気候変動に対するロバスト最適な土地利用計画と水害脆弱性評価

大窪 和明[1]・中居 楓子[2]

[1]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)
[2]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

気候変動に伴う水害の激甚化や頻発化が指摘される中，大雨や海面水位の上昇による高潮が重なった複合的な水害リスクの増大も指摘されている．こうした多様化する水害リスクの変化に土地利用を適応させていくことの必要性は高まっているものの，全てのリスクを避けた土地利用は難しい．大窪・中居 (2022) では土地利用計画に求めるロバスト性に応じて計画者が重み自由度を設定し，その制約下において複数の水害リスクそれぞれの重みを最適化しながらロバスト最適な土地利用計画を求めるモデルを提案し，仮想的な地域設定の下でモデルの性質を確認した．本研究では，このモデルを，沿岸部に位置し複数の河川が市内を流れる愛知県豊橋市に適用し，高潮の年超過確率や重み自由度などの設定条件と最適土地利用計画との関係を明らかにするとともに，破堤点や土地利用ごとの曝露面積などの観点から最適土地利用計画の水害脆弱性を評価する．

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

1. はじめに

最新の IPCC 第 6 次評価報告書によると，世界平均気温は少なくとも今世紀半ばまでは上昇することが報告されている[8]．今後，数十年間で温室効果ガスの排出が大幅に減少しない限り，21 世紀中に 1.5 度および 2.0 度の上昇が予想されている．こうした気温上昇に伴い，洪水の発生頻度の高まることを指摘する研究（Vitousek et al.[16]）や，海面の異常上昇により 2050 年以降，熱帯の大部分が現在の 100 年イベントに毎年さらされる可能性を指摘する研究（Vousdoukas et al.[17]）が報告されている．また，Bevacqua et al.[3] では，地球温暖化による海面上昇が，高潮と大雨の影響による複合洪水を発生させる可能性を高めていることを指摘している．こうした地球温暖化に伴う長期的な水害リスクの高まりへの適応策を考える上で，これらの研究は，これまでに把握されてきた洪水の発生確率を再検討する必要があること，複合洪水を潜在的なハザードとして考慮する必要があることを示唆している．特に，土地利用計画のように長期にわたる計画の策定においては，将来的な水害リスクの変化を検討することが重要になると考える．

我が国においては既存の洪水ハザードマップが提供する情報に加えて，水害の頻度や規模を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[29]．この水害リスクマップは，住民・企業が立地を選択する際に利用可能な情報量を，より充実させ，水害リスクの低い地域への立地を誘導することが期待されている．住民や企業に水害リスクの低い地域への立地を促す一方で，都市全体の土地利用方針の下に作成された計画に基づいて土地利用を規制または誘導する施策を実施する必要がある．しかし，地球温暖化に伴う水害リスクの長期的な変化を捉えることが難しいだけではなく，浸水想定区域が広範であり，計画の策定には困難が伴う．例えば，中野・木内[22] では，ほとんどの自治体において市街化区域と L1 浸水想定区域が重複しており，重複割合が 90% を超える自治体も多いことを報告している．したがって，土地利用計画を策定する上では，想定される水害の規模や頻度を基に，重点的に対策を講じるべき水害リスクについて考えていくことが重要である．

想定される水害の規模や頻度を把握する上で，洪水ハザードマップや水害リスクマップは重要な情報を提供している．これらのマップの中で設定されている浸水想定区域の規模は様々であり，計画規模 L1 だけでも 50 年に一度の規模を想定している河川から，150 年に一度の規模を想定している河川まで様々である．そのため，こうした規模や頻度の設定が異なる水害リスクを，どのように組み合わせながら土地利用計画に反映させていくか，を考えていく必要がある．

