

メッシュ別人口分布の津波安全性評価のための最適避難モデル

東北大学大学院工学研究科 佐藤 千仁
東北大学災害科学国際研究所 堀合 紳弥
東北大学災害科学国際研究所 奥村 誠

1. はじめに

将来の人口分布のあり方は、都市や地域の将来計画における基本的な検討事項である。高齢化による脆弱性の高まりと、防災投資のための財政的の低下が懸念される中、将来の人口分布の自然災害への安全性を評価することの重要性はますます高まっている。特に津波の危険性がある沿岸部の都市域では、浸水区域内に漁業や港湾関係などの産業が集積していることが多く、浸水区域内の人々の滞在を完全に禁止するような規制を実施することは難しい。そのため、浸水区域内の人口分布が、適切な避難により安全性を確保できるのかを確認することが必要となる。

これまでの自治体における津波避難計画では、歩行者や自動車の避難速度に一定値を設定し、津波浸水予想時刻までに移動できる距離を与えて、その範囲内を安全な地域とみなすことが多かった。しかし、歩行者と自動車が混在して避難速度が低下する危険性が考慮されておらず、物理的に実現不可能な避難行動を前提とする安全性の評価となっている。

本稿では、避難を、地域の初期の人口分布を迅速に安全な人口分布に移行させる手段と位置付け、物理的な実現可能性を保証しつつ最も効率的な避難のあり方を求める数理最適化モデルを構築する。複数の人口分布を直接的に扱うために、汎用性の高い地域メッシュを単位として人口分布を表現し、避難交通をメッシュ間の人口の移動として扱う点に特徴がある。また、青森県八戸市を例にモデルの動作を確認する。

2. 津波安全性評価と既往研究

2011年東日本大震災以前は、津波避難における自動車の利用は禁止されていたが、実際に同震災や2016年福島県沖地震では多くの地域で自動車避難が用いられ、その中には距離的に徒歩避難が不可能な地域も多いことが判明した。その後、津波地震想定改訂を受け、自動車避難を前提とする津波避難計画を作成する自治体も増加しているが、前述したように距離に基づく安全性のチェックにとどまり、道路渋滞や歩車の相互作用などは考慮されていない。

避難交通による道路渋滞の可能性を考慮した研究も徐々に蓄積されてきている。たとえば、エージェントベースのシミュレーションモデルを用いた研究は多く行われており、最近では、小坂ら(2017)¹⁾や堀合ら(2024)²⁾のように、積雪による道路条件の違いなどを加味した分析も行われている。ただし、将来の人口分布の安全性評価を行うには、人口分布に対応するエージェントを生成してシミュレーションを繰り返す必要があり、計算コストが大きくなる。道路ネットワーク上で、渋滞の発生を回避するような効率的な交通パターンを求める数理最適化モデル

*Mesh-based optimal evacuation model for safety evaluation of Tsunami evacuation by Kazuto Sato, Shin-ya Horiai and Makoto Okumura

も開発されている³⁾⁴⁾が、複数の人口分布の計算を行うには、人口をネットワーク上に再配分する作業が必要であり、計算コストが大きい。

複数の人口分布を扱うには、ネットワークではなく、地域メッシュをベースとするモデルが望ましいが、研究事例は少なく、増田ら(2023)⁵⁾の洪水避難制御モデルに限られる。このモデルはネットワークベースのモデルの計算負荷の軽減のためにメッシュベースのモデルを採用しているが、その主眼は垂直避難と水平避難の選択率という避難方法の評価にある。

本稿は、地域の人口分布の津波安全性評価を主眼とする点で、上述の研究とは目的が異なる。

3. メッシュベース人口分布の津波安全性評価のための最適避難モデル

本稿では、避難を、地域の初期の人口分布を迅速に安全な人口分布に移行させる手段と位置付け、物理的な実現可能性を保証しつつ最も効率的な避難のあり方を求めるメッシュベースの数理最適化モデルを構築する。

