

異種無線混合DTNを用いた道路寸断情報共有による 避難時間短縮の検討

矢原 裕大¹ 加藤 新良太² 高井 峰生^{3,4} 石原 進⁵

概要: 災害発生時において, 避難者間で道路の不通箇所や被災者の位置等の避難支援情報の共有は, 有用である. しかしながら, 災害時には通信インフラ損壊の可能性があるため, 特定の通信手段に依存しない情報共有手法が求められる. 筆者らは, 災害時にある通信手段が利用不能となった場合でも情報共有を可能とするために, セルラ通信, Wi-Fi, LPWA(Low Power Wide Area) 通信等の複数の異種無線通信手段とDTN(Delay/Disruption Tolerant Network)を用いた避難支援情報共有システムの開発を目指している. 異種無線混合DTNを用いた避難支援情報共有システムの実現には, 災害時の限られた通信機会で情報共有をするために情報送信優先制御, 各通信手段の特性に応じた情報配信手法が必要となる. 本稿では, 送信する避難支援情報の種別, データサイズ, 宛先, 重要度に応じた送信優先度について検討, 複数の通信手段を組み合わせた避難支援情報の配信手法を提案する. 避難者, 固定中継ノード, 災対本部間で異種無線混合DTNを用いて避難支援情報を共有したときに避難者の行動に与える影響を確かめるために, 避難行動と無線通信の簡略モデルを構築し, シミュレーション評価にした. この結果, 使用する通信手段に応じた避難支援情報の配信手法は, 避難時間短縮に有効であることが確認できたものの, 避難支援情報を保持する避難者が, 情報を提供すべき避難者全員に対して情報提供を行えず, 置き去りにする課題が存在することが確認された.

Reducing Evacuation Time by Sharing Damaged Road Information via DTN with Heterogeneous Wireless Communication Media

YUDAI YAHARA¹ ARATA KATO² MINEO TAKAI^{3,4} SUSUMU ISHIHARA⁵

1. はじめに

地震や台風等の災害が発生すると, 被災地域を津波や洪水が襲う可能性があるため, 被災者は迅速な避難を要される. 避難時には, 発生した道路陥没や鉄道等の交通網損壊による移動制限, 避難時の混乱が迅速な避難行動を妨げる

恐れがある. 災害時に, 避難経路や適切な移動手段を避難者に伝えることが求められる.

平時のスマートフォン, タブレット等のモバイル端末を用いた情報共有では, 携帯電話基地局やWi-Fiアクセスポイントが使用されているが, 災害時には, 平時と同様に情報共有ができるとは限らない. 災害が発生すると, セルラ網等の通信インフラが, 停電や設備故障により, 使用不能となる可能性がある. 東日本大震災では, 約850万軒において停電が発生し, 固定通信網は約190万回線が被災, 携帯電話基地局は約29,000局が停止, 損壊した[1][2]. また, 避難者が保持するモバイル端末が使用する通信手段は, セルラ通信, Wi-Fi, Bluetooth等と多様であり, 避難者が利用できる通信手段が同一であるとは限らない. そのため, 災害時にも情報伝達が可能なシステムが求められる.

大和田らは, 複数のアクセスポイントで構築したメッシュ

¹ 静岡大学大学院総合科学技術研究科工学専攻
Department of Engineering, Graduate School of Integrated Science and Technology, Shizuoka University
² 静岡大学創造科学技術大学院自然科学系教育部
Education Division, Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University
³ 大阪大学大学院情報科学研究科
Graduate School of Information and Science, Osaka University
⁴ カリフォルニア大学ロサンゼルス校
University of California, Los Angeles
⁵ 静岡大学大学院工学領域
College of Engineering, Shizuoka University

ネットワークを用いて、道路の不通箇所や避難所の受け入れ状況等の避難支援情報を避難者間で共有すると、避難時間が短縮されることを示している [3]。西山らは、Wi-Fi や Bluetooth による端末間直接通信と DTN(Delay/Disruption Tolerant Network) 技術を用いた災害時情報共有手法を提案している [4]。これらの手法では、情報共有に用いられている無線 LAN 等の通信手段が利用できない場合の代替案が示されていない。そのため、情報共有に用いる通信手段が利用不能となると、情報共有が不可能となる。

筆者らは、災害時において情報伝達を可能とするため、異種無線混合 DTN を用いた避難支援情報共有システムの開発を目指している。このシステムでは、セルラ網等の通信インフラが使用不可となることを考慮して、セルラ網や Wi-Fi, Bluetooth, LPWA (Low Power Wide Area) 通信等の異種無線通信を併用する DTN を用いて避難支援情報を共有する。通信可能範囲や通信帯域等が異なる複数の通信手段を併用することで、通信インフラが損壊している環境下や避難者が使用する通信手段が多様である環境下でも、確実な情報伝達を可能とすることを旨とする。また、情報共有を行う通信端末間が常に End-to-End で接続されているとは限らないため、DTN を用いる。DTN は、他端末との直接通信ができない場合、通信端末がデータを物理運搬し、通信可能になるとデータ転送を行う蓄積運搬形転送 (Store-Carry-Forward) 技術により、個々の端末の通信可能範囲を超えた地域にも情報伝達を可能とする技術である。

本稿では、災害時の限られた通信機会で情報共有をするために、異種無線混合 DTN を用いた避難支援情報共有システムの情報送信手法を提案する。避難支援情報を DTN を介して伝送すると、それによって避難行動が変化する。それは、DTN での通信経路にも影響を与え、その後の避難支援情報の配信にも影響を与える。本稿では、こうした避難行動、DTN、避難支援情報配信の相互の影響を調べるために、避難行動と無線通信の簡略モデルを用いたシミュレーションにより異種無線混合 DTN を用いた避難支援情報配信による避難時間短縮効果を評価する。

