

# 水資源配分のコンフリクト分析

—水資源と人間の営みのゲーム論的モデル化—

岡田 憲夫

## 1. まえがき

水資源と人間の営みは人類の誕生に始まり、以来現在にいたるまで気の遠くなるほどの長い歴史を刻んでいる。水資源が人間の営みに不可欠である以上、その利用をめぐるしばしば複数の利用者の間にコンフリクト(利害の衝突)が生じるのは当然であろう。この場合、水資源の利用は利用者への割当て・配分という形をとるのが普通である。これを「水資源配分」あるいは単に「水配分」という。古今、洋の東西を問わず水配分はコンフリクトの歴史であったといっても過言ではないであろう。

今日、水配分はかつてないほどにコンフリクトの調整の色あいを濃くしている。図1は水配分コンフリクトの発生メカニズムとそれを助長する今日の要因との関係を整理したものである[1]。またコンフリクトを内部コンフリクト(個人の中の複数の価値基準の対立)と外部コンフリクト(複数の利用者間の異なる利害の対立)に分けて整理したものが図2である。これより昔よりよく知られている上下流の水争いは空間的レベルで生じる外部コンフリクトであることがわかる。多目的ダムの貯留量(普通は水位に対応づける)を治水、かんがい、工業、生活などの各セクターにどのように配分するかはセクター間の外部コンフリクトであるといえる。あまりコンフリクトとして意識されないが、渇水時の要請と平常時の要請は競合することが多く、いわば時間軸上での異なる時点間のコンフリクトに相当している。

一口に水配分というが水の何について配分するのだろうか。図3は水がその物性的(形而下的)対象について配分されるか、非物性的(価値的)対象について配分されるかにより、種々のタイプの水配分が考えられることを示している。物性的対象の典型的なものが水量配分や水

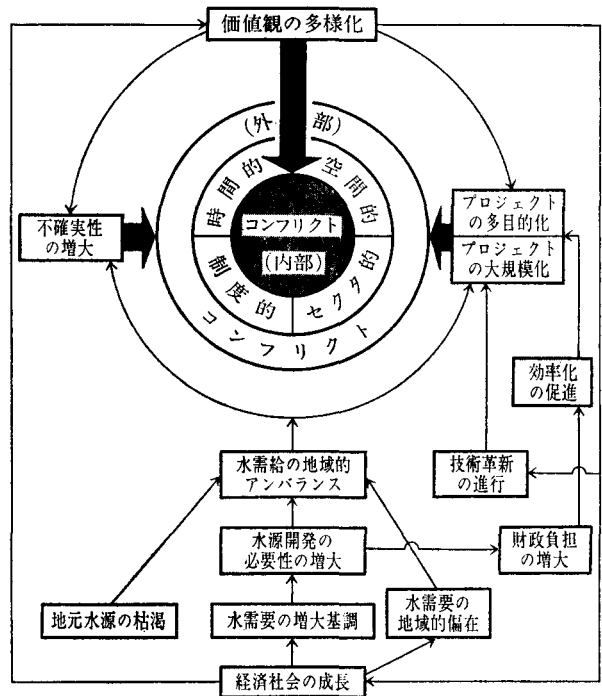


図1 水配分コンフリクトの発生メカニズム

質負荷量配分あるいは費用配分などであるのに対して、満足度・美観性・アメニティなどの配分は非物性的対象についての配分である。現実には後者のタイプの配分は何らかの形で前者のタイプの配分を通じて間接的に行なわれると考えられる。

水配分を規定していく上では「誰によって」「どこから」「どこへ」(あるいは「誰に」)配分されるのかという点も鍵となる。「誰によって」は「供給者」、「どこから」は「供給地」また「どこへ」は「需要地」、「誰へ」は「需要者」のことである。「供給地」および「供給者」を「供給者セクター」、「需要地」および「需要者」を「需要セクター」と統合的に呼ぶ。

