

# 節水と地域間の水融通による渇水リスク分散方法に関する基礎的分析\*

## A Basic Analysis of Drought Risk Allocation

### with Water Transfer between Regions and Water Saving\*

岡徹\*\*・高木朗義\*\*\*

By Toru OKA\*\*・Akiyoshi TAKAGI\*\*\*

#### 1. はじめに

渇水リスクは、気候や流域面積などの地理的条件や水利権などの歴史的条件によって主体間や地域間に格差がある。そのため、1997年の河川法改正において、「渇水調整の協議の円滑化」と「利水者相互間の水融通の円滑化」が新たに盛り込まれた<sup>1)</sup>。前者は、異常渇水時において早い段階から円滑な水利使用の調整を図るため、許可にかかる水利使用が困難となった場合のみならず、困難となる恐れがある場合にも、利水者は渇水調整を行うよう努めなければならないことを規定したものである。一方、後者は、利水者が河川管理者の承認を受けて、自己の水利権に基づく水利使用を他の利水者に行わせることができることを規定したものである。すなわち、異なる水利権を持つ主体間、地域間において水のやり取りが可能となっている。しかし、このような規定がなされたものの、具体的な方策については未だ確立されておらず、主体間、地域間の渇水リスクの格差は縮まっていない。したがって、主体間、地域間で異なる渇水リスクを分散し、より望ましい社会経済としていくための方策を検討する必要がある。なお、渇水リスクの格差に関しては地域間と主体間という二つの問題があるが、本研究では地域間の問題についてのみ考える。また、人々は渇水リスクを事前に回避する手段として、節水という行動をとることが可能である。すなわち平常時に水を節約して、渇水時に使用できる水を確保することにより、渇水の生起確率を小さくすることができる。

以上のことを踏まえ本研究では渇水リスクを分散する方法として、節水および渇水時における地域間の水融通を取り上げ、これらがリスク分散方策として有効であるかどうかについて、公平性と効率性という観点

\*キーマーズ：水資源計画，リスクマネジメント

\*\*正会員，中日本建設コンサルタント(株)水工技術本部

\*\*\*正会員，博(工)，International Institute for Applied Systems

Analysis(IIASA)，岐阜大学工学部社会基盤工学科

(〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1，TEL:058-293-2445，

FAX:058-230-1248，E-mail:a\_takagi@cc.gifu-u.ac.jp)

点から、地域間の所得格差や便益といった指標を用いて分析することを目的とする。

本研究では、まず2.において地域間の諸問題や水融通策などに関する既存研究を整理するとともに、本研究の位置付けを明確にする。3.では節水および水融通を考慮した水消費に関する家計行動をモデル化した上で、地域全体の厚生水準を表す指標として社会厚生関数を定義する。なお、社会厚生関数は効率性と公平性の程度によりBentham型、Nash型、Rawls型の3種類を定義する。4.では最適な節水量を達成するための条件式、および最適な水融通量を達成するための条件式を解析的に導出する。最後に5.では4.までで整理したモデルや条件式を用いて簡単な数値シミュレーションを行い、いくつかの状況下における最適な節水量や水融通量を求め、解析的に導くことができない効率性と公平性の程度について比較分析する。

#### 2. 関連既往研究と本研究の位置付け

横松・小林<sup>2)</sup>は、中央政府が危険地域である地方政府に対して、ある水準の補助金の提供と、危険地域への人口移動を抑制するために地域間財政移転を行い、地方政府が自主的な行動を取った場合、最適な地域間資源・リスク配分が達成可能であることを示している。これは渇水時に、生活用水に余裕のある地域と逼迫した地域との間の水融通によって、最適なリスク配分が達成できる可能性を示している。実際、米国のカリフォルニア州では、水の市場化によって生活用水を融通する方法が水政策の新たな方向性として提案されている<sup>3)</sup>。これを受けて本研究では、渇水リスクを分散する方法として水融通策を取り上げている。

谷本ら<sup>4)</sup>は渇水時の水利用を渇水の発生に先立って決定する手段として、利水者間で水融通に関する契約を取り交わす制度を動的計画法とゲーム理論を用いて設計している。これによると水融通契約を取り交わすことが、渇水発生回数を減少させることから渇水リスクの軽減に有効であるとしている。これに対し本研究においては、中央政府による強制的な地方政府間の水

融通を想定している。この根拠は次のような既存研究成果に基づいている。National Research Council(NRC：米国調査研究評議会)によれば、自発的な水融通は水需要の変化に対応する最も重要なメカニズムであるが、効率性と公平性を保障するためには、広範囲にわたる第3者の介入が不可欠であるとしている<sup>9)</sup>。またRobledo<sup>6)</sup>によると、二人の公共財の私的供給ゲームは人口移動が生じないと仮定すれば、二地域政府の純粋公共財供給ゲームとして読み換えても差し支えないとした上で、主体が完全に利己的であったとしても、安全な主体から危険な主体への財政移転が行われ、危険な地域はより危険な状態にとどまるというモラルハザードが発生するとしている。そのため、上位政府による危険地域に対する規制はパレート改善をもたらすことを示している。そこで本研究では、水融通による地域間格差の是正、すなわち公平化と社会全体の効率化といった観点から、中央政府による強制的な水融通を想定している。なお、わが国では河川管理者がほとんどの水利権を許可水利権として一括管理しているため、現実的にもこのような方策は実現可能であると思われる。

一方、多々納<sup>7)</sup>は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を示している。これはできるだけ公平にリスクを分散することが、水配分の効率性を最大化することを意味している。すなわち節水や水融通により地域、状態にかかわらず一人当たりの水供給量をなるべく等しくすることが効率性を高める可能性を示している。

