

流域の総合的な水資源管理に関する研究

A STUDY ON WATER RESOURCES MANAGEMENT IN A BASIN

吉川勝秀*・関正和**

By Katsuhide YOSHIKAWA and Masakazu SEKI

1. 序

本論文において、筆者らは流域の水資源問題を総合的かつ多角的に検討するための考え方と方法論を提示し、現実の問題を分析・検討する際にどのような問題が生じ、それにどのように対処するかについて論じている。流域の水資源問題を論じる場合には、水循環を総合的に把握しておくことが基本的な前提である。というのは、多くの地域において水利用度が高くなっており、この水の循環に付随した水量・水質をめぐる上下流問題や利水部門間のトレード・オフの問題などが生じているからである。これらの水資源をめぐる諸問題を展望して、それに対処するための対策について検討することは重要である。そして、水資源問題の分析・検討においては、今後ますます総合的かつ多角的な観点に立脚した分析・検討が必要となってくる。

筆者らは、参考文献 1) において、適正な水の利用計画について総合的かつ多角的に検討する必要性を述べ、そのための方法論を提案した。その研究においては、流域(地域)の水資源をめぐる諸問題を総合的、かつ多角的に取り扱ったが、前述の問題点のすべてに 대응するものではなかった。すなわち、① 利水部門間のトレード・オフや上下流間のトレード・オフなどについては、感度分析や分解原理の適用により間接的に取り扱っているが、水資源関連経費の最小化・流域活動費(たとえば、工業出荷額や水資源からみた収容可能人口)の最大化・水質や排出される汚濁負荷量の最小化といった諸目的間のトレード・オフが調整されていない、② 分析対象期間を1年間としたために、水文特性や需要量(特に農水)を十分に考慮しきれなかった。③ また、実践上の問題としては、対象流域の特性と分析の目的に応じ

て、いかに地区分割をするかといった点に対する検討が十分ではなかった。そこで、本研究では上述の問題点に対処するために次の5点について検討した。

① 流域(地域)の特性や分析目的等に適応した地区分割のための考え方とその方法を提示した。

② 水水量や水需要量(特に農水)の季節特性を考慮するために、分析対象期間(1年間)を灌漑期・非灌漑期に分けた。そして、それに伴って生じる貯留量(ストック量)を考慮した水収支の表示方法を提示し、水資源の配分・利用モデルを定式化した。

③ 多目的間の調整を行い、各目的の達成度をバランスよく上昇させた解を比較的容易に求めるために、伏見・山口の改良した目標計画法⁶⁾を導入した。この解法に参考文献⁷⁾で示した分解原理を結合すれば、同時に地区間の調整過程を明示的に把握することも可能である。

④ 将来における地域の水需給問題を検討する際に必要なデータを推定するために、いくつかのシミュレーション・モデルを作成した。このシミュレーション・モデルを改良した最適化モデルを結合することにより、将来の水需給問題を把握し、それに対処する手段・方法について検討することが可能である。

⑤ 最適化モデルを用いた水問題の検討においても、シナリオ分析法を導入して、多角的かつ現実的な分析を行うことを提案し、それを具体化した。

2. 水循環の総合的な把握方法の提示

流域(地域)の水資源問題を総合的に検討するためには、水循環を把握しておく必要がある。水循環を把握する場合には、① 水資源関連要素(水のやりとりを記述する要素、たとえば河川)とその機能、② 分析対象地域とその内部の地区分割、③ 分析対象期間とその間の時期(時間)分割を明確にしておかなければならない。

* 正会員 建設省土木研究所都市河川研究室研究員

** 正会員 建設省土木研究所システム課研究員

表一1 水資源関連要素とその機能

水資源関連要素	概要	機能 地区間 水輸送 要素	水利用 要素	降水 変換 要素	蒸発 散 要素	水質 浄化 要素	汚濁 負荷 発生 要素	貯留 機能 要素
河川	河道・河川敷, ダム	○				○		◎
地下	深層および浅層地下水帯	○				○		◎
上水道	取水・導水・貯水・配水の各施設	○				○		
家庭	住宅		○		○	○	○	
業務	主として第3次産業による業務地区		○		○	○	○	
工業	工場	○	○		○	○	○	
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	○				○		
流域	農地や貯水池以外の地表面	○		○	○	○	○	
ため池	ため池			○	○	○		◎
系外	大気中							

注) ◎は前報(参考文献1))では無視した貯留によるもちこしを示している。

(1) 水資源関連要素とその機能

流域(地域)の水循環・水収支の把握においては,調査・分析目的に応じてそれをどのような要素を介して把握すべきかを決定することになる。

一般には,自然流域(農地を含む)を対象とする場合には,河川・地下・流域・農業・(ため池)要素および系外間の水のやりとりが主として問題となる。対象流域の一部分あるいは全体が都市化している場合には,さらに家庭・業務・上水道・下水道が追加されることが多い。本研究では次のような理由に基づき,表一1に示すような要素を取り上げ,その機能を考慮している。

① 流域の水資源の総合的な管理を目的としていることから,自然水と用・排水を含めた水循環を総合的に把握できるように多くの要素を考えている。

② 特に,後述のケース・スタディにおいて奈良盆地を取り上げていることから,この流域の水循環上重要な役割を果たしているため池を一つの要素として取り上げた。

③ 分析対象期間を渇水期と非渇水期に分割して水循環を把握しようとしていることから,分析対象期間と分析対象期間外,および渇水期と非渇水期の間で受け渡しされる貯留量が大きな役割を演じる。このため河川・地下・ため池要素に対して貯留機能を付与した。

(2) 分析対象地域と地区分割

分析対象地域は,分析目的にもよるが,通常の場合には水文界によって区切られる。対象地域内の地区分割は,① 地表水・地下水の水文特性,② 用・排水システムの状態,③ 地域内の水需要の地区分布,④ 大規模なダムやため池の位置と受益地の分布,⑤ 地域外からの導入システムと受益地の分布,⑥ 観測点の位置,⑦ データのとりやすさ等を考察して,分析目的に適合するように行う必要がある注1)。

以下では,ある程度都市化している地域を含む対象地域において,地区分割を行う場合の手順について検討する。適切な地区分割形態は,上記①~⑦ごとに異なる場合が通常であり全体として都合のよい形態を求める作業プロセスは次のようになる。

step 1: 水文図(地表水・地下水),用・排水システム図(導水を含む),水需要量とその地域分布図等の基本図の作成と個々の特性に着目した地区分割・地区の特徴づけ。

step 2: 自然水,用・排水に着目していくつかの基本図をオーバー・レイして得られる特性図の作成とそれらの特性に着目した分割案の提示。

step 3: step 2で作成した分割案・特性図および基本図をオーバー・レイし,それらの調整を行いながら全体としてもっとも都合のよい地区分割の決定。

本研究では第1段階として表一2に示すような15枚の基本図を作成し,それぞれの特性に着目した地区分割・地域の特徴づけを行った(step 1)。次に,それらをオーバー・レイし,いくつかの特性に着目して,表一2に示すような3枚の特性図を作成した(step 2)。最後に,データの取りやすさや流量・水質観測点の位置など考慮しながら,基本図と特性図を重ねあわせ,適正な水利用計画の検討に対する適合性を考慮して,最終的な地区分割を行った(step 3)注2)。後述のケース・スタディにおいて作成した基本図,特性図を例示的に図一1に示す。

地区分割を行う場合の注意事項について若干の考察を加えると次のようになる。

① 自然水の収支についてみた場合:自然水の収支を把握するために都合のよい地区分割については,金子の研究³⁾がある。金子は全国各地の試験地における実測調

注1) 水循環を把握する場合には,用・排水の水のやりとりを把握しやすいように別々の地区分割を用いればよい。しかし,後述のような,水資源問題を総合的に検討する際には,全体として一つの地区分割を採用すると都合がよい。

注2) 詳しくは,参考文献4)を参照されたい。

表一2 地区分割のための基本図一覧表

図	図番号	図名
基	No. 1	対象地域と市町村界図
	2	水文図その1(地表水に着目)
	3	水文図その2(等地下水位線)
	4	観測点の分布図
	5	上水供給のための広域水道と他地域からの導水システム図
	6	流域下水道システム図
	7	大規模なダム・ため池の位置と容量およびその受益地区の分布図
本	8	ため池の容量分布図(市町村別)
	9	農業用水に関する他地域からの導水システム図
	10	農地の分布とその面積(市町村別)分布図
	11	農地の分布と農業用水の取・排水特性図
図	12	家庭用水使用量分布(市町村別)・住居地区分布図
	13	業務用水使用量分布(市町村別)・商業地区分布図
	14	工業用水使用量分布(市町村別)・工業地区分布図
	15	家庭+業務+工業用水使用量分布図
	16	水文特性(地表水・地下水)に着目した地域の特徴づけ
特性	17	農業用水の大規模な供給・排水特性に着目した地域の特徴づけ
	18	用水(上・下水道)の大規模な供給・排水特性に着目した地域の特徴づけ

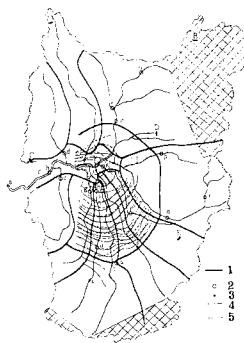
注) これらの図を用いた地区分割の作業プロセスと結果の詳細については、参考文献4)を参照されたい。

査結果をもとにして、地形の特性を考慮した地区分割方法の類型化を行っており、その結果は自然流域や農地の水収支を把握する場合に参考となる。自然水に着目して地区分割を行う場合には、河川系と等高線、および等地下水位線と地質が基礎資料となる。

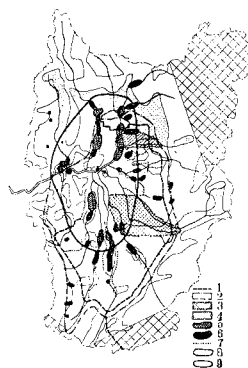
② 用・排水(導水を含む)の収支についてみた場合:用・排水の収支では、上・下水道や河川系統図、および上水や農水等の導水システムに着目する。上・下水道網は行政区画単位で整備されているものと、行政区画にまたがっているものがある。流域下水道や広域水道は後者に相当する。通常の場合には、行政区画界を境とする地区分割を採用することが多い。

