

修士論文

LTE D2D を統合した災害時同報配信システムの提案と評価

公立はこだて未来大学大学院 システム情報科学研究科
情報アーキテクチャ領域

六平 豊

指導教員 中村 嘉隆

提出日 2019年3月15日

Master's Thesis

A Proposal and Evaluation of the Emergency Warning System Integrating LTE D2D

by

Yutaka MUSAKA

MSc Thesis at Future University Hakodate

Supervisor Prof. Yoshitaka NAKAMURA

Graduate School of Systems Information Science
Future University Hakodate
Submitted on March 15th, 2019

Abstract

Japanese mobile carriers are distributing early warning such as earthquake early warning, tsunami warning or disaster evacuation information to user equipment. The Japan Meteorological Agency is informing earthquake early warning and tsunami warning, and the local public agencies are informing disaster evacuation information. In Japan where earthquakes occur frequently, warnings with high speed and high reachability are important for this type of distribution system. Therefore, broadcast emergency system based on Earthquake and Tsunami Warning System (ETWS) is operated. It is difficult to distribute early warning to all User Equipments (UE)s in environments where some evolved Node Bs (eNB)s break down due to large-scale disasters. I focus on ProSe of Public Safety LTE technology which enables Device to Device (D2D) communication without going through core network. I propose an emergency warning system that integrates ProSe into ETWS for the realization of a disaster tolerant network system that can spread early warning out of eNB's coverage in an environment where it is difficult to distribute early warning due to the effects of large-scale disasters. By applying this system, it is possible to deliver emergency bulletins to predict secondary disasters even if the eNB stops functioning due to the disaster. I also propose a diffusion route optimization method utilizing ETWS distribution area configuration and geocast in broadcast message spreading. In addition, I propose a selection scheme for relay UEs near the coverage boundary to reduce the load on relay UEs. In this paper, I reproduce the environment at the time of earthquake occurrence by using the network simulator and evaluated the effectiveness of the proposed system.

Keywords: Earthquake and Tsunami Warning System, Proximity Services, Device to Device, Geocast, Relay UE selection

概要

日本の移動体通信事業者は、気象庁が警報する緊急地震速報や津波警報、地方公共団体が発信する災害・避難情報などを緊急速報として携帯移動端末 (User Equipment: UE) に配信している。地震が多発する日本では速報性が求められているため、Earthquake and Tsunami Warning System (ETWS) に基づいた災害時同報配信システムが運用されている。しかし、大規模災害などが原因で一部の携帯電話基地局 (evolved Node B: eNB) が機能停止している環境では、すべての端末へ緊急速報を配信することが困難である。そのような大規模災害の事例を踏まえ、Long Term Evolution (LTE) 技術を利用した公共安全 LTE (Public Safety LTE: PS-LTE) ネットワーク技術の研究が進められている。そこで、PS-LTE の技術として、コアネットワークを介さずに端末間 (Device to Device: D2D) での直接通信を可能とする Proximity Services (ProSe) に着目する。本研究では、大規模震災の影響で津波警報や災害・避難情報の配信が困難であるような環境において、eNB から配信された緊急速報をカバレッジ外に拡散可能なマルチホップ D2D 通信システムの実現を目的とし、ETWS に ProSe を統合した災害時同報配信システムを提案する。このシステムを適用することで、震災によって eNB が機能停止した場合も、2次災害を警告する緊急速報の配信が可能になる。また、同報メッセージの拡散において、行政境界と端末の位置関係に基づく拡散経路最適化方式を検討する。さらに、提案システムにおける同報メッセージの中継配信時に端末のバッテリー資源を節約させるため、eNB と端末の位置関係に基づく中継端末選定方式を検討する。本提案システムについて、ネットワークシミュレータを用いて震災時の環境を再現し、災害・耐性ネットワーク・システムとしての有効性を示す。

キーワード: Earthquake and Tsunami Warning System, Proximity Services, Device to Device, Geocast, Relay UE selection

