

KIER DISCUSSION PAPER SERIES

KYOTO INSTITUTE OF ECONOMIC RESEARCH

Discussion Paper No.1408

“気候変動適応のための水の地域間連結利用の理論 (2)
ストック型×フロー型”

佐藤 正弘・仲山 紘史

2014 年 7 月



KYOTO UNIVERSITY
KYOTO, JAPAN

気候変動適応のための水の地域間連結利用の理論（２）

ストック型×フロー型*

Theory of inter-regional conjunctive use of water resources, Vol. 2: Stock-flow type

佐藤 正弘[†] 仲山 紘史[‡]
Masahiro Sato, Hirofumi Nakayama

2014 年 7 月

要旨 Abstract

本稿と佐藤・仲山（2014）では、物理的に離れた複数の地域（国）が賦存形態の異なる水資源を保有する場合に、バーチャル・ウォーターを媒介として各地域での水利用を調節することで、水の変動の影響の緩和や取水費用の削減、資源や生態系の保全など、単独の地域では得られない様々な機能を引き出す水利用法——地域間連結利用（*inter-regional conjunctive use*）を提示する。特に本稿では、変動しないストック型水資源を有する地域と、変動するフロー型水資源を有する地域間におけるストック型×フロー型地域間連結利用を扱い、安定化機能やストック保全機能が生じる要件やメカニズムを明らかにする。結論としては、第一に、社会計画者がシステム全体の便益を最大化する場合、フローの変動に合わせてストックの取水量を調節し、全体として利用可能な水の変動を抑える平準化（*leveling*）が行われる結果、水自体の移動ができない地域間であっても安定化機能が作動する。第二に、ストックが異時点間の価値の移動を媒介する役割を果たす結果、将来のフローの変動を吸収することの反射として予備的なストック保全が行われる。第三に、分権的な意思決定が行われる場合でも、取水費用の一部をフロー地域が負担する補償スキームを用いれば、社会計画者のときと同じ機能を再現できる。

In Sato and Nakayama (2014) and this paper, we present the theory of inter-regional conjunctive use of water resources, -- a market-based scheme of water use, which, through the transactions of virtual water, coordinates the real water uses in more than one distant region or country with different forms of water, so that it can

* 本稿は、日本学術振興会科学研究費補助金（#23000001）の助成を受けて行った研究である。

[†] 京都大学経済研究所准教授（先端政策分析研究センター所属）

[‡] 京都大学経済研究所研究員（先端政策分析研究センター所属）

generate various functions that would not be obtained if they were isolated, such as the buffering of water variations, the reduction of withdrawal costs, and the preservation of resources or ecosystems. In particular, this paper deals with the stock-flow type inter-regional conjunctive use, where one region has stock water resource and the other has flow one. First, we find that, even if water itself cannot be moved between the regions, the system-wide benefit would be stabilized as a result of the social planner's "levelling" motion, which reduces fluctuations of the total available water by controlling stock withdrawal according to flow variations. Second, the planner preserves certain amount of water as a precautionary stock to absorb future flow variations, where the stock playing a role of mediating the intertemporal transfer of value. Third, decentralized decisions can duplicate the social planner's solutions by introducing a compensation scheme where the flow region shares a part of the stock withdrawal costs.

JEL classification: F18, Q18, Q25

Keywords: 水資源, 気候変動, 連結利用, 表流水, 地下水, レジリエンス, 食料生産, バーチャル・ウォーター, グリーンウォーター, water resource, climate change, conjunctive use, surface water, groundwater, resilience, food production, virtual water, green water

1. はじめに

本稿と佐藤・仲山 (2014)では、食料生産システムの水レジリエンスを高める戦略の一つとして、水資源の賦存形態の多様性を活用した国家間・地域間での新たな水利用のあり方とその前提となる理論——水資源の地域間連結利用の理論——を提示する。地域間連結利用 (inter-regional conjunctive use) とは、物理的に離れた複数の地域が賦存形態の異なる水資源を保有する場合に、バーチャル・ウォーターを媒介として各地域で水利用を調節することで、水の変動の影響の緩和や取水費用の削減、資源や生態系の保全など、単独の地域では得られない様々な機能を引き出す水利用法である。

本稿と佐藤・仲山 (2014)の内容の分担は以下の通りである。佐藤・仲山 (2014)では、水資源の賦存形態の類型や連結利用の機能評価の方法など、地域間連結利用の理論の前提となる考え方について説明した上で、フロー型×フロー型の地域間連結利用を提示した。具体的には、2国2財2要素モデルを活用して、両国が確率的に変動するフロー型の水資源を有する場合に、両国間の財の貿易によって安定化機能が生じる要件やメカニズムを明らかにした。それに対して、本稿では、ストック型×フロー型の地域間連結利用を提示する。すなわち、一方の国が変動しないストック型の水資源、もう一方の国が変動するフロー型の水資源を利用できる場合における安定化機能やストック保全機能について分析する。

ただし、以下の3点について、佐藤・仲山 (2014)との視点の違いに留意する必要がある。第一は、意思決定主体についての違いである。佐藤・仲山 (2014)のモデルでは、実際の意思決定を行うのはあくまで市場で行動する消費者と生産者であり、安定化価値の評価対象は、そうした経済主体の行動の結果として決まるシステム全体や各国の便益であった。それに対して、本稿では、ストック型水資源の取水というもう一つの意思決定が加わり、佐藤・仲山 (2014)では受動的な便益評価の対象に過ぎなかったシステムや国が、それぞれの便益を最大化する意思決定主体になる。具体的な意思決定としては、両国の便益の合計としてのシステム全体の便益を最大化する社会計画者と、自国の便益を最大化するストック国政府による取水量の決定を取り扱う。便宜上、前者の枠組みを社会計画者レジーム、後者の枠組みを分権レジームと呼ぶ。

第二に、第一の違いの結果として、本稿ではより政策的なインプリケーションを指向した分析を進める。とりわけ、もし社会計画者レジームと分権レジームの間に構造的な相違点が見られるのであれば、その源泉を明らかにし、相違点を乗り越える枠組みを考える。

第三の違いは、評価する機能の種類の違いである。佐藤・仲山 (2014)では、安定化機能のみが評価の対象であったが、本稿では、安定化機能に加え、ストック保全機能や貯蔵機能についても評価を行う。具体的には、開放経済と閉鎖経済では、ストックの取水量はどのような条件の下でどちらが大きくなるか、あるいは、不確実性がある場合となる場合では、どちらが資源保全的な意思決定がなされるのかなどの比較を行う。

本稿の構成は以下の通りである。次節では、ストック型×フロー型の地域間連結利用の基本的な動作について検証するため、1期のみの静学モデルを検討する。このモデルは、異時点間のトレードオフが少ない場合に有効である。ここでは、佐藤・仲山 (2014)で用いた Samuelson (1949)と Dixit and Norman (1980)の思考実験の枠組みを再び使い、安定化を生み出す平準化 (levelling) のメカニズムを明らかにする。第3節では、2期間の動学モデルを用いて、異時点間のトレードオフがある場合の地域間連結利用を考える。ここでは、将来の不確実性を吸収する反射として生じる予備的なストック保全に重点を置いた検討をする。第4節では、現実世界でストック型×フロー型の地域間連結利用を実践するために必要な政策措置として、分権レジームの下で可変性や冗長性を確保するための補償スキームと、オープンアクセスの問題に関する措置について論じる。

2. 静学モデル

2.1 基本設定

記号などの表記は、基本的に佐藤・仲山 (2014)と同じものを使う。ただし、国を表す記号は数字ではなく、ストック型水資源を表す s とフロー型水資源を表す f を用いる。 s 国はストック型の水資源のみを持ち、 f 国は変動するフロー型の水資源のみを持つ。

i 国の水資源と労働の賦存量をそれぞれ W^i , L^i とし、両国の合計を $\bar{W}$, $\bar{L}$ とする。両国の技術は同一で、以下のコブ・ダグラス型生産関数の下で財1、財2を生産する。

$$Y_j^i = F_j(w_j^i, l_j^i) \equiv w_j^{\alpha_j} l_j^{1-\alpha_j}$$

ただし、 Y_j^i は i 国における財 j の生産量、 w_j^i は水の投入量、 l_j^i は労働の投入量を表し、 $\alpha_1 \in (0,1)$, $\alpha_2 \in (0,1)$ であるとする。また、一般性を失うことなく財1の方がより水集約的であるとする。このとき、 $\alpha_1 > \alpha_2$ である。

両国は選好も同一で、以下のコブ・ダグラス型効用関数で表す。

$$u(X_1^i, X_2^i) \equiv X_1^{i\beta} X_2^{i(1-\beta)}$$

ただし、 X_j^i は*i*国における財*j*の消費量を表し、 $\beta \in (0,1)$ とする。

*f*国では、 W^f だけのフローが利用できるとする。ただし、フローは、平均 W_μ^f の既知の確率分布に従って変動する。単純化のため、フローを生産過程に投入すること自体には費用はかからないものとする。ただし、ひとたび生産過程に投入された水資源は、佐藤・仲山 (2014)のモデルに従って部門間でやりとりされ、価格が付く。

*s*国のストックは変動しないが、取水量 W^s に対して取水費用 $c(W^s)$ がかかるものとする。ここでは単純に $c(W^s) = c_0 W^s$ とする (c_0 は正の定数)。なお、取水量に上限はなく、必要な分だけ利用できるものとする。また、*s*国のストックの取水量は、*f*国のフローの実現値 W^f が判明した後で決定されるような状況を考える。

また、本稿のモデルにおいても、各国で両財が生産されるとの仮定を維持する。このとき、 W^f の変動は、以下で定義される範囲の中に収まっている。

$$\left(\frac{\alpha_2}{1-\alpha_2} \cdot \frac{1-\chi}{\chi} \right) \frac{L^i}{\bar{L}} < \frac{W^i}{\bar{W}} < \left(\frac{\alpha_1}{1-\alpha_1} \cdot \frac{1-\chi}{\chi} \right) \frac{L^i}{\bar{L}}, \quad i = s, f \quad (2.1)$$

ただし、 $\chi = \beta\alpha_1 + (1-\beta)\alpha_2$ である。(2.1)の導出方法については、佐藤・仲山 (2014)を参照されたい。

両国ともに、生産過程に投入された水資源は佐藤・仲山 (2014)のモデルにおける所与の水賦存量として扱われ、各部門で生産された財の貿易と消費が行われる。そこで、以下ではこれらの生産や貿易や消費のプロセスは明示的には扱わず、水資源を生産過程に投入した結果としての効用のみを考える。具体的には、閉鎖経済と開放経済における各国の効用を、水賦存量の間接効用関数でそれぞれ以下のように表わす。

$$U^i(W^i) = \psi W^{i\chi} L^{i(1-\chi)} \quad i = s, f \quad (2.2a)$$

$$U^i(W^i, W^j) = \psi \left[\chi \cdot \frac{W^i}{\bar{W}} + (1-\chi) \cdot \frac{L^i}{\bar{L}} \right] \bar{W}^\chi \bar{L}^{1-\chi} \quad i, j = s, f \quad (2.2b)$$

ただし、 $\psi = [\beta\alpha_1^{\alpha_1}(1-\alpha_1)^{1-\alpha_1}]^\beta [(1-\beta)\alpha_2^{\alpha_2}(1-\alpha_2)^{1-\alpha_2}]^{1-\beta} \chi^{-\chi}(1-\chi)^{\chi-1}$ である。なお、(2.2a)と(2.2b)の効用関数には労働賦存量も含まれているが、ここでは固定して考え、単なる定数と見なす。

言うまでもなく、(2.2a)は、単調増加で狭義の凹関数である。また、全ての W^i につい

て3次導関数は正であるため、限界効用関数は狭義の凸である ($U^{i'''}(w^i) > 0$)。同じように、(2.2b)の自国の水資源に関する1次・2次・3次導関数は、両国で両財が生産される全ての (w^i, w^j) について、以下のように表される。

$$\begin{aligned}\frac{\partial U^i}{\partial w^i} &= \psi\chi \left[1 - (1-\chi) \left(\frac{w^i}{\bar{w}} - \frac{L^i}{\bar{L}} \right) \right] \bar{w}^{\chi-1} \bar{L}^{1-\chi} > 0 \\ \frac{\partial^2 U^i}{\partial w^{i^2}} &= -\psi\chi(1-\chi) \left[2 - (2-\chi) \frac{w^i}{\bar{w}} + (1-\chi) \frac{L^i}{\bar{L}} \right] \bar{w}^{\chi-2} \bar{L}^{1-\chi} < 0 \\ \frac{\partial^3 U^i}{\partial w^{i^3}} &= \psi\chi(1-\chi)(2-\chi) \left[3 - (3-\chi) \frac{w^i}{\bar{w}} + (1-\chi) \frac{L^i}{\bar{L}} \right] \bar{w}^{\chi-3} \bar{L}^{1-\chi} > 0\end{aligned}$$

したがって、開放経済下の効用も、自国の水資源については単調増加で狭義の凹関数であり、かつ、限界効用関数が狭義の凸となっている。

一方、開放経済下の効用の、他国の水資源に関する1次導関数は以下のように表される。

$$\frac{\partial U^i}{\partial w^j} = -\psi\chi(1-\chi) \left(\frac{w^i}{\bar{w}} - \frac{L^i}{\bar{L}} \right) \bar{w}^{\chi-1} \bar{L}^{1-\chi} \quad (2.3)$$

(2.3)の正負は $\left(\frac{w^i}{\bar{w}} - \frac{L^i}{\bar{L}} \right)$ の符号、すなわち、自国が相対的に水豊富国であるのか、それとも水希少国であるのかに依存している。水豊富国であれば、他国の水賦存量が増えると効用は減少し、水希少国であれば、他国の水賦存量が増えれば効用は増加する。これは、他国の水賦存量の増減によって、相対的な資源の希少性の違いから生じる両国の比較優位の状況が変化することで、交易条件効果 (term-of-trade effects) が働くためである。とりわけ、自国が水豊富国である場合は、他国の水賦存量が増えることによって、自らの水資源の相対的な豊富さが減少し、水集約的な財に特化することによる利益が失われる。反対に労働に関する比較優位が緩和することによって、他国も労働集約的な財に特化することによる利益が失われるが、それ以上に、自らの資源が増えたことによる利益が大きいため、効用は増加する。逆に、自国が水希少国である場合は、他国の水の増加によってそれまでの比較優位の方向性がさらに強化され、両国ともに恩恵を受けることができる。

