

火山災害と土砂採掘に着目した 確率的動学マクロ経済モデル

横松宗太¹・福島祐基²・岡田憲夫³

¹正会員 工博 京都大学防災研究所 (〒 611-0011 宇治市五ヶ庄)

E-mail: yoko@drs.dpri.kyoto-u.ac.jp

²非会員 工修 三菱東京 UFJ 銀行

³正会員 工博 京都大学防災研究所

インドネシア・メラピ地域では火山噴火が周辺地域に大きな被害を与えている。その一方で、噴火は経済資源として利用可能な土砂を発生させている。また、土砂資源を利用することで地域の経済発展が促されるのと同時に、土砂の過剰採掘による環境の悪化も問題になっている。したがって、地域の長期的発展のためには、防災対策と同時に、噴火により発生する土砂を適切にコントロールすることが必要となる。本研究では、火山災害リスク下の確率的経済成長モデルを定式化し、火山噴火とそれによる土砂資源の発生が現地の経済と環境に与える長期的影響を分析する枠組みを定式化する。そして、数値シミュレーションによって土砂採取や防災対策の長期的効果について分析する。

Key Words : *Volcanic disaster, Mt. Merapi, sand mining, economic growth*

1. はじめに

本研究ではインドネシアのメラピ火山リスクとその周辺地域の地域経済に着目する。メラピ火山は世界で最も活動的な活火山のひとつであり、噴火や溶岩流、火砕流、火山灰、土石流といった様々な火山現象を生じさせている。過去 200 年を平均すると、噴火が 5 年に 1 回、大規模な噴火が 14 年に 1 回の頻度で起こっており、特に最近の 50 年間には活発な噴火活動が見られる。2010 年 10 月に発生した噴火は、避難者が 20 万人を越える甚大な被害をもたらした。噴火活動によって生産された土砂は多くの土砂災害を引き起こし、現地の人々の脅威となっている。

その一方で、メラピ火山の噴火によって生産される土砂は魅力的な資源でもある。土砂資源はコンクリートの材料として不可欠であるが、近年では川砂利の採取を禁止する国が増え、良質な砂利の供給が減ってきている。メラピ火山が生産する土砂はコンクリートの材料として品質が良いため需要が大きい。そのため現地では土砂採掘活動が盛んに行われており、そこに多くの経済活動が生まれている。特に、産業が少なく貧しい農村部では本業ないしは副業として多くの住民が土砂採掘産業からの収入に頼って生活しており、現地の住民には欠かせない産業となっている。

このように土砂採掘産業は現地の経済を潤しているが、一方で公害や河床低下など過剰な土砂採掘によって引き起こされている問題も多い。中でも、違法な土

砂の過剰採掘による河床低下が招く砂防ダムの崩壊は災害リスクを増加させ、また同じく河床低下に起因する橋の崩壊、灌漑施設の無能力化は現地の社会経済に大きな被害を与えている。

以上のように、メラピ火山の噴火および土砂採掘産業はメラピ火山地域において多方面の影響を及ぼしている。現地において不可避である火山との共生や開発と環境のバランスといった問題を考える上で、噴火によって発生する資源をどのようにコントロールしていくかということを経期的な視点で考えていくことが重要になってくる。

本研究ではメラピ火山地域を対象としたマクロ経済成長モデルを用いて噴火と土砂採掘が現地経済に与える長期的な影響を分析する。モデルでは、地域の生産資本と土砂資源のストックを状態変数として扱う。両変数は火山災害がポアソン過程に従って到着するときに、それぞれ下方、上方にジャンプする。そして本研究ではそのような 2 状態変数のジャンプリスクの下での最適な生産・消費行動について分析する。さらに生産資本と土砂資源の 2 種類の状態変数により定義した最適値関数を通じて、火山災害リスク下での社会厚生水準を評価する枠組みを開発することを目的とする。以下、**2.**では 2 部門経済成長モデルを定式化し、最適値関数を導く。**3.**では数値シミュレーションを行い、防災投資や環境投資の効果について考察する。**4.**では本研究の成果を取りまとめるとともに、今後の課題について述べる。

2. 2部門経済成長モデル

(1) モデルの前提

本研究では閉鎖経済を対象とする。国内における産業を、合成財を生産する部門と土砂を生産する部門の2部門に分類する。本モデルでは合成財とは農業、工業が供給する財や、サービス業が供給するサービスなど、土砂以外のすべての財とサービスを含むものとする。

家計は消費 c と環境水準 z から効用を得ると仮定する。消費 c は各時点で合成財部門により供給される。一方、環境水準 z は経済のストック変数として、時間を通じて形成される。本モデルでは環境水準 z として、環境の中で土砂採掘により悪化する部分の水準のみに着目する。土砂採掘によって起こる被害の主なものは河川構造物付近での河床低下、トラックによる道路破損、事故増加、景観悪化などである。これらの環境被害の特徴は採掘禁止区域での採掘が行われることによって環境が大きく悪化するという点である。例えば、河川外の場所や河川構造物付近などで採掘が行われると、河川構造物付近の河床低下が促進され、橋や砂防ダム崩壊の危険性が大きくなる。また、トラックが広範囲を走ることとなり、より広範囲で騒音・振動の被害やトラックによる事故の危険性が増す。景観も悪化する。すなわち採掘禁止区域での採掘が環境悪化の大きな原因であるといえる。したがって、土砂の採掘が活発になり土砂資源ストックが少なくなるほど、環境には悪影響が現れる。反対に土砂資源ストックが多いほど環境悪化は抑制される。よって本研究では、モデルの単純化のため、環境水準 z を土砂資源ストックの水準を同一のものとする。以後、 z を「環境水準」と呼ぶこととするが、火山噴火によって土砂資源ストックが増加すれば「環境水準」が向上することを意味することに留意されたい。

