

# 産業部門間の相互依存性が災害復興過程に及ぼす影響\*

Effects of Mutual Relationships between Industrial Sectors on Restoration Process after Natural Disasters \*

中野一慶\*\*, 多々納裕一\*\*\*

By Kazuyoshi NAKANO\*\*, Hirokazu TATANO\*\*\*

## 1. はじめに

2007年7月に発生した新潟県中越沖地震では、自動車部品を製造する企業の被災が、自動車産業に甚大な影響を与えることを明らかにした。多くの産業で、そのサプライチェーンの中には1社のみしかその部品を供給していないようなクリティカルな中間財が存在することが少なくない。このような状況では、他の工場による代替生産などが難しく、この種の中間財が調達できないことが最終財の生産にも影響を及ぼすのである。このように産業間の相互依存性により、直接的な被害を受けていない産業にも市場を通じて被害が波及していく場合、経済全体としてみれば被害が甚大なものになる。著者ら<sup>1)</sup>はこのような効果をカスケード効果と呼び、中間財、および、最終財を生産する2つの産業を含む経済が災害によって生産基盤に損傷を被った場合に、経済全体での被害を統合的に評価するための方法を提示した。さらに、カスケード効果が生じることによる被害の拡大効果を分離して推計する方法論についても検討した。本研究では、こうした検討をさらに進め、産業部門の相互依存性が経済の復興過程に及ぼす影響を分析し、それが経済全体での被害の大きさに与える影響を分析する。

## 2. モデルの定式化

### (1) 分権経済モデルの設定

#### (a) モデルの前提

当該国には、中間財を生産する産業部門(以下中間財部門)と、最終消費財を生産する産業部門(以下最終財部門)の2つの産業部門と、家計があるとする。中間財部門は最終財部門に中間財を供給する。消費財は国際的に取引され、価格 $p$ で取引されるとする。中間財市場は完全競争市場で

あると同時に、国内で閉じていると仮定する。すなわち、地域内には代替的に中間財を供給する企業が多数存在する一方で、輸送費用の存在のために輸入は生じず、国外の企業とは競争にならない状況を仮定する。資本市場はopenであり、利子率 $r$ は世界市場での均衡により定まるものとする。当該国の保有資本が世界全体での資本総量に比して十分小さく、当該国の資本の変化が世界利子率には影響しないものとする。このとき、世界利子率を $r$ とおくと、当該国にとって $r$ は外生パラメータとなる。また、家計は代表的家計を仮定する。企業が資本を保有しており、家計は企業の全株式を所有していると想定する。人口や労働については国外への移動が容易でない国を想定し、人口変動についても取り扱わないこととする。

#### b) 中間財部門の行動の定式化

中間財部門は資本と労働を投入することによって生産を行う。資本財は国際市場での均衡により価格が決まるとし、価格を1とする。企業は資本を所有し、投資の経路を決定する。投資に、設備の据付費用などの調整費用<sup>2)</sup>がかかると仮定する。また、生産を $Y_1$ 、投資を $I_1$ 、資本を $K_1$ 、賃金率を $w$ 、調整費用関数を $T$ 、雇用労働量を $L_1$ とする。最大化問題を以下のように定式化しよう。

$$\max \int_0^{\infty} (qY_1 - I_1(1 + T(I_1/K_1)) - wL_1)e^{-rt} dt \quad (1)$$

$$s.t. \dot{K}_1 = I_1 \quad (2)$$

$$K_1(0) = \text{given} \quad (3)$$

$$I_1 \geq 0 \quad (4)$$

とおける。ここで式(2)は資本の蓄積式である。本研究が対象とする復興過程は数ヶ月の期間内のことなので、資本の減耗が復興過程に与える影響は大きくないと考え、本章では資本の減耗を取り扱わないこととする。Hayashi<sup>3)</sup>に従い、調整費用 $I_1T(I_1/K_1)$ は投資 $I_1$ と資本 $K_1$ に対し一次同次と仮定する。また式(4)は、一度導入した資本については、導入時と同じ価格で売却できないとの仮定を表す。すなわち投資の不可逆性の仮定を表している。また本研究では労働の変化を取り扱わないものとし、 $L_1, w$ は後に述べる定常状態における値で一定と仮定する。ハミルトニアンを用いてとくと、当座 $I_1 \geq 0$ の条件を無視すると、