以下、2 章では災害時の情報共有手法の関連研究について述べる。3 章では異種無線混合 DTN による避難支援情報共有システムについてその概要と避難支援情報送信手法について説明する。4 章では異種無線混合 DTN による避難支援情報共有システムが避難者の行動に与える影響を確かめるためのシミュレーションモデルを示す。5 章でシミュレーション評価と考察をし、6 章で本稿をまとめる。

2. 関連研究

災害時、市町村の自治体は、被災状況把握のための情報収集、情報提供等に、電話や FAX、インターネット、ホワイトボードや張り紙、テレビやラジオ、防災スピーカ等

を用いている [5]。しかしながら、災害により通信が途絶した場合、防災スピーカ、テレビ、ラジオ放送以外の手段が利用できなくなり、被災者への情報提供や安否確認が困難となる可能性がある。そこで、災害情報や安否情報等を伝えるための代替手段の提案、実証実験が行われている。

大和田らは、NerveNet と呼ばれる避難地域に設置したアクセスポイントで構成されたメッシュネットワークを介して、避難者に避難支援情報を提供する手法を提案している [6]。各アクセスポイントをメッシュ接続することで、一部の無線リンク途絶や外部ネットワークと切断された場合においても、切断された回線を通らないルートでの回線を確保することで、途絶耐性を向上させている。彼らは、災害発生直後に NerveNet を用いて道路の不通箇所や避難所の受け入れ状況等の避難支援情報を共有すると避難者の避難完了時間が短縮されることを、ネットワークシミュレータを用いて確認している [3]。

西山らは Wi-Fi や Bluetooth の機能を有するモバイル端末を活用したアドホックネットワークを構築し、DTN 技術を用いて情報共有を行う手法を提案している [4]。被災者が共有したいメッセージや写真等があると、被災者が保持するモバイル端末は、周辺の避難者が保持するモバイル端末にアクセスポイントを介さずに直接通信し、メッセージを送信する。また、周辺に通信可能な端末が存在しない場合は、Store-Carry-Forward を用いて送信データを物理運搬する。

他にも、災害時において、通信インフラを用いた手法の代替手段として、アドホックネットワーク及び、DTN を活用した情報共有手法が、提案されている [7]。内田らは、都市部と比較して、通信ノード数が少なくかつカバーすべきエリアが広い農村部における災害時の DTN のデータ配送成功率を向上させるために、Wi-Fi, FWA, アマチュア無線などの複数無線インタフェースの中から災害時のネットワーク状況、ノードの動き、メッセージの優先度、ユーザのポリシーなどに基づいて使用する無線インタフェースを決定するコグニティブ無線を用いた情報共有手法を提案している [8]。Fajardo らは、被災者の Wi-Fi や Bluetooth の機能を有する携帯電話を用いた DTN によって画像を収集して、画像に含まれる内容を検出し、重要な内容に応じて情報に優先順位をつけ、その優先順位に応じて送信するコンテンツベースの画像優先順位付け技術を提案している [9]。

Twitter, Facebook 等の Social Network System (SNS) には、災害時、負傷者や支援物資の要請に関するタイムリーな情報が投稿され、これらの情報は、災害時の救援活動等への活用役に役立つとみられている [10][11]。しかしながら、これらは通信インフラを介して情報を得る必要があり、通信インフラ損壊時には SNS の利用が不能となる。

既に活用されている避難支援情報提供の一例として、国

表 1 避難支援情報の種別と内容

避難支援情報の種別	情報の内容
被害状況の情報	被害場所を示す道路 ID 等の座標と被害規模を示す符号からなるテキストデータと被害場所を撮影した写真、動画
避難指示情報	避難者の現在地から避難所までの経路を示すデータ等 (道路構造等の地図データは、避難者の通信端末に事前に保存されていると想定)
救助要請の情報	要救助者の位置を示す座標とトリアージ等で示された要救助者の状態からなるテキストデータ

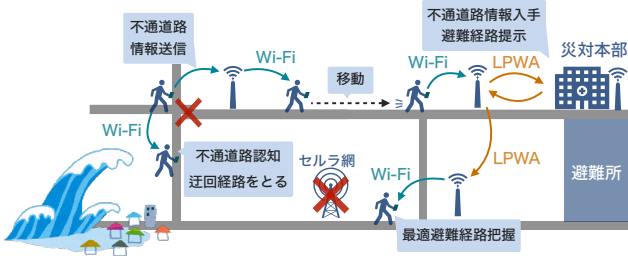


図 1 DTN と異種無線通信を併用した避難時情報共有システム

土地理院の被災後空中写真や ITS Japan の通れた道マップなどがあげられる。通れた道マップは、災害発生に伴う通行可能道路を実際の車両走行実績データを基に地図に示したものである。これは、災害発生後に、実際に走行している自動車をセンサとして得られたデータ（プローブカーデータ）を用いて、Google Maps 等のインターネット上の地図サービス上に自動的に描画するシステムが実用化されている [12]。東日本大震災発生時には、被災地内でガソリンが不足する中、効率的に移動するための信頼できる情報とした他、支援物資の輸送、重機の輸送において活用された [12]。

既存手法の課題として、情報共有が可能か否かは各手法が用いている無線 LAN やセルラ通信による通信手段に依存しており、その通信手段が使用できない場合の代替の通信手段が検討されていない。そのため、情報共有に用いる通信手段が利用不能となると、情報共有が不可能となり、避難の遅れや被害の拡大に繋がることとなる。

3. 異種無線混合 DTN を用いた避難支援情報共有

3.1 概要

異種無線混合 DTN を用いた避難支援情報共有システムは、災害発生直後において自治体や消防署等の災害対策本部（以降、災対本部）と避難する被災者（以降、避難者）間で、被害状況の報告や避難指示等の情報を伝達することを目的とする。これにより、避難者を津波到達時間等の避難完了期限までに安全に避難させることを目指す。図 1 にシステムの概要を示す。

