

DTN を用いた情報共有に伴う積極的な避難行動が避難時間 に与える影響の検討

内藤 輝¹ 高井 峰生^{2,3} 石原 進¹

概要：大規模災害発生時、不道路箇所や避難所の位置に基づいて適切な避難経路を避難者へ提供することは迅速な避難に有用と見込まれる。通信インフラ不能時にも情報共有を可能とするために、矢原らは異種無線混合 DTN を用いた災害情報共有システムを提案している。このシステムは、Wi-Fi や Bluetooth などの短距離広帯域無線通信と LoRa や DCR (Digital Convenience Radio) 等の長距離狭帯域無線通信を併用し、情報共有を可能とするものである。矢原らは、異種無線混合 DTN を用いた避難者間の不道路箇所の情報の共有による避難時間の短縮を確認している。しかしながら、矢原らのモデルでは全避難者は不道路箇所を避けるように最短経路で避難しようとするため、同一の経路を選択する避難者が多くなり、それに伴う道路混雑によって避難が遅れてしまうというケースが確認されている。不道路箇所の情報に加え、混雑状況に基づいた避難経路を提示すれば、効率的な避難が可能になると考えられる。一方で情報を入手した避難者が他の避難者と異なる行動を積極的に行うことで混雑を生じさせ、避難時間が長くなる懸念もある。本稿では、DTN を用いた避難者間での不道路箇所の情報及び、混雑状況に基づいた推奨避難経路の提供に伴う積極的な避難行動が避難時間に与える影響をシミュレーションにより評価する。

1. はじめに

日本は世界有数の災害大国であり、台風や地震などの様々な自然災害が発生しやすい国土を持つ。特に、南海トラフ巨大地震をはじめとした大規模災害発生が懸念されており、それらに対する備えの重要性が増している。災害発生時には、被災地域を津波や洪水が襲う可能性があり、避難経路や移動手段が制限される。そのため、被災者の迅速な避難を可能とするために、避難者や災害対策期間等で適切に避難経路や被災箇所などの災害情報を共有することが求められる。

災害時には停電や携帯電話基地局の故障などによって通信インフラも被害を受けるため、平時と同様の方法を用いた情報共有が困難となる可能性がある。例えば、東日本大震災では約 850 万軒が停電し、被災者が通信できない状況が数日続いた。固定通信網は、被災地の固定通信回線の 50% 以上に当たる 190 万回線が被災し、携帯電話基地局は 2.9 万局が停止、破損した [1] [2]。

矢原らは、通信インフラの被災時にも避難者や災害対策

機関等で情報共有を可能とするため、異種無線混合 DTN を用いた災害情報共有システムを提案している [3]。Wi-Fi や Bluetooth などの短距離広帯域無線通信と LoRa や DCR (Digital Convenience Radio) などの長距離狭帯域無線通信を併用し、DTN を利用して情報共有を可能とするものである。矢原らは、[3] で固定中継ノードの適切な配置箇所や、DTN を用いた情報共有とそれに伴う避難行動による、DTN における情報配信経路の変化の相互影響を考慮した情報配信戦略の検討をしている。また、避難シミュレーションを実施し、避難者間、固定中継基地局で不道路箇所の情報を共有することで、避難時間が短縮されることを確認している。一方で、全避難者が不道路箇所を避けるように避難すると仮定しているため、特定の経路に避難者が集中してしまい、避難が遅れてしまうケースが確認されている。現実の環境においては、避難者自身が混雑状況を自ら判断して異なる経路を選ぶことが考えられる。また、避難者間、固定中継ノードで混雑情報を共有し、システムが混雑状況に基づいた避難経路を提示することで避難者を分散させ、避難時間を短縮できる可能性がある。

しかしながら、避難路を通知するようなシステムにおいて避難者は必ずしも通知された経路で避難することができるとは限らない。例えば、大勢の避難者が北に向かっていくとする。このとき一部の避難者が、携帯デバイスに示さ

¹ 静岡大学
Shizuoka University

² 大阪大学
Osaka University

³ カリフォルニア大学ロサンゼルス校
University of California, Los Angeles

れた指示に従って、南に進もうとする場合、大半の避難者の動きに反した南下する行動が取れるだろうか。このような疑問に答えるために、筆者らは情報取得に伴う周囲の群衆の移動に逆行する行動を考慮した群衆避難シミュレーションモデルを提案している [4]。このモデルはセルオートマトンをベースとしており、情報を取得した避難者の移動先のスペースが少ない場合の、他の避難者のパーソナルスペースを埋めてしまうような移動や、他の避難者の移動の流れに逆らった移動を取り扱うことができるモデルである。

本稿では、異種無線混合 DTN を用いた災害情報共有システムにおいて、不通箇所の情報に加え、混雑状況に基づいた推奨避難経路を避難者へ提供することによる避難時間短縮効果をシミュレーションにより検証する。これに当たり、他の避難者の移動の傾向や密度などにより移動が妨げられることや、情報取得に伴って移動の振る舞いに変化することを考慮し、筆者らの提案する移動モデル [4] を使用する。

以下、2 章では災害時の情報共有手法や移動モデルに関する関連研究について述べる。3 章では異種無線混合 DTN による災害情報共有システムについて概要と課題を述べる。4 章では本稿で想定する異種無線混合 DTN による自立分散的な混雑状況の把握方法と、混雑状況に基づく避難経路の情報提供方法について説明する。5 章では [4] で概要が示された移動モデルについて詳細に述べるとともに、4 章で述べる混雑状況の取得に基づく避難経路の提供についてシミュレーションのためのモデル化をする。6 章でシミュレーション評価に基づき、不通箇所の情報共有による避難時間短縮効果、混雑状況に基づく避難経路の情報の提供による混雑の解消、情報取得に伴う積極的な避難行動が避難時間に与える影響について検証、考察する。7 章で本稿をまとめる。

2. 関連研究

本章では、災害時における情報共有効果に関する研究及び、避難シミュレーションにおいて用いられる移動モデルについて述べる。

2.1 災害時における避難情報共有効果

災害時に既存の通信インフラが使用できない状況における、DTN を用いた情報共有効果に関する研究が東日本大震災以降多くみられる。DTN を用いた情報共有手法として Nishiyama らはスマホ de リレー [5] を提案している。スマホ de リレーは避難者が所有するスマートフォンの Bluetooth を用いた端末間直接通信を用いて情報共有を行う。周辺に通信可能な端末が存在しない場合には通信端末がデータを物理運搬し、端末が移動中に通信可能な端末とすれ違ふとデータを共有する。これにより、通信インフ

ラ不能時にも情報共有を可能とする。また、大和田らは、NeverNet と呼ばれる複数のアクセスポイントで構築したメッシュネットワークを用いて、不道路や避難所の位置などの避難支援情報を避難者に提供する手法を提案している [6]。同手法はアクセスポイントをメッシュ接続することで一部のリンクの途絶に対して耐性を持つ。NeverNet を用いた避難支援情報の提供によって避難時間が短縮されることがシミュレーションによって確認されている。

