

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

矢原 裕大^{1,a)} 加藤 新良太^{1,b)} 高井 峰生^{2,3,c)} 石原 進^{1,d)}

概要：災害時、道路の不通箇所や避難所の位置等の災害情報を避難者や災害対策機関の間で共有することは、迅速な避難を可能とするための喫緊の課題である。筆者らは、通信インフラ不能時でも情報共有を可能とするために、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。本システムでは、Wi-FiやBluetooth等の短距離広帯域無線通信と、LoRaやDCR等の長距離狭帯域無線通信を併用し、かつDTN(Delay/Disruption Tolerant Network)を用いる。DTNでは、人等の移動通信ノードが情報の運搬や中継、転送を担うため、情報を共有できるかどうかは、人の動きや他の人と出会うタイミング、密度等と密接に関係する。人もまた、災害情報取得によって移動量や移動パターンを変更する可能性があるため、DTNを用いた情報共有と避難行動の相互影響を考慮した情報配信を行う必要がある。そこで、本稿ではDTNを用いた災害情報共有と避難行動が相互に与える影響を調べるために、マルチエージェントネットワークシミュレータにて異種無線混合DTNを用いて不通道路情報を共有した際の避難者の行動を観察し、避難者の避難時間を評価した。その結果、異種無線混合DTNを用いて不通道路位置を共有することで避難者の避難時間を短縮できることがわかった。また、避難路上に固定の中継ノードを設置し、複数種類の無線通信手段を用いることで、情報共有の可否が避難者の行動に完全に左右されることはなく、避難が遅れて孤立した避難者にも情報提供が可能であることがわかった。

Evacuation of Interactions between Disaster Information Dissemination via Heterogeneous DTN and Evacuation

1. はじめに

災害避難時に、避難所の位置や収容可能人数、道路の通行可否や混雑度、被災エリアの被害状況等の災害情報を避難者、災害対策機関の間で共有することは、迅速な避難に有効である。しかしながら、災害発生時には停電や携帯電話基地局の故障等により通信インフラも被害を受けており、平時と同様の方法では情報入手が困難である可能性がある。東日本大震災発生では、停電や携帯電話基地局の停止、固定通信回線の被災により、被災者が通信できない状

況が数日間続いた[1]。そのため、災害時には通信インフラ不能時でも情報共有が可能な情報伝達手段が求められる。

通信インフラに依存しない災害時の情報共有手法として、NerveNet[2]、スマホdeリレー[3]が提案されている。NerveNetは、無線通信機能を有する固定基地局複数個で構成されたメッシュネットワークを介して、災害情報を共有する手法である。しかしながら、NerveNetでの情報伝達の可否は固定基地局の位置に左右され、情報共有ができる範囲は限定される。スマホdeリレーは、被災者のスマートフォンのBluetoothを用いた端末間直接通信とDTN(Delay/Disruption Tolerant Network)を用いて災害情報を共有する手法である。DTNは、人や車等の移動通信ノードが情報を蓄積・運搬・転送するため、情報伝達の可否は被災者の移動や密度によって左右される。そのため、平時とは異なるDTNでの情報配信戦略が必要となるが、スマホdeリレーではそのような戦略は検討されていない。また、Bluetoothの通信可能範囲は十数m以内と限られるため、

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

a) yahara.yudai.16@shizuoka.ac.jp

b) kato.arata.17@shizuoka.ac.jp

c) mineo@ieee.org

d) ishihara.susumu@shizuoka.ac.jp

過疎地域の被災者が情報を入手できるエリアに限られる。

こうした課題を解決するために、筆者らは異種無線混合 DTN を用いた災害情報共有システムを提案している [4]。本システムは、Wi-Fi や Bluetooth 等の短距離広帯域無線通信と LoRa (Long Range) や DCR (Digital Convenience Radio [5]) 等の長距離狭帯域無線通信を併用し、かつ DTN を利用して災害時の情報共有を可能とする。本システムは、避難者と災害対策機関、避難所間で不通過路情報や避難所の位置、収容可能人数、避難指示、救助要請等の災害情報を共有することを想定している。

DTN による災害情報配信と避難行動は相互に影響を及ぼす。避難路の情報を避難者に伝え、避難者の行動が変化する。DTN では人等の移動ノードが情報の運搬や中継、転送を担うため、避難行動の変化は DTN を介した情報配信にも影響を及ぼす。筆者らは、DTN を用いた情報配信と避難行動の相互影響を調べるために、マルチエージェントネットワークシミュレータ上に避難行動・情報共有モデルを構築し、避難行動シミュレーションを実施した [6]。しかしながら、[6] では、避難者間で Wi-Fi のみを用いた情報共有のシミュレーションを行っており、電波伝搬モデルも建物の影響を考慮しない二波モデルを用いていた。

そこで本稿では、Wi-Fi に加え固定端末間で LoRa を想定した長距離狭帯域リンクを使用する異種無線混合 DTN にて不通過路情報共有した際の避難者の行動を観察し、異種無線混合 DTN による情報共有と避難行動の相互影響を調べる。シミュレーションには、東海地震発生時の津波浸水区域に指定されている浜松市弁天島周辺の GIS データに基づいて作成した地図を用い、電波伝搬モデルには、電波伝搬に対する建物の影響を考慮できる ITU-R P.1411 [7] を利用した。シミュレーションの結果から、異種無線混合 DTN を用いた災害情報共有がどのような避難者に有効であるかを分析し、情報共有することによって生じる課題についても考察する。また、避難行動と DTN を用いた情報共有が相互に影響を与え合う中でも、提案システムがあらゆる避難者に災害情報を提供できるかについても議論する。

