

土木研究所報告

第151号

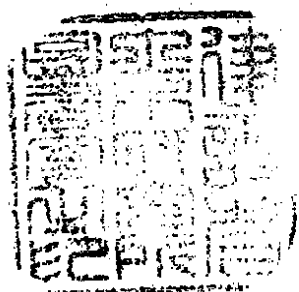
流域における水循環の把握と水資源の配分に関する研究(Ⅱ).....吉川勝秀.....(1)

関 正和

岩松幸雄

河川の水質・汚濁負荷量に関する研究(Ⅰ).....山口高志.....(89)
——汚濁流出特性への水文学的アプローチ——

吉川勝秀



昭和53年11月

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)

吉 川 勝 秀 *
関 正 和 **
岩 松 幸 雄 ***

A Study on Water Budget and Water Resources Allocation in a Region (II) - considering seasonal characteristics and multiobjectives -

Katsuhide Yoshikawa
Masakazu Seki
Sachio Iwamatsu

Synopsis:

In this paper, we proposed a method to manage water resources in a region from comprehensive viewpoint, and it was followed by a case study at the Nara Basin in the valley of the Yamato River.

The method was proposed first to estimate natural and artificial water budget in a region synthetically, considering seasonal characteristics of rainfall and water demand. Then the mathematical model was composed to examine the water resources allocation, from inclusive and multiobjective standpoint. Various kinds of problems were considered regarding to water resources in a region, on the basis of the above method.

In the case study, the synthetic estimation of water budget was examined, and proper allocation of water resources at the present and in the future was studied.

Key words:

Basin Management, Water Budget, Water Use Structure, Seasonal Characteristics, Zoning, Water Resources Correlation Matrix, Multiobjective Optimization, Linear Programming, Goal-programing, Goal Vector, Indifference Curve, Decomposition Principle.

要 旨

本研究では、流域(地域)における総合的な水資源管理のための考え方と方法を提示し、設定した対象流域において、それに基づいたケース・スタディを実施した。まず、降水や水需要量の季節特性を考慮しうるタイム・スケールのもとで、流域(地域)で複雑にやりとりされる水の現況を総合的に把握するための考え方と方法論を提示した。次に、それにもとづいて、多角的な観点から、流域の水資源の配分・利用問題を総合的に検討するために、適正配分モデルを定式化した。これを用いることにより、流域の水資源をめぐる諸問題の検討が可能である。

* 土木研究所河川部 都市河川研究室研究員
* * 土木研究所企画部 システム課研究員
* * * 大臣官房 政策課 建設専門官(前システム課長)

ケース・スタディでは、大和川流域奈良盆地の水循環の総合的な把握と、現状および将来における適正水配分について検討を行った。

キーワード 流域管理、水循環、水利用機構、季節特性、地区分割、水資源関連表、多目的最適化、線形計画法、目標計画法、目標ベクトル、効用関数、分解原理

目 次

1. 序	2	(2) 本モデルの対象	12
2. 従来の研究と本研究の基本的立場	3	(3) 本モデルの全体構成	13
(1) 従来の研究	3	(4) 水資源の配分モデル(狭義)の定式化	14
(2) 本研究の基本的立場と特徴	4	(5) 解法(GD法)	23
3. 水循環の総合的な把握方法の提示	5	(6) 水資源の配分モデル(狭義)の適用について の注意と分析・検討のシナリオ	26
(1) 水資源関連要素とその機能	5	5. 大和川流域の奈良盆地におけるケース・スタディ	27
(2) 分析対象地域と地区分割	6	(1) 大和川流域の奈良盆地の概要	27
(3) 分析対象期間の設定とその間の時間分割	8	(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	28
(4) 水循環状況をシステマティックに表示する 方法の提示	8	(3) 現状把握の方針と結果	34
(5) データの収集・処理・変換・推定	11	(4) 水資源の配分・利用モデルの構成	39
(6) 水循環把握結果のチェック	12	(5) 計算結果と考察	39
4. 水資源の配分・利用モデルの定式化と解法	12	6. 結 論	46
(1) 基本的な考え方	12	参考文献	

1. 序

水資源をめぐる諸問題が複雑に錯綜するようになるにつれて、個々の問題点に対する分析的な研究・検討のみでは、対象流域(地域)の適正な水利用を論じることができなくなっている。ある1つの問題に対して最も都合のよい対策が、他の問題に対しては害となるような例を、現実の問題から多数ひろいあげることは可能である。ここでは、その例として水量・質をめぐる上・下流問題、利水部門間の競合の問題(過水調整含む)をあげるにとどめておく。また、ある問題に対して、例えば経済効率といったような限られた観点からみて都合のよい対策が、環境保全といった他の観点からみると害である場合も少なくない。

水資源をめぐる、このような問題が生じる主たる原因の1つとして、水が循環していることをあげることができる。すなわち、例えば農業用水に限ってみても、水は一度利用された後に排出されて河川流量を構成し、下流において再び用水として利用されたりする。したがって、水問題を検討しようとするば、水の循環を正面から取り上げる必要がある。水循環を総合的か

つ明示的に把握した上で、水資源問題を検討しようとするのが本研究の第一の着眼点であり、これはまた従来の分析的な調査・研究では必ずしも十分に対処しきれていなかった点である。

特定の部門における水資源問題のある観点から解決するために、特定の方法論を提示した研究は、後述するように数多くなされている。しかし、分析対象と視点を少数に限定して分析・検討を行うだけでは必ずしも十分ではない。すなわち、水資源の量・質をめぐる上・下流問題、利水部門間の競合(trade-off)の問題、あるいは詳細な水需給問題等は、総合的かつ多角的に検討する必要がある。そのためには次の2つに対する研究が重要となる。1つは、水循環を体系的に把握し、これにもとづいて水資源配分問題を総合的多角的に検討できるような基本的な概念と包括的な方法論を開発することであり、あと1つは、その概念と方法論を現実の流域の問題に適用する場合に必要となる個別的・具体的な手法を準備し、その妥当性を実証することである。本研究において提示する考え方、モデルおよびその解法は前者に対応する。後者については現時点において最も適切と思われる手法を示し、ケー

ス・スタディで行った分析・検討の過程(history)を示したが、これら個々の具体的手法の妥当性と限界、およびそれらの改良についての検討は、将来の調査・研究に期待するものも多く含まれている。

筆者らは、本研究とほぼ同様の観点から主として方法論を中心に研究を実施し、前報(参考文献(18))においてその結果を報告した。本報告は、それを主として次の3点について拡張・補足したものである。第1点は、現実の問題を取り扱う場合には、地区分割方法やデータの収集・処理・加工方法がきわめて重要であるが、上記方法論の実用化のためのこれらの検討が従来の研究(前報を含めて)では必ずしも十分に行われていなかったと考えられるので、本研究ではできる限り十分な検討を加えた。そして、ケース・スタディにおいてそれらをどのように処理したかについて、詳しく述べている。第2点は、前報で示した方法論を、季節特性が考慮でき、しかも多目的適正化について十分検討できるように拡張したことである。これは、後述するように詳細な水問題の分析・検討においては、地区分割の外に水文量や水需要量(特にカンガイ期に集中する農水)の季節特性を考慮する必要があるからである。その特性を考慮するために、分析対象期間を数期に分割する(タイムスケールを短くすると)、各要素における貯留量の変化が問題となり、これに対処する方法を確立する必要が生じる。そこで、本報告ではそのための方法論を提示した。また、各目的をバランスよく達成させる多目的最適化手法を新たに導入し、各目的間のtrade-offを調整した“選好解”を比較的に容易に算定できるようにした。第3点は、水問題の時系列的な検討やデータの推定のために、簡単ではあるがいくつかのシミュレーション・モデルを新たに作成したことである。改良した最適化モデルと時系列シミュレーションモデルを用いることにより、将来の水資源問題の検討を行うことが可能となっている。

その外にも、従来の最適化モデルを用いた水問題の検討においては、単一あるいは少数の条件下で解析を行うことが多かったと思われるが、多数の分析・検討シナリオを用いたシナリオ分析法を導入することを提案した。また、水質制約条件式や費用算定式の設定方法についても検討を加えている。

本報告の概要を章を追って記すと、第2章では従来の研究の概要を述べ、それらと対比することにより、本研究の基本的立場と特徴を明確にし、第3章で水循環の総合的な把握を行うための考え方とそのための方法を提示し、第4章で総合的かつ多角的に水資源問題を検討するために必要なモデルの定式化と解法を述べ

第5章で大和川流域の奈良盆地において実施したケース・スタディ(水循環状況の把握、適正な水資源の配分・利用についての検討)の結果を述べている。

2. 従来の研究と本研究の基本的立場

ここでは、従来の調査・研究例の概要を述べ、それらと対比することにより、本研究の基本的立場と特徴を明確にしておくことにする。

(1) 従来の研究

(a) 従来の研究の特徴

表-1に(i)流域の水循環やその一部に着目した水収支、(ii)水資源の配分、(iii)(i)および(ii)を同時に取り扱った研究事例を示す。

表-1 従来の研究例

(a) 水循環・水収支の把握に関する研究	(b) 水資源の配分に関する研究
・金子良(1970~1972)	・合田健, 他(1966)
・市川正己(1965, 68)	・末石富太郎(1968)
・関口武(1953)	・Dracup, J. A.(1966)
・建設省土木研究所, 他(1970)	・MEYNTON, N. N.(1967)
・科学技術庁資源局(1964)	・Heady, E. O., et al(1971)
・国土庁水資源局(1976)	・Reynolds, J. E.(1971)
・建設省関東地方建設局(1976)	・Swanson, H. S., et al(1971)
・その他	・Bargur, J. C.(1972)
	・Clyde, G. C., et al(1973)
	・Haimes, Y. Y.(1974)
	・吉川和広, 他(1976)
	・Okada, N.(1976)
	・その他
・建設省土木研究所(1977)	
・三好・関・吉川・朴(1977)	

(i) 水循環・水収支に関する研究

自然水の水循環やその1部の水収支に着目した研究としては、金子の研究が興味深い。金子は、流域の水収支をきわめて実証的に調査し、その特性を地形別に分類して、実測をもとにして自然流域や農業地域の水収

支を把握する場合の基本的な考え方を示している。また、市川は小流域の水収支を把握する場合の考え方を提示し、多摩川流域でその実証を行っている。

国土庁水資源局や建設省関東地建は、利根川水系の自然水と用・排水を含めた水循環の調査を実施し、河川水・地下水や用・排水の収支について検討を行っている。

建設省土木研究所は、全国の河川を対象として、降水量と総流出量の関係をマクロ的に調査し、年間の総量としてみると、流域全体の総損失水量が降水量にかかわらずほぼ一定であることを示している。

(ii) 水資源の配分・利用に関する研究

水資源の配分・利用計画や開発計画・施設計画に関する研究は数多くなされている。そして、適正な計画を数学的に求める方法としては、線形計画法・動的計画法・ネットワーク手法等が用いられている。これらの研究の最近の傾向の1つとしては、多目的に対する最適化手法や非線形性を考慮する手法の開発を指向していることをあげることができよう。前者については Haimes らの SWT 法や伏見・山口の改良した目標計画法をあげることができ、後者については吉川らの研究をあげることができよう。

(iii) 水循環と水資源の配分を同時に取り扱った研究

水循環の把握と水資源の配分・利用計画を同時に取り扱った研究としては、岩松・関・吉川・三好の研究がある。この研究では、流域(地域)の水循環を総合的かつシステムティックに記述するために、水資源連関表を提示し、それに基づいて水資源の配分モデルを定式化して、大和川流域の奈良盆地でケース・スタディを行っている。

(b) 従来の研究の問題点

前述のように、水循環や水収支の把握については、金子らのすぐれた研究がある。しかしながら、都市化流域の水循環・水収支を取り扱う場合には、各種用・排水のやりとりを無視することができず、水循環機構の人為的な改変を考慮する必要がある。したがって、自然水や人為的な用・排水のやりとりを総合的に取り扱うことが重要である。

また、水資源の配分計画に関する研究では、最適な配分形態を数学的に求める手法に対する検討が数多くなされてきた。しかしながら、それらの研究では、単一あるいは限られた利水部門に関する最適配分が論じられる場合が多かった。ところが、流域(地域)に限られた水資源の総合的な配分・管理を行う場合には、多くの利水部門間や上下流間の trade-off の調整を行った上で、適正な計画を求めなければならない。

さらに、従来の研究の多くは、分析対象期間(タイム・スケール)を1年間としたものあるいは時間特性・季節特性を無視したものが多い。しかしながら、流域の総合的な水管理においては、降水や水需要量(特に農水)の季節特性や時間特性を考慮しなければ、十分とはいえないことが多い。

この他にも、単に水量の連続条件のみを考慮するだけではなく、物理的な運動条件や社会的な条件についても配慮する必要がある。また、現実の問題を取り扱うためには、対象地域の特性や分析・検討目的に応じて、どのように地区を分割するかについての研究がきわめて重要となる。

すなわち、流域(地域)の総合的な水資源の管理を指向する場合には、さらに次のような点に対する検討が必要となる。

- ① 流域(地域)で複雑にやりとりされる水に付随して生じる、利水部門間の trade-off や、水量・水質に関連した上下流間(地区間)の trade-off 等を考慮しようとする総合的な取り扱いが必要である。
- ② 水文特性や水需要特性を考慮しようとするタイム・スケールのもとで水循環(水収支)を把握して、それに基づいて水資源の配分・利用計画を論じる必要がある。特に、農水の水需要はカンガイ期に集中しており、1年間といったタイム・スケールで議論するだけでは不十分であり、少なくともカンガイ期・非カンガイ期に分けて考える必要がある。
- ③ 流域全体として適正な水資源の利用を考える場合には、単に水量のバランスをとった上で最適化するのではなく、水の運動に関する物理的な条件や経済・社会・環境等の面からの多くの要請を満たすような水資源の配分・利用計画を立案しなければならないので、そのための手法を確立する必要がある。
- ④ 水資源問題を総合的に取り扱う場合には、最も都合の良い地区分割を行うための方法についての検討が必要である。

(2) 本研究の基本的立場と特徴

著者らは、流域(地域)の水利用度が高まるにつれて、利水部門間の競合や、水量・水質をめぐる上下流問題が生じるために、限られた利水部門を対象とするような取り扱いでは不十分であり、適正な水の利用計画を総合的かつ多角的に検討しなければならないことを述べ、そのための方法論を提案した。¹⁸⁾ すなわち、自

然水および用・排水も含めた複雑な水のやりとり状況を総合的かつシステムティックに表示する方法(水資源連関表)を提示し、水資源の配分・利用計画を総合的かつ多角的に検討するための最適化モデルを定式化した。

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4つの問題点の全てに 대응するものではなかった。すなわち、次のような問題点が未解決であった。

- ① 利水部門間の trade-off や上下流間の trade-off 等については、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、trade-off を調整した上で適正な計画を求めたわけではない。
- ② 分析対象期間を1年間としたために、水文量や需要量(特に農水)の特性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、対象流域の特性に応じて如何に地区を分割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4点に対する検討を行い、参考文献(18)に示した研究をさらに発展させた。

- ① 多目的間の trade-off を調整し、各目的の達成度をバランスよく上昇させるために、目標ベクトルと効用関数を導入した目標計画法を用いることを提案した。この目標計画法と前報で用いた分解原理を結合すれば、多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も可能である。
- ② 水文量や水需要量(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)をカンガイ期・非カンガイ期に分けた。それに伴って生じる貯留量を考慮しうる水収支の表示方法とモデルを提示した。
- ③ 流域の特性を考慮した地区分割を行うための考え方とその方法を提示した。
- ④ 将来における地域の水資源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・モデルと改良した最適化モデルを結合することにより、将来の水資源問題を把握し、それに対処する本手段・方法について検討することができる。

以上の考え方と手法を大和川流域の奈良盆地に適用し、ケース・スタディを実施した。このケース・スタディにより、提示した方法の検討と対象流域の水資源

問題の検討を行った。

3. 水循環の総合的な把握方法の提示

流域(地域)の水資源を総合的に配分・管理することを目的として、水循環を把握する場合には、①水資源関連要素、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分割を明確にしておかなければならない。これらの3点が決定されれば、流域(地域)で複雑にやりとりされる水の状況は、分析対象期間中の「地区間のやりとり」^(注1)、「地区における水資源関連要素間のやりとり」および「分析対象期間の時期の間のやりとり」^(注2)として把握される。

以下では、まず自然水および用・排水も含めた水循環を総合的に把握することを前提として、上記の3点について考察する。次に、それらの3点が決定された場合に、複雑な水循環の状況をシステムティックに表示する方法を提示する。

(1) 水資源関連要素とその機能

流域(地域)の水循環・水収支を把握するためには、水のやりとりをどのような要素を介して把握するかを明確にしておく必要がある。とりあげる要素は調査・分析の目的によって異なる。

流域(地域)の総合的な水資源の管理を目的として、自然水と用・排水を含めた総合的な水循環・水収支を把握する場合には、例えば表-2に示すような要素をとりあげることができる。これらの要素を水資源関連要素とよぶことにする。このような要素を設定すれば流域(地域)内の水のやりとりは、必ずこれらの要素を介して行われるとして取り扱われる。それぞれの要素のもつ機能としては、表-2に示すようなものが考えられる。系外^(注1)は大気中を示し、降水機能および蒸発散水をうけ入れる機能をもつ。

自然流域と農業地域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の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域が都市化している場合には、さらに家庭・工業・業務・上水道・下水道が追加されることが多い。

表-2に示した要素とその機能は、後述のケース・スタディを念頭において設定したものである。調査・分析の目的により、取りあげられる要素とその機能は異なることがある。例えば、タイム・スケールを長期

注1) 分析対象地域外と地区のやりとりも含み、同一水資源関連要素において生じる。

注2) 分析対象期間外と期間内とのやりとりも含み、同一水資源関連要素において生じる。

・流量・水質), (iii) 用・排水システムとその給排水量, (iv) 水需要量とその地区分布, (v) その他地域社会の諸活動に関する量が必要となる。したがって地区分割にあたっては、これらのデータの収集のしやすさに対する検討も重要となる。データ収集上の都合により地区分割を行うとすれば、表-4 のようになることが多い。

表-4 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。

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。例えば、流域下水道や広域水道計画を念頭においた場合には、それらの影響を把握し易いように、通常は行政区画を基本とした地区分割が行われる。また、各利水部門間や流域の上下流問題の trade-off 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、都市域では、上・下水道網、水需要地の配置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を採用することになる。

以上の検討項目の外にも、要求される精度や水量・水質観測地点の配備状況なども考慮する必要があり、画一的な方法で地区分割を行うことはできないが、これらの注意事項に対する検討は、地区分割を行う際の基本である。

以上の考え方のもとで、ケース・スタディでは地区分割を行ったが、その際の作業プロセスとその結果については第5章に示す。

(3) 分析対象期間の設定とその間の時期分割

分析対象期間内の時期分割の仕方(タイム・スケールのとり方)は、分析の目的と対象によって異なるが、水文特性や水需要特性等を考慮して決定されることが多い。

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

$$(I_i)_{\Delta T} = (O_i)_{\Delta T} + (dS)_{\Delta T}$$

(入ってくる水量) (出ていく水量) (貯留量の変化)

タイム・スケール ΔT を十分大きくとれば(例えば1年間)、貯留量の項が相殺されて、分析作業は単純化される。

$$(I_i)_T = (O_i)_T$$

しかし、水需給問題などを詳細に検討しようとするば、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、水資源関連要素における貯留量(例えば地下、ダム、ため池における貯留量)の変化を考慮しなければならない。

本研究では、水資源の利用を考える場合に問題となる、水水量や需要量の季節特性を考慮しうるようなタイム・スケールによる分析を試みる。すなわち、カンガイ期にそのほとんどが使用され、その量も多い農水の特性に着目した分析を行う。

図-3には農水やその他の水需要量の経月変化の例を示す。以下ではこのような水需要特性や降水の季節変化、さらには貯留による流況の調整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総合的かつ多角的な検討を行う。

(4) 水循環状況をシステマティックに表示する方法の提示

以上の考察により、水循環・水収支を把握するためには、分析の目的に適合するように①水資源関連要素の設定、②分析対象地域の設定と地区分割、③分析対象期間の設定とその間の時期分割を行う必要があり、そのための基本事項が明確になったと考えられる。そして、それらのもと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)によって模

注1)したがって、このタイム・スケールで議論できない事柄(たとえば上水需要の日変動、濁水調整など)については近似的な取り扱いあるいは別途の取り扱いを行うことになる。

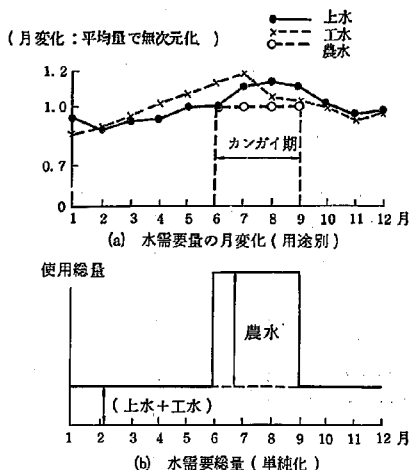


図-3 各用水使用量の経月変化 (一般的なパターン) 注1)

式化して示すことができ、やりとり状況の感覚的な理解に都合がよい。しかしながら、流域(地域)の水資源をめぐる上下流問題や利水部門間の trade-offなどを総合的かつ多角的に検討しようとして、多数の水資源関連要素を考慮に入れ、複雑な水利システムを忠実に表現しようとするればするほど、水のやりとり状況を単純なダイアグラムによって表示することはむずかしくなる。そのような場合には水のやりとりをシステムティックに表示する方法が考えられなければならない。そのための方法として、著者らは前報において、水資源関連表を提案した^{注2)}。しかし、それは分析対象期間を長期にとり、水資源関連要素における貯留量(ストック量)の変化が取り扱いし省略でき、やりとり量(フロー量)のみを考慮すればよい場合のものであった。

注1) 図-3(a)の作成には、参考文献(4)を参考にした。また、参考文献(4)にもほぼ同様の結果が示されている。

注2) この表は、複雑な水のやりとりのシステムティックな表示法であるが、感覚的な水のやりとり状況の理解には必ずしも適しているわけではなく、後述するようにこれをもとにしていくつかの模式図を作成するとよい。また、このようにして水のやりとりを表示すると、水配分モデルの定式化に都合がよい。後述のケース・スタディでは、2種類のモデルを考えたが、単純化したモデルに対しては模式図(ダイアグラム)のみによる水のやりとりを示しておいたため、マトリックスとダイアグラムによる方法を比較された。

ここでは、それをさらに拡張・修正して、貯留量の変化や、貯留量としての水のもち越し(前期からのもち越しと次期へのもち越し)をも表示する方法を提案する。

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 [地区内の水資源関連要素間のやりとり]

(地区内)

② [水資源関連要素と大気中]

(地区内)

③ [水資源関連要素における貯留量としてのもち越し]

(地区内)

④ [水資源関連要素間]

(地区間および地域間)

ここでは、このようなやりとりを、各地区における複雑なやりとり①、②、③と他地区の関係についてはマトリックスで示し、地区間のやりとりはダイアグラムで表示する方法を提案する。これを用いることによって、複雑な水のやりとり(水循環)を総合的に表示することが可能となり、後述の水資源の配分・利用モデルの定式化も容易となる。

図-4は後述のケース・スタディにおける水資源関連要素について、水のやりとりを表示するマトリックスを作成したものである。①の部分は前述の地区内①のやりとりを示し、②および③は地区内②の大気中と水資源関連要素間のやりとりを、④および⑤は地区内③の貯留量としての前期からのもち越しおよび次へのもち越し量を示す。したがって、破線で示した矢印(---)の方向にみていくと、その地区の水資源関連要素 i (図-4では $i=5$)に、どこからどれだけの水が入ってくるかがわかる。そして入ってきた総量は、実線の矢印(—)で示されるように同要素を介して、点線の矢印(-----)で示される要素にそれぞれどれだけの水量がわたされるかが示される。

この表のすべてのマス目に相当する水のやりとりが実際にあるわけではなく、水のやりとりがあるマス目は限定されている。後述のケース・スタディでやりとりが考えられないマス目はぬりつぶし、考えられる部分に変数をわりあてたものが図-5である。また、地

注1) 1) 2) 大気中を除く

注3) 貯留機能をもつ要素のみで、分析対象期間における前期から後期へのもち越し、対象期間前から期間中、期間中から期間外へのもち越しを示す。

注4) 地区間の輸送機能をもつ要素のみにおけるやりとり

注5) 対象流域や分析目的によって、この水のやりとりルートは異なる。

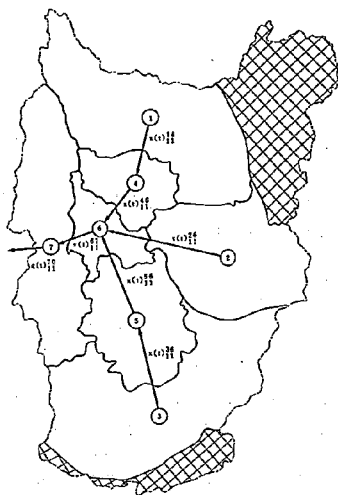


図-6 地区間の水のやりとりの表示方法

各記号は次のように定義する。

- $X(t)_{ij}$: 地区 r の i 要素から地区 s の j の要素へ時期 t にわたされる水量であり、 $X(t)_{ji}$ は地区内の i の要素から j 要素へ時期 t にわたされる水量を示す。
- $u(t)_i$: 地区 r の i 要素に降水として時期 t に入ってくる水量
- $f(t)_i$: 地区 r の i 要素から蒸発散する水量
- $w(t)_i$: 地区 r の i 要素により前期から時期 t にもちこされた水量
- $h(t)_i$: 地区 r の i 要素により時期 t から次期へもちこされる貯留量
- $v(t)_i$: 対象地域外の i 要素から地区 r の i 要素へ時期 t に入ってくる水量
- $g(t)_i$: 地区 r の i 要素から対象地域外の i 要素へ時期 t に出ていく水量
- $X(t)_{i\cdot}$: 時期 t に前期、対象地域外および他の地区から入ってくる水量 (流入量・降水量・貯留によるもちこし量の合計で、同地区要素 (大気中は除く) からの水量は除く)
- $X(t)_{\cdot i}$: 時期 t に次期・対象地域外および他の地区に出ていく水量 (流出量・蒸発散量・貯留

としてのもちこし量) の合計で、同地区他要素 (大気中は除く) への水量は除く

$X(t)_{i\cdot}$: 地区 r の i 要素へ時期 t に入ってくる水量の合計

$X(t)_{\cdot i}$: 地区 r の i 要素を介して時期 t に出ていく水量の合計

なお、対象地域全体のマクロ的な水収支の状況を知るために、この関連表の値を地区 r について加算した場合には、各記号の上に $\sim$ (波線) を付けて表示する。したがって地区数 n 、水資源関連要素数 m とすれば次の関係式が成立する。

$$X(t)_{i\cdot}^* = u(t)_i + w(t)_i + \sum_{(s \neq r)} X(t)_{si} + v(t)_i$$

$$X(t)_{\cdot i}^* = f(t)_i + h(t)_i + \sum_{(s \neq r)} X(t)_{is} + g(t)_i$$

$$X(t)_{i\cdot} = X(t)_{i\cdot}^* + \sum_{j=1}^m X(t)_{ji}$$

$$X(t)_{\cdot i} = X(t)_{\cdot i}^* + \sum_{j=1}^m X(t)_{ij}$$

$$\tilde{X}(t)_{ij} = \sum_{s=1}^n X(t)_{si}$$

以上は水のやりとり量の表示方法について述べたが、必要な場合には、対応するマス目に汚濁負荷量も同様に記入すればよい。

(5) データの収集・処理・変換・推定

現状把握や適正配分シミュレーションで必要とされるデータは、前述のように多種多様である。ところがそのようなデータの全てが対象地域 (地区) の対象期間の値として、求められる精度ですでに収集・整理されるわけではない。

したがって、①新たに観測・調査を実施したり、②データの変換、③モデルによるシミュレーション、④類似データの処理・加工によりデータを得るほかに、⑤何らかの仮定の設定により推定しなければならないものもある。①では、必要とするデータが存在しない場合に、新たに観測・調査等を実施してそれを求める。したがって多くの時間と労力が必要とされることが多い。②は、収集されているデータの地区や期間が、設定した地区分割や分析対象期間と異なる場合に必要となる。③～⑤はデータが存在しない場合に、新たに観測・調査等によらないでデータを推定する方法である。

後述のケース・スタディにおけるデータの収集・処理・変換・推定方法については、補足3 (後記) を参

照された。

(6) 水循環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（例えば農業関連諸量、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。現状では、それら全てが同じ精度で収集されるわけではなく、データの精度が高いチェック・ポイントにおいて、データ把握の際に累積していく誤差をチェックしておかなければならない。

例えば、ある水のやりとり量 $X(t)_{kl}$ が、他のやりとり量 $X(t)_{kl}$ ($k, l = 1, \dots, m$)、 $X(t)_{kl}$ ($k = 1, \dots, m$) との関連で推定されるとする。

$$X(t)_{kl} = \text{fun.}(X(t)_{kl}, X(t)_{kl})$$

そして、チェック・ポイントにおける水量 $X(t)_{kl}$ の値が $X(t)_{kl}$ であったとすると、時期 i に $(X(t)_{kl})$ の値が $X(t)_{kl}$ である誤差が生じていることになる。この誤差 $\delta X(t)_{kl}$ に寄与する $X(t)_{kl}$ 、 $X(t)_{kl}$ の程度は、上式の関数形と $X(t)_{kl}$ 、 $X(t)_{kl}$ の誤差による。上式を $X(t)_{kl}$ 、 $X(t)_{kl}$ のまわりで Taylor 展開し、その近傍で考えることにすれば次式を得る。

$$X(t)_{kl} = X(t)_{kl} + \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^m \alpha'(t)_{kl} \cdot (X(t)_{kl} - X(t)_{kl}) + \sum_{k=1}^m \alpha'(t)_{kl} \cdot (X(t)_{kl} - X(t)_{kl})$$

$$\begin{aligned} \delta X(t)_{kl} &= X(t)_{kl} - X(t)_{kl} \\ &= \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^m \alpha'(t)_{kl} \cdot \delta X(t)_{kl} \\ &+ \sum_{k=1}^m \alpha'(t)_{kl} \cdot \delta X(t)_{kl} \end{aligned}$$

ここに、 $\delta X(t)_{kl} = X(t)_{kl} - X(t)_{kl}$ 、 $\delta X(t)_{kl} = X(t)_{kl} - X(t)_{kl}$ である。

$\delta X(t)_{kl}$ に関する上式により、 $\delta X(t)_{kl}$ に対する各係数・やりとり量の寄与の程度を知ることができる。そこで、関数形および計算上のエラーの検討を行った上でもなおかつ生じる誤差については、オーダー的な考察を行った上で、その調整を行うことが考えられる。すなわち、 $\delta X(t)_{kl}$ のオーダー $O(\delta X(t)_{kl})$ と、 $\alpha'(t)_{kl} \cdot \delta X(t)_{kl}$ および $\alpha'(t)_{kl} \cdot \delta X(t)_{kl}$ のオーダー

を比較して、同程度のオーダーにある項あるいはオーダーの大きな項で調整を行って、 $\delta X(t)_{kl}$ を消去する。

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。チェック・ポイントを設定した上で水のやりとり量をチェックすることは、実測によらない推定データや算定データを含む場合には特に重要である。

4. 水資源の配分・利用モデルの定式化と解法

(1) 基本的な考え方

ここでは、流域（地域）の水資源を、総合的（水資源関連要素と地区について）かつ多角的な観点からみて適正に配分・利用することを検討するためのモデルを定式化する。著者らは、前報において同様の観点から、分析対象期間を長期にとって水のやりとり量（フロー量）のみで考慮すればよい場合のモデルを提示した。以下に示すモデルは、それをさらに発展させて水文量や水需要の時期変動特性（特にカンガイ期に集中する農水需の簡要特性）をも考慮するように、水資源関連要素における貯留量も含めて定式化したものである。さらに、水資源配分モデルへの入力条件として必要な量（現況および将来）をシミュレートするための需要算定や、降雨・蒸散散などに関するいくつかのシミュレーション・モデルも新たに追加した。

水資源の配分・利用モデル（最適化モデル）は、前述の3.(4)で示される変数をもとにして、総合的かつ多角的（多目的）な線形計画問題として定式化される。線形計画法による限界を補うために、制約条件の設定や諸係数（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。定式化の手法として線形計画法を採用した理由は、前報にも記したように、全体的な精度のバランス、手法の利便性、解法の簡便さ、計算量等に配慮したことによる。

(2) モデルの対象

本モデルは、対象地域（流域）における水需給の問題を、単に上水道の給水計画といった少数の利水部門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置き、地域社会と水の関係も多角的に考慮して、総合的に水資源問題を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や水資源関連施設計画の効果の評価、

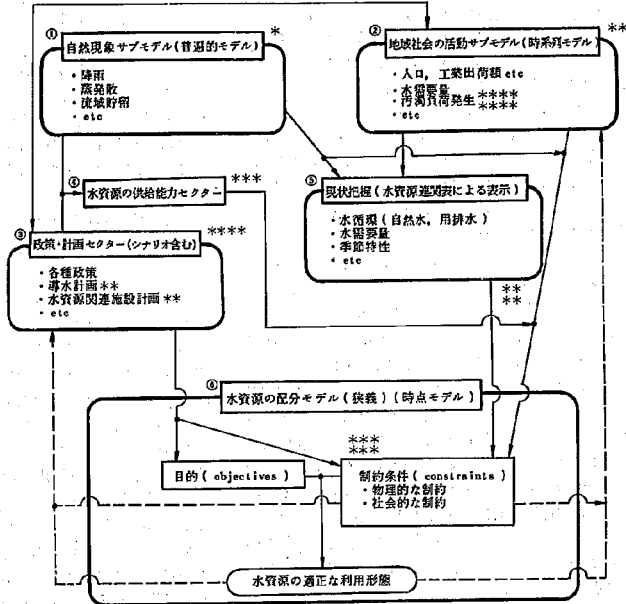
注1) 補足参照

注2) $\alpha'(t)_{kl}$ も誤差を含んだ量であるのが普通である。その場合には、 $\delta X(t)_{kl}$ も誤差を含んだ値として与えられるが、ここではその厳密な議論は省略する。

注3) その際には、 $X(t)_{kl}$ 、 $X(t)_{kl}$ 、 $\alpha'(t)_{kl}$ 、 $\alpha'(t)_{kl}$ の信頼性を考慮して、信頼性の低いものに対して調整を行う。

注4) 補足3.(2)、(3)参照

利水部門間 trade-off、水資源の量・質をめぐる上下流の trade-off の把握とその調整等の問題が総合的かつ多角的に検討されることになる。特に、本研究では、カンガイ期に集中し、その使用量が多い農水の需要特性を考慮しうところが新たな特徴である。また、将来における配分問題(水需給問題)を考察するために作成したシミュレーション・モデル^{注4)}、改良された最適化モデルを併用することにより、将来の水資源問題に対処するための対策についても検討することが可能となっている。



(3) 本モデルの全体構成

本モデルは、各種シミュレーション・モデル、水資源配分モデルおよび政策(計画)セクターより構成されており、その全体構成を

図-7に示す。図-7が示すように、水資源の配分・利用モデル(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)が入力され、将来の水資源の適正配分シミュレーションが可能となる。4.4)では狭義の水資源配分・利用モデルについて記すが、各サブモデル・各セクター・現状把握の方針については補足(後記)を参照されたい。

注1) 総合的な問題を取り扱う場合に、ある一部分の精度にのみに重点を置く取り扱いには適切でない。

注2) 具体的には分解原理と目標ベクトルおよびL字型効用関数を用いた目標計画法の活用を指す。

注3) 自然水、用・排水を含めた水循環であり、他地域からの導水も含む。

注4) 補足(後記)参照

- * 物理モデルであり、参考文献①～④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, objectives と表現される。土木研究所報告150号参照
- **** 土木研究所報告150号参照
- ***** 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、不可能ならば破綻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。
- ***** 流域総計、参考文献④などによる。

図-7 本モデルの全体構成

なお、①の自然現象サブモデルでは、降雨・蒸発散・流域貯留水量等に関する物理現象がモデル化される。②の地域社会の活動サブモデルでは、人口・工業・業務・農業活動や水需水量・汚濁負荷量等の時系列的な変化が推定される。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・適正水資源配分の目的(関数)設定等のために、代替的なシナリオが想定される。④では自然条件や政策・計画により水供給能力^{注5)}が与えられる。⑤では現状の水循環(水利用形態も含む)が把握され、その結果から水資源の配分・利用モデル(狭義)のいくつかの係数・定数が決定される。

注5) 分析目的によっては、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。

(4) 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、総合的かつ多角的な配分モデルを線形計画法により定式化する。

水資源の利用を考える場合には、単にそれがもたらす効用のみに着目するのではなく、利用することにより生じる弊害についても多角的に検討しておく必要がある。そして、利水部門間の trade-off や水量・水質 (汚濁負荷) をめぐる上下流間の trade-off の問題等を調整して、適正な水資源の配分・利用形態を求めなければならない。その際には、水資源の配分・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、必ず満たしておかね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。そして、満たさなければならない条件を満たした上で、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。

このような問題を非線形の問題として定式化することはもちろん可能であるが、4. (1)に記したような理由

により、線形計画法で定式化する。

(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などにより、モデル化のために必要となるものがある。表-5(a)には上述の①、(b)には②、(c)には③を例示的に示す。この外にも分析・検討の目的や対象地域の条件に応じて制約条件を追加する必要がある。また、後述するように、分析・検討の目的に応じて例示した条件式のいくつかを取り除かなければならないこともある。

表-5(a), (b), (c)に示す制約式は、地区 r の分析対象期間 (1年) の前後期について一般的に示したものである。したがって、ここで示した式は、1つの式について原則的には (地区の数, n) $\times$ (分析対象期間内の前後期; 2) 個だけである。

これらの変数および定数は、地区および時期ごとに与えられ、どの地区の変数であるかは添字として示してある。分析対象期間内の前期は $t = t_1$ 、後期は $t = t_2$ 、分析対象期間前は $t = t_1 - 0$ 、後は $t = t_2 + 0$ として必要な場合には明示する。

表-5に示した多くの制約式の意味については、同表中の備考や前報 (参考文献 (18)) に示したので、特に必要だと考えられるものについて若干補足しておく。

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	$\sum_{j=1}^n x(t)_i^{rj} + \sum_{j=1}^m x(t)_i^{rj} + v(t)_i^{rj}$ (他地区同要素へ) (同地区他要素から) (地域外から) $+ u(t)_i^{rj} + w(t)_i^{rj}$ (降水) (前期からのもちこし) $= \sum_{j=1}^n x(t)_i^{rj} + \sum_{j=1}^m x(t)_i^{rj} + g(t)_i^{rj}$ (他地区同要素へ) (同地区他要素へ) (地域外へ) $+ f(t)_i^{rj} + h(t)_i^{rj} \dots \dots \dots (1)$ (蒸発散) (次期へのもちこし)	・ 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。

注1) 集点をしばった分析・検討を行う場合には、必ずしもすべての変数を用いて定式化する必要はない。

注2) 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。

注3) これらについてはP. 76で詳述する。

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)	$x(t)_{12}^f = \alpha(t)_{12}^f \cdot x(t) : f \quad \cdots \cdots (2)$	・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。
(地下 → 河川)	$x(t)_{21}^f = \alpha(t)_{21}^f \cdot x(t) : f \quad \cdots \cdots (2')$	・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
・地下水の地区間移動 (地下水 → 他地区地下)	$x(t)_{22}^f = \alpha(t)_{22}^f \cdot x(t) : f \quad \cdots \cdots (3)$	・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。
・水利用による蒸発散損失 (家庭用水 → 大気中)	$f(t)_4^f = \alpha(t)_4^f \cdot x(t) : f \quad \cdots \cdots (4)$	・定数・係数の意味
(業務用水 → 大気中)	$f(t)_5^f = \alpha(t)_5^f \cdot x(t) : f \quad \cdots \cdots (5)$	$\alpha(t)_{12}^f$; 河川水の地下浸透率 $\alpha(t)_{21}^f$; 地下水の河川流出率 $\alpha(t)_{22}^f$; 地下水の地区間分流係数 $\alpha(t)_4^f \sim \alpha_4^f$; 蒸発散率 $\alpha(t)_{52}^f$; 上水道のろう水率 $\alpha(t)_7^f$; 農水の河川流出率 $\alpha(t)_{72}^f$; 農水の地下浸透率 $\alpha(t)_7^f$; 蒸発散率 $\alpha(t)_{75}^f$; 流域水の河川流出率 $\alpha(t)_{76}^f$; 流域水の下水道流出率 $\alpha(t)_{77}^f$; 流域水の地下浸透率 $\alpha(t)_{78}^f$; ため池への降水入率 $F(t)_7^f$; 地区 r の流域への降水量
(工業用水 → 大気中)	$f(t)_6^f = \alpha(t)_6^f \cdot x(t) : f \quad \cdots \cdots (6)$	・⑬式については参考文献(6)参照
・上水道のろう水 (上水 → 地下)	$x(t)_{32}^f = \alpha(t)_{32}^f \cdot x(t) : f \quad \cdots \cdots (7)$	
・農水の流出・地下浸透・蒸発散	$x(t)_{71}^f = \alpha(t)_{71}^f \cdot x(t) : f \quad \cdots \cdots (8)$	
(農水 → 河川)	$x(t)_{72}^f = \alpha(t)_{72}^f \cdot x(t) : f \quad \cdots \cdots (9)$	
(農水 → 地下)	$f(t)_7^f = \alpha(t)_7^f \cdot x(t) : f \quad \cdots \cdots (10)$	
(農水 → 大気中)	$(\alpha(t)_{71}^f + \alpha(t)_{72}^f + \alpha(t)_7^f = 1)$	
・流域水の流出・地下浸透・蒸発散	$x(t)_{91}^f + x(t)_{92}^f = (\alpha(t)_{91}^f + \alpha(t)_{92}^f) \cdot (x(t) : f - f(t)_9^f - x(t)_{910}^f) \quad \cdots \cdots (11)$	
(流域水 → 河川・下水道)	$x(t)_{92}^f = \alpha(t)_{92}^f \cdot (x(t) : f - f(t)_9^f - x(t)_{910}^f) \quad \cdots \cdots (12)$	
(流域水 → 地下)	$f(t)_9^f = F(t)_7^f - f(t)_7^f \quad \cdots \cdots (13)$	
(流域水 → 大気中)	$(f(t)_9^f, f(t)_{91}^f \gg f(t)_8^f, f(t)_4^f, f(t)_5^f)$	

(流域→ため池)	$x(t)_{10}^r = a(t)_{10}^r \cdot u(t)_{10}^r \dots\dots\dots [14]$	
③ 汚濁負荷の連続条件 ・ r 地区 i 要素について	$\begin{aligned} & \underbrace{\left(y(t)_{10}^r \cdot w(t)_{10}^r + r(t)_{10}^r \cdot v(t)_{10}^r + \sum_{s=1}^n p(t)_{10}^s \cdot e(t)_{10}^s \cdot x(t)_{10}^s \right)}_{\text{(流入汚濁負荷量)}} \\ & + \underbrace{\sum_{j=1}^m P(t)_{10}^j \cdot e(t)_{10}^j \cdot x(t)_{10}^j + q(t)_{10} \cdot X(t)_{10}^r}_{\text{(発生汚濁負荷量)}} \cdot e(t)_{10}^r \\ & = \underbrace{p(t)_{10}^r \cdot (h(t)_{10}^r + g(t)_{10}^r)}_{\text{(流出汚濁負荷量)}} + \sum_{s=1}^n x(t)_{10}^s + \sum_{j=1}^m x(t)_{10}^j \\ & = p(t)_{10}^r (X(t)_{10}^r - f(t)_{10}^r) \dots\dots\dots [15] \end{aligned}$ 〔※ 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参照〕	・ 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。 (発生汚濁負荷) (流入汚濁負荷) (流出汚濁負荷) → 汚濁負荷削減 → $e(t)_{10}^r$; 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 $y(t)_{10}^r, r(t)_{10}^r, P(t)_{10}^j, q(t)_{10}$ $p(t)_{10}^r$; それぞれが掛っている要素の水質(濃度) $e(t)_{10}^r, e(t)_{10}^j$; それぞれが掛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	① 水質・汚濁負荷量制約	$p(t)_{10}^r \leq \bar{p}(t)_{10}^r \dots\dots\dots [16]$ (※ 水質と水のやりとり量の関係およびこの式の取り扱いについては本文参照)	・ 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。 ・ $\bar{p}(t)_{10}^r$; 地区 r の i 要素の水質基準値
	② 維持流量に関する制約	$x(t)_{10}^r \geq \bar{x}(t)_{10}^r \text{ and } g(t)_{10}^r \geq \bar{g}(t)_{10}^r \dots\dots\dots [17]$	・ $\bar{x}(t)_{10}^r, \bar{g}(t)_{10}^r$; 地区 r の必要河川流下水量

要 請 さ れ る 制 約			・この$\bar{x}(t)_i^r, \bar{g}(t)_i^r$としては、通常の環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	$x(t)_i^r \leq x(t)_i^r \text{ or } \sum_{i=3}^7 x(t)_i^r \leq x(t)_i^r \quad \dots\dots\dots (18)$ $(i = 3 \sim 7)$	・$x(t)_i^r$; 地区rのi要素 ($i = 3 \sim 7$) に対する許容地下水取水量 ・$x(t)_i^r$; 地区rの許容地下水取水量
主 か と し て 要 請 地 さ 城 れ 計 る 面 制 面 約	④ 家庭への供給水量に関する制約	$P(t)^r = X(t) : t_i / d(t)_i \geq P(t)^r \quad \dots\dots\dots (19)$	・P^r; 地区rの水資源からみた必要収容可能人口 ・$\bar{P}^r$; P^rの最低水準 ・$\alpha(t)_i^r$; 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	$O(t)_i^r = X(t) : t_i / d(t)_i \geq \bar{O}(t)_i^r \quad \dots\dots\dots (20)$ $(i = 5 \sim 7)$	・$O(t)_i^r$; 地区rのi要素 ($i = 5 \sim 7$) の水質源からみた生産可能額 ・$\bar{O}^r$; O^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 要 請 さ れ る 面 制 面 約	⑥ 建設費・維持費・処理費に関する制約	$\sum_{i=1}^{t_1} (M(t)^r + C(t)^r + D(t)^r) \geq \bar{C}^r \quad \dots\dots\dots (21)$ $\text{or } \sum_{i=1}^{t_2} \sum_{r=1}^n (M(t)^r + C(t)^r + D(t)^r) \geq \bar{C} \quad \dots\dots\dots (21)$	・建設費については、減価償却費 (利子分も含む) で考える。 ・$M(t)^r, C(t)^r, D(t)^r$; それぞれ地区rの建設費、維持管理費、処理費を示す。 ・t_1; 前期, t_2; 後期 ・$\bar{C}^r, \bar{C}$; それぞれ地区rおよび対象地区に対する投資可能限度額を示す。
	⑦ 河川からの取水可能量の上限に関する制約	$x(t)_i^r + x(t)_i^r + x(t)_i^r + x(t)_i^r \geq \bar{S}(t)_i^r - Q(t)_i^r \quad \dots\dots\dots (22)$	・ここで示される制約は、物理的な制約と考えてもよいが、政策的に変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。 ・$\bar{S}(t)_i^r$; 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。 ・$Q(t)_i^r$; 維持流量
主 と し て 施 設 お よ び 技 術 面 か ら 要 請 さ れ る 制 約	⑧ 排水の流出先に関する制約 ・家庭用水→下水道	$x(t)_i^r = \alpha(t)_i^r \cdot (X(t) : t_i - x(t)_i^r - f(t)_i^r) \quad \dots\dots\dots (23)$	・$\alpha(t)_i^r$; 家庭に対する下水道整備率

主として施設および技術面から要請される制約	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	$x(t)_{11}^r = (1 - \alpha(t)_1^r) \cdot (X(t)_1^r - x(t)_{11}^r - f(t)_1^r) \dots (24)$ $x(t)_{15}^r = \alpha(t)_5^r \cdot (X(t)_5^r - x(t)_{15}^r - f(t)_5^r) \dots (25)$ $x(t)_{17}^r = (1 - \alpha(t)_7^r) \cdot (X(t)_7^r - x(t)_{17}^r - f(t)_7^r) \dots (26)$ $x(t)_{19}^r = \alpha(t)_9^r \cdot (X(t)_9^r - x(t)_{19}^r - f(t)_9^r) \dots (27)$ $x(t)_{11}^r = (1 - \alpha(t)_1^r) \cdot (X(t)_1^r - x(t)_{11}^r - f(t)_1^r) \dots (28)$ $x(t)_{19}^r = \frac{\alpha(t)_9^r}{1 - \alpha(t)_9^r} \cdot x(t)_{17}^r \dots (29)$	・ $\alpha(t)_1^r$: 業務に対する下水道整備率 ・ $\alpha(t)_5^r$: 工業に対する下水道整備 ・ $\alpha(t)_7^r$: 流域水の下水道流入率 ・(23)~(28)は、分析のシナリオによっ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。
	⑨ 貯留容量に関する制約	$h(t)_i^r \leq H(t)_i^r \quad (i = 1, 2, 10) \dots (30)$	・ $H(t)_i^r$ は貯留量の上限值である。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 利水要素の再利用水に関する制約	$x(t)_{11}^r \leq RP(t)_1 \cdot (x(t)_{11}^r + x(t)_{15}^r + x(t)_{17}^r + x(t)_{19}^r + x(t)_{11}^r) \dots (31)$ $x(t)_{11}^r + x(t)_{15}^r \leq RU(t)_1 \cdot (x(t)_{11}^r + x(t)_{15}^r + x(t)_{17}^r + x(t)_{19}^r + x(t)_{11}^r) \dots (32)$	・前者は再利用に回しうる水量に関する制約であり、後者は再生水の利用の可能性に対する制約である。 ・ $RP(t)_1$, $RU(t)_1$; それぞれ再生利用に回しうる水量、利用しうる水量に対する上限の率である。
	⑪ 上水道普及率によって定まる用水の供給に関する制約	$x(t)_{11}^r = \alpha(t)_{11}^r \cdot X(t)_1^r \quad (i = 4, \sim 6) \dots (33)$	・ $\alpha(t)_{11}^r$: 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(23)~(28)式と同様に扱うこともある。
	⑫ 各用水の使用量に関する制約	$X(t)_i^r = \beta_i(t) \cdot \left(\sum_{j=1}^7 X(t)_j^r \right) \dots (34)$ $\left(\text{ただし } \sum_{j=1}^7 \beta_j^r = 1 \right)$	・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。(34)式は用水使用量のバランスを保つとした場合の式である。

表-5(c) 分析・検討目的やモデル化のために必要な制約

条 件 名	条 件 式 と そ の 意 味	備 考
① 次期へ持ち越す貯留量に関する制約		・(35)式は分析対象期間へ貯留によりもち越される水量

分析・検討目的やモデル化のために必要となる制約	・分析対象期間前からの量 $w(i_1)_i^* = C(i_1)_i^* \quad (i = 1, 2, 10) \quad \dots\dots (35)$	・(35) 式は分析対象期間が終った時点では、もとの状態に貯留量がもたらなければならないという制約である。すなわち、地下水で考えれば、貯留量がどんどん減少していくような水利用は許さないというシナリオを示す。
	・分析対象期間後の持ち越し量 $h(i_2)_i^* \geq w(i_1)_i^* \quad \dots\dots (36)$	
その他の	③ 用水の受水量の上限に関する制約 $X:i^* \leq X:i^* \quad (i = 4 \sim 7) \quad \dots\dots (37)$	・例えば水資源からみた工業の産出可能高を最大化しようとするは、他の用水は必要以上の受水をしていないようにしておく。 $X:i^*$ は要素 ($i = 4 \sim 7$) の取水量の上限を示す。
	③ その他 その他分析・検討の目的や地区分割の仕方等により制約条件を設定する必要がある、線形化して制約条件式として与える。	・後述のケース・スタディにおける上水や農水の地区間のやりとり量に関する制約などはこれに相当する。 ・施設拡張は考えないというシナリオ場合の施設の容量制約もこれに含める。

① 物理的な制約について

物理的な制約式は前後期共通の形で成立する。ただし、各係数や定数は各期ごとに与えられる。このうち、①は本質的に線形であり、②は本質的には非線形であるがそれを線形化したものである。また、③の汚濁負荷の連続式は水質について非線形であり、この式の取り扱い方には注意を要す。その取り扱いについては水質制約と関連させて後述する。

② 社会的な制約について

社会的な制約式も、その多くは前後期共通な形で与えられるが、財政面からの費用制約式は、前後期の和として考えた方がよい場合が多い。ここでは、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-5(a)の(15)式で計算さ

れるが、この式は非線形であるために、何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のみについて、その取り扱い方を考察する。

方法1) 非線形形式のままで考慮する方法

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線形にするが、水質制約は必ず満足させる方法

汚濁負荷の連続条件式である(15)式により水質を求めると次のようになる。

注1) 共通である場合もある。

注2) 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3) 水質制約は安全側で考慮するが、汚濁負荷の連続条件は満足しない。

$$\begin{aligned} p(t)_i &= (y(t)_i w(t)_i + r(t)_i v(t)_i + \bar{p}(t)_i \cdot e(t)_i) \cdot \\ & \times (t)_i + \sum_{j=1}^m \bar{p}(t)_j \cdot e(t)_j \cdot x(t)_i / \bar{p}(t)_i \cdot (x(t)_i) \quad \text{注1)} \\ & - x(t)_i - h(t)_i \quad \dots\dots\dots (38) \end{aligned}$$

したがって、 $\bar{p}_i$ 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 $\bar{p}(t)_i$ を上流の水質制約値 $\bar{p}(t)_i$ で置き換えて、水質制約条件式 $\bar{p}(t)_i \leq \bar{p}(t)_i$ をかけば、次のように線形化される。

$$\begin{aligned} & (y(t)_i w(t)_i + r(t)_i v(t)_i + \bar{p}(t)_i \cdot e(t)_i \cdot x(t)_i) \\ & + \sum_{j=1}^m \bar{p}(t)_j \cdot e(t)_j \cdot x(t)_i / (x(t)_i - x(t)_i) - \\ & h(t)_i \leq \bar{p}(t)_i \quad \dots\dots\dots (39) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & (y(t)_i w(t)_i + r(t)_i v(t)_i + \bar{p}(t)_i \cdot e(t)_i \cdot x(t)_i) \\ & + \sum_{j=1}^m \bar{p}(t)_j \cdot e(t)_j \cdot x(t)_i \leq \bar{p}(t)_i \cdot (x(t)_i - \\ & \cdot x(t)_i - h(t)_i) \quad \dots\dots\dots (39)' \end{aligned}$$

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良い。ところが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。注2)

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、取水とともに除去される汚濁負荷量を見捨てることにより線形近似する。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。

・汚濁負荷の連続条件式

河川に着目して、上流から下流へ $r_1, r_2, \dots, r_k, \dots$ と地区名を付すことにする。また各地区の下流端にお

注1) 地区内の他の要素からの流入、地区外同要素からの流入、およびダム位置が下流の場合には、 e_i は x_i の項のみに掛けることになる。

注2) 汚濁負荷の連続条件式を近似し、連続条件と水質制約の両方を考慮する。

ける汚濁負荷総量を $Z(t)_k$ で示すことにすれば、次式を得る。

$$\begin{aligned} & (y(t)_k w(t)_k + r(t)_k v(t)_k + \sum_{j=1}^m \bar{p}(t)_j \cdot e(t)_j \cdot x(t)_k) \\ & e(t)_k \cdot x(t)_k + Z(t)_k = Z(t)_k \quad \dots\dots\dots (40) \end{aligned}$$

