

(37) 渇水の規模と発生確率を考慮した水資源確保対策の検討とその評価
—博多湾流域を対象として—

Integrated Water Resources Management and its Evaluation
in a Droughty Watershed with Water Shortage Probability

敵 斗鎔*, 楠田 哲也**

Dooyong Eom*, Tetsuya Kusuda**

Abstract; In arid and semi-arid watersheds, water resources management is of importance to maintain water supply for water works, irrigation, industry, and so on. Because water shortage occurs stochastically, stochastic approaches are inevitable to estimate precipitation and storage in reservoirs and to establish countermeasures for water shortage. Requirements of the water resources management are minimizing cost and LCE, and maximizing user's benefit. Objectives of this study, in which the Hakata bay watershed is the area of interest, are to develop a stochastic model on precipitation, to analyze annual precipitation distribution, to design precipitation patterns on 10, 25, 50 and 100 return years, and to establish water supply alternatives for water shortage. We select water supply alternatives at each water shortage period as follows: First, reservoir storage is simulated by using a tank model, secondly, intakes from reservoirs are calculated, thirdly, water resource alternatives are selected, and finally countermeasures are determined at each water shortage. In conclusion, desalination or other alternative measures, in addition to utilizing groundwater, is inevitable to avoid water shortage in this watershed. Desalination, however, has demerits of high LCE and cost, so that neat technologies to obtain alternative water resources and to reduce water consumption are to be developed.

Keyword; Hakata bay watershed, water resource management, LCE, cost minimum, precipitation

1. はじめに

21世紀を目前にひかえた現在、日常化した水不足を避けるための水資源確保は重要な課題になっている。特に頻繁に渇水の被害を受けている流域において、降水パターンの把握とそれに基づく水供給不足量の予測は流域の水資源確保対策の樹立とその評価のために欠かせない。実際、降水量の長期予測は難しい上に、水不足量と不足パターンに応じて対策を考えなければならないので、年間降水量と年を通しての降水量分布を把握し、さらに、これらをもとに渇水を再現し対策を考えることが必要となる。水道用水源にはダム貯留水、表流水、地下水などがあるが、安定した水源はダム貯留水である。通常ダムの貯水率が一定以下になると表流水などの条件と考えあわせ、渇水と判断される。利用者への水供給方法から見て、渇水時に不足する水道水源を補填するために、節水とは別に地下水、再生水、海水淡水化水などあらゆる代替水源を考えなければならない。そのためにここでは対策の評価指標として費用とLCE(Life Cycle Energy: 施設を建設、共用し、廃棄するまでの総エネルギー消費量のこと。ここでは水1m³当たりのcalとして表現)を用い、代替水源を確保し利水安全度を高めるための最適対策案を求めることを最終目標とする。

本研究の対象地域は、日常的に渇水に覆われている福岡市を中心とする博多湾流域¹⁾である。本流域の流域面積は640km²、人口は173万人(1999年現在)である。本流域には水源となる1級河川はなく、数カ所の中小河

九州大学大学院水工土木専攻 (Department of urban & environmental engineering, Kyushu University)
E-mail: *eomdy@civil.kyushu-u.ac.jp, **kusuda@civil.kyushu-u.ac.jp

川しかないので、安定した水源確保ができていない。すでに流域内の上水需要の約3分の1を流域外導水に依存している。

本研究では、降水量の時系列データから年間の降水パターンを確率的に把握し、シミュレーションにより渇水規模と期間を確率的に表現できるようにした。そして得られた降水確率年データを利用して、水供給の安定性を水供給量、費用、LCEの評価指標により分析した。

2. 確率論的降水量を考慮した年間降水パターンと渇水規模の予測

シミュレーションのために河川流量を作成する手法は荒巻ら^{2,3)}により考案されているが、本研究では既存データが十分でないこともあり、降水量から流出量を算定することにした。まず渇水の度合いを確率年で表わせるようにするために年降水量の変動と年間降雨パターンを確率的に求め、次いで日降水量の年間の分布を表現できるようにした。ここで分析に用いた降水量のデータは1890年-1996年の107年間の福岡管区気象台におけるものである。

