

# 防災投資の経済評価の考え方

岐阜大学工学部 上田孝行\*  
岐阜大学工学部 森杉壽芳\*  
岐阜大学大学院 高木朗義\*\*

本論文は災害をある生起確率のもとで実現する環境水準と経済活動制約として捉え、防災投資はそれらの3要素の水準を改変する行為であると定義する。その立場から、通常の経済活動が行えないために需要と供給の不一致が生じる不均衡状態も表現できる経済社会モデルを構築し、防災投資の便益の定義と計測方法について理論的フレームを提案する。提案されたモデルにより、便益定義として等価的偏差(EV)の概念を拡張したNCEV, ZCEV, ZSCEVの三種を提案し、さらに、それらから危険回避的住民のオプション価値としてSOV, ZSOVを定義し、それらの計測方法としての応用一般均衡分析(CGE)、土地利用モデル、その他の方法を比較検討している。

## 1. はじめに

防災投資の社会的重要性については社会のほぼ全ての構成員が合意すると言えるものの、防災投資も現在の限られた経済資源を将来のために投入する行為であるため、その是非は他の目的の社会基盤投資と同様に合理的・客観的な尺度に基づいて評価されなければならない。阪神大震災による人的・経済的被害の甚大さは社会基盤施設の安全性を強化することへの大きな要請を喚起したが、我々が現在有している全ての経済資源をそのために振り向けることができないという現実が有る限り、防災投資の便益を計測して、ある採択・優先基準のもとに事業を実施して行かざるを得ない。

従来より、社会基盤投資プロジェクトについては伝統的に費用便益分析のアプローチが適用され、防災投資の一例である治水事業に対してもその便益の計測手法が提案・適用されたきた。例えば、わが国でも治水経済調査としてその指針が示されている。伝統的アプローチでの基本的考え方は、まず、様々な災害発生状態毎に被害額を算定し、次に同様に防災投資実施後の被害額を算定する。そして、その差額、すなわち、被害軽減額を各災害状態の発生確率で重み付けした総額(期待被害軽減額)を防災投資事業の便益としている。しかし、このアプローチには次のような問題点がある。

第一は、被害額あるいは便益額の算定において想定する経済社会状況とそれを表現する経済理論モデルについてである。交通プロジェクトや住環境改善プロジェクト等の経済評価においては、現在は一般均衡理論と厚生経済学の基盤の上に便益

が定義され、計測方法についても、その限界や二重計算の危険性の有無が明らかにされている。しかし、それらの理論的フレームは市場で成立している価格のもとでの経済主体も自らの効用(満足)や利潤を最大とするような財の需要・供給量を実現できると想定しており、それ以外の状況が稀に実現している場合については、理論的フレームとは必ずしも整合的でない方法で別途計測されている。災害時には望むだけの需要・供給量が実現できるとは限らず、いわゆる不均衡経済の状況に陥っている。阪神大震災の直後における生活物資の不足、工場施設の損壊による生産活動の停止等々の現象を思い浮かべれば、このことは明らかである。そのため、防災投資便益の評価に当たっては通常の一般均衡理論を理論的基盤とすることは不十分であり、様々な不均衡経済状況を表現し得る理論モデルに立脚する必要がある。

第二の問題は、被害軽減額の期待値で便益を定義することについてである。この定義での便益は、不確実性に直面している評価者にとって唯一の評価尺度ではない。評価者が危険回避的な選好を持つ場合には、一般には、被害軽減額の期待値として定義される便益は他の提案されている定義でのそれに比べて過小評価になることが知られている。従って、不確実性を考慮した評価尺度として提案されている種々の定義を検討し、それらの改良・拡張によって防災投資の評価に適した定義を開発する必要がある。

以上の問題意識にもとづいて、本稿は、災害時の経済社会状態を表現し得る不均衡経済モデルを構築し、それに基づいて防災投資の便益の定義を提案し、その具体的な計測手法の可能性について検討する。なお、本稿は主に理論的フレームを提示することに主眼を置いており、現在筆者らが進めている計測手法の具体的な適用の結果については講演時に紹介あるいは別の機会での報告を行い

Keywords: 防災投資、経済評価、不確実性

\* 岐阜大学工学部, TEL 058-293-2447, FAX 058-230-1248

\*\* 岐阜大学大学院社会人コース

(中日本建設コンサルタント(株))

たいと考えている。

## 2. モデルの基本的考え方

### (1) 経済モデルの基本的前提

本稿で構築する経済モデルは次のような主な前提に基づいている。

i) 経済システムにおいて実現する状態は、離散的に捉えた自然状態に対応して定義され、その状態は  $i \in I = \{0, 1, \dots, N\}$  でラベル付けされている。

ii) 経済システムの地理的空間は適切な方法でゾーンに分割されており、  $j \in J = \{1, \dots, J\}$  でラベル付けされている。

iii) 経済システムには、ゾーン間で自由に立地変更できる同一の選好を有する一定数の家計と、各ゾーン毎に定義される代表的企業、防災投資を行う一つの政府が経済主体として存在している。

iv) 経済システムには、適切な方法で分類された種類毎に財の市場が存在しており、それらは、  $m \in M = \{1, \dots, M\}$  でラベル付けされている。

