【土木計画学研究・論文集 Vol.21 no.2 2004年9月】

ダムの撤去事業における費用配分に関する基礎的考察*

Cost Allocation in Dam Removal Project

谷本圭志**・岩倉幸司***

By Keishi TANIMOTO and Koji IWAKURA

1．はじめに

建設されたダムはやがて撤去の時期を迎える．現にアメリカでは，河川環境，ダムの安全性，堆砂，漁業，維持管理の経済性などを理由に，小規模なダムを中心に多くの撤去事業がなされており，近年では比較的規模の大きなダムの撤去も見られる[1)]．

我が国におけるダムにおいても撤去の例が現れている．熊本県の荒瀬ダムでは流域の水質悪化を理由に2010年を目途にダムの撤去が決定された[2)]．また，国土交通省[3)]やマスメディアの報道[4)]にあるように，一部の水系では堆砂が進んでおり，ダムの撤去も含めて今後どのようにダムを維持管理するのかについての課題が近い将来に大きくクローズアップされる可能性がある．

しかし，ダムの撤去には多くの問題が伴う．その一つとして，ダムに堆積している汚濁物質が撤去によって放出されることにより，河川や海岸の環境を損なう可能性がある．ダムの撤去ではないが，それが実際に生じうることを示した事実として，富山県の出し平ダムでの排砂実験がある．このダムでは，ダムの堆積物を排砂ゲートから放出する実験を行っているが，堆積物の放出によって河川や海岸の環境が汚染され，訴訟問題に発展している．このように，ダムの撤去には河川および海岸環境（以後，一括して単に「環境」と呼ぶ）を損なうリスクが伴う．よって，ダムの管理者は，ダム撤去後における環境の状態に関するリスクを負って撤去を行うことになる．

流域には電力や農業用などの複数のダムが存在し，個々の管理者がそれらを所有している場合が少なからずある．これらの管理者が各々でダムの撤去を検討している場面では，管理者は，リスクを回避するために先発での撤去事業の実施を避け，他の管理者の撤去がもたらす環境への影響を学習することができる後発での事業を選好しうる．すべての管理者が先発での事業を選好しない場合，どの管理者も事業をせず，撤去が遅々として進まないことによって，効率的に撤去が行われない場合が生じうる．そこで本研究では，ダムの撤去における費用を管理者の間で配分することが効率的な事業を実施する上での一つの有効な方策であることに着目し，そのための費用配分手法をゲーム理論と動的計画法を用いて検討する．

2．ダムの撤去の現状と費用配分手法

(1) ダムの撤去の現状

アメリカにおける撤去施設数は，Doyle *et al.*[5)]によると1999年までに421施設，American Rivers[6)]によると，それ以降から2002年までに116施設である．これらのうち，15m以上を越える堤高の施設は全体の約1割程度である．中には堤高が33mのElwha and Glines Canyonダム，29mのNolichucky Damなど，比較的規模の大きな施設の撤去も見られる[7)]．

この背景のもとで，ダムの撤去を技術的にサポートするためのガイドラインや技術レポートの整備もなされている[7)8)9)]．これらでは，河川環境への影響についての解説があり，前章で述べた汚濁性の堆積物に関する留意も触れられている．

国土交通省[3)]によると，これまでに堤高の低い取水堰を中心に326施設が撤去されており，それらの多くは堤高15m未満の施設である．なお，我が国においては堤高が15m未満の施設をダムと呼ばず堰と呼んでいる．我が国ではダムの撤去が即座に緊急的な課題とはならないであろう．しかし，高度経済

*キーワーズ：環境計画，水資源計画，ダム事業

**正会員，工博，鳥取大学大学院社会開発システム工学専攻
（鳥取市湖山町南4丁目101番地，TEL0857-31-5310，FAX0857-31-0882）

***学生会員，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，FAX0857-31-0882）

成長期前後にダムが一気に建設されたこともあり，ダムの物理的な劣化が同時に進行し，それらが同時に撤去の時期を迎えてから検討を始めたのでは，その数の多さにより後手の対応をとらざるを得なくなりうることは認識すべきであろう．

