

# 災害時異種無線混合DTNを用いた道路寸断情報共有が避難行動に与える影響の一考察

矢原 裕大<sup>1,a)</sup> 加藤 新良太<sup>2,b)</sup> 高井 峰生<sup>3,4,c)</sup> 石原 進<sup>5,d)</sup>

**概要：**災害時の迅速な避難のためには、避難者間で道路寸断箇所や避難指示等の避難支援情報を共有することが求められる。筆者らは、災害発生後の通信設備が故障環境下において、Wi-Fi, Bluetooth, LoRa 等の複数種類の無線通信手段を併用する DTN を用いて避難支援情報を共有するシステムの開発を目指している。筆者らのこれまでの検討により、DTN と避難行動が互いに影響を与えることが確認されており、異種無線混合 DTN を用いて道路寸断情報を共有すると、道路寸断情報を保持している避難者が他の避難者を置き去りして避難し、置き去りにされた避難者の避難が遅れることが確認されている。本稿では、この置き去り現象を生じる要因を調べるために、避難行動及び無線通信の簡略モデルを用いて、避難所、道路寸断箇所、避難者の位置による避難者の行動変化を観察し、避難完了までに要する時間をシミュレーション評価した。この結果、置き去り現象は、固定中継ノードの位置、避難所、道路寸断部の位置、道路トポロジー、避難者の位置、移動経路に応じて、発生確率が変化することがわかった。また、固定中継ノードの設置位置の設定には、道路の利用者数、道路の利用時間、その道路を迂回したときの移動距離を考慮する必要があり、それらの値が大きい道路の付近に固定中継ノードを設置したときが費用対効果が高くなることがわかった。

## 1. はじめに

災害発生後の避難時には、避難経路の途絶や移動手段に制限が生じる。被災地で迅速に避難するには、避難者間で道路の不通箇所や避難所の位置等の避難支援情報を共有することが有用である。災害時には、停電や通信設備故障により、セルラ網や固定通信網等の通信インフラは使用不能となるとなる可能性がある。2011年東日本大震災では、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[2][3]。避難者が保持する通信端末に搭載された通信手

段は、セルラ通信、Wi-Fi、Bluetooth 等と多様である。

災害時通信インフラ故障下でも被害状況や避難指示等の情報を共有する手法が求められ、災害時にはこれらを避難支援情報配信に活用することが有用と考えられている。既存手法として、NerveNet[4], Die-hard Network[5], スマホ de リレー[6] 等がある。NerveNet は、複数の Wi-Fi アクセスポイント等の固定基地局で構成されたメッシュネットワークを介して避難支援情報を共有する手法である。スマートフォンの Bluetooth を用いて端末間直接通信と DTN (Delay/Disruption Tolerant Network) 技術を用いて災害情報を共有する。これらの手法では、情報共有に单一の通信手段を用いており、その通信手段が利用できない場合の代替手段が示されていない。

筆者らは、災害時において情報共有を可能とするために、異種無線混合 DTN を用いた避難支援情報共有システムの開発を目指している。本手法では、Wi-Fi や Bluetooth, LoRa 等の複数の無線通信手段を併用した DTN を用いて、避難支援情報を避難者、災害対策機関、避難所間で共有する。Wi-Fi, Bluetooth 等の短距離通信と LoRa 等の広域定速度通信を併用する DTN を用いることで、通信インフラが利用できない環境下や通信孤立地域が存在する場合でも、情報共有を可能とすることを目指す。

<sup>1</sup> 静岡大学大学院総合科学技術研究科  
Graduate School of Integrated Science and Technology,  
Shizuoka University

<sup>2</sup> 静岡大学創造科学技術大学院  
Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University

<sup>3</sup> 大阪大学大学院情報科学研究科  
Graduate School of Information and Science, Osaka University

<sup>4</sup> カリフォルニア大学ロサンゼルス校  
University of California, Los Angeles

<sup>5</sup> 静岡大学学術院工学領域  
College of Engineering, Shizuoka University

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

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

c) mineo@ieee.org

d) ishihara.susumu@shizuoka.ac.jp

DTNによる避難支援情報共有と避難者の避難行動は、相互に影響を及ぼしあう。避難支援情報をDTNを介して伝送すると、その情報を受け取った避難者は経路変更等をするため避難行動に変化が生じる。避難者は、情報の運搬や中継を担っているため、避難者の行動変化はDTNの通信経路を変化させる。それは、その後の情報伝送に影響を与える。

