

# AI を用いた災害対策の提案と MAS による効果検証

Proposal of disaster countermeasures using AI and verification of effectiveness by MAS

田鍋 史生<sup>1</sup> 林 晃輔<sup>1</sup> 山崎 仁士<sup>1</sup> 佐藤 里恵<sup>1</sup> 村越 英樹<sup>1</sup> 林 久志<sup>1\*</sup>  
Fumio Tanabe<sup>1</sup> Kosuke Hayashi<sup>1</sup> Satoshi Yamazaki<sup>1</sup> Rie Sato<sup>1</sup> Hideki Murakoshi<sup>1</sup> Hisashi Hayashi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東京都立産業技術大学院大学 Advanced Institute of Industrial Technology

\*Corresponding author: Hayashi Hisashi, hayashi-hisashi@aait.ac.jp

**Abstract** This paper proposes evacuation strategies using AI and multi-agent simulations. In recent years, the importance of disaster management has increased in Japan due to its geographical characteristics and the impact of global warming. In particular, challenges remain in optimizing information sharing and resource allocation during disasters. This paper focuses on the following three approaches: 1. Predicting evacuation behavior during disasters and optimizing countermeasures using generative AI, 2. Improving evacuation efficiency through dynamic matching of those in need of assistance with supporters based on mobility capabilities, and 3. Verifying the effectiveness of evacuation guidance using drones and other technologies based on the disaster situation. Through these approaches, we propose methods to achieve effective countermeasures and risk reduction related to evacuation behavior during disasters, utilizing AI and multi-agent simulations. It should be noted that this paper is not a summary of completed research, but rather a report summarizing the research concept.

**Keywords** ai; multi-agent simulation; disaster countermeasures

## 1 はじめに

東京都立産業技術大学院大学（以下、AIIT とする）では、専門職大学院として、PBL（Project Based Learning）型教育を導入している [1]。本稿では、PBL 型教育の一環として林 PT（Project Team）で取り組んでいる「AI を用いた災害対策の提案とマルチエージェントシミュレーション (MAS) による効果検証」について報告する。

近年、日本の地理的特性や地球温暖化の影響で災害対策の重要性は高まっており、ソフト面では災害時の情報共有やリソース配置の最適化等が課題となっている。国土交通省令和五年度「国民意識調査」において、防災対策・災害時の対応についての重要度に関するアンケートではハード面の対策だけでなく、ソフト面についての対策も重要であると答えた人が多い傾向があった。満足度についても、災害リスク情報の高度化といったソフト面での対策の評価が低い傾向があった。図 1 は、アンケート結果となっている [2]。こうしたアンケートの結果から、デジタル技術を利用した対策が一層必要とされていることが分かる。これらのニーズに対して、AI/MAS を用いたアプローチによる提案を行う。

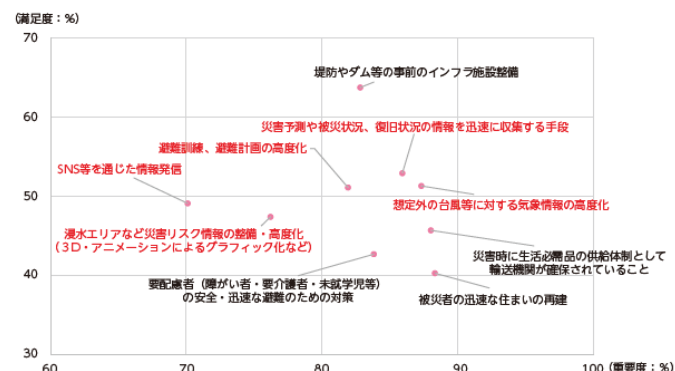


図 1 防災対策・災害時の対応についての重要度・満足度に関するアンケート結果

とくに本プロジェクトでは、マルチエージェントシミュレーションと AI を用いた災害時の避難行動に関連する効果的な対策とリスクの軽減を実現するための新しいアプローチを探る。

本稿の構成は次のようになっている。第 2 章から第 4 章で、各

小テーマについて記述する。第 2 章では、生成 AI を用いた災害時の避難行動の予測と対策の最適化について扱う。第 3 章では、移動能力に基づく支援対象者と支援者の動的マッチングによる避難効率の向上について扱う。第 4 章では、災害被災状況に応じたドローン等による避難誘導の効果検証を扱う。第 5 章で、本研究のまとめと今後の展望について述べる。なお、この論文は完成した研究をまとめたものではなく研究構想をまとめた研究速報である。

## 2 生成 AI を用いた災害時の避難行動の予測と対策の最適化

### 背景

災害時における避難状況を予測するために、マルチエージェントシミュレーションの活用は非常に有効であり、個々のエージェントの行動や選択を詳細に分析することで、災害発生時の避難行動をより正確に予測することが可能となる。正確な避難行動の予測ができれば、それに基づいた適切な対策を事前に立てることができ、避難者の安全性を高め、被害や混乱を最小限に抑えるための実効性の高い対応策を講じることができる。しかしながら、従来のルールベースのマルチエージェントシミュレーションでは、避難時におけるエージェントの心理状態や会話による情報伝達の影響を十分にシミュレートすることができないという課題が存在していた。災害時には、恐怖や不安などの感情や情報伝達等が避難行動に大きな影響を与えるため、これらの要素を考慮しないことは、シミュレーションの現実性を損なう。そこで本小テーマでは、災害時の心理的要因や情報の伝達・共有の状況を、生成 AI を用いたジェネレーションエージェントを用い分析し、シミュレートすることで、従来のマルチエージェントシミュレーションの限界を克服し、より現実的に即した避難行動の予測および予測に基づく避難指示の最適化および避難物資供給などの最適化を目指す。

### 関連研究

従来のルールベースのマルチエージェントシミュレーションから発展させ、エージェントの心理状態や会話による情報伝達の影響をシミュレート可能とするために、マルチエージェントシステムに生成 AI 技術を適用した先行研究については Park らが