本モデルでは、自動車と歩行者が混在し、互いの移動速度を低下させる相互作用を考慮する。また、今後の人口減少や高齢化により地域

内の歩行困難者が増加することを鑑みて、1台の自動車に歩行者を複数回にわたり乗降させる可能性を考える。そこで、避難者を、自動車を運転する「運転者」、運転者に同乗する「同乗者」、「歩行者」の3つモードに分け、避難途中の移行を可能とする。地域メッシュには、自動車と歩行者が移動する道路部分、車両が歩行者を乗降させる道路外部分、防災公園や避難タワーに代表される、浸水区域内の避難場所部分という、3つの部分を考える。以上を図1に示す。

時点 t にメッシュ i に存在する避難者が津波に遭遇するリスク(以下「津波遭遇リスク」) R_t^i を、メッシュ i のその時点 t までの最大浸水深のロジット関数を用いて、

$$R_t^i = 1 / \{1 + \exp(-30 * (\text{時点}t \text{ 以前の最大浸水深} - 0.3))\}$$

と設定する。これは浸水深 0.3m 付近を境に 0 から 1 に数値が急上昇する S 字型の関数である。

浸水区域外メッシュならびに避難場所部分の津波遭遇リスクを 0 とおく。また津波が遡上開始する $t < 30$ までは全メッシュとも津波遭遇リスクを 0 とおく。各時点・各メッシュの津波遭遇リスクと滞在者数の積を足し合わせて、第1波到達から終了までの時間で除して、津波遭遇人数の期待値(以下「津波遭遇人数」)を求める。

本稿のモデルで用いる集合、変数・パラメータ、定式化をそれぞれ、表1から表3に示す。

表 1: 本稿のモデルで用いる集合

T	期の集合	A	地域メッシュの集合
A_a	避難場所をもつ地域メッシュの集合	A_b	避難場所をもたない地域メッシュの集合
A_c	浸水想定域内で、避難場所をもたない地域メッシュの集合		
A_d	浸水想定域外の地域メッシュの集合		
A_i	地域メッシュ i に隣接する地域メッシュの集合		
$N(i), S(i), W(i), E(i)$	地域メッシュ i の道路北, 南, 西, 東側に隣接するメッシュ		