本システムは、災害時の通信設備の損壊や、避難者が持つ通信手段の多様性を想定して、情報共有には、セルラ通信、Wi-Fi、Bluetooth、LPWA 等の通信可能範囲や帯域等が異なる複数の通信手段を用いる。また、情報の共有を行

う避難者及び災対本部間の通信が常に End-to-End で接続されているとは限らないため、DTN を用いることで通信切断が発生する場合でも情報共有を可能とする。

本システムは、避難者が保持するスマートフォンやタブレット等のモバイル端末と、災対本部に設置されたネットワーク機器、避難経路上に存在するネットワーク機器（固定中継ノード）で構成される。避難者が保持する通信端末は、セルラ通信、Wi-Fi、Bluetooth のいずれか 1 つ以上の通信に対応していると想定する。災対本部及び、固定中継ノードに設置されたネットワーク機器は、セルラ通信、Wi-Fi、Bluetooth、LPWA 等の複数の無線通信手段を利用できると想定する。

避難者、固定中継ノード、災対本部間で交換される避難支援情報は、道路や家屋等の被害状況の情報、避難指示情報、救助要請の情報がある。各避難支援情報の内容を表 1 に示す。各避難支援情報は、テキストデータや写真、動画によるデータサイズの違いや被害現場に到達するまでの時間や避難完了までにかかる時間等に伴う送信データの許容遅延、各避難者の状況によって送信データの重要度が異なる。

3.2 動作概要

モバイル端末を保持する避難者は、破損した道路や渋滞した道路を発見すると、それを表すテキストデータや写真等を自身のモバイル端末のバッファやストレージに保存する。避難者は、使用可能な通信手段を用いて、周辺の避難者や固定中継ノードに保存したデータを送信する。避難支援情報を受け取った避難者は、その情報に基づき、被害状況の把握や避難経路の変更等の避難行動をする。避難支援情報を受け取った固定中継ノードは、その情報が既出の情報であるかや単位時間あたりに得られた情報量等に基づき、データの取捨選択やデータの集計を行い、受け取った情報の加工や新たな避難支援情報の生成を行う。その後、地図情報や避難者の位置分布等に基づきその情報が必要となる避難者を予想し、その避難者及び災対本部に避難支援情報を送信する。災対本部は、入手した避難支援情報に基づき、被災地域の被害状況の把握や避難者に対する避難指示、要救助者の救助等を行う。避難指示は、災対本部から直接もしくは中継ノードを介して避難者に送信される。

表 2 各通信手段の伝送速度と伝搬距離

通信手段	最大伝送速度 [bps]	伝搬距離
セルラ (LTE-Advanced/5G)	1G / 20G	約 1km
LPWA (LoRaWAN/Sigfox)	250k / 100	1km – 50km
Wi-Fi (IEEE802.11 a/b/g/n/ac/ax)	54M / 11M / 54M / 600M / 6.9G / 9.6G	約 100m
Bluetooth	2Mbps	約 10m

3.3 異種無線混合 DTN による避難支援情報共有の課題

異種無線混合 DTN による避難支援情報共有システム実現には、次の課題がある。

送信優先制御 避難者、中継ノード、災対本部間のリンクは、常に接続されているわけではない。また、災害時には避難者、中継ノード、災対本部間の通信機会に限られる。そのため、限られた通信機会に情報を伝達する必要がある。そこで、送信データがテキストデータか写真であるかや、被害場所に到達する前に被害情報を送信できるか等の送信データの種別やサイズ、宛先、時間的制約、重要度に応じた送信優先制御が必要となる。

各通信手段の特性に応じたデータ配送 情報共有に使用するセルラ通信、Wi-Fi、Bluetooth、LPWA 通信の各通信手段の帯域や通信可能距離の特性が異なる。表 2 に各通信手段の特性を示す。例えば、LPWA は数 km 程度離れた端末までデータを届けることが可能であるが、帯域幅が狭いためサイズが大きいデータの送信には適していない。Wi-Fi は帯域幅が大きく、写真動画の送信にも適しているが、通信可能範囲が数十 m 程度である。そのため、データ配送時には各通信手段の特性に応じた配送手法が必要となる。

3.4 交換情報の種別、サイズ、宛先、重要度に応じた送信優先度

端末間で交換する避難支援情報の各種類について、サイズ、宛先、重要度に応じた各避難支援情報の送信優先度を検討する。

道路や橋等の被害状況に関しては、誰にも共有されていない情報を優先的に送信すべきである。またこれらはテキストデータ等の帯域を圧迫しにくいサイズのデータとして送信されるべきである。ある避難者によって一度送信されたデータと同じ場所の被害状況が、複数の避難者から送信されることが考えられる。一度送信された情報の類似データについては避難者が把握済みである可能性が高いため、情報の配信は抑制されるべきである。被害場所の写真、動画は被害状況の直感的理解には有用であるものの、データサイズが大きく、帯域を圧迫する。そのため、道路の通行可否等の被害状況を数値化しテキストデータとして送ることで、送信するデータのサイズを小さくし、かつ被害状況を把握できるようにする。

避難指示情報は、避難者を避難完了期限までに避難させることを目的として送信するため、避難に時間を要す避難者に対する情報ほど優先度は高くするべきである。また、避難者の現在地と避難指示に含まれる被害箇所との関係に応じて優先度を決定するべきである。全避難者が徒歩で避難すると仮定した場合、避難所から遠い位置の避難者への情報は、高い優先度で送信すべきである。また、避難経路を変更すべき避難者に対しても、高い優先度で送信されるべきである。

3.5 複数の通信手段を組み合わせた避難支援情報の配信手法

図 2 に情報配信手法の概要を示す。避難支援情報は、その情報の内容によって送信すべき位置、範囲が大きく異なる。図 2 において、道路 A の被害状況の情報は、道路 A 付近に位置する避難者によって生成され、道路 A を通過すると予測される避難者に送信される。避難支援情報の送信者と、その宛先となる避難者らの端末間の距離の分布は数 m–数 km と幅広いことが予想される。そのため、通信可能範囲や通信速度の異なる複数の通信手段を使い分けることが有用と考えられる。本節では、単純化のため、Wi-Fi や Bluetooth 等の無線 LAN と LPWA のみが利用可能な環境下で、避難支援情報を共有することを想定する。

