

開発途上国における防災投資効果評価 モデル開発に関する研究

和田裕行¹・湧川勝己²・横松宗太³・竹谷公男⁴

¹正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社 交通政策部 (〒163-6018 東京都新宿区西新宿六丁目8-1)
E-mail:hiroyuki.wada@tk.pacific.co.jp

²正会員 博(工) 一般財団法人国土技術研究センター (〒105-0001 東京都港区虎ノ門三丁目12-1)
E-mail: k.wakigawa@jice.or.jp

³正会員 博(工) 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)
E-mail: yoko@drs.dpri.kyoto-u.ac.jp

⁴正会員 独立行政法人国際協力機構 (〒102-8012 東京都千代田区二番町5-25)
E-mail: Takeya.Kimio@jica.go.jp

近年、大規模化し、社会経済に深刻な影響を与える自然災害発生に対処するため、防災投資、とりわけ事前の防災投資の重要性が指摘されるようになってきている。特に、開発途上国では経済規模が小さく、防災文化が育まれていないため災害に対し脆弱な状態にあり、経済的基盤が直接被害を受けることで経済成長が大きく阻害され、貧困の罠に陥いるという構図が存在する。事前の防災投資はこうした状況を防止・軽減する極めて有効な手段であるが、その効果を定量的に示し、意思決定に用いることが可能な評価手法が確立されていない。このような背景の下に本研究では開発途上国を対象に事前の防災投資の評価を定量的に行うためのモデルを構築した。また、パキスタンにおけるデータを用いてモデルの有用性を確認するとともに、防災投資が開発途上国の経済成長及び貧困の解消に貢献することを確認した。

Key Words : Natural disaster risk reduction, Development economics, Gini coefficient, DSGE model

1. 研究の目的

近年、大規模で社会経済に大きな影響を与える大規模な自然災害が世界各地で多発し、その被害は、社会、経済、引いては地球環境に対し深刻な影響を与えている。2011年の自然災害の被害額は過去最大の3,800億ドルにも上る¹⁾とされ、経年的にも著しい増加傾向にある。

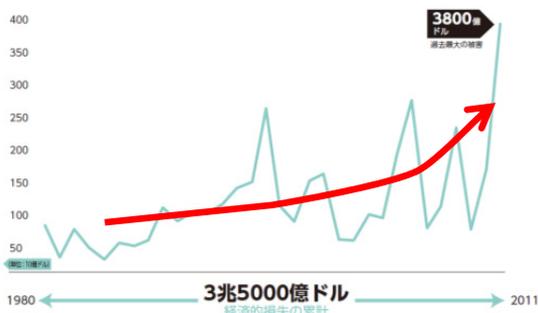
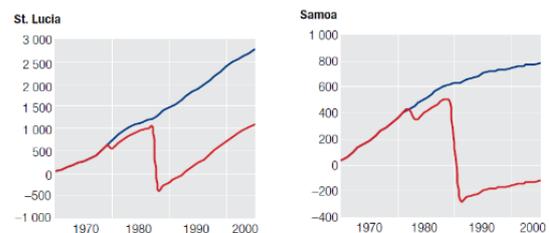


図-1 自然災害による経済被害の推移
(出典：災害に強い将来のための防災¹⁾に一部加筆)

開発途上国における自然災害による経済損失額は大きくなっており、国民経済に多大な影響を与えるようにな

ってきている。例えば2005年のガイアナでの洪水被害が対GDP比で59%のように、²⁾GDPに占める割合で見ても、極めて大きな影響を与えていることが理解できる。このようなGDPに大きな影響を与える自然災害は、持続可能な開発への大きな障害となっているとともに、直接被害だけでなく、間接被害が不安定な経済情勢と相まって開発途上国の発展や国内の安定・治安自体に負の影響を与える大きな要因となっているものと想定される。実際に図-2が示すように自然災害の頻発はその後の経済成長へ大きく影響することが報告されている。³⁾



1970-2006年の累積純資本形成 (単位：百万米ドル、2000年基準)
青：災害による経済損失の影響を含まない場合
赤：災害による経済損失の影響を含む場合

図-2 累積純資本形成からみたスリランカ、サモアでの災害による経済損失への影響 (出典：国連世界防災白書 2009)

