

(8) リスク指標を用いた利水安全度の評価による水資源の開発・運用計画 Evaluation of Water Resources Development and Policies Planning by a Risk Index

田尻 要*・神野健二**・河村 明***

By Kaname TAJIRI, Kenji JINNO and Akira KAWAMURA

1. はじめに

地球の温暖化に伴う水文特性の変化が議論されているなか、日本の各地で降雨の偏在性が原因と思われる渇水が頻発している。耐渇水性の向上を目的とした対応方策として、例えば貯水池や取水および浄水施設を増強するハード面の対策とともに、水資源の広域利用化や海水淡水化の導入計画など、ソフト的な見地から水資源を高度に利用する場合の水供給システムにおける評価手法の確立¹⁾が求められている。

ところで、従来より貯留や取水施設などにおける水文統計量については、確率渇水年が1/10という利水安全度で利水計画が論じられてきたが、水供給システムの末端におけるリスクは利水計画を必ずしも十分に反映した表現で評価されていないように思われる。水資源の運用に関わる担当者が、水資源の開発・運用計画を決定するためには、想定されるシナリオに対して水供給システムに及ぼす影響や効果を適切な評価基準で事前に検討できる必要がある。一方、検討された開発・運用計画に対して社会的なコンセンサスを形成するためには、水供給システムの末端での影響を消費者が容易に理解できる指標で表現されることが望ましい。

このような見地から筆者らは、従来用いられている利水安全度などの指標に加え、水供給システムにおけるリスクを表す指標として、信頼度(*reliability*)、回復度(*resiliency*)、深刻度(*vulnerability*)と、これらの線形結合として定義した渇水リスクであるDRI(*Drought Risk Index*)を提案する。本報では、リスク指標を適用した事例解析として、ある都市圏の中心都市に渇水が発生した場合のシナリオを想定し、水資源の広域利用化を目指した水運用計画や、新規に水資源を確保するための開発計画が、水供給システムに与える影響や効果をリスク指標により検討した。

2. リスク指標の導入

現在、頻繁に用いられている利水安全度の代表的なものに、貯水池不足量に基づく指標や需要量に対する不足率に渇水日数を乗じた不足%(不足%)²⁾などがある。これらの利水安全度の指標は、貯水池や水需給の状況を表しているが、水供給システムの末端すなわち消費者レベルにおける被害の状況を必ずしも十分に反映している表現とは言い難い³⁾。また、各自治体や水道事業者などに対するアンケート⁴⁾によれば、水運用を検討・計画するにあたり、被害の程度をより分かりやすい指標で定量的に評価することが望まれている。ところで、Hashimoto⁵⁾は水源地の貯水運用についてリスク解析の考え方を導入している。これは貯水池の運用方策を、*reliability, resiliency, vulnerability*の3つの指標によって評価する手法である。筆者らは、この評価手法を水供給システムに適用するために以下のように定義した。

* 西松建設(株)技術研究所 研究員 (〒242 神奈川県大和市下鶴間2570-4)

** 九州大学工学部建設都市工学科 教授 (〒812 福岡県福岡市東区箱崎6-10-1)

***九州大学工学部建設都市工学科 助教授 (〒812 福岡県福岡市東区箱崎6-10-1)

1) 信頼度(Reliability)

水供給システムが、必要な水量の基準を満たす確率である。

$$\text{信頼度} = (\text{供給量} \geq \text{需要量}) \text{を満たす日数} / \text{対象期間日数} \quad (1)$$

2) 回復度(Resiliency)

渇水の継続性や立ち直りの早さを表し、回復度の逆数は一度渇水に陥った場合の平均継続期間を意味する。

$$\text{回復度} = \text{渇水の発生回数} / \text{渇水日数} \quad (2)$$

3) 深刻度(Vulnerability)

渇水の深刻さの度合を示す指標であり、渇水期間中の平均不足率を意味する。

$$\text{深刻度} = \text{渇水期間中の総不足量} / \text{渇水期間中の総需要量} \quad (3)$$

4) DRI(Drought Risk Index)

