

灌漑システムにおける水管理の進化と制度設計に関する考察 —公平な水配分のための水管理組織の役割と行動—

吉 永 健 治*

1. はじめに

農業は支配的な水利用部門で世界的にみて約70%の淡水を利用している。農業用水の効率的な水利用については、特に2000年以降において世界水会議（World Water Forum）をはじめ多くの国際的な水会議が開催され、多様な水問題に関して議論が行われてきた。農業用水における水管理は、多くのケースにおいて灌漑システムをいくつかのユニット（例えば、水管理グループなど）に分けて水管理組織を組織し民主的な方法で公平な水配分を促進してきた。そこには地域の降雨パターン、栽培作物、水利用に関する慣習など固有な要素を加味した水利用に関する規律やルールを有する制度が存在する。日本を含む多くのアジア諸国、特に水田農業を中心とするアジア・モンスーン地域には、こうした制度を有する水管理組織が存在し灌漑システムの水管理を効率的に実施してきた経緯がある。旱魃時の水不足における水配分には水管理組織の組合員である農家が対話を通じて民主的な方法で公平な水配分、時として灌漑水路の上・下流側における農民間の水紛争を解決してきた（Yoshinaga, 2012）。こうした民主的な方法を取り入れた水利用の在り方や水管理組織の機能を Water Democracy (Shiva, 2000) として捉えていくことが重要である。それはコミュニティ組織の強化や水に関する地域の伝統や文化の形成にも大きな影響を与えてきたことも事実である。このように農業用水における水管理は地域の社会・経済・環境の実態に根付き、Water Democracy の手法を適用することで進化してきたと言ってよい。しかし今日、多くの灌漑システムにおいて水管理の機能が低下しつつある。その背後には、農民の老齢化、若者の農業離れ、農村社会へのグローバル化の進展など各国に共通した問題が指摘される。なかでも、上流側農民は用水へのアクセスの優位性から、水管理に消費する時間と労働力を機会費用の高い収入源に割り当てて、水管理を怠るようになる。その結果、下流側農家における水不足を生じ灌漑システムのみならず、作物生産量、農家収入などにも影響を与えることになる。

本稿では、こうした背景を受けて灌漑システムにおける灌漑水路の上・下流側農家の公平な水配分に関するコンフリクトとそれに対する水管理組織の役割と責任について、まず水管理組織の制度面におけるインセンティブについて進化ゲーム理論を用いて分析する。さらに水管理をめぐる上・下流側農家の水紛争に関して水管理組織の調停機能を考慮した解決策を展開型ゲーム理論により検討する。これらの分析にはいくつかの文献を参照した。前者の進化ゲーム理論に関しては

* 東洋大学国際地域学部：Faculty of Regional Development Studies, Toyo University

Maynard (1982)、Nowak (2006)、Shone (2001)、江頭他 (2010)、西部 (2004)、大浦 (2008) などを参照した。第3章のモデル分析には大浦 (2008) を参考にした。その他、ゲーム理論に関する文献は多数利用可能であるが、本稿では石黒 (2007, 2010)、Laffont (2005)、Ray (2007) などを参照した。また水管理に関しては吉永 (2009, 2013)、Yoshinaga (2012) などの一連の研究を参考にした。

本稿は以下のような構成からなる。第1章に続いて、第2章では灌漑システムにおける水配分に関連して、水管理組織による水管理の進化とそれに伴う制度設計について言及する。第3章では、灌漑システムにおける効率的な水管理の変化について進化ゲーム理論を用いて分析と考察を行う。第4章では、灌漑水路の上・下流側農家間の水紛争に関して水管理組織の調停を考慮したゲーム理論モデルによる分析を行う。最後に、第5章でこれらの結果を取りまとめて考察を行う。

2. 水配分のための制度設計と水管理組織の関与

2-1 進化の過程と制度の変化

私たちの社会システムはさまざまなルールや規律で成り立っている。こうしたルールや規律を社会制度と捉えれば、社会制度が存在しない社会では秩序は維持されないことになる。社会制度が存在することにより、人々は制度を遵守した行動をとることで、公共財としての便益を享受することができる。しかし同時に、それを維持するためにはコストが必要となる。こうした社会制度はダイナミックで時間の経過とともに変化する。この変化の過程において内生的あるいは外性的な要因が作用することにより、社会制度は常に進化を続ける。進化のベクトルは作用する要因によって正・負のいずれかの方向に、また場合によっては反復しながら多様な社会制度の形態を形成することになる。当然のことながら、政策決定者が制度設計を行う場合には社会制度を進化させ、人々の社会・経済活動における便益を最大化することを意図して行われる。こうした進化の過程が緩やかであれば人々はその変化に柔軟に対応することが可能であり、その過程が急激であれば変化に追従できない状況が生じる。今日のグローバル化の進展とインターネットによる社会ネットシステムの進化はそれを制御する社会制度の構築が追従できない状況にあると言ってよい。こうしたことから今日、社会制度の進化に関する議論は社会システムの急激な変化にいかに対応すべきかが課題となっている。

最近における進化経済学に関する研究の進展は目覚ましい。特にメイナード・スミスがゲーム理論 (Maynard, 1982) を適用したことも関心を高めた背景にある。進化経済学分野における進化について、例えば、江頭他 (2010) によると、「ルールとしての複製子が行動を通じて変化し、その変化した複製子¹⁾が社会的な規模で定着した結果として、制度が変容する。そのとき社会の多くの主体の振る舞いが変わり、主体の相互作用の帰結としての経済システムの振る舞いが変わる。主体の参照するルールの変化が、他の多くの主体に選択されて伝播することで制度が変化し、……さらに、経済システムの振る舞い方の変化が、制度の維持や変容、またルール (複製子) の変化や電波に影響を及ぼす。……」と議論する。

こうした制度の進化に関する考え方を適用して、灌漑システムにおける上・下流側農家における

水利用に関するルールや水管理組織の制度面の変化について議論する。灌漑システムにおける公平な水配分は上・下流側農家の対話と具体的な行動に依存する。一般的に、上流側農家は水へのアクセスの有利性から水管理を怠りがちになる。この背景には水管理には時間と労働力が必要であり、農家にとってコストがかかることがある。また、一般的に、このコストに対する支払いや補償は行われぬ。仮に、上流側農家が効率的な水管理を行っているとするれば、こうしたコストは上流側農家の営農の一部として行う水管理の行動のなかに内部化されていると言ってよい。しかし一方で、上流側農家は水管理のコストが高くなると代わって高い機会費用による収入源を追及するようになれば水管理は実施されなくなる。こうした上流側農家の行動の変化により、これまで上流側農家の営農作業の一部として内部化されてきた水管理コストが顕在化する。すなわち機会費用による新たな収入源という外生的な要因により、水管理という行動自体に変化（進化）が生じることになる（この場合は負のベクトル）。このように多くの灌漑システムにおいて上・下流側農家による水管理の実施による効率的な水利用の在り方が問われている。

