

# 最適土地利用計画モデルによる 集約型土地利用と防災土地利用の両立性の検討

鬼頭 征也<sup>1</sup>・中居 楓子<sup>2</sup>・大窪 和明<sup>3</sup>・秀島 栄三<sup>4</sup>

<sup>1</sup>学生会員 名古屋工業大学工学部社会工学科 (〒465-8555 愛知県名古屋市御器所町)

E-mail: s.kito@st.nitech.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 名古屋工業大学工学部社会工学科助教 工学研究科工学専攻 (同上)

E-mail: nakai.fuko@nitech.ac.jp (Corresponding Author)

<sup>3</sup>正会員 東北大学大学院准教授 国際文化研究科 (〒980-8576 宮城県仙台市青葉区川内 41)

E-mail: kazuaki.okubo.d5@tohoku.ac.jp

<sup>4</sup>正会員 名古屋工業大学工学部社会工学科教授 工学研究科工学専攻

(〒465-8555 愛知県名古屋市御器所町)

E-mail: hideshima.eizo@nitech.ac.jp

地球温暖化や人口減少が進行する中の都市経営においては、洪水リスクの変化に対応しながら、インフラの維持管理の効率化も考慮した、より集約的な土地利用を考えていく必要がある。本研究では洪水による被害が土地利用の効率性を下げることを組み込んだ総期待地代収入に加え、同じ用途地域を隣接させて維持管理の効率化を図った場合の維持管理費用の低減を考慮した最適土地利用計画問題を定式化し、土地利用を純利益の面から評価する。本モデルを愛知県豊橋市に適用した結果、土地利用の効率性を大きく下げようとする破堤シナリオを特定することができた。また、洪水を避ける土地利用と、集約による低減を考えた土地利用の配置は似た傾向を持っており、どちらか一方の方針による土地利用を推進することが、もう一方の推進にもつながる可能性が示唆された。

**Key Words:** *flood risk, infrastructure maintenance costs, adjoining land-use, net income, multi-objective optimization*

## 1. はじめに

地球温暖化や人口減少が進行する中の都市経営においては、変化する洪水リスクに対応しながら、運営や維持管理の効率化も考えた、より集約的な土地利用を考える必要がある。2014年の都市再生特別措置法改正では立地適正化計画制度が新たに創設され、将来的に人口密度を維持することにより、都市サービスを集約しアクセスを担保する地域を居住誘導区域（以下「誘導区域」）として定められるようになった。しかし、これまでに形成された土地利用を基に考えられた土地利用計画が必ずしも洪水リスクを避けたものになっているとは限らない。実際に、2019年12月時点で誘導区域を指定する275の都市のうち242都市は浸水想定区域を含んでいる<sup>1)</sup>。こうした背景から、2020年には誘導区域内において防災指針が定められるようになり<sup>2)</sup>、自治体は浸水が想定される地

域を誘導区域から除くか、何らかの対策を講じつつ誘導の方針を維持するか、といった判断に直面している。以上を踏まえると、自治体には i) 洪水リスクを考慮しつつもできるだけ都市の地代収入を大きくすること、ii) インフラの維持管理を効率的にすることによって都市の費用をできるだけ小さくすること、といった都市経営の戦略が求められていると言える。

上記のような災害リスクと都市の利用に着目した既往研究として大窪・中居<sup>3)</sup>は複数の洪水リスクと土地利用の二つの関係性に着目し、地代収入を最大とするような最適土地利用計画問題を定式化している。このモデルでは土地利用の効率性をあらゆる指標として付け値地代を用い、計画期間内に被災した場合に地代が下がることを考慮しつつ期待地代の総和を求めることで、洪水リスクの影響を考慮している。また、各水害シナリオの重みを設定し、期待地代収入を最小化する重みの下で期待地代

収入を最大化する  $\max\min$  問題として定式化することで、最悪の被害に至るシナリオを回避する土地利用を求めることができるようになっている。ただし、このモデルでは、上記 i) で述べた地代と水害シナリオに応じた都市の収入については考慮されているが、ii) の効率的な維持管理による費用の低減については考慮されていない。

そこで、本研究では既往のモデルを図-1に示す枠組みへと拡張し、i) 水害によって地代が下がることを組み込んだ総期待地代収入に加え、ii) 同じ用途地域を隣接させて維持管理の効率化を図った場合の維持管理費用を考慮した最適土地利用計画問題を定式化し、土地利用を純利益の面から評価する。さらに、最適化問題に含まれるパラメータを感度分析することにより三つの点を明らかにする。一点目は支出に影響する水害シナリオの感度分析である。本研究では破堤地点別の浸水シナリオを考えたうえで「河川堤防のどの箇所が破堤するか分からないケース」と「ある箇所のみ破堤しやすいケース」で純利益と土地利用を求め、特に純利益を大きく低下させるような破堤シナリオを特定する。二点目は費用に影響する維持管理の効率化を表すパラメータの感度分析である。同じ用途地域を隣接させることで単位面積あたりの維持管理費用が「大きく低減されるケース」から「あまり低減されないケース」を考え、各ケースの土地利用の変化と純利益への影響を明らかにする。三点目は、上記の二つの感度分析の特殊ケースとして「洪水が一切起こらないことを前提としたケース」と「用途地域を隣接させても維持管理が効率化されず費用が全く低減されないケース」の土地利用を求めることで、「洪水を避けることのみを考えた土地利用」と「維持管理の効率化のみを考えた土地利用」を比較する。そして、両者が両立するものか、それとも相反するものかを明らかにする。

## 2. 最適土地利用モデルの定式化と分析方法

### (1) 最適土地利用モデルの定式化

#### a) 目的関数の定式化

本研究では対象地域を  $n$  個のメッシュに分割された領域と考え、各メッシュは 4 つ土地利用  $k \in K = \{\text{住居地域, 商業地域, 工業地域, その他}\}$  のいずれかが配置されていると考える。ここで、メッシュ  $i$  における土地利用  $k$  の面積を  $x_{ik}$  であらわす。本モデルでは、各メッシュに配置される土地利用  $k$  の面積  $x_{ik}$  を制御変数として、洪水によって地代が下がることを組み込んだ計画期間内の総期待地代収入  $D(x)$ 、周囲に同じ用途地域が隣接すると費用が低減されることを組み込んだ維持管理費用  $C_1(x)$ 、既存の土地利用からの変更費用  $C_2(x)$  の 3 つの部分目的で構成された目的関数を考える。

