

新規・既存需要間の調整を伴う水配分コンフリクトのモデル分析

— 水力発電と河川環境を巡って*

Coordination of New and Existing Needs in Water Allocation Conflicts

— Conflicts between Hydropower Generation and Environmental Interests *

榊原 弘之, 中瀬 大祐, 岡田 憲夫

By Hiroyuki Sakakibara**, Daisuke Nakase***, and Norio Okada****

1. はじめに

近年, 水資源開発に対する社会的要請の変化に伴い, ダム等の水資源施設の更新整備の必要性が高まっている. すなわち, 新たに生じた需要に対して新規施設の建設のみでなく, 既存施設の機能見直しや流域の水配分変更等によって対応することが今後ますます重要になると見られる. しかし, 既に資源を利用している主体と, 新規に発生した需要を代表する主体の間でコンフリクトが発生する可能性が高い. 本論文では, このような状況下で水資源再開発の手法, 制度的枠組み, 参加者等がまだ確定していない段階を想定する. また, 上位行政機関による中央集権的な計画決定ではなく, 利害当事者(新規・既存需要)の自発的な協力によって解決策が決定されるような「分権的計画システム」を想定する. 上位行政機関は自発的な協力関係形成を促進するための情報提供等を担うものとする. このとき, 計画調整主体は, 当事者らの選好に関して不完全な情報しか得られない可能性が高い. そのとき社会的に最適状態を実現するために必要な基本的要件を見極める必要がある. 本論文ではこのような観点からゲーム理論の一手法であるコンフリクト解析手法¹⁾²⁾の一環として開発されたロバストネス分析³⁾を拡張し, 適用する. 具体的な例としては, 河川環境改善を目的とした発電用ダム再開発を取り上げる.

2. 発電用ダム再開発計画のゲームモデル

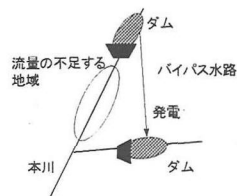


図-1 流域モデル (水力発電と河川環境のコンフリクト)

(1) 発電用ダムと流域環境

図-1に示すような流域モデルを想定して, 水力発電用ダムと流域の河川環境を巡るコンフリクトの分析を行う.

水力発電においては, 位置エネルギーの有効な利用の観点から, 貯水池に貯留した水を直下で本川に放流するのではなく, バイパス水路を介して次々と流下させたり, 別の水系に導水するなどして, 長期間流水を使用することがある. そのとき, ダムの直下流の地域において, 流水が極端に減少し, 生態系や地下水, 景観, 観光などに影響を与える.

新規に発生した水需要である「河川環境」を代表する主体としては, 環境保護団体, 住民組織, 流域協議会といったものが考えられる. ここでは当該地域の地方自治体が, 住民の良好な自然環境に対するニーズを反映させる形で, 電力事業者に対し放流量の増加を求めるとする. 放流量を増加させるためには, 発電規模の縮小や, 新たな施設の建設が必要となる可能性があり, これは電力事業者の減収につながるため, 事業者が自発的に改善策を採る可能性は少ない.

そこで, 電力事業者(既存需要を代表)が地方自治体(新規需要を代表)に対して何らかの負担を求めることが考えられる. このケースでは, 発電用ダムが既に存在し, 長年にわたり操業しているため,

* キーワーズ: 水資源計画, 計画基礎論, 調査論, 計画情報

** 正員, 工修, 山口大学工学部社会建設工学科
(山口県宇部市常盤台 2557, Tel. 0836-22-9721, Fax 0836-35-9479)

*** 学生員, 京都大学大学院
(京都市左京区吉田本町, Tel. 075-753-5070)

**** 正員, 工博, 京都大学防災研究所
(宇治市五ヶ庄, Tel. 0774-38-4035, Fax 0774-38-4044)

電力事業者の既得権を承認し、地方自治体が応分の負担を行う方が現実的であろう。しかし、一方で地方自治体の側も、負担額があまりに大きい場合は、電力事業者との協調策を断念し、独自の解決策に向かうと考えられる。コンフリクトの調整者である計画調整主体は、環境用水の確保手段と同時に費用の配分についても考慮する必要がある。

(2) コンフリクトの基本的構造

上述したような水力発電と河川環境をめぐる電力事業者と地方自治体（地域を代表）との間のコンフリクトをゲーム理論に基づきモデル化する。まずゲームの当事者として、次の2つのプレイヤーを想定する。

地方自治体（プレイヤー1）：環境保全に対する社会的ニーズを代表し、流域の水環境の改善を目標とする主体である。発電用ダムの再開発（共同更新整備）か、独自の新規ダムの建設のいずれかの手段により、河川の流水を回復しようとする。再開発を行う場合は、応分の費用を負担する用意がある。

電力事業者（プレイヤー2）：水力発電の現操業レベルの維持を希望しているが、地方自治体との協力体制の実現のいかんによっては、現状の変更も可能である。

一方、第三の中立的な主体として、地方自治体と電力事業者の利害を調整し、地域全体として最適な計画の実現を目指す計画調整主体を想定する。計画調整主体は、プレイヤー1よりも上位の行政機関と考えられ、都道府県に対する国、市町村に対する都道府県などが考えられる。ただし、計画調整主体は、再開発計画案をプレイヤー1、2に実行させる権限はなく、調停者として、社会全体にとって好ましい計画を両プレイヤーが自発的に採択するような環境整備を行う中立的な主体とする。

プレイヤー2（電力事業者）は既に水資源利用のための設備及び権利（水利権）を有しているのに対し、プレイヤー1（地方自治体）はこれらを今後何らかの手段で取得する必要がある。

プレイヤー1には、本川の減水区間における環境の悪化に対する手段として、次の3種類があるものとする。

プレイヤー2 プレイヤー1（電力事業者） （地方自治体）	水力発電維持 (S)	共同更新整備 (C)
現状受忍 (S)	現状 (SS)	過渡的状态 (SC)
単独で新規ダム建設 (N)	両ダム併存 (NS)	過渡的状态 (NC)
共同更新整備 (C)	過渡的状态 (CS)	共同更新整備 (CC)