渇水調整を行う上で重要な問題のひとつとして挙げられるのが水利権の問題である。水利権は地域の歴史的な背景から変更することは容易ではなく、約30年かかって農業用水から生活用水や工業用水へ転用された水利権は全国で約50m<sup>3</sup>/sしかない<sup>8)</sup>。ただし、これは1千万人以上の生活用水に相当するため、少しでも多くの転用を進めることは非常に有効な手段である。しかし、現状の制度では水利権を放棄する側のメリットがないため、中央政府が適切に管理しながらも水利権を持つ側にもメリットのあるような制度や仕組みをつくる必要がある。これについて池田<sup>9)</sup>は水利権行政への市場メカニズム導入の必要性を主張している。具体的には、有限な資源を排他的に利用する権利の配分を合理的に行う手法として、市場メカニズムを利用することが結果的に資源の最適配分が実現されることを主張している。また、山田<sup>10)</sup>は主体間の水利権問題に焦点を当てた分析を行っている。そこでは、価格メカニズムを用いた水市場による経済システムと現存の制度を組み込んだ経済システムの社会厚生が比較され

ている。結果として、農業用水に関わる制度が社会厚生を下げている、逆に農業用水の使用量を減らすことによって、社会厚生を上げられることが示されている。以上のように主体間の水融通についてはいくつかの既往研究において検討されていることから、本研究では、主体間ではなく地域間の水融通に焦点を当てて検討するものである。しかし、両者はまったく異なる問題ではなく、問題設定や結果などに多少なりとも共通点があるものと思われるため、それらについては既往研究を参考にしながら本研究を進めるものとする。

### 3. 渇水リスク分散方法の評価モデル

#### (1) モデルの仮定

渇水は自然災害のひとつであるが、洪水や地震など、わが国における他の自然災害と異なり、普段の生活用水使用量によって災害の規模が変化するという特徴を持つ。また災害が徐々に進行するため、災害時においてもリスクを分散することが可能である。すなわち、事中において機能するリスク分散方法が存在するという特徴を持つ。そこで本研究では、この二つの特徴を踏まえた渇水リスク分散方法、すなわち節水と地域間の水融通を取り上げる。ただし、事中のリスク分散方法は、いわゆる痛み分けであるため、当然のことながら事中になってからそのルールは決められない。したがって本研究においても、事中に従うべきルールは事前に決めておくことを想定している。以上のような特徴を持つ渇水リスク分散方法を評価するモデルを構築するために、以下のような仮定をおく。

① 渇水は不確実なものであるため、その生起確率を考える。本研究で想定するような隣接する地域においては、水文学的に空間的な相関性が高く、渇水の生起確率は空間的に独立でないことが普通である。本研究においてもこの点を踏まえ、水文学的には渇水の生起確率は独立でないと考ええる。一方、渇水の発生は物理的（自然科学的）な要因だけでなく、社会的な要因にも依存する。すなわち、渇水生起確率は地理的な条件や地形的な条件だけでなく、水利権と節水量にも依存するものと考えられる。水利権が多い地域では渇水が発生し難いし、節水によって渇水の発生確率を抑えることができることは容易に想像できよう。なお簡略化のため、状態は平常時と渇水時の二つの状態(0:平常時, 1:渇水時)のみとする。また節水による渇水生起確率への影響については、当該地域の節水行動のみが反映されるものと考ええる。すなわち、各地域の節水努力が反映されるように渇水生起確率が地域によって異なると仮定する。

② 家計は渇水時を考慮した上で平常時の節水量と水

需要量を決定するものとする。本来であれば事前には渇水状況はわからないが、本研究では過去の経験から政府などにより対応すべき渇水規模とその発生確率の関係が、節水による影響も含めてわかっているものとする。なお、各地域における渇水時の水需要量は、当該地域の取水制限をかけられた供給量に、他地域との間で取り引きする水融通量と、当該地域の家計が節水努力した結果により確保した使用可能量を加えたものとなる。

- ③ 簡略化のため、隣接しているものの水利権が異なるような二つの地域(A,B)を想定する。例えば、木曽川水系における濃尾用水と愛知用水の受益地域がこれに相当すると考えている。この二つの地域では毎年のように取水制限が行われており、愛知用水地域において取水制限が厳しい。また特に平成6年(1994年)の渇水時には水融通が実際に行われている。なお、1998年から長良導水により愛知用水地域の一部(愛知県知多半島地域)への水道用水の取水が開始されているため、渇水被害が少なくなってきたことを追記しておく。本研究では、このような水利権の異なる二地域間の水融通を考える。また、地域間で融通した水は各地域の家計に均等に配分されるものとする。

## (2) 家計の行動モデル

家計は、予算制約下で期待効用が最大になるように行動する。これは次のように定式化できる。

$$V_j = \max_{z_j^0, z_j^1, a_j^0, a_j^1, x_j} (1 - \phi_j(\bar{a}_j^1, x_j)) U(z_j^0, a_j^0 - x_j) + \phi_j(\bar{a}_j^1, kx_j) U(z_j^1, \bar{a}_j^1 + y + kx_j) \quad (1)$$

$$s.t. \quad p^0 z_j^0 + q_j(a_j^0 - x_j) = \Omega_j^0 \quad (2)$$

$$p^1 z_j^1 + q_j(\bar{a}_j^1 + kx_j) + ry = \Omega_j^1 \quad (3)$$

ここで、 $V_j$ : 期待効用関数、 $\phi_j$ : 渇水の生起確率、 $U_j^i$ : 効用関数、 $p^i$ : 合成財価格、 $z_j^i$ : 合成財需要、 $q_j$ : 生活用水価格、 $a_j^0$ : 平常時における節水を考えない場合の水需要量、 $x_j$ : 自主的な節水量、 $\Omega_j^i$ : 一般化可処分所得、 $\bar{a}_j^1$ : 渇水時における水供給量(水利権に基づいて規定される)、 $r$ : 水融通価格、 $y$ : 水融通量、 $k$ : 節水に対する使用可能率、 $j$ : 地域を表す添え字(A または B)、 $i$ : 状態を表す添え字(0: 平常時、1: 渇水時)。(1)式は平常時と渇水時の効用と渇水生起確率に基づく期待効用の最大化を表している。平常時の効用は合成財需要量、水需要量、節水量によって構成され、渇水時の効用は合成財需要量、水供給量、水融通量、節水量によって構成される。モデルの仮定において先述

