



災害リスクを有する国における建設産業の最適規模

瀬木, 俊輔

(Citation)

土木学会論文集, 79(11):23-00140

(Issue Date)

2023-11-20

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(Rights)

© 2023 土木学会

© 2023 Japan Society of Civil Engineers

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/0100492304>



災害リスクを有する国における 建設産業の最適規模

瀬木 俊輔

正会員 神戸大学准教授 大学院工学研究科市民工学専攻 (〒 657-0013 神戸市灘区六甲台町 1)
E-mail: segi@people.kobe-u.ac.jp

本研究は、建設産業の役割を明示的に考慮した動学的確率的一般均衡モデルの定式化を行い、国土の災害リスクと、建設産業の最適規模（資本ストックや雇用者数）の関係を分析する。分析の結果、以下の知見が得られる。長期にわたり災害に見舞われていない平常時において、災害リスクの存在が建設産業の最適規模を増やすかどうかは、家計のリスク回避性向に依存する。リスク回避性向が高い場合には、平常時の建設産業の最適規模は増え、リスク回避性向が低い場合には、最適規模は減る。日本においては、災害保険のリスクプレミアムの高さを考慮すると、災害リスクの存在は、平常時における建設産業の最適規模を増やすと考えられる。災害リスクの向上が顕在化したときには、可能な限り速やかに、建設産業の規模を最適な水準まで拡大すべきである。

Key Words : *disaster, construction sector, resilience, dynamic stochastic general equilibrium (DSGE) model*

1. はじめに

建設産業は、災害後の復興事業の実施において不可欠の役割を果たす。例えば、2011年の東北地方太平洋沖地震の発災後に、地元建設業者と東北地方整備局が連携して行った「くしの歯作戦」では、緊急輸送車の通行を確保するための交通ルートが短期間のうちに啓開された。この活動に参加した地元建設業者へのアンケート調査¹⁾によると、迅速な対応を可能にした要因として、建設機械やオペレータを自社で保有していることが挙げられている。この事例が示すように、建設産業は、保有する資本と労働者の活用によって、短期的な復旧に貢献する。これは広く認識されている事実であると考えられる。

さらに、建設産業が災害後に果たす重要な役割として、破壊された社会資本や民間の住宅・建築物を供給することにより、「中長期的な復興」に貢献することが挙げられる。本研究では、建設産業が有する、この中長期的な役割に着目する。建設産業は、その供給力を短期間のうちに増やすことが困難である。なぜなら、供給力を拡大するためには、建設機械や人的資本（労働者の知識・技能）などの資本を蓄積する必要があり、このような資本蓄積には時間を要するからである。よって、たとえ災害の後に建設産業に対する大きい需要が発生したとしても、その供給力が短期的に増加することはない。以上を踏まえると、復興事業が円滑に実施され

るためには、建設産業に対して、平時から適切な水準の投資を行い、その規模を最適な水準に維持する必要があると言える。

しかし、近年に生じた災害の被災地においては、工事現場を担う技能労働者の不足による入札不調や、工事業者の不足による住宅再建の遅れなどが指摘されている^{2),3)}。今後、首都直下地震や南海トラフ地震など、社会資本や建築物の集積する地域に被害をもたらす災害の発生が確実視されていることを踏まえると、国土強靱化という視点から、建設産業の最適規模について分析を行う必要があると言える。しかし、このような観点から分析を行った研究は乏しいのが現状である。

以上の背景を踏まえ、本研究は、建設産業の役割を明示的に考慮した動学的確率的一般均衡モデル（Dynamic stochastic general equilibrium model, DSGE model）の定式化と分析を行い、国土の災害リスクと、建設産業の最適規模の関係を明らかにすることを目的とする。

2. 既往研究のレビューと本研究の特徴

(1) 既往研究のレビュー

災害発生後の短期的な復旧活動における、建設産業の役割に着目した研究は、数多く存在する。高橋⁴⁾は、建設産業が保有する重機や労働者の技能を活用した、災害応急対応システムの構築の可能性について分析を行っ

ている。皆川ら⁵⁾は、地元建設業者が保有する重機数に着目し、東海地震を想定してがれき撤去にかかる日数のシミュレーションを行っている。田中ら⁶⁾は、九州地方を対象として、建設機械の賦存量および災害対応のための必要量を調査している。その他の類似した文脈の研究事例として、井上・中野⁷⁾、平山ら⁸⁾、皆川ら⁹⁾が挙げられる。このように、災害発生後の短期的な復旧活動における建設産業の役割に関しては、アンケート調査や個別の事例分析を中心として、様々な研究が行われている。

しかし、以上の研究は、被災後の一国の長期的な経済復興に対して、建設産業が果たす役割を分析したものとはなっていない。国土の中長期的な復興という視点から、建設産業の最適規模に関する分析を行った研究は、極めて乏しいのが現状である。

(2) 本研究の特徴

本研究は、資本の蓄積には中長期的な投資が必要であることなど、投資の基本的な特性を踏まえたうえで、マクロ・長期的スケールの分析を行う点に独自性がある。

マクロ経済学の分野においては、資本の蓄積過程やストック水準の最適性を分析する研究の系譜があり、膨大な研究が蓄積している¹⁰⁾。ただし、それらの研究の中で、災害を扱ったものは限られている。瀬木ら¹¹⁾は、災害リスクを軽減させる効果を有する防災資本に着目し、その蓄積過程やストック水準の最適性について分析を行っている。この研究では、確率的に生じる災害という現象を取り扱うために、DSGEモデルを応用している。

しかし、マクロ経済学において一般的に用いられているモデルでは、社会資本や住宅・建築物などの供給を担う建設産業の存在は捨象されている。そこで本研究は、建設産業の役割を明示的に考慮することにより、国土の災害リスクと、建設産業の最適規模の関係を分析可能なDSGEモデルを定式化する。このようなモデルは、マクロ経済学の分野においても、筆者らの知る限り見当たらない。

3. モデル

(1) 定式化

他地域との交易が存在しない閉鎖された一国の経済を想定し、モデルを定式化する。国内の人口と技術水準は通時的に一定であるとする^{注1)}。時間を $t = 0, 1, 2, \dots$ のように離散的に表現する。この国の家計を、無限期間生存する代表的家計として表現する。家計の時点 τ

における期待生涯効用を

$$V_\tau = E_\tau \left[\sum_{t=\tau}^{\infty} \beta^t u(C_t) \right] \quad (1)$$

$$u(C) = \begin{cases} \frac{C^{1-\eta}}{1-\eta} & (\eta \neq 1) \\ \ln C & (\eta = 1) \end{cases} \quad (2)$$

と表す。ここで、 E_τ は、時点 τ の期首に得られる情報を用いて期待値を取る操作を表す。 u は家計の一期間の効用関数である。 C_t は時点 t における、家計の消費財消費量を表す変数である。 $0 < \beta < 1$ は効用の割引因子を表す定数である。 $\eta > 0$ は相対的リスク回避度を表す定数である。

経済には、消費財を生産する産業（消費財産業） C 、機械設備を生産する産業（機械設備産業） E 、建物と社会資本を生産する産業（建設産業） S の、三つの産業が存在する。各産業は、機械資本、建物資本、人的資本、労働力を投入して財を生産する。中間財の投入は考えない。各産業の生産性は、国内の社会資本ストックから正の影響を受ける。以上の関係をコブ・ダグラス型の生産関数によって表現する。

$$Y_{X,t} = A_X K_{X,t}^{\alpha_{KX}} B_{X,t}^{\alpha_{BX}} H_{X,t}^{\alpha_{HX}} L_{X,t}^{\alpha_{LX}} G_t^{\alpha_{GX}} \quad (X \in \{C, E, S\}) \quad (3)$$

ここで、 $K_{X,t}$ 、 $B_{X,t}$ 、 $H_{X,t}$ はそれぞれ、時点 t の期首において産業 X が保有する機械資本ストック、建物資本ストック、人的資本ストックを表す変数である。 $L_{X,t}$ は時点 t において産業 X が雇用する労働力を表す変数である。 G_t は時点 t の期首における国内の社会資本ストックを表す変数である。社会資本ストックは全ての産業の生産性に寄与する。 A_X は産業 X の全要素生産性を表す定数である。 α_{KX} 、 α_{BX} 、 α_{HX} 、 α_{LX} 、 α_{GX} はそれぞれ、産業 X の生産活動における、機械資本、建物資本、人的資本、労働力、社会資本の寄与の強さを決定する正のパラメータである。これらのパラメータの合計値は1であるとする（収穫一定の生産関数を想定する）。

各産業の生産した財は異なる用途に用いられる。消費財産業の生産した財は全て、消費財として家計に消費される。

$$C_t = Y_{C,t} \quad (4)$$

消費財には、自家用車を利用した余暇活動や、住宅内の余暇活動なども含まれると解釈できる。なぜなら、消費財の生産関数である式(3)には、機械資本ストックや建物ストックが含まれており、自家用車は前者に、住宅は後者に含まれると見なせるからである。式(1)から確認できるように、 C_t の増加は家計の効用を増加させる。