\*キーワード: 防災計画, 計画情報

\*\*学生員, 京都大学大学院情報学研究所

〒611-0011 宇治市五ヶ庄, Tel 0774-38-4037

E-mail: nakano@imdr.dpri.kyoto-u.ac.jp

\*\*\*正員, 工博, 京都大学防災研究所 社会防災研究部門

〒611-0011 宇治市五ヶ庄, Fax 0774-38-4308

E-mail: tatano@imdr.dpri.kyoto-u.ac.jp

最大化の一階条件は

$$q \frac{\partial F}{\partial K_1} + \left(\frac{I_1}{K_2}\right)^2 T'(I_1/K_1) - \mu r = -\dot{\mu} \quad (5)$$

$$-1 - T\left(\frac{I_1}{K_1}\right) - \frac{I_1}{K_1} T'(I_1/K_1) + \mu = 0 \quad (6)$$

$$\dot{K}_1 = I_1 \quad (7)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} K_1 \mu e^{-rt} = 0 \quad (8)$$

となる。式 (5) は、

$$q \frac{\partial F}{\partial K_1} + \dot{\mu} + \left(\frac{I_1}{K_2}\right)^2 T'(I_1/K_1) = \mu r \quad (9)$$

と変形できる。これは、最適経路では、中間財価格  $q$  の経路を所与として、每期、資本を 1 単位増加するときの限界収入が、株主である家計の求める収益率と一致することを示している。左辺第 1 項は限界生産物、第 2 項はキャピタルゲインの増分、第 3 項は調整費用が減少することによる収入の増分である。また、式 (6) は、1 単位の投資による費用増分がシャドウプライスと一致する点で投資を決定することを示している。式 (5) (6) により、中間財価格  $q$  を所与として、投資を制御変数、資本を状態変数とした微分方程式系が得られる。中間財部門は、式 (5) と (6) により、投資と資本の経路を決定する。

#### c) 最終財部門の行動の定式化

最終財部門は、資本と中間財、労働を投入することによって生産をおこない、キャッシュフローの現在価値を最大化する。すなわち

$$\max \int_0^{\infty} (pY_2 - qZ_1^2 - I_2 - wL_2)e^{-rt} dt \quad (10)$$

$$s.t. \dot{K}_2 = I_2 \quad (11)$$

$$K_2(0) = \text{given} \quad (12)$$

$$I_2 \geq 0 \quad (13)$$

という最大化問題を解くことになる。ただし生産を  $Y_2$ 、投資を  $I_2$ 、資本を  $K_2$ 、雇用労働量を  $L_2$ 、投入する中間財の量を  $Z_1^2$  と表す。中間財部門と同様、 $L_2$  は一定と仮定する。最終財部門についても、投資の不可逆性を仮定する。ハミルトニアンを用いて、当座、 $I_2 \geq 0$  の条件を無視すると、最大化の一階条件は

$$p \frac{\partial H}{\partial K_2} - \lambda r = -\dot{\lambda} \quad (14)$$

$$-1 + \lambda = 0 \quad (15)$$

$$p \frac{\partial H}{\partial Z_1^2} - q = 0 \quad (16)$$

$$\dot{K}_2 = I_2 \quad (17)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} K_2 \lambda e^{-rt} = 0 \quad (18)$$

となる。式 (14) は、1 単位資本を増加させるときの収入の増分が株主である家計の求める収益率と一致することを意味している。式 (16) は、最適経路では、每期の中間財の限界価値生産物が、価格  $q$  に一致することを示す式であ

る。式 (15) は資本のシャドウプライスが 1 に保たれることを示している。いま、調整費用がないので、資本のシャドウプライスが 1 を下回ると、シャドウプライスが 1 になるまで資本を売却することになるし、1 を上回れば、資本を瞬時に購入することになる。

#### d) 家計の行動の定式化

家計は労働所得と利子所得、配当所得を用いて消費をおこない、残りを対外資産に投資する。対外資産を  $As$ 、消費を  $C$ 、時間選好率を  $\rho$ 、中間財部門の企業の配当を  $\pi_1$ 、最終財部門の企業の配当を  $\pi_2$  とすると、家計は以下の最大化問題をとくことになる。

$$\max \int_0^{\infty} u(C)e^{-\rho t} dt \quad (19)$$

$$s.t. \dot{As} = wL + rAs + \pi_1 + \pi_2 - pC \quad (20)$$

$$As(0) = \text{given} \quad (21)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} As(t)e^{-rt} = 0 \quad (22)$$

