

2024年度

修士論文

複数種UAVと携帯端末による強化学習を用いた最適避難誘導法

指導教員: 上山 憲昭

立命館大学大学院 情報理工学研究科  
情報理工学専攻 博士課程前期課程  
計算機科学コース

学生証番号: 6611230009-1

氏名: 伊吹 宏三郎

# 概要

地震、津波、噴火など、世界各地でさまざまな自然災害が発生している。特に、2011年の東日本大震災では大地震による津波は甚大な被害をもたらした。そのため、地震や津波による被害を軽減するための対策が必要である。これらの災害に対する既存の対策として、UAV (Unmanned Aerial Vehicle) を用いた災害支援が注目されている。UAV とスマートフォンや IoT デバイスを連携させて避難者に被害状況や避難情報を伝える方法が提案されている。しかし、これらの方式の多くは地上に設置されたセンサーデバイスから周囲の災害情報を収集している。災害時に携帯回線の基地局などの通信インフラや地上に設置されたセンサーデバイスが損傷している場合、UAV を制御するための情報が不足し、適切な災害支援を実施できない。また、用いられている UAV の多くは市販の小型 UAV であり、長時間かつ広範囲における連続した避難者探索には適さない。先行研究では、大型 UAV が小型 UAV を運搬しながら被災者を探索し、被災者発見後に分離した小型 UAV が避難誘導するか、被災者の携帯端末と通信可能なら避難経路を送信する避難誘導システムを提案した。本稿では、想定被災地域の範囲を拡大し、小型 UAV の充電や大型 UAV に小型 UAV 搭載のための作業拠点であるベースステーション (BS) の配置位置の災害リスクと人口分布に基づく最適化手法、避難者の誘導が完了した小型 UAV を再度、BS に配置する際に将来の避難完了時間が短くなるように強化学習を用いた小型 UAV の再配置先 BS の最適化手法を提案する。

# 目次

概要	1
第 1 章 序論	4
1.1 研究の背景	4
1.2 研究の目的	4
第 2 章 先行研究	6
2.1 災害時の UAV 利用に関する課題	6
2.2 大型 UAV と小型 UAV と携帯端末を用いた避難誘導システム	6
2.2.1 長時間運用可能な大型 UAV の活用	7
2.2.2 センサー機器の損傷への対応	7
2.2.3 避難者発見後の即時誘導	7
2.3 前提条件	7
2.3.1 大型 UAV の開発	8
2.3.2 空撮画像から地上の人物の検出	8
2.3.3 UAV による道路状況の判定と避難経路作成	8
2.3.4 大型 UAV と小型 UAV の活用	8
2.3.5 小型 UAV による避難者の誘導	9
2.3.6 携帯端末への災害情報提供	9
2.3.7 UAV と地上の携帯端末間の通信	9
2.4 避難誘導システムの動作フロー	9
2.5 先行研究の評価	12
第 3 章 提案方式	14
3.1 先行研究の課題	14
3.2 想定被災地域	15
3.3 大型 UAV の飛行経路	17
3.4 ベースステーション配置設計	19
3.5 小型 UAV の再配置	20
3.6 強化学習	21
3.7 マルチエージェント強化学習	21
3.8 Multi-Agent Deep Deterministic Policy Gradient (MADDPG)	21
3.9 PeettingZoo	22

<b>第 4 章 性能評価</b>	<b>23</b>
4.1 評価条件 . . . . .	23
4.2 BS 配置設計法の評価 . . . . .	23
4.3 強化学習による小型 UAV 再配置位置最適化の評価 . . . . .	25
4.3.1 学習ステップにおける避難完了時間の推移 . . . . .	25
4.3.2 避難完了時間の累積分布 . . . . .	26
<b>第 5 章 まとめ</b>	<b>27</b>
<b>謝辞</b>	<b>28</b>
<b>参考文献</b>	<b>29</b>
<b>外部発表リスト</b>	<b>31</b>

# 第1章 序論

## 1.1 研究の背景

世界各地で様々な自然災害が発生している。日本においては地形、地質、気象などの自然的条件から、地震、津波の世界全体に占める災害発生割合が非常に高い [1]。2011 年の東日本大震災では、大地震による津波は甚大な被害をもたらした。そのため、地震や津波による被害を軽減するための対策が必要である。これらの災害に対する対策として、UAV (Unmanned Aerial Vehicle) を用いた災害支援が注目されている [2]。近年、UAV はその性能が急速に進化し、価格も安く広く市販されるようになったため災害救助分野においてもその利用が注目されている。特に情報収集、偵察分野では、大規模災害時における広域的な被害分布、被害状況の確認や、より詳細な観察などを目的に、人が簡単に立ち入ることのできない場所や、危険な場所の情報を収集することが UAV を用いることで容易となる。大規模災害時の情報収集であれば、有人飛行機の方がはるかに飛行距離、飛行時間が長い。有人飛行機はその機体数、配備、離着陸場所などに制限がある。有人飛行機で探索しきれない箇所に UAV による情報収集を行うことで、より安全かつ効率的に災害救助活動を行うことが期待できる。UAV を用いた災害支援に関する研究は数多く行われている。[3] では、被災地域に設置された IoT デバイスから収集した災害情報をもとに UAV の動作を制御することで災害状況に合わせた効率的な救助支援を行うことが可能である。しかし、大規模災害時に基地局の損傷などにより通信インフラが遮断される場合や、火事や建造物の倒壊によって IoT デバイスが損傷している場合は正確な災害情報を収集することが困難である。既存研究の多くが地上に設置された IoT デバイスから取得した情報をもとに UAV の動作を制御することを前提としているため、大規模災害時には効率的な災害支援の実施は困難である。また、市販されているバッテリー式 UAV の飛行時可能間は 30 分程度であり長時間の運用に適さないことも問題である。UAV を用いた災害支援分野において、大規模災害時、地上に設置された IoT デバイスの損傷にも対応可能であり、UAV のバッテリー容量による飛行時間の制約を抑えた避難誘導を長時間にわたり実施可能な避難誘導システムが必要とされている。

近年では、ガソリンエンジンを搭載した大型 UAV の開発が盛んに進められており、これらの技術革新により、従来のバッテリー駆動型 UAV に比べて飛行時間や航続距離が大幅に向上している。これにより、より広範囲にわたる避難者捜索や、遠隔地への緊急物資の運搬が現実のものとなってきている。

たとえば、燃料の補給が容易で長時間の飛行が可能な大型 UAV を用いることで、これまで対応が困難であった山間部や孤立した島嶼地域でも迅速な救援活動が期待されている。また、災害規模が広がるにつれ、物資供給の拠点間での効率的な輸送が重要となるが、大型 UAV はその高い積載能力を活かして一度に大量の物資を運搬することができるため、災害対応能力の大幅な向上が見込まれる。しかしながら、災害時にこれらの大型 UAV を利用した避難誘導に関する研究や実証実験は、まだ十分に行われていないのが現状である。

## 1.2 研究の目的

UAV を用いた災害支援に関するさまざまな研究が行われている。しかし、既存研究の多くは地上に設置された IoT デバイスから収集した災害情報に基づき UAV の動作を制御するものである。災害時に通信インフラや道路が

損傷している場合、これらの方式では災害情報の収集が困難になり、効果的な災害支援が実施できない恐れがある。また、使用されている UAV のバッテリー容量が小さいため、長時間における連続した災害支援には適さないことも問題である。災害対応において、大型 UAV と小型 UAV を適切に使い分ける、あるいは連携して運用する手法は、非常に重要なテーマであるにもかかわらず、現状ではその研究がまだ十分に進んでいない。両者の特性を活かすことで、従来の単一 UAV 運用に比べて災害支援の効率性と効果を大幅に向上させることが期待される。

そこで、先行研究ではガソリンエンジンを搭載した大型 UAV が小型 UAV を運搬しながら避難者の捜索し、避難者発見後に大型 UAV から分離された小型 UAV が避難誘導を実施するか避難者の持つ携帯端末へ避難経路を送信することで、地上に設置された IoT デバイスとの連携を必要とせず、長時間かつ広範囲に適用できる新たな避難誘導システムを提案した。先行研究ではこの避難誘導システムを 1 つの避難所を中心とした対象領域でのシミュレーション評価を実施した。本稿では、対象領域を複数の避難所を含む地域に拡大し、避難誘導システムを適用する方法を提案する。また、大型 UAV への小型 UAV の再搭載や、バッテリー交換を行う拠点であるベースステーション (BS) の配置位置を災害リスクと人口分布に基づく配置に変更することで避難誘導システムを対象領域の拡大に対応させる、避難者の誘導が完了した小型 UAV を再度、BS に配置する際に決定過程を強化学習を用いて最適化することで、更なる避難時間の短縮を図る。

## 第2章 先行研究

### 2.1 災害時の UAV 利用に関する課題

災害時に UAV と携帯端末を利用した避難誘導支援システムについては様々な研究が行われているがいくつかの課題が存在する。[15] では、UAV を利用した避難誘導を行っている。AR マーカーを避難者に身につけさせることで避難者の位置情報を正確に把握することができる。しかし、避難誘導支援に AR マーカーの利用を前提としているため、AR マーカーを身につけていない避難者を誘導することは不可能である。また、利用が想定されている AR マーカーの普及率が低いことも問題されている。[3][11][12] では、街中に設置された IoT 機器から収集した災害情報をもとに UAV と IoT 機器が互いに自律的に連携することで火災や家屋の倒壊による通行止めなどの二次災害を考慮した避難誘導を可能にするシステムが開発されている。しかし、災害情報の収集を地上に設置された IoT 機器に依存しているため、災害時に機器の損傷が発生する場合はシステムの運用が困難になる。また、両者において利用が想定されている市販のバッテリー式小型 UAV のバッテリー容量は小さいため、最大飛行可能時間は 30 分程度である。避難者の捜索や UAV 間での情報共有のために電力を消費するため実際の飛行可能時間はさらに短くなる。小型 UAV が避難者の捜索や被災地域の情報収集など複数の役割を担う場合、長時間かつ広範囲における連続的な運用は困難である。UAV を用いた災害支援分野では、大規模災害時に地上に設置されたセンサー機器が損傷している場合でも運用可能であり、かつ、UAV のバッテリー容量による飛行時間の制約の影響を抑えた避難誘導システムが必要とされている。