現実の施策上では、さまざまな渇水の状況を同時に把握して評価を行う場合も多いと思われる。このような場合に、渇水のどのような状況を重視するか、重み付けを含めた評価を行うことが可能な指標が必要となる。そこで、1)~3)の3つの指標の重み付き線形和をDRIとして新たに定義し総合的なリスクの指標とする。すなわち、

$$DRI = w_1 \cdot (1 - \text{信頼度}) + w_2 \cdot (1 - \text{回復度}) + w_3 \cdot \text{深刻度} \quad (4)$$

であり、 w_1, w_2, w_3 は各指標に対する重み係数である。評価の対象としている水供給システムにおいて、いずれの指標を重視するかにより係数を変化させた評価が可能である。

3. 対象地域における水資源の概要と課題

リスク指標による評価の事例として、A都市圏の中心都市であるA市の水供給システムを取り上げた。A都市圏では、都市圏の流域に一級河川を持たず、地理的な制約などによって水資源の賦存量が少ないことから、流域外の一級河川であるE川からのF導水を受けている(図-1参照)。A都市圏におけるF導水への依存度は、中心都市のA市で日配水量の約30%、周辺自治体で日配水量の20~50%と高い。A市は自己水源の充実にも力を入れてい

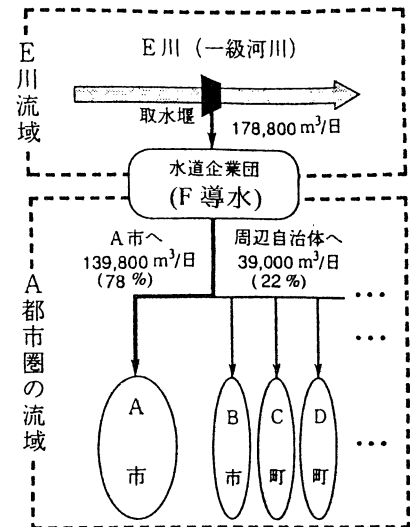


図-1 A都市圏とF導水の概要

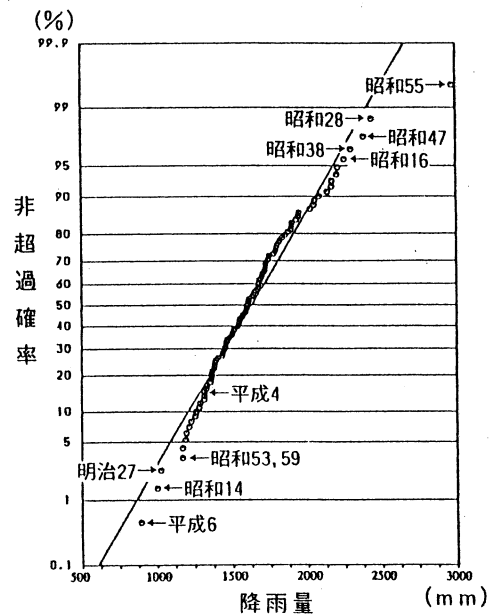


図-2 A市管区気象台における降雨量

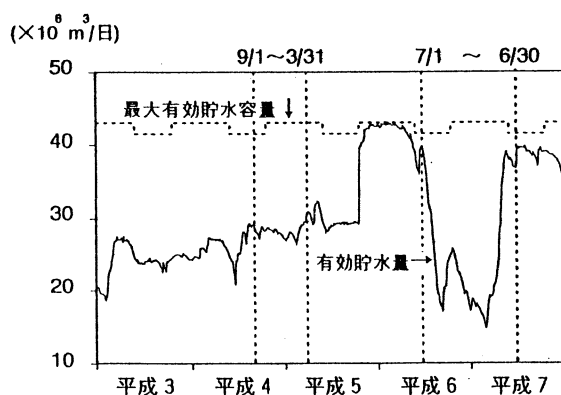


図-3 A市における自己水源(貯水池)の有効貯水量

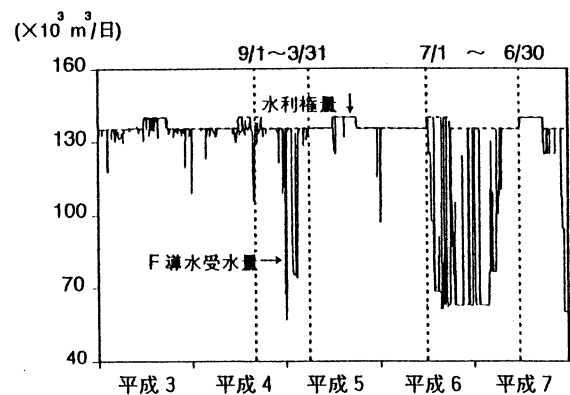


図-4 A市のF導水受水量

るが、周辺自治体では地理的・経済的制約から、必ずしも十分に自己水源が確保されているとは言い難い。このため、E川の流況が悪化しF導水の制限が行われた場合に、A市と比較して周辺自治体の影響は大きい。

近年、A都市圏では平成4年度と平成6年度に渇水が発生した。A市における年間降雨量について105年間の非超過確率を図-2に示す。図中の直線は正規分布に対応する。図-2より、平成4年は約1/6、平成6年は観測史上最も厳しい約1/167程度の渇水であった。また、平成3～7年におけるA市が水利権を持つ貯水池の有効貯水量を図-3に示す。図-3より、特に平成6年度は異常少雨の影響