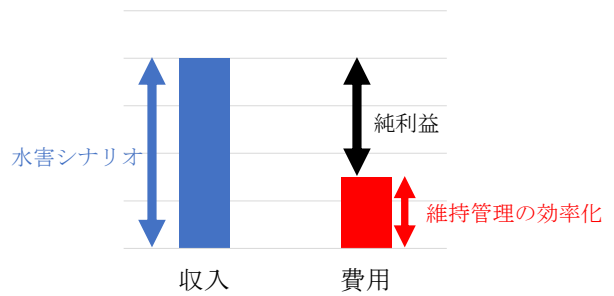


図-1 収入と費用による都市の純利益の定義

洪水によって地代が下がることを組み込んだ計画期間内の総期待地代収入  $D(x)$  は既往研究のモデルを基に、メッシュ  $i$  の期待地代収入  $E_p[r_{ik}^s]$  と対応する土地利用面積  $x_{ik}$  を乗じたものとする。洪水の発生確率が小さいと期待地代の低下が抑制されるため、 $D(x)$  の値は大きくなる。 $D(x)$  は下式のように定式化する。

$$D(x) = \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} E_p[r_{ik}^s] x_{ik} \quad (1)$$

期待地代  $E_p[r_{ik}^s]$  は、計画期間中に得られる地代の総和の期待値である。ここでは、土地利用形態が  $k$  のメッシュ  $i$  について洪水前の地代を  $r_{ik}$ 、シナリオ  $s \in S$  発生後の地代を  $r_{ik}^s$  であらわす。本研究の洪水シナリオ  $s$  は対象の河川の各破堤点による浸水範囲を考える。シナリオ  $s$  は再現期間  $\lambda_s$  とし、計画期間開始期から  $\tau$  年後の発生確率を  $p_s$  とする。計画期間のうち  $t=1$  (計画期間最初の年) から  $t=T$  (計画期間最後の年) まで毎年の洪水の発生確率  $p_s$  は一定とする。また、洪水は計画期間内に一度しか発生しないものとし、地代は災害前後でしか変化しないと仮定する。以上をふまえて社会的割引率を  $\beta$  とおくと計画期間を  $T$  年間とした場合の期待地代は次式で表せる。

$$E_p[r_{ik}^s] = \frac{1 - \beta^T}{1 - \beta} r_{ik} - \frac{r_{ik} - r_{ik}^s}{1 - \beta} \sum_{t=1}^T p_s (\beta^{t-1} - \beta^T) \quad (2)$$

つぎに、維持管理費用  $C_1(x)$  を考える。これは、同じ用途地域が隣接する場合には費用が一部低減される効果があるものとする。あるメッシュ  $i$  の土地利用  $k$  の維持管理費は、単位面積あたりのインフラ維持費  $c_k$  と面積  $x_{ik}$  を乗じたものとする。もし隣り合うメッシュが同じ土地利用だった場合、比例した維持管理費用の低減効果  $z_{ik}$  が生じていると考える。メッシュ  $i$  の土地利用  $k$  の維持管理費から維持管理費用の低減効果  $z_{ik}$  を引いたものをインフラ維持費費用  $C_1(x)$  とし、下式のように定式化する。

$$C_1(x) = \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} (c_k x_{ik} - z_{ik}) \quad (3)$$

対象地域の既存市街地の土地利用を踏まえ、実現可能性の高い解になるよう、最適解において配分される面積  $x_{ik}$  が既存の土地利用から大きく変更されないようにする。このために既存の土地利用からの変更費用  $C_2(x)$  を考える。 $C_2(x)$  は、あるメッシュ  $i$  における土地利用  $k$  の既存の面積  $x_{ik}^0$  と配分する制御変数として面積  $x_{ik}$  の差分に土地利用  $k$  における単位面積当たりの拡大費用  $h_k$ 、撤退費用  $d_k$  を乗じたものとする。また、二つの値のうち大きい値のものを  $C_2(x)$  とし下式のように定式化する。

$$C_2(x) = \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \max \{h_k(x_{ik} - x_{ik}^0), d_k(x_{ik}^0 - x_{ik})\} \quad (4)$$

以上を踏まえ、本研究で求める期待地代収入最大化モデルは収入から費用をひいたものとする。

$$\max_x \{D(x) - (C_1(x) + C_2(x))\} \quad (5)$$

**b) 制約条件の設定**

まず、配分する面積の制約条件を考える。メッシュに配分する面積  $x_{ik}$  の総和は現在の面積  $x_{ik}^0$  の総和と等しい。

$$\sum_{i \in I} \sum_{k \in K} x_{ik} = \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} x_{ik}^0 \quad (6)$$

次に隣り合うメッシュの土地利用が同じに場合に比例した維持管理費用の低減効果  $z_{ik}$  の制約条件式(7)、式(8)を考える。式(7)では、ほかの制約条件式がなければ  $z_{ik}$  は右辺の値をとり、インフラ維持費が低減される度合い  $\alpha_k$  に比例した形でメッシュ  $i$  の維持管理費用  $c_k x_{ik}$  の一部が低減する。式(8)に示すように、 $z_{ik}$  が正となるのは  $x_{ik}$  が正であり、メッシュ  $i$  に周辺と同様の土地利用がある場合だけであることを示す制約条件式を考える。ただし、メッシュ  $i$  が周辺から受ける影響は、メッシュ  $i$  単独の維持管理費用よりも低いと仮定した。

$$c_k \sum_{l \in N_i} \alpha_k x_{lk} \geq z_{ik} \quad (7)$$

$$c_k x_{ik} - z_{ik} \geq 0 \quad (8)$$

**(2) 土地利用と都市の純利益の分析方法**

(1)で定式化した最適化問題に含まれるパラメータのうち、式(2)の洪水の発生確率  $p_s$  と式(7)のインフラ維持費が低減される度合い  $\alpha_k$  の感度分析を行うことで、三点を明らかにする。一点目の  $p_s$  の感度分析 (図-1 左) では破堤シナリオとして「河川堤防のどの箇所が破堤するか分からないケース」と「ある箇所のみ破堤しやすい