現実のままでは需要セクターは必ずしも供給セクターと整合しない。たとえば需要量は必ずしも供給量とバランスしないし、需要地となる地域は往々にして供給地の

おかだ のりお 鳥取大学 工学部

〒680 鳥取市湖山町南4丁目101

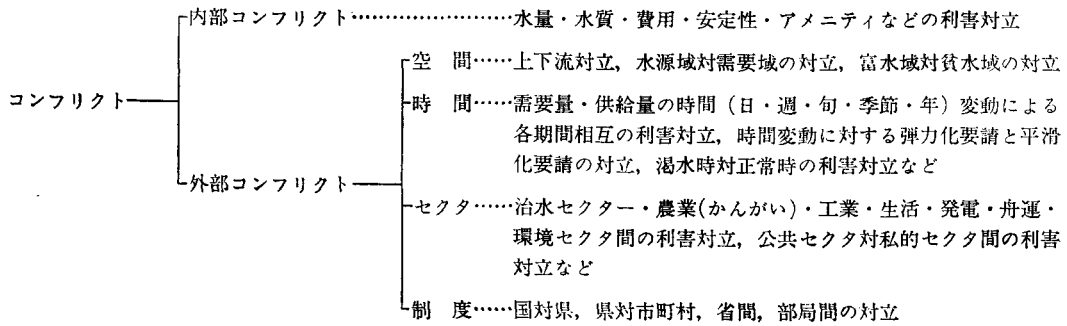


図 2 水配分コンフリクトの分類

地域単位としての流域と合致しないのが普通である。ここに需要セクターと供給セクターの不整合をバランスさせ、両者を整合させる (matching) 行為としての水配分の役割がある。

## 2. ゲーム理論としてみた水配分コンフリクト

水配分コンフリクトの調整問題の中にはゲーム論によるモデル化になじむものが多い。水配分コンフリクトをゲームにみだててモデル化するときこのモデルを水配分ゲームモデルという水配分ゲーム(モデル)という。水配

分ゲームの構造を記述するには展開形、標準形、特性関数形などがあるが、ここでは標準形で表現しておこう。

水配分ゲームは  $[N, A, F, X]$  で一般に表わされる [2]. ここに  $N = \{1, 2, \dots, n\}$  でゲームのプレイヤー ( $n$ 人) の集合である。プレイヤーは供給セクターであったり、需要セクターであったり、両者の混合であったりする。 $A$  は各プレイヤーが持つ戦略の集合の組  $A = \{A_1, \dots, A_n\}$  である。 $F$  は任意の発生事象 ( $a_1 \dots a_n$ ) に関する各プレイヤーの評価関数の集合で、 $F = \{f_1, \dots, f_n\}$  である。ここに  $a_i \in A_i (i=1, \dots, n)$  である。 $X$  はそのときの各プレイヤーの評価関数の値 (利得, ペイオフ) の組  $X = \{x_1,$

