている。春名⁵⁾、吉川⁷⁾は、ダム開発水や三次処理水（再利用水）等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、現象を理解する上で都合が良いとしている。また、吉川⁸⁾は水質を厳密に考慮する際に生ず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なったものが最も多く、^{2)~4)} ¹⁰⁾ ネットワーク手法¹⁾や動的計画法^{3), 12)}を用いたものもある。

従来の水資源の配分・利用に関する研究の問題点としては、次のようなものが挙げられよう。

(i)排水の問題などに関連した、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）等が複雑に絡み合って水配分ネットワークを構成しており、それらが互いに利害を及ぼし合っていることに関する考察が不足している。

(iii)水資源と地域社会の相互関係を、経済・社会・環境等の多角的な観点から考慮した取り扱いが十分でない。

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、排水及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す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は多くの手法が提示されている。^{1), 5), 8), 11), 12), 17)}しかし、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、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、経済学分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る。この表では、流域内の水の面的なやりとりと、水資源に関連する各要素間のやりとりが示される。これにより流域における水循環と水資源の配分状況を総合的に把握することが、水資源をめぐる諸問題の検討を行なう場合の基本的な前提である。

次に、水資源連関表にもとづいて、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。そして、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。前述のように、水質を厳密に考慮しようとするれば、非線形の問題を解く必要がある。本研究では、全体的な精度のバランスと実用性を考え、最適化計算においては水質の制約を除外し、結果が制約を満たしているかをチェックする方法をとる。さらに、従来の研究と異なり、物理的な条件として水の連続条件の外に運動に関する条件も考慮する。また、水資源と地域社会の関係は、各種の社会的制約を設定する際に考

慮することにする。

以上で述べた方法を火和川流域に適用し、ケース・スタディを行なった。その内容は次のようなものである。

(i) 水資源通関表による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) 提案した理論の(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内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える。

3. 流域における水循環と水資源の配分・利用状況を統一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・利用状況を統一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、降水を受水する機能、蒸発散を行なう機能、水質を浄化する機能、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・導水・流域の10要素を取りあげる。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。

表-1 流域構成要素とその特質

流域構成要素	概 要	機能 地区を間水 輸送要素	水 利 用 要 素	も 降 水 受 水 機 能 を も つ 要 素	も 蒸 発 散 機 能 を も つ 要 素	も 水 質 浄 化 機 能 を も つ 要 素	機 能 負 荷 を も つ 要 素
河 川	湖沼を含む	○		○ ^{*2}	○ ^{*2}	○ ^{*3}	
地 下	深層および浅層地下水帯	○				○ ^{*3}	
上 水 道	取水・導水・浄化・配水の各施設	○				○	
家 庭	住 宅		○		○	○ ^{*4}	○
業 務	主として第3次産業による業務地区		○		○	○ ^{*4}	○
工 業	工 場		○		○	○ ^{*4}	○
農 業	水田・畑地および用排水施設	○	○	○	○	○	○
下 水 道	下水道管路網と処理施設	○				○	
導 水 ^{*1}	他流域からの導水施設	○				○ ^{*3}	
流 域	農地以外の地表面			○	○	○ ^{*3}	○

*1 「導水」要素は「上水道」要素または「農業」要素に含めて考えてもよい。

*2 全面積に比して河川・湖沼の面積が小さい場合には無視してもよい。

*3 自 浄 作 用

*4 当該要素内で循環再利用を行なう場合には処理機能が必要となる。

流域内の水はこれら10要素の中のどれかに必ず含まれる。地区内における水のやりとりは、これら10要素相互間で行なわれ、地区間の面的なやりとりは、河川・地下・上水道・農業（用排水施設）・下水道・導水の水輸送機能をもつ諸要素を介して行なわれる。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なわれることになる。

(2) 水資源運覧表

流域内の水は、各要素間・各地区間で様々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-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分析表と似ており、左端にどの地区のどの要素から水が流入してくるのか、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-2におけるAの部分は、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。

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-2では、後述するケース・スタディで水の受けわたしが無いと考えられるマス目を黒く塗りつぶした。同図よりわかるように、A、E、……の対角部分は同様のパターンで塗りつぶされ、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C、F、……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}^r ; r 地区の i 要素から s 地区の j 要素への水輸送量。例えば、 x_{ij}^r 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、対象地域の外、空中等へ移動する水量の合計(r 地区内への移動は除く)。

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_j^{s*} ; 他地区、対象地域外、大気中等から s 地区 j 要素へ移動してくる水量の合計(s 地区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へ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、分析対象期間を長くとれば(例えば1年以上)各要素内の貯留の影響を無視することができ、次の関係式が成立する。

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

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

表-2 水 資 源 連 関 表

流出		地 区 1										地 区 2										系 外 (0)		以 外 地 区	計			
流入	河 川	地下水	上水道	家 庭	業 務	工 業	農 業	下水道	湧 水	流 域	河 川	地下水	上水道	家 庭	業 務	工 業	農 業	下水道	湧 水	流 域	地域外	系 外	計					
地 区 1	河 川					x_{16}^{11}					x_{11}^{12}										----	g_1^1	f_1^1	x_1^{1*}	X_1^{1*}			
	地下水	x_{21}^{11}		x_{23}^{11}	x_{25}^{11}	x_{26}^{11}						x_{27}^{12}									----	g_2^1		x_2^{1*}	X_2^{1*}			
	上水道		x_{32}^{11}		x_{34}^{11}	x_{35}^{11}							x_{37}^{12}								----	g_3^1		x_3^{1*}	X_3^{1*}			
	家 庭				x_{44}^{11}	x_{45}^{11}					x_{47}^{12}										----	g_4^1		x_4^{1*}	X_4^{1*}			
	業 務					x_{55}^{11}					x_{57}^{12}										----	g_5^1		x_5^{1*}	X_5^{1*}			
	工 業						x_{66}^{11}				x_{67}^{12}										----	g_6^1		x_6^{1*}	X_6^{1*}			
	農 業	x_{71}^{11}	x_{72}^{11}								x_{77}^{12}							x_{78}^{12}				----	g_7^1		x_7^{1*}	X_7^{1*}		
	下水道	x_{81}^{11}		x_{83}^{11}	x_{84}^{11}	x_{85}^{11}		x_{86}^{11}	x_{87}^{11}										x_{88}^{12}			----	g_8^1		x_8^{1*}	X_8^{1*}		
地 区 2	湧 水							x_{96}^{11}	x_{97}^{11}											x_{98}^{12}			----	g_9^1		x_9^{1*}	X_9^{1*}	
	流 域	x_{101}^{11}	x_{102}^{11}						x_{106}^{11}												x_{108}^{12}			----	g_{10}^1		x_{10}^{1*}	X_{10}^{1*}
	河 川	x_{11}^{21}										x_{13}^{21}				x_{16}^{21}	x_{17}^{21}				----	g_1^2	f_1^2	x_1^{2*}	X_1^{2*}			
	地下水		x_{22}^{21}									x_{23}^{21}				x_{25}^{21}	x_{26}^{21}	x_{27}^{21}				----	g_2^2		x_2^{2*}	X_2^{2*}		
	上水道			x_{33}^{21}								x_{34}^{21}	x_{35}^{21}	x_{36}^{21}	x_{37}^{21}	x_{38}^{21}	x_{39}^{21}					----	g_3^2		x_3^{2*}	X_3^{2*}		
	家 庭											x_{43}^{21}	x_{44}^{21}	x_{45}^{21}	x_{46}^{21}	x_{47}^{21}	x_{48}^{21}					----	g_4^2		x_4^{2*}	X_4^{2*}		
	業 務											x_{53}^{21}	x_{54}^{21}	x_{55}^{21}	x_{56}^{21}	x_{57}^{21}	x_{58}^{21}					----	g_5^2		x_5^{2*}	X_5^{2*}		
	工 業											x_{63}^{21}	x_{64}^{21}	x_{65}^{21}	x_{66}^{21}	x_{67}^{21}	x_{68}^{21}					----	g_6^2		x_6^{2*}	X_6^{2*}		
系 外 (0)	農 業						x_{77}^{21}					x_{73}^{21}	x_{74}^{21}	x_{75}^{21}	x_{76}^{21}	x_{77}^{21}	x_{78}^{21}	x_{79}^{21}				----	g_7^2	f_7^2	x_7^{2*}	X_7^{2*}		
	下水道							x_{87}^{21}	x_{88}^{21}			x_{83}^{21}	x_{84}^{21}	x_{85}^{21}	x_{86}^{21}	x_{87}^{21}	x_{88}^{21}	x_{89}^{21}				----	g_8^2		x_8^{2*}	X_8^{2*}		
	湧 水								x_{97}^{21}			x_{93}^{21}	x_{94}^{21}	x_{95}^{21}	x_{96}^{21}	x_{97}^{21}	x_{98}^{21}	x_{99}^{21}				----	g_9^2		x_9^{2*}	X_9^{2*}		
	流 域											x_{103}^{21}	x_{104}^{21}	x_{105}^{21}	x_{106}^{21}	x_{107}^{21}	x_{108}^{21}	x_{109}^{21}				----	g_{10}^2		x_{10}^{2*}	X_{10}^{2*}		
	地域外	v_1^1	v_2^1	v_3^1				v_7^1	v_8^1	v_9^1		v_{11}^1	v_{12}^1	v_{13}^1			v_{16}^1	v_{17}^1	v_{18}^1	v_{19}^1				V				
	系 外	w_1^1						w_7^1				w_{11}^1	w_{12}^1				w_{16}^1	w_{17}^1	w_{18}^1	w_{19}^1				U				
	当該地区以外計	x_{11}^{21}	x_{12}^{21}	x_{13}^{21}	x_{14}^{21}	x_{15}^{21}	x_{16}^{21}	x_{17}^{21}	x_{18}^{21}	x_{19}^{21}	x_{20}^{21}	x_{21}^{21}	x_{22}^{21}	x_{23}^{21}	x_{24}^{21}	x_{25}^{21}	x_{26}^{21}	x_{27}^{21}	x_{28}^{21}	x_{29}^{21}								
	計	X_1^{1*}	X_2^{1*}	X_3^{1*}	X_4^{1*}	X_5^{1*}	X_6^{1*}	X_7^{1*}	X_8^{1*}	X_9^{1*}	X_{10}^{1*}	X_1^{2*}	X_2^{2*}	X_3^{2*}	X_4^{2*}	X_5^{2*}	X_6^{2*}	X_7^{2*}	X_8^{2*}	X_9^{2*}	X_{10}^{2*}	G	F		X_{11}^{2*}			

$$x_{ij}^{*s} = \sum_{r=1}^n \sum_{i=1}^m x_{rj}^{rs} + v_j^s + u_j^s \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$X_{ij}^* = \sum_{r=1}^n \sum_{i=1}^m x_{rj}^{rs} + v_j^s + u_j^s \quad \dots\dots\dots (4)$$

