

# 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

大窪 和明<sup>1</sup>・中居 楓子<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 東北大学大学院 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(Corresponding Author)

<sup>2</sup>正会員 名古屋工業大学大学院 工学研究科 (〒 466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

E-mail: nakai.fuko@nitech.ac.jp

気候変動などの影響による災害の多様化が指摘される中で、想定される複数の水害シナリオに適応した土地利用計画の重要性は高まっている。本研究では、相対的な重みを決めることが難しい複数の水害シナリオに対して、計画者が事前に設定した重みを基準としながら、最大の被害が想定されるような重みを内生的に決め、その重みの下で最適な土地利用計画を求めるモデルを提案する。数値実験から、重視する水害シナリオを決めないうまま等分布の重みの下で求められた土地利用計画は、最も大きな被害が想定される水害シナリオに対して頑健であるものの、それ以外のシナリオに対しては脆弱になっている可能性が示唆された。また、事前の重みが等分布であっても、本モデルを適用することによって重みが変わり、各水害シナリオによる被害を分散させた土地利用計画が得られることが確認された。

**Key Words:** disaster management, land use planning, distributionally robust optimization

## 1. はじめに

気候変動などの影響による災害の多様化に伴い、想定される様々な水害シナリオに対応した土地利用計画の重要性は高まっている。最新の IPCC 第 6 次評価報告書では、気候が極端になり、大雨の増加による水害リスクの上昇が指摘されているだけでなく、沿岸域の都市を中心に海面の上昇に伴う高潮のリスクが上昇する可能性も指摘されており<sup>10)</sup>、これまで水害リスクが低いとされていた地域でも、防災対策が必要となる可能性がある。また、気候変動に加えて、堤防や下水道など社会インフラの老朽化に伴う機能の低下は、水害の規模の拡大や、新たなリスクを顕在化させる可能性もある。こうした中、長期的な水害リスクの変化を捉えた情報を基に、今後、発生する可能性のある様々な水害シナリオを踏まえた土地利用計画の策定を支援する枠組みの重要性は高まっている。

水害リスクを捉える上で洪水ハザードマップは重要な情報源であり、その情報は世界各国で提供されており、利用可能な情報や求められる精度・目的等のニーズに応じた様々な方法も研究されている<sup>16)</sup>。日本においても、既存の洪水ハザードマップに加えて、水害の頻度や規模も地図上に可視化した水害リスクマップの作成が始まっている<sup>35)</sup>。水害リスクマップは、河川整備による水害リスクの低減効果の可視化だけでなく、住

民・企業の立地誘導への活用が期待されている。しかし、ほとんどの自治体で市街化区域と L1 浸水想定区域が重複しており<sup>25)</sup>、浸水が想定される範囲は広く、破堤点や規模ごとに複数の水害シナリオを作成し、どのシナリオを重視すべきか重みをつけながら、立地誘導の目標となる土地利用計画を検討する必要がある。また、水害シナリオに重みをつけることは、木内<sup>24)</sup>において紹介されているような計画誘導、規制誘導といった複数の制度を組み合わせた重点的な施策を適用すべき地域を検討する際にも役立つものと思われる。

複数の水害シナリオへの対応が求められる土地利用計画において、それらのシナリオに重みをつけるのは、必ずしも容易ではない。例えば、10年に1度の規模とされている水害シナリオが複数あった場合、それらの相対的な重みを設定するためには、何らかの方針が必要となる。その方針の一つとして、破堤点ごとの破堤確率を基に、重みを設定する方法が考えられる(例えば、宇野ら<sup>32)</sup>、大野ら<sup>31)</sup>)。しかし、破堤点ごとに破堤確率を求めることは容易ではなく、国土交通省の作成した治水経済調査マニュアル(案)内の便益評価においても、破堤確率等の重みを用いることはせず、氾濫ブロックごとの便益を足し合わせることでしている。

複数の水害シナリオを相対化した確率的な評価が難しい場合、例えば、最適化計算の中で最大の被害をもたらす水害シナリオを特定し、その被害を回避するよう

な最適解を求めるロバスト最適化の適用が考えられる。この方法により、最大の被害は避けられるものの、過度に悲観的な最適解が得られる可能性が多くの研究で指摘されている（例えば、Bertsimas and Sim<sup>4)</sup>）。また、実際の自治体の災害対策では、人的、時間的資源に限界がある中、洪水が予想される場合に、ある程度危険性が高いとされる場所に優先的に人員を配置するなどへの対応も取られている。土地利用計画においても同様に、過去の経験などを基に、複数の水害シナリオに対して計画者が便宜的に重みをつけることは可能であると思われる。例えば、治水経済調査マニュアル（案）で用いられているような各水害シナリオでの便益を重みをつけずに足し合わせる操作は、全ての水害シナリオに対して同じ重みをつけていると解釈することができる。しかし、便宜的に設定された重みが楽観的か悲観的なものであるかを判断することは容易ではなく、水害シナリオの数に応じた膨大な重みの組み合わせが考えられる中で、重みを変えながら把握していく必要がある。