以降、2 章では、既存の災害情報共有手法と災害情報共有が避難者に与える影響に関する研究について述べる。3 章では、異種無線混合 DTN を用いた災害情報共有システムについて述べる。4 章では、本稿で用いる避難行動と情報共有のシミュレーションモデルについて述べる。5 章では、シミュレーションにより避難行動と DTN による情報共有の相互影響の評価をする。6 章で本稿をまとめる。

2. 関連研究

本章では、既存の災害情報共有手法と災害情報共有時の人の動きに関する研究について述べる。災害時の情報共有手法として、メッシュネットワークを用いた手法が複数提

案されている [2][8][9]。鈴木らは、無線通信機能を持つ気球を用いた SkyMesh を提案している [8]。Álvarez らは、スマートホームの IoT 機器で構築した Bluetooth Mesh を用いた災害情報共有を提案している [9]。井上らは、被災エリアに無線通信機能を有する固定局を用いた NerveNet を提案している [2]。これらの手法では、メッシュネットワークを構築することで、1 つの通信ノードが故障などで使えなくなった場合でも、故障した通信ノードを避けた経路でデータを転送することで、被災者に情報を伝送できる。

大和田らは、NerveNet [2] を用いて避難所の位置、避難所の受け入れ状況、不通過路箇所を避難者に提供したときの避難者の動きを観察している [10]。大和田らは、マルチエージェントネットワークシミュレータ Scenargie [11] 上に、避難者の行動や情報共有をするモデルを構築し、仙台駅周辺 1 km 四方を対象とした 10,000 人の被災者の発災直後の避難行動をモデル化し、シミュレーションした。シミュレーションの結果、メッシュネットワークを用いた災害情報共有により、被災情報、避難所情報等の最低限の情報共有ができれば、メッシュネットワーク内の避難者は迅速な避難ができることが確認された。

小松らは、スマートフォンアプリを介して避難者に提示した避難経路と避難者が実際に用いた避難経路差分から不通過箇所を予測し、その予測結果を DTN と避難者のスマートフォンに搭載された Wi-Fi や Bluetooth を用いて避難者間で共有する手法を提案している [12]。小松らは、このシステムの有効性を ONE シミュレータ [13] を用いて評価しており、情報共有により避難時間が短縮され、避難者数の増加に伴い、情報共有の有効性も向上することが示している。小松らは、不通過路の情報はこれから不通過路に向かう避難者への情報伝達、つまり、避難する方向とは逆方向への情報伝達が重要であると述べている。そのためには、通信インフラ等の固定基地局を活用することが 1 つの方法であると述べている。しかしながら、避難を支援するためには、どれだけの固定基地局が必要であり、どの位置に設置すると有効であるかについては述べられていない。また、このシミュレーションでは、ONE シミュレータを用いているため、電波伝搬やパケットロスとは考慮されていない。

三角らは、避難者に同一の避難経路を提示することにより発生する道路渋滞の発生を防ぐために、DTN を用いて年齢や性別等の避難者の特性に応じた避難経路を提示する手法を提案している [14]。この手法では、避難者の端末は、避難者の通行履歴から得られる道路の故障確率と事前に避難者の端末に登録された端末を保持する人の属性情報に基づいて、各道路が通行可能かを判定し、判定結果に基づき避難所までの経路を計算、提示する。三角らは、この手法を用いたときの避難時間をマルチエージェントシミュレータを用いて評価しており、避難者の属性を考慮せずに避難

経路を提示する場合より、全体の避難時間が短縮されることを確認した。しかしながら、避難者の年齢や性別から決定される属性の決定方法や、避難者の属性ごとの通行できる道路の故障確率の上限値の決定方法について述べられていない。

岡谷らは、建物内での避難時、建物の職員が口頭で避難誘導をした際の避難者の動きをシミュレーションしている [15]。岡谷らは、人々の口頭での情報伝達をモデル化し、シミュレーションをした結果、避難誘導によって避難時間が短縮されることを明らかにした。しかしながら、避難誘導によって、建物内の通路に新たな混雑が発生したために、避難が遅れる人が存在することも確認された。このシミュレーションでは、建物内での口頭での情報共有のみを想定しており、無線通信や大規模災害発生時の広域にて避難が要される状況は考慮していない。

災害時の通信システムの性能評価のためのシミュレーションにおいて、情報共有システムの性能評価結果はシミュレーションに使用するモデルに強く依存するため、災害時のモビリティのモデリングは重要である [16]。そのため、イベント会場等の特定のエリア内での災害時の人の動きを表現するモビリティモデル [17] や ONE シミュレータ上に災害時の被災者ノードと救助隊員の移動を表現したモビリティモデル [18] が提案されている。また、通信システムがマルチホップ通信にてデータ転送を行う場合、ノードの移動は、情報の送信元、送信先だけでなく、中継ノードにも影響を与える [19]。各モビリティノードの位置関係により、各ノードの通信可否を判断することがモデルには求められる。しかしながら、電波伝搬特性について考慮したものは少なく、上記のシミュレーションでも電波伝搬について考慮しているのは大和田ら [10] のみであり、これもまた建物が電波伝搬に与える影響までは考慮していない。

3. 異種無線混合 DTN を用いた災害情報共有システム

本章では、筆者らが提案している異種無線混合 DTN を用いた災害情報共有システムについて述べる。

3.1 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、Wi-Fi や Bluetooth 等の短距離広帯域無線通信と LoRa や DCR 等の長距離狭帯域無線通信を用いる DTN (異種無線混合 DTN) を用いて、避難者および災害対策機関の間で災害情報を共有する。本システムは、避難者が保持するスマートフォン等のモバイル端末と災害対策本部、消防署、避難所、道路脇などに設置された固定中継ノードといった複数の通信ノードで構成されている。避難者のモバイル端末は、モバイル端末に搭

