

土研資料 第1641号

I S S N 0386—5878

土木研究所資料

水利用率の上昇した流域における
水資源計画に関する研究

昭和56年 3 月

建設省土木研究所
総合治水研究室

Copyright ©1980 fiscal year by P.W.R.I

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor transland into a machine language without the written permission of the Director of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。
したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複写は土木研究所長の承認を得ずしてこれを行ってはならない。

水利用率の上昇した流域における 水資源計画に関する研究

A Study on Water Resources Planning in a Basin Advanced
to the Higher Water Resources Development Stage

昭和 56 年 3 月

March 1981

吉 川 勝 秀*

Katsuhide Yoshikawa

*建設省土木研究所 河川部 総合治水研究室 研究員

Research Engineer of Flood Disaster Prevention Division, River Department,
Public Works Research Institute, Ministry of Construction

要 旨

流域の社会活動が拡大するにつれて水需要量が増加し、河川水の利用率が上昇してきている。その結果、利水者間、上下流間あるいは水利用と水環境間の競合が顕在化し、水量・水質をめぐる総合的な調整を必要とする段階に至っている。さらに計画を超過する渇水が深刻になり、停滞性水域の水環境が悪化するという問題が生じている。

本論文では、流域内の水循環および水利用状況を総合的に把握する手法を検討するとともに、上に述べた新しい課題を計画論的な立場から解析した。

本論文は6章から構成されている。

第1章では、わが国の水利用の歴史的変遷および水利用の現況と問題点について考察し、研究課題を設定した。そして、既往の主な研究を概観して、本論文での各課題の研究方針を明確にした。

第2章では、水循環・水利用の総合的な分析を行った。

総合的な検討を行うには、まず流域の水循環状況を水利用と関連づけて総合的に把握する必要がある。しかし、総合的な把握方法については、従来必ずしも十分な研究が行われていない。本論文では体系的な手法として、水資源連関表による方法を提案した。水資源連関表は経済学における産業連関表と類似しており、この表を用いることにより、複雑な水の移動状況を体系的かつ詳細に記述することが可能となった。

次に、水資源連関表に示される諸量を変数とする総合的かつ多角的な水資源計画モデルを開発した。このモデルにより、物理的制約および社会・経済・環境等の制約を満した上で、水資源計画の多目的最適化について検討することができる。

比較的水利用率の高い奈良盆地（大和川流域）において、提案した水資源連関表およびモデルを適用し、水循環・水利用状況の解析と水資源計画手法の検討を行った。その結果、水資源連関表を用いた分析により、例えば上流都市群の排水による下流河川の水質悪化、地域的な水需給のひっ迫といった現状の水資源計画上の問題点を詳細に説明することができた。さらに、モデルを用いることにより、利水者間、上下流間等の競合の問題を定量的に評価できるだけでなく、複雑な競合を調整する水資源計画案の検討も可能であることを確認することができた。

以上のことから、本章で提案した水資源連関表およびモデルは、水利用率の上昇によって生じる水資源計画上の諸問題を解明する上で有効であることが明らかとなった。

第3章では、第2章の総合的な検討で分析された競合の問題の多くが、主として流域の水循環システム形態に関連していることから、それらの相互関係を明らかにするために、取・排水システム形態と水利用・水環境との関係を詳細に考察した。

近年の水利用率の上昇は主として都市用水需要量の増加によっており、したがって競合の問題の多くは都市用水に関連して発生していることから、都市化流域を対象として検討した。都市化流域の取・排水システム形態は、基本的な8つの形態に類型化された。歴史的にみると、流域の取・排水システムの改変には一つの傾向が認められ、これら8つの形態間の移行としてとらえることができる。したがって、各形態での利水特性および水環境について分析しておけば、取・排水システムの改変を伴う水資源計画を評価する上で有用であることが知られた。

次に、水環境・水供給容量・経済性・安全性等に関する10の評価指標を設定し、数値シミュレーションを行って各形態ごとの特性を定量化した。その結果は一覧図にまとめられ、各形態ごとの特性を相互比較することが可能となった。この図により、新たな取・排水システムの改変による利害得失を知ることができる。さらに、この検討結果より、取・排水システムの改変による利水安全度の変化、処理水を河川に還

元することによる水開発可能量等も明らかになった。

以上の検討により、流域の取・排水システム形態ごとの利害得失が明らかにされるとともに、水資源計画上の重要な要素である水循環形態の計画手法が示された。

第4章では、超過渇水の問題について考察した。

まず、計画渇水規模と耐用年数とから超過渇水の生起確率を算定し、 $1/10$ の渇水を対象とした水資源開発施設のもとでは、10年間に約65%の確からしさで超過渇水が生じることを明らかにした。 $1/10$ の渇水は、現在の水資源開発計画で基準とされているものである。

次に、一般的な流域の流況データを用いて、超過確率のみを対象とした貯水池容量 S_1 、水不足率・日を対象とした容量 S_2 および渇水被害率 (= 総被害額 / 需要量) を対象とした容量 S_3 を算定した。その結果を検討することにより、後の2つの容量 S_2 および S_3 は水利用率の上昇とともに S_1 より大きくなることが明らかにされた。これは、貯水池容量 S_2 および S_3 は超過渇水時の被害率を増加させないために必要とされるものであることから、水利用率の上昇とともによりきびしい渇水を対象とした水資源開発計画が要請されることを示している。この理由の一つは、流況を平滑化して水開発を行う水供給施設の特性によっており、水利用率の上昇に伴い必要貯水池容量が飛躍的に増大し、したがって超過渇水時の水不足量も飛躍的に増大することによっている。あと一つは、わが国では水利用率の上昇が渇水被害原単位の大きな都市用水需要量の増大によっているために、地域社会が渇水被害をより受けやすくなっているためである。

貯水池容量の検討により、水利用率が上昇すると超過渇水を予め考慮した水資源計画が必要であることを明らかにした。したがって、超過渇水を定量的に考慮に入れる計画手法として、費用便益分析に基づく数理モデルを提案した。このモデルを想定流域に適用した結果、経済的な超過渇水対策施設の規模および適切な利水安全度を定めることができた。また、水利用率の低い段階では超過渇水対策は必要としないが、水利用率の上昇とともに一定の利水安全度を保つためにはますます大規模な施設を必要とすることが示された。したがって、水利用率の上昇により、よく知られている水開発効率の低下による水コストの上昇に加えて、超過渇水対策費用のために水コストがさらに増加することが知られた。

以上の検討から、水利用率の上昇によって超過渇水を考慮に入れた水資源計画が必要とされるようになり、提案したモデルによりその検討が可能であることが明らかにされた。

第5章では、流域から排出される汚濁負荷量について検討した。

従来の水資源計画における水質の検討は、水質汚濁防止法等との関係から、主として低流況時を対象としてなされ、出水時の特性は十分に解明されていない。そこで、8河川の水質・流量の毎日観測データを用いて、出水時を含む汚濁負荷量の流出特性を解析し、次のことを明らかにした。汚濁負荷量の多くは降雨流出に対応して流出していること、および水質項目は流量が大きくなるにつれて水質の悪化する汚濁型、水質が良くなる希釈型および流量規模によらない中間型に分類されることが示された。また、総負荷量は低流況時に流出する分と出水時に流出する分とに分離することができるが、排出原単位・流達率による従来の取り扱い方では総量の一部分しか評価していないことから、降雨流出をも考慮した算定が必要であることが明らかになった。

そこで、流量を説明変数に加える流出汚濁負荷量のシミュレーション・モデルを提案し、8河川に適用して妥当性を検証した。また、現実の河川では月1回程度しか水質が観測されていないことから、限られたサンプル・データから総流出負荷量を推定する方法についても検討し、流量を正しく与える推定式を用いると従来の低流況時のみの流量を用いるものに比較して推定精度がよいこと、また系統的な誤差を少なくするためには水質項目ごと(希釈型・中間型・汚濁型)に流量規模を考慮したサンプリングが必要であることが示された。

次に、総流出負荷量を正しく評価するために、従来の低流況時の原単位・流達率モデルとここで提案し

たモデルとを結合したモデルを提案した。このモデルを用いることにより、総流出負荷量の規制について検討することが可能であることが示された。

以上の検討により、流域から排出される総汚濁負荷量を推定する手法を示すとともに、水質源計画の一つの重要な要素である停滞性水域の水質保全計画を策定する手法を提案した。

第6章では、各章の検討内容と主な成果を要約するとともに、総括的な結論を述べた。

目 次

第1章 序 論	1
1. 序 文	1
2. 水利用の現状および問題点	1
3. 水資源計画の概念	3
4. 既往の主な研究	3
5. 本論文の構成	6
第2章 水循環・水利用の総合的な分析	10
1. 水循環・水利用状況の体系的な把握方法	10
2. 総合的な水資源計画モデル	14
3. 実流域への適用	22
4. ま と め	25
第3章 水循環に関する考察	29
1. 水循環システムと水資源計画との関連	29
2. 流域の取・排水システムの類型化と特性分析	29
3. 取・排水システムの特性に関する考察	35
4. 水循環に関する考察の応用	37
5. ま と め	39
第4章 超過渇水に関する考察	41
1. 水利用率の上昇と超過渇水との関係	41
2. 超過渇水の定義と評価方法	41
3. 水利用率の上昇に伴う渇水被害の深刻化	42
4. 超過渇水を考慮する新しい計画理論	43
5. 理論の応用	48
6. ま と め	54
第5章 流域から排出される汚濁負荷量に関する考察	56
1. 水資源計画における水環境の取り扱い	56
2. 河川水質・負荷量の変動特性	56
3. 水文学的なモデルによる汚濁負荷量の推定	63
4. 定期的なサンプリングによる汚濁負荷量の推定	69
5. 原単位・流達率に基づく従来の取り扱い方法の限界とその改良	76
6. ま と め	77
第6章 結 語	80
1. 総 括	80
2. 今後の課題	83
3. おわりに	84

第1章 序 論

1. 序 文

国土庁は、昭和53年に「長期水需給計画」¹⁾を公表し、わが国の水需給状況を明らかにした。これによると、昭和65年の総需要量は1,207億 m^3 /年であり、1/10渇水年における水資源賦存量3,338億 m^3 に対する水利用率は平均36%に達し、主要河川においては40~50%にも達すると推定されている。このような水需要量の増大に対して、建設省の「昭和65年に向けての水資源開発計画と水利用」²⁾では、南関東・京阪神・北部九州での水供給不足の問題、あるいは厳しい社会的制約のもとでの水開発施設建設の遅れによって、それ以外の地域でも水不足の可能性があると推定している。また、水利用率の上昇は、都市排水を主要因とした水環境の悪化および取・排水システム形態によって規定される流域内の水の移動状況(本論文では水循環と呼ぶ)の改変による利水者間、上下流間、水利用と水環境間での水量・水質をめぐる競合問題を顕在化させることを明らかにしている。さらに、例えば昭和53年の北部九州渇水にみられるように、計画を超過する渇水によって、地域社会に深刻な被害が生じるようになることを示している。このような競合の問題、渇水の問題あるいは水環境の悪化といった問題は、初期の水資源開発段階では無視し得たが、水利用率の上昇に伴って顕在化してきたものである。

したがって、水資源計画においては、水需給問題を解明する外に、水量・水質をめぐる複雑な競合問題の総合的な調整が必要とされる段階に至っている。

上に述べた水資源計画上の新たな課題に対して、水需給問題については国土庁および建設省の調査により問題が解明され、対策が示されていることから^{1), 2)}、本論文は次の四つの課題を解明することにより、水利用率の上昇によって生じる問題を解決するいとぐちを得ようとしたものである。

第一の課題は、流域内の水循環・水利用状況を総合的に把握した上で競合の問題(以下では相互干渉と呼ぶ)を分析し、その調整を行う方法についての検討である。また、相互干渉の問題の多くが取水・排水形態と密接な関係にあることから、第二の課題は取水・排水システム形態と水利用上の特性との関係についてのより詳細な検討である。これら二つの課題は、水利用率の上昇に伴って生じる水量・水質に関連した問題点を解明する手法について検討したものであり、第一の課題ではシステム論的な観点から全体像を

明らかにし、多角的な分析を行った。第二の課題では、流域内の水循環形態に着目してさらに詳細な考察を行った。一方、水利用率の上昇に伴って潜在的に重要となってくる問題として、計画を超える渇水(以下では超過渇水と呼ぶ)時の被害が深刻化すること、および停滞性水域の水環境の悪化がある。したがって、第三の課題では、従来の水資源計画では必ずしも十分に考慮されていない超過渇水を考慮に入れる計画手法について検討した。第四の課題としては、流域から排出される汚濁負荷量の把握とその推定方法に関する検討をとりあげた。これは、停滞性水域の水環境の悪化が従来の低流況時を対象とした河川水質・負荷量の取り扱いでは説明しきれないために、雨天時を含めた検討が要請されるようになったためである。

これら四つの課題に対応した問題は、流域の水利用率が上昇することによって同時並行して生じるものであるが、本論文ではそれらの問題すべてを同時に取り扱うのではなく、四つの本質的な課題に細分化して詳細な検討を行った。そして、その結果を特に流域の水利用率の上昇に関連させて統一的に解釈することにより、水資源計画上の新たな課題を解明することを目指したものである。

2. 水利用の現状および問題点

流域の水利用形態は、かつての農業用水を主体とした水利用から、近年の急激な都市用水の増大によって都市型の水利用に変ってきた。これは、水資源の利用が常にその時代の社会形態と密接に関連していることを示している。したがって、わが国の水利用の歴史的な変遷について概観し、水資源をめぐる今日的な課題が発生した背景について整理してみる。

水利用の歴史的変遷は、河川の低水流量あるいは渇水流量で規定される水量的な容量に整合した農業用水の水秩序が形成された過程と^{3)~7)}、それ以後の発電や工業用水、都市用水の参画により新たな水秩序が形成された過程とに大別される。前者の過程では、利用可能な河川低水流量に対応して水田が発達し、さらにため池の建設、河川低水工事および導水路の建設などの利水施設の構築により、新田開発が可能となった。したがって、これは水田の拡大を目指して水利用が進められた過程として位置づけられる。この時代の後期(16世紀頃)には、河川低水流量に相当する水量のほとんどすべてが農業用水として使われ、一種のクライマックス的な水利用秩序が形成されていたといわれている。^{3)~5)}

しかし、このような時代においても、例えば大堰川の寅天堰をめぐって展開された複雑な水利権争いに見られるような水量をめぐる上下流問題がすでに発生している^{6), 7)}。後者の過程は、その初期における農業用水の収奪を経て⁵⁾、その後既得用水の量的な秩序を乱さないで新規用水の開発が行われるようになった時代に対応しているものである。近年の急激な社会活動の拡大により都市型の新規用水が大量に流域の水利用に参画するようになり、それとともに上下流間のみならず、既得利水者と新規利水者間あるいは水利用と水環境との間に、水量・水質に関連した多様な相互干渉が生じるようになってきている⁸⁾。このような相互干渉は、技術的・経済的あるいは環境面からの制約など、種々の制約のもとで規定される水資源の容量に、増大した水利用量が接近することによって顕在化したと見なすことができる。

水利用の歴史をみる場合には、流域の社会活動と水資源の関係が大きく変化してきていることを認識しておく必要がある。すなわち、初期の相互干渉が生じていた時代には、水資源そのものが社会活動の大きな支配要因となっていたために、水資源の容量に整合した社会活動が行われてきた傾向にあり、河川や用水路あるいはため池の近傍において村落が形成された傾向が認められる。しかし、その後現在に至るまでの、鉄道やモータリゼーションに主導されて都市が形成された時代には、水資源は必ずしも都市活動の主要な規定要因としてはとらえられていなかったようにみえる。例えば東京の山の手線に沿って発展した都市群は、当該地域の河川の容量をはるかに超えて存在するようになっている。したがって、この時代には都市活動に見合った水資源開発を行うという視点から、それが可能か不可能かが問われたように思われる。以上のことは、かつては河川網に沿って村落・市街地が形成されていたのに対して、近年では河川を横切る道路や鉄道に沿って都市が発達していることを考えれば、比較的容易に理解しようと思われる。さらにまた、例えば多摩ニュータウンのように、近年の大規模宅地開発は、水源となりうる河川から相当離れた所に都市を形成するものであり、上述の視点を裏付けているように思われる。現在の都市が水資源からみた容量を超えて発展し、種々の問題が潜在的に生じているとする吉川や末石らの主張は、このような背景から行われたものと考えられる。^{9), 10)}

最近の水資源計画において考慮されるべき事柄として、さらに次の二つがある。一つは、多様な水資源対策が実施されるようになってきたことである¹¹⁾。水資源の開発手段としては、従来のダム・湖沼等によって流況を時間的に調整するものの外に、広域導水による地域的な流況の調整に

よる開発、水質の復元あるいは改善による再生水資源開発あるいは海水の淡水化などが行われ始めた。また一方では、節水型の水利用による水需要量のコントロールといった多様な手段が用いられはじめたことである。^{12)~14)} あと一つは、直接的な水の輸送の外に、流域間・国間の物流に伴って実質的な水の輸送が行われているということである。^{9), 15)~17)}

わが国では第一次産品を大量に海外に依存しており、耕地面積に換算すると日本の耕地面積の数倍に相当する農作物や木材を輸入しているが、それを作るに要した水資源を考えれば、莫大な水量が消費されていることになる。したがって、わが国の社会活動は、間接的に水資源を輸入して成り立っているといえることができる。このような現象は流域間でも生じており、社会活動の他流域への依存といった問題も生じている。したがって流域圏内で水資源計画を考える場合にも、流域内で対応可能な部分について問題を解決しようとしていることを明確に意識しておく必要がある。

次に、以上で概観した水利用の歴史的な変遷を念頭において、わが国の水利用の現状とその問題点について概観する。

わが国の水利用の現状は、総括的には以下のように理解できるように思われる。流域内の水利用についてみると、近年の都市の拡大は水需要量を増大させ、都市型の水利用形態を形成した。そして、流域の水賦存量（総降水量から蒸発散量を引いた値）に対する水利用量で定義される水利用率が上昇した地域が数多く認められるようになり^{1), 2)}、それに伴って水資源をめぐる種々の相互干渉が顕在化した。その結果、水量・水質をめぐる総合的な調整がきわめて重要となったと解釈される。

近年重要となった問題点を統一的に解釈するには、上に定義した水利用率が一つの主要な指標となり、水利用率の上昇に着目すると前述の種々の問題は次のように説明される。社会活動の拡大によって水利用量が増大し、水利用量が水資源についての容量に近づいていき、水利用率も上昇していく。水利用率の低い段階では、個々の水利用計画が他の水秩序を大きくは乱さずに進められた。しかし、水利用率が上昇すると、もはや他の秩序を乱さないで水開発が進められなくなり、上下流間・利水部門間、既得利水と新規利水間あるいは水利用と水環境との間に相互干渉が生じるようになってくる。したがって、水利用率の上昇した地域においては、流域内の水循環・水利用状況を総合的に把握し、相互干渉に付随する諸問題を総合的に調整することが必要とされる段階に至る。さらに、水利用率の上昇は超過渇水の問題を深刻化させ、また流域から排出される負荷量によって停滞水域の水質が悪化するために、それらの解明が

必要とされるようになる。

3. 水資源計画の概念

本論文では、水利用率を基本的な指標として水資源計画について考察するが、流域の水資源計画の全体像をとらえるにあたり、さらにブレイク・ダウンして水資源計画の概念について整理しておく必要がある。水資源計画における主要因としては次のようなものがある。第一に、家庭・業務・工業・農業活動といった水利用に係る社会活動がある。社会活動状況は、地域内で地区分布・時間分布をもって与えられ、水資源計画では水需要量や汚濁負荷排出量等に変換して考えられることが多い。第二の要因は、降雨・流量・水質等といった自然・環境要因である。これらのうち、降雨は現在のところ自然現象であり、ある確率分布をもって生起するとみなされている。流量や水質は、水資源開発計画あるいは環境保全計画等により、人為的に改変される。第三の要因は、水資源開発施設、水供給および排水システムに関するものであり、水供給要因と呼ばれる。

これらの三つの主要因により、概念的に水利用の変化を表現したものが図-1.1である。時代とともに社会活動が拡大し、それに伴って水供給施設の拡張が行われ、流量・水質といった環境要因にも変化が生じていく。図-1.1では、社会活動要因の拡大を時間軸上で示しているが、水資源計画では、これを前述の水利用率の上昇としてとらえることができる。そして、水利用率の上昇とともに、水利用量が水供給要因あるいは環境要因で規定される容量に近づき、種々の相互干渉が顕在化すると考えることができる。

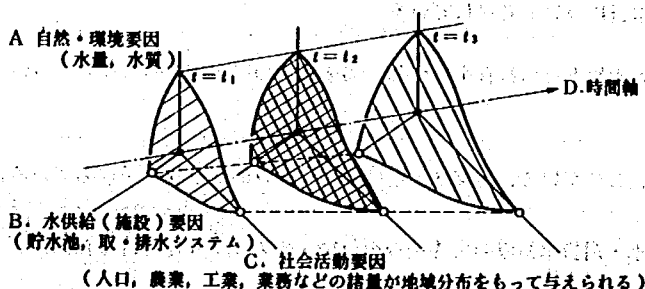


図-1.1 水資源計画の概念図

4. 既往の主な研究

本論文では、水利用率が上昇した流域の水資源計画における基本的な問題点として、前述の4つの研究課題を設定した。これらの研究課題に対応して、次のような手順で従来の研究を概観した。

① 水利用率の上昇により、ある目的を追求する水資源開

発計画あるいは取・排水システムの改変計画は、既存の水秩序、他の利水目的あるいは環境等に、何らかの影響を与えるようになっている。水資源計画における相互干渉の問題は、流域の水循環に付随して生じているものであり、これらの問題の解明には、流域の水循環に関する研究と、その水循環と水利用との関係を明確にした上でそれを分析する必要がある。そこで、まず水循環に関する従来の研究、水利用に関する研究、および総合的かつ多角的な分析手法についての研究を概観した。

② 次に、水資源に関連した種々の相互干渉は、流域内で水が循環していることに付随して生じていることから、水循環と水利用との関係をより本質的に考慮するために、その基本となる取・排水システムの特性を分析し、水循環という視点から水資源計画を取り扱った従来の研究を概観した。

③ 水利用率の上昇とともに、超過確率で示される利水安全度を一定として流況を平滑化する水資源開発施設のもとでは、超過渇水時の被害が深刻化する。そこで、超過渇水に関する従来の研究を概観した。

④ 従来の水資源計画では、水質の検討は主として低流況時の河川水質について行われてきた。そして、下水道の整備や大口排水の水質規制が行われ、低流況時の河川水質が改善されてきている。近年に至って、東京湾・琵琶湖・霞ヶ浦・瀬戸内海等の停滞性水域の水質保全が考えられ始めるようになった。そのためには、従来の低流況時を対象とした水質・負荷量の取り扱いでは十分ではなく、出水時をも考慮に入れる必要があることから、低流況時および出水時の河川水質・負荷量に関する従来の研究を概観した。

1) 水循環および水利用に関する研究

流域の水循環を取り扱った従来の研究のうち、代表的であると考えられる事例とその概要を表-1.1に示す。これらの研究を総括的にながめてみると、地下水や河川水といった自然水の循環や例えば上水のようなある特定の利水部門を対象とした水循環については、個別的に精度高く水収支を把握することを目指したものが多くあることがわかる。自然水および用・排水を含めた形で、利水部門間・地区間の水のやりとり状況を明示的に表現し、流域内の水循環を総合的に把握したものはみうけられない。したがって、流域の水循環状況を総合的に取り扱うためには、従来から行われてきた個別的で精度の高い研究成果を反映しながら総合的かつ体系的に水循環を把握して記述する方法論についての研究が必要である。

一方、水資源の利用に関する研究としては、多角的な観点から水の配分・利用を検討した研究と貯水池計画に関す

表-1.1 水循環に関する研究

対 象	研 究 者	発 表 年	概 要
自 然 水	金子 良 ²⁰⁾	1970~71	自然水・農水の水収支のとらえ方を提案し、豊富な実測データに基づいて地形別に水収支特性を類型化している。きわめて実証的な研究である。
	市川 正巳 ²¹⁾	1968	多摩川流域において、自然水の水収支を金子とほぼ同様の観点から明らかにしている。
	建設省 ²²⁾	1970	全国の10数河川を例として、年間単位の水収支を把握し、降雨損失が地域ごとにほぼ一定の値をもつ傾向にあることを明らかにしている。このほか同時流量観測や水質調査も並行して行っている。
	奈良 県 ²³⁾	1974	大和川流域の奈良盆地において、降雨のうち地下に浸透した水が、3ヶ月の間にはほぼ99%の確かさで河川に還元していることを明らかにしている。
	水収支研究グループ ²⁴⁾	1976	地下水盆の水収支に関する理論的な考察と、実際現象についての検討を行っている。
	市川・樫根 編 ²⁵⁾	1978	水収支の理論・観測精度・地形別の収支特性等について総合的に記述したものであり、実用性の高い研究である。
農 水	建設省 ⁸⁾	1980	最上川において農水の水収支をマクロ的に把握し、農水の河川への還元率を求めている。
	岡 本 ²⁶⁾	1973	農業用水の循環利用特性を考慮して、ある需要量のもとで供給量を算定するCB法を提案している。
	湯 川 ²⁷⁾	1972	愛知用水を例として、水田かんがいにおける水路損失を求めている。
都市用水	建設省近畿地建 ⁸⁾	1980	都市用水の水収支を把握して、用水還元率を一戸建住宅・高層住宅別に求めている。
	建設省関東地建 ⁸⁾	1980	都市形態別の水収支を把握し、用水還元率を都市タイプ別に求めている。
	科学技術庁丹保 ²⁸⁾ ²⁹⁾	1977	都市における水代謝(水循環)を、水利用の本質は水質の消費であるという観点から構造を類型化し、容量と水質について考察している。
	浜口・前田 ³⁰⁾	1976	都市の取・排水システム形態とその特質を分析し、都市域での用水循環のあり方について考察している。
総合水収支	国土庁 ³¹⁾	1976	流域の水質源賦存量の調査において、自然水・用排水のマクロ的な水収支を求めている。
	建設省 ⁸⁾	1980	複数流域において自然水・用排水循環の実態調査を行い、そのモデル化を行った総合研究である。

るものがある。代表的な研究とその概要を表-1.2に示す。前者の研究には、シナリオ分析とそれに基づくシミュレーションによる検討を行ったもの(simulationによる方法)、および最適化モデル(optimizationによる方法)を用いたものに大別される。これらの研究はいずれも水資源問題を地域計画と関連させて取り扱っている。実務的には、シミュレーションによる方法が主として用いられている傾向にある。本論文のような立場から水利用を考える場合には、

流域の水循環と水利用に関連して生じる種々の相互干渉の関係を内包させながら、多角的に分析できるモデルを構築することが必要であろう。次に、貯水池計画などに関連した水文量や水質に関する研究および水需要変動特性に関する研究のうちで、代表的な研究とその概要を表-1.3に示す。これらの研究では、それぞれ個別的高精度の調査・研究が進められており、本論文ではそれらの成果を反映しうる形で議論を進めることにする。

表-1.2 水利用に関する研究

対 象	研 究 者	発 表 年	概 要
水需給計画	合 田 ³²⁾	1966	工業用水の水量・水質の配分にLPを用いた古典的な研究である。
	Okada ³³⁾	1976	川水計画における水量・水質の配分、地域内の地区間配分、多目的選好解の計算、非線形を考慮した最適化等について研究している。水資源計画に多様なORの手法を導入している。
	建設省 ³⁴⁾ 近畿地建 ³⁵⁾ 高 樟	1976	近畿圏の水需給・水質と都市活動との関係をシステム・ダイナミックス・モデルにより分析している。特にシナリオ分析の導入に重点を置いているところがすぐれている。
	国 土 庁 ¹⁾	1979	全国を14ブロックに分け、昭和65年までの水需給の展望を行っている。
利 水 計 算 ・ 水管理計画	浜 口 ³⁶⁾	1977	ダム貯水池の容量を1/10確率容量とする場合、および不足率・日のある基準とする場合には、水利用率の上昇に伴ってそれらにどのような差異が生じるかを示している。
	中 川 ³⁷⁾	1978	マスカープ法で利水安全度を概略的に評価する手法を一般的に述べている。
	竹 内 ³⁸⁾	1974	貯水量の累加損失係数を用いた貯水池群の最適操作を考えるために、DPとLPを組み合わせたDCL法を提案している。
	建設省 ⁴⁾ 土木研究所	1979	渇水時の貯水池運用方式として予測方式、段階的節水方式、確率DP方式を比較し、渇水被害軽減額で評価すると確率DP方式が最もすぐれていることを明らかにしている。

表-1.3 河川水質、水水量、水需要量変動特性に関する研究

対 象	研 究 者	発 表 年	概 要
河 川 水 質	栗 谷 ³⁹⁾	1968	低流況時の河川汚濁負荷量収支について、Streeter・phyrapsの方法を適用している。
	建設省 ²²⁾ 河川局ほか	1970	全国10数河川を対象として低流況時の汚濁負荷量原単位と流達率を測定し、その一般化を行っている。
	茨城大学 ⁴⁰⁾ 農 学 部	1977	霞ヶ浦に流入する河川で汚濁負荷量を毎日観測し、その特性を解析している。
水 文 量	建設省 ⁴¹⁾ 中部地建	1980	利水計画で用いる渇水水文量の模擬発生モデルの比較を行っている。
	吉川・竹内 ⁴²⁾	1975	利水計画に用いる水文量を確率的に与える方法として、渇水持続曲線を提案している。
	浜 口 ³⁶⁾	1977	利水計画に用いる水文データの期間と誤差の関係を実証的に示している。
水需要量 変動特性	住 友 ⁴³⁾	1968	上水道の水需要量 q を、必要最少限量 q_1 と生活にうるおいをもたせるための水量 q_2 に分け、需要量の変動特性の分析を行っている。

(2) 水循環を明確に考慮に入れた水資源計画に関する研究
水循環を明確に考慮に入れた水資源計画に関する研究のうちで、代表的な研究とその概要を、表-1.4に示す。

これらの研究は、流域内の複数地点で水量・水質の計測を行ったものと、水の循環形態に着目して水資源計画との関連を明らかにしようとしたものに分けられる。本論文の課題に対応する後者の研究についてみると、低流況時の水循環

表-1.4 水循環を考慮した水資源計画に関する研究

対 象	研 究 者	発 表 年	概 要
農 水	岡 本 ²⁶⁾	1973	農業用水の循環特性をCB法によって明確に表現している。
	建設省河川局ほか ⁸⁾	1980	農業用水の還元を考慮した水循環のシミュレーションを試みている。
都市用水	建設省河川局ほか ⁸⁾	1980	都市用水の還元量調査をもとにして、還元を見込んだ利水計画について検討している。
	科学技術庁 ²⁸⁾	1977	都市の水循環形態を水代謝系の構造と関係づけて分析している。
全 用 水	建設省河川局ほか ⁸⁾	1980	自然水、用・排水を含む水循環を考慮した総合的な水資源計画について検討している。
	国土庁 ³¹⁾	1976	流域のマクロ的な水収支を把握し、水循環を考慮した水需給計画について検討している。

を規定する取・排水システム形態と水利用上の特性との関係については十分に検討されていないことがわかる。したがって、取・排水システムの類型化およびシステム形態と水利用上の特性との関係についての多角的な分析、システム間の移行に伴う利害得失、還元水を考慮に入れた場合の利水計画の特性分析などについての研究が必要である。

3) 超過渇水に関する研究

水資源計画は、水量的にはある渇水(計画渇水)を対象として立てられている。計画で用いる水文量に関する研究、利水安全度に関する研究、超過渇水時の被害に関する研究、水需要に関する研究、水コストに関する研究、および水資源計画手法に関する研究のうちで、代表的なものとその概要を表-1.5に示す。

従来の研究では、渇水に関する個々の要因について、精度の高い研究が続けられており、特に、水文量については数多くの研究が行われてきている。また、近年利水容量を超える超過渇水時の被害(直接被害ならびに間接被害)の計測、および超過渇水時の管理手法についての研究が始められている。

しかし、超過渇水を計画論上どのように取り扱うかについては(利水安全度としての議論は行われているものの)、治水計画などに比較して相対的に研究が遅れているように思われる。したがって、基本量の計測あるいは推定方法、および水管理方法の研究の外に、計画理論についての研究が必要となっている。

4) 流域から排水される汚濁負荷量に関する研究

流域の水資源計画では、第一に水量の確保が目的とされるが、水の質についての考察も重要である。表-1.6に、河川水質に関連した研究のうちの代表的なものとその概要

を示す。上記1), 2)で示した研究においても、低流況時の水質・負荷量に関しては検討が進められている。しかし、最近では水利用率の上昇した流域の下流端や流域内に停滞性の水環境が問題となっており、排出負荷量の総量規制が問題となりつつある。このような観点からの検討は、必ずしも十分に進められていない。低流況時に流出する負荷量は、後に示すように総流出負荷量のある部分でしかないとから、出水時を考慮に入れた流出負荷量に関する研究が必要である。

以上で概観したように、本論文で設定した研究課題に対しては、必ずしも十分な調査・研究が進められていない。

5. 本論文の構成

本論文の構成は以下のとおりである。

第2章では、水利用率の上昇によって生じる問題をシステム論的な観点から総合的に取り扱う。まず、流域の水循環・水利用状況を体系的に把握・表現する方法について考察する。次に水資源計画上の諸問題を分析し、それらを総合的に調整する水資源計画を検討するためのモデルを作成する。そして本論文で提案する水循環・水利用状況の把握手法とモデルとを現実の流域に適用してそれらの有用性の検証をする。以上の検討により、水利用率の上昇した流域で生じる水資源計画上の問題点を分析するとともに、総合的な水資源計画手法を提案する。

第2章の総合的な分析の結果をうけて、第3章から第5章では、水利用率の上昇によって生じる典型的な問題を詳細に検討する。第3章では、多くの問題が流域の取・排水システムの形態と密接に関係していることから、その形態と水利用・水環境との関係を詳細に考察する。第4章では、

表-1.5 利水安全度および超過渇水に関する研究

対 象	研 究 者	発 表 年	概 要
利水安全度	中 川 ⁴⁴⁾ ほか	1978	利水安全度の設定方法に関する従来の研究を整理している。
	広 瀬 ⁴⁵⁾	1971	利水容量の決定と利水安全度の評価を行っている。
	藤 吉 ⁴⁶⁾	1971	開発水量の設定について、四つの代替的な方法を示している。
	浜 口 ³⁶⁾	1977	水利用率の上昇によって生じる利水安全度1/10とする貯水池容量と水不足%・日を一定とする容量の差異を明らかにしている。
渇水被害	建 設 省 ⁴⁾ 土木研究所	1979	渇水被害原単位(直接被害)を計測している。
	広 田 ⁴⁷⁾	1970	渇水被害の算定を行った古典的な研究である。
	浜 口 ⁴⁸⁾	1977	Willingness to pay (WP) 水単価の計測を行っている。
	建 設 省 ⁴⁹⁾	1980	地域性を考慮した渇水被害原単位を提示している。
	建 設 省 ⁵⁰⁾ 土木研究所	1979	渇水被害のうちの間接被害を産業連関分析手法により推定している。
	山 中 ⁵¹⁾ ほか	1979	WP 水単価を用いて渇水時の水管理ルールについて検討している。
需要量と水コスト	東 京 都 ⁵²⁾	1973	各種水源施設にかかる費用を算定して水コストを求めている。
	建 設 省 ⁵³⁾	1971	ダムによる水開発コストを求め、新規ダムでは水コストが急激に上昇することを示している。
計 画 理 論	佐 川 ⁵⁴⁾	1977	渇水を考慮した水道料金の設定および最適水開発規模設定のための理論を提示している。
	建 設 省 ⁵⁵⁾ 中部地建	1979	節水方式および渇水対策施設を含む耐渇水水資源計画を費用最小とする目的関数のもとで検討している。

表-1.6 流域から排出される汚濁負荷量に関する研究

対 象	研 究 者	発 表 年	概 要
平 常 時	栗 谷 ³⁹⁾	1968	表-1.3 参照。
	建 設 省 ²²⁾ 河川局ほか	1970	表-1.3 参照。
出 水 時	茨 城 大 学 ⁴⁰⁾ 農 学 部	1977	霞ヶ浦に河川から流入する総汚濁負荷量と発生源との関係を求めている。
	Gunnerson ⁵⁶⁾	1967	コロソビヤ川における河川水質と流量の関係を求めている。
	羽 田 ⁵¹⁾	1977	雄物川において同上の検討を行っている。
	E P A ⁵⁸⁾	1971	降雨流出に伴う汚濁負荷量流出をシミュレーションするモデルを提案している。

超過渇水の問題をとり扱い、超過渇水を予め考慮に入れる水資源計画手法を提案する。第5章では、流域から排出される汚濁負荷量を取りあげ、水資源計画における新たな水環境面の考察を行う。

第6章では、以上の検討によって得られた成果をとりまとめ、本論文を総括した。

参考文献

- 1) 国土庁：長期水需給計画，利水経済，水利科学研究所，1979
- 2) 建設省河川局編：昭和65年に向けての水資源開発計画と水利用，日本河川協会，1978
- 3) 華山謙・布施徹志：都市と水資源，鹿島出版，1979
- 4) 建設省土木研究所：渇水時の水管理に関する計画学的研究，土木研究所資料，No.1508，1979
- 5) 佐藤武夫：水の経済学，岩波新書，1965
- 6) 玉城哲：水の思想，論創社，1979
- 7) 辻田啓志：水争い，講談社現代新書，1978
- 8) 建設省河川局河川計画課・土木研究所：水循環と水利用に関する研究，第34回建設省技術研究会報告，1980
- 9) 吉川秀夫：今後の河川計画について，建設省関東地方建設局河川計画課，1976
- 10) 末石富太郎：水資源の危機，日経新書，1978
- 11) 糸林芳彦：水資源問題と土木研究所の役割，土木技術資料，Vol.21，No.9，1979
- 12) 島津暉之：水節約の技術的可能性(I)~(Ⅳ)，同行政的手段に関する検討(I)・(Ⅱ)，水利科学，Vol.15，16，19，No.82，83，85，104，105，1971~'72，1975
- 13) Lovins, A. B.: ソフト・エネルギー・パス，時事通信社，1979
- 14) 建設省土木研究所水文研究室：水使用合理化技術に関する調査報告書，土木技術資料，No.1403，1978
- 15) 丸山民夫：水の輸出量について，工業用水，No.217，1976
- 16) Vogel, E. F.: Japan as Number One, Harvard Univ. Press., Cambridge, 1979
- 17) 建設省ほか：東京都市圏物資流動調査報告書（解析編I），1975
- 18) 国土庁：第3次全国総合開発計画（国土庁試案），1977
- 19) 荻原兼修：流域管理と治水計画，第27回河川講修会テキスト，日本河川協会，1979
- 20) 金子良：水収支特性の地形別類型I)~(Ⅵ)，水利科学，Vol.14，15，No.73~75，77~79，1970~'71
- 21) 市川正巳：多摩川流域における水収支と流量の変化について，東京教育大学地理学研究報告，No.XII，1968
- 22) 建設省河川局河川計画課・土木研究所：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
- 23) 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
- 24) 水収支研究グループ：地下水盆の管理（理論と実際），東海大学出版会，1976
- 25) 市川正巳・権根勇編：日本の水収支，古今書院，1978
- 26) 岡本雅美：水田農業用水の計画需要量の推定法，水利科学，Vol.17，No.2，1973
- 27) 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
- 28) 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，資源調査所資料，No.47，1977
- 29) 丹保憲仁：都市・地域水代謝システムの構造と容量，水道協会雑誌，No.497，1976
- 30) 浜口達男・前田諭：再生水資源開発に関する基本的考察，第30回建設省技術研究会報告，1976
- 31) 国土庁水資源局：水資源賦存量調査について，1976
- 32) 合田健・末石富太郎・住友恒：工業用水計画における水量・水質配分について，土木学会論文報告集，No.134，1966
- 33) Okada, N.: Comprehensive Systems Analysis of Area-Wide, Multi-Modal Water Resources Utilization Systems, Doctorate Dissertation, Kyoto Univ., 1976
- 34) 建設省近畿地方建設局企画部：水管理トータル・システムに関する調査報告書，No.2，1976
- 35) 高棹琢馬・池淵周一：水の需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.259，1977
- 36) 浜口達男：利水安全度からみた貯水池容量の決定方法に関する考察，第31回建設省技術研究会報告，1977
- 37) 中川芳一・辻本善博・西沢常彦：マスカープ法による利水安全度の概略評価，日本水道コンサルタント研究年報，1978
- 38) 竹内邦良：貯水量の累加損失係数を用いた貯水池群の最適操作手法，土木学会論文報告集，No.222，1974
- 39) 栗谷陽一：河川汚濁論，水工学に関する夏期研修会講義集（B.河川コース），1968
- 40) 茨城大学農学部霞ヶ浦研究会：霞ヶ浦，三共科学選書，

1977

- 41) 建設省中部地方建設局：模擬流量発生手法の検討報告書，1980
- 42) 吉川秀夫・竹内邦良：渇水持続曲線の性質とその応用，土木学会論文報告集，No. 234，1975
- 43) 住友恒：都市における上水需要量の変動特性について，土木学会論文報告集，No. 158，1968
- 44) 中川芳一：利水安全度の評価について，日本水道コンサルタント研究年報，1978
- 45) 広瀬利雄：水資源開発計画における利水の安全度について(1)，(2)，水温の研究，Vol. 14，No. 5，6，1971
- 46) 藤吉三郎：利水安全度に関する二，三の考察，土木学会誌，Vol. 56，No. 11，1971
- 47) 広田泰久：利水の安全度について，第24回建設省技術研究会報告，1970
- 48) 浜口博司：渇水時における節水についての一考察，水資源に関するシンポジウム前刷集，1977
- 49) 建設省関東・四国・九州地方建設局企画部：利水経済調査報告書，1980
- 50) 建設省土木研究所：渇水被害の計測について，土木研究所資料，No. 1502，1979
- 51) 山中敦・永田瑞穂・細見寛：W・P法による被害の計測と渇水時水管理への応用について，第33回建設省技術研究会報告，1979
- 52) 東京都主都圏整備局：水のコスト分析(Ⅲ)，1973
- 53) 建設省河川局編：広域利水調査第一次報告書，日本河川協会，1971
- 54) 佐川直人：渇水を考慮した水道料金制の検討，水資源に関するシンポジウム前刷集，1977
- 55) 建設省中部地方建設局木曾川上流工事事務所：耐渇水性水配分計画検討業務報告書，1979
- 56) Gunnerson, C. G. : Streamflow and Quality in the Columbia River Basin, Proc. ASCE, Vol. 93, No. SA6, 1967
- 57) 羽田守夫：雄物川の水質の変動特性とそのモデル化，土木学会論文報告集，No. 265，1977
- 58) U.S. Environmental Protection Agency : Storm Water Management Model, EPA Water Quality Office, 1971

第2章 水循環・水利用の総合的な分析

流域の水利用率が上昇するにつれて、水量・水質に関連した種々の相互干渉が顕在化するために、その総合的な調整が必要とされるようになる。水資源をめぐる競合問題はある利水行為が流域の水循環系を介して他に影響を及ぼすことによって生じることから、この問題を解明するためには、流域の水循環状況を水利用との関係を明確にした上で総合的に把握することから始めなければならない。しかし、水循環に関する諸量が必ずしも十分に計測されていないこと^{1),2)}、およびある特定の利水部門や河川水質のみを対象とした研究は行われているが、流域全体を対象とする総合的な水資源計画についての研究はほとんど行われていないことから^{3)~5)}、そのために用いられる十分な手法は提示されていない。したがって、本章ではまず流域の水循環状況の体系的な把握手法について考察した。

次に、複雑な競合の問題を分析し、それを調整する水資源計画を策定するために、水資源の配分・利用モデルについて検討した。水資源の配分・利用モデルについては、従来から数多くの研究がなされており、わが国では合田らの研究³⁾に始まり、春名らの研究⁴⁾、岡田の研究⁵⁾などがある。諸外国においても類似した研究が行われており、手法的には線形計画法を用いたものが最も多く、ネットワーク手法および動的計画手法などを用いたものもある^{6)~13)}。しかし、それらの研究では、例えば農業用水計画あるいは上水道計画といった限られた利水部門のみしか対象としておらず、流域の水循環・水利用が総合的に取り扱われていない。したがって、流域の水循環と水利用との関係を明示的に表現した上で、水資源計画を総合的に検討しうるモデルを開発した。

水利用率が上昇した奈良盆地（大和川流域）において、提案した水循環の把握手法およびモデルの有効性を検証した。この事例検討により、水利用率の上昇した流域で生じる一般的な水資源計画上の問題点が明らかにされた。

1. 水循環・水利用状況の体系的な把握方法^{14)~7)}

流域の水資源計画を検討するにあたっては、まず水循環・水利用状況を総合的に把握しておく必要がある。そこで、以下では水循環の把握手法およびその体系的な表示方法を提案する。

1) 水循環把握上の基本事項

水循環の把握においては、水のうけわたしが行われる要

素、水の移動を表現するための地区分割および分析対象期間と期間分割を定める。これらを以下ではそれぞれ水資源関連要素、地区分割および分析対象期間と期間分割と呼ぶことにする。

① 水資源関連要素とその機能

水資源関連要素としては、一般に河川・地下・上水道・家庭・業務・工業・農業・下水道・流域（斜面）・ため池および系外（大気中）などが考えられる。これらの各要素は、地区間の水輸送機能・水利用機能・降水受水機能・蒸発散機能・水質浄化機能・汚濁負荷発生機能および水の貯留機能のうちの一つまたは複数をそなえている。これら11の水資源関連要素とその機能を表-2.1に整理した。例えば、河道・河川敷およびダムを総称する河川は、地区間の水の輸送を行い、水浄化および水を貯留するという機能を有している。水資源関連要素および機能は、対象とする流域の特性に応じてさらに細分あるいは複合されてよい。

表-2.1 水資源関連要素とその機能

水資源関連要素	機能	地区間水輸送機能	水利用機能	降水受水機能	蒸発散機能	水質浄化機能	汚濁負荷発生機能	貯留機能
河川	河道・河川敷、ダム、湖沼	○		○	○	○		○
地下	深層および浅層地下水帯	○				○		○
上水道	取水・導水・浄水・配水の各施設	○				○		
家庭	住宅		○		○		○	
業務	主として第3次産業による業務地区		○		○		○	
工業	工場	○	○		○		○	
農業	水田・畑地および用・排水施設	○	○	○	○	○	○	
下水道	下水道管路網と処理施設	○				○		
流域	農地や貯水池以外の地表面	○		○	○	○	○	
ため池	ため池			○	○	○		○
系外	大気中							

注) ○印は後に述べる奈良盆地を対象とした例示である。

② 地区分割

地区間の水の移動を表現するために、対象流域をいくつかの地区に分割する。地区分割に際しては、地表水・地下水の水循環特性、用・排水システムの状況、水需要量の分布、流域外からの導水システム、流量・水質の観測地点等を考慮する。通常、これらの個々の特性を考慮する上で望ましい地区分割はそれぞれ異なる。総合的な水資源計画の検

The map shows the Khabarovsk Krai region, which is divided into several districts. The districts are labeled with letters: A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K, L, M, N, O, P, Q, R, S, T, U, V, W, X, Y, Z. The map also shows the cities of Khabarovsk, Blagoveshchensk, and Komsomolsk-on-Amur. The legend indicates that the solid line represents the administrative boundary of the Khabarovsk Krai, the dashed line represents the administrative boundary of the districts, and the dotted line represents the administrative boundary of the cities.

