

# 災害リスクマネジメントに基づいた総合治水対策の評価モデルの構築\*

## Evaluation Method of Integrated Flood Risk Management\*

吉田正卓\*\*・高木朗義\*\*\*

By Masataka YOSHIDA\*\*・Akiyoshi TAKAGI\*\*\*

### 1. はじめに

わが国の都心部およびその周辺住宅地には、災害脆弱地区が多く存在する。これに対応するため、これまで河道改修や洪水調整池の整備をおこなうとともに、流域内においても流出抑制施設を整備するなど総合治水対策がおこなわれてきた。その結果着実に洪水災害は減少し、治水安全度は高まっている。しかし、それにつれて大都市およびその周辺では都市化が進み、それまでは浸水しやすい場所、いいかえれば、ある程度の浸水が許される場所（いわゆる湛水許容地区）にも住宅などが建てられたために、かつては農作物被害程度にとどまっていたレベルの洪水でも資産被害となってしまいう場合が多くなっている。このような災害脆弱地区では、治水対策をおこなうよりも住民や企業を移転させたほうが社会的費用が少ない場合がある。実際、土砂災害については1999年に広島市郊外で発生した土砂災害を契機に、新たに土砂災害防止法が制定され、住宅の移転を含めた対策が実施されようとしている<sup>1)</sup>。しかし、その具体的な方策はいまだ確立しておらず、早急な検討が望まれている。治水対策について戻って考えてみると、このような立地変更を伴う施策の検討は単純に当該地区のみについておこなう訳にはいかない。なぜなら立地変更は土地利用変化となり、流出現象を介して当該地区のみならず他地区の治水安全度に影響を及ぼすからである。すなわち、各地区の治水安全度と土地利用は地区を越えて相互に依存しており、社会全体として洪水リスクを軽減するためには、この相互依存関係を踏まえた上で検討する必要がある。

近年、「都市型水害」とよばれるカタストロフィックな水害が頻発している。特に、2000年の東海豪雨災害では名古屋市を中心として都市部において大きな被害をもたらした。このようなカタストロフィックな災害に対しては、従来までの施設整備、すなわちハード対策を中心としたリスクコントロールだけでは対応できず、洪水保険

などを中心としたリスクファイナンスも取り入れる必要があることが明らかとなっている<sup>2)</sup>。

以上のことを勘案すると、これからの治水対策は、従来型の施設整備を中心としたハード対策だけでなく、土地利用規制などを含めたリスクコントロールや、洪水保険制度などのリスクファイナンスを効率的に組み合わせしていく、すなわち災害リスクマネジメントに基づいた総合治水対策を実施していく必要がある。そして、このような災害リスクマネジメントに基づいた総合治水対策を立案していくためには、治水対策による効果は当然のことながら、土地利用規制など住宅や企業の立地に関わる施策による効果、さらには洪水保険を中心とするリスクファイナンスによる効果<sup>3)</sup>を同時に捉えながら検討する必要がある。

そこで本研究では、災害リスクマネジメントに基づいた総合治水対策を立案する際に必要である評価モデルを提案するとともに、その適用性について確認することを目的とする。また、治水施設や洪水保険制度を整備すると却って被害ポテンシャルを大きくする、すなわちカタストロフィックな水害に対する脆弱性を高めることはないか、あるいは洪水保険制度の整備は住み替えにどう影響するかなど、新しい施策の影響について、本研究で提案したモデルで評価可能であるかどうかを簡単な数値シミュレーションを通して確認する。

なお、自己財産の回復を目的とする災害保険の強制化は法的に難しいと言われているが、本研究ではシステムとして洪水保険がどのように機能するのかという視点で分析をおこなう。例えば、これまでも現実性を考慮して、地方自治体が住民から税という形で保険料を徴収し、その資金を原資として災害保険を運用するという方法や政府が災害保険のベースに対して補助をおこなって保険料を安くする方法<sup>4)</sup>、あるいは政府による強制保険と市場を通じた災害保険の取引という混合保険システム<sup>5)</sup>などが考えられている。また、このような保険システムであれば、地区毎に異なる保険料率が設定可能であると考えられている。本研究では、このような既往研究で提案されている災害保険に関わる公共政策を想定し、地区別に異なる保険料率の影響を評価できるかどうかを焦点を当てている。

\*キーワード：河川計画，公共事業評価法，リスクマネジメント

\*\*学生員，岐阜大学大学院工学研究科土木工学専攻

\*\*\*正員，博(工)，岐阜大学工学部社会基盤工学科

(岐阜市柳戸1番1，TEL 058-293-2445，

FAX 058-230-1248，E-mail: a\_takagi@cc.gifu-u.ac.jp)

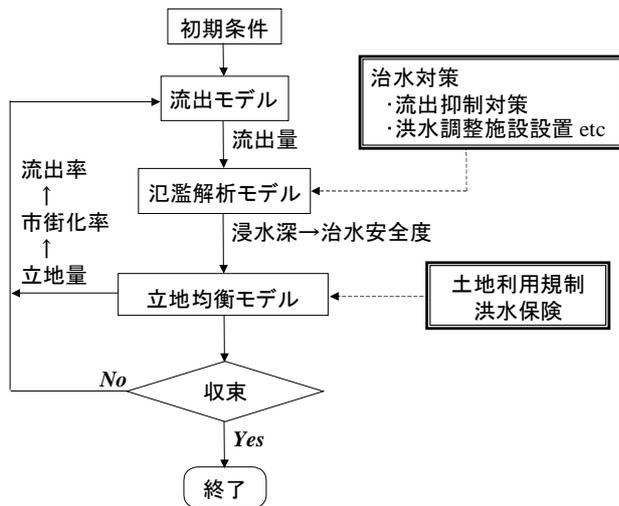


図1 評価モデルの概念

## 2. 評価モデルの構築

### (1) 評価モデルの概要

前述したように、災害リスクマネジメントに基づいた総合治水対策を評価するためには、治水対策、土地利用規制、および洪水保険など、様々な施策による効果を同時、かつ整合的に捉えられるモデルでなければならない。そのためには、まず流出・氾濫現象を捉えられるモデルと立地変化を捉えられるモデルの統合が必要である。そこで本研究では、先行研究<sup>9)</sup>で構築してきた洪水危険度を内生化した立地均衡モデルを基に、図1に示すように洪水保険制度の影響を分析できるようにするための改良をおこなうとともに、世帯だけでなく、企業立地も分析可能なモデルに改良する。そして、このモデルを用い、様々な方策を実施した場合について、被害ポテンシャルや社会厚生を比較することにより、災害リスクマネジメントに基づいた総合治水対策を評価しようとするものである。これが本研究における評価モデルの概念である。

