災害後の瓦礫を考慮した
復興過程の空間均衡に関する一考察

横松宗太[1]

[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

本研究では大災害後に大量に発生する瓦礫が復興の妨げとなる問題に着目する．瓦礫を撤収し，ある地点に集積するスケジュールの決定は，復興住宅を再建するスケジュールや場所の決定と関連している．本研究では瓦礫を除去・集積しながら住宅を再建する問題を，瓦礫を負のストック変数と捉えた最適制御問題として定式化する．そして各ストックのシャドウ・バリューの構造について示すとともに，瓦礫が地点間の復興格差の要因となりえることを示す．

Key Words : *Disaster debris, recovery process, optimal control, shadow value*

1.　はじめに

東日本大震災では東日本の太平洋沿岸部を中心に，13 道県にわたり災害廃棄物約 2,000 万トンと津波堆積物約 1,100 万トンが発生した[1)]．それらの処理は，福島県の一部地域を除いて，2014 年 3 月末に完了した．災害廃棄物の 8 割強にあたる約 1,606 万トンと津波堆積物のほぼ全量にあたる約 999 万トンが再生利用されている．災害廃棄物の津波堆積物（以下,「瓦礫」と総称する）の多くは，被災以前は生産設備や家屋としての価値をもつストックであった．そして，再生利用が可能であれば，瓦礫となった状態においても経済的価値をもっている．したがって，災害リスク下において資本や資産を形成したり，損壊して瓦礫となった資源を再利用したりする問題は，時間軸上のストックのコントロールの問題である．

瓦礫は空間的な問題も引き起こす．住宅や工場，商業施設を復興するためには，瓦礫を撤去する必要がある．建物を再建するためには，まずは瓦礫を取り除いて整地をしなければならない．東日本大震災の被災地のように，新しい災害想定に基づいて新しい街がつくられるとき，どのエリアを優先的に整地して，どのエリアに瓦礫を集積するかを決定する問題は，どのように復興まちづくりを進めるかを決定する問題と関連している．換言すると，瓦礫撤去のための人材や資材を優先的に配分されない地域や，瓦礫の集積所となる地域は復興が遅れることになる．また，復興住宅の建設計画においては，地区ごとの集団移転などのように，地域コミュニティの人々が近いところに居住して，引き続き協力して生活できる環境をつくることが考慮される．すなわち人々は互いに近いところに住むことによって厚生が高くなる．

本研究では，以上のように時間的・空間的に複雑な相互依存構造をもつ問題の中から，瓦礫撤去と住宅再建の空間的な計画問題のみを取り上げて，単純な線形空間モデルを定式化する．各地点の瓦礫ストックと住宅ストックの最適制御ルールを導出するとともに，両ストックのシャドウ・バリューの構造について分析する．

2.　モデル

原点を海岸線とした離散的な線形空間を考える．ある被災地域の各地点は $x(=\{1,2,\cdots,X\})$ により表されるものとする．地点 1 が海岸に最も近く，地点 X が最も内陸にある．いま，地点 1 から X までの空間が災害によって瓦礫に覆われ，復興計画の対象になっている．また，災害発生時点を $t=0$ として，そこから無限の将来までの連続的な時間軸を考える．

災害発生時点 0 において，N 人の家計が自宅を失い，避難所での生活を始めるものとする．家計はいずれかの時点で仮設住宅に移り，復興住宅に入居するまでそこで生活する．本モデルでは，簡単化のため，避難所と仮設住宅の相違については考慮せず，以下では表現を「仮設住宅」に統合する．仮設住宅は復興対象地域の外にあるものとする．時点 t において，仮設住宅で生活する家計数を $n_0(t)$ と表す．また，地点 x に再建された住宅に居住する家計数を $n(x,t)$ と表現する．地域全体での人口の変化はないものとする．よって次式が成