2-2 水管理組織による水管理の進化と制度設計

灌漑システムにおける効率的な水管理に向けた進化の過程において水管理組織の行動と役割は内生的かつ外生的な要因として影響を与える。一般的に、灌漑システムに属する上・下流側農家は水管理組織に属し、水管理に関するルールと規律の遵守を求められ、また灌漑料金の支払い義務を負うことになる。しかし、こうした水管理組織のルールや規律に関する拘束力はなく、違反した農家に対する罰則もないケースが多い。また、灌漑料金の未払いに対する罰則さえないケースも存在する。こうしたケースにおける水管理の実施は非効率的で水不足に遭遇すれば上・下流側農家の間で水紛争が生じることも多い。特に、上流側農家が水管理を積極的に実施するようになるには何らかのインセンティブが付与されるか、水管理組織に拘束力のある権限が付与される必要がある。言い換えれば、これらは水管理の機能を促進し進化させる条件といえる。歴史的に見てアジア諸国における水管理は水管理組織が中心となって公平な水配分に関する決定を行い行動してきた。また、この水管理に関する決定や行動は組合員である農家の意向を反映して民主的な方法で行われてきた。いわゆる Water Democracy の形成を促進することで灌漑地域の水管理も進化してきた。たとえば、共同行動による水路の障害物の除去や清掃、水路や農道沿いの雑草の除去、コミュニティの組織の強化、田植えや収穫祭に関連した水文化など、その活動の範囲や役割を進化させてきた。こうした進化に伴い、水管理組織は灌漑料金の徴収を含む水管理に関するルールや規律を明確にし実践してきた。しかし一方で、水管理組織に付与されている権限は限定的で国によって異なる²⁾。特に、取水権に関してはさまざまな態様が存在する。例えば、オーストラリアにおける水管理組織の組合員の間で行われる水市場における水価格や水取引は進化の形態として先進的な事例といえるかもしれない。

こうしたなか、近年、水管理組織の機能や役割が大きく変化しつつある。その変化は水管理組織の重要な機能である Water Democracy の低下である。この背景には各国に共通した要因とその国・地域における固有の要因が存在する。前者の要因については、農民の老齢化、若者の都市への流出、低い農業収入、灌漑システムの老朽化と維持管理費の増加などがあげられ、いずれも農業部門と水部門が抱える深刻な問題でもある。後者の要因としては、例えば日本の場合、農産物の輸入量、国

内農産物の価格の低迷、水の価値に対する低い認識、農地の転用などが進行し、水利用を含めて水管理組織の機能と役割についての農家の認識が低下し、Water Democracyの有効性も変容しつつある。特に、かつては農村コミュニティの中核的な役割を担ってきた水管理組織の機能や役割の低下が著しい。さらに、上流側農家が水管理より機会費用による高い収入源を追求することになれば、灌漑システム全体の水管理の実施や効率的な水利用への影響は大きい。これに伴う農家の水管理に関する認識の変化は水管理組織の負の進化を加速させているといえる。こうした現状を受けて、水管理組織を進化させるにはWater Democracyの再構築が必要であり、そのためには上・下流側農家の公平で効率的な水管理活動が不可欠である。以下では、Water Democracyの再構築とその進化を促進するための分析として2つのモデル（進化ゲーム理論モデルと水紛争ゲーム理論モデル）を用いて分析を行う。

3. 効率的な水管理に向けた進化ゲーム

3-1 進化ゲームモデル

ここでは、上流側農家の水管理への参加の変化について進化ゲーム理論における模倣ダイナミックスを用いて分析する。この模倣モデルはプレイヤーが2つのタイプの集団、すなわち集団1はWater Democracyが成熟しており水管理に関する事項を決定する集団で、自ら水管理を行う農家(f_H)が水管理を行わない農家(f_L)より多い。集団2はWater Democracyが未成熟で水管理に関する決定が上手くできない集団で、水管理を行わない農家(f_L)が多く、水管理を行う農家(f_H)が少ない集団である。戦略は集団1および集団2において同じ戦略、すなわち水管理に対して高い努力を行う、低い努力しか行わない、の2通りである。また利得は各戦略の組み合わせにおいて非対称であり、ゲームとしては非対称ゲームである。各集団における農家は、どちらの努力を行うかは、水管理に要する時間と労働力の機会費用と水管理を行うことによる生産量の増産による収入増を考慮して判断する。

Water Democracyが形成されている集団1に属する農家は水管理の必要性を認識しており、基本的には水管理を優先して実施する傾向がある。一方、Water Democracyが形成されていない集団2では水管理を実施することなく、自らの機会費用を他の収入源の確保のために利用する傾向がある。仮に、水管理による生産量の増加に伴う収入増が機会費用より高ければ、集団1および集団2において水管理を行う農家を見習って水管理への努力を行う農家が出てくる。しかし逆に、機会費用の方が水管理による収入増より高ければ水管理を行っていた農家は水管理を怠るようになる。また、両者に変化がなければ農家は現状維持の状態にあり水管理を行う。

灌漑システムにおけるWater Democracyは公平な水配分やシステムの維持管理にとって不可欠である。ここで水管理がWater Democracyのルールと規律の下で行われることで、①民主的な決断、②共同行為 (collective action)、③コミュニティの結束などの効果が見込める。こうしたことから、集団1は集団2を対象としてWater Democracyの規律とルールを確立することが、灌漑システム全体の水管理上の効率化を図る上で必要であると考えて働きかけを行う。一方、集団2は水管理の実施より自らの時間と労働力を他の機会費用に適用する方が便益が高いことを主張する。し

		集団2	
		$f_{H'}(y)$	$f_{L'}(1-y)$
集団1	$f_H(x)$	a, b	a, d
	$f_L(1-x)$	d, b	d, d

図1-1: $F_W > F_O$ のとき

		集団2	
		$f_{H'}(y)$	$f_{L'}(1-y)$
集団1	$f_H(x)$	c, c	c, b
	$f_L(1-x)$	b, c	$0, 0$

図1-2: $F_W < F_O$ のとき

たがって、集団2における農家は機会費用より水管理を実施することによる利得が大きくない限り、現状から脱することはない。ここで、Water Democracyの必要性を主張する集団1と機会費用の利得の大きさを守りたい集団2が相対立することになる。

分析にあたって、各集団における農家は水管理による収入増(F_W)と機会費用による収入(F_O)の大きさを考慮し、 $F_W > F_O$ および $F_W < F_O$ の2つのケースを対象とする。これを戦略型ゲームで表すと、それぞれ図1-1および図1-2に示すようになる。ここで、利得を $a > b > c > d > 0$ を用いて表すことにする。