### 2.2 大型 UAV と小型 UAV と携帯端末を用いた避難誘導システム

上記の課題を解決するために、大型回転翼 UAV と小型回転翼 UAV の 2 種類の UAV、および避難者が持つスマートフォンなどの携帯端末を組み合わせた被災地域内の避難者捜索と避難誘導を行うシステムを提案した [5]。本提案システムでは、大型 UAV が小型 UAV を搭載した状態で被災地上空をあらかじめ設定された探索飛行経路に沿って飛行し、避難者の捜索を行う。大型 UAV は、高度なカメラやセンサーを搭載しており、飛行中に撮影した地表の画像を解析することで、火災や建造物の倒壊などの災害状況を詳細に把握する。この情報を基に、通行不能箇所を考慮した安全かつ迅速な避難経路を自動生成する。避難者を発見した場合、大型 UAV が避難者の持つスマートフォンなどの携帯端末と通信可能であれば、その端末に対して生成した避難経路をリアルタイムで送信する。これにより、避難者は迅速に安全な経路を確認でき、混乱を最小限に抑えることが可能となる。一方で、端末と通信が確立できない場合には、大型 UAV が搭載している小型 UAV を放出し、小型 UAV が直接避難者のもとへ移動して誘導を行う。小型 UAV は、LED ライトや音声案内機能を活用し、避難者に視覚的および聴覚的に適切な誘導を提供する。さらに、本システムでは、ガソリンエンジンを搭載した大型 UAV[4][6] を利用を想定しているため、小型 UAV に比べて飛行時間が大幅に延長され、より広範囲の連続した捜索が可能である。この特性により、特に被災地域が広範囲にわたる場合や、複数の孤立した避難者が存在する場合にも効率的な対応が期待できる。また、地表の情報を UAV で撮影した画像をもとに取得するため、地上に設置されたセンサー機器が損傷

している場合でも、精度の高い避難誘導が可能である。これにより、従来のセンサーに依存したシステムに比べ、被災時の柔軟性と信頼性が向上する。

### 2.2.1 長時間運用可能な大型 UAV の活用

避難誘導システムにおける最大の特徴は、ガソリンエンジンを搭載した大型 UAV を使用することで、従来のバッテリー式 UAV では不可能であった長時間かつ広範囲の探索と避難誘導が実現できる点である。従来の UAV を利用した避難誘導方式では、バッテリーの容量制限により、数十分の飛行しかできないことが多く、広範囲の被災地をカバーすることは困難であった。しかし、大型 UAV を活用することで、飛行時間が大幅に延長され、より多くの避難者への誘導が可能となる。この方式により、避難者への迅速な支援が実現され、災害時の効果的な対応が期待される。

### 2.2.2 センサー機器の損傷への対応

従来、多くの UAV 活用研究では、地上に設置されたセンサー機器からの情報収集が前提となっている [?, ?]。これらのセンサー機器が災害の影響で損傷した場合、情報収集が不可能となり、適切な避難誘導が困難になるという問題がある。一方、避難誘導システムでは、地上の道路損傷状況を撮影した画像や映像から道路の通行可否を判断するため、地上のセンサー機器に依存しない。これにより、センサー機器が損傷している場合でも運用が可能となり、より柔軟で信頼性の高い避難誘導が提供される。さらに、方式 X と方式 Y を比較したシミュレーション結果から、地上のセンサー機器から情報が得られない場合でも、センサー機器が使用可能な場合と同等の時間で、すべての避難者の避難誘導を完了できることが確認された。

### 2.2.3 避難者発見後の即時誘導

避難誘導システムでは、避難者を発見するたびに、即座に避難経路の送信または小型 UAV による誘導を実施する。このアプローチは、被災地域の探索を完了した後に避難経路を計画し、避難者を誘導する方式と比較して、より迅速に避難者を避難所に誘導できることがシミュレーションによって確認された。従来方式では、まず被災地全体を探索し、その後避難経路を導出するため、避難誘導の開始までに時間がかかる。しかし、避難誘導システムでは避難者を発見する度に即時に対応を行うため、全体の避難完了時間を短縮することができる。この点において、避難誘導システムは災害発生直後から迅速に避難誘導を行い、避難完了までの時間を大幅に短縮する可能性を持っている。

## 2.3 前提条件

この避難誘導システムを構築するには以下の技術的前提条件を解決しなければならないが、下記に示す既存研究の結果より、大型 UAV と小型 UAV と携帯端末を用いた避難誘導システムは実現可能であるとして、シミュレーションの作成と性能評価を行った。

1. 大型 UAV は小型 UAV を搭載した状態で自律飛行
2. 大型 UAV と小型 UAV は空中で分離

3. 飛行中に撮影した画像から人物の検出
4. 飛行中に撮影した画像から路面の災害状況の取得
5. 取得した災害状況をもとに避難経路の導出
6. 小型 UAV による避難者の誘導
7. UAV と携帯端末間での通信

以下に技術的条件の解決に関連する研究結果を示す。

### 2.3.1 大型 UAV の開発

物流や測量などで利用される多くのバッテリー式 UAV は、飛行時間が約 30 分程度と短く、運用時間に制限がある。また、現場での長時間使用には大量の交換用バッテリーが必要であり、効率的な運用が難しい。この課題を解決するために、エンジンジェネレーターとバッテリーを搭載したハイブリッド型 UAV の開発が進められている [4][6]。ハイブリッド型 UAV はエンジンジェネレーターで発電した電力をモーター駆動に利用することで、長時間の運用を可能にしている。さらに、用途に応じてカメラやセンサーなどの搭載物を柔軟に変更できる点も特長である。また、従来の小型 UAV と比較してペイロード重量が大きく、さまざまな用途への適用が可能である。

### 2.3.2 空撮画像から地上の人物の検出

[7] では、UAV によって撮影された画像や映像からリアルタイムに人間を検出するシステムが提案されている。このシステムは、検出結果を GIS プラットフォーム上で可視化し、地上の人物の位置推定精度を評価している。具体的には、Haar-like 特徴に基づくカスタムバイナリ分類器を訓練し、画像内の対象が人間か否かを迅速に分類することで計算時間を短縮している。さらに、40m の高度で撮影された画像からは数秒以内に人物を検出することが可能であり、精度と計算効率の両立を実現している。この手法は災害現場や大規模イベントでの監視において有用であると考えられる。

### 2.3.3 UAV による道路状況の判定と避難経路作成

[8] では、UAV に搭載されたマルチスペクトルカメラや衛星から取得した事前の画像を用いて、道路抽出および道路状況の検出を行う技術が提案されている。この技術では、抽出された道路情報を活用して避難経路を生成することが可能である。また、路面の構成材料や気象条件に基づいて歩行者の速度を推定し、それを基に避難経路の重み付けを行うことで、最適な避難経路を作成している。これにより、災害時の効率的な避難支援が実現される。

### 2.3.4 大型 UAV と小型 UAV の活用

[9] では、効率的な搜索タスクを完了するために、大型固定翼 UAV と小型回転翼 UAV を組み合わせた新しいタイプの搜索タスク指向型 UAV システムを提案している。小型 UAV を搭載した大型 UAV は事前に計画した軌道に基づき、搜索領域をもれなく搜索し、搜索対象発見後、大型 UAV は小型 UAV を放出する。放出された小型

UAV が低高度で探索を行うことで詳細な情報を得ることができる。シミュレーションの結果より、提案されたシステムは、探索ミッションにおいて大きな応用の可能性を持つことが示されている。

[10] では市販されている小型 UAV を用いて連結された 2 機の UAV の空中分離を可能にするシステムの開発が行なわれている。サーボモーターで構成されるウィンチシステムを取り付けることで、母機 UAV は任意の放出高度まで子機 UAV を降下させることが可能である。子機は母機の下に発生する乱気流の影響を受けない距離まで離れることで容易に空中分離が可能であることが示されている。

### 2.3.5 小型 UAV による避難者の誘導

[3][11][12] では UAV, センサ, 携帯端末などの IoT 機器が状況に応じて協調・連携し、迅速な避難誘導を支援するエージェント型避難行動支援システムの開発を行っている。UAV を含めたセンサーや携帯端末などの IoT 機器とそれらを制御、管理するソフトウェアエージェントによって UAV と IoT 機器を自律的に連携させることで、災害状況に応じた避難誘導を可能にしている。UAV エージェントが危険箇所や二次災害を回避する経路を探索し、避難計画を作成する。避難所までの飛行経路に経由地を設定し、災害状況に基づいて避難経路を決定する。火災などの二次災害までの距離、津波の高さ、時間などに応じて避難経路を作成する。避難経路を決定すると、避難誘導標識を備えた UAV が自律飛行して避難誘導を実行する。

### 2.3.6 携帯端末への災害情報提供

[13] では自然災害による移動体通信インフラの不測の障害時に機能する災害時避難誘導について考察している。携帯電話間の日和見通信を利用し、疫病ルーティングにより災害情報を共有することで、通行不能な道路のリアルタイム情報を基に迅速に避難経路を提案できるという意味で、災害に強い誘導が可能となった。道路地図グラフを用いた数値シミュレーションによる性能評価により、日和見通信を用いることで、平均避難時間が大幅に短縮されることが示された。

### 2.3.7 UAV と地上の携帯端末間の通信

[14] ではリアルタイムの情報通信システムとして、災害情報を保持した UAV から被災者に災害情報を一斉送信するメッセージフェリーを用いた災害情報通信システムを提案している。このシステムでは、メッセージフェリーの高度が 20, 30, 40m, 送信データサイズが 0.5, 1, 3M バイトの場合の地上端末へのノード配信率をシミュレーションで評価した。その結果、すべての地上端末が静止している場合、どの飛行高度とデータサイズの組み合わせでもデータは正常に配信され、信頼性の高い情報配信が可能であることが確認された。

これらの技術的条件は既存の研究結果から解決可能であることが示されている [7][8][9][10][3][11][12]。避難誘導システムはこれらの技術的条件が解決可能であるという前提の下で動作するものとする。

## 2.4 避難誘導システムの動作フロー

図 2.1 に提案した避難誘導システムの動作フローを示す。下記の動作フローに沿って避難誘導を行う。

1. 探索飛行経路の作成: 被災地全域を漏れなく探索する大型 UAV の探索飛行経路を作成する。
2. 離陸と搭載: 大型 UAV は小型 UAV を搭載し、ベースステーション (BS) から離陸する。

3. 探索飛行: 大型 UAV は事前に作成した探索飛行経路に沿って被災地上空を飛行する.

