

水融通の制度の設計に関する一考察*

Designing Water Transfer System*

谷本圭志**・森田浩和***

By Keishi TANIMOTO** and Hirokazu MORITA***

1. はじめに

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多く流域で行われてきた。現行の利水計画では、十年に一回程度生じる渇水を計画基準とし、この基準年に水需要を充足でできることを目標としている。

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、計画基準を超える緊急事態には、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的あるいは用途間の水融通の緊急の実施などの水利調整によって対応せざるを得ない。

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必要性は高まっており、マスメディアにおいてもこれに関する報道¹⁾も盛んになるなど世論の高まりが見られる。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²⁾。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、緊急時に利水者間での合意が成立しないことがある。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、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、渇水時の対応を渇水の発生に先立って決定する手段として、利水者間での水融通

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し、その導入による渇水軽減効果をゲーム理論と動的計画法を用いたモデルを用いて検討する。

2. 既往の研究と想定する水融通

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措置であり、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裏付けがなく、合意の形成を困難なものにしている。よって、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インセンティブを与えるかが課題となる。

水融通には水を融通する側と融通を受ける側の複数の主体が関与するため、貯水池操作ルールなどの従来の多くの渇水対策に関する研究（そのレビューは文献³⁾に詳しい）とは異なり、水融通に関する利水者の意思決定は、複数の主体による意思決定の相互関連性を明示して検討する必要がある。しかし、従来の水融通の研究^{4) 5)}では、水融通の考え方や現行制度での導入可能性を論じているものが見られるものの、水融通を導入した場合での利水者の行動や、その結果としてもたらされる渇水軽減効果を説明した研究は見当たらない。高木⁶⁾らは、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いる。これに対して本研究では、利水者の自発的な契約行動によって期待費用の最小化をもたらし水利調整がなされる制度の設計を目的としている。

水融通の類似事例として電力融通がある。陳ら⁷⁾、

*キーワード：水資源計画，河川計画，水融通

**正会員 博（工）鳥取大学工学部社会開発システム工学科（鳥取市湖山町南4丁目101番地，TEL0357-31-5310，FAX 0857-31-0882）

***正会員 鳥取市都市整備部都市建設課（鳥取市尚徳116番地，TEL0857-20-3256，FAX0857-20-3048）

Li et al.⁸⁾, Aguado et al.⁹⁾は電力融通の理論モデルを構築しているが、単一の主体のとしての費用最小化などの最適化問題を議論しており、そこには複数の電力事業者の間での融通に関する利害の対立は存在しない。昨今、電力自由化の下で複数の主体による電力取引についての研究が始められている¹⁰⁾。しかし、電力は貯蔵できない一方で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ない。つまり、水融通においては、プレイヤーの動的な意思決定を明示的に扱う必要があるものの、電力取引モデルはその性質を踏まえていない。

上記の問題意識のもとで、谷本ら¹¹⁾は水融通の契約制度を設計し、そのもとでの渇水軽減効果を計測するモデルを開発しているが、そのモデルによって扱いうる貯水量の確率過程は独立増分が満たされている場合のみである、プレイヤーの契約料の交渉の場が無限回保証されているなど、限定的な状況においてのみ適用可能である。そこで本研究では、このモデルに改良を加えるとともに、いくつかの契約の形態を想定し、それらの評価を行う。

(2) 水融通契約とその運用

利水者には農業用水、工業用水、都市用水等があり、多くの場合水を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則るため、その量は不確実である。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に関する契約(以後、「水融通契約」と呼ぶ)を交わすものとする。なお、融通の手段はダムの間での導水施設を必ずしも意味せず、各利水者が取水する地点に契約に基づいて水が供給される状況にあればよい。取水するの地点の上流側に異なった河川があり、それらに位置するそれぞれのダムに貯水する利水者が融通する相手に必要な水量を放流することや、同一の多目的ダムに参加している利水者の間で融通を行うことも本研究の想定の