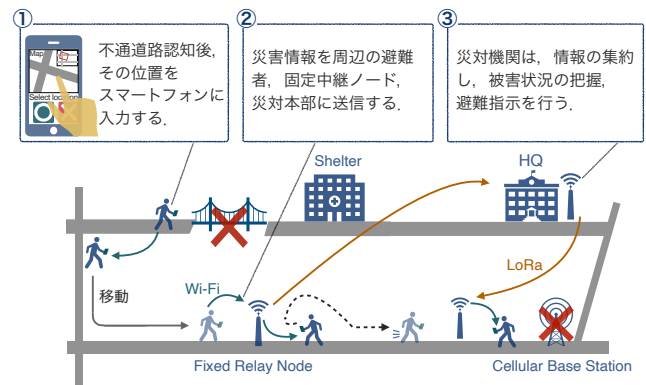


図 1: 異種無線混合 DTN を用いた災害情報共有システム [6]
載された Wi-Fi や Bluetooth 等を用いて、周辺の避難者と固定中継ノードと災害情報を送受信する。固定中継ノードは、短距離広帯域無線通信に加えて、LoRa や DCR 等の長距離狭帯域無線通信が利用できると想定する。また、各通信ノードが携帯電話網を用いて情報を送受信できる場合には、携帯電話網も使用して災害情報を共有する。本システム内で共有する災害情報は、災害によって被災した道路や建物の位置や被害規模、避難所の位置や収容可能人数、避難指示、救助要請などが含まれていると想定する。

異種無線混合 DTN では、短距離広帯域無線通信と長距離狭帯域無線通信を併用することで、互いの無線通信手段の弱点を補い合う。Wi-Fi や Bluetooth は、通信端末を保持する人同士がすれ違う短時間の間でも、端末間で写真や動画等の容量が大きいデータやりとりが可能である一方で、端末個々の通信可能範囲は 100 m 程度と短い。そのため、通信ノード周辺に他の通信ノードが少ないと、マルチホップにて数 km 離れた通信ノードに対して情報を送信できる可能性は低くなる。そこで、1 km 以上離れたノード間でもデータの送受信ができる LoRa や DCR を用いることで、通信ノードの密度が低い場合にも情報共有ができる範囲を広く保つことを可能とする。LoRa や DCR のデータレートは低く、かつこれらの無線通信機能を有する端末を保持している人は少ない。そこで、通信ノード間の距離が短い場合や通信ノードの密度が高く、マルチホップにて広範囲に情報転送ができる場合には、Wi-Fi や Bluetooth を用いて情報を転送する。また、DTN を用いることで、異種の通信手段を用いるネットワーク間のデータのやりとりを可能とし、いずれの通信手段も利用できない場合においても人や車の移動により情報を運搬する。

3.2 避難行動と DTN による情報配信の相互影響

避難者の避難行動と DTN による災害情報配信は、相互に影響を及ぼす。DTN は、人や車等の移動通信端末が情報の中継・運搬・転送を担うことで、通信インフラに依存しない情報配信を可能とする。災害情報を避難者に伝えると、避難者は入手した情報に基づき、避難経路や向かう避

難所の位置を変更し、避難行動に変化が生じる。本システムでは、避難者が情報運搬や中継、転送を担うため、避難者の行動量や行動パターンが変化すると、その後の情報配信も影響を受ける可能性がある。そのため、DTNを用いて効率的に災害情報を配信するには、DTNを用いた情報配信と避難行動が相互に与える影響を考慮する必要がある。そこで本稿では、避難行動とDTNによる災害情報配信の相互影響をシミュレーションにより評価、考察する。

4. 避難行動・情報共有のシミュレーションモデル

本章では、マルチエージェントネットワークシミュレータ上に構築したシミュレーションモデルについて述べる。

4.1 モデル概要

災害時における人の行動と情報共有をモデル化するにあたって、本稿ではマルチエージェントネットワークシミュレータ Scenargie[11]を用いる。シミュレーションでは、GISデータに基づいた地図を作成し、モデル内の避難者は実際の建物、避難場所、道路等に従って移動する。本稿では、避難者間で共有する災害情報は不通過路情報のみとする。本モデルでは、避難者および固定中継ノード間でWi-FiとLoRaを用いて不通過路情報を共有することを想定する。各避難者は、Wi-Fiが利用可能なモバイル端末を有しており、避難路上にはWi-FiとLoRaが利用可能な固定中継ノードが存在すると想定する。避難所や避難経路の探索、情報の送受信、情報の保持は、全て避難者のモバイル端末が行い、各避難者はモバイル端末から提示された指示に従って避難するものとする。

4.2 避難行動モデル

避難者は、発災後、最寄りの避難所へ最短経路を用いて向かう。避難者は、事前に避難所の位置情報と避難者の周辺の地図情報を保持しており、発災後自身が保持する情報に基づき、現在地から避難所までの最短経路を探索する。避難所が複数存在する場合、避難所までの最短経路距離が最も短い避難所を目的地とする。経路計算にはA*アルゴリズムを用いる。避難行動を開始する時刻は各避難者ごとに異なり、その避難開始時刻のばらつきは正規分布に従う。この正規分布の平均と分散はシミュレーションパラメータによって与えられる。なお、避難者は発災前であるシミュレーション時間0秒未満では、避難を開始することはないものとする。