③ 必要データの取りやすさからみた場合:分析・検討のために必要なデータは、(i) 水文量(降水量・蒸発散量)、(ii) 水理量(河川および地下の水位・流量・水質)、(iii) 用・排水システムとその給排水量と水質、(iv) 水需要量とその地域分布、(v) その他地域社会の諸活動に関するデータ等が必要となる。したがって、地区分割にあたっては、これらのデータのとりやすさに対する検討も重要である。データ収集上都合のよい地区分割としては、表一3に示すようになることが多い。

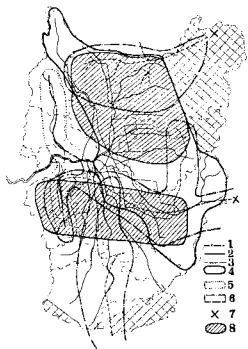
④ 分析・検討目的に対する適合性:地区分割を行うにあたっては、上記①~③の注意事項を念頭において、分析・検討目的に対して都合のよい形態を定めなければならない。たとえば、流域下水道や広域水道計画を念頭



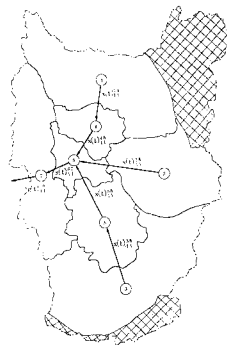
(a) 基本図の例その1(水文図・地下水)



(b) 基本図の例その2(農地の分布と農業用水の取・排水システム)



(c) 特性図の例(大規模な上・下水道網に着目した特性図)



(d) 地区分割結果

図一1 基本図, 特性図, 地区分割図の例

表-3 データのとりやすさからみた地区分割

データの分類	データ収集上都合のよい地区分割方法
水文諸量, 流量・水質	水文界(注)
農業に関する諸量	地形別, 土地改良区
家庭	行政区画
工業	〃
業務	〃
給排水	〃
その他費用等に関する経済データ	〃

注) 地表水と地下水の水文界は必ずしも一致しないことに注意を要す。

においた場合には、それらの影響を把握しやすいように行政区画を基本とした地区分割を行う。また利水部門間や上下流間のトレード・オフを総合的に検討する場合には、農水が主として問題となる領域においては農水の把握に都合のよい地区分割を行い、都市化流域では上・下水道網、水需要地の分布などを表現しうるように地区を分割して、全体として都合のよい形態を採用する。

⑥ 後述するように、水循環を把握した結果が妥当なものであるかどうかを確認するために、各地区の最下流点は流量観測点および水質観測点であることが強く望まれる。

(3) 分析対象期間の設定と時期分割

分析対象期間とその間の時期分割(タイム・スケール)は、分析目的や水文特性・水需要特性等を考慮して決定される。

タイム・スケールを ΔT とした場合には、地区 r における水資源関連要素 i における水収支は次式で表わされる。

$$\underbrace{(I_i^r)}_{\substack{\text{入る水量} \\ (\text{人} \rightarrow \text{く})}} \Delta T = \underbrace{(O_i^r)}_{\substack{\text{出る水量} \\ (\text{く} \rightarrow \text{人})}} \Delta T + \underbrace{(DS_i^r)}_{\substack{\text{貯留量} \\ \text{の変化}}} \Delta T \dots \dots \dots (1)$$

ΔT を十分大きくとれば、貯留量の項が相殺されて、分析作業は単純化される¹⁾。

$$(I_i^r)_T = (O_i^r)_T \dots \dots \dots (2)$$

しかし、水需給量などを詳細に検討しようとするれば、水文特性や水需要特性を表現しうるようなタイム・スケールで分析を行う必要がある。そのような場合には、水のやりとり量の外に、たとえば地下やダム・ため池等のような貯留機能を有する要素における貯留量の変化を考慮しなければならない。

本研究では、分析対象期間としては1年間をとり、経年的な変化については計画対象降水といった概念を用いて考慮する。そして、タイム・スケールは、水文量と水需要量(特に灌漑期にそのほとんどが使用され、しかもその量も多い農業用水の水需要量)に着目した分析を行うために、灌漑期・非灌漑期とする^{注3)}。図-2には、農

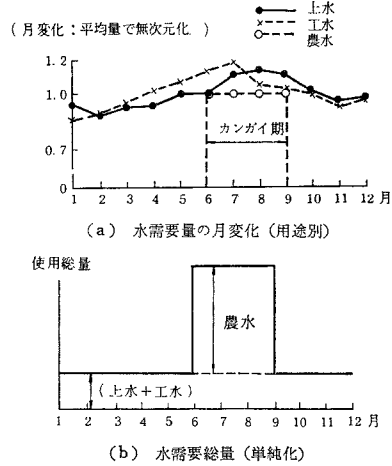


図-2 各用水使用量の月変化(一般的パターン)

水やその他の水需要量の月変化の例を示す。以下では、このような水需要特性や降水の季節変化、さらには貯留(ストック)による流況の平滑化等を考慮した水循環の把握と、水資源の配分・利用に関する検討を行う。

(4) 水循環状況をシステマティックに表示する方法

以上の考察により、水循環・水収支を把握する際に決定しなければならない3つの基本事項が明確になり、それらのもので複雑にやりとりされる水の状況が表現される。少数の水資源関連要素を対象とする場合には、水のやりとり状況は単純な図(ダイアグラム)により模式化して表現することができ、しかも水のやりとり状況の感覚的な理解にも都合がよい。しかしながら、多数の水資源関連要素を考慮に入れ、複雑な水利用システムを忠実に表現しようとすれば複雑に錯綜した水のやりとりを取り扱わなければならない。

流域(地域)内の水は、基本的には次のような4種類の関係でやりとりされている。

- ① [地区内の大気中を除く各要素間] + ② [地区内の各要素と大気中の間] + ③ [貯留機能を持つ要素の貯留量としてのもち越し] + ④ [輸送機能を持つ要素を通じての地区間]

上記の①~③が地区内の水のやりとりルートであり、④が地区間の水のやりとりルートである。

今回の調査では、このような水のやりとりのうち、各地区内の①~③に関する水のやりとりについては、参考文献1)で提案したようなマトリックスにより表示(表-4)、地区間のやりとり④については各要素ごとに

注3) したがって、このタイム・スケールで諸量を平均化して取り扱うために、この単純化によって把握できない事項(たとえば、水需要の日変動・湯水調整など)は、分析の対象にはならない。

表-4 水道源連関表 (地区における複雑な水のやりとり状況をシステムティックに表示する方法)

流出要素	流入要素										蒸発散 E_i	次期への持ちこし W_{i+1}^*	総地区間要素への水量 X_{i+1}^*	地域外への水量 W_{i+1}^{off}	同地区他要素以外への水量の合計 X_{i+1}^{out}	
	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 洗城	10 ため池						
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 洗城																
10 ため池																
総水 U_i																
前期からの持ちこし W_i^*																
総地区間要素から $X_{i+1}^*(in+out)$																
地域外からの水量(湧水含む) W_{i+1}^{off}																
同地区他要素以外からの水量の合計 X_{i+1}^{out}																
入ってくる水量の合計 X_{i+1}^{in}																

ダイアグラムで表示 (図-1 (d) に例示) する方法を用いた。このような表示方法を用いることにより、複雑に錯綜した水のやりとり (水循環) をシステムティックに表現することができる。また、後述の水資源の配分・利用モデルのシステムティックな定式化にも都合がよい。なお、図-1 (d)、表-4 の水のやりとり量 (たとえば X_{ij}^*) にふられた4つの添字のうち、上の二つはどの地区 (左側) からどの地区 (右側) へ水を移動するかを示し、下の二つはどの要素 (左側) からどの要素 (右側) へ水が移動するかを示している注4)。二つの添字が同じ場合には、同一地区内、あるいは同一要素における地区間・時間間の水のやりとりを示している。

以上の水のやりとり量のみについて記したが、必要な場合には、該当するマス目に、あるいは地区間のやりとりを示すダイアグラムに水質を記入すればよい。

(5) 水循環の把握結果のチェック

水循環に関する諸量は、それぞれのデータ項目 (たとえば農業関連諸量、上水関連諸量など) に着目して、各地区ごとに個別に把握されることが多い。現状では、それらすべてがバランスのとれた精度で収集・把握されるわけではなく、データ精度の高いチェック・ポイントにおいて、データ把握上累積していく誤差をチェックし、それを消去しておかなければならない。すなわち、収支把握結果とチェック・ポイントにおける実測値に誤差が

注 4) したがって、各記号の意味はおのずから明確になる。

生じている場合には、それに寄与するファクターのうち、同程度のオーダーの項を調整し、誤差を消去しておく。このような調整を行うことにより、データ把握プロセスにおいて生じる誤差の伝播を防ぐことが可能となる。このようなチェックとその調整は、実測によらない推定データ等を含む場合には特に重要である。

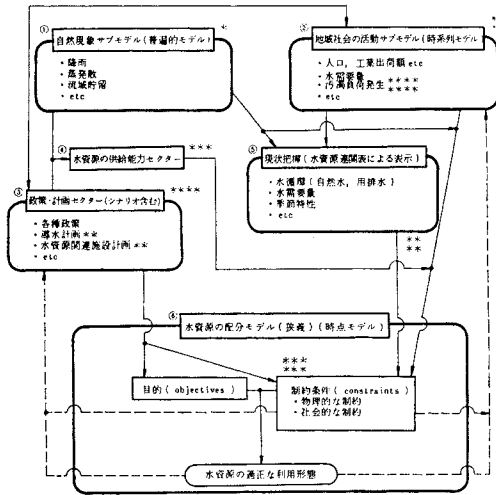
3. 水資源配分モデルの定式化と解法

(1) 本モデルによる検討対象

本モデルは、対象地域 (流域) における水資源問題 (上・下流問題、水需給問題等) を、単に上水道の給水計画といった少数の利水部門と限られた地区を対象としてとらえるのではなく、その地域の水循環機構を念頭におき、地域社会と水資源の関係も多角的に考慮して、水資源問題を総合的に検討するためのものである。したがって、現状や将来における水需要量に対する供給の可能性のチェックや、水資源関連施設計画の評価、利水部門間のトレード・オフ、水資源の量・質をめぐる上下流間のトレード・オフの把握とその調整等の検討と、水利用適正化の検討が行われることになる。