から急激に貯水量が低下していることがわかる。一方、A都市圏へのF導水量も平成4年度と平成6年度は断続的に制限された(図-4参照)。これらの影響を受けて、図-5に示すように平成6年度はA市の実績配水量が減少した。

ところで、平常時(渇水でない場合)の実際の水運用では、需要量の予測を行いそれを満足させるように供給を行うため、需要量と供給量は一致している。しかしながら、渇水時には水源の状況が悪化しているため、予測された需要量に応じた水量が確保できず供給量は減少する。このように、渇水時の需給を検討する場合には需要量の推定が必要である。本報では、(5)式に示す推定モデルにより求められた推定需要量をリスク指標の算定に用いている。

$$Q(t) = 14.91t + 403,392 \times (\text{月係数}) \times (\text{曜日係数または特殊日係数}) \quad (5)$$

ここに、 Q :推定供給量($\text{m}^3/\text{日}$)、 t :平成3年1月1日を起点($t=1$)とした日数

これは、トレンド、月、曜日、特殊日による変動を考慮した日供給量推定式⁹⁾により求めたもので、トレンド成分を除いた値に各月の係数を乗じ、さらに特殊日においては特殊日係数を、それ以外の日には曜日係数を乗じ、最後にトレンド成分を加えることを意味している。トレンドの算定には平成3～5年の3年間のデータを用いており、この推定式の実績配水量に対する平均誤差率は3.56%である。このようにして求めた平成6～7年の推定需要量を図-5中に示している。なお図-2～5中には、平成4年度および平成6年度の渇水について事例解析の対象期間を破線で示している。

このような状況のなか、都市圏全体の水資源を広域的に利用することや、安定的な新規水資源を確保することの必要性など、行政⁹⁾や市民⁷⁾も認識を等しくしており、今後の具体的な施策に期待されている状況である。すなわち、平成4年度のように比較的小規模な渇水の場合は、水資源の広域利用化の考えに基づき都市圏全体で利水安全度の向上を図るために、A市のF導水量の一部を周辺自治体に融通する方策である。また、平成6年度のような大規模渇水に備えて、気候変動の影響を受けにくい安定した新規水資源を確保するために海水淡水化を導入する方策である。