ChatGPT で用いられる大規模言語モデル (LLM) を活用して、計画性・社会性など複雑な能力が求められるマルチエージェントシミュレーションの実現を行った [3]。加藤らはマルチエージェントシミュレーションにおける課題を LLM により解決して、環境に応じた意思決定を行うモデルを提案した [4]。松本らは、柔軟な合意形成シミュレーションの実現のため、他者の意見の影響を受けつつも自身の主張を保つ発言生成手法が、LLM で行えるかを検証した [5,6]。これらの先行研究を参考にし、災害時におけるジェネレーティブマルチエージェントシミュレーターを開発する。また、生成 AI 技術についての活用において注意すべき点等に関しては Oscar らの論文があり、これらを参考にする [7]。過去の実際の災害における被害状況や行動に関しては、国内の事例については、2002 年 7 月の台風 6 号豪雨災害の住民行動の分析 [8]、2016 年の熊本地震での震災後の避難行動に関するモデル分析 [9]、2018 年 7 月の豪雨災害における住民避難行動分析 [10]、海外の事例については、フィリピンでの台風ハイエンにおける避難行動に関する現地調査 [11]、バングラデシュで発生したサイクロンコメンに対する効果的な避難対策についての報告 [12]、アメリカ合衆国等における、大規模災害であるハリケーンに対しての避難の意思決定に社会的つながりがどのように影響を与えたかの調査 [13,14]、等を参考に検証を行う。

## 目的

まず、マルチエージェントシステムに生成 AI 技術を適用した、災害時におけるジェネレーティブマルチエージェントシミュレーションを開発する。図 2 は、システム構成の概要図である。このシステムを用いた会話シミュレーターを活用し、避難者の心理状態や会話の内容を分析する。その結果を過去の災害データや文献データと比較して検証する。検証結果に基づいてシステムを改良し、予測精度の向上を図る。次に、避難時における最適な情報提供や避難指示の方法を検証する。このプロセスでは、どのタイミングで、どのような情報を提供すれば、避難者が最も効率的かつ安全に避難行動を取ることができるかを明らかにする。また、避難所の混雑を緩和するため、災害発生時に各住民に対してどのように避難場所への避難を指示すべきかを検討する。これにより、避難者が特定の避難所に集中することを避け、地域全体に避難者を均等に分散させることが可能となる。さらに、避難所での物資不足を解消するため、作成された避難計画を評価し、必要に応じて最適化を行う。この最適化には、物資の効率的な配分と設備の設置が含まれる。これらの取り組みにより、避難所における物資の適切な供給を確保し、避難者が必要な支援を確実に受け取ることができる環境を整える。このように、避難指示、避難計画、物資配分、設備配備の最適化を通じて、災害時の被害を最小限に抑えることを目指す。

## 問題定義

避難所におけるリソース不足を解消し、全体的な避難計画を最適化するためには、住民の避難行動や発生する可能性がある避難時の課題を正確に予測し、効率的な避難計画・指示の策定、避難資源の配分を行う必要がある。これにより、避難所での混雑を最小限に抑え、避難者全員が安全かつ快適に避難できる環境を整備することが可能である。ここで、エージェントは避難者として、

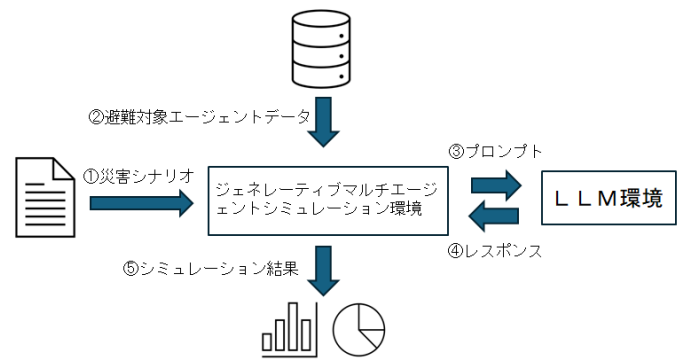


図2 システム構成の概要図

家族等の単位により 1 名から数名で構成されるグループとして分かれている。避難者エージェント  $a$  が実行できるアクションの集合を  $Act(a)$  とすると、 $Act(a) = \{discuss, reflect, evacuate\}$  として、災害が発生すると各エージェントはグループ内の他のエージェントへの相談 ( $discuss$ ) を開始する。シナリオに設定された一般的な情報、各災害シナリオごとの特殊な情報、およびデータベース内のエージェントの個別情報に基づき LLM へのプロンプトを作成し、これに対して LLM が会話形式の内容でレスポンスとして返す。ここで、グループが複数のエージェントで構成される場合はエージェント同士で互いに相談、避難 ( $evacuate$ ) するか否か、避難する場合であり避難所が複数ある場合には、どこに避難するか等を決定する。グループが単数のエージェントで構成される場合は、同様の情報に基づき内省 ( $reflect$ ) を行い自分の意志決定をする。これらの会話の内容および内省における意思決定は、会話シミュレーターに表示される。シミュレーションによる結果は避難状況などの結果レポートとして出力される。また、会話の内容等はテキストログとしてデータベースに保存され、テキストマイニングなどの分析による検証を行えるようにする。災害シミュレーターの予測精度に関しては、過去の災害との比較による一致で比較する。これは、過去のデータによる実際の各種数値とシミュレーション結果との差分により評価する。シミュレーションの結果と実際の値の差異は、例えば避難者数であれば、 $D$  を差異、 $S$  をシミュレーションによる予想避難者数、 $A$  を論文等による実際の値とすると、

$$D = |S - A| \quad (1)$$

で表すことができるので、これらの値の最小化を目指す。避難率は  $R$  として、実際の避難者数を  $E$ 、想定避難対象者数を  $T$  とすると、

$$R = \frac{E}{T} \quad (2)$$

で表されるので、この値が 1 になるように調整する。避難所の適正な収容避難者数に対する避難者の最適化については、各避難所における実際の避難者数と適正な収容避難者の差分の合計を避難者収容人数差分数  $D_{sum}$  として、 $N_a$  ( $a = 1, 2, 3, \dots, n$ ) を各避難所に避難した人数、 $C_a$  ( $a = 1, 2, 3, \dots, n$ ) を各避難所の適正収容避難者数とすると、

