

KIER DISCUSSION PAPER SERIES

KYOTO INSTITUTE OF ECONOMIC RESEARCH

Discussion Paper No.1407

“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”

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（１）

フロー型×フロー型*

Theory of inter-regional conjunctive use of water resources, Vol. 1: Flow-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、変動パターンの異なるフロー型の水資源を有する地域間におけるフロー型×フロー型地域間連結利用を扱い、安定化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、水自体の移動ができない地域間であっても、水の変動が一定の範囲内であれば、システム全体の便益の観点から見ても、個別地域の便益の観点から見ても、安定化機能が発動する。ここでは、自他の資源の変動に応じてお互いの生産パターンを変化させる動きが重要な役割を果たしており、本稿ではこれを適応特化（adaptive specialization）と呼ぶ。

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 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

* 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）

the flow-flow type inter-regional conjunctive use, where both regions have flow water resources but with different patterns of variations. We find that, even if water itself cannot be moved between the regions, the benefits would be stabilized both from the system-wide and local perspectives as long as the flows fluctuate within a certain range. In the flow-flow type inter-regional conjunctive use, the motion of changing production patterns according to water variations in the both regions plays a critical role, which we call “adaptive specialization.”

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

世界の食料生産システムが水資源との関係で直面する不確実性の度合いは、21 世紀半ばにかけてしだいに増大していく。第一の理由は、今後大幅な人口増加を経験するサブサハラと南アジア地域における水資源の賦存形態にある。20 世紀の人口増加の中心であり、かつ緑の革命の先進地域であったモンスーンアジアと異なり、これらの地域ではブルーウォーターの利用可能性が極めて限られており¹、必然的に不安定なグリーンウォーターへの依存が強まっていく。第二の理由は、気候変動がグリーンウォーターにもたらす短期的攪乱、とりわけ干ばつの影響である。一定のシナリオの下では、20 世紀半ばと今世紀末の間で、4～6 ヶ月続く農業的干ばつは強度と頻度が倍増し、12 ヶ月以上続く干ばつは3 倍一般的なものとなる (Sheffield and Wood, 2008)。当然のことながら、グリーンウォーターへの依存が強い地域ほど、干ばつに襲われた場合の潜在的な被害は大きくなる。

このように水をめぐる不確実性の度合いが増大するにつれ、食料生産に占める水レジリエンスの重要性はますます高まっていく。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。ここで賦存形態の多様性とは、フロー型水資源とストック型水資源の区別、そしてこれらのフローやストックの変動パターンの多様性を指す。

ところで、後述するように、賦存形態の多様性を活用した水利用の中には、既に各地で実践され、専門的知見が蓄積されてきたものもある。とりわけ水資源工学の分野では、1960 年代以降、表流水と地下水の連結利用 (conjunctive use) ²と呼ばれる理論が発展してきた。連結利用とは、「表流水資源と地下水資源の組み合わせを活用することで、相互作用を無視した場合より有益な利用を実現する統合的な(水利用)計画」³を指す。典型的には、表流水が天候の影響によって変動する場合に、渇水時には地下水の揚水量を増やして総水投入量を安定化させ、豊水時には揚水量を減らして地下水ストックの補充にあてる。このように表流水の変動に合わせて地下水の利用を調節することで、生産量の安定や地下水資源の保全、揚水費用の節約、地盤沈下の抑制、さらには生態系の保全など、表流水と地下水どちらか単体の利用では得られない様々なメリットを得ることができる。

ただし、これまで各地で実践されてきた連結利用は、表流水と地下水という二つの水源の水を同じ場所で代替的に利用できることが前提となっている。したがって、連結利用が可能なのは、両方の水源の水が物理的に移動可能な範囲——典型的には同じ流域ないし集水域の内部か、運河を用いた水の運搬が可能な隣接流域間に限定されていた。

それに対して、本稿で提案する新たな水利用は、この連結利用の考え方を水の移動ができない離れた国（地域）の間での水利用の調節に応用した、いわば“地域間連結利用”（inter-regional conjunctive use）である。先んじて定義すれば、地域間連結利用とは、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である。

その理論的基盤を築くため、本稿と佐藤・仲山（2014）では、1）水そのものを同じ場所で代替資源として利用することができない場合であっても、賦存形態の異なる水を有する複数の国（地域）が、お互いの水資源の状況に応じて自らの水の投入量を自発的に調節することで、全体として連結利用と類似した効果を生み出すことができるか、2）もし可能であるとしたら、それはどのような条件の下で、どのようなメカニズムを通じて行われるのか、3）こうした調節の結果として、各国の水資源の状況はどのように変化するか、といった論点について検討する。

これらの検討に際して、本稿では貿易理論の基本的なモデルを用いる。地域間連結利用の理論は、異なる国家間だけでなく、国内の異なる地域間の水利用にも適用できる。にもかかわらず、その理論的な検討に際して貿易モデルを用いるのは、国内取引を記述する通常の経済モデルと異なり、貿易モデルは国家間（地域間）で資源（生産要素）の移動ができない状況での財の生産や交換の特性を説明するのに優れているためである。

なお、以降では、本稿が提示する地域間連結利用と区別するため、同じ地域で水を直接連結させる通常の連結利用を、便宜上、“地域内連結利用”（intra-regional conjunctive use）と表現することとする。

本稿と佐藤・仲山（2014）の内容の分担は以下の通りである。本稿では、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する。具体的には、2国2財2要素の貿易モデルを活用して、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する。それに対して、佐藤・仲山（2014）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。

本稿の構成は以下の通りである。次節では、自然資源としての水の特徴である賦存形態の多様性について触れ、フロー型水資源とストック型水資源の分類を行う。第3節では、現実世界で行われてきた地域内連結利用の様態について説明した上で、典型的な意思決定ルールの導出方法や各機能の評価方法などについて、簡単な経済モデルを用いて説明する。また、地域内連結利用と地域間連結利用の射程の違いについても整理する。

第4節では、フロー型×フロー型の地域間連結利用のモデルの基本的な設定を説明した上で、システム全体と国ごとのそれぞれについて、貿易による安定化価値の評価を行い、安定化を生み出す適応特化（adaptive specialization）のメカニズムについて論じる。第5節では、現実世界でフロー型×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、主体間の情報伝達と調節に関する措置と、可変性の確保に関する措置について検討する。

2. 水資源の賦存形態の多様性

水資源は、それが水循環の中のどの過程にあるかによって様々な賦存形態を持ち、それに応じて、資源としての経済・社会・環境面での機能を大きく変化させる。本稿と佐藤・仲山（2014）では、フロー型水資源とストック型水資源という2つの類型と、これらのフローやストックの変動パターンの差異をもってこうした多様性の一端を捉える。

2.1 フロー型水資源とストック型水資源

フロー型水資源とは、過去の利用量とは無関係に、一定の短い期間内に実現する水の量（フロー）の全部ないし一部が利用可能量の上限となるような資源を指す⁴。グリーンウォーター、河川水、滞留時間の短い地下水、湧水などが想定される。一方、ストック型水資源とは、過去から現在までの補充や利用の結果としてある時点で存在する水の量（ストック）が利用可能量の上限となるような資源を指す。滞留時間の長い地下水、湖沼水、貯水池の水などが想定される。

経済学的な視点から見ると、フロー型水資源とストック型水資源には数多くの相違点がある。第一の相違点は、各時点での利用量の制御可能性についてである。フロー型水資源の場合、各時点での利用量はその時点の流量が上限となる。その前後の時点の利用しなかった流量を一時点に集めてきて利用することはできない。それに対して、ストック型水資源の場合、取水設備の技術的制約やコストを考えなければ、一時点で全てのストックを使ってしまうこともできる。

第二に、第一の相違点の結果として、ストック型水資源は、貯蔵によって利用可能量を異時点間で調節することが可能である。そしてこのことによって、ストック型水資源はフロー型水資源を補完する役割を果たすことができる。例えば、河川流量や降水の年間を通じての時間的分布は、必ずしも作物の生育期間中の要水量の時間的分布と一致しない。しかし、ダムや地下水などのストックを使って灌漑を行えば、作物の成長期に十分な降水量が得られない場合にも、降水量と要水量とのギャップを埋めることができる。

第三の相違点は、異時点間のトレードオフの有無である。これも、これまでの点を別の側面から見たものである。フロー型資源は、各期の利用量がその後の利用可能量に影

響を与えることはないため、水利用に関する異時点間のトレードオフはない。たとえば、河川水は上流から下流に常に流れているので、少なくとも一つの地点（およびその上流）においては、現時点での利用量が来期の流量に影響することはない。それに対してストック型資源の場合、帯水層からの揚水や貯水池からの放出を行えば、その分の補充がなされない限り、来期以降の利用可能量は減少する。また、水位の低下によって来期以降の揚水費用が増加することもある。

第四に、一般的には、ストック型資源に比べてフロー型資源の方が、相対的に不確実で変動が大きい。これについては後述する。

水資源の資源としての大きな特徴は、水循環の中で、フロー型資源とストック型資源の両方が併存していることである。特定の水資源が具体的にどの形態をとるかは、当該資源の水循環の中での位置付けや、貯水池の造営などの人間側の働きかけによって決まる。

2.2 フローやストックの変動パターン

以上のような大きな区分を前提としながら、個々の水資源のフローやストックは、気象や地形の状況に応じて様々な変動のパターンをとる。

まず、先にも述べたように、一般にはストック型資源に比べてフロー型資源の方が、相対的に不確実で変動が大きい。特に降水は、季節単位どころか時間・日単位で絶えず変化する最も不安定な水源である。河川水も、降水ほどではないが、上流域の降水や融雪の状況によって大きく変動する。

それに対して、貯水池や地下水などストック型の水資源は相対的に安定している。もちろん、ストック型の水資源も多かれ少なかれ変動する。例えば、湖沼やダムの水の量は、水面への降水や水面からの蒸発、河川からの流入や水底からの浸透などで変動する。地下水ストックも地表面からの補充などによって変動する。地下水の変動の度合いは補充速度によって様々であり、数万年の単位で補充がなされない化石地下水も存在する⁵。

3. 地域内連結利用と地域間連結利用

3.1 地域内連結利用の実践と機能

表流水と地下水を組み合わせて使う行為は、農業用水や生活用水を安定的に確保する方法の一つとして、古くから多くの地域で自発的に実践されてきた。例えば、ある地域で作物の生育期に降水が不足した場合、生産者は農場内の井戸を掘って地下水を汲み上げ、水の不足分を補うことがある。地域内連結利用の考え方は、こうした自発的な実践の背後にある水資源の特性を理論化し、体系的に水資源管理に組み入れることで、無計画な取り組みに伴う資源枯渇などの問題点を克服しながら、後述するような各種の効果

を効率的に引き出すことを企図したものである。

3.1.1 表流水と地下水の相互作用

冒頭で述べたように、地域内連結利用は、表流水と地下水の間の相互作用を利用する。ここでいう相互作用には、大きく分けて、水文学的な相互作用と、人間の利用を通じた相互作用の2種類がある。

水文学的な相互作用としては、例えば、浸透を介した作用がある。降水によって地表面に生じた細かな流出や、河川や湖沼など表流水の一部は、地中に浸透して帯水層を涵養する。運河や水路による水の運搬の過程や耕作地の灌漑、湛水した水田や溜池など、降水や表流水を人為的な目的のために用いる過程でも、その一部は漏水などを通じて地下に浸透する。地域内連結利用では、表流水の利用の過程で、この浸透作用を意図的に利用して帯水層の涵養を積極的に促すことがある。たとえば、帯水層から地下水を汲み上げて使うだけでなく、河川の氾濫時などには浸透池に水を引き込み、人工的な涵養を行う場合もある。また、浸透作用が不十分な場合は、地盤沈下や海水浸入を防止するために、注入井を用いて強制的に帯水層を涵養することもある。

一方、人間の利用を通じた相互作用は、表流水と地下水を代替資源として利用することによる。例えば、降雨や雪解け水の不足で河川流量が低下した際には、その分だけ帯水層からの揚水量を増やし、地下水を灌漑用水や生活用水に用いることができる。逆に、地下水位が低下し、これ以上の揚水が揚水費用の増大や地盤沈下を引き起こす恐れがある場合には、運河を通じて隣接流域から表流水を移入したり、上流での河川水の再利用を促進すれば、その分、地下水の揚水量を減らすことができる。

地域内連結利用では、両水源の間に水文学的な相互作用がなくとも、代替資源としての相互作用のみを活用することもできる（Tsur (1990), Tsur and Graham-Tomasi (1991)など）。また、代替資源としての利用を進める過程で、水文学的な作用が同時に発生する場合もある。例えば、隣接流域からの移入量を増やせば、運搬の過程で水路から水が浸透し、同時に帯水層の涵養も行われる。また、地上の溜池からの取水量を増やし、その分、海岸付近での帯水層からの揚水を減らせば、帯水層への海水浸入を防止することができる。そこで、多くの地域内連結利用において、2種類の相互作用を同時に用いる取り組みがなされている（Danskin and Gorelick (1985), Reichard and Bredehoeft (1984)など）。

3.1.2 地域内連結利用の機能

地域内連結利用には、主に次のような機能がある⁶。

- ・安定化機能

安定化機能（stabilization function）とは、地下水の揚水量を調節することで表流水

の変動による影響を緩和することを指し、緩衝機能 (buffer function) という場合もある。また、それによって得られる便益を、安定化価値 (stabilization value)、緩衝価値 (buffer value) などと表現する (Tsur (1990), Tsur and Graham-Tomasi (1991), Diao et al. (2008)ほか)。表流水自体は変動しないものの、作物の生育サイクルなどに応じて需要量の変動する場合に、地下水の揚水量を調節することで需要に応じた安定的な水供給を行うことも、広くは安定化機能に含めて考えることもできる。地下水の安定化価値については数多くの実証研究で定量化の試みがなされているが、Palanisami et al. (2012)によると、これらの研究では、安定化機能は地下水の総価値を約 15~100%増加させるとの評価がなされている。

