

水融通システムの開発と 渇水リスクの軽減効果分析

谷本 圭志¹・森田 浩和²

1 正会員 工(博) 鳥取大学助教授 工学部社会開発システム工学科 (〒680-8552 鳥取市湖山町南 4-101)

2 学生会員 鳥取大学 工学部社会開発システム工学科 (〒680-8552 鳥取市湖山町南 4-101)

大規模な水資源開発が困難となる今後においては、利水者間の水利調整が重要な渇水対策となる。現河川法は渇水時の水利調整を認めているが、当事者間の円滑な合意形成の観点からは、事前の取り決めがより有効と考えられる。そこで、本研究ではその方策としての水融通契約とその運用を支援するための意思決定マップから成る水融通システムを動的計画法とゲーム理論を援用して開発するとともに、それを用いて渇水リスクの軽減効果を分析する。

Keywords: Water transfer, resources management, drought risk management, game theory, dynamic programming

1. はじめに

我が国の降雨は季節的変動が大きく、その多くは梅雨、台風の季節に集中し、その他の期はさほど多くの降雨に恵まれない。そこで、利用可能な水の量を時間的に平準化するために貯水池整備等の水資源開発が行われてきた。現行の利水計画では、一般に、十年に一回程度生じる渇水を計画基準とし、この基準年に必要水量を供給できることを目標としている。このため、平成6年に発生したような異常渇水には対応できない。

欧米のように数十年に一回程度生じる渇水を基準とするのであれば、より安定した水供給を行うことが可能となろう。しかし、貯水池などの水資源開発施設の建設には、莫大な資金、効率の良い適地、自然環境への配慮が不可欠であり、我が国において新規の建設は困難な現状にある。このため、降雨量が想定を下回る緊急事態には、取水調整や給水圧の調整、水力発電用水の緊急利用や広域のあるいは用途間の水融通の緊急実施などの水利調整によって対応せざるを得ない。

従来のマスメディア等の報道に見られるように¹⁾、水資源開発施設への投資を行うことなく渇水に対応していくための方策である水利調整の社会的要請は高い。そこで、の要点の一つとして、ある流域では余剰水が生じているとの指摘がある²⁾。水資源開発施設の規模が供用当初から不変であるのに対し、農業においては作付面積の減少、工業においては節水技術の開発・導入などの社会的背景の変化が生じており、その意味においては結果的にある

程度の余剰水が生じることはやむを得ないと考えられる。むしろ、その水を有効活用することに要請がある。余剰水を転用などによって有効利用する考えや研究は実際に古くより存在し³⁾、水資源開発施設が進展した昨今でも渇水が頻発する我が国において、その意義が薄れる理由は見当たらない。

現行の河川法には渇水対策として利水者による相互の水利使用の調整を認める規定がある^{4),5)}。しかし、渇水時の水利使用の調整・協議について詳細な規定はなく、その方法等についても利水者に委ねられている。また、利水者の増加や水利使用の広域化、複雑化は利水者間の調整を困難にしつつある。このため、費用負担や使用水量などの様々な事項を緊急時という時間が限られた中で迅速に合意することは困難であり、具体的な調整方法なしでは利水者間での合意がなかなか成立しないのが実状である。協議が成立しない場合に河川管理者が調停、斡旋を行うことができるが、その場合においても具体的な調整方法を整えることなしに成功を納めることができるとは考えられない。

そこで本研究では、利用可能な水を有効に活用することが渇水リスクの軽減にまず必要であるとの認識に立ち、渇水時の水利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(以後、「水融通契約」と言う)を取り交わす制度を設計する。さらに、短期的な渇水被害の軽減を目的とした利水者の契約の運用は必ずしも合理的ではないことを指摘した上で、合理的な意思決定を支援するためのモデルを構築する。

2. 水融通の現状と本研究での想定

(1) 水融通の現状

河川法で規定されている渇水時の水利調整は、通常の水利使用が困難となる可能性が高くなってからの対応措置である。よって、渇水の被害が発生するまでの限られた時間内に利水者間での合意を形成しなければならない状況下で、当事者間での協議や河川管理者による斡旋、調停が円滑に機能するかは疑問である。

