

MFD-RL 配分モデルを用いた 豪雨災害における垂直・水平避難の予測制御

増田 慧樹¹・羽藤 英二²

¹学生会員 東京大学 工学科研究科社会基盤学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

E-mail: masuda@bin.t.u-tokyo.ac.jp

²正会員 東京大学 工学科研究科社会基盤学専攻教授 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

E-mail: hato@bin.t.u-tokyo.ac.jp

豪雨災害において、自宅近くの垂直避難と浸水域外への水平避難は、被害と避難コストに関してトレードオフ関係にある。住民の垂直/水平避難の選択を適切に制御し、被害とコストを最小にする効率的な避難を実現するため、垂直/水平避難の動的な予測制御モデルを定式化した。予測モデルのリアルタイム性と避難行動表現の課題に対し、Macroscopic Fundamental Diagram を用いたゾーンベースシミュレーションによる高速化と、動的離散選択モデルによる避難行動の記述・推定を行った。東京都江東区におけるケーススタディの結果、被害が甚大な地域ほど、垂直避難による孤立のリスクが大きいため、水平避難が促進される。その一方で、直感に反して、低リスク地域においても水平避難や垂直避難の促進が最適となる場合があり、予測モデルに基づく定量的な検討の必要性が示唆された。

Key Words: vertical evacuation, horizontal evacuation, dynamic discrete choice model, evacuation simulation, Macroscopic Fundamental Diagram

1. はじめに

災害は、発災の有無・時間・場所・規模に関する不確実性があり、避難計画の困難さの原因となっている。計画者（自治体・政府）が、不確実性の大きい状況で避難を促進すれば、避難が空振りした場合のコストが増大するが、災害発生の直前まで不確実性が小さくなるのを待っていれば、避難遅れに繋がる。このように、発災の不確実性がある状況において、計画者は、被害の最小化だけでなく、避難に伴うコストの最小化についても考慮した上で、適切な避難計画を立てなくてはならない。

このような不確実性下の避難計画に対して、本研究では、住民の避難行動、特に目的地選択を制御することを考える。避難行動の制御として、これまで、リスクと影響開始時刻が異なる複数地域の避難需要を、時間的に分散させる段階避難 (staged / phased evacuation) の計画が研究されてきた。一方で、発災の不確実性の大きい災害において、避難に伴うコストを考慮すると、浸水域内からの立ち退き避難の出発時刻制御だけでなく、浸水域内での上層階への避難を許容するような、避難の目的地を制御する計画論が必要であろう。

避難の目的地の制御方法として、垂直避難と水平避難の二つの避難方法が考えられる。垂直避難とは、浸水想定区域内の居住者が自宅・施設等の浸水しない上階へ移動することである。水平避難 (立ち退き避難) とは、浸水想定区域内の居住者が浸水想定区域の外側等、災害に対し安全な場所へ移動することである。水平避難を行えば、浸水域での被災のリスクを抑えられるものの、移動距離が大きいため避難に伴うコストは大きくなる。また膨大な自動車避難の需要発生による道路渋滞も懸念される (図-1 黒点線)。このような水平避難需要の集中による問題に対して、垂直避難と水平避難を組み合わせることにより、図-1 黒実線で示すように需要を時空間的に分散させる制御を考える。このとき、浸水継続時間の長い地域においては、ライフライン停止下で長時間の孤立が予想されるため、垂直避難にも被害のリスクが伴う。このように、被害と避難に伴うコストに関してトレードオフの関係にある垂直避難と水平避難を、各地域の被害特性と混雑予測に応じて最適化し、効率的な避難を達成する組み合わせを示すことが本研究の目的である。

不確実性下の垂直/水平避難の計画には、リアルタイム性と精緻な避難行動予測の2点が求められる。まず、

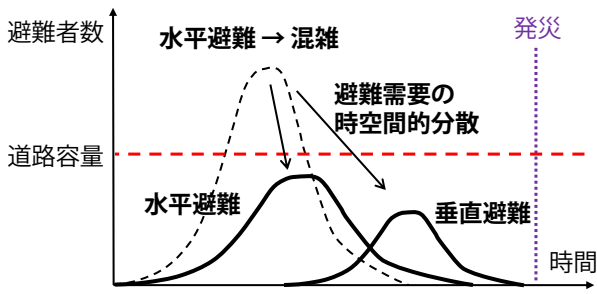


図-1 垂直・水平避難による需要の時空間的分散

リアルタイム性についてである。災害時に計画者は、時間変化する発災確率や、避難者の行動、道路の被災状況等に対応して、逐次的に将来の予測を見直し、最適な計画を変更しなくてはならない。そのため、リアルタイムに計画を評価する、高速な避難交通の予測モデルが必要である。しかし、従来開発されてきた車両ベースやリンクベースの避難交通シミュレーションは、計算時間が大きいため、予測モデルに基づく最適化計算には向かない。そこで、本研究では新たにゾーンベースの避難交通シミュレーションを構築し、計算の高速化を試みる。

また、最適な需要制御策が導かれたとしても、住民の避難行動予測なしには有効な計画とはなり得ない。これまでの避難制御研究では、行政の避難指示によって避難行動を制御することが考えられてきた。しかし、既往研究では、行政からの避難指示が避難行動に与える影響は、状況や受け取る個人によって影響の程度が異なることが示されている¹⁾²⁾。したがって、避難指示を発令すれば住民は避難する、という単純な仮定ではなく、避難者個人の意思決定モデルを構築した上で、制御による避難行動の変化を予測する必要がある。これに対し、本研究では、避難開始時刻選択と目的地選択を同時に扱う動的離散選択モデルを構築し、予測モデルとして利用する。

以上より、本研究では、被害と避難コストのトレードオフを考慮した垂直/水平避難の予測制御モデルを構築する。制御変数は、各地域における垂直/水平避難に対する補助金とする。この際、災害の不確実性に対処するため、逐次的にモデルによる予測と予測に基づく最適化を繰り返し、リアルタイムに計画を修正する枠組みとする。これを実現するため、避難者の行動を予測する動的離散選択モデルと、交通渋滞の発生を予測するゾーンベースの高速な避難交通シミュレーションを構築する。

本稿の構成は以下の通りである。2. では、避難制御に関する既往研究をレビューし本研究の位置づけを示す。3. では垂直/水平避難の予測制御モデルの枠組みを示し、そのモジュールである避難行動モデルと避難交通シミュレーションについて説明する。4. では提案モデルを東京都江東区に適用し、制御の内容について考察する。最後に5. で本研究のまとめと今後の課題を述べる。

2. 既往の研究

(1) 避難制御

避難計画・制御問題は、避難に関する指標を改善することを目的として、平常時や災害時に実施される空間や交通の計画である。ここでは、図-2 に示すように、制御が時間方向の計画を含むかと、将来予測を行うかによって整理し、本研究の位置付けを示す。

まず、避難制御のうち、静的最適化について述べる。これは、ネットワーク上のノードとリンクの位置や容量を決定するネットワークデザイン問題として研究が進められてきた。例えば、避難所配置の最適化について、Uster et al. (2018)³⁾は、建設コストと維持管理コストを最小にするような、避難所と道路の配置と容量を決定するネットワークデザイン問題を提案した。また Sherali et al. (1991)⁴⁾や Kongsomsaksakul et al. (2005)⁵⁾も、避難所配置と与えられた配置の下での避難者の目的地・経路選択を二段階最適化問題として定式化している。避難道路の容量拡張に関して、増田ら (2022)⁶⁾は、上位問題を建設コスト最小化と避難完了人数最大化、下位問題を避難者の避難開始時刻・目的地・経路選択とした二段階最適化問題を定式化し、津波避難を想定した道路容量の最適な配分を決定した。このような静的な最適化は平常時の計画論であり、時間方向の計画の最適化を想定していない。つまり、災害時に時々刻々と変化する状況に対して、最適な計画を逐次変化させる動的な制御を行う枠組みではない。

これに対し、災害時の状況に応じてリアルタイムに避難交通の制御を行う、動的制御の研究がある。中でも、予測モデルによる制御結果の将来予測を利用する予測制御と、制御時点の情報のみで制御を行う Myopic 制御に分けられる。

Myopic 制御の例として、高速道路での合流制御を対象とした、So & Daganzo (2010)⁷⁾、Daganzo & So (2011)⁸⁾の研究が挙げられる。彼らは、高速道路上の避難交通を効果的に捌くため、避難需要予測やリアルタイムの交通観測によらない分散的な需要制御手法を提案した。その手法は、高リスク地帯から低リスク地帯への避難の途中にある合流点において、上流側の高リスク地帯の住民を優先的に通行させ、合流点の下流側に容量の余裕があれば下流側の住民の合流を許容するというもので、直感的・簡便でかつ効果的な制御手法と言える。その一方で、研究で仮定されている高リスク地帯から低リスク地帯への一方の避難は、ハリケーンや津波など避難方向が一様である災害には当てはまるが、発災場所の不確実性や住民の意思決定の多様さにより多方向の避難が生じる場合には当てはまらない。Myopic 制御は、局所的な情報のみを利用するため、複雑なシステム全体に対して、将来にわたる制御を行う場合への適用には難があると言えよう。