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

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

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

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

ここに、 n ；対象流域内の地区数、 m ；流域構成要素数。

なお流域構成要素内の貯留量の変化が問題となるような場合には、水資源連関表の該当するマス目（例えば地下における貯留は x_{ii}^{ri} 、 $i=2$ ）にその値を記入すればよい。

(3) 水資源連関表による現状把握

水資源連関表を用いて流域内の水循環や水資源の配分・利用現況を把握しようとするれば、まずはじめに次の二つの事項を決定しておく必要がある。一つは分析対象期間の決定であり、あと一つは分析対象地域とその内部の地区割りである。

a) 分析対象期間

分析対象期間の決定は、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すれば、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る。たとえば水量の連続条件式は、分析対象期間が長い程、流入量に比べて貯留量の変化が小さくて無視できるので、流入量と流出量が等しいとよい。すなわち、 t 地区の k 要素について

$$\sum_{s=1}^n \sum_{j=1}^m x_{kj}^{sj} + g_k + f_k = \sum_{r=1}^n \sum_{i=1}^m x_{ik}^{ri} + v_k + u_k \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\text{i. e. } X_k^* = X_k \quad \dots\dots\dots (10)$$

なる関係式が成立する。また運動を表わす式は、蒸発散率・湧出率・浸透率・河川（分）（合）流比等を用いて与えることができよう。このように分析対象期間を長くすれば、長期間にわたるトータル量ととり扱うことになり、後述する分析操作が単純化される。もちろん、これ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。ところが、例えば1年間といった分析対象期間をとれば、連続条件および運動に関する条件を単純な形で与えることが可能であろう。ただし、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。通常の場合には、水文界によって区切るのが適切であろう。

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。一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なう必要がある。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-2参照）。そのような場合には、河川を分離するように地区割りをするのが望ましい。

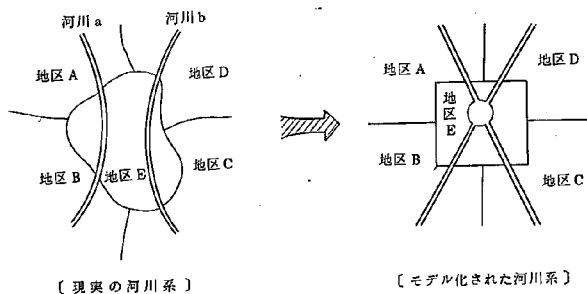


図-2 水資源連関表での河川取り扱い

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。

以上のような特徴をもつ水資源連関表を用いて、流域内で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上で重要であると考えられる。

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われわれが望む事柄は多種多様である。これら種々の欲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要件である。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過ぎない。多角的な観点から水資源計画の検討を行なうためには、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、現実の世界を何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モデルが現実の世界をうまく説明できるか否かを検証することは極めて重要である。同時に、モデルを少し変更させた場合にどのような解が得られるかを把握しておくことも重要である。種々のパラメータや制約条件の変更に伴う感度分析はこの一例であり、解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上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、最適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て考察を進める。

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つは物理的な条件であり、必ず満たされなければならないものである。あと1つは社会的な制約条件であり、前者に比べて融通のきくものもある。後者は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

この条件は線形であり、 k 地区 k 要素について(9)あるいは(10)式で与えられる。

② 運動に関する条件

この条件は一般に線形ではない。しかし、線形計画法により問題を定式化するために、ここでは表-3に示すように線形化した運動に関する条件式を考える。

表-3 水の運動に関する条件

始端	末端要素	運動に関する条件式	α の意味	始端	末端要素	運動に関する条件式	α の意味
河川	(r, r) 他地区の河川	$x_{11}^r = \alpha_{11}^r \cdot x_{11}^r$	分 流 比	河川からの 工業蒸発散	家庭蒸発散	$f_{11}^r = \alpha_{11}^r \cdot X_{11}^r$	家庭の蒸発率
	地域外の河川	$g_{11}^r = \alpha_{11}^r \cdot x_{11}^r$	分 流 比		業務蒸発散	$f_{12}^r = \alpha_{12}^r \cdot X_{12}^r$	業務の蒸発率
	蒸 発 散	$f_{13}^r = \alpha_{13}^r \cdot x_{11}^r$	河川からの 蒸発散		工業蒸発散	$f_{14}^r = \alpha_{14}^r \cdot X_{14}^r$	工業の蒸発率
	ただし、 $\sum_{j=1}^4 \alpha_{1j}^r + \alpha_{15}^r + \alpha_{16}^r = 1$				農業地区内地下水	$x_{15}^r = \alpha_{15}^r \cdot X_{15}^r$	地下浸透率
地下水	地区内の河川	$x_{21}^r = \alpha_{21}^r (X_{21}^r - \sum_{j=2}^4 x_{1j}^r)$	地下水湧出率	洗・域	蒸 発 散	$f_{21}^r = \alpha_{21}^r \cdot X_{21}^r$	農業の蒸発率
	他地区の地下水 ($s \neq r$)	$x_{22}^r = \alpha_{22}^r (X_{22}^r - \sum_{j=2}^4 x_{1j}^r)$	他地区浸透率		地区内の河川	$x_{25}^r = \alpha_{25}^r (X_{25}^r - x_{15}^r)$	直接流出率
	地域外地下水	$g_{21}^r = \alpha_{21}^r (X_{21}^r - \sum_{j=2}^4 x_{1j}^r)$	地域外浸透率		地区内地下水	$x_{26}^r = \alpha_{26}^r (X_{26}^r - x_{16}^r)$	地下浸透率
	ただし、 $\alpha_{21}^r + \sum_{j=2}^4 \alpha_{2j}^r + \alpha_{25}^r + \alpha_{26}^r = 1$				蒸 発 散	$f_{26}^r = \alpha_{26}^r (X_{26}^r - x_{16}^r)$	洗域蒸発散率
上水道	地区内の 地下水	$x_{31}^r = \alpha_{31}^r \cdot X_{31}^r$	調 水 率	ただし、 $\alpha_{31}^r + \alpha_{35}^r + \alpha_{36}^r = 1$			

(II) 社会的な制約条件

以下で社会的に要請される制約を例示的に考察する。

① 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-3 参照)。 r 地区 i 要素に流入し、利用され

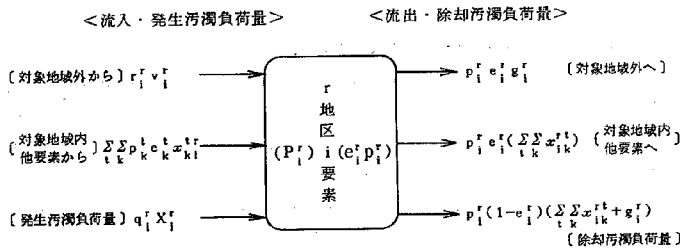


図-3 r 地区 i 要素の汚濁負荷の収支

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他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。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。

$$\begin{aligned}
 & r_i^r v_i^r + \sum_k p_k^i e_k^i x_k^i + q_i^r x_i^r \\
 & = p_i^r e_i^r g_i^r + p_i^r e_i^r \left(\sum_k x_k^i \right) + p_i^r (1 - e_i^r) \left(\sum_k x_k^i + g_i^r \right) \\
 & = p_i^r (X_{21}^r - f_{21}^r) \dots \dots \dots (11)
 \end{aligned}$$

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 : 汚濁負荷流速率 (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 $x_{ij}^r \cdot v_i^r \cdot g_i^r \cdot X_i^r$ 、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、

$$p = (X - f - X'e)^{-1} (v r + X q) \quad (12)$$

となる。ここに、

$$X = \begin{pmatrix} x_{11}^1 & x_{12}^1 & \cdots & x_{1j}^1 & x_{1n}^1 & \cdots \\ x_{21}^1 & x_{22}^1 & \cdots & & & \\ \vdots & & & & & \\ x_{i1}^1 & & & & & \\ \vdots & & & & & \end{pmatrix} \quad v = \begin{pmatrix} v_1^1 \\ v_2^1 \\ \vdots \\ v_j^1 \\ \vdots \\ v_n^1 \end{pmatrix} \quad g = \begin{pmatrix} g_1^1 \\ g_2^1 \\ \vdots \\ g_j^1 \\ \vdots \\ g_n^1 \end{pmatrix}$$

$$X = \begin{pmatrix} X_1^1 \\ X_2^1 \\ \vdots \\ X_j^1 \\ \vdots \\ X_n^1 \end{pmatrix} \quad f = \begin{pmatrix} f_1^1 \\ f_2^1 \\ \vdots \\ f_j^1 \\ \vdots \\ f_n^1 \end{pmatrix} \quad e = \begin{pmatrix} e_1^1 \\ e_2^1 \\ \vdots \\ e_j^1 \\ \vdots \\ e_n^1 \end{pmatrix}$$

$$q = \begin{pmatrix} q_1^1 \\ q_2^1 \\ \vdots \\ q_j^1 \\ \vdots \\ q_n^1 \end{pmatrix} \quad r = \begin{pmatrix} r_1^1 \\ r_2^1 \\ \vdots \\ r_j^1 \\ \vdots \\ r_n^1 \end{pmatrix} \quad p = \begin{pmatrix} p_1^1 \\ p_2^1 \\ \vdots \\ p_j^1 \\ \vdots \\ p_n^1 \end{pmatrix}$$

である。

各要素の水質は上記のようにして求まるが、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。

$$p_i^r \leq \bar{p}_i^r \quad (r = 1, \dots, n) \quad (13)$$

ここに、 $\bar{p}_i^r$; 河川水質基準値である。

② 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する水量は、技術的な制約等から全使用水量のうち一部に限定される。 z_j を循環再利用率の上限とすれば、

$$x_{jj}^r / (x_{1j}^r + x_{2j}^r + x_{3j}^r + x_{jj}^r + x_{nj}^r) \leq z_j \quad (j = 4, 5, 6 \quad r = 1, \dots, n) \quad (14)$$

となる。また、再生水の使用には制限があることが多い。 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。

$$(x_{jj}^r + x_{nj}^r) / (x_{1j}^r + x_{2j}^r + x_{3j}^r + x_{jj}^r + x_{nj}^r) \leq g_j \quad (j = 4, 5, 6 \quad r = 1, \dots, n) \quad (15)$$

