土木学会論文集 No.0/I–1, pp.1–??, 2013.5

大規模自然災害と防災知識形成の動学モデル

横松宗太[1]・石倉智樹[2]

[1]正会員　博士（工学）　京都大学准教授　防災研究所（〒 611-0011 宇治市五ヶ庄）
E-mail: yoko@drs.dpri.kyoto-u.ac.jp
[2]正会員　博士（情報学）　首都大学東京准教授　都市環境学部（〒 192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1）

自然災害が発生するたびに，被害を受けた対象の分野の専門家たちは被災地に出向き，被害状況の詳細な調査を行う．防災の実務的・学術的 R&D（研究開発）においては災害直後の被災地調査が重視され，そこでの成果が後の革新を促すサイクルが存在する．本研究では災害時に新しい知見や次なる課題を得るプロセスを”Opportunity-based learning（OBL, 経験による学習）”と呼ぶ．そして調査結果が一般的知識として体系化されて，次なる災害への減災効果を生む動学的プロセスを定式化する．またマクロ経済的視点から，災害時の OBL の機会を最も有効に利用するための財政政策についても示唆を得ることを目的とする．

Key Words : *Disaster, knowledge development, mitigation, dynamic stochastic macroeconomic model*

1.　はじめに

本研究では，長期に亘る防災政策がマクロ経済リスクをコントロールしながら長期的な経済成長を促す構造について記述する．ハードとソフトの双方において，防災対策は大規模災害が起こるたびに既存の対策のさらなる強化と，新しい技術の導入による対策の多様化を図ってきた．そして次なる災害が発生する際に，それらの新しい対策のリストの有効性は評価を受けることになる．現実に起こる災害では，実験やモデル分析では想定に入っていなかった複雑な被害状況が現れる．よって防災分野では災害直後の被災地調査が重視される．本研究では災害時に新しい知見や次なる課題を得るプロセスを”Opportunity-based learning（OBL，経験による学習）”と呼ぶ．そして，災害時の集中的な調査と，調査結果に基づいた知識の体系化と対策の革新，次なる災害の発生 $\cdots$ を繰り返しながら展開する防災分野特有の R&D（Research & Development）のプロセスを記述する．

本研究ではマクロ経済の規模を対象とする．そして OBL の機会を最も有効に利用するための財政のルールを導出する．防災の R&D を支える平常時の研究費と災害時の調査費の配分に関する示唆を得ることを目的とする．また，マクロスケールを対象とすることによって，ある大規模災害から次の大規模災害までの間に経済が成長していることを考慮する．生産設備等の物的資本の蓄積が進むにしたがって，被害はより複雑化する．全く同じ被害状況が繰り返されない理由は，OBL の機会の希少性に加えて，その間の経済成長にもある．本研究では以上のような過程を対象に，防災対策と OBL が経済成長に与える影響について分析する．

2.　モデル

(1)　事実と知識，減災効果

災害が発生すると，緊急調査による OBL が行われ，新しい事実が収集される．被災者の生活面や社会経済的側面については被害状況が長期にわたり継続するが，とりわけ自然科学的側面については被災直後を逃すと状態が変化してしまう．例えば津波の遡上高を示す痕跡は時間が経つと消失してしまう．工学的な被害状況に関しても，復興を急ぐ目的によって，いつまでも建物を破壊状態のまま維持しておくわけにはいかない．よって新しい事実の収集は災害直後に集中的に行われる．

事実は，そのままでは知識とは言えない．畑村 (2000) は自身が提唱する失敗学において，知識を形成する行為を「知識化」と呼んでいる．個々の失敗の事例の中から，将来他人が使える知識となるように，普遍的な要素を抽出して構造化することの重要性を指摘している．本研究では，このように構造化されて普遍性を備えた情報を「知識 (knowledge)」と呼び，個々の事例として収集された段階の情報を「構造化されていない事実 (unstructured fact)」あるいは単に「事実 (fact)」と呼ぶこととする．事実や知識は，量的なデータと質的な状態の記述の双方を含む．