(1) ケース1: $F_W > F_O$ のとき

このとき利得は、水管理を実施することで生産性が改善されるほか、①民主的な決断、②共同行為、③コミュニティの結束の効果が見込まれ、集団1の農家(f_H)はこれら効果を達成することから利得 a 、集団2の農家($f_{H'}$)は必ずしも集団において多数派ではないためにこれらの効果が減少すると考えて利得 b とする。また集団1の農家(f_L)および集団2の農家($f_{L'}$)はいずれも水管理を行わないことからこれらの効果が期待できないために両集団の利得は d とする。図1-1に示すように、これらの利得を配置すると非対称ゲームとなり、ナッシュ均衡は両集団が水管理を行う($f_H, f_{H'}$)となる。このゲームは水管理の実施の観点からみれば調整ゲームである。

(2) ケース2: $F_W < F_O$ のとき

このとき利得は、水管理に必要な時間と労働力に対する機会費用の方が高い場合で、両集団の農家とも水管理を怠り機会費用の高い収入源を優先することになる。利得については、水管理による効果を考慮して設定する。まず両集団における農家がともに戦略($f_L, f_{L'}$)をとる場合には利得を0とする。一方、高い機会費用のもとで両集団の農家がともに戦略($f_H, f_{H'}$)をとれば、多くが高い機会費用の収入源を追求することになることから利得は c となり、水管理の効果は大きく減少する。集団1および集団2のいずれかが戦略として、水管理を実施するか、怠るか、のいずれかを選択する場合には、怠った農家の利得を b 、水管理を実施した農家の利得を c とする³⁾。このときゲームは非対称ゲームで調整ゲームとなり、この場合2つのナッシュ均衡($f_H, f_{L'}$)および($f_L, f_{H'}$)が存在する。

3-2 分析と考察

最初に、いくつかの仮定を設定する。まず、各集団に属する農家(プレイヤー)は自らがおかれている立場 $i(i=1, 2)$ において微小時間 dt の間に $\alpha_i dt$ の確率で戦略の見直しを行う。戦略の見

直しは自分にとって利得が高い戦略を模倣する。プレイヤー i の集団の人数は N_i 人である。各集団のプレイヤーが見直しを行うケースは、各集団が自らの戦略における利得と相手の戦略の利得を比較して有利な方に見直しを行う。図 1-1 および図 1-2 より、集団 1 において、水管理に高い努力を行う農家 (f_H) が x の割合を占め、努力を怠る農家 (f_L) の割合は $1-x$ である。さらに集団 1 は水管理を重視するグループであることから、 $x > 1-x$, $x > 1/2$ である。集団 1 において戦略を見直す農家の数は $N_1\alpha_1 dt$ である。同様に、集団 2 においては水管理を行う農家 (f_H) は y の割合を占め、努力せずに高い機会費用を追求する農家 (f_L) の割合は $1-y$ で、 $y > 1/2$ とする。

(1) ケース 1 の $F_W > F_O$ のとき

集団 1 において、農家 (f_L) が戦略を f_H に変更するのは、図 1-1 より $x(1-x)N_1\alpha_1 dt$ 、一方、農家 (f_H) は利得上から戦略を変更することはなく現在の戦略にとどまり、その人数は $xN_1\alpha_1 dt$ である。ただし、 $x > 1/2$ である。ここで、微小時間 dt における x の変化を xdt とすると集団 1 における水管理に努力する農家 (f_H) 数の変化は $N_1 dx$ で、 $N_1 dx = x(1-x)N_1\alpha_1 dt$ となり、両辺を $N_1 dt$ で割って整理すると、

$$dx/dt = \alpha_1 x(1-x) \quad (1)$$

となる。式 (1) で $dx/dt = 0$ となるのは、 $x=0$, $x=1$ 、ただし、仮定より $x > 1/2$ である。集団 2 においても同様な処理をする。水管理を怠る農家 (f_H) 数の変化は $N_2 dy$ で $N_2 dy = y(1-y)N_2\alpha_2 dt$ 、両辺を $N_2 dt$ で割って整理すると、

$$dy/dt = \alpha_2 y(1-y) \quad (2)$$

となる。式 (2) で $dy/dt = 0$ となるのは、 $y=0$, $y=1$, $y > 1/2$ である。

以上の結果をもとに定常点を求める。表 1 に示す変数の増減をもとにベクトル図を作成すると図 2 に示すようになる。同図より、 $x(or y)=0$ は、形式上は不安定定常点だが $x(or y) > 1/2$ から達成されない。一方、 $x(or y)=1$ は漸近安定点となる。このときの含意は、集団 1 および集団 2 における農家とも水管理を実施することを選択するようになることを意味する。

(2) ケース 2 の $F_W < F_O$ のとき

集団 1 において農家 (f_L) が戦略を f_H に変更するのは、図 1-2 より利得が 0 の農家が戦略 (f_H) を選択する場合で、農家数 $x^2(1-y)N_1\alpha_1 dt$ が水管理を実施するようになる。一方、農家 (f_H) は戦略 (f_L) の利得 b を選択し、農家数 $xy(1-x)N_1\alpha_1 dt$ が水管理を怠るようになる。ここで、微小時間 dt における x の変化を xdt とすると、水管理を実施する農家数の変化は、 $N_1 dx = x^2(1-y)N_1\alpha_1 dt - xy(1-x)N_1\alpha_1 dt$ となり、両辺を $N_1 dt$ で割って整理すると、

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= \alpha_1 x \{x(1-y) - y(1-x)\} \\ &= \alpha_1 x(x-y) \end{aligned} \quad (3)$$

表 1: x, y の範囲と $dx/dt, dy/dt$ の増・減

変数 x	$0 \leq x \leq 1/2$	$1/2 \leq x \leq 1$
dx/dt の増・減	増加	増加
変数 y	$0 \leq y \leq 1/2$	$1/2 \leq y \leq 1$
dy/dt の増・減	増加	増加

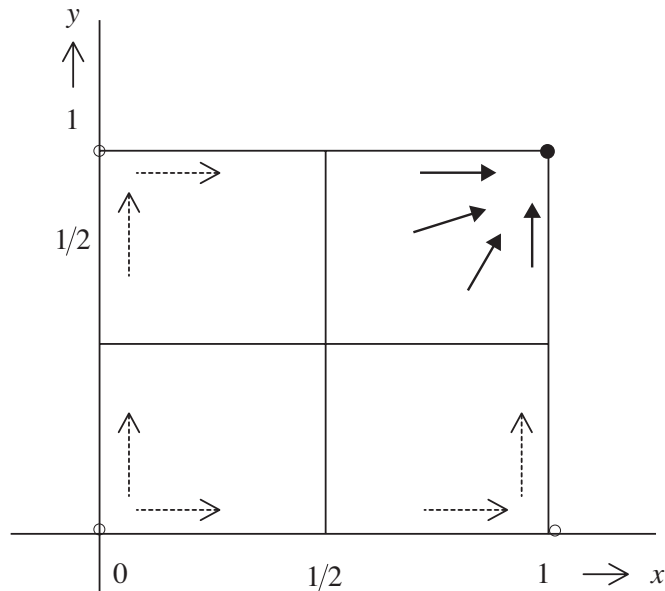


図 2：ケース 1 におけるダイナミクス

となる。

次に、集団 2 において農家 (f_H) が戦略を f_L に変更するのは、図 1-2 より利得が C の農家が戦略 f_L の b を選択する場合で、農家数 $xy(1-y)N_2\alpha_2dt$ が水管理を怠るようになる。一方、農家 (f_L) は戦略 f_H の利得 C を選択し、農家数 $y(1-x)(1-y)N_2\alpha_2dt$ が水管理を実施するようになる⁴⁾。ここで、微小時間の dt における y の変化を ydt とすると、水管理を怠り機会費用の高い収入源を追求する農家数の変化は、 $N_2dy = xy(1-y)N_2\alpha_2dt - y(1-x)(1-y)N_2\alpha_2dt$ となり、両辺を N_2dt で割って整理すると、