参照しながら最終的な地区分割を行う。図-2.1に基本図および特性図を例示した¹⁶⁾。都市化流域の地区分割方法については文献16), 17)にまた自然流域については文献18)に詳しく述べられている。

分析で用いるタイムスケールを ΔT とすると、地区 r の水資源関連要素 i における水収支は次式で表わせる。

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

圖-2.1 基本図、特性図、地区分割図の例

$$(I_i^r) \cdot \Delta T = (O_i^r) \cdot \Delta T + (\Delta S_i^r) \cdot \Delta T \cdots (1)$$

(入ってくる水量) (出ていく水量) (貯留量の変化)

式(1)において ΔT を十分大きくとれば、($\Delta T = T$)、貯留量の変化が左辺および右辺の第一項に比較して無視でき、式(2)を得る。

$$(I_i^r) \cdot T = (O_i^r) \cdot T \cdots \cdots (2)$$

したがって、水収支の表現は単純化される。しかし、水需給の詳細な検討を行うには、水水量の変動特性や水需要量の変動特性を表現しうるようなタイムスケールとする必要がある。そのような場合には、式(1)に示されるように、地下・ため池・ダムなどの貯留機能をもつ要素での貯留量の変化を考慮することになる。

図-2.2に、わが国の一般的な水需要量の変動特性を示す¹⁶⁾。同図に示されるような夏のカンガイ期に大量の農水が使用されるという水需要特性、および水水量の変動特性より、期間分割としてはカンガイ期と非カンガイ期に分けることが考えられる。

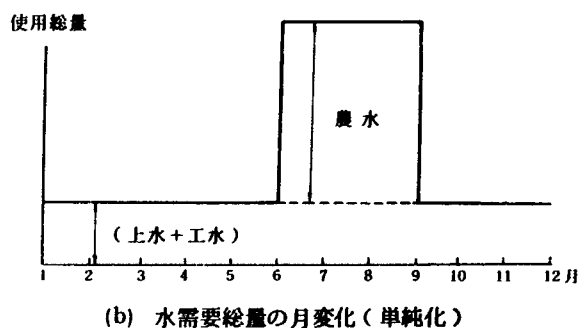
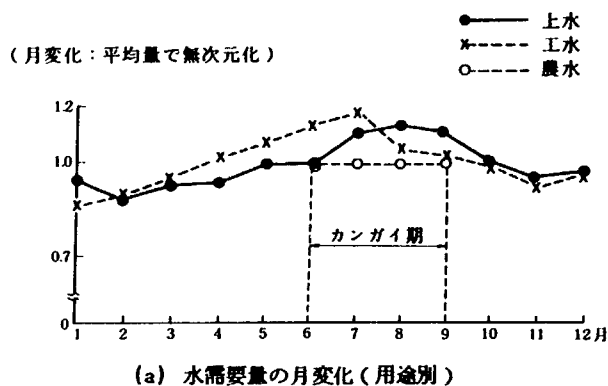


図-2.2 各用水使用量の月変化(一般的なパターン)¹⁶⁾

2) 水循環・水利用状況の体系的な表示方法

流域内の水の移動は、基本的には次のような4つの関係で表わされる。

- ① 大気中は除く地区内の要素間の移動(地区内・期間内)
- ② 地区内の各要素と大気との間の移動(地区内・期間内)

③ 貯留機能をもつ要素での次期へのもち越し(地区内・次の期間へ)

④ 輸送機能をもつ要素を介しての地区間の移動(地区間・期間内)

このような複雑な水のやりとり状況を体系的に表現する方法として、水資源連関表による方法を提案する。水資源連関表は経済学における産業連関表と類似しており、以下の二通りのものがある。

① 貯留を考慮しない水資源連関表^{14), 15)}

分析対象期間を例えば1年といったように長くすると、式(2)に示されるように貯留量の変化を無視することができる。このような場合には、表-2.3に示す水資源連関表を用いることができる。これは、概念的には地域間産業連関表と似ており、左端にどの地区のどの要素から水が流入しているか、上端にどの地区のどの要素へ流れて行くのかを示している。したがって、表-2.3におけるAの部分は、地区1の内部における各要素間の水の受けわたし量を示している。また、Bの部分は地区1から地区2へ輸送される水量を示し、Cの部分は地区1から系外への水量、すなわち、対象としている地域外への流出および空中へ蒸発散する量を示している。一方、Dの部分は地区2から地区1へ輸送される水量を示し、Gの部分は系外から地区1への水量、すなわち、分析の対象としている地域外からの流入量および降水量を示している。

水の受けわたしは、水資源連関表の全マス目で生じるわけではなく、その可能性のあるマス目は限定されている。表-2.3では、通常水の受けわたしが無いと考えられるマス目を空白にした。同表よりわかるように、地区内の水のやりとりを示すA, B, …… の対角部分は同様のパターンをしており、地区間の水のやりとりを示すB, D, …… の部分は水輸送機能をもつ要素の対角成分のみが値をもつ可能性がある。また、対象流域外との水のやりとりを示すC, F, …… とG, H, …… の部分は、水輸送機能をもつ要素、蒸発散機能をもつ要素および降水受水機能をもつ要素のみが値をもつ可能性がある。以上のことから、水資源連関表の各記号は以下のように定義される。

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

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

f_i^r : r地区のi要素から蒸発散する水量。

x_{i*}^r : r地区のi要素から他地区や対象地域の外、大気中へ

表-2.3 水資源連関表(貯留を考えない場合)

流入 \ 流出		地区 1										地区 2										系外流出				
		河川	地下水	上水道	家庭	業務	工業	農業	下水道	流域	ため池	河川	地下水	上水道	家庭	業務	工業	農業	下水道	流域	ため池	地域外流出	蒸発散	計		
地区 1	河川			x_{13}^{11}			x_{16}^{11}	x_{17}^{11}			x_{10}^{11}	x_{11}^{12}										.....	g_1^1	f_1^1	x_{11}^1	
	地下水	x_{21}^{11}		x_{23}^{11}	x_{24}^{11}	x_{25}^{11}	x_{26}^{11}	x_{27}^{11}					x_{22}^{12}									.....	g_2^1		x_{12}^1	
	上水道		x_{32}^{11}		x_{34}^{11}	x_{35}^{11}	x_{36}^{11}							x_{33}^{12}								.....	g_3^1		x_{13}^1	
	家庭				x_{44}^{11}				x_{48}^{11}	x_{49}^{11}												.....		f_4^1	x_{14}^1	
	業務					x_{56}^{11}			x_{58}^{11}	x_{59}^{11}												.....	g_5^1	f_5^1	x_{15}^1	
	工業						x_{66}^{11}		x_{68}^{11}	x_{69}^{11}												.....	g_6^1	f_6^1	x_{16}^1	
	農業	x_{71}^{11}	x_{72}^{11}															x_{77}^{12}				.....	g_7^1	f_7^1	x_{17}^1	
	下水道	x_{81}^{11}		x_{83}^{11}	x_{84}^{11}	x_{85}^{11}	x_{86}^{11}	x_{87}^{11}											x_{88}^{12}					g_8^1		x_{18}^1
	流域	x_{91}^{11}	x_{92}^{11}						x_{98}^{11}		x_{90}^{11}													g_9^1	f_9^1	x_{19}^1
	ため池	x_{101}^{11}						x_{107}^{11}														.....		f_{10}^1	x_{10}^1	
地区 2	河川	x_{21}^{21}											x_{23}^{22}				x_{26}^{22}	x_{27}^{22}			x_{20}^{22}	.....	g_1^2	f_1^2	x_{21}^2	
	地下水		x_{22}^{21}									x_{21}^{22}	x_{23}^{22}	x_{24}^{22}	x_{25}^{22}	x_{26}^{22}	x_{27}^{22}					.....	g_2^2		x_{22}^2	
	上水道			x_{33}^{21}									x_{32}^{22}		x_{34}^{22}	x_{35}^{22}	x_{36}^{22}					.....	g_3^2		x_{23}^2	
	家庭													x_{44}^{22}				x_{48}^{22}	x_{49}^{22}			.....		f_4^2	x_{24}^2	
	業務														x_{55}^{22}			x_{58}^{22}	x_{59}^{22}			.....	g_5^2	f_5^2	x_{25}^2	
	工業															x_{66}^{22}	x_{69}^{22}					.....	g_6^2	f_6^2	x_{26}^2	
	農業							x_{77}^{21}			x_{71}^{22}	x_{72}^{22}							x_{78}^{22}	x_{79}^{22}				g_7^2	f_7^2	x_{27}^2
	下水道								x_{88}^{21}		x_{81}^{22}		x_{83}^{22}	x_{84}^{22}	x_{85}^{22}	x_{86}^{22}	x_{87}^{22}					.....	g_8^2		x_{28}^2	
	流域										x_{91}^{22}	x_{92}^{22}						x_{98}^{22}		x_{90}^{22}		.....	g_9^2	f_9^2	x_{29}^2	
	ため池									x_{101}^{22}							x_{107}^{22}					.....		f_{10}^2	x_{20}^2	
系外流入	地域外流入	v_1^1	v_2^1	v_3^1			v_7^1	v_8^1			v_{11}^1	v_{12}^1	v_{13}^1				v_{16}^1	v_{17}^1							V	
	降水	u_1^1					u_7^1		u_9^1	u_{10}^1	u_{11}^1							u_{18}^1	u_{19}^1	u_{20}^1					U	
計		X_{11}^1	X_{21}^1	X_{31}^1	X_{41}^1	X_{51}^1	X_{61}^1	X_{71}^1	X_{81}^1	X_{91}^1	X_{101}^1	X_{11}^2	X_{21}^2	X_{31}^2	X_{41}^2	X_{51}^2	X_{61}^2	X_{71}^2	X_{81}^2	X_{91}^2	X_{101}^2	G	F	X		

移動する水量の合計(「地区内での移動は除く)。

X_{ij}^r : 「地区」の「要素」から流出・移動する水量の合計。

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

u_j^s : 「s」地区の「j」要素に降水として入ってくる水量。

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

X_{ij}^s : 「s」地区の「j」要素に入ってくる水量の合計。

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

U : 降水として対象地域内へ流入する水量の合計。

G : 対象地域から地域外へ導水・送水・流下等によって出る水量の合計。

F : 対象地域から蒸発散する水量の合計。

このように記号を定めると水量の連続条件として次の関係式が成立する。

$$x_{ij}^{s*} = \sum_{s=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij}^{rs} + g_i^r + f_i^r$$

$$X_{ij}^r = \sum_{s=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij}^{rs} + g_i^r + f_i^r$$

$$x_{ij}^s = \sum_{r=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij}^{rs} + v_j^s + u_j^s$$

$$X_{ij}^s = \sum_{r=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij}^{rs} + v_j^s + u_j^s$$

$$V = \sum_{s=1}^n \sum_{j=1}^m v_j^s$$

$$U = \sum_{s=1}^n \sum_{j=1}^m u_j^s$$

$$G = \sum_{r=1}^n \sum_{i=1}^m g_i^r$$

$$F = \sum_{r=1}^n \sum_{i=1}^m f_i^r$$

ここに、 n ：対象流域内の地区数、 m ：流域構成要素数である。

② 貯留を考慮した水資源連関表^{16),17)}

水資源連関要素における貯留量を考慮する場合には、新たに次の変数が加わる。

h_i^r ：地区 r の i 要素で貯留によって次期にもちこされる水量。

w_i^r ：地区 r の i 要素で貯留によって前期からもちこされた水量。

貯留を考慮した場合には連関表が複雑となるため、地区内の水のやりとりは表-2.4に示す連関表を用いる。地区間の水の移動は図-2.1(d)に示されるようなルート図上に記入する。表-2.4は表-2.3と同様にして水の受けわたりを表現しているが、 i 要素で前期からもちこした水量 w_i^r を降水 u_i^r の下に記入し、次期にもちこされる水量 h_i^r を蒸発散 r_i^r の右に記入する。したがって、貯留を考慮したときの連続条件式は、前述の式で、 u_i^r を $u_i^r + w_i^r$ に、 r_i^r を $r_i^r + h_i^r$ におきかえればよい。

2. 総合的な水資源計画モデル

1) モデル作成の目的

以下で述べる水資源計画モデルを作成する目的は次のようなものである。

- (i) 水資源に対しての要請は多種多様である。これらの要請に対応して適正な水資源計画を検討するのがモデル作成の第一の目的である。多種多様な要請を考慮し、水利用率の上昇に伴って生じる相互干渉を分析して調整する必要があることから、モデルは総合的なものとなる。
- (ii) 水資源計画案は、物理的に実現が可能であり、また社会・経済・環境等の面からも受け入れられるものでなければならない。そして、それらの制約と計画案との相互関係を明確に表現できる分析手法を確立することが必要である。特に目的や制約を変化させた場合に計画がどのような影響を受けるかを把握することは重要である。これらの条件を具体化することがモデル作成の第二の目的である。

2) モデルの全体構成

総合的な水資源計画モデルは、水資源開発上の種々の関連事項を分析して、その調整について検討するための配分

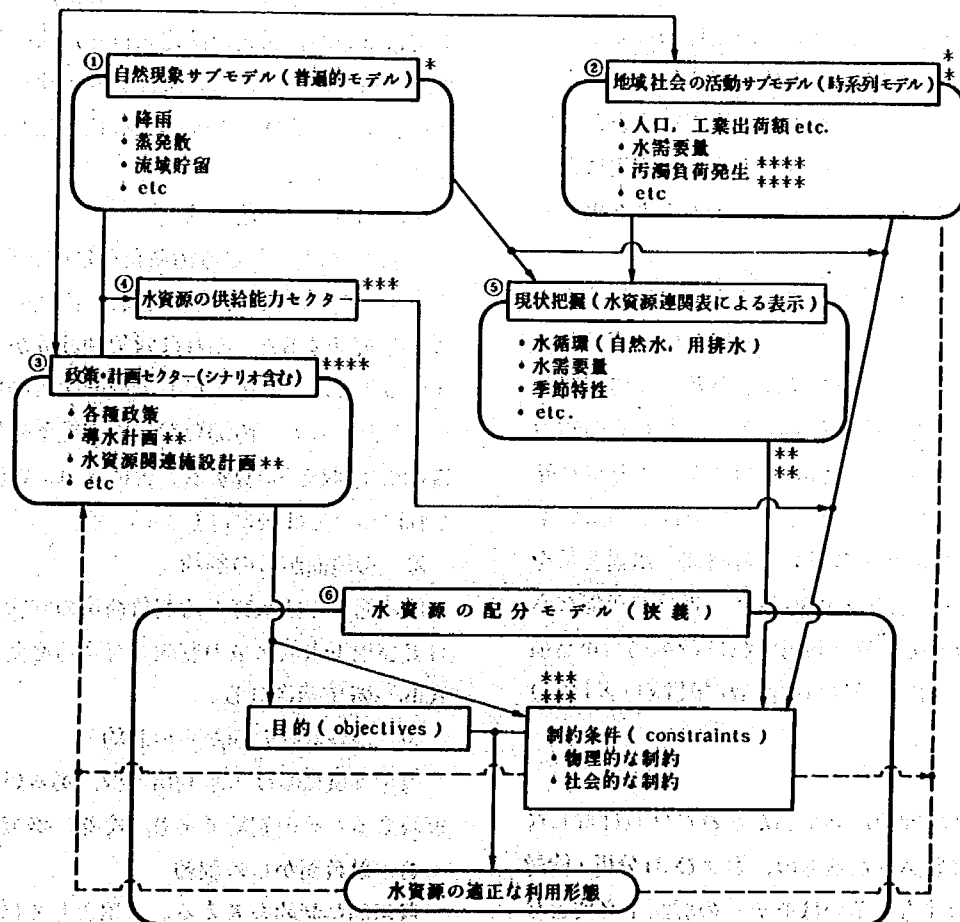
表-2.4 水資源連関表（貯留を考える場合）

流入要素 流出要素	1 河川	2 地下	3 上水道	4 家庭	5 業務	6 工業	7 農業	8 下水道	9 流域	10 ため池	蒸発散 r_i^r	次期への もちこし h_i^r	他地区 同要素へ x_{ij}^{rr}	地域外 同要素へ g_{ij}^{rr}	同地区他要素 以外への水量 の合計 x_{ij}^{rr}	出ていく水量 の合計 x_{ij}^{rr}
1. 河川																
2. 地下																
3. 上水道																
4. 家庭																
5. 業務																
6. 工業																
7. 農業																
8. 下水道																
9. 流域																
10. ため池																
降水 u_i^r																
前期からの もちこし w_i^r																
他地区同要素から x_{ij}^{rr} (他地区)																
地域外からの 水量 g_{ij}^{rr} (導水含む)																
同地区他要素 以外からの 水量の合計 x_{ij}^{rr}																
入ってくる 水量の合計 x_{ij}^{rr}																

・利用モデル、入力条件についての各サブモデルおよび政策（計画）セクターより構成されている。モデルの全体構成を図-2.3に示す。同図が示すように、水資源の配分・利用モデルには、①～⑥のサブモデル、セクターおよび現状把握結果から必要な諸量（係数・定数）が与えられる。水資源の配分・利用モデルへの入力条件となる各サブモデル・各セクターの基本的な考え方は次のとおりである¹⁶⁾。

①の自然現象サブモデルでは、降水量・蒸発散量・流域貯留水量に関する物理現象がモデル化される。後に示す実流域での検討では、過去20年間の水文データから、降雨・河川水量・地下水移動量などの相互関係を解析し、水配分・利用モデルのパラメータを決定している。②の地域社会活

動サブモデルでは、人口・工業・業務・農業およびこれらに関連した水需要量や汚濁負荷量等が時系列的に推定される。③の政策・計画セクターでは、地域社会活動や水資源関連施設計画の代替案の設定および適正な水資源の配分・利用に関する評価項目の設定が行われ、代替的な分析・検討シナリオが設定される（シナリオ分析法の導入）。④では、自然条件や利水施設計画により定まる水供給能力が与えられる。しかし、分析・検討シナリオによっては、この能力を未知として、必要な水資源関連施設計画を求めることもある。⑤では、現状の水循環（自然水、用・排水）が把握され、その結果から配分・利用モデルの諸係数（定数）のいくつかが決定される。



- * : 物理モデルであり、文献6), 153)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制約条件として表現される。
- **** : 狭義の水資源の配分モデルでは制約条件、目的関数として表現される。
- * : 文献12)参照
- ** : 現状把握結果より一部の制約条件の係数・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、不可能ならば最良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する。
- **** : 流域指針などによる制限

図-2.3 水資源配分・利用モデルの全体構成

3) 水資源の配分・利用モデル

水資源の配分・利用モデルは、水資源連関表で定義した変数を基にして、線形計画法によって定式化される。線形計画法を採用した理由は、全体的な精度のバランスおよび解法の簡易さ等について配慮したことによる。精度のバランスに関しては、総合的な問題を取り扱う場合に、ある一部分の精度のみに重点を置く取り扱いが適切ではないと考えられるからである。また、モデル化および解法の簡易さとは、具体的には後述の目標ベクトルと効用関数を用いた目標計画法を活用すれば、シンプレックス法により多目的最適解が求められることを指している。線形化により生じる限界を補うために、制約条件式や目的関数の設定、諸係数（定数）の設定に注意し、感度分析により求められた解の信頼性に対する検討を行うことにする。

水資源の利用を考える場合には、その直接的な効用と、それに付随する弊害について多角的に検討することが必要であり、それらを調整した上で、適正な水資源の配分・利用形態を決定することになる。また、水利用による流域（地域）の水循環の将来変化を検討することも重要であろう。

モデルでは、これらを次のようにして表現している。まず、水資源の適正な配分・利用を論じる場合に必ず満たしておかなければならない物理的な条件や財政・環境・制度等の面からの制約を制約条件として与える。これらの制約のうちのいくつかは、設定する目的（関数）により取り除かれるものがある。そして、満たされなければならない条件を満たした上で、各地区・各要素・各時期の水需要量を供給しうるかどうかをチェックする。次に、供給が可能ならば、どのように水資源を配分・利用すれば最も適当かを検討する。その場合の評価項目は目的関数（単目的・多目的）として設定される。

a) 制約条件式

制約条件には、1) 物理的に必ず満たされ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あるいはモデルの解法上必要となるものがある。表-2.5(a)には上述の1)、(b)には2)に関するものを例示した。3)に該当する制約式には、目標計画法を適用する場合の満足水準・限界水準に関する式等がある。この外にも想定する分析・検討シナリオに応じて、制約条件式を設定または削除しなければならないことがある。

表-2.5(a)、(b)に示す制約式は、地区 r について一般的に示したものである。したがって、ここで示した多くは、地区 (r) ごとおよびカンガイ期 $(t = t_1)$ ・非カンガイ期 $(t = t_2)$ ごとに与えられる $(r \times 2)$ 個。制約式の係数や定数

も地区ごと、時期ごとにそれぞれ値が与えられる。しかし、水量の連続条件式については、カンガイ期・非カンガイ期を含めて定式化されている。また、財政面からの費用制約式は、両期の和として考えた方がよい場合が多く、カンガイ期・非カンガイ期の和として表わすものとする。

これらの制約条件の意味は以下のようなものである。

1) 物理的な制約

• 水量の連続条件

水量の連続条件は水収支の基本的条件であり、 r 地区の i 水資源関連要素（表-2.1参照）について式(3)で与えられる。

• 運動に関する条件

運動に関する条件は、水の流れ方や蒸発散を連続条件とともに規定するものである。一般に運動に関する条件は線形ではないが、係数の決定を行った状態からのかい離が小さい領域では、これらの条件を線形化して近似することが可能である。式(4)~(6)のような線形化した運動に関する条件式を考える。

• 汚濁負荷量の連続式

r 地区 i 要素における汚濁負荷量の収支を考える。水が r 地区 i 要素に流入し、利用された直後の水質（汚濁負荷濃度）を P_i^r とすると、これは対象地域外からと対象地域内のほかの要素からの汚濁量および発生汚濁負荷量に支配される。したがって、汚濁負荷量の連続条件は、表-2.5(a)の備考に示す収支を計算することにより、式(7)で与えられる。これについては後に詳しく述べる。

2) 環境面からの制約

環境面からは水質と汚濁負荷量の制約、維持流量の制約および地下水取水量の制約を与える必要がある。これらは式(8)~(10)で示される。

3) 地域計画の面からの制約

対象地域における水利用現況、あるいは地域開発計画を反映するための制約であり、式(11)、(12)で示される。

4) 財政面からの制約

費用的な制約を考える。費用としては建設費・維持費・水処理費等があり、式(13)、(14)で示される。これについては後に詳しくふれる。

5) 施設能力制約および技術的制約

利水施設の容量から定まる制約および水処理技術から定まる制約であり、式(15)~(16)で示される。

6) 制度面からの制約

既存の水秩序を表現するための制約であり、式(17)で示される。

以上の制約は、後に示す事例検討を想定して例示的に示

表-2.5(a) 物理的な制約条件式

条 件 名	条 件 式	備 考
① 水の連続条件 ・ r 地区 i 要素について	$\sum_{i=1}^n x(t)_{1i}^{rr} + \sum_{j=1}^n x(t)_{ji}^{rr} + v(t)_{ii}^{rr} + u(t)_{ii}^{rr} + w(t)_{ii}^{rr}$ (他地区同要素から) (同地区他要素から) (地域外から) (降水) (前期からのもちこし) $= \sum_{i=1}^n x(t)_{ii}^{rr} + \sum_{j=1}^n x(t)_{ji}^{rr} + g(t)_{ii}^{rr} + f(t)_{ii}^{rr} + h(t)_{ii}^{rr} \dots (3)$ (他地区同要素へ) (同地区他要素へ) (地域外へ) (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。
② 水の運動に関する条件 ・地下水と河川水の関係 (河川 → 地下) (地下 → 河川) ・地下水の地区間移動 (地下水 → 他地区地下) ・水利用による蒸発散損失 (家庭用水 → 大気中) (業務用水 → 大気中) (工業用水 → 大気中) ・上水道の漏水 (上水 → 地下) ・農水の流出・地下浸透・蒸発散 (農水 → 河川) (農水 → 地下) (農水 → 大気中) ・流域水の流出・地下浸透・蒸発散 (流域 → 河川・下水道) (流域 → 地下) (流域 → 大気中) (流域 → ため池)	$x(t)_{12}^{rr} = \alpha(t)_{12}^{rr} \cdot X(t)_{11}^{rr} \dots (4)$ or $x(t)_{21}^{rr} = \alpha(t)_{21}^{rr} \cdot X(t)_{12}^{rr} \dots (4)'$ (ただし、α_{12}^{rr} と α_{21}^{rr} のどちらかはゼロ) $x(t)_{22}^{rr} = \alpha(t)_{22}^{rr} \cdot X(t)_{12}^{rr} \dots (5)$ $f(t)_{11}^{rr} = \alpha(t)_{11}^{rr} \cdot X(t)_{11}^{rr} \dots (6)$ $f(t)_{12}^{rr} = \alpha(t)_{12}^{rr} \cdot X(t)_{11}^{rr} \dots (7)$ $f(t)_{13}^{rr} = \alpha(t)_{13}^{rr} \cdot X(t)_{11}^{rr} \dots (8)$ $x(t)_{32}^{rr} = \alpha(t)_{32}^{rr} \cdot X(t)_{12}^{rr} \dots (9)$ $x(t)_{11}^{rr} = \alpha(t)_{11}^{rr} \cdot X(t)_{11}^{rr} \dots (10)$ $x(t)_{12}^{rr} = \alpha(t)_{12}^{rr} \cdot X(t)_{11}^{rr} \dots (11)$ $f(t)_{11}^{rr} = \alpha(t)_{11}^{rr} \cdot X(t)_{11}^{rr} \dots (12)$ ($\alpha(t)_{11}^{rr} + \alpha(t)_{12}^{rr} + \alpha(t)_{13}^{rr} = 1$) $x(t)_{91}^{rr} + x(t)_{92}^{rr} = (\alpha(t)_{91}^{rr} + \alpha(t)_{92}^{rr}) \cdot (X(t)_{11}^{rr} - f(t)_{11}^{rr} - x(t)_{10}^{rr}) \dots (13)$ $x(t)_{92}^{rr} = \alpha(t)_{92}^{rr} \cdot (X(t)_{11}^{rr} - f(t)_{11}^{rr} - x(t)_{10}^{rr}) \dots (14)$ $f(t)_{11}^{rr} = F(t)_{11}^{rr} - f(t)_{11}^{rr} \dots (15)$ ($f(t)_{11}^{rr}, f(t)_{12}^{rr} \gg f(t)_{13}^{rr}, f(t)_{14}^{rr}, f(t)_{15}^{rr}$) $x(t)_{910}^{rr} = \alpha(t)_{910}^{rr} \cdot u(t)_{10}^{rr} \dots (16)$	・自然の物理法則に支配される運動に関する条件として、蒸発散・地下浸透・地下水の流出・流動に関する条件を与える。 ・この条件は地区分割の仕方によって異なる表示が必要となることがある。文献 15) 参照。 ・関数形を線形表示するために、Taylor 展開して一次の項までとることも考えられるが、ここでは物理的な意味の明確さを考えて、このような関数形を採用した。なおこれらの式は各地区に対して与えられる。 ・定数・係数の意味 $\alpha(t)_{12}^{rr}$: 河川水の地下浸透率 $\alpha(t)_{21}^{rr}$: 地下水の河川流出率 $\alpha(t)_{22}^{rr}$: 地下水の地区間分派係数 $\alpha(t)_{11}^{rr} \sim \alpha(t)_{13}^{rr}$: 蒸発散率 $\alpha(t)_{32}^{rr}$: 上水道の漏水率 $\alpha(t)_{11}^{rr}$: 農水の河川流出率 $\alpha(t)_{12}^{rr}$: 農水の地下浸透率 $\alpha(t)_{13}^{rr}$: 蒸発散率 $\alpha(t)_{91}^{rr}$: 流域水の河川流出率 $\alpha(t)_{92}^{rr}$: 流域水の下水道流入率 $\alpha(t)_{92}^{rr}$: 流域水の地下浸透率 $\alpha(t)_{910}^{rr}$: ため池への降水流入率 $F(t)_{11}^{rr}$: 地区 r からの蒸発散総量 ・式(15)については文献 4) 参照。
③ 汚濁負荷の連続条件 ・ r 地区 i 要素について	$\left(y(t)_{1i}^{rr} \cdot w(t)_{1i}^{rr} + r(t)_{1i}^{rr} \cdot v(t)_{1i}^{rr} + \sum_{j=1}^n p(t)_{ji}^{rr} \cdot e(t)_{ji}^{rr} \cdot x(t)_{ji}^{rr} \right)$ (流入汚濁負荷量) $+ \sum_{j=1}^n p(t)_{ji}^{rr} \cdot e(t)_{ji}^{rr} \cdot x(t)_{ji}^{rr} + g(t)_{ii}^{rr} \cdot X(t)_{1i}^{rr} \cdot e(t)_{ii}^{rr}$ (発生汚濁負荷量) $= p(t)_{ii}^{rr} \cdot \left(h(t)_{ii}^{rr} + g(t)_{ii}^{rr} + \sum_{j=1}^n x(t)_{ji}^{rr} + \sum_{j=1}^n x(t)_{ji}^{rr} \right)$ (流出汚濁負荷量) $= p(t)_{ii}^{rr} \cdot (X(t)_{1i}^{rr} - f(t)_{ii}^{rr}) \dots (17)$ (※ 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) → 汚濁負荷削減 → (流出汚濁負荷) $e(t)_{ii}^{rr}$: 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 $y(t)_{1i}^{rr}, r(t)_{1i}^{rr}, p(t)_{ji}^{rr}, g(t)_{ii}^{rr}, p(t)_{ii}^{rr}$: それぞれにかかっている要素の水質(濃度) $e(t)_{ji}^{rr}, e(t)_{ii}^{rr}$: それぞれにかかっている要素の汚濁負荷削減率

表-2.5(b) 社会的な制約条件式

	条 件 名	条 件 式	備 考
主として環境面から要請される制約	① 水質・汚濁負荷量制約	$p(i)_t^r \leq \bar{p}(i)_t^r$ (※ 水質と水のやりとり量の関係およびこの式の取り扱い方については本文参照)	・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。 ・ $\bar{p}(i)_t^r$: 地区 r の i 要素の水質基準値
	② 維持流量に関する制約	$x(i)_{11}^{rr} \geq \bar{x}(i)_{11}^{rr}, \quad q(i)_{11}^{rr} \geq \bar{q}(i)_{11}^{rr}$	・ $\bar{x}(i)_{11}^{rr}, \bar{q}(i)_{11}^{rr}$: 地区 r の必要河川下流量 ・この $\bar{x}(i)_{11}^{rr}, \bar{q}(i)_{11}^{rr}$ としては、通常的环境等の面から定まる維持流量に洪水時等に流出する無効流量を加えたものを与える。
	③ 地下水取水量に関する制約	$x(i)_{21}^{rr} \leq \bar{x}(i)_{21}^{rr} \text{ or } \sum_{i=3}^7 \bar{x}(i)_{21}^{rr} \leq \bar{x}(i)_{21}^{rr}$ ($i=3 \sim 7$)	・ $\bar{x}(i)_{21}^{rr}$: 地区 r の i 要素($i=3 \sim 7$)に対する許容地下水取水量 ・ $\bar{x}(i)_{21}^{rr}$: 地区 r の許容地下水取水量
主から要請され、土地の計画に反映される制約	④ 家庭への供給水量に関する制約	$P(i)^r = X(i)_{14}^{rr} / d(i)_1^r \geq \bar{P}(i)^r$	・ $\bar{P}(i)^r$: 地区 r の水資源からみた収容可能人口 ・ $\bar{P}(i)^r$: $\bar{P}(i)^r$ の最低水準 ・ $d(i)_1^r$: 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	$O(i)_t^r = X(i)_{14}^{rr} / d(i)_t^r \geq \bar{O}(i)_t^r$ ($i=5 \sim 7$)	・ $\bar{O}(i)_t^r$: 地区 r の i 要素($i=5 \sim 7$)の水資源からみた生産可能額 ・ $\bar{O}(i)_t^r$: $\bar{O}(i)_t^r$ の最低水準 ・ $d(i)_t^r$: 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財政的制約	⑥ 建設費・維持費・処理費に関する制約	$C(i)^r + \sum_{k=1}^2 M(i_k)^r \geq \bar{C}^r$ or $\sum_{r=1}^R (C(i)^r + \sum_{k=1}^2 M(i_k)^r) \geq \bar{C}$	・建設費については、減価償却費(利子分も含む)で考える。 ・ $C(i)^r, M(i_k)^r$: それぞれ地区 r の建設・維持費、操作・運営費を示す。 ・ i_1 : 灌漑期, i_2 : 非灌漑期 ・ $\bar{C}^r, \bar{C}$: それぞれ地区 r および対象地域に対する投資可能限度額を示す。
主として施設および技術面から要請される制約	⑦ 河川からの取水可能量の上限に関する制約	$x(i)_{13}^{rr} + x(i)_{16}^{rr} + x(i)_{17}^{rr} + x(i)_{110}^{rr} \leq \bar{S}(i)_1^r$	・ここで示される制約は、物理的な制約と考へてもよいが、貯水池建設による取水可能量の増大や水利権の付与のように政策的に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。 ・ $\bar{S}(i)_1^r$: 地区 r における河川からの取水可能量の上限。 ・この他にも施設の拡張を考えない場合には、水利施設の容量の上限制約を入れる。
	⑧ 排水の流出先に関する制約	$x(i)_{28}^{rr} = \alpha(i)_1^r \cdot (X(i)_{14}^{rr} - x(i)_{14}^{rr} - f(i)_1^r)$ $x(i)_{27}^{rr} = (1 - \alpha(i)_1^r) \cdot (X(i)_{14}^{rr} - x(i)_{14}^{rr} - f(i)_1^r)$ $x(i)_{29}^{rr} = \alpha(i)_2^r \cdot (X(i)_{14}^{rr} - x(i)_{14}^{rr} - f(i)_2^r)$ $x(i)_{31}^{rr} = (1 - \alpha(i)_2^r) \cdot (X(i)_{14}^{rr} - x(i)_{14}^{rr} - f(i)_2^r)$ $x(i)_{38}^{rr} = \alpha(i)_3^r \cdot (X(i)_{14}^{rr} - x(i)_{14}^{rr} - f(i)_3^r)$ $x(i)_{31}^{rr} = (1 - \alpha(i)_3^r) \cdot (X(i)_{14}^{rr} - x(i)_{14}^{rr} - f(i)_3^r)$ $x(i)_{28}^{rr} = \frac{\alpha(i)_3^r}{1 - \alpha(i)_3^r} \cdot x(i)_{31}^{rr}$	・ $\alpha(i)_1^r$: 家庭に対する下水道整備率 ・ $\alpha(i)_2^r$: 業務に対する下水道整備率 ・ $\alpha(i)_3^r$: 工業に対する下水道整備率 ・ $\alpha(i)_3^r$: 流域水の下水道流入率 ・⑧～⑪は、下水道の施設整備量を定めようとするシナリオにおいては最適化の結果として定めるとして取り除くこともある。
	⑨ 貯留容量に関する制約	$h(i)_t^r \leq H(i)_t^r \quad (i=1, 2, 10)$	・ $H(i)_t^r$ は貯留容量の上限値である。したがって $w(i)_t^r$ ($i=1, 2, 10$)もこの範囲内にある。 ・ $i=2$ (地下)に対しては、物理的な制約と考へてよい。
	⑩ 利水要素の再利用に関する制約	$x(i)_{11}^{rr} \leq RP(i)_t \cdot (x(i)_{11}^{rr} + x(i)_{21}^{rr} + x(i)_{31}^{rr} + x(i)_{41}^{rr} + x(i)_{51}^{rr})$	・前者は再利用に回しうる水量に関する制約であり、後者は利用用途からみた再生水の利用の可能性に対する制約である。 ・ $RP(i)_t, RU(i)_t$: それぞれ再生利用に回しうる水量、利用しうる水量に関する上限の率である。
	⑪ 再生水の使用に関する制約	$x(i)_{11}^{rr} + x(i)_{21}^{rr} \leq RU(i)_t \cdot (x(i)_{11}^{rr} + x(i)_{21}^{rr} + x(i)_{31}^{rr} + x(i)_{41}^{rr} + x(i)_{51}^{rr})$	
	⑫ 上水道普及率によって定まる用水の供給に関する制約	$x(i)_{31}^{rr} = \alpha(i)_{31}^{rr} \cdot X(i)_{14}^{rr} \quad (i=4 \sim 6)$	・ $\alpha(i)_{31}^{rr}$: 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⑧～⑪式と同様に取り扱うこともある。
	⑬ 各用水の使用量に関する制約	$X(i)_{14}^{rr} = \beta(i)_1^r \cdot \left(\sum_{j=1}^7 X(i)_{14}^{rr} \right)$ (ただし $\sum_{j=1}^7 \beta(i)_1^r = 1$)	・これは各用水間の関係を示すために設定されるものであるが、水利権などの場合には、使用量の上・下限値を与えればよい。式⑬は用水使用量のバランスを保つとした場合の式である。ただし、この式を用いる場合には式⑧、⑨と矛盾しないように、式を取り除くなどの配慮をしなければならない。

したものであり、社会的な制約は対象流域によって異なったものとなる。また、例えば③の地域計画の面からの制約などは、もし水供給量の増大を目的とする計画を考える場合には目的関数となり、制約から取り除かれる。

次に、水質・汚濁負荷量制約および費用制約の取り扱い方について詳しく検討しておきたい。

1) 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-2.5(a)の式(7)で計算される。しかし、この式は水質について非線形であるために、なんらかの近似あるいは線形化などを行わなければ、線形モデルに組み込むことができない。以下では、河川水質を例として、モデル内での水質の取り扱い方について考察する。

方法 1): 非線形のままで考慮する方法

汚濁負荷の連続式(非線形)を計算中は除外しておき、計算結果を用いて非線形式のままで水質を計算し、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、満たすように水配分・水利用状況、あるいは水質処理レベルを変更し、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、汚濁負荷の連続条件と水質制約の両方を考慮しており、水質問題が激しくない場合に有効である。

方法 2): 汚濁負荷の連続式は犠牲にするが、水質制約は必ず満足させる方法

汚濁負荷の連続式である式(7)により、水質を求めると次のようになる。

$$p(t)_i^r = (y(t)_i^r \cdot w(t)_i^r + r(t)_i^r \cdot v(t)_i^{rr} + \sum_{j=1}^m p(t)_j^r \cdot x(t)_j^{rr} + \sum_{j=1}^m p(t)_j^r \cdot e(t)_j^r \cdot x(t)_j^{rr}) \cdot e(t)_i^r / X(t)_i^r \quad (38)$$

ここに、地区内要素からの流入地点、地区外要素からの流入地点およびダムの位置が、当該地区の下流端の場合には、 $e(t)_i^r$ は $x(t)_i^{rr}$ の項のみにかかることになる。

したがって、 p_i^r は本質的に各変数に関して非線形である。そこで、水質制約を考慮する際に、上流から流入する河川の水質 p_i^r を、上流の水質制約値 $\bar{p}_i^r$ で置き換えて、さらに地区内の他要素からの流入水質 $p(t)_j^r$ を、 $\bar{p}(t)_j^r$ とすれば、線形化された水質制約条件式を得る。

$$(y(t)_i^r \cdot w(t)_i^r + r(t)_i^r \cdot v(t)_i^{rr} + \bar{p}(t)_i^r \cdot x(t)_i^{rr} + \sum_{j=1}^m \bar{p}(t)_j^r \cdot x(t)_j^{rr} + \sum_{j=1}^m \bar{p}(t)_j^r \cdot e(t)_j^r \cdot x(t)_j^{rr}) \cdot e(t)_i^r \leq \bar{p}(t)_i^r \cdot X(t)_i^r \quad (39)$$

この式のみを用いて、汚濁負荷量の連続条件式を除外しておけば、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

質問題が激しい場合には都合がよい。この方法では、対象地域の下流端における汚濁負荷の総量規制や水質をめぐる上下流関係の検討において、水質制約は安全側で満たすことになるが汚濁負荷の連続条件式は満足しないということになる。

方法 3): 汚濁負荷の連続式を線形化する方法

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

・汚濁負荷の連続条件式

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

$$(y(t)_i^r \cdot w(t)_i^r + r(t)_i^r \cdot v(t)_i^{rr} + \sum_{j=1}^m p(t)_j^r \cdot e(t)_j^r \cdot x(t)_j^{rr} + \sum_{s \in (r-1)} Z(t)_s^r) \cdot e_i^r = Z(t)_i^r \quad (40)$$

・水質制約

$$Z(t)_i^r \leq \bar{p}(t)_i^r \cdot X(t)_i^r \quad (41)$$

次節の実河川への適用では、対象流域の水利用特性を考慮して、方法 3)を用いている。方法 1)および 2)を用いた例は文献 15, 17)に示されている。

2) 費用制約の考え方と定式化

水資源の取水・送水・貯水・浄水・配水・処理・排水等に関する費用は、①施設の建設・維持に必要な費用と、②水利用(取水・送水・貯水・浄水・配水・処理・排水)にあたって必要な施設の操作・運営費用とに大別することができる。①の費用には、土木工事費・機械設備費・用地費等の外に、施設を耐用年数間維持するうえで必要な補修費をも含めて考える。この費用を「建設・維持費」とよぶことにする。この費用は、主として施設の規模・容量等に依存するものと考えられる。②の費用には、電力費・薬品費・人件費等が含まれ、これを「操作・運営費」とよぶことにする。この費用は、主として施設で扱う水量に依存するものと考えられる。これら2種類の費用は、通常それぞれ年間費用に換算して取り扱われる。

一般に、これらの費用は施設容量または取り扱い水量に関して非線形である。多くの場合、施設容量や取り扱い水量が比較的小さい場合には規模の経済性の効果を大きく受け、単位容量(水量)あたりの費用はてい減する。逆に、給・排水管路の設置などにおいてときどきみられるように、

施設で取り扱う水量が多くなるにつれて、配管密度を増すときの用地費等のために単位容量あたりの費用はてい増する場合もある。

こうした関係を単純化して取り扱うための方法として、線形化が考えられる。すなわち、非線形的関係を Taylor 展開して線形化する方法（定数項が含まれる）、および平均単価と施設容量（水量）との一次結合によって線形表現する方法が用いられる。また、適用範囲を広げるために部分線形化手法を用いることが行われる。いずれにしても、これらの近似的な方法を用いる場合には、その適用範囲に注意が必要である。

本論文では次のような費用算定式を用いることにした。

① 施設建設・維持費（地区 r ）

$$C^r = \sum_i \sum_j c_{ij}^{rr} y_{ij}^{rr} + \sum_{i=3,7} (\sum_s c_{ii}^{sr} y_{ii}^{sr} + c_{ii}^{or} y_{ii}^{or}) + (\sum_s c_{ss}^{rs} y_{ss}^{rs} + c_{ss}^{ro} y_{ss}^{ro}) \quad (42)$$

② 施設操作・運営費（地区 r ）

$$M^r = \sum_{k=1}^2 \left\{ \sum_i \sum_j m(tk)_{ij}^{rr} \cdot x(tk)_{ij}^{rr} + \sum_{i=3,7} (\sum_s m(tk)_{ii}^{sr} \cdot x(tk)_{ii}^{sr} + m(tk)_{ii}^{or} \cdot v(tk)_{ii}^{or}) + (\sum_s m(tk)_{ss}^{rs} \cdot x(tk)_{ss}^{rs} + m(tk)_{ss}^{ro} \cdot g(tk)_{ss}^{ro}) \right\} \quad (43)$$

ここに、 y_{ij}^{rs} ：施設容量、 c_{ij}^{rs} ：単位容量当りの建設・維持費、 $m(tk)_{ij}^{rs}$ ：単位水量当りの操作・運営費である。

費用係数 c_{ij}^{rs} および $m(tk)_{ij}^{rs}$ は、施設容量（水量）、地価、地形条件（揚程・距離）、都市の広がりや疎密度、原水水質、新設、増設の別等によって違った値をとる。

本論文では、季節変動特性を考慮した上で妥当な水資源施設計画を探ることを目的としている。さらに、後の事例検討を行う流域も含めて、わが国の多くの地域には既存の水資源施設が存在しているので、それを前提として新たな施設計画を検討することがより現実的であることから、次のような制約式が必要とされる。

$$\left. \begin{aligned} T_k \cdot y_{ij}^{rs} &\geq x(tk)_{ij}^{rs} \\ T_k \cdot y_{ii}^{or} &\geq v(tk)_{ii}^{or} \\ T_k \cdot y_{ss}^{ro} &\geq g(tk)_{ss}^{ro} \end{aligned} \right\} \quad (44)$$

$$y_{ij}^{rs} \geq \bar{y}_{ij}^{rs} \quad (45)$$

ここに、 T_k ：各期の目数（ $k=1$ ：カンガイ期日数（ $=3$ ）、 $k=2$ ：非カンガイ期、期月数（ $=9$ ）、 $\bar{y}_{ij}^{rs}$ ：新規施設をも含めた施設容量（月間取り扱い容量）、 $\bar{y}_{ij}^{rs}$ ：既存施設容量（月間取り扱い容量）である。

ここに、式(44)、(45)は、各期の利用水量のうちでより大きい期のものに対して、施設容量が確保されることを示すた

めのものであり、施設容量が既存容量よりも大きいか、または等しいことを示している（施設のとりこわしは考えていない）。

b) 目的関数

目的関数は、水資源への要請と種々の制約との間の相互関係を分析してその調整を図り、できる限り高い水準で要請を満たす計画案を求めるためのものである。目的関数としては、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の最少化

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

$$\min \sum_{r=1}^n (C^r + \sum_{k=1}^2 M(tk)^r) \quad (46)$$

② 水資源からみた可能産出高の最大化

水資源計画の検討では、地域発展に伴う需要追従型の水供給計画のみでなく、人口・産業等の計画フレームが水資源の供給面からみて妥当なものかどうか、水資源利用の面からみれば産出額を最大化させ得る産業立地パターンはどうあるべきかについての考察も必要であり、次式はこのために用いられる。

$$\max \sum_{r=1}^n \sum_{i=5}^7 \sum_{k=1}^2 O(tk)_i^r \quad (47)$$

③ 水資源からみた可能収容人口の最大化

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

$$\max \left\{ \sum_{r=1}^n P(tk)^r \right\} \quad (\text{ただし、} P(t_1)^r = P(t_2)^r) \quad (48)$$

④ 河川水質の最良化（流出汚濁負荷量の最小化）

河川水質の最良化または流出汚濁負荷量の最小化という観点から、水利利用システムのあり方を検討したり、あるいはまた産業・住宅立地の検討を行う場合に用いられる目的関数である。後の実流域への適用においては、流域最下流端地区からの流出汚濁負荷量の最小化という目的関数を用いている。

$$\min \sum_{k=1}^2 Z(tk)^n \quad (49)$$

⑤ 複数目的の均衡達成

水資源計画の作成においては、複数の目的の達成をめざしていることが多い。上記①～④では、ある特定の目的を目的関数として取り上げ、他の目的については制約条件によって表現しているが、それらの目的は互いにトレード・オフの関係にある。それらを均衡よく達成する計画立案を

求めるために、本論文では伏見・山口による多目的最適化手法を用いる^{16), 17), 19)}。

本節 1) の制約条件式および 2) の目的関数によって構成される水配分・利用モデルを用いて分析・検討することのできるがら(分析・検討のシナリオ)は、次のようにまとめることができる。

① 現状の水利用システムがもつ問題点の発見

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

② 将来計画で考えられている水利用システムがもつ問題点の発見

現時点で検討されている水資源関連施設計画が、将来の水需要と種々の要請を十分に満たし得るかを検討し、将来発生する問題点を見出すことができる。水のやりとりルートには、現状のルートおよび将来計画に含まれているルートを組み込む。

③ 適正な水利用システムの形成とその特質の検討

①、②で指摘される問題点を解消または緩和し、種々の観点からみて適切な水利用システムの形成について検討するとともに、水資源関連施設の拡充・整備によって対応しうる限界を明らかにすることができる。この分析において、水のやりとりルートには、現状ルートおよび将来計画に組み込まれているルートのほかに、建設が可能と思われる最大限のルート(仮想的施設計画ルート)をモデルに組み込む。

4) 解 法

水資源の配分・利用モデルにおいて、複数の目的をバランスよく達成する解を求めるために用いた解法は、伏見・山口により改良された目標計画法である¹⁹⁾。計算手順は図-2.4に示すとおりである。すなわち、まず各単一目的に対する最適化を行う(このとき他の目的は必要最低水準を与える制約条件として考慮する)。このとき、他の目的の達成度をパラメトリックに変化させて目的関数間のトレード-

オフが生じている領域を調べる(パレート域の走査)。次に、その結果や現状値などを考慮して各目的の必要最低水準を設定し、伏見・山口の方法により“選好解”を求める。以上の手順で“選好解”を求めるが、各段階で図-2.4に示すようなフィード・バックが生じる。すなわち、多目的間の調整を行った解を機械的に求めるのではなく、最終的な選好解を得るまでには何回かの判断が必要である。

伏見・山口の解法は、通常の maximin (or minimax) 法により複数目的の達成度をバランスよく向上させた解を求めるためのものであり、次のような考え方に基いている。まず各目的の必要最低水準(限界水準) $G^0 (G_i^0)$ と満足水準 $G^s (G_i^s)$ を与えて、目標空間内での $\vec{G}^0 \vec{G}^s$ なるベクトルを定める。そして各目的間の関係を等効関数で与え、その等効関数を $\vec{G}^0 \vec{G}^s$ ベクトルの方向に平行移動させ、できるだけ G^s に近い解を求める。伏見・山口は、一般的な等効関数を近似的に示すものとして、① $\vec{G}^0 \vec{G}^s$ ベクトルに直交する直線および② $\vec{G}^0 \vec{G}^s$ ベクトル上で折れる直線(L字型、開いたL字型)を提案している。本論文では、主としてL字型等効関数を用いたが、このような解法を採用した理由は以下のとおりである。

① 水資源計画の立案にあたっては、事前に人口・産業等の計画フレーム値、水質環境基準値等の数値が与えられていることが多く、これらを参照して各目的の限界水準および満足水準を設定することは、比較的容易である(各目的に対してウェイトづけをすることはきわめて困難である)。

② 本章 2.3, b) で示したそれぞれの目的の達成に利害関係をもつ人々(集団)は、多くの場合たがいに独立であることから、等効関数を用いて複数目的の達成度をバランスよく向上させる必要がある。

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

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

(満足水準 G_i^s の設定)

費用に関する満足水準

$$G_1 - Y_1 + Z_1 = G_1^s$$

汚濁負荷量に対する満足水準

$$G_2 - Y_2 + Z_2 = G_2^s$$

可能工業産出高に関する満足水準

$$G_3 - Y_3 + Z_3 = G_3^s$$

..... (5)

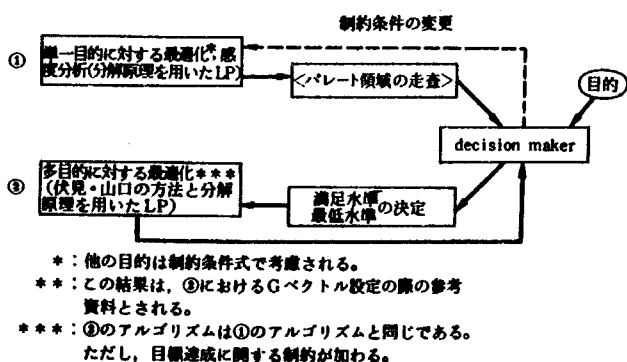


図-2.4 解法の基本的構成

(限界水準 G_i^0 の設定)

費用の支出限界水準

$$G_1 \leq G_1^0$$

汚濁負荷量の許容限界水準

$$G_2 \leq G_2^0$$

可能工業産出高の許容最低水準

$$G_3 \leq G_3^0$$

(各目的間の均衡 - L字型効用関数の設定)

$$Y_1 - \mu_2 Y_2 = 0$$

$$Y_1 - \mu_3 Y_3 = 0$$

(目的関数)

$$\min Y_1$$

(53)

ここに、 Y_i , Z_i は補助変数、 $\mu_2 = (G_1^0 - G_1^1) / (G_2^0 - G_2^1)$, $\mu_3 = (G_1^0 - G_1^1) / (G_3^0 - G_3^1)$ である。

また、このように線形計画法により定式化された問題を分解原理を適用して解けば、各目的の達成度をバランスよく上昇させると同時に、地区間の調整過程を明示的に把握することが可能であり、これをGD法 (Goal Programming coupled with Decomposition Principle) とよぶことにする。分解原理の適用法については、文献14, 15, 20に述べられている。

3. 実流域への適用

1) 対象地域の概要

対象とした大和川流域の奈良盆地は、次のような特徴をもつ地域である。この地域における大和川は河川流量が少なく、農水や上水はその多くを地域外 (吉野川水系、室生川水系) からの導水および地下水に依存している。また、河川の水質は悪く、一級河川の中で最も汚染が進行している河川の一つといわれている。そのために、流域下水道整備が行われており、一部ではすでに下水の下水道への受け入れが行われている。この流域は大阪都市圏に隣接しており、急激な都市化・宅地化が進行している。したがって、水利用率の上昇している同流域は、地域の発展に付随した水需給問題、水質汚濁の問題等を総合的に考慮した水資源計画の検討に適していると考えられる。

2) 水資源関連要素、分析対象地域と地区分割、分析対象期間と期間分割の決定

(I) 水資源関連要素：水資源関連要素とその機能は、表-2.1に示したものを取りあげた。他流域からの導水は、便宜上それを受水する要素を介して行われるものとして取り扱った。

(II) 分析対象地域と地区分割：分析対象地域は大和川流域の奈良盆地とした。地区分割は、表-2.2に示した手順

により決定した。

図-2.1(d)にその結果を示した。作業段階で作成した各図面については、文献16を参照されたい。

(III) 分析対象期間の設定とその期間分割：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性を考慮) に着目したことによる (図-2.3)。

3) 現状把握の方針と結果

上述の基本事項を設定した上で、昭和47年のカンガイ期 (t_1) と昭和48年にかけての非カンガイ期 (t_2) 別に、水循環・水収支の把握を行った。データの収集・変換・加工・推定方法の基本方針は、次のとおりである¹⁶⁾。河川水や地下水などの自然水の収支は、決定した地区分割に対応させてデータを収集・整理し、用・排水の収支については、原則としてそれぞれの水の移動特性を表現し易い地区分割のもとでデータを収集・整理し、それを集計・配分して決定した地区に割り当てた。

現状の水循環状況は、地区内における複雑なやりとりと地区間のやりとりに分けて、第2節で提案した貯留を考慮する水資源関連表により整理した。その結果の一例を表-2.6に示す。このようにして得られた各地区・各時期ごとの河川流量と実測の河川流量とを比較したところ、その差は2~6%であった¹⁶⁾。また、河川水の水質は、排出原単位・汚濁負荷流達率 (削減率も含む) を用いる方法により把握した。得られた各地点の水質は、年間の平均値としてみると、多くの地点で河川水質年鑑²²⁾に示される実測値に対して±20~30%以内の誤差であった¹⁶⁾。しかし、水質年鑑に示される水質は低流況時のものであり、年間総流出負荷を正しく表現していないので (第5章参照)、実測値に合うように原単位・流達率等を修正することはしなかった。

