

## 計画超過渇水を考慮した水資源計画に関する考察

ON WATER RESOURCES PLANNING TAKING EXCESS  
DROUGHTS INTO CONSIDERATION

吉川 秀夫\*・吉川 勝秀\*\*

By <sup>†</sup>Hideo KIKKAWA and Katsuhide YOSHIKAWA

## 1. はじめに

流域の水需要量が増大し、河川水賦存量に対する取水量の比率として定義される水利用率が上昇するにつれて、流況の平滑化による水資源開発施設のもとでは、計画規模を超過する渇水が地域社会に深刻な影響をもたらすようになっている<sup>1)</sup>。

本論文では、まず計画を超過する渇水（以下では超過渇水とよぶ）の評価方法について考察し、ある期間内に超過渇水が生じる可能性を確率論的に検討する。次に、河川の水利用率の上昇に伴って、超過渇水の問題がますます深刻化していくことを示す。

以上の検討結果を考慮したうえで、深刻化していく超過渇水の問題を計画時点であらかじめ考慮に入れる新しい水資源計画手法を提案する。そして、従来の手法との比較分析を行うことにより、その特質を明確にする。

ケース・スタディでは、単純化した流域を対象として、水利用率が上昇するにつれて超過渇水の問題が深刻化していくことを説明するとともに、提案した計画手法による超過渇水を考慮に入れた水資源計画の分析を行う。この分析では、費用便益分析に基づいて、超過渇水対策施設の規模設定（あるいは超過渇水を考慮した利水安全度の設定）、および水利用率と超過渇水対策施設の必要性との関係について検討している。

## 2. 従来の研究と本研究の基本的立場

渇水 (drought) に関する従来の研究について概観し、それらの研究と対比することにより、本研究の基本的立場を明確にしておくことにする。

渇水に関する従来の研究には、大別して4つの流れがあるように思われる。

第1のものは、渇水現象の水文学的側面に重点を置いた研究である<sup>2)~10)</sup>。たとえば、吉川・竹内<sup>2)</sup>は渇水水文学の特性を確率論的にとらえて、渇水持続曲線として整理している。これは治水計画で用いられる降雨強度曲線とほぼ同様の観点に立つものであり<sup>17)</sup>、水不足の程度とその継続期間を同時に表現するものである。一方、中川<sup>3)</sup>は、マスカープ法を用いて吉川・竹内と類似した検討を行っている。

第2のものは、渇水が地域社会に及ぼすインパクトに関する研究である<sup>18)~23)</sup>。たとえば、広田<sup>18)</sup>、浜口<sup>19)</sup>、建設省土木研究所<sup>20)</sup>および同関東地方建設局ほか<sup>21)</sup>は、渇水被害額（直接的な被害）を計測し、被害額原単位を定めている。また、建設省土木研究所<sup>22)</sup>は、産業連関分析により、間接被害の推定を試みている。Millan<sup>23)</sup>は渇水が地域経済に及ぼす影響を線形計画手法により推定している。建設省九州地方建設局<sup>1)</sup>は福岡の渇水被害についての事後調査を行っている。

第3のものは、貯水池の運用および節水といった渇水時の水管理に関する研究である<sup>19), 20), 24), 25)</sup>。たとえば、竹内<sup>24)</sup>は累加損失係数を用いて貯水池群の最適運用方式について検討している。また、建設省土木研究所<sup>20)</sup>は、確率 DP 方式を含む代替的な貯水池運用ルールを設定し、それらのもとで生じる渇水被害額を算定して、超過渇水時の水管理について検討している。浜口<sup>19)</sup>および山中ら<sup>25)</sup>は、WP 水単価<sup>注1)</sup>を計測し、それをを用いて超過渇水時の節水ルールについて検討している。

第4のものは、水資源計画論上いかに渇水を考えていくかについての研究である<sup>7), 8), 26)~33)</sup>。これらの研究は、さらに利水計画の安全度の基準をどの程度にするかを考察したものと、超過渇水時の被害をあらかじめ考慮して

\* 正会員 工博 早稲田大学教授 理工学部土木工学科

\*\* 正会員 工博 建設省土木研究所 河川部総合治水研究室 研究員

注 1) Willingness to pay の略であり、渇水を回避するために支払ってもよい金額から定めた水単価のことである。

水資源計画の規模を定めることを試みたものに分けられる。利水安全度については、広瀬<sup>26)</sup>、藤吉<sup>27)</sup>および中川<sup>28)</sup>が概念的な検討を行い、浜口<sup>9)</sup>、南部ほか<sup>29)</sup>、宮田ほか<sup>7)</sup>および菅原<sup>30)</sup>が、利水計算により具体的な解析を進めている。これらの研究のうちで、菅原が水利用率と必要貯水池容量  $S$  との間にべき乗の関係  $S \propto (q - q_0)^2$ 、( $q$ : 開発水量,  $q_0$ : 自然渇水流量)があることを示していること、および浜口<sup>9)</sup>がマスカープ法による必要貯水池容量の設定方式と渇水期間中の日平均水不足率(水不足量/計画給水量)の和として定義される水不足 %day を基準とする貯水池容量の設定方式のもとでは、水利用率の上昇とともに両方式で定められる容量の間に差異が生じることを示しているのが興味深い。また、Joseph<sup>16)</sup>は設定した計画規模を超過する渇水の生起確率を求めており、これは利水安全度の一つの見方である。

超過渇水を水資源計画上どのように考えていくかについては、佐川<sup>31)</sup>が計画論上の数理モデルを提示しており、建設省中部地方建設局<sup>32)</sup>は具体的な超過渇水対策施設の評価を試みている。また、志村<sup>33)</sup>は、農業用水の利水安全度に関連して、費用便益分析を用いて現在の利水安全度が設定されるようになった経緯について論じている。一方、治水計画における計画超過問題について考察したものとしては、長尾<sup>34)</sup>、吉野・吉川<sup>35)</sup>、山口・吉川・角田<sup>36)</sup>の研究があり、方法論的には渇水の場合と等価なものである。

これらの研究を総括的にながめてみると、まず水資源開発施設をどのような基準(利水安全度)で設計するか、あるいは計画で用いる水文量の特性がどのようなものであるかに重点が置かれていたように思われる。その後、すでに完成している水資源開発施設のもとでの超過渇水のインパクトを把握し、超過渇水時に水管理を合理的に行う方法が検討され始めた。すなわち、最近になって超過渇水時に生じる被害の計測が進められ、それを用いて超過渇水時の適切な貯水池運用方式や節水方式が研究されつつある。

したがって、このような研究をさらに進めると、計画の策定時点において超過渇水への対応手段をあらかじめ考慮するための計画論上の研究が重要な課題として浮かび上がってくる。

本研究は、このような問題意識のもとに、超過渇水を考慮する水資源計画の方法論についていくつかの提案を行ったものである。

### 3. 超過渇水の定義とその評価方法

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考察する。

#### (1) 超過渇水の定義

本論文では、計画時に定められた施設と操作ルールのもとでは計画給水量を供給し得ない状況を生じさせるような供給容量を超過する渇水群を超過渇水と定義する。

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があるが、本論文では以上のような定義のもとで、容量を超過する渇水をすべて超過渇水とよぶことにしたい。

#### (2) 超過渇水の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、その評価方法には、次のようなものが考えられる。第1の方法は、水不足量とその継続期間そのものを確率評価するものであり、田瀬<sup>9)</sup>、吉川・竹内<sup>9)</sup>らが検討を進めている。第2の方法は、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、水不足 %day 指標および渇水時の被害額指標で評価するものである。

本論文では、次節において水利用率が上昇するにつれて超過渇水の問題が深刻化することを説明するために、渇水の評価方法を次のように分類しておくことにする<sup>35), 36)</sup>。