防災の知識は実践を伴うことによって減災の効果を生む．実践は，事前に行われる構造物の耐震化や避難訓練，災害後のボランティアの運営や復興計画などを含む．知識のストックが増加して，個々の知識に基づいた防災の実践の束が増加すると，災害時にそれらの

どれかが大きな減災の役割を発揮する可能性が高まる．換言すると，災害状況の多様性によって，個々の知識と実践がどれだけ役に立つかは確率的な問題と捉えられる．個々の知識 i（に対応した実践 i）の機能水準を確率変数 Θ_i°，その実現値を θ_i と表そう．実現値 θ_i が小さいほど被害率が小さくなる，すなわち高い減災効果を発揮するものとする．それぞれの Θ_i° は互いに独立と仮定する．そして，災害後に最も小さな実現値を示した知識（と実践）のみが採用されるものとする．Θ_i° の最小値を確率変数 Θ°，その実現値を θ と表記する．災害発生時点で N 個の知識ストックがあるとき，採用される知識の水準 θ は次式によって与えられる．

$$\theta := \min[\theta_1, \theta_2, \cdots, \theta_N] \tag{1}$$

Jones(2006) の仮定と同様に，全ての知識の機能水準 Θ_i° は独立同分布とし，それらはワイブル分布に従うものと仮定する．分布関数を以下のように仮定する．

$$F(\theta_i) := 1 - \exp\left\{-\left(\frac{\theta_i}{\beta}\right)^\omega\right\} \tag{2}$$

知識ストックの数 N が増加すれば，最小値 Θ° の期待値や，任意の p パーセンタイル値は減少する．

いま，マクロ経済全体における被害水準を Θ° の p パーセンタイル値と考えよう．p パーセンタイル値 θ^p と，N の減少関数である $p(N)$ の間には以下の関係が成立する．

$$F(\theta^p) = p(N) \tag{3}$$

上式は θ^p と N の関係を陰に定義している．$p(N)$ が

$$p(N) := \exp(-\sigma N) \tag{4}$$

により与えられるものと仮定すると，式 (2)-(4) より

$$\begin{aligned}\theta^p &= \beta\{-\log\{1 - \exp(-\sigma N)\}\}^{\frac{1}{\omega}} \\ &\approx \beta \exp\left(-\frac{\sigma N}{\omega}\right) := \Theta(N)\end{aligned} \tag{5}$$

θ^p が N の関数であることを強調するために，$\theta^p := \Theta(N)$ と表記することとする．$\Theta'(N) < 0$ より，知識ストック N が増加するほど被害水準が減少することを確認できる．以下，便宜上，N を連続変数として扱う．

災害時に k の水準の物的資本が存在するとき，災害によって $\Gamma(g, k, N) \cdot k$ の資本が損壊するものとする．ただし k は資本ストック，g は防災対策を表す．g は毎期フローとして支出されるものとする．資本の被害率 $\Gamma(g, k, N)$ は次式で与えられるものと仮定する．

$$\Gamma(g, k, N) := \Psi(g, k)\Theta(N) \tag{6a}$$

where

$$\Psi_g(g, k) < 0, \quad \Psi_{gg}(g, k) > 0 \tag{6b}$$

$$\Psi_k(g, k) > 0, \quad \Theta'(N) < 0 \tag{6c}$$

$\Psi(\cdot)$ の下付きの添え字は当該変数に関する偏微分を表す．二つの添え字は２階の偏微分を表す．すなわち防災対策 g によって被害率は減少する．一方，経済が成長して資本が深化するほど多くのシステムが互いに複雑に関連するようになるため，被害率も大きくなるものと考える．$\Gamma_g(\cdot) = \partial\Gamma(\cdot)/\partial g < 0$ と $\Gamma_N(\cdot) = \partial\Gamma(\cdot)/\partial N < 0$ が，それぞれ防災対策と知識の減災効果を表している．