こうした背景のなか、国際社会の動きとして、1980年代後半から防災に対しての国際的な取り組みが継続的に強化されており、1994年には国連防災世界会議が開催され、2000年には国連国際防災戦略事務局（以下、UNISDR）が設立されている。また、2005年に行われた第2回国連防災世界会議の行動計画として制定された兵庫行動枠組みでは、「災害による人的被害、社会経済資源の損失削減に向けたしなやかな国・地域の構築」が2015年までの成果として期待され、防災を持続可能な開発に取り入れることや防災体制の整備・能力向上が戦略目標として位置づけられている。

他方で、1980年代後半から貧困問題の解決に向けて、開発途上国に対するミレニアム開発目標（以下、MGDs）が設定され、1992年の国連環境開発会議などの国際的な取り組みを経て2002年に持続可能な開発をテーマに、開発とともに防災の必要性が盛り込まれた「ヨハネスブルク実施計画」が採択された。このように、防災は防災分野だけでなくとどまらず、貧困問題解決等国際社会における主要課題としての認識が進んでいる。

実際に、開発途上国における自然災害は国家の経済発展・国家の安定・貧困解消に対して負の影響を与えやすい。特に、貧困層は一般的に災害被害の影響を受けやすいが、保険や社会保障制度によってほとんど守られていない。国連世界防災白書2009によると、災害の影響が、しばしば長期にわたって収入や消費の低迷、福祉、教育環境等に悪影響を及ぼすことになり、貧困の解消がますます遅れる³⁾ことが謳われている。

しかし、1980年から2009年までの国際援助のうち、912億ドルが災害関連活動に向けられたが、そのうち事前の防災投資向けは僅か33億ドルと活動費の3.6%でしかない¹⁾。これは開発途上国では経済基盤が脆弱なため、防災投資のような長期的成長を見据えた投資への優先度は必ずしも高くないためと考えられる。

こうした状況は、防災に対する必要性の認識が高まっている一方で、事前の防災投資効果を評価する手法が確立されていないために生じていると考えられる。現状で防災投資効果の評価については、国連開発計画（UNDP）で「被災程度を軽減するため予め1ドルを投ずる毎に、災害時に生じる経済損失の7ドル分を回避できる」⁴⁾と謳われる程度の情報にとどまっており、国家レベルの防災の事前投資の水準や、防災投資効果が経済成長および貧困問題への程度貢献をしているかなどを明確にする手法はないと言える。

以上より、開発途上国における事前の防災投資の効果を表す手法を開発し、事前の防災対策の実施に導くことが開発途上国の経済発展にとっても、貧困問題の解決のためにも重要と考えられる。

そこで本研究では、開発途上国における事前の防災投

資による経済効果、貧困の解消等の効果の評価が可能な防災投資効果評価モデル（以下、モデルとする）を開発することを目的とする。

そのため、本論文では、先ず開発途上国の経済成長要素の分析を通じてモデル化にあたって考慮すべき要素を明らかにした上で、それらを考慮した基本的なモデルの構造の開発を試みる。更に、実際の統計データを活用し、開発したモデルの妥当性を確認する。

2. 既存研究と本研究の位置づけ

モデル化を行うにあたっては、途上国の経済サイクルを表現することはもちろんのこととして、防災投資を行うことで、災害発生時の直接被害の軽減が図られ、国家レベルでの長期的な経済発展につながり、貧困の解消にも貢献することを表現することが重要となる。しかしながら、既往研究においては、経済発展と防災投資の効果を一体的に取り扱ったものは存在しない。

防災投資の評価に関する事例としては、洪水対策の評価を氾濫シミュレーションを活用し、治水施設整備による浸水被害額を評価する治水経済調査があるが、治水経済調査においては、資産や経済状況の伸びは考慮せず、現存する一般資産被害の軽減額（直接被害額）の評価に特化したものとなっている。また、治水経済調査は、個別水系や個別プロジェクト単位で評価を行うことが一般的であり、国家レベルでの防災投資の効果を評価したものは非常に少ない。

貧困の解消と経済成長の関係について分析した論文としては、Aart (2007)⁴⁾がある。貧困と経済成長の関係を分析するため、生存必要消費額 c を考慮したStone-Geary型の効用関数を導入し、援助等の政策による経済成長の違いなどの分析を行っている。しかし、貧困と貯蓄又は技術レベルとの関係性に注目しており、防災投資との関係には言及していない。