・貯蔵機能

貯蔵機能 (storage function) とは、浸透池などを通して表流水を地下に浸透させることによって帯水層を涵養し、一種の貯水池として利用することを指し、それによって得られる便益を貯蔵価値 (storage value) という (Reichard and Raucher, 2003)。ダムや溜池など地上の貯水池と比べ、帯水層は蒸発や漏出によるストックの減少の心配が小さく、また、浸透池の造営費などを除けばコストがかからず、地上に貯水施設を建造する場合にかかる巨額の費用を節約することもできる (National Research Council, 1997)。なお、貯蔵した水を渇水時のためのバックアップ・ソースとして用いる場合には、同時に安定化機能を果たすことになる。先行研究では、例えば、Cummings and Winkelman (1970)が、地上の溜池と帯水層における水の貯蔵量についての異時点間での最適配分をモデル化している。

・運搬機能

河川や運河は、運搬の過程で漏出や浸透、蒸発などによって流水の一部が失われる恐れがある。代わりに、帯水層でつながった複数地点で水を利用すれば、水の喪失を回避しながら、事実上、水を運搬するのと同等の効果を得ることができる。こうした機能を運搬機能 (conveyance function) といい、それによって得られる便益を運搬価値 (conveyance value) という (Reichard and Raucher, 2003; National Research Council, 1997)。先行研究では、例えば、Chakravorty and Umetsu (2003)が、運河と帯水層の両方が使え、かつ、両者の間に浸透を通じた相互作用がある場合において、上流から下流までの各地点における運河からの取水と帯水層からの揚水の配分をモデル化している。

・水処理機能

地下水は、帯水層に長期間貯蔵したり、浸透時に砂や砂礫を通過させることで、水中に含まれる病原性の細菌や汚染物質をろ過することができる。そのため、地上に水処理

施設を整備する代わりに、注入井などを通じて地下に水を引き込むことで、帯水層をいわば天然の水処理施設として用いる場合がある（National Research Council, 1997）。このような地下水の機能を水処理機能（**treatment function**）といい、それによって得られる便益を水処理価値（**treatment value**）と呼ぶ（Reichard and Raucher, 2003）。

- ・生態系や景観の保全

河川や湖沼からの取水量が一定の限度を超えると、魚や水鳥などの流域生態系の維持に著しい困難をきたすとともに、景観を破壊し、レクリエーション・スポットや観光資源としての価値が低下する。そこで、渇水などで河川流量や湖沼の水位が低下した場合には、表流水の代わりに地下水の利用を増やすことで、生態系や景観の保全を図ることができる。また、人口涵養のための浸透池など、連結利用のための施設自体が、レクリエーション利用などの副次的な便益を生み出すこともある（Reichard and Bredehoeft, 1984）。

- ・地下水ストックの保全

地下水は、豊水期に表流水の取水を増やして揚水量を補充量より低く抑えたり、洪水を浸透池に引き込んで地下への浸透を促進したりすることによって、計画的にストックの保全を図ることができる。これを、ストック保全機能（**stock-preservation function**）と呼ぶ。ストック保全機能は、他の様々な機能を引き出す過程で、そのための手段や副産物として作用することもある。たとえば、この後述べる揚水費用の削減や地盤沈下の抑制が第一目的であれば、ストックの保全はその手段と考えることもできるし、貯水が第一目的であれば、先述の貯蔵機能と同一視することもできる。

- ・揚水費用の削減

ここでの費用には、水源調査や地質調査のための費用、さく井工事の費用、揚水機（ポンプ）の導入・運転費用、ろ過などの水処理費用などが含まれる。通常、地下水の揚水は、水源の発見・さく井がしやすい帯水層や、深度が浅く低コストで汲み上げられる帯水層、水質が良好で追加処理の必要がない帯水層から順番に行われるため、費用は個々の帯水層の枯渇とともに上昇していく。また、同じ帯水層でも地下水位が低下すれば揚水費用は増加する。したがって、表流水の活用によって地下水ストックを保全することは、同時に、現在または将来の揚水費用を削減することにもつながる。

- ・地盤沈下の抑制

地盤沈下は、地下水の汲み上げによって帯水層に接する粘土層から間隙水が搾り出され、その結果、粘土層が収縮して地面が沈下する現象で、通常は不可逆的な被害をもたらす。表流水の活用によって地下水ストックを保全することは、地盤沈下の抑制にも資

する場合がある。

- ・帯水層への海水浸入の制御

沿岸域において、表流水を帯水層に注入することによって、帯水層への海水の浸入を防ぎ、淡水資源を保全することができる。注入は自然の浸透だけでなく、注入井（injection well）を通じて人工的にも行われる。

3.2 地域内連結利用の理論

地域内連結利用の理論では、通常、1) 表流水と地下水の利用配分に関する最適な意思決定ルールは何か、2) こうした意思決定ルールを前提とした場合、連結利用の各種の機能がもたらす価値はどのように評価できるか、3) 連結利用に必要な諸施設への投資プロジェクトはどのように評価できるか、などの論点について分析する。本稿では、このうち、揚水による異時点間のトレードオフがない場合の意思決定ルールの導出方法と安定化機能の評価方法について、Tsur (1990, 1997), Ranganathan and Palanisami (2004), Gemma and Tsur (2007)などを参考にしながら、1期だけの静学モデルを用いて説明する。

異時点間のトレードオフがない場合とは、たとえば、地下水のストックが定常状態にあり、かつ、補充量が想定される揚水量以上であるような場合や、揚水量に対してストックが巨大で、地下水位の低下による揚水費用の増加などの影響が実質的に無視できるような場合を指し、静学モデルはこうした状況の分析に有効である (Tsur, 1990)。

3.2.1 基本設定

作物の育成に地下水と表流水の2つの水源を利用できる生産者を考える。地下水のストックは変動しないが、揚水量 w に対して揚水費用 $c(w)$ がかかるものとする。ここでは単純に $c(w) = c_0 w$ とする (c_0 は正の定数)。なお、地下水の揚水量に上限はなく、必要な分だけ利用できるものとする。

一方、表流水は F だけ利用できるとする。ただし、表流水は、平均 F_μ 、分散 σ^2 で、 $[F, \bar{F}]$ の範囲で変動する。単純化のため、表流水の利用には費用がかからないものとする。したがって、生産者は地下水よりも表流水を優先的に利用し、足りない分を地下水で補う。また、ここでは、表流水の実現値 F が判明した後で地下水の揚水量を決定するような状況を考える。

この生産者は、作物を市場で売ったり自ら消費したりすることで便益を得る。単純化のため、水以外の生産要素の投入量は水投入量に対して最適化されていると考え、揚水費用を除いた純便益を水投入のみの関数で $U(w + F)$ と表す。 $U(\cdot)$ は、非減少で狭義の凹であるとする。

3.2.2 揚水の意味決定

F が与えられたときに生産者が直面する便益最大化問題は、以下の通りである。

$$\max_{w \geq 0} U(w + F) - c_0 w$$

地下水が全く必要とされないケースは連結利用として意味がないため、ここでは表流水の最低値においても $U'(F) \geq c_0$ が成り立つとすると、表流水の実現値 F に対する地下水の最適揚水量の意味決定ルール $w(F)$ は以下の条件を満たす。

$$U'(w(F) + F) = c_0 \quad (3.1)$$

c_0 は一定であるため、表流水と地下水を合計した最適水投入量 W は、表流水の実現値に依存せず、常に限界便益が単位揚水費用と等しくなる量、すなわち、 $U'(\bar{W}) = c_0$ を満たす一定の量 $\bar{W}$ として与えられる。また、このとき、地下水の最適揚水量の意味決定ルール $w(F)$ は、(3.1)と $\bar{W}$ を用いて、 $w(F) = \bar{W} - F$ と表すことができる。すなわち、表流水の量が増えればちょうどその分だけ地下水の揚水量を減らし、表流水の量が減ればちょうどその分だけ地下水の揚水量を増やす。

3.2.3 安定化機能の評価

次に、地域内連結利用の安定化機能の評価について考える。連結利用の価値を評価する場合、評価対象とする連結利用の機能に応じて、適切なベースラインを選択し、これと比較する方法が用いられる (Reichard and Raucher, 2003)。通常、ベースラインは、連結利用を行うことができない状況に設定する。上述のケースだと、表流水のみで生産を行う場合がベースラインとして想定される。表流水しか使えない場合、期待純便益は $E[U(F)]$ で与えられる。それに対して、地下水が利用できる場合、期待純便益は $E[U(\bar{W}) - c_0(\bar{W} - F)]$ となる。したがって、不確実性下における地域内連結利用の価値 V_U は、両者の差によって以下のように表すことができる。

$$V_U \equiv U(\bar{W}) - E[U(F)] - c_0(\bar{W} - F_\mu) \quad (3.2)$$

しかし、この V_U には、地下水を併用することが生み出す2つの異なる価値が含まれている。一つは、表流水に加え地下水を利用することで、平均的な水投入量が増加したために生じた価値である。これを、増量価値 (augmentation value) と呼ぶこともある (Gemma and Tsur, 2007)。ただし、増量価値は賦存形態の違いから生じる価値ではないため、通常、連結利用に焦点を当てた価値としては、2つ目の安定化価値のみに着目する。安定化価値を増量価値と切り離して単独で評価するためには、もう一つのベ

スラインの設定が必要である。通常、このベースラインは、不確実性がない状況が用いられる。不確実性がない状況における地域内連結利用の期待純便益 V_C は、以下のように表すことができる。

$$V_C \equiv U(\bar{W}) - U(F_\mu) - c_0(\bar{W} - F_\mu) \quad (3.3)$$

安定化価値 SV は、(3.2)と(3.3)を用いて V_U と V_C の差をとることで、以下のように算出される。

$$SV \equiv V_U - V_C = U(F_\mu) - E[U(F)]$$

ここで、 $U(\cdot)$ は狭義の凹関数であることから、 $U(F_\mu) > E[U(F)]$ となるため、以下の命題が成り立つ。

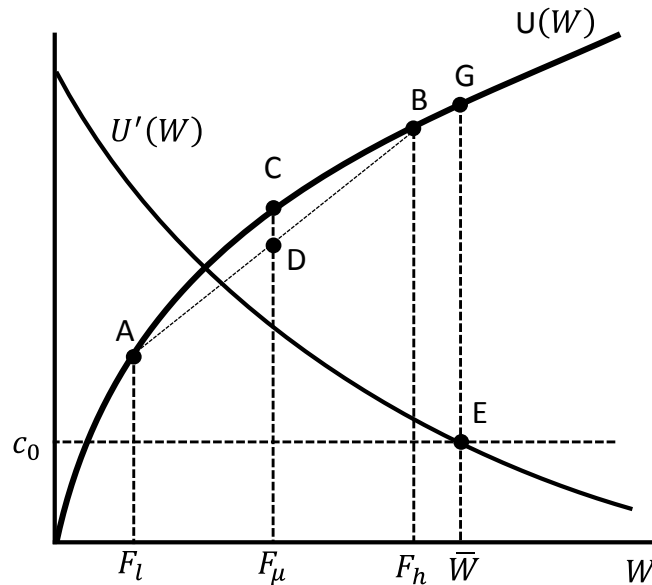
命題 1

便益関数が狭義の凹である場合、安定化価値 SV は正となる。

こうした状況を Tsur (1990)を参考にして説明すると図 3.1 のようになる。図中で、 $U(W)$ は表流水と地下水を合計した水投入量 W に対する便益曲線を、 $U'(W)$ は限界便益曲線を表す。いま、表流水が 50%の確率で F_l （渇水）となり、50%の確率で F_h （豊水）となるとする。地下水が利用できない場合、渇水時の便益は図の点A、豊水時の便益は点Bで与えられるため、期待便益は線分 $F_\mu D$ となる。一方、不確実性がない場合の表流水は平均 F_μ が実現し、便益は線分 $F_\mu C$ となる。便益関数の凹性より、不確実性がある場合の期待便益は、不確実性がない場合の期待便益よりも線分CDの分だけ低くなる。

地下水が利用できる場合はどうだろうか。最適な合計水投入量 $\bar{W}$ は、表流水の実現値にかかわらず、限界便益曲線 $U'(W)$ と c_0 から横軸に平行にひいた直線が交わる点Eに対応する量で与えられ、このときの便益は $\bar{W}G$ となる。地下水は、合計水投入量 $\bar{W}$ と表流水の実現値との間の長さで与えられる。不確実性がある場合の期待揚水費用は不確実性がない場合の揚水費用と同じく線分 $F_\mu \bar{W}$ に c_0 を乗じた量で与えられ、かつ、地下水が利用できる場合の便益 $\bar{W}G$ は不確実性がある場合もない場合も変わらないため、このモデルでの安定化価値は、先ほどの線分CDの長さで表される。この差を生み出しているのは、生産者がリスク回避的であることを反映する便益関数の凹性の度合いと、渇水時の流量 F_l と豊水時の流量 F_h の平均からの乖離の大きさである。

図 3.1 地域内連結利用のモデル (Tsur, 1990)



3.3 地域内連結利用と地域間連結利用の多様性の範囲の違い

連結利用の考え方を地域間連結利用に適用するにあたっては、水源が物理的に離れていることによって生じる射程の違いに留意する必要がある。具体的には、地域間連結利用が連結対象としてシステムに取り込むことができる国や地域の多様性の幅は、以下の3点において地域内連結利用よりも広い。

第一に、地域間連結利用は、連結可能な水資源の賦存形態の範囲が広い。地域内連結利用の対象は、基本的には同じ地域に存在する表流水と地下水である。それに対して、地域間連結利用では、隣接すらしない気候や風土の異なる国の水資源を連結させることができるため、より多様な賦存形態の水を取り扱うことができる。その最たる例が、フロー型×フロー型の連結利用である。フロー型×フロー型の連結利用は、変動の確率分布が異なるフロー型の水資源どうしを連結させる場合を想定している。連結対象は河川水と降水との間であってよいし、河川水どうし、あるいは降水どうしであってよい。特に、今後、主要な水源をグリーンウォーターに依存しなければならない地域では、お互いに変動のパターンが異なるグリーンウォーターを連結させることで、単体の場合に受忍せざるを得ない変動の影響を緩和させていくことができる。