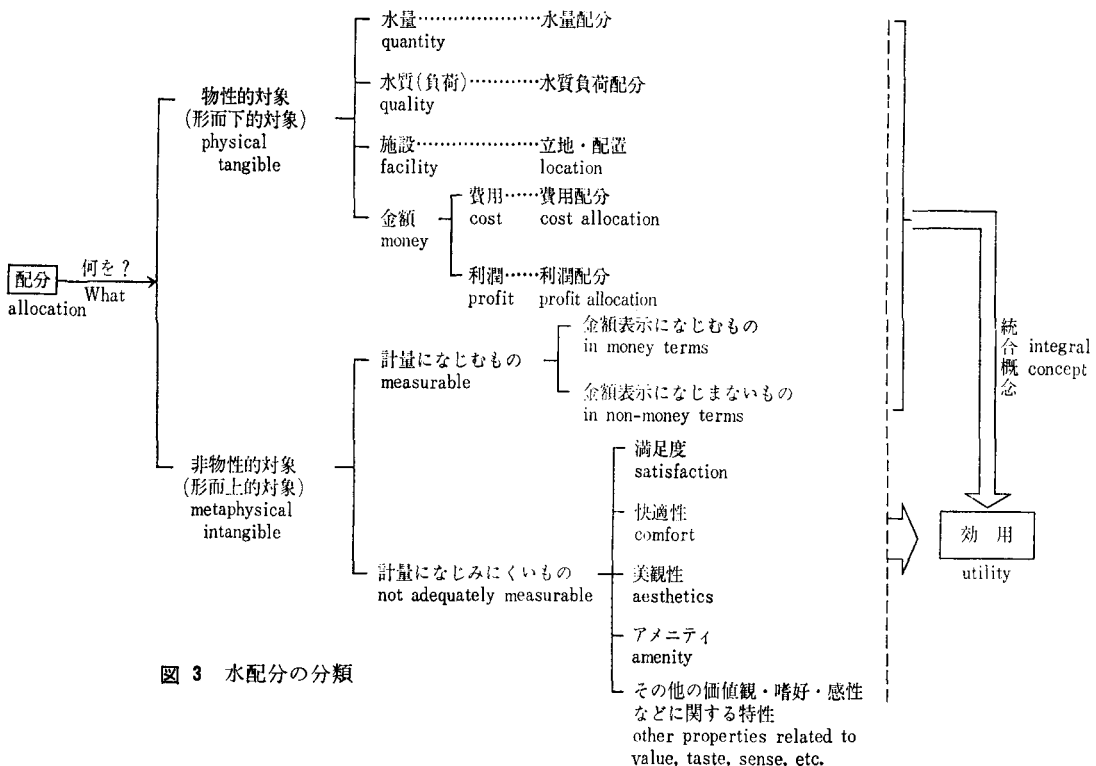


図 3 水配分の分類

...,  $x_n$ ]で,  $x_i = f_i(a_1, \dots, a_n)$

である。

水配分ゲームにおいてはプレイヤー間で提携を形成することを認めてよい場合が多い。後述するように、広域水道事業に伴う費用割振りゲームは各個別市町村での単独行動(事業)の他に、全体または一部の市町村が提携 (coal-

ition) を形成して対抗し、自身にとってより有利な状況を作り出すことを許容している。この種の協力ゲームの構造は特性関数を用いて  $[N, v, X]$  で表わすことができる[2]。ここに  $v$  は特性関数 (characteristic function) で、いわば提携  $S (S \subseteq N)$  のもつ利得獲得能力を表わしている。

### 3. 上下流対立水配分ゲーム

水は重力の法則に従い、上流から下流の向きへ流れる。自明の自然の摂理であるが、これが水ききん(濁水)で異常に少ない流量しか河川に流れず、しかもそれがかんがい期にぶつかると、上流で取水できるか下流でしかできないかは天と地の差の違いをもたらす。江戸時代にあってはこのような場合、夜陰に乗じて上流の堰を破壊して

表 1 上下流対立ゲームの内容

Table with 2 main columns: プレイヤーとオプション (Player and Options) and 実行可能な発生事象 (Possible Occurrences). Rows include options for upper and lower flow players (e.g., water distribution, regional development, support, payment) and a 10-digit decimal representation.

下流に水を導く実力行使をする下流農民ゲリラが出没するのが常であった。血と血で水を争うコンフリクト調整である。

今日でも依然、水利用をめぐる上下流域の対立は水配分コンフリクトの典型的な事例をいくつも提供している。むしろ、過去のように軍事的・暴力的な実力行使に訴えることはありえず、ねばり強い話しあいと交渉にもとづき調整が図られる。国などの広域水管理主体はその場合、調停者を兼ねたプレイヤーとしてゲームに参加することが多い。

Okada, Hipel and Oka [3] や岡田、岡 [4] は琵琶湖総合開発事業に事例を求めて、この種の上下流水配分コンフリクトをモデル化している。それをごく簡単に紹介すると表 1 と表 2 を得る。

表 2 メタゲーム解析による安定性分析

Table for stability analysis showing Nash Equilibria (均衡解) for players (プレイヤー) Upper (上流), National (国), and Lower (下流). It lists stability (安定性), preference vectors (選好性ベクトル), and utility (UI) for different strategies.

注) 厳密には本表はプレイヤー下流からみたハイパーゲームの安定性分析表に相当している。

本ゲームではプレイヤーの集合は  $N = \{1, 2, 3\}$  である。各プレイヤーの戦略の集合は各オプションの採否の組合せで示される。たとえばプレイヤー 1 (「プレイヤー上流」) の戦略は「下流への水配分」を認めるか (「1」) 否か (「0」), 自地域の「地域開発」事業の一環として水資源開発に乗り出すか (「1」) 否か (「0」) によって計 4 通りの組合せの戦略が考えられる。各プレイヤーが特定の戦略を取りあうことによって生じる発生事象は  $2^3 = 128$  通りありうるが、このうち実行不能なものを除くと表 1 のように 32 通りになる。

したがって各発生事象は 0 と 1 の数字の配列によって規定されるが、これを下から上に順次桁が下

がる二進数とみなして十進数に変換すれば表1の最下段の数字の並びを得る。この十進表現の数字が各発生事象を識別する名前に相当すると考えればよい。

このように発生事象の数が多く、しかもその1つ1つの意味内容がかなり多元的なオプションや戦略によって表わされるゲームの場合には、各プレイヤーの評価関数の組  $F = \{f_1, f_2, f_3\}$  によって評価関数値(利得)の組  $X = \{x_1, x_2, x_3\}$  と、各発生事象  $(a_1, a_2, a_3)$  とを計量的に対応づけることは必ずしも容易ではない。このような場合には、 $x_i = f_i(a_1, a_2, a_3)$  を基数型の(効用)関数として表わす代りに、むしろ順序のみの選好関係を表わす序数型の(効用)関数で代表した方が妥当である。