(2) 本モデルの全体構成

本モデルは、水資源の配分モデル、各サブモデルおよび政策 (計画) セクターより構成されており、その全体



- *: 物理モデルであり、参考文献②などによる。
- **：現状の計画、将来計画、政策シナリオ
- ***：狭義の水資源の配分モデルでは constraints として表現される。
- ****：狭義の水資源の配分モデルでは constraints, objectives として表現される。
- ⊕：参考文献⑧参照。
- ⊕⊕：現状把握結果より一部の constraints の係数・定数が定められる。
- ⊕⊕⊕：この段階で制約を満たすような水資源の配分（供給）が可能かどうかチェックされ、不可能ならば破線のルートにより地域社会活動サブモデル、政策セクターにフィードバックをかける。
- ⊕⊕⊕⊕：流域指針などによる。

図-3 本モデルの全体構成

構成を図-3に示す。同図が示すように、水資源の配分モデル（狭義）には、①～⑤のサブモデル・セクター、現状把握結果から必要な諸量（係数・定数）が与えられる。したがって、水資源の適正分配に関する時系列的な検討も可能である。以下では狭義の水資源配分モデルについて詳細に記すが、各サブモデル・各セクターの基本的な考え方は次のとおりである。①の自然現象サブモデルでは、降水量・蒸発散量・流域貯留水量に関する物理現象がモデル化される。ケース・スタディでは過去20年間の水文データから降雨・河川水量・地下水移動量などの相互関係を解析し、水配分モデルのパラメーターを決定している⁵⁾。②の地域社会活動サブモデルでは、人口、工業・業務・農業活動および水需要量、汚濁負荷量等の時系列的な変化が推定される（ケース・スタディではトレンド法で推定）。③の政策セクターでは、地域社会活動・水資源関連施設計画の想定や、適正な水資源配分に関する評価項目の設定が行われ、代替的な分析・検討シナリオが想定される（シナリオ分析法の導入）。④では自然条件や政策・計画により定まる水供給能力が与えられる^{注5)}。⑤では、現状の水循環（自然水、用・排水）が把握され、その結果から配分モデルの諸係数（定数）のいくつかが決まる。

(3) 水資源の配分モデル（狭義）の定式化

ここでは、水資源の適正配分を考察するために、3.(4)で示した変数をもとにして、線形計画法によって定式化する。定式化の手法として線形計画法を採用した理由は、全体的な精度のバランス^{注6)}、手法の利便性^{注7)}、解法の簡便さ、計算量等について配慮したことによる。線形化により生じる限界を補うために、制約条件式や目的関数の設定、諸係数（定数）の設定には注意し、感度分析により信頼性に対する検討を行うことにする。

水資源の利用を考える場合には、それがもたらす効用と、利用することにより生じる弊害について多角的に検討する必要がある。そして、利水部門間のトレード・オフや水量・水質（汚濁負荷）をめぐる上下流間のトレード・オフ問題等を調整して、適正な水資源の配分・利用形態を求めなければならない。また、水利用により流域（地域）の水循環がどのように変化するかという視点からの検討も重要である。

本モデルでは、これらを次のようにして表現することにする。まず、水資源の適正な配分・利用を論じる場合に、必ず満たしておかなければならない物理的な条件や財政・環境・制度等の面からの条件を制約条件として与える^{注8)}。そして、満たさなければならない条件を満たしたうえで、求められる各地区・各要素・各時期の水需要量を供給しうるかどうかをチェックする。次に、供給が可能ならば、どのように水資源を配分・利用すれば最も適正であるかを多角的に検討する。その場合の評価項目を目的関数（単目的・多目的）として設定する。

a) 制約条件式

制約条件には、①物理的に必ず満たさなければならないもの、②社会的に要請されるもの、および、③分析・検討の目的や地区分割の仕方、モデルの解法の選定などにより必要となるものがある。表-5(a)には上述の①、(b)には②を例示した。③に該当する制約式には、目標計画法を適用する場合の満足水準・限界水準に関する式等がある。このほかにも想定する分析・検討シナリオに応じて制約条件式を設定または削除しなければならないこともある。

表-5(a), (b)に示す制約式は、地区 r の分析対象期間（前後期）について一般的に示したものである。したがって、ここで示した式の多くは、地区ごと（ r ）、およ

注5) 分析・検討シナリオによっては、この能力を未知として、必要な水資源関連施設計画を求めることもある。

注6) 総合的な問題を取り扱う場合には、ある一部分の精度のみに重点を置く取り扱いは適切ではない。

注7) 具体的には、後述の目標ベクトルと効用関数を用いた目標計画法の活用をさす。

注8) これらの制約は、設定する目的（関数）により取り除かれるものもある。

び灌漑期 ($t=t_1$)・非灌漑期 ($t=t_2$) ごとに存在し ($r \times 2$ 個), 制約式の係数や定数も地区ごと, 時期ごとにそれぞれ別個の値が与えられる。ただし, 貯留量の時期間の連続条件式は灌漑期・非灌漑期にわたっている。また, 財政面からの費用制約式は, 両期の和として考えた方がよい場合が多く, 地区ごとまたは全地域に対して両期の和として算定する。表一5 に示した多くの制約式の意味については同表中の備考や参考文献 1) に示したので, ここでは特に汚濁負荷の連続式と水質制約のモデル内での取り扱い方と, 費用の算定方法について考察しておく。

(ア) 汚濁負荷の連続式と水質制約の取り扱い方

各地区・各要素の水質は表一5 (a) の式 (17) で計算されるが, この式は水質について非線形であるために, なんらかの近似あるいは線形化などを行わなければ, 線形モデルに組み込むことができない。ここでは, 簡単のために河川の水質について, その取り扱い方を考察する。

方法 1): 非線形のままで考慮する方法注9)

この方法は, 汚濁負荷の連続式 (非線形) は計算中は除外しておき, 計算結果を用いて非線形式で水質を計算し, 水質制約を満たしているかどうかをチェックする。制約を満たしていなければ, 満たすように制約条件式 (水質以外の制約) 等を変更し, 試行錯誤により水質制約を満足するような解を求める。この方法は, 水質問題が厳しくない場合には有効である。

方法 2): 汚濁負荷の連続式は犠牲にするが, 水質制約は必ず満足させる方法注10)

汚濁負荷の連続条件式である式 (17) により水質を求めると次のようになる。

$$p(t)_r = \left(y(t)_r \cdot w(t)_r + r(t)_r \cdot v(t)_r \right) + \sum_{s=1}^n p(t)_s \cdot x(t)_s + \sum_{j=1}^m p(t)_j \cdot e(t)_j \cdot x(t)_j \cdot e(t)_j / X(t)_r \dots (38) \text{注11)}$$

したがって, p_r は本質的に各変数に関して非線形であるが, 水質制約を考慮する際に, 上流から流入する河川の水質 p_s を上流の水質制約値 \bar{p}_s で置き換えて, さらに地区内の他要素からの流入水質 $p(t)_j$ を $\bar{p}(t)_j$ として与えて水質制約条件式 $p_r \leq \bar{p}_r$ を書けば, 水質制約式は次のように線形化される。

$$\left(y(t)_r \cdot w(t)_r + r(t)_r \cdot v(t)_r + \bar{p}(t)_r \cdot x(t)_r \right)$$

$$+ \sum_{j=1}^m p(t)_j \cdot e(t)_j \cdot x(t)_j \cdot e(t)_j \leq \bar{p}(t)_r \cdot X(t)_r \dots (39)$$

この式のみを用いて汚濁負荷の連続条件式を除外すれば, 水質は厳しくチェックされるが, 連続条件は満足されない。しかし, 水質制約に関しては安全側となり, 水質問題が厳しい場合には都合がよい。ところが, この方法では, 対象地域の下流端における汚濁負荷の総量規制や水質をめぐる上下流関係の検討においては, 問題が残る。

方法 3): 汚濁負荷の連続式を線形化する方法

この方法では, 河川から取水するときに, 取水される水と同時に除去される汚濁負荷量を無視することによって汚濁負荷の連続式を線形近似する。したがって, 河川からの取水量が少ない場合には都合がよく, 上下流間問題や総量規制の考察には適している。また, この方法を用いた場合には, 水質制約は安全側でチェックされ, そのときの各地区の最下流端における汚濁負荷の連続式と水質制約式は次のようになる注12)。

・汚濁負荷の連続条件式

河川に着目して, 地区 r の上流地区群を $(r-1)$ で表示することにする。また, 各地区の下流端における汚濁負荷総量を Z_r で示すことにすれば, 次式を得る注12)。

$$\left(y(t)_r \cdot w(t)_r + r(t)_r \cdot v(t)_r \right) + \sum_{j=1}^m p(t)_j \cdot e(t)_j \cdot x(t)_j \cdot e(t)_j + \sum_{s \in (r-1)} Z(t)_s \cdot e(t)_r = Z(t)_r \dots (40)$$

・水質制約

$$Z(t)_r \leq \bar{p}(t)_r \cdot X(t)_r \dots (41)$$

(イ) 費用制約の考え方と定式化の方法

水資源の取水・送水・貯水・浄水・配水・処理・排水等に関する費用は, ① 施設の建設・維持に必要な費用と, ② 水利用 (取水・送水・貯水・浄水・配水・処理・排水) にあたって必要な施設の操作・運営費用に大別することができる。① の費用には, 土木工事費・機械設備費・用地補償費等のほかに, 施設を耐用年数間維持するうえで必要な補修費をも含めて考える。この費用を「建設・維持費」とよぶことにすれば, これは主として施設の規模・容量等に依存するものと考えられる。② の費用には, 電力費・薬品費・人件費等が含まれ, これを「操作・運営費」とよぶことにすれば, これは主として