範囲にある。

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。以後、契約料を支払う利水者を「購入者」、受け取る利水者を「売却者」と呼ぶことにする。

契約に記された満期(契約に基づいて水を融通する期日)に契約が履行されるが、本研究では、水の不足量が生じた際にプレイヤーの選択の余地なしに水融通を行うとする契約(「契約1」と呼ぶ)と、水融通をするか否かを購入者が選択できる契約(「契約2」と呼ぶ)、つまり、水融通の権利をとりかわす二種類の契約を想定する。

満期において、契約1の場合、プレイヤーの意思決定を伴わずに一定量の水が融通され、契約2においては、権利を行使するか否かを購入者が判断する。行使した場合には、権利の売却者から水が融通され、渇水被害を軽減しうる。一方、売却者は、契約時に契約料を受け取るが、満期時に予め契約において指定された状況に至った場合には、自身が所有する水量の一部を放出して融通を行わなくてはならない。また、契約の機会は今期のみならず次期以降も同様に保証されており、その過程においては自らが購入者になる場合も売却者になる場合もある。以上のことを念頭に置き、利水者はどのような契約を締結するか、権利を行使するかを判断を、その時々貯水量、時点を考慮して決定していく。

今期に水の融通を受けると判断した場合、次期以降の貯水量の変動は変化する。このため、現時点での判断は、将来での渇水の発生可能性やそのもとでの利水者の意思決定に影響を及ぼす。このため、現時点で水の融通を受けることは、今直面している渇水被害を軽減しうるという意味では合理的であるが、長期的にその判断が支持されるかは必ずしも自明ではない。契約2においては、融通を受ける際に当該の利水者がその観点から判断を検討する機会が保証されており、契約1においてはその機会がない。

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．任意のプレイヤーを i ($i \in \{1, 2\}$) で表す．任意の時点を離散時間 t で表し、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． t 期における限界水準と貯水量の差（ただし、限界水準 $>$ 貯水量）を不足量と呼び、それは $\max[\underline{v}_i - v_i(t), 0]$ で表される．渇水被害は不足量の関数として与えるが、不足量は貯水量の関数であることから、表記の便宜のため、 t 期における渇水被害を貯水量の関数 $D_i(v_i(t))$ で表す．

(2) 契約のゲーム的記述

任意の期において、プレイヤーは前期に締結した契約の履行と新規の契約の締結を行う．契約を履行する際には、その後に締結しうる新規の契約を念頭におきつつ、どのように履行するか（契約においては、履行についての選択肢はないが、契約 2 においては、権利を行使するかを選択する）を決定する．以下では、前期に締結した契約の履行を行う半期を任意の t 期の「前半」と呼び、 t で表し、契約の締結を行う半期を「後半」と呼び、 t^+ で表す．契約には、購入者と売却者、契約料、貯水量の限界水準、満期が示されている．本研究では、問題の煩雑化を防ぐため、満期までの期間を一期とし、満期以外の期日の融通は認められていないものとする．なお、満期までの期間を二期以上としても、問題の構造は不変である．

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（購入者、売却者）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．一方のプレイヤーが購入者を、もう一方のプレイヤーが売却者を表明した場合に、プレイヤーは予め決められた契約料の算定方法に基づき料金を受け渡す．この契約プロセスは、二段階に分割でき、第一段階は「権利の購入者となる（これを s_1 で表す）、売却者となる（ s_2 ）、契約しない（ s_3 ）」をプレイヤーの行動（表明）の集合とした非協力ゲームであり、第二段階は、第一段階で決定された役割のもとでの契約料の算定である．

