

# 干ばつリスクと植生を考慮した経済成長分析： パキスタンを対象とした多地域多産業モデル

石渡 裕明<sup>1</sup>・鈴木 悠史<sup>2</sup>・澤田 洋平<sup>3</sup>・Asif NASEER<sup>4</sup>・横松 宗太<sup>5</sup>・小池 俊雄<sup>6</sup>

<sup>1</sup>正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社 大阪本社 / 京都大学大学院 工学研究科 博士課程  
(〒 541-0052 大阪府大阪市中央区安土町 2-3-13 / 〒 611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

E-mail: hiroaki.ishiwata@tk.pacific.co.jp / ishiwata@drs.dpri.kyoto-u.ac.jp

<sup>2</sup>非会員 千代田化工建設株式会社 (〒 220-8765 神奈川県横浜市西区みなとみらい 4-6-2)

<sup>3</sup>学生会員 東京大学大学院 工学系研究科 博士課程 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

<sup>4</sup>非会員 東京大学大学院 工学系研究科 修士課程 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

<sup>5</sup>正会員 京都大学 防災研究所 巨大災害研究センター 准教授 (〒 611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

<sup>6</sup>フェロー会員 東京大学大学院 工学系研究科 教授 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

近年の気候変動によって世界各国で干ばつ被害が発生している。干ばつ被害は、直接的に資産や資本を損壊する洪水や地震等と比べると、市場を通じた他産業や他地域への波及効果の比重が大きいことに特徴をもつ。そのような産業間、地域間の影響の差異は、長期的には一国経済のバランス成長に大きな影響をもたらす可能性がある。本研究では、水文分野のモデルから得られる植生量の指標 LAI を、農業部門の生産関数に導入した多地域多産業モデルを定式化する。そしてパキスタンを対象に数値シミュレーションを行い、干ばつリスクが各産業・地域の成長に与える経済的インパクトを定量的に分析する。さらには灌漑施設の整備の長期的な効果について検討する。

**Key Words :** *Drought, Leaf Area Index (LAI), multi-sector and multi-region economic growth model, hydrological-dynamic vegetation model, Pakistan*

## 1. はじめに

干ばつは、広範囲かつ長期的に降水量を激減させる異常気象によりもたらされる災害である。特に農業に対しては、最も重要な生産要素である土地の生産性を低下させる。それによって農作物の質と量は低下する。

経済的視点から見ると、干ばつは市場を通じた波及被害の比重が大きな災害である。洪水や地震は直接的に資産や資本のストックを大量に損壊する。干ばつも飲料水の不足による健康被害をもたらす。その被害は人的資本ストックへの負の影響に他ならない。それと同時に、干ばつによる農作物の減少は産業連関構造を通じて他産業や他地域に波及する。その波及的影響の大きさは産業間、地域間で均一ではない。また、波及効果はフローの被害であるが、とりわけ農業に大きく依存した国にとっては、貯蓄の減少を通じて、一国の経済成長を阻害する可能性がある。成長への効果も産業間、地域間で異なる可能性がある。

農作物の減少の波及効果に関しては、農業経済学の方野を中心に多くの産業連関分析や一般均衡分析がなされてきた。しかしながら本来、経済分析が専門性をもつのは、収穫された農作物の取引過程とその帰結としての市場価格の分析である。生産要素の効率的配分

を論じるために農業生産関数が用いられるが、その関数は生産要素の投入水準と産出水準を統計的に関係づけたものにならざるをえない。また標準的な応用一般均衡モデルでは、一次同次型の生産関数が分析にとって都合がよい。そのような制約の下で、これまで農業経済の一般均衡分析の方野では、労働や資本に加えて、農業生産に特有の土地や水、種や肥料等の中間投入の間の階層関係 (nested structure) を様々な形で仮定する試みを重ねてきた。そこでは理論的妥当性に加えて、各階層の関数のパラメータを同定できることが要件となってくる。そのような条件下において、従来の水と土地の扱いは、降水や灌漑施設によって土地に供給される水の量と、土地の面積を変数として関数を構成し、それが上位の階層で他の投入要素と結びついて、農業産出量が決まるという形態であった。

それに対して、本研究では、水文学の知見を導入することによって、水と土地が植生量を決める階層を生産関数に組み込む。そして植生量を新たな中間生産要素として、最終的な農業生産の階層を構成する。このように最終生産物の前の段階で、植生と水と土地との関係を統計的に同定するため、降水量や灌漑水量が変動するときの生産過程へのインパクトをより詳細に表現することが可能となる。

本研究は、水循環-植生動態モデルと多地域多産業経済成長モデルを植生量指標にて統合することにより、干ばつが経済成長に長期的な影響を及ぼす過程を詳細に記述し、干ばつの経済的影響の定量的評価を行うことを目的とする。そして、多地域多産業経済成長モデルに灌漑施設の整備水準を導入し、干ばつリスク下における経済成長および灌漑施設の整備効果の定量的評価を実施する。以下、第2章では本研究の背景を述べる。第3章では、多地域多産業経済成長モデルの定式化を行う。第4章では、水文モデルで得られたパキスタンの植生量データ等を用いて経済モデルのケーススタディを実施する。そして、第5章で本研究の結論を述べる。

## 2. 研究の背景

### (1) 気候変動と災害リスク

近年の気候変動による自然災害の大規模化や高頻度化は、全世界の自然生態系や社会経済、安全保障に多大な影響を及ぼしている。現在の全世界の地震、津波、熱帯性低気圧、河川氾濫による平均年間損失額は「3,150億米ドル」(UNISDR, 2015<sup>1)</sup>)と推定されており、干ばつ等の他の災害を含めると損失額はさらに大きくなると考えられる。特に、干ばつや洪水等の水文気象関連の災害は、1980年から2011年の間に記録された災害のうちの78.4%を占め、同様に、損失総額の74.3%、死者の61.4%を占めている(GFDRR, 2012<sup>2)</sup>)。また、IPCC (2012)<sup>3)</sup>によれば、「気候変動は、極端現象の発生頻度、強さ、空間的広がり、持続期間やタイミングの変化をもたらす、前例のない極端現象を発生させる可能性がある」と述べており、今後ますますの自然災害の激甚化や高頻度化が予想される。