以上の水収支の把握結果から、水資源をめぐる現状の諸問題について検討を加えることができる。例えば図-2.5(a), (b)は、対象地域における水の利用状況をカンガイ期・非カンガイ期別に集計して整理したものであるが、見掛けの水利用率を (各用水使用量の和) / (降水量 + 地域外からの導水量 - 蒸発散量) として算定すると、年間総量としては約40%であり、カンガイ期・非カンガイ期別に見ると、それぞれ68% (農水: 54%, その他の用水: 14%) および21%であることがわかる。この外にも、各用水の地下水依存度や各利水部門間の関係を詳細に知ることができる¹⁶⁾。

4) 水資源計画の検討

大和川流域の奈良盆地を対象にして設定した分析シナリオおよびそれに対応した計算ゲージスを表-2.7に示す。

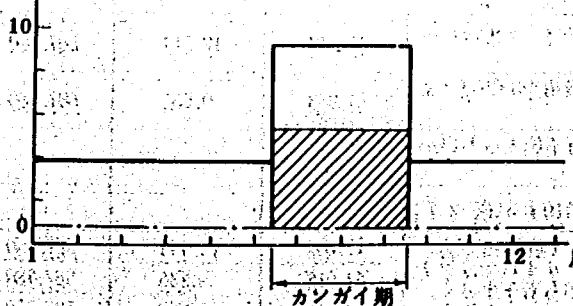
表-2.6 地区1の水資源速関表

流出要素	1 河川	2 地下水	3 上水道	4 家庭	5 業務	6 工業	7 農業	8 下水道	9 流域	10 ため池	蒸発散	次期へのもちこし	他地区からの流入	地域外からの導水
1. 河川			427 107 320			-	10,108 10,108 0			11,054 11,054 0		1,442 0 1,442	160,863 67,296 93,567	-
2. 地下水	102,403 39,088 63,315		2,292 573 1,719	438 109 329	50 13 37	648 162 486	1,404 1,404 0					17,302 14,666 2,636	7,675 4,343 3,332	
3. 上水道		6,130 1,535 4,595		20,647 5,161 15,486	2,159 540 1,619	843 211 632								3,223 806 2,417
4. 家庭	14,995 3,749 11,246							3,559 890 2,669			2,530 633 1,897			
5. 業務	1,587 397 1,190							356 89 267			265 66 199			
6. 工業	1,035 259 776					50 13 37		232 58 174			224 56 168			
7. 農業	9,430 7,336 2,094	27,317 20,315 7,002									19,488 11,089 8,408			
8. 下水道	11,960 4,389 7,571													
9. 流域	41,042 31,905 9,137	62,721 17,130 45,591						7,813 3,352 4,461		2,725 2,725 0	85,327 30,538 54,789			
10. ため池							13,780 13,780 0					22,108 11,054 11,054		
降水 w_i							30,657 13,153 17,504		199,623 85,650 113,978					
前期からのもちこし w_i	1,442 1,442 0	36,044 21,378 14,666								22,108 11,054 11,054				
他地区からの流入 $w_{ij} (i \neq j)$														
地域外からの導水 w_{ij}^* (導水含む)			30,283 7,570 22,713				287 287 0							

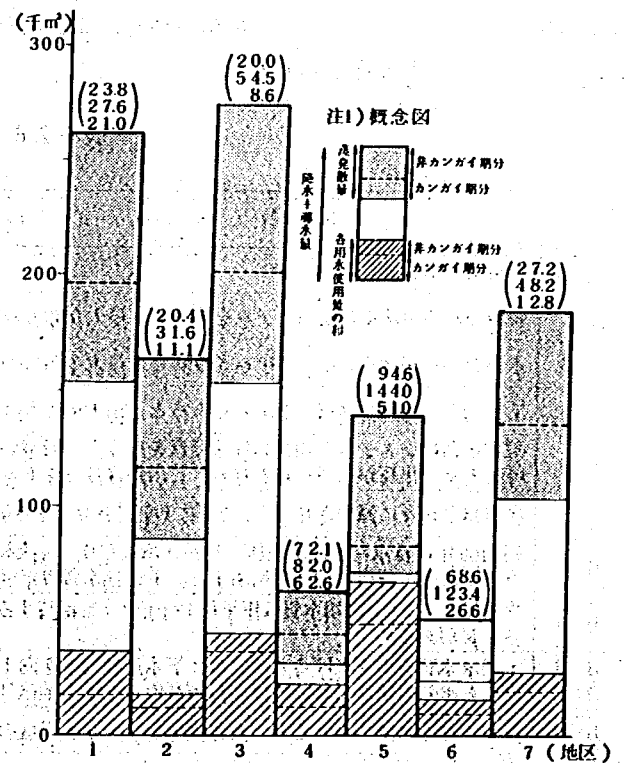
分析シナリオAでは、現況施設のもとでの問題点を明確にすることを試みている。このシナリオのもとでは、現存のルート以外の施設の新設は認めていないが、現存施設の規模の拡張は認め、それに必要な費用を考慮している。

分析シナリオBでは、昭和55年時点までに完成する予定である流域下水道の整備、流域外からの導水量の増加および地区間送水施設の新設を考えている。流域外からの導水量の増加量については、計画で設定されている値を与えた。

$\times 10^6 \text{ m}^3 / \text{月}$
 — (降水量+導水量) - (蒸発散量)
 — (家庭+業務+工業) 用水使用量
 農業用水使用量



(a) 対象地域全体の水利用状況



注2) () 内は利用率(本文参照)で上段: 年平均、中段: カンガイ期、下段: 非カンガイ期の値である。

(b) 対象地域の各地区の水利用状況

図-2.5 現状の水利用状況

表-2.7 分析シナリオと計算ケース

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

また、必要に応じて新たな施設を作る場合についても検討しうるように、可能性のあるルートをすべてモデルに組み込み、必要なルートと規模とが最適化の結果として決定される。

分析シナリオCでは、さらに家庭・業務における個々の利水者が行う循環再利用、下水の地区内循環再利用、および地区間の送水等のルートをモデルに組み込み、最適化の結果として必要な容量が定められる。

ケースA-5およびB-5では、利水システムの水質を耐渇水性を検討するために、降水量を徐々に減少させた。

各計算ケースについての計算結果の概要を表-2.8に示した。計算結果より次のことが明らかになった。

a) シナリオAについて

① 現況の水利用システムのもとで、現況の水利用経費を上回らないこと、現況の水需要を満たすこと、および河川水質を現況より悪化させないことといった制約を課すと、

表-2.8 計算結果の概要

ケース	計算結果の概要	費用 (百万円)	末端汚濁負荷量 (t)	工業産出可能額 (百万円)
現状 (昭和47年)		39,206	10,861	321,063
A-1	費用面から現状水利用システムをみると、最大0.38%の費用削減ができる。	39,057	10,861	321,063
A-2	水質面から現状水利用システムをみると、最大3.9%の負荷量削減ができる。	39,206	10,438	321,063
A-3	工業面から現状水利用システムをみると、最大9.96%の可能生産高増にできる。	39,206	10,861	356,566
A-4	現状水利用システムの均衡的最適運営を行うと、費用が0.16%減、負荷量が1.66%減、可能工業産出高が4.72%増となり、この解はGベクトル上にある(図-2.6)。	39,142	10,680	336,219
A-5	降水量を徐々に減少させると、2年に1度程度発生する渇水で実行不可能になる。	—	—	—
B-1	昭和55年には水需要量が現状より28%増となり、現状水質(水質レベルI)を維持しようとするれば、費用は21.5%増加する。下流端水質は年平均16 ppm。	47,644	12,514	587,780
B-2	水質レベルII(下流端水質は年平均12 ppm)を維持するためには、費用を33%増とす必要がある。	51,983	9,556	587,780
B-3	要求水質を引き上げると、いかに下水道整備率を向上させても実行不能となる(もともと水質事情が厳しいのは奈良市を中心とする地区(地区I)である)。	—	—	—
B-4		—	—	—
B-5	降水を徐々に減少させると、渇水に強いシステム形成のため費用が増加する(図-2.7)	—	—	—
C-1	(昭和55年値) 水需要が増加し、要求水質を引き上げると費用は増加するが、シナリオCではシナリオBよりも多様な施設ルートを含んでいるために、費用の増加率も若干小さく、また、より厳しい水質規制に対しても対応できる(図-2.8)。	47,632	12,492	587,780
C-2		51,918	9,536	587,780
C-3		64,012	6,663	587,780
C-4	環境基準値まで水質レベルを引き上げると50年以降の水需要の増加に対して実行不能となる。	—	—	—

実行可能領域はきわめて狭い。現況値に対して費用面で0.38%, 流出汚濁負荷量で3.9%, 可能工業産出高で10.0%の領域幅が認められるに過ぎない。特に費用面の領域幅が小さいことから、現況の水利用システムはほぼ費用を最小とするシステムに近い状況であると判断される。

② ケースAでは複数目的(三目的)の均衡最適解を求めた。この検討では、一応の目安として限界水準は47年現況値、満足水準はケースA-1からA-3において単一目的に対する最適解として求められたそれぞれの目的関数の値をとってGベクトルを構成した。この場合の均衡最適解は図-2.6に示されており、解はGベクトルと実行可能領域の境界曲面との交点にある。この解を現況の値と比較すると、可能工業産出高を引き上げ、かつ水質汚染を防止するために工水の循環利用を増大させるとともに、水質向上のための下水道整備の促進が必要であることなどが明らかとなった。したがって、この検討から現況での問題点を解消するための対策のガイドラインが与えられた。

③ ケースA-5は降水量を徐々に減少させて、水利用システムの渇水に対する応答をみたものである。その結果を検討することにより、降水量の減少とともに図-2.7に例示されるように費用が増加すること、あるいは水質の悪化、生産額の減少といった現象が生じることが明らかにされた。

b) シナリオBについて(表-2.8)

④ 昭和55年の推定需要量を供給し、かつ水質の悪化を防止するためには、上水道からの供給量の増大、工業用水循環使用量の増大、下水道整備の促進等が必要とされる。

⑤ しかし、ケースB-2~4より、河川水質制約を厳しくすると(水質レベルⅢにすると)、下水道整備率を100%に引きあげたとしても地区1とその下流の地区4において水質制約を満たすことができない。

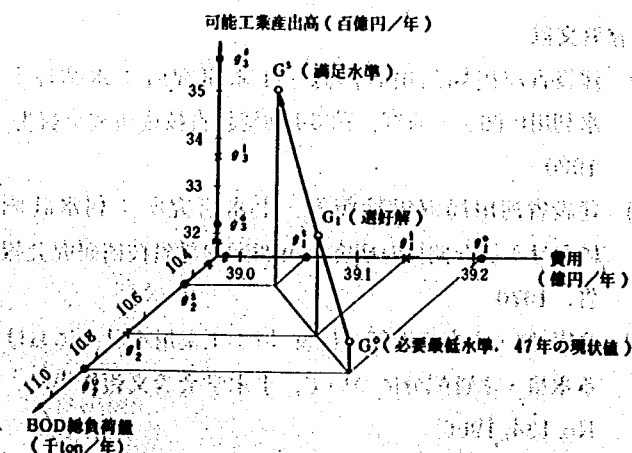


図-2.6 目標空間における各目的値の関係の例示

c) シナリオCについて

⑥ シナリオCにおいては、都市用水の再利用を考慮している。図-2.8(a)に示すように、水需要が増大するにつれて、循環再利用される水量を増大させる必要が生じる。シナリオCの検討では、個別循環再利用より広域循環再利用のコストを高く設定している関係から、現況水質を制約値とすると個別循環再利用のみが行われるという結果を得た。水質制約をそれよりも厳しくしていくにつれて、徐々に広域循環再利用が必要とされるようになる。広域循環再利用が行われると、下水処理水も含めた河川への排水量が減少し、河川に依存する用水取水量も減少せざるを得ない。

⑦ シナリオCのように利水システムを多様化し、施設容量を拡大しても、この流域では水質環境基準(値)の達成が難しいと推定される。したがって、排水水質規制、個別水処理等の分散的な汚濁負荷削減対策が必要である。

⑧ 図-2.8(b)は、シナリオCで想定された水利用システムのもとでの実行可能領域を表現している。同図では、縦軸を可能収容人口に対応する水需要量にとっている。この図から、対象地域の水資源からみた収容可能人口(人口容量)と河川水質および水資源関連費用の間で生じるトレード・オフの程度を知ることができる。なお、多目的選好解がこの曲面上に存在することは、多目的選好解の定義から明らかである。

以上のようなパレート域の走査の外に、信頼性の低い係数・定数(制限値含む)を変化させて感度分析を行うことにより、検討結果を解釈する上での信頼性についてチェックすることができる¹⁶⁾。図-2.7の分析は、水利用の耐渇水性の検討であるとともに感度分析の一例ともなっている。

4. ま と め

本章では、流域内の水循環状況を水利用との関係を明確にした上で総合的に把握する手法、および水資源計画において生じる種々の競合(相互干渉)を調整する計画を策定するための総合的な水資源計画モデルについて検討した。

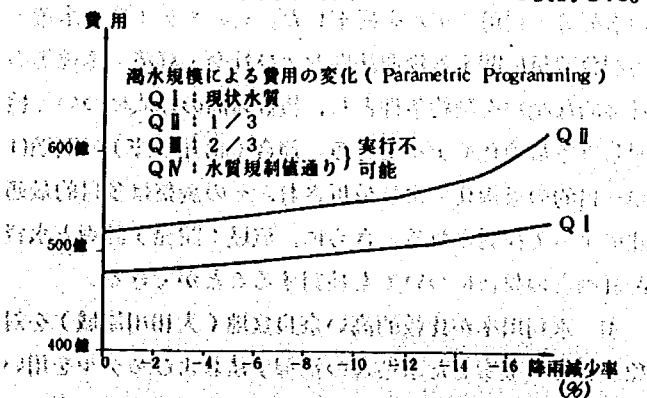
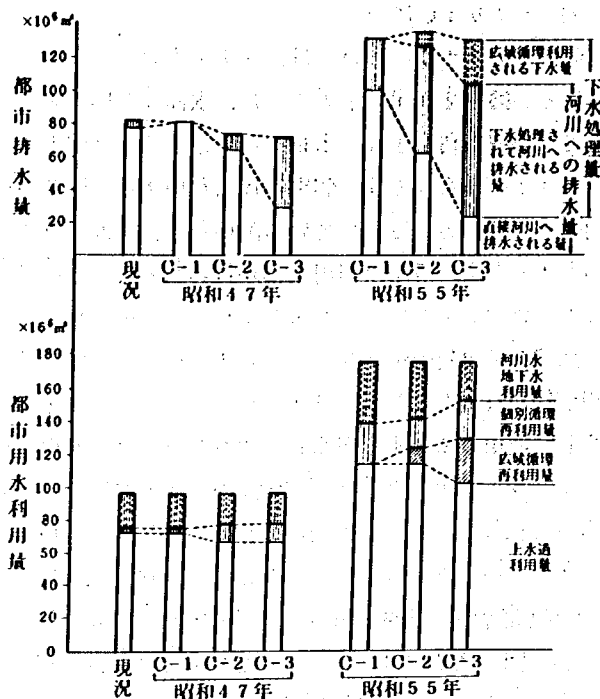
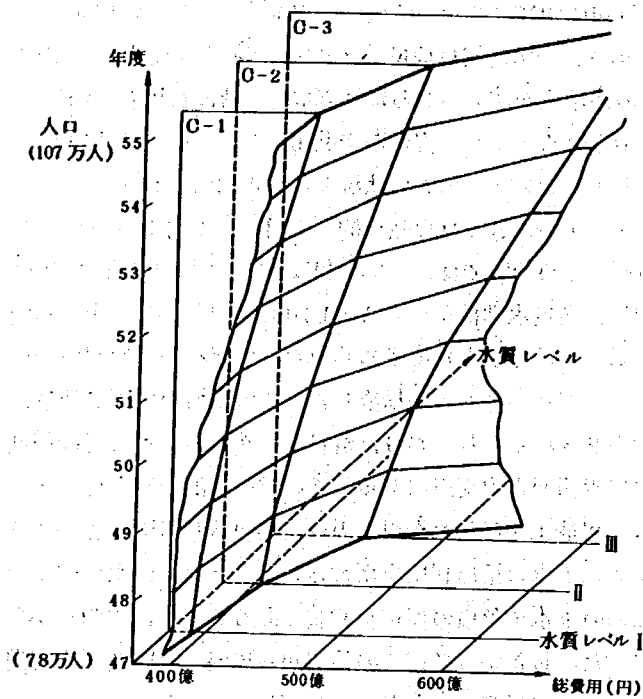


図-2.7 感度分析の一例(降水量について)



(a) 都市用水・都市排水の構成



(b) 対象流域の流域容量

図-2.8 計算結果の例

主な結果は以下のとおりである。

1) 流域内の水循環状況は、水の移動を表現するための水資源関連要素、地区分割および分析対象期間と期間分割を定めることにより把握される。本論文では、一般的な水資源関連要素として河川・地下・上下水道・家庭業務・工業・農業・下水道・流域（斜面）および系外（大気中）の11を設定し、各要素のもつ水循環上の機能を明らかにした。さらに、地区分割および分析対象期間の適切な設定方法を提示した。

2) 体系的な水循環の把握手法として、水資源連関表を提案した。水資源連関表は経済学における産業連関表と類似しており、各マス目に水の移動量を記入する。この手法を用いることにより、流域の複雑な水循環状況を体系的に把握することが可能となった。

3) 水資源計画上の種々の競合を総合的に調整するための水配分・利用モデルを提案した。このモデルは、水量・汚濁負荷量に関する物理法則および社会・経済・環境等の社会的な制約を制約条件とし、複数目的の達成について検討しうる最適化モデルである。競合（相互干渉）の問題は単一目的の最適化により分析され、その調整は多目的最適化によって検討される。さらに、流域（開発）計画と水資源計画との整合についても検討することができる。

4) 水利用率が比較的高い奈良盆地（大和川流域）を対象として、提案した水循環の把握手法およびモデルを用いて現状および将来時点の相互干渉の問題を定量的に評価し、

その調整について検討した結果、手法およびモデルの有効性を確認することができた。

5) 奈良盆地の検討において明らかにされた諸問題は、水利用率の上昇によって一般的に生じるものであり、取排水システム形態と水利用・水環境との関連、超過渇水の問題および流域から排出される総汚濁負荷量の問題についてはより詳細な検討が必要であることを示唆している。

本章では、総合的な分析手法を確立するとともに、水利用率の上昇した流域で生じる水資源計画上の問題点の全体像を明らかにすることを試みた。上記の5)に示される課題については、第3～5章において詳細に検討される。

参考文献

- 1) 建設省河川局河川計画課・土木研究所：水循環と水利用に関する研究、第34回建設省技術研究会報告、1980
- 2) 建設省河川局河川計画課・土木研究所：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
- 3) 合田 健・末石富太郎・住友 恒：工業用水計画における水量・水質配分について、土木学会論文報告集、No.134、1966
- 4) 春名 攻・岡田憲夫：広域利水における水配分計画モデルに関する一考察、土木学会論文報告集、No.211、

1973

- 5) Okada, N : Comprehensive Systems Analysis of Area-Wide, Multi-Modal Water Resources Utilization Systems, Doctorate Dissertation to Kyoto Univ., 1976
- 6) Heady, E. O. et al. : National and Interregional Models of Water Demand, Land Use, and Agricultural Policies, Water Resources Research, Vol. 9, No. 4, 1973
- 7) Reynolds, J. E. : Allocating Water among Alternative Uses, Journal of the Irrigation and Drainage Div., Proc. ASCE Vol. 97, No. 1, 1971
- 8) Меуитов, И.И., Гершковичу, М.И. : Оптимизация использования водных ресурсов в дефицитных по воде бассейнах, Гидротех и Мелиорация, 19-12, 1967.
- 9) Фельдман, М.Л. : Оптимальное распределение водных ресурсов между водопользователями и водопотребителями, Гидротехническое Строительство, Ио. 4, 1969.
- 10) Clyde, C. G., et al. : Optimal Allocation of Water Resources in Utah, Proc. ASCE, Vol. 99, No. HY10, 1973
- 11) Swanson, H. S. et al. : Optimization of Water Allocation Decisions Affecting Estuarine Ecology, Water Resources Bulletin, Vol. 7, No. 4, 1971
- 12) Bargur, J. : Dynamic Multisector Programming Approach to Regional Water Resource Management, Water Resources Research, Vol. 8, No. 4, 1972
- 13) Haimes, Y. Y. et al. : Multiobjectives in Water Resource Systems Analysis : The Surrogate Worth Trade Off Method, Water Resources Research, Vol. 10, No. 4, 1974
- 14) 三好逸二・関 正和・吉川勝秀・朴栄秀 : 流域における水循環の把握と水資源の配分に関する研究, 土木学会論文報告集, No. 269, 1978
- 15) 岩松幸雄・関 正和・吉川勝秀・三好逸二 : 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
- 16) 吉川勝秀・関 正和・岩松幸雄 : 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(III), 土木研究所報告, No. 151, 1978
- 17) 吉川勝秀・関 正和 : 流域の総合的な水資源管理に関する研究, 土木学会論文報告集, No. 287, 1979
- 18) 金子良 : 水収支特性の地形別類型 I)~(V), 水利科学, Vol. 14, 15, No. 73~75, 77~79, 1970 ~ '71
- 19) 伏見多美雄・山口俊和 : 複数の目標をバランスよく達成するための数理計画的な方法, 経営科学, Vol. 19, No. 2, 1975
- 20) Danzing, G. B. et al. : The Decomposition Algorithm for Linear Programming, Econometrica, Vol. 29, No. 4, 1961
- 21) 建設省河川局 : 流量年表, 1972 ~ '73
- 22) 建設省河川局監修 : 日本河川水質年鑑, 1973
- 23) 市川正巳 : 多摩川流域における水収支と流量の変化について, 東京教育大学地理学研究報告 No. XI, 1968
- 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報告書, 資源調査所資料 No. 47, 1977
- 25) 建設省近畿地方建設局河川計画課 : 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
- 26) 科学技術庁資源調査所 : 水資源の利用における水質問題と水質制御に関する調査報告, 資源調査所資料, No. 72, 1975
- 27) 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
- 28) 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, Vol. 12, No. 60, 1968
- 29) W. オーチャード・ヘイズ(小国・坂木訳) : コンピュータによる線形計画法(Advanced Linear Programming Computing Techniques), 培風館, 1973
- 30) 古瀬大六 : 数理計画法 I, 共立出版, 1971
- 31) 渡辺 浩・青沼龍雄 : 数理計画法, 筑摩書房, 1977
- 32) 佐合純造・石崎勝義 : 地下水を含めた現地観測と水循環機構について, 第24回水理講演会論文集, 1980
- 33) 建設省近畿地方建設局大和川工事事務所 : 大和川水系給排水施設調査報告書, 1977
- 34) 建設省河川局 : 奈良盆地水管理計画調査報告書, 1973
- 35) 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
- 36) 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, 1974
- 37) 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, 1973
- 38) 建設省編 : 流域別下水道整備総合調査, 指針と解説, 1974
- 39) 国土地理院 : 大和川流域土地利用図, 1968
- 40) 厚生省 : 水道統計, 1965 ~ '73
- 41) 通商産業大臣官房調査部 : 工業統計表(用地用水編), 1965 ~ '73

- 42 奈良県土木部：下水道事業の概要，1977
- 43 奈良県都市計画協会：奈良県都市計画総括図，1969
- 44 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
- 45 建設省河川局河川計画課・土木研究所：河川の流水管理システムに関する研究，第30回建設省技術研究会報告，1976

- 46 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),(II), 土木研究所報告, No. 151, 154, 1978, 1980
- 47 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
- 48 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報告書，土木研究所資料，No. 1125, 1976

第3章 水循環に関する考察

1. 水循環システムと水資源計画との関連

水資源計画上の相互干渉の問題の多くは、ある利水行為が水循環系を介して他に影響を与えることによって生じる。流域の取・排水システムの形態と水資源計画上の諸問題との間には密接な関係があり、第2章において2, 3の具体例が示された。しかし、流域の水循環系（取・排水システム）と水資源計画との関係については、これまでに必ずしも十分な検討が加えられていない。そのために、例えば流域下水道計画と河川計画・ダム計画等との整合性に関して、種々の問題が生じるようになっていく。

現在の流域の水循環系が形成されてきた経緯について整理してみると、よく知られているように、水資源開発の初期の段階では農業用水に関する取・排水系統が整備された。その後、水力発電や工業・家庭・業務などの都市用水が加わり、新たな取・排水システムに変ってきた。このように、流域の取・排水システムは社会形態に呼応して変化してきた。

これまでに作られてきた取・排水システムの変化には、一つのパターンを見い出すことができる。例えば上流で取水された水が河川に還元され、下流で再び利用される伝統的な循環システムから、清浄な水源を上流に求める広域水道を導入したもの、あるいは効率的な河川水質の改善を目指して流域下水道を導入したものに移行したものが数多く見られる。そして、それぞれの過程にある取・排水システムは、当初は水利用への要請に対応しているが、新たな要請が台頭してくるとかえって不都合になる場合がある。このように水資源計画ときわめて密接な関係にある取・排水システムに関しては、丹保の研究¹⁾および浜口・前田の研究²⁾がある。しかし、丹保の研究では水資源計画における水質の消費のみに着目し、多面的な検討に欠けている。浜口・前田の研究では多面的に取・排水システムの形態と水利用特性との関係を分析しているが、単にシステムの比較が行われただけであり、システム間の移行あるいは地域社会との関係については十分な考察が行われていない。一方、数理計画手法を水資源計画に適用した研究^{3)~6)}では、取・排水システムの特性が明確には取り扱われておらず、水配分の効率性や河川水質の改善のみを対象としているものが多い。このように、流域の水循環形態と水資源計画上の問題については、十分な研究が進められていない。以上のような背景から、本章では水循環形態と水資源計

画との関係を分析した。研究の対象は、近年の水循環に係る諸問題の多くが都市化流域において顕在化していることから、ここでは都市用水に係る取・排水システムとした。そして、従来のように水道計画や下水道計画といった個々の計画のみを考えるのではなく、流域全体の水循環システムの中でそれらを評価すべきであるという観点から考察を進めた。考察は取・排水システムの類型化および特性の多角的分析から始め、システム間の比較およびシステム間の移行に伴う利害得失の分析を行った。さらに、それらの結果を応用して、水循環を明確に考慮に入れた水資源計画を立てる上で問題となる次のような今日的な課題についても検討を加えた。すなわち、取・排水システム形態と利水安全度との関係、都市用水のような特定用水の還元を見込まない現在の計画方式から還元を見込む計画に移行する時に生じる問題、河川維持流量の問題、および水質の還元（処理水の再利用）による水資源開発などである。

2. 流域の取・排水システムの類型化と特性分析

本節では、都市化流域の取・排水システムを基本的なパターンに類型化し、多角的な指標を設定して分析を行うことにより、それぞれのシステムのもとでの水利用上の特性を明らかにする。

1) 取・排水システムの類型化

一般に、流域の取・排水システムを構成する要素としては、河川・地下(水)・上水道・家庭・業務・工業・農業・下水道・流域・ため池・系外といったものが考えられる(第2章、表-2.1参照)^{4), 5)}。本論文では水利用率の上昇した流域を対象とするので、都市化流域の水循環系をとりあげる。そして、河川を介した水の移動状況（開放系としての水循環）に着目し、工場内等での水の再利用による水の移動（閉鎖系としての水循環）は考慮しない^{4), 5), 7)}。

都市化流域の取・排水システムは、既存のシステムに概念的に考えられるものを加えると、図-3.1に示すような8つの基本的なシステムに類型化される。

システムAは伝統的な循環利用型である。システムBは流域下水道（公共下水道）型であり、システムCは広域水道（公共下水道）型、システムDは広域水道・流域下水道型である。また、システムEは2元給水循環利用型、システムFは2元給水再生利用型（Ⅰ）、システムGは2元給水再生利用型（Ⅱ）、システムHは2元給水再生利用型（Ⅲ）と呼ぶことにする。

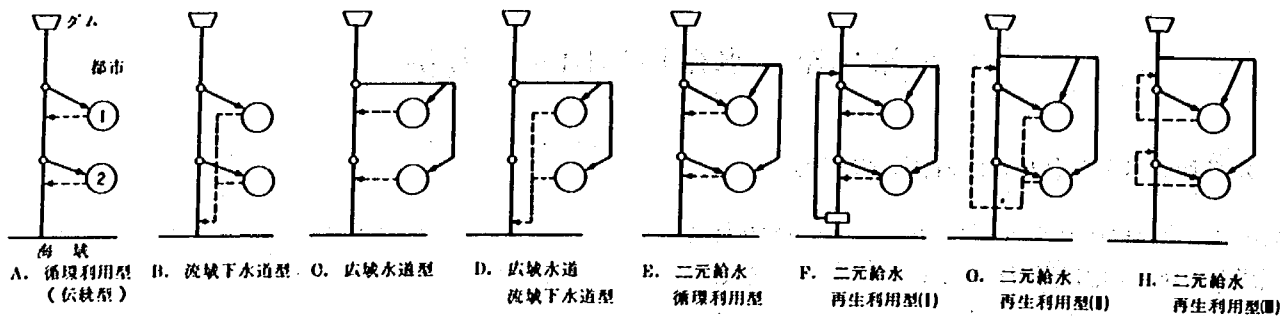


図-3.1 流域(都市)の取・排水システムの類型化

類型化されたシステムのうち、A～Eはすでに多くの流域で実在している形態である。歴史的にみると、Aを経てBあるいはC、D、Eへと移行していく場合が多い。システムB～Dは、水質にはできる限り手を加えない(水質の積極的な利用ではない)“水量消費”型のシステムである。また、システムF～Hについても、いくつかの流域でこの形態へ移行する計画が立案されている。システムF～Hは、積極的に水質を回復させながら水利用を行う“水質の消費と復元”型のシステムである。

2) 取・排水システムの評価指標

取・排水システムの特性を明らかにするために、以下に示す10の評価指標を設定する。

- ①河川の流量
- ②河川の水質
- ③海域(停滞性水域)への汚濁負荷排出量
- ④利水関連費用
- ⑤エネルギー消費量
- ⑥水質事故に対する安全性
- ⑦計画規模以上の渇水(超過渇水)に対する安全性
- ⑧水供給容量
- ⑨単位水量当りの利水費用
- ⑩単位水量当りのエネルギー消費量

評価指標①～③は河道内および停滞性水域の水環境に関するものであり、④、⑤はシステムを建設・運営するために必要な経費およびエネルギーをみるものである。⑥および⑦ではシステムの安全性をみる。また⑧では、最上流端での流量に対する水供給容量(各システムにおいて上流端の流量を与えたときの水供給可能限度量)を算定する。⑨および⑩では、④および⑤で算定したシステム全体の値を単位給水量当りに換算することにより、水コストや給水量当りのエネルギー消費量を求めた。

以上の指標は、一般性を失わない範囲で単純化した次のような条件のもとで計算された。

①～③の指標については、計画流況時のみ(したがって

超過渇水時や洪水時は除く)を考える。また、⑦の指標の算定においては、(i)安全度(超過確率表示)でみる方法、(ii)不足率およびその期間、あるいはそれらの積である不足%・半旬といった不足状態でみる方法、(iii)渇水被害でみる方法が考えられるが、本論文では(ii)の方法を用いた。さらに渇水評価の際の入力データとしては、(i)実績水文量、(ii)渇水持続曲線といった計画水文量、(iii)データ・ジェネレーション(data generation)による水文量が考えられるが、本論文では(i)を用いた。また、農水および残流域流入量は水収支に関連する量であるが、システム間の比較においてはそれを考慮した場合としない場合の結果に本質的な違いがないことから省略した。都市の規模は、システム形態ごとの特性の比較検討を容易にするために、各システム共通とした場合、および各システムの水供給容量の限度までの規模の場合を考えた。都市の規模を同じにして上流取水量を $0.3 \text{ m}^3/\text{sec}$ 、下流を $0.4 \text{ m}^3/\text{sec}$ とした場合には、下水道未完備時と完備時の2つのケースを考え、前者をケース1、後者をケース2とした。また、システムの極限水供給容量に対応した都市規模を設定した場合をケース3とした。

種々のパラメータの値を設定するにあたっては、それらを任意に与えるのではなく、現実の流域での平均的な値を採用することにして、できる限り実状に合致したものを設定するようにした⁹⁾。

設定した各評価指標と水利用との関係は次のようである。⑧の水供給容量の増大は社会的な効用の増大に対応する。そのような効用の増大には、④および⑤で示される費用、⑥および⑩で示されるエネルギー消費量といった支出を伴い、①、②の河川水量や水質の変化、③停滞性水域への汚濁排出量の変化、⑥、⑦に示される水質事故や超過渇水時の安全性に変化が生じる。これらの指標を総合した社会的効用関数は現在のところ定式化されておらず、以下ではシステムの改変あるいはシステム間の移行とともに各指標がどのように変化するかを個別に評価することを試みた。

3) 特性分析のための数値シミュレーション

設定したモデル流域（仮想流域）は図-3.2に示すとおりである。各記号は次のように定義した。

- $P_{t,i}$: 水量・水質のチェック・ポイント ($i = 0 \sim 6$)
 WT : 広域水道
 W : 公共水道
 ST : 流域下水道
 S : 公共下水道
 RK : 河口堰における取水場
 R : 公共下水道の高度処理場
 RS : 流域下水道における高度処理場
 p_i : $P_{t,i}$ 地点の水質
 l : 距離

数値シミュレーションで用いた主な共通データを表-3.1に示した⁹⁾。これらの共通データは上流における単位流量に対応するように設定した。これは、上流流量 $1 \text{ m}^3/\text{sec}$ を基準値として、上流流量で無次元化して考察を行うためである。

各指標の算定式の内容は表-3.2に示すとおりである。表-3.2を補足する意味で、各指標の計算について若干の考察を加える。

① 流量の連続式

$$Q^{i+1} = Q^i - Q_W^i + Q_S^i + Q_R^i \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 Q^i : $P_{t,i}$ の流量、 Q_W^i ・ Q_S^i ・ Q_R^i : それぞれ $P_{t,i}$ と $P_{t,(i+1)}$ の間の取水量・排水量・再生水放流量。したがって、 $Q^0 = Q^*$ (上流端流量) である。

② 汚濁負荷量の連続式と水質

$$G^{i+1} = G^i - P^i \cdot Q_W^i + G_S^i + G_{OS}^i + G_R^i \quad (2)$$

$$p^{i+1} = G^{i+1} / Q^{i+1} \quad \dots\dots\dots (2')$$

ここに、 G^i : $P_{t,i}$ の負荷量、 G_S^i ・ G_{OS}^i ・ G_R^i : それぞれ下水放流水負荷量・下水を介しない放流水負荷量・再生放流水負荷量、 p^i : $P_{t,i}$ の水質。

③ 停滞水域への排出負荷量 q_s (計画流況時)

$$q_s = \int_0^t p^s \cdot Q^s dt \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 t : 対象期間。

④ 利水費用

$$\begin{aligned} \bar{C} &= \sum_j C_j + \sum_j M_j \\ &= \sum_j (c_j \cdot \delta_j + cl_j \cdot l_j \cdot \delta_j) \\ &\quad + \sum_j (m_j \cdot Q_j + ml_j \cdot l_j \cdot Q_j) \quad \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

ここに、 c_j : 単位水量当りの建設費 (プラント等)、 cl_j : 単位水量・単位距離当りの建設費 (配管等)、 m_j ・ ml_j : それぞれ c_j ・ cl_j に対する維持・管理・運営費、 δ_j : 施設能力、 Q_j : 供給量。スケール・メリットを表現する場合には、例えば $c_j \cdot \delta_j$ は $c_j \cdot \delta_j^\alpha$ (α : 定数) となる。しかし、以下の検討では線形式を用い、費用係数を規模の経済を考慮して設定した⁹⁾。

⑤ エネルギー消費量 E

$$\begin{aligned} E &= \sum E_1 + \sum E_2 \\ &= \sum a Q^b + \sum 0.245 \cdot Q \cdot (cl \cdot H) \quad \dots\dots (5) \end{aligned}$$

ここに $E_1 = a Q^b$: 処理に必要なエネルギー、 a ・ b : 定数、 $E_2 = 0.245 \cdot Q \cdot (cl \cdot H)$: 逆送に必要なエネルギー

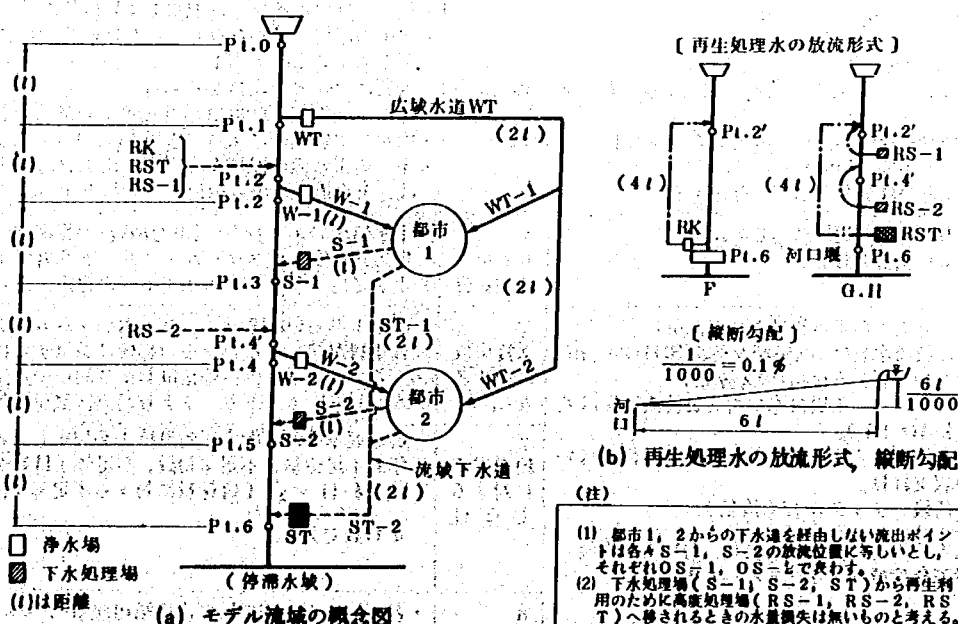


図-3.2 モデル流域の概念図 (記号等の定義含む)

表-3.1 共通基本データの例示

(a) 基本共通データ

Q^*	1.0 m/s (自然流量 0.8 + ダム開発水量 0.2)
Q_M	0.3 m/s (維持流量)
q_1	0.3 m/s (都市1の需要量, 取水量ベース)
q_2	0.4 m/s (都市2の " " " ")
$k = k_1 \cdots k_2$	0.8 (還元率)
S1	0.5 (都市1の下水道整備率)
S2	0.7 (都市2の " " " ")

都市1,2共,広域水道と各都市の公共水道が負担する比率は等しいとする。

(b) 都市の規模, 水需用量, 負荷量原単位

	家 庭	工 業*	摘 要
水使用量 (排水量)	0.345 m ³ /日/人 (4.0×10^{-6} m ³ /s /人)	0.7 m ³ /日/百万円 (8.0×10^{-6} m ³ /s /百万円)	
汚 濁 負 荷 量	50 g/日/人 (0.6×10^{-3} g/s /人)	50 g/日/百万円 (1.2×10^{-3} g/s /百万円)	
都 市 1.	50,000 人	12,500百万円/日	0.3 m ³ /sec使用
" 2.	50,000 人	25,000百万円/日	0.4 m ³ /sec使用

* 化学工業を想定する

(c) 施設能力・水質・距離

施設能力 (m/sec)	水 質 (ppm)	距 離 (km)
δ_{WT}	0.7	P_0 2.0
δ_{W-1}	0.3	P_{S-1} 20.0
δ_{W-2}	0.4	P_{S-2} 20.0
$\delta_{ST}, \delta_{RST}$	0.56	P_{RS-1} (5.0) 20.0
$\delta_{S-1}, \delta_{RS-1}$	0.24	P_{RS-2} (5.0) 20.0
$\delta_{S-2}, \delta_{RS-2}$	0.32	P_{RST} (5.0) 20.0
δ_{RK}	0.56	P_{RK} P_{L5} の水質

(d) 費用係数 (単位水量当り)

上段のcは建設費 (円/m³)
下段のmは維持管理費 (円/m³)

c, m	通 用	デ - タ	備 考
c	ダ ム	20円/m ³	20 × Q_M × 年間 = 126.144 百万円 (すべてのタイプに共通)
c _m	WT, W 1, W - 2	$\frac{100}{m-3} \times 14^{(d)}$	取水, 導水, 浄水, 送水及び給配水費用 に広域水道と公共水道の差は考えない。
c _m	S 1, S 2	$\frac{40}{8}$	公共下水道の2次処理場
c _m	S - 1, S - 2	$\frac{50}{5}$	" の管渠等設備費
c _m	RS - 1, RS - 2	$\frac{35}{25}$	" の3次処理場
c _m	ST	$\frac{30}{6}$	流域下水道の2次処理場
c _m	ST	$\frac{40}{4}$	" の管渠等設備費
c _m	RST	$\frac{30}{20}$	" の3次処理場
c _m	RK	$\frac{30}{5}$	河 口 堰
c _l m _l	RST, RS - 1, RS - 2 RK	0.5 Pl/m ³ /km 0.1 "	再生水送水費

(注) P: BOD水質レベル ppm

ギー, H : 高度差, 0.245: 換算係数, c_1 : 損失等を考慮する係数。係数 a は文献 10) に示される処理レベル 2 (レベル 1: 活性汚泥法 4400KW/(m³・sec), レベル 2: 活性汚泥法 + 高度処理 11200KW/(m³・sec)) とし, 規模の経済を示す b は 0.9 とした⁸⁾。

⑥ 水質事故に対する安全性

(フロー・ネットワークより算定)

⑦ 超過渇水に対する安全性 SA (システム B, C, D について例示)

$$SA = \sum_A \frac{(Q^* - Q_M)}{Q_0} \times 100,$$

表-3.2 共通事項, 評価項目および評価方法 (ケース 1, 2 の例)

共通事項	評価項目	評価方法
1. 流量 (変化)	- 流量はダム直下流の量のみである。 $Q^* = Q_0 + Q_N$ (Q^*: 計画流量, Q_N: 開発流量) - 流域には都市 1, 2 が存在し, 各々家庭 (業務含む) と工場から構成されている。 - 広域水道と公共水道が存在し, 広域水道の都市 1, 2 への給水比率は都市の規模に対応している。 - 流域下水道あるいは公共下水道が存在する。	- 種々の計算ポイントは取水あるいは排水地点とする。 - 河川の維持流量が存在し, それは優先的に確保される。 - 下水道整備率は都市 1, 2 それぞれ 50%, 70%, あるいは両者共に 100% の場合を考える。 - 都市で使用された水量が還元率 k で還元される。 - 取水や水質処理によって水量損失はないとする。 - 下水道未整備の区域から河川に汚濁負荷が流入するポイントは, 下水道からの放流位置と同じとする。
2. 水 質 (変化)	- ダム位置から放流される水質は P_0 (2ppm) - 処理場からの放流水質は 2 次処理レベル (BOD 20ppm) 3 次処理レベル (同 5 ppm) の 2 種類。 - 下水を介しない家庭・工場排水の汚濁負荷流域率は共に 0.3 (下水道は 1.0)。 - 河口堰から上流に戻す際には, 新たな処理は行わない。 - 汚濁負荷の収支計算。 - 水質 = (負荷量フラックス) / (流量)	- 下水処理のエネルギー (電力消費) の算定 (要求水質により処理方式を変え, スケール・メリットを考慮)。 - 水を逆送するためのエネルギーの算定。
3. 停滞性水域の環境	海域へ流入する汚濁負荷量と定義し, 河川の最下流端における汚濁負荷量フラックスとして求める。	- 都市 1 あるいは 2 でコレラ・六価クロム・シアン等による水質事故が起きたとき, その影響はシステムにより異なる。 - ここでは水道の供給停止量および河川の汚染区間をみる。 - 水フロー・ネットワークより汚染区域供給停止量を算定。
4. 利水費用	- 建設費 (capital cost) と維持・管理・運営 (running cost) を算定 (スケール・メリット考慮)。 - 水処理コストは原水水質により変える。	超過渇水時の流況 (半旬単位) を想定し, 各システムごとの年間不足総量, 不足半旬数, 不足%・日数を求める。 不足%・日 = $\sum_i$ (確保量に対する不足%), ここに, i: 不足日数である。
	5. エネルギー消費	
	6. 水質事故に対する安定性	
	7. 超過渇水に対する安全性	
	8. 水供給容量	- 各システムの理論的な水供給可能量 (システムの容量) を算定。 - 容量と水質の関係の分析。 - 限界状況での水利用効率, ダム開発水の効率 (水開発効率) を算定。

$$A \{ Q^* - Q_M | Q^* - Q_M < Q_0 \} \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 Q_0 ：水利権量、 Q_M ：維持流量、 A ：水供給可能量＜水利権量の日（あるいは半日）の集合。

⑧水供給容量 Q_C （ $Q^* - Q_M$ の量が還元率 k で循環した場合）

$$Q_C = (Q^* - Q_M) + k(Q^* - Q_M) + \dots\dots\dots$$

$$\approx \frac{1}{1-k} \cdot (Q^* - Q_M) \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 k は還元率である。

また、この水供給容量を用いて、最上流での流量に対する水供給量の比としての水利効率 ω_0 および上流の貯水池での単位開発水量に対する供給可能水量の増加分の比率 ω_N （水開発効率）は次式で求められる。

$$\omega_0 = Q_C / Q^*, \omega_N = Q_C / (Q^* - Q_M) \dots\dots\dots (8)$$

式(7)で示される水供給容量は完全に定常状態となった時（無限回循環した時）のものであるが、通常はそのような定常状態を期待するのは危険であり、1回循環とみておいた方がより現実的である。表-3.3には1回循環した場合（式(7)で第2項までとる）の値を示した。なお、表-3.3に示す極限水供給容量のもとで、B、C、D、F、G、Hタイプでは水を上下流の都市に任意のわりふりが可能である。しかし、A、Eタイプでは、上流を $(Q^* - Q_M)$ 、下流を $k(Q^* - Q_M)$ としたときに最大容量となる。

⑨および⑩の単位水量当りの利水費用、エネルギー消費量については、式(4)および(5)で算定した値を、ケース1～3の水利用量で除することにより求めた。

このようにして数値シミュレーションを行った結果を図-3.3に模式化して一覧できるようにした。

図-3.3に示す①流量変化および②水質変化における実線は、都市規模を上流 $0.3 \text{ m}^3/\text{sec}$ 、下流 $0.4 \text{ m}^3/\text{sec}$ とし、下水道が未完備時のもの（ケース1）を示す。破線は同じ条件で下水道が完備された場合（ケース2）を示す。一方、点線はケース3についてのものであり、上下流の都市が極限状況の水利用を行うとした場合（容量内で任意に取水可能なB～D、F～Hタイプでは、上下流の取水量の比率を3：4とした）を示している。また、③停滞水域の環境、④利水費用、⑤エネルギー消費、⑥単位水量当りの利水費用および⑦単位水量当りのエネルギー消費では、左端にケース1、中央にケース2、右端にケース3の結果を示している。さらに、各指標は次のように表示されている。①流量変化および②水質変化は、河川の各地点の水量・水質値が横の幅で表示されている。③停滞水域の環境、④利水費用および⑤エネルギー消費量については、縦軸にその大き

表-3.3 各システムの水供給容量 Q_C 、水利効率 ω_0 および水開発効率 ω_N

システム	容 量 (最大)	ω_0	ω_N
A	$(1+k) \cdot (Q^* - Q_M)$	$(1+k) \cdot \frac{Q^* - Q_M}{Q^*}$	$1+k$
B	$(Q^* - Q_M)$	$\frac{Q^* - Q_M}{Q^*}$	1
C	$(Q^* - Q_M)$	$\frac{Q^* - Q_M}{Q^*}$	1
D	$(Q^* - Q_M)$	$\frac{Q^* - Q_M}{Q^*}$	1
E	$(1+k) \cdot (Q^* - Q_M)$	$(1+k) \cdot \frac{Q^* - Q_M}{Q^*}$	$1+k$
F	$\frac{1}{1-k} \cdot (Q^* - Q_M)$	$\frac{1}{1-k} \cdot \frac{Q^* - Q_M}{Q^*}$	$\frac{1}{1-k}$
G	$\frac{1}{1-k} \cdot (Q^* - Q_M)$	$\frac{1}{1-k} \cdot \frac{Q^* - Q_M}{Q^*}$	$\frac{1}{1-k}$
H	$\frac{1}{1-k} \cdot (Q^* - Q_M)$	$\frac{1}{1-k} \cdot \frac{Q^* - Q_M}{Q^*}$	$\frac{1}{1-k}$

（注）1回もどし（1回循環）の場合の値であり、無限回もどしの場合の定常値ではない。

さをとって示した。⑥水質事故に対する安全性では、上流および下流で水質事故が発生した場合（×印で示される）の供給停止量および汚染河道区間を示している。数値はケース2に対応している。ケース1および3では供給停止量は異なるが、水利利用の疎外状況には本質的な違いがないので省略した。⑦計画規模を超過する渇水に対する安全性では、都市水需要量に対する不足半日数（上段）および不足%・日を示しており、年間の総需要量に対する不足の相対的な程度を知ることができる。⑧利水（極限）容量はコップのボリュームで示されており、その横に極限利用状態（ケース3）における利用効率 ω_0 を数値で与えた。⑨単位水量当りの利水費用および⑩単位水量当りのエネルギー消費は、④および⑤と同様に表示した。

図-3.3の計算においては、各指標間の相互関係についての分析も行った。その結果の一例として、利水容量と河川水質との関係を図-3.4に示す。同図は、上流都市の取水量 q_1 と河川水質 p_4' の関係を示しており、システムFでは都市1は $0 \sim 1.94 \text{ m}^3/\text{sec}$ まで取水することができる。その時、 $0 \sim 0.7 \text{ m}^3/\text{sec}$ までは水質の悪化を伴わずに取水可能である。しかし $0.7 \text{ m}^3/\text{sec}$ を越えて $1.94 \text{ m}^3/\text{sec}$ まで取水量を増すと、それとともに水質は2から17.5 ppm（ただし上流の下水道整備率は100%）まで悪化し、取水量と取水水質の間に相互干渉（トレード・オフ）が生じていることがわかる。

図-3.3は前述の三つのケースの都市規模を設定したものであり、システムF～Hのケース1および2では可能な量はすべて逆送するとしている。したがって、システムA～Eは、ケース1および2では純粋な比較計算となっているが、F～Hについては前提条件が異なっている。また、ケース3は極限水利用状態での比較を行ったものであり、