全避難者は、歩いて避難所へ向かい、このときの歩行速度はシミュレーションパラメータから与えられる歩行速度(walkSpeed)と避難者が位置する道路セグメントの混雑度に基づき、以下の式で決定される。

$\max(0.3, \text{walkSpeed} \times$

$(1 - (\text{道路区間上の歩行者数})/(\text{道路長 [m]})))[\text{m/s}]$

道路セグメント上に位置している避難者が多いほど、避難者の歩行速度は低下する。本モデルでは、避難者が道路上で停止することはなく、0.3 m/s未満にはならない。

避難者は、避難中に不通過路セグメントに遭遇すると、その道路セグメントの道路IDを保存する。その後、不通過路を避ける各避難所までの経路を再計算し、目的地と避難経路を再決定する。避難中に他の避難者や固定中継ノードから無線通信を介して不通過路情報を入手すると、同様に、避難者は避難経路の再計算と目的地、経路の再決定をする。また、避難者は不通過路情報入手後、不通過路IDの保存、他の避難者および固定中継ノードへ不通過路情報送信をする(詳細は次項)。

4.3 情報共有モデル

不通過路情報を保持する避難者と固定中継ノードは、自身が保持する不通過路情報を定期的にブロードキャストする。このとき、避難者と固定中継ノードが用いる無線通信手段は、IEEE 802.11n (2,412 MHz with 20 MHz bandwidth)に従っており、これをAd-Hocモードで使用すると想定する。固定中継ノードは、これに加えLoRaを用いた無線通信機能を有する通信機器を保持し、周辺の通信端末と不通過路情報を共有すると想定する。LoRaでの通信時に使用する周波数帯は920 MHz、帯域幅は125 kHzとした。Spreading Factor (SF)の値はSF9を採用し、データレートを1760 bps、最小受信感度を-129 dBmとした。MACプロトコルにはpureALOHAを採用した。

不通過路情報は、不通過路の道路ID、送信者のノードID等に加え、セキュリティに関する情報が付加されたデータと想定し、ある避難者が不通過路に遭遇することで生成される。避難者と固定中継ノードは、不通過路情報を定期的に送信しているときに、保持していない新規の不通過路情報を入手すると、既知の不通過路情報と新規の情報をマージし、マージした情報をそれまでと同じ送信スケジュールで定期的なブロードキャストを続ける。

LoRaを用いた同一不通過路情報の送信は、必要以上に行うと帯域圧迫やパケット衝突に繋がるため、LoRaを用いた同一情報の送信は10回に留めるものとした。固定中継ノードは、これまで送信していない新規の不通過路情報を入手すると、その都度新しい不通過路情報をLoRaを用いて10回送信する。Wi-Fiを用いた情報送信では、送信回数の制限はしない。LoRaを用いた通信にはパケット送信間隔やペイロードサイズに制限がある[20][21]。本稿では、事前に災害情報のやりとりを行う固定中継ノード間で認証手続き等を行い、セキュリティデータを削減するなどして、送信するパケットサイズを減らす等の工夫がされて

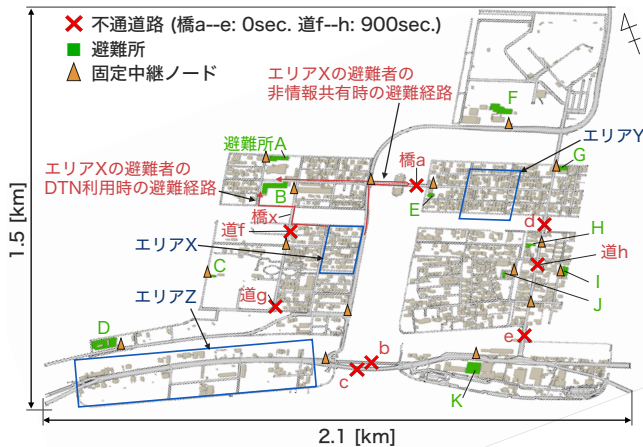


図 2: シミュレーションシナリオ
(数値地図 (国土地理院) [22] をもとに筆者が作成)

いと想定し、これらの制限は考慮しない。

電波伝搬モデルには、屋外環境にて電波伝搬に対する建物の影響を考慮できる ITU-R P.1411[7] を用いた。本モデルは、道路上に位置する通信ノード間の電波伝搬特性を計算できる。家屋や避難所等の建物内にいる避難者は、他の端末との通信不可能となっている。

5. シミュレーション

本章では、前章で述べたシミュレーションモデルを用いてシミュレーションを行い、避難行動と異種無線混合 DTN を用いた災害情報共有の相互影響について考察する。

5.1 シミュレーションシナリオ

シミュレーションは、静岡県浜松市弁天島にて南海トラフ地震が発生し、津波から避難するシナリオを想定した。図 2 にシミュレーションシナリオを示す。各道路セグメントの位置、長さ、幅や建物の位置や大きさ等は、国土地理院の GIS データ [22] に基づき配置した。地震発生時刻は、シミュレーション開始時刻とした。避難所は、浜松市が指定している 11 箇所の津波避難所 [23] とした。1 人あたりに必要な避難所領域を 1.65 m² とし [24]、各避難所の定員を表 1 のように決定した。不通過路箇所は、発災とともに不通となる道を図 2 中の橋 a-e の 5 箇所の橋とし、発災から 15 分後に不通となる道路を道 f-h の 3 箇所とした。固定中継ノードは、避難所の近くの 11 箇所と不通過路の近くかつ避難所の集中が予想される道路である 5 箇所の合計 16 箇所に設置した。これは、[4] の固定中継ノード最適位置の考察結果に基づき決定した。