注 9) 汚濁負荷の連続条件式と, 水質制約式の両方を考慮する。

注 10) 水質制約は, 安全側で考慮するが, 汚濁負荷の連続条件式は満足しない。

注 11) 地区内要素からの流入, 地区外要素からの流入, およびダムの下流の位置が, 地区の下流の場合には, $e(t)_r$ は $x(t)_r$ の項のみにかかることになる。

注 12) 参考文献 1) において, 筆者らは方法 1), 2) を用いたが, 後述のケース・スタディでは, 対象流域の水利用特性と地理的位置を考慮して, 方法 3) を主として用いた。

表-5(a) 物理的な制約

条 件 名	条 件 式 と そ の 意 味	備 考
① 水の連続条件 ・r 地区 i 要素について	$\sum_{s=1}^n x(t)_i^s f_i^s + \sum_{j=1}^m x(t)_i^j r_i^j + v(t)_i^0 f_i^0 + u(t)_i^1 f_i^1 + w(t)_i^2 f_i^2$ <p style="text-align: center;">(他地区同) (同地区他) (地域外) (降水) (前期からの) 要素から 要素から から (もちこし)</p> $= \sum_{s=1}^n x(t)_i^s f_i^s + \sum_{j=1}^m x(t)_i^j r_i^j + g(t)_i^3 f_i^3 + f(t)_i^4 f_i^4 + h(t)_i^5 f_i^5 \dots (3)$ <p style="text-align: center;">(他地区同) (同地区他) (地域) (蒸発) (次期への) 要素へ 要素へ 外へ 散 (もちこし)</p>	・水量に関する物理的な連続条件式であり、r 地区 i 要素について一般的に表示した。
② 水の運動に関する条件 ・地下水と河川水の関係 (河川→地下) (地下→河川) ・地下水の地区間移動 (地下水→他地区地下) ・水利用による蒸発散損失 (家庭用水→大気中) (業務用水→大気中) (工業用水→大気中) ・上水道の漏水 (上水→地下) ・農水の流出・地下浸透・蒸発散 (農水→河川) (農水→地下) (農水→大気中) ・流域水の流出・地下浸透・蒸発散 (流域→河川・下水道) (流域→地下) (流域→大気中) (流域→ため池)	$x(t)_i^1 f_i^1 = \alpha(t)_i^1 f_i^1 \cdot X(t)_i^1 \dots (4)$ <p style="text-align: center;">or</p> $x(t)_i^2 f_i^2 = \alpha(t)_i^2 r_i^2 \cdot X(t)_i^2 \dots (4)'$ <p style="text-align: center;">(ただし、$\alpha_i^1 f_i^1$ と $\alpha_i^2 r_i^2$ のどちらかはゼロ)</p> $x(t)_i^3 f_i^3 = \alpha(t)_i^3 f_i^3 \cdot X(t)_i^3 \dots (5)$ $f(t)_i^4 f_i^4 = \alpha(t)_i^4 f_i^4 \cdot X(t)_i^4 \dots (6)$ $f(t)_i^5 f_i^5 = \alpha(t)_i^5 f_i^5 \cdot X(t)_i^5 \dots (7)$ $f(t)_i^6 f_i^6 = \alpha(t)_i^6 f_i^6 \cdot X(t)_i^6 \dots (8)$ $x(t)_i^7 f_i^7 = \alpha(t)_i^7 f_i^7 \cdot X(t)_i^7 \dots (9)$ $x(t)_i^8 f_i^8 = \alpha(t)_i^8 f_i^8 \cdot X(t)_i^8 \dots (10)$ $x(t)_i^9 f_i^9 = \alpha(t)_i^9 f_i^9 \cdot X(t)_i^9 \dots (11)$ $f(t)_i^{10} f_i^{10} = \alpha(t)_i^{10} f_i^{10} \cdot X(t)_i^{10} \dots (12)$ <p style="text-align: center;">($\alpha(t)_i^8 f_i^8 + \alpha(t)_i^9 f_i^9 + \alpha(t)_i^{10} f_i^{10} = 1$)</p> $x(t)_i^9 f_i^9 + x(t)_i^{10} f_i^{10} = (\alpha(t)_i^9 f_i^9 + \alpha(t)_i^{10} f_i^{10}) \cdot (X(t)_i^9 - f(t)_i^9 - x(t)_i^{10} f_i^{10}) \dots (13)$ $x(t)_i^9 f_i^9 = \alpha(t)_i^9 f_i^9 \cdot (X(t)_i^9 - f(t)_i^9 - x(t)_i^{10} f_i^{10}) \dots (14)$ $f(t)_i^9 f_i^9 = F(t)_i^9 - f(t)_i^9 \dots (15)$ <p style="text-align: center;">($f(t)_i^9, f(t)_i^9 \geq f(t)_i^9, f(t)_i^9, f(t)_i^9$)</p> $x(t)_i^{10} f_i^{10} = \alpha(t)_i^{10} f_i^{10} \cdot u(t)_i^{10} \dots (16)$	・自然の物理法則に支配される運動に関する条件として、蒸発散・地下浸透・地下水の流出・流動に関する条件を与える。 ・この条件は地区分割の仕方によって異なる表示が必要となることがある。土木研究所報告第149-4 (1977) 参照。 ・関数形を線形表示するために、Taylor 展開して一次の項までとることも考えられるが、ここでは物理的な意味の明確さを考えて、このような関数形を採用した。なお、これらの式は各地区に対して与えられる。 ・定数・係数の意味 $\alpha(t)_i^1 f_i^1$: 河川水の地下浸透率 $\alpha(t)_i^2 r_i^2$: 地下水の河川流出率 $\alpha(t)_i^3 f_i^3$: 地下水の地区間分流係数 $\alpha(t)_i^4 f_i^4 \sim \alpha_i^4 f_i^4$: 蒸発散率 $\alpha(t)_i^5 f_i^5$: 上水道の漏水率 $\alpha(t)_i^6 f_i^6$: 農水の河川流出率 $\alpha(t)_i^7 f_i^7$: 農水の地下浸透率 $\alpha(t)_i^8 f_i^8$: 蒸発散率 $\alpha(t)_i^9 f_i^9$: 流域水の河川流出率 $\alpha(t)_i^9 f_i^9$: 流域水の下水道流入率 $\alpha(t)_i^{10} f_i^{10}$: 流域水の地下浸透率 $\alpha(t)_i^{10} f_i^{10}$: ため池への降水流入率 $F(t)_i^9$: 地区 r からの蒸発散総量 ・式 (15) については参考文献 4) 参照。
③ 汚濁負荷の連続条件 ・r 地区 i 要素について	$\left(y(t)_i^1 \cdot w(t)_i^1 + r(t)_i^1 \cdot v(t)_i^1 + \sum_{s=1}^n p(t)_i^s \cdot e(t)_i^s f_i^s \cdot x(t)_i^s f_i^s \right)$ <p style="text-align: center;">(流入汚濁負荷量)</p> $+ \sum_{j=1}^m p(t)_i^j \cdot e(t)_i^j f_i^j \cdot x(t)_i^j r_i^j + q(t)_i^1 \cdot X(t)_i^1 \cdot e(t)_i^1 f_i^1$ <p style="text-align: center;">(発生汚濁負荷量)</p> $= p(t)_i^1 \cdot \left(h(t)_i^1 + g(t)_i^1 f_i^1 + \sum_{s=1}^n x(t)_i^s f_i^s + \sum_{j=1}^m x(t)_i^j r_i^j \right)$ <p style="text-align: center;">(流出汚濁負荷量)</p> $= p(t)_i^1 (X(t)_i^1 - f(t)_i^1) \dots (17)$ <p>(※ この式は水質について非線形であり、この取り扱いについては本文 3. (3) a) 参照)</p>	・汚濁負荷の連続条件、運動条件、生物・化学的条件を含めて考える。 ・この式は次のような black box 的な考えのもとで定式化したものである。 <div style="text-align: center;"> <pre> graph TD A[流入汚濁負荷] --> B[汚濁負荷削減] C[発生汚濁負荷] --> B B --> D[流出汚濁負荷] </pre> </div> $e(t)_i^1$: r 地区 i 要素の汚濁負荷削減率 ただし、降水・蒸発散水の水質 (濃度) はゼロとする。 ・記号の意味 $y(t)_i^1, r(t)_i^1, p(t)_i^1, q(t)_i^1, p(t)_i^1$: それぞれがかかっている要素の水質 (濃度) $e(t)_i^s f_i^s, e(t)_i^j f_i^j$: それぞれがかかっている要素の汚濁負荷削減率