$$D_{sum} = \sum_{i=1}^n |N_i - C_i| \quad (3)$$

で表されるので、この  $D_{sum}$  の値の最小化を検討する。これらの評価値を、会話シミュレーターでの情報伝達内容等やシミュレーション結果から検証することにより、行動予測に基づく訓練計画や情報共有等の施策を通じて、どのように住民の避難行動が変化するかを検証する。例えばエージェントから女性のプライバシーに対する配慮を危惧する発言が多数発せられた場合、避難所に女性専用の区画を設けるなどの対応を行った際に、その対策が避難率の向上や避難先の選択にどの程度影響するかを検証する。この検証結果に基づいて、避難計画の最適化を検討する。

### 解決手法

生成 AI を用いた会話シミュレーターを活用し、災害時におけるエージェント間の情報伝達や意思決定プロセスの精度向上を図る。このシミュレーターでは、地震や洪水、大規模火災、台風等の様々な仮想災害シナリオを設定して被災者の情報伝達や意思決定に基づく避難行動をシミュレートし、その結果を詳細に分析する。図 3 は、シミュレーターの実行画面である。その後、シミュレーション結果を分析し、過去の様々な実際の災害データや文献と照らし合わせることで、シミュレーション結果が現実的かつ信頼性のあるものであるかを検証する。先行研究での状況とも比較し、災害時、緊急時に対応したシステムの改良を行うことにより、一致率の向上を図る。この検証過程において、シミュレーターによる予測精度の向上が確認された後に、避難指示や物資準備のプロセスを最適化し、実際の災害対応計画に反映させることを目指す。これにより、避難所の確保や支援対策がより効果的に行えるようになることを目指す。



図 3 シミュレーターの画面

### シミュレーションの内容

仮想災害シナリオの例として、災害の種類、発生時期、発生地域、被災・避難人数、備蓄食料数や設備の種類が異なる複数の避難所等を設定し、それぞれの特徴や収容能力を定義する。次に、災害発生後にエージェント間でどのような情報のやり取りがなされ、各エージェントがどのような判断基準に基づいて避難行動を決定するかを詳細に検証する。この検証では、ジェネレーティブマルチエージェントシミュレーションでの会話シミュレーターによるエージェント同士の会話内容や、受け取った情報、避難所の混雑状況や食料や衣料品等の必要物資の備蓄状況を考慮に入れ、最も適切な避難指示や情報提供の方法を見出す。図 4 は、各エージェントの会話シミュレーションの相談内容を表示している画面である。図 5 は、グループを構成するエージェントが一人のとき

に内省を行い、その内容を表示している画面である。また、公共放送や緊急速報、SNS などによる情報提供や避難指示がエージェントの行動にどのような影響を与え、避難状況の改善に寄与するかを包括的に検証し、最適な災害対応策の提案を目指す。



図 4 会話シミュレーターによる相談内容の画面

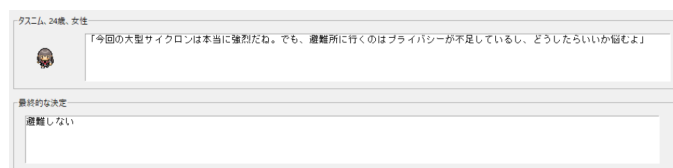


図 5 会話シミュレーターによる内省内容の画面

### 評価軸

1. 過去の災害データとシミュレーション結果との差分：災害シミュレーションの精度を評価するため、過去に発生した災害データと類似した条件下における、シミュレーション結果の差分を検証する。この差分が小さいほど、シミュレーションが現実的な状況を正確に再現できていることを示し、以後の災害対応策の信頼性が高まると考えられる。また、差分の発生した要因などを、エージェント間の会話や意思決定プロセスから詳細な分析を行い、シミュレーションモデルの問題点や改善すべきポイントを特定して、さらなる予測精度向上に繋げることが可能となる。

2. 避難率：災害発生時における住民の避難行動を評価するため、実際に避難を行った人々の割合を測定する。この避難率は、適切な避難指示が行われたか、また住民が正確な状況判断や情報に基づき、迅速かつ安全に避難できたかを評価する指標である。実際の災害発生時において、避難者の保護を効果的に実施するためには、避難所に集まった住民の割合を正確に把握することが重要である。この情報は、避難所内での支援活動や物資の適切な配分を行う際に不可欠であり、さらに避難率の地域別や時間別の分析により、指示のタイミングや地域特性に応じた避難行動の違いを把握し、今後の改善点を見つけることができる。



3. 避難者収容人数差分:避難所ごとの混雑状況、空き状況（余裕度）を評価し、どの程度の避難者が各避難所に集中したか、あるいは無駄な施設が無いかを分析する。この値が低ければ、避難者が適切に分散され、避難所の負荷が適切に管理されていることを示す。また、避難所の収容能力に対して過剰に避難者が集中している場合、その要因を特定して避難指示計画に反映させること等が求められる。避難所の混雑状況を予測することで、追加の避難所の設置や、他の避難場所への誘導といった対応を可能とする。