第二に、地域間連結利用は、動員できる生産技術の種類や数が地域内連結利用よりも多い。地域内連結利用は同じ場所で単一の生産者が複数の水源を利用するものであるため、動員できる生産技術は自ずと限られている。それに対して、地域間連結利用は全く気象条件の異なる場所で活動する複数の生産者を連結することができる。そのため、より多くの品種の作物やより多くの種類の生産方法をシステムに組み込むことができる。

第三に、地域間連結利用は、連結の対象となる水源の数が地域内連結利用よりも多い。地域内連結利用では、物理的に運搬できる範囲の水源——典型的には一つの沿岸地点から取水した河川水と一つの揚水施設から揚水した地下水を連結する。それに対して、地域間連結利用にはそうした制約は存在せず、全く離れた2つ以上の水源を柔軟に組み合わせることが可能となる。また、水源の数を増やせるということは、地域間連結利用に参加する国や地域の数も3つ以上に増やせることを意味する。

4. フロー型×フロー型地域間連結利用のモデル

4.1 閉鎖経済均衡と開放経済均衡

4.1.1 基本設定

本稿で用いるモデルは、2国2財2資源の標準的なヘクシャー・オリー・モデルである。ただし、地域間連結利用の基本的な性質を明らかにするために、一般化可能性を最大限意識しつつも、生産関数や効用関数の形状を特定してモデルを記述する。

国は記号 i で表し、自国を $i = 1$ 、外国を $i = 2$ とする。両国の水資源と労働の賦存量をそれぞれ W^i, L^i とし、その組み合わせを $\Omega^i = (W^i, L^i)$ で表す。また、各資源の両国の合計を $\bar{\Omega} = (\bar{W}, \bar{L})$ 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。

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。

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

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。

水の価格と賃金をそれぞれ r_W^i, r_L^i とし、両者の比率を $r^i \equiv r_W^i / r_L^i$ とすると、単位費用関数は以下のように表される。

$$c_1(r_W^i, r_L^i) \equiv \frac{r_W^i r^{i\alpha_1-1}}{\alpha_1^{\alpha_1}(1-\alpha_1)^{1-\alpha_1}}, \quad c_2(r_W^i, r_L^i) \equiv \frac{r_W^i r^{i\alpha_2-1}}{\alpha_2^{\alpha_2}(1-\alpha_2)^{1-\alpha_2}}$$

また、包絡線定理を用いると、各財を1単位生産する際の費用を最小化する条件付資源需要関数は以下のように表される。

$$\begin{aligned} a_{W1}^i(r_W^i, r_L^i) &\equiv \frac{\partial c_1}{\partial r_W^i} = \frac{r^{i\alpha_1-1}}{\alpha_1^{\alpha_1-1}(1-\alpha_1)^{1-\alpha_1}}, & a_{L1}^i(r_W^i, r_L^i) &\equiv \frac{\partial c_1}{\partial r_L^i} = \frac{r^{i\alpha_1}}{\alpha_1^{\alpha_1}(1-\alpha_1)^{-\alpha_1}} \\ a_{W2}^i(r_W^i, r_L^i) &\equiv \frac{\partial c_2}{\partial r_W^i} = \frac{r^{i\alpha_2-1}}{\alpha_2^{\alpha_2-1}(1-\alpha_2)^{1-\alpha_2}}, & a_{L2}^i(r_W^i, r_L^i) &\equiv \frac{\partial c_2}{\partial r_L^i} = \frac{r^{i\alpha_2}}{\alpha_2^{\alpha_2}(1-\alpha_2)^{-\alpha_2}} \end{aligned} \quad (4.1)$$

(4.1)を用いると、各財の水集約度はそれぞれ $a_{W1}^i/a_{L1}^i = (\alpha_1/1-\alpha_1) \cdot r^{i-1}$ 、 $a_{W2}^i/a_{L2}^i = (\alpha_2/1-\alpha_2) \cdot r^{i-1}$ と表すことができる。ここでは、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。

ここで、各国では両財が生産されると仮定する。財1の価格を p_1^i 、財2の価格を p_2^i と置くと、以下のゼロ利潤条件が成り立つ。

$$\frac{r_W^i r^{i\alpha_1-1}}{\alpha_1^{\alpha_1}(1-\alpha_1)^{1-\alpha_1}} = p_1^i, \quad \frac{r_W^i r^{i\alpha_2-1}}{\alpha_2^{\alpha_2}(1-\alpha_2)^{1-\alpha_2}} = p_2^i$$

財1の相対価格を $p^i \equiv p_1^i/p_2^i$ と置くと、資源価格と財価格の間には以下の関係があることが示される。

$$p^i = \frac{\alpha_2^{\alpha_2}(1-\alpha_2)^{1-\alpha_2}}{\alpha_1^{\alpha_1}(1-\alpha_1)^{1-\alpha_1}} \cdot r^{i\alpha_1-\alpha_2} \quad (4.2)$$

(4.2)から、財価格が与えられれば、資源価格は資源賦存量に依存せずに決まる。これは、このモデルにおいて要素価格非感受性が成り立っていること、さらに、自由貿易の下では資源価格が均等化されるであろうことを示している。

一方、資源の完全投入要件は以下のように表される。

$$a_{W1}^i Y_1^i + a_{W2}^i Y_2^i = W^i, \quad a_{L1}^i Y_1^i + a_{L2}^i Y_2^i = L^i \quad (4.3)$$

(4.3)を Y_1^i と Y_2^i について解くことで、両財の生産量は、資源価格と資源賦存量を用いて以下のように表される。

$$\begin{aligned}
Y_1^i &= \frac{\alpha_1^{\alpha_1}(1-\alpha_1)^{1-\alpha_1}}{\alpha_1-\alpha_2} \cdot r^{i-\alpha_1} [(1-\alpha_2)r^i W^i - \alpha_2 L^i] \\
Y_2^i &= \frac{\alpha_2^{\alpha_2}(1-\alpha_2)^{1-\alpha_2}}{\alpha_1-\alpha_2} \cdot r^{i-\alpha_2} [\alpha_1 L^i - (1-\alpha_1)r^i W^i]
\end{aligned} \tag{4.4}$$

(4.4)より、水賦存量 W^i が増加すれば、財 1 の生産は拡大し、財 2 の生産は縮小することがわかる。これはリプチンスキーの定理が成り立っていることを表している。

4.1.2 閉鎖経済均衡

閉鎖経済における均衡消費量は、一階条件より、価格を用いて以下のように表わされる。

$$X_1^i = \frac{1}{p^i} \cdot \beta(p^i Y_1^i + Y_2^i), \quad X_2^i = (1-\beta)(p^i Y_1^i + Y_2^i) \tag{4.5}$$

市場均衡条件 $X_1^i = Y_1^i$, $X_2^i = Y_2^i$ より、均衡生産量は以下を満たす。

$$\frac{p^i Y_1^i}{Y_2^i} = \frac{\beta}{1-\beta}$$

このとき、 $\chi \equiv \beta\alpha_1 + (1-\beta)\alpha_2 < 1$ と置くと、(4.2), (4.4)より、閉鎖経済均衡における財価格と資源価格は以下のように求まる。

$$\begin{aligned}
p^i &= \frac{\alpha_2^{\alpha_2}(1-\alpha_2)^{1-\alpha_2}}{\alpha_1^{\alpha_1}(1-\alpha_1)^{1-\alpha_1}} \cdot \left(\frac{\chi}{1-\chi}\right)^{\alpha_1-\alpha_2} \left(\frac{L^i}{W^i}\right)^{\alpha_1-\alpha_2} \\
r^i &= \frac{\chi}{1-\chi} \cdot \frac{L^i}{W^i}
\end{aligned}$$

したがって、(4.4), (4.5)より、均衡消費量（生産量）は、資源賦存量によって以下のように表すことができる。

$$\begin{aligned}
X_1^i(\Omega^i) &= \beta \left(\frac{\alpha_1}{\chi}\right)^{\alpha_1} \left(\frac{1-\alpha_1}{1-\chi}\right)^{1-\alpha_1} W^{i\alpha_1} L^{i1-\alpha_1} \\
X_2^i(\Omega^i) &= (1-\beta) \left(\frac{\alpha_2}{\chi}\right)^{\alpha_2} \left(\frac{1-\alpha_2}{1-\chi}\right)^{1-\alpha_2} W^{i\alpha_2} L^{i1-\alpha_2}
\end{aligned}$$

これは、水賦存量が増加した場合、財 1 だけでなく、財 2 の生産量も拡大することを示しており、一見、リンプチンスキーの定理と矛盾するように思える。しかし、リンプチンスキーの定理は財価格が変化しないことを前提としている。均衡状態では、水資源が増加すれば当該財の相対価格は下落する。

均衡状態における各国の効用は、資源賦存量を変数とする間接効用関数によって、以下のように表わすことができる。

$$U(\Omega^i) \equiv u(X_1^i(\Omega^i), X_2^i(\Omega^i)) = \psi W^{i\chi} L^{i1-\chi} \quad (4.6)$$

ただし、 $\psi \equiv [\beta \alpha_1^{\alpha_1} (1 - \alpha_1)^{1-\alpha_1}]^\beta [(1 - \beta) \alpha_2^{\alpha_2} (1 - \alpha_2)^{1-\alpha_2}]^{1-\beta} \chi^{-\chi} (1 - \chi)^{\chi-1}$ である。

4.1.3 開放経済均衡

財の国際価格を $p \equiv p_1/p_2$ と置くと、開放経済での均衡生産量は以下を満たす。

$$p \cdot \frac{Y_1^1 + Y_1^2}{Y_2^1 + Y_2^2} = \frac{\beta}{1 - \beta}$$

また、(4.2)より、財の国際価格が決まると資源価格比は一意に決まるため、両国の資源価格比は均等化する。これを $r \equiv r_W/r_L$ と置く。このとき、(4.2), (4.4)より、開放経済均衡における財価格および資源価格は以下のように求まる。

$$p = \frac{\alpha_2^{\alpha_2} (1 - \alpha_2)^{1-\alpha_2}}{\alpha_1^{\alpha_1} (1 - \alpha_1)^{1-\alpha_1}} \cdot \left(\frac{\chi}{1 - \chi} \right)^{\alpha_1 - \alpha_2} \left(\frac{\bar{L}}{\bar{W}} \right)^{\alpha_1 - \alpha_2} \quad (4.7)$$

$$r = \frac{\chi}{1 - \chi} \cdot \frac{\bar{L}}{\bar{W}}$$

(4.7)は、財価格と資源価格が各資源の総賦存量の比率に依存していることを示している。資源は国境を越えて移動できないにもかかわらず、財価格と資源価格は国ごとの資源賦存量ではなく、システム全体の賦存量の比率によって決まる。したがって、総量に変化がなければ、国ごとの賦存量に増減があったとしても価格には影響しない。この理由については、地域間連結利用のメカニズムの説明の際に明らかにする。

均衡生産量は、資源賦存量によって以下のように表すことができる。

$$\begin{aligned}
Y_1^i(\Omega^1, \Omega^2) &= \left[(1 - \alpha_2)\chi \cdot \frac{W^i}{\bar{W}} - \alpha_2(1 - \chi) \cdot \frac{L^i}{\bar{L}} \right] \frac{1}{\alpha_1 - \alpha_2} \left(\frac{\alpha_1}{\chi} \right)^{\alpha_1} \left(\frac{1 - \alpha_1}{1 - \chi} \right)^{1 - \alpha_1} \bar{W}^{\alpha_1} \bar{L}^{1 - \alpha_1} \\
Y_2^i(\Omega^1, \Omega^2) &= \left[\alpha_1(1 - \chi) \cdot \frac{L^i}{\bar{L}} - (1 - \alpha_1)\chi \cdot \frac{W^i}{\bar{W}} \right] \frac{1}{\alpha_1 - \alpha_2} \left(\frac{\alpha_2}{\chi} \right)^{\alpha_2} \left(\frac{1 - \alpha_2}{1 - \chi} \right)^{1 - \alpha_2} \bar{W}^{\alpha_2} \bar{L}^{1 - \alpha_2}
\end{aligned} \tag{4.8}$$

なお、各国で両財が生産されるとき、(4.8)より、両国の水資源と労働資源に占める各国のそれぞれの資源の割合の間には、以下の関係が成り立っている。

$$\left(\frac{\alpha_2}{1 - \alpha_2} \cdot \frac{1 - \chi}{\chi} \right) \frac{L^i}{\bar{L}} < \frac{W^i}{\bar{W}} < \left(\frac{\alpha_1}{1 - \alpha_1} \cdot \frac{1 - \chi}{\chi} \right) \frac{L^i}{\bar{L}} \tag{4.9}$$

一方、均衡消費量は、資源賦存量によって以下のように表すことができる。

$$\begin{aligned}
X_1^i(\Omega^1, \Omega^2) &= \left[\chi \cdot \frac{W^i}{\bar{W}} + (1 - \chi) \cdot \frac{L^i}{\bar{L}} \right] \beta \left(\frac{\alpha_1}{\chi} \right)^{\alpha_1} \left(\frac{1 - \alpha_1}{1 - \chi} \right)^{1 - \alpha_1} \bar{W}^{\alpha_1} \bar{L}^{1 - \alpha_1} \\
X_2^i(\Omega^1, \Omega^2) &= \left[\chi \cdot \frac{W^i}{\bar{W}} + (1 - \chi) \cdot \frac{L^i}{\bar{L}} \right] (1 - \beta) \left(\frac{\alpha_2}{\chi} \right)^{\alpha_2} \left(\frac{1 - \alpha_2}{1 - \chi} \right)^{1 - \alpha_2} \bar{W}^{\alpha_2} \bar{L}^{1 - \alpha_2}
\end{aligned} \tag{4.10}$$