図-2 コンフリクトの基本構造

- (1) 新たな改善策をとらず、現状を受忍する。
- (2) 単独で新規施設を建設し、水利権を取得する。
- (3) 電力事業者と交渉し、代替発電施設等の建設を含めた発電用ダムの更新整備に参加し、発電用ダムからの本川への放流量を増加させる。

意思決定の側面から見ると、(1)及び(2)についてはプレイヤー1はプレイヤー2の意向とは無関係に意思決定することが可能である。一方(3)の場合、プレイヤー1はプレイヤー2と交渉の上、共同でプロジェクトを実施することになる。

一方プレイヤー2には今後取り得る手段として次の2種類があるものとする。

- (1) 現在の水力発電の規模を維持する。
- (2) 地方自治体と協力して発電用ダムの更新整備を行う。

プレイヤー2についても、(2)は相手プレイヤーとの同意がなければ実現することはできない。

図-2は、以上のような両プレイヤーの取り得る行動（選択肢）の組み合わせとして起こり得るコンフリクトの基本的構造を示したものである。プレイヤーが選択し得る行動を、「戦略」と呼ぶ。プレイヤー1の(1)、(2)、(3)に対応する戦略をそれぞれS、N、Cにより表すこととする。一方プレイヤー2の(1)(2)に対応するのは、S及びCである。

2人のプレイヤーの戦略の組み合わせとして、図-2の6種類の事象が発生し得る。事象SSは、減水区間の生じている現状がそのまま継続することになる。事象NSは、地方自治体が独自に環境の改善策を採る一方、電力事業者はこれまで通りの発電規模を維持するというものである。この場合、プレイヤー1は独自に流水の増加を達成することにより地域の環境は改善されるが、必要な費用はすべて自身

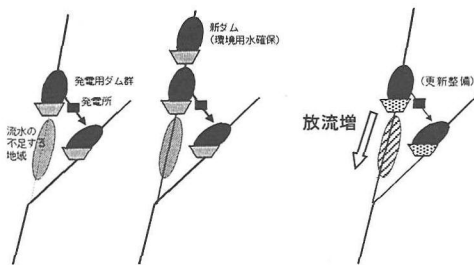


図-3 各事象における事業成立パターン

(左:現状(SS), 中央:非協力・ダム併存(NS),
右:共同化更新整備(CC))

の(地元)負担となる。また、用水を確保するために別の多目的ダムを建設した場合、新たな環境問題の発生や、住民の反発の可能性もある。これに対して、事象 CC においては、両プレイヤーの協力が成立し、発電用ダムの再開発プロジェクトが成立する。再開発プロジェクトにおいては、発電の操業規模が縮小されることもあり得る。図-3に SS (左) NS (中央) CC (右) において実現する事業(成立)パターンを図示する。なお本研究では、共同更新整備、単独での新規施設建設等の意思決定は、一度行われれば少なくとも十数年間は変更困難と考えられることから、ワンショットのゲームとしてモデル化した、

一方 NC, CS, SC は、「互いに適合しない戦略の組み合わせ」であり、実際のプロジェクトに対応しない事象である。これらの事象は、交渉段階における過渡的状态と解釈することができる。従って、どちらの事業者も、これらの事象から他の実現可能な事象への移行を望むと考えられる。

共同更新整備(CC)が常に好ましいとは限らない。しかし社会的厚生がプレイヤー 1,2 の利得の和によって評価されとした場合、両者が得ることができる利得(便益)の和が現状(SS)及び非協力・併存時(NS)よりも大きいならば、CC における社会的厚生は SS 及び NS よりも高くなる。従ってこの場合共同更新整備は社会的にみて実施されるべきと考えられる。

しかし、計画過程をプレイヤー間の非協力ゲームとして見れば、自らの効用が改善されなければ、再開発に同意するインセンティブは存在しない。そこで、社会全体の観点から好ましい(社会的厚生水準が高い)状態への移行が、各個別プレイヤーにとっ

ても好ましいものでなければならない。そこで、費用・便益の配分が問題となる。

共同更新整備プロジェクトにおいては、両者に帰属する便益に基づいて費用負担割合が決定される。複数の主体が参加する水資源開発事業では、費用や便益の配分は常に問題となる。そのうち、新たに多目的ダムを共同で建設する場合には、分離費用身替妥当支出法(SCRB 法⁴⁾)に基づいた共同事業費用の配分制度が存在する。しかし、上述したような、既に開発されている水資源の再配分に関しては、新規・既存両事業者間の負担割合に関して明確に規定した制度は存在しない。

筆者らは、水資源再配分問題のうち特にダムの再開発を伴うものについて、事業費用のみでなく各主体への帰属便益も考慮した純便益の配分法を提案している⁵⁾。従って水資源の再配分がもたらす便益について、事前に全ての情報が得られている場合には、明らかとなった便益の値に基づいて、この種の手法を用いて純便益の配分割合を決定することができる。

この配分方式は計画主体が便益の大きさを正確に知ることができることを前提としている。しかし、本論文で取り上げたような水資源再配分においては、配分の公平性の基準となる値である便益の大きさについて十分な情報が得られない場面を考えている。事実このような想定は水資源の再配分のような新たな事態への未確立の方式の試行的な導入を強いられる場面で、極めて現実性を持つであろう。

本研究ではこのような観点からゲーム理論の一種であるコンフリクト解析手法¹⁾²⁾を用いるとともに、不確実性についてロバストネス分析を拡張・発展させた形で適用する。コンフリクト解析は、序数型の効用、すなわち主体の発生事象に対する選好順序から、各事象の安定性を検討するものである。