(2) 従来の費用配分手法の適用可能性

新規にダムを建設する場合と比べて，ダムを撤去する場合にはそれによってどのような影響がもたらされるのかについての科学的知見が乏しい．このため，生態的，地質的，社会・経済的などの観点から影響の類似性が見出しうるであろう同一の流域内におけるダムの管理者が，撤去の影響に関する情報を互いに学習しあうことが必然的に求められると考えられる．その際，１．に述べたように，各管理者の行動の調整がなされなければ非効率な状況に至る可能性がある．このため，新規にダムを建設する場面を想定して開発されてきた費用配分手法である分離費用身替り妥当支出法[10)]をそのまま用いても，効率的に調整がなされる保証はない．そこで本研究では，流域全体の観点から流域を管理する主体が費用配分方法の適用を各ダム管理者に義務付けることを想定し，効率的な結果に自発的に至るための動機を各管理者に与えるための費用配分方法の検討を行う．

３．ダムの撤去事業における費用配分手法のゲーム論的検討

(1) 想定する状況

流域にある二つのダムに注目する．これらのダムは，二人の管理者がそれぞれ管理しているものとする．これらの管理者が個別にダムを撤去するか待つかをそれぞれ検討しているとする．以後，管理者をプレイヤーと呼び，任意のプレイヤーを $h(\in\{1,2\})$ で表す．

二つのダムから構成されるシステムの状態を各々のダムの劣化状態と環境の状態で定義する．劣化状態は撤去後にはダム自体が消滅するため意味をもたなくなり，環境の状態は，一方の管理者がダムを撤去した後に，その後の管理者の行動に影響を及ぼすという観点で意味をもつ．任意の劣化状態を離散値 i で表し，数値が大きいほど劣化していることを

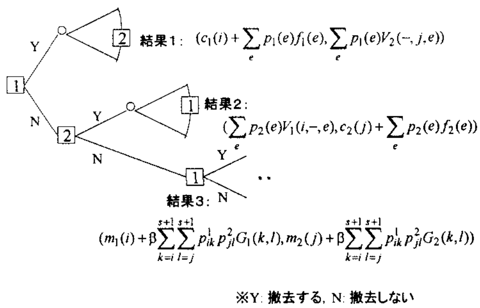

図１　撤去事業の展開ゲーム表現

表す．環境の状態を離散値 e で表し，数値が大きいほど河川環境が良好であることを表している．プレイヤーh が管理するダムの劣化状態が i にある場合にそのダムの撤去に要する費用(「撤去費用」と呼ぶ)を $c_h(i)$, ダムを撤去しなかった場合に要する維持管理費用（維持管理費用からダムの運転により得られる利益を差し引いた純(net)の維持管理費用）を $m_h(i)$ で表す．

プレイヤーh が管理するダムを撤去しなかった場合には，確率 $p^h_{ij}(i\le j\le s+1)$に従ってダムの劣化状態が推移する．ここで，劣化状態 $s+1$ はダムが機能していない状態を表している．劣化状態は自然に改善されることはないものとし，双方のダムの劣化確率は互いに独立であるとする．双方のプレイヤーがダムを撤去していない状況下でプレイヤーh がダムを撤去した場合に環境の状態 e が生起する確率を $p_h(e)$で表す．一方のプレイヤーによるダムの撤去が環境の状態 e をもたらしたという条件のもとで，プレイヤーh のダムの撤去によって環境の状態 e'が生起する確率を $q_h(e'|e)$で表す．環境の状態が e であるもとでプレイヤーh が被る損失を $f_h(e)$で表す．一期当たりの割引因子をβとする．

一期間には一つのダムしか撤去できないとすると，以上の状況は図１に示す展開形ゲームで表すことができる．図中の「結果1」とは，「プレイヤー1 が当該期においてダムを撤去し，その後プレイヤー2 は撤去による環境への影響を学習して，その後に撤去するか否かを決定する」結果を，「結果 2」とは「プレイヤー2 がダムを撤去し，その後にプレイヤー1 は撤去による環境への影響を学習して撤去するか否

かを決定する」結果を，「結果 3」とは「当該期にどちらのプレイヤーも撤去しない」結果である．各結果のもとでのプレイヤーの費用を図中のベクトルで表示している．

□印は決定ノードであり，□の中の数値はどのプレイヤーの決定ノードかを表している．例えば，結果 1 においては，プレイヤー1 のダムの撤去による環境の影響を学習した後に，プレイヤー2 がダムの撤去をするか待機するかを意思決定することを表している．○印は機会ノードであり，そのノードから分岐している円の扇の弧は環境の状態の集合を表しており，その集合に属する一つの要素が確率的に生起する．