2.2 不確実性がない場合

はじめに不確実性がない場合について検討する。

2.2.1 閉鎖経済

閉鎖経済においては、s国の最適取水量は、以下の効用最大化問題の解として与えられる。

$$\max_{W^s \geq 0} U^s(W^s) - c_0 W^s$$

単純化のため、 $W^s \neq 0$ とすると、最適取水量 W_c^a は以下の必要条件を満たしている。

$$U^{s'}(W_c^a) = \psi \chi W_c^{a\chi-1} L^{1-\chi} = c_0 \quad (2.4)$$

2.2.2 開放経済

1) 社会計画者レジーム

はじめに社会計画者レジームを考える。両国の効用の合計を $U^w(W^s, W^f) \equiv U^s(W^s, W^f) + U^f(W^f, W^s) = \psi \bar{W}^\chi \bar{L}^{1-\chi}$ と置くと、社会的最適取水量 W_c^* は以下を満たすように決定される。

$$\frac{\partial U^w}{\partial W^s}(W_c^*, W_\mu^f) = \psi \chi (W_c^* + W_\mu^f)^{\chi-1} \bar{L}^{1-\chi} = c_0 \quad (2.5)$$

(2.4)と(2.5)から、以下の命題が成り立つ。

命題 1

社会計画者レジームにおいては、s国が相対的な水豊富国である場合、のとき $W_c^* > W_c^a$ となり、s国が相対的な水希少国である場合、 $W_c^* < W_c^a$ となる。

(証明)

(2.4)と(2.5)より、閉鎖経済における最適取水量 W_c^a と開放経済における最適取水量 W_c^*

は、それぞれ以下のように表される。

$$W_C^a = \left(\frac{\psi\chi}{c_0}\right)^{\frac{1}{1-\chi}} L^s, \quad W_C^* = \left(\frac{\psi\chi}{c_0}\right)^{\frac{1}{1-\chi}} (L^s + L^f) - W_\mu^f$$

後者は前者を使って以下のように変形できる。したがって、上記命題が成立する。

$$W_C^* = W_C^a + \left[\left(\frac{\psi\chi}{c_0}\right)^{\frac{1}{1-\chi}} L^f - W_\mu^f \right] = W_C^a + L^f \left(\frac{W_C^a}{L^s} - \frac{W_\mu^f}{L^f} \right)$$

(証明了)

命題 1 は、s 国の方が相対的に水資源が豊富な場合は、社会計画者は閉鎖経済よりもストックを多く取水し、s 国の方が水資源が希少な場合は少なく取水することを示している。s 国が水豊富国である場合は s 国のストック取水量を増やすことで貿易相手国の水希少性をシステム全体として補い、s 国が水希少国である場合は逆に貿易相手国の水資源によって s 国の水希少性を補うのである。その理由は、直感的に言えば、社会計画者は両国の比較優位性を高める方向に s 国の水賦存量を調整することで、開放経済による便益を最大化しようとするからである。

社会的最適取水量 W_C^* に対して、両国の便益はそれぞれ以下のように表すことができる。

$$U^s(W_C^*, W_\mu^f) - c_0 W_C^* = \psi \left[\chi \cdot \frac{W_C^*}{\bar{W}_C^*} + (1 - \chi) \cdot \frac{L^s}{\bar{L}} \right] \bar{W}_C^{*\chi} \bar{L}^{1-\chi} - c_0 (\bar{W}_C^* - W_\mu^f) \quad (2.6a)$$

$$U^f(W_\mu^f, W_C^*) = \psi \left[\chi \cdot \frac{W_\mu^f}{\bar{W}_C^*} + (1 - \chi) \cdot \frac{L^f}{\bar{L}} \right] \bar{W}_C^{*\chi} \bar{L}^{1-\chi} \quad (2.6b)$$

ただし、 $\bar{W}_C^* \equiv W_C^* + W_\mu^f$ である。したがって、不確実性がない場合における両国の純便益の和 B_C は、以下のように決定される。

$$B_C \equiv U^s(W_C^*, W_\mu^f) + U^f(W_\mu^f, W_C^*) - c_0 W_C^* = \psi \bar{W}_C^{*\chi} \bar{L}^{1-\chi} - c_0 (\bar{W}_C^* - W_\mu^f) \quad (2.7)$$

2) 分権レジーム

分権レジームにおいて、 s 国が直面する最適化問題は以下の通りである。

$$\max_{W^s \geq 0} U^s(W^s, W_\mu^f) - c_0 W^s$$

やはり単純化のため、 $W^s \neq 0$ とすると、最適取水量 W_c^s は以下の必要条件を満たしている。

$$\frac{\partial U^s}{\partial W^s}(W_c^s, W_\mu^f) = \psi\chi \left[1 - (1 - \chi) \left(\frac{W_c^s}{\bar{W}^s} - \frac{L^s}{\bar{L}} \right) \right] \bar{W}_c^{s\chi-1} \bar{L}^{1-\chi} = c_0 \quad (2.8)$$

ただし、 $\bar{W}_c^s \equiv W_c^s + W_\mu^f$ である。

このとき、以下の命題が成立する。

命題 2

s 国が相対的な水豊富国である場合、 $W_c^s < W_c^*$ となり、 s 国が相対的な水希少国である場合、 $W_c^s > W_c^*$ となる。

(証明)

(2.5), (2.8)より、以下が成り立つ。

$$\frac{\partial U^s}{\partial W^s}(W_c^*, W_\mu^f) = c_0 - \frac{\partial U^f}{\partial W^s}(W_\mu^f, W_c^*) = \frac{\partial U^s}{\partial W^s}(W_c^s, W_\mu^f) - \frac{\partial U^f}{\partial W^s}(W_\mu^f, W_c^*)$$

したがって、(2.3)より、 $\frac{W_\mu^f}{W_c^*} > \frac{L^f}{\bar{L}}$ であれば、 $\frac{\partial U^s}{\partial W^s}(W_c^*, W_\mu^f) > \frac{\partial U^s}{\partial W^s}(W_c^s, W_\mu^f)$ となり、 $\frac{W_\mu^f}{W_c^*} <$

$\frac{L^f}{\bar{L}}$ であれば、 $\frac{\partial U^s}{\partial W^s}(W_c^*, W_\mu^f) < \frac{\partial U^s}{\partial W^s}(W_c^s, W_\mu^f)$ となる。全ての (W^i, W^j) について、 $\frac{\partial^2 U^i}{\partial W^{i2}} < 0$

なので、前者の場合は $W_c^s > W_c^*$ となり、後者の場合は $W_c^s < W_c^*$ となる。

(証明了)

命題 2 は、 f 国が相対的な水希少国であれば、 s 国が単独で決める場合の取水量は社会

的最適取水量よりも必ず過少になり、反対に、 f 国が相対的な水豊富国であれば必ず過大になることを示している。このように、交易条件効果の存在によって、社会計画レジームと分権レジームの意思決定の間にはズレが生じる。

2.3 不確実性がある場合

では、 f 国のフロー量の変動する場合には、どのような状況が実現するのだろうか。

2.3.1 閉鎖経済

閉鎖経済においては、 s 国には不確実性が存在しないので、最適取水量や効用水準は先ほどと同じである。一方、 f 国では、期待効用は $E[U^f(W^f)] = E[\psi W^{\chi} L^{1-\chi}]$ となる。 $U^f(\cdot)$ は狭義の凹関数なので、明らかに $E[U^f(W^f)] < U^f(W_\mu^f)$ である。

2.3.2 開放経済

1) 社会計画者レジーム

開放経済ではどうだろうか。先ほどと同じように、社会計画者レジームから考える。まず、所与のフローの実現値 W^f に対して、社会的最適取水量 W_U^* は以下の必要条件を満たしている。

$$\frac{\partial U^w}{\partial W^s}(W_U^*, W^f) = \psi \chi (W_U^* + W^f)^{\chi-1} \bar{L}^{1-\chi} = c_0 \quad (2.9)$$

(2.9)より、社会計画者レジームにおける最適取水ルールは、 $\psi \chi \bar{W}_U^{*\chi-1} \bar{L}^{1-\chi} = c_0$ を満たす定数 $\bar{W}_U^*$ に対して、 $W_U^*(W^f) = \bar{W}_U^* - W^f$ となる。すなわち、社会計画者はフロー量が増えればちょうどその分だけストックの取水量を減らし、フロー量が減ればちょうどその分だけストックの取水量を増やす。

では、こうした対応の結果として、地域間連結利用の安定化機能はどのように評価できるだろうか。先ほどの最適取水ルールを適用すると、両国の期待純便益はそれぞれ以下のように表すことができる。

$$\begin{aligned}
E[U^s(W_U^*(W^f), W^f) - c_0 W_U^*(W^f)] \\
= \psi \left[\chi \cdot \frac{\bar{W}_U^* - W_\mu^f}{\bar{W}_U^*} + (1 - \chi) \cdot \frac{L^s}{\bar{L}} \right] \bar{W}_U^{*\chi} \bar{L}^{1-\chi} - c_0 (\bar{W}_U^* - W_\mu^f)
\end{aligned} \tag{2.10a}$$

$$E[U^f(W^f, W_U^*(W^f))] = \psi \left[\chi \cdot \frac{W_\mu^f}{\bar{W}_U^*} + (1 - \chi) \cdot \frac{L^f}{\bar{L}} \right] \bar{W}_U^{*\chi} \bar{L}^{1-\chi} \tag{2.10b}$$

したがって、不確実性がある場合における両国の期待純便益の和 B_U は、以下のように決定される。

$$\begin{aligned}
B_U &\equiv E[U^s(W_U^*(W^f), W^f)] + E[U^f(W^f, W_U^*(W^f))] - E[c_0 W_U^*(W^f)] \\
&= \psi \bar{W}_U^{*\chi} \bar{L}^{1-\chi} - c_0 (\bar{W}_U^* - W_\mu^f)
\end{aligned} \tag{2.11}$$

ここで、以下が成立する。

命題 3

社会計画者レジームにおいては、不確実性がある場合のシステム全体の期待純便益と国ごとの期待純便益は、不確実性がない場合の純便益と等しい。

(証明)

(2.5)と(2.9)より、 $\bar{W}_C^* = \bar{W}_U^*$ である。したがって、(2.7)と(2.11)より、 $B_C = B_U$ となる。また、このとき、(2.6a), (2.6b), (2.10a), (2.10b)より、不確実性がない場合の各国の純便益と不確実性がある場合の各国の期待純便益は等しくなる。

(証明了)

閉鎖経済における両国の純便益の和を、不確実性がない場合とある場合でそれぞれ B_C^a 、 B_U^a と置くと、両者の差は以下のように表される。

$$B_C^a - B_U^a = \psi W_\mu^{f\chi} L^{f^{1-\chi}} - E[\psi W^{f\chi} L^{f^{1-\chi}}]$$

不確実性がない場合とある場合における、開放経済への移行によるシステム全体の純便益の増加を、それぞれ $V_C \equiv B_C - B_C^a$ 、 $V_U \equiv B_U - B_U^a$ とすると、最終的に以下が成り立つ。

命題 4

社会計画者レジームにおいては、地域間連結利用による安定化価値 SV は、以下のように正となる。

$$SV \equiv V_U - V_C = \psi W_\mu^{f^x} L^{f^{1-x}} - E \left[\psi W^f L^{f^{1-x}} \right] > 0$$

命題 4 は、水の移動が物理的にできない離れた国(地域)の間での水利用においても、ストック型水資源とフロー型水資源の地域間連結利用は地域内連結利用と同様の安定化機能を持つことを示している。

さらに、命題 3 は、不確実性がある場合でも、システム全体と各国の期待純便益は不確実性がない場合と変わらないことを示している。システム全体も各国もリスク回避的(効用関数の狭義の凹性)であるにもかかわらず、少なくとも期待便益は悪化しない。それだけでなく、命題 3 は、フローの変動に応じてストックを調整するにあたり、少なくとも期待の段階では、勝者・敗者は生じないことを示している。社会計画者レジームにおいては、フローの変動量とストックの調整量が完全に一対一に対応しているためである。

ところで、佐藤・仲山 (2014)のフロー型×フロー型地域間連結利用モデルにおいても、地域間連結利用による安定化価値は一定の条件下で正となった。では、このことと本稿のモデルでの結論はどういう関係にあるのだろうか。第一に、佐藤・仲山 (2014)のモデルでは一定のフローの実現値の中でのみ安定化価値が生じたが、本稿のモデルでは、両国で両財が生産されること以外の制限はない。佐藤・仲山 (2014)のモデルでは、フローの変動の結果としての、各国ごとやシステム全体の水賦存量は市場参加者にとって所与であったが、本稿のモデルでは、水賦存量自体を社会計画者がコントロールすることができるためである。

第二に、佐藤・仲山 (2014)のモデルでも、開放経済への移行の便益は、一定条件の下で不確実性がある場合がない場合を上回っていたものの、開放経済の便益のみ単独で取り出すと、不確実性がある場合の期待便益 ($E[U^w(W^1)] = E[\psi \bar{W}^x \bar{L}^{1-x}]$) は、ない場合の便益 ($U^w(W_\mu^1) = \psi \bar{W}_\mu^x \bar{L}^{1-x}$) より低くなっていた。それに対して、本章のモデルでは、開放経済の便益のみを取り出しても、両者は等しくなっている。

したがって、片方の国がストック型水資源を利用できる場合は、両国・地域の間で適切な協定を締結し、社会計画レジームの地域間連結利用を実現すれば、より広範囲にわたって安定化機能を発動させることができ、しかも、開放経済の期待便益を不確実性がない場合と同水準にまで引き上げることができるのである。