労働市場は非弾力的であり、 $w$  は一定とする。家計が供給する労働量  $L$  は、各部門の労働量の和  $L_1 + L_2$  に一致する。式 (22) は Non Ponzi Game(NPG) 条件<sup>2)</sup> であり、家計が借入によって無限に効用を拡大することを防ぐ条件である。本研究では、開放経済モデルに見られる、利子率が外生的に与えられることによる極端な挙動<sup>2)</sup> を避けるため、多くの先行研究に倣い、 $\rho = r$  との仮定をおく。ハミルトニアンを用いて計算すると、

$$-\frac{u''(C)\dot{C}}{u'(C)} = r - \rho \quad (23)$$

が得られる。 $r = \rho$  を仮定すると、時間によらず消費は一定となる。図 1 は分権経済モデルの概要である。

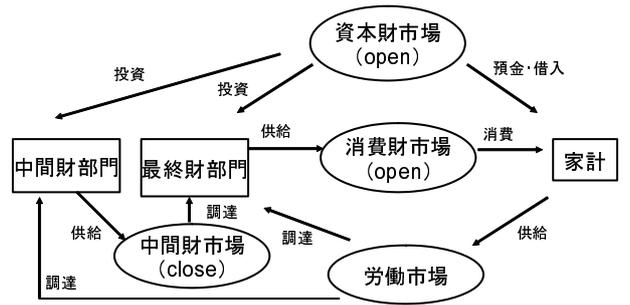


図 1: 分権経済モデルの概要

#### (2) 平常時の経済状態

##### a) 定常状態の存在

企業部門の一階条件式と需給一致条件

$$Y_1 = Z_1^2 \quad (24)$$

から得られる微分方程式系において、 $\dot{K}_1 = \dot{K}_2 = \dot{\mu} = 0$  とすることにより、定常状態での資本量  $K_1^*, K_2^*$ 、シャド

ウプライス  $\mu^*$ 、中間財価格  $q^*$ 、投資量  $I_1^*$  が求まる。また、各産業部門の雇用量や賃金率は、定常状態における労働市場の均衡から決定され、その値から変化をしないと仮定する。この労働市場の均衡においては、両部門での賃金率は一致し、各産業部門において労働の限界価値生産物が賃金率に一致する。これらの条件から、定常状態と、そこにいたるまでの鞍点経路が存在することがわかっている。

### b) 消費

$r = \rho$  の場合、最適な消費経路は、常に一定の消費水準をとることになる。予算制約式を積分し、NPG条件を用いると、その値  $C_0$  は効用関数によらず、

$$\frac{r}{p}(As(0) + \int_0^\infty (pY_2 - \Phi(I_1, K_1) - I_2)e^{-rt} dt) = C_0 \quad (25)$$

となる。ただし、調整費用を含めた投資量  $I_1(1+T(I_1/K_1))$  を  $\Phi(I_1, K_1)$  とおいた。

### c) 貯蓄

家計は、所得から消費を差し引いた分を対外資産によって貯蓄する。貯蓄  $\dot{A}s$  は、予算制約式と式 (25) を用いると、

$$wL + \pi_1 + \pi_2 - r \int_0^\infty (wL + \pi_1 + \pi_2)e^{-rt} dt = \dot{A}s \quad (26)$$

と書ける。これは将来所得の現在価値に基づく消費を上回る収入がある場合には貯蓄がなされるが、そうでない場合にはその取り崩しが生じることを意味する。

### d) 投資

中間財部門の投資は式 (6) から決まる。最終財部門の投資は、部門間の最適な資本比率を満たすように、各期の  $K_1$  の値に応じて  $K_2$  を調整するように決まる。ただし投資の不可逆性を考慮するものとする。

### e) 移行動学

初期の資本ストック  $K(0)$  が与えられると、それに対する  $\mu$  が saddle point path から決まる。すると中間財部門の投資  $I_1$  が式 (6) から決定される。例えば  $K_1(0) < K_1^*$  のときは投資により資本が蓄積され、生産が増加していく。それにともない  $\mu$  が低下していき、やがて定常状態に達する。このとき最終財部門の資本も定常状態の値に収束する。

## 3. 自然災害後の経済復興過程

### (1) 被災後の意思決定

定常状態のある時点  $\tau$  で災害が生起するとする。本研究では、災害により中間財部門の資本のみが  $K_1^*$  から  $K_1^-$  に減少するシナリオを仮定する。被災後の資本の経路を  $\hat{K}_1, \hat{K}_2$  で表す。被災後、中間財部門の企業は  $K_1^-$  を所与として、被災時点で評価したキャッシュフローの現在価値