双方のダムが未撤去であり，それらのダムの劣化状態が(i, j)である場合に，その状態を初期状態としてプレイヤーh が無限遠までに得る総期待割引費用を $G_h(i,j)$で表す．$V_1(i,-,e)$はプレイヤー2 がダムを撤去することによって環境の状態が e となり，プレイヤー1 が管理するダムの劣化状態が i である場合に，当該期から無限遠までにプレイヤー1 が得る総期待割引費用であり，次式で表される．

$$V_1(i,-,e) = \min[c_1(i) + \sum_{e'} q_1(e'|e) f_1(e'), m_1(i) + \beta \sum_{j=i}^{s+1} p_{ij}^1 V_1(j,-,e)] \tag{1}$$

$V_2(-,j,e)$も同様に定式化できる．以後，表記の簡単のために，次式の表記を用いる．

$$\alpha_1 = c_1(i) + \sum_e p_1(e) f_1(e) \tag{2}$$

$$\beta_1 = \sum_e p_1(e) V_2(-,j,e) \tag{3}$$

$$\alpha_2 = \sum_e p_2(e) V_1(i,-,e) \tag{4}$$

$$\beta_2 = c_2(j) + \sum_e p_2(e) f_2(e) \tag{5}$$

$$\alpha_3 = m_1(i) + \beta \sum_{k=i}^{s+1} \sum_{l=j}^{s+1} p_{ik}^1 p_{jl}^2 G_1(k,l) \tag{6}$$

$$\beta_3 = m_2(j) + \beta \sum_{k=i}^{s+1} \sum_{l=j}^{s+1} p_{ik}^1 p_{jl}^2 G_2(k,l) \tag{7}$$

(2) 最適解

プレイヤーの費用の和が最も小さな結果を「最適解」と呼ぶ．最適解は最も効率的な結果である．図 1 に示すゲームにおける最適解は以下のように得られる．

i) $\alpha_3+\beta_3 \le \alpha_1+\beta_1$, $\alpha_3+\beta_3 \le \alpha_2+\beta_2$：結果 3 が最適解
ii) $\alpha_2+\beta_2 \le \alpha_1+\beta_1$, $\alpha_2+\beta_2 \le \alpha_3+\beta_3$ ：結果 2 が最適解
iii) otherwise：結果 1 が最適解

(3) ナッシュ均衡解

図 1 に示すゲームにおけるナッシュ均衡解は以下のように得られる．

i) $\alpha_1 \ge \alpha_3$, $\beta_2 \ge \beta_3$：結果 3 がナッシュ均衡解
ii) $\alpha_1 \ge \alpha_2$, $\beta_2 \le \beta_3$：結果 2 がナッシュ均衡解
iii) otherwise：結果 1 がナッシュ均衡解

(4) 費用配分手法

費用配分の代表的な手法として，シャープレイ値(Shapley value)[11)]がある．この方法は，協力ゲームにおける特性関数形をベースにした共同事業の費用配分手法である．

以下ではまず，本研究で想定されている場面を一旦離れて，シャープレイ値に関する一般的な説明を行う．協力ゲームにおいては，共同事業をそこに参加するすべてのプレイヤーの提携（これを「全提携」と呼ぶ）と考える．シャープレイ値では，共同事業（＝全提携）が形成する過程を想定する．例えば，二人ゲームの場合，プレイヤー1,2 の順に参加して全提携を形成する過程と，プレイヤー2,1 の順に参加する過程の二通りがあり，n 人ゲームにおいては全部で $n!$通りの過程が考えられる．その上で，すべての過程が等確率で生起するとして，当該プレイヤーの参加の際に発生する限界費用を各々の過程の生起確率で平均化して当該プレイヤーの配分値を求める．プレイヤーの集合を N で表し，任意の部分提携を $T(\subset N)$で表す．プレイヤーh の配分値を x_h で，任意の提携 T の費用を費用関数 C を用いて $C(T)$で表す．すると，ゲーム(N,C)におけるシャープレイ値は次式のように定式化される．ただし，プレイヤーの数を

n, 提携 T に属するプレイヤーの数を t で表す.

$$x_h = \sum_{T \subseteq N, h \in T} \frac{(t-1)!(n-t)!}{n!}\left[C(T) - C(T - \{h\})\right] \quad (8)$$

シャープレイ値には加法性やダミーなどのいくつかの公理が満たされる. その詳細については, 文献[12]を参照されたいが, 本手法はこれらの公理を備えるという意味での公正な配分概念である.