### 3 移動能力に基づく支援対象者と支援者の動的マッチングによる避難効率の向上

#### 背景

近年、災害時における避難対策の重要性がますます強調されており、特にショッピングモールなどの大規模な室内施設では、迅速かつ安全な避難が求められている。これらの施設では多様な人々が利用しており、身体障害者や負傷者のように自力での避難が困難な要支援者も少なくない。そのため、こうした要支援者が迅速に避難できるよう、適切な支援を提供することが避難計画の中で重要な要素となっている。しかし、実際の災害時には、適切な支援者が迅速に選定されないことが多く、これが要支援者の避難遅延や避難経路の混雑を引き起こし、全体の避難効率の低下に繋がる可能性がある。特に、従業員やスタッフが支援者としてどのように機能すべきか、そしてその役割が避難効率にどのような影響を及ぼすのかについての研究は十分に進んでいない。これまでの多くの実証研究は、避難経路の最適化や避難誘導の効果に焦点を当てており、避難者の安全な移動を確保するための物理的な環境整備や情報提供が主なテーマとなってきた。しかし、要支援者に対する個別の支援や、支援者としての従業員の役割に関する研究は依然として不足しており、この分野における知見の蓄積が求められている。本小テーマでは、このギャップに着目し、災害時における支援者と要支援者の動的マッチングを通じて避難効率を向上させるためのアプローチを提案する。特に、支援者としての従業員の役割を明確にし、その最適な活用方法を検討することを目的とする。

#### 関連研究

避難効率の向上に関する研究は、特に支援が必要な避難者に焦点を当てたものが増加しており、ますます注目を集めている。ある研究では、異なる能力を持つ人々の避難効率を支援比率に基づいて分析し、支援者の効果的な配置が避難成功にどのように影響するかを明らかにしている [15]。また、別のシミュレーション研究では、高齢者施設における職員の避難行動を検討し、支援者の役割が避難効率に与える影響を示している [16]。さらに、NetLogo を用いた多層階建物での避難シミュレーションや、駅コンコースにおける行動シミュレーションでは、建物内での避難経路の選択や、歩行者の滞留、混雑が避難時間に与える影響が詳細に分析されている [17,18]。特に、複数階の建物からの避難行動をシミュレーションした研究では、避難者の動きや経路選択が避難効率にどのように影響するかを示している [19]。日本国内でも、大規模な商業施設での従業員による避難支援の研究が進んでおり、

従業員の役割が避難全体の効率に与える影響が明らかになっている [20]。最新の研究では、エージェントベースのモデルを用いて、複雑な避難行動をシミュレーションし、最適な避難計画の策定に役立てる手法が示されている [21]。これらの研究は、避難効率向上に向けた多様なアプローチを提供しているが、特に支援者と要支援者の動的マッチングに焦点を当てた研究は依然として不足している。本研究では、このギャップを埋めるため、支援者を動的にマッチングさせる新しいアプローチを提案し、商業施設内での避難効率をさらに高めることを目指している。

#### 目的

本小テーマの目的は、ショッピングモールなどの大規模商業施設において、災害発生時に要支援者が迅速かつ安全に避難できるよう、従業員を支援者として最適にマッチングする方法をマルチエージェントシミュレーションによって分析することにある。具体的には、身体障害者や負傷者など、自力での避難が困難な要支援者と、彼らを支援する従業員との間で、効果的なマッチングパターンを探索する。本小テーマでは、要支援者の位置や状態、そして支援者である従業員の位置や移動能力を考慮したアルゴリズムを構築し、災害時における迅速かつ効果的な支援が実現できるかをマルチエージェントシミュレーションにより検証する。このシミュレーションを通じて、避難時間の短縮と避難経路の混雑緩和を目指し、従業員が支援者として積極的に活躍できる状況を創出することを目標とする。さらに、これにより施設全体の避難効率が向上し、要支援者を含むすべての避難者が安全に避難できる環境を整えるための実践的な知見を提供することを目指す。

#### 問題定義

災害発生時における大規模商業施設内での避難効率を向上させるため、特に身体障害者や負傷者など、自力での迅速な避難が困難な要支援者に対して、適切な支援を提供する方法を検討する必要がある。要支援者には、負傷によって全く移動ができない人や、移動は可能であるものの、歩行速度が遅く通常の避難ペースには追いつけない人が含まれる。これらの人々は、迅速に支援を行わなければ、避難が遅れることにより避難経路の混雑が生じたり、避難全体の効率が低下するリスクがある。災害発生時、要支援者に対して迅速かつ適切な支援を行うことは、避難の成否を左右する重要な要素である。しかし、現状では、支援者を迅速に選定し、要支援者に対して適切にマッチングする仕組みが十分に整備されていないことが多い。このため、支援の遅れや避難経路の混雑が頻繁に発生し、結果として避難全体の効率が低下する可能性が高い。本テーマでは、この問題を解決するため、要支援者と支援者の最適なマッチング方法を提案し、その効果をシミュレーションによって検証することを目指す。要支援者の位置や状態、支援者の移動能力や現在の位置などの要素を考慮した動的なマッチングを実施し、これにより災害時の避難効率を大幅に改善することが期待される。問題の具体化として、商業施設にいるすべての人の集合を  $P$  とし、その中で要支援者を  $A \subset P$ 、支援者を  $B \subset P$  と定義する。各要支援者  $a \in A$  に対して、最適な支援者  $b \in B$  を割り当てることで、全体の避難時間の総和  $\sum_{p \in P} etime(p)$  を最小化することが目標である。ここで、 $etime(p)$  は各人  $p \in P$  が避難を完

了するまでにかかる時間である。

$$\min \sum_{p \in P} etime(p) \quad (4)$$

## 解決手法

災害発生時における要支援者と支援者の適切なマッチングを実現するため、次の 3 つの手法を提案する。まず、「要支援者の検知」を行う。カメラ画像解析システムやセンサーを活用して、要支援者の位置、移動速度、および状態をリアルタイムで監視する。これにより、負傷者や支援が必要な人々を迅速に検知し、彼らの正確な位置を把握することが可能になる。次に、「支援者と要支援者のマッチング」を行う。支援者の移動能力や現在の位置を考慮したアルゴリズムを用いて、最適な支援者を迅速に選定する。これにより、要支援者に対して最も適切な支援者を割り当てることができ、全体の避難効率を向上させることが期待される。最後に、「支援者への支援指示」を行う。選定された支援者には、スマートフォンや専用の通知デバイスを通じて、要支援者の位置や状態、避難経路の情報をリアルタイムで通知する。これにより、支援者は迅速に行動を開始し、要支援者へのサポートを迅速に提供することが可能となる。これらの手法を通じて、要支援者が迅速に適切な支援を受けられるようになり、適切な支援者の選定が効率的に行われることで、全体の避難効率を大幅に向上させることが可能となる。