災害に対する事前の防災投資や復旧・復興のための財源を十分に有していない低所得国や中所得国は災害リスクが大きく、災害が経済的及び社会的な不安定をもたらす原因の一つとなっている。特に貧困層の人々は、災害リスクに対して脆弱な環境で生活していることが多く、災害の発生によって限られた保有資産を失い、災害発生以前よりもさらに困窮した生活を強いられるという負のスパイラルに陥る。このような災害リスクを削減する防災投資を実施しない限り、災害被害による開発のための機会損失が高い水準で留まり、災害リスクが大きな負担となる国の持続可能な開発を困難なものとする。しかしながら、防災投資は短期的な効果が見え難いため、将来的な経済成長のために防災投資、特に事前の防災投資が有効であると理解されながらも、他の政策と比較して優先度を下げられてしまう現状がある。

### (2) 干ばつの経済的側面

干ばつは、世界各国の経済活動に深刻な被害をもたらす気象災害の一つである。IPCC (2014)<sup>4)</sup>は、「気温上昇や干ばつ、洪水、降雨量の変動や極端な降雨により、貧困層の人々の食糧不安が起こるとともに食糧システムの崩壊リスクが生じる」と深刻な懸念を示している。干ばつは農業部門において甚大な被害を発生させ、その影響が家計や他の部門に波及する点が特徴である。水や食糧の不足、衛生状態の悪化は、移民や紛争等の社会不安に繋がり、最悪の場合は大規模な飢饉や疾病により人命が失われることもある。

一般的に、干ばつは気象的干ばつから始まり、次いで水文的干ばつ、農業的干ばつへ進行する。気象学、水

表-1 干ばつの分類と定義

分類	定義
気象学的干ばつ	降水量が極端に少ない期間が継続すること。
水文学的干ばつ	河川流量、貯水池の水位、地下水位等、地位内のいくつかの形態における水量が極端に少ない期間が継続すること。
農業的干ばつ	主に土壌水分量の不足が原因となり、農業生産が減少すること。

文学、農学等の分野では干ばつに関する知見の集積が進んでいる一方で、社会経済的リスクは適切に認知されているとは言い難い状況がある。干ばつは間接的影響が大きいと、被害の全容の解明が困難であり、干ばつの経済損失が過小評価されている可能性がある。

干ばつリスクは地域や産業毎に異なるが、特に農業部門に関しては灌漑施設の整備水準が干ばつリスクに大きく影響する。農業部門の干ばつ対策としては、灌漑施設の整備を促進し、灌漑用水の効率的な利用を通じて、農業生産性の向上を図ることが干ばつの影響を緩和する有効な手段となる。

### (3) 既往研究の概要

気候変動や干ばつ、水資源の配分等の経済的影響の評価に関する既往研究はいくつか存在する。干ばつ被害が農業部門から経済全体へ波及する過程を再現するため、地域や産業を考慮としたモデルが存在する。Jenkins (2011)<sup>5)</sup>は、大気循環モデル(GCM)と産業関連モデルを用いて、降水量に関する指標と過去の干ばつデータから干ばつの規模と経済損失額との関係を明らかにした。Wittwer and Griffith (2011)<sup>6)</sup>は、空間的応用一般均衡(SCGE)モデルを用いて干ばつの影響を分析した。

干ばつによる影響は長期的なものであり、干ばつリスク下においては産業構成の差異などから地域毎に経済成長のポテンシャルが異なる。また、干ばつ被害の軽減へ繋がる灌漑施設等の社会資本整備は、多額の整備費用を要するために長期的な視点で検討される必要がある。既往研究では、応用一般均衡 (CGE) モデルのような静学モデルにて干ばつの経済的被害を分析したものが多い (e.g. Salami et al., 2009<sup>7</sup>); Arndt et al., 2010<sup>8</sup>); Pauw et al., 2011<sup>9</sup>); Thurlow et al., 2012<sup>10</sup>)。しかし、静学モデルは定常均衡周りの議論が主となるため、開発途上国のような定常均衡から大きく離れた環境下における国家の経済成長や社会資本整備効果の分析に当たり十分な枠組みとは言えない。それゆえ、現在から将来に渡る長期的な干ばつの経済的インパクト及び灌漑施設等の社会資本整備効果を分析するためには、動学的な枠組みが要求される。Robinson and Gueneau (2013)<sup>11</sup>)は、地域水システムモデル (RWSM) と動学的 CGE (DCGE) モデルを統合した CGE-W モデルを適用し、干ばつのような水資源ショックに焦点を当て、水資源変化が及ぼす経済的影響を動学的に評価した。Fang et al. (2006)<sup>12</sup>)は、Ramsey 型の経済成長モデルを多地域多産業に拡張し、地域内及び地域間における水資源配分政策の経済的影響を評価するため、水資源政策が GDP や消費、所得、労働・資本配分、価格に与える影響を分析した。

このように干ばつの経済的側面についての知見が増加する一方で、降水量や灌漑水量が変動することによる植生の変化を水文学的に捉え、その指標を導入した生産関数を用いて干ばつの経済的インパクトを分析するような領域横断的な研究は行われていない。

### 3. モデル

#### (1) 基本的な設定

##### a) 経済空間

経済空間は小国閉鎖経済を仮定し、地域  $i \in I = \{1, 2, 3\}$  は Punjab 州 ( $i = 1$ )、Sindh 州 ( $i = 2$ )、Rest of Pakistan ( $i = 3$ ) (以後、ROP とする) の 3 地域、産業  $j \in J = \{a, m, s, w\}$  は農業部門 ( $j = a$ )、工業部門 ( $j = m$ )、サービス部門 ( $j = s$ )、生活用水部門 ( $j = w$ ) の 4 産業で構成されるものと仮定する。また、産業は各部門ともに各地域に存在し、完全競争市場および規模に関する収穫一定を仮定する。

時点  $t$  において地域  $i$  で生産された最終財  $j$  は、価格  $p_{ji}(t)$  で取引される。農業財及び工業財は、完全代替財として輸送費用なしに地域間で取引され、その価格はそれぞれ  $p_{a1} = p_{a2} = p_{a3}$ 、 $p_{m1} = p_{m2} = p_{m3}$  となる。一方で、サービス財及び生活用水財は、地域

間取引のない不完全代替財とし、その価格はそれぞれ  $p_{s1} \neq p_{s2} \neq p_{s3}$ 、 $p_{w1} \neq p_{w2} \neq p_{w3}$  となる。農業財、サービス財、生活用水財は非耐久財として扱われる一方で、工業財は非耐久財かつ耐久財として扱われる。

##### b) 水資源

水資源は各期に確率的に決まる降水量を通じて経済に供給される。簡便化のため、水資源は期を越えた蓄積ができないものとする。水資源は農業部門及び生活用水部門の生産要素として扱う。

##### c) 労働と資本

労働市場及び資本市場は、地域間で開放されているが、一国内で閉鎖され、完全競争的であると仮定する。市場を通じて、賃金率  $\omega(t)$  及び資本レント  $r(t)$  が内生的に決定される。