#### 4. 道路抽出と避難経路導出

4.1 飛行中に撮影した画像から道路の抽出を行い, 火災や家屋の倒壊によって通行不可能な場所を記録する.

4.2 避難者発見時, 通行可能な道路のみから避難者の位置と避難所を結ぶ最短経路を導出する.

4.3 避難所までの安全な避難経路が導出できない場合は, 探索飛行経路に沿って飛行を継続する.

4.4 一定周期で避難経路の導出を試み, 避難経路の導出が可能であれば避難者上空へ移動する.

#### 5. 避難経路の送信と誘導

5.1 避難者が携帯端末と通信可能であれば, 避難者上空へ移動後, その端末に避難経路を送信する.

5.2 通信不可能であれば, 大型 UAV から小型 UAV を分離する.

#### 6. 避難誘導の開始: 避難者自身による避難, または小型 UAV による避難誘導を開始する.

7. 再探索と補充: 大型 UAV が小型 UAV を搭載したままの場合は, 探索飛行経路に戻り, 次の避難者の捜索を行う. 小型 UAV を分離した場合, 大型 UAV は BS へ帰還し, 燃料補充と小型 UAV の再搭載を行う. その後, 大型 UAV は探索再開地点へ移動し, 避難者の捜索を再開する.

以上の動作をすべての避難者が避難所へ避難完了するまで繰り返す. なお, 飛行途中で大型 UAV の燃料が一定量を下回った場合は BS へ帰還し, 燃料の補充を行い, 避難者の捜索を行う.

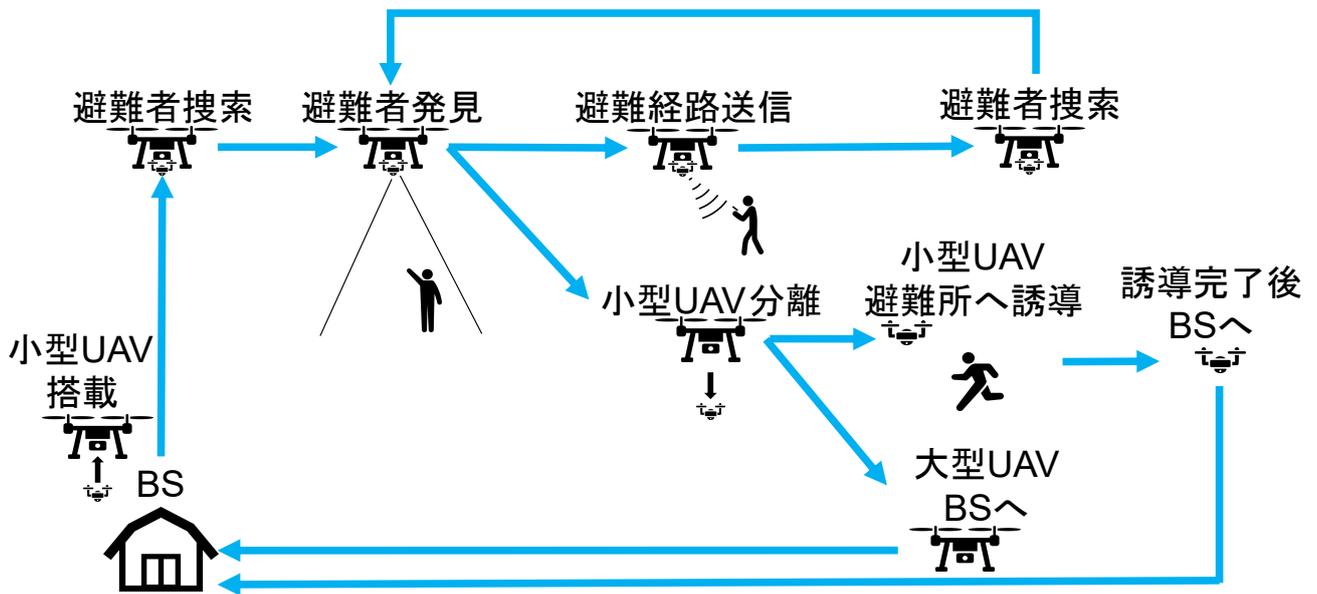


図 2.1: 複数種 UAV と携帯端末を用いた避難誘導

## 2.5 先行研究の評価

先行研究では、滋賀県草津市を対象地域として設定し、避難誘導システムの性能を評価するための計算機シミュレーションを実施した。対象地域は1辺が2kmの正方形領域とし、この範囲内の道路ネットワークをOpenStreetMap (OSM) の地図情報を基に構築した。具体的には、交差点をノードとし、ノード間を結ぶ道路をエッジとするネットワーク構造を作成した。その後、ランダムに選択したノードおよびエッジを削除することで、災害による通行不可箇所をモデル化した。なお、シミュレーションでは災害発生後の道路状況は固定とし、シナリオ途中での変化は考慮していない。大型 UAV については、合計4機を使用し、対象地域を4つの正方形領域に分割して、それぞれに1機ずつ割り当てた。各 UAV は割り当てられた領域内で被害状況を調査し、避難者の位置を特定する役割を担った。また、各領域内には1~3カ所のBSを配置し、BSごとに1~3機の小型 UAV を初期配備した。小型 UAV は、大型 UAV が特定した避難者の位置に向かい、誘導を行うとともに、避難所への安全な経路を案内する役割を果たす。避難誘導の効率性を評価するために、全避難者が避難所へ到達するまでに要する総避難完了時間を主な指標として測定した。

図2.2に測定結果の累積補分布を示す。BSを対象領域の中心である避難所に配置する場合と、対象領域内に分散して配置する場合の2つのシナリオについて比較を行った。被災者の初期位置と通行不可箇所の組み合わせを100通り作成し、それぞれに対して避難完了時間を測定した。シミュレーションの結果は、100通りの測定結果を基に累積補分布として示された。また、大型 UAV 1機あたりの検索範囲内に配置するBSの数と、BSごとに配備される小型 UAV の数を変化させ、その影響を比較した。結果として、大型 UAV 1機あたりの小型 UAV の同時稼働数が減少すると避難完了時間が増加することが確認された。特に同時稼働数が2機以下の場合、避難完了時間は顕著に増加する。この原因として、大型 UAV が被災者の検索を行っている間に、小型 UAV が避難誘導を完了し、BSに戻るサイクルが追いつかず、BSに小型 UAV が存在しない時間帯が発生するためである。一方で、小型 UAV が6機以上の同時稼働を行った場合、避難完了時間の大幅な短縮は見られなかった。これは、一定数以上の小型 UAV が稼働することで、避難誘導の効率が飽和状態に達し、それ以上の小型 UAV を増やしても効果が薄くなるためである。したがって、想定される被災地域の規模で効率的な避難誘導を実現するためには、小型 UAV の同時稼働数を6機とすることが最適である。さらに、避難所配置よりも最適配置の方が避難完了時間を短縮することが示された。これは、最適配置によって避難所間の距離が最短となり、誘導の効率が向上するためである。また、BSを分散配置することにより、燃料補充や小型 UAV の再搭載の際の移動距離が短縮され、避難完了時間がさらに短縮されることが確認された。