本モデルでは社会計画者によるファーストベスト解を導出して、その性質を分析する。時点 t におけるイベントの順序を以下のように仮定する。

- (1) 災害が発生した場合、資産 $a(t)$ の一部が損壊し、土砂供給により環境水準 $z(t)$ が回復する。
- (2) 社会計画者は資産 $a(t)$ 、環境水準 $z(t)$ を確認する。
- (3) 財の消費水準、労働、資本の配分が決まる。
- (4) 合成財、土砂がそれぞれ $y_1(t)$ 、 $y_2(t)$ だけ生産され、合成財が $c(t)$ だけ消費される。
- (5) 次の時点で $a(t) + da(t)$ だけ資産が持ち越される。また $z(t) + dz(t)$ だけ環境水準が持ち越される。

合成財部門 ($j = 1$) と土砂部門 ($j = 2$) における生産技術はそれぞれ以下のように表わされる。

$$Y_1 := \min \left[F_1(K_1, L_1), \frac{Y_{11}}{a_{11}}, \frac{Y_{21}}{a_{21}} \right] \quad (1a)$$

$$Y_2 := \min \left[F_2(K_2, L_2), \frac{Y_{12}}{a_{12}} \right] \quad (1b)$$

$$\text{where } F_j(K_j, L_j) := a_j K_j^{\alpha_{j1}} L_j^{\alpha_{j2}} \quad (a_j > 0) \quad (1c)$$

$$\sum_{i=1,2} \alpha_{ji} = 1, \quad 0 < \alpha_{ji} < 1 \quad (j = 1, 2)$$

K_j 、 L_j はそれぞれ部門 j の生産に使用される資本と労働を表す。また、 $a_{j'j}$ は部門 j' から部門 j への中間投入係数であり、 $Y_{j'j}$ は部門 j' から部門 j への中間投入財の量を表す。ただし土砂の採掘に土砂は用いないものと考え、第2財から第2財への中間投入はないものと仮定する。上式より $Y_{j'j} = a_{j'j} F_j$ が従う。

本モデルでは時点0における対象地域の効率的労働量を1と基準化し、各部門の労働力の比を l_j で表す。また、各要素を効率的労働量で除した効率的労働者一単位あたりの量として以下のように表す。

$$y_j := \frac{Y_j}{AL}, \quad y_{j'j} := \frac{Y_{j'j}}{AL}, \quad k_j := \frac{K_j}{AL}, \quad l_j := \frac{L_j}{L} \quad (2a)$$

$$\text{where } A(t) = e^{xt}, \quad L(t) = e^{nt} \quad (2b)$$

$A(t)$ は技術水準、 $L(t)$ は労働人口であり、それぞれの成長率を $x, n (\geq 0)$ と仮定する。また、本経済では完全雇用が実現し、毎期ごとに蓄積された資産はすべて次の期の第1財(合成財)、第2財(土砂)の生産に使用されるとする。したがって、

$$l_1(t) + l_2(t) = 1 \quad (3a)$$

$$k_1(t) + k_2(t) = a(t) \quad (3b)$$

土砂はそれ自体が最終消費されることはなく、また資本財として蓄積されることもない。つまりその期に生産された土砂はすべて第1財の生産要素として中間投入にまわされるとする。

上述のように、本モデルでは社会的最適解を考える。すなわち社会計画者は完全な先見性を持ち、生涯期待効用水準を最大化するように毎時点の消費や貯蓄、資本、労働配分を決定すると仮定する。生涯期待効用水準は以下のように表される。

$$U(c(t), z(t)) := E \left[\int_0^\infty \left(\frac{b_1 c(t)^{1-\theta} + b_2 z(t)^{1-\theta}}{1-\theta} \right) e^{(n-\rho)t} dt \right] \quad (4)$$

$c(t)$ は一家計当たりの消費、 $z(t)$ は環境水準、 n は人口成長率、 ρ は時間選好率を表す。 $n < \rho$ と仮定する。また、災害は到着率 λ のポアソン過程 $q(t)$ に従って到着すると仮定する。資産 $a(t)$ と環境水準 $z(t)$ の遷移過程は以下のように表される。

$$da(t) = \{(1 - a_{11} - a_{12}a_{21})y_1(t) - c(t) - (n + \delta)a(t)\}dt - ha(t)dq \quad (5a)$$

$$dz(t) = \{-\gamma y_2(t) - \delta_z z(t)\}dt + \Omega z(t)dq \quad (5b)$$

$$dq = \begin{cases} 1 & \text{with prob. } \lambda dt \\ 0 & \text{with prob. } (1 - \lambda) dt \end{cases} \quad (5c)$$

式 (5a) の右辺の最終項は、災害の到着によって h ($0 \leq h \leq 1$) の割合の資本が失われることを表す。一方、式 (5b) の右辺第 1 項は、第 2 部門の生産すなわち土砂の採掘によって環境水準が減少することを表している。また、式 (5b) の右辺の最終項は、火山噴火による土砂供給によって $\Omega z(t)$ ($\Omega \geq 0$) の環境水準の増加が得られることを示している。 h, Ω は一定のパラメータとする。また、 δ, δ_z はそれぞれ資本、環境の減耗率を表す。