無線 LAN と LPWA の通信可能範囲を基準に、情報共有に用いる通信は、情報を共有する端末間の距離が数百 m 以内の場合は無線 LAN のみとし、数 km 以上の場合は無線 LAN と LPWA を組み合わせて利用する。

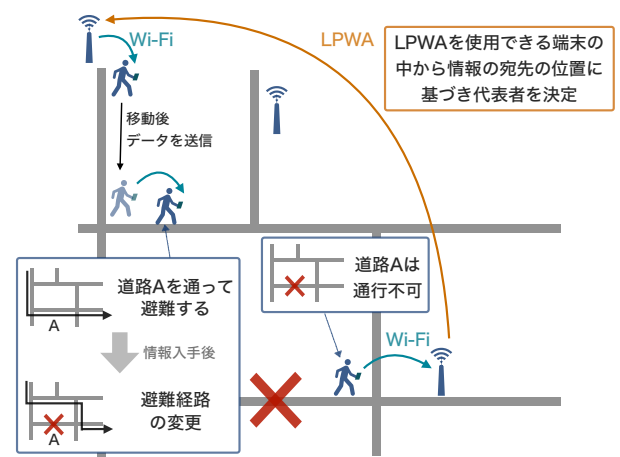


図 2 LPWA と Wi-Fi を併用した情報配信手法

無線 LAN のみを用いて情報共有をする場合、端末間が直接通信を行う。通信可能範囲外の避難者に対しては、複数の通信端末を中継し、データを送信する。このとき、DTN のルーティング手法については既存手法である Epidemic-Routing[13] や Spray-and-Wait[14] 等を用いる。

無線 LAN と LPWA を組み合わせて用いて情報共有をする場合は、LPWA 通信によって情報交換をする端末を限定する。LPWA は、Wi-Fi と比べると通信可能距離が長い一方で、非常に帯域が狭いため、送信するデータを限定し、かつ同じ情報を何度も送信を行わないようにする必要がある。そこで、LPWA を使用してデータを送信する際は、同一の区画内に宛先となる避難者や固定中継ノードが複数存在する場合、代表者を決定し、代表者にのみ LPWA でデータを送信する。その後、代表者は、その情報を宛先となっている他の避難者や固定中継ノードに対して無線 LAN を用いて、データの送信を試みる。

4. 避難行動及び無線通信のモデル化

DTN では、通信端末の位置分布や移動により、端末間の通信の可否が変化する。端末間の通信により避難支援情報を入手した避難者の行動に変化が生じる。この結果、端末間の通信環境にも変化が生じる。このように DTN を用いた避難支援情報の配信と避難行動、通信環境の変化は相互に影響を及ぼし合うため、これらを調べておくことは重要である。本章では、第 3 章で述べた異種無線混合 DTN を用いた避難支援情報共有システムの情報配信手法が避難者の行動に与える影響を確かめるために、シミュレーション評価を行う。交換情報の種別、サイズ、宛先、重要度に応じた送信優先度の決定についてはより詳細な設計が必要であるため、今回の評価では配信する情報の種類は一つのみとした。シミュレーションにあたり、避難中に得られる避難支援情報を加味した避難者の行動、及び、避難者が所持する端末間の通信を考慮したモデルを構築する必要がある。これらを一度に考慮するとモデルが複雑になる。そこで、避難者の行動と端末間の通信を簡略化したセル・オートマトンモデルを C 言語を用いて実装した。以下、実装した避難行動及び無線通信の簡略モデルについて述べる。

4.1 概要

避難者、固定中継ノード、災対本部間で無線 LAN 及び LPWA 通信を用いて避難支援情報を共有するときのモデルを構築した。避難者全員は、無線 LAN の無線通信機能を有する端末を所持していると想定する。固定中継ノード及び災対本部には、無線 LAN と LPWA 通信の無線通信機能を有するネットワーク機器があると想定する。モデルでは、地震発生直後に、避難経路内のある一箇所が道路陥没により寸断された環境下で、1 箇所の避難所へ複数の避難

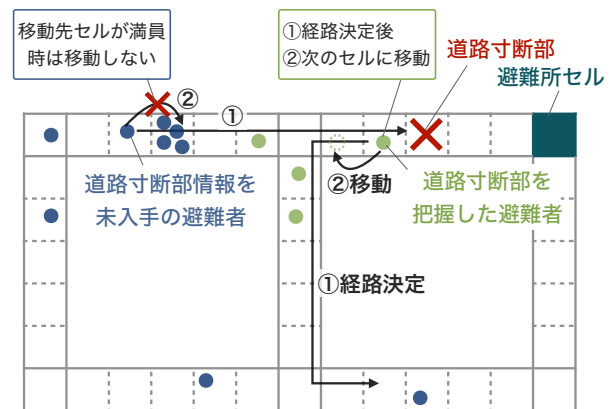


図 3 セル・オートマトンモデルにおける避難行動

者が徒歩で向かう場合を考える。本モデルで共有する情報は、道路寸断情報のみとする。道路寸断情報は、寸断された道路箇所と通れないことを示す符号からなる小サイズのデータであるものとする。