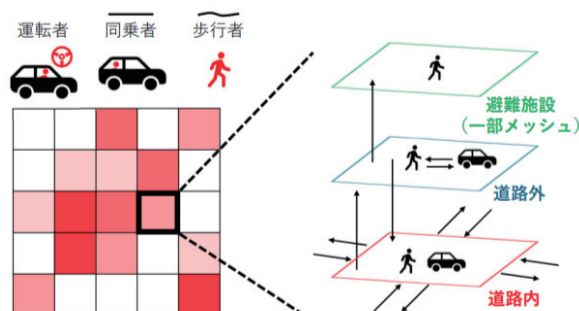


図 1: メッシュおよびモードの概略

表 2: 本稿のモデルの変数・パラメータ

変数	パラメータ
$\overline{p_t^i}, \overline{\tilde{p}_t^i}, \overline{\hat{p}_t^i}$	T_0 地震発生から津波第 1 波到達完了の時間
$\overline{q_t^i}, \overline{\tilde{q}_t^i}, \overline{\hat{q}_t^i}$	T_1 津波第 1 波到達開始から完了までの時間
$\overline{r_t^i}$	θ 自動車の平均乗車可能人数
$\overline{u_t^i}, \overline{\tilde{u}_t^i}, \overline{\hat{u}_t^i}$	R_t^i 津波遭遇リスク
$\overline{v_t^i}, \overline{\tilde{v}_t^i}, \overline{\hat{v}_t^i}$	H^i 道路の収用容量
$\overline{m_{j,t}^i}, \overline{\tilde{m}_{j,t}^i}, \overline{\hat{m}_{j,t}^i}$	δ^i 渋滞流と自由流の密度波速度の比
$\overline{l_t^i}, \overline{\tilde{l}_t^i}, \overline{\hat{l}_t^i}$	τ_1, τ_2 自動車・徒歩での避難準備に要する時間
$\overline{n_t^i}, \overline{\tilde{n}_t^i}, \overline{\hat{n}_t^i}$	τ_3 自動車の乗降に要する最小時間
$\overline{o_t^i}$	τ_4 歩行者の避難場所への入場に要する最小時間
$\overline{s_t^i}$	ϵ_1, ϵ_2 自由流状態の自動車, 歩行者のメッシュ通過時間
$\overline{\tilde{s}_t^i}$	ξ^i 運転可能者の割合
$\overline{\hat{s}_t^i}$	η^i 徒歩困難者の割合
	e_h^i 歩行者と自動車の占有空間の比
	C_j^i メッシュ間移動のフロー容量
	D^i 避難者の人数
	E^i 道路外の駐停車可能な車両台数
	$\hat{F}^i$ 避難場所に収容可能な人数