そこで本研究では、複数の水害シナリオに対して計画者が事前に重みを設定する状況を考え、その重みから任意の距離の範囲内で最大の被害をもたらす重みを効率的に求め、その下で最善となるロバスト最適解を求める土地利用計画モデルを提案する。本モデルでは、重み同士の距離が満たすべき範囲を十分に広く設定した場合には、全ての重みの組み合わせの中から最大の被害をもたらす重みを求めることができる。一方で、この距離を狭く設定した場合、計画者が事前に設定した重みを出来るだけ維持しながら、ロバスト最適な土地利用計画を求めることができる。本稿の構成は、続く第二章において、土地利用計画やロバスト最適化といった関連研究の中での本研究の位置づけについて述べる。第三章では、重みを外生的に扱った土地利用計画モデルを基本モデルとし、重みを内生化した提案モデルについて述べる。第四章で仮想的な水害シナリオの下、モデルの性質を確認し、第五章で結論を述べる。

## 2. 既存研究

土地利用計画モデルは様々な制約条件の下で目的に応じた最適な土地利用を求めることができるため、計画の策定を支援する有効な方法の一つとして、古くから多くの研究がなされてきた（例えば、Herbert and Stevens<sup>9)</sup>、柏谷ら<sup>23)</sup>など）。最近では、都市のコンパクトさや土地利用形態の連担性や両立性に着目したもの（Yao et al<sup>22)</sup>）や、土地の生態系と農産物の生産量に配慮しながら農地や農産物の配置を計画するもの（Kaim et.al<sup>11)</sup>）、木材の供給、生態系・水質の保全、レクリエーションな

ど森林が提供する複数の機能をふまえながら持続可能な森林管理を計画するもの（Uhde et. al<sup>20)</sup>）といったように、対象や目的に応じて持続可能な開発を実現するための計画策定をサポートする様々な土地利用計画モデルが提案されている。例えば、Aerts<sup>2)</sup>では、同種の土地利用形態が出来るだけ隣接し、コンパクトな土地利用を求めることができる計画モデルをとりあげ、計算の負荷やコンパクトさの観点から比較、分析している。また、歩ける都市などの実現に向けて土地利用形態の連担性に着目した計画モデル（Shirabe(2005)<sup>18)</sup>など）や、住居地域と工業地域といった両立が難しい土地利用形態を出来るだけ隣接させないような計画を求めるモデルが提案されている（Cao et al.<sup>5)</sup>など）。また、Handayanto et al.<sup>8)</sup>では、土地利用のコンパクトさなど複数の目的で構成される多目的最適化モデルを用いて、将来の最適な土地利用計画について議論している。

災害リスクを考慮した土地利用計画モデルについて、例えば、Aerts et al.<sup>1)</sup>、Lickley et al.<sup>13)</sup>や Knoke et al.<sup>12)</sup>による研究が挙げられる。Aerts et al<sup>1)</sup>では最大流量の再現確率を用いて水害リスクを評価し、減災対策の方法や実施すべき場所を計画するモデルを提案している。また、ハリケーンによる水害への防災投資を動的計画法によって決めるモデル（Lickley et al.<sup>13)</sup>）や、生産する農産物の種目のポートフォリオ（Knoke et al.<sup>12)</sup>）を計画するモデルが提案されている。これらの研究では、一つの河川や破堤点から洪水が発生するような可能性を考えており、複数の河川に囲まれ、それぞれの破堤確率が異なるような複数の水害シナリオには対応していない。

他にも Motamed et al.<sup>15)</sup>では、専門家へのインタビュー調査結果をもとに、人口密度に応じた災害リスク、土地利用形態への選好を専門家へのインタビュー調査から求め、地震災害に適応した土地利用計画を求める方法を提案している。また、土地利用計画モデルに関連する研究として、最近では、公共施設の老朽化に伴う維持管理費用の増大が予想される中で、洪水災害に備えるための避難所としての公共施設の維持と、維持管理費用の低減という相反する目的が存在する中で、最適維持管理計画モデルを提案している（須々間・奥村<sup>28),29)</sup>）。Okubo et al.<sup>17)</sup>、Uchiuzo et al.<sup>19)</sup>、中居ら<sup>33)</sup>では、災害リスクのある地域において、災害リスク、交通利便性や維持管理費用とのトレードオフ構造を把握することを目的とした土地利用計画モデルを提案している。こうした研究では、浸水想定区域など水害シナリオが一つ与えられた状況での適用が想定されているものが多い。浸水想定区域を想定した計画モデルでは、最大の被害を想定していることになり、災害に対して頑健な計画が求められることが期待できる。一方で、複

数の水害シナリオが想定され、浸水想定区域が広範な地域では、破堤点ごとの複数の水害シナリオに分け、最大の被害よりも、ある程度、楽観的な水害シナリオを想定することも検討する必要があると考える。