立する．

$$n_0(t)+\sum_{x=1}^{X} n(x,t)=N \tag{1a}$$

$$n_0(0)=N,\ \ n(x,0)=0\ \text{ for all } x \tag{1b}$$

時点 t における地点 x の瓦礫ストックを $g(x,t)$ により表す．時点 0 で災害によって与えられた瓦礫の分布を $g_0(x)$ とする．各地点の瓦礫ストックの水準は次式に従って変化するものと仮定する．

$$\dot{g}(x,t)=-\gamma(x,t)+\xi(x,t) \tag{2a}$$

$$g(x,0)=g_0(x) \tag{2b}$$

$$\gamma(x,t)\geq 0,\ \ \xi(x,t)\geq 0 \tag{2c}$$

$$\gamma(x,t)\cdot\xi(x,t)=0\ \text{ for all } x,t \tag{2d}$$

$$\sum_{x=1}^{X}\gamma(x,t)=\sum_{x=1}^{X}\xi(x,t) \tag{2e}$$

「˙」は時間 t による微分を表す．$\gamma(x,t)$ は瓦礫撤去量を表す．$\xi(x,t)$ は瓦礫の流入量であり，他の地点から撤去された瓦礫が地点 x に置かれることを意味する．両変数は非負であるが，両方が同時に正になることはない．また，本モデルでは，瓦礫は対象地域内で移動して，ある地点に集積されるのみとする．対象地域外への移動や最終処分，再生利用については考慮しない．式 (2e) は地域内で瓦礫の総和が保存されることを表す．

瓦礫の撤去作業にはボランティアを含む労働や，重機やシャベルカーやトラックなどの資材を必要とする．任意の１時点において，地域が使用できる人材と資材の総量を L とする．簡単化のためそれらを併せて「労働」と呼び，１次元の変数 $l(x,t)$ で表現する．各地点の瓦礫の撤去量は以下の関数で与えられる．

$$\gamma(x,t)=\Omega(l(x,t))\ \text{for all } x \tag{3a}$$

$$\Omega'(l(x,t))>0,\ \ \Omega''(l(x,t))<0 \tag{3b}$$

$$\sum_{x=1}^{X} l(x,t)\leq L \tag{3c}$$

「$'$」と「$''$」は，それぞれ１変数関数における当該変数による１階微分と２階微分を表す．

時点 t における地点 x の住宅ストックを $h(x,t)$ により表す．初期時点すなわち災害直後における住宅ストックはゼロとする．また，住宅の規格は均一とし，１単位の住宅に１人の家計が入居するものとする．したがって次式が成り立つ．

$$h(x,t)=n(x,t)\ \text{ for all } x,t \tag{4}$$

住宅ストックの蓄積は次式に従うものとする．

$$\dot{h}(x,t)=z(x,t) \tag{5a}$$

$$h(x,0)=0,\ \ z(x,t)\geq 0\ \text{ for all } x,t \tag{5b}$$

$z(x,t)$ は住宅建設の水準を表す．また住宅建設に要する費用を関数 $\phi(z,g,h)$ により表す．すなわち建設費用は調整費用[3)4)]を含み，それは建設地点 x における瓦礫ストック $g(x,t)$ や住宅ストック $h(x,t)$ に依存する．瓦礫が多いほど，建設には追加的な費用が生じる．また，通常，住宅は土地の条件が良いところから建てられるので，既に多くの住宅が建っている地点ほど，新しい建設にはより大きな費用がかかることがある．以上より，関数 $\phi(z,g,h)$ は以下の性質を満たすものとする．

$$\phi(z,0,0)=z, \tag{6a}$$

$$\phi(z,g,h)\geq z\ \text{ for } g>0,\ h>0 \tag{6b}$$

$$\phi_z(\cdot)>0,\ \ \phi_g(\cdot)>0,\ \ \phi_h(\cdot)\geq 0 \tag{6c}$$

$$\phi_{zg}(\cdot)>0,\ \ \phi_{zh}(\cdot)\geq 0 \tag{6d}$$

ただし $\phi(\cdot)$ の右下の添え字は当該変数に関する偏微分を表すものとする．二つの添え字がある場合は二つの変数に関する交差偏微分であり，例えば $\phi_{zg}(\cdot):=\partial^2\phi(\cdot)/\partial z\partial g$ を意味する．