機械設備産業の生産した財は、各産業の機械設備投

資に用いられる。この関係を以下の式で表す。

$$E_{C,t} + E_{E,t} + E_{S,t} = Y_{E,t} \quad (5)$$

ここで、 $E_{X,t}$ ($X \in \{C, E, S\}$) は、時点 t において産業 X が新たに設ける機械設備の量を表す変数である。

建設産業の生産した財は、各産業の建物投資、および、国の社会資本投資に用いられる。この関係を以下の式で表す。

$$S_{C,t} + S_{E,t} + S_{S,t} + S_{G,t} = Y_{S,t} \quad (6)$$

ここで、 $S_{X,t}$ ($X \in \{C, E, S\}$) は、時点 t において産業 X が新たに設ける建物の量を表す変数である。 $S_{G,t}$ は、時点 t において国が新たに設ける社会資本の量を表す変数である。

国内の労働力は通時的に一定であり、その水準を $\bar{L}$ で表す。労働力は三つの産業のいずれかに雇用される。

$$L_{C,t} + L_{E,t} + L_{S,t} = \bar{L} \quad (7)$$

労働者は労働の供給を通じて技能を向上させる (Learning-by-doing)¹²⁾。本研究では、このように蓄積される技能を人的資本と呼ぶ^{注2)}。各産業の人的資本は当該産業に固有のものであり、他産業の生産性の増加には寄与しない。各産業の人的資本は、以下の式に従い蓄積される。

$$I_{X,t} = A_H L_{X,t}^\gamma H_{X,t}^{1-\gamma} \quad (X \in \{C, E, S\}) \quad (8)$$

$$H_{X,t+1} = (1 - \delta_H) H_{X,t} + I_{X,t} \quad (X \in \{C, E, S\}) \quad (9)$$

$I_{X,t}$ は、時点 t において新たに生産される、産業 X の人的資本を表す変数である。式 (8) の右辺は産業 X の人的資本の生産関数となっており、当該産業の現在の労働力 $L_{X,t}$ と、過去に蓄積された人的資本ストック $H_{X,t}$ に応じて、人的資本の生産量が決まることを表している。 $H_{X,t}$ が大きいほど $I_{X,t}$ が増加するのは、熟練労働者から非熟練労働者への技能の継承が行われやすいことを表している。 $0 < \gamma \leq 1$ は、人的資本の生産活動における、雇用される労働力の寄与の強さを決定するパラメータである。

式 (9) は、新たに生産された人的資本により人的資本の蓄積が進むことを表している。 $\delta_H > 0$ は人的資本の減耗率を表す定数であり、熟練労働者の退職などにより、蓄積された人的資本の一部が失われることを表している。

なお、本研究では、式 (3) から確認できるように、産業 X で雇用される労働者数 $L_{X,t}$ が変動しても、産業 X で投入される人的資本 $H_{X,t}$ は短期的には変動しないという仮定を置いている。これは分析の単純化のために置かれる仮定であるが、高い技能を有する熟練労働者は、他産業に移動しにくいと考えられることから、強い仮定ではないと考えられる。

人的資本以外の資本である、機械資本、建物資本、社会資本の蓄積過程は、全て同様の数式により表現される。

$$\hat{K}_{X,t} = (1 - \delta_K) K_{X,t} + E_{X,t} \quad (X \in \{C, E, S\}) \quad (10)$$

$$\hat{B}_{X,t} = (1 - \delta_B) B_{X,t} + S_{X,t} \quad (X \in \{C, E, S\}) \quad (11)$$

$$\hat{G}_t = (1 - \delta_G) G_t + S_{G,t} \quad (12)$$

$$K_{X,t+1} = (1 - \phi_K z_t) \hat{K}_{X,t} \quad (X \in \{C, E, S\}) \quad (13)$$

$$B_{X,t+1} = (1 - \phi_B z_t) \hat{B}_{X,t} \quad (X \in \{C, E, S\}) \quad (14)$$

$$G_{t+1} = (1 - \phi_G z_t) \hat{G}_t \quad (15)$$

式 (10)–式 (12) は、時点 t において新たに設けられる機械設備や建物、社会資本により、資本の蓄積が進むことを表している。 $\delta_K, \delta_B, \delta_G$ はそれぞれ、機械資本、建物資本、社会資本の減耗率を表す正の定数である。

各時点の期末には、災害が発生する可能性がある。この確率的な現象を、0 もしくは 1 の値を取る確率変数 z_t により表現する。 $z_t = 1$ は時点 t における災害の発生を表し、 $z_t = 0$ は時点 t において災害が発生しないことを表す。各時点において、 z_t は i.i.d. の確率分布に従い、その確率関数は

$$\Pr[z_t = z] = \begin{cases} \pi & (z = 1) \\ 1 - \pi & (z = 0) \end{cases} \quad (16)$$

と表される。 $0 \leq \pi \leq 1$ は 1 時点当たりの災害の発生確率を表す定数である。

時点 t の期末に災害が生じた場合には、資本ストックの一部が破壊される。式 (13)–式 (15) は、災害による資本ストックの破壊を表現している。 Hat 記号付きの資本ストックの変数は、時点 t における災害の発生 (z_t の値) が判明する直前のタイミングにおける、資本ストックを表している。 ϕ_K, ϕ_B, ϕ_G はそれぞれ、災害発生時に破壊される機械資本ストック、建物資本ストック、社会資本ストックの割合を表す非負の定数である。時点 t に災害が起きない ($z_t = 0$) 場合には、式 (10)–式 (12) の標準的な資本ストックの遷移式に従い、時点 $t+1$ の資本ストックが決定される。式 (9) の遷移式から確認できるように、人的資本については、災害による技能の劣化は生じないと考えられるため、破壊は生じないと考える。

時点 t の期末に災害が生じた場合 ($z_t = 1$)、時点 $t+1$ 以降の変数には以下のような影響が生じる。まず、物的な資本ストックである $K_{X,\tau}, B_{X,\tau}, G_\tau$ ($\tau \geq t+1$) が減少する。式 (3) より、これは全産業の生産性を減らし、 $Y_{X,\tau}$ を時点 t と同じ水準に保つことが困難になる。その結果、式 (4)–式 (6) より、消費 C_t や投資 $E_{X,t}, S_{X,t}$ を時点 t と同じ水準に保つことも困難になる。このよ

うな状況の中で、式 (7) が示すように労働力 $\bar{L}$ を各産業に分配し、物的な資本ストックの回復（復興）を進めることになる。復興期間中は、産業 C の生産性が低下するうえに、産業 E, S が多くの労働力を雇用するため、家計の消費 C_t は減少する。

以上の前提の下で、本研究は、以下の確率的動学的最適化問題の解として表される、最適成長経路を分析する。

$$\max V_t \quad (17)$$

$$\text{s.t. (3) - (15)}$$

$$\text{Given : } \{K_{X,t}, B_{X,t}, H_{X,t}\}_{X \in \{C, E, S\}}, G_t$$

最適化対象となるのは、時点 t 以降の全ての変数（ただし、境界条件として与えられる時点 t の期首の資本ストックを除く）である。

この最適成長経路は、以下の条件が満たされる場合には、分権的な市場均衡として実現することが知られている¹⁰⁾。

- ・財・労働力・資本の市場が完全競争的である。
- ・家計は所得の範囲内で、式 (1) の期待生涯効用を最大化するように消費と貯蓄を行う。
- ・企業は式 (3) の生産関数と式 (8)–式 (11), 式 (13), 式 (14) の資本蓄積過程の下で、企業価値（利潤の割引現在価値^{注3)}の総和）を最大化するように生産と投資を行う。
- ・政府は一括税により最適な社会資本投資を行う。
- ・家計と企業は災害リスクを正確に把握している。

現実的には、これらの条件が完全に満たされることはないと考えられる。特に、家計と企業が災害リスクを正確に把握しているとは言い難い。よって、現実の経済の成長経路は、最適成長経路から乖離すると考えられる。その場合でも、本研究の分析結果は、政府が建設産業の規模を最適な水準に誘導する場合の指針として用いることができると考えられる。

(2) 最適性条件

最適化問題 (17) の一階の最適性条件を求める。この問題のラグランジュ関数¹⁵⁾を定式化して内生変数について偏微分することにより、

$$C_t^{-\eta} = p_{C,t} \quad (18)$$

$$\frac{\alpha_{LX} p_{X,t} Y_{X,t} + \gamma \hat{q}_{X,t}^H I_{X,t}}{L_{X,t}} = w_t \quad (X \in \{C, E, S\}) \quad (19)$$

$$\hat{q}_{X,t}^K = p_{E,t} \quad (X \in \{C, E, S\}) \quad (20)$$

$$\hat{q}_{X,t}^B = p_{S,t} \quad (X \in \{C, E, S\}) \quad (21)$$

$$\hat{q}_t^G = p_{S,t} \quad (22)$$

$$\beta E_t [q_{X,t+1}^K (1 - \phi_K z_t)] = \hat{q}_{X,t}^K \quad (X \in \{C, E, S\}) \quad (23)$$

$$\beta E_t [q_{X,t+1}^B (1 - \phi_B z_t)] = \hat{q}_{X,t}^B \quad (X \in \{C, E, S\}) \quad (24)$$

$$\beta E_t [q_{t+1}^G (1 - \phi_G z_t)] = \hat{q}_t^G \quad (25)$$

$$\frac{\alpha_{KX} p_{X,t+1} Y_{X,t+1}}{K_{X,t+1}} + \hat{q}_{X,t+1}^K (1 - \delta_K) = q_{X,t+1}^K \quad (X \in \{C, E, S\}) \quad (26)$$

$$\frac{\alpha_{BX} p_{X,t+1} Y_{X,t+1}}{b_{X,t+1}} + \hat{q}_{X,t+1}^B (1 - \delta_B) = q_{X,t+1}^B \quad (X \in \{C, E, S\}) \quad (27)$$

$$\sum_{X \in \{C, E, S\}} \left[\frac{\alpha_{GX} p_{X,t+1} Y_{X,t+1}}{G_{t+1}} \right] + \hat{q}_{t+1}^G (1 - \delta_G) = q_{t+1}^G \quad (28)$$

$$\beta E_t \left[\frac{\alpha_{HX} p_{X,t+1} Y_{X,t+1}}{H_{X,t+1}} + \hat{q}_{X,t+1}^H \left\{ 1 - \delta_H + \frac{(1 - \gamma) I_{X,t+1}}{H_{X,t+1}} \right\} \right] = \hat{q}_{X,t}^H \quad (X \in \{C, E, S\}) \quad (29)$$