その他、国家レベルでの防災対策の意思決定ツールとして、ウィーンにある国際的研究機関であるThe International Institute for Applied Systems Analysisが開発したCATSIM (CATastrophe SIMulation)がある。将来的な災害リスクを想定した場合の「財務ギャップ」を算定することで、財務戦略の最適な組み合わせを得ることができ災害リスク管理のツールとして活用されている。ただし、財務シミュレーションに特化したものであり、財務面以外の質的な要素は考慮されていない。

3. 開発途上国における経済発展要素の分析

(1) 開発途上国経済の構造分析

防災投資と国家経済成長の関係性を表現するモデルを開発する上では、どのような要素が開発途上国経済の経済成長に関係しているかといった構造把握が重要である。そこで、開発途上国における経済発展に関わりの深い要素を抽出するため、JICAの支援国約107ヶ国を対象に、世界銀行データベース World Development Indicators を活用し、重回帰分析を活用した分析を行った。

重回帰分析は、経済成長の度合いを示す指標としてGDP（1人あたりGDPに基準化して活用）を用い、このGDPを説明する統計指標を得ることを目的として実施した。

この分析の結果、GDPを説明する良好な関係式として(1)式が推計された(R²=0.5)。説明変数のt値・p値及び符号条件は表-1のように有意な結果となっており、開発途上国の経済発展には、災害被害率、貧困、教育（識字率、初等教育率）が大きく影響しているものと推察された。

$$\begin{aligned} \text{一人あたりGDP}(\$) = & -346 \times (\text{災害による年平均人的被害率}) \\ & -43.9 \times (\text{貧困率}) + 71.2 \times (\text{識字率}) \\ & + 26.8 \times (\text{初等教育率}) - 1640 (\text{定数項}) \end{aligned} \quad (1)$$

表-1 重回帰分析の結果

変数	t 値	p 値	判定
災害による年平均人的被害率	-2.3531	0.0213	*
貧困率	-2.3888	0.0195	*
識字率	3.2227	0.0019	**
初等教育率	2.7197	0.0082	**
定数項	-0.7628	0.4480	

※ *: 5%有意, **: 1%有意

(2) 既存研究による各要素と経済成長の関係

ここでは、(1)の構造分析により、データから明らかになった経済成長と各要素の関係を更に裏付けるため、既存研究等のレビューにより関係性を確認する。災害被害率と経済成長の関係でみると、特に、開発途上国において災害被害がGDPに顕著に影響することが明らかになっている。例えば、2004年のハリケーン・アイバンによるグレナダの経済被害はGDPの約2倍、2004年のインド洋地震津波によるモルディブの被害額はGDPの60%を超えていることが報告されている²⁾。また、一度低下したGDPが元の水準にまで戻るには多大な時間を要することも解っている。

教育と経済成長の関係についてBarro and Lee (1993)⁶⁾は、人的資本蓄積の推計方法によって統計的有意性等の結果が異なるものの、経済成長と人的資本蓄積の間には安定的な正の相関関係がみられることを指摘している。また、白井 (2004)⁷⁾によると、人的資本の蓄積は経済成長を遂げる上で重要ではあり、投資資金が限定される

開発途上国においては教育や保健衛生の達成段階、物的資本などの他の生産要素との関係を含めた順序づけなどを国情に合わせて検討する必要があるとしている。

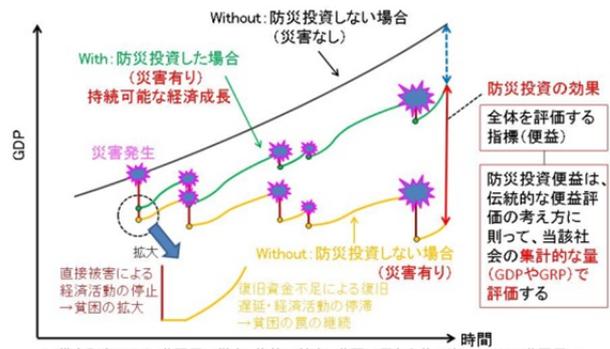
貧困と経済成長についても、開発経済学の先駆者であるNurkse(1953)⁸⁾が、貧困の悪循環として途上国の貧困が長期に実現することを静的な観点から描いたのははじめ、Barro and Sala-i-Martin (1995)⁹⁾は動的な新古典派成長モデルに基づき、貧困の罠が生じるメカニズムを説明するなど、逆説的に貧困の解消が経済成長に繋がることを示している。