特に、水を融通する側のメリットについては十分な裏付けがなく、合意の形成を困難なものにしている。その結果、最も悲観的な場合として、水需給が逼迫した利水者が間近にいるにもかかわらず、余剰水をもった利水者がその用途へ一滴も水を移転しない状況すら見られる。このため、渇水時の水利調整においては、関与する利水者にどのように明確なインセンティブを与えるかが課題の一つとなる。

(2) 水融通に関する既往の研究

従来の渇水時の対応に関する研究はダム操作などが中心であり（例えば多々納ら⁶⁾、レビューは岡田ら⁷⁾に詳しい）、水融通の研究はその考え方や現行制度での導入可能性を論じたものに限定される^{8),9)}。水融通そのものに理論的にアプローチした研究はこれまでに見当たらないが、関連する研究として、鈴木ら³⁾は、神奈川県の水資源共同開発における農業用水の都市用水への転用を巡る開発費用の分担を協力ゲーム理論を用いて検討しているが、そこでは転用する量を開発時に決定する場面を取り上げていることから水利権の再配分に係わる費用の分担問題となっており、各期において利水者間が水をやりとりする融通とは異なる想定である。加藤ら¹⁰⁾は広域水道を対象として水の運用を多目的計画法を用いて検討している。そこではあくまで単一の利水者が広域水道をマネジメントする想定であり、そのアプローチに基づいて複数の利水者の利害が交錯する水融通の本質的な側面を描写することはできない。高木ら¹¹⁾は、複数の利水者間での渇水リスク配分を検討しているが、中央政府がその調整を強制的に実施することを想定しており、結果的に単一の主体のマネジメント問題となっている。水融通の類似事例として電力融通がある。陳ら¹²⁾、Li *et al.*¹³⁾、Aguado *et al.*¹⁴⁾は電力融通の理論モデルを構築しているが、そこでは費用最小化などの最適化問題を議論しており、複数の電力事業者の間に融通に関する利害の対立は存在しない。昨今、電力自由化の下でゲーム理論を用いた電力取引についての研究が始められている¹⁵⁾。しかし、電力は貯蔵で

きない一方水は貯蔵できるという特性の差異があるため、後者については一時点の意思決定においてそれ以後の貯水量のトレンドと意思決定の系列への影響をプレイヤーが必然的に考慮しなくてはならず、動的なゲームを扱うことになるため、電力取引モデルをそのまま水融通に適用できない。

以上より、これまでの研究は単一の管理者による資源の制御という視点にたったものがほとんどであり、それを水融通に適用することは集権的な主体を前提とした利権の再編成を伴うことを意味する。しかし、集権的な主体による水利調整に水利権を保有している利水者が無条件に同意するという前提の現実性は乏しい。これに対し、本研究では利水者が水利権によって獲得した水を利水者のインセンティブに基づいて融通することを想定しており、その想定は必ずしも現行の法制度と対応はしていないものの、上記に示した従来の研究に比べて実行可能性は大きく改善されており、より簡素な制度の提案である。

(3) 水融通契約とその運用

河川水の利水者としては農業用水、工業用水、都市用水等がある。これらの利水者は、それぞれの水利権に基づく貯水量を多くの場合貯水池に確保して、最終需要者に水を供給している。

河川水の貯水池への流入と最終需要者への水の供給により、貯水量は絶えず変化する。特に貯水池への流入は降雨という自然現象に起因するため、その量は不確実性を有している。このため、場合によっては水利計画で想定している流入量を下回り、供給するに十分な量の水が確保できなくなる可能性がある。そこで本研究では、相互に水融通が可能な何らかの手段を確保している利水者が、今後予想される渇水被害を軽減するための事前策として水融通契約を交わすものとする。

水融通を受ける契約を結ぶ場合、契約時に相手の利水者に契約料を支払う必要がある。つまり、水融通契約は将来起こりうる渇水に対する保険的性質を有している。契約料を支払った利水者が満期時に水不足に直面した場合、予め定められた水量が契約の相手から融通され、渇水被害を軽減しうる。一方、水を融通する契約を結んだ利水者は、契約時に契約料を受け取るが、契約相手が水不足に陥った場合には水を融通しなければならない。つまり、自身が所有する水量の一部を放出することになる。

