

応用都市経済モデルを用いた治水対策の経済評価

ECONOMIC EVALUATION OF FLOOD CONTROL COUNTERMEASURES BY USING COMPUTABLE URBAN ECONOMIC MODEL

高木朗義¹・武藤慎一²・太田奈智代³

Akiyoshi TAKAGI, Shinichi MUTO and Nachiyo OHTA

¹正会員 博(工) 岐阜大学講師 工学部土木工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1)

²正会員 博(工) 岐阜大学助手 工学部土木工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1)

³国土交通省建設技官 近畿地方整備局 (〒540-8586 大阪市中央区大手前 1-5-44)

There are interdependence relations between flood risk and land use. The Computable Urban Economic (CUE) model can analyze the effects of flood control countermeasures with considering the interdependence relations. In this paper, we implement the economic evaluation of a flood control countermeasure by using CUE model. We firstly build the CUE model, and simulate the changes of flood risk and land use by a flood control countermeasure with the CUE model. We then show the benefit definitions in a risky world. Finally, we measure the benefits of a flood control countermeasure.

Key Words: Computable Urban Economic Model, Economic Evaluation, Equivalent Variation, Flood Control, Land Use

1. はじめに

わが国における都心部およびその周辺地域では、住宅地の不足に伴って災害脆弱地区にまで開発の手が伸びている。また、上流域での開発は流域の保水能力を低下させ、下流域の治水安全度を低下させる。一方、地域の治水安全度は人々の立地選択に影響を及ぼすため、当該地域および他地域の土地利用を変化させる。今後、治水安全度の情報公開に伴って、人々がそれを認知した上で立地選択すると予想され、治水安全度が土地利用に与える影響は益々大きくなるであろう。以上のように、治水安全度と土地利用は地域を越えて相互に依存する。したがって、将来にわたっては両者の相互依存関係を踏まえた上で、土地利用に関する規制などを含めた総合治水対策“水害につよい街づくり”を実施していく必要がある。

これまで筆者らは、治水安全度が人々の立地選択に影響を及ぼすメカニズムをモデル化し、土地利用変化を考慮した治水対策の経済評価手法を開発してきた¹⁾。しかし、このモデルでは治水安全度が土地利用変化に及ぼす

影響を捉えているのみで、その逆は捉えられていない。計算システムにおいても土地利用予測サブシステムと治水安全度予測サブシステムが独立しており、後者のシステムで予測した治水安全度を外生変数として前者のシステムに受け渡しているのみである。そのため、土地利用の変化が再び治水安全度に影響を及ぼす過程およびそれ以降の循環過程は実行されておらず、治水安全度と土地利用が整合していないという課題を有している。そこで本研究では、治水安全度を予測する流出・氾濫モデルと土地利用を予測する立地均衡モデルを統合し、治水安全度を内生化した立地均衡モデルを構築する。これを応用都市経済(CUE; Computable Urban Economic)モデルと呼ぶ。本モデルを用いることによって、治水対策を実施した場合における治水安全度と土地利用が同時かつ整合して予測できる。

本研究では、CUEモデルを構築し、想定した治水対策に適用することによって対策の経済評価を行うものである。まずCUEモデルを構築する。次に対象地域において治水対策を実施した場合の治水安全度と土地利用を予

測し、治水対策を実施しなかった場合との比較を行うことによって、治水対策による効果を分析する。最後に治水対策の経済評価を行う。評価指標には等価的偏差(EV; Equivalent Variation)をリスク存在下に拡張した便益定義を用い、治水対策の対象地域におけるゾーン別の便益や対象地域外に波及した便益、あるいは平常における便益、それらを総合した便益などの値を計測する。