目次

第 1 章	序論	1
1.1	背景.....	1
1.2	研究目標.....	1
1.3	システム情報科学における本研究の位置付け.....	2
1.4	論文の構成.....	3
第 2 章	関連技術	4
2.1	Earthquake and Tsunami Warning System.....	4
2.1.1	System Information Block.....	4
2.1.2	メッセージ配信エリア.....	5
2.1.3	メッセージ配信方式.....	6
2.1.4	eNB と端末間のチャネル動作.....	7
2.2	Proximity Services.....	7
2.2.1	ProSe の基本構成.....	8
2.2.2	Direct communication.....	8
第 3 章	関連研究	9
3.1	中継配信による同報メッセージの拡散.....	9
3.1.1	MANET と DTN を混合させた情報共有.....	9
3.1.2	すれ違い通信による避難誘導システム.....	9
3.2	同報メッセージ拡散における配信領域の指定.....	9
3.2.1	Directed Flooding.....	10
3.2.2	No Flooding.....	10
3.3	中継端末の選定.....	10
3.3.1	マルチホップ D2D 通信の到達性分析.....	11
3.3.2	ビデオパケットの中継端末選定.....	11
3.4	研究課題.....	11
3.4.1	利用者に依存したネットワーク形成.....	11
3.4.2	同報メッセージ拡散における配信領域の指定.....	11
3.4.3	中継配信を行う中継端末の選定.....	13
第 4 章	提案システム	14
4.1	ETWS へ ProSe の統合.....	14
4.2	ProSe の能動化方式.....	15
4.2.1	ProSe の能動化における課題.....	15
4.2.2	ProSe 能動化方式の手順.....	16
4.3	行政境界と端末の位置関係に基づく拡散経路最適化方式.....	16
4.3.1	geocast を利用した配信範囲制御方式.....	16
4.3.2	ETWS の配信エリア変更方式.....	18
4.3.3	配信範囲制御方式と配信エリア変更方式の適用方法.....	19
4.4	eNB と端末の位置関係に基づく中継端末選定方式.....	19
4.4.1	検討事項と前提条件.....	20
4.4.2	数学的分析による適用条件.....	21
4.4.3	Halfway-Range の最大化アルゴリズム.....	21
第 5 章	評価・考察	22
5.1	評価モデル.....	22

5.1.1	シミュレーションシナリオと実験対象環境.....	22
5.1.2	eNB の配置パターン	23
5.1.3	LTE D2D のパラメータ設定.....	24
5.2	評価実験 1 : ProSe の有効性.....	25
5.2.1	実験方法	25
5.2.2	結果と考察	25
5.3	評価実験 2 : 提案システムにおける人口密度の限界値	26
5.3.1	実験方法	26
5.3.2	結果と考察	26
5.4	評価実験 3 : 拡散経路最適化方式の有効性	27
5.4.1	実験方法	27
5.4.2	結果と考察	28
5.5	評価実験 4 : 中継端末選定方式の有効性	30
5.5.1	実験方法	30
5.5.2	結果と考察	30
5.6	評価実験 5 : シミュレーションの妥当性	31
5.6.1	実験方法	31
5.6.2	結果と考察	31
第 6 章	結言	33
6.1	まとめ	33
6.2	今後の展望	33

第1章 序論

1.1 背景

日本の移動体通信事業者は、気象庁が配信する緊急地震速報や津波警報、地方公共団体が発信する災害・避難情報などを緊急速報として携帯移動端末に配信している。2007年当初の緊急速報は Cell Broadcast Service (CBS) [1]を利用して同報配信されていた。近年ではスマートフォンなどの普及に伴い、CBSを Long Term Evolution (LTE) 規格に対応させた Public Warning System (PWS) [2]が 3GPP (3rd Generation Partnership Project) にて策定され、PWSを利用した同報配信システムが運用されている。PWSはさまざまな用途に応じてサブシステム化されており、地震が多発する日本では速報性が求められているため、Earthquake and Tsunami Warning System (ETWS) [3]を採用している。