v) 各家計はその立地ゾーンにおいて市場での財価格と自らに課せられる需要・供給割り当て制約のもとで期待効用を最大化するように行動する。そして、ある状態のもとでは自由な立地変更を行うことができ、財の需要・供給の結果達成される期待効用水準が高いゾーンへとより多く立地しようとする。その立地選択行動はロジットモデルで表現される。

vi) 各企業も市場での財価格と自らに課せられる需要・供給割り当て制約のもとで期待利潤を最大化するように行動する。ただし、企業の利潤はこの経済システムの全ての家計に均等に配分される。

vii) 政府は各ゾーンに立地している家計からそれぞれ一括税を徴収している。防災投資事業の費用はこの税収によって賄われる。

### (2) 不確実性と環境水準・需給割り当て制約

先に定義した状態の生起確率を次のように表現する。

$\phi_i^j (\leq 1) \in \mathbf{R}_+$  : ゾーン  $j$  での状態  $i$  の発生確率

$$\phi^j = [\phi_0^j, \dots, \phi_I^j] \in \left\{ \phi^j \mid \phi_i^j \geq 0, \sum_{i \in I} \phi_i^j = 1 \right\} \subset \mathbf{R}_+^{I+1}$$

:  $\phi_i^j$  のベクトル表現

$$E^j(X_i^j) = \sum_{i \in I} \phi_i^j \cdot X_i^j$$

: 上記の確率に対応した変数  $X_i^j$  の期待値

次に各状態のもとでの環境水準を次のように定義する。

$H_i^j$  : ゾーン  $j$  での状態  $i$  における環境水準

$$H^j = [H_0^j, \dots, H_I^j] \in \mathbf{R}^{I+1} : H_i^j \text{ のベクトル}$$

さらに、家計と企業に課せられる需要・供給割り当て制約の外生的な上限値を次のように定義する。

$\bar{x}_{mi}^j$  : ゾーン  $j$  に立地している家計に状態  $i$  で市

場  $m$  において課せられる需要・供給割り当ての外生的上限値

$\bar{y}_{mi}^j$  : ゾーン  $j$  の企業に状態  $i$  で市場  $m$  において課せられる需要・供給割り当ての外生的上限値

$\bar{x}_i^j = [\bar{x}_{i1}^j, \dots, \bar{x}_{mi}^j, \dots, \bar{x}_{iM}^j] \in \mathbf{R}^M$  :  $\bar{x}_{mi}^j$  のベクトル

$\bar{y}_i^j = [\bar{y}_{i1}^j, \dots, \bar{y}_{mi}^j, \dots, \bar{y}_{iM}^j] \in \mathbf{R}^M$  :  $\bar{y}_{mi}^j$  のベクトル  
家計が支払う一括税も次のように定義する。

$\tau_i^j$  : ゾーン  $j$  ・ 状態  $i$  で家計が支払う一括税

### (3) 防災投資の表現

この経済モデルでは、防災投資が行われた場合と行われていない場合について、上で定義した状態の生起確率、環境水準、需給割り当て制約の外生的上限値、税額がそれぞれに定義され、次のようにそれらの数値の変更として投資事業が表現される。

$$\phi_i^{aj}, H_i^{aj}, \bar{x}_{mi}^{aj}, \bar{y}_{mi}^{aj}, \tau_i^{aj} \rightarrow \phi_i^{bj}, H_i^{bj}, \bar{x}_{mi}^{bj}, \bar{y}_{mi}^{bj}, \tau_i^{bj}$$

$a, b$  : それぞれ投資が行われた場合と行われなかった場合を表す添字

なお、本稿において投資事業の有無を意味する添字が付されていない表現はそこでの条件式・関係式等がいずれの場合でも成立することを意味する。

## 3. 不確実性下でのミクロ経済行動

### (1) 家計の期待効用最大化・立地選択行動

前述の前提に従って家計の行動は次のような数理最適化問題によって表現される。

$$S = \max_{P^j} \sum_{j \in J} \left\{ P^j E^j(V_i^j) - \left(\frac{1}{\theta}\right) P^j (\ln P^j - 1) \right\} \quad (1.a)$$

$$s.t. \quad \sum_{j \in J} P^j = 1 \quad (1.b)$$

$$V_i^j = V(P_i^j \cdot (w_i - x_i^j) + \pi_i - \tau_i, P_i^j, x_i^j, H_i^j) \\ = \max_{x_i^j} u(x_i^j, H_i^j) \quad (1.c)$$

$$s.t. \quad P_i^j \cdot x_i^j \leq P_i^j \cdot w_i + \pi_i - \tau_i^j \quad (1.d)$$

$$x_i^j \leq \bar{x}_i^j \quad (1.e)$$

for all  $i \in I$  and  $j \in J$

ここで、

$S$  : 経済システム全体での家計の効用の代表値

$u(\cdot)$  : 家計の直接効用関数

$P^j$  : ゾーン  $j$  の立地選択率

$V_i^j$  : ゾーン  $j$  での家計の状態  $i$  における効用水準

$V(\cdot)$  : 家計の間接効用関数

$P_{mi}^j$  : ゾーン  $j$  の家計が状態  $i$  において市場  $m$  での財を需要(供給)する際のゾーンベースの価格

$P_i^j = [P_{i1}^j, \dots, P_{mi}^j, \dots, P_{iM}^j] \in \mathbf{R}_+^M$  :  $P_{mi}^j$  のベクトル

