

渇水リスクと水資源計画*

Drought Risks and Water Resources Systems Planning *

多々納裕一*

By Hirokazu TATANO**

This paper aims to present an analytical framework to analyze drought risk. 'Drought risk' is defined as a probability distribution of social damages caused by drought. In the context of 'drought risk', 'peril', 'hazard', 'agents' and 'actions of agents' are identified and their relationships are shown. 'Hazard' of drought risk is consisted by natural environment, social circumstances and infrastructures. Hard and soft infrastructures play an important role to control drought risk. This paper analyses relationships between social welfare and management policies of water distributing system at drought time, and proposes a model to evaluate these management policies from a view point of 'efficiency' and 'equity' criteria.

1. はじめに

現代の社会では、水供給が安定的に行われることを前提として、日常生活が営まれている。すなわち、水使用に関わる機器の普及、ライフスタイルの変化等によって、我々は快適な日常生活を送っている。しかしながら、ひとたび渇水に見舞われると、それによって生じる被害は甚大なものとなると考えられる。

渇水は、他の災害と異なり、人間が災害の発生に深い関わりをもちやすい。渇水によって生じる被害は、取水制限・給水制限の実施によって発生する。このような措置は、人間の判断によって行われるから、渇水が発生するか否かは、貯水池や水道システム等のインフラストラクチャの整備状況とその管理・運営に委ねられているといっても過言ではない。とはいっても、流況の悪化は自然現象であり、不確実性を伴う。従っ

て、渇水問題を考察する際には、このような不確実性を制御し、社会的に望ましい状態を達成しうるようにインフラストラクチャやその管理・運営方策を検討しておくことが重要である。このためには、流況の悪化から被害に至るまでの現象メカニズムの究明と、被害軽減のための方法論の整備が必要である。

従って、渇水の発生構造を明らかにするとともに、渇水に対して強い社会システムを構成するための方法論に関して考察するが必要であろう。本稿では、まず、リスク分析的な視点から渇水の発生構造をモデル化し、渇水対策をその中に位置づける。しかしながら、渇水対策自体、貯水池の整備等のハードな施設から、渇水時の給水管理方策等のソフトな方策にまで及ぶ広範な代替案の領域を指す。もとより、本稿でそのすべてをカバーすることは難しい。著者らは現在までに、貯水池の整備やその操作ルールの改善によって渇水のリスクを軽減する方策に関して研究してきた。本稿では、具体的な検討事例として、水道事業体が給