Ghosh[4] や Jiang et al.[7] においては，複数の河川それぞれの降雨量のデータとコピュラを使用して，河川ごとの降雨量の相関関係を考慮した洪水の発生確率分布を推定する手法を開発している．Jiang et al. による方法は，河川ごとの洪水の発生確率に基づいて，それぞれの水害リスクに対して重み付けをする上で，有用な知見を提供している．しかし一方では，地球温暖化の進行による降雨パターンの変化に伴い，これまでの多くの降雨量を予測した研究に用いられてきたような定常性の仮定が見直されており，これまでに観測された降雨量の分布が今後も続く保証はない．

地球温暖化に伴う降雨パターンの変化は，これまでに重要視されていなかった水害リスクを高める可能性がある．例えば，将来的な海面上昇に伴い，高潮による水害リスクは上昇する可能性が考えられる．そのため，現在と将来とで重要視される水害リスクが異なる場合，現在の想定の下で策定した土地利用計画を将来的に見直す必要性が生じ，計画の変更に大きなコストを伴う可能性がある．特に，現在は重要視されていなかった水害リスクが，将来，重要なものとして顕在化した場合，大きな被害がもたらされる可能性がある．

こうした背景の下，大窪・中居[23] では水害の発生確率や計画策定者の中での議論を基に，各水害リスクへの重みが事前に設定されたことを前提とし，その事前の重みを参照しながら，被害を大きくするような重みを設定した上で，その最大被害を避けるような土地利用計画を求めるロバスト最適土地利用計画モデルを提案した．この手法を用いることによって，特定の水害に対する被害を小さくする一方で，他の水害に対しては大きな被害が予想されるような土地利用計画の脆弱性が改善され，複数の水害リスクに対してロバストな計画が求められていることが確認された．大窪・中居モデルでは，簡単な数値設定の下で，その性質が確認されている．本研究の目的は，実際の地域設定の下でモデルの性質を確認するとともに，複数の水害リスクについて，それぞれの重みを検討することによって，最大の被害をもたらすような水害の組み合わせを検討する際に応用できることを示すことである．

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ており（例えば，Herbert and Stevens[6]，柏谷ら[20] など），時代のニーズの変遷とともに様々な研究がなされてきた．最近では，持続可能な土地利用計画に関する研究が報告され，都市のコンパクトと土地利用の両立性の検討（Yao et al[19]），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計画 (Kaim et.al[9])，森林の機能（木材の供給，生態系・水質の保全，レクリエーションなど）をふまえた森林管理計画 (Uhde et. al[15]) といった様々なモデルが提案されている．

地球温暖化に伴う降雨パターンの変化等に伴い，最近でも災害リスクを考慮した土地利用計画モデルは提案され続けている（例えば，Aerts et al.[1], Lickley et al.[11] や Knoke et al.[10] など）．これらの多くの研究においては，一つの破堤点から洪水が発生するような水害リスクが想定されている．そのため，複数の河川からの洪水または高潮による水害リスクが想定される場合，それぞれの水害リスクに対して，どのような優先順位を想定した重みを設定すべきか考える必要がある．重みの設定方針について指針を与える研究（例えば，Kaim, Cord and Volk[9] や磯野・奥村[25]，Okubo et al.[13],Uchiuzo et al.[14], 中居ら[27]）もあるものの，網羅的な重みの検討には計算負荷がかかることや，計画者による過度に楽観的または悲観的な重みの組み合わせを避けなければならないことが課題である．大窪・中居[23] では，こうした課題を解決するため，ロバスト最適土地利用計画モデルを提案している．しかし，大窪・中居では簡単な地域設定の下でモデルの性質が把握されており，より現実的な地域設定の下での計算負荷やモデルから得られる重みの性質については未知であり，複数の水害リスクに曝された地域におけるモデル分析を通じた政策的なインプリケーションについて，さらなる議論が必要と考える．

3. モデルの定式化

(1) モデルの枠組み

本研究では大窪・中居モデル[23] を用いる．このモデルは Herbert andStevens[6] や柏谷ら[20] 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．モデルの定式化は，大窪・中居と同様であり，ここでは概要を述べる．