##### ① 頻度による方法 (frequency method)

水不足率と渇水継続期間、あるいはそれら二つの積分指標である渇水時の水不足総量(必要貯水池容量として算定)の生起確率を求め、渇水の評価する。前者については、吉川・竹内<sup>9)</sup>がそれらの同時評価を行っている。一方、後者は、マスカープ法で貯水池容量を設定するために用いられているものである。本論文では、必要貯水池容量  $S$  を用いて評価することにする。この方法で渇水の評価を行うには、水需要量と流況が必要である。

##### ② 深刻さの程度による方法 (severity method)

渇水時の水不足の程度(水不足 %day 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の方法と類似しているが、後に示すように、一定の水準に水不足 %day を保つための貯水池容量は、水利用率の上昇とともに超過確率を一定とする貯水池容量とは異なってくる。この方法では、水需要量、流況および渇水時の貯水池運用ルールが与えられる必要がある。

##### ③ 被害による方法 (damage method)

渇水時に生じる被害額で渇水の評価する。したがって評価には、水需要量、流況、渇水被害関数、貯水池運用ルール、代替水資源への依存の程度等が与えられる必要がある。被害額の算定においては、最近計測が始められた渇水被害額原単位<sup>20), 21)</sup>や、WP 水単価<sup>19), 23)</sup>を用い

る。

以上三つの方法に基づいて立てられた水資源計画には、それぞれの計画の考え方に重要な違いがあるように思われる。すなわち、①の方法に基づいた計画では、計画で設定した渇水以上の超過渇水が十分に考慮されないことが多いのに対して、②および③の方法に基づいた計画では、超過渇水が生じたときの状況を考えている。

#### 4. 水利用率の上昇による超過渇水問題の深刻化

ある規模の渇水を対象として計画された水資源施設のものでは、必然的に超過渇水に見舞われる可能性がある。したがって、以下ではまずある使用年数の間に超過渇水が生起する確率がどの程度であるかを示す。次に、流況の平滑化による水資源開発を一定の利水安全度で行っていけば、水利用率が上昇するにつれて、超過渇水時の被害総額はもとより、単位給水量に対する被害額として定義される被害率も増大し、超過渇水の問題が深刻化していくことを示す。

超過渇水の生起する可能性に関しては、次のような推定が行われる。

一つは、確率論における超過確率の概念により示されるものであり、次のように説明される。降雨がある確率密度分布をもって生起するとする。そして、計画で対象とした渇水の超過確率を  $1/T_1$  ( $T_1$ : return period) とし、その渇水に対処し得るように設計された施設を  $T_0$  年間利用したとする。このとき、計画を超過する渇水が  $T_0$  年間に発生する確率  $P_1$  は次式で与えられる<sup>16), 38)</sup>。

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

式(1)において  $T_1$  および  $T_0$  に種々の値を代入して  $P_1$  を求めたものが表-1である。表より、たとえば現在の水資源開発計画で標準とされている利水安全度を  $1/10$  ( $T_1=10$  (年)) とし<sup>20)</sup>、利用期間  $T_0$  を  $10$  (年) とすると、その期間中に超過渇水が発生する確率  $P_1$  は  $0.65$  であることが知られる。さらに、表-1には利用年数  $10$  年間に return period  $T_1=20, 50, 100$  といった

表-1 超過渇水が生じる確率  $P_1$

$T_1 \backslash T_0$	10	30	50	70	90
10	0.651	0.958	0.995	0.999	0.999 <sub>9</sub>
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).

大規模渇水に見舞われる確率も示されている。したがって、表より計画規模以上の渇水の生じる確率、および大規模な渇水(たとえば  $T_1=100$  年)に見舞われる確率を知ることができる。これが、超過渇水の発生についての確率論的な説明である。

あと一つは、限られたデータにより渇水の生起確率密度を推定する際に生じる統計上の誤差に起因して、超過渇水が生起し得るとするものである。浜口<sup>8)</sup>は、超過確率  $1/10$  の渇水を推定するのに用いるサンプル数と得られる推定値の変動幅との関係について、数値実験を行っている。一方、Joseph<sup>16)</sup>、石崎<sup>37)</sup>、高橋<sup>38)</sup>、Tschannel<sup>14)</sup>により、これに類似した検討が、治水計画における外力について行われている。これらの研究は、推定に用いるサンプル数と得られる推定値に含まれる誤差との関係を明らかにしたものである。この推定の際に生じる誤差のために、計画で予測した以上の頻度で超過渇水が生じることがあり得る。

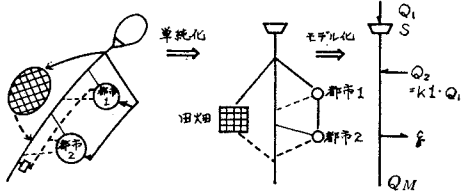
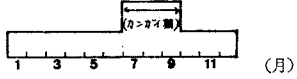
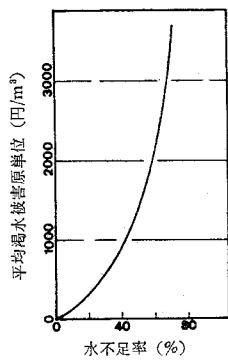
次に、上に述べたように生起する超過渇水の問題が、水利用率の上昇とともに、深刻化していくことを示す。このことは、菅原の導いた関係式  $S \propto (q - q_0)^n$ , ( $n=2$ )<sup>30)</sup> より推測することもできるが、水利用率を上昇させながら、前述の三つの渇水の評価方法のそれぞれに基づく必要貯水池容量を算定し、それらを比較することにより明確にすることができる。

本論文では、そのために次のようなモデル流域を設定した。流況は紀ノ川(寺尾地点)の  $58$  年間の日流量より与えた。モデル流域の取排水システム形態、水利用形態および取水のパターン等は、表-2に示すように設定した。これらの前提条件は、流域間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<sup>40)</sup>。

図-1に計算結果を示した。図は縦軸が必要貯水池容量であり、横軸が開発水量および水利用率である。図に示される3本の線は、それぞれ次のようにして定められた必要貯水池容量である。すなわち、頻度による方法に基づく容量  $S_1$  は、超過確率を  $1/10$  としたものであり、現在の水資源開発計画の標準とされているものである。深刻さの程度による方法に基づく容量  $S_2$  は、超過確率  $1/100$  の渇水に対して、水利用率にかかわらず水不足 % -day を  $2000$  とするために必要とされるものである<sup>8)</sup>。

一方、被害による方法に基づく容量  $S_3$  は、超過確率が  $1/100$  である渇水に対して、渇水被害率(総被害額/総供給量)を水利用率によらず一定とするためのものである。各方法で設定した超過確率、水不足 % -day および被害率は、一応の目安として与えたものであるが、それらを変化させても水利用率と各容量の相対的な関係には違いは認められなかった。

