

# 水害リスクと防災投資の経済評価のための 経済成長モデルの開発

京都大学防災研究所 准教授 横松宗太

## 概要:

本研究では、開発途上国で発生する大規模水害と防災投資が経済に与える長期的なインパクトを定量的に分析するための、2つのタイプの経済成長モデルを開発した。タイプ1のモデルでは、洪水を対象に、災害リスク下における物的資本や資産の形成過程や、長期的に最適な治水施設整備計画について分析した。治水施設の蓄積が他のストックのシャドバリューを上昇させる構造によって、実際には災害が起こらないサンプル経路であっても発現する「事前的风险軽減効果」の存在と大きさを明らかにした。一方、タイプ2のモデルでは、少雨による干ばつを対象に、農業生産の減少が、産業間・地域間に波及する影響や、長期的な経済発展、産業間・地域間格差の変化過程を分析した。また、閉鎖経済のケースにおいて水の市場価値を、開放経済のケースにおいて干ばつと貿易との関係を分析した。さらには比較動学分析によって灌漑施設整備の経済効果を明らかにした。

キーワード: 洪水、干ばつ、経済成長モデル、治水投資評価

## 1. はじめに

本研究では、開発途上国で発生する大規模水害が経済に与える長期的なインパクトを分析する経済成長モデルを開発する。そのモデルを用いて、防災施設の経済価値と、最適な防災投資プロセスを導出する。防災投資やインフラ整備の有効性は、将来の経済成長によって担保される。したがって持続可能な社会経済の発展と整合的な防災投資戦略と経済評価を可能とするモデルの開発は重要な課題である。

本研究は2つのタイプのモデルの定式化と数値分析で構成される。近年、災害経済シミュレーションの分野では、従来の静学的応用一般均衡モデルに加えて、エージェント・ベース・モデル等の不均衡状態を対象としたモデルも増えてきているが、本研究では、動学的最適化問題や、ファーストベスト市場における多地域・多産業の市場均衡問題の枠組みを用いて、規範的な解として災害の影響と防災投資の経済評価を行う点に特徴をもつ。また、水文学や河川工学の最先端の研究によって導出された、降水や氾濫、植生のデータを経済モデルに取り込んだ分野横断的研究としての性格をもつ。

2つのタイプのモデルの経済モデルとしての形式、焦点、政策分析の視点などの相違を表-1に整理する。数理問題としての最大の相違点は、タイプ1のモデルでは

表-1. 2つのタイプのモデルの比較

	タイプ1のモデル	タイプ2のモデル
ハザード	洪水	干ばつ
問題の形式	生産資本、人的資本、防災資本の形成に関する動学的最適化問題。	多地域・多産業経済における市場均衡問題、貯蓄率一定による動学化。
焦点	国の発展段階に応じた防災投資計画	農業被害の地域間・産業間の波及的影響や格差の変化過程。
数値解析の技術的ポイント	最適値関数の値の導出	市場均衡解の導出
政策的示唆	時間的配分	空間的配分
分析のバリエーション	人的資本形成(教育)政策	干ばつ時の農業への補助政策

確率的動学的最適化問題を解くことに対して、タイプ2のモデルでは、時間軸方向の最適資源配分は行わず、各期における産業間・地域間の資源配分を分析する点にある。数学的な難易度はタイプ1の方が高いが、変数の多さに起因した分析の多様性はタイプ2の方が大きい。実務的用途においてどちらが優れているかは、政策分析の関心の内容に依存する。

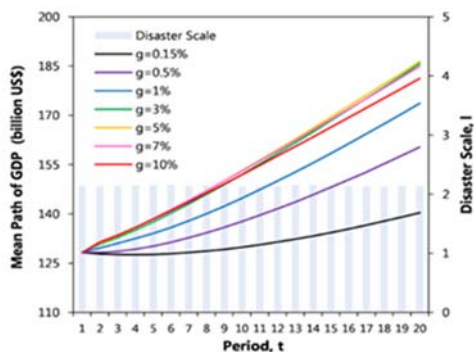


図-1. 防災投資政策と経済成長  
(モンテカルロシミュレーションにおける平均成長経路)

## 2. 洪水リスクと治水投資の長期的効果

課題担当者らは、以前に確率的動的最適化問題を基礎とした、災害リスク下の経済成長分析を行ったが、ここではリスク下の生産資本や資産の蓄積行動に焦点を当て、防災水準については、時間を通じて一定のパラメータとして扱った<sup>1)</sup>。それに対して、本研究のタイプ1のモデルでは、防災資本を内生的な変数とし、その最適な形成過程の分析を行った。枠組みと結果の概要は以下の通りである。