2) 分権レジーム

では、分権レジームではどうだろうか。所与のフローの実現値 W^f に対して、 s 国にとっての最適取水量 W_U^s は以下の必要条件を満たしている。

$$\frac{\partial U^s}{\partial W^s}(W_U^s, W^f) = \psi\chi \left[1 - (1 - \chi) \left(\frac{W_U^s}{\bar{W}_U^s} - \frac{L^s}{\bar{L}} \right) \right] \bar{W}_U^{s\chi-1} \bar{L}^{1-\chi} = c_0$$

ただし、 $\bar{W}_U^s \equiv W_U^s + W^f$ である。

では、以上のような取水量の決定を前提とすると、両国の期待純便益はどのように評価できるであろうか。社会計画者レジームでは、社会計画者はフロー量が増えればちょうどその分だけストックの取水量を減らし、フロー量が減ればちょうどその分だけストックの取水量を増やしたため、いかなる場合も両国の水資源の合計は変わらなかった。このため、期待純便益は確率変数 W^f の線形関数と見ることができ、従って期待純便益は(2.10a)と(2.10b)のように平均 W_μ^f で表すことができた。しかし、今回はフロー量とストックの取水量が一对一の関係にないため、こうした処理ができない。そのため、社会計画者レジームと異なり、不確実性がある場合とない場合で（期待）純便益が等しくなるとは限らない。安定化価値についても、社会計画者レジームのように必ず正になるとは限らない。

もちろん、分権レジームにおいても、パラメーターによっては、安定化機能が働く場合はあるものと考えられる。しかし、その場合でも、社会計画者レジームの下で得られるシステムとしての最大の効果からはズレが生じる。したがって、システムの安定化や資源の保全という政策的観点から考えた場合、両国間の補償などを通じて両レジーム下の各国の便益の差を埋める国際協定や地域間協定を締結することで、積極的に地域間連結利用の効果を最大化することが考えられる。この点については、第4節で再論する。

2.4 ストック型×フロー型地域間連結利用のメカニズムと平準化

2.4.1 システム全体の平準化のメカニズム

社会計画者レジームの地域間連結利用を機能させる上で重要なのが、システム全体の便益における f 国におけるフローの実現量 W^f と s 国におけるストックの取水量 W^s との対応関係である。社会計画者は、あたかも2つの国の資源が同じ場所で用いられているかのように、フローが増えればちょうどその分だけストックの取水量を減らし、フロー

量が減ればちょうどその分だけストックの取水量を増やす。これは、佐藤・仲山 (2014) の地域内連結利用における表流水の実現値と地下水の最適揚水量との一対一の関係と全く同じである。水の移動が物理的にできない離れた国（地域）の間での水利用においても、同じ場所で2つの水源を代替的に利用できる場合と同じ対応がなされるのである。

本稿では、このように、フロー型の水資源の変動に合わせてストック型の水資源の取水量を調節し、システム全体として利用可能な水の変動を抑えることを、平準化 (leveling) と呼ぶ。ストック型×フロー型の地域間連結利用においては、この平準化の意思決定が、安定化をはじめ様々な機能の発現を支えている。

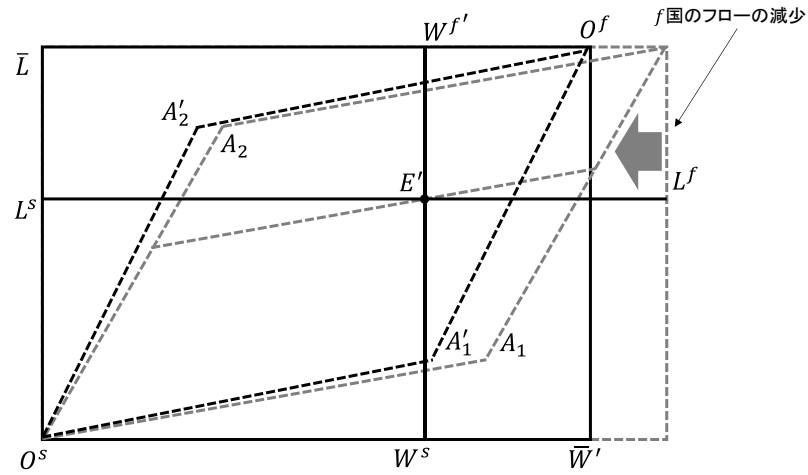
なぜこのような平準化の意思決定が行われるのかを理解するために、佐藤・仲山 (2014)と同様、Samuelson (1949)とDixit and Norman (1980)の思考実験を活用しよう。佐藤・仲山(2014)での議論との違いは、社会計画者が、 s 国の水資源の分だけ費用を支払って、自分にとって最も望ましいように箱の形を変更できることである。システムは、社会計画者が決めた箱の形に応じて財を生産する。

最初に、箱の中を資源が自由に移動できる場合を考えよう。いま、社会計画者にとって望ましい箱の形が、図 2.1(a)における、 s 国の水資源の分 $O^s W^s$ に相当する費用を支払うことで成立しているとする。すなわち、この状態において、箱の大きさが1単位大きくなることによる効用の増分と限界費用が一致している。ある時、 f 国の水資源の量が減り、箱の大きさが小さくなってしまったとする。そこで社会計画者は、再び限界効用と限界費用が一致する点、つまり、図 2.1(b)のようになるまで s 国の水資源を増やす。平準化を行って箱の形を元に戻すのである。箱の形さえ元に戻れば、両国間の資源配分がどうであろうとも、資源は両国間を自由に移動し、先程と同じ効用の水準（取水費用を除く）を達成することができる。

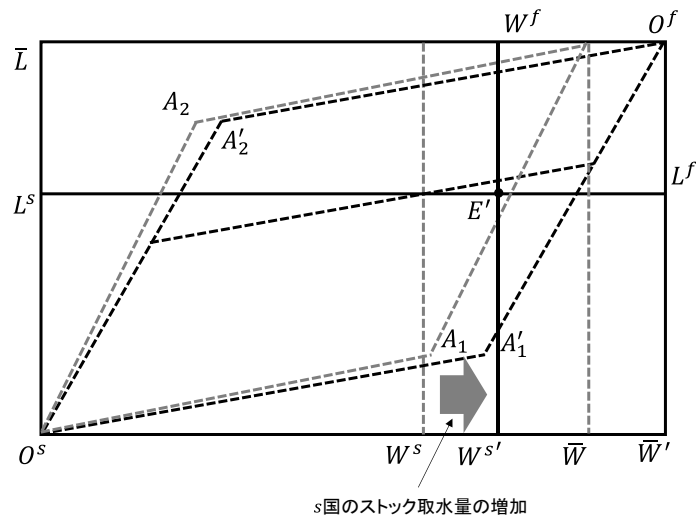
では、資源が移動できない場合はどうだろうか。やはり社会計画者は、減った f 国の水資源の分だけ s 国の水資源を増やし、箱の形を元に戻そうとするであろう。箱の形が元に戻れば、佐藤・仲山 (2014)で説明した思考実験の結果にしたがって、両国間の資源配分の状況が変わっていたとしても、かつ、資源が自由に移動できないとしても、結局は同じ均衡を達成することができるのである。

図 2.1 ストック型×フロー型地域間連結利用における調節

(a) フローの変動



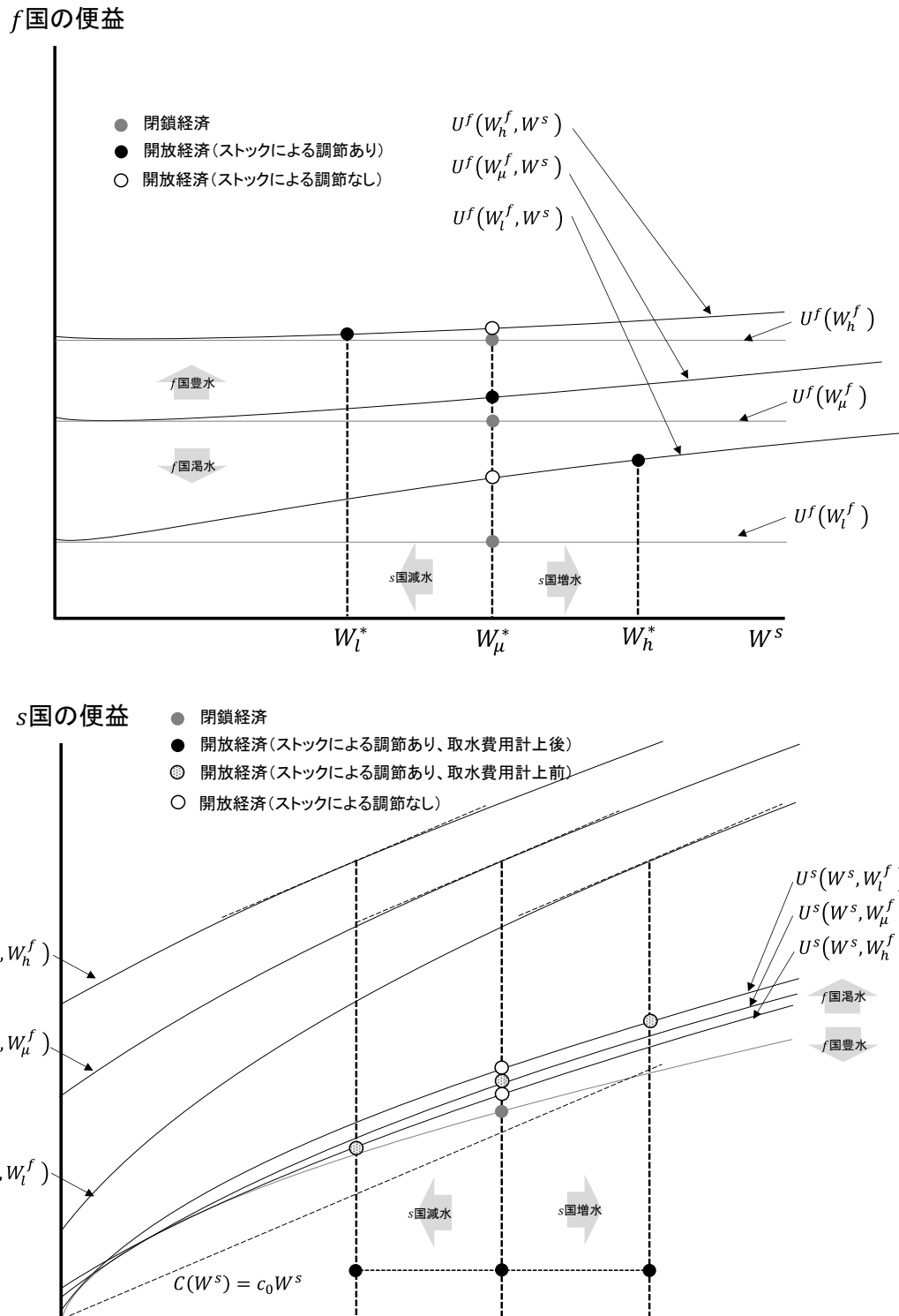
(b) ストック取水量の調節



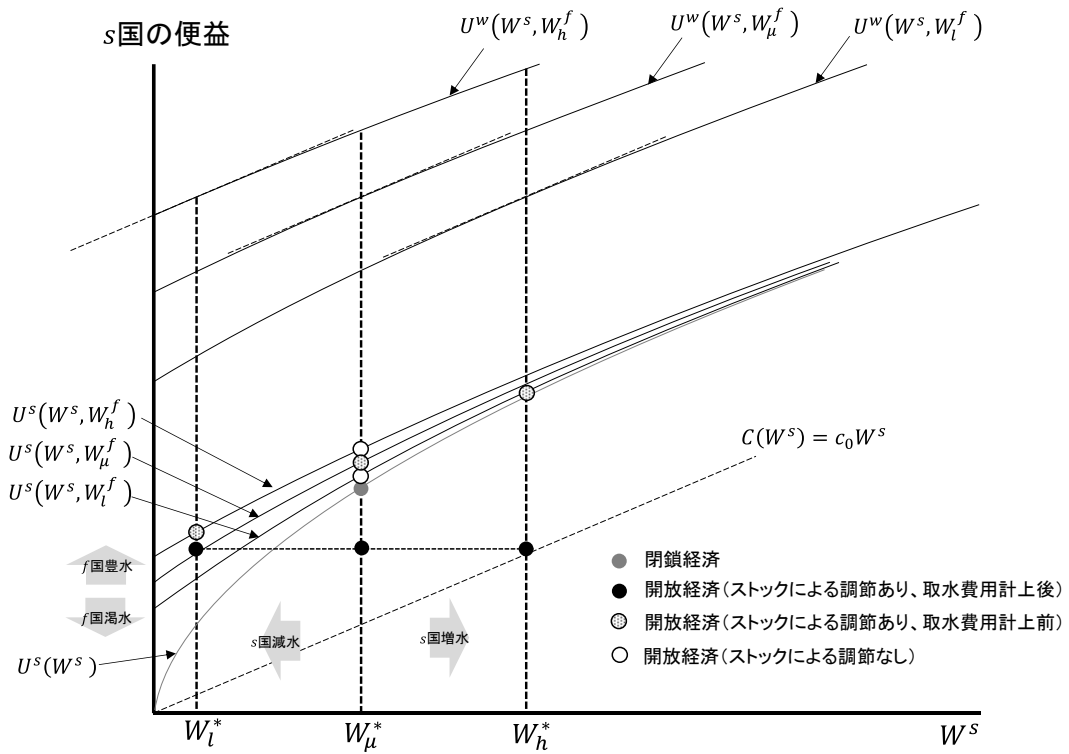
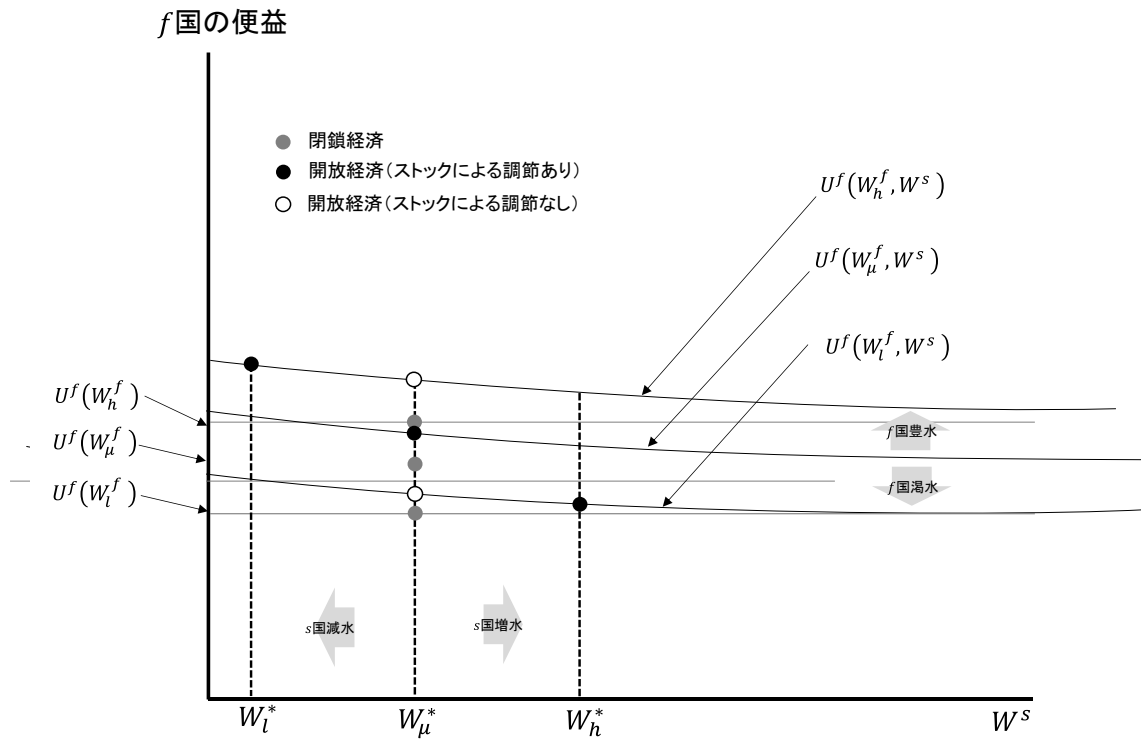
2.4.2 平準化に伴う各国の状況