ケース」を表現し、各々の純利益を求めることで、特に純利益を大きく低下させるような破堤シナリオを特定する。二点目の  $\alpha_k$  の感度分析 (図-1 右) では、同じ用途地域を隣接させることによる維持管理の効率化を考慮することで純利益がどのように変化するかを明らかにする。また、三点目は表-1 に示す 2 つのパラメータについて「洪水が一切起こらないことを前提とする/洪水が発生する」、「用途地域を隣接させても維持管理が効率化されず費用が全く低減されない/低減される」というケースを想定し、その組合せによる 3 つの土地利用 A, B, C の比較をおこなう。まず、ベースラインとして「洪水、用途地域の隣接効率化のいずれも考慮しないケース (A)」を求める。さらに、「洪水を避けることのみを考えた土地利用 (B)」と「維持管理の効率化のみを考えた土地利用 (C)」を用途地域の面積配分の結果から比較する。そして、それらの土地利用が両立するものか、それとも相反するものかを明らかにする。

表-1 土地利用と純便益の比較分析における 3 つの土地利用 A, B, C の考え方とパラメータ設定方法

	洪水が発生する ( $p_s^H = 1/30$ )	洪水が発生しない ( $p_s^H = 0$ )
用途地域の隣接効率化あり ( $\alpha_k = 0.25$ )		土地利用 C
用途地域の隣接効率化なし ( $\alpha_k = 0$ )	土地利用 B	土地利用 A

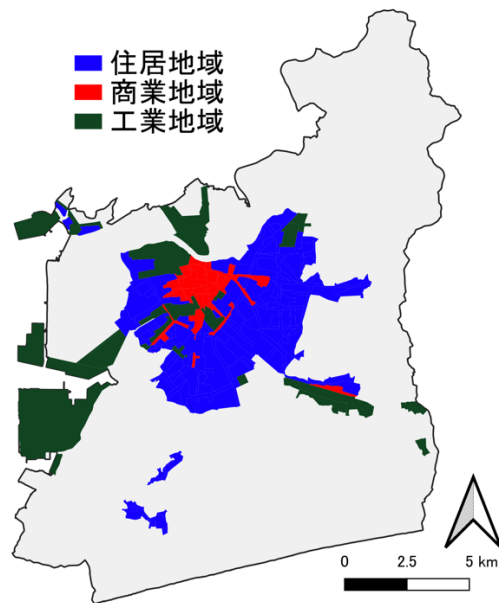


図-2 豊橋市の現状の用途地域の分布

### 3. 対象地域とパラメータの設定

#### (1) 対象地域の概要

本研究では対象地域を愛知県豊橋市とする。豊橋市は人口 370,552 人（2023 年 2 月 1 日現在）の中核市であり、中心部には市役所や美術館などの施設があり、東海道新幹線、東海道本線、飯田線、名鉄名古屋本線、豊鉄市内線、渥美線が通っている。西側は三河湾に面しており、三河港を中心に臨海工業地域が形成されている。図-2 に示すように、現在の土地利用はおもに豊橋市の中心部分に商業系の用途地域が分布しており、その周りに住居系の用途地域がある。工業系の用途地域は三河湾に面している西側と中心部付近に配置されている。また、豊橋市には一級河川の豊川、豊川放水路が流れている。豊川では過去に大きな災害が何度も発生しており、戦後最大の洪水として記録された昭和 44 年 8 月の洪水では、7 棟の家屋が流出し、919 棟が半壊、床上浸水した。これを受けて昭和 13~40 年にかけて放水路が整備された。近年では大きな災害はないが、地域によっては最大浸水深が 13m と想定されているところもある。

#### (2) パラメータの設定

##### a) 計算単位および利用可能な土地

最適土地利用計画は 100m メッシュを単位として計算する。また、各用途の土地利用を配分する候補地は、現状の地形やインフラ整備状況から土地利用に適さない場所は除いた。利用不可能なメッシュは、国土数値情報<sup>4)</sup>の土地利用細分メッシュデータのうち建物を立地させるような土地利用が難しいと考えられる区分（森林、荒地、道路、鉄道、河川地及び湖沼、海浜、海水域）に該当するメッシュとした。図-3 に豊橋市のデータをもとに分類した利用可能メッシュと利用不可能メッシュを示す。

##### b) 浸水に関するシナリオ

本研究では、豊橋市を流れる豊川、豊川放水路を対象とし、堤防上にある複数の破堤点ごとの浸水域をシナリオとして考える。また、各破堤点における破堤は、確率  $p_s$  で発生するものとする。

破堤点別の浸水域は、国土地理院の浸水ナビ<sup>5)</sup>の API を用いて市内各地点に最大の被害をもたらす破堤点（「最大浸水破堤点」データ）を取得したうえで、破堤点が同一となるような一体的な区域を 1 つのシナリオとした（以降、破堤点別の浸水域を「破堤シナリオ」と表記する）。その際、メッシュ数個分しかないシナリオもあったことから、近接した破堤点については複数の破堤点を 1 つにまとめた。破堤シナリオ 1 は河川距離標の豊川左岸 4.8km までの破堤点による浸水域をまとめたもの、破堤シナリオ 2 は豊川左岸 5.0km から豊川左岸 5.8km までの間にある破堤点の浸水域、破堤シナリオ 3 は豊川左

