

国立環境研究所研究プロジェクト報告

NIES Research Project Report from the National Institute for Environmental Studies, Japan

SR - 104 - 2012

全球水資源モデルとの統合を目的とした水需要モデル 及び貿易モデルの開発と長期シナリオ分析への適用 (特別研究)

Development of water demand and trade models for a global water resources
model and their application to long term scenario analyses

平成 21 ~ 23 年度

FY2009 ~ 2011

NIES



独立行政法人 国立環境研究所

NATIONAL INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL STUDIES

<http://www.nies.go.jp/>

全球水資源モデルとの統合を目的とした水需要モデル
及び貿易モデルの開発と長期シナリオ分析への適用
(特別研究)

Development of water demand and trade models for a global water resources
model and their application to long term scenario analyses

平成 21 ~ 23 年度

FY2009 ~ 2011

特別研究「全球水資源モデルとの統合を目的とした水需要モデル及び貿易モデルの
開発と長期シナリオ分析への適用」

(期 間 平成 21 ～ 23 年度)

課題代表者：日引 聡

執 筆 者：日引 聡、久保田泉、岡川 梓、増井利彦、肱岡靖明、
花崎直太、金森有子、藤森真一郎、山本隆広、須賀伸介、
一ノ瀬俊明、高橋 潔

編 者：花崎直太

序

本報告書は、平成 21 ～ 23 年度の 3 年間にわたって実施した特別研究「全球水資源モデルとの統合を目的とした水需要モデル及び貿易モデルの開発と長期シナリオ分析への適用」の研究成果を取りまとめたものです。

発展途上国での人口増加や経済成長にともなって、今後、水利用が世界的に増加していくことが予想されています。その一方で、地球温暖化によって気温や水温が上昇し、また降水が変化することで、水資源に悪影響が及ぶことも懸念されています。日本は水の豊かな国である一方で、生産時に多くの水を使う農畜産物を大量に輸入しており、海外の水事情とも無縁ではありません。このように、世界各地の水不足の問題は、私たちが取り組むべき重要な課題の一つになっています。

上記の問題に取り組むためには、まず、世界の水利用がどう変化していくかを見通すこと、地球温暖化が世界の水循環や食料生産に及ぼす影響を評価すること、水不足を解決するための方法とその効果を検討することが重要です。そのために、自然の水循環と人間の水利用を統合的に扱うことのできる全球水資源モデルの開発は重要な研究課題となっています。国立環境研究所はこれまで東京大学などと全球水資源モデル H08 を共同開発してきました。また、CO₂ 排出などの環境負荷を考慮した経済モデルの開発や、計量経済学的手法を使った消費者行動についてのモデリングの分野で大きな成果を上げてきました。本研究課題は、これらを融合することで、(1) 社会や経済の要素から工業用水、生活用水を推定するモデルの開発、(2) 世界の水資源の偏在の緩和に役立つ農作物貿易を推定するモデルの開発と分析、(3) より効率的な水利用を促進するための政策分析、(4) 統合的な 21 世紀の世界の水資源評価に取り組みました。

今後、開発したモデルを使って、「どのようにして、水不足の問題を克服していけば良いのか」を明らかにしてくれることを願っています。

国際的にも、国内的にも解決しなければならない環境問題が山積しています。持続可能な社会の実現に向けて、今後このような研究が一層進展し、日本あるいは国際的な環境政策を支える知見を提供できる研究活動となることを期待しています。

本研究を進めるにあたり、研究所内外の多くの方々にご協力とご支援をいただきました。ここに深く感謝いたします。

平成 24 年 12 月

独立行政法人 国立環境研究所
理事長 大 垣 眞一郎

目 次

1 研究の目的と経緯	1
1.1 研究の背景と目的	1
1.2 研究の構成と概要	1
1.3 本研究で得られた成果の概要	2
2 研究の成果	
2.1 将来の水利用推計のための社会経済シナリオ	5
2.2 農業・工業・生活用水シナリオの開発	13
2.3 全球水資源評価	20
2.4 詳細な生活用水モデル	25
2.5 家庭における用途別水使用量推計手法の開発	37
2.6 工業用水需要推計モデルの開発とシナリオ分析	46
2.7 二国間農作物貿易モデルの開発と気候変動が農作物貿易に与える影響の分析	58
2.8 複雑ネットワーク理論によるバーチャルウォーター貿易の分析	65
2.9 水取引制度導入の有効性の評価に関する研究	70
2.10 黄河の水資源	79
2.11 まとめ	85
[資 料]	
I 研究の組織と研究課題の構成	89
1 研究の組織	89
2 研究課題と構成	89
II 研究成果発表一覧	90
1 誌上発表	90
2 口頭発表	92

1 研究の目的と経緯

1.1 研究の背景と目的

地球温暖化が世界の水や食料に及ぼす影響を評価したり、人間と自然の水利用の競合を全球規模で評価したりするために、自然の水循環と人間の水利用を統合的に扱うことのできる全球水資源モデルは不可欠なツールである。国立環境研究所が東京大学などと共同開発している全球水資源モデル H08 は、世界で最初に貯水池操作サブモデルを実装したこと¹⁾、それまで独立したモデルとして扱われていた自然水循環・作物成長・環境用水モデルを一つに統合したこと²⁾、季節性を考慮した水資源評価指標を考案したこと³⁾、など世界的にも先導的な役割を果たしているモデルである。

H08 はこれまで自然の水循環（降水・蒸発・流出）、および世界の取水量の 7 割を占める農業用水の推計に力点を置いて開発が行われてきたため、工業用水と生活用水のサブモデルは未開発であった。工業用水と生活用水が世界の取水量に占める割合はそれぞれ 2 割と 1 割であるが、今後、経済成長に伴って、急速に増加すると考えられており、これらのサブモデルの開発が課題となっている。従来、工業用水と生活用水の将来予測には人口や GDP を説明変数とする単純な回帰モデルが提案されてきたが、産業構造やインフラの整備状況が考慮されておらず、急速な経済発展を遂げる途上国の長期将来推計への適用には問題がある事が示された⁴⁾。そこで、地域・産業部門別の活動量を推計できる応用一般均衡モデルの入出力を利用した新しい工業用水需要予測モデル、および、安全な水・衛生設備の技術別普及率に基づく生活用水需要予測モデルの開発を行う。これらのモデルを利用し、IPCC 第 5 次評価報告書の社会経済人口シナリオに整合的な 21 世紀中の家庭・工業用水の国別の推計を行う。

さらに、国際貿易を通じた水需要への影響や国際河川の管理に関連した国家間の水資源の配分も、水資源問題を検討する上で、無視できない要因となっている。H08 は、食料貿易を通じて仮想的に輸出入される水資源である「バーチャルウォーター（VW）貿易」の推計に利用されてきている⁵⁾。この研究では VW 原単位（単位重量の農畜産物を生産するために必要な水の量）を国別に推計できる H08 の特徴を利用し、日本の農畜産物の輸入

統計に VW 原単位を掛けることにより、貿易を通じて日本の水資源が仮想的にどれだけ増加して（節約されて）いるかが議論された。ここで、この解析を世界に拡大するとともに、国際貿易モデルを開発することで、将来社会シナリオ（GDP、人口、貿易の自由化など）が農畜産物貿易（VW 貿易）の変化を通して、世界の水資源逼迫に及ぼす影響を評価する。

これらのモデルを全球水資源モデル H08 に組み入れることで、H08 の拡張と世界の水資源評価の高度化を行うことを目的とする。

1.2 研究の構成と概要

本研究の成果は大きく 4 つに分類できる。

第 1 に、上記の研究計画に従って、将来の世界の水資源評価を実施した。まず、将来の世界の水利用の推計に必要なドライビングフォースである人口や GDP などからなる社会経済シナリオを開発した（2.1 節）。次に、工業用水と生活用水の需要推定モデルを新規に開発し、全球水資源モデル H08 に追加した（2.2 節）。そして、農業・工業・生活用水取水量の将来変化を考慮した将来の世界の水資源評価を実施した（2.3 節）。

第 2 に、新しいデータを利用した革新的な生活・工業用水の需要推定モデルの開発を行った。これまでの生活・工業用水需要推定モデルは、主にデータの制約から、過去の国別の取水量を人口や GDP、発電量など国別の社会経済情報で回帰する統計モデルが多かった。そこで、まず、新しく公開された水道アクセス率などのデータと計量経済学的手法を利用したモデルを開発した（2.4 節）。また、家庭内の水利用を用途別に積み上げて生活用水需要を推定するモデルをアジア 5 か国を対象として開発した（2.5 節）。そして、近年得られるようになった産業別の工業用水取水量情報を利用して、産業別に水需要量を積み上げるモデルを開発した（2.6 節）。これらのモデルはプロジェクト期間内に H08 に実装するには至らなかったが、将来的に導入すべく、引き続き研究を続けていく予定である。

第 3 に、数理モデルを利用したバーチャルウォーター貿易の解釈を行った。これまでのバーチャルウォーター貿易の研究は、その定量化に重点が置かれており、なぜ

そのような貿易構造になるのか説明するに至っていなかった。そこで、まず、計量経済学で頻繁に用いられる重力モデルを利用し、経済成長や気候条件がバーチャルウォーター貿易に及ぼす影響を分析した(2.7節)。また、グラフ理論の一つである複雑ネットワーク理論を利用し、ネットワークとしてのバーチャルウォーター貿易を分析した(2.8節)。これらの研究は、バーチャルウォーター貿易のモデル化や将来推計、政策分析へとつながると期待される。

第4に、分野横断的な水資源管理に関する研究を進めた。これまでの研究は表層水水文学に基づく研究が多く、それ以外の視点は乏しかった。そこで、まず、応用一般均衡モデルを利用して、渇水時の効率的な水資源配分に関する分析を行った(2.9節)。次に、フィールド調査と地下水シミュレーション技術を利用し、世界の代表的な水逼迫地域である中国黄河流域を対象に、地下水需要データの構築を行った(2.10節)。水問題の多様性を捉えるため、こうした分野横断的な取り組みは不可欠である。

1.3 本研究で得られた成果の概要

■成果1 将来の世界の水資源評価

世界を対象とした応用一般均衡モデル AIM/CGE を利用することで、人口や GDP などの水利用に関するドライビングフォースを統合的に示した。IPCC の新シナリオをベースとしており、温暖化影響・適応評価や緩和策との親和性が高いのが特徴である(2.1節)。

次に、全球水資源モデル H08 にこれまでなかった工業用水と生活用水の需要推定モデルを開発した。開発された工業・生活用水モデルは比較的単純な回帰モデルであるが、先進国・発展途上国ともに、過去の取水量の時間変化をよく捉えられることを確認した。また、産業構造変化や効率改善を表現する1つのパラメータを持ち、これを設定することにより、社会経済シナリオに合わせた水利用を表現することができる。このモデルと、2.1節で提供されたドライビングフォースを利用して生活・工業用水の需要を推定したところ、超長期の推計においても、全ての社会経済シナリオについて安定した推計結果を得ることができた。従来モデルで散見された GDP が著しく上昇する途上国において非現実的なほどまで水需要が大きく推定される問題も回避された(2.2節)。

さらに、開発した新しい社会経済シナリオ(2.1節)

と拡張した全球水資源モデル H08(2.2節)を利用して、統合的な全球水循環と水利用に関するシミュレーションを行った。21世紀中の温暖化による気候変化のシナリオには、最新の第5期結合モデル相互比較実験によるものを利用した。この結果を利用し、21世紀中の社会経済と気候の変化に対して発生する水逼迫の強度や地域の分析を行った。人口・社会経済の変化による水需要の伸びは大きいと推定され、水ストレスを示す指標に対する効果は気候変化のそれよりも大きいことが示された。いずれの組み合わせにおいても、水逼迫は20世紀末より増加することが示され、水利用の抑制、温暖化進行の防止、水利用率の向上の必要性が示唆された(2.3節)。

■成果2 新しい生活用水推定モデルの開発

従来の生活用水予測モデルは、人口や GDP を説明変数とした回帰モデルが一般的である。しかし、生活用水は、水・衛生設備へのアクセスと強く関係すると考えられる。そこで、3つのモジュール(①水道へのアクセス率、②水道にアクセスできる人々の1人あたり国別水需要量、③水道施設維持の大きな問題点である漏水量)からなるモデルを構築した。パラメータ推計は5カ年77ヶ国のパネルデータを利用し、計量経済学的手法で実施した。このモデルを利用して分析を行った結果、(a)水道アクセス率は、都市人口と1人あたり実質 GDP が増加するほど上昇すること、(b)水道水需要は、①1人あたり実質 GDP が増加するほど大きくなるがその効果は徐々に逡減し、②人口密度の増加によって1人あたり需要量も増加するが、非線形の関係にあり、③一世帯あたりの構成人員数が多いほど水使用量が節約される効果があること、(c)漏水量は、①1人あたり実質 GDP が増加するほど低下するが、GDP 増加による漏水率低下の効果は、GDP が増加するほど小さくなり、②都市人口比率が上昇するほど漏水率は低下し、③識字率が上昇するほど、漏水率は低下すること、が示された。この新しいモデルを用いることにより、将来の経済発展や人口増加に伴う将来の水道アクセス率の変化と、水道利用下における将来の水需要量を国別に推計することによって、将来の生活用水需要を推定することが可能である(2.4節)。

これと並行して、より詳細な生活用水の需要モデル開発を目的として、世帯構造や機器普及率を考慮した家庭における用途別水使用量を推計する手法の開発に取り組

んだ。本手法は家庭生活からの環境負荷発生量を推計する家計生産・ライフスタイルモデル（HPLM）の家庭における水使用量推計サブモジュールの拡張である。本手法をアジア5ヶ国に適用し、2005年および2050年までの水使用量を推計した。2005年の用途別水使用量については、他調査結果と比較しておおむね良好な推計結果が得て、日本、中国、インド、ベトナム、韓国の1人1日あたり水使用量がそれぞれ228、98、59、89、179Lであることが分かった。また、都市化の進展と世帯人員数の変化、水使用機器普及率の変化を考慮した2050年までの水使用量推計の結果、途上国では1人1日あたり水使用量が増加し、2005年と比較して30%から50%程度の増加が予想された。また、人口増加による影響も考慮するとインドでは2005年と比較して約130%もの水使用量の増加が予想された。一方、先進国である日本や韓国では節水機器の導入も進み、1人あたり水使用量は減少することが予想された。特に日本では人口減少も進むため、国全体として2005年と比較して70%程度の水使用となることが推計された。この研究を発展させることにより、家庭レベルのより詳細な水利用の分析が可能になると期待される（2.5節）。

既存研究の工業用水の将来シナリオの推計方法は部門が1つに集約されており、産業内構造変化、それぞれの産業における技術進歩の見積もり方は、単純化されてきた。本研究では可能な限り国別の水需要統計を部門単位（金属、化学、電力といった）で収集し、それらを部門別で回帰分析にかけることで、過去の水技術進歩を推計するとともに産業用水の現状を部門別で推計する手法を適用する。そして、その水利用の現状に関する情報、将来の産業部門別の生産量と将来の水利用技術のシナリオを基に産業用水の将来シナリオを試算した。将来シナリオにはSSPs（Shared Socioeconomic Pathways）を基に作成した。その結果21世紀後半においてはこれまでの研究よりも全体として低めの推計となった。また、21世紀前半は中国の増加が世界全体の増加に大きく寄与していた（2.6節）。

■成果3 数理モデルを利用したバーチャルウォーターの解釈

主要な農作物である小麦、米、トウモロコシを対象に、重力モデルを二国間の相対貿易に適用し、二国間相対輸出モデルを構築し、パネルデータを用いてパラメー

タ推計をし、実質GDPや気候条件がこれらの相対貿易に与える影響を分析した。得られた主要な結論は、①輸出国及び輸入国の実質GDPの増加は、輸出量を増加させる。特に、米に比べて、小麦とトウモロコシの輸出に対する影響が大きい。②輸出国の気温上昇は、小麦の輸出を減少させるが、米とトウモロコシの輸出を増加させる。③輸入国の気温上昇は、小麦、米、トウモロコシの輸出（輸入国にとっての輸入）を減らす。④②と③の結果、世界全体で気温が3℃上昇した場合、小麦では、8.91%輸出が減少し、米では、1.1%輸出が増加し、トウモロコシでは、0.15%輸出が減少する。⑤輸出国の降水量増加は、いずれの作物の輸出も減少させる（特に、小麦に対する影響が大きい）。輸入国の降水量の増加は、小麦の輸出（輸入国にとっての輸入）を減少させるが、米とトウモロコシの輸出を増加させる。⑥この結果、世界全体で10%の降水量増加（97mm/年）による輸出への影響は、小麦の場合、2.25%輸出減、米の場合、0.84%輸出増、トウモロコシの場合、3.15%の輸出増となる（2.7節）。

次に、複雑ネットワーク理論を利用してバーチャルウォーター貿易を分析した。H08を利用することで時系列情報を含むバーチャルウォーター貿易量データベースを構築し、複雑ネットワーク理論を利用してネットワークの特性を分析し、さらにネットワークをモデル化することで、構造の要因分析を行った（2.8節）。

■成果4 分野横断的な水資源管理に関する研究

分野横断的な水資源管理に対する取り組みの1つとして、まず経済学の立場から渇水時の水資源配分のあり方について分析を行った。水資源の効率的な利用を促進するための手段として、水資源の市場取引（水取引）が提案されている。将来、気候変動により渇水の頻度が増加すると予想されることから、渇水時における効率的な水資源の利用は重要な課題であり、日本国内でも市場メカニズムに基づいた水資源配分に関心が向けられ始めている。本研究では、日本を9地域に分割した多地域応用一般均衡モデルの開発を行い、ある地域で渇水が起こった場合の域内の経済影響と、周辺地域への波及的経済影響を分析し、水取引を実施することで渇水による経済的影響をどの程度緩和できるかを定量的に評価した。関東で5%の取水制限を行うことを想定し、農業用水、都市用水といった用途（部門）の間で水取引を行う場合と行わ

ない場合のシナリオのシミュレーション分析を行っている。その結果、以下のような結論を得ている。

- (a) 部門ごとに水取引を認めないケースでは、水資源の限界便益は部門間で大きく異なり、部門ごとに渇水リスクの格差が存在することがわかった。とくに農業部門と製造業部門の水資源の限界便益の差が大きく、農業部門は潜在的な水資源の売り手、他は買い手となる。
- (b) 部門を超えた水取引を行うことで、渇水の影響は全体として緩和される。関東地域で5%の取水制限を行う際に、部門間で水が融通されないことの社会的費用は、関東地域の地域GDPで見ると、0.015%ポイントとなった。これは、約32億円に相当する額である。
- (c) 渇水が起こった場合、生産額あたりの非市場水取原単位 ($\text{m}^3/\text{円}$) の大きい部門を中心に影響を受けるが、必ずしも原単位の大きい順に大きな影響を受けるわけではない。これは、他の地域との競争の度合いが、部門ごとに異なるためである。

将来、温暖化が進み、渇水が頻発するようになれば、部門間で水をスムーズに融通し、各地域・各部門の渇水リスクを分散するニーズが高まっていくと考えられる。日本におけるより効率的な水資源配分を可能とするための制度の設計に、本研究のようなモデル研究が貢献することが期待される(2.9節)。

最後に、中国の黄河流域において、大西ら(2006)⁶⁾の推計した水資源需給構造と、Ichinose et al. (2009)⁷⁾の推計した地下水利用構造とを地域別に直接比較することにより、データが存在せず実態把握の困難であった当該流域における地表水の利用構造を描き出すことを試みた。黄河流域に大部分が含まれる35の地級行政単位を抽出し、立地の近接性と水資源需給構造の形態的類似性(共通する特徴)に着目してそれらを12の小流域に分類した。一般に上流域では地表水に依存し、農業での利用割合が低いと、地下水利用の季節変動性は小さい。一方、中流域から下流域では地下水への依存の度合いが高くなり、農業での利用割合が高くなるため、地下水利用の季節変動性は大きくなる。とりわけ、その傾向は黄土高原において顕著である。また、最下流域では再び地表水に依存している。さらに地下水利用構造の類似性にも

かかわらず、小流域の中でも地表水を含めた水資源の需給構造に多様性が見られる地域がある。とりわけ中流域では、大河川へのアクセスの状況に応じて多様性が顕著である。昨今、世界的に化石水の利用による地球環境影響が注目されており、黄河流域はその最も典型的な地域といえる(2.10節)。

参 考 文 献

- 1) Hanasaki, N., Kanae S. and Oki T. (2006) A reservoir operation scheme for global river routing models, *J. Hydrol.* Vol. 327, 22-41.
- 2) Hanasaki, N., Kanae S., Oki T., Masuda K., Motoya K., Shirakawa N., Shen Y. and Tanaka K. (2008) An integrated model for the assessment of global water resources - Part 1: Model description and input meteorological forcing, *Hydrol. Earth Syst. Sci.* Vol. 12, 1007-1025.
- 3) Hanasaki, N., Kanae, S, Oki T., Masuda K., Motoya K., Shirakawa N., Shen Y. and Tanaka K. (2008) An integrated model for the assessment of global water resources - Part 2: Applications and assessments, *Hydrol. Earth Syst. Sci.* Vol. 12, 1027-1037.
- 4) 花崎直太, 増富祐司, 高橋潔, 脇岡靖明 (2008) 全球水資源評価における家庭・工業用水取水量の将来推計式の相互比較, *地球環境研究論文集* Vol. 16, 1-8.
- 5) 犬塚俊之, 新田友子, 花崎直太, 鼎信次郎, 沖大幹 (2008) 水の供給源に着目した日本における仮想的な水輸入の内訳, *土木学会水工学論文集* Vol. 52, 367-372.
- 6) 大西暁生, 井村秀文, 白川博章, 韓驥 (2006) 黄河流域水資源需給の時間・空間構造の把握に関する研究, *環境システム研究論文集*, Vol. 34, 611-622.
- 7) Ichinose T., Harada I., Ee M.S. and Otsubo K. (2009) Estimation of groundwater resource demand in the Yellow River Basin, China, *From Headwaters to the Ocean: Hydrological Change and Watershed Management*, Taylor & Francis, 477-482.

2 研究の成果

2.1 将来の水利用推計のための社会経済シナリオ

2.1.1 研究の背景

本特別研究では、主として水資源の利用や逼迫について将来の気候変動や社会経済活動の変化による影響を評価することを目的としている。こうした分析において、将来の社会経済活動の様々な可能性を検討することは重要であり、これまでも IPCC (2000)¹⁾ で示されている SRES や IPCC (2001, 2007)^{2,3)} の統合報告書、UNEP (2002)⁴⁾ の GEO3 等で定量的、定性的に取り組まれてきた。特に、IPCC 第5次評価報告書にむけて作業が進められている新しいシナリオ開発では、社会経済活動と温室効果ガス排出量を推計する統合評価モデル (IAM) と、将来の気候変化を推計する気候モデル (CM)、気候変動による影響を推計する影響モデル (IAM) の3つのグループが連携して統合的なシナリオ作成に向けて取り組んでいる (図 2-1-1)。

本節では、本特別研究用にとりまとめた GDP や人口、その他の関連指標からなる社会経済シナリオを提示する。また、こうした社会経済シナリオは常に更新され、新たなシナリオ作成が行われている。そこで、今後、こうした研究を行う場合の参考となるように、IPCC 第5次評価報告書に向けて現在作業が進められているシナリオ作成の過程を、本特別研究で定量化した将来シナリオとともに説明する。

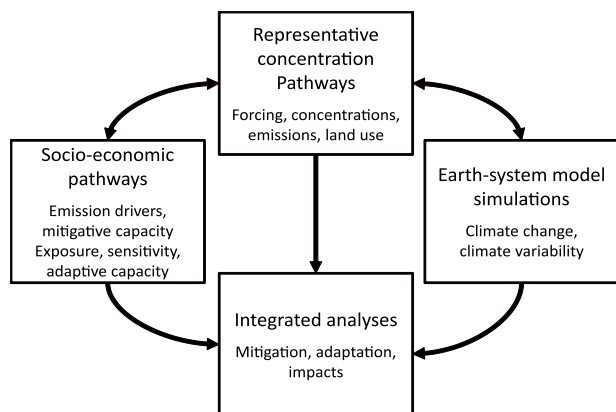


図 2-1-1 IPCC 第5次評価報告書に向けたシナリオ作成過程と4つのシナリオ (排出、社会経済、気候変動、影響) の関係 (O'Neill and Schweizer (2011)⁵⁾ より)

2.1.2 新シナリオ作成過程と RCPs、SSPs

IPCC (2000)¹⁾ では、SRES と呼ばれる社会経済シナリオと排出シナリオが定量的、定性的に示された。SRES では、将来の社会経済活動が、(A) 経済優先か (B) 環境と経済の調和か、(1) グローバル化が進展するか、(2) 地域のブロック化が進むかという2つの軸で描写されている。SRES とそれに続く IPCC 第3次、第4次評価報告書で代表されるこれまでのシナリオ作成では、社会経済活動を記述したシナリオを作成し、それに対応した温室効果ガス排出シナリオを定量化し、これをもとに、気候モデルを用いて将来の気候変動を予測し、温暖化による影響を分析するという過程を経てきた (Sequential approach)。しかしながら、こうした方法では、社会経済シナリオの作成から影響シナリオの作成までにかかなりの時間を要することが指摘されてきた。

そこで、新しいシナリオ開発においては、図 2-1-1 に示すように、はじめに排出シナリオである RCPs (Representative Concentration Pathways) が作成され、これをもとに気候モデルが将来の気候変動が予測される。こうした作業と並行して、SSPs (Shared Socio-economic Pathways) と呼ばれる将来の社会経済活動が定量化される。最終的に将来の社会経済活動と気候変動を統合する形で影響シナリオを作成する方法 (parallel process) がとられている⁶⁾。

はじめに推計された RCPs では、国立環境研究所の AIM を中心とするグループ (Masui et al. (2011))⁷⁾ のほかに、米国 Pacific Northwest National Laboratory (PNNL) の GCAM (Thomson et al. (2011))⁸⁾、オーストリア International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) の MESSAGE (Riahi et al. (2011))⁹⁾、オランダ PBL Netherlands Environmental Assessment Agency の IMAGE (van Vurren et al. (2011a))¹⁰⁾ の各モデルが、将来の放射強制力を 2.6、4.5、6.0、8.5W/m² に安定化するための温室効果ガス排出経路や 0.5 度メッシュでの排出の空間分布、土地利用変化を詳細に定量化してきた (van Vuuren et al. (2011b))¹¹⁾。これらの詳細なデータは、IIASA のサイト (<http://www.iiasa.ac.at/web-apps/tnt/RcpDb/dsd?Action=htmlpage&page=about>) からダ

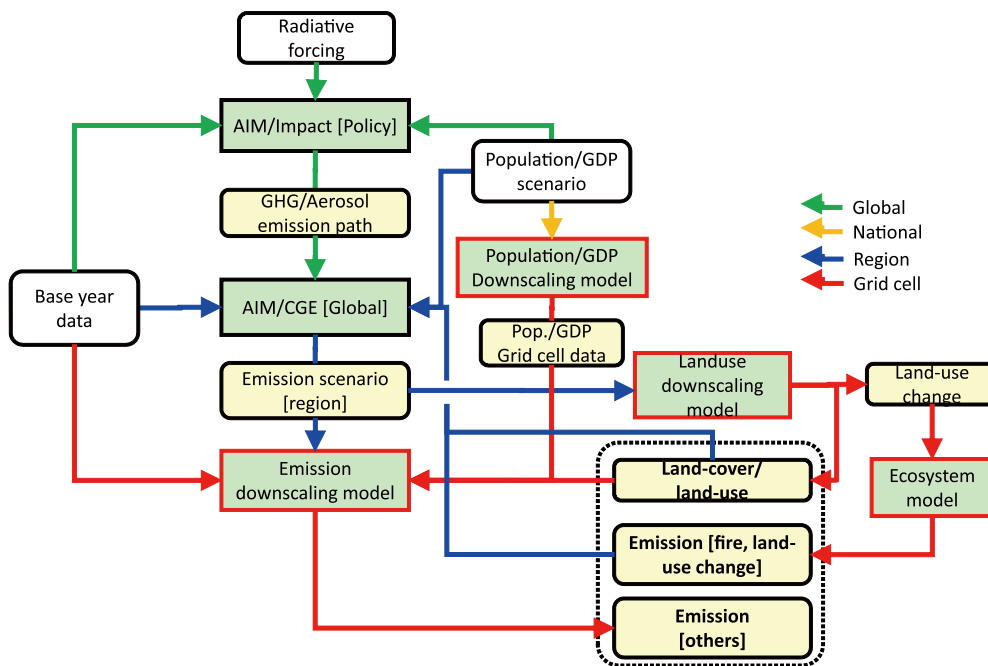


図 2-1-2 RCP における AIM を中心とした分析のフロー

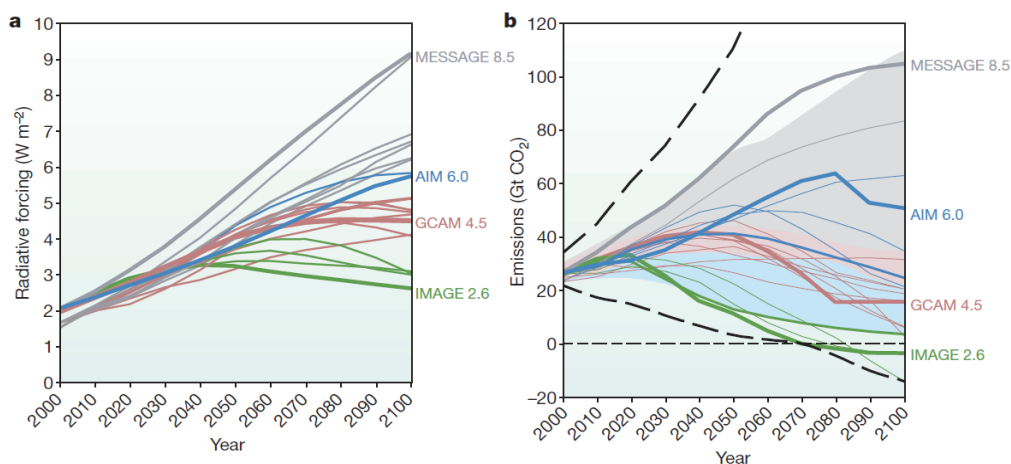


図 2-1-3 RCPs の放射強制力 (a) と温室効果ガス排出量 (b) の推移

ダウンロード可能である。図 2-1-2 は RCPs での AIM を中心としたグループによる分析のフローを示している。図 2-1-3 に RCPs の温室効果ガス排出経路と放射強制力を示す。

RCPs では、前述の 4 つの IAM がそれぞれ独自に想定した社会経済シナリオをもとに排出経路が推計されており、単に「放射強制力に対する排出経路を示す」だけのものであった。気候モデルでは、RCPs をもとに将来の気候変動のシミュレーションが行われているが、それと並行して、IAM では共通の社会経済シナリオである SSPs の作成が着手されている。SSPs では、将来の社会経済活動を再現するシナリオとして、図 2-1-4 に示すような緩和策、適応策への社会経済の挑戦の大きさによっ

て 5 つの姿が描かれる予定である。なお、SSPs で示される社会経済の姿は、温暖化対策をとらない成り行き社会の姿であり、これに、RCPs の各排出経路を実現する政策手段と併せて提示される予定である。また、SSPs の作業と並行して、AgMIP (The Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project) や ISI-MIP (Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project) といった各分野を対象としたモデル比較研究も行われている¹。

1 AgMIP については <http://www.agmip.org/>、ISI-MIP については http://www.pik-potsdam.de/research/climate-impacts-and-vulnerabilities/projects/Externally_RD2/isi-mip を、それぞれ参照のこと。

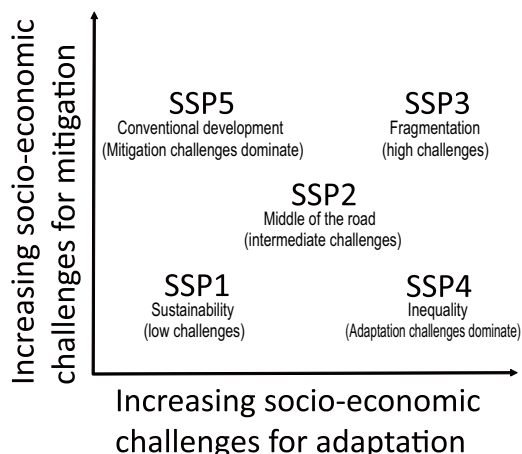


図 2-1-4 SSPs で描写される 5 つのシナリオ

表 2-1-1 ドライビングフォースにおける地域区分

XOC	Oceania
JPN	Japan
CHN	China
IND	India
XSA	Rest of Asia
XNA	North America
XLM	Latin America
XE25	EU
XER	Rest of Europe (Including Baltic countries)
CIS	Former Soviet Union (excluding Baltic countries)
XME	Middle East
XAF	Africa

2.1.3 将来シナリオ作成のためのドライビングフォース作成作業

前節で示したように、IPCC 次期評価報告書に向けた社会経済シナリオは作成段階にある。そこで、本研究における全球水資源評価 (2.2 節・2.3 節) では、2011 年 11 月時点の社会経済シナリオを利用することにした。以下では、項目ごとにそれらの数値をとりまとめる。

表 2-1-1 に本データの世界モデルの地域区分の定義を示す。以下では、これらの地域ごとに社会経済シナリオの各項目について数値を示す。なお、各データは、RCPs で AIM を中心としたチームが提供したモデルではなく、Fujimori et al. (2012)¹²⁾ で示されている応用一般均衡モデルを用いて計算されたものであり、一般にも公開されている²⁾。ドライビングフォースとして取り上げる項目は、人口 (表 2-1-2)、GDP (表 2-1-3)、GDP に占める一次産業の比率 (表 2-1-4)、電力需要量 (表 2-1-5) であり、いずれも温室効果ガス削減を行わない成り行きケースの結果を示したものである³⁾。

2.1.4 まとめと今後の課題

本研究では、IPCC 次期評価報告書の作成過程における社会経済シナリオの位置づけ、作成方法を説明するとともに、本特別研究で共通に使用する GDP や人口等のドライビングフォースの値を明示した。こうしたシナリ

オ研究は、常に前提となる統計情報や将来推計のもととなるモデルが更新されており、継続的な改訂作業が必要となる。また、社会経済活動の将来予測の 1 つの特徴として、きわめて広範囲な要素の検討が必要であるが、各要素がもつ不確実性の幅はきわめて大きく、今後も本節で示したようなシナリオを通じて多様な社会を記述することが求められる。シナリオの用途を踏まえて、新しい知見をいかに組み入れて将来シナリオを作成するかとともに、更新された数値にいかに迅速に対応できるかがということが求められる。

また、これまでに作成したシナリオの検証作業についてはあまり試みられてはいないが、今後の将来シナリオを検討する上で、検証作業は重要な要素になると考えられる。将来を正確に予測することは不可能であるが、取り上げた要素が適切であったか、定量化の手法に改善の余地がないか、定性的なストーリーは定量化と整合的であったかなど、検証作業を通じて、将来シナリオをより意味のあるものにしていくことが、温暖化研究のような長期分析には必要になると考えている。

参 考 文 献

- 1) IPCC (2000) Emissions Scenarios, Cambridge University Press.
- 2) IPCC (2001) Climate Change 2001, Cambridge University Press.
- 3) IPCC (2007) Climate Change 2007, Cambridge University Press.
- 4) UNEP (2002) Global Environment Outlook 3, Earthscan.

2) 2011 年 11 月 15 日版のデータであり、最新データは aimdata@nies.go.jp に登録することでダウンロードできる。なお、ダウンロード可能なデータは、本節で示したデータのほか、一次エネルギー供給、GHG 排出量、電源別発電電力量、部門別付加価値額である。

3) 本節では、紙面の都合上、10 年ごとのデータを示しているが、前述のダウンロード可能なデータは、2005 年から 1 年ごとのデータが示されている。

- 5) O'Neill B. and Schweizer V. (2011) Mapping the road ahead, *Nature Climate Change*, Vol. 1, 352-353.
- 6) Moss, R.H., Edmonds, J.A., Hibbard, K.A., Manning, M.R., Rose, S.K., van Vuuren, D.P., Carter, T.R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G.A., Mitchell, J.F.B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S.J., Stouffer, R.J., Thomson, A.M., Weyant, J.P. and Wilbanks, T.J., (2010) The next generation of scenarios for climate change research and assessment, *Nature*, Vol. 463, 747-756.
- 7) Masui, T., Matsumoto, K., Hijioka, Y., Kinoshita, T., Nozawa, T., Ishiwatari, S., Kato, E., Shukla, P.R., Yamagata, Y. and Kainuma, M., (2011) An emission pathway for stabilization at 6 Wm⁻² radiative forcing, *Climatic Change*, Vol. 109, 59-76.
- 8) Thomson, A., Calvin, K., Smith, S., Kyle, G.P., Volke, A., Patel, P., Delgado-Arias, S., Bond-Lamberty, B., Wise, M., Clarke, L. and Edmonds, J., (2011) RCP4.5: a pathway for stabilization of radiative forcing by 2100, *Climatic Change*, Vol. 109, 77-94.
- 9) Riahi, K., Rao, S., Krey, V., Cho, C., Chirkov, V., Fischer, G., Kindermann, G., Nakicenovic, N. and Rafaj, P., (2011) RCP 8.5—A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions, *Climatic Change*, Vol. 109, 33-57.
- 10) van Vuuren, D., Stehfest, E., Elzen, M.J., Kram, T., Vliet, J., Deetman, S., Isaac, M., Klein Goldewijk, K., Hof, A., Mendoza Beltran, A., Oostenrijk, R. and Ruijven, B., (2011a) RCP2.6: exploring the possibility to keep global mean temperature increase below 2 °C, *Climatic Change*, Vol. 109, 95-116.
- 11) van Vuuren, D., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.-F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S. and Rose, S., (2011b) The representative concentration pathways: an overview, *Climatic Change*, Vol. 109, 5-31.
- 12) Fujimori, S., Tu, T.T., Masui, T. and Matsuoka, Y., (2012) AIM/CGE [basic] manual. Discussion Paper Series. 2012-01, Center for Social and Environmental Systems Research, National Institute for Environmental Studies, Tsukuba, Japan, p. 74.

表 2-1-2 人口 (单位: 1000 人)

		2005	2010	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
SSP1	XOC	33532	36593	41164	44720	47385	48817	49147	48622	47252	45100	42478
SSP1	JPN	126393	126536	122507	114881	106047	96568	86870	77254	68665	61407	55213
SSP1	CHN	1314885	1348932	1364084	1327576	1253703	1139277	1002039	861305	726558	606776	513428
SSP1	IND	1140043	1224614	1353476	1435285	1473122	1457433	1396006	1294883	1164705	1021374	880334
SSP1	XSA	1030874	1097476	1201311	1265557	1293763	1276977	1220976	1134733	1026649	910049	798357
SSP1	XNA	329104	344401	366638	381823	392346	395854	393255	387694	377263	361479	342313
SSP1	XLM	557165	590210	636240	660092	664184	645974	610719	563143	506111	444902	385445
SSP1	XE25	461193	471461	473241	465566	452421	431735	403645	374542	346688	319910	294897
SSP1	XER	218074	231914	234005	230075	222232	209254	192247	173189	153529	135138	118954
SSP1	CIS	201206	203684	204554	200077	193059	182828	169919	156188	142491	130050	119106
SSP1	XME	190129	215480	252648	282395	307222	323790	330105	326831	315823	300409	281925
SSP1	XAF	911120	1022234	1250978	1482834	1717227	1931855	2115104	2257071	2348286	2387588	2378387
SSP2	XOC	33532	36593	42056	47096	51475	55233	58405	60997	63106	64697	65819
SSP2	JPN	126393	126536	124804	120218	114340	108549	103241	98126	94365	92345	91330
SSP2	CHN	1314885	1348932	1396249	1402301	1370651	1305734	1221935	1136462	1058832	995456	952208
SSP2	IND	1140043	1224614	1386909	1523482	1627029	1692008	1717969	1708200	1670462	1614974	1550899
SSP2	XSA	1030874	1097476	1231023	1342812	1424382	1473421	1490566	1480972	1452817	1415362	1375920
SSP2	XNA	329104	344401	374265	401529	425342	446742	466151	484573	501174	515120	526315
SSP2	XLM	557165	590210	652311	701734	734873	751076	753355	745303	729227	708836	687630
SSP2	XE25	461193	471461	482980	489103	489983	487667	481551	475426	472939	473670	475786
SSP2	XER	218074	221185	226291	227776	226140	222009	215316	207494	200310	194633	190269
SSP2	CIS	201206	203684	209126	210523	209821	207988	203969	199614	196129	193586	191840
SSP2	XME	190129	215480	259004	299195	336609	370051	396271	415438	429482	440395	448014
SSP2	XAF	911120	1022234	1278199	1562047	1869561	2191599	2512188	2820005	3105039	3358296	3574141
SSP3	XOC	33532	36593	42948	49474	55644	62111	68816	75512	82646	90151	97754
SSP3	JPN	126393	126536	127100	125560	122775	121476	121958	123002	126559	133361	141749
SSP3	CHN	1314885	1348932	1428414	1477134	1492424	1490584	1479841	1477053	1494476	1536145	1602979
SSP3	IND	1140043	1224614	1420342	1612029	1788097	1952664	2096026	2223492	2341556	2455132	2569745
SSP3	XSA	1030874	1097476	1260285	1420181	1559460	1688939	1803102	1904533	2005625	2111462	2224410
SSP3	XNA	329104	344401	381892	421240	458839	501186	548104	597912	653419	713975	776609
SSP3	XLM	557165	590210	668382	743630	809323	868965	923186	975948	1030193	1088725	1153723
SSP3	XE25	461193	471461	492719	512655	528211	547941	570120	594964	630307	676056	726485
SSP3	XER	218074	231914	245361	257244	266724	277467	287361	297760	311860	329318	349497
SSP3	CIS	201206	203684	213697	220982	227119	235692	243452	252636	265712	281046	298569
SSP3	XME	190129	215480	265351	316013	366880	420410	471850	521638	573200	627173	682766
SSP3	XAF	911120	1022234	1305420	1641422	2025831	2469755	2955291	3476382	4031276	4607712	5198432
SSP4	XOC	33532	36593	42056	47096	51475	55233	58405	60997	63106	64697	65819
SSP4	JPN	126393	126536	124804	120218	114340	108549	103241	98126	94365	92345	91330
SSP4	CHN	1314885	1348932	1396249	1402301	1370651	1305734	1221935	1136462	1058832	995456	952208
SSP4	IND	1140043	1224614	1386909	1523482	1627029	1692008	1717969	1708200	1670462	1614974	1550899
SSP4	XSA	1030874	1097476	1231023	1342812	1424382	1473421	1490566	1480972	1452817	1415362	1375920
SSP4	XNA	329104	344401	374265	401529	425342	446742	466151	484573	501174	515120	526315
SSP4	XLM	557165	590210	652311	701734	734873	751076	753355	745303	729227	708836	687630
SSP4	XE25	461193	471461	482980	489103	489983	487667	481551	475426	472939	473670	475786
SSP4	XER	218074	221185	226291	227776	226140	222009	215316	207494	200310	194633	190269
SSP4	CIS	201206	203684	209126	210523	209821	207988	203969	199614	196129	193586	191840
SSP4	XME	190129	215480	259004	299195	336609	370051	396271	415438	429482	440395	448014
SSP4	XAF	911120	1022234	1278199	1562047	1869561	2191599	2512188	2820005	3105039	3358296	3574141
SSP5	XOC	33532	36593	42319	47849	52905	57658	62130	66310	70305	74044	77516
SSP5	JPN	126393	126536	124804	120218	114340	108549	103241	98126	94365	92345	91330
SSP5	CHN	1314885	1348932	1428414	1477134	1492424	1490584	1479841	1477053	1494476	1536145	1602979
SSP5	IND	1140043	1224614	1420342	1612029	1788097	1952664	2096026	2223492	2341556	2455132	2569745
SSP5	XSA	1030874	1097476	1259089	1417319	1555007	1682267	1793489	1891788	1989295	2090835	2199208
SSP5	XNA	329104	344401	374265	401529	425342	446742	466151	484573	501174	515120	526315
SSP5	XLM	557165	590210	665239	735428	794804	846065	890402	931649	972544	1016119	1064771
SSP5	XE25	461193	471461	482980	489103	489983	487667	481551	475426	472939	473670	475786
SSP5	XER	218074	231914	242480	250113	254839	258789	260587	261949	265270	270696	278145
SSP5	CIS	201206	203684	213697	220982	227119	235692	243452	252636	265712	281046	298569
SSP5	XME	190129	215480	265351	316013	366880	420410	471850	521638	573200	627173	682766
SSP5	XAF	911120	1022234	1305420	1641422	2025831	2469755	2955291	3476382	4031276	4607712	5198432

表 2-1-4 GDP に占める一次産業の比率 (単位: %)