通信インフラ不能時には DTN の利用だけではなく、ラジオや防災無線などの音声ベース情報共有方法も有効であると考えられる。渡辺らは災害発生時に情報拡散手段を組み合わせることで相乗効果が生まれ、単体での使用に比べて避難時間が短縮されるかを評価している [7]。道路寸断情報を、ラジオ、Twitter、車両間の無線通信、人伝などの複数の情報拡散手法を組み合わせて共有することを想定しており、避難時間が短縮されることをシミュレーションによって確認している。松島らは避難者の情報伝達能力を考慮した広域災害避難シミュレーションモデルを提案している [8]。松島らのモデルでは、避難者が他の避難者へ呼びかけを行うことによって避難場所や特定の場所への避難経路の情報を共有する行動が考慮されている。拡声器を所持した誘導員の動員や行政無線の設置も考慮しており、音声を媒体として避難経路情報と避難所の情報を避難者へ提供する。神戸市、仙台市、つくば市の 3 地域を対象にシミュレーションを実施し、音声による避難経路情報共有による避難時間の短縮効果を確認している。

2.2 人流の動きの差異を考慮できる移動モデル

人流に沿う・逆らう場合の人の動きの差異を考慮できるモビリティモデルとして、Social Force Model (SFM) [9] が知られている。SFM は歩行者同士が互いに影響してその挙動が変化するかという点に主眼を置いたモデルである。歩行者は目的地からの引力、他の歩行者や壁などの障害物からの斥力を受けるものとし、それらの力の合成によって避難者の運動を決定づけるものである。人体が受ける摩擦力や圧力なども考慮されており、歩行者が接触した時の相互作用を反映したモデルである。一般的にマルチエージェントモデルによるシミュレーションにおいて SFM をベースとしたモデルが提案されている [10] [11]。

Yamazaki らは人間の心理モデルを組み込んだ避難シミュレーションモデルを提案している [12]。Yamazaki らのモデルは、災害発生時の心理的バイアスを考慮した、避難者の避難開始の遅れや、周囲の避難者への追従、歩行速度の調整などが反映されたマルチエージェントベースのモデルである。Yamazaki らはシミュレーションによって心理的な要素の考慮していないモデルよりも正確な避難行動を提供することを示している。

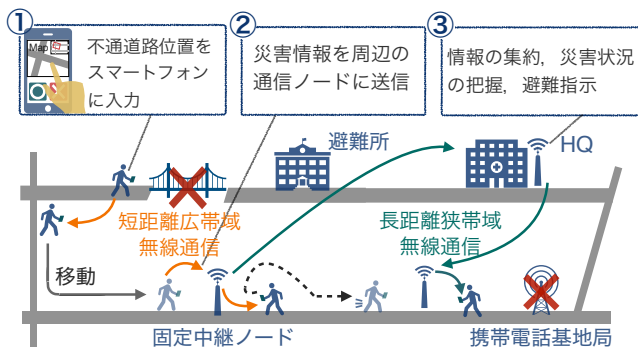


図 1 異種無線混合 DTN を用いた災害情報共有システム

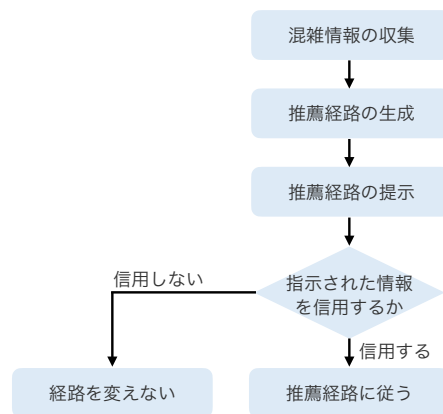


図 2 避難経路の推薦と避難行動の流れ

以上のように DTN を利用した避難支援に関する研究は多く行われているが、短距離広帯域無線通信と長距離狭帯域無線通信を併用した DTN を用いて自立分散的に混雑状況に基づく避難経路を提供を行い、情報共有に伴う行動変化を考慮して避難支援の効果を検証する取り組みは筆者らの知る限り行われていない。

3. 異種無線混合 DTN を用いた避難支援情報共有システム

3.1 システムの概要

図 1 に、異種無線混合 DTN を用いた災害情報共有システムの概要を示す。本システムは災害発生時、単一の通信手段に依存せず、被災者の動きを考慮した災害情報共有システムである。本システムでは Wi-Fi や Bluetooth などの短距離広帯域無線通信と LoRa やデジタル簡易無線 (DCR) などの長距離狭帯域無線通信を併用した DTN (異種無線混合 DTN) を用いることにより、被災者や災害対策機関で、被災した道路の位置や被害規模、避難所の位置や収容可能人数、避難指示、救援要請といった災害情報を共有する。システムは避難者が保持するモバイル端末と、災害対策機関や道路脇に設置された固定中継ノードからなる。避難者が保持するモバイル端末には短距離広帯域無線通信機能が搭載されており、避難者や固定中継ノードが通信可能になるとそれらの間で避難支援情報を交換する。固定中継ノードには、短距離広帯域無線通信機能に加え、長距離狭帯域無線通信機能が搭載されており、周囲の避難者との間で避難支援情報を交換するだけでなく、固定中継ノード間で避難支援情報の交換を行う。

3.2 異種無線混合 DTN を用いた避難支援情報共有時の課題

災害発生時には避難者は基本的に避難所へと向かうため、避難所へ向かう方向から逆方向へ進む避難者は少なくなり、その方向への DTN を用いた情報伝達は難しくなる。しかしながら、不通道路などの被災箇所に関する情報は、その被災箇所へ到達前の避難者へ提供されることでその効

果を発揮する。

不通箇所の情報を取得した避難者は、不通箇所を避けるように避難を試みる。しかしながら、多くの避難者が距離に基づいた最短経路に従って避難すると、特定の経路へ避難者が集中してしまう可能性がある。従って、不通箇所の情報のみの共有だけでは避難路の混雑によって避難が遅れてしまう可能性がある。一方で、不通箇所の情報だけでなく、避難路の混雑状況を共有できれば、特定の経路への避難者の集中を解消できる可能性がある。

不通箇所の情報や避難経路情報を取得した避難者は経路変更のために、周囲の群衆の流れに逆らった移動や方向転換を必要とされることが予想される。混雑した状況下では必ずしも自身の望む方向へ進ことができるわけではない。避難者の特性や避難者の密度のほか、他の避難者の移動の流れによる影響を受ける。そのため、シミュレーションを行う際には人流に沿う場合と逆らう場合の人の動きの際を考慮できるモビリティモデルが必要となる。さらに、人の動きや移動の傾向によって情報共有の効果が変化することが予想される。したがって、各避難者の状況に応じた情報配信を可能とするために、災害時の人や車両の動きを加味した情報配信戦略が必要となる。

4. 混雑状況の取得に基づく避難経路の推薦

本章では矢原らの提案する異種無線混合 DTN による避難支援システムを拡張し、固定中継ノードによる混雑状況の推定及び、混雑状況に基づく避難経路の提供方法について述べる。図 2 に混雑状況に基づく避難経路の生成から避難者をの行動に至るまでの過程を示す。これを実現するために、以下 4 点について考慮する必要がある。i) 被災エリアにおける道路や交差点ごとの混雑状況の把握方法。ii) 取得した混雑状況に基づいた避難所までの望ましい経路の生成方法。iii) 生成された経路情報の配信方法。iv) 避難者の情報に対する信用の有無。以下、上記の 4 点について詳細を説明する。