最後に，地域がもつ合成財ベースの資産ストックを $A(t)$ により表す．資産 $A(t)$ は住宅やインフラのような復興の対象となる物的資産以外の財のストックとする．貯金等の金融資産と考えてもよい．貯蓄は地域の外部で行われ，単位時間当たり ρ の利子率により利子を得るものとする．資産 $A(t)$ の蓄積過程は以下に従う．

$$\begin{aligned}\dot{A}(t)=&\ \rho A(t)+Y-Nc(t)\\ &-\sum_{x=1}^{X}\phi(z(x,t),g(x,t),h(x,t))\end{aligned} \tag{7a}$$

$$A(0)=A_0 \tag{7b}$$

$\rho A(t)$ は利子所得を，Y は地域家計の労働所得の和を表す．また，$c(t)$ は１人あたりの消費水準を表す．本モデルでは瓦礫と住宅のストックのコントロールの問題に関心を集中するため，対象地域内での生産は考えない．よって家計は毎期，地域の外で所得 Y を得て，財 $Nc(t)$ を購入するものとする．式 (7a) の右辺第４項は建設にかかる費用の和である．

時点 t の社会厚生を次式によって評価する．

$$\begin{aligned}U(t):=&\ Nu_c(c(t))+\left\{\sum_{x=1}^{X}n(x,t)\right\}u_h(\sigma^2(\mathbf{n}(x,t)))\\ &+n_0u_h^0(n_0(t))\end{aligned} \tag{8}$$

$u_c(\cdot)$ は消費に関する効用関数であり，消費水準 $c(t)$ に依存する．一方，$u_h(\cdot)$ は住宅に関する効用を表す．既述のように，個々の住宅の規格は１で一律であるものとする．一方，居住の効用は，地域の人々がどのくらい近隣に住むかにも依存し，人々の立地の分散 $\sigma^2(\mathbf{n}(x,t))$ に関して減少関数であると仮定する．$\sigma^2(\cdot)$ は次式により与えられる．

$$\mathbf{n}(x,t):=(n(1,t),n(2,t),\cdots,n(X,t)) \tag{9a}$$

$$M_1(t):=\frac{\sum_x x\cdot n(x,t)}{\sum_x n(x,t)} \tag{9b}$$

$$M_2(t) := \frac{\sum_x x^2 \cdot n(x,t)}{\sum_x n(x,t)} \tag{9c}$$
$$\sigma^2(\mathbf{n}(x,t)) = M_2(t) - (M_1(t))^2 \tag{9d}$$

$M_1(t)$ は居住地点に関する平均であり，$M_2(t)$ は 2 次のモーメントを表す．

また式 (8) の $u_h^0(\cdot)$ は仮設住宅の効用を表す．社会厚生関数の各部分効用関数は以下の性質をもつものと仮定する．

$$u_c'(c) > 0, \quad u_c''(c) < 0 \tag{10a}$$
$$u_h(\sigma^2) > u_h^0(N) \quad \text{for } \sigma^2 \leq {}^{\exists}\bar{\sigma}^2 \tag{10b}$$
$$u_h'(\sigma^2) < 0, \quad u_h^{0\prime}(n_0) \leq 0 \tag{10c}$$

復興住宅が完成すると，そこに入居する住民の生活水準は向上する．式 (10b) は，立地に関する空間的な孤立の程度がある水準以下であれば，復興住宅への入居が効用を上げることを保証している．それと同時に，仮設住宅の居住者が少なくなってくると，残された人の気持ちが滅入ってくることも指摘されている．式 (10c) の右の条件はその事実を反映している．

