

# 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。

我が国におけるダムにおいても、ダムの撤去が維持管理上での一つの選択肢となりつつある。その一つの傍証として、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<sup>1)</sup>。また、国土交通省<sup>2)</sup> やマスメディアの報道<sup>3)</sup> にあるように、一部の水系では堆砂が進んでおり、撤去を含めたダムの維持管理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、ダムの撤去に起因する河川および海岸環境（以後、一括して単に「環境」と呼ぶ）の状態に関する不確実性が存在する。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（以後、「リスク」と呼ぶ）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事業の実施を避け、他の管理者による撤去がもたらした環境への影響を学習して、後発で事業の実施を決定することを選好しうる。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有効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.*<sup>4)</sup>によると1999年までに421施設、American Rivers<sup>5)</sup>によると、それ以降から2002年までに116施設である。ただし、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おり、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<sup>6)</sup>。

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<sup>6)7)8)</sup>。これらでは、河川環境への影響についての詳しい解説があり、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<sup>2)</sup>によると、我が国においては、堤高の低い取水堰を中心に、これまで326施設が撤去さ

\*キーワード：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)

れており、それらの多くは堤高 15m 未満の施設である。我が国においてはダム撤去が当面緊急とはならないであろう。しかし、高度経済成長期前後にダムの建設が一気に進んだこともあり、撤去の緊急性が高まってからでは、その数の多さにより後手の対応をとらざるを得なくなることは認識すべきであろう。

## (2) 従来の費用配分手法

従来、ダム事業における費用配分は、新規に多目的ダムを建設する際の共同事業を対象としてきた。現在、我が国ではアメリカの TVA 事業において開発された SCRB 法(Separable Cost Remaining Benefit method)を基本とした分離費用身替り妥当支出法が供用されており、その妥当性については岡田ら<sup>9)</sup>などが検討している。

しかし、ダムの建設事業と撤去事業においては以下の差異があり、この手法を適用する上での前提条件が撤去事業において該当しない。一つは、建設事業においては、全ての関与主体が建設事業にコミットすることを前提とするが、撤去事業では今撤去することにコミットするか延期するかは主体の判断による。二つ目は、建設事業において費用の配分を決定する際に、当該の建設事業に参加しなかった場合に、その主体が独自で代替の事業をした場合に要する費用、すなわち「身替り費用」を算出するが、撤去事業においてはその費用が不確実である。つまり、今、撤去をしないことは次期以降に撤去を延期することを意味するが、次期までにダムの劣化が確率的に進行する。よって、次期までに撤去を延期した場合に要する身替り費用は不確実であり、その値はどのような劣化状態に至るかによって異なる。

このように、建設事業とは異なった状況に撤去事業があることから、前章に述べたような撤去事業において生じる非効率性を従来の費用配分手法によって解決できる保証はない。

## 3. ダムの撤去事業における費用配分手法のゲーム論的アプローチ

### (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  $h(h \in \{1, 2\})$  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無効となり、環境の状態は一方の管理者がダムを撤去した後に有効となる。任意の劣化状態を離散値  $i$  で表し、数値が高くなるにつれて劣化が進行していることを表す。劣化状態  $s+1$  は故障状態である。環境の状態を離散値  $e$  で表し、数値が大きくなるほど良好な河川環境であるとする。劣化状態  $i$  においてプレイヤー  $h$  がダムを撤去した場合に要する費用（「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とダムの運転により得られる利益の差（維持管理費用から利益を差し引いた純(net)の費用を混乱を招かぬ範囲で以後「維持管理費用」と呼ぶ）を  $m_h(i)$  で表す。

ダムを撤去しなかった場合には、確率  $p_{ij}(i \leq j \leq s+1)$  に従って次期におけるダムの劣化状態が推移する。双方のダムでの劣化確率は独立であるとする。双方のプレイヤーがダムを撤去していない状況下で任意の管理者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  $p(e)$  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、もう一方のプレイヤーのダムの撤去によって環境の状態  $e'$  が生起する確率を  $q(e'|e)$  で表す。ダムを撤去することでプレイヤー  $h$  が得る利益を  $f_h(e)$  で表す。一期当たりの割引因子を  $\beta$  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「当該期にプレイヤー 1 は撤去せずにプレイヤー 2 が撤去し、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。各結果でのプレイヤーの費用をベクトルで表示している。

$$\beta_3 = m_2(j) + \beta \sum_{k=i}^{s+1} \sum_{l=j}^{s+1} p_{ik} p_{jl} G_2(k, l) \quad (6)$$

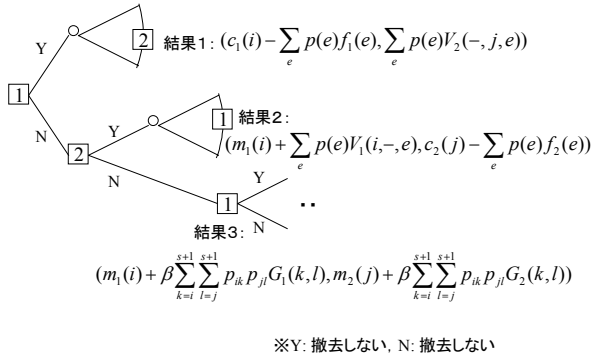


図-1 撤去事業の展開ゲーム表現

□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のダムへの撤去による環境の影響を学習した後に、プレイヤー2がダムへ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、その状態の一つ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 $h$ が無遠慮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、当該期から無遠慮までにプレイヤー1が得る総期待割引費用である。 $V_2(-j, e)$ も同様に解釈できる。以後、表記の簡単のために、次式の表記を用いる。

$$\alpha_1 = c_1(i) - \sum_e p(e) f_1(e) \quad (1)$$

$$\beta_1 = \sum_e p(e) V_2(-, j, e) \quad (2)$$

$$\alpha_2 = m_1(i) + \sum_e p(e) V_1(i, -, e) \quad (3)$$

$$\beta_2 = c_2(j) - \sum_e p(e) f_2(e) \quad (4)$$

$$\alpha_3 = m_1(i) + \beta \sum_{k=i}^{s+1} \sum_{l=j}^{s+1} p_{ik} p_{jl} G_1(k, l) \quad (5)$$