互いのプレイヤーが異なる役割を表明し、その

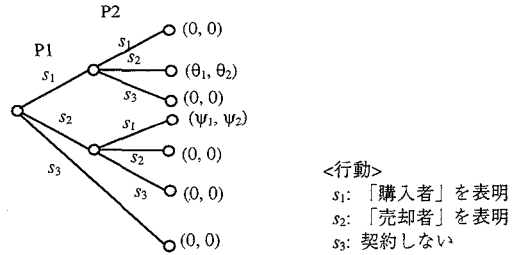


図 1 契約プロセスの展開形ゲーム表現

役割のもとで契約料が受け渡されたとき、「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、完全完備情報を想定する．プレイヤーは第二段階での契約料の算定手法を知りつつ第一段階で行動を選択する．以上の状況を展開形ゲーム（以後、「契約ゲーム」と呼ぶ）で表現すると、図 1 のようになる．ここに P1, P2 はそれぞれ先手、後手プレイヤーである．() の中に契約が成立しない場合の利得を 0 に基準化した双方のプレイヤーの利得を示している．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．

(3) 契約の締結時におけるプレイヤーの行動

任意の t 期の後半において、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) 今期の渇水被害、(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的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（「総期待割引費用」と呼ぶ）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 期にプレイヤー i が貯水している水量のうち、契約を導入していない場合のそれを $u_i(t)$ 、水融通契約に起因する水量を $w_i(t)$ と表す．これらの水量はすべて離散量とする． t 期のプレイヤー i の貯水量は $u_i(t) + w_i(t)$ である．貯水量の状態ベクトルが $(u_1(t), w_1(t), u_2(t), w_2(t))$ であるときの、 t 期から無限遠までのプレイヤー i の総期待割引費用を $V_i(u_1(t), w_1(t), u_2(t), w_2(t), t)$ で表す．なお、表記の便宜上、以後 $V_i(u_1, w_1, u_2, w_2, t)$ と表す．一期当たりのプレイヤー i の割引

因子を $\beta_i(0 < \beta_i < 1)$ で表す。すると、契約を締結する t^* 期におけるプレイヤーの総期待割引費用は次式で表される。

$$V_i(u_1, w_1, u_2, w_2, t^*) \in \{x_i + D_i(v_i(t^*)) + \beta_i E[V_i^b(u_1, w_1, u_2, w_2, t^* + 1)], -x_j + D_j(v_j(t^*)) + \beta_j E[V_j^s((u_1, w_1, u_2, w_2, t^* + 1))], D_i(v_i(t^*)) + \beta_i E[V_i^d((u_1, w_1, u_2, w_2, t^* + 1))]\} \quad (1)$$

ここに、 x_i はプレイヤー i が購入者となった場合の契約料である。契約料の決定は本章の(5)において検討する。オペレーター E は期待値をとることを示している。 V_i^b はプレイヤー i が購入者となった場合の総期待割引費用であり、 V_i^s は売却者となった場合の、 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、プレイヤー1に関して次式が成り立つ。

$$V_1^b = V_1(u_1, [w_1 + dw_1]_1, u_2, [w_2 - dw_1]_2, t^* + 1) \quad (2)$$

$$V_1^s = V_1(u_1, [w_1 - dw_2]_1, u_2, [w_2 + dw_2]_2, t^* + 1) \quad (3)$$

$$V_1^d = V_1(u_1, w_1, u_2, w_2, t^* + 1) \quad (4)$$

ただし、 dw_i は融通によってプレイヤー i が受け取る水量を表しており、その具体的な与え方は以下の検討においては任意である。貯水池には貯水許容量があり、プレイヤー i の上限は貯水容量 v_i^* 、下限は0であることから、 $u_i + w_i + dw_i \leq v_i^*$ かつ $0 \leq u_i + w_i - dw_i$ である。それらを考慮するために上式の第一式、二式においては次式に定義する関数を用いている。

$$[w_i + dw_i]_i = \min[w_i + dw_i, v_i^* - u_i] \quad (5)$$

$$[w_i - dw_i]_i = \max[w_i - dw_i, -u_i] \quad (6)$$

(1)式における“ $\in$ ”は、契約ゲームの均衡解が $\{\}$ 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 が購入者となる結果が均衡解である場合、 V_i は $x_i + D_i(v_i(t)) + \beta_i E[V_i^b]$ と等しくなる。