筆者らは、避難行動、異種無線混合DTNを用いた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てシミュレーションをし、異種無線混合DTNを用いた避難支援情報配信による避難完了時間短縮効果を評価した[1]。その結果、異種無線混合DTNを用いて道路寸断情報を共有すると、道路寸断情報を保持している避難者が、他の避難者を置き去りにして避難し、置き去りにされた避難者の避難が遅れることが確認された。本稿では、この置き去り現象を生じる要因を調べるために、避難行動及び無線通信の簡略モデルを用いて、[1]で用いたシナリオに加え、避難所、道路寸断箇所を変化させた複数のシナリオを用いてシミュレーションをし、避難者の行動変化を評価した。また、シミュレーションの結果に基づき、適切な固定中継ノードの設置位置を検討した。

以降、2章では、災害時情報共有システムと災害時DTNを用いた情報共有の性能評価についての関連研究について述べる。3章では異種無線混合DTNを用いた避難支援情報共有システムについて述べる。4章では、本稿で用いる避難行動と無線通信の簡略モデルについて述べる。5章で、シミュレーションによる避難行動と異種無線混合DTNを用いた避難支援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、既存の災害時情報配信手法と災害時DTNを用いた情報配信の性能評価に関する研究について述べる。

### 2.1 既存の災害時情報配信手法

NerveNetは、避難地域に設置した複数の固定基地局を用いてメッシュネットワークを介して、災害情報を提供する手法である[4]。Wi-Fiアクセスポイント等の固定基地局でメッシュネットワークを構築することで、一部の固定基地局が故障したり、ある固定基地局間の接続が切れた場合でも、切断された回線を避けたルートを用いて情報を伝送することを可能としている。

スマホdeリレーは、Wi-FiやBluetoothの機能を有するモバイル端末でアドホックネットワークを構築し、DTN技術を用いて災害情報を提供する手法である[6]。被災者が災害時情報を共有するとき、被災者の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とアクセスポ

イントを介さずに直接通信し、情報を伝送する。周辺に通信可能である端末が存在しない場合、Store-Carry-Forward技術を用いて、情報の運搬、中継を行う。

### 2.2 災害時DTNを用いた情報配信の性能評価

Marín-Campilloらは、災害シナリオにおけるDTNの転送プロトコルの性能を評価している[7]。現実的な災害領域間の移動をモデル化したモビリティモデル[8]を使用して、Epidemic[9]、PRoPHET[10]、MaxProp[11]、TTR[12]の災害シナリオにおけるルーティング特性をシミュレーションにより比較、評価している。シミュレーションの結果、MaxPropプロトコルが最も配信率が高く、TTRが最もオーバヘッドが小さく、エネルギー消費が最も低いことが示された。しかしながら、配信する情報の緊急性や通信ノードの密度によって、最適となるプロトコルが異なることを述べている。

Takahashiらは、災害シナリオにおけるDTN転送プロトコルのメッセージ配達の公平性を評価している[13]。災害時において、稼働している基地局や情報を保持している通信ノードが多数の被災者に対して情報を送信するときには、公平性が求められる。著者らは、シミュレータONEにてランダムウォークモデルを使用し、DTNの転送プロトコル(Direct Delivery, First Contact, Epidemic[9], Spray and Wait[14], Binary Spray and Wait[14], PRoPHET[10])のメッセージ配達における通信ノードごとの配達されたメッセージの数とその遅延を比較、評価している。その結果、既存のDTNの転送プロトコルでは災害シナリオにおいて公平性を確保できないことを示している。

Rosasらは、既存の災害時DTN情報配信手法評価のためのモビリティモデルの特徴を調査している[15]。著者らは、災害状況下の実際のノードの移動軌跡が存在しないことや既存のモビリティモデルが特定のシナリオのみを想定して設計されていることが原因で、既存のモビリティモデルの比較が困難であることを述べている。また、既存の災害時のDTNプロトコルの評価においては、人口が密集した小規模なシナリオ等に限定されたり、多くの災害シナリオでは非現実的であると述べている。

## 3. 異種無線混合DTNを用いた避難支援情報共有システム

本章では、筆者らが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について説明する。

### 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、避難者と災害発生直後に災害対策本部(以降、災対本

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

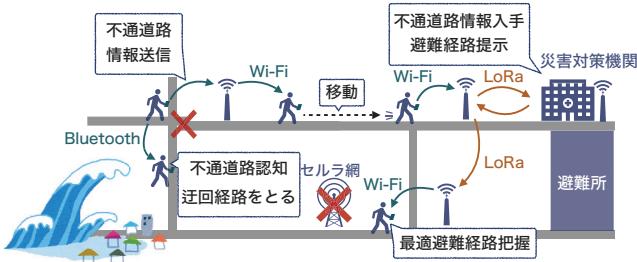


図 1 DTN と異種無線通信を併用した避難時情報共有システム

部) や消防局等の災害対策機関、避難所間で、被害状況の報告や避難指示等の情報を共有することを目的とする。図 1 にシステムの概要を示す。

本システムでは、情報共有に、Wi-Fi, Bluetooth 等の広帯域通信と、LoRa 等の狭帯域通信を用いる。また、使用可能である場合はセルラ通信も用いる。複数種類の通信手段を用いることで、災害時の通信設備損壊や避難者が使用できる通信手段の多様性に対応する。さらに災害時には、情報を交換する通信端末間の通信が常に End-to-End で接続されているとは限らないため、DTN を用いる。