これまでに紹介した多くの土地利用計画モデルでは、交通利便性と維持管理費用といったような両立が難しい複数の基準や目的を考慮した多目的最適化モデルとして定式化されている。本研究で対象とする破堤点や規模の異なる複数の水害シナリオを考慮した土地利用計画についても、各シナリオに重みを設定するという点で似た問題構造を持つものと考えられる。土地利用計画を策定する上で、こうした複数の基準や目的につける重みは、計画に関わる行政関係者や住民などの立場や個人によって異なると考えられるため、様々な重みの設定方法が議論されてきた。例えば、Kaim, Cord and Volk<sup>11)</sup> や磯野・奥村<sup>27)</sup> では、重みの設定方法に対する指針を与えている。Kaim, Cord and Volk<sup>11)</sup> では、計画の中で考慮する基準の数や、関係者が参加する時期に応じて推奨する土地利用計画モデルを提案している。その中で、事前に計画策定の段階では、各基準を重み付けした目的関数を考慮し、重みを変えながらパレートフロンティアを求める方法が推奨されている。この方法の欠点としては、重みの組み合わせが膨大であるため、計算負荷がかかることや、計画者が求めるような複数の目的をバランス良く組み合わせた重みが結果的に得られにくいことを挙げている。また、水害シナリオを対象とした重みの設定では、過度に楽観的または悲観的な重みの組み合わせが選ばれてしまう可能性も考えられる。本研究では、これら2つの設定方法が、関係者によって与えられた破堤確率または各シナリオへの重みを参照しながら最大の被害となるような重みを求め、その下で効果が最大となるような土地利用計画を効率的に求めるモデルを提案する。

計画者によって与えられた分布を参照しながら目的関数の値に応じて分布を決める問題について、本研究では分布的ロバスト最適化(DRO:Distributionally Robust Optimization, Delage and Ye<sup>6)</sup> など)を援用する。DROでは、データ等から求めた確率分布で重みづけした期待値で目的関数を定式化した場合に、その確率分布に誤差が伴うものと考えられる。この誤差の大きさによっては、最適解の性能が著しく低下するため、最悪のケースとなるような誤差を求め、その下でロバスト最適解を求める方法である(例えば、Delage and Ye<sup>6)</sup>, Ben-tal et al.<sup>3)</sup>, Wang et al.<sup>21)</sup>, Mohajerin Esfahani and Kuhn<sup>14)</sup>, Hanasusanto and Kuhn<sup>7)</sup> など)。本研究では、Hanasusanto and Kuhn<sup>7)</sup> に基づいて各水害シナリオに対して計画者が設定した重みの間の距離を定式化する。

### 3. モデルの定式化

#### (1) モデルの前提

本研究では、柏谷ら(1996)と同様に付け値地代を土地利用の効率性を表す指標として考え、計画区域内の付け値地代の総和を最大化する土地利用配分を求める土地利用計画モデルを考える。本モデルは静的な最適化問題であり、計画期間の最初の年に全ての土地利用が最適配分に変更され、その配分結果に基づいて発生する付け値地代を最大化することを考える。ただし、計画期間中に水害が発生することによって付け値地代が低下する状況を考え、各水害シナリオの再現期間を用いて確率的に評価された期待付け値地代を用いる。

計画区域を複数のメッシュで分割すると考え、メッシュ  $i \in \mathcal{I} = \{1, 2, \dots, I\}$  ごとに住宅や商業地といった土地利用形態  $k \in \mathcal{K} = \{1, 2, \dots, K\}$  を配分する面積  $x_{ik} \in \mathbf{X} = \{\mathbb{R}^{N \times K} : \forall i \in \mathcal{I}, k \in \mathcal{K}\}$  を決める。洪水の破堤点など浸水の発生箇所や、L1, L2といった規模ごとに水害シナリオ  $s \in \mathcal{S} = \{1, 2, \dots, S\}$  を考える。水害シナリオ  $s$  ごとに再現期間  $\lambda_s$  の情報が与えられ、 $1/\lambda_s$  年に一度といった情報が与えられていると考える。本研究では、水害シナリオ  $s$  による被害を、付け値地代の低下として表現し、低下する付け値地代の範囲で浸水範囲を考える。実際に、平成27年関東・東北豪雨による被害を受けた常総市では、浸水地域における地価の下落が確認されており(氏原ら<sup>30)</sup>)、水害による被害の大きさを考える上で有用な評価指標の一つと考える。ここでは土地利用形態が  $k$  のメッシュ  $i$  について水害が起こる前のフロア付け値地代を  $b_{ik}$  で表し、水害シナリオ  $s$  が発生した後のフロア付け値地代を  $b_{ik}^s$  で表す。計画開始期から  $t$  年後に水害シナリオが発生する確率を  $p(t|\lambda_s)$ 、社会的割引率を  $\beta$  とおくと、土地利用計画で考慮する期間を  $T$  年間に設定した場合に、計画期間中に得られる付け値地代の総和の期待値を  $\mathbb{E}_p[r_{ik}^s]$  とおくと、

$$\mathbb{E}_p[r_{ik}^s] = \sum_{t=1}^T p_s(t|\lambda_s) \left( \sum_{\tau=1}^{t-1} \beta^{\tau-1} b_{ik} + \sum_{\tau=t}^T \beta^{\tau-1} b_{ik}^s \right) + \left( 1 - \sum_{t=1}^T p_s(t|\lambda_s) \right) \sum_{\tau=1}^T \beta^{\tau-1} b_{ik} \quad (1)$$

