

2. 渇水をもたらす諸原因

もちろん、こうした渇水の主な原因として気象条件が挙げられるが、人口の都市集中及びそれに伴う業務・サービス活動の拡大により増大した都市用水の需要増、その需要を水源手当ての遅れを待てず、渇水時には取水できない不安定取水に依存するといった、本質的に渇水の影響を受け易い水利用構造を惹起してきたことにも原因があろう。しかも、近年の大都市圏における都市活動は常に正常な水利用ができることを前提に展開されているため、いったんこのような前提がくずれると、それによって受ける社会的・経済的影響は甚大とならざるをえない。以下では、こうした渇水をもたらす原因をいくつかの側面に絞って述べておく。

2.1 異常気象

渇水の自然的素因として異常少雨や異常高温が考えられる。降水量及び気温の経年変化と異常少雨については気象庁が昭和59年3月に発表した「近年における世界の異常気象の実態調査とその長期見通しについて(Ⅲ)」の中でふれられている。全国23地点の年平均気温と年降水量データの空間平均をとり、さらにその値を時間平均として5年移動平均値で示した結果によれば、年平均気温は10年程度の周期で変動を繰り返しながら、若干上昇傾向にある。また年降水量は1900年代から現在まで多雨期と少雨期が交互に出現し、1960年代から現在までは少雨期にある。また、近年の異常気象の発生状況は、異常高温とともに異常少雨の多発が特徴として指摘されている。

さらに、図-1は台風のわが国への襲来数を示したものである。1940年代後半から1950年頃と、1960年前後に多く、1960年代から1970年代中頃までは減少している。その後は減少傾向が止まっているようであるが、1984、1986年のように台風が1つも

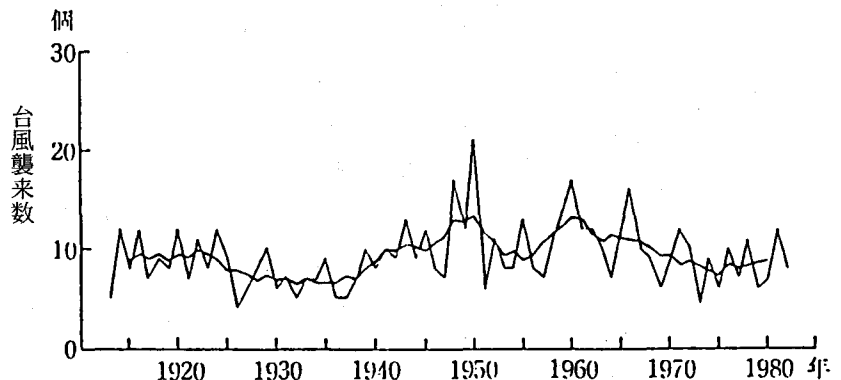


図-1 台風の日本への年間襲来数

太線は5年移動平均。襲来数には、上陸した台風のほか、日本列島の200～300km以内に接近した台風も含めた。

上陸しない年が出現している。なお、1986年8月東日本で記録的な大雨があったが、これは台風10号が温帯低気圧にか変わったものである。もちろん台風は風水害をもたらすので歓迎はできないが、近年の秋冬渇水の発生にはこうした台風の上陸数の少なさにも原因がありそうである。

2.2 河川水利用水準の上昇と不安定取水

全国年降水量と渇水発生地区数の関係を見ると、なるほど、降水量が減少するにつれて渇水の発生地区数は増加しているが、同時に年代別にみた場合、同様な降水量であっても年代が進むにつれて渇水発生地区数が増加していることが注目される。年代が進むにつれて水需要が増大していることが大きく係わっている。図-2は昭和33年以降の総水需要量及び農業用水・工業用水・生活用水それぞれの推移を示したものであるが、この間の水需要増が明らかである。

ところで、こうした水需要増に対処するため、わが国では河川水の開発、それもダムによる水資源開発が鋭意進められてきており、今後もこの開発方式が大きな柱であることにかわりない。いま、ある河川で新規の水需要に対処するためダムによる水資源開発をおこなうことを考える。図-3はその開発の概念図を示したものである。(a)は河川水の利用水準が低い状況を示しており、新規の水需要が段階的に増大し、利用水準(確保流量)が(b), (c), (d)と増大した場