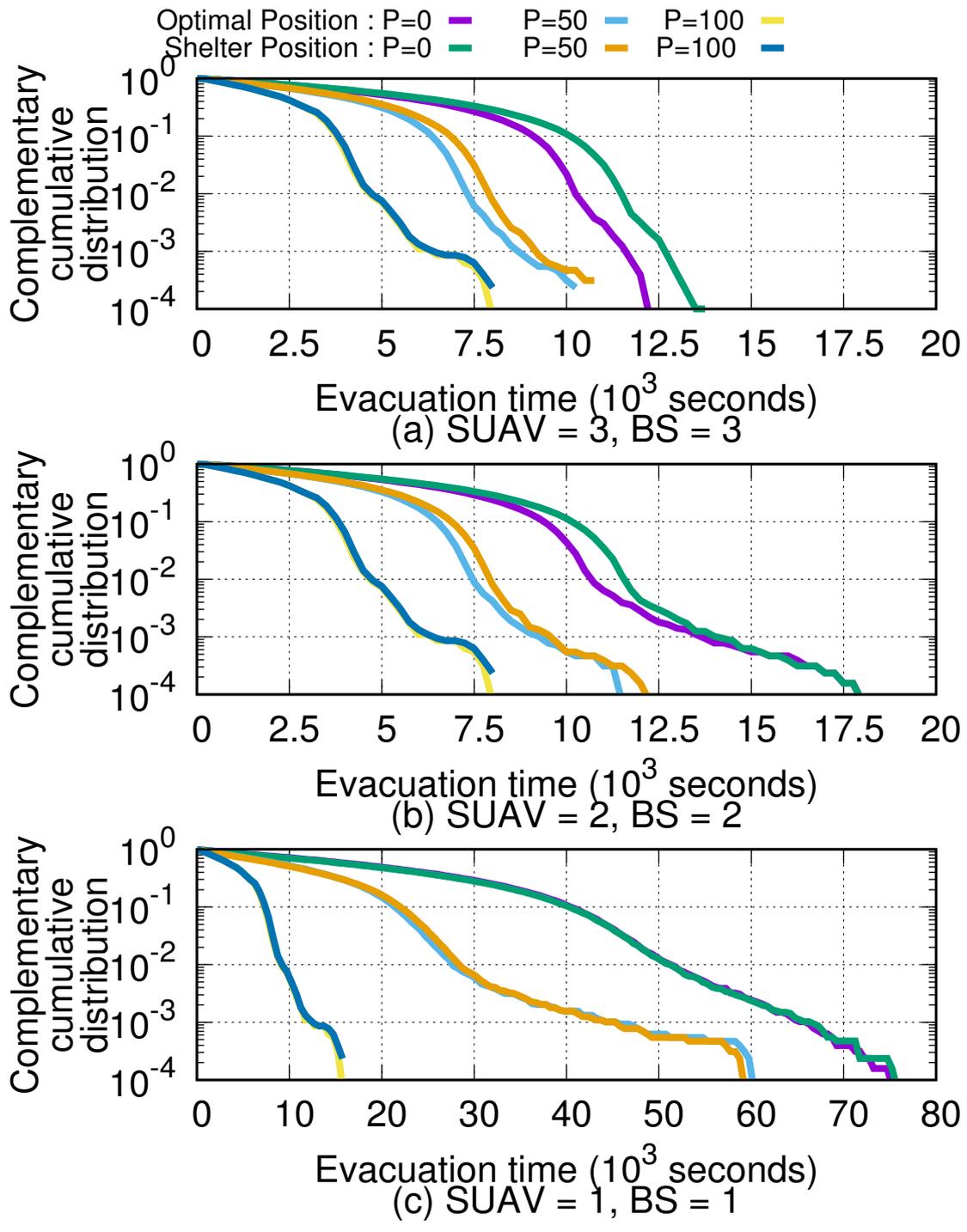


図 2.2: 避難完了時間の累積補分布

## 第3章 提案方式

### 3.1 先行研究の課題

先行研究では、避難誘導システムの評価が1つの避難所を中心とした対象地域のみで行われており、実際の災害時における複数の避難所を含む広範な地域での運用には課題が残されている。このような限定的な評価では、実際の被災状況で発生し得る複雑な要件や広範な地域特有の課題に対応するためのシステム性能を十分に検証することができない。避難者の初期配置が完全にランダムに行われていた点も課題である。被災地では人口密集地域と過疎地域が混在しているが、ランダム配置の手法では人口密集地域における避難者数の集中を考慮できず、結果として密集地域での誘導に大幅な時間を要する場合があった。このような非効率性は、避難者への迅速な対応という観点から大きな問題となる。また、大型 UAV の飛行経路が避難所を中心とした放射状に設定されていたため、避難所から遠く離れた場所に位置する避難者の誘導には多くの時間を要する問題が指摘されている。この設計では、避難所周辺の避難者には迅速な対応が可能である一方、遠隔地における避難者へのアクセスが遅れることから、避難誘導の均等性や迅速性が課題となっている。また、河川の氾濫による浸水や洪水が発生しやすい地域、土砂崩れが起りやすい地域といった災害リスクが高い地域においては、より迅速な避難が必要であるにもかかわらず、こうしたリスク要因を十分に考慮した飛行経路の最適化がなされていなかった。この結果、災害リスクの高い地域での避難誘導が遅れ、重大な被害拡大につながる可能性があった。さらに BS の配置についても、対象領域内の面積を等分する単純な方法に基づいていたため、避難者の分布や避難誘導の需要に応じた最適化がなされていなかった。この配置方法では、避難者が集中する地域や災害リスクが高い地域での通信需要を満たすことができず、避難誘導の効果が十分に発揮されない可能性がある。

### 3.2 想定被災地域

本稿では、より現実的で実用性の高い避難誘導システムの評価を実現するため、従来の1つの避難所を想定した限定的な地域から対象領域を拡大し、複数の避難所を含む地域でのシステム性能を検証する。想定被災地域として、宮城県石巻市の3平方キロメートルにわたる地図データを OpenStreetMap (OSM) より取得し、このデータを基に交差点(ノード)と自動車道(エッジ)から構成される詳細な道路ネットワークを作成した。図 3.1 に道路ネットワークを示す。この道路ネットワークは、避難者の移動経路や避難誘導に必要な情報を網羅的に反映するための基盤データとして活用される。避難所としては、地域内に位置する小学校、中学校、高等学校、役所の中から計9か所を選定した。また、避難誘導を支援する Base Station, 以下 BS の候補地として、交番、病院、自治会館などの公共施設を設定した。これにより、避難所および BS の配置が現実の災害対応に即した条件となるよう配慮した。

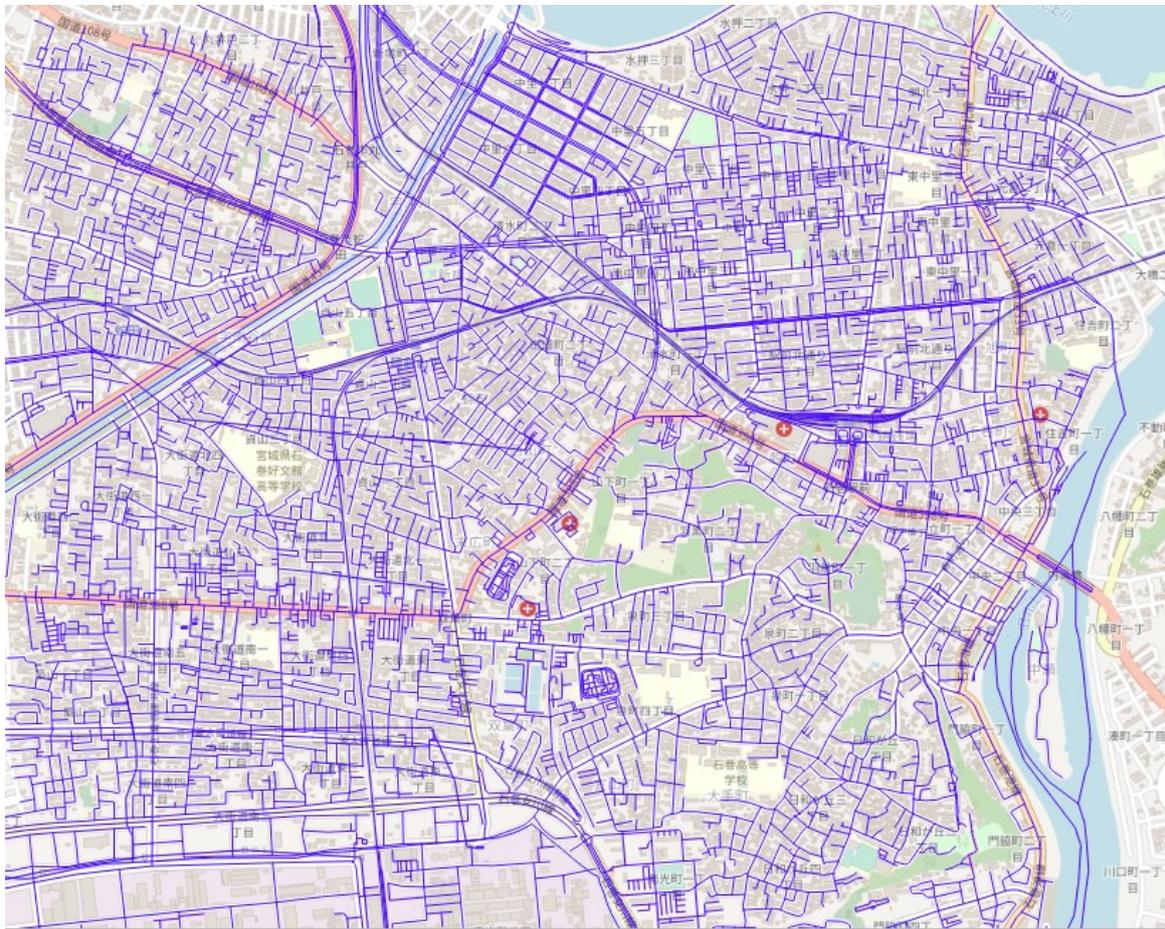


図 3.1: 想定避難地域の道路ネットワーク

さらに、人口密集地域と過疎地域が混在する状況を考慮して、避難者を現実的に配置するための手法を採用した。具体的には、国土地理院が公開する推計人口データを基に、500メートルメッシュ単位で推計人口を算出した。この推計には、建造物の床面積を用いて人口を按分する方法を採用し、各500メートルメッシュ内の人口分布を推計した。推計結果を図3.2に示す。この推計結果を基に、500メートルメッシュ人口を想定被災地域の総人口で割った値を配置確率として定義し、この確率に従って避難者を配置するメッシュを選択した。その後、選択したメッシュ内のランダムな交差点ノードに避難者を配置することで、現実的な人口分布に基づく避難者の初期配置を再現した。これらの手法により、現実の災害時における人口密集地域と過疎地域の特徴を反映した避難者配置を実現し、避難誘導システムの性能評価において現実に即した結果を得ることが可能となる。また、避難所およびBSの候補地設定においても、実際の地域特性を考慮することで、災害発生時の実用性を高めた評価基盤を構築した。

