

多地域動学マクロ経済モデルを用いた 国土構造と災害脆弱性に関する研究

石井 良治¹・福田 大輔²

¹正会員 一般財団法人 計量計画研究所 (〒 162-0845 新宿区市谷本村町 2-9)
E-mail: rishii@ibs.or.jp

²正会員 東京工業大学大学院准教授 理工学研究科土木工学専攻 (〒 152-8552 目黒区大岡山 2-12-1)
E-mail: fukuda@plan.cv.titech.ac.jp

我が国は世界的に災害リスクの高い国土である。ひとたび巨大災害が大都市圏で発生した場合、その影響は国全体に及び国力の衰退をもたらしかねない。そのような観点から、現状の一極集中型国土構造の問題点が指摘されている。本研究では、空間的・時間的に災害の影響が広く波及してしまう状態を災害脆弱性が高い状態と呼ぶこととし、国土構造と災害脆弱性の関係について知見を得ることを目的とする。災害の特徴をより正確に捉えるため、確率的な多地域動学マクロ経済モデルを構築し分析に用いる。構築したモデルについて数値計算を行った結果、より望ましい国土構造は社会厚生と災害脆弱性の観点からでは異なる可能性があること等が示唆された。

Key Words : disaster vulnerability, national land structure, dynamic multi-regional macroeconomic model, restoration path

1. はじめに

我が国は世界的にみても災害リスクの高い国土である。ひとたび巨大災害が発生すると、被災地域に大きな直接被害をもたらすだけでなく、時間的・空間的に影響が広がることで、国全体の経済に対して悪影響を及ぼすであろうことは想像に難くない。わが国は、全国比 3.6% の面積しかない東京圏が、27.5% の人口 (2009 年)、31.9% の GDP (2008 年) を有しており集中型の国土構造であると言える (山口¹⁾)。このように人口や産業の集中した大都市圏で巨大災害が発生した場合、その影響は甚大となり国力の衰退をもたらしかねない。もし国土が過剰な集中型であり、巨大災害に対して国土全体として脆弱な状態であるならば、分散化を促すことによって災害に対する脆弱性を低下させていく必要がある。

一方で、我が国は集中型の国土構造によるメリットも享受してきた。例えば経済学において“集積の経済”と呼ばれる現象があり、人や産業が集中することにより生産性が効率化されてきた。国土構造には集積と分散の双方にメリットがあり、これらはトレードオフの関係にある。より望ましい国土構造を議論していくためには、両者のメリットを同一のフレームで扱える経済モデルの構築が必要となる。

本研究は、このような経済モデル構築のための第一ステップであり、国土の分散化による災害脆弱性の低減効果を経済モデルを用いて検証することに焦点を当

てる。分析にあたっては、災害の性質をモデル内で適切に表現するために、確率的な多地域動学マクロ経済モデルを構築する。このモデルを利用し、ある国土構造において災害が発生した場合の被害を計算することで、脆弱性を数値的に評価することを試みる。

2. 分析の枠組み

(1) 災害脆弱性

あるシステムが外的な攪乱要因に対して有する強さを表す概念として“強靱性 (Resilience)”が挙げられる。藤井ら²⁾では、社会経済が強靱であるとは『どのような危機が訪れようとも、致命傷を避け、可能な限り被害を最小化し、こうむった被害の可能な限り早期に回復できる』状態にあることと述べている。つまり強靱性は、何らかの外的ショックが発生した際に、どれくらいの影響を受けるのか、どれくらいのスピードで元に戻るのか、という 2 点によって規定されるといえる。本研究では、この強靱性とは逆の概念として“脆弱性 (Vulnerability)”を定義し議論していく。

Fingleton et al.³⁾を基に脆弱性の概念図を表したものが図 1 である。図中には、ショックの後に通るであろう複数の経路が描かれている。経路 A は外的要因により一時的に生産が減少した後、比較的短期間で元のパスへと復元していく。

経路 A と比較して経路 B と経路 C は脆弱性が高いと考えられる。経路 B は、経路 A と比較して、もとの

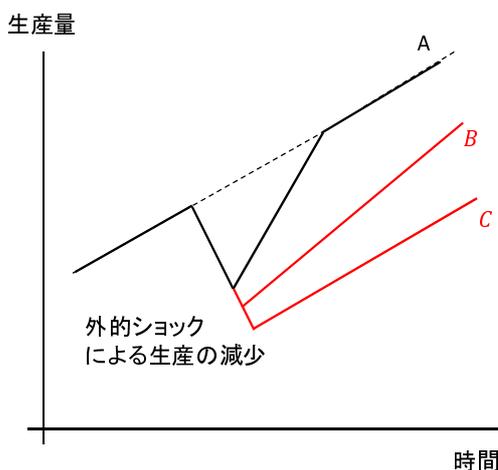


図 - 1 脆弱性の概念図

パスに復元するまでにより多くの時間を必要としている。災害を例とすると、復興予算の策定に時間がかかり他地域からの援助が遅れたため、復興までの時間がかかり生産性の低下した状態が続く場合などが考えられる。経路 C は、もとのパスに復元することができず外的ショックの影響が恒久的に残る状態を表す。阪神大震災や東日本大震災の後には、被災地域からの人口流出や集積の喪失が確認されており、それによる永続的な生産性の低下が起こることが考えられる。

本研究では、特に経路 A と経路 B を比較した脆弱性の概念に着目する。つまり、長期的には元のパスに戻るが、経路 A と比べて、「一時的な生産の減少幅の増大」や「復元までにかかる期間の増大」が見られる状態を脆弱性と定義する。以上のような脆弱性の概念を踏まえた上で、災害に対して脆弱とならない国土構造を考えていく。

(2) 災害の性質

モデルを構築する際に考慮すべき災害の性質について確認する。災害自体は局所的な現象であるが、地域間の交易を通じて他地域にその影響が波及する可能性がある。また、復旧は段階的に行われ被災前よりも生産水準の低い状態が続くため、災害の影響が長期にわたって残る可能性がある。先の脆弱性の概念と対応させると、災害の影響の空間的・時間的波及が大きくなるほど脆弱性が高くなると考えられる。このような災害の性質を捉え災害脆弱性を評価するために、時間的・空間的に影響が波及する様子をモデルの中で記述できる必要がある。