		2005	2010	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
SSP1	XOC	3.2	3.2	2.8	2.5	2.2	1.9	1.7	1.5	1.4	1.2	1.1
SSP1	JPN	1.4	1.3	1.0	0.7	0.5	0.3	0.3	0.2	0.2	0.1	0.1
SSP1	CHN	11.5	13.6	16.5	17.0	16.3	14.8	13.3	11.9	10.5	9.4	8.5
SSP1	IND	16.4	17.7	17.4	13.3	8.6	5.0	3.0	1.9	1.3	1.0	0.9
SSP1	XSA	7.6	7.8	7.6	6.8	5.6	4.5	3.6	2.9	2.4	2.1	1.9
SSP1	XNA	1.1	1.1	1.0	0.9	0.7	0.6	0.5	0.4	0.4	0.3	0.3
SSP1	XLM	5.1	5.2	5.1	4.6	3.9	3.3	2.8	2.5	2.2	2.0	1.8
SSP1	XE25	1.7	1.7	1.8	1.7	1.6	1.5	1.3	1.2	1.1	1.0	0.9
SSP1	XER	4.6	4.6	4.3	3.5	2.7	2.1	1.7	1.4	1.2	1.0	0.9
SSP1	CIS	5.5	5.9	6.0	5.4	5.0	4.4	3.9	3.5	3.2	3.0	2.8
SSP1	XME	4.9	4.8	4.2	3.3	2.7	2.2	1.9	1.7	1.6	1.5	1.4
SSP1	XAF	13.5	13.5	12.2	9.6	7.0	4.9	3.6	2.8	2.3	1.9	1.7
SSP2	XOC	3.2	3.3	3.2	3.1	2.9	2.7	2.4	2.1	1.8	1.6	1.5
SSP2	JPN	1.4	1.3	1.2	1.0	0.7	0.6	0.4	0.4	0.3	0.2	0.2
SSP2	CHN	11.5	13.7	17.5	19.4	20.1	19.4	18.2	16.7	14.9	13.3	12.0
SSP2	IND	16.4	18.1	20.1	19.3	17.1	13.7	9.9	6.7	4.5	3.0	2.2
SSP2	XSA	7.6	7.9	8.4	8.3	7.8	6.9	5.8	4.9	4.0	3.3	2.8
SSP2	XNA	1.1	1.1	1.2	1.2	1.1	1.0	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4
SSP2	XLM	5.1	5.2	5.5	5.5	5.1	4.6	4.0	3.4	3.0	2.6	2.3
SSP2	XE25	1.7	1.8	2.0	2.1	2.1	2.0	1.9	1.7	1.5	1.3	1.2
SSP2	XER	4.6	4.7	4.7	4.3	3.9	3.3	2.7	2.3	1.9	1.6	1.4
SSP2	CIS	5.5	5.9	6.1	5.9	6.0	5.7	5.1	4.5	4.0	3.6	3.3
SSP2	XME	4.9	4.8	4.4	3.9	3.6	3.2	2.7	2.3	2.0	1.7	1.6
SSP2	XAF	13.5	13.6	13.3	12.2	10.6	8.8	7.1	5.6	4.5	3.7	3.0
SSP3	XOC	3.2	3.3	3.2	3.1	2.9	2.6	2.4	2.1	1.9	1.7	1.5
SSP3	JPN	1.4	1.3	1.1	0.9	0.7	0.5	0.4	0.3	0.3	0.2	0.2
SSP3	CHN	11.5	13.7	17.1	18.6	18.8	17.8	16.4	14.8	13.1	11.7	10.4
SSP3	IND	16.4	18.2	20.1	19.1	16.3	12.7	9.0	6.1	4.0	2.7	2.0
SSP3	XSA	7.6	7.9	8.3	8.0	7.3	6.3	5.3	4.4	3.6	3.0	2.5
SSP3	XNA	1.1	1.1	1.1	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.4
SSP3	XLM	5.1	5.3	5.5	5.3	5.0	4.4	3.9	3.4	2.9	2.6	2.3
SSP3	XE25	1.7	1.8	1.9	2.0	2.0	1.8	1.7	1.5	1.3	1.1	1.0
SSP3	XER	4.6	4.7	4.6	4.3	3.8	3.1	2.6	2.1	1.8	1.5	1.2
SSP3	CIS	5.5	5.9	6.5	6.6	6.4	5.8	5.1	4.5	4.0	3.6	3.3
SSP3	XME	4.9	5.0	5.0	4.8	4.3	3.6	3.0	2.4	2.0	1.7	1.5
SSP3	XAF	13.5	13.7	13.6	12.5	10.8	8.7	6.9	5.4	4.2	3.3	2.7
SSP4	XOC	3.2	3.3	3.2	2.9	2.6	2.2	1.9	1.5	1.3	1.0	0.8
SSP4	JPN	1.4	1.3	1.2	0.9	0.6	0.4	0.3	0.2	0.2	0.1	0.1
SSP4	CHN	11.5	13.7	17.1	18.2	17.9	16.2	14.2	12.1	10.1	8.4	7.1
SSP4	IND	16.4	18.2	20.0	18.8	16.0	12.2	8.6	5.6	3.6	2.4	1.7
SSP4	XSA	7.6	7.9	8.3	7.8	6.9	5.8	4.7	3.7	2.9	2.3	1.8
SSP4	XNA	1.1	1.2	1.2	1.1	0.9	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2
SSP4	XLM	5.1	5.3	5.4	5.2	4.6	3.9	3.3	2.7	2.2	1.8	1.5
SSP4	XE25	1.7	1.8	1.9	1.9	1.8	1.5	1.3	1.0	0.8	0.6	0.5
SSP4	XER	4.6	4.7	4.7	4.2	3.5	2.8	2.2	1.7	1.3	1.0	0.8
SSP4	CIS	5.5	6.0	6.2	5.9	5.8	5.2	4.4	3.7	3.1	2.7	2.3
SSP4	XME	4.9	4.9	4.4	3.8	3.5	2.9	2.5	2.0	1.7	1.4	1.2
SSP4	XAF	13.5	13.7	13.4	12.0	10.2	8.2	6.4	4.9	3.7	2.9	2.3
SSP5	XOC	3.2	3.3	3.3	3.2	3.1	2.9	2.5	2.2	2.0	1.8	1.6
SSP5	JPN	1.4	1.3	1.2	1.0	0.7	0.5	0.4	0.3	0.3	0.2	0.2
SSP5	CHN	11.5	13.8	17.7	19.9	20.7	20.2	19.3	17.9	16.5	15.1	14.0
SSP5	IND	16.4	18.2	20.5	20.2	18.1	14.8	11.0	7.7	5.2	3.6	2.6
SSP5	XSA	7.6	7.9	8.5	8.6	8.1	7.2	6.2	5.3	4.4	3.7	3.2
SSP5	XNA	1.1	1.1	1.2	1.2	1.1	1.0	0.9	0.8	0.8	0.7	0.6
SSP5	XLM	5.1	5.3	5.6	5.6	5.3	4.9	4.3	3.8	3.3	2.8	2.6
SSP5	XE25	1.7	1.8	2.0	2.2	2.3	2.2	2.1	1.9	1.7	1.6	1.5
SSP5	XER	4.6	4.7	4.7	4.4	3.9	3.4	2.8	2.4	2.1	1.8	1.6
SSP5	CIS	5.5	5.9	6.4	6.6	6.6	6.2	5.7	5.0	4.5	4.0	3.7
SSP5	XME	4.9	5.0	5.0	4.7	4.1	3.5	2.9	2.4	2.0	1.7	1.5

表 2-1-5 電力需要 (単位: ktoe)

		2005	2010	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
SSP1	XOC	27225	30015	32867	34615	34457	33537	32600	31679	30542	29007	26988
SSP1	JPN	92119	89828	94547	97950	100817	102798	101582	96589	89475	80646	69866
SSP1	CHN	261841	380225	542299	652681	712905	733880	726222	670043	632062	582588	528587
SSP1	IND	60650	86596	140705	209004	299331	385851	444737	483530	506644	517167	518288
SSP1	XSA	114758	134934	188560	241028	301895	351374	386268	411414	433097	447985	458921
SSP1	XNA	431438	442041	499267	561510	617695	663759	706510	752760	796139	835653	869695
SSP1	XLM	98270	108164	131986	158969	194516	229025	255247	273000	281255	284763	275522
SSP1	XE25	329866	330784	355373	374483	382490	385316	384424	384397	383841	389243	394729
SSP1	XER	53020	57459	68268	78969	83220	86384	87273	86111	84519	84327	84240
SSP1	CIS	284433	328592	412425	500947	618999	667973	641381	562262	466471	471199	476104
SSP1	XME	50855	61051	81411	102873	138228	173356	200403	230225	268290	329931	436679
SSP1	XAF	46429	54802	78696	115669	177978	251768	325606	407469	493220	602289	744995
SSP2	XOC	27225	29873	32913	35426	35619	34682	33533	32470	31768	31408	30794
SSP2	JPN	92119	89208	92521	94692	96078	96951	95544	91783	87698	83644	78989
SSP2	CHN	261841	380615	548622	666360	728540	754235	733494	708689	703777	691476	676435
SSP2	IND	60650	86709	144694	227410	350990	485905	587107	656421	697640	704616	678813
SSP2	XSA	114758	133093	182649	231893	289833	339588	372528	398086	423786	451072	477918
SSP2	XNA	431438	437131	488198	548007	597237	632615	661990	690236	717883	744912	770409
SSP2	XLM	98270	107405	129882	155899	191021	224401	247825	262678	269018	269869	271752
SSP2	XE25	329866	328795	355935	384076	397438	400611	395299	386689	380173	376025	377309
SSP2	XER	53020	56213	67128	79615	84720	88027	89425	88959	86966	85031	84567
SSP2	CIS	284433	326272	414625	524710	692812	811804	845681	812660	726401	615939	613902
SSP2	XME	50855	60239	80818	104132	138545	169376	188428	204606	221161	242905	283705
SSP2	XAF	46429	54363	78316	118777	190270	278446	368154	466331	570879	701755	846162
SSP3	XOC	27225	30348	34728	38584	40136	40768	41311	41762	42579	43572	44395
SSP3	JPN	92119	91834	101730	109835	116121	124091	131596	137045	142978	150263	156797
SSP3	CHN	261841	382580	566629	714842	811101	871674	926045	958592	981280	999591	1015953
SSP3	IND	60650	86045	142143	223303	348495	496743	626542	738121	831320	910104	979303
SSP3	XSA	114758	135974	195446	256734	323000	383419	436524	487135	538005	591065	646324
SSP3	XNA	431438	449707	534092	628803	715099	794839	874490	959064	1054923	1161778	1275999
SSP3	XLM	98270	111223	145724	189036	242858	298774	346089	386923	422715	455192	486030
SSP3	XE25	329866	334092	380344	433637	475312	514675	550701	585586	628972	682294	737607
SSP3	XER	53020	58227	71753	88837	98139	106574	114062	121076	128840	135654	142696
SSP3	CIS	284433	333295	446921	596963	800927	975131	1074035	1115512	1114171	1065509	986015
SSP3	XME	50855	62107	88566	123134	176875	232631	274529	311401	344897	377201	410108
SSP3	XAF	46429	55348	80870	121898	195580	288051	383820	490910	606959	728557	853989
SSP4	XOC	27225	30105	34163	37923	39271	39297	39061	38927	39093	39522	40105
SSP4	JPN	92119	89501	94362	98149	101054	103569	104107	102306	100022	98002	95538
SSP4	CHN	261841	354311	443425	475746	461456	418185	372274	319128	266314	218339	177659
SSP4	IND	60650	80633	115465	157078	208107	247496	259085	252042	233581	210249	186175
SSP4	XSA	114758	128689	165134	196117	224533	239670	243428	241832	237560	232870	229550
SSP4	XNA	431438	440213	504710	577566	640661	690790	735384	780018	825566	870448	915218
SSP4	XLM	98270	103003	118853	136861	159675	179846	191604	197052	197788	194770	189969
SSP4	XE25	329866	329207	358849	386645	398543	402076	398260	392909	390498	391438	394135
SSP4	XER	53020	55437	64815	75889	78266	79028	78155	76678	75242	74349	73652
SSP4	CIS	284433	304479	329010	355990	408365	420551	388687	339251	285717	234182	186470
SSP4	XME	50855	55864	63866	71093	83090	90677	90109	87125	82883	78659	75015
SSP4	XAF	46429	50768	63112	82756	114537	144232	165926	184123	198455	209549	218342
SSP5	XOC	27225	30939	36620	41615	44578	46459	48137	49924	52298	55257	58382
SSP5	JPN	92119	92710	103604	112263	120039	128916	135516	139073	142767	147817	152366
SSP5	CHN	261841	393477	619464	817790	971564	1105451	1245727	1392290	1603022	1860842	2164666
SSP5	IND	60650	89812	164720	285002	489206	764314	1045389	1328369	1611802	1907801	2240222
SSP5	XSA	114758	138846	209936	290503	391673	500646	610097	728449	881616	1090519	1347045
SSP5	XNA	431438	456395	555976	664413	768251	865744	961808	1068327	1186891	1317560	1452790
SSP5	XLM	98270	112298	148173	194215	257796	333376	408604	486964	563821	651014	761198
SSP5	XE25	329866	340946	401671	469069	522137	565665	598693	627469	657966	695997	739069
SSP5	XER	53020	59574	77768	93561	107608	121894	135630	147812	160708	178276	200112
SSP5	CIS	284433	342556	497764	717835	1039835	1341624	1573812	1730882	1808555	2039665	2333843
SSP5	XME	50855	63388	96095	139582	206754	277855	334698	392043	454006	524529	625939

2.2 農業・工業・生活用水シナリオの開発

2.2.1 全体における位置付け

本研究プロジェクトの1つの目的として、地球温暖化による水資源への影響を地球規模で予測し、有効な適応策を立てていくための科学的知見を提供することがある。将来の水資源への温暖化影響を予測する上で、将来の水利用シナリオを適切に設定することは重要である。本稿では、2.3節で論じる全球水資源モデル H08¹⁾ による全球温暖化影響評価における、農業用水、工業用水、生活用水の将来シナリオについて示す。

本研究プロジェクトにおいて工業用水モデルと生活用水モデルの開発が行われ、それぞれ2.6節、2.4～5節で紹介されている。2.6節の工業用水モデルは応用一般均衡モデルから推計される産業別の活動量を利用した先進的なものであるが、先進国のみでパラメータ同定が行われたため、途上国への適用時の妥当性に課題を残している。2.4～5節の生活用水モデルは高度な計量経済学的手法を使った先進的なものだが、長期のモデル適用時の結果の安定性に課題を残している。例えば、現在の発展途上国が将来に大きな経済成長を遂げるシナリオを与えたとき、推計される生活用水量が非現実的なほどに高くなってしまふ問題がある（舩岡靖明、私信）。本研究プロジェクトにおいて、先進性は中程度であるものの、さまざまなシナリオに対し、現実的な範囲内の推計結果を出す工業用水・生活用水モデルも開発しており、本節ではこれらのモデルとその結果について紹介する。

2.2.2 既存の研究

水利用は農業、工業、生活用水に大別される。それぞれについて、これまでどのように全球規模の将来推計が行われてきたかについてまとめる。

2.2.2.1 農業用水

農業用水は世界全体の取水量の約7割を占める。2000年頃までに実施された研究では、過去の農業用水の変動を人口やGDP等で回帰してモデルを構築し、将来の農業用水の推計を行っていた²⁾。その後、Döll and Siebert (2000, 2002)^{3,4)} によって、灌漑農地の土壌水分量の不足からグリッド別に農業用水を推計するプロセスベースの手法が確立し、以降主流となっている。

Döll and Siebert (2000, 2002)^{3,4)} の手法とは次のようなものである。正味の灌漑需要 I_{net} [kg s^{-1}] を次のように求める。

$$I_{net} = (E_{pot} - P_{eff}) \cdot A_{hus,c} \quad (1)$$

ここで、 E_{pot} は可能蒸発散量 [$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$]、 P_{eff} は有効降雨量 [$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$]、 $A_{hus,c}$ は c 期作目の収穫面積 [m^2] である。 $A_{hus,c}$ には次のような関係がある。

$$\sum_c A_{hus,c} = i \cdot A_{irg} \quad (2)$$

ここで、 A_{irg} は灌漑設備のある農地面積（以下灌漑面積） [m^2]、 i は耕作強度 [-]、つまり1年間に何回作付を行うかである。例えば、 i が1の場合、1年間の総収穫面積と灌漑面積が同じ、つまり全ての灌漑面積で年1回収穫が行われることを示す。Döll and Siebert (2002)⁴⁾ によると、世界で i は 0.8～1.5 の値を取る。灌漑取水量 I_{gross} は以下のように示される。

$$I_{gross} = I_{net} / e \quad (3)$$

ここで、 e は灌漑効率である。灌漑取水量は農業用水のほとんどを占めるため、本稿ではこれを農業用水とみなす。

前段落をまとめると、Döll and Siebert (2000, 2002)^{3,4)} の手法を採る場合、 E_{pot} 、 P_{eff} 、 A_{irg} 、 i 、 e の5つのデータが必要であり、将来推計を行うにあたってこれらが必要となる。 E_{pot} と P_{eff} については基本的に気象要素があれば推定可能である。これに対し、 A_{irg} 、 i 、 e は各国の農業政策や人口、食料価格、食料需要などと密接に関わっており、シナリオとして用意しておくことが必要である。

Döll (2002)⁵⁾ は Döll and Siebert (2000, 2002)^{3,4)} の手法を利用し、温暖化による将来の世界の農業用水の推定を行った。ただし、気象要素のみを考慮して E_{pot} と P_{eff} の将来推計は行ったものの、 A_{irg} 、 i 、 e は現状で固定していた。Alcamo et al. (2003)⁶⁾ は1995年を基準年として2025年の水資源評価を実施し、 A_{irg} のみ30年間に1.5%増加、灌漑効率の改善は $0.3\% \text{ yr}^{-1}$ というシナリオを与え、それ以外については現状で固定していた。

式(1-3)を見ると分かる通り、推計結果は A_{irg} 、 i 、 e に対して大きな感度を持つが、要因が複雑なため、シナリ

オを開発するのも一般的に困難である。

2.2.2.2 工業用水・生活用水

工業用水と生活用水はそれぞれ世界の取水量の約2割と1割を占める。既存の研究は、過去の国別・地域別の時系列統計データを重回帰して統計モデルを構築し、将来推計を行った例が多い⁶⁾。なお、工業用水と生活用水は同時にモデル構築が行われる事例が多い。

重回帰モデルを構築する手法は容易に見えるが、工業用水や生活用水の時系列データがグローバルに整備されていないため、実施するのは困難である。最近になって、AQUASTATが国別の時系列データの公開を開始したが⁷⁾、それまでは時系列データを1カ国集めるだけでも、大きな苦労があった(大瀧雅寛、私信)。なお、AQUASTATにしても、欠損が非常に多く、時系列と呼べるデータが得られる国は限られている。

さらに、統計モデルに共通の課題や限界もある。第1に、説明変数の取る値がパラメータを同定したときと大きく異なったとき、推計結果も非現実的なものになることがある。例えば、社会経済シナリオの中には途上国の急速な経済成長を想定するものがあるが、GDPを説明変数とした回帰モデルでは、最後途上国の工業用水使用量が短期間で先進国の水準を上回るようになり、生活用水使用量が数倍になったりすることがある⁸⁾。これらは産業の成立やインフラの整備にかかる時間等を勘案すると明らかに実現困難と考えられる場合もある。第2に、パラメータは過去の説明変数と被説明変数の関係に基づき、一組だけ定まるが、社会経済シナリオによっては、将来パラメータが変わると想定するのが妥当なこ

ともある。例えばGDPを説明変数とした回帰モデルの場合、GDPが高くてエネルギー多消費型、GDPが高くて環境重視型という2つの社会像に対し、過去から同定されたパラメータ組だけを利用するならば、推計結果が同じになり、社会経済シナリオの意図からずれてしまう問題がある。

2.2.3 モデル開発

2.2.3.1 農業用水

既存の研究に示した通り、農業用水(灌漑用水)を求めるのに必要な要素は E_{pot} (可能蒸発散量)、 P_{eff} (有効降雨量)、 A_{irg} (灌漑面積)、 i (耕作強度)、 e (灌漑効率)の5つである。このうち、 E_{pot} と P_{eff} は水資源モデルと気候シナリオから算出可能である。よって、今回シナリオとして用意しなければならないのは A_{irg} 、 i 、 e の3つである。これらはモデル開発が難しいため、メタ分析を実施することにした。

これまでに世界の農業や食料に関する見通しを示した報告書が多数発行されてきた。このうち、灌漑農地に関して定量的なシナリオが示されているものとして、Rosegrant et al. (2002)⁹⁾、Bruinsma (2003)¹⁰⁾、Alcamo et al. (2005)¹¹⁾、de Fraiture et al. (2007)¹²⁾、Rosegrant et al. (2009)¹³⁾がある。 A_{irg} 、 i 、 e についてまとめた結果を表2-2-1に示す。これらの報告書は、目標となる将来の1時点の灌漑が定量的に示されており、時系列変化を示したものはなかった。表2-2-1の5つの報告書の中で、最も農業用水が大きくなる方向の予測を示したのがBruinsma et al. (2003)¹⁰⁾であり、逆に最も小さくなる予測を示しているのがAlcamo et al. (2005)¹¹⁾であった。

表 2-2-1 5つの報告書に示された将来の灌漑面積、耕作強度、灌漑効率の変化率の見通し

文献	灌漑面積[km ²]	灌漑面積[%/yr]	耕作強度[%/yr]	灌漑効率[%/yr]
Rosegrant et al. 2002	375 (1995), 441 (2025)			
Bruinsma, 2003	202 (2000), 242 (2030)	0.6	0.4	0.3
Alcamo et al. 2005	239 (2000), 252 (2050)	0.11		-
de Fraiture et al. 2007	340 (2000), 450 (2050)		0.6	-
de Fraiture et al. 2007	340 (2000), 394 (2050)		0.3	-
de Fraiture et al. 2007	340 (2000), 370 (2050)		0.15	-
de Fraiture et al. 2007	340 (2000), 340 (2050)		0	-
de Fraiture et al. 2007	340 (2000), 340 (2050)		0	-
de Fraiture et al. 2007	340 (2000), 340 (2050)		0	-
Rosegrant et al., 2009	433 (2000), 478 (2025)	0.06	0.15	0

以上を踏まえ、以下のようなモデルを構築した。まず、 A_{irg} , i , e はそれぞれ時間に対して冪乗関数で増加していくものとした。

$$A_{irg}^t = (1 + r_{area})^{t-t_0} A_{irg}^{t_0} \quad (4)$$

$$i_{irg}^t = (1 + r_{int})^{t-t_0} i_{irg}^{t_0} \quad (5)$$

$$e_{irg}^t = (1 + r_{eff})^{t-t_0} e_{irg}^{t_0} \quad (6)$$

ここで、 t は期間、 t_0 は基準期間、 r_{area} , r_{int} , r_{eff} はそれぞれ表 2-2-2 にまとめた変化率、右肩の記号は期間を示す。係数 r_{area} , r_{int} , r_{eff} は表 2-2-1 を元に、表 2-2-2 のように高位、中位、低位シナリオを設定した。

2.2.3.2 工業用水・生活用水

前節でまとめたとおり、工業・生活用水の推定に当たり、限られた時系列データをもとに長期間安定した推定結果が得られるモデルが必要である。また、社会経済シナリオの想定する世界に合わせてパラメータを変更できることが望ましい。そこで、過去の工業・生活用水の変化について再考した。

過去の工業・生活用水の時系列データは AQUASTAT を利用した⁷⁾。これは世界の 200 の国について、1960～2010 年の 5 年おきの国別取水量を提供している。ただし、欠損も多いため、本研究では 4 時点以上がとれる 16 か国（工業用水）、21 か国（生活用水）について解析を行った。

先行研究により、工業用水の伸びは発電量と比例することが知られている。そこで、各国の工業用水について、横軸に年、縦軸に発電量当たり工業用水量（以下工業用水原単位、 i_{ind} ）を取ってプロットしたところ、どの国のプロットもほぼ直線上にあり、原単位の変化率 (s_{ind}) は、 $50 \leq i_{ind}$ となる国（カテゴリ 1）において s_{ind} は $-5.8 \sim -0.7$ 、 $10 \leq i_{ind} < 50$ （カテゴリ 2）で s_{ind} は $-1.6 \sim +0.7$ 、 $i_{ind} < 10$ （カテゴリ 3）で -0.2 （イスラエルのみ）であった。

表 2-2-2 灌漑面積、耕作強度、灌漑効率の変化率のシナリオ

	低位	中位	高位
灌漑面積[%/yr]	0.06	0.3	0.6
耕作強度[%/yr]	0.15	0.2	0.4
灌漑効率[%/yr]	0.3	0.15	0

以上を踏まえ、工業用水 (I) は式 (7) のように表すことができる。

$$I = ELC \times (i_{ind,t_0} + s_{ind,cat} \times (t - t_0)) \quad (7)$$

ここで、ELC は発電量 [MWh]、 i_{ind,t_0} は基準年の工業用水原単位 [$m^3 yr^{-1} MWh^{-1}$] である。このうえで、カテゴリ 1、2、3 それぞれの s_{ind} の中央値をとって、低位シナリオとした。この低位シナリオに沿って進むと、世界の全ての国は現在のイスラエルの水準にまで原単位が減少していく。ただし、世界の産業構造を考えると極端であるため、カテゴリ 2 までで原単位の減少が止まり、さらに、 s_{ind} が低位シナリオの半分のものの中位シナリオとし、さらにカテゴリ 1 までしか原単位が減少せず、 s_{ind} が低位シナリオの 1/4 のものを高位シナリオとした（表 2-2-3）。

同様に生活用水の伸びは人口と比例することが知られている。同じく、各国の 1 人当たり生活用水について、横軸に年、縦軸に 1 人当たり生活用水量（以下生活用水原単位、 i_{dom} ）を取ってプロットしたところ、やはりプロットが直線状に並ぶことが分かった。原単位の変化率 (s_{dom}) は人口が 1000 万人以上の国において $-3.6 \sim 3.3$ [$L person^{-1} day^{-1} yr^{-1}$] であることが分かった。符号や傾きは 1 人当たり GDP などと明瞭な関係が見いだせなかったが、1 人当たり GDP が 2000 ドル未満の国で生活用水原単位が 200 [$L person^{-1} day^{-1}$] 未満の場合に減少している国はなかった。

以上を踏まえ、生活用水 (D) は式 (8) のように表すことができる。

$$D = POP \times (i_{dom,t_0} + s_{dom,cat} \times (t - t_0)) \times 0.365 \quad (8)$$

ここで、POP は人口 [person]、 i_{dom,t_0} は基準年の生活用水原単位 [$L day^{-1} person^{-1}$]、0.365 [$day yr^{-1} m^3 L^{-1}$] は単位を合わせるための項である。原単位の変化率は国によってまちまちであったため、典型的な変化率である ± 2 [$L day^{-1} person^{-1} yr^{-1}$] を変化率とし、原単位が

表 2-2-3 工業用水原単位の変化率のシナリオ

	低位	中位	高位
$50 \leq i_{ind}$	-2.5	-1.2	-0.6
$10 \leq i_{ind} < 50$	-0.7	-0.35	0
$i_{ind} < 10$	-0.2	0	0

200 [L day⁻¹ person⁻¹] へ収束していく世界を低位シナリオ、原単位が200 [L day⁻¹ person⁻¹] 未満の国は300 [L day⁻¹ person⁻¹] へと成長するものの、それ以外の国は現在と変わらない世界を中位シナリオ、全ての国の水消費量が伸び続ける世界を高位シナリオと設定した(表2-2-4)。

各国の時系列で同定された S_{dom} と S_{ind} を利用して過去の工業用水と生活用水を再現するとそれぞれ図2-2-1と図2-2-2のようになり、過去の変動を非常によく説明できることが分かる。

2.2.4 シナリオ

本研究においては、社会経済シナリオとして、2.1節で構築した SSP シナリオを利用する。SSP には SSP1/2/3/4/5 の5シナリオがある。SSP1は技術の急速な発達により、適応も緩和も容易になる社会を、SSP3は経済の緩慢な成長と人口の急増により、適応も緩和も困難な社会を、SSP2はその中間の社会を示す。SSP4は主要排出国で低炭素技術が進むものの、その他の地域で発展が遅れることにより、適応は困難だが緩和が容易な社会を示す。SSP5は化石燃料に頼って発展する社会で、適応は容易だが緩和は困難な社会である。

SSPには人口やGDPなどの定量的なシナリオの他に、技術進歩や教育水準などの定性的なシナリオもある。特に定性的なシナリオを勘案し、SSPシナリオと農業・工業・生活用水の3つのシナリオのどれが対応するのか検討し、表2-2-5のようにまとめた。

表2-2-4 生活用水原単位の変化率のシナリオ

	低位	中位	高位
$400 \leq d_{dom}$	-2 ($200 \leq d_{dom}$)	0	2
$200 \leq d_{dom} < 400$	-2 ($200 \leq d_{dom}$)	0	2
$d_{dom} < 200$	2 ($d_{dom} < 200$)	2 ($d_{dom} < 300$)	2

2.2.4.1 農業用水シナリオ

前述の通り、灌漑用水を推定するには本節で開発した A_{ig}, i, e を H08 モデルに与えて計算を実施しなければならない。こうして求めた将来の灌漑用水量の推定結果は2.3節で述べる。ここでは、 A_{ig}, i, e の時間変化のみを図2-2-3に示す。

2.2.4.2 工業用水シナリオ

SSP1/2/3/4/5の2025年、2055年、2085年の世界全体の工業用水取水量を図2-2-4に示す。SSP1は原単位の変化率が高く(表2-2-3)、経済成長にもかかわらず工業用水取水量が減少する。SSP2は現状とほぼ同じで、2085年になって微減する。SSP3は単調に増加していく。SSP4とSSP5は変化が小さいものの高止まりする。

今回の推定結果は、先行研究である Alcamo et al. (2007)¹⁴⁾ と Shen et al. (2008)¹⁵⁾ による SRES B2, A2 シナリオの幅の中に取まっている。ここで、本研究は SSP3 以外のシナリオは増減が小さく、どちらかと言えば Shen et al. (2008)¹⁵⁾ よりも Alcamo et al. (2007)¹⁴⁾ の結果に近い。また、SSP1では取水量が顕著に減少しているが、このようなシナリオは Alcamo et al. (2007)¹⁴⁾ や Shen et al. (2008)¹⁵⁾ にはなく、例外的と言える。

2.2.4.3 生活用水シナリオ

SSP1/2/3/4/5の2025年、2055年、2085年の世界全体の生活用水取水量を図2-2-5に示す。SSP1のみほぼ横ばいだが、それ以外のシナリオでは単調に増える。

取水量増加の程度としては、Alcamo et al. (2007)¹⁴⁾ より低く、Shen et al. (2008)¹⁵⁾ のシナリオに近い。ただし、SSP3の2085年の世界の総取水量は Alcamo et al. (2007)¹⁴⁾ のシナリオに近い。

2.2.5 まとめ

本節では、農業・工業用水・生活のシナリオの構築

表2-2-5 SSPと各シナリオの対応表

	灌漑面積[% yr ⁻¹]	耕作強度[% yr ⁻¹]	灌漑効率[% yr ⁻¹]	工業用水(表2-2-3)	生活用水(表2-2-4)
SSP1	低位	低位	低位	低位	低位
SSP2	中位	中位	中位	中位	中位
SSP3	高位	高位	高位	高位	高位
SSP4	低位	低位	高位	高位	高位
SSP5	高位	高位	低位	低位	低位

を行った。農業用水は H08 によるモデル計算に必要な、灌漑面積、耕作強度、灌漑効率の時間変化に関するモデルを開発した。工業用水と生活用水はそれぞれ社会経済要素で回帰するモデルを開発した。それぞれのモデルは

挙動を決定するパラメータが1つずつある。これらのパラメータを高位・中位・低位推計用に3つずつ用意した後、SSPの世界観に合わせた。これにより、SSPそれぞれに対応したシナリオを構築することができた。

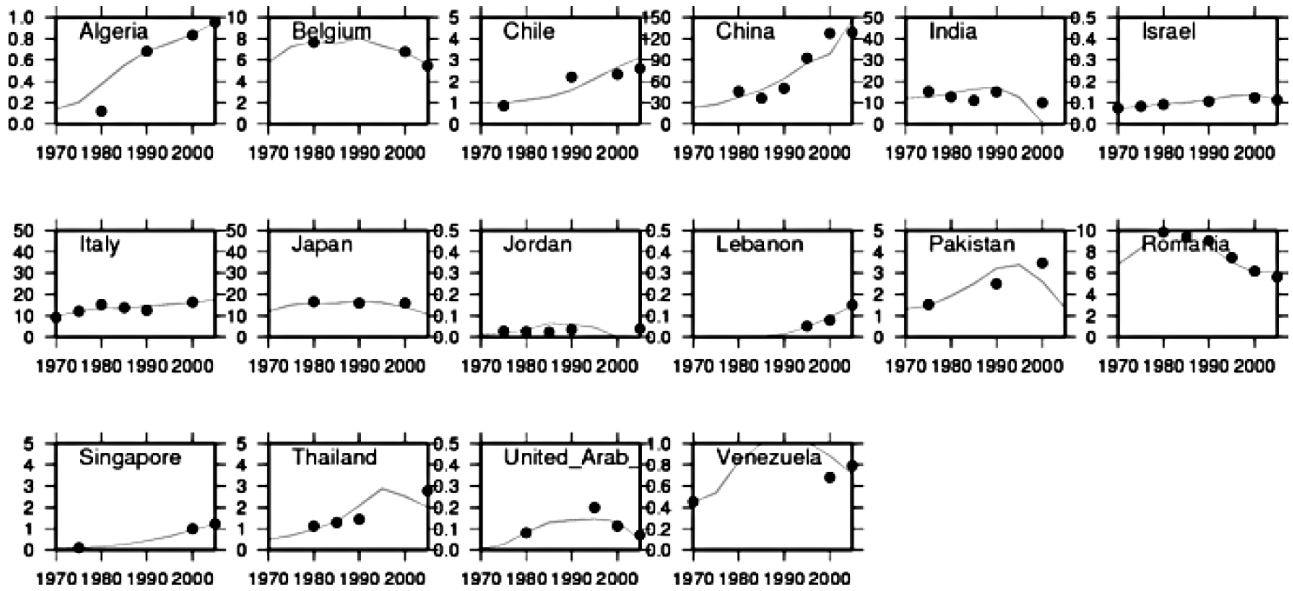


図 2-2-1 16 国における工業用水モデルの再現性。縦軸は取水量 $[\text{km}^3 \text{ yr}^{-1}]$

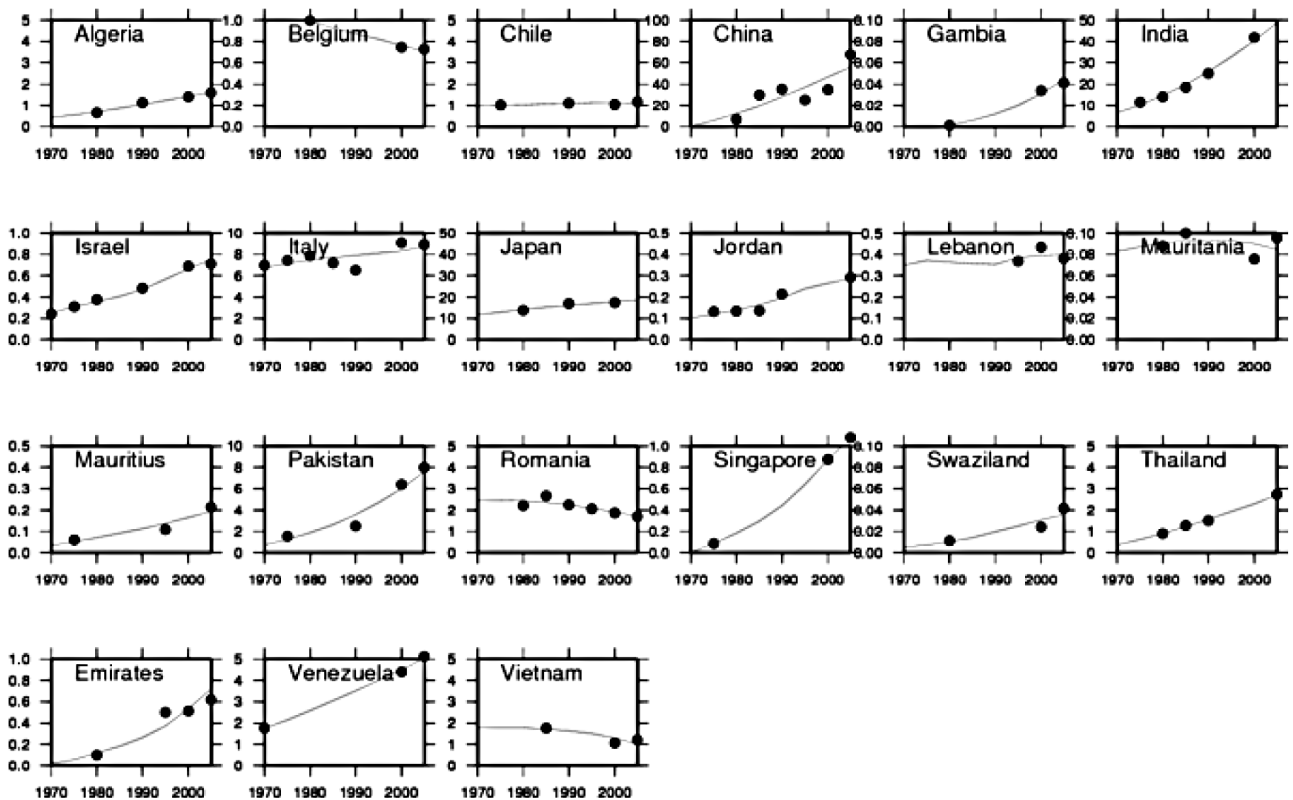


図 2-2-2 21 国における生活用水モデルの再現性。縦軸は取水量 $[\text{km}^3 \text{ yr}^{-1}]$

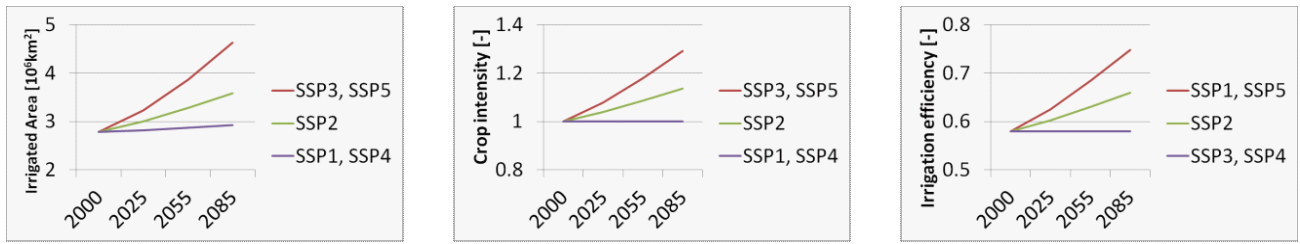


図 2-2-3 農業用水取水量に関するシナリオ。a) 灌漑面積、b) 耕作強度、c) 灌漑効率の将来シナリオ

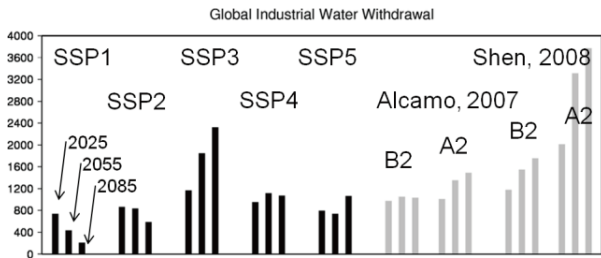


図 2-2-4 世界の総工業用水取水量の将来シナリオ
[$\text{km}^3 \text{yr}^{-1}$]

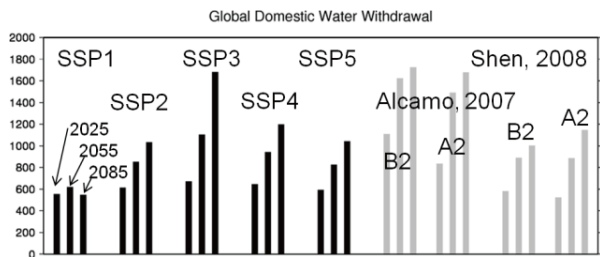


図 2-2-5 世界の総生活用水取水量の将来シナリオ
[$\text{km}^3 \text{yr}^{-1}$]

* 本節は、本研究プロジェクトの成果である研究論文

「A global water scarcity assessment under shared socio-economic pathways — Part 1: Water use」(Hydrology and Earth System Sciences Discussion 誌に Discussion Paper として掲載) に基づいた内容で、論文中の一部の計算結果を抜粋して使用している。なお、論文には新しい検討結果も含まれており、結果が本節と一部異なる場合もある。

参 考 文 献

- 1) Hanasaki, N., Kanae S., Oki T., Masuda K., Motoya K., Shirakawa N., Shen Y. and Tanaka K. (2008) An integrated model for the assessment of global water resources - Part 1: Model description and input meteorological forcing, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, Vol. 12, 1007–1025.
- 2) Seckler, D., Amarasinghe U., Molden D., de Silva R. and Barker R. (1998) World water demand and supply. 1990 to 2025: Scenarios and issues. In: *International Water Management Institute*.
- 3) Döll, P. and Siebert S. (2000) A digital global map of irrigated areas, *ICID J.*, Vol. 49, 55–66.
- 4) Döll, P. and Siebert S. (2002) Global modeling of irrigation water requirements, *Water Resour. Res.*, Vol. 38, 1037.
- 5) Döll, P. (2002) Impact of climate change and variability on irrigation requirements: A global perspective, *Climatic Change*, Vol. 54, 269–293.
- 6) Alcamo, J., Döll P., Henrichs T., Kaspar F., Lehner B., Rosch T. and Siebert S. (2003) Development and testing of the WaterGAP 2 global model of water use and availability, *Hydrolog. Sci. J.*, Vol. 48, 317–337.
- 7) Food Agriculture Organization (FAO) , (2012) AQUASTAT, <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/main/index.stm> (last accessed 2012/08/03)
- 8) 花崎直太, 増富祐司, 高橋潔, 脇岡靖明 (2008) 全球水資源評価における家庭・工業用水取水量の将来推計式の相互比較, *地球環境研究論文集*, Vol. 16, 1–8.
- 9) Rosegrant, M.W., Cai X. and Cline S.A. (2002) *World Water and Food to 2025: Dealing with Scarcity*. International Food Policy Research Institute, Washington, D.C.
- 10) Bruinsma, J. (2003) *World agriculture: towards 2015/2030 An FAO perspective*, EarthScan.
- 11) Alcamo, J. et al. (2005) *Changes in Ecosystem Services and Their Drivers across the Scenarios*. In *Ecosystems and Human Well-being: Scenarios*. Hassan

- R., Scholes R. and Ash N. (eds) . Washington, D.C.: Island Press, 299–373.
- 12) de Fraiture, C., Wichelns D., Rockström J. and Kemp-Benedict E. (2007) Looking ahead to 2050: scenarios of alternative investment approaches. In *Water for food, water for life: a comprehensive assessment of water management in agriculture*. Molden, D. (ed) . Earthscan, London.
- 13) Rosegrant, M., Fernandez M. and Shinha A. (2009) Looking into the future for agriculture and AKST. In *Agriculture at a crossroads*. McIntyre, B.D., Herren, H.R., Wakhungu, J. and Watson, R.T. (eds) . Island Press , Washington, D.C.
- 14) Alcamo, J., Flörke M., and Märker M. (2007) Future long-term changes in global water resources driven by socio-economic and climatic changes, *Hydrolog. Sci. J.*, 52, 247–275.
- 15) Shen, Y., Oki T., Utsumi N., Kanae S. and Hanasaki N. (2008) Projection of future world water resources under SRES scenarios: Water withdrawal, *Hydrolog. Sci. J.*, 11–33.