今期の水融通契約は、次期の渇水リスクを利水者間で分散するのみならず、次期以降の貯水量の状態にも影響を与える。ここで、利水者は貯水量やその推移確率、時期といった情報に基づいて水融通契約に関する判断をすることから、今期にどのような契約を結ぶかは、次期以

降の貯水量の推移とその下でどのような契約を結ぶかに必然的に依存する。このため、(契約を結ばないことも含めて) どのような契約を結ぶかに関する意思決定は単純な問題ではない。

そこで、本研究では無限遠までに生じる費用，すなわち総期待割引費用の最小化を利水者の目的とした上で，その達成のための利水者の合理的な意思決定を動的計画法とゲーム理論を用いて導出する。さらに，その結果を用い，各利水者がどのような契約を結ぶべきかを貯水量の状態の対応づけて表した「意思決定マップ」として示す。これにより，貯水量の状態と時期のみを判断材料として契約の容易な運用を可能とすることができるようになる。

3. 水融通契約の設計

(1) 渇水被害

二人の利水者（以後、「プレイヤー」と呼ぶ）が契約を行う場面を想定する。プレイヤーの集合を $N=\{1,2\}$ で表し，任意のプレイヤーを $i(i \in N)$ で表す。任意の t 期にプレイヤー i が確保している貯水量を $v_i(t)$ と表す。プレイヤー i の貯水量がある限界水準 $\underline{v}_i$ を下回ったときに，渇水被害が生じるとする。ただし，その水準は唯一であるとする。 t 期における水の不足量は $\max[\underline{v}_i - v_i(t), 0]$ で与えられ，渇水被害は不足量の関数である。ただし，以下では表記の便宜のため，不足量は貯水量の関数であることから，渇水被害を貯水量の関数 $D(v_i(t))$ として記す。

(2) 契約場面のゲーム的記述

プレイヤーは毎期の期首に契約を結ぶことができる。この契約には，融通の受け手と渡し手，契約料，貯水量の限界水準，満期時に融通される水量および満期が示されている。本研究では，問題のいたずらな煩雑化を防ぐため，満期を一期とし，融通の行使は満期時のみとして検討する。

上記に示した契約の内容を所与とした上で，プレイヤーは事前に決められたプロセスに基づいて契約の締結を行う。その内容は以下の通りである。各期においてプレイヤーはどの役割（融通の受け手，渡し手）で契約を結びたいか，もしくは結びたくないかを表明する。ここで，一方のプレイヤーが融通の受け手を，もう一方のプレイヤーが融通の渡し手を表明した場合に，プレイヤーは契約料を交渉する。この状況を形式的に整理すると，契約のプロセスは二段階のゲームから構成されており，第一段階のゲームは各プレイヤーの行動の集合を { 融通の受け手となる(これを s_1 で表す)，渡し手となる(s_2)，契約し

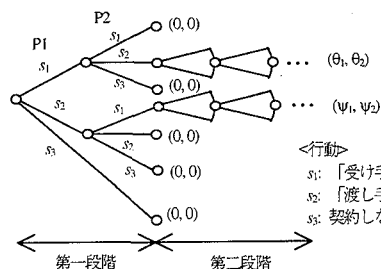


図-1 契約プロセスのゲーム的記述

ない(s_3)とした二人非協力ゲームであり，第二段階のゲームは契約料を巡る交渉ゲーム¹⁰⁾である。交渉ゲームでは，契約料を一方のプレイヤーに提案し，それに対してもう一方のプレイヤーが受諾か拒否かの応答を行う。提案者は交互に入れ替わり，そのプロセスが無限回繰り返される。

このゲームにおけるプレイヤーの戦略は，第一段階における行動と第二段階においてどのような提案をしどの提案を受諾するかを組みで定義される。互いのプレイヤーが異なる役割を表明し，その役割の下で行われる交渉によってある契約料が決定されたとき，「契約が成立した」と言う。プレイヤーの間での情報の非対称性はないものとし，完全完備情報のゲームを想定する。プレイヤーは第二段階の部分ゲームがどのような帰結になるかを知りつつ，第一段階で行動を選択する。以上のゲーム（以後，「契約ゲーム」と呼ぶ）を図-1に表す。ここに $P1, P2$ はそれぞれ先手，後手プレイヤーであり，第二段階の円弧は契約料の範囲を示している。()の中に双方のプレイヤーの利得を示しており，契約が成立しない場合の利得を 0 に基準化している。実現するゲームの結果は，部分ゲーム完全均衡解(subgame perfect equilibrium)で与える。