計画者は無限の将来に亘る社会厚生の現在価値を最大化するものとする．社会的最適化問題は以下のように表される．

$$\max \ W(0) := \int_0^\infty U(t) \exp(-\rho t) dt \tag{11a}$$
subject to

Eq.(1a),(1b), (2a)-(2e),(3a),(3c),

Eq.(4),(5a),(5b), (7a),(7b)

$$\lim_{t\to\infty} \lambda_A(t) \exp(-\rho t) \cdot A(t) = 0 \tag{11b}$$
$$\lim_{t\to\infty} \sum_{x=1}^{X} h(x,t) = N \tag{11c}$$

$\lambda_A(t)$ は当該期価値で表した金融資産のシャドウ・バリューを表す．よって終端条件式 (11b) は No-Ponzi-Game 条件を表す．また，終端条件式 (11c) は，いずれ住民の全てが仮設住宅を出て復興住宅に居住する条件を意味する．

3. 最適化条件

当該期価値ハミルトニアンは以下のように表される．

$$\begin{aligned}\mathcal{H}(t) = U + \lambda_A \Bigg[\dot{A} + \sum_x \Big\{ & q_h \dot{h} + q_g \dot{g} + \nu_h \cdot (h - n) \\ & + \nu_\gamma \cdot (\Omega(\cdot) - \gamma) + \varepsilon_z z + \varepsilon_\gamma \gamma + \varepsilon_\xi \xi \Big\} \\ & + \nu_L \cdot \left(L - \sum_x l \right) + \nu_\xi \cdot \left(\sum_x \gamma - \sum_x \xi \right) \\ & + \nu_N \cdot \left(N - \sum_x n - n_0 \right) \Bigg] \end{aligned} \tag{12}$$

以後，煩雑さを避けるために，混乱の生じない限り x や t の表記は省略する．上記のように，全てのシャドウ・バリュー（以下「SV」）を金融資産の SV である $\lambda_A(t)$ で基準化することとする．したがって，例えば住宅建設の SV は $\lambda_A q_h$ の積で与えられることになるが，以後は記載の簡単化のため，基準化された SV である q_h を単に「シャドウ・バリュー (SV)」と呼ぶこととする．

最適制御問題 (11a)-(11c) の状態変数は $A, \{h\}, \{g\}$ である．よって合計 $(2X+1)$ 個の状態変数の問題となる．一方，制御変数のリストは $c, \{z\}, \{\gamma\}, \{\xi\}, \{l\}, \{n\}, n_0$ となる．1 階の最適化条件を整理した結果を以下に示す．

消費水準

金融資産の SV と消費水準に関して以下の結果を得る．

$$\lambda_A(t) = \text{const.} := \bar{\lambda}_A \tag{13a}$$
$$u_c'(c) = \bar{\lambda}_A \quad \Rightarrow \quad c(t) = \text{const.} := \bar{c}(\bar{\lambda}_A) \tag{13b}$$

$\lambda_A(t)$ は時間を通じて一定となり，それによって $c(t)$ も一定となる．この結果は社会厚生の割引率が外生的な利子率と一致していることによるものである．一定である $\bar{\lambda}_A, \bar{c}$ の水準は，式 (7a) を終端条件式 (11b) の下で積分することにより得られる生涯予算制約式を満たすように決まる．

仮設と復興住宅のシャドウ・バリュー

人口の配分条件より，以下の関係を得る．

$$\nu_N(t) = u_h^0(n_0) + n_0 u_h^{0\prime}(n_0) \tag{14a}$$
$$\nu_h(x,t) = u_h(\sigma^2) + N_1 u_h' \sigma_n^2(\mathbf{n}) - \nu_N(t) \quad \text{for all } x \tag{14b}$$
$$\text{where } N_1(t) := \sum_x n(x,t) = N - n_0(t) \tag{14c}$$
$$\sigma_n^2(\mathbf{n}) := \frac{\partial \sigma^2(\mathbf{n})}{\partial n(x,t)} = \frac{1}{N_1} \{(x - M_1)^2 - \sigma^2(\mathbf{n})\} \tag{14d}$$

