

シナリオに基づく擬似人流生成のためのシミュレーション基盤の構築

澁谷遊野*, 龐 岩博*, 関本 義秀*

A Scenario-Based Generation of Pseudo People Flows in Urban Spaces

Yuya SHBUYA *, Yanbo PANG *, Yoshihide SEKIMOTO *

Analyzing what-if scenarios in urban spaces before implementing policy interventions or city feature modifications is expected to improve decision makings and people's behavior changes in urban spaces. Digital twin technologies, based on multi-dimensional data and simulation technologies, have started to provide such opportunities. To contribute to this domain, we develop multiple sub-modules to simulate scenarios to understand how people's flow in a city would change. The simulation models generate pseudo people flow data in urban spaces based on user input scenarios. We test example scenarios such as what would happen if a large shopping mall was constructed in a town and how long people's evacuation would take when a disaster happens.

Keywords: 擬似人流 (Pseudo People Flow) デジタルツイン (Digital Twin) シナリオ分析 (Scenario-based analysis) シミュレーション (Simulation)

1. はじめに

政策介入や都市基盤の変更等に応じて都市空間で起こりうるシナリオを事前に推定し分析することは、公衆衛生や都市計画、マーケティング等幅広い分野で応用が期待される。特に人流把握に対する需要は大きい。特に、デジタルツイン技術と人流を含む多様なデータの組み合わせにより、ユーザーが Web ブラウザ上で任意のシナリオを試すことができるような環境開発が望まれる (Ketzler *et al.* 2020; Ramu *et al.*, 2022)。他方、人流データのシミュレーションは一般的に大規模なコンピューター資源や高価な位置情報データの購入等が前提となる。そこで本研究では、ユーザーがデジタルツイン上で簡易的なシミュレーションを試すことができる環境構築に貢献するため、基盤的なシミュレーションモジュールのプロトタイプを開発した。具体的にはユーザーが任意のシナリオに関する情報を入力すると、入力シナリオに基づいた都市空間での擬似的な人の流れデータを生成するモジュールを作成した。例えば、大型ショッピングモールが建設された場合に人の流れや買い物行動にどのような変化が起こりうるのか、災害発生時の避難行動は個人属性等に応じてどのように変化するかなどのシナリオ検証を可能にするものである。

本モジュールの特徴は、年齢や性別、職業タイプ、世帯構成などの個人属性に応じたシナリオ生成や、個人の異質性を考慮した行動パターンの検討が可能である点にある。また、本モジュールで生成する人流データは実データではないため、一般的な位置情報データに比べ、プライバシーへの懸念が少ない。

本稿は以下次のように構成される。まず第2章で関連研究および本研究の基盤技術である擬似人流について概観する。続く第3章では、本研究で作成するモジュールの概要を示す。第4章では、モジュールで生成した擬似人流データの結果を示す。第5章で本稿をまとめる。

2. 関連研究

本章では、まず2.1節で都市空間のデジタルツインの主要機能のうち what-if 分析に着目しながら関連研究を示し、続いて2.2節で、本稿で生成する擬似人流に関連する先行研究をまとめる。

2.1. デジタルツインでの What-if 分析

デジタルツインは、データやシミュレーションによって現実世界の物や場所、人などを仮想的にデジタル空間に表現するもので、都市空間のほか工場の

* 正会員 東京大学空間情報科学研究センター (The University of Tokyo, Center for Spatial Information Science)
E-mail : yuya-shibuya@csis.u-tokyo.ac.jp, pybdtc@csis.u-tokyo.ac.jp, sekimoto@csis.u-tokyo.ac.jp

生産ラインでの活用から農業、環境・気象、医療まで多様な分野で取り組みが広がっている (Rasheed *et al.*, 2020; Ramu *et al.*, 2022; Ketzler *et al.*, 2020). 都市空間のデジタルツインは、工場のデジタルツインなど特定領域での運用と比べて、レプリカの対象となるデータが膨大かつ複雑であることなどから実用は始まったばかりである (Batty & Wei, 2020). 特に物理空間 (例えば建物や道路、地形等) のみならず物理空間と環境との相互作用や社会経済的側面をデジタルツイン上でどう実現するかは課題である (Batty, 2018). 都市空間におけるデジタルツインの中核的機能としては、実世界と限りなく近い環境生成に基づく現状の確認のほか、実世界では容易に試すことができないシナリオを仮想空間で実現する What-if シナリオ分析を行える点もある. (Ketzler *et al.* 2020; Ramu *et al.*, 2022; 総務省, 2021). What-if 分析を通じた実世界とデジタル空間の間でのフィードバック循環が生まれることで、都市空間の利便性向上や気候変動、人口減少や高齢化等の各自治体が抱える課題への貢献が期待される. なお、ユーザーの入力値に基づき Web 上でユーザーが様々なシナリオを試すことができるアプリケーションの例としては Hasegawa *et al.* (2019)がある. 国内自治体を対象に、ユーザーの設定値に基づき将来の推計人口や、医療機関・公共施設等へのアクセシビリティの変化など確認できる (Hasegawa *et al.*, 2019). こうしたユーザーの入力値に基づく比較的自由的なシミュレーションが、より多様な都市機能や社会経済的側面についても実行できるようになることが期待される. そこで本稿では、デジタルツインの機能のうち、インタラクティブな What-if 分析を可能とするシミュレーション機能の開発に貢献することを目的とする. 特に、本稿では人の流れのシミュレーションに着目してモジュールを作成する. 次節では、シナリオに応じた擬似的な人流データの作成方法を関連研究に基づき示す.