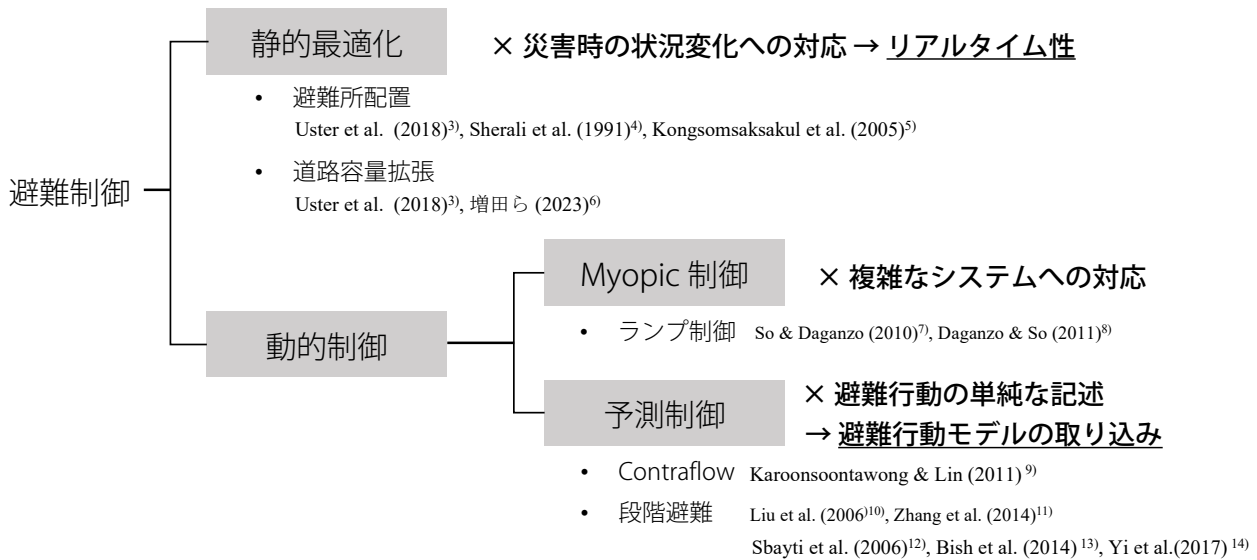


図-2 既往の避難制御の研究と本研究の位置付け

このような Myopic 制御の課題に対し、予測モデルを用いて制御結果の将来予測を行い、予測に基づいて各時刻の制御を決定するのが、予測制御である。予測制御の既往研究として、contraflow と段階避難がある。Contraflow（逆走レーン）とは、アメリカのハリケーン避難において、リスク地域から流出する方向の移動が流入方向の移動を卓越することを利用し、流入車線の向きを逆にして、流出リンクの交通容量拡張を行う計画である。これは、逆走レーンへの転換箇所と転換数を決定する整数計画問題として記述できる。例えば、Karoonsoontawong & Lin (2011)⁹は遺伝的アルゴリズムによる解法を適用し、contraflow が総旅行時間を減少させることを示している。Contraflow は交通の供給施設側の動的容量制御であるが、需要側である避難者の行動制御として、段階避難が挙げられる。段階避難（staged / phased evacuation）とは、被災地域内において被害の程度や発生時間帯が異なることを利用して避難人口を最適な順序で避難させることで、避難需要を分散させ道路混雑を最小化するための方策である。Liu et al. (2006)¹⁰は、避難指示の発令順序を制御変数として段階避難の最適化問題を定式化し、段階避難により平均避難時間が短縮されることを示した。同様の混雑解消効果は、Zhang et al. (2014)¹¹のシナリオ分析や、Sbayti et al. (2006)¹², Bish et al. (2014)¹³, Yi et al. (2017)¹⁴による最適化モデルによっても報告されている。

しかし、既往のほとんどの予測制御に関する研究は、解析的・高速に制御変数を求めるため、避難者の行動に単純な仮定が置かれている。例えば、住民の避難開始時刻選択に関して、Liu et al. (2006)¹⁰, Sbayti et al. (2006)¹², Bish et al. (2014)¹³では、統計的な意思決定モデルが用いられず既往災害の避難率曲線が用いられている。経路選択についてもシステム最適や利用者均衡の仮定が用いられるこ

とが多い。そのため、避難者の行動を精緻に反映した予測モデルが用いられていないという課題がある。

本研究では、水害からの避難に関して、垂直/水平避難の予測制御モデルを構築する。既往研究から、動的な予測制御モデルを構築する際に、予測モデルのリアルタイム性と避難行動モデルの精緻化が論点となる。以下では、この2点について避難交通シミュレーションと避難行動モデルをレビューする。

(2) 避難交通シミュレーション

避難制御における将来予測は、(1) 避難への参加および開始時刻選択、(2) 避難トリップの分布（目的地選択）、(3) 避難トリップの配分の3点から構成されている。3) 避難トリップの配分を予測する避難交通シミュレーションモデルとして、NETVAC¹⁵, MASSVAC¹⁶, REMS¹⁷, RouteSim¹⁸, OREMS¹⁹等の避難交通シミュレーションモデルが開発されてきた。中でも動的避難交通シミュレーションモデルは、利用者均衡やシステム最適を仮定した静的な配分モデルと比べると、交通流のダイナミクスや災害の状況や情報に応じた避難者の行動変化を表現することが可能であるため、災害時の交通状況の予測に有用である。しかし、ネットワークサイズが大規模になると計算負荷が高くなるため、実世界のネットワークへの適用や膨大なシナリオ評価に基づく最適解の探索に課題を残している。災害時の時々刻々と変化する状況に対して、逐次的に計画を修正するためには、災害時にリアルタイムに交通シミュレーションによる将来予測に基づいて制御変数の最適化を行う必要がある。したがって、実世界のネットワークにおいて避難交通シミュレーションの1回の実行時間の高速化は不可欠である。

そこで、動的かつ高速な交通シミュレーションモデル

として、ゾーンベースの交通シミュレーションに着目する。ゾーンベースの交通シミュレーションは、ネットワーク内部の車両存在台数とフローを関連づける巨視的な交通状態表現である *Macroscopic Fundamental Diagram (MFD)*^{20,21)}の考え方を元に発展してきている。Yildirimoglu et al. (2014)²²⁾は、ネットワーク全体を複数のゾーンに分割しそのゾーン間での経路選択を考える *regional path* の考え方により、MFD に基づくゾーンベースの動的交通量配分を示した。Knoop et al. (2015)²³⁾や Kim et al. (2018)²⁴⁾は、Cell Transmission Model に基づくゾーン間の交通シミュレーションに MFD による混雑表現を導入した、Network Transmission Model を構築した。ゾーンベースの交通シミュレーションは、交通状態を理論に基づきながら巨視的に表現するため計算の高速化が実現でき、リアルタイムの制御と相性が良い。本研究では、モデルに基づく予測制御の最適化計算の高速化を図るため、MFD に基づくゾーンベースの避難交通シミュレーションを構築する。

(3) 避難行動モデル

本節では、(1) 避難への参加および開始時刻選択、(2) 避難トリップの分布（目的地選択）についての避難者の行動予測を扱った研究をレビューする。

(1) 避難への参加および開始時刻選択に関して、離散選択モデルの枠組みで避難参加・開始時刻選択を記述する研究がある。中でも、Fu and Wilmot による *sequential logit* モデルの研究^{25,26)}は、ロジットモデルを時系列で繰り返し適用することにより、避難参加と開始時刻選択を一体的に扱うことに成功している。このモデルは、災害時に動的に変化する状況の意思決定への影響をモデル化する一方で、将来にわたって変化する状況を推測しながら現在の行動を決定する、再帰的な意思決定を記述することはできない。Pel et al. (2012)²⁷⁾でも指摘されているように、災害時に避難者は現在の状況だけではなく、あり得る選択肢を選んだ場合の将来の効用も意識しながら意思決定していると考えられる。

そのため、近年では意思決定の動学性を考慮したモデルの開発が進められている。将来効用を考慮した避難行動モデルには、動的離散選択モデルを避難開始時刻選択に適用した研究^{28,29)}や、避難行動を時空間ネットワーク上の経路選択として捉えた研究³⁰⁾がある。浦田ら (2016)²⁸⁾は、避難者が認知する将来効用が実際に得られる真の将来効用と異なるという動学的異質性を考慮した避難開始時刻選択モデルを構築し、不確実性下の意思決定の枠組みを示した。Rambha et al. (2021)²⁹⁾も将来の周囲状況の認知に関して部分情報を仮定した動的離散選択モデルを構築し、将来のハリケーンの発達過程への信念を表すパラメータと避難開始時刻選択を同時に推定している。Anyidoho et al. (2022)³¹⁾による分析では、地域全体の避難率

の推定には静的なロジットモデルが簡便で予測力も高いが、時間的・空間的な避難需要の偏在を予測する際には動的離散選択モデルが優位であることが示されている。

避難開始時刻選択と比較すると、(2) 避難の目的地選択に関して離散選択モデルを応用した研究は少ない。避難場所の選択は、選択肢集合の膨大さから、離散選択モデルの枠組みではほとんど扱われず、主に重力モデルに基づく地域間流動の予測が行われてきた³²⁾。一方、日本の豪雨災害では詳細なスケールでの避難先の選択が行われるため、個人の意思決定モデルに基づく非集計的な目的地選択の予測が有効であると考えられる。豪雨災害を対象に、動的・確率的な選択肢集合形成を扱った近藤ら (2022)による研究³³⁾があるものの、豪雨災害における目的地選択の意思決定に関する研究蓄積は小さいと言える。

また、避難時の目的地選択行動に関しては、目的地選択と開始時刻選択、交通手段選択など多次元の意思決定の相関や時間的な連続を表現することの重要性が指摘されている。例えば、Wong et al. (2020)³⁴⁾は、2017年のハリケーン *Ima* の避難行動データから目的地選択と開始時刻選択に高い相関があることを発見し、両者を統合的に扱う *Portfolio choice* モデルを構築している。また、飯塚ら (2020)³⁰⁾は、津波避難を対象に、避難開始時刻選択・目的地選択・経路選択を時空間ネットワーク上の経路選択として一体的に捉え、Discounted Recursive Logit モデル³⁵⁾により記述した。このように、目的地までの距離や種別と、開始時刻の選択は相互に関係しあうと考えられるため、両者を統一的に扱うモデルとして記述する必要がある。

(4) 本研究の位置付け

本研究では、被害と避難コストを考慮した、垂直/水平避難の最適な組み合わせを達成するため、避難者の目的地選択行動の予測制御を行う。

発災の不確実性の下での複雑な避難現象を動的に制御するためには、モデルによる将来予測に基づく予測制御が有効であろう。その際に、災害時の状況変化に対応できるリアルタイム性をもつ避難交通シミュレーションと、避難行動の精緻な予測モデルが必要である。避難交通シミュレーションに関しては、既存の車両・リンクベースのシミュレータの高い計算負荷の課題を解決するため、交通状態の巨視的な記述である *Macroscopic Fundamental Diagram* を用いて、ゾーンベースの避難交通シミュレーションを構築する。避難行動モデルは、避難者の将来効用を考慮した再帰的な意思決定と、開始時刻選択と避難先選択の相互作用の表現が重要であることが指摘されている。よって、本研究では、飯塚・羽藤 (2020)³⁰⁾のモデルに基づき、時空間上の経路選択を Discounted Recursive Logit モデル³⁵⁾により記述することで、再帰的かつ統合的な避難行動モデルを構築する。

3. モデルのフレームワーク

まず、垂直/水平避難の予測制御を最適化問題として定式化し、制御変数・目的関数について説明する。次に、避難者の行動予測のモデルに関して、将来の状況を見据えた避難開始時刻・目的地の動的な意思決定構造をモデル化する。加えて、各避難者の避難開始時刻・目的地選択行動を踏まえた、避難交通の予測モデルについて、ゾーンベースの避難交通シミュレーションを構築する。最後に、以上のモデルを用いた最適化問題の求解アルゴリズムについて述べる。

(1) 垂直/水平避難の予測制御モデル

a) 最適化問題としての定式化

垂直/水平避難の予測制御を以下のような最適化問題として定式化する。

$$\begin{aligned} & \underset{\mathbf{u}}{\operatorname{argmin}} [z_1, z_2]^T \\ & \text{s.t.} \quad \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0 \\ & \quad \mathbf{x}(t+1) = f(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}) \end{aligned} \quad (1)$$