4. リスク指標による水資源運用計画の検討

4.1 シナリオの設定

リスク指標を用いた水資源の運用計画に対する評価の事例として、A都市圏の中心都市であるA市の水供給システムについて平成4年度の渇水を取り上げる。平成4年度の渇水のような比較的小規模な渇水の場合に、A市の水資源の一部を自己水源の状況が悪化していた周辺自治体に融通することで、A都市圏全体の利水安全度が向上すると考える。すなわち、A都市圏へのF導水におけるA市の受水量の一部を、周辺自治体に振り当てる水運用計画である。ここでは、F導水の水量が制限された平成4年9月1日から平成5年3月31日までの7ヶ月間を対象の評価期間とした。またA市において、降雨量が少ないことにより自己水源のダム流入量および

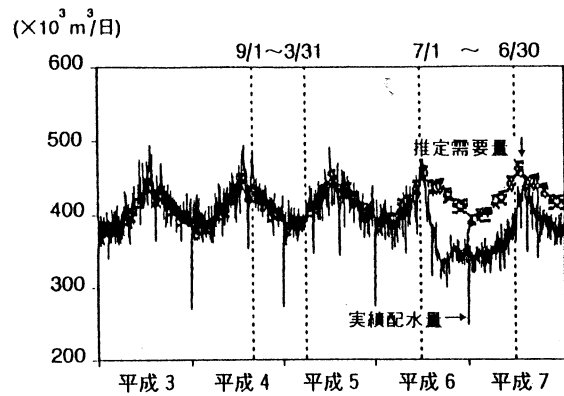


図-5 A市の水需給と推定需要量

取水量が減少し、流況の悪化により河川取水水量も減少すると想定して、F導水の受水量を変化させた。

なお、A市のF導水の受水量は、水利権量を受水率100%とする。また、自己水源のダム流入量および河川取水量の減少は、降雨量の減少が反映されるとして、対象期間における降雨量の非超過確率1/10,1/20,1/30の渇水年降雨量を求め、実績降雨量との比で自己水源のダム流入量および河川取水量の実績値から減少させた(表-1参照)。本来ならば、降雨量に基づく流入量予測を行うべきであるが、ここでは利水安全度の検討を主な目的としているため、このように簡便な手法をとっている。

表-1 A市における確率渇水年の降雨量

平成4年度渇水のシミュレーション期間の降雨量 (平成4年9月1日～平成5年3月31日)		
確率渇水年	渇水年降雨量 (mm)	実績降雨量との比
1/10渇水年	496	0.944
1/20渇水年	452	0.861
1/30渇水年	429	0.817

4.2 結果と考察

対象期間中のA市における実績配水量と推定需要量を用いて、降雨量が非超過確率で1/10,1/20,1/30になった場合の、F導水の受水率を変化させた水運用計画によるリスク指標を図-6～8に示す。図-6の指標が表している意味を、例えばF導水の受水率が40%の場合に着目して述べる。受水率が40%のとき、信頼度は0.57、回復度は0.25、深刻度は0.06、DRIは0.42である。これは、対象期間中のE川受水率が40%に制約されると、信頼度は0.57、つまり対象期間中の57%の期間のみで配水量が需要量を満足し、残りの43%の期間が渇水状態であることを表している。回復度は0.25となっており、この逆数が4.0であることから、一度渇水状態に陥った場合の平均