2011年の東日本大震災では約2万9000局(東北・関東地域の基地局総数は約13万7500局)の携帯電話基地局(evolved Node B: eNB)が機能停止した[4]。スマートフォンのような端末(User Equipment: UE)の接続性はインターネットとの中継機となっているeNBのカバレッジ(電波到達範囲)に依存している。そのため、地震などの災害によって一部のeNBが機能停止した場合、停止したeNBが収容していた端末への津波警報や、その後の災害・避難情報などの続報を配信することが不可能になる。このような状況でも有効な、災害耐性のあるネットワーク・システムの検討が重要となってきている。本論文では、停止したeNBが収容していたために電波が到達できなくなった領域をカバレッジ外と呼ぶ。

大規模災害の事例を踏まえて、米国や英国では公共安全(Public Safety: PS)ネットワークの構築が進められている。PSネットワークは、LTEを共通の基盤技術として構築することが検討されており、PS-LTEと称されている。PS-LTEは、災害発生時にもリアルタイムに情報を共有できる手段を確保することで、効率的な救命・救助活動を行うための基盤技術として期待されている[5]。PS-LTEを実現するための技術として、コアネットワークを介さずに端末間(Device to Device: D2D)での直接通信を可能とする Proximity Services (ProSe) [6]の仕様が進められている。日本でもPS-LTEの実現に向けてワーキンググループが結成され、議論が進められている[7]。

1.2 研究目標

本研究では、大規模震災の影響で津波警報や災害・避難情報の配信が困難であるような環境において、eNBから配信された緊急速報をカバレッジ外に拡散可能なマルチホップD2D通信システムの実現を目的とし、ETWSにProSeを統合した災害時同報配信システムを提案する。このシステムを適用することで、震災によってeNBが機能停止した場合も、二次災害を警告する緊急速報の配信が可能になる。そのために、以下に示す3つの機能を実現することが重要である。また、各機能の概略図を図1に示す。

- A) 中継配信による同報メッセージの拡散：同報メッセージをカバレッジ外に存在する端末へD2D通信を利用して中継することで、情報が必要な利用者への配信を可能にする。現状では、端末間でのトランシーバーのような動作のみが想定されており、連携して自動的にメッセージを拡散する仕組みが望まれる。
- B) 同報メッセージ拡散における配信領域の指定：配信領域を行政境界に適合させることで、避難指示や避難所の指定など、詳細な情報の配信を実現可能とする。カバレッジ外へ

ッセージを拡散させる際の配信領域を制御することで、現状の緊急速報よりも配信位置に即した詳細な情報提供の可能性が期待できる。

- C) 端末負荷を考慮した中継端末の選定：同報メッセージの拡散を行う中継端末を選定することで、災害時における貴重なバッテリー資源の節約を可能にする。不要な中継配信を最小限に抑制することで、実用化への可能性が期待できる。