本システムで用いる通信端末は、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、災害対策機関に設置されたネットワーク機器、避難経路上に設置されたネットワーク機器（固定中継ノード）を想定する。避難者が保持するモバイル端末は、セルラ通信、Wi-Fi, Bluetooth のいずれか 1 つ以上が使用できると想定する。災害対策機関及び避難経路上に設置されたネットワーク機器は、セルラ通信、Wi-Fi, Bluetooth, LoRa 等の複数の無線通信手段に対応していると想定する。

避難者、災害対策機関、固定中継ノード間で交換する情報は、道路や家屋等の被害状況の情報、避難指示情報、救助要請の情報である。それぞれの情報の内容やデータ種別を表 1 に示す。

### 3.2 本避難支援情報共有システムの動作例

避難者は、不通である道路や渋滞が発生している道路を発見すると、そのことを表すテキストデータや写真として、保持するモバイル端末に保存する。その後、避難中に通信可能な通信端末に遭遇すると、使用可能な通信手段を用いて、その情報を送信する。避難支援情報を受け取った避難者は、その情報に基づき、移動手段の変更や避難経路変更等の避難行動をする。固定中継ノード及び災害対策機関は、共有された情報の集計や分析を行う。その後、集計、

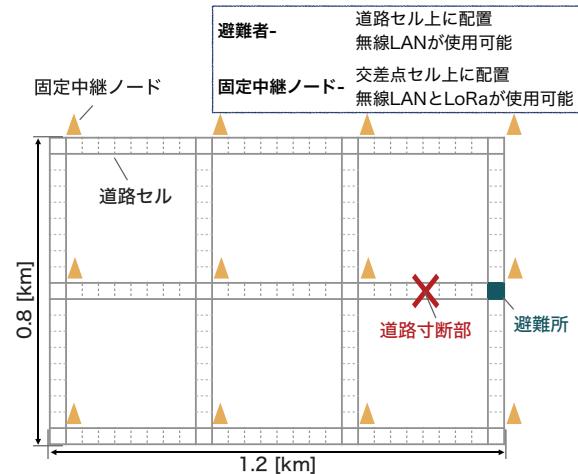


図 2 [1] におけるシミュレーションシナリオ

分析した結果から避難指示情報や被害情報を生成し、その情報を避難者や固定中継ノードに送信する。災害対策機関は、集計、分析した結果に基づき、被害状況の把握や、要救助者の救助等の災害対策行動をする。

### 3.3 避難行動と DTN による情報共有の関係

DTN を介した避難支援情報共有と避難者の避難行動は、相互に作用する。DTN を介して避難支援情報を伝送すると、その情報を受け取った避難者は、情報に基づき、道路寸断部を避けるような経路に避難経路を変更する等の避難行動を変える。避難者は DTN において避難支援情報の物理運搬や転送を担っている。そのため、避難者の行動の変化は、DTN の通信経路や通信機会を変化させる。それは、その後の避難支援情報配信に影響を及ぼすため、避難行動が変化する前には、情報配信が可能だったエリアが行動変化により情報配信不可能になる可能性がある。本稿では、避難行動と DTN の相互影響について調べる。また、効果的な固定中継ノードの配置位置について検討する。

筆者らは、災害発生後避難所近くの道路が寸断された環境下（図 2）において、異種無線混合 DTN を用いて避難者間で道路寸断情報を共有した場合の避難者の行動を簡略モデルを用いて観察した [1]。その結果、図 3 のような、道路寸断情報を保持する避難者が、他の避難者に情報を伝達する前に道路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現象（以降、置き去り現象）が発生することを確認した。道路寸断情報を保持している避難者の近くに位置している避難者は、道路寸断

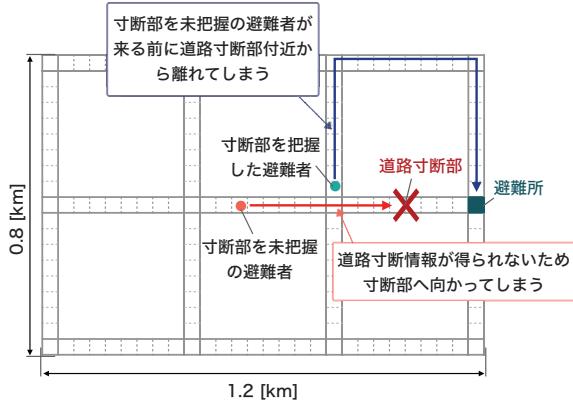


図 3 道路寸断箇所を把握した避難者が寸断箇所に向かう可能性のある避難者を置き去りにする現象の発生

情報を道路寸断部到達前に入手できるため、災害発生後から避難完了までの時間が短縮される。しかしながら、情報を保持している避難者の通信端末の通信範囲から離れている避難者は、置き去りにされるため、道路寸断情報を入手できず、道路寸断部に向かってしまう。それにより、避難に遅れが生じた。この置き去り現象は、固定中継ノードの稼働位置や稼働している数に応じて、発生確率が変動することがわかった[1]。