一般化シャープレイ値[13]は, シャープレイ値を拡張した費用配分手法であり, 全提携の形成過程の生起確率を任意に与えることができる.

$$x_h = \sum_{T \subseteq N, h \in T} \pi(T, T - \{h\})[C(T) - C(T - \{h\})] \quad (9)$$

ここに, $\pi(T,T-\{h\})$は, 提携 $T-\{h\}$が形成された後にプレイヤーh が参加する確率である. 一般化シャープレイ値には, シャープレイ値が備える公理が満たされる. プレイヤー1 が後に共同事業に参加する過程の生起確率を $y(0 \leq y \leq 1)$とすると, 二人ゲームにおける一般化シャープレイ値は以下のようになる.

$$x_1=(1-y)C(1)+y(C(12)-C(2))$$
$$x_2=yC(2)+(1-y)(C(12)-C(1)) \quad (10)$$

(5) 費用配分手法の適用とその効果

ダムの管理者は個々に撤去事業を実施することから, 撤去事業はシャープレイ値の説明で言及した「共同事業」という概念と相容れない. しかし, 本研究では同じ流域に属するダム管理者の間で費用を配分する場面を想定するため, 費用を配分する管理者の集合を N としてゲーム(N,C)を定義し, そのゲームへ費用配分手法を適用する. その際, 費用関数を以下のように定義する.

結果 1 が生起した場合には, 配分される費用, すなわち $C(12)$は $\alpha_1+\beta_1$ で, $(C(1), C(2))$は(α_3, β_3)で与える. 結果 2 においても同様に, $(C(12), C(1), C(2))$は$(\alpha_2+\beta_2, \alpha_3, \beta_3)$で与える. 結果 3 のもとでは撤去が行われないことから費用も配分しないこととする, よって, 結果 3 のもとでの費用関数を定義する必要はない. よって, 図 1 に示すゲームに一般化シャープレイ値を適用した場合, 結果 1 における各プレイヤーの配分費用(α_1', β_1')は(10)式より次式のように導出できる.

$$\alpha_1'=(1-y)\alpha_3+y(\alpha_1+\beta_1-\beta_3)=y(\alpha_1+\beta_1-\alpha_3-\beta_3)+\alpha_3 \quad (11)$$
$$\beta_1'=y\beta_3+(1-y)(\alpha_1+\beta_1-\alpha_3)=(1-y)(\alpha_1+\beta_1-\alpha_3-\beta_3)+\beta_3 \quad (12)$$

しかし, 上式は適切な値ではない. これは, 図 1 に示すゲームに費用配分手法を適用すると, 次期以降のゲームにも費用配分手法が適用され, 各プレイヤーが負担する次期以降の費用にも影響が及ぶためである. つまり, 結果 3 のもとでの費用(α_3, β_3)は直接的に配分されないものの, 次期以降の費用 G_h が変わるという意味で費用配分手法の適用に間接的な影響を受ける. 一般化シャープレイ値を適用したもとでの結果 3 での費用を(α_3', β_3')で表すと, (11), (12)式は以下のように修正される.

$$\alpha_1'=y(\alpha_1+\beta_1-\alpha_3'-\beta_3')+\alpha_3' \quad (13)$$
$$\beta_1'=(1-y)(\alpha_1+\beta_1-\alpha_3'-\beta_3')+\beta_3' \quad (14)$$

一般化シャープレイ値を適用したもとでの結果 2 での費用(α_2', β_2')は, 同様の検討によって, (13), (14)式の α_1, β_1 をそれぞれ α_2, β_2 に変更した場合の式として得られる.