このような前提にたち各発生事象の選好性に着目して各プレイヤーごとに高い順に左から並べたものが表2である。このような考え方でモデル化したゲームをメタゲーム(metagame)という。これはHoward[4]によって開発され、Fraser and Hipel[5]によって応用・改良が進められ、「コンフリクト解析法」としてシステム化されている。実は表2の結果は不完全情報下のゲームを想定しており、「プレイヤー下流」は「プレイヤー国」および「プレイヤー上流」とともに相手の選好性について正確な情報を有していない。このように選好性についての誤認(misperception)がプレイヤー間で生じているようなメタゲームをハイパーゲーム(hypergame)という。

表2中、「E」を冠した発生事象が均衡解である。これは各プレイヤーについて発生事象が「r」(合理的)、「s」(制裁)のいずれかと判定されるような場合に相当している。逆に、いずれかのプレイヤーに「u」(不安定)が付されるときは、その発生事象は均衡解とはなりえない。メタゲームやコンフリクト解析法の詳細についてはFraser and Hipel[5]や岡田、ハイプル、フレーザー、福島[6]を参照されたい。

#### 4. 費用割振りゲーム

水配分計画においては複数のセクターを巻き込んだ多目的ダム建設事業や複数の市町村による広域水道事業などの共同事業が多く実施される。これは、ひっばくした水需給下において大規模水源を確保する有効な整備方式であるが、同時に規模の経済性のメリットを追求しようとするインセンティブも働いている。この場合、共同事業費を各参加者(プレイヤー)はどのように配分するのが公正かつ合理的かという問題が生じる。これがいわゆる費用割振り問題(cost allocation)で、水資源計画の分野

では古くて新しい関心事である。

Suzuki and Nakayama [7], Young, Okada and Hashimoto [8], Okada [9], [10], 鈴木光男 [11], Young et al [12]はこの種の費用割振り問題が特性関数型の協力 $n$ 人ゲームとしてモデル化できることを明らかにしている。それとともに、公正配分概念としてのコア(core)に基づいたいくつかの唯一解(仁,比例最小コア,弱最小コア,相対仁,平均仁差など)やシャプレイ値が提案されている。また従来、単なる財務の手続き論としてその理論的意味づけにあまり顧慮が払われてこなかった現行の多目的ダムの費用割振り方式(分離費用身替り妥当支払い方式, Separable Cost Remaining Benefit Method)が上述の $n$ 人協力ゲームの解概念と密接な関連があることが示されている(Okada [9], Driessen and Tus [10])。これなどはゲーム理論が水資源計画の分野に新鮮な科学的視座を提供した好例である。

#### 5. 環境負荷量配分ゲーム

湖沼や内海などは流れ込んだ汚濁負荷量の逃げ口が少なく、そのまま沈澱堆積して水域の汚染を深刻なものにする。このような事態を改善するために水域に流入する汚濁負荷量自体の総量を規制・削減するとともに、その削減量を排出側に割当てする方式がわが国で導入されてきている。岡田ら[11]やKilgour et al [12]はこの種の環境負荷量配分ゲームが排出側をプレイヤーとした $n$ 人協力ゲームとしてモデル化できることを示すとともに、これが費用割振りゲームときわめて密接な関連があることを明らかにしている。図4は排出側が2か所(2人ゲーム)の場合を対象に、縦軸を総削減負荷量、 $A$ ( $t$ /日)、横軸をプレイヤー1の割当て率 $\rho_1$ ( $0 \leq \rho_1 \leq 1$ )としたときの $(A, \rho_1)$ の点が満たすべき公正規範領域を表わしている。ここではプレイヤー2がプレイヤー1に比べて3倍の汚濁負荷量を自地域から排出すると仮定し、費用割振りの観点からみて点1, 4などは不公正に $(A, \rho_1)$ が設定されることを意味している。

