

主体相互の水融通契約の導入による渇水被害軽減に関する研究

(株)日立情報制御システム	正会員	○大熊慶之
鳥取大学工学部	正会員	谷本圭志
鳥取大学工学部	正会員	喜多秀行

1. はじめに

渇水時における渇水被害の軽減策としては、河川等からの取水制限、他用途からの緊急的な水融通などがある。とりわけ他用途からの水融通は積極的に実施すべきとの社会的要請が大きいものの、当事者間の合意や水利権等の制約によりこれまで必ずしも円滑に行われてきたとは言えない。

ここでもし、渇水による被害が発生する以前に用途間で水融通の契約が行えたとすれば、未然に渇水による被害を回避できるのではないかと考えられる。そこで、本研究では渇水による被害を回避する手段として主体相互による水融通の契約を考え、契約の導入によって渇水被害がどれだけ軽減されるかについての考察を行う。

2. 本研究が想定する水融通契約

本研究では、既に供用されている多目的ダムに事業参加している2つの事業主体を対象とした相互的な水融通契約を想定する。各主体は独自の貯水量を確保しており、貯水量は河川からの流入と水供給などの放流に起因して変動する。事前に渇水による水不足が生じた場合、水の水融通を受ける権利（以後、「融通権」と呼ぶ）を他主体から購入できる契約を考える。こうした契約は予め定められた時刻 $t(t = n\Delta T, n = 1, 2, \dots)$ において契約機会が設けられるものとする。融通権は融通権を購入した次の契約時において行使可能であるとする。

3. 主体相互による水融通契約

3.1. 貯水量の変動

貯水量の変動は、河川からの流入と放流に起因している。流入量に関しては不確実な降雨量に依存しており、かつ季節的な周期をもっている。放流量においては需要量は流入量に比べて変動幅は小さく確定的であり、かつ単位時間に一定量であると考えられる。以下に貯水量の変動を確率過程を用いて定式化する。

$I(t)$ を0から時刻 t までの総流入量、時刻0から t までの平均的な総流入量を $\phi(t)$ で表す。また、 $b_i\Delta t$ を時間 Δt における放流量とする。このとき主体 $i(i \in \{1, 2\})$ の貯水

量の変動を $V_i(t + \Delta t) - V_i(t)$ は次式のように表される。

$$V_i(t + \Delta t) - V_i(t) = \frac{1}{2} \{ (\phi(t) - I(t)) \cdot (1 - e^{-a}) \Delta t + \sigma \epsilon \} - b_i \Delta t \quad (1)$$

ここで、 ϵ は、平均0、分散 $\sigma^2(1 - e^{-2a})/2a$ に従う誤差項を表している。 a は回帰する速度を表すパラメータであり、この値が大きいほど確率過程は $\phi(t)$ と近くなる。また流入量の増分はそれぞれの主体に等分されるとする。

3.2. 融通される水量の決定

本研究では、ある一定の貯水量を下回った場合においてのみ水融通の対象となると考える。この一定の貯水量を下限貯水量と呼び V_i と定義する。融通権を購入し次の契約時において下限貯水量を下回った場合権利を行使することによって不足した水量の水融通を受けることは基本的には可能である。しかしながら融通権を売却した主体が購入者の不足した水量を融通できるほど十分に貯水量を確保しているとは限らない。そこで契約に基づいて融通される水量は以下のように決定されることにする。

- 購入者である主体が一期後にもつ貯水量が下限貯水量 V_i を上回っているならば、主体間での水融通は行わない。
- 売却者である主体が一期後に下限貯水量 V_i を維持できなかった場合、主体間の水融通は行わない。
- 売却者である主体は下限貯水量 V_i を維持できる範囲で水を融通する。すなわち購入者である主体に水融通をした後に売却者が保有する水量は、彼の下限貯水量を下回ることではない。

3.3. 契約料の導出

主体 i が融通権を購入する場合の契約料 Y_i は、1) 権利行使時点で回避される被害額と2) 権利行使以降において回避される被害額の和として与えられる。以降、主体はリスク中立的であると仮定すると、1) は、次式のように定式化される。ただし、渇水の被害額は、水の不足量を水の価格 p で乗じたものとして与えるとする。

$$Y_i = p \cdot e^{-r\Delta T}$$

$$\cdot E[\max[\min[V_i - V_i(t + \Delta T), V_j(t + \Delta T) - V_j], 0]] \quad (2)$$

時刻 $t + \Delta T$ での貯水量の分布関数を $\Phi(V_i(\Delta T))$ で表す。また $\Delta t \rightarrow 0$ として、上式の極限をとると上式は次式となる。ただし、 r は安全利子率である。この式より $Y_i > 0$ であれば $Y_j = 0$ となることが示される。

$$Y_i = p \cdot e^{-r\Delta T} \left\{ \int_{c_1} (V_i - V_i(\Delta T)) d\Phi(V_i(\Delta T)) + \int_{c_2} (V_j(\Delta T) - V_j) d\Phi(V_i(\Delta T)) \right\} \quad (3)$$

2) については次式で定式化できる。

$$p \cdot \int_{\Delta T}^{2\Delta T} e^{-r\Delta T} \{ E[\max[0, V_i - V_i(t)]] \text{not} \times \text{not} \} - E[\max[0, V_i^* - V_i(t)]] \theta_1 \times \theta_2 \} dt \quad (4)$$