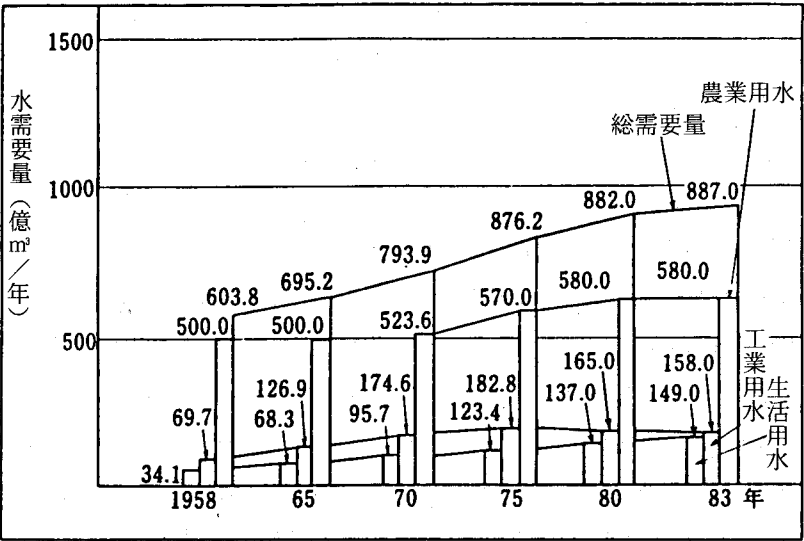


図-2 水需要量の推移 国土庁水資源部

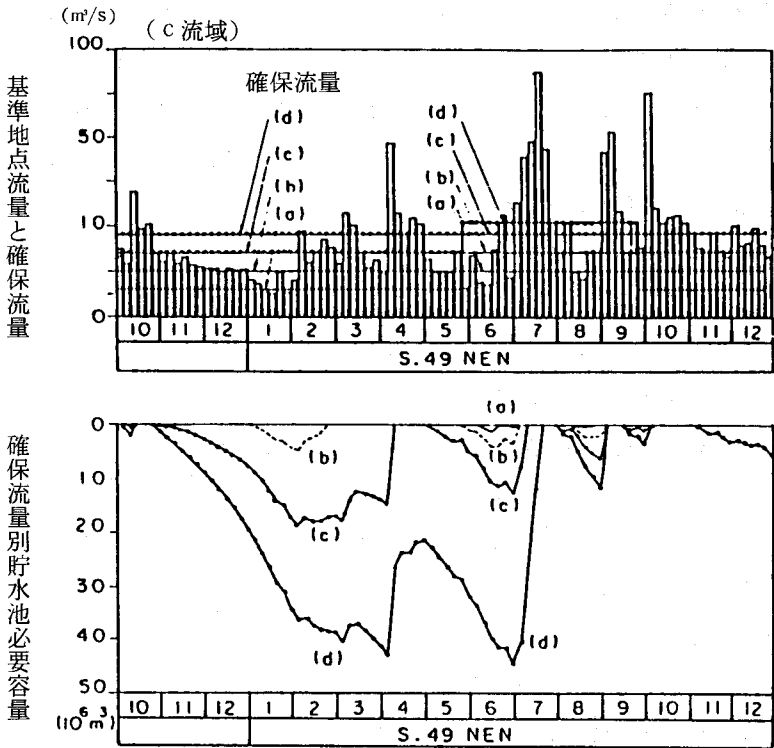


図-3 基準地点における流況と貯水池必要容量

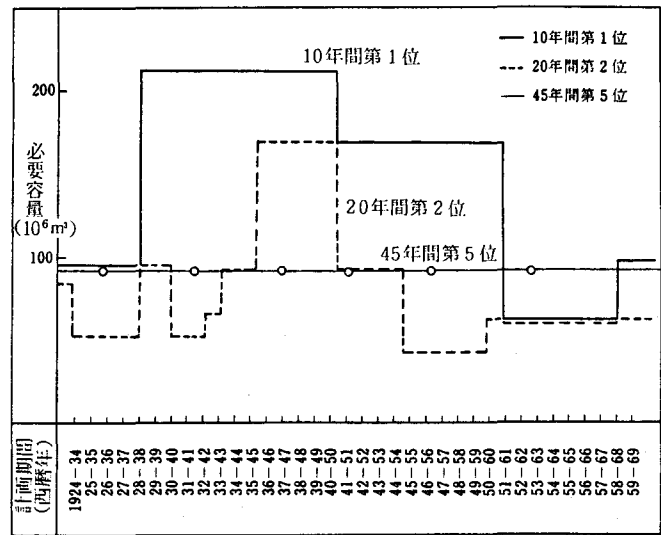
合を想定している。10年に1回程度発生する規模の渇水に相当する年（基準渇水年ともいう。もちろん、この基準渇水年より少ない河川流況の年に対しては、この水資源開発施設の規模でもって計画上的的確に対処できないわけで、これを計画超過渇水とか異常渇水といって、その対策を講じる必要があることはいうまでもない。詳しくは後述する）の流況が図の自然流量図であるとする、この年には利用水準の上昇とともに確保流量と自然流量の間に不足が生じることになる。この不足部分へ豊水時に貯水した河川水をダム貯水池から補給することによって年間通して安定した水供給が可能となる。ところが、確保流量が(a), (b), (c), (d)と増加するにつれて同じ水量を開発するにもダムの規模（確保流量別貯水池必要容量の最大値で与えられる貯水池容量をいう）が異なってくる。すなわち、確保流量が増加するにつれ、それを開発するに要する補給量が大きくなり、補給量が大きいほど貯水池容量が大きくなって、必然的に建設に用いる費用も増大する。このことは水利用水準の増加に伴い、水資源開発の効率が低下することを意味している。また、利用水準が増加していくにつれて渇水の終了する時期（貯水池必要容量が最大となる時期）は遅れる傾向にあり、渇水の回数は減少するが、期間は長期化することも読みとれる。さらに、一部の地域では増大する水需要にこうした河川水の開発が追いつかず、水資源開発施設が近い将来に建設されること等を条件に、緊急かつ暫定的に図中の不足部分が不足したままの形で取水するといった不安定取水にたよっている。この取水は河川流量が豊富な時には取水できるが、流況が悪化したときには取水できないものであり、たちまち渇水被害をこうむることになる。ちなみに、この量は南関東、京阪神地域等の大都市地域を中心として全国の都市用水需要の約1割にも相当するといわれている。

なお、水需要増の見直しについても昨今議論のあるところであるが、なるほどその増加はスローダウンしているようであるが、全体として増加基調には変わらないことは認識しておく必要がある。再び人口の都市集中がはじまっていること、工業用水の回収率がかなり上限に近づいてきていること、は場整備、水田の汎用田化、畑作かんがいの進展、畜産用水増、環境用水の需要など、各用水とも増加の動向にあると推測されるからである。

2.3 基準流況の設定

2.2で述べたように、通常、実施されている水資源開発施設の規模については、当該河川の計画対象年（基準渇水年）を定め、その計画対象年における計画地点の河川流況をもとに、当該河川において占用されている既得権益を損なわない範囲で新規水資源開発可能量が設定される。そして、この計画対象年の決め方としては、考え方として至近10ヶ年間の第1位相当渇水年の計画地点の流況により利水基準地点における確保流量に対する貯水池よりの補給運用を試行し、補給のために必要な貯水池容量が最大となる年を採用することを原則として行なわれている。ところが、最近10年あるいは20年の水文データの渇水第1位あるいは第2位をとって計画貯水池容量を決定しても、それはその対象とする期間内であることであって、たとえば図-4に示すように、その資料期間のとり方により、大幅な変動を示すことがある¹⁾。かりに、あるダムが多雨期あるいは豊水期に相当するような10年の流況からその容量及び開発量が設定されておれば、近年の少雨期の流況に対してはおのずと渇水状況をまねかざるをえない。

もちろん、従来の水利用の慣習、さらにはデータの少なさもあって便宜上、こうした取扱いを行なっているのであるが、不確実な水文現象のもとで限られた水をいかに効率よく運用するかといった立場からは長期間かつ精度の高い水文データに基づく評価が必要である。資料期間のとり方、資料数の相違による安全度の不安定性や渇水流況のサンプルの少なさを解消する意味でも、渇水流況を再現する確率モデル、シミュレーションによるサンプル補充法の展開が今後とも必要であろう。



図－４ 計画期間と渇水順位および第２位貯水池容量の変動状況の事例

このようにみえてくると、大都市地域を中心に頻発する渇水は、もちろん異常少雨、異常高温といった気象条件に負うところも大きいですが、都市用水の一部が不安定取水に依存していること、河川水利用水準の上昇による貯水池貯水量の回復の長期化などに負うところもあり、ひとたび渇水に見舞われると、常に正常な水利用を前提に展開されている都市活動にとっては、その水利用の合理化に伴う水の弾力的使用のむつかしさもあって、深刻な渇水被害をこうむる可能性が高くなっているといえよう。