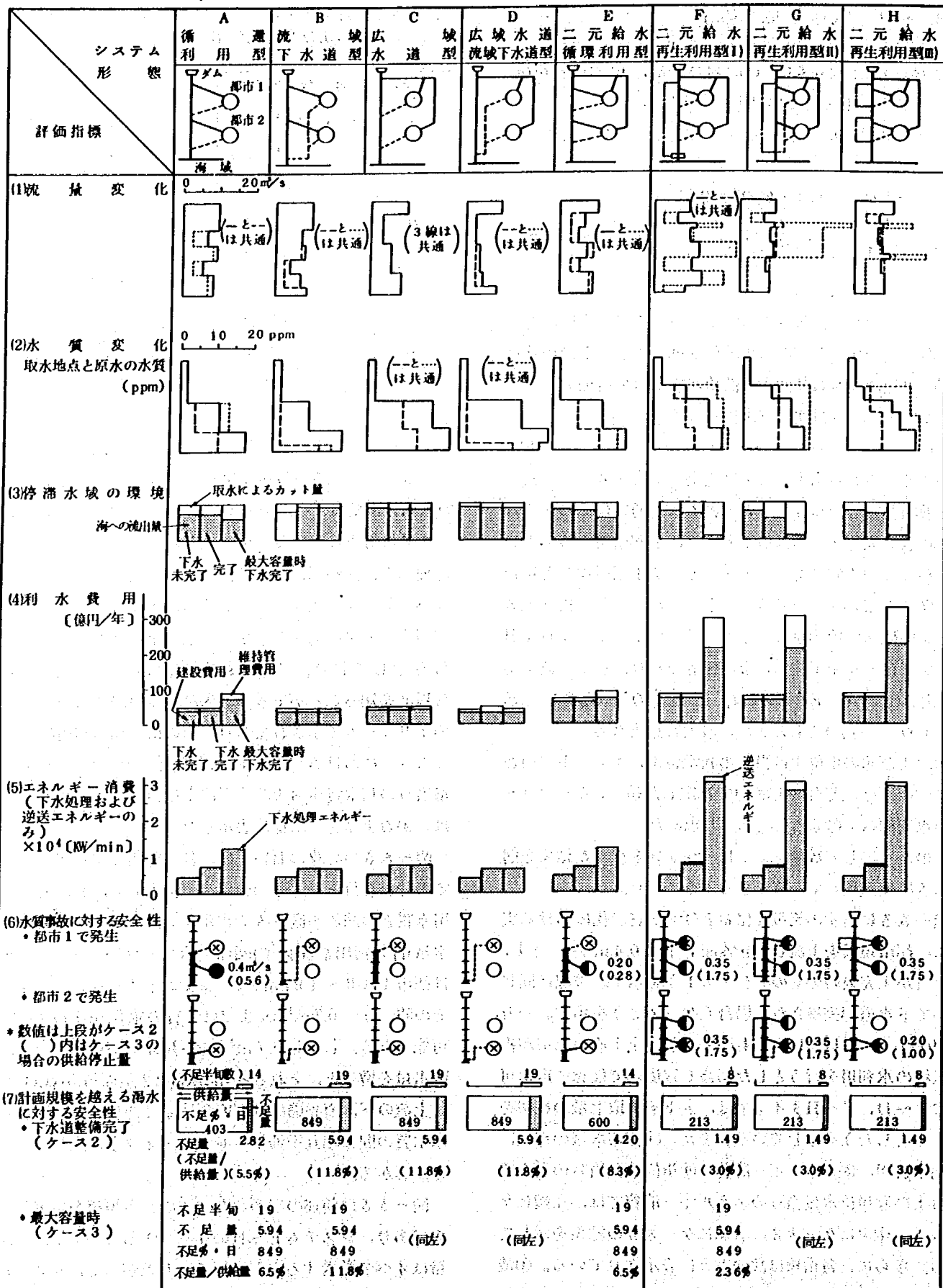


図-3.3 シミュレーションの結果(次のページへつづく)

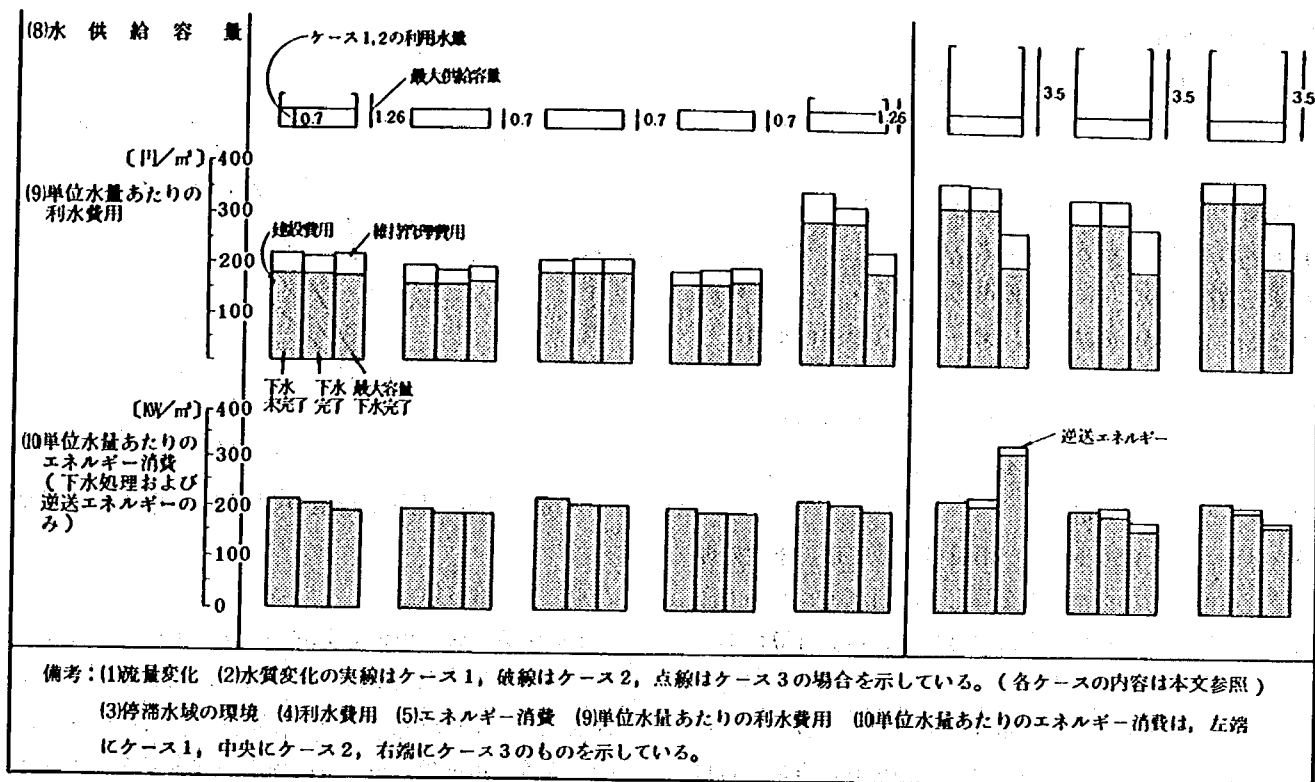


図-3.3 シミュレーションの結果(前ページのつづき)

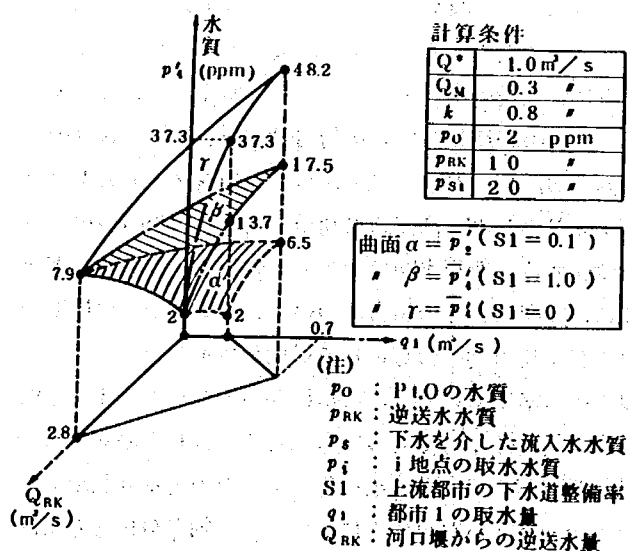


図-3.4 容量と水質の関係(システムF)

そのような条件下で各システムの比較が可能である。

3. 取・排水システムの特性に関する考察

取・排水システムの特性についてのシミュレーション結果(図-3.3)について、まず各評価指標ごとに考察し、次にそれらを総括する。

1) 各評価指標についての考察

① 河川流量

(図-3.3(1)流量変化よりわかるように、伝統的システム

から主として水質(取水水質および河川水質)を確保するために広域水道・流域水道を導入したシステムB~Dに移行するにつれて、河川内の水量は減少する。河川維持流量が定められていない河川では、極端な場合には無流量状態が出現する可能性があり、河川環境面からみると望ましくない状況が生じる。一方高度な再利用システムF~H(システムAも実質的には再利用システムである)では、水を逆送すれば河川の水量は確保される。河川流況の保全のために下水処理を導入する事例は、このような特質に着目したものと考えてよい。

② 河川水質

図-3.3(2)に示す河川水質についてみると、水処理後の水質レベルを固定すれば、水量とは逆にシステムBおよびDは最も良好である。取水水質を確保するために、この特性に着目してシステムBおよびDに移行した事例が多い。再利用型であるシステムAおよびF~Hは、現況の下水処理レベルでは水質的には悪くなる。したがって、①および②より水量と水質の間にトレード・オフの関係があることがわかる。

③ 停滞水域への汚濁負荷排出量

②と同様に水処理レベルを固定すると、循環利用型システム(A、F~H)では、水利用に関連した処理による分だけ多くの負荷量が削減されることになり、排出負荷量は減少する。

④ 利水費用

図-3.3(4)利水費用では、施設建設関連費用（capital cost）と維持・管理・運営費用（running cost）を示した。高度の再利用型システムでは、逆送する水の分だけ総経費は高くなる。また極限容量を供給すると仮定して、公企業体が総支出＝総収入となるように水コストを定めるとすれば、通常の場合には高度の再利用型システムでは料金高となる。その場合の結果を、図-3.3(9)の単位水量当りの利水費用として示した。なお、利水費用の計算においては、規模の経済および水質悪化による処理費用の上昇を考慮するように諸定数・係数を与えている⁹⁾。

⑤ エネルギー消費量

各システムごとのエネルギー消費量としては、下水処理および逆送のエネルギーのみを算定し、利水のための（浄水場での）処理エネルギー等は除外している。計算にあたり、下水処理水の再利用を行うシステムでは、再利用しないシステムより、より高度な処理をするものと仮定している。図-3.3(5)エネルギー消費量よりわかるように、高度の再利用型システム程エネルギー消費量は大きくなる。これに利水のための処理エネルギー等を加えると、さらにこの傾向は強まる。図-3.3(10)には、単位水量当りのエネルギー消費量を示した。

⑥ 水質事故に対する安全性

図-3.3(6)に示すように、循環利用型システム（A、E～H）では、水質事故に対する安全性は低い。また逆送システムであるF～Hでは、下流の都市で水質事故が発生すると、上流での供給がさまたげられる事態が生じうる。

⑦ 計画規模以上の渇水に対する安全性

図-3.3(7)には、上段に供給が需要を下回る半旬数、中段に不足量および不足率・日、下段に総不足量（%）および（不足量総量）／（供給量）を示している。これより、ケース1および2では、開放系として再利用を行うシステム程水量的にみた安全性は高いことがわかる。しかし、ケース3では各システムの安全性はほぼ同じである。ただし、この計算においては、想定した実流域（猪名川）の実績流量から流量波形を定め、超過渇水に対する安全性を算定した⁹⁾。また、確率評価された計画流況（渇水持続曲線など）を用いた検討も行っているが、ほぼ同様の結果を得ている。図-3.5には、上流端流量 Q^* と各システムの不足量の関係を示した。横軸が上流端流量 Q^* 、縦軸は Q^* のもとで各システムが水利用に供給する水量 Q_c を示している。例えば、システムB、C、Dでは、計画水需要量 $0.7 \text{ (m}^3/\text{sec)}$ を供給するためには、 Q^* が $1.0 \text{ (m}^3/\text{sec)}$ 以上（ 0.3 は維持流量 Q_M ）必要であることを示している。

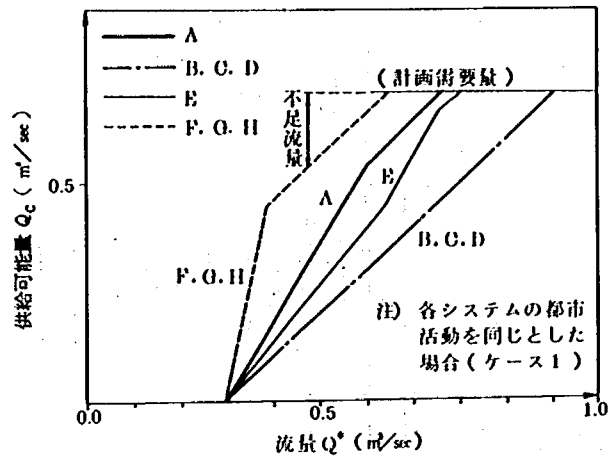


図-3.5. 上流端流量 Q^* と供給可能量 Q_c との関係

⑧ 水供給容量

上流端流量を1単位（ $1 \text{ m}^3/\text{sec}$ ）とすれば、水量のみでみた水供給可能限度量は、理論的には式(7)で示される等比級数の和（くり返し利用量の算定）で与えられる。しかし、図-3.3(8)水供給容量では、現実の利水実態に基づいて、1回もどしの場合の容量をコップのボリュームで示している。同図より、高度の再利用型システムでは、理論的な容量はきわめて大となる。しかし、図-3.3(2)および(5)が示すように、水質や費用・エネルギーは悪化あるいは増大していく。極限利用状況での水利用効率 ω_0 は、一過型のシステム（B、C、D）の 0.7 から伝統的システムAおよびシステムEの 1.26 、高度の再利用システム（F～H）の 3.5 まで変化する。新規水開発効率もこの値に一致する。表-3.3に、1回もどしの場合について、各システムの極限容量および水利用効率の算定式を対比して示した。

以上の考察においては、各指標間のトレード・オフ（例えば水量的には十分であっても水質的には利水の対象にならず、したがって多元給水を行ってもその全量は利用できないといったような事柄）についての詳細な分析と考察は省略したが、開放系としての各種取・排水システムごとの特性を定量的に評価することができた。

2) 総合的な考察

図-3.3に示した結果を総括するにあたり、考察を容易にするために、次のような作業仮説を設定する。

(I) 流域の取・排水システムは、自然発生的なシステムAから始まり、水質（取水水質、河川水質）制約のために、BあるいはCを経てD、Eに移行する。システムB～Cは、一過型のシステムであり、実質上“水質の消費”と水の“量的な消費”が等価と見なされる。

(II) さらに水利用率の上昇した状況下では、水量の確保という要請（水需要量の増大などによる水需要の逼迫）

により、“水質の消費と復元”を指向したシステムF～Hへと移行する。

以上の仮説に従ってながめると、河川水量については一度悪化した後（システムDまで）、再び改良されていく。逆に河川水質（ケース2）でみると、一度良くなった後（システムDまで）に再び悪くなる。汚濁負荷の排出量は河川流量と同じ経緯をたどる。利水関連費用についてみると、システムの移行に伴い、新規施設のcapital costとrunning costは、規模の経済のために、経済的になった後再び費用増となる。ただし、システム間の移行の際に施設を廃棄する場合には、トータルの費用は全くこれとは異なる。この時、容量いっぱい水を供給するとして水コスト（＝総費用／総供給量）を求めると、処理費の増大などによりコスト高となる傾向にある。水質事故に対する安全性は、高くなった後再び低くなる。したがって、総括的にいえば、伝統的システムから水質制約のために一過型システムを経て“水質の消費と復元”を指向するシステムに移行するにつれて、費用増・エネルギー消費増・水質事故に対する安全性の低下という犠牲のもとに、利水容量・利水安全度・河川水質の増大が生じることになる。

これらは、水利用率の上昇とともに、水質の復元（処理水の再利用）を指向していくシステムに移行する際に生じる基本的な特性であると考えられる。

4. 水循環に関する考察の応用

多くの流域において、水利用の高度化・複雑化に伴って、取・排水システムの改変がすでに行われてきている。今後とも種々の事情により、システムの改変は避けることが出来ないように思われる。すなわち、例えば用水の水質を確保するために取水位置を上流とする広域水道の導入、河川水質を良くするための流域下水道の導入、さらには積極的な水質の復元による水資源の開発を行う再生水資源計画などにより、新たなシステムの構築が行われるものと考えられる。

本節では、そのようなシステムの改変に付随した問題を取りあげ、上述の結果を応用して2、3の考察を行ってみたい。

システム間の移行に伴う問題としては、次のようなものがあげられる。

- ① システム間の移行方式の選択
- ② システム間の移行に伴う利水安全度の変化
- ③ 特定用水の還元を見込まない現在の利水計画方式から見込む方式に移るとした場合の問題

④ 水利用率の上昇に伴って超過渇水による被害が深刻化することが知られており^{12,13}、計画時点で超過渇水を予め考慮しておくことがますます重要となっていることから、耐渇水性の取・排水システムの評価の問題

①の分析では図－3.3(4)利水費用、(8)容量と利用効率の指標に主として着目する。②の分析では図－3.3(7)計画規模を超える渇水に対する安全性の指標に主として着目する。そして、その他の指標は周辺条件として考慮する。③の分析では図－3.3(1)流量変化の指標に主として着目する。また、④の分析は①～③の分析を考慮に入れて、耐渇水性の取・排水システム形態を定めようとするものであり、計画内と超過渇水の際の諸量を同時に取り扱う費用便益分析を行うことを最終目標としている。

①～③の分析については、上述の分析結果を用いることにより検討が可能であり、以下にその結果を述べる。④の分析については渇水被害等の別途の検討が必要であり、これについては利水安全度の見方と合せて次章で検討する。

1) システム間の移行方式（水質の復元による水開発）

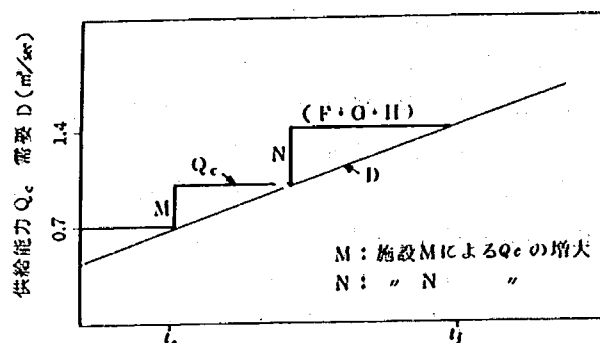
水質の復元による水資源の開発（例えば下水処理水を工業用水として供給したり、農水や維持用水とふりかえることにより都市用水を開発することなど）が議論され始めており、わが国においてもいくつかの事例がある。また、土木研究所などにより、諸外国の実例が紹介されている^{14,15}。以下では、そのような問題をシステム間の移行による水資源の開発という観点からとらえてみる。

図－3.6に、水需要量（増大）と水供給容量との関係を模式化して示す。通常の利水容量の増大は、図－3.6(a)に示すような複数の施設（ダム・導水・再生水資源など）によっており、段階的な規模の拡張が行われる。①の分析で考察する事柄は、代替施設の選択および水供給容量の増大方式である。水供給容量を増大させる方式には、図－3.6(b)に示される段階拡張方式と一括拡張方式がある。

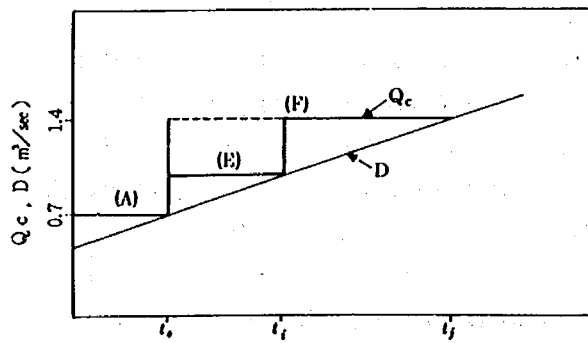
表－3.4(a)には、水供給容量の増大を取・排水システムの改変のみによるとした場合に、現状の施設を活用しながら移行する方式を示した。例えば、A→E→Fというシス

表－3.4 システム間の移行形式

(a) 現状の施設を捨てずに移行		(b) 現状の施設を捨てて移行	
・二元給水・再生利用で供給量増加 新設される施設		・一元給水一回利用が循環利用に転化する ことで供給量増加	
① A→E→F	WT, RK	① B→(A) (ST→S-1; S-2)	
② A→E→H	WT, RS-1	・システムの構造の変化（例えば都市1と2の比）により供給量増加。	
③ B→G	WT, RST	② E→(A)	
④ C→E→F	W-1, W-2, RK	WT-2の減小によりシステム全体の容量増加。	
⑤ C→E→H	W-1, W-2, RS-1, RS-2		
⑥ D→G	W-1, W-2, RST		



(a) 水需要量 D と供給能力 Q_c
(施設・規模の拡張規模式図)



(b) システム間の移行による供給能力の増大
(一括拡張: $A \rightarrow F$, 段階的拡張: $A \rightarrow E \rightarrow F$)

図-3.6 施設・規模の拡張(システム間の移行)

システム間の移行には、施設の廃棄はない。

水開発手段としてダム等の施設によるかあるいはシステム間の移行によるかを比較する方法として、効率性の面からは費用便益分析が用いられる。同様に、 A から F のシステムに移行するとして、 $A \rightarrow E \rightarrow F$ という段階的な拡張と $A \rightarrow F$ という一括拡張があり、この場合にも費用・便益分析を用いることができる^{8), 9)}。

2) システム間の移行による利水安全度の変化

次に、取・排水システムの形態および水利用方式と利水安全度との関係について考える。これは、一つには各取・排水システムの水供給能力の違いを明らかにしたいためである。さらに、最近では計画超過渇水が地域社会に大きなインパクトを与えており、利水安全度についても整理しておくことが重要と考えられるからである。

利水安全度の評価方法には種々の方法がある。それらの方法については次章で詳細に述べることにして、ここではそのうちの一つである不足率・日指標により各システムの利水安全度(耐渇水性)を評価することにする。

各システムの利水安全度については、図-3.3(7)計画規模を超える渇水に対する安全性において、ケース2および3についての計算結果が示された。その結果から、極限容量に対応する水利用を行うと超過渇水に対する安全度は各システム共通となることがわかる。しかし、現実の水利用は、必ずしも各システムの極限容量での取水は行われておらず、利水安全度に差異がある。そして、この利水安全度の差異は容量と取水量から定まるので、現状の安全度を保持するか安全度を現状より下げて供給量を増すかといった検討も、取・排水システムと利水を考える上で重要と考えられる。

図-3.7には、各システムの水供給容量と利用量の関係を示した。同図では、単純化して、各システムの極限容量(最上流端における必要確保流量、図-3.5参照)は異なるが、都市の規模は共通(ケース1, 2)としている。

図-3.7より次のようなことが明らかになる。

① 各システムのもとで、同じ都市の規模に見合った水利用が行われると、利水安全度に差があり、これは各システムの水循環特性によっている。このように、取・排水システムの水循環特性と関連して期待できる利水安全度を以下では構造的な利水安全度と呼ぶことにする。したがって、各システムにおいて、水供給のために必要とされる上流の確保流量と水供給容量との差に対応して超過渇水の深刻さの程度が異なる。

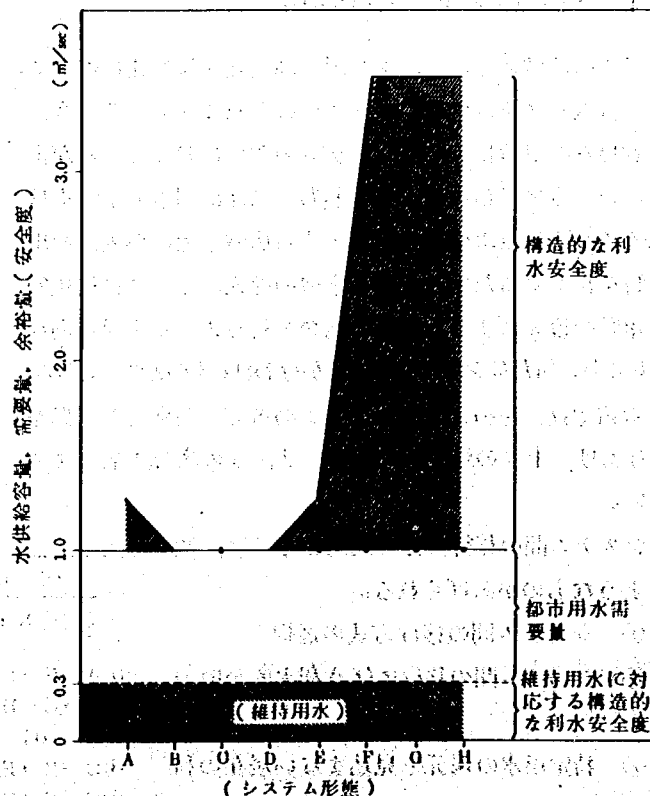


図-3.7 構造的な利水安全度

② 例えば、システムAでは、供給容量が $1.26 \text{ m}^3/\text{sec}$ であるが、都市の規模を各システム共通の $0.7 \text{ m}^3/\text{sec}$ とすれば、その差分だけの構造的な利水安全度が高いことになる。一方システムBおよびCでは、そのような構造的な利水安全度は有していない。またシステムD～Hについては、同様の利水安全度を有している。

③ 各システムの極限容量に対応した都市の規模のもとで水利用が行われると、渇水の深刻さを不足率・日指標で評価すればすべて同じとなる。

④ 以上の考察では、超過渇水時に維持用水を他の用水にふり向けることを考えていない。それを行った場合には、維持流量に相当した利水安全度の上昇が期待されることになる。

3) 還元を見込んだ利水計画の特性

ここでは、用水の還元を見込んだ場合と見込まない場合の利水計画の特性を、システムA、B、CおよびDを例として分析する。

この分析は、図-3.3(1)河川流量、(7)計画規模を超える渇水に対する安全性および(8)水供給容量に着目することにより可能である。その結果として、次のようなことが明らかとなる。

① システムAにおいて用水の還元を見込まなければ、システムA～Dは計画上是同じ利水安全度を有すると見なされる。

② しかし、ダム操作がある基準点での確保流量に基づいて行われる場合には、上流都市からの還元水がその基準点で観測されているためにダムからの補給水量は少なくて済む。したがって、システムAは還元水量分だけシステムB～Dに比較して余裕がある。このことから、現実の利水安全度はシステムAがB～Dに比較して高い。

③ システムAでは、用水の還元量を見込む利水形態への移行が可能である。システムB～Dについては、水が河川をバイパスするために、それが可能ではない。すなわち、システムAでは還元を見込む利水計画に移行することにより、新たな水が計画論上生み出されることになる。しかし、システムAにおいてすでに基準点で還元水を見込んだ水管理が行われ、それに相当する需要が発生している場合にはこの限りではない。

④ 以上よりわかるように、現行の利水計画においては、河川維持用水の設定や還元量を見込まないことにより、利水の安全度が確保されている。したがって、単に水供給水量の増大といった限られた観点からこれを否定することは必ずしも適切ではないと考えられる。

5. ま と め

本章では、水資源計画上の競合の問題の多くが流域の取・排水システム形態と密接に関連して生じていることから、都市化流域を対象としてそれらの関係について考察した。主な結果は以下のとおりである。

1) 都市化流域の取・排水システム形態は、伝統的循環利用型、流域下水道型、広域水道型、広域水道・流域下水道型、二元給水循環利用型、二元給水再生利用型(Ⅰ)～(Ⅳ)の8つの基本的な形態に類型化される。

2) 取・排水システムの改変にはある傾向が認められ、上記の8つの形態間の移行としてとらえることができる。取・排水システムの改変はある目的を追求するために行われることから、ある時期には水資源に対する要請に対応した形態であっても、新たな要請が生じるとかえって不都合となる場合が認められる。

3) したがって、取・排水システム形態ごとの水利用特性および水環境について分析しておけば、取・排水システムの改変による利害得失を予め予測できることから、水利用の経済性、水資源開発の効率性、河川の水量・水質、取水の水量・水質的な安全性、エネルギー消費量および水環境に関する10の指標を設定して形態ごとの特性を定量化した。この結果は一覧図に整理され、システム形態ごとの特性の比較が可能となった。この図より、取・排水システムの改変を伴う水資源計画を、流域の水循環系の適正化という観点から予め評価することができる。

4) 上記3)の分析から、水循環を明確に考慮に入れた水資源計画の特性として、さらに次のことが知られた。例えば、システム形態ごとの利水安全度は広域水道型が最も低く、伝統的循環型からより高度な循環型になるにつれてより高くなるが、水質事故に対する安全性はその逆であること、あるいは現在の利水計画方式では見込まれていない都市用水のような特定用水の還元を見込むようになると、水供給容量は増加するが利水安全度は低下することが判明した。さらに、河川維持用水は超過渇水に対する安全性を高めること、あるいは循環型システムにおいて水質処理を行って水開発を行うとすれば水供給容量は飛躍的に増加することなどが知られた。

以上の考察は都市化流域を対象としたものであるが、水利用率の低い流域を対象とした検討においても、本章で提示した手法により同様の検討が可能と考えられる。

参考文献

- 1) 丹保憲仁：都市・地域水代謝システムの構造と容量，水道協会雑誌，No. 497, 1976
- 2) 浜口達男・前田論：再生水資源開発に関する基本的考察，第30回建設省技術研究会報告，1976
- 3) 合田健・末石富太郎・住友恒：工業用水計画における水量・水質配分について，土木学会論文報告集，No. 134, 1966
- 4) 三好逸二・関正和・吉川勝秀・朴栄秀：流域における水循環の把握と水資源の配分に関する研究，土木学会論文報告集，No. 269, 1978
- 5) 吉川勝秀・関正和：流域の総合的な水資源の管理に関する研究，土木学会論文報告集，No. 287, 1979
- 6) Okada, N. : Comprehensive Systems Analysis of Area-Wide, Multi-Modal Water Resources Utilization Systems, Doctorate Dissertation, Kyoto Univ., 1976
- 7) 加藤迪：資源からの発想，中公新書，1979
- 8) 山口高志・吉川勝秀：流域の取・排水システムに関する2, 3の考察，土木技術資料，Vol. 21, No. 9, 1979
- 9) 建設省土木研究所：流域の取・排水システムに関する調査，総合治水研究室資料，1977
- 10) Robert, E. B., Hagen, R. M. : Explore the "Energy Economics" of Waste Water Treatment and Reuse, California Water Pollution Control Association, 1978 (吉野・斉藤訳，月刊下水道Vol. 2, No. 1, 1978)
- 11) 建設省河川局河川計画課・土木研究所：河川の流水管理システムに関する研究，第30回建設省技術研究会報告，1976
- 12) 建設省土木研究所：渇水時の水管理に関する計画学的研究，土木研究所資料，No. 1508, 1979
- 13) 浜口達男：利水安全度からみた貯水池容量の決定方法に関する考察，第31回建設省技術研究会報告，1977
- 14) 土木学会編：下水道の今日的展望，土木学会誌，Vol. 64, No. 6, 1979
- 15) 建設省土木研究所下水道部：アメリカ合衆国における下水処理水再利用の現状，土木研究所資料，No. 1161, 1976
- 16) 建設省関東・四国・中国地方建設局企画部：利水経済調査報告書，1980
- 17) 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，資源調査所資料，No. 47, 1977
- 18) 建設省近畿地方建設局河川計画課：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
- 19) 科学技術庁資源調査所：水資源の利用における水質問題と水質制御に関する調査報告，資源調査会報告，No. 72, 1975
- 20) 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
- 21) 建設省関東地方建設局企画課：広域水管理機構調査報告書，1976
- 22) 末石富太郎：用途別給水計画の研究，水道協会雑誌，No. 436, 1971
- 23) 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
- 24) 建設省河川局河川計画課・土木研究所：水循環と水利に関する研究，第34回建設省技術研究会報告，1970
- 25) 岡本雅美：水田農業用水の計画需要量の推定法，水利科学，Vol. 17, No. 2, 1973
- 26) 建設省河川局河川計画課・土木研究所：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
- 27) 友野勝義：水道における拡張事業規模の経済，水道協会雑誌，No. 519, 1977
- 28) 三菱総合研究所：公共土木計画への費用便益分析適用性に関する研究，1977
- 29) 中川芳一：利水安全度の評価について，日本水道コンサルタント研究年報，1979
- 30) 山口高志・吉川勝秀・奥石洋：河川の水質・負荷量に関する水文学的研究，土木学会論文報告集，No. 293, 1980

第4章 超過渇水に関する考察

1. 水利用率の上昇と超過渇水との関係

わが国では、水資源開発の多くが貯水池による流況調整によって行われており、ある確率で生起する渇水（計画渇水）を対象として施設が設計されていることから、利水の安全度は対象とした渇水の超過確率により表現されている。通常の水資源開発計画の利水安全度は、かつては $2/10 \sim 3/10$ とされていたが、最近では $1/10$ が標準とされている^{1), 2)}。

従来の渇水に関する研究では、ある利水安全度をもつ施設を合理的に計画するために、渇水水文量に関して検討を加えたものが多く³⁾⁻¹⁰⁾、水資源計画上は計画超過渇水をほとんど考慮に入れていない¹¹⁾⁻¹⁸⁾。しかし、ある利水安全度で計画された水資源開発施設のもとでは、ある確率で超過渇水が生じ、しかも例えば昭和48年の北部九州での渇水で経験されたように、水利用率の上昇とともに超過渇水による被害が深刻化していることから、最近では渇水時の水管理方式についての研究が進められつつある。すなわち、竹内の研究¹⁹⁾、今村らの研究¹⁾あるいは山中らの研究²⁰⁾では、既存の水供給施設の最適操作ルールや最適節水方式についての検討がなされている。

水利用率と水資源開発計画との関係については、菅原²⁶⁾が必要貯水池容量 S は開発水量 q から自然渇水流量 q_0 を引いた値の自乗に比例して増大することを示している。浜口²⁷⁾は菅原の研究をさらに発展させて利水安全度について検討し、利水安全度 $1/10$ とする貯水池容量と渇水時の水不足率（日を一定とする容量を比較した結果から）利水の安全性を確保するためには水利用率の上昇とともに安全度を変える必要があることを明らかにした。

以上のことから、水利用率が上昇するにつれて超過渇水の問題が重要となることが知られたが、その原因についての詳細な検討は十分に行われていない。また、超過渇水を予め考慮に入れる計画手法に関しては、佐川²⁴⁾が水道料金の検討において数理モデルを提案し、建設省中部地方建設局が超過渇水対策施設について検討しているものの、超過渇水対策施設の規模の決定および適切な利水安全度設定のための理論としては十分なものとはいえない。したがって、本章ではまず超過渇水の生起確率および水利用率と超過渇水時の被害との関係について検討することにより、利水安全度を一定として水資源開発を行った場合、水利用率の上昇とともに超過渇水時の被害が深刻化していく原因を

解明した。この検討から、水利用率の上昇とともに超過渇水を予め考慮に入れた計画が必要となることが示されたので、そのための数理モデルを提案し、事例検討によりモデルの検証を行った。

2. 超過渇水の定義と評価方法

本節では、超過渇水を定義し、それを評価する方法について述べる。

1) 超過渇水の定義

本論文では、超過渇水を次のように定義した。すなわち、超過渇水とは、計画時に定められた施設と操作ルールのもとで、要求される水需要量に対して必要な水量を供給できない状況を生じさせるような、利水施設の供給容量を超過する渇水群を指すものとする。

渇水については、従来から計画（対象）渇水、異常渇水等の呼び名¹⁾があるが、上に述べた明確な定義のもとで、水供給容量を超過する渇水をすべて超過渇水と呼ぶことにする。

2) 超過渇水の代替的な評価方法とその特質

超過渇水は、水不足量とその継続期間により示される。したがって、その評価方法としては、次のようなものが考えられる。一つは水不足量とその継続期間の生起確率で評価するものであり、田瀬⁵⁾、吉川・竹内²⁸⁾らが検討を進めている。あと一つは、渇水時の水不足の程度を積分指標としてとらえるものであり、マスカープ法による渇水補給量指標、不足率・日指標²⁷⁾および渇水時の被害指標で評価するものである。

ここでは、次節において水利用率の上昇による超過渇水の深刻化の説明を行うために、渇水の評価方法を次のように分類しておく。

① 頻度による方法（frequency method）

この方法では、水不足率と継続期間、あるいはそれら二つの積分指標である渇水補給量の生起確率で渇水进行评估する。前者については、治水計画における降雨強度曲線²⁹⁾と等価な概念で、吉川・竹内²⁸⁾がそれらの同時評価を行っている。一方、後者はマスカープ法としてダム計画に広く用いられている^{17), 27)}。

この方法では、ある水利用率のもとでの渇水水文量の評価を行うので、評価の際に必要なものは水需要量と水文量である。以下では、この方法として渇水補給量 S を用いることにする。

② 深刻さの程度による方法（severity method）

この方法では、超過渇水時の水利用の障害の程度（不足率・日指標による）で渇水の評価する。同一渇水の評価においては、この方法は①の方法と等価である。しかし、後に示されるように、ある一定の不足率・日を保つためのダム容量とある超過確率を保つためのダム容量とは異なってくる。この方法では、水需要量・水文量および渇水時のダム操作ルールが与えられる必要がある。

③ 被害による方法 (damage method)

この方法では、超過渇水時に生じる被害で渇水の評価する。評価のためには、水需要量・水文量・渇水被害関数・ダム操作ルール・代替水資源への依存の程度等が与えられる必要がある。被害額の算定は、最近計測が始められた渇水被害額原単位^{1), 22)}やWP (Willingness to Pay) 水単価^{20), 21), 25)}を用いて行う。

以上の①～③の方法は、水資源計画での用いられ方に本質的な違いがあるように思われる。すなわち、①の方法が用いられる場合には、超過渇水が生じるまでを考えていることが多いのに対して、②および③の方法では、超過渇水が生じた後を考えている。

3. 水利用率の上昇に伴う渇水被害の深刻化

ある基準の渇水を対象とした水供給施設のもとでは、必ず供給容量を超過する渇水群が存在する。そこで、まず超過渇水が生起する確率がどの程度であることを示す。次に、利水安全度を一定として水資源開発を行っていけば、水利用率の上昇とともにどのような問題が生じるかを検討する。

1) 超過渇水の生起確率

超過渇水の発生に関しては、次の二つの理由が考えられる。

一つは、確率論における超過確率によって示されるものである。仮に、降雨が全くランダム現象であり、ある確率分布をもっているとする。そして、超過確率 $1/T_1$ (T_1 : return period) で設計した施設を T_0 年間利用したとする。そのとき、計画を超える現象が発生する確率 P_1 は次式で与えられる^{10), 30)}。

$$P_1 = 1 - \left(1 - \frac{1}{T_1} \right)^{T_0} \quad \dots\dots\dots (1)$$

式(1)において、現在の利水計画の基準とされている利水安全度 $1/10$ ($T_1 = 10$ (年)) を与え¹⁾、利用期間 $T_0 = 10$ (年) を代入すると、表-4.1 に示すように、超過渇水の発生する確率 P_1 は 0.65 となる。表-4.1 では、さらに利用年数 10 年間に、return period $T_1 = 20, 50, 100$ (年) といった大規模な渇水にみまわれる確率を求めている。これより、基準とした以上の渇水が生じる確率および大規模な渇

表-4.1 超過渇水の生じる確率 P_1

$T_0 \backslash T_1$	10	30	50	70	90
10	0.651	0.958	0.995	0.999	0.9999
20	0.401	0.785	0.923	0.972	0.990
50	0.183	0.455	0.636	0.757	0.838
100	0.096	0.260	0.395	0.505	0.595

注) T_0 : 利用年数, T_1 : 設計外力のリターン・ピリオド (return period)。

水 (例えば $T_1 = 100$ (年)) にみまわれる確率がわかる。これが、超過渇水が生起することの確率論的な説明である。

あと一つは、限られた期間の統計データにより、超過確率を推定する場合に生じる統計上の誤差 (不確定性) に起因する超過渇水生起の可能性として説明される^{27), 30), 31)}。これに関しては、浜口²⁷⁾が、渇水規模推定に用いるサンプル数と推定値のちがいについて、実績値を用いた数値実験を行っている。一方、Joseph¹⁰⁾、高橋³⁰⁾、石崎³¹⁾、Tschannerl³²⁾により、治水計画における外力に対して同様の検討が行われている。これらの研究は、限られたデータから設計外力を推定する際に生じる誤差に起因した計画超過問題を論じたものである。

2) 超過渇水被害の深刻化

現在の水開発方式のもとでは、水利用率の上昇とともに超過渇水問題が深刻化する。これは、菅原の導いた関係式 $S \propto (q - q_0)^n$ ($n = 2$; q_0 : 渇水流量, q : 利用水量, S : 貯水池容量)²⁶⁾より推測することもできるが、前述の三つの評価方法を用いることにより、より厳密に説明できる。

図-4.1 は、A 河川の 58 年間にわたる流量データ (一級河川の実測データ) を用い³³⁾、三つの評価方法に基づく利水計画でそれぞれ必要とされる貯水池容量と水利用率との関係を示している。この計算は、モデル流域について行われた。モデル流域の取・排水システム、水利用状況および取水のパターン等は、表-4.2 に示すように与えている。これらの前提条件は、多くの流域の比較分析の後に設定したものであり、利水形態の基本的な部分を内包していると考えられる。

図-4.1 では、縦軸が貯水池容量 S である。図中の三本の線は、以下に示す三つの基準のもとで決定されたものである。すなわち、頻度による方法では超過確率を $1/10$ (方法 1)、深刻さの程度による方法では不足率・日を一応 2000 とし、その超過確率を $1/100$ とした (方法 2)²⁷⁾。一方、被害による方法では、超過確率 $1/100$ の渇水に対して水利用率によらず被害率 (総被害額 / 総供給量) を一定と

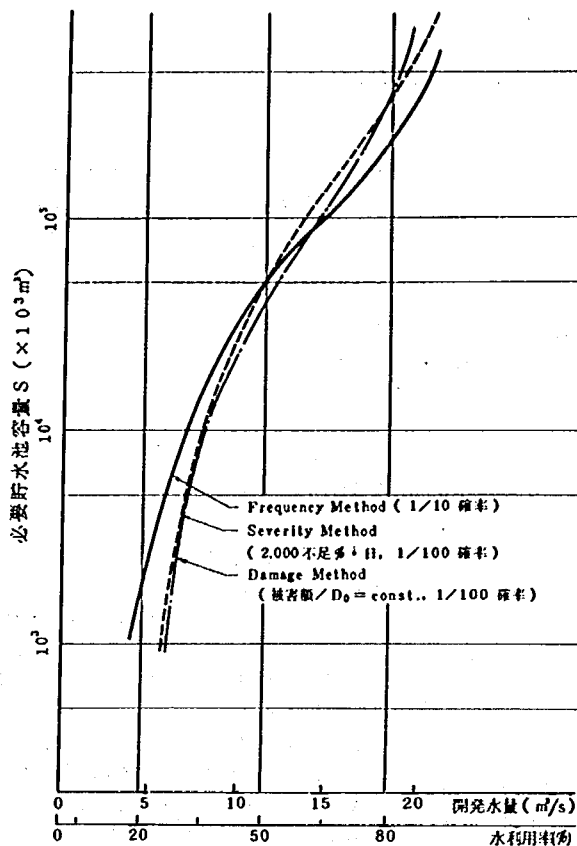


図-4.1 各基準(方法)で必要とされる貯水池容量 S と水利用率との関係

した(方法3)。年平均被害額をとってもほぼ同様な結果を得る。

図-4.1において、①と②および③の方法で計算される必要容量を比較すると次のことがわかる。超過渇水時の水不足に関する②および③の基準を満たそうとすると、水利用率が上昇するにつれて、①の基準で求まる貯水池容量よりもより大きな容量を必要とする。このことは、従来用いられてきた①の基準(1/10の安全度)で水資源開発施設を作っていけば、超過渇水時の被害率や水供給不足率が增大していくことを示している。

超過渇水の問題が深刻化していくのは次の二つの理由によると考えられる。その一つは、水資源開発を流況の平滑化によって行っていくと、平滑化のための補給量が飛躍的に増大すると同時に、ある超過確率の渇水時の水供給不足量も増大していくという水供給施設の特性による。あと一つは水利用の特性に関係している。わが国では、水利用率の上昇が主として渇水被害の大きな都市用水の増加によっており、渇水に対して水利用構造がぜい弱化していくためである。

頻度による方法および深刻さの程度による方法では、これら二つの原因のうち、水供給施設の特性を算定している。

一方、被害による方法では、水供給上の特性と水利用上の特性を含めた形で、超過渇水問題の程度を評価する。図-4.1では、水利用構造を表-4.2に示すように、各用水の比率は同じ(パターンC)ままで水利用総量が増大していくとしている。水利用構造が渇水に対してぜい弱化していけば(すなわち渇水被害が大きな用途の水利用比率が増せば)超過渇水の問題はさらに深刻化すると推定される。

近年における既往の大渇水の程度は、500～8000 不足%・日である¹⁾。

超過渇水を考慮した水資源計画の方法としては、次のような三つの代替的な方法が考えられよう。

①頻度による方法(利水安全度一定)を今までどおり用いるが、その基準をより高める。

すなわち、水利用率の上昇とともに利水安全度の基準をかつての10年第2位、3位から現在の第1位に向上させたように¹⁾、今後さらに例えば15年第1位といったように基準をあげていく。

②通常の水供給施設は現在の基準である10年第1位の渇水に対処しうるように作っていき、超過渇水対策施設をそれに追加して作る。

これは、緊急水備蓄ダム・再生水資源開発施設・地下水利用施設といった施設を、10年第1位より大きな渇水に対処しうるように作っておき、超過渇水時のみにそれを使うという方式である。

③利水施設規模(安全度)を、超過渇水の状況も考慮して適切に定める。

次節において、このような考え方のもとで水資源計画を策定するための新しい計画理論を示す。

4. 超過渇水を考慮する新しい計画理論

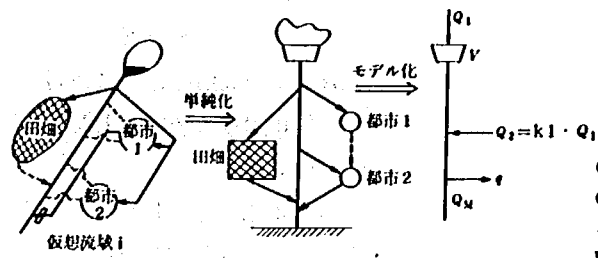
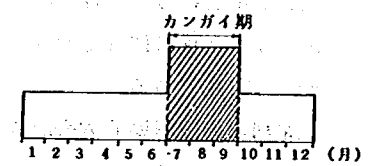
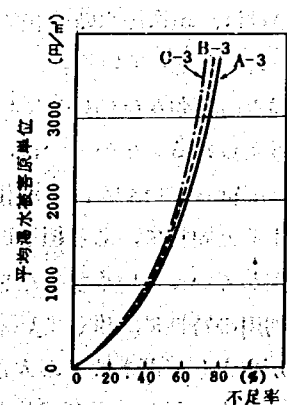
ここでは、超過渇水を考慮する新しい水資源計画手法について述べる。考察を進めるにあたっては、従来の計画手法と対比しながら議論を進める。

1) 水資源計画における基本量

水資源計画における基本量として、本論文では①需要量(水利権量)の関数 D 、②供給量の関数 S 、③計画内と計画超過時の費用関数 c (capital cost)・ m (running cost)④便益関数(水の単価) α 、⑤渇水被害の関数 E 、⑥水文学と需要量とを用いた利水計算で求められる超過渇水の発生確率関数 $Pr(S)$ 、および各生起確率のもとでの水供給不足率 $R(S)$ とその継続期間 $g(S)$ を設定する。

超過渇水時の水不足を示す指標として不足率と継続期間を用いたのは、概念の簡明化と渇水被害原単位が不足率 α とに与えられているためである。水不足%・日はより安定

表-4.2 モデル流域の概要

項目	内 容	補 足																																																																																									
1.流域概要	・流域のモデル化  Q_1 : ダム地点流入量 Q_2 : 残流域流入量 q : 取 水 量 V : 貯水池容量 Q_M : 河道維持流量	流域の構成は概念的に左図のように都市と田畑で構成されていると考える。																																																																																									
2.流域構成要素の比率 (取水比率)	(単位:%) <table><tr><th rowspan="2">パ タ ー ン 要 素</th><th colspan="3">A</th><th colspan="3">B</th><th colspan="3">C</th></tr><tr><th>A-1 非カンガイ期</th><th>A-2 カンガイ期</th><th>A-3 通年平均</th><th>B-1 非カンガイ期</th><th>B-2 カンガイ期</th><th>B-3 通年平均</th><th>C-1 非カンガイ期</th><th>C-2 カンガイ期</th><th>C-3 通年平均</th></tr><tr><td>家 庭</td><td>40</td><td>10</td><td>32.5</td><td>40</td><td>20</td><td>35</td><td>40</td><td>30</td><td>37.5</td></tr><tr><td>業務1</td><td>10</td><td>2.5</td><td>8.125</td><td>10</td><td>5</td><td>8.75</td><td>10</td><td>7.5</td><td>9.375</td></tr><tr><td>業務2</td><td>10</td><td>2.5</td><td>8.125</td><td>10</td><td>5</td><td>8.75</td><td>10</td><td>7.5</td><td>9.375</td></tr><tr><td>工業1</td><td>20</td><td>5</td><td>16.25</td><td>20</td><td>10</td><td>17.5</td><td>20</td><td>15</td><td>18.75</td></tr><tr><td>工業2</td><td>20</td><td>5</td><td>16.25</td><td>20</td><td>10</td><td>17.5</td><td>20</td><td>15</td><td>18.75</td></tr><tr><td>農 業</td><td>-</td><td>75</td><td>18.75</td><td>-</td><td>50</td><td>12.5</td><td>-</td><td>25</td><td>6.25</td></tr><tr><td>計</td><td>100</td><td>100</td><td>100</td><td>100</td><td>100</td><td>100</td><td>100</td><td>100</td><td>100</td></tr></table>	パ タ ー ン 要 素	A			B			C			A-1 非カンガイ期	A-2 カンガイ期	A-3 通年平均	B-1 非カンガイ期	B-2 カンガイ期	B-3 通年平均	C-1 非カンガイ期	C-2 カンガイ期	C-3 通年平均	家 庭	40	10	32.5	40	20	35	40	30	37.5	業務1	10	2.5	8.125	10	5	8.75	10	7.5	9.375	業務2	10	2.5	8.125	10	5	8.75	10	7.5	9.375	工業1	20	5	16.25	20	10	17.5	20	15	18.75	工業2	20	5	16.25	20	10	17.5	20	15	18.75	農 業	-	75	18.75	-	50	12.5	-	25	6.25	計	100	100	100	100	100	100	100	100	100	利水構成要素は家庭、業務(1, 2), 工業(1, 2) および農業である。 それらの取水比率は、A, B, Cの3つのパターンを考えたが、単位水量当りの渇水被害は通年平均でみるとどれも大差はない。したがって、ここではA, B, Cのうち最も都市化されたパターンCを選定した。なお、業務1とは営業停止損失の大きいグループであり、例えば、学校、事務所、飲食店、ホテル、旅館などである。業務2とは、サウナ、鮮魚、豆腐、クリーニング等営業停止損失の小さいグループである。また工業1とは石油化学等停止損失の大きいもの、工業2は紙・パルプのように停止損失の小さいものを指す。
パ タ ー ン 要 素	A			B			C																																																																																				
	A-1 非カンガイ期	A-2 カンガイ期	A-3 通年平均	B-1 非カンガイ期	B-2 カンガイ期	B-3 通年平均	C-1 非カンガイ期	C-2 カンガイ期	C-3 通年平均																																																																																		
家 庭	40	10	32.5	40	20	35	40	30	37.5																																																																																		
業務1	10	2.5	8.125	10	5	8.75	10	7.5	9.375																																																																																		
業務2	10	2.5	8.125	10	5	8.75	10	7.5	9.375																																																																																		
工業1	20	5	16.25	20	10	17.5	20	15	18.75																																																																																		
工業2	20	5	16.25	20	10	17.5	20	15	18.75																																																																																		
農 業	-	75	18.75	-	50	12.5	-	25	6.25																																																																																		
計	100	100	100	100	100	100	100	100	100																																																																																		
3.取水のパターン	・カンガイ期間、非カンガイ期間の設定 																																																																																										
4.利水計算方式	上流にダムを想定し、ダム直下流に維持流量の制約を設け、残流域流入量も考慮した。なお、残流域流入量はダム流入量のk1倍であるとした。また、下流で確保地点を設け、ここにおいて全用水を確保するものとする。																																																																																										
5.その他	・不足日・日の定義 確保不足日・日とは次式で定義されるものである。 $\sum \left(\frac{\text{確保不足量 (m}^3\text{/sec)}}{\text{確保量 (m}^3\text{/sec)}} \right), i: \text{不足日数}$	・渇水被害原単位の例 																																																																																									