本研究で構築するモデルは、実証分析ができることを目標とする。ここでは実際の地域を仮定しつつも仮想的な地域を想定した簡単なシミュレーションしかできていないが、将来的には実際の総合治水対策を評価することができるモデルとして構築する。したがって、各関数は一般形で示すのではなく、具体的な関数を当てはめたものとして示している。ただし、示した関数の形やパラメータについては当然のことながら、地域特性によって変化するものであり、本研究の後半でおこなっている簡易シミュレーションで用いた値が一般的に使える訳ではないことに注意して欲しい。

近年、カストロフィックな災害に対する対策については、資産形成過程を詳細に記述した経済評価モデルがいくつか提案されている<sup>7)</sup>。筆者らも同様な取り組みを

おこない、その成果については別の機会に発表しているところである<sup>8)</sup>。このような動学モデルに対し、本研究で構築する評価モデルでは、家計や企業への資源配分を所与とする。当然のことながら本評価モデルでは資産形成過程は分析できないが、既往の動学モデルに関する研究成果を見ると、最適な資産形成では一定率の資源配分となる、あるいは筆者らの先行研究では一定率として分析を進めているため、静学モデルによる分析とまったく相容れられない訳ではないと思われる。また本研究では、世帯と企業という2つの主体について立地という面から各地区の資産量を評価しようとするものであり、その部分に焦点を絞って新しいタイプの総合治水対策が社会厚生や被害ポテンシャルにどのような影響をもたらすのかを評価することを目的としている。

### (2) 評価モデルの仮定

評価モデルを構築するために次の仮定をおく。

- ①社会はいくつかの地区で構成されている。なお、地区内は均一空間であるものとする。
- ②各地区の土地利用は任意である。すなわち、居住用および業務用の土地利用が混在しているものとする。
- ③社会はいくつかの確率で発生する洪水状態で構成されているものとする。洪水状態は対象とする地区や河川特性および河川計画規模を考慮するとともに、超過洪水対策として洪水保険が有用である点も踏まえて、現況で浸水しない状態から、計画規模以上の想定し得る最大の状態までを何段階かに分けて捉える必要がある。
- ④社会は同一の選好をもつ多数の世帯、同じく同一の選好をもつ多数の企業（企業所有者）、地区毎に一括して土地を所有する地主、政府の4部門と土地市場で構成されているものとする。本来、企業と世帯の間には労働や財に関する需給関係が存在するが、本研究では土地需給に関する競争のみを考えることとする。なぜなら、本研究における対象地区は、比較的小さな範囲を想定しており、この範囲で労働や財の市場が閉じているとは考えにくいからである。
- ⑤世帯および企業が土地サービスを必要するときは、地主から土地を賃借する。すなわち、土地の使用については賃貸借契約のみとし、売買契約は考えないものとする。
- ⑥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、ワルラス的な多市場同時均衡に基づき、地区毎に土地サービスの取引量と地代が内生的に決定されるものとする。
- ⑦評価指標は、社会厚生と被害ポテンシャルとする。社会厚生は、社会全体（本研究では対象地域）における各主体の厚生（期待効用水準や利潤など）の総和で定

義され、水害危険地区だけでなく安全地区を含め、災害時だけでなく平常時も含めた評価指標である。一方、被害ポテンシャルとは、災害事象が発生した場合における社会全体での被害規模であるため、災害時に他地区へ被害が波及しなければ、水害危険地区における資産量の総和として捉えることができる。本研究では、世帯および企業の保有資産量を一定と仮定しているため、被害ポテンシャルを水害危険地区における世帯数と企業数として定義する。なお、被害ポテンシャルは小さいほど良いという評価指標である。すなわち、水害危険地区の世帯数や企業数が少ないほどよいと考えることとなる。

### (3) 流出氾濫モデル

治水安全度が人々の立地選択に影響を及ぼす一方で、開発による流出量の増大が洪水被害を招く恐れがある。そこで、後で示す立地均衡モデルと整合的に用いることを念頭に置いた流出氾濫モデルを構築する。この流出氾濫モデルと立地均衡モデルでやり取りされる変数は、市街化面積と浸水深であり、それらについて相互リンクのし易さを考えてモデル化する。

流出氾濫モデルの具体的なモデルは多数存在するため、検討すべき河川や流域の特性に合わせて選べばよい。例えば、先行研究<sup>9)</sup>では kinematic wave 法と開水路型二次元タンクモデル（平面タンクモデル）法を用いている<sup>9)</sup>。本研究では対象地区を小さい範囲にしており、より簡易な計算方法で十分であると思われるため、流出モデルとして合理式合成法、氾濫解析モデルとして一池モデルを用いることとする。

具体的には、まず立地均衡モデルの計算結果から求められる世帯数、企業数とそれぞれの土地需要面積から市街化面積を式(1)によって求め、これを式(2)に代入して流出率を計算する。これによって、流出氾濫モデルと立地均衡モデルがリンクすることとなる。なお当然のことであるが、これについては相当数の立地変更があれば、流出氾濫状況に影響を及ぼすが、そうでない場合にはその影響は僅かであり、現実には後者の状況であることが多いことに注意されたい。また浸水深は式(5)の  $H - V$  曲線ように求めることとし、立地均衡モデルには治水安全度として受け渡すことになる。なお、式(5)の  $H - V$  曲線は、地区の地形によって決まるものであり、一般式として表現しづらいため、本研究の後半でおこなう数値シミュレーションに対応した地区特定のもの示している。式(5)は東海豪雨災害の再現計算結果<sup>10)</sup>から近似的に作成したものである。