表 2 にシミュレーションパラメータを示す。シミュレーションエリア内に避難者が 1,000, 3,000 人位置するシナリオにてシミュレーションをし、全避難者の内それぞれ 250, 800 人を高齢者とした。これらは平成 27 年国勢調査結果 [25] に基づき決定した。シミュレーション開始時、被災者は全員いずれかの建物に位置するものとし、その初期

表 1: 各避難所の定員

避難所	定員 (人)	面積 (m ²)	避難所	定員 (人)	面積 (m ²)
A	434	717	G	127	210
B	218	360	H	112	186
C	485	800	I	73	121
D	309	510	J	115	190
E	90	150	K	703	1160
F	409	676			

表 2: シミュレーションパラメータ

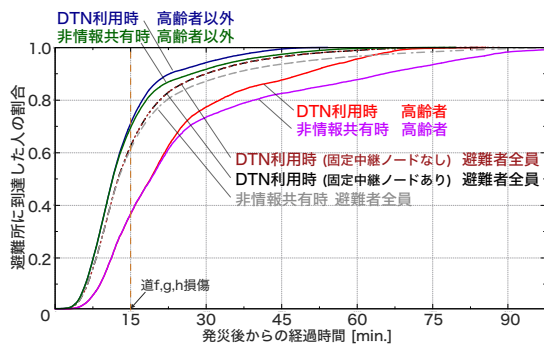
パラメータ	値
避難者数	1,000 (内高齢者 250) 人, 3,000 (内高齢者 800) 人
歩行速度	高齢者: 0.4-0.7 m/s (一様分布), 高齢者以外: 0.7-1.5 m/s (一様分布)
避難者の避難開始時刻のばらつき	$\mu = 4.0, \sigma = 1.5$ (min.)
避難者の初期位置	いずれかの建物内 (一様乱数を用いて決定)
不通過路情報の送信間隔	10.0 sec.
短距離広帯域無線通信の Mac/Phy	IEEE 802.11n (2,412 MHz with 20 MHz bandwidth)
長距離狭帯域無線通信の Mac	PureALOHA
長距離狭帯域無線通信の Phy	LoRa (920 MHz with 125 kHz bandwidth)
通信端末の動作モード	Ad-Hoc
MCS Index (短距離広帯域無線通信)	7 (64QAM, 5/6 Coding, 1 stream)
Tx Power (短距離広帯域無線通信)	10 dBm
Tx Power (長距離狭帯域無線通信)	13 dBm
Rx Sensibility (短距離広帯域無線通信)	-70 dBm
Rx Sensibility (長距離狭帯域無線通信)	-129 dBm
不通過路情報の IP パケットサイズ	354 バイト
電波伝搬モデル	ITU-R P.1411 [7]
シミュレーション時間	150 min.

位置は一様乱数に基づき決定した。避難者の避難開始時刻のばらつきは正規分布に従っており、その平均は発災から 4 分、分散は 1.5 分とした。この値は、津波避難計画策定指針 [26] に基づき決定した。避難者は、歩いて避難所へ向かい、その歩行速度は、津波避難実態調査結果 [27] を参考に、高齢者は 0.4-0.7 m/s、それ以外の人は 0.4-1.5 m/s と設定した。避難者の歩行速度は、設定された歩行速度を基準に同一道路に位置する避難者の人数により動的に変化する。道路には車は存在せず、避難者は車道を通っての移動も可能であるとした。

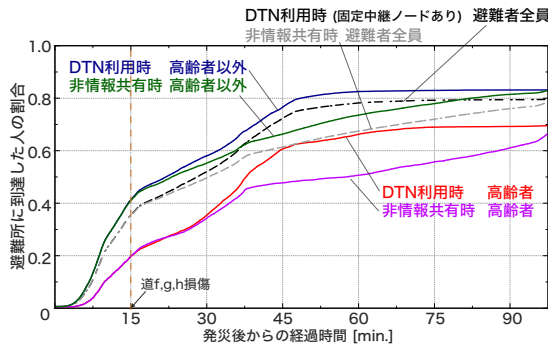
5.2 シミュレーション評価

5.2.1 各避難者が避難に要した時間

図 3 に各避難者が発災から避難所到達までにかかった時間の累積分布を示す。図 3 は、初期配置および避難開始時間を変更して複数回シミュレーションした際の各避難者の避難時間を評価している。避難者 1,000 人時には 50 回、3,000 人時には 10 回シミュレーションした結果を示している。表 3 に避難者の避難時間のパーセンタイル値を示す。これらから、異種無線混合 DTN を用いた情報共有によって非情報共有時よりも避難時間が短縮されていることがわかる。特に、高齢者は、歩行速度が遅く不通過路の影響による避難の遅れが大きいいため、避難時間の短縮効果が大きいの。避難者数 3,000 人のときには、避難所 E, G-J が満員となっている。避難所 H-J に向かう避難者は、3 箇所全て



(a) 避難者数 1,000 人のとき



(b) 避難者数 3,000 人のとき

図 3: 各避難者の避難時間

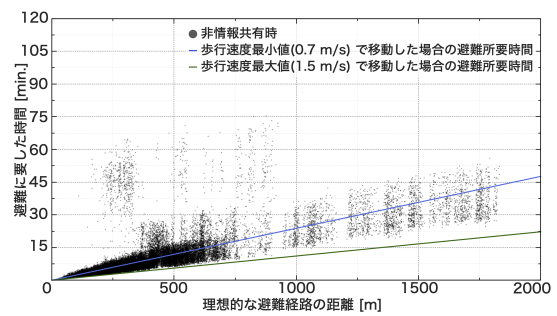
表 3: 避難者が避難に要した時間 (パーセンタイル値)