本稿では、図 2 の避難所、道路寸断箇所の位置に加え、それ以外の場所に避難所、道路寸断箇所が位置している場合においての避難者の行動を観察し、シミュレーション評価により、避難行動と DTN の相互影響について検証する。

#### 4. 避難行動、無線通信のモデル化

本章では、避難行動と異種無線混合 DTN による情報共有の相互影響を確認するために用いる簡略モデルの概要について述べる。本稿で用いるモデルは、図 2 のシナリオにおいて、避難者の行動を観察した際[1]に用いたモデルと同じモデルである。避難行動と異種無線混合 DTN による情報共有を行うモデルには、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、避難者の性別や年齢に応じた移動速度や移動手段の違いや電波伝搬や通信端末間の通信に用いるプロトコル等を考慮する必要がある。これらを一度に考慮するとモデルが複雑になるため、本稿では、以降に示す避難行動と無線通信を簡略化したセル・オートマトンモデルを用いた。

##### 4.1 概要

本モデルでは、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、災対本部間で無線 LAN 及び LoRa を用いて道路寸断情報を共有することを想定する。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 LoRa 通信の無線通信機能を

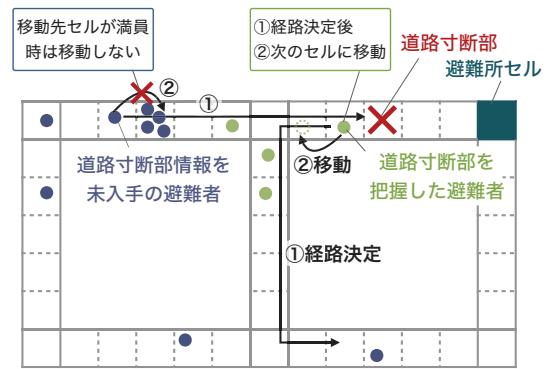


図 4 セル・オートマトンモデルにおける避難行動

有するネットワーク機器があると想定する。共有する情報は、道路寸断情報のみである。道路寸断情報は、寸断された道路の位置と通れないことを示すことを表す符号からなる 100 Byte 以内のテキストデータであるとする。

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。

各タイムステップごとに、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、 $R_{lora}$  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[9] を採用した。すなわち、寸断情報を保持する通信ノードは通信可能な通信ノードと遭遇する度に、通信可能なノードに対し保持する寸断情報を送信する。

##### 4.2 避難行動のモデル

本モデルにおける避難者の避難行動の概要を図 4 に示す。避難者は災害発生後、道路及び交差点セル間を移動し、避難所へ向かう。避難者は、保持している情報に基づき避難経路を決定する。道路寸断部に到達した避難者は、道路寸断情報を保持し、その後その場所を迂回する避難所までの最短経路をとる。

##### 4.3 無線通信のモデル

本モデルにおける無線通信の概要を図 5 に示す。道路寸断情報を保持する避難者は、各タイムステップごとに無線 LAN を用いて  $R_{wlan}$  セル内に位置する通信ノードに対し、寸断情報を送信する。 $R_{wlan}$  は無線 LAN の通信可能範囲を表す。道路寸断情報を保持する固定中継ノードは、LoRa を用いて  $R_{lora}$  セル内に位置する通信ノードに対し、寸断

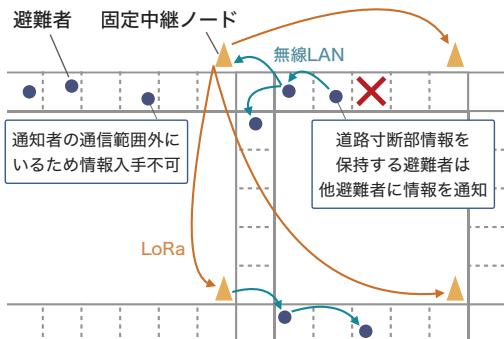


図 5 セル・オートマトンモデルにおける無線通信  
( $R_{\text{wlan}} = 2$ ,  $R_{\text{lora}} = 20$  のとき)