(4) 契約の満期におけるプレイヤーの行動

満期において、契約1の場合は、プレイヤーには

何ら判断の余地なく水融通が行われる。よって、例えば、プレイヤー1が権利の購入者、プレイヤー2が売却者であるとする、各期の前半に関して次式が成立する。

$$V_1^b(u_1, w_1, u_2, w_2, t^*) = V_1(u_1, [w_1 + dw_1]_1, u_2, [w_2 - dw_2]_2, t^*) \quad (7)$$

$$V_2^s(u_1, w_1, u_2, w_2, t^*) = V_2(u_1, [w_1 + dw_1]_1, u_2, [w_2 - dw_2]_2, t^*) \quad (8)$$

一方で、水融通の権利をとりかわす契約、すなわち契約2の場合、権利を購入したプレイヤーは水が融通された場合とされない場合の総期待割引費用を比較し、前者が小さい場合にのみ権利を行使する。例えば、プレイヤー1が権利の購入者、プレイヤー2が売却者である場合における、プレイヤー1の意思決定は次式で表される。

$$V_1^b(u_1, w_1, u_2, w_2, t^*) = \min[V_1(u_1, [w_1 + dw_1]_1, u_2, [w_2 - dw_2]_2, t^*), V_1(u_1, w_1, u_2, w_2, t^*)] \quad (9)$$

権利の売却者は購入者の行使の決定を受け入れるのみであるため次式を得る。ただし、括弧 $\{\}$ は購入者が権利を行使した場合には第一項が、そうでない場合は第二項が該当することを表している。

$$V_2^s(u_1, w_1, u_2, w_2, t^*) = \{V_2(u_1, [w_1 + dw_1]_1, u_2, [w_2 - dw_2]_2, t^*), V_2(u_1, w_1, u_2, w_2, t^*)\} \quad (10)$$

(5) 契約料の算定方法とゲームの均衡解

契約料はプレイヤーの行動に影響を与える要因であることから、その算定方法は効率的な結果を導くと同時にプレイヤー間での公平性を満たすようになっているべきである。以下では、そのような契約料の算定方法について検討する。

第一段階において、あるプレイヤーが先手で購入者となり、他方のプレイヤーが後手で売却者となった場面を想定しよう。先手、後手のプレイヤーをそれぞれプレイヤー1,2と呼ぶ。以下では表記の簡単のため、 $\beta_i E[V_i^k]$ を単に $V_i^k(k = b, s, d)$ と記す。

図1に示す利得は契約を結ばなかった結果の総期待割引費用で基準化しているため、プレイヤー1の利得 θ_1 は、契約を結ばなかった場合の総期待割引費用と購入者として契約を結んだ場合のそれとの差、つまり総期待割引費用の節約額 $V_1^d - (V_1^b + x_1)$ で定義される。同様に、プレイヤー2の利得 θ_2 は $V_2^d - (-x_1 + V_2^b)$ で与えられる。契約料の決定は、これらの和で与えられる $(V_1^d - V_1^b - x_1) + (x_1 - V_2^b + V_2^d) = V_1^d - V_1^b - V_2^b + V_2^d$ 、つまり、節約額の合計（以後、「総利得」と呼ぶ）の配分と等価である。総利得は、二人が契約によって最大限節約できる総期待割引費用である。

プレイヤー1が先手で売却者となり、プレイヤー2が後手で購入者となった場面についても同様の議論により、この場合での契約料の決定は、総利得 $V_2^d - V_2^b - V_1^s + V_1^d$ の配分である。なお、契約を結ばない場合には当然のことながら配分は行われず、総利得は0である。

総期待割引費用の最小化は利得の最大化と等価であることに留意すると、費用最小的な効率的な結果とは、総利得が最大となっている結果に他ならない。よって、効率性の観点に基づく、契約料は総利得が最大になっている結果をナッシュ均衡解に導くように算定されていけばよい。