代表的個人は、各期毎に 1 単位の労働と  $k$  単位の資本を供給し、その報酬として労働所得と資本所得を得る。代表的個人は非弾力的に労働を供給するものと仮定すると、総労働力  $L(t) = L(0) \cdot (1+n)^t$  は総人口に等しくなる。ここでは、簡便化のために  $L(0) = 1$  とする。 $n$  は人口増加率である。代表的個人の貯蓄は、銀行を介して生産資本として企業へ投資される。また、保有する土地及び水資源を企業に供給することで、その報酬として企業利潤の分配を受ける。

時点  $t$  において地域  $i$  の産業  $j$  の生産に投入された労働力と資本の総和をそれぞれ  $L_{ji}(t)$ 、 $K_{ji}(t)$  とする。

#### (2) 生産技術

##### a) 農業部門

農地  $h \in H = \{1, 2\}$  を灌漑用地 ( $h = 1$ ) と天水用地 ( $h = 2$ ) に分類する。GTAP-W モデル (Calzadilla et al., 2011<sup>13</sup>) の農地と水との合成要素を形成する入れ子構造を基に、本研究では農地、水、灌漑施設の合成要素とする新たな入れ子構造を形成する。農地、水、灌漑施設の合成要素は Leaf Area Index (以降、LAI とする)  $X_{hi}(t)$  として扱い、水循環-植生動態モデル (CLVDAS) の出力で得られる LAI を本モデルへ投入する。LAI とは単位土地面積に対する全ての葉の片側の総面積の比率である。LAI が大きくなるほど植生量が多いことを示し、それは農地として適当な土地であることを示す。

$$X_{hi}(t) := [\beta_{Thi} T_{hi}(t)^{\alpha_{Xhi}} + \beta_{Zhi} Z_{hi}(t)^{\alpha_{Xhi}}]^{\frac{1}{\alpha_{Xhi}}} \quad \text{for all } h, i, \quad (1a)$$

$$Z_{1i}(t) = Z_{1i}^p(t) + \Xi_i^s Z_{1i}^s(t) + \Xi_i^g Z_{1i}^g(t), \quad (1b)$$

$$Z_{2i}(t) = Z_{2i}^p(t) \quad \text{for all } i. \quad (1c)$$

$T_{hi}(t) = \bar{T}_{hi}$  は作付面積であり、本研究では簡便化のために定数として与える。灌漑用地にて利用可能な水の総量  $Z_{1i}(t)$  は、3 種類の水資源 (天水  $Z_{1i}^p(t)$ 、河川灌漑水  $\Xi_i^s Z_{1i}^s(t)$ 、地下水  $\Xi_i^g Z_{1i}^g(t)$ ) の合計である。なお、 $\Xi_i^s$  及

び  $\Xi_i^g$  はそれぞれ河川及び地下からの灌漑水の輸送効率を示す。灌漑水の輸送効率は、政策変数として外生的に与える。一方、天水用地にて利用可能な水の総量  $Z_{2i}(t)$  は、天水  $Z_{2i}^p(t)$  に等しいものとする。LAI を構成する農地及び利用可能な水の総量の代替弾力性は、 $\sigma_{X_{hi}} := 1/(1 - \alpha_{X_{hi}})$  となる。動学的最適化問題の中では、LAI は状態変数ベクトル  $\mathbf{X}(t) := (\{X_{hi}(t)\}_{h=1,2, i=1,2,3})$  として扱える。なお、LAI を測定する手法は、Sawada et al. (2014a, 2014b)<sup>14)15)</sup>にて開発及び発展されている。これ以降、特に注意が必要となる場合を除いて、期を表す表記  $(t)$  は省略する。

産業  $j'$  にて生産され、地域  $i$  の産業  $j$  に投入される中間財を  $\mathcal{Y}_{j'ji}$  と表記する。農業部門の総生産量  $Y_{ai}$  及び最終財の生産関数  $F^{ai}$  は次のように与えられる。

$$Y_{ai} := \min \left[ F^{ai}(AL_{ai}, K_{ai}, A_{X1}X_{1i}, A_{X2}X_{2i}), \frac{\mathcal{Y}_{aai}}{\phi_{aai}}, \frac{\mathcal{Y}_{mai}}{\phi_{mai}}, \frac{\mathcal{Y}_{sai}}{\phi_{sai}} \right] \quad \text{for all } i, \quad (2a)$$

$$F^{ai}(AL_{ai}, K_{ai}, A_{X1}X_{1i}, A_{X2}X_{2i}) := B_{ai}[\beta_{Lai}(AL_{ai})^{\alpha_{ai}} + \beta_{Kai}K_{ai}^{\alpha_{ai}} + \beta_{X1i}(A_{X1}X_{1i})^{\alpha_{ai}} + \beta_{X2i}(A_{X2}X_{2i})^{\alpha_{ai}}]^{\frac{1}{\alpha_{ai}}} \quad \text{for all } i. \quad (2b)$$

ここで、 $A$  及び  $A_{Xh}$  はそれぞれ労働及び LAI の生産性水準を表し、生産性水準は時間とともに成長する。 $\phi_{j'ai}$  は中間財の投入係数である。また、労働、資本、LAI の代替弾力性は、 $\sigma_{ai} := 1/(1 - \alpha_{ai})$  により表される。

### b) 工業・サービス部門

工業部門及びサービス部門の総生産量  $Y_{mi}, Y_{si}$ 、最終財の生産関数  $F^{mi}, F^{si}$  は次のように与えられる。

$$Y_{ji} := \min \left[ F^{ji}(AL_{ji}, K_{ji}, A_{Tj}\tilde{T}_{ji}), \frac{\mathcal{Y}_{aji}}{\phi_{aji}}, \frac{\mathcal{Y}_{mji}}{\phi_{mji}}, \frac{\mathcal{Y}_{sji}}{\phi_{sji}} \right] \quad \text{for } j = m, s, \text{ all } i, \quad (3a)$$

$$F^{ji}(AL_{ji}, K_{ji}) := B_{ji} \left[ \beta_{Lji}(AL_{ji})^{\alpha_{ji}} + \beta_{Kji}K_{ji}^{\alpha_{ji}} + \beta_{\tilde{T}ji}(A_{Tj}\tilde{T}_{ji})^{\alpha_{ji}} \right]^{\frac{1}{\alpha_{ji}}} \quad \text{for } j = m, s, \text{ all } i. \quad (3b)$$