したように、本研究では隣接する二地域を想定しているため、各地域の渇水生起確率は水文学的には独立でないと考え、各地域の水利権と平常時の節水量によってのみ渇水発生確率が地域的に異なるものとする。(2)式は平常時の予算制約を表しており、合成財需要と水需要が可処分所得に等しくなっている。(3)式は渇水時の予算制約を表しており、合成財需要と、当該地域からの水供給量と節水量、他地域からの水融通量にそれぞれの価格を乗じたものが可処分所得に等しくなっている。なお、水融通量  $y$  は渇水時において水を供給する側の地域において負値をとるものとし、逆に水を受け取る側の地域において正値をとるものと定義する。したがって、水融通供給側は水融通により収入を得ることができ、水融通需要側は水融通に伴う支払いが生じるように定義されることとなる。また、平常時の節水量は同量を渇水時に使用できるわけではなく、降水量、ダム貯水量などによって、渇水時に使用可能量が異なる。ここでは、このような状況を簡単に表すパラメータとして節水量と渇水時の使用可能水量の割合  $k$  を用い、渇水時の使用可能量  $kx_j$  を定義している。

本研究では節水と水融通の費用について考慮しないこととする。節水については、節水コマの購入など直接的な費用が生じる場合も考えられるが、その他の費用負担に比べて安いと思われる。本研究では、そのような直接的な費用よりも、節水努力をすることによる平常時の効用の低下に着目して節水に対する負担を評価している。また、水融通については、隣接する地域を想定しているため、費用がかからないものと想定している。ただし、地理的、地形的な条件によっては水融通に関する費用が無視できない場合もあるだろう。例えば、水源や河道の相互の距離が大きく隔たっている場合や急峻な山脈が分水嶺となって相互に隔てられた地理的關係にある場合には、水融通を実際に行うための施設整備などの費用がかかるであろう。本モデルにおいて、それらを考慮する一つの方法としては、水融通価格に水融通にかかる費用を上乗せすることが考えられるが、費用負担問題など別に考慮しなければならない多くも問題も生じてくると思われる、このような問題が想定される場合には、モデルの改良を行い、改めて分析をする必要があろう。

## (3) 社会厚生関数

地域間の渇水リスク分散方法を評価するために、社会厚生関数を用いて社会全体の厚生を定義する。社会厚生関数とは、社会全体の良し悪しを「社会厚生」の大きさで測り、社会厚生が何に依存して決まるかを示したものである。ここではCES型社会厚生関数<sup>11)</sup>を用

いと、中央政府による地域間の水融通量の決定問題として次のように定式化できる。

$$SW = \max_y W = \left[ \sum_j V_j^{1-\varepsilon} \right]^{\frac{1}{1-\varepsilon}} \quad (4)$$

ここで、 $SW$ ：社会厚生水準、 $\varepsilon (\geq 0)$ ：公平性への社会的配慮の強さを表すパラメータであり、これが大きい程公平性をより考慮した社会的価値規範を表す。

CES 型社会厚生関数は、パラメータ  $\varepsilon$  の値を変えることによって、次のような代表的社会厚生関数に分類される。

$$W = \begin{cases} \sum_j V_j & \text{for } \varepsilon \rightarrow 0 : \text{Bentham型} \\ \prod_j V_j & \text{for } \varepsilon \rightarrow 1 : \text{Nash型} \\ \min \{V_1, \dots, V_j, \dots\} & \text{for } \varepsilon \rightarrow \infty : \text{Rawls型} \end{cases} \quad (5)$$

これ以降の検討や議論において、これらの定義に関する理解が欠かせないため、小林<sup>11)</sup>をもとに各社会厚生関数の定義を簡単に説明しておく。

#### (a) Bentham 型社会厚生関数（以下、BSWF と略す）

BSWF では、ある地域における代表的家計（以下家計）の効用が 1 単位増加すれば、社会厚生が 1 単位だけ増加するため、渇水リスクの大きさにかかわらず、どの地域の個人であっても、その効用が増大すれば、社会厚生は等しく増加することになる。すなわち BSWF は、功利主義的な社会的価値規範を表現していると解釈できる。この BSWF は伝統的な費用便益分析における社会的便益の計測に採用されているものであり、言い換えれば、効率性にかかわる社会的価値規範を表現したものであるが、公平性については考慮されていない。

#### (b) Nash 型社会厚生関数（以下、NSWF と略す）

NSWF では、ある地域の家計の効用が 1 単位増加すれば、他地域の家計の効用の積だけ社会厚生が増加するため、ある地域の家計の効用が他地域の家計の効用よりも相対的に低いほど、その増加はより大きな社会厚生を増加をもたらすことになる。すなわち、渇水に対して脆弱な地域への効用を増加させることが、社会厚生をより大きく増加させることになる。すなわち NSWF は、平等主義的な社会的価値規範を表現していると解釈できる。言い換えれば、効率性と公平性の両面を考えた社会的価値規範を表したものである。

#### (c) Rawls 型社会厚生関数（以下、RSWF と略す）

RSWF では、社会構成家計のうち最も効用が低い地域の家計、つまり渇水に対して最も脆弱な地域の家計

に限り、その効用が 1 単位増加すれば、1 単位だけ社会厚生は増加するが、そうでない場合には、いくらその効用が増加しても、社会厚生は増加しないことになる。すなわち RSWF は、Rawls の公正主義的な社会的価値規範を表現していると解釈できる。言い換えれば、公平性にかかわる社会的価値規範を表現したものであり、効率性については考慮されていない。

### 4. 渇水リスク分散の最適化条件

ここでは、3. で構築した評価モデル、すなわち家計の行動モデルと社会厚生関数を用いて、最適な渇水リスク分散を達成するための節水量や水融通量に関する条件を導出する。

#### (1) 最適節水量

(1)～(3)式を解くと次のような水需要量に関する最適化条件が得られる。

$$\frac{\partial U(z_j^0, a_j^0 - x_j^0)}{\partial a_j^0} = \frac{\partial U(z_j^0, a_j^0 - x_j)}{\partial z_j^0} \frac{q_j}{p^0} \quad (6)$$