計画調整主体は両プレイヤーに対して共同更新整備を提案し、両プレイヤーをより社会的厚生の高い事象 CC に導こうと努めるものとする。その際事象 CC が、どちらの主体もそこから移行しないような安定性を有していることが必要となる。以下では、事象 CC のように計画調整主体が実現させようとしている事象を「実現目標事象」と呼ぶ。

表-1 分析の対象とする事象

プレイヤー	現状受忍 (S)	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
	単独で新規ダム建設 (N)	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0
	C 負担レベル小 (L)	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0
	C 負担レベル中 (M)	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0
	C 負担レベル大 (H)	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
プレイヤー	水力発電維持 (S)	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	C 代替発電手段 (O)	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	C ダムの嵩上げ (U)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	C 新規ダム (D)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
	事象の名前	SS	NS	LS	MS	HS	SO	NO	LO	MO	HO	SU	NU	LU	MU	HU	SD	ND	LD	MD	HD

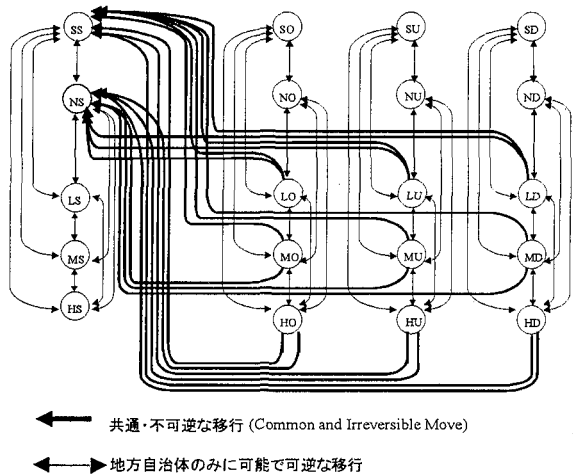
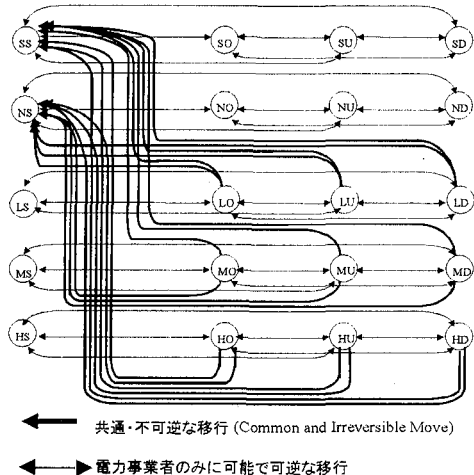


図-4 地方自治体の可能な移行を示すグラフ



図一 5 電力事業者の可能な移行を示すグラフ

(3) コンフリクトのモデル化

(2)において定義した事象 CC は、実際にはさらに複数の（下位）事象に別れ、共同更新整備に関して複数の（下位）計画案が用意されていることも多い。プレイヤー 1 に関しては、負担のレベルを複数設定することができる。一方プレイヤー 2 は複数の代替的な発電手段を想定することができる。そこで、各プレイヤーの戦略 C を細分化した次のような下位戦略を設定する。

プレイヤー1

C: 共同更新整備

{

 L: 負担レベル小

 M: 負担レベル中

 H: 負担レベル大

プレイヤー 2

C: 共同更新整備 { 0: 水力以外の手段により代替
U: 既存ダムの嵩上げ
D: 他の流域のダムに発電を追加

表-1 は、各発生事象を示したものである。また、ある事象におけるプレイヤー i のペイオフを $P_i(\cdot)$

により表す.

(4) グラフモデルによる記述

従来のコンフリクト解析においては、表-1のように主体の採る戦略の組み合わせにより発生事象が表現されていた。そのため、任意の2事象間の移行は原則的にどちらか一方の主体にのみ可能であった。しかし、ここで扱っているような協力関係の形成過程をこのようなモデルにより表現する場合、いくつかの問題が存在する。まず、非協力的な状態(SS または NS)から協力・共同化(CC)への移行には、両者が戦略を変更する必要があるのに対し、協力関係の解消は、一方が離脱するのみで可能であると考えられる。つまり、どちらも CC から SS または NS への移行が可能である(これを共通の移行(Common Move)と呼ぶ)。一方で、SS または NS から CC への一段階での移行は不可能(不可逆な移行(Irreversible Move))である。このような共通の移行(Common Move)及び不可逆な移行(Irreversible Move)

は、従来の双行列による標準型ゲームでは表現することができない。

そこで、Fang, et al.⁶⁾による、「コンフリクトのためのグラフモデル」を用いてモデル化する。図-4、図-5 は、表-1 に示すコンフリクトをグラフ形式で表現したものである。グラフモデルにおいては、事象をノード、各主体の可能な移行をリンクにより表現する。図-4 は地方自治体、図-5 は電力事業者の移行可能な動きを矢印により表現している。CC から SS, NS への移行が、どちらの主体にも可能な不可逆の移行として表されていることがわかる。

3. ロバストネス分析の適用による共同更新整備プロジェクトの安定性条件の特定

(1) 安定性の定義

コンフリクト解析における安定性分析¹⁾²⁾は、各主体が各発生事象に対して与えている序数型の効用（選好順序）が、両プレイヤーと計画調整主体の共有する情報となつており、事象の安定性を分析するものである。

まず、Fang, et al.⁶⁾をもとに、コンフリクト解析において必要ないくつかの定義を行う。ここでは2人ゲームを仮定する。

1) 事象 k の可達リスト(reachable list): $S_i^+(k)$

プレイヤー i が事象 k から事象 k_1 に一方的に移行可能なとき、 k_1 は事象 k の reachable list $S_i^+(k)$ に属する。

$k_1 \in S_i^+(k)$ であることは、プレイヤー i のグラフモデルにおいて k から k_1 へのリンクが存在することと同義である。

2) 事象 k の一方的改善事象(Unilateral Improvement): $S_i^+(k)$

$k_1 \in S_i^+(k)$ であり、かつ主体 i が k より k_1 を選好するとき、 k_1 は主体 i にとっての事象 k からの一方的改善事象(Unilateral Improvement, UI) $S_i^+(k)$ に属する。