$$\begin{aligned} \frac{dy}{dt} &= \alpha_2xy(1-y) - y(1-x)(1-y) \\ &= \alpha_2y(1-y)(2x-1) \end{aligned} \quad (4)$$

となる。これらの結果から、ダイナミクスの定常点を求める。式 (3) および (4) において、 $dx/dt=0$ から $x=0$, $x=y$, $dy/dt=0$ から $y=0$, $y=1$, $x=1/2$ であり、定常点の状態空間は 4 つの頂点 $(0,0)$, $(1,0)$, $(0,1)$ および $(1,1)$ と、前者において $x=y=1/2$ とおくと $(1/2, 1/2)$ となる。これをもとに、表 2 に示すように変数の増減を調べ、ベクトル図を作成すると図 3 に示すようになる。

図 3 におけるダイナミクスは定常点 $(1/2, 1/2)$ を中心に左回りのベクトルで示されている。すなわち、集団 1 における水管理を実施する農家が増加すれば、一方で集団 2 における水管理を怠り

表2: x, y の範囲と $dx/dt, dy/dt$ の増・減

変数 x	$0 \leq x \leq 1/2$	$1/2 \leq x \leq 1$
dx/dt の増・減	減少	増加
変数 y	$0 \leq y \leq 1/2$	$1/2 \leq y \leq 1$
dy/dt の増・減	増加	減少

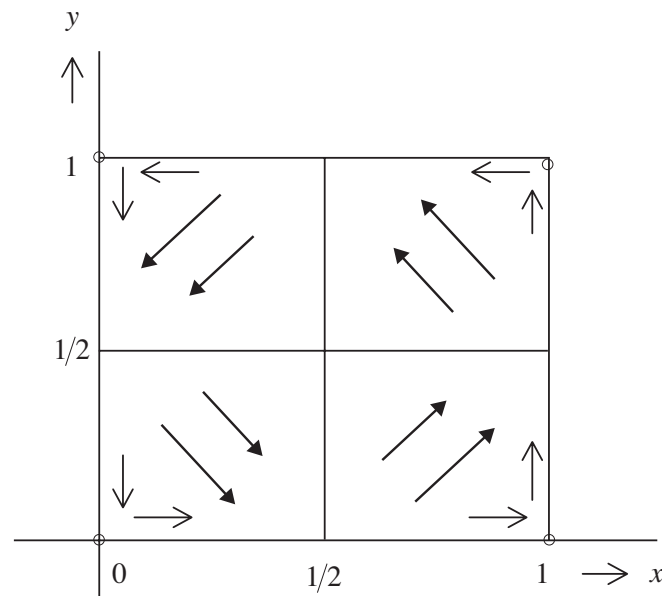


図3: ケース2におけるダイナミクス

機会費用を追求する農家も増加する。また、機会費用による収入源を追求する農家が増加すれば、今度は水管理を実施する農家が減少し、さらに機会費用による収入減を追求する農家が減少する、といったように繰り返しが生じる。この現象を灌漑システム全体から見ると、水管理を実施する農家数が増加すると、一部に水管理を怠り機会費用を追求し、他の農家の水管理にタダ乗りする農家が出てくる。逆に、機会費用を追求する農家が増加すれば、水管理組織や農家自身が生産への影響を危惧するようになり、水管理を実施する農家が増加すると理解できる。ここで、戦略の見直しの確率が、 $\alpha_1 > \alpha_2$ のとき、すなわち集団1における見直しの確率が集団2の確率より大きいとき、水管理を実施する農家が増加するベクトルが大きくなり、逆に $\alpha_1 < \alpha_2$ のときは機会費用を追求する農家が増加するベクトルが大きくなる。

4. 灌漑水路の上・下流側農家間の水紛争モデル

4-1 モデル

灌漑水路の上・下流側における農家に対する公平な水配分は水管理組織の重要な役割の一つである。上・下流側における可能な水利用へのアクセスの優位性の違いから、効率的な水管理の実施による公平な水配分をめぐる上・下流側の農家間においてしばしば水紛争が生じる。こうした水紛争における水管理組織による Water Democracy にもとづいた解決策の模索は、農家の水の価値に

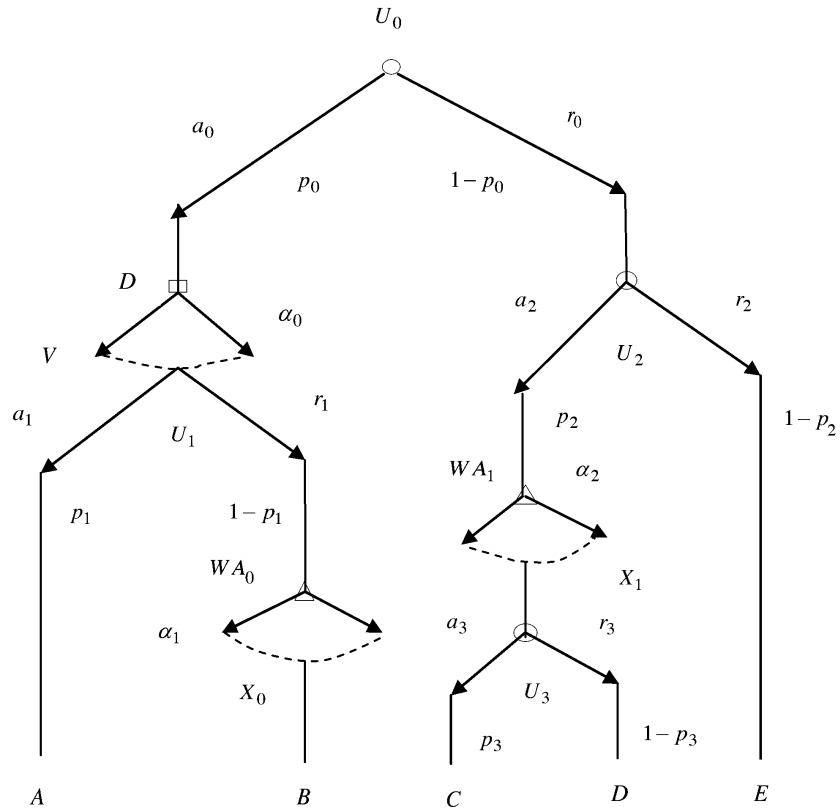
対する認識の向上、組織の維持、コミュニティの結束力の強化などに直結する。ここでは、上・下流側農家における水管理の実施をめぐる紛争と水管理組織による仲介を考慮してゲーム理論を用いて分析する。まず、モデルを構築するための必要な要素について定義と説明を行う。