被害の空間的な波及については、空間的応用一般均衡モデルを用いた一連の研究があり、例えば小池ら⁴⁾や武藤ら⁵⁾によって、ある地域で災害が発生した場合の

他地域への影響が推計されている。一方で、時間的な波及については動学マクロ経済モデルを用いた一連の研究があるが、特に多地域の枠組みで分析を行っているものとしては Tatano et al.⁶⁾がある。

また、災害には不確実な現象であるという特徴もあり、確率的に発生する現象として災害を表現する必要がある。確率的な事象を考慮した動学分析としては動学的確率的一般均衡モデルを用いた研究があるが、それを災害の分野に応用した研究としては五十部ら⁷⁾や Ikefuji et al.⁸⁾がある。

本研究は、これらの多地域動学マクロ経済モデルを拡張し分析を行っていく。確率的な事象を考慮した上で多地域の動学マクロ経済モデルを構築している研究としては Den Haan et al.⁹⁾があるが、災害を対象とした研究ではない。災害分野での研究としては、瀬木ら¹⁰⁾がある。本研究は、これらの研究を参考にした上で、社会資本をモデルに組み込む等の拡張を加えモデルを構築する。

(3) 分析の方針

本研究での目的は「国土構造と災害脆弱性の関係性についての基本的特性を数値的に分析すること」である。そのためには、災害の影響が空間的・時間的に広範囲にわたることや災害が不確実性を持つことをモデル内で表現する必要があるため、確率的な多地域動学マクロ経済モデルとして定式化を行う。モデルを用いて災害が発生した場合の被害を計算することで、脆弱性の数値的な評価を試みる。また、国土構造の違いによって脆弱性がどのように変化してくるのかを分析し、分散化による災害脆弱性の低減の効果についての検証を行う。

本研究での国土構造は、基本的に各地域の人口と災害リスクと地域の空間配置によってのみ規定されるものとする。国土構造が集中型か分散型かということは地域間の人口比率によってのみ決まるとする。また、その人口分布についてはパラメータとして外生的に与えて分析を行う。これは、ある国土構造が実現した状態で、その国土構造がどのような災害脆弱性を有するかを分析することに焦点をあてているためであり、国土構造自体をどのように実現するのかどうかについては本研究の対象外とする。

3. モデルの定式化

本章ではモデルの定式化を行う。まず t 期における経済システムを記述した上で、それを動学的最適化問題として定式化し動学過程を導出する。

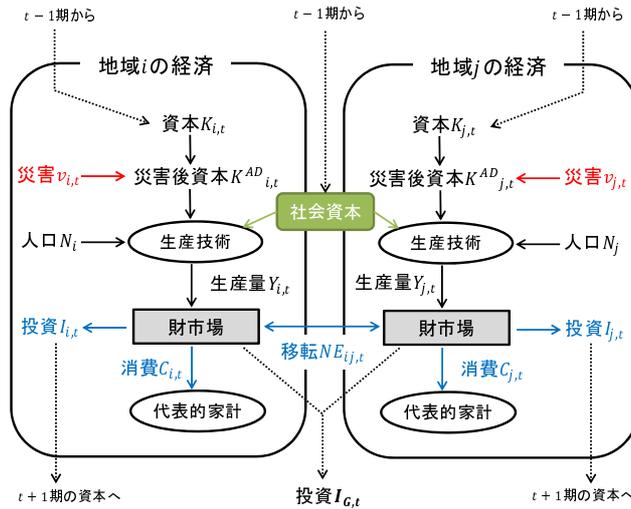


図 - 2 経済システムのイメージ図

(1) 経済システム

t 期における経済システムとして、以下の条件を仮定する。

- (a) M 個の地域から成り立つ閉鎖経済を考える。
- (b) t 期が始まる際に、各地域 i は生産資本 $K_{i,t}$ 、人口 N_i を保有する。国全体として、社会資本 G_t が存在する。
- (c) 生産資本は各地域にとって私的な資本であり、社会資本は国全体で共有の資本として用いられる。
- (d) 災害は期首に発生し、利用可能な資本を減少させる。
- (e) 各地域は資本と労働を用いた生産活動を行う。
- (f) 各地域は同一の財を生産し、それを消費と投資の両方に用いる。
- (g) 投資は次の期の資本ストックになる。ただし、投資には調整費用が発生する。
- (h) 各地域間での財の移出入や資本の移動は行われるが、地域外とのやりとりはないものとする。
- (i) 各地域に存在する代表的家計は消費した財の量に従い効用を得る。
- (j) 各地域の人口は期間を通じて一定であり、人口移動はないものとする。

この経済システムを表したものが、図 2 である。以下、各要素について詳しく述べていく。

a) 災害の発生

t 期において災害が発生する場合は、期首から活動開始までの間にある確率に従って発生するものとする。災害が発生することにより資本が損傷し、以後利用できる資本が減少すると仮定する。つまり、 t 期において実際に使用できる災害後生産資本 $K^{AD}_{i,t}$ と災害後社会資本 G^{AD}_t は、災害を表現する確率変数 $v_{i,t}$ を用いて、

$$K^{AD}_{i,t} = e^{v_{i,t}} K_{i,t} \quad (1)$$

$$G^{AD}_t = e^{v_{i,t}} \eta_i G_t \quad (2)$$

η_i : 各地域に保有する社会資本の割合

と表すことができる。社会資本は国全体で共有の資本として用いられるが、災害発生時には各地域が保有している割合 η_i に従って損傷すると仮定している。また、災害の発生確率を p_i 、災害による資本の損傷割合を ϵ_i とすると、 $v_{i,t}$ は以下を満たす。

$$\begin{aligned} \text{probability } 1 - p_i : v_{i,t} &= 0 \\ \text{probability } p_i : v_{i,t} &= \log(1 - \epsilon_i) \end{aligned} \quad (3)$$

p_i : 災害の発生確率

ϵ_i : 災害による資本の損傷割合

b) 生産技術

各地域は労働力と資本を用いて生産活動を行うとすると、生産関数は、

$$Y_{i,t} = F(K^{AD}_{i,t}, \tau_i G^{AD}_t, N_i) \quad (4)$$

τ : 社会資本へのアクセス性

となる。ここで労働力は各地域の人口に等しいと仮定している。本モデルにおいて、社会資本とは公共投資によって整備されるインフラストラクチャーのことを指し、社会資本が整備され交通や情報のやり取りが盛んになることで生産性が向上すると仮定している。