を得る。ラグランジュ関数の定式化は紙面の都合上割愛する。 $w_t, p_{X,t}, \hat{q}_{X,t}^K, \hat{q}_{X,t}^B, \hat{q}_{X,t}^H, \hat{q}_t^G, q_{X,t}^K, q_{X,t}^B, q_t^G$ はラグランジュ乗数であり、それぞれ、労働力の価値、産業 X が生産する財の価値、産業 X が期末 (z_t の実現値が判明する直前) に保有する機械資本の価値、産業 X が期末に保有する建物資本の価値、産業 X が期末に保有する人的資本の価値、期末の社会資本の価値、産業 X が期首に保有する機械資本の価値、産業 X が期首に保有する建物資本の価値、期首の社会資本の価値を表す^{注4)}。式 (18)–式 (29) はそれぞれ、ラグランジュ関数を $C_t, L_{X,t}, E_{X,t}, S_{X,t}, G_t, \hat{K}_{X,t}, \hat{B}_{X,t}, \hat{G}_t, K_{X,t+1}, B_{X,t+1}, G_{t+1}, H_{X,t+1}$ について偏微分することにより得られる。式 (3)–式 (15), 式 (18)–式 (29) が、式 (17) の最適化問題の一階の最適性条件となる。

(3) モデルの解法

本研究のモデルの解析的な分析は困難であるため、数値的な解法によりモデルを分析する。採用する解法は、DSGE モデルの解法として一般的な摂動法 (Perturbation method)^{15), 16)} である。この手法の概要を付録 1 に記す。

この手法を使うには、モデルに非確率的定常状態 (Non-stochastic steady state) が存在する必要がある。本研究のモデルは z_t という確率変数を含むため、定常状態を定義できない。しかし、 z_t をその期待値 π で置き換えた確定的なモデルには、定常状態が存在する。こ

の定常状態を、元のモデルの非確率的定常状態と定義する。

摂動法は、モデルの非確率的定常状態の近傍における政策関数（制御変数の最適値を与える状態変数の関数、Policy function）を近似する多項式関数を、陰関数定理により求めるものである。本研究は、政策関数を一次関数により近似する。

4. モデルの分析

(1) パラメータの設定

パラメータの設定に際しては、文献を参照して現実的な値を設定する。本研究が設定するパラメータの値を表-1に示す。時間に関係するパラメータは、モデル上の1期間が1四半期に相当すると考えてパラメータ設定を行う。

$\bar{L}$, A_X , A_H の値は、内生変数の数値の単位を変える効果のみを有し、モデルの定性的な分析結果に影響を与えない。そこで、これらの値は1などの適当な値に設定する。

本研究のようなモデルの非確率的定常状態における一期間の投資収益率は、 $1/(\beta) - 1$ と表せることが知られている¹⁵⁾。本研究は、この値が $(1/1.04)^{1/4}$ になるように β を設定する。これは、平均的な年間投資収益率が4%になることを意味する。

相対的リスク回避度を表すパラメータ η には、1もしくは5を設定する。 η は、家計が消費の変動をどれだけ嫌うのかを表しており、この値が大きいくほど、災害後の消費（すなわち、生活水準）の低下を抑えることに対して、家計はより高い支払い意思額を持つようになる。4. (2)において後述するように、このパラメータは、モデルの定性的な分析結果に差をもたらす重要なものである。本研究では $\eta = 1$ の場合と $\eta = 5$ の場合の分析結果を取り上げ、 η に関する感度分析を行う。 $\eta = 1$ はDSGEモデルを用いた実証的な分析においてよく使われる設定である¹⁵⁾。 $\eta = 5$ は、現実に観察された株式市場のリスクプレミアムをDSGEモデルで説明する研究で利用された実績がある¹⁷⁾。

資本減耗率は、一般的な資本の耐用年数を参考に設定する。機械資本の耐用年数は10年、建物資本の耐用年数は25年、社会資本の耐用年数は50年と考え、 δ_K , δ_B , δ_G をそれぞれ、2.5%, 1%, 0.5%に設定する。人的資本の減耗率は、労働者が技能を蓄積した熟練労働者になってから引退するまでの期間が25年であると考え、 δ_H を1%に設定する。

災害の発生確率 π には、50年に1回の頻度で生じる災害を想定して0.5%を設定する。また、災害リスク

表-1 パラメータの設定値

パラメータ	値
$\bar{L}$	1
$A_X (X \in \{C, E, S\})$	1
A_H	0.1
β	$(1/1.04)^{1/4}$
η	1 or 5
δ_K	0.025
δ_B	0.01
δ_G	0.005
δ_H	0.01
π	0 or 0.005
ϕ_K	0.05
ϕ_B	0.05
ϕ_G	0.05
γ	0.76
α_{KC}	0.1267
α_{BC}	0.1358
α_{HC}	0.2167
α_{GC}	0.0875
α_{LC}	0.4333
α_{KE}	0.1810
α_{BE}	0.0740
α_{HE}	0.2200
α_{GE}	0.0825
α_{LE}	0.4400
α_{KS}	0.1050
α_{BS}	0.0525
α_{HS}	0.2633
α_{GS}	0.0525
α_{LS}	0.5267

の存在が建設産業の最適規模に与える影響を明らかにするために、災害が起きない $\pi = 0\%$ の環境も分析し、 $\pi = 0.5\%$ の分析結果と比較を行う。

災害発生時に破壊される資本の割合である ϕ_K , ϕ_B , ϕ_G には一律で5%を設定する。内閣府の作成した南海トラフ巨大地震の被害想定¹⁸⁾によると、検討のベースとなるケースでは、実物資産のストック被害額が100.5兆円と推計されており、これを2019年末の日本国内の住宅・その他の建物・構造物・機械・設備の名目固定資本ストック総額である1831.5兆円で除すと、5.5%になる。

人的資本の生産関数における、雇用される労働者数の寄与の強さを決定するパラメータ γ には、Vasilev¹⁹⁾を参考に0.76を設定する。

各産業の生産関数における、機械資本、建物資本、人

的資本、労働力、社会資本の寄与の強さを決定するパラメータ $\alpha_{KX}, \alpha_{BX}, \alpha_{HX}, \alpha_{LX}, \alpha_{GX}$ は、以下のように設定する。これらのパラメータは、企業の利潤最大化行動の下では、産業 X において生産される付加価値の総額に占める、各生産要素に対する支払額のシェアに一致することが知られている。Valentinyi and Herrendorf²⁰⁾ はアメリカ合衆国を対象にして、産業部門ごとに、各生産要素への対価の支払い額のシェアを算出している。本研究は、この研究において算出されたシェアを基に、これらのパラメータを設定する。産業 C のパラメータの設定には、“Consumption”（消費財）部門のシェアを、産業 E のパラメータの設定には、“Equipment investment”（機械設備投資）部門のシェアを、産業 S のパラメータの設定には、“Construction investment”（建設投資）部門のシェアを、それぞれ用いる。

$\alpha_{KX}, \alpha_{BX}, \alpha_{HX}, \alpha_{LX}, \alpha_{GX}$ の設定に当たり、注意すべきことが二つある。第一は、社会資本は生産活動に寄与するものの、それに対する対価は支払われない（もしくは過小にしか支払われない）ことである。社会資本が受け取るはずだった余剰（レント）は、企業の利潤となり、民間資本の所有者に配分される。そのため、Valentinyi and Herrendorf の分析結果において、 α_{GX} の寄与は、民間資本に対する対価に含まれていることになる。第二は、Valentinyi and Herrendorf の研究では、土地への対価を考慮しているが、本研究では、土地を生産要素として考慮していないことである。

第一の問題の解決策として、本研究は、現実に支払われている民間資本の対価のうちの $1/4$ が、社会資本の受け取るはずだった余剰だと考え、 α_{GX} を設定する。その結果、 α_{GX} の値は部門により異なるが、 $0.05-0.09$ の範囲の値となる。これは日本を対象に社会資本ストックの生産性への寄与を推定した塚井ら²¹⁾ の推定値と比べて大きくない数値であり、過剰な値ではないと考えられる^{注5)}。