$$N^j B^j + n^j b^j = K^j \quad (1)$$

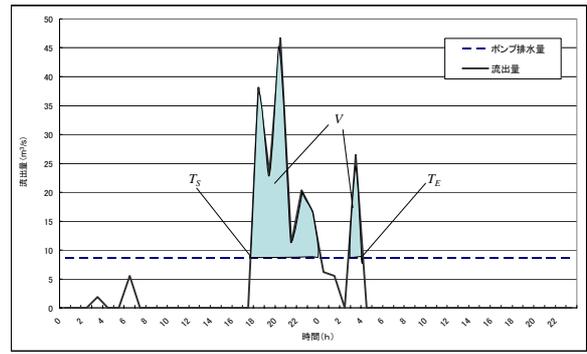


図2 流出量と浸水量

$$f^j = \frac{0.9 \times K^j + 0.6(A^j - K^j)}{A^j} \quad (2)$$

$$Q_i^j(t) = \frac{1}{3.6} f^j I_i(t) A^j \quad (3)$$

$$V_i^j = \sum_{j=1}^j \sum_{t=T_S}^{T_E} (Q_i^j(t) - Q_C^j) - V_C^j \quad (4)$$

$$H_i^j = \frac{\sqrt{V_i^j}}{480} \quad (5)$$

ここで、 $i$  : 洪水状態を表す添字、 $j$  : 地区を表す添字、 $I$  : 到達時間当たりの降雨量、 $f$  : 流出率、 $H$  : 最大浸水深 (= 治水安全度)、 $Q$  : 流出量、 $Q_C$  : 流下能力 (ポンプ排水を想定し一定と考える)、 $V$  : 最大浸水量、 $V_C$  : 流出抑制施設貯留量、 $A$  : 流域面積、 $K$  : 市街化面積 (= 土地供給量)、 $b, B$  : 1世帯、1企業当たりの平均土地需要量、 $n, N$  : 世帯数、企業数、 $T_S, T_E$  : 流出量が流下能力を最初に上まわる時刻、すなわち浸水開始時刻、および浸水量が最大となる時刻、本研究の後半でおこなう数値シミュレーションでは図2のような(途中流出量が流下能力を下まわっており、浸水量の一部を排水しているが、その後の流出量はその排水量より多いため、図2の時刻  $T_E$  で浸水量が最大となっている)。

### (3) 立地均衡モデル

#### (a) 世帯の行動モデル

治水施設整備、土地利用規制、洪水保険制度整備という災害リスクマネジメントに基づく総合治水対策を評価するためには、少なくとも治水安全度、洪水保険、土地需要およびその他消費という4つの要素を捉える必要がある。したがって、これら最低限必要な4要素の評価をおこなうためのモデルを構築する。

すべての世帯は任意の地区に居住するものとし、地区、洪水状態毎の予算制約下で土地需要量、合成財需要量をコントロールして期待効用を最大にするよう行動するものとする。また、世帯は洪水保険に加入するとともに、洪水による資産被害のうち洪水保険でカバーできない分が存在するものとする。

以上の点を踏まえて、世帯の効用関数をコブ・ダグラス型を用いて定式化すると、次のようになる。

$$E^j(u_i^j) = \max_{x,b} \sum_i \phi_i^j x_i^{\alpha_x} b^{j\alpha_b} \quad (6)$$

$$[ \{1 - (1 - w^j) D_i^j\} z^j ]^{\alpha_z} (H' + H_i^j)^{\alpha_H} \quad (7)$$

$$s.t. \quad p_i x_i^j + r^j b^j + \xi^j h^j = y^j - g^j \quad (7)$$

$$w^j D_i^j z^j = h_i^j \quad (8)$$

ここで、 $E^j(u_i^j)$ ：期待効用水準、 $u$ ：効用水準、 $\phi$ ：洪水状態の生起確率、 $x$ ：合成財需要量、 $z$ ：保有資産、 $w$ ：洪水保険のカバー率、 $D$ ：資産被害率、 $H'$ ：浸水深評価基準高、 $P$ ：合成財価格、 $r$ ：地代、 $\xi$ ：洪水保険に対するリスクプレミアム、 $h$ ：洪水保険でカバーする資産被害額の期待値（ $= \sum_i \phi_i^j w^j D_i^j z^j$ 、なお、 $\xi h$ ：保険料）、 $y$ ：所得、 $g$ ：一括固定税、 $h'$ ：保険金、 $\alpha_x, \alpha_b, \alpha_H, \alpha_z$ ：パラメータ。

これらを解くと、世帯の土地需要関数、合成財需要関数、および洪水状態別効用水準を得る。

$$b^j = \left( \frac{\Omega^j}{r^j} \right) \alpha_b \quad (9)$$

$$x_i^j = \left( \frac{\Omega^j}{p_i} \right) \alpha_x \quad (10)$$

$$u_i^j = \left( \frac{\alpha_x}{p_i} \right)^{\alpha_x} \left( \frac{\alpha_b}{r^j} \right)^{\alpha_b} \{ (1 - D_i^j) z^j + h' \}^{\alpha_z} (H' + H_i^j)^{\alpha_H} \Omega^j \quad (11)$$

ここで、 $\Omega^j = (y^j - \xi^j h^j - g^j)$ 。

世帯は各地区で得られるであろう期待効用水準に従って、より高い期待効用水準を達成できるように居住地区を選択する。本研究ではこれを Logit モデルを用いて表現する。したがって、立地選択確率は次のようになる。この Logit モデルにより得られる地区選択確率より地区における立地量が決定される。

$$P^j = \frac{\exp(\theta \cdot E^j(u_i^j))}{\sum_j \exp(\theta \cdot E^j(u_i^j))} \quad (12)$$

ここで、 $P$ ：世帯の地区選択確率、 $\theta$ ：パラメータ。

このとき、最大期待効用値を示す満足度関数を得る。

$$SV = \frac{1}{\theta} \ln \left[ \sum_j \exp \{ \theta \cdot E^j(u_i^j) \} \right] \quad (13)$$

ここで、 $SV$ ：最大期待効用値（満足度関数）。

### (b) 企業の行動モデル

世帯の行動モデルと同様に最低限必要な要素の評価をおこなうためのモデルを構築する。

不確実性下では、企業は利潤が定かではないという危険に直面しているため、このような危険に対する企業の行動が決定的な役割を演じる。ここでは、企業所有者を想定してこのような企業の行動を考えるものとする<sup>11)</sup>。具体的には利潤量を変数とする効用関数を導入し、期待効用の最大化が企業の目的と考える。企業は地区、洪水状態毎の生産技術制約下で土地需要量、合成財供給量、労働需要量をコントロールして期待効用最大化行動をするものとする、次のように定式化される。

$$E^j(v_i^j) = \max_{X_i^j, B^j, Y^j} \sum_i \phi_i^j \cdot v_i^j (\pi_i^j) \quad (14)$$

$$s.t. \quad X_i^j = \eta B^j \beta_B Y^j \beta_Y \quad (15)$$

$$[ \{ (1 - (1 - W^j) D_i^j) Z^j \} ]^{\beta_Z} (H' + H_i^j)^{\beta_H} \quad (16)$$

$$\pi_i^j = p_i X_i^j - r^j B^j - \omega^j Y^j - \xi^j m^j - G_i^j \quad (16)$$

$$W^j D_i^j Z^j = m_i^j \quad (17)$$

ここで、 $E^j(v_i^j)$ ：期待効用水準、 $v$ ：効用水準、 $\pi$ ：利潤、 $X$ ：合成財供給量、 $\eta$ ：生産効率、 $Y$ ：労働需要量、 $Z$ ：保有資産、 $W$ ：洪水保険のカバー率、 $D'$ ：資産被害率、 $\omega$ ：賃金率、 $m$ ：洪水保険でカバーする資産被害額の期待値（ $= \sum_i \phi_i^j W^j D_i^j Z^j$ 、なお、 $\xi m$ ：保険料）、 $G$ ：一括固定税、 $m'$ ：保険金、 $\beta_B, \beta_Y, \beta_H, \beta_Z$ ：パラメータ。