c) 投資と資本の蓄積

t 期から $t+1$ 期への資本の遷移は、

$$K_{i,t+1} = (1 - \delta_K)K_{i,t}^{AD} + I_{i,t} \quad (5)$$

$$G_{t+1} = (1 - \delta_G)G_t^{AD} + I_{G,t} \quad (6)$$

δ_K : 生産資本の減耗率

δ_G : 社会資本の減耗率

に従うとする。

また投資を行う際には、既存の資本量と投資量に応じた調整費用 ψ^K, ψ^G が発生すると仮定する。これは、実際の復旧には時間がかかり、他地域と比較して生産の低下している期間が一定程度続く状況を表現するためである。調整費用が入ることにより、ある地域で災害が発生した場合に、他の被災していない地域から資本の移転が行われ、資本が瞬時に回復してしまうという状況になることが回避される。

d) 財市場の均衡

財市場は地域ごとに閉鎖しておらず、地域間でやり取りができるとする。

$$NE_{ij,t} = -NE_{ji,t} \quad (7)$$

$NE_{ij,t}$: 地域 i から地域 j への財の移転

が成立する。経済全体での財の均衡を考えると次のようになる。

$$\sum_i Y_{i,t} = \sum_i C_{i,t} + \sum_i I_{i,t} (1 + \psi^K(I_{i,t}, K_{i,t}^{AD})) + I_{G,t} (1 + \psi^G(I_{i,t}, G_t^{AD})) \quad (8)$$

e) 代表的家計

各地域に存在する代表的家計は消費した財の量に応じて効用 $u(c_{i,t})$ を得る。 $c_{i,t} = \frac{C_{i,t}}{N_i}$ であり、一人あたりの財の消費量を表す。また限界効用逓減が成り立つとし、効用関数 $u(c_{i,t})$ は、

$$\lim_{c_i \rightarrow \infty} u_c(c_{i,t}) = 0 \quad (9)$$

$$\lim_{c_i \rightarrow +0} u_c(c_{i,t}) = \infty \quad (10)$$

$u_c(\cdot)$: 効用関数 u を c で一階微分した関数

を満たすものとする。

(2) 動学的最適化問題

社会的計画者が期待社会厚生を最大化する問題を考える。目的関数は、

$$U_0 = E_0 \left[\sum_{t=0}^{\infty} \beta^t W_t \right] = E_0 \left[\sum_{t=0}^{\infty} \beta^t \left(\sum_i \kappa_i u \left(\frac{C_{i,t}}{N_i} \right) \right) \right]$$

κ : パレート荷重

β : 割引因子

である。制約条件として、各期の経済システムで定式化された式 (1)、式 (2)、式 (3)、式 (4)、式 (5)、式 (6)、式 (8) を用いると、以下のような動学的最適化問題に書き直すことができる。

$$\max_{C_{i,t}, I_{i,t}, I_{G,t}} E_0 \left[\sum_{t=0}^{\infty} \beta^t \left(\sum_i \kappa_i u \left(\frac{C_{i,t}}{N_i} \right) \right) \right] \quad (11)$$

$$s.t. \quad \sum_i F(K_{i,t}^{AD}, \tau_i G_t^{AD}, N_i) = \sum_i C_{i,t} + \sum_i I_{i,t} (1 + \psi^K(I_{i,t}, K_{i,t}^{AD})) + I_{G,t} (1 + \psi^G(I_{i,t}, G_t^{AD})) \quad (12)$$

$$K_{i,t+1} = (1 - \delta_K)K_{i,t}^{AD} + I_{i,t} \quad (13)$$

$$G_{t+1} = (1 - \delta_G)G_t^{AD} + I_{G,t} \quad (14)$$

$$K_{i,t}^{AD} = e^{v_{i,t}} K_{i,t} \quad (15)$$

$$G_t^{AD} = e^{v_{i,t}} \eta_t G_t \quad (16)$$

この問題を解くことにより、最適な操作変数の流列 $\{y_t\}_{t=0}^{\infty}$ を得ることができる。これは、ある経済の想定下において期待社会厚生を最大化するような最適な資源配分に他ならない。実際の分析においては、操作変数の流列 $\{y_t\}_{t=0}^{\infty}$ を実際に計算するのではなく、 t 期と $t+1$ 期の関係性を表す政策関数 (Policy Function) ,

$$x_{t+1} = h(x_t, v_t) \quad (17)$$

を求めることとなる。

(3) 動学過程

式 (11)-式 (16) で定式化された問題から、動学的ラグランジアンを用いることで、以下の一階の必要条件が得られる。導出方法については加藤¹¹⁾ を参考にしている。

$$\Lambda_t = \frac{\kappa_i}{N_i} u_c \left(\frac{C_{i,t}}{N_i} \right) \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \Lambda_t & \left(1 + \psi_{i,t}^K(\cdot) + I_{i,t} \psi_{i,t}^K(\cdot) \right) \\ & = \beta E_t [\Lambda_{t+1} (e^{v_{i,t+1}} F_{K,i,t+1}(\cdot) + e^{v_{i,t+1}} (1 - \delta) \\ & \quad - I_{i,t+1} e^{v_{i,t+1}} \psi_{K,i,t+1}^K(\cdot) + e^{v_{i,t+1}} (1 - \delta) I_{i,t+1} \\ & \quad + e^{v_{i,t+1}} (1 - \delta) I_{i,t+1} \psi_{i,t+1}^K(\cdot))] \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \Lambda_t & \left(1 + \psi_t^G(\cdot) + I_{G,t} \psi_t^G(\cdot) \right) \\ & = \beta E_t [\Lambda_{t+1} (e^{v_{i,t+1}} F_{G,i,t+1}(\cdot) + e^{v_{i,t+1}} (1 - \delta) \\ & \quad - I_{G,t+1} e^{v_{i,t+1}} \psi_{G,t+1}^G(\cdot) + e^{v_{i,t+1}} (1 - \delta) I_{G,t+1} \\ & \quad + e^{v_{i,t+1}} (1 - \delta) I_{G,t+1} \psi_{i,t+1}^G(\cdot))] \end{aligned} \quad (20)$$

$$K_{i,t+1} = (1 - \delta) e^{v_{i,t}} K_{i,t} + I_{i,t} \quad (21)$$

$$G_{t+1} = (1 - \delta_G) G_t^{AD} + I_{G,t} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \sum_i F_{i,t}(\cdot) & = \sum_i C_{i,t} + \sum_i I_{i,t} (1 + \psi_{i,t}^K(\cdot)) \\ & \quad + I_{G,t} (1 + \psi_t^G(\cdot)) \end{aligned} \quad (23)$$