年降水量を確率年で表現する手法⁴⁾として、極端値の再現に有利な対数正規分布を利用することにし、横軸に降水量の対数値を、縦軸にヘイゼン(Hazen)プロット [$P(x)=2i/(2N+1)$] (ここで、 i は年降水量データの順位、 N は年降水量データの総数、 $P(x)$ は降水確率)をとった。年降水量をプロットした後、平常年、10年、25年、50年、100年確率の年降水量を算定した。その結果、平常年の降水量は1613mm、10年確率降水量は1225mm、25年確率降水量は1088mm、50年確率降水量は1000mm、そして100年確率降水量は913mmとなった。

長期的な年降水量の変動特性を明らかにするために年降水量の自己相関係数を求めた。計算式と条件は次の通りである。

$$r(k) = \left\{ \sum_{i=1}^{n-k} (y_i - m)(y_{i+k} - m) / (n-k) \right\} / \sum_{i=1}^n (y_i - m)^2 / n$$

$r(k)$ はタイムラグ k での自己相関係数、 m は平均値、 n はデータの数である。

107年間の年降水量データを用い54年までの時間ずれ(ラグ)を考慮したが、極わだった周期性もなく、自己相関係数は最大で0.3以下と小さかったので、各年の降水量は相互に独立しているとし、完全乱数を用いて求めることにした。つぎに年間の平均的な降水パターンを得るために107年間の日単位の降水量を年当初からのそれぞれの日毎に分布型を求め1年を通しての降水量分布パターンを算定した。日降水量パターンを、平均パターンを中心に上下の標準偏差のところを境界とし、多雨年(1 σ 以上)、平常年(-1 σ ~+1 σ)、少雨年(-1 σ 以下)に分類し、日単位の降水量の年間分布型を得た(図1参照)。そして、10年確率、及びそれより長い確率年の降水量は少雨年に属するので、年間の降水量パターンを少雨年のものとして所与の条件とし、確率的に与えられる年間降水量に応じて各日の降水量を算定した。この手法によりある確率年の平均日降水量データを作成することができる。しかし、日単位の降水量をある程度ランダムに変動させるために、少雨年に属するデータの年当初からのある日数

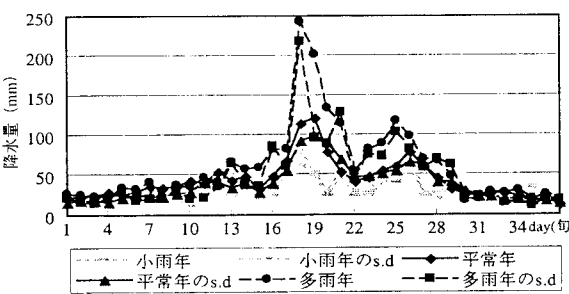


図1 3種の降水量パターンとその標準偏差(s.d.)

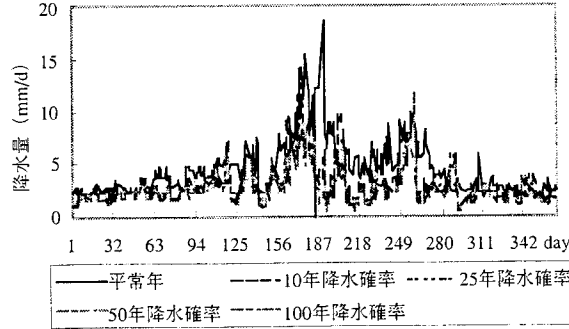


図2 降水確率年ごとの平均降水量分布

の日の降水量分布形を求め、その分布系を重みとする乱数を発生させ変動成分を作りだし、それを基本パターンに重畳した。この方法により、確率年に相当する短期（日）変動を含んだ年間の降水パターンを作り出すことができる。平常年、10年、25年、50年、100年降水確率年に対し、この方法により、複数年の降水量データを作成した。同じ確率年でも日降水量はそれぞれ異なる。図2は繰り返し計算によって得られた同一確率年毎の降水量分布の平均パターンを示している。ここでは、このようにして算定した降水量データを用いてダムへの流入水量等を算定した。