表 3: 本稿のモデルの定式化

$\min \sum_{t=0}^{T_0} \left[\sum_{i \in A} \frac{1}{T_1} R_t^i \left((p_t^i + \tilde{p}_t^i + \hat{p}_t^i) + (q_t^i + \tilde{q}_t^i + \hat{q}_t^i) \right) + \frac{1}{1000} \sum_{i \in A_d} \sum_{j \in A_i} (m_{j,t}^i + \tilde{m}_{j,t}^i + \hat{m}_{j,t}^i) + \frac{1}{1000} \sum_{i \in A_d} \tilde{s}_t^i \right] \quad (1)$	
メッシュの保存則	避難場所の収容容量制約
$p_t^i + u_t^i - v_t^i + l_t^i - n_t^i = p_{t+1}^i, \forall t \in \{0, \dots, T-1\}, \forall i \in A \quad (2)$	$\tilde{r}_t^i \leq \hat{F}^i, \forall t \in \{0, \dots, T\}, \forall i \in A_a \quad (29)$
$\tilde{p}_t^i + \tilde{u}_t^i - \tilde{v}_t^i + \tilde{l}_t^i - \tilde{n}_t^i = \tilde{p}_{t+1}^i, \forall t \in \{0, \dots, T-1\}, \forall i \in A \quad (3)$	避難前の出発時間制約
$\hat{p}_t^i + \hat{u}_t^i - \hat{v}_t^i + \hat{l}_t^i - \hat{n}_t^i = \hat{p}_{t+1}^i, \forall t \in \{0, \dots, T-1\}, \forall i \in A \quad (4)$	$l_t^i = 0, \forall t \in \{0, \dots, \tau_1 - 1\}, \forall i \in A \quad (30)$
$q_t^i - l_t^i + n_t^i - s_t^i = q_{t+1}^i, \forall t \in \{0, \dots, T-1\}, \forall i \in A_a \quad (5)$	$\tilde{l}_t^i = 0, \forall t \in \{0, \dots, \tau_2 - 1\}, \forall i \in A \quad (31)$
$\tilde{q}_t^i - \tilde{l}_t^i + \tilde{n}_t^i - \tilde{s}_t^i = \tilde{q}_{t+1}^i, \forall t \in \{0, \dots, T-1\}, \forall i \in A_a \quad (6)$	$\hat{o}_t^i = 0, \forall t \in \{0, \dots, \tau_2 - 1\}, \forall i \in A_a \quad (32)$
$\hat{q}_t^i - \hat{l}_t^i + \hat{n}_t^i - \hat{s}_t^i = \hat{q}_{t+1}^i, \forall t \in \{0, \dots, T-1\}, \forall i \in A_a \quad (7)$	メッシュ移動量の上限制約 (メッシュ存在量以下)
$q_t^i - l_t^i + n_t^i = q_{t+1}^i, \forall t \in \{0, \dots, T-1\}, \forall i \in A_b \quad (8)$	$v_t^i + n_t^i \leq p_t^i, \forall t \in \{0, \dots, T\}, \forall i \in A \quad (33)$
$\tilde{q}_t^i - \tilde{l}_t^i + \tilde{n}_t^i - \tilde{s}_t^i = \tilde{q}_{t+1}^i, \forall t \in \{0, \dots, T-1\}, \forall i \in A_b \quad (9)$	$l_t^i + s_t^i \leq q_t^i, \forall t \in \{0, \dots, T\}, \forall i \in A_a \quad (34)$
$\hat{q}_t^i - \hat{l}_t^i + \hat{n}_t^i - \hat{s}_t^i = \hat{q}_{t+1}^i, \forall t \in \{0, \dots, T-1\}, \forall i \in A_b \quad (10)$	$l_t^i \leq q_t^i, \forall t \in \{0, \dots, T\}, \forall i \in A_b \quad (35)$
$\tilde{r}_t^i + \tilde{o}_t^i = \tilde{r}_{t+1}^i, \forall t \in \{0, \dots, T-1\}, \forall i \in A_a \quad (11)$	$\tilde{v}_t^i + \tilde{n}_t^i \leq \tilde{p}_t^i, \forall t \in \{0, \dots, T\}, \forall i \in A \quad (36)$
$u_t^i = m_{N,t}^{S(i)} + m_{S,t}^{N(i)} + m_{W,t}^{E(i)} + m_{E,t}^{W(i)}, \forall t \in \{0, \dots, T-1\}, \forall i \in A \quad (12)$	$\tilde{l}_t^i + \tilde{o}_t^i + \tilde{s}_t^i \leq \tilde{q}_t^i, \forall t \in \{0, \dots, T\}, \forall i \in A_a \quad (38)$
$\tilde{u}_t^i = \tilde{m}_{N,t}^{S(i)} + \tilde{m}_{S,t}^{N(i)} + \tilde{m}_{W,t}^{E(i)} + \tilde{m}_{E,t}^{W(i)}, \forall t \in \{0, \dots, T-1\}, \forall i \in A \quad (13)$	$\tilde{l}_t^i + \tilde{s}_t^i \leq \tilde{q}_t^i, \forall t \in \{0, \dots, T\}, \forall i \in A_b \quad (39)$
$\hat{u}_t^i = \hat{m}_{N,t}^{S(i)} + \hat{m}_{S,t}^{N(i)} + \hat{m}_{W,t}^{E(i)} + \hat{m}_{E,t}^{W(i)}, \forall t \in \{0, \dots, T-1\}, \forall i \in A \quad (14)$	$\tilde{l}_t^i + \tilde{s}_t^i \leq \tilde{q}_t^i, \forall t \in \{0, \dots, T\}, \forall i \in A_b \quad (40)$
$v_t^i = m_{N,t}^i + m_{S,t}^i + m_{W,t}^i + m_{E,t}^i, \forall t \in \{0, \dots, T-1\}, \forall i \in A \quad (15)$	$p_t^i \geq \sum_{s=1}^{\epsilon_1} u_{t-s}^i, \forall t \in \{\epsilon_1, \dots, T\}, \forall i \in A \quad (41)$
$\tilde{v}_t^i = \tilde{m}_{N,t}^i + \tilde{m}_{S,t}^i + \tilde{m}_{W,t}^i + \tilde{m}_{E,t}^i, \forall t \in \{0, \dots, T-1\}, \forall i \in A \quad (16)$	$\tilde{p}_t^i \geq \sum_{s=1}^{\epsilon_2} \tilde{u}_{t-s}^i, \forall t \in \{\epsilon_2, \dots, T\}, \forall i \in A \quad (42)$
$\hat{v}_t^i = \hat{m}_{N,t}^i + \hat{m}_{S,t}^i + \hat{m}_{W,t}^i + \hat{m}_{E,t}^i, \forall t \in \{0, \dots, T-1\}, \forall i \in A \quad (17)$	$q_t^i \geq \sum_{s=1}^{\tau_3-1} n_{t-s}^i, \forall t \in \{\tau_3, \dots, T\}, \forall i \in A \quad (43)$
同乗者数の上限制約	$\tilde{q}_t^i \geq \sum_{s=1}^{\tau_3-1} \tilde{n}_{t-s}^i, \forall t \in \{\tau_3-1, \dots, T\}, \forall i \in A_c \quad (44)$
$\overline{m_{j,t}^i} \leq m_{j,t}^i(\theta-1), \forall t \in \{0, \dots, T-1\}, \forall i \in A, \forall j \in A_i \quad (18)$	$\tilde{q}_t^i \geq \sum_{s=1}^{\tau_4} \tilde{n}_{t-s}^i, \forall t \in \{\tau_4, \dots, T\}, \forall i \in A_a \cup A_d \quad (45)$
$\overline{\tilde{l}_t^i} \leq \tilde{l}_t^i(\theta-1), \forall t \in \{0, \dots, T-1\}, \forall i \in A \quad (19)$	同乗者の避難場所なしメッシュでの降車禁止制約
$\overline{n_t^i} \leq n_t^i(\theta-1), \forall t \in \{0, \dots, T-1\}, \forall i \in A \quad (20)$	$\tilde{s}_t^i \leq 0, \forall t \in \{0, \dots, T\}, \forall i \in A_c \quad (46)$
$\overline{p_t^i} \leq p_t^i(\theta-1), \forall t \in \{1, \dots, T\}, \forall i \in A \quad (21)$	$q_0^i \leq \xi^i D^i, \forall i \in A \quad (47)$