こうしたシステム全体の平準化の動きに伴って、各国では何が起こっているのだろうか。図 2.2(a), (b)は、s国が相対的に水豊富である場合と希少である場合に分けて、フローの変動とそれに対するストックの調節によって、各国の便益がどのように変化するかを示したものである。いずれも横軸はストックの取水量 W^s を表しているが、縦軸は図によってf国の便益とs国の便益のいずれかを設定している。ここでは単純化のため、不確実性がない場合のフロー量を W_μ^f として、50%ずつの確率で豊水(W_h^f)と渇水(W_l^f)が生じるとする。

図 2.2 社会計画者レジームにおける各国の便益の動き
(a) s 国が水豊富国の場合



(b) s国が水希少国の場合



まず、 s 国が水豊富国である場合から考える。図 2.2 (a)のはじめの図は f 国の便益の変化を表している。閉鎖経済では灰色の丸に対応する便益の変動が生じる。開放経済に移行し、かつ、ストックの取水量による調節を行わない場合、白抜きの丸に対応する便益が実現する。これは一方の国の水賦存量を固定した佐藤・仲山 (2014)の状況に対応している。ストックによる調節を行うと、最終的に黒丸に対応する便益が実現する。白抜きの丸に比べて黒丸の方が便益の変動の幅が縮小しており、平準化によって、水希少国である f 国の便益が安定化されている。

一方、次の図は、この時の s 国の便益の変化を表したものである。閉鎖経済下では s 国には不確実性がないため、灰色の丸は変動しない。開放経済に移行すると、ストックの調節をしなくても、 f 国のフローの変動に合わせて国内で適応特化 (佐藤・仲山, 2014)が行われ、結果として白抜きの丸に対応する便益が実現する。ストックによる調節を行うと、網掛けで抜いた丸に対応する便益が実現し、調節を行わない場合に比べて便益の変動幅が大きくなっている。しかし、さらに取水費用を計上することで最終的に得られる黒丸の純便益は、フローの変動を吸収しているのにもかかわらず、変動していない。

次に、 s 国が水希少国である場合を考える。図 2.2 (b)のはじめの図は f 国の便益の変化を表している。先ほどとの大きな違いは、ストックによる調節を行うと、便益の変動の幅がかえって拡大していることである。命題 3 で見たように、期待便益は不確実性がある場合とない場合で変わらないものの、 f 国が水豊富国である場合に限り、実際に実現する便益のばらつきは拡大する。次の図からわかるように、それに対して、取水費用を計上した s 国の最終的な純便益は、先ほどと同じく変動しない。

このように、社会計画者レジームでは、システム全体として安定化機能が作動していても、両国の相対的な水賦存量の状況に応じて、国ごとの便益の変動の様態には大きな非対称性が生じる。具体的には、 s 国が水豊富国で f 国が水希少国の場合は f 国の便益の変動幅は縮小し、逆の場合は拡大する。また、いずれの場合も取水費用を考慮した s 国の純便益は変動しない。

システムが変動をどの部分 (国) でどの程度吸収するかは、システム全体の安定化価値の大きさとは無関係に、取水費用の負担の構造に依存する。とりわけ、取水費用を全て s 国が負担する状況で生じるこうした極端な非対称性は、負担割合の構造を変えることで緩和させることができる。この点については、分権レジームの問題と併せ、第 4 節で政策的措置を検討する中で再論する。

3. 動学モデル

3.1 基本設定

次に、2 期間の動学モデルにおける地域間連結利用を考える。ただし、以下では、社会計画者のケースのみに焦点を絞り、分権レジームについては次節で論じる。 s 国の 1 期目のストック量を S_1 、2 期目のストック量を S_2 と置く。 s 国はストックの範囲で、1 期目に W_1^s 、2 期目に W_2^s の水資源を取水し、生産過程に投入する。ここでは下付き添字は期を表すことに注意されたい。ストック型水資源の利用には、期初のストック量 S_t とその期の水の利用量 W_t^s の関係に応じて、以下で定義される費用がかかるものとする。

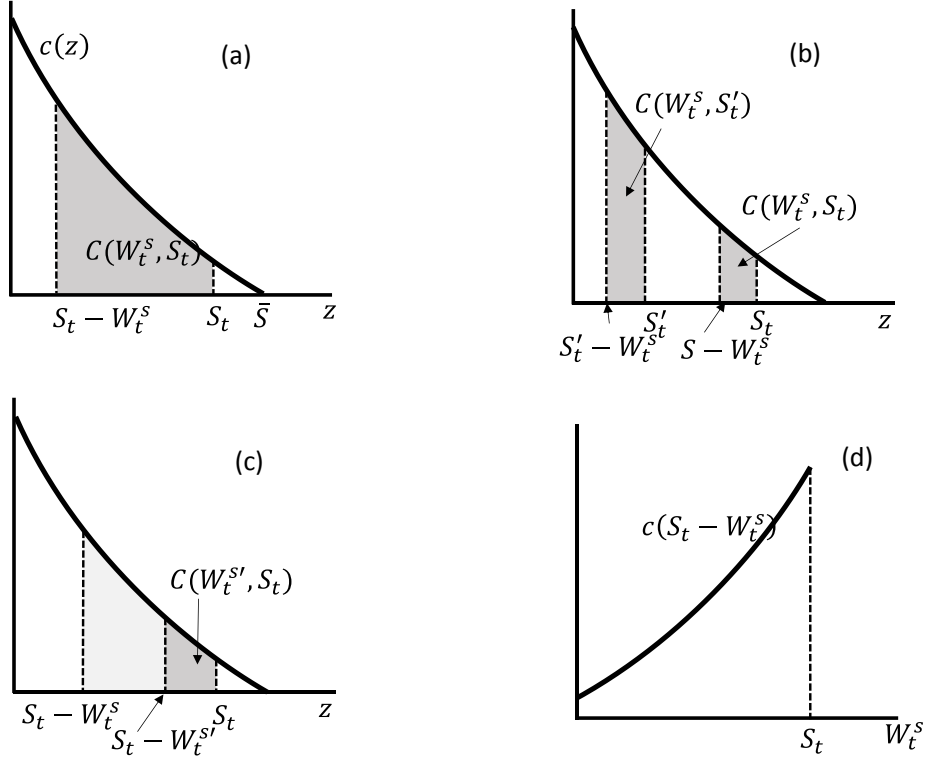
$$C(W_t^s, S_t) \equiv \int_{S_t - W_t^s}^{S_t} c(z) dz, \quad \forall W_t^s \in [0, S_t] \quad (3.1)$$

$c(\cdot)$ は S_t から $S_t - W_t^s$ まで取水する過程での瞬間的なストック水準に対応した単位取水費用を表す関数で、非増加かつ凸であるとする。したがって、ストックが減少するとともに、単位取水費用は増加するか一定で、かつ、増加率は大きくなるか一定である。単位取水費用がストックの減少とともに増加するのは、例えば、ストックの減少とともに地下水位が低下し、その分、汲み上げにかかる使用電力が増加したり、より強力なさく井設備やポンプが必要となったりする状況が想定される。また、流域全体のレベルでは、一つの帯水層の枯渇に応じて、新たな帯水層を見つけるための水源調査などが必要となる。さらに、社会全体の観点からは、地下水位の低下によって、地盤沈下や帯水層への海水の浸入などの社会的費用が増加することも考えられる。一方で、凸性は若干強い仮定でもある。例えば、単位あたりの電力料金が使用量とともに低下するような設定の場合は、単位費用関数が狭義の凹になることも考えられる。ただし、実証的なデータに基づくものも含め、多くの先行研究では、線形を含め凸としており (Burt (1964a, 1964b), Tsur and Graham-Tomasi (1991), Provencher and Burt (1993) など)、本稿もこの仮定を用いることとする。

図 3.1 は、(3.1) の費用の構造を表したものである。(a) からわかるように、 $C(W_t^s, S_t)$ は、取水前のストック水準 S_t から取水後のストック水準 $S_t - W_t^s$ までの単位取水費用を積分したものである。(b) に図示されているように、同じ取水量 W_t^s であっても、取水前のストック水準が小さいほど、地下水位が低く深い地層から水をくみ上げる必要があるなどのため、取水費用は大きくなる。また、(c) からわかるように、取水前のストック水準が同じであれば、取水量が大きくなるにつれ取水費用は大きくなる。(3.1) を W_t^s で微

分すると、限界費用関数 $c(S_t - W_t^s)$ が得られる（図 3.1(d)）。

図 3.1 取水費用の構造



f 国のフロー型の水資源は1期目に W_1^f 、2期目に W_2^f が実現する。フロー型の水資源の実現値は、平均 W_μ^f の既知の確率分布に従って変動する。また、ここでも変動は(2.1)で定義される範囲の中に収まっているものとする。生産者は期初に各期のフローの量を知ることができ、1期目の時点で、既にその期の実現値 W_1^f はわかっている。ただし、来期、すなわち1期目の時点からみた2期目のフローの量 W_2^f はわからない。後ほどの比較の便を考え、1期目に既に実現したフロー量はちょうど平均 W_μ^f であったとする。両国とも割引率は δ ($\delta \in (0,1)$) とする。

3.2 不確実性がない場合

3.2.1 閉鎖経済

1期目からの持ち越し分 S_2 の量を所与とした場合、2期目に s 国が直面する効用最大化問題は、以下のように表される。

$$\begin{aligned} & \max_{W_2^s} U_2^s(W_2^s) - \int_{S_2 - W_2^s}^{S_2} c(z) dz \\ & s.t. \quad 0 \leq W_2^s \leq S_2 \end{aligned}$$

$W_2^s \neq 0$ とすると、閉鎖経済における 2 期目の最適取水量 W_{2C}^a の必要条件は以下のよう
に与えられる。

$$\begin{aligned} U_2^{s'}(W_{2C}^a) &> c(S_2 - W_{2C}^a), \quad W_{2C}^a = S_2 \\ \text{または、} U_2^{s'}(W_{2C}^a) &= c(S_2 - W_{2C}^a), \quad W_{2C}^a < S_2 \end{aligned} \quad (3.2)$$

1 期目からの持ち越し分 S_2 を所与とした 2 期目の最適意思決定ルールを $W_{2C}^a(S_2)$ と置く
と、1 期目に s 国が直面する効用最大化問題は、以下のように表される。

$$\begin{aligned} & \max_{W_1^s} U_1^s(W_1^s) - \int_{S_1 - W_1^s}^{S_1} c(z) dz + \delta \left[U_2^s(W_{2C}^a(S_2)) - \int_{S_2 - W_{2C}^a(S_2)}^{S_2} c(z) dz \right] \\ & s.t. \quad S_2 = S_1 - W_1^s \geq 0, \quad W_1^s \geq 0 \end{aligned}$$

$W_1^s \neq 0$ とし、また、1 期目で全てのストックを使い切ってしまうことはないとする
と、閉鎖経済における 1 期目の最適取水量 W_{1C}^a の必要条件は以下のように表される。

$$U_1^{s'}(W_{1C}^a) - c(S_1 - W_{1C}^a) = C_s + C_d \quad (3.3a)$$

ただし、 C_s と C_d はそれぞれ以下のように定義される。

$$C_s \equiv \delta [U_2^{s'}(W_{2C}^a(S_2)) - c(S_2 - W_{2C}^a(S_2))] W_{2C}^{a'}(S_2) \quad (3.3b)$$

$$C_d \equiv \delta [c(S_2 - W_{2C}^a(S_2)) - c(S_1 - W_{1C}^a)] \quad (3.3c)$$

(3.3a)の左辺は、所与のストック水準 S_1 の地下水を 1 期目に W_{1C}^a だけ揚水する場合の、
取水費用も勘案した限界純便益を表している。これはストック水準 S_1 におけるストック
型水資源のシャドウプライスである。右辺は資源経済学でいう限界ユーザーコストで、
資源を追加で 1 単位利用することによって失われる将来の便益の現在価値を表す。言
い換えれば、現在の資源利用の機会費用である。地下水の揚水の場合、ユーザーコスト
はストックコスト (stock cost) と深度コスト (depth cost) の 2 つの要素に分けられる