2.2. 擬似人流

都市空間での人の流れの把握は公衆衛生や都市計画、商業振興などで需要が高く、また携帯電話など

の位置情報端末の普及により活用が進んでいる. 他方、一般的な位置情報データはプライバシーに関する懸念が高く、また高価であり誰でも利用できる状態とは言い難い. こうしたことから、シミュレーションのよって実際の人々の動きを再現し、擬似的な人流データ生成する研究が進んでいる (Kashiyama *et al.*, 2017; Kashiyama *et al.*, 2022). Kashiyama *et al.* (2022) は、パーソントリップ調査や国勢調査等のデータに基づき日本全国をカバーする擬似人流データを生成した. 生成データは東京大学空間情報科学研究センターの共同研究利用システム Joras で公開されている (<https://pflow.csis.u-tokyo.ac.jp/archives/1471/>参照). Kashiyama *et al.* (2022) ではまず (1) 国勢調査等の人口分布に従った個人属性を持つエージェントを生成し、(2) マルコフモデルを用いて活動データを生成する (自宅・職場・学校・買物・飲食・病院・その他). 続いて (3) エージェントの個人属性に基づき (2) の活動を行う場所を選ぶ. 職場と学校以外の活動場所は離散選択モデルに基づき選ぶ. (4) 活動場所への移動は個人属性や移動目的、移動距離交通アクセス情報等に基づき確率的に割り当てる. 最後に (5) 道路ネットワークや鉄道ネットワークデータに基づき軌跡データを生成する. 本稿でも、Kashiyama *et al.* (2022)に基づき人流データを生成する. 次章では、本研究で開発するモジュールの概要を示す.

3. 人流シミュレーションの構築とシナリオ

本研究では、任意のシナリオをユーザーが手元で実行し、結果を確認することができるよう、以下の構成要素を持つモジュールを開発する.

- i. 都市空間で発生しうるシナリオについて、ユーザーが任意パラメータを設定することができるようにする. モジュールは、パラメータを入力値として受け取る.
- ii. 軽量化のため、ユーザーの分析対象自治体に限って擬似人流を生成する. シミュレーションを軽量化し、実行時間を短縮する.



図1 開発モジュールのイメージ

- iii. シナリオ変更前の擬似人流とシナリオに基づく人流の比較が容易となるよう Kashiyama *et al.* (2022)の擬似人流と同じ出力フォームとする
- iv. ユーザーが生成した擬似人流のデータを簡易的に確認できるよう生成した擬似人流をマップ上で示す

以上の要素を持つモジュールを具体的なシナリオに基づき複数作成する。このうち、本稿では (1) 都市空間内の建物情報の変更機能と (2) 個人の異質性を考慮した避難行動選択機能の2つのモジュールの概要を示す。2つのモジュールの概要とユーザーが入力できるパラメータは表1に示す。

表1. 各モジュールのシナリオ例とユーザー入力値

モジュール	分析シナリオ例	変更する都市空間情報	受け取り可能なユーザー入力値
1. 建物変更機能	新規商業地開発での買物目的のトリップや人流の変化	建物情報、変更した建物情報に関連する経済パラメータ	建物削除範囲(矩形範囲)、新規設置する建物の座標や建物面積、用途、収容数等
2. 避難行動選択機能	市民の災害時の避難行動に関する意識や選択確率が変わった場合の避難行動	個人属性別の避難行動選択確率(属性に応じた選好)	避難対象範囲、避難場所候補地、避難開始推奨時間、避難行動選択のパラメータ(2.2参照)

2.1. モジュール1: 建物情報変更機能

本モジュールでは、新規に建物が設置された場合や撤退した場合、建物の利用用途が変更された場合などのシナリオに基づき人流にどのような変化が起

こりうるのかを確認できるようにする。既存建物を削除したい場合は削除範囲を矩形範囲でモジュールに入力し、新規建物を設置したい場合は建物の座標や建物面積 (㎡)、用途、収容数を入力する。建物削除や新規建物設置はどちらか一方のみでも、両者の複数の組合せでも入力値となる。例えば特定のエリアで区画整理や商業地開発を行う場合は、既存建物削除範囲を指定し、複数の新設建物情報を入力値とする。モジュールは受け取った建物削除範囲および新設建物情報に基づき自動で既存の建物情報データを変更する。具体的には、建物情報に変更を加えたメッシュに対応する経済関連パラメータ(メッシュの就業者数等)も建物変更情報に基づき自動で更新する。これら変更情報に基づき、当該自治体の擬似人流を新たに生成する。擬似人流生成手法は Kashiyama *et al.* (2022)を用いた。ただし、モジュールの軽量化のため、シミュレーションで用いるデータは、分析対象の自治体とその隣接自治体のデータのみを用いた。道路・鉄道ネットワークデータは当該自治体にかかるデータのみを用いた。