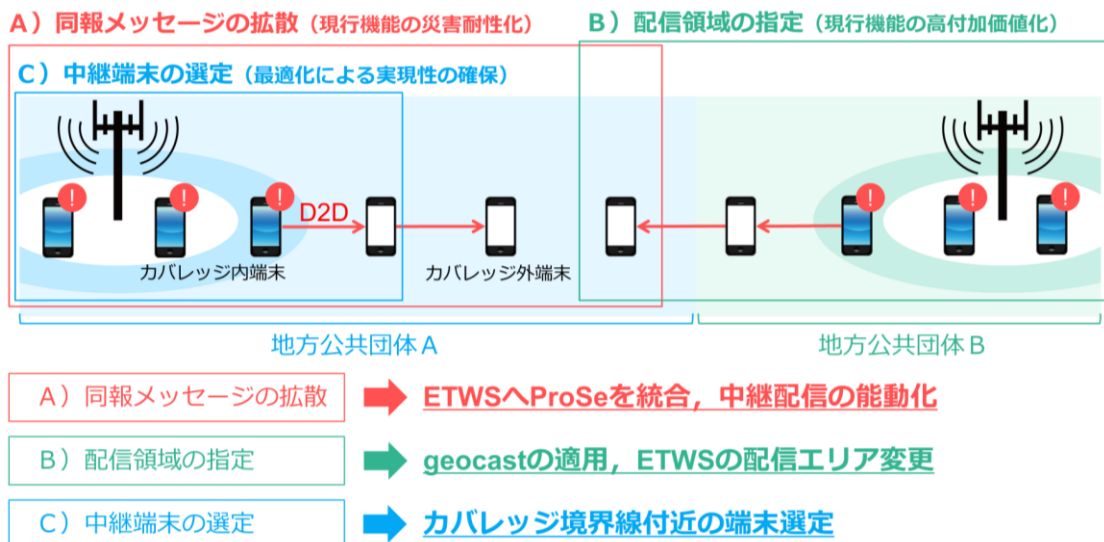


図 1 提案システムの概略図

Figure 1 Schematic of the proposed system

これらを実現するにあたり、LTE 技術を利用した D2D 通信技術は ETWS との親和性が高いと考えられるため、ProSe を用いて ETWS を拡張することを検討する。提案システムによって、eNB 経由での通信が困難な場合においても、同報メッセージを中継可能なマルチホップ D2D 通信システムが実現する。このとき、同報メッセージの中継効率を妨げないような D2D 通信の能動化方式を検討する。また、提案システムにおける同報メッセージの中継配信時に配信範囲を制御しながら迅速な配信を行うため、geocast[8]を利用した行政境界と端末の位置関係に基づく拡散経路最適化方式を検討する。さらに、提案システムにおける同報メッセージの中継配信時に端末のバッテリー資源を節約させるため、eNB と端末の位置関係に基づく中継端末選定方式を検討する。これらの検討事項に対して、災害時の状況を再現したシミュレーションにより有効性を確認する。

1.3 システム情報科学における本研究の位置付け

本研究は、災害時に一部の eNB が機能停止している状況において、緊急メッセージを端末同士で自動的に共有可能な災害耐性ネットワーク・システムを実現するための研究として位置付けられる。災害時の代替ネットワーク構築を対象に Mobile Ad-hoc NETwork (MANET) や Delay Tolerant Networking (DTN) に関する研究は数多くなされているが、Wi-Fi Direct や Bluetooth などの比較的短い通信可能範囲の通信規格を利用していたため、迅速性を保ちながら情報を共有することが困難であった。しかし、本研究で提案するシステムは 3GPP が策定して間もない LTE D2D 技術を取り扱っており、迅速性を保ちながら緊急メッセージの情報共有を可能とした災害耐性ネットワーク・システムの実現に期待できる。また、LTE D2D に関する研究は注目を集めており、本研究で扱う課題の一般性は広がるものと思われる。

1.4 論文の構成

以下、2章では、日本で運用されている同報配信システムと PS-LTE 技術として運用が期待されている D2D 通信技術について述べる。3章では、研究目標で述べた3つの機能に関連する研究を述べ、災害時同報配信システムとして運用するための研究課題を考察する。4章では、提案システムである LTE D2D を統合した災害時同報配信システムについて述べる。5章では、震災時の環境をネットワークシミュレータで再現し、本提案システムを適用した際の有効性を示す。6章では、本論文のまとめと今後の展望について述べる。

第2章 関連技術

本研究で検討する災害時同報配信システムの提案に先立ち、Earthquake and Tsunami Warning System (ETWS) と Proximity Services (ProSe) について説明する。

2.1 Earthquake and Tsunami Warning System

ETWS[3]はLTEネットワーク上で動作する同報配信システムである。ETWSのネットワークアーキテクチャは図2のようになっており、気象庁や地方公共団体などのCell Broadcast Entity (CBE)、メッセージ作成と配信エリア特定を行うCell Broadcast Center (CBC)、eNBを収容しているMobility Management Entity (MME)を介して、eNBは収容している端末に緊急速報のメッセージ内容をシステム報知情報(System Information Block)に含めて配信する。また、ETWSは従来1回で配信していた緊急速報を2回に分離して配信している。第1報にあたるPrimary Notificationは、極めて迅速性が必要な情報を理論上実現可能な最短時間で端末に配信する。第2報にあたるSecondary Notificationは、震度や震源地などの第1報を補足する詳細な情報を端末に配信する[9]。