2. 応用都市経済(CUE)モデル

(1)CUE モデルの概要

CUE モデルは、地域の治水安全度を予測する流出・氾濫モデルと土地利用を予測する立地均衡モデルの2つを統合したモデルであり、治水安全度と土地利用の相互依存関係を整合的に捉えることができるモデルである。具体的な計算フローは図-1に示すとおりである。まず、流出・氾濫モデルによって各降雨規模における地域別の浸水深を求める。次に、その浸水深を立地に対する魅力の1要因として立地均衡モデルに入力して、各地域の立地量および土地需給量を求める。続いて、立地量と1世帯当たりの土地面積から市街化率を求め、それを不浸透率に変換して流出・氾濫モデルに入力する。このような計算の循環過程によって、立地量が収束するまで繰り返し計算を行い、治水安全度と立地量が整合した状態を予測するものである。

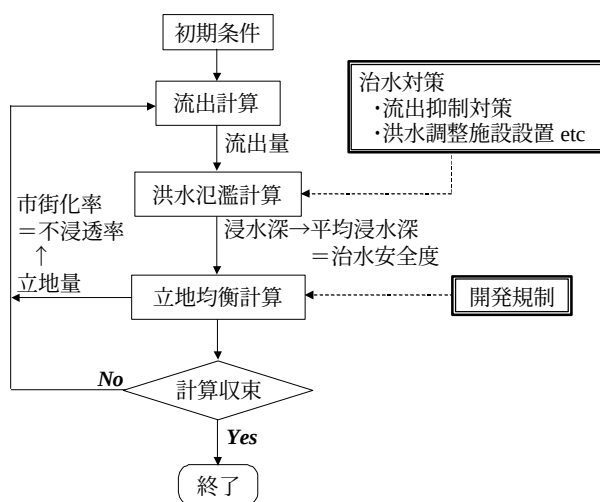


図-1 CUE モデルの計算フロー

(2)流出・氾濫モデル

図-2に示すように対象流域を流出域と氾濫域の2つに区分し、流出計算および洪水氾濫計算を行う。なお、洪水氾濫計算では、河川の破堤を考えず、溢水のみを想定する。この溢水に加えて、流出域から流入する落水および氾濫域への降雨による内水を対象として氾濫計算を行う。流出域における流出計算には、kinematic wave法を用い、氾濫域における洪水氾濫計算には、開水路型二次元タンクモデル（平面タンクモデル）法を用いる²⁾。

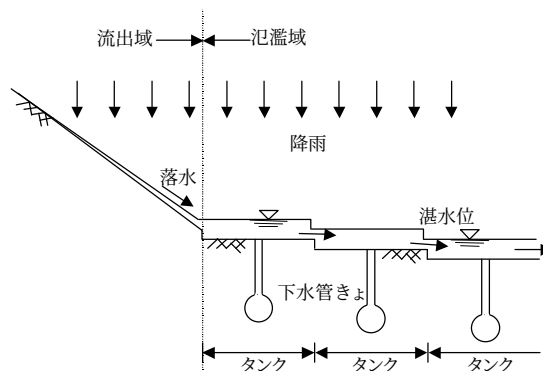


図-2 流出・洪水氾濫モデルの概要

(3)立地均衡モデル

a) 仮定条件

災害生起確率、浸水深、種々の環境水準、総立地量、所得を与件として、各地域における土地需給量、地代および立地量を求めるモデルである。本モデルの主な仮定は以下のとおりである。

- ①世帯の行動は災害の生起確率を考慮した期待効用理論に基づいて捉える。
- ②治水対策の対象地域を重点的に分析できるモデルにするため、地域選択（対象地域とそれ以外を選択）とゾーン選択（対象地域内のゾーンを選択）という2段階 Nested Logit Model で捉える。
- ③立地均衡と土地取引は災害が起こるかもしれない将来を見越して現時点で行われると考える。
- ④経済主体は、同一の選好をもつ多数の世帯とゾーンごとに土地を一括して所有する不在地主のみを考える。
- ⑤土地取引は賃貸借契約のみを考える。
- ⑥総立地量を与えた上で、それを地域（ゾーン）へ配分する構造とする。

b) 世帯の行動モデル

リスク存在下の最適消費行動から得られる期待効用水準を立地の魅力度指標と考え、式(1)のように定式化する。

$$E^j(V_i^j) = \sum_i f_i^j \cdot V_i^j$$

$$= \sum_i f_i^j \cdot a \ln(\bar{H} - H_i^j) (c^j \ln R^j + dI + eGD^j + fGT^j + g) + x^B \quad (1)$$