表—2 モデル流域の概要

項目	内容	補足																																
1. 流域概要	<p>・流域のモデル化</p> 	<p>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。</p> <p><math>Q_1</math>: 貯水池地点流入量  <math>Q_2</math>: 残流域流入量  <math>q</math>: 取水量  <math>S</math>: 貯水池容量  <math>Q_M</math>: 河川維持流量</p>																																
2. 利水要素の比率 (取水量比率 %)	<table border="1"> <thead> <tr> <th>要素</th> <th>非かんがい期</th> <th>かんがい期</th> <th>通年平均</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>家庭</td> <td>40</td> <td>30</td> <td>37.5</td> </tr> <tr> <td>業務 1</td> <td>10</td> <td>7.5</td> <td>9.375</td> </tr> <tr> <td>業務 2</td> <td>10</td> <td>7.5</td> <td>9.375</td> </tr> <tr> <td>工業 1</td> <td>20</td> <td>15</td> <td>18.75</td> </tr> <tr> <td>工業 2</td> <td>20</td> <td>15</td> <td>18.75</td> </tr> <tr> <td>農業</td> <td>—</td> <td>25</td> <td>6.25</td> </tr> <tr> <td>計</td> <td>100</td> <td>100</td> <td>100</td> </tr> </tbody> </table>	要素	非かんがい期	かんがい期	通年平均	家庭	40	30	37.5	業務 1	10	7.5	9.375	業務 2	10	7.5	9.375	工業 1	20	15	18.75	工業 2	20	15	18.75	農業	—	25	6.25	計	100	100	100	<p>利水要素は家庭、業務 (1, 2)、工業 (1, 2) および農業である。それらの取水量比率は、ある程度都市化された場合を想定して設定した。業務 1 とは営業停止損失の大きいグループであり、たとえば、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 とは石油化学等の停止損失が大きいもの、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。</p>
要素	非かんがい期	かんがい期	通年平均																															
家庭	40	30	37.5																															
業務 1	10	7.5	9.375																															
業務 2	10	7.5	9.375																															
工業 1	20	15	18.75																															
工業 2	20	15	18.75																															
農業	—	25	6.25																															
計	100	100	100																															
3. 取水のパターン	<p>・かんがい期間、非かんがい期間の設定</p> 																																	
4. 貯水池容量の計算方式	<p>上流に貯水池を想定し、残流域流入量も考慮した。残流域流入量はダム流入量の <math>K1</math> 倍であると仮定した。また、下流に取水地点を設け、ここにおいて全用水を取水するものとし、河川維持流量も設定した。</p>																																	
5. その他	<p>・水不足 %-day の定義</p> <p>水不足 %-day とは次式で定義されるものである。</p> $\sum_i = \left( \frac{\text{水不足量 (m}^3/\text{sec)}}{\text{計画給水量 (m}^3/\text{sec)}} \right)_i$ <p><math>i</math>: 水不足日数</p>	<p>・渇水被害原単位</p> 																																

図—1 において、①の方法で定められた容量  $S_1$  と②および③の方法で定められた容量  $S_2$  および  $S_3$  とを比較すると、水利用率が上昇するにつれて、 $S_2$  および  $S_3$  が  $S_1$  に比較してより大きくなるのがわかる。 $S_2$  および  $S_3$  は、水利用率が上昇しても超過渇水時の水不足の程度 (水不足 %-day) および渇水被害率を増加させないために必要とされるものである。したがって、図—1 より、現在用いられている ①の方法で貯水池を計画していけば、水利用率が上昇するにつれて超過渇水時の水

不足 %-day や渇水被害率が増大し、超過渇水の問題が深刻化していくことが知られる。

超過渇水が深刻化していく原因としては、次の二つが考えられる。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、平滑化のための必要貯水池容量が飛躍的に増大していき<sup>18)</sup>、したがって超過渇水時の水供給不足量も飛躍的に増大していくという水資源供給施設の特性的ためである。あと一つは水利用の特性に関係している。すなわち、わが国では水利用率の上昇が主として渇

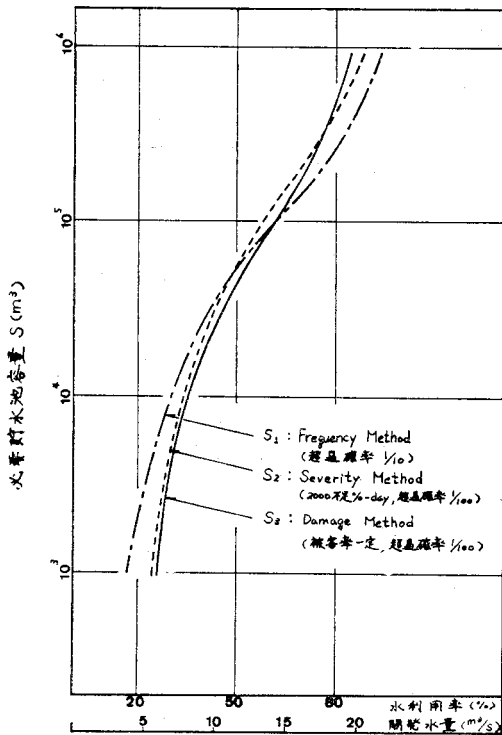


図-1 各方法で必要とされる貯水池容量と水利用率との関係

水被害額原単位が相対的に大きな都市用水需要量の増大によっていることから、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。

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、水資源供給施設の特性のみを評価している。一方、被害による方法では、水資源供給施設の特性と水利用の特性とを同時に評価している。

図-1 は、表-2 に示した各用水の取水量比率で取水総量が増大していくとした場合のものである。水利用状況が渇水に対してせい弱化していけば（すなわち渇水被害が大きな用途の水利用率が増せば）、ますます超過渇水の問題が深刻化していくと推測される。

近年における既往の大渇水の程度は、500~8000 水不足 %day である<sup>20)</sup>。

現在の水資源開発計画方式のもとでは、水利用率の上昇とともに超過渇水の問題が深刻化していく。したがって、超過渇水の問題をあらかじめ考慮に入れる水資源計画が必要であり、その方式としては次のようなものが考えられよう。

① 頻度による方法に基づく方式をいままでどおり用いるが、その基準をより高める。すなわち、渇水に対する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 10 年第 1 位に向上させたように<sup>20)</sup>、水利用率の

上昇とともに、その基準をたとえば 15 年第 1 位といったように高く設定する。

② 通常の水資源開発施設は、現在の方式で 10 年第 1 位の渇水に対処し得るように作っていき、超過渇水対策施設を別途に準備しておく。これは、緊急水備蓄ダム、再生水資源開発施設および地下水利用施設などを、10 年第 1 位より大規模な渇水に対処するために作っておき、超過渇水時のみにそれらを使うという方式である。

③ また、水資源開発施設の規模（利水安全度）を、超過渇水時の状況をもあらかじめ考慮して、ケース・バイ・ケースで適切に定めるという方式も考えられる。

次節において、これら三つの方式のもとで、水資源計画を策定するための新しい計画理論の定式化を試みる。

### 5. 超過渇水を考慮する計画手法

本節では、超過渇水をあらかじめ考慮する水資源計画手法について考察する。

#### (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 水供給容量の関数（貯水池容量  $S$  で表示）、③ 超過渇水の生じていない状況（以下では平常時とよぶ）を対象とした施設および超過渇水時を対象とした施設の費用関数  $C$  (capital cost; 年償却額で与えるものとする) および  $m$  (running cost)、④ 便益関数  $A$ 、⑤ 渇水被害の関数  $E$ 、⑥ 流況と需要量とを用いた必要貯水池容量  $S$  の計算より定められる超過渇水の発生確率密度関数  $P_r(S)$ 、および超過渇水時の水不足率  $R(S)$  と渇水継続期間  $g(S)$  を設定する。超過渇水時の水不足の程度を示す指標として、水不足率と継続期間とを用いたのは、渇水概念を簡明化するとともに、水不足率ごとに与えられている渇水被害原単位を用いて渇水被害額を算定するためである。水不足 %day はより安定した指標であるが、渇水被害額とは一対一に対応しないという欠点がある。

#### (2) 水資源計画の方式

超過渇水を明確には考慮に入れていない従来の計画方式と 4. で述べたそれを考慮する方式について、費用便益分析の観点から考察する。超過渇水を考慮に入れる方式は、本論文で新しく提案するものである。

水資源計画の方式は、計画の対象により次のように分類することができる。

##### (i) 平常時のみを考える方式（方式 1）

これは従来の水資源計画において用いられている方式

であり、ある超過確率の濁水を計画濁水として、それに対処できるような水資源開発施設を定めるためのものである。

超過濁水が生じた状況については考慮しない。したがって、平常時のみを考え、水供給による便益から費用を差し引いて純便益を求める。この方式で作られる水供給施設は、平常施設とよぶことにする。