はじめに計画区域を複数のメッシュで分割すると考え，住宅や商業地といった土地利用形態 $k \in \mathcal{K} = \{1,2,\cdots,K\}$ について，メッシュごと ($i \in \mathcal{I} = \{1,2,\cdots,I\}$) に面積 $x_{ik} \in \mathbf{X} = \{\mathbb{R}^{N\times K} : \forall i \in \mathcal{I}, k \in \mathcal{K}\}$ を配分する状況を考える．水害リスクは，破堤点，規模や浸水想定区域ごとに異なる水害シナリオ s を設定すると仮定し，ここでは水害シナリオごとの被害を付け値地代の低下として表現する（$s \in \mathcal{S} = \{1,2,\cdots,S\}$）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[26])，水害による被害の影響を表す一つの指標と考えられる．

ここでは土地利用形態が k であるメッシュ i の水害発生前のフロア付け値地代を b_{ik} で表し，水害シナリオ s による影響を受けた後のフロア付け値地代を b^s_{ik} で表す．各水害シナリオの再現期間や発生確率などに基づいてメッシュ i，水害シナリオ s，および土地利用形態 k ごとの期待総フロア付け値地代 $\mathbb{E}_p[r^s_{ik}]$ が得られたと仮定する．さらに，計画者が各水害シナリオの計画上の重視度を事前に検討し，設定された重みを $\bar{\mathbf{w}} = \{\bar{w}_1, \bar{w}_2, \cdots, \bar{w}_s, \cdots, \bar{w}_S\}$ で与えたとき，総付け値地代を最大化する最適土地利用計画モデルは次のように定式化される．

$$\max_{\mathbf{x}} \quad \sum_{s\in\mathcal{S}} \bar{w}_s \sum_{i\in\mathcal{I}} \sum_{k\in\mathcal{K}} \mathbb{E}_p[r^s_{ik}] x_{ik} - \sum_{i\in\mathcal{I}} \sum_{k\in\mathcal{K}} \{c_k(x_{ik} - x^o_{ik})^+ + d_k(x^o_{ik} - x_{ik})^+\} \tag{1}$$

subject to

$$\sum_{i\in\mathcal{I}} x_{ik} = D_k, \quad \forall k \in \mathcal{K} \tag{2}$$

$$\sum_{k\in\mathcal{K}} x_{ik} \le A_i, \quad \forall i \in \mathcal{I} \tag{3}$$

$$x_{ik} \ge 0, \quad \forall i \in \mathcal{I}, \forall k \in \mathcal{K} \tag{4}$$

ただし，$x^+ = \max(x, 0)$ で表す．目的関数式 (1) 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の費用をそれぞれ計画区域内で合計した値を考える．大窪・中居において導入された第二，三項は，既に利用されている土地利用形態からの変更が難しく，既存の土地利用からの変更にコストがかかると考えている．すなわちメッシュ i において土地利用形態 k として現在，利用されている面積を x^o_{ik} としたとき，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，それぞれ設定すると考え，c_k, d_k とおく．

制約条件式 (2)，(3) は，Herbert and Stevens[6]，柏谷ら[20] 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 (2))，各メッシュで利用可能な面積の制約 (式 (3)) を表す．また，x_{ik} は非負の制御変数とする（式 (4)）．

大窪・中居では，ロバスト最適化の考え方に基づいて，被害が最も大きくなるような水害シナリオの重み $\mathbf{w}$ を最適化計算の中で求めつつ，その被害を避けるような土地利用計画を求めるモデルを考えている．すなわち，計画者が事前に設定した重み $\bar{\mathbf{w}}$ から，自由度 ϵ の範囲内で最大の被害が想定されるような重みを求めるモデルを定式化している．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．

$$\sum_s |w_s - \bar{w}_s| \le \epsilon \tag{5}$$

ただし，ϵ は非負のパラメータであり，ϵ を大きく設定するほど，$\bar{\mathbf{w}}$ から，より離れた重み $\mathbf{w}$ を設定することが可能となり，より大きな被害を想定することができる．一方で，$\bar{\mathbf{w}}$ を各水害シナリオの発生確率と解釈した場合，式 (5) は，事前に求められた発生確率と，実際の発生確率との差異を，どの程度まで考えるかを制約する条件式と捉えることもできる．したがって，$\bar{\mathbf{w}}$ について信頼できる値が設定できており，差異が生じない場合には，事前に設定された発生確率を変更する必要が少ないため，ϵ を小さく設定することができる．