・水質制約

$$\begin{aligned} & \bar{p}(t)_k = Z(t)_k / (x(t)_k - x(t)_k - h(t)_k) \\ & \leq \bar{p}(t)_k \quad \dots\dots\dots (41) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \cdot Z(t)_k \leq \bar{p}(t)_k \cdot (x(t)_k - x(t)_k - h(t)_k) \\ & \dots\dots\dots (42) \end{aligned}$$

1) 費用制約の考え方と定式化の方法

費用には、大別して①建設費(減価償却費と用地費; 利子を含めた年度ごとの値として考える)、②維持費(管理費含む)、③処理費などがあり、それらの値はモデルにおいては水のやりとり量(volume)の関数として記述しなければならない。ここでは、次のように単純化した一般形で考える。

$$y_\ell = \text{fun.}^\ell(x_1, x_2, \dots) \quad (\ell=1, 2, 3) \quad \dots\dots\dots (43)$$

ここに、 y は各費用を示し、添字 ℓ は $\ell=1$: 建設費(用地費含む)の減価償却費(利子分含む)、 $\ell=2$: 維持費、 $\ell=3$: 処理費を示す。また、 $x_1, x_2, \dots$ は水のやりとり量を示すものとする。(43)式は水のやりとり量のみについて見た場合にも、一般的には非線形であり、何らかの方法で線形化する。あるいはそれに準じた方法をとらなければならない。線形化の方法としては、(43)式をTaylor展開して、その適用範囲を限定することにより線形化することも考えられるが、通常はやりとり量に費用係数を掛けて算定する方法がとられている。注5)

すなわち、次式により算定される場合が多い。

$$y = c_1 x_1 + c_2 x_2 + \dots \quad \dots\dots\dots (44)$$

このときに、費用係数 c は地区 r (場所)、時期 t 、水のやりとり量 x_k ($k=1, \dots$)の関数である。

$$C = \text{fun.}(r, t, x_k)$$

注3) 水質に関する議論の項、および参考文献(30)参照

注4) ただし、その時は(43)式が、水のやりとり量に関して微分可能でなければならない。

注5) 前者では定数項が含まれるが、後者では定数項が含まれない。

したがって、(43) 式で費用を算定する場合には、費用係数の与え方が問題となる。

費用係数 (43) 式を分析の目的により、次のように分解すると都合よい場合がある。

$$y_1 = [C_{11} \cdot x_1^0 + \bar{C}_{11} \cdot (x_1 - x_1^0) \cdot U(x_1 - x_1^0)] \\ + [C_{21} \cdot x_2^0 + \bar{C}_{21} \cdot (x_2 - x_2^0) \cdot U(x_2 - x_2^0)] \\ + \dots \dots \dots (43)'$$

$$y_l (l=2, 3) = [C_{1l} \cdot x_1 \cdot U(x_1^0 - x_1) + \bar{C}_{1l} \cdot x_1^0 \cdot U(x_1 - x_1^0) + C_{2l} \cdot x_2 \cdot U(x_2^0 - x_2) + \dots \dots \dots] + \dots \dots \dots (43)''$$

ここに、 $U(x_1 - x_1^0)$ は単位ステップ関数であり、 $x_1 \geq x_1^0$ のとき $U=1$ 、 $x_1 < x_1^0$ のとき $U=0$ である。

これらの式は、現状の施設における容量 $x_1^0, x_2^0 \dots$ を越えた水のやりとりも許し、そのために必要な費用を見込む場合のものであり、 $C_{11}, C_{21} \dots$ は現状の施設に対して、 $\bar{C}_{11}, \bar{C}_{21} \dots$ は新たな施設に対して算定された費用係数である。 $x_1^0, x_2^0 \dots = 0$ とすれば、単純な線形式と同じであり、全く新たな施設計画の検討を行う場合の費用算定式となる。また、本研究のように分析対象期間をカンガイ期・非カンガイ期に分ける場合には、さらに次のように考えると都合が良い。すなわち、 $l=2, 3$ については水利用量に応じてカンガイ期・非カンガイ期ごとに (44) 式の関数形で費用を算定するが、 $l=1$ の建設費 (用地費含む) については、次のような関数形を用いると、より合理的である。

$$y_1 = [C_1 + C_2 + \dots \dots \dots]^{注1)} \\ \text{(現状施設の } l=1 \text{ に関する費用)} \\ + [C_1' \cdot \delta_1 + C_2' \cdot \delta_2 + \dots \dots \dots] \\ \text{(新規施設に対する } l=1 \text{ に関する費用)} \dots \dots \dots (43)'''$$

ここに、 $\delta_i = (x_{(i)} - x_{(i)}^0) / T_1, (x_{(i)} -$

$x_{(i)}^0) / T_2$ のうち大きな値をとり、利水施設の拡張あるいは新設分を示す。ここに、 T_1 : 前期 (カンガイ期)、 T_2 : 後期 (非カンガイ期) の期間 (タイム・インターバル) である。

(43), (43)' ~ (43)''' 式で費用を算定する場合には、それぞれの式で費用が正しく算定されるように、費用係数を設定しなければならない。後述のケース・スタディでは (43)', (43)''' 式で費用を算定したが、その際の費用係数については補足 (後記) を参照されたい。

なお、費用算定式を水のやりとり量に関して非線形として考えなければならない場合には、①費用係数を水のやりとり量に応じて変化させる方法および②係数を固定し、水のやりとり量に関して非線形とする方法がある。①の方法については合田の研究があり、本研究も基本的にはこの方法を用いている。②の方法については吉川らの研究がある。

(43)' ~ (43)''' 式を本研究における変数を用いて表示したもののについては補足 (後記) および参考文献 (18) を参照されたい。

以上のようにして、費用関数は与えられるが、分析対象期間を前後に分けた場合にも、費用制約は年間の総量として与えた方がより現実的であり、本研究では前後期の和として費用を考える。

③ 分析・検討目的やモデル化のために必要となる制約について

この制約は、表-5(c)に示したように、分析シナリオ (設定する目的) や、地区分割の仕方などにより必要となる。前者の例としては、水資源からみた工業の産出可能高を最大化する場合に、他の用水についてはその必要最小限の量を与える外に、不必要な受水はしないという制約を与えることなどがある。したがって、この上限に関する制約は、設定する目的関数により取り除かなければならないこともある。また、地区分割の仕方により必要となる制約としては、例えば後述のケース・スタディにおける農水や上水の地区間のやりとり量に対する制約などがある。これは、設定した地区分割により、ため池からの受益地区が分割されたことにより必要となった制約条件式である。地下水量やダム・ため池の貯留量に関する制約は、分析対象期間前後の貯留量 (ストック量) に対してその関係を与えるものである。ケース・スタディでは、通常の降雨条

注1) すでに建設している施設の減価償却費 (用地費含む) である。

注2) 現状施設に関する分析を行う場合には、その容量以上の水のやりとりは許さないという制約条件を与えた。

注3) 非線形の問題を解く方法もすでにいくつか開発されている。その主要な方法としては①シンプレックス法を使用する方法 ②シンプレックス法的解法 (simplex-like method) ③傾斜法 (勾配法) (gradient method) ④罰金法 (penalty method) およびその他に大別される。詳しくは参考文献 (30) (31) 参照

件のもとでは分析対象期間前後の量は等しくなければならぬとした。これは、地下貯留水量の連続的な減少やダム・ため池の貯留量をいくつような水利利用をしてはならないという制約である。また、現状の施設の拡張は考えない場合には、現状の施設の容量を制約として入れておく必要がある。

以上は制約条件を例示的に考察したものであるが、この外にも必要に応じて線形化した制約条件式が設定される。

(b) 目的関数

目的関数は、上述のような制約条件を満たすような水利利用可能な場合に、水利状況に応じて定まる目的の達成度を算定する関数である。目的関数としては、例えば次のようなものが考えられよう。

- ① 水資源の利用に関する費用をできる限り小さくする。
- ② 水資源からみた産出可能高をできる限り大きくする。
- ③ 水資源からみた収容可能人口をできる限り大きくする。
- ④ 河川の水質（汚濁負荷総量）をできる限り良く（少なく）する。
- ⑤ ①～④のような多くの目的をバランスよく達成させる。

以上の目的関数のうち、①～④のような単一目的を取りあげられる場合には、他の目的はその必要最低水準を与える制約条件として考慮する。これらの目的を目的関数として表示したものについては、補足4（後記）を参照されたい。

以上のような最適化モデルにおいては、分析・検討のシナリオは上述の制約条件式の一部および目的関数により表現される。単一の目的関数を採用した場合に検討しうる分析・検討のシナリオについては、前報で詳しく論じた。本モデルでは、そのようなシナリオの外に、複数の目的をバランスよく達成させるとどのような水資源の配分・利用形態となるかについても検討することが可能となっている。

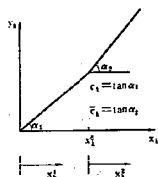
なお、水利施設の拡張を許すシナリオのもとで、費用を目的関数（単一目的）とし、その関数形が図-8(a)（費用増）のように単純化（近似）できる場合には、費用を最小化するという目的のもとで解くことができる。すなわち、変数を分割することにより線形計画問題として解くことができる。その際の考え方を以下に示す。

注1) 線形化しない場合には、水質や費用の項で論じたような方法をとる必要がある。

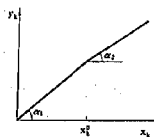
新たな非負変数 x_k^1, x_k^2 を次のように定義（図-8(a)参照）すると

$$\left. \begin{aligned} \textcircled{1} \quad & 0 \leq x_k^1 \leq x_k^2, \quad 0 \leq x_k^2 \\ \textcircled{2} \quad & x_k^1 = x_k^2 \text{ のときにのみ } x_k^2 > 0 \end{aligned} \right\} \dots (44)$$

次の関係式が成立する。



(a) 費用増



(b) 費用減

図-8 費用関数の線形化

$$x = x_k^1 + x_k^2$$

$$y_k = c_k x_k^1 + \bar{c}_k x_k^2$$

$$y = \sum_{k=1}^K y_k = \sum_{k=1}^K (c_k x_k^1 + \bar{c}_k x_k^2)$$

ここに、 K は x_k の総数である。

今、 x_k に対して課せられる制約条件が、 $\sum_{k=1}^K a_{ik} x_k = b_i$ ($i=1, \dots, I$) であるとすれば、次式を解けばよいことになる。

注2) 分析・検討のシナリオは制約条件式と目的関数により表現されるが、前述のすべての制約式と目的関数が取りあげられるわけではなく、シナリオによってはいくつかの制約条件や目的関数は取りはずす必要が生じる場合がある。例えば利水施設計画を検討する場合の取水可能量の上限に関する制約式などがこれに相当する。

注3) 施設の拡張を行う場合などは、このような関数形であることが多い。

$$y = \sum_{k=1}^K y_k = \sum_{k=1}^K (C_k x_k + \bar{C}_k x_k) \longrightarrow \min \quad (46)'$$

$$\text{sub. to } \begin{cases} \sum_{k=1}^K a_{ik} (x_k + \bar{x}_k) = b_i & (i=1, \dots, I) \quad (46)'' \\ x_k \leq \bar{x}_k & (46)''' \\ x_k \geq 0 & (46)'''' \end{cases}$$

また、例えばスケール・メリットなどのために費用が遙越するような場合には、費用最小化の目的関数のもとでは上述のような方法を用いることができず、別の方法によらなければならない。

5. 解法 (GD法)

ここでは、水資源の配分・利用モデル(狭義)の解法として用いる手法について、その考え方と特徴について述べる。この手法は、伏見・山口らによって改良された目標計画法と、前報(参考文献⑧)において用いた分解原理を結合したもので、地域の水資源に関する利水部門間のtrade-offや地区間(上・下流含む)のtrade-offの問題の把握とその調整についての検討を行なうための手法である。この手法を以下ではGD法(Goal-Programming coupled with Decomposition Principle Method)と呼ぶことにする。

(a) 手法の特徴

分解原理には大別して二つの利点がある。^(注2)一つは大規模な問題を「分権的」に解決する手段として用いることができることであり、あと一つは計算の能率化(必要記憶容量の減少)である。Danzig-Wolfの分解原理を用いたときの前者の利点を水配分問題に適用すれば、例えば全体の最適化の過程を地区間の調整の過程としてとらえることができる。また、この手法を利水部門間の調整の過程を明示的にとらえるために用いることも可能である。さらに、水配分問題にこの原理を適用した場合の後者の利点もものがすことができない。^(注3)分解原理を水配分モデルに適用した場合の数学的構成とその意味については、参考文献⑧に詳述したので、ここでは省略する。

目標計画法(Goal-Programming)は、複数目的を定められた水準に近づけるような型の問題を扱う特殊な線形計画手法である。複数の目的の達成度をそれぞれ大きくしていくと、やがて「他の目的の達成度を減少させることなしには、もはやどの目的の達成度も増大させえない」という状態(パレート最適の状態)になる。このような多目的間のtrade-offが生じている領

域がわかるだけでは、実用上は不十分であり、その中の特定点を意志決定者の要求に応じて好ましい解(選好解と呼ぶ)として求める必要がある。そのための一つの手法として目標計画法がある。ここでは、従来の目標計画法の特徴と問題点を伏見・山口の文献⑧をもとにして明確にし、本研究で用いる選好解を求める方法について述べることにする。

目標計画法では、各目的に対して満足水準(目標)を与え、それに対する目的の達成水準をもとにして選好解を求めることになる。選好解を求める際の方法及びしては、従来から次の3つが用いられてきた。

- ① 目標のすべてを満たし得ない場合に、各目標の不達成度(リグレット)に重要度の順位を与えて、そのような関係のもとでリグレットを最小にする。一付順法—
- ② ①と同様の場合に、各目標の不達成度に対する相対的な重みづけを行ない、そのもとでリグレットの最小化を行なう。—加重法—
- ③ 達成度の最小の目標を最大にする。—max-min法—

これらの方法には、例えば次のような欠点がある。

- ① すべての論議が、与えられた満足水準 given として行なわれる。したがって、各目的間のtrade-offの関係が最適解の決定のプロセスに関与しない。^(注4)
- ② 付順法では目標の重要度の大きい順に絶対順数($p_i > p_i + 1$)をつけ、 $\sum p_i d_i$ を最小にする。ここに d_i は目標の達成度を満足水準との差として示されるリグレットである。

このような方法では、高い順位の目標が満足水準に達しなければ、それより低い順位の目標についての配慮が放棄されてしまうが、実用的には各目標の達成度はいっせいに増大させたい。また、各目標の達成度をバランスよく増大させようとする、各目標水準を細かく区分し、区分された各水準をそれぞれ独立した目標のように取り扱う必

注1) 本研究の主旨は、この手法を提案したことにあるのではなく、GD法は利水部門間のtrade-offの調整と上・下流問題の明確な把握のための“tool”として用いるものである。地域の水資源問題を水需要特性や水循環特性を考慮しうるタイム・スケールのもとで、総合的かつ多角的に検討するのが本研究の旨点である。

注2) 前報(参考文献⑧)を参照。

注3) 詳しくは、参考文献⑧を参照されたい。

注4) これに対してHaimesのSWT法は、制約条件化した目的関数のもとでtrade-off関数を求め、それをふまえて問題の再構成を行ない、最終的には意志決定者の評価基準により選好解を決定するというたぐりな構造をもっていることを紹介しておく。

要が生じる。

- ③ 加重法では、加重係数 w_i を用いて $\sum w_i d_i$ を最小化する。この場合には、その係数をどのように与えるかという根本的な問題がある。また、加重総和を最小にしようとするやり方では、実際の達成度は重みどりの割合にはならない場合がしばしばある。⁽²²⁾

- ④ max-min 法では、質的に異なる諸目標を同一次元で比較してしまうことになる。

以上の問題のうち②～④に対処するための一つの方法として、バランスよく各目標の達成度を大きくするために、伏見・山口は目標ベクトルと効用関数という概念を用いている。この方法は、手法的には max-min の線形計画法を用いているが、現実問題と数字モデルの対応づけを明確にする。^(注1)

本研究で用いる線形計画問題の解法 (GD 法) は、上述のような特徴をもつ伏見・山口の目標計画法に分解原理を結合したものである。多目的に対する最適化を行なうために、目標計画法を用いる理由は、(1) 各目的間の相対的な重要さを与えるのはむずかしいが、各目的の最低水準・満足水準を与えるのは、実際上比較的容易であること、(2) 伏見・山口の方法を用いることにより、各目標の達成度をバランスよく大きくすることが数学的に可能であることなどである。また、分解原理の使用は前述の2つの理由によるが、前者の利点についてはすでに前報で述べたので、今回は後者の利点に着目して、最も効率的な Orchard-Hays の方法 (補足参照) を用いている。

(b) GD 法の構成

本解法の構成を図示すると次のようになる (図-9)。^(注2)

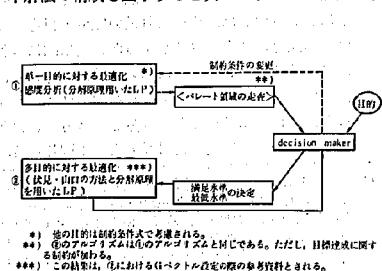


図-9 本解法の基本的構成

注1) ただし、あくまで前記①のように各目標に対して満足水準を与えられた場合のことである。

すなわち、まず単一目的に関する最適化を行ない (このとき、他の目的はその必要水準を与える制約条件として考慮する)。それと同時に目的関数間の trade-off が生じるパレート域の探索を行なう。次に、その結果や現状値などを考慮して、各目的の最低水準・満足水準を決定し、GD法により選好解を求める。以上の手順で解を求めるが、各段階で図-9に示すようなフィード・バックが生じるので、機械的に解を求めることはできない。すなわち、本解法は「対話型」であり、最終的な選好解を得るまでに、向回かの判断が必要である。

(c) 数学的構成

図-9 ③の計算は、通常のシンプレックス法あるいは分解原理を用いた解法であり、ここでは省略する。^(注3) 以下では、多目的最適化に関する②の部分について記す。^(注2) なお、②の計算アルゴリズムは①のアルゴリズムと全く同様であるが、以下に述べるような条件式と目的関数が追加される。

(1) 目標ベクトルと効用関数

現実の問題として、各目標の最低要求水準 ($G_1^0, \dots, G_m^0$) と満足水準 ($G_1^s, \dots, G_m^s$) を与えることは比較的容易である。各目的の達成度をバランスよく増大させていくと、各目標は G^* に近づいていくはずである。その近づき方は、2目標を例にとって示すと図-10のようになる。

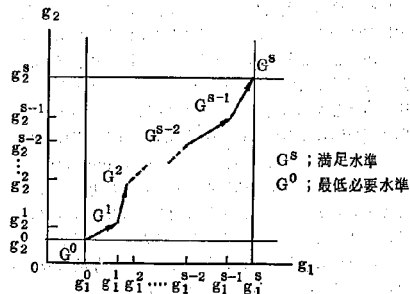


図-10 目標ベクトル (G ベクトル)

しかし、同図に示すような $G^1 \dots G^{s-1}$ を正確につかむのは容易ではない。そこで、一つの近似として G^0, G^s

注2 詳しい計算手順のフローチャートは、補足 (後記) に示す。

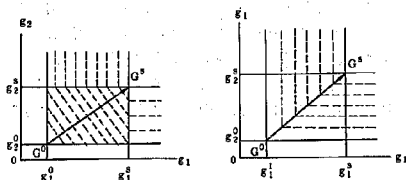
注3 前報 (参考文献⑩), 参考文献 (30) 参照。

なるベクトル $G (\lambda_i; i=1, \dots, m)$ を考える。ここに、 $\lambda_i = g_i^* - g_i^0$ である。

この G ベクトル上では、 G^0 に近づくにつれて満足^{注1)}の程度は大きくなっていく。そこで、この G ベクトル上の任意の点と効用の等しい点の集合^{注2)} (効用関数) を目標空間 ($g_i \geq g_i^0$) 上で求めることができれば、単に G ベクトル上のみでなく、パレート領域の境界における最適解を求めることが可能となる。

現実の意志決定者の価値体系を反映する効用関数としては、種々のタイプがありうるが、線形計画法における取り扱いやすさを前提として、伏見・山口は次のようなものを提案している。

- ① 各目標の達成度、あるいは不達成に $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$ の比の重みづけを行なう。この場合には G ベクトルと効用関数は直交する (図-11(a))。



(a) 加重方式の図解

(b) L字型の効用関数

図-11 効用関数

- ② 効用曲線が G ベクトルを頂点として折れ曲がっている (図-11(b))。

- ③ これは効用曲線ではないが、 G 線上のみで最適解を求める場合には、 $g_i(x)/\lambda_i = \dots = g_m(x)/\lambda_m$ とおくことになる。ここに $g_i(x)$ は目標 G_i 達成度を示す目的関数である。

④ このタイプは従来の GP 手法でよく用いられる加重方式と同じであるが、加重係数 (不達成度に対して掛ける) を g_i^0 と g_i^* から定めようとするものである。この方法でさらに現実的な意味をもたせようとするれば、例えば λ_i / g^0 あるいは $\lambda_i / (1/2 (g^0 + g^*))$ を重みとして与え、不達成度を最小化する方法がある。このタイプは目標相互間に代替関係 (一方が大きければ他方は小さくてよい) がある場合に用いられる^{注3)}。

⑤ このタイプは、複数の目標達成度をバランスよく大きくするという複いをかなりよく反映している。ま

た、適当な変換を行うことにより他のケースへの応用も可能となる^{注4)}。

⑥ このタイプは、 $d_i^* = \lambda_i / \lambda_1 \cdot d_1^*$ ($i=2, \dots, m$) を制約条件に加え d_i^* を最小化するという方法で最適解が得られる。しかし、解が存在しない場合や、パレート領域外の解が求まることがある。

本研究の解法においては、以上3つの方法のうち、①の重みづけによる方法 ($w_i = \lambda_i / g_i^0$ or $\lambda_i / (g_i^* - g_i^0)$ を重みとする) と②の方法を採用し、主として後者を用いる。そして、

$$\min \left\{ \sum w_i \cdot d_i^* \right\}$$

or

$$\max \left\{ \min \left\{ (g_i^* - g_i^0) / \lambda_i \right\} \right\}$$

(max-min 法)

により最適化を行ってみる。なお、⑥の方法の場合の最適解は必ずパレート領域内にある。

後者の場合の数学的構成は次のようにある。

$$g_i(x) \pm \gamma_i \mp z_i = g_i^* \quad (i=1, 2, \dots, m; \text{符号同順})$$

.....⑦

ただし、符号の上のものは目的の最大化の場合に対応し、下のは目的の最小化に対応する。

⑧式を2変数について図示すると次のようになる (図-12)。

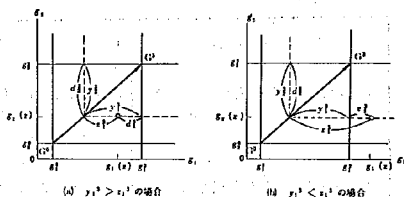
(a) $y_1 > x_1$ の場合(b) $y_1 < x_1$ の場合

図-12 偏差変数の図解

次に、

$$y_i^* / \lambda_1 = y_2^* / \lambda_2 = \dots = y_m^* / \lambda_m \quad \text{.....⑧}$$

として、 z_i^* は制約のないスラック変数とする。

$$\mu_i = \lambda_i / \lambda_1 \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad \text{.....⑨}$$

とおくと次式を得る。

$$\mu_1 y_1^* = \mu_2 y_2^* = \dots = \mu_m y_m^* \quad \text{.....⑩}$$

そこで、次の式を解けば、L字型効用関数を用いた場合の解を得る。

注1) 等効用を示す無差別曲線を指す。

注2) もちろん、それが G ベクトル上にあることもありうる。

注3) しかし、前述の欠点のうち後者はとりのぞかれない。

注4) 開いたL字型効用関数の使用を指す。

$$\left. \begin{aligned} \min. & y_i^* \quad (i=1, \dots, m \text{ 中の任意の } 1 \text{ つ}) \\ & \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot x_j \pm y_i^* = g_i^* \quad (i=1, 2, \dots, m, \text{ 符号同順}) \dots (5) \\ & \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot x_j \geq g_i^* \quad (i=1, 2, \dots, m) \\ & \mu_1 y_i^* - \mu_i y_i^* = 0 \quad (i=2, 3, \dots, m) \\ & \text{・制約条件 (通常の制約条件)} \end{aligned} \right\}$$

これにより、不効用の最小化が行なわれる。

また、他の目的の妥当水準を与えておき、そのもとである目的の最大化を目指すことも考えられ、上述の方法と同様に定式化される。

なお、現実のシミュレーションにおいては、L字型効用関数法と加重法による解法を併し、Gベクトルおよび、L字型効用関数の角度(開いたL字型効用関数)⁽²⁾の変更に対する感度分析を行ない、適切な選好解について検討するとよい。

(6) 水資源の配分・利用モデル(狭義)の適用について の注意と分析・検討のシナリオ

水資源の配分・利用モデル(狭義)で取り扱う問題は、①制約条件を満たすような水資源の配分・利用が可能かどうかのチェック、②制約条件を満たしうる場合に、目的関数(複数でも可)によって評価項目が与えられれば、それを最もよく満たす解、あるいは

パレート域における選好解を決定することであるが、その解決には2つ基本的な前提を忘れてはならない。第1の前提は、制約条件および目的(関数)の妥当性である。これは自明の事柄であり、これ以上言及することはしない。第2の前提は、第1の前提が全く妥当である場合にも忘れてはならないものであり、この前提の如何により得られる解が全く妥当でないという場合も生じうる。この前提は、本モデルにおいては水のやりとりルートの設定とその影響の正しい記述である。したがって、後述の議論は、設定(あるいは想定)されたルートに対する妥当性に対するものであることを注意しておく必要がある。

したがって、本研究の分析においては、①現状のルート、②将来時点では施設計画も含めたルート、③現状のルート+全く仮想的な施設計画ルートを設定する。^(注1)そして、それぞれのルートのもので、目的関数で示される評価項目を与えることにより、現在あるいは将来の水利用形態の適正化やそのために必要な施設計画、渇水年に対する水需給問題の綿密な検討とその際の適正化(対策)等について議論することになる。具体的に考えられる分析・検討のシナリオを表-6に例示的に示しておく。

表-6 分析・検討のシナリオ

モデルの形態	分析シナリオのパターン**
① 現状ルートを表現したモデル (S.47年度モデル)	①シナリオ1)：降雨・導水量(外生変数)を変化させる(ある目的関数のもとで)。 ②シナリオ2)：降雨・導水量を固定し、目的関数を変える(多角的検討)。
② 将来のルート*を表現したモデル (S.55年度モデル)	③シナリオ3)：降雨・導水量を想定し、水供給の可能性のチェック(ある目的関数のもとで)、可能なら適正利用形態の検討(多角的検討)不可能なら対策の検討 ④シナリオ4)：降雨・導水量を変化させる(ある目的関数のもとで)。
③ 仮想ルートを設定したモデル (施設計画 検討モデル)	⑤シナリオ5)：降雨・導水量を固定し、ルートを想定して水資源関連施設計画を検討する。 ・広域水道、流域下水道計画(地区間ルート)の評価についての検討 ・導水の合理的利用についての検討 ・三次処理水の利用(地区内ルート)の影響についての検討 ・etc

* 計画ルートを含めたルート

** 水利部門間や上・下流間、あるいは目的間のtrade-offの把握とその調整は、各シナリオにおいて行われる。

注1) 前報(参考文献④)では③のルートを考えている。

5. 大和川流域の奈良盆地におけるケース・スタディ

(1) 大和川流域の奈良盆地の概要

ここでは、大和川流域の奈良盆地を建設省近畿地方建設局の調査資料(参考文献②)をもとにして、水資源に関する側面から概観しておく。対象地域の地理的な位置や歴史的な変遷等については、前報および参考文献②を参照されたい。

① 流域の現状

大和川流域は、古くから穀倉地帯として文化の発達のための物質的基礎を提供してきたが、近年は大阪に鉄道で約1時間という地理的条件により、急速に都市化の波がおし寄せており、住宅地が形成・拡大している。また、阪神工業地帯からは、電器・機械・食品・化学等を中心とする工業が内陸部に進出してきており、奈良県も工業誘致につとめているために、流域の姿は大きく変わろうとしている。^(注1)

② 流況と利水状況

同地域は、山が浅い上に降水量が少なく、^(注2) 河川流量は比較的少ないが、平地部が開けているために用水としての利用度は高い。

・同地域の農業用水は、河川流量が少ないために、表流水の他にため池や地下水を水源としているところが多い。また、重要な水源として紀ノ川分水(吉野川分水)があり、曾我川および東部幹線水路と西部

幹線水路を経て農業用水として利用されている。^(注3)

ため池に関しては、カンガイ面積が10ha以上あるいは有効貯水量10,000 m³以上のものが奈良県で約1,000ヶ所あり、貯水量約3,000万m³・カンガイ面積17,000haとなっている。^(注4) また、50万m³以上の大規模なため池も同県に4ヶ所ある。

地下水くみあげ井戸は2~3m程度の浅井戸から、200m程度の深井戸まで使用されており、奈良県で129ヶ所から約165,000m³/日の揚水が行われている。

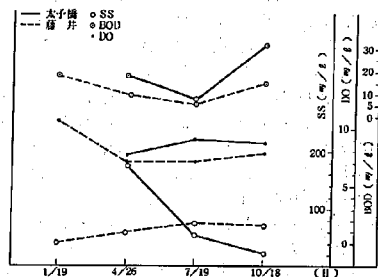
・上水道は、奈良県では地表水と地下水をほぼ半半ずつ使用している。しかし、その表流水も大和川のものを使用することは少ない。

・工業用水は、奈良県では大和川から取水しておらず、地下水からは20,117m³/日(0.23m³/sec)の取水を行っている。

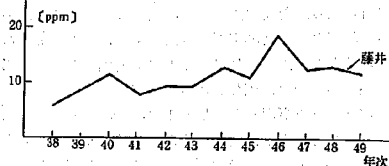
・その他の用途としては、水産用水・レクリエーション等があり、それらの面からの需要は今後増加すると予想される。

③ 大和川の河川水質^(注5)

大和川流域における近年の急激な産業発達・人口の集中は、大和川の水質悪化の主要原因となっており、同河川は1級河川で2番目に汚濁した河川となっている。昭和47年度時点の地点別水質、BODの経年変化、河川の上流から下流への縦断変化および生物学的な水質階級図を図-13(a)~(d)に示す。



(a) 昭和47年の大和川の水質(季節変化)



(b) 大和川の水質(BOD)の経年変化

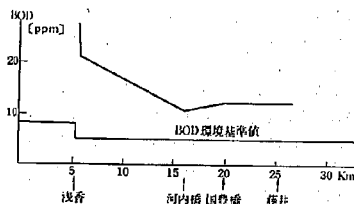
図-13 大和川の水質

注1 同地域の市町村別の県勢状況については、参考文献②および後述の補足を参照されたい。

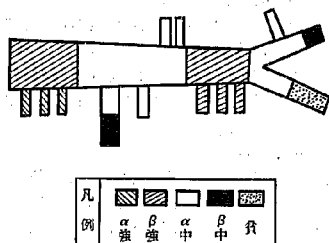
注2 降雨状況については補足参照

注3 後述の図-14(d)参照。

注4 後述の図-15(g)参照。



(c) 大和川の水質(BODの縦断変化)(昭和47年度)



(d) 生物学的水質階級図(昭和49年)

図-13 大和川の水質

④ 大和川とその流域の将来の方向²⁵⁾

・流域の開発と水需給の動向

大阪経済圏に近接し、交通の便にも恵まれているために、対象地域では大規模な宅地造成や工業の進出などが予想され、人口・出荷額ともに増加すると考えられている。将来の水需給については、以下のように想定されている。

農業用水は減少しつつあり、 $5.8 \text{ m}^3/\text{sec}$ の減少が見込まれている。

上水道・工業用水はかなりの新規需要が見込まれている。しかし、同流域はもともと水資源には恵まれておらず、従来においても夏場には、無流量状態になることがしばしばあった。また、開発に伴う水質汚濁の進行により、現在以上の取水は期待できない状況にある。滝畑ダム・初瀬川ダム計画により、ごく一部の新規需要が充足される外は、地下水や淀川水系・紀ノ川水系からの導水に依存せざるを得ない。カンガイ期には紀ノ川(吉野川)から最大 $10.977 \text{ m}^3/\text{sec}$ の分水がなされているが、河川への還元の仕方と状況への影響等については、今後の調査が必要とされている。

・水質汚濁への対策(流域下水道計画)

水質汚濁の進行に伴う上水道の取水中止や、魚類の浮上死等の問題のために、奈良県ではそれに対処するために流域下水道計画を立案し、すでにその1部では排水の受入れがなされている。この計画が完成することにより、自流のもとと少ない河川の流量がバイパス流下するために、低水の潤滑化が新たな問題となる可能性もある。^{注1)}

注1) 他地域からの導水水量の河川への還元などがあるので、この問題は単純に論じられない。

(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

水資源関連要素は第3章で示したものをとりあげ、その機能も表-2に示したとおりとする。他地域からの導水は、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う。ただし、仮想的な施設計画について水配分計算をする計算には、若干の変更を行う。^{注2)}

(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(図-14)、地区分割は第3章で示した手順により決定した。まず15枚の基本資料(図-14, 15(a)-(n))を作成し、それぞれの特性に着目した場合の地区分割・地区の特徴づけ(地区分割案1)を行った。

次に、水文特性、農水の供給源・供給網、上下水道網に着目して基礎図面の何枚かずつを重ね合せ、それぞれの面から地区分割案1の調整を行い、地区の特徴づけを行って3つの特性図(図-16(a)-(c))を作成した。最後に、それらをオーバーレイし、データのとりやすさや観測点に注意して調整を行い、分析・検討目的との適合性をチェックして最終的な地区分割を行った(図-17)。^{注3)}この際の手順については、補足2(後記)に詳述した。

(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、その期間をカンガイ期(t_1)・非カンガイ期(t_2)に分割した。この分割

注2) 具体的には、後述の計算結果と考察の項で示す。

注3) 水配分計算時には、分析シナリオに応じてこの地区分割に対するモデルと、より大きな地区分割に対する2通りのモデルを作成した(ケース・スタディ参照)。

は、水文特性や水需要特性(特にカンガイ期にその需要が集中する農水の特徴を考慮)に着目したことによる(図-3)。

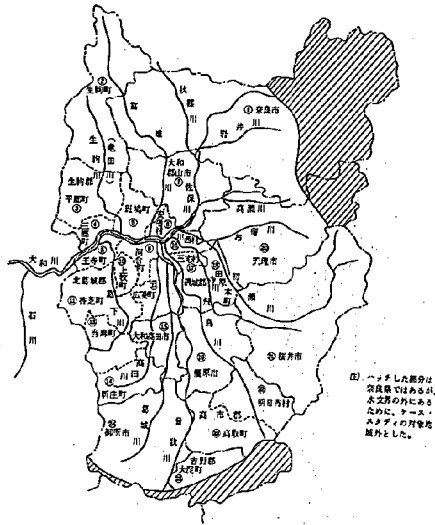


図-14 対象地域(大和川流域の奈良盆地)

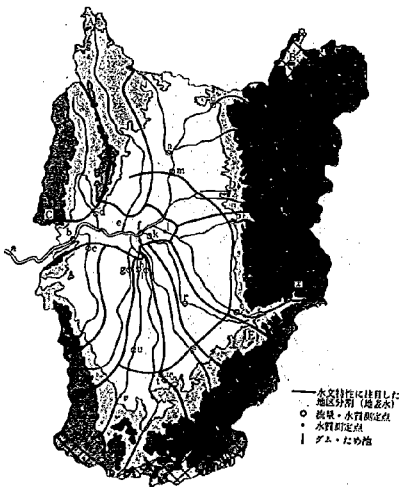


図-15(a) 水文図その1(地表水)

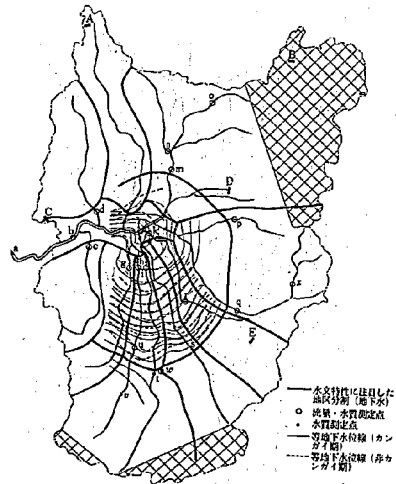


図-15(b) 水文図その2(等地下水水位線/カンガイ期・非カンガイ期)

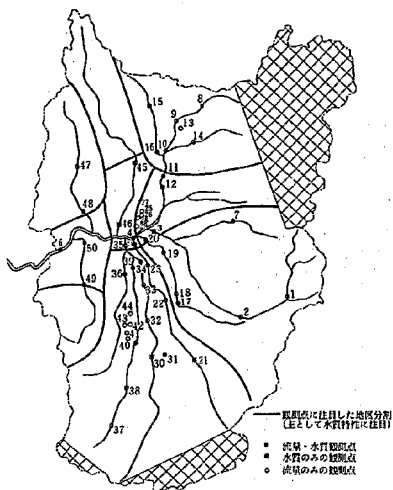


図-15(c) 観測点の分布図

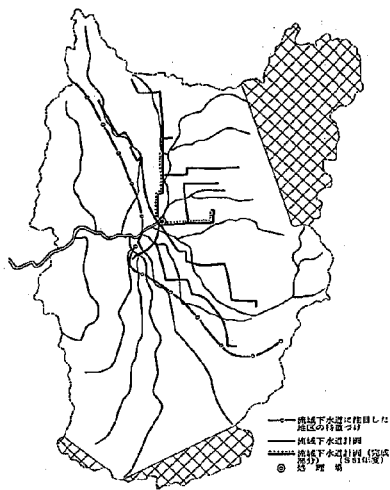


図-15(e) 流域下水道システム図

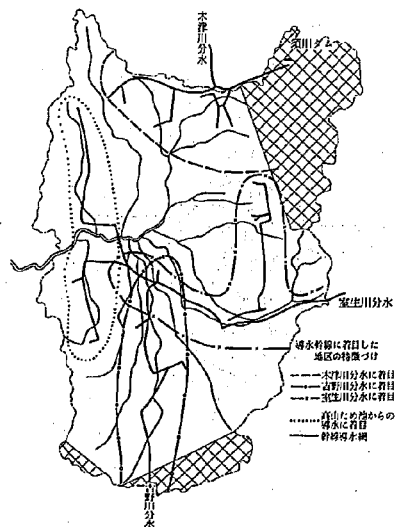


図-15(d) 上水供給のための広域水道と他地域からの導水システム図

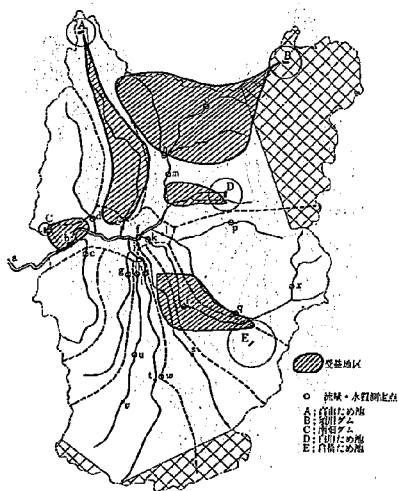


図-15(f) 大規模なダム・ため池の配置とその受益地区の分布 (概要) 図

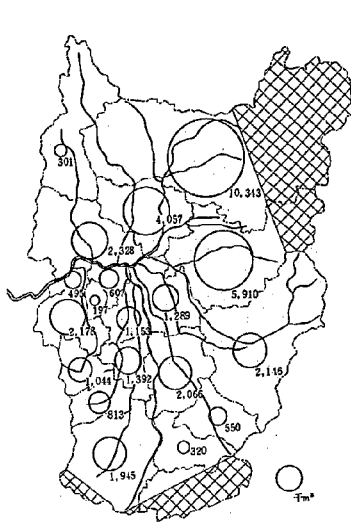


図-15(g) ため池の容量分布図(市町村別)

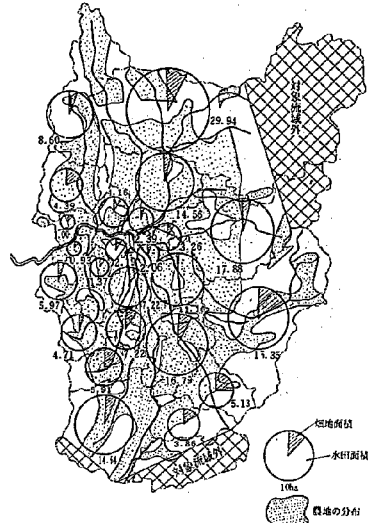


図-15(i) 農地の分布とその面積(市町村別)分布図

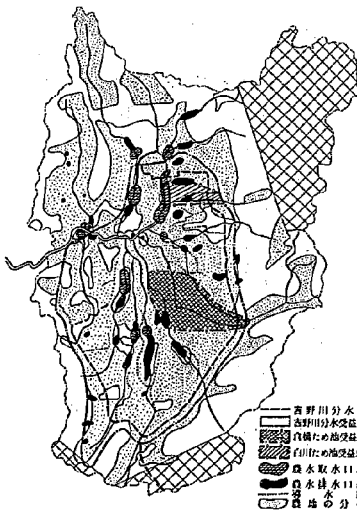


図-15(h) 農業用水に関する他地域からの導水システム図(吉野川分水)

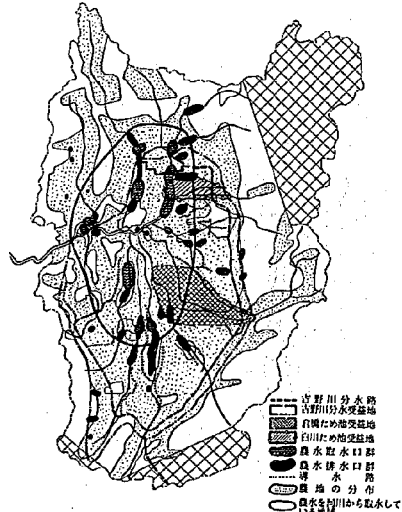


図-15(j) 農地の分布と農業用水の供給排水特性図

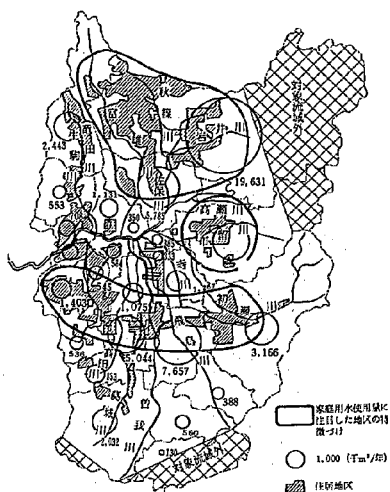
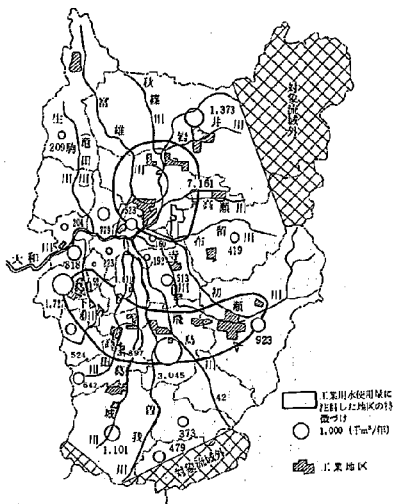


圖-15(k) 家庭用水使用量分布(市町村別)
住居地区分布図



図一 15 (四) 工業用水使用量分布 (市町村別)・工業地区分布図

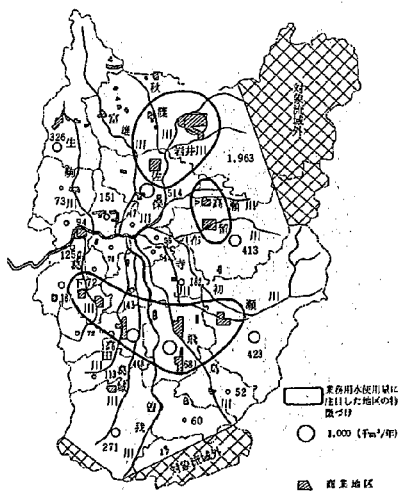


圖-15(1) 業務用水使用量分布(市町村別)・商業地区分布図

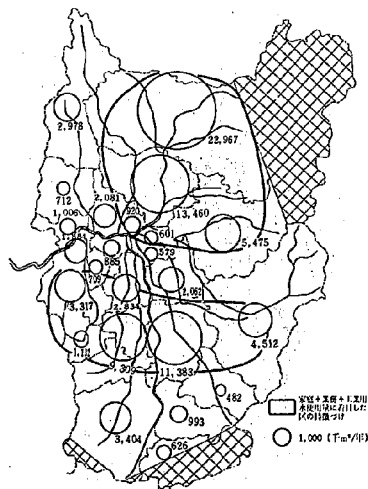


圖-15(n) 家庭+業務+工業用水使用分布圖

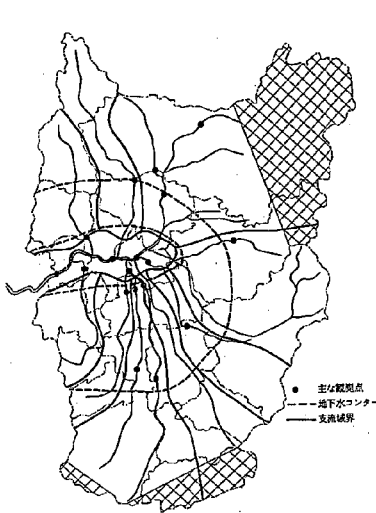


図-16(a) 水文特性に着目した地区分割

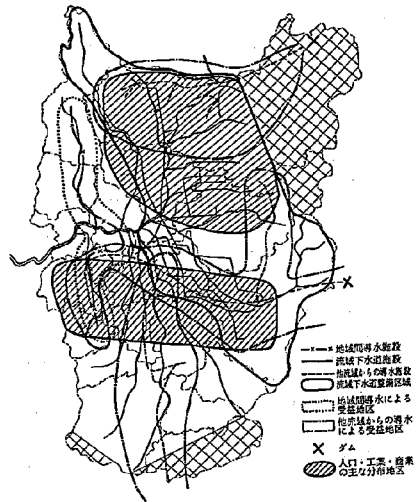


図-16(c) 用水(上・下水道)の大規模な供給・排水状況に着目した地域の特徴づけ

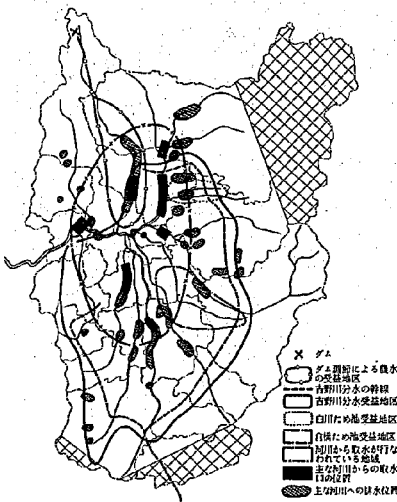


図-16(b) 農水の大規模な供給・排水状況に着目した地域の特徴づけ

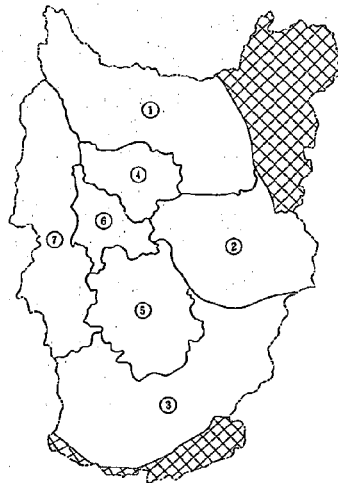


図-17 地区分割結果

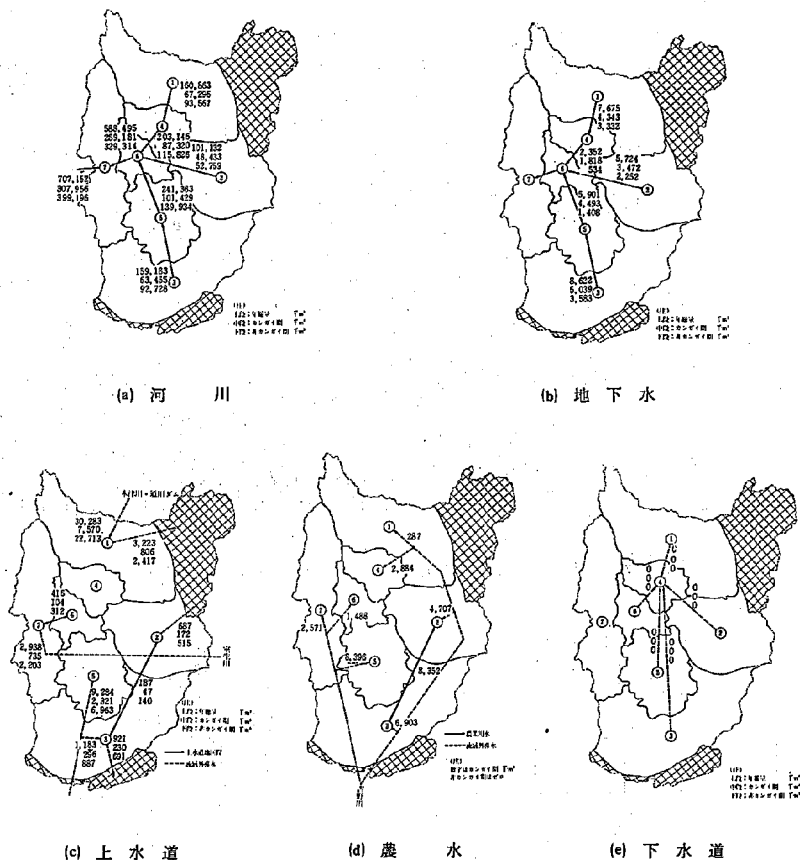


図-19 現状把握結果2 (地区間の水のやりとり)

また、河川水の水質は排出原単位、汚濁負荷伝達率(削減率も含む)を用いる方法により把握した。その結果は、河川水質年表などに示される晴天時観測データをもとにした年間平均値とは、多くの地点ではほぼ満足できる対応をみた。しかし、対象流域においては、晴天時・雨天時を通じた水質観測は実施されておらず、厳密な水質のチェックは不可能であった。そのために、今回は実測値(水質年表に示される値)に適合するよ

うに原単位や伝達率等を修正することはなかった。

以上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-21は、その1例として、対象地域における水の利用状況をカンガイ期・非カンガイ

注1) 筆者等の1人は、いくつかの河川の毎日の観測データを用いた水解析を実施しており、その結果については、次の機会に報告する(参考文献(7))。

流出要素	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 ため池	10 その他	高水	水質への影響	地地区への影響	地地区内への影響
1 河川	304,745	8,828	118,336	363	118,336	91	118,336	35,134	35,134	35,134	35,134	3,410	1,451,242	207,152
2 地下	299,518	2,207	115,356	91	115,356	272	115,356	0	0	0	0	127	627,114	307,936
3 上水道	294,797	6,421	118,336	834	102	13,056	16,026	0	0	0	0	82,753	824,128	399,196
4 家庭	15,180	4,045	58,909	6,208	6,852	1,713	0	0	0	0	0	0	0	0
5 業務	19,436	4,955	14,726	1,853	5,139	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6 工業	50,774	12,634	38,330	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7 農業	5,321	1,356	4,155	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8 下水道	20,542	5,137	15,406	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9 ため池	74,439	212,253	29,874	184,761	14,535	55,491	0	0	0	0	0	0	0	0
10 その他	13,288	4,429	8,659	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
地地区	205,644	266,303	131,180	65,043	54,474	0	0	0	0	0	0	0	0	0
地地区内	48,036	48,036	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
地地区外	236,318	90,400	131,732	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
地地区内への影響	3,410	1,451,242	207,152	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
地地区外への影響	3,410	1,451,242	207,152	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
地地区内への影響	3,410	1,451,242	207,152	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
地地区外への影響	3,410	1,451,242	207,152	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

図-20 現状把握結果3 (対象地域全体としての水のやりとりの総計)

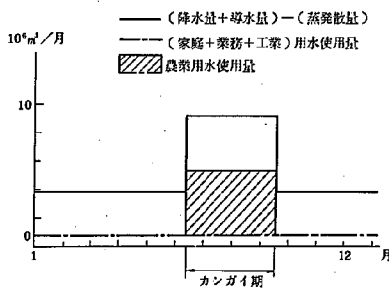


図-21(a) 対象地域全体の水利用状況

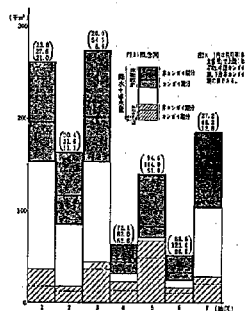


図-21(b) 対象地域の各地区の水利用状況

期についてマクロ的に見たものである。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

注1) 今回は「流域」要素の外に「農業」・「家庭」・「業務」・「工業」を合せた総蒸発散量を用いた。しかし、厳密に考える場合には、水を利用することにより発生する蒸発散量は、差し引いておく必要があると思われる。

%であり、カンガイ期・非カンガイ期別にみると、それぞれ68% (農水; 54%, その他の用水; 14%) および21%である。また、図-21(b)は、各地区ごとに水の利用状況を見たものである。これにより、各地区の水利用量と利用率を知ることができる。同図より、対象流域では、地区3~5の利用率が高いことがわかる。

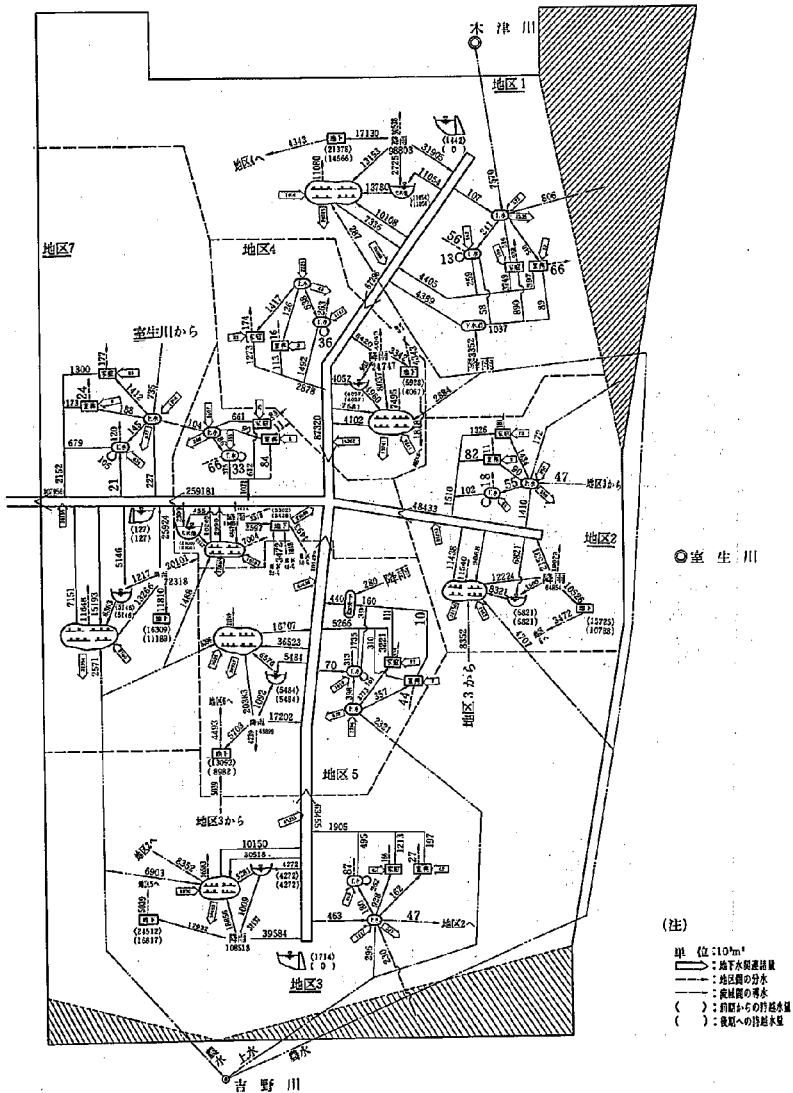


図-22(a) 大和川流域奈良盆地水利用模式図
 (昭和47・6・15~昭和47・9・15(カンガイ期))