$w_{mi}$  : 市場  $m$  で取引される財の状態  $i$  における家計の初期賦存量

$w_i = [w_{i1}, \dots, w_{mi}, \dots, w_{iM}] \in \mathbf{R}_+^M$  :  $w_{mi}$  のベクトル

$x_{mi}^j$ : ゾーン  $j$ ・状態  $i$  において家計が市場  $m$  で需要(供給)しようとする財の量

$x_i^j = [x_{i1}^j, \dots, x_{mi}^j, \dots, x_{Mi}^j] \in \mathbf{R}^M$ :  $x_{mi}^j$  のベクトル

$\bar{x}_{mi}^j$ : ゾーン  $j$ ・状態  $i$  において家計が市場  $m$  で実現できる財の需要(供給)量

$\bar{x}_i^j = [\bar{x}_{i1}^j, \dots, \bar{x}_{mi}^j, \dots, \bar{x}_{Mi}^j] \in \mathbf{R}^M$ :  $\bar{x}_{mi}^j$  のベクトル

$\pi_i$ : 状態  $i$  での家計が配当として得る企業の利潤

以上の最大化問題は、ゾーン・状態別の家計の財需要(供給)関数とゾーン別の立地選択率、および家計が達成する効用水準のこの経済システム全体での代表値を表す最適値関数を次のように与える。

$$x_i^j = x_i^j(p_i^j \cdot (w_i - \bar{x}_i^j) + \pi_i - \tau_i, p_i^j, \bar{x}_i^j, H_i^j) \quad (2.a)$$

$$p_i^j = \frac{\exp(\theta E^j(V_i^j(\cdot)))}{\sum_{j \in \mathbf{I}} \exp(\theta E^j(V_i^j(\cdot)))} \quad (2.b)$$

$$S = \left(\frac{1}{\theta}\right) \ln \left\{ \sum_{j \in \mathbf{I}} \exp(\theta E^j(V_i^j(\cdot))) \right\} \quad (2.c)$$

## (2) 企業の利潤最大化行動

各ゾーン毎に定義されている代表的企業は環境水準に依存した生産技術のもとで期待利潤を最大化するように財の投入・産出を行う。この行動を次のような数理最適化問題で表現する。

$$\Pi^j = E^j(\Pi_i^j) \quad (3.a)$$

$$\Pi_i^j = \Pi(q_i^j, \bar{y}_i^j, H_i^j) = \max_{y_i^j} q_i^j \cdot y_i^j \quad (3.b)$$

$$s.t. \quad T(y_i^j, H_i^j) \leq 0 \quad (3.c)$$

$$y_i \leq \bar{y}_i \quad (3.d)$$

for all  $i \in \mathbf{I}$  and  $j \in \mathbf{J}$

ここで、

$\Pi^j$ : ゾーン  $j$  の企業の期待利潤

$\Pi_i^j$ : ゾーン  $j$  の状態  $i$  での企業の利潤

$q_{mi}^j$ : ゾーン  $j$  の企業が状態  $i$  において市場  $m$  での財を供給(需要)する際のゾーンベースの価格

$q_i^j = [q_{i1}^j, \dots, q_{mi}^j, \dots, q_{Mi}^j] \in \mathbf{R}_+^M$ :  $q_{mi}^j$  のベクトル

$y_{mi}^j$ : ゾーン  $j$ ・状態  $i$  において企業が市場  $m$  で供給(需要)しようとする財の量

$y_i^j = [y_{i1}^j, \dots, y_{mi}^j, \dots, y_{Mi}^j] \in \mathbf{R}^M$ :  $y_{mi}^j$  のベクトル

$T(\cdot)$ : 生産技術を表す変形関数

$\bar{y}_{mi}^j$ : ゾーン  $j$ ・状態  $i$  において企業が市場  $m$  で実現できる財の供給(需要)量

$\bar{y}_i^j = [\bar{y}_{i1}^j, \dots, \bar{y}_{mi}^j, \dots, \bar{y}_{Mi}^j] \in \mathbf{R}^M$ :  $\bar{y}_{mi}^j$  のベクトル

以上の最適化問題から家計の場合と同様の考え方により、次の企業の財供給(要素需要)関数が得られる。

$$y_i^j = y_i^j(q_i^j, \bar{y}_i^j, H_i^j) \quad (4)$$

## 4. 不均衡を含む経済状況の表現

本稿での経済モデルは、各財市場で集計された需要量の実現値が供給量のそれと一致して清算される条件、各経済主体への財の割り当てメカニズムおよび価格決定メカニズムを定義することで完結する。集計レベルでの財の需要量と供給量を定義するために経済システムにおける家計の総数を導入する。