3. 統計的に推定された降水量をもとにしたダムの貯水率変化と日取水量の算定

博多湾流域における上水道の主水源であるダムの貯水率変化を算定し、渇水の発生可能性を検討する。渇水は降水が少なくダムの貯水率がある値を下回ると発生するものとする。ここでは、全ダムの貯水量を求めるのに、対象流域が比較的狭いので対象流域の全ダムを一つのダムにまとめて計算することにした。ダムには水道専用と多目的のものがあ、各ダムの有効貯水量は用途別に分けられているが、渇水時には渇水調整により当初の権利がそのまま守られることが少ない。そこで、用途を区別せず、まずダムの全有効容量を対象に流入・流出と貯水量を算定した。その際、取水はダムの貯水率が一定の値を下回ると制限されることにした。算定方法は以下の通りである。

3. 1 ダムへの流入・ダムから貯水率変化の算定

ダムへの流入量を4段タンクのモデルにより計算した。タンクモデルの各係数として、実データとの相関関係がもっとも高い係数値を選択し、統計的に与えた降水量をもとに流出量を算定した。計算地点の確率降水量と実ダムサイトの降水量には差があったので、一定の比率を乗じ、一致度を高めた。そして、実データと流出量の相関関係が0.9以上になった係数値を採用した。

ダムからの流出量はダムでの取水量（ W_d ）と河川純放流量（河川へのネットの放流量）（ W_{fn} ）とし、河川純放流量（ W_{fn} ）を灌漑用水（ W_{fa} ）と河川維持水（ W_{fr} ）に分けて算定した。全取水量（ W_t ）はダムのない河川における取水量（ W_r ）とダムでの取水量（ W_d ）の和とし、地下水からの取水は河川取水に含めて表現した。

$$(W_t = W_r + W_d)$$

灌漑用水（ W_{fa} ）と河川維持水（ W_{fr} ）はまとめて扱い、灌漑期と非灌漑期、平常時と渇水時を考慮し、ダムの全放流量を計算した。

$$\text{純放流量} (W_{fn}) = W_{fa} + W_{fr}$$

$$\text{ダムの総放流量} (W_{fn}) = W_{fa} + W_{fr}$$

灌漑期には、灌漑用水の日平均供給量をダムの放流実績から計算することにし、平常時の灌漑期の放流量と非灌漑期の放流量の差から日平均10万トンを得た。また渇水時には灌漑用水供給量は渇水調整により削減されるので、慣例に従い平常時の50%まで実績に基づいて削減した。河川維持用水は洪水時期を除いた1990年から1996年の間の平常年実績である日量10万トン、渇水時には日量5万トンとした。結局、河川純放流量は平常年の場合、灌漑時期には日平均20万トン、非灌漑時期には10万トンとなる。渇水時には10万トン、非灌漑時期には5万トンとなる。いずれも実績値であるが、用水供給量はダムの貯水率や渇水調整によりに変わりうる。ダム貯水率は経年的に変化するもので、初期条件として一義的に定める

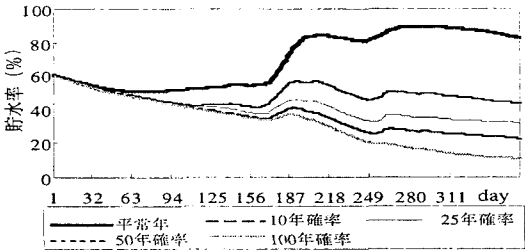


図3 降水確率年ごとのダム平均貯水率変化

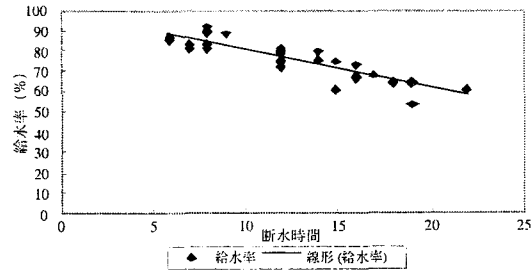


図4 断水時間と給水率の関係

のは、妥当ではない。しかし、ここでは、変動特性を把握するために、流域内の全ダムの1月の平均貯水率である60%と設定し、同じ初期条件のもとで確率年ごとの差をみることにした。ダムの最大貯水率は100%とし、これを超えるときにはそのまま流出させた。