また節水量に関する最適化条件は次のようになる。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial (1 - \phi(x_j, \bar{a}_j^1))}{\partial x_j} U(z_j^0, a_j^0 - x_j) + \frac{\partial \phi(x_j, \bar{a}_j^1)}{\partial x_j} U(z_j^1, \bar{a}_j^1 + y + kx_j) \\ & + (1 - \phi(x_j, \bar{a}_j^1)) \frac{\partial U(z_j^0, a_j^0 - x_j)}{\partial x_j} + \phi(kx_j, \bar{a}_j^1) \frac{\partial U(z_j^1, \bar{a}_j^1 + y + kx_j)}{\partial x_j} \\ & = -(1 - \phi(x_j, \bar{a}_j^1)) \frac{\partial U(z_j^0, a_j^0 - x_j)}{\partial z_j^0} \frac{q}{p^0} + \phi(kx_j, \bar{a}_j^1) \frac{\partial U(z_j^1, \bar{a}_j^1 + y + kx_j)}{\partial z_j^1} \frac{qk}{p^1} \end{aligned} \quad (7)$$

(6)式より、家計は平常時の水需要量に対する限界効用が、合成財需要量の限界効用に生活用水価格と合成財価格の比を乗じたものに等しくなるように水需要量を決定する。また(7)式の左辺は、節水量の限界期待効用、すなわち節水量 1 単位変化させたときの期待効用の変化分であり、右辺は平常時の合成財に対する限界効用にその生起確率と価格の比を乗じたものと、渇水時の合成財に対する限界効用にその生起確率と価格の比を乗じたものとの差分である。したがって家計は、節水量に対する限界期待効用が、状態毎の合成財に対する限界効用にその生起確率と価格の比を乗じたものの差と等しくなるように節水量を決定する。なお、家計は節水量を決定する際、渇水の生起確率を考慮することも確認できる。

#### (2) 最適水融通量

##### (a) BSWF に基づく場合（ $\varepsilon = 0$ ）

BSWF に基づく場合には、各地域の期待効用に世帯

数を乗じたものの和が最大になるように水融通を行うことになる。したがって、(4)式は次のように書き直すことができる。

$$\max_y N_A \left\{ (1 - \phi(x_A, \bar{a}_A^1)) \mu_A^0 + \phi(x_A, \bar{a}_A^1) \mu_A^1 \right\} + N_B \left\{ (1 - \phi(x_B, \bar{a}_B^1)) \mu_B^0 + \phi(x_B, \bar{a}_B^1) \mu_B^1 \right\} \quad (8)$$

ここで、 $\mu_j^i$  は(1)～(3)式を解くことによって得られる状態別の効用水準である。

(8)式より、BSWFに基づく場合の水融通量に関する最適化条件が次のように得られる。

$$N_A \phi(x_A, \bar{a}_A^1) \frac{\partial \mu_A^1}{\partial y} + N_B \phi(x_B, \bar{a}_B^1) \frac{\partial \mu_B^1}{\partial y} = 0 \quad (9)$$

(9)式は、渇水時の水融通量に対する限界効用（二地域間のやり取りであるため、どちらかの地域が正值となり、もう一方が負値となる）に渇水生起確率と家計数を乗じたものが地域間で相殺されるように水融通量が決定されることを示している。すなわち、家計数と渇水生起確率で表現されている地域間格差に合わせて水融通が行われれば社会厚生が最大になる。なお、地域間の家計数の違いが水融通量の決定に影響を及ぼすことから、個人間の配分、すなわち公平性については考慮されていないと言える。ただし、家計数が同程度の地域間では結果的に公平性も考慮されることになる。さらに渇水生起確率が考慮されていることから、両地域の節水量が水融通量に影響することがわかる。

#### (b) NSWF に基づく場合（ $\varepsilon = 1$ ）

NSWFに基づく場合には、各地域の期待効用の積が最大になるように水融通を行うことになる。したがって、(4)式は次のように書き直すことができる。

$$\max_y N_A \left\{ (1 - \phi(x_A, \bar{a}_A^1)) \mu_A^0 + \phi(x_A, \bar{a}_A^1) \mu_A^1 \right\} \times N_B \left\{ (1 - \phi(x_B, \bar{a}_B^1)) \mu_B^0 + \phi(x_B, \bar{a}_B^1) \mu_B^1 \right\} \quad (10)$$

(10)式より、NSWFに基づく場合の水融通量に関する最適化条件が次のように得られる。

$$\phi(x_A, \bar{a}_A^1) \left\{ (1 - \phi(x_B, \bar{a}_B^1)) \mu_B^0 + \phi(x_B, \bar{a}_B^1) \mu_B^1 \right\} \frac{\partial \mu_A^1}{\partial y} + \phi(x_B, \bar{a}_B^1) \left\{ (1 - \phi(x_A, \bar{a}_A^1)) \mu_A^0 + \phi(x_A, \bar{a}_A^1) \mu_A^1 \right\} \frac{\partial \mu_B^1}{\partial y} = 0 \quad (11)$$

(11)式は、渇水時の水融通量に対する限界効用に渇水生起確率と他地域の期待効用水準を乗じたものが両地域で相殺されるように水融通量が決定されることを示している。すなわち、渇水生起確率の地域間格差に

他地域の期待効用を加味して水融通が行われれば社会厚生が最大になる。なお、限界効用に他地域の期待効用水準が乗じられていること、および家計数が乗じられていないことから、個人間の配分、すなわち公平性についても考慮されていると言える。さらにBSWFと同様に渇水生起確率が入っていることから、節水量が水融通量に影響することがわかる。

#### (c) RSWF に基づく場合（ $\varepsilon = \infty$ ）

RSWFに基づく場合には、最も効用水準の低い社会構成家計の効用が最大になるように水融通を行うことになる。したがって、(4)式は次のように書き直すことができる。

$$\max_y \min(V_A, V_B) \quad (12)$$

RSWFの解釈として、公正主義的な社会価値規範を表現しているため、水融通量に関する最適化条件が次のように得られる。

$$V_A = V_B \quad (13)$$

(13)式は、両地域の期待効用水準が等しくなるように地域間の水融通が決定されることを示している。すなわち、両地域の期待効用水準が等しくなるように水融通が行われれば社会厚生が最大になる。なお、期待効用水準のみによって水融通量が決定されることから、個人間の配分、すなわち公平性についてのみ考慮されていると言える。他の二つの社会厚生関数と異なる点として、水融通量に対する限界効用が入っていないことが挙げられるが、このことから効率性を考慮せず、公平性のみに依存して水融通量が決定されることがわかる。