2.3 全球水資源評価

2.3.1 全体における位置付け

本研究プロジェクトの1つの目的は、地球温暖化による水資源への影響を地球規模で予測し、有効な適応策を立てていくための科学的知見を提供することである。2.1節で開発された社会経済シナリオ、および2.2節で開発された水利用シナリオを利用し、本節では全球水資源モデル H08^{1,2)} を利用した水資源評価の結果を示す。

2.3.2 既存の研究と本研究の特徴

水資源への将来の温暖化影響を考える場合、水資源量と水利用量の両方について検討することが必要になる。将来の気候変化に伴う水資源量、特に河川流量の変化は広域水文モデルを利用して将来推計が行われてきた³⁾。また、将来の社会経済変化に伴う水利用量の変化は主に回帰モデルを利用して将来推計が行われてきた^{4,5)}。そして、これらを組み合わせることにより、包括的な水資源への影響が評価されてきた⁶⁻⁸⁾。

しかし、先行研究には3つの課題がある。第1に、先行研究の多くが年単位で評価をしていることである。水資源量にも水利用量にも季節変動・年々変動があり、地球温暖化がこれらにどのような影響を与えるかを評価することが重要である。第2に、先行研究は Nakicenovic and Swart (2000)⁹⁾ による社会経済・排出シナリオおよびそれに基づく気候シナリオを利用していたことである。現在、新しい排出シナリオが公開され、それに基づく気候シナリオが整備されつつある。また、新しい社会経済シナリオも策定されつつある。最新の科学的知見に基づくシナリオを利用するためには、評価をこれらの新シナリオに対応させる必要がある。第3に、先行研究の多くが気候と人口以外の要素を現状で固定して評価を行っていることである。しかし、例えば、将来の人口増加に伴って灌漑農地面積が変化することはあり得るが、この場合水利用量を大きく増やすはずである。

本節では、これらの問題に対応した新しい全球水ストレス評価の検討結果を報告する。すなわち、第1の課題に対しては日単位で水需給を計算することのできる全球水資源モデルを用いることによって、第2の課題に対しては、公開が開始された Representative Concentration Pathways (RCP) に基づく気候シナリオおよび、2.1節

で説明した Shared Socioeconomic Pathways (SSP) に基づく社会経済シナリオを利用することによって、第3の課題に対しては、2.2節で説明した工業用水・生活用水需要推計モデルと、2.1節の SSP シナリオを組み合わせることで、それぞれ解決する。

2.3.3 新シナリオ

これまで温暖化研究で利用されてきたのは SRES シナリオである⁹⁾。シナリオは A1 (高成長社会)、A2 (多元化社会)、B1 (持続発展型社会)、B2 (地域共存型社会) の4つの社会・経済発展の叙述的な筋書きに対応して、複数の統合評価モデルを用いることで、排出シナリオ (温室効果ガスの将来排出パス) と社会経済シナリオ (人口や GDP などの想定) の組み合わせとして作成された。

SRES は IPCC 第3次・第4次評価報告書で利用された。その後、新シナリオの策定が多くの研究者によって進められた¹⁰⁾。新シナリオは独立した排出シナリオと社会経済シナリオからなる。

排出シナリオは RCP と言い、RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5 の4つから構成される。RCP8.5 以外の3つの数字は長期安定化させる放射強制力 [W/m^2] の水準を示している。RCP8.5 は安定化シナリオではなく、2100年時点の放射強制力が $8.5 [W/m^2]$ 以上でその後も上昇することが想定されている。

社会経済シナリオは SSP と言う。SSP は緩和策の取りやすさ、適応策の取りやすさの2軸に対応した SSP1, SSP2, SSP3, SSP4, SSP5 の5つの世界を描く。それぞれ、持続可能な世界 (緩和: 容易、適応: 容易)、中庸な世界 (中庸、中庸)、分断された世界 (困難、困難)、富めるものと貧しいものに別れた世界 (容易、困難)、化石燃料による世界 (困難、容易) を表す。SSP は現在査読中であり、確定されているものはないので、本研究では2.1節で示した国立環境研究所のアジア太平洋統合評価モデルによる暫定結果を利用した。

RCP に整合的な気候シナリオの開発が Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) により進められている。このプロジェクトには全球気候モデルを開発する世界の多数の機関が参加し、4つの RCP シナリオに沿って気候シナリオの開発を行っている。

2012年5月現在、40以上の全球気候モデルのシナリオがCMIP5のウェブサイトから配布されている（ただし欠損等もあり、今回の検討に利用可能なものは限られている）。

2.3.4 方法

2.3.4.1 実験設定

本節では、社会経済シナリオとしてSSP1とSSP3の2つ、気候政策シナリオとして気候政策なし（BAU）と気候政策あり（STB）の4つの組み合わせについて、シナリオ分析を行う。ここで、BAUにはRCP8.5を、STBにはRCP4.5を対応させた。繰り返しになるが、SSPとRCPは独立しており、例えばSSP1とRCP4.5も、SSP1とRCP8.5も組み合わせ可能である。気候シナリオはCanESM2モデルの予測結果のみを利用した。不確実性を評価するため、モデルは複数利用すべきであるが、本節では割愛する。本研究では基準期間を1961-1990とし、評価期間を2041-2070とした。世界全体を対象とし、空間解像度は $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ とする。

2.3.4.2 モデル：構造

モデルは全球水資源モデルH08を利用する。全球水資源モデルは陸域の自然の水循環と主要な人間の水利用を扱うことができる。H08は陸面過程、河川、作物成長、貯水池操作、環境用水設定、取水の6つのサブモデルからなる。本検討におけるそれぞれの役割は次のようになる。陸面過程サブモデルは気象条件を考慮することにより、降水量を蒸発量と流出量に分離する。気候変化が水資源量（流出量）に与える影響を評価する重要な役割を担う。河川サブモデルは $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 単位で計算された流出量を河道網に沿って流下させ、河川流量を計算する。各地・各時間で得られる水資源量はここで求められる。ここで本研究では 1.0×10^9 [m³]以上の貯水容量を持つ507の貯水池を考慮する。貯水池操作サブモデルは、これらの貯水池に個別に操作アルゴリズムを設定する。基本的に豊水時に貯水し、渇水時に放流するので、貯水池の下流では河川流量の変動幅が減少する。作物成長サブモデルは農地における作物の成長を計算する。特に重要なのは、世界各地の作付日と収穫日を推定することである。灌漑農地では作付日と収穫日の間に灌漑が行われ、農業水需要が発生する。ここで、農業水需要は2種類定義する。消費ベースの農業水需要とは無尽

蔵の水源があったとして、作付日から収穫日まで、灌漑農地で発生する灌漑需要を全てまかなった場合必要になる水の量である。この量を灌漑効率で除することにより求められるのが取水ベースの農業水需要である。環境用水とは河川生態系のために河川に維持すべき流量と定義される。環境用水設定サブモデルは比較的単純なアルゴリズムにより水文環境に合わせて月別にこの量を設定する。最後に取水サブモデルは生活・工業・農業用水の順に、水需要を満たすべく取水を行う。本検討では河川からの取水のみを考え、上流から順に取水していくものとした。なお、環境用水は常に維持し、この流量を下回らない範囲で取水を行う。

2.3.4.3 モデル：入力データ

H08を使ったシミュレーションには気象と地理に関する入力データが必要である。

気象データは、全球をカバーする空間解像度 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ のものが必要である。また、計算対象期間中の日単位データが必要である。要素としては、気温、湿度、風速、気圧、下向き短波放射、下向き長波放射、降雨量、降雪量の8つが必要である。基準期間は、上記条件を満たすWeedon et al. (2011)¹¹⁾を利用した。これは世界を空間解像度 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 、1958～2001年を6時間単位でカバーする全球気象データである。本研究ではこれを日単位に変換して利用した。

地理データとして、同解像度の全球データが必要である（表2-3-1）。要素は多数あるが、自然地理、構造物・土地利用、社会に関する情報が必要である。自然地理情報については基本的に計算期間を通じて不変と考えられる。これに対し、構造物・土地利用情報や社会情報は、基準期間・評価期間ともに変化し続けるものである。しかし、時間変化を示すデータは入手が困難なため、基準期間に関しては2000年付近のもの、評価期間に関しては期間の中央である2055年付近のものを利用した。基準期間に利用したデータの完全なリストはHanasaki et al. (2010)¹²⁾にある。

2.3.4.4 気候シナリオ

将来期間の気象データは、RCP4.5とRCP8.5の排出シナリオを利用したCanESM2の出力を利用した。これらのデータの空間解像度は $2.8^{\circ} \times 2.8^{\circ}$ （赤道付近で約300km）であったので、まず線形内挿によってダウンス

表 2-3-1 地理データ

		シナリオ
自然地理	海陸分布	なし
	河川流下方向	なし
構造物・ 土地利用	貯水池位置・諸元	なし
	天水農地分布	なし
	作付種	なし
	灌漑農地分布	あり
	灌漑水利用効率 ¹	あり
	耕作強度 ²	あり
社会	人口	あり
	工業用水需要	あり
	生活用水需要	あり

¹ 取水ベースの農業水需要に対する消費ベースの農業水需要の割合

² 1年に何回作付を行うか

ケールした。次に、気候モデルの出力にはバイアスが含まれるため、各要素は以下のように準備した。気温と下向き長波放射のシナリオは、対象期間と基準期間の気候モデル出力の差を月別に取り、Weedon et al. (2011)¹¹⁾に加えた(スケーリング法)。また、降水に関しては、同じく比を取り、Weedon et al. (2011)¹¹⁾に掛けた。相対湿度、下向き短波放射、気圧、風速については、基準期間から不変と見なした。降水量は気温と湿度を利用し、降雨量と降雪量に分類した。

2.3.4.5 地理シナリオ

まず、自然地理については変化なしとみなした。灌漑地面積、耕作強度、灌漑効率、工業用水需要、生活用水需要については、2.2節で開発したシナリオ通りとする。人口については、SSPから世界12の地域について提供される。これらは2.2節で示した方法によりグリッドデータを準備した。

2.3.5 結果

2.3.5.1 年単位の指標による水資源評価

まず、従来の研究で頻繁に利用されてきたWithdrawal to Water Resources Ratio (WWR) 指標を用いて水資源の評価を行った。この指標は式(1)のように表わされる。

$$WWR = W / R \quad (1)$$

ここで W は年取水量 [$\text{km}^3 \text{yr}^{-1}$]、 R は年流量 [$\text{km}^3 \text{yr}^{-1}$] である。本研究において、 R は自然状態(ダムや取水が

ない状態)における河川流量を計算した結果を利用した。 W は生活・工業・農業用水取水量の和である。生活・工業用水は、2.2節で示した取水量ベースの水需要量を、農業用水は、気候シナリオ・地理シナリオに応じて H08 で推定された取水ベースの水需要量を用いた。この結果を図 2-3-1 に示す。

WWR 指標が 0.4 を超える強い水ストレス地域は中国北部、インド西部、アラビア半島、アフリカ北部、アメリカ西部に見られる。

2.3.5.2 日単位の指標による水資源評価

次に、Hanasaki et al. (2008b)²⁾ で提案された Cumulative Withdrawal to Demand Ratio (CWD) 指標を用いて水資源の評価を行った。この指標は式(2)のように表わされる。

$$CWD = \sum w / \sum d \quad (2)$$

ここで、 w は日単位の取水量で、 d は日単位の水需要量であり、生活・工業・農業用水の和である。 Σ は期間中の総和を示す。 w は H08 の計算結果を利用する。すなわち、水需要があっても、環境用水を残すだけの河川流量がない場合、取水量は水需要を下回る。CWD の計算結果を図 2-3-2 に示す。

図 2-3-2 によると、CWD 指標が 0.5 を下回る強い水ストレス地域は WWR 指標の強い水ストレス地域に加え、インド東部と東南アジア、アフリカ南端、オーストラリア北端、ブラジル東部などに広がっている。これらの多くは雨季の季節性を持つ地域であり、特に乾季の水不足の深刻化が懸念される。

2.3.6 水ストレス人口

最後に、WWR が 0.4 を上回るところに住む人口と CWD が 0.5 を下回るところに住む人口、いわゆる水ストレス人口をそれぞれ求めた(表 2-3-2)。CWD の場合、基準期間(CTR)の水ストレス人口は 16.1 億人であるが、SSP1-BAU(持続可能な世界-気候政策なし)の場合には 27.6 億人となる。ここで気候政策を導入すると、26.4 億人に抑えることができる(SSP1-BAU)。ここで、SSP3-BAU(分断された世界-気候政策なし)では 40.6 億人となり、仮に気候政策を導入しても 39.7 億人となること示された。このように、STB は BAU よりも水ストレス人口を小さくするが、SSP1 と SSP3 の差の方

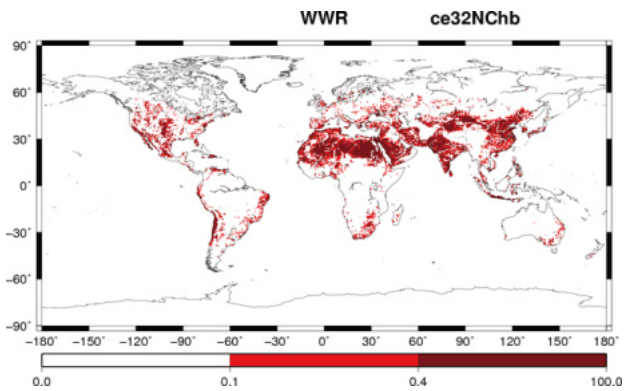


図 2-3-1 WWR の結果

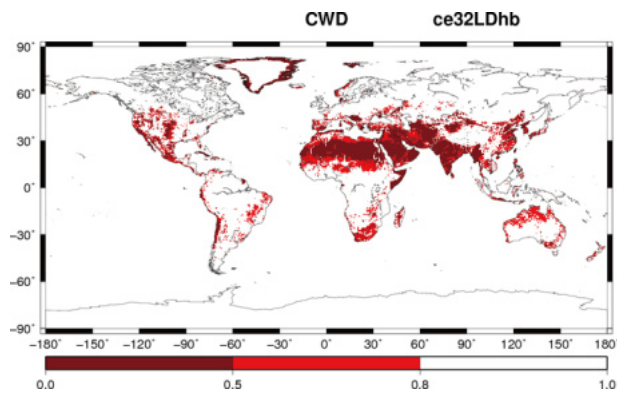


図 2-3-2 CWD の結果

表 2-3-2 水ストレス人口

	CWD	WWR
CTR	1.61×10^9	1.94×10^9
SSP1-BAU	2.76×10^9	2.62×10^9
SSP1-STB	2.64×10^9	2.57×10^9
SSP3-BAU	4.06×10^9	3.90×10^9
SSP3-STB	3.97×10^9	3.86×10^9

がより大きい。これは、Vörösmarty et al. (2000)¹³⁾の研究とも整合的であり、人口や GDP の大きな違いに加え (2.1 節)、水需要に関するモデルの振る舞いと、SSP との対応付けの方法にも依存しているものと考えられた (2.2 節)。

2.3.7 まとめ

新しい全球温暖化水資源評価を実施した。まず、H08 の機能を利用することにより、日単位の水逼迫指標 CWD を利用した評価を行った。この結果、年単位の WWR に比べて水ストレス地域が拡大することが示唆さ

れた。また、2.1 節で議論された事項を含む、IPCC 新シナリオに対応した水資源評価を実施した。このとき、2.2 節で開発した生活・工業用水需要および灌漑シナリオを利用することで、社会経済シナリオ SSP との整合性を高めることができた。本検討では SSP1 と SSP3、気候政策なしとありの組み合わせについて調べたが、水ストレス人口は社会経済シナリオの違いの方が大きかった。

研究期間内に、1 モデル、1 期間に関する検討を完了することができた。今後、多モデル・多期間の検討を実施することが必要である。また、地域特性を評価し、同じ水逼迫が生じているにしる、それが水資源量の低下によるものなのか、水利用量の増加によるもののかなど、詳細な分析を実施することが重要である。

*本節は、本研究プロジェクトの成果である研究論文

「A global water scarcity assessment under shared socio-economic pathways — Part 2: Water availability and scarcity」(Hydrology and Earth System Sciences Discussion 誌に Discussion Paper として掲載) に基づいた内容で、論文の一部の計算結果を抜粋して使用している。なお、論文には新しい検討結果も含まれており、結果が本節と一部異なる場合もある。

参 考 文 献

- 1) Hanasaki, N., Kanae S., Oki T., Masuda K., Motoya K., Shirakawa N., Shen Y. and Tanaka K. (2008) An integrated model for the assessment of global water resources - Part 1: Model description and input meteorological forcing, Hydrol. Earth Syst. Sci., Vol. 12, 1007-1025.
- 2) Hanasaki, N., Kanae S., Oki T., Masuda K., Motoya K., Shirakawa N., Shen Y. and Tanaka K. (2008) An integrated model for the assessment of global water resources - Part 2: Applications and assessments, Hydrol. Earth Syst. Sci., Vol. 12, 1027-1037.
- 3) Milly, P.C.D., Dunne K.A. and Vecchia A.V. (2005) Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate, Nature, Vol. 438, 347-350.
- 4) Alcamo, J., Döll P., Henrichs T., Kaspar F., Lehner

- B., Rösch T., and Siebert S. (2003) Development and testing of the WaterGAP 2 global model of water use and availability, *Hydrolog. Sci. J.*, 48, 317–337.
- 5) Shen, Y., Oki T., Utsumi N., Kanae S. and Hanasaki N. (2008) Projection of future world water resources under SRES scenarios: Water withdrawal, *Hydrolog. Sci. J.*, 11–33.
 - 6) Arnell, N.W. (2004) Climate change and global water resources: SRES emissions and socio-economic scenarios, *Global Environ. Chang.*, Vol. 14, 31–52.
 - 7) Oki, T. and Kanae S. (2006) Global hydrological cycles and world water resources, *Science* 313, 1068–1072.
 - 8) Alcamo, J., Florke M. and Marker M. (2007) Future long-term changes in global water resources driven by socio-economic and climatic changes, *Hydrolog. Sci. J.*, Vol. 52, 247–275.
 - 9) Nakicenovic, N. and Swart R. (2000) Special Report on Emissions Scenarios: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, Cambridge University Press.
 - 10) Moss, R. H., Edmonds J. A., Hibbard K. A., Manning M. R., Rose S. K., van Vuuren D. P., Carter T. R., Emori S., Kainuma M., Kram T., Meehl G. A., Mitchell J. F. B., Nakicenovic N., Riahi K., Smith S. J., Stouffer R. J., Thomson A. M., Weyant J. P., and Wilbanks T. J. (2010) The next generation of scenarios for climate change research and assessment, *Nature*, 463, 747–756.
 - 11) Weedon, G.P., Gomes S., Viterbo P., Shuttleworth W.J., Blyth E., Österle H., Adam J.C., Bellouin N., Boucher O. and Best M. (2011) Creation of the WATCH Forcing Data and Its Use to Assess Global and Regional Reference Crop Evaporation over Land during the Twentieth Century, *J. Hydromet.*, Vol. 12, 823–848.
 - 12) Hanasaki, N., Inuzuka T., Kanae S., and Oki T. (2010) An estimation of global virtual water flow and sources of water withdrawal for major crops and livestock products using a global hydrological model, *J. Hydrol.*, 384, 232–244.
 - 13) Vörösmarty, C.J., Green P., Salisbury J. and Lambers R.B. (2000) Global water resources: Vulnerability from climate change and population growth, *Science* 289, 284–288.

2.4 詳細な生活用水モデル

2.4.1 生活用水需要量把握の重要性

世界全体の需要別水利用量は、農業用水：約 69 %、工業用水：約 18 %、生活用水：約 13 %の割合となっている¹⁾。生活用水は全体への割合は小さいものの、人間が生きるための基本的要件であり、社会システムを維持するために必要不可欠である。しかしながら、人口増加、都市化、生活スタイルの変化により、需要量が急激に増加し、水不足が深刻な問題となることが懸念されている²⁻⁴⁾。

生活用水量は、どのような設備によって水が供給されるかにより、その量が大きく異なる。WHO では、安全な水へのアクセスとして、居住施設・区域への給水管接続 (Piped water into dwelling, yard or plot)、公共水栓 / 給水塔 (Public tap or standpipe)、掘り抜き井戸 / 試錐孔 (tubewell or borehole)、保護された掘り井戸 (Protected dug well)、保護された湧水 (Protected spring)、雨水収集 (rainwater collection) が定義されている⁵⁾。水道を利用する場合には 1 人あたり 1 日約 150 ~ 400L と報告されているが、公共水栓などのその他設備を利用する場合は、人間の基本的な生活に必要な水量 (50L/人/日) に満たない場合が多いため、生活用水量を推計するには水道利用量に着目する必要がある⁶⁾。そこで、本研究では、全球水資源評価に資する生活用水需要量を推計するために、水道利用下における水需要量を世界別別に推計するモデルの開発を目的とする。既存研究では、1 人あたり GDP を説明変数とするモデルが提案されてきたが、概念的なモデルにとどまっておらず、モデル式やパラメータに統計的な裏付けがなされていなかった⁷⁻⁹⁾。花崎ら (2008)⁸⁾ は、世界の国レベルで生活用水量を推計する際、経済レベルだけではなく、生活様式の違いも考慮する必要性を指摘している。本研究では、経済レベルに加えて、生活様式や水道システムの管理レベルを考慮し、パネルデータ分析を行うことで、社会的および経済的背景の異なる国毎の状況を考慮したモデルの開発を試みる。このようなモデルを開発することで、社会経済の多様な発展下における生活用水の需要量を適切に分析できると考えられる。

本節では、まず、既存の生活用水需要予測推計について整理し (2.4.2 節)、本研究で開発したモデルについて

述べ、得られた推計結果を考察し (2.4.3 節)、最後にまとめを述べる (2.4.4 節)。

2.4.2 既存研究の整理と本研究の位置づけ

既存研究を表 2-4-1 に整理する。全球の生活用水需要量の将来推計を行うためのモデルは、これまでにいくつか開発されてきた (モデル群 1)。これらの研究では、1 人あたり GDP や人口を説明変数として、国レベルの家庭用水の取水量の推計式を構築し、過去のデータを参考にパラメータを同定して、全球の将来推計を行っている。しかし、これらのモデルには 2 つの問題がある。第 1 に、パラメータについて統計的な検証が行われていない。第 2 に、水道用水需要量を決定する要因として 1 人あたり GDP にしか注目していない。花崎ら (2008)⁸⁾ では、高橋ら (2000)⁹⁾、Alcamo et al. (2003)¹⁰⁾、Shen et al. (2008)¹¹⁾ の推計式の比較評価を行っており、水需要量の各国モデルを構築するにあたり、生活様式の違いを考慮することの重要性を指摘している。さらに、水道用水需要量を決定する要因は、所得や生活様式だけではなく、政治体制や、文化的背景を含む生活様式の違い、自然条件などが考えられるが、先行研究では 1 人あたり GDP にすべての関連要因を含有させてしまっており、こうした変数を考慮していないことから、所得の効果と所得以外の効果を分離できていないと考えられる^{10,11)}。

一方、国レベル・市町村レベルの生活用水需要量については、1 人あたり GDP 以外の水需要決定要因を説明変数に加え、モデルパラメータを統計的に同定する手法が広く採用されてきた (モデル群 2)。生活用水需要量の推計に関して、Arbues et al. (2003)¹⁷⁾、House-Peters et al. (2010)¹⁸⁾ が詳細な総説論文を公表している。これらの論文では、生活用水需要量を決定する因子や推計手法について整理している。生活用水需要量を決定する因子として、水道料金、家計の収入、気温、降水量、世帯人数、居住設備、料金形態、屋内外別の水利用状況などが挙げられている。例えば、Schleich et al. (2009)⁶⁾ は、ドイツの 600 程度の配水区を対象として、統計的手法を用いた家庭用水需要分析を行っており、水道料金や所得だけでなく、平均世帯人数、井戸を持っている世帯の割合が水需要量を決定する要因であるという結論を得

表 2-4-1 既存研究のまとめ

	文献	スケール	説明変数	パラメータ の同定	特徴
モデル 群 1	高橋ら (2000) ⁹⁾	国レベル (全球)	人口	—	取水量は人口に比例
	Alcamo et al. (2003) ¹⁰⁾	国レベル (全球)	人口、pcGDP	非統計的 手法	生活様式の違いを考慮
	Shen et al. (2008) ¹¹⁾	国レベル (全球)	人口、pcGDP	非統計的 手法	生活様式の違いを考慮して いない。
	本 研 究	国レベル	pcGDP、平均世帯人員 数、独裁体制指標ほか	統計的に 推計	生活様式の違いを考慮。水 道アクセス率、水需要量、 漏水率の区別。
モデル 群 2	Schleich & Hillenbrand (2009) ⁶⁾	市町村レベル (ドイツ)	水道料金体系、井戸所有 世帯の割合、全建物数に 対する世帯数の割合 など	統計的に 推計	生活様式や気候条件の違 いがある程度とらえるこ とができるが、対象が先進 国に限られる。
	Hughes et al. (2010) ¹²⁾	国レベル (OECD 諸国)	人口、pcGDP、気温、降 水量、土地利用	統計的に 推計	対象が先進国に限定され ている。
モデル 群 3	Otaki et al.(2008) ¹³⁾ Lu (2007) ¹⁴⁾ Willis et al. (2011) ¹⁵⁾ Lallana et al. (2001) ¹⁶⁾	ミクロレベル (フィールド調 査)	使途別 (トイレ、風呂、 洗濯、炊事)	—	実際の水利用形態を適切 に表し、生活様式や節水行 動などを定量的に評価で きる。途上国も含めて全 ての国のデータを収集す ることは非常に困難。

注) pcGDP は、1人あたり GDP の意。

ている。Hughes et al. (2010)¹²⁾ は、水関連インフラの温暖化に関わる適応コストを算出するにあたり、国別生活用水需要量モデルのパラメータを統計的に推計しているが、対象が OECD 諸国に限定されている。国レベル・全球レベルの水需要についても、こういった詳細な変数をモデルに含めることができれば、経済的要因だけでなく、生活様式や社会的・政治的・文化的特性の変化まで考慮した将来推計を行うことができる。しかし、こういった変数に関する過去のデータが入手できるのは、一部の先進国に限られており、とくに途上国に関してはほとんどデータが入手できないため、経済以外の要因が水需要量に与える影響を考慮できる全球レベルの将来推計モデルは現在のところ存在しない。

実際の生活用水需要量は、保有している水利用機器 (トイレ、風呂など) に強く依存する。そのため、モデル群 3 のように利用者へのアンケートやフィールド調査の結果からボトムアップ式に生活用水需要量を推計する手法が考えられる¹⁴⁻¹⁷⁾。しかし、詳細な調査結果を全ての国について収集することは非常に困難であり、モデル

群 2 以上に、国レベル・全球レベルの生活用水需要量を把握する手法としては適していない。

本研究は、モデル群 1 と同様に全球の国別生活用水需要量推計を目的としながら、モデル群 2 で採用されている統計的手法を用いてモデル開発を試みる。さらに、花崎ら (2008)⁸⁾ の指摘を受け、所得と水需要の関係に加えて、政治的・社会的情勢、固有の文化的背景を含む生活様式といった所得以外の要因を考慮し、両者の効果を分離した独自のモデルの開発に取り組む。

本研究で用いる統計的手法はパネルデータ分析である。パネルデータ分析とは、同一の主体を継続して観察して得られる複数時点のクロスセクションデータ (パネルデータ) を用いて、主体間の観察不能な属性を定数項の違いとしてコントロールし、各種変動要因の効果を推計する手法である。上に挙げた水道水需要量を決定する要因のうち、所得以外の要因についてはデータとして入手できないものが多いが、こうした脱落変数の存在により推計結果にバイアスが生じる可能性があることが知られている。しかし、パネルデータ分析を行うことによ

り、脱落変数のうち、入浴習慣の有無や地理的条件といった時間を通じて変化しないものを国別の定数項の違いとしてコントロールすることができる。つまりパネルデータ分析は、先行研究の所得の効果から所得以外の効果を分離できていないという問題を解決するために有効な手法であると言えるため、本研究で採用することにした。

2.4.3 生活用水需要モデルの開発

生活用水需要量は、どのような施設（例えば、水道、井戸、公共要水栓、など）にアクセスしているかによって大きく異なる。特に、水道施設にアクセスしているかそうでないかによって、水使用量は大きく異なる。本研究で開発するモデルは、図2-4-1に示すように、3つのモジュール①水道へのアクセス率、②水道にアクセスできる人々の1人あたり国別水需要量、③さらに、水道施設維持の大きな問題点である漏水率によって構成される。すなわち、生活に関わる水の使われ方を次のように三つに分類した場合、「a）：水道にアクセスした人および都市活動に利用される水」、「b）：水道施設から配水された水が、個人や都市活動で用いられる前に水道管破損や盗水によって失われる水」、「c）：水道にアクセスできない人および都市活動に利用される水」、本研究では、a)とb)を対象とする。それぞれのモジュールは以下のように定式化した。各モジュールで使用した説明変数の意味は表2-4-2にまとめる。

2.4.3.1 水道アクセス率モジュール

水道アクセス率とは、ある国の人口に対する水道施設を利用することができる人口の割合（%）である。水道施設にアクセスできる場合とできない場合とでは、1人あたり水使用量が大きく異なるため、将来の水道アクセス率の変化をモデルで考慮できるようにしておくことは非常に重要である。水道施設へのアクセス率に影響を与える要因として、1人あたり所得、都市人口比率が考えられる。1人あたり所得が増加するほど、国全体として水道事業への投資が増加し、水道施設にアクセスできる人口が増加すると考えられる。また、水道施設は、農村部よりも人口の集中している都市部から整備されると考えられることと、都市人口が増加するほど利用人口の割に水道管の全長が短くて済み、給水設備整備・管理の効率性が良くなると考えられることから、都市人口比率の

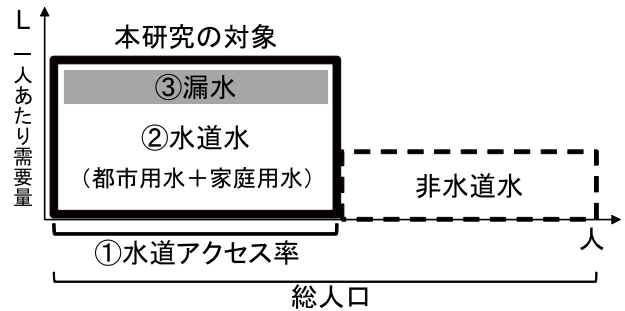


図2-4-1 開発するモデルの対象範囲

上昇は国全体の水道アクセス率を上昇させる効果があると考えられる。以上の2つの変数については、多くの国についてデータを入手することができる。一方で、仮に1人あたり所得や都市人口比率が同じであっても、水道アクセス率は各国で異なる。すなわち、これら2つの要因以外にも、生活様式、文化的要因、社会の成熟度といった要因も水道施設へのアクセス率に影響を及ぼすものと理論的には考えられる。しかし、これらの要因を数量的に把握することは困難であり、データとして利用不可能である。一般に、脱落変数が誤差項と相関を持つ場合、他の説明変数の係数の推計値にバイアスをもたらす可能性があることが知られている。そこで本研究では、水道アクセス率モデルを以下のように考え、パネルデータ分析によってパラメータを統計的に同定する。

$$\begin{aligned} \ln(\text{水道アクセス率}(\%)_{it}) &= \alpha_i + \beta_1 \ln(\text{都市部人口率}_{it}) \\ &+ \beta_2 \ln(\text{1人あたり実質GDP}_{it}) \\ &+ \text{誤差項}_{it} \end{aligned}$$

ここで、 α_i は標本期間内で一定であると考えられる第*i*国の特有の効果を表し、 β_n ($n=1, 2$)は各国共通のパラメータを表す。パネルデータ分析を行うことのメリットは、この入手不可能な国別の事情の持つ時間を通じて一定の効果下定数項の違いとして捉えることでコントロールし、人口や1人あたりGDPや人口の分布と水道アクセス率の関係を表すパラメータを同定できることである。なお、気温や降水量といった自然条件も水道施設建設に影響を与えることが考えられるが、本研究では、国別の多様な水源に関するデータ（河川、地下水、雨水等）を入手できなかったため今回の解析に加えなかった。ただし、これらのうち、推計期間中に変化しなかった要因については、定数項の違いとして捉えられる。

表 2-4-2 各モジュールの変数の意味

変数	意味	経済的 要因	政治的・ 社会的情勢	文化的背景を含 む生活様式	自然 条件
水道アクセス率モジュール					
都市人口比率 (%)	水道整備や管理の効率性を表す指標。			○	
1人あたり実質 GDP	水道設備投資の増加。	○			
定数項	期間を通じて変化しない国ごとの違い（入浴習慣や庭の水撒き習慣の有無、気温などの自然条件、地理条件など）。		○	○	○
水道用水需要モジュール					
タイムトレンド (西暦年)	時間の経過とともに起こる技術進歩。	○	○	○	
1人あたり実質 GDP	所得の増加によって、水消費量が増加する。	○			
人口密度	平均的な生活様式の指標（密集して住んでいるか。国レベル）。			○	
平均世帯人員数	平均的な生活様式の指標（大家族か、核家族か。世帯レベル）。			○	
定数項	期間を通じて変化しない国ごとの違い（入浴習慣や庭の水撒き習慣の有無、気温などの自然条件や地理条件など）。			○	○
漏水率モジュール					
タイムトレンド (西暦年)	技術進歩。供給側の要因。	○	○	○	
1人あたり実質 GDP	所得が増えることで漏水率が下がる。	○			
都市人口比率 (%)	水道供給事業整備の効率性の指標（供給側の要因）。			○	
識字率 (%)	インフラ管理能力（供給側の要因）、盗水（需要側の要因）の代理指標。		○		
独裁体制指標	インフラ整備状況や管理能力の代理指標（供給側の要因）。		○		
定数項	期間を通じて変化しない国ごとの違い。		○	○	○

2.4.3.2 水道用水需要量モジュール

次に、水道にアクセスできる人々を対象として、1人あたり水道用水需要モジュールを構築する。水道需要量は、経済が発展するほど増加すると考えられている。これは、1人あたり所得が増加することにより、水洗式トイレ、入浴設備といった水利用機器・設備が家庭に普及するためであり、1人あたり所得は既存研究においても

説明変数として使用されている。しかし、水道用水需要量の大きさは、1人あたり所得だけではなく、入浴習慣の有無、家族との同居といった生活様式の変化によっても影響を受け、将来的に変化していくものと考えられる。また、水利用機器・設備は技術進歩によって水利用効率は改善していくと考えられる。以上を考慮し、本研究では水道用水需要量モデルを以下のように定式化した。

$$\begin{aligned}
& \ln (1 \text{ 人あたり水道用水需要量}_{it}) \\
& = \gamma_i + \delta_1 \ln (\text{タイムトレンド}_{it}) \\
& + \delta_2 \ln (1 \text{ 人あたり実質 GDP}_{it}) \\
& + \delta_3 (\ln (1 \text{ 人あたり実質 GDP}_{it}))^2 \\
& + \delta_4 \ln (\text{人口密度}_{it}) \\
& + \delta_5 (\ln (\text{人口密度}_{it}))^2 \\
& + \delta_6 \ln (\text{平均世帯人員数}_{it}) \\
& + \delta_7 (\ln (\text{平均世帯人員数}_{it}))^2 \\
& + \delta_8 \ln (1 \text{ 人あたり実質 GDP}_{it}) \\
& \quad \times \ln (\text{人口密度}_{it}) \\
& + \delta_9 (\ln (1 \text{ 人あたり実質 GDP}_{it}))^2 \\
& \quad \times \ln (\text{人口密度}_{it}) \\
& + \delta_{10} \ln (1 \text{ 人あたり実質 GDP}_{it}) \\
& \quad \times \ln (\text{平均世帯人員数}_{it}) \\
& + \delta_{11} (\ln (1 \text{ 人あたり実質 GDP}_{it}))^2 \\
& \quad \times \ln (\text{平均世帯人員数}_{it}) \\
& + \text{誤差項}_{it}
\end{aligned}$$

ここで、 γ_i は標本期間内で一定であると考えられる第 i 国の特有の効果を、 δ_m ($m=1, \dots, 11$) は各国共通のパラメータを表し、水道アクセス率モデルと同様にパネルデータ分析を行う。1人あたり水道水使用量は、漏水量を除いたものとする。タイムトレンドとは時間の経過とともに起こる技術進歩、人口密度や平均世帯人員数はその国の平均的な生活様式を考慮するための変数である。1人あたり実質 GDP と人口密度の交差項と1人あたり実質 GDP と世帯人員数との交差項は、1人あたり実質 GDP が水消費量に与える影響の大きさが、人口密度や世帯人員数の違いによって異なるという可能性を捉えるための項である。1人あたり実質 GDP と人口密度の交差項の係数は正であることが期待される。人口密度が上昇することで、水道整備を効率的に進めることができるため、人口密度が高いほど、1人あたり実質 GDP が増加した時の1人あたり水道用水需要量に与える効果は大きくなると考えられるためである。一方、1人あたり実質 GDP と世帯人員数との交差項の係数は負であることが期待される。なぜなら、世帯人員数が増えれば世帯あたりの水使用が効率的になると考えられるため、実質 GDP が増加した時の1人あたりの水使用の増加の割合は、平均世帯人数が多い国ほど小さいと考えられるからである。また、それぞれの非線形の効果を検討するため、2乗の項も加えている。その他、説明変数として

使用することのできない生活様式や文化的背景といった要因のうち、時間変化によらないものについては、定数項 γ_i の違いとして国別に捉えられる⁴。

2.4.3.3 漏水率モジュール

漏水率とは、浄水場から各世帯に水が供給される過程で失われる水の量の割合 (%) である。漏水とは具体的に、配管の老朽化による漏水や水道管への不法な接続、水道メーターの不正などさまざまな要因により生ずるものである。日本の漏水率は世界的に見て非常に低く、わずか数パーセントであるが、先進国であっても 20% を超える都市も決して珍しくはない。したがって、漏水率の変化は、最終的な水道用水需要量を推計するにあたり、非常に重要な要素である。漏水率を決定する要因として、水道供給設備の維持していくための行政サービスの水準や、管理能力といった供給側の要因と、盗水といった利用者側の要因が考えられることから、以下のよう

$$\begin{aligned}
& \ln (\text{漏水率} (\%)_{it}) \\
& = \zeta_i + \eta_1 \ln (\text{タイムトレンド}_{it}) \\
& + \eta_2 \ln (1 \text{ 人あたり実質 GDP}_{it}) \\
& + \eta_3 (\ln (1 \text{ 人あたり実質 GDP}_{it}))^2 \\
& + \eta_4 \ln (\text{都市人口比率}_{it}) \\
& + \eta_5 \ln (\text{識字率}_{it}) \\
& + \eta_6 \ln (\text{独裁体制指標}_{it}) + \text{誤差項}_{it}
\end{aligned}$$

ζ_i は標本期間内で一定であると考えられる第 i 国の特有の効果を、 η_l ($l=1, \dots, 6$) は各国共通のパラメータを表し、(1) 水道アクセス率モジュール、(2) 水道用水需要量モジュールと同様にパネルデータ分析を行うことでパラメータを推計する。タイムトレンド、都市人口比率、独裁体制指標は、水道供給側の要因であり、識字率

4 水道料金の所得に対する水準は、水道水需要を決定する要因であると考えられる。しかし、水道料金のデータは、入手できる国の数が非常に限定されており、入手できたとしても、自治体によって異なっていたり、ブロック料金制、定額制、逦増型料金制、逦減型料金制といった別があり、料金体系は様々であることから、国レベルの平均的な水道料金を多数の国について特定し、それを比較するのは非常に困難であることから、今後の課題とする。なお、本研究では、パネルデータ分析を行っていることから、所得に対する水道料金が標本期間中で大きく変化がないのであれば、その違いは個別効果として定数項に含まれる。

は供給側・利用者側の両方の要因であると考えられる。タイムトレンドとは、時間の経過に伴う技術進歩を表し、機器の水利用効率の改善を想定している。都市人口比率は水道供給整備の効率性の指標として説明変数に加えた。また、独裁体制指標は、社会情勢あるいは水道供給サービス事業の効率性を反映するものと考え、説明変数に追加した。具体的には、独裁体制下では自由な経済活動が制限される傾向が強く、このことがインフラを維持・管理していくための行政サービスの水準や、管理能力の低さとして漏水率に影響を与えらる。独裁体制指標はその代理変数としての役割が期待される。犯罪率が高いと盗水が増え、犯罪率は識字率によって大きく影響されると考えられることから、識字率を犯罪率の代理変数として用いた。同時に、識字率は、労働者の教育水準の代理変数でもありと考えられることから、漏水の供給側の要因として、水道サービスに関わる労働者の質や管理能力の代理変数としての役割を期待し、説明変数に加えた。なお、所得と識字率に相関がある可能性は非常に高いと考えられる。しかし、所得以外にも、初等教育体制、印刷出版文化、紛争といったものが、識字率に影響を与える要因として考えられていることから、所得との相関が高いからといって、識字率を説明変数の候補から外してしまうと、所得の係数に除外変数バイアスをもたらす可能性が出てくる。したがって、本研究では両変数とも説明変数として加えることとした。

パラメータ推計に使用したのは、10カ年、101カ国のパネルデータである⁵。データの出所は、水道アクセス率、都市部人口比率はWHO/UNICEF Joint Monitoring Programme (JMP) for Water Supply and Sanitation⁷、1人あたり実質GDPはWorld Development Indicators 2009¹⁰、1人あたり水道水総使用量⁶および漏水率⁷はThe International Benchmarking Network for Water and Sanitation Utilities (IBNET)²⁰、平均世帯人員数および

識字率はGlobal Market Information Database (GMID)²¹、人口密度はWorld Population Prospects²²である。独裁体制指標はPolity IVプロジェクトの政治体制指標を用いた²³(表2-4-3)。また、1人あたり水道水総使用量に(1-漏水率)を乗じて、漏水を除いた1人あたり水道水使用量を計算した。

3つのモジュールの間で、101カ国のうち推計対象に含まれる国は異なるが(表2-4-4)、全てのモジュールに対して、1人あたりGDPが1,000ドル未満から15,000ドルの国をカバーしている(表2-4-5)。所得の低い国に偏っている傾向は見られるものの、全てのモジュールについて1人あたりGDPを説明変数に加えているため、所得分布の偏りについてはコントロールされる。したがって、全球モデルとして妥当な推計を行えるかと判断した。

なお、今回開発した水道アクセス率モデルや漏水率モデルは、利用したデータが100%以下の値であるが、将来推計を行った場合、説明変数の値次第では100%を超える可能性もある。本研究ではどの変数がモデルに影響を与えるかを知ることが第一の目的であった。よって、将来推計におけるモデルや説明変数の取り扱い方については今後の課題とする。

2.4.4 パラメータの推計結果

推計結果は表2-4-6・7・8に示す通りである。推計ごとにはハウスマン検定を行ったところ、水道アクセス率モジュール、漏水率モジュールについては変量効果モデルが棄却され、水道用水需要モジュールについては変量効果モデルが採択された。したがって、水道アクセス率モジュール、漏水率モジュールについては固定効果モデル、水道用水需要量モジュールについては変量効果モデルの結果を掲載している⁸。

水道アクセス率モジュールでは、都市人口、1人あたり実質GDPがともに正で有意に推計された(表

5 国・年によって入手できない変数があるため、各モジュールの推計に使用される国・年の数は必ずしもこれらと一致しない。

6 1人あたり水道水総使用量のデータは各水道事業者から提供されたものであるが、各需要者の給水量を計測することは非常に困難なため、水道水使用量は給水量を人口で割ったデータである可能性が高いが、その詳細は記載されていない。

7 漏水率は、全国値であるが、各国の各水道事業者から提供されたデータを統合したものであり、一国すべての水道事業者や水道需要者のデータを積み上げて作成されたものではない。

8 固定効果モデルと変量効果モデルは、個別効果を表す定数項を定数パラメータとして扱うか、確率変数として扱うかという違いであり、モデル自体の定式化が異なるというわけではない。つまり、被説明変数や説明変数が全く同じモデルを、個別効果 α_i の特徴に応じて別の推定方法で推定しているということであり、固定効果モデルと変量効果モデルのどちらが採択されたかによって、解釈に違いが出てくるものではない。固定効果モデルと変量効果モデルのどちらの結果を採択するかの判定を行うのがハウスマン検定であり、本研究もパネル分析を行う際の一般的な手続きに従った。

表 2-4-3 データの出所

変数	データの出所
水道アクセス率 (%)	The International Benchmarking Network for Water and Sanitation Utilities (IBNET) (変数名: proportion of Total population served with Piped Water (%))
1人あたり水道水総使用量 (L/人/日)	The International Benchmarking Network for Water and Sanitation Utilities (IBNET) (変数名: Total Water Consumption (L/person/day))
漏水率 (%)	The International Benchmarking Network for Water and Sanitation Utilities (IBNET) (変数名: Non Revenue Water (%))
都市部人口比率 (%)	WHO / UNICEF Joint Monitoring Programme (JMP) for Water Supply and Sanitation (変数名: proportion of Urban Population (%))
1人あたり実質 GDP (US ドル)	World Development Indicators 2009 (変数名: GDP per capita(PPP2005))
平均世帯人員数 (人)	Global Market Information Database (GMID) (変数名: Occupants per Household at January 1st - number)
識字率 (%)	Global Market Information Database (GMID) (変数名: Adult Literacy Rate)
独裁体制指標	Polity IV プロジェクトの政治体制指標 (0~10) (変数名: AUTOC)
人口密度 (人/km ²)	World Population Prospects (変数名: Population density)

2-4-6)。水道アクセス率は都市人口と1人あたり実質 GDPが増加するほど上昇するといえる。水道は農村部よりも都市部から整備されるため、都市部人口の増加は水道需要の増加を意味する。同時に、都市人口が増加するほど、水道整備の効率性が良くなると考えられることから、都市部人口の増加は水道アクセス率を上昇させる効果があると考えられる。また、豊かになるほど水道整備への投資が増加するといえる。

次に、水道用水需要量モジュールの推計結果を考察する(表 2-4-7)。タイムトレンド(西暦年)の係数は負で有意に推計された。これは、時間がたつにつれて水道用水需要量は減少しているということであり、技術の進展により節水に向かう傾向があると解釈することができる。1人あたり実質 GDPの効果を、推計結果に基づいて計算したところ、1人あたり実質 GDPが1%増加すると、1人あたり水道用水需要量が0.55%増加するという結果となった⁹。このことから、豊かになれば生活用水

を使用する機器や設備の導入が増え、需要量が増加すると考えられる。詳しく見ると、1人あたり実質 GDPの1次の項の係数は正、2次の項の係数は負で有意に推計された。このことは、1人あたり水道用水需要量と実質 GDPの関係は、下に開いた形状の2次曲線で表されることを意味するが、分析に使用した実質 GDPのデータは、極大点をとる値よりも小さい。したがって、1人あたり実質 GDP増加によって需要量は増加するが、その効果は GDPの増加に伴って逡減していることがわかる。また、1人あたり実質 GDPと世帯人員数の交差項の係数は負で有意に推計された。これは、1人あたり実質 GDP増加による水消費量増加の効果は、平均世帯人員数によって異なるということである。人口密度については、2乗の項の係数のみが正で有意に推計された。このことは、人口密度の増加によって1人あたり需要量も増加するが、非線形の関係にあることを意味する。人口密度が高いと、社会経済活動が活発になり、図 2-4-1に示す家庭用水と分離して考慮している都市活動に必要な水(都市用水)の増加につながると推察される¹⁰。さらに、平均世帯人員数の効果を推計結果に基づいて計算し

9 1人あたり実質 GDPが増加した時の1人あたり水道用水需要量の変化は、1人あたり実質 GDPの偏微係数によって表される。本モジュールに使用した全77カ国のサンプルの世帯平均人員数の平均値(1.4284)を用いて1人あたり GDPの偏微係数を評価すると、0.5500となった。また、後述の世帯平均人員数の持つ効果についても1人あたり実質 GDPと1人あたり実質 GDPの2乗のサンプル平均(それぞれ、8.1892、68.3611)を用いて同様に評価したところ、-0.54となった。

10 ただし、都市部と農村部では、人口密度の効果が異なると考えられる。しかしこれらのデータは入手できないため、効果を特定するためには工夫が必要である。これは今後の課題とする。