洪水リスク下の1国経済を対象に、生産資本、家屋・家財資産、人的資本、防災資本(治水施設)を形成する動的確率的最適化問題を定式化する。生産資本と家屋・家財資産は、水害が発生すると一部が損壊する。損壊率は、水害発生時点の防災資本の水準に依存する。また各期の防災(治水)投資水準は、各期の国内総生産(GDP)の一定割合(防災投資率)  $g$  とする。防災投資率  $g$  を政策分析のパラメータとし、さまざまな水準の  $g$  に対応した経済成長経路を比較する。

動的確率的最適化問題の最適値関数は多次元のストック変数に対して定義される。最適値関数は Bellman 方程式によって再帰的に与えられる。本研究では、Value Function Iteration (VFI)を用いて、最適値関数と最適な制御ルールを数値的に解く。また、それらが得られた後に、確率的に発生する災害過程の下での最適成長経路をシミュレートする。分析は、ある一つの災害過程を対象に、災害発生と各変数の変化の関係に着目した標本経路分析(sample-path analysis)と、モンテカルロシミュレーションの結果の平均値を用いた平均経路分析(mean-path analysis)で構成される。

パキスタンを対象にケーススタディを行った。より大きな防災投資政策  $g$  によって防災投資水準が高くなるほど、災害時の経済損失は小さくなる。その一方、防災投資率  $g$  がある水準を越えると、防災投資に過剰な資源が配分されることになり、生産資本や人的資本への投資に十分な資源を充てることができなくなり、経済成長は小

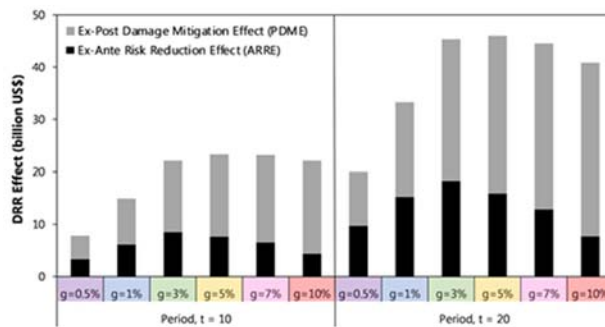


図-2. 防災投資効果(DRRE)と、事前的リスク軽減効果 (ARRE)、事後的被害軽減効果(PDME)

さくなる。図-1は、最適な  $g$  は3%から5%の範囲にあることを示している。防災投資が経済成長に与える効果は、防災投資額の GDP 比率に関して単峰型になる。また、最適な防災投資水準には及ばないとしても、例えば  $g$  を0.15%から1%のオーダーに上げることによって、大きな経済成長効果が得られることもわかる。

また、本研究では「防災投資効果(Disaster Risk Reduction Effect, DRRE)」を「事前的リスク軽減効果(Ex-Ante Risk Reduction Effect, ARRE)」と「事後的被害軽減効果(Ex-Post Damage Reduction Effect, PDME)」に分解するとともに、モンテカルロシミュレーションを用いて両効果を計測する手法を開発した。事後的被害軽減効果(PDME)は、防災資本が災害発生時に実際にGDP被害を軽減した額を集計したもの(のモンテカルロシミュレーションの平均値)である。一方で、事前的リスク軽減効果(ARRE)は、結果的に災害が発生しなかった経路において、防災投資がどれだけGDP成長を押し上げたかを測る。ARREは、生産資本の損失の可能性が小さくなることによって、より投資が促されることによって生じる。防災投資の蓄積が他のストックのシャドウバリューを上昇させる構造によって、実際には災害が起こらないサンプル経路であっても発現する経済成長効果に相当する。

図-2は、基準年から10年後と20年後のGDPの上昇で評価した防災投資効果(DRRE)と、ARREとPDMEの内訳を示す。防災投資率  $g=3%$ の政策では、ARREはDRREの約40%を占めることがあきらかになった。

ARREは(事前の意味での)リスク下の最適投資行動を分析する動的確率的最適化問題の枠組みにおいて導かれる効果である。動的確率的最適化を行わない評価枠組みでは、防災投資の価値は過少評価される可能性がある。

## 3. 干ばつの波及的被害と経済成長

干ばつ災害の政策分析に関して、課題担当者らは、本課題と並行して、2国が干ばつの発生状況に応じて穀物をシェアする協定を結ぶ政策の分析を行った<sup>2)</sup>。そこで