4.1 混雑状況の把握方法

異種無線混合 DTN において避難者の所有するモバイル端末と固定中継ノードのみを用いて混雑状況を把握する方法について述べる。混雑状況の把握のために避難者の所有するモバイル端末が一定期間ごとに自身の滞在している GPS などによって取得した位置情報を周囲にブロードキャストする。固定中継ノードは短距離広帯域無線の通信可能範囲内に存在する避難者から受信したビーコンを一定期間カウントすることで、その時点での隣接する道路セグメントや交差点内の避難者の数を推定する。固定中継ノード間で長距離無線通信を用いることで取得したビーコンの数を共有することで、避難所までの経路上に存在する避難者の数を推定することができる。このように、短距離無線通信と長距離無線通信を併用することで、固定中継ノードの稼働台数や避難者の密度にもよるが、被災エリアの広範囲にわたる混雑状況の把握が可能となる。本稿でのシミュレーションでは、3 台の固定中継ノードが混雑状況把握のためのパケット収集を行うことを想定している。

4.2 推奨避難経路の生成方法

固定中継ノードによって収集された混雑状況に基づいた生成方法として、次のような基準によって生成する方法が考えられる。i) 避難所までの経路候補のうち、経路上の避難者数が最も少なくなる経路の推薦。ii) 避難所までの経路候補のうち、混雑による避難者の歩行速度の低下と避難所までの距離に基づいて計算される避難時間を基準とした避難経路の生成。i) による経路の生成は、固定中継ノードから避難所までの経路の候補に対してそれぞれに含まれる道路、交差点上の避難者の合計を比較して、最もその数が小さい経路を選ぶことで可能である。ii) による経路の生成を行うには、経路の混雑度合いに加えて避難者の歩行速度を正しく推定する必要がある。避難者の混雑した状況での歩行速度は運動能力により異なるので、避難者ごとに適切な経路を個別で生成することが求められる。ii) による避難経路生成の方が i) に比べて避難時間短縮効果が期待できるが、避難者の特性や状況に合わせて異なる経路を提供することが必要になるためシステムが複雑になる。本稿でのシミュレーションでは i) に基づいた経路生成を扱う。

4.3 生成された経路の提供方法

生成された経路の提供方法としては複数の方法が考えられる。複数の固定中継ノードが共通の起点から避難所までの同じ経路を生成してを配信する方法や、各固定中継ノードがそれぞれの位置に応じて異なる経路を配信することなどが考えられる。固定中継ノードから受信した経路の扱いにも複数の方法がある。固定中継ノードから受信した経路を DTN によって他の避難者に伝えるか否か。伝えるので

あれば何ホップ先まで伝えるのか、あるいはどの位置の避難者に伝えるかなど様々な方法がありうる。

生成された推奨避難経路の情報がどのように避難者に提供されるかによって避難行動へ与える効果は異なる。例えば、マルチホップで避難者間で経路情報を共有する場合、経路情報が生成された位置から離れている一部の避難者においては推奨経路が望まれた経路とはならない可能性がある。さらに、多くの避難者へ経路の情報が広まると、その経路に従って避難者が集中してしまう懸念もある。本稿でのシミュレーションでは、単純なシナリオを想定し、ある 1 台の固定中継ノードのみが、自身と他の固定中継ノードから収集してきたデータをもとに生成した経路を、自身と直接通信可能な避難者へ提供するものとし、避難者はその経路を他の避難者には伝えないものとした。つまり、避難者は固定中継ノードから直接推奨避難経路を受け取った場合のみ、その経路に従って行動する。

4.4 避難者の情報に対する信用度の考慮

避難者は経路情報を受け取ったとしても、必ずしもその経路に従って避難するとは限らない。情報の性質や送信元の違いによって信用する度合いは異なると考えられる。例えば、他の避難者を経由して受け取る情報は固定中継ノードから直接提供される情報と比べて、信用されにくい可能性が考えられる。加えて、避難者の情報に対する信用の度合いは避難行動によって変化する可能性がある。例えば、経路情報を受け取った直後はその経路を信用していないが、他の避難者が経路を信じて行動する様子を見て、その経路を信じるという可能性も考えられる。情報に対する信用度と避難行動は相互作用を及ぼすことが想定されるため、情報共有モデルに情報に対する信用度を考慮することで、より詳細な避難行動のモデル化ができると考えられる。本稿でのシミュレーションでは、避難者は推奨避難経路を受信すると、必ずその情報を信じるものとした。

5. シミュレーションモデル

異種無線混合 DTN による避難支援システムにおいて不通箇所の情報に加え、4 章で述べた混雑状況に基づく避難経路の生成及び配信をモデル化する。情報を取得した避難者が避難経路を変更しようとする際、その避難行動は避難者の特性や他の避難者の密度、他の避難者の移動の流れによる影響を受ける。そのため他の避難者流れに沿う・逆らう移動や情報取得に伴って移動の傾向が変化することを考慮した上で移動モデルを設計した。以下、避難者の移動モデルと避難支援情報の共有モデルについて述べる。移動モデルについては [4] で提案しているモデルを包含しているが、完全性のため本稿においても説明する。

5.1 前提条件

本シミュレーションでは災害発生後、セルラ通信が使用できない環境下で、避難者、固定中継ノード間で短距離広帯域無線通信、及び長距離狭帯域無線通信を用いることを想定する。全避難者は短距離広帯域無線通信が利用できるモバイル端末を所持していると想定する。固定中継ノードは対象領域内の交差点に設置され、短距離広帯域無線通信と長距離狭帯域無線通信が利用できると想定する。災害発生直後に、道路のある1箇所が寸断された状況において、避難者は徒歩で1箇所の避難所へ避難する。各避難者、固定中継ノードは対象領域の地図を持っている。避難者は自身の現在位置と避難所の位置を知っており、セル数に基づいて現在位置から避難所までの最短経路で避難することができる。避難者、固定中継ノード間では不道路の位置を共有し、固定中継ノードは避難者に対して混雑状況に基づいた領域内の避難者がとるべき避難所までの推奨避難経路を提供する。

シミュレーションモデルは二次元セルオートマトンモデルをベースとしており、道路を連続するセルの集合として表現している。各道路、交差点にはそれぞれIDが割り当てられる。1つのセルに入ることができる最大避難者数を N_{\max} とする。

5.2 避難者の移動モデル

5.2.1 基本方針

避難者は各タイムステップで自らの所有する情報に基づいて避難所までの最短経路を求めてそれに基づいて移動を試みる。避難者は自身のとりたい経路と周辺セルの状況に応じて行動（上下左右のセルへの移動、あるいは移動しない）を確率的に決定する。この要素を本モデルに反映させるために、移動確率の計算に Floor field を用いる。避難者は情報の取得に伴い、その情報の内容によって、周囲の避難者の流れに逆らうような行動をとることになる可能性がある。このような避難者に情報の有無で行動を変化させる要素を導入する。

5.2.2 移動確率の計算

目的地までの距離に加えて、隣接セルの避難者の移動方向と情報取得に伴って生じる周囲の流れに逆らう積極的な行動を反映できるように各方向への移動確率を計算する。セル i の4近傍隣接セルの集合を C_i とする。セル i に滞在する避難者がセル $j \in C_i$ へ移動する時の移動確率は以下のように計算される。

$$p_{i,j} = \frac{S_{i,j}}{\sum_{k \in C_i} S_{i,k}} \quad (1)$$

$$S_{i,j} = \exp(\Delta f_{i,j}) \hat{N}_j \exp(F_{i,j})$$

$S_{i,j}$ はセル i から j へ移動しようとする強さを表す。 $\Delta f_{i,j}$

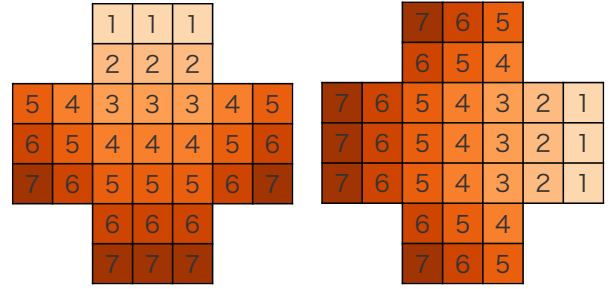


図 3 Floor field の例

は目的地までの距離であり、5.2.3 で述べる Floor field に基づいて計算する。 \hat{N}_j はセルに新たに収容可能な人数に関する変数である。情報を取得した避難者が積極的な移動をすることを考慮して5.2.4 に示す方法で計算する。 $F_{i,j}$ は隣接セルの避難者の移動方向、及び周囲の流れに逆らう移動を避難者の行動に反映させた移動の強さを表す値である。5.2.5 で $F_{i,j}$ の計算方法を示す。