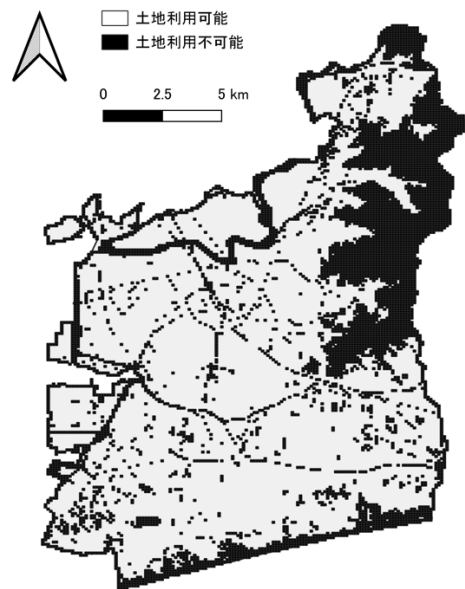


図-3 利用可能メッシュと利用不可能メッシュ

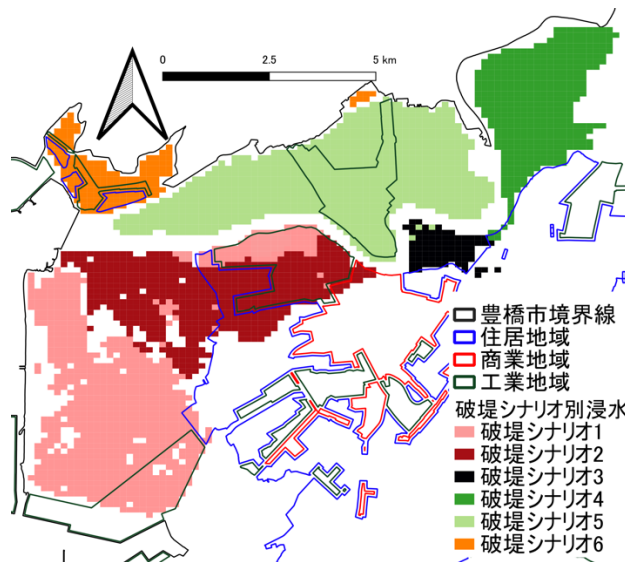


図-4 破堤シナリオの空間分布

岸 6.8km から豊川左岸 9.2km までの間にある破堤点の浸水域、破堤シナリオ 4 は豊川左岸 10.4km から豊川左岸 14.6km までの間にある破堤点の浸水域、破堤シナリオ 5 は豊川右岸 11.4km までの間にある破堤点の浸水域、破堤シナリオ 6 は豊川右岸 11.8km から豊川右岸 15.2km までの間にある破堤点の浸水域とした。その結果、図-4 に示す 6 つのシナリオが作成された。破堤シナリオ 1, 2, 5 の一部の浸水域は市街化区域と重なっている。

各年の破堤シナリオ  $s$  の発生確率  $p_s$  は、式(9)の超過洪水の発生確率  $p_s^H$  と破堤確率  $p_s^B$  の同時確率として表す。

$$p_s = p_s^H p_s^B \quad (9)$$

まず、超過洪水の発生確率  $p_s^H$  を設定する。これは、

現状の豊川の整備水準をふまえてつ可変のパラメータを前提としているが、本分析では、洪水が発生する場合は  $p_s^H=1/30$  と仮定し、洪水が発生しない場合は  $p_s^H=0$  とする。各破堤点の破堤確率  $p_s^B$  は大きく分けて2つのケースを考える。1つは、どの点で破堤するかわからない、つまり不確実な場合を考えるもので、 $p_s^B$  はすべての破堤シナリオを等確率とする。上述したように、今回の場合6つの破堤シナリオがあるので、 $p_s^B = 1/6$  となる。もう1つはいずれか1つの点で破堤しやすくするときで、1つの破堤シナリオは  $p_s^B=1$ 、それ以外の破堤シナリオは  $p_s^B=0$  となるように設定する。このようにして、7つの破堤シナリオ（全破堤点等確率で破堤、破堤点1で破堤、破堤点2で破堤、破堤点3で破堤、破堤点4で破堤、破堤点5で破堤、破堤点6で破堤）を考える。

d) 各メッシュの洪水前後の地価

被災前の地価  $r_{ik}$  は式(6)の地価関数を用いて推定し、メッシュごとの地価を算出する。

$$\log(y_i) = \alpha + \beta^t X \tag{10}$$

本研究では説明変数  $X$  として、豊橋市の地価公示価格（円/m<sup>2</sup>）、用途地域ダミー（住居系、商業系、工業系）、緊急輸送道路ダミー、最寄駅からの距離（m）の7つの変数を用いて  $N=111$  で地価を推定した。その結果を表-2に示す。調整済み決定係数は0.46であった。本研究の各メッシュの地価は、結果から有意な変数（地価（円/m<sup>2</sup>）、用途地域ダミー（住居系、商業系）、最寄駅からの距離（m））のみを用いて推定したものとした。推定した地価の空間分布を図-5に示す。また、洪水が発生した後の地価  $r_{ik}^s$  は一律で40%低下するものとした。

e) 単位面積あたりの維持管理費用

単位面積あたりの維持管理費用  $c_k$  は公共下水道の更新（打替え）費用のみを想定する。環境省<sup>6)</sup>より、公共下水道は50年に1回更新し、1mあたりの更新費用は75,000（円/m）とされている。更新費用は50年かけて払うものとし、このうち30年で払わなければならない費用分に相当する45,000円を単位面積あたりのインフラ維持費とする。今回は、土地利用によって単位面積あたりの費用は変わらないとする。単位面積あたりの拡大費用  $h_k$  および撤退費用  $d_k$  は、土地利用を拡大、撤退すると工事の必要が生じ、下水道の更新費用が発生すると考え、維持管理費用  $c_k$  と同じ値とする。

f) インフラ維持費の低減度合い  $\alpha_k$

隣接しているメッシュが同じ用途の土地利用であった場合にインフラ維持費が低減される度合い  $\alpha_k$  は、自メッシュ  $i$  の上下左右に同じ用途地域かつ同じ面積を配置した場合であっても  $i$  のインフラ維持費が負にならないようにするため、 $\alpha_k=0.25$  から  $\alpha_k=0$  まで0.05刻みで変化させることとする。