ここで(13)式に着目しよう. この式を変形すると, $\alpha_3'-\alpha_1'=y(-\alpha_1-\beta_1+\alpha_3'+\beta_3')$を得る. 左辺は結果 1 が実現した場合の結果 3 に比べたプレイヤー1 の費用の節約額である. (14)式についても同様に, $(1-y)(-\alpha_1-\beta_1+\alpha_3'+\beta_3')$はプレイヤー2 にとっての節約額である. よって, 一般化シャープレイ値は節約額を双方のプレイヤーで按分することを要請し, その節約額は結果 3 に対する結果 1 の相対的な価値である. この価値の構成について考察する.

任意のプレイヤーが相手のプレイヤーの撤去によって環境への影響を学習する価値は, 学習できる場合の費用とできない場合の費用の差で与えられる. すなわち, プレイヤー1 にとっての学習の価値は $\alpha_1-\alpha_2$ で, プレイヤー2 にとってのそれは $\beta_2-\beta_1$ である. また, 今撤去を実施せずに次期以降に遅らせた場合の待機の価値は, プレイヤー1 のそれは $\alpha_1-\alpha_3'$ で, プレイヤー2 にとってのそれは $\beta_2-\beta_3'$である.

ここで，結果 1 のもとでの節約額に関して次式が成立する．

$$-\alpha_1-\beta_1+\alpha_3'+\beta_3' = -(\alpha_1-\alpha_3')+(\beta_2-\beta_1)-(\beta_2-\beta_3') \quad (15)$$

上式は，節約額がプレイヤー1 および 2 の待機の価値をあきらめ，かつプレイヤー2 が学習の価値を得た場合の合計の価値である．よって，一般化シャープレイ値が実質的に配分しているのは，この合計の価値である．以上の解釈は，結果 2 においても同様に成立する．

【命題 1】
ナッシュ均衡解が最適解に一致するための十分条件は，費用配分手法を適用後の結果 3 のもとでのプレイヤーh の費用を $C(h)$であるとし，結果 1 もしくは 2 が生じた場合でのプレイヤーの費用の和を $C(12)$として一般化シャープレイ値を適用することである．

【証明】
本章の(2)，(3)に示した最適解とナッシュ均衡解の条件に基づくと，費用配分手法が適用されているもとでは，次式が成立している場合に，それらが常に一致する．

$$\alpha_1'-\alpha_2' = z_1(\alpha_1'+\beta_1'-\alpha_2'-\beta_2')\ (z_1\geq 0) \quad (16)$$
$$\beta_3'-\beta_2' = z_2(\alpha_3'+\beta_3'-\alpha_2'-\beta_2')\ (z_2\geq 0) \quad (17)$$
$$\alpha_1'-\alpha_3' = z_3(\alpha_1'+\beta_1'-\alpha_3'-\beta_3')\ (z_3\geq 0) \quad (18)$$

上式を用いると，次式が成立している場合に上式が恒等的に成立することが導かれる．

$$z_1 = 1-z_2 = z_3 = z \quad (0\leq z\leq 1) \quad (19)$$

(19)式を(16)～(18)式に代入すると次式を得る．

$$\alpha_1' = z(\alpha_1'+\beta_1'-\alpha_3'-\beta_3')+\alpha_3' \quad (20)$$
$$\beta_1' = (1-z)(\alpha_1'+\beta_1'-\alpha_3'-\beta_3')+\beta_3' \quad (21)$$
$$\alpha_2' = z(\alpha_2'+\beta_2'-\alpha_3'-\beta_3')+\alpha_3' \quad (22)$$
$$\beta_2' = (1-z)(\alpha_2'+\beta_2'-\alpha_3'-\beta_3')+\beta_3' \quad (23)$$

ここに，結果 1,2 のもとでのプレイヤーの費用の和は配分手法の適用の有無にかかわらず一定であるため，$\alpha_1'+\beta_1'=\alpha_1+\beta_1$, $\alpha_2'+\beta_2'=\alpha_2+\beta_2$ が成立する．よって，上式は次式と等価である．

$$\alpha_1' = z(\alpha_1+\beta_1-\alpha_3'-\beta_3')+\alpha_3' \quad (24)$$
$$\beta_1' = (1-z)(\alpha_1+\beta_1-\alpha_3'-\beta_3')+\beta_3' \quad (25)$$
$$\alpha_2' = z(\alpha_2+\beta_2-\alpha_3'-\beta_3')+\alpha_3' \quad (26)$$
$$\beta_2' = (1-z)(\alpha_2+\beta_2-\alpha_3'-\beta_3')+\beta_3' \quad (27)$$