表2-4-4 各モジュールの推計対象国

	国名	アクセス率	消費量	漏水率		国名	アクセス率	消費量	漏水率
1	Albania	○	○	×	52	Madagascar	○	○	×
2	Algeria	○	×	×	53	Malawi	○	○	○
3	Argentina	○	○	×	54	Malaysia	○	○	○
4	Armenia	○	○	×	55	Maldives	○	×	×
5	Australia	×	○	×	56	Mali	○	○	×
6	Bangladesh	○	○	○	57	Mauritania	○	○	○
7	Belarus	○	○	○	58	Mauritius	○	○	×
8	Benin	○	○	×	59	Mexico	○	○	×
9	Bhutan	○	○	○	60	Moldova	○	○	×
10	Bolivia	○	○	×	61	Mozambique	○	○	×
11	Bosnia and Herzegovina	○	×	×	62	Namibia	○	○	×
12	Botswana	○	×	×	63	Nepal	○	×	×
13	Brazil	○	○	×	64	New Zealand	○	○	×
14	Bulgaria	○	○	×	65	Nicaragua	○	○	×
15	Burkina Faso	○	○	○	66	Niger	○	○	○
16	Burundi	○	○	○	67	Nigeria	○	○	×
17	Cambodia	○	○	○	68	Norway	○	×	×
18	Cameroon	○	×	×	69	Pakistan	○	○	○
19	Cape Verde	○	○	×	70	Panama	○	○	×
20	Chad	○	×	×	71	Paraguay	○	○	×
21	Chile	○	○	×	72	Peru	○	○	×
22	China	○	○	○	73	Philippines	○	○	×
23	Colombia	○	○	×	74	Poland	○	○	×
24	Congo	○	×	×	75	Romania	○	○	×
25	Congo, Dem. Rep.	○	×	×	76	Russia	○	○	○
26	Costa Rica	○	○	×	77	Rwanda	○	○	○
27	Cote d'Ivoire	○	×	×	78	Samoa	○	×	×
28	Croatia	○	○	×	79	Senegal	○	○	×
29	Czech Republic	○	○	×	80	Seychelles	×	○	×
30	Djibouti	○	×	×	81	Sierra Leone	○	×	×
31	Ecuador	○	○	×	82	Singapore	×	○	○
32	El Salvador	○	○	×	83	Slovakia	○	○	×
33	Eritrea	○	×	×	84	Solomon Islands	○	×	×
34	Ethiopia	○	○	○	85	South Africa	○	○	×
35	Fiji	○	×	×	86	Sri Lanka	○	○	○
36	Gabon	○	○	○	87	Sudan	○	○	○
37	Georgia	○	○	○	88	Tajikistan	○	○	○
38	Ghana	○	○	○	89	Tanzania	○	○	○
39	Guinea	○	○	×	90	The Gambia	○	×	×
40	Honduras	○	○	×	91	Togo	○	○	○
41	Hungary	○	○	×	92	Tonga	○	×	×
42	India	○	○	×	93	Tunisia	○	○	○
43	Indonesia	○	○	○	94	Turkey	○	○	○
44	Jordan	○	×	×	95	Uganda	○	○	○
45	Kazakhstan	○	○	○	96	Ukraine	○	○	×
46	Kenya	○	○	×	97	Uruguay	○	○	×
47	Kyrgyz Republic	○	○	○	98	Uzbekistan	○	○	○
48	Lao PDR	○	×	○	99	Vanuatu	○	×	×
49	Lesotho	○	○	×	100	Venezuela	○	○	×
50	Liberia	○	○	○	101	Vietnam	○	×	○
51	Macedonia, FYR	○	×	×					

表 2-4-5 データの記述統計

	平均値	最大値	最小値	標準偏差	サンプル数
1人あたり水消費量(L/人/日)	174.54	702.00	6.00	121.48	347
1人あたり水消費量(漏水分を除く)	116.12	400.14	3.06	91.05	347
漏水率(%)	35.43	90.00	0.00	16.66	351
1人あたり実質 GDP (USドル PPP2005/人)	6188.26	49711.35	244.33	7730.97	917
人口密度(人/km ²)	159.69	6966.60	2.00	620.23	936
平均世帯人員数(人)	4.43	7.20	2.30	1.13	864
識字率(%)	79.39	99.90	9.00	20.89	884
都市人口率(%)	49.57	100.00	0.00	23.04	960
水道アクセス率(%)	45.95	100.00	0.00	34.39	942
人口(千人)	47910.26	1337411.00	81.13	167253.24	945
独裁体制指標(0~10)	1.86	10.00	0.00	2.63	850

表 2-4-6 水道アクセス率モジュールの推計結果

	係数		標準誤差	t 値
都市人口比率(%)	0.8279	***	0.1285	6.44
1人あたり実質 GDP	0.0905	**	0.0429	2.11
定数項	-0.3707		0.4240	-0.87
国数	98			
決定係数 (Within)	0.0909			
決定係数 (Between)	0.7065			
決定係数 (Overall)	0.7007			

***、**、*は、それぞれ、1%、5%、10%の水準で有意であることを表す。

表 2-4-7 水道用水需要量モジュールの推計結果

	係数		標準誤差	z 値
タイムトレンド(西暦年)	-70.1780	***	26.0499	-2.69
1人あたり実質 GDP	8.8716	*	4.9694	1.79
1人あたり実質 GDP ² 乗	-0.5067	*	0.2960	-1.71
人口密度	-2.5964		2.8873	-0.90
人口密度 ² 乗	0.0546	*	0.0328	1.66
平均世帯人員数	28.7538	*	15.3946	1.87
平均世帯人員数 ² 乗	0.1012		0.8854	0.11
1人あたり実質 GDP×人口密度	0.5549		0.6550	0.85
1人あたり実質 GDP ² 乗×人口密度	-0.0350		0.0382	-0.92
1人あたり実質 GDP×平均世帯人員数	-7.2813	**	3.6066	-2.02
1人あたり実質 GDP ² 乗×平均世帯人員数	0.4436	**	0.2173	2.04
定数項	501.3677	**	202.9821	2.47
国数	77			
決定係数 (Within)	0.0163			
決定係数 (Between)	0.4448			
決定係数 (Overall)	0.3866			

***、**、*は、それぞれ、1%、5%、10%の水準で有意であることを表す。

表2-4-8 漏水率モジュールの推計結果

	係数		標準誤差	t 値
タイムトレンド（西暦年）	221.4132 ***		53.2202	0.00
1人あたり実質 GDP	-5.3408 ***		1.8386	0.01
1人あたり実質 GDP ² 乗	0.2427 **		0.1095	0.03
都市人口比率（%）	-1.3761 *		0.7720	0.08
識字率（%）	-0.5473 ***		0.1958	0.01
独裁体制指標	-0.0594		0.2309	0.80
定数項	-1646.5000 ***		400.4829	0.00
国数	34			
決定係数（Within）	0.0013			
決定係数（Between）	0.3416			
決定係数（Overall）	0.1717			

**, **, *は、それぞれ、1%、5%、10%の水準で有意であることを表す。

たところ、平均世帯人員数が1%増加した場合の1人あたり水道用水需要量は0.54%減少するという結果となった。これは、世帯共通で水道水を使用することの節水効果を示していると考えられる。

最後に、漏水率モジュールの推計結果を見てみると、1人あたり実質 GDPが増加するほど漏水率は低下するという推計結果が得られた（表2-4-8）。1人あたり所得の増加は、水道事業への予算の増加、水道供給サービスの質の向上による事業管理の改善、あるいは犯罪率の低下を反映していると考えられる。ただし GDPの2乗の項が正であることから、GDP増加による漏水率低下の効果は、GDPが増加するほど小さくなる。都市人口比率が上昇するほど、漏水率は低下する。都市部に多くの人口が集まっているほど、水道網の整備や管理が行いやすくなるためと考えられる。また、識字率が上昇するほど、漏水率は低下している。教育の普及による労働者の質の向上・消費者の知識向上によって、水道事業の効率性が上がる。あるいは、犯罪率が低下し、盗水が減少するものと考えられることができる。

2.4.5 結論

本研究では、全球水資源評価に資する生活用水需要量を推計するために、水道利用下における水需要量を世界国別に推計するモデルの開発を行った。従来、全球の国レベルで生活用水量を推計する場合、人口や1人あたり GDPを用いて推計されてきたが、本研究では、水利用を水道アクセス率、水道用水需要量、漏水率の3つプロセスに分離して、それぞれを経済的要因、政治的・社会的情勢、文化的背景を含む生活様式の変化といった要

因を考慮したモデルの開発に成功した。今後、このモデルを将来推計に用いる場合、説明変数の将来シナリオをどのように準備するか、推計値が妥当なものとなるかが大きな課題となるが、将来シナリオの設定に関しては、現在、IPCC第5次評価報告書に向けて開発されているSSPs（Shared Socio-Economic Pathways）の活用が考えられる。将来推計値の妥当性については、最大値（例えば、アクセス率や漏水率は100%を上限とする、水道用水需要量は現在考え得る最大の利用量を上限とする、等）の設定を検討して、推計に用いることで課題を解決できると考えている。

今後の課題は、①本推計に用いたデータの拡充、②将来のシナリオを作成するためのモデルとしての妥当性を検証すること、③将来推計に用いる説明変数のシナリオ作成、が挙げられる。①に関しては、特に漏水率モジュールの推計に用いられたデータの国数が少なかったため、他のデータソースを探すことなども検討し、より多くの国をカバーするようなデータを準備することで、モデルの妥当性をより高める必要がある。②に関しては、1999年から2008年のデータセットに基づいてパラメータを同定したが、説明変数を将来シナリオに基づき変化させた場合、想定外（例えば、アクセス率が100%を大きく越えてしまう場合や1人あたりの水道用水需要量が実際に使われるであろう用途別需要量を大幅に超えてしまう場合）値が推計されないか確認する必要がある。③に関しては、SRES（Special Report on Emission Scenarios）で提供されている、人口やGDP以外の説明変数のシナリオをどのように開発するかについて検討を行う必要がある。

*本節は、本研究プロジェクトの成果である研究論文「国別生活用水需要の将来推計のためのモデル開発－水道用水需要量に着目して－」（環境科学会誌 掲載予定）に基づいた内容である。環境科学会誌編集委員会の了承を得た上で、論文中の一部の計算結果を抜粋して使用している。

参 考 文 献

- 1) The 3rd United Nations World Water Development Report: Water in a Changing World.
- 2) Muller, M. (2007) Adapting to climate change: water management for urban resilience. *Environment and Urbanization*, Vol. 19, No. 1, 99-113.
- 3) Satterthwaite, D., Saleemul H., Mark P., Hannah R. and Patricia L. R. (2007) Adapting to Climate Change in Urban Areas; The Possibilities and Constraints in Low- and Middle-income Nations, *Climate Change and Cities Series, Discussion Paper No. 1*, International Institute for Environment and Development (IIED), London, 107.
- 4) McGranahan, G. (2002) Demand-Side Water Strategies and the Urban Poor, *PIE Series No. 4*, IIED, London, 67.
- 5) Gleick, P. (1996) Basic water requirement for human activities: meeting basic needs. *Water International* 21, 83-92 http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd17/basic_wate.pdf.
- 6) Schleich, J., Hillenbrand T. (2009) Determinants of residential water demand in Germany, *Ecological Economics*, Vol. 68, 1756-1769.
- 7) WHO/UNICEF, (2010) Progress on Sanitation and Drinking-water: 2010 Update. WHO/UNICEF Joint Monitoring Programme for Water Supply and Sanitation. http://whqlibdoc.who.int/publications/2010/9789241563956_eng_full_text.pdf.
- 8) 花崎直太, 増富祐司, 高橋潔, 舩岡靖明 (2008) 全球水資源評価における家庭・工業用水取水量の将来推計式の相互比較, *地球環境研究論文集*, Vol. 16, 1-8.
- 9) 高橋潔, 松岡譲, 島田洋子, 嶋村亮 (2000) 気候変動下での地球規模の水資源評価と渇水対策戦略評価のためのモデル開発, *第8回地球環境シンポジウム講演論文集*, 175-180.
- 10) Alcamo, J., Döll P., Henrichs T., Kaspar F., Lehner B., Rosch T., and Siebert S. (2003) Development and testing of the WaterGAP 2 global model of water use and availability, *Hydrolog. Sci. J.*, Vol. 48, 317-337.
- 11) Shen, Y., Oki T., Utsumi N., Kanae S., and Hanasaki N. (2008) Projection of future world water resources under SRES scenarios: 1. Water withdrawal, *Hydrolog. Sci. J.*, Vol. 53, 11-33.
- 12) Hughes, G., Chinowsky P., Strzepek K. (2010) The costs of adaptation to climate change for water infrastructure in OECD countries, *Utilities Policy*, Vol. 18, 142-153.
- 13) Otaki, Y., Otaki M., Pengchai P., Ohta Y., and Aramaki T. (2008) Micro-components survey of 31 residential indoor water consumption in Chiang Mai. *Drinking Water Engineering and Science*, Vol. 1, 17-25.
- 14) Lu, T. (2007) Research of domestic water consumption: a field study in Harbin, China. Master thesis of 14 Science of Loughborough University. <http://www.systemicpeace.org/inscr/p4manualv2009.pdf>
- 15) Willis, R.M., Stewart R.A., Panuwatwanich K., Williams P.R. and Hollingsworth A.L. (2011) Quantifying the influence of environmental and water conservation attitudes on household end use water consumption, *Journal of Environmental Management*, Vol. 92, 1996-2009.
- 16) Lallana, C., Krinner W. and Estrela T. (2001) Sustainable water use in Europe - Part 2: Demand management, European Environmental Agency, Environmental issue report No.19.
- 17) Arbués, F., García-Valiñas M.A., Martínez-Españeira, R. (2003) Estimation of residential water demand: a state of the art review. *Journal of Socioeconomics*, Vol. 32, 81-102.
- 18) House-Peters, L.A. and Chan H. (2010) Urban water demand modeling: Review of concepts, methods, and organizing principles, *Water Resources Research*, Vol. 47, W05401.
- 19) World Bank (2009) World Development Indicators

2009, World Bank Publications, 434pp.

20) <http://www.ib-net.org/>

21) <http://www.euromonitor.com/>

22) http://esa.un.org/unpd/wpp/unpp/panel_population.htm

23) <http://www.systemicpeace.org/polity/polity4.htm>

2.5 家庭における使途別水使用量推計手法の開発

2.5.1 使途別水使用量の把握の必要性と現状

本節では、生活用水需要を詳細に推計するための使途別の水使用量推計手法について説明する。

家庭における水の使途別使用量は地域により大きな違いがある。その理由として、降水量や水資源量といった自然環境の違いによるものや、上水道や井戸などのインフラ整備状況の違いによるもの、また、生活様式等の文化の違いが挙げられる。

日本においては1965年には1人1日生活用水として165L使用していたが、その後約30年の間に2倍近い322Lの水を使用するようになった¹⁾。この生活用水量増加の原因としては、上下水道等のインフラの整備や水洗トイレの普及が進んだことや、生活水準の向上が考えられる。2005年時点では、アジアにおける1人1日水使用量は日本が一番大きく、他のアジア諸国の中には1日の1人あたり水使用量が100Lにも満たない国が多い²⁾。しかし、多くのアジア諸国では今後の人口増加や、経済成長に伴い、インフラの整備や水洗トイレ等水使用機器の普及が進み、今後の水使用量が急激に増加することが予想される。人口増加や都市域への人口集中などと相まって、生活の基盤を維持するための十分な水を確保できない場合、持続可能な発展に大きな障壁になることが懸念されている。持続可能な発展のための計画を立てるためにも、現状や将来の水使用量の構造を把握することが非常に重要になる。

生活の中でエネルギーや水をどの程度消費できるかどうかは、われわれの生活の豊かさにも強く影響する。水使用量は、われわれの生活にも強く影響を与えるにもかかわらず、研究はまだ少なく消費実態はつかみきれていない部分も多い。

家庭部門における水使用に関する研究では、水使用量総量の推計を行う研究が多い。それらの研究のほとんどは、水の使用量に影響を与える人口やGDP等を説明変数として、分析を行うものである。例えば、Alcamo et al. (2003)³⁾の開発した水使用量推計モデルWaterGAP 2の中では1人あたりGDPを説明変数とした式を用いて生活用水を推計している。また、回帰分析を行った例としては、Zhang and Brown (2005)⁴⁾の中で、生活用水に影響を与えると思われる変数(水使用回数や世帯属性

など)を説明変数として回帰分析を行った例などもある。

また、使途別水使用量については、実地調査を報告しているものがほとんどであり、使途別水使用量を推計している研究は少ない。調査結果についても国全体の結果ではなく、特定の都市や地域を対象としたもので、単年の調査がほとんどである。アジアを対象に行われた調査を表2-5-1に示した。表2-5-1からも明らかなように、家庭用水について断片的な情報は得られるものの、国全体の水使用量の傾向を把握するのは困難である。

以上のように、家庭における水使用量に関する研究や調査についてまとめると、水使用量総量については、社会、経済変数を利用して推計する手法が提案されているが、家庭での使途別水使用量については、地域、年ともに非常に限られた調査結果が報告されているのみであり、包括的に研究、調査が進んでいる状況ではない。そこで、本研究では、様々な統計から得られる情報を中心に、各国の使途別水使用量を把握する方法を提案し、2005年を基準年とした使途別水使用量の把握と、2050年までの使途別水需要量の変化を推計した。さらに、収集可能なデータを使用し、世帯構造や機器普及率を考慮した詳細な推計を可能にすることで、調査データが少ない発展途上国でも適応できるツールを開発した。また、本ツールをアジア各国に適用し、2050年までの水使用量を推計した。

2.5.2 基準年の使途別水使用量推計

本研究では、次の二つの推計を行った。はじめに、1) 世帯人数や機器普及率と使途別水使用量の関係を定義して、基準年(2005年)の使途別水使用量を推計した。次に、2) 世帯人数や機器普及率の変化を考慮した2050年までの使途別水使用量の推計を行った。

まず1)の基準年における水使用量の推計では、使途別水使用量に関係する様々な変数(都市部と農村部における水道の普及率、下水道の整備率等のインフラの導入状況の違い、世帯人数の違い)を考慮した積み上げ計算により使途別水使用量を推計した。本推計で用いた使途別水使用量を決定する変数間の関係を図2-5-1に示す。家庭の水使用量は生活スタイルや水利用に関わる機器の導入状況などで大きく異なる。そこで、家庭で使用さ

表 2-5-1 アジアにおける家庭の水使用量に関する調査報告

国	都市・地域	内容	年	文献
日本	東京	使途別水使用割合	2006, 2004	東京都水道局 ⁵⁾
中国	北京	使途別水使用量	2003	Lu ⁶⁾
	北京, Hebei, Shengzhen	使途別水使用量	調査年不明	Lu ⁶⁾
	Harbin	使途別水使用量	推計年不明	Lu ⁶⁾
韓国	全国	使途別水使用量	2006, 2007	韓国環境部 ⁷⁾
インド	Jaipur city	使途別水使用量	調査年不明	Jethoo and Poonia ⁸⁾
スリランカ	全国	使途別水使用量		Lanka Rainwater Harvesting Form ⁹⁾
シンガポール	全国	総水使用量	1995-2004	Tortajada ¹⁰⁾
バングラデシュ	農村部	使途別水使用量	調査年不明	Milton et al. ¹¹⁾
カンボジア		総水使用量	1998, 2002	WEPA, homepage ¹²⁾
インドネシア	ジャカルタ	総水使用量	1991	Crane ¹³⁾
フィリピン	全国	使途別水使用量	調査年様々	Inocencio ¹⁴⁾
タイ	全国	総水使用量	1995-2000	ADB ¹⁵⁾
	バンコク	使途別水使用量	1996	Otaki et al. ¹⁶⁾

れる水の使途として、トイレ、風呂、食器洗い、洗濯、飲食、その他の6つを想定した。水の使途の定義を表2-5-2に示した。これらの使途のうち、飲食用とその他の水需要は社会・経済変数から推計することが困難であるため、外生的にシナリオで使途別水使用量を決め、他の4つの使途については、使途別水使用量に関係する変数から推計した。以後、推計方法について説明する。

2.5.2.1 トイレにおける水使用量

トイレの使用における水使用量は、大きく2種類がある。1つは、a) トイレ施設そのものを清掃するための水使用量と、もう1つは、b) 体の洗浄を目的とした水使用量である。a) のケースでは、日本などの先進国で利用されている水洗トイレでトイレの洗浄に用いる場合と、水汲み場から柄杓を利用して洗浄する場合、また、もともと水の流れているところにトイレを設置する場合などがある。今回の推計では家庭での水使用量なので、もともと水の流れているところにトイレを設置するケースの水使用量は計上しないものとする。水洗トイレのトイレ洗浄用の水使用量は10L/回¹¹⁾、体の洗浄用の水使用量は1L/回¹⁷⁾とする。トイレ洗浄用の水使用量は地域

によって異なると思われるが、現時点では十分な情報がないため、全地域で同じ値を用いた。

また、b) のケースでは、最新のトイレのようにウォシュレット機能が付いているものや、体洗浄用の水道が併設されているケースなど様々あるが、全てのケースを含むものとする。

これらの情報を整備するには、種類別のトイレ普及率データが必要となるが、整備されたデータは非常に少ない。そこで各国の調査等から表2-5-3のように設定した。

また、トイレの使用回数は、1日7回²⁰⁾とするが、そのうち家庭でのトイレの使用回数は在宅時間によるものとし、学生と勤労者については1日3.5回、その他は6.3回とした。

2.5.2.2 風呂における水使用量

風呂での水使用量には、シャワーによるものと、風呂使用によるものがある。特にアジアの地域では風呂を使用する文化は日本以外には見られないため、日本以外はシャワー使用のみを考慮した。シャワーの使用も地域によって異なる。日本でのシャワーの使用は、風呂の代替であり、比較的時間をかけて使用しているが、アジアの暑い地域では、汗を流すために1回の使用時間は短いが生に何度も使用している。そこで、各地域のシャワー回数と水の使用量を表2-5-4のように設定した。途上国

11 日本衛生設備機器工業会³⁵⁾の現在使用トイレの洗浄水量に関する調査結果から、現在使用されているトイレの平均的な洗浄水量を10Lと設定した。

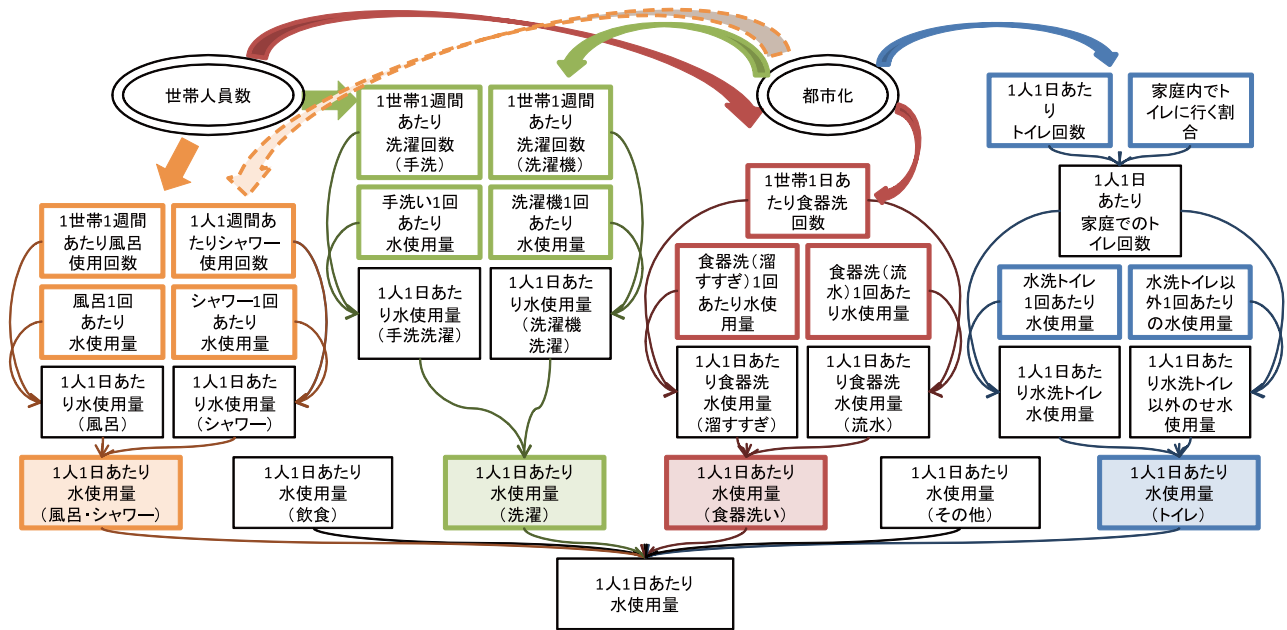


図 2-5-1 モデル構造

におけるシャワー回数について根拠となるような文献はなかった。しかし、気候や習慣等により国により違いがあることが予想されるため、本研究では次のように設定した。中国では夏は1日に1回、春と秋は、週5回程度、冬は週3回²⁰⁾と設定し、その結果年平均5回/週とした。一方、インドでは、上水道の普及レベルを考慮しても明らかに中国より少ないことが予想されるので、中国の冬程度のレベルが年間続くものとした。ベトナムは、非常に暑いため、頻繁にシャワー浴びるものとし、一番暑い3カ月のみ1日2回シャワーを利用し、他の季節は1日1回シャワーを浴びるものとした。

2.5.2.3 食器洗いにおける水使用量

食事の回数は1日3回とし、そのうち家の中で食べる割合(内食率)を考慮して食器洗い回数を設定した。さらに、洗い方についても流水すすぎか溜すすぎかを考慮した。流水すすぎの水量は45L/回(日本・韓国)、36L/回(それ以外の国)、溜すすぎの水量は20L/回とした。先進国については、日本電機工業会の基準を参考に¹²⁾、1回あたり45Lとした。途上国では、流水すすぎ

12 日本電機工業会の基準では食器を手洗した時の使用水量として、1日2回の食器洗いについて、食器53点・小物24点を10Lのお湯でつけ置き洗った後、毎分6Lで食器1点あたり13.5秒、小物1点あたり5.5秒流し湯ですすぐものとしている。1回あたり5Lのつけ置き洗いが非現実的なため半分の2.5Lとした場合、水使用量が89.75Lとなるため、1回あたり水使用量を45Lとした。

表 2-5-2 水の使途の定義

使途	特徴
トイレ	トイレの使用に伴う水の消費量。水洗トイレそのものの洗浄とウォシュレット等の体の洗浄が目的の水使用量を含む。
風呂	風呂やシャワーによる体の洗浄のために使用される水使用量。
飲食用	単純な飲料用の水消費量と食事の準備に伴う水消費量(食材の洗浄や調理に使用する水使用量)。
食器洗	食後の食器の洗浄に要する水消費量。
洗濯	衣類の洗浄に要する水消費量。
その他	洗顔や庭への散水・洗車など上記に含まれない水使用量。

でも先進国よりは水使用量が少なく、先進国の80%の36Lとした。溜めすすぎに関する情報は少ないが、大瀧²⁵⁾から1人1日15L程度使用することなので、4人家族、1日3回の食事という設定で1世帯あたり1回の溜めすすぎ水使用量を20L/回とした。また、流水すすぎを行なっている割合は、日本で100%、韓国で60%、その他は20%とした。この割合に関する情報は文献で得られなかったため、本研究では筆者が適宜設定した。内食率はEuromonitor International¹⁸⁾の消費支出金額データから計算した。

2.5.2.4 洗濯における水使用量

洗濯の方法としては、洗濯機の利用と手洗いの2種類がある。洗濯機の普及率は表2-5-5に示した通りであるが、アジアの途上国では普及率が高くても洗濯機を使用しない、もしくは洗濯機と手洗いの併用をしている世帯が多いことが明らかになっており^{25, 26)}、洗濯機利用率

表 2-5-3 トイレの普及率データ

[単位:%]	日本	中国	インド	ベトナム	韓国
水洗トイレ普及率 ^{*1}	90	-	35.1	36.2	94
設定					
都市部水洗トイレ普及率	100	65 ^{*2}	35.4 ^{*3}	75 ^{*4}	90 ^{*5}
農村部水洗トイレ普及率	90	40 ^{*2}	17.9 ^{*3}	22 ^{*4}	75 ^{*5}

*1: Euromonitor International¹⁸⁾*2: Census 2000¹⁹⁾やEuromonitor International¹⁸⁾、インド、ベトナムの普及率などから仮定*3: Government of India²⁰⁾*4: General statistics office, Vietnam²¹⁾

*5: 韓国の水洗トイレの普及率は、統計によりかなり差が見られるため、日本よりは若干低めであると設定した。

表 2-5-4 風呂・シャワー回数と水の使用量

	日本	中国	インド	ベトナム	韓国
一週間の風呂の回数 [回/週]	3.5375 ^{*1}	0	0	0	0
一週間のシャワーの回数 [回/週]	3.4625 ^{*1}	5	3	8.75	7
風呂の水使用量 [L/回]	200	-	-	-	-
シャワーの水使用量 [L/回]	60	30	30	30	60

*1: 横須賀市上下水道局²³⁾

は表 2-5-5 のように、先進国では普及率と使用率が同じものとしたが、途上国では普及率の約 1/3 の使用率¹³であると設定した。洗濯機には大きく一層式と二層式のものがあるが、種類別データは入手できなかったため、一層式が普及していると仮定している。また洗濯機の性能は基準年においては、全て 110L/回¹⁴とした。

2.5.2.5 飲食・その他における水使用量

飲食、その他については、基準年において参考となるようなデータがある場合はその値を、そうでない場合は、適宜データを設定した。設定した値については、表 2-5-6 に示した通りである。

2.5.2.6 2005 年の用途別水使用量

各国の推計結果を表 2-5-7 から表 2-5-11 に示した。日本は、風呂、トイレ、食器洗い、洗濯の順に水が使用され、1人1日あたり 228L 使用していると推計された。

13 花王²⁶⁾から、中国都市部においては、洗濯機の普及率が 97%であるにもかかわらず、洗濯機の使用頻度が平均週 2 回程度、手洗いの頻度は 4.4 回程度であることから、本研究では途上国では、洗濯機の普及率に対し使用頻度が約 1/3 であると設定した。

14 洗濯機の種類のよっても水使用量は大きく異なるので、厳密な設定は非常に困難であるが、生活知恵袋ホームページ³⁰⁾に 2005 年に調査された水槽式とドラム式洗濯機の 1 回あたり平均水使用量を参考に設定した。海外に普及している製品についての情報は得られなかったため、日本と同じ値としている。

東京都の 2006 年の調査結果 (表 2-5-7) と比較すると、総量、用途別水使用量ともに概ね同様の傾向を示しており、全体的に良好な推計結果が得られた。

中国では、2005 年における 1 人 1 日水使用量が約 98L と推計された。この結果は、中国全体の報告値より 20%程度大きく、また北京等の都市部における水使用量の 30-40%程度小さい値となった。中国では、人々の生活レベルの格差が激しく、水の使用に関しても、インフラの整備状況、生活レベルが都市部と農村部では大きく異なっている。しかし、近年の急速な発展に伴い都市部のみならず農村部でもインフラの整備が進んできたことを考慮すると、IBNET²⁾の 77L/day/人は若干少ないのではないと思われる。経済成長に伴う水使用機器の普及率の増加や、人々の清潔への関心の増大に伴い水使用量は増加していると考えられ、都市部ではかなり水を使用しているとの報告²⁷⁾もあるが、それでも中国における 1 人 1 日あたり平均水使用量は日本の 40%程度であることがわかった。また、用途別結果を北京と河北の調査結果とすると、飲食や食器洗の項目については、絶対量が大きく違わないが、トイレや洗濯といった機器により水使用量が大きく異なる用途については、国全体は都市部と比較してかなり小さいことがわかった。

韓国の結果を見ると、水使用量総量は 179L/day/人と推計され、報告値^{7, 28, 29)}と比較して妥当な値となったが、用途別の結果については調査結果と若干の乖離が

表 2-5-5 洗濯機普及率

	日本	中国	インド	ベトナム	韓国
報告書数値 ^{*1}	99	63	16	8	98
推計使用値	99	21	5	3	98

*1: Euromonitor International¹⁸⁾

表 2-5-6 飲食・その他における水使用量データ

	日本	中国	インド	ベトナム	韓国
飲食	27.3 ^{*1}	15 ^{*2}	10 ^{*3}	15 ^{*2}	15 ^{*2}
その他	19.8 ^{*1}	2 ^{*5}	2 ^{*5}	2 ^{*5}	11.4 ^{*4}

*1: Nakagawa, N. et al¹⁷⁾

*2: 日本では、調理の際に食材の洗浄や調理方法として水を必要とするものが多いが、これらの国では、調理に必要な水の量は半分であると設定。

*3: インドでは、*2の国よりもさらに調理に必要な水の量が少ないものとした。

*4: 韓国環境部⁷⁾

*5: 情報がなかったため、日本で歯磨きや洗顔のために使用される分の水量のみ計上した。

表 2-5-7 日本の水使用量推計結果

[単位: L/day]	推計結果		東京都 [*]	
トイレ	45	20%	70.0	28%
風呂	69	30%	60.0	24%
飲食用	27	12%	57.5	23%
食器洗	34	15%		
洗濯	31	14%	40.0	16%
その他	20	9%	22.5	9%
合計	228	100%	250.0	100%

*東京都水道局⁵⁾

表 2-5-8 中国の水使用量推計結果

[単位: L/day]	推計結果		中国 ^{*1}		北京 ^{*2}		河北 ^{*2}	
トイレ	24	24%	44.0	29%	44.2	32%		
風呂	21	22%	40.1	27%	37.5	32%		
飲食用	15	15%	48.0	32%	27.9	20%		
食器洗い	18	19%						
洗濯	18	18%	18.0	12%	17.5	13%		
その他	2	2%	-	-	10.4	8%		
合計	98	100%	77	150	100%	138	100%	

*1 IBNET²⁾*2 Zhang, H.²⁷⁾

表 2-5-9 韓国の水使用量推計結果

[単位: L/day]	推計結果		韓国 ^{*1}		韓国 ^{*2}		韓国 ^{*3}	
トイレ	39	22%	43.4	24%				
風呂	60	34%	58.2	33%				
飲食用	15	8%	29.6	17%				
食器洗	26	14%						
洗濯	27	15%	35.4	20%				
その他	11	6%	11.4	6%				
合計	179	100%	144-161	186	178	100%		

*1 Kim, J. et al.²⁸⁾*2 Grafton, R. Q. et al.²⁹⁾*3 韓国環境部⁷⁾

表 2-5-10 インドの水使用量推計結果

[単位: L/day]	推計結果	
トイレ	14	23%
風呂	13	22%
飲食用	10	17%
食器洗	12	21%
洗濯	8	14%
その他	2	3%
合計	59	100%

表 2-5-11 ベトナムの水使用量推計結果

[単位: L/day]	推計結果		ベトナム [*]
トイレ	16	18%	
風呂	38	42%	
飲食用	15	17%	
食器洗い	13	15%	
洗濯	6	7%	
その他	2	2%	
合計	89	100%	93

* IBNET²⁾

見られた。特に、飲食と食器洗いに使用される水使用量に関してのかい離が激しい。この点については今後も精査が必要だが、韓国の生活レベルを考慮した上で、中国や日本の調査結果と比較してみると、韓国の調査結果が若干小さいと思われる。

インドやベトナム等の途上国では、推計結果を比較する調査結果が少なく、現状では結果の妥当性を十分に評価できない。しかし、ベトナムについては、使用総量の推計結果は報告値と比べて約4L/day/人少ないだけの結果となり、妥当な推計結果が得られた(表2-5-11)。今後、現地調査や統計データの整備が進み、用途別水使用量の状況が適切に把握されることを期待したい。

2.5.3 将来の用途別水使用量推計

2.5.3.1 2050年までのシナリオ

将来の用途別水使用量は、大まかには地域の発展に伴うインフラの整備(水道アクセス率の向上等)による水使用量の増加と、機器の改善に伴う水使用量の減少が同時に起きることが考えられる。本研究では、これらの二つの大きな変化に加え、世帯人員数の変化と都市化率の変化という二つの社会変化を考慮した将来推計を行った。

世帯人員数については、過去30年程度の推移を考慮して減少するものとし、図2-5-2に示すシナリオを設定した。また都市化率についてはUN³⁰⁾を使用した(図2-5-3)。各国機器普及率等のシナリオ設定を表2-5-12にまとめた。先進国では洗濯機やトイレについて節水機器が導入されるものとした。2050年において導入、普及する節水機器は、日本が最も進んでいるものとし、洗濯機は1回の水使用量が65L、トイレは1回の水使用量が4Lのものが普及するものとした。2011年現在で、洗濯機については水使用量が72L/回³¹⁾、トイレでは4.8L/回³²⁾の節水機器が販売されており、将来普及する機器効率は、現在の最新式の機器が2040年(現在の30年後)に平均的に普及し、機器効率の変化が指数関数で表現されるものと仮定した場合に、2050年に普及する平均的な機器効率として設定した。また、途上国ではインフラの整備に伴い、機器等が普及するものとしている。風呂・シャワーの使用回数は、日本とインドについてシャワーの回数が増えるものと設定した。日本に関しては、横須賀市水道局³³⁾から一週間当たりの風呂の利用回数が減っており、これまでの傾向を踏まえて、5年で

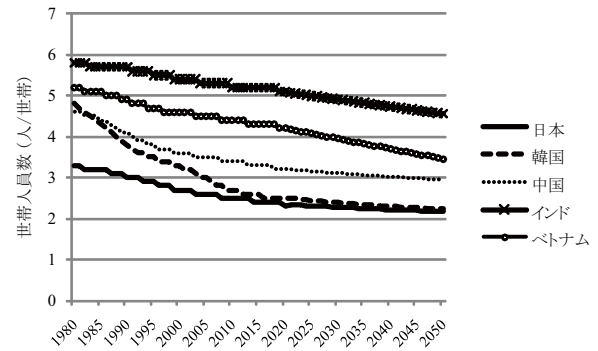


図2-5-2 世帯人員数の設定

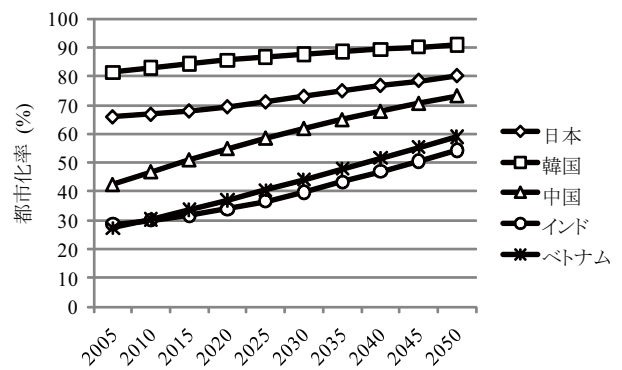


図2-5-3 都市化率の設定

0.05回/週ずつ減るものとした。その減少分が、シャワーの利用回数の増加になるものとした。インドについては、上下水道の整備に伴い今まで以上にシャワーを浴びる文化になるものと想定し、2020年までは5年ごとに0.075回/週ずつ増えるものとし、それ以降は、3倍の0.225回/週増えるものとした¹⁵⁾。流水すすぎ率は途上国について5年ごとに一律2%ずつ増加するものとした。

2.5.3.2 2050年の用途別水使用量推計結果と考察

2050年までの用途別水使用量の推計結果を図2-5-4から図2-5-8に示す。日本や韓国では節水機器の導入が進むことにより、1人あたり水使用量は減少すると推計された。一方、中国・インド・ベトナムでは、インフラの整備や水使用機器の普及により水使用量が増加することが推計された。

日本では2050年にかけて1人あたり水使用量が減少し続ける一方、韓国では一度増加し、その後減少に転じる結果となった。日本と韓国で使用量の推移の違いがあるのは、韓国の方が水洗トイレの普及率が若干低いた

15 2020年までは一年で最も暑い3カ月間にシャワーの回数が増えるものとし、2025年以降は、暑い9カ間でシャワーの回数が増えるものと想定した。

表 2-5-12 その他のシナリオ設定 (図中 2005 年→2050 年)

		日本	中国	インド	ベトナム	韓国
風呂	風呂回数[回/週]	3.54→3.09	-	-	-	-
	シャワー回数[回/週]	3.46→3.91	-	3→4.6	-	-
	シャワー水使用量[L/回]	60→51	-	-	-	-
洗濯	洗濯機水使用量[L/回]	110→65	110→80	110→90	110→90	110→65
	洗濯機普及率[%]	-	20→100	5→41	3→48	-
トイレ	トイレ水使用量[L/回]	10→4	-	-	-	10→5.5
	トイレ普及率[%]	-	55→100(都市部) 20→65(農村部)	35→80(都市部) 18→55(農村部)	30→66	90→100(都市部) 75→100(農村部)
食器洗	流水すすぎ水使用量[L/回]	45→27	-	-	-	-
	流水すすぎ利用率[%]	-	20→38	20→38	20→38	-
	内食率	-	93→75	95→86	85→76	73→64

め、その普及率の増加があるためである。

中国、インド、ベトナムでは、いずれも水洗トイレの普及により、大幅な水使用量の増加が推計された。

表 2-5-13 に将来推計結果のまとめを示す。インドやベトナムでは 1 人 1 日あたり水使用量の増大に加え、人口増加も進み、国全体としての水使用量がそれぞれ 2.27 倍、1.62 倍になることが推計され、激しく増加することが明らかになった。中国では 1 人あたり水使用量は増加するものの、2050 年時点では、人口増加のピークを越え減少し始めているため、国全体としては現在より 28 % 程度の水使用量増加に留まると推計された。また、日本では、節水機器の導入により 1 人あたり水使用量が減少する可能性を示したが、さらに、人口減少の効果も考慮すると国全体としては、2005 年時点の 7 割程度の水使用量となることが示唆された。アジアでは、発展途上の国が多く、今回推計対象とした中国、インド、ベトナム以外にも、人口の増加、経済の成長に伴う水使用量の増加が予想される国が多くある。家庭生活において、水が十分に使えることが健康で快適な生活への鍵の一つであり、急激な水需要の増加に見合う供給ができるかどうか、アジア地域の成長のポイントとなるだろう。

2.5.4 結論

本節では、都市化率と世帯規模を考慮したボトムアップ型の家庭における用途別水使用量を推計する手法について説明し、アジア地域に適用した結果を示した。2005 年の用途別水使用量については、他調査結果と比較しておおむね良好な推計結果を得ることができたとともに、日本、中国、インド、ベトナム、韓国の 1 人 1 日あたり水使用量がそれぞれ 228、98、59、89、179L であることが分かった。また、都市化の進展と世帯人員数の変化、水使用機器普及率の変化を考慮した 2050 年までの

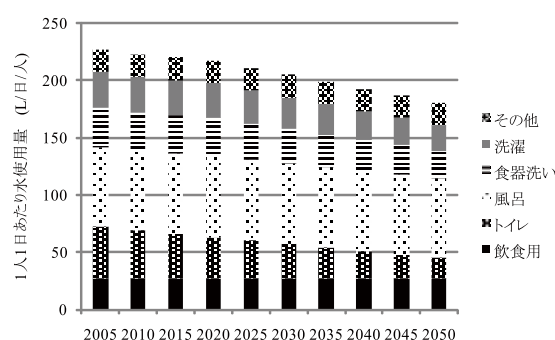


図 2-5-4 日本の用途別水使用量推計結果

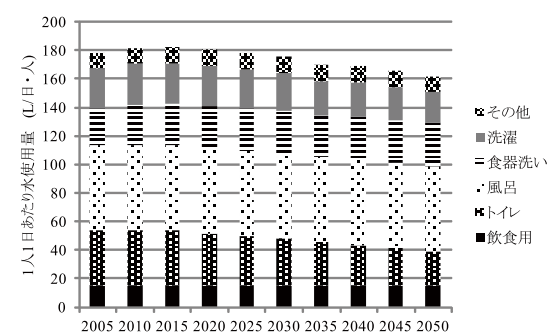


図 2-5-5 韓国の用途別水使用量推計結果

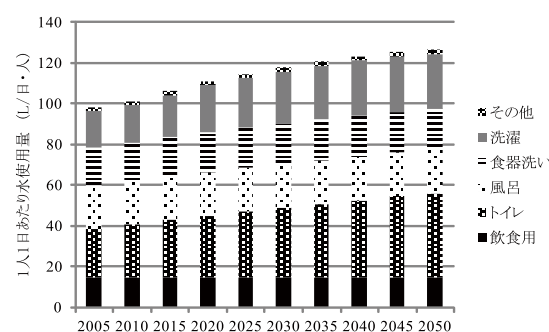


図 2-5-6 中国の用途別水使用量推計結果

水使用量推計の結果、途上国では 1 人 1 日あたり水使用量が増加し、2005 年と比較して 30 % から 50 % 程度の増加が予想された。また、人口増加による影響も考慮するとインドでは 2005 年と比較して約 130 % の水使用量の増加が予想された。一方、先進国である日本や韓国

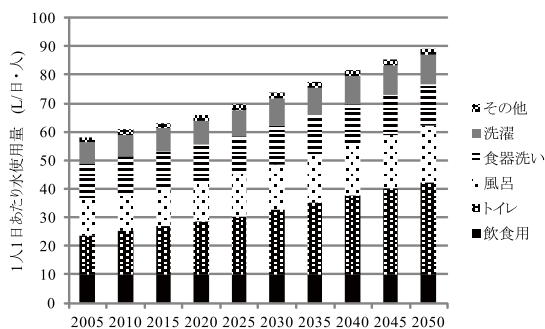


図 2-5-7 インドの用途別水使用量推計結果

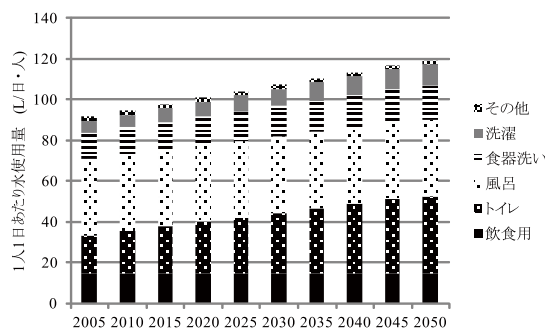


図 2-5-8 ベトナムの用途別水使用量推計結果

表 2-5-13 水使用量推計結果まとめ

	日本	中国	インド	ベトナム	韓国
2005年1人1日あたり水使用量 [L]	228	98	58	92	179
2050年1人1日あたり水使用量 [L]	181	127	89	119	162
2005年→2050年					
1人1日あたり水使用量増加率	79%	130%	153%	129%	91%
人口増加率 ³⁴⁾	86%	99%	148%	125%	100%
全国の水使用量増加率	68%	128%	228%	162%	91%