3. 渇水問題の階層構造的認識

農業用水を中心として、水利用水準の低い時代にあっては異常少雨がもたらす渇水（当時はむしろ早ばつといったほうが適切かもしれないが）により収穫激減といった被害が生じ、それに対しては井戸を掘るといった形で対応していたであろう。ところが、工業用水、生活用水需要の急増、河川水利用水準の上昇、水需給の一時的アンバランスといった社会経済的側面の係わりの強い都市活動サイドの実質的、心理的被害現象に冠した渇水にあっては、同じ異常少雨であっても、それが末端需要者にどのような被害、意識を与えるか、またそれを軽減するための対応策としてどのようなことが考えられるか、といった内容が問題そのものの複雑性、多面性、広範性をうけ、その端的かつ簡便な定形化が困難になってきているのではなかろうか。すなわち、システム論的に解釈するなら、従来は異常少雨－早ばつ・収穫激減という入出力間の空間的・時間的隔たりが小さく、その対応も井戸を掘るといった、サブシステムあるいはコンポーネント対応でよかったものが、近年の渇水においては異常少雨－取水可能量低下・給水制限、実質的・心理的被害といった入出力間で、空間的・時間的隔たりの大きさ、中間介在因子の多さなどがあり、その対応策もシステムとしての対応策、悪く言えば暗中模索の状況に変質してきているの

ではなかろうか。

たとえば、図-5に示すように異常少雨といった危険事象をインプットとし、渇水という故障を回避する装置をシステムとして、そのアウトプットとして損害あるいは被害が生じるという形で渇水問題を描くと、このシステムをとりまく多くの制約条件、不確実さのもとで、われわれは何らかの行動、すなわち耐渇水方策を講じることになろう。さらに、この故障回避装置としてのシステムは素因である異常少雨をインプットとし、アウトプットとして末端水需要者の被害を考えると、両者は因果の連鎖を経巡って結びついていくわけで、少なくともそれを明確にしていくためには、サブシステムの概念を導入した、いわゆる階層構造に着目した整理が必要ではなかろうか(図-6)。もちろん、階層構造として何をとるか、何を第一義の階層構造とみるか、現実問題との対応を考えると、その選択すら問題とすべきであるが、たとえば渇水問題を気象レベル、水文レベル、水管理レベルあるいは社会・経済的レベル(もちろん、このレベルは大きいので、さらにいくつかのレベルに分割する必要がある)、といった階層に分割し、各階層でのインプットである危険事象(たとえば、異常少雨、河川・湖沼・地下水の水位・流量低下、ダム貯水池の水位・

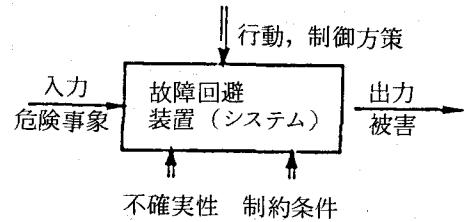


図-5 システムとしてみた渇水問題

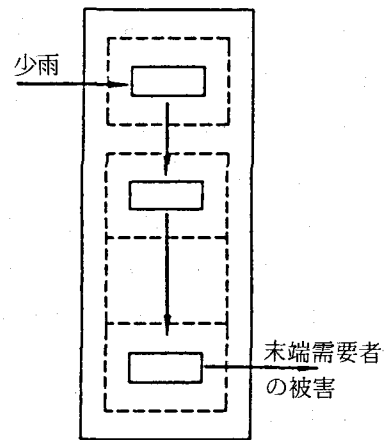


図-6 システムの階層構造

流量低下、取水量・配水量・給水量の低下など)、システムとしての対応行動(たとえば、降雨予測の精度アップ、渇水流況の予測、貯水池操作、各用水間の配分・調整、水道事業者での給水制限等の調整など)、結果としての被害、これらの評価および評価指標、その確率的表示法、などを項目としてマトリックス表現で整理することはできないだろうか²⁾。こうした分類・整理を通して渇水問題の錯綜・暗中模索の状況から抜けだしたいものである。

4. 渇水の時・空間生起特性

渇水は洪水と違って、その継続が長期間にわたることによって被害が生じ、しかも広範囲に及ぶという特性をもっている。そこで以下ではこうした特性を考慮に入れて、渇水の各階層での評価をマクロ的に扱った研究事例をいくつか紹介しておこう。もちろん、これらの特性及びその評価は後述する利水安全度概念を規定する一つの要因である確保あるいは利用水準というものを明確に設定して議論したものではないが、渇水の時・空間生起特性を知るのに有用であろう。

4.1 渇水持続曲線

吉川・竹内は水文時系列の渇水時における持続特性を、期間長とその間の平均水水量の統計処理から、確率降雨強度式と類似の概念で、渇水持続曲線（DDC）を提案し、渇水の確率年を評価した。すなわち、渇水を移動平均降水量の年最小値という水水量でとらえている。図-7は1912年から1981年の69年間にわたる琵琶湖全流域の面積月降水量データに、この渇水持続曲線を適用した結果の一例である。昭和59年8月から翌年2月まで、いずれの累加月をとっても、その累加雨量は過去最小値を上回る少なさであり、その異常性を読みとることができる。また、この渇水持続曲線を用いると、危険率何%を覚悟すれば何日平均で何mm/dayの降水を期待できるかを読みとることができ、その渇水対策への応用が試みられている³⁾。

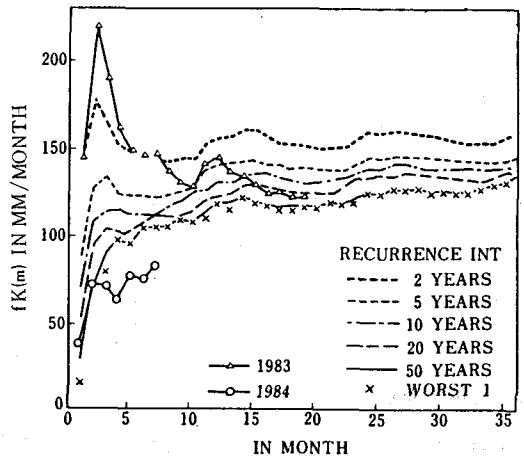


図-7 渇水持続曲線（8月を起点）

4.2 少雨の空間的生起特性

渇水発生年における夏期（5～9月）の総降雨量の平年比（%）を等値線で示し、同時に渇水発生地域をプロットすると、渇水発生地域は、大略平年比70%以下の地域に収まっている⁴⁾。田瀬らも統計的处理が容易である年降水量をとりあげ、各種再現期間の渇水発生頻度、渇水面積、そして空間的構造を分析している⁵⁾。また、池淵らは各流域の累加月総降雨量の同時生起性を多次元同時非超過確率で表現し、近畿圏における少雨の空間的生起特性を考察している⁶⁾。