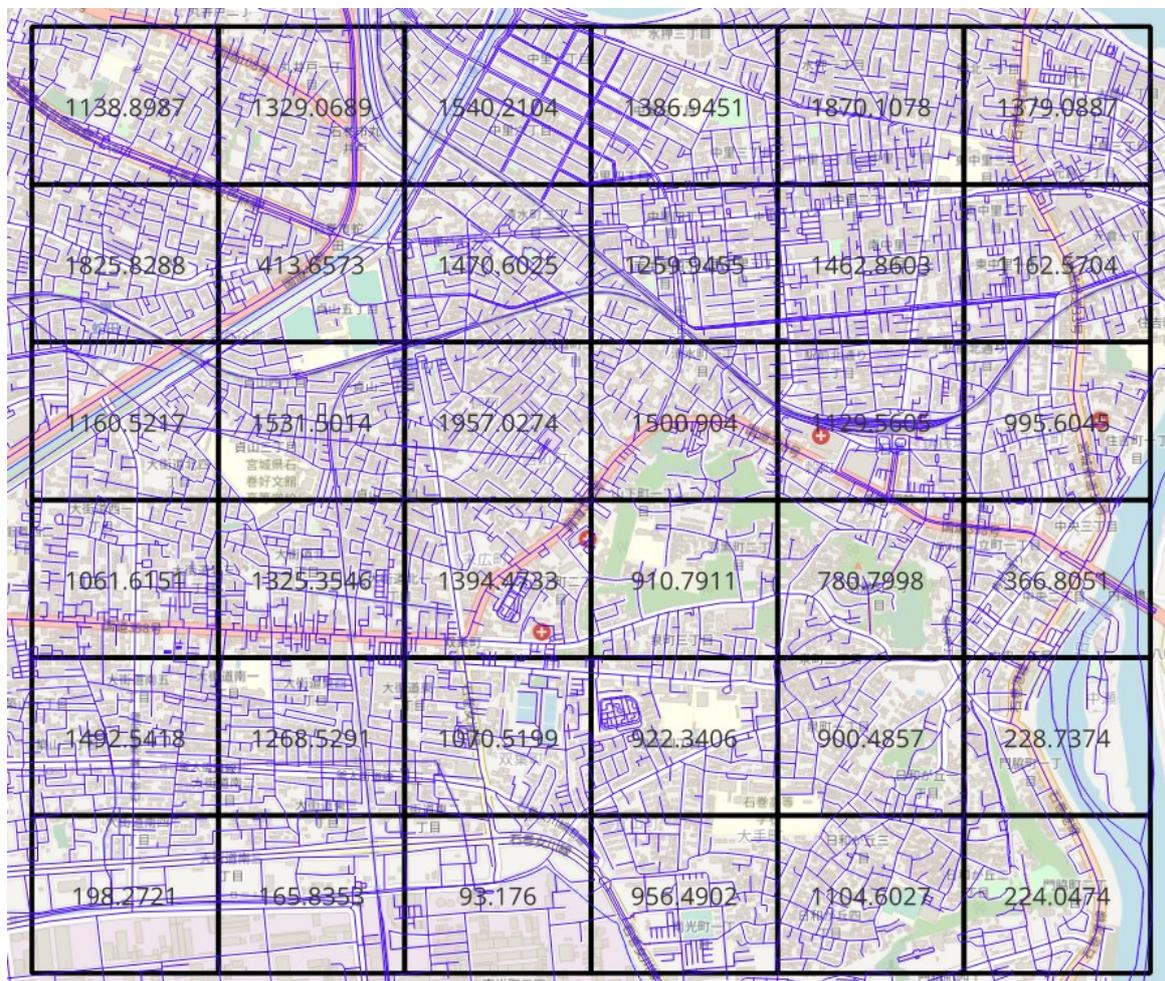


図 3.2: 500 平方メートルメッシュごとの推計人口

### 3.3 大型 UAV の飛行経路

先行研究においては、大型 UAV の飛行経路が避難所を中心とした放射状に設定されており、避難所から遠隔地に位置する避難者の捜索や誘導に時間を要するという課題が指摘されていた。この飛行経路では、避難者の捜索と同時に被災地域内の道路状況の確認も行う必要があったため、大型 UAV の飛行速度が制限されるという問題が生じていた。特に、洪水や土砂崩れなどの災害リスクが高い地域において、捜索や避難誘導が遅延する懸念があった。また、これらの災害リスクを優先的に考慮する仕組みが十分ではなく、リスクの高い地域での避難誘導効率が低下する可能性があった。これらの課題を解決するために、本稿では災害リスクを考慮した大型 UAV の飛行経路を設計する。国土地理院によって公開されている複数のハザードマップ（河川の氾濫による浸水想定、津波の到達想定、土砂崩れ範囲想定）を活用し、100メートルメッシュごとに災害リスクを数値化する。具体的には、各ハザードマップに基づき、各メッシュに対して0から15の16段階で災害リスク値を付与する。図3.3に災害リスク値を示す。この災害リスク値は、災害の発生確率および影響範囲を定量的に表現したものであり、複数のリスク要因を統合的に考慮することが可能である。

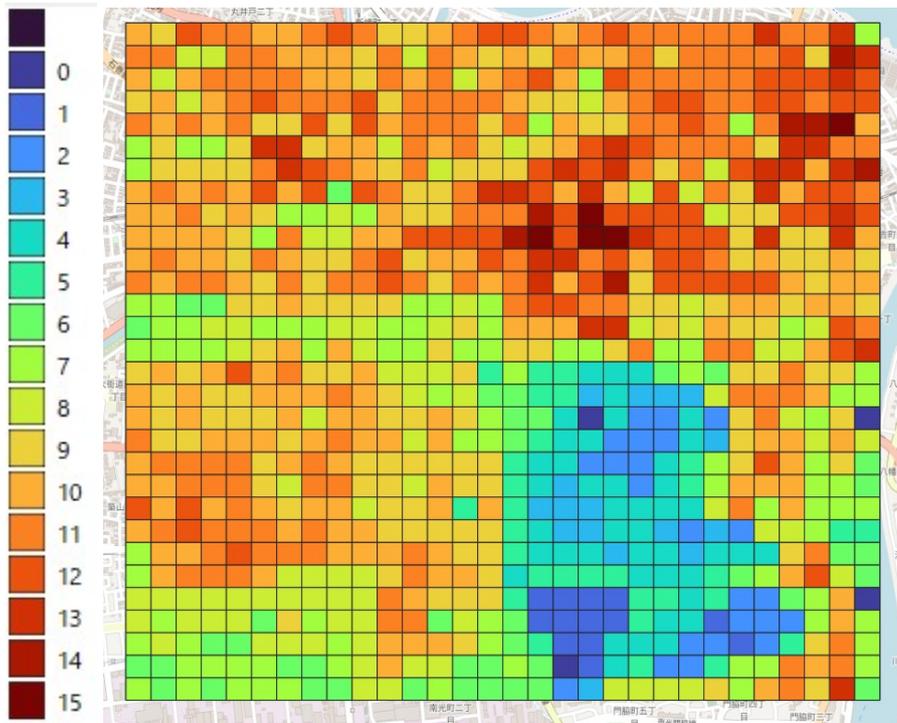


図 3.3: 災害リスク値

次に、100メートルメッシュごとに算出した災害リスク値を基に、500メートルメッシュ単位でリスク値の平均を計算し、7段階で避難者搜索優先度を設定する。図3.4に避難者搜索優先度を示す。この優先度設定により、大型 UAV が災害リスクの高い地域を優先的に搜索する仕組みを構築する。優先度が高いメッシュから順に搜索を行うことで、洪水や土砂崩れなどの危険性が高い地域における避難誘導の迅速化を図る。さらに、大型 UAV の飛行経路は、この搜索優先度に基づいて計算され、優先度の高いメッシュを効率的に搜索するように設計される。この手法により、避難所から遠い場所に位置する避難者の搜索や誘導が迅速化されるだけでなく、災害リスクの高い地域においても効果的な避難誘導が可能となる。これにより、避難誘導システムの実効性が向上し、実際の災害時における迅速かつ安全な避難支援が期待される。

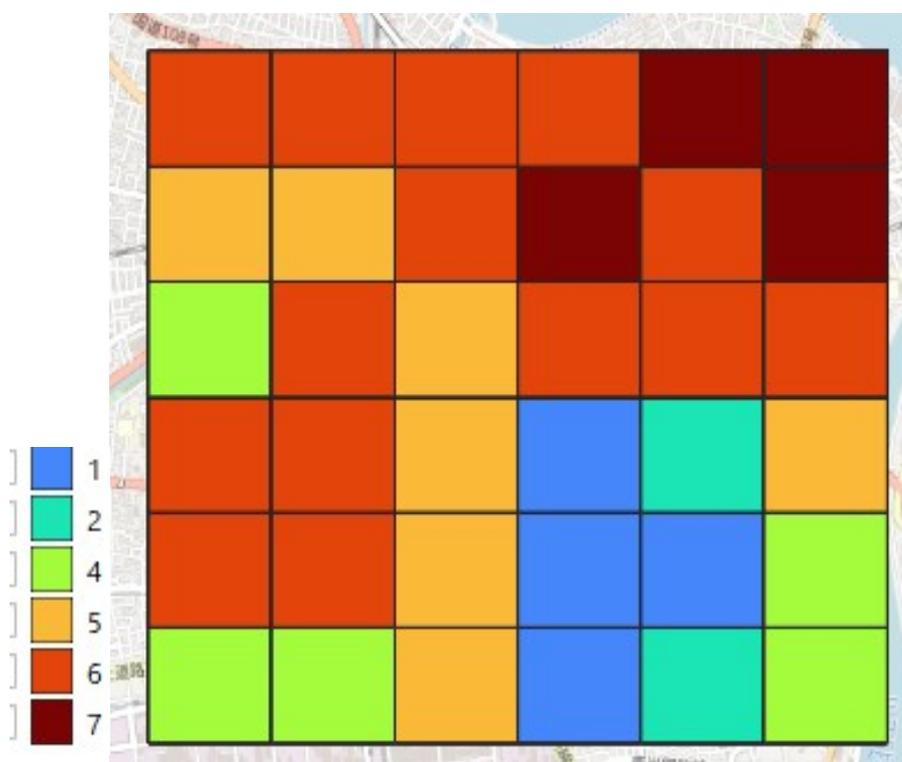


図 3.4: 避難者搜索優先度

### 3.4 ベースステーション配置設計

対象領域の拡大に伴い、BS の配置位置を最適化することは、避難誘導システムの有効性を高める上で不可欠である。特に、先行研究では単一の避難所を想定しており、BS 配置の最適化について十分な検討が行われていなかった。一方、本稿では複数の避難所が存在する状況を考慮しており、BS の配置が最適化されていない場合、特定の避難所への移動に時間を要する可能性や、一部の避難所に誘導が集中せず避難の効率が低下する可能性がある。このような課題を解決するため、本稿では、避難完了時間を短縮することを目的として、避難者の平均移動距離を最小化するとともに、避難者経路数が最大化される位置に BS を配置する手法を提案する。図 3.5 に避難所と BS の配置候補を示す。図内赤色の丸は避難所となる学校と役所の中心座標を表しており、青色の丸は BS の配置候補である交番、病院、自治会館などの公共施設を表している。