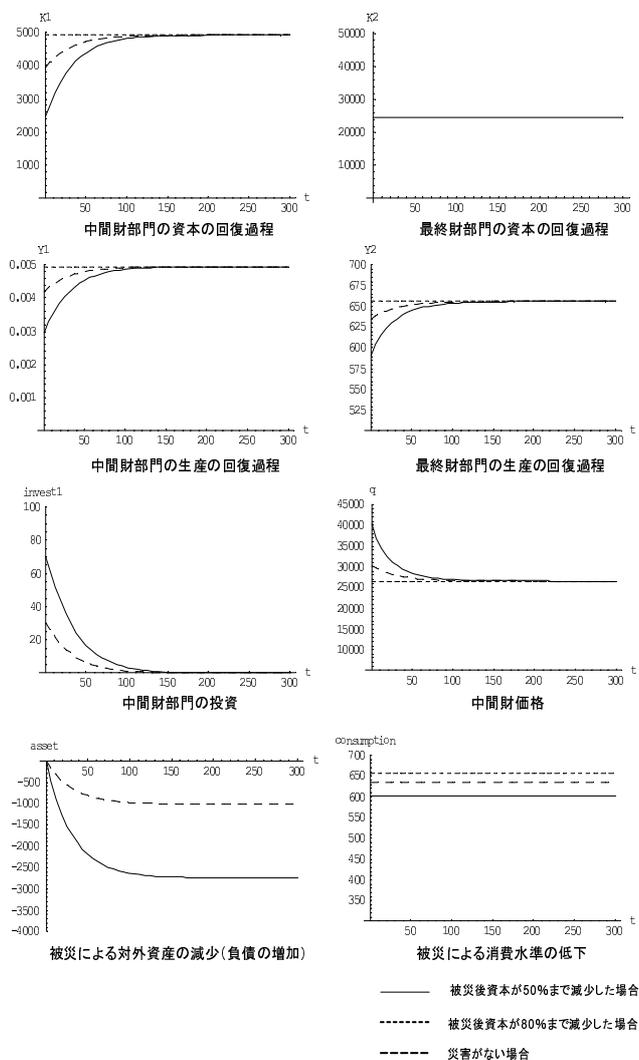


図 2: 数値計算例：自然災害後の復興過程

を最大化するように投資、資本の経路を決定する。家計は、被災前の対外資産を所与として、 $\tau$  時点以降の生涯効用を改めて最大化するよう、消費の経路を決定する。ただし被災後の労働市場の変化は取り扱わないものとし、労働賃金率や各生産部門の雇用労働量は、被災前の均衡から決定される水準から変化しないと仮定する。詳細な定式化については省略する。

### (2) 災害後の復興過程

各産業部門で、投資の不可逆性が拘束的にならないと仮定すると、ハミルトニアンを用いて一階条件を求め、平常時と同様に  $q, \lambda$  を消去し、需給一致条件  $Z_1^2 = Y_1 = A_1 K_1^\alpha L_1^{1-\alpha}$  を用いると被災後の復旧過程を決定する条件が得られる。しかし調整費用の存在から中間財部門の生産は瞬時には回復せず、生産の低下が生じる期間が存在する。すると最終財部門が被災しない場合、被災直後に  $K_2$  は変化しないために最終財部門で資本が余剰になり、その限界生産性が低下する。このとき最終財部門の資本の  $\tau$  時点でのシャドウ

プライスが1を下回るため、最終財部門にとっては、負の投資にかかる調整費用がゼロであれば、最終財部門は瞬時に資本を売却し最適な資本の水準に調整する。しかし実際には、一度導入した資本を導入時と同じ価格で売却することは難しい。本研究では一度導入した資本の売却の際の価格が非常に低いと仮定する。このとき最終財部門は、すでに導入してある資本を売却することはせず、資本を被災前のまま据え置いておくことを選択する。すなわち、 $I_2 = 0$ となる。すると復興過程を決定する条件は最終的に

$$\gamma \frac{I_1}{K_1} = -1 + \mu \quad (27)$$

$$pB\alpha(1 - \beta - \eta)K_2^\beta K_1^{\alpha(1-\beta-\eta)-1} \Theta + \frac{(-1 + \mu)^2}{2\gamma} - \mu r = -\dot{\mu} \quad (28)$$

$$\dot{K}_1 = I_1 \quad (29)$$

$$\dot{K}_2 = 0 \quad (30)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} K_1 \mu e^{-rt} = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} K_2 \lambda e^{-rt} = 0 \quad (31)$$