$\bar{q}_t^i \leq q_t^i(\theta - 1), \forall t \in \{1, \dots, T\}, \forall i \in A$ (22)	$q_0^i + \sum_{t=0}^T \bar{l}_t^i \leq (1 - \eta^i)D^i, \forall i \in A$ (48)
道路内のメッシュ間フロー容量制約	初期条件
$m_{j,t}^i \leq C_j^i, \forall t \in \{0, \dots, T-1\}, \forall i \in A, \forall j \in A_i$ (23)	$q_0^i + \bar{q}_0^i = D^i(\text{given}), \forall i \in A$ (49)
$\bar{m}_{j,t}^i \leq \bar{C}_j^i, \forall t \in \{0, \dots, T-1\}, \forall i \in A, \forall j \in A_i$ (24)	操作変数の非負制約
$u_t^i + e_h^i \bar{u}_t^i \leq \delta^i \{H^i - p_t^i - e_h^i \bar{p}_t^i\},$ $\forall t \in \{0, \dots, T-1\}, \forall i \in A$ (25)	$\frac{p_t^i, q_t^i, u_t^i, v_t^i, m_{j,t}^i, \bar{l}_t^i, n_t^i}{p_t^i, q_t^i, u_t^i, v_t^i, m_{j,t}^i, \bar{l}_t^i, n_t^i} \geq 0,$
$v_t^i + e_h^i \bar{v}_t^i \leq \delta^i \{H^i - p_t^i - e_h^i \bar{p}_t^i\},$ $\forall t \in \{0, \dots, T-1\}, \forall i \in A$ (26)	$\bar{p}_t^i, \bar{q}_t^i, \bar{u}_t^i, \bar{v}_t^i, \bar{m}_{j,t}^i, \bar{l}_t^i, \bar{n}_t^i, \bar{o}_t^i \geq 0,$
道路外の収容容量制約	$s_t^h, \bar{s}_t^i \geq 0,$
$q_t^i - q_0^i + \sum_{s=0}^{t-1} s_s^i \leq E^i, \forall t \in \{0, \dots, T\}, \forall i \in A_a$ (27)	$\forall t \in \{0, \dots, T\}, \forall i \in A, \forall j \in A_i, \forall h \in A_a$
$q_t^i - q_0^i \leq E^i, \forall t \in \{0, \dots, T\}, \forall i \in A_b$ (28)	