これらを解くと、地区毎の土地需要関数、合成財供給関数、および洪水状態別利潤関数を得る。

$$B^j = \frac{\omega^j \beta_B Y^j}{r^j \beta_Y} \quad (18)$$

$$X_i^j = \eta \left( \frac{\omega^j \beta_B}{r^j \beta_Y} \right)^{\beta_B} \{ (1 - D_i^j) Z^j + m_i^j \}^{\beta_Z} (H' + H_i^j)^{\beta_H} Y^j \quad (19)$$

$$\pi_i^j = p_i \eta \left( \frac{\omega^j \beta_B}{r^j \beta_Y} \right)^{\beta_B} \{ (1 - D_i^j) Z^j + m_i^j \}^{\beta_Z} (H' + H_i^j)^{\beta_H} Y^j \quad (20)$$

$$- \frac{\omega^j}{\beta_Y} Y^j - \xi^j m_i^j - G_i^j$$

企業も世帯と同じように立地選択行動をとるものとし、Logit モデルを用いて表現する。

$$P'^j = \frac{\exp \{ \theta' \cdot E^j(v_i^j) \}}{\sum_j \exp \{ \theta' \cdot E^j(v_i^j) \}} \quad (21)$$

ここで、 $P'$ ：企業の地区選択確率、 $\theta'$ ：パラメータ。

このとき、最大期待効用値を示す満足度関数を得る。

$$SV' = \frac{1}{\theta'} \ln \left[ \sum_j \exp \{ \theta' \cdot E^j(v_i^j) \} \right] \quad (22)$$

ここで、 $SV'$  : 最大期待効用値 (満足度関数) .

### (c) 土地供給者の行動モデル

地主は地区毎に一括して土地を所有し、地代 (均衡価格) によって供給面積を変化させるものとし、大橋・青山<sup>12)</sup>のモデルを参考にして土地供給関数を以下のように定式化する. このモデルを用いることで、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不在地主の行動を捉えられる.

$$K^j = \bar{K}^j \left(1 - \frac{\sigma}{r^j}\right) \quad (23)$$

ここで、 $\bar{K}$  : 土地供給可能面積,  $\sigma$  : パラメータ.

### (d) 政府の行動モデル

政府は、世帯と企業から徴収した一括固定税を原資として、流出抑制施設整備への投資を行う.

$$C(V_c^j) = g^j + G^j \quad (24)$$

ここで、 $C(\cdot)$  : 流出抑制施設整備費用.

### (e) 均衡条件

土地市場で集計された需要と供給が均衡し、各地区の市場均衡価格 (地代) が決定される. 地代が決定される市場均衡条件は以下ようになる.

$$b^j \cdot n^j + B^j \cdot N^j = K^j \quad (25)$$

このように市場均衡によって決定された地代により世帯と企業は期待効用最大化行動をとり、その結果、各地区へ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.

$$\sum_j n^j = n^T \quad (26)$$

$$\sum_j N^j = N^T \quad (27)$$

ここで、 $n^T$  : 総世帯数,  $N^T$  : 総企業数.

式(25)の市場均衡条件、式(26)、(27)の立地均衡条件よりワルラス的な多市場同時均衡に基づき、各地区の立地量と地代の均衡解が同時に決定される. 例えば、式(25)に、式(9)、(18)、(23)を代入することにより、均衡地代は次式のように表される.

$$r^{j*} = \sigma + \frac{\Omega^j \alpha_b n^{j*}}{K^j} + \frac{\beta_B \omega^j Y^j N^{j*}}{\beta_Y K^{j*2}} \quad (28)$$

ここで、 $n^*$ ,  $N^*$  : 流出氾濫現象の均衡と立地均衡条件を満たした上で決定される各地区の世帯数、企業数.



図3 野並地区

## 3. 総合治水対策を評価するための条件設定

本研究で構築したモデルは、災害リスクマネジメントに基づく総合治水対策を評価することを目的としている. したがって、従来では評価できなかった様々な施策に対して評価できるかどうか、すなわちモデルの適用性を確認する必要がある. そのためにここでは、まず第一段階として3種類の施策のそれぞれについて適当な評価ができるかどうかを確認する. 次に第二段階として3種類の施策を組み合わせた場合について、それらが同時、かつ整合的に評価できるかどうかを確認する.

### (1) 対象地域

本研究では、東海豪雨災害によって大きな被害を被った野並地区およびこの周辺地区の2地区について、いくつかの修正および追加的条件を加えた仮想的な地域を想定するものとする. 野並地区は図3に示すように、二級河川天白川に支川の藤川が合流する場所に位置し、また東側には相生山がひかえているため、降雨量が非常に多い場合には、相生山からの表面流が斜面途中にある郷下川を越えて当該地区に流入してしまうという地形的に水害に対して脆弱な地区である. しかし、このことを除けば立地条件は良好であり、特に地下鉄の駅もこの地区内に建設されており、利便性が高いことから住宅や企業が多く立地している.

これらの情報を参考にして、水害危険地区 (地区1) と安全地区 (地区2) の2地区からなる仮想的な対象地域を設定する. また、災害規模は東海豪雨災害における状況を想定する. なお、災害は内水のみを想定し、外水氾濫については考慮しないこととする.

### (2) 対象施策

災害リスクマネジメントに基づいた総合治水対策として、次の3種類の施策を考える. また、これらの3つの施策を組み合わせた場合についても対象とする.