表-2 地価の推定結果

変数	推定値(標準誤差)
切片	11.25 *** (0.19)
用途地域ダミー 住居系	0.32 (0.16)
用途地域ダミー 商業系	0.73 *** (0.20)
用途地域ダミー 工業系	-0.05 (0.19)
緊急輸送道路ダミー	-0.11 (0.16)
最寄りの駅からの距離[m]	-0.00 *** (0.00)
N	111
r <sup>2</sup> (調整済み決定係数)	0.46

\*\*\* p<0.001; \*\* p<0.01; \* p<0.05 . p<0.1

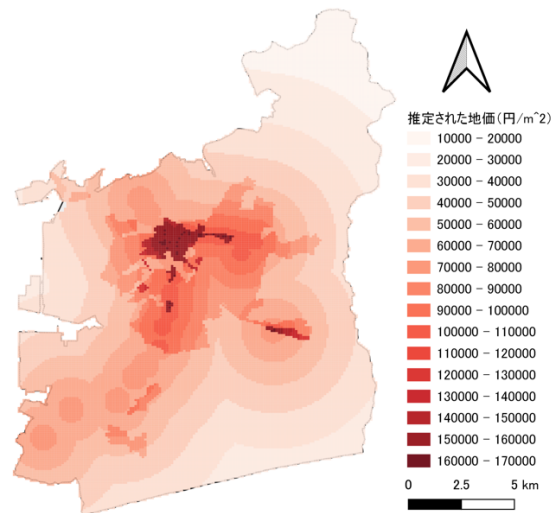


図-5 豊橋市における推定された地価の空間分布

4. 分析結果

本章では、最適土地利用計画モデルを豊橋市に適用した結果を示す。(1)では各破堤点の破堤確率  $p_s$  の感度分析をおこない、特に純利益を大きく低下させるような破堤シナリオを示す。(2)ではインフラ維持費が低減される度合い  $\alpha_k$  の感度分析により、土地利用と純利益の変化を示す。(3)では「洪水を避けることのみを考えた土地利用 (B)」と「維持管理の効率化のみを考えた土地利用 (C)」をベースラインシナリオ (A) と比較する。

(1) 各破堤シナリオの発生確率  $p_s$  の感度分析結果

各破堤シナリオの発生確率  $p_s = p_s^H p_s^B$  について、超過洪水の発生確率を  $p_s^H = 1/30$  で固定したうえで、各破堤点の破堤確率  $p_s^B$  の7つの破堤シナリオ（全破堤点等確率で破堤、破堤点1で破堤、破堤点2で破堤、破堤点3で

破堤、破堤点 4 で破堤、破堤点 5 で破堤、破堤点 6 で破堤) に応じた最適な土地利用を求めた。なお、インフラ維持費が低減される度合いは  $\alpha_k=0$  とした。得られた各破堤シナリオの純利益を図-6 に示す。破堤点 2, 5 において都市の純利益が特に低くなっていることから破堤点 2, 5 によって最大の浸水深となるような地域では対策が必要であるといえる。また、破堤点 3, 4, 6 では純利益がほかの破堤シナリオと比べて低くない。したがって、浸水がある程度受け入れる判断がなされる場合は、各地域の安全度を破堤点 3, 4, 6 の浸水域で相対的に低くし、破堤点 2, 5 の浸水域で相対的に高くするといった対策をとることで、豊橋市全体で期待される純利益を上げることができる。

(2) インフラ維持費の低減度合い  $\alpha_k$  の感度分析結果

インフラ維持費が低減される度合い  $\alpha_k$  について、 $\alpha_k=0.25$  から  $\alpha_k=0$  まで 0.05 刻みで変化させた時の純利益の変化を 7 つのシナリオ別に図-7 に示す。洪水が発生する場合 ( $p_s^H=1/30$ ) の純利益は実線、洪水が発生しない場合 ( $p_s^H=0$ ) の純利益は破線で示している。この結果より、インフラ維持費が低減される度合い  $\alpha_k$  が増加す