災害はポアソン過程に従って到着するものと仮定する．ポアソン過程を $q(t)$ により表し，$dq(t)$ を次式のように定義する．

$$\begin{aligned} dq(t) &= 0 \ \text{ with prob. } 1 - \mu\ dt \\ &= 1 \ \text{ with prob. } \mu\ dt \end{aligned} \tag{7}$$

ただし μ はポアソン到着率を表す．時点 t における災害の発生を $dq(t) = 1$ により表す．

閉鎖・実物１財経済を考える．平常時の生産のフローを生産関数 $f(k)$ により表現する．災害が発生すると，被災によって労働供給が減少するため，その期の生産のフローは $\eta f(k)$ $(0 < \eta < 1)$ だけ減少するものとする．本来，減少率 η も知識や防災対策に依存するが，モデルの煩雑さを避けるため，ここでは一定と仮定する．今後，定量的な分析の際には，人的被害の軽減や生活の復旧のための知識や資源を新たな変数として導入して，式 (6a) と同様の被害率関数を設定する必要がある．

１人当たりの資本ストック $k(t)$ の成長過程は次式のように表される．

$$\begin{aligned} dk(t) &= \{f(k(t)) - c(t) - g(t) - m_2(t) - \delta_1 k(t)\}dt \\ &-\{\Gamma(g(t), k(t), N(t))k(t) + \eta f(k(t)) + m_1(t)\}dq(t) \end{aligned} \tag{8}$$

右辺１行目は平常時の，２行目は災害時の変化を表す．$c(t)$ は消費水準，$m_2(t)$ は平常時の防災研究への資金の投入を表す．$\delta_1 k(t)$ は資本の減耗である．１行目は平常時の投資に相当する．右辺２行目の第１項は災害による資本の損壊を，第２項は生産の減少を表す．$m_1(t)$ は災害調査すなわち OBL への資金の投入を表す．

構造化されていない事実のストックを $z(t)$ により表す．災害時に OBL によって収集される事実のフローを関数 $\Omega(\zeta(k, z, N), m_1)$ により仮定する．ただし

$$\zeta(k(t), z(t), N(t)) := k(t) - \chi_1 z(t) - \chi_2 N(t) \tag{9a}$$

$$\Omega_\zeta(\zeta, m_1) > 0, \quad \Omega_{\zeta\zeta}(\zeta, m_1) > 0 \tag{9b}$$

$$\Omega_{m1}(\zeta, m_1) > 0, \quad \Omega_{m1m1}(\zeta, m_1) < 0 \tag{9c}$$

$\Omega(\cdot)$ の下付きの添え字は当該変数に関する偏微分を表す．二つの添え字は２階の偏微分を表す．$\zeta(k(t), z(t), N(t))$ は時点 t における経済の発展状況と災害経験の差を反映した指標である．経済が発展して資本ストック k が蓄積されると，災害によってこれまでに経験したことがない被害状況が生まれる．とりわけ過去の災害の際に OBL によってストックされた事実や知識が少なければ，新たな災害の際に想定外の事実が発生しやすくな

り，OBL はより多くの事実を収集する．$\zeta(k,z,N)$ は想定外の事実の潜在量を意味する指標である．式 (9b) は経済成長に伴って想定外の事実が逓増することを表す．なおモデルの簡単化のため，χ_1, χ_2 は一定のパラメータとする．式 (9c) は，災害調査への資金 m_1 が増加すればより多くの事実が得られることを示す．ただし調査人員の数が有限である以上，資金の投入の効果は逓減する．