本モデルでは、道路と交差点を連続するセルの集合として定義する。1つの道路に並ぶセルの数を道路長とし、1つのセルに入ることができる最大避難者数を設ける。固定中継ノードは、各交差点に設置可能とする。各固定中継ノードが稼働しているか否かは、設定する災害の規模により決定する。また、災対本部は、避難所に設置され、災害規模によらず常時稼働しているものとする。各タイムステップで、避難者は避難経路の決定、移動、通信の順に行動する。まず、避難者はセル間を移動する。避難者は道路寸断情報を保持していると、通信可能範囲 R_{wlan} 内の避難者と固定中継ノードにその情報を通知する。固定中継ノードは、通信可能範囲 R_{wlan} 内の避難者に加え、 R_{lpwa} 内の固定中継ノードに情報を通知する。無線 LAN を用いた DTN のルーティング手法には、Epidemic-Routing を採用した。すなわち、情報を保持する避難者は避難中にすれ違った全ての避難者に対し、情報を送信する。情報を受け取った避難者は同様にすれ違った避難者に情報を送信しながら、避難所へ向かう。

4.2 避難行動のモデル

避難者の初期位置は、一様乱数を用いて決定される。避難者は災害発生後、道路及び交差点のセル間を移動し、避難所へ向かう。1 タイムステップあたりに移動するセル数は、最大 1 セルである。セル・オートマトンモデルにおける避難者移動の概要を図 3 に示す。各避難者は、各タイムステップで、自身の保持する情報に基づき現在位置から避難所までの避難経路を決定する。その後、避難者は決定した避難経路に沿って移動する。ただし、移動する先のセルに存在する避難者数とそのセルに入ることができる最大避難者数に達している場合、避難者は現在いるセル内に留まる。災害発生直後、各避難者は避難所までの最短経路の情

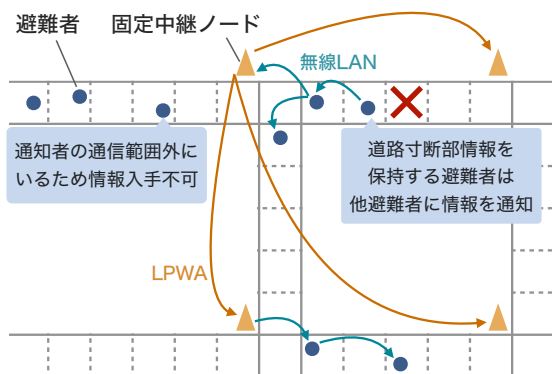


図 4 セル・オートマトンモデルにおける無線通信
($R_{wlan} = 2$, $R_{lpwa} = 20$ のとき)

報のみを保持しており、その最短経路を利用して避難所へ向かう。避難中に道路寸断部に到達した避難者は、寸断された道路箇所を記憶し、道路寸断箇所から道路を引き返し、迂回する。避難者は道路寸断情報を入手すると、道路寸断箇所を回避する避難所までの最短経路を求め、その経路に従って移動する。

4.3 無線通信のモデル

セル・オートマトンモデルにおける無線通信の概要を図 4 に示す。DTN を用いて道路寸断情報を共有する際、情報を保持している避難者は、通信端末の通信可能範囲内に他の避難者、もしくは固定中継ノード、災対本部が存在すると、通信端末に直接接続し、情報を送信する。

モデルでは、各タイムステップで、迂回中の避難者が、道路寸断情報を自身の位置から R_{wlan} セル内の避難者に通知する。 R_{wlan} は通知可能なセルの範囲であり、通信端末の通信可能範囲を表す。 $R_{wlan} = 1$ の時、自身のいるセルと隣接セルにいる他の避難者に通知可能となる。 $R_{wlan} = 2$ の時は、自身のいるセルと隣接セルにいる他の避難者、2 つ隣のセルにいる他の避難者に通知可能となる。この通知を受け取った避難者は、受け取ったタイムステップと同じタイムステップ内において、自身の位置から R_{wlan} セル内の他避難者に受け取った情報を通知する。道路寸断箇所の情報を保持する避難者は、寸断部を回避した避難経路で移動すると同時に、各タイムステップごとに受け取った情報を自身から R_{wlan} セル内の他避難者に通知する。

固定中継ノード及び災対本部は、無線 LAN に加え、LPWA 通信も使用する。固定中継ノード及び災対本部は、周辺避難者から道路寸断情報を受け取ると、周辺の情報未入手の避難者及び固定中継ノード、災対本部に対し、情報を送信する。周辺の避難者に対し、情報を送信する際は、無線 LAN を用いて、避難者の通信端末に直接接続し、情報を送信する。固定中継ノード、災対本部に対して、情報を送信する際は、LPWA 通信を用いて情報を送信する。

モデルでは、固定中継ノードは、情報を避難者から受け

表 3 シミュレーションパラメータ

パラメータ	値
1 つのセルの大きさ	2.0 m 四方
1 つのセルに存在できる最大避難者数	4 人
シミュレーションエリア内の避難者数	300 人
避難者の移動速度	1.0 m/sec.
無線 LAN の通信可能範囲 R_{wlan}	1-10 セル
LPWA の通信可能範囲 R_{lpwa}	500 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	50 min. (1500 タイムステップ)

取ると、受け取ったタイムステップと同じタイムステップ内において、自身から R_{lpwa} セル内の固定中継ノード及び災対本部に、受け取った情報を通知する。その後、同タイムステップ内で、自身から R_{wlan} セル内に位置する避難者に、道路寸断情報を通知する。道路寸断情報を保持する固定中継ノードは、各タイムステップにおいて、自身から R_{wlan} セル内の避難者に情報を送信する。各固定中継ノードは、LPWA 通信を用いた道路寸断情報の送信は一度しか行わない。また、固定中継ノードは、1 タイムステップ内で LPWA、無線 LAN の両方を用いた情報の送信が可能とする。

本モデルでは、モデルの複雑化を防ぐため、パケットロス、構造物等の影響による電波減衰は考慮しない。

5. シミュレーション評価

異種無線混合 DTN を用いた避難支援情報共有システムが避難者の行動に与える影響を確かめるために、第 4 章で述べた避難行動シミュレーションにより、避難者全員の避難完了に要する時間に与える影響を評価した。DTN を用いて道路不通箇所の情報共有を行った場合と、情報共有を行わなかった場合、全避難者が最適経路を用いて避難した場合のシミュレーション結果を比較し、異種無線混合 DTN を用いた避難支援情報共有の有効性を考察する。