これらの放流量の値をもとに渇水の度合により純放流量を次節で述べる方法で調整した。確率年ごとの降水量パターンを100回求め、その結果を用いて計算して得られたダムの貯水率の平均分布は図3のようになる。平常年に比べて10年降水確率で貯水率が50%より下がってしまい、ほぼ渇水状態になることが分かる。降水確率年が長くなるほど平均貯水率が減少することになり、10年確率以上の小降水量が続くと渇水が長期的になることが分かる。100年確率の降水の場合には貯水率が10%以下にまで落ちることが分かる。これは初期値を固定した場合の計算結果であり、固定させなければ、確率年が長くなるほど貯水率はいっそう低くなる年が現れる可能性がある。

3. 2 対象確率年の取水量の算定

水道水源用の取水はダム取水と河川取水からなるとし、渇水時のそれらの取水量はダムの貯水率に応じて変化させた。ダムでの取水量は、断水があれば、その時間に応じて変化する。その関係は完全に一義的ではないが、おおよその関係があり、図4に示すように断水時間が6時間になると給水率はほぼ15%減になる。断水時の実績によると、ダムの取水制限は貯水率が50%を割った時点から始まり、貯水率40%でダム取水必要量の15%減、貯水率30%で20%減、貯水率20%で25%、貯水率10%で30%減となっているので、これらの値を採用することにした。

渇水時の水道水源不足量の計算方法は次の通りである。まず1年を通しての日需要量パターンデータを求めようとした。年間の給水量は人口増にもかかわらず現状ではほぼ一定であり、渇水時にしか減少しないので、対象流域の平常年の5年間の日平均給水量データから平均的な年の日需要量パターンを作成する。その需要量パターンデータを利用し、取水実績をもとに日取水量をダム取水分と河川取水分に分ける。そして渇水時の河川取水量はダム取水量と同じパターンで変化するとし、渇水時の取水量は前述のようにダム貯水率に合わせ変動することにして総取水量を算定する。ある降水確率年の給水量の減少量は給水量パターンから相当する確率年の水道用の全取水量を差し引いたものであり、代替水源の導入必要量はこの差、つまり不足分となる。ある確率年の取水量変化を求めると図5のようになる。確率年が長くなるほど上水不足量が増加し水不足期間も長くなることが分かる。

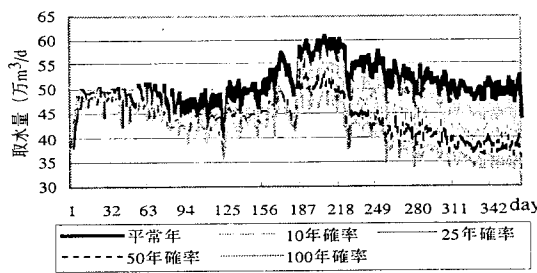


図5 降水確率年毎の取水量変化の算定結果

4. 代替水資源確保のための対策とその評価

4. 1 対策選択のための評価基準設定

水道水の用途は家庭部門と産業分門・商業部門からなる都市活動用水部門に分けられるが、本流域では家庭部門での消費が73%に及んでいる⁸⁾。一方、産業分門には用水を多量に消費するものではなく商業部門にはデパートが多い。そのため、水の質的要求から見て都市活動用水部門は家庭部門と同等の要求性を持つものとした¹⁸⁾。

代替水源は、家庭部門のカスケード式節水をはじめ、地下水涵養後の井戸水、個別循環・広域循環の

表1 LCEと費用の算定結果

供給方法	LCE			コスト 円/m ³	処理能力
	建設 kcal/m ³	運用 kcal/m ³	合計 kcal/m ³		
上水道	1407 ⁵⁾	1299 ⁵⁾	2706 ⁵⁾	219 ⁷⁾	5万~10万m ³ /日
再生水(広域循環)	552	3195	5573	608	4500m ³ /日
再生水(個別循環)	648	7254 ⁶⁾	7902	376 ⁶⁾	658m ³ /日
海水淡水化	1540	12978	14518	600	4万m ³ /日
浅井戸	96	511	607	22	48m ³ /日
下水道	568	1258	1826	274	35万m ³ /日