避難交通の予測モデル f の予測に基づいて、目的関数 z_1 と z_2 を最小化する制御変数 \mathbf{u} を求める問題である。

b) 制御変数

垂直/水平避難の予測制御の制御変数は、各地域における垂直/水平避難のそれぞれに対する補助金とする。避難の補助金は、避難に対する補償・報酬として避難者の行動に大きく影響を与えられる利点を持つ。実際に、東京都江戸川区においては、「大規模水害時自主的広域避難補助金」として、大規模水害の危険が高まっている場合に、広域避難のために区外の宿泊施設を利用した住民に対して、一人あたり 1 泊 3,000 円の補助金を支給する制度を設けている。本研究では、避難補助金を垂直避難に対しても適用し、垂直/水平避難の組み合わせを最適化することを試みる。制御変数ベクトル \mathbf{u} を書き下すと以下ようになる。

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= [u_{1v}, u_{1h}, u_{2v}, u_{2h}, \dots, u_{A_u v}, u_{A_u h}], \\ \text{where, } u^{\min} &\leq u_{i\{v,h\}} \leq u^{\max}, \forall i \in 1, \dots, A_u \end{aligned} \quad (2)$$

\mathbf{u} の下付きの数字は対象ゾーンを表し、下付きの v は垂直避難を、 h は水平避難を表す。 A_u は制御対象地域の数、 u^{\min}, u^{\max} [単位:円] はそれぞれ、避難補助金の最小と最大の金額である。

c) 目的関数

次に、目的関数について述べる。日本の大都市における大規模水害の特徴として「発災の不確実性」と「発災した場合の被害の大きさ」があり、それにより生じる水平避難と垂直避難のトレードオフを目的関数で考慮する

必要がある。発災した場合、浸水による人命被害が危惧されるだけでなく、低地部においては浸水の長期化と膨大な孤立者により救助の難航が予想される。そのため、浸水深や浸水継続時間の大きい地域の人口に対しては浸水域外への水平避難が求められる。しかしながら、破堤に至る大規模水害の予測は困難で、予測の空振りを考えると多くの時間と移動を伴う広域的な水平避難を全員に求めることは非現実的である。そのため、災害リスクに応じて一部の人口の垂直避難を認める計画とするべきであろう。このようなトレードオフを考慮するため、本研究では、2つの目的関数を考える。

一つ目は、浸水による人的被害の最小化である。このとき、浸水による直接の被害と浸水域での孤立による被害を分けて考える。

$$\min_{\mathbf{u}} z_1 = \sum_{i=1}^A \left\{ \lambda w_i x_i^{\text{low}}(T; \mathbf{u}) + w_i x_i^{\text{high}}(T; \mathbf{u}) \right\} \quad (3)$$

$x_i^{\text{low}}(T; \mathbf{u})$ は、発災時刻 T にゾーン i において 2 階以下の低層階にとどまっている人口である。 $x_i^{\text{high}}(T; \mathbf{u})$ は、発災時刻 T にゾーン i において 3 階以上の高層階に避難または居住している人口である。 w_i はゾーン i の被害の大きさを表す変数で、本研究においては、浸水深と浸水継続時間の積で与えた。したがって、 \sum 中の第一項は発災時に低層階に避難せずに留まっていることによる人的被害を表し、第二項は発災後の浸水域での孤立による人的被害を表す。 λ はその相対的なリスク差を表す変数である。 z_1 を最小化することは、発災後に大きな人命被害が予想される地域に存在する人口を減らし、被害の小さな地域に水平避難させることを意味する。

二つ目は、避難によるコストの最小化である。避難によるコストは、避難の心理的コストや機会損失を含む。このとき、避難補助金は、そのようなコストを補償して避難を促進するものと考えられるため、避難によるコストを表す変数として用いる。

$$\min_{\mathbf{u}} z_2 = \sum_{i=1}^A \left\{ u_{iv} x_{iv}(T; \mathbf{u}) + u_{ih} x_{ih}(T; \mathbf{u}) \right\} \quad (4)$$

$x_{iv}(T; \mathbf{u})$ は、ゾーン i の住民で垂直避難を行った人口、 $x_{ih}(T; \mathbf{u})$ は、ゾーン i の住民で水平避難を行った人口である。 z_1 の人的被害が最小化される時、高リスク地域から低リスク地域へ移動するような避難制御が行われるため、 z_2 の避難コストは大きくなる。一方で、 z_2 の避難コストを小さくするとき、高リスク地域においても垂直避難を促進するような避難制御が行われるため、 z_1 の総被災リスクは上昇する。したがって、 z_1 と z_2 はトレードオフの関係にあることがわかる。以上により、垂直/水平避難の予測制御モデルが定式化された。

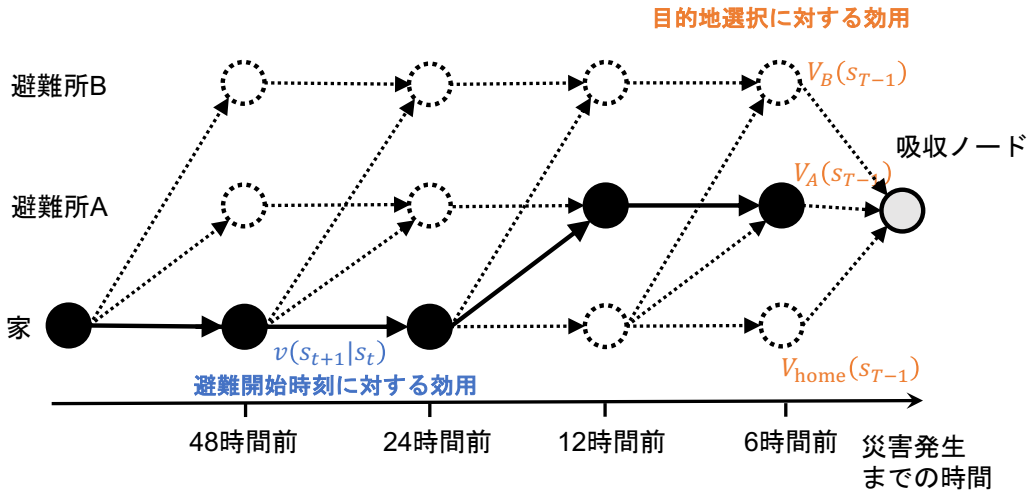


図-3 動的避難目的地選択モデルの概念図

(2) 動的避難目的地選択モデル

本節では、住民の避難の有無・開始時刻・目的地の選択行動を離散選択モデルの枠組みで記述する。

本モデルの対象は、大河川の氾濫や台風などある程度リードタイムが長い災害からの事前避難であり、災害発生数日前から数時間前までになされる。このような状況における避難行動は、「災害発生を見据えて避難場所の候補地を数カ所決めておき、現在地に留まった場合のリスクと避難した場合の機会損失（自宅の滞在効用）を勘案しながら各時刻に避難するか否か、避難する場合はどこへ避難するかを決定する選択行動」と捉えることができよう。本研究では、このような避難行動を時空間ネットワーク上での経路選択として捉え、避難の有無・開始時刻・目的地の選択を同時に含んだモデルとして定式化する。上に述べたモデルの考え方を示したのが図-3である。各時刻に時空間ネットワーク上の次のノードを選択する逐次的な経路選択を記述することにより、避難の有無・開始時刻・目的地選択が表現できる。

次に、時空間上の経路選択行動（すなわち避難の有無・開始時刻・目的地選択行動）を Discounted Recursive Logit モデル³⁹⁾を用いて記述する。

空間上の位置 a と時間 t の組み合わせで決まる時空間上の位置を状態 $s_t = (a, t)$ とする。状態 s_t から s_{t+1} へ遷移する意思決定者は、状態 s_t から s_{t+1} の遷移による即時効用 $u(s_{t+1}|s_t)$ と、 s_{t+1} へ遷移することで将来得られる効用の期待値、つまり s_{t+1} の価値関数 $V^d(s_{t+1})$ の和を最大化するように s_{t+1} を選択すると仮定する。ここで即時効用を $u(s_{t+1}|s_t) = v(s_{t+1}|s_t; \theta) + \mu \epsilon(s_{t+1})$ と表し、 $v(s_{t+1}|s_t; \theta)$ を効用の確定項、 θ をパラメータベクトル、 $\epsilon(s_{t+1})$ を iid ガンベル分布に従う効用の誤差項、 μ をガンベル分布のスケールパラメータとする。現在の状態から次時点の状態を逐次的に決定する確率的な過程にマル

コフ性を仮定すると、期待最大効用 $V^d(s_t)$ は Bellman 方程式を用いて以下のように定式化できる。

$$V^d(s_t) = \max E \left[\sum_{\tau=t}^T \beta^{\tau-t} u(s_{\tau+1}|s_\tau) \right]$$

$$= E \left[\max_{s_{t+1}} \{ v(s_{t+1}|s_t; \theta) + \beta V^d(s_{t+1}) + \mu \epsilon(s_{t+1}) \} \right] \quad (5)$$

β は期待最大効用に対する時間割引率であり $0 \leq \beta \leq 1$ を満たす。誤差項にガンベル分布を仮定しているため、式(5)はログサムの形に書き換えることができる。

$$V^d(s_t) = \begin{cases} \mu \log \sum_{s_{t+1} \in A(s_t)} e^{\frac{1}{\mu} (v(s_{t+1}|s_t; \theta) + \beta V^d(s_{t+1}))}, & s_t \neq d \\ 0, & s_t = d (t = T) \end{cases} \quad (6)$$

ここで $A(s_t)$ は、 s_t から接続する次時点の状態集合を表す。吸収状態 d から接続する状態は存在しないため、 $V^d(d) = 0$ とする。

本研究では、最終目的地の効用を考慮しながら各時点の状況に応じて逐次的に意思決定を行うという避難時の行動を再現するため、目的地選択に関する効用を明示的に扱う。具体的には、吸収状態の1時点前の状態の価値関数 $V^d(s_{T-1})$ が目的地選択に対する効用であるとし、 θ とは異なるパラメータ α と説明変数を用いて記述する。これは、吸収ノードへの遷移効用の確定項 $v(d|s_{T-1})$ を α でパラメタライズすることに対応する。よって、 $V^d(d) = 0$ から式(7)を繰り返し用いることで、後ろ向き帰納法により任意の時点 t における状態 s_t について、 $V^d(s_t)$ を求めることができる。

$$V^d(s_t) = \begin{cases} \mu \log \sum_{s_{t+1} \in A(s_t)} e^{\frac{1}{\mu} (v(s_{t+1}|s_t; \theta) + \beta V^d(s_{t+1}))}, & t < T-1 \\ v(d|s_{T-1}; \alpha), & t = T-1 \\ 0, & t = T \end{cases} \quad (7)$$

