

水融通権の契約制度の設計と渇水リスク軽減効果の分析*

Designing Water Transfer System and Drought Risk Reduction

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の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、利水者間で水融通の権利に関する契約(以後、「水融通契約」と言う)を取り交わす制度をゲーム理論と動的計画法を用いて設計し、渇水軽減効果を数値実験により確認する。

2. 既往の研究と想定する水融通契約

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。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。

このように、水融通には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、複数の主体による意思決定の相互作用を踏まえたフレームで検討する必要がある。高木⁴⁾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費用最小的に水利調整がなされる契約の設計を目的としている。

(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。河川水の水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

*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，TEL0857-31-5310，FAX 0857-31-0882)

***正会員 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，TEL0857-31-5333，FAX 0857-31-0882)

るため、その量は不確定である。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契約を交わすものとする。

水融通の権利を獲得する契約を結ぶ場合、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。権利の購入者が満期時に水不足に直面した場合、権利を行使するか否かを判断する。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、権利の売却者は、契約時に契約料を受け取るが、権利の購入者が権利を行使した場合には水の融通が求められる。つまり、売却者は自身が所有する水量の一部を放出する。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、そのときの貯水量、時点を考慮して決定していく。

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 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 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 $\max[v_i - v_i(t), 0]$ 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 $D_i(v_i(t))$ として記す。

(2) 契約のゲーム的記述

プレイヤーは期の後半（これを t^+ で表す）に契約を結ぶことができるとする。この契約には、権利の購入者と売却者、契約料、貯水量の限界水準、満期時に融通される水の価格および満期が示されている。

上記の事項を所与とし、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（権利の購入者、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、プレイヤーは契約料を交渉する。この契約プロセスは、二段階のゲームとして整理でき、第一段階のゲームは（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集合とした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⁵⁾である。交渉ゲームでは、契約料を一方のプレイヤーが提案し、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。

互いのプレイヤーが異なる役割を表明し、その役割の下での交渉によって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。

契約の満期に、権利を購入したプレイヤーは権利を行使するか否かの決定を行う。本研究では、問題の煩雑化を防ぐため、満期を一期とし、権利の行使は満期時のみとする。行使の決定を行う期を任意の期 t の前半と呼び、 t^- で表す。

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) 契約の締結時におけるプレイヤーの行動

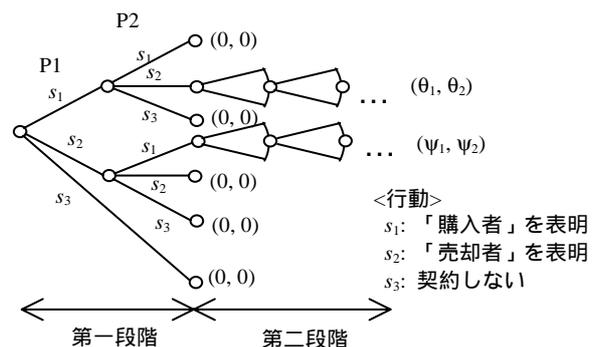


図1 契約プロセスのゲーム的記述

任意の t 期の前半において、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) 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。 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、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 $V_i(u_1(t), w_1(t), u_2(t), w_2(t), t)$ 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^+ 期において、プレイヤーは以下の動的計画問題を解くことになる。

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

ここに、 V_i^b はプレイヤー i が権利の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、融通権の行使によりプレイヤー i が受け取る水量を dw_i で表すと、プレイヤー 1 に関して次式が成り立つ。

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

$$V_1^s = V_1(u_1, w_1 - dw_1, u_2, w_2 + dw_1, t^+ + 1) \quad (3)$$

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

オペレーター E は期待値をとることを示している。(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 $x_i + D_i(v_i(t)) + \beta_i E[V_i^b]$ と等しくなる。

第一段階のゲームにおいて、権利の購入者となったプレイヤーを 1 、売却者となったプレイヤーを 2 と表す。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。契約料の交渉は図 1 の第二段階の部分ゲームに該当する。プレイヤー 1 が交渉の結果獲得する利得 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、 $V_1^d - (V_1^b + x_1)$ として定義される。同様に、プレイヤー 2 の利得 θ_2 は $V_2^d - (-x_1 + V_2^s)$ で与えられる。契約料を巡る交渉はこれらの和で与えられる $(V_1^d - V_1^b - x_1) + (x_1 - V_2^s + V_2^d) = V_1^d - V_1^b - V_2^s + V_2^d$ 、すなわち、総利得の配分を巡る交渉と等価である。無限回繰り返される交渉によって、先に契約料を提案するプレイヤー（ここでは i とする）とそうでないプレイヤー（ j とする）が獲得する総利得の配分割合 q_i, r_j は次式で表される。

$$q_i = \frac{1 - \beta_2}{1 - \beta_1 \beta_2}, q_2 = \frac{\beta_2 (1 - \beta_1)}{1 - \beta_1 \beta_2} \quad (5)$$