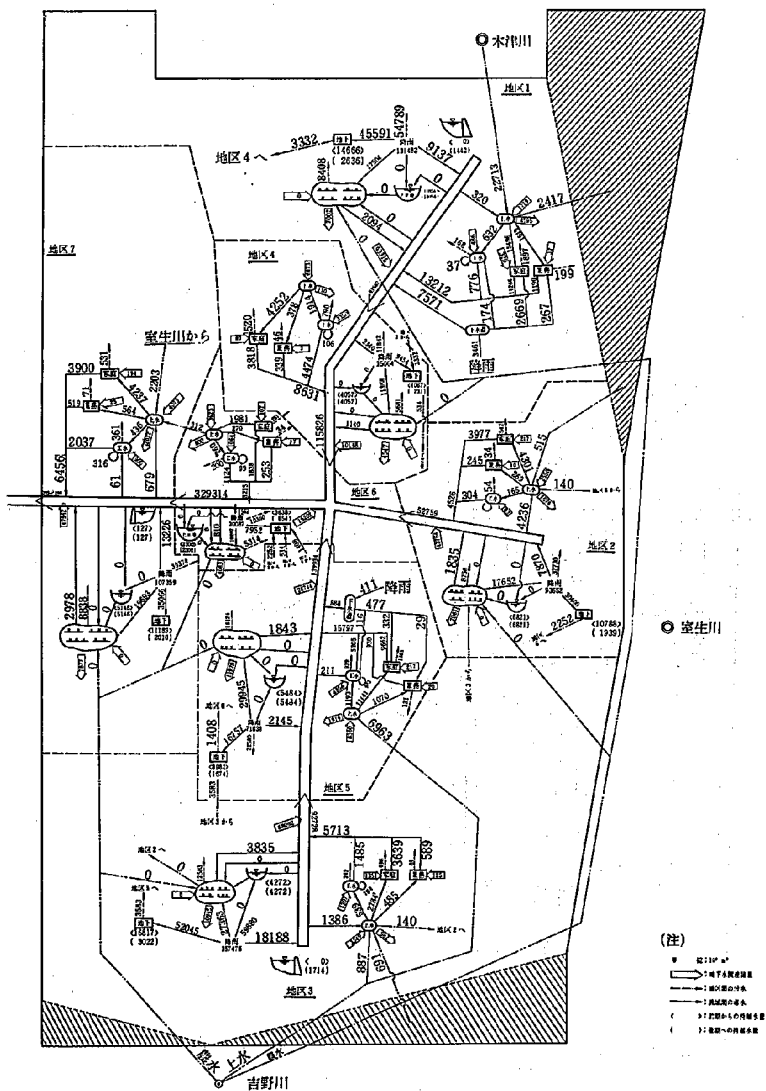


図-22(b) 大和川流域奈良盆地水利模式図
〔昭和47・9・15～昭和48・6・14 (非カンガイ期)〕

この外にも、図-20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については図-19より、地区内の関係については図-18に例示した連関表より知ることができる。

また、このようにして把握された水循環状況を単純化して模式図により表現すると、対象地域(流域)の水の動きの全体的な理解に都合がよい。図-22(a),

(b)はそのために作成したものの一例である。この外にも、河川からの取水や河川への還元状況、地下水のくみあげやかん養状況等に着眼して、各特性を表示する図を作成する事ができ、水循環状況の感覚的な理解を助けることができる。

(4) 水資源の配分・利用モデルの構成

水資源の配分・利用モデルは、設定する分析・検討シナリオにより定まる水のやりとりルート(地区におけるルートと地区間ルート)のもとで定式化される。モデルの制約条件式、目的関数、入力データ(外生変数)、条件式および目的関数の諸定数・係数の与え方とその値については、補足(後記)を参照されたい。

本研究においては、表-6に示す分析シナリオのもとで、種々のタイプの水資源問題を検討するためのシミュレーションを行った。

計算においては、図-9に示した手順を用いた。すなわち、まず全ての制約条件を満足するような水資源の配分が可能であるかをチェックし、可能ならば単一の目的関数に対する最適化を行う。その結果も合せて検討し、Gベクトルを決定し、多目的に対する調整を行ってパレート領域における選好解をGD法により決定した。モデルとしては次のような2つを用いた。表-7(a)~(c)に示す分析シナリオに対するモデルは、現状把握における地区分割・要素・タイムスケールのもとで、変数約850(地区内変数820,地区間変数30),制約条件式約1,040(地区内変数のみからなる制約条件式約940,地区間変数も含む制約条件式約100)から構成されている。また、全く仮想的なルートを設定したモデルでは、対象地域を4つに地区分割し、要素は工業・家庭・業務を一緒にして「都市」とし、開放系としての再利用を考慮するために「再開発」を追加した。そして、それに対応したモデルは、変数約300(地区内変数約60,地区間変数約240),制約条件式約280(地区内変数のみからなる制約条件式約240,地区間変数も含む制約条件式約50)から構成されている。

(5) 計算結果と考察

大和川流域の奈良盆地におけるケース・スタディでは、表-6に示すようなシナリオに応じて制約条件式(式、係数・定数)を設定し、複数の目的関数のもとで計算を行った。ここでは、まず現状把握における地区分割・要素・タイムスケールのもので、表-7(a)~(c)に示すシナリオ(計算ケース)を例としてとりあげ、その1例について計算結果の解釈の仕方について詳述し、他のケースについては、結果のみを記す(計算1)。次に、全く仮想的な再生水資源の利用を考えた場合について、地区分割・要素を現状把握とは変えて配分・利用計算を行った結果を示す(計算2)。それをもと

表-7(a) 大和川・奈良盆地の水配分シナリオ
(計算ケース分類)

(I) 目的関数によるケース分類	
㉔	費用最小化
㉕	水質最良化
㉖	工業出荷額最大化
㉗	複数目標の均衡的増大化
(II) 対象年度によるケース分類	
㉘	昭和47年現在の施設を前提にする。
①	平 年
②	渇 年
㉙	昭和55年の施設を前提にする。
③	平 年
④	渇 年
㉚	長期的施設整備を前提にする。
⑤	平 年
⑥	渇 年
(III) 解の求め方によるケース分類	
㉛	Parametric Programming を行う。
㉜	Decomposition Principle で行う。

表-7(b) 大和川・奈良盆地の水配分シナリオ
(制約条件)

対象年度によるケース分類		制 約 条 件 式						
年	年・組	①農業	②人口	③産業	④水質	⑤開採	⑥都市	⑦再生水
47	①平 年	47年農業	47年人口	47年産業	47年水質	47年開採	47年都市	47年再生水
	②渇 年	47年農業	47年人口	47年産業	47年水質	47年開採	47年都市	47年再生水
55	③平 年	55年農業	55年人口	55年産業	55年水質	55年開採	55年都市	55年再生水
	④渇 年	55年農業	55年人口	55年産業	55年水質	55年開採	55年都市	55年再生水
長期	⑤平 年	長期農業	長期人口	長期産業	長期水質	長期開採	長期都市	長期再生水
	⑥渇 年	長期農業	長期人口	長期産業	長期水質	長期開採	長期都市	長期再生水

表-7(ロ) 大和川・奈良盆地の水配分シナリオ(目的関数による分類)

対象年度によるケース分類		目的関数によるケース分類			
年	平・渴	◎費用最小化	◎水質最良化	◎工業出荷額 最大化	◎複数目標 均衡的増大
47	①平 年	C 1	Q 1	O 1	G 1
	②渴 年				G 2
55	③平 年	C 3	Q 3	O 3	G 3
	④渴 年				G 4
長 期	⑤平 年				G 5
	⑥渴 年				

にして、本モデルにより検討しうる事柄を明らかにするとともに、対象地域の水資源問題について検討する。

a) 計算Ⅰ(モデルⅠ)

まず、現状把握時点进行分析対象期間とした分析(表-7(c)の①)をもとにして、本モデルによる分析結果の解釈を行う。このとき、水のやりとりルートは現状のルートのみとし、必要ならば施設の拡張は許し、それに必要な費用は決定する。配分計算では、まず与えられた降水量・導水量のもとで各種制約を満たすような水利用が可能かどうかをチェックする。次に、そのような水利用が可能ならば単一目的を設定して最適化を行う。この時、他の目的はその必要最低水準を与える制約条件として考慮する。この時点で、制約条件と

して考慮される他の目的の必要最低水準を変化させて感度分析を行い、目的間の trade-off の関係も把握する(パレート領域の走査)。最後に、現状における値や単一目的に対する最適解などを参考にして、各目的の最低水準と満足水準を与えてGベクトルを決定し、GD法により各目的の達成度をバランスよく上昇させた場合の解を求める。

以上のような手順により計算した結果の一例を、表-8、図-23に示す。表-8には、現状値(分析対象期間の実績値)および各単一目的を取りあげて最適化した場合の最適解(太線で囲んだ値; C 1, Q 1, O 1)、およびその時の他の目的値を示す。単一目的に対する最適化計算においては、他の目的は現状値を必

表-8 大和川・奈良盆地における計算結果の一例(計算Ⅰ)

ケース	総費用(千円)	総汚濁負荷量(王寺) (kg)	総工業産出可能高(千万円)
現 状 値 (47)	39,206,075	10,860,960	32,106.327
C 1 (47・費用最小)	39,056,959	10,860,960	32,106.327
Q 1 (47・負荷最小)	39,206,075	10,437,671	32,106.327
O 1 (47・出荷額最大)	39,206,075	10,860,960	35,656.636
D 1 (47・複数目標最大)	39,142,418 (達成率 42.69%)	10,680,217 (達成率 42.69%)	33,621.940 (達成率 42.69%)

注) 各値の桁数は計算上のものであり、必ずしも有効数字の桁数を示すものではない。

注) 可能であれば、どの制約が満足されないかチェックする。そして、必要ならば(それら)の制約をどの程度緩和すると可能になるかをパラメトリック法により計算する。

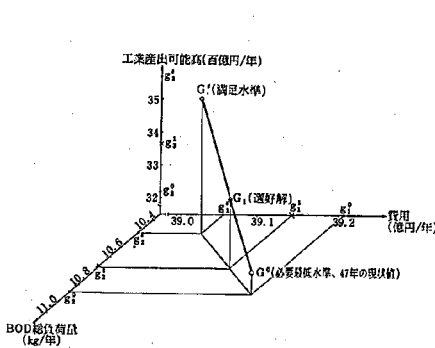


図-23 目標空間における各目的値の関係
(計算1の一例)

要最低水準として考慮している^{注1)}。また、同表中のG1は、現状値を必要最低水準(G_0)とし、単一目的に対する最適解を満足水準(G_s)として便宜的に与えた場合に、GD法により求められる多目的“選好解”である。図-23は、表-8に示した各目的値を目標空間で図示したものである。今回の計算では、設定した目標ベクトル G_0, G_s とパレート域の境界(C1, Q1, O1を通る凸面)の位置関係から、Gベクトル上で選好解が得られている。図-24には、多目的“選好解”を与える状態にあるときに、地域全体としての水利用量・供給源別水供給量を見るために、現状把握における図-20と同様にして集計した結果を示している。これにより、各分析シナリオに応じて水のやりとりがどのように変化するかわかる^{注3)}。以上が計算結果の解釈の一例である。なお、表-7に示すシナリオの47年(昭和47年6月～昭和48年6月)①平年では、現状把握で得

流入要素	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	高水期	次期への	地域外への	地域外への
流出要素	河川	地下水	上水道	家庭	農林	工業	農業	下水	流域	ため池		もろこし	の水量	の水量
1 河川	川	8,820 2,203 6,615	796 603 297	125,323 128,305 0	0	0	0	0	0	32,810 30,149 2,661	0	3,688 6,615 3,283	1,445,768 634,416 806,342	307,113 319,393 330,720
2 地下 水 (水)		511,655 238,708 272,969	38,159 9,459 26,700	9,459 2,697 0	12,411 170 13,088	18,563 4,365 0	0	0	0	0	0	76,915 63,310 12,605	40,713 27,704 12,605	179,669 154 3,666
3 上 水 道		15,723 3,937 11,784	14,081 1,535 44,047	1,301 4,605 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4 家 庭	路	54,721 13,640 41,081	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5 農 林	路	5,713 1,351 4,362	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6 工 業	業	14,906 4,737 14,189	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7 農 業	業	218,143 163,213 54,933	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8 下 水 道		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9 流 域	域	218,143 163,213 54,933	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10 た め 池		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
地 域 外	水	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
初期からの	もろこし	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
地域外	地域外	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
地域外からの	地域外	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
地域外からの	地域外	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
地域外からの	地域外	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
地域外からの	地域外	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
地域外からの	地域外	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
地域外からの	地域外	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
地域外からの	地域外	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
地域外からの	地域外	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
地域外からの	地域外	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
地域外からの	地域外	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
地域外からの	地域外	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
地域外からの	地域外	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
地域外からの	地域外	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
地域外からの	地域外	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
地域外からの	地域外	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
地域外からの	地域外	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
地域外からの	地域外	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
地域外からの	地域外	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
地域外からの	地域外	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
地域外からの	地域外	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
地域外からの	地域外	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
地域外からの	地域外	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
地域外からの	地域外	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
地域外からの	地域外	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
地域外からの	地域外	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
地域外からの	地域外	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
地域外からの	地域外	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
地域外からの	地域外	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
地域外からの	地域外	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
地域外からの	地域外	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
地域外からの	地域外	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
地域外からの	地域外	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
地域外からの	地域外	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
地域外からの	地域外	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
地域外からの	地域外	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
地域外からの	地域外	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
地域外からの	地域外	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
地域外からの	地域外	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
地域外からの	地域外	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
地域外からの	地域外	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
地域外からの	地域外	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
地域外からの	地域外	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
地域外からの	地域外	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
地域外からの	地域外	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
地域外からの	地域外	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
地域外からの	地域外	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
地域外からの	地域外	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
地域外からの	地域外	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
地域外からの	地域外	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
地域外からの	地域外	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
地域外からの	地域外	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
地域外からの	地域外	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
地域外からの	地域外	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
地域外からの	地域外	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
地域外からの	地域外	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
地域外からの	地域外	0	0	0	0	0	0							

図-24 対象地域全体としての水のやりとりの総計(計算1の一例)

注1 必要最低水準を変化させれば、当然のことながら、C1, Q1, O1は、変化することが多い。

注2 選好解は、いつもGベクトル上で求めるわけではないが、今回のようにGベクトルを定めると解がGベクトル上となることが多い。

注3 図-9を作成するために用いた各地区の水のやりとりを示す図を用いることにより、分析シナリオに応じて各地区内の水のやりとりの変化を知ることができるが、ここでは省略する。

た降水量・導水量を外生的な条件とし、現状のルートのもとで最適化を行った。すなわち、最適化のためには都合のよいルートがあっても、そのルートの新設は考えていない。しかし、現状のルートのもとで必要な施設の拡張は許し、それに必要な費用は算定している。このとき、他の全ての条件(水質規制や水需要量など)は現状値を用いている。

他の計算ケースにおいては、47年②渇水年では、降水量のみを過去11年(昭和40～50年)間の最低(約50年に1回の渇水)とし、他は①と全く同様の条件を想定している。したがって、①、②のケースでは、制約条件がきびしいために、各目的の最適値もあるところで抑えられている。55年③平年は、平均降水量・計画導水量を外生的に与え、必要な施設の拡張を許す場合の解である。また、55年④渇水年では、降水量を47年②と同じとし、必要な施設の拡張は許している。47年⑤仮想では、47年②渇水年と同様の条件のもとでルートの新設も考えて最適化している。

以上のようなシナリオのもとでの計算により明らかとなった点を挙すると次のようになる。

- ① 単一目的に対する最適化を行うと、前報図で述べたように、水資源のみからみた工業産出可能高(工業出荷額)や収容可能人口を最大化する目的の場合には、各種制約を満たした上でまだ余裕のある水が、原単位の小さな地区に送られることになる。そのために、地区間の水のやりとりも活発化する傾向がある。施設の拡張を許す場合には、目的の達成度を上昇させるために必要な施設が、費用制約などの許す範囲内で積極的に進められることになる。対象地域における計算では、前述の47年の平年の条件下で、他の水需要量を現状値(47年の値)とした場合に、水資源のみからみた工業産出可能高は現状(47年の出荷額)の約26%増となっている。
- ② 費用や水質(下流端の汚濁負荷量)の最小化を目的とした場合には、費用のかさむ利水や汚濁負荷を多く発生する利水が極力抑えられる傾向がある。47年①平年の条件下で総費用を最小化することを目的とした計算によると、利水に関する総費用は、現状(47年の値)を約1.4%下げることが可能となっている。同様に、最下流端のBOD汚濁負荷量を最小とすることを目的とした計算では、現状値(47年の値)を約7.9%減じることが可能となっている。これは、水質に換算すると1.2ppmに相当する。
- ③ カンガイ期(t_1)、非カンガイ期(t_2)別にみ

ると、例えば昭和47年①平年の条件による計算で工業産出可能高を最大化しようとすると、非カンガイ期に余裕のある水を積極的に活用することになる。

- ④ 多目的の達成度をバランスよく上昇させると、trade-offの関係にある各目的の達成度は、単一目的に対する最適状態よりも低くなる。各目的の達成度がどの程度のものを選好解とするかについては、Gベクトルと効用関数を変化させながら検討するとよい。
- ⑤ 対象流域の将来(55年)についてみると、現在の想定されている水供給計画のもとで、平均降雨があった場合には、現状の利水施設の容量を若干拡張することにより、必要とされる水需要量を供給しうると予想される。しかし、10年に1回程度の渇水が来た場合には、渇水調整が必要とされよう。それに対処するために、地域外からの導水と節水、および利水システムの改変と施設の拡張が必要とされる。

5) 計算2(モデル2)

仮想的なルートを含めた分析シナリオとしては、ここでは次のようなものを考える。

・分析シナリオ

同地域の昭和55年から56年にかけてのカンガイ期・非カンガイ期において、10年確率の年平均降水量があり、現在計画されている地域外からの導水が実現した場合に、流域の水資源からみた容量はどの程度かを算定するとともに、多目的に対して適切な水利用・排水状況(すなわち、各目的(容量)の間のtrade-offを調整して選好する状態)を算定する。このときに、現在いくつかの水系において仮想的に考えられつつある、下水処理水の開放系としての再利用に関するルートを含めることにする。

以上のようなシナリオについて検討するために、計算1(モデル1)より単純化したモデルを用いた。地区区分は、図-25に示すとおりとした。また、各水資源関連要素番号は次のように定めた。要素番号1は「河川」、2は「地下」、3は「上水道」、4は「都市^(注1)」、5は「農業」、6は「下水道」、7は「流域」、8は下水処理水の開放系としての再利用を仮想的に考えるために「再開発」とした。他の記号は、現状把握における定義に従って設定した。なお、ため池による貯留量としてのもちこし量は、地下水としてのもちこし量と一併に取り扱った。そして、図-26(a)、(b)に模式化して示したようなモデルとした。

注1 家庭用水、業務用水および工業用水を含む。

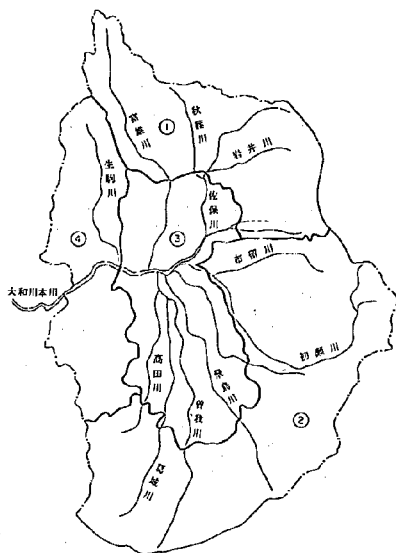


図-25 モデル2の地区分割

前述の現状把握結果を、図-26(a), (b)のような水のやりとりに変換して、現状における水の循環状況を示したものが、図-27(a), (b)である。そして、前述の手順により分析シナリオについて計算を行った結果が表-9, 図-28, 29(a), (b)である。このような計算結果は、各係数や制限値によって異なるので、表-9, 図-28では現状値で基準化することにより、その大小関係のみを示した。図-29(a), (b)は、多目的に対して選好した状態における水のやりとり状況を示したものであり、これらと現状の水のやりとり図と比較することにより、水循環・水収支がどのように変化したかがわかる。計算で用いた係数や各種制限値については、参考文献図を参照されたい。なお、各目的の必要最低水準ならびに満足水準は計算1と同様に設定した。

以上の仮想的な計算により、開放系としての再利用が対象地域全体の水資源に関する費用・下流端の汚濁負荷量・都市への供給可能量に与える影響を推定する

注1) モデル1については、各種係数・制限値を補足に示しているので、計算結果の数値自体に意味があると考えられるのでその値を示した。しかし、モデル2については、冗長になるのを避けるために計算条件を示していないので、このような表示の方法を用いた。

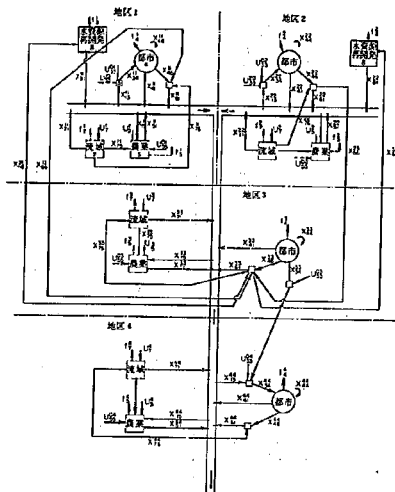


図-26(a) 水循環・水収支モデル図(仮想モデルの地上水), (モデル2)

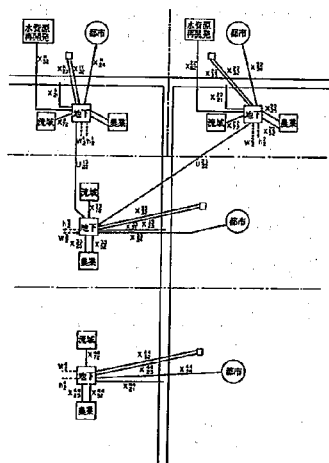


図-26(b) 水循環・水収支モデル図(仮想モデルの地下水), (モデル2)

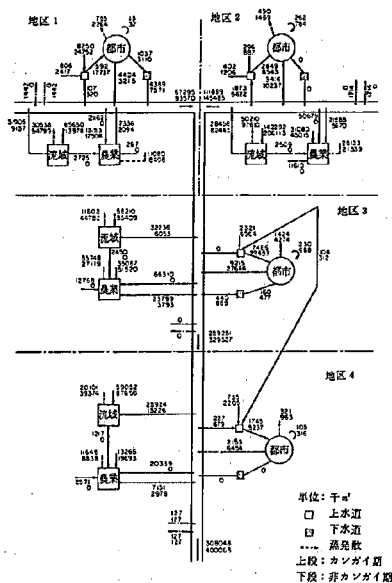


図-27(a) 現状の水収支〔地上水の流れ
(昭和47年)〕

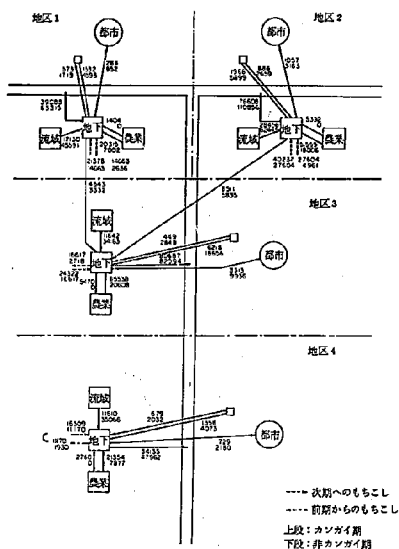


図-27(b) 現状の水収支〔地下水の流れ
(昭和47年)〕

表-9 目的関数の値 (計算2の一例)

目的関数		項目	総費用 (G_1) (億円/年)	最下流域汚濁負荷量 (G_2) (ton^3 /年)	最下流域年平均水質 (P P M)	都市用水層給水量 (G_3) (億 m^3 /年)
単 目 的 (55年)	費用最小 (G_1)		1.8	0.4	0.4	1.7
	最下流域汚濁負荷量最小 (G_2)		3.4	0.3	0.3	1.7
	都市への供給量最大 (G_3)		8.8	0.7	0.7	4.2
多目的 (55年)	選好状態		4.6	0.4	0.4	3.2

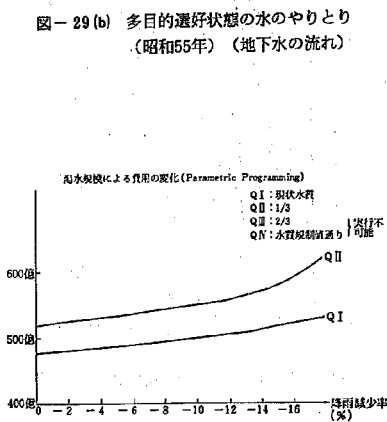
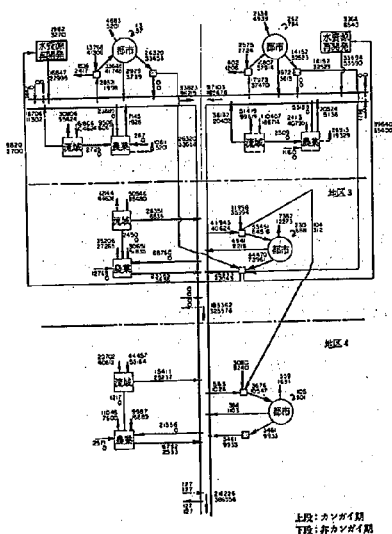
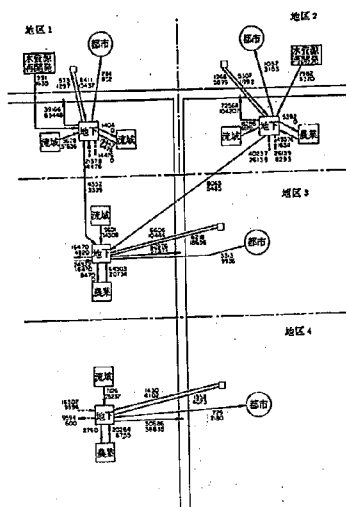
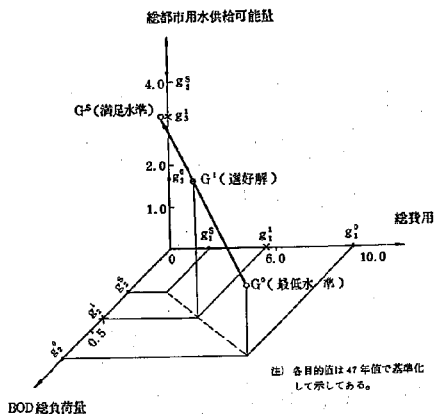
注) 47年の実績値で基準化して示す。

ことができる。

○ その他の結果

① 今回の計算では、諸定数・定数(制限値含む)を変化させて感度分析を行い、各目的に関するパラメータ領域の走査や、各パラメータが結果に与える影響の把握を行った。その例を、計算1; 2に

ついてそれぞれ図-30, 31, 32に示す。図-30は、計算1において対象流域の最下流域における水質(汚濁負荷量)制約が水資源からみた工業産出可能高に与える影響を見たものである。また、図-31は、計算2において下水道整備率を変化させてその影響を見たものである。図-32は、流域容量と費用・



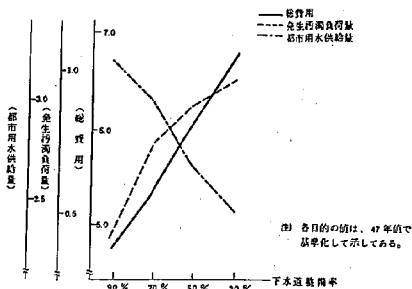


図-31 感度分析(計算2の一例, 昭和55年)

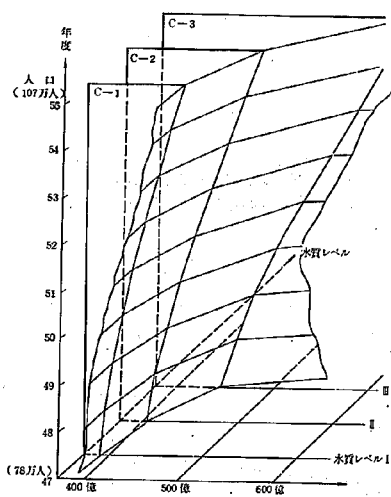


図-32 大和川流域の奈良盆地の流域容量

水質の関係をみたものである。この外にも、信頼性の低いデータに基づいて設定した係数・定数(制限値)に対して感度分析を行い、モデルの信頼性に対する検討も行った。このような作業は、結果の信頼性をチェックする上で極めて重要であると考えられる。

- ② 図-33は、現状把握結果および計算1で得られた解について、用・排水の構成をみたものである。

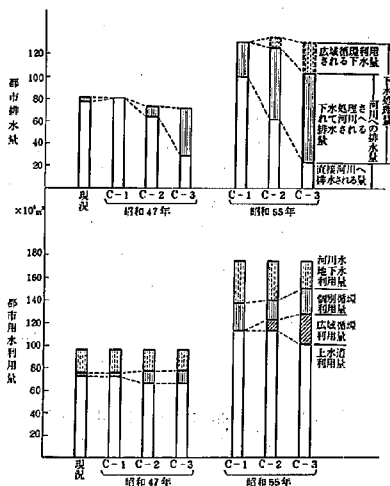


図-33 都市用水・都市排水の構成

- ⑤ 表-8, 9に示す水資源からみた工業産出可能高や、それと同様にして示される収容可能人口などは、費用制約や環境制約、あるいは利水施設の状況などによって定まる水資源からみた流域の容量であり、これらの値は、地域の将来計画などに反映されるべきものである。しかし、これらの値は前述したような種々の条件下で得られたものであり、前提条件が変われば(例えば大規模な利水関連投資が行われたり、節水化が大きく進んだ場合など)変化するので、計算の際に設定した条件のもとで解釈されなければならない。また、これらの値は水資源という側面からのみ見た容量であり、地域の発展は、この外にも種々のファクターが寄与しているので、計算結果の活用においては他の条件に多大の注意を払わなければならない。

6. 結 論

本研究では、大別して2つの点について検討を行った。1つは、対象流域(地域)における自然水と用・排水を含めた、水循環(水収支)の総合的な把握である。あと1つは、水循環を念頭において、対象地域(地域)の水資源の配分・利用形態の適正なあり方を総合

的かつ、多角的に検討することである。そのために、本研究ではいくつかの考え方と方法論を提示し、ケース・スタディによりその検討を行うとともに、地域の水資源をめぐる諸問題の実証的な分析・検討を行った。提示した考え方や方法論、調査・分析・検討プロセスおよびその結果は、水資源をめぐる諸問題の総合的かつ、多角的な検討を行うには有用であると考えられる。

本研究の内容は、次のように大別される。

① 水文量や水需要量の季節特性を考慮しうる形で、流域(地域)の水循環・水収支を総合的に把握する場合の考え方と、複雑な水のやりとり状況をシステマチックに表示する方法を提示した。

② 流域(地域)の水資源をめぐる諸問題を分析し、適正な利用・配分について総合的かつ、多角的に検討するためのモデルを提示した。このモデルは、多目的最適化をはかる線形計画モデルと総量の算定や将来推定のためのシミュレーション・モデルから構成される。

③ 上記①、②で提示した考え方や方法・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、提案した考え方と方法を検証するとともに、同地域の水資源問題の検討を行った。

上記①～③の検討において明らかになった点や、有用であると考えられる事柄を列挙すると次のようになる。

(1) 水循環の把握について

・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・レイして調整を行って、最終的な地区割を行うとよい。

・流域の水利用について総合的かつ、詳細に検討する場合には、カンガイ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。そのため、カンガイ期・非カンガイ期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。

・複雑な水循環・水収支のシステマチックな表示方法として、本研究で示した方法を用いると都合がよい。

(2) 水配分モデルについて

・水資源の配分・利用問題を、(i)季節特性も考慮し、(ii)総合的で、かつ(iii)多角的に検討するための手段として、本研究で提示した線形計画法による multi-objectives のモデルを用いるとよい。

・目的間の trade-off 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(伏見・山口)の適用が有効である。

この解法に、地区間の関係を明示的に把握するための分解原理(前報で用いた Dantzig-Wolfe 法)を結合すれば、多目的に対する適正化の検討と地区間の調整状況の明示的な把握を同時に行うことも可能である。

・また、水質制約(本質的に非線形)や費用関数の合理的な取り扱い方法を提案した。

(3) ケース・スタディについて

個々の分析結果に対する考察については、本文中に述べたので、全般的な結論のみを記すと次のようになる。

・(1)、(2)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。

・提案したモデルによる水資源の配分利用の計算により、水資源からみた地域社会の容量の算定や適正な水利用について検討することが可能である。

・しかし、総合的な分析・検討を行うためには多くのデータが必要となるが、現状においては、それら全てが既に収集・整理されているわけではない。総合的な水資源の管理を行うためには、必要なデータ項目とその精度に着目して、今後の観測・調査のあり方やデータの整理・蓄積について再検討が必要であると思われる。

・ケース・スタディにおけるデータの加工・推定方法については、補足として明示しておいた。しかし、必ずしも確立された手法ばかりではないので、現場の調査を実施する場合には、各データの把握方法については、該当する専門研究室に照会することが望ましい。

本研究を実施した結果の感想と今後の課題について記せば次のようになる。

① 本研究のように総合化を目指した研究においては、現状では精度的に必ずしも十分でないデータも取り扱わなければならない。しかし、その一部のデータの精度が向上しなければ全体としての議論ができないわけではない。精度は現状でやりうる程度としても、水資源からみた流域全体の“絵”を書くだけでも多くの意義があると考えられる。また、さらに進んで水資源からみた流域のあり方についても検討しておくことが望まれる。そのため利用することができる手法も数多く開発されている。今後は、現場で生じている水問題を、そのような手法の利点を活用しながらより実証的に取り扱うことが望まれる。

② 今後の課題としては、流域の取・排水システムと河川系の関係を明確にし、地域の水代謝系（代替的な水代謝系）と水からみた地域の容量等についてより詳細な分析を行い、水の面からみた流域の適正利用について検討することがあげられる。その場合には、本研究で用いたような最適化モデル（optimization model）の外に、河道の水量・汚濁負荷量や人口・出荷額等に関するいくつかのシミュレーション・モデル（simulation model）を併用する必要があると考えられる。また、タイムスケールも計画論としてはカンガイ期・非カンガイ期別、施設計画を検討する場合には、半旬単位程度が適切であると考えられる³⁵⁾。以上のような考え方のもとで、今後は猪名川水系においてケース・スタディを実施する予定であり、その結果については、次の機会に報告したい。

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課・河川計画課の方々、大和工事事務所橋本調査課長・細川技官からは、資料の提供と調査の便宜をはかっていただいた。また、土木研究所都市河川研究室山口高志室長から多くの助言と援助を得た。この外にも、土木研究所水資源開発研究室裏戸室長、中村・大内研究員、水文研究室北川・佐合研究員をはじめ多くの研究員から助言を得た。

本研究を進める上で、(株)長大橋設計センター朴栄秀氏に多くの面で協力を得、本研究をまとめる段階で、東京工業大学吉川教授からは、有益な情報を得たことを記して感謝の意を表します。

考 参 文 献

(a) 本文関係の参考文献

- (1) 金子良：水収支特性の地形別類型Ⅰ)～Ⅶ)，水利科学，No.73～75，77～79，1970～1972
- (2) 市川正己：多摩川流域の水収支と流量変化，東京教育大学地理学研究报告，No. 10，1968
- (3) 市川正己：流域の水収支について——多摩川流域を例として——，地理，No.10，1968
- (4) 国土庁水資源局：水資源賦存量調査について，1976
- (5) 建設省関東地方建設局：水循環機構調査報告書，1976
- (6) 建設省土木研究所。他：利水計画における流況把握の研究，第23回建設省技術研究会報告，1970
- (7) 関口武・吉野正敏：日本の流域別水収支の年変化

- 様式，地理学評論，No.26，1953
- (8) 山本荘毅・権根勇：水循環の立場からみた地下水利用のあり方，水利科学，No.97，1974
- (9) 岡本雅美：水田農業用水の計画需要量の推定方法，水利科学，No.91，1973
- (10) 金子良：農村地域の水資源極養機能，水利科学，1971
- (11) 市川正己：水文学の基礎，古今書院，1973
- (12) 和田清夫監修：Climate of Japan，東京堂，1958
- (13) 合田健，他：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
- (14) 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
- (15) 吉川和広・岡田憲夫：非線形計画モデルによる一水系流域における広域的・多角的な水配分に関する分析——，土木学会論文報告集，No. 247，1976
- (16) 末石富太郎：都市開発と水質汚濁防止——計画的な立場と水質経営との関連——，水利科学，No.60，1968
- (17) 堤武，他：下水道整備システムに関するシステム論的研究Ⅰ，Ⅱ，第9回衛生工学研究討論会論文集，1973
- (18) 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，No. 149，1977
- (19) Okada, N.: Comprehensive Systems Analysis of Area-Wide, Multi-Modal Water Resources Utilization Systems, Doctorate Dissertation Kyoto Univ., 1976
- (20) Haima, Y. Y., Hall, W. A.: Multiobjectives in Water Resource Systems Analysis: The Surrogate Worth Trade off Method, Water Resources Research, Vol. 10, No. 4, 1974
- (21) Cohen, J. L., Mark, P. H.: A Review and Evaluation of Multiobjective Programming Techniques, Water Resources Research, Vol. 11, No. 2, 1975
- (22) 伏見・山口：複数目標をバランスよく達成するための数値計画論的方法——目標計画法の改善のための方法論的考察——，経営科学，Vol. 19, No. 2, 1975
- (23) 丹保恵仁：都市・地域水代謝システムの構造と容量——都市用・排水系の再評価のための研究(Ⅰ)——，水道協会雑誌，No. 479，1976
- (24) 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, 同所資料47号, 1977
- (55) 建設省関東地方建設局: 広域水機構管理調査, 1976
- (56) 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
- (57) 岩松・吉川: 公共事業の計画策定手法に関する研究——計画マトリックス手法と地域マクロ・モデルを中心にして, 土木研究所報告, No.150, 1977
- (58) Water Resources Bureau, National Land Agency, Japanese Government: Creating a Water Resources Model, 1977
- (59) 高柳琢馬, 他: 水階給構造に関するシステム・ダイナミックス論的研究, 土木学会論文報告集, No.258, 1977
- (60) 渡辺浩・青沼龍雄: 数理計画法(P.222~), 筑摩書房, 1977
- (61) 古瀬大六: 数理計画法I——線型計画——(P.183~), 共立出版(株), 1971
- (62) 川崎精一: 都市化流域における河川システムに関する研究, 建設省近畿地方建設局, 1974
- (63) 東京都水道局: 昭和50年水道年報, 1976
- (64) 建設省関東地方建設局利根川ダム統合管理事務所: 水循環について, 1976
- (65) 建設省土木研究所都市河川研究室: 流域の取・排水システムに関する研究〜水資源からみた地域(流域)容量の算定と適正な水利用システムについての検討〜, 1978
- (b) ケース・スタディで引用あるいは参考にした資料・文献
- (59) 参考文献(a)の(5)
- (57) 建設省近畿地方建設局企画課: 都市排水の質的制御システムに関する調査報告書, 1975
- (60) 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
- (61) 建設省河川局: 河川水質年鑑, 1973
- (62) 建設省近畿地方建設局大和工事事務所: 淀川・大和川・紀ノ川水系利水現況図, 1970
- (63) 奈良県土木部: 下水道事業の概要, 1977
- (64) 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作業報告書, 1977
- (65) 国土地理院: 大和川流域土地利用図, 1968
- (66) 奈良県都市計画協会: 奈良県都市計画総括図, 1969
- (67) 厚生省: 水道統計, 1970~1972
- (68) 通産省: 工業統計表(用地・用水編), 1973
- (69) 参考文献(a)の(2)
- (49) 建設省河川局: 奈良盆地水管理計画調査報告書, 1977
- (49) 湯川清光: 基幹施設における水管理損失, 農業土木学会論文集, No.41, 1972
- (50) 建設省四国地方建設局石牛川ダム工事事務所: 石牛川ダム建設に関する基本計画資料, 1969
- (51) 参考文献(a)の(1)
- (52) 湯川清光: 水田カンガイにおける水管理損失——愛知用水管理損失の研究II, 農業土木学会論文集, No.41, 1972
- (53) 参考文献(a)の(5)
- (54) 松尾新一郎・河野伊一郎: 溜池利用による水循環について, 水資源に関するシンポジウム前刷集, 1977
- (55) 木俣勲, 他: 輪換畑における降雨と暗渠流出に関する研究(I), 農業土木学会論文集, No.35, 1971
- (56) 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
- (57) 建設省土木研究所: 都市域からの雨天時汚濁流出調査報告書, 土木研究所資料第1019号, 1975
- (58) 本間仁編: 応用水理学下II(数値解析・水文観測), 丸善, 1971
- (59) 参考文献(a)の(6)
- (60) 参考文献(a)の(2)
- (61) 建設省土木研究所水文研究室: 荒川扇状地地下貯水池構想(案), 1977(private information)
- (62) 建設局河川局: 流量年表, 1973~74
- (63) 建設省編: 流域別下水道整備総合調査——指針と解説——, 社団法人日本下水道協会, 1974
- (64) 杉木昭典: 水質汚濁——現象と対策——, 技報堂, 1974
- (65) 建設省近畿地方建設局大滝ダム工事事務所: ダム放流設備計画資料調査(その3), 1977
- (66) 建設省土木研究所水資源開発研究室: 貯水池水質の実態に関する概況調査, 土木研究所資料第1136号, 1976
- (67) 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
- (68) 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, 土木研究所資料第1125号, 1976
- (69) W. オーチャード・ヘイズ著, 小国・坂本訳: コンピュータによる線形計画法(Advanced Linear-Programming Computing Techniques), 培風館, 1973
- (70) 山口高志・吉川勝秀: 河川の水質・汚濁負荷量に関する研究(I), 1978(to be established)
- (71) 科学技術庁資源局: 利根川水系における水収支,

1964

(c) 水資源問題に関する啓蒙的な文献

- (1) 中澤式仁：水資源の話，日経文庫，1974
- (2) 黒沢俊一：水資源計画，朝倉書店
- (3) 参考文献(a)の図
- (4) 参考文献(a)の図
- (5) 参考文献(a)の図
- (6) 末石富太郎：論壇時評 I～V，用水と廃水，Vol. 19, No. 6, ～Vol. 20, No. 2, 1977～8
- (7) 華山謙・布施徹志：都市と水資源——水の政治経済——，鹿島出版会，1977
- (8) 玉井賢二，他：水と文明，日本放送出版協会，1970
- (9) 石橋多聞：飲み水の危機，東京大学出版会，1970
- (10) 佐藤武夫：水の経済学，岩波新書，1965
- (11) 島津暉之：水節約の技術的可能性 I)～(III)，水利科学 No. 82, 83, 85, 1971～2
- (12) 島津暉之：水節約の行政的可能性に関する検討 I)～(II)，水利科学，No. 104, 105, 1975
- (13) 志村博康：水資源の再配分をめぐる水利制度上の諸問題についての考察，水資源に関するシンポジウム前刷集，1977
- (14) 末石富太郎：水資源危機～瀕く都市をどう救う～，日経新書，1978
- (15) 島津康男：環境アセスメント，日本放送出版協会，1977
- (16) 茨城大学農学部霞ヶ浦研究会編：霞ヶ浦，三共科学選書 7，1977

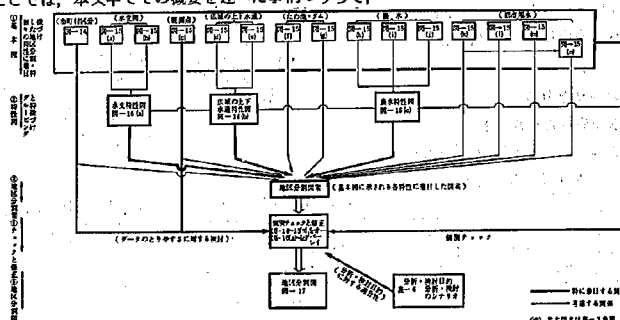
【補足】

補足の目次

1. 補足の概要	51
2. 地区分割の手順	51
3. 現状把握におけるデータの収集・変換・推定方法	52
(1) 現状における水のやりとりルート	52
① 地区における水のやりとりルート	52
② 地区間ルート	52
(2) 水のやりとり量の現状把握	52
① 地区を構成する市町村と地区別の統計データ	53
② 降水量・蒸発散量	54
③ 上水道、家庭・業務用水関係諸量	55
④ 農業関係諸量	57
⑤ 「流域」、地下(水)関係諸量	60
(3) 水収支把握結果のチェック	65
① 王寺町藤井における流量のチェック	65
② 水質のチェック	67
4. 水資源の配分・利用モデルおよび解法の詳細	68
(1) 制約条件式	68
(a) 物理的な制約条件	68
(b) 社会的な制約条件	69
(c) 分析・検討シナリオやモデル化のために必要となる制約	70
(2) 目的関数	71
(3) 計算手順のフロー・チャート	71
5. 分析・検討シナリオと入力データ・パラメータ	72
(1) 外生変数	72
(2) 入力パラメータ	74
6. シミュレーション・モデルの概要	85
(1) 自然現象サブモデル(普遍的モデル)	85
(2) 地域社会の活動サブモデル(時系列モデル)	86

1. 補足の概要

ここでは、本文中でその概要を述べた事柄のうちで、



付図-1
地区分割の手順

本研究で重点的に検討したこと、および本研究の具体的内容を知る上で必要なものについて補足しておく。その内容は大別すると次の5項目についてである。

① 地区分割の手順

ここでは、本文中で述べた各基本図をオーバー・レイしながら、全体として都合のよい地区分割を得る場合の手順を示してある。

② 現状把握におけるデータの収集・変換・推定方法

ここでは、現状の水のやりとり量を如何にして把握し、どのようにしてそのチェックを行ったかを具体的に示してある。

③ 水資源の配分・利用モデルの詳細

ここでは、本文中でその概要を述べた水資源の配分・利用モデルの詳細を、具体的な変数を用いて列挙してある。

④ 分析・検討シナリオと入力データ・パラメータ

ここでは、適正配分シミュレーションに必要なデータやパラメータの設定について、ある分析・検討シナリオの場合について例示的に示してある。

⑤ シミュレーション・モデルの詳細

ここでは、現状把握や適正水配分シミュレーションにおいて必要なデータを推定する場合の参考とするために作成したモデルについて記してある。

2. 地区分割の手順

ケース・スタディにおける地区分割の考え方と手順については、第3章(2)で述べた。ここでは、その手順をフロー・チャートを用いて明確にしておく。

付図-1は、作業手順を図示したものであるが、作業は①→⑤の順序に行った。①基本図の部分では、本文表-3に示すような個々の特性を地図上に表現し、その個々の特性に着目した場合に都合のよい地区分割・地区分類(特徴づけ)を行った。②特性図では、地表水・地下水に関する水文特性、広域の上・下水道に

関する給排水システムの特性、農業の地域外からの導水、大規模なため池・ダムからの給水状況や、河川に関する取・排水状況に関する特性を単純化して示す図を、付図-1に示すような基本図をオーバー・レイして作成した。③では、②で作成した3枚の特性図を中心にして、他の基本図に示される特性も考慮しながら、基本図に示される個々の特性を表現するのに都合がよいと考えられる地区分割案を作成した。④では、③で作成した地区分割案を、(i)基本図、(ii)データのとりやすさ(市町村別に与えられるデータ・水文観測データ)、(iii)分析・検討目的と対比することにより、分割案の修正を行って、最終的な地区分割形態を決定した。このうち、(i)~(iii)の対比は、図面をオーバー・レイしながら検討した。

3. 現状把握におけるデータの収集・変換・推定方法

ここでは、大和川流域の奈良盆地におけるケース・スタディで、カンガイ期・非カンガイ期別の自然水および用・排水を含めた水循環(水収支)を把握した際の考え方と方法を明示しておく。本文第3章で述べたように、必要なデータの全てが求められる精度・形態で入手できるわけではない。今回の調査では、すでに収集されているデータを中心にして、現状でやりうる精度で水循環をマクロ的に把握してみることにした。したがって、入手できないデータについては、新たに測定を実施することはないで、何らかの方法により推定した。

以下では、本研究が対象とするような総合的かつ多角的な水資源問題の検討を行う場合に、どのようなデータが必要であり、現状においてそのうちどれだけのデータがどの程度の精度で入手できるかの概要と、収集されていない(入手できない)データを如何にして推定したかを明示する。そのために、まず(1)現状における水のやりとりルートを提示し、次に(2)本研究で用いた個々のルートにおける水のやりとり量(収支)の把握方法について記す。

(1) 現状における水のやりとりルート

① 地区における水のやりとりルート

本文中の図-5に示したルートのうち、ぬりつぶしたマス目以外が、現状における地区(内)の水のやりとりルートであると考えてよい。

- 注1) 昭和47年6月15日~48年6月14日間を対象にし、昭和47年6月15日~9月15日をカガイ期(前期)、昭和47年9月16日~昭和48年6月14日を非カンガイ期(後期)とした。
注2) 昭和47年6月15日~48年6月14日を指す。

② 地区間ルート

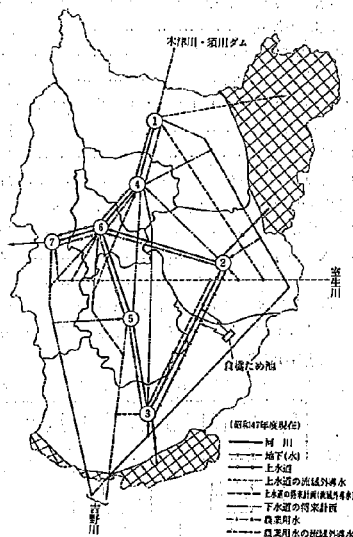
地区間の水のやりとりルートを付図-2に示す。また、これをマトリックス表示すると付図-3のようになる。

地区におけるルートを単純化して模式化すると、付図-4のようになる。

(2) 水のやりとり量の現状把握

水のやりとり量には、(i)上水のように主として統計データによるもの、(ii)降水のように主として観測データによるもの、(iii)何らかの方法により推定しなければならないものがある。また、採用した地区分割や時期分割と異なった情報インデックスのもとで収集されているデータについては、採用した地区割りや時期にわりふらなければならない。

以下では、まず採用した地区(分割)と市町村の関係を示し、次に各データ項目ごとに、本研究で用いた水のやりとり量把握のための考え方と算定方法を示す。



付図-2 地区間のやりとりルート (昭和47年度)

注3) 地区によっては、そのいくつかのルートが存在しない場合もある。

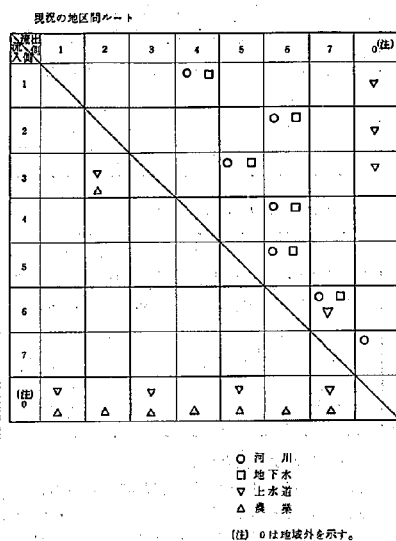
注4) 新たに調査・測定すれば必要はない。

注5) 第30回建設省技術研究会報告(1976)の「流出管理システムに関する研究」参照

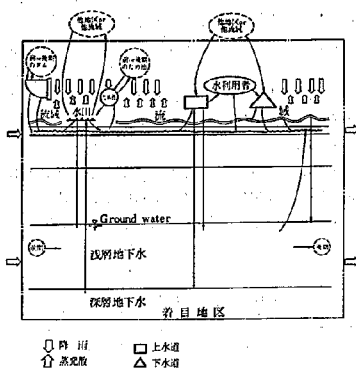
① 地区を構成する市町村と地区別統計データ

付表-1には地区番号とそれを構成する市町村名を、

付表-2には地区別の統計データを示す。



付図-3 現状の地区間ルートのマトリックス表示



付図-4 水収支概念図

付表-1 地区を構成する市町村

地区	地区を構成する市町村
1	奈良市, 生駒市, 天理市※
2	天理市※, 桜井市※
3	桜井市※, 高市郡明日香村, 高市郡高取町, 吉野郡大淀町, 御所市, 北葛城郡新庄町
4	大和郡山市
5	磯城郡田原本町, 北葛城郡広陵町, 大和高田市, 橿原市
6	生駒郡斑鳩町, 生駒郡安堵村, 磯城郡川西村, 磯城郡三宅村, 北葛城郡河合町
7	生駒市※, 生駒郡平群町, 生駒郡三郷町, 北葛城郡王寺町, 北葛城郡上牧町, 北葛城郡香芝町, 北葛城郡当麻町

(注) ※印は地区分割のさいに地区分割線で分割された市

付表-2 地区別データ

項目 地区	人口 (人)	上水道 普及率 (%)	下水道 整備率 (%)	面積 (km ²)	農地面積 (km ²)	水田面積 (km ²)	畑地面積 (km ²)	家庭水量 単位 (ℓ/人・日)	工業 出荷額 (百万円/年)	工業水量原単位 (m ³ /年・百万円)
1	210,441	97.4	18.5	154.14	22.23	20.52	1.71	275	46,458.6	33.2
2	76,085	94.2	0	113.38	23.77	21.37	2.40	217	11,259.2	42.5
3	92,843	66.6	0	176.74	34.84	30.71	4.13	163	45,972.5	73.4
4	64,280	98.0	0	42.74	14.56	13.88	0.68	247	120,717.2	59.3
5	181,824	98.2	3.1	94.40	42.39	39.35	3.04	228	58,540.3	153.7
6	47,534	94.5	0	38.23	14.06	12.97	1.09	160	12,665.1	149.9
7	107,818	95.6	0	117.59	23.53	21.57	1.96	150	25,324.3	142.9
計平均	780,825	93.2	5.7	737.22	175.38	160.37	15.01	219	320,930.7	84.3

なお、本ケース・スタディでは、採用した地区分割線により、生駒市・天理市・桜井市の3市が分割された。したがって、この3市に対する統計データを各地区にわりふらなければならない。全面積・農地面積・人口・業務活動・工業活動・上水道施設のわりふり比率 $\alpha_1 \sim \alpha_6$ の値は、以下の通りである。

・生駒市

生駒市は地区分割の結果地区1と地区7に分割される。本研究で用いた両地区に対するわりふり比の決定過程を、 α_3 を例にして示せば次のようになる。

地区	全人口 100%			
	人口集中地区 45.3%*	住居地区 40%*	その他 14.7%*	
地区1	0	20%	7%	27%
地区7	45.3%	20%	7.7%	73%

・統計データによる。

・統計データを参考に推定した。

(注) 人口集中地区、住居地区、その他に属する人口を各々地区1、7に分配する割合は人口集中地区分布図、住居地区分布図から求めた。

すなわち、人口の場合にはその居住地に著目して、まず人口集中地区、住居地区、その他に分配する。次に、人口集中地区が地区1、7に分布する割合を地図からよみとり、その比率により人口をわりふる。住居地区、その他についても同様の手順をとる。