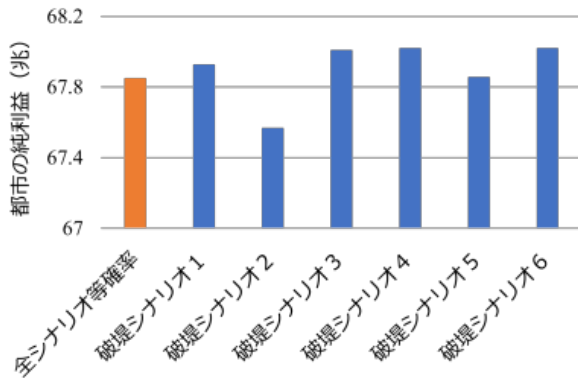


図-6 各破堤シナリオの純利益

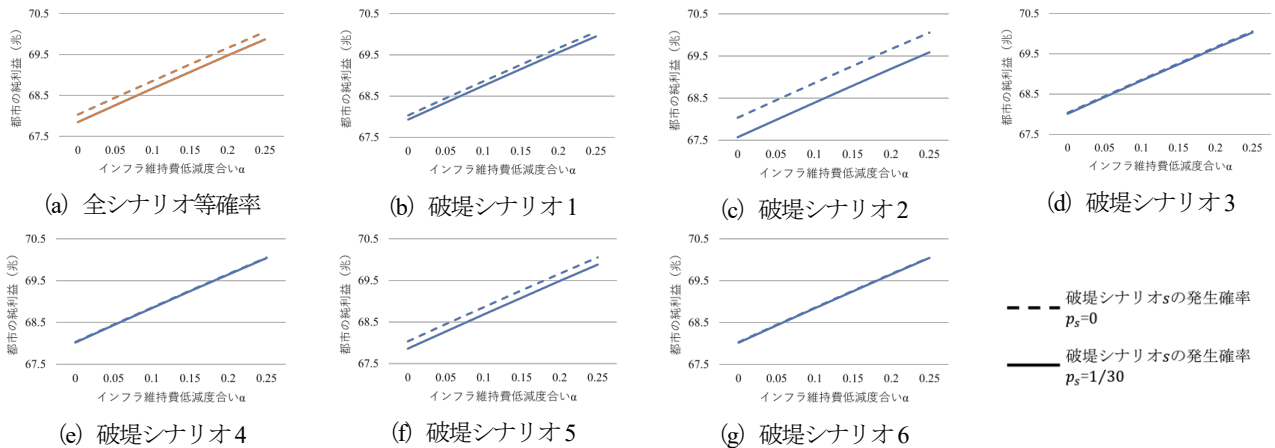


図-7 各破堤シナリオにおける感度分析の結果

ると、純利益が上がる事が分かる。これは式(3)の構造から当然の結果と言えるが、 $\alpha_k$  を大きくすることで都市の費用が減るためである。また、破堤シナリオ 3 (図-7(d))、破堤シナリオ 4 (図-7(e))、破堤シナリオ 6 (図-7(g)) で破堤させるケースにおいては、洪水が発生する場合と発生しない場合で純利益に差は見られなかった。このことから、純利益の面からみると破堤シナリオ 3, 4, 6 を考慮した最適土地利用は洪水の発生有無によらないことが分かった。

(3) 洪水を考慮した土地利用と用途地域の隣接効率化を考慮した土地利用の比較分析結果

表-1 に示す 2 つのパラメータについて、「洪水が一切起こらないことを前提とする ( $p_s^H = 0$ ) / 洪水が発生する (ただし  $p_s^H = 1/30$ )」, 「用途地域を隣接させても維持管理が効率化されず費用が全く低減されない ( $\alpha_k = 0$ ) / 低減される ( $\alpha_k = 0.25$ )」というケースを考える。本研究の最適土地利用モデルにそれらのパラメータを与えた結果得られた土地利用として、図-8 に「(B) 洪水を避けることのみを考えた場合 ( $p_s^H = 1/30, \alpha_k = 0$ )」, 図-9 に「(C) 維持管理の効率化のみを考えた場合 ( $p_s^H = 0, \alpha_k = 0.25$ )」を示している。それぞれの図の左列は「(A) ベースラインシナリオ ( $p_s^H = 0, \alpha_k = 0$ )」の結果、中央列は B または C の土地利用となっており、これらは (a) 住居地域 (青), (b) 商業地域 (赤), (c) 工業地域 (緑) の 3 つの用途別に配分された面積を示している。さらに、右列にはベースラインシナリオ A からの土地利用の変化を増加 (赤) 減少 (青) に分けて示している。

図-8 の洪水を避けることのみを考えた場合では、住居地域、商業地域は主に居住誘導区域内に配分されているものの、南西部に一部の住居地域と少数の商業地域が点在した (図-8 (a), (b))。この傾向はベースラインシナリオ (A) と同じである。つまり、仮に洪水を避けるこ

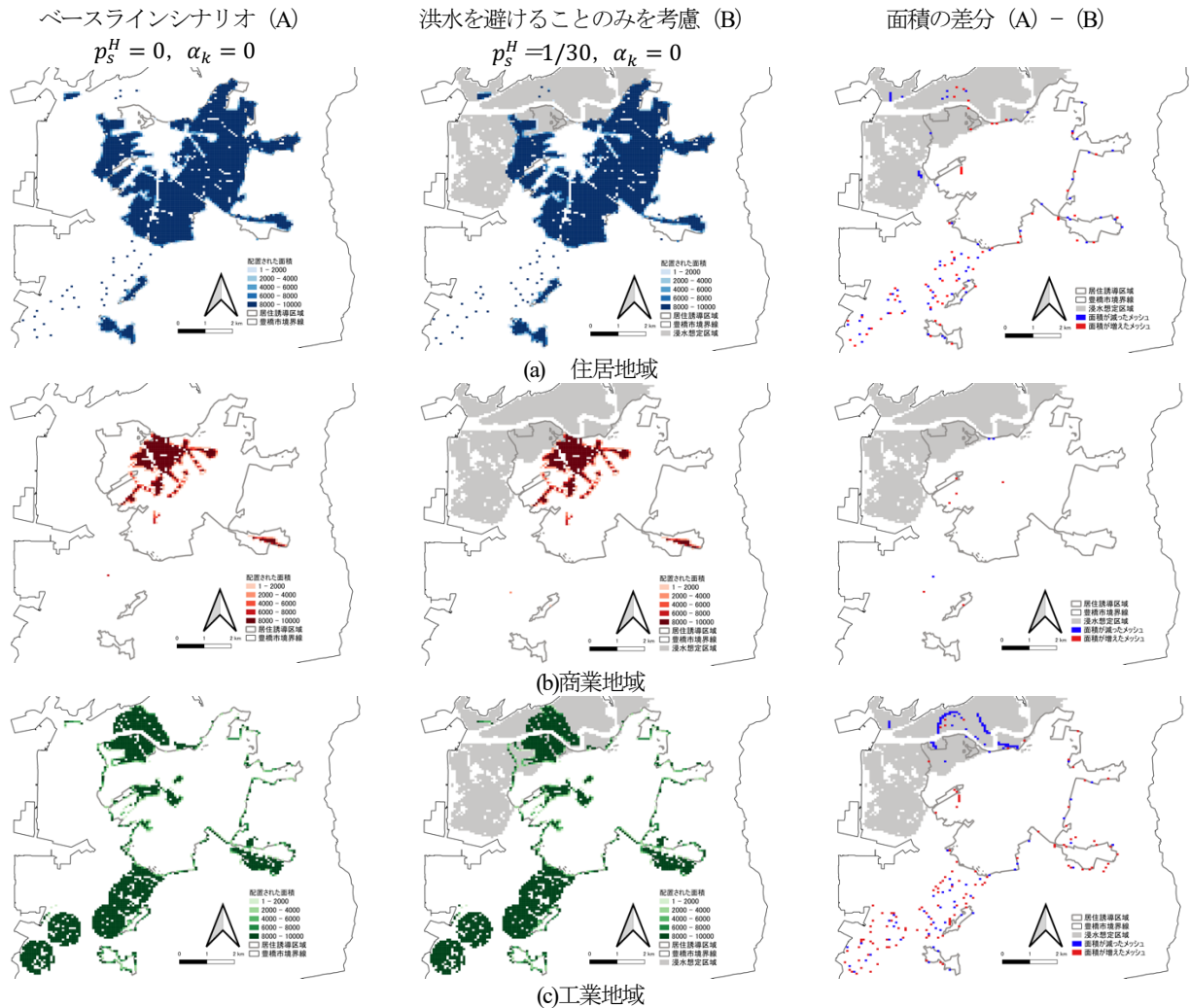


図-8 (B) 洪水を避けることのみを考えた場合 ( $p_s^H = 1/30, \alpha_k = 0$ ) と (A) ベースラインシナリオの土地利用の比較