注) コストは1990年で換算 注) 広域循環の再生水には下水処理含む
注) 上水道のコストは福岡市全体での値
注) 下水道のコストは1000m³/日での値

下水処理水再生水、海水淡水化水とした。それぞれのLCEとコストの原単位は表1の通りである。これらの具体的な算定方法は文献1,9を参考されたい。各水源を利用する際に指標である費用とLCEのいずれを用いるかにより優先順位は異なる。家庭部門での高水質と低水質の用途比率の調査結果からみると、家庭部門でのカスケード式節水率は需要量の15%まで可能である(文献1,8,10参照)ので、家庭部門の全水消費量に対する総給水量の比である73%を乗じた値11%を利用可能量の上限とした。井戸水は雑用水水質以下の用途に制限したため、この水質で満足できる全需要量の33%まで導入可能とした。また汲上げ量がこの量を越えられないときはその量までを利用可能とした。地下水汲み上げ可能量の算定方法は文献1,9を参考されたい。個別循環の再生水は大型ビルと集合住宅で利用可能であるとし、最大利用可能量は実績値をもとに推定した値の4900m³/dとした。下水処理水を利用した広域循環の再生水利用は計画分を含め最大6100m³/dとした。海水淡水化の規模は現在計画が進んでいる5万m³/dの規模に設定した。代替水源をすべて導入した後も生じる水不足分については、海水淡水化の規模を増加させて対応することとし、その場合のLCEやコストを算定した。

ここで、個別循環は、ある建物内部での循環であるため、その分公共下水道の処理費を支払わなくてよい。そのため、下水処理水を利用する広域循環より安くなるが、処理方法と規模に制限があるため消費エネルギーは大きくなる。カスケード式節水は水道水の節約のみならず、下水処理費と消費エネルギーの節約ともなる。結局、消費エネルギーを評価基準にとると、代替水源の導入順序はカスケード式節水、井戸水、広域循環、個別循環、海水淡水化の順になり、費用を評価基準にとると、カスケード式節水、井戸水、個別循環、広域循環、海水淡水化の順になる。ここでは、エネルギー消費最少の観点から上水供給量の不足分を代替水源から導入することにし、需要量を満す量までカスケード式節水、井戸水、広域循環水、個別循環水、そして、海水淡水化水の順で導入することにした。確率年別の代替水源導入時のコストとLCEは日単位で計算し、対象確率年の不足日数と不足量も算定した。

4. 2 降水確率年に応じた代替水源の導入方式と評価

確率年別の代替水源の導入量の計算結果は図6～10のようになる。降水確率年が長くなるほど喝水の規模が大きくなり、代替水源の導入量と利用日数が多くなる。図11で示すように水資源利用日数によると、10年確率程度の喝水でも水不足が生じ、代替水源の利用日数がかなりにのぼることが分かる。10年確率程度でも海水淡水化水の稼働日があるので、それ以上確率年の場合には海水淡水化水を利用せざるを得ない。海水淡水化を導入すれば、25年確率の喝水までの水不足をほとんど防げることが分かる。