以上、既存研究からも、構造分析で確認した要素と経済発展の関係性があることが確認された。したがって、モデル化を行うにあたっては、災害被害率、貧困、教育を適切に考慮することが重要であるといえる。

4. モデル構築の基本的考え方

(1) モデルの基本方針

モデルによる分析の目的は、防災投資の有無や対策の種類に応じた自然災害による直接被害の程度の違いが、中長期的にGDP等の経済成長(図-3)や、貧困の割合等の社会構造(図-4)に与える影響を把握することにある。その上で、防災投資の有無などの各状況下における経済成長に関するシミュレーションを行い、予測結果を比較することで防災投資による効果を評価できるようにする。



※ 災害発生により、貧困層の増大、格差の拡大、貧困の罠から抜け出せなくなる貧困層の拡大・継続

図-3 防災投資の有無による経済成長の違いの評価

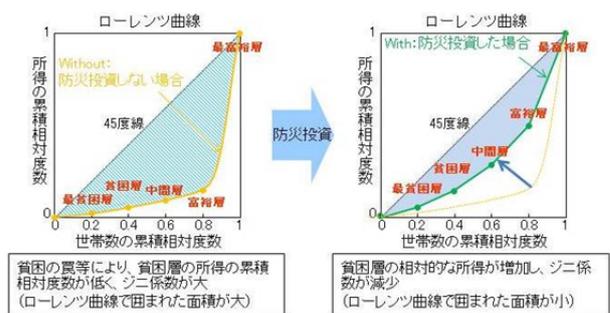


図-4 防災投資の有無による貧困の状況の評価

その際、開発途上国の特性を適切に表現するため、経済成長のサイクルを表現することに加え、3章の分析で明らかとなった、経済成長と関係の深い災害・貧困・教育の要素も含め、下表にて要素毎のモデル化の考え方を整理する。

表-2 モデルを構成する要素の考え方

要素	モデル化の考え方
<経済> a) 経済成長を表せること	災害発生の有無・程度の違いによる直接被害の差が及ぼす中長期的な経済成長の違いを表現する。
<災害> b) 災害の被害率を考慮すること	洪水・地震等の災害種別を考慮するとともに、人的資本への被害である人的被害率・死亡率、家屋家財等の物的被害率・企業の資本被害としての金融被害率の各種災害被害率を考慮する。
<貧困> c) 貧困の状況を考慮すること	階層を分けることで、貧困層と富裕層等の階層による災害への影響を考慮する。
<教育> d) 教育の要素を考慮すること	教育水準による所得の違いを表現するため、教育投資による人的成長を表現する。

上記の要素を考慮しつつモデルの方針を反映させるにあたっては家計行動に着目することとした。

教育水準の向上による将来給与の向上などは家計の消費行動によって支えられていること、また、災害被害は家計の消費行動や教育投資に大きく直接影響を与えること、貧困層ほどその影響が大きいこと、これらすべてが経済成長に関連するなど、いずれの要素も家計行動に着目することによってモデル化することが可能である。

さらに、開発途上国においては第一次産業の依存度が高いことや、外国資本の誘致などにおいても労働資本の提供が条件になるなど、家計の労働資本が国力の基礎となっていることから、家計の消費行動に着目したモデル化の検討を行うことが重要であると考えられる。一方、全体のGDPは国内生産によって表現することとするので、家計を中心としたうえで企業行動も反映したモデル化を行う必要がある。

(2) モデルの枠組み

次に、表-2で整理した要素毎のモデル化の考え方を満足するためのモデルの枠組みについて考える。

基本的なモデルの枠組みとして、静学モデルが一時点での状態予測に過ぎないのに対し、災害の有無・程度の違い<要素 b)>による人的資産の蓄積の違い<要素 d)>や、GDP 経済成長<要素 a)>等の資本蓄積の違いを、貧困層などの階層毎に表現する<要素 c)>ことが可能な動学的均衡モデル「DSGE モデル」を選定する。