#### (3) 最適水融通価格

(2)では社会厚生関数を用いて、二地域間における最適な水融通量を決定する条件式を示したが、これは次のように書き直すことができる。

$$\frac{\partial SW(y, r)}{\partial y} = 0 \quad (14)$$

(14)式より求められた最適水融通量を $y^*$ とする。その下で社会厚生関数を水融通価格で一階微分することによって、最適水融通価格の条件式が次のように導出できる。

$$\frac{\partial SW(y^*, r)}{\partial r} = 0 \quad (15)$$

(15)式は最適水融通量から求められた、最適水融通価格の条件式となっており、この関係を満たすことが各社会厚生関数の最適化問題を水融通量と水融通価格の両方について解いたことになる。

## 5. 渇水リスク分散方法の検討

ここでは、仮想的な地域を想定して、家計の行動モデルを特定化することによって4.で導出した節水量と水融通量の最適条件式を特定化し、数値シミュレーションを行い、渇水リスク分散方法について検討する。具体的には、いろいろな状況下における最適な節水量や水融通量を求め、解析的に導くことができない効率性と公平性の程度について比較検討するものである。

### (1) 家計の行動モデルの特定化

(1)式で定義した家計の行動モデルを Cobb-Douglas 型効用関数により特定化すると次のようになる。

$$V_j = \max_{z_j^0, z_j^1, a_j^0, x_j} \left( 1 - \phi \left( \bar{a}_j^1 + kx_j \right) \right) (z_j^0)^{\alpha_j} (a_j^0 - x_j)^{\beta_j} + \phi \left( \bar{a}_j^1 + kx_j \right) (z_j^1)^{\alpha_j} (\bar{a}_j^1 + y_j + kx_j)^{\beta_j} \quad (16)$$

$$s.t. \quad p^0 z_j^0 + q_j^0 (a_j^0 - x_j) = \Omega_j^0 \quad (17)$$

$$p^1 z_j^1 + q_j^1 (\bar{a}_j^1 + kx_j) + ry_j = \Omega_j^1 \quad (18)$$

(16)式において、平常時の水消費量は水需要量から節水量を引いた分とし、渇水時の水消費量は水利権に基づいて割り当てられた水供給量に、地域間の水融通量と平常時の節水量による使用可能量を加えたものとする。また(17)、(18)式はそれぞれ平常時、渇水時の予算制約である。(16)～(18)式を解くことにより、各需要関数が次のように求められる。

$$z_j^{0*} = \frac{\alpha_j}{p^0} \Omega_j^0 \quad (19)$$

$$a_j^{0*} = \frac{\beta_j}{q_j} \Omega_j^0 \quad (20)$$

$$z_j^{1*} = \frac{\Omega_j^1 - q_j (\bar{a}_j^1 + kx_j^*) - ry_j}{p^1} \quad (21)$$

$$x_j^* = x_j(z_j^{0*}, a_j^{0*}, z_j^{1*}) \quad (22)$$

(22)式の最適節水量の関数は、非常に冗長であるため一般形で表している。また(19)～(22)式を(16)式に代入することにより、間接期待効用関数が求まる。

### (2) 渇水生起確率の特定化

渇水生起確率は、降雨量や流域状況などの地理的条

件や水利権だけでなく、平常時の節水量にも影響を受けるものとし、渇水時の水供給量と節水量の関数として次のように特定化する。

$$\phi \left( \sum (\bar{a}_j^1 + kx_j) \right) = \phi_0 - (\phi_0 - \phi_f) \exp \left\{ - \left( \frac{\rho}{\sum (\bar{a}_j^1 + kx_j)} \right)^\gamma \right\} \quad (23)$$

ここで、 $\phi_0$ ：基準渇水生起確率（地理的条件に起因するもの）、 $\phi_f$ ：補正渇水生起確率、 $\rho, \gamma$ ：パラメータ。

式(23)の軌跡は逆 S 字曲線となる。この数値シミュレーションでは同一水系内における二地域を対象に節水や地域間の水融通について検討するため、3. (1)モデルの仮定でも述べたように、水文学的には各地域の渇水生起確率は独立でないと考え、自然科学的には水系全体として同じ渇水生起確率であるとし、水利権と節水量という社会的な条件によってのみ各地域の渇水発生確率が異なると考える。具体的には、各地域の水利権の違いによって生じる渇水時における水供給量の違い、および各地域の節水量によって、渇水生起確率が地域ごとに異なるものとする。

### (3) 検討条件と手順

数値シミュレーションでは、対象地域として仮想的な二地域(A,B)を想定する。このうち A 地域は優先的な水利権（例えば既得水利権）を有し、渇水リスクの小さい地域とし、B 地域は渇水リスクの大きい地域とする。検討にあたっての諸条件を以下に示す。

- ① 渇水規模は取水制限率で表現し、ここでは地域全体で 10, 30, 50%という 3 ケースを想定する。ただし、この 3 ケースを同時に考えて平常時の行動を決定するのではなく、それぞれが独立に発生するとして、ケース毎に平常時の行動を決定するものとする。すなわち、各ケースは想定される渇水レベルとその発生確率が異なる別々の地域を想定していると言ってもよい。あるいは貯水施設の整備レベルが異なる場合を想定しているとも言える。
- ② 渇水が生じ、地域全体に取水制限をかけなければならない時は、先に B 地域から取水制限がかかり、B 地域にもうこれ以上取水制限をかけられない状況（最大取水制限率を 60%と想定する）になると A 地域にも取水制限がかかるものとする。このような条件設定としたのは、それぞれの渇水レベルに対して各地域の取水制限率、すなわち、渇水状況が異なる場合を想定するためである。つまり、地域全体の取水制限が低い時（両地域の世帯数が同じであれば 30%以下の場合）には B 地域だけに制限がかかる。一方、地域全体の取水制限が高い時