以下は、コンフリクト解析においてしばしば用いられる解概念である²⁾。

1. (強) ナッシュ安定性

事象 k が主体 i にとって (強) ナッシュ安定であるとは、 i が自らの戦略の変更により事象 k か

ら利得を改善することができないことを意味する。つまり、 $S_i^+(k) = \emptyset$ である。これは、あるプレイヤー i について、自らの戦略を一方的に変更しても自らの効用が改善されない場合、プレイヤー i は戦略を変更する動機を持たないことによる。

2. 連続的安定性

事象 k が主体 i にとって連続的安定であるとは、 $S_i^+(k)$ に含まれるすべての k_1 について、 $P_i(k) \geq P_i(k_1)$ であるような $k_2 \in S_i^+(k_1)$ が存在することである。

これはあるプレイヤー i が、自らの戦略を変更することによって効用を増加させることができる (UI を有する) 場合も、他方のプレイヤー j が、結果としてプレイヤー i の効用が元の事象よりも小さくなるような UI (これを「制裁」と呼ぶ) を有する場合、プレイヤー i は結局戦略変更を思いとどまると考えられることによる。

ナッシュ安定または連続的安定のいずれかの条件を満たす場合、プレイヤー i はその発生事象から他に移動することはないとし、これを「安定」と呼ぶ。双方のプレイヤーにとって安定な発生事象は、「均衡な事象」と呼ばれ、どのプレイヤーもそこから離脱する動機を持たない安定的な発生事象と考えられる。次節で示すロバストネス分析手法においても、これらの解概念を用いることができる。

(2) ロバストネス分析

(a) ロバストネス分析の拡張

従来のコンフリクト解析では、(1)で定義した2種類の解概念に基づき、各事象の安定性を検討する。この過程は、安定性分析と呼ばれる。

しかし、事象に対する主体の選好順序（序数型効用）が主体（ここでは事業者）本人以外に明らかでない場合、その事象が安定であるかどうかを知ることができない。さらに、解概念のうち連続的安定性は、主体が相手主体の利得改善行動を予測することを前提としている。相手主体の可能な行動が相手にとって利得の改善につながるか否かを知ることができなければ、行動の判断基準自体が成立しない。

2. で述べたように現実の社会資本整備の計画段階においては、関係各主体の選好に関して完全な情報が初めから得られていることは少ないと考えられる。そこで、代替案としていくつかの事象を想定したう

えて、当事者の主体が互いに不確実であった情報を共有して解を見出して行くプロセスが必要となる。計画段階における交渉や話し合いは、そのような重要な意味を持つものといえよう。この交渉においてどのような情報が最低限共有されるべきかが明らかとなっていれば、コンフリクトの解消に要する手戻りを回避し、調整時間の短縮につながる事が期待される。

そのような観点から、岡田ら³⁾はコンフリクトの下で、ある事象が安定であるために最低限必要な選好順序に関する条件が何であるかを特定するアプローチとして、ロバストネス分析を提唱している。すなわち2人の主体間のコンフリクトにおいて一方の主体の選好に関しては完全な情報が得られ、他方の主体についてはそれがまったく明らかになっていない場合について、事象の安定・不安定を決定する選好順序を特定するためのアルゴリズムが開発されている。本論文では、プレイヤー i, j の発生事象に対する選好順序がともに不明な、より一般的なケースに拡張したロバストネス分析手法を提案する⁷⁾⁸⁾⁹⁾。

(b) 選好に関する部分情報

ロバストネス分析は主体の選好に関する情報が不完備であるケースに適用される。しかし、多くのケースでは、すべての選好順序に関する情報は得られなくとも、一部の選好順序に関しては、確定的な情報を入手できると考えられる。以下ではある選好順序について全ての当事者が完全な情報を有している（どちらの事象が選好されるかわかっている）場合、その状態において部分情報が得られていると呼ぶこととする。部分情報 I は次のように定義できる。

定義

2つの事象(k_1, k_2)に関するプレイヤー i の選好順序 $k_1 \succ k_2$ がコンフリクトに関与しているすべてのプレイヤーに明らかになっているとき、その選好順序を規定する不等式 $P_i(k_1) > P_i(k_2)$ は部分情報 I の要素である。また、 I によって k より選好が高いことが全当事者の「共通の知識となっている事象の集合」を $\Phi_i^+(k, I)$ 、 k より選好が低いことが全当事者の「共通の知識となっている事象の集合」を $\Phi_i^-(k, I)$ として表す。つまり、部分情報 I によって、 $P_i(k_j) > P_i(k)$ であることが当事者の共有する情報に含まれるとき、事象 k_j は $\Phi_i^+(k, I)$ に属し、 $P_i(k_j) < P_i(k)$ であること

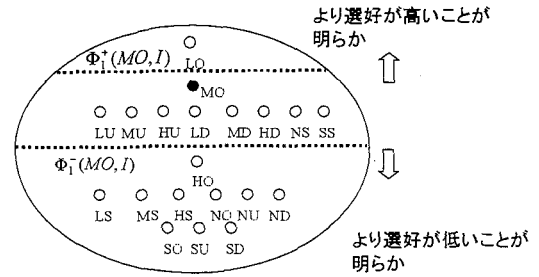


図-6 事象 MO の $\Phi_i^+(MO, I)$ と $\Phi_i^-(MO, I)$

が当事者の共有する情報に含まれるとき、事象 k_j は集合 $\Phi_i^-(k, I)$ に属する。

以下では、どちらの事業者も、過渡的状态(CS, SC, NC)から他の実現可能な事象(SS, NS, CC)への移行を望むと考える。すなわち、次のような選好関係はあらかじめ明らかになっているものとする。