2.2. モジュール2: 個人の異質性を考慮した避難行動選択機能

本モジュールでは、災害時の市民の避難行動選択パターンを検証を目的とした。避難行動は災害の種

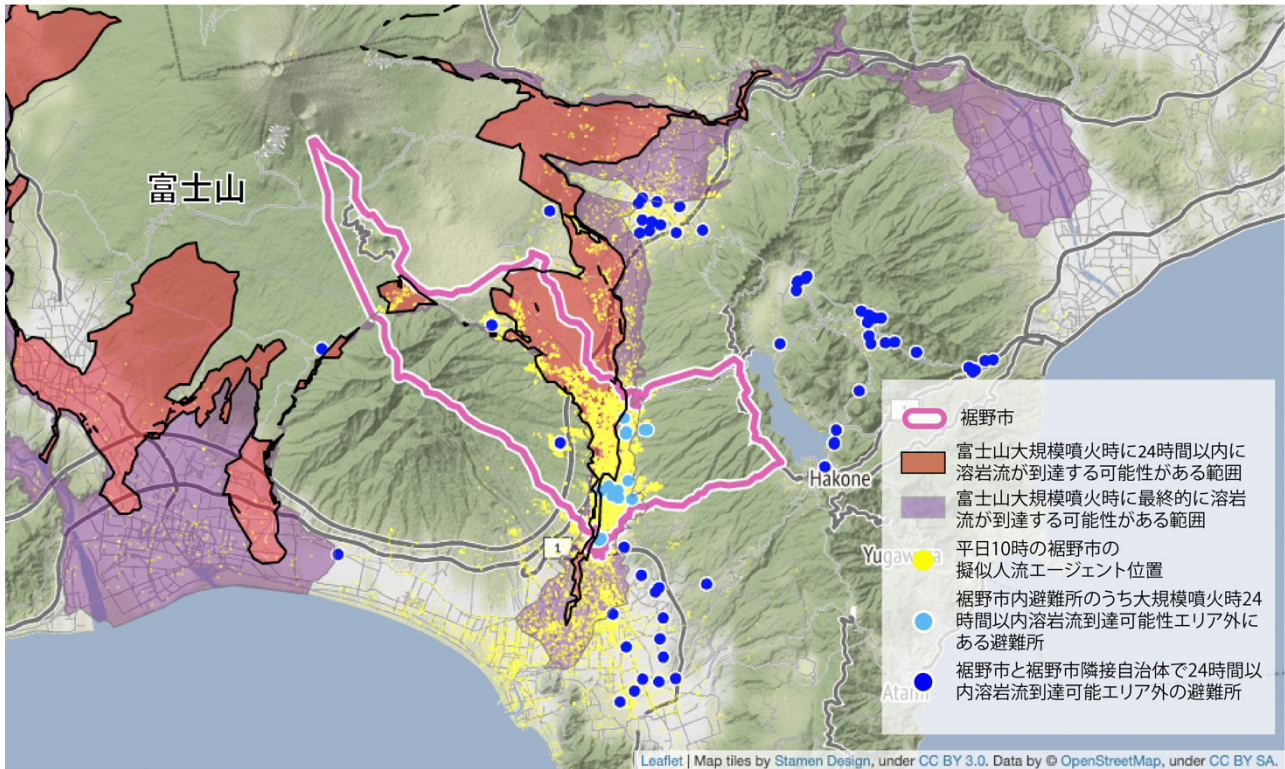


図2. 富士山大規模噴火時に溶岩流到達可能性がある範囲と裾野市の擬似人流エージェント位置 (富士山火山防災対策協議会「溶岩流可能性マップ」に基づき筆者作成)

別や規模によっても異なるため、本稿では、静岡県裾野市での富士山噴火時の避難を事例にモジュールを作成した。静岡県裾野市は、富士山の大規模噴火発生時、溶岩流が到達する可能性があるエリアを有する(静岡県, 2021)。富士山火山防災対策協議会「溶岩流可能性マップ」に基づき、擬似人流データ(Kashiyama *et al.*, 2022)を重ねると、平日午前10時では、裾野市人口の29.9%が大規模噴火発生時に24時間以内に溶岩流が到達する可能性がある範囲にいる(図2)。

モジュールを用いて変更できる都市空間情報は避難場所候補地や市外への避難が必要な場合の市外最終避難場所候補地である。また、災害発生時刻に応じて人々の所在地や行動パターンが異なる可能性があることから、避難開始時刻も設定できることとした。その上で、モジュールでは、エージェントは溶岩流到達地域外へ避難するかどうかを選択する。エージェントが選択しうる避難行動は付録図A1に示す。エージェントは避難開始時間 $t = t_0$ 以降、避難行動の効用の大きさに基づき確率的に避難行動を選択することとした。エージェントが t_0 で避難を選択

した場合は次期 t_1 で避難選択は行わず、 t_0 で避難を選択しなかった場合は t_1 で避難選択をする。以降同様に逐次的に選択を行う。溶岩流到達時刻を T としたとき、 $t \geq T$ でエージェントは選択の機会が与えられず避難する。 t_k で避難を選んだ場合は、(a) 最寄り一次避難所を経由してバス等で移動するか、(b) 自ら避難するかを選んだ上で、溶岩流到達可能性範囲外の避難所に避難する。 t_k で避難しないを選んだ場合は、(i) その場に留まる、(ii) 自宅に戻る、(iii) 職場へ行く、(iv) 家族を迎えに行くから次の行動を選ぶ(付録図A1)。 t_{k+1} で再び避難するかどうかを選択する。 t_k から t_{k+1} との時間間隔は、移動が発生する場合は交通手段と距離によって算出した移動時間と滞在・待機時間の合計とした。滞在・待機時間は $10 + \varepsilon$ 分と仮定し、 ε は平均10標準偏差5の正規分布に従うものとした。移動がない場合は滞在・待機時間のみで算出した。

なお、本来であれば、実際の避難行動データ等を用いた避難行動モデルの構築やパラメータ推定が望ましいが、本モジュールはプロトタイプであることからエージェントの個人属性や環境条件に応じた選

択モデルを以下に示す方法で操作的に定めた。

まず、避難により得られる効用 (V^e) と避難をしないことで得られる効用 (V^{ne}) を次式で求める。

$$V_{i,c,m,f}^e = \frac{\beta_{1f}(\alpha_c + \gamma x_i)}{\delta^m \lambda^{1/d}} \quad (1)$$

$$V_{i,c,m,f}^{ne} = \beta_{1f} \delta^m \lambda^{1/d} ((1 - \alpha_c) - \gamma x_i) \quad (2)$$

i は i 番目のエージェントを示す。 c は時間帯カテゴリで c_1 は 6:00-15:59, c_2 は 16:00-21:59, c_3 は 22:00-5:59 を示す。 m は避難開始推奨時刻 (初期設定 10:00 でユーザー入力値で変更可能) からの経過時間を示す。 δ^m は時間割引で初期値は 0.97 とした。 避難開始推奨時刻から時間が経過すると、避難することで得られる効用がより大きくなることとする。 d_i は i 番目のエージェントの m 時点での位置と 3 時間以内溶岩流到達可能性範囲との最短直線距離 (km) を示す。 λ の初期値は 0.97 とした。 エージェントがいる地点に溶岩流到達可能性が迫っているほど避難から得られる効用は大きいとする。 f は世帯構成カテゴリで、 f_1 は単独世帯, f_2 は非親族を含む世帯, f_3 は一世代世帯, f_4 は二世代世帯, f_5 は三世代世帯の世帯構成を示す。 x_i は i 番目のエージェントの年齢を標準化した値である (平均値 0, 標準偏差 1)。 γ の初期値は 0.005 として年齢が大きいほど避難から得られる効用がやや大きくなることとした。 α_{c1} と α_{c2} は一般的な大規模水害時の避難率を参考に 0.43 とした。 α_{c3} の初期値は 0.2 とした。 β_{1f} は世帯構成タイプ f によって変動する。 避難行動選択の傾向が世帯構成別に異なることを示す。 β_{1f} の初期値は付録表 A1 に示す。 避難を選ぶ確率は $\frac{\exp V^e}{\exp V^e + \exp V^{ne}}$ とする。 避難を選ぶ確率はエージェントが避難を選択肢として選ぶ確率となる。