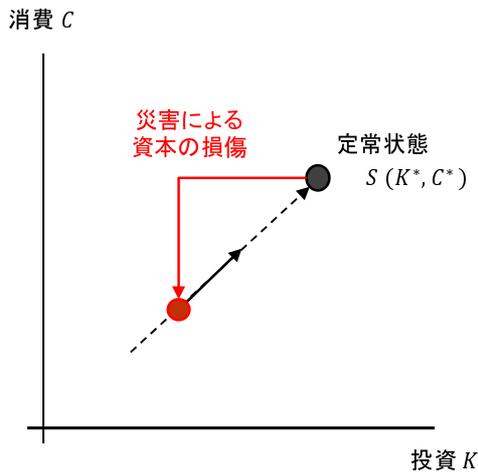


図 - 3 復旧過程

Λ_t : ラグランジュ乗数

$X_x(\cdot)$: 関数 X を変数 x で微分した関数

ここで

$$F_{i,t}(\cdot) = F(K_{i,t}^{AD}, \tau_i G_{i,t}^{AD}, N_i)$$

$$\psi_{i,t}^K(\cdot) = \psi(I_{i,t}, K_{i,t}^{AD})$$

$$\psi_{i,t}^G(\cdot) = \psi(I_{G,t}, G_{i,t}^{AD})$$

この差分方程式体系を解くことによって政策関数を得るが、解析的にその解を求めることは困難であり、数値計算により近似的に政策関数を得る。

数値計算には perturbation method を用いた。perturbation method とは、政策関数について定常点周りにテイラー展開を行い近似的な解を得る方法である。定義域全体で関数を多項式近似をする projection method 等の他の手法と比較して、複数の状態変数を扱いやすいというメリットがある。テイラー展開を行う際には二次近似を用いた。数値計算方法については Heer et al.¹²⁾, Schmitt-Grohe et al.¹³⁾ を参考にしている。

(4) 災害脆弱性の評価

災害脆弱性の評価方法について述べる。まず、定常状態を定義する。定常状態とは「災害が発生せず、かつ t 期から $t+1$ 期の資本が変化しなくなる状態」をさす。図 3 における $S(K^*, C^*)$ は定常状態を、 X^* は変数 X の定常状態における値を表す。

次に復旧過程について記述する。あらかじめ経済が定常状態にあるとし、時点 t_1 において災害が発生するものとする。被災することにより資本が損傷し、定常状態 S から被災後の状態に不連続にジャンプする。それ以降は災害が発生しないと仮定した場合に、再度元の定常状態に戻るまでに描く動学過程を災害の復旧過程とする。この様子を表したものが図 3 である。

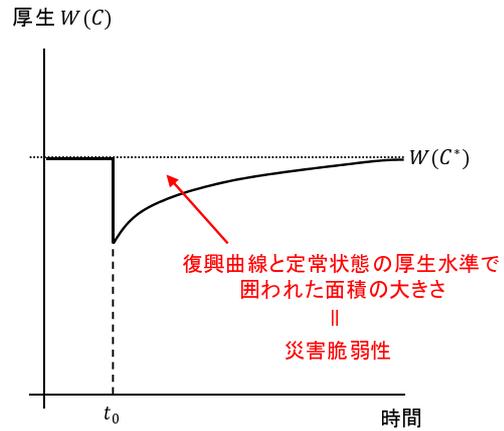


図 - 4 災害脆弱性

この復旧過程を、時間軸で書き直したグラフが図 4 の復旧曲線である。図 1 で示したように、災害脆弱性は災害発生後の社会厚生の低下幅と復旧までの期間によって規定され、脆弱性が高くなるほど曲線は右下へとシフトしていく。モデルにおいては簡単化のため経済成長は考慮されていないが、脆弱性が高まると同様にシフトし復旧曲線と定常状態の厚生水準で囲われた部分の面積が大きくなっていくと考えられる。本研究では、この面積を災害脆弱性 VUL と定め評価に用いる。

$$VUL \equiv \int_0^{\infty} e^{(1-\frac{1}{\beta})t} (W(u^*) - W(u_t)) dt \quad (24)$$

実際に近似的に計算を行い、以下のように各期間の災害による社会厚生の低下分を足し合わせることで算出する。

$$VUL \approx \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t (W(u^*) - W(u_t)) \quad (25)$$

4. モデルの特定化

(1) 関数の特定化

効用関数、生産関数、投資の調整費用について関数の特定化を行う。

a) 生産関数

コブ = ダグラス型の生産関数を仮定する。

$$F(K, G, N) = A(K)^\alpha (N)^{1-\alpha} (G)^{\alpha_G} \quad (26)$$

A : 技術水準のパラメータ

α, α_G : パラメータ

b) 効用関数

相対的リスク回避度一定の効用関数を仮定する。

表 - 1 パラメータの設定

生産関数のパラメータ	α	0.25
	α_G	0.12
	A	1
割引因子	β	0.98
異時点間の代替弾力性の逆数	σ	1.2
生産資本の減耗率	δ_K	0.05
社会資本の減耗率	δ_G	0.02
生産資本の調整費用のパラメータ	ϕ_K	0.5
社会資本の調整費用のパラメータ	ϕ_G	1

$$u(C) = \frac{C^{1-\sigma} - 1}{1-\sigma} \quad (27)$$

σ : 異時点間の代替弾力性の逆数

e) 投資の調整費用

投資の調整費用としては、以下の関数形を仮定する。

$$\psi^K(I, K) = \frac{\phi_K}{2} K \left(\frac{I}{K} \right)^2 \quad (28)$$

$$\psi^G(I, G) = \frac{\phi_G}{2} G \left(\frac{I}{G} \right)^2 \quad (29)$$

ϕ_K, ϕ_G : パラメータ

この式では、資本と比較して投資の比率が多くなるほど、調整にかかるコストが多くなると仮定している。また同様の比率であっても、資本の絶対量が多くなると調整費用がより多く必要となる。