③ 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。

$$x_{2i}^r \leq \bar{x}_{2i}^r \text{ または } \sum_{i=3}^7 x_{2i}^r \leq \bar{x}_{2i}^r \quad (16)$$

$$(i = 3, 4, 5, 6, 7 \quad r = 1, \dots, n)$$

ここに、 $\bar{x}_{2i}^r$ および $\bar{x}_{2i}^r$ 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。

④ 水資源から見た収容可能人口

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

$$p^r = X_4^r / d_4^r \geq \bar{p}^r \quad (17)$$

ここに、 d_4^r ; 1人当りの使用水量である。

⑤ 水資源から見た生産可能高

r 地区における工業・農業・業務における生産可能高も、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得るのに必要な水量を d_i^r とすれば、次の制約条件式を得る。

$$O_i^r = X_i^r / d_i^r \geq \bar{O}_i^r \quad (18)$$

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

ここに、 $\bar{O}_i^r$ は必要生産額である。

⑥ 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況により、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流域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。

$$x_{13}^r + x_{14}^r + x_{15}^r + x_{16}^r + x_{17}^r \leq \bar{s}_1^r \quad (19)$$

ここに、 $\bar{s}_1^r$ は河川からの取水可能量の上限值である。

⑦ 維持流量

河川流量は、環境保全等の面からある一定量 ($\bar{x}_{11}^r$ および $\bar{g}_1^r$) を越えることが望まれている。

$$x_{11}^r \geq \bar{x}_{11}^r \text{ および } g_1^r \geq \bar{g}_1^r \quad (20)$$

$$(r, s = 1, \dots, n \text{ ただし } r \neq s)$$

⑧ 建設費および運営費

利水施設の建設に伴い支出されるべき建設費は、水輸送量の増分とそれを一単位増加させるために必要な建設費用との積として表わされるものとする。また、運営費は各要素間の水輸送量 (とくに送水量・浄水量等) と一単位の水を輸送 (送水・浄水) するのに必要な費用との積で表わすことにすると、地区 r の総運営費 C^r は

$$C^r = \sum_i \sum_j C_{ij}^r x_{ij}^r + \sum_i C_{1i}^r g_i^r + \sum_i C_{1i}^r v_i^r \quad (21)$$

と書くことができる。ここに、 C_{ij}^r (C_{1i}^r , C_{1i}^r) ; r (r, o) 地区 i (i, o) 要素から s (o, r) 地区 j (o, i) 要素へ単位水量を輸送 (取水・浄水を含む) する間に必要とされる費用である。ただし、 o は対象流域外を示す。

r 地区の利水施設建設費を M^r とすれば、費用に関する制約条件式は次のようになる。

$$C^r \leq \bar{C}^r \text{ and } M^r \leq \bar{M}^r \quad (22)$$

または

$$\sum_{r=1}^n C^r \leq \bar{C} \text{ and } \sum_{r=1}^n M^r \leq \bar{M} \quad (23)$$

ここに、 $\bar{C}^r$, $\bar{M}^r$, $\bar{C}$, $\bar{M}$ は、各地区または対象流域について定められる投資可能額である。

なお、主として現在の施設のもとで水配分形態を見直す場合には、相対的に運営費の占める割合が大きくなり、(21)式のみを用いることも考えられる。

また、建設費と運営費を一緒にして考える場合には、次のような取り扱いも可能である。

$$C^r = \sum_i \sum_j C_{ij}^r x_{ij}^r + \sum_i C_i^r g_i^r + \sum_i C_i^r v_i^r \quad (24)$$

$$C^r \leq \bar{C}^r \text{ or } \sum_{r=1}^n C^r \leq C \quad (25)$$

ここに、係数 C_{ij}^r , $C_i^r g_i^r$, $C_i^r v_i^r$ は、建設費に減価償却係数を乗じた費用と運営費の和として、それぞれ x_{ij}^r , g_i^r , v_i^r の単位水量に対して定められる費用係数である。 $\bar{C}^r$ および $\bar{C}$ は各地区および対象流域について定められる建設費と運営費を含めた投資可能額である。

⑨ 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、これら相互の均衡を保つこともできる。

$$X_{i-1}^r = \beta_i^r \left(\sum_{k=4}^7 X_{i-k}^r \right) \quad (i=1, \dots, n) \quad (26)$$

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

⑩ その他

その他の制約も必要に応じて考慮する必要がある、線形表示されてモデルに組みこまれる。

線形計画法においては、制約条件が非線形のものについては何らかの方法で線形化する必要がある。この線形化が解に及ぼす影響を把握しておくことは重要であり、諸係数の設定には工夫をこらし、感度分析等によりそれらの変化が最適解に及ぼす影響を明確にしておくことが望ましい。

b) 目的関数

ここで扱うような計画の問題では、変数の数に比べて制約条件式の数が少ない。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。仮にこれらを満たす解があったとしても、各変数の値を決めることはできない。ここでいう目的関数は、すべての制約を満たす計画案のうち、何らかの目的を決めることによりその目的を最も満たすものを採用する（それとともに各変数の値は決定される）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。

$$\min. \left\{ \sum_{r=1}^n (C^r + M^r) \right\} \text{ or } \min. \left\{ \sum_{r=1}^n C^r \right\} \quad (27)$$

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。

$$\max. \sum_{r=1}^n P^r \quad (28)$$

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。

$$\max. \sum_{i=1}^n O_i^r \quad (i=5, 6, 7) \quad (29)$$

④ ウェイトつけた目的関数を最大にする。

$$\max. \left[w_1 \cdot \left(\sum_{r=1}^n P^r \right) + w_2 \cdot \left(\sum_{r=1}^n O_f^r \right) - w_3 \cdot \left\{ \sum_{r=1}^n (C^r + M^r) \right\} \right] \dots\dots\dots (30)$$

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、これらの中から適切なものを一つ選ぶことになる。

なお、目的関数④のように多目標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各々の目標の達成水準を考慮する目標計画法（Goal programming）やSWT（Surrogate Worth Trade-off）¹⁷⁾法等を用いることも可能である。

線形計画法において、前述の制約条件群の中から採りあげる条件が多いとその解は現実的であり、実現の容易なものとなることが多い。一方、採りあげる条件が少なければ実現は困難である反面、問題の特性を把握する上で都合がよい。

5. 大和川流域におけるケース・スタディ

ここでは第3・4章で示した理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年度における大和川流域の水量収支を把握した。そのために必要なデータは昭和47年度のものであるが、一部昭和45年度のものを用いた。

次に、流域内に入ってくる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という最適配分モデルを作成し、それを大和川流域に適用することにより理論の検討を行った。そのために、最適化を行なう対象年度も昭和47年とした。

対象とした奈良県内の大和川流域を図-4に示す。この地域は25の市町村から構成されており、奈良市、天理市、御所市および吉野郡大淀町の面積のうち各々42.1%、19.1%、7.5%、76.8%は対象流域外にある。この地域は大和平野地域と呼ばれ、県内の都市活動、工業活動さらには農業活動の中心地である。

また、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、大体王寺町藤井の一方所から対象流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。

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。

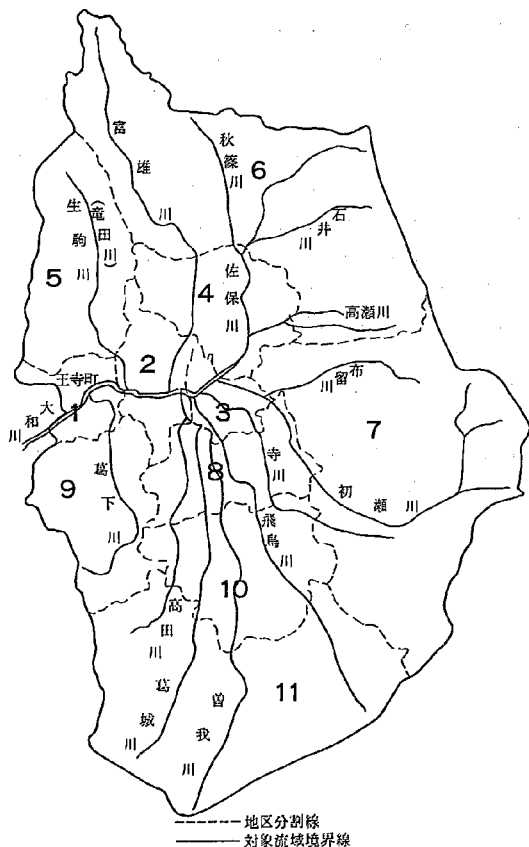


図-4 対象流域（奈良盆地大和川流域）と地区分割

(1) 流域構成要素

第3章では、流域構成要素として10要素としたが、ここでは、この流域の特徴を考慮して、そのうち「導水」要素をなくし、「上水道」・「農業」が他流域から導水する場合には、それぞれの要素を直接に介して行なわれるとして取り扱う。本章で用いる要素と要素番号を次のように定める。

- | | | | | |
|-------|-------|--------|-------|-------|
| 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 | |

(2) 地区分割

本研究では、第3章(3Kb)で述べたことに注意し図-4のように地区割りを行なった。

(3) 水資源連関表による現状把握

3章で述べた水資源連関表を大和川流域で作成するにあたり、次のような同流域の特徴を考慮した。流域→上水道というルートを設けているのは、一部の地区が上水をため池から取水しているためである。また、この流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-4で決定した地区のうち第1地区を除いては流域外への流出はない。さらに、すべての地区で対象流域外からの河川水・地下水の流入(v_f^i , v_g^i)および流域外への地下水の流出(g_f^i)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いるが、流域外への分水(g_f^i)は行なっていない。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_g^i , g_g^i)はもちろんだ。なお、降水の河川への流入(u_f^i)および河川水の蒸発(f_f^i)は「流域」要素を介して行なわれるとして取り扱った。

水資源連関表は、まず昭和47年度1年間について各市町村別の連関表を作り、先の地区割りに組みかえたものである。表-4に水資源連関表の1部分を示す。また、図-5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。さらに、表-5は作成した水資源連関表をもとにして、流域全体としての各流域構成要素間の水のやりとり量について集計したものである。現況把握を行なう際に、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¹³⁾その値を推定した。

表-4 水 資 源 連 関 表 (現 状)

(地区1)

(地区2)