避難を選んだ場合は、(a) 市内の最寄り一次避難所を経由してバス等で市外へ避難する確率と (b) 自家用車等で各自市外へ避難する確率を κ , $\kappa-1$ とした。 κ の初期値は 0.2 とした。

避難しないを選んだ場合は、(i) 家族を迎えに行く、(ii) その場に待機、(iii) 自宅に戻る、(iv) 職場に戻るからひとつの行動を選ぶ。 それぞれの選択肢の効用は次式で求める。 ただし、自宅にいる場合は v^{home} を、職場にいる場合や非就業者である場合は v^{work} を、単独世帯の場合は v^{pick} を選択肢に

含まない。

$$V_{i,f}^{pick} = \beta_{2f} - \theta |x_i| \quad (3)$$

$$V_{i,f}^{stay} = \beta_{3f} + \theta x_i \quad (4)$$

$$V_{i,f}^{home} = \beta_{4f} x + \theta x_i \quad (5)$$

$$V_{i,f}^{work} = \beta_{5f} x + \theta |x_i| \quad (6)$$

β の値の初期値は付録表 A1 に示す。 θ の初期値は 0.05 とした。 求めた効用の集合 D から d を選ぶ確率は $\frac{\exp V_d}{\sum_{d \in D} \exp V_d}$ とした。 パラメータは α , β , γ , δ , λ , θ や避難開始推奨時間はユーザーの入力値として受け取ることができる。 パラメータの値を変更することで、市民の避難の必要性や避難手段に対する認識が変化した場合の避難行動選択を簡易的に模倣することが可能になる。 各エージェントの避難やそれ以外の行動での交通手段選択は Kashiyama *et al.* (2022) に基づいた。 ただし、一次避難所を経由して最終避難場所へ移動する場合のみバスとした。

なお、本モジュールはプロトタイプであり、現在静岡県や裾野市の避難計画等に基づいていない。 また、前述のように避難行動選択モデルも実データに基づいていない。 実データの基づいた避難選択モデルの構築は今後の課題とする。

3. 開発モジュールを用いたシナリオの検討結果

本章では静岡県裾野市を事例にモジュール 1 (建物情報変更) とモジュール 2 (避難行動選択) で生成した擬似人流データの概要を示す。

3.1. モジュール 1: 建物情報変更機能

モジュール 1 の実行例として、大型商業施設が新設された架空のシナリオに基づき、人の流れの変化を検証した。 このシナリオでは、現状の建物には変更を加えず、裾野駅の南西約 1.5km 付近に大型商業施設を想定した建物情報を加えた。 この新規商業施設は裾野市内の買物目的の既存の施設の最大値の 2 倍程度の規模を想定した。 具体的には、買物を主目的とした新規建物 6 件と飲食を目的とした施設 3 件、その他目的の施設 2 件を追加した。 新規建物を設置したメッシュの買物関連の従業者数は、裾野市内で最大の買物関連従業者数をもつメッシュの値の 2 倍

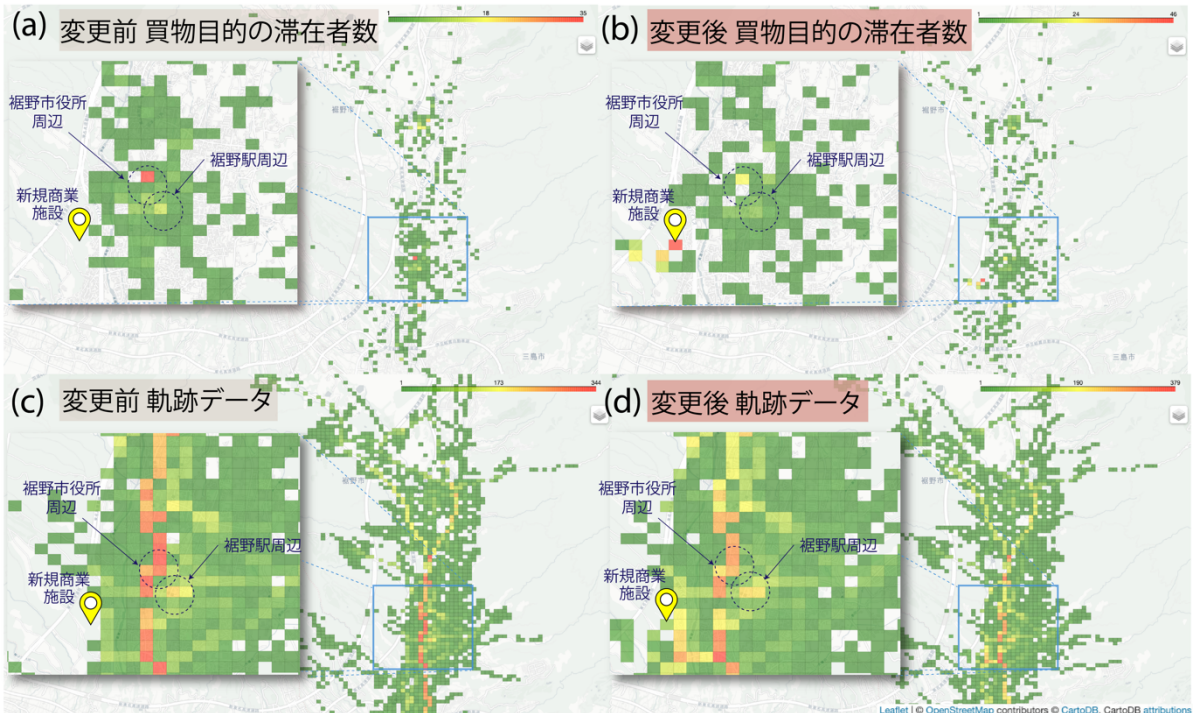


図 3. モジュール 1 で建物情報変更を行った場合の人の流れの変化例を示すヒートマップ。図中メッシュの色が濃い赤はより多くの滞在者数もしくは軌跡があることを示す。緑は少ないことを示す。いずれも午後 4 時台のデータに基づく。