した渇水評価指標であるが、渇水被害を算定する場合には、不足率・日指標（あるいは渇水補給量）は渇水被害と一対一に対応しないという欠点がある。

2) 理論の定式化

現在の水資源計画方法および上述の超過渇水を考慮する三つの新しい方法（以上合計4）を、費用便益分析に基づいて定式化する。このうち、後の三つの方法は新しくここで提案するものである。

水資源計画の基本的な考え方（シナリオ）を表-4.3に示す。表-4.3に示す計画の方法は、それぞれ次のことを示している。

●平常時のみ考える（シナリオ1）

これは従来の水資源計画において用いられてきたものであり、ある超過確率の渇水を計画渇水として、それに対処できるような水資源開発施設を設計する。したがって、計画渇水のみを対象としているために、計画を超過する渇水（超過渇水）は考えない。この前提のもとで供給による便益とそのために必要な費用から計画を評価する。以下では、このようにして計画されたものを平常施設と呼ぶ。

●超過渇水時のみを考える（シナリオ2）

平常施設のもとで生じる超過渇水に対処することのみを考える。すなわち、超過渇水対策施設の評価を行うものであり、超過渇水対策施設による被害の軽減（保全便益）あるいはそれによる追加的な水供給の便益と費用から計画を評価する。

●平常時と超過時を合せて考える（シナリオ3）

平常施設の規模および超過渇水対策の規模について、シナリオ1、シナリオ2を同時に考えて評価を行う。したがって、平常時と超過時を含めた総合的な評価を考える。

この時、次のような検討も可能である。すなわち、ダム計画において平常時と超過時を含めて考え、そのもとで最適な規模を決定すること（シナリオ3'）もできる。

●平常施設を与件とし、最適な超過渇水対策を考える（シナリオ4）

これは、シナリオ1を与件として、シナリオ2を追加する場合であり、現在の利水施設のもとで超過渇水対策を実施する場合に用いられる。シナリオ4は、シナリオ3の一つの特殊な場合に相当している。

以上の考え方のもとで、理論的な定式化を行う前に、次のような単純化した前提を置くことにする。

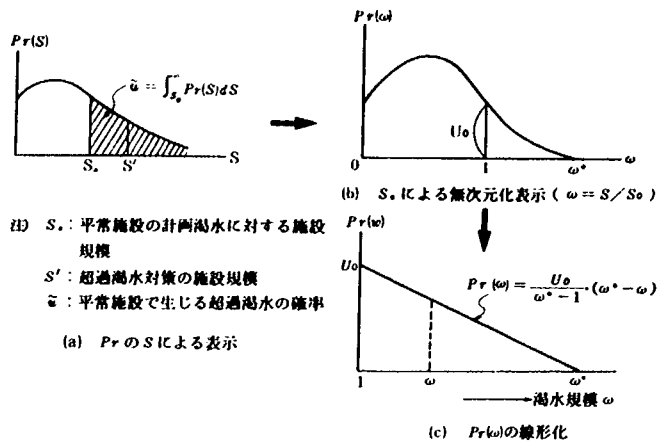
（前提1）：超過渇水の生起確率密度は、それを回避するために必要な貯水池容量 S により表わす。したがって、水需要量 D を与件とすれば、超過渇水の発生確率密度関数は図-4.2(a)に示すようになる。

（前提2）：平常時の水の便益としては、 $M'_1 = \int_0^D \alpha(D) \cdot dD$ （社会的余剰）とする場合²⁴⁾、および $M'_1 = \alpha \cdot D$ （水価値 α 一定）とする場合が考えられる。したがって、水の便益 M'_1 からランニング・コスト b_1 （維持管理費 $m_1^1(S_0)$ と運営費 $m_2^1(D)$ ）を引いた M_1 は、 $M_1 = \int_0^D (\alpha(D) - b_1) \cdot dD$ および $M_1 = \alpha_0 \cdot D - (m_1^1(S_0) + m_2^1(D))$ となる。

表-4.3 水資源計画の考え方に関するシナリオ

考 え 方	内 容	備 考
・ 平常時のみを考える。 (シナリオ1)	$B_0 = (\text{平常時の水便益}) - \frac{(\text{そのための費用})}{\text{平常施設のみ}} \dots\dots\dots (1)$	現在の利水計画におけるコストアロケーション方式は、広い意味で解釈すれば、この式で与えられる。
・ 超過時のみを考える。 (シナリオ2)	$B_1 = (\text{保全便益}) - \frac{(\text{そのための費用})}{\text{超過渇水対策施設のみ}} \dots\dots\dots (2)$ $B_2 = B_1 + (\text{超過渇水対策施設による水供給の便益}) \dots\dots\dots (2')$ $B_2' = (\text{超過渇水対策施設による水供給の便益}) - (\text{そのための費用}) \dots\dots\dots (2'')$ $B_2'' = B_2' - (\text{被害}) \dots\dots\dots (2''')$	超過渇水対策施設のみの評価に限定して考える
・ 平常時と超過時を合せて考える。 (シナリオ3)	$B_3' = B_0' + B_1 \dots\dots\dots (3)$ $B_3 = B_0' + B_2 \dots\dots\dots (3')$ $B_3'' = B_0' + B_2' \dots\dots\dots (3'')$	平常施設の規模および超過渇水対策施設の規模をパラメトリックに変え、optimumを求める。
・ 平常施設を与件とし、最適な超過渇水対策を作る。 (シナリオ4)	$B_4 = B_0'(S_0: \text{given}) + B_1 \dots\dots\dots (4)$ $B_4' = B_0'(S_0: \text{given}) + B_2 \dots\dots\dots (4')$ $B_4'' = B_0'(S_0: \text{given}) + B_2' \dots\dots\dots (4'')$	現状施設を与件としており、シナリオ3の特殊な場合である。現在考えられている経年貯留型のダム計画等を想定している。

注) B_0' は超過渇水時に平常施設より供給される水の便益を含む。



図一 4.2 洪水生起確率密度関数 Pr の模式図

ここに、 m_j^i の添字 $i = 1$ は平常時を示し ($i = 2$: 超過時) $j = 1$ は capital cost ($j = 2$: running cost) を示している。以下では、平常時の水価値 α_0 を一定とする後者の M_1' , M_1 を考える。

(前提 3) : 超過洪水対策のランニング・コスト b_2' は、 $b_2' = m_1^2$ (維持管理費) + m_2^2 (運営費) に分けられる。そして m_1^2 は平常時・超過時にかかわらず必要とされるが、 m_2^2 は超過時に施設を運用する際にのみ必要とされる。

以上の前提のもとで、表一 4.3 に示す水資源計画理論を定式化する。超過便益 (総便益 - 総費用) に基づく費用効果分析 (Benefit・Cost Analysis) を用いるとすれば、表一 4.4 に示す理論式が得られる。これらの式に含まれる算定項目およびそれぞれの項目が考慮される期間を表一 4.5 に示す。

表一 4.4 に示した式は、それぞれ次のことを示している。

式(5)の B_0 は通常の水資源計画の超過便益である。式(6)の B_1 は、超過洪水対策による被害の軽減という保全便益のみを便益としたときの超過便益である。式(7)の B_2 は、超過洪水対策施設による水供給の便益 (単価 α_1) および保全便益を考えた超過便益である。式(8)の B_2' は、超過洪水対策による水供給の便益のみを考えた超過便益である。式(9)の B_2'' は、 B_2' より被害を引いた超過便益である。以上のうち、 $B_1 \sim B_2''$ は超過洪水対策施設の評価のみを考えている。式(10)~(12)の B_3' , B_3 , B_3'' は、平常施設の超過便益 B_0^* に超過洪水対策施設の $B_1 \sim B_2'$ をそれぞれ加えたものであり、平常時と超過時を同時に考えている。

以上の式を用いて次の事項を検討することができる。

① 最適値の決定と超過便益の要因分析

超過便益 $B_i = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ は、変数 X_j が $j=2$ までは図式化することにより関数の形を知るとともに、最適値を求めることができる。すなわち、超過便益 B_i と変数 X_1, X_2 の関係を走査することができる。しかし、 j

>2 の場合には図式化して視覚的に関数形を調べることができないので、いわゆる極値問題としてみる方が有利である。

B_i の極値は、 $\partial B_i / \partial X_j = 0 (j = 1 \sim n)$ を連立して解を求め、ヘッセの行列式により、それが正しい極であるかを探ることになる³⁴⁾。後に示す事例検討では、単純な状況下での最適値の決定および超過便益の要因分析の例を示す。

② 公的な立場での水コスト分析

営利を目的としない公的な立場での水コストは、総支出 = 総便益 (ACルール) の関係より定められる。すなわち、超過便益 $B = 0$ として水コストを算定することが普通である。したがって、上述のそれぞれの計画の考え方のもとで、公企業的な立場から水コストを定めたときの、水コストの違いを知ることができる。

例えば計画内のみを考える (超過洪水を考慮しない) シナリオ 1 において、 $B_0 = 0$ (総支出 = 総便益) とすれば、水コスト C は次式のようになる。

$$C = \frac{c_1(S_0) + m_1^1(S_0) + m_2^1(D)}{D} \quad \dots\dots\dots (13)$$

これは、水コスト = (総費用) / (供給量) であり、通常の公企業の水コスト設定ルールを示している²⁴⁾。

一方、超過洪水時をも考慮したシナリオ 3 の B_3' では、 $B = 0$ として求められる超過時の水コスト C_1 は次のようになる。

$$\begin{aligned} C_1 = & \left[\{ c_1(S_0) + m_1^1(S_0) + m_2^1(D) \} \right. \\ & + \{ c_2(S' - S_0) + m_1^2(S' - S_0) \\ & + \int_{S_0}^{\infty} Pr(S) \cdot R(S) \cdot g(S) \cdot m_2^2(S - S_0) \cdot dS \\ & \left. - \int_{S_0}^{S'} Pr(S) \cdot R(S) \cdot g(S) \cdot E(S - S_0) \cdot dS \right] \\ & / \{ 1 - \int_{S_0}^{\infty} Pr(S) \cdot R(S) \cdot g(S) \cdot dS \} \cdot D \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (14)$$

式(11)において、平常時と超過時の水コストを一定 ($C = C_1 = C'$) とすれば次式を得る。

$$\begin{aligned} C' = & \left[\{ c_1(S_0) + m_1^1(S_0) + m_2^1(D) \} \right. \\ & + \{ c_2(S' - S_0) + m_1^2(S' - S_0) \\ & + \int_{S_0}^{\infty} Pr(S) \cdot R(S) \cdot g(S) \cdot m_2^2(S - S_0) \cdot dS \\ & \left. - \int_{S_0}^{S'} Pr(S) \cdot R(S) \cdot g(S) \cdot E(S - S_0) \cdot dS \right] \\ & / \{ 1 - \int_{S_0}^{\infty} Pr(S) \cdot R(S) \cdot g(S) \cdot dS \} \cdot D \end{aligned}$$

表-4.4 表-4.3 に示すシナリオの定式化

	考 え 方 お よ び 理 論 式
シナリオ 1 : 平常時のみ	$B_0 = (\text{平常時の水便益}) - \frac{(\text{そのための費用})}{\text{平常時の capital cost} + \text{running cost}}$ $= \alpha_0 D - \{ c_1(S_0) + m_1^1(S_0) + m_2^1(D) \} \quad \dots\dots (5)$ $(\text{ } = \{ \alpha_0 D - (m_1^1(S_0) + m_2^1(D)) \} - c_1(S_0) = M_1 - c_1(S_0)) \quad \dots\dots (5')$
シナリオ 2 : 超過時のみ	$B_1 = (\text{保全便益}) - \frac{(\text{そのための費用})}{\text{超過時の capital cost} + \text{running cost}}$ $= \int_{S_0}^{S'} Pr(S) \cdot R(S) \cdot g(S) \cdot E(S - S_0) \cdot dS - \{ c_1(S' - S_0) + m_1^2(S' - S_0) \\ + \int_{S_0}^{\infty} Pr(S) \cdot R(S) \cdot g(S) \cdot m_2^2(S - S_0) \cdot dS \} \quad \dots\dots (6)$ (m_1^2: 維持・管理費, m_2^2: 運営費) $B_2 = B_1 + (\text{超過渇水対策施設による水供給の便益})$ $= B_1 + \alpha_1 \cdot D \cdot \int_{S_0}^{S'} Pr(S) \cdot g(S) \cdot R(S) \cdot dS \quad \dots\dots (7)$ (α_1: 超過時の水単価) $B_2' = (\text{超過渇水対策施設による水供給の便益}) - (\text{そのための費用})$ $= \alpha_1 \cdot D \cdot \int_{S_0}^{S'} Pr(S) \cdot g(S) \cdot R(S) \cdot dS - \{ c_2(S' - S_0) + m_1^2(S' - S_0) \\ + \int_{S_0}^{\infty} Pr(S) \cdot R(S) \cdot g(S) \cdot m_2^2(S - S_0) \cdot dS \} \quad \dots\dots (8)$ $B_2'' = B_2 - (\text{被害})$ $= B_2 - \int_{S'}^{\infty} Pr(S) \cdot R(S) \cdot g(S) \cdot E(S - S_0) \cdot dS \quad \dots\dots (9)$
シナリオ 3 : 平常時と 超過時	$B_3' = B_0^* + B_1$ $= \alpha_0 \cdot \{ 1 - \int_{S_0}^{\infty} Pr(S) \cdot R(S) \cdot g(S) \cdot dS \} \cdot D - \{ c_1(S_0) + m_1^1(S_0) + m_2^1(D) \} \\ + \int_{S_0}^{\infty} Pr(S) \cdot R(S) \cdot g(S) \cdot E(S - S_0) \cdot dS - \{ c_2(S' - S_0) + m_1^2(S' - S_0) \\ + \int_{S_0}^{\infty} Pr(S) \cdot R(S) \cdot g(S) \cdot m_2^2(S - S_0) \cdot dS \} \quad \dots\dots (10)$ $B_3 = B_0^* + B_2$ $= \alpha_0 \cdot \{ 1 - \int_{S_0}^{\infty} Pr(S) \cdot R(S) \cdot g(S) \cdot dS \} \cdot D - \{ c_1(S_0) + m_1^1(S_0) + m_2^1(D) \} \\ + \int_{S_0}^{S'} Pr(S) \cdot R(S) \cdot g(S) \cdot E(S - S_0) \cdot dS - \{ c_2(S' - S_0) + m_1^2(S' - S_0) \\ + \int_{S_0}^{\infty} Pr(S) \cdot R(S) \cdot g(S) \cdot m_2^2(S - S_0) \cdot dS \} + \alpha_1 \cdot D \cdot \int_{S_0}^{S'} Pr(S) \cdot g(S) \cdot R(S) \cdot dS \quad \dots\dots (11)$ $B_3'' = B_0^* + B_2' \quad \dots\dots (12)$
シナリオ 4 : 平常時と 超過時	これはシナリオ 3 において、平常時の規模 S_0 を固定したものであり、理論式は式(10)~(12)と同じである。

表-4.5 便益・費用・被害項目とその算定領域

	項 目	平 常 時	超 過 時 (異 常 時)	
		0	1	(超過洪水対策) の施設規模 ω ω^*
便 益	1. 平常施設による平常時の便益	→		
	2. 平常施設による便益の期待値	→		→
	3. 超過洪水対策施設による超過時の便益の期待値		→	→
費 用	4. 平常施設の建設費・維持管理費・運営費	→		
	5. 超過洪水対策施設の建設費および維持管理費	→		→
	6. 超過洪水対策施設の運営費		→	→
洪水被害	7. 平常・超過洪水対策施設の補給不足による洪水被害			→
	8. 平常施設の補給不足による洪水被害		→	→

前記の C_1 , C' は、超過洪水を考慮した場合の水コストを与える。超過洪水を考慮しないとすれば、 C' は式(13)の C に一致する。

ここで求められた式(13)による水のコストは、ACルールにより算定されたものであり、平常的な水資源の一つの価値と考えられる。現実には水はこのような価値に近い料金で利用されている^{24), 34)}。

しかし、式(14)、および(15)に示すように、超過洪水を考慮に入れた場合の水価値と入れない場合の価値には差があり、公企業が超過洪水対策費用を加えて水コストを算定するようになると(被害軽減額は無視する)、水コストが上昇することがわかる。すなわち、水利用率が上昇するにつれて、水資源開発効率の低下によるコストの上昇に加えて、超過洪水対策施設費用のためにさらにコストが上昇することが予測される。

5. 理論の応用

提案した理論を用いてケース・スタディを行い、超過洪水を考慮する水資源計画の分析を行う。

1) 概 要

ケース・スタディの前提と概要は以下のとおりである。

①分析の目的は、提案した理論を具体的かつ簡明に示すことであり、超過洪水を考慮に入れたときの水供給施設規模に着目する。すなわち、超過洪水対策施設の規模設定に関する分析を中心とし、水利用率と最適施設規模との関係についても考察する。

②対象とした流域は表-4.2に示したものと同一である。この時、水需要量は水利用率により表現する。各用水の比

率は同表に示されるパターンCとし、水利用率によらず一定とする。

③用いる基本量の関数(テーブル関数)は、線形近似したものを用いる。線形化したことによる影響はパラメトリックな感度分析により把握する。

④洪水の規模は、それを回避するのに必要な貯水池容量 S により表現し、それを現状の貯水池容量 S_0 で無元化した ω で記述する(図-4.2(b), (c))。

⑤分析に用いる線形化した諸量の関数形およびそれらに含まれる諸係数・定数は表-4.6のように定義した。分析に用いた値を表-4.7(a), (b)に示す。表-4.7(a)の諸定数・係数は、前述のA川のデータを用いた利水計算により算定されたものである。一方、表-4.7(b)に示す費用 $c_1 \cdot m_1^1 \cdot m_1^2$ については、平均的な費用を設定した。平常時の水便益(単価) α_0 は、設定した費用に対して総支出=総収入として定められたものである³³⁾。被害関数は、土木研究所によって計測された利水用途別の節水率と被害額との関係を想定流域に適用したものであり¹⁾、線形化したときの係数 a は4000円/㎡である。超過時に追加供給される水の便益 α_1 (単価)は、その計測事例がないので、 $\alpha_1=100 \sim 4000$ 円/㎡の範囲で変化させて計算結果を調べることとした。

表-4.5に示される理論式の各項は、表-4.8に示す線形化したものを用いる。

2) 分析の内容(シナリオ)

超過便益関数 $B_0 \sim B_3$ のうちから、代表的なものとして式(6)の B_1 、式(7)の B_2 、および式(11)の B_3 の三つを主としてとりあげる。

これらを用いて行った計算の意図(計算シナリオ)を表

表-4.6 線形化した関数とパラメータ

	項目あるいは記号	関数あるいは記号の意味	備 考
(1) 基本関数	① 渇水発生確率	$P_r(\omega) = \frac{U_0}{\omega^* - 1} (\omega^* - \omega)$ $1 \leq \omega \leq \omega^*$	②これは ω という規模の渇水が発生したときの節水率である。したがって、 ω 規模の渇水時には $D \cdot R(\omega)$ だけ不足する。すなわち、 $D \cdot (1 - R(\omega))$ だけ供給可能である。 ③これは ω という規模の渇水が発生したときの渇水期間である。年間割合で与える。(1/12 ならば平均渇水期間が一月と考える) ④節水率の関数で与える。
	② 節 水 率	$R(\omega) = K \cdot (\omega - 1)$ $1 \leq \omega \leq \omega^*$	
	③ 渇 水 期 間 の年間割合	$g(\omega) = b \cdot$ $1 \leq \omega \leq \omega^*$	
	④ 渇水被害原 単位(円/㎡)	$\delta(\omega) = a \cdot R(\omega) = a \cdot K(\omega - 1)$ $1 \leq \omega \leq \omega^*$	
(2) パラメーター	U_0	$\omega = 1$ のときの発生確率	U_0 , ω^* は水利用率ごとに与える。
	ω^*	考えるべき渇水の最大規模	
	b	係数(上述の(1)参照)	
	K	"	
	a	"	
(3) 費用に関する デ ー タ	c_1 円/㎡	平常施設の建設費単価	
	c_2 "	超過渇水対策施設の建設費単価	
	m_1^1 "	平常施設の維持・管理費	
	m_2^1 "	" 運営費	
	m_1^2 "	超過渇水対策施設の維持・管理費	
	m_2^2 "	" 運営費	
	α_0 "	平常時の水利用便益	
	α_1 "	超過時の "	
(4) そ の 他 の デ ー タ	D ㎡/s	想定流域の水需要量	
	N "	年間の秒数(定数 = $365 \times 24 \times 60^2$)	

表-4.7 (a) 利水計算より与えられる諸量

ケース	水利用率 (%)	計画レベル	開 発 量 q (㎡/s)	貯水池容量 (㎡)	U_0	ω^*	b	K
1	20	1/10	8	17×10^6	0.29	1.69	0.077	0.85
2	50	1/5	15	100×10^6	0.45	1.88	0.55	1.00
3	50	1/10	15	117×10^6	0.33	1.60	0.89	1.54
4	50	1/20	15	130×10^6	0.22	1.45	0.52	1.90
5	80	1/10	20	460×10^6	0.19	2.04	1.71	1.50

表-4.7 (b) 費用・便益に関する諸量

(円/㎡)

	平 常 施 設 (平 常 時)		超過渇水対策施設 (超 過 時)	
建 設 費	c_1	80	c_2	60
維持管理費	m_1^1	10	m_2^1	15
運 営 費	m_1^2	10	m_2^2	15
水利用便益	α_0	100	α_1	100 ~ 4000
渇水被害原 単位	a	4000		

ー4.9に示す。同表には、以下の検討で一応の標準とした係数・定数の値および感度分析による変動幅を示した。各計算シナリオの考え方は、次のとおりである。

●計算シナリオ1では、標準ケースのパラメータのもとで、理論式に基づいた計算を行い、超過便益 B_1 , B_2 , B_3 を求める。そして、計算結果の解釈の方法を示す。この計算の時点において、超過渇水時の水価値についての感度分析を行う。水利用率80%, パラメータは標準ケースである。

●計算シナリオ2では、流域の水利用率が上昇していく

表-4.8 便益・費用・被害の定式化

① 渇水を考えない場合の平常時の平常施設による利益
$N \cdot \alpha_0 \cdot D$ $(N \cdot \alpha_0 \cdot D)$
② 平常施設による平常時および超過時の便益
$N \cdot \alpha_0 \cdot D \left[\underbrace{1}_{\text{平常時}} - \underbrace{\int_1^{\omega^*} Pr(x) \cdot g(x) dx}_{\text{超過渇水時}} + \underbrace{\int_1^{\omega^*} Pr(x) \{1 - R(x)\} \cdot g(x) dx}_{\text{超過渇水時の補給}} \right]$ $\left(N \cdot \alpha_0 \cdot D \left\{ 1 - \frac{r}{12} (\omega^* - 1)^4 \right\} \right)$
③ 超過時の超過渇水対策施設による便益
$N \cdot \alpha_1 \cdot D \left[\underbrace{\int_1^{\omega} Pr(x) \cdot R(x) \cdot g(x) dx}_{\omega \text{ 以内}} + R(\omega) \underbrace{\int_{\omega}^{\omega^*} Pr(x) \cdot g(x) dx}_{\omega \text{ 以上}} \right]$ $\left(N \cdot \alpha_1 \cdot D \cdot \frac{r}{12} \left\{ 2(\omega - 1)^4 + (\omega - 1)^3 (-3\omega + \omega^* + 2) + (\omega - 1)(\omega^* - 1)^3 \right\} \right)$
④ 平常施設の建設費および維持管理・運営費
$N \cdot D (c_1 + m_1 + m_1^2)$ $(N \cdot D (c_1 + m_1 + m_1^2))$
⑤ 超過渇水対策施設の建設費および維持管理費
$N \cdot D \cdot R(\omega) \cdot (c_2 + m_2)$ $(N \cdot D \cdot K \cdot (c_2 + m_2) (\omega - 1))$
⑥ 超過渇水対策施設の超過時運営費
$N \cdot m_2^2 \cdot D \left[\underbrace{\int_1^{\omega} Pr(x) \cdot R(x) \cdot g(x) dx}_{\omega \text{ 以内}} + R(\omega) \underbrace{\int_{\omega}^{\omega^*} Pr(x) \cdot g(x) dx}_{\omega \text{ 以上}} \right]$ $\left(N \cdot m_2^2 \cdot D \cdot \frac{r}{12} \left\{ 2(\omega - 1)^4 + (\omega - 1)^3 (-3\omega + \omega^* + 2) + (\omega - 1)(\omega^* - 1)^3 \right\} \right)$
⑦ 超過時の渇水被害額 (ω 以上の渇水が対象になる)
$N \cdot D \int_{\omega}^{\omega^*} Pr(x) \cdot \{R(x) - R(\omega)\} \cdot \{\delta(x) - \delta(\omega)\} \cdot g(x) \cdot dx$ $\left(N \cdot D \cdot \frac{K \cdot a \cdot r}{60} \cdot (\omega^* - \omega)^4 \cdot (3\omega^* + 2\omega - 5) \right)$
⑧ 平常施設のみによる場合の平常時～超過時の被害額
$N \cdot D \int_1^{\omega^*} Pr(x) \cdot R(x) \cdot g(x) \cdot \delta(x) \cdot dx$ $\left(N \cdot D \cdot \frac{K \cdot a \cdot r}{60} \cdot (\omega^* - 1)^5 \right)$
$\text{ここに } r = \frac{K \cdot b \cdot U_0}{\omega^* - 1.0}$

注) 下段の〔 〕内は線形化した場合の計算式を示す。

表-4.9 計算シナリオと定数

計算シナリオ (標準ケース)	1. B_1, B_2, B_3 の 形状定数	2. 水利用率を定数 (計画レベル一定)	3. 要因分析 (Bのうちのわけ 分析)	4. 便益関数変更
(1) 水文学的 パラメータ U_0 ω α_1 α_2 α_3 表-4.7(a)	(同 左)	(同 左)	(同 左)	(同 左)
(2) 費用パラメータ c_1 m_1 c_2 m_2 表-4.7(b)	(同 左)	(同 左)	(同 左)	(同 左)
(3) 水 便 益 パラメータ $a_0 = 100 \text{ 円/日}$ $a_1 = 4000$ 表-4.7(c)	(同 左)	(同 左)	(同 左)	(同 左)
(4) 漏水被害 パラメータ $\alpha = 4000 \text{ 円/日}$	(同 左)	(同 左)	(同 左)	(同 左)

場合を想定し、超過確率 1/10 の漏水を対象として平常施設を作るものとして、水利用率 20, 50 および 80 % での最適な超過漏水対策施設規模を求めることにより、水利用率と超過漏水対策の必要性との関係を分析する。パラメータは標準ケースである。

●計算シナリオ 3 では、超過便益関数 B に含まれる各項の値とそれが B にどのように寄与しているかを示す。水利用率 80 %、パラメータは標準ケースである。

●計算シナリオ 4 では、表-4.10 に示す 7 つの評価関数を設定し、超過便益関数のとり方による最適規模の違いを分析する。水利用率 80 %、パラメータは標準ケースである。

表-4.10 代替的な評価式

評価式	表-4.4 に示す項目による表示
B_0	① - ④
B_0^*	② - ④
B_1	⑧ - ⑦ - ⑤ - ⑥
B_2	$B_1 + ③$
B_2'	③ - ⑥ - ⑥
B_3	$B_0^* + B_2$
B_3'	$B_0^* + B_2'$

3) 結果と考察

a) 各計算シナリオに対する考察

①計算シナリオ 1

水利用率 80 %、平常施設の計画レベル (安全度) 1/10 とした場合について、 B_1, B_2, B_3 の計算を行った結果を図-4.3(a), (b)に示す。縦軸は超過便益 B、横軸は超過漏水

施設の規模 ω ($\omega = S/S_0$ であり、平常施設の規模で無次元化) を示している。 B_2, B_3 については、超過漏水施設により超過時に追加的に供給される水の単価 α_1 をパラメトリックに 100 ~ 4000 (円/ m^3) の範囲で変化させている。

図-4.3(a)より、保全便益に基づく超過便益 B_1 でみると、超過漏水対策施設の規模 ω に関して極大点が存在する。したがって、この点 ω と 1.50 に対応する超過漏水対策施設は、経済的に最も妥当性を有するものと見なせる。この場合の施設規模は、表-4.6 に示される定義式より次のようになる。

$$\begin{aligned} R(\omega) \cdot D &= K \cdot (\omega - 1) \cdot D \\ &= 1.50 \cdot 0.50 \cdot D \\ &= 0.75 \cdot D \end{aligned}$$

また、節水期間 $g(\omega) \cdot 365$ は次のようになる。

$$\begin{aligned} g(\omega) \cdot 365 &= b \cdot (\omega - 1) \cdot 365 \\ &= 1.18 \cdot 0.50 \cdot 365 \\ &= 220 \text{ (日)} \end{aligned}$$

すなわち、平常施設で供給している水量の 75 % を 220 日間供給できる超過漏水対策施設 (平常施設のもとで 220 日間にわたり 75 % の節水を必要とする超過漏水を対象とした施

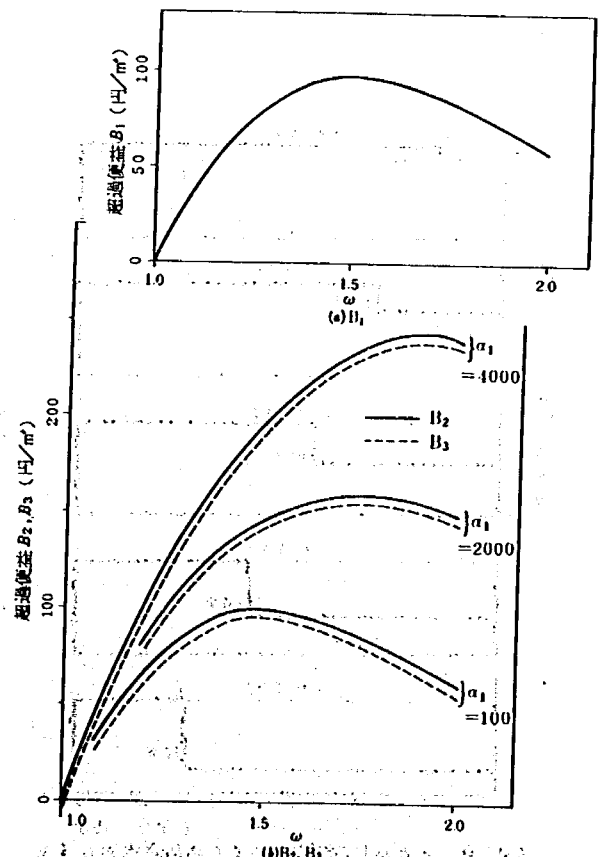


図-4.3 計算シナリオ 1: 超過便益 $B_1 \sim B_3$ (水利用率 80 %, 計画レベル 1/10)

設)を作れば、超過便益 B_1 を最大にできることを示している。そのような施設が対象とする渇水は、超過確率でみると約1/50程度である。

各 ω に対応する渇水の程度を図-4.4(a), (b)に示す。図-4.4(a)は水利用率80%, 計画レベル1/10の場合のものである。図-4.4(b)は計算を行うその他のケースの例として、水利用率50%の場合を示している。

超過渇水時に超過渇水対策施設により供給される水の便益に保全便益を加えたものから費用を引いた超過便益 B_2 についてみるときは、超過渇水時に追加供給される水の価値を知る必要があり、 B_3 についても同様である。しかし、そのような水の価値についての計測はほとんど行われていないことから、図-4.3(b)では超過時に供給される水の単価 α_1 を100~4000(円/m³)の範囲で変化させた。今仮に $\alpha_1 = 4000$ (円/m³)とすれば、 $\omega \approx 1.9$ で B_2 が極大値をとる。したがって、 B_1 と B_2 では、最も効果的な規模が異なることがわかる。

B_3 については、図-4.3(b)に示されるように B_2 とほぼ同様の結果を得た。 B_2 と B_3 がほぼ同じ値となっているのは、ほぼ総収入(水コスト×給水量)=総支出(トータル費用)というルール(ACルール)により、平常時の水単価 α_0

が定められているので、水供給便益と費用($c_1 + m_1 + m_2$)が相殺されるためである。

以下の検討では、被害原単位($a = 4000$ 円/m³)を考慮して、一応 $\alpha_1 = 4000$ 円/m³を標準ケースとして設定した。これは、渇水被害が超過渇水時の水の価値の一つの目安を与えると考えたからである。

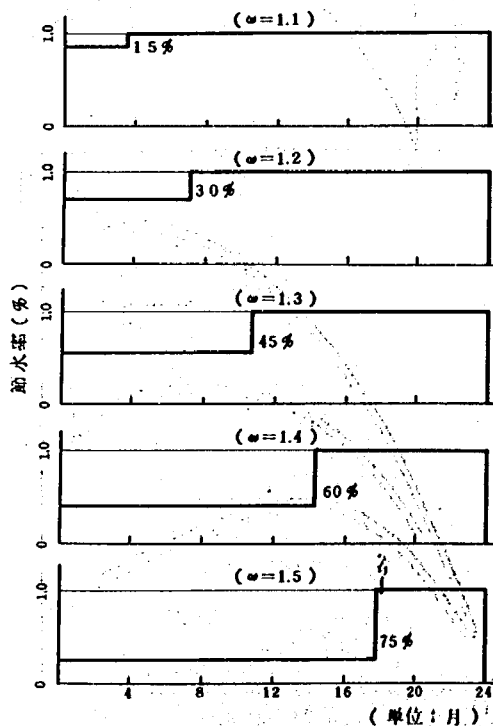
②計算シナリオ2

図-4.5には、水利用率を変化させたとき(平常施設の計画レベルは1/10)に、 ω_{opt} と B_1 の関係がどのようになるかが示されている。同図より、定性的な傾向として、水利用率の低い段階(例えば20%)では、超過渇水対策を行えば、超過便益 B が負となることから、水利用率が低い段階では超過渇水対策は必要でないこと、および水利用率がある程度以上(図では約50%以上)になるとその必要性が生じることがわかる。

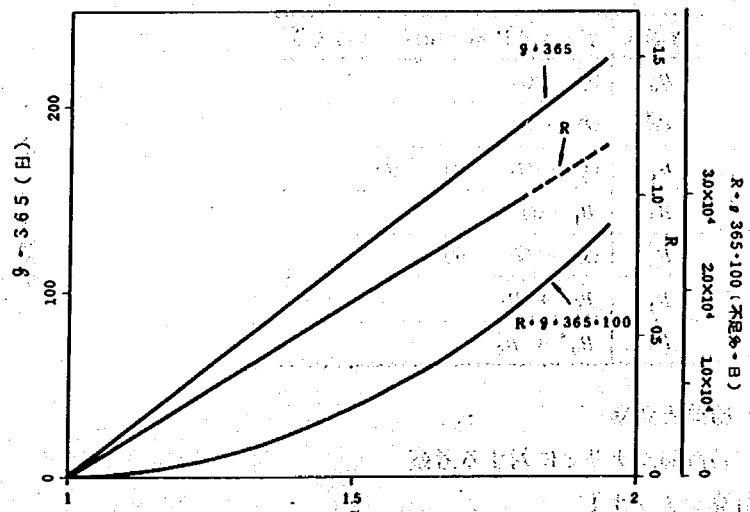
水利用率と超過渇水対策施設の必要性に関するより厳密な分析を行うには、水利用率と各パラメータの関係を正確に与える必要がある。

③計算シナリオ3

図-4.6には、平常施設の計画レベル1/10, 水利用率80%の場合について、超過便益関数 B に含まれる各項の内訳(寄与の程度)を示した。ただし、このときのパラメータは標準ケースである。同図より、各項の B に対する寄与の程度を知ることができる。



(a) R , g と ω との関係その1(水利用率80%)



(b) R , g , $R \cdot g$ と ω との関係その2(水利用率50%)

図-4.4 節水率 $R(\omega)$, 節水期間 $g(\omega)$, 不足日 $R \cdot g \cdot 365 \cdot 100$ と ω との関係

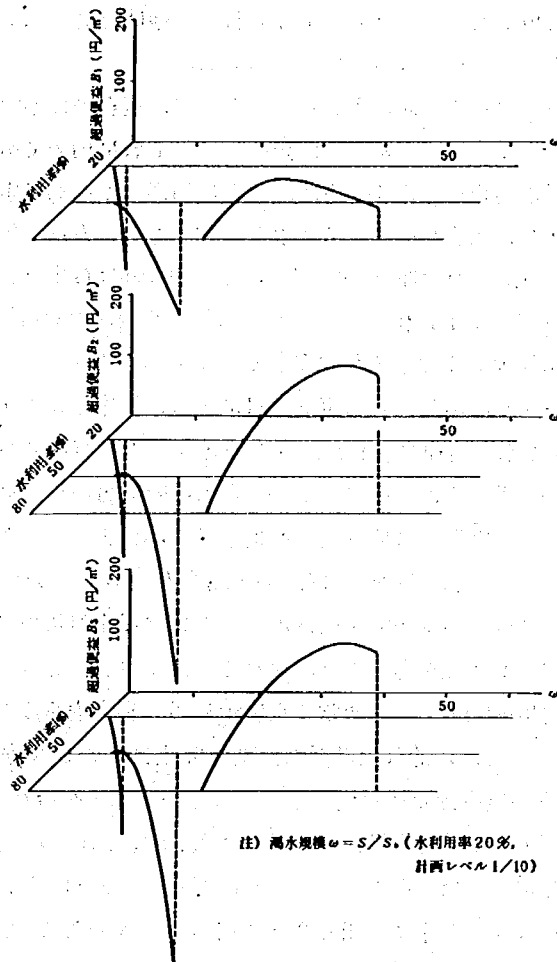


図-4.5 計算シナリオ2：水利用率と超過便益 B の関係
(計画レベル1/10, $\alpha_0=100$, $\alpha_1=4000$, $a=4000$)

④計算シナリオ4

超過便益関数として表-4.10に示したような種々のものを設定し、超過便益 B を計算したものが図-4.7である(水利用率80%, 平常施設の計画レベル1/10)。同図より、評価の考え方によって最適規模がどの程度異なるかがわかる。

b) 全般的な考察

上述の検討は、現実の水供給・水利用構造を単純化した想定流域を対象としたものであり、その結果は以下に示すように解釈されるべきであろう。

① 超過漏水対策の必要性やその効果について行った分析結果は、水資源計画において超過漏水を考慮に入れる方法を示すとともに、提案したモデルの有効性を検証している。

② 水供給施設の最適操作、および最適節水ルールを考慮に入れた場合には、節水率、節水期間および被害関数が

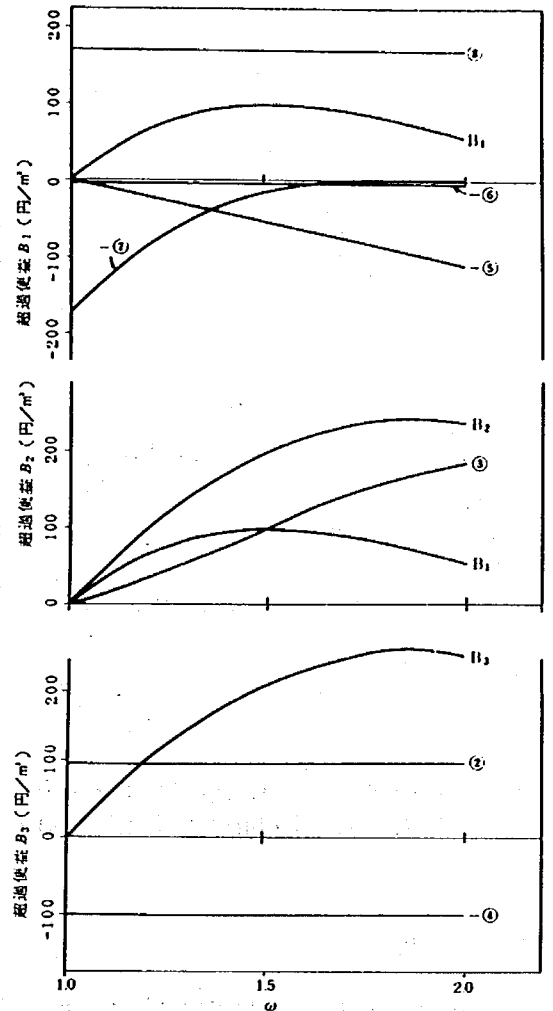


図-4.6 計算シナリオ3：超過便益 B の要因分析
(水利用率80%, 計画レベル1/10)

異なるだけであり、上に示したものと同様の検討が可能である。

③ 現実の流域を対象とした場合には、本論文では単純化して取り扱った諸量が厳密に与えられる(計測上の問題が生じる可能性はありうるが)ので、同様の手順により超過漏水を考慮に入れた検討が可能である。

④ 提案した費用便益モデルにより最適な利水安全度を定めるとすれば、流域の特性に応じてそれぞれ異なったレベルが選定され、また同一流域内でも水資源への需要圧力の強さ、あるいは被害構造に応じて利水部門別に異なった計画レベル(利水安全度)が選定されることが予想される。

⑤ 本論文では、超過漏水を考慮に入れた水資源計画手法の検討を主眼としたことから、事例検討では諸量をすべて線形近似し、単純化して取り扱った。諸量の設定に関しては、超過漏水対策施設の費用、超過漏水時の水の価値についての厳密な調査が今後の課題である。

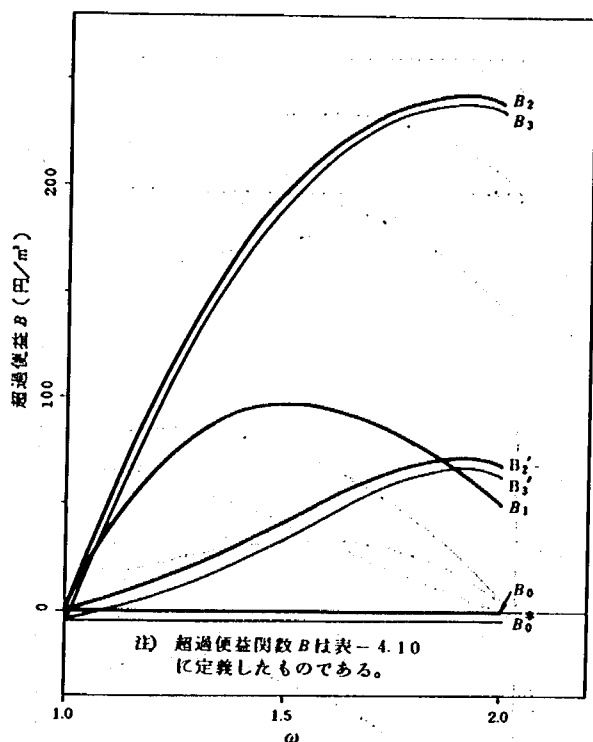


図-4.7 計算シナリオ4：超過便益関数のとり方による最適規模の違い(水利用率80% 計画レベル1/10)

6. ま と め

本章では超過渇水の問題について検討した。主な結果は以下のとおりである。

① 計画で対象とした渇水規模と耐用年数とを用いて超過渇水の生起する確率を算定し、例えば利水安全度 1/10 の施設では、10 年間に 65% の確からしさで超過渇水が生じることを示した。

② モデル流域で、超過確率のみを対象とする貯水池容量 S_1 、水不足%・日を対象とする容量 S_2 および渇水被害率(=総被害額/供給水量)を対象とする容量 S_3 を算定した結果を比較することにより、渇水被害率を増加させないために必要とされる容量 S_2 および S_3 は、水利用率の上昇とともに現在の計画方式で求められる S_1 に比較してより大きくなることが知られた。したがって、利水安全度を一定とする現在の方式で水資源開発を行っていけば、水利用率の上昇とともに渇水時の被害が深刻化することが判明した。

③ 超過渇水時の被害が深刻化する理由の一つは、流況を調整して水開発を行う施設の特性によっており、水利用率の上昇とともに渇水補給量が飛躍的に増大し、したがって超過渇水時の水不足量も飛躍的に増大するためである。あと一つは、近年の水利用率の上昇が渇水被害原単位の犬

きな都市用水需要量の増大によっており、地域社会が渇水被害をより受け易くなっているためである。

④ 超過渇水を考慮に入れた計画として、現在の標準的な利水安全度で通常の水資源開発を行い、それに加えて超過渇水対策施設を準備する方法、および超過渇水をも考慮して適切な利水安全度を定めて水資源開発を行う方法を想定し、そのための数理モデルを提案した。モデルは費用便益分析に基づいて定式化されたものであり、超過渇水対策施設の最適規模および最適利水安全度を求めることができる。

⑤ モデル流域における事例検討により、提案したモデルは超過渇水を考慮に入れた計画を策定する上で有用であることを確認することができた。さらにこの検討から、水利用率が低い段階では超過渇水対策施設は必要とせず、現在の基準である利水安全度 1/10 の水開発が妥当であったこと、および水利用率が 50% 前後になると超過渇水対策施設が経済的に妥当性をもつようになることが示された。例えば、水利用率 80% では、通常の水供給施設の利水安全度を 1/10 とすると、最適な超過渇水施設の規模は超過確率約 1/50 程度の超過渇水に対処しうるものという結果を得た。

⑥ 現実の流域で超過渇水を考慮に入れた計画について検討する場合には、提案したモデルは渇水時の最適水管理ルールを検討する手法と組み合わせて用いるべきである。管理ルールのシナリオ分析を行うことにすれば、事例検討と同様の分析が可能である。

参 考 文 献

- 1) 建設省土木研究所：渇水時の水管理に関する計画学的研究，土木研究所資料，No. 1508，1979
- 2) 建設省九州地方建設局：福岡市渇水実態調査，1978
- 3) Hudson, H. E., Hazan, R. : Drought and Low Streamflow, Handbook of Applied Hydrology (Edition-in-Chief: Ven Te Chow); McGraw-Hill Inc., 1964
- 4) 長尾正志：貯水池をもつ河川の渇水確率について，京都大学防災研究所年報11号B，1968
- 5) 田瀬則雄：渇水評価への連の理論の応用，地理学評論，Vol. 50, No. 8, 1977
- 6) Jackson, B. B. : Markov Mixture Models for Drought Lengths, Water Resources Research, Vol. 11, No. 1, 1975
- 7) Brutsaert, W., Nieber, J. L. : Regionalized Drought Flow Hydrographs From a Mature Glaciated Plateau, Water Resources Research, Vol. 13, No. 3, 1977

- 8) Gupta, V. K., Duckstein, L. : A Stochastic Analysis of Extreme Droughts, Water Resources Research, Vol. 11, No. 2, 1975
- 9) Askew, A. J., Yeh, W. W-G., Hall, W.A. : A Comparative Study of Critical Drought Simulation, Water Resources Research, Vol. 7, No. 1, 1971
- 10) Joseph, E. S. : Frequency of Design Drought, Water Resources Research, Vol. 6, No. 4, 1970
- 11) 広瀬利雄 : 水資源開発計画における利水の安全度について (1), (2), 水温の研究, Vol. 14, No. 5, 6, 1971
- 12) 室田明・江藤剛治・吉岡正道 : 水文資料に起因する水資源計画の信頼度について, 土木学会論文報告集, No. 222, 1974
- 13) 宮田信一・竹内清文 : 利水安全度に関する一考察, 第32回建設省技術研究会報告, 1978
- 14) 藤吉三郎 : 利水計画の安全度に関する二, 三の考察, 土木学会誌, Vol. 56, No. 11, 1971
- 15) 中川芳一 : 利水安全度の評価について, 日本水道コンサルタント研究年報, 1978
- 16) 南部三郎ほか : 利水計画における安全度に関する一考察, 第26回建設省技術研究会報告, 1972
- 17) 中川芳一 : マスカーブ法による利水安全度の概略評価, 日本水道コンサルタント研究年報, 1978
- 18) 広田泰久 : 利水の安全度について, 第24回建設省技術研究会報告, 1970
- 19) 竹内邦良 : 貯水量の累加損失係数を用いた貯水池群の最適操作手法, 土木学会論文報告集, No. 222, 1974
- 20) 山中敦・永田瑞穂・細見寛 : WP法による被害の計測と渇水時水管理への応用について, 第33回建設省技術研究会報告, 1979
- 21) 浜口博司 : 渇水時における節水についての一考察, 水資源に関するシンポジウム前刷集, 1977
- 22) 建設省関東・四国・中国地方建設局企画部 : 利水経済調査報告, 1980
- 23) 建設省土木研究所 : 渇水被害の計測について, 土木研究所資料, No. 1502, 1979
- 24) 佐川直人 : 渇水を考慮した水道料金制の検討, 水資源に関するシンポジウム前刷集, 1977
- 25) 建設省中部地方建設局 : 耐渇水性水配分計画検討業務報告書, 1979
- 26) 菅原正巳 : 水の利用率と貯水池の大きさ, 水利科学, Vol. 12, No. 60, 1968
- 27) 浜口達雄 : 利水安全度からみた貯水池容量の決定方法に関する考察, 第31回建設省技術研究会報告, 1977
- 28) 吉川秀夫・竹内邦良 : 渇水持続曲線の性質とその応用, 土木学会論文報告集, No. 234, 1975
- 29) 岩井重久・石黒政義 : 応用水文統計学, 森北出版, 1970
- 30) 高橋浩一郎 : モンテ・カルロ法による河川の計画高水流量の推定を巡る研究, 水利科学, Vol. 14, No. 5, 1970
- 31) 石崎勝義 : 超過外力と河川計画, 土木技術資料, Vol. 17, No. 4, 1975
- 32) Tschannerl, G. : Designing Reservoirs with Short Streamflow Records, Water Resources Research, Vol. 7, No. 4, 1974
- 33) 建設省土木研究所総合治水研究室 : 超過渇水を考慮した水資源計画に関するケース・スタディ報告書, 1980
- 34) 笠原皓司 : 微分積分学, エイエンス社, 1974
- 35) 東京都主都圏整備局 : 水のコスト分析(Ⅱ), 1973
- 36) Millan, J. : Drought Impact on Regional Economy, Hydrology Paper, Colorado State University, Colorado, 1972
- 37) WMO Exective Committee : Drought, Special Environmental Report No. 5, World Meteorological Organization, 1975
- 38) 志村博康 : 異常渇水と河川水利計画, 水利科学, Vol. 23, No. 129, 1979
- 39) 今村瑞穂・関正和・中村昭 : 渇水の構造分析と流水管理への適用, 土木技術資料, Vol. 21, No. 9, 1979
- 40) 長尾義三 : 経済的な海岸構造物の規模決定法について, 港湾, Vol. 41, No. 7, 1964
- 41) 吉野文雄・吉川勝秀 : 土地利用の変化に起因する洪水災害変化の分析と治水対策の評価, 土木技術資料, Vol. 22, No. 2, 1980
- 42) Grigg, N. S., Helweg, O. J. : State-of-the-Art of Estimating Flood Damage in Urban Areas, Water Resources Bulletin, Vol. 11, No. 2, 1975