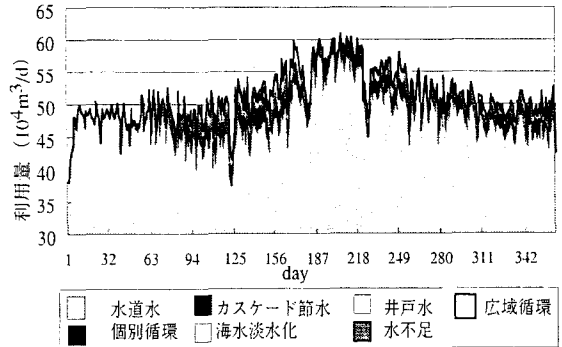


図7 10年確率降水の代替水資源利用量

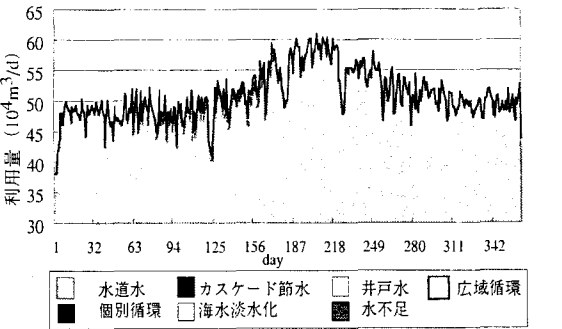


図8 25年確率降水の代替水資源利用量

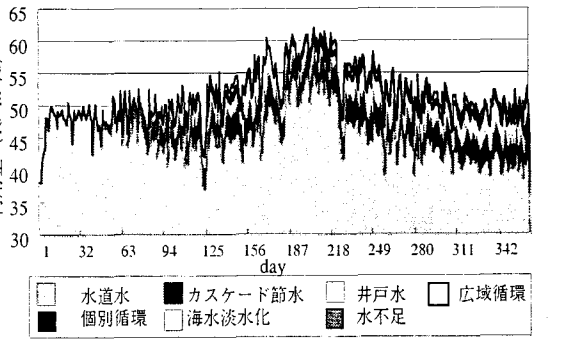


図9 10年確率降水の代替水資源利用量

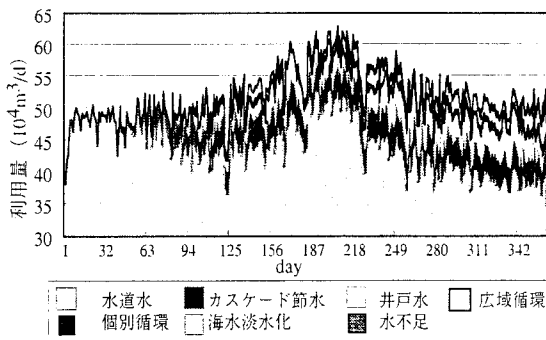


図9 50年確率降水の代替水資源利用量

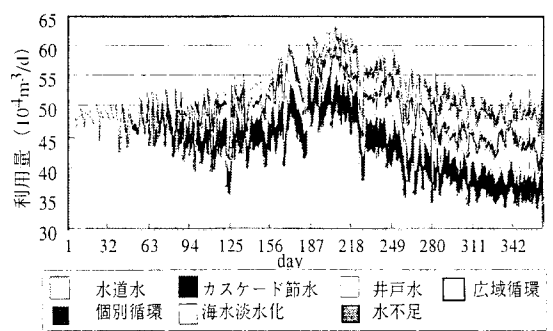


図10 100年確率降水の代替水資源利用量

100年降水確率では海水淡水化施設の稼働日数は約150日にもものぼるが、現在想定 of 海水淡水化施設の規模である日5万トンを供給しても結果的には70日以上の水不足が生じることになる。

平常時の需要量を賄うための水源の構成を具体的に見ると、10年確率でも全代替水源を導入する必要があり、50年確率以上になると、カスケード式節水と井戸水利用も多くなり、再生水も海水淡水化も必要となるが、水不足は避けられない。図12の水資源利用量をみると、平常年の不足分はカスケード式節水で十分であり、10年確率でもカスケード式節水と井戸水利用で水不足はほとんど賄えるが、再生水と海水淡水化も少し要することになる。25年確率では、カスケード式節水はほとんど最大になって、井戸水もかなり増加している。海水淡水化を導入すれば水不足は生じない。50年確率では、個別循環の水まで最大限利用され、海水淡水化水もかなり増えている。100年確率では、全代替水源が最大限利用されても、水不足が生じる。図13に示すように、LCEはカスケード式節水のLCEを0にしていることと井戸水のLCEの低さの影響もあり、平常年より10年と25年確率の方が低くなるが、50年確率以上では海水淡水化のLCEが大きくなり、平常年より増加する。不足分をまったくなくそうとすると一層増加することになる。図14のように費用面では、カスケード式節水の費用が0であることと井戸水の安さの影響もあり、平常年より全体の費用は抑えられ、25年確率で最少になって、50年確率からは海水淡水化が導入され少し増加する。その値は確率年が長くなるにつれて大きくなる。確率年が長くなるにつれ、費用とLCEは水