程度とした。シナリオに基づき擬似人流を生成した結果を図 3 に示す。図中 (a) はシナリオ変更前の買物目的滞在者数のヒートマップを示す（自宅滞在以外）。図中 (b) はシナリオ変更後の同ヒートマップを示す。メッシュの色が赤に近いほど買物目的滞在者がメッシュ内に多いことを示す。シナリオ変更前は裾野市役所周辺での買物目的滞在者数が最も多いが、変更後は新設した建物周辺で滞在人口が最も多い。同様に図 3 (c) はシナリオ変更前の軌跡データのヒートマップを、図中 (d) はシナリオ変更後の軌跡データヒートマップを示す。シナリオ変更前は、裾野市を南北方向に移動する軌跡の割合が多い（図 3-c）。建物情報変更後は、南北方向への移動は多いものの、新設建物周辺メッシュの軌跡が増加している。

図 4 に建物変更前後の買物目的訪問者の変化を示す。変更前は 0 である建物情報変更メッシュへの買物目的訪問者は、変更後は 1 日あたり 220 を超えた。時間帯としては、午前 10 時から 12 時頃までと午後 2 時から 5 時頃の訪問が多いことがわかる (a)。建物情報変更前に最も買物目的での訪問者が多いメッ

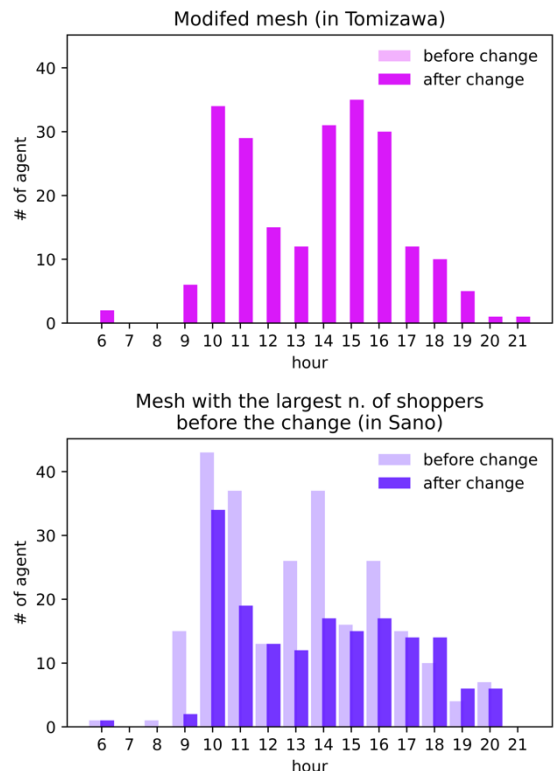


図 4. 大型商業施設を模した建物を追加したメッシュでの買物目的での時間帯別滞在者数 (a) とシナリオ変更前の最も買物目的での滞在者数が多いメッシュでの買物目的の時間帯別訪問者数 (b)。新規建物を設置したメッシュはシナリオ訪問前の買物訪問者数は 0 であるため (a) ではシナリオ変更前のデータの表示はない。