## シミュレーションの内容

ショッピングモールで災害が発生した際の避難シナリオをマルチエージェントシミュレーションによって再現する。このシミュレーションでは、従業員が避難支援者としての役割を担い、要支援者と共に避難を行う状況を想定している。具体的には、カメラ画像解析システムやセンサーを用いて、要支援者をリアルタイムで動的に検知する。検知された要支援者の位置や状態に基づき、最適な支援者が迅速に選定され、マッチングが行われる。選定された支援者は、要支援者のもとへ速やかに移動し、サポートを行いながら避難を開始する。さらに、シミュレーションでは、支援者と要支援者が共に最適な避難経路を通じて移動し、全体の避難時間を短縮する過程を詳細に再現する。この過程において、避難者の動きや支援活動の効果を定量的に評価し、様々なマッチングパターンを検討する。これにより、最も効果的な支援者の選定方法を分析し、災害時の避難効率を最大限に高める手法を見出すことを目指す。図 6 に示されているフロアマップは、NetLogo を用いてシミュレーションしたショッピングモール内部の避難状況を表している。青色のエリアは商業施設の構造を示し、赤いアイコンは要支援者、緑色のアイコンは支援者を表している。このシミュレーションでは、支援者が要支援者の位置を把握し、適切な避難経路を通じて避難を支援する様子が視覚的に再現されている。各支援者は、最適なルートを選択しながら要支援者と共に移動するため、全体の避難効率が向上する過程を検証することが可能である。

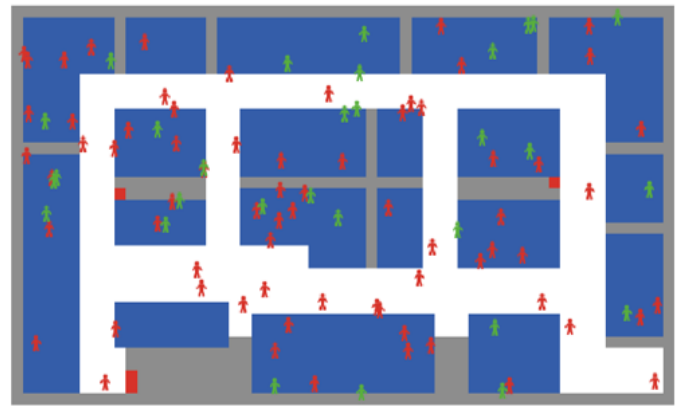


図 6 NetLogo によって作成されたフロアマップ

## 評価軸

1. 避難完了時間の総和：この評価軸は、災害発生時におけるすべての避難者が避難を完了するまでにかかる時間の総和を評価するものである。特に、支援が必要な要支援者に対して適切な支援者を迅速に割り当て、全員の避難時間を最小化することが求められる。避難完了時間は、避難計画の実効性を判断する重要な指標であり、施設内にいる全員が無事に避難するまでの時間を短縮することが避難効率の向上に直結する。評価式としては、避難者全員の避難時間  $etime(p)$  を合計したものをを用いる。

$$\sum_{p \in P} etime(p) \quad (5)$$

この評価軸を最小化することが、研究全体の目的と一致しており、シミュレーションにおいては、全体の避難時間を減少させる最適な支援者と要支援者のマッチング方法を検証する。

2. 支援開始までの時間：この評価軸は、要支援者が支援を受け始めるまでにかかる時間を測定するものである。具体的には、災害発生後、各要支援者  $a \in A$  が支援者  $b \in B$  とマッチングされ、支援者が実際に要支援者に到達して支援を開始するまでの時間を評価する。この指標は、支援者と要支援者の動的なマッチングアルゴリズムの効果を測る重要な要素であり、支援開始の迅速さが避難の成否に大きな影響を与える。特に、大規模な商業施設のような複雑な環境では、支援が遅れることで避難経路が混雑し、避難全体が遅れるリスクがあるため、この評価軸は重要である。支援開始時間を短縮することで、要支援者が迅速に支援を受け、避難全体の効率が向上する。シミュレーションにおいて、この指標を用いて支援者と要支援者の最適なマッチングが実現されているかを評価し、改善の余地を探る。

## 4 ドローンによる災害被災状況に応じた避難誘導の効果検証

### 背景

災害が発生した際、安全な場所で被災するとは限らない。また、災害そのものによる直接的な被害だけではなく、その後の時間経過と共に発生する二次災害からも身の安全を確保しなければならない。そのため、災害発生後は早急に広域避難場所などの安全な場所への避難が必要であると考えられる。このとき、避難するた



めには安全な場所への避難経路およびその経路上における災害発生状況の把握が重要となってくる。しかし、災害発生時は設備の被災あるいはアクセスの集中などにより、インターネットなどの通信網が正常に利用できない恐れがある。このように避難経路や災害状況が把握できない場合、安全な場所への避難が遅れ、二次災害に巻き込まれるリスクも増加してしまうと考えられる。これらの理由から、安全に避難するためには被災状況に応じた避難誘導が必要であると考えられる。

### 関連研究

災害の発生状況に応じた避難誘導を行うにあたり、人の手ですべて実現するためには、状況把握のために災害現場を目視等で確認しなければならず、そのための人員や災害現場への配置時間を要してしまう。さらには誘導者自身が二次災害に巻き込まれるリスクがあることも考慮すると、安全な手段とは言い切れない。これらの課題に対応するために、近年ではドローン（UAV）の活用が検討されており、シミュレーション環境での検証を中心に様々な取り組みが行われている。

まず、UAV を用いて複数のターゲットを検出する研究としては、Haythem らの強化学習を利用した事例 [22] のほか、多数の研究事例がある。UAV による災害への直接的な対応としての活用においては、Blais らは UAV 群のコントロール方法として強化学習を利用し、山火事の消火活動のため出火地点に飛行させるというシミュレーションを行っている [23]。