式(1)は目的関数であり、津波遭遇人数(第1項)のほかに、浸水区域外の無駄な移動に対するペナルティ(第2項)と、浸水区域外での無駄な降車に対するペナルティ(第3項)を加えたもので、これを最小化する。以下特徴的な定式化のみ説明を加える。式(25)(26)は自動車(運転者)と歩行者の混在を表現した収容制約であり、各モードの存在量が多いほど、互いのモードの道路内への流入と流出が小さくなる。式(41)(42)はメッシュ流入後一定時間メッシュに滞在させることで、運転者、歩行者それぞれのメッシュ通過に要する時間制約を表現している。式(43)(44)は自動車への乗降に要する時間を、一定時間道路外に滞在することで示す。式(45)は避難場所への入場に時間を要することを示す。式(47)(48)はそれぞれ、運転者数の上限、同乗者数の下限を示し、降車は徒歩困難者数に対応する。

本稿のモデルの各変数は非負の連続変数であり、目的関数、制約式が全て一次式のため、線形計画モデルとして一般的な数理計画ソルバーで求解できる。本稿では、商用ソルバーGurobi Optimizer v11.0.3⁶⁾を用いた。

4. 青森県八戸市を例にとったモデルの動作確認

3. で説明したモデルの動作確認を、青森県八戸市で行う。八戸市は、東日本大震災において最大 6.4m の津波が襲来し、死者 1 名、行方不明

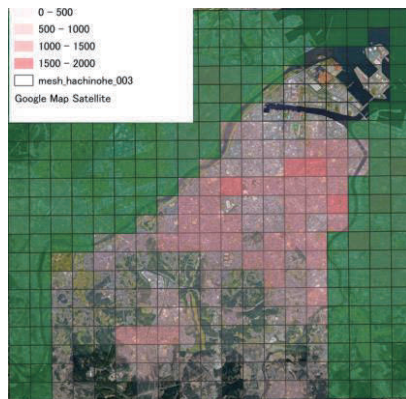


図 2: 対象地域の人口分布

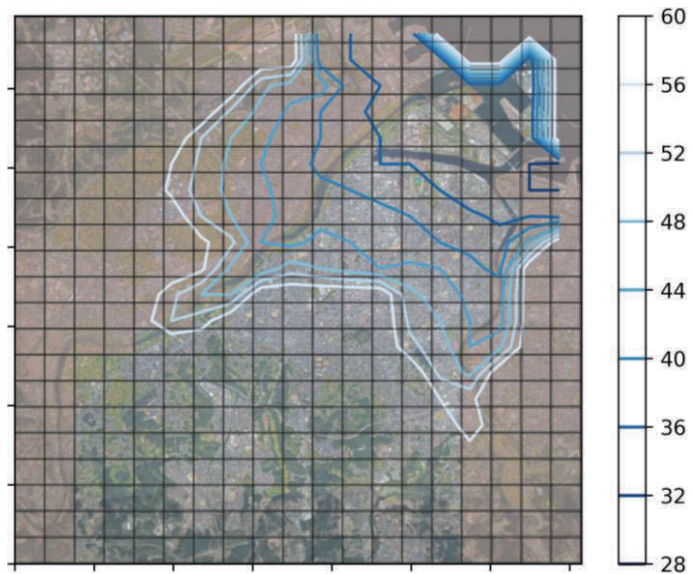


図 3: 津波浸水区域の時間推移

者 1 名(2024 年 3 月 1 日時点)を含む被害が生じた。日本海溝地震で想定される津波では、時間的猶予が小さく、より大きな被害が想定されることから、計算対象とした。