吸収状態を考えず各目的地を終端として、終端における

効用 $V^d(d)$ をパラメータ α により表現することも、式(7)と等価であるが、この場合、終端時刻からの後ろ向き計算を目的地ごとに行う必要があり計算コストが大きくなる。そのため吸収状態を導入し後ろ向き計算を一度とし計算コストを低減させている。以上のような目的地効用の明示的な記述が、従来の逐次的な経路選択モデルと本モデルの異なる点である。以上より、状態遷移確率 $p(s_{t+1} | s_t)$ は以下のように定式化される。

$$p(s_{t+1} | s_t) = \frac{e^{\frac{1}{\mu}(v(s_{t+1}|s_t; \theta) + \beta V^d(s_{t+1}))}}{\sum_{s'_{t+1} \in A(s_t)} e^{\frac{1}{\mu}(v(s'_{t+1}|s_t; \theta) + \beta V^d(s'_{t+1}))}} \quad (8)$$

選択確率を用いて各経路の尤度を計算し、最尤推定により以下の尤度を最大化するパラメータ θ, α, β を推定する。 $\delta_{s_t}^{s_{t+1}}$ は状態 s_t から状態 s_{t+1} へ実際に遷移すれば 1, それ以外は 0 となる二値変数である。

$$L(\theta, \alpha, \beta) = \prod_{n=1}^N \prod_{t=1}^T p_{k,n}(s_{t+1} | s_t) \delta_{s_t}^{s_{t+1}} \quad (9)$$

以上により、住民の避難の有無・開始時刻・目的地選択を予測するモデルが定式化できた。

(3) ゾーンベース避難交通シミュレーション

避難制御においては計算時間の遅れが避難遅れに直結するため、観測を行ってからなるべく早く最適化計算を行い、適切な制御を行う必要がある。特に本研究のようにシミュレーションベースの最適化手法を用いる場合、シミュレーション 1 回あたりの計算時間を高速化する必要がある。一車両ベース表現である追従モデルや、リンクベースの表現である Cell Transmission Model³⁶⁾³⁷⁾, Link Transmission Model³⁸⁾は、エージェント数が増えたり対象ネットワークが巨大になったりすると、計算時間やメモリ使用量の増大し、リアルタイムの制御には向かない。よって本研究では、交通状態を巨視的に分析する手法である Macroscopic Fundamental Diagram (MFD) を用いた交通シミュレーションを構築し、最適化計算の高速化を試みる。

本研究では、MFD を用いたゾーン単位の交通シミュレーションモデルである Network Transmission Model²³⁾²⁴⁾を用いて避難交通シミュレーションを構築する。Network Transmission Model は、ゾーン間の交通の流入・流出についてリンクベースの交通シミュレーションである Cell Transmission Model の考え方を援用しつつ、セルの単位をリンクからゾーンへ拡張したモデルと言える。以下では、Network Transmission Model におけるゾーン間のフローについて、図-4 を用いて説明する。

図-4 において、ゾーン*i*からゾーン*j*への移動を考える。Network Transmission Model では、時間*t*にゾーン*i*からゾーン*j*へ移動する車両の数 $n_{i \rightarrow j}(t)$ は、ゾーン*i*の移動需要

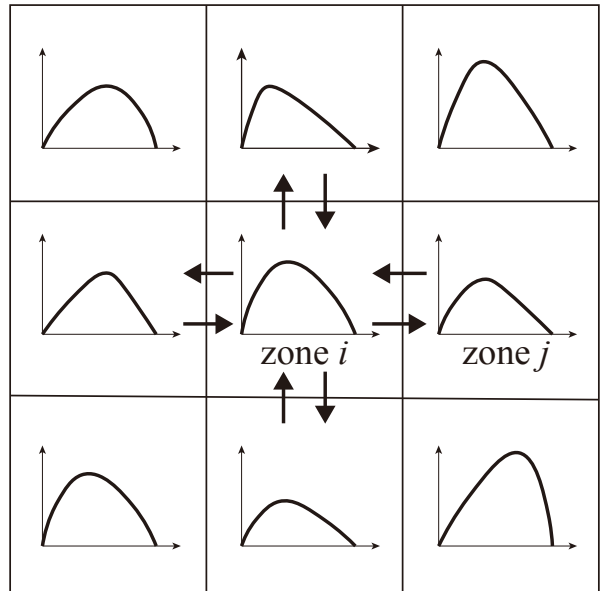


図-4 Network Transmission Model の概念図

と境界リンクの容量により決まるゾーン*i*からの流出量 $q_i(t)$ と、ゾーン*j*の混雑によって決まるゾーン*j*の受け入れ可能流入量（可能流入量と呼ぶ） $s_j(t)$ のうち、小さい方と考える。つまり、ゾーン*i*からゾーン*j*への流出需要がどれだけ大きくても、ゾーン*j*が混雑していれば可能流入量が小さいため、移動できる車両数が制限されるとし、式(10)のように定式化する。

$$n_{i \rightarrow j}(t) = \min\{q_i(t) \cdot \delta_{i \rightarrow j}(t), s_j(t) \cdot \delta_{i \rightarrow j}(t)\}$$

$$\text{where, } \delta_{i \rightarrow j}(t) = \frac{n_{i \rightarrow j}^{\text{vod}}(t)}{\sum_{m_i \in M_i} n_{i \rightarrow m_i}^{\text{vod}}(t)} \quad (10)$$

ここで $\delta_{i \rightarrow j}(t)$ は、時間*t*にゾーン*i*で発生する移動需要のうちゾーン*j*に向かう需要の割合である上付添字の vod は移動需要を表し、動的目的地選択モデルにより計算される。 M_i はゾーン*i*に隣接するゾーンを表す。

次に、式(10)におけるゾーン*i*からの流出量 $q_i(t)$ を定式化する。ここで、MFD がゾーン内の車両存在台数 $n_i(t)$ と、ネットワークから流出するフロー $q_i^o(t)$ の関係であることを利用する。MFDの関数形を、パラメータ α により特定したとすると、ゾーン*i*からの流出量は式(11)のようにかける。

$$q_i^o(t) = \text{MFD}(n_i(t); \alpha) \quad (11)$$

ただし、この定式化では以下の二つの問題を考慮できていない。一つ目は、ゾーン内外の移動需要の区別である。もし同ゾーン内移動の割合が高ければ、ネットワークの処理能力（交通容量）の一部はゾーン内部の交通の処理に使われ、余った分がゾーン外へ流出する交通に使われる。そのため、式(11)の流出量は、ゾーン*i*の移動需要のうちゾーン外への移動の割合を表す変数 $\delta_i(t)$ を用いて式(12)のように補正される。

$$q_i^{\text{cor1}}(t) = \delta_i(t) \cdot q_i^o(t),$$

$$\text{where, } \delta_i(t) = \frac{\sum_{m_i \in M_i} n_{i \rightarrow m_i}^{\text{vod}}(t)}{\sum_{m_i \in M_i} n_{i \rightarrow m_i}^{\text{vod}}(t) + n_{i \rightarrow i}^{\text{vod}}(t)}. \quad (12)$$

避難時には天候・時刻・季節によって近くの場合への避難でも自動車が使われることがあるため、以上の補正を行わなければゾーン間の移動を過大評価してしまう可能性がある。

二つ目の問題は、ゾーン境界のリンク容量の考慮である。もしゾーン境界のリンク容量が極端に小さくボトルネックになっていれば、ゾーンからの流出量はそのリンクの交通容量によって規定される。よって、式(12)の流出量を以下の式(13)のように補正する。

$$q_i^{\text{cor2}}(t) = \min(q_i^{\text{cor1}}(t), q_i^{\text{max}}(t)),$$

$$\text{where, } q_i^{\text{max}}(t) = \sum_{m_i \in M_i} \min\{n_{i \rightarrow m_i}^{\text{vod}}(t), C_{i \rightarrow m_i}\}. \quad (13)$$

$C_{i \rightarrow m_i}$ はゾーン*i*から隣接するゾーンへ接続する道路リンクの交通容量の和である。逆に、ボトルネックとなるリンクがゾーン境界に位置するようにゾーン分割を行うことで局所的な混雑現象を記述できるため、フローをゾーン単位に粗視化することのデメリットを緩和することができると考えられる。以上により、ゾーン*i*からの流出需要を定式化できた。

次に式(10)におけるゾーン*j*の可能流入量 $s_j(t)$ を定式化する。Kim et al. (2018)²⁴を参考に、同一ゾーンでは車両存在台数-可能流入量の関係と、車両存在台数-流出量の関係がほぼ同じであると仮定して、可能流入量を以下の式(14)のように定式化する。

$$s_j(t) = \begin{cases} C_i^{\text{out}} & (n_i(t) \leq n_i^{\text{critical}}) \\ \text{MFD}(n_i(t); \alpha) & (n_i(t) > n_i^{\text{critical}}) \end{cases} \quad (14)$$

where, $C_i^{\text{out}} = \max\{\text{MFD}(n_i(t); \alpha)\}$

n_i^{critical} は、ゾーン*i*からの流出量が最大となる時の車両存在台数であり、 $\max\{\text{MFD}(n_i(t); \alpha)\}$ となる $n_i(t)$ である。以上により $q_i(t), s_j(t)$ を計算できるため、式(10)を用いてゾーン*i*からゾーン*j*のフローを計算できる。

以上により計算されるゾーン内の混雑とゾーン間のフローを、待ち行列を用いたモデルと組み合わせて動的な交通シミュレーションを構築する。避難需要の配分のアルゴリズムを以下に記す。

初期避難者分布を $x_i(0)$ とし、総避難者数を $N = \sum_{i=1}^A x_i(0)$ とする。ここで*i*は各ゾーンを表す添字であり、*A*は全ゾーン数である。次に動的目的地選択モデルにより、個人*n*の開始時刻 τ_n と目的地 d_n を決定する。また目的地までのゾーン間の経路を最短経路探索で決定する。ただし最短経路が複数ある場合はランダムに一つの

経路を決定する。本研究では目的地選択をゾーンに集計した上でゾーン間の経路選択を考えているため、避難者は平均的にはゾーン間の最短経路を移動すると仮定する。

次に、タイムステップ*t*、避難終了フラグ δ_n^{end} 、待ち行列*Q*、ゾーン間の流出台数 o_{ij}^t [台]を初期化する。*Q*は優先度付き*i, j*キューで、待ち行列*Q*内の避難需要を配分する際には、避難者は*Q*に入った順に処理される。流出台数 o_{ij}^t は、Network Transmission Model によって計算されるゾーン*i, j*間のフロー $x_{i \rightarrow j}(t)$ によって制限される。すなわち、アルゴリズム上で $x_{i \rightarrow j}(t)$ はゾーン*i, j*間の疑似的な交通容量として機能する。