現在価値最適値関数は以下のように表される。

$$\bar{V}(t, a(t), z(t)) = \max[U(c(t), z(t))e^{(n-\rho)t} dt + E[\bar{V}(t+dt, a(t+dt), z(t+dt))]] \quad (6)$$

当該価値最適値関数 $V(a(t), z(t))$ は次式を満足する。

$$V(a(t), z(t))e^{(n-\rho)t} = \bar{V}(t, a(t), z(t)) \quad (7)$$

Hamilton-Jacobi-Bellman 方程式を以下のように得る。

$$\begin{aligned} (\rho - n)V(a(t), z(t)) &= \max[U(c(t), z(t)) \\ &+ V_a\{(1 - a_{11} - a_{12}a_{21})f_1(k_1(t), l_1(t)) \\ &- c(t) - (n + \delta)a(t)\} \\ &+ V_z\{-\gamma f_2(k_2, l_2) - \delta_z z\} \\ &+ \lambda\{V((1 - h)a(t), (1 + \Omega)z(t)) - V(a(t), z(t))\} \\ &+ \zeta(t)\{f_2(k_2(t), l_2(t)) - a_{21}f_1(k_1(t), l_1(t))\} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\text{where } V_a := \frac{\partial V(\cdot)}{\partial a(t)}, \quad V_z := \frac{\partial V(\cdot)}{\partial z(t)}$$

$\zeta(t)$ は時点 t に採掘された土砂の価値を意味する。ここで解析解を得るために $\alpha_{11} = \alpha_{21}$, $\alpha_{12} = \alpha_{22}$ と仮定し、 $\alpha_{11} = \alpha_{21} = \alpha$, $\alpha_{12} = \alpha_{22} = 1 - \alpha$ と表記することとする。このとき、当該期価値最適値関数は以下のように求まる。

$$V(a(t), z(t)) = \frac{B_1 a^{1-\theta} + B_2 z^{1-\theta}}{1 - \theta} \quad (9a)$$

where

$$B_1 := \left\{ \frac{\theta b_1^{\frac{1}{\theta}}}{\rho - n + (n + \delta)(1 - \theta) - \lambda((1 - h)^{1-\theta} - 1)} \right\}^{\theta} \quad (9b)$$

$$B_2 := \frac{b_2 + \frac{1-\theta}{\theta} H_1 b_2}{\{\rho - n + (1 - \theta) - \lambda((1 + \omega)^{1-\theta} - 1)\} H_2} \quad (9c)$$

$$H_1 := 1 + \frac{\alpha}{AB_1(\theta a_1 - \alpha a_2)(1 - a_{11} - a_{12}a_{21})} \quad (9d)$$

$$H_2 := \frac{1}{\theta} + \left(\frac{1}{\theta} - 1 \right) \frac{\alpha}{AB_1(\theta a_1 - \alpha a_2)(1 - a_{11} - a_{12}a_{21})} \quad (9e)$$

$$A := \frac{a_2}{a_{21}a_1 + a_2} \quad (9f)$$

$a(t)$ と $z(t)$ の潜在価値や最適な制御変数は以下のように求められる。

$$V_a(t) = B_1 a(t)^{-\theta} \quad (10a)$$

$$V_z(t) = B_2 z(t)^{-\theta} \quad (10b)$$

$$\zeta(t) = \frac{(1 - a_{11} - a_{12}a_{21})a_1 V_a + \gamma a_2 V_z}{a_{21}a_1 + a_2} \quad (10c)$$

$$k_1(t) = Aa(t) \quad (10d)$$

$$k_2(t) = (1 - A)a(t) \quad (10e)$$

$$l_1(t) = A \quad (10f)$$

$$l_2(t) = 1 - A \quad (10g)$$

$$y_1(t) = a_1 Aa(t)^\alpha \quad (10h)$$

$$y_2(t) = a_2(1 - A)a(t)^\alpha \quad (10i)$$

$$c(t) = \left(\frac{b_1}{B_1} \right)^{\frac{1}{\theta}} a(t) \quad (10j)$$

労働と資本の部門間の配分比率はともに $A : 1 - A$ で、時間を通じて一定となる。また、効用関数 (4) の下では、各時点の消費は資産水準 $a(t)$ に比例し、環境水準 $z(t)$ や環境に対する選好 b_2 からは独立となる。一方、各時点で採掘する土砂の経済価値 $\zeta(t)$ は、資産の潜在価値と土砂ストックの潜在価値の双方に依存することがわかる。

3. 数値シミュレーション

(1) パラメータの設定

本研究が対象地域とする 5 つの県が属するジョグジャカルタ特別州とセントラルジャワ州の 2008 年の実質 GRP(Gross Regional Product) の合計は 187 兆ルピア (207 億ドル) であり、主な産業は農業である。本章では 5 つの県の中で最も土砂採掘が盛んであるマゲラン県のデータを用いて数値計算を行う。そのためのパラメーターを以下のように設定する。可能な限り現場に近い地域のデータを用いるが、一部はインドネシア全土や日本のデータで補っている。より詳細な現地データの収集は今後の課題とする。まず、土砂採掘部門から合成財部門への中間投入係数 a_{21} について、マゲラン県のデータを用いて $a_{21} = 0.022$ とする。マゲラン県における土砂採掘の GRP における割合が 2.2% であることを参照している⁴⁾。合成財部門から合成財部門への中間投入係数 a_{11} については、現地の主な産業が農業であることからインドネシアの産業連関表⁵⁾のデータを用いて $a_{11} = 0.61$ とする。また、合成財部門から土砂採掘部門への中間投入係数 a_{12} については、日本の産業連関表⁶⁾のデータを用いて $a_{12} = 0.4$ とする。噴火の発生確率 λ については、14 年に 1 度大規模な噴火が起こっていることから $\lambda = 0.0714$ とする。人口成長率はセントラルジャワ州の 0.94% を採用する⁷⁾。資本減耗