また、純輸出は以下の通りである。

$$\begin{aligned}
EX_1^i(\Omega^1, \Omega^2) &= \frac{[(1 - \chi)\alpha_1]^{\alpha_1} [\chi(1 - \alpha_1)]^{1 - \alpha_1}}{\alpha_1 - \alpha_2} \left(\frac{W^i}{\bar{W}} - \frac{L^i}{\bar{L}} \right) \bar{W}^{\alpha_1} \bar{L}^{1 - \alpha_1} \\
EX_2^i(\Omega^1, \Omega^2) &= \frac{[(1 - \chi)\alpha_2]^{\alpha_2} [\chi(1 - \alpha_2)]^{1 - \alpha_2}}{\alpha_1 - \alpha_2} \left(\frac{L^i}{\bar{L}} - \frac{W^i}{\bar{W}} \right) \bar{W}^{\alpha_2} \bar{L}^{1 - \alpha_2}
\end{aligned}$$

i 国は、 $\left(\frac{W^i}{\bar{W}} - \frac{L^i}{\bar{L}} \right)$ が正であれば財 1 を輸出し、財 2 を輸入する。これは、各国は相対的に賦存量の豊富な資源を集約的に用いる財を輸出するとのヘクシャー・オリーンの定理が成り立つことを示している。

開放経済における各国の効用は、資源賦存量を変数とする間接効用関数によって、以下のように表わすことができる。

$$U(\Omega^1, \Omega^2) \equiv u \left(X_1^i(\Omega^1, \Omega^2), X_2^i(\Omega^1, \Omega^2) \right) = \psi \left[\chi \cdot \frac{W^i}{\bar{W}} + (1 - \chi) \cdot \frac{L^i}{\bar{L}} \right] \bar{W}^\chi \bar{L}^{1 - \chi} \tag{4.11}$$

4.2 安定化機能の評価

地域内連結利用における安定化価値の評価方法を地域間連結利用に応用するには、以下の3点について追加的な検討が必要である。第一に、地域間連結利用の場合、ベースラインとなる連結利用を行うことができない状況としては、閉鎖経済を想定することが自然である。ただし、閉鎖経済から開放経済に移行することの便益には、不確実性の有無にかかわらず得られる、両国の平均的な資源配分を反映した貿易の利得一般が含まれてしまう。そのためさらに、両国の水資源に不確実性がない状況下と、一方もしくは両方の国の水資源に不確実性がある状況下とで、移行の便益を比較する。

第二に、地域内連結利用では意思決定者は単一であったため、評価の視点はこの意思決定者の便益だけであった。しかし、地域間連結利用の場合、両国を合わせたシステム全体としての視点のほか、国ごとの視点、さらには、国内の各経済主体の視点が存在する。本稿では、国内の経済主体の視点については触れず、システム全体の便益を最大化する視点と、国ごとの視点について分析する。

第三に、フロー型水資源を有する国どうしの地域間連結利用については、本来、お互いの水の変動の分布の組み合わせによって安定化価値がどのように変化するかを見ることが重要である。特に実践では、両国のフローどうしが独立ではなく、何らかの確率的な関係性がある場合が考えられる。例えば、広域的な干ばつに同時に襲われる可能性がある地域間での連結利用と、地形的な影響によって片方が干ばつに直面する際にはもう片方が多雨となるような地域間での連結利用では、評価が全く異なる。このような場合には、安定化機能の評価にポートフォリオ理論を活用することが考えられる。しかし、本稿では単純化のため、極端なケースとして、一方の国の水資源のみが変動する場合を考える。以下では、仮に自国の水資源のみが変動し、外国は変動しない場合を想定する。

労働資源の賦存量と外国の水資源は変動しないため、(4.6)、(4.11)の間接効用関数は、さらに自国の水資源だけの関数として書き換えることができる。いま、閉鎖経済における自国と外国の効用をそれぞれ $U^{1a}(W^1)$ 、 $U^{2a}(W^1)$ 、開放経済における自国と外国の効用を $U^1(W^1)$ 、 $U^2(W^1)$ とし、それぞれ以下のように表す。

$$U^{ia}(W^1) \equiv \psi W^i L^{1-\chi},$$

$$U^i(W^1) \equiv \psi \left[\chi \cdot \frac{W^i}{\bar{W}} + (1-\chi) \cdot \frac{L^i}{\bar{L}} \right] \bar{W}^\chi \bar{L}^{1-\chi}$$

さらに、システム全体の便益を評価するため、閉鎖経済と開放経済それぞれにおける両国の効用の和を以下のように記述する。

$$U^{wa}(W^1) \equiv U^{1a}(W^1) + U^{2a}(W^1) = \psi W^{1\chi} L^{1-\chi} + \psi W^{2\chi} L^{2-\chi}$$

$$U^w(W^1) \equiv U^1(W^1) + U^2(W^1) = \psi \bar{W}^\chi \bar{L}^{1-\chi} \quad (4.12)$$

4.2.1 システム全体の安定化機能

最初に、システム全体の安定化機能について検討する。前節と同様の手法を取り、不確実性がない状況における開放経済への移行の便益を以下のように表わす。

$$V_C \equiv U^w(W_\mu^1) - U^{wa}(W_\mu^1) = \psi \left(\bar{W}_\mu^\chi \bar{L}^{1-\chi} - W_\mu^{1\chi} L^{1-\chi} \right) - \psi W^{2\chi} L^{2-\chi}$$

ただし、 W_μ^1 は W^1 の平均 $E[W^1]$ を表し、 $\bar{W}_\mu = W_\mu^1 + W^2$ とする。一方、不確実性がある状況における開放経済への移行の便益は以下のように表される。

$$V_U \equiv E[U^w(W^1) - U^{wa}(W^1)] = E \left[\psi \left(\bar{W}^\chi \bar{L}^{1-\chi} - W^{1\chi} L^{1-\chi} \right) \right] - \psi W^{2\chi} L^{2-\chi}$$

図 4.1 水資源の変動に伴う開放経済の価値の変化（システム全体）

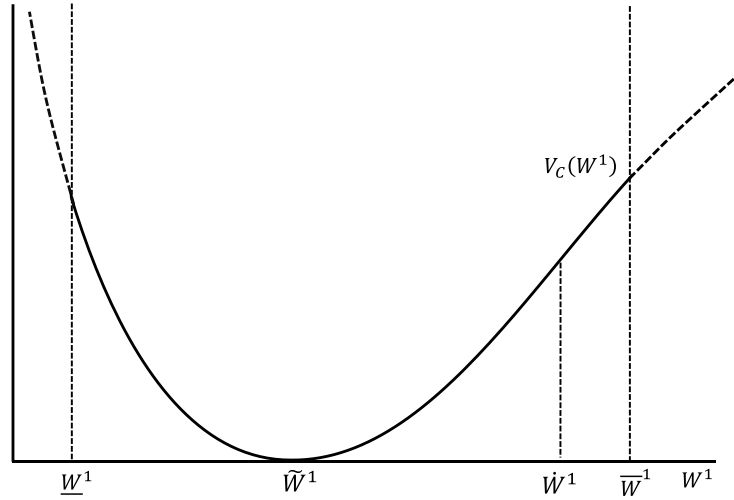


図 4.1 は、 V_C を W^1 の関数としてその形状を表したものである。なお、以下では、 $\frac{W^1}{\bar{W}} = \frac{L^1}{L}$ となる W^1 を $\tilde{W}^1$ とする。 $W^1 = \tilde{W}^1$ のとき、両国の相対的な資源の希少性の差異は解消され、貿易は起こらない。さらに、(4.9)を満たす W^1 の範囲、すなわち、両国で両財が生産される W^1 の範囲を $(\underline{W}^1, \bar{W}^1)$ とし、 $\left(\frac{w^1}{\bar{w}}\right)^{2-\chi} = \left(\frac{L^1}{L}\right)^{1-\chi}$ を満たす W^1 を $\hat{W}^1$ とする。曲線 $V_C(W^1)$ は、 $\tilde{W}^1$ に対応する点を底点としながら左右に向かって増加する。曲線は図中の多くの部分において凸形で、水資源の増加とともに $V_C(W^1)$ の増加幅は大きく（減少幅は小さく）なっていくが、 $\hat{W}^1$ を境に増加幅の伸びは減少に転じる。なお、図中では $\hat{W}^1$

は $(\underline{W}^1, \overline{W}^1)$ の範囲内になっているが、実際には、両者の関係は両国の資源の相対的な賦存状況とパラメーターに依存する。

以上のような $V_C(W^1)$ の形状より、以下が成り立つ。

命題 2

W^1 が $(\underline{W}^1, \overline{W}^1) \cap (0, \dot{W}^1)$ の範囲内で変動するとき、システム全体にとっての地域間連結利用の安定化価値は正となる。すなわち、

$$SV \equiv V_U - V_C > 0.$$

(証明)

$(\underline{W}^1, \overline{W}^1) \cap (0, \dot{W}^1)$ の範囲において、関数 $V_C(W^i)$ は狭義の凸である。したがって、 $V_C(W^1) < E[V_C(W^1)] = V_U$ である。

(証明了)

なお、 W^1 の範囲の一部が $\dot{W}^1$ より右にかかっている場合でも $V_U > V_C$ が成り立つことはあるが、確率分布全体の形状による。

4.2.2 国ごとの安定化機能

それでは、国ごとの安定化機能はどうだろうか。不確実性がある状況とない状況における開放経済への移行の便益はそれぞれ以下のように表される。

$$\begin{aligned} V_C^1 &= U^1(W_\mu^1) - U^{1a}(W_\mu^1) = \psi \left\{ \left[\chi \cdot \frac{W_\mu^1}{\bar{W}_\mu} + (1 - \chi) \cdot \frac{L^1}{\bar{L}} \right] \bar{W}_\mu^\chi \bar{L}^{1-\chi} - W_\mu^{1\chi} L^{1-\chi} \right\} \\ V_C^2 &= U^2(W_\mu^1) - U^{2a}(W_\mu^1) = \psi \left\{ \left[\chi \cdot \frac{W_\mu^2}{\bar{W}_\mu} + (1 - \chi) \cdot \frac{L^2}{\bar{L}} \right] \bar{W}_\mu^\chi \bar{L}^{1-\chi} - W_\mu^{2\chi} L^{2-\chi} \right\} \\ V_U^1 &= E[U^1(W^1) - U^{1a}(W^1)] = E \left\{ \psi \left[\chi \cdot \frac{W^1}{\bar{W}} + (1 - \chi) \cdot \frac{L^1}{\bar{L}} \right] \bar{W}^\chi \bar{L}^{1-\chi} - W^{1\chi} L^{1-\chi} \right\} \\ V_U^2 &= E[U^2(W^1) - U^{2a}(W^1)] = E \left\{ \psi \left[\chi \cdot \frac{W^2}{\bar{W}} + (1 - \chi) \cdot \frac{L^2}{\bar{L}} \right] \bar{W}^\chi \bar{L}^{1-\chi} - W^{2\chi} L^{2-\chi} \right\} \end{aligned}$$

図 4.2 水資源の変動に伴う開放経済の価値の変化（各国）

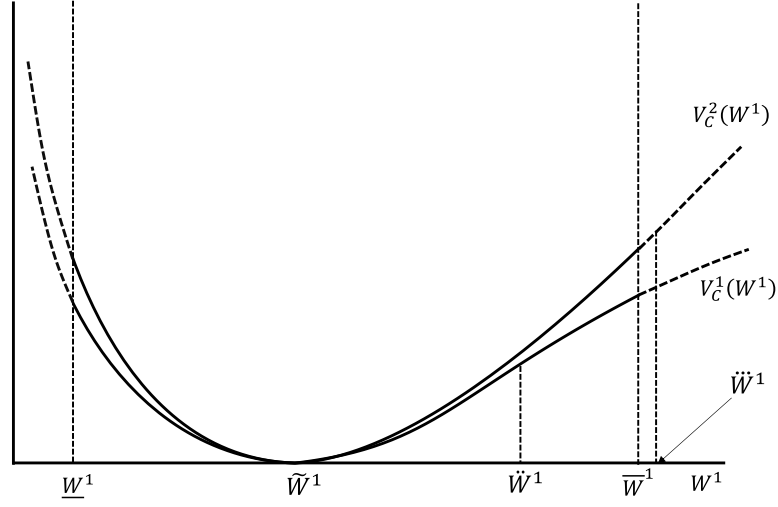


図 4.2 は、先程と同じように、 V_C^1 と V_C^2 を W^1 の関数としてそれぞれの形状を表したものである。なお、ここでは、

$$2 - (2 - \chi) \frac{W^1}{\bar{W}} + (1 - \chi) \frac{L^1}{\bar{L}} = \left(\frac{W^1}{\bar{W}} \right)^{\chi-2} \left(\frac{L^1}{\bar{L}} \right)^{1-\chi}$$

$$\frac{W^2}{\bar{W}} = \frac{1 - \chi}{2 - \chi} \cdot \frac{L^2}{\bar{L}}$$

を満たす W^1 を、それぞれ $\dot{W}^1$ 、 $\ddot{W}^1$ と置く。

先ほどと同じように、 $V_C^1(W^1)$ と $V_C^2(W^1)$ の形状より、それぞれ以下が成り立つ。

命題 3

W^1 が $(\underline{W}^1, \bar{W}^1) \cap (0, \dot{W}^1)$ の範囲内で変動するとき、自国にとっての地域間連結利用の安定化価値は正となる。すなわち、

$$SV^1 \equiv V_U^1 - V_C^1 > 0.$$

命題 4

W^1 が $(\underline{W}^1, \bar{W}^1) \cap (0, \dot{W}^1)$ の範囲内で変動するとき、外国にとっての地域間連結利用の安定化価値は正となる。すなわち、

$$SV^2 \equiv V_U^2 - V_C^2 > 0.$$

証明は命題 2 と同様であるので省略する。

4.3 フロー型×フロー型地域間連結利用のメカニズムと適応特化

前節では、安定化価値が正になることを数学的な論理関係のみから機械的に示したが、背後にはどのようなメカニズムが働いているのであろうか。

4.3.1 システム全体の安定化のメカニズム

最初にシステム全体の安定化のメカニズムを考える。注目すべき点の一つは、(4.12)に見られるように、開放経済におけるシステム全体の効用関数 $\psi \bar{W}^x \bar{L}^{1-x}$ が、各国の資源賦存量の配分に依存していないことである。この経済では両国間で水資源や労働資源を移動させることができないにもかかわらず、システム全体の効用はシステム全体の水資源と労働資源の賦存量のみによって決定される。