第二の問題の解決策として、土地への対価のシェアは、他の民間資本のシェアに比例配分する。例えば、Valentinyi and Herrendorf の分析結果において、消費財部門の機械設備に対する対価のシェアは 14% 、建築物に対する対価のシェアは 15% 、土地に対する対価のシェアは 6% となっている。これらの数値から社会資本の生産性への寄与（ $1/4$ ）を控除すると、それぞれ、 10.5% 、 11.25% 、 4.5% となる。そのうえで、土地に対する対価のシェアの 4.5% を、機械設備と建築物に対する対価のシェアに比例配分すると、前者のシェア（ α_{KC} ）は 12.67% 、後者のシェア（ α_{BC} ）は 13.58% となる。

α_{HX} と α_{LX} の合計値には、産業 X の労働者に対する支払額のシェアを用いる。労働者への対価には、人的資本への対価と労働力への対価が含まれるため、 α_{HX}

 表-2 π と変数の長期平均値の関係

π	0	0.005	0.005
η	1 or 5	1	5
K_C	23.11	22.76	22.75
K_E	3.76	3.72	3.72
K_S	2.11	2.12	2.12
B_C	31.06	30.45	30.45
B_E	1.93	1.90	1.90
B_S	1.32	1.32	1.32
G	31.48	30.79	30.79
L_C	0.8002	0.7981	0.7981
L_E	0.0926	0.0928	0.0928
L_S	0.1072	0.1091	0.1091

表-3 災害リスクが変数の長期平均値に与える影響

π	0.005	0.005
η	1	5
K_C	-1.54%	-1.56%
K_E	-1.07%	-1.09%
K_S	+0.45%	+0.40%
B_C	-1.94%	-1.96%
B_E	-1.47%	-1.49%
B_S	+0.03%	-0.02%
G	-2.20%	-2.21%
L_C	-0.26%	-0.26%
L_E	+0.24%	+0.22%
L_S	+1.79%	+1.74%

と α_{LX} の個別のパラメータの値は、Valentinyi and Herrendorf の分析結果のみからは特定できない。本研究では、労働者に対する支払額のシェアのうち、 $1/3$ は人的資本への対価、 $2/3$ は労働力への対価と考え、 α_{HX} と α_{LX} を決定する。なお、付録2に示すように、 α_{HX} と α_{LX} の比の設定は、定性的な分析結果にほとんど影響を与えなかった。これは、本研究の分析結果が、人的資本を考慮しなくても成立することを意味する。そのため、以下の分析では、人的資本に焦点を当てた分析は行わない。

(2) 災害リスクが建設産業の最適規模に与える影響

a) 長期平均値

本研究のモデルには災害という確率的なショックが存在するため、定常状態は存在しない。しかし、マルコフ定常分布は定義できる。そこで、物的資本ストックと産業別の雇用の長期平均値（定常分布の期待値）に注目する。 π と η の値に対応した、変数の長期平均値

を表-2に示す。 $\pi = 0$ の場合には、モデルは決定論的になるため、定常状態が存在する。この定常状態における変数の値は η に依存しない。 $\pi = 0$ の場合と比較したときの、変数の長期平均値の変化率を表-3に示す。長期平均値を求める際には、100万期間のモンテカルロ・シミュレーションを実行した。この際、乱数 z_t の流れには同一のものを利用した。産業別の人的資本ストック H_X については、その長期平均値の変化率が L_X の長期平均値の変化率に等しいため、割愛している。

これらの表から三つのことが確認できる。第一に、長期平均値は η の値にほぼ依存しない。

第二に、ほとんどの物的資本ストックの長期平均値は、災害リスクの存在により減少する。これは、災害の生じる国においては、物的資本が災害により破壊されるため、そのストックを高く保つことが困難であることによる。ただし、物的資本ストックの変化率には、産業ごとに差がある。消費財産業と比較すると、機械設備産業の物的資本ストックの減少率は小さい。建設産業の機械資本ストックは、災害リスクの存在により増加する。以上の理由は、機械設備産業と建設産業が、災害により破壊された物的資本ストックを復旧するという役割を有するため、災害リスクがこれらの産業の重要性を高めることだと考えられる。建設産業の機械資本ストックが増加する理由は、建設産業が労働集約的である（生産活動への機械資本、建物資本、社会資本の寄与が小さい）ことだと考えられる。すなわち、建設産業の生産性は、他の産業に比べると、災害の影響を受けにくい。そのため、被災後の復興の起点としての役割を担えることから、建設産業の相対的な重要性が災害リスクにより高まると考えられる。

第三に、災害リスクの存在により、消費財産業の雇用 L_C の長期平均値は減少するのに対して、機械設備産業と建設産業の雇用 L_E , L_S の長期平均値は増加する。増加率は、建設産業の方が機械設備産業よりも大きい。この理由は上で考察したように、災害リスクが機械設備産業と建設産業の重要性を高めること、および、建設産業の方がその程度は大きいことだと考えられる。

b) 平常時

本研究のモデルでは、災害はランダムに発生する。そのため、運が良ければ、長期にわたり災害が発生しない可能性もある。国が長期にわたり災害に見舞われない場合、経済は定常状態に収束する（これは非確率的定常状態とは異なる）。この定常状態を平常時定常状態と呼ぶことにする。本項では、平常時定常状態における物的資本ストックと産業別の雇用に注目する。 π と η の値に対応した、平常時定常状態における変数の値を表-4に示す。また、 $\pi = 0$ の場合と比較したときの、平常時定常状態における変数の値の変化率を表-5に示す。

表-4 π と平常時定常状態の関係

π	0	0.005	0.005
η	1 or 5	1	5
K_C	23.11	23.06	23.27
K_E	3.76	3.74	3.82
K_S	2.11	2.10	2.15
B_C	31.06	30.95	31.31
B_E	1.93	1.92	1.96
B_S	1.32	1.31	1.35
G	31.48	31.31	31.86
L_C	0.8002	0.8007	0.7987
L_E	0.0926	0.0925	0.0932
L_S	0.1072	0.1069	0.1081

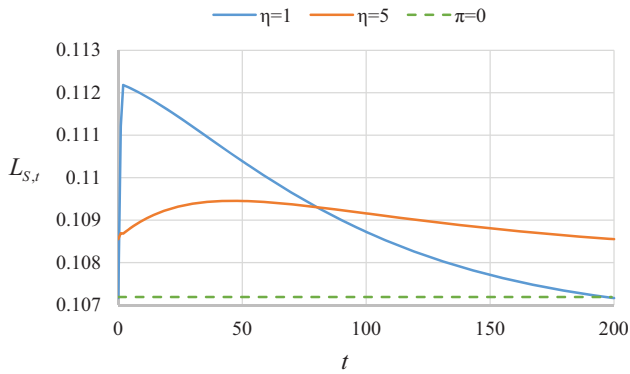
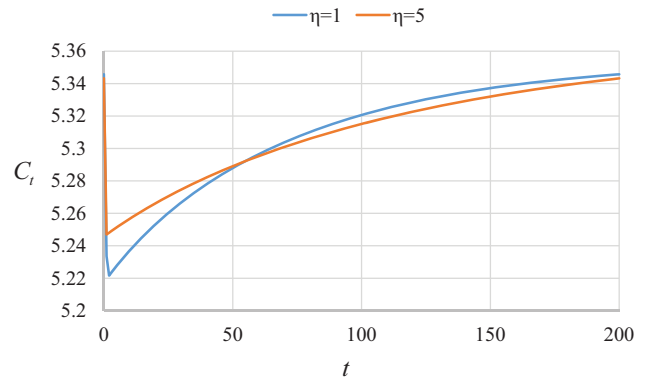
表-5 災害リスクが平常時定常状態に与える影響

π	0.005	0.005
η	1	5
K_C	-0.22%	+0.70%
K_E	-0.48%	+1.49%
K_S	-0.70%	+1.75%
B_C	-0.35%	+0.80%
B_E	-0.61%	+1.60%
B_S	-0.83%	+1.86%
G	-0.56%	+1.20%
L_C	+0.06%	-0.19%
L_E	-0.16%	+0.59%
L_S	-0.30%	+0.88%

す。産業別の人的資本ストック H_X については、その変化率が L_X の値の変化率に等しいため、割愛している。

これらの表から、災害リスクが平常時定常状態に与える影響は、家計の相対的リスク回避度 η に依存することが確認できる。 $\eta = 5$ の場合には、物的資本ストックが増加する。物的資本ストックの増加率は、建設産業、機械設備産業、消費財産業の順に大きい。消費財産業の雇用は減少するのに対して、機械設備産業と建設産業の雇用は増加する。雇用の増加率は建設産業の方が大きい。一方、 $\eta = 1$ の場合には逆の結果が得られる。これらの結果は、平常時における建設産業の最適規模が、家計のリスク回避性向によって変化することを示している。

以上の結果の理由は、次のように考えられる。平常時において、物的資本に対する投資の最適水準は、二つの効果により決定される。第一は、災害が発生すると資本が破壊されるため、投資が無駄になってしまうことである。これは投資の最適水準を低下させる。第