ここで、 i ：状態(平常時,洪水時)を表す添字、 j ：ゾーンを表す添字、 $E^j(V_i^j)$ ：期待効用水準、 V_i^j ：効用水準、 f_i^j ：状態 i の生起確率、 H_i^j ：浸水深、 R^j ：地代、 I ：所得、 D^j ：鉄道駅まで500m圏内率、 T^j ：岐阜駅までの所要時間、 $\bar{H}$ ：効用関数の序列を整合化する定数(=10)、 x^B ：地域Bの補正定数、 a, c^j, d, e, f, g ：パラメータ。

世帯は式(1)で定式化した各地域(ゾーン)の期待効用水準を完全情報として、より高い期待効用水準を達成できるように地域(ゾーン)を選択する。これを第1段階では治水対策の実施地域Aとそれ以外の地域Bを選択し、第2段階では地域A内のゾーンを選択するという2段階のNested Logit Modelで表現すると、次のようになる。

$$W = \frac{1}{w} \ln \left\{ \exp[w \cdot S^A] + \exp[w \cdot S^B] \right\} \quad (2)$$

$$S^A = \frac{1}{q} \ln \left\{ \sum_j \exp(q \cdot E^j(V_i^j)) \right\} \quad (3), \quad S^B = E^B(V_i^B) \quad (4)$$

$$P^A = \frac{\exp[w \cdot S^A]}{\exp[w \cdot S^A] + \exp[w \cdot S^B]} \quad (5), \quad P^B = 1 - P^A \quad (6)$$

$$P^{Aj} = \frac{\exp(q \cdot E^j(V_i^j))}{\sum_{j'} \exp(q \cdot E^{j'}(V_i^{j'}))} \quad (7)$$

ここで、 W ：立地選択で達成される最大期待効用値、 S^A, S^B ：地域 A, B の最大期待効用値、 P^A, P^B, P^{Aj} ：立地選択確率、 q, w ：Logit パラメータ。

c) 不在地主の行動モデル

不在地主は、ゾーン毎に土地を一括して所有し、地代によって供給面積を変化させるとして、大橋・青山³⁾のモデルを参考に次のように定式化する。これにより地代の上昇が供給量を増加させ、下落が供給量を減少させるという不在地主の行動を捉えることができる。

$$L_s^j = K^j \left(1 - \frac{s^j}{R^j} \right) \quad (8)$$

ここで、 L_s^j ：土地供給量、 K^j ：土地供給可能面積、 s^j ：パラメータ。d) 均衡条件

本研究では、ゾーンごとに1つずつ土地市場があると想定する。各ゾーンの世帯は式(1)からロアの定理⁴⁾によって得られる土地需要関数に基づき土地を需要する。一方、不在地主は式(8)で示したように土地を供給する。各ゾーンの立地量が収束すると、市場で集計された需要と供給が均衡し、各ゾーンの市場均衡価格(地代)が決まる。地代が決定される市場均衡条件は次のようになる。

$$q_d^B \cdot N^B = L_s^B \quad (9)$$

$$q_d^j \cdot N^{Aj} = L_s^j \quad (10)$$

$$q_d^j = - \left[\frac{\partial V_i^j}{\partial R^j} \right] \bigg/ \left[\frac{\partial V_i^j}{\partial I} \right] = - \frac{c^j}{d} \cdot \frac{1}{R^j} \quad (11)$$