(2) パラメータの設定

数値シミュレーションを行うにあたり、パラメータの設定を表1のように行った。パラメータの設定は橋本ら¹⁴⁾の値を参考にしている。ただし、社会資本の減耗率に関しては、寿命が50年程の長期インフラを想定した設定としている。

国土全体での人口は1で固定しており、人口分布は各地域の人口比率で与えられる。例えば2地域モデルにおいては、片方の地域の人口比率が0.5の場合を分散型、0.8の場合を集中型の国土構造としている。

タイムスパンは「1期間=1年」と設定している。災害は50年に一度、つまり2%の確率で発生し、発生した際には資本の10%を損傷させるのを基本ケースとした。

パレート荷重は人口比率に等しいとしている。これはベンサム型の社会厚生関数を想定しているためである。

2地域モデルにおいては両地域とも社会資本に対して完全にアクセスできるとし、 $\tau_1 = \tau_2 = 1$ と設定している。3地域モデルにおけるアクセス性については

後述する。各地域の社会資本保有量は各地域で同量であると仮定し、 η_i は地域数の逆数で与えた。

5. 復旧過程の分析

前章までに構築したモデルによる数値計算結果を述べていく。まずは2地域モデルにおいて、片方の地域で災害が発生した場合の復旧過程について分析を行う。

地域1にて災害が発生した場合について、図5は復旧過程における地域1と地域2の生産資本の関係を、図6は地域1の生産資本と社会資本の関係を、それぞれ分散型と集中型の国土構造の場合について示している。図の点線は両地域の成長率が同じとなる最適な成長経路を示す。

グラフの右上が定常状態を示しており、災害発生後には地域1の生産資本は減少するため、図5では左方に、図6では左下へと不連続にジャンプしている。

災害後には、両地域とも最適な成長経路へ近づきながら定常状態へ回復していくことがわかる。地域1の資本が一定程度回復するまで地域2の資本は減少しており、被災した地域への投資が優先されていることがわかる。

復旧過程における資本ストックの量を時間軸で表したものが図7である。

分散型国土構造においては、災害後は地域1の資本が急降下しており、その後は地域1の資本は増えていき地域2は徐々に減少していくことで最適な復旧過程が達成されることがわかる。一方、集中型の国土構造においては変化のパターンは同じであるが、定常状態における資本蓄積の量が大きくことなるため、被災していない地域から被災している地域に十分な移転が行われていないことが確認できる。

図8は災害が社会資本に与える影響を表す。分散型国土では、社会資本がすぐに復旧を始められる。しかし、集中型国土構造では、地域1の生産資本に対して

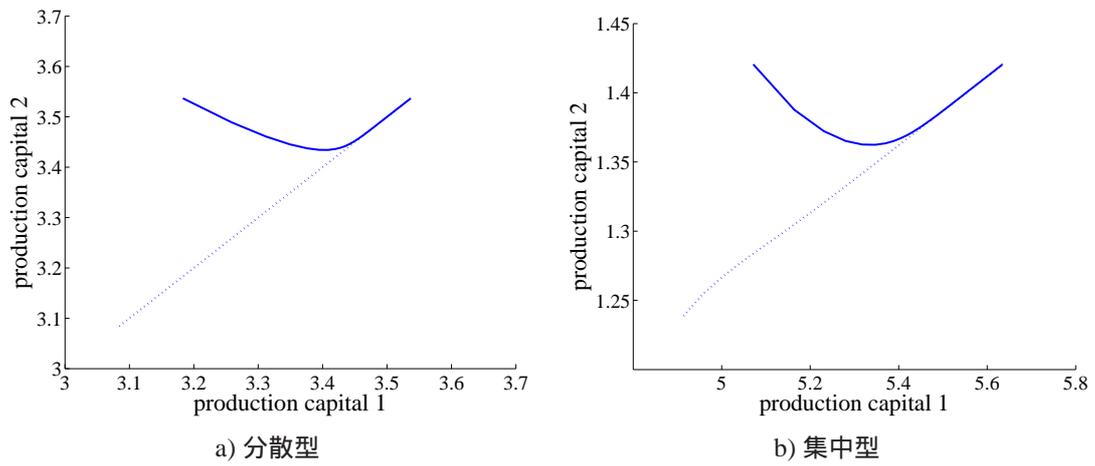


図 - 5 地域 1 と 2 の生産資本の復旧過程

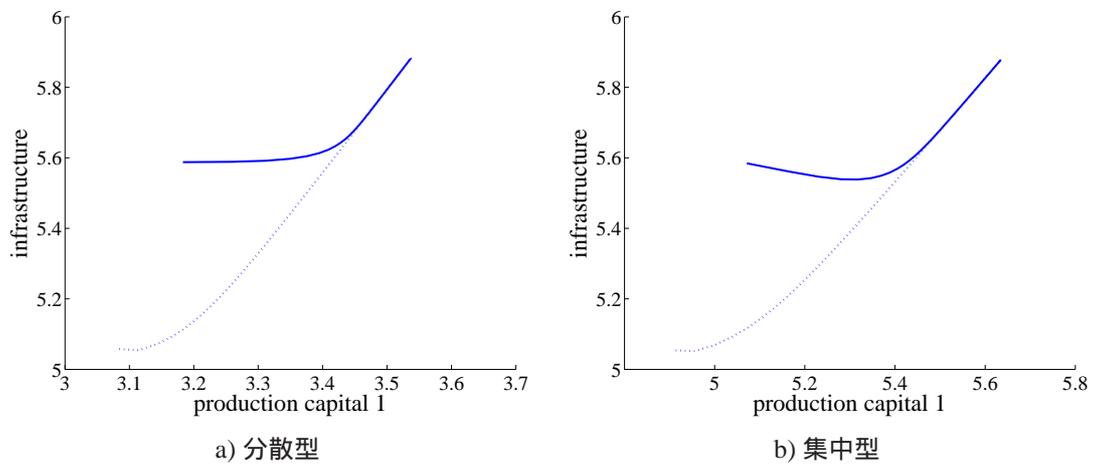
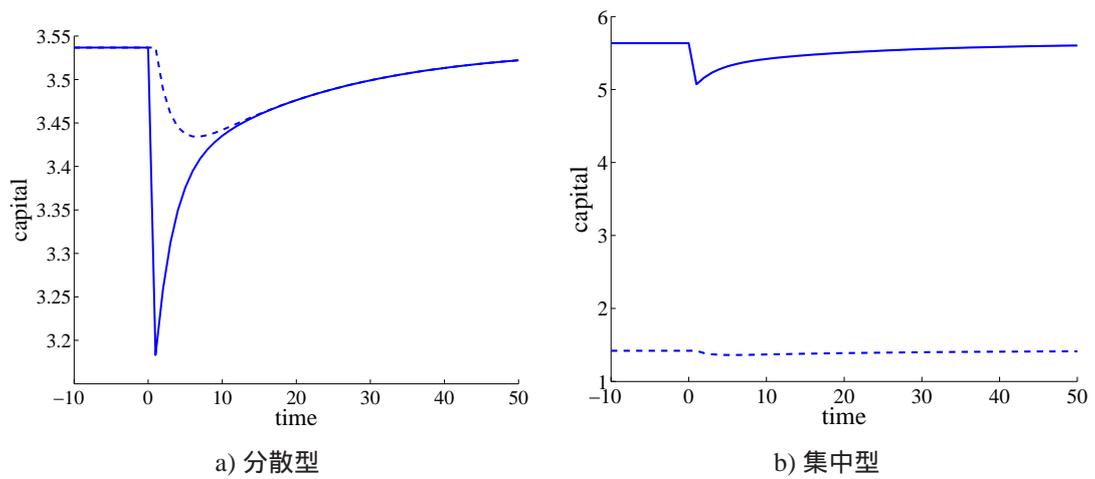
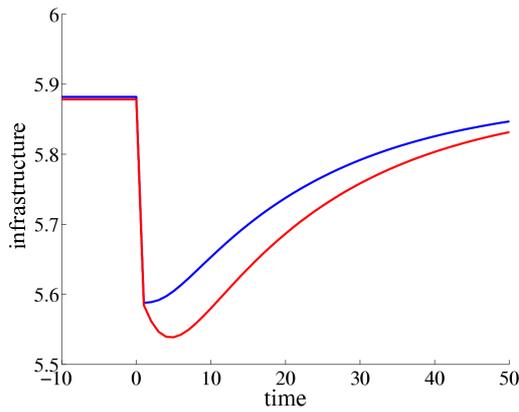