ここで、 $\tilde{T}_{ji}$  は生産施設の土地であり定数として与える。 $A_{Tj}$  は土地の生産性水準を表し、生産性水準は時間とともに成長する。また、労働、資本、土地の代替弾力性は、 $\sigma_{ji} := 1/(1 - \alpha_{ji})$  により表される。

### c) 生活用水部門

各地域に水資源を生活用水として家計に供給する企業が存在すると仮定する。生活用水の生産には天水のみを必要とし、その他の生産要素は不要とする。時点  $t$  における地域  $i$  の生活用水の総生産量  $Y_{wi}$  は、次のよ

うに表される。

$$Y_{wi} := B_{wi}Z_{wi} \quad \text{for all } i. \quad (4)$$

確率的に与えられる降水量のランクを  $\psi(t) \in \Psi = \{1, 2, \dots, N\}$  とする。天水ベクトル  $\mathbf{Z}^p(t) = (\{Z_{hi}^p(t), Z_{wi}(t)\}_{h=1,2, i=1,2,3})$  は降水量の実現ランク  $\hat{\psi}(t)$  の関数となる。よって、 $\mathbf{Z}^p(t)$  は集合  $\{\mathbf{Z}_1, \dots, \mathbf{Z}_\psi, \dots, \mathbf{Z}_N\}$  の内、降水量のランク  $\hat{\psi}(t)$  に該当する値を取る。 $\psi(t)$  の発生確率を  $\mu_\psi$  で表すと、 $\sum_{\psi=1}^N \mu_\psi = 1$  となる。また、 $\mu_\psi$  は  $t$  に依らず一定の値を取る。

灌漑水量のランクも同様に確率変数  $\psi(t)$  で与えられ、河川灌漑水及び地下水の分布関数はそれぞれ  $\Phi_{hi}^s(Z_{hi}^s|\psi(t))$ 、 $\Phi_{hi}^g(Z_{hi}^g|\psi(t))$  で表す。降水量と灌漑水量のランクは必ずしも一致しないが、ある程度の相関を持つ。

## (3) 最適化行動

### a) 家計

代表的個人の地域  $i$  で生産された財  $j$  の需要を  $q_{ji} := Q_{ji}/L$  とする。各地域で生産された農業財は互いに完全代替財であると仮定しているため、農業財の需要は  $q_a := \sum_i q_{ai}$  で与えられる。工業財のケースも同様であり、工業財の需要は  $q_m := \sum_i q_{mi}$  となる。

代表的家計の最適化問題は次の一期間効用水準の最大化によって表される。

$$\max_{\mathbf{q}} u(\mathbf{q}) := \prod_{\tilde{j}} q_{\tilde{j}}^{\gamma_{\tilde{j}}}, \quad (5a)$$

$$\text{subject to } \mathbf{p}^t \cdot \mathbf{q} \leq \tilde{y}. \quad (5b)$$

ただし、

$$\mathbf{q} := (q_a, q_m, q_{s1}, q_{s2}, q_{s3}, q_{w1}, q_{w2}, q_{w3})^t \quad (6)$$

は需要ベクトルであり、

$$\mathbf{p} := (p_a, p_m, p_{s1}, p_{s2}, p_{s3}, p_{w1}, p_{w2}, p_{w3})^t \quad (7)$$

は価格ベクトルである。さらに、 $\gamma_{\tilde{j}}$  ( $\tilde{j} \in \{a, m, s1, s2, s3, w1, w2, w3\}$ ) は需要のシェアパラメータであり、 $\gamma_{\tilde{j}} > 0$  かつ  $\sum_{\tilde{j}} \gamma_{\tilde{j}} = 1$  が成り立つ。

代表的家計の所得  $I$  と財の購入に費やす予算  $\tilde{y}$ 、貯蓄(投資)に割り振る予算  $\eta$  は次のように表される。

$$I = \omega + k\{r - n\} + \sum_{j,i} \pi^{ji}, \quad (8a)$$

$$\tilde{y} := (1 - \sigma^{sr}) \cdot I, \quad (8b)$$

$$\eta := \sigma^{sr} \cdot I. \quad (8c)$$

ここで、所得は労働所得、資本所得、企業の利潤分配から成る。 $k := K/L$  は一人あたり資本ストック、 $\pi^{ji} := \Pi^{ji}/L$  は一人あたりの企業の利潤分配額である。生産要素市場は一国内で閉じられているため、家計貯蓄の総量は企業の資本需要量の合計  $K := \sum_{j,i} K_{ji}$  に等しくなる。 $\sigma^{sr}$  は貯蓄率であり一定率とする。

最大化された効用水準  $\nu$  をもたらす支出額を次のように置く。

$$\Omega(\mathbf{p}, \nu) \equiv \tilde{y}, \quad (9a)$$

$$\text{where } \nu = u(\mathbf{q}^*(\mathbf{p}, \tilde{y})). \quad (9b)$$

ただし、 $\mathbf{q}^*$  は需要ベクトルである。一期間効用水準の関数が Cobb-Douglas 型で与えられているため、支出関数  $\Omega(\cdot)$  は  $\nu$  に関して線形であり、 $\mathbf{p}$  の一次同次であり、凹関数となる。各財の最適需要量は、Shepherd の補題を適用することにより得られる。

$$q_j^{**}(\mathbf{p}, \nu) = \frac{\partial \Omega(\mathbf{p}, \nu)}{\partial p_j} \quad \text{for all } j. \quad (10)$$

代表的家計の生涯期待効用は次のように表される。

$$EU = E \left[ \sum_{t=0}^{\infty} \left\{ \frac{\nu^{1-\theta} - 1}{1-\theta} \right\} \cdot \left( \frac{1+n}{1+\rho} \right)^t \right]. \quad (11)$$

ここで、 $\theta$  は相対的危険回避度、 $\rho$  は将来効用の割引率、そして  $E[\cdot]$  は期待値操作を表す。生涯期待効用は、人口増加の影響を考慮に入れている。本研究では、家計の最適化行動は各期の一期間効用水準を最大化することと仮定しているため、生涯期待効用は社会厚生指標の一つとして扱われる。

資本の形成過程は次のように表される。

$$\begin{aligned} \Delta k(t) &:= k(t+1) - k(t) \\ &= \frac{I(t) - \Omega(\mathbf{p}(t), \nu(t))}{1+n} = \frac{\eta(t) - (\delta+n)k(t)}{1+n}. \end{aligned} \quad (12)$$

## b) 企業

付加価値価格は、中間財価格を考慮して次のように与えられる。

$$p_{ji}^v := p_{ji} - \phi_{aji} p_a - \phi_{mji} p_m - \phi_{sji} p_s \quad \text{for } j = a, m, s, \text{ all } i. \quad (13)$$