表-3 一般的なモデルの枠組みの特徴

評価手法	概要	特徴
消費者余剰推定法	個別プロジェクトの費用便益分析で採用されている一般的な手法。	○評価が容易。 ×非市場的項目の便益を計測できない。
マクロ計量経済モデル	消費、投資、貿易などの相互の関係を統計的に分析し、経済への影響を把握。	○現況再現が的確であり、将来予測が可能。 ×政策がもたらす複数の効果のそれぞれの大きさや、変数間の相互関係を把握しにくい。
静学的均衡モデル (CGE 等)	ある一時点での消費や投資の均衡を予測することが可能。	○ある時点の経済構造や社会的格差の分析が動学モデルに比べて容易。 ×時系列的な効果を考慮できない。
動学的均衡モデル (DSGE モデル)	需要と供給を考慮しつつ、時系列の変化も考慮した予測が可能。	○時系列で変化していく要素 (人的資本等の蓄積) を考慮した予測が可能。 ×シミュレーションの難易度が高い。

(3) モデルの全体構造

(1) 基本的な考え方、(2) モデルの枠組みを踏まえ構築するモデルの全体構造は図-5の通りである。

家計行動と企業行動を定式化することで、GDP やジニ係数を算出できるモデルとする。防災投資の有無による被害率の変化を入力した際の均衡状態を予測し、その差により防災投資の効果を表現できるものにする。

また、災害被害の影響は、所得階層ごとに異なることが想定されるため、家計行動を階層毎に表現する。

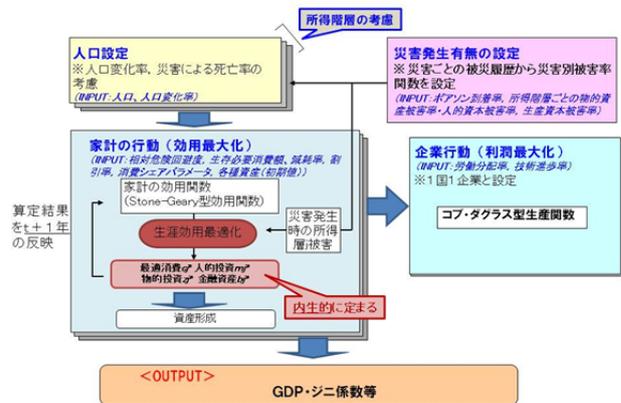


図-5 モデルの全体構造

5. モデルの定式化

(1) 家計モデル

全ての家計はポワソン過程に基づき発生する災害リスクを認知しているものとし、(2)式に示す生涯期待効用最大化を目的とする合理的な所得分配を行うものと仮定する。この際、家計は毎期の労働所得・利子所得を、消費、物的資産形成、貯蓄、人的投資に配分するものとする。

なお、所得階層の違いを考慮するため 5 つの階層毎 (最貧困, 貧困, 中間, 富裕, 最富裕) の行動を把握する。

$$\max E \left[\int_t^{\infty} u(c_j, z_j) e^{-\rho_j t'} dt' \right] \quad (2)$$

c_j : 消費財(非耐久), ρ_j : 一般化割引率 (c_j, z_j): 効用関数
 z_j : 家屋・家財(物的資産), E : 期待値操作, t : 期間 j : 階層

a) 効用関数

期間効用関数は (3) 式とし、家計は貧困の罅に陥ることを表現するため、合成財の消費と物的資産から効用を得るものとする。ただし、消費と物的資産には最低消費水準が存在する。それらを以下の \bar{c} , \bar{z} のように効用関数に組み込むことにより、それぞれの水準が \bar{c} , \bar{z} 付近になると限界効用が高くなり、消費や物的資産形成が優先されることになるため、結果的に所得を他の投資に回せなくなる。このような方法により家計は貧困の罅に陥ることになることを表現する。

$$u(c_j, z_j) = \frac{\left\{ (c_j - \bar{c})^\gamma \cdot (z_j - \bar{z})^{1-\gamma} \right\}^{1-\theta}}{1-\theta} - 1 \quad (3)$$

c_j : 消費財(非耐久), \bar{c} : 生存必要消費額
 z_j : 家屋・家財(物的資産), \bar{z} : 生存必要物的資産
 γ : 消費のシェアパラメータ θ : 相対的危険回避度

なお、貯蓄によって形成された金融資産は、金融機関を通じて、企業の生産資本となるため、家計の金融資産は企業の生産資本として生産性を向上させる。一方、人的投資は将来の人的資本として生産性を向上させる。このように、貯蓄や人的資本投資は将来の消費増加を図ることを目的とした行動である。