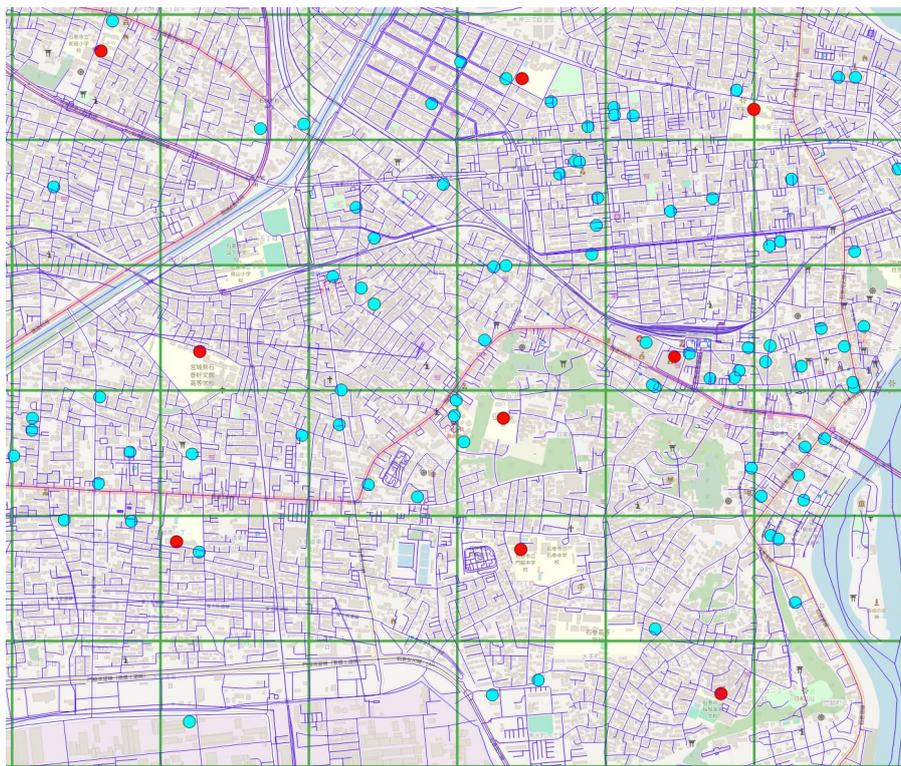


図 3.5: 避難所と BS の配置候補

BS の配置位置の最適化に際しては、避難者の移動をシミュレートするため、OpenStreetMap (OSM) の地図データから作成した道路ネットワークを使用する。このネットワークは、交差点（ノード）と道路（エッジ）から構成される。さらに、災害によって通行不可となる道路を考慮するため、災害リスク値から算出した確率に基づいて選択したノードおよびエッジを削除し、災害による通行不可箇所を含む損傷道路ネットワークを作成する。異なる 30 種の損傷道路ネットワークを用い、すべての損傷道路ネットワークにおいて交差点ノードに対して避難所—BS 間、および BS—交差点ノード間の経路長が最短となる組み合わせを求める。さらに、各 BS 候補地において、避難者経路数の平均値を算出し、その平均値が最大となる候補地を BS の最適配置位置として決定する。図 3.6 に最適化された BS の位置を緑色の丸で示す。この方法により、災害による道路の損傷を考慮しつつ、避難者

の移動時間を短縮し、特定の避難所への移動時間を削減しつつ、避難所間の均等な誘導を可能とする。また、複数の損傷道路ネットワークを考慮した配置により、災害シナリオが異なる場合でも柔軟に対応可能なBS配置計画が策定できることが期待される。

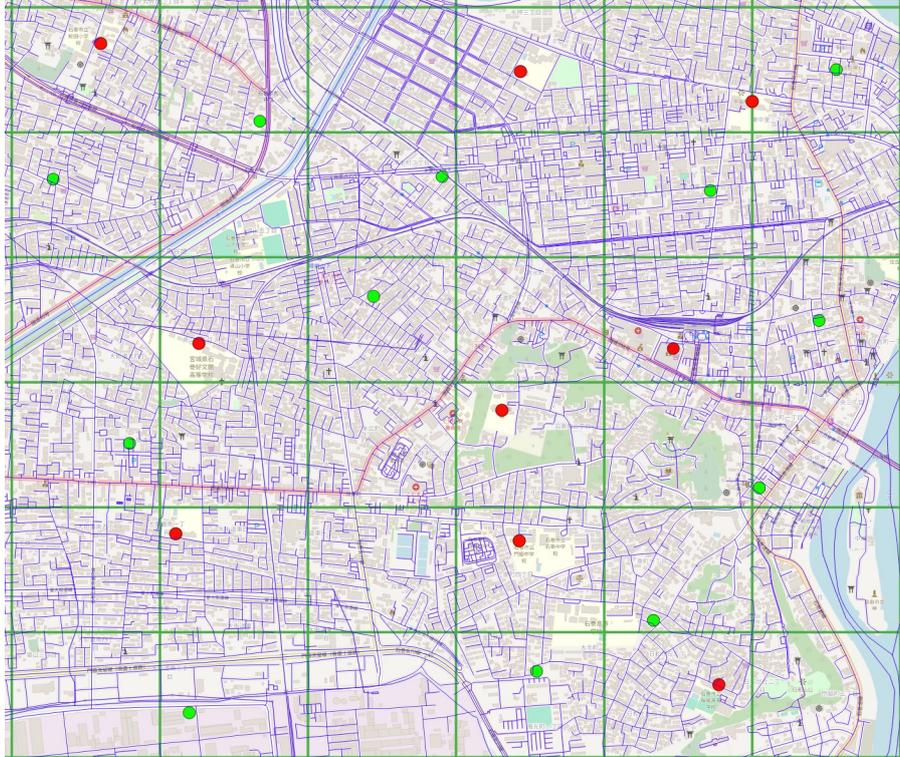


図 3.6: 避難所と BS の最適配置

### 3.5 小型 UAV の再配置

先行研究においては、小型 UAV に配備される BS の位置が事前に決定されており、各 BS に配備される小型 UAV の数も固定されていた。この固定された配備方式では、特定の BS 周辺に避難者が多く存在する場合、同時に避難誘導を実施できる小型 UAV の稼働数が不足するという問題が生じる。このため、避難者を発見しても、その誘導を開始できないケースが発生し、結果として全避難者の避難完了時間が増大するという非効率的な状況が生じる可能性があった。これらの課題を解決するため、本稿では、強化学習を活用して、避難誘導完了後の小型 UAV の再配置先 BS を動的に最適化する手法を提案する。この手法により、各 BS への小型 UAV の配備数を状況に応じて柔軟に調整することができ、避難誘導を効率的に実施することが可能となる。具体的には、避難者が集中している BS に対して、必要な数の小型 UAV を再配備することで、誘導能力を強化し、避難者の誘導遅延を最小限に抑える。強化学習においては、避難誘導の状況や避難者の配置、BS の状態を入力として、再配置先の BS や配備数の最適化を行うための報酬関数を定義する。この報酬関数は、全避難者の避難完了時間の短縮を目標とし、各小型 UAV の再配置を逐次的に調整する。これにより、各 BS の負荷を動的に分散させるとともに、避難誘導の効果を最大化することが期待される。この強化学習ベースの最適化手法を採用することで、従来の固定的な

配備方式では達成できなかった、より効率的で迅速な避難誘導が可能となり、全避難者の避難完了時間の短縮が実現できると考えられる。さらに、この方法は避難誘導システムの柔軟性を高め、実際の災害時における適応能力を向上させることができる。

### 3.6 強化学習

強化学習は機械学習の一分野であり、ある環境において得られる累積報酬を最大化する行動系列を学習することを目的とする手法である。機械学習は大きく分けて、教師あり学習、教師なし学習、強化学習の3つに分類される。本節では、教師あり学習および教師なし学習との比較を通じて、強化学習の特徴を説明する。教師あり学習は、データ集合とそれに対応する正解ラベルが与えられる環境で使用される学習手法である。この手法の目的は、与えられたデータとラベルの対応関係を学習することであり、未知のデータに対して適切なラベルを予測することにある。一方、教師なし学習は正解ラベルが与えられない環境で適用され、データ集合の中から潜在的な構造や規則性を見出すことを目的としている。これに対し、強化学習の特筆すべき特徴は、事前にデータが与えられない点である。強化学習では、エージェントが実際の環境において試行錯誤を繰り返すことを通じてデータを収集する。この過程でエージェントは環境から報酬を得て、その報酬を基に最適な行動を導き出す方策（ポリシー）を学習する。このように、データ収集と学習がエージェントの主体的な行動に基づいて進行するという点において、強化学習は教師あり学習や教師なし学習とは一線を画している。この試行錯誤を伴う学習プロセスは、環境の変化に適応しながら動的に最適な行動を選択する能力をエージェントに与える。したがって、強化学習は特に複雑で動的な環境下における意思決定問題において有効性を発揮する。

### 3.7 マルチエージェント強化学習

一般的な強化学習では、単一のエージェントを対象とした学習が想定される場合が多い。しかしながら、現実世界の多くの問題においては、複数のエージェントが同時に存在し、それぞれが相互作用を行う状況が頻繁に発生する。このような複数エージェントの学習を対象とした手法は「マルチエージェント強化学習 (Multi-Agent Reinforcement Learning, MARL)」と呼ばれ、近年、その研究が活発に進められている。マルチエージェント強化学習の重要性は、現実世界への応用において特に顕著である。例えば、交通制御、ロボット群制御、災害時の避難誘導などの分野では、複数のエージェントが協調または競合しながら行動を学習する必要がある。これらの応用分野において、マルチエージェント強化学習は有望な解決手段を提供すると期待されている。一方で、マルチエージェント強化学習には単一エージェント強化学習にはない特有の課題が存在する。その主な理由として、複数のエージェントそれぞれに対して方策（ポリシー）を学習させる必要がある点が挙げられる。このプロセスでは、エージェント間の相互作用を考慮した学習が不可欠であり、環境が動的かつ複雑になるため、計算量が増大することが知られている。特に、各エージェントが他のエージェントの行動を予測しながら最適な方策を学習する必要があるため、単一エージェントのケースに比べて学習プロセスが困難になる。