農業部門における企業の最適化問題は、利潤最大化問題として次のように与えられる。

$$\begin{aligned} &\Pi^{ai}(p_{ai}^v, \omega, r^k, \hat{\mathbf{X}}_i) \\ &:= \max_{L_{ai}, K_{ai}} [p_{ai}^v F^{ai}(AL_{ai}, K_{ai}, A_{X1} \hat{X}_{1i}, A_{X2} \hat{X}_{2i}) \\ &\quad - \omega L_{ai} - r^k K_{ai}] \quad \text{for all } i. \end{aligned} \quad (14)$$

ただし、 $\hat{\mathbf{X}}_i := (\hat{X}_{1i}, \hat{X}_{2i})$  である。また、 $r^k = r + \delta$  であり、 $\delta$  は資本の減耗率を表す。

工業部門及びサービス部門の企業の最適化問題も同様にして次のように与えられる。

$$\begin{aligned} &\Pi^{ji}(p_{ji}^v, \omega, r^k, \tilde{T}_{ji}) \\ &:= \max_{L_{ji}, K_{ji}} [p_{ji}^v F^{ji}(AL_{ji}, K_{ji}, \tilde{T}_{ji}) - \omega L_{ji} - r^k K_{ji}] \\ &\quad \text{for } j = m, s, \text{ all } i. \end{aligned} \quad (15)$$

生活用水部門における生活用水財の価格は、

$$p_{wi} = B_{wi} = \text{Const.} \quad \text{for all } i \quad (16)$$

となり、企業の利潤は常にゼロとなる。

## (4) 市場均衡と社会最適化

### a) イベントフロー

各期のイベントフローは次の通りである。

i) 降水量のランク  $\hat{\psi}(t)$  が決まり、それに伴って  $\mathbf{Z}(t)$  が決定される。これにより LAI の水準  $\mathbf{X}(t) := (\{X_{hi}(t)\}_{h=1,2, i=1,2,3})$  が決まる。よって、 $t$  期における経済環境は状態変数  $\mathbf{S}(t) := (K(t), \mathbf{X}(t))$  により与えられる。

ii) 家計は生産要素市場にて労働と資本を企業へ供給し、財・サービス市場にて企業が生産した最終財を購入する。そして、所得の一定割合を貯蓄する。一方で、企業は生産要素と中間財を需要し、最終財を供給する。このように家計と企業の需要と供給が一致するような形で市場均衡が達成される。

iii) 人口が増加し、資本の総量が新たに貯蓄された分だけ増加する。

iv)  $t$  期から  $t+1$  期へ移行し、i) から同様のサイクルを繰り返す。

### b) 市場均衡と社会最適化の条件

各家計は同質の選好を持ち、各産業の各企業は規模に関する収穫一定の技術により財を生産する。家計が保有する生産要素は全て企業へ供給され、企業は供給された全ての生産要素を素に財を生産し、生産により得られた利益を全て家計へ分配する。全ての家計が近視眼的であり異時点間での資源配分の最適化を行わない一方で、各期においてはパレート最適を実現している。それゆえ、市場均衡問題が社会最適化問題と等価になるため、本研究では比較的計算が容易となる社会最適化問題により均衡条件を記述する。

一人あたりの状態変数ベクトルを  $\mathbf{s} := (k, \mathbf{x})$  と置くと、労働と資本の制約条件は次のようになる。

$$\sum_{j,i} l_{ji} + \sum_{h,i} \kappa_{Lhi} \tau_{hi} = 1, \quad (17a)$$

$$\sum_{j,i} k_{ji} = k. \quad (17b)$$

ここで、 $\kappa_{Lhi} \tau_{hi}$  は  $\tau_{hi}$  単位の農地を耕作するために必要な労働力である。

各財の需給量と供給量が一致する市場クリアリング条件は次のように記述される。

$$\sum_i F^{ai}(\cdot) = \sum_{j,i} \phi_{aji} F^{ji}(\cdot) + q_a + \sum_{h,i} \kappa_{hi} \tau_{hi}, \quad (18a)$$

$$\sum_i F^{mi}(\cdot) = \sum_{j,i} \phi_{mji} F^{ji}(\cdot) + q_m + \eta, \quad (18b)$$

$$F^{si}(\cdot) = \sum_j \phi_{sji} F^{ji}(\cdot) + q_{si}, \quad (18c)$$

$$F^{wi}(\cdot) = q_{wi}, \quad \text{for all } i. \quad (18d)$$

左辺は各財の総供給量、右辺は中間財を含む財の総需要量を表す。 $\kappa_{hi} \tau_{hi}$  は  $\kappa_{hi}$  単位の農地の作付に使われる