流出 流入	(地区1)									(地区2)									系外 (a)		
	1 河川	2 地下水	3 上水道	4 家庭	5 業務	6 工業	7 農業	8 下水道	9 流域	1 河川	2 地下水	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	g 地域外	f 蒸発
1 河川			-			-	2,209			-									-	641,233	
2 地下水	31,499		2,423	10	1	821	116				0								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	1,790	1,737														-			-		1,737
8 下水道	-		-	-	-	-	-										-		-		
9 流域	9,139	2,862	165					-													9,540
1 河川	558,699												-			-	7,725		-		
2 地下水		-								27,598		3,654	46	7	1,110	405			0		
3 上水道			0								907		1,846	245	239				(9)~416	-	
4 家庭													-				-	1,664			228
5 業務														-			-	223			30
6 工業															91		-	1,146			203
7 農業							-			6,008	5,930								-		5,930
8 下水道								-				-	-	-	-	-			-		
9 流域										11,817	3,765	-						-			12,550
他地区同要素から	(9)から 42,346	(5)から 9,487 (9)から 20,193	-				-	-		(3)から 329,729 (4)から 46,155 (5)から 31,851 (8)から 113,266	(4)から 9,666 (8)から 12,553	-				-	-				
系外 (a)	p 地域外		-				184					-				434					
と降水							2,725		19,245							9,303		25,099			

(注) 横線は今回のケース・スタディでは水の受けわたりが考えられないルートを示す。

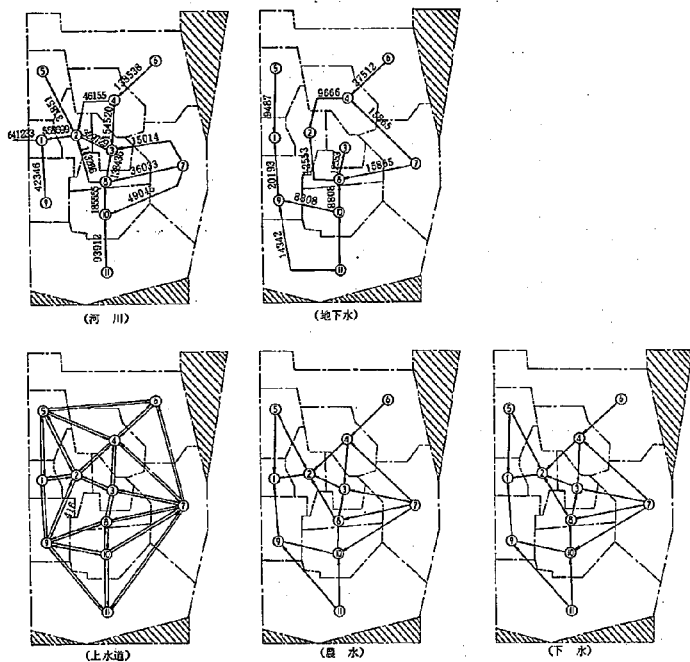


図-5 地区間を移動する水の収支現況

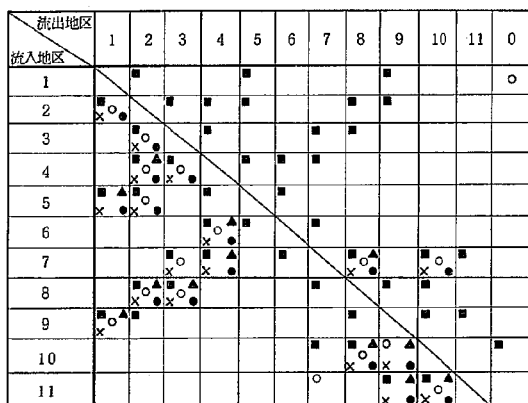
表-5 対象流域全体としての各要素間の水のやりとり

流出 流入	1 河川	2 地下水	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(a)	
											地域外	蒸発
1 河川			7,098			363	172,643			1,933,108	641,233	
2 地下水	237,046		40,463	3,335	403	17,411	9,086			169,994		
3 上水道		16,180		58,903	6,208	6,852				416	4,831	694
4 家庭				—				4,002	50,774			6,836
5 業務					—			395	5,421			1,766
6 工業						2,435		387	20,542			15,748
7 農業	170,344	157,833								—		144,729
8 下水道	25,166		—	—	—	—	—			—		19,895
9 流域	388,781	133,732	1,730					20,382				446,270
他地区 同要素から	1,933,099	169,994	416				—	—				
系外 (a)	地域外		43,588				27,236					
降水							277,047		934,048			

(4) 大和川流域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よりモデル化した。各地区内部の配分ルートは表-2に示したとおりである。流域を構成する9要素のうち5要素（河川・地下・上水道・農業・下水道）では、水は地区間でやりとりされる。昭和47年度の大和川流域では、図-6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-3に示される諸係数および河川水・地下水の分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、対象流域外（対象地域外および系外）から受けとる水を対象流域内の各地区各要素へ適正配分するためのものであり、流域の降水量および他の流域からの流出・入量は、外生的に与えられる。ま



(注) ○; 河川 ▲; 地下 ■; 上水道 ×; 農業 ●; 下水道
g; 対象流域外を示す。

図-6 地区間を移動する水のルート

た、流域→上水道 (a_{59}^{19}) は、ため池からの取水量を示し、これも外生的に与えた。用いた各種制約条件および諸係については補足(後記)を参照されたい。各種制約条件式は、各地区内の変数のみで構成されるものと地区間にまたがる変数を含むものに分けることができる。このような線形計画法の問題は、主問題として各地区相互間の調整により全体としての最適化を目指す一つの問題と、副問題として各地区内部の最適化を目指す問題に分けて考えることができる。このような問題に対しては、分解原理 (Decomposition Principle) を適用すると現象の理解や計算機の必要記憶容量節約の上で有利である。¹⁹⁾ その考え方や計算方法は参考文献(7), 16に詳しく述べられている。

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, 地区間の変数を含む制約条件式 115) から構成される。

(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なった。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を最小に(27)式の後者)、第2(ケースⅡ)は水資源から見た収容可能人口を最大に(28)式)、第3(ケースⅢ)は同じく工業産出可能高を最大に(29)式で $i=6$)するものである。

その結果の一部を、現状把握に関する表-4、図-5および表-5と同様の形式で表-6、図-7(a)~(c)および表-7(a)~(c)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主な結論は次のとおりである。

(i) 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、地区間と地区内部の調整過程としてとらえることができる。解の改良を行な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-8に示す。同図で目的関数が急変するところは地区間変数に対して解の改良を行なったところであり、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。

(ii) 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、水配分合理化の余地があると考えられる。

(iii) 第2の目的関数のもとでは、1人当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、この流域では水資源に関する投資可能額を増すと収容可能人口が急増することを示している。

(iv) 第3の目的関数のもとでは、(iii)と同様にすべての制約を満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当てられる。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、流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、可能投資額の増加とともに産出可能高は急増する。

(v) さらに感度分析の一例(図-9参照)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程、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。

(vi) 第2、3の目的関数を設定して行な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。

(vii) 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。

表-6 水 資 源 連 関 表 (ケ-ス I)

(地区 1)										(地区 2)										系 外 (a)	
流 出	1 河 川	2 地下水	3 上水道	4 家 庭	5 業 務	6 工 業	7 農 業	8 下水道	9 流 域	1 河 川	2 地下水	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	g 地域外	f 発 生
1 河 川			19,612			201	2,209			-									-	643,799	
2 地下水	36,154		2,423	472	63	821	0				-								0		
3 上水道		5,107		15,263	2,030	0						-							(9)へ186	0	
4 家 庭				0				6,923	6,923												1,688
5 業 務					0			921	921												251
6 工 業						0		434	434												153
7 農 業	1,719	1,699															-		-		1,699
8 下水道	10,663		0	0	0	0	0										-		-		
9 流 域	13,287	2,147	165					2,385													9,540
1 河 川	564,951											0			330	7,725			(1)へ564,951	-	
2 地下水		-								25,542		2,925	57	8	1,110	0			-		
3 上水道			0								726		1,835	246	0				-	0	
4 家 庭													0				832	832			227
5 業 務														0			112	112			30
6 工 業															0		612	612			216
7 農 業							0			5,867	5,797								0		5,797
8 下水道								0		4,693		0	0	0	0	0			0		
9 流 域										8,145	2,824	0					3,137				12,550
他 地 区 同 要 素 へ	(9)から 42,419	(5)から 7,627 (9)から 18,451	0				0	0		(3)から 332,150 (4)から 45,230 (5)から 33,869 (8)から 117,500	(4)から 8,770 (6)から 11,525	(9)から 119				0	0				
系 外 (a)	g 地域外		0				184					0				434					
	f 地 域 水						2,725		19,245							9,303		25,099			

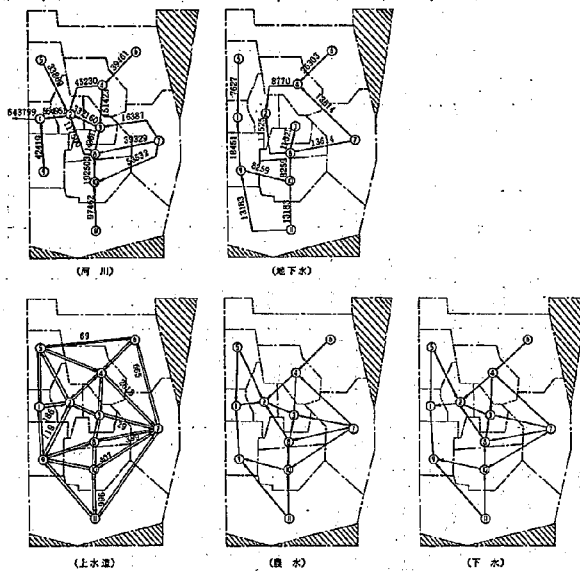


図-7(a) 地区間を移動する水の配分状況の表示(ケースⅠ)

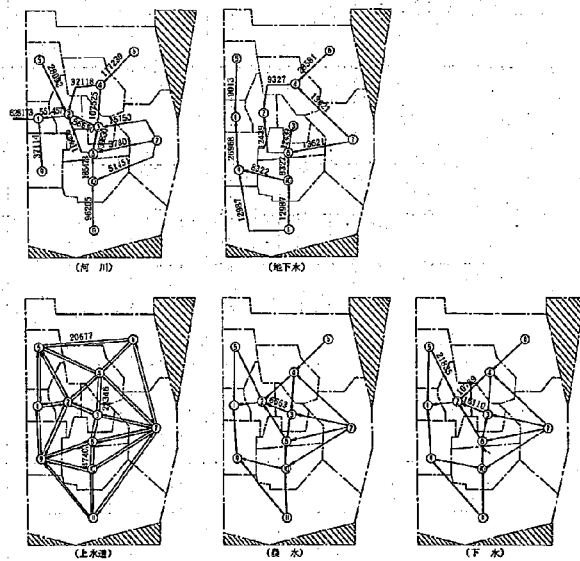


図-7(b) 地区間を移動する水の配分状況の表示(ケースⅡ)