図 - 6 生産資本と社会資本の復旧過程



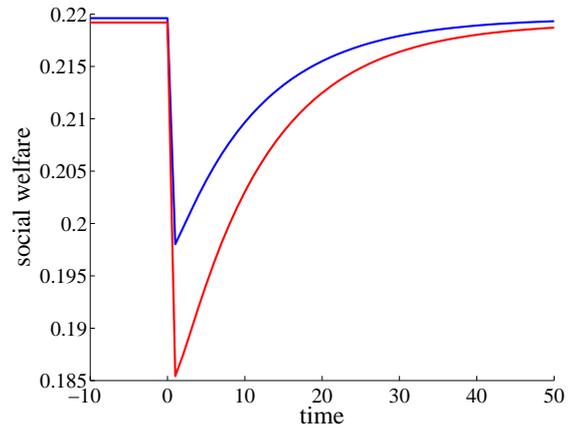
実線: 地域 1 (被災地域) 点線: 地域 2

図 - 7 生産資本の復旧過程



青: 分散型 赤: 集中型

図 - 8 社会資本の復旧過程



青: 分散型 赤: 集中型

図 - 9 災害後の社会厚生の変化

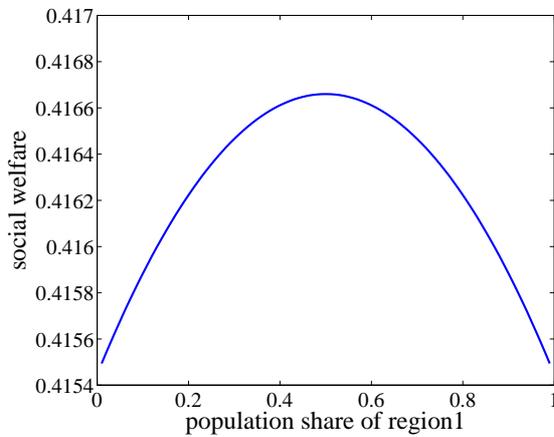
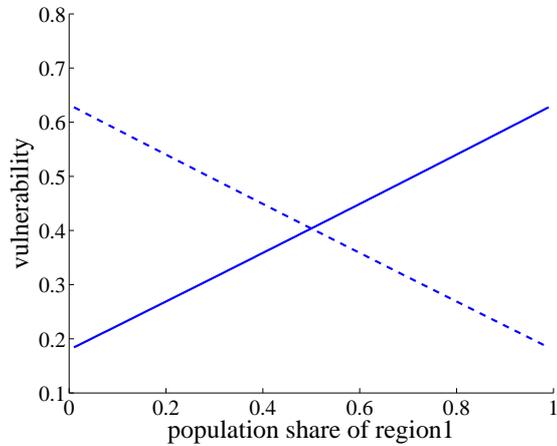


図 - 10 社会厚生の違い: case.1



実線: 地域1で災害が発生した場合
点線: 地域2で災害が発生した場合

図 - 11 災害脆弱性の違い: case.1

重点的に投資が行われ、社会資本はしばらくの間蓄積されない。

図9は災害後の社会厚生の変化を表している。分散型の国土構造の方が集中型の国土構造と比べて災害発生後の社会厚生の損失が小さいことがわかる。結果として、集中型の復旧曲線は分散型の復旧曲線よりも右下に位置し、集中型では災害脆弱性が大きくなっていることがわかる。災害脆弱性の値を計算すると分散型国土構造では0.213であり、集中型国土構造では0.344となっている。

6. 災害脆弱性の分析

本章では、国土構造と災害脆弱性の関係について述べる。まず Case.1 ~ Case.3 として、2地域モデルによ

て地域間の災害リスクが異なる場合や社会資本の有無があった場合の国土構造と災害脆弱性の関係について検討していく。Case.4では、3地域モデルを用いて地域の空間配置と災害脆弱性の関係について分析する。

(1) Case.1: 各地域の災害リスクが同じ場合

各地域が同じ災害リスク ($p = 0.02$, $\epsilon = 0.1$) を有する場合を考える。図10および図11は地域1の人口比率を変化させた際の、期待社会厚生と各地域で災害が発生した際の災害脆弱性の変化を表す。

分散型国土構造(地域1の人口比率が0.5)において期待社会厚生が最大となる。これは災害リスク分散の効果と資本の絶対量が減少することによる投資の調整費用の減少に起因する。