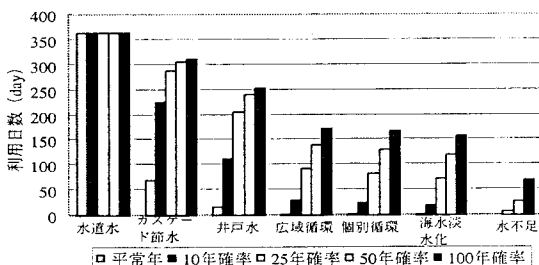


図11 確率年毎の平均水資源利用日数

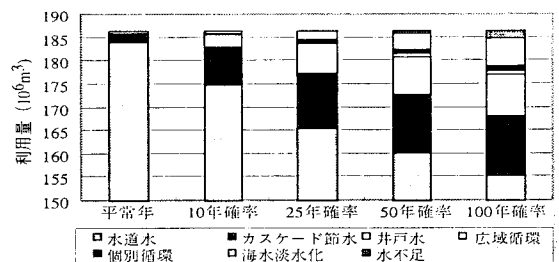


図12 確率年毎の水資源利用量割合

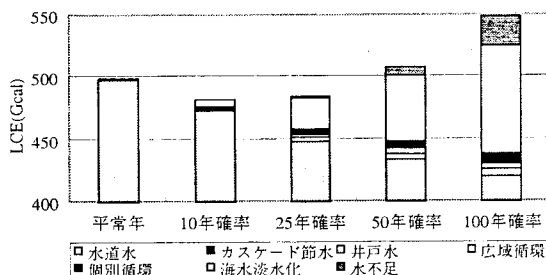


図13 確率年毎の計算結果 (LCE)

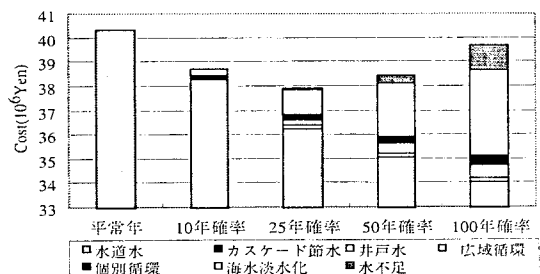


図14 確率年毎の計算結果 (Cost)

道水をも含めたときには小さくなるが、代替水源だけの純費用とLCEは段々増加する。カスケード式節水を除いて計算すると、当然ながら両方とも平常年より大きくなる。

結局、対策をすべて導入しても、海水淡水化を現行計画の5万m³/dとする限り50年確率以上の渇水になると水不足が生じることになる。効果の定量化に問題は残されているが、カスケード式節水が費用、LCEともにもっとも有利な選択肢である。費用優先と省エネ優先の場合に分けて算定したが、全体の代替水源の割合が低いため、大きな差は見られなかった。渇水時の不足量を賄うためには海水淡水化の導入も考慮に入れる必要はあるが、地球環境保全の観点から、より省エネ対策が求められている。ここで触れなかったが、平常時に可能な限り有効利用できるように水資源の余剰分をダムに戻して貯水し、渇水時に備える方策もありうる。

5. 評価と考察

降水確率年に応じた代替水源確保策について、費用とLCEから評価した。降水パターンにもよるが、確率年が長くなると渇水が起こりやすくなるので、目標水準に応じて渇水対策を適切に選択しなければならないことになる。

カスケード式利用は費用とエネルギーを節減できるが、平常年には、なかなか実行されない。これは家計が負担する水道代が相対的に低く、節約に向けてのインセンティブになりえていないことを意味する。渇水になると、対策としては最初に導入される対策であるので、その重要性は欠かせない。頻繁に渇水に見舞われる地域では可能な限り渇水を避ける対策をとるようになるが、それは渇水時の大きなリスクを回避しようとする意志が働くからである。流域単位の渇水対策を取るためには、流域の利水安全度よりは渇水被害度に基づいた対策を立てるべきであると考えられる。流域の利水安全度を基本にして対策をとることになるが、対策をとる際流域での被害を最小にすることが第一の目的になるので、渇水の予測被害額を算定し、それを最小にする対策が必要であろう。なお、ここで示した降水確率年データは典型的分布を求めるために平均化したものである。実際の降水確率年データは変動するので、ダムの貯水率はより低くなる可能性がある。したがって、既に述べたように渇水対策を立てるために、ここでは仮定した初期条件そのものも、確率的に変動させる必要がある。