情報を送信する。このとき、送信情報を受け取ることができるのは、LoRa を使用できる固定中継ノード、災対本部のみである。 $R_{\text{lora}}$  は無線 LAN の通信可能範囲を表す。各固定中継ノードは、LoRa を用いた道路寸断情報の送信回数は一度で、複数回の送信は行わない。また、道路寸断情報を保持する固定中継ノードは、避難者同様に各タイムステップごとに無線 LAN を用いて  $R_{\text{wlan}}$  セル内に位置する通信ノードに対し、寸断情報を送信する。

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 と避難行動の相互関係を調べ、[1] で観察された置き去り現象を生じる要因を調べるために、異種無線混合 DTN を用いた避難支援情報共有システムを用いて道路寸断情報を避難者、固定中継ノード間で共有したときの避難行動シミュレーションをした。本章では、第 4 章で述べたモデルを用いて、避難者の災害発生後から避難完了までに要する時間を評価する。

### 5.1 シミュレーションシナリオ

図 6 にシミュレーションに用いるシナリオを示す。シミュレーションは、道路 17 本、道路接続部 12箇所からなる  $1.2 \text{ km} \times 0.8 \text{ km}$  の領域において、避難者が避難所に向かうことを想定した。避難者全員は徒歩で避難所に向かう。表 2 にシミュレーションで用いるパラメータを示す。避難者の移動速度は、地震発生後の避難可能距離算出時に用いる値と同値の  $1.0 \text{ m/sec.}$  とした [17]。各セルに入ることができる避難者数は 4 人とし、歩いて避難するために必要な密度である避難歩行密度が最大  $1 \text{ 人}/\text{m}^2$  となるようにした [16]。領域内に配置する避難者は、一様乱数によって決定される。各タイムステップにおいて、避難者が移動する順番は、一様乱数によって決定される。

避難所は図 6 中の 0~11 番いずれかの道路接続部とし、道路寸断部は 6 中の 0~16 番いずれかの道路の中間部とした。避難所及び道路寸断部は、 $12 \times 17$  通りの全てのシナリオ

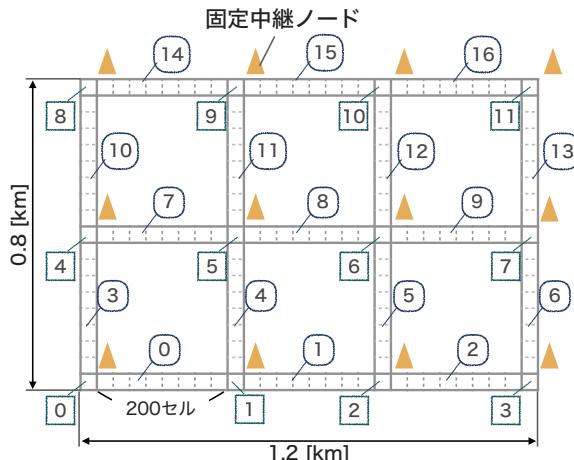


図 6 シミュレーションシナリオ

表 2 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 $R_{\text{wlan}}$	50 m (25 セル)
LoRa の通信可能範囲 $R_{\text{lora}}$	1000 m (500 セル)
1 タイムステップあたりの時間	0.2 sec.
シミュレーション時間	80 min. ( 2400 タイムステップ )

においてシミュレーションをした。

比較のために、以下の 3 つの条件でシミュレーションを行った。

- (a) DTN 利用時: 異種無線混合 DTN を用いて道路寸断情報を共有した場合。避難者は道路寸断情報を入手後に寸断部を迂回した経路で避難。
- (b) 非情報共有時: 道路寸断情報を共有しない場合。避難者は道路寸断部に到達後に寸断部を迂回した経路で避難。
- (c) 全避難者情報把握時: 全避難者が事前に道路寸断情報を把握している場合。避難者は被災直後から寸断部を迂回した経路で避難。

(a) DTN 利用時、固定中継ノードは各交差点に配置する。固定中継ノードが災害により故障することを想定し、固定中継ノードが被災し故障する確率（故障率）を設定した。固定中継ノードの故障率  $P_{\text{fault}}$  は、0.0, 0.2, 0.5, 0.8, 1.0 の場合においてシミュレーションをした。各固定中継ノードが故障しているか否かは、各試行の開始時に判定し、その後の故障、回復はないものとした。

避難者は無線 LAN が利用でき、固定中継ノードは無線 LAN と LoRa が使用できることとした。無線 LAN の通信可能範囲は 25 m 以内、LoRa の通信可能範囲は 1,000 m 以内とした。