#### 6. むすび

以上、本論では水資源を利用する人間の営みをコンフリクト分析の視点から捉えるとともに、ゲーム理論を用いたモデル化が科学的な分析・評価の上で有効であることを例示した。実際、水資源の分野はゲーム理論の単なる応用場面を提供するだけでなく、理論構築の上で本質的かつ有用なコンフリクト概念を抽象化していく鉱脈

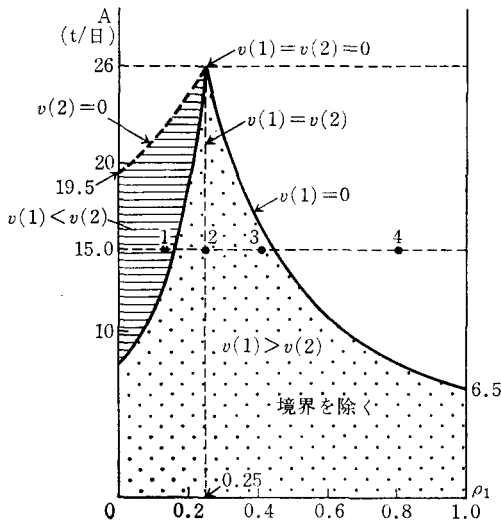


図 4 2人環境負荷量配分ゲームの公正規範領域の一例

としても有望な分野であると考えられる。

#### 参 考 文 献

- [1] 岡田憲夫, 水資源計画・管理と水配分問題——そのシステム論的位置づけ, システムと制御, Vol.27, No.10, (1983), 625-633.
- [2] 鈴木光男, 中村健二郎, 社会システム——ゲーム論的アプローチ, 共立出版, 3-9.
- [3] N. Okada, K.W. Hipel and Y.Oka Hypergame Analysis of the Lake Biwa Conflict, Water Resources Research, Vol.21, No.7(1985), 917-926.
- [4] N. Howard, Metagame Analysis of Business Problems, INFOR 13, (1975), 48-67.
- [5] N. M. Fraser and K. W. Hipel, Conflict Analysis—Models and Resolutions, North Holland, (1984).
- [6] 岡田憲夫, K.W. ハイプル, N.M. フレーザー, 福島雅夫, コンフリクトの数理—メタゲーム理論とその拡張, 現代数学社, (近刊).
- [7] M. Suzuki and M. Nakayama, The Cost Assignment of the Cooperative Water Resource Development: A Game Theoretic Approach, Manage. Sci., 22, (1976), 1081-1086.
- [8] H. P. Young, N.Okada and T. Hashimoto, Cost Allocation in Water Resources Development, Water Resources Research, Vol.18, No.3, (1982), 463-475.
- [9] N. Okada, A Man-Machine Interactive Approach to Cost Allocation: A Gaming Analysis, Proc. of JSCE, No.343, (1984), 275-284.
- [10] N.Okada, Cost Allocation in Multi-Purpose Reservoir Development, Proc. of the IFAC World Congress, Kyoto, Vol. XXIII, (1981), 90-95.
- [11] 鈴木光男, 費用分担ゲームの解, 数理科学, No. 256, (1984), 63-68.
- [12] H. P. Young et al, Cost Allocation: Methods, Principles, Applications, North Holland, (1985).
- [13] T. S. H. Driessen, The Cost Gap Method and Other Cost Allocation Methods For Multipurpose Water Projects, Water Resources Research, Vol.21, No.10, (1985), 1469-1475.
- [14] 岡田憲夫, 錦織敦, ゲーム理論を用いた環境負荷量配分モデルに関する研究, 土木計画学研究・論文集, No. 3, (1986), 65-72.
- [15] D.M.Kilgour, N. Okada, and A. Nishikori, Load Control Regulation of Water Pollution—An Analysis Using Game Theory, Journal of Environmental Management, (forthcoming).

#### 「研究レポート」の原稿募集

ORの実践をわかりやすい事例を中心に紹介してほしいという会員からの要望がある一方で、OR理論の展開あるいは手法の開発など学術的な研究報告も忘れないでという注文も根強くあります。

本誌では「論文・研究レポート」という審査論文欄を設けております。この論文・研究レポートでは、特に、経営の実践に役立つ理論研究、手法あるいはシステムの開発、概念フレームおよび方法論等を扱った研究のご寄稿を歓迎いたします。

投稿要領：学会原稿用紙36枚（25字×12行）以内（図表を含む）、投稿先はOR学会事務局OR誌編集委員会宛。

なお、原稿の他コピーを2部添付してください。  
(OR誌編集委員会)