また，知識の生産関数を $H(s,m_2)$ により仮定する．s は OBL によって蓄積された後に研究テーマとなる事実である．以下の関係を仮定する．

$$H_s(s,m_2) > 0, \quad H_{m2}(s,m_2) > 0 \tag{10}$$

ただし $H_s(\cdot) := \partial H(\cdot)/\partial s$，$H_{m2}(\cdot) := \partial H(\cdot)/\partial m_2$ である．構造化されていない事実 $z(t)$ と知識 $N(t)$ の変化過程は以下のように表される．

$$\begin{aligned} dz(t) &= -s(t)dt \\ &\quad + \Omega(\zeta(k(t),z(t),N(t)),m_1(t))dq(t) \end{aligned} \tag{11a}$$

$$dN(t) = \{H(s(t),m_2(t)) - \delta_2 N(t)\}dt \tag{11b}$$

$s(t)$ を研究することによって，$s(t)$ は $z(t)$ のストックから差し引かれる．また，式 (11b) の $\delta_2 N(t)$ は知識の陳腐化を意味する．

(2) 動学的最適化問題

代表的家計の各時点の効用関数を $U(c)$ により表す．家計は危険回避的とし，$U(c)$ は $U'(c) > 0, U''(c) < 0$ を満たすものとする．社会的最適化問題は代表的家計の生涯期待効用最大化問題として以下のように表される．

$$\max_{\boldsymbol{u}} EU := E\int_0^\infty U(c(t))\exp(-\rho t)dt \tag{12}$$

subject to eq.(8),(11a),(11b)

ただし E は期待値操作，ρ は時間選好率である．表記の便宜上，状態変数ベクトルを $\boldsymbol{x}(t) := (k(t),z(t),N(t))^T$，制御変数ベクトルを $\boldsymbol{u}(t) := (c(t),g(t),m_1(t),m_2(t),s(t))^T$ と表そう．ただし上付き T は転置を表す．また，以後，混乱が生じない限り，時間を表す「(t)」の表記を省略する．

式 (8),(11a),(11b) を以下のように表記する．

$$\boldsymbol{dx} = \boldsymbol{b}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{u})dt + \boldsymbol{l}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{u})dq \tag{13a}$$

$$\boldsymbol{b}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{u}) := \begin{pmatrix} f(k) - c - g - m_2 - \delta_1 k \\ -s \\ H(s,m_2) - \delta_2 N \end{pmatrix} \tag{13b}$$

$$\boldsymbol{l}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{u}) := \begin{pmatrix} -\Gamma(g,k,N)k - \eta f(k) - m_1 \\ \Omega(\zeta(k,z,N),m_1) \\ 0 \end{pmatrix} \tag{13c}$$

現在期価値最適値関数 $\bar{V}(t,\boldsymbol{x}(t))$ を次式により定義する．

$$\begin{aligned} \bar{V}(t,\boldsymbol{x}(t)) &= \max_{\boldsymbol{u}}[U(c(t))\exp(-\rho t)dt \\ &\quad + E[\bar{V}(t+dt,\boldsymbol{x}(t+dt))]] \end{aligned} \tag{14}$$

便宜上，任意の 3 変数のベクトル $\boldsymbol{v}$ と，$\boldsymbol{v}$ に関する勾配ベクトルに関して以下の表現を用いる．

$$\boldsymbol{v}^T := (v_1,v_2,v_3), \quad \boldsymbol{\nabla} := \left(\frac{\partial}{\partial k}, \frac{\partial}{\partial z}, \frac{\partial}{\partial N}\right) \tag{15a}$$

$$\boldsymbol{v}^T\boldsymbol{\nabla} := v_1\frac{\partial}{\partial k} + v_2\frac{\partial}{\partial z} + v_3\frac{\partial}{\partial N} \tag{15b}$$