5.2.3 Floor field

目的地までの距離を避難者の行動に反映させるために Floor field を用いる。セルオートマトンによるモデルに距離による遠距離の影響を反映する際に一般的に用いられるものである [13] [14]。図 3 に北端、東端を目的地とする場合の Floor field の値の例を示す。各セルは floor field の値を持っており、最終目的地から近いセルほど小さい値を持つように設定される。セル i からセル j へ移動する時、その Floor field 値を f_i, f_j とすると floor field の差は $\Delta f_{i,j} = f_i - f_j$ と計算される。すなわち、 $\Delta f_{i,j}$ は目的地までの近さを表す変数であり、目的地までの距離を移動確率に反映するために用いる。例えば、北端を目的地として移動している避難者が不通箇所の情報や推奨避難路の情報を受信することで、目的地を東端へ変更する場合、避難者は自身が参照する Floor field を図 3(a) から図 3(b) へ変更する。

5.2.4 セルの収容人数の拡大

通常セルオートマトンモデルではセルの最大収容人数は一定であるが、本モデルでは、情報取得に伴う積極的な避難行動により狭いスペースにでも入り込むことを想定し、通常時の最大収容人数よりも多く収容することを許容する。そこで、式 (1) の \hat{N}_j を情報を持たない避難者と情報を取得した避難者で場合分けし、以下のように計算する。

$$\hat{N}_j = \begin{cases} N_{\max} - N_j & \text{情報を持たない避難者} \\ N_{\max} - N_j + N_{\text{add}} & \text{情報を取得した避難者} \end{cases}$$

5.2.5 周囲の避難者の流れに逆らう移動の強さ

避難者が周囲の避難者の移動方向に逆らってでも移動しようとする行動を扱う。このような積極的な行動をする強さを実行力 E と定義する。 $F_{i,j}$ の計算には E に加え、移

動先セル j に滞在する避難者の 1 タイムステップ前の移動方向を考慮する。自身の移動方向に対して逆方向、垂直方向へ移動、また、停止している移動先セル j に滞在する避難者の数をそれぞれ N_r^j, N_c^j, N_s^j とすると、 $F_{i,j}$ は以下のように計算される。

$$F_{i,j} = E - W_r N_r^j - W_c N_c^j - W_s N_s^j \quad (2)$$

W_r, W_c, W_s はそれぞれ、 N_r^j, N_c^j, N_s^j が移動を妨げる度合いを与える重みである。避難者に対して逆方向に進むほど強く移動を妨げると考えられるため、 $0 \leq W_r \leq W_c \leq W_s \leq 1$ とする。また、自身と同じ方向へ移動する避難者については移動を妨げないものとし、これは $F_{i,j}$ の計算に含めない。

5.3 避難支援情報の生成と提供のモデル化

5.3.1 基本設定

本モデルにおける無線通信の概要を図 4 に示す。4 近傍距離で表した短距離広帯域無線通信の通信可能範囲を R_{short} 、長距離狭帯域無線通信の通信可能範囲を R_{long} とする。通信ノードが短距離広帯域無線通信を用いて情報を送信するとき、自身から R_{short} セル以内に存在するすべての通信ノードへ情報が送信される。長距離狭帯域無線通信については固定中継ノード間のみで使われるため、送信元の固定中継ノードから R_{long} セル以内に存在するすべての固定中継ノードへ情報が送信される。避難者は 1 タイムステップごとに自身の滞在している道路もしくは交差点の ID が付与されたパケット、不通箇所情報を周囲の通信ノードへ送信する。固定中継ノードは周囲の通信ノードへ不通箇所情報を共有することに加え、混雑状況に基づいた推奨避難経路情報の提供を行う。以下、不通箇所情報の共有と混雑状況に基づいた推奨避難経路の生成と配信方法のモデルについて述べる。

5.3.2 不通箇所情報の共有

避難者は不通箇所遭遇するもしくは他の通信ノードから不通箇所の道路 ID を取得すると、 R_{short} 以内に存在するすべての通信ノードへその道路 ID を送信する。不通箇所の道路 ID を取得した通信ノードは、同じタイムステップの間でその ID を周辺の R_{short} 以内に存在する通信ノードへ送信する。この情報配信時には、複数の通信ノードが 1 度送信した情報と同じ情報を短時間に何度も送信してしまい、ブロードキャストストームが発生し、ネットワークの帯域を圧迫してしまう懸念があるが、本システム利用時にはアドホックネットワークにおいてブロードキャストストームの問題を回避する既存のフラディング手法 [15] が使用されていると仮定する。固定中継ノードは、1 タイムステップごとに短距離広帯域無線通信を用いて周囲の避難者へ不通箇所情報の道路 ID を送信することに加え、10 タイムステップごとに長距離狭帯域無線通信を用いて R_{long} 以

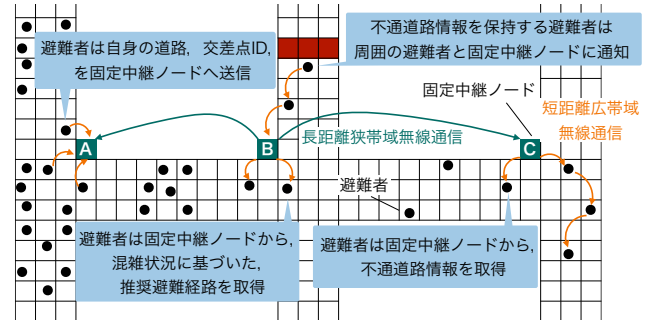


図 4 セルオートマトンにおける無線通信モデル

内の他の固定中継ノードと不通箇所の情報の共有をする。

5.3.3 混雑状況に基づいた推奨避難経路の生成と配信方法

混雑状況を推定するために、避難者が 1 タイムステップごとに送信している自身の現在地の道路と交差点の ID を使用する。固定中継ノードは図 4 のように交差点に隣接するセルに設置されるため、隣接している道路や交差点の ID が付与されたパケットを受信することができる。固定中継ノードは 10 タイムステップの間に、受信した道路や交差点の ID が付与されたパケットの数をその ID に対応づけてカウントする。固定中継ノードは 10 タイムステップごとに、収集した部分的な混雑状況、すなわち、隣接する道路と交差点ごとの受信パケット数を通信可能な R_{long} 内の他の固定中継ノードと共有する。固定中継ノードは共有された受信したパケット数をその ID ごとに加算する。固定中継ノードは対象地域の地図を所持しているため、避難所の位置を知っている。固定中継ノードは自身の位置から避難所までの経路上の道路、交差点でカウントされた受信パケット数を合計し、自身の位置から避難所までの経路候補の中で最もパケットの合計数が少ない経路を避難者へ提供する。この推奨避難経路情報は 10 タイムステップごとに固定中継ノードから R_{short} 以内に存在する避難者へ提供される。