#### (a) 洪水保険

洪水によって損傷するであろう資産のうち、洪水保険によってカバーされる分については、リスクプレミアム

付きの保険料を支払っておくことで被災時に回復することができる。また、「現況」を施策を実施しない状況として位置付け、実社会における洪水保険の平均的な加入率を考慮して、全世帯一律に被害額の30%がカバーされているものとする。洪水保険に対する公的施策を行った場合にもリスクプレミアムはそれを踏まえて市場において決まるものである<sup>13)</sup>が、その公的施策の方法には様々なものがあるため、本研究ではそれらを特定せず、カバー率が上昇するに従ってリスクプレミアムも増大するという性質だけ捉え、外生的に与えることとする。具体的には、現況でカバー率=30%でリスクプレミアム=1とし、施策としては50%で2、65%で3、80%で4、100%で5と設定する。

### (b) 土地利用規制

水害危険地区（地区1）の供給面積を抑制することにより、安全地区（地区2）への住み替えを誘引する施策を考える。規制する面積は供給可能面積の10%、20%、30%、40%とし、それぞれの施策について評価をおこなう。なお、土地利用規制をおこなうための直接費用は考えないこととする。なぜなら、土地市場を通じて土地需要（世帯と企業）が被る社会的費用で考えればよいからである。しかし、土地供給者の生産者余剰が変化するため、その変化分については評価することとする。

### (c) 治水(流出抑制)施設整備

世帯および企業から徴収する一括固定税を原資として、水害危険地区（地区1）に流出抑制施設（洪水調整地）を建設し、被害を軽減させる。具体的には、流出抑制施設の建設費単価を過去の実績などから貯留量1m<sup>3</sup>当たり10万円とし、水害危険地区（地区1）に立地する世帯と企業が一括固定税として25年間に均等で支払うこととする。具体的には、洪水調整地の容量を10,000m<sup>3</sup>、20,000m<sup>3</sup>、30,000m<sup>3</sup>、40,000m<sup>3</sup>とし、この分の浸水量が軽減するものと考え、それぞれの施策について評価をおこなう。

以上、本研究では、3種類の施策に対して、それぞれ4つのレベルを実施することとなるため、表1に示すように各レベルについて①～④という記号を当てはめて整理しておく。

### (3) データ・セットおよびパラメータ推定

2. で構築したモデルに表2に示すデータ・セットを入力し、地区1の現況を再現するように試行錯誤によってパラメータを推定した。なお、洪水状態は平常時と洪水時の2つに区分することとした。パラメータ推定結果を表3、地区1の現況再現性を表4に示す。これらの結果を見てみると、本研究で構築したモデルの現況再現性は概ね確保されていると思われるため、このモデルを用いて各種・各レベルの総合治水対策、ならびにそれ

表1 対象施策

|     | 洪水保険                 | 土地利用規制 | 流出抑制<br>(洪水調整池設置)    |
|-----|----------------------|--------|----------------------|
| 施策① | $w = 50\%, \xi = 2$  | 10%    | 10,000m <sup>3</sup> |
| 施策② | $w = 65\%, \xi = 3$  | 20%    | 20,000m <sup>3</sup> |
| 施策③ | $w = 80\%, \xi = 4$  | 30%    | 30,000m <sup>3</sup> |
| 施策④ | $w = 100\%, \xi = 5$ | 40%    | 40,000m <sup>3</sup> |

表2 データ・セット

|                 |                      | 地区1                  | 地区2                  |
|-----------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| $\phi$ (洪水発生確率) |                      | 1/50                 | —                    |
| 世帯              | $x$ (合成財消費量)         | 3770 千円              |                      |
|                 | $b$ (土地需要量)          | 116m <sup>2</sup>    | 103m <sup>2</sup>    |
|                 | $z$ (保有資産)           | 15,000 千円            |                      |
|                 | $y$ (所得)             | 4,570 千円             |                      |
|                 | $D$ (資産被害率)          | 0.6                  | —                    |
|                 | $n^T$ (地域総世帯数)       | 4500 戸               |                      |
| 企業              | $X$ (合成財生産量)         | 8660 千円              | 8704 千円              |
|                 | $Y$ (労働需要量)          | 1920 時間              |                      |
|                 | $B$ (土地需要量)          | 39m <sup>2</sup>     | 34m <sup>2</sup>     |
|                 | $Z$ (保有資産)           | 8488 千円              |                      |
|                 | $D'$ (資産被害率)         | 0.6                  | —                    |
|                 | $\varpi$ (貸金率)       | 2172 円/時間            |                      |
|                 | $N^T$ (地域総企業数)       | 12000 企業(人)          |                      |
| 地主              | $\bar{K}$ (土地供給可能面積) | 741750m <sup>2</sup> | 750000m <sup>2</sup> |

表3 パラメータ推定結果

|    |                       |                    |
|----|-----------------------|--------------------|
| 世帯 | $\alpha_x$ (合成財消費量)   | 0.8308             |
|    | $\alpha_b$ (土地需要量)    | 0.1692             |
|    | $\alpha_H$ (浸水深)      | -0.05              |
|    | $\alpha_z$ (資産)       | 0.0001             |
|    | $\theta$ (ロジットパラメータ)  | 0.043              |
| 企業 | $\beta_Y$ (労働)        | 0.9425             |
|    | $\beta_B$ (土地需要量)     | 0.0575             |
|    | $\beta_H$ (浸水深)       | -0.03              |
|    | $\beta_Z$ (資本)        | 0.00001            |
|    | $\eta$ (生産効率)         | 0.5714             |
| 地主 | $\theta'$ (ロジットパラメータ) | $1 \times 10^{-6}$ |
|    | $\sigma^1$ (地区1の土地供給) | 2549               |
|    | $\sigma^2$ (地区2の土地供給) | 2760               |

表4 地区1の現況再現性

|                       | 現況 <sup>14)</sup> | 再現結果  | 誤差 <sup>*</sup> |
|-----------------------|-------------------|-------|-----------------|
| 地代(円/m <sup>2</sup> ) | 6,364             | 6,351 | 0.2%            |
| 世帯数(戸)                | 1,869             | 1,855 | 0.7%            |
| 企業(人)                 | 5,695             | 5,664 | 0.5%            |