では節水機器の導入も進み、1人あたり水使用量は減少することが予想された。特に日本では人口減少も進むため、国全体として2005年と比較して70%程度の水使用となることが推計された。

本手法を世界各国に発展させることにより、2.4節で説明した水使用量推計手法の妥当性を裏付けることも可能となる。また、全球水資源モデルとリンクすることで、より社会経済状況や節水行動も考慮した動的な家庭用水の将来推計が可能になることが期待される。

*本節は、本研究プロジェクトの成果である研究論文

「家庭における用途別水使用量推計手法の開発とアジア各国への適用」(環境科学会誌 掲載予定)に基づいた内容である。環境科学会誌編集委員会の了承を得た上で、論文中の一部の結果を抜粋して使用している。

参 考 文 献

- 1) 国土交通省：平成23年版 日本の水資源, http://www.mlit.go.jp/tochimizushigen/mizsei/tochimizushigen_mizsei_tk2_000002.html, (参照 2011-10-5).
- 2) The International Benchmarking Network for Water and Sanitation Utilities (IBNET): <http://www.ib-net.org/>

- 3) Alcamo, J., Döll P., Henrichs T., Kaspar F., Lehner B., Rösch T., and Siebert S. (2003) Development and testing of the WaterGAP 2 global model of water use and availability, *Hydrological sciences journal*, Vol. 48, No. 3, 317-337.
- 4) Zhang, H. H. and Brown D. F. (2005) Understanding urban residential water use in Beijing and Tianjin, China, *Habitat International*, Vol. 29, 469-491.
- 5) 東京都水道局：http://www.waterworks.metro.tokyo.jp/customer/life/g_jouzu.html.
- 6) Lu, T. (2007) Research of domestic water consumption: a field study in Harbin, China, Master thesis of Science of Loughborough University.
- 7) 韓国環境部 (2010) 節水型機器補給拡大方案研究.
- 8) Jethoo, A. S. and Poonia M.P. (2011) Water Consumption Pattern of Jaipur City (India), *International Journal of Environmental Science and Development*, Vol. 2, No. 2, 152-155.
- 9) Lanka Rainwater Harvesting Form: Household water security in Sri Lanka Using Domestic Roof Water Harvesting, ERB IC18-CT98-0276.
- 10) Tortajada, C. (2006) Water management in Singapore, *Water resources development*, Vol. 22, No. 2,

- 227-240.
- 11) Milton, A. H., Rahman H., Smith W., Shrestha R., and Dear K. (2006) Water consumption patterns in rural Bangladesh: are we understanding total arsenic load?, *Journal of water and health*, Vol. 4, No. 4, 431-436.
 - 12) Water Environment Partnership Asia (WEPA) <http://www.wepa-db.net/policies/state/cambodia/drinking.htm>
 - 13) Crane, R. (1994) Water markets, market reform and the urban poor: Results from Jakarta, Indonesia, *World development*, Vol. 22, No. 1, 71-83.
 - 14) Inocencio, A. B., Padilla J. E. and Javier E. P. (1999) Determination of basic household water requirements, *The PIDS discussion paper series*, 99-02.
 - 15) ADB (1999) *Handbook for the economic analysis of water supply projects*, ADB.
 - 16) Otaki, Y., Otaki M., Pengchai P., Ohta Y. and Aramaki T. (2008) Micro-components survey of residential indoor water consumption in Chiang Mai, *Drinking Water Engineering and Science*, Vol. 1, 17-25.
 - 17) Nakagawa, N., Otaki M., Aramaki T. and Kawamura A. (2009) Influence of water-related appliances on projected domestic water use in Tokyo, *Hydrological Research Letters*, Vol. 3, 22-26.
 - 18) Euromonitor International: *Global Market Information Database*, <http://www.portal.euromonitor.com/portal/>, (Accessed 2010-9-1).
 - 19) National Bureau of Statistics of China (2003) *China 2000 population census*.
 - 20) Government of India: *Housing condition and amenities in India 2008-09 NSS65th Round*, National sample survey office (2010) Report No.535.
 - 21) General statistics office (2008) *Vietnam: Result of the survey on household living standards 2008*, statistical publishing house.
 - 22) 省エネ・防犯住宅推進委員会：省エネ・防犯住宅推進アプローチブック (2006)。
 - 23) 横須賀市上下水道局：平成 17 年度 水使用についてのアンケート結果報告, <http://www.water.yokosuka.kanagawa.jp/enq/jouge/2005/index.html>, (参照 2011-10-5)。
 - 24) Xing, R. and Ikaga T. (2011) A Forecast of Effective Global Warming Countermeasures for the Residential Sector in China for the year 2050, *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 221-225.
 - 25) 大瀧雅寛：タイ王国における水利用事情, <http://www.eng.ocha.ac.jp/enveng/pdf/v9n1.pdf>.
 - 26) 花王ホームページ：中国洗濯実態調査 第一報（都市部 600 世帯）～洗濯の水使用量を試算～ http://www.kao.com/jp/corp_news/2010/20100730_001.html, (参照 2011-10-5)。
 - 27) Zhang, H.: *Nine Dragons, One River: The Role of Institutions in Developing Water Pricing Policy in Beijing, PRC*. <http://www.chs.ubc.ca/china/>.
 - 28) Kim, J., Lee D. and Jung N. (2006) Analysis of household water demand patterns by meters recording, *American society of civil engineers, Water distribution systems analysis symposium 2006*, 1-8.
 - 29) Grafton, R. Q.: *Determinants of residential water demand in OECD countries*, <http://www.oecd.org/dataoecd/41/62/43181240.pdf>.
 - 30) United Nations (UN) (2009) *World Urbanization Prospects 2009*, United Nations.
 - 31) Panasonic: <http://ctlg.panasonic.jp/product/info.do?pg=04&hb=NA-VT8000L>, (参照 2011-10-5)。
 - 32) TOTO: <http://www.toto.co.jp/products/toilet/neorest/index.htm>, (参照 2011-10-5)。
 - 33) 横須賀市水道局：平成 20 年度 水使用についてのアンケート調査結果報告, <http://www.water.yokosuka.kanagawa.jp/enq/jouge/2008/index.html>, (参照 2011-10-5)。
 - 34) United Nations (UN) (2010) *World Population Prospects 2010*, United Nations.
 - 35) 日本衛生設備機器工業会：節水便器の普及に向けた生活者意識調査, <http://www.sanitary-net.com/trend/research.html>, (参照 2011-10-5)。
 - 36) 生活知恵袋ホームページ：洗濯機の水使用量, <http://www.seikatu-cb.com/kiwami/siyous01.html>, (参照 2011-10-5)。

2.6 工業用水需要推計モデルの開発とシナリオ分析

2.6.1 研究背景

これまで世界を対象とした多くの水資源評価分析が行われてきた (Oki et al. (2003)¹⁾; Alcamo et al. (2007)²⁾; Hanasaki et al. (2008)³⁾; Shen et al. (2008)⁴⁾)。こうした水資源評価の研究では、基本的に今世紀中に人口増加、所得増大により水需要が増加し、水資源逼迫の可能性があるとされている。さらに、気候変化も加わり、地域によっては水資源が非常に限られる可能性も指摘されている。

水の需要源は大別して、農業、産業、家庭に分けられるが、それらは1995年付近でそれぞれ約66%、21%、13%とされている⁵⁾。水資源評価を行う上で工業用水は一見重要そうでないように見えるが、今後の途上国を中心とした経済発展によってはその物理的な量、シェアが大きく伸びる可能性もある。Alcamo et al. (2007)²⁾とShen et al. (2008)⁴⁾は、社会経済シナリオとしてSRES⁶⁾を用いて、産業用水の将来シナリオを提示したが、それらは今後産業用水が大きく増加することを示していた。

ただし、これらの先行研究はいずれも産業用水を集約的に扱っている。Alcamo et al. (2007)²⁾は、電力消費量をドライビングフォースとして、水利用技術進歩(水消費強度)を1人当たりGDPで記述した式で推計を行った。Shen et al. (2008)⁴⁾は、電力消費をドライビングフォースとして、水利用技術進歩をタイムトレンドで記述した式で推計を行った。これらの既往研究のシナリオでは共通して以下の強い仮定を暗黙に置いている。すなわち、産業内構造変化による水消費強度の変化、各部門によって異なる技術進歩は集約的に扱われている産業全体の技術変化に内包するというものである。

上述の先行研究が上述のような手法を取ったのには理由が2点あると考えられる。第1に、世界全域をカバーした現状を記述する水統計はAQUASTAT⁷⁾がほぼ唯一の統計であるが、そこには部門別の情報が収録されていないことである。第2に電力、産業別の工業生産等の水需要のドライビングフォースとなる指標の将来シナリオが得られなかったということである。

本研究では上述の問題点を克服して産業用水(取水)に関する将来シナリオの新しい推計を提案する。そのた

めに、本研究では主として3つの工程を行った。まず1) 国別・部門別の水消費統計を集め回帰分析にかけることで、過去に経験した技術変化を部門別で推計する。そして、2) その回帰式で得られた結果を基に、現状の部門別の産業用水を推計する。最後に、3) ドライビングフォースとなる産業別生産、電力生産量の将来シナリオと将来の水利用技術に関する想定を行って産業用水の将来推計を行う。ここで、ドライビングフォースはIAM(Integrated Assessment Model)の一つであるAIM/CGEモデル⁸⁾から得る。

現状に関する情報が不足している点を補おうとした取組としてはVassolo et al. (2005)⁹⁾がある。Vassolo et al. (2005)⁹⁾は、工業生産の物理量当たりの水消費量を先進国から得て、それらを使って産業別の推計を試みた。ただし、Vassolo et al. (2005)⁹⁾では現状の産業部門の分割を行ったが、過去の技術変化に関する解析は行われなかった。また当時の試みでは使えた情報が非常に限られていたが、現在EUROSTAT¹⁰⁾をはじめとして、少しずつ産業用水に関する情報が増えており、それらをシステムティックに用いれば、より現状を表すのにもっともらしい推計ができる可能性がある。

一方、将来のドライビングフォースとして前提となる社会経済シナリオであるが、現在SRES⁶⁾の次の社会経済シナリオとしてSSPs(Shared Socioeconomic Pathway)(Moss et al. (2010)¹¹⁾, O'Neill et al. (2011)¹²⁾など)が作成されている。このSSPsをベースにした研究はまだ数少ないが、Jiyong et al. (2012)¹³⁾がある。今回はこのSSPsをベースとする社会経済シナリオをAIM/CGEモデルに入力して、水需要のドライビングフォースとなる産業別の生産量を準備した。

次節では、本研究が採用した手法の全体像について述べる。2.6.3節では過去の水消費の解析手法について述べる。2.6.4節では推計された現状の産業用水について示す。2.6.5節では将来シナリオの推計で用いるドライビングフォースと水技術の想定について述べる、2.6.6節では将来シナリオの結果について解析し、2.6.7節で本研究をまとめる。

2.6.2 分析方法

まず、本研究の全体像を述べる。将来の産業用水シナリオを作成することが最終的な目的である。この時に部門別、地域別の推計を試みる。そのためには3種類の情報が必要となる。すなわち、第1に産業用水のドライビングフォース、第2に将来の技術見通し、第3に現状の部門別、地域別の水取水量（もしくは水消費強度）である。1つ目の情報は、部門別の実質付加価値額及び火力・原子力・バイオマス発電量を用いる。これらのドライビングフォースはSSPsを社会経済シナリオとして用いたAIM/CGEモデルの出力を使用する。

2つ目の将来の水技術の見通しは、過去の水技術の進歩を計測し、それを基にシナリオとして設定する。このために国別、部門別の取水に関する統計を集め、回帰分析を行った。

3つ目の現状の部門別取水量は前述の回帰分析より推計する。この回帰分析では世界の標準的な水消費強度や水技術の改善に関する情報が得られる。推定結果を基に統計情報がない地域等を補完した。本推計の手順を図2-6-1に示す。

本研究で使う2つのツールAIM/CGEと回帰分析について簡単に説明する。AIM/CGEモデルは、世界を

12地域、38部門に分割した逐次動学型の応用一般均衡モデルである。2005年を基準年として2100年まで1年ステップで計算がなされる。エネルギー需給の記述をより詳細にするために、発電は11部門にわかれている。各産業部門はCES関数のネスト構造で表されている。貿易は各財について一つの世界市場を仮定している。モデル詳細についてはFujimori et al. (2012)⁸⁾を参照されたい。

次に回帰分析であるが、ここでは各産業別で回帰分析を行う。各産業の水消費強度(生産指数あたりの取水量)を説明する式を想定する。水技術の時間的改善を表す項、各国の水技術差を調整する項、世界の標準的な水技術を表す項という3つの変数を回帰する。国際統計では部門別の情報が得られないので、国統計を基本として国横断的に分析を行う。ここでは部門別に加えて産業全体という区分についても推定を行う。これは次のステップで基準年の産業用水を作成する際に、コントロールトータルとするためである。

2.6.2.1 回帰分析

(回帰式とその考え方)

過去の技術進歩及び、各国別・部門別水取水量を計算

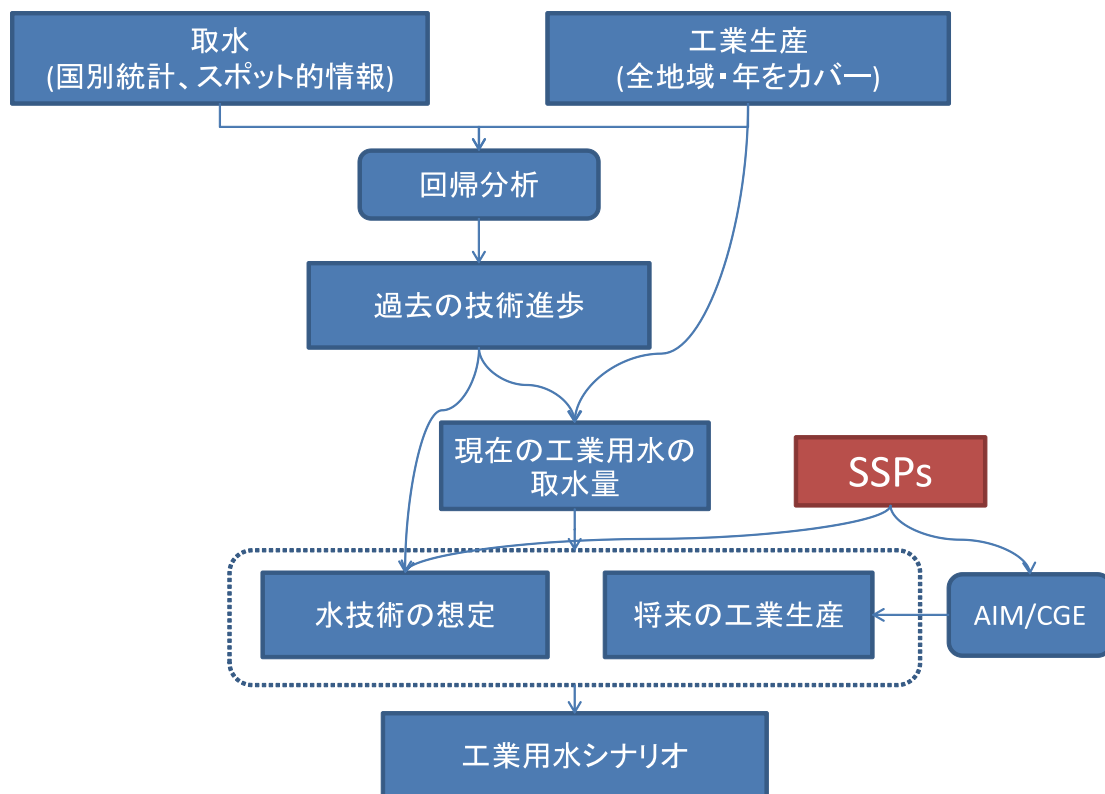


図2-6-1 分析手法の全体像

するために回帰分析を行う。基本的には水消費強度（ドライビングフォースあたりの水取水量）の推計を試みる。まずは我々が仮定した式を示し、そこから我々が置いた仮定について説明する。

$$WD_{r,j}^t = \gamma_{r,j}^t \cdot \overline{D_{r,j}^t}, \quad \forall r \in R, j \in J, t \in T \quad (1)$$

$$\ln \gamma_{r,j}^t = \alpha_j \bar{t} + \beta_{r,j} + C_j, \quad \forall r \in R, j \in J_d, t \in T \quad (2)$$

$$WD_{r,j}^t = \overline{WD_{r,j}^{0t}} + \varepsilon_{r,j}^t \quad (3)$$

$\overline{D_{r,j}^t}$: t年、部門j、地域rにおける活動量

$WD_{r,j}^t$: t年、部門j、地域rにおける取水量

$\overline{WD_{r,j}^{0t}}$: 水消費量（統計値）

$\gamma_{r,j}^t$: t年、部門j、地域rにおける水消費強度

α_j ; 部門jの水消費技術改善係数

$\beta_{r,j}$; 部門j、国rの水消費係数

C_j ; 部門jの水消費係数

$\varepsilon_{r,j}^t$; 誤差項

J : 部門集合

J_d : 詳細な部門の集合（産業全体を含まない）

J_i : 産業全体の集合

R : 地域の集合

T : 時間の集合

アッパーバーがついているのは、既知の外生変数であり、それ以外は内生変数である。

最初の式は、取水量がドライビングフォースと水消費強度をかけることで得られるという定義式である。ドライビングフォースは各部門の生産量を表す指標である。

2つ目の式は水消費強度を説明する式であり、この式が回帰分析される。第1項は技術進歩を表すもので、タイムトレンドで技術進歩を説明するとした。これは先に述べた Shen et al. (2008)⁴⁾ の考え方と同じである。第2項は各国別の技術水準を表すものである。この変数が機能するのは統計値が得られる国のみである。3つ目の項は世界の標準的な水消費強度を表す係数である。この式

の意味するところを説明する。

我々はまずある部門jについては全世界共通した標準的な水消費係数Cが存在すると仮定した。次に、時系列的に水消費に関する情報が得られる場合は、Cと異なる各国の技術水準をβで表現する。そして、技術進歩は全世界共通で年々同様に行われると仮定した。

3つ目の式は取水量の観測値とここでの推定値の誤差を表すものである。これらの式を詳細な部門別で適用することを試みる。

ただし、産業用水トータルは水の技術だけでなく、産業構造の変化も水消費強度に織り込まれることになるため、国によってその技術改善スピードが異なることが予想された。そのため産業用水全体に対しては(2)の代わりに以下の(2)'を適用する。

$$\ln \gamma_{r,j}^t = (\alpha_j + d_{r,j}) \bar{t} + \beta_{r,j} + C_j, \quad \forall r \in R, j \in J_i, t \in T \quad (2)'$$

$d_{r,j}$: 国別の産業構造変化に伴う水消費強度改善を表す変数

この式はタイムトレンド項に各国の産業構造変化を表すdという係数を用意することで各国別の産業構造変化を表現した。

(適用先と得られた統計値)

今回の分析では、表2-6-1に示すような部門単位で上述の回帰式を適用した。

次に、我々が収集した統計について述べる。表2-6-2は産業用水について情報を収録した統計である。統計によっては非常に限られた情報しか収録していない。例えば、AQUASTATは産業全体のみ、USGS (2004)¹⁴⁾は

表2-6-1 部門分類

産業全体
金属
化学
電力
食料加工
鉱業
非金属鉱物加工
紙パルプ
繊維
その他産業

発電部門のみ収録している。また、部門単位で限られているだけでなく、年単位でも限られている統計も多い。例えば、日本の工業統計¹⁵⁾は長期の時系列（1961年から2004年の各年）で統計が得られるが、イギリスの水統計である Environmental Accounts - Consumption of water resources by industrial sector¹⁶⁾では1年しか得られない。

次に、各産業の生産量を表す指数であるが、電力については物理的な火力・原子力の生産量^{17, 18)}、それ以外の部門については Fujimori et al. (2011)¹⁹⁾ で用いた実質価格付加価値額を用いた。これらの生産量指数のデータの利用可能性から実際に回帰式を適用した期間は1971-2005年である。

(データのスクリーニング)

実際に前述の回帰分析を適用しようとする際にデータを見たところ、回帰分析に不適切であると考えられる

データが存在した。そこで、本研究では以下の3つの基準を設けてデータのスクリーニングを行った。

- 1) ある国、部門の観測値のうち最も近い年もの同士を比べて年率換算の変化率を取り、この変化率が2倍以上もしくは半分以下である。
- 2) 産業全体については AQUASTAT と各国の統計を比較して、2倍以上の乖離が1年でも見られた場合、国統計の方を優先して採用し、AQUASTAT の情報を棄却した。ただし、実際には欠測などで AQUASTAT と各国統計を比較できた例は少なく、実際に棄却された国はオーストラリアだけだった。
- 3) 発電部門については発電量をドライビングフォースとして使うので、kWhあたりの水需要 m³ という物理量として比較可能である。アメリカの2000年の実情である 21,000gal/MWh (Freedman and Wolfe (2007)) から判断し、この値から10倍もしくは1/10離れているような値はかなり非現実的である

表 2-6-2 収集した統計とその概要

統計名	発行年	発行者	産業の部門数	収録年	収録国数
Environmental Accounts - Consumption of water resources by industrial sector	2009	Office for National Statistics (UK)	15	1997	1
Industrial Water Use ²⁰⁾	2010	Statistics Canada	18	2005-2007	1
Water account Australia ²¹⁾	2010, 2006	Australian Bureau of Statistics	15	2001, 2004, 2008	1
Report On the State of the Environment In China ²²⁾	2005-2010	Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China	43	2004-2007	1
Industrial statistics	2007	METI (Japan)	10	1950-2004	1
SI-STAT database ²³⁾	2011	Statistical Office of the Republic of Slovenia	8	1985-2005	1
Water statistics	2011	EUROSTAT	10	1998-2007	37
AQUASTAT	2011	FAO	1 (産業全体のみ)	1965-2010	85
Estimated Use of Water in the United States in 2000	2004	USGS (US)	1 (発電のみ)	1970年から10年おき	1

と考えられたので、除外した。

(結果)

回帰式の適用結果を示す。ここでは技術進歩係数に注目して結果を示す。表 2-6-3 は推定結果、t 値及びデータ数と修正済み決定係数を表している。データ数は国×年の数となる。産業全体以外は負値を取った。産業用水のシェアが最も多いと言われる電力では -0.03 となり年率約 3% の技術進歩が観測された。また、化学や鉱業などで高い技術進歩率が見られ、金属や紙パルプでは相対的に低かった。また係数 α の t 値を見ると十分に高い値をとり、t 値がゼロである産業全体を除きいずれの部門でも有意であった。自由度修正済み決定係数も比較的大きな値を取っており、推定式の再現性も高いと考えられる。産業全体は α の推計値自体がゼロ (0.000) であったため、t 値もゼロとなった。

2.6.3 推計と統計・他研究との比較

本研究推計値を AQUASTAT と比較する。AQUASTAT では産業用水トータルしか得られないので、産業用水トータルのみでの比較を行った。図 2-6-2 は AQUASTAT と本研究推計値を比較可能な国、年についてプロットしたものである。おおむね AQUASTAT と近い値を取っていることがわかる。これは表 2-6-3 の推計結果の決定係数の値の高さから見ても容易に想像の付く結果である。

次に既存の研究と本研究の推計を比較する。Vassolo et al. (2005)⁹⁾ が、全世界で電力とそれ以外の産業用水

を分けた唯一の研究であるのでここではそれと比較する(表 2-6-4)。ただし、いくつか比較する上で注意が必要である。第 1 に、Vassolo et al. (2005)⁹⁾ は 1995 年付近の推計をしたものであり、本研究は 1995 年と将来推計の基準年となる 2005 年の値を示す。第 2 に本研究推計のその他産業には Mining も含まれていることである。また、地域区分については Vassolo et al. (2005)⁹⁾ がどのように対応しているか詳細が不明だったので、多かれ少なかれ地域区分による誤差も含まれると思われる。従って、ここでは本研究推計値と Vassolo et al. (2005)⁹⁾ でどのような差があるのか、あるとしたらどのような理由によるものなのかを議論する。

ここで比較した結果、いくつか注目すべき点があった。まず、最も多くの取水がある、北米については、本研究と Vassolo et al. (2005)⁹⁾ は比較的近い値を取っている。発電由来は本研究が $196 \times 10^9 \text{ m}^3$ であるのに対し

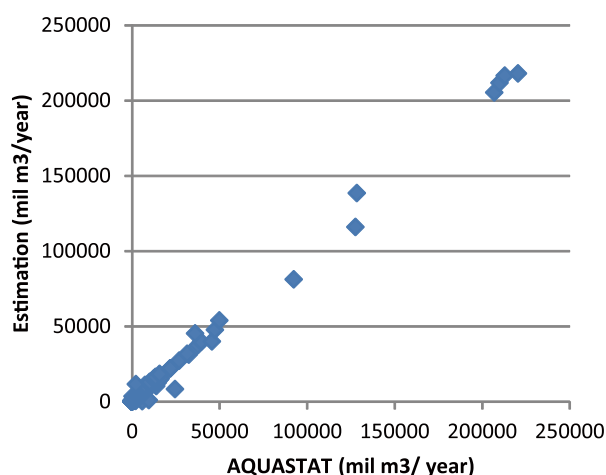


図 2-6-2 AQUASTAT と本研究推計値の比較

表 2-6-3 推定結果 (α)

	α	t 値	修正済み決定係数	国数	データ数
産業全体	0	0	0.96	77	225
金属	-0.014	-57.45	0.94	7	60
化学	-0.045	-160.71	0.97	12	82
電力	-0.030	-204.67	0.97	8	60
食料加工	-0.021	-105.37	0.93	11	75
鉱業	-0.038	-133.59	0.98	7	30
非金属鉱物加工	-0.037	-155.41	0.87	4	38
紙パルプ	-0.016	-53.81	0.94	13	91
繊維	-0.033	-108.21	0.94	11	79
その他産業	-0.089	-291.45	0.85	7	27

(産業全体を除き α は 95%信頼区間で有意)

表 2-6-4 2000 年付近の推計値と既存研究との比較

	電力		製造業			
	本研究		本研究		Vassolo et al. (2005)	
	2005	1995	2005	1995	2005	1995
北米	218.46	196.48	224.40	34.03	39.47	42.53
中南米	17.08	11.76	7.31	17.36	18.47	21.39
アフリカ	6.87	5.45	3.64	5.70	3.71	6.22
ヨーロッパ	188.42	161.69	121.79	48.53	49.01	96.59
西アジア	2.84	1.56	1.46	0.48	0.39	2.72
アジア	117.56	85.29	41.03	109.95	71.35	149.42
オセアニア	63.49	50.60	1.14	1.64	2.15	5.93
世界	614.71	512.84	400.77	217.69	184.56	324.79

* Vassolo et al. (2005)⁹⁾は 1995 年付近の推計

** 本研究 Europe は旧ソ連を含む

て Vassolo et al. (2005)⁹⁾ では $224 \times 10^9 \text{m}^3$ である。その他産業は発電よりも近く、 $39 \times 10^9 \text{m}^3$ と $42 \times 10^9 \text{m}^3$ であった。次に欧州であるが、発電由来は約 30 % 程度の乖離であるがその他産業由来は 2 倍近い乖離がある。これらについては明確に原因について述べることは困難であるが、1 つ重要な要素として考えられたのは旧ソ連である。欧州の多くの主要な国については EUROSTAT によって我々の推計は調整されているが、ロシアなどの旧ソ連諸国は統計が得られなかったため、旧ソ連の推計値は本研究で推計された係数に依存する。例えば、本研究が推計した旧ソ連の発電由来の取水は $60 \times 10^9 \text{m}^3$ あり、Vassolo et al. (2005)⁹⁾ と比較しても十分大きな値であった。

本研究のアジアの値についてみると、発電由来は Vassolo et al. (2005)⁹⁾ より大きく、その他産業由来は Vassolo et al. (2005)⁹⁾ より低い。発電由来の取水については 2005 年の中国だけで $45 \times 10^9 \text{m}^3$ あり、我々の推計がそれほど過大評価しているとは考えていない。もちろんこの統計値と比較している 1995 年は 10 年差があり、その間電力消費の増加と技術進歩があるため単純な比較はできないことは断っておきたい。一方その他産業はやはり 2005 年の中国で $26 \times 10^9 \text{m}^3$ 、日本が $12 \times 10^9 \text{m}^3$ (2004 年) であるため、我々の値が過小評価であるというのも難しいだろう。

世界全体からみるとオセアニアは大きなシェアではないが、Vassolo et al. (2005)⁹⁾ との値の乖離は非常に大きい。オセアニアについては経済規模から考えてもその大部分をオーストラリアが占めているという点から比較

的検証が容易である。オーストラリアの統計²¹⁾ によれば、2000 年における発電由来は $54.8 \times 10^9 \text{m}^3$ 、その他産業由来は $0.9 \times 10^9 \text{m}^3$ であった。これらは AQUASTAT の 2000 年の報告 $2.4 \times 10^9 \text{m}^3$ と大きな乖離があったため、データスクリーニングの基準に AQUASTAT の値が棄却されている。そのため、AQUASTAT とは大きく異なる値が推計され、結果として Vassolo et al. (2005)⁹⁾ と乖離が大きくなっていると考えられる。

2.6.4 産業用水の現状

前節で得られた結果から現状の推計を行う。回帰式で得られた係数とドライビングフォースから推計する。部門別の計算をしたのちにそれらを集計し、産業全体の量と合わせるようにスケールアップ、もしくはスケールダウンを行ったものを現状の産業用水とする。繰り返しになるが、国統計が存在する地域は、係数 β が機能して、その国の技術水準を表す。そのため、統計値が存在する地域の推計値は自動的に各国統計に近い値となる。

推計の結果を部門別、地域別でみたものを図 2-6-3、図 2-6-4 に示す。地域別にみると北米が最も大きなシェアを占め、次いで、中国、西欧となる。これらはほぼ経済の規模に比例している。ただし、2005 年時点では世界で 2 番目に大きな GDP を持つ日本は 2 % と低いシェアであり、水消費強度は小さい。これは回収水を含む水利用技術が高いことによると考えられる。

次に部門別でみると、電力が全体の 3/4 を占める。次いで、金属、化学となり、全体のそれぞれ 8.5 % となった。

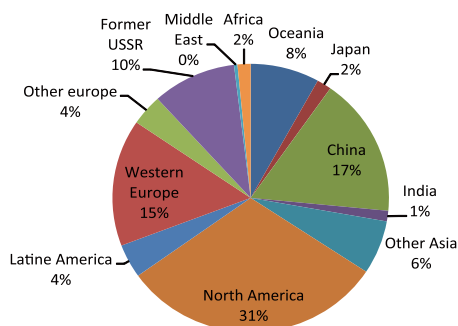


図 2-6-3 2005 年における地域別の産業用水

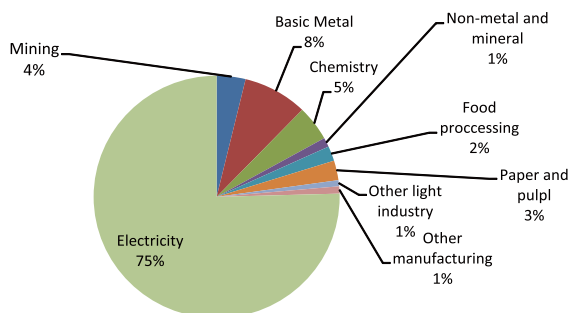


図 2-6-4 2005 年における産業部門別の産業用水¹⁶

2.6.5 水の将来技術

我々の過去の推計結果からは、非常に強い技術改善がなされてきたと考えられる。例えば電力で見られるように年率3%という水消費強度の改善は今後も見込めるのかどうかは非常に不確実である。

我々は過去と同様に強い技術改善が進むケースは適応策のチャレンジが相対的に低い SSP1 と SSP5 の世界観に合致すると考えこれらのシナリオでは過去の技術進歩が継続すると仮定した。すなわち、SSP1 と SSP5 では回帰分析で得られた係数をそのまま使うこととなる。SSP3、SSP4 では Adaptive Challenge が大きい世界である。すなわち水技術に関して進歩が小さいとして、回帰式で得られた値の1/4を割り当て、中庸な世界である SSP2 は半分の値を使用した。これらの想定は恣意的であり、推計に大きな影響を与えるため、次節では感度分析を示している。

ただし、電力部門については、我々は物理的な量 m^3/MWh をチェックすることができる。電力部門では、基本的に冷却用途に水は使われるが、閉ループで再利用をしても、物理的な限界として $3 m^3/MWh$ とされている (EPRI, 2002)²⁴⁾。従って、この水準を超える技術改

16 軽工業は繊維と木材の合計である。

善を持つ地域はこの値を下限とした。

2.6.6 将来シナリオ

工業用水の将来シナリオの推計に使う、工業生産、発電等のドライビングフォースは SSP を用いた。SSP については 2.1 節を参照されたい。

2.6.6.1 将来シナリオの概要

図 2-6-5 に世界全体の産業用水のシナリオ SSP1-SSP5 を示す。SSP1 は 21 世紀中一貫して低下していく。これは水利用技術が相対的に高いシナリオであること、また電力や産業生産がそれほど伸びないシナリオであるためである。SSP1 以外のシナリオでは 2030、2040 年頃までは増加するが、その後徐々に低下していく。水技術進歩が低い SSP3、SSP4 は他のシナリオよりも高い値を示した。SSP4 では特に電力も産業生産もともに低いシナリオであるにもかかわらず、相対的に取水量が高く出たのは技術の想定が大きく寄与しているものと考えられる。

次に、既往の研究と本研究の推計値を比較する。図 2-6-6 は、本研究推計値に他研究の結果 (Shen et al. (2008)⁴⁾; Alcamo et al. (2007)²⁾; Shiklomanov (2000)⁵⁾ をプロットした。Shen et al. (2008) と Alcamo et al. (2007) は SRES をベースとした推計であり、シナリオの記号 A1 などは SRES のそれと対応する。今回の推計は他研究と比べると全体として低めとなっている。Shen et al. (2008)⁴⁾ の B2 以外を除いては、既存研究では 21 世紀をとおして増加するという見込みであるのに対して本研究は 21 世紀後半にはある程度安定化するという見通しとなった。

既存の研究の多くは将来にわたって工業用水が大きく増加していくというものであるが、本研究では異なる結果となったため、この点について少し議論が必要と思われる。本研究の回帰分析から得られた電力の水消費改善率 3.0% が真値であり、将来にわたってそれが期待できるという前提で議論を進めるなら、21 世紀中に工業用水が大きく増加するためには、電力生産量が年率 3% 以上で成長するという見通しが必要となる (その他部門よりも電力の割合が大きいため、議論を簡単に進めるために電力とする)。この年率 3% という値は 95 年間続けると約 17 倍となる。我々の SSP の定量化ではそのような大規模な電力の増加は見込まれなかったため、21 世紀で産業用水が安定化するという結果になった。

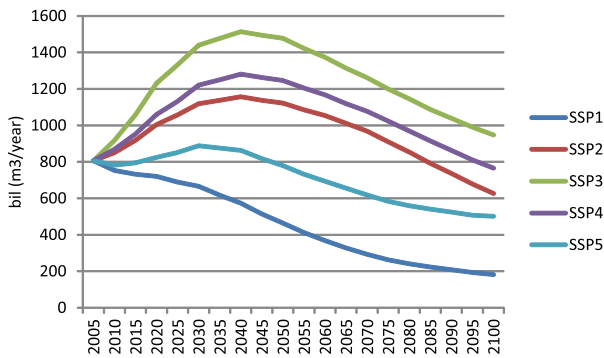


図 2-6-5 世界全体の産業用水シナリオ

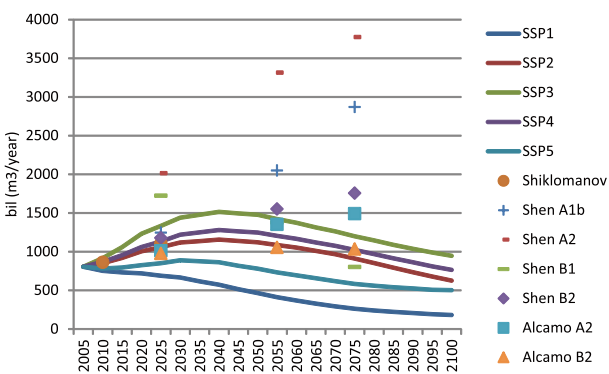


図 2-6-6 世界全体産業用水シナリオ(他の研究との比較)

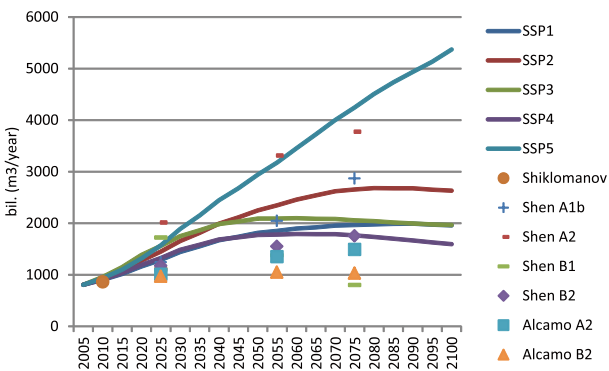


図 2-6-7 水技術進歩がないと仮定した時の世界全体の産業用水

これらの違いを生み出しているのはドライビングフォースと技術の想定である。残念ながら、SRESベースで用いられたドライビングフォースは集約的であるため、本研究でSRESの値を使って他研究と比較検証することはできないため、ドライビングフォースと技術の想定いずれの要因がこのような差異を生み出しているか結論付けることはできない。そこで、次項では2種類の感度解析を行い、本研究の推計値の性質について議論する。

2.6.6.2 感度分析

ここでは2種類の感度解析を行った。1つはSSP1-SSP5に対して水技術進歩が全くないケースである。水技術進歩がないという仮定は非現実的ではあるが、ドライビングフォースの増加によりどの程度潜在的な重要が増加するかということがこの感度解析からわかる。

その結果が図2-6-7である。既存の研究よりは全般に高い値となることがわかる。特にSSP5は2100年で5000 10億 m³を超え現状の約7倍となる。前項のSSP5と比べると大きな差があることから、技術進歩の仮定は非常に大きな影響を与えることがわかる。他のシナリオは電力や産業生産の安定化によりその増加は21世紀後半で落ち着くが、全般に他研究よりも高い値となる。

次に、中庸的なシナリオであるSSP2について4つの技術進歩を仮定して計算した(図2-6-8)。その4つとは過去と同じ速度(Opt)、半分(middle)、1/4(Pes)、なし(No)の4つである。これらの4つの感度解析でも非常に大きな幅ができることがわかる。2100年ではOptとNoの間で10倍近い差がある。MiddleやPesといった技術進歩を想定すると、21世紀中盤でピークを迎え、2100年にはやはり下がっていく。既存研究と比較的同等の軌跡を取るのには、No、Middle、Pesの3つのシナリオである。これらの感度解析からは、過去の技術進歩がどの程度将来続くのかということは今後の産業用水を見通すうえで極めて重要であることがわかる。

2.6.6.3 部門別の解析

次に、部門別に産業用水の内訳を見てみる。次の図2-6-9は2005年とSSP1-SSP5の2100年における内訳を世界全体と中国について表している。世界全体の部門内訳の様相は大きく変わらないという結果となった。発

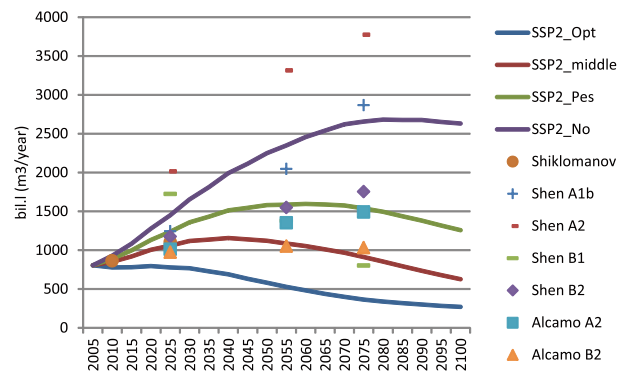


図 2-6-8 4つの水技術進歩の仮定を用いたSSP2の世界全体の産業用水

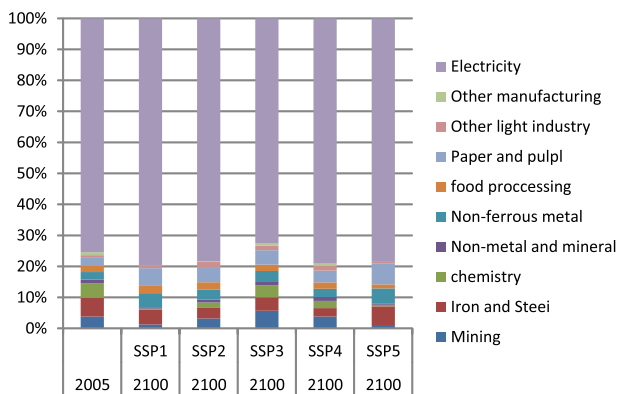


図 2-6-9 世界全体の部門別内訳

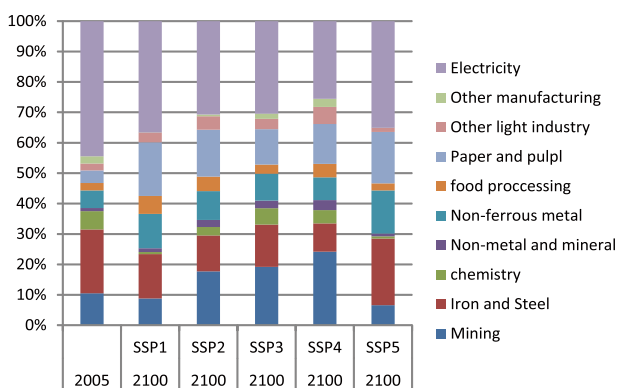


図 2-6-10 中国の部門別内訳

電以外の部門の内訳はシナリオにより若干の差異はあるもののいずれのシナリオにおいても 2100 年では基本的に電力部門が大きな割合を占めている。しかし、地域別にこれを見るとその限りではない。ここではその例として中国を見てみる（図 2-6-10）。2005 年で約半分を占めていたが、2100 年ではその割合が若干下がる結果となった。この結果も、ドライビングフォースがどのように推移するのか、電力と産業生産の関係がキーポイントとなる。従って、AIM/CGE での推計でどのような想定をしているかに強く依存する。ここではやはりその推計値自体の妥当性については立ち入らないが、少なくともこういった既存研究で水利用技術と産業構造変化が集約されて推計されていたものとは異なる推計が可能ながわかる。

2.6.6.4 地域別の解析

次に地域別の内訳を SSP1-SSP5 について見てみる（図 2-6-11）。SSP によって経済成長の速度が先進国と途上国で異なるため、その内訳は大きく変わるものもある。例えば、SSP4 の 2100 年について見てみると、中国の

シェアは小さく北米や EU といった先進地域は依然として大きなシェアを占めている。これは SSP4 が非常に格差の広がる社会を想定しているおり、途上国は成長速度が遅いためである。

SSP によって異なる様相はあるが、一貫してみられるのは 2030 年頃までに世界全体で増加している需要が中国の増加によって引き起こされていることである。中国では 2030 年頃までは技術進歩の速度以上に電力や産業生産の増加が早く、結果としていずれのシナリオでも産業用水が増加する。水資源評価をするときには産業用水だけでなく農業用水も考えないといけないが、2030 年付近の中国はある程度水需要が大きくなっていることを考えて、適切な水資源管理が必要になるのではないかと推測できる。一方、アジアのもう一つ重要な国であるインドもシェアが大きくなっており、2100 年においては中国のシェアを超えている。インドについても今後注視する必要性があるかもしれない。

2.6.7 議論及び結論

本研究ではまず産業用水に関する統計情報を国別で収集し、そこから回帰分析を用いて過去の技術進歩を推計するとともに水需要の現状の推計を行った。次いで、将来のドライビングフォースと技術進歩に関する仮定を、SSPs を基に準備し、産業用水の将来シナリオを試みた。ただし、推計の過程では多くの仮定が置かれている。いくつか主要なものについてここでは議論しておく。

第 1 に、技術進歩をタイムトレンドで説明したことは最初に述べておきたい。将来シナリオにおいては技術進歩をどの程度見積もるかで大きくその値が変わることを示したが、その技術進歩が継続的に時間変化に応じて得られるというモデル自体は今回の限られた統計情報から有意であったが、より情報が集まれば、異なるモデルを想定できる可能性もある。今後統計情報が拡充されることが望まれる。

第 2 に、基本的には先進国を中心とした統計から途上国の現状を推計し先進国と同様の技術進歩を仮定しているが、大きなバイアスを生んでいるかもしれない。この点についても、今後途上国の統計情報が揃うことが強く望まれる。