こうした分析を通して、降水レベルにとどまっているが、渇水期間の長短に応じて各種の再現期間をもった渇水がどの程度の面積を覆うか、また実用上の問題として、流域間輸送を伴うような広域導水の可能性に対するマクロな情報を提供してくれよう。

4.3 社会システム要因との関連

昭和53年の異常渇水は全国的なもので、5月～11月の7ヶ月間で、1都2府43県の988水道事業体において断減水が生じ、なかでも福岡市は287日間に及ぶ給水制限が実施され、給水制限%・dayにして8503%・dayという過去に例をみない厳しいものであった。池淵らはこの53年に渇水をうけた福岡など約80都市をとりあげ、それらが必ずしも同一条件で同程度の渇水を生じていないのは、気象・水文特性、水資源の保有量（ダム貯水量、大河川の有無、集水面積、地下水）、社会・経済的背景（主要産業、人口）、水道設備（上水道普及率、水道料金）、などの都市のもつ性格のなかに、渇水を発生させたり、発生してから厳しい状態に落とし込んだりする背景があるとして、1）渇水が発生した場合、渇水の厳しさ（給水制限%・day）はどのような指標で説明されるか、2）渇水が発生するか否かは、どのよう

な指標に起因するか、といった視点に、重回帰分析及び判別関数法を適用し、渇水の地域的特性と要因構造の究明を試みている⁷⁾。ここで注目すべきは、どちらの分析においても地下水の取水量に占める割合が説明変数として使われ、渇水において安定した地下水取水ができるか否かが大きく左右することがわかる。井戸等による複数水源の確保、河川水と地下水の有機的運用、などの重要性を示唆しているようである。もちろん、こうした分析にあってはもっと細かく貯水池操作や水のやりとりなど実施された渇水対応策といったデータが収集されることが必要となつてこよう。こうしたデータの収集が必ずしも容易なものではないが、渇水の要因構造を水管理レベルあるいは社会・経済的レベルにまで立入って、しかもそれを地域的、時系列的に詳細に考察していくためには不可欠となつてこよう。

5. 利水安全度

流域の社会経済活動を安定的に継続発展させるためには、それを支えるに必要な水量・水質が安定的に供給されることが強く望まれる。そしてわれわれは自然的であれ、何らかの人為的操作が入ったものであれ、これら変動するインプットを、社会が要求するそれぞれの水準あるいはアウトプットを満たすように何らかの変換システムを構成しているわけである。ところが往々にして、これらインプットは大なり小なり不確定性に見舞われており、時には要求を満たすことができない。ここに、利水安全度の概念が存在することになり、それを規定する要因として、少なくとも、1) 不確定な水量、水質の変動状況、2) 要求・確保の対象となる目標値あるいは水準(もちろん、水量、水質とも)、3) 両者を対応させる変換システム、いわゆる水資源の開発・配分・操作システム(もちろん、このシステムにも新規なもの他に、既存の取・排水システムも含まれる)、がある。

ところで、この利水安全度の問題は水利用・開発形態の高度化・複雑化にともなつて益々重要性を高めてきているが、同時に広汎・多岐な様相を呈してきている。以下では、これら問題のいくつかの側面をとりあげるとともに、それに対するいくつかのアプローチを述べる。

5.1 渇水の評価指標と利水安全度

利水安全度の問題は渇水あるいは渇水状態をどのように定義し、それをどのように確率評価するか、という問題に帰着するところが大きい。いま、簡単のため図-8に示すようにある期間に限定して、しかも確保すべき水準

(truncation level) が一定であるとする、渇水状態を表示するにもいくつかの指標が考えられる。すなわち強度特性として、平均不足度(magnitude or

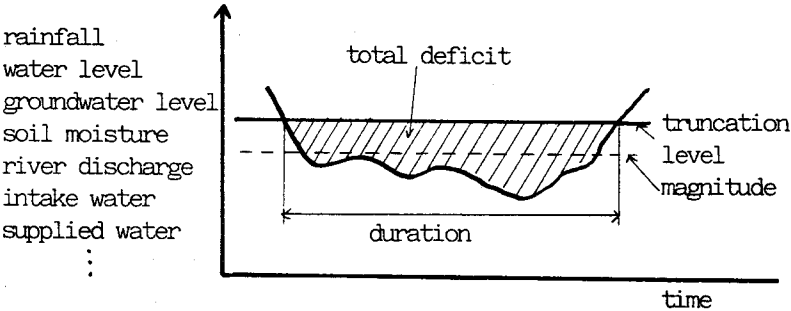


図-8 一定期間での渇水指標

average deficit = 不足総量 / 不足期間), 不足総量 (total deficit or severity), 不足期間 (duration) が考えられる。また, その空間的広がりを見ると不足地域 (area) が, さらに対象期間を広げると, その生起頻度 (frequency) などの指標がでてくる。しかも図の縦軸は前述の各階層レベルごとに異なった変量を取りうるし, 横軸の時間軸も日, 半旬, 旬, 月といった異なった時間単位を取りうる。一方, これらどちらかという物理的特性としての指標にとどまらず, その不足がもたらす社会・経済的さらには心理的特性としての影響あるいは被害にまで換算する方向での指標づくりに発展するものも考えられる。

わが国でも, 渇水の頻度の他にしばしば用いられる不足%・day は不足総量に相当するもので, 渇水の規模を代弁するとしているが, その対象レベルで取水制限%・day, 給水制限%・day が考えられる。また, 社会・経済的影響の大きさ, 厳しさ, 深刻さをより反映するものとして渇水被害関数や渇水被害可能額などが用いられるが, これらも渇水の評価指標である。