配分の手順は、まず待ち行列*Q*から処理が行われる。*Q*内の各避難者に対して、現在のゾーン*i*から最短経路上の次のゾーン*j*への流出台数が Network Transmission Model により決定される疑似的な交通容量 $x_{i \rightarrow j}(t)$ に達していれば、その避難者は現在のタイムステップは移動できずゾーン*i*に止まり、再び待ち行列に入る。

一方、ゾーン*i*からゾーン*j*への流出台数が $x_{i \rightarrow j}(t)$ に達していなければ、避難者はゾーン*j*に移動し、流出台数を1増やす。そして、ゾーン*j*が目的地と一致していれば避難終了フラグ δ_n^{end} を1として次ステップ以降は配分計算から除外される。*Q*内と同様の処理を、集合*R*についても行う。集合*R*は、避難開始時刻 τ_n が現タイムステップ*t*以前、かつまだ避難が終了していない、かつ待ち行列*Q*に入っていない避難者の集合である。

以上の処理を $t = T$ となるまで行い、 $t = T$ (発災時)の避難者分布 $x_i(T)$ 、各ゾーン間で発生した待ち行列長、平均移動時間、各地域の滞在人口・避難人口を返す。

(4) 垂直/水平避難の予測制御の求解アルゴリズム

以上により定義された、垂直/水平避難の予測制御の求解アルゴリズムについて述べる。上に示した避難者の行動予測と交通混雑予測は解析的に求解することが困難な非線形なシステムモデルであるため、シミュレーションベースの近似的な最適手法を採用する。具体的には、メタヒューリスティックスの一種である、Particle Swarm Optimization (PSO)を採用する。PSOは、目的関数の形や近傍構造に関する情報を必要としないため、本研究のようなシミュレーションベースの最適化に適した手法と言える。

PSOでは、初期値として多数の制御変数ベクトル(粒子)を発生させ、各粒子が最適解に関する情報を交換しながら解を改善する。各粒子は、前回動いていた方向と、自分がこれまで経験した最適解の位置、グローバルな最適解の位置の情報から、次の解を決定する。詳細なアルゴリズムを表-1に示す。

粒子の速度の更新式の第一項の w は慣性の重みを表す定数で、これまでの探索方向をどれほど保存するかを表

表-1 Particle Swarm Optimization のアルゴリズム

1.	粒子の初期化	制御変数ベクトル \mathbf{u} を M 個ランダムに生成し、各粒子（制御変数）を初期化
2.	パーソナルベストの初期化	各粒子がこれまで発見した最適解 \mathbf{u}_m^p ($m = 1, \dots, M$)を現在位置に初期化
3.	グローバルベストの初期化	\mathbf{u}_m ($m = 1, \dots, M$)について、 \mathbf{u}_m がパレート解である m をランダムに選択し、各粒子が参照するグローバルな最適解 \mathbf{u}_m^g を決定
4.	粒子の位置の更新	各粒子 m について、 $\mathbf{u}_m \leftarrow \mathbf{u}_m + \mathbf{v}_m$ と更新
5.	パーソナルベストの更新	目的関数値 $z_1^{(\mathbf{u}_m)}, z_2^{(\mathbf{u}_m)}$ を計算し、 \mathbf{u}_m が $z_1^{(\mathbf{u}_m)} < z_1^{(\mathbf{u}_m^p)}$ かつ $z_2^{(\mathbf{u}_m)} < z_2^{(\mathbf{u}_m^p)}$ を満たせば、 $\mathbf{u}_m^p \leftarrow \mathbf{u}_m$ と更新
6.	グローバルベストの更新	\mathbf{u}_m がパレート解である m をランダムに選択し、各粒子が参照するグローバルな最適解 \mathbf{u}_m^g を決定
7.	粒子の速度の更新	\mathbf{v}_m を以下の式で更新 $\mathbf{v}_m \leftarrow w \mathbf{v}_m + c_1 r_1 (\mathbf{u}_m^p - \mathbf{u}_m) + c_2 r_2 (\mathbf{u}_m^g - \mathbf{u}_m)$

し、以下の式で与える。

$$w(t) = w_{high} - (w_{high} - w_{low}) \frac{t}{T} \quad (16)$$

w_{high} は探索開始時点の重み、 w_{low} 最終時点の重みである。第二項は、粒子 m がこれまでに経験した最も良い解の方向に向かって探索する戦略を表す。 r_1 ($0 \leq r_1 \leq 1$)は乱数で、 c_1 はこの項をどれほど重視するかの重みを表す。第三項は、 M 個の粒子全体がこれまでに経験した最も良い解の方向に向かって探索する戦略を表す。 r_2 ($0 \leq r_2 \leq 1$)は乱数で、 c_2 はこの項をどれほど重視するかの重みを表す。以上の \mathbf{v}_m の更新式により、局所最適解の探索と大域的最適解の探索を両立している。

アルゴリズム中では、多目的最適化問題における最適解の定義としてパレート解を用いた。パレート解とは、いずれの目的関数の減少も、他の目的関数を増加させることなしには不可能な \mathbf{u} のことである。言い換えれば、パレート解とは、他の全ての目的関数を固定したときに、ある目的関数を最小にする \mathbf{u} のことである。パレート解は一般に集合となり、その集合をパレート解集合やパレートフロンティアという。

4. 東京都江東区におけるケーススタディ

以上により定義された垂直/水平避難の予測制御モデルを東京都江東区におけるケーススタディに適用する。東京都江東区は荒川下流域に位置するとともにその大部分が海拔 0m 地帯となっているため、巨大台風や豪雨により万が一荒川の堤防が破堤した場合、被害範囲、被害人口、浸水深、浸水継続時間の観点から甚大な被害が予

表-2 調査概要

調査対象	調査時点で江東区に居住している 357名
調査方法	Webによるアンケート調査
調査期間	① 2022年3月2日～4日 ② 2023年1月5日～13日
回答票数	調査期間① 247名 (回答率92.5%) 調査期間② 110名 (回答率67.5%)

想されている。そのため、他の荒川・江戸川流域自治体とともに、区外も含めた浸水区域外への「広域避難」が検討されてきた経緯がある。一方で、破堤による大規模水害は予測が困難であるため、強制力を伴う大規模な避難命令は現時点では考えづらく、垂直避難と水平避難のトレードオフを抱えている。

本章では、まず動的避難目的地選択モデルの推定結果を示した後、制御の計算設定と結果について述べる。

(1) 動的避難目的地選択モデルの推定

3. (1)に示す動的避難目的地選択モデルの推定を行う。推定に用いた調査データの概要を表-2に示す。本研究で用いるデータは、2022年3月2日から3月4日にかけてと、2023年1月5日から1月13日にかけて Web 上で行われたアンケート調査により得られた。調査では、史上最大級の台風が接近している状況を想像してもらい、仮想的な災害に対する避難行動の Stated Preference (SP) 調査を行った。調査対象者は、調査時点で東京都江東区に居住している人を対象に Web 上で募集を行った。仮想

表-3 動的目的地選択モデルの推定結果

	estimates	t-stat
非自宅への目的地効用		
浸水深[10m]	-6.448	-5.70**
小学校・中学校 (0/1)	0.380	1.38
自宅への目的地効用		
防災への興味 (1:興味あり~5:興味なし)	-0.100	-0.45
自宅が浸水域にあり2階以下 (0/1)	-1.480	-2.91**
自宅の選択肢固有定数	3.597	3.14**
経路の効用 (避難タイミング択)		
河川の主観氾濫確率 [100%] * 自宅ダミー	-0.437	-3.33**
避難指示の発令 (0/1)	-0.171	-0.33
避難指示の発令r * 自宅が浸水域で2階以下(0/1)	0.823	1.31
log(10*移動距離)/10 (台風上陸48時間前)	0.711	1.47
log(10*移動距離)/10 (台風上陸24時間前)	-4.536	-5.43**
log(10*移動距離)/10 (台風上陸12時間前)	-5.021	-3.21**
log(10*移動距離)/10 (台風上陸6時間前)	-2.801	-1.57
垂直避難補助金 [10000円]	0.473	4.53**
水平避難補助金 [10000円]	0.199	2.37*
時間割引率	0.914	36.52**
サンプル数	409	
初期尤度	-1395.2	
最終尤度	-817.1	
修正済み ρ^2 値	0.40	

の災害シナリオは、台風の上陸日時、現在の日時、現在の天候、公共交通の運休情報、自治体からの避難情報の5つについての10通りの組み合わせからなる。このシナリオを実験計画法に基づき各調査対象者に割り付けた。

調査対象者は台風直撃の2日前、1日前、12時間前、6時間前の4つの時刻における避難行動について回答する。質問項目は、個人属性（性別・年齢・介助の有無等）、世帯属性（世帯構成、住居形態、居住階数等）、避難行動と意識（河川の主観氾濫確率、避難先の選択肢、避難の有無、避難先、避難交通手段等）、防災意識（防災計画への興味、ハザードマップの理解度等）からなる。

また、自宅近くでの垂直避難と自治体外への水平避難のそれぞれについて、「垂直/水平避難を行った場合に自治体から補助金が支給される場合、何円あれば避難しますか」という質問を行った。この質問への回答から、行政からの補助金が回答金額分ある場合に避難行動を行う仮想的な避難行動データを生成した。

このデータを用いて、3. (1)に示す動的避難目的地選択モデルを推定した結果を表-3に示す。

非自宅の目的地を選択する効用のパラメータを見ると目的地の浸水深に関するパラメータが負で有意に出ており、浸水深の大きい目的地を回避する傾向が推定された。

自宅を目的地として選択する効用のパラメータを見ると、自宅が浸水域内の2階以下のダミー変数が負で有意に、自宅の選択肢固有定数が正で有意になっている。このことから、自宅が浸水域内の低層階である人は災害発

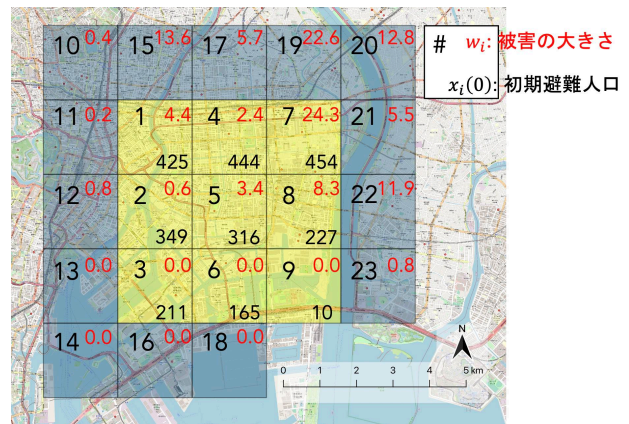


図-5 対象地域とゾーンの分割

生前に自宅外へ避難する選好が比較的高いが、そうでない人は自宅に留まる選好が高いことがわかる。

次に、経路の効用を見ると、河川の主観氾濫確率は負で有意に出ており、主観氾濫確率が大きい人ほど自宅の滞在効用が低下する、つまり避難効用が向上することがわかる。行政からの広域避難指示発令のダミー変数はどのwaveでも有意に出ておらず、避難指示が避難のトリガーにはなっていないとは言えない。避難先までの距離のパラメータは、台風上陸24時間前と12時間前で負で有意に出ており、避難先として自宅からの近い避難先が選ばれやすいことがわかる。避難の補助金については、広域避難のパラメータの方が小さいため、広域避難を促す方がより多くの金額が必要と解釈できる。