(ii) 超過濁水時のみを考える方式 (方式 2)

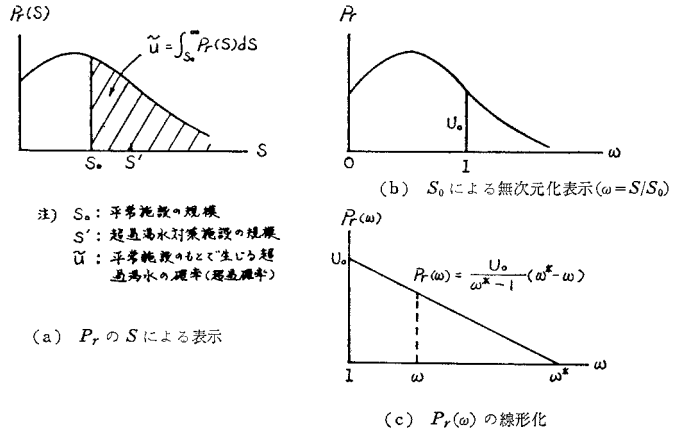
平常施設のもとで生じる超過濁水に対処することのみを考える。したがって、この方式は超過濁水対策施設のみを対象としたものであり、超過濁水対策施設による濁水被害額の軽減 (保全便益) やそれによる追加水供給の便益と費用とから純便益が算定される。

(iii) 平常時と超過濁水時を合わせて考える方式 (方式 3)

平常施設の規模および超過濁水対策施設の規模を適切に定めるために、方式 1 および方式 2 とを組み合わせた方式であり、平常時と超過濁水時とを同時に考える。この方式の特殊な場合として、単一の貯水池による水資源開発計画において、平常時と超過濁水時とを同時に考慮して適切にその規模を定めることも考えられる。

以上の各方式についての純便益関数を表-3 に示した。表に示される各純便益関数はそれぞれ次のようなものである。

式 (1) の  $B_0$  は、通常の超過濁水を考慮に入れない計画方式の純便益であり、水供給便益から費用を引いた値である。式 (2) の  $B_1$  は、超過濁水対策施設からの超過濁水時の追加水供給による被害額の軽減という保全便益のみを便益とし、それから費用を引いた純便益である。式 (3) の  $B_2$  は、超過濁水対策施設により追加供給される水の便益のみを便益としたときの純便益である。式 (4) の  $B_2'$  は  $B_2$  より被害を引いた純便益であ



注)  $S_0$ : 平常施設の規模  
 $S'$ : 超過濁水対策施設の規模  
 $\tilde{U}$ : 平常施設のもとで生じる超過濁水の確率 (超過濁率)

(a)  $P_r$  の  $S$  による表示

(b)  $S_0$  による無次元化表示 ( $\omega = S/S_0$ )

(c)  $P_r(\omega)$  の線形化

図-2 濁水の生起確率密度関数  $P_r$  の模式図

る。  $B_1 \sim B_2'$  は、超過濁水対策施設の評価のみを考えたものである。式 (5)~(7) の  $B_3', B_3, B_3''$  は、平常施設の純便益  $B_0^*$  ( $B_0$  に平常施設の超過濁水時の水供給便益を加えたもの) に超過濁水対策施設の純便益  $B_1 \sim B_2'$  をそれぞれ加えたものであり、平常時と超過濁水時とを同時に考えたものである。

以上の純便益関数を定式化するにあたり、一般性を失わない範囲で単純化するために、次のような前提を置く。

(前提 1): 超過濁水の規模は、それを回避するために必要な貯水池容量  $S$  により、水利用率ごとに定められるものとする。したがって、超過濁水の発生確率密度関数は図-2 (a) のように表現される。

(前提 2): 平常時に供給される水の便益としては、 $A_0 = \int_0^D \alpha_0(D) \cdot dD$  (社会的余剰) とする場合、および  $A_0 = \alpha_0 \cdot D$  (水価値  $\alpha_0$  一定) とする場合とが考えられる<sup>31)</sup>。ここに、 $\alpha_0(D)$  および  $\alpha_0$  は単位給水量当たりの水便益であり、前者はその値が給水量によって変わるとする場合を、また後者は給水量によらず一定とする場合を示している。したがって、水の便益  $A_0$  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

表-3 水資源計画の方式

考 え 方	内 容	備 考
平常時のみを考える方式 (方式 1)	$B_0 = (\text{平常時の水便益}) - (\text{そのための費用})$ 平常施設のみ	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、この式に含まれる。
超過濁水時のみを考える方式 (方式 2)	$B_1 = (\text{保全便益}) - (\text{そのための費用})$ 超過濁水対策施設のみ $B_2 = (\text{超過濁水対策施設による水供給の便益}) - (\text{そのための費用})$ $B_2' = B_2 - (\text{被害額})$	超過濁水対策施設のみの評価に限定して考えている。
平常時と超過濁水時を合わせて考える方式 (方式 3)	$B_3' = B_0^* + B_1$ $B_3 = B_0^* + B_2$ $B_3'' = B_0^* + B_2'$	平常施設の規模および超過濁水対策施設の規模をパラメトリックに変え、それぞれの最適規模を求める。

注)  $B_0^*$  は超過濁水時に平常施設より供給される水の便益を含む (表-4 参照)。

いた  $A_1$  は、 $A_1 = \int_0^D (\alpha_0(D) - b_1(D)) \cdot dD$  および  $A_1 = \alpha_0 \cdot D - (m_1^1(S_0) + m_2^1(D))$  となる。ここに、 $m_j^i$  の添字  $i=1$  は平常時を、 $i=2$  は超過渇水時を示しており、また  $j=1$  は維持管理費を、 $j=2$  は運営費を示している。本論文では、平常時の水価値  $\alpha_0$  を一定とする後者の  $A_0$  および  $A_1$  の場合のみを考える。

(前提 3)：超過渇水対策のランニング・コスト  $b_2$  は、 $m_1^2$  (維持管理費) と  $m_2^2$  (運営費) との和で与えられる。 $m_1^2$  は平常時と超過渇水時とにかかわらず必要とされ、 $m_2^2$  は超過渇水時に施設を運用する際のみ必要とされる。

以上の前提のもとで、表-3 に示した水資源計画方式を定式化すると表-4 が得られる。表-3 および表-4 に示される純便益関数に含まれる便益、費用および被害項目の内容と、それぞれの項目が考慮される領域を表-5 に示した。