5.1 シミュレーションシナリオ

図 5 に本シミュレーションのシナリオを示す。道路 17 本と交差点 12 箇所からなる $1.2 \text{ km} \times 0.8 \text{ km}$ の領域でシミュレーションを行った。道路寸断部は、避難所近くの道路上とした。本シミュレーションのパラメータを表 3 に示す。1 つのセルの大きさは、2.0 m 四方とした。避難歩行密度は 1 人/m^2 とするため、1 つのセル内に入れる避難者数は 4 人とした [15]。避難者の移動速度は 1.0 m/sec. とした。これは、地震発生後の避難可能距離算出時に用いる値と同値とした [16]。1 タイムステップの長さは、2.0 sec. とした。シミュレーションエリア内に配置する避難者数は、300 人とした。各タイムステップで移動する避難者の順序はランダムとした。

比較のため、シミュレーションは以下の 3 つのシナリオで行った。

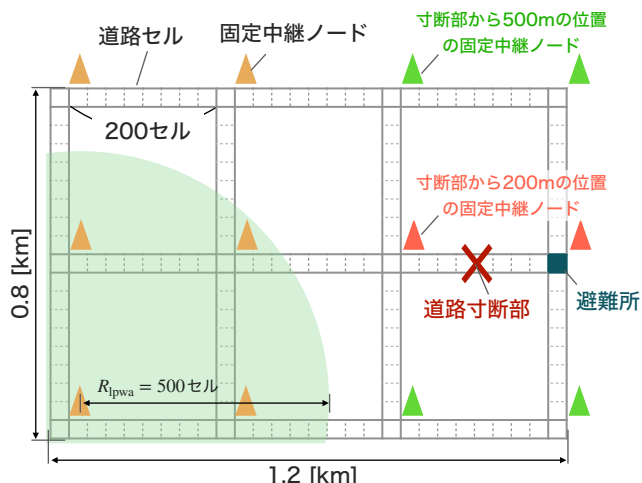


図 5 シミュレーションシナリオ

- (a) DTN 利用時: DTN による情報共有を行い、避難者は道路寸断情報を入手した後に迂回路を使用して避難
- (b) 非情報共有時: 情報共有を行わず、避難者は自身が道路寸断部に到達した後のみ迂回路を使用して避難
- (c) 全避難者情報把握時: 全避難者が事前に道路寸断部を把握しており、被災直後から道路寸断部を避けた経路を選択

シミュレーション時間は、1,500 タイムステップ (50min.) とし、シミュレーション回数は各条件で 10,000 回行った。(a) DTN 利用時のシミュレーションにおいて、避難者が保持する通信端末の通信可能範囲 R_{wlan} は、2, 5, 10 セルとした。固定中継ノード及び災対本部が使用する LPWA 通信の通信可能範囲 R_{lpwa} は、500 セルとした。

DTN 利用時のシミュレーションでは，以下の 2 つのシナリオをシミュレーションした．

- (A) 避難者が保持する通信端末のみを用いて避難支援情報を共有する場合
- (B) (A)に加えて、固定中継ノード、災対本部間で、避難支援情報を共有する場合

(B) 避難者、固定中継ノード、災对本部間で情報共有する場合は、固定中継ノード設置位置を以下のように設定した。

- (i) 各交差点に固定中継ノードを配置した場合
- (ii) 道路寸断部から 200m 以内の交差点にのみ固定中継ノード設置した場合
- (iii) (iii) に加え、道路寸断部から 500m 以内の交差点に固定中継ノード設置した場合

(i) の場合には、固定中継ノードが災害により故障していることを想定し、各試行において各固定中継ノードが全く動作しない確率（故障率）を与えることとし、故障率が 0.0,

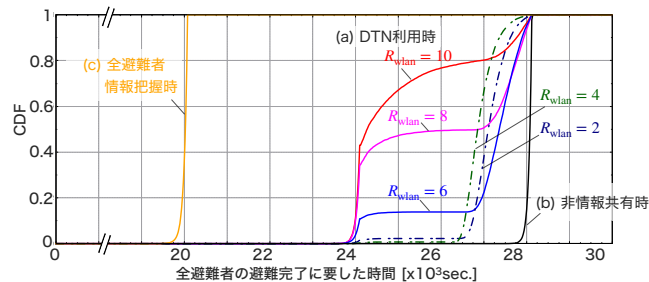


図 6 避難者間の直接通信と DTN を用いたときのシミュレーション結果

0.2, 0.5, 0.8, 1.0 の場合においてシミュレーションした。故障の有無は各試行の開始時に判定し、その後稼働状態は変化しないものとした。

5.2 評估指標

本システムが避難者の避難完了時間に与える影響を確認するため、シミュレーションの評価指標は、シミュレーションエリア内の全避難者が避難完了するまでに要した時間の累積分布とした。全避難者の避難完了時間が短いほど、良い結果となる。

5.3 端末間直接通信と DTN を用いたときのシミュレーション結果

図 6 に、無線 LAN による端末間直接通信を用いた DTN で避難者間でのみ避難支援情報を共有した場合の各条件におけるシミュレーション結果を示す。

シミュレーションの結果、(a) DTN 利用時において、10,000 回行った試行のうち 1-5 割で、全避難者が避難完了するまでの時間が (b) 非情報共有時より 20% 短縮され、残りが 10% 短縮されることが確認できた。道路寸断箇所に向かう可能性のある避難者全員に情報提供されたとき、避難時間が 20% 以上短縮される。避難時間が 20% 短縮された試行の割合が、 $R_{wlan} = 10$ のときは約 5 割、 $R_{wlan} = 6$