システム全体の効用が両国間の資源配分の状況に依存しない理由を理解するには、貿易モデルにおける資源の働きの構造についての分析が必要である。そこで以下では、Samuelson (1949)と Dixit and Norman (1980)の思考実験を応用して、この構造について検討する。

図 4.3 Samuelson (1949)と Dixit and Norman (1980)の思考実験

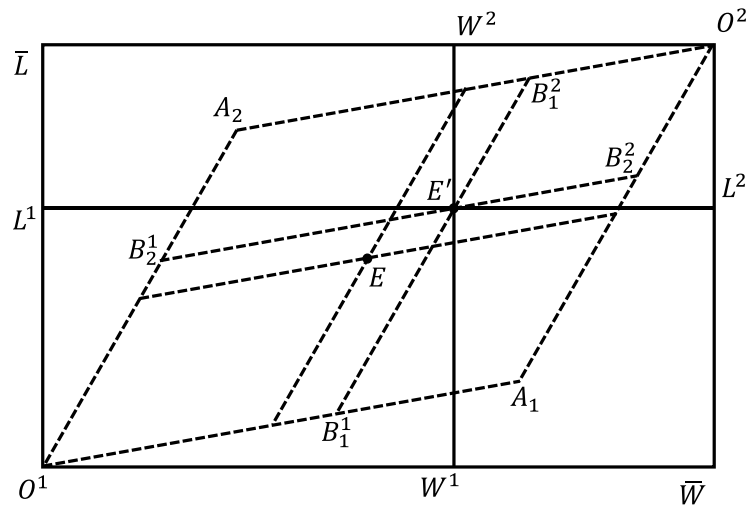


図 4.3 のボックスダイアグラムは、横軸の長さに両国の水資源の合計 $\bar{W}$ を、縦軸の長さに両国の労働資源の合計 $\bar{L}$ をとったものである。自国から見た資源賦存量（および投入量）を左下の点 O^1 を原点とした座標、外国から見た資源賦存量（および投入量）を右上の点 O^2 を原点とした座標で考える。はじめに、水資源と労働資源を両国間で自由に移動できる状況を仮定する。こうした状況は、2つの水源の水資源を完全に代替的に使えるという点で、地域内連結利用の状況と似ている。違う点は、ここでは生産設備が2つに分かれていることである。2つの資源は自由に動かせるので、システム全体の水資源と労働資源の賦存量の状況によって決まるシステム共通の資源価格に基づいて、各国

の賦存量が配分される。仮にこの配分を点 E で表す。各財への水資源と労働資源の投入量も、そしてそれに対応した各財の生産量（消費量）も、このシステム共通の資源価格に基づいて決まる。具体的には、(4.1)に従って、単位費用を最小化する各財への資源投入量 (a_{w1}, a_{w2}) と (a_{l1}, a_{l2}) が決まる。システム全体の各財の生産量（消費量） Y_1, Y_2 は、以下のシステム全体の資源の完全投入条件が成り立つ点で決まる。

$$a_{w1}Y_1 + a_{w2}Y_2 = \bar{W}, \quad a_{l1}Y_1 + a_{l2}Y_2 = \bar{L}$$

以上によって決まるシステム全体の各財への資源投入量は、図中の点 A_1 や点 A_2 の座標で表されている。

Samuelson (1949)と Dixit and Norman (1980)が思考実験の中で問うたのは、水資源と労働資源が両国間を移動できない場合にも、以上と同じシステム全体の均衡資源価格と均衡生産量、そして均衡資源投入量を達成できるか、ということであった。いま、両国の資源賦存量が平行四辺形 $O^1A_1O^2A_2$ の中の任意の点 E' で与えられているとする。 O^iA_1, O^iA_2 のベクトルで挟まれた領域は、それぞれの国にとっての不完全特化の円錐になっている。したがって、各国の資源賦存量がこの領域の内部にある限りは両財が生産される。このとき、各国における各財の生産量は、(4.3)の国ごとの資源の完全投入要件に従って、(4.1)が表すベクトル (a_{w1}, a_{l1}) 、 (a_{w2}, a_{l2}) をそれぞれ Y_1^i, Y_2^i 倍したベクトルの和が賦存量ベクトル (W^i, L^i) に一致するように決定される。図 4.3 の中では、 $O^1B_1^1, O^1B_2^1$ が自国の各財への資源投入量のベクトルとなり、 $O^2B_1^2, O^2B_2^2$ が外国の各財への資源投入量のベクトルとなる。明らかに、水資源、労働資源それぞれについて両国の各財への投入量を足し合わせれば、先ほどと同じ配分となっている。このとき、財価格や資源価格も先ほどの均衡価格と等しくなっているはずである。

実際、開放経済での両国の各財への資源投入量を合計は、(4.13a)のように両国間の資源配分には依存せず、システム全体の資源賦存量によって決まる。さらに、(4.13b)のように、各財への資源投入量の比率はシステム全体の資源賦存量にも依存せず、資源集約度と選好を表すパラメーターのみによって固定されている。

$$\begin{aligned} w_1^1 + w_1^2 &= \frac{\beta\alpha_1}{\chi} \cdot \bar{W}, & w_2^1 + w_2^2 &= \frac{(1-\beta)\alpha_2}{\chi} \cdot \bar{W} \\ l_1^1 + l_1^2 &= \frac{\beta(1-\alpha_1)}{1-\chi} \cdot \bar{L}, & l_2^1 + l_2^2 &= \frac{(1-\beta)(1-\alpha_2)}{1-\chi} \cdot \bar{L} \end{aligned} \quad (4.13a)$$

$$\frac{w_1^1 + w_1^2}{w_2^1 + w_2^2} = \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \cdot \frac{\beta}{1-\beta}, \quad \frac{l_1^1 + l_1^2}{l_2^1 + l_2^2} = \frac{1-\alpha_1}{1-\alpha_2} \cdot \frac{\beta}{1-\beta} \quad (4.13b)$$

つまり、両国で両財が生産される限りは、水資源と労働資源が両国間を移動できない

場合であっても、両国間の資源配分の状況いかにかわらず、自由に移動できる場合と同じ均衡を達成できる。連結利用の文脈で言えば、このシステムの下では、水資源を物理的に移動できない地域間連結利用においても、水資源を地域間で自由に移動し、完全に代替的に利用できる場合と全く同じ均衡が達成されるのである。開放経済におけるシステム全体の効用関数 $\psi \bar{W}^\chi \bar{L}^{1-\chi}$ が両国間の資源配分に依存していないのはこのためであり、また、この構造は、本稿と佐藤・仲山（2014）で論じるモデルの両方において、地域間連結利用を支えるメカニズムの柱となっている。

もちろん、それぞれの国での資源投入量（ここではベクトル $O^1 B_1^1, O^1 B_2^1, O^2 B_1^2, O^2 B_2^2$ で表される）は、両国間の資源配分の状況、すなわち点 E' の位置によって決まる。これは、開放経済下においては、生産と消費とを分離して決めることができることを反映している。つまり、システム全体の生産量と消費量は、先ほどの論理に従って両国間の資源配分に依存せずに決まる一方で、各国の生産（と貿易）のパターンは、それとは独立して、両国間の資源配分の状況、すなわち相対的な資源の希少性の差異に応じて最適化されるのである。

では、生産と消費とが分離できない閉鎖経済では何が起こるであろうか。閉鎖経済における各財への資源投入量は、以下のように決定される。

$$\begin{aligned} w_1^i &= \frac{\beta \alpha_1}{\chi} \cdot W^i, & w_2^i &= \frac{(1-\beta)\alpha_2}{\chi} \cdot W^i \\ l_1^i &= \frac{\beta(1-\alpha_1)}{1-\chi} \cdot L^i, & l_2^i &= \frac{(1-\beta)(1-\alpha_2)}{1-\chi} \cdot L^i \end{aligned} \quad (4.14a)$$

各財への各資源の投入量は、その国のそれぞれの資源の賦存量によって固定されている。労働投入量は水資源の賦存量に依存しないため、水資源投入量に対する限界生産物の逓減により、水資源が減る局面では加速的に生産量（消費量）は減少し、増える局面では増加幅が鈍化していく（図 4.4，図 4.5）。

各財への資源投入量が固定されていることと、そのために生産量（消費量）が加速的に減少（ないし増加幅が鈍化）していくことの理由は、直感的に言えば、この経済が2種類のバランスをとることを要請しており、閉鎖経済では両者のトレードオフを回避できないためである。バランスの一つは、両財の消費のバランスであり、どちらかの財に偏向して消費量を変化させると、その分だけ、限界効用逓減の影響を大きく受ける。もう一つのバランスは、各財の生産に投入される資源間の比率であり、どちらかの資源に偏向して投入量を変化させると、その分だけ、限界生産物逓減の影響を大きく受ける。

図 4.4 自国の水資源の変動に伴う自国の資源投入の変化（閉鎖経済）

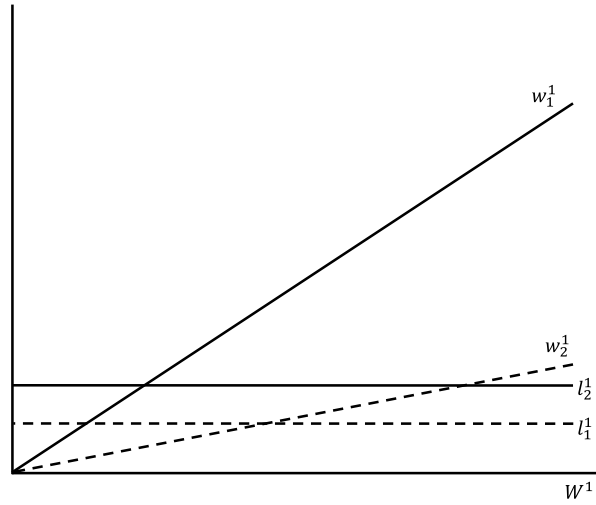
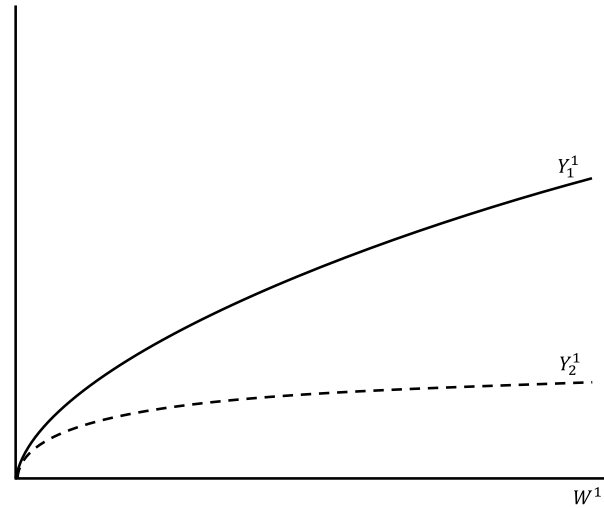


図 4.5 自国の水資源の変動に伴う自国の生産量の変化（閉鎖経済）



(4.5)より、この経済では、両財の消費量の間には以下の関係が成り立っている。

$$\frac{pX_1^i}{X_2^i} = \frac{\beta}{1-\beta}$$

すなわち、相対価格で評価した両財の価値の比率が、各財に対する効用のウェイトの比率 $\beta/(1-\beta)$ に等しいように消費量のバランスが確保される。また、(4.14a)より、閉鎖経済では、各財への各資源の投入比率は以下のように表される。

$$\frac{w_1^i}{w_2^i} = \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \cdot \frac{\beta}{1-\beta}, \quad \frac{l_1^i}{l_2^i} = \frac{1-\alpha_1}{1-\alpha_2} \cdot \frac{\beta}{1-\beta} \quad (4.14b)$$

これは、各財への資源投入量の比率が、開放経済のときと同じく、選好と資源集約度を表すパラメーターのみに依存すること、より詳しく言えば、各財の消費のバランスを示すパラメーター $\beta/(1-\beta)$ と、各財の生産に投入される資源間の比率のバランスを示す水集約度（労働集約度）のパラメーター α_1/α_2 、 $(1-\alpha_1)/(1-\alpha_2)$ に応じて分配されることを示している。各財への資源投入量の比率は、各国の資源の賦存量いかににかかわらず、(4.13b)のシステム全体のそれと同じ選好と資源集約度のウェイトによって固定されているのである。ここでは労働の賦存量は一定であるため、水賦存量の変動にかかわらず各財への労働の投入量は変わらないのに対して、各財への水資源の投入量は、比率が固定されたまま自国の賦存量とともに増減する。結果として、自国の水賦存量が減少（増加）すると、両財ともに、労働投入量に対する水投入量の比率は減少（増加）し、水についての限界生産物の逓減により、生産量の減少幅（増加幅）は拡大する。

では、開放経済ではどうだろうか。両国の資源投入量の合計は先に見たとおりだが、各国での資源投入量は(4.15a)のようになる。

$$\begin{aligned}
 w_1^i &= \frac{\alpha_1}{(\alpha_1 - \alpha_2)\chi} \left[(1 - \alpha_2)\chi \cdot \frac{W^i}{\bar{W}} - \alpha_2(1 - \chi) \cdot \frac{L^i}{\bar{L}} \right] \cdot \bar{W} \\
 w_2^i &= \frac{\alpha_2}{(\alpha_1 - \alpha_2)\chi} \left[\alpha_1(1 - \chi) \frac{L^i}{\bar{L}} - (1 - \alpha_1)\chi \cdot \frac{W^i}{\bar{W}} \right] \cdot \bar{W} \\
 l_1^i &= \frac{1 - \alpha_1}{(\alpha_1 - \alpha_2)(1 - \chi)} \left[(1 - \alpha_2)\chi \cdot \frac{W^i}{\bar{W}} - \alpha_2(1 - \chi) \cdot \frac{L^i}{\bar{L}} \right] \cdot \bar{L} \\
 l_2^i &= \frac{1 - \alpha_2}{(\alpha_1 - \alpha_2)(1 - \chi)} \left[\alpha_1(1 - \chi) \frac{L^i}{\bar{L}} - (1 - \alpha_1)\chi \cdot \frac{W^i}{\bar{W}} \right] \cdot \bar{L}
 \end{aligned} \tag{4.15a}$$