$N_T$ : 経済システム全体の家計総数

また、ゾーンベースでの価格と市場ベースでの価格は交通費用の存在等によって必ずしも一致しない。そこで市場ベースでの価格が次の関係式でゾーンベースでの価格に変換されるものとする。その変換は例えばIceberg型の交通費用の概念を用いることで正当化される。

$$p_i^j = R_{mi}^j p_i \quad (5.a)$$

$$q_i^j = Q_{mi}^j p_i \quad (5.b)$$

ここで、

$R_{mi}^j$ :  $p_{mi}^j = R_{mi}^j p_{mi}$  となる  $R_{mi}^j$  からなる対角行列

$Q_{mi}^j$ :  $q_{mi}^j = Q_{mi}^j p_{mi}$  となる  $Q_{mi}^j$  からなる対角行列

$R_{mi}^j, Q_{mi}^j$ : 価格の変換係数

$p_{mi}$ : 状態  $i$  での市場  $m$  の市場ベースの価格

$p_i = [p_{i1}, \dots, p_{mi}, \dots, p_{Mi}] \in \mathbf{R}_+^M$ :  $p_{mi}$  のベクトル

この変換により価格変数は各財市場について市場ベースで考えれば良いことになる。

以上の設定を用いて集計レベルでの各財市場での清算条件を次のように定義する。

$$N_T \sum_{j \in \mathbf{I}} p_i^j \bar{x}_i^j - \sum_{j \in \mathbf{I}} \bar{y}_i^j - N_T w_i = 0 \quad (6)$$

次に各経済主体への財の割り当てメカニズムと価格決定メカニズムを定義する。財の割り当ては各経済主体が本来は需要(供給)と考えているだけの量を集計したとき、集計された供給(需要)がそれを満たすことができない場合に、個々の経済主体が実際に取引して実現できる需要(供給)量を決定するメカニズムである。このメカニズムには、様々な構造があり得るが、例えば、先着順に需要量を満たしていくという割り当てもあれば、着順によらず均等に割り当てる方法や、ある基準に従って配分率を定めるなどの方法も可能である。価格決定については集計された需要が供給を上回る場合には、いわゆる売り手市場になって価格が上昇し、逆であれば買い手市場となり価格は低下する。通常はこの過程を通して集計需要と集計供給自体が調整されて両者が一致するような水準に価格が決定されることになるが、数量の調整が困難な状況においては価格がどのような水準に決定されるかということは一概に言えない。例えば、ある財は供給不足のため価格が急騰するかも知れないし、また、別の財は必需的なため価格統制が行われるかも知れない。阪神大震災のような非常時においてどのような方法で不足している財が配分された

のが一般的であったか、また、通常取引価格と比べて価格がどのような水準で取引されていたかについては実態調査の結果を待たざるを得ない。ここでは、それらのメカニズムを特定せずに、次のような関数を導入して定義する。

$$p_i = F_i \left( N_T \sum_{j \in J} P^j \bar{x}_i^j, \sum_{j \in J} \bar{y}_i^j + N_T w_i \right) \quad (7.a)$$

$$\bar{x}_i^j = X_i^j \left( N_T \sum_{j \in J} P^j \bar{x}_i^j, \sum_{j \in J} \bar{y}_i^j + N_T w_i \right) \quad (7.b)$$

$$\bar{y}_i^j = Y_i^j \left( N_T \sum_{j \in J} P^j \bar{x}_i^j, \sum_{j \in J} \bar{y}_i^j + N_T w_i \right) \quad (7.c)$$

ただし、ここで導入した  $F_i(\cdot)$ ,  $X_i^j(\cdot)$ ,  $Y_i^j(\cdot)$  はベクトル関数である。

本稿での経済システムの状況は以上のように最初に定義した状態毎に表される。実現する状況では(6)と(7)に加えて、各経済主体が実現する財の需要(供給)量について次の関係式と家計と企業の間での利潤の分配関係を表す関係式が成立している。

$$\bar{x}_{mi}^j = \min \left\{ x_{mi}^j (p_i^j \cdot (w_i - \bar{x}_i^j) + \pi_i - \tau_i \cdot p_i^j, \bar{x}_i^j, H_i^j), \bar{x}_{mi}^j \right\} \quad (8.a)$$

$$\bar{y}_{mi}^j = \min \left\{ y_i^j (q_i^j, \bar{y}_i^j, H_i^j), \bar{y}_{mi}^j \right\} \quad (8.b)$$

$$\pi_i = \left( \frac{1}{N_T} \right) \sum_{j \in J} \Pi_i^j \quad (8.c)$$

ここで、注意すべきは、外生的な需要(供給)割り当て制約が有効でない財の市場においても、他の財の市場でそれが有効であるために、内生的な割り当てが発生する場合があることである。例えば、製品自体の供給は外生的制約を受けていないとしても、その原材料の市場が制約されていれば、製品の供給量に制約が発生してしまう。

最終的には、各状態のもとで実現される経済状況は(6),(7),(8)および家計の立地選択比率を表す(2.b)からなる方程式体系を価格と実現される需要(供給量)について解いて得られたその解として表現される。解の存在については本稿で投入した各関数について連続性が満たされている限りは通常の経済モデルと同様に不動点定理を用いて証明(例えば、Takayama(1985)など)ができる。ただし、唯一性については保証されず、割り当てと価格決定のメカニズムの想定によっては複数の解が存在し得る。解の安定性については、それらのメカニズムが財の自発的交換と整合的である場合(Benassy(1982))にはそれが保証される。