 図-1 被災後の $L_{S,t}$ の推移

 図-2 被災後の C_t の推移

二は、災害の後に残される資本ストックが多いと、家計の消費を高く保ちやすくなることである。これは投資の最適水準を増加させる。第二の効果は、家計がリスク回避的である程、すなわち、消費の低下を抑えることに対して高い支払い意思額を持つ程、高く評価される。 $\eta = 5$ の場合には、第二の効果が卓越しているため、投資や資本ストックの最適水準が増加する。その結果、投資財を生産する産業である機械設備産業と建設産業の資本ストックと雇用が増加する。機械設備産業に比べて、建設産業の方が資本ストックと雇用の増加率が高い理由は、被災後の復興の起点として建設産業が重要な役割を有することだと考えられる。一方、 $\eta = 1$ の場合には、第一の効果が卓越しているため、逆の結果が得られる。

$\eta = 1$ の環境において、災害リスクの存在は平常時の建設産業の雇用を減らすにもかかわらず、建設産業の雇用の長期平均値は増やす。これは、災害後の復興過程において、建設産業の雇用が短期的に大きく増加することを意味している。このことは図-1 から確認できる。この図は、災害が 200 期間に 1 回の頻度で等間隔に起きることが繰り返されるシナリオにおける、建設産業の雇用 $L_{S,t}$ の推移を示している^{注9)}。災害が期末に発生する時点をも $t = 0$ としている。青いグラフは $\eta = 1$ の場合の推移を、オレンジのグラフは $\eta = 5$ の場合の推移を、緑の破線は災害が起きない ($\pi = 0$) の環境の定常状態における雇用の水準を示している。 $\eta = 1$ と $\eta = 5$ のどちらの場合においても、被災後に $L_{S,t}$ が増加し、復興が進むのに伴い減少するという傾向が観察される。ただし、 $\eta = 5$ の場合には、その変化は小さく、 $L_{S,t}$ は被災後も平常時も一定の水準を保つように推移している。その水準は災害が起きない環境の雇用より常に高い。 $\eta = 1$ の場合には、被災後に $L_{S,t}$ が大きく増加するものの、最終的には災害が起きない環境の雇用を下回るようになる。

$\eta = 1$ と $\eta = 5$ の場合では、被災直後と平常時における建設産業の最適規模が異なったものになる。これは

災害後の家計の消費の推移に差をもたらす。これは図-2 から確認できる。この図は、図-1 と同じ条件の下で、消費 C_t の推移を示したものである。被災後の $1 \leq t \leq 54$ の期間においては、 $\eta = 5$ の場合の方が消費は高い。一方、 $t \geq 55$ 以降は、 $\eta = 1$ の場合の方が消費は高い。この理由は二つある。第一の理由は、 $\eta = 1$ の場合、急速な復興を実現するために、建設産業の雇用を短期的に大きく増やす代わりに、消費財産業の雇用を大きく減らし、消費を犠牲にする戦略が取られることである。一方、 $\eta = 5$ の場合には、被災後に残される資本ストックが多いため、消費財産業の雇用をあまり減らさずに復興を進められる。第二の理由は、 $\eta = 1$ の場合、表-4、表-5 で見たように、平常時に機械設備産業と建設産業の雇用を減らして消費財産業の雇用を増やすため、高い消費を実現しやすいことである。一方、 $\eta = 5$ の場合には、平常時も機械設備産業と建設産業の雇用を高く保つため、消費が抑えられる。

c) 分析から得られる知見

本節の分析結果と考察より、以下の知見が得られる。被災後の復興過程における建設産業の（資本ストックや雇用の）最適規模は、災害リスクの高い国ほど大きい。一方、長期にわたり災害に見舞われていない平常時において、災害リスクの存在が建設産業の最適規模を増やすかどうかは、家計のリスク回避性向に依存する。リスク回避性向が高い場合には、平常時の建設産業の最適規模は増え、リスク回避性向が低い場合には、最適規模は減る。

図-3 は、家計の相対的リスク回避度 η と、災害リスク下の平常時定常状態における建設産業の雇用 L_S の関係をプロットしたものである。緑の破線は $\pi = 0$ の環境の定常状態における L_S の水準を示している。この図より、災害リスクの存在が平常時の建設産業の最適規模を増やすような η の閾値は、概ね 2.0 であることが確認できる。

ここで問題になるのは、現実の家計のリスク回避性向は、平常時の建設産業の最適規模を増やす程度に高

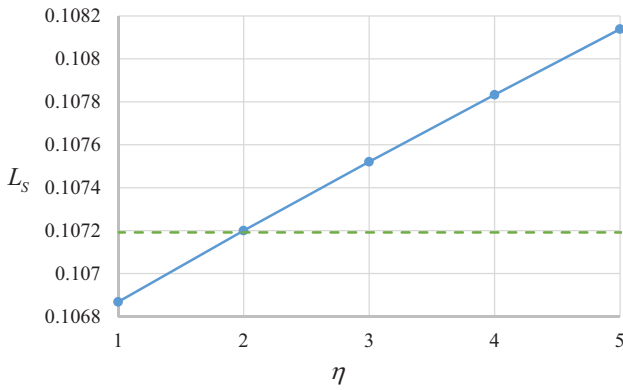
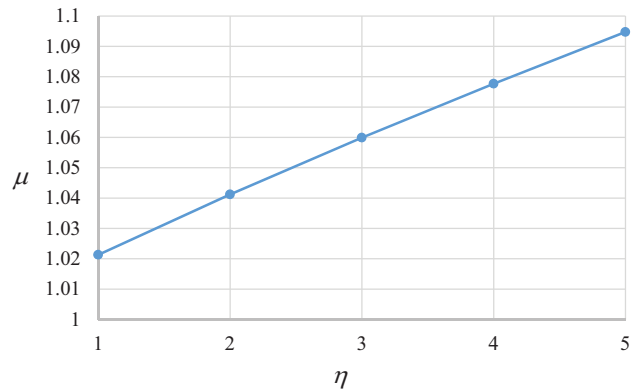

 図-3 η と平常時の L_s の関係


図-4 η とマークアップ率の関係

いのか、ということである。次節では、日本の災害保険のリスクプレミアム（保険の引き受け手がリスクを引き受ける対価として受け取る報酬）を用いて、この問題について考察する。

(3) 相対的リスク回避度 η の水準に関する考察

一般に、 η の値は 1 から 2 の間の範囲にあると考えられることが多い。その理由は、 η の値がこの範囲にあるとき、現実に観察される景気変動下の消費と投資の分散比や、個人のライフサイクル下の貯蓄行動などを上手く説明できるためである²²⁾。しかし、本節で議論するように、現実に観察される災害保険のリスクプレミアムを踏まえると、 η の値を高く設定した分析結果の方が、有用な政策的示唆を提供すると考えられる。

一般に、災害保険の保険料にはリスクプレミアムが上乗せされているため、保険料と保険金の期待値は一致せず、前者の方が高い。前者の値を後者の値で除した値を $\mu \geq 1$ で表し、横松・小林²³⁾ に倣いマークアップ率と呼ぶ。これは、リスクプレミアムの大きさを測る指標である。マークアップ率が高いことは、家計や企業が災害から受ける被害を抑えることに対して、より高い支払い意思額を持つことを意味する。例えば、災害時の被害額を X 円減らすような防災投資の便益は、災害の発生確率 π とマークアップ率 μ を用いて、 $\pi\mu X$ 円と表せる。

現実の保険のマークアップ率を求めるには、長期間のデータを用いて、保険会社の一年間当たり保険料の平均値と、一年間当たり保険金の平均値を求め、前者を後者で除せばよい。このとき、後者は保険金の期待値に近い数値になっていると考えられる。

日本においては、純粋な災害保険のマークアップ率を求めることは困難である。地震保険の保険金のデータは公開されていない。風水害の被害の補償は、一般的な火災保険に含まれている。火災保険のマークアップ率を求めることは可能であるが、これは純粋な災害保険のマークアップ率とは異なる。このような限界は

あるものの、災害保険のマークアップ率のおおよその大きさを把握するために、火災保険のマークアップ率を求める。損害保険料率算出機構統計集²⁴⁾に掲載されている、2007 年から 2021 年にかけての火災保険（住宅、一般、工場、倉庫物件を対象とするもの）の保険料の総額は 14 兆 4778 億円、保険金の総額は 8 兆 8553 億円であり、これらの数値を用いてマークアップ率を求めると 1.63 になる。リスクが高い（被害総額の年変動が大きい）保険ほどマークアップ率は増加するため、地震保険のマークアップ率はこれよりも高いことが予想される。

本研究のモデルは金融市場を明示的に表現していないが、災害保険が存在すると仮定した場合に、そのマークアップ率がいくらかになるのかは評価できる²²⁾。時点 t の期末に生じる災害の被害を補償する（掛け捨て型の）災害保険が存在し、この保険が時点 t の期首に販売されるとすれば、そのマークアップ率 μ_t は、

$$\begin{aligned} \mu_t &= \frac{p_{C,t+1}\{1\}}{E_t[p_{C,t+1}]} \\ &= \frac{p_{C,t+1}\{1\}}{\pi p_{C,t+1}\{1\} + (1-\pi)p_{C,t+1}\{0\}} \\ &= \frac{(C_{t+1}\{1\})^{-\eta}}{\pi(C_{t+1}\{1\})^{-\eta} + (1-\pi)(C_{t+1}\{0\})^{-\eta}} \quad (30) \end{aligned}$$

と表される。ここで、変数の後に付けられている $\{z\}$ は、その変数の値が $z_t = z$ のシナリオが実現した場合のものであることを意味する。この式が成立する理由は付録 3 に記す。災害が起きれば消費は低下するため、 $c_{t+1}\{1\} < c_{t+1}\{0\}$ が成立する。一般に、 μ_t は η について単調増加する。