閉鎖経済のときの(4.14b)と異なり、各財への資源投入量の比率は固定的ではなく、(4.15b)のように、各国の賦存量の割合に基づく比較優位・劣位に応じて変化する。これは、先ほどの思考実験の際に見たように、各国の生産の様態がシステム全体の生産量や消費量とは独立して、両国間の資源配分の状況、すなわち相対的な資源の希少性の差異に応じて最適化されることの現れである。

$$\begin{aligned}
 \frac{w_1^i}{w_2^i} &= \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \cdot \frac{\left[(1 - \alpha_2)\chi \cdot \frac{W^i}{\bar{W}} - \alpha_2(1 - \chi) \cdot \frac{L^i}{\bar{L}} \right]}{\left[\alpha_1(1 - \chi) \frac{L^i}{\bar{L}} - (1 - \alpha_1)\chi \cdot \frac{W^i}{\bar{W}} \right]}, \\
 \frac{l_1^i}{l_2^i} &= \frac{1 - \alpha_1}{1 - \alpha_2} \cdot \frac{\left[(1 - \alpha_2)\chi \cdot \frac{W^i}{\bar{W}} - \alpha_2(1 - \chi) \cdot \frac{L^i}{\bar{L}} \right]}{\left[\alpha_1(1 - \chi) \frac{L^i}{\bar{L}} - (1 - \alpha_1)\chi \cdot \frac{W^i}{\bar{W}} \right]}
 \end{aligned} \tag{4.15b}$$

なお、各財の消費に体化した資源投入量（つまり、消費に体化したバーチャル・ウォーターとバーチャル・ランド）を w_{Xj}^i , l_{Xj}^i とすると(4.16a)のように表される。両国間での配分は、(4.10)の均衡消費量と同様、両国の水資源と労働資源に占めるそれぞれの国の資源の割合を χ で加重平均した $\chi \cdot \frac{W^i}{\bar{W}} + (1 - \chi) \cdot \frac{L^i}{\bar{L}}$ に比例して割り当てられる。また、(4.16b)のように、両財間の配分はやはり選好と集約度の比率で固定されている。

$$\begin{aligned} w_{X1}^i &= \frac{\beta \alpha_1}{\chi} \left[\chi \cdot \frac{W^i}{\bar{W}} + (1 - \chi) \cdot \frac{L^i}{\bar{L}} \right] \bar{W} \\ w_{X2}^i &= \frac{(1 - \beta) \alpha_2}{\chi} \left[\chi \cdot \frac{W^i}{\bar{W}} + (1 - \chi) \cdot \frac{L^i}{\bar{L}} \right] \cdot \bar{W} \\ l_{X1}^i &= \frac{\beta(1 - \alpha_1)}{1 - \chi} \left[\chi \cdot \frac{W^i}{\bar{W}} + (1 - \chi) \cdot \frac{L^i}{\bar{L}} \right] \cdot \bar{L} \\ l_{X2}^i &= \frac{(1 - \beta)(1 - \alpha_2)}{1 - \chi} \left[\chi \cdot \frac{W^i}{\bar{W}} + (1 - \chi) \cdot \frac{L^i}{\bar{L}} \right] \cdot \bar{L} \end{aligned} \quad (4.16a)$$

$$\frac{w_{X1}^1}{w_{X2}^1} = \frac{w_{X1}^2}{w_{X2}^2} = \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \cdot \frac{\beta}{1 - \beta}, \quad \frac{l_{X1}^1}{l_{X2}^1} = \frac{l_{X1}^2}{l_{X2}^2} = \frac{1 - \alpha_1}{1 - \alpha_2} \cdot \frac{\beta}{1 - \beta} \quad (4.16b)$$

以上のように、閉鎖経済では、各財への資源投入量の比率は、両国間の資源配分の状況いかににかかわらず、開放経済におけるシステム全体のそれと同じ選好と資源集約度のウェイトによって固定され、開放経済では、それとは独立して、両国間の資源配分の状況に応じて最適化される。閉鎖経済では、各財の消費の比率のバランスと各財の生産に投入される資源間の比率のバランスのトレードオフを回避できないのに対して、開放経済ではそれが可能となるのである。

結果として、閉鎖経済では、図 4.3 の左下の長方形の範囲で変動に対処しなければならないのに対して、開放経済では、各国の資源賦存量の配分のいかににかかわらず、あたかも一つの国のように、大きな長方形全体を使って変動に対処することができる。もちろん、大きな長方形も変動によって大きさが変わるが、 W^1 と W^2 の合計値である $\bar{W}$ によって対処するため、変動の影響は全体として緩和される。とりわけ、 W^1 が減少する局面では、閉鎖経済における資源の利用可能量はゼロに近づくため、生産量は急速にゼロに近づくのに対して、開放経済ではそのようなことはない。一方で、 W^1 が増加する局面では、閉鎖経済、開放経済ともに限界生産物と限界効用が逡減していく中で、開放経済では W^2 分だけ資源が多いメリットが小さくなり、図 6.3 で見たように、やがて両経済の効用の差の増加幅、すなわち曲線 $V_C(W^1)$ の増加幅は減少に転じる。こうした構造が $V_C(W^1)$ の形状を生み出し、安定化価値を生み出しているのである。

4.3.2 国ごとの安定化のメカニズム

では、国ごとの安定化価値はどのように生み出されているのであろうか。それを考えるためには、各国内の資源投入や生産の状況をより詳しく見ていく必要がある。

1) 自国経済

閉鎖経済における自国の状況は、図 4.4、図 4.5 で見たとおりである。一方、開放経済では、図 4.6、図 4.7 に見られるように、水資源の増減に伴う比較優位性の変化に応じて、生産の特化（この場合は不完全特化）と各財への資源投入のリバランスが行われる。たとえば、自国の水資源が減少する局面では、減少に伴って労働集約的な財についての比較優位が強まるため、水資源と労働は急速に財 2 に移動する。その際、財 1 への水投入量は閉鎖経済よりも急激に減少し、かつ、労働投入も減少するため、生産量は閉鎖経済よりも急激に減少していく。ただし、水投入量の減少は線形であるのに対し、労働投入量の減少は加速度的であるため、水投入量の減少による限界生産物逓増の効果は一部打ち消される。一方、財 2 については、 $\frac{L^1}{L} < \frac{1-\alpha_1}{\alpha_1} \cdot \frac{\chi}{1-\chi}$ の場合、水資源全体の減少速度を財間の投入配分のリバランス速度が上回るため、水資源は減っているにもかかわらず水投入は緩やかながら線形に増加し、かつ、労働投入が財 1 から加速的に移動する。このため、水投入の増加による限界生産物逓減の効果は打ち消され、結果として生産量は加速的に増加する。 $\frac{L^1}{L} > \frac{1-\alpha_1}{\alpha_1} \cdot \frac{\chi}{1-\chi}$ の場合には、資源の減少速度がリバランス速度を上回るため、水投入は線形に減少するものの、閉鎖経済より緩やかである上、労働投入も増加するため、やはり生産量は加速的に増加する。いずれの場合においても、自国は水資源の減少とともに労働集約的な財の生産に特化し、それを外国に輸出する対価として水集約的な財を輸入することによって、両財の消費の減少に歯止めをかけることができる。結果として、水資源の減少に伴う効用の減少幅は、閉鎖経済におけるそれより小さくなり、かつ、両者の差は水資源の減少とともに拡大していく。

一方、自国の水資源が増大する局面では、水集約的な財についての比較優位が強まるため、水資源と労働は財 1 に移動する。その結果、財 1 への水投入は閉鎖経済より急速に線形に増加し、かつ、労働投入も増加するため、投入量自体の増加と、水投入の限界生産物逓減の効果が一部打ち消されることの両方により、生産量は閉鎖経済より急速に増加する。ただし、労働投入の増加幅は鈍化していくため、限界生産物逓減を打ち消す効果は徐々に小さくなり、閉鎖経済より緩やかではあるが、生産量の増加幅も鈍化する。一方、財 2 については、 $\frac{L^1}{L} < \frac{1-\alpha_1}{\alpha_1} \cdot \frac{\chi}{1-\chi}$ の場合、水資源全体の増加速度を財間の投入配分のリバランス速度が上回るため、水投入は緩やかながら線形に減少し、水資源が増えていくにもかかわらず生産量は減少する。ただし、労働投入も減少するため、水投入の減

少による限界生産物逡増の効果は打ち消され、生産量の減少幅は鈍化する。 $\frac{L^1}{L} > \frac{1-\alpha_1}{\alpha_1}$.

$\frac{\chi}{1-\chi}$ の場合には、資源の増加速度がリバランス速度を上回るため、水投入は線形に増加するものの、増加速度は閉鎖経済より緩やかである上、労働投入も減少するため、やはり生産量は減少する。いずれの場合も、水集約的な財の生産に特化することで、閉鎖経済で生じる水投入の限界生産物逡減の効果を一部打ち消しながら財 1 の生産を拡大することができる。結果として、効用の増加幅は、閉鎖経済におけるそれより大きくなり、かつ、両者の差は水資源の増加とともに拡大していく。

図 4.6 自国の水資源の変動に伴う自国の資源投入の変化（開放経済）

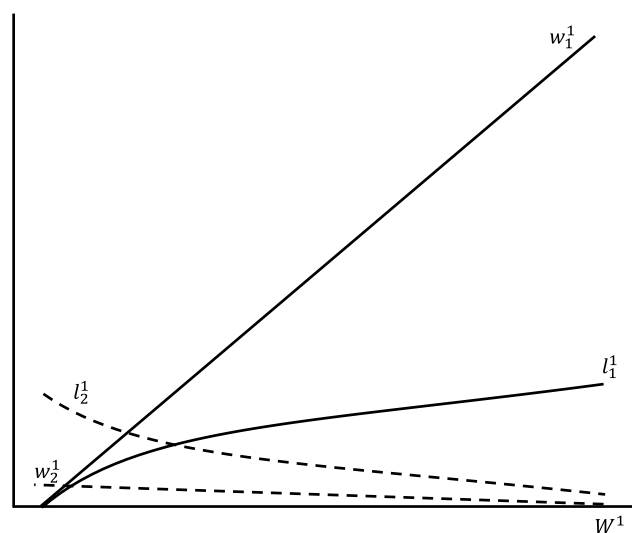
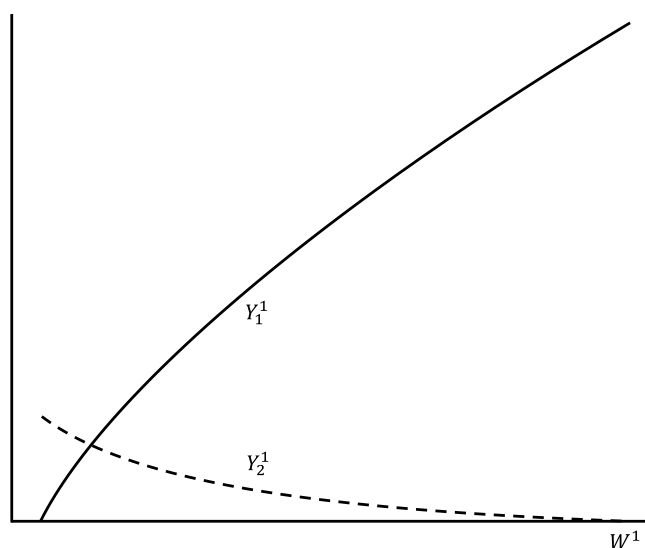


図 4.7 自国の水資源の変動に伴う自国の生産量の変化（開放経済）



2) 外国経済

外国の方は、閉鎖経済では水資源が変動しないため変化はない。一方、開放経済では、図 4.8、図 4.9 に見られるように、自国の水資源が減少する局面では、水集約的な財についての外国の比較優位が強まるため、水資源と労働は急速に財 1 に移動し、財 1 の生産量は増加する。しかも、水投入量は線形に増加するのに対して、労働投入は加速的に増加するため、水投入の限界生産物逓減の効果を打ち消し、生産量は加速的に増加する。一方、財 2 については、財間の投入配分のリバランスによって水資源も労働資源も減少するため、生産量が減少する。このように、外国は、水集約的な財の生産に特化し、それを自国に輸出して外国の消費・効用の減少に歯止めをかけるとともに、自国は労働集約的な財への特化することで当該財の生産を増やすことができる。外国は、自国の消費・効用を安定化させる対価として、増産された労働集約的な財を輸入し、自らも消費・効用を高めることができる。しかも、外国における水集約的な財の増産と他国における労働集約的な財の増産は、ともに限界生産物逓減の効果が一部打ち消されるため加速的に増加し、結果として、外国の効用の増加幅も拡大していく。

一方、自国の水資源が増大する局面では、自国の水資源の増加に伴って労働集約的な財についての比較優位が強まるため、水資源と労働資源は急速に労働集約的な財に移動する。水集約的な財については、水投入は線形に減少し、労働投入も減少するため、生産量は減少する。ただし、労働投入の減少幅は鈍化していくため、生産量の減少幅も緩和する。労働集約的な財については、水投入は線形に増加し、労働投入も増加するため、生産量は増加する。労働も増加するため、水投入の増加による限界生産物逓減の効果は一部打ち消されるが、労働投入の増加幅は鈍化していくため、効果は徐々に少なくなり、生産量の増加幅も鈍化する。