(1) プレイヤー：このゲームには3人のプレイヤーが存在する。まず、上流側農家 (U_i) ($i=0,1,2,3$ で手番を表す)、下流側農家 (D) で灌漑システムにおける水管理をめぐるコンフリクトの状態にある。もう1人のプレイヤーは水管理組織 (WA_i) ($i=0,1$ で手番を表す) で両農家が所属しており、灌漑システムの水管理の維持管理に加えて上・下流側の農家に公平な水配分のための役割を担っている。上流側農家は水へのアクセスの優位性から下流側農家に比較して水管理を怠りがちである。特に、水管理に必要な時間や労働力に対する機会費用が高い場合には、上流側農家はさらに水管理を実施しなくなる傾向が強い。一方、下流側農家にとって水利用の可能性は上流側農家の水管理の実施に大きく依存しており、上流側農家が水管理を怠れば、灌漑面積が減少し、生産量の低下の原因となる。こうした状況に対して、水管理組織は上・下流側農家の水問題の解決に向けて行動する。

(2) 行動空間：ゲームにおける各プレイヤーの行動は、まず下流側農家の水管理に関する調停交渉に対して上流側農家 (U_0) が合意する (a_0)、合意しない (r_0)、という選択から開始される。上流側農家が交渉に合意した場合には下流側農家の手番となり、上流側農家 (U_1) の水管理の実施に対する補償などの具体的な提案 (V) を行う。この提案に対して上流側農家は再び合意するか (a_1)、合意しないか (r_1)、の選択を求められる。合意しない場合には水管理組織 (WA_0) が確率 θ_0 で調停に乗り出し⁵⁾、調停案 (α_1) を提案し、上流側農家 (U_1) を説得する。一方、下流側農家の交渉提案に上流側農家 (U_0) が合意しなかった場合には水管理組織が確率 θ_0 で調停に乗り出す。これに対して、上流側農家 (U_2) は調停を受け入れるか (a_2)、拒否するか (r_2)、の選択肢がある。上流側農家が調停を受け入れれば水管理組織 (WA_1) は具体的な調停案 (α_2) を提案する。これに対して上流側農家 (U_3) は再びその調停を受け入れる (a_3)、受け入れない (r_3)、について選択を行う。

(3) ゲーム構造：3人のプレイヤーによる選択と決定により、結果として5つの状態が生じる。まず、上流側農家 (U_0) が下流側農家の提案に合意した場合 (a_0) において、下流側農家が提案する補償案 (α_0) に対して、上流側農家 (U_1) が合意すれば (a_1) 状態 A が達成される。しかし、合意しなければ水管理組織 (WA_0) の調停案 (α_1) を受け入れ状態 B となる。一方、状態 C は上流側農家 (U_3) が水管理組織 (WA_1) の調停を受け入れ、調停案 (α_1) に対して合意する (a_3) ケースで、合意しない (r_3) ケースが状態 D となる。また状態 E は上流側農家 (U_0) が下流側農家の提案に合意せず (a_3)、水管理組織の調停案も受け入れない (r_2) ケースである。このゲームは各プレイヤーの行動が明らかで対称ゲームである。ゲーム構造と利得を展開型で表わすと図4に示すとおりである。

(4) 利得の配置：ゲームの構造から上流側農家 (U_0) が確率 p_0 で下流側農家の調停案に合意する (a_0) 場合と確率 $1-p_0$ で合意しない (r_0) に分けて検討する。具体的な利得の考え方は次の4-2節で言及する。



状態	利得		
	上流農家(U)	下流農家(D)	水管理組織(WA)
A	$p_1 W_B - C_B$	$W_B - \alpha_0 V$	I_r
B	$\theta_0(1-p_1)w_b - c_b$	$\theta_0 w_b - (1-\alpha_0 V)$	$-(t + \alpha_1 X_0) + I_r$
C	$\theta_0 p_2 p_3 W_B - C_B$	$\theta_0 p_2 p_3 W_B$	$-(t + \alpha_2 X_1) + I_r$
D	$\theta_0 p_2(1-p_3)w_b - c_b$	$\theta_0 p_2(1-p_3)w_b$	$-t$
E	$(1-p_2)O_p - w_b$	$(1-p_2)w_b - c_b$	$-I_r$

図4：モデルの構造と利得表

4-2 ゲームの分析と考察

(1) ケース1：上流側農家 (U_0) が下流側農家の提案に合意する (a_0) 場合

まず、上流側農家 (U_0) が下流農家の提案に合意すれば、下流側農家は具体的な提案 $d^1 = \alpha_0 V$ 、ただし $\alpha_0 \in [0, 1]$ を提示し、上流側農家 (U_1) はこの提案が自らの保留価格 $d > d^1$ であれば、手番 U_1 で確率 p_1 で水管理を行うことに合意 (a_1) する。一方、確率 $1-p_1$ で合意しない (r_1) を選択する場合には水管理組織 (WA_0) が確率 θ_0 で調停に入り、上流側農家 (U_1) の合意を得るために留保価格 d に対する不足分の提案 $d^2 = \alpha_1 X_0$ 、ただし $d^2 = 1-d^1$ を行い、上流側農家を説得する。すなわち、 $d > d^1 > O_p > d^2$ 、(O_p は機会費用) で、上流側農家 (U_1) は水管理を実施することになる。なお、水管理組織 (WA_0) の調停には取引費用 t がかかるものとする。ここで、水管理を実施することによる灌漑システム全体の便益を W_B 、水管理が実施しないときの便益を w_b とし、 $W_B > w_b$