$$\begin{aligned} P_1(R_k A_j) &> P_1(R_k S), P_1(R_k A_j) > P_1(SA_j), P_1(R_k A_j) > P_1(NA_j) \\ P_1(SS) &> P_1(R_k S), P_1(SS) > P_1(SA_j), P_1(SS) > P_1(NA_j) \\ P_1(NS) &> P_1(R_k S), P_1(NS) > P_1(SA_j), P_1(NS) > P_1(NA_j) \\ P_2(R_k A_j) &> P_2(R_k S), P_2(R_k A_j) > P_2(SA_j), P_2(R_k A_j) > P_2(NA_j) \\ P_2(SS) &> P_2(R_k S), P_2(SS) > P_2(SA_j), P_2(SS) > P_2(NA_j) \\ P_2(NS) &> P_2(R_k S), P_2(NS) > P_2(SA_j), P_2(NS) > P_2(NA_j) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで共同更新整備の各代替案を $R_k A_j$ ($R_k A_j$ はそれぞれプレイヤー1の戦略 L, M, H 、プレイヤー2の戦略 O, U, D に対応) と表す。また過渡的状态のうち、 CS に対応する事象（プレイヤー1が負担の意志を表明しているのに対してプレイヤー2は水力発電維持の意志を示す）を $R_k S$ 、 SC に対応する事象（プレイヤー2は共同更新整備に応じる意志を表明しているのに対してプレイヤー1が現状受忍の意志を示す）を SA_j 、 NC に対応する事象（プレイヤー2は共同更新整備に応じる意志を表明しているのに対してプレイヤー1が単独でのダム建設の意志を示す）を NA_j と表す。

さらに、プレイヤー1の戦略 L, M, H は負担の程度を意味し、プレイヤー2の戦略固定のもとでは互いに自らの負担が少ない状況をより高く選好することから、明らかに次の情報も得ることができる。

$$\begin{aligned} P_1(L A_j) &> P_1(M A_j) > P_1(H A_j) \\ P_2(L A_j) &< P_2(M A_j) < P_2(H A_j) \end{aligned} \quad (A_j \text{ はプレイヤー2の戦略}) \quad (2)$$

(1), (2)式が表す情報を「自明の先験的情報」と呼ぶ。

図-6 は自明の先験的情報 I ((1), (2)式) をもとに、 $\Phi_i^+(MO, I)$ と $\Phi_i^-(MO, I)$ を模式的に示したものである。これらの情報を用いることにより、ある事象が安定であるために満たすべき条件のうち、まだ明らかになっていない（調査すべき）条件（選好関係の不等式）の数を減少させることができる。

(c) 安定性の条件

事象 k がプレイヤー i にとって安定であるためには、当該プレイヤー及び相手プレイヤーの選好順序のうち、一部の事象の対がある選好関係を有していればよい。従って、事象 k が安定であるための十分条件は、当該選好順序に関する不等式の集合により表される。これは以下のように定式化可能である。

まず、ある事象がプレイヤーにとってナッシュ安定または連続的安定であるための十分条件を示す。

事象 k がプレイヤー i にとってナッシュ安定または連続的安定であるための十分条件

(相手プレイヤーを j とする)

• $k_1 \in (S_i(k) \cap \Phi_i^+(k, I))$ である任意の k_1 について

$$① P_j(k_2) > P_j(k_1) \text{ and } P_i(k) > P_i(k_2) \quad (3)$$

を満足する $k_2 \in (S_j(k_1) \setminus \Phi_j^-(k_1, I))$ が存在すること。

$$② P_i(k) > P_i(k_2) \quad (4)$$

を満足する $k_2 \in (S_j(k_1) \cap \Phi_j^+(k_1, I))$ が存在すること。

①及び②は、 $k_1 \in (S_i(k) \cap \Phi_i^+(k, I))$ である（プレイヤー i の UI であるとわかっている）事象 k_1 に関して制裁が成立するための条件式である。

• $k_1 \in (S_i(k) \setminus (\Phi_i^+(k, I) \cup \Phi_i^-(k, I)))$ である任意の k_1 について

$$③ P_i(k) > P_i(k_1) \quad (5)$$

$$④ P_j(k_2) > P_j(k_1) \text{ and } P_i(k) > P_i(k_2) \quad (6)$$

を満足する $k_2 \in (S_j(k_1) \setminus \Phi_j^-(k_1, I))$ が存在すること。

$$⑤ P_i(k) > P_i(k_2) \quad (7)$$

を満足する $k_2 \in (S_j(k_1) \cap \Phi_j^+(k_1, I))$ が存在すること。

$k_1 \in (S_i(k) \setminus (\Phi_i^+(k, I) \cup \Phi_i^-(k, I)))$ である（プレイヤー i

が k から移行可能ではあるが、その移行がプレイヤー i にとって改善であるか改悪であるか明らかでない）事象 k_1 に関しては、UI が存在しない条件 ((5) 式) または制裁が成立する条件 ((6),(7)式) が成立する必要がある。

(3)～(7)式から、プレイヤー i の十分条件集合のバ

ターンの数は

$$\prod_{k_1 \in (S_i(k) \cap \Phi_i^+(k, I))} \{ | \{ S_j(k_1) \setminus \Phi_j^-(k_1, I) \} | \} \times \prod_{k_1 \in (S_i(k) \setminus (\Phi_i^+(k, I) \cup \Phi_i^-(k, I)))} \{ | \{ S_j(k_1) \setminus \Phi_j^-(k_1, I) \} | + 1 \} \quad (8)$$

となる。ここに $|集合|$ はその集合の大きさを表す。

(3)～(7)式で示した安定性条件の特殊な例として、

$S_i(k) \setminus \Phi_i^+(k, I) = \{\emptyset\}$ で、任意の

$k_1 \in (S_i(k) \setminus (\Phi_i^+(k, I) \cup \Phi_i^-(k, I)))$ について (5) 式が成立する場合、事象 k はナッシュ安定である。