以上の設定の下，大窪・中居では重みの分布 $\mathbf{w}$ 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以下の min-max 問題として定式化している．

$$\max_{\mathbf{x},\mathbf{y}} \min_{\mathbf{w}} \sum_{s\in\mathcal{S}} w_s \sum_{i\in\mathcal{I}} \sum_{k\in\mathcal{K}} \mathbb{E}_p[r^s_{ik}] x_{ik} - \sum_{i\in\mathcal{I}} \sum_{k\in\mathcal{K}} y_{ik} \tag{6}$$

subject to (2)–(5)

$$\sum_s w_s = 1 \tag{7}$$

$$y_{ik} \ge c_k(x_{ik} - x^o_{ik}), \quad \forall i \in \mathcal{I}, k \in \mathcal{K} \tag{8}$$

$$y_{ik} \ge d_k(x^o_{ik} - x_{ik}), \quad \forall i \in \mathcal{I}, k \in \mathcal{K} \tag{9}$$

ただし，全ての重みを合計した値は 1 としている ((7))．また，式 (1) 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 (8), (9) を用いた等価な表現に置き換えている．この最適化問題は，Mohajerin Esfahani and Kuhn[12]，Wang et al[18], Hanasusanto and Kuhn[5] による手法を応用すると，次のような最大化問題として表現することができる．

$$\max_{\mathbf{x},\mathbf{y},\lambda,\mu,\boldsymbol{\phi},\boldsymbol{\psi}} \mu - \epsilon\lambda + \sum_{s\in\mathcal{S}} (\psi_s - \phi_s)\bar{w}_s - \sum_{i\in\mathcal{I}} \sum_{k\in\mathcal{K}} y_{ik} \tag{10}$$

subject to (2)–(4), (8) and (9)

$$\mu + \psi_s - \phi_s \le \mathbb{E}_p[r^s_{ik}] x_{ik}, \quad \forall s \in \mathcal{S} \tag{11}$$

$$\phi_s + \psi_s \le \lambda, \quad \forall s \in \mathcal{S} \tag{12}$$

$$\lambda, \phi_s, \psi_s \ge 0, \quad \forall s \in \mathcal{S} \tag{13}$$

ただし，各水害シナリオへの重み w_s は，式 (12) 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. 対象地域の設定

(1) 状況設定

本研究では愛知県豊橋市を対象地域とする．愛知県豊橋市では，市内を豊川，梅田川，柳生川といった複数の河川が流れており，それぞれの河川に計画規模，想定最大規模に応じた洪水浸水想定区域が作成されてい

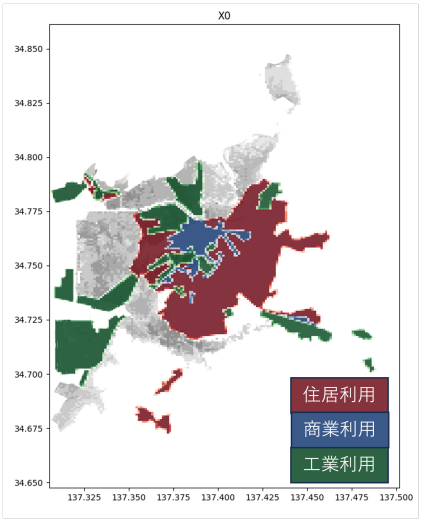


図-1: 既往の土地利用形態

る．また，市の西部は海に面しているため，高潮も災害リスクとして考えられており，伊勢湾台風規模，室戸台風規模といった規模の想定の下で，高潮浸水予想図が作成されている．これらの浸水想定区域は，特に高潮の浸水想定区域が広範であるため，全ての浸水域を避けた土地利用が難しい都市の一つである．