(両地域の世帯数が同じであれば 30%を超える場合)は B 地域にだけ制限をかけると最大取水制限率の 60%を超えるため、A 地域にも取水制限がかかるものとする。

- ③ 平常時に最低限必要な水需要量を確保するため、節水量は最大 30(m<sup>3</sup>/年)とする。
- ④ 地域間の水融通価格は 1~3,000(円/m<sup>3</sup>)を検討範囲とする。

検討の手順は次のとおりである。

- ① 地域全体の水供給量を両地域の水利権（上述した条件②）に基づいて配分する。
- ② 各ケースの取水制限下における最適節水量と、各配分条件式 (BSWF, NSWF, RSWF) により導出される水融通量を同時決定する。
- ③ ②を 1~3,000(円/m<sup>3</sup>)の水融通価格ごとに行う。
- ④ 両地域の計算値を用いて、渇水時の水供給量や期待効用水準、総効用水準、さらには地域間の格差（等価変分を用いて両地域の期待効用水準の差を所得に換算した値）、水融通という施策がもたらす便益（等価変分により水融通を行った場合と行わなかった場合の期待効用水準の差を所得に換算した値）を算出する。

#### (4) データとパラメータの設定

本検討で用いるデータセットとパラメータを表 1 に示す。地域の規模による影響が及ばないように、各地域に同じ世帯数が存在すると想定した。一般化可処分所得は、総務省「家計調査」<sup>12)</sup>の全国平均値とした。生活用水価格は濃尾用水・愛知用水の受益地域における水道料金<sup>13)</sup>に基づいて標準的な値を想定した。ただし、本来ならば生活用水価格は機会費用として水需給状況、渇水状況に応じた価格変化をするように設定する必要があると思われるが、本研究では現状における固定価格を利用して検討を行うこととした。平常時の標準的な生活用水使用量<sup>14)</sup>を想定し、一般化可処分所得との関係から合成財と生活用水の消費比率を求めて、効用関数のパラメータを設定した。すなわち、(19)式、(20)式における一般化可処分所得、合成財消費額（＝合成財需要×合成財価格）、生活用水消費額（＝生活用水使用量×生活用水価格）に対して現実のデータを与え、パラメータ  $\alpha$ 、 $\beta$  の値を求めるものである。なお、節水に対する使用可能率については簡略化のため  $k=1$  とした。一方、10%の取水制限が 3 年に一回、30%が 5 年に一回、50%が 20 年に一回程度発生すると想定し、これらと整合するように渇水発生確率のパラメータを設定した。表 1 の 3 つの  $\rho$  は、左から渇水発生確率が 1/3、1/5、1/20 となる値である。なお、両地域で

表 1 データセットとパラメータ

|                           | 変数           | A 地域           | B 地域     |
|---------------------------|--------------|----------------|----------|
| 世帯数                       | $N$          | 200,000        | 200,000  |
| 一般化可処分所得<br>(千円/年)        | $\Omega_j^i$ | 2,145          |          |
| 合成財価格(千円)                 | $p_j^i$      | 1              |          |
| 生活用水価格(円/m <sup>3</sup> ) | $q_j$        | 80             | 100      |
| 効用関数の<br>パラメータ            | $\alpha$     | 0.994857       | 0.994286 |
|                           | $\beta$      | 0.005143       | 0.005714 |
| 基準渇水発生確率                  | $\phi_0$     | 0.5            |          |
| 補正渇水発生確率                  | $\phi_j$     | 0.01           |          |
| 渇水発生確率関数の<br>パラメータ        | $\rho$       | 700, 10, 0.001 |          |
|                           | $\gamma$     | 0.2            |          |

表 2 想定取水制限下における水供給量と節水量

|     | 水供給量: $\bar{a}_j^1$ |      | 節水量: $x_j$ |      |
|-----|---------------------|------|------------|------|
|     | A 地域                | B 地域 | A 地域       | B 地域 |
| 10% | 120                 | 96   | 18         | 27   |
| 30% | 120                 | 48   | 23         | 30   |
| 50% | 72                  | 48   | 30         | 30   |

[単位はすべて m<sup>3</sup>/年]

パラメータが同じ値であるのは先述したように同一水系内の二地域を想定しているからである。

#### (5) 検討結果

本検討条件では地域全体で 10%の取水制限がかかった場合においてのみ A 地域に取水制限がかかっている。逆に言えば、これ以外の地域および条件では程度の違いはあるものの取水制限がかかっている。想定した取水制限のそれぞれについて各地域における渇水時の水供給量と最適節水量を求めた結果を表 2 に示す。また水融通に関する計算結果は図 1~3 のとおりである。図 1~3 の横軸はすべて想定した水融通価格である。図 1 は水融通価格ごとに二地域間でやり取りする最適な水融通量を示している。図 2 は地域間格差、すなわち公平性に関する評価値を示している。この図中の所得格差とは A 地域と B 地域の期待効用水準が等しくなるような追加的所得であり、所得格差が大きいくほど二地域間の期待効用水準の格差が大きい。図 3 は社会的便益、すなわち効率性について比較している図である。この図中の社会的便益とは水融通を行わなかった場合と行った場合の効用が等しくなるような追加的所得に世帯数を乗じたものである。