(Provencher and Burt, 1993)。ストックコストは、現在の取水によって将来利用可能なストックが減るために諦めなければならない、将来のストックから得られるはずであった便益の現在価値を指す。(3.3b)からわかるように、 C_s は、1期目の取水量を1単位減らし、2期目の初期ストック S_2 を増やすことによって増加する2期目の揚水量($W_{2c}^a(S_2)$)に、そのストック水準での2期目の限界純便益($U_2^s(W_{2c}^a(S_2)) - c(S_2 - W_{2c}^a(S_2))$)をかけ、現在価値に割り引いた値として与えられる。一方、深度コストとは、現在の取水を1単位減らすことで節約できるはずであった将来の取水費用を指す。(3.3c)からわかるように、 C_d は、1期目の取水量を1単位減らし、2期目の初期ストック S_2 を増やすことによって節約できるはずであった取水費用であり、具体的には1期目から2期目にかけての限界費用の増加分として与えられる。

なお、(3.2)より、 $U_2^s(W_{2c}^a) = c(S_2 - W_{2c}^a)$ のケースでは、 C_s はゼロとなる。持ち越し分が2期目の取水量を制約していないためストックコストはなく、ユーザーコストは全て深度コストとして現れる。

以下では、単純化のため、2期目にストックを全て使い切ることがない場合のみを考える。この場合、最終的に最適化の必要条件は以下のように表される。

$$U_2^s(W_{2c}^a(S_2)) = \psi \chi W_{2c}^a(S_2)^{\chi-1} L^{1-\chi} = c(S_2 - W_{2c}^a(S_2)) \quad (3.4a)$$

$$\begin{aligned} U_1^s(W_{1c}^a(S_1)) - c(S_1 - W_{1c}^a(S_1)) &= \psi \chi W_{1c}^a(S_1)^{\chi-1} L^{1-\chi} - c(S_1 - W_{1c}^a(S_1)) \\ &= \delta [c(S_2 - W_{2c}^a(S_2)) - c(S_1 - W_{1c}^a(S_1))], \quad S_2 = S_1 - W_{1c}^a(S_1) \end{aligned} \quad (3.4b)$$

(3.4a)は、 S_2 を所与とした2期目の最適意思決定 $W_{2c}^a(S_2)$ が満たす条件を表し、(3.4b)は、それを前提として1期目の最適意思決定 $W_{1c}^a(S_1)$ が満たす条件を表している。

3.2.2 開放経済

同じように、開放経済における最適化の必要条件は以下のように表される。

$$\frac{\partial U_2^w}{\partial W_{2c}^s}(W_{2c}^*(S_2, W_\mu^f), W_\mu^f) = \psi \chi [W_{2c}^*(S_2, W_\mu^f) + W_\mu^f]^{\chi-1} \bar{L}^{1-\chi} = c(S_2 - W_{2c}^*(S_2, W_\mu^f)), \quad (3.5a)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_1^w}{\partial W_{1c}^s}(W_{1c}^*(S_1), W_\mu^f) - c(S_1 - W_{1c}^*(S_1)) &= \psi \chi [W_{1c}^*(S_1) + W_\mu^f]^{\chi-1} \bar{L}^{1-\chi} - c(S_1 - W_{1c}^*(S_1)) \\ &= \delta [c(S_{2c} - W_{2c}^*(S_2, W_\mu^f)) - c(S_1 - W_{1c}^*(S_1))], \quad S_2 = S_1 - W_{1c}^*(S_1) \end{aligned} \quad (3.5b)$$

3.3 不確実性がある場合

3.3.1 閉鎖経済

閉鎖経済においては、 s 国には不確実性が存在しないので、最適取水量や効用水準は先ほどと同じである。一方、 f 国では、期待純便益の現在価値は以下ようになる。

$$U_1^f(W_\mu^f) + \delta E[U_2^f(W_2^f)] = \psi W_\mu^{f\chi} L^{f1-\chi} + \delta E[\psi W_2^{f\chi} L^{f1-\chi}]$$

3.3.2 開放経済

先ほどと同じように $W_2^s \neq 0$ とし、やはり 2 期目にストックを使い切らない場合を考えると、2 期目の社会的最適取水量 W_{2U}^* は以下を満たすように決定される。

$$\frac{\partial U_2^w}{\partial W_2^s}(W_{2U}^*, W_2^f) = \psi \chi (W_{2U}^* + W_2^f)^{\chi-1} \bar{L}^{1-\chi} = c(S_2 - W_{2U}^*) \quad (3.6)$$

図 3.2(a), (b) はいずれも、横軸に W_2^s をとった場合の、(3.6) の条件を図示したものである。ただし、(a) では限界費用曲線は線形、(b) では狭義の凸である。どちらのグラフにおいても、2 期目の取水量とそれに対応する限界費用は、ちょうど限界便益曲線と限界費用曲線の交点で決まる。限界便益曲線は、 W_2^f の変化に応じて左右にシフトする。一方、限界費用曲線は、 W_2^f が変化しても曲線自体は動かず、 W_2^f の変化は曲線上の動きとして表される。

いま、表流水 W_2^f が、それぞれ p_l と p_h の確率で W_l^f と W_h^f のどちらかの値をとるとする ($W_l^f < W_h^f$, $p_l + p_h = 1$)。また、両者の平均を $W_\mu^f \equiv p_l W_l^f + p_h W_h^f$ とする。いずれのグラフにおいても、点 HQ_hIQ_l で囲まれる四角形は平行四辺形となっている。また、このとき、線分 Q_hK と線分 KI の比率は、 p_h と p_l の比率に対応している。

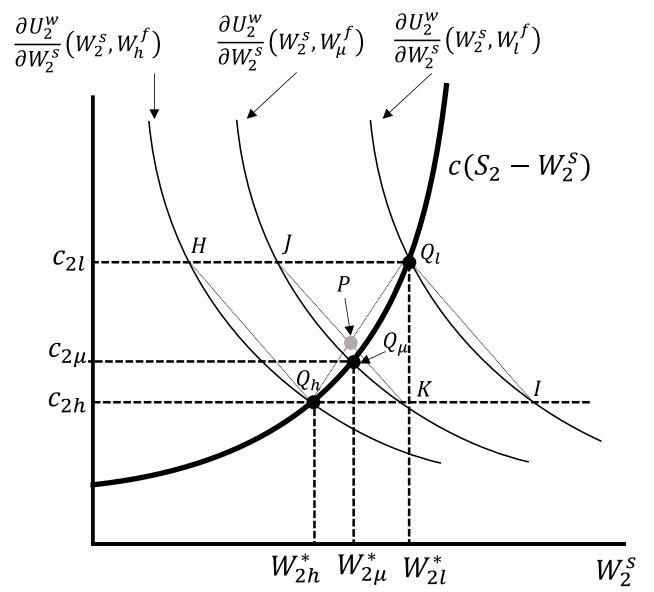
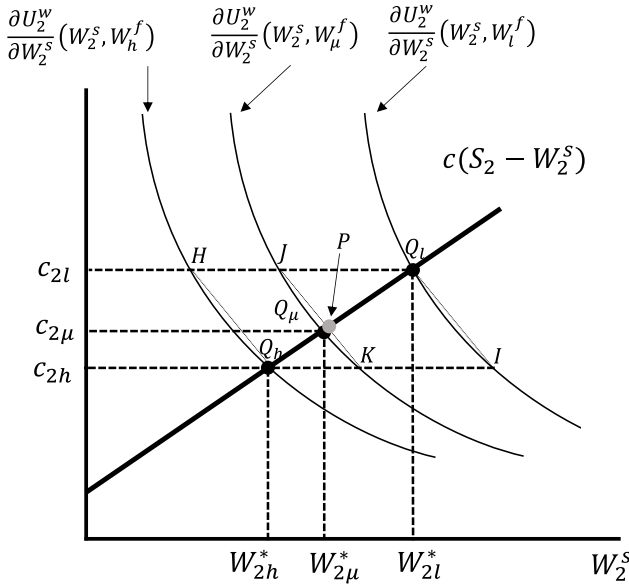
フローに不確実性がなく、常に W_μ^f が得られる場合の取水量を $W_{2\mu}^*$ 、不確実性があり、フローの実現値が W_h^f であった場合の取水量を W_{2h}^* と W_l^f であった場合の取水量を W_{2l}^* とする。図からわかるように、3 者の関係は $W_{2h}^* < W_{2\mu}^* < W_{2l}^*$ となる。また、これらに対応した限界費用は、縦軸に沿って $c_{2h} < c_{2\mu} < c_{2l}$ の順で与えられる。不確実性がある場合の期待揚水量を $W_{2U} \equiv p_l W_{2l}^* + p_h W_{2h}^*$ 、期待限界費用を $c_{2U} \equiv p_l c_{2l} + p_h c_{2h}$ と置く。線分 Q_hQ_l と線分 JK の交点を P とすると、線分 Q_hP と線分 PQ_l の比率は p_h と p_l の比率に対応するので、点 P の横軸の座標は W_{2U} になり、縦軸の座標は c_{2U} になる。

(a)のように限界費用関数が線形の場合、 W_{2U} は $W_{2\mu}^*$ より必ず大きくなり、 c_{2U} は $c_{2\mu}$ より必ず大きくなる。点 P と点 Q_μ はいずれも限界費用曲線上にあるため、点 P は点 Q_μ と一致するか、右上か左下にある。一方、限界便益関数の狭義の凸性より、点 P は同曲線の湾曲の“内側”の点であるため、点 Q_μ より右上にあることになる。

図 3.2 2 期目の取水量の決定

(a) 限界費用曲線が線形の場合

(b) 限界費用曲線が狭義の凸の場合



(b)のように限界費用関数が狭義の凸の場合は、 c_{2U} は $c_{2\mu}$ より必ず大きくなる。限界便益曲線と限界費用曲線の狭義の凸性より、点 P は両方の曲線の湾曲の“内側”にあるため、必ず点 Q_μ よりも上にあるからである。一方で、先ほどと異なり、 W_{2U} と $W_{2\mu}^*$ の大小関係は一概には言えない。

(3.6)の条件を満たす2期目の最適意思決定ルールを $W_{2U}^*(S_2, W_2^f)$ と置くと、1期目に社会計画者が直面する最適化問題は、以下のように表される。

$$\begin{aligned} \max_{W_1^s} & U_1^w(W_1^s, W_\mu^f) - \int_{S_1 - W_1^s}^{S_1} c(z) dz + \delta E \left[U_2^w(W_{2U}^*(S_2, W_2^f), W_2^f) - \int_{S_2 - W_{2U}^*(S_2, W_2^f)}^{S_2} c(z) dz \right] \\ \text{s.t. } & S_2 = S_1 - W_1^s \geq 0, \quad W_1^s \geq 0 \end{aligned}$$

$W_1^s \neq 0$ とし、また、1期目でも2期目でも全てのストックを使い切ってしまうことはないとする、最終的に最適化の必要条件は以下のように表される。

$$\frac{\partial U_2^w}{\partial W_2^s}(W_{2U}^*(S_2, W_2^f), W_2^f) = \psi\chi[W_{2U}^*(S_2, W_2^f) + W_2^f]^{\chi-1}\bar{L}^{1-\chi} = c(S_2 - W_{2U}^*(S_2, W_2^f)), \quad (3.7a)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_1^w}{\partial W_1^s}(W_{1U}^*(S_1), W_1^f) - c(S_1 - W_{1U}^*(S_1)) \\ = \psi\chi[W_{1U}^*(S_1) + W_1^f]^{\chi-1}\bar{L}^{1-\chi} - c(S_1 - W_{1U}^*(S_1)) \\ = \delta E \left[c(S_2 - W_{2U}^*(S_2, W_2^f)) - c(S_1 - W_{1U}^*(S_1)) \right], \quad S_2 = S_1 - W_{1U}^*(S_1) \end{aligned} \quad (3.7b)$$

3.4 地域間連結利用の機能の評価

2期目の安定化機能については、以下の命題が成立する。

命題 5

不確実性がある場合とない場合とで1期目からのストックの持ち越し量 S_2 が同じであり、かつ、 W^f の変動の範囲全体で最適取水量 $W_2^*(S_2, W^f)$ について以下の両方の条件が成り立つ場合、安定化価値は正となる。

$$\begin{aligned} \text{i. } c'(S_2 - W_2^*(S_2, W_2^f)) &\geq -\psi\chi(1-\chi)\bar{W}_2^{*\chi-2}\bar{L}^{1-\chi} \\ \text{ii. } \frac{c''(S_2 - W_2^*(S_2, W_2^f))}{[c'(S_2 - W_2^*(S_2, W_2^f))]^2} &\leq \frac{2-\chi}{\psi\chi(1-\chi)} \cdot \left(\frac{\bar{W}_2^*}{\bar{L}}\right)^{1-\chi} \end{aligned}$$

ただし、 $\bar{W}_2^* \equiv W_2^*(S_2, W_2^f) + W_2^f$ とする。

(証明) 付録参照

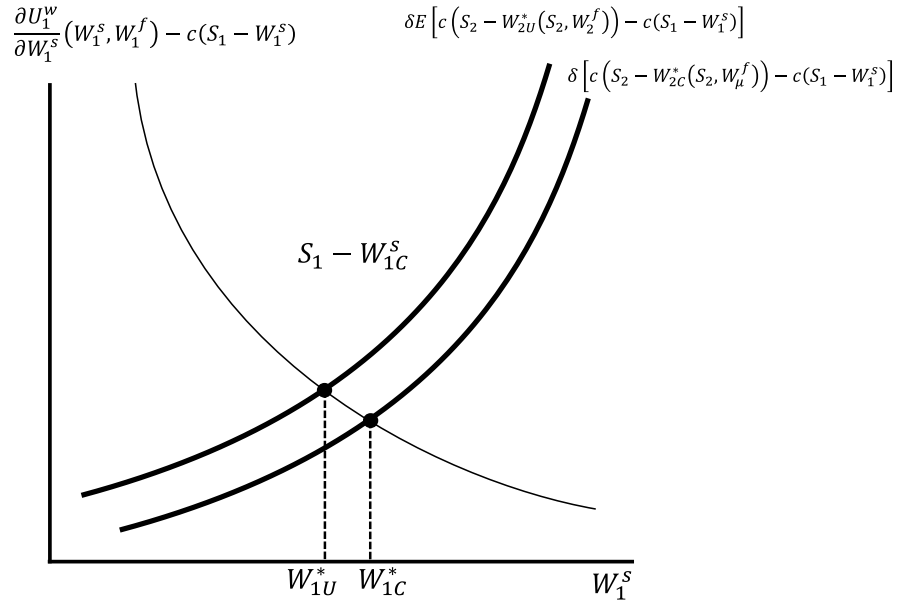
先行研究にならい、単位費用関数（限界費用関数）を線形とした場合——たとえば $c(z) = c_0(S_1 - z)$ とした場合（ c_0 は正の定数）、上記の i, ii の条件は、以下の条件一つに置き換えることができる。

$$\text{i'. } \frac{\partial^2 U_2^w}{\partial W_2^{s2}}(W_2^*(S_2, W_2^f), W_2^f) = -\psi\chi(1-\chi)\bar{W}_2^{*\chi-2}\bar{L}^{1-\chi} \leq -c_0$$