シミュレーションシナリオ (避難者数 1,000 人時)	パーセンタイル値	避難に要した時間 [min.]			
		70	80	90	99
避難者全員	非情報共有時	17.50	22.18	34.95	82.28
	DTN 利用時 (固定中継ノードあり)	16.98	20.80	29.96	61.00
	DTN 利用時 (固定中継ノードなし)	17.00	20.82	29.98	61.00
高齢者以外	非情報共有時	15.12	18.13	27.15	53.63
	DTN 利用時 (固定中継ノードあり)	14.76	17.36	22.76	43.15
高齢者	非情報共有時	26.68	39.61	65.36	96.02
	DTN 利用時 (固定中継ノードあり)	25.23	32.71	49.33	68.04

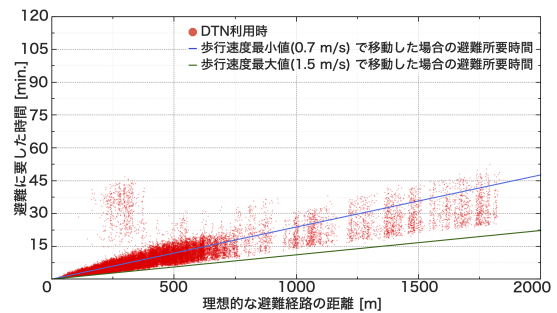
の避難所が満員になると行き場を無くしてしまい、避難できなくなった。

図 4, 図 5 に避難者数 1,000 人時の各避難者が避難に要した時間の分布を示す。これらの図では、避難者が避難に要した時間として、発災後からの時間ではなく、各避難者が避難を始めてから避難所に到達するまでの時間を縦軸としてプロットしている。例えば、ある避難者が発災から 5 分後に避難を開始し、避難所に発災から 15 分後に到着した場合、避難に要した時間は 10 分となる。横軸は、各避難者が事前に全ての不通過路を認知している場合の最寄りの避難所までの最短経路の距離 (理想的な避難経路の距離) としている。また、各グラフに、避難者が理想的な経路を用いて設定した歩行速度の最小値 (青の線) と最大値 (緑の線) で避難した場合の避難時間を示している。

図 4, 5 から、DTN による情報共有により多くの避難者の避難時間が短縮されていることがわかる。特に、理想的な避難経路の距離が 200-800 m の避難者の多くが避難時間が大幅に短縮されているのがわかる。この避難者の多く

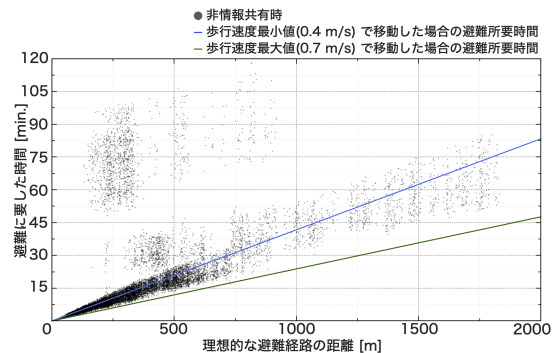


(a) 非情報共有時

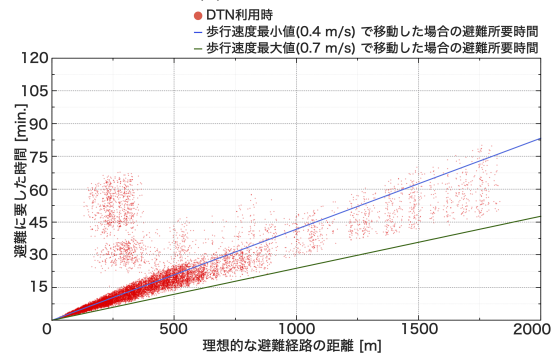


(b) DTN 利用時

図 4: 高齢者以外の避難者が避難に要した時間の分布



(a) 非情報共有時



(b) DTN 利用時

図 5: 高齢者が避難に要した時間の分布

は、初期位置が図 2 内のエリア X とエリア Y であった。また、理想的な避難経路の距離が 950 m 以上の避難者も情報共有により避難時間が 3-10 分程度短縮されている。この避難者は、初期位置が図 2 内のエリア Z であった。エリア X, Z に位置する避難者は、不通過路を認知する前後で、最寄りの避難所が変化し、避難経路が大きく変わる。そのた

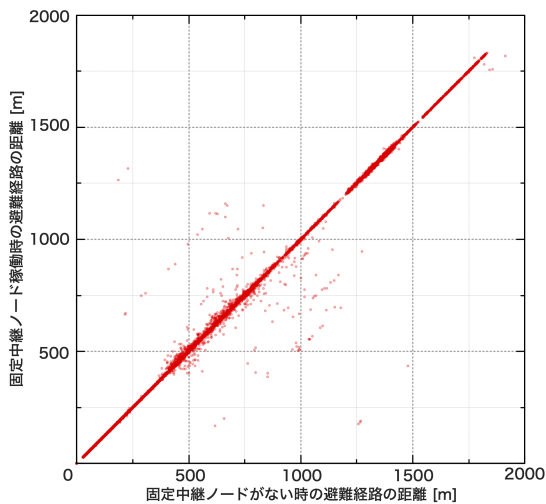


図 6: 避難者が避難に用いた経路の距離の分布

め、情報共有により不通過路情報をより早期に入手でき、目的地の避難所を変更することで、避難所変更前後の避難経路差異が小さくなり、避難経路の短縮および避難時間の短縮につながる。