*キーワード：リスク、渇水、水資源計画、給水管理方策

**正員、鳥取大学助教授、工学部社会開発システム工学科
(鳥取市湖山町南 4-110)

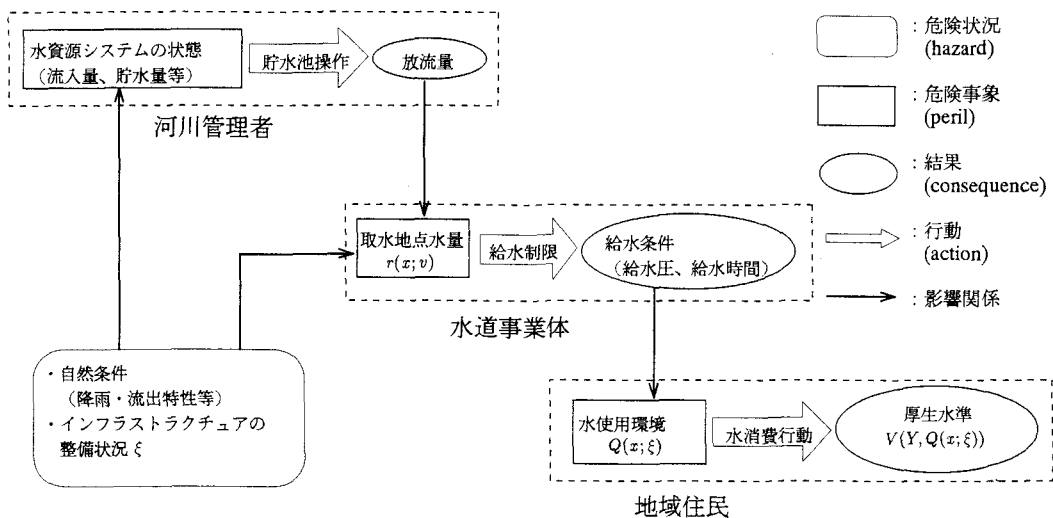


図-1 渇水リスクの発生構造

水制限を行う際のルールである渇水時の給水管理方針を取り上げ、その設計方法に関して考察することとする。

2. 渇水リスクの発生構造

(1) リスク分析の基礎的な枠組み

岡田¹⁾は、伝統的な保険管理論におけるリスクマネジメントの概念をシステム論的に整理している。リスクに関わる「主体」を「行動主体」と「被害客体」とに区別され、「被害客体」が被る「損害」の生起確率を「リスク」と定義されている。「被害客体」が被る「損害」は「行動主体」の「行動(action)」と行動主体の行動の対象となる「危険事象(peril)」によって規定される。「危険事象」の生起確率は「危険事象」の発生環境である「危険状態(hazard)」によって規定される。このため、「損害」は「危険状態(hazard)」のもとで生起する「危険事象」とそれに対して行動主体の「行動」の結果として生じる。ここで、上述の「リスク」を規定する要素のうち、操作可能な要素は「危険状態」である。危険事象の発生環境である「危険状態」の制御は「危険事象」の生起確率分布に影響を及ぼし「行動主体」の「行動」を誘導するという役割を果たす。このような枠組みを渇水問題に適用し、渇水リスクの発生構造を明確化しよう。

(2) 渇水リスクの発生構造

「渇水」は、河川流況の低下に伴って、平常時には充

足されている水需要が満たされなくなる現象であり、「渇水リスク」はこのような現象の発生によって生じる被害の確率分布である。いま、貯水池を含む水資源システムと水道システム、さらに水の需要主体である地域住民から構成されている水利用システムを考えよう。このとき、リスク分析の枠組みに従えば、この水利用システムにおける渇水リスクの発生構造は図-1のように整理できる。

渇水リスクの発生構造の第1の特色は、複数の行動主体の行動が最終的な被害客体である地域住民の厚生水準に影響を及ぼすことである。すなわち、これら各々の主体は「危険事象」を認知し、これに対応するため「行動」を起こす。その行動の結果が次なる主体に「危険事象」として影響を及ぼすという重層的な影響関係にある。

渇水リスクの発生構造の第2の特色は、「危険事象」の発生環境である「危険状態」が、降雨や流出の特性等の自然的な条件、水需要を規定する社会経済条件及びインフラストラクチャの整備状況といった政策変数によって構成されていることである。これらの「危険状態」は、それぞれの行動主体の「危険事象」の発生確率、すなわち、水利用システムの状態の生起確率を規定し、地域住民にとっての「危険事象」である水使用環境をも規定する。これらの「危険状態」のうちで制御可能なものはインフラストラクチャの整備状況である。ここで、インフラストラクチャとしては、

貯水池や水道システム等の施設の物的なインフラストラクチャと貯水池の操作ルールや水道システムの管理・運用方式等の非物的なインフラストラクチャがあると考えられる。

以上の議論から、渇水対策はインフラストラクチャの整備によって渇水による被害の生起確率分布を望ましい方向に改変する行為であると位置づけることができよう。従って、渇水対策を推進していく際には、これらのインフラストラクチャを有機的に組み合わせる渇水の被害やその生起確率を改善していくことが望ましい。この際、地域住民の立場からプロジェクトの整備効果の評価を行い、地域の状況に応じた適正な整備が図られねばならない。

現在までに、渇水対策に関する多くの研究が行われてきた²⁾。その多くは貯水池の整備やその操作ルールに関するものである^{3) 4)}。中川⁵⁾が指摘しているように、水資源システムにおける危険事象の発生と、水道システムにおける危険事象の発生は必ずしも一致しない。さらに、他の事情が一定であったとしても水道システムの形態や渇水時の給水管理方策によって被害は大きく異なるであろう。このように、水道システムの形態やその管理方策を改善することは、渇水リスクを軽減するための有効な手段となり得ると考えられる。配水ブロック化⁶⁾や水道広域化⁷⁾等の水道システムの形態に関する研究も見られるが、これらの研究は水量や水圧の安定性が議論されるにとどまっており、地域住民の厚生にまで踏み込んだ検討は行われていない。このような問題意識から、以下では、渇水時の給水管理方策と地域住民の厚生の関係を明示的にモデル化するとともに、水配分の効率性・公平性という観点から渇水時の給水管理方策を評価する方法を提示し、望ましい給水方策に関して考察した結果について述べることをとする。

3. 渇水時の給水管理方策に関する分析

(1) 分析の枠組み

渇水時の給水管理方策として減圧給水を取り上げる。減圧給水では、給水システム内の節点水圧が調節され、各家庭の給水栓における水圧が減少する。水圧の減少に伴ない各世帯の水使用量は減少し、厚生水準も低下する。ここで、各世帯における給水圧は、給水システムの物理的な諸元や管理方策、各世帯のおか