当該期価値最適値関数を $V(\boldsymbol{x}(t))$ と表し，$V(\boldsymbol{x}(t)) = \bar{V}(t,\boldsymbol{x}(t))\exp(-\rho t)$ が成立しているとしよう．若干の計算により，以下のように Hamilton-Jacobi-Bellman(HJB) 方程式が得られる．

$$\rho V = \max_{\boldsymbol{u}}\left[U + (\boldsymbol{b}^T\boldsymbol{\nabla})V + \mu\{V(\boldsymbol{x}+\boldsymbol{l}) - V(\boldsymbol{x})\}\right] \tag{16}$$

3. 知識形成過程

(1) 最適化条件

各制御変数の 1 階の条件は以下のように導かれる．以後，表記の簡単化のため，V のみの表記は平常時の $V(\boldsymbol{x})$ を，V^+ の表記は災害時に状態変数がジャンプした後の $V(\boldsymbol{x}+\boldsymbol{l})$ を表すこととする．また，V, V^+ の右下に付される添え字は当該変数に関する偏微分を表すこととする．内点解を仮定すると，

$$c: \quad U' = V_k \tag{17a}$$

$$g: \quad -\mu V_k^+ \Gamma_g k = V_k \tag{17b}$$

$$m_1: \quad \mu V_z^+ \Omega_{m1} = \mu V_k^+ \tag{17c}$$

$$m_2: \quad V_N H_{m2} = V_k \tag{17d}$$

$$s: \quad V_N H_s = V_z \tag{17e}$$

各制御変数について，左辺は限界効用ないし限界効果を，右辺は限界費用を表す．V_k, V_k^+ はそれぞれ平常時，災害時の資産価格である．また，V_z, V_z^+ は OBL により得る事実の限界価値である．社会的価格と呼ぶこともできる．V_N, V_N^+ は知識の限界価値である．最適値関数の形がわかっているとすると，状態変数ベクトル $\boldsymbol{x}, \boldsymbol{x}+\boldsymbol{l}$ の値に対応した各価格はわかる．

式 (17b) より，防災対策 g の限界効果を財単位によって $R_g := -\mu\Gamma_g k$ と表そう．R_g を防災対策の期待限界減災効果と呼ぶことができる．R_g は資産価値と以下の関係をもつことがわかる．

$$\frac{1}{R_g} = \frac{V_k^+}{V_k} \tag{18}$$

$1/R_g$ は一単位の期待減災効果を得るために事前に投じる資源の量を表す．通常，災害後には資産の総量が減少するため資産価格は上昇する．よって，上式より $R_g < 1$ となり，式 (6b) より $R_{gg} < 0$ であるため，$R_g = 1$ を満たす g よりも大きな g が必要となることがわかる．災害後の資産価格の上昇を考慮に入れないと，防災対策の水準は過少に止まることになる．以後，災害後の資

産価格の増加率を

$$\pi := \frac{V_k^+}{V_k} - 1 \tag{19}$$

によって表すこととする．

条件 (17a)-(17e) を整理することにより，平常時と災害時の資源配分に関する以下の関係を得る．

$$V_k = U' = V_N H_{m2} = \frac{H_{m2}}{H_s} V_z \tag{20a}$$

$$V_k^+ = V_z^+ \Omega_{m1} \tag{20b}$$

平常時の研究資金 m_2 は，追加的 1 単位の資金が生み出す知識，すなわち研究の数 H_{m2} が，価格比 V_k/V_N に一致するように決められる．また災害時の調査資金 m_1 は，追加的 1 単位の資金が生み出す事実，すなわち新しい被災事例の数 Ω_{m1} が，災害時の価格比 V_k^+/V_z^+ に一致するように決められる．若干の計算により，m_1 と m_2 の配分比率は次式を満たすことがわかる．

$$\frac{\Omega_{m1}}{H_{m2}} = \frac{\pi+1}{\nu_z - \rho} \frac{\mu \Omega_\zeta \chi_1}{H_s} \tag{21a}$$