図 4.8 自国の水資源の変動に伴う外国の資源投入の変化（開放経済）

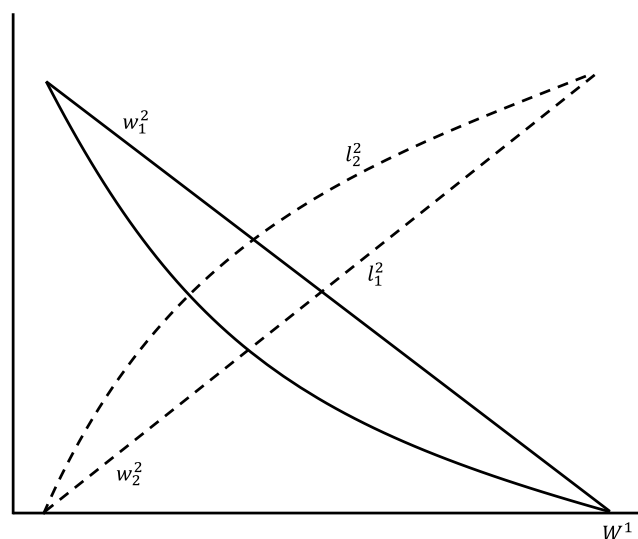
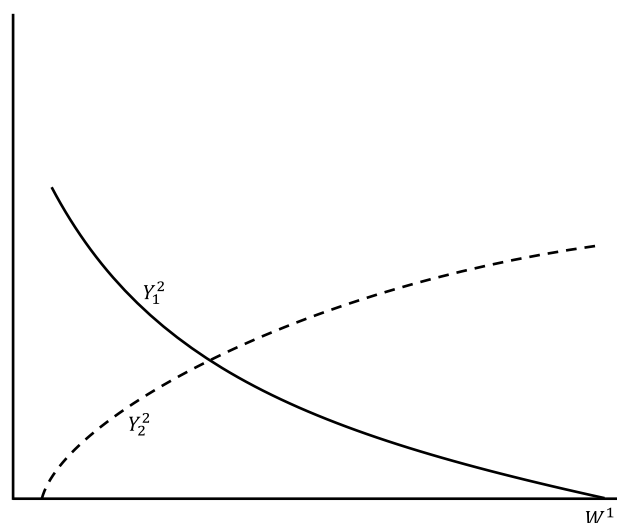


図 4.9 自国の水資源の変動に伴う外国の生産量の変化（開放経済）



4.4 適応特化

システム全体の安定化においても、国ごとの安定化においても、それらを生み出す源泉となっているのは、開放経済における消費とは分離された生産の特化（この場合は不完全特化）と各財への資源投入のリバランスである。一方の国の水資源が減少した場合、水が減った国は水集約的でない財の生産に特化し、もう一方の国から水集約的な財を輸入することで、水資源の変動が消費や効用に及ぶことを回避する。あるいは、既に水集約的な財の輸出国である場合は、輸出量を減らすことで、やはり消費や効用への影響を回避する。逆に、もう一方の国は、比較優位を活かして水集約的な財を輸出したり、水集約的な財の輸入を減らすことで、経済的な利益を増大させる。

開放経済における特化は貿易論における極めて古典的なテーマであるが、ここで問題にしているのは、産業構造の違いなどを反映した長期的な特化ではなく、気候変動などによって水資源の賦存量が変動する状況における短期的な特化である。また、後に述べるように、このように変動が激しい状況では、現時点での比較優位に従って生産体制を固定させるのではなく、状況に応じて特化のパターンを柔軟に変化させていく体制を構築することの方が重要である。そこで、本稿では、自国と相手国の資源の変動に応じてお互いの生産パターンを変化させる動きを、貿易論における一般的な用語と区別して、適応特化（adaptive specialization）と呼ぶこととする。

5. 現実の制約下におけるフロー型×フロー型地域間連結利用

前節では、完全競争市場の下で、かつ、変動が一定の範囲内であれば、フロー型×フロー型の地域間連結利用は特段の政策措置なしに成立し、安定化機能が作動することを示した。しかし、現実世界で完全競争市場が成立することは稀である。情報の非対称性や不完全性、独占や寡占といった多くの市場に共通する市場の失敗の原因はもちろん、水利権の譲渡性の有無や特化のパターンの変更に伴う摩擦など、様々な要因によって市場の機能は影響を受ける。現実世界で地域間連結利用を実現するためには、こうした様々な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、将来の研究課題として残す部分も含め、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。政策措置のうちストック×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、主体間の情報伝達と調節に関する措置と、可変性の確保に関する措置の一部について検討する。

なお、これらの政策措置を実施するにあたっては、連結対象となる国や地域の間で協定を結ぶことで、足並みを揃えて環境整備を進めることが望ましい。両国の合意がないとそもそも機能しない措置はもちろん、単独で行える体制整備についても、協定に基づいて両国で同時に進めることで、より効果的に地域間連結利用が機能する環境を作り出すことができる。

5.1 主体間の情報伝達と調節

意思決定主体が単一である地域内連結利用と異なり、地域間連結利用では、複数の主体間で互いの水賦存量に関する情報をどのように伝達し、どのようなメカニズムを通じて水利用量の調節を行うかが重要な論点となる。この点について、本稿では、基本的に価格シグナルを媒介とした市場による調節をモデル化した。すなわち、両国にまたがる統制者が全ての水利用者の便益や費用に関する情報を収集し、集権的に利用配分を制御するのではなく、水利用者が市場で形成される財や水資源の価格をもとに行動を選択する中で、水賦存量の変動に関する情報が価格に集約され、結果的に効率的な利用配分が行われる。適応特化は価格シグナルを介した調節過程の最たるものである。

適応特化を成り立たせる調節過程には、水価格の変化によって利用者（生産者）の間で水資源の配分が調節される段階と、財価格の変化によって財の消費量や生産量、そして貿易量が調節される段階とがある。言い換えれば、前者はリアルな水資源の配分をめぐる調節であり、後者はバーチャル・ウォーターの配分をめぐる調節である。ただし、本稿で扱った一般均衡モデルからも明らかなように、2つの過程は独立しているわけではなく、相互に影響し合いながら調節が行われる。地域間連結利用はまさにこの相互関係に依拠した仕組みであり、また、この相互関係に焦点を当てることで、これまで着目

されてこなかったバーチャル・ウォーターの新たな役割を考えることができる。

バーチャル・ウォーターには、農産物の輸入を通じて水稀少国の水ストレスを緩和するという役割が伝統的に期待されてきた。一方、地域間連結利用におけるバーチャル・ウォーターは、気象や資源の状況に関する情報を価格シグナルに集約して伝達することで、変動の分布や賦存形態が異なる各地域の水利用の調節を媒介する役割を担っている。気象の不安定性の影響を分散・吸収したり、地下水や生態系の保全を図ったりといった地域間連結利用の諸機能が作動するのは、バーチャル・ウォーターを媒介としたこうした調節の結果である。バーチャル・ウォーターは、水賦存量の地域間ギャップを埋めるだけでなく、リアルな水資源の利用そのものを賦存形態に応じて適正化する役割を果たしているのである。

バーチャル・ウォーターがこうした役割を果たす上で、価格シグナルの働きは極めて重要であり、価格はシステム全体の水資源の変動の状況をできる限り正確に反映して変化する必要がある。本稿のモデルが不完全特化を前提としている理由もここにある。完全特化の下では両国の資源価格がシステム全体の資源賦存量に応じて均等化されないため、媒介としての機能を十分に果たすことができない。

また、関税や輸出補助金、数量制限といった貿易制限的措置が、適応特化に関連した価格シグナルの機能を妨げている場合には、できる限りこれを排除することも必要である。そのためには、地域間連結利用を行う当事国の間でこれらの措置を撤廃する協定を締結するか、どちらかの水賦存量が一定の限度を超えて変動する場合だけでも、措置を停止する（あるいは、発動しない）協定を結ぶことが有効であると考えられる。

5.1.1 利用者間の水資源の配分制度

ところで、リアルとバーチャルの2つの調節過程は、密接な相互関係にありながらも、それぞれに固有の特徴も存在する。特に、リアルな水資源の配分には水資源に特有の様々な制度的要素が絡んでくる。

利用者間でのリアルな水資源の配分方法には、(i) 利用者が自由に取水を行う場合や、(ii) 制度化された手続きに従って水利権の取得がなされ、権利の範囲内で取水が行われる場合、(iii) 水利権などを取引する比較的流動性の高い市場を通じて配分が決定される場合、(iv) 水公社や水道局などの水管理機関が利用者（契約者）に水を配分し、利用量に応じて課金する場合などがある。

(i)の自由な取水については、特にストック×フロー型地域間連結利用に際して、オープンアクセス状態のストックからの取水が問題となる。この点については佐藤・仲山(2014)で論じる。

(ii)の水利権による配分については、一般には、譲渡性が高くなるほど、価格シグナルによる調節は効率的になされる。このため、地域間連結利用の活用に際しては、適応

特化が柔軟になされるように、取引費用が低く、譲渡性の高い制度が導入されていることが望まれる。

また、一部の国や地域では、価格シグナルによる調節をより円滑にするため、積極的に水利権や水自体の取引を活発化させる取り組みがなされている。その代表例が、(iii)の水利権や水の取引市場である。水利権や水の取引市場は、アメリカ、オーストラリア、チリなど、深刻な水不足に直面するいくつかの国や地域で先駆的に実践されている。水利権そのものが取引の対象となる場合もあれば、水利権の移転は伴わず、一定期間における水利用量が取引される場合もある。制度化された流動性の高い取引市場が存在する場合、適応特化に必要な価格シグナルは有効に機能する可能性が高い。

5.1.2 水管理機関による水の配分とバーチャル・ウォーター取引制度

(iv)の水管理機関が利用量に応じて利用者（契約者）に課金する水配分方法は、農業用水を含め、多くの国で主要な水配分方法として採用されている。ここで言う水管理機関とは、国や地方自治体の水当局や、水公社などの公営企業が想定される⁷。

水管理機関が水の配分に関与する場合、水賦存量の状況を反映した適切な価格設定がなされれば、やはり地域間連結利用は機能すると考えられる。また、連結利用の機能をより効果的に引き出すためには、連結の相手方となる国や地域の水管理機関との間で、お互いの水の価格設定について一定の調節を行うことも考えられる。以下では、こうした調節のあり方の一つとして、水管理機関の間でバーチャル・ウォーターを取引する制度的な枠組みを設けることで、バーチャルな配分をめぐる調節過程をリアルな配分をめぐる調節に活用する方法を提示する。実現のためには、今後さらなる研究が必要ではあるが、ここでは、試論として大枠の考え方を示す。

バーチャル・ウォーター取引制度は、1) 両国の水管理機関が、バーチャル・ウォーターの取引を行い、バーチャル・ウォーターの価格を決定する段階、2) そこで決まったバーチャル・ウォーターの価格を、水管理機関が国内の水価格として適用し、それに基づいて水利用者（生産者）が各財への水投入量と生産量を決定する段階、3) バーチャル・ウォーター取引での決定に基づいて、両国間で財の交換を行う段階の3段階から構成される。

1) バーチャル・ウォーターの取引

以下では、 L^i , l_j^i は労働ではなく土地資源の賦存量と投入量を表すとする。まず、均衡状態において、各財の単位たりの生産のために投入される水資源と土地資源の量を、それぞれ τ_{Wj} , τ_{Lj} と置く。技術同一の仮定の下では、この量は各財の単位あたりの消費に体化したバーチャル・ウォーターとバーチャル・ランドの量に一致する。すなわち、以下のように表現される。

$$\begin{aligned}\tau_{W1} &\equiv \frac{w_1^i}{Y_1^i} = \frac{w_{X1}^i}{X_1^i}, & \tau_{W2} &\equiv \frac{w_2^i}{Y_2^i} = \frac{w_{X2}^i}{X_2^i} \\ \tau_{L1} &\equiv \frac{l_1^i}{Y_1^i} = \frac{l_{X1}^i}{X_1^i}, & \tau_{L2} &\equiv \frac{l_2^i}{Y_2^i} = \frac{l_{X2}^i}{X_2^i}\end{aligned}$$

前節のモデルに照らして考えると、 τ_{Wj} , τ_{Lj} はあくまで均衡状態で内生的に得られる量である。しかし現実には、各品種の収穫量あたりに必要な水の量や土地面積については多くの実証データが存在し、気温や土壌の質など様々な農業気象学的条件に応じた必要量を予測することも可能である。そこで、以下では、両国の水管理機関にとって τ_{Wj} と τ_{Lj} の値は既知であるとする。

水管理機関は、自らの保有するリアルな水資源と土地の総価値を予算として、バーチャル・ウォーターとバーチャル・ランドの取引を行うことで、それぞれの国・地域の便益を最大化する。バーチャル・ウォーターとバーチャル・ランドの価格をそれぞれ r_{XW} , r_{XL} とすると、水管理機関の最適化問題は以下のように表される。

$$\begin{aligned}\max_{X_1^i, X_2^i} u(X_1^i, X_2^i) &\equiv X_1^{\beta} X_2^{1-\beta} \\ \text{s.t. } r_{XW}(\tau_{W1}X_1^i + \tau_{W2}X_2^i) + r_{XL}(\tau_{L1}X_1^i + \tau_{L2}X_2^i) &\leq r_{XW}W^i + r_{XL}L^i\end{aligned}$$

この段階では、両国は各財の需要量である X_1^i や X_2^i を相手国に提示しているわけではない。したがって、各財の輸出量や輸入量も取引の俎上には載っていない。ここでやりとりされているのは、あくまでバーチャル・ウォーターとバーチャル・ランドの需要量、すなわち $\tau_{W1}X_1^i + \tau_{W2}X_2^i$ と $\tau_{L1}X_1^i + \tau_{L2}X_2^i$ だけである。

この問題を解くと、以下の最適消費量を得る。

$$X_1^i = \frac{\beta}{r_{XW}\tau_{W1} + r_{XL}\tau_{L1}} \cdot (r_{XW}W^i + r_{XL}L^i), \quad X_2^i = \frac{1-\beta}{r_{XW}\tau_{W2} + r_{XL}\tau_{L2}} \cdot (r_{XW}W^i + r_{XL}L^i) \quad (5.1)$$

このとき、バーチャル・ウォーター（バーチャル・ランド）の取引市場では、以下の市場清算条件が成り立っている。

$$\begin{aligned}\tau_{W1}(X_1^1 + X_1^2) + \tau_{W2}(X_2^1 + X_2^2) &= \bar{W} \\ \tau_{L1}(X_1^1 + X_1^2) + \tau_{L2}(X_2^1 + X_2^2) &= \bar{L}\end{aligned} \quad (5.2)$$