6. シミュレーション評価

異種無線混合 DTN を用いた情報共有及び、情報共有に伴う積極的な避難行動が避難時間に与える影響を確かめるために、第 3 章で述べた移動モデルと無線通信モデルを用いて、避難シミュレーションを行った。

6.1 シミュレーションシナリオ

図 5 に示すようにシミュレーションマップは道幅 3 セルの道路 17 本、交差点 12 箇所、避難所 1 箇所からなる。各道路、交差点にはそれぞれ ID が割り当てられている。矢原らのシミュレーションの結果から、固定中継ノードは不通箇所付近と、避難者が多く通ることが予想される箇所に配置することで効果が発揮されることが確認されているため、交差点 ID3, 7, 11 の地点に配置した。不通箇所箇

表 1 シミュレーションシナリオ

	避難者間の 不通箇所の情報共有	固定中継ノードの 不通箇所の情報共有	固定中継ノード による経路分散
(i) 情報共有なし	-	-	-
(ii) 短距離広帯域無線通信による共有のみ	✓	-	-
(iii) 短距離広帯域無線通信+長距離狭帯域無線通信	✓	✓	-
(iv) 短距離広帯域無線通信+長距離狭帯域無線通信+経路分散	✓	✓	✓

*各シナリオについて積極的行動あり/なしの場合を設定

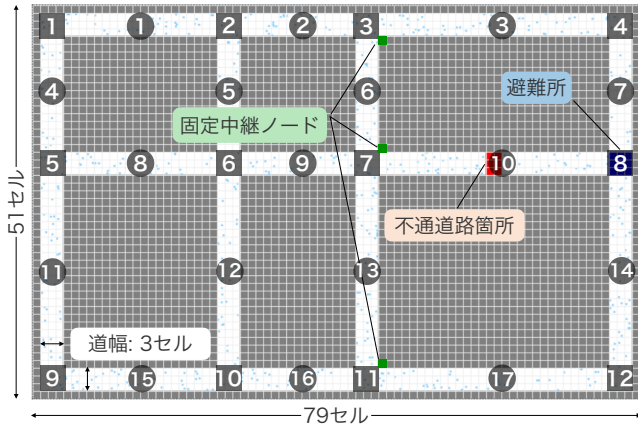


図 5 シミュレーションマップ
(推奨避難経路の配信は交差点 7 の固定中継ノードのみが行う)

所は道路 ID10 の中央とした。

シミュレーションパラメータを表 2 に示す。セルの大きさは 2 m 四方とした。道幅は 6 m となり、一般的な住宅街における道路幅と同程度の道幅となる [16]。歩行者の密度を 1 人/m² としたため、セルの最大収容人数 N_{max} は 4 人とした。歩行者の歩行速度は [17] で定められている速度を参考にし、1 m/sec. とした。1 タイムステップあたりの時間は 2 sec. とした。従って避難者は 1 タイムステップで最大 1 セル進むことができる。シミュレーション時間は 22 min. (660 タイムステップ) とした。これは、南海トラフ巨大地震を想定した、浜松市における最大津波到達時間を参考に設定した [18]。

シミュレーションは表 1 に示す 4 パターンで行った。シナリオ (i) では、避難者、固定中継ノードともに情報共有を行わないため、すべての固定中継ノードが故障しており、避難者はモバイル端末を所有していないシナリオに相当する。避難者は自身が不通道路箇所を発見した場合のみ、不通道路箇所を避けるように経路を更新する。シナリオ (ii) では、避難者間でのみ不通箇所の情報共有を行う。避難者は自身が不通道路箇所を発見、もしくは他の避難者から不通箇所の情報取得した場合に、不通道路箇所を避けるように経路を更新する。シナリオ (iii) では、避難者間での不通箇所の情報共有を行うことに加え、固定中継ノードと避難者間でも不通箇所情報を共有する。シナリオ (iv) では、シナリオ (iii) の設定に加え、固定中継ノードによる推奨避難経路の配信を行う。混雑状況把握のための交差点及

表 2 シミュレーションパラメータ

パラメータ	値
セルの大きさ	2.0 m 四方
セルの最大収容人数 N_{max}	4 人
追加の収容人数 N_{add}	1 人
避難者の初期位置	一様乱数
全避難者数	100-1600 人
避難者の移動速度	1.0 m/sec.
実行力 E	[0, 1]
(W_r, W_c, W_s)	(0.5, 0.3, 0.1)
短距離広帯域無線通信の通信可能範囲 R_{short}	3 セル
長距離狭帯域無線通信の通信可能範囲 R_{long}	100 セル
1 タイムステップあたりの時間	2.0 sec.
シミュレーション時間	22 min. (660 タイムステップ)

び道路 ID に対応されたパケットの収集は図 4 における全ての固定中継ノードが行い、混雑状況に基づいた経路情報の提供は交差点 ID7 の固定中継ノードのみが行うものとした。また、シナリオ (i)-(iv) それぞれにおいて、情報取得に伴う積極的な避難行動を取る場合と、取らない場合でシミュレーションを行った。

6.2 シミュレーション結果

図 6 にシナリオ (i)-(iv) について、全避難者数を変化させた場合の結果を示す。不通箇所の情報もしくは経路情報を取得した避難者が積極的な行動をとる場合の結果を実線で、積極的な行動を取らない場合を点線で示す。

6.2.1 不通箇所の情報共有による避難時間短縮効果

図 6 に示す結果から、シナリオ (i) とシナリオ (ii) における全避難者避難完了時間を比較すると、全避難者数が 100 人の場合には約 20% 短縮されており、全避難者数が 1100 人の場合には約 72% 短縮されている。より避難者の密度が高い、全避難者数が 1600 人の場合については、不通道路の情報共有を行う (ii)-(iv) のシナリオでは全避難者が 22 分以内に避難所へ到達しているが、情報共有を行わないシナリオ (i) において全体の 30% の避難者が最大津波到達時間である 22 分以内に避難所へ辿り着くことができていないことが確認できる。避難者の密度が高くなるほど、不通箇所情報の共有効果が大きいことが確認できる。