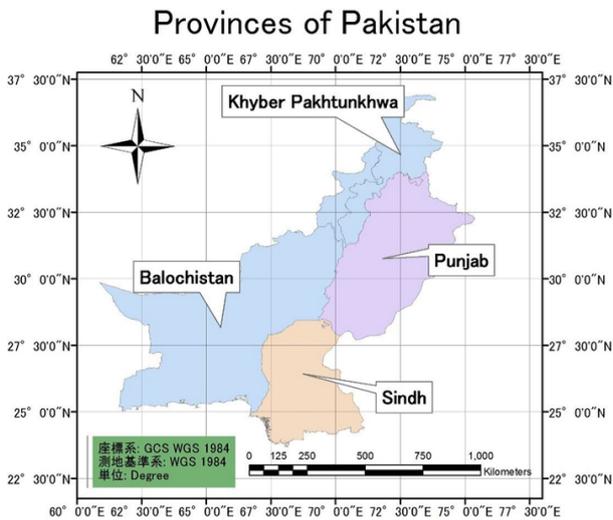


図-1 パキスタンの主な州の位置関係

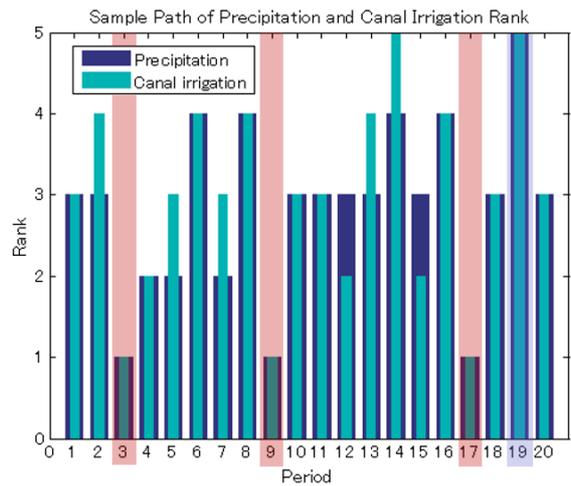


図-2 利用可能な水資源（天水と灌漑水）のランクの例

種としての農業財の量を表す。

以上より、社会最適化問題における Lagrange 関数は次のように記述される。

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L} := & u(\mathbf{q}) + \lambda_l \left[ 1 - \sum_{j,i} l_{ji} - \sum_{h,i} \kappa_{Lhi} \tau_{hi} \right] \\
 & + \lambda_k \left[ k - \sum_{j,i} k_{j,i} \right] \\
 & + \lambda_a \left[ \sum_i F^{ai}(\cdot) - \sum_{j,i} \phi_{aji} F^{ji}(\cdot) - q_a - \sum_{h,i} \kappa_{hi} \tau_{hi} \right] \\
 & + \lambda_m \left[ \sum_i F^{mi}(\cdot) - \sum_{j,i} \phi_{mji} F^{ji}(\cdot) - q_m - \eta \right] \\
 & + \sum_i \lambda_{si} \left[ F^{si}(\cdot) - \sum_j \phi_{sji} F^{ji}(\cdot) - q_{si} \right]. \quad (19)
 \end{aligned}$$

ここで、 $\lambda_l, \lambda_k, \lambda_a, \lambda_m, \lambda_{si}$  は Lagrange 乗数である。Lagrange 関数から得られる一階条件式を解くことにより、社会的最適解が得られる。

#### 4. ケーススタディ

##### (1) 対象地域の概要

本研究は、パキスタンを対象国として扱う。パキスタンは係争中の地域を除くと、図-1のように Punjab 州、Sindh 州、Balochistan 州、Khyber Pakhtunkhwa 州の4つの州が存在している。

パキスタンでは、1998年から2002年に甚大な被害をもたらした干ばつをはじめ、パキスタンでは頻りに干ばつが発生しており、干ばつは経済成長を妨げる最も大きな要因の一つとなっている。パキスタンの主産

業は農業であることから、干ばつによる作物被害は大きな経済的損失となる。特に、農業地帯である Punjab 州や Sindh 州は他の地域よりも大きな損失を被る。その結果、経済成長が阻害され、貧困者を増大させる原因となる。

干ばつによる農業への影響を緩和するためには、灌漑施設が重要となるが、「灌漑施設の老朽化により農業生産性は低い状態」(国際協力銀行, 2007<sup>16</sup>)に留まっている。よって、灌漑施設の整備を促進し、灌漑用水の効率的な利用を通じて、農業生産性の向上を図ることが干ばつの影響を緩和する有効な手段となる。

本ケーススタディにおける基準年は2007年とし、技術成長率は2%を仮定する。

##### (2) 干ばつが国家経済全体へ与える影響

干ばつが発生した期と利用可能な水資源（天水と灌漑水）が最大となった期に観察される経済的インパクトを定性的に分析する。図-2に示すランクの天水と灌漑水が利用可能な水資源として得られたケースを例として考える。図-2で示された例は、50年に一度の規模の大干ばつが3期、9期、そして17期に発生したケースである。これ以降、図中の赤塗潰部(3期、9期、17期)は干ばつ年、青塗潰部(19期)は最大水資源年を指すものとする。

次に、図-3は利用可能な水資源が図-2のケースにおける実質 GDP の経年変化を示す。GDP は干ばつ年に大きく減少し、最大水資源年には増大することを確認できる。