ミクロ経済学における標準的な一般均衡モデルでは、以上のような需給割り当て制約は現れない。本稿のモデルから見れば、通常の一般均衡モデルは(8)に含まれる外生的な需給割り当て制約が十分に大きく、どの経済主体についても市場で決定される価格のもとでは常に望むだけの需要(供給)量を実現できるという状況を表していることになる。従って、本稿のモデルは通常の一般均衡モデルを

包含し、かつ、不均衡経済状況までも表現できる広範なモデルとなっている。

## 5. 防災投資による便益の定義

### (1) 等価的偏差の概念に基づく便益定義

社会基盤整備のような経済システムの外生的な条件の変更に伴う種々の影響は最終的には家計の効用水準を変化させる。便益はその効用水準の変化を貨幣タームに変換したものとして定義されるが、その変換に対応していくつかの代表的な考え方がある。その中でも効用水準の単調変換としての性質を満たすものとして等価的偏差(Equivalent Variation、以下ではEVと略す)の概念が広く用いられており、本稿でもこの概念を基本として便益を定義する。

EVの概念では、便益は、整備プロジェクトが行われた場合(以下ではwith caseと呼ぶ)に達成されるのと同じだけの効用水準を行われなかった場合(without caseと呼ぶ)の状況のもとで達成するためには、どれだけの追加的所得を家計が受け取らなければならないかという金額で定義される。しかしながら、本稿で構築した経済モデルにはいくつかの効用の概念が導入されており、効用の概念としてその内のどれを用いるか、また、変化前の状況としてどれに着目するかという点に応じて等価的偏差の概念の範囲内でも便益は異なった定義になる。そこで、以下では等価的偏差の概念に従っていくつかの便益の定義を説明していく。なお、以下では家計当たりの便益で説明して行くが、言うまでもなく、社会的便益はそれを集計したものである。

まず第一は、with の場合の効用水準をゾーン・状態別に捉え、without の経済状況もゾーン状態別に捉えてEVを定義したものである。これをZone-State Contingent EVと呼ぶものとし、次式を満たす  $EV_i^j$  として定義する。

$$V_i^{bj} = V(p_i^{aj} \cdot (w_i - \bar{x}_i^{aj}) + \pi_i^a - \tau_i^a + EV_i^j, p_i^{aj}, \bar{x}_i^{aj}, H_i^{aj}) \quad (9)$$

これは家計が本来は自由に行えるはずである立地変更を認めずに、with caseでもwithout caseと同じゾーンに立地しているものと仮定して、着目している状態だけに限定してwithoutの場合から環境水準や経済状況が変化したことによる便益を定義したものである。言うまでもなく、この定義では便益はゾーン・状態別に異なる。逆に、これに着目すれば、どのような状態で、どのゾーンで防災投資の効果が大きいかを知ることができ、防災計画を空間的に、かつ、状態毎に展開する上での有益な情報と成り得る。

第二の定義は、with の場合の効用水準はゾーン毎の期待効用水準として捉え、それと同じ期待効用水準をwithoutの場合にも保持するという条件のもとでwithoutのどの状態にある家計に対しても同

じ金額の追加的所得を支払うとした時のそれを便益とする定義である。これは、ゾーンは特定化されているが、withoutの場合については状態を限定せずと同じ金額を支払うとしているため、Zone-contingent EVと呼ぶものとし、それを次式を満たす $EV^j$ として定義する。

$$E^{bj}(V_i^{bj}) = E^{aj}(V(p_i^{aj} \cdot (w_i - \bar{x}_i^{aj}) + \pi_i^a - \tau_i^a + EV^j, p_i^{aj}, \bar{x}_i^{aj}, H_i^{aj})) \quad (10)$$

この定義はwithoutでの各状態については限定しないため、ゾーン間だけの比較を行う場合の情報を与える。例えば、ある防災投資が広域に複数の地域にわたって行われるような時に事業による受益に見合った費用負担を各地域が行う場合などでは、この定義の便益が有益な情報を与える。

第三の定義では、まず、withの場合に達成される効用水準は(1.a)で定義した家計がゾーン選択を行った結果として実現される代表的家計の効用水準とする。withoutの場合にも代表家計の効用水準をwithのそれと同じ水準に保持するという条件のもとで、withoutのどのゾーンのどの状態にある家計に対しても同じ金額の追加的所得を支払うとする。その金額を便益とする定義である。これは、ゾーンも状態も特定化せずと同じ金額を支払うとしているため、Non-contingent EVと呼ぶものとし、それを次式を満たすNCEVとして定義する。

$$S^b = \sum_{j \in J} P^{aj} E^{aj}(V(p_i^{aj} \cdot (w_i - \bar{x}_i^{aj}) + \pi_i^a - \tau_i^a + NCEV, \dots)) \quad (11)$$

これはどのゾーン、どの状態であっても同じ金額を支払うとして便益を定義していることから、経済システムの中で家計の立地先候補となるどのゾーンにおいても、例えそこで防災投資が行われなくても、他のゾーンで投資が行われれば便益が発生することになる。すなわち、防災投資から直接に影響を受けないゾーンであっても、家計の立地変更のメカニズムを通してそこにも間接的に便益が波及することを意味している。