シナリオ (ii)、シナリオ (iii) について、全避難者数の設

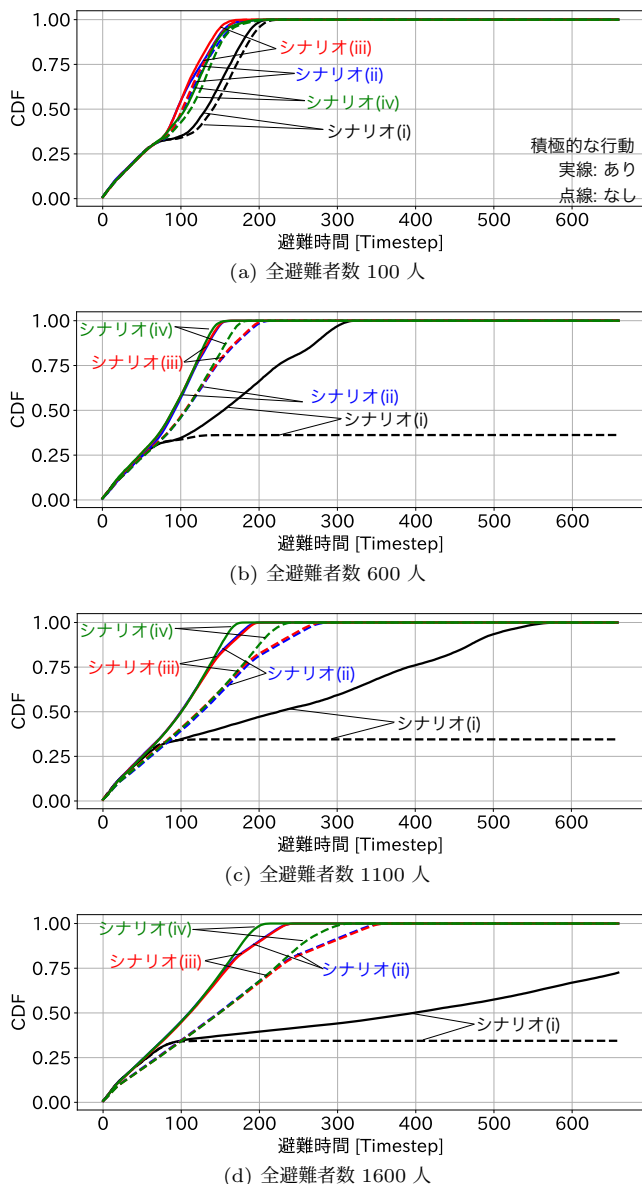


図 6 全避難者数を変化させた際の避難時間の CDF

定ごとに比較する。全避難者数が 100 人の場合にはシナリオ (ii) よりシナリオ (iii) の方が避難時間が短い傾向にあることが確認できる。この要因を探るために避難者の密度が低い時の避難者の移動を観察すると、シナリオ (ii) において一部の避難者が置き去りとなってしまう、避難が遅れてしまうケースが確認された。不通箇所を所有した避難者が、不通箇所の情報を持たない他の避難者へ情報を受け渡す前に避難所へ到達してしまうため、他の不通箇所の情報を持たない避難者は不通過路へ向かってしまい、一部の避難者の避難時間が延びてしまっている。置き去り問題は避難者の初期位置によっては発生しない場合もあるが、避難所から遠い避難者が孤立してしまうような配置となった際に観測されることが多くあった。

置き去り現象は矢原らのシミュレーションでも指摘されている課題であり、移動モデルと通信モデルの一部を変更

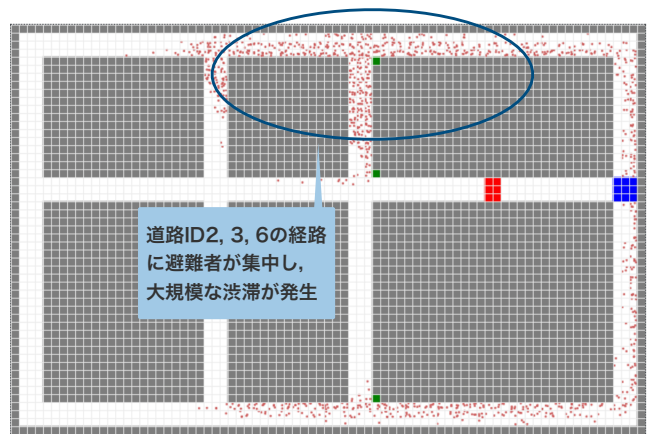


図 7 特定の避難経路への避難者の集中 (全避難者数 1600 人, シナリオ (iii))

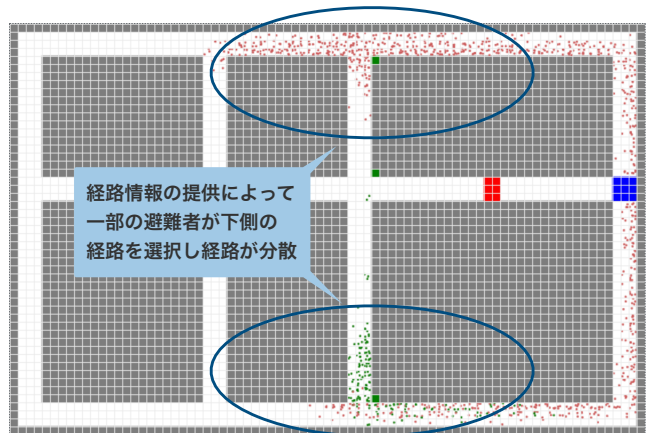


図 8 避難経路の分散 (全避難者数 1600 人, シナリオ (iv))

した本シミュレーションにおいても確認された。置き去り問題については固定中継ノードの配置によって解消されることを矢原らが述べている。本シミュレーションにおいても不通箇所の情報及び経路情報を提供するシナリオ (iii), (iv) では積極的な行動の有無に関わらず置き去り現象は解消されている。なお、置き去り問題は避難者の密度が高くなると避難者間の情報共有のみで十分に不通箇所の情報が普及するため発生しない。そのため、避難者の密度が高い場合には、シナリオ (ii), (iii) の避難時間の分布がおおよそ一致していると考えられる。

6.2.2 固定中継ノードを使った推奨避難経路提供の効果

図 6(b)-(d) に示す結果から、避難者の人数が増加するにつれて、経路情報の提供の効果が大きくなっていることが確認できる。全避難者数の増加に伴い、避難経路の混雑が発生しやすくなることに加え、不通箇所の情報の普及が十分に行われる。シナリオ (i), (ii), (iii) では全ての避難者は不通箇所を避けた最短経路で避難しようとするため、特定の避難経路へ避難者が集中する。図 7 に全避難者数 1600 人, シナリオ (iii) におけるアニメーションのスナップショットを示す。赤色のノードは不通箇所の情報を取得

した避難者を表す。今回用いたシミュレーションマップでは、図 7 に示すように道路 ID2, 3, 6 へ避難者が集中した。図 8 に全避難者数 1600 人、シナリオ (iv) におけるアニメーションのスナップショットを示す。緑色のノードは推奨避難経路の情報を受け取った避難者を表す。シナリオ (iv) では混雑状況に基づいた推奨経路の提供によって、道路 ID13,14,17 の経路へ避難者の一部が誘導され、特定の避難経路への集中が緩和されることが確認された。

一方で、図 6(a) に示す結果から、全避難者数が 100 人の時にはシナリオ (iv) より不通箇所の情報のみを共有したシナリオ (iii) の方が避難時間が短い傾向にあることが分かる。シナリオ (iv) では固定中継ノードが収集した道路及び交差点 ID が付与されたパケット数から、ID と対応する道路及び交差点内の避難者数をカウントし、交差点 ID7 に設置された固定中継ノードが、避難者数が少ない交差点及び道路を經由して避難所へ向かうよう経路情報を避難者へ与える。そのため、避難者の密度が低い場合には、最短経路となる道路の混雑度が渋滞が発生するほど高くないにもかかわらず、より空いている遠回りの経路へ誘導してしまう場合があり、却って避難時間が長くなってしまおうと考えられる。