#### (a) 節水と水融通に関する考察

まず最適節水量について見てみると、表 2 より渇水リスクが高い地域で節水量が多くなっていること、お

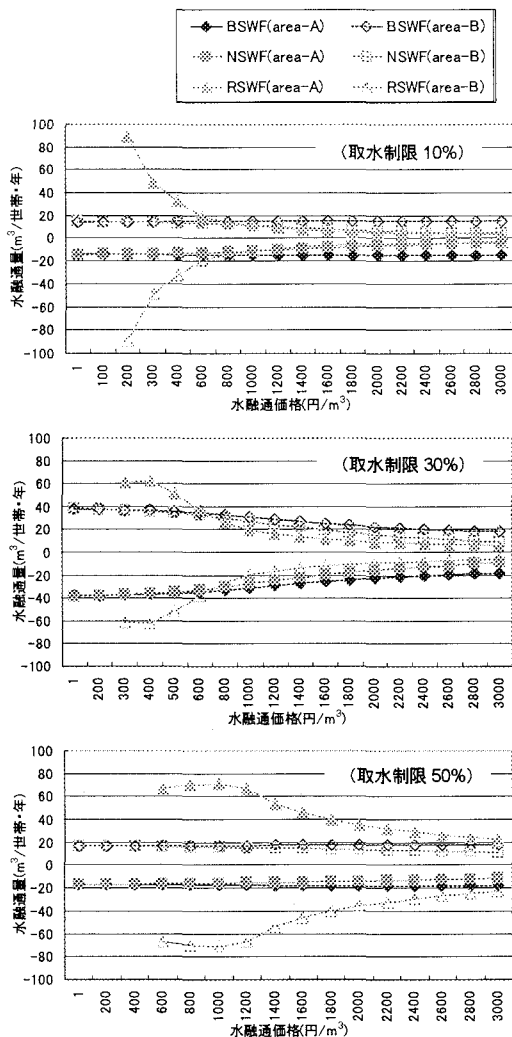


図1 地域間の水融通量

および渇水規模（取水制限率）が大きいほど節水量が多くなっていることがわかる。また、取水制限がかからない場合（10%のA地域）においても節水を行うことが最適な行動であるという結果となった。さらにその節水量はBSWFに基づいた場合の水融通量に等しくなっている。したがって、これは水融通を行うために節水を行っているという解釈でき、水融通制度の位置付けにより、渇水リスクの小さい地域において、渇水時のみならず平常時でさえも、地域全体の渇水リスク分散に貢献するように行動する誘因を与えたことを意味している。

#### (b) 公平性に関する考察

BSWFに基づく場合、いずれの取水制限についても地域間格差は水融通価格にほぼ比例して大きくなる。NSWFに基づく場合は、水融通価格が安いときにはBSWFとほぼ同じであるが、ある水融通価格以上にな

ると一定の値となる。また、ここで without とは水融通を行わない場合の地域間格差を示している。すなわち、水利権の違いによる地域間格差を示している。なお、効率性しか考慮されないBSWFを用いて公平性に関する考察を行うことは通常なされないが、ここではBSWFを公平性に関する評価のベンチマークとするため、他の指標と並べて用いている。

地域間格差の図を見ると、すべての取水制限においてBSWFとNSWFは水融通価格1(円/m³)で最も低く、200(円/m³)以上においては水融通を行わない場合を上回っており、水融通を行う場合でも地域間に格差が存在することがわかる。また地域間の関係はすべての水融通価格において、A地域の期待効用がB地域のそれを上回っている。したがって、水融通価格を低く設定することによって、地域間格差を是正することができ公平性を改善させ得ると言える。

#### (c) 効率性に関する考察

BSWFおよびNSWFに基づく場合、水融通価格が高くなるにつれて社会的便益は減少する。一方RSWFに基づく場合には、水融通価格が高くなるほど社会的便益は増加するが、その値自体は負の値となっているため効率的な配分であるとは言えない。なお、公平性に関する評価と同様に、ここではRSWFを公平性に関する評価のベンチマークとするため、他の指標と並べて用いている。

社会的便益の図を見ると、すべての取水制限においてBSWFとNSWFは水融通価格1(円/m³)が最も高く、その値は水融通価格が高くなるにつれて徐々に減少していることがわかる。したがって、水融通価格を低く設定することにより、社会的便益をより多く発生させることができ効率性を改善させ得ると言える。つまり、水が逼迫しているB地域により安い価格で水を提供することが、社会全体にとって効率的であるということである。

以上のことから、水融通価格を低く設定することが地域間格差を是正させ、公平性を改善させ得るとともに、社会全体としても効率的であると言える。

## 6. おわりに

本研究では、渇水リスクを分散する方法として節水と地域間の水融通について検討した。まず家計の行動モデルを定式化し、節水量の最適化条件を導出するとともに、この条件式を満たした効用水準を社会厚生関数に導入し最適な水融通量条件式を導出した。その結果、最適な水融通量条件式において生起確率が入っていることから、自主的な節水によって渇水時の水融通に影響を及ぼすことが明示された。また、効率性を改



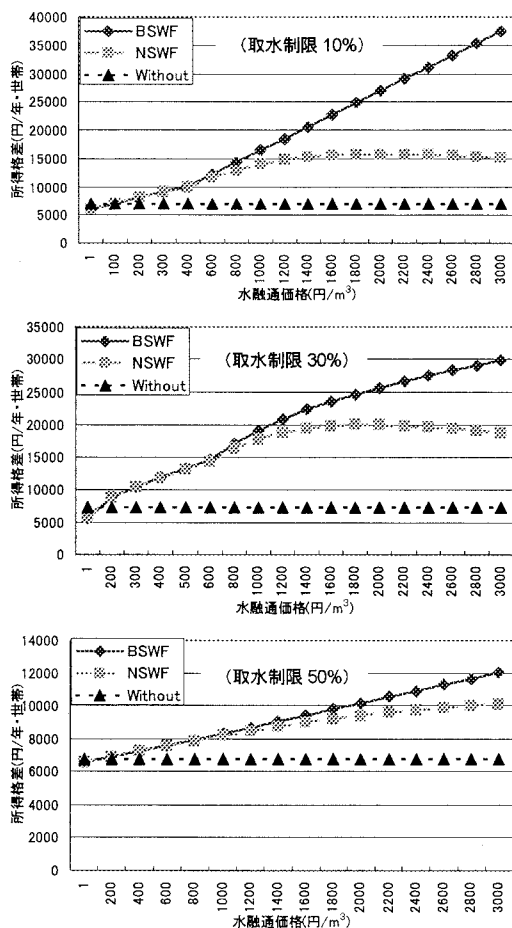


図2 地域間格差

善するためには、家計数と漏水発生確率を加味した限界効用が地域間で相殺されるようにする必要があることがわかった。これに加えて公平性を改善するためには、他地域の期待効用を考慮する必要があることも確認できた。なお、本研究では両地域の期待効用が等しい状態を最も公平としているが、これは公平性の定義によって条件が異なることに注意する必要がある。