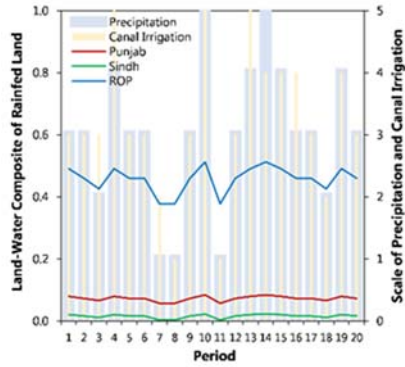


図-3. 「水-土地合成要素」の変化過程

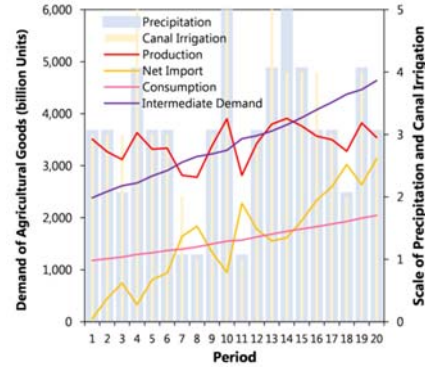


図-5. 農業生産と農業財の中間需要と最終需要、純輸入の過程

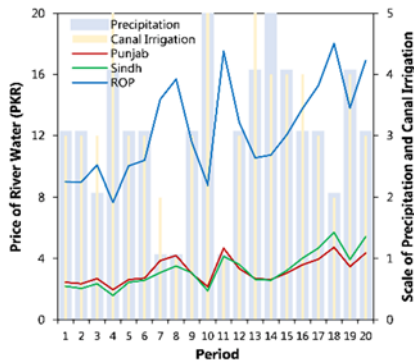


図-4. 水の価値の変化過程 (閉鎖市場ケース)

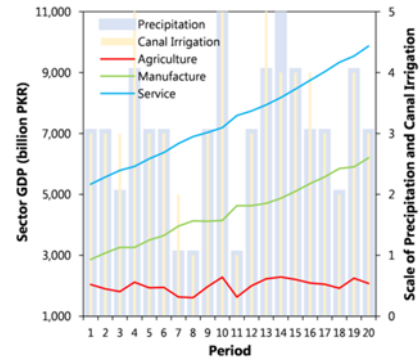


図-6. 産業 GDP の過程

は2国間や他の海外市場との空間横断的な取引に焦点を当て、静学的モデルで分析を行った。それに対して、本研究のタイプ2のモデルでは、1国内の地域間の被害の波及や経済成長へのインパクトに着目した。さらには水の市場価値を導出した。枠組みと結果の概要は以下の通りである。

干ばつリスク下にある、3地域×3産業で構成された1国経済を考える。産業は農業、製造業、サービス業で構成されている。農業財と製造業財は地域を越えて交易可能な財であり、サービス業のサービスは交易不可能であるとする。生産要素である資本と労働の市場は1国で閉じている。一方で、それらは毎期、降水量が与えられた後に国内の地域間・産業間を自由に移動できると仮定する。よって、毎期の自然環境に応じて、より高い価値を生み出す地域・産業へと移動することになる。

本研究では、水文・植生モデルから得られる葉面積指数を用いて農業生産関数の技術パラメータを同定する方法を開発した。すなわち、階層構造として定式化される農業生産関数のキャリブレーションを、(通常のキャリブレーションで用いる)最終的な生産量よりも、より源に近い(すなわち生産構造の上流)階層である「水-土地合成要素」の水準において行う方法を考えた。それによって、降水量の農業生産へのインパクトがより正確に導かれるようになる。また農地を灌漑農地と天水農地に分

類し、灌漑用地では河川からの灌漑用水の利用可能量や、地下水の利用可能量を考慮する。

また、閉鎖経済と開放経済の2ケースの分析を行う。海外との貿易を考慮しない閉鎖経済モデルでは、全ての生産要素と産出物が有限であり、全ての財の価格が内生的に決まる。したがって資源の希少性を考慮した市場評価に適している。本研究では閉鎖経済ケースにおいて、各期の水の価値の市場評価を行う。一方、開放経済モデルは貿易の変化を分析することができる。本研究では開放経済ケースにおいて、海外からの農作物の調達を考慮した国内の市場均衡を記述する。

パキスタンを対象にケーススタディを行った。図-3から図-7は、一つの標本経路の下でのいくつかの変数の変化過程を示す。棒グラフは降水量と灌漑用水の利用可能量を示し、それらのスケールは右の軸に示されている。図-3は、降水量に関する一つの標本経路の下での、天水農地の「水-土地合成要素」の水準の変化過程を示す。11期のような干ばつ期では、その水準が減少する。一方、図-4は、閉鎖経済ケースにおける水の市場価値を表す。降水量が最も多い10期と、干ばつの11期を比較すると、11期において水の価値が2倍近くの高騰する。