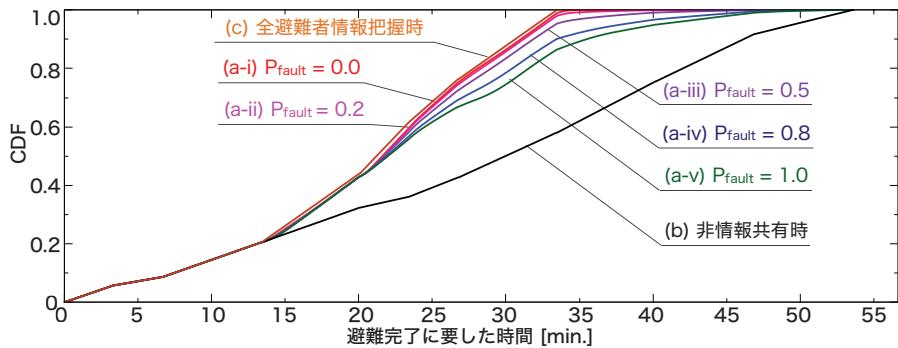


図 7 避難所を[11], 道路寸断部を[16]としたとき, 各避難者が避難完了に要した時間の分布

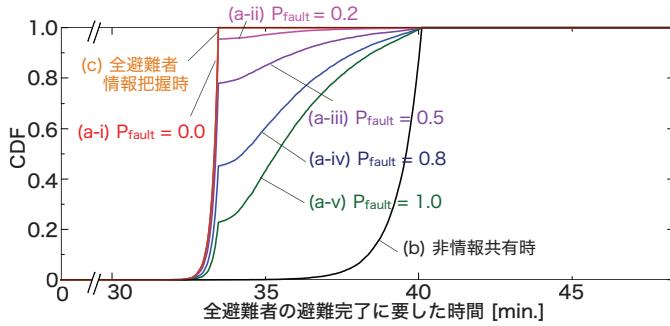


図 8 避難所[3], 道路寸断部[4]時のシミュレーション結果

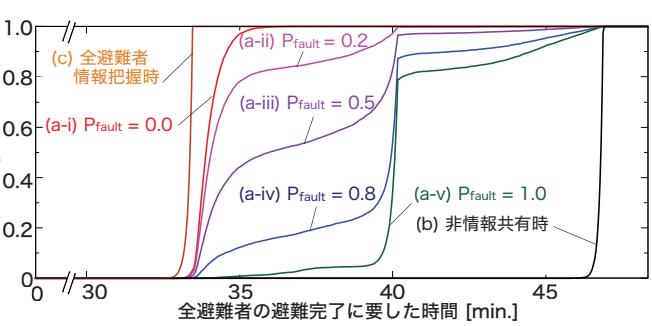


図 9 避難所[7], 道路寸断部[9]時のシミュレーション結果

## 5.2 評価指標

評価指標には、避難者が災害発生直後から避難完了するまでに要した時間を用いた。シミュレーションでは、各避難者の避難完了時間と全避難者が避難完了するまでの時間を評価した。

## 5.3 各避難者の避難完了までに要した時間

図 7 に、避難所を 11 番の道路接続部、寸断道路を 16 番の道路、避難者 300 人とした場合の各避難者が災害発生直後から避難完了までに要した時間の分布を示したヒストグラムを示す。図 7 は 10,000 回行ったシミュレーションの各避難完了時間で避難した避難者の数の分布を示している。

シミュレーションの結果、非情報共有時は避難完了者数が災害発生後から線形に増加しているのに対し、DTN 利用時は災害発生後 13 分経過すると避難完了者数の増加率が上昇しているのがわかる。したがって、DTN を用いた道路寸断情報情報の共有は、多くの避難者の避難完了時間を早めることが可能である。DTN 利用時には、固定中継ノードの故障率が低い場合は災害発生後 35 分で全避難者が避難完了している。一方で、DTN 利用時の固定中継ノードの故障率が高い場合は、災害発生後 35 分が経過した時点では約 1 割の避難者が避難完了しておらず、全避難者の避難完了時間は災害発生後 50 分である。このことから、固定中継ノードの故障率が高い場合は、図 3 のような置き去り現象が頻繁に発生していることがわかる。

## 5.4 全避難者が避難完了するまでの時間の評価

### 5.4.1 避難所と道路寸断箇所を固定したシナリオにおけるシミュレーション結果

図 8 に、避難所を 3 番の道路接続部、寸断道路を 4 番の道路、避難者 300 人とした場合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を示す。図 9 に、避難所を 7 番の道路接続部、寸断道路を 9 番の道路、避難者 300 人とした場合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を示す。図 8、図 9 は 10,000 回行った各シミュレーションごとの一番最後に避難した避難者が避難に要した時間を評価している。

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。図 9 では、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に要する時間が 30% 短縮され、約 7 割で避難に要する時間が 15% 短縮された。ところが、残りの約 2 割では避難に要する時間の短縮は約 1-10% に留まっている。つまり、これら約 2 割は置き去り現象が発生している。

図 9 では、DTN 利用時、固定中継ノードの故障率による避難完了時間のばらつきが大きい。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 3 割が避難に要する時間が 30% 短縮され、稼働率が 80% の場合、約 8 割が避難に要する時間が 30% 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、避難に要する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。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。また、LoRa 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避難完了時間短縮に有効であることが確認できた。