また、貧困層は災害時に借入が困難となることが知られている。そのような流動性制約を、金融資産の非負制約として設定する。

b) 人的投資と人的資本の関係

所得階層 j の人的投資に対する人的資本の形成過程を以下のように仮定することで、教育の要素を考慮する。このとき、人的資本の災害被害を考慮するため、人的被害率の項を設定する。

$$dh_j = \{ \eta(m_j) - \delta_h h_j \} dt - \omega_j h_j dq \quad (4)$$

δ_h : 減耗率, $\eta'(m_j) > 0$, $\eta''(m_j) \leq 0$, ω_j : 人的被害率
 h_j : 人的資本, m_j : 人的資本への投資 (教育費等)

c) 物的投資と物的資産の関係

所得階層 j の家屋・家財等の物的資産の形成過程を以下のように仮定する。このとき、物的資本の災害被害を考慮するため、物的被害率の項を設定する。

$$dz_j = \{ \xi_j - \delta_z z_j \} dt - \varphi z_j dq \quad (5)$$

z_j : 物的資産, a_j : 総資産, ξ_j : 物的資産形成
 δ_z : 物的資産の減耗率, φ : 物的被害率

d) 金融投資と金融資産の関係

所得階層 j の金融資産の形成過程を以下のように設定する。このとき、資産被害を考慮するため、資本被害率の項を設定する。

$$db_j = (rb_j + wh_j - c_j - \xi_j - m_j) dt - \psi b_j dq \quad (6)$$

b_j : 金融資産, r : 利子率, w : 貸金率 (1 人的資本当たり), ξ_j : 物的資産形成, ψ : 資本被害率

e) 総資産

所得階層 j の総資産を金融資産と物的資産の和で定義する。その変化過程は、金融資産と物的資産の変化過程の和で与えられる。

$$da_j = db_j + dz_j \\ = (ra_j + wh_j - c_j - rz_j - m_j - \delta_z z_j) dt - \{ \psi a_j + (\varphi - \psi) z_j \} dq \quad (7)$$

(2) 企業モデル

企業は、労働と資本をレンタルして、財を生産する。今回のモデルでは、一国一企業を想定し、代表的企業の生産関数 (GDP 関数) を Cobb-Douglas 型¹⁰⁾ 生産関数により設定する。

$$Y(t) = F(H(t), K(t)) = B(t)H(t)^a K(t)^{1-a} \quad (8)$$

$H(t)$: 人的資本ストック, $B(t)$: 外生的技術進歩
 $K(t)$: 金融資本ストック, α : 人的資本比率

6. 開発モデルの妥当性の検証

(1) 検証の方法

開発したモデルの妥当性を確認するため、UNISDR でも災害と経済成長の関係について考察を行っている¹¹⁾ パキスタンを事例として、実際の国単位のデータを用いたモデルの検証を実施した。まずは、過去から近年までのデータ事例にモデルを適用することで再現結果からモデルの妥当性を確認する。そのうえで今後 30 年間の将来予測を行い防災投資の有無により経済成長や貧困の解消を表現できるかを確認する。

なお、今回は、検証の手順・結果の概要報告にとどめ、各種パラメータについては、追っての報告とさせていただく。

a) 検証手順

- 検証は以下の①～④に示す手順 (図-6) に従って行う。
- ① 災害が発生する前の年度 (2004 年) での GDP の実績値にモデル推計値が合致するように生産関数のパラメータのキャリブレーションを行う。
 - ② 災害毎の被害率を与えることで、実際に災害が発生し

た2005, 2007, 2010年の災害を考慮した実績GDPをモデルが再現できているかを確認する。

- ③UNISDRによる災害無しの場合のGDP予測値とモデルの予測値を比較し、現況再現ができているかを確認する。この際、判断基準としては予測値のオーダーが一致しているかどうかにより再現性を判断する。
- ④防災対策有無別の将来予測を実施する。