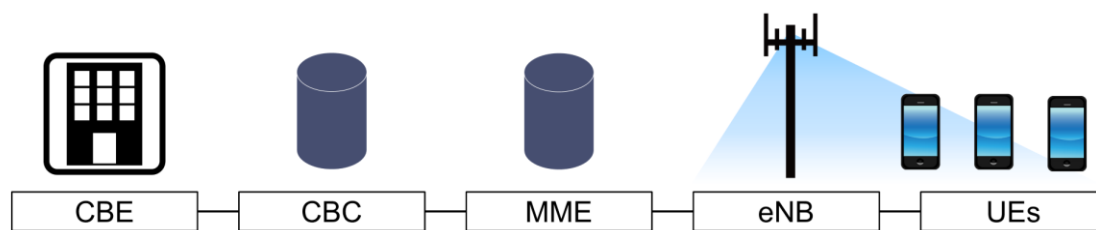


図2 ETWSのネットワークアーキテクチャ

Figure 2 ETWS network architecture

2.1.1 System Information Block

SIBはSIB1～SIB13の13種類あり、eNBが端末を対象に周期的に配信を行っている。ETWSに関係するブロックはSIB1、SIB10、SIB11の3つである。SIB1は80ms周期で端末に送信し、SIB1以外の報知情報を受信するための、スケジューリング情報が含まれている。つまり、SIB1を受信することで、SIB2～SIB13を受信することが可能となる。SIB10はETWSのPrimary Notificationに該当し、一定周期(3GPP仕様上設定可能な周期は80ms, 160ms, 320ms, 640ms, 1.28s, 2.56s, 5.12s)で端末に送信している。SIB11はETWSのSecondary Notificationに該当し、SIB10と同様の一定周期で端末に送信している。

Primary NotificationはmessageIdentifier, serialNumber, warningTypeが設定されている。messageIdentifierは表1に示すように、16bitのビット列で災害の種類を示す。WarningTypeは表2に示すように、8bitのビット列を2つ用いて災害の種類と端末の処理方法を示す。WarningTypeに関するパラメータは表3と表4に示す。このようにすべてのメッセージがパラメータによりパターン化されており、配信速度の向上を図っている。Secondary NotificationはmessageIdentifier, serialNumber, messageを含む[1]。

表 1 messageIdentifier のパラメータ
Table 1 Parameter of messageIdentifier

message id	災害の種類
4352 (0x1100)	地震
4353 (0x1101)	津波
4354 (0x1102)	地震と津波

表 2 Warning Type parameter の表現
Table 2 The encoding of the Warning Type parameter

Octet 1							Octet 2								
7	6	5	4	3	2	1	0	7	6	5	4	3	2	1	0
Warning Type Value							Emergency User	Popup	Padding						

表 3 Warning Type Value のパラメータ
Table 3 Parameter of Warning Type Value

Warning Type Value	Warning Type
000 0000	Earthquake
000 0001	Tsunami
000 0010	Earthquake and Tsunami

表 4 緊急ユーザ警告およびポップアップ表示
Table 4 Emergency user alert and popup indications

Field	Emergency User Alert		Popup	
	0	1	0	1
Instruction to Terminal	No instruction as to emergency alert.	Activate emergency user alert.	No instruction as to popup.	Activate popup on the display.