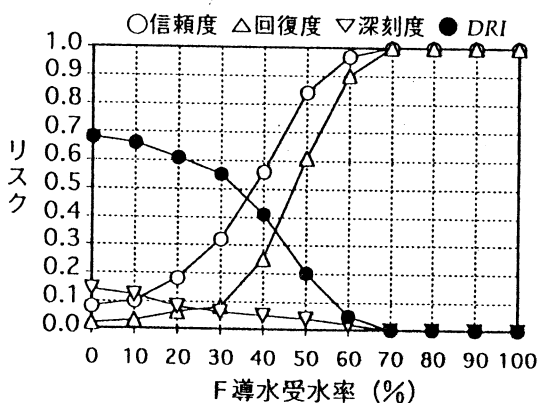


図-6 1/10渇水年のリスク指標

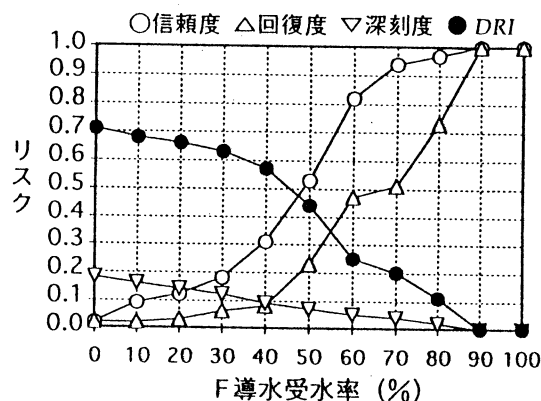


図-7 1/20渇水年のリスク指標

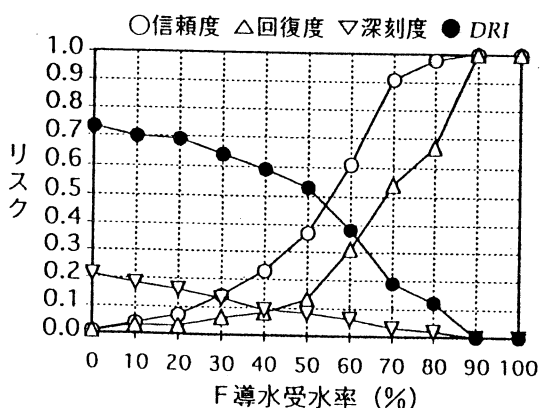


図-8 1/30渇水年のリスク指標

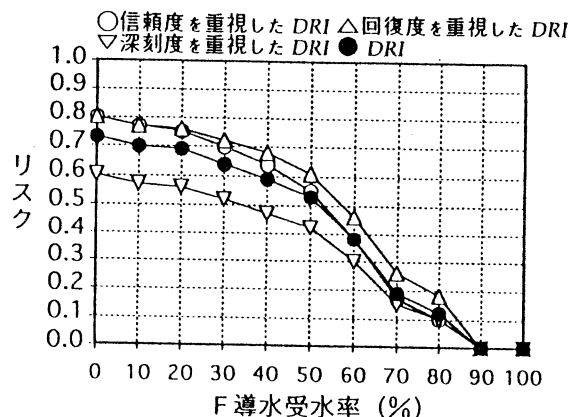


図-9 各指標を重視したDRI

継続期間が4日間であることを表している。深深度は0.06で、渇水期間中の平均不足率が6%であることを表している。さらに、信頼度、回復度、深深度を同じ重みで評価した場合、すなわち(4)式の各指標に対する重み係数 w_1, w_2, w_3 を1/3としたDRIは0.42となっている。図-6から、降雨量が非超過確率で1/10の場合は、F導水の受水率が70%に制約されても、いずれの指標からもリスクは生じないことがわかる。また、降雨量が非超過確率で1/20(図-7)および1/30(図-8)の場合、受水率が90%に制約されるとリスクが生じることがわかる。これらのことから降雨量の非超過確率が1/10では、A市におけるF導水量の30%(約42,000m³/日)を、1/20~1/30では10%(約14,000m³/日)を周辺自治体に融通することが可能であると考えられる。