同様に $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_4, \alpha_5$ についても商業、工業および農地の分布図から決定し、 α_6 は前述のように $\alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$ から算定され、結局付表-3のようになる。

付表-3 生駒市のわりふり比率

データ	地区	1	7
全面積 52.58 km ²		$\alpha_1 = 40\%$ (21.03km ²)	$\alpha_1 = 60\%$ (31.55km ²)
農地面積 8.60 km ²		$\alpha_2 = 40\%$ (3.44km ²)	$\alpha_2 = 60\%$ (5.16km ²)
人口 40,723人		$\alpha_3 = 27\%$ (10,995人)	$\alpha_3 = 73\%$ (29,728人)
業務活動		$\alpha_4 = 20\%$	$\alpha_4 = 80\%$
工業活動		$\alpha_5 = 90\%$	$\alpha_5 = 10\%$
上水道施設		$\alpha_6 = 49\%$	$\alpha_6 = 51\%$

注1) $\alpha_6 = \frac{\alpha_3 \cdot x_{31}^{AA} + \alpha_4 \cdot x_{41}^{AA} + \alpha_5 \cdot x_{51}^{AA}}{x_{31}^{AA} + x_{41}^{AA} + x_{51}^{AA}}$
ここに、 $x_{31}^{AA}, x_{41}^{AA}, x_{51}^{AA}$ ；それぞれAにおける水のやりとり量を示す。

・天理市、桜井市

天理市および桜井市についても同様にして算定すると、付表-4、5のような値を得る。

付表-4 天理市のわりふり比率

データ	地区	地区2	地区3
全面積 98.93 km ²	$\alpha_1 = 55\%$ (54.41 km ²)	$\alpha_1 = 45\%$ (44.52 km ²)	
農地面積 15.35 km ²	$\alpha_2 = 70\%$ (10.75 km ²)	$\alpha_2 = 30\%$ (4.60 km ²)	
人口 52,759人	$\alpha_3 = 51\%$ (26,907人)	$\alpha_3 = 49\%$ (25,852人)	
業務活動	$\alpha_4 = 10\%$	$\alpha_4 = 90\%$	
工業活動	$\alpha_5 = 20\%$	$\alpha_5 = 80\%$	
上水道施設	$\alpha_6 = 43\%$	$\alpha_6 = 57\%$	

付表-5 桜井市のわりふり比率

データ	地区	1	2
全面積	69.38 ㎢	$\alpha_1 = 15\%$ (10.41 ㎢)	$\alpha_1 = 85\%$ (58.97 ㎢)
農地面積	14.47 ㎢	$\alpha_2 = 10\%$ (1.45 ㎢)	$\alpha_2 = 90\%$ (13.02 ㎢)
人口	51,766人	$\alpha_3 = 5\%$ (2,588人)	$\alpha_3 = 95\%$ (49,178人)
業務活動		$\alpha_4 = 20\%$	$\alpha_4 = 80\%$
工業活動		$\alpha_5 = 30\%$	$\alpha_5 = 70\%$
上水道施設		$\alpha_6 = 7\%$	$\alpha_6 = 93\%$

② 降水量、蒸発散量

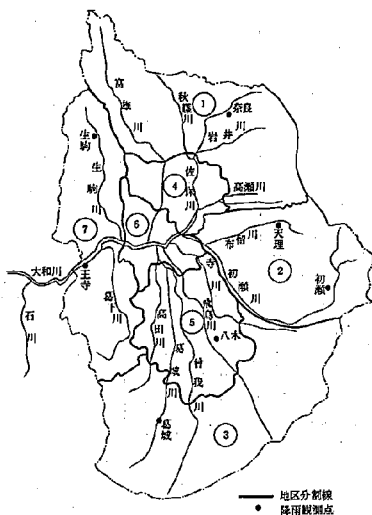
付図-5に奈良盆地内の雨量観測所を、付表-6に各観測所の支配率を示した。本ケース・スタディでは、分析対象時期を昭和47年6月15日～48年6月14日の1年間とし、奈良盆地のカンガイ期間を6月15日～9月15日とした。それに従って、月雨量のうち6月および9月は、記録された値の $\frac{1}{2}$ (15日分)をカンガイ期、非カンガイ期にふり分けて、各期の雨量を算出した (付表-7)。

付図-5の観測所位置と付表-6の支配率を考慮して、各観測所記録が各地区に及ぼす「寄与率」を付表-8のように設定し、各地区で用いる雨量を決定した (付表-8)。

・蒸発散量

付図-6は大正7年～昭和40年の47年間 (昭和16年は欠測)の計器測定による奈良県平均蒸発散量 (EP)である。一方、水収支計算により求められた蒸発散量は $E = 680 \text{ mm/年}$ となっており、上記計器によるEPとの比は $E/EP = 0.63$ である。ここでは流域の年間蒸発散量としてEを採用するが、このように降雨の多少にかかわらず年間蒸発散量一定という考え方は、

注2) 蒸発散量Eを実測の降雨Rおよび流量Qを用いて、 $E = R - Q$ として算定する。



付図-5 降雨観測所

付表-6 各観測所の支配率

観測所	生駒	奈良	王寺	天理	八木	初瀬	葛城
支配率	0.121	0.112	0.094	0.176	0.226	0.123	0.148

付表-7 降水記録

観測所	47年 6月 下旬	7月	8月	9月 上旬	9月 下旬	10月	11月	12月	48年 1月	2月	3月	4月	5月	6月 上旬	カンガイ 期 計	非カンガイ 期 計	総計
	カンガイ期						非カンガイ期										
生駒	116	391	158	108	108	95	111	58	141	69	28	253	160	48	773	1,071	1,844
奈良	93	343	115	90	90	58	94	43	124	63	14	220	102	45	641	853	1,494
王寺	96	266	69	78	78	69	100	40	113	58	11	187	112	40	509	808	1,317
天理	84	279	89	64	64	57	71	51	112	64	30	200	96	40	516	785	1,301
八木	88	236	126	68	68	49	82	44	83	65	18	209	108	35	518	761	1,279
初瀬	89	305	137	97	97	60	85	67	84	69	25	226	114	40	628	867	1,495
葛城	90	257	210	119	119	67	131	65	99	70	32	247	125	51	676	1,006	1,682

注1) 無効水量の割合

建設省河川局・土木研究所による「利水計画における
流況把握の研究」⁵⁾(昭和44年)でも支持されている。

本調査では、 $E = 680 \text{ mm/年}$ をさらにカンガイ期
(6月15日～9月15日)と非カンガイ期(9月15日～
6月14日)にふり分ける必要があり、この比率は付図
-6の計器蒸発量の分布を用いて定めた。

カンガイ期 $E_1 = 680 \times 40\% = 270 \text{ mm}$

非カンガイ期 $E_2 = 680 \times 60\% = 410 \text{ mm}$

この値を地区1～7に適用すれば、各地区の蒸発散
量は、 E_1 、 E_2 に地区面積を掛けて付表-9のように求
まる。

なお、前述の降雨とここで述べた蒸発散量の地区別
総量は、「流域」要素と「農業」要素の和であり、「流
域」要素に対する数値は、これらの地区別総量から後述
する「農業」要素に対する値を差し引いた値として算
定される。

③ 上水道・家庭・業務用水関係諸量

- 基本的には水道統計などのデータによった。
- データがないもの(いくつかの $x_{54}^{\text{生駒}}$ 、 $x_{55}^{\text{奈良}}$)
については、付表-10に示す原単位を用いて算
定した。
- 上水の流出入水量の差を $x_{56}^{\text{生駒}}$ とするが、差引き
として足りない場合は無収率を20%として、 $x_{56}^{\text{生駒}}$
と $x_{57}^{\text{奈良}}$ を若干調整した。
- 対象地域外にまたがる市町村では、対象地域外
が使用する家庭用水・業務用水を $g_{58}^{\text{生駒}}$ として取
り扱った。
- 上水道に依らない家庭用水・業務用水は、全て
地下水に依るとした。すなわち、次式により定
めた。

(mm)

付表-8 各観測所の各地区に対する「寄与率」と雨量

観測所 地区	生駒	奈良	王寺	天理	八木	初瀬	葛城	カンガイ 期雨量	非カンガイ 期雨量
1	0	10	0	0	0	0	0	641 mm	853 mm
2	0	0	0	0.5	0	0.5	0	572	826
3	0	0	0	0	0.3	0.3	0.4	614	891
4	0	0.5	0	0.5	0	0	0	579	819
5	0	0	0	0	1.0	0	0	518	761
6	0	0	0.4	0.3	0.3	0	0	514	787
7	0.4	0	0.6	0	0	0	0	615	913

付表-9 各地区の蒸発散量

(×10³ m³)

別称	地区	1	2	3	4	5	6	7	計
カンガイ期		41,618	30,613	47,720	11,540	25,488	10,322	31,749	199,050
非カンガイ期		63,197	45,485	72,463	17,523	38,704	15,674	48,212	302,230
計		104,815	77,099	120,183	29,063	64,192	25,996	79,961	501,310

付表-10 家庭・業務用水原単位

原単位 地区	家庭用水 ℓ/(人・日)	業務用水(注) ℓ/(人・日)
奈良市	275	27
人口5万人以上	247	22
人口5万人以下	165	22

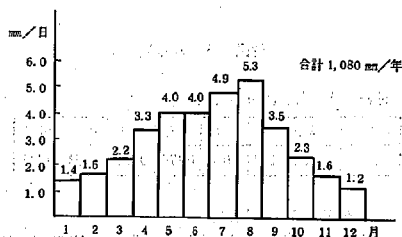
(注) 全人口に対する値として算定した。

付表-11 工業地区名とそれを構成する市町村
(工業出荷額比率含む)

工業地区	構成市町村と工業出荷額比率(%)
中和東部	天理市(31.2) 桜井市(68.8)
奈良・郡山	奈良市(25.0) 大和郡山市(71.9) 生駒市(2.2) 平群町(0.9)
中和	大和高田市(41.1)斑鳩町(8.6) 王寺町(8.8)広陵町(17.4)香芝町(18.6) 河合町(2.3)上牧町(1.0)三郷町(2.2)
中和・中部	橿原市(57.2)田原町(9.4)高取町(7.0) 大淀市(9.0)安堵村(10.0)川西村(3.0) 三宅村(3.6)明日香村(0.8)下市町(考慮しない)
南和	御所市(45.9)新庄町(22.3)当麻町(18.2) 五条市(13.6)

$$\frac{x_{11}'}{x_{22}'} = \text{原単位} \times \text{人口} \times (1 - \text{上水道普及率})$$

- 工業用水の取水量は、「工業統計表」(用地・用



付図-6 計器蒸発量

水涵)に工業地区別にまとめられており、取水源内訳として表流水・地下水・回収水・その他がある。これを各工業地区内にある市町村に振り分けるときは、工業出荷額の比率によった。その他は回収水に含めた。付表-11に、工業地区名とそれを構成する市町村の工業出荷額比率を示した。

- 家庭蒸発散量

$$f_{11} = (x_{11}'' + x_{22}'' + x_{33}'') \times \text{家庭蒸発率}$$

- 家庭排水量

$$x_{11}'' = (x_{11}'' + x_{22}'' + x_{33}'') \times \text{下水道整備率}$$

$$x_{11}' = (x_{11}'' + x_{22}'' + x_{33}'') \times (1 - \text{下水道}$$

整備率)

- 業務蒸発散量, 排水量
家庭に準ずる。
- 工業蒸発散量, 排水量
家庭に準ずる。

以上のようにして年間の総量を算定し, 「上水道」, 「家庭」, 「業務」, 「工業」の給水形態や使用形態は一年間を通じてあまり変化しないと考え, カンガイ期, 非カンガイ期に対するその値は年間量を各期の長さの比でふり分けた。⁽⁴⁷⁾

④ 農業関係諸量

• 減水深

付図-7に奈良盆地の減水深分布図を示す。この図より, 下流に行くに従って減水深が小さくなっていく

用水量算定のための減水深としては17mm/日を採用した。

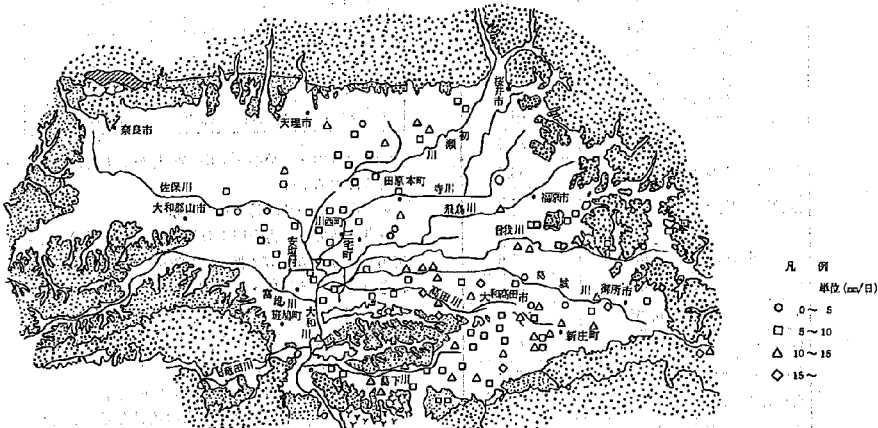
なお, この減水深は水田に対してのみ適用される。

• 農水の地下水依存量

参考資料⁽⁴⁷⁾によれば, 昭和50年度における奈良盆地全体としての農水の地下水取水量は10,964千 m^3 である。この値を昭和47年度にも用いることにすれば, 全水田面積が160.37 km^2 であり, カンガイ期間90日に対して0.76 mm/日となる。地下水依存割合はどの地区も等しいと仮定して, この数字を各地区にあてはめた。

• 有効雨量

湯川は, 愛知用水管理損失の一連の研究の中で, カンガイ期間の有効雨量として, 単純に5mm以上の降雨日数に日減水深(水路損失を含めない)を乗じた量を用いることを提案している。^{(49), (52)}



付図-7 減水深分布図⁽⁴⁷⁾

傾向があることがわかる。これは, 下流の河川に囲まれた地域の排水性の悪さと関係していると考えられる。「大和平野カンガイ排水実態調査報」(昭和23年)では, 地区別に水田内で減水深調査を行っている。これらの結果にもとづいて, 現在, 大和平野の減水深として10.5 mm/日を採用されている。⁽⁴⁸⁾しかしながら, 農業用水量の算定に用いる減水深としては, その他に水路などの損失率を見込まなければならぬ。その量を全体の40%とすれば, 水路損失は約6.5 mm/日となり,

注1) 本文図-3, 参考文献20 参照

そこで, 奈良盆地のカンガイ期間(6月15日~9月15日)の5mm以上の降雨日数を, 昭和47年6月15日~9月15日の王寺・葛城のデータにより算定してみると, 27日となる。この値を用いれば, カンガイ期間の有効雨量は

$$10.5 \text{ mm} \times 27 \text{ 日} = 283.5 \text{ mm}$$

となる。

• 農水のため池利用

奈良盆地では, 1,100個・総貯水量3,900万 m^3 のた

め池が存在する。これらのため池は盆地内にほぼ均一に分布している(付表-12、本文図-15H)。

ため池の水はカンガイ用水として利用されている。

付表-12 市町村別ため池容量と貯水面積

市町村名	ため池容量千 m^3	満水位面積ha
奈良市	10,343	397.8
生駒市	301	11.6
生駒郡平群町	856 (注)	32.9
〃 三郷町	195 (注)	7.5
〃 斑鳩町	811 (注)	31.2
〃 安堵村	466 (注)	17.9
大和郡山市	4,037	158
北葛城郡王寺町	495	19
〃 河合町	607	23.3
〃 上牧村	197	7.6
〃 香芝町	2,178	83.8
〃 広陵町	1,153	44.3
〃 当麻町	1,044	40.2
〃 額田町	813	31.3
大和高田市	1,392	53.5
磯城郡川西村	255 (注)	9.8
〃 三宅村	161 (注)	6.2
〃 田原本町	873 (注)	33.6
橿原市	2,066	79.5
天理市	5,910	227.3
桜井市	2,146	82.5
高市郡明日香村	550	21.2
高市郡高取町	320	12.3
御所市	1,945	74.8
吉野郡大淀町		
計	39,134	1,505.1

昭和51年度「大和川水系給排水施設調査作業報告書」
近畿地建 大和工事事務局
(注) は推定値

そこで、今回は上述の貯水容量とその間にため池に降った降水量が、カンガイ期の農業用水として使われると仮定した。そして、カンガイ期から非カンガイ期に移る時点でため池は満水状態にあり、その量は河川からの取水によりまかなわれると仮定した。また、非カ

ンガイ期のため池への降水量は、上述の仮定のもとでは、最終的には河川に流出することになるが、ここでは流域を介して流出するものとして取り扱った。上述の方針により求めたカンガイ期のため池からの取水量、およびため池諸元を付表-13に示した。ただし、総貯水容量3900万 m^3 に対して総貯水面積は1500haであり、平均水深は約2.6mとなる。同表中の各地区の貯水面積は貯水容量を2.6mで除した値である。

付表-13 地区別ため池容量、貯水面積および取水率

地区	貯水容量	貯水面積	降雨補給	カンガイ期取水率
1	11,054千 m^3	4252 ha	2,726千 m^3	13,780千 m^3
2	6,821	262.3	1,500	8,321
3	4,272	164.3	1,009	5,281
4	4,057	156.0	903	4,960
5	5,484	210.9	1,092	6,576
6	2,300	88.5	455	2,755
7	5,146	197.9	1,217	6,363
計	39,134	1,505.1	8,902	48,036

以上の水田・ため池・河川の関係を示すと付図-8のようになる。

● 農水の対象地域外からの導水

奈良盆地では、吉野川より農水の分水を受けており、昭和47年度はカンガイ期に27,236千 m^3 を受取った。これを「淀川・大和川・紀の川水系利水現況図」(昭和45年度作製)の用水路設備状況から各市町村にふりわけた。次に、その値を基にして地区1~7の量を求めた。その結果を付表-14に示す。

● 農水の対象地域内における地区間分水

桜井市内の倉橋ため池は河川の流況を調節しており、桜井市内の水田(1301ha)をはじめとする下流の農地の合計2035haは、2.4 m^3/sec の水をカンガイ期に受益している。

一方、本研究で行った地区分割では、桜井市が地区②、地区③にまたがっている。したがって、倉橋ため池の存在する地区③の農地は、この水を自地区の河川から取水していると考えてさしつかえないが、地区②については、地区③の河川水を使っていることになる。

そこで、この水を農水の地区間分水量として取り扱い、その量は水田面積に比例しているとして、以下のようにして算定した。

注1) これらの仮定は実測値が入手できなかったために設定したが、今後検討を要す。

ここに

 Q_1 : 地区③から地区②への農水の地区間分水量

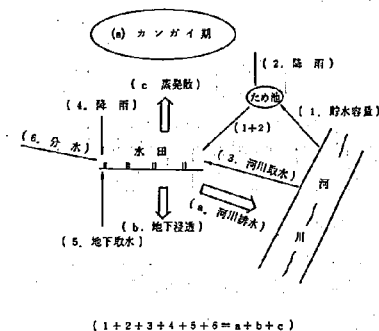
 Q_2 : 地区②およびその下流地区で利用する量であり、これは河川水として取水されているので、河川流量として取り扱う。

・農水の河川依存量

農水の河川取水量は、その量が明確でないために、日減水深(17mm/日)で示される要求量から分水量、有効雨量、地下(水)およびため池からの取水量を差し引いた残りとして算定した。

・農地からの蒸発散量

金子は、カンガイ期の水田からの蒸発散量を、地方別に付表-15のように示している。¹⁾



付表-15 地方別水田蒸発散量標準値

(旬別平均値, mm/日)¹⁾

地方	旬	6			7			8			9			10		
		上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下
北海道	3	4	4	4	4	5	5	6	4	4						
東北	4	4	4	4	4	5	5	6	6	5	4	4				
関東	3	4	4	4	4	4	6	6	6	6	5	5	5			
北東	4	4	4	4	4	4	6	6	6	6	6					
近畿	4	4	4	4	4	4	5	6	7	6						
山陰					5	5	5	6	6	5	5	4	4			
山陽					4	5	7	7	7	6	5	4	4			
四国	4	5	6	6	6	6	6	6	6	5	5	5	5	5		
九州	4	6	6	6	6	7	6	5	5	5	5	5	5	5		
全国平均	4	4	4	4	4	5	6	6	6	5	5	5	5	5	5	

付図-8 水田とため池・河川の関係

付表-14 各地区の農水の分水受け取り量

地区	分水量 千 m^3
1	287
2	4707
3	6903
4	2884
5	8396
6	1488
7	2571
計	27236

$$(1) Q = 2.4 \text{ m}^3/\text{m}^2 \times 90 \text{ 日} \times 24 \times 60^2 = 18,662.4 \times 10^3 \text{ m}^3$$

$$(2) Q_1 = 18,662.4 \times 10^3 \times \frac{1.301}{2.035} \times 0.7 = 8,352 \times 10^3 \text{ m}^3$$

$$(3) Q_2 = Q - Q_1 = 10,310.4 \times 10^3 \text{ m}^3$$

注1) 桜井市内の農地のうち、地区③に存在する割合

カンガイ期における奈良盆地の水田からの蒸発散量を、この表をもとにして6mm/日と考える。この値は、流域平均値として求められた、前記②の蒸発散量で示したカンガイ期の3mm/日(270mm÷90日)の2倍である。

また、非カンガイ期の水田からの蒸発散量は、水田以外と差異はないと仮定する。すなわち、非カンガイ期は、水田を含めた流域全体から等しく蒸発散すると仮定する。前記②の蒸発散量で示した非カンガイ期の総蒸発散量410mmを用いれば、1.49mm/日(410mm÷275日)である。このように、カンガイ期の水田からの蒸発散量のみが大きく、非カンガイ期の水田からの蒸発散量は、水田以外からのものと同程度であることは、付表-16からも類推することができる。同表は、蒸発計蒸発量と広域蒸発散量との比率を月別に示したものである。³⁵⁾

付表-16 蒸発計蒸発量と広域蒸発散量との比較^{注1)}

月	水田	水田以外
1	0.4~0.5	0.4~0.5
2	0.4~0.5	0.4~0.5
3	0.5~0.6	0.5~0.6
4	0.1	0.6
5	1.0	0.6~0.7
6	1.0~1.1	0.7
7	1.2~1.3	0.8
8	1.2~1.3	0.8
9	1.3	0.8
10	0.8	0.7~0.8
11	0.7	0.6~0.7
12	0.5~0.6	0.5~0.6

・カンガイ期の農水の排水

前述のように、カンガイ期には水田から6mm/日の蒸発散がある。したがって、減水深17mm/日のうち、 $17-6=11$ mm/日^{注1)}が地下に浸透する量であるとみることができる。また、河川への排水量は、この間の農業用水に対して無効である降水量、すなわち降雨量-有効雨量であると仮定する。^{注2)}

・非カンガイ期の農業の水源

奈良盆地には、水田に比較して面積は小さいけれども畑地があり、非カンガイ期における畑地のカンガイ用水も考慮しなければならない。今回は、畑地のカンガイ用水は全て降雨によるものと仮定した。したがって、非カンガイ期には降水のみが農業に入ってくることになる。

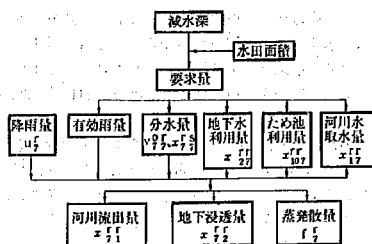
・非カンガイ期の農水の排水

非カンガイ期に農地に降った雨の流出は、後述の流域要素に降った雨と同様に取り扱う。すなわち、総降水量のある割合が蒸発散し、残りの量から地下浸透量を差し引いた残りが河川に流出するものとする。^{注3)}

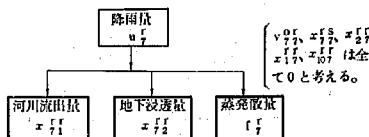
・農水関連諸量のまとめ

以上で述べた算定手順を示せば、次のようになる。

(1) カンガイ期



(2) 非カンガイ期



(3) ため池に関する諸量

$$x(t_1)_{10} = \text{降雨量} \times \text{ため池面積} \quad \text{注4)}$$

$$x(t_2)_{10} = \text{貯水容量}$$

$$w(t_1)_{10} = h(t)_{10} = \text{貯水容量} \quad (t = t_1, t_2)$$

$$h(t_1)_{10} = w(t_2)_{10} = \text{貯水容量}$$

そのようにして把握した農水関連諸量を付表-17に示す。

④ 「流域」, 地下(水)関係

・「流域」要素の降水・蒸発散量

地区全体の総降水量、蒸発散量については、②降水量、蒸発散量で述べた。また、「農業」要素に対するこれらの算定方法は④で述べた。したがって、「流域」要素に対するこれらの値は、地区総量から「農業」要素の値を差し引けばよい。

・地下浸透量

奈良県が行った調査では、昭和43年~46年のデータをもとにして、河川流出量を流出ハイドログラフにより直接地表流出量と基底流出量に分離することなどを行い、地下水資源の評価を行っている。

その調査によると、降雨などの地下に浸透した水量は、その月の量も含めて約3ヶ月間でほぼ全量が河川に基底流出として流出するとされている。

付表-18は、昭和43~46年の各月の降雨量とカンガイ用の導入水量、およびそれらの全量のうち何%が地

注1) 本研究では、農地における(蒸発散量+地下浸透量)と水路損失の和を減水深としており、水路損失も地下浸透であると考えれば、このような結果となる。

注2) 一度地下に浸透した水が地表水として河川に排水されることもありうるが、今回はこのような取り扱いをした。下流の水収支に対しては、どちらの取り扱いを行っても問題はない。

注3) 参考文献の取り扱いに準ずる。

注4) ため池への降水量を便宜上このように取り扱った(ため池の集水面積を無視)。 u_{10} を水のやりとりルートとして設定すればこのような処理は必要がなくなる。

付表-17 農水関連諸量の現状把握結果

上段はカンガイ期 下段は非カンガイ期 (千 m^3)

地区	水田面積 ha	降雨量	カンガイ期 要求水量	水田への 有効雨量	V_{17}	x_{17}^1	x_{17}^2	x_{17}^3	x_{17}^4	x_{17}^5	f_1	x_{17}^{10}	w_5	h_5
1	2,052	13,152 17,504	31,396 —	5,817 —	287 0	—	10,108 0	1,404 0	13,780 0	7,336 2,094	20,315 7,002	11,080 8,408	2,725 0	11,054 11,054
2	2,137	12,224 17,652	32,696 —	606 —	4,707 8,352	—	9,068 0	1,462 0	8321 1,835	11,438 7,061	21,156 8,755	11,540 6,821	1,500 0	6,821 6,821
3	3,071	18,856 27,363	46,986 —	8,706 —	6,903 8,352	—	30,518 0	3,930 0	5,281 0	10,150 3,836	30,403 10,945	16,893 12,593	1,009 0	4,272 4,272
4	1,388	8,037 11,368	21,236 —	3,835 —	2,884 0	—	7,681 0	1,776 0	4,960 0	4,102 1,140	13,741 4,547	7,495 5,681	903 0	4,057 4,057
5	3,935	20,383 29,945	60,206 —	3,676 —	8,395 0	—	36,523 0	5,035 0	6,576 0	16,707 1,843	38,957 11,978	21,249 16,124	1,092 0	5,484 5,484
6	1,297	6,667 10,207	19,844 —	3,677 —	1,488 0	—	10,265 0	1,659 0	2,755 0	2,990 810	12,840 4,083	7,004 5,314	455 0	2,300 2,300
7	2,157	13,266 19,693	33,002 —	6,115 —	2,571 0	—	15,193 0	2,760 0	6,353 0	7,151 2,978	21,354 7,877	11,648 8,838	1,217 0	5,146 5,146

付表-18 降雨量と地下浸透量

年度	月	降雨量 $\times 10^6 m^3$	導水量 $\times 10^6 m^3$	地下浸透率 %	地下浸透率 の平均 %
カンガイ期	43	6 67.8 7 246.7 8 159.1 9 128.8	2.1 2.1 2.1 2.1	12 (12.4) 12.4 (12.5) 11 (11.1) 36 (36.5)	17.9 (18.1)
	44	6 183.5 7 171.2 8 55.5 9 30.9	1.8 1.8 1.8 1.8	12 (12.1) 14.2 (14.3) 15 (15.5) 27 (28.5)	17.1 (17.6)
	45	6 171.1 7 699 8 798 9 90.0	2.2 2.2 2.2 2.2	19 (19.2) 26 (26.8) 15.5 (15.9) 30 (30.1)	22.6 (23.0)
	43	10 75.3 11 26.9 12 75.3	—	28 77 39	42
	44	1 57.6 2 57.6 3 79.9 4 74.0 5 62.2	—	41 59 39 28 25	
	45	10 28.2 11 37.3 12 28.2	—	44 44 32	
	46	1 27.5 2 36.0 3 39.3 4 129.7 5 79.9	—	37 37 38 24 20	
	47	10 60.9 11 69.4 12 28.8	—	46 38 67	44.6
	48	1 24.0 2 34.3 3 61.5 4 74.4 5 110.4	—	58 50 27 39 32	
	49	—	—	—	
	50	—	—	—	
	51	—	—	—	

(注) 43年度のカンガイ期の導水総量 $8.4 \times 10^6 m^3$ を取知として各月に振分けたものであり、44,45年度についても同様の取り扱いをした。

下に浸透するかを示したものである。ただし、 α 表示した数字のうち () 内は降雨量のみに対する割合 (%) である。

この表から、カンガイ期には降雨総量の約20%が地下に浸透しており、非カンガイ期には約40%が浸透していることがわかる。

・降雨の河川への直接地表流出量

河川へ直接流出する地表流出量は、降雨量から蒸発量、地下浸透量、「流域」水の下水道流入量を差し引いた量として算定した。

・地下水の河川還元量 (基底流出量)

前述の地下浸透量でも触れたように、奈良県の調査では、奈良盆地全体を対象にして河川流出量を直接地表流出と基底流出に分離した。付表-19は昭和43年～46年にわたる月別の基底流出量であり、盆地全体では、カンガイ期に流域面積655 km^2 について0.97mm/日の基底流出がある。これらの値は、王寺町藤井の地点を対象にして解析されたものであるが、各地区に対してこの数値が平均的に配分されるものと仮定した。

付表-19 月別基底流出量 ($\times 10^6 m^3$)

月	43~44	44~45	45~46	3ヶ年平均	3ヶ年平均計	流域面積
6	68	17.3	21.3	15.1	カンガイ期 76.1	0.97 mm/日
7	30.9	29.6	28.8	29.8		
8	17.7	9.4	16.0	14.4		
9	22.2	7.4	20.9	16.8		
10	42.4	11.4	26.6	26.8	非カンガイ期 174.0	1.08 mm/日
11	22.8	12.9	25.8	20.5		
12	29.4	13.9	22.1	21.8		
1	21.4	10.3	17.0	16.2		
2	31.6	10.8	15.3	19.2		
3	30.1	15.5	17.1	20.9		
4	27.9	23.6	28.0	25.8		
5	18.7	22.7	27.1	22.8		

・地下水貯留量

浸透した地下水は、非常に長時間を経て流出するわけであるが、奈良県の調査では、月単位の解析を行い、各月ごとの地下浸透水量および基底流出量を算出している。付表-20は、流域全体のカンガイ期から非カンガイ期へと移行する時点の地下水資源を取り出したもの

のほとんどが深層地下水を利用しており、盆地全体ではその利用量は1日当たり約218千 m^3 であり、1県当りに換算すれば0.333千 m^3 /日となる。

深層地下水と浅層地下水の間での水のやりとりについては、今後の調査をまたなければならない部分が多い。しかし、取り扱い上は、浅層地下水の貯留量と深

付表-20 カンガイ期から非カンガイ期へと移行する時点の地下水資源量

9月→10月

($\times 10^6 \text{ m}^3$)

	昭和43年	昭和44年	昭和45年	3ヶ年平均
9月に生じた浸透水総量	45.28	8.34	26.51	26.71
9月に浸透した水量のうち月内の流出量	-12.49	-4.20	-16.94	-11.21
8月に生じた浸透水の内9月に持越す量	9.65	2.99	3.52	5.39
8月に生じ、9月に持越された量のうち9月に流出	-8.58	-2.66	-3.13	-4.79
計9月末日に残る量	33.86	4.47	9.96	16.10

付表-21 非カンガイ期からカンガイ期へと移行する時点の地下水資源量

5月→6月

($\times 10^6 \text{ m}^3$)

	昭和44年	昭和45年	昭和46年	3ヶ年平均
5月に生じた浸透水総量	15.63	15.97	35.65	22.42
5月に浸透した水量のうち月内の流出量	-9.59	-10.66	-16.59	-12.28
4月に生じた浸透水の内5月に持越す量	8.01	12.62	10.73	10.45
4月に生じ、5月に持越された量のうち5月に流出	-7.19	-11.32	-9.62	-9.38
計5月末日に残る量	6.86	6.61	20.17	11.21

(注) 3月のはキャンセルして0となる。

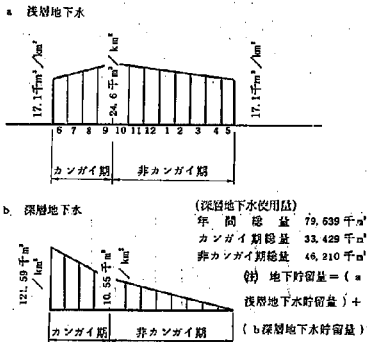
である。⁵⁶⁾同じく付表-21は、非カンガイ期からカンガイ期へと移行する時点のものである。この値が流域全体に均等に分布していると仮定すれば、各時点で、この調査で用いている流域面積655 km^2 で割った1県当たり24.6千 m^3 、17.1千 m^3 の地下水が貯留されていることになる。^{注1)}ただし、この数値は浅層地下水に対する値である。

深層地下水については、奈良盆地の各地下水利用者

注1) 参考文献03とは多少矛盾する仮定である。

層地下水の変化量がわかれば問題はない。そこで、本研究においては、付図-9に示すような量を地下水貯留として取り扱った。そして、深層地下水の変化量はくみあげ量で近似し、浅層と深層地下水のやりとりは無視した。^{注2)}

注2) 浅層から深層への水のやりとりを考えれば、地下貯留量はこの場合より少なくなる。



付図 - 9 地下水貯留量の取り扱い方

・ダム等貯水池の持ち越し水量

奈良盆地内のダムあるいはダムと同様の機能を持ったため池を、付表 - 22 に諸元と共に示す。同表の示すように、南畑ダム以外は全てカンガイ用ダムである。

(1) 南畑ダム (上水道用のダム)

(a) カンガイ期

$$\begin{aligned} \text{流入量} &= \text{流域面積} \times (\text{降雨量} - \text{蒸発散量}) \\ &= 1.18 \text{ km}^2 \times (615 \text{ mm} - 270 \text{ mm}) \\ &= 407 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{利用量} &= 60^\circ \times 24 \times 90 \text{ 日} \times 0.0116 \frac{\text{m}^3}{\text{sec}} \\ &= 90.2 \text{ mm} \quad (\text{取水量}) \end{aligned}$$

付表 - 22 奈良盆地内のダムの諸元 (註)

ダム名	属する区	有効貯水容量	流域面積	摘要
高山ため池	1	530×10 ³ m ³	2.3 km ²	カンガイ用 1.0 m ³ /sec
白川ため池	1	862 "	間接 4.5 "	カンガイ用
倉橋ため池	3	1,714 × "	1.2 "	カンガイ用 2.4 m ³ /sec
南畑ダム	7	126.6 × "	1.18 "	上水道三郷町 常用水道 0.0116 m ³ /sec

(註) 対象地域内のもの

(b) 非カンガイ期

$$\text{流入量} = 1.18 \times (913 - 410) = 593.5 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} \text{利用量} &= 60^\circ \times 24 \times 275 \text{ 日} \times 0.0116 \frac{\text{m}^3}{\text{sec}} \\ &= 275.6 \text{ mm} \quad (\text{取水量}) \end{aligned}$$

上式はダムの流入・放流量を概算的に算定したものであるが、カンガイ期・非カンガイ期共に利用量をはるかに上まわる流入量がある。そこで、今回は持ち越し量に関する資料を入手できなかったために、カンガイ期から非カンガイ期あるいは非カンガイ期からカンガイ期へと移行する時点では、有効貯水量が確保されていると仮定した。

(2) 倉橋ため池

(a) カンガイ期

$$\begin{aligned} \text{流入量} &= 11.0 \frac{\text{km}^2}{\text{日}} \times (614 \text{ mm} - 270 \text{ mm}) \\ &= 3784 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{利用量} &= 60^\circ \times 24 \times 90 \text{ 日} \times 2.4 \frac{\text{m}^3}{\text{sec}} \\ &= 18662 \text{ mm} \end{aligned}$$

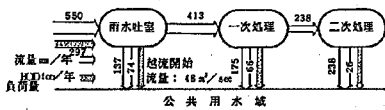
このように、水利権量 $2.4 \text{ m}^3/\text{sec}$ をカンガイ期間に常時取水しているとすれば到底要求を満たすことはできない。しかし、実際の取水総量は、上記数値に比べてかなり小さいものと思われるが、その値は明確ではない。したがって、ここでは非カンガイ期へ移行するときは、カンガイ期にできるだけ多くの水を供給するために、持ち越し量は 0 であると仮定した。他の高山・白川の両ため池についても同様とする。

(b) 非カンガイ期

カンガイ用のみに使われているので、非カンガイ期には、他の利用者はない。したがって、非カンガイ期からカンガイ期へと移行するときは有効貯水容量の全量がためられた状態であると仮定する。他のため池についても同様とする。

・下水道への流入水および下水処理水の排出

昭和47年度において公共下水道が運用されたのは、奈良市および橿原市のみであり、処理能力は各々 $21,500 \text{ m}^3/\text{日}$ ($7847.5 \text{ m}^3/\text{年}$)、 $6000 \text{ m}^3/\text{日}$ ($2190 \text{ m}^3/\text{年}$) である。合流式下水道の場合には、雨水が下水道に多量に流入し、その全量を処理するわけではない。合流式下水道への汚水および雨水の流入および排水状況の概要を付図 - 10 に示す。⁵⁷⁾



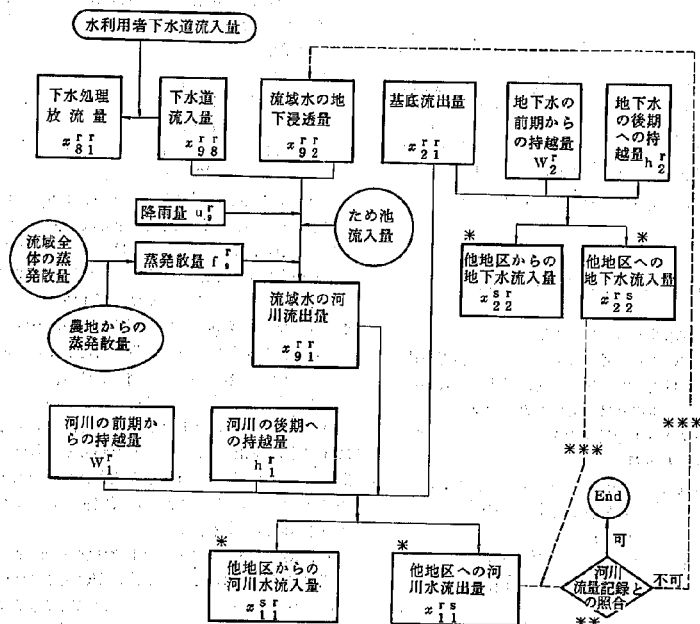
付図 - 10 合流式下水道への汚水及び雨水の流入および排水状況の概要

家庭・業務・工業からの排水の下水道流入量については、③で述べたとおりである。流域水の下水道への流入量は、下水道の集水面積に降水量を乗じた値とする。

下水道からの放流量は、流入水に等しいと仮定するが、下水道を経由した水の汚濁負荷削減量については、付図-10のように取り扱う必要がある。今回は、実測データが入手できなかったために、同図の比率を用いて汚濁負荷削減量を算定した。

・流域関連諸量のまとめ

以上で流域関連諸量を個別に扱ったが、それらの収支を考慮しながら、全体を把握するときの決定手順を付図-11に示す。図中に破線で示したフィード・バック・ループは、各地区ごとに適用される。なお、盆地全体としての入出量の検討は、本研究では、後述するように王寺町藤井における流量により行った。また、付表-23にはそのようにして把握された結果を示す。



付図-11 流域関連諸量の決定手順

注1) 下水道からの漏水や地下水の下水道への流入はないと仮定する。もしその量が無視できない場合には、 x_{88}^r を水のやりとり量として与える必要がある。

(注)

* これらは、水のやりとりルートが存在する地区間について、上流地区から下流地区へと収支を合せながら逐次計算していく。

* チェック・ポイントにおいて、実測されている水量、水質と合致しなければ、適切な項目にフィード・バックさせて修正を行う。その際の考え方については本文第5章で述べた。

* 地下水の地区間移動量と河川水の地区間移動量(直接地表流出量)を比べることを収支把握の一つのチェック材料とした。一例として岩木川右岸地域の1962年7月の10日間の水収支結果では、地下水の地区間移動量は全流出量の約20%である。また、荒川の扇状地での一調査資料によれば約5%である⁶¹⁾。前項までの収支把握方法では地下水移動量が大きく算出されるので、ここでは地下水の河川還元量と地区間移動量の割合がカンガイ期では9:1、非カンガイ期には95:5になると仮定して修正を行った(付図-14のフィード・バック参照)。その結果、地表水の流出量と地下水の流出量の和に対する地下水の地区間移動量は、上流地区では5%前後、中流部あるいは下流部地区では1~2%となった。ただし地区6は前述の地下水位図からわかるように、上流地区から流動してきた地下水は地区6付近で大半が大和川に還元しているとみることができると、下流側の地区7への地下水移動は0とし、上流側から流動してきた地下水は地区6で全ての量が河川に還元していると考えた。また、この調整の結果として、流域全体の地下水還元量(基底流出量)は、カンガイ期には流域面積当たり3.46mm/日、非カンガイ期には、1.35mm/日となった。

付表-23 地区別流域水関連諸量

上段はカンガイ期
下段は非カンガイ期 (千mm)

地区	流域面積	x_{11}^1	x_{11}^2	x_{11}^3	流域全体の蒸発散量	f_0	x_{11}^1	x_{11}^2	w_2	h_2	w_1	h_1	x_{11}^1	x_{11}^2	x_{11}^3	x_{11}^4	参考
1	154.14	3,352 4,461	4,389 7,571	17,130 45,591	41,618 63,197	30,538 54,789	31,905 9,137	30,083 63,315	21,378 14,666	14,666 2,636	1,442 0	1,442 0	4 4,343 3,332	—	—	4 67,296 93,567	11,080 8,408
2	113.38	0	0	10,526 30,400	30,613 46,486	19,073 37,730	21,531 7,870	31,253 43,764	15,725 10,788	10,788 1,939	0	0	6 3,472 2,252	—	—	6 48,433 52,769	11,540 8,756
3	176.74	0	0	17,932 52,045	47,720 72,463	31,137 59,680	39,534 18,188	45,355 63,092	24,512 16,817	16,817 3,022	1,714 0	1,714 0	5 5,038 3,583	—	—	5 63,455 92,728	16,583 12,583
4	42.74	0	0	3,342 9,454	11,540 17,523	4,045 11,842	8,420 2,340	16,362 10,148	5,928 4,067	4,067 731	0	0	1 4,343 3,332	1 1,818 534	1 67,296 93,567	1 87,320 115,826	7,495 5,661
5	64.40	280 411	440 888	5,703 16,737	25,488 38,704	4,239 22,580	17,202 2,145	40,436 26,744	13,092 8,982	8,982 1,614	0	0	3 5,039 3,583	3 4,498 1,408	3 63,455 92,728	3 101,429 136,934	21,249 16,124
6	38.23	0	0	2,597 7,932	10,322 15,674	3,318 10,350	6,614 1,568	23,889 15,202	5,302 3,638	3,638 654	0	0	2 24,536 9,783 4,194	2 0 0	2 23,182 308,519	2 259,191 329,314	7,004 5,314
7	117.59	0	0	118,10 35,066	31,749 48,212	20,101 38,374	25,924 13,226	34,135 47,962	16,309 11,189	11,189 2,010	127 127	127 127	6 0 0	—	—	6 23,182 308,519	11,648 8,838

注)なお、降雨量は下の通りである。()内は「流域」に対する降雨総量

	地区1	2	3	4	5	6	7
カンガイ期	641 mm (85,650千mm)	572 (52,630)	614 (89,662)	579 (16,710)	518 (48,516)	514 (12,984)	615 (59,052)
非カンガイ期	853 mm (113,978千mm)	826 (76,000)	891 (130,113)	819 (23,036)	761 (41,893)	787 (19,880)	913 (87,666)

(3) 水収支把握結果のチェック

① 王寺町藤井における流量のチェック

奈良盆地は地表水・地下水に関して水文学的にクローズされた地形であり、流出する全ての水は王寺を過

過すると言われている。したがって、上述のようにし

注1) 今回は、使用しうる流量が王寺町藤井におけるものみであったために、この地点のみでチェックを行った。水質については、後述するように数地点でチェックを行った。

て把握された王寺に相当する計算流量と観測流量とを
 比較することによって、対象地域全体の水の収支〔降
 雨総量+流域外導水量-蒸発散量-貯留量の変化分〕
 の他に、貯留量の算定の仕方（特に深層地下水に対す
 る扱い）などに問題があったように思えるが、いずれ

付表-24 王寺における流量のチェック

計 算 値		観 測 値 62
カ ン ガ イ 期	① 降 雨 量	437,790 千 m^3 (594 mm)
	② 流域外導水 上 水 計	9712 27236 36948 (4.8 m^3/sec)
	③ 蒸 発 散 量 流 水 域 田 利 用 者 計	-112451 - 86599 - 2990 -202,040 (274 mm)
	④ 河 川 貯 留 前期から 後期へ 差 引	- 3283 127 3,156
	⑤ 地下水貯留 前期から 後期へ 差 引	102,246 - 70,147 320,99
	⑥ ため池貯留 前期から 後期へ 差 引	- 39,134 - 89,134 0
	①+②+③+④+⑤+⑥	307,953 注 (39.6 m^3/sec)
	① 降 雨 量	626,898 千 m^3 (850 mm)
	② 流域外導水 上 水 計	29,145 0 29,145 (1.2 m^3/sec)
	③ 蒸 発 散 量 流 水 域 田 利 用 者 計	-236,555 - 65,704 - 8,970 -311,229 (422 mm)
非 カ ン ガ イ 期	④ 河 川 貯 留 前期から 後期へ 差 引	- 127 - 3283 3,156
	⑤ 地下水貯留 前期から 後期へ 差 引	70,147 - 12606 57,541
	⑥ ため池貯留 前期から 後期へ 差 引	- 39,134 - 39,134 0
	①+②+③+④+⑤+⑥	(注) 399,199 (1.68 m^3/sec)
	① 降 雨 量	626,898 千 m^3 (850 mm)
	② 流域外導水 上 水 計	29,145 0 29,145 (1.2 m^3/sec)
	③ 蒸 発 散 量 流 水 域 田 利 用 者 計	-236,555 - 65,704 - 8,970 -311,229 (422 mm)

(注) この数値は97に等しい。

が正しく把握できたかどうかをチェックすることができ
 る。その結果を付表-24に示す。

・考察

付表-24の王寺における流量とのチェックからわかる
 ように、奈良盆地に対する降雨量、導水量などの
 input量、蒸発散などの output量は大体流量記
 録と一致し、誤差は計算値が記録値をカンガイ期に2
 倍、非カンガイ期に6倍を超えるのみであった。その誤
 差が生じた原因は降雨量、蒸発散量の見積の不正確さ

にしろ盆地全体量に関してはほぼ満足すべき結果が得
 られた。

次に、もし各地区の最下流河川流量記録がとられて
 いたならば、各地区で計算された河川流量と照合する
 ことにより、収支把握の結果（方法）の良し悪しを判
 断することができる。今回の地区分割による各地区の
 最下流点は、一応流量が観測されている点ではあった
 が、通年調査ではなく、定期あるいは不定期に測定さ
 れるもののみであるために、各地区ごとのチェックは

できなかった。なお、大和川流域の奈良盆地で流量記録が充実にとられているのは王寺町藤井以外にはないようである。

実際の調査では、各地区の最下流点は流量記録が必ずとられているという条件のもとで収支把握を行うことが望ましいし、それが可能となるような観測体制が望まれる。

以上のようにして、自然水および人為を介した水の循環状況を把握した。このようにして把握された水のやりとり量をシステムチックに表示したものが、本文図-18~22の現状把握結果である。なお、水のやりとり量の桁数は、計算上のものであり、必ずしも有効数字の桁数とは一致しない。

② 水質のチェック

本研究では、現況の水(量)収支結果をもとにして、本文図式を用いて水質を算定した。

図式を用いれば、 r 地区を通過する水量 $\sum_{i=1}^n (q_{ri})$ を用いて平均水質が次のように与えられる。

$$P_{ri} = \frac{\sum_{i=1}^n q_{ri}}{\sum_{i=1}^n 1}$$

計算に必要な各要素を経由した水の水質値および流

速率は、後述の 5(2)に示すものを用いて、カンガイ期、非カンガイ期および年間平均値としての河川水質を計算し、その結果を付表-25に示した。同表中には、各地区の最下流点に相当する水質測定点の昭和47年度および48年度の測定値も併せて示した。なお、観測点の位置は付図-12に示したとおりである。

水質を算定する際には、各要素から河川への排水量、各要素の水質、流速率等の多くのパラメータを用いており、その信頼度の検討を行う必要もあるが、現況収支把握の結果や前記までに述べたパラメータを用いて計算した水質値は上表のようになり、大体測定記録に近い値が得られている。しかし、測定記録は晴天時のものであり、雨天時・雨天時を通じた測定は実施されていないので、厳密な意味での水質チェックは不可能であった。

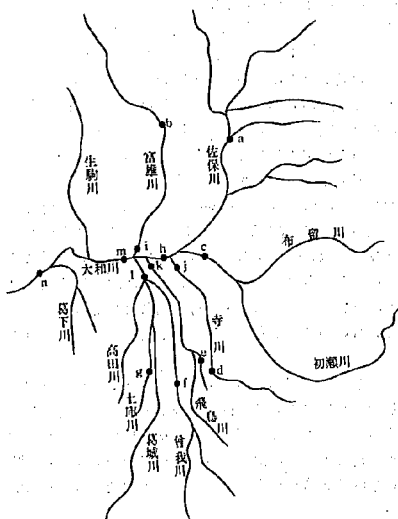
水質についても、河川流量により水量の収支を検討したように、実測値と算定値のギャップを小さくするように調整することが考えられる。しかし、本研究では上述のような理由もあり、水質についてはこの程度の精度の議論を行うことにして、その調整は行なわなかった。

付表-25 河川水質のチェック

BOD (ppm)

地区	(注1) 現況収支結果から得た計算値	(注2) 記 録			
		測定点	測定点名称	S47年度平均	S48年度平均
1	12.6	a	佐保川大師橋	16.0	22.7
	18.1		富雄川大和田橋	—	17.3
	16.4				
2	8.5	c	大和川上吐田橋	15.0	11.1
	10.0				
	9.3				
3	7.7	d	寺川 興仁橋	5.5	11.2
	8.8	e	飛鳥川小室橋	—	18.1
	8.3	f	曾我川橋上橋	—	30.6
		g	土庫川丸和精製橋	—	51.3
4	15.1	h	大和川太子橋	16.0	42.6
	26.1		富雄川大島橋	9.1	9.0
	21.4				
5	14.9	j	寺川吐田橋	27.0	114.2
	20.8		飛鳥川保田橋	13.0	19.1
	18.3		曾我川保橋	—	20.4
6	12.5	m	大和川御幸大橋	18.0	17.5
	19.8				
	16.6				
7	11.7	n	王寺町藤井	16.0	14.3
	14.9				
	17.4				
	15.4				

(注1) 計算値の中段は非カンガイ期平均 (注2) 環境庁水質保全局「水質年鑑」
下段は年間平均 1975年版芙蓉情報センターより
上段はカンガイ期平均



(注) 環境庁水質保全局「水質年鑑」
1975年版実情情報センターより

付図-12 水質測定点

4. 水資源の配分・利用モデルの詳細

ケース・スタディにおけるモデルの制約条件と目的関数を列挙すれば次のようになる。

(1) 制約条件式

以下に記す制約条件式は、地区*r*について一般的に表示するものであり、カンガイ期 (t_1)・非カンガイ期 (t_2) に対して成立するものについては (t) として示す。したがって、特にことわらない限り1つの式について同じ形式の式が、カンガイ期・非カンガイ期の両方に対して地区の数だけたてられる。また、式中の〔 〕で囲んだ項は、地区あるいは分析・検討シナリオによっては存在するところとしないところがあり、実際の計算においては地区におけるやりとりルートおよび地区間ルート図により必要かどうかを判断しなければならない。

(a) 物理的な制約条件式

① 水量の連続条件式

①-1 河川

$$[v(t)_{11}^r + \sum x(t)_{11}^r] + [w(t)_{11}^r + x(t)_{11}^r] + x(t)_{11}^r + x(t)_{11}^r + x(t)_{11}^r + x(t)_{11}^r + x(t)_{11}^r$$

$$+ [x(t)_{11}^r] + x(t)_{11}^r = x(t)_{11}^r + x(t)_{11}^r + x(t)_{11}^r + x(t)_{11}^r + [g(t)_{11}^r]$$

①-2 地下(水)

$$[\sum x(t)_{11}^r] + w(t)_{11}^r + x(t)_{11}^r + x(t)_{11}^r + x(t)_{11}^r + x(t)_{11}^r = [x(t)_{11}^r] + x(t)_{11}^r + x(t)_{11}^r + x(t)_{11}^r + x(t)_{11}^r + x(t)_{11}^r + h(t)_{11}^r + [x(t)_{11}^r]$$

①-3 上水道

$$v(t)_{11}^r + [\sum x(t)_{11}^r] + x(t)_{11}^r + x(t)_{11}^r + [x(t)_{11}^r] = x(t)_{11}^r + x(t)_{11}^r + x(t)_{11}^r + x(t)_{11}^r + x(t)_{11}^r + [\sum x(t)_{11}^r] + [g(t)_{11}^r]$$

①-4 家庭

$$x(t)_{11}^r + x(t)_{11}^r + x(t)_{11}^r + [x(t)_{11}^r] = [x(t)_{11}^r] + x(t)_{11}^r + x(t)_{11}^r + f(t)_{11}^r$$

①-5 業務

$$x(t)_{11}^r + x(t)_{11}^r + x(t)_{11}^r + [x(t)_{11}^r] = [x(t)_{11}^r] + x(t)_{11}^r + x(t)_{11}^r + f(t)_{11}^r$$

①-6 工業

$$[v(t)_{11}^r] + [\sum x(t)_{11}^r] + x(t)_{11}^r + x(t)_{11}^r + x(t)_{11}^r + x(t)_{11}^r = x(t)_{11}^r + x(t)_{11}^r + x(t)_{11}^r + x(t)_{11}^r + f(t)_{11}^r + [\sum x(t)_{11}^r] + [g(t)_{11}^r]$$

①-7 農業

$$v(t)_{11}^r + [\sum x(t)_{11}^r] + u(t)_{11}^r + x(t)_{11}^r + x(t)_{11}^r + x(t)_{11}^r + x(t)_{11}^r = x(t)_{11}^r + x(t)_{11}^r + x(t)_{11}^r + x(t)_{11}^r + f(t)_{11}^r + [\sum x(t)_{11}^r] + [g(t)_{11}^r]$$

①-8 下水道

$$[\sum x(t)_{11}^r] + x(t)_{11}^r + x(t)_{11}^r + x(t)_{11}^r + x(t)_{11}^r = [x(t)_{11}^r] + [x(t)_{11}^r] + [x(t)_{11}^r] + [x(t)_{11}^r] + [x(t)_{11}^r] + [x(t)_{11}^r] + [x(t)_{11}^r]$$