と表される。ただし、水害が起きた年から付け値地代が  $b_{ik}^s$  に下がると仮定した。すなわち、式(1)の第一項は計画開始年から  $T$  年後までの間に水害が生じたときの期待値を表しており、それぞれを現在価値に割り引いた1年目から  $(t-1)$  年目までの付け値地代  $b_{ik}$  と  $t$  年目から  $T$  年目までの付け値地代  $b_{ik}^s$  とで構成される。式(1)の第二項は、 $T$  年後までに水害シナリオ  $s$  が生じなかったときの期待値を表している。

$\mathbb{E}_p[r_{ik}^s]$  中の  $p(t|\lambda_s)$  は、例えば、Lickley et al.<sup>13)</sup> のように Poisson 分布で与えることによって計算可能である。

また、付け値地代が災害の前後でしか変化しない、という仮定をおくと  $\mathbb{E}_p[r_{ik}^s]$  は、

$$\mathbb{E}_p[r_{ik}^s] = \frac{1-\beta^T}{1-\beta} b_{ik} - \frac{b_{ik} - b_{ik}^s}{1-\beta} \sum_{t=1}^T p^s(t|\lambda_s) (\beta^{t-1} - \beta^T) \quad (2)$$

に従って計算できる。したがって、水害リスクマップ上<sup>35)</sup>に記載される洪水の頻度、水害による付け値地代の低下の想定<sup>30)</sup>、計画期間の長さといった情報を反映させたパラメータを設定することができる。

## (2) 基本モデルの定式化

本モデルでは、期待付け値地代の最大化に加えて、既にご利用されている土地利用形態からの変更が難しい点を考慮し、既存の土地利用からの変更にコストがかかると考える。既存のメッシュ  $i$  において土地利用形態  $k$  として利用されている面積を  $x_{ik}^o$  としてたときに、面積を  $x_{ik}$  に変更するためには土地改良等の費用が必要であると考える。面積の増減に必要な単位あたりの費用を、それぞれ  $c_k, d_k$  とおく。

降雨量や最大流量などを基に計算された水害シナリオ  $s$  の発生確率  $p(t|\lambda_s)$  とは別に破堤点ごとの破堤確率や、計画者が考える各水害シナリオへの重視度といった計画上、事前に設定される重みを  $\bar{\mathbf{w}} = \{\bar{w}_1, \bar{w}_2, \dots, \bar{w}_s, \dots, \bar{w}_S\}$  で与える。この重みに基づいた土地利用計画モデルを基本モデルとして、次のように定式化する。

$$\max_{\mathbf{x}} \sum_{s \in S} \bar{w}_s \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \mathbb{E}_p[r_{ik}^s] x_{ik} - \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \{c_k(x_{ik} - x_{ik}^o)^+ + d_k(x_{ik}^o - x_{ik})^+\} \quad (3)$$

subject to

$$\sum_{i \in I} x_{ik} = D_k, \quad \forall k \in K \quad (4)$$

$$\sum_{k \in K} x_{ik} \leq A_i, \quad \forall i \in I \quad (5)$$

$$x_{ik} \geq 0, \quad \forall i \in I, \forall k \in K \quad (6)$$

ただし、 $x^+ = \max(x, 0)$  で表す。目的関数式 (3) の第一項は土地利用計画の実施によって発生する付け値地代の総和の期待値、第二項は各メッシュにおいて土地利用形態ごとに面積を広げることの費用、第三項は土地利用形態ごとの面積を狭めること費用をそれぞれ計画区域内で合計した値を考える。制約条件式 (4), (5) は、Herbert and Stevens<sup>9)</sup>、柏谷ら<sup>23)</sup> においても考慮されている制約条件式であり、計画区域内の全ての人口を居住させるために必要な土地を準備する、といった計画区域内で必要とされる土地利用への需要 (式 (4)), 各メッシュで利用可能な面積の制約 (式 (5)) を表す。また、 $x_{ik}$  は非負の制御変数とする (式 (6))。

## (3) 基本モデルへの DRO の適用

ここでは、計画者が事前に設定した重み  $\bar{\mathbf{w}}$  から、より大きな被害が想定されるような重みを求めるモデルを定式化する。具体的には、各水害シナリオへの重みの分布を考え、 $\bar{\mathbf{w}}$  と最適化の中で決める  $\mathbf{w}$  との間の分布間の距離と、その制約条件式を次のように定義する。

$$\sum_s |w_s - \bar{w}_s| \leq \epsilon \quad (7)$$

ただし、 $\epsilon$  は非負のパラメータであり、 $\epsilon \geq 0$  を大きく設定するほど、 $\bar{\mathbf{w}}$  から、より離れた重み  $\mathbf{w}$  を求めることができる。式の左辺は、DRO を取り扱った Ben-tal et al.<sup>3)</sup> における Variation distance, Hanasusanto and Kuhn<sup>7)</sup> における 1-Wasserstein ball に相当しており、極端な重みにも対応でき、計算上の取り扱いが容易である。