$$\text{where} \quad \nu_z := \frac{E[dV_z/dt]}{V_z} \tag{21b}$$

ν_z は事実の価格の期待成長率を意味する．上式は以下のように変形することができる．

$$\Omega_{m1} H_s = \Pi \cdot \mu \Omega_\zeta \chi_1 \cdot H_{m2} \tag{22}$$

ただし $\Pi := (\pi+1)/(\nu_z - \rho)$ は価格の成長率に関わる乗数をまとめた補正係数である．左辺は OBL に投じた資金が得る事実と，その事実が生み出す知識を表す．右辺は，今回の OBL による事実収集によって次回の OBL の生産性が減少する影響と，研究活動を支える資金を表しており，OBL から知識生産に至るまでのコストを表す．知識生産の産出と費用の両側面を捉えた財政を運営することが重要である．

(2)　知識と経済の成長過程

若干の計算により，資産価格と事実，知識の価格は以下の確率微分方程式にしたがって成長することがわかる．

$$\frac{dV_k}{V_k} = \left[\rho + \mu + \delta_1 - f' + \mu\left\{\Lambda - 1 - \frac{\Omega_\zeta}{\Omega_{m1}}\right\}\frac{V_k^+}{V_k}\right]dt + \left\{\frac{V_k^+}{V_k} - 1\right\}dq \tag{23a}$$

$$\frac{dV_z}{V_z} = \left[\rho + \mu + \mu\{\Omega_\zeta\chi_1 - 1\}\frac{V_z^+}{V_z}\right]dt + \left\{\frac{V_z^+}{V_z} - 1\right\}dq \tag{23b}$$

$$\frac{dV_N}{V_N} = [\rho + \mu + \delta_2 + \mu\left\{\left(\Gamma_N k + \frac{\Omega_\zeta}{\Omega_{m1}}\chi_2\right)(\pi+1)H_{m2} - \frac{V_N^+}{V_N}\right\}\Bigg]dt + \left\{\frac{V_N^+}{V_N} - 1\right\}dq \tag{23c}$$

$$\text{where} \quad \Lambda := \Gamma_k k + \Gamma + \eta f' \ (>0) \tag{23d}$$

Λ は資本蓄積がもたらす災害被害の限界的な増分を表す．期待成長率は以下のようになる．

$$\frac{E[dV_k/dt]}{V_k} = \rho + \delta_1 - f' + \mu\left\{\Lambda - \frac{\Omega_\zeta}{\Omega_{m1}}\right\}\frac{V_k^+}{V_k} \tag{24a}$$

$$\frac{E[dV_z/dt]}{V_z} = \rho + \mu\Omega_\zeta\chi_1\frac{V_z^+}{V_z} \tag{24b}$$

$$\frac{E[dV_N/dt]}{V_N} = \rho + \delta_2 + \mu\left(\Gamma_N k + \frac{\Omega_\zeta}{\Omega_{m1}}\chi_2\right)(\pi+1)H_{m2} \tag{24c}$$

ストックの価格タームで議論するとき，被害や費用に相当する項は成長率を増加させる．ストックが減少することによって当該ストックの希少性が増すからである．同様の理由により，知識の期待減災効果 $\mu\Gamma_N k\ (<0)$ は成長率を減少させる効果をもつ．

確率的 Euler 方程式と消費の期待成長率は次式のように表される．

$$\frac{dU'(c)}{U'(c)} = \left[\rho + \mu + \delta_1 - f' + \frac{\mu}{R_g}\left(\Lambda - 1 - \frac{\Omega_\zeta}{\Omega_{m1}}\right)\right]dt + \left\{\frac{1}{R_g} - 1\right\}dq \tag{25a}$$

$$\frac{E[dc/dt]}{c} = \frac{1}{R_r(c)}\left\{f' - \rho - \delta_1 - \frac{\mu}{R_g}\left(\Lambda - \frac{\Omega_\zeta}{\Omega_{m1}}\right)\right\} \tag{25b}$$