一方で、図 8 では、DTN 利用時、固定中継ノードの故障率による避難完了時間のばらつきが少ない。このことから、避難所を 3 番の道路接続部、寸断道路を 4 番としたシナリオを用いた場合では、置き去り現象があまり発生していないことがわかる。これは、避難所から道路寸断部が離れた位置にあるため、寸断道路の利用を試みる避難者が少ないとや寸断道路の利用を試みる避難者は、災害発生直後に寸断部に到達するため、早い段階で寸断情報を入手できることが要因である。

#### 5.4.2 全シナリオのシミュレーション結果

図 10 に、避難所及び道路寸断部の位置を変化させた全てのシナリオにおいてシミュレーションをしたときの、全避難者が避難完了するまでに要した時間の累積分布を示す。図 10 は、各シナリオにおいて 10,000 回行ったシミュレーションごとの一番最後に避難した避難者を評価している。

シミュレーションの結果、避難所や道路寸断部の位置によって避難完了時間は変化し、DTN 利用時は、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は高く、置き去り現象が発生する可能性があることが確認された。置き去り現象の発生の有無は稼働している固定中継ノードの位置だけでなく、避難所や道路寸断部位置や道路トポロジー、避難者の位置や移動経路にも依存していることがわかる。そのため、固定中継ノードの設置時には、避難者の密度、道路トポロジーを考慮した上で、置き去り現象が発生しにくい位置を検討する必要がある。

#### 5.4.3 固定中継ノードの設置位置

固定中継ノードの設置時には、避難者が避難完了に要する時間をどれだけ短縮されるかに加えて、設置コストを抑えることを考慮する必要がある。より少ない固定中継ノードの設置数で、大きな効果を生むことが望ましい。

図 8, 9, 10 から、道路寸断箇所と避難所間の距離が近いとき、固定中継ノードの故障率による避難完了に要する時間のばらつきが大きいことがわかる。つまり、道路寸断箇所と避難所間の距離が近いとき、固定中継ノードの稼働数が避難者の避難完了時間に大きな影響を与える。これは、以下の 3 点が原因である。

**寸断道路の利用者数:** 避難所に近い道路の方が、避難所から離れた道路よりも、その道路を含む避難経路を選択する避難者数が多い。シミュレーションでは、一様乱数を用いて避難者の初期位置を設定しており、災害発生後、避難者は避難所へ向かう。そのため、避難所近くの道路の利用を試みる避難者は多い。利用者数が多い道路が寸断されると、迂回が必要となる避難者が増加し、避難に遅れが生じる。

**寸断道路の利用時間:** 避難所に近い道路は、災害発生直後から全避難者避難完了まで断続的に利用されるのに対し、避難所から離れた道路は、全避難者避難完了する直前には利用者はおらず、利用時間が限られる。断続的に利用される道路が寸断された場合、全避難者が避難完了までに要する時間は長くなる。

**迂回路の距離:** 図 8 で用いたシナリオと図 9 で用いたシナリオを比較すると、図 9 の方が道路寸断箇所に到達後に選択する迂回路の距離が長い。総移動距離が長いほど、道路寸断到達した避難者が避難完了に要する時間は長くなる。

したがって、固定中継ノードは、避難時における道路の利用者数が多い道路、避難時における道路の利用時間が長い道路、道路が寸断された場合にとる迂回路が限定されたり、迂回路の距離が長くなる道路の近くに配置すると、費用対効果が高くなる。図 6 において、避難者が一様乱数を用いて配置されることから、避難所に接続された道路である 6 番、9 番、13 番の道路が、利用者数が最も多く、利用時間が最も長く、迂回路の距離が長い。そのため、シミュレーションで用いた環境下においては、6 番、9 番、13 番の道路付近に固定中継ノードを配置することが望ましい。

## 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が避難行動に与える影響を確認するために、避難行動及び無線通信の簡略モデルを用いて、シミュレーションを行い、避難者の行動を観察、評価した。シミュレーションの結果、道路寸断情報を保持する避難者が、他の避難者に寸断情報を伝達する前に道路寸断箇所から離れてしまい、寸断道路に向かう可能性のある避難者を置き去りにし、一部の避難者の避難が遅れる現象が生じることを確認した。この現象は、固定中継ノードの位置、避難所、道路寸断箇所の位置、道路トポロジー、避難者の位置、移動経路の複数の要因により、発生確率が変化することがわかった。また、固定中継ノードの設置位置を検討した結果、配置には道路の利用者数、道路の利用時間、その道路を迂回したときの移動距離を考慮する必要があることがわかった。具体的には、道路の利用者数が最も多く、利用時間が最も長く、迂回路の距離が最も長い道路付近に固定中継ノードを