### 3.8 Multi-Agent Deep Deterministic Policy Gradient (MADDPG)

マルチエージェント強化学習における代表的なアルゴリズムとして、Multi-Agent Deep Deterministic Policy Gradient (MADDPG) [2] が挙げられる。この手法は、単一エージェントを対象とした強化学習アルゴリズムである Deterministic Policy Gradient (DPG) [26] を複数エージェントの環境に適用可能な形に拡張したものであ

る。MADDPG は、Actor-Critic [20] フレームワークに基づいて動作し、エージェント間の協調的な行動学習を可能にする。本アルゴリズムでは、学習時に各エージェントが他のすべてのエージェントの観測と行動を既知の情報として利用できることを前提としている。この特性により、各エージェントが個別に学習するだけでは得られない協調的な方策を獲得することが可能となる。Critic と Actor はそれぞれエージェントの数だけ存在する。特定のエージェントに対応する Critic は、そのエージェントだけでなく、他のすべてのエージェントの観測と行動履歴を利用して学習を行う。このような設計により、各 Critic はエージェント間の相互作用を考慮した学習が可能となる。一方、Actor は学習された Critic の情報を活用して更新され、実際の行動選択時には自身の観測のみを基に行動を決定する。このように、Critic が他のエージェントの観測や行動を利用するモデルは、中央監視モデルとして知られている。MADDPG の有効性は、さまざまなタスクを通じて実証されている。例えば、障害物が存在する環境で高速で移動する単一の目標を、複数のゆっくり動くエージェントが協調して捕獲するタスクや、エージェントの数と同数の目標が存在し、それぞれのエージェントが別々の目標を占有するタスクなどがある。前者のタスクでは、単一エージェントでは速さの制約により目標を捕獲できないが、複数エージェントが協調することでタスクを達成可能となる。後者のタスクでは、各エージェントが独立して行動した場合、全ての目標を占有できない場合がある。このようなタスクにおいて、MADDPG は単一エージェントを個別に学習させた場合と比較して優れた性能を示すことが確認されている。

### 3.9 PettingZoo

本稿においては、避難誘導における小型 UAV の再配置問題を強化学習に基づいて最適化するための学習環境を構築した。この学習環境の作成には、Python で開発されたマルチエージェント強化学習用フレームワークである PettingZoo を採用した。PettingZoo は、シンプルかつ柔軟なインターフェースを提供し、一般的なマルチエージェント強化学習問題を効率的に表現することが可能である。本稿では、このフレームワークを活用し、小型 UAV の動的な再配置を最適化するシミュレーション環境を構築した。学習環境では、避難誘導問題を避難所と BS をランドマークとし、小型 UAV をエージェントとしてモデル化している。エージェントは、ランドマーク間を移動することで避難誘導を行う。エージェントが BS に到達した際には正の報酬を付与し、BS で待機している場合には負の報酬を与える設計を採用した。さらに、報酬設計においては、残り避難者数や BS に待機中の小型 UAV の数といった要素を考慮し、適切な重み付けを行った。特に、各 BS における残り避難者の予測数を基に、避難需要が高い BS に対して高い報酬を設定することで、リソースの迅速な割り当てを実現している。一方で、各 BS に待機中の小型 UAV 数に応じて報酬を調整することで、過剰なリソースの集中を防ぐ仕組みも導入している。この学習環境においては、避難誘導を完了した小型 UAV の再配置先 BS を決定するプロセスを強化学習により最適化している。具体的には、各エージェントが残り避難者数の多い BS に対して優先的にリソースを割り当てると同時に、待機中の UAV 数を考慮したリソースの分散を実現することを目的として行動を学習することで、全体的な避難完了時間の短縮を目指している。PettingZoo を用いた本学習環境は、マルチエージェント強化学習アルゴリズムの適用が容易であり、動的な状況変化への高い適応性を有している。このため、エージェントの動作効率の向上を図るだけでなく、避難誘導プロセス全体の効率化を促進することが期待される。

## 第4章 性能評価

### 4.1 評価条件

宮城県石巻市を対象地域として、提案した BS 配置法と強化学習による小型 UAV の再配置先 BS の最適化手法の性能を評価するための計算機シミュレーションを実施する。対象地域は、第3章で作成した損傷道路ネットワークを用いる。対象地域には270名の避難者を配置する。避難者の配置は、対象地域内の人口分布を基に確率的に決定し、各避難者は配置されたノード上で大型 UAV に発見されるまで移動しないものと仮定する。これにより、避難者の初期位置が探索プロセスに与える影響を評価可能とする。大型 UAV は合計4機を使用し、対象地域を4分割した正方領域に基づいてそれぞれの探索範囲を割り当てる。この方式により、大型 UAV の探索効率を確保し、探索範囲の重複を最小限に抑える。また、小型 UAV は36機を使用する。小型 UAV は、大型 UAV が避難者を発見した後、避難者の誘導を担当し、BS を経由しながら効率的に避難所まで誘導する役割を担う。避難所は対象地域を9分割した1km四方の区画内に存在する小学校、中学校、高等学校、役所の中から1カ所を選定し、計9カ所を定義する。加えて、BS は前節で述べた配置手法に基づき、対象地域内に12カ所配置する。避難者の携帯端末が大型 UAV と通信可能である割合は50%とする。この条件は、避難者の通信手段が限定される実際の災害状況を模擬するものである。4機の大型 UAV の初期位置は対象領域の中心に最も近い避難所とする。シミュレーション開始からすべての避難者が避難所に到達するまでの時間を避難完了時間と定義する。

### 4.2 BS 配置設計法の評価

提案した BS 配置法の有効性をシミュレーションにより評価した。評価条件に加え、各 BS に小型 UAV を3機配備し、避難誘導を完了した小型 UAV が元の BS に帰還するという共通の条件のもと、提案方式に基づく BS 配置法と、BS 配置候補地からランダムに BS を配置した場合のそれぞれについて全避難者の避難完了時間を測定した。結果を累積分布として表したものを図4.1に示す。

図4.1から、BS 配置候補地からランダムに BS を配置する場合と比較して、提案方式に基づき最適位置に BS を配置した場合の方が避難完了時間が短縮されることが確認できる。この結果は、提案方式では複数の損傷道路ネットワークにおいて、各交差点ノードから避難所までの移動距離や BS の経由回数を考慮して BS を配置しているためである。これにより、道路損傷による迂回の発生を抑制できるだけでなく、大型 UAV が燃料補充や小型 UAV の再搭載のために BS へ向かう際の移動距離も短縮される。

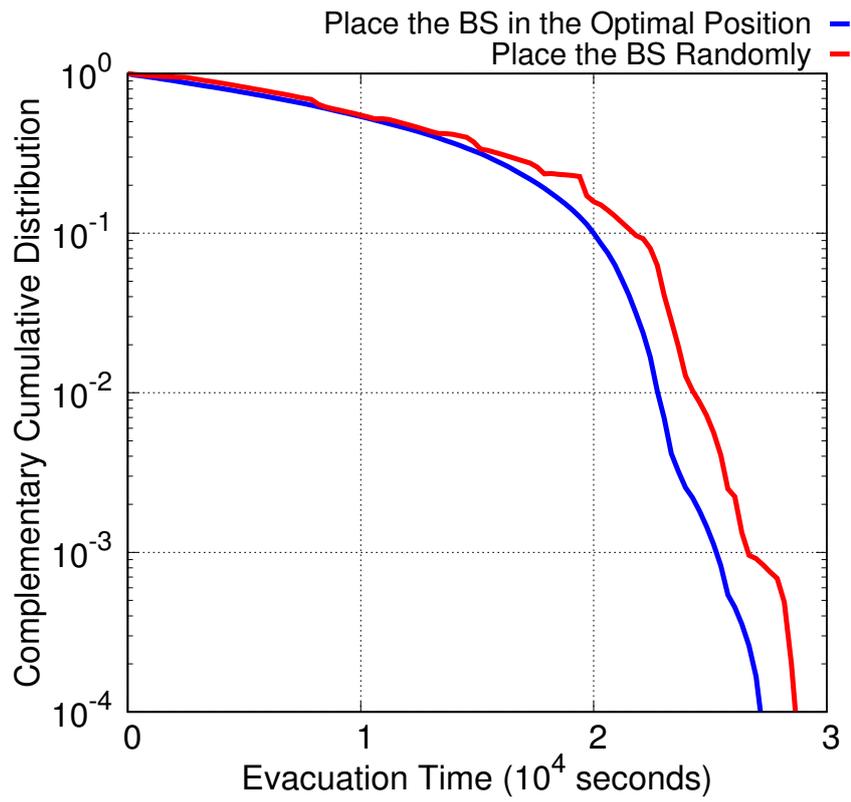


図 4.1: BS 配置法ごとの避難完了時間

### 4.3 強化学習による小型 UAV 再配置位置最適化の評価

強化学習による小型 UAV 再配置位置最適化の有効性をシミュレーションにより評価した。上記の評価条件のもと、PettingZoo を用いて UAV の動作を再現するカスタム環境を作成した。このカスタム環境において、小型 UAV の再配置先を最適化することを目指し、強化学習を適用した。学習の目標は、全体を通じた避難完了時間を短縮することであり、避難誘導を完了した後の小型 UAV の再配置先 BS を決定する意思決定モデルを学習させた。学習の進行状況を示すため、強化学習の学習ステップに応じた避難完了時間の推移を図 4.2 に示す。