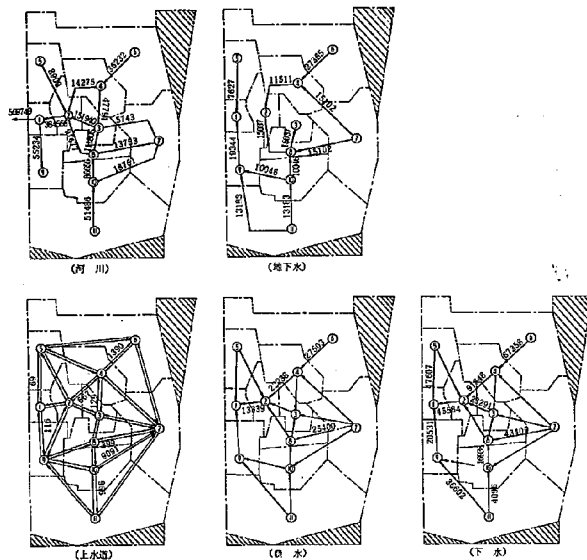


図-7(c) 地区間を移動する水の配分状況の表示(ケースⅢ)

表-7(a) 対象地域全体としての各要素間の水のやりとり(ケースⅠ)

流入	流出	1 河川	2 地下水	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	対象流域 域外へ	系外 (蒸発)
1 河川				313			10,862	172,643			1,969,837	643,799	
2 地下水		215,631		38,734	3,385	365	16,199	0			154,313		
3 上水道			15,544		58,859	6,230	0				5,558	* 4,831	
4 家庭					0				27,387	27,387			7,469
5 業務						0			2,911	2,911			794
6 工業							0		11,501	11,501			4,059
7 農業		167,116	154,905								0		154,905
8 下水道		158,339		0	0	0	0	0			0		
9 流域		286,532	104,886	* 1,581					116,540				466,159
他地区 同要素から		1,969,837	154,313	5,558				0	0				
対象流域 域外から				* 43,668				* 27,236					
降水流入量								* 277,047		* 934,048			

(注) *印は外生値であることを示す。

表-7(b) 対象地域全体としての各要素間の水のやりとり(ケースII)

流入 \ 流出	1 河川	2 地下水	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	対象流 域外へ	系外 (蒸発)
1 河川			132,409			12,559	172,643			1,601,016	623,173	
2 地下水	239,866		40,463	12,620	1,656	14,492	0			163,627		
3 上水道		17,097		147,980	18,387	0				53,763	* 4,831	
4 家庭				0				70,664	70,664			19,272
5 業務					0			8,819	8,819			2,405
6 工業						0		11,501	11,501			4,059
7 農業	162,692	157,116								6,663		157,116
8 下水道	207,522		0	0	0	0	0			48,734		
9 流域	335,717	104,886	* 1,691					116,540				466,159
他地区 同要素から	1,601,016	163,627	53,763				6,663	48,734				
対象流域 外から			*43,688				*27,236					
降水流入量							*277,047		*934,048			

表-7(c) 対象地域全体としての各要素間の水のやりとり(ケースIII)

流入 \ 流出	1 河川	2 地下水	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	対象流 域外へ	系外 (蒸発)
1 河川			9,912			313,612	172,643			1,078,643	519,749	
2 地下水	259,521		31,164	3,385	385	11,283	0			172,583		
3 上水道		16,574		58,959	6,230	0				12,827	* 4,831	
4 家庭				0				27,387	27,387			7,469
5 業務					0			2,911	2,911			794
6 工業						0		136,060	138,080			43,734
7 農業	108,365	184,279								88,430		184,279
8 下水道	284,919		0	0	0	0	0			372,269		
9 流域	413,112	104,886	* 1,691					116,540				466,159
他地区 同要素から	1,078,643	172,583	12,827				88,430	372,264				
対象流域 外から			*43,688				*27,236					
降水流入量							*277,047		*934,048			

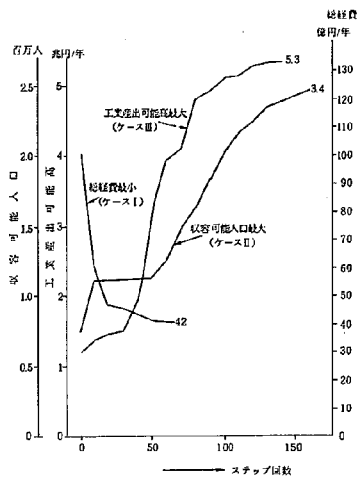


図-8 目的関数の変化

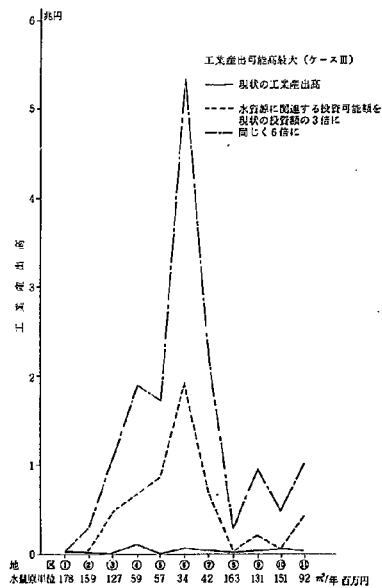


図-9 水配分に関する負担可能な費用を変化させたときの感度分析

125

6. 結 論

本研究の成果と今後の課題は次のとおりである。

(i) 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定を必要とするが、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、水利利用率、河川取水量などを把握することができる。

(ii) 水資源の配分・利用問題を、上記の水量収支のとらえ方にもとづいて定式化した。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。

(iii) 奈良盆地大和川流域でケース・スタディを行ない、(i)、(ii)の方法を具体化した。

(iv) 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なうとともに、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、直接測定されてないデータは解析法を用いて推定する必要があるが、その手法も水文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なうためには、全体としてバランスのとれた観測や、解析法の開発を行なうべきであると考えられる。

(v) 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等を考慮しうる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、今回示したフロー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。

(vi) 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も必要とする。したがって、流域の水管理を総合的に行なうためにも、地域データ・バンク・システム¹⁹⁾の整備が望まれる。

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，土木学会論文集，No 134，1966年10月。
- 2) Earl, O. H. et al : National And Interregional Models Of Water Demand, Land Use And Agricultural Policies, Water Resources Research, Vol. 9, No 4, August, 1973.
- 3) John, E. R. : Allocating Water Among Alternative Uses, Journal Of The Irrigation And Drainage Division, Vol. 97, No 1, March, 1971.
- 4) МЕУИТОВ, И. И. - ГЕРШКОВИУ, М. И. Оптимизация использования водных ресурсов в дефицитных по воде бассейнах, Гидротех и Мелиорация, 19-12, 1967
- 5) ФЕЛЬДМАН, М. Л. : Оптимальное распределение водных ресурсов между водопользователями и водопотребителями, Гидротехническое Строительство, No 4, 1967
- 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，水道学会誌，No 436，1971年1月。
- 10) Calvin, G. C. et al : Optimal Allocation Of Water Resources In Utah J. Hy. Div., A. S. C. E., October, 1973.
- 11) Huntington, S. S. et al : Optimization Of Water Allocation Decisions Affecting Estuarine Ecology, Water Resources Bulletin, Vol. 7, No 4, August, 1971.
- 12) Jona Bargur : Dynamic Multisector Programming Approach To Regional Water Resource Management, Water Resources Research, Vol. 8, No 4, August, 1972.
- 13) 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。
- 14) 高橋穠・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。
- 15) 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，A. E. S. J., 1965年10月。
- 16) George, B. D., Philip, W. : The Decomposition Algorithm For Linear Programs, Econometrica, Vol. 29, No 4, October, 1961.
- 17) Halmes, Y. Y., Warrer, A. H. : Multiobjectives In Water Resource Systems Analysis ; The Surrogate Worth Trade Off Method, Water Resources Research,

August , 1974.

- 18) 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.
- 19) 建設省土木研究所企画部：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.

< 補 足 >

1. 記 号 説 明

(1) 変 数

x_{ij}^{rr} : 第 r 地区における i 要素から j 要素へのうけわたり水量

x_{11}^{rs} : 第 r 地区から第 s 地区に移動する河川水量

x_{14}^{rg} : 第 r 地区から流域対象外へ移動する河川水量

x_{22}^{rs} : 第 r 地区から第 s 地区に移動する地下水量

x_{33}^{rs} : " " " 上水々量

x_{77}^{rs} : " " " 農水々量

x_{88}^{rs} : " " " に移動する下水々量

f_4^r : 第 r 地区家庭用水の蒸発量

f_5^r : " 業務用水の "

f_6^r : " 工業用水の "

f_7^r : " 農業用水の "

f_9^r : " 流域水の "

(2) 入力データ及びパラメータ

v_3^r : 対象流域外から第 r 地区への上水のうけわたり量

v_7^r : " " 農水 "

u_7^r : 第 r 地区農業への流入降水量

u_9^r : " 流域への "

g_3^r : 第 r 地区上水の対象流域外への分水量

a_{93}^{rr} : 第 r 地区における上水の流域(たとえばため池)からの取水量

A_4^r : 第 r 地区における家庭が受けとる水量の下限值

AM_4^r : " " " 上限値

A_6^r : " 工業 " 下限値

AM_6^r : " " " 上限値

A_7^r : 第 r 地区における農業が河川より取水する水量の下限值

AM_7^r : " " " 上限値

ϵ_r : " 業務水量と家庭水量の比率

B_3^r : " 上水の地下水取水制限量

B_6^r : " 工業 " "

B_7^r : " 農業 " "