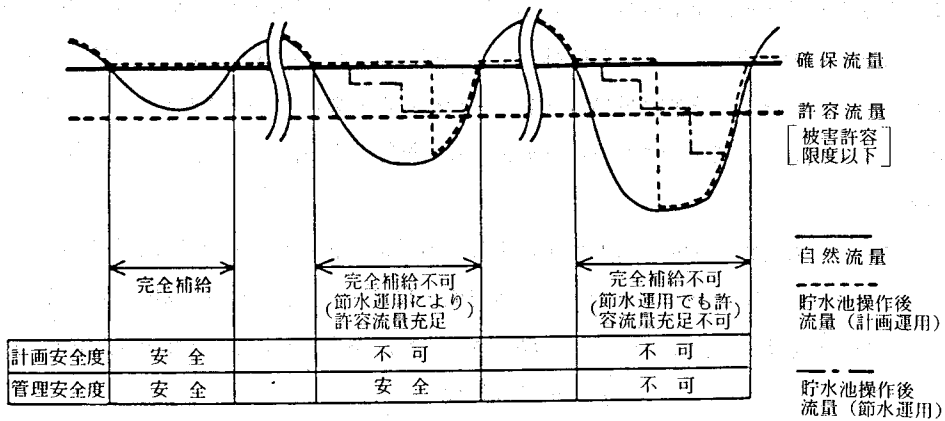
もちろん, これら指標はその生起頻度との組合せで, 渇水または渇水被害の生起確率や期待値, 標準偏差といった形で評価されることによって安全度概念としての評価となる。橋本らの提示したreliability, resiliency, vulnerability なる概念⁹⁾は後述するが, 利水安全度概念としてよくまとまっている。余談であるが, わが国では危険度とリスクとか言うよりも安全度といった言葉を用いるが, 確率の定義からすれば, わが国の安全度は危険度に相当しているようである。たとえば現行の利水安全度 1/10 というのは, あくまで計画レベルでのものであるが, 自然流量をダム貯水池システムによって下流取水地点における確保流量を満たすように補給運用しても, それを下回る確率が 1/10 あるということで, 逆に 9/10 は確保できることをいっている。

5.2 計画安全度と管理安全度

ここでは主に貯水池システムによる時間的流況調整が水資源開発問題においても渇水調整問題においても重要との視点から, 自然流況と確保流量といった流量レベルを対象として議論を展開する。ところで, この場合の利水安全度において2つの場面を考えておくことが重要である。すなわち, 水資源開発・配分計画の作成にあたっての, いわゆる計画レベルでの安全度問題と, 開発・配分施設の管理運用といった管理レベルの安全度問題である。

中川らは, この両者を計画安全度, 管理安全度とよび, それぞれ以下のように定義している⁹⁾。計画安全度: 計画上設定された開発施設規模, 開発水量 (確保流量) のもとで計画通りの利水が可能となる確からしさ, すなわち自然流量が確保流量 (努力目標) を割った状態において貯水池からの補給が可能となる確からしさ。管理安全度: 計画通りの利水が可能でない状態において, 開発施設の運用や節水などによって許容流量 (固守目標) を充足する, すなわち水の不足による被害が許容限度以下にできる確からしさ (……は筆者が付記)。自然流量が確保流量以下となった場合, まず貯水池からの補給が行なわれ, 確保流量は充足される。しかし, このような状況が長期化し貯水量が減少すると補給を完全に行なうことはできなくなる。このような状況が予想される場合は, 維持流量の利水への転用や利水の弾力

性を期待した節水運用などにより被害の発生を抑制，最小化することがはかられる。この貯水池の運用と流況との関係を模式的に示し，上記の2つの安全度の概念を説明したものが図－9である。



図－9 貯水池運用と流況との模式図

計画安全度は開発施設や開発可能量の設定基準として用いられ，現行の利水安全度 1/10 がまさにこれに相当しているが，この計画安全度水準で貯水池規模を設定しても河川水の利用水準が上昇するにつれて同一渇水時においても不足%・day や渇水被害額などの期待値が増加することは留意しておくべきである¹⁰⁾。さらに渇水の頻発に見舞われている昨今，水資源開発施設の建設を進め，計画安全度どおりの安全度を早期に保持することが，もちろん不可欠であるが，それと同時にこの管理安全度をどの程度の水準に保持すべきか，またそれを保持するために必要な渇水流況の予測精度の向上，節水運用ルールの確立，さらには許容流量の設定のあり方など，多くの課題に答えていかなければならない。図－9からは管理安全度は計画安全度より高いはずであるが，往々にして不安定取水の存在，渇水流況予測の不備，合理化に伴う弾力性の低下などを考えると，計画完成までの暫定的なものとはいえ，現行の利水システムでは管理安全度は計画安全度より低くなっているのではなかろうか。

5.3 利水システムの安全度評価

前述までの議論は暗黙のうちに，単一のダム貯水池とその下流にある単一の取水地点を対象とした系についてのものであったが，流域にはいまやダム貯水池を含め堰，浄水場，かんがい施設，下水道，終末処理場など多くの利水関連施設が張りめぐらされてきており，多くの取水・排水地点で水量，水質両者を含めた評価とその安全度評価が必要になってきている。すなわち，各コンポーネントを対象とするだけでなく，利水システムとしての対応が重要になってきている。このことは，利水安全度に影響を及ぼす要因として重視されている利用排水の河川への還元水，ダム貯水池相互の有機的運用，複数水源の存在，残流域流量などの効果を分析するのに重要であることはもちろん，従来ややもすれば確保あるいは需要サイドの確保流量がかんがい期，非かんがい期の違いは導入しているものの，ほとんど一定の確定量としての扱いに終始しがちであるが，今後はこの需要サイドの不確定性も自然流量の不確定さとあわせ安

全度評価に重要になってこよう。たとえば、この需要サイドの不確定さをもたらす要因として、1) 水需要量の予測、2) 水利権量の実態、3) 河川の正常・維持流量の実態、4) 需要量の季節変化と日内変化(苗代期の用水の集中化、畑作かんがい、主婦の労働化に伴う家庭用水の集中化など)、5) 許容流量設定にからむ水需要の弾力性・耐渇水性、などが考えられるが、このどちらかというアウトプットの不確定性をどのように評価し、どのように利水安全度評価に導入していくかが重要となってくる。さらに、既存の施設と新規の施設との間における機能分担の評価も必要であり、これら総合した適正な利水システムの構成が、利水安全度問題とからめて重要になってこよう。

最近、池淵らはこうした立場から利水システムの水量、水質両者を考慮した安全度評価を展開しつつある^{11), 12)}。もちろん、こうした展開にはシミュレーション技法と結合したシナリオ分析が考えられるが、ここではスクリーニング段階あるいは予備的検討の段階に位置づける形で、最上流の河川流量の時・空間確率構造のみを用いた確率マトリックス演算による方法で展開している。詳細は文献にゆずり、以下にその基本的な考え方のみを述べておく。まず、安全度の指標には橋本らの提案している Reliability (信頼度), Resiliency (回復度), Vulnerability (深刻度) 概念を導入している。いま、 t 時あるいは t 期におけるシステムの出力を $X(t)$ とし、出力が i レベルとなる確率を $P_i(t) = \Pr\{X(t) = x_i\}$ とすると、信頼度 $REL(t)$ 、回復度 $RES(t)$ 、深刻度 $VUL(t)$ はそれぞれ以下のように定義されるものである。

$$REL(t) = \Pr\{X(t) \in S\} = \sum_{i \in S} P_i(t)$$

$$RES(t) = \Pr\{X(t+1) \in S | X(t) \in F\}$$

$$= \sum_{i \in S, j \in F} \Pr\{X(t+1) = x_i, X(t) = x_j\} / \sum_{j \in F} \Pr\{X(t) = x_j\}$$

$$VUL(t) = \sum_{i \in F} v_i \cdot P_i(t), \text{ ただし } v_i = [(x^* - x_i) / x^*]^r$$