表-5 (b) 社会的な制約

	条件名	条件式とその意味	備考
主として環境面から要請される制約	① 水質・汚濁負荷量制約	$p(t)_i^r \leq \bar{p}(t)_i^r \dots\dots\dots (18)$ (※ 水質と水のやりとり量の関係およびこの式の取り扱い方については本文参照)	<ul style="list-style-type: none"> ここでいう水質は平均的な水質であり、通常の水質制約とは多少異なる。 河川水質のみが問題となるときは $i=1$ のみを考えることになる。 $\bar{p}(t)_i^r$: 地区 r の i 要素の水質基準値
	② 維持流量に関する制約	$x(t)_{11}^r \geq \bar{x}(t)_{11}^r, g(t)_{11}^r \geq \bar{g}(t)_{11}^r \dots\dots\dots (19)$	<ul style="list-style-type: none"> $\bar{x}(t)_{11}^r, \bar{g}(t)_{11}^r$: 地区 r の必要河川流下水量 この $\bar{x}(t)_{11}^r, \bar{g}(t)_{11}^r$ としては、通常的环境等の面から定まる維持流量に洪水時等に流出する無効流量を加えたものを与える。
	③ 地下水取水量に関する制約	$x(t)_{2i}^r \leq \bar{x}(t)_{2i}^r$ or $\sum_{i=3}^7 \bar{x}(t)_{2i}^r \leq \bar{x}(t)_{2i}^r \dots\dots\dots (20)$ ($i=3\sim 7$)	<ul style="list-style-type: none"> $\bar{x}(t)_{2i}^r$: 地区 r の i 要素 ($i=3\sim 7$) に対する許容地下水取水量 $\bar{x}(t)_{2i}^r$: 地区 r の許容地下水取水量
主として地域計画面から要請される制約	④ 家庭への供給水量に関する制約	$P(t)^r = X(t)_4^r / d(t)_4^r \geq \bar{P}(t)^r \dots\dots\dots (21)$	<ul style="list-style-type: none"> $\bar{P}(t)_4^r$: 地区 r の水資源からみた取容可能人口 $\bar{P}(t)_4^r$: $P(t)_4^r$ の最低水準 $d(t)_4^r$: 地区 r の1人当りの水使用量
	⑤ 業務・工業・農業への供給水量に関する制約	$O(t)_i^r = X(t)_i^r / d(t)_i^r \geq \bar{O}(t)_i^r \dots\dots\dots (22)$ ($i=5\sim 7$)	<ul style="list-style-type: none"> $\bar{O}(t)_i^r$: 地区 r の i 要素 ($i=5\sim 7$) の水資源からみた生産可能額 $\bar{O}(t)_i^r$: $O(t)_i^r$ の最低水準 $d(t)_i^r$: 地区 r の i 要素 ($i=5\sim 7$) の水量原単位
主として財政面から要請される制約	⑥ 建設費・維持費・処理費に関する制約	$C(t)_r + \sum_{k=1}^2 M(t_k)^r \geq \bar{C}^r \dots\dots\dots (23)$	<ul style="list-style-type: none"> 建設費については、減価償却費(利子分も含む)で考える。 $C(t)_r, M(t_k)^r$: それぞれ地区 r の建設・維持費、操作・運営費を示す。 t_1: 灌漑期, t_2: 非灌漑期 \bar{C}^r, \bar{C}: それぞれ地区 r および対象地域に対する投資可能限度額を示す。
		or $\sum_{r=1}^n \left(C(t)_r + \sum_{k=1}^2 M(t_k)^r \right) \geq \bar{C} \dots\dots\dots (24)$	
主として施設および技術面から要請される制約	⑦ 河川からの取水可能量の上限に関する制約	$x(t)_{13}^r + x(t)_{16}^r + x(t)_{17}^r + x(t)_{110}^r \leq \bar{S}(t)_1^r \dots\dots\dots (25)$	<ul style="list-style-type: none"> ここで示される制約は、物理的な制約と考えてもよいが、貯水池建設による取水可能量の増大や水利権の付与のように政策的に要えることが比較的容易であるために、社会的な制約に含めた。 $\bar{S}(t)_1^r$: 地区 r における河川からの取水可能量の上限。 この他にも施設の拡張を考えない場合には利水施設の容量の上限制約を入れる。
	⑧ 排水の流出先に関する制約 ・家庭用水→下水道 家庭用水→河川 ・業務用水→下水道 業務用水→河川 ・工業用水→下水道 工業用水→河川 ・流域水→下水道	$x(t)_{48}^r = \alpha(t)_4^r \cdot (X(t)_4^r - x(t)_{44}^r - f(t)_4^r) \dots\dots\dots (26)$	<ul style="list-style-type: none"> $\alpha(t)_4^r$: 家庭に対する下水道整備率 $\alpha(t)_5^r$: 業務に対する下水道整備率 $\alpha(t)_6^r$: 工業に対する下水道整備率 $\alpha(t)_9^r$: 流域水の下水道流入率 (26)~(31)は、下水道の施設整備量を定めようとするシナリオにおいては最適化の結果として定めるとして取り除くこともある。
		$x(t)_{41}^r = (1 - \alpha(t)_4^r) \cdot (X(t)_4^r - x(t)_{44}^r - f(t)_4^r) \dots\dots\dots (27)$	
$x(t)_{58}^r = \alpha(t)_5^r \cdot (X(t)_5^r - x(t)_{55}^r - f(t)_5^r) \dots\dots\dots (28)$			
$x(t)_{51}^r = (1 - \alpha(t)_5^r) \cdot (X(t)_5^r - x(t)_{55}^r - f(t)_5^r) \dots\dots\dots (29)$			
$x(t)_{68}^r = \alpha(t)_6^r \cdot (X(t)_6^r - x(t)_{66}^r - f(t)_6^r) \dots\dots\dots (30)$			
$x(t)_{61}^r = (1 - \alpha(t)_6^r) \cdot (X(t)_6^r - x(t)_{66}^r - f(t)_6^r) \dots\dots\dots (31)$			
	$x(t)_{98}^r = \frac{\alpha(t)_9^r}{1 - \alpha(t)_9^r} \cdot x(t)_{91}^r \dots\dots\dots (32)$		
⑨ 貯留容量に関する制約	$h(t)_i^r \leq H(t)_i^r \quad (i=1, 2, 10) \dots\dots\dots (33)$	<ul style="list-style-type: none"> $H(t)_i^r$ は貯留量の上限値である。したがって $w(t)_i^r$ ($i=1, 2, 10$) もこの範囲内にある。 $i=2$ (地下) に対しては、物理的な制約と考えてよい。 	
⑩ 利水要素の再利用に関する制約 ・再生利用に回しうる水量に関する水量の制約 ・再生水の使用に関する制約	$x(t)_{1i}^r \leq RP(t)_i \cdot (x(t)_{11}^r + x(t)_{22}^r + x(t)_{33}^r + x(t)_{44}^r + x(t)_{55}^r) \dots\dots\dots (34)$	<ul style="list-style-type: none"> 前者は再生利用に回しうる水量に関する制約であり、後者は利用用途からみた再生水の利用の可能性に対する制約である。 $RP(t)_i, RU(t)_i$: それぞれ再生利用に回しうる水量、利用しうる水量に関する上限の率である。 	
	$x(t)_{6i}^r + x(t)_{8i}^r \leq RU(t)_i \cdot (x(t)_{11}^r + x(t)_{22}^r + x(t)_{33}^r + x(t)_{44}^r + x(t)_{55}^r) \dots\dots\dots (35)$		

	条 件 名	条 件 式 と そ の 意 味	備 考
主 要 請 求 施 設 制 約	⑩ 上水道普及率によって定まる用水の供給に関する制約 ・上水→利水要素 (4~7)	$x(t)_i^r = \alpha(t)_i^r \cdot X(t)_i^r \quad (i=4\sim 6) \dots\dots\dots(36)$	・ $\alpha(t)_i^r$: 各用水に対する上水道普及率 ・分析のシナリオによっては (26)~(31) 式と同様に取り扱うこともある。
	⑪ 各用水の使用量に関する制約	$X(t)_i^r = \beta(t)_i^r \cdot \left(\sum_{j=4}^7 X(t)_j^r \right) \dots\dots\dots(37)$ $\left(\text{ただし } \sum_{j=1}^7 \beta(t)_j^r = 1 \right)$	・これは各用水間の関係を示すために設定されるものであるが、水利権などの場合には、使用量の上・下限値を与えればよい。式(37)は用水使用量のバランスを保つとした場合の式である。ただし、この式を用いる場合には式(21)、(22)と矛盾しないように、式を取り除くなどの配慮をしなければならない。

て施設で扱う水量に依存するものと考えられる。これら2種類の費用は、通常それぞれ年間費用に換算してとらえる。

一般的にこれらの費用は、施設容量または取扱い水量に関して非線形であり、多くの場合、施設容量や取扱い水量が比較的小さい場合には規模の経済性の効果を大きく受け、単位容量(水量)あたりの費用はてい減する。逆に、給水管路の設置の場合などにとときみられるように、施設で取り扱う水量が多くなるにつれて、配管密度を増すときの用地費等のために単位容量あたりの費用はてい増する場合もある。

こうした関係をより単純に取り扱うための一方法として線形化が考えられ、非線形的関係を Taylor 展開して線形化する方法(定数項が含まれる)と、平均単価と施設容量(水量)との一次結合によって線形表現する方法がある。いずれにしても、これらは近似的表現であり、その適用範囲に注意すべきはいうまでもない。

ケース・スタディにおいて採用した費用算定式は以下のとおりである。

① 施設建設・維持費(地区 r)注13)

$$C^r = \sum_i \sum_j c_i^r y_i^r + \sum_{i=3,7} \left(\sum_s c_i^s y_i^s + c_i^r y_i^r \right) + \left(\sum_s c_8^s y_8^s + c_8^r y_8^r \right) \dots\dots\dots(42)$$

② 施設操作・運営費(地区 r)

$$M^r = \sum_{k=1}^2 \left\{ \sum_i \sum_j m(t_k)_i^r x(t_k)_i^r + \sum_{i=3,7} \left(\sum_s m(t_k)_i^s x(t_k)_i^s + m(t_k)_i^r v(t_k)_i^r \right) + \sum_s \left(m(t_k)_8^s x(t_k)_8^s + m(t_k)_8^r g(t_k)_8^r \right) \right\} \dots\dots\dots(43)$$

ここに、 y_i^r : 施設容量、 c_i^r : 単位容量当りの建設維持費、 $m(t_k)_i^r$: 単位水量当りの操作運営費である。

費用係数 c_i^r 、 $m(t_k)_i^r$ は、施設容量(水量)、地価、地形条件(揚程・距離)、都市の広がり疎密度、原水水质、新設・増設の別等によって支配される。

ところで、本論文の着目点の1つは、季節変動特性を

注13) 年間の値として算定する。

考慮して水資源施設計画を適正化することにあり、しかもケース・スタディ対象地域をも含めてわが国の多くの地域には既存の水資源施設が存在し、それをベースとして新たな施設計画を検討するのがより現実的であることから、次のような制約式が必要とされる。

$$\left. \begin{aligned} T_k \cdot y_i^r &\geq x(t_k)_i^r \\ T_k \cdot y_i^r &\geq v(t_k)_i^r \\ T_k \cdot y_8^r &\geq g(t_k)_8^r \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(44)$$

$$y_i^r \geq \bar{y}_i^r \dots\dots\dots(45)$$

ここに、 T_k : 各期の月数 ($k=1$: 灌漑期月数 (=3), $k=2$: 非灌漑期月数 (=9)), y_i^r : 新規施設をも含めた施設容量(月間取扱い容量)、 \bar{y}_i^r : 既存施設容量(月間取扱い容量)である。