以上の設定のもと、基本モデルは重みの分布  $\mathbf{w}$  に関する最小化と、制御変数  $\mathbf{x}, \mathbf{y}$  に関する最大化で構成される 2 段階の最適化問題として定式化される。

$$\max_{\mathbf{x}, \mathbf{y}} \min_{\mathbf{w}} \sum_{s \in S} w_s \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \mathbb{E}_p[r_{ik}^s] x_{ik} - \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} y_{ik} \quad (8)$$

subject to (4)–(3)

$$\sum_s w_s = 1 \quad (9)$$

$$y_{ik} \geq c_k(x_{ik} - x_{ik}^o), \quad \forall i \in I, k \in K \quad (10)$$

$$y_{ik} \geq d_k(x_{ik}^o - x_{ik}), \quad \forall i \in I, k \in K \quad (11)$$

ただし、全ての重みを合計した値は 1 としている ((9))。また、式 (3) 中の土地利用形態ごとに面積を変更することのコストは、計算の容易さから、式 (10), (11) を用いた等価な表現に置き換えている。DRO を扱った Mohajerin Esfahani and Kuhn<sup>14)</sup>、Wang et al<sup>21)</sup>、Hanasusanto and Kuhn<sup>7)</sup> では、分布  $\mathbf{w}$  を求める最小化問題をサブ問題とし、その双対問題を用いて最大化問題のみの 1 段階の最適化問題として定式化するアプローチをとっている。本研究でも、これらの手法にならない、 $\mathbf{w}$  を含む項と制約条件式から構成されるサブ問題を考え、その Lagrange 関数  $\mathcal{L}(\mathbf{w}, \mathbf{X}, \mathbf{z}, \lambda, \mu, \phi, \psi)$  を下式のように表す。

$$\begin{aligned} \mathcal{L}(\mathbf{w}, \mathbf{X}, \mathbf{z}, \lambda, \mu, \phi, \psi) &= \sum_{s \in S} w_s \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \mathbb{E}_p[r_{ik}^s] x_{ik} \\ &+ \sum_{s \in S} \phi_s (w_s - \bar{w}_s - z_s) + \sum_{s \in S} \psi_s (-w_s + \bar{w}_s - z_s) \\ &+ \lambda \left( \sum_{s \in S} z_s - \epsilon \right) + \mu \left( 1 - \sum_{s \in S} w_s \right) \quad (12) \end{aligned}$$

ただし、式 (12) 中の  $\lambda, \mu, \phi_s, \psi_s$  は、それぞれの制約条件式の Lagrange の未定定数である。また、式 (12) は、 $z_s := |w_s - \bar{w}_s|$  として、次の制約条件式を考えている。

$$z_s \geq w_s - \bar{w}_s, \quad \forall s \in S \quad (13)$$

$$z_s \geq \bar{w}_s - w_s, \quad \forall s \in S \quad (14)$$

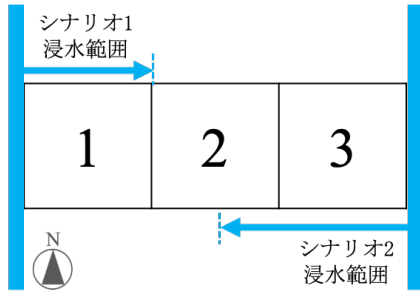
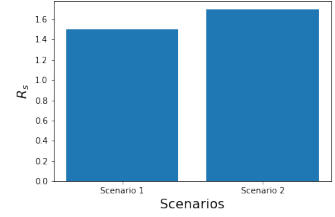


図-1: 計画区域と水害シナリオの設定

1	2	3
$x_{11}$	$x_{21}$	$x_{31}$
1.00	1.00	0.00

(a) 土地利用計画



(b) 目的関数値

図-2: 土地利用計画と目的関数値 ( $\epsilon = 0, \mathbf{w} = \bar{\mathbf{w}}$ )

表-1: 各シナリオの  $\mathbb{E}_p[r_{iks}]$  の想定

シナリオ (S)	メッシュ (I)		
	1	2	3
1	0.5	1	1
2	1	0.7	0.3

以上から、DRO は下式のような最大化問題として表現することができる。

$$\max_{\mu, \lambda, \psi_s, \phi_s} \mu - \epsilon\lambda + \sum_{s \in \mathcal{S}} (\psi_s - \phi_s) \bar{w}_s - \sum_{i \in I} \sum_{k \in \mathcal{K}} y_{ik} \quad (15)$$

subject to (4)–(6), (10) and (11)

$$\mu + \psi_s - \phi_s \leq \mathbb{E}_p[r_{ik}^s] x_{ik}, \quad \forall s \in \mathcal{S} \quad (16)$$

$$\phi_s + \psi_s \leq \lambda, \quad \forall s \in \mathcal{S} \quad (17)$$

$$\lambda, \phi_s, \psi_s \geq 0, \quad \forall s \in \mathcal{S} \quad (18)$$

ただし、各水害シナリオへの重み  $w_s$  は、式 (17) の双対変数として内生変数として求めることができる。

#### 4. 数値実験

##### (1) 状況設定

図-1 に示すように計画区域を 3 つのメッシュに区切り、それぞれの土地利用形態を考える ( $I = \{1, 2, 3\}$ )。ここでは計画区域の東西が河川に接しており、それぞれの河川からの洪水被害を考える ( $\mathcal{S} = \{1, 2\}$ )。水害シナリオの設定として、西側の河川からの洪水被害 ( $s = 1$ ) はメッシュ 1 にのみ影響するとし、計画内で考慮する  $\mathbb{E}_p[r_{ik}^s]$  を表-1 のように与える。