次に家計の行動モデルを特定化することによって水融通条件式を特定化した後、仮想的な地域を想定し漏水リスク分散に関する分析を行った。一計算例ではあるが、水融通を行わなかった場合に比べて、公平性・効率性共に効果が見られるような水融通価格の存在を確かめることができた。その価格とは本研究の設定においては  $1(\text{円}/\text{m}^3)$ であった。この価格以外では効率性もしくは公平性のどちらかの効果しか上げていない。しかしながら節水と水融通を実施することによって、効率性と公平性を高めることができる可能性があることがわかった。

今後は水融通量や価格を中央政府などによる強制

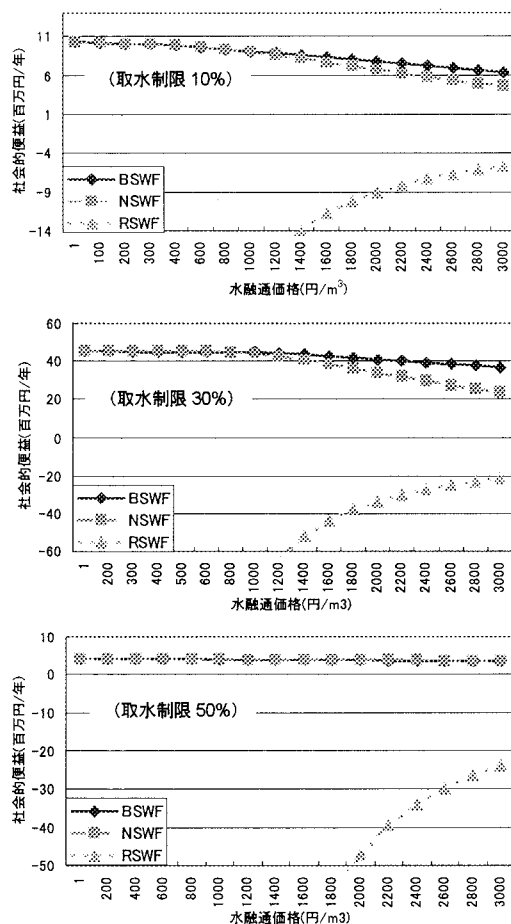


図3 社会的便益

的な実施ではなく、家計がその量や価格を決定することができるような想定を行うことが必要であるように思われる。また仮想的な地域ではなく、実証的な分析を踏まえて総合的な漏水リスクマネジメントを検討していく必要がある。

#### 参考文献

- 1) (財)河川情報センター：新しい河川制度の構築－漏水調整の円滑化のための措置－, River Net, <http://www.river.or.jp/kasenhou/kasenhou.html>.
- 2) 横松宗太, 小林潔司：分権的防災投資と地域間リスク配分, 土木計画学研究講演集 No.23(2), pp.149-152, 2000.
- 3) DAVID N. KENNEDY: Water Resources Development and Management in California ~ A Historical Perspective, アメリカ水資源セミナー講演論文集, pp.43~47, 2000.
- 4) 谷本圭志, 森田浩和：水融通システムの開発と漏水リスクの軽減効果分析, 環境システム研究論文

集 Vol.30, pp.241-247, 2002.

- 5) Neil S. Grigg: 水資源マネジメントと水環境(浅野孝監訳), 技報堂出版, pp.389-390, 2000.
- 6) Robledo, J.R.: Strategic risk taking when there is a public good to be provided privately, *Journal of Public Economics*, Vol.71, pp.403-414, 1999.
- 7) 多々納裕一: 渇水リスクと水資源計画, 土木計画学研究講演集 No.16(2), pp.211-217, 1993.
- 8) 国土庁: 新しい全国総合水資源計画, 1999.
- 9) 池田修: 水利権の再配分を推進するために, 土木学会誌, pp.36-37, 2000.
- 10) 山田貴久: 水資源政策の厚生分析 岐阜大学修士論文, 1997.
- 11) 小林潔司: 公平論を巡る最近の理論的展開, 土木

計画学ワンデーセミナー シリーズ 19 土木計画における公平論を巡って, pp.51-58, 2000.

- 12) 総務省: 家計調査, <http://www.jil.go.jp/statis/shuyo/200210/0601.htm>.
- 13) 愛知県健康福祉部生活衛生課: 愛知県の水道 平成 13 年度(水道年報), 2003.
- 14) 国土交通省土地・水資源局水資源部: 平成 14 年版「日本の水資源」(概要版), <http://www.mlit.go.jp/tochimizushigen/mizsei/hakusyo/index5.html>, 2002.

---

## 節水と地域間の水融通による渇水リスク分散方法に関する基礎的分析\*

岡徹\*\*・高木朗義\*\*\*

わが国には地震や洪水と並んで渇水という災害が存在するが、近年、施設整備によるリスク軽減策は実行し難くなっている。一方、渇水リスクは地理的条件や歴史的背景によって地域間、主体間に格差があり、調整の余地が残されている。そこで本研究では、施設整備に依らない方策として節水と地域間の水融通に着目し、効率性のみならず公平性も考慮した渇水リスク分散方法について検討した。数値シミュレーションでは、効率性の指標として社会的便益を、公平性の指標として地域間所得格差を用いて様々なケースを比較検討することにより、ある水融通の価格において良好な渇水リスク分散となり得ることを示す。

---

## A Basic Analysis of Drought Risk Allocation with Water Transfer between Regions and Water Saving\*

By Toru OKA\*\*・Akiyoshi TAKAGI\*\*\*

Although there is a drought together with an earthquake and a flood in disasters, recently, it has been hard to carry out the risk mitigation measures with the infrastructure facilities in Japan. On the other hand, there is still room for adjustment, because the drought risk has the difference between regions and between agents according to the geographical conditions and the historical background. In this study, we examined the allocation of drought risk considering not only efficiency but also equity, focusing on the saving water and water transfer between regions as the measures that do not depend on the infrastructure facilities. We show that the allocation of drought risk was well in a certain price of water transfer by comparison with the various cases using the social benefit and the differential income between regions respectively as indexes of efficiency and equity in simulation

---