これらの式は，費用配分手法を適用した場合の結果 3 におけるプレイヤーh の費用を $C(h)$として，発生した結果における費用の和を $C(12)$とした場合の一般化シャープレイ値による配分値である．

【証明終】

命題 1 より，一般化シャープレイ値を適用することによりナッシュ均衡解が常に最適解となり，非効率な結果の発生を回避しうることが明らかになった．

(6) 簡便な費用配分の運用への接近

①配分費用における循環構造に関する改善

(24)～(27)式には(α_3', β_3')が含まれており，配分費用には「費用配分値は配分手法の適用によって影響を受ける費用(α_3', β_3')によって決定される」という複雑な循環構造を有している．そこで以下では，その構造を踏まえた計算をせずとも管理者が容易に配分値を導出することができ，かつ，ナッシュ均衡解が最適解と一致するための費用配分手法の運用について検討を行う．

表記の便宜上，α_{31} を $m_1(i)$，β_{31} を $m_2(j)$と表し，$\alpha_{32}=\alpha_3-\alpha_{31}$，$\beta_{32}=\beta_3-\beta_{31}$ と表す．α_{31} と β_{31} は費用配分手法の適用に関して不変であるが，α_{32} と β_{32} は $G_h(i,j)$を含んでおり，それらの値は費用配分手法の適用の有無によって変化する．よって，費用配分手法を適用した場合の費用に関して次式が成立する．

$$\alpha_3'=\alpha_{31}+\alpha_{32}',\ \beta_3'=\beta_{31}+\beta_{32}' \quad (28)$$

【命題 2】
次式に示す重み z^*が予め与えられている場合，結果 3 のもとでの費用の一部(α_{31}, β_{31})を($C(1)$, $C(2)$)と

し，結果1もしくは2のもとでのプレイヤーの費用の和を $C(12)$ として一般化シャープレイ値を適用すると，ナッシュ均衡解は最適解に一致する．

$$z^* = \frac{\alpha'_{32}}{\alpha'_{32} + \beta'_{32}} \tag{29}$$

【証明】

重み z^* のもとで，一般化シャープレイ値を適用した場合の結果1における各プレイヤーの配分費用は(24), (25)式より次式のようになる．

$$\alpha_1{}' = z^*(\alpha_1+\beta_1-\alpha_{31}-\alpha_{32}{}'-\beta_{31}-\beta_{32}{}')+\alpha_{31}+\alpha_{32}{}' \tag{30}$$

$$\beta_1{}' = (1-z^*)(\alpha_1+\beta_1-\alpha_{31}-\alpha_{32}{}'-\beta_{31}-\beta_{32}{}')+\beta_{31}+\beta_{32}{}' \tag{31}$$

(30)式と(32)式，(31)式と(33)式が等しい場合，α_{32}' および β_{32}' を用いない(32), (33)式によって費用を配分することと(30), (31)式を用いて配分することは等価である．

$$\alpha_1{}' = z^*(\alpha_1+\beta_1-\alpha_{31}-\beta_{31})+\alpha_{31} \tag{32}$$

$$\beta_1{}' = (1-z^*)(\alpha_1+\beta_1-\alpha_{31}-\beta_{31})+\beta_{31} \tag{33}$$

(30)式の右辺と(32)式のそれが等しく，かつ(31)式の右辺と(33)式のそれが等しいという連立方程式を解くと，$z^*=\alpha_{32}{}'/(\alpha_{32}{}'+\beta_{32}{}')$ が導かれる．結果2に関しても同様の検討により，(29)式に示す z^* が導出される．ここで，(30), (31)式に示す費用配分のもとでは，ナッシュ均衡解が最適解と常に一致することから，命題が導かれた．【証明終】

よって，$\alpha_{32}{}', \beta_{32}{}'>0$ もしくは $\alpha_{32}{}', \beta_{32}{}'<0$ が成立している場合には，0と1の間に z^* が唯一存在する．これらの条件がいずれも成立しない場合は，z^* は0もしくは1の端点となる．その具体的な場面とは，一方のダムが比較的新しく当面（正の）利益が期待でき，もう一方のダムが劣化して維持管理費がかさんでいる状況である．その場合には劣化しているダムがもう一方のダムの撤去を待つまでもなく，自らが撤去費用を負担して撤去すべきであることは自明であり，重みが端点解として導出される．