6.2.3 積極的な避難行動に関するパラメータによる影響

本シミュレーションにおける積極的な避難行動に関するパラメータとしてセルの追加の収容人数 N_{add} 、実行力 E 、他の避難者の流れによる影響度を表す重み W_r, W_c, W_s が挙げられる。セルのサイズを 2.0 m 四方、歩行者の密度を 1 人/m² としているため、追加で収容できる人数は 1 人が限界だと考えられる。そのためセルの追加の収容人数 N_{add} は 1 人とした。実行力 E は避難者ごとの特性によって変化する値であるため、 $[0, 1]$ の一様乱数で与えた。他の避難者の流れによる影響度を表す重み W_r, W_c, W_s はいくつかのパラメータセットが考えられる。他の避難者によって移動を妨げられる度合いを決定する重みのパラメータであるため、この重みを大きくすることで自身と同じ方向へ移動する避難者が多いセルへの移動が促され、小さくすることで他の避難者の移動方向を無視した最短経路での移動が促される。そのため、このパラメータが避難時間や避難行動に与える影響を調べるためにいくつかのパラメータセットについて、シナリオごとに比較した。

図 9 に他の避難者の流れによる影響度を変化させた際の避難時間の CDF を示す。シナリオ (i)–(iv) において、重みが小さい場合には最短経路上のセルへ移動しようとする避難者が増加し渋滞が発生してしまうことから、重みが小さくなるほど避難時間が長くなっていると考えられる。また、シナリオ (i) では $W_r, W_c, W_s = (1.0, 1.0, 1.0)$ の場合において、避難時間が極端に遅くなってしまうことが確認された。避難者の移動を観察すると、不通道路付近におい

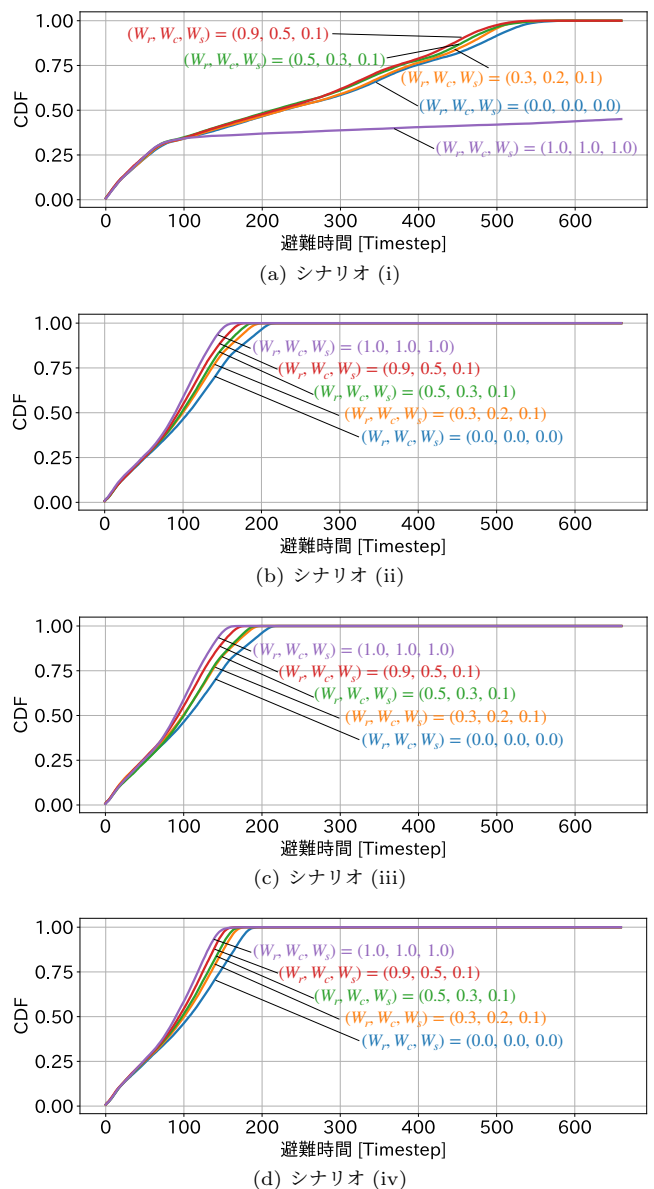


図 9 他の避難者の流れによる影響度を変化させた際の避難時間の CDF (全避難者数 1100 人、 $E = [0, 1]$)

て、不通道路箇所を発見した避難者が経路変更のために折り返しを試みるが、後続の情報を持たない避難者が最短経路に沿って立て続けに不通道路へ押し寄せるため、不通道路付近での移動が停止してしまうデッドロックの発生が確認された。一方で、 $W_r, W_c, W_s = (1.0, 1.0, 1.0)$ 以外の場合には双方のレーンが形成され、不通道路付近での移動が停止してしまうような状態は発生しなかった。

以上のことから、重みを変化させることで、避難者の振る舞いの変化することが確認でき、極端に大きな値を与えるとデッドロックが発生してしまうことが分かった。そのため本シミュレーションではデッドロックが発生しない範囲で周囲の流れの影響をモデルに反映するために、 $W_r, W_c, W_s = (0.5, 0.3, 0.1)$ のパラメータを採用した。

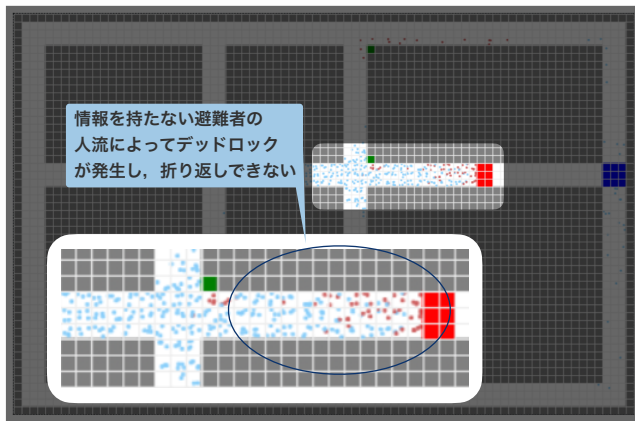


図 10 シナリオ (i) において積極的な避難行動をしない場合

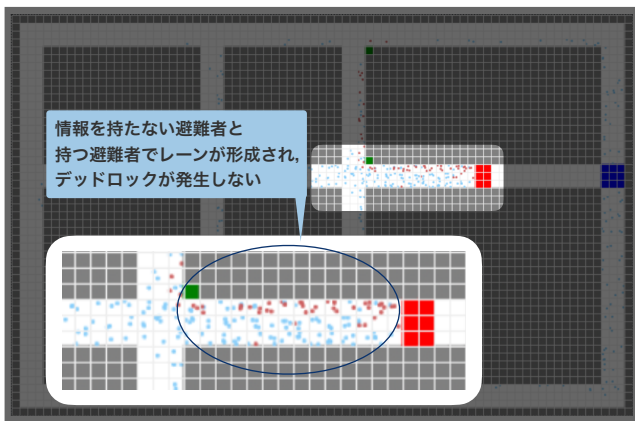


図 11 シナリオ (i) において積極的な避難行動をする場合

6.2.4 積極的な避難行動が避難時間に与える影響

図 6 に示す結果から、シナリオ (i) で積極的な避難行動を取らない場合では、全避難者数が 100 人の場合を除いて、22 分以内に約 70% の避難者が避難所へ辿り着くことができていないことが確認できる。図 10 にシナリオ (i) における情報取得（このシナリオでは避難者自身が不通箇所遭遇した場合のみ）に伴う積極的な避難行動を取らない場合のアニメーションのスナップショットを示す。赤色のノードが情報を取得した避難者、水色のノードが情報を持たない避難者を表している。アニメーションにより避難行動を確認すると、前項 6.2.3 で述べたようなデッドロックの発生が確認された。以上のデッドロックの発生は避難者数が 100 人の場合には確認されなかった。この場合は、避難者の密度が十分低いことから、不通箇所付近へ避難者が集中しないため、デッドロックは発生しなかったと考えられる。