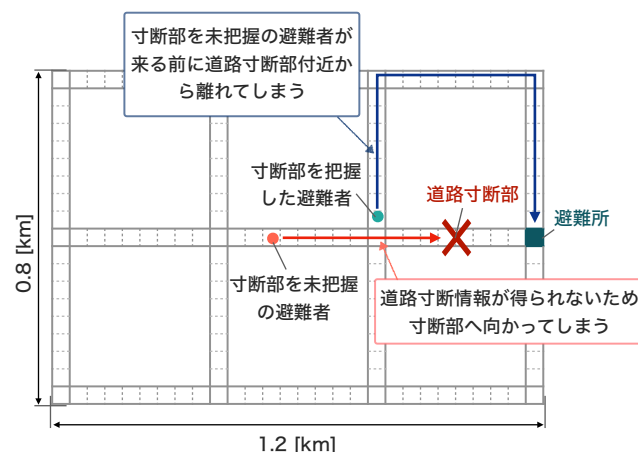


図 7 道路寸断箇所を把握した避難者が寸断箇所に向かう可能性のある避難者を置き去りにする現象の発生

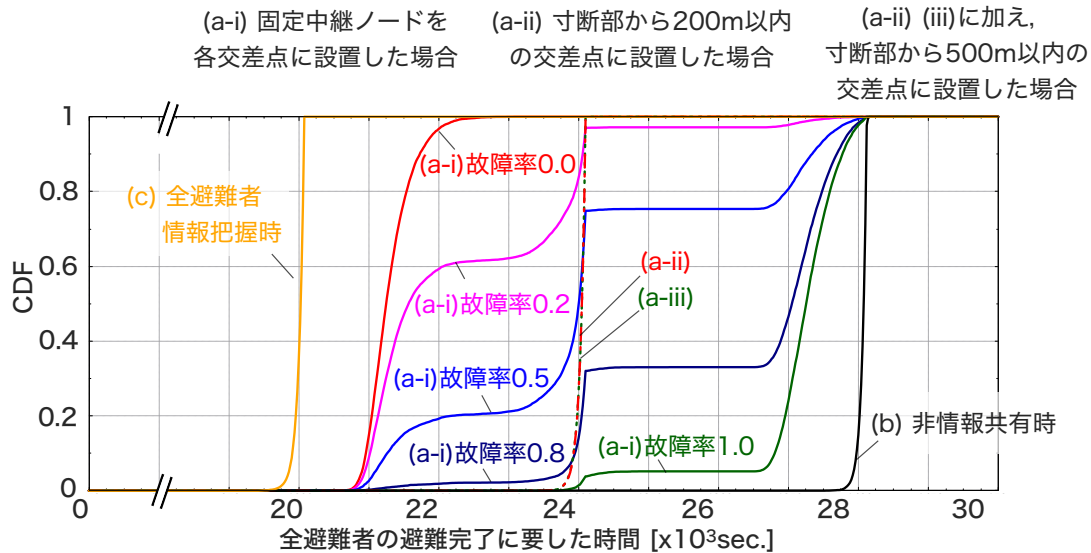


図 8 異種混合無線 DTN を用いたときのシミュレーション結果

のときは約 2 割, $R_{wlan} = 2$ のときは約 1 割となった. 無線 LAN の通信可能範囲 R_{wlan} が大きいほど, 避難時間が 20%以上短縮される試行の割合が大きくなる. シミュレーションの避難者のトレースを確認したところ, 避難時間の短縮度合いが小さい場合には, 道路寸断箇所を把握した避難者が他の避難者に情報を伝達する前に寸断箇所から離れてしまい, 寸断箇所に向かう可能性のある避難者を置き去りにすること (以降, 置き去り現象) が観察された (図 7).

5.4 異種無線混合 DTN のシミュレーション結果

図 8 に無線 LAN と LPWA を用いた DTN で避難者, 固定中継ノード, 災対本部間で避難支援情報を共有した場合の各条件におけるシミュレーション結果を示す. 図 8 は, 無線 LAN の通信可能範囲 R_{wlan} を 5 セルとした場合の結果である.

シミュレーションの結果, DTN 利用時, 稼働している固定中継ノードが多いほど避難完了時間が短縮される可能性が高いことが確認された. 固定中継ノードが全く稼働していない場合, 10,000 回行った試行のうち約 1 割で非情報共有時より避難時間が 15%短縮された. 残りの 9 割では避難時間が約 10%短縮された. 全ての交差点に固定中継ノードを設置したとき, 固定中継ノードの稼働率が 20%の場合, 約 4 割が避難時間が 15%短縮され, 稼働率が 80%の場合, 約 6 割が避難時間が 25%短縮され, 約 3 割が 15%短縮された. つまり, 固定中継ノードの稼働率が高くなることにより, 避難時間が短縮されやすくなった. これは, 固定中継ノードが道路寸断情報を保持し続け, 移動する避難者に情報を提供することで置き去り現象が発生しにくくなるためである. また, 固定中継ノードを道路寸断部から 200m 以内の交差点のみに設置した場合と, それに加え, 寸断部から 500m 以内の交差点に設置した場合とはともに, 避難完

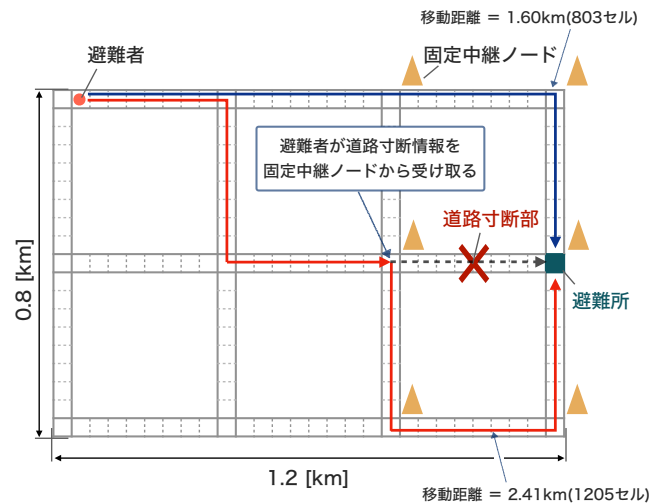


図 9 避難所から最も離れた位置の避難者の避難経路選択の一例

了時間は避難者の初期配置によらず全ての場合で約 24,000 秒となり, 避難時間が非情報共有時より 15%短縮された. これは, 避難所から最も離れた位置から避難を始めた避難者が, 固定中継ノードが設置された位置より手前で道路寸断情報を入手できず, 図 9 に示す経路をとった避難者が存在するためである. これらの結果より, LPWA を用いた固定中継ノードを用いて避難者により早い段階で, すなわち避難者の初期位置に近い場所で道路寸断情報を配信することが有効であることが確認できた.