計算対象地域は、2 つの河川に囲まれた、八戸市中心市街地の浸水区域内、44,050 人(国勢調査⁷⁾)とし、図 2 に夜間人口の分布を示す。対象の津波は、日本海溝地震モデルによる津波であり、浸水深の時間変化は、尾崎ら(2024)⁸⁾が日本工営株式会社の津波解析コードにより実施した、数値計算結果を使用する。第 1 波の浸水は地震発生後 30 分から 60 分の間に広がる。図 3 には、浸水深が 0.10m を超えたタイミングを等高線で示している。道路データには、オープンデータソースの Open Street Map⁹⁾ を使用し、各メッシュ内の道路延長と道路交差数、メッシュ間を横断する道路本数をそれぞれ得た。各メッシュ内の道路延長はメッシュの収容容量、道路本数はメッシュ間フロー容量、道路交差数はこれら両方の設定に、それぞれ使用する。この他、一般的な乗用車の定員から、車の定員を 4 人とし、自由流状態の運転者、歩行者の移動速度をそれぞれ 30km/h、5km/h とする。運転者ならびに歩行者の出発準備時間は、東日本大震災の実績値を基にそれぞれ 25 分、15 分とする。

なお、本稿では、全ての徒歩困難者を一度の乗車では運び切れない設定を与えて、運転者が歩行者を複数回乗車させることを確認する。そのため、同乗者各メッシュの運転者可能者の割合を 0.10、徒歩困難者の割合は 0.40 と設定した。

以上の条件で計算を行った結果、津波遭遇人数は 0.26 人となった。初期人口のまま避難が行われなかった場合の津波遭遇人数は 2.1×10^4 人であるため、理想的な避難を行えば、津波遭遇人数を約 8 万分の 1 にできることが分かる。

次に、横軸に時間を取り、各時点の人口分布のままで避難が行われなかった場合の津波遭遇人数を縦軸にとったグラフを図 4 に示す。歩行者が避難開始する $t=16$ で津波遭遇人数が減少し始め、