第 3 に、将来の技術の想定である。ここでは技術進歩に回収水など特定の技術を考慮せずに集約化された 1 つの“技術”として表現した。また、過去の技術進歩を基

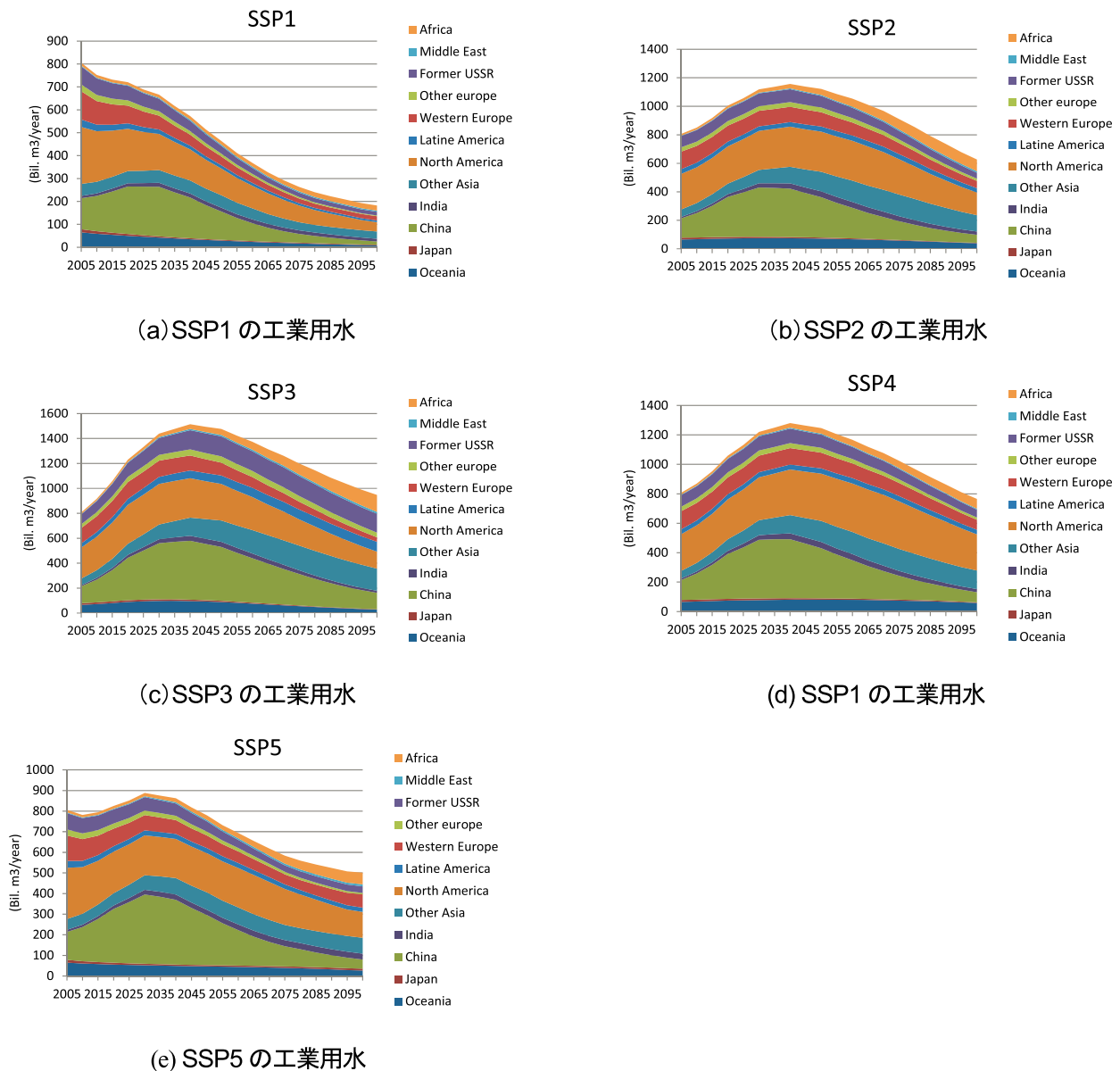


図 2-6-11 地域別内訳

準に将来のそれを想定し、各 SSP に配置したがこの想定は我々の恣意的なものである。本研究では技術進歩について感度解析を行い、この点は極めて重要であることを議論したが、異なる想定も十分に考えられる。

最後に、本研究の取水量推計では、水の市場、価格、供給可能性については考慮せず、潜在的な需要量を推計した。農業用水のシナリオや河川流域別の水のひっ迫度によって、水の価格は変わるだろうし、それによって需要、技術も影響を受けると考えられる。これらの供給可能性も考慮した推計は今後の課題としたい。

以上のようないくつかの限界点はあるものの、本研究は産業用水の将来シナリオとしていくつかの重要な点を示した。最後にその結論を述べる。

21 世紀前半で多くのシナリオで将来の産業用水は増

加したが、後半には安定化することになった。これはドライビングフォースが安定化してくるシナリオが多かったとともに継続的な水技術が想定されたためである。

21 世紀前半の増加は中国に寄与するところが大きかった。また、21 世紀後半ではインドがそのシェアを伸ばすシナリオが多く見られた。

将来の水技術の想定は大きな影響力を持つ因子であり、今後それを適切に見通すためにも統計情報の拡充は重要である。

参 考 文 献

1) Oki, T., Agata Y., Kanae S., Saruhashi T. and Musiake K. (2003) Global water Resources Assessment under

- Climatic Change in 2050 using TRIP, IAHS Publication, Vol. 280, 124–133.
- 2) Alcamo, J., Florke M. and Marker M. (2007) Future long-term changes in global water resources driven by socio-economic and climatic changes, *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 52, No. 2, 247–275.
 - 3) Hanasaki, N., Kanae S., Oki T., Masuda K., Motoya K., Shirakawa N. and Shen Y. (2008) An integrated model for the assessment of global water resources - Part 2: Applications and assessments. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 12, No. 4, 1027–1037.
 - 4) Shen, Y., Oki T., Utsumi N., Kanae S. and Hanasaki N. (2008) Projection of future world water resources under SRES scenarios: water withdrawal, *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 53, No. 1, 11–33.
 - 5) Shiklomanov, I. (2000) World water resources and water use: present assessment and outlook for 2025. In: *World Water*
 - 6) Nakicenovic, N., Swart, R. (Eds.) (2000) *Special Report on Emissions Scenarios*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
 - 7) FAO (2012) AQUASTAT, <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/main/index.stm>.
 - 8) Fujimori, S., Masui T. and Matsuoka Y. (2012) AIM/CGE [basic] manual, Discussion paper series, Center for Social and Environmental Systems Research, NIES.
 - 9) Vassolo, S. and Doell P. (2005) Global-scale gridded estimates of thermoelectric power and manufacturing water use. *Water Resources Research*, Vol. 41, No. 4.
 - 10) EUROSTAT (2011) Water statistics, http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Water_statistics.
 - 11) Moss, R.H., Edmonds, J.A., Hibbard, K.A., Manning, M.R., Rose, S.K., van Vuuren, D.P., Carter, T.R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G.A., Mitchell, J.F.B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S.J., Stouffer, R.J., Thomson, A.M., Weyant, J.P. and Wilbanks, T.J. (2010) The next generation of scenarios for climate change research and assessment, *Nature*, Vol. 463, 747–756.
 - 12) O'Neill B.C., Carter T.R., Ebi K.L., Edmonds J., Hallegatte S., Kemp-Benedict E., Kriegler E., Mearns L., Moss R., Riahi K., van Ruijven B. and van Vuuren D., Workshop on The Nature and Use of New Socioeconomic Pathways for Climate Change Research, Meeting report, https://www.isp.ucar.edu/sites/default/files/Boulder%20Workshop%20Report_0.pdf.
 - 13) Eom, J., K. Calvin, L. Clarke, J. Edmonds, S. Kim, R. Kopp, P. Kyle, P. Luckow, R. Moss, P. Patel, M. Wise (2012) Exploring the future role of Asia utilizing a Scenario Matrix Architecture and Shared Socioeconomic Pathways, *Energy Economics*, in press.
 - 14) USGS. (2004) Estimated Use of Water in the United States in 2000. USGS Circular 1268; March 2004. <http://pubs.usgs.gov/circ/2004/circ1268/pdf/circular1268.pdf>
 - 15) 経済産業省 (2007) Industrial statistics, <http://www.meti.go.jp/statistics/tyo/kougyou/result-2/h17/kakuho/youti/index.html>.
 - 16) Office for National Statistics (United Kingdom) (2009) *Environmental Accounts - Consumption of water resources by industrial sector*.
 - 17) IEA (International Energy Agency) (2009a) *Energy Statistics of OECD countries*, International Energy Agency, Paris, France.
 - 18) IEA (International Energy Agency) (2009b) *Energy Statistics of non-OECD countries*, International Energy Agency, Paris, France.
 - 19) Fujimori, S. and Matsuoka Y. (2011) Development of method for estimation of world industrial energy consumption and its application, *Energy Economics*, Vol. 33, 461–473.
 - 20) Statistics Canada (2010) *Industrial Water Use*, Statistics Canada, Environment Accounts and Statistics Division.
 - 21) Australian Bureau of Statistics (2006) *Water account Australia 2004–05*, Australian Bureau of Statistics.
 - 22) Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China (2010) *Report On the State of the Environment In China*.
 - 23) Statistical Office of the Republic of Slovenia (2011) SI-STAT database, <http://www.stat.si/pxweb/Dialog/varval.asp?ma=2761807E&ti=Water+use+by+indu>

strial+activities,+mio+m3,+Slovenia,+annually&path=../
Database/Environment/27_environment/08_joint_
questionnaires/01_27618_inland_waters/&lang=1.

24) EPRI (2002) Water and Sustainability (Volume 1):
Research Plan. 1006784. Palo Alto, CA.

2.7 二国間農作物貿易モデルの開発と気候変動が農作物貿易に与える影響の分析

2.7.1 農作物貿易とバーチャル・ウォーター

経済成長や人口増加にともなう水需要の増加や気候変動は、世界の水資源の利用・不足の問題に大きな影響を及ぼす。特に、経済成長や人口増加に起因して、世界の食料需要は急激に増加しており、将来の農業生産が水資源問題に与える影響は大きい。

農業生産に与える要因の一つに貿易がある。Hanasaki et al (2010)¹⁷は2000年の貿易フローのデータを用いて、バーチャル・ウォーター（仮想水）¹⁷を推計している。それによると、2000年の大麦、小麦、米、大豆、トウモロコシなどの主要な農作物と畜産物（牛肉、豚肉、鶏肉）の貿易によって生じたバーチャル・ウォーターは545km³であったという。

農作物の輸入は、輸入国での農作物生産を減らすことで農業生産に必要な水使用量を減らし、輸入国の水資源不足を緩和する働きがある。一方、輸出国では、農業生産による水使用量を増加させる。このため、比較優位の結果、相対的に水資源の豊富な国での農業生産及び農作物の輸出が促進され、水資源の豊富でない国での農業生産を減らすことができれば、国際貿易は、世界全体の水資源不足の問題を緩和することに貢献すると考えられる。

しかし、そのような状況下であっても、将来の経済成長や人口増加による食料需要の増加は、将来の農作物貿易を増加させ、世界全体の水資源不足の問題に大きな影響を及ぼす。また、将来の気候変動は、農業の生産性への影響を通じて農作物の貿易に影響を与える。気温の低い国では、気温上昇によって農業の生産性が上昇すれば、その国の農作物の輸出を増加させるし、気温が高い国では、気温上昇によって農業の生産性が下落すれば、その国の農作物の輸出を減少させるかもしれない。

気候変動や経済成長が将来の農業生産に起因する水需要にどのような影響を与えるかを明らかにするために、これらの要因が、農作物貿易に与える影響を分析する必要がある。

本節では、主要な農作物である米、トウモロコシ、小麦を対象に開発した、二国間の相対貿易モデルのフレームワークを説明し、気候条件がこれらの相対貿易（特に、輸出国にとっての輸出）に与える影響についての分析結果について説明する。

以下、2.7.2節では、モデルのフレームワークを含む分析方法及びデータについて説明し、2.7.3節では分析結果について説明する。最後に、2.7.4節で研究の成果を要約する。

2.7.2 モデルのフレームワークと分析方法

二国間貿易を分析した先行研究は数多くある（van Beers and van den Bergh (1997)³、Harris et al. (2002)⁴、Jug and Mirza (2005)⁵、Xu (2000)⁶、Costantini and Crespi (2008)⁷、Bergstrand (1985)⁸、Rose (2005)⁹、Baier and Bergstrand (2007)¹⁰）。これらは、通常、重力モデルのフレームワークを応用して二国間貿易の決定要因を分析している。たとえば、van Beers and van den Bergh (1997)³、Harris et al. (2002)⁴、Jug and Mirza (2005)⁵、Xu (2000)⁶、Costantini and Crespi (2008)⁷、Tsurumi et al. (2011)¹¹は、環境政策が二国間の貿易フローに与える影響を分析している。Rose (2005)⁹、Baier and Bergstrand (2007)¹⁰は、貿易の自由化（自由貿易協定への加入、WTO（世界貿易機構）やGATTへの加盟）が二国間の貿易フローに与える影響を分析している。一方、Bergstrand (1985)⁸は、食品、飲料・たばこ、機械・輸送機器、化学製品、燃料など、業種別の二国間の貿易フローを対象に、輸出国や輸入国の実質GDPなどの経済的要因が貿易に与える影響を分析している。しかし、著者の知る限り、個別の農作物を対象に、経済的要因や気候要因が二国間貿易に与える影響を分析した先行研究は存在しない。

17 農畜産物生産のためには多量の水が消費される。たとえば、1kgのトウモロコシ生産のためには、灌漑用水として1,800リットルの水が利用される（環境省 (2011)²）。このため、農畜産物を輸入すれば、その輸入国は、輸入に相当分の農畜産物を自国で生産した場合に必要な水の消費を減らすことができる。このように、農畜産物の輸入は、輸出国での生産に利用された水を輸入したものと解釈できる。したがって、バーチャル・ウォーターとは、農畜産物の貿易を通じて、仮想的に輸入したと解釈した水の量をいう。詳細は、Hanasaki et al. (2010)¹⁷を参照されたい。

2.7.2.1 二国間農作物（小麦、米、トウモロコシ）輸出モデル

本研究では、3つの農作物（小麦、米、トウモロコシ）を対象に、それぞれの二国間輸出モデルを推計する。以下では、二国間貿易（輸出）をモデル化するフレームワークに重力モデルを応用する。このとき、 t 年における、 e 国（輸出国）から i 国（輸入国）への農作物 j （小麦、米、トウモロコシ）の輸出国の実質輸出額を X_{eit}^j とすると、農作物 j に関する二国間の輸出モデルは（1）式で表される。

$$\begin{aligned} \ln X_{eit}^j = & \alpha_1 + \beta_1 \ln GDP_{e,t} + \beta_2 \ln GDP_{i,t} \\ & + \beta_3 \ln \frac{K_{e,t}}{L_{e,t}} + \beta_4 \ln \frac{K_{i,t}}{L_{i,t}} + \beta_5 \ln Dis_{ei} \\ & + \beta_6 DBorder_{ei} + \beta_7 DIn_{ei} \\ & + \beta_8 \ln T_{e,t} + \beta_9 \left(\ln T_{e,t} \right)^2 \\ & + \beta_{10} \ln T_{i,t} + \beta_{11} \left(\ln T_{i,t} \right)^2 \\ & + \beta_{12} \ln Rain_{e,t} + \beta_{13} \left(\ln Rain_{e,t} \right)^2 \\ & + \beta_{14} \ln Rain_{i,t} + \beta_{15} \left(\ln Rain_{i,t} \right)^2 + \varepsilon_{ij} \end{aligned} \quad (1)$$

ただし、 GDP_e 、 GDP_i 、 K_e/L_e 、 K_i/L_i 、 Dis_{ei} 、 $DBorder_{ei}$ 、 DIn_{ei} 、 T_e 、 T_i 、 $Rain_e$ 、 $Rain_i$ はそれぞれ、輸出国の実質GDP、輸入国の実質GDP、輸出国の資本労働比率、輸入国の資本労働比率、輸出国と輸入国の直線距離、国境ダミー変数（輸出国と輸入国が国境を接していれば1、そうでなければ0をとる）、内陸国指数（輸入国及び輸出国の両方が内陸国である場合には2、どちらか一方だけが内陸国の場合には1、そうでなければ0をとる）、輸出国の年平均気温、輸入国の年平均気温、輸出国の年平均降水量、輸入国の年平均降水量を表している。また、 ε_{ij} は誤差項を表している。

輸出国の実質GDPは、先行研究と同様、農作物生産の増加が輸出を増加させる効果を明らかにする変数として用いている。すなわち、輸出国の実質GDPが農作物生産と相関が高ければ、輸出国の実質GDPの増加は、輸出国による農作物輸出を増加させると期待される。また、輸入国の実質GDPは、輸入国の購買力を測る変数として用いている。輸入国の実質GDPが大きければ、財の購買力が大きくなるので、農作物に対する需要も増加する結果、農作物輸出（輸入国にとっての輸入量）を増加させると考えられる。資本労働比率は輸出国あるいは

は輸入国の比較優位を測る変数として用いている。ただし、本節では、国際的に見た比較優位を測ることを目的としているため、輸出国あるいは輸入国の各年の資本労働比率を、同年の資本労働比率の世界平均で割ったものを使っている。すなわち、世界と比較して、相対的に資本労働比率が低い輸出国ほど、農作物のように労働集約的な財生産に比較優位をもつため、国内の農作物生産が多くなる結果、その輸出が多くなると期待される¹⁸。同様の理由で、輸入国が、世界と比較して、相対的に資本労働比率が低ければ、輸入国でも農作物の生産量が多くなる結果、そのような作物の輸入（輸出国にとっての輸出）が減ると期待される。

輸出国と輸入国の直線距離、国境ダミー変数、内陸国指数は、先行研究と同様に、貿易相手国との貿易に伴う輸送費を表す変数として用いている。すなわち、直線距離が短いほど、また、国境に接しているほど、輸送費が安くなるので、輸出が促進されると期待される。また、貿易相手国が内陸国でなければ、比較的輸送費が安い海上輸送を使えるため、輸出が促進されると期待される。

最後に、輸入国及び輸出国の気候変数として、気温と降水量を使っている。これは、気温や降水量が、農作物の生産への影響を通じて、貿易に影響を与えると考えられるからである。すなわち、気温の低い輸出国での気温上昇は、農作物の生産性の上昇を通じて、農作物生産を増加させるため、輸出国の輸出を増加させるかもしれない。しかし、気温の高い輸出国における気温上昇は、農作物の生産性の下落を通じて、農作物生産を減らすため、輸出国の輸入を減少させるかもしれない。同様に、気温の低い輸入国での気温上昇は、農作物の生産性の上昇の結果、輸出国の輸出（すなわち、輸入国にとっての輸入）を減らし、気温の高い輸入国での気温上昇は、農作物生産性の下落の結果、輸出国の輸出（すなわち、輸入国にとっての輸入）を増やすかもしれない。降水量についても、同様に考えることができる。すなわち、降水量の少ない輸出国での降水量の増加は、農作物の生産性の上昇を通じて、農作物生産を増加させるため、輸出国の輸出を増加させるかもしれない。しかし、輸出国にお

18 この仮説は、国際貿易における標準的な理論の一つである、ヘクシャー＝オーリンの定理に依拠している。この定理は、本節で用いた重力モデルのフレームワークを国際貿易の問題に応用する際、よく用いられる。ヘクシャー＝オーリンの定理については、竹森（1994）¹²⁹やLeamer（1995）¹³⁰が参考になる。

いて、台風などの影響で、降水量が多くなった場合、水害などによって農作物が被害を受け、その生産性を低下させる結果、輸出国の輸出量を減らすかもしれない。また、輸入国において、台風などの影響で降水量が多くなった場合、輸出国の輸出（輸入国にとって輸入）を増加させるかもしれない。

2.7.2.2 データ

推計に使用したデータは、1986年から2000年の15年で、各年8,056の二国間貿易（輸出国は96カ国、輸入国は126カ国）のパネルデータである。農作物別の二国間貿易の輸出額は、国際連合食糧農業機関のFAOSTAT¹⁴⁾より入手した。各国実質GDPについては世界銀行の統計WDI¹⁵⁾から入手した。資本労働比率についてはExtended Penn World Tables 3.0¹⁶⁾より入手した。二国間の主要都市間の距離、国境ダミーのデータはAndrew K. Rose (2005)⁹⁾において使用されたデータセットをRoseのホームページ¹⁷⁾より入手した。

気象データ（国別年平均気温及び年平均降水量）については、Weedon et al (2011)¹⁸⁾で提供しているWATCH Forcing DataとRamankutty et al. (2008)¹⁹⁾で提供している農地面積のデータを利用して、独自に作成した。WATCH Forcing Dataは、全球を緯度経度0.5度に分割し、それぞれの格子について、気温及び降水量のデータを提供している。その格子を、国別に分類した上で、各国別に平均気温や降水量を計算したものを、当該国の気温及び降水量として定義している。その際、各格子の中には農地以外の土地も含まれているので、農作物生産に関係するより適切な気候変数を作成するために、農地以外の地域の気温や降水量を除いた農地だけの気温及び降水量のデータを作成する必要がある。このために、Ramankutty et al. (2008)¹⁹⁾から得られる農地面積情報を用い、格子ごとに農地の比率でウェイト付けした上で、各国の平均値を計算した。

2.7.3 分析結果

モデルで使用した変数の中で、輸出国と輸入国の直線距離、国境ダミー変数、内陸国指数は、時間を通じて変化しない変数である。このため、本節では、Pooled OLSによって推計した。小麦、米、トウモロコシの二国間貿易輸出関数の推計結果は、表2-7-1の通りである。まず、F検定の結果、本モデルの定式化が有意に意

味があることが確認された。

2.7.3.1 経済的要因等が輸出に与える影響

輸出国実質GDP及び輸入国実質GDPのパラメータは、小麦、米、トウモロコシのいずれの輸出においても、1%の有意水準で有意に正であった。分析対象の品目は異なるものの、この結果は、Bergstrand (1985)⁸⁾を初めとする多くの先行研究と一致している。すなわち、輸出国の実質GDPが大きいほど、また、輸入国の実質GDPが大きいほど、輸出国の輸出（輸入国にとっての輸入）が増加することが明らかとなった。推計結果から、輸出国実質GDPの輸出弾力性（1%の輸出国実質GDPの増加によって生じる輸出の増加率(%)）は、小麦が0.581、米が0.149、トウモロコシが0.589であるのに対して、輸入国実質GDPの輸出弾力性（1%の輸入国実質GDPの増加によって生じる輸出の増加率(%)）は、小麦が0.224、米が0.053、トウモロコシが0.249と計算された。

その結果、輸出国実質GDPの弾力性の方が、輸入国実質GDP弾力性よりも大きく（2～3倍の大きさ）、輸出国の実質GDPの成長が貿易に大きな影響を与えていることがわかった。このように、輸入国の実質GDPの輸出（輸入国にとっての輸入量）への影響が小さなものになるのは、小麦、米、トウモロコシといった主要な穀物が必需財的な性質をもっており、輸入国の実質GDPが増加してもそれほど消費量が増加しないからだと考えられる。また、小麦やトウモロコシと比較して、米の弾力性は小さく（4分の1程度）、農作物によって、弾力性が大きく異なることが明らかとなった。これは、米が主に主食としての利用が中心であるのに対して、小麦やトウモロコシは多様な食品、あるいは、燃料に利用されており、さまざまな用途での需要が存在するために、輸入国の購買力の増加（実質GDPの増加）によって需要が増加した場合、あるいは、輸出国で生産量が増加した場合に、輸出（輸入国にとっての輸入量）を増加させる効果はより大きくなると考えられる。

輸出国の資本労働比率は、小麦、米、トウモロコシのいずれの場合も、1%有意水準で有意にマイナスであった。このことは、資本労働比率の低い輸出国（相対的に資本より労働の多い輸出国）ほど、労働集約的（あるいは、非資本集約的）な農作物の生産により比較優位をもつために、より多くの農作物の生産を行う結果、輸出量

表 2-7-1 作物別二国間貿易モデルの推計結果

	小麦		米		トウモロコシ	
	推計値	標準誤差	推計値	標準誤差	推計値	標準誤差
ln(輸出国実質 GDP)	0.581***	0.010	0.149***	0.005	0.589***	0.010
ln(輸入国実質 GDP)	0.224***	0.008	0.053***	0.004	0.249***	0.008
ln(輸出国資本労働比率)	-0.098***	0.008	-0.085***	0.005	-0.082***	0.009
ln(輸入国資本労働比率)	-0.017	0.011	0.035***	0.005	0.121***	0.010
ln(取引相手国との距離)	-0.664***	0.022	-0.284***	0.013	-0.699***	0.022
国境ダミー	1.386***	0.127	1.429***	0.101	2.680***	0.142
内陸国指数	-0.261***	0.021	-0.131***	0.011	-0.092***	0.021
ln(輸出国平均気温)	-3.880***	0.290	0.922***	0.051	0.904***	0.186
{ln(輸出国平均気温)} ²	0.663***	0.056	-0.121***	0.011	-0.110***	0.038
ln(輸入国平均気温)	0.739***	0.129	0.318***	0.082	1.169***	0.141
{ln(輸入国平均気温)} ²	-0.185***	0.027	-0.091***	0.016	-0.264***	0.029
ln(輸出国平均降水量)	2.948***	0.088	1.225***	0.046	2.723***	0.109
{ln(輸出国平均降水量)} ²	-0.227***	0.007	-0.088***	0.004	-0.202***	0.009
ln(輸入国平均降水量)	0.474***	0.144	0.290***	0.058	-0.208	0.141
{ln(輸入国平均降水量)} ²	-0.038***	0.011	-0.016***	0.005	0.027**	0.011
定数	-31.753***	0.702	-25.887***	0.321	-37.832	0.700

***、**、*はそれぞれ、1%、5%、10%の有意水準で有意な変数を表している。

が多くなることを意味している。一方、輸入国の資本労働比率は、小麦に関しては、有意ではなかったが、米とトウモロコシについては、1%有意水準で有意にプラスであった。これは、資本労働比率の低い輸入国ほど、労働集約的な農作物の生産により比較優位をもつために、輸入国での農作物の生産が多くなり、輸出国にとっての輸出量（輸入国にとっての輸入量）が減ることを意味している。

取引相手国との輸送費用に関わる変数の推計結果についても、期待通りの結果が得られた。まず、取引相手国との距離は、小麦、米、トウモロコシのいずれの場合も、1%有意水準で有意にマイナスであった。このことは、距離が離れるほど、輸送費用が増加するため、輸出量が減少することを意味している。同様に、国境ダミーは、いずれの作物の場合でも、1%有意水準で有意にプラスであり、国境を接する国同士の貿易は、促進されることがわかった。また、内陸国指数は、いずれの作物でも、1%有意水準で有意にマイナスであった。内陸国指数は、輸入国及び輸出国の両方が内陸国である場合には2、どちらか一方だけが内陸国の場合には1、そうでなければ0をとる変数である。したがって、この推計結果は、海上輸送が利用可能な相手と貿易をすることで、よ

り輸送費用の低い輸送手段が利用可能になることから、貿易が促進されることを意味している。

2.7.3.2 気温が輸出に与える影響

気温変数については、一乗項、二乗項とも、いずれの作物においても、1%の有意水準で有意であった。しかし、その符号は、作物によって異なる。(1)式から、輸出国の気温変化が輸出量に与える影響は(2)式、輸入国の気温変化が輸出量に与える影響は(3)式で計算できる。

$$\frac{\partial \ln X_{ei,t}^j}{\partial \ln T_{e,t}} = \beta_8 + 2\beta_9 \ln T_{e,t} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \ln X_{ei,t}^j}{\partial \ln T_{i,t}} = \beta_{10} + 2\beta_{11} \ln T_{i,t} \quad (3)$$

推計されたパラメータと各国（輸出国及び輸入国）の平均気温を使い、(2)式及び(3)式を個別に計算することにより以下のことがわかった。

まず、輸出国（農作物の主要な生産国）の気温と農作物輸出の関係について検討しよう。(2)式とパラメータの推計値を使うと、小麦の場合、輸出国の年平均気温が18.7℃を越える国(東南アジア、中東、中米、アフリカ)では(2)式がマイナスの値となり、気温上昇にともなっ

て、輸出が減少する一方、18.7℃を下回る国（ヨーロッパ、東アジア、北米、南米）では(2)式がプラスの値となり、気温上昇に伴って輸出が増加することがわかった。これは、小麦が、主に冷涼な地域での栽培が適した作物であるため、平均気温が低い国では、気温上昇が小麦の生産性上昇による生産増によって輸出が増加する一方、平均気温が高い国では、気温上昇はむしろ小麦の生産性を低下させるため、輸出が減少するものと考えられる。

一方、米やトウモロコシについて、個別の国（輸出国）についての気温上昇が輸出に与える影響を試算すると、どの輸出国の気温（年平均気温）を使って(2)式を計算しても、いずれの国でもプラスの値となることが明らかとなった¹⁹。このことは、米やトウモロコシでは、輸出国の気温上昇は、輸出を増加させる効果をもつことを意味している。これは、気温上昇によって作物の生育がよくなり、生産性が上昇することで、より生産量が増加し、それを輸出に回せるようになることを意味している。このように、米やトウモロコシで、小麦と異なる結果が生じたのは、小麦の適温は10～25℃とされているのに対し、トウモロコシの適温はそれよりも高い（雄穂抽出期に21-30℃の等温線の地域で栽培が多い）ことが主因と考えられる。なお、平均気温の対数の2乗の項のパラメータの推計値がマイナスであることから、平均気温の高い輸出国ほど、気温上昇による輸出増加の効果が小さいことも明らかとなった。これは、気温の低い国（特に寒冷地）ほど、気温上昇が生産性を引き上げ、生産を増加させる効果が大きくなることを意味している。このため、気温上昇は、熱帯地域に属する国（東南アジア、中東、中米、アフリカなど）の生産よりも、寒冷地域に属する国（ヨーロッパ、特に、北欧）の生産を増加させる効果が大きいと、相対的に寒冷地域に属する国の輸出をより大きく増加させる効果をもつと考えられる。

次いで、気温上昇による世界全体の平均的な輸出への影響を見るために、(2)式及び(3)式と推計に用いた輸出国及び輸入国の分析対象期間（1986～2000年）の平均気温の値（16.2℃）を使って、輸出国において3℃

の気温上昇があった場合の輸出量に与える平均的な影響、及び、輸入国において3℃の気温上昇があった場合の輸出量に与える平均的影響を計算すると、表2-7-2のようになる。

表2-7-2 から、以下のことが明らかとなった。

- ①輸出国の気温上昇は、小麦の輸出を減少させるが、米とトウモロコシの輸出を増加させる。特に、3℃の気温上昇は、小麦の輸出を平均で3.54%減らす、米とトウモロコシの輸出を、それぞれ、4.61%、5.41%程度増加させる。
- ②輸入国の気温上昇は、小麦、米、トウモロコシの輸出（輸入国にとっての輸入）を減らす。特に、3℃の気温上昇は、小麦の輸出を平均で5.37%、米の輸出を3.48%、トウモロコシの輸出を5.56%減らす。
- ③すべての国（輸出国及び輸入国）で、3℃気温上昇による輸出への平均的な影響は、小麦の場合、8.91%輸出減、米の場合、1.13%輸出増、トウモロコシの場合、0.15%の輸出減となる。

2.7.3.3 降水量が輸出に与える影響

降水量変数については、トウモロコシの輸入国の降水量の一乗の項を除き、いずれの作物、いずれの項においても、1%あるいは5%の有意水準で有意であった。しかし、その符号は、作物によって異なる。(1)式から、輸出国の降水量変化が輸出量に与える影響は(4)式、輸入国の降水量変化が輸出量に与える影響は(5)式で計算できる。

$$\frac{\partial \ln X_{ei,t}^j}{\partial \ln Rain_{e,t}} = \beta_{12} + 2\beta_{13} \ln Rain_{e,t} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \ln X_{ei,t}^j}{\partial \ln Rain_{i,t}} = \beta_{14} + 2\beta_{15} \ln Rain_{i,t} \quad (5)$$

推計されたパラメータと各国（輸出国及び輸入国）の平均降水量を使い、(4)式及び(5)式を用いて、気温のケースと同様に、輸出国あるいは輸入国の降水量の増加が輸出量に与える影響を個別に計算することができ

表2-7-2 3℃の気温上昇が輸出に与える影響 (%)

	小麦	米	トウモロコシ
輸出国気温影響	-3.54	4.61	5.41
輸入国気温影響	-5.37	-3.48	-5.56
総気温影響	-8.91	1.13	-0.15

19 輸出国の中でナイジェリアの平均気温が最も高く、28.7℃であった。本節での議論は、あくまでも、ナイジェリアの気温を上限とした場合の議論であることに注意されたい。

る。

以下では、まず、輸出国（農作物の主要な生産国）の降水量と農作物輸出の関係について検討しよう。(4)式及びパラメータの推計値を使うと、小麦の場合、輸出国の年平均降水量が661mmを越える国（主に、東南アジア、東アジア、北中南米、ヨーロッパの一部、アフリカの一部の国）では、(4)式がマイナスの値となるため、降水量の増加にともなって、輸出が減少する一方、661mmを下回る国（上記以外の地域）では、(4)式がプラスの値となるため、降水量に伴って輸出が増加することがわかった。これは、降水量が適量を越えない範囲では、降水量の増加は、小麦の生産性上昇による生産量の増加によって、輸出を増加させるが、適量を超えて降水量が多い地域では、生産性が低下し、輸出を減らす力が働いていることを意味しているものと考えられる。同様の現象が、米やトウモロコシでも観察された。米の場合には、輸出国の年平均降水量が1054mmを越える国（主に、東南アジア、東アジア、南米の一部の国）、トウモロコシの場合には846mmを越える国（主に、東南アジア、東アジア、北中南米、ヨーロッパの一部）では、降水量の増加に伴って、輸出が減少することがわかった。

次いで、降水量の増加による世界全体の平均的な輸出への影響を見るために、(4)式及び(5)式から、推計に用いた輸出国及び輸入国の分析対象期間（1986～2000年）の平均降水量の値（973mm）を使って、輸出国の降水量増加が輸出量に与える平均的な影響（輸出国降水量の輸出に対する感度）、及び、輸入国の降水量増加が輸出量に与える平均的な影響（輸入国降水量の輸出に対する感度）を検討しよう。計算結果は、表2-7-3のようになる。（ただし、推計結果が有意でない変数の場合、0と設定して計算している。）

表2-7-3から、以下のことが明らかとなった。

- ①輸出国の降水量増加は、平均的には小麦、トウモロコシの輸出を減少させ、米の輸出量を増加させる。10%の降水量増加（97.3mm/年の増加）は、小麦、トウモロコシの輸出をそれぞれ平均で1.76%、0.57%減少させる一方、米の輸出を0.14%増加させる。
- ②輸入国の降水量の増加は、平均として、小麦の輸出（輸入国にとっての輸入）を減らす。米とトウモロコシの輸出は増加させる。すなわち、10%の降水量の増加（97.3mm/年）は、小麦の輸出を平均で0.49%

減らす。米とトウモロコシの輸出をそれぞれ0.7%、3.72%増加させる。

- ③すべての国（輸出国及び輸入国）で、10%の降水量増加による輸出への平均的な影響は、小麦の場合、2.25%輸出減、米の場合、0.84%輸出増、トウモロコシの場合、3.15%の輸出増となる。

2.7.4 おわりに

本節では、3つの主要な農作物（小麦、米、トウモロコシ）を対象に、作物別に二国間輸出モデルを構築し、パラメータ推計を行い、輸出に影響を与える要因について分析した。

その結果、以下のことが明らかとなった。

輸出国及び輸入国の実質GDPの増加は、輸出国の輸出量を増加させる。特に、米に比べて、小麦とトウモロコシの輸出に対する影響が大きい。このため、米に比べて小麦やトウモロコシの方が、将来の経済成長によって輸出国の農業用水需要を高める効果が大きい。

輸出国の気温上昇は、平均的に小麦の輸出を減少させるが、米とトウモロコシの輸出を増加させる。また、輸入国の気温上昇は、小麦、米、トウモロコシの輸出（輸入国にとっての輸入）を減らす。この結果、世界全体で気温が3℃上昇した場合、小麦では、8.91%輸出が減少し、米では、1.13%輸出が増加し、トウモロコシでは、0.15%輸出が減少する。

輸出国の降水量増加は、小麦とトウモロコシの輸出を減少させるが、米の輸出を増加させる。輸入国の降水量の増加は、小麦の輸出（輸入国にとっての輸入）を減らす。米とトウモロコシの輸出は増加させる。すべての国（輸出国及び輸入国）で、10%の降水量増加（97.3mm/年）による輸出への影響は、小麦の場合、2.25%輸出減、米の場合、0.84%輸出増、トウモロコシの場合、3.15%の輸出増となる。

表2-7-3 降水量増加が輸出に与える影響

	小麦	米	トウモロコシ
輸出国降水量感度	-0.176	0.014	-0.057
輸入国降水量感度	-0.049	0.070	0.372
総降水量感度	-0.225	0.084	0.315

注) 降水量感度は、(輸出変化率) ÷ (降水量変化率) と定義される。

*本節は、本研究プロジェクトの成果である研究論文「気候要因が農作物貿易に与える影響に関する実証分析－小麦、米、トウモロコシのケーススタディー」（環境科学会誌、掲載予定）に基づいた内容で、環境科学会誌編集委員会の了承を得た上で、論文を抜粋して使用している。

参 考 文 献

- 1) Hanasaki, N., Inuzuka T., Kanae S. and Oki T. (2010) An estimation of global virtual water flow and sources of water withdrawal for major crops and livestock products using a global hydrological model, *Journal of Hydrology*, Vol. 384, No.3-4, 232-244.
- 2) 環境省 (2011) Virtual Water, http://www.env.go.jp/water/virtual_water/, (accessed 2011-12-1).
- 3) van Beers, C. and van den Bergh J. C. J. M. (1997) An Empirical Multi-Country Analysis of the Impact of Environmental Regulations on Foreign Trade Flows, *Kyklos*, Vol. 50, 29-46.
- 4) Harris, M. N., Kónya L. and Mátyás L. (2002) Modeling the Impact of Environmental Regulations on Bilateral Trade Flows: OECD, 1990-1996, *World Economics*, Vol. 25, No. 3, 387-405.
- 5) Jug, J. and Mirza D. (2005) Environmental Regulations in Gravity Equations: Evidence from Europe, *World Economics*, Vol. 28, No. 11, 1591-1615.
- 6) Xu, X. (2000) International Trade and Environment Regulation: Time Series Evidence and Cross Section Test, *Environmental and Resource Economics*, Vol. 17, No. 3, 233-257.
- 7) Costantini, V. and Crespi F. (2008) Environmental Regulation and the Export Dynamics of Energy Technologies, *Ecological Economics*, Vol. 66, No. 2-3, 447-460.
- 8) Bergstrand, J. H. (1985) The gravity equation in international trade: some microeconomic foundations and empirical evidence, *Review of Economics and Statistics*, Vol. 67, 481-488.
- 9) Rose, A. K. (2005) Does the WTO make trade more stable?, *The Open Economics Review*, Vol. 16, No. 1, 7-22.
- 10) Baier, S. L. and Bergstrand J. H. (2007) Do free trade agreements actually increase members international trade?, *Journal of International Economics*, Vol. 71, No. 1, 72-95.
- 11) Tsurumi, T., Managi S. and Hibiki A. (2011) Do Environmental Regulations Increase Bilateral Trade Flows?, *Proceedings of 18th Annual Conference of European Association of Environmental and Resource Economists*, http://www.webmeets.com/files/papers/EAERE/2011/714/EAERE2011_Trade_TMH.pdf, (accessed 2011-9-1).
- 12) 竹森俊平 (1994) 国際経済学, 東洋経済新報社, 364.
- 13) Leamer, E. E. (1995) *The Heckscher-Ohlin Model in Theory and Practice*, Princeton Studies in International Finance, 77, Princeton University Press, Princeton, NJ, 55.
- 14) FAO, FAOSTAT, <http://faostat.fao.org/site/537/default.aspx> (accessed 2010-12-15)
- 15) World Bank, WDI, <http://ddp-ext.worldbank.org/ext/DDPQQ/member.do?method=getMembers&useid=1&queryId=135> (accessed 2011-1-25)
- 16) Extended Penn World Tables 3.0, <http://homepage.newschool.edu/~foleyd/epwt/>, (accessed 2011-2-10)
- 17) Rose, Andrew K. <http://faculty.haas.berkeley.edu/arose/StabilityRev.zip>, (accessed 2011-3-1)
- 18) Weedon, G.P., Gomes S., Viterbo P., Shuttleworth W. J., Blyth E., Österle H., Adam J. C., Bellouin N., Boucher O. and Best M. (2011) Creation of the WATCH Forcing Data and Its Use to Assess Global and Regional Reference Crop Evaporation over Land during the Twentieth Century, *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 12, 823-848.
- 19) Ramankutty, N., Evan A., Monfreda C. and Foley J. (2008) Farming the Planet. Part 1: The Geographic Distribution of Global Agricultural Lands in the Year 2000, *Global Biogeochemical Cycles*, Vol. 22, GB1003, 1-19.