Macroscopic Fundamental Diagram of each zone

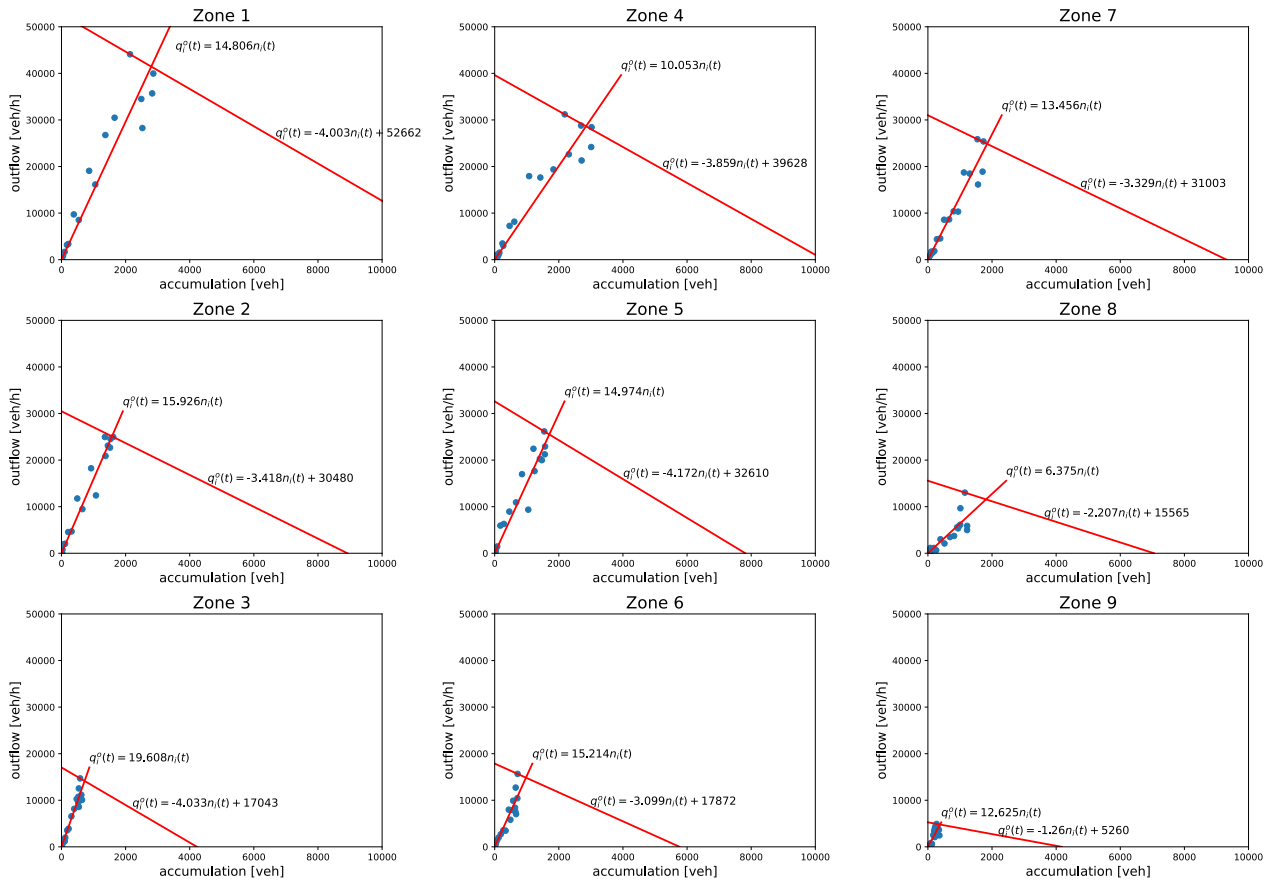


図-6 各ゾーンの Macroscopic Fundamental Diagram の作成

最後に、時間割引率は1に近い値が出ており、将来効用を考慮した行動がとられているといえる。これは本調査がSP調査であることを考えると妥当な結果であろう

(2) 垂直/水平避難の予測制御の計算設定

計算の対象範囲とゾーンの分割を図-5に示す。江東区周辺の地域を2km四方のグリッドに分割したゾーンを採用した。図-5中で黄色く示したゾーン番号{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9}が、避難補助金の対象となるゾーンであり、制御対象ゾーンと呼ぶ。それ以外のゾーンは避難需要の受け入れ先のゾーンであり、外部ゾーンと呼ぶ。制御対象ゾーンには初期避難需要として、令和2年国勢調査における世帯数を20で割った需要を配置した。図-5の各ゾーン右下の数字が各ゾーンの初期避難需要を表す。なお、外部ゾーンには初期避難需要を配置せず、制御対象ゾーンに外部から流入する避難人口は想定しない。江東区南部は埋立地であり北側の地域との間は橋で結ばれているため、避難交通のボトルネックとなることが懸念される。そのためゾーン分割においては、ゾーン{3,6,9}とゾーン{2,5,8}の境界が埋立地とそれ以外の地域の境界に当たるように設定し、Network Transmission Modelにおいて境界リンクの容量を考慮可能である。

避難交通シミュレーションの1タイムステップは6(分)とし、避難車両は平均時速20km/hで移動すると仮定する。垂直/水平避難の補助金の最低金額は0円、最高金額は3000円とする。図-5において各ゾーンの右上の数字が、式(3)における各ゾーンの被害の大きさ w_i を表す。浸水深と浸水継続時間のデータは、国土交通省の浸水ナビAPIより想定最大規模の洪水発生時の最大浸水深と最大浸水継続時間を取得した。各ゾーンの避難場所容量 C_i は、国土数値情報の避難所データをもとに作成した。避難シミュレーションに必要な各世帯の社会経済属性は前節で説明した調査データに基づいて決定した。表-3における主観確率、防災への興味、避難先のタイプは、調査データの分布と一致するように各世帯に割り振った。居住階数は、令和2年国勢調査の居住階数別世帯数から各ゾーンの居住階数別世帯数を計算し、ゾーン内で居住階数別世帯分布が実データと一致するように各世帯の居住階数を割り振った。行政からの広域避難指示が台風上陸の12時間前に発令されるとした。

(3) ゾーンベースシミュレーションのMFDの設定

次に、各ゾーン内とゾーン間の交通フローを規定する、Macroscopic Fundamental Diagram (MFD)と境界リンクの設定

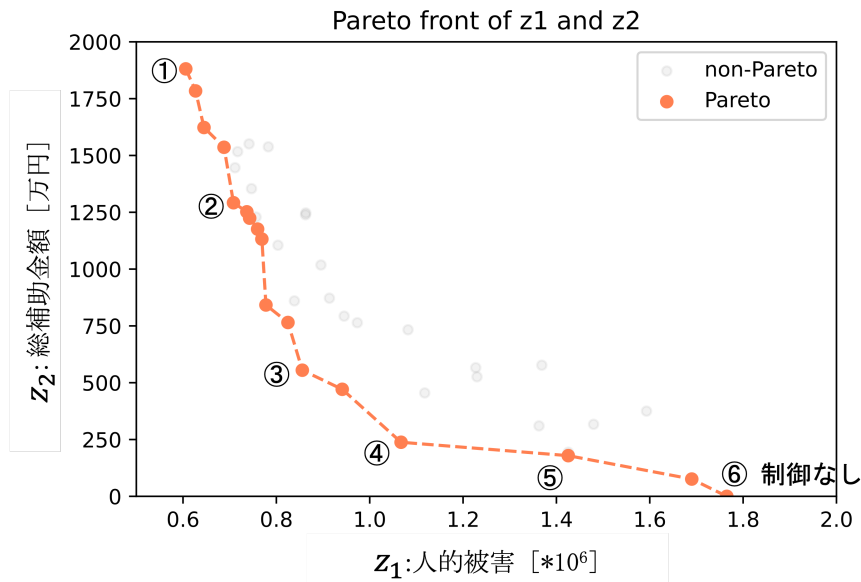


図-7 目的関数 z_1 と z_2 のパレートフロンティア

について述べる. MFD に関して, 本研究では, 対象ネットワーク内で交通マイクロシミュレーションを実施し, 各ゾーンの集計的な車両存在台数と流出交通量の関係を求める. モデルは, 東京大学において開発されたマイクロシミュレーションモデル Hongo を用い, ゾーン 1 から 23 に合計 15000 台のランダムな OD をもつ車両を一斉に発生させた. 出力として, 各時間帯に, 各リンク上に存在する車両の数を得ることができるため, 車両存在台数 $n_i(t)$ と流出交通量 $q_i^o(t)$ をゾーンごとに直接集計した. ゾーン 1 から 9 の $n_i(t) - q_i^o(t)$ 関係を, 図-6 の青プロットに示す.

この結果から, Network Transmission Model における式 (11), (14) において用いるため, 以下の手順で, 2 本の直線により MFD の関数形を推定する.

- 1) ミクロシミュレーションにより得られた車両存在台数と流出交通量のプロットから回帰直線を推定する (図-6 の右上がりの直線) .
- 2) 各ゾーン内の総リンク長に停止交通密度 (jam density) を乗じ, 速度が 0 [km/h] となるときの各ゾーンの車両存在台数 $n_{i,jam}$ を求めた. なお, 停止交通密度は, 120 台/km とした.
- 3) $n_{i,jam}$ と最大流出量の点を結び渋滞層の関数とする (図-6 の右下がりの直線) .
- 4) 関数形は, $q_i^o(t) = \min(f_1(n_i(t)), f_2(n_i(t)))$ である. ただし $f_1(n_i(t))$ は, 1) の直線, $f_2(n_i(t))$ は, 3) の直線である.

図-6 から, 江東区内において他地域からの水平避難先とされているゾーン 3, 6, 9 の交通容量と, 速度が 0 [km/h] となるときの各ゾーンの車両存在台数 $n_{i,jam}$ が小さいことがわかる. 図-5 からも分かる通り, ゾーン 3, 6,

9 は人口がその他の地域と比べて少なく道路総延長も小さいため, ゾーンの交通容量が小さいと考えられる. そのため, 災害時に平常時と異なる需要が流入すれば, ゾーン内の交通パフォーマンスが低下する可能性があり, 交通シミュレーションモデルに基づく避難交通の制御方策の検討が必要である.