N_1 は復興住宅に住む家計の人数を，$\sigma_n^2(\mathbf{n})$ は立地の分散の $n(x,t)$ に関する偏微分を表す．$\nu_N(t)$ は仮設住宅の SV を意味する．式 (14a) の右辺第 1 項は仮設住宅に新規に加わる 1 人の家計の効用を表し，第 2 項は既に仮設住宅に住んでいる入居者全員が当該家計の加入から得る限界効用である．第 2 項はコミュニティが得る限界効用に相当する．本問題では，人口の保存条件にかかる随伴変数 $\nu_N(t)$ すなわち人口の SV が，仮設住宅入居の限界的な社会厚生と等価となる．

$\nu_h(x,t)$ は復興住宅の限界価値に相当する．式 (14b) の右辺第 1 項は限界的に復興住宅に入居する家計の効用を，第 2 項は復興住宅コミュニティの限界効用を表す．第 3 項の $-\nu_N(t)$ は仮設住宅にて失われる社会厚生である．復興住宅の SV はそれらを考慮したネットの限

界的な社会厚生によって与えられる．

なお，右辺第 2 項の復興住宅コミュニティの限界効用は正にも負にもなりうる．$\sigma_n^2(\mathbf{n})$ は 1 人の家計が地点 x に居住するときの分散の変化を意味する．式 (14d) より次式が従う．

$$x \leq M_1 - \sigma \ \text{ or } \ x \geq M_1 + \sigma \quad \Rightarrow \quad \sigma_n^2(\mathbf{n}) \geq 0 \tag{15a}$$

$$M_1 - \sigma < x < M_1 + \sigma \quad \Rightarrow \quad \sigma_n^2(\mathbf{n}) < 0 \tag{15b}$$

すなわち新しい立地点 x が平均からの 1 標準偏差の距離以上（未満）にあれば，立地の分散は大きく（小さく）なりコミュニティの限界効用は減少（増加）する．

復興住宅建設のシャドウ・バリュー

条件 (11c) より，無限の将来では全ての家計が復興住宅に入居しているため，さらなる住宅建設はなされない．$\nu_h(x,t)$ は有限の上限値に止まることから，$\lim_{t\to\infty} q_h(x,t) = 0$ である．そのことを考慮すると，住宅建設 $\dot{h}(x,t)$ の随伴変数 $q_h(x,t)$ は次式のように導かれる．

$$q_h(x,t) = \int_t^\infty \{\nu_h - \phi_h(z,g,h)\} \exp\{-\rho(t'-t)\} dt' \tag{16}$$

$q_h(x,t)$ は復興住宅建設の SV と解釈することができる．右辺の $\nu_h(x,t')$ は当該住宅がもたらす将来の各時点 t' の社会厚生を表す．また，$\phi_h(\cdot)$ は当該住宅がその後の住宅建設コストを増加させる影響を表している．したがって $q_h(x,t)$ は，最適計画経路上において，上記の二つの項を集計した現在価値として与えられる．

瓦礫のシャドウ・バリュー

瓦礫ストックの SV は次式のように導かれる．同様に，$\lim_{t\to\infty} q_g(x,t) = 0$ を考慮すると，

$$q_g(x,t) = \int_t^\infty \{-\phi_g(z,g,h)\} \exp\{-\rho(t'-t)\} dt' \ < 0 \tag{17}$$

すなわち瓦礫の SV は，それが将来にわたってもたらす建設費用の増分の現在価値に相当し，負の符号をもつものとなる．

瓦礫撤去の条件

瓦礫撤去作業が終息に向かう前の，全ての労働が作業に採用されている状況を対象とする．すなわち $\nu_L(t) \geq 0$ を仮定する．

i) 瓦礫が撤去される地点

$$l(x,t) > 0$$

$$\Leftrightarrow \ \varepsilon_l(x,t) = -\nu_\gamma \Omega_l(l) + \nu_L = 0 \tag{18a}$$