$\alpha_{32}{}'$ と $\beta_{32}{}'$ は数値計算によって求めることができるため，対象とするダムについてそれらを技術者や研究者が予め計算し，その重みを用いた配分を管理者に義務付けると，その重みを所与とした管理者の撤去に関する各期の判断の結果は，効率的な撤去事業に必ず導かれる．

②期待値の配分に関する改善

命題2より，重み z^* のもとで配分に要する費用項目は$(\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2, \alpha_{31}, \beta_{31})$である．これらの費用項目は，具体的には(2)～(7)式に示すように，「現在におけるダムの撤去および維持管理費用」と「ダムの撤去後に管理者が被る損失」によって構成されている．このうち，前者の費用は現在の劣化状態のもとで確定した値として得られるが，後者の損失は撤去に伴う環境の状態のリスクを伴う確率的な値である．つまり，一般化シャープレイ値で導出される配分値は期待値である．ここに，配分を行う現実の場面を考えると，期待値を管理者の間で配分することの経験も合意も存在しない．しかし，以下に示す命題3が成立することから，費用や損失が確定したそれぞれの時点において命題2に示した重みに基づいて一般化シャープレイ値を適用する運用を行えば，結果として(32), (33)式に得られる配分と等価な配分を得ることができる．

【命題3】

費用や利益が確定したそれぞれの時点において，命題2に示した重みに基づいて一般化シャープレイ値を適用する運用を行えば，(32), (33)式に得られる配分と等価な配分を得る．

【証明】

一般化シャープレイ値には加法性が成立する．ここに，加法性とは以下に示す性質である．

$$x(N, C^1)+x(N, C^2)=x(N, C^1+C^2) \tag{34}$$

ただし，$x(N, C)$はゲーム(N, C)の配分ベクトルである．よって上式は，全体の費用 C^1+C^2 を C^1 と C^2 に任意に分割した場合に，分割したゲームでのそれぞれの配分の和は全体の費用の配分に等しいことを示している．また，一般化シャープレイ値の定義より，

もとの費用関数を正数倍したゲームにおいては，同じ正数倍した配分値が導出される．すなわち，任意の$\lambda>0$に関して次式が成立する．

$$x(N, \lambda C)=\lambda x(N, C) \tag{35}$$

ここで，C'を「現在におけるダムの撤去および維持管理費用」から成る費用関数，すなわち，例えば結果1においてはC': $(C(12), C(1), C(2))=(c_1(i), m_1(i), m_2(j))$であり，$C''(e)$を「ダムの撤去後に環境の状態が$e$のもとで管理者が被る損失」から成る費用関数，すなわち，$C''(e)$: $(C(12), C(1), C(2))=(f_1(e)+V_2(i,-,e), 0, 0)$とすると，現在において配分すべき全体の費用$C$は次式で表される．

$$C=C'+\Sigma_e p(e)C''(e) \tag{36}$$

(36)式はCが加法和で与えられることを示している．よって，(34)〜(36)式より次式を得る．

$$\begin{aligned} x(N, C) &= x(N, C')+x(N, \Sigma_e p(e)C''(e)) \\ &= x(N, C')+\Sigma_e p(e)x(N, C''(e)) = \end{aligned} \tag{37}$$

この式は，現在において確定している費用に基づいてゲーム(N, C')に関してまず配分を行い，ダム撤去後において環境の状態が特定された時点でゲーム$(N, C''(e))$に関する配分を行うように運用すれば，実質的には現在において$x(N, C)$の配分ベクトルを得ていることと等しいことを表している．【証明終】

4．おわりに

本研究では，流域に二人の管理者がそれぞれのダムの撤去を検討している場面を想定し検討した．その結果，一般化シャープレイ値を各結果に適用することによって，ナッシュ均衡解を最適解と一致させることができることが明らかになった．また，その知見を容易に運用できるようにするため，煩雑な計算を要する変数を管理者が計算せずとも効率的な結果に自ずと至る動機を備えた配分の重みが存在することを示すとともに，不確実性を伴う費用や損失はその値が確定した時点で一般化シャープレイ値を用いることで依然として効率的な結果が得られることを示した．