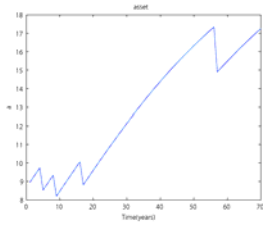


図-1 噴火が初期に集中する場合の $a(t)$

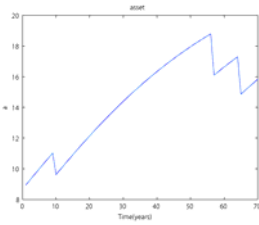


図-2 噴火が後期に集中する場合の $a(t)$

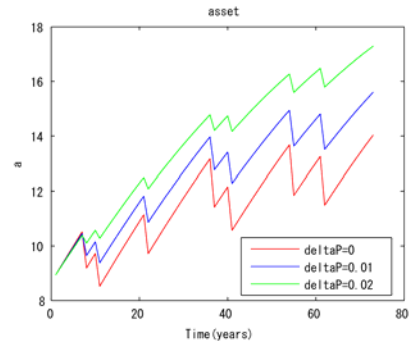


図-7 $A_P = 50$ の場合の $a(t)$ の変化

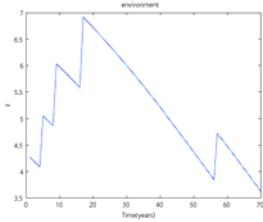


図-3 噴火が初期に集中する場合の $z(t)$

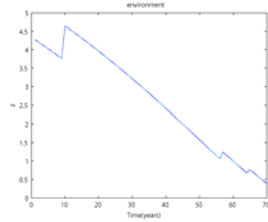


図-4 噴火が後期に集中する場合の $z(t)$

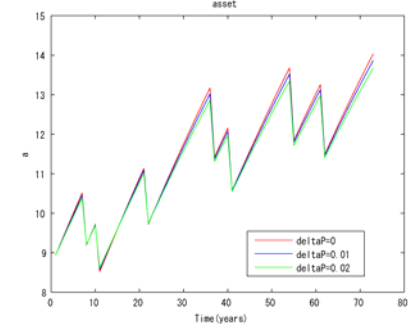


図-8 $A_P = 5$ の場合の $a(t)$ の変化

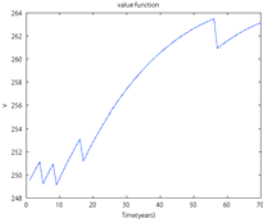


図-5 噴火が初期に集中する場合の $V(t)$

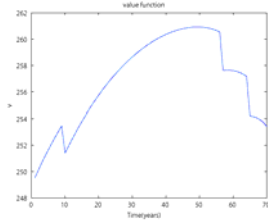


図-6 噴火が後期に集中する場合の $V(t)$

率 δ , 時間選好率 ρ はそれぞれ $\delta = 0.02$, $\rho = 0.04$ とする。また、2001 年のインドネシアの産業連関表を用いたキャリブレーションにより、資本集約度 α を $\alpha = 0.64$ とする。さらに対象とするマゲラン県の GRP とインドネシアの GDP の比を用い、マゲラン県の 2001 年の経済状況を再現するように第 1 財、第 2 財のスケールパラメータ a_1, a_2 , 2001 年の資本ストック $a(1)$ をそれぞれ $a_1 = 2.56$, $a_2 = 0.0166$, $a(1) = 9.9607$ (億ドル) と設定する。マゲラン県の人口は 111461 人⁸⁾, 利率は 15.48% (2001 年)⁹⁾, 人口成長率はマゲラン県が属するセントラルジャワ州の 1990 年から 2000 年の平均のデータを用いて 0.0094% と設定する。本数値計算では初期時点を 2001 年とする。

(2) 噴火のタイミングと成長過程

噴火が経済成長の初期に集中する場合と後期に集中する場合の資本 $a(t)$, 環境水準 $z(t)$, 最適値関数 $V(t)$

の成長曲線を図 1-6 に示す。図 1,2 より、噴火が起こると資本の一部が破壊されるため $a(t)$ は瞬間的に減少する。一方で定常状態から離れることにより、災害後の成長率は災害前と比べて大きくなる。また、図 3 より、噴火が初期に集中して起こった場合、土砂が生産される回数が多いため土砂資源量は増加していき、一度の災害によって増加する土砂資源量も増していく事がわかる。そのため土砂採掘の減少分より噴火による回復分のほうが大きくなり、噴火があまり起こらなくなった後期においても $z(t)$ の水準はそれほど低下していない。それに対して、図 4 より、後期に噴火が集中して起こった場合、土砂採掘により土砂資源量は減少していき、一度の噴火によって増加する土砂資源量も減っていく事がわかる。そのため後期には既に $z(t)$ の水準が下がってしまったため、立て続けに起こる噴火によっても土砂資源はあまり発生しない。その結果 $z(t)$ は初期値に比べて大きく減少し、生涯効用を表す最適値関数の値も後期に大きく減少することとなる。この結果は、噴火による土砂の発生量が土砂ストック $z(t)$ に比例するという、モデルの便宜的仮定に依存している。しかしながら、一度破壊された環境はなかなか回復しないという構造が現実には存在する場合には、上記の定性的構造が部分的にあてはまる。そして本結果は、全く同じ経済条件でも噴火が起こるタイミングによっては