(4) 垂直/水平避難の予測制御の計算結果

以上の設定のもと, 垂直/水平避難の予測制御の計算結果を示す. 図-7 に目的関数 z_1, z_2 のパレートフロンティアを示す. 橙の点がパレート解を表す.

目的関数 z_1, z_2 のパレートフロンティアより, z_1 (人的被害) を減少させようとする, z_2 (避難コスト) が増加するトレードオフ関係が確認できる. 補助金を出さない場合 (⑥) は, 避難コストは 0 だが, 人的被害は大きくなるため, 発災しないことが完全に予想できる場合は, 避難補助金を出さないのが最適である. 一方, ①の点は, 人的被害を最小にできるが, 避難コストが約 1900 万円と膨大になる. よって, 発災すると完全にわかっている場合にしか有効でないと云える. 実際には, 発災には不確実性があるため, 人的被害とコストを考慮しながら, 計画者に対して, この 2 つの間の別のパレート解を示すことが有用であろう.

そこで, 図-6 に示す①から⑥のパレート解について, 制御変数である垂直/水平の補助金額を表-4 および表-5 に示す. 人的被害が最小かつ避難コストが最大となるパレート解①では, 全地域において水平避難補助金が出されており, 浸水域内の人口を減らす制御が行われることがわかる. 一方で, パレートフロンティアの右端の点 (⑥, $z_2 = 0$ の点) は, いずれの避難補助金も出さない, 制御なしの場合である. 次に, 水平避難の補助金額のパ

表-4 パレート解における水平避難の補助金額

z_1 : 人的被害 z_2 : 総補助金額 [万円]	①	②	③	④	⑤	⑥ 制御なし
	$z_1 = 0.606$ $z_2 = 1881$	$z_1 = 0.708$ $z_2 = 1292$	$z_1 = 0.856$ $z_2 = 555$	$z_1 = 1.067$ $z_2 = 238$	$z_1 = 1.425$ $z_2 = 179$	$z_1 = 1.765$ $z_2 = 0$
Zone 1	1500	2500	0	0	500	0
Zone 2	1500	0	0	0	0	0
Zone 3	1000	0	0	0	0	0
Zone 4	2500	0	0	0	0	0
Zone 5	2500	1500	0	0	0	0
Zone 6	2500	1500	1000	1500	500	0
Zone 7	2500	3000	2500	1000	0	0
Zone 8	2500	2500	1000	0	0	0
Zone 9	2500	0	1000	0	0	0

表-5 パレート解における垂直避難の補助金額

z_1 : 人的被害 z_2 : 総補助金額 [万円]	①	②	③	④	⑤	⑥ 制御なし
	$z_1 = 0.606$ $z_2 = 1881$	$z_1 = 0.708$ $z_2 = 1292$	$z_1 = 0.856$ $z_2 = 555$	$z_1 = 1.067$ $z_2 = 238$	$z_1 = 1.425$ $z_2 = 179$	$z_1 = 1.765$ $z_2 = 0$
Zone 1	0	0	0	500	0	0
Zone 2	1000	2500	500	0	0	0
Zone 3	500	0	3000	500	0	0
Zone 4	0	500	0	0	0	0
Zone 5	2000	1500	500	0	1500	0
Zone 6	1000	1000	1000	0	0	0
Zone 7	0	0	0	0	0	0
Zone 8	2000	0	0	0	0	0
Zone 9	0	1000	0	1000	0	0

レート解による違いについて、表-4 に着目する。パレート解①から⑥に向かって、避難コストの最小化がより重視されるようになると、全体的に水平避難補助金が減少する。ゾーン 6, 7 は、避難コストの最小化を比較的重視する解においても、水平避難補助金が出されており、水平避難を促進する効果の大きいゾーンと言える。図-5 に示す通り、ゾーン 7 は被害が最大のゾーンであるため、水平避難を促進し浸水域での孤立人数を減少させることの効果が大きいと考えられる。一方でゾーン 6 は被害が小さいため、水平避難を促進することは直感に反する。これは、ゾーン 6 の避難所容量を他のゾーンからの避難者のために空けるような制御が行われた可能性があるが、各地域の避難者の OD についての詳細な分析は今後の課題である。水平避難補助金が次に多くのシナリオで出されるゾーンは、ゾーン 8, 5, 1 で、被害が中程度のゾーンである。したがって、基本的に被害の大きいゾーンから

順に水平避難を促進する制御が行われるが、リスクの低い地域においても水平避難を促進することが最適となる場合があることが示唆された。

次に表-5 に示す、垂直避難の補助金額のパレート解による違いについて考察する。人的被害の最小化を比較的重視する①から③のパレート解においては、ゾーン 2, 3, 5, 6 の垂直避難が促進されることがわかる。ゾーン 2, 5 は被害が中程度の地域であり、浸水域での孤立による被害より、垂直避難により犠牲者を減らす効果の方が卓越したため、垂直避難が促進されたと考えられる。ゾーン 3, 6 は被害の小さい地域であるが、垂直避難が促進されている。これは、水平避難と同様に非浸水域の避難所容量と関係していると予想される。

以上のことから、垂直/水平避難の最適な組み合わせとして、次のようなことが導かれる。まず、浸水深と浸水継続時間が大きく被害が甚大な地域では、垂直避難に

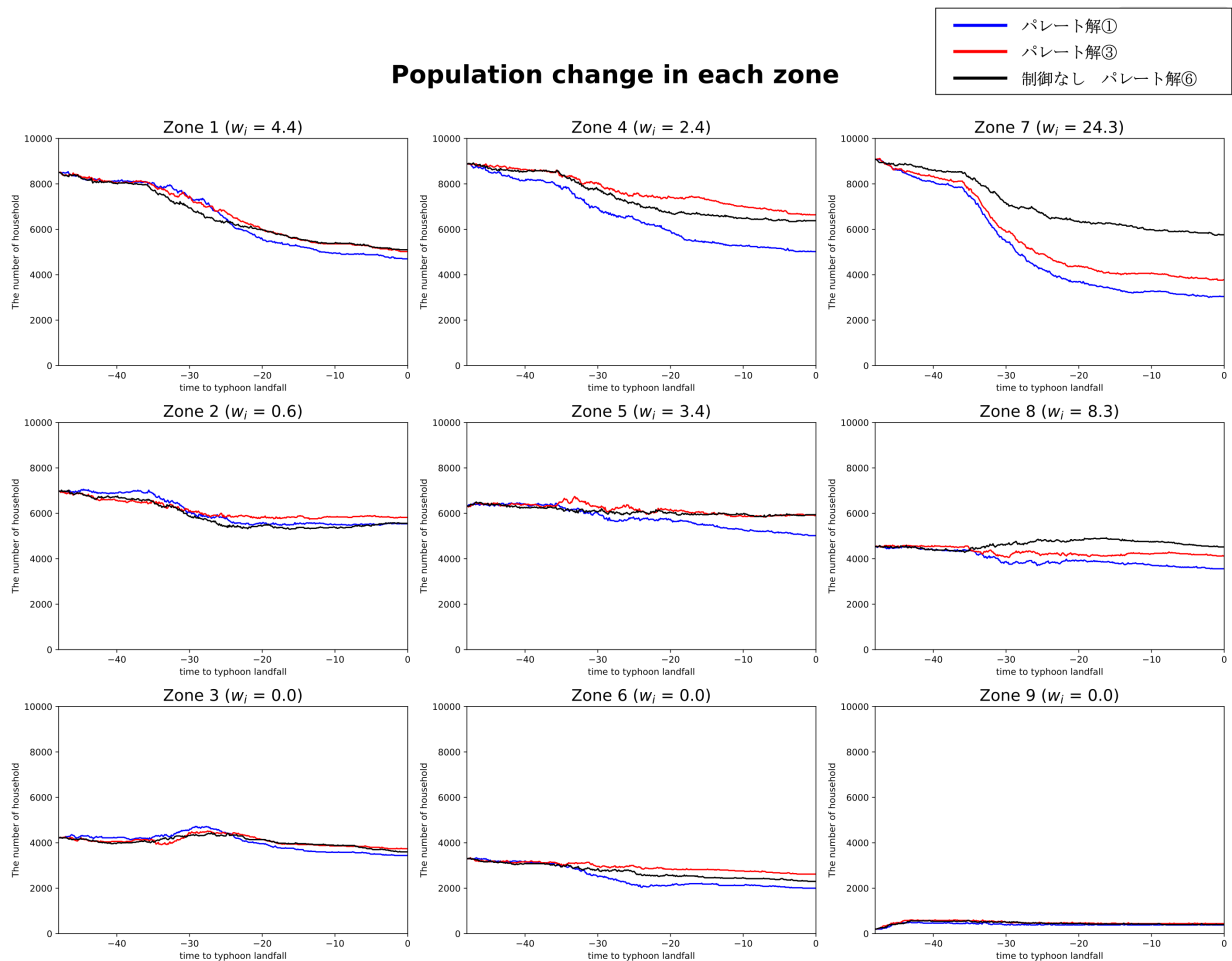


図-8 パレート解①, ③, ⑥(制御なし)における各ゾーンの人口の推移

よる孤立のリスクが大きいため、水平避難を促進することが望ましい。また、リスクが中程度の地域で、垂直避難を促進することによる浸水域での孤立による被害を、犠牲者の減少による効果が上回る場合には、垂直避難が促進される。一方で、直感とは反してリスクの低い地域においても水平避難や垂直避難を促進することが最適となる場合がある。そのため、予測モデルを利用した最適化計算に基づく、垂直/水平避難の予測制御が必要といえよう。

最後に、パレート解①③⑥における各地域の人口の推移を図-8に示す。図-8中の青線は図-7のパレート解①(被害最小)の各ゾーンの避難人口の推移、赤線はパレート解③、黒線はパレート解⑥(制御なし)である。パレート解①は、被害の大きい地域であるゾーン4, 5, 7, 8の最終人口が顕著に少なく、浸水域外へ人口を流出させる制御が行われていることが確認できる。表-5より、パレート解①ではゾーン4に水平避難を促進する制御が行われるが、パレート解③では行われない。これにより、ゾーン4の最終人口の違いに影響しているだけでなく、パレート解①では、ゾーン4から隣のゾーン7へ流入する人口を抑える効果もあることが推察される。また、パ

レート解③と⑥の違いに注目すると、高リスク地域のゾーン7, 8の最終人口が、パレート解③の方が小さい。このことから、被害の大きいゾーンにおいて避難コストのかかる水平避難を促進し、浸水後に孤立する人口を減少させるか否かが、パレート解による制御の違いとして挙げられる。