ここに、式(44)、(45)は、各期の利用水量のうちでより大きい期のものに対して施設容量が確保されることを示すためのものであり、施設容量が既存容量よりも大きいか、または等しいことを示している(施設の取りこわしは考えない)。

b) 目的関数

目的関数は、分析シナリオを制約条件式とともに表現するためのものであり、たとえば次のようなものが考えられよう。

① 水資源利用に関する費用の最小化

人口・産業等の計画フレームが与えられ、水需要量が想定される場合に、これに対する供給水量を確保し、他の制約条件を満たしつつ、最小の費用で建設・運営できる水利用システムの検討を行う場合に用いられる目的関数である。

$$\min. \sum_{r=1}^n (C^r + \sum_{k=1}^2 M(t_k)^r) \dots\dots\dots(46)$$

② 水資源からみた産出可能高の最大化

水資源計画は決して地域発展に伴う需要追従型の計画であってはならず、人口・産業等の計画フレームが、水資源の供給面からみて妥当なものかどうか、水資源の利用面からみれば産出額を最大化させ得る産業立地パターンはどうあるべきか、といった検討が必要であり、次式はこのために用いられる目的関数である。

$$\max. \sum_{r=1}^n \sum_{i=5}^7 \sum_{k=1}^2 O(t_k)^r \dots\dots\dots (47)$$

③ 水資源からみた収容可能人口の最大化

上記 ② の目的関数と同様に、人口フレームの検討、水資源面からみた最適住宅立地パターンの検討に用いられる。

$$\max. \left\{ \sum_{r=1}^n P(t_k)^r \right\} \text{ (ただし, } P(t_1)^r = P(t_2)^r \text{)} \dots\dots\dots (48)$$

④ 河川水質の最良化 (流出汚濁負荷量の最小化)

河川水質の最良化または流出汚濁負荷量の最小化という観点から水利用システムのあり方、または産業・住宅立地の検討を行う場合に用いられる目的関数であり、ケース・スタディでは最下流端地区からの流出汚濁負荷量の最小化という目的関数を用いた。

$$\min. \sum_{k=1}^2 Z(t_k)^n \dots\dots\dots (49)$$

⑤ 複雑目的のバランスのよい達成

水資源計画の作成においては常に複数の目的の達成をめざしている。上記 ①～④ においてはある特定の目的を目的関数として取り上げ、他の目的については制約条件によって表現しているわけであるが、これらの目的は相互にトレード・オフの関係にあり、これらを均衡よく達成させるために本研究では伏見・山口による多目的最適化手法を適用した^{り、9)}。

本節 a) の制約条件式および b) の目的関数によって構成される水配分モデルによってわれわれが分析・検討しようとしていることがら (分析・検討のシナリオ) は次のようにまとめることができる。

① 現状の水利用システムがもつ問題点の発見

現状の水利用システムが種々の観点 (目的) からみてどのような問題を含んでいるか、また、渇水時にはどのような問題が発生するのを見出す分析であり、水のやりとりルートとして現状のルートのみをモデルに組み込む。

② 将来計画で考えられている水利用システムがもつ問題点の発見

現時点で検討されている水資源関連施設計画が将来の水需要と種々の要請を十分に満たし得るかを検討し、将来発生するであろう問題点を見出す分析であり、水のやりとりルートには現状のルートと将来計画に含まれているルートをモデルに組み込む。

③ 流域にふさわしい水利用システムの形成とその特質の検討

①、② で指摘される問題点を解消または緩和し、種々の観点からみて適切な水利用システムを形成するとともに、水資源関連施設の拡充・整備によってできる限界を明らかにする。この分析にあたっては水のやりとりルー

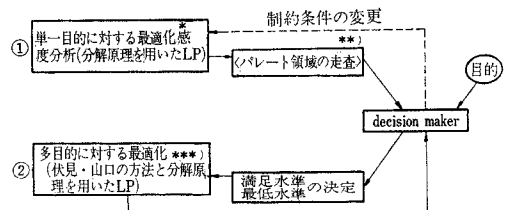
トとして現状ルートと将来計画に組み込まれているルートのほかに、建設が可能と思われる最大限のルート (仮想的施設計画ルート) をモデルに組み込む必要がある。

(4) 解 法

水資源の配分モデルを用いて複数の目的をバランスよく達成できる解を求めるために用いた手法は、伏見・山口により改良された目標計画法であり、計算手順は図-4 に示すとおりである。すなわち、まず各単一目的に関する最適化を行い (このとき他の目的は必要最低水準を与える制約条件として考慮する)、それと同時にパラメトリックな方法により目的関数間のトレード・オフが生じているパレート域の走査を行う。次にその結果や現状値などを考慮して各目的の必要最低水準と満足水準を設定し、伏見・山口の方法により“選好解”を求める。以上の手順により“選好解”を求めるが、各段階で図-5 に示すようなフィード・バックが生じる。すなわち、多目的間の調整を行った解を機械的に求めるのではなく、最終的な選好解を得るまでには何回かの判断が必要である。

伏見・山口の解法は、通常 max-min (or min-max) 法により多目的の達成度をバランスよく上昇させた解を求めるためのものであり、次のような考えから構成されている。まず、各目的の限界水準 $G_o(g_o^i)$ と満足水準 $G_s(g_s^i)$ を与えて目標空間内で $\overline{G_o G_s}$ なるベクトルを定める。そして各目的間の関係を効用関数として与え、その効用関数を $\overline{G_o G_s}$ ベクトルの方向に平行移動させ、できるだけ G_s に近い解を求める。このとき、伏見・山口は代替的な効用関数として、① $\overline{G_o G_s}$ ベクトルに直交する直線、② $\overline{G_o G_s}$ ベクトル上で折れる直線 (L 字型、開いた L 字型)、を提案している。本研究では主として L 字型効用関数を用いたが、こうした解法を採用した理由は以下のとおりである。

① 水資源計画の作成においては、事前に人口・産業等の計画フレーム値、水質環境基準値等の数値が与えられていることが多く、これらを参照しつつ、各目的の限



*: 他の目的は制約条件式で考慮される。
 **: この結果は、②における G ベクトル 設定の際の参考資料とされる。
 ***: ②のアルゴリズムは①のアルゴリズムと同じである。ただし、目標達成に関する制約が加わる。

図-4 本解法の基本的構成

界水準および満足水準を設定することが比較的容易である（各目的に対してウェイトづけをすることはきわめて困難である）。

② **b)** で示したそれぞれの目的の達成に利害をもつひとびと（集団）は多くの場合たがいに独立であり、諸目的間の関係を効用関数を用いて分析するとともに、その達成度をバランスよく向上させる必要がある。

③ この解法は、いくつかの新たな制約式と目的関数を追加したうえでシンプレックス法を用いて解くものであり、計算が比較的容易である。

費用の最小化、流域末端での総汚濁負荷量の最小化、工業産出可能高の最大化を均衡的に達成するための定式化例を以下に示す。いま、総費用を G_1 、流域末端総汚濁負荷量を G_2 、工業産出可能高を G_3 と示せば、次のような制約式と目的関数が新たに追加される。

（満足水準 G_i^s の設定）

$$\left. \begin{array}{l} \text{費用に関する満足水準} \\ G_1 - Y_1 + Z_1 = G_1^s \\ \text{汚濁負荷量に関する満足水準} \\ G_2 - Y_2 + Z_2 = G_2^s \\ \text{工業産出可能高に関する満足水準} \\ G_3 - Y_3 + Z_3 = G_3^s \end{array} \right\} \dots\dots\dots (50)$$

（限界水準 G_i^l の設定）

$$\left. \begin{array}{l} \text{費用の支出限界水準} \\ G_1 \leq G_1^l \\ \text{汚濁負荷量の許容限界水準} \\ G_2 \leq G_2^l \\ \text{工業産出可能高の許容最低水準} \\ G_3 \leq G_3^l \end{array} \right\} \dots\dots\dots (51)$$

（各目的間の均衡—L字型効用関数の設定）

$$\left. \begin{array}{l} Y_1 - \mu_2 Y_2 = 0 \\ Y_1 - \mu_3 Y_3 = 0 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (52)$$

（目的関数）

$$\min Y_1 \dots\dots\dots (53)$$

ここに、 Y_i, Z_i は補助変数、 $\mu_2 = (G_1^l - G_1^s) / (G_2^s - G_2^l)$ 、 $\mu_3 = (G_1^l - G_1^s) / (G_3^s - G_3^l)$ である。

また、このように線形計画法として定式化された問題を分解原理を適用して解けば、各目的の達成度をバランスよく上昇させると同時に、地区間の調整過程を明示的に把握することが可能であり、これを GD 法 (Goal Programming coupled with Decomposition Principle) とよぶことにする。分解原理の適用法¹³⁾については、前報^{1), 4)}を参照されたい。

4. ケース・スタディ

(1) 対象地域の概要

ケース・スタディで対象とした大和川流域の奈良盆地は次のような特徴をもつ地域である。この地域における大和川は流量が少なく、農水や上水はその多くを地域外（吉野川水系、室生川水系）からの導水や地下水に依存している。また、河川の水質は悪く、一級河川の中でもっとも汚染が進行している河川の一つといわれている。そのために、流域下水道整備が行われており、一部ではすでに下水の受け入れが行われている。この流域は大阪都市圏に隣接しており、県が誘致を進めていることもあって、急激な都市化・宅地化が進行している。したがって、地域の発展に付随した水需給問題、水質汚濁の問題等を包含した水からみた地域計画が必要とされている地域と考えられる。

(2) 水資源関連要素、分析対象地域と地区分割、分析対象期間と時期分割の決定

(i) 水資源関連要素：水資源関連要素とその機能は、表—2 に示したものを取り上げた。他流域からの導水は、それを受水する要素を介して行われるものとして取り扱った。