ここで、 q_d^j, q_d^B ：土地需要量。

住環境水準および地代より得られる期待効用水準を指標として立地選択を行い、各地域、ゾーンの立地量が決定される。立地均衡条件は以下のようになる。

$$\sum_j N^{Aj} + N^B = N \quad (12)$$

ここで、 N^{Aj}, N^B ：地域 A 内の各ゾーンおよび地域 B の立地量、 N ：総立地量。

式(9),(10)の市場均衡条件、式(12)の立地均衡条件より、各地域、ゾーンの立地量と地代の均衡解が同時に決定される。計算フローは図-3に示すとおりである。

3. 対象地域

本研究では、岐阜県南部を流れる境川流域を対象地域とする。境川流域は木曾川と長良川に挟まれており、昭

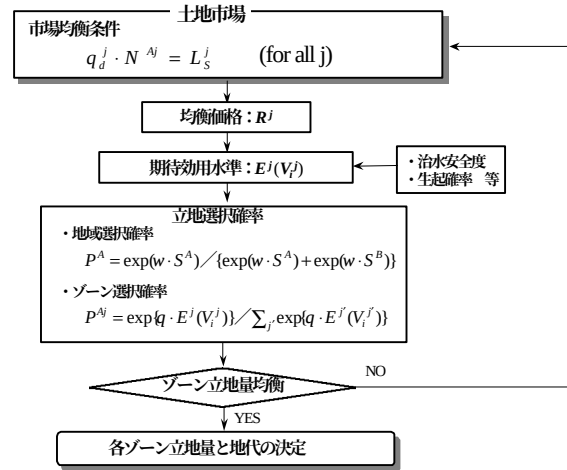


図-3 立地均衡モデルの計算フロー

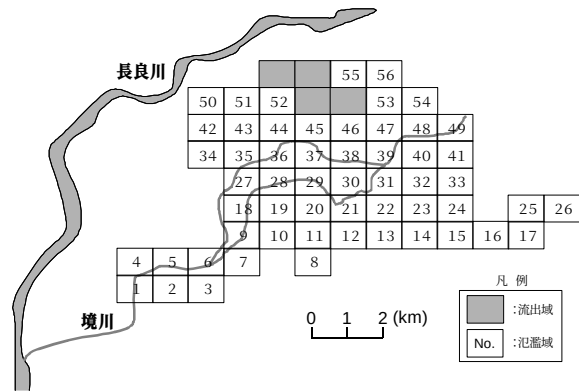


図-4 対象区域：境川流域ゾーン分割図

和30年代以降の経済活動の活発化に伴って、市街化が進行することにより洪水流出量の増大を招き、流域内の治水安全度が著しく低下している。現在では、総合治水対策が実施されている。図-4にゾーン分割した対象区域図を示す。ゾーンは1kmメッシュサイズで、流域全体で60ゾーンある。このうち、4ゾーンの地形勾配が急であるため、これを流出域として取り扱い、残り56ゾーンを氾濫域として取り扱う。境川流域における現在(1995年)の世帯数は65,902戸である⁵⁾。なお、地域Bは周辺の11市28町とする。地域Bの総面積は約1,900km²、世帯数は516,619戸である⁶⁾。

4. 治水対策による治水安全度と立地量の変化

(1) 計算条件

本研究ではCUEモデルを用いて、治水対策による治水安全度と立地量の変化をシミュレーションし、治水安全度と立地量の関係、および治水対策による効果について分析する。ただし、立地量は世帯の立地量についてのみ対象とする。正確に市街化率を捉えるためには、企業の立地量を捉える必要があり、その重要性は十分認識しているが、これについては今後の課題としたい。

具体的には、まず現況データに基づいて CUE モデルのパラメータを設定し、現況における治水安全度と立地量を求める。この計算結果を without とする。次に、流域全体に流出抑制のための洪水調整施設（例えば、各戸貯留施設など）を設置するという治水対策を想定し、その対策を実施した場合の治水安全度と立地量を求める。この計算結果を with とする。この with と without の2つの治水安全度と立地量、およびその空間分布を比較することにより、治水対策による治水安全度と立地量の変化を同時に分析することができる。なおこれ以降、治水安全度とは平均期待浸水深を示す。