μ_t は時点 t の状態変数に依存するが、ここでは、状態変数が非確率的定常状態の水準にあるときのマークアップ率に着目する。 $\pi = 0.005$ の設定の下で、 η とリスクプレミアムの関係をプロットしたものを図-4 に示す。 $\eta = 5$ の設定でも、現実に観察される高いマークアップ率を再現するには不十分であることが確認できる。本研究のモデルを用いて高いマークアップ率を再現するためには、 η を概ね 40 に設定する必要がある。

しかし、このように非常に高い η の値は現実的ではない^{注7)}。現実的な水準の η を採用しながら、高いマークアップ率を再現するためには、本研究のモデルには含まれていない要素を考慮する必要がある^{注8)}。

ただし、どのような要素を考慮するにせよ、現実に観察される災害保険のリスクプレミアムを再現するモデルにおいては、家計は災害後の消費の低下を抑えることに対して、高い支払い意思額を有することになる。そのようなモデルにおいて、被災後の復興の起点となる建設産業の役割は、高く評価されると考えられる。よって、定性的には、前節の $\eta = 5$ の場合の分析結果と同様の結果が得られると考えられる。

以上の議論より、以下の知見が得られる。日本においては、災害保険のリスクプレミアムの高さを踏まえると、 η の値を高く設定した分析結果の方が、有用な政策的示唆を提供すると考えられる。すなわち、災害リスクの存在は、平常時における建設産業の最適規模を増やすと考えられる。

(4) 比較動学分析

現在、地球温暖化の進行に伴い、洪水や高波、土砂災害のリスクが過去よりも高まっている。本研究のモデルにおいて、この現象は災害発生確率 π の増加として捉えられる。 η の値が高い場合には、このような環境の中で、建設産業の規模を拡大することが最適になる。本節では、比較動学分析により、建設産業の規模拡大の最適な移行過程と、この移行過程における社会資本投資の役割について考察する。本節の分析においては、家計の相対的リスク回避度には $\eta = 5$ を用いる。

過去に災害に見舞われたことがない国を考える。この国の経済は、時点 $t = 0$ において、 $\pi = 0$ の場合の定常状態（表-4 の $\pi = 0$ の列に示された状態）に収束していると考えられる。いま、 $t = 1$ において、災害リスクの向上が顕在化し、今後は $\pi = 0.005$ であることが判明したとする。このとき、経済は（途中で災害が起きない限り）表-4 の $\pi = 0.005, \eta = 5$ の列に示された状態に向けて移行していくことになる。

図-5-図-7 は、この移行過程における変数の推移を示したグラフである。ただし、グラフ中の変数の値は、 $\pi = 0$ の場合の定常状態からの変化量として表されている。すなわち、ある変数の時点 t の値を x_t で、 $\pi = 0$ の場合の定常状態における変数の値を $\bar{x}^{\pi=0}$ で表すとき、 $x_t - \bar{x}^{\pi=0}$ の値がグラフに示されている。機械資本ストック $K_{X,t}$ の推移は、建物資本ストック $B_{X,t}$ の推移と似た傾向を示すため、グラフは割愛した。

図-5 と図-6 より、災害リスクの向上が顕在化すると、直ちに機械設備産業と建設産業の雇用と建物資本ストックが増加することを確認できる。これらの産業の雇用

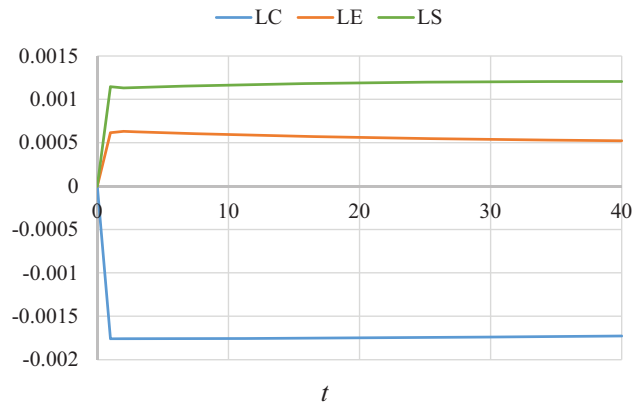


図-5 移行過程における $L_{X,t}$ の推移

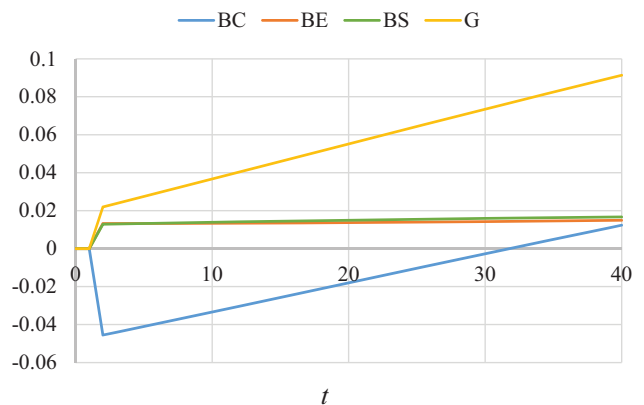


図-6 移行過程における $B_{X,t}, G_t$ の推移

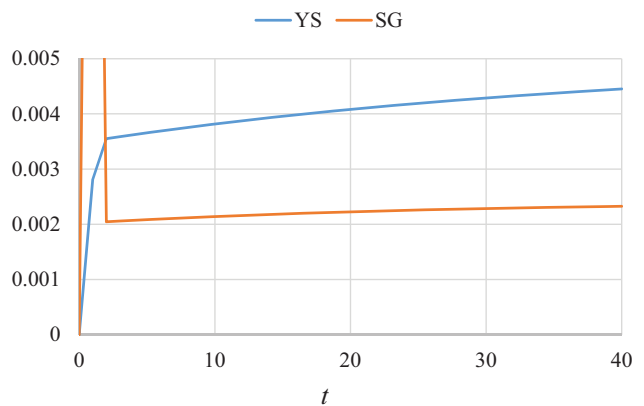


図-7 移行過程における $Y_{S,t}, S_{G,t}$ の推移

と建物資本ストックは、災害リスクの向上が顕在化した直後に急激に増加するものの、それ以降はあまり変化しない。図として示してはいないが、同様の変化は、機械資本ストックにも生じる。

災害リスクの向上が顕在化した直後に、機械設備産業と建設産業の規模拡大が優先される結果として、消費財産業の雇用と物的資本ストックは急激に減少する。そのため、家計の消費は減少する。この結果は、この移行過程が、短期的には国民に負担を強いるものであることを意味する。ただし、消費財産業の物的資本ストックは徐々に回復し、最終的に $\pi = 0$ の場合の定常

状態の水準を回復する。この理由は、機械設備産業と建設産業の規模が拡大し、消費財産業の物的資本への投資が増加することである。

図-6より、災害リスクの向上が顕在化した直後に、社会資本ストックは増加することが確認できる。これは、社会資本が機械設備産業と建設産業の生産性向上に寄与するためだと考えられる。機械設備産業と建設産業の物的資本ストックは、 $t=2$ 以降はあまり変化しないのに対して、社会資本ストックは $t=2$ 以降も増加し続ける。これは、社会資本ストックを増やすことにより、消費財産業の生産性を上げ、家計の消費を増やせるためである。 $t=2$ 以降、増加した建設産業の生産量のほとんどは、消費財産業の建物資本への投資と、社会資本投資に使用される。図-7より、移行過程における建設産業の生産量 $Y_{S,t}$ の増加量のうち、社会資本投資 $S_{G,t}$ の増加量が占める割合は50%以上であることが確認できる^{注9)}。

本節の分析結果と考察より、以下の知見が得られる。災害リスクの向上が顕在化したときには、可能な限り速やかに、機械設備産業と建設産業の規模を最適な水準まで拡大すべきである。このとき、拡大した建設産業の供給力を社会資本投資に活用すべきである。

5. おわりに

本研究は、建設産業の役割を明示的に考慮したDSGEモデルの定式化を行い、国土の災害リスクと、建設産業の最適規模の関係を分析した。分析の結果、以下の知見が得られた。長期にわたり災害に見舞われていない平常時において、災害リスクの存在が建設産業の最適規模を増やすかどうかは、家計のリスク回避性向に依存する。リスク回避性向が高い場合には、平常時の建設産業の最適規模は増え、リスク回避性向が低い場合には、最適規模は減る。日本においては、災害保険のリスクプレミアムの高さを考慮すると、災害リスクの存在は、平常時における建設産業の最適規模を増やすと考えられる。災害リスクの向上が顕在化したときには、可能な限り速やかに、建設産業の規模を最適な水準まで拡大するとともに、拡大した供給力を社会資本投資に活用すべきである。

本研究には次の課題が残されている。本研究では、国内に複数の地域が存在することを考慮せず、国内の経済変数を集計的に扱った。しかし、建設産業の規模について議論するうえでは、時間軸の視点のみならず、地理的な視点も重要となる。災害後に、被災地の迅速な復興を実現するためには、被災していない地域の建設産業の資本と労働力を、被災地に供給することが効果