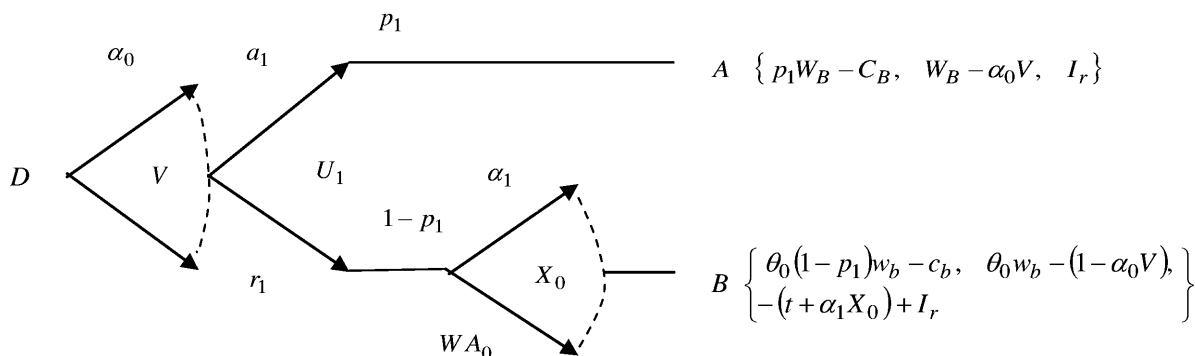


図5：上流側農家 (U_0) が下流側農家の提案に合意するとき (a_0) の利得

である。水管理を実施しないときの便益 w_b と機会費用 O_p との関係は $O_p > w_b$ である。また、このときのコストをそれぞれ C_B, c_b ($C_B < c_b$) とし、灌漑料金を I_r 、さらに $W_B > C_B, w_b > c_b$ とする。これらの条件設定を考慮して、後方推定法により各プレイヤーの利得を求める。上流側農家 (U_1) の利得は、水管理を実施する (状態 A) とき $p_1 W_B - C_B$ 、水管理を実施しない (状態 B) とき $\theta_0(1-p_1)w_b - c_b$ で、下流側農家の利得はそれぞれ $W_B - \alpha_0 V, \theta_0 w_b - (1 - \alpha_0 V)$ 、また水管理組織の利得を $I_r, -(t + \alpha_1 X_0) + I_r$ とする。これらの利得を用いて、上流側農家 (U_0) における期待利得を求めると、状態 A のとき $p_0 \{ p_1 W_B - C_B + (\theta_0(1-p_1)w_b - c_b) \}$ 、状態 B のとき $p_0 \{ W_B - \alpha_0 V + (w_b - (1 - \alpha_0 V)) \}$ となる。各状態における利得の配置を図5に示す。

ここで、ケース1における上・下流側農家の利得関係をもとに分析する。下流側農家が $\alpha_0 \in [0, 1]$ の範囲で提案 V を行う。このとき、上流側農家 (U_1) は以下の選択を行う。

$$U_1 = \begin{cases} a_1 \text{ を選択、} d > \alpha_0 V \text{ のとき} \\ r_1 \text{ を選択、} d < \alpha_0 V \text{ のとき} \end{cases}$$

これにより、後方推定法で上流側農家の最適戦略を求めると、まず上流側農家 (U_1) が水管理を実施しない (r_1) 場合には水管理組織 (WA_0) が調停に乗り出し、上流側農家 (U_1) の合意を得るために留保価格 (d) に対する不足分の提案 $d^2 = \alpha_1 X_0$ 、ただし $d^2 = 1 - d^1$ 、を行う。これにより、水管理を実施する (a_1) 場合と実施しない (r_1) 場合の期待利得を比較する。いま、水管理を実施する (a_1) ときに、 $p_1 W_B - C_B > \theta_0(1-p_1)w_b - c_b$ が成立するためには $p_1 > \frac{1}{W_B + \theta_0 w_b} \{ \theta_0 w_b - (c_b - C_B) \} > 0$ 、ただし $C_B < c_b$ であることが必要条件となる。一方、実施しない (r_1) 場合には不等号が逆になる。このとき水管理組織 (WA_0) が調停に乗り出す確率 θ_0 が小さくなれば、右辺の値は小さくなり、水管理を行う確率 p_1 も小さくなる。逆に、確率 θ_0 が大きくなれば、水管理を行う確率 p_1 は大きくなる。すなわち、上流側農家 (U_1) は水管理組織 (WA_0) が調停に乗り出すという確信が大きければ大きいほど自ら水管理を実施する戦略を選択するようになる。また、このとき上流側農家の利得は下流側農家の利得より大きいことが必要であり、 $p_1 W_B - C_B > W_B - \alpha_0 V, W_B(1-p_1) + C_B < \alpha_0 V$ となる。具体的には、上流側農家 (U_1) が下流側農家の提案 ($\alpha_0 V$) を受け入れて水管理を行うには、上流側農家 (U_1)

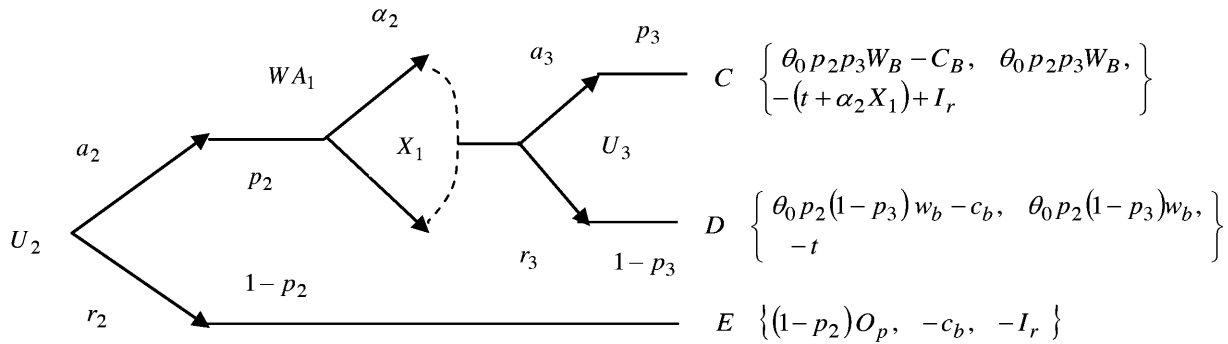


図6：上流側農家が下流側農家の提案に合意しないとき (y_0) の利得

の利得が水管理を行わないときの利得とコストの総和より大きいことが条件となる。

(2) ケース2：上流側農家(U_0)が下流側農家の提案に合意しない(r_0)場合

次に、上流側農家(U_2)が下流側農家の提案に合意しなければ、上流側農家(U_2)は確率 p_2 で水管理組織(WA_1)の調停を受け入れ(a_1)、 $1 - p_2$ の確率で調停を受け入れない(r_1)とする。上流農家(U_2)が調停を受け入れる場合には水管理組織(WA_1)が確率 θ_0 で調停に入り、水管理組織(WA_1)は $\alpha_2 \in [0, 1]$ で具体的な提案 $d^3 = \alpha_2 X_1$ を提示し、上流側農家(U_2)は手番 U_3 において確率 p_3 で水管理の実施を受け入れる(a_3)ことに変更し、 $1 - p_3$ で当初通り合意しない(r_3)を選択する。この場合、水管理組織(WA_1)の提案 $d^3 = \alpha_2 X_1$ は、 $0 < d^3 < O_p$ で、これは上流側農家(U_2)が手番 U_0 で水管理の実施に関して下流側農家の提案に合意していないことを反映している。