(2)シミュレーション結果

治水対策を実施した場合(with)と実施しなかった場合(without)における治水安全度と立地量を CUE モデルにより求めた。結果を図-5～図-8 に示す。図-5 は、without と with のそれぞれにおける治水安全度と立地量の空間分布を表した図である。図-6 は治水対策による治水安全度と立地量変化の空間分布を示した図であり、図-5 における上の図と下の図の差をとったものである。図-7 は各ゾーンにおける治水対策による立地量変化を表した図である。図-8 は治水対策による各ゾーンの治水安全度の変化量と立地変化量との相関図である。

これらの図から次のようなことが考察できる。

治水安全度が大きく向上しているゾーンが6ゾーン存在する。これらのゾーンはいずれも支川が通過するゾーンであり、without での治水安全度が低かったゾーンである。立地量は治水安全度が大きく向上したゾーンを中心に増加している。

治水安全度が低下したゾーンや向上幅が小さいゾーンでは立地量が減少しているところもある。図-8 に示した治水安全度変化量と立地変化量の相関係数は 0.941 であり、治水安全度の向上と立地量の増加の間には正の相関があると言える。

治水安全度が向上すれば立地量が必ずしも増加するという訳ではなく、他ゾーンとの関係から立地量が減少する場合もある。特に、立地量が大きく向上したゾーンの周辺はこのような傾向が見られる。これは、治水安全度のより高いゾーンへ世帯が集中するからであると考えられる。

5. リスク存在下の便益定義

リスク存在下における便益定義については多数の既存研究が存在する。筆者らはこれまでに既存研究を整理した上で、リスク存在下における便益定義を整理している¹⁾。以下にそれらの概要と定義式を示す。なお、これの便益定義には、治水経済調査マニュアル⁷⁾と同様に災害による資本損傷の回復期間が考慮されていないことに注意が必要である。