※誤差 =  $|1 - (\text{再現結果} / \text{現況})| \times 100$

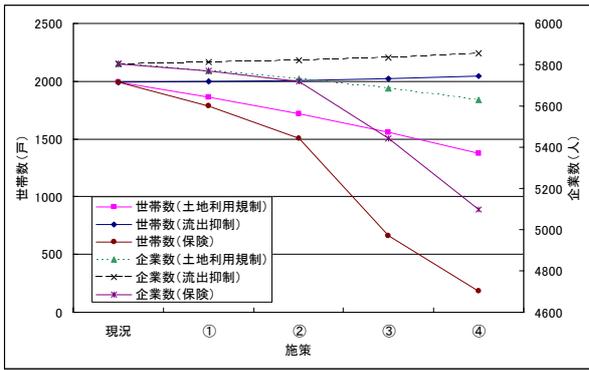


図4 水害危険地区（地区1）の世帯数，企業数

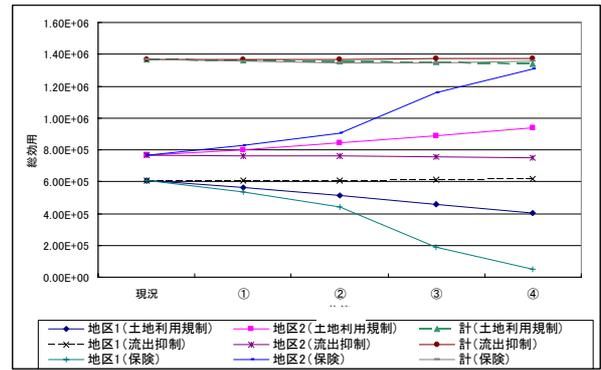


図7 世帯の総効用

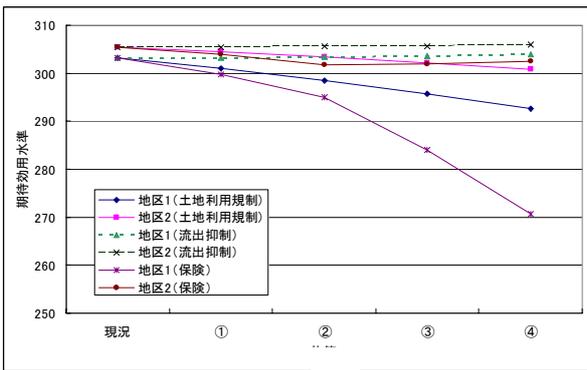


図5 世帯の期待効用水準

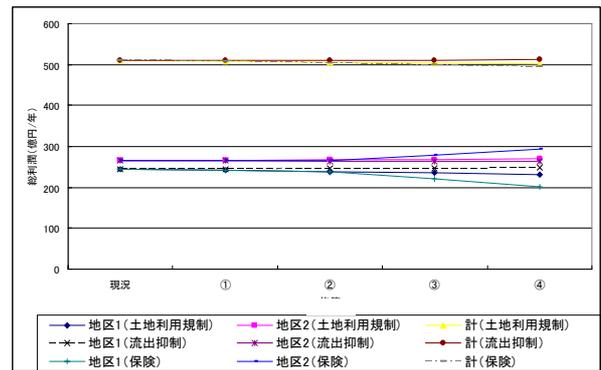


図8 企業の総総利潤

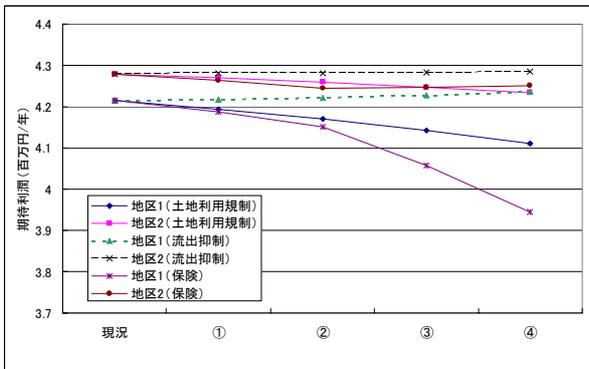


図6 企業の期待利潤

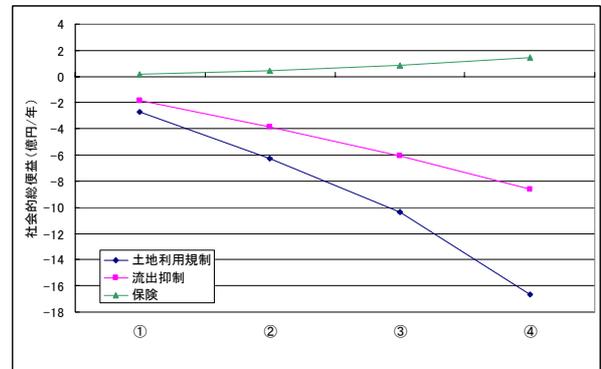


図9 社会的総便益

らの組合せをおこなった場合について、世帯、企業の立地の動向および効用、利潤の変化を推計する。

#### 4. 総合治水対策の評価結果と考察

##### (1) 施策を単独で実施した場合

各種・各レベルの施策を実施した場合 (with) と実施しなかった場合 (without) について、立地の動向、および効用、利潤の変化を推計した。その結果を図4～図9に示す。図中の横軸に記した番号は表1に対応している。図4は先に定義した被害ポテンシャルについて見るためのものである。図5の期待効用水準、図6の期待利潤と

は、一世帯あるいは一企業当たりの値を示している。また、図7の世帯の総効用、図8の企業の総総利潤とは、図5～6に示した一世帯、一企業当たりの期待効用水準、期待利潤に各地区に立地している世帯数、企業数を掛けることによって、各地区の合計値を示している。さらに図9の社会的総便益とは、世帯の総便益、企業の総総利潤、地主の総余剰変化を合計したものである。なお、世帯の総便益とは、等価的オプション価格を空間に拡張した便益定義に基づいた非限定便益<sup>15)</sup>によって求めた値に地域全体の世帯数を掛けたものである。

まず図4を見てみると、流出抑制では施策のレベルを上げる、すなわちより安全な施策を実施するに従って世

帯数も企業数も増加する傾向にあることがわかる。一方、土地利用規制、洪水保険は施策のレベルを上げる、すなわちより安全な施策を実施するに従って世帯数、企業数とも減少する傾向にある。したがって、本モデルを用いることによって、3種類の施策のうち、流出抑制施設整備をおこなうと却って被害ポテンシャルを大きくするという結果を導き出すことができた。

図5～6を見てみると、流出抑制施設整備をおこなった場合のみ、地区1、2とも期待効用水準、期待利潤が増大していることがわかる。地区1だけではなく地区2でも増大するのは、地区1に世帯や企業が移転することにより地区2の土地需要量が減少し、地代が安くなるからである。基本的な地域間の波及効果ではあるが、本モデルはこれを正しく表現できている。

図7～8を見てみると、地区2では洪水保険、土地利用規制の実施によって一世帯、一企業当たりの効用、利潤が減少したにも関わらず、世帯数、企業数の増加により総効用、総利潤が増加することがわかる。一方、施策の種類やレベルに関わらず、世帯数、企業数が減少している地区は総効用、総利潤も減少している。しかし、地区1において総効用、総利潤が減少しても、世帯数、企業数が減少していれば、被害ポテンシャルを下げたことに他ならず、社会的に意味があると思われる。本モデルでは被害ポテンシャルを一つの評価指標としており、このような考察が可能であることを強調したい。しかし、本来は被害ポテンシャルも考慮した社会厚生指標を考案すべきである、という大きな課題が残っている。