第5章 流域から排出される汚濁負荷量に関する考察

1. 水資源計画における水環境の取り扱い

水資源計画において最も初期に水環境が意識されたのは、取水水質に関してであろう。わが国では、かつては清れつな河川水が取水できたし、水浄化技術が向上していることから、飲料水の多くが河川水によって供給されている。しかし、その後工業排水や都市排水によって河川水質が悪化し、下流での取水に支障をきたしたり、あるいは河川水質が悪化したためにその改善が問題となり、汚濁負荷の排出源と河川水質との関係を知る必要が生じた。そのために、Streeter・Phyllipsの方法に基づく調査あるいはより直接的に流達率を測定する調査が行われるようになった。その代表的なものとして、全国の十数河川を対象とした建設省の調査¹⁾があり、その結果に基づいて下水道の計画指針²⁾が作られている。そして、原単位・流達率法により汚濁負荷排出源と河川水質が関係づけられ、下水道整備や大口排水源における水質規制が実施されるようになり、数多くの河川で河川水質の改善が認められるようになっている。

このような対策の実施にもかかわらず、例えば琵琶湖・瀬戸内海・霞ヶ浦・東京湾といった停滞性水域の水環境が悪化しつつある。この原因は、停滞性水域に流入してくる総汚濁負荷量である。水利用率の上昇とともに、水需要量が増大して、排出される汚濁負荷量も増大する。したがって、水利用率の上昇した流域では、水資源計画においても、新たな水環境の問題として流域から排出される負荷量の規制を考える必要が生じている。しかし、従来の

水資源計画では低流況時の河川水質を対象としていたために、総汚濁負荷量の問題が十分に考慮されておらず、出水時を含む汚濁負荷量の流出特性に関する調査・研究は十分に行われていない。

したがって、本章ではまず汚濁負荷量の流出特性を解析して、負荷量の多くが降雨流出に対応して流出していることを示すとともに、従来の低流況時を対象とした取り扱いでは総流出負荷量の一部分しか考慮されておらず、降雨・流量といった水文学的要因を考慮した新たな取り扱いが必要であることを明らかにした。次に、水文学的な要因を考慮して流出する汚濁負荷量を計算するモデルを提案し、それによる推定精度を示した。また、一般に河川水質の測定は月に1回程度しか行われていないことから、限られた水質サンプルから総流出負荷量を推定する方法を示し、推定精度を明らかにした。以上の検討を行った後、低流況時には従来の原単位・流達率モデルを用い、出水時には水文学的なモデルを用いる汚濁負荷量の算定式を提示した。このモデルを用いることにより、停滞性水域の水質保全計画を合理的に取り扱いうことが示される。

2. 河川水質・負荷量の変動特性³⁾⁻⁶⁾

流域から排出される汚濁負荷量の実態を知るには、従来から調査されてきた低水流量相当時の特性の外に、負荷量を流送する降雨流出（降雨、流量）との関係を明らかにしておく必要がある。したがって、まず従来の調査・研究では必ずしも十分に調べられていない出水時の汚濁負荷量流

表-5.1 対象河川名、水質項目、観測方法等

河 川	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 年 (S 47~51)	*	水道局	濁度・KMnO ₄ 消費量・NH ₄ -N・ABS・BOD
猪 名 川	②	"	"	"	滝山浄水場	"	濁度・KMnO ₄ 消費量・NH ₄ -N・Cl
多 摩 川	③	"	"	" **	調布堰玉川浄水場	"	濁度・KMnO ₄ 消費量・BOD・NH ₄ -N・EC・DO
園 部 川	④	"	1時間ごとの観測による流量コンボジット	1 年間 (S 47)	木川町・園部橋	建設省	COD・T-P・TOC ケルダール窒素
恋 瀬 川	⑤	"	"	"	石岡市・愛郷橋	"	COD・T-P・TOC ケルダール窒素
山 王 川	⑥	"	"	"	石岡市・山王橋	"	COD・T-P・TOC ケルダール窒素

* 磯島・庭窪・柴島の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。

出特性を解析した。解析に用いた水質、流量および降雨データを表-5.1に示した。この解析によって得られた主要な結果を以下に示す 3)~6)。

1) 汚濁負荷量 Q_s および水質 C と流量 Q との関係

河川水質 C と流量 Q との関係は、平均的にみると $C \propto Q^n$ で近似される 7)~9)。この式において $n > 0$ である水質項目は汚濁型、 $n \approx 0$ の場合には中間型、 $n < 0$ の場合には希釈型の水質項目と呼ぶことができる。図-5.1に、淀川を例とした水質 C および負荷量 Q_s と降雨流出との対応関係を示す。一般に、同一河川・同一水質項目に対してもべき数 n は観測時間間隔のとり方によって多少異なる。観測時間間隔を変えたときの C および Q_s と Q との関係を、対象とした全河川について示したものが表-5.2である。

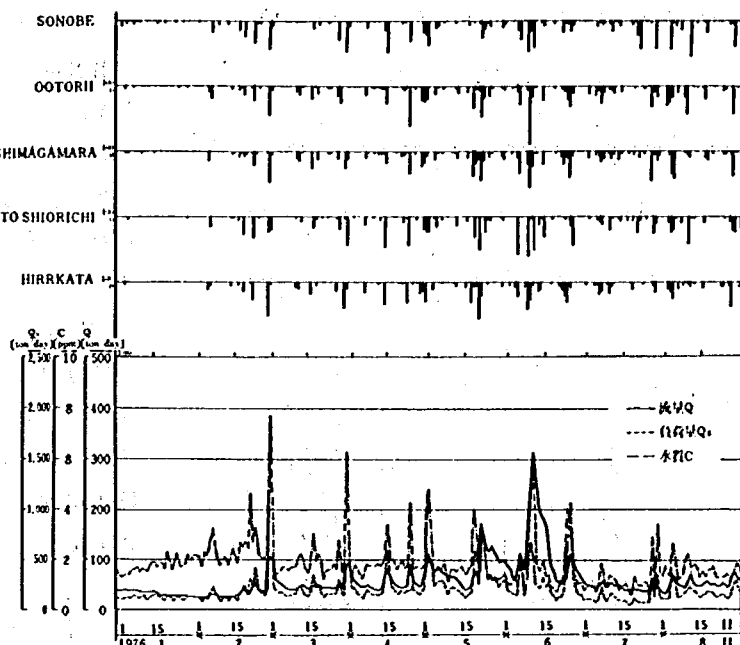


図-5.1(a) ポルトグラフの例(河川①, BOD)

ii) 低流況時と出水時に流出する負荷量の比率

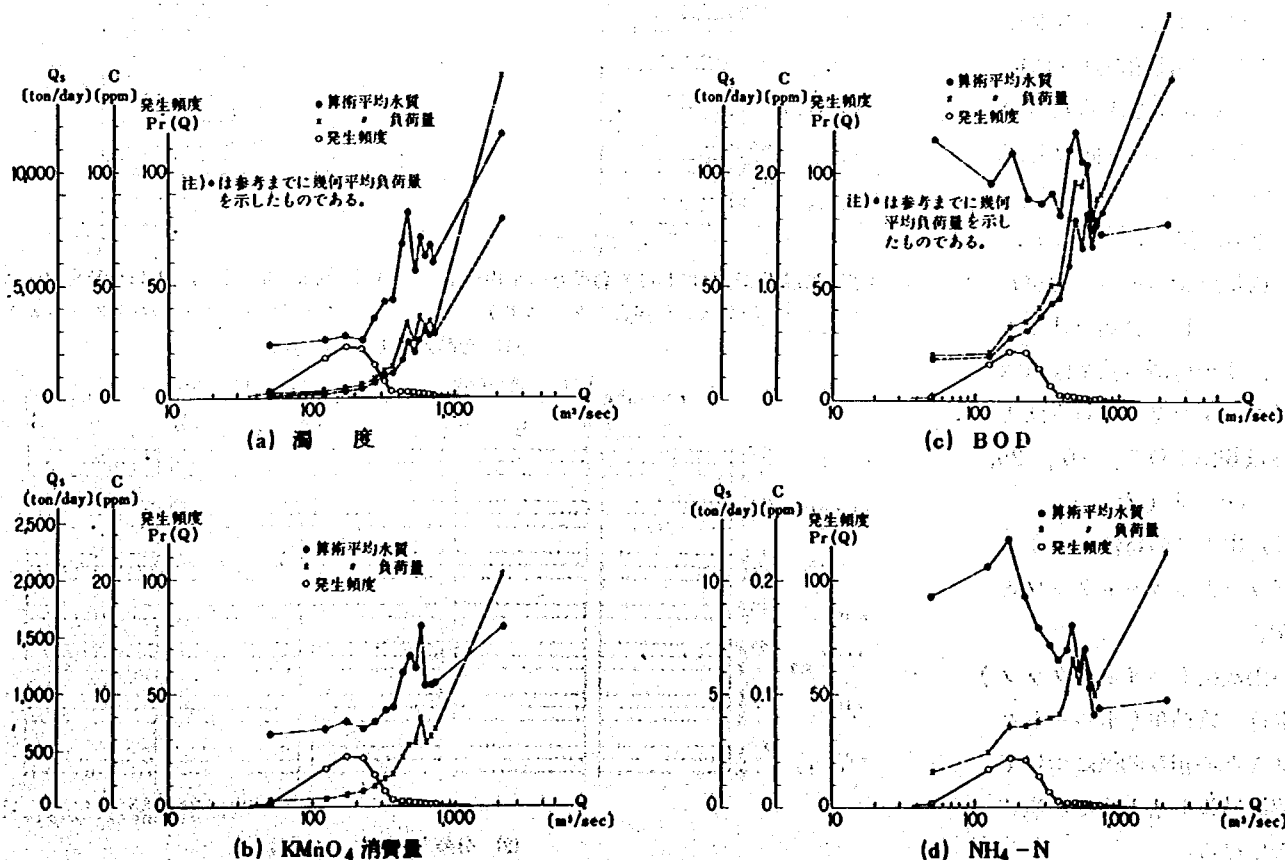


図-5.1(b) 流量の発生頻度と平均水質・負荷量(河川①)

表-5.2 Q_s あるいは $C \sim Q^n$ としたときの n の値

水質項目	日変化		月変化 (複数河川)	流域規模別 (複数河川)
	出水時 (河川①のみ)	日データによる 回帰式より		
濁度	$Q_s \sim Q^{0.25}$ $C \sim Q^{1-2}$	$Q_s \sim Q^{1.6-1.9}$ $C \sim Q^{0.5-0.9}$	$Q_s \sim Q^2$ $C \sim Q$	$Q_s \sim Q^2$ $C \sim Q^{0.6}$
KMnO ₄ 消費量	$Q_s \sim Q^{1.5-2}$ $C \sim Q^{0.5}$	$Q_s \sim Q^{1-1.2}$ $C \sim Q^{0-0.2}$	$Q_s \sim Q$ $C \sim Q^0$	$Q_s \sim Q^2$ $C \sim Q^{0.6}$
BOD	$Q_s \sim Q^{1.5}$ $C \sim Q^{0-0.5}$	$Q_s \sim Q^{0.6-0.9}$ $C \sim Q^{0.3-0.4}$	$Q_s \sim Q$ $C \sim Q^0$	$Q_s \sim Q^{1-1.5}$ $C \sim Q^{-0.1}$
NH ₄ -N	$Q_s \sim Q^{1-2}$ C (明確な関係なし)	$Q_s \sim Q^{1.1-1.2}$ $C \sim Q^{-0.6-0.1}$	$Q_s \sim Q^{0.5-1}$ $C \sim Q^{-0.5-0}$	$Q_s \sim Q^{0.5}$ $C \sim Q^{-0.2}$
TOC	—	$Q_s \sim Q^{1-1.1}$ $C \sim Q^{0.1-0.3}$	$Q_s \sim Q$ $C \sim Q^{-0.5-0}$	$Q_s \sim Q$ $C \sim Q^{0.1}$
T-P	—	$Q_s \sim Q^{0.7-1.1}$ $C \sim Q^{-0.3-0}$	$Q_s \sim Q$ $C \sim Q^0$	$Q_s \sim Q$ $C \sim Q$
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	—	$Q_s \sim Q^{0.7}$ $C \sim Q^{-0.3}$	$Q_s \sim Q^{0.7}$ $C \sim Q^{-0.3}$	—

注) これらの式を得るために使用したデータの期間や年度は必ずしも整合がとれていない。したがって、定性的な Q_s 、 C と Q の関係をみるためのものである。

・波形のちがいを(相関解析による分析)

出水時のハイドログラフに比べ、ポルトグラフは一般に先鋭であり、このことは流量・水質・負荷量の自己相関係数および相互相関係数を求めることにより明確にすることができる。淀川を例として、それらの自己相関係数を求めたものが図-5.4である。降雨および流量と水質・負荷量との相互相関係数が図-5.5である。図-5.4および5.5において、流量 Q に関するものと各水質項目に関するものの低減特性を比較すると、ポルトグラフがハイドログラフに比較して先鋭であることを確認することができる。さらに、図-5.5により、各水質項目が先行降雨および当日降雨に対して汚濁型であるか希釈型であるかを判別することもできる。

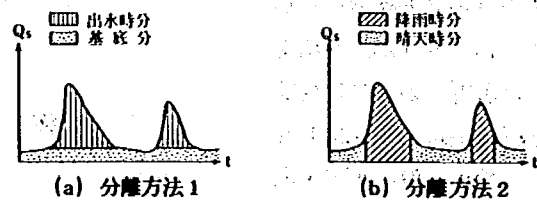


図-5.2 分離方法の概念図

河川の汚濁負荷量は定常的に流出している負荷量と、降雨流出に対応して流出する負荷量に分けられる。図-5.2に示すような二種類の基準に従って、その比率を求めたものが図-5.3である。同図より、水質項目によって異なるが、降雨流出に伴って流出している負荷量が相当多いことがわかる。ただし、分離の基準として、(1)の分離方法では低水流量を、また(2)の分離方法では流量規模上位5、10、25、50、70%とした。

iii) 出水時の特性(ハイドログラフとポルトグラフとの関係)

降雨流出(ハイドログラフ)と水質・負荷量(ポルトグラフ)との相互関係についての解析結果をまとめると次のようになる。

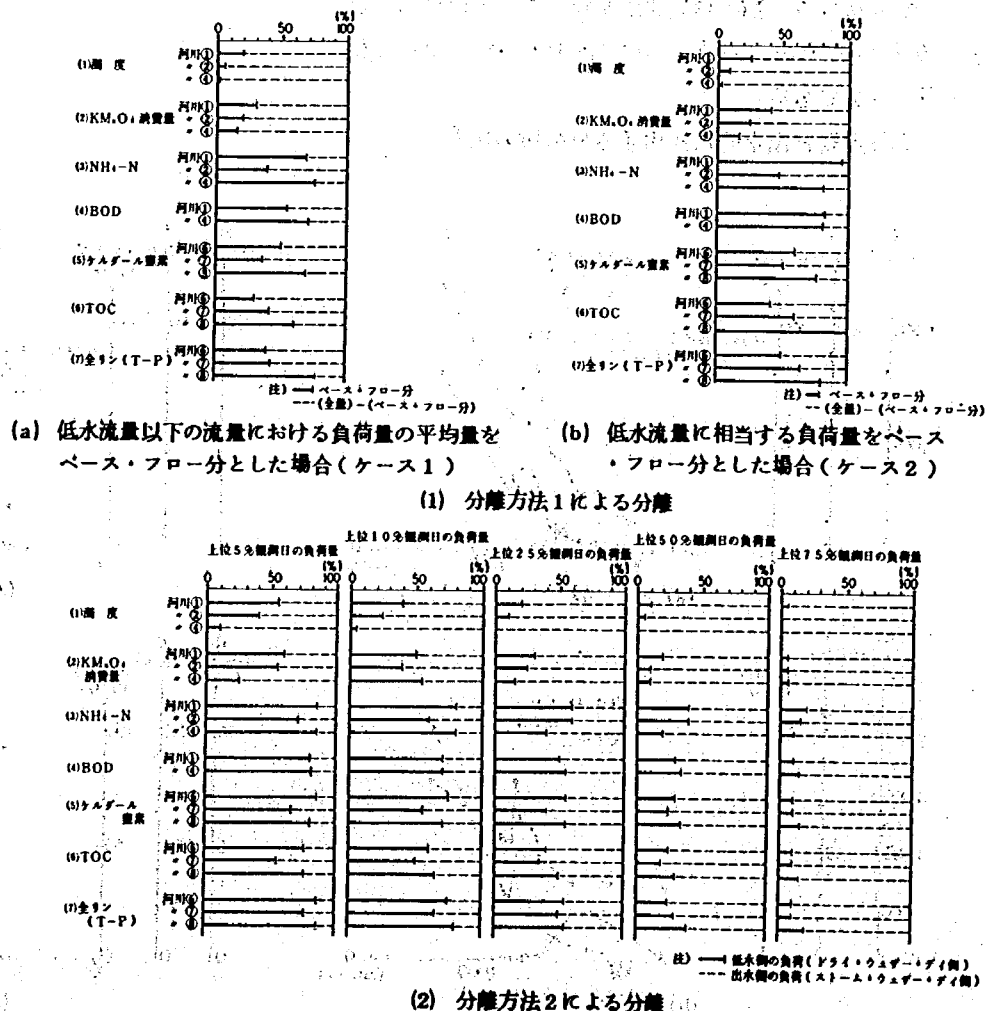


図-5.3 汚濁負荷量の分離結果

・ループ特性（単一出水時の特性）

上記の相関解析で示されたハイドログラフとポルトグラフの位相のずれのために、単一出水時の流量と水質・負荷量の関係はループを描く。淀川の濁度についてのループ特性を図-5.6に示す。このような特性は他の水質項目についても同様にみられる^{4), 10)}。

・連続出水時の特性

ある規模の流量に対応した流出負荷量および水質は、先行する降雨（あるいは先行晴天日数）によって異なる。その一例として、淀川の濁度およびBODについて、前5日間に $250\text{m}^3/\text{sec}$ を超える孤立したピーク出水があった場合、および無かった場合のピーク流量と水質・負荷量のピーク値との関係を図-5.7に示す。このような特性は他の河川および水質項目についても同様にみられ、先行する出水がある場合には、次の出水時の負荷量はそれが無い場合に比較して減少する^{3), 5)}。

・汚濁負荷量流出特性の模式化

以上の特性解析の結果を総合することにより、出水時における汚濁負荷量の流出特性は図-5.8に示すように模式化される。すなわち、単一出水においては増水時と減水時で Q_0 および C と Q との関係が異なる。さらに、先行出水（あるいは先行晴天日数）により同じ規模の流量に対する Q および C の値が異なる。ただし、その違いの程度は水質項目によって異なり、水質項目によってはこの特性をオーダ的に無視できるものがある。

・長期データによる流出特性の分析

多摩川における17年間の毎日観測データをもとにして、経年的な負荷量流出特性を調べると、図-5.9のようになる。同図より、濁度・ KMnO_4 消費量・ECのように、水質項目によっては、その年の降雨流出量により負荷量が大きく変化することがわかる。一方、 $\text{NH}_4\text{-N}$ のように、経年的に流出負荷量に変化を傾向は認められるが、降雨流出量によらず、その量がほぼ定まっていると推定されるもの（負荷量の供給に限りがあるもの）がある。これは汚濁

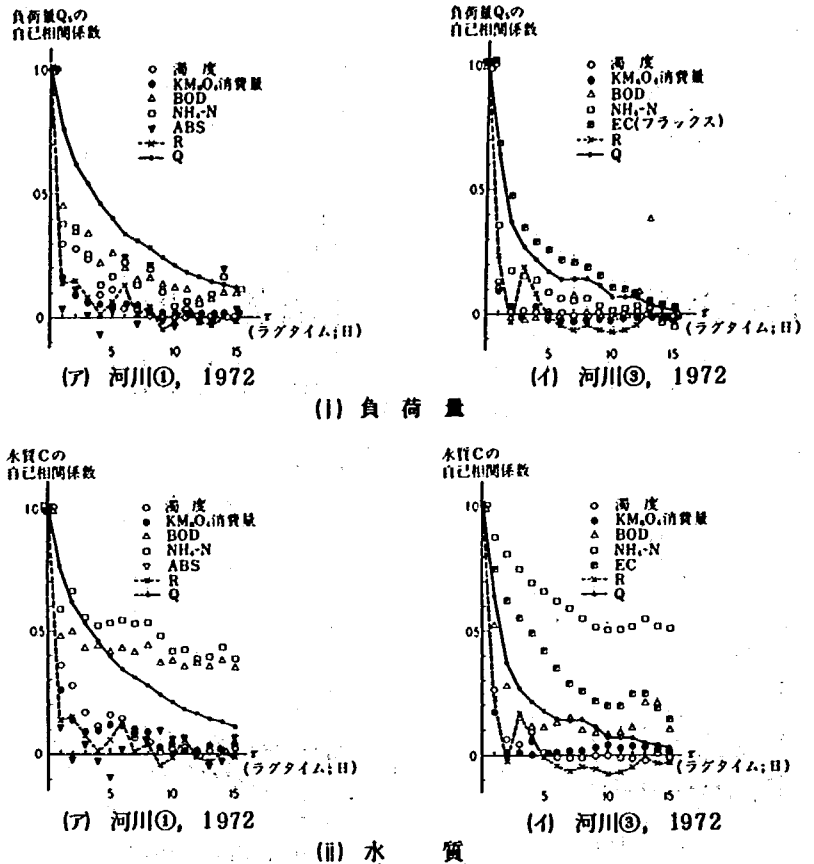


図-5.4 負荷量・水質の自己相関係数

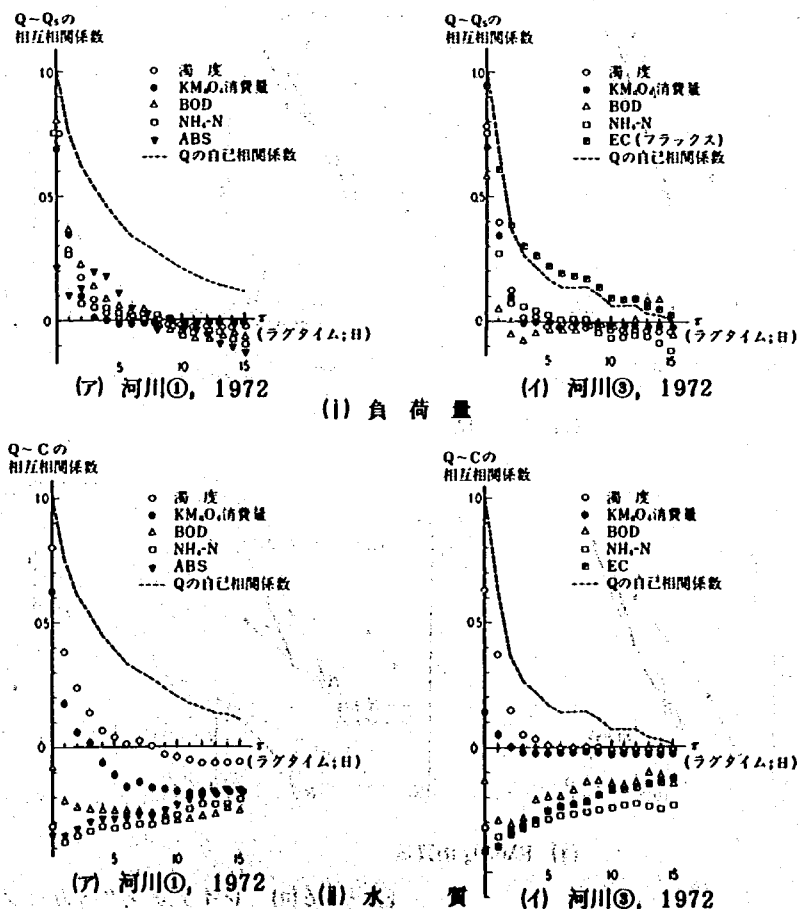


図-5.5(a) 流量と負荷量・水質の相互相関係数

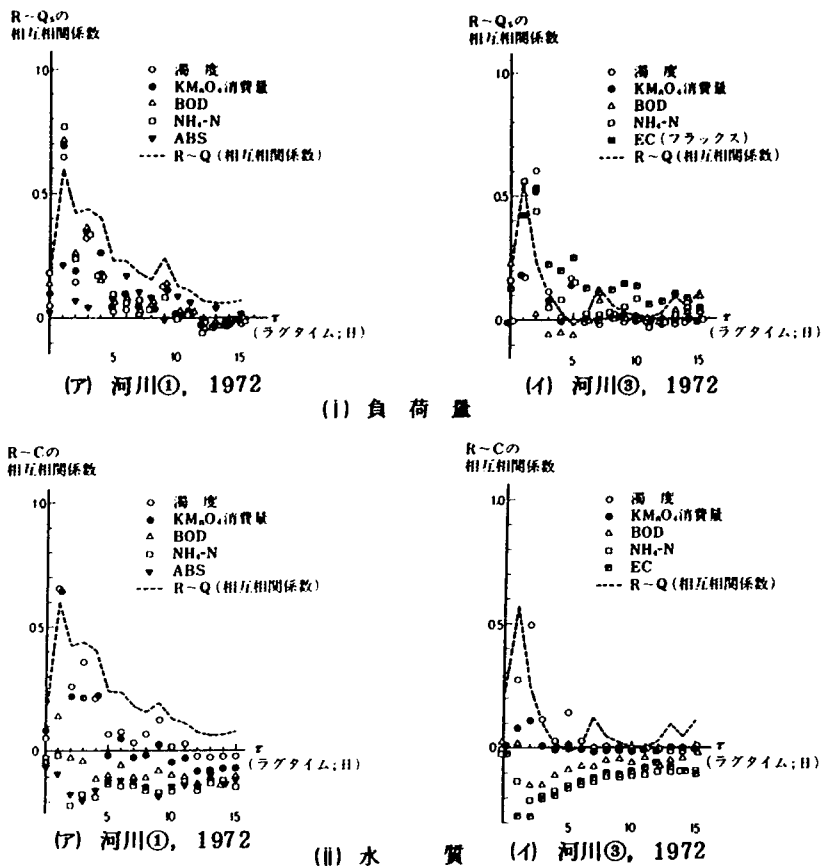


図-5.5(b) 降雨と負荷量・水質の相互相関係数

負荷量の供給と関係していると思われる。

・流量および流域指標と流出汚濁負荷量との関係

図-5.10 には、流出汚濁負荷量と流量（比流量）および流域指標との関係を示す。同図より、流出する汚濁負荷量は流量に強く規定されていることがわかる。ここに示した以外の水質項目についてもほぼ同様の傾向が認められる³⁾。前述の Q_s および C と Q との関係、および流域指標との関係についての解析から、汚濁負荷流出量の支配要因は表-5.3 のようになると推測される^{3), 5)}。

以上に汚濁負荷流出特性の概要を示したが、詳細な分析については文献 3)~6) に示されている。ここで得られた結果を考慮して汚濁負荷の流出特性を整理すると次のようになる。

① 流出する汚濁負荷量は降雨、流量といった水文学的要因に強く規定される。すなわち、個々の出水時においては流量が大きくなったときに多くの負荷量が流出しており、また年間単位でみると、濁度 (SS) や KMnO_4 消費量 (COD) は数倍流出する。

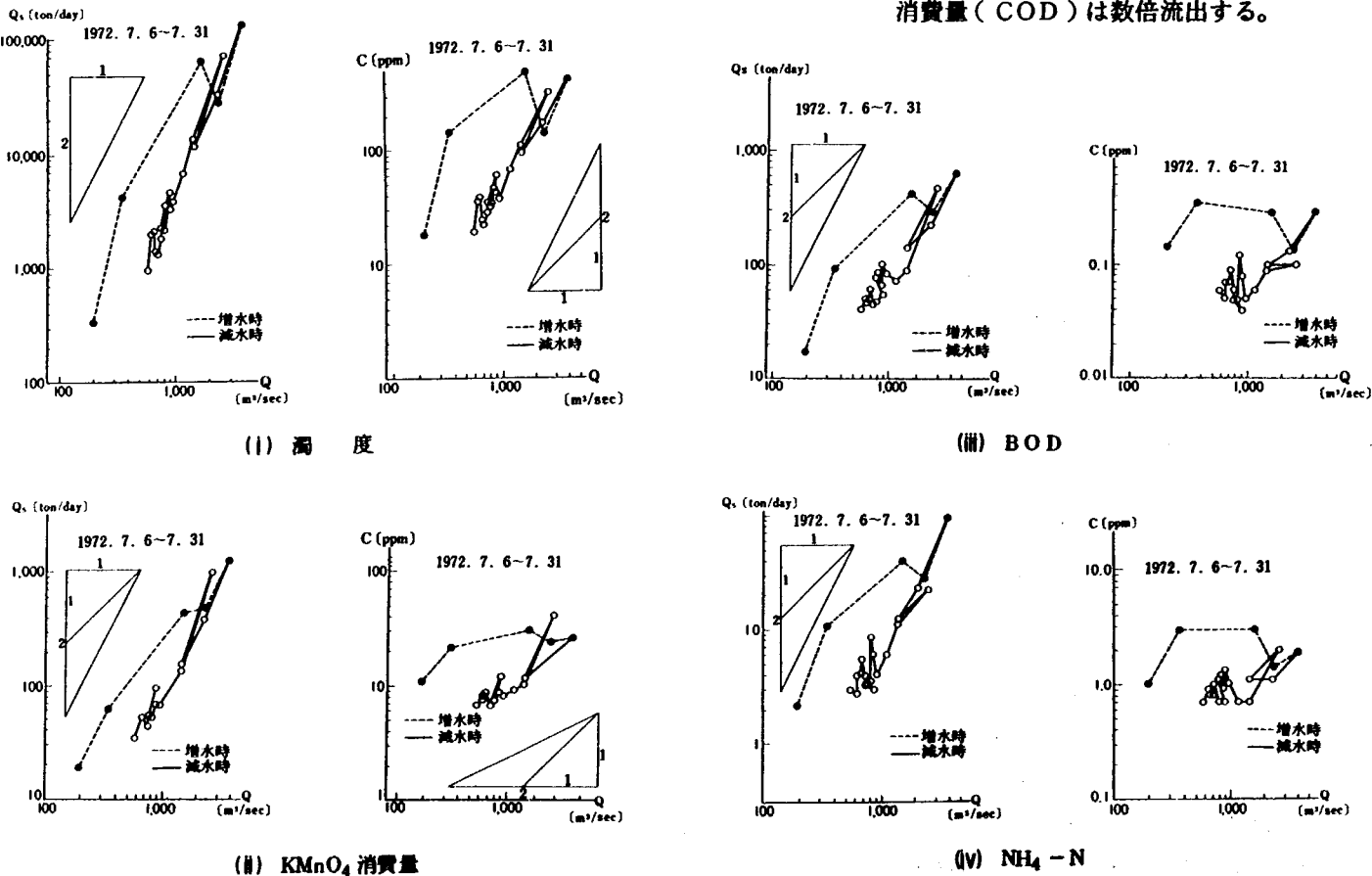


図-5.6(a) レイティング・カーブ（単一出水時）

(Q_s , $C \sim Q$ の関係, 河川①)

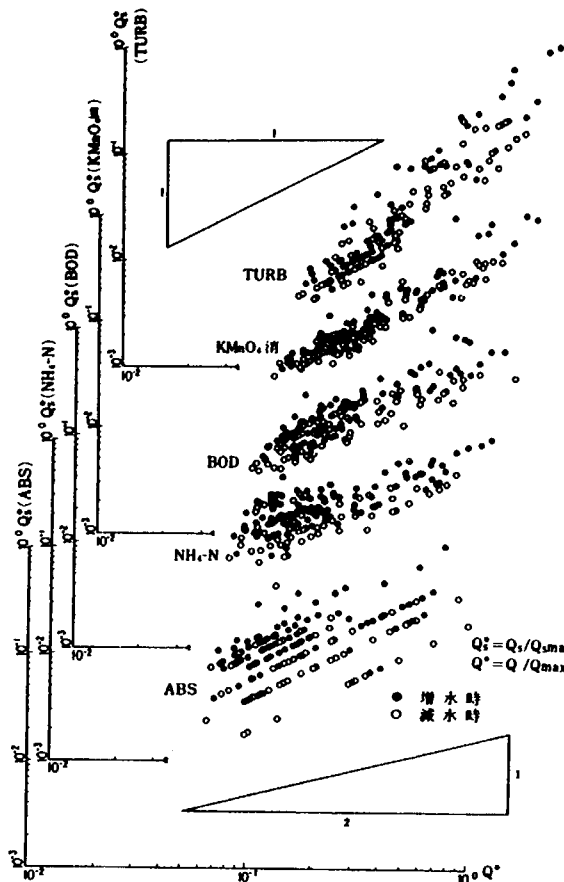


図-5.6(b) レイティング・カーブ(複数出水の重ね合わせ)(河川①)

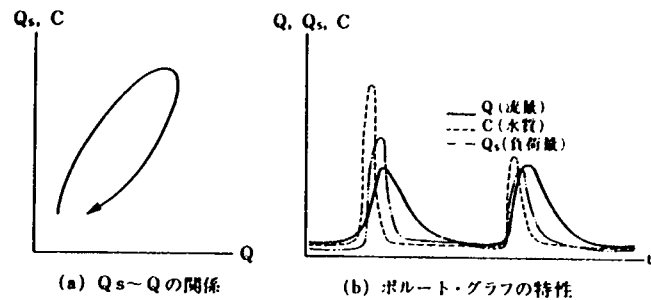


図-5.8 汚濁負荷流出特性の模式化

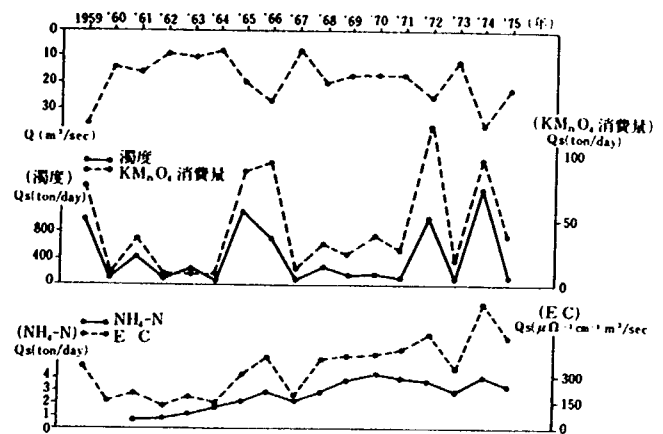
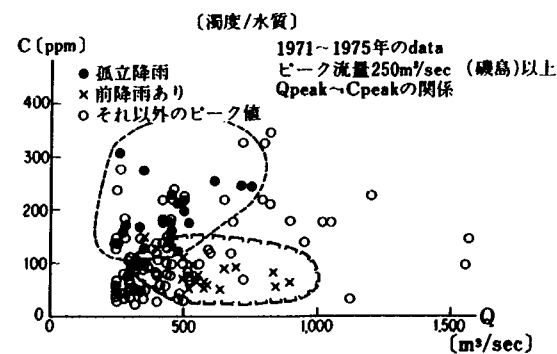
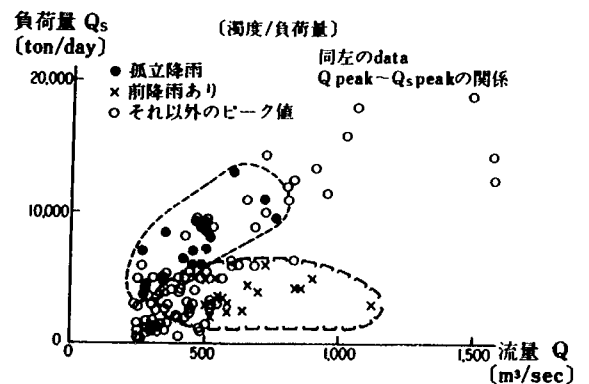


図-5.9 長期データによる汚濁負荷流出特性の分析

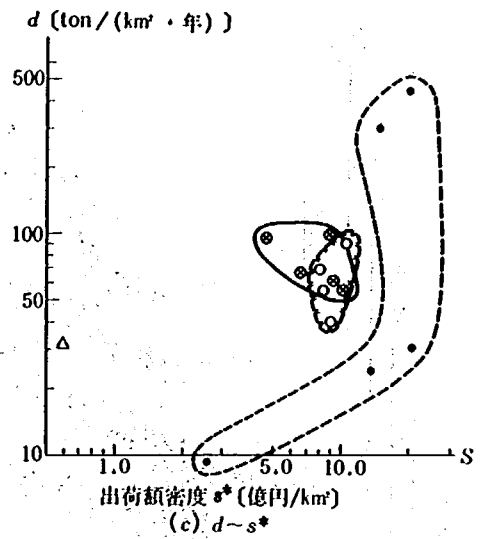
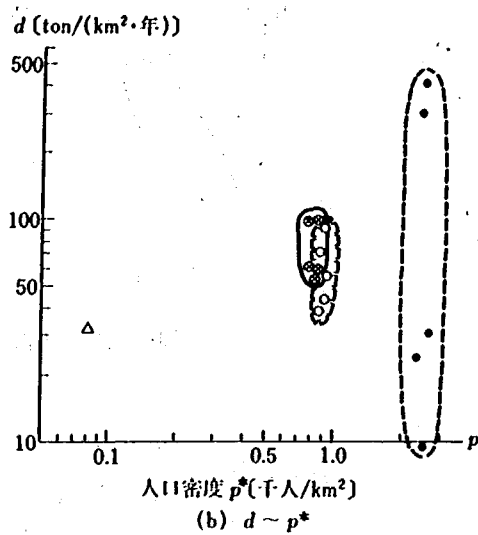
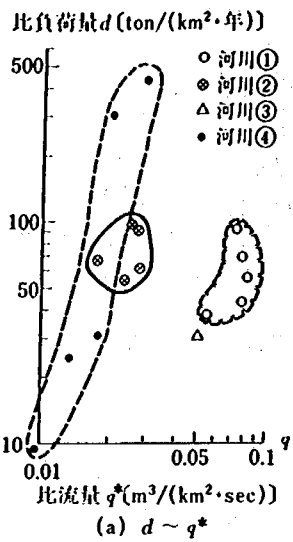


(a) 濁度

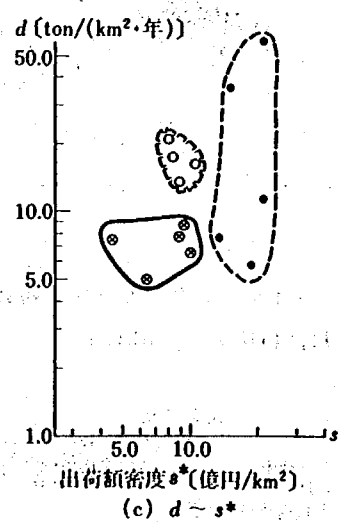
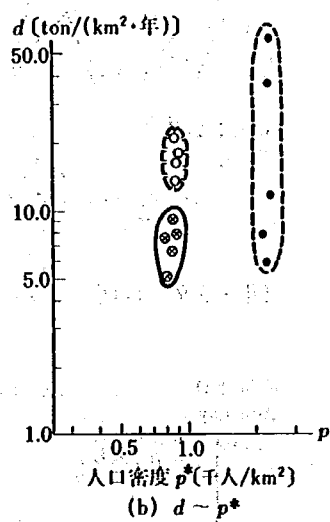
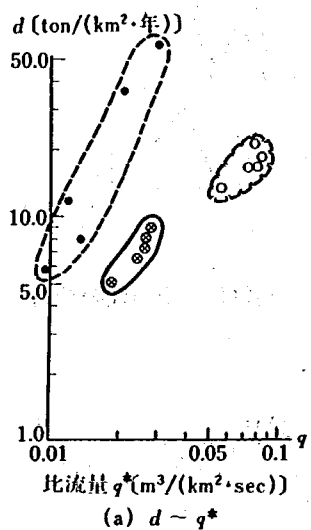


(b) BOD

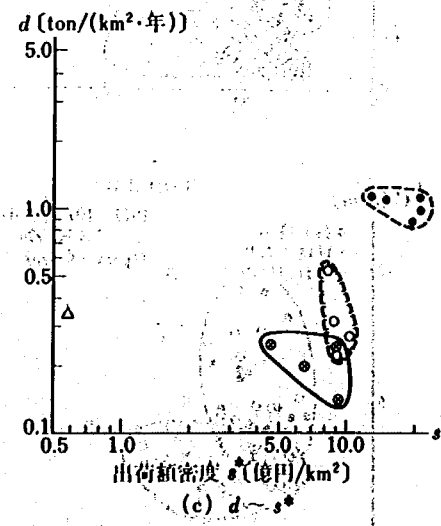
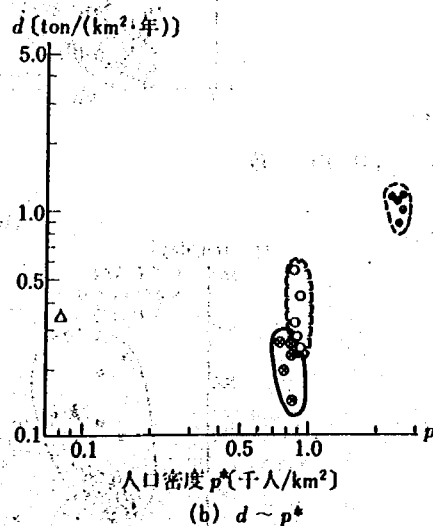
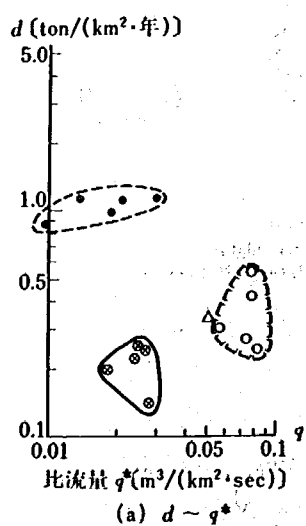
図-5.7 $Q_{peak} \sim Q_{s, peak}$ (or C_{peak}) の関係 (河川①)



(I) 濁 度



(II) KMnO₄ 消費量



(III) NH₄-N

図-5.10 汚濁負荷流出の支配要因分析

表-5.3 汚濁負荷流出の支配要因

水質項目	指標 流域の 地形・地質	社会指標 (農林業工場、事業所、 人口、下水道整備率など)	水文学的要因 (降雨あるいは流量)
濁度	○		○
KMnO ₄ 消費量	○	○	○
BOD	△	○	○
NH ₄ -N		○	○
ABS		○	○
ケルゲル率		○	○
TOC	△	○	○
T-P	△	○	○
E.C	○	△	○

注1) ○:重要な支配要因, ○:支配要因の一つ, △:関係は認められる, 空白:関係が明白ではない。
 注2) 社会指標は、流域面積に対する比(たとえば人口密度や山林・農地面積率など)として考えている。
 注3) 水文学的要因以外の指標は後述の水文学的なシミュレーション・モデルのパラメーターを支配する。

② 晴天時と雨天時に流出する汚濁負荷量の比率は、図-5.3に示すように、非常に多くの負荷量が出水時に流出している。濁度・KMnO₄消費量などの汚濁型の水質項目については、大きな出水時には必ず多量の負荷量が流出する。一方、BODのような中間型あるいはNH₄-Nのような希釈型の水質項目では、出水時に流出する汚濁負荷量のうちの相当量は、流域の社会活動により排出され蓄積していたものと考えられ、流出負荷量は先行する出水や晴天日数に影響される。

③ 低流況時についての原単位・流達率法を用いた従来の水質の取り扱いにおいては、上に述べた水文学的要因が考慮されていない(水文学的要因が説明変数に入っていない)ため、流出汚濁負荷量を説明しようとすれば、年度によって流達率を数倍変化させる必要が生じる。したがって、より合理的に流出汚濁負荷量を取り扱うためには、新たに水文学的要因を説明変数に取り込む必要がある。

3. 水文学的なモデルによる汚濁負荷量の推定

第2節の解析により流出汚濁負荷量を正しく評価するには、降雨や流量といった水文学的要因を考慮に入れる必要があることが明らかにされた。したがって、汚濁負荷量・水質の水文学的なシミュレーションについて考える。

前節の解析により得られた汚濁負荷の流出特性の概念図は、流量と汚濁負荷量との関係は単一出水時には増水時と減水時で異なっていること(図-5.8(a))、および先行する出水があると、その後の出水時の負荷量はそれが無い場合に比較して少ないことを模式的に示している。したがって、これらの特性を表現するためには、水文学的要因(降雨量、流量)を説明変数とする河川水質・負荷量のシミュレーションが必要であり、そのためにまず水質・負荷量の水文学的なシミュレーションの考え方を分類し、モデルの構造についての理論的考察を行う。次に二つのタイプ

のシミュレーション・モデルを提案し、7河川の複数水質項目に対して適用し、その適合性について検討する。

1) 水文学的なシミュレーション・モデルの分類

従来の水文学的なシミュレーション・モデルは基本的な二つのタイプに分類できる。一つは流量 Q や降雨量 R を説明変数としたものであり、式(1)で示される。

$$\frac{Q_s}{C} = \text{func.}(Q) \text{ or } \text{func.}(Q, R) \dots\dots\dots (1)$$

このようなモデルは汚濁負荷を流送する能力に着目したものであり、これを「流送能力」型モデルと呼ぶことにする。

あと一つは流出する汚濁負荷量のポテンシャル L をも導入したモデルであり、式(2)~(4)のように表わされる。このようなモデルを「流送能力・供給関数」型と呼ぶことにする。

$$\frac{Q_s}{C} = \text{func.}(Q, L) \text{ or } \text{func.}(Q, R, L) \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{dL}{dt} = L_{in} - Q_s \dots\dots\dots (3)$$

$$L_{in} = f(t) \dots\dots\dots (4)$$

ここに式(2)は汚濁負荷量の流送に関する方程式(運動方程式と考えてよい)、式(3)は汚濁負荷量ポテンシャルの連続式、式(4)は流出する汚濁負荷量の供給を示すものであり、 L_{in} は負荷量の供給関数である。このタイプのモデルは、汚濁負荷量流出特性の解析結果(図-5.8(a), (b))と原理的に対応している。しかし、このモデルにおいて L が水文学的要因の関数である場合(例えば濁度のように雨が降ればその程度により L が決まる場合)には、「流送能力」型モデルと等価である。したがって、 L を支配する式(3)は、概念として汚濁負荷量の「蓄積」を考えたものであり、降雨による「浸食」といった概念は含まれていない。

以上のような基本的な考え方に基づくモデルのうち代表的なものを表-5.4, 5.5に示す。

「流送能力」型モデルでは、同時刻の流量やある一定時刻の降雨のみを説明変数とする場合には、同じ降雨あるいは流量条件のもとでは同一の負荷量が流出することになる。ただし、前期降雨(あるいは先行晴天日数)などを説明変数に加えて連続出水時に負荷量が減少すること(あるいは長期間出水が無かった場合には増大すること)を説明したり、また増水時と減水時のループ特性を、水位や水面勾配などの特別な関数形を用いて説明する試みもなされている。^{7), 9), 18)}

2) 二つのタイプのモデルの関数

両タイプのモデルの関係をみるために、式(1)および式(2)を次のように単純化した場合について考える。

表-5.4 「流送能力」型モデル

Straub (1935) 吉川 (1952) Gunnerson (1967)	Hart ら (1964)	羽田 (1977) 山口・吉川 (1978)	山口・吉川 (1978)
$Q_s = a Q^b$	$Q_s = a_0 Q_0$ (地下流出) + $a_1 Q_1$ (中間流出) + $a_2 Q_2$ (表面流出) (あるいは) $= a_0 Q_0^{b_0} + a_1 Q_1^{b_1} + a_2 Q_2^{b_2}$	$Q_s = a Q^b + f(R)$	$Q_s = f(Q, R) = \sum_{i=1}^k a_i \cdot Q_i + \sum_{i=1}^k b_i \cdot R_i$ (あるいは) $= \sum_{i=1}^k a_i \ln \cdot Q_i + \sum_{i=1}^k b_i \cdot \ln R_i$ ここに i : 流量地点・時間を示す インデックス

表-5.5 「流送能力・供給関数」型モデル

EPA (SWM model)* (1971) Sartor (1972)	稲場* (1975)	山口ら* (1976, 1978)	淀川工事事務所 (1974)	高畑ら* (1976)	Hall *** (1970)
$\left. \begin{aligned} & \cdot -\frac{dL}{dt} = krL \\ & \cdot L = L_0 + L \Delta T \end{aligned} \right\} \text{地表モデル}$ ここに, $L_0 = L(t=0)$ ΔT : 先行晴天日数 L : 残留量 r : 降雨強度	$\cdot Q_s = k Q^{1.5}$ $\cdot \frac{dL}{dt} = r L_{in}$ すなわち $L = L_0 + r L_{in} \Delta T$ ここに, r : 残留率	$\cdot Q_s = a Q^b L^c$ $\cdot \frac{dL}{dt} = L_{in} - Q_s$ $\cdot L_{in} = \text{const.} (t)^{**}$ (あるいは) $= f(R)$	$\cdot Q_s = f(Q) f(L) \cdot Q$ $\cdot \frac{dL}{dt} = L_{in} - Q_s$ $\cdot L_{in} = \text{const.}$	$\cdot Q_s = -\frac{dL}{dt} = \frac{Q}{V} \cdot L$ $\cdot L = L_0 + r L_{in} \Delta T$ (あるいは) $\frac{dL}{dt} = r L_{in}$ ここに, V : mixing volume	$Q_s = f(Q)$ $a_1 Q^a$ (Model 1) $a_2 Q^a + c Q$ (Model 2) $a_3 Q - b_1 Q \log Q$ (Model 3) $a_4 Q \exp(-b_2 Q)$ $a_5 Q - b_3 Q^r$ $a_6 Q / (1 + b_4 Q^s)$ (Model 4) $\frac{(a_7 - c_0) Q^r}{1 + b_4 Q^s} + c_0 Q$ (Model 5)

* : 下水道についてのmodel。 ** : 晴天時の時間分布を与えることもある。 *** : 原文は濃度(水質)について述べている。
 **** : 各モデルともに負荷量ポテンシャルの上限を設けることもある。

$$\left. \frac{Q_s}{C} \right\} = \text{func.}(Q) = a Q^b \quad \dots\dots\dots (1)'$$

$$Q_s(T) = a' Q^{b'}(T) \cdot \underbrace{\left[L_0 + \int_0^T (L_{in}(t) - Q_s(t)) dt \right]}_{\dots\dots\dots} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \left. \frac{Q_s}{C} \right\} &= \text{func.}(Q, L) \\ &= \text{func.}(Q) \cdot \text{func.}(L) \\ &= a' Q^{b'} L^{c'} \quad \dots\dots\dots (2)' \end{aligned}$$

ここに a, b, a', b', c' は定数である。式(2)' における変数分離は表-5.5に示したようにSWMモデル・淀川工事事務所のモデル・高畑らの混合モデル・Hall のモデルなどにも見うけられる。しかし厳密な理論的・実証的検証は行われておらず、実測値との対応が比較的良好な作業仮説 (working hypothesis) と考えてよい。