的である。一方、平時においては、復興関連の需要が無いため、建設産業の供給力に余裕が生じる。この余裕の生じた供給力を、国土強靱化のために、都市部と地方部の社会資本投資に、どのように配分すべきかを考察する必要がある。そのために、モデルを複数地域に拡張して分析を行う必要がある。

謝辞： 本研究はJSPS 科研費 JP21K14265 の助成を受けたものです。ここに記して謝意を表します。

付録1. モデルの解法

式(16)の確率関数を持つ確率変数 z_t を、

$$z_t = \pi + \sigma \varepsilon_t \sqrt{\pi(1-\pi)} \quad (31)$$

と表す。 ε_t は以下の確率関数を持つi.i.d.の確率変数である。

$$\Pr[\varepsilon_t = \varepsilon] = \begin{cases} \pi & \left(\varepsilon = -\frac{\pi}{\sqrt{\pi(1-\pi)}} \right) \\ 1 - \pi & \left(\varepsilon = \frac{1-\pi}{\sqrt{\pi(1-\pi)}} \right) \end{cases} \quad (32)$$

ε_t は平均0、分散1の確率変数である。 σ は摂動法のために導入される便宜的な定数である。 $\sigma=1$ のとき、式(32)で表される z_t の確率分布は、式(16)の確率関数により表される。通常は $\sigma=1$ と見なして良いが、モデルの非確率的定常状態を求めるときのみ、 $\sigma=0$ に設定される。

次に、モデルの一階の最適性条件を表す式(3)–式(15)、式(18)–式(29)を、以下のベクトル関数の形式で記述する。

$$E_t f(\mathbf{y}_{t+1}, \mathbf{y}_t, \mathbf{x}_{t+1}, \mathbf{x}_t, z_t) = \mathbf{0} \quad (33)$$

ここで、 $\mathbf{x}_t$ はモデルの状態変数の対数値のベクトルであり、 $\ln K_{X,t}$ 等を要素とする。 $\mathbf{y}_t$ はモデルの制御変数(状態変数以外の変数、ラグランジュ乗数を含む)の対数値のベクトルであり、 $\ln L_{X,t}$ 等を要素とする。

ここで、 $\mathbf{y}_t$ の最適値を与える政策関数を、 $\mathbf{x}_t$ と σ を引数とする関数として、 $\mathbf{y}^*(\mathbf{x}_t, \sigma)$ で表す。また、 $\mathbf{x}_{t+1}$ の最適値を与える政策関数を、 $\mathbf{x}_t$ と z_t, σ を引数とする関数として、 $\mathbf{x}^*(\mathbf{x}_t, z_t, \sigma)$ で表す。非確率的定常状態においては、定常状態を維持することが最適となるため、

$$\mathbf{y}^*(\bar{\mathbf{x}}, 0) = \bar{\mathbf{y}} \quad (34)$$

$$\mathbf{x}^*(\bar{\mathbf{x}}, \pi, 0) = \bar{\mathbf{x}} \quad (35)$$

が成立する。ただし、 $\bar{\mathbf{y}}$ と $\bar{\mathbf{x}}$ はそれぞれ、非確率的定常状態における状態変数の対数値と制御変数の対数値を表す。これらの関数を式(33)に代入すると、

$$E_t f(\mathbf{y}^*(\mathbf{x}^*(\mathbf{x}_t, z_t, \sigma), \sigma), \mathbf{y}^*(\mathbf{x}_t, \sigma), \mathbf{x}^*(\mathbf{x}_t, z_t, \sigma), \mathbf{x}_t, z_t) = \mathbf{0} \quad (36)$$

表-6 災害リスクが変数の長期平均値に与える影響

π	0.005	0.005
η	5	5
人的資本	考慮	考慮しない
K_C	-1.56%	-1.55%
K_E	-1.09%	-1.08%
K_S	+0.40%	+0.40%
B_C	-1.96%	-1.94%
B_E	-1.49%	-1.47%
B_S	-0.02%	-0.01%
G	-2.21%	-2.20%
L_C	-0.26%	-0.26%
L_E	+0.22%	+0.22%
L_S	+1.74%	+1.73%

表-7 災害リスクが平常時定常状態に与える影響

π	0.005	0.005
η	5	5
人的資本	考慮	考慮しない
K_C	+0.70%	+0.69%
K_E	+1.49%	+1.48%
K_S	+1.75%	+1.74%
B_C	+0.80%	+0.78%
B_E	+1.60%	+1.57%
B_S	+1.86%	+1.83%
G	+1.20%	+1.17%
L_C	-0.19%	-0.18%
L_E	+0.59%	+0.60%
L_S	+0.88%	+0.86%

という x_t と σ についての恒等式が得られる (z_t は式 (31) より $\sigma \varepsilon_t$ を用いて表せる)。この恒等式の左辺を x_t と σ について一階微分すると 0 になるという条件、および、式 (34)、式 (35) から、非確率的定常状態における、政策関数の一階偏導関数の値が求められる^{注 10)}。すなわち、政策関数の一階のテイラー近似式が得られる。この手法の詳細は参考文献^{15), 16)}を参照されたい。

付録 2. 人的資本の効果

表-1 では、労働者に対する支払額のシェアのうち、1/3 は人的資本への対価、2/3 は労働力への対価と考え、 α_{HX} と α_{LX} を設定した。ここでは、1%が人的資本への対価、99%が労働力への対価と考えて α_{HX} と α_{LX} を設定した場合の分析結果を見る。相対的リスク回避度 η は 5 に固定する。

表-3、表-5 の結果を得た分析と同様にして、災害リスクが変数の長期平均値に与える影響と、平常時定常状態に与える影響を分析する。その結果を表-6、表-7 に整理する。表の左の列は人的資本を考慮した場合の結果であり、表-3、表-5 の結果を再掲したものである。右の列は人的資本を考慮しない場合の結果である。これらの結果より、人的資本の考慮の有無は、災害リスクと建設産業の最適規模の係数に、ほとんど影響を与えないことが確認できる。

付録 3. 式 (30) の意味

消費財を価値尺度財とし、1 単位の消費財の価値を 1 円に基準化する。いま、1 円の保険料を支払うことによ

り、災害時に X 円の保険金が支払われる災害保険を考える。この保険のマークアップ率（保険料÷保険金の期待値）は $\mu_t = 1/(\pi X)$ と表される。

この保険への加入を検討する家計の意思決定を考えよう。この保険に加入するために、家計は時点 $t+1$ の消費財 1 単位を手放す必要がある。消費財 1 単位の限界価値は $p_{C,t+1}$ であるから、これによる生涯効用の低下量の期待値は、 $A = E_t[p_{C,t+1}]$ と評価できる。一方、この保険に加入すると、時点 t の期末に災害が起きた際に、時点 $t+1$ の消費財が X 単位手に入る。これによる生涯効用の増加量の期待値は、 $B = \pi X p_{C,t+1} \{1\}$ と評価できる。もし、経済に災害保険が存在するとしたら、そのリスクプレミアムは $A = B$ が成立するように設定されなければいけない。さもなければ、家計はその保険を無限に購入するか、無限に販売することにより、生涯効用を無制限に増やしてしまう。 $A = B$ が成立するとき、 $1/(\pi X)$ の値は、式 (30) の右辺として表せる。

NOTES

- 注 1) 人口の増加率（減少率）が一定の状況や、全産業の技術進歩率が等しく一定の状況についても、変数を適切に基準化することにより、本研究のモデルを用いた分析が可能である¹⁰⁾。本研究の定性的な分析結果は人口増加率や技術進歩率に依存しないため、本研究では人口・技術水準は通時的に一定であると考える。
- 注 2) 人的資本の蓄積過程を表現するモデルには、Learning-by-doing の他に、労働時間外の教育や職業訓練による蓄積に着目したものがある^{13), 14)}。本研究では、建設産業における熟練労働者の技能の研鑽は、主として業務の中で行われることから、Learning-by-doing のモデルを採用した。
- 注 3) 将来の利潤の割引には、市場で成立する金利を用いる。
- 注 4) これらのラグランジュ乗数は、分権的な市場均衡における価格に対応している。例えば、 $p_{X,t}$ は産業 X の生産する財の価格に対応する。
- 注 5) 塚井らの研究では、集計化された GRP を対象に、民間資本・労働力・社会資本の生産性への寄与が推定さ

れており、 α_{GX} に相当する値としては、0.083–0.112 の推定値が得られている。

- 注 6) そのようなシナリオが偶然に生じた状況を想定している。このシナリオが確定的に生じる場合の分析結果とは異なることに注意されたい。
- 注 7) 同じような問題は株式のリスクプレミアムについても存在しており、単純な DSGE モデルでは、 η の値を非現実的に高い水準に設定しないと、株式の高いリスクプレミアムを再現できないことが知られている²²⁾。
- 注 8) 具体的な要素として、以下の四つが考えられる。第一は、家計が過去の消費習慣を記憶しており、習慣よりも低い水準の消費から強い不効用を受けるという、Habit formation²⁵⁾ である。第二は、プロスペクト理論が想定するように、家計が災害の生じる可能性を重く評価する傾向を有することである。第三は、家計や企業の流動性制約である。災害後の物的資本の復旧には多額の資金が必要となるが、多くの家計や企業はそのために必要な現金を借り入れできない。その結果、被災後の復旧資金を得られる災害保険の価値が高く評価される。第四は、実際の家計の寿命は有限であるため、ライフサイクルの中で多額の資産を喪失することに対して強い拒否感を有することである。
- 注 9) $t = 1$ において $S_{G,t}$ のグラフが $Y_{S,t}$ のグラフを超えている理由は、消費財産業の建物資本への投資の一部が $S_{G,t}$ に転用されるためである。
- 注 10) y^*, x^* の σ に関する一階偏導関数は 0 となることが知られている。