①-9 流域

$$u(t)_{11}^r = x(t)_{11}^r + x(t)_{11}^r + x(t)_{11}^r + x(t)_{11}^r + f(t)_{11}^r$$

①-10 ため池

$$w(t)_{11}^r + x(t)_{11}^r + r(t)_{11}^r = x(t)_{11}^r + h(t)_{11}^r$$

② 水の運動に関する条件

②-1 地下水の地区間流動量

$$x(t)_{11}^r = \alpha(t)_{11}^r \cdot \{x(t)_{11}^r + x(t)_{11}^r + x(t)_{11}^r + w(t)_{11}^r + [\sum x(t)_{11}^r]\}$$

②-1' 地下水の河川還元量

$$[x(t)_{11}^r] = [\alpha(t)_{11}^r] \cdot \{x(t)_{11}^r + x(t)_{11}^r + x(t)_{11}^r + w(t)_{11}^r + [\sum x(t)_{11}^r]\}$$

約)

- ① 分析対象期間前後の貯留量の受け渡しに関する制約

・分析対象期間前からの量

- ①-1 $[w(t_1)]_1^t = \text{const. } A_1$
 ①-2 $[w(t_1)]_2^t = \text{const. } A_2$
 ①-3 $[w(t_1)]_{10}^t = \text{const. } A_{10}$

・分析対象期間後への持ち越し量

- $h(t_2)_1^t \geq \text{const. } A_1$
 $h(t_2)_2^t \geq \text{const. } A_2$
 $h(t_2)_{10}^t \geq \text{const. } A_{10}$

- ①-4 $[h(t_2)]_1^t = [w(t_2)]_1^t$
 ①-5 $h(t_2)_2^t = w(t_2)_2^t$
 ①-6 $h(t_2)_{10}^t = w(t_2)_{10}^t$

- ② 用水の受水量の上限に関する制約

②-1 家庭用水の受水量の上限に関する制約

$$x(t)_{24}^t + x(t)_{34}^t + [x(t)_{44}^t] + [x(t)_{54}^t] \leq DU(t)_4$$

②-2 工業用水の受水量の上限に関する制約

$$x(t)_{16}^t + x(t)_{26}^t + x(t)_{36}^t + x(t)_{46}^t + [x(t)_{56}^t] + [v(t)_{56}^t] + [\sum x(t)_{66}^t] \leq IU(t)_6$$

②-3 農業用水の受水量の上限に関する制約

$$x(t)_{17}^t + x(t)_{27}^t + [x(t)_{37}^t] + x(t)_{47}^t + U(t)_{17}^t + v(t)_{27}^t + [\sum x(t)_{37}^t] \leq AU(t)_7$$

③ 用水の地下水による自給

③-1 家庭用水の地下水自給

$$x(t)_{24}^t \leq KY(t)_4 \quad \text{or} \quad x(t)_{24}^t = \frac{\alpha(t)_4}{1 - \alpha(t)_4} \cdot (x(t)_{34}^t + [x(t)_{54}^t])$$

③-2 業務用水の地下水自給

$$x(t)_{34}^t \leq GY(t)_5 \quad \text{or} \quad x(t)_{34}^t = \frac{\alpha(t)_5}{1 - \alpha(t)_5} \cdot (x(t)_{44}^t + [x(t)_{54}^t])$$

④ 地区分割によって生じる上水・農水の地区間変数に対する制約

・(地区分割の仕方により必要となる制約)

④-1 上水の地区間変数に対する制約 注1)

$$[x(t)_{33}^t] \geq WL(t)_{33}^t$$

$$[x(t)_{33}^t] \leq WU(t)_{33}^t$$

④-2 農水の地区間変数に対する制約 注1)

$$[x(t)_{33}^t] \geq AL(t)_{33}^t$$

$$[x(t)_{33}^t] \leq AU(t)_{33}^t$$

(2) 目的関数

本ケース・スタディでは次の4つの目的関数を用いた。

1. 水資源からみた対象地域全体の工業産出可能高を最大にする。

$$PR = \left[\frac{1}{\sum PR(t)} \cdot \{ x(t)_{16}^t + x(t)_{26}^t + x(t)_{36}^t + x(t)_{46}^t + [x(t)_{56}^t] + [v(t)_{56}^t] + [\sum x(t)_{66}^t] \} \right] t_1 + t_2 \rightarrow \max$$

2. 対象地域全体における水資源の配分・利用に関する総費用を最小化する。

$$CO = \{ \text{②-1式および②-2式の左辺の和} \} \rightarrow \min$$

3. 流域の最下流点の水質(通過する汚濁負荷量)を最良にする。

$$ZO = [Z(t_1)^t + Z(t_2)^t] \rightarrow \min$$

4. 上記1,2,3をバランスよく達成する。

$$G \text{ ベクトル} = [PR^* - PR^0, CO^* - CO^0, -(ZO^* - ZO^0)]$$

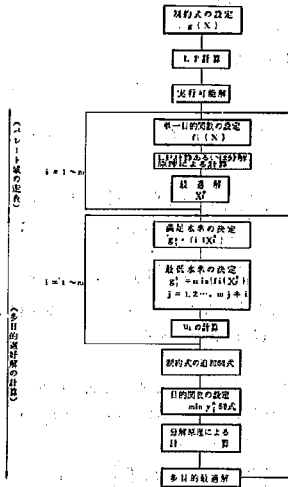
ここに、添字 s : 満足水準, 添字 0 : 必要最低水準を示す。

(3) 計算手順のフロー・チャート

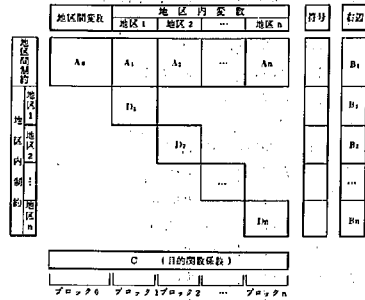
GD法は、伏見・山口のGoal-programingに分解原理を適用したものである。分解原理を適用する場合には、前報(参考文献8)で示したように、係数行列は付図-13のようなブロックに分割して整理する。

GD法の計算手順は付図-14に示す通りである。バレット域の走査を行う時などは、同図で分解原理とした部分を、通常のシンプレックス法で解いても良い。また、分解原理を用いた解法には、Dantzig-Wolfe法や Orchard-Hays 法などがあり、前報においては Dantzig-Wolfe 法を用いた。Dantzig-Wolfe の方法は、計算結果(プロセス含む)に対して前報で述べたような解釈が可能であるが、計算時間が長大なものとなる。そこで、今回の計算においては、Orchard-Hays の方法を用いた。この方法はパラメトリック右辺法を用い、Dantzig-Wolfe 法とは反対に主(親)問題をまず修正した形で解き、次に副(子)問題を解く。そして、最後にパラメトリック右辺法でもとの親問題にもどすという構造をもち、たいへん効率が良い。その詳細については、参考文献8に簡潔に述べられているので参照されたい。

注1) ④-1, ④-2は共にカンガイ期のみが必要であり、非カンガイ期にはとりあげない。



付図-14 G.D法による計算手順



付図-13 分割形式

米（昭和55年）における計算1のシミュレーションについて設定した例である。^{注1)}

(1) 外生変数

① 降水量

降水量は、過去10年間（昭和42～50年）の月別データおよび後述の降雨解析結果をもとにして、分析シナリオに適合する対象降雨を設定した。

現状のもとでのシミュレーションでは、現状把握で得られた値を用いた（付表-26）。また、水資源計画として考える渇水としては、過去10年間の最低降雨を想定した。異常渇水時の降雨量は、後述の付図-19のリターン・ピリオドをもとにして想定した。

なお、後述の解析結果（付図-17）によると、同地域の年平均降水量は約1400mm程度であり、10年に1回の渇水時の降水量は1200～1250mm程度であると

5. 分析・検討シナリオと入力データ・パラメータ
ここでは、適正水配分シミュレーションにおいて設定しなければならないデータとパラメータを、計算1を例として、設定の際の考え方とその値を例示的に示しておく。本文でも述べたように、これらのデータとパラメータは、分析シナリオによって異なるものがある。以下に示すものは、現状把握時点（昭和47年）および将

付表-26 降雨量 (u_1^f, u_1^g)

地区	1	2	3	4	5	6	7
地区全体(mm)	641 853	572 826	614 891	579 819	518 761	514 787	615 913
u_1^f 流域 (千m)	85,650 113,978	52,630 76,000	89,662 130,113	61,710 23,636	28,516 41,893	12,984 19,880	59,052 87,666
u_1^g 農業 (千m)	13,152 17,504	12,224 17,652	18,856 27,363	8,037 11,368	20,383 29,945	6,667 10,207	13,266 19,693

注1) 昭和47年度におけるシミュレーションにおいても、分析シナリオによっては必要でない条件式があり、それに伴って不必要となるパラメータもある。

考えられる。

② 地域外からの導水量(上水・農水)

奈良盆地への導水には、(i)吉野川(紀の川)、(ii)室生川(室生ダム)、(iii)木津川、(iv)須川ダムからのものがある。これら(i)~(iv)の導水総量を、現状把握時点で示せば付表-27ようになる。

これらの量は、通常のシミュレーションでは各地区ごとの導水量として外生的に与えられる。しかし、導水量(総量は一定)の奈良県全体としての合理的な利用や、将来どの程度導水できれば都合がよいかといった分析シナリオのもとでは、内生変数として取り扱われる場合もある。昭和55年時点では、さらに吉野川から地区3, 4, 5, 6, の上水道に合計 $1 \text{ m}^3/\text{sec}$ 、宇陀川から同じく地区1, 2, 3, 6, 7の上水道に合計 $1.6 \text{ m}^3/\text{sec}$ が導水される計画がある。

(注1)

③ 対象地域外への送水量(上水)

これは、分析対象地域を大和川流域に限定したために、奈良市などが分割されたことにより生じた量であるが、この量の算定は現状把握において用いた方法による。

それを現状把握時点について示せば付表-28のようになる。

④ 将来の地域社会活動データと用水原単位

ここでは、昭和55年時点での水資源問題を検討するために必要な人口・産出高(およびそれらの原単位)の想定方法とその結果を記す。

カ) 人口と家庭用水原単位

人口は、昭和39~51年の実績値(データは地域経済総覧による)を用いて、各市町村別に最小二乗法を用

いて時系列の推定を行い、各地区にわりふった。また、家庭用水原単位は、昭和47年の各地区の原単位に、水系開発施設計画調査(近畿・内陸)昭和55年の値を昭和47年の値で除した比率 α を乗じた値として設定した。その結果を付表-29に示す。

4) 産出高

・工業出荷額と原単位

工業出荷額は、昭和40~49年の実績値(工業統計表市町村編による)を用いて、人口と同様に推定した。また、その値は工業出荷額デフレーターにより昭和47年度の値にデフレートした。工業用水の使用水量原単位は、水系開発施設計画調査によると上述の比率 $\alpha = 1$ であり、現状値を用いた。また、回収率は同調査の結果より0.442平均値を想定した。なお、今回の調査

付表-29 人口と家庭用水原単位

地区	昭和55年推定人口(人)	家庭用水原単位($\ell/\text{人} \cdot \text{日}$)
1	320,315	366
2	90,994	289
3	105,385	217
4	88,422	329
5	232,566	303
6	69,072	213
7	167,178	200

付表-27 導水量

単位 $\text{千} \text{m}^3$

地区	1	2	3	4	5	6	7
昭和55	7,570 22,713	—	296 887	—	2,321 6,963	—	735 2,203
昭和77	287 0	4,707 0	6,903 0	2,884 0	8,396 0	1,488 0	2,571 0

付表-28 地域外への送水量

単位 $\text{千} \text{m}^3$

地区	1	2	3	4	5	6	7
昭和55	806 2,417	172 515	230 691	—	—	—	—

(注) 昭和77 はシミュレーション結果として定められる。

注1) 対象地域の設定の仕方により生じた量である(前述)。

これらの値は、現状把握の結果を用いる。ただし、 α_{90}^* と α_{91}^* は下水道の整備状況・形態によって変わるために、分析シナリオに応じて適切な値を設定する必要がある。付表-32には現状把握時点の値を示す。

付表-32 分流係數

地区	项目	α'_{21}	α'_{31}	(注) α'_{31}	α'_{32}	α'_{72}	α'_{92}
1		0.65 0.88	0.19 0.12	* 0.67 0.23	0.19 "	0.52 0.40	0.33 0.77
2		0.65 0.85	0.26 0.10	0.67 0.20	0.24 "	0.48 0.40	0.33 0.80
3		0.62 0.84	0.18 0.14	0.69 0.25	0.17 "	0.53 0.40	0.31 0.75
4		0.60 0.47	0.16 0.10	0.72 0.20	0.02 "	0.54 0.40	0.28 0.80
5		0.64 0.62	0.21 0.06	* 0.75 0.13	0.13 "	0.51 0.40	0.25 0.87
6		0.78 0.74	0.13 0.08	0.72 0.16	0.22 "	0.56 0.40	0.28 0.84
7		0.68 0.85	0.18 0.15	0.69 0.27	0.23 "	0.53 0.40	0.31 0.73

地区 5 0.839 : 0.161

(河川への流出・排水々質)

注3) ここには、河川の水質(汚濁負荷量)制約のみを考える場合について記しておく。また、水質項目についてはBODのみを考える。

附表一31 業務用水原單位

地 区	現状（昭和47年） （ℓ／人・日）	昭和55年推定原単位 （ℓ／人・日）
奈良市	27	36
それ以外	22	29

農業用水使用量は、水田面積と減水深を用いて算定する。対象地域の農業用水使用量は減少の傾向にある⁵²⁾が、その転用等については多くの問題があり、今回は使用水量・減水深ともに現状の値を昭和55年度においても用いることにした。

(2) 入力パラメータ

付表-33 蒸発散率, 蒸発散総量

項目 地区	α_1^t	α_2^t	α_3^t	α_4^t	F^t (千 m^3)
1	0.12	0.12	0.15	0.29	41.618
	"	"	"	0.48	63.197
2	"	"	0.15	0.26	30.613
	"	"	"	0.50	46.486
3	"	"	0.10	0.29	47.720
	"	"	"	0.46	72.463
4	"	"	0.15	0.30	11.540
	"	"	"	0.50	17.523
5	"	"	0.14	0.28	25.488
	"	"	"	0.54	38.704
6	"	"	0.14	0.31	10.322
	"	"	"	0.52	15.674
7	"	"	0.13	0.29	31.749
	"	"	"	0.45	48.212

家庭・業務・工業の各水利用者の排水々質を 200ppm とする。下水道に流入する水の水質は、流域水も一部加えた混合排水であり、150ppm と考える。この数値は、谷端川流域(流域面積 5.4 km^2 , 人口 14 万人)における下水道施設に流入する負荷量と雨水吐からの放流水質、一次・二次処理後の放流水質に関する解析結果を用いて推定したものである。⁵⁷⁾

さらに、地下水の河川還元時には負荷量は無視してもよいと思われるので、水質は 5ppm として、後述するように流率率を 0 とした。

また、ダムに貯留されている水の水質は、多くのダムの水質の記録によると 1~3ppm のものが圧倒的に多いので、ここでは 2ppm を用いた(付表-34)。^{65), 66)}

付表-34 流出水・排水、前期からのもち越し水の水質

P_1^t	5 ppm
P_2^t	200
P_3^t	"
P_4^t	"
P_5^t	20
P_6^t	150
P_7^t	1
$\gamma(t_1)^t$	2

(流率率)

河川への流出過程における汚濁負荷流率が必要な要素は、地区内部からとしてはまず地下水があるがこれは 0 とし、農業・流域については 1 と考える。即ち、農水、流域水の排水はほとんど浄化されずに河川に流

入するものとする。

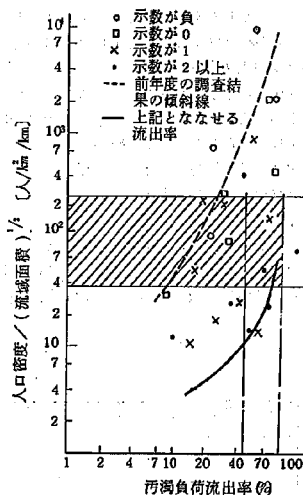
次に、家庭・業務・工業の水利用者の排水の流率率、河川内での自浄作用を考慮した河川水の地区間流率率、下水処理水の流率率(1-処理率)は各々次のように設定した。

(ア) 家庭・業務・工業の排水の流率率

建設省が行った河川における汚濁負荷の流出率の研究⁵⁾では、汚濁負荷流出率=汚濁負荷実測値/汚濁負荷推定値として定義し、家庭排水や工場排水の汚濁負荷流出率について調査を行った。^{注1)}

ここで、汚濁負荷実測値とは対象とする流域の末端で実測した汚濁負荷量であり、汚濁負荷推定値とは個々の汚濁負荷発生源で発生した負荷量から各種の処理施設で処理されて除去される量を差し引いたものである。

この研究では、汚濁負荷流出率に關係する最も重要な因子は流域の広さと人口密度であり、汚濁負荷流出率と(人口密度/流域面積)には明らかな相関があることを示している。



付図-15 汚濁負荷流出率と人口密度/(流域面積)^{1/2}との関係

注1) 低流量時の調査である。

付図-15はその関係を示すもので、図中に記されている示数とは、その他の要因として主要汚濁源の相対的位置や、廃水の性質などを考慮した場合の傾向を示すものであり、結論として下水道に取り入れられない工場排水は図中の実線の上限值で推定するのがよく、家庭排水に対しては点線の傾向線を適用してよいとしている。

付表-35 (人口密度/流域面積^{1/2})

地区 1	110
2	63
3	39
4	230
5	198
6	201
7	85

付表-35はこれに従って、地区別の(人口密度/流域面積^{1/2})を示したもので、地区によってパラツキがみられ、そのパラツキの範囲を示したものが付図-13のハッチングした部分である。

付図-15に示すように家庭下水の場合にはかなりのパラツキがみられるが、ここでは示数をゼロ程度と考え、地区によらないで一律0.5と仮定した。また、工場廃水の場合には上限をとると考えれば1.0としてもさしつかえないように思われる。

(イ) 下水処理放流水の水質

第3節において谷端川流域における雨水吐からの放流水質、一次・二次処理後の放流水質に関する解析に触れたが、それによれば総量としての平均水質は約45

ppmであり、下水流入水質が150ppmであるので流達率(1-処理率)は0.3となる。

(ロ) 河川内の自浄作用

河川内部で自浄作用を考えると、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 r 地区の河川長をとって流達率を次式で求めた。

$$e^{r-1} = e^{K \ell} = e^{K \cdot \frac{\ell}{v}}$$

($r-1$ は r 地区の上流地区を意味する)

以上をまとめれば、河川に流入する各要素からの排水の流達率および河川水の地区間流達率は付表-36のようになる。

付表-36 流 達 率

e_{21}	0	e_{11}^{14}	0.94 ($\ell = 7 \text{ km}$)
e_{41}	0.5	e_{11}^{35}	0.90 ($\ell = 11 \text{ km}$)
e_{51}	0.5	e_{11}^{46}	0.94 ($\ell = 7 \text{ km}$)
e_{61}	1.0	e_{11}^{57}	0.97 ($\ell = 3 \text{ km}$)
e_{71}	1.0		
e_{81}^{**}	0.3		
e_{91}	1.0		

註) 地区2.4.5を示す。

** 汚濁負荷カット率

③ 社会的な制約に関するパラメーター

$$(\bar{p}_1^r, \bar{x}_{21}^{r2}, \bar{x}_{21}^{r2}, \bar{x}_{11}^{r2}, \bar{g}_{11}^{r2}, d_1^r, \bar{p}_1^r, d_1^r, \bar{p}_1^r, C_{ij}, D_{33}, D_{17}, D_{33}, \bar{e}_{33}^{r2}, \bar{e}_{11}^{r2}, \bar{e}_{11}^{r2}, \bar{e}_{11}^{r2})$$

・水質制限値・地下水取水制限値 ($\bar{p}_1^r, \bar{x}_{21}^{r2}, \bar{x}_{21}^{r2}$)

水質制限値や地下水取水制限値については、分析目的に応じて変更する必要がある。現状把握時点における地下水取水量は付表-37のようになる。また、河川水質は王寺でBODが約15ppmである。現状把握時点におけるシミュレーションでは、これらの値を制限値として用いた。

付表-37 地下水取水制限値

地区	1	2	3	4	5	6	7
$\bar{x}_{21}^{r2}$ (註)	2,261 2,571	2,453 2,970	5,963 6,092	5,150 10,117	9,519 13,453	3,261 4,811	4,826 6,192
$\bar{x}_{21}^{r2}$	162 486	65 193	403 1,207	1,117 3,350	1,619 4,856	355 1,064	634 1,900

註) $\bar{x}_{21}^{r2} = (x_{21}^{r2} + x_{21}^{r2} + x_{21}^{r2} + x_{21}^{r2} + x_{21}^{r2})$ の現状値, $\bar{x}_{21}^{r2} = x_{21}^{r2}$ の現状値

・河川維持流量

河川の浄化等のために維持流量が必要とされるが、ここではカンガイ期、非カンガイ期ごとに渇水流量をその値として想定した。昭和37年の3月の渇水時における同時流量観測では、板東で $0.419 \text{ m}^3/\text{sec}$ ($0.16 \text{ mm}/\text{日}$)目安では $2.4 \text{ m}^3/\text{sec}$ ($0.42 \text{ mm}/\text{日}$)、王寺では $2.9 \text{ m}^3/\text{sec}$ ($0.44 \text{ mm}/\text{日}$)となっており、下流に行くにつれて増加している。なお、板東は地区4の下流端、目安は地区6の下流端に相当する位置である。

ここでは上記の値を参考にして、カンガイ期、非カンガイ期共に上、中流部 $a \sim e$ は $0.16 \text{ mm}/\text{日}$ 、下流部 f, g では $0.44 \text{ mm}/\text{日}$ の値を用いるものとする(付表-38参照)。

付表-38 河川維持流量
(千mm)

$a: \bar{x}_{11}^{\dagger}$	2,219 6,659
$b: \bar{x}_{26}^{\dagger}$	1,633 4,898
$c: \bar{x}_{35}^{\dagger}$	2,545 7,635
$d: \bar{x}_{46}^{\dagger}$	2,835 8,505
$e: \bar{x}_{56}^{\dagger}$	3,904 11,713
$f: \bar{x}_{57}^{\dagger}$	24,537 73,612
$g: \bar{x}_{77}^{\dagger}$	29,194 87,582

(注) 用いる地区の流域面積

a : 地区1	154.14 km^2
b : 地区2	113.38 km^2
c : 地区3	176.74 km^2
d : 地区1.4	196.88 km^2
e : 地区3.5	271.14 km^2
f : 地区1~6	619.63 km^2
g : 地区1~7	737.22 km^2

以上のような河川の維持流量に、洪水時に流れ去る水量を加えたものが、河川流量に関する制約値となる。なお、河川からの取水可能量の上限値から維持流量分を差し引いておけば、河川流量に関する制約式は取り除いてもよい。

・水量原単位、水資源からみた収容可能人口・産出可能高の下限値

現状把握結果により、付表-39に示すような値を得る。ただし、これは現状における値を下限値として用いる場合についてである。

なお、将来時点におけるシミュレーションでは、これらの値を修正する必要がある、その例については補足5.(2)、④で述べる。

・費用係数、費用算定距離、投資(支出)可能限度額

<費用係数の設定>

(a) 費用算定の基本的考え方

水資源の取水・送水・浄水・配水・処理・排水に関して生ずる費用は、①施設の建設等に必要費用と②水の利用(取水・送水・浄水・配水・処理・排水)に必要な費用に大別することができる(付図-16参照)。

水利用施設の建設等に必要費用には、土木工事費・機械設備費・用地費のほかに施設を耐用年数間維持する上で必要な補修費も含めて考える。こうした施設の建設等に必要費用は、施設の規模・容量およびその建設位置等に大きく依存すると考えられる。

水の利用に必要な費用には、電力費・薬品費・人件費等の施設を運営するための費用が含まれ、主として水利用量に大きく依存する。

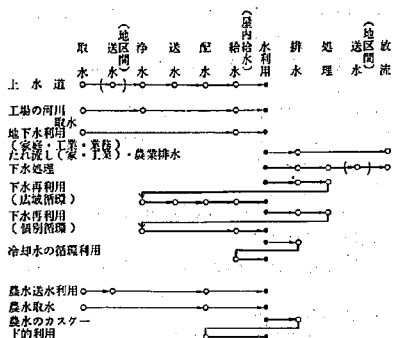
これらの費用を次のような考え方にもとづいて推定

付表-39 水量原単位、用水使用量

地区	家庭用水原単位 $\ell/\text{人} \cdot \text{日}$	業務用水原単位 $\ell/\text{人} \cdot \text{日}$	家庭用水 使用量 千mm^3	業務用水 使用量 千mm^3	業務対家庭 用水比	工水原単位 $\text{mm}^3/\text{年} \cdot \text{百万}$	工水使用 水量 千mm^3	農水取水量 千mm^3
1	275	29	5,270 15,815	553 1,656	0.105	33.2	386 1,155	25,292 0
2	217	13	1,507 4,518	93 279	0.062	42.5	120 358	18,851 0
3	163	26	1,379 4,135	224 670	0.162	73.4	845 2,530	39,729 0
4	247	22	1,446 4,339	129 385	0.089	59.3	1,791 5,370	14,417 0
5	228	22	3,785 11,358	364 1,090	0.096	153.7	2,248 6,743	48,134 0
6	160	22	696 2,088	95 287	0.136	149.9	474 1,423	14,679 0
7	150	20	1,477 4,431	197 589	0.133	142.9	905 2,713	24,316 0

注1) 水量原単位により水使用量に換算して与える。

する。



付図-16 水利用プロセス

- (1) 水利施設の建設等の費用は、単位水量を処理するのに必要な施設規模を設置するのに必要な費用 (円/㎥) として下式により算定する。

$$C = \frac{A \times (r + n + m) + B \times r}{r \times T} \quad (1)$$

C: 施設建設等費用 (円/㎥)

A: 土木工事費及び機械設備費 (円)

r: 年金利

n: 償却率

m: 固定資産保存率 (施設を耐用年数間維持するのに必要な補修費率)

B: 用地費 (円)

y: 施設容量 (㎥/月)

T: 年間施設稼働月数 (月)

かんがい関係施設: 3 カ月

一般: 12 カ月

- (2) 水利施設の建設等の費用は、施設を建設した時点の費用を用いる。この理由は後述する。

- (3) 水利施設の運営等の費用は、単位水量あたりの費用 (円/㎥) として、次式により、平均的な値として算定する。

$$m = \frac{D}{x} \quad (2)$$

m: 施設運営費等費用 (円/㎥)

D: 電力・薬品費・人件費 (円/一定期間)

x: 処理水量 (㎥/一定期間)

(b) 費用の算定式の定式化

水利施設の建設・運営費用は、(a)で設定した費用係数 C、m を用いて次のように算定される。

(記号の説明)

C_{ij}^s : r 地区 i 要素から s 地区 j 要素へ水輸送 (処理) するための水利施設の建設等費用 (円/㎥)

m_{ij}^s : r 地区 i 要素から s 地区 j 要素へ水輸送 (処理) するための運営費用 (円/㎥)

δ_{ij}^s : r 地区 i 要素から s 地区 j 要素へ水輸送 (処理) するための水利施設の 1 カ月あたりの容量 (㎥/月)

δ_{ij}^s : r 地区 i 要素から s 地区 j 要素へ水輸送 (処理) するための既存水利施設の 1 カ月あたりの容量 (㎥/月)

$x(t_1)_{ij}^s$: カンガイ期の水輸送 (処理) 量 (㎥/カンガイ期)

$x(t_2)_{ij}^s$: 非カンガイ期の水輸送 (処理) 量 (㎥/非カンガイ期流域における水利施設の総建設・運営費は次式で算定する。

$$\sum_r \sum_s \sum_i \sum_j \{ T_r \cdot C_{ij}^s \cdot \delta_{ij}^s + m_{ij}^s \cdot x(t_1)_{ij}^s + m_{ij}^s \cdot x(t_2)_{ij}^s \} \quad (3)$$

ただし、 $T_r = 12$ カ月

そして、次の 3 つの制約条件式を追加する。

$$\delta_{ij}^s \geq \delta_{ij}^s \quad (4)$$

$$T_1 \delta_{ij}^s \geq x(t_1)_{ij}^s \quad (5)$$

$$T_2 \delta_{ij}^s \geq x(t_2)_{ij}^s \quad (6)$$

$T_1 = 3$ カ月 (カンガイ期)。

$T_2 = 9$ カ月 (非カンガイ期)

ここに、 C_{ij}^s 、 m_{ij}^s 、 δ_{ij}^s 、 T_1 、 T_2 、 T_r は定数であり、 δ_{ij}^s 、 $x(t_1)_{ij}^s$ 、 $x(t_2)_{ij}^s$ は変数である。

以上の算定式は次のように解釈される。

- (1) 既存水利施設の容量内で水利用が行われる場合には、その施設の費用は、 $T_r \cdot C_{ij}^s \cdot \delta_{ij}^s + m_{ij}^s \cdot (x(t_1)_{ij}^s + x(t_2)_{ij}^s)$ で計算される。

ただし、 $T_1 \cdot \delta_{ij}^s \geq x(t_1)_{ij}^s$ 、 $T_2 \cdot \delta_{ij}^s \geq x(t_2)_{ij}^s$ 、 $\delta_{ij}^s = \delta_{ij}^s$ である。ここで注目したいのは、第一項の既存水利施設の減価償却費等を定数として表わしているという点である。すなわち、既存の水利施設に関する費用としては、減価償却費等のみを考え、水のやりとり量とは無関係に一定額を計上する。

- (2) そして、新規施設の建設や既存施設の拡張・

整備する場合には、そのために必要な費用が追加される。先に、水利施設の建設費等を建設時点の費用とした理由はここにある。新規施設の整備や既存施設の拡張に要する建設費等は次式で表わされる。

$$T_1 C_{ij}^s (\delta_{ij}^s - \bar{\delta}_{ij}^s) \quad \begin{array}{l} \text{新規施設: } \delta_{ij}^s = 0 \\ \text{施設拡張: } \delta_{ij}^s > 0 \end{array} \quad (7)$$

ただし、 $\delta_{ij}^s > \bar{\delta}_{ij}^s$ であり、 $T_1 \bar{\delta}_{ij}^s < x(t_1)Y_{ij}^s$ または $T_2 \bar{\delta}_{ij}^s < x(t_2)Y_{ij}^s$ である。同時に、 $T_1 \delta_{ij}^s \geq x(t_1)Y_{ij}^s$ かつ $T_2 \delta_{ij}^s \geq x(t_2)Y_{ij}^s$ である。

- (3) 水利施設の建設費等と運営費等の分離を行なった理由は2つある。一つは、既存施設を利用するときと新たに施設を建設して水利用を行うときでは費用の面で大きく異なるということを表現するためである。というのは、既存施設に関しては運営費用等が主として問題となり、新規施設を建設する場合には、建設費等と運営費等の合計額を考えなければならないからである。このような方法で費用を計上することにより予測されることは、施設拡張を許す場合でも、既存施設を遊休にして新規施設を作ろうとすることがシミュレーション・モデルの中では起りにくいということであり、合理的かつ現実的な解を得ることができるわけである。

- (4) 第2の理由は、カンガイ期には稼動していても非カンガイ期には遊休になる施設については、非カンガイ期であっても減価償却はするが、運営費等は不要であることを表現するためである。このような方法を用いることにより、費用係数の設定も合理的かつ比較的容易に行えることになる。

- (5) 最後に、施設の拡張を許す場合には、新設・拡張される施設規模はカンガイ期または非カンガイ期の処理水量の最大値になることがほぼ保証されていることを説明しておく。すなわち

$$\bar{\delta}_{ij}^s = \max \{ x(t_1)Y_{ij}^s / T_1, x(t_2)Y_{ij}^s / T_2, \bar{\delta}_{ij}^s \} \quad (8)$$

が成立し、式(4)~(6)の少なくともひとつは等号になるということである。総建設費・運営費(3)式を最小化することを目的関数にとったシミュレーション・ケースにおいては、無駄な費用を切りつめようとする努力が最大限に行われるので、(8)式は正確に達成されることは容易にわ

かる。また、他の目的関数ととられるシミュレーション・ケースにおいても、費用の制約が与えられ、その制約条件が効いている(スラック変数がゼロになっている)限り(8)式は正確に成り立つ。現実問題として費用の制約に余裕があることは例外的であるので、多くのケースについて(8)式は成り立つと考えてよい。上記の定式化では扱えない問題としては次のようなものと考えられる。このモデルでは、ある計画対象時点において最適な水利用システムを考えることを前提としている。したがって、特定の時点の最適化ではなく、ある時期にわたって最適な水利用システムを考えた場合には、各時点ごとに最適化されて形成される水利用システムと、ある期間についての最適化が行われて創り出される水利用システムとの間に差異が生ずることがありうる。こうした問題は、基本的には今取り上げているタイプのモデルでは取り扱えない。しかし、ある期間にわたる最適システムを求めるモデルはきわめて膨大になり、殆んどそれを解くことが不可能であることから、そうしたモデルによって問題を解くことは極力避け、計画対象時点をできるだけ先に取る等の操作により、問題を解くことが望まれる。その他の殆んどの問題は、 C_{ij}^s と m_{ij}^s なる係数の設定法を工夫することにより解決される。

(C) 費用係数の設定

各費用係数の算定には、付図-16のような水利用プロセスを想定し、付表-40のように、それぞれの費用係数がどのプロセスを含むかを定めた。そして、各プロセスの費用を加算して、付表-41(a)~(c)のような費用係数(費用算定距離を含む)を設定した。

付表-41 費用係数(a)建設費等

単位施設能力当りの施設償却費・用地費C_{ij}(円/m)

地区	1	2	3	4	5	6	7
C ₁₃	164	139	160	(163)	(185)	(206)	171
C ₁₆	(80)	(80)	(80)	(80)	80	(80)	80
C ₁₇	15	15	15	15	15	15	15
C ₁₊₁₀	50	50	50	50	50	50	50
C ₂₃	167	180	200	152	179	202	246
C ₂₄	59	59	59	59	59	59	59
C ₂₅	64	64	64	64	64	64	64
C ₂₆	59	59	59	59	59	59	59
C ₂₇	50	50	50	50	50	50	50
C ₃₄	9	9	9	9	9	9	9
C ₃₅	60	60	60	60	60	60	60
C ₃₆	50	50	50	50	50	50	50
C ₄₄	(370)	(370)	(370)	(370)	(370)	(370)	(370)
C ₄₈	70	(80)	(90)	(60)	80	(88)	(82)
C ₅₅	(490)	(490)	(490)	(490)	(490)	(490)	(490)
C ₅₈	70	(80)	(90)	(60)	80	(88)	(82)
C ₆₅	65	(65)	65	65	65	65	65
C ₆₈	70	(80)	(90)	(60)	80	(88)	(82)
C ₇₁	5	5	5	5	5	5	5
C ₈₁	1	-	-	(1)	1	-	(1)
C ₈₄	(394)	-	-	(438)	(442)	-	(454)
C ₈₅	(394)	-	-	(438)	(442)	-	(454)
C ₈₆	(80)	-	-	(80)	(80)	-	(80)
C ₉₈	5	(5)	(5)	(5)	5	(5)	(5)
C ₁₀₇	12	12	12	12	12	12	12
C ₃₃	0-1 20	0-2 ~	0-3 27	0-4 ~	0-5 45	0-6 ~	0-7 130
	3-2 77	6-7 44					
	0-1 37	0-2 10	0-3 4	0-4 37	0-5 10	0-6 26	0-7 24
C ₁₇	3-2 6						
C ₈₈	1-4 (12)	2-4 (15)	5-4 (12)	3-5 (17)	7-5 (11)	6-7 (10)	

()内は将来解析のために付加される係数

~ は地区r, s間の係数であることを示す。

付表-41 費用係数(b) 運営費等

単位水量当りの維持管理費 m_i^2 (円/ m^3)

地 区	1	2	3	4	5	6	7
m_{13}	26	26	26	(27)	(28)	(34)	30
m_{16}	(36)	(36)	(36)	(36)	36	(36)	36
m_{17}	4	4	4	4	4	4	4
m_{1-10}	7	7	7	7	7	7	7
m_{23}	28	31	33	27	30	33	38
m_{24}	5	5	5	5	5	5	5
m_{25}	11	11	11	11	11	11	11
m_{28}	10	10	10	10	10	10	10
m_{27}	7	7	7	7	7	7	7
m_{34}	1	1	1	1	1	1	1
m_{35}	8	8	8	8	8	8	8
m_{36}	7	7	7	7	7	7	7
m_{44}	(60)	(60)	(60)	(60)	(60)	(60)	(60)
m_{48}	25	(25)	(25)	(25)	25	(25)	(25)
m_{55}	(80)	(80)	(80)	(80)	(80)	(80)	(80)
m_{58}	25	(25)	(25)	(25)	25	(25)	(25)
m_{66}	25	(25)	25	25	25	25	25
m_{68}	25	(25)	(25)	(25)	25	(25)	(25)
m_{71}	1	1	1	1	1	1	1
m_{81}	1	-	-	(1)	1	-	(1)
m_{84}	(62)	-	-	(69)	(69)	-	(72)
m_{85}	(62)	-	-	(69)	(69)	-	(72)
m_{86}	(17)	-	-	(17)	(17)	-	(17)
m_{98}	1	(1)	(1)	(1)	1	(1)	(1)
m_{10-7}	3	3	3	3	3	3	3
m_{33}	0-1 6	0-2 6-7	0-3 6	0-4	0-5 7	0-6	0-7 15
m_{77}	0-1 6 3-2 3	0-2 5	0-3 2	0-4 6	0-5 5	0-6 6	0-7 6
m_{88}	1-4 (2)	2-4 (3)	5-4 (2)	3-5 (3)	7-7 (2)	6-7 (2)	

() 内は将来解析のために付加される係数

付表-41 費用係数(c)費用算定距離

(上水 ℓ_{15}) (農水 ℓ_{17}) (下水 ℓ_{18})

区 間	距 離	区 間	距 離	区 間	距 離
6-7	4 (km)	3-2	5 (km)	1-4	6 (km)
3-2	4	0-1	50	2-4	8
0-1	20	0-2	35	5-4	6
0-3	15	0-3	15	3-5	9
0-5	25	0-4	50	7-5	5
0-7	40	0-5	25		
		0-6	35		
		0-7	30		

また、投資可能限度額については、昭和47年の値を参考にして、その2~3倍をとれば付表-42のようになる。

付表-42 投資可能限度額

地 区	昭和47年	47年の2倍	47年の3倍
1	約58億	116億	174億
2	52	104	156
3	63	126	189
4	44	88	132
5	89	178	267
6	31	62	93
7	55	101	165

・河川からの取水可能限度量、上水道普及率・下水道整備率、貯留容量、再利用に関する制限値(取水可能量^{注1)})

各地区内部での河川からの取水現況値 $\{x(i)Y_{11} + x(i)Y_{12} + x(i)Y_{13} + x(i)Y_{14}\}$ および取水可能量 QM_i を付表-43に示した。表中の値は、王寺における昭和34~43年の10年間の平均流量 $15.83 \text{ m}^3/\text{sec}$ を流域面積 737.22 km^2 で除した値 $1.86 \text{ mm}/\text{日}$ に、各地区の面積を乗じたものである。すなわち、平均流量以下ならば全量取水可能であるという仮定のもとで計算したものである。

注1) 河川からの取水可能量の上限に関する制約式は、利水施設の拡張を行う場合には取り除く必要がある。

付表-43 現況の取水量および取水可能量

(千 m^3)

地区	取水現況値	取水可能量 QM_i	
		年 間	カンガイ期 非カンガイ期
1	21,269 320	104,408	42,931 61,477
2	17,299 4,236	76,798	31,578 45,220
3	35,253 1,386	119,717	49,226 70,491
4	11,738 0	133,359	54,835 78,524
5	42,077 211	183,659	75,518 108,141
6	12,565 0	419,712	172,579 247,133
7	20,587 740	499,363	205,330 294,033

(注) 用いる流域面積

地区1	154.14 km^2
2	113.38 km^2
3	176.74 km^2
4	196.88 km^2
5	271.14 km^2
6	619.63 km^2
7	737.22 km^2

ただし、上述のようにして算定した年間の取水可能量をカンガイ期・非カンガイ期にふり分けるときには、雨量を用いて決定した。すなわち、前述のように各地区ごとに雨量を計算したが、盆地全体雨量はカンガイ期で593.83 mm、非カンガイ期で850.35 mmであり、その雨量比を用いて年間の取水可能量をわりふった。なお、取水可能量を現況値の何割増しとして与えることも考えられる。

(上水道普及率、下水道整備率)

既に原データ表に記載したように現状の上水道普及率・下水道整備率は付表-44の通りである。

(再利用率、再利用対象用途の割合)

考え方の詳細は土木研究所資料第1125号に記した通りであり、ここでもその値を用いるとすれば、各地区共通で次の数字を用いる(付表-45a),(b))。

なお、三次処理等による再生水の開放系としての利用を考えなければ、単に回収水という概念で再利用対象用途をみればよい。すなわち、工業においては回収率を考えればよい。現状の収支把握から得た地区別の回収率は付表45(c)のようになる。

付表-44 上水道普及率, 下水道整備率

地区	1	2	3	4	5	6	7
α_4, α_5	97.4	94.2	66.6	98.0	98.2	94.5	95.6
$\beta_4, \beta_5, \beta_6$	18.5				3.1		

α_i : 上水道普及率 ($i=4$: 家庭 $i=5$: 業務)
 β_i : 下水道整備率 ($i=6$: 工業)

付表-45 再利用率, 再利用対象用途の割合

(a) 再利用対象用途の割合		(c) 回収率(現況)	
RU_4	0.307	地区 1	0.03
RU_5	0.640	2	0
RU_6	0.827	3	0.31
		4	0.02
		5	0.07
		6	0.07
		7	0.12
(b) 再利用率			
RP_4	0.096		
RP_5	0.290		
RP_6	0.460		

量に関する制限

(貯留量)

河川・地下・ため池に関しては貯留量を設定して、カンガイ期から非カンガイ期、非カンガイ期からカンガイ期へと移行する時点の量を現況把握で得た。

配分計算時には前期(カンガイ期)に対するもち越し量つまり非カンガイ期からカンガイ期に移行する量 $w(t_1)_1^1, w(t_1)_2^2, w(t_1)_3^3$ は現況把握で得た値を用い、カンガイ期から非カンガイ期に移行する量 $h(t_1)_1^1 = w(t_2)_1^1, h(t_1)_2^2 = w(t_2)_2^2, h(t_1)_3^3 = w(t_2)_3^3$ に対しては下限と上限の制約を設けた。付表-46には現況値と共にそれらの下限値(0), 上限値(現況値)を示した。

(上水, 農水の地区間分水量)

上水については, 現況把握時点では(地区6→地区7)の市町村間でやりとりがある。

また, 地区分割に伴って生じた地区間移動(地区3→地区2)が存在する。そして, 農水は地区分割に伴

③: 分析・検討目的やモデル化のために必要な制約に関するパラメータ

・対象期間前からのもち越し量, 地区間のやりとり

付表-46 貯留量の制限値(注)

地区		1	2	3	4	5	6	7
$w(t_1)_i^j$	$w(t_1)_1^1$	1,442		1,714				127
	$w(t_1)_2^2$	21,378	15,725	24,512	5,928	13,092	5,302	16,309
	$w(t_1)_3^3$	11,054	6,821	4,272	4,057	5,484	2,300	5,146
$h(t_1)_i^j$	現況値	0		0				127
	上限 HU_1^1	1,514		1,800				
$h(t_1)_2^2$	現況値	14,666	10,788	16,817	4,067	3,982	3,638	11,189
	上限 HU_2^2	22,447	16,511	25,738	6,224	13,747	5,567	17,124
$h(t_1)_3^3$	現況値	11,054	6,821	4,272	4,057	5,484	2,300	5,146
	上限 HU_3^3	11,607	7,162	4,486	4,260	5,758	2,416	5,403

(注) 上下限値は容量に関する制約である。 h についての下限値は0とし, 上限値は現況値を参考にして設定した。

って地区間移動がある(地区3→地区2)。

配分計算時にはこれらに対して上限と下限の制約を設けそれらの値を現況値と共に付表-47に示した。

付表-47 上水、農水の地区間分水量(現況)

(千 m^3)

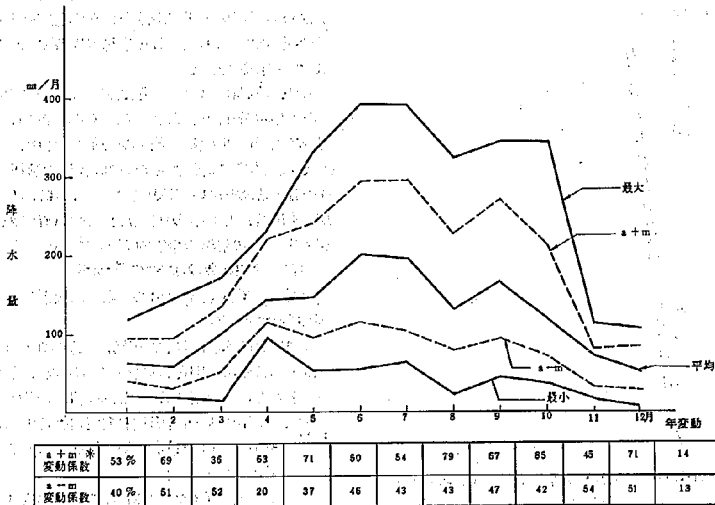
	地区	現 状 値	下 限 値	上 限 値
上 水	6→7	x_{33}^{67} 104 312	WL_{33}^{67} 0 0	WU_{33}^{67} 109 328
	3→2	x_{33}^{32} 47 140	WL_{33}^{32} 0 0	WU_{33}^{32} 49 147
農 水	3→2	x_{32}^{32} 8,352 0	AL_{32}^{32} 0 0	AU_{32}^{32} 8,770 0

6. シミュレーション・モデルの概要

適正な水資源の配分について検討するには、水資源の配分モデルの入力データと、各パラメータを適切に設定しなければならない。例えば将来の水需給(水配分)を検討しようとするれば、降雨や水需要量などを設定する必要がある。ここでは、そのために作成したシミュレーション・モデルの概要を記す。

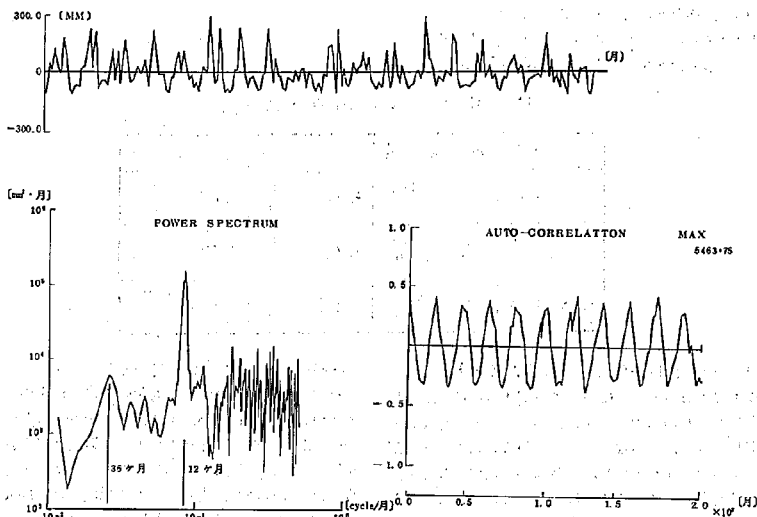
(1) 自然現象サブモデル(普遍的モデル)

・降雨・蒸発散量・地域貯留総量の変化サブモデル
水資源の適正配分における対象降雨は、過去のデータに基づいて設定したが、①降雨の平均的な月変動および経年変動パターンとその分散、②降雨総量の確率年を知るために、過去20年のデータをもとにして分析を行った。すなわち、実測データに単純な統計的操作を加えて、平均・分散解析・相関解析(スペクトル解析を含む)を行なった。その例を付図-17~19に示す。

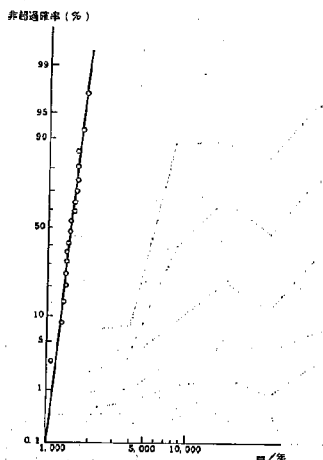


※ 月平均に対する変動

付図-17 大和川流域の降水量変動(昭和31~48年)



付図-18 大和川流域の降雨量の相関・スペクトル解析



付図-19 対数確率紙による年総降雨量の確率年推定 (Hazen法)

また、蒸発散量については、年間の総量が降水量にかかわらずば一定であるという仮定をもとにして、月変動についてはその分布形を実測値に基づいて仮定した(付図-20, 21)。

また、流量については過去20年のデータを用いて降雨と同様の分析を行った。これらをもとにして、対象流域降水量・損失量・流出高を示すと付図-22のようになる。さらに対象地域全体の貯留量の解析を、 $P = D + E + \Delta S$ を用いて算定した。ここに、 P : 降水量、 D : 流出高、 E : 損失量、 ΔS : 地域貯留総量の変化である。その結果の例を付表-48に示す。

(2) 地域社会の活動サブモデル

・人口・産業産出(出荷)高、水需要量、汚濁負荷発生量サブモデル

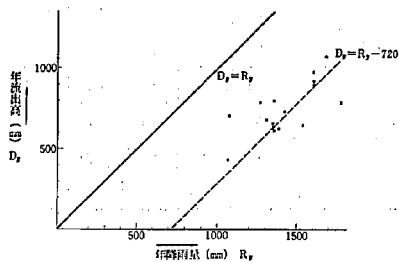
将来における水需要量を推定するために、時系列の人口・産業産出(出荷)高推定モデルを、現状のパターンをもとにして定式化した。同様に、それらの関数として、水需要量・汚濁負荷発生量推定モデルを作成した。その一部の関数形を示せば次のようになる。

① 将来人口の推定

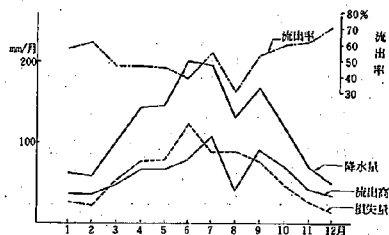
人口や工業出荷額などの経年変化を推定する方法としては、計量統計法(計量経済学的方法含む)、SD法、

注1) 前述の付図-6参照

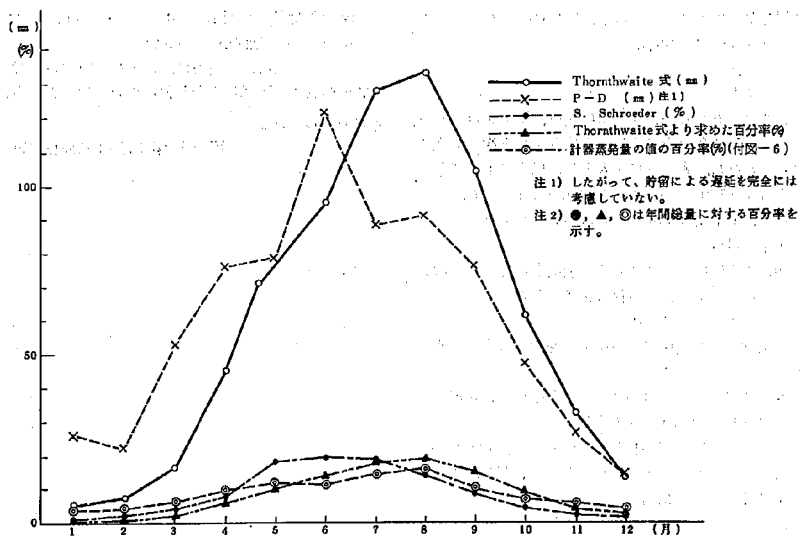
注2) これらの推定値は、あくまでも現状のパターンで変化した場合の値であり、パラメータ設定の際に参考にした。



付図-20 大和川流域の損失量



付図-22 降雨量、流出高の月別変化平均(王子、S31~48年)



付図-21 蒸発散量の分布

付表-48 大和川流域のマクロ的な水収支表(奈良盆地全体)

月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	合計
降水量 P	62	58	100	143	145	200	195	131	166	117	69	49	1435
流出高 D	36	36	47	67	67	78	107	40	90	70	43	35	716
損失量 $P-D$	26	22	53	76	78	122	88	91	76	47	26	14	719
蒸散量 E	7	14	29	58	129	137	129	108	58	29	14	7	719
$(P-D)-E$	19	8	24	18	-51	-15	-41	-17	18	18	12	7	0
貯留量 ΔS	19	27	51	69	18	3	-38	-55	-37	-19	-7	0	31

(例) $P = D + E + \Delta S$

(P, D, E は実測および他の推定式により与える。

下表はG. Schroederの百分率により蒸発散総量をわりふったときの値である。)

時系列法(タイム・トレンド法、ロジスチック曲線法含む)が用いられることが多い。今回のケース・スタディでは、時系列法のうち回帰分析法とロジスチック曲線法で推定式を作成し、両者による推定値を比較した。推定式は、昭和31~51年の市町村別データ(地域経済総覧による)を用いて市町村別に定式化し、推定結果をケース・スタディの地区にわりふった。

・ロジスチック曲線法

$$\frac{d p}{d t} = b \cdot p \cdot \left(1 - \frac{p}{k}\right)$$

ここに、 p ：人口、 k ：飽和人口、 b ：定数である。

一例として奈良市の人口推定式を示すと次のようになる。ただし、 $k = 500$ 千人とした場合のものである。

$$p(t) = 500 / [1 + \exp(0.386 - 0.075 \cdot t)]$$

ここに、 t ：昭和45年度からの経過年数である。

・重回帰分析法

構造式の形は、時間 t のみを説明変数とする2次式とし、最小二乗法により係数を決定した。

$$\hat{p} = a_0 + a_1 t + a_2 t^2$$

一例として奈良市の人口推定式を示せば次のようになる。

$$\hat{p} = -11.5 + 0.557 \times (\text{昭和年}) + 0.0930 \times (\text{昭和年})^2$$

(重相関係数 $R = 0.937$)

以上のようにして昭和55年度の人口を推定したが、その結果にはあまり差がなかったので、単純な推定式である後者の値を採用した。

(1) 将来の工業出荷額の推定

工業出荷額は、昭和41~49年度のデータ(工業統計表市町村編による)を用いて、人口と同様の形で推定式を作成した。

(例) 汚濁負荷発生量の推定

・工業・家庭からの量

補足5, (2), ②に示した方法による推定方法を参考にした。

・流域の非点源からの量

次のような形の重回帰式による推定値を参考にした。

$$(\text{BOD負荷量}/\text{全面積}) = a_0 + a_1 \cdot (\text{人口}/\text{全面積}) + a_2 \cdot (\text{農地面積}/\text{全面積})$$

なお、この式には降雨条件が含まれていないので多少問題がある。降雨量との関係については現在さらに検討を進めている。⁷⁰⁾

(昭和53年4月11日原稿受理)

注1) 土木研究所報告第150号(1977)参照

河川の水質・汚濁負荷量に関する研究(I) —汚濁流出特性への水文学的アプローチ—

山口 高 志*

吉 川 勝 秀**

A Hydrologic Study On Characteristics Of Water Quality And Pollutant Load Of The River (I)

Takayuki Yamaguchi

Katsuhide Yoshikawa

[Synopsis]

It comes to be recognized that not only pollutants of dry weather flow but also storm weather flow must be controlled to preserve public water bodies. But comprehensive study with regard to characteristics of pollutant effluence of all weather days have not been conducted and many problems remain unsolved. In this paper, we analysed mechanism of pollutant effluence about several water quality items from hydrologic approach using everyday water quality data of 9 rivers. In addition, pollutant load was divided into two parts, for dry weather flow and storm weather flow. Also we proposed hydrologic water quality simulation model and examined relation between pollution effluence and basin characteristics.