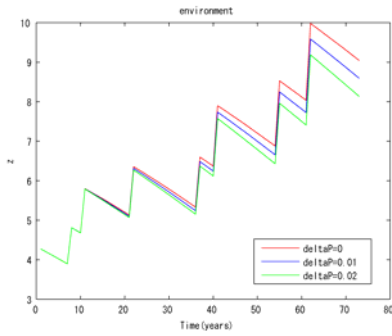


図-9 $A_P = 50$ の場合の $z(t)$ の変化

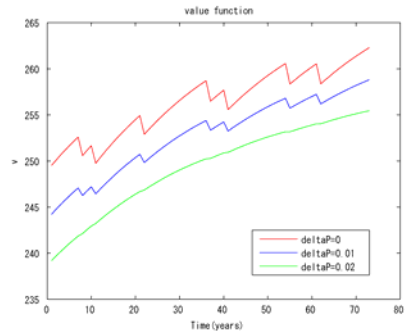


図-11 $A_P = 50$ の場合の $V(t)$ の変化

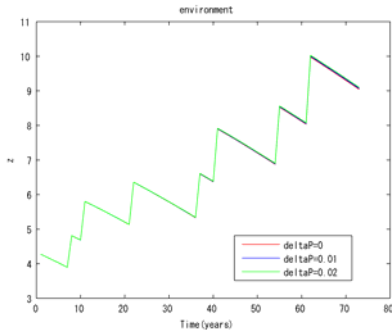


図-10 $A_P = 5$ の場合の $z(t)$ の変化

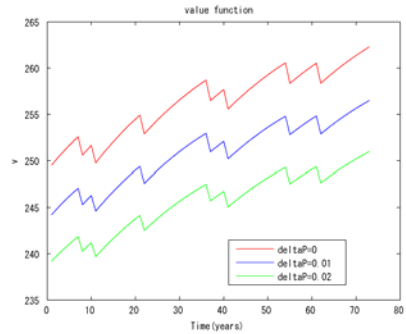


図-12 $A_P = 5$ の場合の $V(t)$ の変化

大きく異なった発展の経路を辿るという可能性を示している。すなわち土砂資源量が少ない状況下での採掘は、土砂資源が豊富な状況下での採掘に比べて長期的に環境水準に悪影響を及ぼす可能性がある。一時的にGDPが上がるからといって土砂資源量を考慮せずに土砂採掘を行うことは、長期的には効用を下げる可能性がある。

(3) 防災対策

ここでは各時点において $a(t)$ の一部を防災対策に充てることを考える。新たに防災力を表すパラメータを P ，防災対策支出を表すパラメータを $\delta_P (\geq 0)$ ，防災技術を表すパラメータを $A_P (\geq 0)$ と定義し，式 (5a) を以下のように書き直す。

$$da(t) = \{(1 - a_{11} - a_{12}a_{21})y_1(t) - c(t) - (n + \delta + \delta_P)a(t)\}dt - \frac{ha(t)}{P}dq \quad (11a)$$

$$P := 1 + A_P\delta_P \quad (11b)$$

すなわち毎年 $a(t)$ の δ_P の割合を防災対策に配分することにより防災力 P が向上し，噴火によって損壊する資産の割合が低下すると仮定する。

防災技術が高い場合と低い場合を比較するため， $A_P = 5$ と $A_P = 50$ の場合のそれぞれについて，現状以上の防災対策を行わない場合 ($\delta_P = 0$)，毎年 $a(t)$ の 1% を

防災対策に追加した場合 ($\delta_P = 0.01$)，毎年 $a(t)$ の 2% を防災対策に追加した場合 ($\delta_P = 0.02$) の 3 通りの分析を行う。それぞれの場合について $a(t)$ ， $z(t)$ ， $V(t)$ の成長曲線を図 7-12 に示す。赤線は $\delta_P = 0$ ，青線は $\delta_P = 0.01$ ，緑線は $\delta_P = 0.02$ の場合である。 $A_P = 5$ の場合，防災対策支出による資産 $a(t)$ の減少分のほうが噴火の被害軽減分より大きな影響をもち，結果として $a(t)$ の蓄積が減少している。すなわち防災技術が低い水準にある場合には防災対策の費用対効果が低く，目的とは反対の効果が出てしまう場合がある。それに対して $A_P = 50$ の場合には，より大きな防災対策を施すほど 70 年後の資本ストックが大きくなっており，意図した防災対策の効果が現れている。しかしながら図 11,12 をみると， $A_P = 50$ の場合においてさえ，防災対策を大きくするほど社会厚生が下がっている。これは防災対策によって $a(t)$ が増加することにより土砂採掘量 $y_2(t)$ も増加し，その結果 $z(t)$ の水準が下がるからである。防災投資が資本ストックの蓄積と生産の成長を促すことによって自然資源の過剰採取をもたらし，環境水準が低下することにより効用が下がっている。このことは過剰防災投資が資源の無駄使いとなり効用が下がるという通常の見解とは異なる，過剰防災投資のもう一つの側面を指摘している。