以上に述べた内容及びプロセスから構成される契約が，本研究で設計した水融通契約である。

(3) 総期待割引費用の定式化

任意の t 期の期首において，どのような契約を結ぶかをプレイヤーが思索している場面を想定しよう。プレイヤーが被りうる費用は，(1) 今期に支払うもしくは受け取る契約料，(2) 次期の渇水被害，(3) 次期以降の(1)と(2)の総和であり，(3)は次期以降の契約ゲームにおける戦略の意思決定に依存する。プレイヤーの目的は，今期から無限遠までのこれらの期待割引費用の合計の最小化であり，プレイヤーの関心はその目的を達成する戦略の系列（政策）を見出すことである。

任意の t 期におけるプレイヤー1,2の貯水容量の状態へ

クトルが $(v_1(t), v_2(t))$ であるときの、その期から無限遠までのプレイヤー i の総期待割引費用を $V_i(v_1(t), v_2(t), t)$ で表す。一期当たりの割引因子を $\beta(0 < \beta < 1)$ で表す。すると、動的計画法により以下の再帰方程式を得る。

$$\begin{aligned} V_i(v_1(t), v_2(t), t) \in \\ \{ & x_i + D_i(v(t)) + \beta E[V_i^b(v_1(t+1), v_2(t+1), t+1)], \\ & -x_j + D_j(v(t)) + \beta E[V_i^s(v_1(t+1), v_2(t+1), t+1)], \\ & D_i(v(t)) + \beta E[V_i^d(v_1(t+1), v_2(t+1), t+1)] \} \end{aligned} \quad (1)$$

ここに、 x_i はプレイヤー i が受け手となる契約が成立した場合の水融通の契約料である。この値がどのように決定されるかについては次節に詳述する。 V_i^b はプレイヤー i が融通の受け手となった場合の総期待割引費用であり、 V_i^s は渡し手となった場合の、 V_i^d は契約を結ばなかった場合のそれを表している（正確には、「契約を結ばなかった」場合と「結果的に契約を結ばなかった」場合の二つがあるが、それらをまとめて前者で代表する）。例えば、融通によってプレイヤー i が受け取る水量を dv_i で表すと、プレイヤー i に関して次式が成り立つ。

$$V_i^b = V_i(v_1(t+1) + dv_1(t+1), v_2(t+1) - dv_1(t+1), t+1) \quad (2)$$

$$V_i^s = V_i(v_1(t+1) - dv_2(t+1), v_2(t+1) + dv_2(t+1), t+1) \quad (3)$$

$$V_i^d = V_i(v_1(t+1), v_2(t+1), t+1) \quad (4)$$

オペレーター E は期待値をとることを示している。ここで留意すべきは、貯水量ベクトル (v_1, v_2) に関して同一の確率分布で期待値をとることができるのは、貯水量の確率過程に独立増分の性質が備わっている場合である。(1)式の括弧 $\{\}$ は、契約ゲームの均衡解がその中の一つの式を特定することを意味している。例えば、プレイヤー i が受け手となる結果が均衡解である場合、 V_i は $x_i + D_i(v(t)) + \beta E[V_i^b]$ と等しくなる。

(4) 契約料の交渉

第一段階のゲームにおいて、融通の受け手となったプレイヤーを i 、渡し手となったプレイヤーを j と表す。以下では表記の簡単のため、 $\beta E[V_i^k]$ を単に $V_i^k(k=b, s, d)$ と記す。