被害額の期待値は契約の成否に依存することから、上式では主体の融通権の売買に関する意思決定（以後、戦略と呼ぶ）の組み合わせを条件とした条件付き期待被害として与えられることを意味している。各主体の戦略としては、融通権を売る (sell)、買う (buy)、契約しない (not) の3通りがある。 $\theta_i (\in \{\text{buy}, \text{sell}, \text{not}\})$ は主体 i によって選択された戦略を表している。

4. 融通権の売買に関する主体の意思決定モデル

契約の成立可能性をゲーム理論を用いて分析する。ゲームに参加する主体 $i (\in 1, 2)$ をそれぞれプレイヤー 1, 2 とする。各プレイヤーは融通権に関して（購入する、売却する、契約しない）の3つ戦略をもっており、それぞれを「buy」「sell」「not」と表す。それぞれのプレイヤーがとる戦略の組み合わせによるゲームの結果は表2に表される。

表1 ゲームの結果

		プレイヤー2		
		sell	buy	not
プレイヤー1	sell	D_i^n	$-Y_i - (D_i^n - D_i^b) + \underline{D}_i^s$	D_i^n
	buy	D_i^s	$Y_i + (D_i^n - D_i^b) + \underline{D}_i^s$	D_i^s
	not	D_i^n	D_i^n	D_i^n

上段: プレイヤー1の利得
下段: プレイヤー2の利得

ただし、 $\underline{D}_i^k$ はプレイヤー i の役割が k (s : 売却者, b : 購入者, n : 契約が不成立) である場合の権利行使以降における期待被害額を表している。ここで先に示した $Y_i > 0, Y_j = 0$ が成立し、 $-Y_i - (D_i^n - D_i^b) + \underline{D}_i^s < D_i^s$ が成立する場合、ゲームの結果としてプレイヤー i を融通権購入者、プレイヤー j を売却者として決定される。

5. シミュレーション分析

以上により得られた知見を用いて水融通契約を導入することによって洪水被害の軽減が達成しうるか仮想的な数値例を用いて検討を行った。契約の機会を1年に12回の契約機会を与えた。各主体の初期貯水量をそれぞれ70(千 m^3)、下限貯水量を25(千 m^3)及び貯水可能な貯水量を100(千 m^3)、水の価格を0.02(千円/千 m^3)とした。また降雨量の確率過程に関するパラメータとして a を0.2、 σ を2.0とした。これら初期値のもと各主体の放流量パラメータ b_1, b_2 を表2のようにおいた。それぞれのシミュレーションは50年間（契約機会600回）を対象に行った。結果50年における水融通契約の導入による契約成立回数と洪水被害の軽減額を表3に示す。

表2 パラメータの設定

数値例1				数値例2			
月	b1	b2		月	b1	b2	
1	0.1	5		1	0.1	0.1	
2	0.2	3		2	0.2	0.2	
3	1	3		3	1	0.5	
4	3	1		4	3	3	
5	5	0.5		5	3	3.5	
6	5	0.1		6	5.5	5	
7	4	0.1		7	5.5	6	
8	4	0.5		8	3	3	
9	1	0.5		9	3	2.8	
10	1	3		10	1	1	
11	0.2	4		11	0.5	0.5	
12	0.1	5		12	0.5	0.5	

表3 水融通契約の成立回数と被害軽減額(千円)

月	主体1buy	主体2buy	主体1sell	主体2sell	月	主体1buy	主体2buy	主体1sell	主体2sell
1	0	41	41	0	1	0	0	0	0
2	0	50	50	0	2	0	0	0	0
3	0	50	50	0	3	0	0	0	0
4	0	14	14	0	4	0	0	0	0
5	0	0	0	0	5	0	0	0	0
6	6	0	0	6	6	0	0	0	0
7	30	0	0	30	7	0	0	0	0
8	50	0	0	50	8	38	0	0	38
9	43	0	0	43	9	27	0	0	27
10	17	0	0	17	10	12	0	0	12
11	0	0	0	0	11	0	0	0	0
12	0	0	0	0	12	0	0	0	0
Total	140	155	155	140	Total	77	0	0	77
主体1: 契約を行わず、場合の被害額					主体1: 契約を行わず、場合の被害額				
主体1: 契約導入による被害軽減額					主体1: 契約導入による被害軽減額				
主体2: 契約を行わず、場合の被害額					主体2: 契約を行わず、場合の被害額				
主体2: 契約導入による被害軽減額					主体2: 契約導入による被害軽減額				

以上の結果より数値例1のように双方の主体の貯水量の変動が高い負の相関性を持っている場合、双方とも洪水被害の軽減が確認され、水融通契約の導入効果は高くなることがわかった。また数値例2のように正の相関が高く、一方の主体が一方的に売却者の役割を担う場合においてはその主体の洪水被害が増加してしまうことが確認された。これは、売却者は一期間先の洪水被害のみを考慮すると長期的には洪水被害の増大をもたらすことがあるためと考えられる。従って、一期間先の洪水被害のみを考慮するという本研究における前提の下では、必ずしも洪水被害が達成しえないといえる。

6. おわりに

本研究では、水融通契約における洪水被害の軽減方策について検討し、水融通契約導入の有効性の範囲を明らかにできた。今後の課題については、複数期にまたがる融通権の価格付けを行いたいと考えている。