れている地理的条件、さらには、給水ブロック内の他の世帯の水使用量に依存して定まる。

そこで、本研究では、図-2に示すように家計の水消費行動モデルを管路解析モデルと連動させたモデル（給水管理シミュレーションモデル）により、減圧給水代替案に対応した各節点水圧と各世帯の水使用量並びに厚生水準を同時に算定し、厚生の地域的分布を効率性・公平性という観点からアトキンソン指標により総合的に評価するという方法を提示する。

(2) モデルの定式化

a) 給水管理シミュレーションモデル

まず、管路シミュレーションモデルについて概説する。本モデルは、各節点における水使用量を特定の節点における水圧（操作変数）を所与として、各節点水圧、各世帯における給水圧を求めるモデルである。本モデルは節点エネルギー位法によって以下のように定式化される。

$$Q_{ij} = R_{ij} |E_i - E_j|^{a-1} (E_i - E_j) \quad (1)$$

$$\sum_j Q_{ij} + M_i T x_i(\tau_i) = 0 \quad (2)$$

$$\tau_i = \xi(\pi \ell^2 / 4)^{-1} (E_i - h_i - v^2 / 2g)^{-1} \quad (3)$$

ここで、 Q_{ij} : (i, j) 間の流量、 E_i : 節点 i のエネルギー位、 M_i : 節点 i の世帯数、 T : 時間係数、 ℓ : 給水栓の口径、 ξ : 給水栓での損失係数、 h_i : 地盤高、 v : 流速、 g : 重力加速度である。これらの式は通常の節点エネルギー位法の定式化と同様であるが、式(2)に水消費行動モデルの出力である節点 i から給水をうける世帯の水使用量 $x_i(\tau_i)$ を含む点と、式(3)により各世帯の単位水量当りの獲得所要時間 τ_i を求めている点に特色がある。次に、世帯の水消費行動モデルについて述べる。本モデルは、管路シミュレーションモデルにより求めた単位水量当りの獲得所要時間を所与として水使用量 $x_i(\tau_i)$ 、厚生水準 $V_i(\tau_i)$ を算定するモデルである。紙幅の都合によりモデルの詳細は参考文献⁸⁾を参照いただきたい。ここでは、効用関数をトランスログ型、家計生産関数を CES 型に特定化した場合の水使用量 $x_i(\tau_i)$ 、厚生水準 $V_i(\tau_i)$ の導出結果を示す。

$$x_i(\tau_i) = (p + \tau w)^{-1} s_i(\tau_i) S_i(\tau_i) Y \quad (4)$$

$$V_i(\tau_i) = \exp \left\{ - \sum_j \alpha_j \ln \psi_j - \sum_j \sum_k \beta_{jk} \ln \psi_j \ln \psi_k \right\} (5)$$

ただし、 $s_i(\tau_i) = (p + \tau w)^{\gamma} c_1^{1-\gamma} \{\pi(\tau_i)\}^{-1}$ 、 $\pi(\tau_i) = \{(p + \tau w)^{\gamma} c_1^{1-\gamma} + w^{\gamma} c_2^{1-\gamma} + q^{\gamma} c_3^{1-\gamma}\}^{1/\gamma}$ 、 $S_i(\tau_i) = \{\alpha_1 + \sum_k \beta_{1k} \ln \psi_k\} \{\sum_j \alpha_j \ln \psi_j + \sum_j \sum_k \beta_{jk} \ln \psi_j \ln \psi_k\}^{-1}$ 、

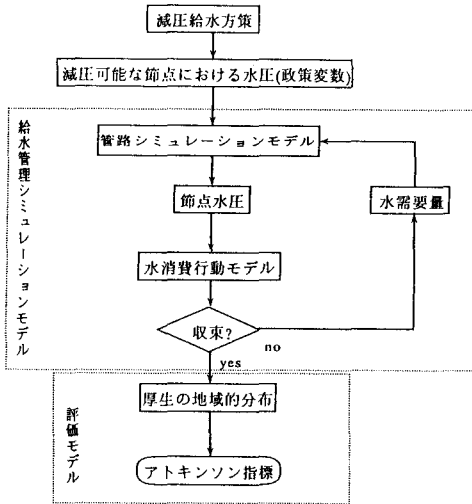


図-2 モデルの全体構成

$(\psi_1, \psi_2, \psi_3) = (\pi(\tau_i)/Y, w/Y, 1/Y)$ であり、 p : 水の価格、 q : 市場財の価格、 w : 賃金率、 Y : full-income、 $\alpha_i, \beta_{ij}, \gamma$: パラメータである。