事象 k がプレイヤー i にとってナッシュ安定であるための十分条件

$k_1 \in (S_i(k) \setminus \Phi_i^-(k, I))$ である任意の k_1 について

$$P_i(k) > P_i(k_1) \quad (10)$$

この条件は、プレイヤー i が事象 k から移行可能な事象のうち、現状の悪化につながるものが明らかになっている移行 ($\Phi_i^-(k)$ に含まれる事象への移行) を除いたすべての移行が、プレイヤー i の UI でないことを保証するために満足すべき選好関係を示している。十分条件集合に含まれる不等式の数は、 $| \{ S_i(k) \setminus \Phi_i^-(k, I) \} |$ となる。

ナッシュ安定性は連続的安定性よりも厳しい概念であり、ナッシュ安定であるための条件を満足する事象は必ず連続的安定であるための条件を満足する。従って (10) 式を満足することは、その事象の安定性がより頑健(Robust)であるための条件となっている。

(4) ロバストネス分析の適用

(a) 共同更新整備の安定性

事象 k が安定（ナッシュ安定または連続的安定）であるためには、(3)～(7)式が成立することを確認するのみでよい。この条件式を用いて、地方自治体と電力事業者の間のコンフリクト（図-4及び図-5）における、共同更新整備事象の安定性について検討する。

(1)式より、現状(SS)、ダム併存(NS)、及び共同更新整備(LO, LU, LD, MO, MU, MD, HO, HU, HD)以外的事象には均衡しないことになる。

共同更新整備 $R_{ij}A_j$ が安定であるためには、まず次の条件を満たす必要がある。これらは(5)式に対応する条件式である。

$$P_1(R_{ij}A_j) > P_1(SS), P_1(R_{ij}A_j) > P_1(NS)$$

$$P_2(R_{ij}A_j) > P_2(SS), P_2(R_{ij}A_j) > P_2(NS) \quad (11)$$

(11)式は $R_{ij}A_j$ という協力関係（共同更新整備）から

どちらのプレイヤーも一方的に離脱しないための条件を示している。 $R_b A_j$ の社会的厚生水準（両プレイヤーの利得の和）が NS , SS を下回る場合は、(11)式は成立しない。従って、本モデルにおいて、共同更新整備 $R_b A_j$ が安定であるための条件には、 $R_b A_j$ の実施により社会的厚生水準が改善されるための十分条件が含まれていることになる。

次に異なる共同更新整備案への一方的移行に対する安定性について検討する。プレイヤー 1 は、自らの戦略が H の場合は M または L , M の場合は L へ（すなわちより少ない負担レベルへ）移行することによって自らの利得を改善することができる。つまり、地方自治体にとって協力（費用負担）の水準を低下させることは、一方的改善のための行動となり得る。例えば $LO, MO \in S_1^+(HO)$ である。その結果、共同更新整備の事象は、 LA_j (A_j はプレイヤー 2 の任意の共同更新整備の戦略) を除いてプレイヤー 1 がナッシュ安定となる可能性はない。一方的改善の可能な主体が、最終的結果よりも最初の代替案を選好するならば、移行は起こらない。そのための十分条件は、(3)～(7)式より次のようになる。

プレイヤー 1 について安定であるための十分条件

・任意の $R_k A_j \in S_1^+(R_k A_j)$ について

①ある $R_k A_j \in \{S_2(R_k A_j) \setminus \Phi_2^-(R_k A_j, I)\}$ につき

$$P_1(R_k A_j) > P_1(R_k A_j), P_2(R_k A_j) > P_2(R_k A_j) \quad (12)$$

$$\textcircled{2} P_2(SS) > P_2(R_k A_j) \quad (13)$$

$$\textcircled{3} P_2(NS) > P_2(R_k A_j) \quad (14)$$

のうちいずれかが成立すれば、プレイヤー 1 は $R_k A_j$ から他の共同更新整備へ移行することはない。

プレイヤー 2 について安定であるための十分条件

・任意の $R_i A_k \in S_2(R_i A_k)$ について

$$\textcircled{3} P_2(R_i A_j) > P_2(R_i A_k) \quad (15)$$

④ある $R_i A_k \in \{S_1(R_i A_k) \setminus \Phi_1^-(R_i A_k, I)\}$ につき

$$P_2(R_i A_j) > P_2(R_i A_k), P_1(R_i A_k) > P_1(R_i A_k) \quad (16)$$

$$\textcircled{5} P_1(SS) > P_1(R_i A_k) \quad (17)$$

$$\textcircled{6} P_1(NS) > P_1(R_i A_k) \quad (18)$$

のうちいずれかが成立すれば、プレイヤー 2 は $R_i A_k$ から他の共同更新整備へ移行することはない。

この結果から、次のような知見が得られる。

・ $R_k A_j$ が安定であるためには、両プレイヤーが SS , NS よりも $R_k A_j$ を選好することが必要条件となる。

これは、安定な共同更新整備案は、各プレイヤーがそれぞれ独自に行動を選択した場合 (SS 及び NS) よりも両プレイヤーにとって望ましいものでなければならないことを指す。言い換えれば、安定な共同更新整備は、各プレイヤーが個別に行動した場合の結果に対してパレート改善とならなければならない。

・より有利な共同更新整備事業への各プレイヤーの移行を防ぐには、①その一方的改善が相手事業者の交渉からの離脱 (SS や NS への移行) に即結びつくか、②相手プレイヤーが協力の水準を低下させる (プレイヤー 1 が負担レベルを低下させるか、プレイヤー 2 がプレイヤー 1 の選好が低い代替案に移行する) ことによって、自らの利得水準が最初の代替案よりも低下する、のどちらかが必要条件となる。②は、電力事業者の戦略変更による地域環境変化と自治体の戦略変更による負担額の変化量を比較し、どちらを高く評価するかにより事象の安定・不安定が決定することを意味する。言い換えれば、地域環境の変化 (改善, 改悪双方の可能性が存在する) と負担額との間のトレードオフの程度に依存する。