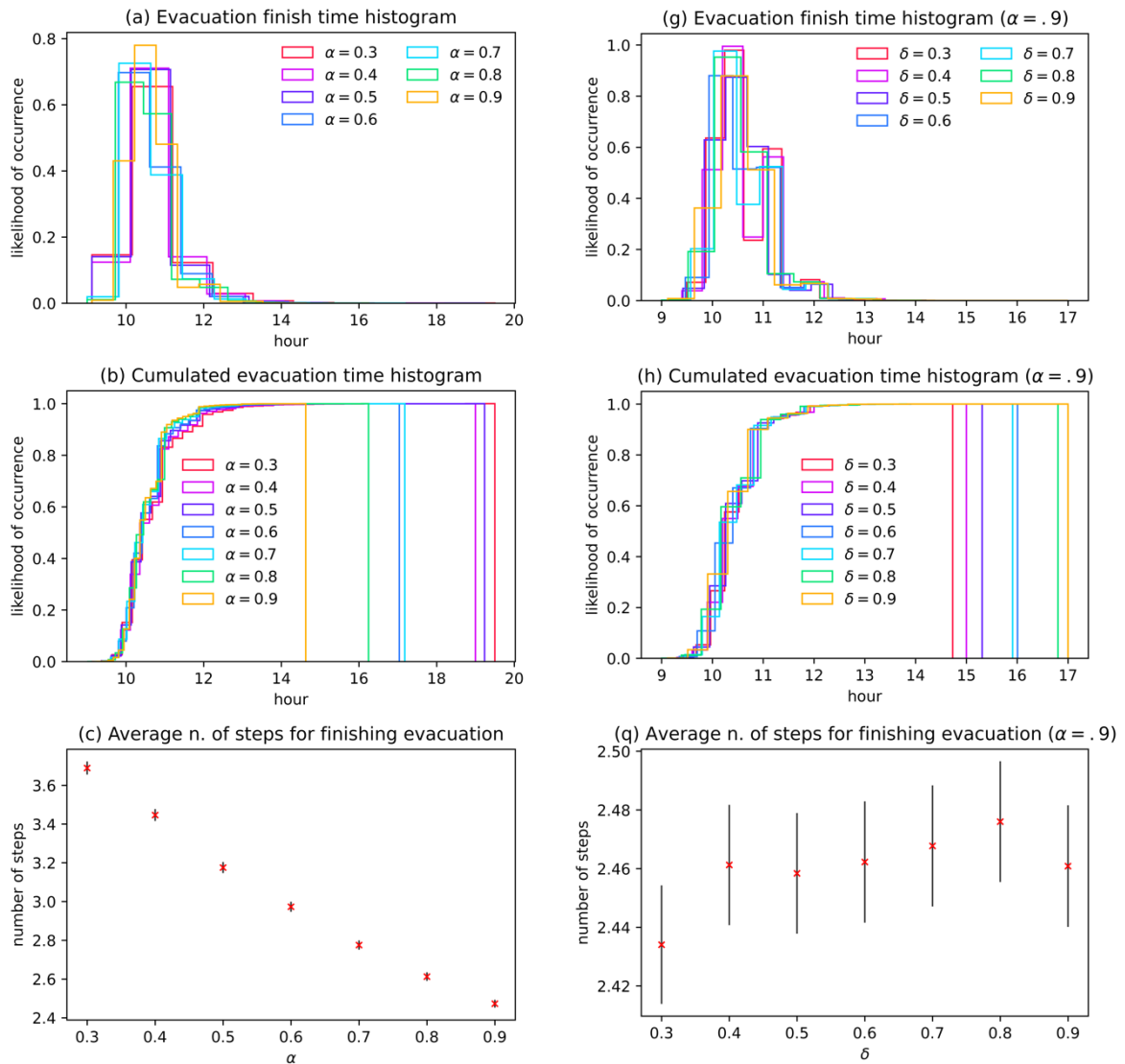


図5. モジュール2でユーザー入力値（パラメータ α と δ ）を変更した際のエージェントの避難行動の変化. α は避難する確率に関するパラメータで、 δ は時間割引率に関するパラメータ（2.2節参照）. (a)と(d)は避難完了時間のヒストグラム, (b)と(e)は累積避難完了時間ヒストグラム, (c)と(f)はエージェントが避難を始める前に選択する避難以外の行動数の平均値（赤）と平均値の95%信頼区間（黒実線）を示す.

シユにおける, 建物情報変更後の買物目的訪問者は, 1日あたりで171人と変更前の訪問者67%程度が減っていることがわかる (b). ただし, 午前中の訪問者数が多い傾向は変わらない.

以上のように, モジュール1を用いることで, ユーザーが任意に設定したシナリオに基づき, 起こりうる人流変化を事前に把握することができる. なお, 擬似人流データは平日の典型的な1日の人流を示すことから休日での買物行動とは異なる可能性が高い.

3.2. モジュール2: 個人異質性を考慮した避難行

動選択

2.2で示した避難行動選択モデルを基にパラメータを変更させた際の避難行動を確認した. エージェントは午前10時から避難が推奨され, 大規模噴火発生時に24時間以内に溶岩流到達可能性のある範囲の外に避難する. 本稿では避難完了は24時間以内溶岩流到達地域範囲外へ到達した時点で避難が完了したとみなした. 午前10時時点で24時間以内溶岩流到達地域範囲外にいるエージェントは避難が完了しているものとみなした. 図5に, 避難選択パラメータのうち, 避難する確率に関するパラメータ α