本研究では、二人の管理者からなる場面を想定した．この状況をn人の場面に拡張しようとすると，各結果のもとでの費用関数の定義について工夫を要する．すなわち，本研究では二人ゲームであったため，提携は全提携と単独の提携のいずれかであり，前者は任意の結果のもとでの双方の費用の和，後者は双方が撤去を待機した場合の費用として与えたが，三人以上のゲームにおいて費用配分手法を適用する場合には，部分提携の費用をどのように与えるかの検討を要する．

また，本研究ではダムは単一の目的をもつ管理者に所有されている場面を想定したが，実際の多くのダムは多目的である．本研究の知見を多目的ダムに拡張するためには，同一のダムに参加している主体の間と，本研究で想定しているダムの間での配分の双方が同時ないし逐次的に決定されるモデルとする必要がある．

本研究では，プレイヤーが他のプレイヤーの行動から学習の機会を得る場面に着目しており，ダムの撤去以外の状況にも適用しうる．例えば，需要が不確実な場合の交通網整備や宅地開発などは本研究と同様の構造を有しているであろう．将来の予測が困難であるもとで，プレイヤーが分権的に社会基盤・施設を整備していくことが今後の趨勢であるとの認識に基づくと，本研究をより一般的に拡張するとともに，各対象の固有の特性を組み込んだ分析道具へと発展させることを考えていく必要がある．以上，今後の課題としたい．

参考文献

1) 青山己緒 訳：ダム撤去，岩波新書，2004.
2) 熊本日日新聞社ホームページ.
(http://kumanichi.com/feature/arase/)
3) 国土交通省：ダム事業に関するプログラム評価書，2003.1.
4) 朝日新聞，平成14年11月18日.
5) Doyle. M., Stanely. E., Luebke. M, and Harbor. M.: Dam Removal: Physical, Biological, and Societal Considerations, American Society of Civil Engineers Joint Conference on Water Resources Engineering

and Water Resources Planning and Management, 2000.
6) American Rivers ホームページ.
(http://www.americanrivers.org/).
7) American Society of Civil Engineers: Guidelines for Retirement of Dams and Hydroelectric Facilities, 1997.
8) American Rivers: Exploring Dam Removal –A Decision-Making Guide, 2002.
9) American Rivers: The Ecology of Dam Removal, 2002.
10) 岡田憲夫，谷本圭志：多目的ダム事業における慣用的費用割り振り法の改善のためのゲーム論的考察，土木学会論文集，No.524/IV-29, pp.105-119, 1995.
11) Shapley, L. S.: Cores of Convex Games, International Journal of Game Theory 1, pp.11-26, 1971.
12) 例えば，鈴木光男：新ゲーム理論，到草書房，1994.
13) Dinar, A. and Dan, Y.: Sharing Regional Cooperative Gains From Reusing Effluent for Irrigation, Water Resources Research 22, No.3, pp.339-344, 1986

ダムの撤去事業における費用配分に関する基礎的考察

谷本圭志・岩倉幸司

ダムの撤去は今後避けて通れない課題である．ダムを撤去した場合にはダムに堆積した汚濁物質が放出されることがあり，河川環境を損なうリスクをダムの管理者が負う．よって管理者は，他の管理者の撤去による環境への影響を観測・学習し，それを踏まえて撤去すべきかを決定することを選好しうるため，遅々として撤去が効率的に進まない事態が生じる．そこで本研究では，撤去事業を効率的に実施するための管理者の間での費用配分手法をゲーム理論を用いて検討するとともに，得られた理論的な知見を踏まえつつ簡便で容易な運用を行いうるための方法について検討する．

Cost Allocation in Dam Removal Project

By Keishi TANIMOTO and Koji IWAKURA

In dam removal project, dam manager may prefer to wait the others' removal and learn the impact of the environment by removal. If all managers in the basin have same preference, the dams cannot be removed efficiently. In this study, we model the dam removal project by use of game theory and dynamic programming. Then, we show that cost allocation method proposed in cooperative game theory can contribute to efficient dam removal. In addition, we propose the cost allocation scheme which enables the manager to apply theoretical result without complicated mathematical computation.