以上の3つの定義は後述するようなある関係式を満たし、明確な社会経済的解釈を行い得る代表的な定義である。しかし、既に述べたようにEVは、withの場合の効用水準としてどの効用の定義を採用するかという点、そして、withoutの場合に支払いの行われる状況をどのように想定するかという点の組み合わせに応じて種々の派生的定義を行うことが可能であるため、上記の3種類の定義以外にも便益の定義はあり得る。例えば、その例として次のような定義も提案されている。

まず、Non-contingent EVの定義式では、Withoutのどのゾーン、どの状態においても同額を支払うとしているが、それをゾーン、状態別に異なる額を支払うものとする。しかし、(11)の一つの定義式に(ゾーン数  $J$ ) × (状態数  $I + 1$ )だけの未知変数が

含まれることになり、それを満たす解は無数にあり不定となる。その中から解を確定させたFair Bet EV(例えば、Graham(1981))と呼べる次のような数理最適化問題の解  $FBEV_i^j$  が便益定義として提案されている。

$$\max_{FBEV_i^j} \sum_{j \in J} P^{aj} E^a(FBEV_i^j) \quad (12.a)$$

s.t.  
 $S^b =$

$$\sum_{j \in J} P^{aj} E^{aj}(V(p_i^{aj} \cdot (w_i - \bar{x}_i^{aj}) + \pi_i^a - \tau_i^a + FBEV_i^j, \dots)) \quad (12.b)$$

この定義では、功利主義的な立場から、立地者の多いゾーンでより大きな便益が発生していると思なすことになる。

これ以外の派生的なEV概念についても定義できるが、全てが防災計画的な立場から見て有益な意味解釈を与えるものとは限らない。本稿で示した以外の定義については、別の機会に種々の定義の比較にさらに重きをおいて報告したい。

## (2) 期待等価的偏差とオプション価値

従来の防災投資評価の手法では、被害軽減額の期待値で便益を定義しており、また、本稿のような立地選択については明示的に考慮していない。従来の場所・状態毎の被害軽減額の計測は、どのような一貫性のある理論的背景のもとに行われきたかが必ずしも明確でないため、本稿のZone-state-contingent EVによる便益はそれと必ずしも一致しない。しかし、例え一致するとしても生じる問題として、本稿での示した3つの定義を用いて、不確実性下での便益定義として期待値を用いることの問題点について検討する。

まず、ある一つのゾーン  $j$  についてのみ着目してみる。そのゾーンでの便益を状態毎に定義したものが  $EV_i^j$  であり、その期待値はゾーンを特定して定義されるものであるため、Zone-contingent Expected EVと呼ぶものとし、次のように表す。

$$EEV^j = E^{aj}(EV_i^j) \quad (13)$$

(10)で定義された便益であるZone-contingent EVもゾーンを特定して定義した便益である。従って、ゾーンを特定して便益を計測する場合、これらの2つの定義があり得る。間接効用関数はいずれの定義のEVについても凹関数であるため、Jensenの不等式(例えば、Johansson(1995)など)を根拠として、次の関係が成り立つ。

$$EV^j - EEV^j = ZCOV^j \geq 0 \quad (14)$$

すなわち、Zone-contingent EVは、一般に、Zone-contingent Expected EVよりも大きい。それらの差はオプション価値(Option Value、以下では略してOV)と呼ばれる。OVは家計が危険回避的選好(例えば、Varian(1992)など)を持つ場合に発生するものであり、危険を回避したいと望む家計が防災投

資により危険が軽減されること自体の便益を意味している。(14)の  $ZCOV^j$  はゾーンを特定したOVであるため、Zone-contingent OVと呼ぶものとする。

これに対してゾーンを特定せずに経済システム全体についても期待等価的偏差とOVの概念を定義することができ、それぞれをSocial Expected EV、Social OVと呼ぶものとして、次のように表される。

$$EEV = \sum_{j \in J} P^{aj} E^{aj}(EV_i^j) \quad (15.a)$$

$$NCEV - EEV = SOV \geq 0 \quad (15.b)$$

このように定義したSOVは(13)、(14)、(15.a)を用いると次のように分解される。

$$\begin{aligned} SOV &= NCEV - EEV \\ &= NCEV - \sum_{j \in J} P^{aj} \cdot EV^j + \sum_{j \in J} P^{aj} \cdot EV^j - EEV \\ &= NCEV - \sum_{j \in J} P^{aj} \cdot EV^j + \sum_{j \in J} P^{aj} \cdot \{EV^j - E^a(EV_i^j)\} \\ &= NCEV - \sum_{j \in J} P^{aj} \cdot EV^j + \sum_{j \in J} P^{aj} \cdot ZCOV^j > 0 \end{aligned} \quad (16)$$

上式において、第3項はZone-contingent OVの総和であり、第1項と第2項でNon-contingent EVの総和とZone-contingent EVの総和の差が表されている。第3項はどの家計もwithoutの場合と同じゾーンに立地するものとして定義されたOVである。従って、本稿で定義したSOVは家計が立地選択によりwithの場合には立地ゾーンを変更できること考慮しないでOVを定義した場合に比べて、第1項と第2項の差の分だけ大きくなっている。すなわち、家計が危険回避的であるために発生するOVに加えて、立地選択を行えることに起因した便益が含まれている。