式(2)', (3), (4)を連立して Q_s について解くと次のようになる。

ここに, L_0 は L の初期値である。

したがって, 「流送能力・供給関数」型のモデルでは, 負荷量ポテンシャルの程度(式(5)の波線部分で示される)により流出負荷量が修正されており, 先行晴天日数(期間)の程度による流出負荷量の変化や連続出水時の流出負荷量の減少がこの項で修正されていると考えることができる。なお, 高畑らの混合モデルにおいては, 基本的には式(5)を次のように単純化して近似するが, 本質的には変わりがない(出水時期中の L_{in} は考慮しないことが多い)。

$$L = L_0 + r \cdot L_{in} \cdot \Delta T \cdot n \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$Q_s = -\frac{dL}{dt} = \frac{Q}{V} \cdot L \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 γ ：残留率、 ΔT ：期間のタイム・スケール、 n ：先行晴天期間数、 V ：混合容積 (mixing volume) である。

以上が「流送能力」型および「流送能力・供給関数」型モデルの基本構成と両者の基本的な関係である。本論文では、「流送能力」型モデルを実河川に適用するにあたり、当初式(1)'を用いたが精度的に十分ではなかったために、式(1)'に定数項(ベース・フローに対応する項)を加えた次式で示されるモデルを採用した。

$$\left. \begin{aligned} Q_s &= A_0 + (-1)^M a(|Q - Q_0|)^b, \\ \left\{ \begin{array}{l} Q > Q_0 \rightarrow M = 2 \\ Q < Q_0 \rightarrow M = 1 \end{array} : (a > 0) \right\} \end{aligned} \right\} \dots (8)$$

「流送能力・供給関数」型モデルについても、同様にして $Q_s = A_0'(\text{ベース・フロー分}) + (-1)^M a'Q^{b'}L^{c'}$ とすることも可能であるが、パラメータはできる限り少なくしたいこと、およびシミュレーション結果の適合性からみて、式(2)'で示される $a'Q^{b'}L^{c'}$ の形を採用した。

図-5.11に、式(8)、式(5)および式(6)・(7)の実河川(淀川のKMnO₄消費量・BOD・NH₄-N)への適用例を示す。同図に示すシミュレーションは、それぞれのモデルを2カ月間(1976年5月1日~6月31日)のデータを用いて同定(training)したときのものである。式(8)のモデル(モデル1)については最小2乗法によりパラメータを定めた。式(5)のモデル(モデル2)については、 L_{in} を年間平均の日流出負荷量、 L の初期値 L_0 を $20 \times L_{in}$ として、定数 a' 、 b' 、 c' を同定した。式(6)・(7)の混合モデル(モデル3)については、同様にして L_{in} を年間平均の日流出負荷量、 L_0 を $20 \times L_{in}$ とし、 $Q_s = kQL$ とし定数 k を定めた。また、式(5)において出水時の負荷量供給を無視したもの(モデル2')も同図中に示した。図-5.11に示された区間は、感度分析により L_0 の与え方による影響が顕著でなくなる区間(シミュレーションを始めて40日以降で同定区間以外)について示している。

3) パラメータの同定と実河川への適用

「流送能力」型モデル(式(8))では、同定すべきパラメータは A_0 、 a および b である。これらの三つのパラメータは、 Q_0 を低流況時の平均的な値として、最小2乗法により同定した。モデル1の最小2乗法による同定方法には二つあり、一つはレイティング・カーブ(両対数方眼紙上で流量を横軸、負荷量を縦軸にプロットした図)¹⁰⁾の勾配から b を定めた後に A_0 、 a を定める方法、あと一つはまず A_0 を低流況時の平均的な負荷量などに設定して a 、 b を定める方法である。以下に述べるものはすべて前者の方

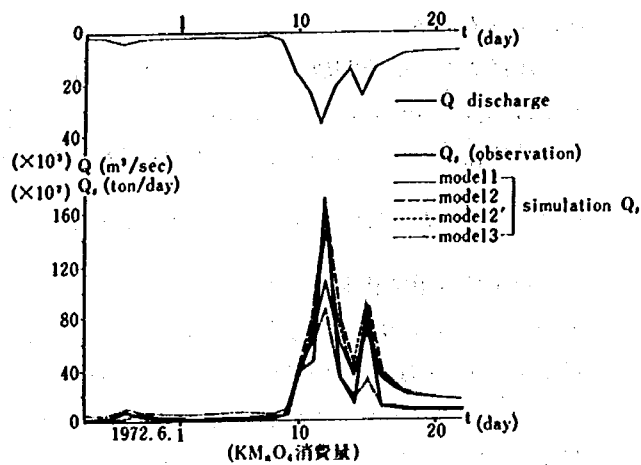
法によるものである。

「流送能力・供給関数」型モデル(式(5))では、 L_{in} としては $L_{in} = \text{constant } A$ (Q_s の年間平均値)とする場合、および $L_{in} = \text{constant } B + f(R)$ (ただし T が十分大きい場合には、 $\frac{1}{T} \int_0^T L_{in} dt = \text{constant } A$)について検討したが、以下では単純化した前者を用いた。モデル2の同定においては、 L_{in} の外に L_0 も与える必要があり、図-5.11に示すモデル同定において与えたものと同様にした。

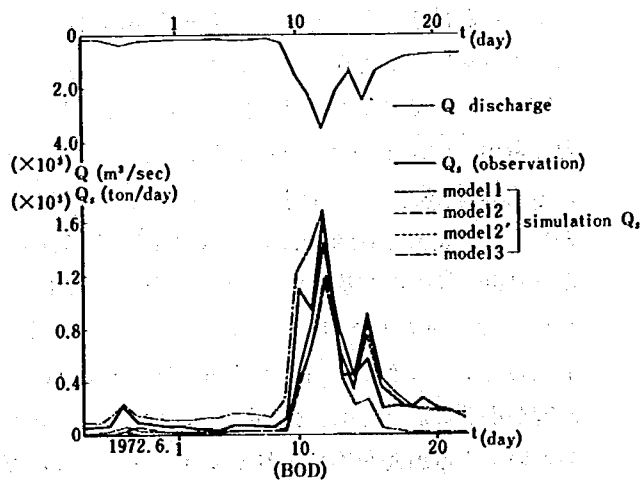
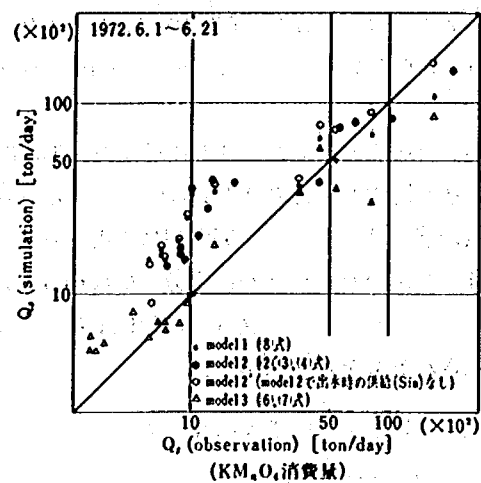
二つのタイプのモデルにおいて各パラメータが推定値に与える影響を把握しておくことは、パラメータを同定する上で重要である。そのために行った感度分析の結果を図-5.12に示す。同図はある出水期について例示したものであるが、これにより各パラメータの変化が結果に与える定性的な影響を知ることができる。すなわち、同定したモデルの定数を一応2割増減させて感度分析を行うと、「流送能力」型のモデル1の A_0 の変化がシミュレーション値に与える影響は定数項なので小さく、べき数 b は指数なのできわめて大であり(図は省略)、 a は Q^b の倍率でありそれらの中間的な影響を及ぼす。「流送能力・供給関数」型のモデル2では、 a および b についてはモデル1とほぼ同様であり、 c 、 L_{in} 、 L_0 の変化に対しては同図が示すように相対的に影響が小さい。ただし、長期間シミュレーションでは L_{in} の違いによる誤差が累積されてゆき、 L_0 の与え方による誤差はある程度の区間が過ぎると消失する。したがって、前述の L_0 の与え方、および比較的長期間のシミュレーションを前提として L_{in} を年間平均の Q_s として与えたことが妥当であることをこれらの結果は裏付けている。しかし、これはNH₄-Nのように経年的にその供給が大きく変化しない人為排出源に依存すると考えられる負荷量については現象的にみても妥当であると思われるが、水文学的要因により流出が大きく変化する水質項目に対しては、実際の現象とは必ずしも十分に対応しているわけではない。すなわち、「流送能力・供給関数」型のモデルでは L_{in} によって長期間に流出する負荷量が決まるので、 L_{in} を一定とすると経年的な変化は生じないが、水質項目によっては年平均の Q_s が年総流量によって大きく変化するものがある(図-5.9)。

以上是比较的流量規模が大きな時についてみた場合のことであるが、流量規模の小さい低流況時に対してもほぼ同様のことがいえる。

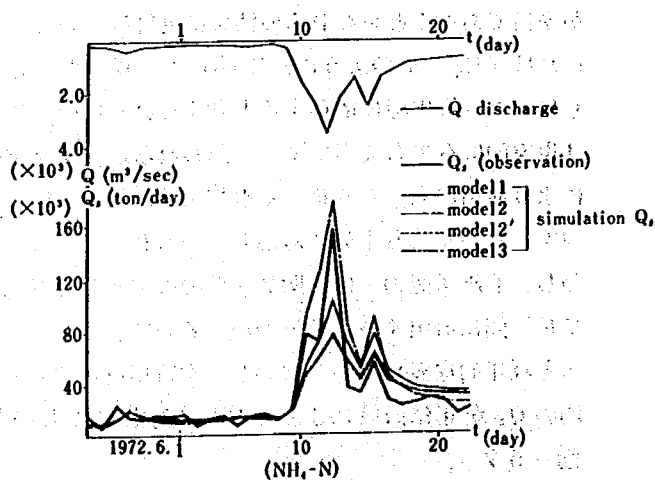
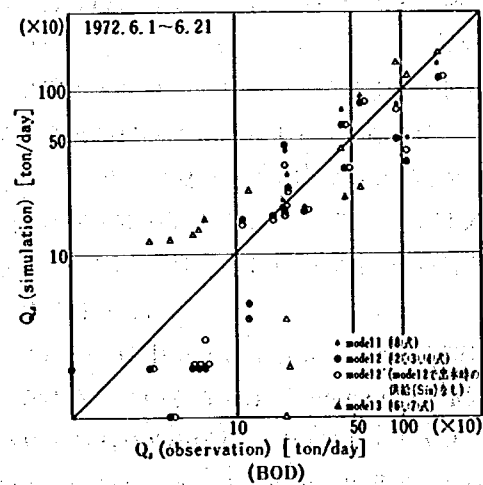
各モデルの定数決定においては、同定区間(training interval)と検証区間(checking interval)を設定して、作成されたモデルの精度をチェックした。その結果、水文



(a) KMnO_4 消費量



(b) BOD



(c) $\text{NH}_4\text{-N}$

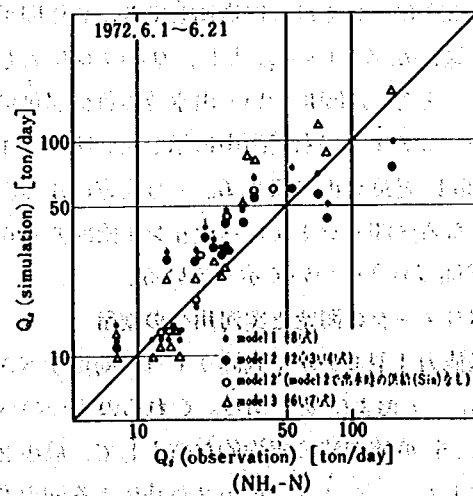


図-5.11 シミュレーション・モデルの検証(河川①)

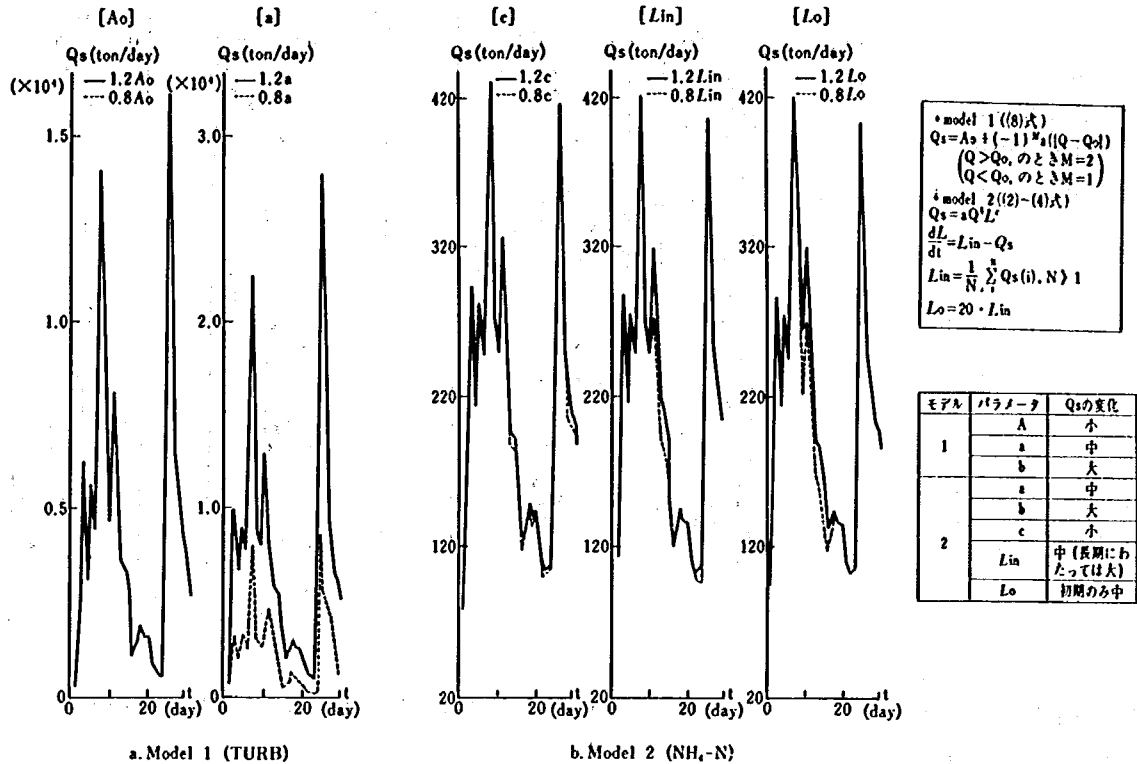


図-5.12 感度分析の例(河川①)

学的なモデルは高流量を含む同定区間においてモデルを同定した場合の方がシミュレーションの精度が高いことが明らかになったことから、以下のモデルは出水期を含む区間でモデルの同定を行った。

淀川を例として、同定区間および検証区間を変えたときの精度について検討した結果を図-5.13に示す。ここに R はシミュレーション値と実測値の相関係数、 E は検証区間内の総負荷量としての誤差、 M は検証区間内の総負荷量に着目して定義した平均誤差率；

$$M = \frac{\sum_{i=1}^n W_i \cdot (\Delta Q_s(i) / Q_s(i))}{\sum_{i=1}^n W_i}, W_i = Q_s(i) /$$

$\sum_{i=1}^n Q_s(i)$, $Q_s(i)$: 実測値, $\Delta Q_s(i) = (\text{シミュレーション値} - \text{実測値})$ である。全体としての平均誤差は、単純には

$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta Q_s(i) / Q_s(i)$ としてもよいが、各 i における誤差の全体に対する寄与(ウェイト)を考慮することにした。

図-5.13(a)より、水質項目ごとにみると相関係数 R は同定区間および検証区間のとり方にかかわらず、両モデルとも濁度あるいは KMnO_4 消費量、 BOD 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 ABS の順に小さくなっている。総負荷量の誤差 E および平均誤差率 M は、 KMnO_4 消費量、 BOD 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 ABS の順に大きくなる傾向がみられるが、必ずしも明確ではない。図-5.13(a)の②および⑥の結果を比較してみ

ると、1年間で同定すると2カ月間で同定した場合より総負荷量の誤差は小さくなっているが、平均誤差率はむしろ大きくなっている。また④の結果でみると、 $\text{NH}_4\text{-N}$ や ABS についてはトータルの誤差が相当大きく、経年的な特性が正しくモデル化されていないことがわかる。また①、②、③および⑥の結果において、総負荷量の誤差がほとんどすべて負に出ている。これは、同定区間内のデータに流量規模が相対的に小さい日が比較的多く含まれていたことによると考えられる¹⁰⁾ また2カ月間のデータで同定して経年的(経時的)に検証を行うと、「流送能力・供給関数」型のモデルでは、誤差が非常に大きくなること(例えばある年度の淀川の ABS については年間総負荷量の約2倍)がある。これは、汚濁負荷の供給量 L_{in} を、モデルを同定した年度の年間平均値としているためであり、実用上は L_{in} の与え方が重要な課題となることを示している。したがって、今後の課題として、供給関数 L_{in} (流域の地質・地形条件、社会活動状況および水文学的要因などの関数であると想像される)の解明が重要である。

図-5.13(b)は各モデルの同定区間(2カ月)を変えた場合のものであるが、これより同定区間を9月・10月、あるいは11月・12月のように比較的流量規模が小さい区間にとると誤差が大きくなっていることがわかる。したがって、水文学的なモデルは、流量規模が大きい区間を含むデータで同定する必要がある。

図-5.14には、複数河川の複数水質項目に対して二つのタイプのモデルを適用し、2カ月間のデータでモデルを同定した場合のシミュレーション結果をE, R, Mについて示す。同図には、シミュレーション・モデルによる前述のベース・フロー分(B.F.)とストーム・フロー分(S.F.)の負荷量の分離、およびドライ・ウェザー・デイ分(D.W.D.)とストーム・ウェザー・デイ分(S.W.D.)の負荷量の分離を行ったものを、実測値から分離したものと併記して示している。これら二つの方法による分離結果は、全負荷量に対する分離されたそれぞれの負荷量の比として示されている。また、同図中にはモデルによる分離結果の妥当性を検証するために、実測値による分離結果¹⁾を(—●—)として併記した。ただし、ここでは分離の基準を低水流量としている。これにより、シミュレーションによる分離の精度についても知ることができる。

なお、モデルの同定に際しては、 $Q_s = \text{func.}(Q)$ あるいは $Q_s = \text{func.}(Q, L)$ としてモデルを一次的に同定し、その段階で生じている誤差 $\bar{E}(t) [(\text{実測値}) - (\text{シミュレーション値})]$ を、 $\bar{E}(t) = \text{func.}(R)$ あるいは $\bar{E}(t) = \text{func.}(R, L')$ などとして段階的に同定して、精度の向上を図ることも考えられる。しかし、モデルの同定はできる限り

簡潔にしたいこと、および本論文では水文学的要因によるシミュレーションの可能性について検討しているので“モデルいじり”に陥るのとは避けたかったことなどにより、そのような方法は採用しなかった。

4) シミュレーション結果についての考察

図-5.14に示すシミュレーション結果(2カ月間データで同定、1年間データ検証)より次のことがわかる。

① 本論文で用いた水文学的なモデルによるシミュレーションの年間総負荷量としての誤差Eは、大規模河川の濁

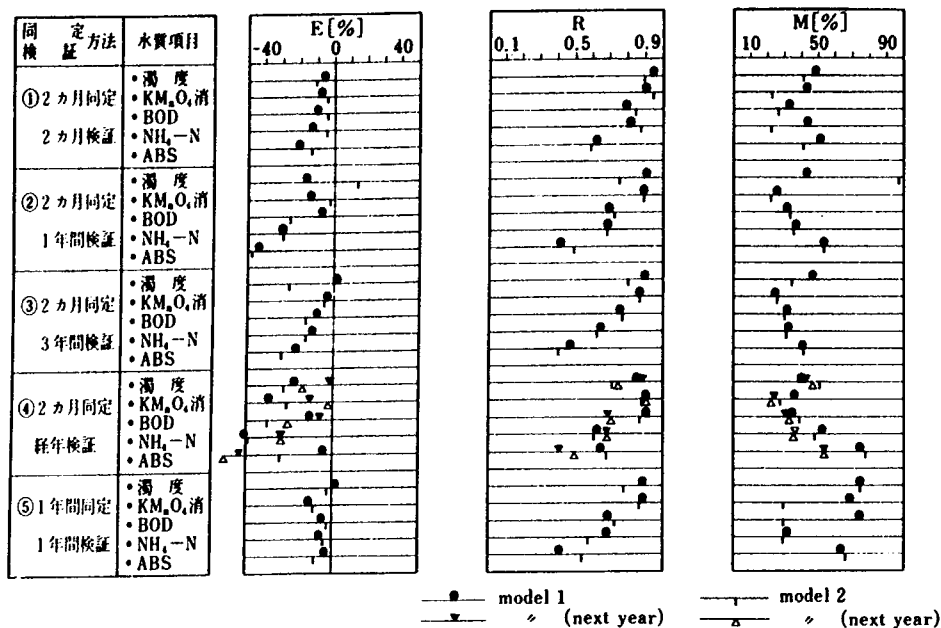
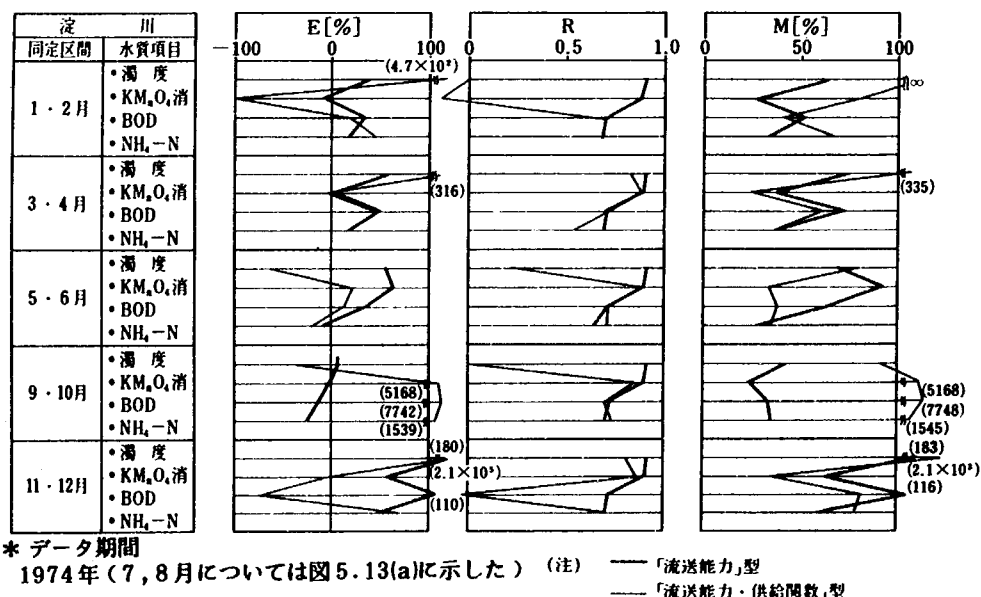


図-5.13(a) 同定および検証方法と予測精度(河川①)



* データ期間

1974年(7, 8月については図5.13(a)に示した)

(注) — 「流送能力」型
— 「流送能力・供給関数」型

図-5.13(b) 同定区間についての感度分析(河川①, 1974)

度KMnO₄消費量, BOD, NH₄-N, ECなどについては約±30%以内である。

② 同様に実測値と推定値の相関係数Rは0.70~0.95程度である。また平均誤差率Mは約40%程度である。

③ ポルト・グラフのシミュレーション精度は、EC, 濁度あるいはKMnO₄消費量, BOD, NH₄-Nの順に低くなる。これは人為的な排出源からの負荷量と水文学的要因の対応があまり良くないことと一致している。

④ EC, 濁度, KMnO₄消費量はパラメータの数が少

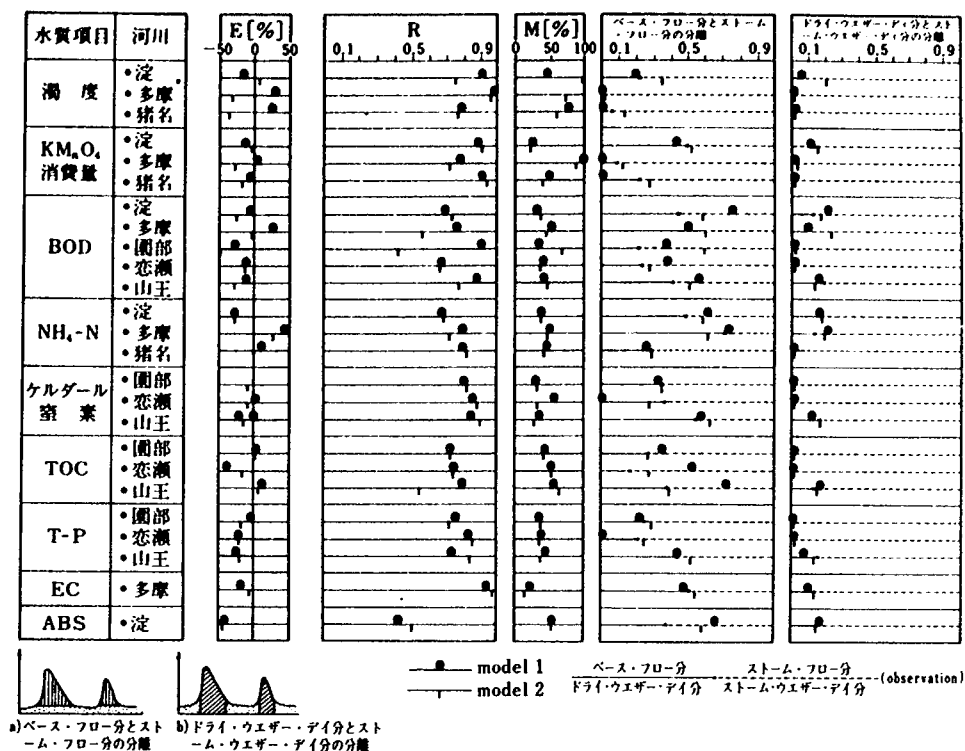


図-5.14 シミュレーション結果

なく同定も容易な「流送能力」型のモデルで十分にシミュレーションすることができる。BOD, NH₄-Nのように人為的な排出源に主として依存すると考えられる水質項目については、「流送能力・供給関数」型の方が適合性が良い傾向にある。しかし、これは今回対象としたような水質項目について見た場合のことであり、「流送能力」型と自然起因汚濁の水質項目、また「流送能力・供給関数」型と人為汚濁の水質項目が必ず対応するわけではない。例えば、人為汚濁負荷のうち田畑・山林土壌に含まれる浮遊物質としてのリン・有機物等は、「流送能力」型でシミュレーションが可能であると推定される⁵⁰⁾。

⑤ ABSに対しては水文学的なモデルの適合性が悪い(水文学的要因によるシミュレーションが難しい)。

⑥ モデルの同定に関しては、次のようなことがいえる。水文学的なモデルの定数は、低流況時のデータを多く含む同定区間よりも、高流況時のデータを多く含む同定区間において同定した方が、年間を通じてのシミュレーションでは精度が高い傾向にある。

また図-5.14に示す負荷量の分離結果から次のことがわかる。

① 水文学的なモデルにより、ベース・フロー分とストーム・フロー分の比率は、±10%以内の誤差で推定することができる。

② ドライ・ウェザー・デイ分とストーム・ウェザー・デイ分の比率は、±10%以内の誤差で推定することができる。

以上の考察は、モデルの定数を上述のような仮定のもとで単純な統計的手法により同定した場合の結果である。今後の課題としては、シミュレーションの適合性(例えば各時間のポルト・グラフの適合性、あるいは年間総負荷量に対する適合性)を最大にするような同定手法(あるいは同定理論)の導入が考えられる。

4. 定期的なサンプリングによる汚濁負荷量の推定

現実の河川では、水質観測が月に1回程度しか行われていないのが実状である。費用等の理由により、観測回数を増すことは難しいと考えられるので、定期的にサンプリング

与えられた限られたデータから流出総負荷量を推定する必要
がある。

1) 2, 3の理論的な考察

従来の研究を概観しながら、限られたサンプルによる年
間総負荷量の推定に関する2,3の考察を行う。

① 代表値とサンプル数の関係^{19), 20)}

河川の代表値としての水質・負荷量を推定するために必
要なサンプル数(河川および水質項目によって異なる)の
決定には、統計的な検定法の適用が可能である²¹⁾。すなわ
ち、限られたサンプルから母集団の平均値(あるいは最頻
値)を推定するために、区間推定の方法が利用される。こ
の方法を用いることにより、信頼度を設定した場合に、必
要なサンプル数(この場合には水質観測回数)を知ること
ができる。その際の考え方は以下のようである。

単純化して、正規分布の母集団(平均 μ , 分散 σ^2)に
ついて考える。このとき、ランダム・サンプル($X_i; i =$
 $1, n$)の平均値 $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$ は平均 μ , 分散 σ^2/n

の正規分布 $N(\mu, \sigma^2/n)$ に従い、標準化した $C = (\bar{X} - \mu) / (\sigma/\sqrt{n})$ は $N(0, 1^2)$ に従う。 $N(0, 1^2)$ にお
いて、 $|C| > C_0$ ($C_0 > 0$)の確率 $Pr(|C| > C_0) = \alpha$
となる C_0 を定める(図-5.15)。

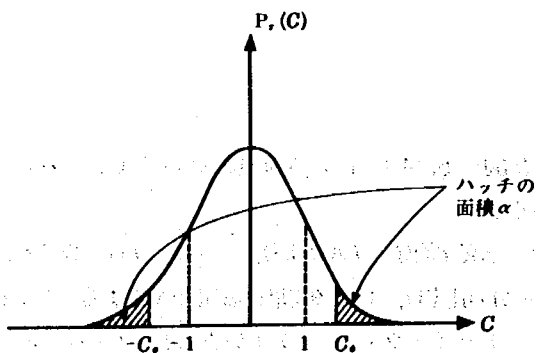


図-5.15 標準化した水質 C の発生頻度の模式図

もとの母集団における $1 - \alpha$ (すなわち $(1 - \alpha) \times$
 100%)の信頼区間は、次のようにして求められる。

$$\begin{aligned} 1 - \alpha &= Pr(-C_0 \leq C \leq C_0) \\ &= Pr(-C_0 \leq (\bar{X} - \mu) / (\sigma/\sqrt{n}) \leq C_0) \\ &= Pr\left[\bar{X} - C_0 \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{X} + C_0 \frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right] \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (9)$$

対数正規分布の場合には、実数に変換したときの信頼区
間は $(10^{\bar{X} - C_0 \frac{\sigma}{\sqrt{n}}}, 10^{\bar{X} + C_0 \frac{\sigma}{\sqrt{n}}})$ となる。 σ' は母集団の
対数変換値の標準偏差である。

次に観測によって得られる精度は、サンプルの平均 $\bar{X}$ と
 μ と仮定すれば、 $\alpha = (\bar{X} \pm C_0 \frac{\sigma}{\sqrt{n}}) / \bar{X}$ として求めるこ
とができる(平均値と信頼限界の比として定義)。

$$\begin{aligned} \alpha &= (\bar{X} \pm C_0 \frac{\sigma}{\sqrt{n}}) / \bar{X} \\ &= 1 \pm (\sigma/\bar{X}) \cdot (C_0/\sqrt{n}) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (10)$$

上式により、観測回数(サンプル数)が増すにつれて精
度が向上することがわかる。平均値からの誤差を、平均値
との比で求めると $\pm(\sigma/\bar{X}) \cdot (C_0/\sqrt{n})$ となる。した
がって、誤差 e を許容するときの必要な観測回数 n は次式
で与えられる。

$$n = [(\sigma/\bar{X}) \cdot (C_0/e)]^2 \quad \dots\dots\dots (11)$$

同様にして対数正規分布の場合には、次式を得る。

$$n' = [C_0 \cdot \sigma' / \log(1 \pm e)]^2 \quad \dots\dots\dots (12)$$

平均および分散を近似的に与える(例えばサンプル・デ
ータ、あるいは類似河川のデータより推定する)ことによ
り、式(11)および(12)を用いて各河川の水質項目ごとに必要と
される観測回数を求めることができる。

② 負荷量の平均値と水質および流量の平均値との関係
負荷量を水質および流量から推定する場合の一般的な関
係を導くことにする。今、正しく全データ($C_i, Q_i;$
 $i = 1, N$)がある場合を考える。その時、流量と水質の
平均値は次式で与えられる。

$$\bar{C} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N C_i, \quad \bar{Q} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N Q_i \quad \dots\dots\dots (13)$$

次に負荷量は $Q_{oi} = C_i \times Q_i$ であり、 $C_i = \bar{C} + \Delta C_i$,
 $Q_i = \bar{Q} + \Delta Q_i$ とすると、次式が得られる。

$$\begin{aligned} Q_{oi} &= (\bar{C} + \Delta C_i) \cdot (\bar{Q} + \Delta Q_i) \\ &= \bar{C} \cdot \bar{Q} + \bar{C} \cdot \Delta Q_i + \bar{Q} \cdot \Delta C_i + \Delta C_i \cdot \Delta Q_i \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (14)$$

式(14)の期待値をとると、 Q_o の平均値 $\bar{Q}_o$ を得る。

$$\begin{aligned} \bar{Q}_o &= \bar{C} \cdot \bar{Q} + \bar{C} \cdot E(\Delta Q_i) + \bar{Q} \cdot E(\Delta C_i) \\ &\quad + E(\Delta C_i \cdot \Delta Q_i) \\ &= \bar{C} \cdot \bar{Q} + r \cdot \sigma_Q \cdot \sigma_C \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (15)$$

ここに、 r : Q と C の相関係数、 σ_Q : Q の標準偏差、 σ_C :
 C の標準偏差である。

式(15)より、流量 Q と水質 C に相関がある場合(図-5.
16参照)には、 Q および C の平均値より $\bar{Q}_o = \bar{C} \cdot \bar{Q}$ と
すると一定の誤差 $r \cdot \sigma_Q \cdot \sigma_C$ が生じることがわかる。す
なわち、 Q と C に正の相関がある場合(例えば濁度)には、
平均値の積として求まる $\bar{Q} \cdot \bar{C}$ は真の $\bar{Q}_o$ より小さな値となり、
負の相関がある場合には大きな値となる。

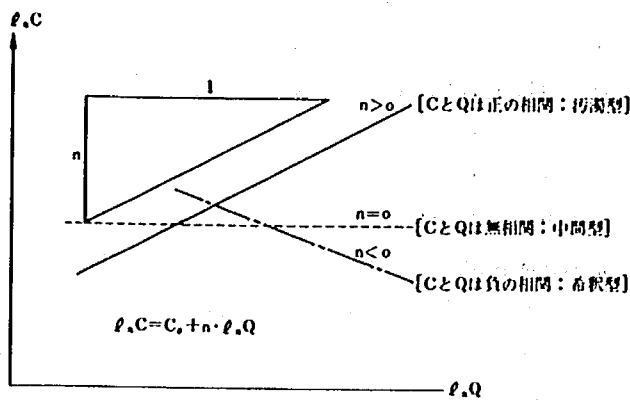


図-5.16 流量と水質の関係の概念図

③ サンプルング方法及び推定式と精度

流量の発生頻度（確率） $P_r(Q)$ および水質と流量との関係式を用いて、確率平均としてみた場合の推定値の誤差について考察し、限られたサンプルにより年間総負荷量を推定する際の、サンプルング方法および推定式と予測精度との関係を考察する。

河川水質・負荷量の変動特性解析により得られた結果を参考にして、以下のことを仮定する。³⁾⁻⁶⁾

仮定1) 流量の発生頻度は対数正規分布で近似される。

$$P_r(Q^*) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left\{ -(\ln Q^* - \mu)^2 / 2\sigma^2 \right\}$$

仮定2) 水質は対数線形で近似される。

$$\ln C^* = C_0^* + n \cdot \ln Q^* \quad (17)$$

ここに、 $Q^* = Q / Q_{\max}$ 、 $C^* = C / C_{\text{mean}}$ 、 $C_0^* = C_0 / C_{\text{mean}}$ 、 $Q_{\max}$ ：最大流量、 C_{mean} ：平均水質、 μ ： $\ln Q^*$ の平均値、 σ ： $\ln Q^*$ の分散の平方根である。

したがって、年間総負荷量 $Q_s(\text{total})$ は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} Q_s(\text{total}) &= \int_{-\infty}^{\infty} C \cdot Q \cdot P_r(Q) \cdot dQ \\ &= C_{\text{mean}} \cdot Q_{\max} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \exp \{ C_0^* + n \cdot \ln Q^* \} \cdot Q^* \cdot P_r(Q^*) \cdot d(\ln Q^*) \\ &= C_{\text{mean}} \cdot Q_{\max} \cdot Q_s^*(\text{total}) \end{aligned} \quad (18)$$

ここに $Q_s^*(\text{total}) = \int_{-\infty}^{\infty} C^* \cdot Q^* \cdot P_r(Q^*) \cdot d(\ln Q^*)$ である。

式(18)により総流出負荷量が与えられるが、現実には全サンプルが測定されているわけではなく、限られた数のサンプルから $Q_s(\text{total})$ を推定することが普通である。その際の推定精度は、水質項目の特性（汚濁型であるか希釈型

であるか）、サンプルングの方法、サンプル数および推定式により異なる。そこで、これら三つの要因のとり扱い方によって系統的に生じる推定誤差を明らかにする。

• 水質項目

$$C^* = C_0^* + n \cdot \ln Q^* \quad (n > 0 : \text{汚濁型}, n = 0 : \text{中間型}, n < 0 : \text{希釈型})$$

• サンプルング方法（図-5.17 参照）

- (i) ランダムあるいは等間隔（定期）サンプルング（ N 1 個のサンプル）
- (ii) 低流量時主体のサンプルング（ N 1 個のサンプル）
- (iii) 高流量時主体のサンプルング（ N 1 個のサンプル）

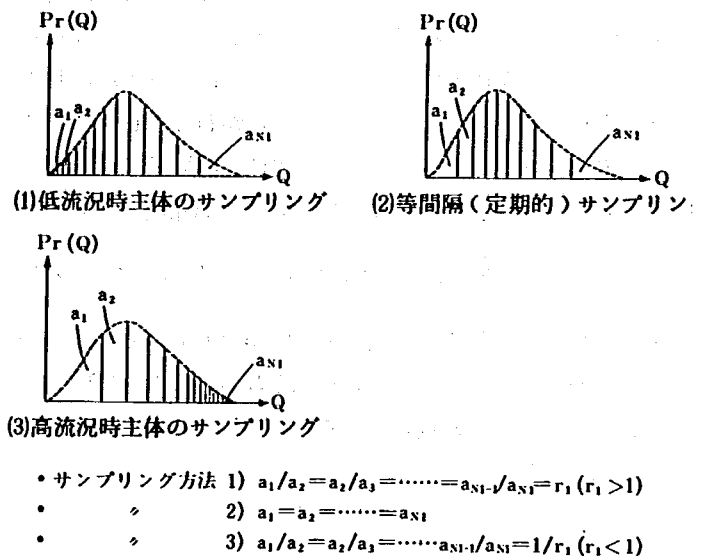


図-5.17 サンプルング方法の概念図

• 推定式

$$\textcircled{1} \quad Q_s'(\text{total}) = \frac{1}{N1} \cdot \sum_{i=1}^{N1} (C_i \cdot Q_i) \cdot N$$

$$\textcircled{2} \quad Q_s'(\text{total}) = \left[\frac{1}{N1} \sum_{i=1}^{N1} C_i \right] \cdot \left[\frac{1}{N1} \sum_{i=1}^{N1} Q_i \right] \cdot N$$

$$\textcircled{3} \quad Q_s'(\text{total}) = \left[\frac{1}{N1} \sum_{i=1}^{N1} C_i \right] \cdot \int_{-\infty}^{\infty} Q \cdot P_r(Q) \cdot dQ$$

$$\textcircled{4} \quad Q_s'(\text{total}) = \int_{-\infty}^{\infty} a Q^b \cdot P_r(Q) \cdot dQ$$

ただし、 $Q_s = a Q^b$ （レイティング・カーブ）の定数 a 、 b は N 1 個のサンプルより最小 2 乗法で同定する。

ここに、 N ：対象とする全期間数（母集団の総数）、 $N1$ ：用いるサンプル数（ $N > N1$ ）、 C および Q_s の単位はそれぞれ（ppm）、（ton/day）である。

①、②式は測定日のみのサンプルによる場合、③式は流量データが水質データより豊富な場合、④式は③式と同様な条件下でレイティング・カーブを用いる場合を念頭にお

いている。

母集団の総数を 100 としてサンプル数 $N = 10$ (年日数を 365 とすると年間約 36 回サンプリングしたときに対応) とし、それぞれの水質項目・サンプリング方法・推定式で計算される $Q_s'(total)$ と真値 $Q_s(total)$ の比 $F = Q_s'(total) / Q_s(total)$ を求めたものを図-5.18 に例示する。ただし、同図の計算においては、対象とした各河川の対数変換した流量 $\ln Q^*$ の平均値 μ 、および分散 σ^2 について検討し、その中間的な値としてそれぞれ -2.7 および 0.93 とした⁴⁾。また C_0^* については 1.0 前後とし、図-5.18(a) にその値を示した。図-5.18(b) より、汚濁型、中間型、希釈型 ($n \cong 0$) ごとに、前述のサンプリング方法および推定式を用いるときに生じる誤差を知ることができる。すなわち、④式を用いる場合には、 $\ln C^* = C_0^* + n \cdot \ln Q^*$ が正しく与えられると、サンプリング方法にかかわらず真値に一致し、 $F = 1.0$ となる。③式については、総流量は常に正しく与えられるので、等間隔サンプリングでは希釈型 ($n < 0$) の場合には $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_i$ が真値より大きくなるため、 F は 1.0 より大きくなる。汚濁型の水質項目 ($n > 0$) の場合には、逆に F は 1.0 より小さな値となる。①および②式については、サンプル数にもよるので一般的な結論は下せない。

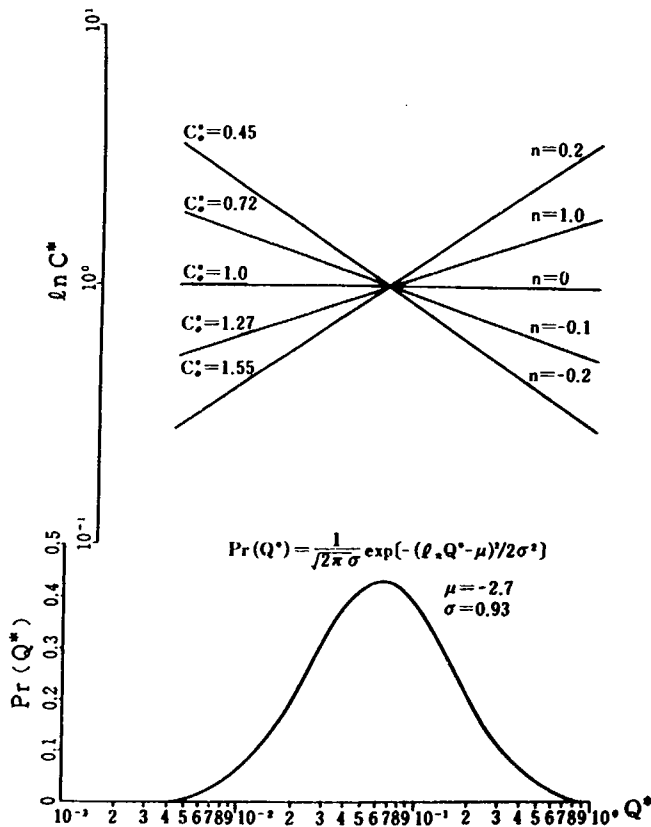


図-5.18(a) 計算条件の概要

いが、低流況時や高流況時に片寄ったサンプリングでは大きな誤差が生じる。②式については、サンプル数が増すにつれて誤差は式(9)によって示されるものに近づく。同様に①式は真値に近づく。

サンプリング方法に着目すると、ランダム・サンプリングの場合が比較的眞値に近い値を与える。推定式についてみると④式がサンプリング方法・水質項目によらず眞値を与えている。③式は、水質項目ごとに系統的な誤差が生じるが、サンプリング方法の違いによる誤差の変化は比較的小さい。

以上のことから、水質と流量の関係(式(7))、サンプリング方法および推定式によって系統的に生じる誤差が明らかにされた。この結果は、総流出負荷量を推定する方法を決める際に考慮されるべきものである。ただし、以上は確率平均としての考察であり、実際の河川では $C \sim Q$ の関係にバラツキがあり、そのために大きな誤差が生じることがある。

2) 実河川における総負荷量の推定

上述の一般的な考察で得られた結果を考慮に入れて、実河川の限られたサンプルから総負荷量を推定することを考える。サンプリング方法および推定式はそれぞれ以下のようなものを考える(本章第4節1)、⑧とは多少異なっているが、本質的には等価とみなしてよい)。

• サンプリング方法

- 1) 月3回等間隔(5日, 15日, 25日)
- 2) 月3回低流況時(できる限り等間隔)
- 3) 月3回高流況時(できる限り等間隔)

• 推定式(表-5.6)

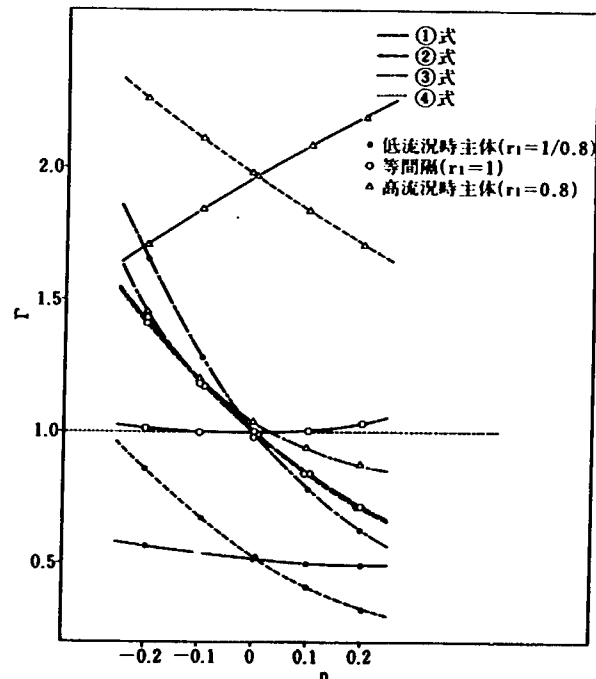


図-5.18(b) 限られたサンプルにより推定した場合の誤差

表-5.6 推定式

① $Q_s(\text{total}) = \sum_{i=1}^{12} \bar{C}_i \times \bar{Q}_i \times B_i$	$\bar{C}_i$: i 月のサンプルの平均水質 $\bar{Q}_i$: i 月の平均流量 B_i : i 月の日数
② $Q_s(\text{total}) = \sum_{i=1}^{12} (C_{1i} \times Q_{1i} + C_{2i} \times Q_{2i} + C_{3i} \times Q_{3i}) / 3$ $\times (\text{月の日数})$	
③ $Q_s(\text{total}) = \sum_{i=1}^{12} \bar{C}_i \times TQ_i$	TQ_i : i 月の総流量
④ $Q_s(\text{total}) = \bar{C} \times \bar{Q} \times 365$	$\bar{C}$: 全サンプルの平均水質 $\bar{Q}$: 全サンプルの平均流量
⑤ $Q_s(\text{total}) = \bar{C} \times TQ$	TQ : 年間総流量
⑥ rating curve より (その1) ・ $Q_s = aQ^b$ で、全サンプルより定数 a 、 b を同定 ・ $Q_s(\text{total}) = \sum_{i=1}^{365} aQ_i^b$	
⑦ rating curve より (その2) ・ $C = a'Q^{b'}$ で全サンプルより a' 、 b' を同定 ・ $Q_s(\text{total}) = \sum_{i=1}^{365} a'Q_i^{b'} \times Q_i$	

表-5.6に示される①、②および④式は、サンプリング時の水質と流量のみから年間総負荷量を推定するものであり、最も簡便な方法である。③、⑤、⑥および⑦式は、流量が毎日観測されている場合に適用できる式である。⑥および⑦式は、第4節1)、③の数値実験において、 C or $Q = aQ^b$ の関係 (レイティング・カーブ) が正しく与えられていれば、常に真値を与えたものに対応している。

3) 計算結果と各図の見方

以上のようなサンプリング方法及び推定式により、 $I = Q_s(\text{推定値}) / Q_s(\text{真値: 実測値})$ を表-5.1に示す全河川・全水質項目について計算した⁴⁾ 淀川を例として、その結果を図-5.19 ~ 5.21に示す。

・図-5.19 (サンプリング方式・サンプリング回数に着目)

図-5.19には、各水質項目ごとに、サンプリング方式とサンプリング回数を変えた時に、各推定がどのような値を示すかをみたものである。図-5.19では、上段が等間隔サンプリングの場合であり、縦軸は I 、横軸は N_0 である。

サンプリング回数 N_0 (月当りの回数) = 0.5, 1.0, 3.0, 5.0 ごとに、それぞれ7本の線を記入している。これらは左から①~⑦式に対する値を示しており、各式のたて幅は2日前後させてサンプリングした感度分析による変動幅を示している。同様にして、中段・下段にそれぞれ高流況時主体、低流況時主体にサンプリングした場合のものを示し

ている。

・図-5.20 (各推定式に着目)

図-5.20は各推定式に着目したものであり、推定式ごとの推定精度および必要なサンプリング回数をみようとしたものである。図-5.20は、図-5.19と同様に縦軸が I 、横軸が N_0 である。各推定式ごとに、それぞれ太い実線・破線・細い実線の3本で一組になっている線が、水質項目数に等しい数だけ描かれている。3本一組の線は、右上の(注)に示すように、左から汚濁型の水質項目より始めて希釈型の水質項目の順 (濁度・ KMnO_4 消費量・ BOD ・ $\text{NH}_4\text{-N}$ の順) に I を示している (縦の幅は前述の感度分析による)。太い実線が等間隔サンプリング、破線が低流況時主体のサンプリング、細い実線が高流況時主体のサンプリングにそれぞれ対応している。

4) 考 察

上述の数値解析は、一つの試行であって完全な一般性をもっているものではないが、定性的な考察は可能であり、限られたサンプルによる年間総流出負荷量を推定することに関して次のことが明らかとなる。

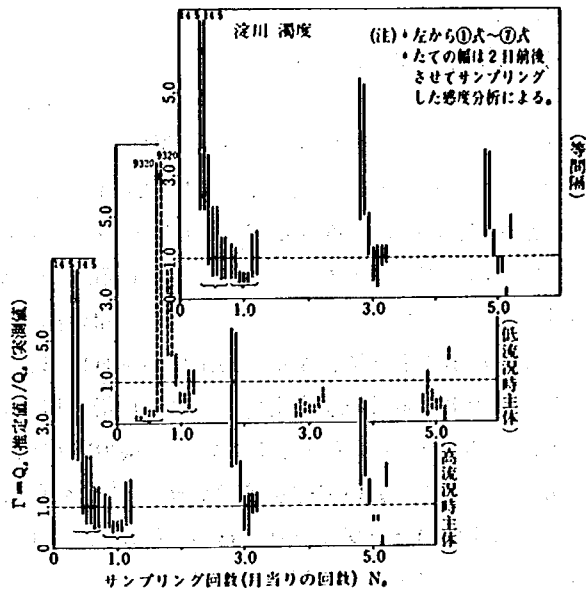
・サンプリング方法について

① 第4節2)において、流量に対する各水質項目の応答特性 (汚濁型・中間型・希釈型に分類) に着目して、サンプリング方法ごとの推定値と真値との関係についての理論的な考察を行ったが、実河川における検討においても、ちらばりはみうけられるものの、その結果が確認された。例えば図-5.19の淀川の例でも、汚濁型の水質項目 ($n > 0$: 濁度, KMnO_4 消費量) に対しては、高流況時主体 (あるいは等間隔) のサンプリング方式が他の方式に比較して相対的に良い結果を与えている。また希釈型 ($n < 0$) ではあるが n がゼロに近い $\text{NH}_4\text{-N}$ や BOD (水質は平均的にみると流量規模とほとんど無関係) については、サンプリングの方法にかかわらず真値に近い結果が得られている。