次いで，噴火の規模に関して防災対策効果を比較す

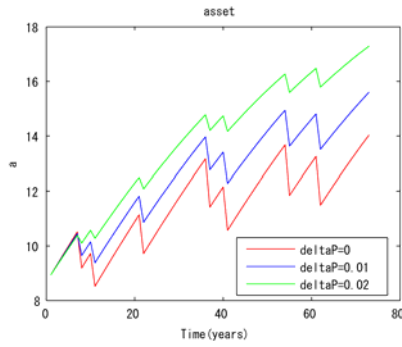


図-13 $h = 0.15$ の場合の $a(t)$ の変化

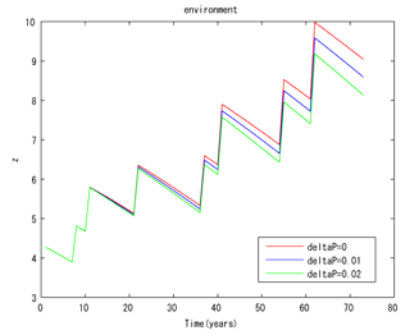


図-15 $h = 0.15$ の場合の $z(t)$ の変化

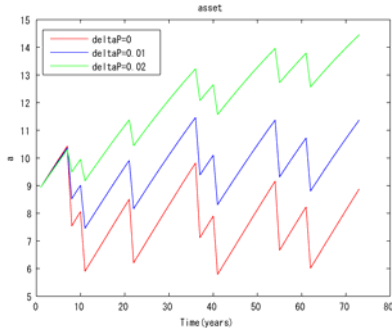


図-14 $h = 0.3$ の場合の $a(t)$ の変化

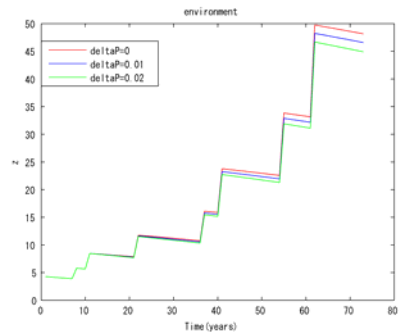


図-16 $h = 0.3$ の場合の $z(t)$ の変化

る。 $h = 0.15$ と $h = 0.3$ のそれぞれの場合について、同様に $\delta_P = 0, 0.01, 0.02$ の3つの防災対策を採用した場合の $a(t)$, $z(t)$, $V(t)$ の成長曲線を図 13-18 に示す。図 18 より、 $h = 0.3$ の場合、噴火直後は防災対策が大きいほうが効用が大きくなっていることが分かる。これは一定以上の噴火の規模であれば防災対策によって効用を上げることが可能であるということを示している。また、図 17 と図 18 の間で $\delta_P = 0.02$ の経路を比較すると、後期の効用はほとんど変わらないことが見て取れる。このことは、適切な防災対策を行えば噴火の規模が上昇した場合でも $V(t)$ を下げずにすみ、場合によっては $V(t)$ を上げることすらできるという可能性を示している。このことは、噴火には土砂資源が得られるという正の側面があることに着目した本研究の特徴を表すものである。

(4) 環境の回復

ここでは各時点において $a(t)$ の一部を環境の回復に充てることを考える。新たに環境回復力、環境投資、環境回復技術を表すパラメータをそれぞれ E , δ_E , A_E と定義し、式 (5a),(5b) を以下のように書き直す。

$$da(t) = \{(1 - a_{11} - a_{12}a_{21})y_1(t) - c(t) - (n + \delta + \delta_E)a(t)\}dt - ha(t)dq \quad (12a)$$

$$dz(t) = \{-\gamma y_2 - \delta_z + E\}z(t)dt + \Omega z(t)dq \quad (12b)$$

$$E := A_E \delta_E \quad (12c)$$

すなわち毎年 $a(t)$ の δ_E の割合を環境対策に配分することにより環境回復力 E が向上し、毎時 $z(t)$ の一定の割合だけ環境水準が回復すると仮定する。図 19-21 に環境回復投資を行った場合の $a(t)$, $z(t)$, $V(t)$ の成長曲線を示す。赤線は $\delta_E = 0$ 、青線は $\delta_E = 0.01$ 、緑線は $\delta_E = 0.02$ の場合である。図 19,20 から、環境投資が大きいほど $a(t)$ は小さく、 $z(t)$ は大きいことが分かる。特に後期になるほど $z(t)$ に差が付き、その一方 $a(t)$ はそれほど変わらないため長期的には環境投資を行ったほうが効用が大きくなることがわかる。

また、図 22 では $b_2 = 0.2$ を $b_2 = 0.3$ に変更し、環境への意識が上がった社会における $V(t)$ の成長曲線を示す。環境への意識が上がった社会では、環境投資はより大きな効果をもつ。以上より、一定以上の環境への関心と環境回復技術の下では長期的には環境投資を行った方が効用が大きくなることがわかる。このことは、土砂採掘量を減らすか、不確実な噴火に依存するかでしか環境対策がとれなかった社会が、床固めなどの、自発的に環境を回復する技術を獲得することによって効用を増加させられる可能性を示している。