[Key Words]

total amount regulation, load of dry and storm weather flow, hydrologic water quality analysis, water quality simulation model, point source, nonpoint source.

[概 要]

公共用水域の水質を保全するためには、晴天時の汚濁負荷量のみでなく、雨天時に降雨を介して流出する汚濁負荷量をも制御しなければならないことが認識されつつある。しかし、晴天時および雨天時を含めた汚濁負荷流出特性についての広範な研究は、必ずしも十分に行われてきたわけではなく、多くの課題が残されている。

本論文は、多河川・多水質項目について、晴天時および雨天時の汚濁負荷流出特性を明らかにしたものである。すなわち、主として水文学的なアプローチにより、汚濁流出メカニズムを解析するとともに、晴天時と雨天時の負荷量を分離した。また、水文学的水質・負荷量シミュレーション・モデル、および流域特性と汚濁負荷流出の関係（ポイント・ノンポイントソースからの負荷量の分離についての試算含む）についても検討した。

● キーワード

汚濁負荷総量規制、晴天時・雨天時負荷量、水文学的水質解析、水質シミュレーション・モデル、ポイント・ノンポイントソース

* 土木研究所 都市河川研究室長
** 土木研究所 都市河川研究室研究員

目 次

1. はじめに	4
2. 従来本研究の基本的立場	4
(1) 従来研究	4
(2) 本研究の基本的立場と特徴	5
3. 毎日観測データを用いた基礎的な水質・負荷量特性解析	6
(1) 解析方法とデータ	6
a) 水文学的な解析 (その背景と方法)	6
b) 比較河川・比較水質項目的な解析 (その背景と方法)	6
c) 解析におけるタイム・スケール	6
d) データ項目と出典	7
(2) 時系列特性の解析	7
a) ボルトグラフの特性解析	7
① ボルトグラフの例	7
② 相関解析 (自己相関・相互相関解析)	7
(ア) 各ボルトグラフ自体の特性 (自己相関解析)	7
(イ) 流量～水質・負荷量の関係 (相互相関解析その1)	8
(ウ) 降雨～流量・水質・負荷量の関係 (相互相関解析その2)	9
b) 出水時の特性, 経月変化特性, 季節変化特性, 経年変化特性解析	11
① 出水時の特性 (単一出水時の水質と負荷量)	11
② 経月変化特性	14
③ 季節変化特性	17
④ 経年変化特性	18
(3) 汚濁負荷流出特性の解析	21
a) 水文学的にみた先行降雨が汚濁負荷流出に与える影響	21
① マクロ的・統計的にみた場合	21
② ハイドログラフ・ボルトグラフのピーク値でみた場合	22
b) 統計的にみた流量と水質・負荷量の関係	22
① 流量規模別にみた流量発生頻度と水質・負荷量	22
(4) 基礎的な解析結果のまとめ	27
a) 時系列的な解析で明らかになったこと	27
① ボルトグラフの特性について	27
② 出水時の特性・経月特性・季節特性・経年特性解析により明らかになったこと	27
b) 汚濁負荷の流出特性解析で明らかになったこと	27
① 水文学的にみた先行降雨が汚濁負荷流出に与える影響	27
② 流量規模別にみた流量と水質・負荷量の関係	27
c) その他の結果	28
4. 水質・負荷量特性解析結果を応用した汚濁負荷量流出機構の解明	28
(1) 概要	28
(2) 総量規制を前提とした晴天時と雨天時の負荷量の分離	28
a) 晴天時と雨天時の負荷量の分離 (分離方法1)	29
b) 晴天時分と雨天時分の負荷量の分離 (分離方法2)	30
(3) 河川の水質・負荷量のシミュレーション	31
a) 水文学的 (物理的) アプローチ	31

b) 統計的アプローチ	33
① C or $Q_s = \text{func.}(Q, R)$ とする回帰モデル	33
(ア) 回帰モデルⅠ	33
(イ) 回帰モデルⅡ	35
② 単純統計モデル	35
(4) 地域(流域)特性と汚濁流出の関係	35
(5) ポイントソース・ノンポイントソースからの汚濁流出量の分離	38
① 比負荷量による試算	43
② 原単位法による試算	44
5. 結論	45
参考文献	

- 補足(河川の水質・負荷量の経月変化特性図)

1. はじめに

河川の水質管理においては、従来は晴天時（あるいは低水）を対象とした水質基準を設定し、晴天時の主要な汚濁排出源であると考えられる大規模な工場や下水処理場（ポイントソース）の水質を規制することに主眼が置かれていた。しかし、瀬戸内海や東京湾、琵琶湖、霞ヶ浦などの停滞水域の汚濁が進行し、ダムによる濁水の長期化などが問題となるにつれて、日本の多くの河川のように急流で雨天時の汚濁した水がすみやかに海に流出してしまう河川においても、雨天時の河川水質が問題となってきた。アメリカでは、日本と同様の停滞水域の汚濁の問題の外に、日本とは異なり長大な緩流河川が多いために、降雨により流出した汚濁負荷が晴天時にも河川中を流下し、河川の水質基準を達成するためには、降雨を介して流出する部分が多いノンポイント^(注1)の負荷量が問題とされるようになってきている。

以上のような理由から、晴天時および雨天時を含めた河川の水質・汚濁負荷量に関する研究が必要とされている。しかしながら、従来の多くの調査・研究では、晴天時と雨天時（特に洪水時）を含めて総合的に検討したものは少ないと考えられる。そこで、本研究では、晴天時・雨天時を含めた水質・負荷量特性を、毎日観測データを用いて主として水文学的な観点から明らかにした。そして、その結果を応用して、晴天時と雨天時の汚濁負荷量のマクロ的な分離を行うとともに、水文学的水質シミュレーションについて検討した。また、流域特性と河川水質・負荷量の関係や、ポイント・ノンポイントからの汚濁負荷量の分離についても検討した。

本報告では、第2章で従来の研究について概観するとともに、それらと対比することにより、本研究の基本的立場と特徴について述べ、第3章で毎日観測の水質データ（多河川、多水質項目）を用いて、主として水文学的な観点から水質・負荷量の基礎的な解析を行った結果を記し、第4章でその結果を応用しながら晴天時と雨天時の汚濁負荷量の分離、流域特性と汚濁流出の関係、ポイントソース・ノンポイントソースの負荷量の分離および水文学的水質・負荷量のシミュレーションについて述べ、第5章で本研究の結論をまと

めた。

2. 従来の研究と本研究の基本的立場

ここでは、従来の河川の水質・汚濁負荷量に関する研究を概観し、それらに対比することにより、本研究の基本的立場と特徴を明確にする。

(1) 従来の研究

河川の水質・汚濁負荷量に関しては、様々な観点からアプローチした研究が行われている。すなわち、①汚濁負荷量の発生（自然発生、人為的発生を含む）・流出・流下機構に関する研究、②水質判定指標ならびに観測回数に関する研究、③分析技術・処理技術に関する研究、④水質と生態の関係に関する研究、⑤日変化・週変化などの水質の変動特性に関する研究、⑥水文学的水質解析に関する研究、⑦物理的・化学的・生物学的な水質変化機構の解析に関する研究、⑧その他がある。

そのような研究のうちで、本研究で対象とする①、⑤、⑥に関するものとしては、表-1に示すようなものが代表的であると考えられる。同表でその他としたものは、①、⑤、⑥に関する研究以外で、本研究を進める際に参考にしたものの一例である。

従来の研究を河川の水質・汚濁負荷量管理という観点からながめてみると、次のように特徴づけることができよう。^(注2)

表-1 従来の研究例（日本のもののみ）

①汚濁負荷量の発生に関する研究	・建設省土木研究所 他 (1969) ・河東地建 (1977) ・広崎・西村 (1973) ・茨城大学農学部 (1977) ・和田安彦 (1978) ・高沢 勇 (1973) ・浮田・大西 (1976) ・山口誠志 (1977) ・その他
②水質変動特性に関する研究	・建設省関東・近畿地建 (1977) ・その他
③水文学的な水質解析に関する研究	・羽田守夫 (1977) ・建設省土木研究所 (1975) ・市川 新 (1974) ・その他
④その他	・野間和之 (1977) ・市川・池田 (1976) ・佐藤・吉川・芦田 (1958) ・その他

注1) Clean Water Actでは、点源については全汚濁負荷量を削減するために、①1977年までにBPT (Best Practicable Technology) での処理、②1983年までにBAT (Best Available Technology) での処理、③1985年までに全く排出をしないという目標を定めている。参考文献99-100参照

注2) 以下の分類は便宜的なものであり、必ずしも厳密に年代の前後を示しているわけではない。水質研究室長村上健博士から、この分類には混乱がみられるので、特徴づけの概念として（第一段階）を汚物汚染、有機汚濁、無機汚濁、温度規制、工場排水規制とし（第二段階）を有機汚染または富栄養化、総量規制としてはどうかという指摘を受けたことを付記しておく。

① 〈第一段階〉：流域の都市化、および特定の汚濁物を排出する産業により河川が汚染されるようになった。それを規制するために水質基準（排出源における基準と河川の水質基準）が設定され濃度規制が実施され始めた。この時期には主として晴天時の河川水質が研究され、汚濁負荷の流量率の概念が提示された。そして、汚濁防止対策として下水道が整備されはじめた。

② 〈第二段階〉：停滞水域の水質の悪化や、生態系の破壊が問題となってきた。そのために、家庭下水や工場などのポイントソースからの汚濁排出総量に関する調査が実施されはじめた。そしてポイントソースからの排出汚濁負荷量に関する総量規制が考えられはじめた。この時期には、生物学的な水質判定法やモニタリング・システムを活用した水質予測方法（フィルタリング理論を用いることが多い）などが河川の水質管理に活用されるようになった。

③ 〈第三段階〉：雨天時に合流式下水道から越流する水による汚濁負荷や、農地・都市域・建設現場等の地表面から供給される汚濁負荷量が停滞水域の汚濁に寄与していることが明らかになり始め、降雨時の水質・負荷量を考慮するための水文学的なアプローチによる水質解析の研究が行われるようになった。

第一段階の研究例としては、建設省土木研究所他の研究(1969)¹⁾、神奈川県の研究(1978)²⁾、第二段階の研究例としては、津田らの研究(1972)³⁾や、市川・池田の研究(1976)⁴⁾、第三段階の研究例としては、市川の研究(1975)⁵⁾、羽田の研究(1977)⁶⁾、山口の研究(1977)⁷⁾などをあげることができる。

建設省土木研究所他の「利水計画における流量把握の研究」では、全国の10河川を対象として晴天時の水質データを解析し、流域の人口や工業出荷額などと汚濁負荷量を関係づけている。また、野間らの「神奈川県における水域環境の水質管理計画策定のための研究(1)~(4)」では、河川・湖沼の汚濁防止計画を策定するために、基礎的な水質の把握方法を提示し、神奈川県内の多数の河川・湖における広範な実測データを用いて、それを具体化している。この研究では、水質そのものとそれらのhistoryが積分された指標としての生物による水質管理の必要性に着目している。この研究は、水質を総合的・多角的かつ実証的に取り扱っており、実際的な水質管理計画策定の指針を与えるものと考えられる。

津田らの生物による水質の判定に関する一連の研究では、水質汚濁の積分された影響を知ることの必要性

が指摘され、全国の河川の生物からみた汚染地図が作成された。生物学的な水質判定の歴史は古く、Kolkwitz Marsson (1902) により始められ、Liebmann (1955)、津田 (1964) などにより判定法の基礎が作られているが、それらが河川の水質管理において積極的に活用されるようになった。また化学的水質指標と生物相の関係についての調査も実施されている。市川・池田の研究では、モニタリング計画を前提としてフィルタリング理論による水質予測が検討されている。

市川は、タイムスケールを時間として、孤立降雨とそれに伴う水質・負荷量のハイドログラフを観測し、その特性をパターン化している。羽田の雄物川における研究では、どちらかという自然地域の河川水質と流量にどのような関係があるかが明らかにされている。この研究では、溶解性無機物質・浮遊性無機物質・有機物質に関する多水質項目にわたりその特性が明らかとされている点が興味深い。また羽田はGunnersonとほぼ同様の調査を行い単純な水質予測式を提案しているが、浮遊性物質およびCODはその濃度Cを $C = \text{func.}(Q)$ とするのではなく、 $C = \text{func.}(Q, R)$ とすることを提案している。しかしこの研究においても、対象期間内の晴天時・雨天時（特に洪水時）のすべての水質・負荷量について調査しているわけではない。

以上の外にも、例えば茨城大学農学部履修研究会の霞ヶ浦の水質に関するきわめて総合的かつ実証的な研究などが見られる。

(2) 本研究の基本的立場と特徴

河川の水質・汚濁負荷量は、晴天時および雨天時ではその特性が異なることが多い。従来は、主として晴天時における水質が問題とされることが多かったが、前述のように停滞水域の汚濁防止が問題とされるようになってきた。すなわち、雨天時には農地や山地、市街地および建設現場などの地表面が雨で洗われることによる汚濁流出量が相当大きいのではないかということが認識されはじめてきている。アメリカでは、EPAのClean Water Actにより、降雨を介して流出してくるノンポイントソースの汚濁負荷の削減計画が実施に移されつつある^{21)~43)}。また、晴天時に合流式下水道に堆積した汚濁負荷量が雨天時に河川に流入して公共水域を汚濁することを防止するために、その対策が検討・実施されている。日本の河川は急流で、相対的に短く、アメリカの河川とは多少水質問題は異なるが、河川にダムが造られたことにより雨天時の濁水が一時貯められ晴天時に汚濁した水が放流されるようになり（濁水の

長期化)下流に湖(例えば琵琶湖、霞ヶ浦など)や湾、内海(例えば東京湾、瀬戸内海)を有する場合の流入負荷量の制御計画が立案されるようになるにつれて、従来のように晴天時の河川水質管理のみでなく雨天時の水質管理が必要となるようになってきている。しかし、そのための実証的な調査研究は、必ずしも十分に行われているとはいえない。したがって、まず第一段階として晴天時および雨天時の水質・汚濁負荷量がどのようになっているかを、流域特性(土地利用特性を含む)が異なる複数の河川の種々の水質項目について明らかにする必要がある。これが本研究の第一の着目点であり、水文学的アプローチ(雨量・流量を用いた解析)が必要なる理由でもある。

さらに進んで、停滞水域の汚濁防止計画において重要である晴天時分負荷量と降雨を介した雨天時分負荷量の構成比や、ポイントソースとノンポイントソースからの汚濁負荷量の構成比を明らかにする必要がある。本研究では、水文学的な解析結果を応用しながら、それらについてマクロ的な試算を行う。これが本研究の目指す第二の着目点である。

また、水質変動特性を把握し、降雨・流量(水文学的)を説明変数とする水文学的シミュレーション・モデルの基本構造を提示するとともに、いくつかのタイプのモデルを作成する。そしてその特徴や限界を明らかにする。

本研究の特徴としては、①水文学的アプローチによる全天候時の水質解析であること、②流域特性(土地利用特性含む)の異なる多数の河川を対象とした比較河川的な解析であること、③複数の水質項目を対象とした比較水質項目的な解析であることをあげることができる。また、本研究では、できる限り日常用いられている単純な解析方法を用い、その結果も図や表を用いてわかりやすく表現することも試みている。

なお、本研究ではデータの制約により濁度・ KMnO_4 消費量・ BOD ・ $\text{NH}_4\text{-N}$ などについて多くの解析を行っており、停滞水域の水質管理では特に重要である窒素(N)、リン(P)についての解析はそれらに比較して少なくなっている。しかしながら、本研究の解析結果は、河川の水質・負荷量に関して多くの知見を与えうると考えられる。

3. 毎日観測データを用いた基礎的な水質・負荷量特性解析

ここでは、多河川・多水質項目に関する毎日観測デ

ータを用いて、多角的な観点から実証的に河川の水質・負荷特性を明らかにする。その結果は、できる限り図表を用いることによりビジュアルに表示する。この章では、実測データを用いた解析結果をできる限り多く示すが、結果のまとめを章の最後に述べてあり、そのみにより本章の内容は理解できるはずである。本章の基礎的な解析結果は、次章において現実の水質管理上有益な情報を得るために応用される。また水文学的に水質シミュレーション・モデルの基本構造を与える。

(1) 解析方法とデータ

a) 水文学的な解析(その背景と方法)

以下では、河川の水質・負荷量の特性を、主として水文量(雨量・流量)との関係において把握する。これは、汚濁負荷量は水に溶解あるいは流送されることにより河川に流入して、流下していくからである。特に降雨を説明要因とするのは、ノンポイントソースから流出する負荷量や、ポイントソースから排出された後に河川や溝等に堆積している負荷量が、降雨を媒介として流出することが多いからである。解析において用いる方法は、データの平均化に関する統計的な整理法(クラス分類・クロス集計等)・相関解析法などである。

水文学的な解析方法は、河川の中流や下流に停滞水域が存在する場合には、後述するように水質管理において有用な情報を提示することができる。

b) 比較河川・比較水質項目的な解析(その背景と方法)

河川の水質としては、濁度(あるいはSuspended Solid)、 BOD 、 COD (あるいは KMnO_4 消費量)、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 N 、 P 、 ABS ^{注2)}、重金属などが考えられ、その流出特性や供給特性は、流域特性・土地利用特性により異なることが多い。河川あるいは停滞水域の水質管理計画を立案しようとするれば、水質項目ごとに、汚濁物質の流入・流下特性を明確にし、どのような規制方法(対策)を用いることにより、どの程度の効果があるかを明らかにする必要がある。そこで、本研究では複数の水質項目をとりあげて、同一の水質項目についても流域特性の異なる複数の河川を対象とし、比較河川・比較水質項目的な解析を行う。これにより、水質項目ごとの特性の一般化や、流域特性と負荷量の関係がある程度明らかにすることができる。

c) 解析におけるタイム・スケール

解析におけるタイム・スケールは、対象とする現象

注1) $\text{NH}_4\text{-N}$:アンモニア性窒素

注2) ABS :アルキルベンゼンスルホン酸ナトリウム

の特性ならびに解析結果の適用を考えて設定しなければならない。すなわち、例えば単一出水時の水質や汚濁負荷量特性（ポルトグラフ）を知ろうとする場合には、出水のスケールをいくつかに分割するようなタイム・スケールを設定する必要がある。したがって、本研究のように日単位のデータを用いれば、数日間継続するような出水時のポルトグラフしか分析になじまないことになる。しかし、より大きなタイム・スケール（例えば大河川の単一出水時の特性、月特性、年特性など）の現象については、その特質を把握することができる。

本研究では、毎日観測データを用いて、数日間継続するような出水時の特性、経月特性、経年特性、ならびに従来から河川の流量管理で用いられてきた日単位の流量規模別にみた特性が分析対象となる。

小出水時の水文学的特性を把握するために、タイム・スケールを短くとした観測は、建設省などにより実施されているので参照されたい。^{(12), (13), (30), (33)} また解析において要請されるタイム・スケールについては、参考文献⁽³⁾に詳しく述べられている。

d) データ項目と出典

本研究で用いたデータの概要（河川名、水質項目名、タイムスケール、測定期間等）と出典を表-2に示す。なお、各河川の流域特性の概要は第4章で示す。

(2) 時系列特性の解析

ここでは、多水系、多年度のデータを用いて、タイム・スケールを日・月・年にとって、水質項目ごとの時系列的な変化特性を主として水文学的なアプローチにより明らかにすることを試みる。

(a) ポルトグラフの特性解析

ここでは、まずタイムスケールを日とした場合の流量のハイドログラフと水質・負荷量のポルトグラフを例示的に示す。次に相関解析により降雨・流量と水質・負荷量の関係を把握する。

① ポルトグラフの例

河川①（表-2参照）を例として、水質・負荷量のポルトグラフを濁度・BODについて表示すると、図-1(a), (b)のようになる。これらの図から、河川の水質・負荷量は、相当な部分が河川流量や降雨に応答して変化していることがわかる。

② 相関解析（自己相関、相互相関解析）

ここでは、まず自己相関解析により、水質・負荷量の自己相関関係を明らかにし、降雨・流量の特性と比較することによりポルトグラフの特性を調べる。次に相互相関解析により、降雨・流量に対する水質・負荷量の応答関係を明らかにする。以下では、河川①、④を例にとって、比較水質項目にその結果を示す。

(7) 各ポルトグラフ自体の特性（自己相関解析）

図-2(a), (b)に例示する負荷量・水質の自己相関係

表-2 データ項目と出典

河川名	番号	タイムスケール	水質測定方法	測定期間	観測場所	観測者	水 質 項 目
淀川 [*]	①	日	毎日定時刻	5カ年 (S47~51)	水道局	水道局	濁度・KMnO ₄ 消費量・NH ₄ -N・ABS・BOD
猪名川	②	"	"	"	龍山浄水場	"	濁度・KMnO ₄ 消費量 NH ₄ -N・Cℓ ⁻
千歳川	③	"	"	"	上江別浄水場	"	濁度
多摩川	④	"	"	**	箕布環玉川浄水場	"	濁度・KMnO ₄ 消費量・BOD NH ₄ -N・EC・DO
利根川	⑤	"	"	"	建設省	建設省	Cℓ ⁻
園部川	⑥	"	1時間ごとの観測 によるコンボジット	1年間 (S47)	木川町・園部橋	"	COD・T-P・TOC ケルダール窒素
恋瀬川	⑦	"	"	"	石岡市・愛郷橋	"	COD・T-P・TOC ケルダール窒素
山王川	⑧	"	"	"	石岡市・山王橋	"	COD・T-P・TOC ケルダール窒素
造賀川	⑨	"	毎日定時刻	"	伊佐座浄水場	水道局	濁度・NH ₄ -N

^{*} 磯島・庭原・築島の3地点のデータを用いたが、特に地点名を明示しない場合は磯島地点に対するものである。

** ただし、BODはS.48, 49年のみである。

注1) 水質や負荷量の時系列的な変化を示すグラフをポルトグラフと呼ぶことにする。なお前述の市川新は、水質ハイドログラフという表現方法を用いている（参考文献(12)）。

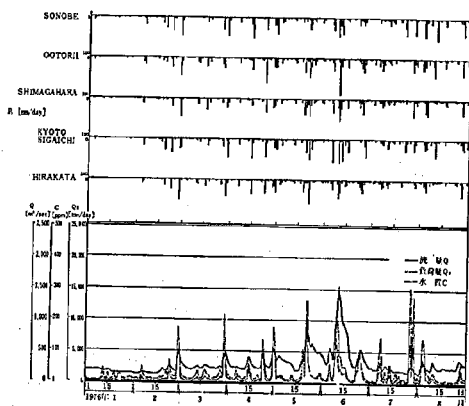


図-1 (a) ポルトグラフの例その1 (河川①, 濁度)

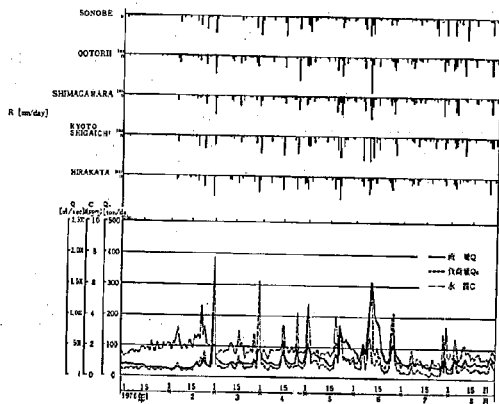


図-1 (b) ポルトグラフの例その2 (河川①, BOD)

数と、同図中の降雨・流量の自己相関係数を比較する。

確率統計水文学における研究により、降雨はランダムでその自己相関係数はデルタ関数的であり、流量は低減部分の存在により自己相関係数がよりゆっくり低減することが明らかにされている¹⁾。したがって、それらと水質・負荷量の自己相関係数を比較することにより

各水質項目の波形（特に低減特性）がわかる。

(イ) 流量～水質・負荷量の関係(相互相関解析その1)

同一地点の流量のハイドログラフと水質・負荷量のポルトグラフ間の相互相関係数を用い、流量～水質・負荷量の応答関係を求めると図-3(a), (b)のようになる。同図より次のことがわかる。

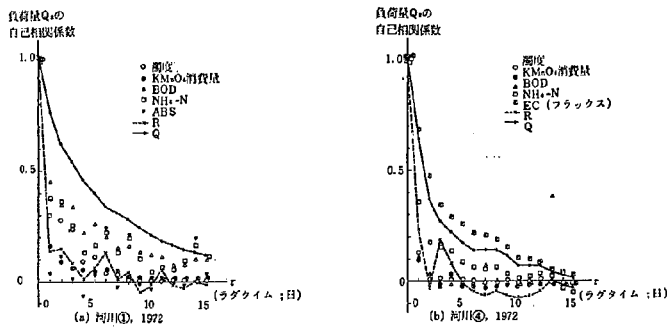
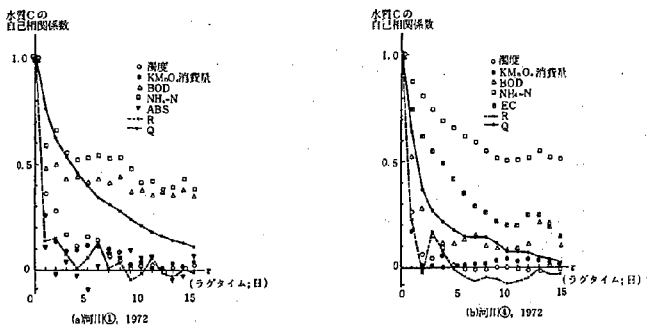
図-2 (a) 負荷量 Q_s の自己相関係数

図-2 (b) 水質Cの自己相関係数

(i) 濁度・ KMnO_4 消費量・BOD・電気伝導度(EC)の負荷量(フラックス)は、比較的小さい流量と高い正の相関関係にあり、その相関は河川①、④では数日間であるが、水質項目により異なる(図-3(a)の河川①濁度で約6~7日)。特にECのフラックスは流量との相関が高く、その波形が流量とほぼ相似であることがわかる。

(ii) 濁度・ KMnO_4 消費量の水質は、流量と正の相関があり、流量が増すと濃度も増加する。そしてその相関はしばらく継続する(図-4(a)の河川①濁度では約5日程度)。そして、それ以前の流量は水質と負の相関関係にあり希釈として作用する。

(iii) BOD・ $\text{NH}_4\text{-N}$ ・EC・ABSの水質は、流量と負

の相関があり、流量が増すと水質は良くなるし、先行流量も希釈に作用していることがわかる。

(ウ) 降雨~流量・水質・負荷量の関係(相互相関解析その2)

降雨~流量・水質・負荷量の応答関係を相互相関係数から見たものが図-4(a), (b)である。ただし、このときの降雨は水質観測地点より上流域のものを用いている。同図に示されている降雨と流量の相互相関係数(相互相関係数)についても、確率統計水文学としてすでに解析が行われており、水文学的解釈が与えられている。したがって、他の相互相関係数を降雨~流量のものと比較することにより次のようなことがわかる。

(i) 濁度・ KMnO_4 消費量・BOD・ $\text{NH}_4\text{-N}$ ・ECの負荷量(フラックス)は、降雨~流量の相関と近い関係

注1) 白と土に換算した値

注2) 負荷量 $Q_s = \text{水質}C \times \text{流量}Q$ であるが、電気伝導度や後述の蓄存微素量(DO)などは負荷量ではないのでフラックスと呼ぶことにする。

注3) ただし、BODは初期においては汚濁型であり、このような水質項目を初期汚濁型と呼ぶことができる。

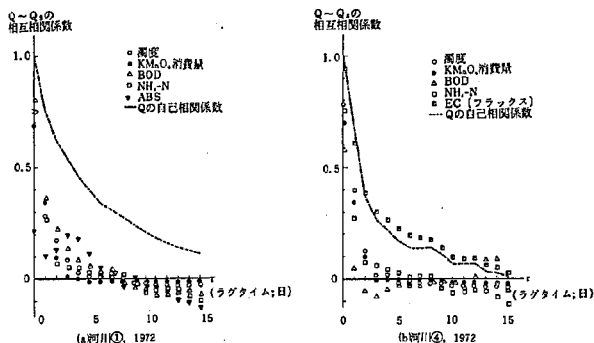
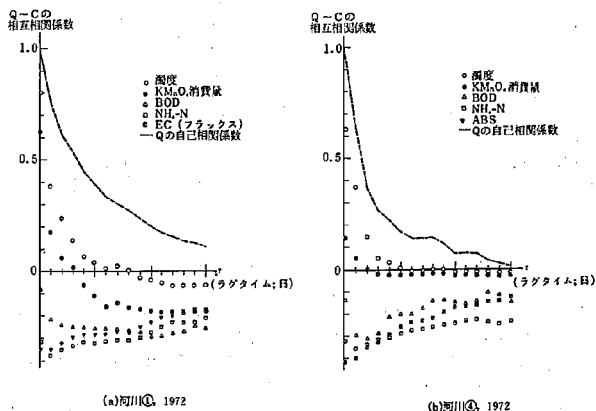
図-3 (a)流量Qと負荷量 Q_s の相互相関係数

図-3 (b)流量Qと水質Cの相互相関係数

にある。河川①では、その相関関係の継続状況が降雨～流量に比較して低減が急である。

(ii)濁度・ KMnO_4 消費量の水質は、降雨～流量の相関と比較的に近い正の相関関係にある。したがって、濁度・ KMnO_4 消費量の水質は降雨に対して汚濁型であり、その影響はしばらく継続することかわかる(図-3(a)の例では約10日間)。

(iii)BOD・ $\text{NH}_4\text{-N}$ ・EC・ABSの水質は降雨と負の相関関係にある。したがって、BOD・ $\text{NH}_4\text{-N}$ ・EC・A

BSの水質は降雨に対して希釈型である。^{注1)}ただし、河川①、④ではBODは初期において(当日および前日の降雨に対して)は汚濁型となっており、それ以後(前々日以前の降雨に対して)は希釈型となっている。

(iv)ECは降雨に対して希釈型であり、そのフлакセスは降雨～流量の関係に近い。

注1) 河川①、④でタイムスケールを日とした場合の結果であることに注意

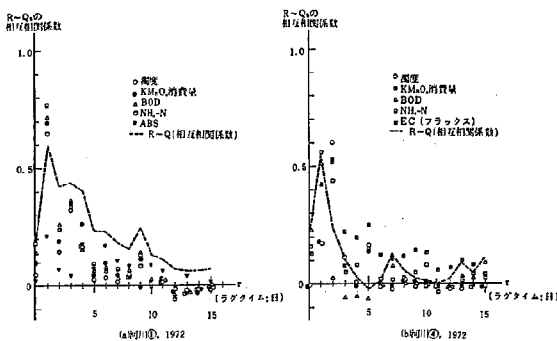
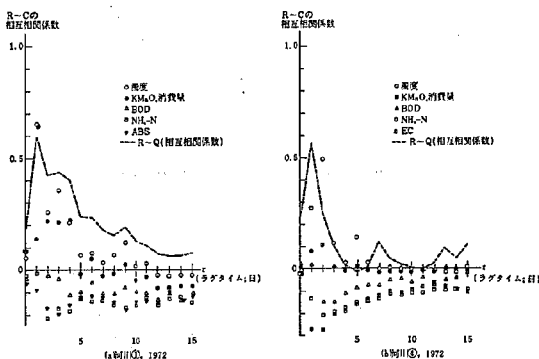
図-4 (a) 降雨Rと負荷量 Q_s の相互相関係数

図-4 (b) 降雨Rと水質Cの相互相関係数

(b) 出水時の特性、経年変化特性、季節変化特性、経年変化特性解析

ここでは、水文学的観点から、水質・負荷量の変動特性を比較水質項目・比較河川のかつ時系列的に分析する。そのための方法としては、単純な統計的操作(平均化操作)のみを用いる。

① 出水時の特性(単一出水時の水質と負荷量)

前述のように、各水質は出水時に比較的急激に変化し、その低減は流量に比較して急なものが多く、流量程ゆるやかな低減部分をもたないことが多い。ここでは、その特性をハイドログラフのように時間に関して時系列的に見るのではなく、流量との関係において時系

列的にみることにする。

以下に示す図-5～12は、河川①の大規模出水について水質項目ごとに流量との関係をみたものである。すなわち図-5～12には、河川①の1972～1976年に発生した9回の大規模出水について、その結果を整理したものである。各図の左側の図(a図)は、単一出水時の挙動を見るために例示したものであり、右側の図(b図)はそれらを重ね合わせたものである。これらの図では、増水時と減水時を区別できるように表示しており、流量についてみると出水時に水質・負荷量の変化がループを描くことがわかる。しかもその変化は流量による流送力のみでは説明できないと考えられる。

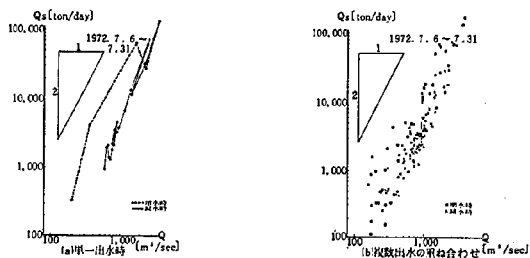


図-5 河川①の濁度・負荷量の出水時の特性

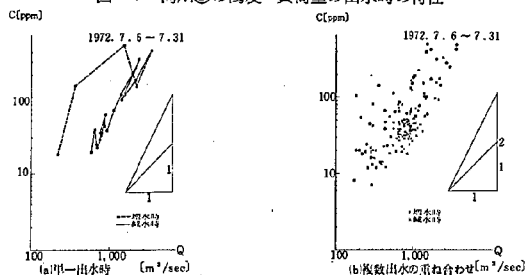


図-6 河川①の濁度・水質の出水時の特性

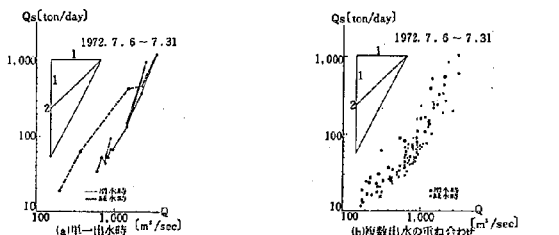


図-7 河川①のKMnO消費量・負荷量の出水時の特性

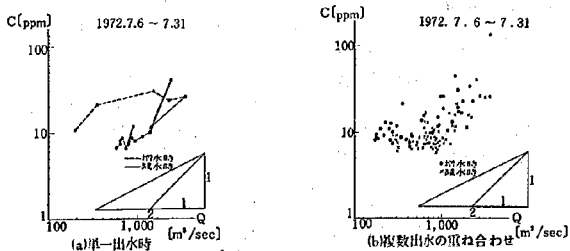


図-8 河川①のKMnO消費量・水質の出水時の特性

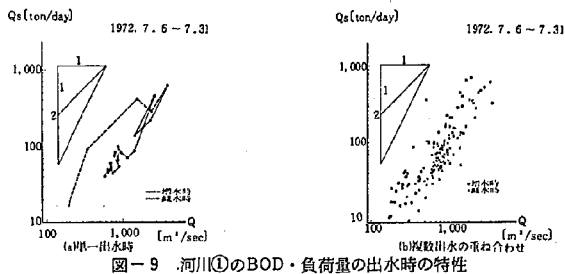


図-9 河川①のBOD・負荷量の出水時の特性

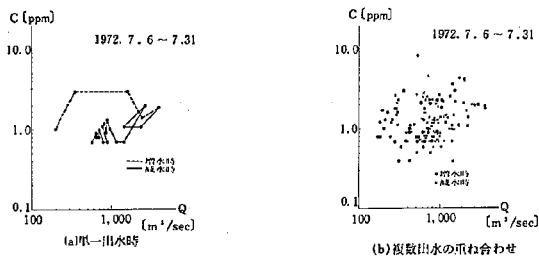


図-10 河川①のBOD・水質の出水時の特性

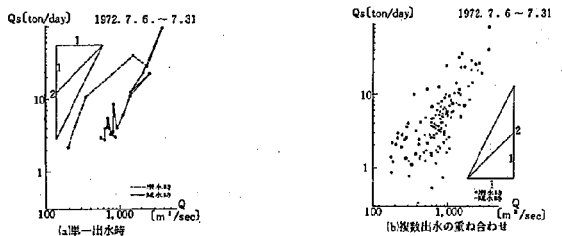


図-11 河川①のNH₄-N・負荷量の出水時の特性

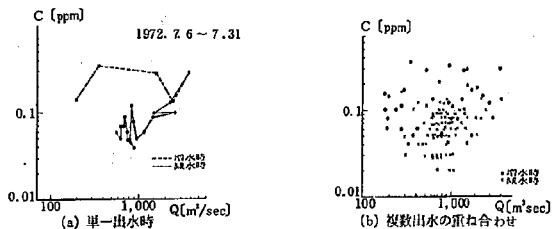


図-12 河川①のNH₄-N・水質の出水時の特性

これらについては後述のシミュレーションの項で再び検討する。以上の図より次のことが明らかとなる。

(i) $Q_s \sim Q$, $C \sim Q$ の関係は、単一出水についてみると時計回りのループを描く。すなわち、同一流量に対して増水時が減水時より大きな値をとる。

(ii) 河川①の各水質項目については、近似的に次の関係式が成立する。

- 濁度 ; $Q_s \sim Q^{1.25}$
; $C \sim Q^{1.2}$
- KMnO_4 消費量 ; $Q_s \sim Q^{1.5-2}$
; $C \sim Q^{0.5}$
- BOD ; $Q_s \sim Q^{1.5}$
; $C \sim Q^{0.5-1.5}$ (注2)
- $\text{NH}_4\text{-N}$; $Q_s \sim Q^{1.5}$
; $C \sim$ (Q と明確な相関関係がない)

② 経月変化特性

ここでは、タイム・スケールを月単位にとり、年間の変動特性をみる。河川①を例として分析した結果を図-13~17に示す。また他の全河川のものについては、補足(後記)に一括して示しているので参照されたい。ただし、収集し得たデータ上の都合により、期間および水質項目は河川により異なっている。また、同一河川で多年度にわたるデータがある場合には、一年間のデータについてその経月変化(その1)を示し、他は重ね合わせてプロットしたもの(その2)を示す。プロットしたデータは、毎日観測したデータを月毎に平均したものである(注3)。この場合にも、増水期と減水期を区別しうるように、その点が何月のものであるかを表示してある。また、経月変化特性を時系列的に表示した例(河川①の濁度について示す)を図-18に示しておく。

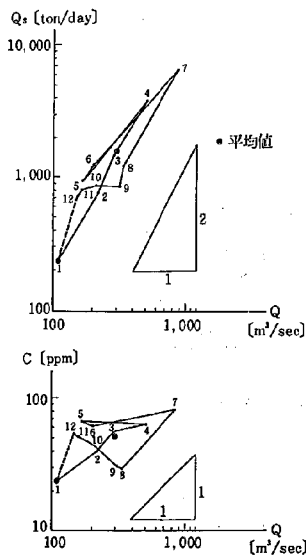


図-13(a) 河川①の濁度の月変化(その1)

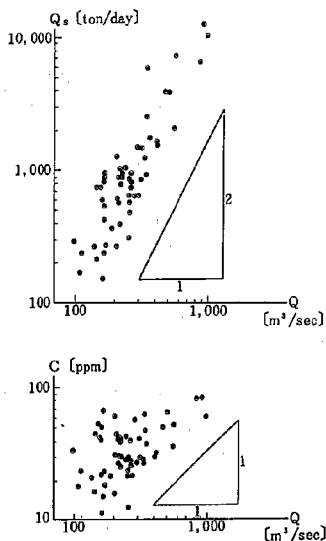
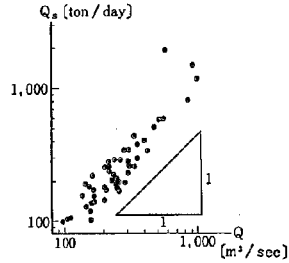
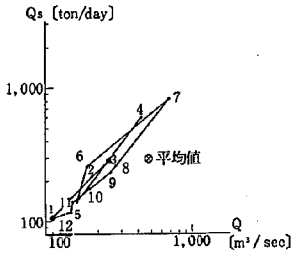


図-13(b) 河川①の濁度の月変化(その2)

注1) 浮田・大西は、小河川のある種の水質項目では、反時計回りのループが観測されることを示している(参考文献(31))。これは、都市河川研究室で行った雨天時合流式下水道越流水調査でも時折観測されている。

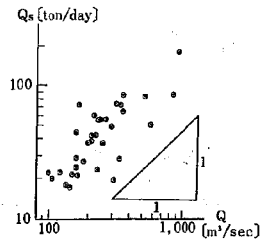
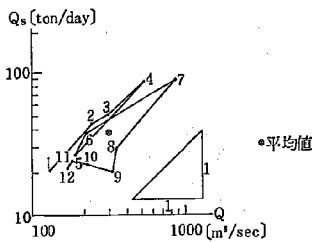
注2) あまり明確でない。

注3) 算術平均値



図一14(a) 河川①KMnO₄消費量の月変化(その1)

図一14(b) 河川①のKMnO₄消費量の月変化(その2)



図一15(a) 河川①のBODの月変化(その1)

図一15(b) 河川①のBODの月変化(その2)

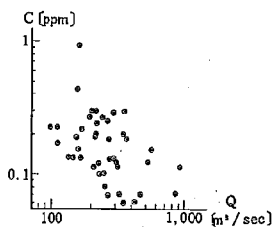
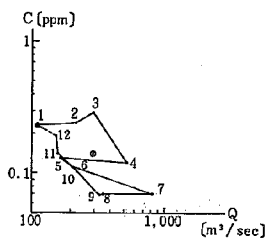
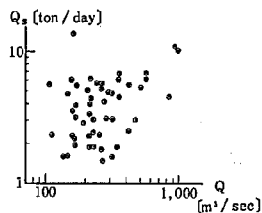
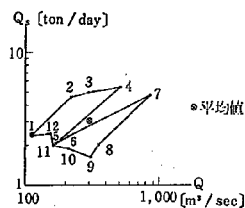
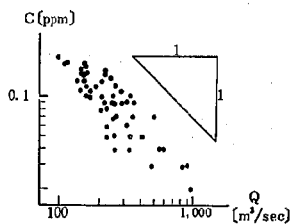
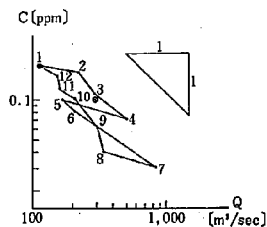
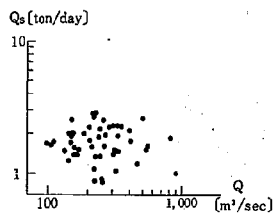
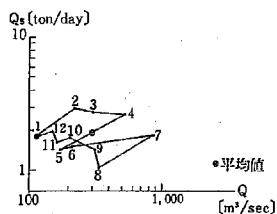
図-16(a) 河川①のNH₄-Nの月変化 (その1)図-16(b) 河川①のNH₄-Nの月変化 (その2)

図-17 (a) 河川①のABSの月変化 (その1)

図-17 (b) 河川①のABSの月変化 (その2)

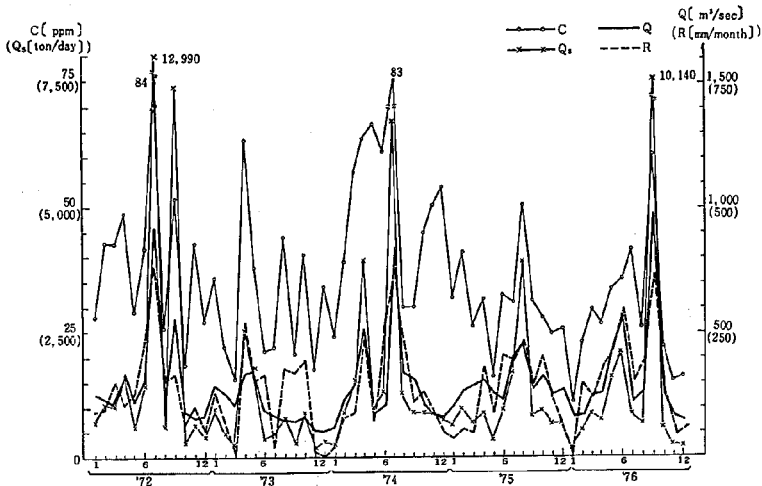


図-18 河川①の濁度の経月変化の例 (月単位のボルトグラフ、ハイドログラフ)

以上の図より、タイム・スケールを月として見た場合には次のことが明らかとなる。

(i) 濁度については、対象とした河川①～④、⑨について次のような傾向がある。

• $Q_s \sim Q^0$, $C \sim Q$

したがって、流量に関して汚濁型である。

(ii) $KMnO_4$ 消費量については、対象とした河川①、②、④について次のような傾向がある。

• $Q_s \sim Q$, $C \sim \text{constant}$

(iii) CODについては、対象とした河川⑥～⑧について次のような傾向がある。

• Q_s (明確な関係なし), $C \sim Q^{-1}$

(iv) BODについては、対象とした河川①、④について次のような傾向がある。

• $Q_s \sim Q$, $C \sim \text{constant}$ (注1)

(v) NH_4-N については、対象とした①、②、④、⑨の河川について次のような傾向がある。

• $Q_s \sim Q$, $C \sim Q$

(vi) TOCについては、対象とした⑥～⑧の河川について次のような傾向がある。

• $Q_s \sim Q$, $C \sim Q^{-0.5}$

(vii) 全リン (T-P) については、対象とした河川⑥～

⑧について次のような傾向がある。

• $Q_s \sim Q$, $C \sim \text{constant}$

(viii) A B Sについては、対象とした河川①について次のような傾向がある。

• $Q_s \sim \text{constant}$, $C \sim Q^{-1}$

(ix) 電気伝導度 (EC) については、対象とした河川④について次のような傾向がある。

• $Q_s \sim Q^{0.7}$, $C \sim Q^{-0.3}$

そして流量との相関がきわめて高い。

(x) Cl^- については、対象とした河川②～⑤について次のような傾向がある。

• $Q_s \sim Q$, $C \sim Q^{0.4-0.5}$

以上の図-13～17および付図よりわかるように、今回用いたデータにおいてもGunnerson¹³⁾や羽田¹⁴⁾らが指摘したような、年周期のループ特性も見うけられる。しかし、相対的に単一出水時程それは明確でない。

③ 季節変化特性

水質の季節変化は前述の経月変化図より明らかであるが、ここではより単純化したものを、河川①の濁度・BODについて例示する (図-19)。ただし、プロットとしたデータは毎日観測データを5年間にわたって平均 (算術平均) したものである。これにより、濁度の水質・負荷量は春から秋にかけての出水期に増大

注1) 河川によってその差がかなりある。

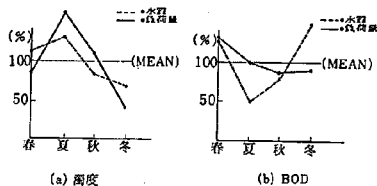
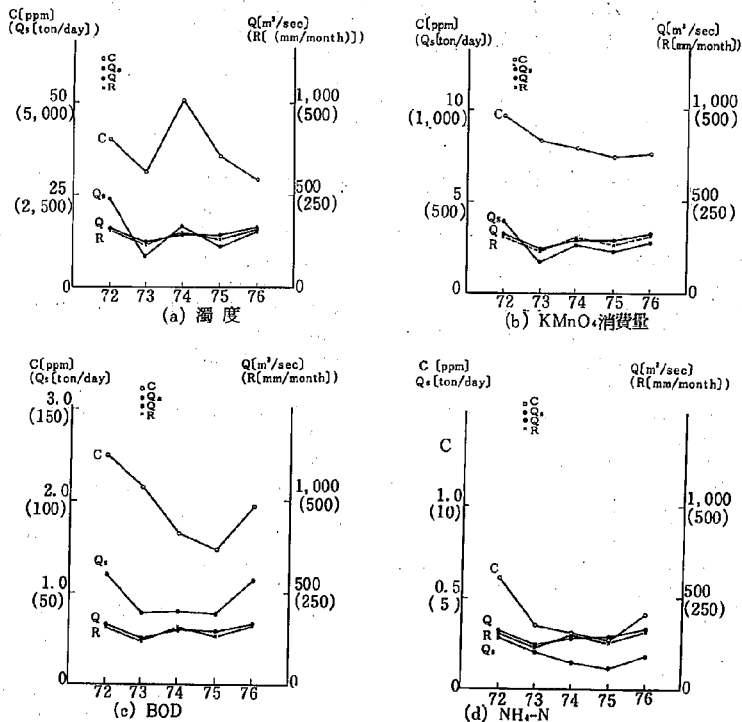


図-19 河川①の濁度・BODの季節変化

し、秋から冬にかけての低水期に低下していることがわかる。また、BODはその逆である。

④ 経年変化特性

ここでは、河川①について、比較水質项目的に年単位の時系列変化を調べる。図-20(a)~(d)にその結果を示す。ただし、プロットしたデータは、毎日観測データを年間にわたって平均(算術平均)したものである。図-20(a)~(d)は、濁度・ KMnO_4 消費量・BOD・ $\text{NH}_4\text{-N}$ について時系列的に平均値を示したものであり、図-21はBODについて例示的にその変動幅(日単位の変動幅)を示したものである。

図-20 河川①の濁度・ KMnO_4 消費量・BOD・ $\text{NH}_4\text{-N}$ の経年変化

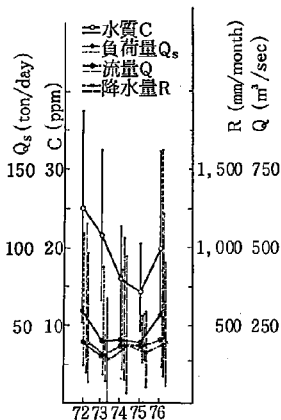
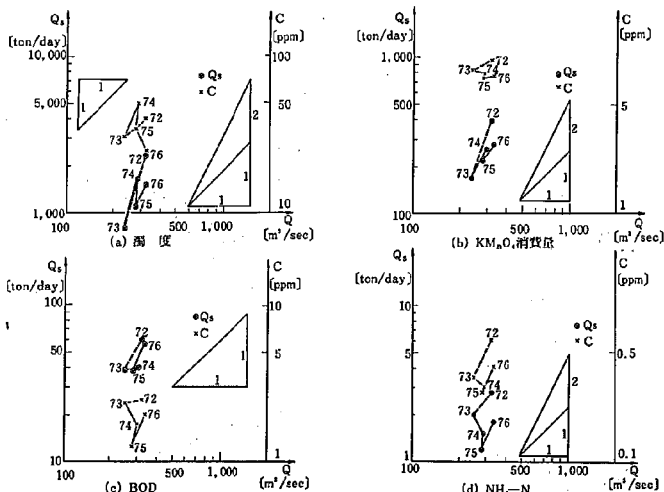


図-21 河川①のBODの変動幅

図-22(a)~(d)は、汚濁負荷流出状況が時系列的にどのように変化してきているかを見るために、流量指標も導入してプロットしたものである。図-22(a)~(d)は年間の平均値の時系列変化を見たものであり、(e)~(h)は流量規模別の水質・負荷量が経年的にどのように変化しているかを見たものである。図-22のように表示して、同程度の流量における水質・負荷量が経年的に一定の傾向をもって変化している場合には、水質の悪化や改善が認められることになる。図-22より河川①の水質・負荷量の経年変化をみると、同規模の流量に対する水質・負荷量の値が低下しているきざしが認められるので、河川①の水質および流出負荷量は改善される傾向にあると思われる。汚濁負荷流出量は、前述したように流量(降水量)によって大きく変化するので、水質および負荷量が土地利用の変化や汚濁削減計画の実施によりどのように変化してきているかを見るためには、流量の影響(水文的要因の影響)を取り除いて考える必要がある。したがって、汚濁負荷量の流出状況や水質の経年変化を知るためには、流量指標を含む図22(a)~(h)のような取り扱いが要請される。^(E1)

図-22 (a)~(d) 河川①の濁度・KMnO₄消費量・BOD・NH₄-Nの経年変化(平均値)

注1) 従来から河川水質の管理においては、水質の経年変化を知るために、低水流量の流況における水質が主として用いられてきたが、図-22に示すような全流況時における傾向をみることも重要であると考えられる。

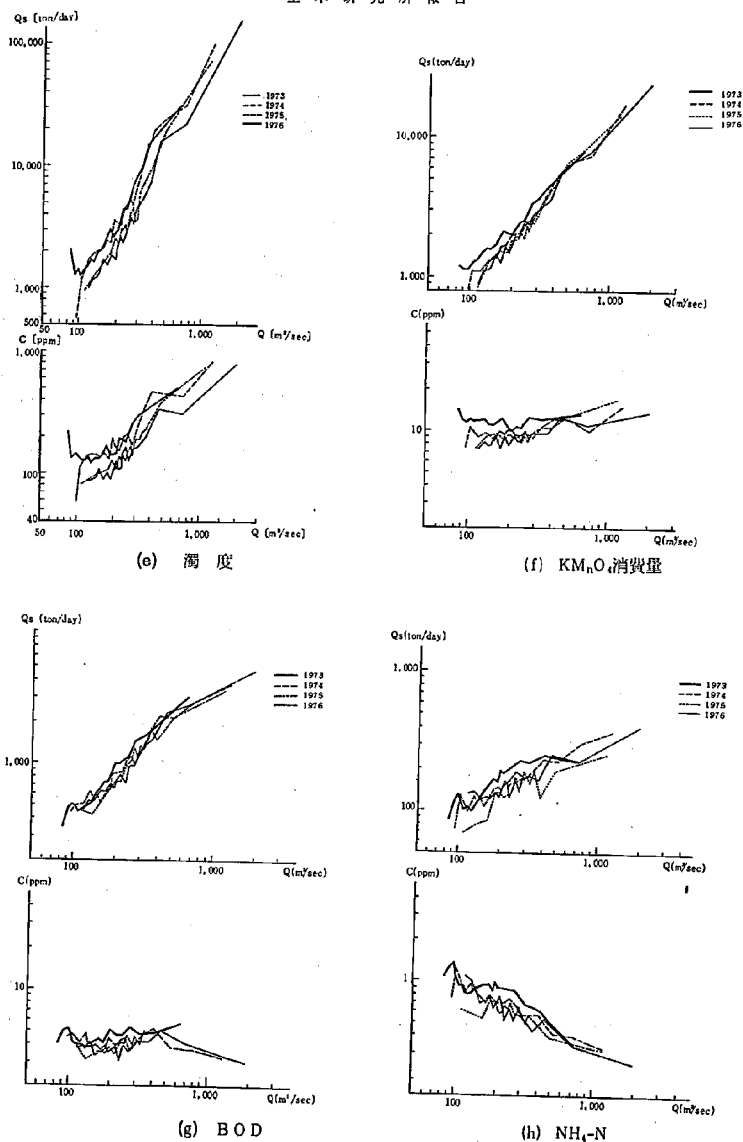


図-22 (e)~(h) 河川①の濁度・ KMnO_4 消費量・BOD・ $\text{NH}_4\text{-N}$ の経年変化(流量規模別)

(3) 汚濁負荷流出特性の解析

ここでは、汚濁負荷の流出特性を、水文学的にミクロに見た場合、ならびに統計的にマクロに見た場合について明らかにしておく。前者では、汚濁負荷流出および水質に及ぼす先行降雨の影響について述べ、後者では低水流量・平水流量・豊水流量といった流量規模別（したがって、時系列を無視する）に平均化して水質・負荷量の値をみることにする。

a) 水文学的に見た先行降雨が汚濁負荷流出に与える影響

ここでは、水文学的な汚濁負荷流出量シミュレーション・モデルを作成する場合に必要な先行降雨が流出に及ぼす影響を明確にしておく。

① マクロ的・統計的にみた場合

先行降雨が汚濁負荷流出に与える影響については、前述の降雨と汚濁負荷量および水質の相互相関解析でその一部を明らかにした。ここでは、分析の方法を先行降雨量に基づいて分類・整理したものを、河川①の濁度・BODについて、図-23、24に示しておく。用い