ここで同様に、後方推定法を適用して各プレイヤーの利得を求める。上流側農家の利得は、水管理組織(WA_1)の調停に応じて水管理を実施する(状態 C)ときは $\theta_0 p_2 p_3 W_B - C_B$ 、調停に合意しない(状態 D)ときは $\theta_0 p_2 (1 - p_3) w_b - c_b$ となり、下流側農家の利得はそれぞれ $\theta_0 p_2 p_3 W_B$ 、 $\theta_0 p_2 (1 - p_3) w_b$ 、また水管理組織の利得はそれぞれ $-(t + \alpha_2 X_1) + I_r$ 、 $-t$ となる。一方、水管理組織(WA_1)が調停を行うことなく、上流側農家(U_2)が水管理を実施しない場合(状態 E)における各プレイヤーの利得は、上流側農家(U_2)は機会費用 $(1 - p_2) O_p$ を得ることになり、下流側農家の利得は $-c_b$ 、水管理組織の利得は $-I_r$ となる。これらをまとめて、図6に各状態における利得の配置を示す。同図に示す利得を用いて、上流側農家(U_0)における期待利得をもとめると、状態 C のとき $(1 - p_0) \{ \theta_0 p_2 p_3 W_B - C_B + (\theta_0 p_2 (1 - p_3) w_b - c_b) \}$ 、状態 D のとき $(1 - p_0) \{ \theta_0 p_2 p_3 W_B + \theta_0 p_2 (1 - p_3) w_b \}$ 、状態 E のとき $(1 - p_0) \{ (1 - p_2) O_p - c_b \}$ となる。

まず、ここでプレイヤーは上流側農家(U_2)と水管理組織(WA_1)である。上流側農家(U_2)は確率 p_2 で水管理組織(WA_1)の調停を受け入れ(a_2)、 $1 - p_2$ の確率で調停を受け入れない(r_2)とする。調停を受け入れる場合には水管理組織(WA_1)が確率 θ_0 で調停に入り、水管理組織(WA_1)は $\alpha_2 \in [0, 1]$ で具体的な調停案 $d^3 = \alpha_2 X_1$ を提示する。このとき、上流側農家(U_2)は以下の選択を行う。

$$U_2 = \begin{cases} a_1 \text{ を選択、 } d > \alpha_2 X_1 \text{ のとき} \\ r_1 \text{ を選択、 } d < \alpha_2 X_1 \text{ のとき} \end{cases}$$

ここでもケース1と同様に、後方推定法で最適戦略を求める。この部分ゲームにおける戦略の選択肢は3つの状態 C 、 D 、 E に帰する。まず、上流側農家 (U_3) が水管理組織 (WA_1) の調停案を受けて水管理を実施する (a_3) を選択するには、 $\theta_0 p_2 p_3 W_B - C_B > \theta_0 p_2 (1 - p_3) w_b - c_b$ が成立する必要がある、 $p_3 > \frac{1}{\theta_0 p_2 (W_B + w_b)} \{ \theta_0 p_2 w_b - (c_b - C_B) \}$ 、ただし、 $C_B < c_b$ であることが必要条件となる。一方、水管理を実施しない場合 (r_3) には不等号が逆になる。これは上流側農家 (U_2) が水管理を実施する戦略への転換の確率 p_2 と水管理組織 (WA_1) が調停に乗り出す確率 θ_0 の組み合わせによる確率 $\theta_0 p_2$ が小さくなれば、右辺の値は小さくなる。このとき、上流側農家 (U_2) が水管理を行う確率 p_2 と水管理組織 (WA_1) が調停を行う確率 θ_0 は小さくなる。逆に、確率 $\theta_0 p_2$ が大きくなれば、上流側農家 (U_2) が水管理を行う確率 p_2 と水管理組織 (WA_1) が調停を行う確率 θ_0 は大きくなる。すなわち、上流側農家 (U_2) は水管理組織 (WA_1) が調停に乗り出すという確信が大きければ大きいほど水管理を実施する戦略へ転換することを選好するようになる。

次に、この結果を受けて上流側農家 (U_2) が下流側農家の提案を拒否し、機会費用を選択する戦略 (r_2) を取った場合と比較する。すなわち、 $\theta_0 p_2 p_3 W_B - C_B > (1 - p_2) O_p$ 、 $p_2 > \frac{1}{O_p + \theta_2 p_3 W_B} (O_p + C_B) > \frac{C_B}{\theta_2 p_3 W_B}$ 、ただし $W_B > C_B$ 、となり、これは分母における上流側農家 (U_3) が水管理を実施する戦略へ転換する確率 (p_3) と水管理組織 (WA_1) が調停に乗り出す確率 θ_0 の組み合わせによる確率 $\theta_0 p_3$ が0に近くなるほど、上流側農家 (U_2) が水管理を実施する戦略に転換する確率 p_2 は大きくなる。このとき、水管理組織 (WA_1) が調停を行う可能性は低く、また上流側農家 (U_3) が水管理を実施する確率も低く、結果として水管理を実施しない戦略 (r_3)、すなわち機会費用が選択される。逆に、確率 $\theta_0 p_3$ が1に近くなれば、確率 p_2 は小さくなり、上流側農家 (U_2) は機会費用を選択し水管理を実施しないことから、上流側農家 (U_2) は水管理を実施することなく機会費用を選択するようになる。

最後に、上流側農家 (U_0) の最適戦略の選択について分析する。後方推定法によりケース1とケース2における期待利得を比較する。まず、ケース1において上流側農家 (U_0) は戦略 $a_0 \rightarrow a_1$ 、ケース2において戦略 $r_0 \rightarrow r_2$ をとることから、両ケースの期待利得は $E_A = p_0 \{ p_1 w_b - C_B + \theta_0 w_b (1 - p_1) - c_b \}$ および $E_E = (1 - p_0) \{ (1 - p_2) O_p - w_b \}$ となり、 E_A と E_E を比較すると、上流側農家 (U_0) の戦略選択の確率 p_0 は、

$$p_0 = \begin{cases} 1 & E_A > E_E \text{ のとき} \\ 0 & E_A < E_E \text{ のとき} \end{cases}$$

となる。ここで、 $p_0 = 1$ のとき、 $E_A = \{ p_1 w_b - C_B + \theta_0 w_b (1 - p_1) - c_b \}$ で $p_1 w_b + \theta_0 w_b (1 - p_1) > C_B + c_b$ となり、上流側農家 (U_1) の期待利得はコストより大きく、上流側農家 (U_0) は水管理を行う戦略 (a_0) を選択する。一方、 $p_0 = 1$ のとき $E_E = (1 - p_2) O_p - w_b$ で、 $(1 - p_2) O_p > w_b$ となり、上流側農家 (U_2) が戦略 (r_1) を選択するとき、機会費用が水管理を実施しないときのコストより大きく、このとき上流側農家 (U_0) は水管理を実施しない戦略 (r_0) を選択する。ちなみに、下流側農家の利得については、上