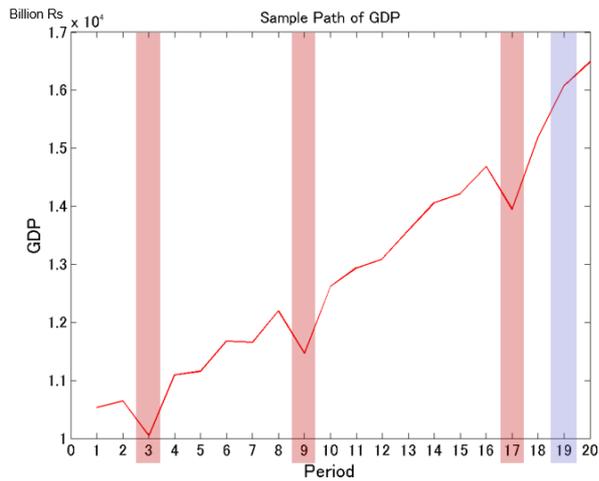


図-3 図-2 のケースにおける実質 GDP の経年変化

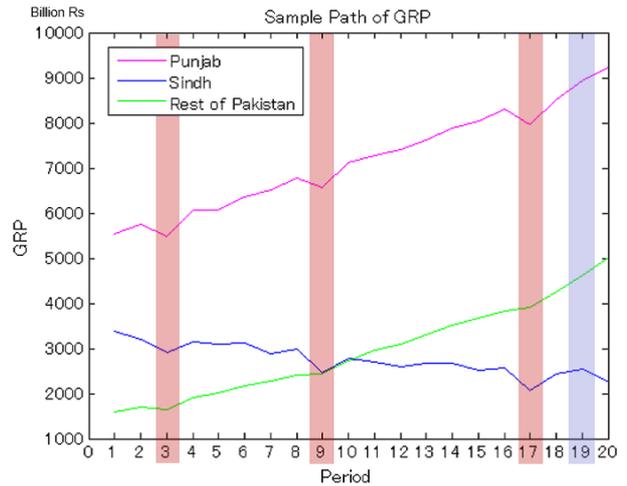


図-5 図-2 のケースにおける実質 GRP の経年変化

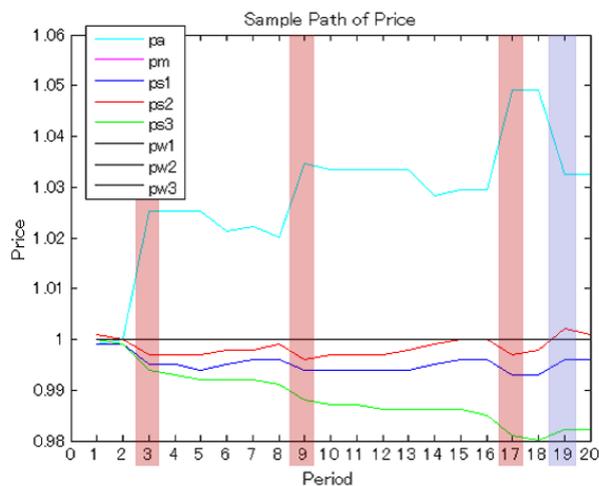


図-4 図-2 のケースにおける財の価格の経年変化

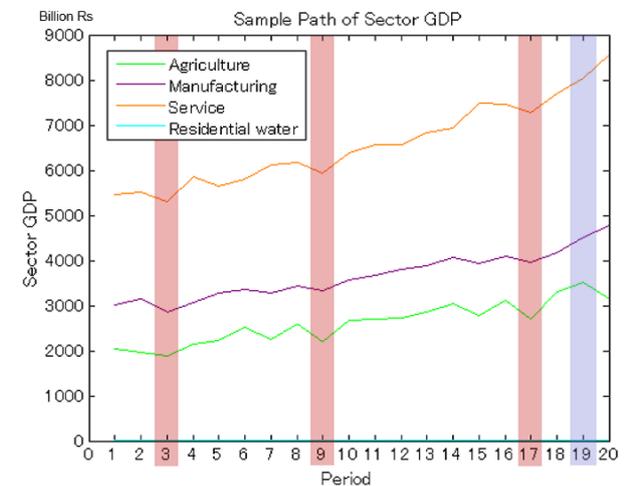


図-6 図-2 のケースにおける産業別 GDP の経年変化

### (3) 干ばつが財の価格へ与える影響

図-4 は利用可能な水資源が図-2 のケースにおける各財の価格の経年変化を示す。なお、工業財を価値基準財とし、その価格を  $p_m = 1$  に基準化している。干ばつにより農業財の価格が最も大きな影響を受けることを確認できる。農業財の価格は干ばつ年に大きく上昇し、その価格は干ばつ後も上昇したままの状態が続く。また、最大水資源年には価格が下落することを確認できる。

### (4) 干ばつが各地域へ与える影響

図-5 は利用可能な水資源が図-2 のケースにおける実質 GRP の経年変化を示す。GRP に対する干ばつの負の影響は、農業部門の生産量が総生産額の大きな比率を占める Punjab 州や Sindh 州で大きい。一方で、農業部門の生産量が比較的小さい ROP では干ばつの影響は

小さい。また、最大水資源年においては、全ての地域で GRP の増加が見られる。

### (5) 干ばつが各産業へ与える影響

図-6 は利用可能な水資源が2のケースにおける産業別 GDP の経年変化を示す。干ばつ年の農業財価格の高騰による農業財需要の低下から農業財生産量が減少し、その結果として農業部門 GDP が大きく下落する。その負の影響は、農業財を中間財として需要するサービス部門へ特に影響が及ぶ。

### (6) 灌漑施設の整備水準と期待経済成長

期待経済成長を分析するため、モンテカルロシミュレーションを実施する。そして、灌漑施設の整備水準と期待経済成長との関係を分析する。図-7 はモンテカルロ

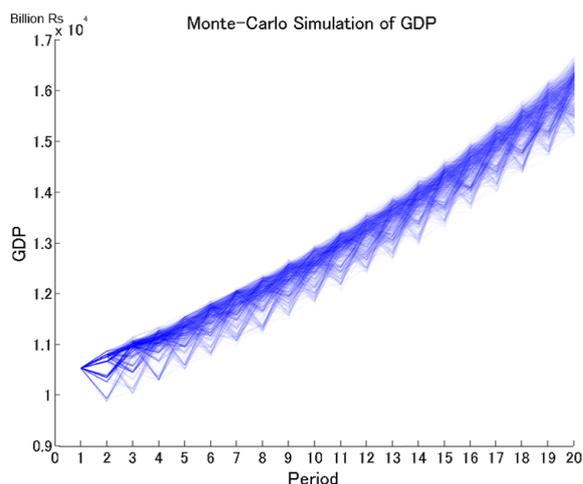


図-7 モンテカルロシミュレーション (GDP, 1000 回)

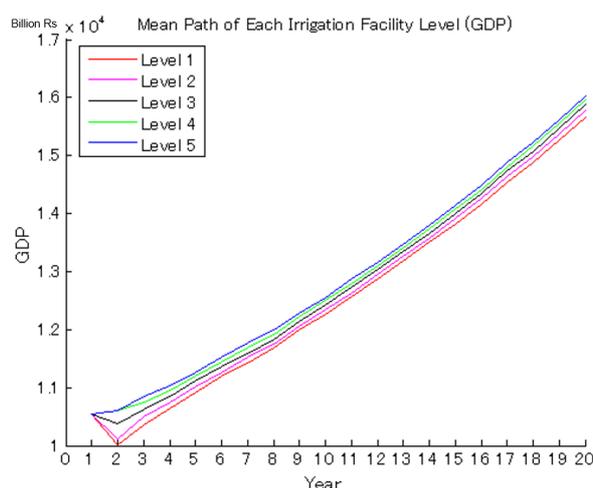


図-9 灌漑施設の整備水準と期待経済成長 (GDP)

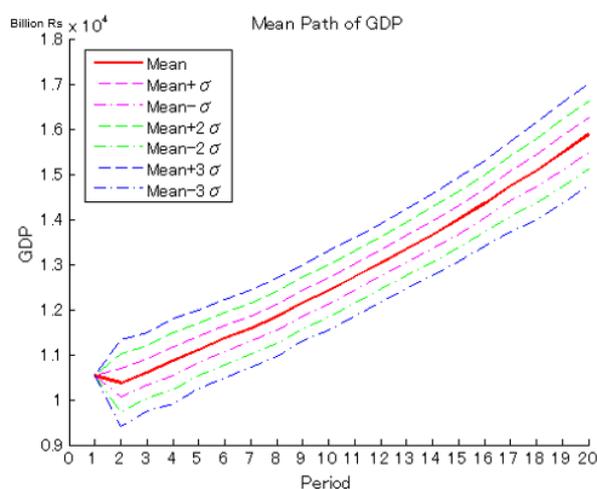


図-8 期待経済成長 (GDP)

シミュレーションを 1,000 回実施した際の各々の GDP を示し、図-8 はその GDP の期待成長を示す。図-9 は灌漑施設の整備水準別の GDP の期待経済成長を示す。

表-2 整備水準 3 からの GDP の乖離

整備水準	灌漑効率	GDP の乖離	
		10 期目	20 期目
1	-40%	-1.18%	-1.34%
2	-20%	-0.55%	-0.59%
3	0%	0.00%	0.00%
4	20%	0.74%	0.52%
5	40%	1.10%	1.00%