また、分散型国土構造では各地域で災害が発生した

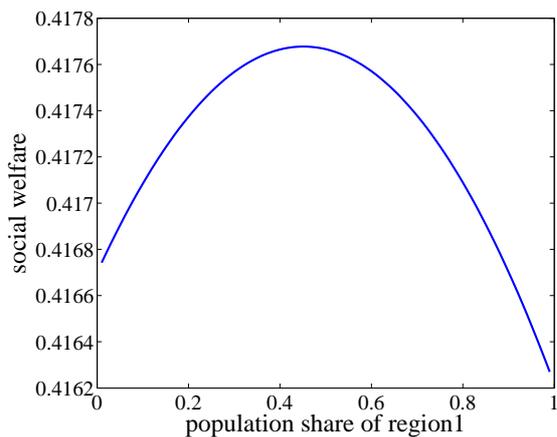
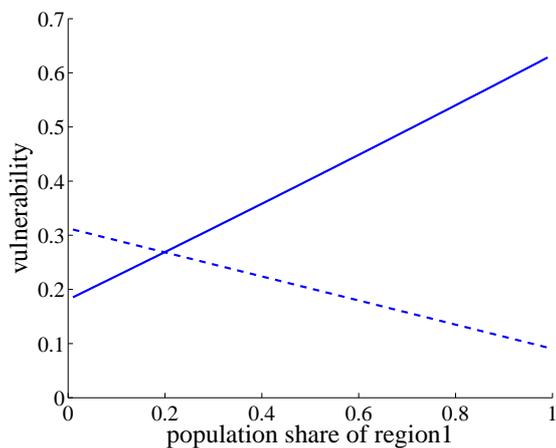


図 - 12 社会厚生の違い: case.2



実線: 地域 1 で災害が発生した場合
点線: 地域 2 で災害が発生した場合

図 - 13 災害脆弱性の違い: case.2

場合の災害脆弱性が等しくなる。地域 1 の人口比率が大きくなるほど、地域 1 で災害が発生した場合の災害脆弱性は大きくなり、一方で地域 2 で災害が発生した場合の災害脆弱性は小さくなる。

いずれかの地域で災害が発生したとしても国全体が大きな影響を受けることを避けるという観点からすると、各地域で災害が発生した場合の災害脆弱性の最大値がもっとも小さくなる分散型の国土構造が望ましいといえる。

(2) Case.2: 地域間で災害リスクが異なる場合

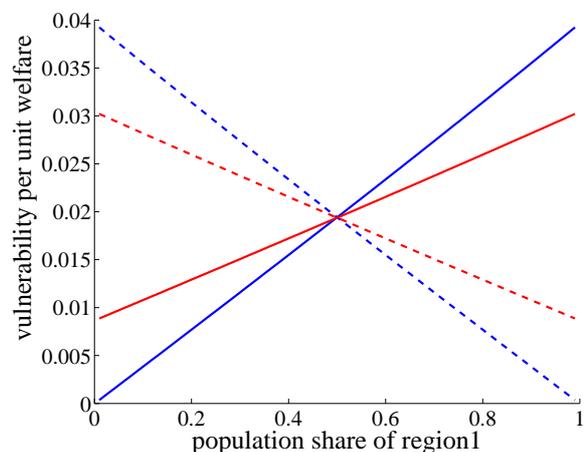
図 12 と図 13 は、地域間で災害リスクが異なる場合の社会厚生と災害脆弱性の変化を表す。地域 2 の災害リスクは地域 1 と比較して小さいとし、 $p = 0.01$ および $\epsilon = 0.05$ で与える。

地域 1 の人口比率が 0.41 の時に、社会厚生は最大となる。一方で、各地域の災害からもたらされる災害脆弱性は人口比率 0.2 の時に等しくなる。地域間の災害リスクが異なる場合、望ましい国土構造は社会厚生最大化の観点と災害脆弱性を避けるという観点では異なる可能性があることがわかる。

(3) Case.3: 社会資本の影響

社会資本が災害脆弱性に与える影響について、社会資本がモデルに組み込まれている場合とそうでない場合を比較することで検証を行う。本ケースでは、社会厚生あたり災害脆弱性という指標を用いる。これは災害脆弱性を社会厚生で割って求めた指標であり、経済規模が異なるモデル間の比較を行うために用いる。

図 14 は社会資本がモデルに組み込まれている場合と組み込まれていない場合についての災害脆弱性を比較



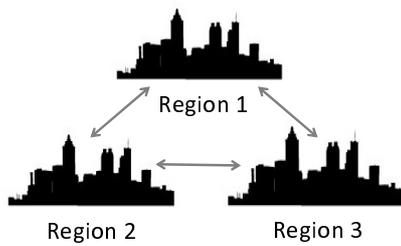
青: 社会資本なし 赤: 社会資本あり
実線: 地域 1 で災害が発生した場合
点線: 地域 2 で災害が発生した場合

図 - 14 厚生あたり災害脆弱性の違い: case.3

したものである。分散型国土において両者の災害脆弱性が等しくなっていることがわかる。しかし、集中型国土においては、人口が集積している地域の災害脆弱性は社会資本があることで小さくなることがわかる。一方で、人口が少ない地域の災害脆弱性は社会資本があることで大きくなっている。つまり、社会資本は地域間の災害脆弱性を均質化させる影響があるといえる。

(4) Case.4: 地域の空間配置が異なる場合 (3 地域モデル)

ここでは、地域の空間配置によって災害脆弱性がどのように異なるのかについて検討を行う。本研究では、



a) 環状型



b) 直列型

図 - 15 地域の空間配置

3 地域モデルを用いて図 15 に示す 2 種類の空間配置について分析を行う．空間配置はアクセス性のパラメータ τ を以下のように設定することで表現する．

環状型 : $\tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = 1$

直列型 : $\tau_1 = 1, \tau_2 = \tau_3 = 2/3$

環状型の国土構造では、全ての地域が等しくインフラにアクセスできるものと仮定している．直列型の国土構造では、両端の地域は中心の地域と比較してインフラへのアクセス性が低いと仮定している．

以上の 2 つの国土構造について、今までと同様に人口比率を変えて分析を行った．ここで人口比率を変化させるのは地域 1 のみであり、地域 2 と地域 3 については残りの人口比率を半分ずつに分けた．例えば、地域 1 の人口比率が 0.5 の時には、地域 2 と 3 の人口比率はそれぞれ 0.25 となるように設定した．