図 2 中のエリア Y に位置する避難者の多くは、避難所 E, G が発災後 10–15 分程度で満員になったことで、最寄りの避難所到達後に別の避難所への避難を余儀なくされ、避難所のたらい回しにあった。特に、高齢者は歩行速度が遅いため、たらい回しにされる人数が多く、さらなる避難の遅れに繋がっている。そのため、不通過路位置だけでなく、避難所の収容状況や各避難者がどの避難所に向かっていくかを共有することが求められる。また、[28]のように、高齢者の避難所の決定権を優先して避難者の避難所を割り当てる手法も有効であると考えられる。避難所の収容状況を共有する場合には、避難者は避難所内にいる人が収容可能人数の何%に達したらその避難所へ向かうことを諦めるのかや、通信可能範囲外の避難者がどの避難所へ向かう可能性があるかを考慮すべきである。最寄りの避難所へ向かうことを諦めたことにより、実際には最初に向かっていた避難所の収容人数に少し空きがあったにもかかわらず、かえって避難時間が伸びることもあるため、避難所の変更は慎重に考慮すべきである。

5.2.2 固定中継ノードの有無が避難者に与える影響

避難路上の固定中継ノードは、通信インフラ同様災害により故障し、稼働しないことも考えられる。そこで、固定中継ノード不能時に避難者間で不通過路情報を共有したシナリオにて、シミュレーションした。図 3a に固定中継ノード稼働/不能時の各避難者が発災から避難所に到達するまでの時間を示す。図 6 に固定中継ノード稼働/不能時に各避難者が避難に用いた経路の距離の比較を示す。

避難者の動きを観察したところ、固定中継ノード不能時に、初期位置が図 2 中のエリア X である避難者の一部が、他の避難者よりも避難開始が遅れてしまい、橋 a の不通過

路情報を他の避難者から入手できずに置き去りにされ、不通過路所に向かってしまうことがあった。道 f 周辺でも同様の現象が発生していることがわかった。この置き去り現象が発生するのはこの 2 箇所のみであり、置き去り現象にあう避難者も全体の 5% 未満であった。これは、浜松市の避難所が置き去り現象の起きにくい位置に設置されているためと考えられる。一方で、固定中継ノード稼働時にはこの現象は見られなかった。図 6 から、固定中継ノード稼働時の方が避難経路距離が短い避難者が存在することがわかる。したがって、固定中継ノードを設置し、異種無線通信の併用して不通過路情報を共有することで、避難が遅れ孤立した避難者に対しても情報提供が可能となり、避難経路距離を短縮できることがわかる。

置き去り現象によって避難経路の距離が伸びている避難者がいるにもかかわらず、図 3a では固定中継ノード稼働時と不能時に避難時間に差がほとんどない。これは、情報共有によって避難者が同一の経路を選択することになり、避難所周辺の道が混雑し、避難所周辺の避難者の歩行速度が低下することが原因である。一方で、置き去りにされた避難者は、周辺に避難者がいない道を通るため速く移動できる。そのため、置き去りにされて避難が遅れるはずであった避難者が、避難所周辺を歩いている避難者が避難する前に他の避難者に追いつくことができる。それにより、固定中継ノード稼働時と不能時の避難時間に差が見られない。避難経路を同一となることを防ぎ、経路を分散させるための避難経路情報を共有することで、さらなる避難時間の短縮が見込める。避難者を分散させる際には、避難者の移動速度や位置、道路の幅、混雑道路の迂回による経路距離の延長が、どの程度許容されるかを考慮すべきである。また、道路の混雑予想をした避難者全員が混雑した道を選択してしまい、混雑を避けるために選択した道がかえって混雑する可能性も考慮すべきである。

図 6 を見ると、固定中継ノード稼働時の方が固定中継ノード不能時よりも避難経路が短縮されている避難者がいる一方で、固定中継ノード不能時の方が避難経路距離が短くなっている避難者もいることがわかる。この避難者らは、固定中継ノード不能時には、不通過路情報の入手が遅れ、避難が遅くなる避難者がいるおかげで、避難所が満員になる前に避難できていたが、固定中継ノードの存在により理想的な避難経路に近い経路を用いて避難する避難者が増加し、自身が避難所に着いたときには満員になってしまい、避難所の変更することになったために避難時間が長くなった。このように、より多くの避難者に情報共有できることで避難が遅れてしまう避難者が存在することがわかった。

6. まとめ

本稿では、異種無線混合 DTN を用いた災害情報共有と

避難行動が相互に与える影響を調べるために、マルチエージェントネットワークシミュレータ Scenargie にて、不道路情報避難者および避難路上の固定端末間で共有するシミュレーションをした。シミュレーションでは、Wi-Fiに加え、固定端末間でLoRaを想定した長距離狭帯域リンクを使用する異種無線混合DTNを用いて情報を共有することを想定した。シミュレーションの結果、異種無線混合DTNを用いて不道路情報を共有することで避難者の避難時間を短縮できることがわかった。また、避難路上に固定端末を設置し、複数種類の無線通信手段を用いることで、情報共有の可否が避難者の行動に完全に左右されることなく、避難が遅れて孤立した避難者にも情報提供が可能であることがわかった。不道路情報に加えて、避難所情報や避難経路情報を共有することでさらなる避難時間の短縮が期待できる。これらの情報をどのように共有するかの検討やこれらの情報を共有した時の避難者の行動変化や避難時間に与える影響の考察が、今後の課題として挙げられる。災害情報を複数種類共有する際の送信頻度や送信優先度、送信経路の決定手法についても、今後検討する必要がある。