$$\Leftrightarrow \ \nu_\gamma(x,t) = \frac{\nu_L}{\Omega_l(l)} > 0 \tag{18b}$$

$$\Leftrightarrow \ \gamma(x,t) = \Omega(l) > 0 \ \ \& \ \ \xi(x,t) = 0 \tag{18c}$$

$$\Leftrightarrow \ \varepsilon_\gamma(x,t) = 0 \ \ \& \ \ \varepsilon_\xi(x,t) \geq 0 \tag{18d}$$

$$\Leftrightarrow \ \nu_\gamma(x,t) = -q_g + \nu_\xi > 0 \tag{18e}$$

$$\Leftrightarrow \ -q_g(x,t) > -\nu_\xi(t) \tag{18f}$$

$q_g(x,t)$ は時点 x に依存した瓦礫の SV である．一方，ν_ξ は x に依存しない変数で，社会全体での瓦礫の SV に相当する．式 (18f) は地点 x で瓦礫ストックを 1 単位減らすことの価値 $(-q_g(x,t))$ が，社会全体で瓦礫を 1 単位減らすときの価値 $(-\nu_\xi(t))$ を上回っていることを示している．そのような地点で瓦礫の撤去がなされる．すなわち瓦礫の他の地点への移動がなされる．また，式 (18e) に示すように，ここでは $\nu_\gamma(x,t)$ はそのネットの価値，すなわち地点 x での価値と社会全体の価値の差に一致する．

ii) 瓦礫が撤去されない地点

$$l(x,t) = 0$$

$$\Leftrightarrow \ \varepsilon_l(x,t) = -\nu_\gamma \Omega_l(0) + \nu_L \geq 0 \tag{19a}$$

$$\Leftrightarrow \ \nu_\gamma(x,t) \leq \frac{\nu_L}{\Omega_l(0)} \tag{19b}$$

$$\Leftrightarrow \ \gamma(x,t) = \Omega(0) = 0 \ \ \& \ \ \xi(x,t) \geq 0 \tag{19c}$$

$\nu_L(t)$ は，地点 x に依存しない，社会全体での労働の SV である．式 (19b) に示すように，瓦礫撤去の SV の $\nu_\gamma(x,t)$ が，限界生産性で評価した労働の SV よりも小さいとき，当該地点の瓦礫は撤去されない．以上の関係が満たされた上で，瓦礫の集積所となる地点では以下の関係が成り立つ．

$$\gamma(x,t) = 0 \ \ \& \ \ \xi(x,t) > 0 \tag{20a}$$

$$\Leftrightarrow \ \varepsilon_\gamma(x,t) \geq 0 \ \ \& \ \ \varepsilon_\xi(x,t) = 0 \tag{20b}$$

$$\Leftrightarrow \ q_g(x,t) = \nu_\xi(t) < 0 \ \ \& \ \ \varepsilon_\gamma(x,t) = \nu_\gamma \geq 0 \tag{20c}$$

社会全体の瓦礫の SV である $\nu_\xi(t)$ は，瓦礫集積点における $q_g(x,t)$ に等しい．

一方，瓦礫が放置されたままで，集積地にもならない地点では，条件 (19a)-(19c) に加えて以下の関係が成り立つ．

$$\gamma(x,t) = 0 \ \ \& \ \ \xi(x,t) = 0 \tag{21a}$$

$$\Leftrightarrow \ \varepsilon_\gamma(x,t) \geq 0 \ \ \& \ \ \varepsilon_\xi(x,t) \geq 0 \tag{21b}$$

$$\Leftrightarrow \ 0 < -q_g + \nu_\xi \leq \nu_\gamma \leq \frac{\nu_L}{\Omega_l(0)} \tag{21c}$$

瓦礫ストックの減少の SV である $(-q_g(x,t))$ は，社会全体の瓦礫処分の価値 $(-\nu_\xi(t))$ より大きい．それゆえ瓦礫の流入はなされない．しかし，$\nu_\gamma(x,t)$ が，基準化した労働の SV よりも小さいため，撤去作業に労働が投じられない状況になっている．