Q_1^r : 第 r 地区における河川の必要維持流量

QM_1^r : " " からの取水可能水量の上限

dR_r : 第 r 地区における家庭使用水量原単位

PR_r : 第 r 地区における工業産出高水量原単位
 k_4^r : " 家庭に対する上水道給水率
 k_5^r : " 業務 " "
 s_4^r : " 家庭に対する下水道整備率
 s_5^r : " 業務 " "
 s_6^r : " 工業 " "
 s_9^r : " 流域 " "
 RP_4^r : 第 r 地区家庭要素の内部循環再生水に対する再利用率
 RP_5^r : " 業務要素の " "
 RP_6^r : " 工業要素の " "
 RU_4^r : " 家庭要素で再生水が利用される割合の上限值
 RU_5^r : " 業務要素 " "
 RU_6^r : " 工業要素 " "
 P_2^r : 第 r 地区の地下水の汚濁負荷濃度
 P_7^r : " 農水 " "
 P_8^r : " 下水 " "
 P_9^r : " 流域水 " "
 $\bar{P}_1^r$: 第 r 地区の河川水に対する水質環境基準値
 e_{21} : 地下水が河川に流出するときの汚濁負荷量流達率
 e_{71} : 農 業 " "
 e_{81} : 下水処理場から河川に放流するときの汚濁負荷量流達率
(= 放流水質 / 混合排水水質)
 e_{91} : 流域から河川に流出するときの汚濁負荷量流達率
(以上 $e_{21} \sim e_{91}$ は地区によらないとした)
 $e_{11}^{r,q}$: 第 r 地区の河川が対象流域外へ移動するときの汚濁負荷量流達率
 $e_{11}^{r,s}$: 第 r 地区の河川が第 s 地区へ移動するときの汚濁負荷量流達率
 $\alpha_{11}^{r,q}$: 第 r 地区から発する河川水のうち、対象流域外へ流出する場合の分流比
 $\alpha_{11}^{r,s}$: 第 r 地区から発する河川水のうち、第 s 地区河川に流出する場合の分流比
 $\alpha_{22}^{r,s}$: 第 r 地区から発する地下水のうち、第 s 地区地下水に流出する場合の分流比
 $\alpha_{21}^{r,s}$: 第 r 地区から発する地下水のうち、自地区の河川に流出する場合の分流比
 $\alpha_{32}^{r,s}$: 第 r 地区上水道の地下に流入する率 (漏水率)
 $\alpha_{72}^{r,s}$: " 農水の地下浸透率
 $\alpha_{91}^{r,s}$: " 流域水の河川への流出率
 $\alpha_{92}^{r,s}$: " 流域水の地下浸透率
 $\alpha_{4f}^{r,s}$: " 家庭用水の蒸発率
 $\alpha_{5f}^{r,s}$: " 業務用水の " "
 $\alpha_{6f}^{r,s}$: " 工業用水の " "

α_{7f}^{rf} : 第7地区農業用水の蒸発率

α_{9f}^{rf} : " 流域水の "

CTr : 第7地区が負担することの可能な取水、給水、配水、排水、処理等水利用に関する年間当りの事業費および維持管理費

Cij : 流域構成要素からj要素へと水量が配分されときの単位水量当り事業費及び維持管理費(これは地区によらないとする)

D_{33} : 上水の地区間分水において、単位水量当、単位距離当りの年間事業費および維持管理費

D_{77} : 農水の " "

D_{88} : 下水の地区間移動において、単位水量当、単位距離当りの年間事業費および維持管理費

ℓw_r : 第7地区の上水道が流域対象外から分水を受けるときの費用算定距離

ℓa_r : 第7地区の農業が流域対象外から分水を受けるときの費用算定距離

ℓ_{33}^{rs} : 第3地区の上水道が第7地区の上水道から分水を受けるときの費用算定距離

ℓ_{77}^{rs} : 第7地区の農業が第7地区の農業から分水を受けるときの費用算定距離

ℓ_{88}^{rs} : 第7地区の下水を第8地区に送るときに生ずる費用を計算するための費用算定距離

2. モデルの詳細

シミュレーションに際しては以上に示した全ての変数を実変数としてとらえるのではなく、たとえば、第7地区から発する河川水の総量 $\sum_s \alpha_{11}^{rs}$ を一つの変数としてとらえる。そうすると、 α_{11}^{rs} は分流比 α_{11}^{rs} を与えることによって決定される。地下水についても同様である。さらに、各地区内部の変数も各種条件を与えることによって、実変数をかなり減少させることができる。これら実変数を減少させるための各種条件式を示せば以下の通りであり、①～⑭は表-3に示した運動に関する条件式、⑮～⑳は地区間の移動ルートをもたない要素の水量の連続条件式である。

- ① 河川水の分流
- ② 地下水の分流(地区間移動)
- ③ " (地区内部河川への流出)
- ④ 上水の漏水
- ⑤ 家庭用水の蒸発
- ⑥ 業務 "
- ⑦ 工業 "
- ⑧ 農水の地下浸透
- ⑨ " の蒸発
- ⑩ 流域水の河川への流出
- ⑪ " 地下への浸透
- ⑫ " 蒸発
- ⑬ 家庭用水流入出連続式
- ⑭ 業務用水 "
- ⑮ 工業用水 "

(i) 制 約 条 件

制約条件には等式で表わされる物理的な制約条件と不等式で表わされる場合が多い社会的な制約条件がある。これらを変数の種類を類別すれば、地区内部の変数だけで表わされる制約式と地区間移動変数を含む制約式の2つに分けられる。本ケース・スタディーで用いた制約式を第7地区に着目して示せば以下のようになる。

A. 地区内部の変数だけで表わされる制約式

A-1 家庭用水の総受水量はある値以上である。

$$x_{24}^{rr} + x_{34}^{rr} + x_{44}^{rr} + x_{54}^{rr} \geq A_4^r \quad (1)$$

A-2 家庭用水の総受水量はある値以下である。

$$x_{24}^{rr} + x_{34}^{rr} + x_{44}^{rr} + x_{54}^{rr} \leq AM_4^r \quad (2)$$

A-3 工業用水の総受水量はある値以上である。

$$x_{16}^{rr} + x_{26}^{rr} + x_{36}^{rr} + x_{56}^{rr} + x_{66}^{rr} \geq A_6^r \quad (3)$$

A-4 業務用水と家庭用水の比率が一定である。

$$x_{25}^{rr} + x_{35}^{rr} + x_{45}^{rr} + x_{55}^{rr} = \epsilon_r \times (x_{24}^{rr} + x_{34}^{rr} + x_{44}^{rr} + x_{54}^{rr}) \quad (4)$$

A-5 工業用水の受水量はある値以下である。

$$x_{16}^{rr} + x_{26}^{rr} + x_{36}^{rr} + x_{56}^{rr} + x_{66}^{rr} \leq AM_6^r \quad (5)$$

A-6 上水道の地下水取水量はある値以下である。

$$x_{23}^{rr} \leq B_3^r \quad (6)$$

A-7 工業の地下水取水量はある値以下である。

$$x_{26}^{rr} \leq B_6^r \quad (7)$$

A-8 農業の河川取水量はある値以上である。

$$x_{17}^{rr} \geq A_7^r \quad (8)$$

A-9 農水の河川取水量はある値以下である。

$$x_{17}^{rr} \leq AM_7^r \quad (9)$$

A-10 家庭内部循環再生利用に使用できる水量は家庭用水総量に再利用率を乗じた値以下である。

$$x_{44}^{rr} \leq RP_4^r \times (x_{24}^{rr} + x_{34}^{rr} + x_{44}^{rr} + x_{54}^{rr}) \quad (10)$$

A-11 業務内部循環再生利用に使用できる水量は業務用水総量に再利用率を乗じた値以下である。

$$x_{55}^{rr} \leq RP_5^r \times (x_{25}^{rr} + x_{35}^{rr} + x_{45}^{rr} + x_{55}^{rr}) \quad (11)$$

A-12 工業内部循環再生利用に使用できる水量は工業用水総量に再利用率を乗じた値以下である。

$$x_{66}^{rr} \leq RP_6^r \times (x_{16}^{rr} + x_{26}^{rr} + x_{36}^{rr} + x_{56}^{rr} + x_{66}^{rr}) \quad (12)$$

A-13 家庭が使用できる再生水は家庭総使用量に再利用対象用途率を乗じた値以下である。

$$x_{44}^{rr} + x_{54}^{rr} \leq RU_4^r \times (x_{24}^{rr} + x_{34}^{rr} + x_{44}^{rr} + x_{54}^{rr}) \quad (13)$$

A-14 業務が使用できる再生水は業務総使用量に再利用対象用途率を乗じた値以下である。

$$x_{55}^{rr} + x_{65}^{rr} \leq RU_5^r \times (x_{25}^{rr} + x_{35}^{rr} + x_{45}^{rr} + x_{55}^{rr}) \quad (14)$$

A-15 工業が使用できる再生水は工業総使用量に再利用対象用途率を乗じた値以下である。

$$x_{66}^{rr} + x_{36}^{rr} \leq RU_6^r \times (x_{16}^{rr} + x_{26}^{rr} + x_{36}^{rr} + x_{56}^{rr} + x_{66}^{rr}) \quad (15)$$

B. 地区間移動変数を含む制約式

B-1 河川連続条件式

$$\sum_j x_{11}^{rr} + x_{21}^{rr} + x_{71}^{rr} + x_{81}^{rr} + x_{91}^{rr} = x_{13}^{rr} + x_{16}^{rr} + x_{17}^{rr} + \sum_j x_{11}^{rs} \quad (16)$$

B-2 地下(水)連続条件式

$$\sum_j x_{22}^{rr} + x_{32}^{rr} + x_{72}^{rr} + x_{92}^{rr} = x_{21}^{rr} + x_{23}^{rr} + x_{24}^{rr} + x_{25}^{rr} + x_{26}^{rr} + x_{27}^{rr} + \sum_j x_{22}^{rs} \quad (17)$$

B-3 上水道連続条件式

$$v_3^r + \sum_j x_{33}^{rs} + x_{13}^{rr} + x_{23}^{rr} + x_{83}^{rr} + a_{93}^{rr} = x_{32}^{rr} + x_{34}^{rr} + x_{35}^{rr} + x_{36}^{rr} + \sum_j x_{33}^{rs} + g_3^r \quad (18)$$

B-4 農業連続条件式

$$u_7^r + v_7^r + \sum_j x_{77}^{rs} + x_{17}^{rr} + x_{27}^{rr} + x_{87}^{rr} = x_{71}^{rr} + x_{72}^{rr} + f_7^r + \sum_j x_{77}^{rs} \quad (19)$$

B-5 下水道連続条件式

$$\sum_j x_{88}^{rr} + x_{48}^{rr} + x_{58}^{rr} + x_{68}^{rr} + x_{98}^{rr} = x_{81}^{rr} + x_{83}^{rr} + x_{84}^{rr} + x_{85}^{rr} + x_{87}^{rr} + \sum_j x_{88}^{rs} \quad (20)$$