とだけを考える場合は、これらの点在了地域では撤退という判断がなされないことを意味する。この結果は、南西部は豊川、豊川放水路の浸水想定区域に含まれていないというデータの特性によるものである。また、図-8 (b)の商業地域は、面積の差分が小さいことから、洪水を考慮しようがしまいが、ほとんど立地は変わらない。図-8 (c)の工業地域はもともと浸水想定区域に含まれるエリアが多いため、洪水を考える場合には豊川北側のエリアで大きくメッシュが減っている。ただし、減ったのは外縁部のみであり、浸水想定区域内であっても部分的に残存する結果となった。隣接の効果が考慮されていない ( $\alpha_k = 0$ ) にも関わらず、このように浸水区域内に工業地域が残った理由は、本モデルの目的関数 (式(4)) に既存の土地利用からの変更費用が含まれているからである。最適化において、洪水による地価の低減よりも変更費用が上回ることから撤退が生じなかったと推察される。

図-9の隣接による維持管理の効率化のみを考えた場合も、概ね住居地域、商業地域は主に居住誘導区域内に配分されている。しかし、面積の差分を見ると、ベースラ

インシナリオ (A) において居住誘導区域の外に点在了していたメッシュが減り、代わりに区域内部と外縁部で面積の配分が増えていることがわかる。この傾向は、特に図-9 (a)の住居地域の結果において顕著である。これは、隣接による維持管理の効率化が全体の純利益を増やすためである。一方、図-9 (c)の工業地域では、低減効果を得るために面積を増やすべきところとそうでないところが外縁部において混在する結果となった。

図-8と図-9を各々の面積の差分 (右列) によって比較すると、洪水の考慮有無を比較したケース (図-8) では立地適正化区域の外にばらついて配分されている面積が区域外の別のところに配分される一方で、隣接の考慮有無を比較したケース (図-9) では、立地適正化区域の外にばらついて配分されていた面積が区域の外縁部に接するような形で移動した。また、大きな違いはみられないものの、図-8で示された浸水区域内にある工業地域の外縁部の撤退は、図-9においてはやや控えめであることがわかった。ただし、いずれにしても豊川北部にある工業地帯では面積の配分が減らされていることから、洪水の

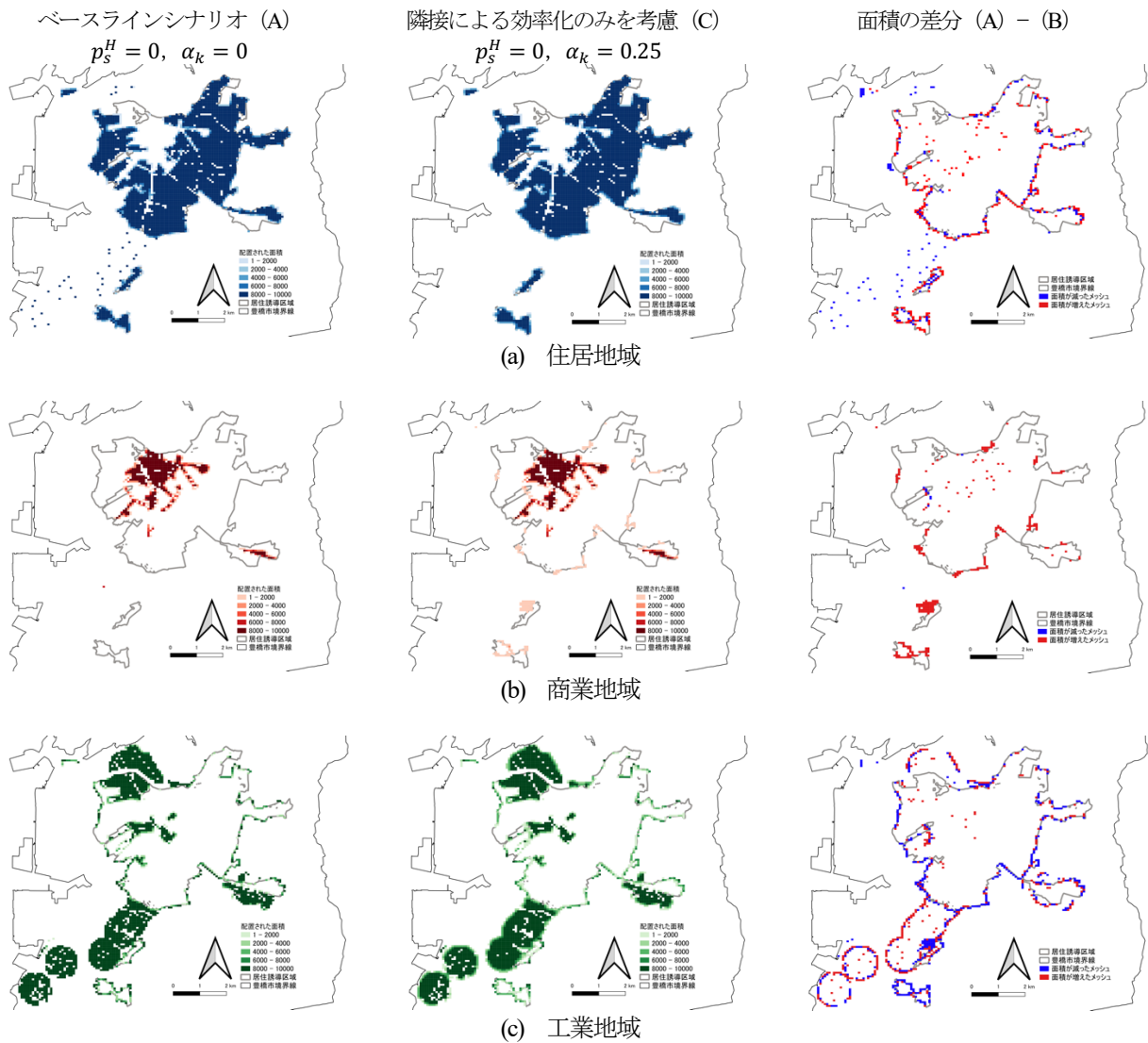


図-9 (C) 隣接による維持管理の効率化のみを考えた場合 ( $p_s^H = 0, \alpha_k = 0.25$ ) と (A) ベースラインシナリオの土地利用の比較