6. 終わりに

渇水に見舞われやすい地域において、確率的に降水量を求め、流域のダムの貯水率変化、取水量変化と水不足量を推定し、代替水源を評価した。渇水は気象条件と利水状況に応じ発生するので、LCEと費用を指標とした最適な水供給方法の検討は、流域の水資源管理政策のなかで重要な意味を持つ。計画論として、渇水を回避する確率年は、渇水時の被害全額と整備費用との関係から定められるべきものであり、単純に確率年を定めてよいものではない。しかし、現行の種々の計画論においては、計画値を越えたときの事態を考慮していないことが多い。本研究では、確率年に応じた水供給方法を設定し、その最少費用算定ができるようにした。今後、渇水時の被害全額の算定方法を開発し、最適確率年の設定を検討する予定である。また、確率年設定後の実際の操作論においても合わせて検討したい。

参考文献

- 1) 巖斗鎔、石川和也、楠田哲也：渇水に見舞われやすい流域における水資源確保対策の検討とその評価—博多湾流域を対象にして—、土木学会環境工学研究論文集・第35巻、pp.61-71, 1988
- 2) 荒巻俊也、松尾友矩：流域水管理シミュレーションに用いる流量の作成手法に関する研究、土木学会論文集 Vol601/VII-8, pp.23-33, 1998
- 3) 荒巻俊也、松尾友矩：水・汚濁物質収支シミュレーションを用いた水量・水質管理施策の確率評価、土木学会論文集 Vol601/VII-8, pp.45-57, 1998
- 4) 白岩隆巳ら、3母数対数正規分布の検討と改良分布型の検証—岡山・福岡・前橋を事例として—水文・水資源学会誌 Vol111, No15(1998)、pp492-497

- 5) 水道と地球環境を考える研究会編：地球環境時代の水道、技報堂出版、p.109, 1992
- 6) 地球環境に関する委員会編：持続可能な社会を支える建築設備のために、社団法人空気調和・衛生工学会、pp.227-229, 1997
- 7) 福岡市水道局：福岡市水道局事業統計、1995
- 8) 亀岡真人：博多湾流域における水循環利用可能性、九州大学工学部水工土木学科卒業論文、p.54, 1997
- 9) 石川和也：水循環を考慮する都市における水使用；LCEとコストによる評価、九州大学大学院水工土木学専攻修士論文、1998
- 10) 福岡県水資源対策局編：福岡都市圏水資源対策研究会討議資料、1995, 1997
- 11) 福岡県編：福岡県の水道（平成7年度）、1997
- 12) 楠田哲也、森山克美：費用・便益による排水処理システムの評価、環境システム研究Vol.22、pp.171-181, 1994
- 13) 大西文秀、増田昇、安部大就、西脇国博、杉本三千雄、佐藤吉之：集水域を単位とした環境容量を求める新しい試み、環境情報科学Vol.24-1、1995
- 14) 田頭直人、鈴木勉、内山洋司：都市インフラストラクチャー構築の資源使用量と環境負荷、電力中央研究所報 Y95011、〈財〉電力中央研究所、pp.59-71, 1996
- 15) 池田秀昭、井村秀文：社会資本整備にともなう環境インパクトの定量化に関する研究、環境システム研究、Vol.21、pp.192-199, 1993
- 16) 建設省土木研究所地質化学部化学研究室編：資源・エネルギー環境負荷の算定手法の開発と実態調査報告書、環境庁、1993
- 17) 土木学会環境工学委員会編：流域水質管理システム開発小委員会報告書、1997
- 18) 下水道工事積算編集研究会編：下水道工事の積算、経済調査会、1994
- 19) 沖縄県企業局編：沖縄県海水淡水化施設導入計画概要、1995
- 20) 水収支研究グループ編：地下水資源・環境論—その理論と実践、共立出版、1993
- 21) 田尻要、喝水レベルと利水安全度を考慮した都市圏の水資源運用に関する基礎的研究、九州大学大学院水工土木学専攻博士学位論文、1997
- 22) 村岡治道、寝屋川流域における水循環の解明と21世紀対応の水資源確保に関する研究、大阪大学大学院土木工学専攻博士学位論文、1999