また、図-5は、開放経済ケースにおける農業生産と

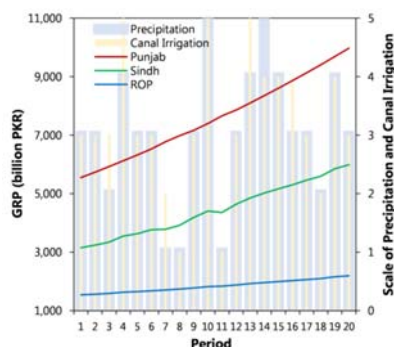


図-7. 地域 GDP の過程

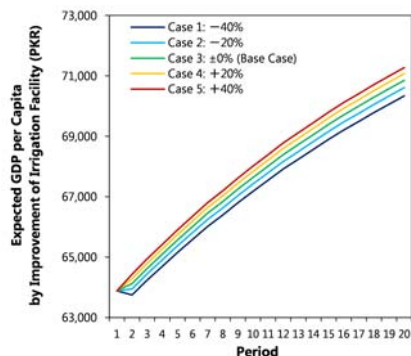


図-8. GDP の平均成長経路と、灌漑施設整備の効果

農業財の中間需要と最終需要、純輸入の過程を示す。干ばつ期には国内の農業生産が減少する一方で、農業財の輸入が増加する。それによって需要側の水準は比較的安定する。そして農業財の輸入を増やすためには、製造業財の輸出を増やす必要がある。よって、図-6 に示すように、干ばつ期には製造業 GDP が拡大する。また、図-7 に示すように、生産の固定要素に関する環境的な差異に起因して、経済成長の傾きは地域間で異なったものとなる。図-8 は、モンテカルロシミュレーションの結果として得られた GDP の平均成長経路と、灌漑施設投資の効果を示す。

タイプ2のモデルでは、閉鎖経済ケースと開放経済ケースの分析を行った。特に閉鎖経済ケースは現実から乖離しているようにも思われるが、農業財価格が内生的に決まる市場における、水の限界生産性の評価は、水の希少性の指標としての意味をもっている。

#### 4. おわりに

本研究では、大規模水害と防災投資が経済に与える長期的なインパクトを定量的に分析するための2つのタイプの経済成長モデルを開発した。既述のように、両モデルはそれぞれに異なった特徴をもっている。しかし、その相違は、対象とするハザードを規定するものではない。すなわち確率的動学的最適化問題を干ばつリスクの評価に適用することも、貯蓄率一定のモデルを用いて洪水の地域間・産業間の波及的被害を調べることもできる。両方の特徴を併せ持ったモデルや、さらには洪水と干ばつの双方をカバーするモデルの開発は今後の重要な課題である。

また、本研究は、水文学や河川工学の分野で得られた降水や氾濫、植生のデータを経済モデルに取り込んだ分野横断的研究となっている。国立研究開発法人土木研究所水災害・リスクマネジメント国際センター (ICHARM) の小池俊雄センター長と東京大学の元小池研究室のグループが開発した最先端の氾濫モデルや植生モデルのシミュレーション結果を経済モデルに入力する手法についても、本研究の特徴の一つである。

現時点において災害リスクに晒された資本・資産が小さな開発途上国では、静学的評価による防災投資便益は小さなものとなる。それに対して本研究は、動学的問題の規範的解によって、成長のエンジンとしての防災投資便益を定量的に評価するためのモデルを開発した。さまざまなデータ環境への対応や、個人間の格差の分析<sup>3)</sup>など、今後に残された課題は多いが、広い範囲の問題への応用の可能性をもった基礎モデルができたと考える。

#### 謝辞

本研究を遂行するにあたって、石渡裕明氏 (パシフィックコンサルタンツ株式会社)、小池俊雄センター長 (ICHARM)、澤田洋平研究官 (気象庁気象研究所)、鈴木悠史氏 (千代田化工建設株式会社) にはとりわけ多大なご協力を頂きました。記して感謝申し上げます。

#### 参考文献

- 1) Yokomatsu, M., Wada, H., Ishiwata, H., Kono, T., Wakigawa, K.: An Economic Growth Model for Disaster Risk Reduction in Developing Countries, the Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, October 5-8, 2014, San Diego, CA, USA, pp.1584-1591, 2014.
- 2) Ishiwata, H., Yokomatsu, M., Elagaty, M., Koike, T., Sawada, Y., Jaranilla-Sanchez, P.A., and Suzuki, Y.: Two-country computable equilibrium model of international drought risk sharing: the case of Pakistan and the Philippines, The proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), Banff Center, Banff, Canada, October 5-8, 2017; pp. 3578-3583, 2017.
- 3) 横松宗太: 災害とインフラストラクチャ, 経済成長, 格差, 土木学会論文集 D3, Vol. 73, No.5, pp. I\_1-I\_17, 2017.