REFERENCES

- 国土交通省東北地方整備局: 震災直後から、迅速に地元建設企業が活動を開始, 2012, https://www.thr.mlit.go.jp/bumon/kisya/kisyah/images/42180_1.pdf (2023/04/20 アクセス). [Tohoku Regional Development Bureau, Japan Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism: *Shinsai Chokugo Kara Jinsoku Ni Zimoto Kensetsu Kigyo Ga Katsudo Wo Kaishi*, 2012, https://www.thr.mlit.go.jp/bumon/kisya/kisyah/images/42180_1.pdf (accessed on 2023/04/20).]
- 国土交通省: 被災地における入札不調案件の契約状況等について, 2013, <https://www.mlit.go.jp/common/000988233.pdf> (2022/9/30 アクセス). [Japan Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism: *Hisaichi Ni Okeru Nyusatsu Jokyo To Ni Tsuite*, 2013, <https://www.mlit.go.jp/common/000988233.pdf> (accessed on 2022/9/30).]
- 多田忠義: 東日本大震災被災地における建築関連の労働需給実態, 金融市場 2013 年 6 月号, 農林中金総合研究所, 2013. [Tada, T.: *Higashi Nihon Daishinsai hisai ken ni okeru kenchiku kanren no rodo jukyu jittai*, *Kinyu Shijo*, Volume of June 2013, Norinchukin Research Institute.]
- 高橋和雄: 建設業の災害予防・災害応急対策への活用に関する研究, 土木学会論文集 F6, Vol. 67, No. 2, pp. 29-34, 2011. [Takahashi, K.: Investigation on use of construction industry to countermeasures of natural disasters, *Journal of Japan Society of Civil Engineers F6*, Vol. 67, No. 2, pp. 29-34, 2011.]
- 皆川勝, 渡邊祐介, 草柳満: 災害初期の啓開における地域間連携の有効性の検討, 土木学会論文集 F4, Vol. 68, No. 3, pp. 57-67, 2012. [Minagawa, M., Watanabe, Y. and Kusayanagi, M.: Effectiveness of area cooperation for removal of debris caused by severe earthquake, *Journal of Japan Society of Civil Engineers F4*, Vol. 68, No. 3, pp. 57-67, 2012.]
- 田中徹政, 加知範康, 塚原健一: 地域の被災後の応急復旧力に着目した九州地方における建設機械の賦存量に関する考察, 土木学会論文集 F4, Vol. 89, No. 4, pp. 291-301, 2013. [Tanaka, T., Kachi, N. and Tsukahara, K.: Evaluation of balance between emergency disaster response construction machinery needs and its supply capacity in Kyushu Region, *Journal of Japan Society of Civil Engineers F4*, Vol. 89, No. 4, pp. 291-301, 2013.]
- 井上勉介, 中野晋: 2016 年熊本地震における地元建設企業の災害対応に関するインタビュー調査, 土木学会論文集 F6, Vol. 73, No. 2, pp. 27-34, 2017. [Inoue, S. and Nakano, S.: Interview survey on disaster recovery by local construction companies in the 2016 Kumamoto Earthquake, *Journal of Japan Society of Civil Engineers F6*, Vol. 73, No. 2, pp. 27-34, 2017.]
- 平山修久, 永田尚人, 上村俊一, 河田恵昭: 南海トラフ巨大地震時における災害廃棄物処理に係る災害対応リソース, 地域安全学会論文集, Vol. 33, pp. 157-164, 2018. [Hirayama, N., Nagata, H., Uemura, S. and Kawata, Y.: Disaster response resources related to disaster debris operation after Nankai Trough Earthquake, *Journal of Social Safety Science*, Vol. 33, pp. 157-164, 2018.]
- 皆川勝, 三枝大祐, 飛田雅紀: 被災物撤去の効率性に及ぼすリース業者保有数を含む建設重機分布の影響, 土木学会論文集 F4, Vol. 71, No. 4, pp. 85-95, 2015. [Minagawa, M., Mitsueda, D. and Tobita, M.: Influence of construction machine distribution including leased machines for rubble processing, *Journal of Japan Society of Civil Engineers F4*, Vol. 71, No. 4, pp. 85-95, 2015.]
- Romer, D.: *Advanced Macroeconomics 5th ed.*, McGraw-Hill College, 2018.
- 瀬木俊輔, 石倉智樹, 横松宗太: 動学的確率的マクロ経済モデルの長期的な防災投資計画への応用, 土木学会論文集 D3, Vol. 68, No. 3, pp. 129-143, 2012. [Segi, S., Ishikura, T. and Yokomatsu, M.: Application of dynamic stochastic macroeconomic model for long-term disaster prevention planning, *Journal of Japan Society of Civil Engineers D3*, Vol. 68, No. 3, pp. 129-143, 2012.]
- Chang, Y., Gomes, J. F., Schorfheide, F.: Learning-by-Doing as a Propagation Mechanism, *The American Economic Review*, Vol. 92, No. 5, pp. 1498-1520, 2002.
- Ben-Porath, Y.: The production of human capital and the life cycle of earnings, *Journal of Political Economy*, Vol. 75, No. 4, pp. 352-365, 1964.
- Trostel, P.: The effect of taxation on human capital, *Journal of Political Economy*, Vol. 101, No. 2, pp. 327-350, 1993.
- Heer, B. and Maussner, A.: *Dynamic General Equilibrium Modeling: Computational Methods and Applications*, 2nd ed, Springer, 2009.
- Schmitt-Grohé, 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, pp. 755-775, 2004.
- Jermann, U. J.: Asset pricing in production economies, *Journal of Monetary Economics*, Vol. 41, pp. 257-275, 1998.
- 内閣府政策統括官(防災担当): 南海トラフ巨大地震の被害想定について(経済的な被害), https://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku-wg/pdf/3_sanko.pdf (2023/04/20 アクセス). [Director General for Disaster Management, Japan Cabinet Office: *Nankai Trough Kyodai Jishin No Higai Sotei Ni Tsuite (Keizaiteki Na Higai)*, https://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku-wg/pdf/3_sanko.pdf (accessed on 2023/04/20).]
- Vasilev, A.: A real-business-cycle model with human capital accumulation: lessons for Bulgaria (1999-2018), *Macroeconomics and Finance in Emerging Market Economies*, pp. 1-15, 2021.
- Valentinyi, A. and Herrendorf, B.: Measuring factor income

- shares at the sectoral level, *Review of Economic Dynamics*, Vol. 11, pp. 820-835, 2008.
- 21) 塚井誠人, 江尻良, 奥村誠, 小林潔司: 社会資本の生産性とスピルオーバー効果, 土木学会論文集, No. 716, IV-57, pp. 53-67, 2002. [Tsukai, M., Ejiri R., Okumura, M. and Kobayashi, K.: Productivity of infrastructure and spill overt effects, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, No. 716 / IV-57, pp. 53-67, 2002.]
- 22) Mehra, R. and Prescott, E.C.: The equity premium: A puzzle, *Journal of Monetary Economics*, Vol. 15, No. 2, pp.145-161, 1985.
- 23) 横松宗太, 小林潔司: カタストロフ・リスクと防災投資の経済評価, 土木学会論文集, No. 639, IV-46, pp. 39-52, 2000. [Yokomatsu, M. and Kobayashi, K.: Catastrophe risks and economic valuation of disaster prevention investment, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, No. 639 / IV-46, pp. 39-52, 2000.]
- 24) 損害保険料算出機構: 損害保険料率算出機構統計集, <https://www.giroj.or.jp/publication/statistics/> (2023/04/20 アクセス) [General Insurance Rating Organization of Japan: *Songai Hoken Ryo Ritsu Sanshutsu Kiko Tokei Shu*, <https://www.giroj.or.jp/publication/statistics/> (accessed on 2023/04/20).]
- 25) Constantinides, G. M.: Habit formation: A resolution of the equity premium puzzle, *Journal of Political Economy*, Vol. 98, No. 3, pp. 519-543, 1990.

(Received May 23, 2023)

(Accepted September 8, 2023)

ON THE OPTIMAL SIZE OF CONSTRUCTION SECTOR UNDER DISASTER RISK

Shunsuke SEGI

This study formulates a dynamic stochastic general equilibrium model that explicitly considers the role of the construction sector. Then, this study analyzes the relationship between national disaster risk and the optimal size of the construction sector in terms of capital stock and number of employees. This study obtains the following findings with the analysis. The risk aversion tendency of the households affects whether the disaster risk increases the optimal size of the construction sector in the normal period, when disasters have not hit for a long time. When the risk aversion is high, the optimal size of the construction sector in the normal period increases, and vice versa. Considering the high risk premium of disaster insurance in Japan, the presence of disaster risk will increase the optimal size of the construction sector in the normal period. The size of the construction sector should be expanded to the optimum level as soon as possible when the increase in disaster risk becomes apparent.