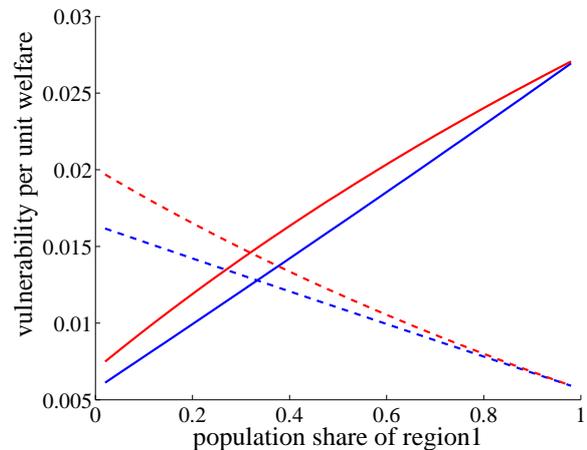
図 16 は各国土構造における災害脆弱性の変化を表したものである．環状型の国土構造においては、分散型（地域 1 の人口比率が 0.33）が災害脆弱性を避ける観点から最も望ましいことがわかる．直列型においても、同様の人口比率が望ましいことがわかる．しかし、厚生あたり災害脆弱性が環状型の時よりも大きい．これは直列型においては、生産資本がアクセス性の高い地域 1 に集中するためだと考えられる．

7. おわりに

(1) 本研究の成果

本研究では、確率的な多地域動学マクロ経済モデルを用いて、複数の国土構造のパターンにおいて災害が発生した場合の被害を計算することで、災害脆弱性と国土構造の関係性についての基礎的な検討を行った．得られた知見は以下の通りである．

- 分散型国土構造は集中型国土構造と比較して高い



青: 環状型 red: 直列型
 実線: 地域 1 で災害が発生した場合
 点線: 地域 2 で災害が発生した場合

図 - 16 厚生あたり災害脆弱性の違い: case.4

脆弱性を有する．

- 地域間の災害リスクが異なる場合、社会厚生最大化の観点と災害脆弱性低下の観点からは望ましい国土構造は異なる可能性がある．
- 社会資本は地域間の災害脆弱性を均質化させる効果がある．
- 地域の空間配置に起因する社会資本へのアクセス性の低下がある場合、災害脆弱性は増加する可能性がある．

(2) 今後の課題

本研究では、非常に単純な経済システムを想定した分析を行った．例えば、地域間の自発的な交易等は本モデルでは表現されていない．複数財のモデルを組み合わせることにより、交易を通じた災害の影響の波及を表現できるようにしていくことで、より現実に即した被害を

計算できるようにする必要がある。

また本研究では、災害脆弱性の指標を新しく定義し評価に用いたが、この指標の持つ経済学的意味合いについては検討されておらず、今後厳密な検討を加えていく必要がある。

さらに、本研究では人口分布を外生的なパラメータとして与えたが、各地域の人口は経済活動の結果から内生的に決まるものである。人口移動や人口移動を発生させる要因の一つである集積の経済性をモデルに組み込むことで、脆弱でない国土構造をどのように達成するかという議論を行うことができるようになると思われる。集積の経済性を考慮した人口規模の決定については、空間経済学において一連の研究が蓄積されているが、本研究でのマクロ経済モデルのアプローチとは大きく異なるものであり、これらを組み合わせたモデルを構築していくことは大きな課題である。

参考文献

- 1) 山口広文: 首都直下型地震と首都機能をめぐる課題, 調査と情報 ISSUEBRIEF, Vol. 725, 2011.
- 2) 藤井聡・久米功一・松永明・中野剛志: 経済の強靭性 (Economic Resilience) に関する研究の展望, *RIETI Policy Discussion Paper* 2012.
- 3) Fingleton, B., Garretsen, H., and Martin, R.: Recessionary shocks and regional employment: evidence on the resilience of uk regions, *Journal of Regional Science*, Vol. 52, No. 1, pp. 109–133, 2012.
- 4) 小池淳司・上田孝行・秋吉盛司: 社会資本ストック崩壊による経済的被害の空間的把握 空間的応用一般均衡

モデルによる計量厚生分析, 土木計画学研究・論文集, Vol. 21, No. 2, pp.367–374, 2004.

- 5) 武藤慎一・青木優・森杉壽芳・上泉俊雄・桐越信: SCGEモデルによる東日本大震災の経済的被害計測, 土木計画学研究・講演集, Vol. 45, 2012.
- 6) Tatano, H., Homma, T., Okada, N., and Tsuchiya, S.: Economic restoration after a catastrophic event: Heterogeneous damage to infrastructure and capital and its effects on economic growth, *Journal of Natural Disaster Science*, Vol. 26, No. 2, pp. 81–85, 2004.
- 7) 五十部渉・多々納裕一・岡田憲夫: 災害リスクが経済成長に与える影響と防災投資の効果に関する研究, 土木計画学研究・講演集, Vol. 23, pp.533–536, 2000.
- 8) Ikefuji, M. and Horii, R.: Natural disasters in a two-sector model of endogenous growth, *Journal of Public Economics* 2012.
- 9) Den Haan, W., Judd, K., and Juillard, M.: Computational suite of models with heterogeneous agents ii: Multi-country real business cycle models, *Journal of Economic Dynamics and Control*, Vol. 35, No. 2, pp. 175–177, 2011.
- 10) 瀬木俊輔・石倉智樹・横松宗太: 災害リスクの動的な地域間配分と防災投資に関する分析, 土木計画学研究・講演集, Vol. 44, 2011.
- 11) 加藤涼: 現代マクロ経済学講義 動学的一般均衡モデル入門, 東洋経済新報社, 2007.
- 12) Heer, B. and Maussner, A.: *Dynamic general equilibrium modeling: computational methods and applications*, Springer, 2009.
- 13) Schmitt-Grohe, S. and Uribe, M.: Solving dynamic general equilibrium models using a second-order approximation to the policy function, *Journal of economic dynamics and control*, Vol. 28, No. 4, pp. 755–775, 2004.
- 14) 橋本政晶・石倉智樹: 社会資本整備の長期的費用負担に関する動学分析, 土木計画学研究・講演集, Vol. 41, No. 2, 2010.