b) 評価モデル

評価モデルはシミュレーションモデルの結果として得られる厚生の地域的分布 $(V_1(\tau_1), \dots, V_n(\tau_n))$ を評価するモデルである。本研究では渇水時の給水管理における公平性の確保の重要性に着目し、次のアトキンソン指標 W によって評価モデルを構成する。

$$W = \begin{cases} \bar{V} \{n^{-1} \sum_i^n (V_i(\tau_i)/\bar{V})^{1-\varepsilon}\}^{1/(1-\varepsilon)} & (\varepsilon \neq 1) \\ \bar{V} \{\prod_i (V_i(\tau_i)/\bar{V})\}^{1/n} & (\varepsilon = 1) \end{cases} \quad (6)$$

ここで、 $\bar{V}$ は厚生水準の平均値、 n : 世帯数である。アトキンソン指標 W は $\varepsilon \rightarrow \infty$ のとき、 $\min V_i(\tau_i)/n$ をあたえ、 $\varepsilon \rightarrow 0$ のとき、平均値 $\bar{V}$ を与える。すなわち、 $\varepsilon \rightarrow \infty$ のとき公平性を重視し、 $\varepsilon \rightarrow 0$ のとき効率性を重視した評価を与える指標である。

(3) 数値計算事例

T 村を対象として、5%の給水制限が実施された場合を想定し、シミュレーション実験を行った。その評価結果を図-3に示す。図-3から、効率性の観点からは「代替案2: 給水圧の均等化」が、公平性の観点からは「代替案3: 各世帯の厚生水準の均等化」がそれぞれ望ましいという結果が得られた。また、「代替案1: 5%一率水量削減」は「代替案2: 給水圧の均等化」に比べて、公平性、効率性いずれの観点からも劣ることがわかる。

4. おわりに

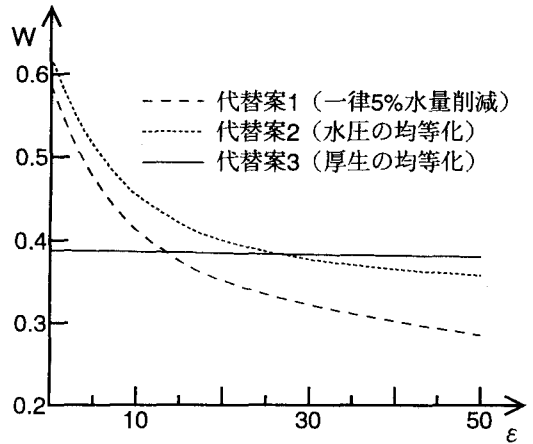


図-3 代替案の評価結果

以上、本稿では、渇水の発生構造を明らかにするとともに、渇水対策をその中に位置づけた。さらに、水道事業者が給水制限を行う際のルールである渇水時の給水管理方策を取り上げ、その設計方法に関して考察した。シミュレーション実験の結果、水配分の効率性を最大化するという意味で、できるだけ給水圧を均等化するような給水方策が望ましいことがわかった。このことは、水道システムの形態を改善し、渇水に強いシステムを構成するためにも有効な情報となろう。循環型利用等の高度利用や代替水源の確保等、水道システムのハードな対応も今後分析することが必要であろう。

参考文献

- 1) 岡田憲夫: 災害のリスク分析の見方, 土木学会土木構造物委員会, 「土と防災」講習会テキスト, pp.61-78, 1985.
- 2) 多々納裕一・岡田憲夫: 水資源システムのリスクマネジメント課題と展望, 土木計画学研究・講演集, No.14(2), pp.43-46, 1991.
- 3) 宝 馨: 水資源システムにおける確率論的モデルと手法の評価に関する研究, 京都大学博士学位論文, 1989.
- 4) 多々納裕一: 利水用貯留施設整備代替案の設計・評価の方法論に関する研究, 京都大学博士学位論文, 1992.
- 5) 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, 京都大学博士学位論文, 1984.
- 6) 萩原良巳・今田俊彦・森野彰夫: 配水ブロック化評価プロセスに関する一考察, 第18回衛生工学研究討論会講演論文集, pp.215-220, 1982.
- 7) 萩原良巳・今田俊彦: 水道広域化の効果の評価に関する方法論的研究, 衛生工学研究論文集, Vol.21, pp.1-10, 1985.
- 8) 岡田憲夫・多々納裕一・小林潔司・並河光夫: 渇水時の水消費行動のモデル分析, 京都大学防災研究所年報, 第34号 B-2, pp.127-144, 1991.