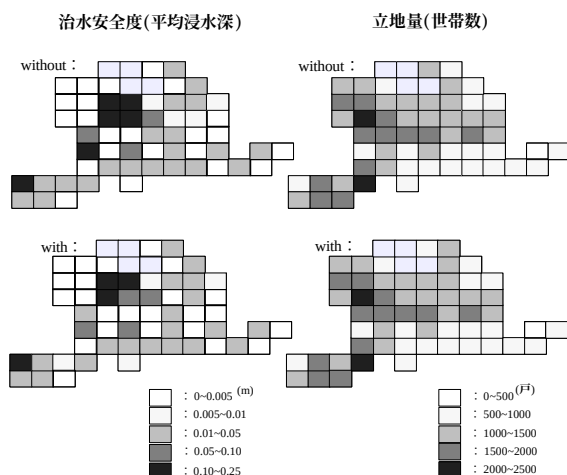


図-5 with／without の治水安全度と立地量の空間分布

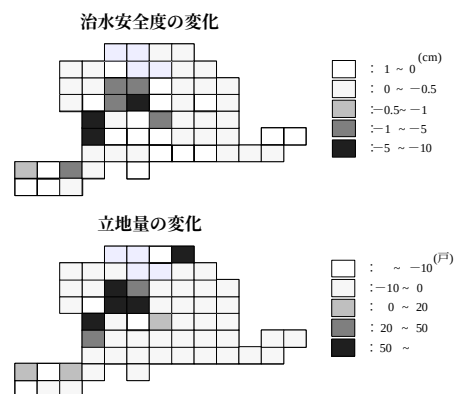


図-6 治水対策による治水安全度と立地量変化の空間分布

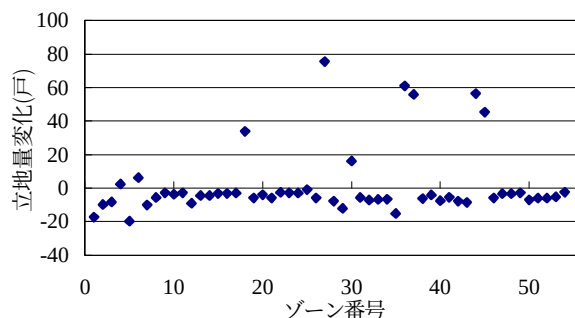


図-7 治水対策による各ゾーンの立地量変化

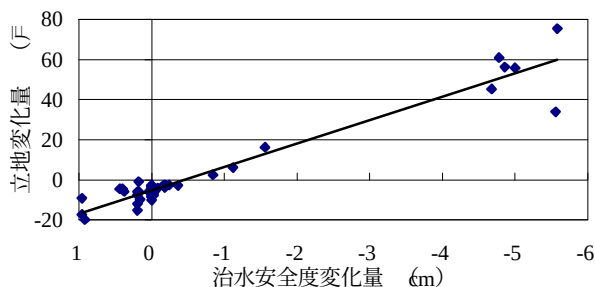


図-8 治水対策による治水安全度と立地量の変化

(1)世帯の便益

a)地域・状態別 EV

with における地域、状態毎の効用水準 V_i^{bj} を維持するという条件の下で、without にとどまるために必要な最小補償額を便益とする。これを地域・状態別 EV と呼び、式(13)に示す $ZSCEV_i^j$ として定義する。

$$V_i^{bj} = V_i^j(a, I^a + ZSCEV_i^j) \quad (13)$$

ここで、 a, b : without, with を表す添字。

b)地域別期待 EV

地域・状態別 EV に without の状態の生起確率を乗じて足し合わせた期待値を地域別期待 EV と呼び、次式に示す $ZCEEV^j$ として定義する。

$$ZCEEV^j = \sum_i f_i^{aj} \cdot ZSCEV_i^j \quad (14)$$

c)地域別 EV

with における地域毎の期待効用水準 $E^{bj}(V_i^{bj})$ を維持するという条件の下で、without にとどまるために必要な最小補償額を便益とする。これを地域別 EV と呼び、次式に示す $ZCEV^j$ として定義する。

$$E^{bj}(V_i^{bj}) = \sum_i f_i^{aj} \cdot V_i^j(a, I^a + ZCEV^j) \quad (15)$$

d)浸水リスクに対するオプション価値

状態に対して不変の便益と状態別便益の期待値とは一般的に等しくならず、差が存在する。その差はオプション価値と呼ばれている。地域別 EV と地域別期待 EV との差は浸水被害の生起確率を考慮しているかどうかの差であるため、浸水リスクに対するオプション価値と呼び、次式に示す $ZCOV^j$ として定義する。

$$ZCOV^j = ZCEV^j - ZCEEV^j \quad (16)$$

e)期待 EV

地域別 EV に without の立地選択確率を乗じて足し合わせた期待値を期待 EV と呼び、次式に示す EEV として定義する。

$$EEV = \sum_j P^{aA} P^{aAj} ZCEV^j + P^{aB} ZCEV^B \quad (17)$$

f)Non Contingent EV

with における最大期待効用値 W^b を維持するという条件の下で、without にとどまるために必要な最小補償額を便益とする。これを Non-Contingent EV と呼び、次式に示す $NCEV$ として定義する。

$$W^b = \frac{1}{w} \ln \left\{ \exp \left[\frac{w}{q} \ln \sum_j \exp \left\{ q \cdot \sum_i f_i^{aj} V_i^j(a, I^a + NCEV) \right\} \right] + \exp \left[w \cdot \sum_i f_i^{aB} V_i^B(a, I^a + NCEV) \right] \right\} \quad (18)$$

g)地域選択の自由に対するオプション価値

Non-Contingent EV と期待 EV との差は立地選択確率の変化に対する便益と捉えることができ、治水対策による対象地域の安全度の向上による便益、すなわち立地選択の自由度の増加分²⁰⁾と考えられることから地域選択の自由に対するオプション価値 $LCQOV$ として定義する。

$$LCQOV = NCEV - EEV \quad (19)$$

h)総期待 EV

地域・状態別 EV に without の状態の生起確率と立地選択確率を乗じて足し合わせた期待値を総期待 EV と呼び、次式に示す $SEEV$ として定義する。

$$SEEV = \sum_j P^{aA} P^{aAj} E^{aj}(ZSCEV_i^j) + P^{aB} E^{aB}(ZSCEV_i^B) \quad (20)$$

i)総オプション価値

地域、状態にかかわらず一定の便益として捉える Non-Contingent EV と地域、状態別 EV の期待値として定義された総期待 EV との差は、地域選択の自由に対するオプション価値と浸水リスクに対するオプション価値に立地選択確率を乗じた和である。よってこのオプション価値を総オプション価値 SOV として定義する。

$$SOV = NCEV - SEEV \\ = LCQOV + \sum_j P^{aA} P^{aAj} ZCOV^j + P^{aB} ZCOV^B \quad (21)$$