5.5 考察

(A) 避難者が保持する通信端末のみを用いて道路寸断情報を共有する場合では, 道路寸断情報の共有が避難者の行動に左右されるため, 置き去り現象が見られる場合も観察された. (B) 避難者, 固定中継ノード, 災対本部間で, 異種無線混合 DTN を用いて道路寸断情報を共有する場合で

は、固定中継ノードの配置により、置き去り現象が発生しない場合も多く存在した。置き去り現象が発生するか否かは、稼働している固定中継ノードの位置に依存しており、固定中継ノードを設置する位置が道路寸断部に近い位置ほど置き去り現象は発生しにくく、避難完了時間の短縮効果が大きい。そのため道路寸断情報を共有する場合には、道路損壊が発生しやすい位置に固定中継ノードを置くことが望ましい。しかしながら、災害時に共有する避難支援情報は道路寸断情報以外の情報も多くあるため、それらも考慮した設置位置の検討が必要である。

6. まとめ

本稿では、異種無線混合 DTN を用いた避難支援情報共有システムの情報送信手法を提案した。提案した手法が有効かを評価するために、避難行動及び無線通信の簡略モデルを実装し、シミュレーション評価を行った。評価の結果、使用する通信手段に応じた避難支援情報の配信手法は、避難時間短縮に有効であることが確認できたものの、避難支援情報を保持する避難者が、情報を提供すべき避難者全員に対して情報提供を行えず、置き去りにするといった課題が存在することがわかった。

今後、情報送信手法の詳細設計を行い、ネットワークシミュレータ Scenargie を用いて避難行動と無線通信の詳細モデルを構築し、情報送信手法の有効性の評価と課題の解決について検討する予定である。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金 19H04092 の助成によるものである。

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 (IN-TELEC), pp. 1–5 (2011).
- [3] 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," 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 113, No. 168, pp. 67–71 (2013).
- [4] H. Nishiyama, M. Ito, N. Kato: "Relay-by-smartphone: realizing multihop device-to-device communications," in *IEEE Communications Magazine*, Vol. 52, No. 4, pp. 56–65 (2014).
- [5] 耐災害 ICT 研究協議会: "災害に強い情報通信ネットワーク 導入ガイドライン," <https://www.nict.go.jp/info/topics/2018/07/pdf/Guideline.pdf> (2018)
- [6] M. Inoue, Y. Owada, K. Hamaguti, R. Miura: "Nerve net: A regional-area network for resilient local information sharing and communications," 2nd International Symposium on Computing and Networking (CANDAR '14), pp. 3–6 (2014).
- [7] D. G. Reina, M. Askalani, S. L. Toral, F. Barrero, E. Asimakopoulou, N. Bessis: "A Survey on Multihop Ad Hoc Networks for Disaster Response Scenarios," *International Journal of Distributed Sensor Networks*, Vol. 11, No. 10 (2015).
- [8] N. Uchida, N. Kawamura, N. Williams, K. Takahata, Y. Shibata: "Proposal of delay tolerant network with cognitive wireless network for disaster information network system," in *Proceedings of the 27th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA' 13)*, pp. 249–254 (2013).
- [9] J. T. B. Fajardo, K. Yasumoto, and M. Ito, "Content-based data prioritization for fast disaster images collection in delay tolerant network," in *Proceedings of the 7th International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Networking (ICMU' 14)*, pp. 147–152 (2014).
- [10] M.-A. Abbasi, S. Kumar, J. A. A. Filho, and H. Liu, "Lessons learned in using social media for disaster relief—ASU crisis response game," in *Social Computing, Behavioral—Cultural Modeling and Prediction*, Vol. 7227 of *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 282–289 (2012).
- [11] Michael J. Widener, Mark W. Horner, Sara S. Metcalf: "Simulating the effects of social networks on a population's hurricane evacuation participation," *Journal of Geographical Systems*, Vol. 15, No. 2, pp. 193–209 (2013).
- [12] 須藤三十三, 浦川豪, 福重新一郎, 濱本兩太, 林春男: "広域的な災害発生後のプローブ情報の活用—東日本大震災での事例を通して—," *情報システム学会誌*, Vol. 8, No. 1, pp. 30–41 (2012).
- [13] A. Vahdat, D. Becker: "Epidemic Routing for Partially-Connected Ad Hoc Networks," *Duke Tech Report CS-2000-06* (2000).
- [14] T. Spyropoulos, K. Psounis, C.S. Raghavendra: "Spray and Wait: An Efficient routing Scheme for Intermittently Connected Mobile Networks," *Proceedings of the 2005 ACM SIGCOMM workshop on Delay-Tolerant Networking*, pp. 252–259 (2005).
- [15] 大阪府: "災害に強い都市づくりガイドライン," <http://www.pref.osaka.lg.jp/sokei/bousaiguide/index.html> (2020/02/17 確認).
- [16] 津波避難ビル等に係るガイドライン検討会, 内閣府: "津波避難ビル等に係るガイドライン (案)," <http://www.bousai.go.jp/kohou/oshirase/h17/pdf/050323shiryoku2.pdf> (2020/02/16 確認).