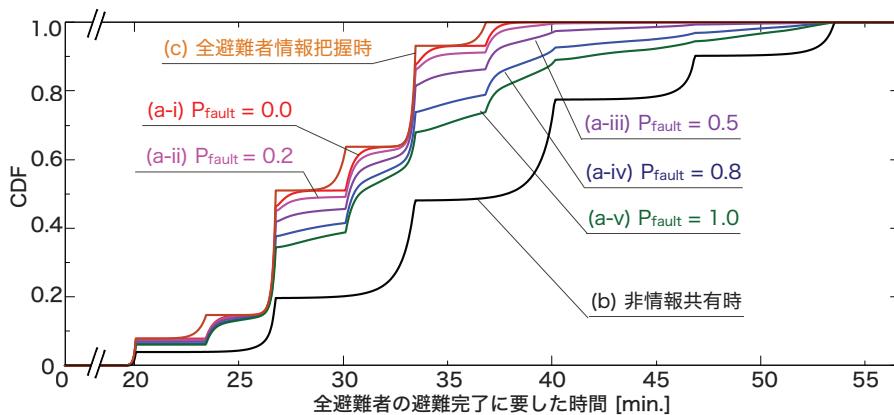


図 10 避難所及び道路寸断部を変化させた全てのシナリオにおけるシミュレーション結果

設置したときが最も費用対効果が大きいことがわかった。

今後は、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、固定中継ノードの設置効果を評価する予定である。

## 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] 矢原裕大, 加藤新良太, 高井峰生, 石原進: “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,” 情報処理学会 DICO MO 2020, pp. 1443–1451 (2020).
- [2] Kobayashi M.: “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).
- [3] Adachi T., Ishiyama Y., Asakura Y., Nakamura K.: “The restoration of telecom power damages by the Great East Japan Earthquake,” 2011 IEEE 33rd International Telecommunications Energy Conference (INTELEC), pp. 1–5 (2011).
- [4] Inoue M., Owada Y., Hamaguti K., Miura R.: “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).
- [5] 大和田泰伯, 前野誉, 加藤新良太, 佐藤剛至, 天間克宏, 高井峰生, 久利敏明, 石原進: “分散サーバ間の移動体による非同期通信を用いた災害時情報共有システム,” 信学技報, Vol. 120, No. 73, pp. 7–12 (2020).
- [6] Nishiyama H., Ito M., Kato N.: “Relay-by-smartphone: realizing multi-hop device-to-device communications,” in IEEE Communications Magazine, Vol. 52, No. 4, pp. 56–65 (2014).
- [7] Martín-Campillo A., Crowcroft J., Yoneki E., Martí R.: “Evaluating opportunistic networks in disaster scenarios,” Journal of Network and Computer Applications, Vol. 36, No. 2, pp. 870–880 (2013).
- [8] Aschenbruck N., Gerhards-Padilla E., and Martini P.: “Modeling mobility in disaster area scenarios,” Performance Evaluation, Vol. 66, No. 12, pp. 773–790 (2009).
- [9] Vahdat A., Becker D.: “Epidemic Routing for Partially-Connected Ad Hoc Networks,” Duke Tech Report CS-2000-06 (2000).
- [10] Lindgren A., Doria A., Schelén O.: “Probabilistic Routing in Intermittently Connected Networks,” ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communication Review, Vol. 7, No. 3, pp. 19–20 (2003).
- [11] Burgess J., Gallagher B., Jensen D., Levine B.: “Max-Prop: Routing for Vehicle-Based Disruption-Tolerant Networks,” In Proc. the 25th IEEE International Conference Computer Communications (2006).
- [12] Martí R., Robles S., Martín-Campillo A., Cucurull J.: “Providing Early Resource Allocation During Emergencies: The Mobile Triage Tag,” Journal of Network and Computer Applications, Vol. 32, No. 6, pp. 1167–1182 (2009).
- [13] Takahashi A., Nishiyama H., Kato N., “Fairness Issue in Message Delivery in Delay- and Disruption-Tolerant Networks for Disaster Areas,” 2013 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC '13), pp. 890–894 (2013).
- [14] Spyropoulos T., Psounis K., Raghavendra C. S.: “Spray and Wait: An Efficient Routing Scheme for Intermittently Connected Mobile Networks,” In Proc. the ACM SIGCOMM Workshop on Delay-Tolerant Networking, pp. 252–259 (2005).
- [15] Rosas E., Hidalgo N., Gil-Costa V., et al.: “Survey on Simulation for Mobile Ad-Hoc Communication for Disaster Scenarios,” Journal of Computer Science and Technology, Vol. 31, No. 2, pp. 326–349 (2016).
- [16] 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).
- [17] 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/050323shiryoub2.pdf> (2020/02/16 確認).