一方、東側の河川からの洪水被害 ( $s = 2$ ) は、シナリオ 1 よりも大きな被害をもたらすものを想定し、メッシュ 2 の一部とメッシュ 3 に被害をもたらす、シナリオ 2 によるメッシュ 3 の被害が最大となるように設定した。計画者は、これらの水害シナリオに同じ重みを設定し、土地利用計画を策定する ( $\bar{\mathbf{w}} = (\bar{w}_1, \bar{w}_2) = (0.5, 0.5)$ ) と考える。ただし、ここでは重みの変化に対して利用されるメッシュの変化を見るために、一種類の土地利用形

態のみを考え ( $\mathcal{K} = \{1\}$ )、土地利用を変更することのコストを 0 として考える ( $c_k = d_k = 0, \forall k \in \mathcal{K}$ )。全てのメッシュの面積を 1 ( $A_1 = A_2 = A_3 = 1$ ) とし、計画区域内における土地利用形態 1 への需要  $D_1 = 2.0$  とし、この需要を満たすためには、少なくとも 2 つのメッシュを利用しなければいけない状況を考える。

##### (2) 計算結果

###### a) 重みを変更できない場合 ( $\epsilon = 0$ )

重みの自由度を決める  $\epsilon$  を 0 とし、 $\bar{\mathbf{w}}$  からの重みの変更を認めない基本モデルでの計算結果を図-2 に示す。図-2a から、各水害シナリオへの重みを 0.5 で設定した場合、メッシュ 1 と 2 の全ての面積を利用する土地利用計画が得られることがわかる。これは、表-1 に示すようにシナリオ 1 よりもシナリオ 2 の発生による  $\mathbb{E}_p[r_{ik}^s] x_{ik}$  の低下が大きいので、シナリオ 2 による被害を避けようとするため、メッシュ 3 の利用を避けた土地利用がなされていることが確認できる。このときの目的関数値について重み付けする前の値  $R_s$  を図-2b に示す。ただし、 $R_s$  を次のように定義し、

$$R_s := \sum_{i \in I} \sum_{k \in \mathcal{K}} \mathbb{E}_p[r_{ik}^s] x_{ik}^* \quad (19)$$

$x_{ik}^*$  はモデルから得られた最適解を表す。図-2b から、シナリオ 2 が発生することによる  $R_2$  の値は、 $R_1$  よりも高く、シナリオ 2 による浸水被害に対して頑健な土地利用が計画されていることがわかる。一方、シナリオ 1 が発生することによる  $R_1$  の値は低いので、シナリオ 2 に対して頑健である一方で、シナリオ 1 に対しては脆弱な土地利用が計画されているといえる。すなわち、各シナリオへの重みを同じに設定した場合、被害の大きいシナリオの方を避けるような土地利用計画が求められやすく、他のシナリオに対しては脆弱な計画となる可能性が示唆された。

###### b) 重みを変更できる場合 ( $\epsilon > 0$ )

次の期待付け値地代の合計が最小となるように計算された重み  $\mathbf{w}^*$  の下での土地利用計画を調べるため、 $\epsilon = 0.5$  として、 $\bar{\mathbf{w}}$  からの変更を許した場合の結果を図-3 に示

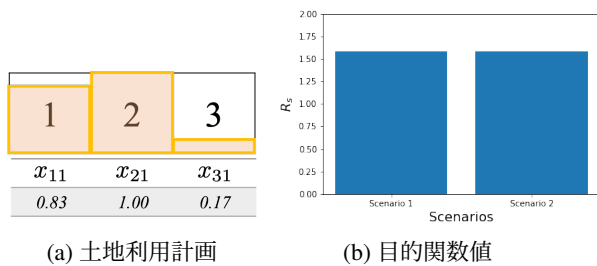


図-3: 土地利用計画と目的関数値 ( $\epsilon = 0.5, \mathbf{w} = \mathbf{w}^*$ )

す。このときの最適な重みは  $\mathbf{w}^* = (0.58, 0.42)$  であった。まず、各重みが  $\bar{\mathbf{w}}$  で与えられている場合、シナリオ 1 による期待付け値地代  $R_1$  が小さいため (図-2b),  $\bar{w}_1 = 0.5$  よりもシナリオ 1 により大きな重みを設定することで、目的関数値を下げる事ができる。