ところで、渇水期間は可能な限り短い方が望ましい。しかしながら一般的な取水運用、特に渇水時においては、貯水池の水を温存する方針に基づく場合が多いと考えられる。すなわち、渇水期間は短いが一日当たりの不足率が非常に大きい渇水よりも、渇水期間が多少長くても生活に支障をきたさない程度の日当たりの不足率を目指した運用である。これは、リスク指標の回復度や深深度を重視して検討することに相当する。そこで、信頼度、回復度、深深度のいずれかの指標を、残りの指標の2倍に重視した場合、つまり、(4)式の重視したい指標の重み係数を1/2、残りの指標の係数を1/4に考えた場合のDRIを図-9に示す。図-9において、例えばDRIが0.2の場合に着目すると、回復度を重視したDRI($w_1 = 1/4, w_2 = 1/2, w_3 = 1/4$)の受水率は48%、深深度を重視したDRI($w_1 = 1/4, w_2 = 1/4, w_3 = 1/2$)の受水率は40%である。これは、期間中の平均不足率が多少大きくなっても、渇水の平均継続期間を短くしたい場合には48%の受水率が必要であることを示している。一方、渇水の平均継続期間が長くなっても、期間中の平均不足率を小さくしたい場合は、40%の受水率が必要であることを示している。また、前者と比較して後者は、F導水の受水率で8%多くの水量を周辺自治体に融通できる可能性を示しているが、この水量をA市は自己水源から取水して補う必要がある。このように、DRIが等しい状況でも、いずれの指標を重視するかにより、運用方策の目的に応じて必要な水量を検討することが可能である。

5. リスク指標による水資源開発計画の検討

5.1 シナリオの設定

平成6年度のように大規模な渇水に備えるために、A市に海水淡水化のような安定した新規水資源を確保する計画が、A市の水供給システムに与える効果をリスク指標により検討する。A市の自己水源のダム貯水量が急激に減少を始めた平成6年7月1日から、給水制限が解除された平成7年6月30日までの12ヶ月間を対象の評価期間とした。なお、導入する安定確保量は、実績配水量に安定確保量を加えた場合に、推定需要量を超えない範囲とした。

5.2 結果と考察

対象期間に安定確保量を導入した場合の配水量と、推定需要量の関係から求められたリスク指標を図-10に示す。図-10の回復度とDRIに着目すると、90,000m³/日の確保量を導入すれば、リスクは生じないことがわか

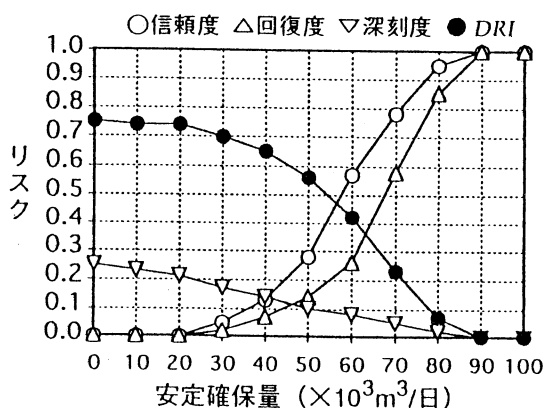


図-10 安定水源を確保した場合のリスク指標

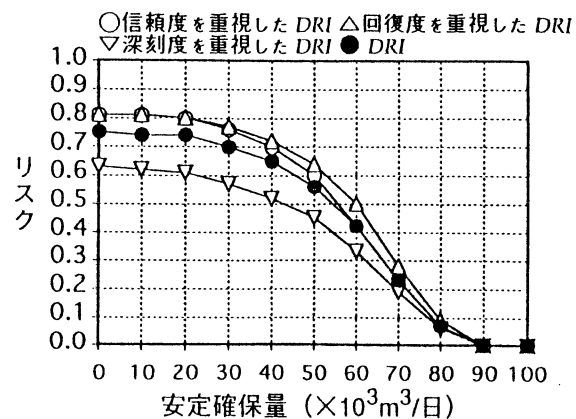


図-11 各指標を重視したDRI

る。また、例えば70,000m³/日の確保量を導入した場合の回復度に注目すると、安定確保量を導入しない場合(回復度は0で期間中の全てで渇水状態)と比較して、回復度は0.25(渇水の平均継続期間は4日)まで向上する。一方DRIに着目すると、約61,000m³/日の安定確保量を導入すれば、導入しない場合と比較してリスクは約50%に軽減されることがわかる。