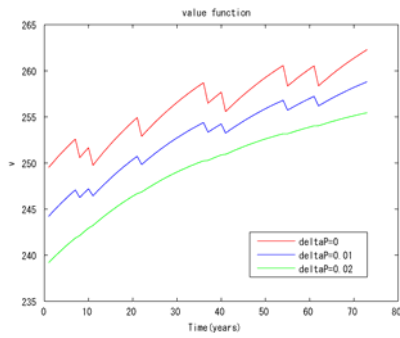


図-17 $h = 0.15$ の場合の $V(t)$ の変化

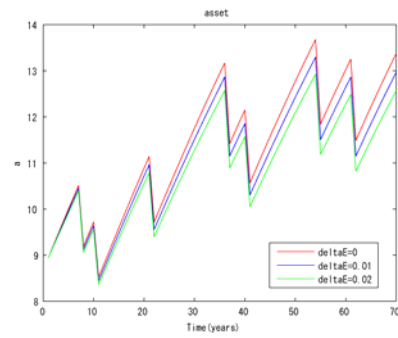


図-19 環境投資を行った場合の $a(t)$

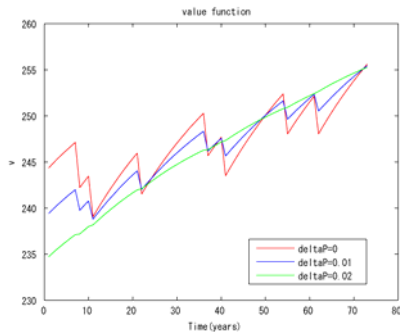


図-18 $h = 0.3$ の場合の $V(t)$ の変化

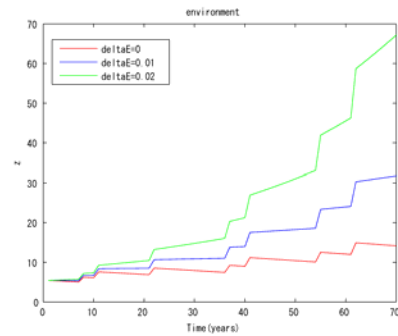


図-20 環境投資を行った場合の $z(t)$

(5) 噴火時の土砂の大量採掘

本稿の冒頭で述べたように、噴火の直後には、砂防ダムの容量回復のためや、農地などの生産手段を失った人々が生計をたてるためといった様々な理由から土砂採掘量が増加する。ここではそのような噴火時の土砂の大量採掘について考える。噴火時において、社会は $y_2(t)$ に加えて $\delta_m \Omega z(t)$ だけ土砂を採掘するとする。この $\delta_m \Omega z(t)$ の分を「追加採掘」と呼ぶこととする。そして $\delta_m \Omega z(t)$ を域外に売却することで資本財に変えることが可能であると仮定する。このとき土砂を資本財に変えるレートを p_s とする。 p_s は時間を通じて一定と仮定する。式 (5a),(5b) を以下のように書き直す。

$$da(t) = \{(1 - a_{11} - a_{12}a_{21})y_1(t) - c(t) - (n + \delta)a(t)\}dt - \{ha(t) - p_s \delta_m \Omega\}dq \quad (13a)$$

$$dz(t) = \{-\gamma y_2 - \delta_z z(t)\}dt + (1 - \delta_m)\Omega z(t)dq \quad (13b)$$

噴火の規模が $h = 0.15$ と $h = 0.4$ のそれぞれの場合について、追加採掘を行わない場合 ($\delta_m = 0$)、災害時に発生した土砂資源の半分を追加採掘する場合 ($\delta_m = 0.5$)、災害時に発生した土砂資源のすべてを追加採掘する場合 ($\delta_m = 1$) の $a(t)$ 、 $z(t)$ 、 $V(t)$ の成長曲線を図 23-28 に示す。赤線は $\delta_m = 0$ 、青線は $\delta_m = 0.5$ 、緑線は $\delta_m = 1$ の場合である。図 23,24 より、 $h = 0.4$ の場合、発生し

た土砂資源の半分を追加採掘した場合 ($\delta_m = 0.5$) は 60 年後の資本ストックが $h = 0.15$ の場合と比較して約 5 億ドルの減少で済んでいるのに対し、追加採掘を行わない場合 ($\delta_m = 0$) は約 7.4 億ドルも減少する。また、噴火の規模が小さい場合 ($h = 0.15$) には土砂資源の追加採掘を行うと長期的な効用は追加採掘を行うほど低くなる。これは噴火による $z(t)$ の回復が小さくなり、さらに $a(t)$ が増加すると土砂採掘量 $y_2(t)$ の増加を通じて $z(t)$ の減少が加速されるからである。一方噴火の規模が大きい場合 ($h = 0.4$) には図 28 から長期的な効用は発生した土砂資源の半分を追加採掘する場合 ($\delta_m = 0.5$) が最も高いことが分かる。これは噴火の規模が大きい場合には噴火時の $z(t)$ の回復が大きく、また $a(t)$ の被害も大きいので、適度な追加採掘を行って豊富な土砂資源を資本に変えることでより大きな効用が得られるからである。以上より、噴火時における適切な水準の追加採掘は、災害後の貧困の畏を抜け出すためのビッグプッシュと同様の役割を果たすことが期待できる。しかしその際には、将来の環境水準を考慮に入れて、災害の規模に対応した適切な水準を選択することが重要となる。