2.8 複雑ネットワーク理論によるバーチャルウォーター貿易の分析

2.8.1 研究開始の経緯

本節では複雑ネットワーク理論を利用したバーチャルウォーター貿易の分析について報告する。この課題は当初の研究計画の中に含まれていなかったため、まず研究開始の経緯について説明する。

2009年12月、筆者はアメリカ地球物理学連合大会に出席し、H08を使ったバーチャルウォーター分析の研究成果を報告した（後にHanasaki et al. (2010)¹⁾として出版されるもので、当時は印刷中だった）。このとき研究に関心を示したPrinceton大学の水文学研究室の博士課程の学生に、筆者は原稿を手渡した。その直後、同研究室のMegan Konarが共同研究を提案し、筆者が受諾したことから研究活動が始まった。研究提案は彼女の博士論文の一部であり、複雑ネットワーク理論を利用してバーチャルウォーター貿易を分析するというものだった。筆者が2カ国間のバーチャルウォーター貿易量データを提供し、Megan Konarと、もう一人の博士課程の学生であるCarole Dalinの2人が複雑ネットワーク理論による分析を行うという分担で研究を進めた。2012年7月までに、4編の国際誌が出版され、数編が準備中である。長くメールのみでの共同研究が続いたが、2011年12月、筆者がアメリカ地球物理学連合大会に再び出席した際によく直接会うことができた。

この共同研究が本特別研究に結び付けられる理由は2点ある。第1に、特別研究の成果を含む最新のH08の計算結果を利用しているからである。第2に、バーチャルウォーター貿易を新しい方法論を使って分析する研究であり、2.7節で示した重力モデルを利用した分析を補足し合うからである。

2.8.2 研究の背景

農畜産物の生産には多くの水が必要である。特に降水量の乏しい乾燥・半乾燥地で農畜産物を生産する場合、多くの灌漑が必要となり、水不足の原因となる。このとき、農畜産物を生産せずに輸入すれば、水利用を抑制できる。つまり、農畜産物の輸送が仮想的に水の輸送に相当すると考えることができる。製品の輸出入に伴って仮想的に輸送される水をバーチャルウォーターと言う。

バーチャルウォーターの概念は1993年にTony Allan

によって提唱され²⁾、以降、多くの研究者によって研究が展開された。まず、何人かの水文学者が、バーチャルウォーター原単位（単位重量当たりの製品の生産に必要な水の量）の定量化に取り組んだ。これらの手法は体系化され、バーチャルウォーター原単位、および、バーチャルウォーター貿易量（製品の貿易量にバーチャルウォーター原単位を掛け、換算したもの）のデータベースが製品別・国別の整備された(Oki and Kanae (2004)³⁾; Hoekstra and Hung (2005)⁴⁾など)。これらのデータベースを利用してバーチャルウォーター貿易の分析が多数行われた。最も基本的な分析は、農畜産物貿易によって世界の水資源量がどの程度再配分されているかというものである。農畜産物貿易によって仮想的に輸出入されている水の量をOki and Kanae (2004)³⁾は683 km³/yr、Chapagain et al. (2006)⁵⁾は695 km³/yrと推計した（注：対象としている品目が異なるため、直接比較はできない）。また、バーチャルウォーター節水に関する研究も行われた。これは、輸出国が輸出用製品を作るのに必要な水の量が、輸入国が同じ製品を生産したとして仮想的に必要なになる水の量より小さい時、貿易によって地球全体で消費する水の量を節約できるという概念である。この値をOki and Kanae (2004)³⁾は460 km³/yr、Chapagain et al. (2006)⁵⁾は350 km³/yrと推計した。その後、それぞれの機会費用の違いを考慮するため、バーチャルウォーターの起源を天水と灌漑水に分離する研究が展開されている^{1,5)}。

バーチャルウォーターは水文学に新たな視点を持ち込んだ。すなわち、降水を起源とする水収支が流域単位で閉じるのは水文学の大前提であるが、バーチャルウォーターを導入することで、流域を越えた水の移動という視点が持ち込まれたのである。特に、水問題はローカルな問題という認識を覆した功績は大きい。ただし、未解明の課題も多数残っている。第1に、バーチャルウォーター貿易がどの程度水不足の解決に役立っているのかという問題である。この問題に対しては、そもそもバーチャルウォーター輸送が何によって駆動されているのか、メカニズムを解明しなければならない。第2に、バーチャルウォーター貿易は時間的・歴史的にどう発展してきたのかという問題である。特に過去の政策や国際

情勢、国境の変化はどのような影響をもたらしたのか、関心が集まっている。この問題に対しては、データ不足とデータ処理の煩雑さを解決しなければならない。

共同研究では H08 を利用することで時系列情報を含むバーチャルウォーター貿易量データベースを構築し、複雑ネットワーク理論を利用してネットワークの特性を分析し、さらにネットワークをモデル化することで、構造の要因分析を行った。

2.8.3 時系列情報を含むバーチャルウォーター貿易量データベースの構築

本研究では農産物 5 品目(大麦、トウモロコシ、コメ、大豆、小麦)と畜産物 3 品目(牛肉、豚肉、鶏肉)の国際貿易に伴うバーチャルウォーター貿易量を対象とする。バーチャルウォーター貿易量は次のように表現される。

$$VWT_{e,i} = \sum_c VWC_c \cdot Q_{e,i,c} \quad (1)$$

ここで、 $VWT_{e,i}$ は輸出国 e から輸入国 i へのバーチャルウォーター貿易量、 VWC_c は製品 c のバーチャルウォーター原単位、 $Q_{e,i,c}$ は輸出国 e から輸入国 i への製品 c の輸出入量である。ここで、 $Q_{e,i,c}$ は国連食糧農業機関 (Food Agriculture Organization, FAO) によるデータベース FAOSTAT を利用した。

世界各国の製品別のバーチャルウォーター原単位は全球水資源モデル H08 を利用して推定した¹⁾。H08 には作付日・収穫日・栽培期間を推定する作物成長過程や、その期間中の農地からの蒸発散量を推定する陸面過程に関するサブモデルがある。そこで、H08 を利用して、全球 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ の空間解像度で 1986 年から 2001 年までシミュレーションを実施し、その結果からバーチャルウォーター原単位を製品別国別に推定した。さらに、H08 には灌漑や貯水池に関するサブモデルがあるので、天水起源と灌漑水起源に分類した。

なお、製品の 2 カ国間貿易量および各国の単位面積当たり収量について 1986 年から 2001 年まで時系列データを得ることができた。しかし、バーチャルウォーター貿易量の時系列データを開発するにあたって必要な、気象、農地、灌漑農地、栽培種 (品目・品種) の変化について、気象以外では全球 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ の時系列情報を得ることが困難であった。そこで、農地、灌漑農地、栽培種 (品目・品種) は 2000 年のデータで固定して計算を行っ

た。このため、期間中に大きく農地・灌漑農地が拡大した場合や、栽培期間の大幅な変化を伴う品目・品種の変化が起きたことは、シミュレーションに反映されていないので注意が必要である。

2.8.4 複雑ネットワーク理論

本節では、以降の内容を理解するために必要な複雑ネットワーク理論の基本的な概念について整理する。この理論については、増田と今野 (2006)⁶⁾ と増田 (2007)⁷⁾ に非常によくまとめられているので参照されたい。

世界のバーチャルウォーター貿易をネットワーク (グラフ) に置き換える方法は次のようなものである。まず、国際食料貿易に参加する国をノード、輸出国から輸入国へのバーチャルウォーターの流れをリンクとして表現する。ここで、ノードから伸びるリンクの数を次数と呼び、リンクの太さ (ここではバーチャルウォーターの量) を強度という。

単純な例を示したい。アメリカから日本に 100、日本からアメリカに 10 のバーチャルウォーターが輸出されているとする (表 2-8-1)。この場合、ノードはアメリカと日本の 2 つある。リンクはアメリカと日本の間で 1 本と考えることもできるし、アメリカから日本と日本からアメリカの 2 本と考えることもできる。前者を方向性なし、後者を方向性ありと呼ぶ。

表 2-8-1 は行列を用いることで数学的に表現される。まず、方向性ありの場合、次数に関してはノード間のリンクの本数を要素とする行列で、強度は、あるノードから他のノードへのバーチャルウォーターの量を要素とする行列で、それぞれ以下のように表される。

$$A_D = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad W_D = \begin{pmatrix} 0 & 100 \\ 10 & 0 \end{pmatrix}$$

次に、方向性なしの場合、次数と強度はそれぞれ次のように表される。方向性なしの場合両者とも行列は対称になる。強度に関しては、双方の輸出量の和として定義される。

$$A_U = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad W_U = \begin{pmatrix} 0 & 110 \\ 110 & 0 \end{pmatrix}$$

表 2-8-1 仮想的な輸出入表

	アメリカ	日本
アメリカ	0	100
日本	10	0

2.8.5 バーチャルウォーター貿易のネットワークとしての解釈

本節では、Konar et al. (2011)⁸⁾ にまとめられた1つ目の共同研究の成果について述べる。

この研究ではバーチャルウォーター貿易研究の新しい概念的枠組みと方法論を示した。筆者らは複雑ネットワーク理論を利用して、世界の農畜産物貿易に伴うバーチャルウォーター貿易のネットワーク構造を分析した。バーチャルウォーター貿易をノードとリンクとして表すと図2-8-1のようになる。

まず、ネットワークの次数を分析し、輸出国の次数を降順に並べ替えると、指数分布に従うことが分かった。ただし、この関係は輸入国に対して成り立たないことが分かった。続いて、ネットワークの強度を分析し、強度表したものを降順に並べ替えると、引き延ばされた指数分布とよく一致することが分かった。このことから強度の不均一性、つまり、貿易量が少数の国に偏っていることが示唆された。また、強度と次数の関係を分析したところ、冪乗則に従うことを見出した。すなわち、強度を s 、次数を k とすると、 $s(k) \sim k^\beta$ の関係がある (β は係数)。

次数を分析したところ、貿易相手国の多い国は、貿易相手国の少ない国と結びつく関係があり、クラスタ性(3つ以上の国が相互に結びつく関係)は小さかった。しかし、強度(バーチャルウォーター貿易量)を分析すると、この構造が逆転することが分かった。このことは世界の階層構造、つまり、多くの水を貿易する国は多くの水を貿易する国とつながりやすく、クラスタ性が高いことを示している。このことは特に方向性ありの場合、つまり輸入と輸出を区別したときに顕著であった。

一連の分析の結果、世界のネットワーク構造を形成する決定的な役割を果たす国が明らかになった。この研究は次節で紹介する、地球温暖化に対して貿易ネットワー

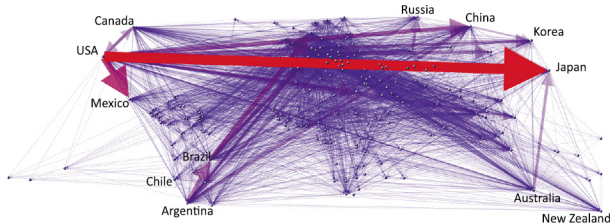


図2-8-1 バーチャルウォーター貿易をノードとリンクとして表したもの (Konar et al., 2011⁸⁾, Fig 2 より)

クを最適化することを目的とした、世界のバーチャルウォーター貿易のモデルの開発のために必要な枠組みを提供した。

2.8.6 バーチャルウォーター貿易のネットワークのモデル化と将来シナリオ分析

本節では、Suweis et al. (2011)⁹⁾ にまとめられた2つ目の共同研究の成果について述べる。

食料生産への影響があるという点において、周期的あるいは一過性の水不足は世界の重大な問題である。この問題の大局的な特徴はバーチャルウォーター貿易に反映されると考えられる。筆者らはまず、前節で示した主要農畜産物に関する国家間のバーチャルウォーター貿易のネットワークの分析を踏まえ、各国のGDPと農地への年降水量のみを説明変数とするネットワークを構築するモデル (Fitness model) を開発した。このモデルにより、ネットワークのトポロジー (ノードとリンクの構造) および重みづけされたリンク (バーチャルウォーター貿易量) が再現できた(図2-8-2)。このモデルによって、バーチャルウォーター貿易のグローバルな結び付きを捉え、定量的に記述することができる。また、ネットワーク構造とバーチャルウォーター再配分において、少数の国が中心的な役割を演じることを明らかにできる。

最後に、筆者らは将来の政治・経済・気候的シナリオにおける、ネットワーク構造の予測の例を示した。この結果によると、大量のバーチャルウォーターを貿易する国への依存度がますます増大することが示唆された。

2.8.7 バーチャルウォーター貿易の時間変化

本節では、Dalin et al. (2012)¹⁰⁾ にまとめられた3つ

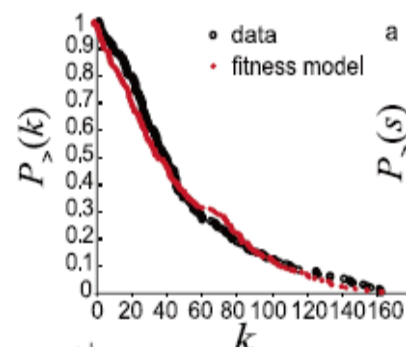


図2-8-2 次数 (k) の累積分布関数。点は現実のネットワーク、赤線は Fitness model。(Suweis et al. (2011)⁹⁾, Fig2 より抜粋)

目の共同研究の成果について述べる。

世界の淡水資源利用は、経済成長、人口増加と気候変化により、増大の圧力下にある。筆者らは FAOSTAT から得られた各年の貿易量と H08 でモデル推計して得られた各年のバーチャルウォーター原単位を利用して、1986～2007年の各年のバーチャルウォーター貿易ネットワークを構築した。筆者らは1986～2007年のネットワークの発展を分析し、実際に起こった貿易政策・社会経済状況・農業効率化と関連付けた。この結果、世界の農畜産物貿易のリンク数とバーチャルウォーター貿易量は22年で2倍に増加したことが示された。ネットワークには22年にわたって継続的・組織的に特徴が維持されているものもあるが、地域や国のバーチャルウォーター貿易のパターンは大きく変化した。例えば、アジアはバーチャルウォーター輸入量が170%も増加し、北米から南米へと主要な相手国が変化した。中国のバーチャルウォーター輸入の増加は2000年の国内政策の変更による大豆輸入の増加に関連付けられた。重要なことに、この変化は世界の大豆市場において、バーチャルウォーター節水概念により、世界全体を節水に向かわせた。しかし、この変化はブラジルの大豆生産に依存するため、アマゾンの森林伐採に間接的に貢献することになる。筆者らは国際食料貿易が世界の水資源の節約につながっていることを見出した。世界全体の水利用という観点において、効率改善が行われていることが示唆された。

2.8.8 水源に着目したバーチャルウォーター貿易の時間変化

本節では、Konar et al. (2012)¹¹⁾ にまとめられた4つ目の共同研究の成果について述べる。

世界の食料安全保障は食料品の貿易により大きく依存しつつある。農業生産に必要な水資源は圧倒的に降水を起源とするもの（グリーンウォーター）だが、灌漑を起源とするもの（ブルーウォーター）も重要な役割を果たしている。これらの異なる水源は明瞭に異なる機会費用を持っており、水源別のバーチャルウォーター貿易の時間変化も考慮していく必要がある。1986年には世界で $42 \times 10^9 \text{ m}^3$ のブルーウォーターと、 $310 \times 10^9 \text{ m}^3$ のグリーンウォーターが1986年に貿易されていたが、2008年にはそれぞれ $78 \times 10^9 \text{ m}^3$ と $594 \times 10^9 \text{ m}^3$ になったと推定された。グリーンウォーターの主要な輸出国はアメ

リカ、アルゼンチン、ブラジルの3つの国である。分析の結果、1つの国が輸出相手国を増やすにつれ、より多くのブルーウォーターが輸出されるようになる傾向があるものの、輸入相手国が増えても特定の水源の輸入が増えるわけではないことが分かった。貿易相手国が増えるにつれて、ある国が輸入するバーチャルウォーターの量は時間とともに減少しているが、大豆の貿易は例外で増えている。バーチャルウォーター節水について検討したところ、ブルーウォーターとグリーンウォーターのネットワークはともに効率的であることが分かった。つまり、1984年にはそれぞれ $52 \times 10^9 \text{ m}^3$ および $39 \times 10^9 \text{ m}^3$ が、2008年には $119 \times 10^9 \text{ m}^3$ および $105 \times 10^9 \text{ m}^3$ が節約された。重要なことに、水利用が効率的になるように農畜産物貿易が活性化しているため、時間とともに節約量が上がっている。

2.8.9 まとめと今後の課題

複雑ネットワーク理論を用いた研究を展開した。従来の研究において、バーチャルウォーター貿易は各国の水資源の多少と常に結び付けられていたが、ネットワークを数学的に捉える事により、新たな視点から、客観的に分析を進めることができた。これは世界で初めての試みであり、著名な雑誌に4編の論文を掲載することもできた。ただし、これまでに実施した分析は極度に抽象的であり、今の段階では現実世界における解釈や政策的含意を得にくい。この新しい分析手法と、既存の水資源分析を高度に融合し、政策支援に資する情報を提供すべく、研究を続けていくことが必要である。

参 考 文 献

- 1) Hanasaki, N., Inuzuka T., Kanae S. and Oki T. (2010) An estimation of global virtual water flow and sources of water withdrawal for major crops and livestock products using a global hydrological model, *J. Hydrol.* Vol. 384, 232-244.
- 2) Allan, J.A. (1993) Fortunately there are substitutes for water: otherwise our hydropolitical futures would be impossible In *Priorities for water resources allocation and management* London, UK: Overseas Development Administration, 13-26.
- 3) Oki, T. and Kanae S. (2004) Virtual water trade and

- world water resources, *Water Sci. Technol.* Vol. 49, 203-209.
- 4) Hoekstra, A.Y. and Hung P.Q. (2005) Globalisation of water resources: international virtual water flows in relation to crop trade, *Global Environ. Chang.* Vol. 15, 45-56.
 - 5) Chapagain, A.K., Hoekstra A.Y. and Savenije H.H.G. (2006) Water saving through international trade of agricultural products, *Hydrol. Earth Syst. Sci.* Vol. 10, 455-468.
 - 6) 増田直紀, 今野紀雄 (2006) 「複雑ネットワーク」とは何か, 講談社ブルーバックス
 - 7) 増田直紀 (2007) 私たちはどうつながっているのか, 中公新書
 - 8) Konar, M., Dalin C., Suweis S., Hanasaki N., Rinaldo A. and Rodriguez-Iturbe I. (2011) Water for food: The global virtual water trade network, *Water Resour. Res.* Vol. 47, W05520.
 - 9) Suweis, S., Konar M., Dalin C., Hanasaki N., Rinaldo A. and Rodriguez-Iturbe I. (2011) Structure and controls of the global virtual water trade network, *Geophys. Res. Lett.* Vol. 38, L10403.
 - 10) Dalin, C., Konar M., Hanasaki N., Rinaldo A. and Rodriguez-Iturbe I. (2012) Evolution of the global virtual water trade network, *P. Natl. Acad. Sci. USA*, Vol. 109, 5989-5994.
 - 11) Konar, M., Dalin C., Hanasaki N., Rinaldo A. and Rodríguez-Iturbe I. (2012) Temporal dynamics of blue and green virtual water trade networks, *Water Resour. Res.*, Vol.48, W07509.

2.9 水取引制度導入の有効性の評価に関する研究

2.9.1 経済学による水資源管理へのアプローチ

本節では、分野横断的な水資源管理に対する取り組みの1つとして、経済学の立場から渇水時の水資源配分のあり方について分析した成果をまとめる。我が国では、水需要に対して十分な供給がされるように水資源開発が進められてきた結果、普段生活している中で水が「資源」であることを実感することは少ない。しかし、いったん渇水が起これば、利用者間で競合が起こることとなり、水が限られた資源であることが実感できるであろう。経済学では、「限りある資源を誰がどれだけ使うか」という資源配分の問題が根本的な関心事の一つであり、効率的な資源配分を達成する方法として、市場メカニズムを通じた配分方法が提案されている。本節では、現行制度下のように、市場メカニズムに基づかない渇水時の水資源配分の問題点を明らかにし、その社会的費用を定量的に評価する。

2.9.2 研究の背景と目的

2.9.2.1 現行の水資源配分の課題—利水者間の渇水リスク格差

水資源は、水利権に基づいて利水者間で利用量が配分されている。この配分は、主に歴史的経緯によって決まってきたものである。このため、水の需要が増大すると、利水者間で水利権を再配分するのではなく、水資源を新たに開発することで新しい水利権を創出する形で対応してきた。

したがって、平常時においては、利水者は必要に応じて水を利用することができ、そのことで他者の水の利用を制限することにはならない。水を利用するための費用は、水道料金や水利費といった形で負担されているが、他の利水者との調整のための追加的な費用は発生しないとよい。

ただし、いったん渇水が発生すると、十分な水を利用できない者が現れ、利水者間で競合が起こることとなり、利水者間でどのように配分するかが問題となる。現在の日本では、利水者間で「水融通」が行われ、誰がどれだけの水を使うかが調整されている。水利用を増加させることで社会的便益をより大きく増加させる用途に水資源を配分すること、すなわち限界便益に応じた水資源

の配分が、水利用の総便益を最大にするためには重要な条件となる。しかし実際には、現在の水融通は、複雑な利権関係や歴史的経緯に基づいて行われており、限界便益に応じた水資源配分が実現されているわけではない。また、水利権は一度手放すと再度手に入れることが難しく、必要性の低い水利権を所有し続ける動機となっている。こうしたことが原因となって、渇水リスクには、地域間、利水者間で格差が存在しているのが現状である。

2.9.2.2 市場取引による効率的な水資源配分の達成

限界便益に応じた水資源配分の達成を助ける手段として、水の市場取引（水取引）が世界的に注目されている。水取引とは、水資源に利用権²⁰を設定して価格をつけ、利水者が必要に応じて水資源を購入・売却できるという制度であり、広く知られている例としてカリフォルニア渇水銀行によるプログラムがある²¹。渇水時に水資源を市場取引できるようにすれば、限界便益の高い者は、限界便益の低い者から利用権を購入することで、多くの水資源を利用できるようになる。なぜなら、限界便益の高い者、すなわち、水の利用を増やした場合により大きな便益を生み出すことのできる者は、利用権に対して高い支払意志額を持ち、限界便益の低い者は低い支払意志額しか持たない。このため限界便益が低い者は、自分の支払意志額より利用権価格が高ければそれを売ろうとし、限界便益が高い者は、利用権価格が支払意志額より低い限り、それを購入して水を利用しようとするからである。逆に、限界便益の低い者からすれば、水資源を利用しないことによって便益（生産の利益）を失うが、権利を売ることによって受け取る対価がそれを上回れば、このような取引は、限界便益の低い者にもメリットがある。このようにして、利水者間で取引を行った結果、限界便益

20 利用権には、現在の取水権のようにストックについて設定するもの（恒久的な利用権）だけでなく、フローについて設定するもの（一時的な利用権）の2種類が考えられる。ただし、恒久的な利用権を市場取引するには、権利関係の整理と大規模な法改正が必要となることから、現実的ではない。実際に、カリフォルニア渇水銀行で取引される利用権は、新たに設定された一時的な利用権である。

21 ただし、カリフォルニア渇水銀行による水市場は自由な市場ではなく、効率的な水資源配分が保証されるものではないことが、遠藤（2007）¹¹で指摘されている。

の高い利水者に多くの水資源が配分され、限界便益の低い利水者には少ない水資源が配分されることとなる。つまり、水取引を通じて、限界便益に応じた水資源配分が実現され、社会全体としての渇水による損失を小さくすることが期待できる。

2.9.2.3 渇水リスク格差の存在による社会的費用の定量的評価

利用者間で水資源の利用が限られていることで、限界便益の高い者が水を利用できず、水利用が非効率になってしまう。そこで、日本においても、渇水時の効率的な水資源配分を通じた水利用の安定性の確保や、未使用淡水資源の有効利用といった観点から、水取引制度に目が向けられ始めている。しかし、非効率な水利用によって失われる便益（以下では、社会的費用と呼ぶ）に関する研究は進んでおらず、制度に関する議論をするための情報は依然として乏しい。

こうした背景から、本節では、渇水リスク格差が存在することによる社会的費用を定量的に評価することを目的とした分析を行う。渇水時に水取引を行うことで、農業用水・都市用水の用途間でどのような水資源配分が達成されるか、それによる経済への影響を、シミュレーション分析を行うことで明らかにし、用途ごとに水利用が限られていることの社会的費用を定量的に評価する。想定する渇水は、数年間（3～5年間）にわたる連続的な渇水とする。渇水は流域スケールで起こるが、たとえば農作物の収量に影響が出た場合、その影響は農業部門のみではなく、域内・周辺地域の飲食料品部門や家庭部門にも広く波及すると考えられる。そこで本節では、日本を9地域に分割した多地域応用一般均衡モデルを開発し、関東で渇水が起こった場合の域内の影響と、周辺地域への波及的影響を分析することとする。

2.9.3 効率的な水資源配分に関する先行研究

2.9.3.1 日本の水資源利用による限界便益

日本を対象とした用途間の水資源配分に関する定量分析を行った研究として、福石（2010）²⁾が挙げられる。福石（2010）²⁾では、産業連関線形計画法によって部門別の水資源利用によるGDPへの限界的な寄与が計算されており、農業部門よりも製造業部門の方が水利用によるGDP増加への貢献度が高いという結果が得られている。しかし、水取引によって限界便益に応じた水資源を

配分した場合には言及されていない。また、計算されているのは全国の平均的な値であるが、気候変動による影響を踏まえるのであれば、降雨の変化などの影響は日本全国で均一ではない上、地域間で産業構造や水資源への依存度は大きく異なる。したがって、水資源が制約された場合の経済的影響を地域ごとに見ておく必要がある。

2.9.3.2 応用一般均衡モデルを用いた水資源問題の経済的評価に関する研究

応用一般均衡モデルを用いて水資源配分問題の経済的評価を行った先行研究は海外で多く行われており、水資源と貿易の関わりを分析したものと、水逼迫度の高い国を対象に、国内でどのように水資源をマネジメントするのかを分析したものに分けられる。

Diao and Roe（2003）³⁾では、モロッコを対象として、農作物貿易の自由化と水資源の再配分について動的応用一般均衡モデルで分析を行っている。農作物の関税が撤廃されることで国内の農業部門は縮小するが、同時に水資源市場を創設することで、水資源の効率的な利用を達成することができるとともに、農家が貿易自由化による損失を補填することが可能であるとされている。Berritella et al.（2007）⁴⁾では、世界を対象とした応用一般均衡モデル（GTAP-W）を用いて、農業部門の水資源量が減少した場合に経済（貿易・GDP・厚生）にどのような影響が出るのかを定量的に把握している。水資源制約をうける地域での農作物の生産が減少する一方、制約を受けない地域での生産は増加するという結果を示している。また、水資源制約に直面する地域の経済厚生が悪化するケースが多く、水が部門間で移動できない場合には、影響がより深刻に出るという結果を示している。Calzadilla et al.（2010）⁵⁾では、GTAP-Wを用いて、農業部門で利用される水の供給源（Blue water と Green water²²⁾）を区別して扱い、2025年における農業部門での水利用形態の違いによる経済への影響を評価しており、経済と環境の持続性の間にトレードオフ関係があることを明らかにしている。

国内の水資源配分や、水資源配分による所得配分へ

22 Blue water とは、降雨のうち河川、湖沼、貯水池、地下水層に留まるものを指し、この一部が灌漑に利用されている。Green water とは、降雨のうち蒸発と蒸散で大気中へ戻るものを指し、森林や天水作物への供給源となっている。

の影響を評価した先行研究も多数存在する。Letsoalo et al. (2007)⁶⁾では、南アフリカにおいて、灌漑農業部門、資源採掘部門、林業部門での水資源利用に対して水利用税を徴収することで、三重の配当²³⁾が得られるかどうかを、応用一般均衡モデルで評価している。Van Heerden et al. (2008)⁷⁾でも南アフリカの部門間ごとの水利用税と所得分配の関係が明らかにされている。Hassan and Thurlow (2011)⁸⁾でも、同じく南アフリカにおける水資源マネジメントを対象とされており、農業部門内での水資源の配分や都市部の製造業部門と農村部の水資源配分について論じられている。Cakmak et al. (2008)⁹⁾では、多地域応用一般均衡モデルを用いて、食料価格の世界的高騰や気候変動による外生的なショックがあった場合に、トルコの農業部門と非農業部門にどのような影響があるかを、水資源の配分を含めて分析されている。

以上の先行研究の中では、世界と日本国内という対象の違いや、農業部門分類の細かさという違いはあるものの、特定地域での水資源制約による地域間取引(貿易)を通じた経済的影響を分析しているという点では、Barrittella et al. (2007)⁴⁾が本節に最も近い立場にある。また、産業部門別の水の限界便益の評価に関しては、福石 (2010)²⁾が参考となる。

2.9.4 定量評価分析に使用するモデルとシミュレーションシナリオ

2.9.4.1 モデルとデータ

分析に使用するモデルは、多地域応用一般均衡モデルである。応用一般均衡モデルとは、経済学分野における一般均衡理論に基づいて構築される経済モデルの1つである。応用一般均衡モデルでは、外生ショックがある市場だけでなく、他の複数の市場との相互作用まで含めた分析を行うことができるため、貿易自由化や、温暖化対策制度の導入の議論において広く使用されているツールである。

本節で使用するモデルは日本を北海道、東北、関東、中部、近畿、中国、四国、九州、沖縄の9地域に分割しており、9地域それぞれに34生産部門(34種類の財を生産する34の代表的企業)と1つの代表的家計が存在し、

23 ここでいう「三重の配当」とは、水資源マネジメント料金を課して水資源の配分を効率的にし、かつ収入をうまく還流することで(1)水資源の節約(2)経済成長の加速(3)衡平な所得分配に資することができるという意味で使用されている。

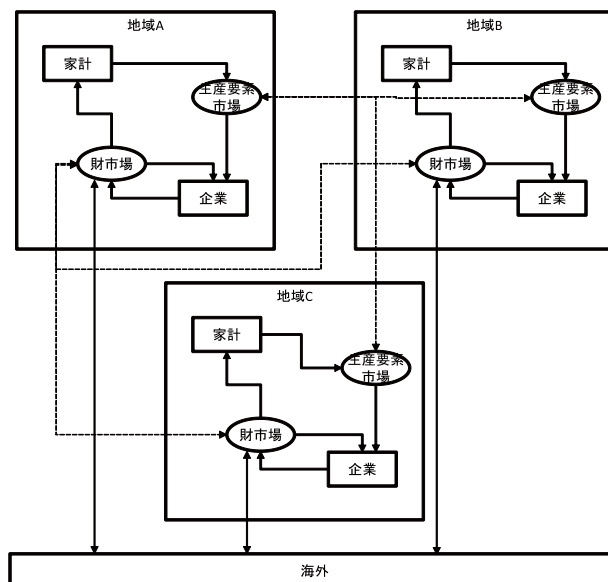


図 2-9-1 モデルの全体構造

それぞれ生産活動、消費活動を行うことが想定されている。9地域の間では財・サービスの取引が行われる(図 2-9-1、表 2-9-1)。

本モデルでは市場水と非市場水を分けて考えている。(図 2-9-2)市場水とは、水道事業部門(上水道・工業用水道)を通して供給される水を指しており、価格(水道料金)を支払うことで使用することができる。市場水の利用者は、家庭部門、製造業部門、サービス産業部門である。非市場水とは、表流水・伏流水、井戸水など直接取水される淡水を指しており、価格はない²⁴⁾。非市場水の利用者は、農林水産部門、製造業部門、公益事業部門(電力・ガス・熱供給)、公務部門である²⁵⁾。なお、本節における非市場水は、新たに取水される水のみを対象とし、製造業部門における回収水、および水力発電に使用される水は除外している。モデルでは、市場水・非市場水を、各部門の生産のために投入される財として扱っている。水道事業部門が供給する市場水は、図 2-9-3における中間財として投入される。一方、非市場水は、多段入れ子型の生産関数の最上段で、他の合成中間投入財および生産要素の合成財と比例的に投入される

24 現実には水利権があり、非市場水の利用についても価格が発生しているが、本節では従来の水利権に相当する費用負担については資本の一部として取り扱うこととしている。

25 家庭部門においても、東北や九州の一部の県を中心として非市場水の利用が認められる。しかし、我が国の水道普及率(給水人口/総人口)は2005年時点で97.2%に上ることから(厚生労働省健康局水道課調べ)、本節では対象としないこととする。

表 2-9-1 財・産業区分と水利用

財・部門名	市場水	非市場水	財・部門名	市場水	非市場水
1 農林水産業	×	○	18 輸送機械	○	○
2 鉱業	○	×	19 精密機械	○	○
3 石油・原油・天然ガス	○	×	20 その他製造業	○	○
4 飲食料品	○	○	21 再生資源回収	○	×
5 繊維	○	○	22 建設	○	×
6 紙パルプ	○	○	23 電力	○	○
7 化学	○	○	24 ガス・熱供給	○	○
8 石油・石炭製品	○	○	25 水道・廃棄物処理	○	○
9 プラスチック	○	○	26 商業	○	×
10 窯業・土石	○	○	27 金融保険	○	×
11 鉄鋼	○	○	28 運輸	○	×
12 非鉄金属	○	○	29 通信	○	×
13 金属製品	○	○	30 公務	○	○
14 一般機械	○	○	31 教育・医療	○	×
15 電気機械	○	○	32 対事業所サービス	○	×
16 通信機器	○	○	33 対個人サービス	○	×
17 電子部品	○	○	34 その他サービス	○	×

関係を想定している。

現実に渇水時に節水する場合には、水を利用しないことによって失われる利益、すなわち、節水による機会費用が発生しているが、本モデルは、この機会費用を水資源制約のシャドウ・プライスとして明示的に扱うことができるメカニズムを持っている。このメカニズムにより、2.9.2.2 で述べた水取引をモデルで扱うことができる。詳細については岡川と増井 (2012)¹⁰⁾ を参照されたい。

本モデルで使用している経済データは、『平成 17 年地域間産業連関表¹¹⁾』である。関東地域²⁶⁾ の GDP は全国の 44 % を占め、次いで近畿、中部が大きな経済規模を持つ地域となっている。関東・中部・近畿は農林水産業部門の締める割合が他の地域よりも低い。

各地域・各部門の取水量データについては、製造業部門については『工業統計調査¹²⁾』を使用した。農業部門・発電・水道・公務部門における取水量（非市場水投入量）については『日本の水資源²⁷⁾』に掲載されている国土交通

26 関東地域に含まれる都道府県は、茨城、栃木、群馬、埼玉、千葉、東京、神奈川、新潟、山梨、長野、静岡である。

27 平成 19 年度版¹³⁾、平成 20 年度版¹⁴⁾、平成 21 年度版¹⁵⁾、平成 22 年度版¹⁶⁾ の各版より、2005 年に関する該当データを収集した。ただし、発電事業、ガス供給、熱供給部門の非市場水使用量については、2003 年の値を参照している。

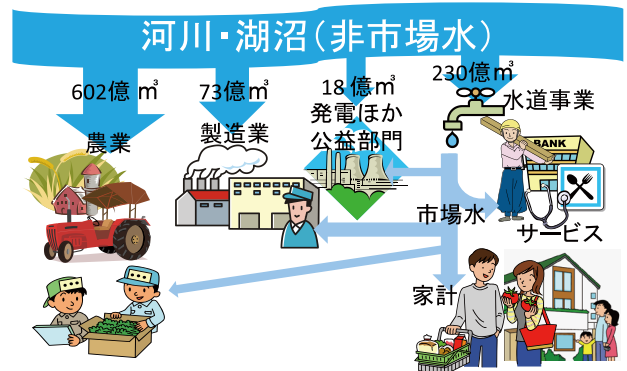


図 2-9-2 市場水と非市場水

省水資源部による推定量を使用した。

主要部門の粗生産額あたりの取水原単位 (m³/百万円) を表 2-9-2 に示す。同一部門であっても、地域によって取水原単位は大きく異なる。これは、各部門を構成する基本部門の違いや、各基本部門が保有する技術の違いに起因する。例えば農林水産部門について見ると、東北と中部の値が他の地域に比べてかなり大きい。この違いをもたらしている最も大きな要因は作付けの違いであり、東北や中部などの水田の割合が高い地域では取水原単位の値が大きくなる。また、灌漑効率の違いといった要因も考えられる。製造業部門における原単位の違いの要因としては、部門分類の粗さ、すなわち同じ部門に分類されてもその構成が地域によって異なることと、回

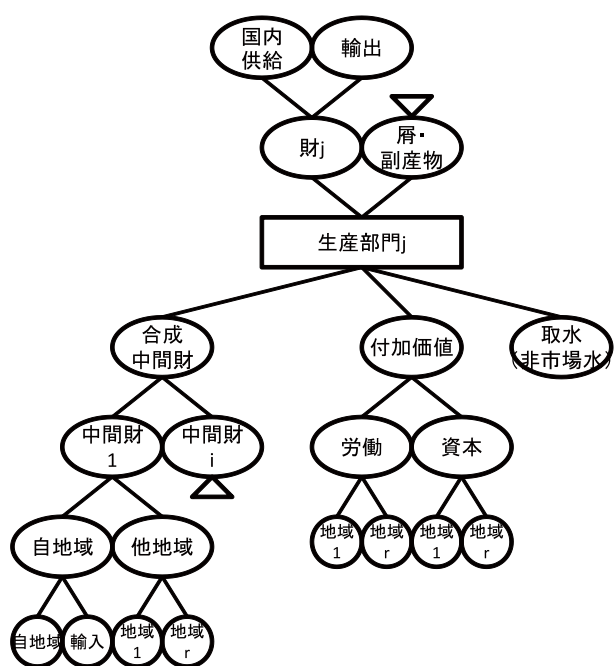


図 2-9-3 生産構造

取水利用などの生産設備の違いが挙げられる。

2.9.4.2 定量評価分析のためのシミュレーションシナリオの設定

本節では、基準ケースを平常時、すなわち水資源の供給が需要を上回っている状態とする。この基準ケースに対して、渇水が起こった場合に、水取引によって水資源利用の限界便益の大きい利用者が、一時的な水資源利用のための費用（利用権価格）を負担し、限界便益の低い利用権の所有者から利用権を購入することによって水資源を利用することを想定した以下2つのシナリオについてシミュレーション分析を行う。渇水発生を想定する地域は、経済規模が大きく、周辺地域に対して大きな影響力を持つ関東とする。

(1) 部門別取引ケース

関東で渇水が発生し、5%の取水制限を行うものとする。取水制限は、農林水産業、製造業、電力・ガス・熱供給・公務（公益部門）、水道・廃棄物の用途ごとに行う。取水制限は、平常時の取水量の95%分の取水権を用途ごとに発行することで行う。発行された取水権は取引可

表 2-9-2 地域別部門別取水原単位 (m³/百万円)

	北海道	東北	関東	中部	近畿	中国	四国	九州	沖縄
農林水産	2,567.3	8,892.8	2,723.6	8,777.1	5,605.8	6,182.2	3,333.1	3,142.6	2,282.5
飲食料品	88.7	27.0	21.4	29.2	17.8	19.2	38.5	39.3	107.2
繊維	28.7	337.3	81.1	274.5	131.3	90.9	299.6	227.8	198.5
紙・パルプ	1,487.3	531.8	156.4	331.6	59.1	700.1	191.6	615.8	497.1
化学	77.2	74.8	12.7	90.0	17.8	71.4	41.5	154.8	46.9
石油・石炭製品	0.5	0.5	0.8	1.2	0.9	0.9	0.5	0.5	0.5
プラスチック	13.2	13.8	14.3	38.9	42.6	13.1	73.5	65.1	30.1
窯業・土石	56.4	55.2	36.3	48.4	26.7	51.8	102.1	35.7	21.3
鉄鋼	163.8	40.7	21.1	6.1	11.3	8.0	6.7	31.5	16.3
非鉄金属	154.7	48.3	25.2	31.4	8.7	4.6	10.7	4.3	20.9
金属製品	1.4	13.5	7.4	16.5	4.1	8.0	3.2	6.5	8.2
一般機械	2.0	2.8	2.4	5.0	1.4	0.6	6.6	1.6	2.9
電気機械	10.9	2.0	5.3	4.5	3.9	4.2	2.6	6.2	4.4
通信機器	0.2	0.8	1.2	1.4	0.7	0.1	0.0	0.8	-
電子部品	17.6	4.2	6.7	13.0	10.8	0.9	5.7	11.3	-
輸送機械	0.9	3.4	3.3	2.0	2.1	0.9	0.3	1.6	2.2
精密機械	7.7	6.3	5.3	10.1	2.7	13.2	3.3	51.5	7.7
その他製造業	6.1	12.2	6.9	10.2	5.1	4.6	15.0	12.3	4.4
電力	32.5	32.5	32.5	32.5	32.5	32.5	32.5	32.5	32.5
ガス・熱供給	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
水道・廃棄物処理	2,658.1	3,331.2	2,075.6	4,258.1	2,735.4	4,435.7	4,873.2	2,856.3	2,560.5
公務	34.8	341.7	0.7	139.5	6.5	14.3	-	-	-

能であり、用途ごとにオークション形式で初期配布されるものとする。

(2) 全部門取引ケース

関東で渇水が発生し、全ての用途に対して5%の取水制限を行う。取水制限は、(1) 部門別取引ケースと同様の方法で行うが、部門を超えた取水権の取引が認められる。

現在の取水制限は、上水、工業用水、農業用水といった用途（部門）ごとに節水率を設定する形で行われることが多いため、(1) のように部門ごとに水資源を融通することを想定したシナリオを設定する。(1) では、各部門内では、水取引によって取水の限界便益が均等になるように水資源が配分される。しかし、部門ごとに取引市場が分断されていることから、4つの部門間の取水権の価格は異なり、取水の限界便益は異なる結果となる。それに対して、(2) では、全部門の合計取水量に対して取水上限が設定され、4つの部門の間で水取引が行われることから、取水による限界便益は均等化される。

(1) と (2) を比較することで、部門を超えた水融通によって、渇水による被害がどの程度緩和されるのか、逆に言えば、部門間で水融通が制限されていることの費用を評価することができる。また、水取引における潜在的な売り手と買い手を特定することができる。

2.9.5 シミュレーションの結果

2.9.5.1 部門別取引ケース

部門別取引ケースでは、部門をこえた水取引が認められないため、4つの部門で異なる水資源価格（利用権価格）がつく。部門別の利用権価格は、農林水産業部門で18.8円/m³、製造業部門で848.6円/m³、水道部門で2282.4円/m³、公益部門で79.0円/m³となった。(表2-9-3)この値はそれぞれの部門における非市場取水5%削減による限界便益を表しており、限界便益の部門間格差の存在を示していると言える。

図2-9-4(1)によると、取水制限に直面した関東地方の地域の付加価値の合計²⁸減少幅が一番大きく、約0.02%減少する。財の取引を通じて、関東地域以外も影響を受ける。とくに東北・北海道・中部への影響は他の地域に比べて大きい。また、図2-9-5(1)から、関東のGDP低下の要因は、消費の減少であることがわかる。

28 地域GDPは「GDP = 消費 + 投資 + 移出 - 移入 + 輸出 - 輸入」と定義される。

表2-9-3 利用権価格（円/m³）

	(1) 部門別取引	(2) 全部門取引
農林水産	18.8	35.0
製造業部門	848.6	35.0
公益部門	2,282.4	35.0
水道・廃棄物	79.0	35.0

注) 基準ケースでは水資源供給が需要を上回るとしていることから、どの部門にも水資源価格は発生しない。

部門別生産量を見ると、関東地域の農林水産業の生産量は5%減少している(図2-9-6)。これは他の部門との水取引を認めておらず、非市場水の取水量が生産量に比例しているという生産技術構造の仮定によるものである。また、製造業部門は全体として生産を縮小する結果となった。これは、部門別取引ケースでは、関東地域の製造業部門のみで非市場取水量を5%削減しなければならないことによる。繊維、紙パルプ部門といった取水原単位の大きい部門を中心に生産量が減少しているが、必ずしも原単位の大きい順に影響を受けるわけではない。例えば、表2-9-1によると窯業・土石は鉄鋼より取水原単位が大きいですが、鉄鋼の方が生産量の減少幅が大きい。この影響の違いは、他の地域との競争の度合いが部門別に異なることが一因となっている。

周辺地域の部門別生産量への影響(図2-9-7)を見ると、関東域内とは逆に、農林水産業や水資源集約的な製造業部門の生産量が増加しており、関東の渇水による生産の落ち込みが、周辺地域での生産増加によってカバーされていることがわかる。また、このことから、周辺地域での水資源利用量が増加していることが示唆される。

2.9.5.2 全部門取引ケース

全部門取引ケースでは部門を越えた水取引を行うことから、全部門で同じ取水権価格(35.0円/m³)となる。(表2-9-2)どの部門も水資源を1m³使用することで、35円の限界便益が得られるということを意味しており、渇水リスクが部門間で均等化されていると言える。(1) 部門別取引ケースの取水権価格と比べると、35.0円/m³よりも低い価格がついているのは、農林水産業のみである。このことから、全部門で取引を行うケースでは、農林水産業が水資源の売り手、それ以外の部門が買い手となっていることがわかる。また、関東地域のGDPの減少率は約0.005%となり、(1) 部門別取引ケースよりも

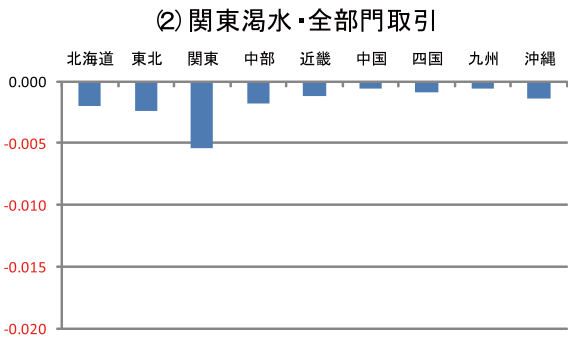
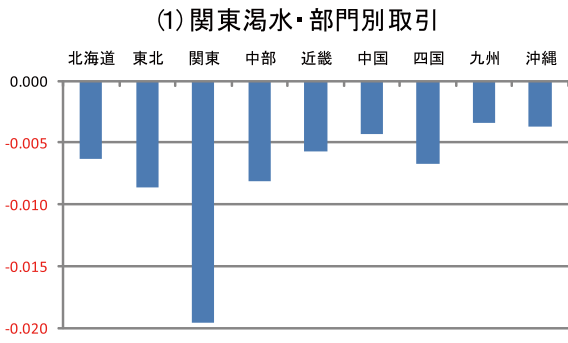


図 2-9-4 各地域の GDP への影響（基準ケースからの変化率%）

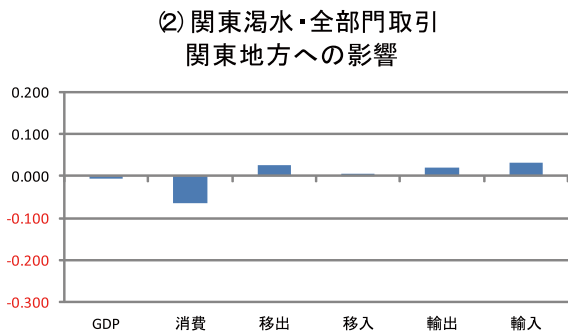
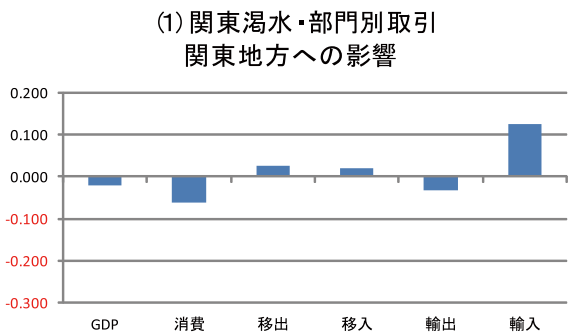


図 2-9-5 地域 GDP 変化率（%）に対する寄与度

影響が小さくなった。（図 2-9-4 (2)）

関東地域の農林水産部門の生産量は 8%減少している（図 2-9-6）。このことは、農林水産部門の水利用量も同時に 8%減少していることを意味するが、全体としての取水制限は -5%であることから、農林水産業から他の部門に対して 3%ポイントの水資源が融通されているこ

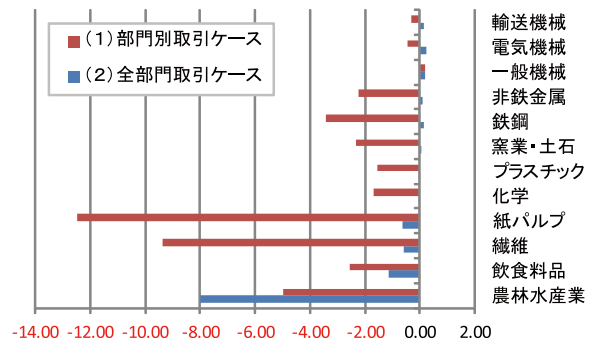


図 2-9-6 関東地域の部門別生産量への影響（基準ケースからの変化率%）

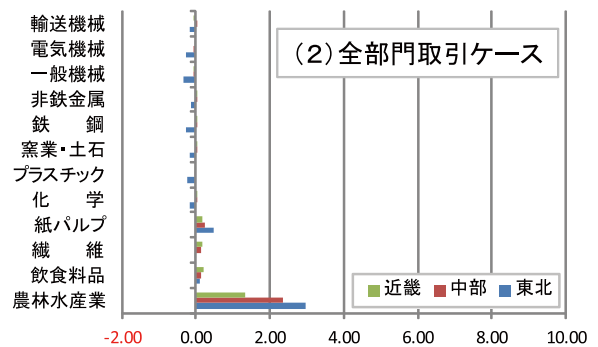
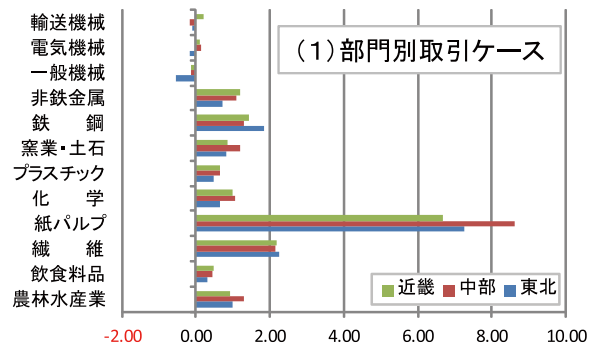


図 2-9-7 周辺地域の部門別生産量への影響（基準ケースからの変化率%）

とがわかる。製造業への影響は、(1) 部門別取引ケースに比べて大幅に緩和されていると言える。ただし、飲食料品部門は農作物を多く投入していることから、取水原単位の大きさのわりに影響を強く受けているものと考えられる。

2.9.5.3 シミュレーション結果のまとめ

本節のシミュレーション分析の結果を以下にまとめる。第 1 に、部門ごとに水取引を認めないケース (1) では、水資源の限界便益は部門間で大きく異なり、部門ごとに渇水リスクの格差が存在することがわかった。とくに農業部門と製造業部門の水資源の限界便益の差が大きいと言え、農業部門は潜在的な水資源の売り手、他は

買い手であることがわかった。

第2に、部門を越えた水取引を行うことで、渇水の経済影響は全体として緩和されることが示された。部門ごとに水市場が分断されているケース(1)では、農林水産部門、製造業部門ともに生産量の減少が見られた。一方で、部門間の水取引を認めるケース(2)では、農林水産業から製造業へ水資源が融通されることで、全体の影響が緩和される結果となった。

第3に、渇水が起こった場合、非市場水取水原単位の大きい部門を中心に影響を受けるが、必ずしも原単位の大きい順に大きな影響を受けるわけではない。これは、他の地域との競争の度合いが、部門ごとに異なるためである。

以上の結果を先行研究との比較によって評価する。福石(2010)²⁾によると、日本の全国平均の部門別水シャドウ・プライスは、農林水産業部門で低く、製造業部門で高い結果となっている。これは本節の分析結果の傾向と概ね一致するものである。

Barrittella et al. (2007)⁴⁾では、ある地域で水資源制約が課せられると、別の地域での水の利用量が増加するという結論が出されており、本節の分析結果は整合するものである。制約のかかった地域のGDPは減少し、水が部門間で移動できない場合には、影響が深刻に出るという点でも一致している。また、農業部門における水利用の限界便益が他の部門に比べて小さいという結果も一致するものである。

2.9.6 結論

本節では、数年単位で起こる連続的な渇水を想定し、水資源を限界便益に応じて配分した場合の経済的影響を、多地域応用一般均衡モデルを用いて分析し、部門ごとに水利用が限られていることの費用、すなわち、非効率な水利用によって失われる便益(付加価値合計)を評価した。分析結果に基づけば、部門間での水利用の限界便益は大きく異なることから、渇水時に水資源に価格をつけて部門間で取引を行うことにより、全体としての経済的影響は緩和される。関東地域で5%の取水制限を行う際に、部門間で水が融通されないことの社会的費用は、関東地域の地域GDPで見ると、0.015%ポイントとなった。これは、約32億円に相当する額である。

将来温暖化が進み、渇水が頻発するようになれば、部門間で水をスムーズに融通し、各地域・各部門の限界便

益の格差をなくして社会的費用を最小にするニーズが高まっていくと考えられる。水資源の利用について、歴史的経緯や食料や貿易といった他の政策との整合性と併せて、効率性に配慮した制度設計が求められる。

2.9.7 今後の課題

本節の分析を進めていく過程で、水資源問題、とくに渇水を応用一般均衡モデルの枠組みでとらえることには、乗り越えなければならない課題があることが明らかとなった。この分野の将来的な発展に向けて、今後の課題を明らかにしたことも本プロジェクトの重要な成果であると考えられることから、以下に整理しておく。

第1に、時間スケールの問題である。本節の計算結果は、年間を通じた慢性的な渇水の影響であると言える。しかし実際には、水資源の需給には季節性があるため、渇水は断続的に起こると考えられる。つまり、年間取水量に対する不足量は同じであっても、1ヶ月間断水が続く場合と、1年を通して慢性的に不足しているのでは、経済的影響は異なるということであり、とくに農作物は成長時期に水供給がないことが収量に大きな影響を与えるであろう。このように日単位・月単位の渇水の影響を、年単位の時間スケールを持つ経済データとモデルでどのように評価するかは今後の大きな課題である。

また、第2の課題は、対象とする地域スケールの問題である。渇水は河川の流域単位の問題であるのに対し、応用一般均衡モデルで使用する経済データは県別、地方別、国別といった区分でしか手に入れることができない。今後は、以上のような問題点を解決する手法を開発するとともに、異なったアプローチによる評価も併せて行っていく必要がある。

*本節は、本研究プロジェクトの成果である研究論文

「多地域応用一般均衡モデルを用いた渇水時の水資源配分の経済的評価」(上智経済論集第57巻第一・二号合併号(pp55-75))¹⁰⁾に基づいた内容である。上智経済論集編集委員会の了承を得た上で、論文中の一部の計算結果を抜粋して使用している。

参 考 文 献

- 1) 遠藤崇浩(2007)カリフォルニア渇水銀行の一考察 水配分における政府の役割, 水資源・環境研究,

- Vol. 20, No. 2, 125-136.
- 2) 福石幸生 (2010) 経済学と水資源 - 日本における水のシャドウ・プライスの測定 -, 慶應義塾大学産業研究所ディスカッションペーパー, No.123.
 - 3) Diao X. and Roe T. (2003) Can a water market avert the “double-whammy” of trade reform and lead to a “win-win” outcome?. *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 45, No. 3, 708-723.
 - 4) Berrittella M., Hoekstra A.Y., Rehdanz K., Roson R. and Tol R.S.J. (2007) The economic impact of restricted water supply: A computable general equilibrium analysis. *Water Research*, Vol. 41, 1799-1813.
 - 5) Calzadilla A., Rehdanz K. and Tol R.S.J. (2010) The economic impact of more sustainable water use in agriculture: A computable general equilibrium analysis. *Journal of Hydrology*, Vol. 384, No. 3-4, 292-305.
 - 6) Letsoalo, A., Blignaut J., deWet T., de Wit M., Hess S., Tol R.S.J. and van Heerden J. (2007) Triple Dividends of Water Consumption Charges in South Africa, *Water Resources Research*., Vol. 43, W05412.
 - 7) van Heerden J.H., Blignaut J. and Horridge M. (2008) Integrated water and economic modelling of the impacts of water market instruments on the South African economy. *Ecological Economics*, Vol. 66, No. 1, 105-116.
 - 8) Hassan R. and Thurlow J. (2011) Macro-micro feedback links of water management in South Africa: CGE analyses of selected policy regimes. *Agricultural Economics*, Vol. 42, No. 2, 235-247.
 - 9) Cakmak E.H., Dudu H., Saracoğlu D.Ş., Diao X., Roe T. L. and Tsur Y. (2008) Macro-Micro Feedback Links of Irrigation Water Management in Turkey. *Policy Research Working Paper Series*, No. 4781, The World Bank.
 - 10) 岡川 梓, 増井利彦 (2012) 多地域応用一般均衡モデルを用いた渇水時の水資源配分の経済的評価, *上智経済論集*, Vol. 57, No. 1-2, 55-75.
 - 11) 経済産業省 (2010) 平成 17 年度地域間産業連関表.
 - 12) 経済産業省 (2007) 工業統計調査, 平成 17 年確報 用地用水編.
 - 13) 国土交通省土地・水資源局水資源部 (2007) 第 III 編 日本の水資源と水需給の現況『平成 19 年度版 日本の水資源.
 - 14) 国土交通省土地・水資源局水資源部 (2008) 第 III 編 日本の水資源と水需給の現況, 平成 20 年度版 日本の水資源.
 - 15) 国土交通省土地・水資源局水資源部 (2009) 第 II 編 日本の水資源と水需給の現況, 平成 21 年度版 日本の水資源.
 - 16) 国土交通省土地・水資源局水資源部 (2010) 第 II 編 日本の水資源と水需給の現況, 平成 22 年度版 日本の水資源.