(ii) 分析対象地域と地区分割：分析対象地域は大和川流域の奈良盆地とし、地区分割は 3. で示した手順により決定した。

図—1 (d) にその結果を示した^{注14)}。

(iii) 分析対象期間の設定とその期間の分割：分析対象期間は1年間とし、その期間を灌漑期 (t_1)、非灌漑期 (t_2) に分割した。この分割は、水文特性や水需要特性（特に灌漑期にその需要が集中する農水の特性を考慮）に着目したことによる（図—2）。

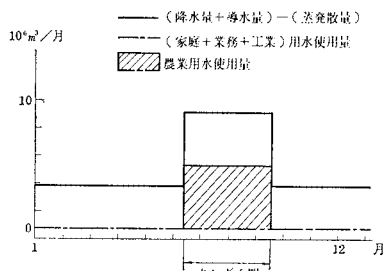
(3) 現状把握の方針と結果

上述の水資源関連要素・分析対象地域と地区分割のもとで、昭和 47 年の灌漑期 (t_1) と昭和 48 年にかけての灌漑期 (t_2) 別に水循環・水収支の把握を行った。データの収集・変換・加工・推定方法の基本方針について記せば次のようになる。水収支の把握は、水水量に関するものは決定した地区分割に対して行ったが、その他の資料については、原則としてそれぞれの特性が把握しやすい地区分割のもとで把握し、それを集計・配分して、決定した地区にわりあてた。

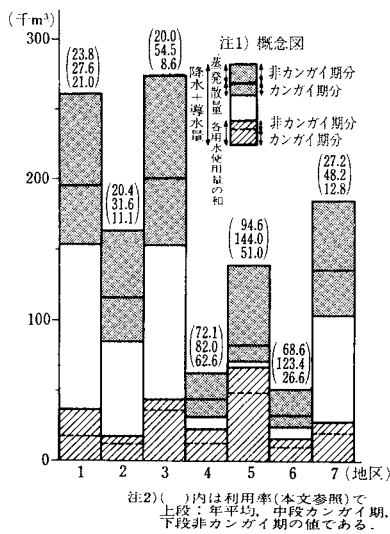
現状把握結果は 2. で提示した方法で、地区における複雑なやりとりと、地区間のやりとりとして表—4、図—1 (d) の形式で整理した。各地区・各要素・各時期ごとに把握した結果と最下流端における実測流量の差は数パーセントであった。また、河川水の水質は排出原単

注14) 各図面については参考文献 4) を参照されたい。また、仮想的なルートを想定したシナリオにおいては、より単純化した地区分割を行った。

位、汚濁負荷流達率（削減率も含む）を用いる方法により把握した。そのようにして得られた各地点の水質は、年間の平均値としてみればその多くの地点で流量年表で示される実測値とはほぼ満足できる対応をみた^{注15)}。そのようにして把握されたデータを用いることにより、現状の水資源をめぐる諸問題について検討を加えることができる。図-5 (a), (b) はその一例として、対象地域における水の利用状況を灌漑期・非灌漑期について、マクロ的にみたものである。水利用率を「各用水使用量の和」/「降水量+地域外からの導水量-蒸発散量」として算定すると、年間総量としては約 40% であり、灌漑期、非灌漑期別にみると、それぞれ 68%（農水：54%，その他の用水：14%）および 21% である。このほかにも、現状把握結果を用いることにより、各用水の地下水依存度や、各利水部門間の関係等を知ることができる。また、各要素の地区間の関係や地区内の各要素間の関係についても、同様を知ることができる⁹⁾。



(a) 対象地域全体の水利利用状況



(b) 対象地域の各地区の水利利用状況

図-5 現状の水利利用状況

注15) しかし、流量年表に示される水質は晴天時のものであり、問題がある。そこで、今回は実測値に合うように原単位・流達率等を修正することはしなかった。

(4) 計算結果と考察

大和川流域の奈良盆地を対象にして実施したケース・スタディの分析シナリオと計算ケースを表-6 に示す。

分析シナリオ A では現況の施設ルートのもとで、その問題点を明確にすることを試みている。このシナリオのもとでは現存のルート以外の施設の新設は認めていないが、現存施設の規模の拡張は認め、それに必要な費用を考慮している。

分析シナリオ B では、昭和 55 年計画施設ルートである下水道整備と流域外からの導水量の拡充、および地区間送水施設の新設を考えている。ただし、流域外からの導水量の拡充は計画値を用い、それ以外の施設ルートはモデルに組み込み、最適化の結果として必要なルートの選定と規模の決定を行っている。

分析シナリオ C では、さらに家庭・業務における個別循環利用、下水の地区内循環再利用および地区間の送水等のルートモデルを組み込み、最適化の結果として必要な容量を定めている。

なお、ケース A-5 および B-5 では、利水システムの耐濁水性を検討するために、降水量を徐々に減少させてその応答をみた。

各計算ケースについての計算結果の概要を表-7 に示したが、より詳細にみると次のようになる。

a) シナリオ A について

① 現況の水利用システムのもとで、現況の水利用経費を上回らないこと、現況の水需要を満たすこと、水質を現況より悪化させないことといった制約を課すと、その実行可能領域はきわめて狭く、現況値に対して費用面で 0.38%，流出汚濁負荷量で 3.9%，工業生産可能額で 10.0% の領域幅が認められるに過ぎない。特に費用面の領域幅が小さいことから、現況の水利用システムはほぼ費用を最小とするシステムに近い形態であると考えられる。

② ケース A-4 では 3 目的の均衡最適解を求めている。ここでは限界水準として 47 年現況値、満足水準としてケース A-1~A-3 の単一目的に対する最適解の各目的関数値をとって G ベクトルを構成している。その結果、この場合には均衡最適解は G ベクトルと実行可能領域の境界曲面との交点に存在することがわかる(図-6)。この解を現況と比較すると、工業産出可能額を引き上げ、かつ水質汚染を防止するために、工水の循環利用を増大させるとともに水質向上のための下水道整備の促進が必要であることなどがわかり、現況での問題が浮き彫りにされる。

③ ケース A-5 は降水量を徐々に減少させて、水利用システムの濁水に対する応答をみたものであり、降水

表-6 分析シナリオと計算ケースの設定

シナリオ	A	B	C	
分析目的	現状(昭和47年)水利用システムがもつ問題点の発見	将来計画(昭和55年)での水利用システムがもつ問題点の発見	流域にふさわしい水利用システムの形成とその特質の検討	
ケース名	A-1~A-5	B-1~B-5	C-1~C-4	
施設ルート	現状施設ルート(昭和47年)	現状および昭和55年計画施設ルート(主として下水道および上水道整備)	シナリオBの施設ルートに主として個別循環・地区循環ルートを追加	
制約条件	費用	現状の地区ごとの費用を上回らぬこと。	費用制約なし	
	水需要	現状の各地区・各利水者の水需要を満たすこと。	昭和55年の各地区・各利水者の水需要を満たすこと。	昭和47年から55年までの水需要をパラメトリックに増加させる。
	水質(BOD)	現状の各地区の水質(水質レベルI)を満たすこと。	B-1: 水質レベルI(現状)を満たす。 B-2: 水質レベルII(33%改善)を満たす。 B-3: 水質レベルIII(67%改善)を満たす。 B-4: 水質レベルIV(環境基準)を満たす。 B-5: 水質レベルI, II, III, IVを与える。	C-1: 水質レベルI(現状)を満たす。 C-2: 水質レベルII(33%改善)を満たす。 C-3: 水質レベルIII(67%改善)を満たす。 C-4: 水質レベルIV(環境基準)を満たす。
	降水	A-1~A-4: 年間降水量を与える。 A-5: 年間降水量からパラメトリックに減少させる(耐渇水性検討)。	B-1~B-4: 年間降水量を与える。 B-5: 年間降水量からパラメトリックに減少させる(耐渇水性検討)。	年間降水量を与える。
	導水量	現状導水量を与える。	昭和55年計画導水量を与える。	昭和47年から55年計画導水量までパラメトリックに増加させる。
目的関数	A-1: 費用(最小化) A-2: 流域末端流出汚濁負荷量(最小化) A-3: 工業産出可能高(最大化) A-4, A-5: 上記3目的の均衡最適化	費用(最小化)	費用(最小化)	

表-7 計算結果の概要

ケース	計算結果の概要	費用(百万円)	末端汚濁負荷量(t)	工業産出可能額(百万円)
現状(昭和47年)		39 206	10 861	321 063
A-1	費用面から現状水利用システムをみると、最大0.38%の費用削減ができる。	39 057	10 861	321 063
A-2	水質面から現状水利用システムをみると、最大3.9%の負荷量削減ができる。	39 206	10 438	321 063
A-3	工業面から現状水利用システムをみると、最大9.96%の生産可能額増ができる。	39 206	10 861	356 566
A-4	現状水利用システムの均衡的最適運営を行うと、費用が0.16%減、負荷量が1.66%減、工業産出可能額が4.72%増となり、この解はGベクトル上にある(図-6)。	39 142	10 680	336 219
A-5	降水量を徐々に減少させると、2年に1度程度発生する渇水で実行不可能になる。	—	—	—
B-1	昭和55年には水需要量が現状より28%増となり、現状水質(水質レベルI)を維持しようとすれば、費用は21.5%増加する。下流端水質は年平均16ppm。	47 644	12 514	587 780
B-2	水質レベルII(下流端水質は年平均12ppm)を維持するためには、費用を33%増とする必要がある。	51 983	9 556	587 780
B-3 B-4	要求水質を引き上げると、いかに下水道整備率を向上させても実行不能となる(も)つとも水質事情が厳しいのは奈良市を中心とする地区(地区1)である)。	—	—	—
B-5	降水を徐々に減少させると、渇水に強いシステム形成のため費用が増加する(図-7)。	—	—	—
C-1	(昭和55年値)	47 632	12 492	587 780
C-2	水需要が増加し、要求水質を引き上げると費用は増加するが、シナリオCではシナリオBよりも多様な施設ルートを含んでいるために、費用の増加率も若干小さく、また、より厳しい水質規制に対しても対応できる(図-8)。	51 918	9 536	587 780
C-3		64 012	6 663	587 780
C-4	環境基準値まで水質レベルを引き上げると50年以降の水需要の増加に対して実行不能となる。	—	—	—