2.1.2 メッセージ配信エリア

メッセージ配信エリア指定方法は3種類あり、Cell 単位ごと、Tracking Area (TA) 単位ごと、Emergency Area (EA) 単位ごとに指定する方法がある。これらの配信エリア指定方式を図 3 に示す。Cell 単位レベルの配信エリアは Cell ID のリストから成り立っており、指定された Cell のみに配信される。TA 単位レベルの配信エリアは Tracking Area Identity (TAI) のリストから成り立っており、TAI に含まれる Cell に配信される。EA 単位レベルの配信エリアは各 Cell に EA ID を割り振り、該当する EA のみに配信される。緊急速報は EA を単位として配信指定されていることが多い。

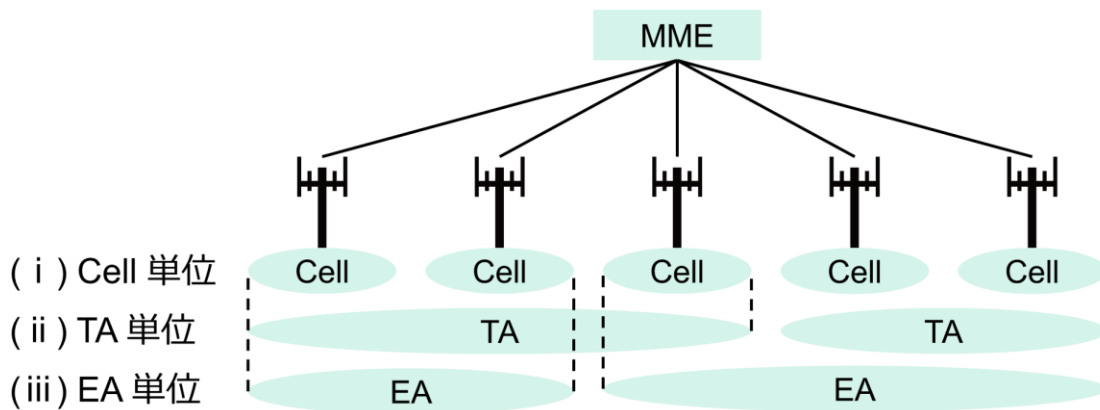


図 3 ETWS の配信エリア指定方法
Figure 3 Distribution area designation method

2.1.3 メッセージ配信方式

ETWS のメッセージ配信方式を図 4 に示し、端末に緊急速報が到達するまでの手順を説明する。(i~ii) CBC は CBE から配信要求を受信すると、緊急速報のメッセージ作成と配信エリア特定を自動的に行う。(iii) CBC は特定した配信エリアの MME に対して、緊急速報のメッセージ内容と配信エリア情報を載せた Write-Replace Warning Request を送信する。(iv~v) MME は応答メッセージである Write-Replace Warning Confirm を CBC に送信し、CBC は CBE に配信要求を受け付けて緊急速報配信処理の開始に関する応答を返す。(vi~vii) MME は受信した配信エリア情報を確認し、該当する eNB に Write-Replace Warning Request を送信する。(viii) 要求を受信した eNB は Write-Replace Warning Request を基に配信エリアを決定する。(ix~x) eNB はページング信号である ETWS indication を送信し、システム報知情報の System Information Block (SIB) を用いて緊急速報を送信する。Primary Notification は SIB10, Secondary Notification は SIB11 に該当する。(xi) eNB は緊急速報のブロードキャストが完了した後、MME に Write-Replace Warning Confirm を送信する。