住宅建設ルール

住宅建設の意思決定は以下の関係を満たす．

$$z(x,t) > 0$$

$$\Leftrightarrow \ \varepsilon_z(x,t) = \phi_z(z,g,h) - q_h = 0 \tag{22}$$

一方，建設がなされないケースでは次式が成立する．

$$
\begin{aligned}
& z(x,t) = 0 \\
\Leftrightarrow\ & \varepsilon_z(x,t) = \phi_z(z,g,h) - q_h > 0
\end{aligned}
\tag{23}
$$

例えば住宅建設の費用関数が以下のような形をしていたとしよう．

$$
\phi(z,g,h) := z \cdot (1 + \kappa_1 g + \kappa_2 zg + \kappa_3 zh) \tag{24}
$$

この関数は式 (6a)-(6d) の条件を満たしている．限界費用は以下のようになる．

$$
\phi_z(z,g,h) = 1 + \kappa_1 g + 2(\kappa_2 g + \kappa_3 h)z \tag{25}
$$

このとき，式 (22),(23) の建設ルールは具体的に以下のように表現される．

$$
q_h(x,t) > 1 + \kappa_1 g \quad \Rightarrow \quad z(x,t) = \frac{q_h - 1 - \kappa_1 g}{2(\kappa_2 g + \kappa_3 h)} \tag{26a}
$$

$$
q_h(x,t) \leq 1 + \kappa_1 g \quad \Rightarrow \quad z(x,t) = 0 \tag{26b}
$$

すなわち式 (16) で与えられる住宅建設の SV が $1+\kappa_1 g$ よりも大きいときに建設が行われる．このとき，式 (26a) に示すように，住宅建設の件数は瓦礫 g の減少関数となる．一方，住宅建設の SV が $(1+\kappa_1 g)$ よりも小さいと建設が行われない．瓦礫 g が多いと，$q_h \leq 1+\kappa_1 g$ となるケースが多くなる．このことからも瓦礫の存在は地点間の復興の格差を助長することがわかる．

4. おわりに

東日本大震災後，被災した地域の間で復興の速度に差異が発生した．原因はいくつもある．本研究では，それらのうち，地域間で不均一にもたらされた瓦礫が格差の一因になりえることに着目した．そして各地点の瓦礫を負のストックと捉えた最適制御問題を定式化し，瓦礫ストックと復興住宅ストックのシャドウ・バリューの構造を明らかにするとともに，瓦礫撤去と住宅建設の最適ルールを導出した．それによって，種々の経済主体間のゲーム的状況ではない，社会計画問題においてさえ，地点間で復興格差が生じる可能性があることを示した．

瓦礫がもたらす復興の妨げや地域間外部性，さらには再利用の可能性を考慮するとき，資本や資産の真の価値（シャドウ・バリュー）は，通常市場で観察される資産価額とは異なったものとなる．実務において，災害の直接被害は，損壊したストックの資産価額によって評価されるが，さまざまな外部性を考慮するとき，ストック被害の評価は異なったものとなる可能性がある．そのとき，そのようなストックを護る防災施設の便益評価も異なったものとなる．

以上の可能性を検証するには数値計算が必要となる．多数のストック変数が存在する問題で，解析的に完全な最適経路を導出することは不可能である．今後は瓦礫処理問題に関わる本質的な要素を一つ一つモデルに取り入れていくと同時に，数値計算に取り組む予定である．

参考文献

1) 環境省: http://kouikishori.env.go.jp/disaster_waste/progress/
2) Ekici, Siddik, David A. McEntire, and Richard Afedzie: Transforming debris management: considering new essentials, Disaster Prevention and Management: An International Journal Vol.18, No.5, pp.511-522, 2009.
3) Eisner, Robert, and Robert H. Strotz: Determinants of business investment, in Commission on Money and Credit: Impacts of Monetary Policy, Prentice-Hall, 1963.
4) 朱保華: 投資関数の理論, 九州大学出版会, 1995.

(平成 27 年 4 月 24 日 受付)