2.10 黄河の水資源

2.10.1 黄河流域における水資源の開発利用

今日、黄河流域における水資源の開発利用をめぐる問題は次のように認識されている¹⁾。最近数十年における大規模な水利事業の推進にもかかわらず、水資源が不足している。1980年代以降、渇水期の持続による流量の減少が著しい。利用できる地表水が少ないため、平原地区における大規模な地下水の汲み上げが行われている。このため、広域にわたり地下水位の大幅な低下が発生している。また、水資源の不足している乾燥・半乾燥地域における水資源需給の矛盾（水資源が必要であるのに使える水資源が存在しない）は深刻化している。国土の52%において、汲み上げ過剰の状態にあり、涵養が進みにくく滞留時間が1万年前後に及ぶ化石水のような深層地下水が利用されている。さらに、急速に発展する都市と工業が、生態環境用水と農業用水を圧迫している。工業用水と農業用水におけるこうした緊張状態にもかかわらず、水資源の浪費問題も深刻である。加えて、水質も劣化している。

黄河流域の1人あたり年間水資源量は約580tであり、これは世界平均の6%、中国平均の24%である²⁾。一方、流域の総水需要は人口増加、灌漑農地の発達、工業化、都市化の進展に伴い増加し続けており、1980年の271億tに対し、近年では年間平均で300億tを超えている³⁾。

以上の背景より、流域全体にわたる地域ごとの水需給構造を把握し、水資源の合理的かつ効率的な利用方法を模索することが重要である⁴⁾。広大な黄河流域では、気候・水文条件が地域によって大きく異なるため、継続的なモニタリングと水循環の解明が進められている⁵⁾。また、主産業である農業には灌漑が必須であり、農業における生産活動や水利用状況の変化が流域全体の水資源需給バランスに大きな影響を与える⁶⁾。そのため、特定の地域における生産活動や水利用の調査もさかんに行われている⁶⁾。一方、流域全体を網羅する水資源需給バランスの把握や総合的な水資源管理を目的とした研究⁷⁾は少なく、その分析に用いられたデータや資料の多くが一般に入手困難であり、用いられた手法や作成されたモデルの内部も不明な部分が多い²⁾。

これらの状況を踏まえ大西ら（2006）⁴⁾は、黄河流域全体の水資源需給の時空間構造を県級行政単位（省級行

政単位、地級行政単位の下の行政単位であり、面積的には日本の郡に相当する。）別・月別に表現し、上流から下流への取水・耗水・還元といった一連の水循環を分析するための枠組みを提示した。彼らのモデルにおいては黄河流域に属する県級行政単位をボックスで表現し、そのそれぞれにおいて降水量・蒸発散量からもたらされる水資源量と、生産・経済活動に伴う取水量および耗水量を推計している。そこでは人口やGDPから推計された産業構造・工業生産額、既存統計などによる作物別水需要パターン・灌漑面積などが用いられている。次に、黄河流域全体にわたって上流から下流へとすべてのボックスを配置し、河道に沿ってそれらをリンクさせることで上流から下流までのカスケード関係を構成している⁸⁾。また黄河における計算流量について、観測流量を用いて検証し、ある程度の整合性を確認している。しかしここでは、地表水と地下水の水資源量が手法上の制約から混同されており、これらの現象を個別に再現するには至らなかった。

一方、黄河流域における地下水資源の問題は、資源利用の空間的分布のアンバランスと、その不合理な開発利用方式である。Ichinose et al. (2009)⁹⁾は、黄河流域における地下水位の挙動を数値シミュレーションで再現することを目的として、具体のデータが公開されていない地下水需要の空間分布を高解像度のグリッドベースで把握することを試みた。この出力を用いて行われた3次元地下水循環モデルによる数値シミュレーション¹⁰⁾を通じ、この推計結果が現実に近い地下水利用実態を表現しているものであることが示された。この推計には、本来地表面における人間活動としての水資源利用とはなんら物理的関係を持たない地表面夜間光衛星画像¹¹⁾や、統計資料として公開されている県級行政単位別耕地面積などを参考に、「黄河水資源公報」などで省級行政単位別に公開されている農業・工業・生活用の地下水取水量を各県級行政単位やグリッド（約1120m四方）に配分する手法を採っている。しかし、農業用取水量の季節依存性は非常に大きいため、地下水の挙動を理解するためにも、単純な灌漑モデルを立てての季節変化の推計⁹⁾ではなく、正確な農事暦を反映した取水シナリオの把握が課題として残っていた。また、それにより、地域ごとの地

下水需要内訳を把握し、地表水との併用を念頭にした季節別水資源融通方策を考えることも可能となる。

2.10.2 研究目的と解析手法

以上により本研究では、大西ら (2006)⁴⁾ の推計した水資源需給構造と、Ichinose et al. (2009)⁹⁾ の推計した地下水利用構造とを地域別に直接比較することにより、データが存在せず実態把握の困難であった地表水と地下水それぞれの利用構造を描き出すことを試みる。本研究の詳細については紙面の制約上、本研究の成果を発表した一ノ瀬ら (2012)¹²⁾ に譲るとして、ここではその概要のみを紹介する。大西ら (2006)⁴⁾ の対象年次は1997年、Ichinose et al. (2009)⁹⁾ の対象年次は1996年である。Ichinose et al. (2009)⁹⁾ においては、グリッドで表現された工業用と生活用の地下水利用量を県級行政単位別に集計したマップも提示しており、今回比較に用いられるのはそのデータである。まず、黄河流域に大部分が含まれる35の地級行政単位 (図2-10-1; 表2-10-1) を抽出し、立地の近接性と水資源需給構造の形態的類似性に着目してそれらを12の小流域に分類した。なお、その過程で共通する特徴が記述できるよう、数度にわたる試行錯誤がなされているが、とりわけ地下水資源の使途に注目し、地下水利用の季節変動性を重視している。

Ichinose et al. (2009)⁹⁾ では県級行政単位でこれらのデータが推計されている。しかし推計手法上の制約から、省内の農業用地下水利用構造 (季節間や作物間の分担比率) が同じものとなっており、県級行政単位での地域比較から得られる情報は利用量合計の絶対量の差のみである。よって本研究では、このデータを地級行政単位へ集計した上で解析を行なっている。次節では、Ichinose et al. (2009)⁹⁾ による地下水利用構造と大西ら (2006)⁴⁾ の推計した水資源需給構造とを小流域別に比較した結果を、上流から下流へと順に、地表水を含んだ水資源需要と地下水利用とを、セクター (工業、生活、農業) 別に交互にならべたグラフの形で示す。大西ら (2006)⁴⁾ のデータも県級行政単位別に推計が行われており、同様に地級行政単位 (省級行政単位の下の行政単位であり、面積的には日本の県に相当する。) へと集計を行なっている。水資源需要と地下水利用との差が地表水利用に相当するが、上述の2つの先行研究における推計精度の相違から、水資源需要が地下水利用をわずかながら下回るケースも見られる。その場合も、水資源需要はほとんど地下水利用によってまかなわれているものと解釈した。また大西ら (2006)⁴⁾ によれば、工業および生活での水資源需要における季節変化は無視できるとされ、4半期ごと (季節別) に示した農業での水資源需要と比較でき



図2-10-1 黄河流域に大部分が含まれる35の地級行政単位の位置
 地図の出典: Y. Masutomi, Y. Inui, K. Takahashi and Y. Matsuoka (2007) *Hydrological Processes*
 図の中央付近に海に流出しない内流域が存在する。

るよう、図中には年間値を4分の1にした値（4半期分に相当）を示した。

地下水利用の季節変動性については、各小流域を代表する地級行政単位における農業（季節変化は明瞭である）でのピークの値と、農業以外（工業および生活の合計）での4半期分の値を比較し、前者が大きいほうから小さいほうへ順に季節変動性を5段階（極めて大きい、大きい、中程度、小さい、極めて小さい）にカテゴライズした。数値的な目安として、農業でのピークの値が農業以外での4半期分の値に対し、10%程度かそれ以下を「極めて小さい」、同程度から2倍までを「中程度」、4倍以上となる場合を「極めて大きい」としている。

2.10.3 黄河流域における水資源需給構造の分類

結果（図2-10-2～図2-10-7にサンプルを例示）は表2-10-1のように整理される。一般に上流域では地表水に依存し、農業での利用割合が低いいため、地下水利用の季節変動性は小さい。一方、中流域から下流域では地下水への依存の度合いが高くなり、農業での利用割合が高くなるため、地下水利用の季節変動性は大きくなる。とりわけ、その傾向は黄土高原において顕著である。また、最下流域では再び地表水に依存している。さらに、

地下水利用構造（農業と農業以外の量的な比率および季節変動性）の類似性にもかかわらず、小流域の中でも地表水を含めた水資源の需給構造（おもに地表水と地下水の比率）に多様性が見られる地域がある。

とりわけ中流域では、大河川へのアクセスの状況に応じて多様性が顕著である。なお今回はおもに、絶対量の多い農業における水資源利用量に着目して考察を行っているが、農業以外についても同様の考察が可能と思われる。しかし、絶対量が小さい上に共通する特徴の抽出が困難であったため、主たる分析対象とはしていない。

2.10.4 まとめ

中国の黄河流域において、大西ら（2006）⁴⁾の推計した水資源需給構造と、Ichinose et al.（2009）⁹⁾の推計した地下水利用構造とを地域別に直接比較することにより、データが存在せず実態把握の困難であった当該流域における地表水の利用構造を描き出すことを試みた。黄河流域に大部分が含まれる35の地級行政単位を抽出し、立地の近接性と水資源需給構造の形態の類似性（共通する特徴）に着目してそれらを12の小流域に分類した。一般に上流域では地表水に依存し、農業での利用割合が低いため、地下水利用の季節変動性は小さい。一

表2-10-1 小流域別水資源需給構造のまとめ

小流域	地級行政単位	地下水利用の季節変動性	農業用水	特徴
黄河最上流域（青海）	西寧、海東	極めて小さい	地表水が主	
黄河上流域（甘肅）	蘭州、白銀、臨夏	小さい	地表水が主	
黄河上流域（寧夏）	銀川、石嘴山、吳忠	小さい	地表水が主	稲作
黄河中流域（内モンゴ）	フフホト、包頭、オルドス、バヤンノール	極めて大きい	地表水が主	
黄河中流域（陝西）	延安、榆林、渭南	大きい	地下水が主	渭南では地表水にも依存
黄河中流域（山西）	太原、吕梁、晋中	大きい	2:1で地表水が多い	吕梁では地下水が主
汾河流域（山西）	运城、臨汾、晋城	極めて大きい	2:1で地表水が多い	臨汾では地下水が主
黄河渭水分水嶺地域（甘肅・寧夏）	定西、固原	中程度	地表水が主	農業以外は地下水が主
渭水上流域（甘肅・陝西）	天水、平涼、慶陽、宝鶏	中程度	3:1で地表水が多い	
渭水下流域（陝西）	西安、咸陽、銅川	大きい	3:1で地表水が多い	銅川では地下水が主
黄河下流域（河南）	洛陽、三門峽	大きい	地下水が主	
黄河最下流域（山東）	済南、泰安、東營	中程度	地表水が主	

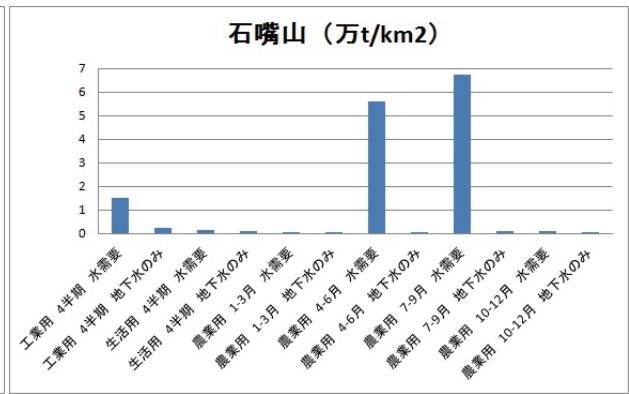
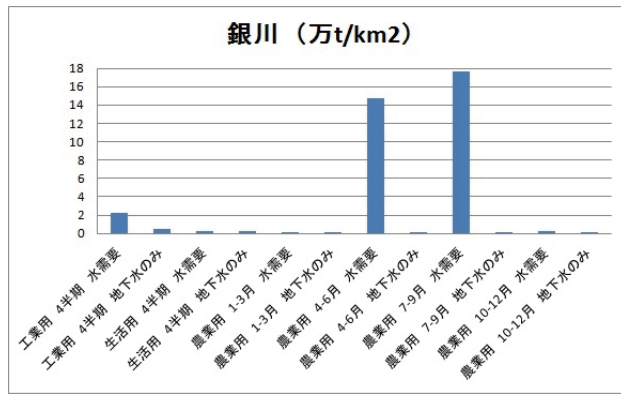


図 2-10-2 黄河上流域（寧夏）における水資源需給構造

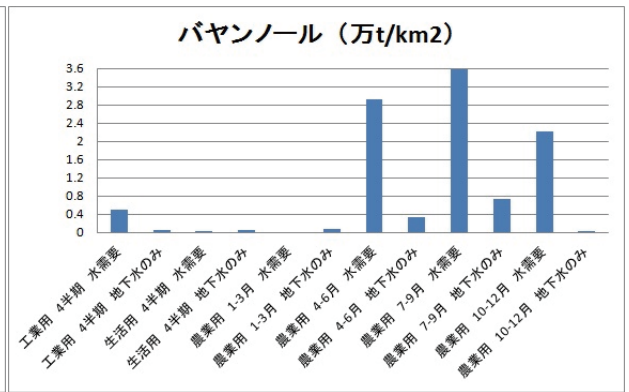
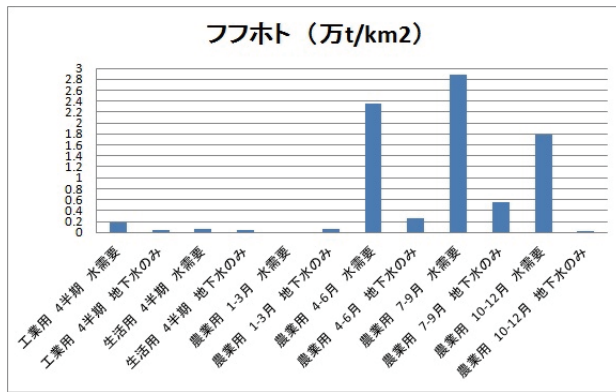


図 2-10-3 黄河中流域（内蒙古）における水資源需給構造

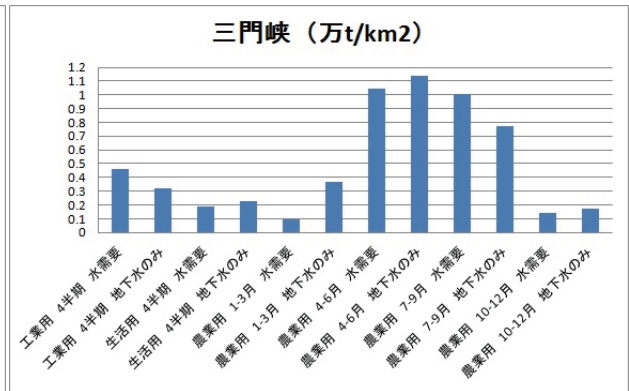
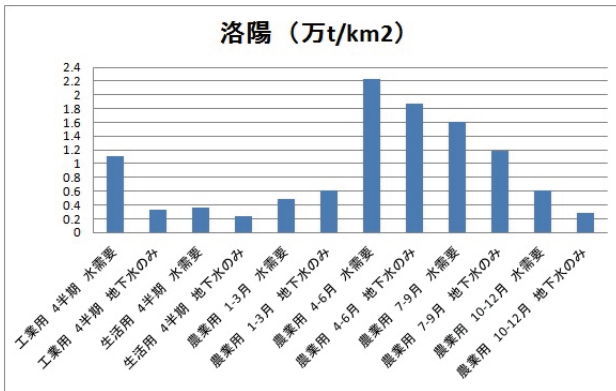


図 2-10-4 黄河下流域（河南）における水資源需給構造

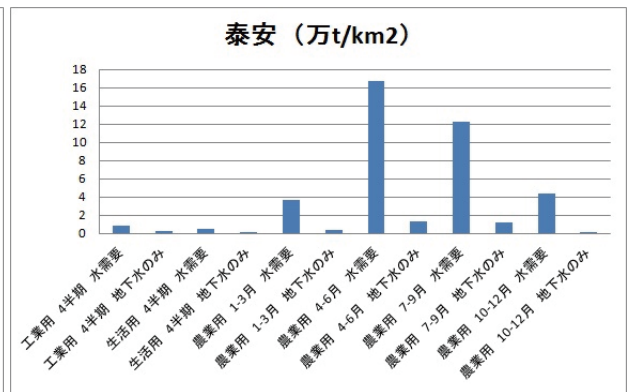
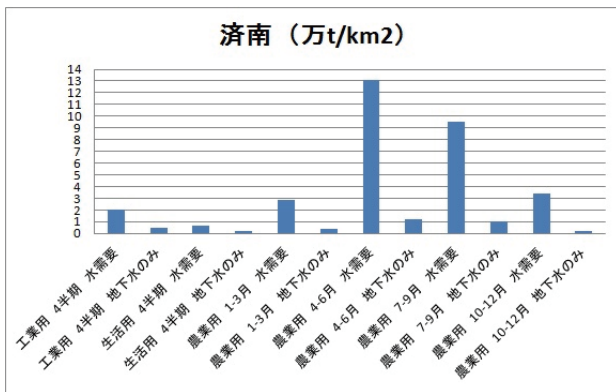


図 2-10-5 黄河最下流域（山東）における水資源需給構造

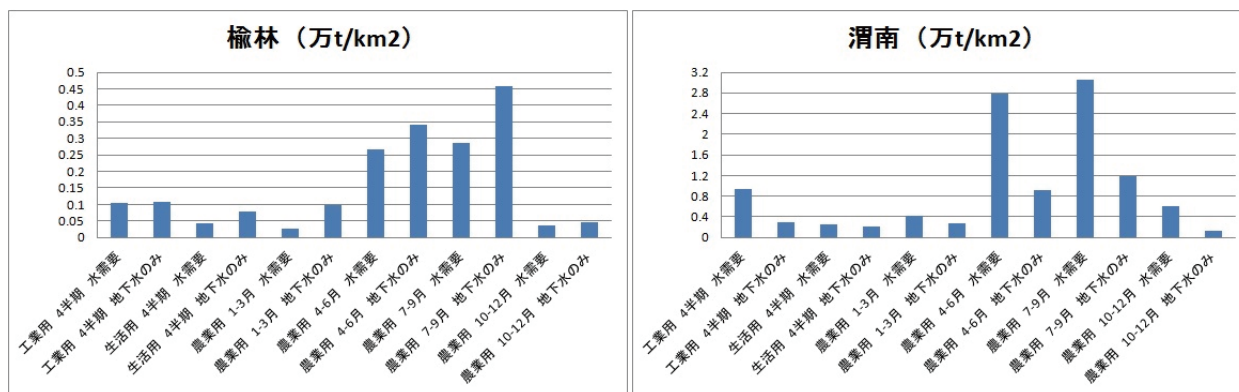


図 2-10-6 黄河中流域（陝西）における水資源需給構造

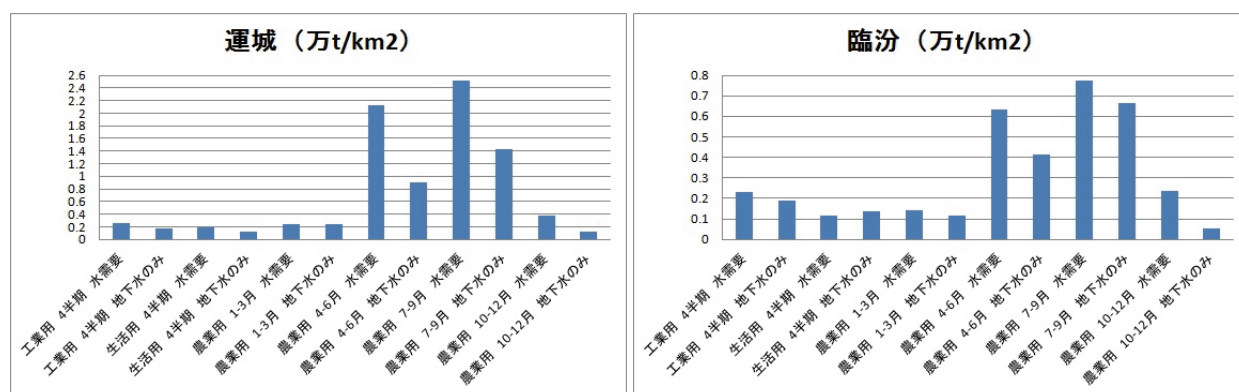


図 2-10-7 汾河流域（山西）における水資源需給構造

方、中流域から下流域では地下水への依存の度合いが高くなり、農業での利用割合が高くなるため、地下水利用の季節変動性は大きくなる。とりわけ、その傾向は黄土高原において顕著である。また、最下流域では再び地表水に依存している。さらに地下水利用構造の類似性にもかかわらず、小流域の中でも地表水を含めた水資源の需給構造に多様性が見られる地域がある。とりわけ中流域では、大河川へのアクセスの状況に応じて多様性が顕著である。

*本節は、本研究プロジェクトの成果である研究論文「黄河全流域における水資源需給構造の分類 - 地下水と地表水のバランスに注目して -」（環境科学会誌掲載予定）³¹⁾に基づいた内容である。環境科学会誌編集委員会の了承を得た上で、論文の一部の結果を抜粋して使用している。

参 考 文 献

1) 劉昌明 (2007) 中国の水循環, 水資源与生態保護 (中

国語), 「現代中国環境論」, 愛知大学, 61-75.

2) 国際協力銀行 (2004) 中国北部水資源問題の実情と課題～黄河流域における水需給の分析～, JBIC Research Paper, No. 28.

3) 中華人民共和国水利部黄河水利委員会 (1997-2000) 黄河水資源公報.

4) 大西暁生, 井村秀文, 白川博章, 韓驥 (2006) 黄河流域水資源需給の時間・空間構造の把握に関する研究, 環境システム研究論文集, Vol. 34, 611-622.

5) Xu Z., Takeuchi K., Ishidaira H. and Zhang X. (2002) Sustainability analysis for Yellow River water resources using the system dynamics approach, Water Resource Management, Vol. 16, 239-261.

6) Hoshikawa K., Nagano T., Donma S., Watanabe T. and Fukushima Y. (2004) Application of Irrigation Management Performance Assessment Model (IMPAM) to the Lower Seyhan Irrigation Project, ICCAP-Cappadocia Workshop, 93-96.

7) The World Bank, Sinclair Knight Merz and Egis Consulting Australia (2001) The General Institute of Wa-

ter Resources & Hydropower Planning and Design, China Agenda for Water Sector Strategy for North China, Vol. 1-4.

- 8) 井村秀文, 大西暁生, 岡村実奈, 方偉華 (2005) 黄河流域の縣市別データに基づく水資源需給空間構造の把握に関する研究, 環境システム研究論文集, Vol. 33, 477-485.
- 9) Ichinose T., Harada I., Ee M.S. and Otsubo K. (2009) Estimation of groundwater resource demand in the Yellow River Basin, China, From Headwaters to the Ocean: Hydrological Change and Watershed Management, Taylor & Francis, 477-482.
- 10) 森康二, 多田和宏, 西岡哲, 登坂博行 (2007) 地下水循環モデルの構築とシミュレーション, 人・自然・地球共生プロジェクト「アジアモンスーン地域における人工・自然改変に伴う水資源変化予測モデルの開発」平成 18 年度成果報告書, 文部科学省研究開発局, 199-207.
- 11) Zhuo L., Ichinose T., Zheng J., Chen J., Shi P. and Li X. (2009) Modeling the population density of China at the pixel level based on DMSP/OLS non-radiance-calibrated nighttime light images, International Journal of Remote Sensing, Vol. 30, 1003-1018.
- 12) 一ノ瀬俊明, 大西暁生, 石峰 (2013) 黄河全流域における水資源需給構造の分類 - 地下水と地表水のバランスに注目して -, 環境科学会誌 (掲載予定)

2.11 まとめ

従来、全球水資源評価は水文学者や水文気象学者によって実施されてきた。その中でも、コンピュータシミュレーションを得意とする者によって担われてきた。しかし、水利用と水問題は多様であり、さまざまな学問的背景を持つ研究者が、それぞれの視点と手法を持ち込んで分析するとともに、それらをつなぐ共通のプラットフォームの整備が不可欠である。

本研究では、社会科学を専門とする研究者が多数参加し、全球水資源モデル H08 を基盤としつつ、それぞれの持つ視点と手法から、広域の水問題に挑んだ。こうした分野横断的な取り組みは、非常に稀な取り組みである。この中から多数の研究成果が生まれ、24 編の誌上発表（20 編が査読あり）と 32 編の口頭発表にまとめられた。

本研究では外部プロジェクトとの連携も重視した。特に、東京大学の沖大幹教授をリーダーとする科研課題「世界の水資源の持続可能性評価のための統合型水循環モデルの構築」と東京工業大学の鼎信次郎准教授をリーダーとする CREST 課題「世界の持続可能な水利用の長

期ビジョン作成」とは毎年夏に合同研究会を行い、高度な研究交流を実施した。2011 年は環境科学会で「世界で生じる水問題とその解決に向けた多様な研究アプローチ—社会科学からのアプローチ—」と「世界で生じる水問題とその解決に向けた多様な研究アプローチ—最先端の学際的モデリング—」の 2 つのシンポジウムを企画し、実施した。ここでは 15 件の発表があり、広く聴衆を集めることができた。

3 年間のメンバーの活動は大変に活発であった。定例会が 11 回、論文輪読会が 8 回行われ、メンバーはそれぞれの視点と方法論や最新の論文に触れることができた。こうした活動を通し、所内構成員の相互理解と将来の協力体制の基盤が形成されたのは大きな成果と言えるだろう。

3 年間、限られたエフォート率で臨んだため、全ての成果を全球水資源モデルあるいは全球水資源評価として統合できたわけではない。しかし、今後取り組むべき方針については、十分な整理ができたと考えられる。

[資 料]

I 研究の組織と研究課題の構成

1 研究の組織

[A 研究担当者] (現在の職員の現職, 転出者は転出時の職)

社会環境システム研究領域

環境経済・政策研究室

日引 聡

久保田 泉

岡川 梓

統合評価研究室

増井利彦

肱岡靖明

花崎直太

金森有子

藤森真一郎

山本隆広*

交通・都市環境研究室

須賀伸介

環境計画研究室

一ノ瀬俊明

地球環境研究センター

温暖化リスク評価研究室

高橋 潔

2 研究課題と構成

(1) 地域別部門別工業用水の推計と将来需要予測モデルの開発

増井利彦・岡川 梓・藤森真一郎

(2) 安全な水・衛生設備へのアクセスを考慮した生活用水の将来需要予測モデルの開発

肱岡靖明・金森有子・岡川 梓

(3) 国際貿易と国家間の水資源利用に関する研究

日引 聡・久保田 泉

(4) 全球水資源モデルへの成果の集約と水資源評価の高度化

花崎直太・一ノ瀬俊明・須賀伸介・高橋 潔・山本隆広*

*現在、長岡工業高等専門学校環境都市工学科

II 研究成果発表一覧

1 誌上発表

発表者・(刊年)・題目・掲載誌・巻(号)・頁

Dalin C., Konar M., Hanasaki N., Rinaldo A., Rodriguez-Iturbe I. (2012) Evolution of the global virtual water trade network. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109 (16), 5989-5994

Gudmundsson L., Tallaksen L.M., Stahl K., Clark D.B., Dumont E., Hagemann S., Bertrand N., Gerten D., Heinke J., Hanasaki N. et al. (2012) Comparing Large-Scale Hydrological Model Simulations to Observed Runoff Percentiles in Europe, *Journal of Hydrometeorology*, 13 (2), 604-620

Haddeland I., Clark D. B., Franssen W., Ludwig F., Vob F., Arnell N.W., Bertrand N., Best M., Folwell S., Hanasaki N. et al. (2011) Multimodel Estimate of the Global Terrestrial Water Balance: Setup and First Results, *Journal of Hydrometeorology*, 12 (5), 869-884

萩原健介, 石田裕之, 花崎直太, 鼎信次郎 (2013) 農作物の栽培を想定した世界のバイオ燃料ポテンシャルの推定. *環境科学会誌*, (受理)

Hanasaki N., Inuzuka T., Kanae S., Oki T. (2010) An estimation of global virtual water flow and sources of water withdrawal for major crops and livestock products using a global hydrological model, *J. Hydrol.*, 384 (3/4), 232-244

Hanasaki, N., Fujimori, S., Yamamoto, T., Yoshikawa, S., Masaki, Y., Hijioka, Y., Kainuma, M., Kanamori, Y., Masui, T., Takahashi, K., and Kanae, S. (2012) A global water scarcity assessment under Shared Socio-economic Pathways: Part 1 Water use scenario, *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 9, 13879-13932

Hanasaki, N., Fujimori, S., Yamamoto, T., Yoshikawa, S., Masaki, Y., Hijioka, Y., Kainuma, M., Kanamori, Y., Masui, T., Takahashi, K., and Kanae, S. (2012) A global water scarcity assessment under Shared Socio-economic Pathways: Part 2 Water availability and scarcity, *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 9, 13933-13994

日引聡 (2011) 世界で生じる水問題とその解決に向けた多様な研究アプローチ - 社会科学からのアプローチ -, *環境科学会誌*, 24 (6), 571-574

日引聡 (2011) 世界で生じる水問題とその解決に向けた多様な研究アプローチ - 最先端の学際的モデリング -, *環境科学会誌*, 24 (6), 586-589

日引聡, 鶴見哲也, 馬奈木俊介, 花崎直太 (2013) 気候要因が農作物貿易に与える影響に関する実証分析 - 小麦, 米, トウモロコシのケーススタディ -, *環境科学会誌*, (受理)

一ノ瀬俊明, 大西暁生, 石峰 (2012) 黄河全流域における水資源需給構造の分類 - 地下水と地表水のバランスに注目して -, *環境科学会誌*, (受理)

金森有子, 脇岡靖明 (2012) 家庭における用途別水使用量推計手法の開発とアジア各国への適用, *環境科学会誌*, (受理)

Konar M., Dalin C., Suweis S., Hanasaki N., Rinaldo A., Rodriguez-Iturbe I. (2011) Water for food: The global virtual water trade network, *Water Resources Research*, 47, W05520

Konar M., Dalin C., Hanasaki N., Rinaldo A., Rodriguez-Iturbe I. (2012) Temporal dynamics of blue and green virtual water trade networks. *Water Resources Research*, 48, W07509

Miyawaki, K., Omori Y., Hibiki A. (2011) Panel Data Analysis of Japanese Residential Water Demand Using a Discrete/Continuous Choice Approach, *The Japanese Economic Review*, 62 (3), 365-386

大瀧雅寛, 花崎直太, 藤田夏海, 荒巻俊也 (2012) 工業用水のグローバル予測モデルにおける水利用効率改善率の決定方法の検討, *環境科学会誌*, (受理)

岡川梓, 脇岡靖明, 金森有子 (2012) 国別生活用水需要の将来推計のためのモデル開発 - 水道用水需要量に着目して -, *環境科学会誌*, (受理)

岡川梓, 増井利彦 (2012) 多地域応用一般均衡モデルを用いた渇水時の水資源配分の経済的評価, *上智経済論集*, 57 (1/2), 55-75

Pokhrel Y., Hanasaki N., Koirala S., Cho J., Yeh P.J.-F., Kim H., Kanae S., Oki T. (2012) Incorporating Anthropogenic Water Regulation Modules into a Land Surface Model, *Journal of Hydrometeorology*, 13, 255-269

Pokhrel Y.N., Hanasaki N., Yeh P.J.F., Yamada T.J., Kanae S. (2012) Model estimates of sea-level change due to anthropogenic impacts on terrestrial water storage, *Nature Geoscience*, 5, 389-392

Suweis S., Konar M., Dalin C., Hanasaki N., Rinaldo A., Rodriguez-Iturbe I. (2011) Structure and controls of the global virtual water trade network, *Geophysical Research Letters*, 38, L10403

山本隆広, 花崎直太, 高橋潔, 肱岡靖明 (2011) 季節性を考慮した水逼迫指標を用いた全球温暖化水資源評価, *水工学論文集*, 55, 259-264

山本隆広, 花崎直太, 高橋潔, 肱岡靖明, 申龍熙 (2011) 地球温暖化による世界の水資源影響評価とその適応策に関する一考察, *土木学会論文集 G (環境)*, 67 (5), 1-8 <地球環境論文賞受賞>

吉川沙耶花, 山田花グレニス, 花崎直太, 鼎信次郎 (2013) 1960年から2000年の取水源別灌漑水供給量の推定, *環境科学会誌*, (受理)

- Fujimori S., Hanasaki N., Kainuma M., Hijioka Y. (2011) NIES Socio-Economic Scenarios, ENERGY MODELING FORUM 2011 Workshop on Climate Change Impacts and Integrated Assessment (CCI/IA)
- Fujimori S., Masui T., Hanasaki N., Hijioka Y., Takahashi K., Kainuma M. (2011) Activities of AIM on SSPs, The Nature and Use of New Socioeconomic Pathways for Climate Change Research
- 藤森真一郎, 増井利彦, 高橋潔, 肱岡靖明, 甲斐沼美紀子, 花崎直太 (2012) Shared Socioeconomic Pathways (SSPs) とは, 革新プロ, S-5, S-8 合同シンポジウム
- 萩原健介, 花崎直太, 鼎信次郎 (2011) 農作物の栽培を想定した放棄地および休耕地におけるバイオ燃料の潜在性評価, 環境科学会 2011 年会
- 花崎直太, 犬塚俊之, 鼎信次郎, 沖大幹 (2009) 全球水資源モデルを利用した水源情報を含む世界のバーチャルウォーター貿易量の推計, 水文・水資源学会 2009 年研究発表会
- Hanasaki N. (2009) Global water resources issues and the challenge of global hydrological modeling, 2009 Jpn.-Am. Front.Eng.
- Hanasaki N., Kanae S., Oki T. (2009) Two novel applications of an integrated model for the assessment of global water resources, AGU 2009 Fall Meet.
- Hanasaki N., Yamamoto T. (2010) Challenges of global water resources modeling: Toward climate change impact assessment at a sub-annual timescale, 2nd Hydrol.delivers Earth Syst.Sci.Soc.
- Hanasaki N., Inuzuka T., Kanae S., Oki T. (2010) A model-based estimation of global virtual water flow and sources of water withdrawal, GCI Conf.
- 花崎直太 (2011) 新しい全球水資源温暖化影響評価に向けて, 環境科学会 2011 年会
- Hanasaki N., Fujimori S. (2011) Global water scarcity assessment under post-SRES scenarios, AGU Fall Meeting 2011
- 花崎直太 (2012) 陸域の水循環と人間の水利用～コンピュータシミュレーションから見えてきたもの～, 第4回「水科学」ワークショップ『水の多様性を極める』－水科学の現在と未来－
- 肱岡靖明 (2010) 影響評価からの期待する社会経済シナリオ, シナリオ・影響評価 国内ワークショップ
- 肱岡靖明, 岡川梓, 金森有子 (2011) 国別生活用水需要モデルの開発と将来生活用水需要のシナリオ分析, 環境科学会 2011 年会
- 日引聡, 鶴見哲也, 馬奈木俊介, 花崎直太 (2011) 農作物貿易モデル開発とバーチャルウォーターに関する実証分析, 環境科学会 2011 年会
- 一ノ瀬俊明 (2011) 中国における水資源の現状と予測から見える問題点－黄河流域の地下水を中心に－, 環境科学会 2011 年会
- 一ノ瀬俊明, 大西暁生, 石峰 (2012) 黄河全流域における水資源需給構造の類型化, 2012 年日本地理学会春季学術大会
- Ichinose T., Onishi A., Shi F. (2012) Classification of structure of water resource supply and demand in the Yellow River Basin of China, Japan Geoscience Union Meeting 2012
- 金森有子, 肱岡靖明 (2011) 家庭における用途別水使用量推計手法の開発とアジア各国への適用, 環境科学会 2011 年会
- 久保田泉 (2011) アジア地域における国際河川の非航行利用に関する制度設計の展望と課題, 環境科学会 2011 年会
- Masui T., Fujimori S., Hasegawa T., Hanasaki N., Shin Y., Takahashi K., Hijioka Y., Kainuma M. (2012) Application of AIM (Asia-Pacific Integrated Model) toward new socio-economics cenario development integrating climate change mitigation, impact and adaptation, The 5th IAMC Annual Meeting
- 松崎嵩史, 日引聡, 鶴見哲也, 馬奈木俊介, 花崎直太 (2012) 気候要因が農業貿易に与える影響の実証分析, 環境経済・政策学会 2012 年大会
- Miyawaki K., Omori Y., Hibiki A. (2011) Exact Estimation of Demand Functions under Block-Rate Pricing, IWREC (International Water Resource Economics Consortium) Conference in Water Economics

岡川梓, 増井利彦 (2011) 多地域応用一般均衡モデルを用いた渇水時の水資源の経済的評価, 環境科学会 2011 年会

Okagawa A., Masui T. (2012) An economic evaluation of water resource allocation during water shortage using a multiregional computable general equilibrium model, 19th Annual Conference of the European Association of Environmental and Resource Economists

大瀧雅寛, 藤田夏海, 花崎直太, 荒巻俊也 (2011) 工業用水予測モデルのパラメータ決定手法の検討, 環境科学会 2011 年会

Tsurumi T., Hibiki A., Managi S. (2010) Environmental regulations and bilateral trade flows, 4th World Congr. Environ. Resour. Econom.

山本隆広, 花崎直太, 鄭輝ちよる, 高橋潔, 肱岡靖明 (2010) 全球水資源モデル H08 を利用した季節性を考慮した世界の温暖化水資源影響評価に向けて - 将来気象データに対する H08 の応答に関する一考察 -, 水文・水資源学会 2010 年研究発表会

Yamamoto T., Hanasaki N., Jung H., Takahashi K., Hijioka Y. (2010) Application of global water resources model H08 to assess seasonal variability change of global water resources by using multiple GCM projections under climate change, 5th APHW Conf.

Yamamoto T., Hanasaki N., Takahashi K., Hijioka Y. (2010) Global water resources assessment at a sub-annual timescale: Application to climate change impact assessment, AGU 2010 Fall Meet.

山本隆広, 花崎直太, 高橋潔, 肱岡靖明 (2011) 季節性を考慮した水逼迫指標を用いた全球温暖化水資源評価, 第 55 回水工学講演会

吉川沙耶花, 山田花グレニス, 花崎直太, 鼎信次郎 (2011) 20 世紀の灌漑地 (HIMDaS) データを用いた農業取水量の推定, 環境科学会 2011 年会

NIES RESEARCH PROJECT REPORT FROM
THE NATIONAL INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL STUDIES, JAPAN

国立環境研究所研究プロジェクト報告
SR - 104 - 2012

平成 24 年 12 月 28 日発行

編 集 国立環境研究所 編集委員会

発 行 独立行政法人 国立環境研究所

〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16 番 2

電話 029-850-2343 (ダイヤルイン)

印 刷 株式会社 イ セ ブ

〒305-0005 茨城県つくば市天久保 2 丁目 11-20

Published by the National Institute for Environmental Studies

16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8506 Japan

December 2012

無断転載を禁じます

リサイクル適性の表示：紙へリサイクル可
本冊子は、グリーン購入法に基づく基本方針における「印刷」に係る判断の基準にしたがい、印刷用の紙へのリサイクルに適した材料 [A ランク] のみを用いて作製しています。