以上から、防災投資が行われることは、災害時の環境水準や需給割り当て制約水準が改善されて被害が軽減されることの便益だけでなく、危険の回避を望む家計の不安感を軽減する便益、そして、投資が行われて改善された地域へ立地が進むことによる便益も発生させると言える。

## 6. 便益計測手法の検討

### (1) 従来の便益計測手法

これまで、社会基盤整備による便益の計測手法としては、一般均衡モデルにより経済状況を詳細に計算して便益の定義式を解いて計測する手法が提案されてきたが、それは極めて多大な労力を要するのが一般的であったため、理論的にはそれを基礎としながらいくつかの限定的な前提を追加した上で簡便に計測する手法も開発・適用されてきた。現在では一般均衡モデルを理論的構造をできるだけ忠実に保持しながら実際のデータを用いて適用する応用一般均衡モデル(Computable General

Equilibrium Model、以下ではCGEモデルと略す)の手法も開発されている。また、それよりは幾分簡略化されたモデルとして、特に不動産市場での一般均衡を表現した土地利用モデルによる便益計測も行われている。それらにより、簡便法より詳細な計測が試みられている。

簡便な計測手法としては、第一に、需要・供給量が社会基盤整備と強く関連している財の市場に着目して、そこで観察される需要(供給)曲線を利用して計測するShort Cut法が挙げられる。第二には、社会基盤整備の影響が空間的に均一でなく立地場所に依存しているため、投資が行われた地域が十分に小さい場合には空間価値を表す土地価格の変化に着目して便益を計測するHedonic Priceの手法(例えば、金本(1992)など)である。

以下では、これらの既往手法をベースとしてその拡張・改良による計測の可能性を検討する。

### (2) CGEモデルによる計測

本稿で提示した全ての定義での便益を計測するためには、ゾーン・状態別の経済状況を全て詳細に計算しなければならない。その目的には、CGEモデルをベースとした手法が適していると考えられる。現在ようやく適用実績が出現してきているCGEモデルでも、極めて膨大なデータ収集と処理が必要であるのが実際である。本稿で構築した経済モデルは一般均衡理論を包含したより広範なモデルであり、かつ、経済状況を表現するための外生変数・内生変数ともに通常の一般均衡理論よりも非常に多くなる。計算アルゴリズムとしては、CGEモデルで現在使用されている各種のアルゴリズムの活用(例えば、駄田井(1986))が期待できるものの、解くべき問題の規模と複雑さは未知である。実務に普及する実用的手法として実績が蓄積されるまでには今しばらくの時間を要すると考えられる。しかし、ゾーンを大きくとり、国民経済あるいは地域経済レベルでマクロに評価する目的であれば、変数を大幅に節減でき、現在の計算技術でも適用可能であると思われる。この場合について筆者らはパイロットモデルを開発中である。

### (3) 土地利用モデルによる計測

土地利用モデルは、その開発経緯を見ると必ずしも経済理論と整合的に開発されてきた訳ではないが、近年のモデルは一般均衡理論をベースとした上で土地・建物等の不動産市場の一般均衡と立地選択行動に焦点を当てた経済モデル(例えば、上田(1995))となっている。土地利用モデルは都市圏レベルでの経済システムを対象としており、その内部での社会基盤整備の便益計測には有効性が確認されている。防災投資が都市内のあるゾーンで行われるような場合であり、かつ、主に生起確率と環境水準に影響するような場合であれば、一般的な財の需給割り当てについては無視できるので、不動産市場に焦点を当てた土地利用モデルによる

計測は可能であると考えられる。地震についてこのような想定での計測が可能であるかどうかは今後さらに検討が必要であるが、都市域の河川に対する治水事業の場合には上のような想定を行って便益計測を行える。森杉・上田他(1995)はそのための土地利用モデルを開発し、実際の治水事業の便益計測に適用を試みている。

#### (4) Short Cut 法による計測

社会基盤整備の中でも交通整備の場合はそれが交通サービスでの需給変化に直結しているため、それに着目した便益の計測が可能(森杉(1989))である。それ以外の社会基盤整備の場合、特にそれが主に環境水準を変化させるような事業である場合には、どのような財の市場と強く関連しているかを一概に言うことは困難である。しかし、環境水準の変化は立地場所に依存しているため、そこでの土地需要の変化を伴うことは一般的に認められる。そのため、事業が行われたゾーンまたは地域での集計レベルの土地需要(供給)関数を観察し、それを用いて便益を計測する方法が簡便法として可能である。災害が生じた状態が短期であれば、その期間内に集計レベルでの土地需要(供給)が大きく変化するとは言えないため、この方法で状態別にEVを計測することは容易でないが、大野・森杉他(1995)では海面上昇対策事業の便益計測にこの方法を適用することを試みている。

#### (5) Hedonic Price 法による計測

Hedonic Priceによる方法は土地利用モデルによる計測や土地需要(供給)量に着目したShort Cut法と同様に環境水準の変化が立地場所に依存していることに着目した手法であり、しかも、それらの手法よりもさらに簡便化された手法であるため、それが適用可能となるための前提は一層限定的である。すなわち、防災投資が行われる範囲が経済システム全体に比べて十分に小さいという前提が課される。土地価格を防災投資により変化する確率的な環境水準の関数(Hedonic Price 関数)として十分な精度で推定できるかどうかについては、治水事業の場合は高木・大野他(1993)や宮田・安邊(1991)で一応の成果が得られている。これを参考に地震等の場合についても同様に推定が行えるかどうか、今後の実証研究により確認する必要がある。