最後に、図9の施策による社会的総便益を見てみる。ここでも、流出抑制では施策のレベルを上げると増加するが、洪水保険や土地利用規制では減少している。

以上のことをまとめると、本研究で設定した条件の下ではあるが、まず流出抑制施設整備は便益が投資費用を上まわるという結果、つぎに洪水保険は保険料の増大という費用が被害軽減額による便益を上まわるという結果、さらに土地利用規制は土地資産の放出という費用に比べて被害軽減額による便益を上まわるという結果、をそれぞれ個別に導くことができたことが成果である。

なお、洪水保険については、平常時におけるリスクプレミアム付きの保険料支払いと洪水時において保険でカバーされる資産被害額とのトレードオフ問題となっている。また、土地利用規制も同様で、平常時における土地資産の減少と移転に伴う被害軽減額とのトレードオフ問題となっている。そして、本モデルはこれらについて洪水発生確率を踏まえた上で期待効用水準に基づき、さらに他地域への波及効果をも考慮して評価している。しかし、評価結果から判断すると、本研究で設定したパラメータは資産の選好に対する値が小さく設定されており、被害軽減額による期待効用水準への影響が小さくしか表

れてきていないことが考えられる。したがって、これについては横松・小林<sup>7)</sup>などを参考にしながら、パラメータの感度分析を行うことを今後の課題としたい。

## (2) 施策を組み合わせる実施した場合

3種類の施策を組み合わせる実施した場合について、シミュレーションをおこなった結果の一部を図10～12に示す。図10～12はすべて3種類の流出抑制施設整備（各図とも左から施策なし、20,000m<sup>3</sup>、40,000m<sup>3</sup>）を基準として、土地利用規制と洪水保険を組み合わせる実施した場合の結果を示している。図10は水害危険地区（地区1）の世帯数を示しており、被害ポテンシャルの一部を表している。図11は世帯の総効用を示している。図12は地域全体の社会的総便益を示しており、社会厚生を表している。

施策を組み合わせるおこなっても、地区1の世帯数は減少する。したがって、流出抑制施設整備を行っても土地利用規制や洪水保険制度整備という施策を組み合わせる行えば、被害ポテンシャルを減らす可能性があることを評価できた。また、施策を組み合わせる行った場合には、どの組合せを実施しても世帯の総効用が減少するだけでなく、地域全体の社会的便益もマイナスになってしまうという結果となった。これは流出抑制による効用や社会的便益の増加分よりも、他の2つの施策による減少分の方が大きいためである。すなわち、施策を組み合わせるおこなった場合には、流出抑制による効果は、洪水保険と土地利用規制による効果に比べて小さいという評価ができたことになる。したがって、本モデルを用いることにより、異質な3種類の施策を同時に評価できたと考え、このことが本研究の最大の成果であると考える。

## 5. おわりに

本研究では、従来では同時に評価することが難しかった洪水保険、土地利用規制、流出抑制（洪水調整池設置）という3つの施策について、同時に、かつ整合的に評価をすることができるモデルを構築した。また、本評価モデルは、各地区の世帯数や企業数を推定できることから被害ポテンシャルについても評価を行うことが可能である。簡単なシミュレーションを通して、本評価モデルの適用性を確認したところ、パラメータの推定や条件設定においていくつかの課題を残したものの、3種類の施策を同時に評価できることが確認できた。シミュレーション結果においては、流出抑制施設整備だけが僅かながら効果がある一方で、被害ポテンシャルを増加させることになることが示された。逆に、土地利用規制や洪水保険は効果は得られないものの、被害ポテンシャルを減少させることが示された。これについてはもう少し詳細なデ

流出抑制なし

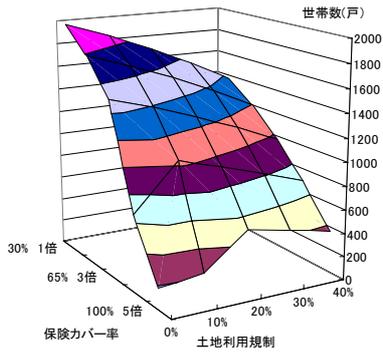
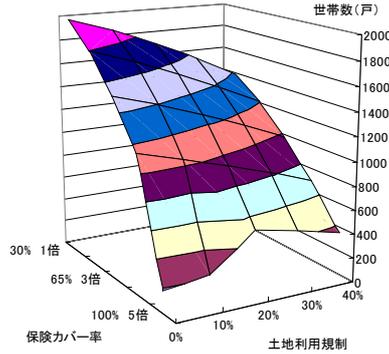
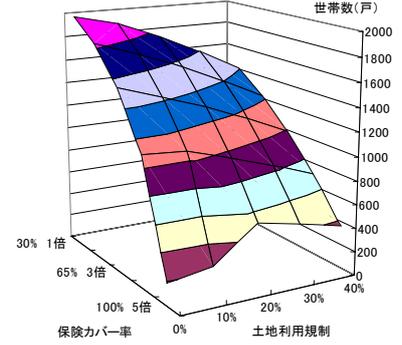
流出抑制 20,000m<sup>3</sup>流出抑制 40,000m<sup>3</sup>

図 10 地区 1 の世帯数

流出抑制なし

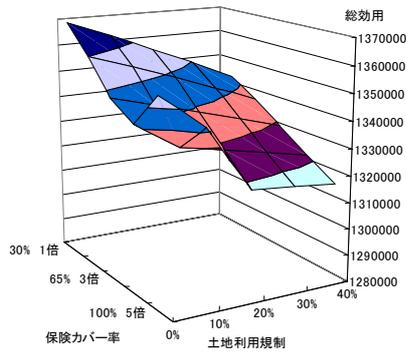
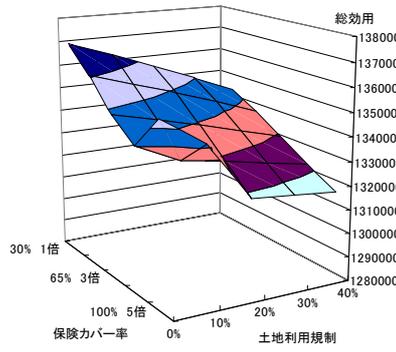
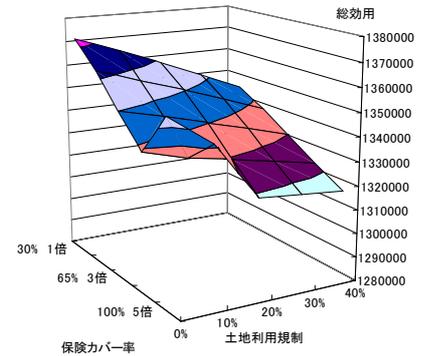
流出抑制 20,000m<sup>3</sup>流出抑制 40,000m<sup>3</sup>