先手プレイヤーと後手プレイヤーの総利得の配分比率を z : $1-z$ ($0 \leq z \leq 1$)とする。つまり、 x_i ($i=1,2$)を以下のように決定する。

$$\begin{aligned} V_1^d - (V_1^b + x_1) &= z(V_1^d - V_1^b - V_2^s + V_2^d) \\ \Rightarrow x_1 &= (1-z)(V_1^d - V_1^b) - z(V_2^d - V_2^s) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} V_2^d - (V_2^b + x_2) &= (1-z)(V_2^d - V_2^b - V_1^s + V_1^d) \\ \Rightarrow x_2 &= z(V_2^d - V_2^b) - (1-z)(V_1^d - V_1^s) \end{aligned} \quad (12)$$

すると、展開形ゲームは図2のように導かれる。ここに、配分比率を先手プレイヤーと後手プレイヤーとの間で固定することが重要となる。すなわち、図2に示す任意の部分ゲームおよびその縮約ゲームにおいて、先手プレイヤーは $z \times$ 各結果での総利得、後手プレイヤーは $(1-z) \times$ 各結果での総利得を比較して、自らに最も高い利得をもたらす結果に至る行動を選択する。つまり、「自らに最も高い利得をもたらす結果」は「最も高い総利得をもたらす結果」に一致する。

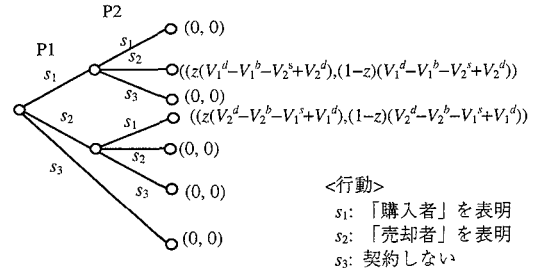


図2 算定された契約料のもとでの展開形ゲーム

以上のことは、任意の先手、後手プレイヤーについて成立することから、上記のような契約料の算定方法を予め定めておくと、そのもとでのプレイヤーの自発的な契約行動は、先手、後手の順序に関係なく自ずと効率的な結果をもたらす。

公平性については、 z を0から1のどの値に設定するかという問題と考えられる。現実的には0.5が最もありうる値である。0.5という値は、単に「折半」ということだけでなく、割引因子の等しいプレイヤーが無限回の交渉ゲームを行った結果での配分比率と等価であり¹²⁾、交渉ゲームの結果として導かれる値であるとの意味付けもなされる。いずれにせよ、何らかの公平性の規範が存在し、それを z の値に反映させることができれば、公平性を考慮した契約料の算定がなされる。

以上より、上記の契約プロセスおよび契約料の算定方法のもとでは総利得の最大化が達成される。また、配分比率が先手、後手プレイヤーに関して固定されていることから、双方のプレイヤーにとっての配分利得が最大となる結果が常に保証される。よって、各プレイヤーの契約行動は、各々の総期待割引費用の最小化行動と同等である。この結果より、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のもとでは、任意のプレイヤーは総期待割引費用を最小化する行動を選択する。つまり、次式が成立する。

$$\begin{aligned} V_i(u_1, w_1, u_2, w_2, t^*) &= \min[x_i + D_i(v_i(t^*)) + V_i^b, \\ &\quad -x_j + D_i(v_i(t^*)) + V_i^s, D_i(v_i(t^*)) + V_i^d] \end{aligned} \quad (13)$$

なお、状態と行動の数がそれぞれ有限であるため、各状態において総期待割引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(11)式に関して保証される¹³⁾。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. 渇水リスク軽減効果の分析

上記に示したモデルを解くとともに、その結果を用いて、一年間の貯水量の変動を100回発生させて数値シミュレーションを行い、水融通契約の有無および契約の種類別の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を渇水発生回数とする。

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。

各プレイヤーの貯水量の状態を10段階で表す。その際、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、年当たりの利率率で4%に相当する。また、一期間を一ヶ月とし、渇水被害の関数は一庫ダムの流域にある豊中市の平成13年度の給水単価178.97円/㎡を参考に、200円/㎡×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。購入者が満期に水不足に直面した場合に、売却者はその不足量を購入者に融通することを原則とする。しかしながら、売却者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場合もあろう。その場合、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、「売却者の限界水準を下回らない範囲で購入者の不足量を融通する」という売却者の貯水量に条件