また災害情報の収集としては、森らはシミュレーション上で深層強化学習を利用して複数の UAV を協調させることで、広域の情報収集のための効率的かつ網羅的な探索行動則を獲得した [24]。Xue らは山火事の発生地点を早期に特定するため、メタヒューリスティックのひとつであるアントコロニーアルゴリズムを改良して複数 UAV に搭載し、その探索効果をシミュレーションで確認した [25]。

さらに避難誘導の検討として、鈴木らはシミュレーション空間において、避難者が着装する AR マーカーをドローンに認識させて誘導シミュレーションを行い、その実現可能性を確認した [26]。Katayama や Takahashi らは津波からの避難を想定し、エージェント型 IoT デバイスを連携させて災害状況を把握し、その情報に基づいて複数の UAV で避難誘導を行う避難誘導支援システムの開発を目指しており、実機による検証飛行も行っている [27–31]。Kambayashi らは山岳地帯での土砂崩れによる避難を対象として、2 種類の UAV を用途で分け、それらを連携させて避難支援を行うシステムを提案しシミュレーションを行っている [32]。

### 目的

本小テーマでは災害の発生状況に応じた避難誘導方法を提案し、マルチエージェントシミュレーションによってその効果の検証を行うことを目的とする。図 7 に今回提案する避難誘導のイメージを示す。具体的な方法を検討するにあたり、地上に設置した機器や設備を用いた誘導方法では、災害によってそれらが物理的な被害を直接被ってしまった場合、あるいはそれらに物理的な被害がなくても電源や通信経路が遮断された場合、避難誘導に利用できなくなる恐れがある。そのため関連研究を踏まえ、本小テーマにおいても同様にドローンを活用する方法を検討する。

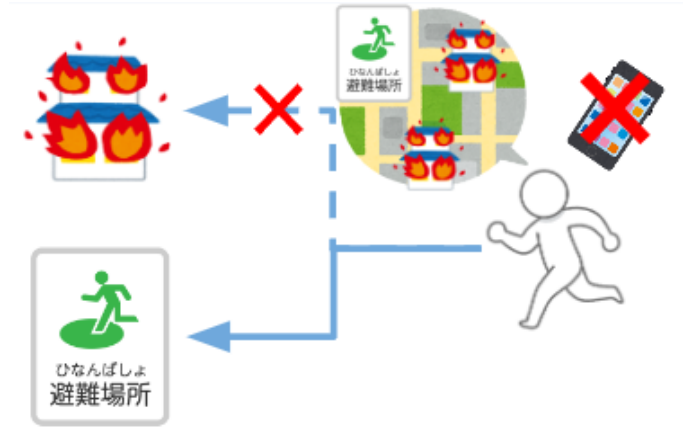


図 7 ネットワーク通信に依存しない災害状況に応じた避難誘導のイメージ

### 問題定義

関連研究における避難誘導の方法として、ほとんどはドローンが避難者を探索したうえで、その滞留場所から避難場所へ避難者を先導するという誘導方法となっている。この誘導方法では、誘導する避難者の数が多い、あるいは避難者を探索する範囲が広いといった場合、ドローンは避難者の滞留位置と避難場所を何度も往復する必要がある。これらは避難者全体の避難時間などの観点から考慮すると、決して効率面で優れた避難とは呼べないと考えられる。また避難誘導が間に合わず、二次災害に巻き込まれてしまう可能性も考えられる。

そのため、本小テーマではドローンが避難者を探索したうえで、避難所まで誘導するのではなく、避難者に現在地や避難所などといった地理情報およびその周辺の災害状況を避難者に直接提供することを提案する。これにより取得情報に基づいて避難者自身で避難を行うことで、エリア内の避難者全体の避難時間の短縮と避難完了者数の増加を目指す。

今回の前提条件として、今回は歩行者の避難誘導を対象とするため自動車や車道の実在は考慮しない。またドローンのバッテリーは有限であり、一定時間飛行（移動）すると充電のために拠点などに強制的に帰還することを制約条件として加える。

このとき、避難完了者数を  $n$ 、各避難者ごとの避難時間を  $t_a$  ( $a = 1, 2, 3, \dots, n$ ) とすると、避難者全体の合計避難時間  $T_{sum}$  は以下の式で表される。

$$T_{sum} = \sum_{i=1}^n t_i \quad (6)$$

また、避難完了者において一人あたりの平均避難時間  $T_{avg}$  は以下の式となる。

$$T_{avg} = \frac{T_{sum}}{n} \quad (7)$$

### 解決手法

本来ドローンを飛行させるためには遠隔で操縦する操縦者が必要であるが、災害発生時にそのような人員を確保することは現実的ではないため、自律飛行による飛行を想定とする。本小テーマで提案する具体的なドローンによる避難誘導方法は以下のとおりである。

まず、災害エリア内に複数台の自律飛行ドローンを飛行させ、エリア内の災害状況および避難者の探索を行う。具体的には、こ

これらの探索を郡全体で効率的に実行させるため、各ドローンには専用のアルゴリズムなどを搭載する。このアルゴリズムの候補としてはメタヒューリスティックアルゴリズムまたは強化学習の利用を検討している。また、災害発生現場を発見した場合はその位置情報を一定範囲内に存在する他のドローンへ共有するための通信機能を有するものと設定する。

次に、ドローンが避難者を発見した場合、ドローンからその避難者に向けてエリア内の避難場所および最新の災害発生場所を伝達する。この具体的な伝達方法として、今回は各ドローンが移動体基地局機能を有する、あるいは Bluetooth 規格による送信機能を有するなど想定し、避難者が保有するスマートフォンへ情報を配信できるものとする。