## (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。このゲームにおける最適解は以下のように得られる。

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

## (3) ナッシュ均衡解

この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)  $\alpha_1 \geq \alpha_3, \beta_2 \geq \beta_3$  : 結果3がナッシュ均衡解
- ii)  $\alpha_1 \geq \alpha_2, \beta_2 \leq \beta_3$  : 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

上の結果より、ナッシュ均衡解は最適解と必ずしも一致しない。そこで、それらを一致させるための費用配分手法を検討する。費用配分の代表的な手法として、一般化シャープレイ値(Generalized Shapley value)<sup>10)</sup>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配分手法である。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定式化される。

$$\begin{aligned} x_1 &= \pi C(1) + (1-\pi)(C(12) - C(2)) \quad (0 \leq \pi \leq 1) \\ x_2 &= (1-\pi)C(2) + \pi(C(12) - C(1)) \end{aligned} \quad (7)$$

## (5) 費用配分手法の適用とその効果

ダムの撤去はそのダムの管理者が他の管理者と提携を組むことなく実施するものであり、撤去事業においては特性関数形ゲームにおける「提携」という概念がそもそもない。しかし、各結果はある提携によって実現されたものと解釈することで、費用配分手法を本問題に適用しうる。以後、費用配分手法を適用した場合の結果1,2,3のもとでの費用ベクトルをそれぞれ $(\alpha_1', \beta_1'), (\alpha_2', \beta_2'), (\alpha_3', \beta_3')$ で表す。

単独のプレイヤーから成る提携(「単独提携」と呼ぶ)の費用 $(C(1), C(2))$ を、結果3における費用 $(\alpha_3',$

$\beta_3$ )であるとする。よって、結果 3 においては、単独提携の費用が各プレイヤーの費用となり、一般化  $s_y$  プレイ値は適用しない。この結果のもとで費用配分手法を適用した場合の費用( $\alpha_3'$ ,  $\beta_3'$ )が割り当てられているのは、次期以降において費用配分手法の適用がなされるためである。つまり、次期以降に費用配分手法が適用されることから、結果 3 のもとでの費用は( $\alpha_3$ ,  $\beta_3$ )ではなく( $\alpha_3'$ ,  $\beta_3'$ )となる。

結果 1 および 2 のもとでは、双方のプレイヤーの費用の和を  $C(12)$ とみなす。すると、結果 1 が生じた場合の費用関数は  $C(12)=\alpha_1+\beta_1$  で与えられる。よって、結果 1 が実現した場合の各プレイヤーの配分費用を次式のように得る。ただし、 $0 \leq y \leq 1$  である。

$$\alpha_1' = y(\alpha_1 + \beta_1 - \alpha_3' - \beta_3') + \alpha_3' \quad (8)$$

$$\beta_1' = (1-y)(\alpha_1 + \beta_1 - \alpha_3' - \beta_3') + \beta_3' \quad (9)$$

同様に、結果 2 のもとでの各プレイヤーの配分費用は次式で与えられる。

$$\alpha_2' = y(\alpha_2 + \beta_2 - \alpha_3' - \beta_3') + \alpha_3' \quad (10)$$

$$\beta_2' = (1-y)(\alpha_2 + \beta_2 - \alpha_3' - \beta_3') + \beta_3' \quad (11)$$

一般化シャーププレイ値を撤去事業に適用した場合、以下の命題を得る。

#### 【命題 1】

一般化シャーププレイ値を適用すると、ナッシュ均衡解は常に最適解に一致する。

#### 【命題 2】

ある重み  $y^*$ のもとでは、プレイヤーは  $G_h(i, j)$ の値を認識しなくてもナッシュ均衡解は最適解に常に一致する。

証明は紙面の都合上省略するが、命題 1 は、撤去事業の非効率性は一般化シャーププレイ値を適用することで解決しうることを示している。命題 2 においては、ある重みの適用を前提として一般化シャーププレイ値の適用を義務化すると、プレイヤーはゲームの値  $G_h(i, j)$ を知らずとも自発的に効率的な結果が生じることを示している。

## 4. おわりに

本研究では、二人の管理者からなる場面を想定した。このモデルを  $n$  人の場面に拡張しようとする、各結果のもとでの提携の費用の定義を要する。本研究では二人ゲームを対象としたため、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が必要となる。以上、今後の課題としたい。

## 参考文献

- 1) 熊本日日新聞社ホームページ.  
(<http://kumanichi.com/feature/arase/>)
- 2) 国土交通省：ダム事業に関するプログラム評価書，2003.1.
- 3) 朝日新聞，平成 14 年 11 月 18 日.
- 4) 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.
- 5) American Rivers ホームページ.  
(<http://www.americanrivers.org/>).
- 6) American Society of Civil Engineers: Guidelines for Retirement of Dams and Hydroelectric Facilities, 1997.
- 7) American Rivers: Exploring Dam Removal – A Decision-Making Guide, 2002.
- 8) American Rivers: The Ecology of Dam Removal, 2002.
- 9) 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.
- 10) Dinar, A. and Dan, Y. : Sharing Regional Cooperative Gains From Reusing Effluent for Irrigation, Water Resources Research, Vol.22, No.3, pp.339-344, 1986