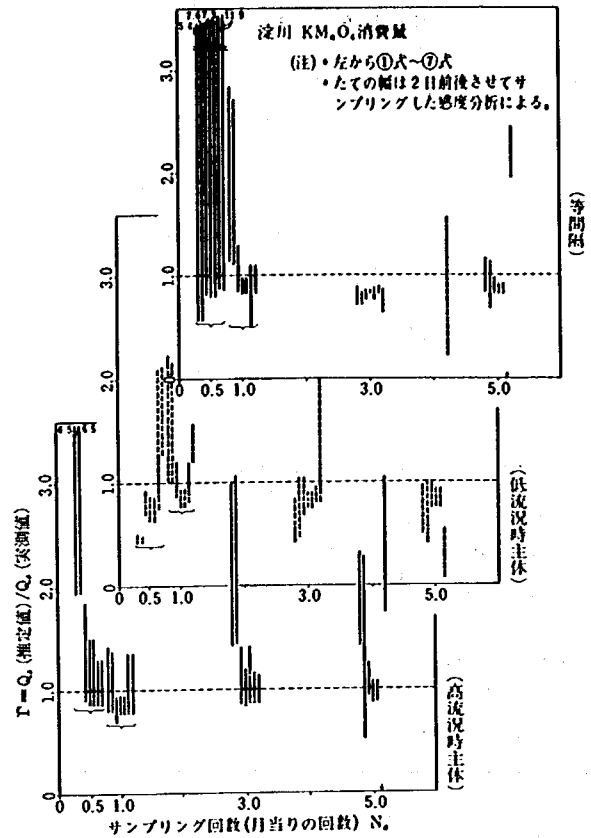
② 以上のことにより、年間総流出負荷量を限られたサンプルから推定する際には、水質と流量の関係に着目した水質の観測が必要であることが分る。すなわち、汚濁型 ($n > 0$) に対しては高流況時主体のサンプリングが要請され、また希釈型の場合 ($n < 0$) には低流況時主体のサンプリングが必要である。しかし、 $n \approx 0$ の中間型に近い水質項目については、流量規模にとらわれないサンプリングでよい。

③ したがって、従来から行われてきた低流況時に片寄った水質観測のもとでは、汚濁型の水質項目に対する総流出負荷量の推定においては真値より小さな値を得る可能性が高い。

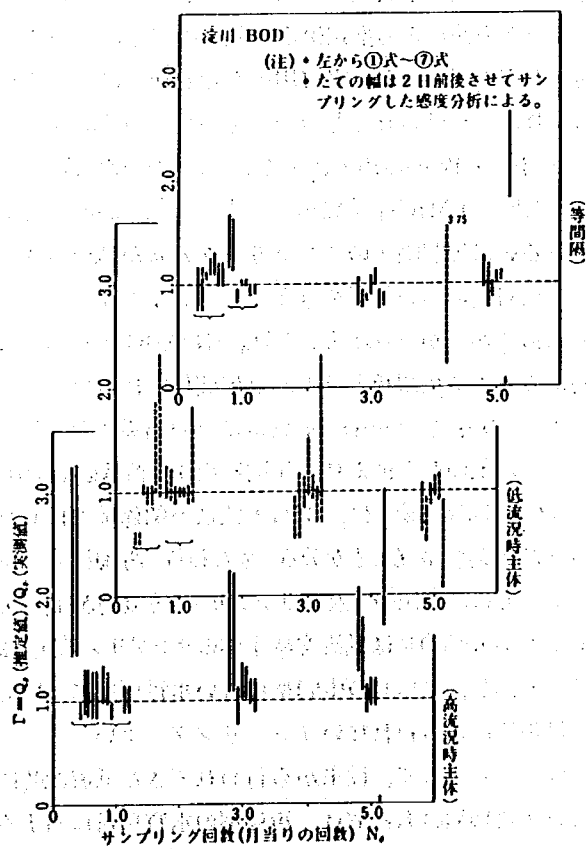
・推定式について



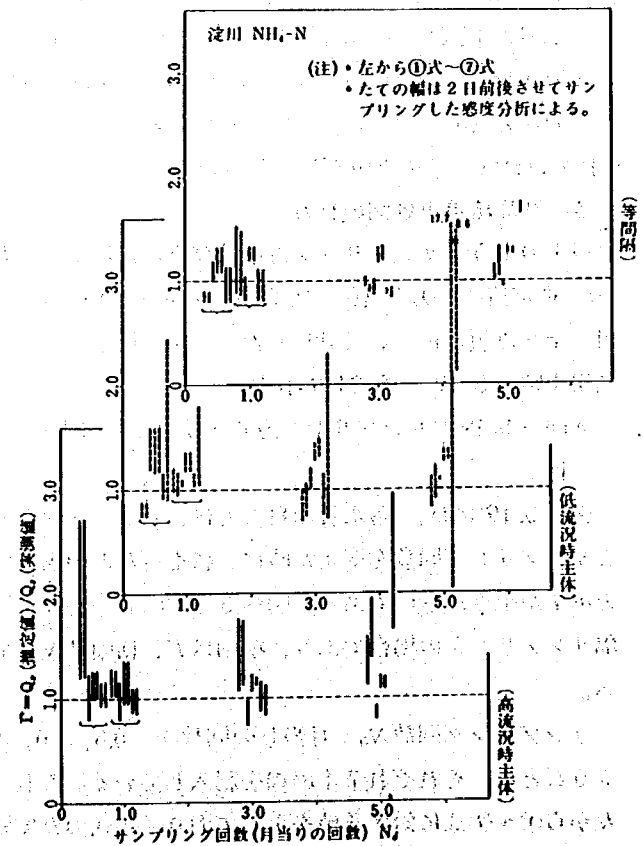
(a) (河川①: 濁度)



(b) (河川①: KMnO_4 消費量)

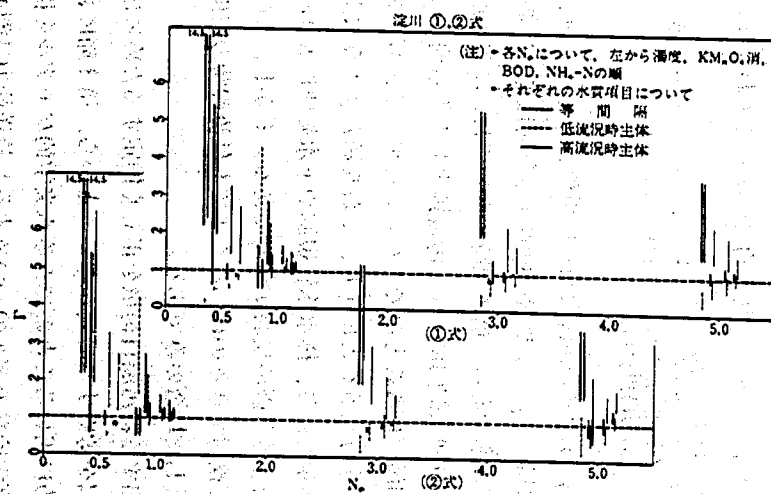


(c) (河川①: BOD)

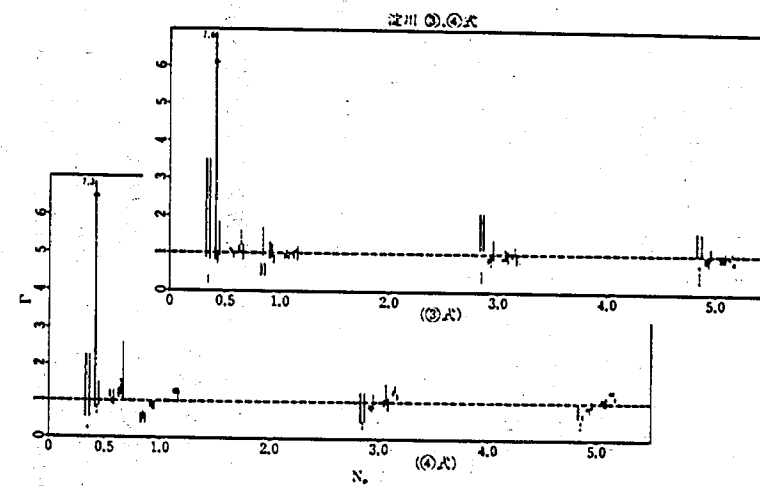


(d) (河川①: $\text{NH}_4\text{-N}$)

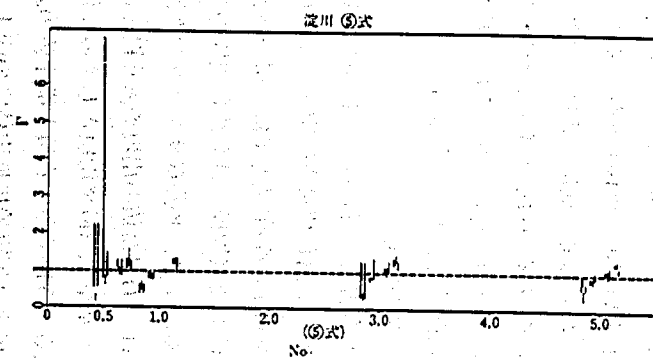
図-5.19 限られたサンプルによる年間総負荷量の推定(その1)



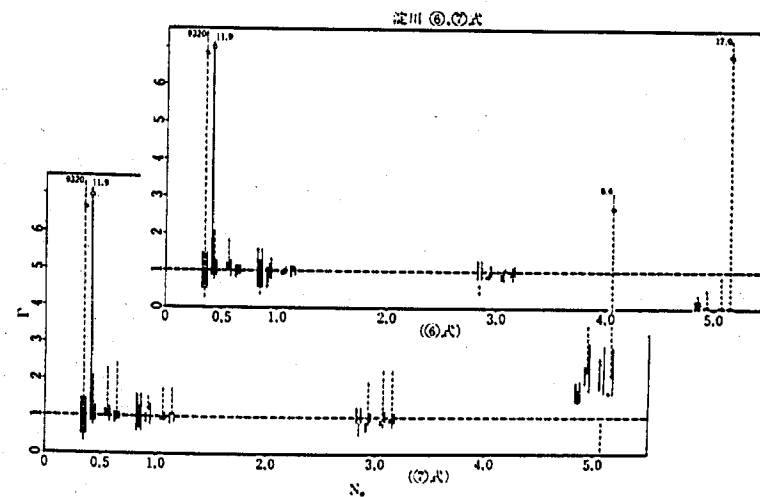
(a) 河川①：①，②式



(b) 河川①：③，④式



(c) 河川①：⑤式



(d) 河川①：⑥，⑦式

図-5.20 限られたサンプルによる年間総負荷量の推定(その2)

① 図-5.20が示すように、原則として水質観測時の水質と流量のみのデータから総流出負荷量を推定する①、②、④式についてみると、①、②式では推定誤差は相当大きい。それに対して④式は相対的に良い結果を示している。しかし、①、②、④式のような方法では、水質項目のタイプ（ $n \geq 0$ ）ごとに前述の理論的な考察で示された一定の片寄りをもった系統的な誤差が生じる。

② 流量データが十分とられている河川において用いることのできる③、⑤、⑥、⑦式のうちでは、計算方法が単純な③および⑥式が前述の④式とほぼ同様の推定値を与えている。レイティング・カーブを用いる⑤および⑦式は、第4節1)、③の検討において、サンプリング方法にかかわらず最も正しい推定を行う方法であることが示されたが、限られたサンプルのみから係数を機械的に同定すると大きな誤差が生じる傾向にある。

③ 以上より、水質・流量データがサンプリング時のもののしか無い場合には、④式が相対的に良い結果を与えることがわかる。また、流量データが十分そろっている場合には、③式あるいは⑥式が相対的に安定した結果を示している。しかし、③、④、⑤式においては、水質項目のタイプ（ $n \geq 0$ ）とサンプリング方式との関係により、一定の片寄った系統的な誤差が生じる。

④ ⑥および⑦式のレイティング・カーブによる方法は、係数を機械的に同定すると大きな誤差が生じるが、係数 b あるいは b' を文献1)、2)に示されるような平均的な値で与えるか、あるいは長期間の（しかも広い流量規模の範囲をカバーする）データを用いて定めた係数を与えると、一定の片寄った誤差が生じないので、逆に言えばそのための観測体制を整えることが望まれる。なお、レイティング・カーブによる方法（「流送能力」型モデル）をさらに発展させると、「流送能力・供給関数」型モデルとなる。

・サンプリング回数について

一般的な水質項目（有害物質等は除く）に関していえば、ある与えられた精度で総流出負荷量を推定するために必要なサンプリング回数を規定する要因としては、用いる推定式・水質項目・流域条件（流域規模と社会活動規模の相対値の関数）が挙げられる。また、必要なサンプリング回数を決定する方法としては、(i)異常値の出現をある程度におさえる（超過確率でみる基準）、(ii)平均値としてみた場合の誤差がある範囲に入るようにする（真値と推定値の誤差でみる基準）、(iii)さらにより現実的に推定精度の向上が十分期待される回数までとる（観測の効率性でみる基準）などが考えられる。しかし、今回の限られた試行から必要なサンプリング回数を一般的に示すことはできないので、若干

の定性的な考察を加えるにとどめる。

①～⑥の各式では、水質項目ごとに一定の片寄った誤差が生じているものの、サンプリング回数と推定値との関係は明確に認められる。例えば淀川の各水質項目についてみると、月1回程度の観測による③、④、⑥式を用いた推定では、濁度の誤差は±50%程度以内、 KMnO_4 消費量、BOD、 $\text{NH}_4\text{-N}$ は±25%程度以内である。全般的な傾向として、月1回程度のサンプリング回数とさらに回数を増した場合の推定精度はあまり違っておらず、したがって実用的には月1回程度が妥当と思われる。精度をさらに向上させるためには相当サンプリング回数を増すことを覚悟しなければならない。

5. 原単位・流達率に基づく従来の取り扱い方法の限界とその改良

第2節の河川水質・負荷量の変動特性解析および第3、4節の推定に関する考察より、河川を流下する総汚濁負荷量は水文学的要因（降雨・流量）によって強く規定されることが明らかとなった。このことから、水文学的要因を説明変数として含まない原単位・流達率法^{2)、23)、24)}によって総負荷量を推定することには限界があることが示された。したがって、出水時も考慮に入れて流域からの総流出汚濁負荷量を推定し、その規制方法を合理的に検討するためのモデルについて考察する。

原単位・流達率モデルは、基本的には次式で表わされる。

$$Q_j' = \sum_j \underbrace{(d_j \cdot D_j)}_{\substack{(j \text{ 利水要素か} \\ \text{らの排出負荷量})}} \cdot \underbrace{e_j}_{\text{流達率}} \quad \dots\dots\dots (19)$$

ここに、 d_j ： j 要素の汚濁負荷量原単位、 D_j ： j 利水要素の水利用量、 e_j ： j 要素の位置から負荷量 Q_j の測定地点への流達率である。低流況時においては、式(19)を用いることにより利水部門に関する汚濁排出源とある地点の負荷量とを関係づけることができる。したがって、ある地点で水質基準を与えることにより、それを満たすような水利用状況を推定したり、排水水質規制や下水処理により河川水質を改善する計画の検討が可能である。しかし、この方法によって検討できるのは、あくまでも低流況時の河川水質を対象とした場合のみである。

一方、流出する総汚濁負荷量を正しく推定するためには、水文学的要因を考慮する必要があることから、第3節においてそのために用いることのできる水文学的なモデルを提案した。水文学的なモデルの一つである「流送能力」型モデルを例として、原単位・流達率法によるモデルと対比することにより、両モデルの意味を明確にする。「流送能力」

型モデルは式(8)により表現される。式(9)と式(8)を比較し、式(9)が低流況時のみに適用されることを考えると、式(8)の A_0 と式(9)の Q_0' がほぼ同じであると見なせる。

$$A_0 \approx Q_0' \quad \dots\dots\dots (20)$$

このように考えると、出水時をも考慮に入れて河川の汚濁負荷量 Q_0 を正しく表現する式として、次式が近似的に成り立つことが類推される。

$$Q_0 = \sum_j (d_j \cdot D_j) \cdot e_j + (-1)^M a (|Q - Q_0|)^b$$

$$(Q > Q_0 : M = 2, Q < Q_0 : M = 1)$$

\dots\dots\dots (21)

式(21)を導く際に「流送能力・供給関数」型モデルを用いると、排出された汚濁負荷量の蓄積を考慮した式が得られる。

$$Q_0 = \sum_j (d_j \cdot D_j) \cdot e_j + a' Q^{b'} L^{c'}$$

\dots\dots\dots (22)

式(21)および(22)は、出水時に流出する負荷量を正しく表現するように原単位・流達率モデルを拡張したものであり、第3節の検討から河川の実測データにより低流況時および出水時の特性を表現しうることが確認されている。

これらの式を用いる場合には、次のことを念頭においておく必要がある。従来の原単位・流達率法のデータは、主として家庭・業務・工業・畜産等の点源負荷量について観測されたものである。ところが、出水時には低流況時に排水路・下水道・河川に蓄積したものが線源負荷として流出する。さらに、山地・市街地・農地といった面源からの流出負荷量がある。線源・面源(ノンポイント・ソース)からの負荷量の流出機構については、ほとんど計測が行われておらず、わずかに地表面・下水管路内の残存負荷量についての測定が2,3行われているにすぎない^{14), 24)}。ポイント・ソース負荷量とノンポイント・ソース負荷量の大きな比率については、筆者が山王川・恋瀬川・園部川の比較分析により求めたもの³⁾、茨城大学農学部²⁵⁾などがある。また、建設省猪名川工事事務所では流域をいくつかのブロックに分けて流量・水質観測を行って、水文学的要因を考慮したモデルの検討を行っている²⁶⁾。しかし、流出負荷量と排出負荷量と排出源との対応を明確にするためには、今後さらに排出源での負荷量調査、あるいは河道や排水路等での残存負荷量調査が必要である。

以上の検討から、式(21)あるいは(22)を用いることにより、出水時をも考慮に入れて流域から排出される汚濁負荷量を合理的に算定し、その規制計画について検討しうることが示された。したがって、本論文の第2章および第3章では低流況時に流域から排出される負荷量を原単位・流達率モ

デルにより算定したが、ここで提案したモデルを用いることにより、出水時にも考慮した総流出負荷量を算定することが可能である。

6. ま と め

本章では、水利用率の上昇した流域の下流にある停滞性水域の水質保全のためには、流域から排出される総汚濁負荷量を規制する必要があることから、そのための手法について検討した。以下に主な結果について述べる。

① 従来の水質に関する検討は、主として低流況時を対象としていたことから、出水時を含む汚濁負荷量の流出特性についての十分な調査・研究が行われていない。したがって、大小8河川での水質・流量の毎日観測データを用いてその特性を解析し、汚濁負荷量の多くが降雨流出に呼応して流出していること、および低流況時に流出する負荷量と出水時に流出している量を分離することにより、従来の低流況時のみを対象とした取扱いでは総流出負荷量の一部分しか評価していないことを明らかにした。さらに、水質項目は、流量が大きくなるにつれて水質が悪化する汚濁型、良くなる希釈型および流量規模に関係しない中間型に分類しうることが示した。

② 以上の検討から、流出負荷量を正しく評価するには降雨流出を考慮に入れる必要があることが明らかにされた。したがって、流量を説明変数に加えた2種類の汚濁負荷量シミュレーション・モデルを提案した。一つは流量のみによる「流送能力」型モデルであり、あと一つは流量および汚濁負荷量の供給・蓄積を考慮した「流送能力・供給関数」型モデルである。これらのモデルを前述の8河川に適用した結果、年間総流出負荷量を±30%以内の誤差で推定しうること、および汚濁型の水質項目は「流送能力」型モデルで十分であるが、希釈型あるいは中間型の水質項目には「流送能力・供給関数」型モデルの適合性が良い傾向にあることなどが明らかにされた。

③ 通常の河川では水質観測が月に1回程度しか行われていないことから、限られた水質データから年間総流出負荷量を推定する方法を提案し、8河川に適用した結果次のことが明らかにされた。推定式に関しては、流量はできるだけ正しく与える推定式を用いた場合が従来の低流況時のみを考慮する方法に比較して推定精度が良いこと、また汚濁型および希釈型の水質項目については流量規模を考慮したサンプリングを行わなければ系統的な誤差が生じることが知られた。サンプリング回数については、月1回から5回まで増しても推定精度があまり向上しなかったことから、実用的には月1回程度が妥当であると判断された。

④ 上述の検討で明らかにされた汚濁負荷量の流出特性を考慮に入れて、流域から排出される負荷量を正しく評価するモデルとして、低流況時の原単位・流達率モデルに出水時の水文学的なモデルを結合した新しいモデルを提案した。このモデルを用いることにより、汚濁負荷の排出源と流出負荷量との対応づけを原理的に行うことができる。モデルの妥当性は流域の下流端で検証されたが、点源・面源からの排出された負荷量が河道等に堆積し、流出する過程での検証は今後に残された課題である。

参考文献

- 建設省河川局河川計画課ほか：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。
- 建設省編：流域別下水道整備総合計画調査（指針と解析），日本下水道協会，1977。
- 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)，土木研究所報告，No 151，1978。
- 山口高志・吉川勝秀：河川の水質・汚濁負荷量に関する研究(II)，土木研究所報告，No 154，1980。
- 山口高志・吉川勝秀・奥石洋：河川の水質・負荷量に関する水分学的研究，土木学会論文報告集，No 293，1980。
- 吉川勝秀：河川水質・汚濁負荷量の変動特性とその推定，第24回水理講演会論文集，1980。
- 吉川秀夫：浮遊流砂量に関する二，三の考察，土木研究所報告，No 83，1952。
- Gunnerson, C. G. : Streamflow and Quality in the Columbia River Basin, Proc. ASCE, Vol. 93, No SA 6, 1967。
- 羽田守夫：雄物川の水質の変動特性とそのモデル化，土木学会論文報告集，No 265，1977。
- Walling, D. E. : Assessing the Accuracy of Suspended Sediment Rating Curves for a Small Basin, Water Resources Research, Vol. 13, No 3, 1977。
- 山口高志・吉川勝秀・浅野富夫：河川水質・負荷量の変動特性とそのシミュレーション，土木技術資料，Vol. 22, No 9, 1980。
- Ledbetter, J. E., Gloyna, E. F. : Predictive Techniques for Water Quality-Inorganics, Proc. ASCE, Vol. 90, No SA 1, 1964。
- U. S. Environmental Protection Agency : Storm Water Management Model, EPA Water Quality Office, 1971。
- Sartor, J. D., Boyd, G. B. : Water Pollution Aspects of Street Surface Contaminants, U. S. Environmental Protection Agency, EPA-R2-72-081, 1972。
- 山口高志：雨天時合流式下水道からの汚濁流出シミュレーション，土木技術資料，Vol. 18, No 2, 1976。
- 建設省近畿地方建設局淀川工事事務所：降雨時の河川水質の挙動について，1974。
- 高畑征三郎・神山桂一：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。
- Hall, F. R. : Dissolved Solids-Discharge Relationships. I. Mixing Models, Water Resources Research, Vol. 6, No 3, 1970。
- 新田正：河川の水質の変動に関する研究，東京工業大学学報，No 20, 1961。
- 建設省河川局河川計画課：河川水質変動の一般的特徴について，1978。
- 鈴木義一郎：統計解析法の原理，朝倉書店，1977。
- 環境庁：瀬戸内海・伊勢湾・東京湾における総量規制方式策定調査報告書，1977。
- 野間紀文ほか：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, 12, Vol. 20, No 2, 3, 1977~'78。
- 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，No 1019, 1975。
- 茨城大学農学部霞ヶ浦研究会：霞ヶ浦，三共科学選書，1977。
- 建設省近畿地方建設局猪名川工事事務所：猪名川渇水時流水管理計画検討業務報告書，1979。
- 建設省関東・中部・近畿地方建設局：東京湾・伊勢湾・瀬戸内海流入河川汚濁負荷量算定手法調査報告書，1979。
- 建設省近畿地方建設局：非点源汚染に関する調査，1978。
- 日本地球化学会編：水汚染の機構と解析，産業図書，1978。
- Hetting, L. J., Sykes, R. M. : Sources of Nutrients in Canadarago Lake, Journal, Water Pollution Control Federation, Vol. 45, No 1, 1973。
- Shannon, E. E., Brezonik, P. L. : Eutrophication Analysis, A Multivariate Approach, Proc. ASCE, Vol. 98, No SA 1, 1972。
- 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.
- 33) 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.
- 34) 高森義親・田淵俊雄: 水田肥料の流出と陸水の富栄養化, 河川水質年鑑, 1977.
- 35) Walling, D. E.: Assessing the Accuracy of Suspended Sediment Rating Curves for a Small Basin, Water Resources Research, Vol. 13, No 3, 1977.
- 36) O'Connor, D. J.: The Concentration of Dissolved Solids and River Flow, Water Resources Research, Vol. 12, No 2, 1976.
- 37) 宮永洋一・安芸周一・斉藤茂: 貯水池流入河川における水温・濁度の現地観測および予測, 第23回水理講演会論文集, 1979.
- 38) 橋治国・那須義和: 河川における汚濁物質の流出機構, 第11回水質汚濁研究に関するシンポジウム講演集, 1977.
- 39) Thomas, G. W., Crutchfield, J. D.: Nitrate - Nitrogen and Phosphorus Contents of Streams Draining Small Agricultural Watershed in Kentucky, Journal of the Environmental Quality, Vol. 3, No 1, 1974.
- 40) Guy, H. P.: An Analysis of Some Storm-Period Variables Affecting Stream Sediment Transport, U. S. Geological Survey, Professional Paper, 462 - E, 1964.
- 41) Cahill, T. H. et al.: Evaluation of Phosphorus Dynamics in a Watershed, Proc. ASCE, Vol. 100, No EE2, 1974.
- 42) Cordery I.: Quality Characteristics of Urban Storm Water in Sydney, Australia, Water Resources Research, Vol. 13, No 1, 1977.
- 43) 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.
- 44) Loehr, R. C.: Characteristic and Comparative Magnitude on Non-Point Sources, Journal, Water Pollution Control Federation, Vol. 46, No 8, 1974.
- 45) 稲場紀久雄: 雨天時下水の水量水質制御に関する研究, 京都大学博士論文, 1975.
- 46) Wanielista, M. P.: Stormwater Management, Quantity and Quality, Ann Arbor Science Publishers Inc., 1978.
- 47) Rutherford, J. C., O'Sullivan, M. J.: Simulation of Water Quality in Tarawera River, Proc. ASCE, Vol. 100, No EE2, 1974.
- 48) Gupta, S. K., Solomon, S. I.: Distributed Numerical Model for Estimating Runoff and Sediment Discharge of Ungaged Rivers, 3. Comparison with Other Simple Techniques, Water Resources Research, Vol. 13, No 3, 1977.
- 49) 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.
- 50) Bailey, R. R. et al.: Predicting Pesticide Runoff from Agricultural Land, A Conceptual Model, Journal of Environmental Quality, Vol. 3, No 2, 1974.
- 51) Coughlin, R. E., Hammer, T. R.: Stream Quality Preservation through Planned Urban Development, U. S. Environmental Protection Agency, Report No EPA-A5-73-019, 1973.
- 52) Crawford, N. H., Donigian, A. S.: Pesticide Transport and Runoff Model for Agricultural Lands, U. S. Environmental Protection Agency, Report No EPA 660/2-74-013, 1973.
- 53) 松本順一郎(研究代表者): 水域の水質予知と水質制御(研究発表論文集), 文部省研究費特別研究(I), 1975.
- 54) 和田安彦: 非点源負荷の定量化と流出管理(1), (2), 環境技術, Vol. 9, No 11, 12, 1980.

第6章 結 語

1. 総 括

流域の社会活動が拡大するにつれて水需要量が増大し、河川水の利用率が上昇している。その結果、利水者間、上下流間あるいは水利用と水環境間の競合が顕在し、水量・水質をめぐる総合的な調整を必要とする段階に至っている。さらに、計画を超過する渇水が深刻になり、また停滞性水域の水環境の悪化といった問題が生じている。これらの問題は、水資源開発の初期の段階では相対的に無視し得たが、水需要量が増大するにつれて、水資源計画上の新たな課題となったものであり、問題の本質を解明するには、河川水量に対する取水量の比と定義される水利用率に着目する必要がある。

本論文は、水利用率の上昇によって生じるようになった新たな課題を以下のように細分し、その解明を行ったものである。一般に、水利用率の上昇は上に述べた競合の問題を顕在化させるので、その総合的な調整が必要とされることから、第1の課題として流域の水循環・水利用の総合的な分析方法を取りあげた。この課題に対しては、システム論的観点から総合的かつ多角的な取り扱いを試みた。次に、水利用率の上昇がもたらす問題のうち、特に重要であると考えられる次の三つをとりあげ、詳細に分析した。すなわち、種々の競合の問題は、ある利水行為が流域の水循環系を介して他に影響を及ぼすことによって生じることから、水循環形態と水利用・水環境との関係を解明する必要がある、第2の課題としてはこの問題をとりあげ、水循環に関する詳細な考察を行った。第3の課題としては、深刻化する超過渇水の問題をとりあげ、それに対処するための計画手法について検討した。第4の課題は水環境に関するものであり、流域から排出される汚濁負荷量の評価とその規制方法について検討した。

本論文は6章から構成されており、以下に第1章から第5章までの内容と主な結果について述べ、本論文を総括する。

第1章では、わが国の水利用の歴史的な変遷について概観し、水資源開発が進むにつれて上述の問題が生じるようになったことを明らかにした。さらに既往の主な研究について述べ、本論文で設定した課題の研究方針を明確にした。

第2章では水循環・水利用に関する総合的な分析を行った。流域の水利用率が上昇するにつれて顕在化する競合の

問題を解明して、その調整を行うためには、流域の水循環状況を水利用との関係を明確にした上で総合的に把握する必要がある。しかし、そのための総合的かつ体系的な把握方法については、ほとんど研究が進められていない。したがって、自然水および用・排水を含めた水循環の状況を体系的に表現する手法について検討した。

水循環を表現するためには、水のうけわたしを行う要素を設定する必要がある、本論文では一般的な要素として、河川・地下・上水道・家庭・業務・工業・農業・下水道・流域(斜面)・ため池・系外(降雨・蒸発散)の11を設定した。流域の水循環状況は、同一地区内でのこれら要素間、および同一要素内の地区間の水の移動として表現される。そのような水の移動状況を体系的に把握する手法として、水資源連関表を提案した。水資源連関表は産業連関分析における連関表と類似しており、各マス目に水のうけわたし量を記入する。水資源連関表としては、年間の平均量を考えて、要素内での貯留量の変化が無視できる場合に用いられるものと、分析対象期間内の水量変化および貯留量変化を考慮するものの2種類があり、後者を用いれば任意のタイムスケールを設定して水循環を把握できる。

水資源連関表を用いて水循環を正しく把握するためには、対象流域の水移動特性および水利用特性を考慮して、要素、地区分割および分析対象期間と期間分割を適切に定める必要があることから、それらの一般的な設定方式を提示した。

次に、水資源連関表により表示される水循環・水利用状況をモデル化し、総合的な水資源計画モデルを開発した。このモデルは多目的最適化モデルであり、水量・水質の連続条件と運動条件(物理的制約)および社会・経済・環境面から要請される社会的制約条件を満たした上で、水資源計画上の複数目的を追求する計画案について検討することができる。さらに、水配分・水利用状況を変化させたときに、水循環および社会・経済・環境指標にどのような影響が及ぼされるかを推定することができる。また逆に、社会・経済・環境指標をある水準まで高めるには、水配分をどのようにすべきかを分析することも可能である。前述の競合の問題は、単一目的の最適化によって分析され、その調整は多目的最適化によって検討される。モデルは線形計画法により定式化されているが、制約条件や目的関数の非線形性は、部分線形化することにより考慮できる。

水利用率が約40%と高い大和川流域の奈良盆地に提案した水資源連関表およびモデルを適用し、水循環・水利用の

分析を行うとともに、総合的な水資源計画について検討した。その結果、水循環・水利用の分析に関しては、水資源連関表を用いることにより、詳細な水循環状況を統一的に把握でき、さらにその結果を整理することにより、大略的な水循環・水利用特性の抽出、水利用上の問題点の発見、あるいは各地区ごとの水利用率の算定が可能であることが知られた。モデルを用いた分析では、例えば同流域では上流域で多量の水利用が行われており、排出される汚濁負荷量も多いことから河川水質（BOD）が悪化し、水質基準が満足されない状況が生じていること、また今後水需要量が急激に増加すると予想され、水需給がひっ迫し渇水被害が深刻化することなどが明らかにされた。さらに、このような競合の問題は、モデルを用いることにより詳細かつ定量的に評価でき、それを緩和するための水資源対策案の設定、あるいは社会・経済・環境指標をある水準にするための水資源計画案についての定量的な検討も可能であることが確認された。

以上のことから、提案した水資源連関表およびモデルは、水利用率の上昇した流域において総合的かつ多角的に水資源計画を検討する上で有効であることが検証された。

第3章では水循環に関する考察を行った。

第2章で総合的に検討された競合の問題の多くは、取・排水システム形態と密接に関連して生じている。しかも、取・排水システムの改変・構築は、ある特定の目的を追求して行われることが多く、その結果他の利水者や水環境との間で種々の摩擦を生じさせているのが実状である。したがって、取・排水システムの形態と競合問題との相互関係を分析する必要があることから、その関係を詳細に分析した。近年の取・排水システムの改変は都市用水に関して行われることが多いため、この検討は都市化流域の取・排水システムを対象として行った。

都市化流域の取・排水システムは、上流で取水された水が河川に還元し、下流で再び利用されたかつての伝統的なシステムから、例えば清浄な水源を上流に求めるために広域水道を導入したもの、あるいは効率的に河川水質を改善することを目指して流域下水道を導入したものなどに変わってきた。このようにある目的を追求するシステムに移行することにより、流域内の水循環状況が大きく変化するため、特定の目的は達成し得たとしても、他の利水者あるいは水環境に大きな影響を与えることが知られている。しかし、取・排水システム形態と利水特性あるいは水環境との関係、および形態間の移行による利害得失についての定量的な検討はほとんど行われていない。

したがって、既存のシステム形態および将来作られる可能性のある形態を比較分析し、都市化流域の取・排水システムを伝統的循環利用型、流域下水道型、広域水道型、広域水道・流域下水道型、二元給水循環利用型および二元給水再生利用型(I)~(Ⅳ)の8つの基本的な形態に類型化した。これらの形態と流域の社会活動との関係を調べたところ、それぞれのシステムは構築された時代の要請に整合しており、システムの移行にもある傾向があることが知られた。すなわち、伝統的な開放系の循環システムから広域水道型や流域下水道型のような一過型のシステムに移行し、さらには河口堰および再生水資源開発施設から水供給を行うシステムにまで移行する傾向が認められた。

次に、水利用の経済性、水資源開発の効率性、取水の水量・水質的な安全性、エネルギー消費および水環境に関する10の指標を設定し、類型化した8つのシステム形態のもとでの利水特性および水環境の特性を定量的に分析した。その結果は一覧図として整理され、この図により各システムごとの特性の相互比較が可能となった。したがって、この図により、ある目的を追求して新しい取・排水システムに移行したときの利点、および他の利水者や水環境への影響を予め推定することができる。さらに、取・排水システムの改変が避けられない流域においてこの図を活用すれば、流域水循環形態の適正化という観点から、新たな取・排水システムのあり方を探ることが可能である。

以上の検討から、計画上の理念が確立されていない水量と水質の取り扱い方、用水の還元を計画上見込まない現在の方式から見込む方式に移行する場合の問題、およびシステム間の移行による利水安全度の変化の問題などについての定量的な知見を得ることができた。例えば、都市用水のような特定用水の還元を見込むようになると、水供給容量は増大するが利水安全度は低下すること、また伝統的な循環システムから広域水道型や流域下水道型のシステムに移行すると、利水安全度が低下することなどを定量的に評価しうることが知られた。

流域の水循環形態は水利用・水環境を強く規定するものであり、個々の目的を追求する取・排水システムの改変計画は、水利用率の上昇につれて、流域の水循環の適正化という側面からも評価される必要性が生じてくる。上述の検討結果を用いることにより、その場合の定性的な評価が可能であり、また同様の手順による分析を行うことにより、定量的な評価も可能となった。

第4章では超過渇水に関する考察を行った。

わが国の水資源開発の多くは、貯水池による流況調整に

よって行われている。貯水池による水資源開発は、概ね 1/10 の生起確率の渇水を対象として計画されていることから、計画を超過する渇水にみまわれる可能性がある。しかし、従来の水資源計画では概ね 1/10 の渇水のみしか対象とされておらず、超過渇水を考慮に入れていない。最近になって、既存の施設のもとで超過渇水が生じた場合の対応策として、施設の最適操作および最適節水に関する研究が行われ始めているが、これらの水管理ルール合理化のみでは大規模な超過渇水に対処することはできないことから、超過渇水への対応を予め考慮した水資源計画手法を確立する必要がある。

したがって、第4章ではまず計画で対象とした渇水の超過確率と耐用年数とから超過渇水の生じる確率を算定した。その結果、例えば利水安全度 1/10 で計画すると、10年間 65% の確率で超過渇水が生じることが示された。利水安全度 1/10 は、現在の水資源開発計画の基準とされているものである。この検討においては、さらに大規模な超過渇水が生起する確率も算定された。

次に、一般的な流域の流況データを用いて、超過確率のみを対象とした貯水池容量 S_1 、水不足の程度を示す不足%・日を対象とした容量 S_2 、および単位給水量当りの渇水被害額（渇水被害率）を対象とした容量 S_3 を計算した。その結果を検討したところ、水利用率が上昇するにつれて、 S_1 に比較して S_2 および S_3 が大きくなることが知られた。 S_1 は現在の水資源計画方式で求まるものであり、 S_2 および S_3 は渇水被害率を増大させないために必要とされるものであることから、現在的方式で利水安全度を一定として水開発を行っていけば、水利用率の上昇とともに渇水被害総額だけでなく、被害率も増大することが判明した。この理由の一つは水供給施設の特性によっており、水利用率が上昇するにつれて貯水池からの水補給量が飛躍的に増大し、したがって超過渇水時の水不足の程度も飛躍的に増大するためである。あと一つは、近年の水利用率の上昇が渇水被害額原単位の大きな都市用水需要量の増大によっているため、地域社会が渇水被害をより受け易くなっているためである。

以上のことから、水利用率が上昇するにつれて、超過渇水を予め考慮に入れた計画方式が必要であることが明らかにされた。超過渇水を考慮に入れた計画としては、利水安全度を概ね 1/10 として通常の水資源開発を行い、それに加えて超過渇水対策用の施設も準備する方法、および超過渇水を考慮した上で適切な利水安全度を定めて水資源開発を行う方法が考えられる。したがって、このような超過渇水を考慮に入れた計画を可能にする理論を提案し、数理モデルとして定式化した。モデルは費用便益分析に基づくも

のであり、超過渇水対策施設の最適規模および最適利水安全度を算定することが可能となった。提案したモデルにおいて超過渇水を考慮に入れないとすれば、既往の計画理論式が導かれる。

このモデルを想定流域に適用した結果、超過渇水対策の最適規模および超過渇水を考慮に入れた適切な利水安全度を求めることができた。また、水利用率を上昇させながら超過渇水対策施設の経済的な規模を求めたところ、水利用率が低い段階ではどのような規模の超過渇水対策施設でも超過便益が正とはならないことが判明した。したがって、水利用率が低い段階では超過渇水対策を必要としないことから、従来の利水安全度を概ね 1/10 とする計画が妥当であったと判断された。しかし、ある水利用率以上になると超過便益が正となり、しかも水利用率が上昇するにつれてますます大規模な渇水に対処する施設で最適解が得られた。例えば、想定流域の検討では、従来の計画方式で通常の水資源開発が行われると、水利用率が約 50% になると超過渇水対策を作る必要性が生じること、また水利用率が 80% で約 1/50 といった大規模な超過渇水対策を必要とすることが知られた。

提案した理論を応用して、水コストの分析を行った。一般に、公企業では総支出が総収入にほぼ等しいとして水コストを算定しているが、超過渇水は考慮に入れていない。そこで、数理モデルを用いて超過渇水を考慮に入れた水コストを算定し、考慮に入れない水コストと比較した。その結果、水利用率が上昇するにつれて、よく知られている水資源開発効率の低下によるコスト上昇に加えて、超過渇水対策費用のためにコストがさらに上昇することが知られた。

以上の検討から、流域の水利用率が上昇するにつれて、超過渇水を予め考慮に入れた水資源計画が必要となることが示され、そのためには提案したモデルが有効であることが確認された。

第5章では流域から排出される汚濁負荷量に関する考察を行った。

わが国では、水資源計画における水質の検討は、水質汚濁防止法等との関係から主として低流況時の河川水質に対してなされ、排出原単位・流達率法による河川水質の推定法が確立された。この方法に基づいて、河川水質を改善するための下水道整備計画や排出規制が行われたことから、多くの河川で低流況時の河川水質の改善が認められるようになっている。ところが、それらの対策が実施されて低流況時の河川水質が改善されたにもかかわらず、水利用率の高い流域の下流にある停滞性水域の水環境が悪化している。

このような停滞性水域の水環境の悪化を規定する大きな要因は、流入してくる総汚濁負荷量であるが、従来の研究では低流況時の河川水質を対象としていたことから、出水時を含めた汚濁負荷量の流出特性は必ずしも十分に調べられていない。

したがって、出水時を含めた河川水質・汚濁負荷量の流出特性を明らかにする必要がある。そこで出水時も含めた汚濁負荷量の流出特性を、大小の8河川で毎日観測した水質・流量データを用いて解析した。その結果、流量規模と水質の関係から、水質項目は流量が大きくなると水質が悪化する汚濁型、希釈されて良くなる希釈型および流量規模にほとんど関係しない中間型に分類しうることが示された。また、流出する汚濁負荷量を低流況時分と出水時分に分離した結果を比較検討することにより、出水時に多くの負荷量が流出していることが明らかにされた。したがって、低流況時を対象とした原単位・流達率法では、現実の総流出負荷量の一部分しか評価していないことから、降雨流出をも考慮に入れた流出汚濁負荷量の算定が必要であることが示された。

そこで、説明変数に河川流量を加えた二つのタイプの水質・負荷量のシミュレーション・モデルを提案した。これらの水文学的モデルは、流量のみ考慮する「流達能力」型、流量および汚濁負荷量の供給・蓄積を考慮する「流達能力・供給関数」型である。それぞれのモデルを8河川に対して適用したところ、総汚濁負荷量が±30%以内の誤差で推定しうること、および水質項目ごとにどちらのモデルの適合性が良いかが明らかにされた。例えば、濁度(濁質)・ KMnO_4 消費量のような汚濁型の水質項目については、パラメータの少ない「流達能力」型で十分であるが、中間型あるいは希釈型であるBODや $\text{NH}_4\text{-N}$ のような水質項目には、「流達能力・供給関数」型の方が適合性が良い傾向にあることが知られた。

次に、多くの河川では月に1回程度しか水質が観測されていないことから、限られた水質データと流量から年間総流出負荷量を推定する方法について検討した。推定精度は、用いる推定式、サンプリングを行う流量規模およびサンプリング頻度によって異なるため、推定式としては水質観測日のみの流量を用いる式3つおよび流量は毎日観測したものより正しく与える式4つの合計7つの式を考えた。また、サンプリング方式は、低流況時主体、等間隔および高流況時主体の三つとし、サンプリング回数は月1回から5回まで変化させた。8河川での検討から、推定式としては一般に流量を正しく与える方法が従来の低流況時の流量のみを用いるものに比較して良い結果を与えること、サンプリング方法に関しては汚濁型の水質項目は

高流況時主体、希釈型は低流況時主体が良い結果を示し、中間型の水質項目はサンプリング方法とあまり関係しないことが明らかにされた。サンプリング回数については、月5回まで増加させても大幅な精度向上は認められなかったことから、実用的には月1回程度が妥当であり、さらに精度を向上させるには相当回数を増す必要があることが知られた。

以上の基礎的な分析を行った後に、流出汚濁負荷量を合理的に算定するモデルについて検討した。汚濁負荷量の流出は、上に示されたように流量のような水文学的要因に強く規定されるが、人口・工業・畜産などの流域指標との関係も認められる。低流況時の流出負荷量は社会活動と密接に関係しており、従来から用いられてきた排出原単位・流達率法はそれを端的に表現している。したがって、これら二つの汚濁負荷量流出特性を表現するモデルとしては、低流況時には排出原単位・流達率モデルを用い、出水時には水文学的なモデルを用いるのが合理的であることから、それらを結合したモデルを提案した。このモデルを停滞性水域に流入する総汚濁負荷量削減計画の検討で用いられれば、降雨流出の影響を十分に考慮した上で汚濁負荷の排出源と流入負荷量とを原理的に対応づけることができる。しかし、このモデルは流域下流端では検証されたが、流域内の各地点では検証されておらず、それが今後の課題として残された。

以上の検討から、水資源計画の一つの大きな要素である水質保全計画の一環として、流域から排出される総汚濁負荷量の規制計画を合理的に策定する手法が示された。

上に述べたように、本論文では水利用率の上昇によって新たに台頭してきた水資源計画上の課題に対して、全体を一つとして取り扱うとともに、特に本質的な問題についてはそれを抽出して詳細に検討するという研究方法をとった。第3章から第5章の課題については従来ほとんど研究が行われていないが、今後ますます水資源計画を策定する上で重要性が増すと考えられるので、本論文では特に重点的な考察を行った。水利用率の上昇した流域の水資源計画では、もちろん本論文で対象としたもの以外の諸問題についても検討を加える必要がある。しかし、取り扱った4課題は水利用率の上昇によって生じる本質的な問題点を内包していることから、それらの結果を用いることにより、水利用率の上昇を考慮に入れた計画の策定が可能であると思われる。

2. 今後の課題

1) 諸量の計測について

本論文では、総合的な検討において、現状では必ずしも十分な精度で計測されていない水循環・水利用に関する諸量をも考慮に入れ、精度的な整合性および誤差の消去法についての検討を行った。しかし精度を向上させるには、水収支に関する観測体制を整備し、継続的なデータ収集が必要とされる。また、超過渇水時の被害関数、確率水文学、水利用率ごとの施設費用、水コスト、排出負荷量および負荷量の蓄積状況等についてのより精度の高い計測が必要と思われる。

2) 確率水文学について

水資源開発計画は、ある生起確率の渇水を対象として立てられ、入力条件としての水文学量は、過去の実績をもとに統計処理されて用いられることが多い。渇水事象の再現性、統計処理に用いるデータの有限性などの理由により、現状では必ずしも信頼性が高くないことから、確率水文学の合理的な決定法が研究されるべきであろう。また、近い将来の渇水を予測する手法の研究も重要である。

3) 評価指標について

多角的な観点から計画代替案を選定する場合には、評価指標がきわめて重要である。水資源計画の評価指標は、時代あるいは地域性によって変化するが、本論文でふれたようにその変化にはある傾向が認められる場合も多い。そこで、評価指標の時代的な変化や地域性などを調査し、長期的な展望のもとで計画案を選定するための指標を明確にすることも重要である。

4) 水循環に関する考察の発展について

本論文では都市化流域を対象としたが、農水の水循環をも考慮することにより、水利用率の低い流域を対象とした研究も必要であろう。また、取・排水システム形態についても、現実のより複雑な場合を対象として分析することも必要と考えられる。その場合にも、本論文で提示した分析方法を活用することができよう。

5) 超過渇水に関する考察の発展について

渇水時における施設の最適操作および節水方式と本論文で提示した理論を結合した検討を行うことが考えられる。同様に、代替的水資源との組み合わせ、在庫管理、一時的疎開等を考慮した検討も必要と思われる。また、水資源の重要性に応じて、用水別・地域別に利水安全度を変えた場合の利害得失についての調査も重要であろう。

6) 流出負荷量に関する考察の発展について

汚濁負荷排出源と河川下流端の負荷量を関係づけるために、排出量調査および多地点同時水質流量調査を行って、提案したモデルを厳密に検証する必要がある。また、停滞水域の水質と流入負荷量の因果関係に関する調査・研究を

反映して、最適な負荷量規制方法について検討するとともに、流入負荷量を把握するための水質・流量観測システムについて研究する必要があると思われる。

7) 総合的な分析の発展について

上述の計測の問題および評価指標の問題の外に、時系列的な検討を容易にするために例えばシステム・ダイナミックスのようなシミュレーション・モデルを用いることも考えられる。その場合には、検討事項についてのシナリオ分析が重要となる。

3. おわりに

水資源計画では、物理的な事象と社会事象が同時に考慮されることから厳密な理論を構築するのがむずかしく、そのためにきわめて限定された対象のみを考えて、数理計画手法を適用し、総合的・多角的な水資源計画の研究とすることもある。しかし、本論文では最近の水資源計画上の課題の多くは、流域の水利用率が上昇したことによって生じており、それらの問題はいくつかの本質的な課題に分類しうるものと考えた。そして、できるだけ多くの課題を同時に考えるシステム論的な検討を行うと同時に、本質的に重要と考えられる課題に対してはより詳細な考察を行うという立場をとった。システム論的な検討においては、数理計画手法を活用した。また、詳細な考察を行った課題に対しては、できる限り現実的な問題点に配慮し、必要以上の数理解析的な取り扱いを避けた。

本論文に記した新しい視点からの水資源問題の取り扱いおよび手法は、水質源学の進歩に寄与するものと確信する。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、早稲田大学吉川秀夫教授（元東京工業大学教授）には終始高い視点からご指導をいただいた。土木研究所水資源開発研究室今村瑞穂室長には、水管理に関する行政上の諸問題についての幅広いお考えを聞かせていただき、参考にさせていただいた。四国地方建設局河川計画課関正和課長（元土木研究所）には、本研究に着手する機会を与えていただくとともに、ご指導を受けた。

また、東京工業大学日野幹夫教授、福岡捷二助教授、山梨大学竹内邦良助教授をはじめ、以下に示す方々からご助言とご協力をいただいた。土木研究所（敬称省略）、土屋昭彦（元河川部長）、山口高志（元総合治水研究室室長）、吉野文雄、村上健、岩松幸雄（元システム課長）、橋本健（元水文研究室研究員）

中村昭，石川忠晴，本間久枝，中島輝雄，桐生祝男。

その他（敬称省略）：町野健治，朴栄秀，高野悦二，奥石洋。

ここに，記して感謝の意を表します。

水利用率の上昇した流域における
水資源計画に関する研究

土研資料 第1641号
昭56年3月(1981)

キーワード 水循環, 水利用, 水配分, 取排水システム計画超過渇水,
河川水質, 汚濁負荷量, 水利用率

要 旨 河川からの取水量が増大し, 水利用率の上昇している流域に
おける水資源計画手法について検討した。主な内容は, 水循環・水
利用状況の総合的な把握手法, 水資源の配分, 取排水システム形態
と水利用・水環境との関係, 超過渇水を考慮に入れた水資源計画手
法および河川水質・汚濁負荷量に関する計画学的検討である。



郵便はがき

下を40
さは円
いっ切
て手

3 0 5 - □ □

茨城県筑波郡豊里町旭一番地
建設省土木研究所
総合治水研究室
御中

No. _____

No. _____

配布先氏名

配布先住所





土木研究所資料第 1641 号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名

印