そして、避難者はドローンから送信される情報より、最短かつ安全な経路で移動できる避難場所を判断し、各自で避難を実施するものとする。

これらの内容について、避難誘導ドローンの集合を  $d$ 、避難者の集合を  $e$  とすると、それぞれが実行できるアクションの集合  $Act(d)$  と  $Act(e)$  は以下となる。

$$Act(d) \ni fly, charge, find, inform \quad (8)$$

$$Act(e) \ni explore, evacuate \quad (9)$$

$Act(d)$  について、 $fly$  はシミュレーション空間内の自律飛行、 $charge$  は充電、 $find$  は二次災害箇所などの検知、 $inform$  はドローンの位置  $(x, y)$  の周辺（半径  $r$  メートル以内）の避難者が保有するスマートフォンおよび他ドローンへの情報通知をそれぞれ表す。

また  $Act(e)$  について、 $explore$  は避難所までの経路および二次災害発生状況を把握していない状態での周辺の徘徊、 $evacuate$  は避難誘導ドローンから情報を取得したうえでの避難所までの移動をそれぞれ表す。

## シミュレーションの内容

本小テーマで提案する避難誘導方法を検証するための大まかなシミュレーション内容は以下のとおりである。

まず、実在する日本国内の都市の一部範囲について、広域避難場所等も含めてマルチエージェントシミュレーションの環境上に設定する。

次に、その都市の防災計画などで想定されている災害状況および時間経過に伴い発生する二次災害もシミュレーション上に設定する。今回は大規模地震によって建物の倒壊に伴う道路の閉鎖および家屋の出火と延焼を想定し設定する。

そのうえで、この環境下において避難者および提案するドローンをマルチエージェントとしてそれぞれ複数生成する。

そして提案手法の有無を分けてシミュレーションを行い、提案手法の効果を検証する。

## 評価軸

本小テーマにおいては、提案する避難誘導方法の有無によって 2 つの項目の比較を行い、その効果を評価するものとする。具体

的な項目は問題定義の節にて扱った以下の項目である。

1. 避難を完了することができた避難者エージェントの数  $n$
2. 避難が完了した避難者エージェントの避難時間（合計時間  $T_{sum}$  および平均時間  $T_{avg}$ ）

## 5 まとめ

本研究では、マルチエージェントシミュレーションを用いた災害時の避難行動に関連する効果的な対策とリスクの軽減を実現するための方策を研究テーマとしている。今後は、マルチエージェントシミュレーションの実装を進め、各サブテーマの提案手法の有効性を検証していく。

第 2 章では、災害時の避難行動の予測と対策の最適化をテーマとした。今後、生成 AI を用いたジェネレーティブマルチエージェントシミュレーションによるエージェントの心理状態やエージェント同士の会話などの結果を分析することにより、避難指示の方法や物資の配分、避難施設・設備等を最適化し、効果の検証を行う予定である。

第 3 章では、災害時における大規模商業施設内での要支援者と支援者の動的マッチングによる避難効率の向上について述べた。今後は、マルチエージェントシミュレーションを用いて提案手法の有効性を検証し、避難計画への応用を目指す予定である。

第 4 章では、災害発生状況下においても安全に避難できる誘導方法の検討について述べた。本小テーマではドローンによる避難誘導を想定しており、今後はマルチエージェントシミュレーションでその効果を検証する予定である。

## 参考文献

1. 東京都立産業技術大学院大学. PBL (Project Based Learning) 型教育. Available: <https://aiit.ac.jp/education/pbl/> (Accessed: 2024-04-10).
2. 国土交通省 令和 5 年度国土交通白書「国民意識調査」, 図表 I-1-1-17 防災対策・災害時の対応に関する重要度・満足度 Available: <https://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/r04/hakusho/r05/html/n1114000.html> (Accessed: 2024-10-08).
3. Park JS, O' Brien J, Cai CJ, Morris MR, Liang P, Bernstein MS. Generative agents: Interactive simulacra of human behavior. Proceedings of the 36th annual acm symposium on user interface software and technology. 2023; 1-22.
4. 加藤新, 服部宏充, 吉添衛, 山本友輔. LLM に基づくエージェントモデルの MAS への導入. 人工知能学会全国大会. 2024. doi:10.11517/pjsai.JSAI2024.0\_2F4GS504
5. 松本宇宙, 白松俊, 岩田崇, 水本武志. GPT-3.5 を用いた社会問題に関する合意形成シミュレータの試作および改善手法の検討. 電子情報通信学会 合意と共創研究会 研究報告. 2023. doi:10.11517/jsaisigtwo.2023.CCI-011\_09
6. 松本宇宙, 白松俊, 岩田崇, 水本武志. LLM を用いた議論シミュレータのための仮想市民エージェントの意見変容制御手法の試作. 人工知能学会全国大会論文集. 2024. doi:10.11517/pjsai.JSAI2024.0\_4R1OS8a05
7. Trespalacios OO, Peden AE, Hunter TC, Costantini A, Haghani M, Rod JE, et al. The risks of using ChatGPT to obtain common safety-related information and advice. Saf Sci. 2023;167. doi:10.1016/j.ssci.2023.106244
8. 牛山素行, 今村文彦, 片田敏孝, 吉田健一. 高度防災情報時代における豪雨災害時の住民行動 - 2002 年 7 月台風 6 号豪雨災害を事例として -. 水文・水資源学会誌. 2004;17 巻: p.150-158. doi:10.3178/jjshwr.17.150
9. 吉田護, 柿本竜治, 畑山満則, 阿部真育. 震災後の避難行動に関するモデル分析 - 2016 年熊本地震の事例を通じて -. 土木学会論文集 D3 (土木計画学). 2023; 土木計画学研究・論文集 第 35 巻 (特集): I\_249-I\_258. doi:10.2208/jscejpm.74.I\_249