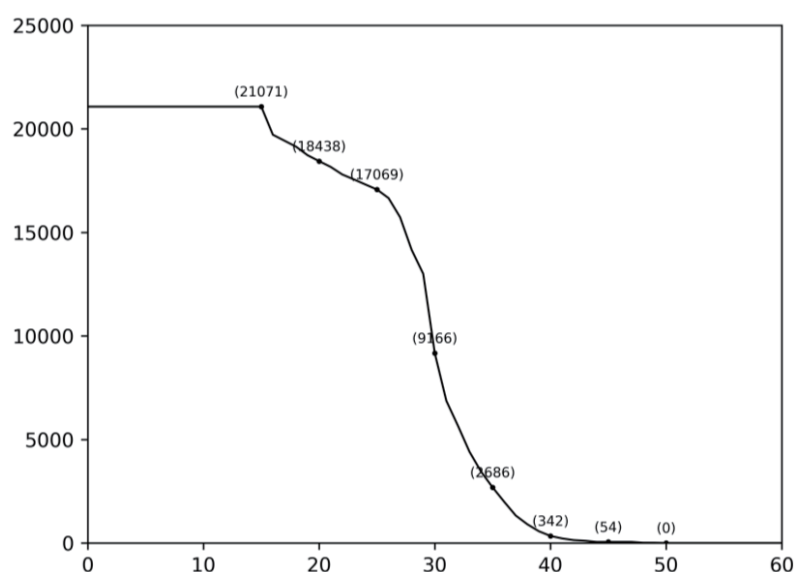


図 4: 各時点の人口分布の津波遭遇人数推移

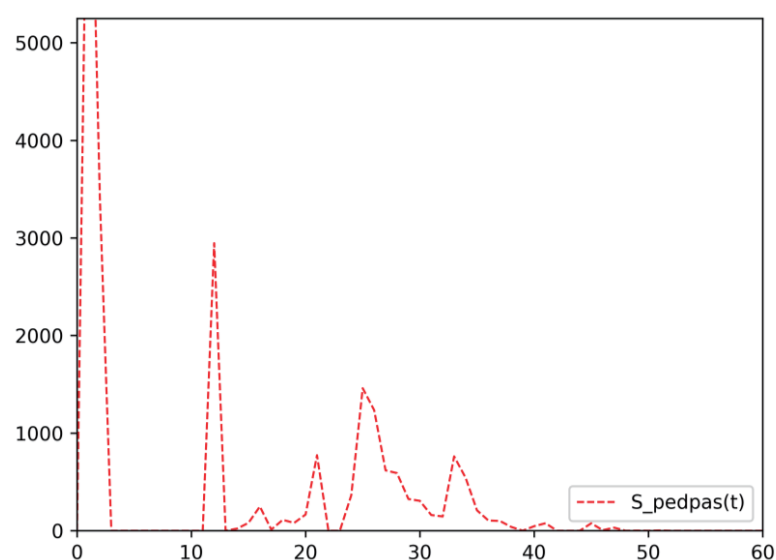


図 5: 歩行者の乗車量推移

運転者が避難開始する $t=26$ から減少率が大きくなっている。続いて、横軸に時間、縦軸に歩行者の乗車量をとったグラフを図 5 に示す。これより、運転者の出発する $t=26$ 以降も乗車が続いていることがわかる。これは、最適解において、本稿のモデルの特徴である、避難途中で複数回歩行者を同乗させることが、最適解で生じていることを示す。

以上から、安全な人口分布に素早く変化させるような、同乗を含む理想的な避難を求めるという本モデルの最適解として、妥当な解が計算されていることを確認した。

5. おわりに

本稿では、人口分布の津波に対する安全性を評価し、防災計画の検討に用いるための、歩車混合避難を含むメッシュベース最適化モデルを提案した。また、青森県八戸市を例に、モデルの動作確認を行った。今後は、本稿のモデルを用いた人口分布の分析を進める。また、避難場所使用や移動速度、同乗といった各種の条件を変更して、津波遭遇人数の変化を確認することで、この地域のもつ津波災害への脆弱性を把握できると考えられる。

謝辞

本稿の津波遭遇リスク計算にあたり、日本工営株式会社ならびに八戸工業大学より津波数値解析データをご提供いただきました。ここに深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 小坂陽介, 野村尚樹, 大藤愛子, 宮島昌克: マルチエージェントシステムを用いた津波避難に関する解析—輪島市臨海地域を対象とした事例研究—, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.73, No.4(地震工学論文集第 36 巻), pp. I_1010-I_1017, 2017.
- 2) 堀合紳弥, 奥村誠: 積雪道路上での歩車混在空間における津波避難シミュレーション, 土木計画学研究発表会・講演集, Vol. 70, CD-ROM, 2024.
- 3) 竹居広樹, 奥村誠: 津波避難における自動車利用率設定のための基礎的分析手法, 土木学会論文集 D3(土木計画学), Vol. 74, No.5, pp. 181-189, 2018.
- 4) 横山宗一郎, 安藤宏恵, 倉内文孝, 杉浦聡志: 徒歩と自動車の混合モードにおける津波最適避難計画モデル, 土木学会論文集 D3(土木計画学), Vol. 59, No.3, pp. 2167-2174, 2016.
- 5) 増田慧樹, 羽藤英二: 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, 土木計画学研究発表会・講演集, Vol. 67, CD-ROM, 2023.
- 6) Gurobi Optimizer Release Notes v11.0.3, <https://www.gurobi.com/downloads/gurobi-optimizer-release-notes-v11-0-3/> (参照: 2025-01-14)
- 7) 総務省統計局: 令和 2 年国勢調査
- 8) 尾崎壮一, 古里春花, 堀合紳弥, 野島和也, 田中聖三, 高瀬慎介: 構造物を考慮した八戸市における津波遡上解析, 計算工学講演会論文集, Vol. 29, pp. 728-730, 2024.
- 9) OpenStreetMap, <https://www.openstreetmap.org/> (参照: 2025-01-14)