(b) 実現目標事象 MO への適用例

以上をもとに実際に実現目標事象 MO が安定 (ナッシュ安定または連続的安定) であるための条件集合を求めたものが表-2, 表-3 である。表-2 はプレイヤー 1 (地方自治体) が MO から移行しないための条件、表-3 はプレイヤー 2 (電力事業者) が MO から移行しないための条件の集合である。表-2, 表-3 の任意の条件集合の組み合わせが、 MO が安定であるための十分条件となる。

発生事象が安定であるためには、2 人のプレイヤーのいずれもそこから移行する動機を持たないことが必要であるが、そのための条件集合には、①ナッシュ安定性条件のみ、②連続的安定性条件のみ、③①, ②の混在、の 3 種類が存在する。表-2 及び表-3 は、各条件集合が①, ②, ③のいずれに属するかを示している。3 種類の安定な事象の有効性について考えると、①のナッシュ安定の場合、両プレイヤーは自らの UI の有無のみにより移行するか否かを決定するため、相手の選好順序に関する情報は必要ない。しかし、②③では相手が本当に制裁として

表－2 事象 MO に対するロバストネス分析の適用
結果(1)

(プレイヤー 1 に関する十分条件集合)

	共同更新整備からの 離脱に関する安定性	より少ない負担レベルへ 移行に対する安定性
条件集合 1 ③	P1(SS)<P1(MO) P1(NS)<P1(MO)	P1(LD)<P1(MO) P2(LO)<P2(LD)
条件集合 2 ③	P1(SS)<P1(MO) P1(NS)<P1(MO)	P1(LU)<P1(MO) P2(LO)<P2(LU)
条件集合 3 ③	P1(SS)<P1(MO) P1(NS)<P1(MO)	P2(LO)<P2(NS)
条件集合 4 ③	P1(SS)<P1(MO) P1(NS)<P1(MO)	P2(LO)<P2(SS)

表－3 事象 MO に対するロバストネス分析の適用
結果 (1)

(プレイヤー 2 に関する十分条件集合)

	共同更新整備からの 離脱に対する安定性	施設計画案の変更に対する安定性 (自らの選好に基づく (相手の制約に基づく 安定性) 安定性)
条件集合 1 ①	P2(SS)<P2(MO) P2(NS)<P2(MO)	P2(MD)<P2(MO) P2(MU)<P2(MO)
条件集合 2 ③	P2(SS)<P2(MO) P2(NS)<P2(MO)	P2(MU)<P2(MO)
条件集合 3 ③	P2(SS)<P2(MO) P2(NS)<P2(MO)	P2(MD)<P2(MO)
条件集合 4 ③	P2(SS)<P2(MO) P2(NS)<P2(MO)	P2(MD)<P2(MO)
条件集合 5 ③	P2(SS)<P2(MO) P2(NS)<P2(MO)	P2(MD)<P2(MO)
条件集合 6 ③	P2(SS)<P2(MO) P2(NS)<P2(MO)	P2(MU)<P2(MO)
条件集合 7 ③	P2(SS)<P2(MO) P2(NS)<P2(MO)	P2(MD)<P2(MO)
条件集合 8 ③	P2(SS)<P2(MO) P2(NS)<P2(MO)	P1(MU)<P1(SS)
条件集合 9 ③	P2(SS)<P2(MO) P2(NS)<P2(MO)	P1(MD)<P1(NS) P1(MU)<P1(NS)
条件集合 10 ③	P2(SS)<P2(MO) P2(NS)<P2(MO)	P1(MD)<P1(NS) P2(LU)<P2(MO)
条件集合 11 ③	P2(SS)<P2(MO) P2(NS)<P2(MO)	P2(LD)<P2(MO) P1(MU)<P1(NS)
条件集合 12 ③	P2(SS)<P2(MO) P2(NS)<P2(MO)	P2(LD)<P2(MO) P2(LU)<P2(MO)
条件集合 13 ③	P2(SS)<P2(MO) P2(NS)<P2(MO)	P1(MD)<P1(SS) P1(MU)<P1(SS)
条件集合 14 ③	P2(SS)<P2(MO) P2(NS)<P2(MO)	P1(MD)<P1(SS) P2(LU)<P2(MO)
条件集合 15 ③	P2(SS)<P2(MO) P2(NS)<P2(MO)	P1(MD)<P1(SS) P1(MU)<P1(SS)
条件集合 16 ③	P2(SS)<P2(MO) P2(NS)<P2(MO)	P1(MD)<P1(SS) P1(MU)<P1(NS)

機能する戦略を有していることを知らなければ、均衡であるはずの事象から移行してしまうプレイヤーが現れることも有り得る。従って計画調整主体が実際に安定な状態を導くためには、選好性に関する情報を調査して獲得するのみでなく、その情報を当事者である二人のプレイヤーに最終的に公開、確認し、共有する必要がある。

(c) 多くの追加的部分情報が得られた場合

各プレイヤーの選好の傾向について、(1), (2)式に加えて事前にさらに多くの部分情報が得られるケースも考えられる。その場合は、推定に反する選好条件を含む条件集合を除外することにより、実現目標

表－4 事象 MO に対するロバストネス分析の適用
結果 (2)

(プレイヤー 1 に関する十分条件集合)

	より少ない負担レベルへ 移行に対する安定性
条件集合 a ②	P1(LU)<P1(MO)
条件集合 b ②	P2(LO)<P2(NS)
条件集合 c ②	P2(LO)<P2(SS)

表－5 事象 MO に対するロバストネス分析の適用
結果 (2)

(プレイヤー 2 に関する十分条件集合)

	共同更新整備からの 離脱に対する安定性	施設計画案の変更 に対する安定性 (相手の制約に基づく 安定性)
条件集合 a ③	P2(SS)<P2(MO) P2(NS)<P2(MO)	P2(LU)<P2(MO)