ここで、バーチャル・ウォーターとバーチャル・ランドの相対価格を $r_X \equiv r_{XW}/r_{XL}$ と置いて、(5.1)を(5.2)に代入すると、最終的に以下の均衡価格が得られる。

$$r_x = \frac{\chi}{1-\chi} \cdot \frac{\bar{L}}{\bar{W}} \quad (5.3)$$

(5.3)で表されるバーチャル・ウォーターとバーチャル・ランドの均衡相対価格は、開放経済下の均衡資源価格(4.7)と一致する。また、このとき、財の均衡消費量は開放経済下の均衡消費量(4.10)と一致し、バーチャル・ウォーターとバーチャル・ランドの均衡需要量は、開放経済下の消費に体化したバーチャル・ウォーターとバーチャル・ランドの量(4.16a)と一致する。このように、水管理機関の間でのバーチャル・ウォーターとバーチャル・ランドの取引によって、地域間連結利用の均衡を完全に再現することができる。

バーチャル・ウォーターとバーチャル・ランドの総均衡需要量をそれぞれ $w_x^i \equiv w_{x1}^i + w_{x2}^i$, $l_x^i \equiv l_{x1}^i + l_{x2}^i$ と置くと、以下のように表される。

$$w_x^i = \left[\chi \cdot \frac{W^i}{\bar{W}} + (1-\chi) \cdot \frac{L^i}{\bar{L}} \right] \cdot \bar{W}, \quad l_x^i = \left[\chi \cdot \frac{W^i}{\bar{W}} + (1-\chi) \cdot \frac{L^i}{\bar{L}} \right] \cdot \bar{L}$$

また、バーチャル・ウォーターとバーチャル・ランドの純輸出量 w_{EX}^i , l_{EX}^i は、それぞれ以下ようになる。

$$w_{EX}^i \equiv W^i - w_x^i = (1-\chi) \left(\frac{W^i}{\bar{W}} - \frac{L^i}{\bar{L}} \right) \cdot \bar{W}, \quad l_{EX}^i \equiv L^i - l_x^i = \chi \left(\frac{L^i}{\bar{L}} - \frac{W^i}{\bar{W}} \right) \cdot \bar{L} \quad (5.4)$$

両国は、財の交換（貿易）の際に、この量のバーチャル・ウォーターとバーチャル・ランドを交換することで取引を履行する。

2) 財の生産量の決定

各国の水管理機関は、1) で決まったバーチャル・ウォーターの均衡価格を、国内の生産者に対して水を配分する際の価格として用いる。この価格は、開放経済下における均衡資源価格と同じなので、各財の生産量は、最終的に(4.10)のように決定される。

3) 財の交換

両国は、1) で決めた各財の消費量と2) で決めた生産量の差（超過需要）を交換する。消費量と生産量は、開放経済下のそれと等しくなっているので、財の交換を行えば、それによって交換されるバーチャル・ウォーターとバーチャル・ランドの量は、1) で取り決めた取引量(5.4)と等しくなっている。

以上に提示した理論上のバーチャル・ウォーターの取引制度は、以下のような特徴を持っている。第一に、1) のバーチャル・ウォーターの取引の段階では、各国は各財をどれくらい消費するかという情報をやりとりする必要はなく、国内の各財の需要と各財の単位たりの資源投入量 τ_{Wj} , τ_{Lj} についての情報をもとに、交換したいバーチャル・ウォーターとバーチャル・ランドの量のみを相手国に提示すればよい。第二に、3) の財の交換の段階で、各財の超過需要に体化したバーチャル・ウォーターとバーチャル・ランドの量は、1) の交換契約に相当する量となっているため、財価格による調節は必要ない。

言うまでもなく、こうした予定調和的な結果が得られるのは、各財の単位たりの資源投入量 τ_{Wj} , τ_{Lj} が、開放経済における均衡資源投入量に設定されているからである。先述のように、現実世界では、実測データなどをもとに単位たり資源投入量を予測することは難しいことではないが、開放経済均衡で得られる数値と正確に一致するとは限らない。また、水管理機関による各財の需要見通しが誤っている場合も考えられるし、水管理機関が適用した水価格の下で、開放経済下の均衡生産量が完全に再現されとも限らない。したがって、交換契約に定められたバーチャル・ウォーターとバーチャル・ランドの量と、実際の超過需要に体化したそれとの間にはずれが生じることが考えられる。このような場合には、3) のような予定調和的な財の交換よりも、通常通り財の取引を行った上で、支払いに際して、1) で取り決めたバーチャル・ウォーター分に相当する金額を控除するなどの枠組みの方が現実的であると考えられる。

5.2 可変性の評価と補償

地域間連結利用は、システムのどこかに必ず変化の余地を作ることを求める。佐藤・仲山 (2014) で扱うような、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。しかし、可変性の代表例は、言うまでもなく適応特化である。

前節で論じたように、適応特化は、産業構造の違いなどを反映した固定的・長期的な特化とは異なり、変動が激しい環境下において、自他の気象条件などに応じて特化のパターンを柔軟に変化させていくものである。したがって、たとえ現在の比較優位の状況から見て最適であったとしても、特定のパターンに特化することがその後の変化の可能性を奪ってしまうような場合は、適応特化とは言えない。

もちろん、現実の食料生産において、各国・各地域の生産のパターンを短期の間に柔軟に変化させることは容易ではない。実際、生産者は特定の作物や品種に合わせて土壌の質や保有する農業設備を調整しており、それを突然他の作物や品種向けに変更することは難しい。しかし、現実の世界においても、とりわけ半乾燥地域のように激しい気候の変動にさらされている地域では、その年の降水量の状況に応じて、作物や品種ごとの

作付面積の割合を調整している。たとえば、雨季の降水量が豊富な年にはトウモロコシを多めに作付けするが、そうでない年には、より乾燥に強い豆類の作付面積を増やす。

適応特化は、現実の世界でも行われているこうした適応の方法の延長線上にあり、さらに、自国の水資源の状況だけでなく、物理的に離れた他国の水資源の状況も考慮に入れながらシステマチックに作付比率を変更することを示している。その際、特に以下の3点に留意しながら可変性を向上させることが重要である。

第一に、適応特化においては、特化することそのもの以上に、状況に応じて特化のパターンを柔軟に変更できる体制の構築が重要である。こうした体制の構築には、たとえば、品種改良においても、他の品種には転用できない特殊な農業気象学的な栽培環境を必要とする品種よりも、他の品種と同じ状況での栽培が容易な品種を優先的に開発することが考えられる。そのことによって、生産者のレベルでその年の気象状況に応じた柔軟な作付選択を行うことが可能になる。その他、作付選択の変更に柔軟に対応できる農業設備の確保、販路の迅速な変更を可能にする流通システムの整備など、気象状況に応じた柔軟な対応が可能な体制を整えていくことが望ましい。

しかし、こうした体制の整備には、品種改良のための開発コストはもちろん、新たな種子や肥料の購入、圃場の整備、農業機械の変更、販路の変更に伴う取引先の確保や契約の締結など、様々なコストが想定される。そこで2つ目の留意点として、システムのレジリエンスを向上させるために、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。たとえば、適応特化に柔軟に対応できる設備を備えた生産者には、地域内で何らかの補償を与えることも考えられる。

そして、こうした補償の原資には、地域間連結利用によって回避することができた社会全体のコストを当てることが適切である。例えば、地域間連結利用を通して安定性を確保することで、個々の地域は単独で対処する場合に必要であった食料備蓄のコストや貯水池等の造営コストを回避することができる。こうしたコスト回避によって得た利益の一部を、システムの可変性を担うための体制整備のコストを受忍している主体に還元するのである。

3点目に、全ての農地が一斉に作付の変更を行う必要はなく、システムの中で可変性を取り入れる箇所やそれを担う主体を戦略的に選択することで、可変性の実装に伴うコストを最小限に抑えることもできる。農地によっては、作付する作物や品種の変更が難しい場所もあれば、そうでない場所もある。また、変更のしやすさは作物や品種ごとにも違う。一般には、果樹や商品作物などの多年生の作物や、米などの特殊な栽培環境が必要な作物は、柔軟な作付変更が難しい。また、脱穀や乾燥など特殊な工程を必要とする作物も、設備の変更に伴うコストが大きい。

そこで、相対的に作付変更の限界的なコストが低い農地から優先的に適応特化の任を負わせる一方で、平時においてはこうした農地に何らかの補償を行うようなスキームを

構築することが考えられる。このことにより、システム全体としては、現状において行われている気象に応じた調整に比べても低い社会的費用の下で有効な調節を行うことができる。

レジリエンスを意識したこうした生産体制の変更は、グリーンウォーターへの依存度が高く、かつ、ますます増大する気候変動の影響下においては、いずれにせよ求められる対応である。地域間連結利用は、こうした対応の延長線上にさらにシステム全体として水レジリエンスを高めるための有効な手段となりえるのである。

参考文献

- Cummings, R.G., and D.L. Winkelman, 1970, Water resource management in arid environs, *Water Resources Research* 6, 1559-1568.
- Danskin, W.R., and S.M. Gorelick, 1985, A policy evaluation tool: Management of a multiaquifer system using controlled stream recharge, *Water Resources Research* 21, 1731-1747.
- Diao, X., A. Dinar, T. Roe, and Y. Tsur, 2008, A general equilibrium analysis of conjunctive ground and surface water use with an application to Morocco, *Agricultural Economics* 38, 117-135.
- Dixit, A.K., and V. Norman, 1980, *Theory of international trade*, Cambridge: Cambridge University Press.
- Foster, S., F. van Steenberg, J. Zuleta, and H. Garduno, 2010, Conjunctive use of groundwater and surface water: from spontaneous coping strategy to adaptive resource management, *GW-MATE Strategic Overview Series 2*, Washington, D.C.: The World Bank.
- Foster, S., and F. van Steenberg, 2011, Conjunctive groundwater use: a “lost opportunity” for water management in the developing world?, *Hydrogeology Journal* 19, 959-962.
- Gemma, M., and Y. Tsur, 2007, The stabilization value of groundwater and conjunctive water management under uncertainty, *Review of Development Economics* 29, 540-548.
- Kerr, J.M., 1996, Sustainable development of rainfed agriculture in India, *EPTD Discussion Paper* 20, Washington, D.C.: International Food Policy Research

Institute.

National Research Council, 1997, *Valuing ground water: economic concepts and approaches*, Washington, D.C.: National Academy Press.

Palanisami, K., M. Giordano, K.R. Kakumanu, and C.R. Ranganathan, 2012, The stabilization value of groundwater: evidence from Indian tank irrigation systems, *Hydrogeology Journal* 20, 933-941.

Ranganathan, C.R., and K. Palanisami, 2004, Modeling economics of conjunctive surface and groundwater irrigation systems, *Irrigation and Drainage Systems* 18, 127-143.

Reichard, E.G., and J.D. Bredehoeft, 1984, An engineering economic analysis of a program for artificial groundwater recharge, *Water Resource Bulletin* 20, 929-939.

Reichard, E.G. and R.S. Raucher, 2003, Economics of conjunctive use of groundwater and surface water, In: Lawford, R., D. Fort, H. Hartmann, and S. Eden (eds.), 2003, *Water: Science, policy, and management*, Water Resource Monograph 16, Washington, D.C.: American Geophysical Union.

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.

Sehgal, J., and I.P. Abrol, 1994, *Soil degradation in India: status and impact*, Nagpur: National Bureau of Soil Survey and Land Use Planning.

Sheffield, J. and E.F. Wood, 2008, Projected changes in drought occurrence under future global warming from multi-model, multi-scenario, IPCC AR4 simulations, *Climate Dynamics* 31, 79-105.

Tsur, Y., 1990, The stabilization role of groundwater when surface water supplies are uncertain: The implications for groundwater development, *Water Resources Research* 26, 811-818.

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.

Tsur, Y., 1997, The economics of conjunctive ground and surface water irrigation

systems: Basic principles and empirical evidence from Southern California, In: Parker, D.D., and Y. Tsur (eds.), 1997, *Decentralization and coordination of water resource management*, Boston: Kluwer Academic Press.

You, L., C. Ringler, U. Wood-Sichra, R. Robertson, S. Wood, T. Zhu, G. Nelson, Z. Guo, and Y. Sun, 2011, What is the irrigation potential for Africa? A combined biophysical and socioeconomic approach, *Food Policy* 36, 770-782.

小尻利治, 2006, 『役に立つ土木工学シリーズ 2 水資源工学』, 朝倉書店.

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 (2) ストック型×フロー型」, *KIER Discussion Paper* 1408.

¹ 南アジアでは既に灌漑ポテンシャルの多くを使っていることに加え、地下水の過剰揚水や土壌浸食、塩害といった灌漑に伴う多くの問題に直面している (Kerr, 1996; Rodell et al., 2009; Sehgal and Abrol, 1994 など)。アフリカでは、灌漑ポテンシャルは多く残されているものの、今後すべての条件が整ってポテンシャルが拡大したとしても、灌漑農地の割合はアジアの半分にも満たない (You et al., 2011)。

² 日本語では、連結利用のほか、有機的活用と呼ぶ場合もある (小尻, 2006)。

³ National Research Council (1997)の定義より。ただし、括弧内は著者補足。

⁴ 単純化のため、ここでいう水の利用可能量は、水そのものの物理量だけから考えて、フローやストックから取水できる上限量を指すものとする。実際の利用可能量は、取水設備の容量や水利権の範囲、流域生態系や景観への配慮など様々な要因によって規定されることに留意が必要である。

⁵ したがって、地下水は、補充速度に応じて再生可能資源と再生不可能資源のいずれの側面からも見ることができる。

⁶ Reichard and Bredehoeft (1984), Reichard and Raucher (2003), Foster et al. (2010), Foster and van Steenberg (2011)の整理を参考にした。

⁷ 日本では、通常、土地改良区が農業水利施設の整備を行っており、各生産者は施設の建設費用の償還金や維持費などの水利費を負担することで農業用水の供給を受けている。こうした配分方法も、広くは水管理機関による配分として考えることができる。