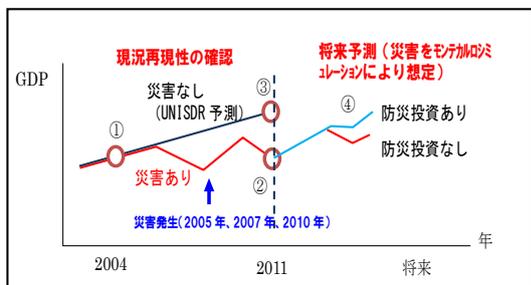


図-6 モデル検証の手順

b) 災害の設定方法

将来予測を行う上で、必要となる災害の発生・規模を以下のように設定する。

災害被害率はEM-DATや世界銀行のデータベースを用い、パキスタンにおける過去約30年の災害履歴(地震、洪水、ストームを区別)から資本被害、人的被害、死亡率それぞれの被害率関数を推計した。ただし生産資本と家計の物的資産の被害率は等しいと仮定した。

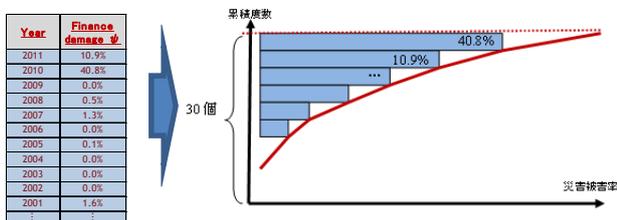


図-7 災害履歴を用いた被害率関数の設定イメージ

なお、防災対策の効果を確認するためには、本来防災対策の内容に応じた被害率の関係を把握した上で、対策有の場合の成長過程をシミュレートし、防災対策無の成長過程と比較する必要がある。しかし今回はデータの制約から、仮に過去に発生した最大の災害被害率を半減できる防災対策を行った場合に限定した。

(2) 現況再現

モデルによる再現結果は図-8の通りであり、災害があった実績値と、災害がない場合のUNISDRによる推計値とモデルの値を比較すると、概ね同様のオーダーで再現できた。したがって、本モデルを防災投資の有無による経済成長の違いを記述する手法として適用することの妥当性が確認された。

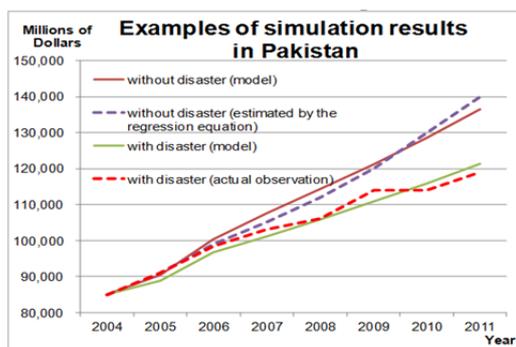


図-8 本モデル予測値とUNISDR予測値の比較結果

(3) 将来予測

将来予測により、以下のことが確認された。

防災対策が有の場合には防災対策無の場合と比べて、2042年時点で約25%高い経済成長が実現される。

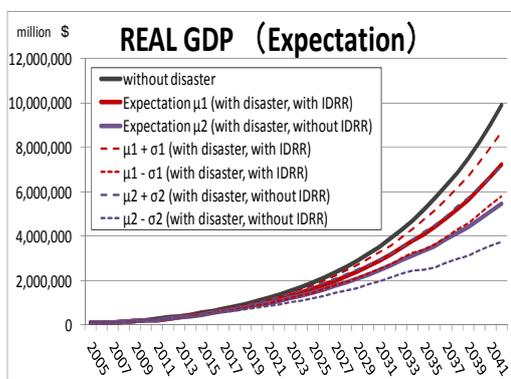


図-9 GDPの成長過程

防災対策有の場合には、防災対策無の場合と比べ2042年時点でジニ係数が約0.5%改善される。

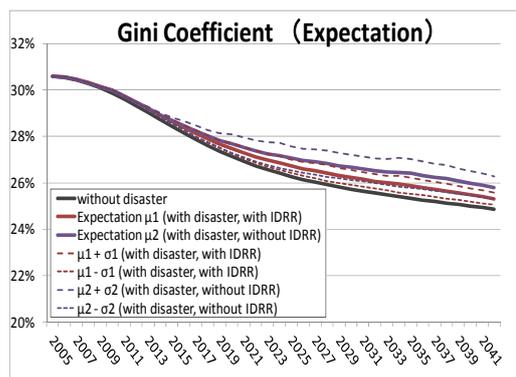


図-10 ジニ係数の推移

7. 結論

(1) 成果

今回開発したモデルを、パキスタンを対象に適用した結果、モデルの妥当性が概ね確認できた。また、将来災害に見舞われた場合においても、事前の防災投資を行う