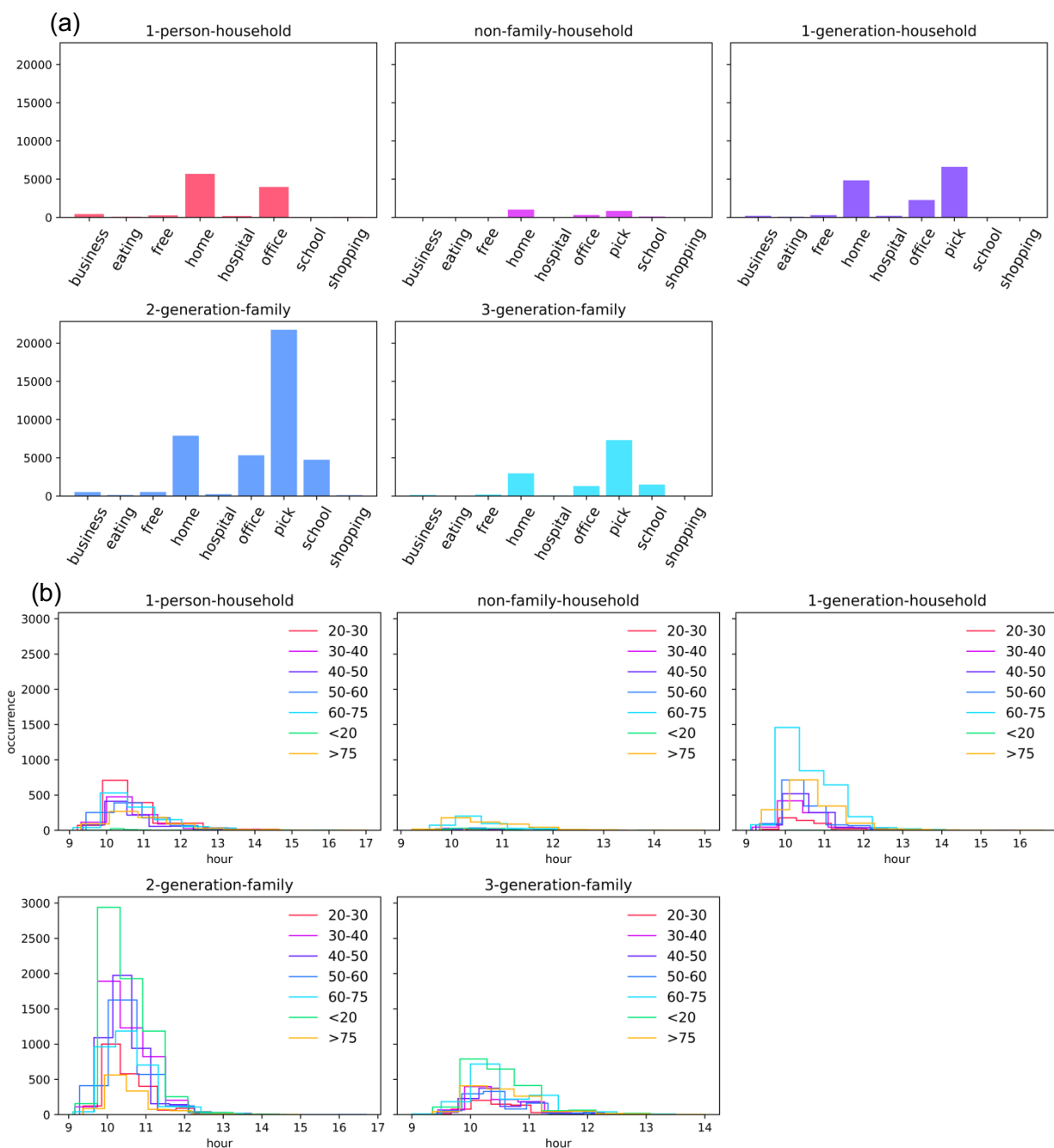


図6 避難開始推奨時刻から避難するまでの間の選択行動の世帯構成タイプ別 (a) と世帯構成タイプおよび年代別の避難完了時刻のヒストグラム (b)

の値を任意に変化させ、それ以外のパラメータは初期値とした場合の結果を示す。図中 (a) は避難完了時刻のヒストグラムを示し α の値が大きくなると早い時間帯で避難を行うエージェントが増える。また、図中 (b) は避難完了時刻の累積ヒストグラムを示す。 α が小さいと、裾野市全体での避難完了時刻が遅くなる。これは、避難する傾向が全体として小さい場合には避難完了までにかかる時間が長くなることを

示す。図中 (c) はエージェントが避難完了までに行った行動の数の平均値で、 α の値が大きくなるほど、避難完了までにとる行動が減り、避難行動を取り始める時間帯が早い傾向があることを示す。また、同様に時間割引率に関するパラメータ δ を任意の値に変更し、その他のパラメータを初期値とした際の結果を図 5 (d) から (f) に示す。 δ が大きいと時間経過に伴う避難確率が大きくなることを示す。図 6 に

パラメータを初期設定値とした場合の擬似人流生成結果を世帯構成タイプや年代別にわけて示す。図 6

(a) はエージェントが t_0 以降避難を選択するまでに選択した行動の分布を世帯構成タイプごとに示す。図 6 (b) は世帯構成タイプ別・年代別の避難完了時間の分布ヒストグラムを示す。ユーザー入力値に基づき市民の行動が生成されていることが確認できる。例えば、二世帯世帯のエージェントは避難行動を選択する前に、家族を迎えに行くケースが最も多く、次いで自宅に滞在したり、帰宅するケースや職場や学校に向かったり、職場や学校で待機するケースも一定程度存在することがわかる。また、図 6 (b) に示すように、二世帯世帯では、午前 10 時前後で避難をすぐ開始するエージェントも多いが、家族を迎えに行くなどその他の行動をとるケースも多いことなどから、午後 11 時から午後 12 時前後で避難を開始するケースも多いことが読み取れる。

以上のように、モジュール 2 を用いることで、ユーザーが任意に設定した個人属性に応じたシナリオに基づき、避難行動選択のパターンを確認することができる。

4. まとめ

本研究では、任意のシナリオをユーザーが手元で実行し、結果を確認することができるような構成要素を持つシミュレーション基盤モジュールを作成した。作成したプロトタイプは、一般的な人流データで分析が困難である個人属性に応じた What-if 分析を行うことができる点に特徴がある。なお、本研究で開発した各モジュールはプロトタイプ段階であり、シナリオに基づく生成人流の評価を行う必要がある。今後の課題としたい。また、ユーザーの用途に応じた利用の容易性や利便性向上に向けた更なる検証が必要である。

謝辞

本研究実施にあたり、静岡県に富士山ハザードマップのデータを貸与していただきました。また、本研究実施にあたっては、東京大学社会基盤学科で開講された少人数セミナーへの参加学生に協力いただき

ました。感謝を申し上げます。

参考文献

- 静岡県 (2022) 富士山ハザードマップ (令和 3 年 3 月改定)
<https://www.pref.shizuoka.jp/bousai/fujisanhazardmap.html> (accessed Aug. 30, 2022.)
- 総務省 (2021) デジタルツインの現状に関する調査研究の請負成果報告書
https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/linkdata/r03_06_houkoku.pdf. (accessed Aug. 30, 2022.)
- Batty, M. (2018). Digital twins. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 45(5), 817–820.
- Batty, M., & Yang, W. (2022). *A Digital Future for Planning*. 146.
- Hasegawa, Y., Sekimoto, Y., Seto, T., Fukushima, Y., & Maeda, M. (2019). My City Forecast: Urban planning communication tool for citizen with national open data. *Computers, Environment and Urban Systems*, 77, 101255.
- Kashiyama, T., Pang, Y., & Sekimoto, Y. (2017). Open PFLOW: Creation and evaluation of an open dataset for typical people mass movement in urban areas. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 85, 249–267.
- Kashiyama, T., Pang, Y., Sekimoto, Y., & Yabe, T. (2022). Pseudo-Pflow: Development of Nationwide Synthetic Open Dataset for People Movement Based on Limited Travel Survey and Open Statistical Data. *SSRN Electronic Journal*.
- Ketzler, B., Naserentin, V., Latino, F., Zangelidis, C., Thuvander, L., and Logg, A. (2020) Digital Twins for Cities: A State of the Art Review. *Built Environment*. 46(4), 547–73.
- Rasheed, A., San, O., & Kvamsdal, T. (2020). Digital Twin: Values, Challenges and Enablers From a Modeling Perspective. *IEEE Access*, 8, 21980–22012.
- Ramu, S. P., Boopalan, P., Pham, Q.-V., Maddikunta, P. K. R., Huynh-The, T., Alazab, M., Nguyen, T. T., & Gadekallu, T. R. (2022). Federated learning enabled digital twins for smart cities: Concepts, recent advances, and future directions. *Sustainable Cities and Society*, 79, 103663.