$$\text{where} \quad R_r(c) := -\frac{U''(c)c}{U'(c)} \ (>0) \tag{25c}$$

$R_r(c)$ は相対的危険回避度を表す．式 (25a) の右辺 2 行目のジャンプ項は πdq に等しい．よって災害時には消費の限界効用は資産価格と同率で上方にジャンプする．すなわち消費は下向きにジャンプする．一方，平常時においては，OBL に関する項 Ω_ζ/Ω_{m1} が消費の成長率を増加させる．Ω_ζ/Ω_{m1} によって消費の期待成長率も増加する．式 (9b)(9c) より，経済が成長して潜在的な想定外 ζ が多くなるほど，また災害調査に投じる資金 m_1 が増加するほど，消費の成長率は増加することがわかる．

4.　おわりに

自然災害がマクロ経済成長に与えるインパクトに関しては，それほど大きな負の影響はないといった実証分析の結果は少なくない．中には，災害が老朽化した施設の取り換えや新技術の導入の契機になる等の理由によって，正の経済成長効果をもたらすといった指摘も存在する．本研究も，自然災害リスクの存在が経済成長率を向上させる可能性があることを示すものである．ただし，本研究ではその成長エンジンを OBL，すなわち「経験による学習」に見出す．東日本大震災では，地震

と津波との複合災害や原子力発電事故など，経験によってしか学習しえない知見が得られている．起こった惨事が将来繰り返されないよう，この機会 (opportunity) の経験・知見を最も有効に利用するための調査・研究活動が求められる．本研究では，そのための資金の支出を経済成長によってバックアップすることを支持する理論フレームの作成を試みた．今後はキャリブレーションの方法について検討し，定量的な解を導く必要がある．

参考文献

1) Ueda, T., Ochi, S. and Yokomatsu, M.: Knowledge and Skill for Infrastructure Technology, *Selected Proceeding of 11th Uddevalla Symposium 2008 on Spatial Dispersed Production and Network Governance*, pp.537-552, 2008.
2) 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.
3) 角元惠理歌，横松宗太，岡田憲夫：防災知識の形成過程に着目した災害リスク下の地域経済成長モデル，第 43 回土木計画学研究発表会・講演集，83，2011.
4) 畑村洋太郎：失敗学のすすめ，講談社, 2000.
5) Romer, P.M.: Endogenous Technological Change, *Journal of Political Economy*, Vol.98, S71-S102, 1990.
6) Grossman, G., Helpman, E.: *Innovation and Growth in the Global Economy*, The MIT Press, 1991.
7) Jones, C.I.: Knowledge and the Theory of Economic Development, *Working Paper*, 2006.
8) Kremer, M.: The O-Ring Theory of Economic Development, *Quarterly Journal of Economics*, Vol.108, No.4, pp.551-576, 1993.
9) Stokey, N., Lucas, R.E.Jr. and Prescott, E.C.: *Recursive Methods in Economic Dynamics*, Harvard University Press, 1989.
10) Turnovsky, S.J.: *Methods of Macroeconomic Dynamics*, The MIT Press, 1995.
11) Albala-Bertrand, J.M.: *The Political Economy of Large Natural Disasters with Special Reference to Developing Countries* , Clarendon Press, Oxford, 1993.
12) Stewart, F., Fitzgerald, E.V.K.: *War and Underdevelopment*, Oxford University Press, Oxford, 2001.
13) Skidmore, M. and Toya, H.: Do Natural Disasters Promote Long-run Growth?, *Economic Inquiry*, Vol.40, Issue 4, pp.664-687, 2002.
14) Okuyama, Y.: Economics of Natural Disasters: A Critical Review, *Research Paper*, Regional Research Institute, West Virginia University, 2003.
15) Hallegatte, S, and Dumas, P.: Can natural disasters have positive consequences?: Investigating the role of embodied technical change, *Ecological Economics*, Vol.68, Issue 3, pp.777-786, 2009.