これは、最適取水量において限界便益の通減速度が限界費用の通増速度 c_0 よりも大きいことを示している。

次に、安定化機能の作動が1期目の意思決定に及ぼす影響について考える。図3.3は、不確実性がある場合とない場合における1期目の最適化条件(3.5b)と(3.7b)を図示したものである。図3.2における検討より、不確実性がない場合の(3.5b)の右辺の曲線は、不確実性がある場合の(3.7b)の右辺の曲線よりも常に下にある。このため、1期目の限界純便益曲線との交点で与えられる1期目の最適取水量は、不確実性がない場合よりも不確実性がある場合の方が少なくなる。

図 3.3 1期目の取水量の決定



これらの結果より、以下の命題が成り立つ。

命題 6

社会計画者レジームでは、全ての初期ストック水準 S_1 に対して以下が成り立つ。

$$W_{1U}^*(S_1) < W_{1C}^*(S_1)$$

これは、将来の揚水量に不確実性があるとき、1期目の取水の意思決定に際し、いわゆる予備的貯蓄と類似した効果が働くことを示している。予備的貯蓄

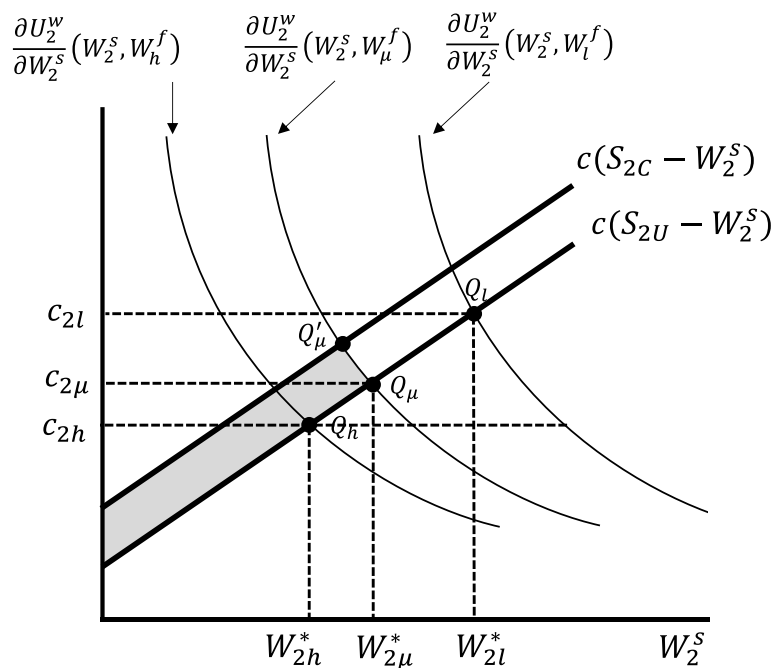
(precautionary saving) とは、将来所得の不確実性のみに起因する貯蓄のための予備的な需要 (Leland, 1968) と定義され、意思決定者がリスク回避的であることに加

え（便益関数が狭義の凹）、この場合のように限界便益関数が狭義の凸である場合に生じることが知られている。

連結利用の文脈に置き換えれば、ストック型資源の貯蔵機能が、一般の経済活動における貯蓄に相当する働き、すなわち異時点間の価値の移動を媒介する役割を果たす。その結果、2期目にフローとストックを連結し、フローの変動をストックの取水量で吸収することの反射として、1期目の取水量を節約するインセンティブが働く。異時点間のトレードオフがある場合の地域間連結利用では、安定化機能とストック保全機能（および貯蔵機能）が表裏一体のものとして作用しているのである。

なお、命題 5 では、不確実性がある場合とない場合とで、1期目からのストックの持ち越し量 S_2 が同じであることを前提に、2期目の安定化価値が正となることを示した。しかし、実際には不確実性がある場合の方が持ち越しは大きくなる。図 3.4 は、1期目における取水量の節約が2期目の意思決定にもたらす影響を示したものである。1期目からの持ち越し量の増加（減少）は、限界費用曲線の右（左）へのシフトで表される。図中では、不確実性がある場合の限界費用曲線 $c(S_{2U} - W_2^S)$ は、ない場合の限界費用曲線 $c(S_{2C} - W_2^S)$ と比べて、ちょうど1期目の節約分だけ右にシフトした位置にある。したがって、もしベースラインとなる便益を実際の持ち越し量におけるそれに設定した場合、定義上、安定化価値は持ち越し量が同じで計算した場合に比べて図の網掛けの部分だけ大きくなる。

図 3.4 1期目の取水量の節約が2期目にもたらす効果



4. 現実の制約下におけるストック型×フロー型地域間連結利用

ここまで、システム全体の便益を最大化する社会計画者が存在すれば、ストック型×フロー型の地域間連結利用が成立し、安定化機能やストック保全機能が作動することを示した。しかし、現実世界では、例外的な場合を除き、複数の国や地域を集権的に統制する社会計画者は存在しない。また、現実世界では、個々の生産者が自由に地下水を汲み上げるために過剰揚水や枯渇の危険が生じるなど、そもそも社会計画者や各国政府の視点さえも成り立っていない場合も多く存在する。現実世界で地域間連結利用を実現するためには、こうした要素を考慮に入れた適切な政策措置を施し、地域間連結利用のメカニズムが正常に作動する環境を整備する必要がある。

そこで以下では、現実の制約下において地域間連結利用の諸機能を効果的に引き出すために必要な政策措置について論じる。ただし、政策措置のうちフロー×フロー型地域間連結利用との関係が大きいものについては佐藤・仲山 (2014)に譲り、本稿では、分権レジームを前提として可変性や冗長性を確保するための補償スキームと、オープンアクセスの問題に関する措置について論じる。

4.1 可変性・冗長性の評価と補償スキーム

地域間連結利用は、システムのどこかに必ず変化の余地やある種の冗長性を作ることを求める。可変性の代表例は言うまでもなく適応特化だが、加えて、フローの変動に応じてストックの取水量を調節することもこれに該当する。また、予備的なストック保全を行うことは、将来の不確実性に備えて冗長性を確保する行為であると言える。

しかし、変化を前提とした体制の構築や冗長性の確保には、様々なコストがかかる。ここでいうコストには、地下水の揚水費用などの直接の取水費用はもちろん、予備的なストックを確保するために放棄せざるを得なかった収穫といった機会費用も含まれる。システムのレジリエンスを向上させるためには、こうした変化を前提とした体制整備を積極的に評価し、社会全体で効率的にコストを共有する仕組みを作っていく必要がある。

こうした仕組みが欠如している場合には、第2節で見た通り、社会計画者レジームと分権レジームの意思決定の間にずれが生じたり、社会計画者レジームであっても、国ごとの便益の変動の様態に大きな非対称性が生じたりする。

そこで以下では、両国間の協定や取引に基づいて取水費用を補償するスキームを構築することで、可能な限りずれや非対称性を埋め、地域間連結利用の諸機能を拡充する方策を検討する。その際、基本的には、各国がそれぞれの便益最大化を行う分権レジームに依拠した分析を行う。

4.1.1 静学モデルにおける補償スキーム

いま、両国間の協定によって、取水費用のうち割合 κ に当たる分を、 s 国への補償という形で f 国が負担することが定められているとする。取水量 W^s と負担割合 κ は、フローの実現値 W^f が判明した後で、両国の取引によって決まる。ここでは単純化のため、どちらの国も価格支配力を持たず、完全競争の下で取引が行われるものとする。

s 国、 f 国の最適化問題は、それぞれ以下のように表される。

$$\begin{aligned} \max_{W^s} \psi & \left[\chi \cdot \frac{W^s}{W^s + W^f} + (1 - \chi) \cdot \frac{L^s}{L} \right] (W^s + W^f)^\chi \bar{L}^{1-\chi} - (1 - \kappa) c_0 W^s \\ \max_{W^s} \psi & \left[\chi \cdot \frac{W^f}{W^s + W^f} + (1 - \chi) \cdot \frac{L^f}{L} \right] (W^s + W^f)^\chi \bar{L}^{1-\chi} - \kappa c_0 W^s \end{aligned} \quad (4.1)$$

このとき、均衡においては、以下の最適取水ルール $W^s(W^f)$ と最適負担割合 $\kappa(W^f)$ が得られる。

$$W^s(W^f) = \bar{W} - W^f \quad (4.2a)$$

$$\kappa(W^f) = -(1 - \chi) \left(\frac{W^f}{\bar{W}} - \frac{L^f}{L} \right) \quad (4.2b)$$

ただし、 $\bar{W}$ は $\psi \chi \bar{W}^{\chi-1} \bar{L}^{1-\chi} = c_0$ を満たす定数である。

(4.2a)より、均衡においては、フローが増えた分だけストックの取水量を減らし、フローが減った分だけストックの取水量を増やすこととなり、第2節で見た社会計画者レジームと同様の対応がなされることがわかる。

また、(4.2b)より、負担割合は両国の相対的な水希少性の状況、すなわち資源賦存量に基づく比較優位の状況によって左右され、ここではフローの量 W^f が減るほど f 国の負担割合は増大する。また、 f 国が水希少国の場合、補償額 $\kappa(W^f)c'W^s$ は正となり、豊富国の場合は負となる。補償額が負という状況は、逆に f 国の側が補償を受けない限り取水を増やしてほしくないと考えていることを示している。しかし、取水の決定権が資源保有国（ s 国）にある通常の場合では、交易条件効果だけを理由に f 国の側から s 国に補償を求めることは考えにくい。したがって、この場合は取引不成立となり、 s 国は補償のない分権レジームと同じ意思決定をすることになる。一方で、国内の地域間では取水量の調整が比較的行きやすいため、こうした双方向の協定を形成することも可能である

と考えられる。以下では、単純化のため、 s 国が f 国に補償することも含めて連結利用協定に定められているとして議論を進める。

上記のスキームの下で、システム全体、そして国ごとの便益や安定化機能はどう評価できるだろうか。均衡における s 国、 f 国の純便益を W^f の関数 $\tilde{U}^s(W^f)$ 、 $\tilde{U}^f(W^f)$ で表すと、それぞれ以下ようになる。

$$\begin{aligned}\tilde{U}^s(W^f) &= \psi \left[\chi \cdot \frac{\bar{W} - W^f}{\bar{W}} + (1 - \chi) \cdot \frac{L^s}{\bar{L}} \right] \bar{W}^\chi \bar{L}^{1-\chi} \\ &\quad - \left[1 + (1 - \chi) \left(\frac{W^f}{\bar{W}} - \frac{L^f}{\bar{L}} \right) \right] c_0 (\bar{W} - W^f) \\ \tilde{U}^f(W^f) &= \psi \left[\chi \cdot \frac{W^f}{\bar{W}} + (1 - \chi) \cdot \frac{L^f}{\bar{L}} \right] \bar{W}^\chi \bar{L}^{1-\chi} + (1 - \chi) \left(\frac{W^f}{\bar{W}} - \frac{L^f}{\bar{L}} \right) c_0 (\bar{W} - W^f)\end{aligned}$$

このとき、両国の純便益の合計は $\psi \bar{W}^\chi \bar{L}^{1-\chi} - c_0 (\bar{W} - W^f)$ となり、(2.7)と(2.11)で表される社会計画者レジームにおけるシステム全体の純便益と等しくなる。閉鎖経済の純便益は両レジームで変わらないため、システム全体の安定化価値は命題 4 より正となる。したがって、以下の命題が成立する。

命題 7

(4.1)で表される取引によって各国が取水費用を分担する場合、分権レジームにおいても社会計画者レジームと同様の取水決定がなされ、両国の純便益の和は社会計画者レジームと等しくなる。また、システム全体としての地域間連結利用の安定化価値は正となる。

一方、国ごとの安定化機能については、以下の命題が成り立つ。

命題 8

(4.1)で表される取引によって各国が取水費用を分担する場合、 s 国にとっての地域間連結利用の安定化価値は正となり、 f 国にとっての安定化価値は、 W^f が以下を満たす $\bar{W}^f$ 未満の範囲で変動する限り正となる。

$$\left(\frac{\dot{W}^f}{\bar{W}}\right)^{\chi-2} \left(\frac{L^f}{\bar{L}}\right)^{1-\chi} = 2 \quad (4.3)$$

(証明)

不確実性がない場合とある場合における開放経済への移行の便益を、それぞれ以下のように表す。

$$V_C^j \equiv \tilde{U}^j(W_\mu^f) - U^j(W_\mu^f), \quad V_U^j \equiv E[\tilde{U}^j(W^f) - U^j(W^f)], \quad j = s, f$$

V_C^s を W^f の関数とすると、2次導関数は $V_C^{s''}(W^f) = 2(1-\chi)c_0/\bar{W} > 0$ となるため、 $V_U^s - V_C^s > 0$ である。同じように、 V_C^f を W^f の関数とすると、2次導関数は $V_C^{f''}(W^f) = -2(1-\chi)c_0/\bar{W} + \psi\chi(1-\chi)W^{\chi-2}L^{1-\chi}$ となるため、(4.3)を満たす $\dot{W}^f$ 未満の範囲では $V_U^f - V_C^f > 0$ である。