流側農家(U_0)が戦略 $a_0 \rightarrow a_1$ をとる場合において、状態が最大の利得をもたらすためには状態 A と C を比較して、 $W_B - \alpha_0 V > \theta_0 p_2 p_3 W_B$ 、 $W_B > \frac{\alpha_0 V}{(1 - \theta_0 p_2 p_3)}$ であることが必要条件となる。また、水管理組織の利得は明らかに状態 A において最大になる。

5. 結論

本稿では、灌漑システムの上・下流農家の公平な水配分に関するコンフリクトとそれに対する水管理組織の役割と責任について、進化ゲーム理論と展開型ゲーム理論によるモデル分析を行った。まず進化ゲームでは水管理を実施する集団と実施しない集団における水管理による生産量および収入と機会費用による収入を考慮し、両集団に属する農家が水管理の実施に関してどのような行動をとるかについて分析した。農家は水管理を実施することで得られる便益（損失）と機会費用の大小を考慮して、水管理に対する行動を変化（進化）させることを明らかにした。

また、展開型ゲームでは上・下流側農家における水管理の実施をめぐる紛争と水管理組織による調停に関して分析した。具体的には、①上流側農家が下流側農家に対して水管理に要するコストを補償する提案に合意する場合と②上流側農家が下流側農家のそうした提案に合意しない場合に分けてモデルの分析を行った。こうした状況で、上流側農家が下流側農家の提案を受けない場合には水管理組織が調停案を提案し、上流側農家が水管理を実施するか、否か、について判断する。この結果、上流側農家は水管理組織が水管理の実施に関して調停に乗り出すという確率が大きくなれば水管理を実施する戦略に転換することを選好し、確率が小さければ機会費用の高い収入源を追求することを選択する。すなわち、上流側農家は下流側農家が提案する水管理に要するコストに対する補償が機会費用より大きければ水管理の実施を選択する。

結論として、灌漑システムにおける公平な水配分は上・下流側農家が水の希少性と価値を認識し、協調して水管理を行うことが不可欠である。そのためには水管理に要するコストは自らの営農活動に内部化されることが必要である。しかし、上流側農家が水管理を怠り機会費用を追求する行動をとるような場合においては水管理組織による調停が求められ、調停における解決策として経済的なインセンティブを付与するような手段について考慮することも必要である。

「謝意」

本稿を作成するにあたっては、文部科学省科学研究費「気候変動に対する適応策としての Water Democracy の再構築に関する研究」（研究課題番号：21405029）による支援を受けたことをここに記しておきたい。

注釈

- 複製子 (replicator) とはコピーしたり伝達したりできる一つ一つのルールをいう。それらのルールを活用して行動する相互作用 (interactor) という (江頭他、2010)。
- 日本では農業用水施設などに関しては土地改良法、水利権に関しては河川法によって規定されている。

- 3) 水管理を怠った農家は水管理を実施した農家に“タダ乗り”することになり、水管理を怠った農家の利得を $b > c$ とする。
- 4) 一方、農家(f_L)は戦略 f_L の利得 b および戦略 f_H の利得 c を選択し、農家数 $x(1-x)(1-y)^2 N_2 \alpha_2$ および $(1-x)(1-y)^2 N_2 \alpha_2$ が水管理を怠るようになる。
- 5) 以下、水管理組織が調停に乗り出す確率を θ_0 とする。

参考文献

- (1) Laffont, J.J. (2005) : Regulation and Development, Cambridge University Press
- (2) Martin A. Nowak. (2006) : Evolutionary Dynamics, The Belknap Press of Harvard University Press
- (3) Maynard Smith, J. (1982) : Evolution and Theory of Games, Cambridge University Press、(寺本英、梯正之訳 (1985) : 「進化ゲーム理論：闘争の議論」、産業図書)
- (4) Ray, D. (2007) : A Game-Theoretic Perspective on Coalition Formation, Oxford University Press
- (5) Ronald Shone. (2001) : An Introduction to Economic Dynamics, Cambridge University Press
- (6) Shiva, V. (2000) : Water Wars, South End Press
- (7) Yoshinaga, K. (2012) : *Sustainable Water Management for Food Security-Theoretical Considerations*-, Regional Development Studies, Toyo University, Vol. 13, pp.151-176
- (8) 石黒薫 (2010) : 「インセンティブな国際経済学」日本評論社
- (9) 石黒薫 (2007) : 「入門・国際政治経済学の分析」、勁草書房
- (10) 江頭進他編 (2010) : 「進化経済学」、日本経済評論社、1 - 12 ページ
- (11) 大浦宏邦 (2008) : 「社会科学者のための進化ゲーム理論」、勁草書房
- (12) 西部忠編著 (2004) : 「進化経済学のフロンティア」、日本評論社
- (13) 吉永 健治 (2009) : 灌漑システムにおける最適な水配分のための誘因政策と罰則に関する分析 —フィリピン *Balanac River Irrigation System* を事例にして—、Vol.12、国際地域学研究、pp.1-20
- (14) 吉永健治 (2013) : 経済的手法による水紛争の解決に関する考察—灌漑システムの上・下流側の水紛争を事例に一、第 49 集、東洋大学大学院紀要 (近刊予定)

Study on Evolution of Water Management Practice and
Institutional Design in Irrigation System
— Role and Responsibility of Water User's Association
for Equal Water Allocation —

Kenji YOSHINAGA

The paper analyzes the conflict around an equal water allocation between farmers upstream and downstream including its role and responsibility of water user's association by applying the models of evolutionary game theory and extensive form game theory. In the evolutionary game theory, it clarifies how both groups of implementing and not implementing water management practice could take action for water management taking into account income increment by better water management and income obtained by opportunity cost. It is clear that farmer will change evolutionally their preference for water management by comparing the benefit (or loss) of water management and opportunity cost.

The analysis also focuses on conflict resolution around water management and intervention by water user's association by using the extensive form game theory. In other words, the analysis is based on the model with two cases of whether the farmer downstream agrees or does not agree to compensate the farmer upstream for their cost of water management. If the farmer upstream does not accept a proposal by farmer downstream, water user's association will intervene with its proposal for negotiation and observe whether the farmer upstream could properly implement water management or not. This leads that farmer upstream prefers to implement water management if the probability of intervention by water user's association is high, otherwise chose opportunity cost as a high income source. This means that the farmer upstream will prefer to water management if compensation by downstream is higher than an opportunity cost.

As a result, it is imperative for both farmers upstream and downstream that they should recognize the scarcity and value of water for collective water management achieving a fair water allocation. Given this, the cost of water management should be internalized into their own farming practice. Having said this, it is noted that economic incentive as resolution measure by intervention of the water user's association if the farmer upstream pursues a higher opportunity cost instead of implementing water management.

Key words: Water management, Water user's association, Water conflict, Farmers upstream and downstream, Economic measures and incentive, Opportunity cost.