次に、以上のように定式化された純便益関数を用いて検討することができる事柄について述べる。

表-4 表-3 に示した計画方式の定式化

	考え方および理論式
方式 1	$B_0 = (\text{平常時の水便益}) - \frac{(\text{そのための費用})}{\text{平常時の capital cost + running cost}}$ $= \alpha_0 D - \{c_1(S_0) + m_1^1(S_0) + m_2^1(D)\} \dots\dots\dots (8)$ $= (\alpha_0 D - (m_1^1(S_0) + m_2^1(D)) - c_1(S_0) = A_1 - c_1(S_0)) \dots\dots\dots (8)'$
方式 2	$B_1 = (\text{保全便益}) - \frac{(\text{そのための費用})}{\text{超過渇水時の capital cost + running cost}}$ $= \int_{S_0}^{S'} P_r(S) \cdot R(S) \cdot g(S) \cdot E(S - S_0) \cdot dS$ $- \left\{ c_1(S' - S_0) + m_1^2(S' - S_0) + \int_{S_0}^{\infty} P_r(S) \cdot R(S) \cdot g(S) \cdot m_2^2(S - S_0) \cdot dS \right\} \dots\dots\dots (9)$ <p style="text-align: center;"><math>(m_1^2: \text{維持・管理費}, m_2^2: \text{運営費})</math></p> $B_2 = (\text{超過渇水対策施設による水供給の便益}) - (\text{そのための費用})$ $= \alpha_1 \cdot D \cdot \int_{S_0}^{S'} P_r(S) \cdot g(S) \cdot R(S) \cdot dS$ $- \left\{ c_2(S' - S_0) + m_1^2(S' - S_0) + \int_{S_0}^{\infty} P_r(S) \cdot R(S) \cdot g(S) \cdot m_2^2(S - S_0) \cdot dS \right\} \dots\dots\dots (10)$ <p style="text-align: center;"><math>(\alpha_1: \text{超過渇水時の水単価})</math></p> $B_2' = B_2 - (\text{被害額})$ $= B_2 - \int_{S'}^{\infty} P_r(S) \cdot R(S) \cdot g(S) \cdot E(S - S_0) \cdot dS \dots\dots\dots (11)$
方式 3	$B_3' = B_0' + B_1$ $= \alpha_0 \cdot \left\{ 1 - \int_{S_0}^{\infty} P_r(S) \cdot R(S) \cdot g(S) \cdot dS \right\} \cdot D$ $- \{c_1(S_0) + m_1^1(S_0) + m_2^1(D)\}$ $+ \int_{S_0}^{\infty} P_r(S) \cdot R(S) \cdot g(S) \cdot E(S - S_0) \cdot dS$ $- \left\{ c_2(S' - S_0) + m_1^2(S' - S_0) + \int_{S_0}^{\infty} P_r(S) \cdot R(S) \cdot g(S) \cdot m_2^2(S - S_0) \cdot dS \right\} \dots\dots\dots (12)$ $B_3 = B_0' + B_2 \dots\dots\dots (13)$ $B_3'' = B_0' + B_2' \dots\dots\dots (14)$

(3) 最適規模の決定

表-4 の純便益関数を用いることにより、各計画方式のもとでの最適施設規模が求められる。これについては、ケース・スタディにおいて、単純化したモデル流域を対象とした最適値の決定、および純便益関数の要因分析を行った事例を示す。

(4) 公的な観点からの水コスト分析

純便益関数を応用することにより、水コストの分析を行うことができる。営利を目的としない公企業では、水コストが総支出=総収入 (AC ルール) として定められている<sup>21)</sup>。すなわち、このような観点からは、純便益  $B_i=0$  として水コストが算定される。そこで、上述のそれぞれの計画方式のもとで、公企業的な観点から水コストを算定すると以下ようになる。

平常時のみを対象に、方式 1 の  $B_0=0$  (総支出=総便益) として水コスト  $C_0$  を求めると次式を得る。

$$C_0 = \frac{c_1(S_0) + m_1^1(S_0) + m_2^1(D)}{D} \dots\dots\dots (15)$$

式 (15) は、水コストが (総費用)/(供給量) となることを示しており、これはよく知られている公企業の水コスト設定ルールにほかならない<sup>41)</sup>。

一方、たとえば超過渇水時をも考慮する方式 3 の式 (13) において、平常時と超過渇水時の水コストを一定とすれば次式を得る。

$$C' = \left[ \{c_1(S_0) + m_1^1(S_0) + m_2^1(D)\} + \{c_2(S' - S_0) + m_1^2(S' - S_0) + \int_{S_0}^{\infty} P_r(S) \cdot R(S) \cdot g(S) \cdot m_2^2(S - S_0) \cdot dS\} \right] / \left[ \left\{ 1 - \int_{S'}^{\infty} P_r(S) \cdot R(S) \cdot g(S) \cdot dS \right\} \cdot D \right] \dots\dots\dots (16)$$

式 (15) と式 (16) とを比較すると、式 (16) では超過渇水を考慮に入れることにより式 (15) が補正されていることがわかる。さらに、両式の比較から、水利用率の上昇とともに、よく知られている水資源開発効率の低下による水コストの上昇に加えて、超過渇水時の水不足に対する認識が高まれば、超過渇水対策施設の費用のためにさらに水コストが高くなることが知られる。

6. ケース・スタディ

単純化した流域を対象として、超過渇水を考慮に入れた水資源計画に関する 2, 3 の検討例を示す。

(1) ケース・スタディの概要

ケース・スタディの前提と概要は以下のとおりであ

表一5 便益・費用・被害の定式化

① 平常施設による平常時の便益 ( $\omega=0\sim 1$ )	$\frac{N \cdot \alpha_0 \cdot D}{[N \cdot \alpha_0 \cdot D]}$
② 平常施設による平常時および超過渇水時の便益の期待値 ( $\omega=0\sim \omega^*$ )	$\frac{N \cdot \alpha_0 \cdot D \left[ 1 - \int_1^{\omega^*} P_r(x) \cdot g(x) \cdot dx + \int_1^{\omega^*} P_r(x) \cdot (1-R(x)) \cdot g(x) \cdot dx \right]}{\text{平常期間} \quad \text{超過渇水期間} \quad \text{超過渇水時の補給}}$ $[N \cdot \alpha_0 \cdot D \cdot \left\{ 1 - \frac{r}{12} (\omega^* - 1)^4 \right\}]$
③ 超過渇水時の超過渇水対策施設による便益の期待値 ( $\omega=1\sim \omega^*$ )	$N \cdot \alpha_1 \cdot D \cdot \left[ \int_1^{\omega} P_r(x) \cdot R(x) \cdot g(x) \cdot dx + R(\omega) \cdot \int_{\omega}^{\omega^*} P_r(x) \cdot g(x) \cdot dx \right]$ $[N \cdot \alpha_1 \cdot D \cdot \frac{r}{12} \cdot \{ 2(\omega-1)^4 + (\omega-1)^3(-3\omega + \omega^* + 2) + (\omega-1)(\omega^* - 1)^3 \}]$
④ 平常施設の建設費および維持管理・運営費 ( $\omega=0\sim \omega^*$ )	$\frac{N \cdot D \cdot (c_1 + m_1^1 + m_2^1)}{[N \cdot D \cdot (c_1 + m_1^1 + m_2^1)]}$
⑤ 超過渇水対策施設の建設費および維持管理費 ( $\omega=0\sim \omega^*$ )	$\frac{N \cdot D \cdot R(\omega) \cdot (c_2 + m_2^2)}{[N \cdot D \cdot K \cdot (c_2 + m_2^2) (\omega - 1)]}$
⑥ 超過渇水対策施設の超過渇水時運営費 ( $\omega=1\sim \omega^*$ )	$N \cdot m_2^2 \cdot D \cdot \left[ \int_1^{\omega} P_r(x) \cdot R(x) \cdot g(x) \cdot dx + R(\omega) \cdot \int_{\omega}^{\omega^*} P_r(x) \cdot g(x) \cdot dx \right]$ $[N \cdot m_2^2 \cdot D \cdot \frac{r}{12} \cdot \{ 2(\omega-1)^4 + (\omega-1)^3(-3\omega + \omega^* + 2) + (\omega-1)(\omega^* - 1)^3 \}]$
⑦ 超過渇水時の渇水被害額の期待値 ( $\omega=\omega\sim \omega^*$ )	$N \cdot D \int_{\omega}^{\omega^*} P_r(x) \cdot \{ R(x) - R(\omega) \} \cdot \{ \delta(x) - \delta(\omega) \} \cdot g(x) \cdot dx$ $[N \cdot D \cdot \frac{K \cdot a \cdot r}{60} \cdot (\omega^* - \omega)^3 (\omega^* + 2\omega - 5)]$
⑧ 平常施設のみによる場合の被害額の期待値 ( $\omega=1\sim \omega^*$ )	$N \cdot D \int_1^{\omega^*} P_r(x) \cdot R(x) \cdot g(x) \cdot \delta(x) \cdot dx$ $[N \cdot D \cdot \frac{K \cdot a \cdot r}{60} \cdot (\omega^* - 1)^3]$ <p>ここに、<math>r = \frac{K \cdot b \cdot U_0}{\omega^* - 1.0}</math>、<math>\omega</math> : 超過渇水対策施設の規模</p>