#### 4.3.1 学習ステップにおける避難完了時間の推移

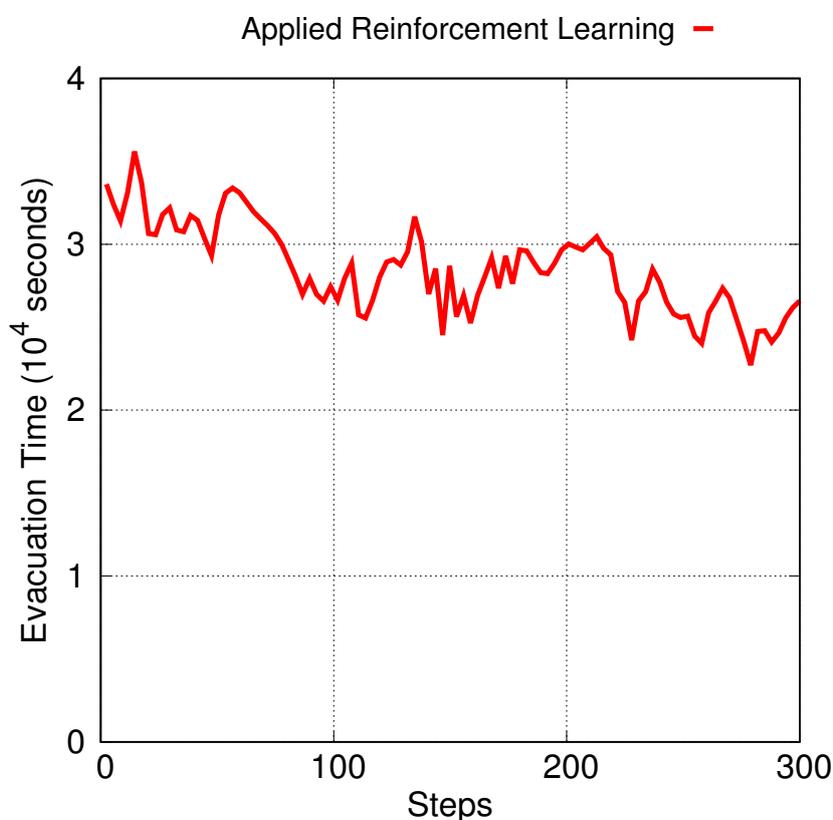


図 4.2: 学習ステップごとの避難完了時間の推移

図 4.2 から明らかなように、学習ステップ数が増加するにつれ、全体の避難完了時間が徐々に短縮されていることが確認できる。この結果は、強化学習を適用することで、効率的な再配置戦略が構築されることを示しており、避難誘導における UAV 運用効率の向上に寄与するものである。

### 4.3.2 避難完了時間の累積分布

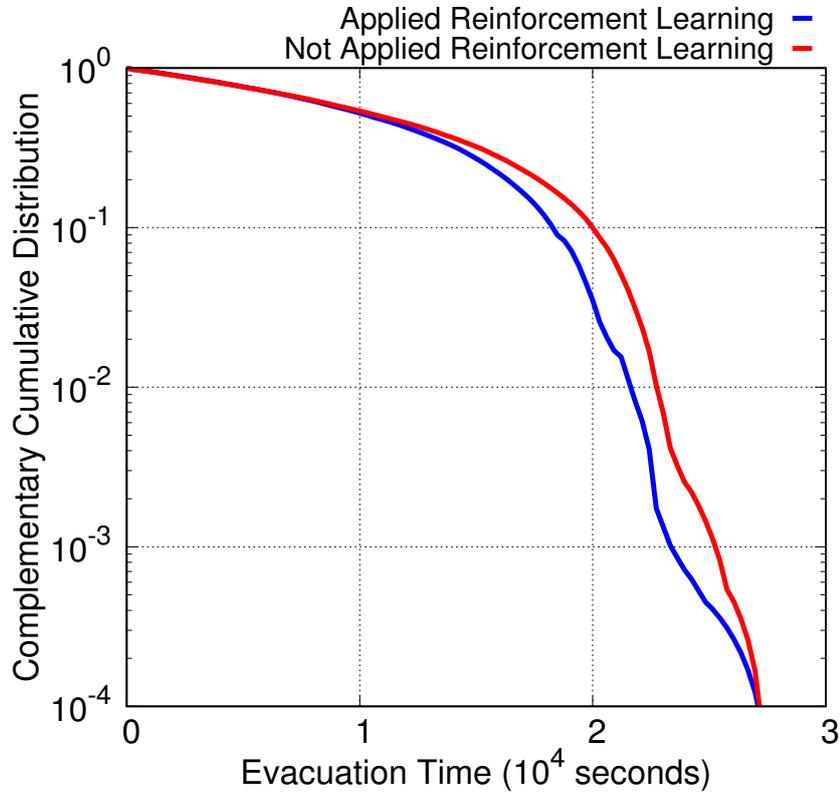


図 4.3: 強化学習の有無と避難完了時間

強化学習による小型 UAV 再配置最適化の効果を検証するため、小型 UAV の誘導完了後、元々配備されていた BS に再配置され、全 BS で小型 UAV の配備数が均一に保たれる場合と小型 UAV の再配置先 BS および BS ごとの小型 UAV 配備数を強化学習によって最適化する場合のそれぞれの条件下で 50 回の独立したシミュレーションを行い、全避難者の避難完了までに要する時間を測定する。測定結果は累積補分布として図 4.3 に示す。

図 4.3 から強化学習を適用し、各 BS の小型 UAV 配備数を最適化することで避難完了時間の短縮が達成されていることが確認できる。

## 第5章 まとめ

本稿では、先行研究で提案した大型 UAV と小型 UAV の複数種の UAV と避難者の持つスマートフォンなどの携帯端末を組み合わせた避難誘導システムの対象領域を複数の避難所を含む地域に拡大し、避難誘導システムを適用する方法を提案した。大型 UAV への小型 UAV の再登載や、バッテリー交換を行う拠点であるベースステーション (BS) の配置位置を災害リスクと人口分布に基づく配置に変更することで避難誘導システムを対象領域の拡大に対応させた。また、避難者の誘導が完了した小型 UAV を再度、BS に配置する過程を強化学習を用いて最適化することで、更なる避難時間の短縮を達成した。今後の課題としては、避難者が移動する場合や、道路状況が逐次的に変化する場合への避難誘導システムに対応させることが挙げられる。

# 謝辞

本稿を行うにあたり，ご指導をいただいた上山教授に感謝します．また日常，有益な議論をしていただいた研究室の皆様に感謝します．

## 参考文献

- [1] 内閣府 防災情報のページ <https://www.bousai.go.jp/kaigirep/hakusho/h18/bousai2006/html/honmon/hm01010101.htm>
- [2] M. Erdelj and E. Natalizio, “UAV-assisted disaster management: Applications and open issues,” in Proc. International Conference on Computing, Networking and Communications., 2016, pp. 1-5
- [3] K. Katayama, H. Takahashi, N. Yokota, K. Sugiyasu, G. Kitagata and T. Kinoshita, “An Effective Multi-UAVs-Based Evacuation Guidance Support for Disaster Risk Reduction,” in Proc. IEEE International Conference on Big Data and Smart Computing., 2019, pp 1-6
- [4] Aero Range Quad <https://g-lab.com/products/aerorangequad/>
- [5] 伊吹宏三郎, 上山 憲昭, “複数種の UAV と携帯端末を用いた避難誘導システム“, 電子情報通信学会 2023 年総合大会, B-15-27, 埼玉 2023 年 3 月
- [6] 曾澤高圧コンクリート AZ-1000 スペックカタログ <https://www.aaa-llc.jp/az-1000-catalog>
- [7] N. Bhattarai, T. Nakamura and C. Mozumder, “Real Time Human Detection and Localization Using Consumer Grade Camera and Commercial UAV,” 2018
- [8] C. Liu and T. Szirányi, “Road Condition Detection and Emergency Rescue Recognition Using On-Board UAV in the Wildness ,” 2022
- [9] W. Cai, Z. Ye, J. Zeng, “Research on the Design and Path Planning of Child-mother UAV System for Search Task ,” 2021 Journal of Physics Conference Series
- [10] N. Nauwynck, H. Balta, G. D. Cubber and H. Sahli, “In-flight launch of unmanned aerial vehicles,” in Proc. International Symposium on Measurement and Control in Robotics., 2018
- [11] K. Katayama, H. Takahashi, N. Yokota and K. Sugiyasu, “Evacuation Guide Supporting System using UAV for Coastal Area,” in Proc. IEEE 3rd Global Conference on Life Sciences and Technologies., 2021, pp 1-2
- [12] K. Katayama, H. Takahashi, N. Yokota, K. Sugiyasu, and T. Kinoshita, “Cooperation Scheme of Multi-UAVs for Evacuation Guidance Support,” in Proc. IEEE 7th Global Conference on Consumer Electronics., 2018, pp 1-2
- [13] A. Fujihara and Hiroyoshi Miwa, “Real-time Disaster Evacuation Guidance Using Opportunistic Communications”, Proc. of 2012 IEEE/IPSJ 12th International Symposium on Applications and the Internet, pp. 326-331, July 2012.

- [14] R. Sato, O. Oyakhire and K. Gyoda, "Performance evaluation of Disaster Information Communication System using Message Ferry", Proc. of ITC-CSCC2019, pp. 588-591, July 2019.
- [15] M. Suzuki, K. Hama and T. Nakamura, "Evacuation Support System Used by Cooperation Drone", Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers, vol. 56, no. 1, pp. 24-30, Feb. 2020.

## 外部発表リスト

- [1] 伊吹宏三郎, 上山 憲昭, “複数種の UAV と携帯端末を用いた避難誘導システム“, 電子情報通信学会 2023 年総合大会, B-15-27, 埼玉 2023 年 3 月
- [2] 伊吹 宏三郎, 上山 憲昭, “災害時の複数種 UAV と携帯端末を用いた避難誘導システム“, 電子情報通信学会ネットワークシステム (NS) 研究会, 沖縄, 2023 年 3 月
- [3] 伊吹宏三郎, 上山憲昭, “複数種 UAV と携帯端末を用いた避難誘導のベースステーション配置設計“, 電子情報通信学会 2023 年ソサイエティ大会, B-6-47, 名古屋, 2023 年 9 月
- [4] Kozaburo Ibuki and Noriaki Kamiyama, “Evacuation Guidance System Using UAVs of Multiple Types at Disaster,” IEEE CyberSciTech 2024, Malay, Philippines, Nov. 2024
- [5] 伊吹宏三郎, 上山 憲昭, “複数種 UAV による避難誘導システムの強化学習を用いた小型 UAV 再配置“, 電子情報通信学会 2025 年総合大会, 東京, 2025 年 3 月