10. 高木朗義, 杉浦聡志, 森啓明, 岩田秀樹. 平成 30 年 7 月豪雨災害における住民避難行動分析 – 岐阜県を事例に –. 自然災害科学. 2019;38 巻: p. 133-151. doi:10.24762/jndsj.38.S06\_133
11. 黒部笙太, 高木泰士. 高潮浸入時の避難行動に関する現地調査と浸水・避難統合数値シミュレーションの構築. 土木学会論文集 B3 (海洋開発). 2018;74: I\_779-I\_784. doi:10.2208/jscejoe.74.I\_779
12. Swarnali C, Akihiko H. Evacuation behavior: Why do some people never evacuate to a cyclone shelter during an emergency? A case study of coastal bangladesh. Journal of Disaster Research. 2020;15 巻. doi:10.20965/jdr.2020.p0481
13. Metaxa-Kakavouli D, Maas P, Aldrich DP. How social ties influence hurricane evacuation behavior. Proc ACM Hum Comput Interact. 2018;2: 1–16.
14. Collins J, Ersing R, Polen A, Saunders M, Senkbeil J. The effects of social connections on evacuation decision making during Hurricane Irma. Weather Clim Soc. 2018;10: 459–469.
15. Li K, Fu W, Cai J, Qu L, Yao T, Lin X. Analysis of evacuation efficiency for differently-abled people in multi-layered buildings based on assistance ratio. Applied Sciences. 2023;13: 12554. doi:10.3390/app132312554
16. Lim H, Lee H, Hwang J-H. Multi-agent simulation on staff evacuation behavior in elderly nursing home fire emergencies. Buildings. 2023;13: 400. doi:10.3390/buildings13020400
17. Lestari D, Sabri A, Handhika T, Murni. The simulation of evacuation from multistorey building using NetLogo. IOP Conf Ser: Mater Sci Eng. 2020;854: 012060. doi:10.1088/1757-899X/854/1/012060
18. 大内一昇, 森下正道, 林田和人, 佐野友記. NetLogo を用いた駅コンコースにおける行動シミュレーション その 2 歩行者の行動シミュレーター (DFMAPs) を用いたシミュレーションによる空間評価. 日本建築学会情報システム技術論文集. 2016;pp.141-144 Available: <http://news-sv.aij.or.jp/jyoho/s1/proceedings/2016/pdf/H16.pdf> (Accessed: 2023-10-14).
19. Fang H, Lv W, Cheng H, Li X, Yu B, Shen Z. Evacuation optimization strategy for large-scale public building considering plane partition and multi-floor layout. Front Public Health. 2022;10. doi:10.3389/fpubh.2022.847399
20. 有友春樹, 白木渡, 井面仁志. 大型商業施設における避難誘導に関する危機管理対策の検討. 安全問題研究論文集. 2008;3. Available: <http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00913/2008/03-0037.pdf> (Accessed: 2023-10-12).
21. Smith J, Doe J. Simulating the effects of gate machines on crowd traffic based on the modified social force model. Mathematics. 2023;11: 780. doi:10.3390/math11030780
22. Salameh HB, Hussienat A, Alhafnawi M, Ajlouni AA. Autonomous UAV-based surveillance system for multi-target detection using reinforcement learning. Cluster Comput. 2024;27: 9381–9394. doi:10.1007/s10586-024-04452-0
23. Blais M-A, Akhloufi MA. Drone swarm coordination using reinforcement learning for efficient wildfires fighting. SN Comput Sci. 2024;5. doi:10.1007/s42979-024-02650-6
24. 森裕太, 荒井幸代. 広域情報収集に向けた自律 UAV の分散協調型飛行方策の獲得. 人工知能学会全国大会論文集. 2022;JSAI2022: 3N3GS1002–3N3GS1002. doi:10.11517/pjsai.JSAI2022.0\_3N3GS1002
25. Xue F, Geng P, Hao H, He Y, Liang H. A multiple fire zones detection method for UAVs based on improved ant colony algorithm. In: Jin H, Pan Y, Lu J, editors. Data science and information security. Singapore: Springer Nature Singapore; 2024. pp. 194–208.
26. 鈴木学, 浜克己, 中村尚彦. 協調ドローンをを用いた避難誘導支援システム. 計測自動制御学会論文集. 2020;56: 24–30. doi:10.9746/sicetr.56.24
27. Katayama K, Takahashi H, Yokoyama S, Gäfvert K, Kinoshita T. Evacuation guidance support using cooperative agent-based IoT devices. 2017 IEEE 6th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE). 2017. pp. 1–2. doi:10.1109/GCCE.2017.8229431
28. Katayama K, Takahashi H, Yokota N, Sugiyasu K, Kinoshita T. Cooperation scheme of multi-UAVs for evacuation guidance support. 2018 IEEE 7th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE). 2018. pp. 221–222. doi:10.1109/GCCE.2018.8574602
29. Katayama K, Takahashi H, Yokota N, Sugiyasu K, Kinoshita T. Design and Implementation of Multiagent-based Evacuation Guidance Support System using UAVs. 2018 9th International Conference on Awareness Science and Technology (iCAST). 2018. pp. 196–201. doi:10.1109/ICAwST.2018.8517175
30. Katayama K, Takahashi H, Yokota N, Sugiyasu K, Kitagata G, Kinoshita T. An effective multi-UAVs-based evacuation guidance support for disaster risk reduction. 2019 IEEE international conference on big data and smart computing (BigComp). 2019. pp. 1–6. doi:10.1109/BIGCOMP.2019.8679474
31. Takahashi H, Katayama K, Yokota N, Sugiyasu K. Evacuation Guide Supporting System using UAV for Coastal Area. 2021 IEEE 3rd Global Conference on Life Sciences and Technologies (LifeTech). 2021. pp. 235–236. doi:10.1109/LifeTech52111.2021.9391881
32. Kambayashi Y, Tago I, Takimoto M. A Multi-agent Approach for Evacuation Support in Mountainous Areas Using UAV. In: Dignum F, Corchado JM, De La Prieta F, editors. Advances in practical applications of agents, multi-agent systems, and social good the PAAMS collection. Cham: Springer International Publishing; 2021. pp. 127–138.



Open Access This article is licensed under CC BY 4.0. To view a copy of this license, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>