注) 下段の [ ] 内は線形化した場合の計算式を示す。

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、超過渇水を考慮したときの水資源対策施設の規模に着目する。したがって、超過渇水対策施設の規模設定に関する分析を中心とし、水利用率と超過渇水対策施設の必要性との関係についても考察する。

② 対象とした流域は表一2に示したのと同じである。水需要量は年々増大するものとし、それを水利用率の上昇として表現する。各用水の比率は同表に示されたものであり、水利用率によらず一定とする。

③ 渇水の規模は、それを回避するために必要な貯水池容量  $S$  により表現し、それを平常施設の容量  $S_0$  で無次元化した  $\omega$  で記述する (図一2 (b), (c))。

④ 基本量はすべて線形化したものを用いる。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

は図一2 (c) および表一6のように定義した。設定した各パラメーターの値を表一7 (a), (b) に示した。表一7 (a) の諸定数・係数は、モデル流域で必要貯水池容量を計算することにより定められたものである。一方、表一7 (b) に示す費用  $C_j$  および  $m_j^i$  については、平均的な費用を設定した。平常時に供給される単位水量当たりの便益  $\alpha_0$  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水コストに等しいとした。渇水被害関数のパラメーター  $a$  は、文献20)において計測された渇水被害原単位をモデル流域の水利用状況に適用して定めたものであり、 $a=4000$  円/m<sup>3</sup> となった。超過渇水時に追加供給される単位水量当たりの便益  $\alpha_1$  については計測事例がないことから、100~8000円/m<sup>3</sup> まで変化させて得られる結果を調べることとした。

## (2) 分析のシナリオ

ケース・スタディでは、純便益関数  $B_0 \sim B_3''$  のうちの代表的なものとして、式 (9) の  $B_1$ 、式 (10) の  $B_2$  および式 (13) の  $B_3$  の三つを取り上げた。

これらを用いて行った分析の意図は以下のとおりである。

計算ケース1は、純便益関数  $B_1, B_2, B_3$  と超過渇水対策施設の規模  $\omega$  との関係を調べ、得られた結果の解釈を行うためのものである。この分析において、 $B_2$  および  $B_3$  の  $\alpha_1$  に対する感度分析を行った。

計算ケース2は、水利用率と超過渇水対策施設の必要性との関係を調べるためのものである。平常施設の利水安全度を1/10とし、水利用率は20%から80%まで変化させた。

計算ケース3は、純便益関数  $B_1, B_2, B_3$  に含まれる各項目の大きさを調べるためのものである。

## (3) 結果と考察

計算ケースごとに得られた結果を示し考察する。

### a) 計算結果の個別的考察

#### ① 計算ケース1

水利用率80%、平常施設の利水安全度を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一3 (a), (b) に示す。縦軸は単位供給水量当たり ( $D'=1$  m<sup>3</sup>) の純便益  $B_i$ 、横軸は超過渇水施設の規模  $\omega$  ( $\omega=S/S_0$ ) である。 $B_2, B_3$  については、超過渇水施設により超過



表-6 線形化した関数とパラメーター

	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 超過渇水の発生確率密度関数 ② 水不足率(節水率) ③ 渇水期間の年間割合 ④ 渇水被害原単位 (円/m <sup>3</sup> )	$P_r(\omega) = \frac{U_0}{\omega^* - 1} \cdot (\omega - \omega^*) \quad 1 \leq \omega \leq \omega^*$ $R(\omega) = K \cdot (\omega - 1) \quad 1 \leq \omega \leq \omega^*$ $g(\omega) = b \cdot (\omega - 1) \quad 1 \leq \omega \leq \omega^*$ $\delta(\omega) = a \cdot R(\omega) = a \cdot K \cdot (\omega - 1) \quad 1 \leq \omega \leq \omega^*$	②のR(ω)はωという規模の渇水が発生したときの水不足率である。したがって、ω規模の渇水時にはD・R(ω)だけ水が不足する。すなわち、D・(1-R(ω))だけ水供給が可能である。 ③のg(ω)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1か月である)。 ④のδ(ω)は水不足率の関数で与えられる。
(2) 基本関数のパラメーター	$U_0$ $\omega$ $b$ $K$ $a$	$\omega=1$ のときの渇水の発生確率 考えるべき渇水の最大規模 係数(上記の(1)参照) 係数( " ) 係数( " )	$U_0, \omega^*, b, K$ は水利用率ごとに与えられる。
(3) 費用に関するデータ	$c_1$ 円/m <sup>3</sup> $c_2$ " $m_1^1$ " $m_2^1$ " $m_1^2$ " $m_2^2$ " $a_0$ " $a_1$ "	平常施設の建設費単価(年費用) 超過渇水対策施設の建設費単価(年費用) 平常施設の維持・管理費単価 " 運営費単価 超過渇水対策施設の維持・管理費単価 " 運営費単価 平常時の水利用便益単価 超過渇水時の "	
(4) その他のデータ	$D$ m <sup>3</sup> /s $N$ "	水需要量 年間の秒数(定数=365×24×60 <sup>2</sup> )	

表-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(利水安全度)	開発量d(m <sup>3</sup> /s)	貯水池容量S(m <sup>3</sup> )	$U_0$	$\omega^*$	$b$	$K$
1	20	1/10	8	17×10 <sup>8</sup>	0.29	1.69	0.077	0.85
2	50	1/5	15	100×10 <sup>8</sup>	0.45	1.88	0.55	1.00
3	50	1/10	15	117×10 <sup>8</sup>	0.33	1.60	0.89	1.54
4	50	1/20	15	130×10 <sup>8</sup>	0.22	1.45	0.52	1.90
5	80	1/10	20	460×10 <sup>8</sup>	0.19	2.04	1.71	1.50

=0.75 D

また、超過渇水対策施設からの給水期間  $g(\omega) \cdot 365$  は次のようになる。

$$g(\omega) \cdot 365 = b \cdot (\omega - 1) \cdot 365$$

$$= 1.18 \cdot 0.50 \cdot 365$$

$$\approx 220 \text{ (日)}$$

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渇水対策施設(平常施設のもとで220日間75%の節水を必要とする超過渇水を対象とした施設)を作れば、純便益  $B_1$  を最大にできる。同様にして、220日間75%の節水が必要とされる超過渇水の超過確率を求めると、約1/40となる。

各  $\omega$  に対応する超過渇水の規模を図-4(a), (b)に示した。図-4(a)は水利用率80%、平常施設の利水安全度が1/10の場合のものであり、図-4(b)は計算を行ったその他のケースの例として、水利用率50%の場合を例示したものである。

超過渇水時に、超過渇水対策施設から追加供給される水の便益から費用を引いた純便益  $B_2$  についてみると、超過渇水時に追加供給される水の単位水量当たりの便益  $\alpha_1$  を知る必要がある。 $B_2$  についても同様である。しかし、そのような水の便益  $\alpha_1$  についてはほとんど計測が行われていないことから、図-3(b)では  $\alpha_1$  を100~8000(円/m<sup>3</sup>)の範囲で変化させてみた。いま仮に  $\alpha_1=4000$ (円/m<sup>3</sup>)とすれば、 $\omega=1.9$ で  $B_2$  が極大値をとる。したがって、 $B_1$  と  $B_2$  とでは、最も効果的とされる規模が異なることがわかる。

表-7 (b) 費用・便益に関する諸量

	(円/m <sup>3</sup> )			
	平常施設(平常時)		超過渇水対策施設(超過渇水時)	
建設費	$c_1$	80	$c_2$	60
維持管理費	$m_1^1$	10	$m_1^2$	15
運営費	$m_2^1$	10	$m_2^2$	15
水利用便益	$a_0$	100	$a_1$	100~8000
渇水被害原単位	$a$	4000		