たデータは河川①の1972～1976の5年間の毎日観測データである。図-23、24より、次のことが明らかとなる。

- ・河川①の場合には、汚濁流出に当日～2日前までの間の降雨量が大きな影響を与える。特に前日の降雨の影響が大きい。^{注1), 注2)}
- ・ $R(-1)$, $R(-2)$, $R(-2-0)$ 共に河川①では、30mmぐらいから影響が出ている。
- ・図-43(a)よりわかるように、BODについては先行降雨量が多くなると降雨による希釈作用が働いている。

ここに $R(t) = \int_0^t R(t) dt$ であり、図中の記号は次のように定義した。

【記号】

- : $R(1) = \int_0^1 R(t) dt$ に対する水質・負荷量
- ×: $R(-1) = \int_{-1}^0 R(t) dt$ ”
- △: $R(-2) = \int_{-2}^{-1} R(t) dt$ ”
- : $R(-2-0) = \int_{-2}^{-2} R(t) dt$ ”

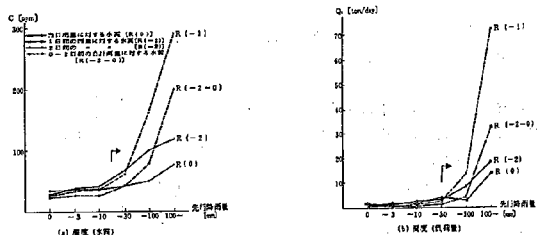


図-23 河川①における降雨に対する濁度の応答

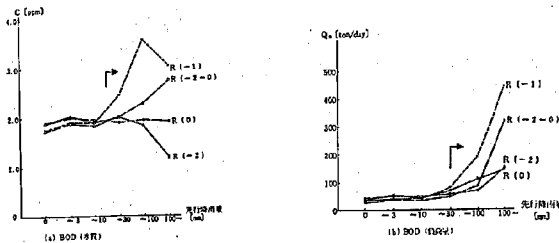


図-24 河川①における降雨に対するBODの応答

注1) これは主として、水質観測が午前9時の一時点であり、降雨量が1日の総量であることによる。また、流速時間の影響も含まれている。

2) 降雨は日単位でみると全流域に降ることが多い(降雨の地区間の相関がきわめて高い)。

② ハイドログラフ・ポルトグラフのピーク値でみた場合

ここでは、降雨をそれに付随して生じる流量で代替させて考察する。河川①の濁度・BODについて、ある流量規模以上の流量ピークに対応する濃度・負荷量ピーク値をプロットしたものを図-25, 26に示す。同図に示したデータは、河川①の1972~1976年間の全データを用いて作成したポルトグラフから、ピーク流量が250 m^3/sec 以上のものを総てひろいあげたものである。同図において孤立降雨としたものは、前の5日間が流量の低減部分にあたるか、あるいはほぼ同じ流量の状態にあった場合のものである(前5日間の流量は250 m^3/sec 以下)。また前降雨ありとしたものは、前の5日間に250 m^3/sec を超える出水(ピーク出水)があった場合のものである。これらの判定基準ならびに設定した流量規模は必ずしも妥当なものとは言えないが、図-25, 26から先行降雨が汚濁負荷流出規模に与える影響の状況を知ることができる。

すなわち、濁度・BODの水質・負荷量のピーク値で見た場合に、先行の降雨(流出)があれば、それが無い場合に比較して同じ流量規模に対して、汚濁負荷流出量は減少していることがわかる。この結果は、後述する水文的水質・負荷量シミュレーション・モデルの基本構造の一部を与える。

b) 統計的にみた流量と水質・負荷量の関係

① 流量規模別にみた流量発生頻度と水質・負荷量
流量規模別に平均化した流量の発生頻度と水質・負荷量の平均値(算術平均値)の関係を、河川①の濁度・ KMnO_4 消費量・BOD・ $\text{NH}_4\text{-N}$ について、図-27~30に例示的に示す^{注1}。また図-31, 32には、濁度・BODについて流量規模の小さい方から累積していった汚濁負荷量、および各流量規模ごとの負荷量を総量に対して%表示したものを示す。また、図-33は最大流量に対する流出規模を%表示し、それに対する濁度・BOD負荷量の累積和をみたものである。

以上の図は、各流量規模(日流量規模)ごとの平均値についてみたものであるが、流量規模ごとに汚濁負荷量がどのように分布しているかをみたものは、図-34, 35である。したがって上述のような図を解釈する場合には、このような前提(各規模ごとにちらばりがあること)に注意を要す。

注1) 流量は各規模の中央値とした。

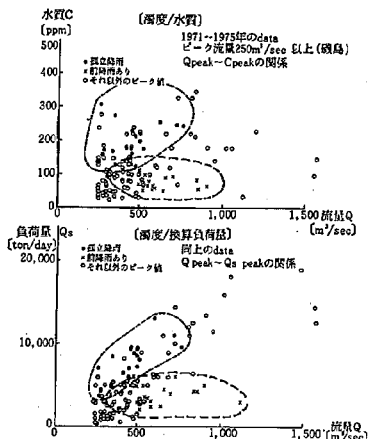


図-25 河川①濁度の $Q_{\text{peak}} \sim C_{\text{peak}}$ (or Q_s peak) の関係

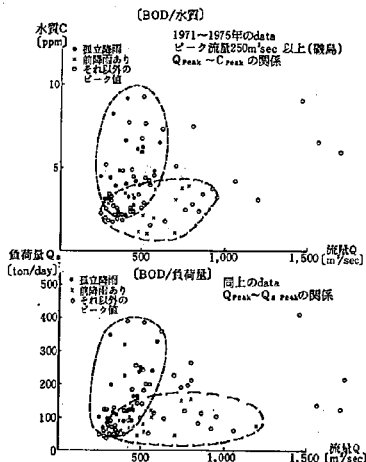


図-26 河川①BODの $Q_{\text{peak}} \sim C_{\text{peak}}$ (or Q_s peak) の関係

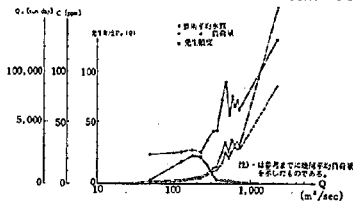


図-27 流量の発生頻度、平均水質・負荷量 (河川①)

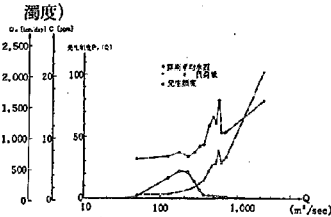


図-28 流量の発生頻度、平均水質・負荷量 (河川①
KMnO₄消費量)

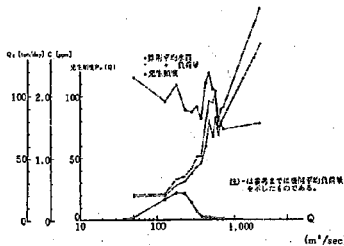


図-29 流量の発生頻度、平均水質・負荷量 (河川①
BOD)

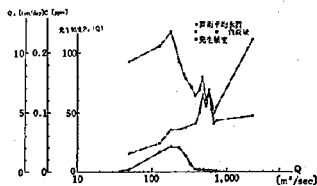


図-30 流量の発生頻度、平均水質・負荷量 (河川①
NH₄-N)

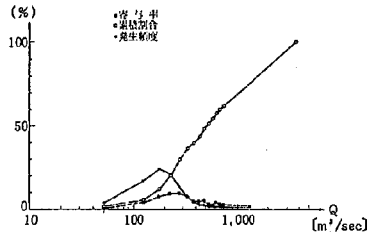


図-31 総負荷量に対する流量規模毎の寄与率と累積割合 (河川①濁度)

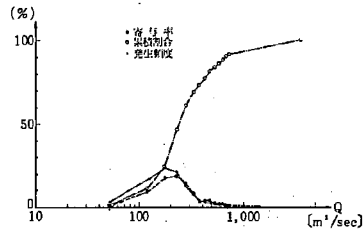


図-32 総負荷量に対する流量規模毎の寄与率と累積割合 (河川①BOD)

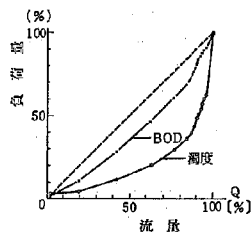


図-33 流量と負荷量の累積分布関係 (観測日による
クラス分け) (河川①)

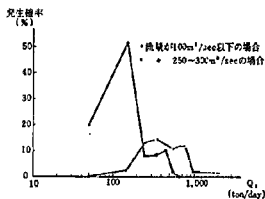


図-34 各流量規模における負荷量の分布状況例 (河川①濁度)

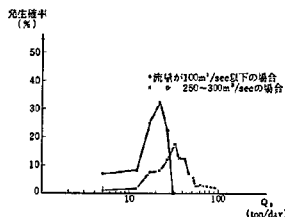


図-35 各流量規模における負荷量の分布状況例 (河川①BOD)

図-36~49は、流量規模ごとに水質・負荷量の平均値をみたものであり、マクロ的な流量と水質・負荷量の関係を知ることができる。^(注1)

図-36~49により、流量規模別に見た場合に、濃度・負荷量と流量の間に、各河川の中規模流量に対して近似的に次の関係が成立することがわかる。

- ・濁度: $Q_s \sim Q^2$, $C \sim Q$
- ・ KMnO_4 消費量: $Q_s \sim Q$, $C \sim \text{constant}$
- ・BOD: $Q_s \sim Q$, $C \sim \text{constant}$
- ・ $\text{NH}_4\text{-N}$: $Q_s \sim Q^{0.5}$, $C \sim Q^{-0.5}$
- ・TOC: $Q_s \sim Q$, $C \sim \text{constant}$
- ・T-P: $Q_s \sim Q$, $C \sim \text{constant}$
- ・ケルダール窒素: $Q_s \sim Q$, $C \sim \text{constant}$

図-36~49より、各水質項目が流量規模に対して汚濁型か希釈型か、あるいはその中間型であるかわかる。すなわち、マクロ的に平均してみると濁度は汚濁型、 $\text{NH}_4\text{-N}$ は希釈型、 KMnO_4 消費量・BOD・TOC・T-P・ケルダール窒素はほぼその中間型であることがわかる。しかし、例えば KMnO_4 消費量(図58~60)についてみると、流量が増すにつれて一時水質が良くなり、さらに増すと再び悪化する傾向にあり、上記のタイプ分けはあくまでもマクロ的にみた場合のものである。

注1) ここでは、時系列の特性は平均化により相殺されている。

以上は流量規模別に平均化してみたものであるが、各出水別にみた場合に、各水質項目が汚濁型か希釈型であるかは、前出の3.(2)の相関解析によりわかる。すなわち、 $Q_s \sim C$ の相互相関係数の $r=0$ の値が負であるものは、各出水について平均的にみれば希釈型である。なお、市川は参考文献⑫において、単一出水時の濁度・COD・ $\text{NH}_4\text{-N}$ のボルトグラフを測定している。それによると濁度・CODが汚濁型、 $\text{NH}_4\text{-N}$ が希釈型となっており、相関解析の結果とほぼ一致している。

なお、図36~49は、第4章で使用するための基礎資料であり、流量の規模別頻度と濃度・負荷量の平均値を示している。

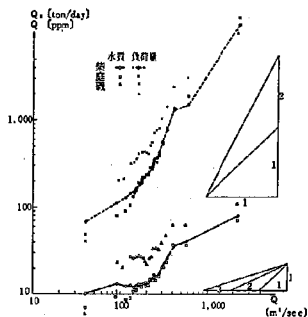


図-36 濁度; Q_s , $C \sim Q$ の関係 (河川①)

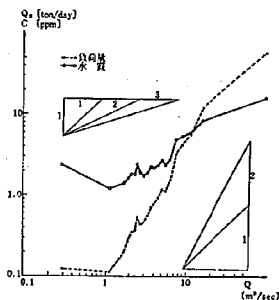


図-37 濁度; Q_s , $C \sim Q$ の関係 (河川②)

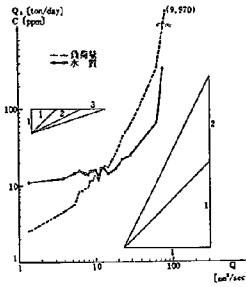


図-38 濁度; Q_s , $C \sim Q$ の関係 (河川④)

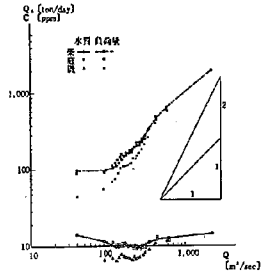


図-39 KMnO_4 消費量; Q_s , $C \sim Q$ の関係 (河川④)

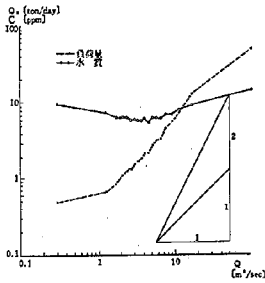


図-40 KMnO_4 消費量; Q_s , $C \sim Q$ の関係 (河川②)

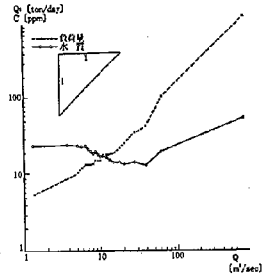


図-41 KMnO_4 消費量; Q_s , $C \sim Q$ の関係 (河川④)

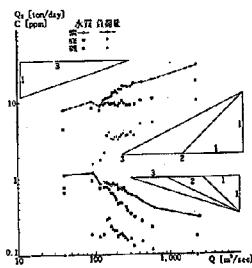


図-42 $\text{NH}_4\text{-N}$; Q_s , $C \sim Q$ の関係 (河川①)

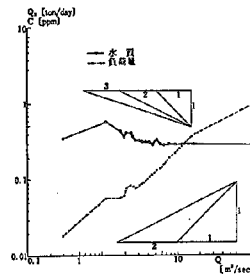
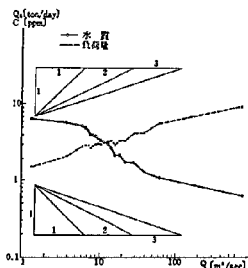
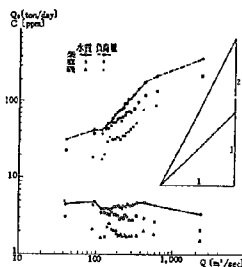
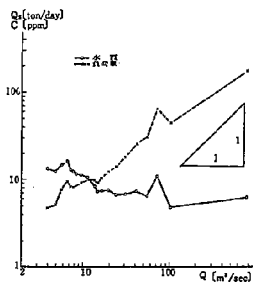
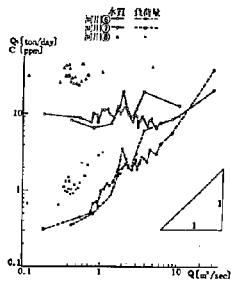
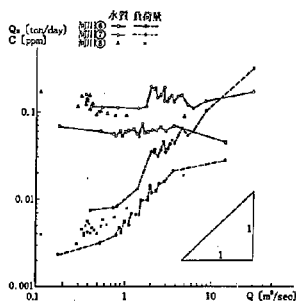
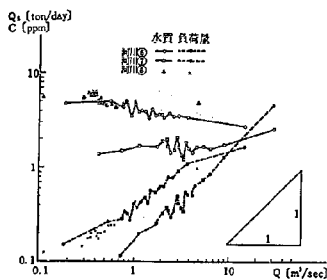


図-43 $\text{NH}_4\text{-N}$; Q_s , $C \sim Q$ の関係 (河川②)

図-44 $\text{NH}_4\text{-N}$; Q_s , $C\sim Q$ の関係 (河川④)図-45 BOD; Q_s , $C\sim Q$ の関係 (河川①)図-46 BOD; Q_s , $C\sim Q$ の関係 (河川④)図-47 TOC; Q_s , $C\sim Q$ の関係 (河川⑥～⑧)図-48 T-P; Q_s , $C\sim Q$ の関係 (河川⑥～⑧)図-49 ケルゲール素; Q_s , $C\sim Q$ の関係 (河川⑥～⑧)

(4) 基礎的な解析結果のまとめ

本章では、水量・水質の毎日観測データを用いて、タイム・スケールを日・月・季・年にとって、水質・負荷量の変化特性を水文学的な観点から明らかにした。その際に、必要に応じて比較河川・比較水質項目的な検討を行った。その結果のうちで主要なものの概要を整理すると次のようになる。

a) 時系列的な解析で明らかになったこと

① ポルトグラフの特性について

- ・降雨・流量ハイドログラフと水質・負荷量ポルトグラフを示し、水質・負荷量が相当の部分において流量や降雨に応答しながら変化していることを示した(図-1(a), (b))。
- ・水質・負荷量のポルトグラフの特性を、すでに水文学(確率統計水文学)において特性が明らかとされている降雨・流量ハイドログラフと比較することにより明らかとした。
- ・すなわち、降雨・流量と各水質・負荷量の自己相関係数を比較することにより、各水質・負荷量の低減特性が、降雨・流量とどのような関係にあるかを示した(図-2(a)~(b))。
- ・また、降雨・流量と水質・負荷量の相互相関係数を求めることにより、水質・負荷量が降雨・流量に対してどのような応答関係にあるかを明らかにした。これにより、降雨・流量が水質・負荷量にどのような影響(希釈・汚濁など)を与えているか、またどの期間の降雨・流量がどの程度効いているかがわかる(図-3, 4)。
- ・これらの結果は、前降雨の影響などと合わせて、ポルトグラフを水文学的にシミュレーションする場合の基本構造を与える(第4章(3)参照)。

② 出水時の特性・経月特性・季節特性・経年特性解析により明らかになったこと

- ・タイム・スケールを日としたときの単一出水時の特性(複数の水質項目)を、河川①を例にとって、流量を説明変数とする水文学的アプローチにより明らかにした(図-5(a)~(2b))。そして、同じ流量に対して増水時の水質・負荷量が減水時より大きな値をとり、したがって $C \sim Q$ あるいは $Q_s \sim Q$ カーブはループを描くことを示した。また、平均的にみた場合の $C \sim Q$ および $Q_s \sim Q$ の関係を、水質項目ごとに明らかにした。これらの結果は、時系列にポルトグラフをシミュレーションする場合においては、モデルの基本構造として考慮されるべきものである(第4章(3)参照)。
- ・タイム・スケールを月とした時の特性を、多河川・

多水質項目について、流量との関係において明らかにした。そして、流量によりどの程度まで濃度・負荷量を説明できるかを、水質項目ごとにグラフにより示した(図-13~17, 付図-1~19)。また、 $C \sim Q$ および $Q_s \sim Q$ の近似的な関係を示した。

- ・タイム・スケールを季節とした場合の特性を、河川①の濁度・BODを例にとって明らかにした(図-19)。

- ・タイム・スケールを年とし、河川①を例として経年的な水質・負荷量変動特性を明らかにした。その場合に、水質・負荷量は降雨あるいは流量によって変化するの、時系列的な変化を見るためには、それらの影響を除いて見る必要があることを述べ、そのための方法を示した(図-21, 22)。

b) 汚濁負荷の流出特性解析で明らかになったこと

① 水文学的にみた先行降雨が汚濁負荷流出に与える影響

- ・前降雨が河川水質・汚濁負荷量に与える影響については、前述の相互相関解析によって定性的な傾向は明らかとなっているが、ここでは河川①を例にとって、その影響の程度を、前降雨の規模別に調べた(図-23, 24)。また、先行降雨(それに伴う流出)により汚濁負荷流出が生じると、その履歴現象によりすぐ後の汚濁負荷流出量(あるいは水質)は減少することを示した(図-25, 26)。これらの結果は、水質・負荷量を多数の出水について連続シミュレーションするモデルを作る場合には、先行降雨(流出)の影響として考慮されるべきものである(第4章(3)参照)。

② 流量規模別にみた流量と水質・負荷量の関係

- ・前降雨の影響や時間・日・月・季節変化による変動分を統計的に平均化した場合の流量と水質・負荷量の関係を、多河川・多水質項目について明らかにした(図-27~49)。その際に、各流量規模ごとの負荷量の発生頻度を例示した(分布状況、図-27~30)。
- ・そして、その結果と流量の発生頻度を掛けることにより、流量規模にわたって累加した負荷量を求めた(図-31~33)。
- ・ここで示した $C \sim Q$ および $Q_s \sim Q$ の関係は、時系列性は無視しているが(したがって履歴現象や出水時と減水時の特性等は平均化により消されている)、マクロ的に晴天時および雨天時の水質・負荷量特性を知るために活用することができる。
- ・すなわち、流量(降雨)に関して各水質は汚濁型

であるか希釈型であるか、またその程度がどのくらいであるかわかる。

c) その他の結果

以上a), b)および後述の4.(3b)の結果を用いて、 Q_s およびCをQのべき乗として記述した場合の指数nを整理すると表-3のようになる。同表からわかるように、タイム・スケールのとり方および対象とするデータ（出水時のみを対象とした場合と全データを対象とした場

合のちがいを指す）により、nは若干異なる値となっている。しかし、流量が Q_s およびCに与える影響は、定性的にはほぼ一致していることがわかる。なお、表-3に示される関係式を得る際に、 $Q_s = C \cdot Q$ の関係をj用いて $C \sim Q^{n-1}$ 、 $Q_s = Q \cdot C \sim Q^{n+1}$ としてべき指数を整合させることも可能であるが、今回はそのような操作はしていない。

表-3 $Q_s, C \sim Q^n$ としたときのnの値

データ 水質項目	日 変 化		月 変 化 (複数河川)	流量規模別 (複数河川)	備 考
	出水時（河川①のみ）	日データによる回帰式より			
濁 度	$Q_s \sim Q^{-2.5}$ $C \sim Q^{-1.2}$	$Q_s \sim Q^{1.6-1.9}$ $C \sim Q^{0.6-0.9}$	$Q_s \sim Q^2$ $C \sim Q$	$Q_s \sim Q^2$ $C \sim Q$	(1) これらの関係式は、3.(2b)①、②、④および後述の4.(3b)①ア)で得られたものであり、本文中に明示したように、これらの式を得るために使用したデータの整合は必ずしもとれていない。 (2) したがって、定性的な Q_s, C とQの関係を見るためのものである。(各河川ごとの厳密な関係式は本文中に示した)
KMnO ₄ 消費量	$Q_s \sim Q^{1.5-2}$ $C \sim Q^{0.5}$	$Q_s \sim Q^{1-1.2}$ $C \sim Q^{0.2-0.7}$	$Q_s \sim Q$ $C \sim Q^0$	$Q_s \sim Q$ $C \sim Q^0$	
BOD	$Q_s \sim Q^{1.5}$ $C \sim Q^{0.5-0.9}$	$Q_s \sim Q^{0.6-0.9}$ $C \sim Q^{-0.3-0.6}$	$Q_s \sim Q$ $C \sim Q^0$	$Q_s \sim Q$ $C \sim Q^0$	
NH ₄ -N	$Q_s \sim Q^{1-2}$ C（明確な関係なし）	$Q_s \sim Q^{0.1-1.2}$ $C \sim Q^{-0.6-0.1}$	$Q_s \sim Q$ $C \sim Q^{-0.5}$	$Q_s \sim Q^{0.5}$ $C \sim Q^{-0.5}$	
TOC	—	$Q_s \sim Q^{1-1.1}$ $C \sim Q^{0.1-0.3}$	$Q_s \sim Q$ $C \sim Q^{-0.5}$	$Q_s \sim Q$ $C \sim Q^0$	
T-P	—	$Q_s \sim Q^{0.7-1.1}$ $C \sim Q^{-0.3-0}$	$Q_s \sim Q$ $C \sim Q^0$	$Q_s \sim Q$ $C \sim Q^0$	
ケルダール窒素	—	$Q_s \sim Q^{0.8-1.1}$ $C \sim Q^{-0.2-0}$	—	$Q_s \sim Q$ $C \sim Q^0$	
EC	—	$Q_s \sim Q^{0.7}$ $C \sim Q^{-0.2}$	$Q_s \sim Q^{0.7}$ $C \sim Q^{-0.2}$	—	

4. 水質・負荷量特性解析結果を応用した汚濁負荷量流出機構の解明

(1) 概 要

ここでは、第3章で解析した基礎的な事柄をもとにして、いくつかの実際上有益な結果を提示する。その内容は、①総量規制を前提とした晴天時および雨天時分の負荷量の分離、②河川の汚濁負荷量のシミュレーション、③地域（流域）特性と汚濁流出の関係、④ポイント・ノンポイント負荷量の分離についてである。

①では、晴天時および雨天時の汚濁負荷量の分離を行う。そして現在の汚濁防止対策の位置づけと将来の対策について言及する。

②では、基礎的な水質解析結果をもとにして、水文学的に水質をシミュレーションする場合の基礎的要件

を明確にする。そして、いくつかのケース・スタディにおいて作成したモデルを提示する。

③では、地域（流域）の特性と汚濁流出の関係を複数の河川データを用いて解析する。

④では、ポイントソースとノンポイントソースからの汚濁負荷量の分離について検討する。

(2) 総量規制を前提とした晴天時および雨天時の負荷量の分離

河川の水質・負荷量規制を考える場合には、いくつかの基本的な前提を設定しておくことよい。それは、日本のような急流河川では、工学的に二つのケースを考えるとよいからである。一つは、上水道として水が利用でき、水遊びや水泳ができるような清浄な水が晴天時に流れているようにすることである。あと一つは、中流や下流に湖、ダム、潟、浦および内瀬などの停滞

水域が存在する場合に、富(過)栄養化等の汚染を防止することである。前者の場合には、日常のポイントソースからの汚濁負荷量が相対的に重要である。後者では、降雨によって流送されるノンポイントソースからの汚濁がきわめて重要となる。ここに、ポイントソースからの汚濁負荷量とは人間活動により排出される負荷量のうち、下水管や汚水溝等を経由して河川に流入するものを指す。また、ノンポイントソースからの汚濁負荷量は、自然地や農地、都市の地表面等から主として降雨に伴って河川に流入してくる汚濁負荷量である。その源は、自然地や建設現場での土地の浸食、農薬肥料・糞糞、都市に堆積した塵埃などである。

ここでは、後者のケースを想定した水質管理における管理目標を設定するために、前述の晴天時と雨天時の汚濁負荷量の分離について記す。その結果は、ポイントソース、ノンポイントソースからの汚濁負荷量の近似的な分離とも考えられるが、これについては後述する。

a) 晴天時と雨天時の負荷量の分離(分離方法1)

前述のように、晴天時と雨天時の汚濁負荷量の分離は、停滞水域の汚濁制御という面からはきわめて重要

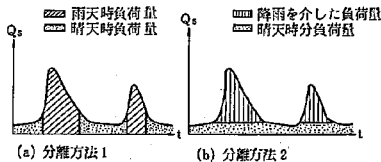


図-50 分割方法の概念図

であるが、それは第3章の基礎的な解析結果を用いて比較的容易に算定できる。すなわち、実測データから与えられる平均的な $Q_s=f_1(Q)$, $Pr(Q)=f_2(Q)$ より、流量規模に関する累加負荷量は次式で求められる。

$$Q_s(Q) = -\int_0^Q dq_s = -\int_0^Q f_1(q) \cdot Pr(q) dq \dots (4-1)$$

ここに、 $Pr(Q)$ は流量規模 Q の発生確率である。したがって、 $Q_s(Q) = Q_s(Q)/Q_{s(\text{total})}$ とすれば、全負荷量に対するある流量規模まで(ここでは最大流量から最低流量の方向に加算していく)の負荷量の割合を知ることができる。すなわち図-50(a)のようにして分離する。

表-4 晴天時と雨天時の負荷量の分離(分離方法1)

上 位	河川番号	5 %	10 %	25 % (雨水流量)	50 % (平均流量)	75 % (低水流量)
① 濁 度	①	45%	60%	80%	90%	95%
	②	60	75	90	95	100
	③	90	90	100	100	100
② $KN+O_2$ 消費量	①	40	50	70	80	95
	②	45	60	75	90	95
	③	75	80	85	90	95
③ NH_4-N	①	15	20	40	60	80
	②	30	40	40	60	85
	③	15	20	90	80	90
④ BOD	①	20	30	50	70	90
	②	20	30	45	65	85
⑤ ケルダール窒素	①	15	25	45	75	90
	②	35	35	50	70	90
	③	25	20	45	60	80
⑥ TOC	①	45	50	65	80	90
	②	25	40	60	75	90
	③	25	35	55	70	85
⑦ 全リン	①	15	25	45	75	90
	②	25	35	50	70	90
	③	15	20	45	60	80

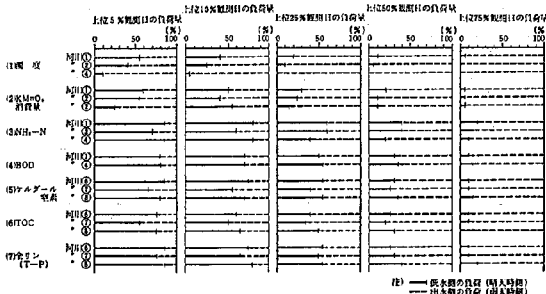


図-51 分離方法1による分離結果

注1) ケース1・2は相互に関係があるが、このような分離が日本の多くの河川に妥当であることは後述する。

その結果を、流水管理で用いられている流量規模別に分離して表現したものを表-4、図-51に示す。

図-51より、濁度、 KMnO_4 消費量は大規模な流量(例えば、豊水流量(上位25%)以上の流量)時にその多くが流出していることがわかり、もし停滞水域の汚濁(濁度・ KMnO_4 消費量)を防ぐためにこれらの負荷総量を規制しようとするば、降雨に付随する汚濁流出の防止(例えば、建設現場から流出するSSを貯水地で一時貯めて、沈降させるなど)が要請されることがわかる。

また、BOD、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、T-P、ケルダール窒素などは、平水流量以下でもかなり流出しており、晴天時の負荷量流出規制も重要であることがわかる。

以上の計算では、流量と負荷量の関係式 $Q_p=f(Q)$ および流量の発生頻度 $P_f(Q)=f(Q)$ が必要であるが、前者については従来から数多くの調査が実施されている。また後者については、大河川では流量年表に示される流況図から日数を算定する方法(タイム・スケールが異なる場合でも同様の方法を用いればよい)により容易に算定することができる。

b) 晴天時分と雨天時分の負荷量の分離(分離方法2)

また、晴天時分の負荷量と雨天時分の負荷量を図-50(b)のように近似的に分離してみると、なお特徴が明

確になる。この時に、ここでは次のように2つのケースについて分離した結果を示す。

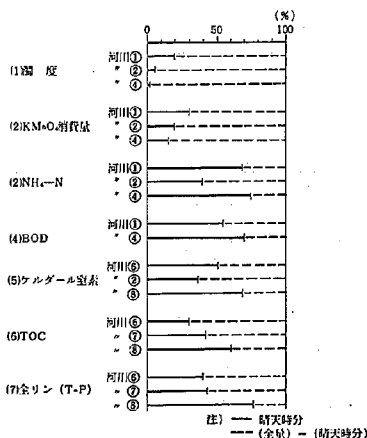
(I) 低水流量以下の流量の日に流出している負荷の平均値を、晴天時分の負荷量と仮定して、両者を分離する(ケース1)。

(II) 低水流量に相当する流量のときの平均負荷量を、晴天時分の負荷量と仮定して、両者を分離する(ケース2)。

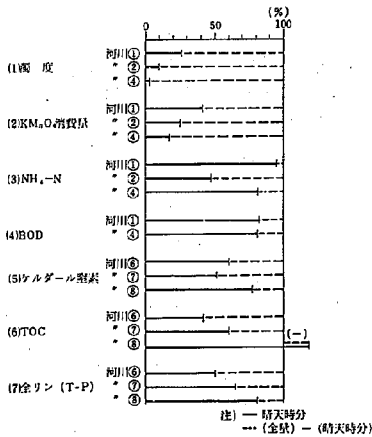
(I)、(II)の結果を、表-5、図-52に示す。

以上のような図-51、52より、晴天時と雨天時に流出している負荷量の程度(図-51)、および晴天時分負荷量(降雨を介しない負荷量)と降雨を介した負荷量の程度(図-52)を知ることができる。ただし、これらは分離のための参考資料であり、厳密な分離を行っているわけではないが、マクロ的な認識を助け、いくつかの有益な結論を与える。

- ・濁度や KMnO_4 消費量は、降雨を介した流出分が相当多く、水文学的取り扱いが特に重要である。
- ・BOD、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、ケルダール窒素、T-Pは、降雨を介しない流出と降雨による流出がほぼ半々程度あり、晴天時汚濁流出の把握と平行して、雨天時の汚濁流出の水文学的な把握が要請される。



(a) 低水流量以下の流量における負荷量の平均値を晴天時分とした場合(ケース1)



(b) 低水流量に相当する負荷量を晴天時分とした場合(ケース2)

図-52 分離方法2

注1) 晴天時分負荷量とは、晴天時流出負荷量を指し、降雨を介した負荷量とは、晴天時に排出されて河道等に堆積しているものと、降雨により生産される負荷量を指す。

表-5 晴天時分と雨天時分の汚濁負荷量の分離
(分離方法2) (単位: %)

項目	晴天時分 (低水以下の平均で計算)	雨天時分 (低水で計算)
①濁度 河川	① 19.2 ② 8.6 ④ 1.4	25.8 9.8 1.8
②KMnO ₄ 消費量 河川	① 30.1 ② 19.0 ④ 14.8	41.2 25.0 17.0
③NH ₄ -N 河川	① 68.0 ② 38.8 ④ 75.2	95.0 47.0 81.4
④BOD 河川	① 54.0 ④ 70.0	72.0 80.1
⑤ケルダール窒素 河川	⑥ 50.4 ⑦ 37.2 ⑧ 68.8	59.6 50.6 77.2
⑥TOC 河川	⑥ 29.6 ⑦ 41.6 ⑧ 59.2	41.2 60.0 118.4
⑦全リン 河川	⑥ 38.8 ⑦ 42.0 ⑧ 75.6	50.2 64.6 80.6

表-6 シミュレーション・モデルの分類

形態	用途(その他)
① 水文学的なシミュレーション・モデル $Q_s = f(Q, R)$	● 流量 given → 流下汚濁量 河川水質の推定 ● 合流式下水道越流水 → 河川への汚濁負荷流入量の推定
② 水質管理シミュレーション・モデル $C = f(t, \dots)$ $C = f(x, t) = C(x, \dots, t)$	● ポイント排水規制 → 水質基準 ● モニタリング → 管理 (上・下流間の関係, 水質項目間の関係) ● フィルタリング理論を適用することが多い
③ 土地利用の変化と水質の関係・各地区からの汚濁流出量の推定モデル	● 将来の汚濁負荷流出量の算定 ● 宅地開発やダム工事等による汚濁流出量の増分の推定
④ 水理学的シミュレーション・モデル	● 海洋の非定常の汚濁解析(拡散の解析) ● 移流拡散解析
⑤ 生物・化学的なシミュレーション・モデル	● 閉水域の富栄養化の推定 ● 河川の自浄作用
⑥ その他	

(3) 河川の水質・負荷量のシミュレーション

河川の水質・負荷量シミュレーション・モデルは、表-5に例示するように、いくつかの観点から作られているように思われる。ここでは前述のように停滞水域の水質管理においては雨天時の流入負荷量が重要位置を占めていること、また今日水質管理上問題とされるようになってきたノンポイントソースからの汚濁負荷量が主として降雨に付随して流出していることを念頭において、降雨あるいは流量を一つの説明変数として用いる水文学的な立場から水質をシミュレーションするモデルについて記す。すなわち、表-6の①、③に関するモデルについて述べる。

a) 水文学的(物理的)アプローチ

水文学的なアプローチによる従来の研究例については、第2章でその概要を述べた。ここでは、実際上の用途を考えて、水文学的なアプローチによる解析の対象を、①水質・負荷量ポルトグラフのシミュレーション(時系列)、②水質・負荷量の統計的シミュレーション(時系列および流量規模別)に分けて考える。

ここでは、①に関して記すが、②についてはb)統計的アプローチにおいて論じることとする。

第3章で、河川の水質・負荷量ポルトグラフのシミュレーションにおいて着目すべき事項を、実測データを用いて3つ指摘した。^(注1)

(i)汚濁負荷量・水質ポルトグラフは、流量(降雨)のハイドログラフによく応答している(図-1)。

そして、単一出水に着目してみると、流量に比較して低減が急である(図-2)。ただし、その程度は水質項目によって異なる。

(ii)上記①のことを別の観点からみると、すなわち汚濁負荷量・水質を流量で説明しようとするれば、単一出水時にはループを描く(図-5~12)。

(iii)孤立出水時と連続出水時では、流量が同じでも水質・汚濁負荷量が異なり、履歴現象がみられる(複数の出水に着目した図-25、26)。

以上のことを模式化して図示すると、図-53、54のようになる。したがって、時系列的に水質・汚濁負荷

注1) ただし、電気伝導度などの溶解性物質のように流量のみでシミュレーションできそうなものを除く。

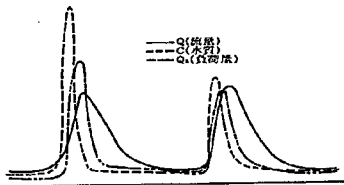


図-53 ①、②の特徴の模式化(汚濁型水質項目の例)

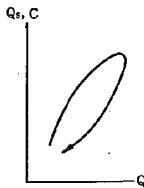


図-54 ②の特徴の模式化

量を記述する水文学的シミュレーション・モデルにおいては、少なくとも次の点に着目しておく必要がある。

- (i) 水質・負荷量は同時点・同時刻の流量(降雨あるいは降雨と流量としてもよい)のみを説明変数として記述することはむずかしい。
- (ii) したがって、汚濁負荷の供給に関する説明変数(汚濁負荷量流出ポテンシャル/供給関数)が必要である^{注1)}。

これらを工学的に表現するモデルの形態としては、流出に關する汚濁負荷量ポテンシャルを S とすれば、例えば次のように考えることもできる。

$$Q_s = \text{func.}(Q, S) \quad (4-2)$$

$$Q = \text{func.}(R) \quad (4-3)$$

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt} &= S_{in} - Q_s \\ S_{t=0} &= S_0^{(2)} \\ S_{in} &= f(t) \end{aligned} \quad (4-4)$$

注1) 先行降雨あるいは先行出水を説明変数に加える方法もありうるが、ここではポテンシャルの概念について考察する。

注2) シミュレーションを始める時点の S の値であり、流出負荷量ポテンシャルの初期値である。

(4-2)式は汚濁流出の支配方程式、(4-3)式は通常の降雨流出を支配する式で、実測流量があればこの式は不要、(4-4)式は汚濁負荷量の供給・流出を支配する式である。

筆者らは、さきに合流式下水道敷設流域において、次のような前提のもとで、水質シミュレーション・モデルを作成しその適合性を検討した。

$$(i) Q_s = \text{func.}(Q, S) = aQ^b S^c \quad (1)$$

a, b, c : constant また S はここでは下水管内だけを考へるものとする。 b は $Q_s \sim Q$ カーブ(ループを描く)から平均的な勾配として決定する。

(ii) Q は実測値あるいは降雨より算定する(修正RRL法を使用)。

(iii) S_{in} は、まずBODのようなソースが限られるものに対しては、 $S_{in} = f(t) \approx S_{in}(\text{constant})$ とし、晴天時流量をあたえたが、SSのように雨天時の地表等からの寄与が無視できないものに対しては、降雨強度 r が作用する地表負荷ポテンシャル S' を新たに考へた。この場合地表面の運動方程式は $Q_s' = a' r^b S'^c$ 、連続式は $\frac{dS'}{dt} = S_{in}' - Q_s'$ であり $\frac{dS}{dt} = S_{in} - Q_s + Q_s'$ となる(Q_s' : 地表からの流出あるいは流入負荷)。

(iv) BODの場合、 S_0, a, c はtrial and errorでポットグラフが合うように決定する。ただし晴天時および雨天時両者に適合度のよいものは、ほとんど一義的にきまる。

このようにして作成したモデルによるシミュレーション結果は、概して実測値との適合度がよく、とくにBODについては数都市の観測結果に対して良い結果を得た。その一例を図55、56に示す。さらに複数の降雨を含む10日間の連続シミュレーションでもよい結果を得た。しかしSSに対しては、常数値がときには倍になることもあって(例えば S', a', c')、その一義性などで疑問が残る。BODについては、一流域で S に対する実測調査を行ってほぼ一致することを確めたが、これはいつも実施可能な方法ではない。 S_{in} (例えば路面塵埃堆積量の資料等)はアメリカでは調査されているが、日本における調査例は、五指に満たない状態である^{注1)}。

実際河川に予想されるモデルは、河川内(上記モデルでは下水管内)に較べて、地表面負荷の比重が大きいのでBODの場合でも上述のSSに対するモデルを使用しなければならないことが予想される。

注3) $Q_s = aQ^b(Q - Q_0)S^c$ とする場合についても検討している。ここに Q_0 は限界的な掃流力

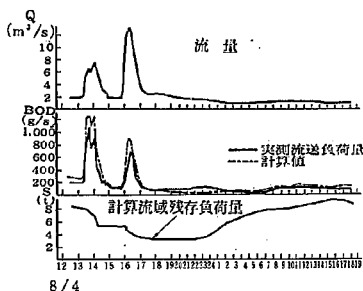


図-55 流送負荷量シミュレーション結果及び流域残存負荷量(S)の変化 (昭和48年8月4日, 谷端川排水区)

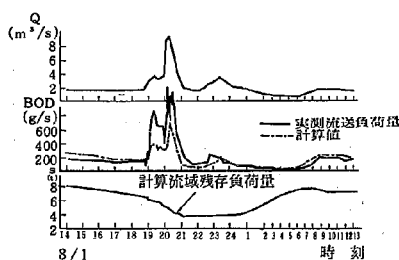


図-56 流送負荷量シミュレーション結果及び流域残存負荷量(S)の時間変化図 (昭和48年8月1日, 谷端川排水区)

以上のモデルと第3章で提示したデータから、次のような点が明確になった。

- (I) 基本的なモデルの考え方は、汚濁負荷の供給ならびに流送能力を考慮しているの、ほぼ妥当なものと考えられる。
- (II) S , S' , a , a' , ……の常数は、trial and errorで決定するために、モデルが恣意的になる可能性が高い。低水時と雨天時に分けてのモデルの同定や、発生負荷量およびそれと流出負荷量の関係の実測等により同定すべき常数を減らしていくことが必要である。
- (III) (I)と同じ視点からの考察として、上述のモデルは、水質の挙動については相当に説明力があるが、汚濁源 (例えば原単位等) との関係が全くつかめて

いないことがあげられる。今後この面の調査が必要と思われる。

水文学的モデルは、必ずしも上述のようなパラメトリックなモデルでなくとも、実用上有効なモデルを作ることには可能である。そのようなモデルの一種である統計的なモデルを以下で述べることにする。

b) 統計的アプローチ

ここでは統計的アプローチにより河川の水質・負荷量を推定する方法について、二つの方法を示し、その利用対象と適用性について記す。これら二つの方法は、河川の水質・汚濁負荷量を、河川の流量を主たる説明変数として推定する水文学的なモデル (降雨も必要に応じて説明変数に加える) であることは、前述のa)と同じである。モデルの一つは、時系列的にボルトグラフをシミュレーションするので、前述のa)のモデルと同様の観点に立っているが、パラメータを統計的に同定する。あと一つは、さらに単純化して時系列現象を単に流量と水質・負荷量の関係としてとらえ (時系列性を無視)、先行降雨の履歴現象などは、それらの結果生じる値の平均値として示す方法である。

① C or $Q_s = \text{func.}(Q, R)$ とする回帰モデル^(E2)

このモデルは、 C or $Q_s = \text{func.}(Q)$ あるいは、 C or $Q_s = \text{func.}(Q, R)$ とするモデルで、羽田の椎物川におけるモデルなどに相当している。

通常の統計的取り扱いの方法としては、 Q_s or $C = \text{func.}(Q, R)$ を次のような関数形で仮定することが多い。

$$(i) Q_s = A_0 Q(t)^b \cdot R(t)^c$$

$$\text{i.e. } \log Q_s = a + b \log Q(t) + c \log R(t)$$

$$(ii) Q_s = a + b Q(t) + c R(t)$$

ここに A , a , b , c は定数である。

一般的な傾向として、(iii)式は $\text{func.}(Q, R)$ を Taylor 展開して一次の項まで取って接線近似したものであり、その適用領域が狭くなることが多い。(i)式は、変数分離型と仮定するものであり、多くの場合にこの形が用いられる。また、履歴現象を示すために、複数年刻をとることもある¹⁾。

(ア) 回帰モデル I

回帰モデル I としては、水質観測点の流量のみを用いてどの程度水質・負荷量を説明し得るかを見るため

注1) ただし、前述のa)のモデルは汚濁負荷量の供給関数 (4-4) 式を導入しているが、以下のモデルは Gunnerson や羽田らと同様に Q および R のみによる流送能力のみを考慮している。

注2) C , Q_s が流量 Q や降雨 R に依存する程度についてを第3章で多くの実測データを用いて図示した。ここではそのように図示したものを定量的に考察するために、いくつかのモデルを考える。

に、 C or $Q_s = aQ^b$ とする統計的モデルを考える。したがって、この時には時間遅れや先行降雨等は考慮しない。それらを考慮した統計モデルについては、回帰モデルⅡで示す。なお、このような関数形で、羽田は自然河川に近い雄物川を対象とした昭和49年10月～昭和51年2月の1年5ヶ月間に1日1回測定した水質（各季30～40日の合計150日の水質）に対して、溶解性物質については全データ、浮遊物質および有機物質については無降雨期・融雪期のデータに分けて相当信頼性の高い回帰式が得られることを示している。

ここでは、全河川の全データを用いた（データのグ

ルーピングはしない）回帰式を示す（表-7）。

表-7より、EC（電気伝導度とそのフラックス）や濁度・ $KMnO_4$ 消費量などの負荷量以外は、相関係数が小さく、その地点の流量のみでは必ずしも十分に記述することができず、先行降雨条件や汚濁負荷量の供給特性等を考慮しなければならないことがわかる。

なお、前述の羽田が浮遊性物質や有機物質に対して0.9以上の相関係数を得ているのは、データをグルーピングして回帰式を定めたからであり、全データ（洪水時は含まないと考えられる全データ）に対してそのような高い係数を得ているわけではない。

表-7 モデルⅠの回帰分析結果

水質項目・河川番号	負 荷 量 Q_s	水 質 C
(1)濁度 河川①	$Q_s = 0.011 \cdot Q^{1.88}$ ($R=0.93$)	$C = 0.127 \cdot Q^{0.88}$ ($R=0.77$)
	$Q_s = 0.607 \cdot Q^{1.64}$ ($R=0.91$)	$C = 0.142 \cdot Q^{0.84}$ ($R=0.72$)
	$Q_s = 0.439 \cdot Q^{1.55}$ ($R=0.78$)	$C = 5.032 \cdot Q^{0.54}$ ($R=0.41$)
	$Q_s = 0.168 \cdot Q^{1.58}$ ($R=0.96$)	$C = 1.941 \cdot Q^{0.88}$ ($R=0.85$)
(2) $KMnO_4$ 消費量 河川①	$Q_s = 0.404 \cdot Q^{1.17}$ ($R=0.92$)	$C = 0.214 \cdot Q^{0.17}$ ($R=0.34$)
	$Q_s = 0.352 \cdot Q^{1.33}$ ($R=0.94$)	$C = 4.07 \cdot Q^{0.33}$ ($R=0.46$)
	$Q_s = 0.380 \cdot Q^{1.00}$ ($R=0.89$)	$C = 16.0 \cdot Q^{-0.004}$ ($R=0.01$)
(3) NH_4-N 河川①	$Q_s = 1.79 \cdot Q^{1.17}$ ($R=0.49$)	$C = 20.7 \cdot Q^{-0.51}$ ($R=0.66$)
	$Q_s = 0.019 \cdot Q^{1.16}$ ($R=0.91$)	$C = 0.234 \cdot Q^{0.16}$ ($R=0.20$)
	$Q_s = 0.010 \cdot Q^{1.18}$ ($R=0.85$)	$C = 0.121 \cdot Q^{0.17}$ ($R=0.19$)
	$Q_s = 1.15 \cdot Q^{0.34}$ ($R=0.64$)	$C = 13.4 \cdot Q^{-0.63}$ ($R=0.79$)
(4)BOD 河川①	$Q_s = 0.741 \cdot Q^{0.62}$ ($R=0.74$)	$C = 13.8 \cdot Q^{-0.34}$ ($R=0.33$)
	$Q_s = 1.829 \cdot Q^{0.62}$ ($R=0.63$)	$C = 21.4 \cdot Q^{-0.34}$ ($R=0.43$)
(5)ケルダール窒素 河川⑥	$Q_s = 0.327 \cdot Q^{0.84}$ ($R=0.84$)	$C = 3.78 \cdot Q^{-0.16}$ ($R=0.25$)
	$Q_s = 0.119 \cdot Q^{0.99}$ ($R=0.84$)	$C = 1.38 \cdot Q^{0.04}$ ($R=0.15$)
	$Q_s = 0.386 \cdot Q^{0.84}$ ($R=0.76$)	$C = 4.47 \cdot Q^{-0.16}$ ($R=0.22$)
(6)TOC 河川⑥	$Q_s = 0.595 \cdot Q^{1.10}$ ($R=0.79$)	$C = 8.82 \cdot Q^{0.10}$ ($R=0.02$)
	$Q_s = 0.762 \cdot Q^{1.12}$ ($R=0.84$)	$C = 6.89 \cdot Q^{0.10}$ ($R=0.12$)
	$Q_s = 2.29 \cdot Q^{0.87}$ ($R=0.57$)	$C = 26.5 \cdot Q^{0.22}$ ($R=0.13$)
(7)全リン 河川⑥	$Q_s = 0.048 \cdot Q^{0.91}$ ($R=0.81$)	$C = 0.561 \cdot Q^{0.007}$ ($R=0.01$)
	$Q_s = 0.012 \cdot Q^{1.51}$ ($R=0.83$)	$C = 0.136 \cdot Q^{0.008}$ ($R=0.01$)
	$Q_s = 0.077 \cdot Q^{0.69}$ ($R=0.53$)	$C = 0.086 \cdot Q^{-0.31}$ ($R=0.30$)
(8)EC 河川③	$Q_s = 62.2 \cdot Q^{0.11}$ ($R=0.99$)	$C = 720 \cdot Q^{-0.58}$ ($R=0.93$)

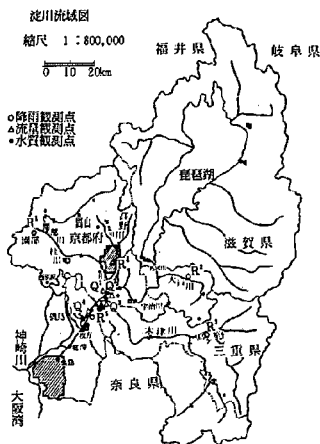


図-57 対象流域の降雨と流量・水質観測点

(イ) 回帰モデルⅡ

この回帰モデルは次のような二つの意図をもったモデルである。

(i) 回帰モデルⅠでは、水質観測点の流量のみを説明変数としたが、その外に降雨も説明変数に加える。このときに先行降雨を説明変数に加えるのは、第3章で示したような履歴現象を近似的に把握するためのものであり、当該時の降雨は降雨に関する汚濁現象を示すためのものである。

(ii) 対象流域内の各地域の特性が異なる場合に、その特性に応じて地域をいくつかの地区に分割し、それぞれの地区の流量や雨量を説明変数に加える。このようにして、モデルの精度を向上させるとともに、各地区が水質観測点の水質・汚濁負荷量にどの程度寄与しているかを把握する。

以下に示す河川①の対象地点は、流域特性の異なる上流地域を貫流した3河川の合流点の下流であり、上流の降雨や合流前の3河川の流量を説明変数として汚濁負荷量の算定式を統計的に作成すれば、上流の各地区からの汚濁負荷量の程度を推定することができるはずである。また、このような地区分割を行うことにより、回帰モデルⅠのタイプの精度も向上する。

図-57、表-8に対象地域の概略と、現象を適切に

表現するために検討した代替式（その信頼性含む）を示す。ただし、タイム・スケールは日であり、用いたデータは1976年の毎日観測データである。流量 Q 、雨量 R の添字は、上が地区番号を示し、下がタイムラグ(日単位)を示している。すなわち、 Q_2^1 は桂川の2日前の流量を示している。

表-8に示した回帰式により、流域をその特性が把握し易いように地区分割し、先行降雨条件や流達時間を考慮することにより、回帰モデルの精度がかなり向上することがわかる(表-6と比較)。また、このように各地区の降雨や流量を説明変数として用いることにより、水質観測点の水質(負荷量)に対して、それぞれの地区がどの程度寄与しているかを推定することができる。

なお、以上のような簡単な回帰モデルの精度をさらに向上させようとするれば、例えば羽田が雄物川で用いたような季節別にグルーピングしたデータに対してそれぞれ式を定める方法、低水時と洪水時別に式を定める方法などが考えられる。また、作成したモデルによるシミュレーション結果の信頼性のチェックを行うために、用いるデータをtraining用とchecking用に分けて使用することも考えられる。これらについては現在調査を進めており、次の機会に報告したいと考えている。

(2) 単純統計モデル

このモデルは、単純に過去のデータから流量規模別の平均的な水質・負荷量を算定し、 Q_s or $C = \text{func}(Q)$ の関数形を定める。図-36-49は、その関数をグラフ表示したものである。ただし、図-34、35に示したように、ある流量規模に対する水質は先行降雨等の条件や増水時と減水時などによって異なり、その変動幅は相当大きいので、これを水文学的モデルとして使用する場合には、その適用対象は限定される。その適用例は前述の晴天時・雨天時の負荷量のマクロ的な分離などである。

(4) 地域(流域)特性と汚濁流出の関係

ここでは、マクロ的にみた場合の流域特性と汚濁負荷流出量の関係を、汚濁負荷量の実測値(複数河川・複数水質項目)といくつかの流域指標を用いて検討する。

表-9(a)-(e)に対象とした河川の流域指標と降雨・流量汚濁負荷量を示す。同表の汚濁負荷量は毎日データを加算して得た値であり、実測値である。

汚濁負荷流出量と流域指標の関係を、流域の規模(流域面積あるいは流量)の影響を除いて考えるために、比負荷量(=総負荷量/流域面積)と流域の社会活動指標(流域全体の平均的な人口密度、工業出荷密度)