2つのオプション価値を含んでいる便益定義は Non-Contingent EV のみである。また、一般均衡理論に基づいていることから、Non-Contingent EV は波及効果まで捉えている。なお、2つのオプション価値は常に正となる訳ではない。よって、Non-Contingent EV が期待 EV より、あるいは地域別 EV が地域別期待 EV より常に大きくなるとは限らない。しかし、Non-Contingent EV が2つのオプション価値を捉えた唯一の指標であることは変わらないため、リスク存在下における対策の経済評価に対しては Non-Contingent EV が最適な便益定義であると考えられる。

(2)不在地主の便益

不在地主の便益は、生産者余剰の変化分として次式に示すように近似的に定義する。

$$LB \equiv \sum_j \frac{1}{2} (L_s^{aj} + L_s^{bj})(R^{bj} - R^{aj}) + \frac{1}{2} (L_s^{aB} + L_s^{bB})(R^{bB} - R^{aB}) \quad (22)$$

(3)社会的純便益

治水対策の社会的純便益 SNB は、世帯の便益である Non-Contingent EV に総立地量を乗じた値と不在地主の便益との和で定義される。

$$SNB = N \cdot NCEV + LB \quad (23)$$

6. 治水対策による便益

4. で CUE モデルによるシミュレーションを行った治水対策に対して、5. で定義した便益の値を求めた。

1世帯当たりの地域・状態別 EV($ZSCEV$)の値を図-9に示す。この図では、地域A内56ゾーンと地域Bにおける平常時、流出・氾濫計算で設定した降雨規模の1/5、1/50に対する便益値を示している。平常時の便益は全ゾーンで0である。1/5では6ゾーン、1/50では4ゾーンの便益値が大きい。これらのゾーンは何れも浸水深が大