契約料の交渉は図-1に示す第二段階の部分ゲームに該当する。プレイヤー i が交渉によって獲得する利得 (θ_i) は、契約を結ばなかった場合の総期待割引費用と受け手として契約を結んだ場合のそれとの差であり、次式のように定式化される。

$$V_i^d - (V_i^b + x_i) \quad (5)$$

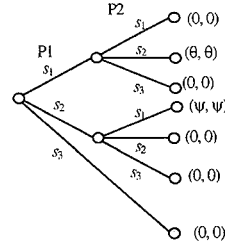


図-2 契約ゲームの縮約ゲーム

同様の考えに基づき、プレイヤー j が交渉によって獲得する利得 (θ_j) は次式で与えられる。

$$V_j^d - (-x_i + V_j^s) \quad (6)$$

以上より、契約料を巡る交渉は(5)式と(6)式の和で与えられる(7)式、すなわち、総利得の配分を巡る交渉と等価である。

$$(V_i^d - V_i^b - x_i) + (x_i - V_j^s + V_j^d) = V_i^d - V_i^b - V_j^s + V_j^d \quad (7)$$

契約は期首の限られた時間内で行われるとすると、交渉における割引因子はほとんど1に近いと仮定することができる。この仮定の下、無限回繰り返される交渉によって各プレイヤーはそれぞれ総利得の半分、つまり、 $(V_i^d - V_i^b - V_j^s + V_j^d)/2$ を獲得する¹⁷⁾。すると、図-1において $\theta_i = \theta_j$ 、 $\psi_i = \psi_j$ が成立する。以上により、契約料 x_i はこの配分利得を実現する形で次式のように与えられる。

$$x_i = (V_i^d - V_i^b + V_j^s - V_j^d)/2 \quad (8)$$

(5) 契約ゲームの均衡解

以上に示した第二段階の部分ゲームの均衡解より、図-1に示すゲームは図-2に示すゲームに縮約される。ただし、図-2における θ_i は $\theta_1 (= \theta_2)$ 、 ψ は $\psi_1 (= \psi_2)$ をそれぞれ表している。図-2は非常に単純なゲームであり、部分ゲーム完全均衡解は、融通における役割を表明するプレイヤーの順序に関係なく、双方のプレイヤーにとって最も高い利得を実現する結果となる。双方のプレイヤーの利得は等しいことから、個人的にも双方全体にも最大の利得を保証する解が自発的に達成される。すると、以下の定理を得る。

定理：ゲームの均衡解によって指定される契約は、総期待割引費用を最小化する契約と一致する。つまり、次式が成立する。

$$V_i(v_i(t), v_2(t), t) = \min[x_i + D_i(v_i(t)) + V_i^b, -x_j + D_j(v_j(t)) + V_j^b, D_i(v_i(t)) + V_i^d] \quad (9)$$

証明: $\max[\theta, \psi] = \theta \geq 0$ が成立していると仮定しよう。この場合の均衡解においては、プレイヤー1が融通の受け手、プレイヤー2が渡し手となることを表明する。その下では、 $x_1 + D_1(v_1(t)) + V_1^b = \min[x_1 + D_1(v_1(t)) + V_1^b, -x_2 + D_2(v_2(t)) + V_2^b, D_1(v_1(t)) + V_1^d]$ が成り立つことを証明する。

$$1) x_1 + D_1(v_1(t)) + V_1^b \leq -x_2 + D_2(v_2(t)) + V_2^b$$

契約料に関して、次式を得る。

$$V_1^d - (V_1^b + x_1) = \theta \Rightarrow x_1 = -\theta + V_1^d - V_1^b \quad (10)$$

$$V_1^d - (-x_2 + V_1^b) = \psi \Rightarrow x_2 = \psi + V_1^b - V_1^d \quad (11)$$

よって、次式が成立する。

$$x_1 + D_1 + V_1^b - (-x_2 + D_2 + V_2^b) = -\theta + D_1 + V_1^d - (-\psi + D_2 + V_2^d) = \psi - \theta \leq 0 \quad (12)$$

$$2) x_1 + D_1 + V_1^b \leq D_1 + V_1^d$$

$$x_1 + D_1 + V_1^b - (D_1 + V_1^d) = -\theta + D_1 + V_1^d - (D_1 + V_1^d) = -\theta \leq 0 \quad (13)$$