すなわち、より大きな被害の想定として、 $\bar{\mathbf{w}}$  のときの土地利用計画において、より大きな被害をもたらすシナリオ 1 が、より頻繁に起こるような状況を考えていることに相当する。シナリオ 1 が重視される一方で、シナリオ 2 は相対的に重視されなくなるため、シナリオ 2 において最大の被害を受けるメッシュ 3 が利用されるようになる。これにより、シナリオ 2 における期待付け値地代収入  $R_2$  が下がるため、 $R_1, R_2$  がちょうど、等しくなったときに、最大の被害が想定され、重みの変更が止まる、というように解釈できる。このように重みを変えることによって、図-2b のように、どちらか一方の水害シナリオに対して脆弱になるような土地利用計画ではなく、図-3b のように、どちらの水害シナリオに対しても、同程度の期待付け値地代が得られるような土地利用計画が得られることが確認できた。

## 5. 結論

本研究では、破堤点や規模の異なる複数の水害シナリオに適応した土地利用計画の策定を支援するロバスト最適土地利用計画モデルを提案した。本モデルでは、あらかじめ計画者が設定した重みを基準に、最大の被害を与えるような重みを内生的に決め、その重みの下で最大の被害を避けるような土地利用計画を求めるモデルとなっている。定式化には、DRO の考え方を援用し、詳細なメッシュでも扱いやすい土地利用計画モデルを提案した。

本研究の数値実験から、起きうる可能性のある全ての水害シナリオに同じ重みをつけ、重みを変えない設定の下で土地利用計画を求めた場合、最も大きな被害が想定される水害シナリオに対しては頑健な計画が求められることが確認された。その一方で、それ以外の

水害シナリオに対しては脆弱な土地利用計画になっている可能性が示唆された。また、本モデルを適用し、あらかじめ計画者が設定した重みから、より最大の被害を想定できるように変更可能とした場合、どちらかの水害シナリオに対して極端に脆弱であるようなことがない土地利用計画が求められることが確認された。以上から、複数の水害シナリオに対して同じ重みをつけることは、最大の被害をもたらす水害シナリオ以外のシナリオに対して脆弱な土地利用計画となる可能性が示唆された。また、各水害シナリオに対して異なる重みを設定することで、被害を分散させるような土地利用計画が達成できる可能性があるといえる。

**謝辞:** 本研究は JSPS 科研費 22K04361 の助成を受けたものです。

## 参考文献

- 1) Aerts, J. C.J.H. and Botzen, W. and A. van der Veen, J., Krywkow, J., and Werners, S.: Dealing with uncertainty in flood management through diversification, *Ecology and Society*, Vol.13(1), online, 2008.
- 2) Aerts, J. C.J.H. and Eisinger, E. and Heuvelink, G. B.M. and Stewart, T. J.: Using linear integer programming for multi-site land-use allocation, *Geographical Analysis*, Vol.35, pp.148–169, 2003.
- 3) Ben-Tal, A. and Den Hertog, D., De Waegenaere, A., Melnberg, B. and Rennen, G.: Robust solutions of optimization problems affected by uncertain probabilities, *Management Science*, Vol.59, pp.341–357, 2013.
- 4) Bertsimas, D. and Sim, M., The Price of Robustness. *Operations Research* Vol.52(1), pp.35–53, 2004.
- 5) Cao, K. and Zhang, W. and Wang, T.: Spatio-temporal land use multi-objective optimization: A case study in Central China, *Transactions in GIS*, Vol.59, pp.726–744, 2019.
- 6) Delage, E. and Ye, Y.: Distributionally robust optimization under moment uncertainty with application to data-driven problems, *Operations Research*, Vol.58, pp.595–612, 2010.
- 7) Hanasusanto, G. A. and Roitch, V. and Kuhn, D. and Wiesemann, W.: Distributionally robust optimization, Joint chance constraints, Robust optimization, *Operations Research*, Vol.65, pp.751–767, 2017.
- 8) Handayanto, R. T. and Tripathi, N. K. and Kim, S. M. and Guha, S.: Achieving a sustainable urban form through land use optimisation: Insights from Bekasi City's land-use plan (2010-2030), *Sustainability (Switzerland)*, Vol.9, online, 2017.
- 9) Herbert J. D. and Stevens B.H.: A model for the distribution of residential activity in urban areas, *Journal of Regional Science*, Vol.2, pp.21–36, 1960.
- 10) IPCC: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
- 11) Kaim, A. and Cord, A. F. and Volk, M.: A review of multi-criteria optimization techniques for agricultural land use allocation, *Environmental Modelling and Software*, Vol.105, pp.79–93, 2018.