また4. で検討した図-9と同じように、各指標に重み付けをしたDRIを図-11に示す。例えば、リスクを0.4まで低下させたい場合、回復度を重視したDRIでは約64,000m³/日、深刻度を重視したDRIでは約55,000m³/日の安定確保量を導入する必要がある。これは、渇水の平均継続期間の短縮を目指す場合は、渇水期間における平均不足率の減少を目指す場合と比較して、約9,000m³/日のより多くの水量が必要であることを示している。

4. おわりに

水資源の開発・運用計画を決定するためには、想定されるシナリオに対して水供給システムに及ぼす影響や効果を適切な評価基準で事前に検討できる必要がある。また、検討された開発・運用計画に対して社会的なコンセンサスを形成するためには、水供給システムの末端におけるリスクを消費者が容易に理解できる指標で表現されることが望ましい。このような見地から筆者らは、水供給システムに対してより具体的な検討を行うための指標として、信頼度(*reliability*)、回復度(*resiliency*)、深刻度(*vulnerability*)と、これらの線形結合として定義した渇水リスクであるDRI(*Drought Risk Index*)を提案した。リスク指標を適用した事例解析として、ある都市圏の中心都市に渇水が発生した場合のシナリオを想定し、水資源の広域利用化を目指した水運用計画や、新規に水資源を確保するための開発計画が、水供給システムに与える影響や効果をリスク指標により検討した。得られた主な結論を以下に示す。

- 1) 水資源の広域利用化を目指した水運用計画として、平成4年度のように比較的小規模な渇水の場合、A市へのF導水量の一部を周辺自治体に融通するシナリオを想定した。この水運用計画に基づいてA市の水供給システムにおけるリスク指標を求めた結果、非超過確率1/10で70%、1/20~1/30で90%の受水率があれば利水安全度への影響はないことがわかった。これは降雨量が非超過確率1/20~1/30の場合で、A市の周辺自治体に約14,000m³/日(約37,800人/日)の給水量を融通できる可能性を示している。
- 2) 平成6年度のような大規模な渇水に備えるために、安定して確保できる新規水資源の開発計画として、海水淡水化を導入するシナリオを想定した。平成6年度に発生した渇水レベルの水運用においては、安定的に90,000m³/日の水量を確保すればリスクは生じないことがわかった。また、約61,000m³/日の安定確保量を導入することで、導入しない場合と比較してリスクは約50%に軽減されることがわかった。

謝辞：本研究は、文部省科学研究費補助金(総合研究(A))「平成6年度渇水の気象・水文学的検証と渇水時のリスクマネジメントに関する研究」研究代表者:池淵周一)の助成を得ました。また、貴重なデータとご意見をいただいた、A市およびA都市圏の水道管理に携わっておられる職員の方々に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1)白水暢・友野勝義:水道におけるリスク管理の現状,水道協会雑誌,Vol.64,No.1,pp.32-41,1995.
- 2)池淵周一:水資源システムにおける安全度概念の定式・定量化と計画論への応用に関する総合的研究,昭和61,62年度科学研究補助金研究成果報告書,1988.
- 3)国土庁長官官房水資源部:日本の水資源-健全な水循環をめざして-,1994.
- 4)Tsuyoshi HASHIMOTO, Jery R. Stedinger, Daniel P. Loucks: Reliability, Resiliency, and Vulnerability Criteria For Water Resource System Performance Evaluation, *Water Resources Research*, Vol.18, No.1, pp.14-20, 1982.
- 5)末吉信一郎・河村 明・神野健二・田尻 要: A市における日配水量の統計的特性について, 土木学会西部支部 1992年度研究発表会概要集, pp.123-124, 1993.
- 6)A県: A県水資源総合利用計画(第4次), 1996.
- 7)九州大学出版会: A市で学びA市で考える環境問題, pp.63-67, 1996.