1)と2)より、 $x_1 + D_1 + V_1^b = \min[x_1 + D_1 + V_1^b, -x_2 + D_2 + V_2^b, D_1 + V_1^d]$ が成立する。同様に、 $\max[\theta, \psi] = \psi \geq 0$ が満たされている場合には、 $-x_2 + D_2 + V_2^b = \min[x_1 + D_1 + V_1^b, -x_2 + D_2 + V_2^b, D_2 + V_2^d]$ が、 $\max[\theta, \psi] < 0$ が成立する場合には、 $D_1 + V_1^d = \min[x_1 + D_1 + V_1^b, -x_2 + D_2 + V_2^b, D_1 + V_1^d]$ が成り立つ。以上の議論は、プレイヤー2についても同様に成立する。【証明終】

契約を導入しない場合と比較して導入した場合に節減できる期待費用がゲームの利得であることに留意すると、 $\max[\theta, \psi] \geq 0$ が成立する場合においてのみ契約が成立することから、①契約を導入することによって双方のプレイヤーの期待費用が必ず節減される。また、 $\max[\theta, \psi] = \theta (\geq 0)$ の場合、利得 θ を保証する均衡解が実現することから、②双方のプレイヤーの期待費用の和が最小となる契約が常に成立する。つまり、個々のプレイヤーの動機を保証しつつ、期待費用最小化という観点で最も効率的な契約が成立する。上に設計した契約プロセスの意義はまさにこの二つの点にある。

なお、状態と行動の数がそれぞれ有限であるため、各状態において期待費用が最小化されるという意味での最適な政策の存在が(9)式に関して保証される¹⁸⁾。しかし、それが常に唯一であるとは限らない。その場合、期待費

用とは異なった別の評価規範(分散など)を用いてプレイヤーは採るべき政策を判断しうが、双方のプレイヤーが選択した政策が異なりうる場合についてはその調整が必要である。この問題は、本研究で扱う範囲を超えるので検討の対象としない。

4. 意思決定支援モデルの開発と渇水リスク軽減効果の分析

(1) 意思決定マップの導出

(9)式に得られた再帰方程式を解くことにより、任意の貯水量の状態、時期において各プレイヤーがどのような契約を結ぶべきかを意思決定することができる。さらに、その計算結果を視覚的にマップ(これを「意思決定マップ」と呼ぶ)として整理することで、容易にその決定を行うことが可能となる。そこで、以下では具体的な数値例を用いることにより、意思決定マップを導出する。その際、貯水池の規模と貯水量の確率過程は、兵庫県の一庫ダムに基づくものとする。なお、一人のプレイヤーの貯水量の確率過程を実際の一庫ダムのデータより推定し、それを時間軸上でシフトさせた確率過程をもう一方のプレイヤーの貯水量の確率過程とする。限界水準と渇水被害の関数についてはそれぞれ仮想的に与える。

各プレイヤーの貯水容量に対する貯水率を10段階で表し、その一段階を一つの状態とする。すなわち、任意のプレイヤーの貯水量は1~10の状態で表される。なお、貯水量が少ないほど状態の番号が小さいものとする。過去の渇水記録より、取水条件が厳しくなる状態2を渇水の被害が発生する限界水準とした。実データから推移確率を推定し、割引因子 β を $1/(1.04/12)$ として与える。これは、年当たりの利子率で4%に相当する。また、一期間を一ヶ月とし、渇水被害の関数を暫定的に水道料金×不足量で与える。

契約における融通量を以下のように想定する。受け手が満期に水不足に直面した場合に、渡し手はその不足量を受け手に融通することを原則とする。しかしながら、もし渡し手にそのための十分な貯水量が満期時に確保されていないならばどうなるであろうか。この場合、他の利水者から水を調達するのは、水の輸送や合意形成などの様々な制約により現実的ではない。そこで、「渡し手の限界水準を下回らない範囲で受け手の不足量を融通する」という渡し手の貯水量に条件づけられた融通契約を想定する。つまり、プレイヤー*i*が受け手となった場合の融通量 dv_i を次式のように定義する。

$$dv_i(t) = \max[\min[v_2 - v_i(t), v_i(t) - v_2], 0] \quad (14)$$

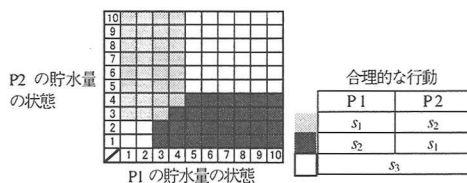


図-3 意思決定マップの例

以上の想定の下で、各プレイヤーの貯水量の変動の相関についていくつかのケースを想定し、(9)式の動的計画問題を解くことにより意思決定マップを導出した。その例としてある月のマップを図-3に示す。プレイヤーは互いの貯水量の状態を観察し、意思決定マップを見ることによりその月にどのような契約をすべきかが容易に分かる。また、このマップに従って行動することにより、総期待割引費用の最小化が達成される。その意味で、本研究において得られた知見は有用である。