5. まとめ

本研究では、豪雨災害における垂直/水平避難の予測制御モデルを提案した。発災の不確実の下で、複雑な避難行動・交通をリアルタイムに制御するため、予測モデルに基づく動的制御問題を最適化問題として定式化した。災害時の避難者の行動に働きかけ望ましい方向に誘導することで、効率的な避難を実現するためには、避難者の災害時意思決定の分析が不可欠である。そこで、避難の開始時刻と目的地選択を時空間ネットワーク上の経路選択モデルとして、Discounted Recursive Logitモデルを用いて定式化した。東京都江東区における調査データによりモデルを推定し、居住地の災害リスクによる避難行

動の選好の違いや、垂直/水平避難補助金の影響の違いについて明らかにした。

また、避難行動と交通現象の詳細な予測に基づいたリアルタイムの最適化計算に用いるため、ゾーンベースの避難交通シミュレーションモデルを構築し、計算の高速化を可能にした。その際に、Macroscopic Fundamental Diagram に基づくゾーン内の混雑の表現と、ゾーン間の境界リンク容量の考慮によるボトルネックの表現により、災害時の混雑の発生を記述した。

以上の予測モデルによる将来予測に基づいて、各ゾーンの垂直/水平避難補助金の金額を決定する最適化問題を定式化した。豪雨災害の特徴である、発災の予測困難性と発災した場合の被害の甚大さを考慮するため、避難に伴うコストと発災した場合の被害とのトレードオフをバランスする、多目的最適化問題として定式化した。

提案した予測制御モデルを東京都江東区の巨大台風による荒川の破堤を想定した避難シナリオに対して適用した。被害とコストのトレードオフをバランスする複数のパレート解について、その制御内容を確認した。その結果、浸水深と浸水継続時間が大きく被害が甚大な地域では、垂直避難による孤立のリスクが大きいため、水平避難が促進されることがわかった。また、リスクが中程度の地域では、垂直避難を促進することによる浸水域での孤立による被害を、犠牲者の減少による効果が上回る場合には、垂直避難が促進されることを示した。一方で、直感とは反して、リスクの低い地域においても水平避難や垂直避難を促進することが最適となる場合があるため、予測モデルを利用した制御の必要性が示唆された。

最後に今後の課題と展望を述べる。第一に、提案した予測制御モデルについて、災害時の不確実な状況に対する計画修正の効果を確認する必要がある。本稿では、一時点の最適化への適用に留まっているが、避難需要の予測とのずれや道路容量の低下など災害時の様々なシナリオに対して逐次的に提案モデルを適用し、静的な最適化の結果に対して、リアルタイムな計画修正の効果を確かめる必要がある。第二に、交通施設側の制御と組み合わせた、制御のパフォーマンスの評価は今後の課題である。パレート解においては、ほとんどのゾーンで避難人数が定員に達しているため、避難所の新規設置や大規模輸送機関による避難人口の輸送によって、避難所容量を拡大できた場合に、さらに避難の効率性を高められる可能性がある。このような、交通施設側の制御を制御変数として加えることにより、さらに包括的な避難制御の分析が可能になるだろう。

REFERENCES

1) 片田敏孝, 児玉真, 浅田純作, 及川康, 荒畑元就. 東海豪雨災害を事例にした避難に関わる意思決定の状況依

- 存性に関する研究. 水工学論文集, 46:319–324, 2002.
- 2) 梶谷義雄, 杉浦聡志, 畑山満則, 高木朗義. 災害時の避難行動に対する態度形成と避難実態に関する要因分析: 平成 30 年 7 月豪雨を対象として. 自然災害科学, 39(3):207–220, 2021.
- 3) Halit Uster, Xinghua Wang, and Justin T Yates. Strategic evacuation network design (send) under cost and time considerations. *Transportation Research Part B: Methodological*, 107:124–145, 2018.
- 4) Hanif D Sherali, Todd B Carter, and Antoine G Hobeika. A location-allocation model and algorithm for evacuation planning under hurricane/flood conditions. *Transportation Research Part B: Methodological*, 25(6):439–452, 1991.
- 5) Sirisak Kongsomsaksakul, Chao Yang, and Anthony Chen. Shelter location-allocation model for flood evacuation planning. *Journal of the eastern Asia society for transportation studies*, 6:4237–4252, 2005.
- 6) 増田慧樹, 羽藤英二, 小関玲奈, 飯塚卓哉. 再帰ロジックを援用した復興都市計画のパレートフロンティア分析. *交通工学論文集*, 8(1):11–20, 2022.
- 7) Stella K. So and Carlos F. Daganzo. Managing evacuation routes. *Transportation Research Part B: Methodological*, 44:514–520, 2010.
- 8) Carlos F. Daganzo and Stella K. So. Managing evacuation networks. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 17:405–415, 1 2011.
- 9) Ampol Karoonsoontawong and Dung-Ying Lin. Time-varying lane-based capacity reversibility for traffic management. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 26(8):632–646, 2011.
- 10) Ying Liu, Xiaorong Lai, and Gang-Len Chang. Cell-based network optimization model for staged evacuation planning under emergencies. 1964:127–135, 1 2006.
- 11) Zhao Zhang, Katherine Spansel, Brian Z Wolshon Zhang, K Spansel, and B Wolshon. Effect of phased evacuations in megaregion highway networks. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research*, 2459:101–109, 2014.
- 12) Hayssam Sbayti and Hani S. Mahmassani. Optimal scheduling of evacuation operations. 1964:238–246, 1 2006.
- 13) Douglas R Bish, Hanif D Sherali, and Antoine G Hobeika. Optimal evacuation planning using staging and routing. *Journal of the Operational Research Society*, 65(1):124–140, 2014.
- 14) Wenqi Yi, Linda Nozick, Rachel Davidson, Brian Blanton, and Brian Colle. Optimization of the issuance of evacuation orders under evolving hurricane conditions. *Transportation Research Part B: Methodological*, 95:285–304, 1 2017.
- 15) Yosef Sheffi, Hani Mahmassani, and Warren B Powell. A transportation network evacuation model. *Transportation research part A: general*, 16(3):209–218, 1982.
- 16) Antoine G Hobeika and Changkyun Kim. Comparison of traffic assignments in evacuation modeling. *IEEE transactions on engineering management*, 45(2):192–198, 1998.
- 17) Suleyman Tufekci and Thomas M Kisko. Regional evacuation modeling system (rems): A decision support system for emergency area evacuations. *Computers & industrial engineering*, 21(1-4):89–93, 1991.

- 18) Athanasios K Ziliaskopoulos and S Travis Waller. An internet-based geographic information system that integrates data, models and users for transportation applications. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 8(1-6):427–444, 2000.
- 19) Ajay K Rathi and Rajendra S Solanki. Simulation of traffic flow during emergency evacuations: a microcomputer based modeling system. In *Proceedings of 1993 Winter Simulation Conference-(WSC'93)*, pages 1250–1258. IEEE, 1993.
- 20) Carlos F. Daganzo. Urban gridlock: Macroscopic modeling and mitigation approaches. *Transportation Research Part B: Methodological*, 41:49–62, 1 2007.
- 21) Nikolas Geroliminis and Carlos F. Daganzo. Existence of urban-scale macroscopic fundamental diagrams: Some experimental findings. *Transportation Research Part B: Methodological*, 42:759–770, 11 2008.
- 22) Mehmet Yildirimoglu and Nikolas Geroliminis. Approximating dynamic equilibrium conditions with macroscopic fundamental diagrams. *Transportation Research Part B: Methodological*, 70:186–200, 2014.
- 23) Victor L Knoop and Serge P Hoogendoorn. An area-aggregated dynamic traffic simulation model. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 15:226–242, 2015.
- 24) Sunghoon Kim, Sehyun Tak, and Hwasoo Yeo. Agent-based network transmission model using the properties of macroscopic fundamental diagram. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 93:79–101, 8 2018.
- 25) Haoqiang Fu and Chester G. Wilmot. Sequential logit dynamic travel demand model for hurricane evacuation. 1882:19–26, 1 2004.
- 26) Haoqiang Fu, Chester G Wilmot, Earl J Baker, and H Fu. Sequential logit dynamic travel demand model and its transferability. 1977:17–26, 1 2006.
- 27) Adam J. Pel, Michiel C.J. Bliemer, and Serge P. Hoogendoorn. A review on travel behaviour modelling in dynamic traffic simulation models for evacuations. *Transportation*, 39:97–123, 1 2012.
- 28) 浦田淳司, 羽藤英二, 柳沼秀樹. 将来効用の動学的異質性を考慮した避難開始選択モデルの構築. *土木学会論文集 D3 (土木計画学)*, 72(4):261–277, 2016.
- 29) Tarun Rambha, Linda K. Nozick, and Rachel Davidson. Modeling hurricane evacuation behavior using a dynamic discrete choice framework. *Transportation Research Part B: Methodological*, 150:75–100, 8 2021.
- 30) 飯塚卓哉, 羽藤英二. 津波避難データの 2 つの回答バイアスに着目した動的活動経路選択モデルの推定手法. *都市計画論文集*, 55(3):682–689, 2020.
- 31) Prosper K. Anyidoho, Rachel A. Davidson, Tarun Rambha, and Linda K. Nozick. Prediction of population behavior in hurricane evacuations. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 159:200–221, 5 2022.
- 32) Guangxiang Cheng, Chester G Wilmot, and Earl J Baker. Dynamic gravity model for hurricane evacuation planning. *Transportation research record*, 2234(1):125–134, 2011.
- 33) 近藤愛子, 浦田淳司, 羽藤英二. 選択枝の不確実性を考慮した動的離散選択モデル. *交通工学研究発表会論文集 第 42 回交通工学研究発表会*, pages 381–387. 一般社団法人交通工学研究会, 2022.
- 34) Stephen D Wong, Adam J Pel, Susan A Shaheen, and Caspar G Chorus. Fleeing from hurricane irma: Empirical analysis of evacuation behavior using discrete choice theory. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 79:102227, 2020.
- 35) Yuki Oyama and Eiji Hato. A discounted recursive logit model for dynamic gridlock network analysis. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 85:509–527, 2017.
- 36) Carlos F. Daganzo. The cell transmission model: A dynamic representation of highway traffic consistent with the hydrodynamic theory. *Transportation Research Part B: Methodological*, 28:269–287, 8 1994.
- 37) Carlos F. Daganzo. The cell transmission model, part ii: Network traffic. *Transportation Research Part B: Methodological*, 29:79–93, 4 1995.
- 38) Isaak Yperman, Steven Logghe, Chris MJ Tampere, and Ben Immers. Multicommodity link transmission model for dynamic network loading. Technical report, 2006.

(Received ?????)

(Accepted ?????)