ここに、 S 、 F はそれぞれシステムが安全(success), 故障(failure) である集合を、 x^* は要求される出力、たとえば確保流量、水質環境基準などを表わす。 r は任意の値であるが、 $r = 1$ の場合は不足%, $r = 2$ は渇水被害関数に相当する。

つぎに、利水システムのモデル化であるが、空間的に複雑な利水システムを、その取・排水構造から、いくつかの基本ユニットに分類すると、

- 1) 量や質の変化をもたらす水利用施設(その背後には水利用者がいる)
- 2) 水質の浄化を行なう水処理施設
- 3) 取水・放流を行う分岐・合流施設
- 4) 河川表流水の流れを変えるダム貯水池・導水路

といったパートから構成されており、実際にはそれらが多数組合わさっていると考える。そして各施設の持つ特徴を表現しうる何らかのパラメータを定義する意味で、各種利水施設の入出力変換マトリックスを、たとえば還元マトリックス、汚濁マトリックス、取水マトリックスといった施設通過前の水量・

水質レベルに対する、通過後の水量、水質レベルの確定的あるいは条件付確率マトリックスとして与え、システム内の各評価地点における水量・水質レベルの生起確率行ベクトル及び t 時と $t+1$ 時の同時生起確率マトリックスを、最上流地点の水量レベルの生起確率行ベクトル及び条件付確率マトリックスのこれら施設の変換マトリックスとの連結による演算をほどこして算定し、設定した S 、 F 集合、 x^* を満たす確率、期待値として利水システムの安全度を評価している。この展開はさらに、ダムの放流マトリックスを導入した並列2ダムからの合成放流量の生起確率行ベクトル及び同時生起確率マトリックスが、この利水システムの最上流地点の水量レベルの生起確率行ベクトル、同時生起確率マトリックスに相当すると考えられることから、並列2ダムを含むより一般的な利水システムの各評価地点での水量、水質両者を考慮した信頼度、回復度、深刻度が時々刻々評価できることになる。

したがって、これら算定のプロセスにでてくる多くの変換マトリックスや確率マトリックスに、本節のはじめに述べたいいくつかの要因を組み込むことによって、それらの効果を表現することができるし、また、たとえば安全度評価をベースとした利水システム策定目標を「規定の安全度の範囲内という制約条件のもとで、システムの構成・運用費用を最小にすること」とすると、一種の Chance Constraint 最適化問題が構成できよう。

6. 渇水対応策

昭和53年渇水のなかでも福岡市はその影響が最も大きかった地域であり、第3次、第4次の給水制限がかけられるなど、最悪時には100万人の市民が5時間の給水しか受けられず、給水制限の期間も287日と長期に及んだ。この間、快適性、利便性の減少とともに生活様式の変更も余儀なくされた。家庭ではポリ容器、インスタント食品等の不時の出費、プールの使用自粛、水を使用する業種の売上げ高の減少、出荷額の減少等、地域の経済・社会に深刻な影響を与え、さらには疎開といった行動も一部にはみられた。その後頻発する渇水にあっても、これほどではないにしても大なり小なり物理的あるいは心理的な被害あるいは影響をうけている。われわれはこうした渇水の発生による国民生活及び経済社会活動への影響の増大に対して、これら渇水の階層レベルに応じた適確な対応策を実施していく必要がある。すでに述べたように、たとえば気象レベルにあっては気温や無降雨期間、雨の予測、水文レベルにあっては渇水流況の予測をそれぞれ精度アップすることが、さらに水管理レベルの上位にあっては渇水時の貯水池システムによるハード・ソフトな対応策が、それをうけての各用途間の配分調整や、よりわれわれに身近なものとしての水道事業体による給水制限等の調整が対応策として柱となろう。もちろん、各階層レベルとも下位のものは上位の対応策の結果に連鎖していることはいうまでもない。

6.1 渇水対策ダム

ダム貯水池システムによる時間的流況調整が渇水時においてもその対応策として上位にあろう。ところが、前述したところからも明らかなように、わが国では1/10の確率で生起する渇水(基準渇水、計画安全度1/10)を対象として施設が計画設計されている。自然流況の異常性はときとして、この計画

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もたらさう。さらに流況悪化の場合には管理安全度といえどもそれを超過することがありうる。われわれはこれを超過渇水とか異常渇水とか呼んでいるが、いずれにしても計画時であれ、現行時であれ、利水施設の供給容量を超過する渇水群があるわけであり、その対応策が渇水被害の深刻さとともに益々重要になってきている。もちろん、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位から現行の第1位に向上させたように、今後さらに15年第1位、20年第1位といったように基準をあげていくことが考えられるが、現行の水利秩序を重んじるなら、また費用負担の変更をともなうことを考えると、その実施は困難といわざるをえない。そこで登場してくるのが、通常の水供給施設は現在の基準である1/10渇水に対処しようようにしておき、それを超過する渇水に対しては別途渇水対策ダムを追加して建設しておくというものである。この渇水対策ダムは、通常の利水容量の他に、異常渇水時において社会生活を維持するために必要最小限の生活用水・都市活動用水等を供給するための渇水対策容量をもったダムをいうが、多目的ダムの容量のなかにこうした渇水対策容量をもたせるか、単独に渇水対策専用のダムにするかのいずれかになろう。もちろん、渇水時、本ダムにあっては節水運用をはかり、管理安全度を保持する努力をするわけで、それでも容量が確保できないとなると、渇水対策容量から必要最小限度の補給運用をはかるというものである。

この渇水対策ダムの容量決定及び運用方法、さらに経済効果の評価等が今後とも重要となってくるが、ここでは容量決定の一つの方法として友杉らの研究¹³⁾を紹介しておく。淀川水系桂川の桂地点の18年間の流況を対象として、まず、最近の10年間の流況を計画基準期間とし、各種の利用率 Q_d/Q_m (Q_d ；取水必要量、 Q_m ；平均

流量) に対して必要貯水池容量 V_p をマスカーブ法によって求める (図-10 の点線)。つぎに、この V_p に対して全期間の流況を適用して各利用率 Q_d/Q_m と不足 $\% \cdot \text{day } S$ の関係図を求める。この S をパラメータとする Q_d/Q_m と必要貯水池容量 V との関係を求めたのが図-10 の実線である。いま、社