契約料 x_1 はこの利得を実現するように、つまり $V_1^d - V_1^b - x_1$ が(5)式に示す総利得の配分割合と等しくなるよう契約料が決定される。利得 θ_i が得られる結果の下での契約料についても同様である。

(4) 権利の行使時におけるプレイヤーの行動

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権利を行使する。ただし、 p は水の単価でありプレイヤー 1 が権利の購入者である場合について示している。

$$V_1^b(u_1, w_1, u_2, w_2, t^+) = \min[V_1(u_1, w_1 + dw_1, u_2, w_2 - dw_1, t^+) + pdw_1, V_1(u_1, w_1, u_2, w_2, t^+)] \quad (6)$$

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

いは第二項が該当することを表している。ただし、プレイヤー2 が権利の売却者であることを仮定している。

$$V_2^s(u_1, w_1, u_2, w_2, t^-) = \{V_2(u_1, w_1+dw_1, u_2, w_2-dw_2, t^+) - pdw_1, V_2(u_1, w_1, u_2, w_2, t^+)\} \quad (7)$$

(5) 契約ゲームの均衡解

契約料の交渉においてどのプレイヤーが先に提案する権利をもっているかによって均衡解は異なる。

権利の購入者に提案する権利がある場合

仮に先手プレイヤーを 1 とすると、プレイヤー1 は $q_1\theta_1$ と $r_1\phi_1$ を比較し、そのうち大きな利得を得る結果に至る戦略をとる。 $q_1\theta_1 \geq r_1\phi_1$ は必ずしも $\theta_1+\theta_2 \geq \phi_1+\phi_2$ と対応しないことから、双方のプレイヤーの総利得が最大となる結果が均衡解となる保証はない。

先手プレイヤーに提案する権利がある場合

$\max[\theta_1+\theta_2, \phi_1+\phi_2] \geq 0$ とすると、仮に先手プレイヤーを 1 とすると、プレイヤー1 は $\theta_1+\theta_2$ と $\phi_1+\phi_2$ の大きな結果に至る戦略をとる。より厳密には、 $q_1(\theta_1+\theta_2)$ と $q_1(\phi_1+\phi_2)$ の両者を比較して戦略を選択する。これは、(5) 式に示すように、プレイヤー1 の利得が総利得 $\theta_1+\theta_2$ をもたらす結果と総利得 $\phi_1+\phi_2$ をもたらす結果の下で、総利得に同一の係数を乗じているためである。 $\max[\theta_1+\theta_2, \phi_1+\phi_2] < 0$ の場合は、契約の成立しない結果が均衡解であり、その下での総利得が全ての結果の中で最大となっている。以上のことは、先手プレイヤーが誰であろうと無関係に成立する。

以上より、のように提案権を与えることにより、契約ゲームは双方の期待費用の和が最小となる契約が常に成立し、契約を導入しない場合に比べて双方のプレイヤーの期待費用が改善される。この結果より以下の定理を得る。その証明は講演時に譲る。

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。

$$V_i(u_1, w_1, u_2, w_2, t^+) = \min[x_i + D_i(v_i(t^+)) + V_i^s, D_i(v_i(t^+)) + V_i^d]$$

$$-x_j + D_j(v_j(t^+)) + V_j^s, D_j(v_j(t^+)) + V_j^d] \quad (9)$$

4. 湯水リスク軽減効果の分析

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湯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湯水が発生したとし、限界水準を下回った期の数を湯水発生回数とする。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。

計算結果の詳細は講演時に譲るがいずれの数値例においても湯水発生回数が減少しており、契約の導入による湯水リスク軽減効果が認められた。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図より分かった。

5. おわりに

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したい。

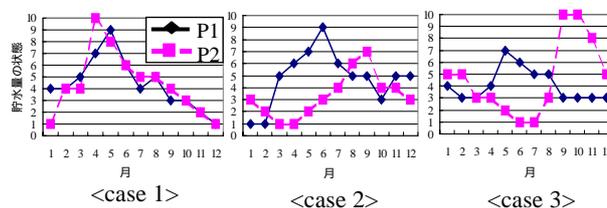


図3 各数値例における貯水量の変動の例

参考文献

- 1) 例えば朝日新聞朝刊, 2002 年 3 月 4 日。
- 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) 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湯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.
- 5) Rubinstein, A.: Perfect Equilibrium in a Bargaining Model, Econometrica 50, pp.97-109, 1982.