(証明了)

このように、2国間で比較優位に応じて取水費用を分担する補償スキームを構築すれば、分権レジームの下でも社会計画者レジームを正確に再現できるだけでなく、フローが一定の量未満であれば、国ごとにも安定化機能が有効に働く。また、第2節で論じた、国ごとの便益の変動の様態についての非対称性も緩和される。

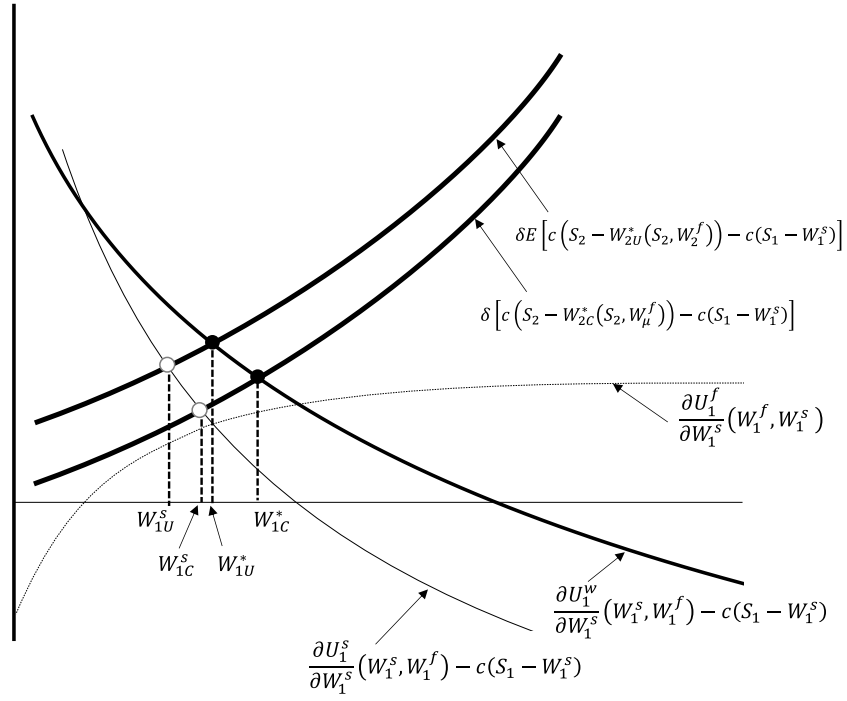
4.1.2 動学モデルにおける補償スキーム

ストックを保全して冗長性を確保するためには、その分を取水して現在の生産に充てていれば得られたはずの便益を放棄することが求められる。そのため、分権レジームの下では、あくまで自国が被る便益の変動の範囲でしかストック保全がなされず、システム全体にとって最適な保全量を確保できない可能性がある。

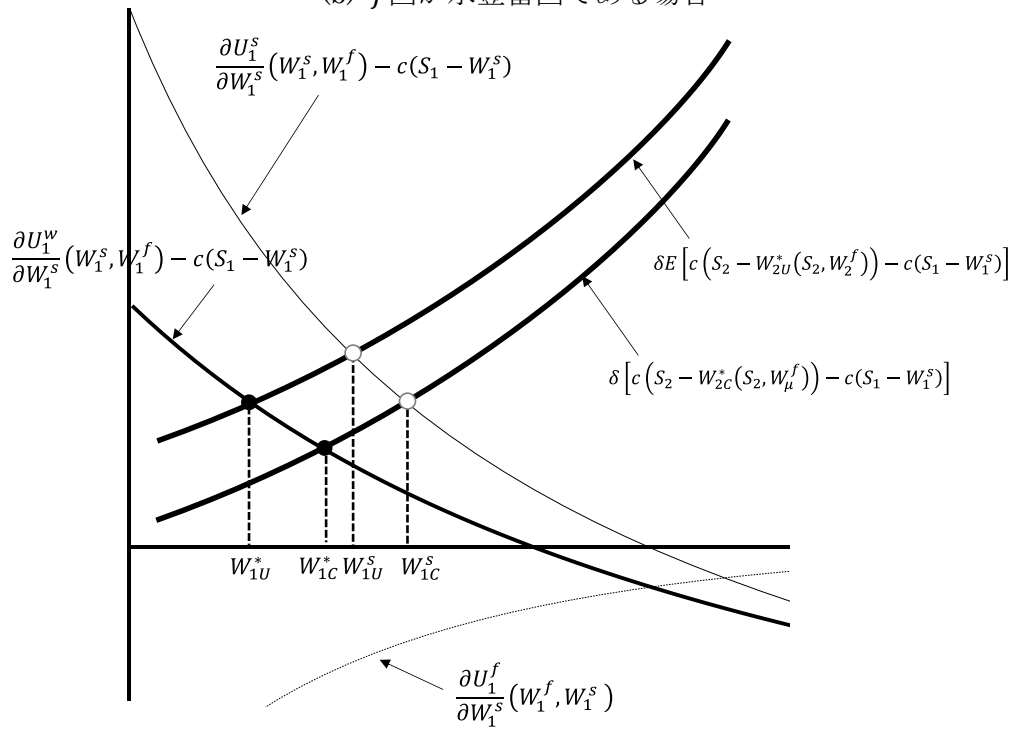
図 4.1 は、社会計画者レジームと分権レジームにおける2期目の意思決定を比較したものである。命題 2 より、 f 国が水希少国の場合、分権レジームの取水量は社会計画者レジームより少なくなり、豊富国の場合は多くなる。加えて、レジームごとに予備的なストック保全の大きさ、すなわち将来に不確実性がある場合の取水量とない場合の取水量の差を比べると、(a)と(b)のいずれにおいても、分権レジームの方が小さくなっている。

図 4.1 1 期目の取水量の決定（社会計画者レジーム，分権レジーム）

(a) f 国が水希少国である場合



(b) f 国が水豊富国である場合



こうした状況を改善するためには、フローが変動する 2 期目だけでなく、1 期目についても補償を通じて費用を分担するスキームを構築することが有効である。

はじめに 2 期目について考える。ここでは、先程と同じように、両国間の協定によって、取水費用のうち割合 κ_2 に当たる分を、 s 国への補償という形で f 国が負担することが定められているとする。このとき、 s 国、 f 国の最適化問題は、それぞれ以下のように表される。

$$\begin{aligned} \max_{0 \leq W_2^s \leq S_2} \psi & \left[\chi \cdot \frac{W_2^s}{W_2^s + W_2^f} + (1 - \chi) \cdot \frac{L^s}{L} \right] (W_2^s + W_2^f)^\chi \bar{L}^{1-\chi} - (1 - \kappa_2) \int_{S_2 - W_2^s}^{S_2} c(z) dz \\ \max_{0 \leq W_2^f \leq S_2} \psi & \left[\chi \cdot \frac{W_2^f}{W_2^s + W_2^f} + (1 - \chi) \cdot \frac{L^f}{L} \right] (W_2^s + W_2^f)^\chi \bar{L}^{1-\chi} - \kappa_2 \int_{S_2 - W_2^s}^{S_2} c(z) dz \end{aligned}$$

均衡においては、最適取水ルール $W_2^s(S_2, W_2^f)$ は、以下の(4.4a)の条件を満たすように与えられる。また、最適負担割合 $\kappa_2(S_2, W_2^f)$ は(4.4b)のように表される。

$$\psi \chi [W_2^s(S_2, W_2^f) + W_2^f]^{\chi-1} \bar{L}^{1-\chi} = c(S_2 - W_2^s(S_2, W_2^f)) \quad (4.4a)$$

$$\kappa_2(S_2, W_2^f) = -(1 - \chi) \left[\frac{W_2^f}{W_2^s(S_2, W_2^f) + W_2^f} - \frac{L^f}{L} \right] \quad (4.4b)$$

(4.4a)より、ここでも(3.5a)や(3.7a)の社会計画者レジームにおける取水量を再現できていることがわかる。また、(4.4b)より、負担割合は資源賦存量に基づく比較優位の状況に左右される。 f 国の負担割合は、フローの量 W_2^f が減った場合に加え、1 期目からの持ち越し量 S_2 が増えて取水費用が軽減され、2 期目の取水量 $W_2^s(S_2, W_2^f)$ が増加する場合にも増える。

次に 1 期目を考える。2 期目と同様、取水費用のうち割合 κ_1 に当たる分を f 国が負担するものとする。(4.4a), (4.4b)を用いると、1 期目における s 国、 f 国の最適化問題はそれぞれ以下のように表される。なお、以下では不確実性がある場合の式のみ記載し、不確実性がない場合については省略する。

$$\begin{aligned}
& \max_{W_1^s} U_1^s(W_1^s, W_\mu^f) - (1 - \kappa_1) \int_{S_1 - W_1^s}^{S_1} c(z) dz \\
& \quad + \delta E \left\{ U_2^s(W_{2U}^s(S_2, W_2^f), W_2^f) - [1 - \kappa_2(S_2, W_2^f)] \int_{S_2 - W_{2U}^s(S_2, W_2^f)}^{S_2} c(z) dz \right\} \\
& \text{s. t. } S_2 = S_1 - W_1^s \geq 0, \quad W_1^s \geq 0
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \max_{W_1^s} U_1^f(W_\mu^f, W_1^s) - \kappa_1 \int_{S_1 - W_1^s}^{S_1} c(z) dz \\
& \quad + \delta E \left[U_2^f(W_2^f, W_{2U}^s(S_2, W_2^f)) - \kappa_2(S_2, W_2^f) \int_{S_2 - W_{2U}^s(S_2, W_2^f)}^{S_2} c(z) dz \right] \\
& \text{s. t. } S_2 = S_1 - W_1^s \geq 0, \quad W_1^s \geq 0
\end{aligned}$$

2期目にストックを使い切ることはないとすると、均衡において、最適取水ルール $W_{1U}^s(S_1)$ は以下の(4.5a)の条件を満たすように与えられる。また、最適負担割合 $\kappa_1(S_1)$ は(4.5b)のように表される。

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial U_1^w}{\partial W_1^s}(W_{1U}^s(S_1), W_\mu^f) - c(S_1 - W_{1U}^s(S_1)) \\
& = \delta E \left[c(S_2 - W_{2U}^s(S_2, W_2^f)) - c(S_1 - W_{1U}^s(S_1)) \right]
\end{aligned} \tag{4.5a}$$

$$\begin{aligned}
\kappa_1(S_1) = & -(1 - \chi) \left[\frac{W_\mu^f}{W_{1U}^s(S_1) + W_\mu^f} - \frac{L^f}{\bar{L}} \right] \\
& + \delta E \left[\frac{\partial \tau_2}{\partial S_2}(S_2, W_2^f) \int_{S_2 - W_{2U}^s(S_2, W_2^f)}^{S_2} c(z) dz \right. \\
& \left. + H(W_2^f, S_2) \right] [c(S_1 - W_{1U}^s(S_1))]^{-1}
\end{aligned} \tag{4.5b}$$

ただし、 $H(W_2^f, S_2)$ は以下のように定義される。

$$\begin{aligned}
H(W_2^f, S_2) \equiv & (1 - \chi) \left[\frac{W_2^f}{W_{2U}^s(S_2, W_2^f) + W_2^f} - \frac{W_\mu^f}{W_\mu^f + W_{1U}^s(S_1)} \right] \left[c(S_2 - W_{2U}^s(S_2, W_2^f)) \right. \\
& \left. - c(S_1 - W_{1U}^s(S_1)) \right].
\end{aligned}$$

(4.5a)より、1期目においても、(3.7b)の社会計画者レジームにおける取水量を再現で

きていることがわかる。

(4.5b)の最適負担割合 $\kappa_1(S_1)$ については若干の説明を要する。第1項は、(4.2b)や(4.4b)と同様、当期の比較優位の状況によって決まる値を表す。第2項の期待値の括弧内の最初の項は、1期目の取水量の限界的な変化が2期目の両国の費用負担にもたらす変化——すなわち、1期目の取水量を減らして持ち越し量を1単位増やすことによって、取水費用の低下を通じて2期目の取水量が増え、結果として f 国から s 国に還元される補償額の増加分を表している。

一方、予備的なストック保全と1期目の負担割合との関係は、期待値の括弧内の2つ目の項に表されている。 $H(W_2^f, S_2)$ は、システム全体の水資源に占める f 国の水資源の割合の変化に、1期目から2期目にかけての限界費用の増分を乗じたものである。前節の図3.3で見たように、1期目から2期目にかけての限界費用の増分は、予備的なストック保全の源泉となっていた部分であり、2期目の期待限界費用が不確実性のない場合に比べて大きいことを反映している。ここで、前章の命題5のi'のように単位費用関数(限界費用関数)を線形とした場合、 $\frac{\partial^2 H}{\partial W_2^f{}^2}(W_2^f, S_2) < 0$ が得られ、同じ持ち越し量の下では、

$E[H(W_2^f, S_2)] > H(W_\mu^f, S_2)$ となる。したがって、予備的なストック保全の場合と同じく、期待値の括弧内の2つ目の項も不確実性がある場合の方が大きくなる。つまり、2期目の期待限界費用が不確実性のない場合に比べて大きいほど、予備的なストック保全のインセンティブが高まるとともに、 f 国の負担割合が増大する方向に作用するのである。別な言葉で言えば、将来の不確実性に対処するための冗長性の必要性が高まるほど、安定化機能によって大きな便益を受けるフロー型資源国の負担割合が高まる圧力が働いている。

4.2 オープンアクセス問題

4.2.1 オープンアクセス問題と地域間連結利用

オープンアクセスとは、排他的な所有ないし使用が可能であることを意味する排除可能性がなく、資源が誰でもアクセス可能な状態に置かれている状態を指す。資源がオープンアクセスの状態にあり、かつ、通常の私的財と同様の競合性を有する場合——すなわち、ある主体が当該資源を利用することで、他の主体がそれを同時に利用することができなくなるような場合、資源の過剰利用が生じる恐れがある。その典型例が、地下水の枯渇の問題である。