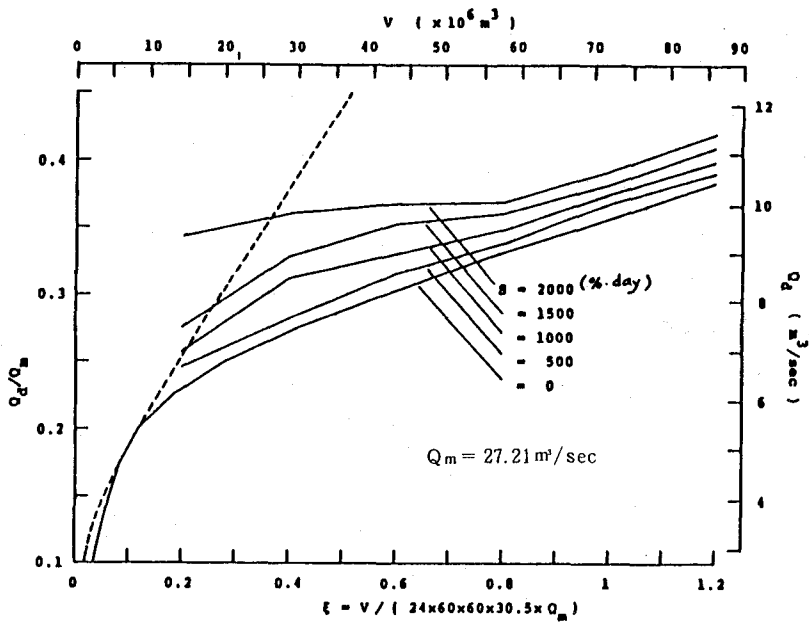


図-10 河川水利用率と必要貯水池容量の関係

会が我慢できる不足 $\%$ ・day として、 $S = 500, 1000, 1500(\%$ ・day)の3つのケースを考えると、図-10 からそれぞれの場合に必要な貯水池容量 $V(S)$ が求められ、計画基準渇水年に対する容量 V_p との差、 $\Delta V(S) = V(S) - V_p$ として渇水対策ダムの容量が求められる。

6.2 渇水流況の予測

渇水対策ダムはその運用となるとソフトな問題を含むが、施設の建設をとまなうハードな対応策である。渇水が予想される、あるいは渇水が出現している状況においてはダム貯水池による流況調整が少なくとも取水地点での流量確保をはかる上位の管理レベルでは重要な対応策となる。この流況調整を合理的かつ効率的に実施するためには精度の高い渇水流況の予測が望まれる。渇水の特徴として、その被害は長期間の集積結果が大きくものをいう。このことは予測にあっても、長期的な流況予測を必要とする。気象庁発表の長期予報は、予報対象地域が広域的であり、その精度も水管理に应用するにはまだ十分ではないが、それでもそれぞれの対象流域において、1) 500 mb 高度場のみを用いた重回帰式による予測手法¹⁴⁾、2) 客観的類似選択による予測手法¹⁵⁾、など鋭意研究が進められている。もちろん、異常少雨といった平常年とは異なる現象にこうした統計的手法を適用することの妥当性、最近では気候変動が激しく、概して少雨傾向にあるようだが、その動向を反映していくことの必要性など検討事項も多い。

こうした長期予測に加えて、ダム貯水池による流況調整にあってはもう少し短い流況予測も必要である。これにもいくつかの立場を異にした研究がある。詳細はそれぞれの文献にゆずるが、

- 1) 竹内らの渇水持続曲線を用いる方法¹⁶⁾
- 2) 神田らの型紙渇水流況を用いる方法¹⁷⁾
- 3) 小尻ら、宝らの Kalman filtering and prediction theory を用いる方法(前者¹⁸⁾は流出モデルに自然てい減曲線を、後者¹⁹⁾はタンクモデルを最終的には ARMAX モデルに変換して適用)、などがある。1)は予測を回避する、あるいは現象のランダム性を重視する立場、2)は渇水流況のパターン化、3)は最新の観測情報を取りこみながらの adaptive modification、に焦点をあてている。

いずれにしても渇水流況の予測は管理安全度を高める意味においても、実時間でのダム貯水池による渇水流況調整においても不可欠であり、予測のリードタイム、予測精度、調整方法との関連も含め、今後、大いに検討されるべき課題であろう。

6.3 渇水調整

渇水流況が型紙であれ予測であれ、与えられるとダム貯水池による流況調整は、現在のダム貯水量を勘案し、いつから節水あるいは給水制限に入り、その後の不足に伴う需要者側の被害を可能な限り軽減するような形で操作されよう。このダム貯水池による渇水調整を一種の最適化問題として構成し、時々刻々の放流量を決定する問題が多く提案されている。たとえば DP や確率 DP による定式化である²⁰⁾、²¹⁾、²²⁾。この場合においても操作の目的あるいは評価関数の設定は重要な問題であり、よく用いられるものに渇水被害関数に相当する確保流量と実供給量との差の二乗の時間的累加値の最小化がある。しかし現実問題として、この評価関数でいいのか、換言すればこの評価関数に被害の計量化がどの程度にま

で内生化されているのかといったことも考えておく必要がある。現在鋭意進められている各地域別、各用途別の渇水被害原単位と節水率の関数表示²³⁾や、さらに心理的被害にまで立入ろうとする WP 水価 (Willing to pay)²⁴⁾、渇水のもたらす心理的影響を渇水生起の可能性による住宅効用の低減としてとらえ、その計量化に一対比較アンケート調査のトレードオフ法を適用した方法²⁵⁾など、いくつか努力が払われている。

一方、ダム貯水池による渇水流況調整は水管理レベルにあってはより上位に位置し、取水地点までの流況調整であったが、取水地点からさらに末端需要者に至るまでにもいくつかの渇水調整問題がある。たとえば、利水者間、用途間の配分調整、いわゆるプライオリティや配分量の問題、給水系統の融通性の問題、水道事業体の給水制限のやり方、公平な給水制限の実施方策、などである。