B-6 第 r ゾーン河川水質の制約

$$P_1^r \leq \bar{P}_1^r \quad (21)$$

なお、この制約はシミュレーションの際にははずしておき、結果がこれを満たしているかどうかをチェックする。

B-7 第 r 地区が負担しうる事業費の年間償還額及び維持管理費には制限がある。

$$\begin{aligned} & C_{13} \cdot x_{13}^{rr} + C_{16} \cdot x_{16}^{rr} + C_{17} \cdot x_{17}^{rr} + C_{23} \cdot x_{23}^{rr} + C_{24} \cdot x_{24}^{rr} \\ & + C_{25} \cdot x_{25}^{rr} + C_{26} \cdot x_{26}^{rr} + C_{27} \cdot x_{27}^{rr} + C_{34} \cdot x_{34}^{rr} + C_{35} \cdot x_{35}^{rr} \\ & + C_{36} \cdot x_{36}^{rr} + C_{44} \cdot x_{44}^{rr} + C_{48} \cdot x_{48}^{rr} + C_{55} \cdot x_{55}^{rr} + C_{58} \cdot x_{58}^{rr} \\ & + C_{66} \cdot x_{66}^{rr} + C_{68} \cdot x_{68}^{rr} + C_{71} \cdot x_{71}^{rr} + C_{81} \cdot x_{81}^{rr} + C_{83} \cdot x_{83}^{rr} \\ & + C_{84} \cdot x_{84}^{rr} + C_{85} \cdot x_{85}^{rr} + C_{86} \cdot x_{86}^{rr} + C_{87} \cdot x_{87}^{rr} + C_{93} \cdot a_{93}^{rr} \\ & + C_{98} \cdot x_{98}^{rr} + D_{33} \cdot \ell w_r \cdot v_3^r + \sum_j D_{33} \cdot \ell_{33}^{rs} \cdot x_{33}^{rs} + D_{77} \cdot \ell a_r \cdot v_7^r \\ & + \sum_j D_{77} \cdot \ell_{77}^{rs} \cdot x_{77}^{rs} + \sum_j D_{88} \cdot \ell_{88}^{rs} \cdot x_{88}^{rs} \leq C T_r \quad (22) \end{aligned}$$

ただし、上水、農水に対しては第 r 地区が他地区から分水を受ける場合にそれは第 r 地区の負担とし、逆に下水については第 r 地区が他地区に送水する場合に第 r 地区の負担と考えた。

B-8 河川維持流量に関する制約

$$\sum_j x_{11}^{rs} \geq Q_1^r \quad (23)$$

B-9 河川からの取水可能量の制約

$$x_{13}^{rr} + x_{16}^{rr} + x_{17}^{rr} \leq Q M_1^r \quad (24)$$

(ii) 目的関数

本ケース・スタディーで用いた目的関数は次の3種類である。

- (1) 対象流域全体において取水、給水、浄化、排水……等の水利用に関する総費用を最小にする。

$$\sum_{\substack{r \\ s}} (C_{13} \cdot x_{13}^{rr} + C_{16} \cdot x_{16}^{rr} + C_{17} \cdot x_{17}^{rr} + C_{23} \cdot x_{23}^{rr} + C_{24} \cdot x_{24}^{rr} + C_{25} \cdot x_{25}^{rr} \\ + C_{26} \cdot x_{26}^{rr} + C_{27} \cdot x_{27}^{rr} + C_{34} \cdot x_{34}^{rr} + C_{35} \cdot x_{35}^{rr} + C_{36} \cdot x_{36}^{rr} + C_{44} \cdot x_{44}^{rr} \\ + C_{48} \cdot x_{48}^{rr} + C_{55} \cdot x_{55}^{rr} + C_{58} \cdot x_{58}^{rr} + C_{66} \cdot x_{66}^{rr} + C_{68} \cdot x_{68}^{rr} + C_{71} \cdot x_{71}^{rr} \\ + C_{81} \cdot x_{81}^{rr} + C_{83} \cdot x_{83}^{rr} + C_{84} \cdot x_{84}^{rr} + C_{85} \cdot x_{85}^{rr} + C_{86} \cdot x_{86}^{rr} + C_{87} \cdot x_{87}^{rr} \\ + C_{98} \cdot x_{98}^{rr} + \sum_{\substack{r \\ s}} D_{33} \cdot \ell_{33}^{rr} \cdot x_{33}^{rr} + \sum_{\substack{r \\ s}} D_{77} \cdot \ell_{77}^{rr} \cdot x_{77}^{rr} + \sum_{\substack{r \\ s}} D_{88} \cdot \ell_{88}^{rr} \cdot x_{88}^{rr}) \rightarrow \min \quad (25)$$

- (2) 水資源からみた収容可能人口を最大にする。

$$\sum_r \frac{1}{dRr} (x_{24}^{rr} + x_{34}^{rr} + x_{44}^{rr} + x_{84}^{rr}) \rightarrow \max \quad (26)$$

- (3) 水資源からみた対象流域全体の工業産出可能高を最大にする。

$$\sum_r \frac{1}{pRr} (x_{16}^{rr} + x_{26}^{rr} + x_{36}^{rr} + x_{66}^{rr} + x_{86}^{rr}) \rightarrow \max \quad (27)$$

3. 入力データ及びパラメーター

入力データは現況把握資料ならびに市町村別原データ¹³⁾から得た値を用い、できるだけ現実に合った結果を得ようとした。また、上水道給水率、下水道整備率などのパラメーターは、今回のシミュレーションではある一定値にセットした。

これらは以下に記すように12種に分類でき、それらの値を表-1～表-12に示す。

- (1) 外生変数

降水量や対象流域外に対する入出量データである。

表-1 外 生 変 数

(千 m^3 /年)

データ 地区	v_3^r	v_7^r	u_7^r	u_8^r	g_3^r	a_{93}^{rr}
1	0	184.0	2,725.0	19,245.0	0	165.0
2	0	434.0	9,303.0	25,099.0	0	0
3	0	1,054.0	10,549.0	9,030.0	0	0
4	0	2,884.0	20,559.0	39,790.0	0	0
5	0	0	9,329.0	73,977.0	0	51.0
6	30,283.0	287.0	46,602.0	237,931.1	3,223.0	49.0
7	0	5,619.0	45,664.0	214,418.0	687.0	1,465.0
8	1,260.0	3,640.0	25,953.0	33,733.0	0	0
9	2,938.0	2,387.0	18,734.0	52,798.0	0	0
10	8,024.0	4,756.0	33,902.0	46,808.0	0	0
11	1,183.0	5,991.0	53,727.0	181,228.0	921.0	0

- (2) 家庭使用水量原単位及び工業産出高水量原単位

現況把握から得たものである。

表-2 家庭使用水量原単位

データ 地区	dR_r ℓ / 日・人	pR_r m^3 / 年・百万円
1	164.0	178.0
2	164.0	159.0
3	153.0	127.0
4	247.0	59.0
5	164.0	57.0
6	263.0	34.0
7	203.0	42.0
8	164.0	153.0
9	164.0	131.0
10	247.0	151.0
11	252.0	92.0

(3) 各種制限値

家庭用水、工業用水及び農水の河川からの取水水量には下限を設け、その値は現況値とし、さらに業務と家庭の水量比率も現況値を用いた。次に、上水道、工業及び農業の地下水取水水量は地盤沈下を考慮して制限を設けることにし、現況値を用いた。

河川維持流量に関する制約は、河川の維持流量と洪水時に制御されることなく流出する水量の和として求められる。今回は低水流量の約9割として設定した。また河川からの取水可能水量としては、河川の維持流量に関する制約を満たすための水量以外は全て利用できる（そのための利水施設は完備されるものとする）ものとして設定した。

家庭および工業用水の総受水量の上限値、農業の地下水取水水量の上限値は $99.9 \times 10^7 m^3$ / 年 として設定した。また、農業の河川取水水量の上限値は、上述の河川取水可能量とした。

表-3 各種制限値

(千 m^3 /年)

データ 地区	A_4^r	A_6^r	A_7^r	ε_r %	B_5^r	B_6^r	B_7^r	Q_1^r
1	1,649.0	1,022.0	2,209.0	13.3	2,423.0	821.0	116.0	14.2×10^4
2	1,892.0	1,440.0	7,725.0	13.4	3,654.0	1,110.0	406.0	11.6×10^4
3	892.0	457.0	8,226.0	14.5	1,176.0	309.0	434.0	7.1×10^4
4	5,785.0	7,161.0	15,242.0	8.9	8,898.0	4,467.0	802.0	2.7×10^4
5	1,775.0	253.0	5,487.0	13.4	2,031.0	166.0	288.0	0.9×10^4
6	21,084.0	1,541.0	27,443.0	10.5	2,292.0	648.0	1,444.0	2.7×10^4
7	7,577.0	1,216.0	24,311.0	9.9	4,960.0	656.0	1,280.0	3.6×10^4
8	2,442.0	2,129.0	19,241.0	13.3	2,608.0	1,559.0	1,013.0	6.2×10^4
9	2,484.0	2,343.0	11,720.0	13.3	977.0	1,547.0	617.0	0.9×10^4
10	12,701.0	6,862.0	25,134.0	8.9	8,538.0	4,916.0	1,323.0	5.3×10^4
11	3,963.0	2,637.0	25,905.0	12.9	2,906.0	1,212.0	1,363.0	3.6×10^4

(4) 汚濁負荷濃度と河川水質環境基準値

各汚濁負荷発生要素の排出濃度は、汚水を 200 ppm¹³⁾、雨水を 1 ppm¹³⁾として現状把握資料から地区別に割出した。

また、環境基準値は、昭和 50 年、55 年において 10 ppm であるが、この基準値ではあまりにも厳しすぎるため、20 ppm として入力した。

表-4 汚濁負荷濃度と河川水質環境基準値

(ppm)

データ 地区	P_2^r	P_7^r	P_8^r	P_9^r	$\bar{P}_1^r$
1	5.0	20.0	200.0	60.0	20.0
2	5.0	20.0	200.0	60.0	20.0
3	5.0	20.0	200.0	60.0	20.0
4	5.0	20.0	200.0	100.0	20.0
5	5.0	20.0	200.0	40.0	20.0
6	5.0	20.0	200.0	40.0	20.0
7	5.0	20.0	200.0	40.0	20.0
8	5.0	20.0	200.0	60.0	20.0
9	5.0	20.0	200.0	40.0	20.0
10	5.0	20.0	200.0	100.0	20.0
11	5.0	20.0	200.0	40.0	20.0