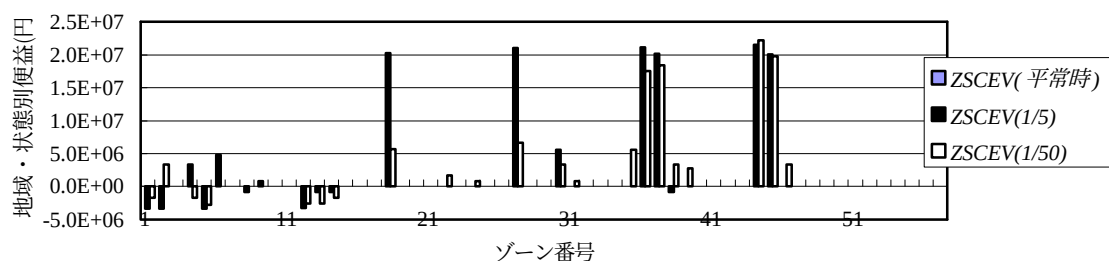


図-9 1世帯当たりの地域・状態別 EV(ZSCEV)の値

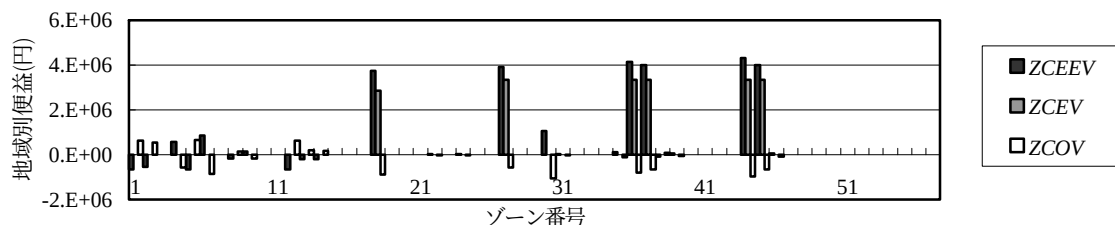


図-10 1世帯当たりの地域別期待 EV(ZCEEV), 地域別 EV (ZCEV), 浸水リスクに対するオプション価値(ZCOV)の値

幅に小さくなったゾーンである。以上のように地域・状態別 EV による評価は、浸水深の変化が支配的である。

1世帯当たりの地域別期待 EV(ZCEEV), 地域別 EV (ZCEV), 浸水リスクに対するオプション価値(ZCOV)の値を図-10に示す。地域別期待 EV は地域・状態別 EV の期待値であるため当然のことながら、図-9と同じ傾向を示している。地域別 EV もほぼ同じ傾向を示しているが、地域別期待 EV より小さい値を示しているため、浸水リスクに対するオプション価値が負の値であるゾーンが多くなっている。このようにオプション価値が負になることがあるが、これに対する解釈は確立されていない。

これら以外の便益定義について、その値を表-1に示す。このうち、上から5つの定義は1世帯当たりの便益値を、下から3つの定義は地域A(境川流域)および地域B(周辺市町村)における集計値を表している。

治水経済調査で計測される期待被害額に近い便益定義が総期待 EV であるが、その値は治水対策の最適な便益定義である Non-Contingent EV に比べて小さくなっている。その差が総オプション価値であり、これを含めた評価を行わなければ過小評価になる。一方、境川流域と治水対策の波及効果が及ぶ地域全体では、不在地主の便益がゼロとなり、社会的総便益は正となった。

表-1 治水対策の便益算定結果

便益定義	便益値
期待 EV (EEV)	51,438 円
地域選択の自由に対するオプション価値 (LCQOV)	21,457 円
総期待 EV (SEEV)	64,440 円
総オプション価値 (SOV)	8,455 円
Non-Contingent EV (NCEV)	72,895 円
全世帯の便益 ($N \times NCEV$)	377 億円
不在地主の便益 (LB)	0 億円
社会的総便益	377 億円

7. おわりに

CUE モデルは、治水対策を実施した場合における治水安全度と土地利用が同時かつ整合して予測できる手法である。本研究では、CUE モデルを構築し、治水対策に適用して対策の経済評価を行ったものである。具体的には、境川流域において治水対策による治水安全度と立地量の変化を予測し、リスク存在下に拡張した便益定義を用いて、治水対策による便益の値を求めた。その結果、治水安全度が向上しても必ずしも立地量が増加する訳ではなく、他地域との関係から立地量が減少する場合もあること、治水安全度の変化が大きい地域は立地量の増加が大きいこと、便益計測においてはオプション価値や土地供給に関する便益の計測が重要であること、などが判った。

今後の課題としては、CUE モデルを企業の立地を考慮したモデルへ拡張することが挙げられる。

参考文献

- 1) 高木朗義, 森杉壽芳, 上田孝行他: 立地均衡モデルを用いた治水投資の便益評価手法に関する研究, 土木計画学研究・論文集, No.13, 339-348, 1996.
- 2) 大都市における雨水整備研究会: 大都市下水道事業の雨水整備に関する検討報告書その7—下水道雨水排水計画策定マニュアル, pp.139-141, 1997.
- 3) 大橋健一・青山吉隆: 土地政策からみた地域の開発効果の計量化に関する研究, 土木計画学研究・講演集, No.11, pp.391-397, 1988.
- 4) ハル・R・ヴァリアン: ミクロ経済分析, 勁草書房, 1986.
- 5) (財)日本統計協会: 平成7年国勢調査地域メッシュ統計, 1995.
- 6) 岐阜県: 平成7年岐阜県統計書, 岐阜県統計協会, 1995.
- 7) 建設省: 治水経済調査マニュアル, 2000.

(2001.4.16 受付)