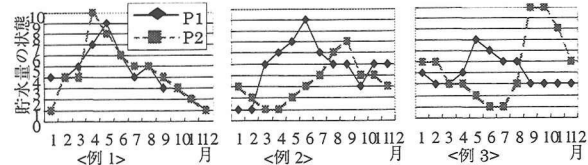


図3 各数値例における貯水量の変動の例

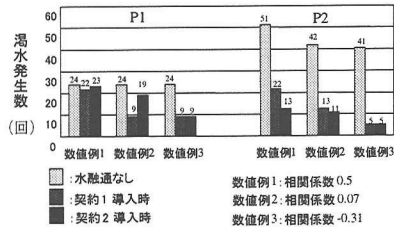


図4 渇水発生回数の比較

表1 総期待割引費用の計算結果例（単位：億円）

	数値例1	数値例2	数値例3
契約なし	95.67, 95.67	98.07, 97.02	99.19, 97.45
契約1	21.91, 21.91	19.35, 18.30	19.21, 17.47
契約2	21.91, 21.91	19.35, 18.30	19.21, 17.47

注：各項目に示す左右の数値は、それぞれプレイヤー1、2の総期待割引費用である。

づけられた契約を想定する。つまり、プレイヤー i が購入者となった場合の融通量 dw_i を次式のように定義する。なお、前章までの議論は任意の dw_i に関して成立することから、下式を仮定してもこれまでの議論は損なわれない。

$$dw_i = \max[\min[v_i - v_i, v_j - v_j], 0] \quad (14)$$

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と呼び、各数値例の下での貯水量の変動の例を図3に示す。渇水発生回数の結果を図4に示す。いずれの数値例においても双方のプレイヤーの渇水発生回数が減少している。その効果は、プレイヤーの貯水量の相関が低いほど大きくなる。これは、相関が低ければ、一方のプレイヤーの貯水量が小さいときに他方のプレイヤーの貯水量が大きいことから、水を融通しあえる状況が多く発生することによる。また、水融通を導入することにより、渇水の発生回数がプレイヤーの間で平滑化されていることも分かる。これは、融通を介して二つのダムの水資源をプレイヤーが共有しているためと思われる。

1月の後半の貯水状態が $(u_1, w_1, u_2, w_2) = (8, 0, 8, 0)$ である場合の総期待割引費用を表1に示すが、契約を導入しなかった場合に比べて費用が1/4程度に減少している。

契約2の場合には、契約の履行時におけるプレイヤーの意思決定の柔軟性が確保されるため、総期待割引費用の減少が期待される。しかし、数値計算の結果は表1に示すように、柔軟性の価値はない。これは、本研究の想定においては、満期には購入者がほとんどの場合に権利を行使するという結果を得ているためである。よって、総期待割引費用の最小化という観点で契約1と2のどちらが優れているかについては、同等であるとの結果となっている。これについて、以下に若干の考察を加える。

(9)式より、任意の t 期において V_i が「 w_i に関して非増加でかつ w_j に関して非減少」(以後、この条件を単に「条件」と呼ぶ)であれば、プレイヤーは常に権利を行使する。そのためには、逐次計算法¹⁴⁾の考え方に基くと、(13)式より、 D_i 、 x_i および $-x_j$ が条件を満たしていれば十分である。貯水量が多ければ被害が減少することから D_i は一般にこの条件を満たすが、 x_i および $-x_j$ については(11)、(12)式にあるように、その成立は必ずしも自明ではない。ここで、例えば(11)式に着目すると、 $x_1 = (1-\alpha)(V_1^d - V_1^b) - \alpha(V_2^d - V_2^b)$ であり、 V_1^d と V_1^b および V_2^d と V_2^b における w_i と w_j に関する限界的な変化の程度がほぼ同一であれば、 $V_1^d - V_1^b$ 、 $V_2^d - V_2^b$ における w_i と w_j に関する限界的な変化が互いに打ち消し合うことで x_1 に関して条件が成立しうる。 x_2 に関しても同様である。任意の t 期および t 期における V_i は D_i をベースとして求められるため、その値の w_i と w_j に関する限界的な変化の程度は D_i のそれに類似する。このことは、 V_i の派生である V_i^d 、 V_i^b 、 V_i^s についても同様である。よって、 D_i の関数形によっては、 x_1 、 x_2 に関して条件が成立せず、本研究で得た結果とは異なった結果が得られる可能性がある。