(2) 渇水リスク軽減効果の数値分析例

水融通契約の導入に関する金銭的評価は、渇水被害の関数が特定化できれば上述の動的計画問題を解くことで導出することができる。すなわち、導入なしの場合の総期待割引費用と導入ありの場合のその差をとることで得られる。先述したように、本研究では、暫定の渇水被害として不足量に水道料金を乗じた関数を想定し、その下で上に示した意思決定マップを導出した。しかし、その関数の妥当性は必ずしも高くはないことから、以下では関数形の影響を直接的かつ大きく受ける金銭的評価を導くのをあえて避け、渇水の発生回数を渇水リスク軽減効果の指標として用いる。また、(9)式は契約を導入しなかった場合に比べて導入によって期待費用が節減できることを表しているが、渇水の発生回数の増減については何も示していない。以下で渇水の発生回数を検討するのは、その増減についての確認をする意味も含まれている。

数値シミュレーションを100年分行い、水融通契約の有無における渇水発生回数を比較する。当該の期間において貯水量が限界水準を下回った場合に渇水が発生したとし、限界水準を下回った期の数に渇水発生回数とする。以後、双方のプレイヤーの貯水量に関して正の相関がある、相関がない、負の相関がある場合をそれぞれ数値例1、2、3と呼ぶこととする。各数値例の下での貯水量の変動の例を図-4に、渇水発生回数の結果を図-5にまとめて示す。

数値例1では、水融通契約を導入することにより、渇水発生回数はプレイヤー1について64回から29回、プレ

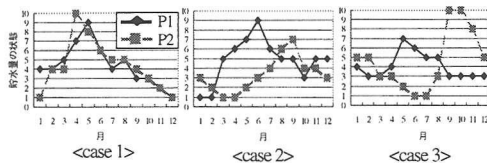


図-4 各数値例における貯水量の変動の例

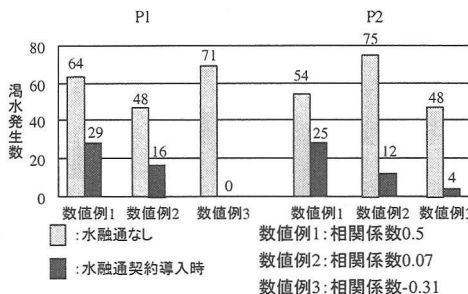


図-5 渇水発生回数の比較

イヤー2について61回から25回へと減少しており、契約の導入による渇水リスク軽減効果が認められた。数値例2においてプレイヤー1の渇水発生回数は48回から16回へ、プレイヤー2のそれは75回から12回へと減少している。数値例3では、一方のプレイヤーが水不足に直面する可能性の高い時期に他方のプレイヤーは豊富な水を確保する可能性が高いことから水融通契約の導入効果は最も高いと考えられる。その結果、渇水発生回数はプレイヤー1が71回から0回、プレイヤー2が48回から4回へと減少している。

以上の結果から、いずれのケースにおいても水融通契約は渇水リスクの軽減に有効であることが示された。また、プレイヤーの貯水量の変動の相関が水融通契約の有効性を左右することが明らかとなった。

5. おわりに

本研究ではゲームを用いて水融通契約を設計した。その契約プロセスによることで、個々のプレイヤーにとって期待費用が節減できるとともに、双方のプレイヤーの期待費用の和を最小化する契約が結ばれることが明らかとなり、この点が本研究で提案する契約制度の利点である。

契約の背後には、水が逼迫しているプレイヤーのニーズと余剰の水をかかえているプレイヤーのニーズを融通する水と契約料を介してマッチさせるメカニズムがあり、また長期的な観点からプレイヤーの行動の系列を見出すことを可能としているため、無限遠までの期待費用を最