## 7. おわりに

本稿は阪神大震災を契機とした防災投資への社会的要請の高まりを背景として、防災投資の経済評価を行うための経済モデルを提案し、また、それに従って複数の便益の定義を示した。さらに、既往の便益計測手法をベースとして、実際の計測の可能性について検討した。

社会基盤整備の便益についての既往の定義・計

測手法と比較して、本研究で提案したものの特徴は以下の通りである。

- i) 便益の定義・計測を行う際の理論的ベースとして、災害時に財の需給制約が発生することを表現し得る不均衡経済モデルに拡張した経済モデルを構築した。
- ii) EV の概念を用いて不確実性下での便益を定義し、危険回避的な家計のOVだけでなく、立地選択の自由があることによる便益も含んだ便益指標を定義した。
- iii) 既往の便益計測手法をベースとして計測方法の可能性を検討し、今後の実際的な計測手法の開発・適用の方向性を示した。

以上の議論を本稿では展開してきたものの、言うまでもなく、今後の研究には多くの課題が残っている。実際的な計測手法の開発については既に関連箇所では言及しているが、それらに加えて理論的な観点からは主な課題として、以下のものに取り組んでいく予定である。

- i) 経済モデルにおいて導入した価格決定メカニズム、割り当てメカニズムの代表的な構造の決定と定式化が必要である。特に、震災時に一般的であった構造を調べ、それをモデル化していくことが必要である。
- ii) 経済モデルへの保険システムの明示的な導入を行わなければならない。わが国では、交通事故や火災等に比べて自然災害について保険で十分にカバーされていないため、今回のモデルでは保険システムの導入は行わなかった。しかし、リスクへの対応として保険システムは最も重要な方策の一つであり、特に、人的被害への私的対応としてはそれが大きな役割を果たしており、人的被害を軽減する投資の便益を計測する際にはこれを手がかかりとせざるを得ない。今後のモデルで保険システムを考慮することは不可欠である。
- iii) 事後的な復旧・復興投資の評価方法との理論的な関連性の検討も行う必要がある。防災投資は事前の対策であるので、事後的な投資の評価とは性質が異なる。このことが便益評価においてどのような意味を持つかについても検討していかなければならない。

## 参考文献

- 上田孝行(1995): 交通・立地分析モデルを用いた都市交通改善の影響分析、日本交通研究会、1995  
金本良嗣(1992): ヘドニック・アプローチによる便益評価の理論的基礎、土木学会論文集, No.449/IV-7, pp.47-56, 1992  
高木朗義・大野栄治・森杉壽芳・沢木真次(1993): 治水事業の経済効果計測に関する研究、土木計画法学研究・論文集, No. 11, pp.191-198, 1993  
駄田井正(1986): 経済学説史のモデル分析、九州大学出版会、1986  
宮田譲・安邊英明(1991): 地価関数に基づく治水

事業効果の計測、第26回日本都市計画学会学術  
論文集, pp.109-114, 1991  
森杉壽芳(1989): プロジェクト評価に関する最近の  
話題、土木計画学研究・論文集, No.7, pp.1-33,  
1989  
森杉壽芳・大野栄治・小池淳司・高木朗義・高橋  
靖英(1995): 海面上昇の被害とその対策の便益の計  
測手法、土木計画学研究・論文集, No. 12, pp.141-  
150, 1995  
森杉壽芳・上田孝行・高木朗義・小池淳司・西川  
幸雄(1995): 土地利用モデルを用いた防災投資の便  
益評価手法に関する研究、土木計画学講演集,  
No.18, (掲載予定)、1995

Benassy, J.P. (1982) : The Economics of Market  
Disequilibrium, Academic Press, 1982  
Graham, D.A. (1981): Cost Benefit Analysis Under  
Uncertainty, American Economic Review, Vol.71,  
pp.715-725, 1981  
Johansson, P.O. (1995): Evaluating Health Risks,  
Cambridge University Press, 1985  
Takayama, A.(1985) : Mathematical Economics,  
Cambridge University Press, 1985  
Varian, H.R. (1992): Microeconomic Analysis,  
Norton, 1992

## ON THE ECONOMIC EVALUATION OF DISASTER PROTECTION PROJECT

Taka UEDA, Hisa MORISUGI and Aki TAKAGI

This paper defines a disaster as environment and economic constraint varying with probability distribution of state-of-nature. A disaster protection project is regarded as an action for improving these factors except state-of-nature. In this line of thought, this paper first builds economic model to describe disequilibrium economy where markets do not work efficiently because of demand-supply imbalance, and then proposes theoretical framework for definition and measurement of benefit. By extending the concept of Equivalent variation, NCEV, ZCEV, and ZSCEV are proposed on the basis of the model, and SOV and ZCOV are defined to clarify the benefit of risk reduction itself. Finally, practical methodologies to measure the benefit such as Computable General Equilibrium Model, Land Use Model, and others are examined from the point of applicability.