ところで、こうしたレベルの渇水調整にあっては、より直接的に水道事業体、企業、一般家庭の反応が強くでてくるところであり、かなり心理的な側面、意識構造にまで立入る必要もある。すなわち、渇水時のこれら需要者の意識構造、そこからでてくる水需要の弾力性、耐渇水性、渇水調整のやり方とその反応、など物理的から心理的レベルの被害の計量化が重要になってきている。さらに、1次、2次取水あるいは給水制限程度においては、通常いわれている公称給水制限と、実給水制限との格差があって、渇水被害がなかなか顕在化していないとか、マスメディアによって情報レベルの渇水感覚が新たに出現しているなど、渇水のとらえ方も一様ではない。もちろん、1次あるいは2次制限程度の渇水時にあっても、水道事業体の努力、たとえば夜間での取水・貯水による平滑化運用、渇水経験に根差した合理化の浸透などによって、実害が軽減されているのであろう。いずれにしても、これら心理的な意識構造の分析は、今後とも渇水被害の計量化においても、また渇水対応策、とりわけソフトな対応策を考えていくうえにおいても重要となっていく。

現在、こうした意識構造の分析には、よくアンケート調査が用いられる。もちろん、アンケート調査の目的、対象地域、対象時期などによって、調査結果から抽出できる情報はそれぞれ異なるのが当然であるが、下記のような情報は有用であろう。

- 1) 水道事業体の渇水対応策としては、渇水の進展に応じて初期の段階では節水協力の広報活動、配水系統の変更、公園や噴水等の環境用水利用の制限を、ついで圧力調整いわゆる水圧低下、さらに進むと時間給水で対応しているようであり、それに応じて需要者への影響も大きくでてくる。さらに断水ともなるとそのインパクトは急増する。
- 2) 一般家庭では節水につとめ、水の留置きや風呂、洗濯の後水利用などで対応しているようであるが、一方では火事に対する不安感をもっている。
- 3) 企業等の生産活動にあっては、渇水の進展に応じて水量管理、水質管理、さらに生産設備管理へとその影響が波及していくようである。
- 4) 給水制限に対する需要者の受忍限度であるが、一般家庭にあっては20%前後を境にして大きくかわるようで、20%程度までの制限なら、2、3週間ぐらいは我慢してもよいという意識がかなりあるよう

である。一般家庭にあっては水需要弾力性があり、耐渇水性もあるようであるが、これにも渇水経験の有無が作用するであろうし、調査対象が2次制限程度にとどまっていたことも関係していよう。ところが、工業用水道利用企業にとっては回収率の向上など水利用の高度化が限界にきているところでは、20%といえどもこれ以上の節水はむづかしいようで耐渇水性は弱くなっている。

5) 新聞、テレビを主としたマスメディアによる情報伝達手段の発達と、それに対する一般市民の関心の高まりにつれて、一部、水源の枯渇現象が報じられた時点で、それが直接目に見えない社会的な影響を引き起こしはじめるようになってき、実際には水道の出具合の変化がない、あるいは軽微であるにもかかわらず、情報によって市民が渇水を認識し、不安がり、渇水の程度を深刻化する傾向がでてきている。

今後とも、こうしたアンケート調査が実施・蓄積され、需要者の渇水時の意識構造が分析されていくにつれ、それをとりこんだ被害の計量化、節水ルールの整備、さらには利水安全度の評価やその適正水準の設定、などが物理的、水文的なレベルから心のかよったものになっていくことを期待したい。

以上、渇水をめぐる諸問題と題して、主として量的な側面に焦点をあてて述べてきたが、渇水はこうした量的問題に加え、水位、流量低下による景観面への影響、さらに水質悪化への影響と広汎多岐な問題をなげかけてきている。研究レベル、行政レベル、市民レベルの有機적連けいを軸に、これら渇水をめぐる諸問題が一步一步解決へと前進していくことを期待したい。

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, pp. 89～90, 昭54.
- 2) 池淵周一（代表）：渇水災害の生起特性と耐渇水方策に関する研究，昭和60年度科学研究費補助金（自然災害(2)）研究成果報告書，昭61.
- 3) 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, 昭50.
- 4) 今村瑞穂・大内忠臣：水資源管理における利水安全度，第2回水資源に関するシンポジウム前刷集，pp. 503～508, 昭57.
- 5) 田瀬則雄・高山茂美・市川 当：日本における渇水の空間的発生特性，第2回水資源に関するシンポジウム前刷集，pp. 485～490, 昭57.
- 6) 池淵周一・白村 暁：少雨の空間的生起特性，土木学会関西支部年次学術講演会講演概要，昭61.
- 7) 池淵周一・嶋田善多：渇水の地域的特性とその要因構造分析，京大防災研年報第25号 B-2, pp. 297～315, 昭57.
- 8) T. Hashimoto, J.K. Stedinger and D. P. Loucks: Reliability, Resiliency and Vulnerability Criteria for Water Resource System Performance Evaluation, W. R. R., vol. 18, No.1,

- pp. 14～20, 1982.
- 9) 中川芳一：水資源の開発・配分計画に関するシステム論的研究，京都大学学位論文，pp. 42～59，昭59.
- 10) 前出 4)
- 11) 小尻利治・池淵周一・飯島 健：安全度評価をベースにした最適な水利用システムの構成に関する研究，第29回水理講演会論文集，pp. 323～328，昭60.
- 12) S. Ikebuchi and T. Kojiri：Optimal Modeling in Water Resources Management Systems Based on Reliability Analysis, Proc. of Roc-Japan Joint Seminar on Water Resources Engineering, pp. 233～243, 1987.
- 13) 石原安雄・友杉邦雄・下島栄一：貯水池系による水供給の不安定性の保障基準について，土木学会第38回年次学術講演会講演概要，pp. 153～154，昭58.
- 14) 建設省土木研究所：貯水池の規模及び運用の計画手法に関する研究，昭55.
- 15) 建設省琵琶湖工事事務所：琵琶湖流域気象予測手法の検討，昭62.
- 16) 前出 3)
- 17) 神田 徹・畑 恵介：渇水期間における利水用貯水池の実時間操作方式，第25回水理講演会論文集，pp. 285～292，昭56.
- 18) 高埴琢馬・池淵周一・小尻利治：低水時における実時間ダム貯水池操作のシステム論的研究，京大・防災研年報第26号 B-2, pp. 287～301. 昭58.
- 19) 高埴琢馬・宝 馨・他2名：琵琶湖の水位変動予測モデルについて，土木学会関西支部年次学術講演会講演概要，昭61.
- 20) 前出 18)
- 21) 辻本善博・萩原良己・中川芳一：確率 DP による貯水池群操作に関する一考察，土木会第33回年次学術講演会講演概要，pp. 73～74，昭53.
- 22) 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21-9, 昭54.
- 23) 前出 22)
- 24) 山中 敦・他2名：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回建設技術研究会報告，昭54.
- 25) 寺川 陽：渇水のもたらす心理的被害の計量化の一手法，第2回水資源に関するシンポジウム前刷集，pp. 527～532，昭57.