小化する契約のみが成立する。このことが、プレイヤーのインセンティブによって達成されるという点が重要である。

次いで、契約を運用する際の利水者の合理的な意思決定を支援するために意思決定マップを導出した。さらに、それを用いて水融通契約の導入による渇水リスク軽減効果を確認した。

今後は、三人以上の利水者を対象とした場面を想定し、ここで構築したモデルを拡張するなどさらなる検討を進めたい。

謝辞：本研究を遂行するに当たり、鳥取大学工学部社会開発システム工学科の河合一教授、細井由彦教授に多くの助言をいただいた。付して、謝辞とします。

参考文献

- 1) 例えば朝日新聞朝刊, 2002年3月4日, 1998年8月27日(名古屋)
- 2) 嶋津暉之：水問題原論, 北斗出版, 1993.
- 3) Suzuki, M. and M. Nakayama: The cost assignment of the cooperative water resource development: A game theoretical approach, *Management Science* 22, pp.1081-1086, 1976.
- 4) 河川管理行政実務研究会：河川管理の実務, pp.102-115, 1999.
- 5) 国土庁長官官房水資源部：水資源白書, 日本水資源, 1999.
- 6) 多々納裕一・岡田憲夫・河合一：渇水の継続期間を明示的に組み込んだ貯水池運用計画モデル, *土木計画学研究・論文集* No.9, pp.173-180, 1991.
- 7) 岡田憲夫・若林拓史・多々納裕一：社会基盤整備の計画・管理のためのリスク分析的アプローチ ―水利用と道路利用問題を対象として, *土木学会論文集* No.464/IV-19, pp.33-42, 1993.
- 8) 志村博康：渇水に対する三つの対応ステージと将来的課題,

水道協会雑誌, 第64巻, 第7号, pp.77-82, 1995.

- 9) 志村博康：農業水利と国土, 東大出版会, 1987.
- 10) 加藤博光・栗栖宏充・瀬古沢照治・館 仁平：広域水運用計画への対話型他目的計画法への応用, *計測自動制御学会論文集*, Vol.35, No.2, pp.280-287, 1999.
- 11) 高木朗義・武藤慎一・濱平涼子：地域間リスク配分を考慮した渇水調整ルールの実証的分析, *土木計画学研究・講演集*, Vol.24, 2001.
- 12) 陳洛南・池田和彦・東仁・石関光男・境武久・中村滋・鈴木昭男・荻本和彦：Benders 分解法による連系系統の最適電源開発計画, *電気学会誌 B*, 113 巻 6 号, pp.643-652, 1993.
- 13) Li, W. and R. Billinton: Incorporation and Effects of Different Supporting Policies in Multi-area Generation System Reliability Assessment, *IEEE Transactions on Power Systems* 8, pp.1061-1067, 1993.
- 14) Aguado, J. and H. Quintana: Inter-Utilities Power-Exchange Coordination: A Market-Oriented Approach, *IEEE Transactions on Power Systems* 16, pp.543-519, 2001.
- 15) Park, J. and B. Kim, M., Jung, and J. Park: A Continuous Strategy Game for Power Transactions Analysis in Competitive Electricity Markets, *IEEE Transactions on Power System* 16, pp.847-855, 2001.
- 16) Rubinstein, A.: Perfect Equilibrium in a Bargaining Model, *Econometrica* 50, pp.97-109, 1982.
- 17) Osborne, M. and A. Rubinstein: Bargaining and Markets, Academic Press, San Diego, 1990.
- 18) Ross, S.: Applied Probability Models with Optimization Applications, Holden-Day, 1970.

Developing Water Transfer System and its Drought Risk Reduction

Keishi TANIMOTO and Hirokazu MORITA

To reduce the drought risk, it is promising measure to transfer the water from those who have sufficient surplus water to the water users who lack water. However, it is not used very much in Japan because it may not encourage the users to transfer due to no economical merit and so on. In this paper, water transfer contract is designed in order to give the water users the incentives to do so. In addition, we develop the model to guide the users to contract rationally so as to minimize the total expected discounted cost. We show that the water transfer system can be effective to reduce drought risk.