となる。ただし中間財部門の生産関数、調整費用を

$$F(K_1, L_1) = A_1 K_1^\alpha L_1^{1-\alpha}, \quad T\left(\frac{I_1}{K_1}\right) = \frac{\gamma}{2} \frac{I_1}{K_1} \quad (32)$$

とおき、最終財部門の生産関数を

$$H(K_2, Z_1^2, L_2) = A_2 K_2^\beta (Z_1^2)^{1-\beta-\eta} L_2^\eta \quad (33)$$

とおいた。また  $B = A_1^{1-\beta-\eta} A_2$ ,  $\Theta = L_1^{(1-\alpha)(1-\beta-\eta)} L_2^\eta$ とおいた。

図2に各産業部門と家計部門の復旧過程の数値計算の結果を示す。中間財価格の上昇があることや、最終財部門での生産の減少が生じることがわかる。家計部門では消費が離散的に減少していることや、企業部門への復興資金の供給のために負債が増加していく様子がわかる。

#### 4. カスケード効果が災害復興過程に及ぼす影響の分析

著者ら<sup>1)</sup>は、災害により中間財部門が被災し、その生産が減少した場合に中間財の地域外からの輸入に輸送費用がかかることがカスケード効果を生じさせることを明らかにした。すなわち中間財の地域間の取引にかかる輸送費用などの取引費用が十分小さければカスケード効果は生じないが、そうでない場合には何らかのカスケード効果が生じる。このように考えると、輸送費用がゼロである場合を仮に想定することでカスケード効果が生じることによる影響を分析することができる。調整費用も含めた中間財部門の毎期の投資支出を  $\Phi_1$ 、最終財部門の生み出す毎期の付加価値を  $AV_2 = pY_2 - qY_1$  と表し、カスケード効果が生じない場合の各変数を “ $\sim$ ” を付すことによって表すとカスケード効果が生じる場合の部門別の被害項目を表1のように作成することができる。

表1: カスケード効果を分離した場合の部門別被害項目表

企業部門	家計部門
中間財部門	効用減少
生産(付加価値)減少	CascadeEffect
CascadeEffect	$\tilde{V}_1 - V_1^- + V_2^* - V_2^-$
$\int_{\tau}^{\infty} (q^* \tilde{Y}_1 - \hat{q} \tilde{Y}_1) e^{-r(t-\tau)} dt$	
PrimaryEffect	PrimaryEffect
$\int_{\tau}^{\infty} q^* (Y_1^* - \tilde{Y}_1) e^{-r(t-\tau)} dt$	$V_1^* - \tilde{V}_1$
復旧投資	
CascadeEffect	
$\int_{\tau}^{\infty} (\hat{\Phi}_1 - \tilde{\Phi}_1) e^{-r(t-\tau)} dt$	
PrimaryEffect	
$\int_{\tau}^{\infty} \tilde{\Phi}_1 e^{-r(t-\tau)} dt$	
最終財部門	
生産(付加価値)減少	
CascadeEffect	
$\int_{\tau}^{\infty} (AV_2^* - \hat{A}V_2) e^{-r(t-\tau)} dt$	
計 $V_1^* - V_1^- + V_2^* - V_2^-$	$V_1^* - V_1^- + V_2^* - V_2^-$

表1において、PrimaryEffect(一次効果)とは、カスケード効果が生じない場合に生じる被害額の方である。カスケード効果が生じる場合には、この効果に加えて、さらに被害の変化が生じると考えると、その変化分を表1では CascadeEffect という項目で表現している。

表1において中間財部門の生産減少における CascadeEffect は負、復旧投資における CascadeEffect は正、最終財部門における CascadeEffect は正であることを著者らは明らかにした<sup>1)</sup>。本研究ではこうした検討をさらに進め、数値計算等を用いてカスケード効果が生じることが経済の復興過程に及ぼす影響を分析するとともに、カスケード効果が経済全体としての被害額の大きさに及ぼす影響について分析する。詳細な結果については講演時に譲る。

#### 参考文献

- 1) 中野一慶・多々納裕一：産業間の相互依存性を考慮した自然災害による経済被害の整合的評価方法，土木計画学研究・論文集，(投稿中)。
- 2) Barro, R.J. and X. Sala-i-Martin: *Economic Growth* 2nd-ed, MIT-Press, 2004.
- 3) Hayashi Fumio: Tobin's Marginal and Average q: A Neoclassical Interpretation., *Econometrica* 50(Jan.), pp.213-224, 1982.