表-8 (a)濁度の回帰式

被説明変数	定数項	説明変数									重相関係数, その他		
		量				用					重相関係数R (D・W法)	式のタイプ	ラグタイム (日)
桂川Qの係数	宇治川Qの係数	木津川Qの係数	枚方Qの係数	桂川流域Rの係数	宇治川流域Rの係数	木津川流域Rの係数	京都市街地Rの係数	枚方Rの係数					
Q ₁ (濁度)	-1702.6	0	0	0	0	57.25 (0.149) (2.85)	3.01 (0.009) (0.16)	0	8.84 (0.020) (0.37)	0	0.845 (1.002)	線形	0
		0	0	0	0	26.34 (0.058) (1.10)	-110.27 (0.215) (-4.14)	300.41 (0.497) (10.78)	75.70 (0.153) (2.91)	0			-1
		0	0	0	0	7.67 (0.018) (0.34)	0	101.42 (0.241) (4.68)	45.80 (0.123) (2.33)	0			-2
Q ₂ (濁度)	-914.29	32.86 (0.400) (8.31)	-6.89 (-0.473) (-10.22)	32.78 (0.736) (20.70)	0	0	0	0	0	0	0.961 (1.762)	線形	0
Q ₃ (濁度)	-954.66	38.056 (0.373) (7.51)	-6.781 (-0.451) (-9.49)	30.221 (0.634) (15.37)	0	9.113 (0.048) (0.90)	-7.398 (-0.042) (-0.79)	0	-5.795 (-0.026) (-0.48)	0	0.966 (1.762)	線形	0
		0	0	0	0	18.155 (-0.079) (-1.49)	-16.742 (-0.067) (-1.26)	35.531 (0.113) (2.15)	26.998 (0.105) (1.98)	0			-1
		0	0	0	0	11.944 (0.057) (1.07)	0	-14.220 (-0.067) (-1.25)	-34.321 (-0.170) (-3.23)	0			-2
Q ₄ (濁度)	-3032.8	0	0	0	13.98 (0.816) (26.96)	0	0	0	0	0	0.816 (0.701)	線形	0
log Q ₁ (濁度)	2.167	0	0	0	0	-0.0012 (-0.001) (-0.02)	0.0458 (0.043) (0.81)	0	0.1167 (0.094) (1.77)	0		対数線形	0
		0	0	0	0	-0.0909 (-0.066) (-1.31)	-0.0493 (-0.034) (-0.64)	0.3147 (0.194) (3.72)	0.4459 (0.324) (6.44)	0			-1
		0	0	0	0	-0.1124 (-0.088) (-1.67)	0	0.1942 (0.154) (2.94)	0.2862 (0.256) (5.19)	0			-2
log Q ₂ (濁度)	0.0726	0.5614 (0.272) (5.37)	-0.1421 (-0.073) (-1.39)	1.1902 (0.605) (14.44)	0	0	0	0	0	0	0.893 (1.564)	対数線形	0
log Q ₃ (濁度)	-2.026	0	0	0	1.912 (0.886) (23.02)	0	0	0	0	0	0.836 (1.232)	対数線形	0
log Q ₄ (濁度)	0.1278	0.3625 (0.173) (3.29)	0.1392 (0.069) (1.31)	0.8939 (0.465) (9.86)	0	0.0266 (0.037) (0.69)	-0.0287 (-0.043) (-0.80)	0	-0.0165 (-0.021) (-0.39)	0	0.910 (1.623)	対数線形	0
		0	0	0	0	-0.0320 (-0.038) (-0.71)	-0.0529 (-0.058) (-1.06)	0.1551 (0.151) (2.85)	0.1743 (0.201) (3.84)	0			-1
		0	0	0	0	0.0103 (-0.013) (-0.24)	0	0.0454 (0.056) (1.05)	0.0192 (0.071) (1.34)	0			-2
C (濁度)	8.479	0	0	0	0	0.349 (0.114) (2.16)	-0.372 (-0.129) (-2.45)	0	0.135 (0.037) (0.70)	0	0.802 (1.914)	線形	0
		0	0	0	0	-0.107 (-0.030) (-0.56)	-0.247 (-0.062) (-1.16)	0.215 (0.454) (9.61)	0.432 (0.114) (2.16)	0			-1
		0	0	0	0	0.381 (0.110) (2.09)	0	0.413 (0.125) (2.37)	0.008 (0.003) (0.05)	0			-2
C (濁度)	18.64	0.0716 (0.050) (0.94)	-0.0390 (-0.157) (-3.01)	0.2117 (0.344) (6.96)	0	0	0	0	0	0	0.676 (1.671)	線形	0
C (濁度)	5.667	0	0	0	0.069 (0.587) (12.50)	0	0	0	0	0	0.560 (1.494)	線形	0

C (角度)	10.17	0 (0.0091 0.041 0.78)	0	0	0 (0.2792 (0.090 1.69)	-0.3124 (-0.109 -2.03)	0	0.1924 (0.052 0.98)	0	0.805 (1.911)	線形	0	
		0	0	0	-0.0092 (-0.002 -0.05)	-0.235 (-0.057 -1.08)	1.9017 (0.347 6.95)	0.6073 (0.145 2.71)	0			-1	
		0	0	0	0.4167 (0.120 2.28)	0	0.3201 (0.092 1.73)	0.1296 (0.040 0.74)	0			-2	
100Q ₀ (角度)	0.981	0	0	0	0.0451 (0.000 1.13)	-0.0045 (-0.006 -0.12)	0	0.0132 (0.016 0.30)	0	0.744 (1.953)	対数線形	0	
		0	0	0	-0.0508 (-0.058 -1.10)	-0.0354 (-0.038 -0.71)	0.2455 (0.227 4.38)	0.2702 (0.299 5.89)	0			-1	
		0	0	0	-0.0367 (-0.044 -0.82)	0	0.1320 (0.158 3.01)	0.1370 (0.195 3.75)	0			-2	
100Q ₀ (角度)	0.7031	0.3579 (0.144 3.77)	-0.7237 (-0.350 -7.80)	0.9357 (0.599 13.18)	0	0	0	0	0	0.820 (1.485)	対数線形	0	
100Q ₀ (角度)	-0.9391	0	0	0	0.9034 (0.606 14.53)	0	0	0	0	0.605 (1.130)	対数線形	0	
100Q ₀ (角度)	0.7473	0.1802 (0.097 1.83)	-0.4657 (-0.250 -4.65)	0.7131 (0.422 8.73)	0	0.0410 (0.063 1.19)	-0.0410 (-0.068 -1.27)	0.1515 (0.163 3.10)	-0.0288 (-0.022 0.50)	0	0.820 (1.485)	対数線形	0
		0	0	0	-0.3623 (-0.048 -0.89)	-0.0498 (-0.060 -1.13)	0.0373 (0.051 0.95)	0.1647 (0.210 4.03)	0			-1	
		0	0	0	-0.0065 (-0.009 -0.17)	0	0	0.0403 (0.065 1.22)	0			-2	

(注) 3つならんだ数値は、上段：回帰係数、() 内の上：偏相関係数、同下：t-valueである。

表-8 (b)KMnO₄消費量、BODの回帰式

被説明 変数	定数項	説明変数								重相関係数、その他			
		流 量				量				重相関係数R (D・W比)	式のタイプ	ラグタイム (日)	
Q ₀ (KMnO ₄ 消費量)	桂川Qの 係数	宇治川Qの 係数	木津川Qの 係数	枚方Qの 係数	桂川流域 Rの係数	宇治川流域 Rの係数	木津川流域 Rの係数	京都市街地 Rの係数	枚方Rの 係数				
	-78.84	0	0	0	0	5.417 (0.141 2.68)	-2.544 (-0.071 -1.34)	0	5.490 (0.120 2.27)	0	0.868 (1.271)	線形	0
		0	0	0	0	3.069 (0.068 1.28)	-7.427 (-0.146 -2.78)	33.594 (0.538 12.01)	3.893 (0.079 1.49)	0			-1
		0	0	0	0	0.557 (0.013 0.25)	0	8.365 (0.200 3.85)	5.630 (0.150 2.85)	0			-2
Q ₀ (KMnO ₄ 消費量)	7.654	0.201 (0.025 0.47)	-0.251 (-0.178 -3.43)	4.489 (0.506 26.08)	0	0	0	0	0	0	0.961 (1.312)	線形	0
100Q ₀ (KMnO ₄ 消費量)	-1.067	0	0	0	1.3365 (0.858 31.86)	0	0	0	0	0	0.858 (1.408)	対数線形	0
C (KMnO ₄ 消費量)	5.241	0	0	0	0	0.0128 (0.034 0.64)	-0.0406 (-0.115 -2.18)	0	0.0421 (0.094 1.77)	0	0.773 (1.564)	線形	0
		0	0	0	0	-0.0183 (-0.041 -0.78)	0.0280 (0.057 1.07)	0.2237 (0.396 8.13)	0.0220 (0.045 0.86)	0			-1
		0	0	0	0	0.0180 (0.113 2.15)	0	0.0279 (0.069 1.31)	-0.0091 (-0.025 -0.47)	0			-2

Q_{EC} ($KMnO_4$ 消費量)	0.863 (0.231) (4.51)	0.210 (-0.552) (-12.11)	0.534 (0.507) (14.53)	0	0	0	0	0	0	0	0.776 (1.425)	対数線形	0
Q_{EC} ($KMnO_4$ 消費量)	0.1095 (0.121) (2.29)	-0.4011 (-0.417) (-8.61)	0.3743 (0.450) (9.45)	0	0.0124 (0.039) (0.74)	-0.0116 (-0.046) (-0.74)	0	0.0099 (0.029) (0.54)	0	0.822 (1.617)	対数線形	0	
	0	0	0	0	-0.0287 (-0.078) (-1.46)	-0.045 (-0.011) (-0.21)	0.0855 (0.191) (3.65)	0.0641 (0.170) (3.23)	0			-1	
	0	0	0	0	0.0053 (0.016) (0.28)	0	0.0251 (0.074) (1.38)	0.0064 (0.021) (0.40)	0			-2	

これより BOD

Q _B (BOD)	3.039 (0.235 (0.114 (2.16	-0.083 (-0.128 (-2.42	0	0	0	0	0	0	0.492 (0.159 (3.03	-0.297 (-0.091 (-1.72	0.937 (1.759)	線形	0
			0	0	0	0	0	0	-0.647 (-0.194 (-3.73	2.458 (0.526 (11.57			-1
			0	0	0	0	0	0	-0.412 (-0.137 (-2.61	-0.0003 (-0.001 (-0.0001			-2
C _B (BOD)	2.032 (0.0139 (0.217 (4.20	0.0037 (0.186 (3.57	0	-0.0051 (-0.257 (-5.02	0	0	0	0	0.0095 (0.102 (1.22	-0.122 (-0.123 (-2.34			
			0	0	0	0	0	0	-0.0080 (-0.080 (-1.52	0.0587 (0.437 (9.17			
			0	0	0	0	0	0	-0.0071 (-0.078 (-1.48	0.0150 (0.133 (2.55			

の関係を見たもの(分散図)が図-58~66である。

また、図-58~66に示したような単一指標によるのではなく、多くの指標による説明(Q_B or $Q_B/A = \text{func.}$ (流量, 流域面積, ……))を行うために、重回帰分析により汚濁負荷流出量と流域指標の関係をつけば、次のような式を得る。^{注1), 2), 3)}

- $Q_B(\text{濁度}) = 18.2 - 0.00646 \cdot (\text{比流量}) + 59.9 \cdot (\text{人口密度}) - 0.00040 \cdot (\text{出荷額密度})$
($R = 0.48$)
- $Q_B(KMnO_4\text{消費量}) = -43.8 + 1370 \cdot (\text{比流量}) + 30.0 \cdot (\text{人口密度}) - 0.574 \cdot (\text{出荷額密度})$
($R = 0.79$)
- $Q_B(NH_4-N) = -0.454 + 11.9 \cdot (\text{比流量}) + 0.424 \cdot (\text{人口密度}) + 0.0148 \cdot (\text{出荷額密度})$
($R = 0.96$)
- $Q_B(BOD) = -30.8 + 1190 \cdot (\text{比流量}) - 5.43 \cdot (\text{人口密度}) + 1.88 \cdot (\text{出荷額密度})$
($R = 0.60$)

$$Q_B(EC) = 7.22 + 380 \cdot (\text{比流量}) - 4.95 \cdot (\text{人口密度}) + 0.347 \cdot (\text{出荷額密度})$$

or ($R = 0.99$)

$$Q_B(\text{濁度}) = 221000 \cdot (\text{比流量})^{2.11} \cdot (\text{人口密度})^{0.993} \cdot (\text{出荷額密度})^{0.297} \quad (R = 0.69)$$

$$Q_B(KMnO_4\text{消費量}) = 7680 \cdot (\text{比流量})^{1.76} \cdot (\text{人口密度})^{1.14} \cdot (\text{出荷額密度})^{-0.0154} \quad (R = 0.86)$$

$$Q_B(NH_4-N) = 0.0640 \cdot (\text{比流量})^{-0.408} \cdot (\text{人口密度})^{0.993} \cdot (\text{出荷額密度})^{0.0038} \quad (R = 0.60)$$

$$Q_B(BOD) = 148 \cdot (\text{比流量})^{1.03} \cdot (\text{人口密度})^{0.311} \cdot (\text{出荷額密度})^{0.191} \quad (R = 0.47)$$

$$Q_B(EC) = 200 \cdot (\text{比流量})^{1.11} \cdot (\text{人口密度})^{-1.10} \cdot (\text{出荷額密度})^{1.13} \quad (R = 0.99)$$

(5) ポイントソース・ノンポイントソースからの汚濁流出量の分離

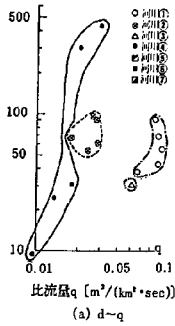
河川の汚濁源として表-10に示すようなものが考えられる。従来の水質保全のための排水規制は、大規模

注1) 単位: Q_B ($\text{tcm}/(\text{km}^2 \cdot \text{年})$) (ECについては($\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{ml}/(\text{km}^2 \cdot \text{sec})$)), 比流量($\text{ml}/(\text{km}^2 \cdot \text{sec})$), 人口密度(千人/ km^2), 出荷額密度(億円/ km^2)

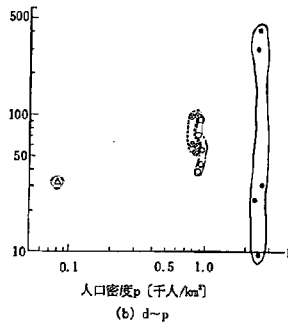
注2) 回帰式の決定には時系列およびクロスセクション・データ(プーリング・データ)を用いた。また、濁度などは符号条件から考えたと無理があり、これらの式は今回用いたデータに対してのみ適用される。

注3) この式は汚濁負荷削減施設(例えば下水処理場)の効果も含んだデータで同定されたものである。その効果を明示的に示す形の式を作成するのが今後の課題として残されている。

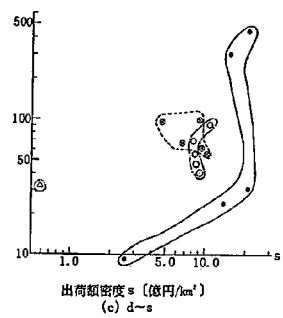
比汚濁負荷量 d ($\text{ton}/(\text{km}^2 \cdot \text{年})$)



d ($\text{ton}/(\text{km}^2 \cdot \text{年})$)

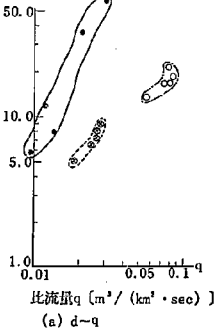


d ($\text{ton}/(\text{km}^2 \cdot \text{年})$)

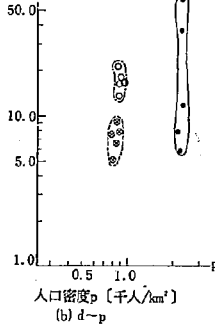


図一 濁度の分散図

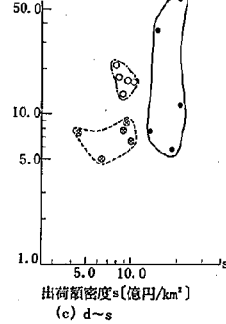
d ($\text{ton}/(\text{km}^2 \cdot \text{年})$)



d ($\text{ton}/(\text{km}^2 \cdot \text{年})$)

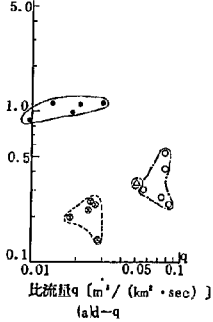


d ($\text{ton}/(\text{km}^2 \cdot \text{年})$)

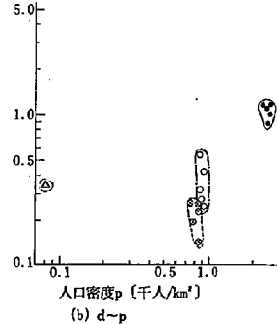


図一59 KMnO_4 消費量の分散図

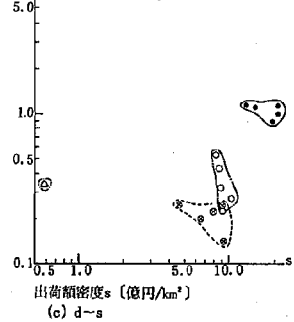
d ($\text{ton}/(\text{km}^2 \cdot \text{年})$)



d ($\text{ton}/(\text{km}^2 \cdot \text{年})$)



d ($\text{ton}/(\text{km}^2 \cdot \text{年})$)



図一60 $\text{NH}_4\text{-N}$ の分散図

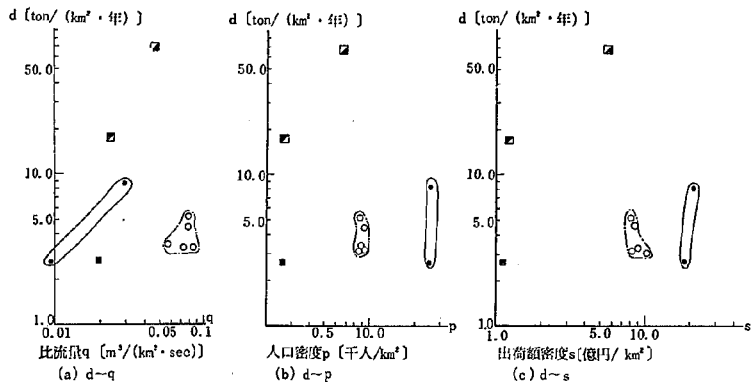


図-61 BODの散布図

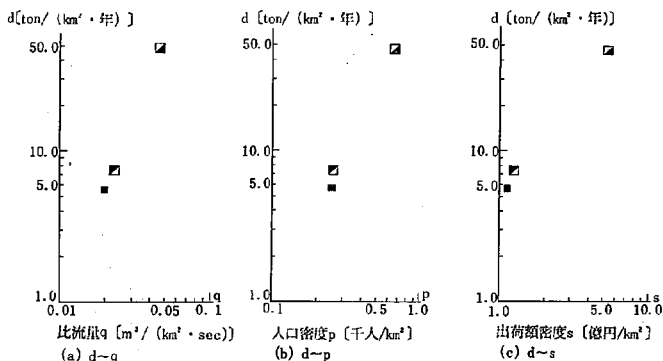


図-62 CODの散布図

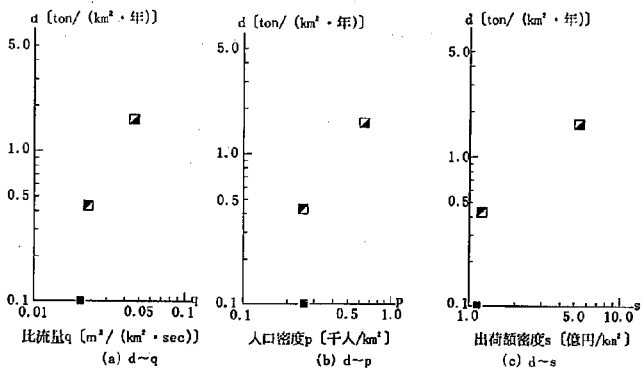


図-63 全リン(T-P)の散布図

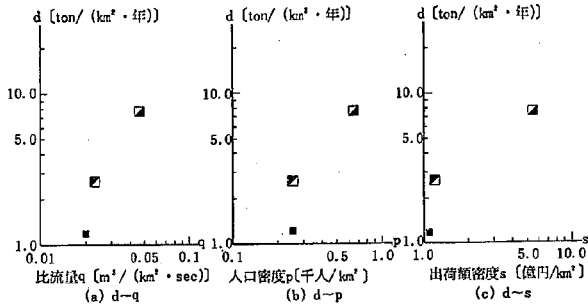


図-64 ケルダール窒素の散布図

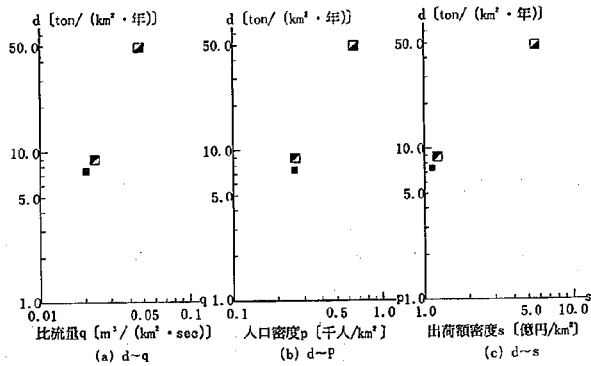


図-65 TOCの散布図

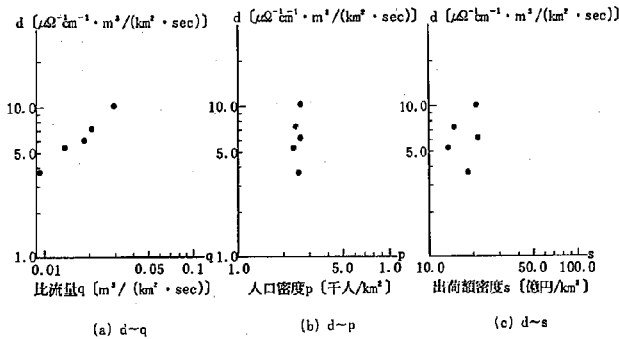


図-66 電気伝導度(ECフラックス)の散布図

表-9 (d)河川④の流域指標と負荷量

河川	流域面積 (km ²)	昭和45年				
		昭和45年	昭和47年	昭和48年	昭和49年	昭和50年
河川	流域面積 (km ²)	1,322	1,314	1,688	1,668	1,678
	流域人口 (人)	16,82	25,77	11,81	36,54	22,70
	流域人口 (人/ha)	23,894	27,412	12,082	533,088	38,216
	KM ₂ O ₃ 消費量 (t)	966	45,333	7,379	75,526	14,600
	NH ₄ -N (t)	1,409	1,383	1,684	1,427	1,237
	BOD (t)	3,211	10,282			
	BOD (30°C)	391.3	348.2	344.9	317.7	333.2
	山	17,300	15,903	14,700	13,400	12,200
	畑	81,700	77,500	73,500	69,100	64,900
	田・畑計	116,600	114,400	113,200	106,600	101,900
河川	土地利用 (ha)	810,000	818,000	819,000	810,000	810,000
	人 (千人)	2,908	3,042	3,121	3,196	3,252
	うち下水道人口					
	市	10,367	9,200	8,100	7,600	6,699
	町	47,142	44,300	41,700	39,000	36,319
	村	15,671	13,222	12,276	10,282	9,649
	うち食料品	17,007	13,222	12,276	10,282	9,649
	繊維工業					
	化学・石油・石炭					
	工業用地					

(1) 河川④および河川⑤の流域面積は、河川④の流域面積に河川⑤の流域面積を加えたものである。
 (2) 河川④の流域面積は、河川④の流域面積に河川⑤の流域面積を加えたものである。
 (3) 河川④の流域面積は、河川④の流域面積に河川⑤の流域面積を加えたものである。

表-9 (e)霞ヶ浦流入3川(河川⑥~⑧)の流域指標と負荷量(昭和47年)

河川	流域面積 (km ²)	河川⑥		
		河川⑥	河川⑦	河川⑧
河川	流域面積 (km ²)	81.8	209.0	12.3
	流域人口 (人)	1,454	1,404	1,454
	流域人口 (人/ha)	1.90	4.19	0.57
	COD	597.4	1,178.5	560.7
	BOD	558.1	570.1	836.9
	ケルダール型炭素	213.9	247.1	92.7
	TOC	733.3	1,571.3	608.1
	全タン (T・P)	35.4	20.4	20.4
	田	727.4	3,031.5	256.9
	畑	1,222.7	2,100.9	187.6
河川	土地利用 (ha)	2,950.1	5,112.4	454.8
	田畑計 (ha)	1,200.1	1,218.8	1,218.8
	山林	300	14,100	0
	人口 (千人)	23.9	33.5	7.9
	うち下水道人口			
	市	3,738	2,925	0,177
	町	13,413	39,145	2,883
	村	97.53	235.44	66.76
	うち食料品			
	繊維工業			
	化学・石油・石炭			
	工業用地			

(注) * 表1 () 内はカンガイ面積を示す。
 * 表2 昭和48年の値

なポイントソース(大規模点源)を中心に進められてきた。しかし最近では、前述のように停滞水域の汚濁防止や低水時の水質基準の達成のためには、ノンポイントソース(非点源)や中小点源からの汚濁負荷量をも規制する必要性が生じてきている。したがって水質保全(改善)計画を策定するためには、河川の汚濁負荷量に占めるそれらの非点源からの負荷量を分離しておく必要がある(図-67参照)。

ここでは、前述の河川汚濁負荷量の測定値と流域指標データ(表-9(a)~(e)および図-58~68参照)を用いて、大規模点源負荷とその他の負荷量(ノンポイントソース負荷と中小点源負荷)を分離を試みる。ここでは次の2つの方法を用いて試算する。

(1)方法1:比負荷量による方法

この方法では流域特性の異なる河川の比負荷量(=負荷量/流域面積)を求め、河川間の比較を行うことにより分離する。

(2)方法2:原単位を用いる方法

この方法では、汚濁発生原単位と流達率(あるいは流出負荷量原単位)を用いて分離する。

(1)の比負荷量による方法では、第3章および第4章

(4)で述べたように多くの水質項目の負荷量が流量に依存するために、気象条件の類似した河川(あるいは同一流域の支川)間で比較を行う必要がある。(2)の原単位による方法では、ある条件下で測定された原単位および流達率(あるいは流出原単位)を準用し、負荷量の分離を行う。そして、測定された負荷量と計算された負荷量が異なる場合にはわりとどし計算を行う。

① 比負荷量による試算

この場合には、ポイント・ノンポイントソースからの負荷量を完全には分離できず、負荷量が近似的に分離される(図-68参照)。

ここでは、図-57~65に示した比負荷量を用いて、流域特性の異なる霞ヶ浦流入3川(山王川、園部川、恋瀬川)の比較を行うことにより面源負荷量とその他を分離することを試みる。

表-9(e)に示したように、これらの3川では河川⑧(山王川)が最も都市化した河川であり、河川⑦(恋瀬川)はほぼ自然河川、河川⑥(園部川)はその中間的河川であると考えられる。そこで河川⑦を

注1) 計算値が測定値と合うように流達率(あるいは流出原単位)を修正する。

表-10 河川の汚濁源の種類

ポイント源	大点源	工場、下水処理場、屎処理場大規模な畜舎、他
非ポイント源	地表面源	家庭、商店、中小事務所、他
非ポイント源	地表面源	田、畑、山林、市街地、開発・造成地、鉱山、降雨、他
ポイント源	基底的排出源	地下の鉱物、他

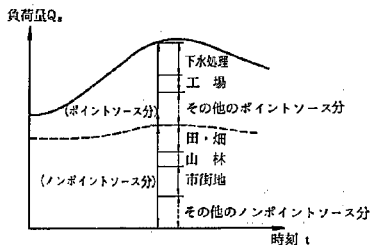
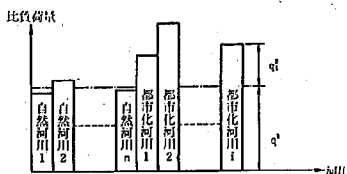


図-67 河川の負荷量形成の概念図



* 都市化河川についての計算方法
(ノンポイントソース+中点源からの分) : (その他からの分)
 $q_1 = q_2 + q_3$

図-68 比負荷量を用いた分離方法の概念図

自然河川と仮定すれば、図-61~65に示される河川⑥、⑧の比負荷量から図-68に示すような計算を行うことにより、それらの河川のノンポイントソースおよび中点源負荷量の割合 γ と、それ以外(大規模点源など)からの負荷量の割合 $(1-\gamma)$ が求められる。このよ

表-11 比負荷量を用いた分離*

河川	水質項目	$1-\gamma$ [%]	γ [%]
河川⑥	TOC	20	30
	BOD	60	40
	COD	25	75
	T-P	75	25
	ケルダール窒素	50	50
河川⑧	TOC	85	15
	BOD	95	5
	COD	90	10
	T-P	95	5
	ケルダール窒素	75	25

* ここで得られた値と前述の図-61, 52を比較されたい。

うな計算により表-11のような結果が得られる。

なお、参考までに茨城大学農学部が洪水時を除いて同様に計算した、緩ヶ浦の西浦に流入する河川に対する大規模点源と面源(大規模点源以外)分についてみると、T-Pが70%対30%、全窒素が41%対59%、無機態総窒素が62%対38%となっており、調査水質項目が異なっているので厳密な比較はできないが、T-Pなどは洪水時も含めた本調査と近い値となっている。また、表-11に示される河川⑧の各水質項目の割合はほぼ近い値であるが、河川⑥についてはかなりのばらつきがみうけられる。

② 原単位法による試算

既往の原単位として公表されているのはBODが多く、ここではBODのみについて発生および流出負荷量を推定する。既往の原単位調査では、発生原単位および流達原単位が測定されている。そこで、まず発生原単位しか求められていない汚濁発生源については、実測負荷量および流達原単位が求められている発生源からの流達率をもとにして、流達率を算定する。次に流達率がほぼ妥当なものについて、ポイント・ノンポイントソースからの負荷量を分離する。

表-12において、 $Q_0 = Q_1 + Q_2$ (Q_1 : 流出負荷量, Q_2 : 流出率, Q_3 : 発生負荷量)の関係から、 Q_3 の流達率 γ を求めると、次のようになる。

注1) この表は前述の流域データと原単位、および実測値より作成した。

河川①(淀川)	;0.277
河川④(多摩川)	;0.114
河川⑥(園部川)	;0.253
河川⑦(恋瀬川)	;0.116
河川⑧(山王川)	;2.167

これらのうち河川⑧(山王川)の流達率は1より大となった。この原因としては、大流域で平均的に定めた原単位を小流域で用いたために特殊な工場からの汚濁負荷量が過小評価されている外に、河川⑧(山王川)は石岡市市街地の排水路的な性格が強いが今回の計算ではそれを考慮していないことによると思われる。河川⑧(山王川)を除く4河川で見た場合、BODの流出率は0.1-0.25程度となる。いずれにしても、原単位法による流出負荷量の推定では、平均的に用いる原単位そのものの精度に加え、実際には流出率が汚濁発生源の特性や流域の排水路網、さらにはその年の水文量によって変わってくるものと思われ、かなりの誤差が生じることが覚悟しなければならぬと考えられる。

表-11の結果から、ノンポイントソースとポイントソースからの流出負荷量の割合を求めると、表-13の

表-12 BOD負荷量の推計

観測点	観測期間	推定されたBOD負荷量 (kg/d)							
		河川①	河川④	河川⑥	河川⑦	河川⑧	河川⑨	河川⑩	河川⑪
上流	11/11	311	31	9	325	1.8	6.3	1.2	
中流	11/11	325,736	9,600	4,387	136,044	318.4	3304.8	317.4	
下流	11/11	18,600	122	8,504	33,441	5,044	9,674	758	
合計	11/11	4,130	168	423	1,044	11.5	114.8	8.8	
観測点	11/11	401.1	13.7	13.1	136.3	5.94	13,030	1,054	
観測点	11/11	5.0	0.2	0.6	1.4	0.01	0.148	0.008	
観測点	11/11	43.8			16.8	1.375	1,560	2,393	

(注) ① 月平均流量 (kg/d) ② 月平均流量 (kg/d) ③ 月平均流量 (kg/d) ④ 月平均流量 (kg/d) ⑤ 月平均流量 (kg/d) ⑥ 月平均流量 (kg/d) ⑦ 月平均流量 (kg/d) ⑧ 月平均流量 (kg/d) ⑨ 月平均流量 (kg/d) ⑩ 月平均流量 (kg/d) ⑪ 月平均流量 (kg/d)

表-13 ポイントソース、ノンポイントソースからの負荷量の割合 (原単位法による)

	河川①	河川④	河川⑥	河川⑦
ノンポイントソースの寄与率	10.0%	5.6%	1.2%	10.4%
ポイントソースの寄与率	90.0%	94.4%	98.8%	89.6%

注 ノンポイントソースとして、田・畑、山林が考慮していないが、市街地を含めるとさらに割合は高くなる。

ようになる。

以上のような二つの方法により、大規模点源負荷量とその他の負荷量の分離およびポイント・ノンポイントソースの負荷量の分離についての試算を行ったが、これらの値については今後さらに多くの事例 (特に排

出源調査および流達状況調査) により検証する必要がある。前者の分離は同一地域の同時期の実測値をもとにした比較であり、マクロ的な分離を行った値としてはその信頼性は低くないと考えられる。しかし、後者の原単位による方法は、あくまでも従来から主として晴天時 (あるいは低流量時) に用いられてきた原単位による推定値であり、その信頼性は原単位の信頼性と同様に低いと考えられる。また原単位による方法では、降雨や流量条件についての配慮に欠けている点も問題である。

5. 結 論

本研究では、主として水文学的なアプローチにより、多河川・多水質項目の水質解析を行い、河川の水質・汚濁負荷量の特性を明らかにした。そして、その結果の応用として、長大(緩流)河川や停滞水域の水質管理においては、雨天時の汚濁負荷量の管理が必要であることを実測データを用いて示すとともに、水文学的な水質・汚濁負荷量シミュレーションについていくつかの検討を行った。またさらに発展させて、晴天時・雨天時負荷量の分離、流域特性と汚濁負荷量流出の関係、ポイント・ノンポイントソース負荷量の分離についても検討した。

本研究で検討し、明らかとなった点を列挙すると次のようになる。

- (1) 河川の水質・汚濁負荷量特性を、多河川・多水質項目について、タイム・スケールを日・月・季・年とした全天候時のデータを用いて、水文学的観点から見た基礎的な解析を行った。
- ・自己相関解析により、水質ボロートグラフの特性を降雨・流量の特性と比較することにより明らかにするとともに、降雨・流量に対する水質・負荷量の応答特性を相互相関解析により把握した。
- ・流量と水質・負荷量の関係を、単一出水時の変化、経月変化、季節変化、経年変化として把握した。そして、河川の水質・負荷量を考える際には、降雨・流量を主要な支配要因の一つとして考える必要があることを示した。その結果の一例として、年間の平均水質と負荷量の経年変化を見る場合には、流量 (降雨) の影響を除いて考える方法を示した。
- ・河川の流量管理において用いられてきた、時系列

注1) ある条件下で測定された負荷量から算定された原単位を、条件の異なるところでも普遍的に用いる場合の信頼性を指す。

性を無視した流量規模整理法を適用し、流量規模別の水質・負荷量の関係を明らかにした。この結果を用いることにより、晴天時・雨天時の汚濁負荷量の分離が可能となる。また降雨（流量）に関して汚濁型（雨が降れば負荷量の供給が相当増し、水質・負荷量ともに悪くなる）の水質項目と、希釈型（雨が降っても負荷量の供給が限られているために水質は希釈される）の水質項目がわかる。

・先行降雨が汚濁流出に与える影響を明らかにした。その結果と前述の相関解析の結果を用いて、ポートグラフの特性を単純化して示し、シミュレーション・モデルの現象面からみた基本構造を示した。そして、その特性を記述するためには、水文学的な流送能力と供給関数を考える必要があることを示した。

(Ⅱ)基本的な水質・負荷量解析結果を用いて、晴天時と雨天時の汚濁負荷量の分離を行い、長大（緩流）河川や停滞水域の水質管理においては、雨天時の水質・負荷量についても考慮しておく必要があることを示した。

(Ⅲ)①の結果を参考にしながら、いくつかの簡単な水文学的河川水質・汚濁負荷量シミュレーション・モデルを作成した。

- ・水文学的なパラメトリック・モデルとして、都市域の中小河川である合流式下水道を例としたモデルを示した。このモデルでは、汚濁流出量の算定において、流量から定まる流送能力と、汚濁負荷量の供給（関数）も考慮している。
- ・簡単な統計的回帰モデルとして、①その地点の流量のみで水質を算定するモデル、②地域を分割し、時間遅れも考慮した各地区の流量・降雨を説明変数とするモデルを示し、その精度を明らかにするとともに、その適用性について検討した。後者のモデルは、①のモデルの精度を向上させることの

外に、対象流域内の各地区が水質観測点の水質・負荷量に与える影響（寄与率）を把握するといった意味をもっている。

(Ⅳ)流域特性と汚濁負荷流出の関係、およびポイント・ノンポイントソースからの汚濁負荷量のマクロ的な分離について検討し、試算的にその特性を明らかにした。

以上のようにして、本研究では河川のある基準点で測定されたデータを用いて、水文学的なアプローチにより基礎的な解析を主として行った。また、河川の汚濁形成機構を流域指標データと実測負荷量を用いて試算的に把握した。今後の課題としては、水文学的な水質・負荷量シミュレーション・モデルの改良と、河川の汚濁負荷形成機構についての詳細な調査がある。現在その作業を実施しており、次の機会に報告したいと考えている。

謝辞

本研究を進めるにあたっては、関東地方建設局霞ヶ浦工事事務所、近畿地方建設局淀川工事事務所・猪名川工事事務所から貴重なデータを提供していただいた。また、本省河川計画課および同上の各工事事務所、土木研究所水質研究室・都市河川研究室が参加する河川水質特性に関する研究会の方々には、有益な情報を提供していただくとともに多くの教示を得た。さらに、土木研究所土屋河川部長、水質研究室大島研究員、三次処理研究室酒井研究員、水資源開発研究室坂戸室長、東京工業大学日野教授からは、本研究を進める際に有益な助言を得た。また、本報告書を作成する段階で水質研究室長村上博士・大島研究員からは、筆者らの独断と基礎的な事項に対する認識不足に対して多くのご教示と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) 建設省土木研究所、他：利水計画における流況把握の研究、第23回建設省技術研究会報告、1969
- (2) 野間紀之：神奈川県における水域環境の水質管理計画策定のための研究(1)～(4)、用水と廃水、Vol. 19, No. 11～Vol. 20, No. 3、1977～1978
- (3) 栗谷陽一：河川汚濁論、水工に関する夏期研修会講義集（B. 河川コース）、1968
- (4) Shasthy, J. S., et al: Nonlinear Parameter Estimation In Water Quality Modeling, Journal of the Environmental Engineering Division, ASCE, Vol. 99, No. EE3, 1973
- (5) Rutherford, J. C., O'Sullivan, M. J.: Simulation of Water Quality in Tarawera River, Journal

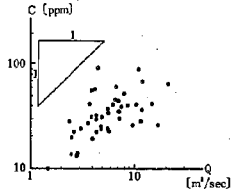
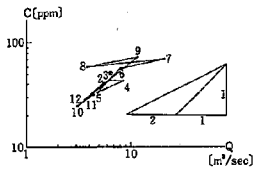
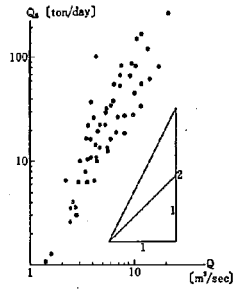
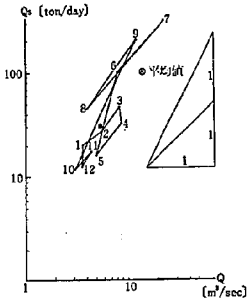
- of the Environmental Engineering Division, ASCE, Vol.100, No.2, 1974
- (6) 那須義和・橋治国：汚濁河川における有機物の挙動についての研究～石狩川についての一考察 1～4, 第9回～第12回衛生工学研究討論会講演論文集, 1973～1976
 - (7) 津田松苗：水質汚濁の生態学, 公害対策同友会, 1972
 - (8) 森下郁子：川の健康診断, NHKブックス, 1977
 - (9) 日野幹雄：生態系と水理学, 水工に関する夏期研修会講義集, 水工学シリーズ78-A-4, 1978
 - (10) 市川新・池田三郎：発見的自己組織化法による水質予測, 土木学会論文報告集, No. 269, 1976
 - (11) 池田三郎, 橋本義一：GMDH (発見的自己組織化法) と複雑な系の同定・予測, 計測と制御, Vol. 14, No. 2, 1975
 - (12) 市川新：水質ハイドログラフに関する研究, 第19回水理講演会論文集, 1975
 - (13) 羽田守夫：堆物川の水質変動特性とその変化, 土木学会論文報告集, No. 265, 1977
 - (14) 山口高志：都市河川における水質汚濁の問題点—合流式下水道越流水シミュレーションを中心に—, 河川水質年鑑, 1977
 - (15) Gunnerson, C.G. : Streamflow and Quality in the Columbia River Basin, Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE, Vol.93, No. SA 6, 1967
 - (16) Ledbetter, J.O., Gloyna, E.F. : Predictive Techniques for Water Quality Inorganics, Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE, Vol.90, No. SA 1, 1964
 - (17) Hart, F.C., et al : Predictive Techniques for Water Quality Inorganics (Discussion), Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE, Vol.90, No. SA 5, 1964
 - (18) Guy, H.P. : An Analysis of Some Storm-Period Variables Affecting Stream Sediment Transport, U.S. Geological Survey, Professional Paper 462-E, 1964
 - (19) O'Connor, D.J. : The Concentration of Dissolved Solid and River Flow, Water Resources Research, Vol.12, No. 2, 1976
 - (20) Gupta, S.K., Solomon, S.I. : Distributed Numerical Model for Estimating Runoff and Sediment Discharge of Ungaged River, 3. Comparison With Other Simple Techniques, Vol.13, No. 3, 1977
 - (21) Hall, F.R. : Dissolved Solids - Discharge Relationships, 1. Mixing Models, 2. Applications to Field Data, Water Resources Research, Vol. 6, No. 3, 1970, Vol. 7, No. 3, 1971
 - (22) 山口高志：都市河川の動態—水質ハイドログラフ—, 水工に関する夏期研修会講義集, 水工学シリーズ78-A-5, 1978
 - (23) 綾・岩佐・松尾：濁質の流送過程について, 第22回水理講演会論文集, 1978
 - (24) 橋治国, 那須義和：河川における汚濁物質の流出機構 (増水時についての考察), 第11回水質汚濁研究に関するシンポジウム講演集, 1977
 - (25) Walling, D.E. : Assessing the Accuracy of Suspended Sediment Rating Curves for a Small Basin, Water Resources Research, Vol.13, No. 3, 1977
 - (26) Drake, J.J., Ford, D.C. : Hydrochemistry of the Athabasca and North Saskatchewan Rivers in the Rocky Mountains of Canada, Water Resources Research, Vol.10, No. 6, 1974
 - (27) Cahill, T.H., et al : Evaluation of Phosphorus Dynamics in a Watershed, Journal of the Environmental Engineering Division, ASCE, Vol.100, No. EE 2, 1974
 - (28) Moore, S.F., et al : Describing Variance With a Simple Water Quality Model and Hypothetical Sampling Programs, Water Resources Research, Vol.12, No. 4, 1976
 - (29) Cordery, I. : Quality Characteristics of Urban Storm Water in Sydney, Australia, Water Resources Research, Vol.13, No. 1, 1977
 - (30) 村上・道上・下島：大戸川における微細砂の流送過程について, 京都大学防災研究所年報第13号 B, 1970
 - (31) 浮田正夫, 大西弘：小河川におけるN, P流達率に関する研究, 第12回衛生工学研究討論会講演論文集, 1976
 - (32) 高畑・寺島・神山：合流式下水道における雨天時流出汚濁負荷量の推定, 第12回衛生工学研究討論会講演論文集, 1976

- ③ 建設省関東・近畿地方建設局：河川水質特性解析，1977
- ④ 松原重昭：都市域からの雨天時汚濁流出特性と排水システムの合理化，土木技術資料，Vol. 16, No. 5, 1974
- ⑤ 中村栄一：雨天時合流式下水道の汚濁対策，土木技術資料，Vol. 18, No. 6, 1976
- ⑥ 茨城大学農学部段ヶ浦研究会：段ヶ浦，三共科学選書，1977
- ⑦ 建設省近畿地方建設局：低水管理と利水計画に関する調査，1977
- ⑧ 建設省近畿地方建設局長菅湖工事事務所：非点源汚染に関する調査，1978
- ⑨ 建設省近畿地方建設局：「低水管理と利水計画に関する調査」，「非点源汚染管理に関する調査」会議録，1978
- ⑩ Pisano, M.A. : Non-point Sources of Pollution: A Federal Perspective, Journal of the Environmental Engineering Division, ASCE, Vol. 102, No. EE3, 1976
- ⑪ Haith, D.A. : Land Use and Water Quality in New York Rivers, Journal of the Environmental Engineering Division, ASCE, Vol. 102, No. EE1, 1976
- ⑫ Crawford, N.H., Donigan, Jr. S. : Pesticide Transport and Runoff Model for Agricultural Lands, Report No. EPA-660/2-74-013, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., 1973
- ⑬ Shannon, E.E., Brezonik, P.L. : Eutrophication Analysis: A Multivariate Approach, Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE, Vol. 98, No. SA1, 1972
- ⑭ Loehr, R.C. : Characteristics and Comparative Magnitude of Non-point Sources, Journal, Water Pollution Control Federation, Vol. 46, No. 8, 1974
- ⑮ Hetling, L.J., Sykes, R.M. : Sources of Nutrients in Canadarago Lake, Journal, Water Pollution Control Federation, Vol. 45, No. 1, 1973
- ⑯ Fruh, E.G. : The Overall Picture of Eutrophication, Journal, Water Pollution Control Federation, Vol. 39, No. 9, 1967
- ⑰ Gburek, W.J., Heald, W.R. : Soluble Phosphate Output of an Agricultural Watershed in Pennsylvania Water Resources Research, Vol. 10, No. 1, 1974
- ⑱ Bailey, R.R., et al. : Predicting Pesticide Runoff from Agricultural Land: A Conceptual Model, Journal of the Environmental Quality, Vol. 3, No. 2, 1974
- ⑲ Thomas, G.W., Crutchfield, J.D. : Nitrate-Nitrogen and Phosphorus Contents of Streams Draining Small Agricultural Watersheds in Kentucky, Journal of the Environmental Quality, Vol. 3, No. 1, 1974
- ⑳ Frere, M.H. : Adsorption and Transport of Agricultural Chemicals in Watersheds, Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, Vol. 16, No. 3, 1973
- ㉑ Woolhiser, D.A. : Hydrologic and Watershed Modeling-State of the Art-, Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, Vol. 16, No. 3, 1973
- ㉒ Coughlin, R.E., Hammer, T.R. : Stream Quality Preservation through Planned Urban Development, Report No. EPA-A5-73-019, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., 1973
- ㉓ 広崎昭太，諏訪隆之：河川・用水の水質汚濁と都市化との関係についての変量解析，数理科学，No. 117, 1973
- ㉔ 洞沢勇：河川上流における自然汚濁量と比流出量について，用水と廃水，Vol. 15, No. 11, 1973
- ㉕ 和田安彦：河川上流部の自然負荷の定量化とその特性，用水と廃水，Vol. 20, No. 4, 1978
- ㉖ 高村義親，田岡俊雄：水田肥料の流出と陸水の富栄養化，河川水質年鑑，1977
- ㉗ 本間・石原編：応用水理学下Ⅱ（数値解析，水文観測），丸善K.K., 1971
- ㉘ 日野幹雄：スペクトル解析，朝倉書店，1977
- ㉙ 小泉清明：川と湖の生態系，共立出版，1971
- ㉚ 古川秀夫：浮遊流砂量に関する二，三の考察，土木研究所報告第83号，1952
- ㉛ 須賀晃三：混合粒徑特性を考慮した河川の浮遊流砂，土木研究所資料第612号，1970

(昭和53年7月25日原稿受理)

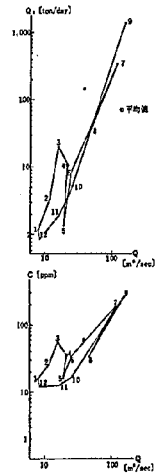
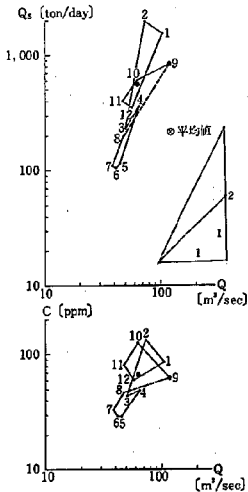
【補足】(河川の水質・負荷量の経月変化特性図)

●河川の水質・負荷量の経月変化特性図のうち、本文中に記さなかったものを以下に示す。



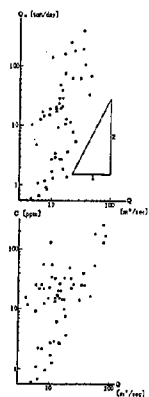
付図一 1 (a) 河川②濁度の月変化 (その 1)

付図一 1 (b) 河川②の濁度の月変化 (その 2)

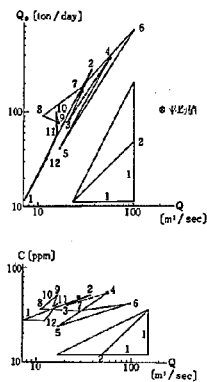


付図一 2 河川③の濁度の月変化

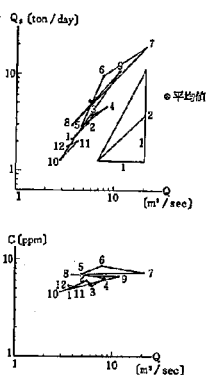
付図一 3 (a) 河川④の濁度の月変化 (その 1)



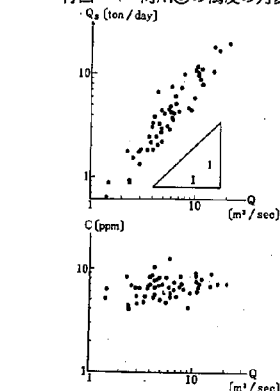
付図-3 (b) 河川④の濁度の月変化 (その2)



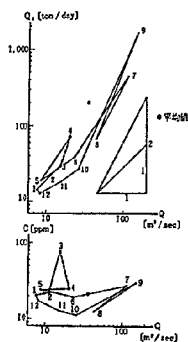
付図-4 河川⑨の濁度の月変化



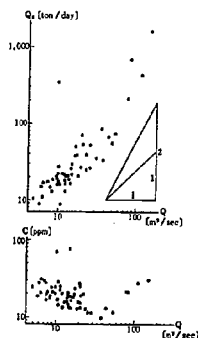
付図-5 (a) 河川②のKMnO消費量の月変化 (その1)



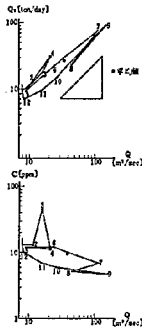
付図-5 (b) 河川②のKMnO消費量の月変化 (その2)



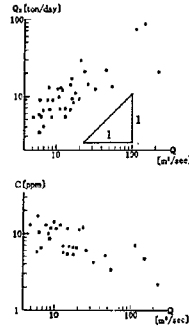
付図-6 (a) 河川④のKMnO消費量の月変化 (その1)



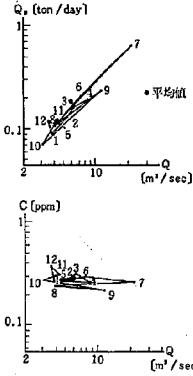
付図-6 (b) 河川④のKMnO消費量の月変化 (その2)



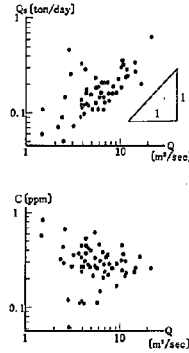
付図-7 (a) 河川④BODの月変化 (その1)



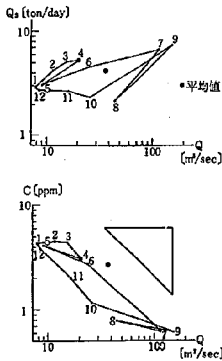
付図-7 (b) 河川④BODの月変化 (その2)



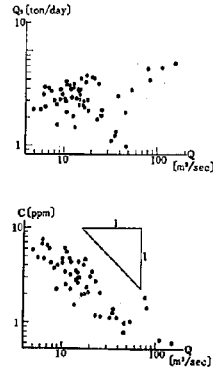
付図-8 (a) 河川②のNH₄-Nの月変化 (その1)



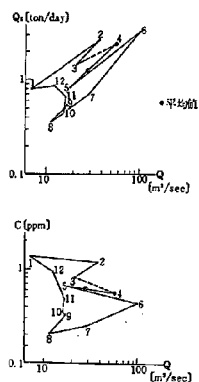
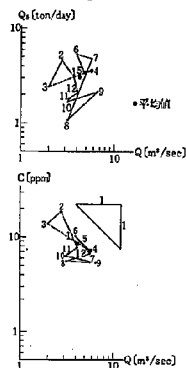
付図-8 (b) 河川②NH₄-Nの月変化 (その2)



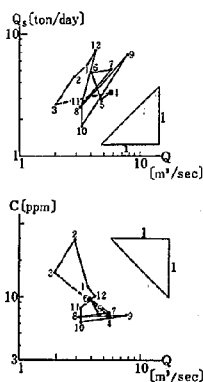
付図-9(a) 河川③のNH₄-Nの月変化 (その1)



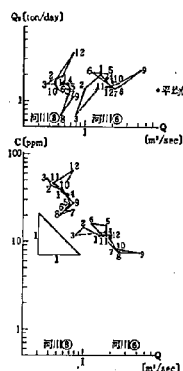
付図-9(b) 河川③NH₄-Nの月変化 (その2)

付図—10 河川⑩のHN₂Nの月変化

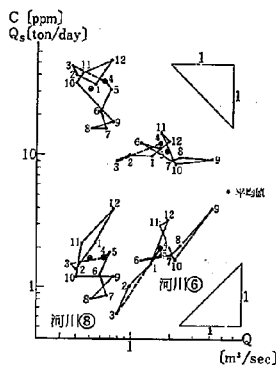
付図—12 河川⑦のCODの月変化



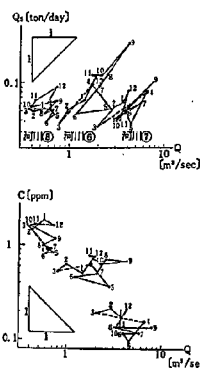
付図—14 河川⑦のTOCの月変化



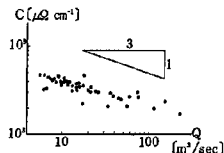
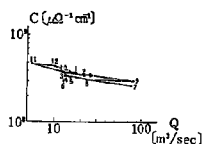
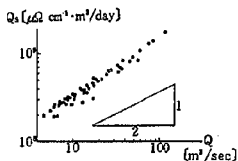
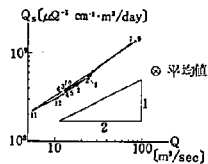
付図—11 河川⑥、⑧のCODの月変化



付図—13 河川⑥、⑧のTOCの月変化

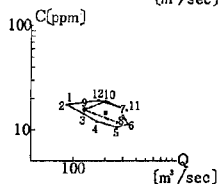
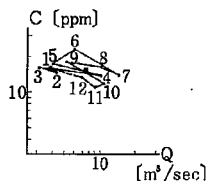
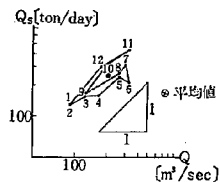
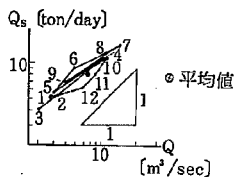


付図—15 河川⑥～⑧のT-Pの月変化



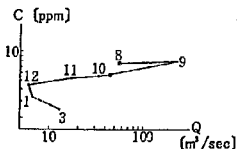
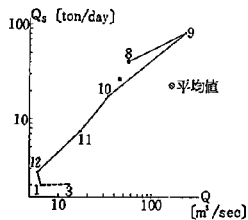
付図一16 (a) 河川④のECの月変化 (その1)

付図一16 (b) 河川④のECの月変化 (その2)



付図一17 河川②のCl⁻の月変化

付図一18 河川⑤のCl⁻の月変化



付図一19 河川④のDOの月変化