図 11 世帯の総効用

流出抑制なし

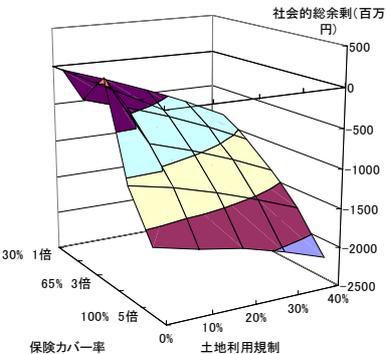
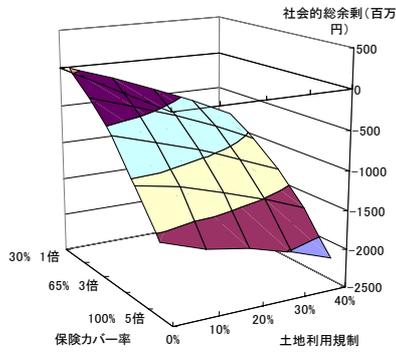
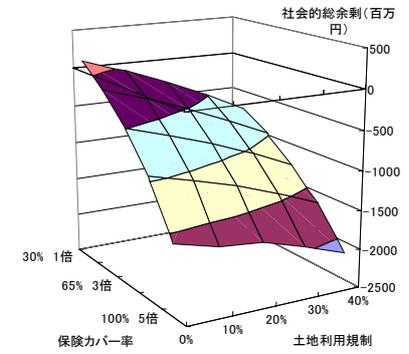
流出抑制 20,000m<sup>3</sup>流出抑制 40,000m<sup>3</sup>

図 12 社会的総便益

ータを用いることやパラメータの感度分析をおこなうとともに、モデルの改良についても検討していきたいと考えている。特に、本モデルでは保険料やカバー率などを外生的に与えているため、今後は公的関与のあり方や再保険およびその他の資産市場も含め、洪水保険システムの成立条件を踏まえたモデリング<sup>16),17)</sup>を行い、実現可能性を考慮した上で検討できるようにする必要があると考えている。さらに、モデルの中にまだ評価されるべきである施策の効果、例えばカタストロフ性や当該地区に対する安心感のようなものが十分評価できていないと思われるため、これらについても考慮できるようなモデルに

改良するとともに、計算過程において精緻化していきたい。

なお、本研究は「河川整備基金助成事業『災害リスクマネジメントに基づく新たな総合治水対策の提案』(助成番号：14-1-⑧-2号)」の助成を受けておこなったものである。ここに記して(財)河川環境管理財団の関係各位に感謝の意を表す。

#### 参考文献

- 1) 土砂災害防止法研究会編著：土砂災害防止法解説 土砂災害警戒区域等における土砂災害防止対策の推進に関する

- 法律, 2001.
- 2) 社団法人 土木学会: リスクマネージメント入門, 土木学会誌, pp.5-45, 2000.
  - 3) 小林潔司・横松宗太: 治水経済評価のフロンティア: 期待被害額パラダイムを越えて, 河川技術に関する論文集 Vol.6, pp.237-242, 2000.
  - 4) 横松宗太, 小林潔司: 自治体保険による地域間最適リスク配分, 土木計画学研究・論文集,
  - 5) Bolomqvist, A. and Johanson, P.-O.: Economic efficiency and mixed public/private insurance, Journal of Public economics, Vol.66, pp.505-516, 1997.
  - 6) Akiyoshi TAKAGI, Taka UEDA: Evaluation of Flood Mitigation Countermeasures Considering the Interdependence Between Flood Risk and Land Use, First Annual IIASA-DPRI Meeting, <http://www.iiasa.ac.at/Research/RMS/dpri2001/papers.html>, 2001.
  - 7) 横松宗太・小林潔司: 防災投資による物的被害リスクの軽減便益, 土木学会論文集, No.660/IV-49, pp.111-123, 2000.
  - 8) 高木朗義・水谷伊孝: 住み替え行動を考慮した災害リスクマネジメントに関する一考察, 応用地域学会第 16 回研究発表会, 2002.
  - 9) 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.
  - 10) 富永晃宏: 天白区野並地区の洪水について, 2000 年 9 月東海豪雨災害に関するミニシンポジウム報告書, pp.31-38, 2001.
  - 11) 酒井泰弘: 不確実性の経済学, 株式会社有斐閣, 1984.
  - 12) 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.
  - 13) Borch, K.: Economics of Insurance, North-Holland, 1990.
  - 14) 上田孝行・高木朗義: 防災事業の便益計測法—治水事業を例にして—, 社会資本整備の便益評価: 一般均衡理論によるアプローチ, 森杉壽芳編著, 第 6 章, pp.91~126, 勁草書房, 1997.
  - 15) 平成 12 年国勢調査.
  - 16) Ekenberg, L. and Brouwers, L., et. al.: Flood Risk Management Policy in the Upper Tisza River Basin; Simulation and Analysis of Three Flood Management Strategies, Interim Report, IR-03-003, <http://www.iiasa.ac.at>, 2003.
  - 17) Brouwers, L.: Spatial and Dynamic Modeling of Flood Management Policies in the Upper Tisza, Interim Report, IR-03-002, <http://www.iiasa.ac.at>, 2003.

## 災害リスクマネジメントに基づいた総合治水対策の評価モデルの構築\*

吉田正卓\*\*・高木朗義\*\*\*

カタストロフィックな洪水災害に対応するためには、従来型の施設整備によるハードを中心としたリスクコントロールだけでは難しく、ソフト対策としての土地利用規制や洪水保険制度などのリスクファイナンスも取り入れたリスクマネジメントに基づく総合治水対策を実施していく必要がある。そこで本研究では、災害リスクマネジメントに基づいた総合治水対策を立案する際に必要である評価モデルを構築し、その適用性について検討した。その結果、従来では比較が困難であった洪水保険、土地利用規制および流出抑制という 3 つの施策について、同時かつ総合的に評価できることを簡単なシミュレーションを通じて確認した。

## Evaluation Method of Integrated Flood Risk Management\*

By Masataka YOSHIDA\*\*・Akiyoshi TAKAGI\*\*\*

It is difficult that the risk control such as the structure constructions only mitigate the catastrophic flood disaster. So, we have to carry out the integrated flood risk management including the non-construction measures as the land use regulation and the risk finance as flood disaster insurance. In this paper, we structured the model that integrate the location equilibrium model and the runoff-inundation model for evaluating the integrated flood risk management. And it was shown through the simple simulations that this model is able to comprehensively evaluate the integrated flood risk management, especially, the disaster insurance systems, the land use regulations and the flood controls.