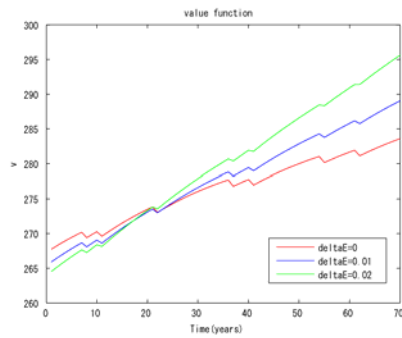


図-21 環境投資を行った場合の $V(t)$

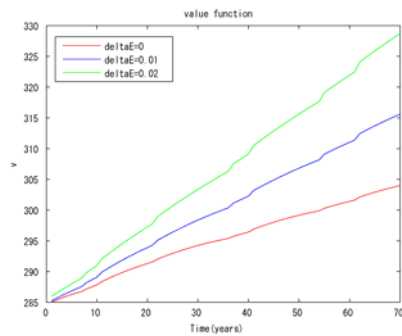


図-22 環境投資を行った場合の $V(t)$ ($b_2 = 0.3$)

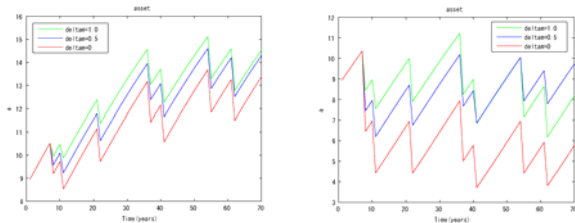


図-23 $h = 0.15$ の場合の $a(t)$ の変化

図-24 $h = 0.4$ の場合の $a(t)$ の変化

4. おわりに

本研究ではインドネシア・メラピ火山地域において火山の噴火が資本を破壊すると同時に資源を生み出すという特徴に着目し、確率的経済成長モデルを用いて火山噴火とそれによる資源利用が現地の経済と環境へ与える長期的影響を定量的に分析する手法を示した。また、人々が環境からも効用を得ているという事実に着目し、資源を生み出す側面をもつ災害が現地の経済と環境に与える長期的影響について分析した。数値解析では、災害の規模やタイミング、環境への意識を変えた複数のシナリオを用意し、それぞれの場合においてどのような対策をとれば社会厚生が高められるかを検討した。その結果、防災技術が一定水準以上であれば、

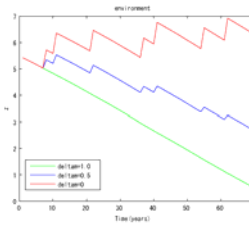


図-25 $h = 0.15$ の場合の $z(t)$ の変化

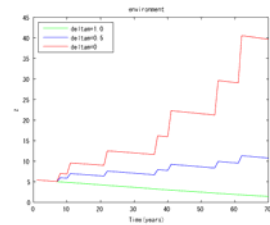


図-26 $h = 0.4$ の場合の $z(t)$ の変化

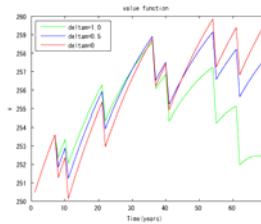


図-27 $h = 0.15$ の場合の $V(t)$ の変化

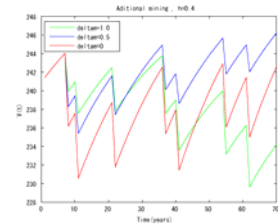


図-28 $h = 0.4$ の場合の $V(t)$ の変化

噴火の規模が大きければ防災対策が有効であることが確認された。それに対して、噴火の規模が小さければ、大きな防災対策は生産の増加と土砂採掘の増加を通じて、結果的に環境水準が下がる結果を導く可能性があることが判明した。また、環境への意識が高い場合や、噴火の規模が小さい場合には環境回復投資が有効であることが確認された。さらに、環境悪化を促進すると懸念されている噴火時の追加採掘は、適切な量を守れば被災後の経済の停滞を抜け出すビッグプッシュとしての役割を果たす可能性があることが示された。なお、本研究は今後には多くの課題を残している。第一に、本モデルでは数学的扱いの簡単化のために、 $\alpha_{11} = \alpha_{21}$ という仮定や、噴火時に発生する土砂資源量が $z(t)$ に比例するという仮定を設けた。その仮定を外した数値解析を行う必要がある。第二に、市場均衡問題や開放経済モデルへの拡張が必要である。第三に、現地のより正確なデータを収集して、より正確なパラメータ設定を行う必要がある。

参考文献

- 1) WHO: Mt. Merapi Volcano Eruption, Central Java Province, Republic of Indonesia, Emergency Situation Report, ESR (6) 9, November 2010.
- 2) Ikhsan, J.: Study on Integrated Sediment Management in an Active Volcanic Basin, Ph.D. dissertation, Kyoto University, 2010.
- 3) Voight, B., Constantine, E.K., Siswawidijoyo, S. and Torley, R.: Historical eruptions of Merapi volcano, Central Java, Indonesia, 1768-1998, Journal of Volcanology and Geothermal Research, Vol.100, pp.69-

138,2000.

- 4) DGWR, Ministry of Settlement and Regional Infrastructure, Republic of Indonesia: Review master plan study on Mt. Merapi, Supporting Report[F] Socio-Economy
- 5) GTAP Data Base HP: <https://www.gtap.agecon.purdue.edu/databases/v6/default.asp>
- 6) 財団法人総合研究開発機構 HP: <http://www.nira.or.jp/past/menu2/index.html>
- 7) インドネシア統計局 HP: <http://dds.bps.go.id/eng/>
- 8) Mongabay.com HP: <http://population.mongabay.com/population/indonesia>
- 9) Trading Economics HP: <http://www.tradingeconomics.com/indonesia/deposit-interest-rate-percent-wb-data.html>

(平成 23 年 5 月 5 日 受付)