以下では、簡単なモデルを用いて、ストック型資源がオープンアクセスの状態にある

場合に地域間連結利用に生じる問題について検討する。ここでは、民間の事業者がストック型資源から取水を行い、それを政府が一定の価格で買い取る状況を考える。政府が買い取った水は、これまで通り財の生産過程に投入される。いま、 m 個の事業者がストックの取水に従事しているとする。個々の事業者はストックから w だけ取水し、政府がそれを単位あたり r_w の価格で買い取る。ストックは S の量だけあり、取水量の合計 W に対して、1単位あたり $c(S - W)$ の取水費用がかかる。 $c(\cdot)$ は非増加で凸である。

最初に、事業者による取水量を政府が統制し、全事業者の利潤の合計が最大化するように取水量を割り当てる場合を考える。なお、価格 r_w は、最終的に全事業者の取水量を合計した量が、ちょうど地域間連結利用のための最適取水量に合致するように調整されているとする。このとき、政府の最適化問題は以下の通りである。

$$\begin{aligned} \max_w & m[r_w w - c(S - mw)w] \\ \text{s.t.} & 0 \leq mw \leq S \end{aligned}$$

単純化のため、取水量は正で、かつ、全事業者の取水量を合計してもストックを使い切ることはないとする。このとき、各事業者への配分を w^* とすると、最適化条件は以下のように表すことができる。

$$r_w - c(S - mw^*) = -mc'(S - mw^*)w^* \quad (4.6)$$

これは、追加で1単位取水することによる個々の事業者の利潤（左辺）が、それによって増加する全ての事業者の取水費用の大きさ（右辺）と等しくなるところまで取水が行われることを示している。

次に、同じ最適価格 r_w の下で、個々の事業者が独自に取水量を決める場合を考える。他の事業者の最適取水量を w^o とすると、これを所与とした場合の個々の事業者の最適化問題は、以下のように表すことができる。

$$\begin{aligned} \max_w & r_w w - c(S - w - (m - 1)w^o)w \\ \text{s.t.} & 0 \leq w \leq S - (m - 1)w^o \end{aligned}$$

このとき、この事業者の利潤最大化条件は以下のように表される。

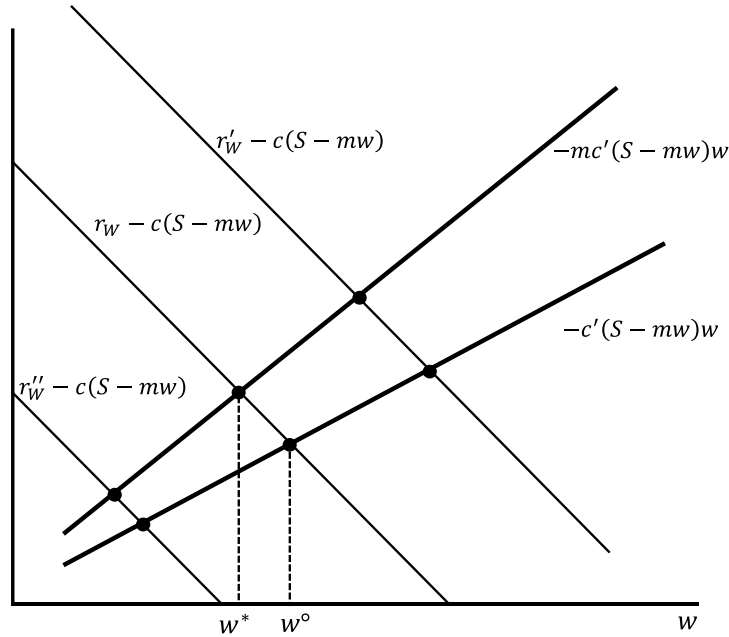
$$r_w - c(S - w - (m - 1)w^o) = -c'(S - w - (m - 1)w^o)w$$

これは、追加で1単位取水することによる限界利潤（左辺）が、それによって増加するこの事業者の取水費用の大きさ（右辺）と等しくなるところまで取水を行うことを示している。均衡状態では全ての事業者の取水量が同じになるので、利潤最大化条件はさらに以下のように書きかえることができる。

$$r_w - c(S - mw^o) = -c'(S - mw^o)w^o \quad (4.7)$$

横軸に取水量 w をとって、(4.6)と(4.7)の条件式をグラフに表したのが図 4.2 である。両条件式の左辺は共通で、右下がりである。右辺はどちらも右上がりだが、(4.6)の右辺は(4.7)の右辺を縦に m 倍している。したがって、オープンアクセス下での総取水量 mw^o は、中央統制下で実現する地域間連結利用の最適取水量 mw^* より大きくなる。

図 4.2 オープンアクセス下での取水量の決定



オープンアクセス下におけるこうした乖離の源泉は、(4.6)と(4.7)の右辺の構造に表れている。すなわち、(4.6)では、最適取水量の決定に際して全ての事業者に及ぶ影響を考慮しているのに対し、(4.7)では、自らの取水費用への影響のみ考慮している。一般に、このように意思決定に際して他の経済主体の生産性や費用に与える外部効果が考慮されないことが、オープンアクセス下における資源の過剰利用の原因となっている。

フローの変動に合わせて取水量を調節するため、政府が買い取り価格を上げた場合 (r'_w) や下げた場合 (r''_w)、最適取水量からの乖離はどのように変化するであろうか。図のようにどちらの曲線も線形の場合は、価格上昇局面では乖離幅が増加し、価格減少局面では乖離幅が縮小する。ただし、結論は両曲線の形状に左右される。

このように、ストック型水資源の取水がオープンアクセス下で行われる場合、取水量は地域間連結利用における最適水準より過大になる。したがって、乖離幅の大きさによっては、地域間連結利用によるストック保全効果が打ち消され、資源の縮小や枯渇を招く恐れがある。さらに、オープンアクセス下では、フローの減少に合わせてストックの取水量を増やす局面と、逆にフローの増加に合わせてストックの取水量を減らす局面で、乖離幅が非対称に変化する可能性がある。そのため、非対称の度合いによっては、地域間連結利用の安定化機能が損なわれてしまう恐れもある。そこで、地域間連結利用の機能を最大限引き出すためには、オープンアクセス状態を解消する取り組みが不可欠となる。

4.2.2 オープンアクセス問題の解消方法

オープンアクセス問題の原因となる資源の排除不可能性は、資源の排他的利用を可能にする所有権などの社会制度が欠如している場合や、制度とは無関係に資源そのものの性質から排除が技術的に難しい場合に成立する⁴。地下水の場合、複数の主体が一つの帯水層から揚水を行う状況で、権利が明確に規定されておらず、各主体が無制限に揚水できる場合に排除不可能性が生じる。また、権利自体は存在しても、揚水権が土地所有権と分離していない場合にも排除不可能性は生じ得る。例えば、土地所有に伴う権利が地下水にも及び、土地所有者がそれぞれの井戸から自由に揚水できる場合には、揚水による地下水位の低下が近隣の井戸にも及び、過剰揚水が生じることがある。

オープンアクセスの状態を回避するためには、第一に、伝統的共同体のように、同じ帯水層から揚水する利用者間で利用上限に関する自発的なルールを決め、遵守していくという方法が考えられる。こうしたアプローチは、集団の規模が比較的小さく、利用者間の共通認識を醸成しやすい場合に有効である。第二に、地下水に関する権利を土地所有権と分離し、量的な上限を定める形で規定することが考えられる。特に、許可制度などを導入し、行政が各主体の揚水量に直接的に制限を加えられる状態が望ましい。この場合、例えば、行政が地下水の管理計画を策定し、帯水層全体での毎年の揚水上限を設

⁴ 技術的に排除が難しい場合とは、例えば、信号機の信号、気候の安定性、オゾン層による保護などが考えられる。ただし、これらの例では競合性が生じないため、オープンアクセス問題は発生しない。排除不可能性と非競合性の両方の側面がある財を公共財という。

定するとともに、揚水許可に記載された量や比率に応じて、個別の主体に揚水上限を配分することが考えられる。

付録 命題 5 の証明

閉鎖経済を第一のベースラインとすると、不確実性がある場合の地域間連結利用の価値は、両国の期待純便益の合計の差によって以下のように表される。以下では、表記の簡素化のため期を表す下付き添字は省略する。

$$V_U \equiv E \left[U^w(W_U^*(S, W^f), W^f) - \int_{S-W_U^*(S, W^f)}^S c(z) dz \right] - \left\{ U^s(W_C^a(S^a)) - \int_{S-W_C^a(S^a)}^S c(z) dz + E[U^f(W^f)] \right\} \quad (\text{A.1})$$

ただし、 S^a は閉鎖経済におけるストックの持ち越し量を示す。

同様に、不確実性がない場合の地域内連結利用の価値は以下のように表される。

$$V_C \equiv U^w(W_C^*(S, W_\mu^f), W_\mu^f) - \int_{S-W_C^*(S, W_\mu^f)}^S c(z) dz - \left[U^s(W_C^a(S^a)) - \int_{S-W_C^a(S^a)}^S c(z) dz + U^f(W_\mu^f) \right] \quad (\text{A.2})$$

ここで、 S を所与として、フローの実現値が W^f であったときの最適取水量 $W^*(W^f)$ の下での開放経済における純便益を、以下のように W^f のみの関数 $\tilde{U}(W^f)$ で表す。

$$\tilde{U}(W^f) \equiv U^w(W^*(W^f), W^f) - \int_{S-W^*(W^f)}^S c(z) dz$$

このとき、 $\tilde{U}(W^f)$ の1次導関数は、(3.7a)を用いて以下のように表される。

$$\tilde{U}'(W^f) = \psi \chi [W^*(W^f) + W^f]^{\chi-1} \bar{L}^{1-\chi} [2W^{*'}(W^f) + 1]$$

$W^*(W^f)$ について、陰関数定理より以下が得られる。

$$W^{*'}(W^f) = \frac{\psi\chi(1-\chi)[W^*(W^f) + W^f]^{\chi-2}\bar{L}^{1-\chi}}{-\psi\chi(1-\chi)[W^*(W^f) + W^f]^{\chi-2}\bar{L}^{1-\chi} + c'(S - W^*(W^f))} \quad (\text{A.3})$$

(A.2), (A.3)を用いると、 $\tilde{U}(W^f)$ の2次導関数は以下のように表される。

$$\begin{aligned} & \tilde{U}''(W^f) \\ &= \psi\chi[W^*(W^f) \\ &+ W^f]^{\chi-2}\bar{L}^{1-\chi} \left\{ \frac{-(1-\chi)c'(S - W^*(W^f))}{\{-\psi\chi(1-\chi)[W^*(W^f) + W^f]^{\chi-2}\bar{L}^{1-\chi} + c'(S - W^*(W^f))\}^2} \right. \\ &\cdot \left\{ c'(S - W^*(W^f)) + \psi\chi(1-\chi)[W^*(W^f) + W^f]^{\chi-2}\bar{L}^{1-\chi} \right\} \\ &\left. + 2[W^*(W^f) + W^f] \cdot W^{*''}(W^f) \right\} \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

一方、(A.3)を用いると、 $W^{*''}(W^f)$ は以下のように表される。

$$\begin{aligned} W^{*''}(W^f) &= \frac{\psi\chi(1-\chi)(2-\chi)[W^*(W^f) + W^f]^{\chi-3}\bar{L}^{1-\chi}}{\{-\psi\chi(1-\chi)[W^*(W^f) + W^f]^{\chi-2}\bar{L}^{1-\chi} + c'(S - W^*(W^f))\}^3} \\ &\cdot \left\{ \frac{\psi\chi(1-\chi)[W^*(W^f) + W^f]^{\chi-1}\bar{L}^{1-\chi}}{2-\chi} \cdot c''(S - W^*(W^f)) \right. \\ &\left. - [c'(S - W^*(W^f))]^2 \right\} \end{aligned}$$

したがって、

$$\frac{c''(S - W^*(W^f))}{[c'(S - W^*(W^f))]^2} \leq \frac{2-\chi}{\psi\chi(1-\chi)[W^*(W^f) + W^f]^{\chi-1}\bar{L}^{1-\chi}} \quad (\text{A.5})$$

のとき、 $W^{*''}(W^f) \geq 0$ となる。

(A.4), (A.5)より、

$$c'(S - W^*(W^f)) \geq -\psi\chi(1-\chi)[W^*(W^f) + W^f]^{\chi-2}\bar{L}^{1-\chi} \quad (\text{A.6})$$

かつ(A.5)が成り立つとき、 $\tilde{U}(W^f)$ の2次導関数は非負となり、したがって $\tilde{U}(\cdot)$ の凸性から $E[\tilde{U}(W^f)] \geq \tilde{U}(W_\mu^f)$ を得る。このとき、 $E[U^f(W^f)] < U^f(W_\mu^f)$ と合わせ、(A.1), (A.2)より、以下が成り立つ。

$$SV \equiv V_U - V_C = E[\tilde{U}(W^f)] - \tilde{U}(W_\mu^f) - E[U^f(W^f)] + U^f(W_\mu^f) > 0$$

(証明了)

参考文献

- Burt, O.R., 1964a, Optimal resource use over time with an application to ground water, *Management Science* 11, 80-93.
- Burt, O.R., 1964b, The economics of conjunctive use of ground and surface water, *Hilgardia* 36, 31-111.
- Dixit, A.K., and V. Norman, 1980, *Theory of international trade*, Cambridge: Cambridge University Press.
- Leland, H.E., 1968, Saving and uncertainty: The precautionary demand for saving, *The Quarterly Journal of Economics* 82, 465-473.
- Provencher, B., and O. Burt, 1993, The externalities associated with the common property exploitation of groundwater, *Journal of Environmental Economics and Management* 24, 139-158.
- Samuelson, P.A., 1949, International factor price equalization once again, *Economic Journal* 59, 181-97. Reprinted in Edward R. Leamer, (eds.), 2001, *International Economics*, New York: Worth.
- Tsur, Y., and T. Graham-Tomasi, 1991, The buffer value of groundwater with stochastic surface water supplies, *Journal of Environmental Economics and Management* 21, 201-224.

佐藤正弘, 仲山紘史, 2014, 「気候変動適応のための水の地域間連結利用の理論 (1) フロー型×フロー型」, *KIER Discussion Paper* 1407.