時に追加的に供給される単位水量当たりの便益  $\alpha_1$  をパラメトリックに100から8000(円/m<sup>3</sup>)まで変化させた。

便益として保全便益のみを考えた純便益  $B_1$  でみると、超過渇水対策施設の規模  $\omega$  に関して極大点が存在している(図-3(a))。したがって、この点  $\omega_{opt} \approx 1.50$  に対応する規模の超過渇水対策施設は、 $B_1$  による評価では最も効果的なものとなる。そのような超過渇水対策施設の規模は、表-6に示される式により次のようになる。

$$R(\omega) \cdot D = K \cdot (\omega - 1) \cdot D$$

$$= 1.50 \cdot 4.5 \cdot D$$

$B_3$  については、図-3 (b) に示されるように、 $B_2$  とほぼ同様の結果が得られた。これは、平常時の水の単位水量当たりの便益  $\alpha_0$  が AC ルールで定められているので、平常時の便益と費用とが相殺されるためである。

以下の検討では、被害関数のパラメーター  $a=4000$  (円/m<sup>3</sup>) を考慮して、一応  $\alpha_1=4000$  (円/m<sup>3</sup>) に設定した。これは、湯水被害額が超過湯水時の水の価値の一つの目安となると考えたためである。

② 計算ケース 2

図-5 は、水利用率を変化させて (平常施設の利水安全度は 1/10), 純便益関数の変化をみたものである。図-5 より、定性的な傾向として、水利用率の低い段階 (図では 50% まで) では、どのような規模の超過湯水対策施設でも純便益は負となっている。したがって、水利用率が低い段階では、超過湯水対策施設を作る必要性が低いことが知られる。一方、水利用率がある程度以上になると純便益が正となり、超過湯水対策施設が必要となることがわかる。

③ 計算ケース 3

図-6 には、平常施設の利水安全度を 1/10 とし、水利用率 80% の場合について、純便益関数  $B_i$  に含まれる各項の内訳 (寄与の程度) を示した。図より、 $B_i$  に含まれる各項の相対的な大きさおよび関数形を知ることができる。

b) 全般的な考察

上述の検討は単純化したモデル流域を対象としたものであり、その結果は以下のように解釈されるべきである

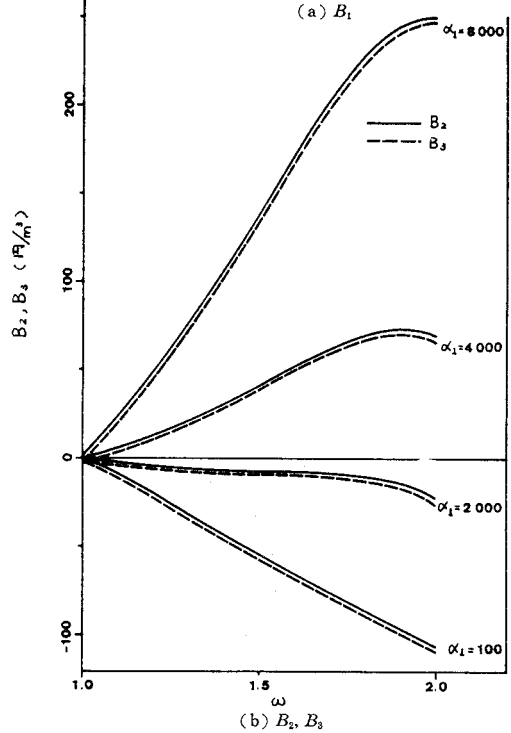
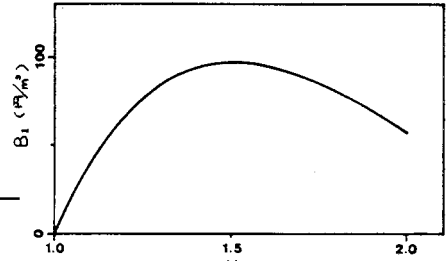
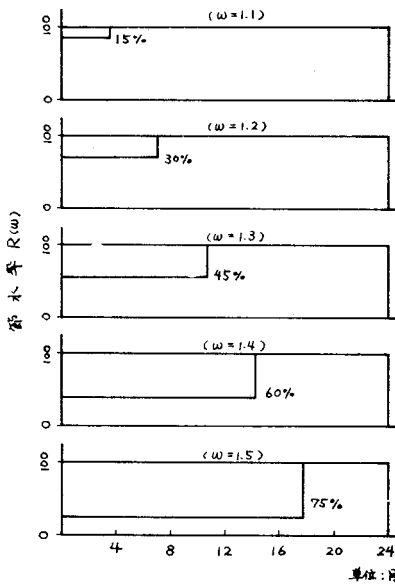
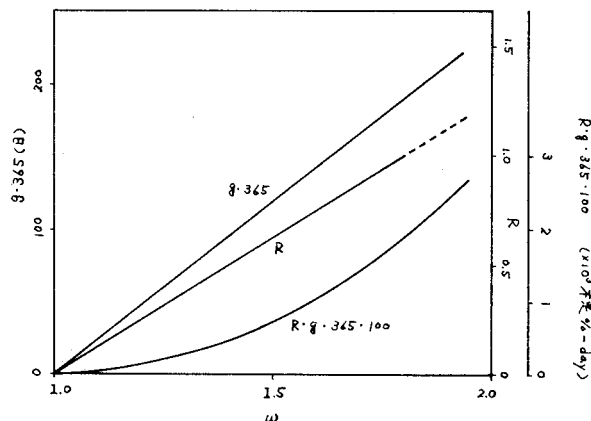


図-3 計算ケース 1: 純便益  $B_1, B_2, B_3$  (水利用率 80%, 平常施設の利水安全度 1/10)

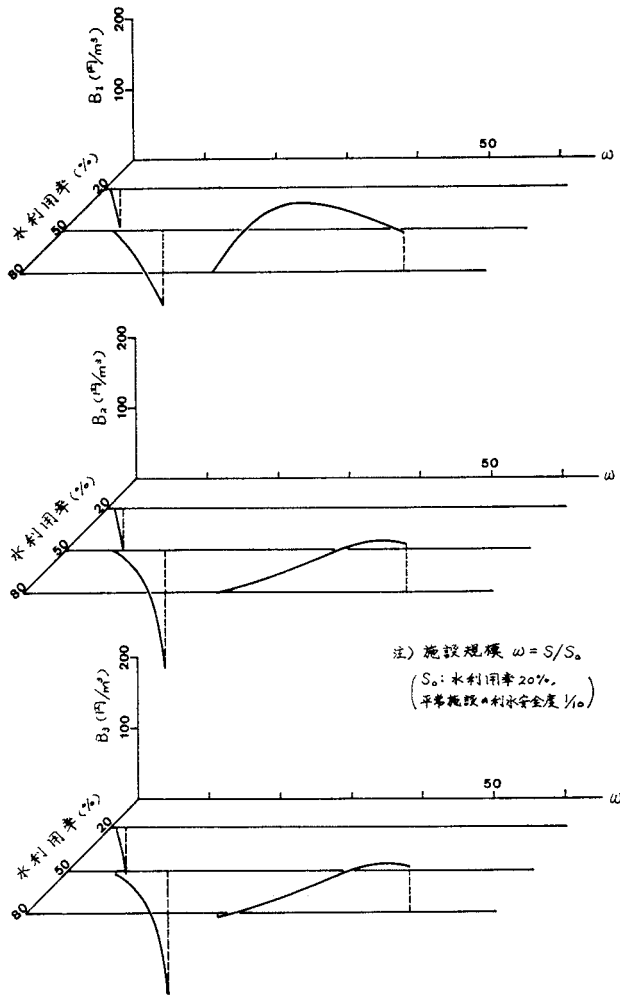


(a)  $R(\omega), g(\omega)$  (水利用率 80%)