付録

表 A1. 避難行動を選択しなかった場合の選択行動推定のためのパラメータ β の初期値

世帯構成	$f1$			$f2$			$f3$			$f4$			$f5$		
	$t1$	$t2$	$t3$	$t1$	$t2$	$t3$	$t1$	$t2$	$t3$	$t1$	$t2$	$t3$	$t1$	$t2$	$t3$
避難する (β_1)	0.9	0.9	0.9	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4
家族を迎えに行く (β_2)	n.a.	n.a.	n.a.	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1
その場待機 (β_3)	0.5	0.5	0.8	0.5	0.5	0.8	0.5	0.5	0.8	0.5	0.5	0.8	0.5	0.5	0.8
自宅に戻る (β_4)	0.25	0.35	0.15	0.25	0.35	0.15	0.25	0.35	0.15	0.25	0.35	0.15	0.25	0.35	0.15
職場へ行く (β_5)	0.25	0.15	0.05	0.25	0.15	0.05	0.25	0.15	0.05	0.25	0.15	0.05	0.25	0.15	0.05

註1 : $f1$ = 単独世帯, $f2$ = 非親族世帯, $f3$ = 1 世代世帯, $f4$ = 2 世代世帯, $f5$ = 3 世代世帯

註2 : $t1$ = 6:00-15:59, $t2$ = 16:00-21:59, $t3$ = 22:00-5:59

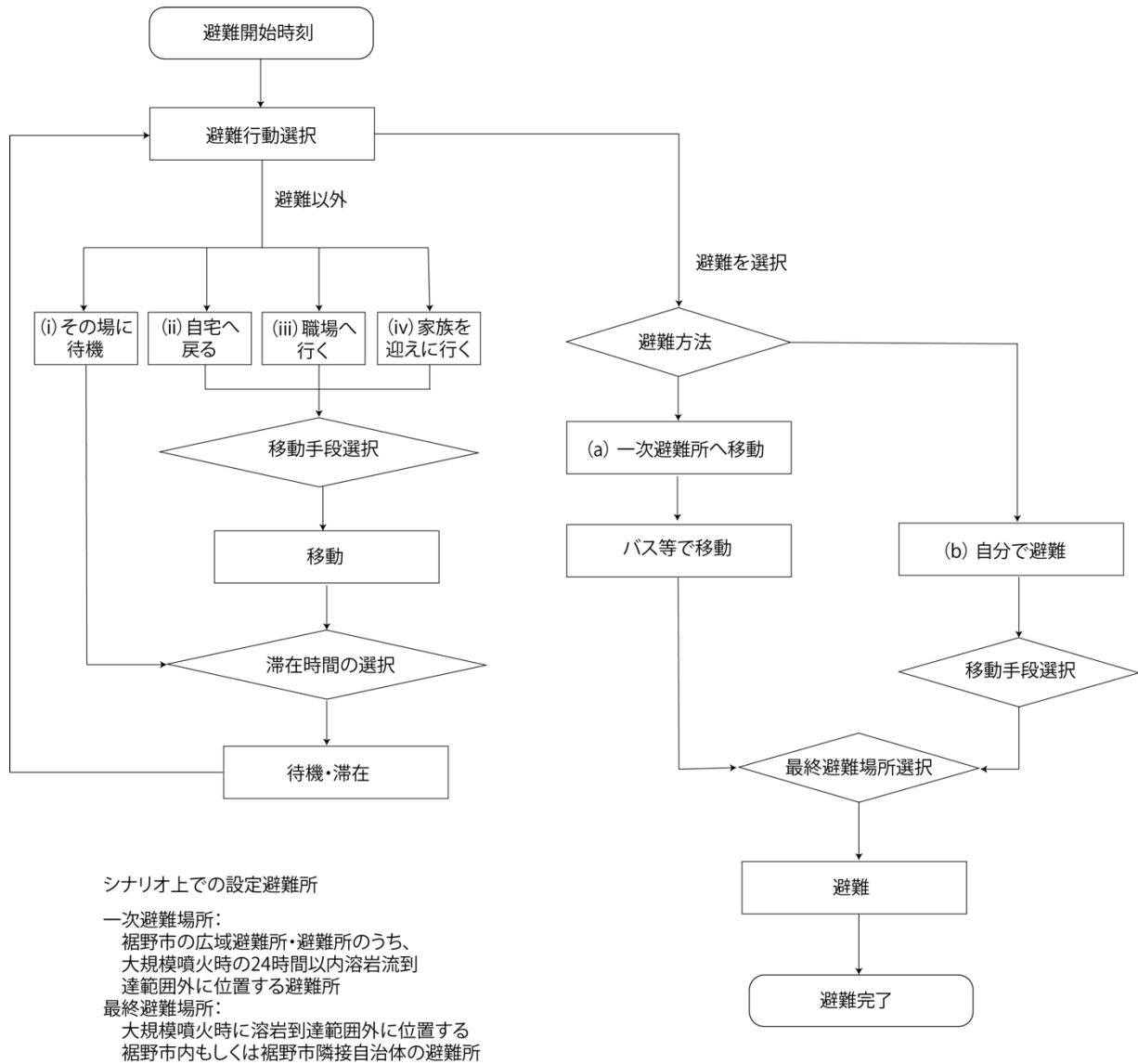


図 A1 モジュール1 の設計のために用いたエージェントの避難行動選択の流れ。本稿でのシナリオ内の設定であり自治体の避難計画等に基づくものではない。