ここでは，計画規模での豊川・豊川放水路，梅田川，柳生川の浸水想定区域を考え，それぞれ 1/150, 1/50, 1/30 の規模が設定されている．また，ここでは高潮による浸水想定区域も考えている．本研究で考える土地利用計画では，100m×100m で区切られた各メッシュに住居利用，商業利用，工業利用の面積を大窪・中居モデルに従って配分することを考える．既存の土地利用を図-1 に示す．

ここでの期待地代 $\mathbb{E}_p[r_{ik}^s]$ は，計画期間を T 期間中に複数の水害が発生する可能性も考慮し，水害シナリオごとの年超過確率を p_s で表し，下式に従って計算する．

$$\mathbb{E}_p[r_{ik}^s] = \sum_{y=0}^{T} p_s^y (1-p_s)^{T-y} \sum_{\tau \in \mathcal{T}_{sy}}^{T} R(r_i, r_i^s, \tau) \qquad (14)$$

ただし，$\mathcal{T}_{sy}$ は計画期間中で y 回の水害が発生する期の集合を表しており，$R(r_i, r_i^s, \tau)$ は，$\mathcal{T}_{sy}$ の各要素で表された期に水害シナリオが発生したと考えたときの現在価値に割り引かれた計画期間中の地代の総和を表している．

5. まとめ

本研究では，愛知県豊橋市の土地利用計画をケーススタディとして，複数の水害シナリオに対してロバスト最適な土地利用計画を算出するモデルを適用する．発表会では，重みの自由度 ϵ に関する土地利用ごとの曝露面積や重みの組み合わせの分析結果を報告するとともに，最適土地利用計画の水害脆弱性について議論したい．

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) E. Bevacqua et al., Higher probability of compound flooding from precipitation and storm surge in Europe under anthropogenic climate change. *Sci. Adv.* 5,eaaw5531(2019).
4) Ghosh, S.: Modelling bivariate rainfall distribution and generating bivariate correlated rainfall data in neighbouring meteorological subdivisions using copula. *Hydrol. Process.*, 24: 3558-3567, 2010.
5) 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.
6) Herbert J. D. and Stevens B.H.：A model for the distribution of residential activity in urban areas, *Jounrnal of Regional Science*, Vol.2, pp.21–36,1960.
7) Jiang, X., Tatano,H., and Hori T.: A Methodology for Spatial Flood Risk Assessment Taking Account of the Spatial Temporal Characteristics of Rainfall. *IDRiM Journal* 3 (1): 75-79, 2013.
8) 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. Portner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegra, M. Craig, S. Langsdorf, S. Loschke, V. Moller, A. Okem, B. Rama (eds.). Cambridge University Press. In Press.
9) 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.
10) 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.
11) 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.
12) 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.
13) 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.
14) 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.
15) 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.
16) Vitousek S. V. et al. Doubling of coastal flooding frequency within decades due to sea-level rise, *Sci. Rep.*,7, 1399,2017
17) M.I., Mentaschi, L., Voukouvalas, E. et al. Global probabilistic projections of extreme sea levels show intensification of coastal flood hazard. *Nat Commun* 9, 2360 (2018).
18) Wang, Z., Glynn, P. W. and Ye, Y.: Likelihood robust optimization for data-driven problems, *Computational Management Science*, Vol.13, pp.241–261, 2016.
19) 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.
20) 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.
21) 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.
22) 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.
23) 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, 2022.
24) 鬼頭征也，中居楓子，大窪和明，秀島栄三：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，第 67 回土木計画学研究発表会・講演集, 2023.
25) 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.
26) 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.
27) 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.
28) 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.
29) 国土交通省：流域治水プロジェクト，https://www.mlit.go.jp/river/kasen/ryuiki_pro/(accessed 2022.08.10).

(Received October 13, 2023)

(Accepted October 13, 2023)