事象に均衡するための条件を絞り込むことができる。

表－4、表－5は、①プレイヤー 1 が、可能ならば現状(SS)及び単独での改善策(NS)よりも任意の共同更新整備を志向し、②プレイヤー 2 が、プレイヤー 1 の負担オプション固定の下で、戦略 O を U に次いで 2 番目に選好するという追加的部分情報がある場合について、 MO が安定であるための必要条件を示したものである。表－2 及び表－3 に比べ、発生事象が安定であるための必要十分条件が絞り込まれていることがわかる。

プレイヤー 2 が水力以外の発電手段による代替案 (O) を嵩上げ(U)の次に選好している場合、事象 MO は両プレイヤーがともに次善の戦略を選択している妥協案となり得る。従って表－4 及び表－5 に示される条件は MO が安定な代替案となるための条件と考えることができる。表－5 からわかるように、プレイヤー 2 が MO から移行しないための十分条件集合は、1 通りに絞られる。これらの結果から計画調整主体が得ることができる知見は以下の通りである。

すなわちプレイヤー 1 が共同更新整備を志向している場合、安定性を規定するのは、両プレイヤーの、負担額と (2つの施設案 O と U における) 利得の間でのトレードオフの程度である。例えば、プレイヤー 1 は負担率を減少させる (戦略を L に変更する) 動機を持つが、その後のプレイヤー 2 の戦略変更 (LO から LU) による利得の減少 (嵩上げ案の採用による新たな水没地の発生等) が負担額減少の効果を上回

るならば、プレイヤー 1 は *MO* からの移行を思いとどまるであろう。同様にプレイヤー 2 の移行を防ぐには、プレイヤー 1 の負担額減少(*MU* から *LU*)が制裁として機能する必要がある。

4. おわりに

以上本研究ではプレイヤーの選好に関する情報が不完備な状況でのコンフリクトをモデル化し分析した。筆者らは本研究と同様の条件下で、プレイヤーの自己申告に基づいて選好を判断し、実行すべきプロジェクトを決定する調整メカニズム¹⁰⁾¹¹⁾についても検討している。今後の課題としては、計画調整手法間の相互比較が挙げられる。

参考文献

- 1) 岡田憲夫, キース・W・ハイブル, ニル・M・フレージャー, 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, 1988.
- 2) Fraser, N. M. and K. W. Hipel: Conflict Analysis—Models and Resolutions, North-Holland, 1984.
- 3) 岡田憲夫, 谷本圭志, 荒添正棋: 都市開発・防災コンフリクトの調整問題に関するメタゲーム論的考察 — Robustness 分析手法の提案 —, 土木学会論文集, No.524/IV-29, pp.79-92,1995,10.
- 4) 岡田憲夫: 公共プロジェクトの費用配分法に関する研究 その系譜と展望, 土木学会論文集,

No.431/IV-15, pp. 19-27, 1991.

- 5) 榊原弘之: 流域規模の水資源再配分としてみたダム再開発プロジェクトの費用・便益配分問題に関する研究, 京都大学修士論文, 1997.
- 6) Fang, L., K. W. Hipel, and D. M. Kilgour: Interactive Decision Making — the Graph Model for Conflict Resolution, Wiley-Interscience, 1993.
- 7) 榊原弘之, 中瀬大祐, 岡田憲夫: 新規・既存需要間の調整を伴う水配分コンフリクトのモデル分析 — 水力発電と河川環境を巡って, 土木計画学研究・講演集, No.20 (1), pp.147-150, 1997.
- 8) 中瀬大祐: 流域における環境流量の確保と発電用ダム再開発に伴うコンフリクト分析, 京都大学工学部卒業論文, 1997.
- 9) 榊原弘之, 中瀬大祐, 岡田憲夫: 水資源再配分のための不確実性下の意志決定過程に関するゲーム論的研究, 日本リスク研究学会第 10 回研究発表会論文集, Vol.9, pp.130-135, 1997.
- 10) 五十部渉, 榊原弘之, 多々納裕一, 岡田憲夫: 不完備情報下での発電用ダム再開発における純便益配分法の提案, 土木学会関西支部年次学術講演会, 1998(投稿中).
- 11) 榊原弘之, 五十部渉, 多々納裕一, 岡田憲夫: 水資源開発プロジェクトにおける不完備情報下での純便益配分法の社会的効率性に関する基礎的考察, 土木学会関西支部年次学術講演会, 1998(投稿中).

新規・既存需要間の調整を伴う水配分コンフリクトのモデル分析 — 水力発電と河川環境を巡って

榊原 弘之, 中瀬 大祐, 岡田 憲夫

今後の水資源計画においては、新規開発のみでなく、より有効な用途への水資源再配分の必要性がより高まると考えられる。その場合、既存の利用者と新規の参入者の間での調整が不可欠となる。費用・便益の配分はその一手段と考えられる。しかし特に計画・調整プロセスの初期段階においては、プレイヤーの発生事象に対する選好順位が明確でないことが多い。本研究では、このような状況をゲーム理論に基づきモデル化し、計画調整主体が代替案の安定性を保障する最小限の条件を特定するための逆解析的手法として提案されたロバストネス分析手法を拡張し、水力発電と河川環境を巡る電力事業者と地方自治体との間のコンフリクトに適用した。

Coordination of New and Existing Needs in Water Allocation Conflicts

— Conflicts between Hydropower Generation and Environmental Interests

By Hiroyuki Sakakibara, Daisuke Nakase, and Norio Okada

In water resources planning, reallocation of water between conventional and new purposes is becoming more critical for efficient use of resources. The interests of existing users and newly emerged users should be coordinated to implement reallocation. However, planning authority may not be well informed of preferences of players (users) involved in the projects. This results in the difficulty in resolving conflicts and specifying of the project that improves all players' situation. In this study, the conflict is modeled based on game theory. Then the conditions that an outcome is stable for all players is specified by extending robustness analysis method.