観点からも、維持管理の効率化の観点からも撤退という選択肢が肯定されうると言える。また、商業地域については、図-9 (b)の結果からは南部の居住誘導区域を商業地域として利用することが望ましいとされるのに対し、図-8 (b)の洪水リスクを避ける観点からは、この地域の利用は望ましくないという結果となった。今回は市北部の豊川と豊川放水路による浸水のみを考慮しており、南部の地域はその浸水区域に含まれていないため、浸水しない地域で撤退が生じたという結果は直感と反するものである。また、維持管理の効率化の観点からはより狭い地域に集約すれば維持管理費が下がるため、南部に商業地域を広げるとい結果も直感と反するものである。今回、このように、図-8 (b)において南部に商業地域が立地しない/図-9 (b)では立地する、という逆とも言える結果が生じた理由は「地価の高いところに各用途地域を

立地させることで、地代収入を大きくする」という本モデルの構造によるものと考えられる。一つには、地代収入を大きくする観点からは、ある土地利用を1つのメッシュに高密度に集約するよりも低密度であっても広く配置するほうが良い場合があるということが挙げられる。また、同じ用途が隣接することによる維持管理費用の低減効果が強くなればなるほど、既存の土地利用(図-2)を変更して拡大撤退する費用が相対的に大きくなるため、図-9 (b)では、むしろ南部の既存の商業地域を撤退させず残したほうがよいという結果が生じたと推察できる。

以上のように、面積の差分の空間的な傾向は土地利用 A-B と土地利用 A-C で違いがあったものの、土地利用 B と C の各用途地域の空間的な配分は似ており、概ね両立するといえる。

## 5. 考察およびまとめ

本研究では、洪水による被害が土地利用の効率性を下げることが組み込んだ総期待地代収入に加え、同じ用途地域を隣接させて維持管理の効率化を図った場合の維持管理費用の低減を考慮した最適土地利用計画問題を定式化し、土地利用を純利益と各用途地域の空間分布の面から評価した。本モデルを愛知県豊橋市に適用した結果、おもに2つの知見が得られた。

一つ目として、土地利用の効率性を大きく下げような破堤シナリオを特定することができた。豊橋市において浸水のある程度受け入れる判断がなされる場合は、各地域の安全度を破堤点 3, 4, 6 の浸水域で相対的に低くし、破堤点 2, 5 の浸水域で相対的に高くするといった対策をとることで、豊橋市全体で期待される純利益を上げることができる。これは、豊橋市において破堤点 2, 5 付近に既に都市機能などが集積しているという事実とも整合的な結果となっている。また、破堤点 3, 4, 6 は洪水の有無を考慮してもしなくても、純利益はほとんど変わらないということも分かった。

二つ目として、洪水を避ける土地利用と、集約による維持管理効率化による維持管理費用の低減を考えた土地利用の配置は概ね似た傾向を持っていることが明らかになった。つまり、どちらか一方の方針を重点化しても、もう一方の方針に大きく障らない可能性が示唆されたと言える。ただし、豊川北部の浸水区域内において、洪水を考慮した土地利用 B では工業地域の外縁部が大きく撤退している一方で、維持管理費効率化を考慮した土地利用 C では撤退の度合いが小さく、また逆に外縁部で工業地域の面積配分が増える結果となっていることも分かった。したがって、このエリアにおいては部分的に B と C の土地利用が相反する場合があるといえる。

また、本モデルの特性により、住居地域、商業地域については現在の土地利用とあまり変わらない結果が出た。

これは、モデルの構造として、地価関数を用いて推定された地価が高い地域により多くの用途地域を配分する仕組みになっているためである。今回、地価を推定するのに用いた変数の中に用途地域ダミー（住居系）と用途地域ダミー（商業系）が含まれている。現在居住誘導区域内にある住居地域、商業地域に該当する地域は地価が高いため、地価が高く推定された。これにより、住居地域、商業地域は地代収入を増加させるために移転する必要がなく、元の土地利用から大きく変わらなかった。一方、工業地域については臨海部に位置している既存の立地から内陸部に大きく移動する結果となった。これは、地価の推定に駅からの距離を変数として扱っているためである。また、海上交通の利便性を表す変数を入れていないことから、臨海部よりも内陸部駅周辺に最適解が配置されやすかったといえる。

**謝辞：**本研究は、JSPS 科研費 22K04361（研究代表者：東北大学・大窪和明）の助成を受けて実施した。

## 参考文献

- 1) 「安全なまちづくり」・「魅力的なまちづくり」の推進のための都市再生特別措置法等の改正について国土交通省都市局都市計画課
- 2) Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism 水災害対策とまちづくりの連携令和2年9月16日国土交通省都市局資料3.
- 3) 大窪和明, 中居楓子: 複数の水害シナリオに対するロバスト最適化による土地利用計画の検討, 第66回土木計画学研究・講演集, Vol.66, CD-ROM, Vol.66, 2022.
- 4) 国土数値情報ダウンロードサービス, <https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/index.html>, 2023.2現在.
- 5) 浸水ナビ, <https://suiboumap.gsi.go.jp/>, 2023.2現在.
- 6) 環境省【浄化槽サイト】生活排水処理施設整備計画策定マニュアル, <https://www.env.go.jp/recycle/jokaso/data/manual/index.html>, 2023.2現在.