量の減少とともに水質の悪化、生産額の減少または費用の増大といった現象が生じ、降水量が1437mm/年(2年に1度程度の渇水)になるとこのシステムの実行可能領域はなくなる(図-8)。

b) シナリオBについて

④ 予想される昭和55年の水需要を満たし、水質の悪化を防止するためには、上水道使用量の増大、工業用水循環使用量の増大、下水道整備率の向上等が必要とされる。

⑤ しかし、河川水質制約を厳しくすると、地区1(奈良市・生駒市の一部)とその下流の地区4において、下水道整備率を100%に引き上げたとしても水質制約を満たせなくなる。

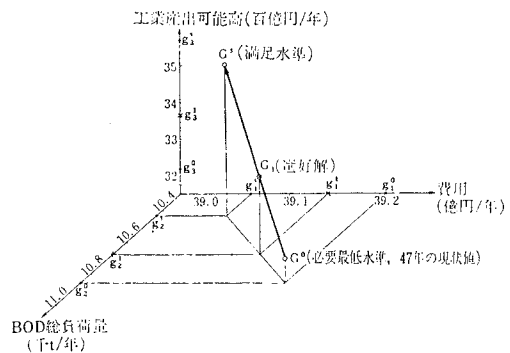


図-6 目標空間における各目的値の関係の例示

⑥ 非灌漑期に比べ、灌漑期の水需給はかなりひっ迫

するために、非灌漑期の余剰水をため池に貯水し、灌漑期に農水として使用すると有利であることがわかる。

c) シナリオ C について

⑦ シナリオ C においては、都市用水の再利用をも考えている。図-7 (a) に示すように、水需要が増大するにつれて循環利用される水量の増大が要請されるようになる。また、本ケース・スタディでは個別循環利用より広域循環利用のコストを高く設定している関係から、現況水質を制約値とすると個別循環利用のみであるが、水質制約を厳しくしていくにつれて徐々に広域循環利用が必要とされるようになる。それに伴って下水処理水も含めて河川に排水される水量が減少し、河川に依存する水量も減少する。

⑧ シナリオ C のように利水システムを多様化し、施設容量を拡大しても、この流域では水質環境基準（値）の達成が難しいと推定される。

⑨ 図-7 (b) は、シナリオ C で想定された水利用システムの実行可能領域を表現している。同図では縦軸を収容可能人口として水需要量の指標としたが、この図から対象地域の水資源からみた収容可能人口（人口容量）と要求河川水質および水資源関連費用のトレード・オフの程度を知ることができる。なお、多目的選好解がこの曲面上に存在することは明らかである。

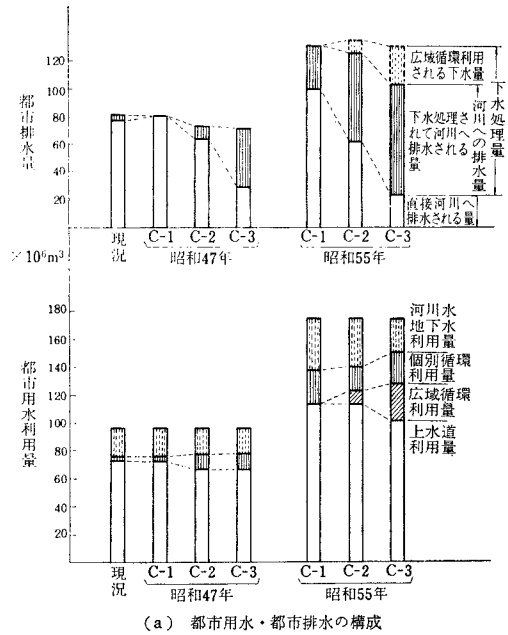
以上のようなパレート域の走査のほかにも、信頼性の低い係数・定数（制限値含む）を変化させて感度分析を行い、結果の信頼性についてのチェックを行った。その一例が図-8 である。

5. 結 論

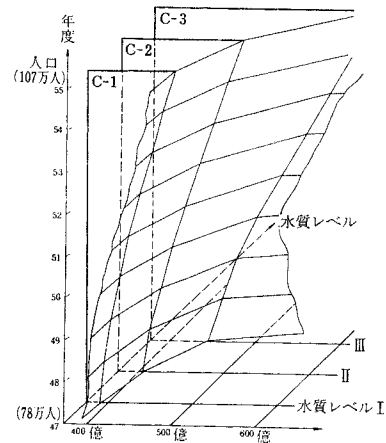
本研究では、① 自然水と用・排水を含めた水循環を把握するための基本的な考え方と水循環状況のシステムティックな表示方法を提示し、② 流域（地域）の水資源問題を、水循環とその季節特性を考慮したうえで総合的かつ多角的に検討するためのモデルを定式化し、③ 対象流域におけるケース・スタディを実施して、地域の水資源問題の実証的な分析を行った。本研究で明らかとなった点や有用であると考えられることがらを列挙して本研究の結論とする。

(1) 地区分割を行うには、まず各水資源関連要素や水需要の分布等の個々に着目した分割あるいは特徴づけを行い、それらをオーバー・レイして調節を行って最終的な地区割りを行うとよい。

(2) 流域の水利用について総合的に検討する場合には、灌漑期にその使用量が集中し、しかもその量が多い農水の特性を考慮する必要がある、年間総量による取り扱いでは不十分である。そのために、灌漑期・非灌漑期



(a) 都市用水・都市排水の構成



(b) 対象流域の流域容量

図-7 計算結果の例

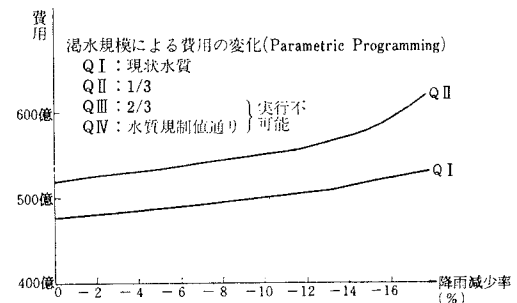


図-8 感度分析の一例（降水量について）

に分析対象期間を分ける必要があり、本研究のような取り扱いが必要である。

(3) 複雑な水循環・水収支のシステマティックな表示方法として、2.(4)で示した拡張した水資源連関表による方法を用いると都合がよい。

(4) 流域(地域)の水資源をめぐる諸問題を分析し、適正な利用・配分形態を総合的かつ多角的に検討するためには、多目的最適化に関する線形配分モデルと諸量の算定や将来推定のためのシミュレーション・モデルを結合する必要がある。

(5) 目的間のトレード・オフを調整し、多目的の達成度をバランスよく上げるための手法として目標ベクトルと効用関数を活用した目標計画法を用いると、現実的な多目的最適化の検討が比較的容易になる。

(6) 最適化手法を用いた水問題の検討においても、シナリオ分析法を用いて多角的な調査を行うとよい。

(7) 費用関数と水質制約の定式化についていくつかの提案を行った。

(8) 上記(1)~(7)で提示した考え方と方法・モデルを大和川流域の奈良盆地に適用し、ケース・スタディを実施して、同地域の水資源問題の検討を行った。その結果、(1)~(7)で提示した考え方と方法は、現実の水資源をめぐる諸問題を総合的かつ多角的に分析・検討するために有用であることが実証された。

(9) しかし、そのためには多くのデータが必要となってくるが、現状においてはそれらすべてが入手可能なわけではなく、その観測・調査・推定が必要であり多くの時間と労力を要する。

謝辞：本研究を進めるにあたっては、建設省近畿地建企画課・河川計画課・大和工事事務所、東京工業大学吉川教授をはじめ、土木研究所の多くの方々のご指導を得たことを記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 三好・関・吉川・朴：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，土木学会論文報告集，No. 269，

- 1978.
- 2) 金子 良：水収支の地形別分類(I)~(IV)，水利科学，No. 73~79，1970~1972.
- 3) 市川正己：多摩川流域の水収支と流量の変化，東京教育大学地理学研究報告，XII，1968.
- 4) 建設省土木研究所：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(II)，土木研究所報告，第151号，1978.
- 5) Haimes, Y.Y. and Hall, W.A.: Multiobjectives in Water Resource System Analysis, Water Resources Research, Vol. 10, No. 4, 1974.
- 6) 伏見・山口：複数目的をバランスよく達成するための方法論的考察，経営科学，Vol. 19, No. 2, 1975.
- 7) OKada, N.: Comprehensive Systems Analysis of Area-Wide, Multi-Modal Water Resources Utilization Systems, Doctorate Dissertation, Kyoto Univ., 1976.
- 8) 岩松・吉川・金井：公共事業の影響を把握するための地域モデルに関する研究，土木学会論文報告集，No. 284，1979.
- 9) Cohen, J.L. and Mark, P.H.: A Review and Evaluation of Multiobjective Programming Techniques, Water Resources Research, Vol. 11, No. 2, 1975.
- 10) Orchard-Hays, W.: Advanced Linear-Programming Computing Techniques, McGraw-Hill, Inc., 1968.
- 11) Danzig, G.B., et al.: The Decomposition Algorithm for Linear Programming, Econometrica, Vol. 29, No. 4, 1961.
- 12) 科学技術庁資源調査所：都市における水代謝系の構造と容量に関する調査，資源調査所資料第47号，1977.
- 13) 建設省近畿地方建設局：阪神圏における再生水資源開発に関する調査報告書(その2)，1976.
- 14) 建設省近畿地方建設局大和工事事務所：大和川水系給排水施設調査報告書，1977.
- 15) 建設省河川局：奈良盆地水管理計画調査報告書.
- 16) 奈良県：奈良盆地の地下水資源(カンガイ用水の地下水涵養について)，1974.
- 17) 建設省近畿地方建設局大和工事事務所：大和川低水流量調査報告書，1970.
- 18) 建設省編：流域別下水道整備総合調査，日本下水道協会，1974.
- 19) 山口・吉川：河川の水質・汚濁負荷量に関する研究(I)，土木研究所報告，第151号，1978.

(1978.8.15・受付)