謝辞 本研究は、科学研究費補助金19H04092の助成に基づいている。

参考文献

- [1] Ranghieri, F. and Ishiwatari, M.: *Learning from Megadisasters: Lessons from the Great East Japan Earthquake*, World Bank Publications (2014).
- [2] Inoue, M. et al.: Nerve Net: A Regional-area Network for Resilient Local Information Sharing and Communications, *2014 Second International Symposium on Computing and Networking*, IEEE, pp. 3–6 (2014).
- [3] Nishiyama, H., Ito, M. and Kato, N.: Relay-by-Smartphone: Realizing Multihop Device-to-Device Communications, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 52, No. 4, pp. 56–65 (2014).
- [4] Yahara, Y., Kato, A., Takai, M. and Ishihara, S.: On Interactions between Evacuation Behavior and Information Dissemination via Heterogeneous DTN, *Journal of Information Processing*, Vol. 30 (2022).
- [5] ARIB STD-T98 ver. 1.4: Digital Convenience Radio Equipment for Simplified Service (2014).
- [6] 矢原裕大, 加藤新良太, 高井峰生, 石原進: DTNによる不道路情報共有と避難行動間の相互影響に関する実地図に基づいたシミュレーション評価, 第29回マルチメディア通信と分散処理ワークショップ論文集, pp. 170–177 (2021).
- [7] Recommendation ITU-R P.1411-11: Propagation Data and Prediction Methods for the Planning of Short-range Outdoor Radiocommunication Systems and Radio Local Area Networks in the Frequency Range 300 MHz to 100 GHz (2021).
- [8] Suzuki, H. et al.: An Ad hoc Network in the Sky, SKYMESH, for Large-scale Disaster Recovery, *IEEE Vehicular Technology Conference*, IEEE, pp. 1–5 (2006).
- [9] Álvarez, F. et al.: Bluemergency: Mediating Post-disaster Communication Systems using the Internet of Things and Bluetooth Mesh, *2019 IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC)*, pp. 1–8 (2019).
- [10] 大和田泰伯他: 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).
- [11] Scenargie: Space-Time Engineering, LLC, (online), available from (<https://www.spacetime-eng.com/>) (accessed 2022.01.25).
- [12] Komatsu, N. et al.: Automatic Evacuation Guiding Scheme based on Implicit Interactions between Evacuees and Their Mobile Nodes, *GeoInformatica*, Vol. 22, No. 1, pp. 127–141 (2018).
- [13] Keränen, A.: The Opportunistic Network Environment Simulator, (online), available from (<https://akeranen.github.io/the-one/>) (accessed 2021.04.14).
- [14] Misumi, M. and Kamiyama, N.: Evacuation-Route Recommendation Using DTN with Evacuee Attributes in Disasters, *2021 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pp. 1–7 (2021).
- [15] Okaya, M. and Takahashi, T.: Agent-Based Evacuation Behavior Simulations and Evacuation Guidance, *Journal of Information Processing*, Vol. 22, No. 2, pp. 319–324 (2014).
- [16] Jahir, Y. et al.: Routing Protocols and Architecture for Disaster Area Network: A Survey, *Ad Hoc Networks*, Vol. 82, pp. 1–14 (2019).
- [17] Aschenbruck, N., Gerhards-Padilla, E. and Martini, P.: Modeling Mobility in Disaster Area Scenarios, *Performance Evaluation*, Vol. 66, No. 12, pp. 773–790 (2009).
- [18] Uddin, M. Y. S. et al.: A Post-disaster Mobility Model for Delay Tolerant Networking, *Proceedings of the 2009 winter simulation conference (WSC)*, IEEE, pp. 2785–2796 (2009).
- [19] Ishibashi, B. and Boutaba, R.: Topology and Mobility Considerations in Mobile Ad hoc Networks, *Ad hoc networks*, Vol. 3, No. 6, pp. 762–776 (2005).
- [20] Adelantado, F. et al.: Understanding the Limits of LoRaWAN, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 55, No. 9, pp. 34–40 (2017).
- [21] ARIB STD-T108 ver. 1.4: 920MHz-band Telemeter, Telecontrol and Data Transmission Radio Equipment (2021).
- [22] 国土地理院: 数値地図, (オンライン), 入手先 (<https://www.gsi.go.jp/top.html>) (参照 2021.07.21).
- [23] 浜松市: 浜松市防災マップ, (オンライン), 入手先 (<https://hamabosai.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=d4070f31679d487ab858eb38d1d6ae3a>) (参照 2021.07.17).
- [24] 内閣府: 避難者に係る対策の参考資料, (オンライン), 入手先 (<http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/senmon/shutohinan/pdf/sanko01.pdf>) (参照 2022.01.28).
- [25] 浜松市: 平成27年国勢調査結果, (オンライン), 入手先 (https://www.city.hamamatsu.shizuoka.jp/gyousei/library/cyousakekkasyo/1_kokuseicyousa/cyousakekka/019_h27_chousakekka.html) (参照 2021.07.21).
- [26] 総務省: 津波避難対策に関する調査の結果に基づく公表について, (オンライン), 入手先 (https://www.soumu.go.jp/kanku/tohoku/houdou_180706.html) (参照 2022.01.25).
- [27] 総務省: 市町村における津波避難計画策定指針, (オンライン), 入手先 (https://www.fdma.go.jp/neuter/about/shingi_kento/h24/tsunami_hinan/houkokusho/p02.pdf) (参照 2022.01.25).
- [28] 田中智基他: 被災者行動の不確実性を考慮した災害弱者のための避難所決定手法の提案, マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム2134論文集, Vol. 2020, pp. 778–784 (2020).