5. おわりに

本研究ではゲーム理論と動的計画法を援用して水融通の制度を設計した。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総期待割引費用の和を最小化する契約が自発的に結ばれることが明らかとなった。

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、定理に示したように、無限遠までの総期待割引費用を最小化する契約のみが成立する。つまり、費用最小的という意味での効率的な結果のみが常に成立する。数値実験では、契約を導入によって渇水発生回数および総期待割引費用が減少することを確認し、この制度が渇水被害軽減に貢献していることを具体的に示すことができた。

ここで示した水融通の契約は、あくまで総期待割引費用の最小化をもたらし一つの手段にすぎず、代替的な形態によってもその達成は可能である。むしろ、貯水池の容量配分を見直すことがより直接的な対応となる。しかし、それらが迅速に進捗しない状況においては、水融通は次善としての策としての有効性が認められ、その機能は本研究で示されたような制度のもとで十分に発揮することが可能となる。

水の融通が可能となる利水者の数はそう多くないのが現実であるが、二人以上の利水者と融通しあう状況もあろう。また、割引因子などが利水者の間で共有情報となっていない、すなわち不完備情報下の状況が生じうることもある。以上の場合において、どのようなメカニズムで効率的な水融通が達成されるかについて、今後の課題としたい。

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) 河川管理行政実務研究会：河川管理の実務、pp.102-115, 1999.
- 3) 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.

- 4) 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.
- 5) 志村博康：農業水利と国土，東大出版会，1987.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) Aguado, J. and H.. Quintana: Inter-Utilities Power-Exchange Coordination: A Market-Oriented Approach, IEEE Transactions on Power Systems 16, pp.543-519, 2001.
- 10) 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.
- 11) 谷本圭志，森田浩和：水融通システムの開発と渇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.241-248, 2002.
- 12) Osborne, M. and A. Rubinstein: Bargaining and Markets, Academic Press, San Diego, 1990.
- 13) Ross, S.: Applied Probability Models with Optimization Applications, Holden-Day, 1970.
- 14) 三根久，河合一：信頼性・保全性の数理，朝倉書店，1982.

水融通の制度の設計に関する一考察

谷本圭志・森田浩和

水資源開発施設の建設が困難となっている現在において，利水者間での水融通は渇水被害の軽減のための一つの現実的な方法である．しかし，これまでにはほとんど融通が実施されておらず，その原因の一つとして，水を融通する側には何のメリットもないことがあげられる．本研究では，渇水の発生に先立って利水者が水融通に関する契約を交わす制度を設計した．その制度のもとでは，利水者による自発的な契約によって自身の期待費用が最小となり，かつ関与する利水者の費用の合計が最小となる効率的な契約が締結されることが示された．また，数値実験を行うことで渇水の発生回数がどれだけ減少するかについて示すことができた．

Designing Water Transfer System

By Keishi TANIMOTO and Hirokazu MORITA

Water transfer has not been commonly used to reduce drought risk because it is difficult to resolve the conflict among the water users. This study focuses that this conflict can be resolved by introducing the incentive mechanism to transfer water. Specifically, we design the contract over the water transfer by use of game theory and dynamic programming. Under this contract, we show that water users contract so as to minimize the total expected discount cost from now to infinite horizon. Numerical examples show that the number of the drought can be decreased when water users obey the optimal contract policy.