- 12) Knoke, T. and Paul, C. and Härtl, F. and Castro, L. M. and Calvas, B. and Hildebrandt, P.: Optimizing agricultural land-use portfolios with scarce data-A non-stochastic model, *Environmental Modelling and Software*, Vol.120, pp.250–259, 2015.
- 13) Lickley, M. J., Lin, N. and Jacoby, H. D.: Analysis of coastal protection under rising flood risk, *Climate Risk Management*, Vol.6, pp.18–26, 2014.
- 14) Mohajerin Esfahani, P. and Kuhn, D.: Data-driven distributionally robust optimization using the Wasserstein metric: performance guarantees and tractable reformulations, *Mathematical Programming*, Vol.171, pp.115–165, 2017.
- 15) Motamed, H., Ghafory-Ashtiany, M., Amini-Hosseini, K., Mansouri, B. and Khazai, B.: Earthquake protection, Land use planning, Optimisation, Risk-sensitive planning, *Natural Hazards*, Vol.103, pp.87–102, 2020.
- 16) Mudashiru, R. B., Sabtu, N., Abustan, I. and Balogun, W.: Flood hazard mapping methods: A review, *Journal of Hydrology*, Vol.603, 2021.
- 17) Okubo, K., Kim, J., and Okumura, M., : Sustainable land-use planning model for disaster-affected areas, *Proceedings of the International Symposium on City Planning*, p.10, 2013.
- 18) Shirabe, T.: A model of contiguity for spatial unit allocation, *Geographical Analysis*, Vol.37, pp.2–16, 2005. *Computers, Environment and Urban Systems*, Vol.46, pp.25–34, 2014.
- 19) Uchiuzo, T., Nakai, F., Okubo, K.: Analyzing Urban Intensification and Disaster Risk Reduction Using the Optimal Land-Use Model, *Conference Proceedings of 2021 IEEE 10th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)*, pp.115–116, 2021.
- 20) Uhde, B., Hahn, A., Griess, V. C. and Knoke, T.: Hybrid MCDA Methods to Integrate Multiple Ecosystem Services in Forest Management Planning: A Critical Review, *Environmental Management*, Vol.56, pp.373–388, 2015.
- 21) Wang, Z., Glynn, P. W. and Ye, Y.: Likelihood robust optimization for data-driven problems, *Computational Management Science*, Vol.13, pp.241–261, 2016.
- 22) Yao, J., Zhang, X. and Murray, A. T.: Spatial Optimization for Land-use Allocation: Accounting for Sustainability Concerns, *International Regional Science Review*, Vol.41, pp.579–600, 2018.
- 23) 柏谷増男, 朝倉康夫, 矢島徹也: 道路混雑緩和のための土地利用誘導モデルに関する研究, *土木計画学研究・論文集*, Vol.13, pp.247–256, 1996.
- 24) 木内望: 水害リスクを踏まえた建築・土地利用マネジメントに関する考察-土地利用・建築規制, 計画誘導, 市場誘導に関わる制度の実態と課題-, *都市計画論文集*, Vol.54, pp.923–930, 2019.
- 25) 中野卓, 木内望: 水害リスクを踏まえた都市づくりにおける洪水浸水想定区域の活用可能性と課題, *都市計画論文集*, Vol.55, pp.888–895, 2020.
- 26) 齋藤晋佑, 姥浦道生: 水害リスクコントロールの実態と土地利用規制を通じた課題に関する研究-建築基準法39条による規制に着目して-, *都市計画論文集*, Vol.47, pp.445–450, 2012.
- 27) 磯野昂士, 奥村誠: コンパクトシティ施策における複数の計画規範のトレードオフ構造の分析, *都市計画論文集*, Vol.52, pp.413–420, 2017.
- 28) 須々間淳, 奥村誠: 多機能公共施設の更新戦略最適化, *都市計画論文集*, Vol.54, pp.758–765, 2019.
- 29) 須々間淳, 奥村誠: 公共施設の削減方針が洪水避難場所に与える影響, *土木学会論文集 D3 (土木計画学)*, Vol.75, pp.I.223–I.232, 2019.
- 30) 氏原岳人, 和氣悠, 森永夕佳里: 平成27年9月関東・東北豪雨がもたらした被災地の人口及び地価変動-茨城県常総市を対象として-, *都市計画論文集*, Vol.54, pp.57–63, 2019.
- 31) 大野峻, 杉浦聡志, 高木朗義: 破堤確率と上下流の関係を考慮したリスク評価に基づく流域治水計画策定方法, *土木学会論文集 D3 (土木計画学)*, Vol.72, pp.I.149–I.158, 2016.
- 32) 宇野尚雄, 森杉壽芳, 杉井俊夫, 中野雄治: 被災事例に基づく河川堤防の安全性評価, *土木学会論文集*, Vol.400, pp.161–170, 2016.
- 33) 中居楓子, 内生蔵達也, 大窪和明: 津波リスクの低減と平常時の利便性を考慮した最適居住地域配置モデルによるトレードオフの分析, *土木学会論文集 D (土木計画学)*, Vol.77, pp.431–447, 2022.
- 34) 国土交通省水管理・国土保全局: 治水経済調査マニュアル(案), 2020.
- 35) 国土交通省: 流域治水プロジェクト, [https://www.mlit.go.jp/river/kasen/ryuiki\\_pro/](https://www.mlit.go.jp/river/kasen/ryuiki_pro/) (accessed 2022.08.10).

(Received September 30, 2022)

(Accepted XXXX XX, XXXX)

## LAND USE PLANNING MODEL BASED ON DISTRIBUTIONALLY ROBUST OPTIMIZATION FOR MULTIPLE FLOOD SCENARIOS

Kazuaki OKUBO, Fuko NAKAI