(5) 上水道給水率、下水道整備率

上水道給水率は現況把握で得た値をもとに、また、下水道整備率は家庭、業務、工業に対してそれぞれ 50% とし、流域に対しては下水道整備地域でも大雨時には下水を通らず、直接河川に流出する量があることを考慮に入れ上記 50% の値をさらに下げて 25% とした。

表-5 上水道給水率、下水道整備率

(%)

データ 地区	k_4^r	k_5^r	s_4^r	s_5^r	s_6^r	s_7^r
1	97.0	97.0	50.0	50.0	50.0	25.0
2	97.0	97.0	50.0	50.0	50.0	25.0
3	87.0	87.0	50.0	50.0	50.0	25.0
4	97.0	97.0	50.0	50.0	50.0	25.0
5	87.0	87.0	50.0	50.0	50.0	25.0
6	97.0	97.0	50.0	50.0	50.0	25.0
7	92.0	92.0	50.0	50.0	50.0	25.0
8	97.0	97.0	50.0	50.0	50.0	25.0
9	97.0	97.0	50.0	50.0	50.0	25.0
10	97.0	97.0	50.0	50.0	50.0	25.0
11	75.0	75.0	50.0	50.0	50.0	25.0

(6) 再利用率, 再利用対象用途の割合¹³⁾

住居地区からの発生汚水のうち, 集合住宅よりの発生汚水の占める割合を31.2%, また家庭要素内において再利用水の使用用途は便所, 散水, 洗車のみとし, それらが家庭用水の中で占める割合は30.7%である。したがって, 家庭要素独自の再生循環利用方式を考える場合, 家庭用水総量のうち再生利用水として使い得る割合, 即ち, 再利用率は上記2者の積と考えられ, 9.6%となる。

同様に, 業務地区からの発生汚水のうち, オフィスビルからのものの占める割合を45.4%, 再利用水の使用用途を便所, モップのみとし, その割合を64.0%とすれば再利用率は29.0%となる。

工業については, 用水型工業からのものの占める割合を55.2%, 回収水も考慮して再利用水の使用用途を冷却, 温調, 製品処理及び洗浄の $\frac{1}{2}$ とし, その割合を82.7%とすれば再利用率は45.6%となる。

表-6 再利用率, 再利用対象用途の割合

データ 地区		(%)				
		RP_4^r	RP_5^r	RP_6^r	RU_4^r	RU_5^r
1		9.6	29.0	46.0	30.7	64.0
2		"	"	"	"	"
3		"	"	"	"	"
4		"	"	"	"	"
5		"	"	"	"	"
6		"	"	"	"	"
7		"	"	"	"	"
8		"	"	"	"	"
9		"	"	"	"	"
10		"	"	"	"	"
11		"	"	"	"	"

(7) 河川分流比, 地下水分流比

現況把握を行なう際に用いた方針通り, 河川水については各地区に含まれる河川の平水流量と分流方向から定め, 地下水については地下水系(等地下水位線)から分流方向を定め, 分流比は仮定した。¹³⁾

(8) 河川流出率, 地下浸透率

上水の地下浸透率(漏水率)は現況把握資料から求め, また, 地下水の当該地区河川への流出率, 流域水の河川流出率, 地下浸透率及び漏水の地下浸透率は現況把握を行なう時の方針に従ってその値を用いた。¹³⁾

(9) 家庭, 業務, 工業, 農業及び流域各水量の蒸発率

現況把握を行なう時の方針に従って決めた。¹³⁾

表-7 河川分流比 α_{11}^{rr} と地下水分流比 α_{11}^{rg}

(%)

$\tau \backslash s$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	g
1												100
2	100											
3		100										
4			23 (20)	77								
5	(70)		100									
6				100 (50)								
7				15 (30)				36 (30)		49		
8			45 (30)	55 (30)								
9	100 (50)											
10								100 (30)	(30)			
11									(30)	100 (30)		

(注) g は流域外を示す。() 内は地下水の場合を示す。

表-8 河川流出率, 地下浸透率

(%)

データ 地区	α_{21}^{rr}	α_{32}^{rr}	α_{72}^{rr}	α_{91}^{rr}	α_{92}^{rr}
1	100.0	22.8	33.2	70.0	30.0
2	100.0	24.8	33.2	70.0	30.0
3	100.0	13.5	33.2	70.0	30.0
4	80.0	1.9	33.2	70.0	30.0
5	30.0	18.6	31.3	70.0	30.0
6	50.0	18.6	31.5	70.0	30.0
7	40.0	23.8	33.2	70.0	30.0
8	40.0	20.3	33.2	70.0	30.0
9	50.0	35.3	32.4	70.0	30.0
10	40.0	10.7	33.2	70.0	30.0
11	40.0	15.4	31.3	70.0	30.0

表-9 蒸 発 率

(%)

データ 地区	α_4^{rf}	α_5^{rf}	α_6^{rf}	α_7^{rf}	α_9^{rf}
1	12.0	12.0	15.0	33.2	50.0
2	12.0	12.0	15.0	33.2	50.0
3	12.0	12.0	15.0	33.2	50.0
4	12.0	12.0	15.0	33.2	50.0
5	12.0	12.0	15.0	31.3	50.0
6	12.0	12.0	15.0	31.5	50.0
7	12.0	12.0	15.0	33.2	50.0
8	12.0	12.0	15.0	33.2	50.0
9	12.0	12.0	15.0	32.4	50.0
10	12.0	12.0	15.0	33.2	50.0
11	12.0	12.0	15.0	31.3	50.0

40) 流 達 率

河川への流出過程における汚濁負荷流達率に必要な要素は、地区内部においてはまず地下水があるがこれは0とし、農薬は0.2¹³⁾、流域からの流達率は流域面積と人口密度に関係し¹³⁾、地区によってばらつきはあるが0.3とした。また、下水道からのものとしては下水処理後の放流水質を混合排水(200 ppmと考えた)で除した値を用いることができる。ここでは、とりあえず処理後の放流水質を20 ppmとした。

次に、他地区から河川が流入する場合には自浄作用を考え、自浄係数を $K = 4.797 \times 10^{-6} \text{ sec}^{-1}$ 、流下速度を $v = 0.5 \text{ m/sec}$ 、流下距離 ℓ (m)は河川に沿う地区間重心距離をとって次式を用いた。¹³⁾

$$k = \exp \left(-K \cdot \frac{\ell}{v} \right) \quad \dots\dots\dots (28)$$

表-10 流 達 率

(%)							
e_{21}	0	e_{71}	20	e_{61}	10	e_{91}	30

e_{11}^{rs}

(%)

$\begin{matrix} s \\ \tau \end{matrix}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	g
1												97
2	96											
3		97										
4		94	94									
5		92										
6				93								
7			95					92		97		
8		96	96									
9	94											
10								94				
11										92		

(注) g は流域外を示す。

(II) 費用係数及び各地区の負担可能な費用の上限値

- (i) 費用係数とは、まず地区内部のものとしては例えば上水道が河川から取水するときの単位水量当り費用あるいは下水が河川に放流するときの単位排水量当りの処理費用等のことである。これらは経持管理費及び事業費(建設費)の均等年賦額の合計を考えている。¹³⁾

また、地区間移動要素のうち、上水道、農薬、下水道については送水に伴う単位水量当り、単位距離当りの費用を必要とする。¹³⁾

- (ii) 各地区の水利用者は水利用に伴って取水、導水、浄水、送水、配水、排水処理等の費用を負担しなければならぬが、年間で負担し得る上限値を次のように設定した。

表-11(I) 費用係数

(円/㎡, 円/㎡/km)

C_{13}	20.0	C_{35}	20.0	C_{84}	60.0
C_{16}	10.0	C_{44}	150.0	C_{85}	60.0
C_{17}	5.0	C_{48}	10.0	C_{86}	60.0
C_{23}	10.0	C_{55}	100.0	C_{87}	20.0
C_{24}	10.0	C_{58}	10.0	C_{93}	20.0
C_{25}	10.0	C_{65}	50.0	C_{98}	5.0
C_{26}	10.0	C_{68}	10.0	D_{33}	0.4
C_{27}	10.0	C_{71}	1.0	D_{77}	0.2
C_{34}	20.0	C_{81}	10.0	D_{88}	0.1
C_{35}	20.0	C_{83}	50.0	—	—

表-11(II) 負担可能な費用上限値

(億円)

地区	データ
1	10.0
2	10.0
3	10.0
4	10.0
5	10.0
6	20.0
7	10.0
8	10.0
9	10.0
10	10.0
11	10.0

II2 費用算定距離

上記表-11(I)で記したように水の地区間輸送機能をもつ要素のうち、上水道、農業、下水道について地区間の送水(分水)費用を算出するときに送水(分水)距離が問題となり、それらを費用算定距離と名付けた。また、上水道、農業については流域対象外から分水を受けているがその際にも費用算定距離を必要とする。これについては木津川水系からのときは15.0km、吉野川水系からのときは20.0kmとする。

表-12(i) 費用算定距離

(a) 上水道 ℓ_{33}^{rs} , (b) 農業 ℓ_{77}^{rs}

(km)

$r \backslash s$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1		4.0			8.5				5.5		
2	4.0 (3.5)		4.0	6.5	8.5			5.5	6.5		
3		4.0 (4.0)		5.5			8.5	3.0			
4		6.5 (5.5)	5.5 (5.5)		6.5	7.0	11.5				
5	8.5 (7.0)	8.5 (8.0)		6.5		8.5					
6				7.0 (8.0)	8.5		17.0				
7			8.5 (8.0)	11.5 (10.0)		17.0		7.0 (8.5)		7.0 (10.0)	14.5
8		5.5 (5.5)	3.0 (5.0)				7.0		7.0	5.5	
9	5.5 (7.0)	6.5						7.0		7.0	5.5
10							7.0	5.5 (6.5)	7.0 (8.5)		7.0
11							14.5		5.5 (10.0)	7.0 (7.0)	

(注) () 内は農業の値を示す。

(c) 下水道 ℓ_{88}^{rs}

(km)

$r \backslash s$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1											
2	4.0										
3		4.0									
4		6.5	5.5								
5	8.5	8.5									
6				7.0							
7			8.5	11.5				7.0		7.0	
8		5.5	3.0								
9	5.5										
10								5.5	7.0		
11									5.5	7.0	

表-12(ii) 費用算定距離

(km)

地区	データ	ℓw_r	ℓa_r
1		0	20.0
2		0	20.0
3		0	20.0
4		0	20.0
5		0	0
6		15.0	20.0
7		0	20.0
8		20.0	20.0
9		20.0	20.0
10		20.0	20.0
11		20.0	20.0