図 11 にシナリオ (i) における情報取得に伴う積極的な避難行動を取る場合のアニメーションのスナップショットを示す。避難行動を確認すると、情報を取得した避難者が、不通道路へ立て続けに押し寄せる情報を持たない避難者の流れに逆らった積極的な避難行動をすることで、折り返しに成功している。これに伴い、情報を得た避難者と情報を持たない避難者で双方向のレーンが形成され、デッドロ

ックが発生していない。デッドロックが発生しないことから、シナリオ (i) において積極的な避難行動をとる場合には避難者数が増加した場合にも 22 分以内に避難できていると考えられる。しかし、全避難者数が 1600 人の場合には約 22% の避難者は 22 分以内に避難することができていない。これは避難者の密度が高いことによる避難経路の混雑が原因であると考えられる。

図 6 に示す結果から、情報の共有を行うシナリオ (ii)–(vi) ではすべてのシナリオにおいて、積極的な避難行動をとることで避難時間が短縮されることが確認された。積極的な避難行動を行うことで他の避難者の流れに逆らっても自身の目的方向へ進むとすることで、避難時間が短縮されていると考えられる。シナリオ (ii)–(iv) において積極的な行動を取らない場合については、シナリオ (iv) の推奨避難経路の提供による避難時間短縮効果が積極的な行動をとる場合に比べて大きいことが確認できる。積極的な避難行動を取らない場合には混雑時に他の避難者の流れに逆らわないため、停止する避難者が増加する。そのため、推奨避難経路の提供による混雑解消の効果が大きくなっていると考えられる。

7. まとめ

本稿では、異種無線混合 DTN を用いた災害情報共有システムにおいて、不通箇所の情報に加えて、混雑状況に基づく推奨避難経路を避難者に提供する方法を示し、シミュレーションをによりその効果を確認した。シミュレーションにあたり、情報を取得した避難者の積極的な行動を考慮した。シミュレーションの結果、混雑状況に基づいた推奨避難経路情報を提供することで、特定の避難路への避難者の集中を緩和することができ、避難者の密度が高い場合に道路混雑解消効果が大きくなることが確認できた。加えて、情報取得に伴った積極的な避難行動を取り入れることで避難時間が短縮されることが確認された。避難者間の情報共有ができないシナリオにおいては双方向のレーンが形成され、デッドロックが解消されることが確認された。

本稿の範囲では混雑状況に基づく推奨避難経路の提供は 1 台の固定中継ノードが行い、避難者間でのマルチホップの共有を行わないことを想定した。また、避難者は受信した情報を必ず信用するという条件の下シミュレーションを実施した。現実的には、マルチホップでの情報共有を行う場合、情報を信用しない場合がありうる。今後はこれらを取り入れたモデルへの拡張を予定している。加えて、避難者の情報に対する信用度の動的な変化がある場合についてシミュレーションによって評価する予定である。

謝辞

本研究は科学研究費補助金 22H03579 の助成による。

参考文献

- [1] M. Kobayashi, Experience of infrastructure damage caused by the Great East Japan Earthquake and countermeasures against future disasters, in *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 3, pp. 23–29 (2014).
- [2] T. Adachi, Y. Ishiyama, Y. Asakura and K. Nakamura, The restoration of telecom power damages by the Great East Japan Earthquake, 2011 IEEE 33rd International Telecommunications Energy Conference (INT-ELEC), pp. 1–5 (2011).
- [3] 矢原裕大, 加藤新良太, 高井峰生, 石原進: 避難行動シミュレーションを用いた異種無線混合 DTN による災害情報共有が避難に与える影響の評価, 情報処理学会研究報告マルチメディア通信と分散処理 (DPS), vol.2022-DPS-190, no.32, pp.1–8 (2022).
- [4] 内藤輝, 高井峰生, 石原進: 情報取得に伴う流れに逆行する行動を考慮した群衆避難シミュレーションモデルの提案, 情報処理学会第 85 回全国大会, 講演番号 4ZC-04 (2023).
- [5] H. Nishiyama, M. Ito and N. Kato, Relay-by-smartphone: realizing multihop device-to-device communications, in *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 4, pp. 56–65 (2014).
- [6] 大和田泰伯, 井上真杉, 浜口清, 三浦龍, 原井洋明: 都市災害における避難行動シミュレーションとローカルな情報共有による効果, 信学技報, vol. 113, no. 168, pp. 67–71 (2013).
- [7] 渡辺奈美, 横山和俊: 災害発生時における複数の情報拡散手段を組み合わせた避難手法の評価, 情報処理学会第 85 回全国大会 講演番号 5ZA-09 (2023).
- [8] 松島弘, アランニャクラウス, 狩野均: 避難者の情報伝達能力を考慮した広域災害避難シミュレーション, 研究報告数理モデル化と問題解決 (MPS), vol. 2014-MPS-100, no. 7, pp. 1–6 (2014).
- [9] D. Helbing, P. Molnr: Social force model for pedestrian dynamics, *Phys. Rev. E.*, 51, pp. 4282–4286 (1995).
- [10] J. Song, F. Chen, Y. Zhu, N. Zhang, W. Liu and K. Du, : Experiment Calibrated Simulation Modeling of Crowding Forces in High Density Crowd, in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 100162–100173 (2019).
- [11] Zhao, Y., Liu, H. & Gao, K. : An evacuation simulation method based on an improved artificial bee colony algorithm and a social force model. *Appl Intell* 51, pp. 100–123 (2021).
- [12] Yamazaki, T., Tamai, H., Owada, Y., Hattori, K., Taira, S., Hamaguchi, K. : Urban Disaster Simulation Incorporating Human Psychological Models in Evacuation Behaviors. In: Murayama, Y., Velez, D., Zlateva, P., Gonzalez, J. (eds) *Information Technology in Disaster Risk Reduction. ITDRR 2016. IFIP Advances in Information and Communication Technology*, vol. 501. Springer, Cham, pp. 20–30 (2017).
- [13] 柳澤大地, 西成活裕: 群衆運動のセルオートマトンモデル, 情報処理学会誌, vol.58, no.7, pp. 570–573 (2017).
- [14] 高杉肇, 只木進一, 日永田泰啓: 二次元セルオートマトンモデルにおける歩行者の避難過程, 交通流シミュレーションシンポジウム論文集, vol. 8, pp. 57–60 (2002).
- [15] O. K. Tonguz, N. Wisitpongphan, J. S. Parikh, F. Bai, P. Mudalige and V. K. Sadekar, On the Broadcast Storm Problem in Ad hoc Wireless Networks, 2006 3rd International Conference on Broadband Communications, Networks and Systems, pp. 1–11 (2006).
- [16] 国土交通省 (幅員構成に関する規定)
入手先 (<https://www.mlit.go.jp/road/sign/pdf/kouzourei.3.pdf>) (参照 2023-05-20).
- [17] 内閣府 (津波避難ビル等に係るガイドライン)
入手先 (<https://www.bousai.go.jp/kohou/oshirase/h17/pdf/050323shiryu2.pdf>) (参照 2023-05-20).
- [18] 静岡県津波浸水想定 (津波防災地域づくりに関する法律第 8 条第 1 項)
入手先 (<https://www.pref.shizuoka.jp/bosaikinkyu/sonae/earthquake/jishintsunami/1040794/1029853.html>) (参照 2023-05-20).