(b)  $R(\omega), g(\omega), R \cdot g$  (水利用率 50%)

図-4 節水率  $R$ , 湯水継続期間  $g$  および水不足 %\*day ( $R \cdot g \cdot 365 \cdot 100$ ) と  $\omega$  との関係



図一5】計算ケース 2：水利利用率と純便益関数  $B_1, B_2, B_3$  との関係 (平常施設の水利安全度 1/10)

う。

① 超過渇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渇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 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ので（計測上の問題はあるが）、同様の手順により超過渇水を考慮に入れた水資源計画の検討が可能である。

③ 本論文では手法的な検討を主眼としたことから、諸量の設定に関しては、今後の調査に期待するものも含まれている。超過渇水対策施設の費用および超過渇水時の水の便益についての調査が今後の課題であろう。

④ 提案した費用便益分析モデルにより最適な水利安全度を定めるとすると、流域の特性に応じてそれぞれ異なるレベルが選定され、また同一流域内でも水利部門

別に異なるレベルが選定されることが予想される。

## 7. 結 語

本論文では、超過渇水の問題について検討した。おも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利用年数とを用いて超過渇水の生起する確率を算定し、たとえば水利安全度 1/10 の施設では、10 年間に 65% の確からしき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 %-day を対象とする容量  $S_2$  および渇水被害率（総被害額/供給水総量）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、水利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、水利利用率の上昇とともに超過渇水の問題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原因の一つは、流況を調整して水開発を行う施設の種類によっており、水利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おり、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。

(4) 超過渇水を考慮に入れた計画として、現在の標準的な水利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水利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水利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うえで有効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、現在の基準である水利安全度 1/10 の水開発が妥当であったこと、および水利利用率が上昇するにつれ

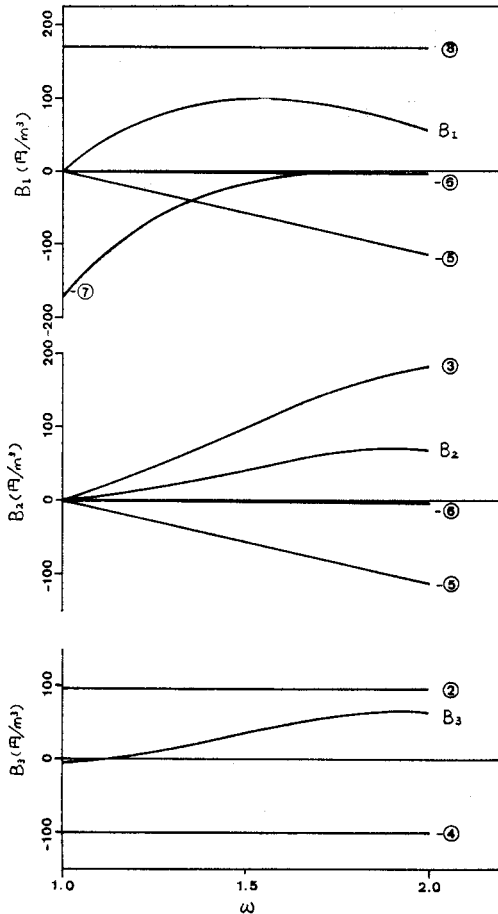


図-6 計算ケース 3: 純便益関数  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_3$  に含まれる各項の大きさ (水利用率 80%, 平常施設の利水安全度 1/10)

て超過洪水対策施設が費用便益分析的に妥当性をもつようになることが示された。モデル流域での分析では、水利用率 80% において、通常の水供給施設の利水安全度を 1/10 とすると、最適な超過洪水施設の規模は超過確率約 1/40 程度の超過洪水に対処し得るものという結果を得た。

(6) 現実の流域で超過洪水を考慮に入れた計画について検討する場合には、提案したモデルは洪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) 建設省九州地方建設局：福岡市洪水実態調査(概要版), 1978.
- 2) 吉川秀夫・竹内邦良：洪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.
- 3) 中川芳一：マスカープ法による利水安全度の概略評価, NSC(日本水道コンサルタント)研究年報, 1978.

- 4) Hudson, H.E. and R. Hazan: Drought and Low Streamflow, Handbook of Applied Hydrology (Edition-in-Chief: Ven Te Chow), McGraw-Hill Inc., 1964.
- 5) 長尾正志：貯水池をもつ河川の洪水確率について, 京都大学防災研究所年報第 11 号 B, 1968.
- 6) 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.
- 7) 富田信一・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.
- 8) 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.
- 9) 田瀬則雄：洪水評価への連の理論の応用, 地理学評論, Vol. 50, No. 8, 1977.
- 10) WMO Executive Committee: Drought, Special Environmental Report No. 5, World Meteorological Organization, 1975.
- 11) Jackson, B.B.: Markov Mixture Models for Drought Lengths, Water Resources Research, Vol. 11, No. 1, 1975.
- 12) Brutsaert, W. and J.L. Neiber: Regionalized Drought Flow Hydrographs from a Mature Glaciated Plateau, Water Resources Research, Vol. 13, No. 3, 1977.
- 13) Gupta, V.K. and L. Duckstein: A Stochastic Analysis of Extreme Droughts, Water Resources Research, Vol. 11, No. 2, 1975.
- 14) Tschannel, G.: Designing Reservoirs with Short Streamflow Records, Water Resources Research, Vol. 7, No. 4, 1974.
- 15) Askew, A.J., W.W-G. Yeh and W.A. Hall: A Comparative Study of Critical Drought Simulation, Water Resources Research, Vol. 7, No. 1, 1971.
- 16) Joseph, E.S.: Frequency of Design Drought, Water Resources Research, Vol. 6, No. 4, 1970.
- 17) 岩井重久・石黒政義：応用水文統計学, 森北出版 K.K., 1970.
- 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) 浜口博司：洪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.
- 20) 建設省土木研究所：洪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.
- 21) 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.
- 22) 建設省土木研究所：洪水被害の計測について, 土木研究所資料, No. 1502, 1979.
- 23) Millan, J.: Drought Impact on Regional Economy, Hydrology Paper, Colorado State University, Colorado, 1972.
- 24) 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.
- 25) 山中 敦・永田瑞穂・細見 寛：WP 法による被害の計測と洪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.
- 26) 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.
- 27) 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.
- 28) 中川芳一：利水安全度の評価について, NSC(日本水道コンサルタント)研究年報, 1978.
- 29) 南部三郎ほか 3 名：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.

- 30) 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.
- 31) 佐川直人：洪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.
- 32) 建設省中部地方建設局：耐洪水性水配分計画検討業務報告書，1979.
- 33) 志村博康：異常洪水と河川水利計画，水利科学，Vol. 23, No. 129, 1979.
- 34) 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.
- 35) 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.
- 36) 山口高志・吉川勝秀・角田 学：治水計画の策定および評価に関する研究（I），土木研究所報告，No. 156, 1981.
- 37) 石崎勝義：超過外力と河川計画，土木技術資料，Vol. 17, No. 4, 1975.
- 38) 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.
- 39) 建設省土木研究所総合治水研究室：超過洪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.
- 40) 吉川秀夫・吉川勝秀：流域の取・排水システムと水循環を考慮した水資源計画に関する研究，土木学会論文報告集，No. 308, 1981.
- 41) 笠原皓司：微分積分学，サイエンス社，1974.
- 42) 東京都首都圏整備局：水のコスト分析（II），1973.
- 43) Grigg, N.S. and O.J. Helweg：State-of-the-Art of Estimating Flood Damage in Urban Areas, Water Resources Bulletin, Vol. 11, No. 2, 1975.
- 44) 広長良一・八島 忠・坂野重信：低湿地緩流河川の治水計画について，土木学会論文集，No. 20, 1954.

(1980.8.18・受付)