灌漑水の輸送効率は灌漑施設の整備水準に依存するため、灌漑施設の整備水準が高いほど灌漑水の輸送効率が高く、農業部門 GDP を上昇させる要因となる。

## 5. おわりに

本研究の一つ目の成果は、経済モデルと水文モデルの統合である。水循環-植生動態モデルから得られた植生量指標 LAI を経済モデル内の生産関数に導入した。水文学的アプローチの導入によって、水資源と農地との間の関係に裏付けを与えた。

二つ目の成果は、干ばつと灌漑施設の経済的影響の定量的評価を可能にしたことである。実際の降水および河川灌漑データに基づいて作成した水資源量の確率変数を用いて、干ばつの発生によってマクロ経済に影響が出るプロセスを記述し、灌漑施設の整備水準が地域間と産業間の経済成長に与える影響を評価可能にした。

今後、取り組むべき課題としては、一つ目に気候変動や他の自然環境の変化を考慮することである。気候変動により干ばつの発生確率が增大した場合の影響、地下水の枯渇の影響、氷河の流出の増加がもたらす長期的な変動の影響等を考慮に入れる必要がある。二つ目に水資源の再配分の便益を評価することである。灌漑施設の整備水準等の政策変数に地域間及び産業間の水資源の再配分の可能性を含める必要がある。

## 付録 I 水文モデルの出力値

次の表に水文モデルで得られる主な出力値を示す。(その他データ及び設定方法の詳細については、鈴木<sup>17)</sup>を参照)

表-3 基準年における植生量指数 (LAI)

農地区分	地域区分		
	Punjab ( $i = 1$ )	Sindh ( $i = 2$ )	ROP ( $i = 3$ )
灌漑用地 ( $h = 1$ )	0.721	0.194	0.085
天水用地 ( $h = 2$ )	0.080	0.021	0.491

表-4 降水ランクの実現確率

降水ランク	実現確率
1	5.26%
2	22.81%
3	42.11%
4	28.07%
5	1.75%

表-5 利用可能な天水量 (灌漑用地)(単位 : km<sup>3</sup>)

ランク (灌漑用地)	地域区分		
	Punjab ( $i = 1$ )	Sindh ( $i = 2$ )	ROP ( $i = 3$ )
1	14.26	0.5004	0.6302
2	18.73	2.370	0.8186
3	23.20	4.240	1.007
4	29.51	8.519	1.255
5	35.82	12.80	1.503

表-6 利用可能な天水量 (天水用地)(単位 : km<sup>3</sup>)

ランク (天水用地)	地域区分		
	Punjab ( $i = 1$ )	Sindh ( $i = 2$ )	ROP ( $i = 3$ )
1	10.45	0.1798	4.437
2	13.73	0.8518	5.763
3	17.00	1.524	7.089
4	21.63	3.062	8.837
5	26.26	4.599	10.58

表-7 利用可能な河川灌漑水量 (単位 : km<sup>3</sup>)

ランク	地域区分		
	Punjab ( $i = 1$ )	Sindh ( $i = 2$ )	ROP ( $i = 3$ )
1	52.54	40.61	4.740
2	56.07	43.33	5.058
3	59.59	46.06	5.376
4	64.98	50.22	5.862
5	70.37	54.38	6.348

表-8 利用可能な生活用水 (単位 : km<sup>3</sup>)

ランク	地域区分		
	Punjab ( $i = 1$ )	Sindh ( $i = 2$ )	ROP ( $i = 3$ )
1	4.492	2.471	1.038
2	4.795	2.684	1.258
3	5.098	2.896	1.479
4	5.546	3.279	1.773
5	5.995	3.661	2.068

Change Adaptation, pp. 7, 2012

- 4) IPCC: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (Summary for Policy makers), pp. 13, 2014
- 5) Jenkins, K. L.: Modelling the economic and social consequences of drought under future projections of climate change, University of Cambridge, 2011.
- 6) Wittwer, G. and Griffith, M.: Modelling drought and recovery in the southern Murray-Darling basin, *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics*, Vol. 55(3), pp. 342-359, 2011.
- 7) Salami, H., Shahnooshi, N. and Thomson, K. J.: The economic impacts of drought on the economy of Iran: an integration of linear programming and macroeconomic modelling approaches, *Ecological Economics*, Vol. 68(4), pp. 1032-1039, 2009.
- 8) Arndt, C., Strzepeck, K., Tarp, F., Thurlow, J., Fant, C. and Wright, L.: Adapting to climate change: an integrated biophysical and economic assessment for Mozambique, *Sustainability Science*, Vol. 6(1), pp. 7-20, 2010.
- 9) Pauw, K., Thurlow, J., Bachu, M. and Van Seventer, D. E.: The economic costs of extreme weather events: a hydrometeorological CGE analysis for Malawi, *Environment and Development Economics*, Vol. 16(02), pp. 177-198, 2011.
- 10) Thurlow, J., Zhu, T. and Diao, X.: Current climate variability and future climate change: estimated growth and poverty impacts for Zambia, *Review of Development Economics*, Vol. 16(3), pp. 394-411, 2012.
- 11) Robinson, S. and Gueneau, A.: CGE-W: An in-

## 参考文献

- 1) UNISDR: GAR 世界防災白書 2015(ポケット版), pp.3, 2015.
- 2) GFDRR: The Sendai Report: Managing Disaster Risks for a Resilient Future, pp. 14, 2012.
- 3) IPCC: Special Report on Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate

- egrated modeling framework for analyzing water-economy links applied to Pakistan, Proc. of the 16th Annual Conference on Global Economic Analysis, 2013.
- 12) Fang, X., Roe, T. L. and Smith, R. B. W.: Water shortages, water allocation and economic growth: the case of China, *Proc. of the 10th Joint Conference on Food, Agriculture and the Environment*, 2006.
  - 13) Calzadilla, A., Rehdanz, K. and Tol, R. S. J.: The GTAP-W model: accounting for water use in agriculture, *Working Paper of Kiel Institute*, 2011.
  - 14) Sawada, Y., Koike, T. and Jaranilla-Sanchez, P. A.: Modeling hydrologic and ecologic responses using a new eco-hydrological model for identification of droughts, *Water Resources Research*, Vol. 50(7), pp. 6214-6235, 2014a.
  - 15) Sawada, Y. and Koike, T.: Simultaneous estimation of both hydrological and ecological parameters in an ecohydrological model by assimilating microwave signal, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. 119(14), pp. 8839-8857, 2014b.
  - 16) 国際協力銀行: パキスタンの発展に向けて: パキスタンに対する円借款 (ODA) 業務の概要, pp. 8, 2007.
  - 17) 鈴木悠史: 水循環-植生動態モデルと多地域多部門経済成長モデルの統合による干ばつ被害の評価, 東京大学修士論文 (工学系研究科), 2015.