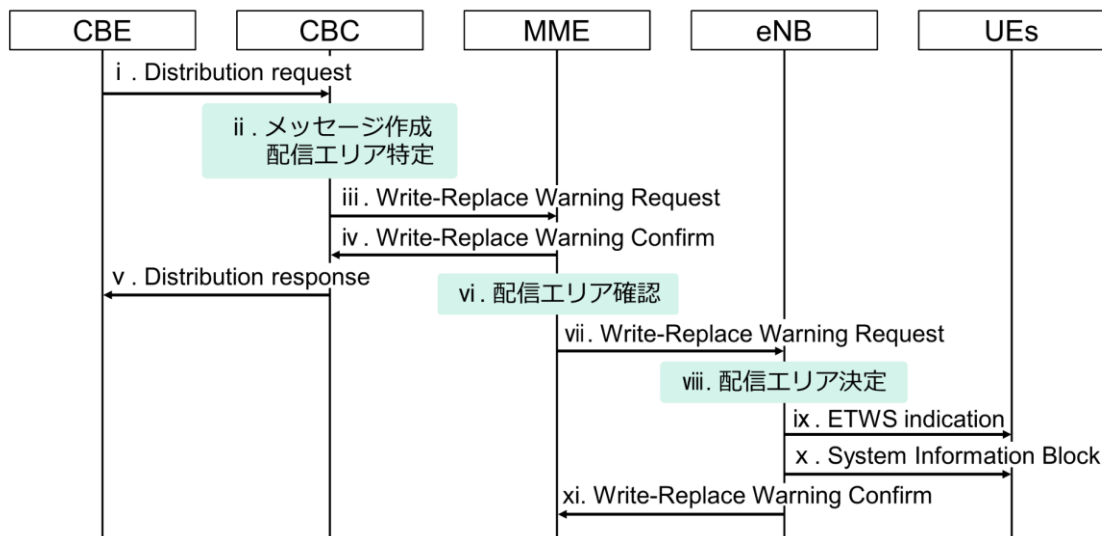


図 4 緊急速報の配信方式
Figure 4 Early warning distribution method

2.1.4 eNB と端末間のチャネル動作

図 4 (ix~x) における, eNB が端末へ緊急速報を配信するときのチャネル動作を図 7 に示し, 詳細を説明する. eNB は Write-Replace Warning Request を受信すると, Paging Channel (PCH) を用いて ETWS indication を端末に送信する. 端末は ETWS indication を受信すると, Broadcast Control Channel (BCCH) を用いて緊急速報の受信を開始する. このとき, 緊急速報である SIB10 (Primary Notification) および SIB11 (Secondary Notification) を受信するためのスケジューリング情報は, eNB が定期的に報知している SIB1 に含まれているため, SIB1 を受信した後に SIB10 および SIB11 の受信開始が可能となる. 端末は SIB10 および SIB11 を確認すると, アラートとポップアップでユーザに通知する. また, 重複した SIB は通知しないようになっている.

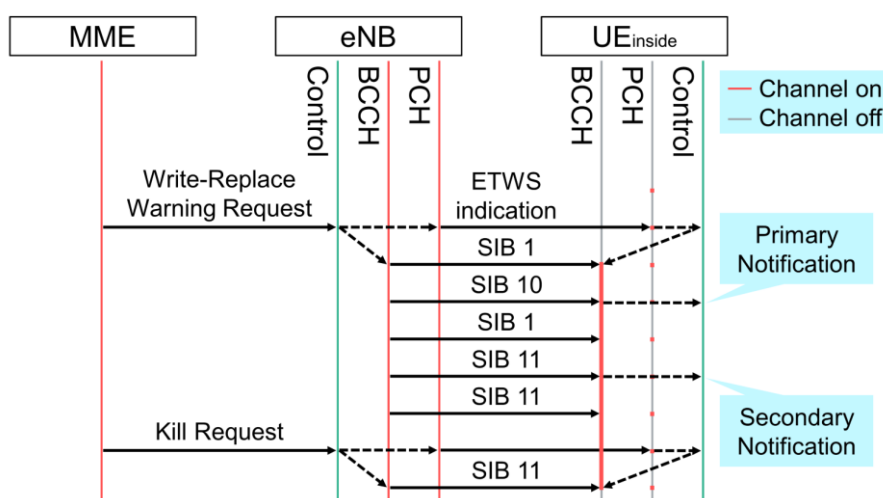


図 5 eNB と UE 間のチャネル動作
Figure 5 Channel operation between eNB and UE

2.2 Proximity Services

ProSe[6]は LTE のアップリンク周波数帯域を用いて eNB を介さない D2D を可能とする通信技術であり, 3GPP で仕様化が進められている. D2D 通信シナリオは図 6 のような 3 つの通信シナリオがある. また, ProSe は近接端末とのデータ通信や音声通話などが可能となる Direct communication および, 周辺の端末発見やサービス検出が可能となる Device discovery の 2 つの機能から構成されている[10]. 本研究では ETWS で配信されたメッセージをカバレッジ外へ中継配信させるため, カバレッジ拡大シナリオおよび Direct communication 機能に着目する.

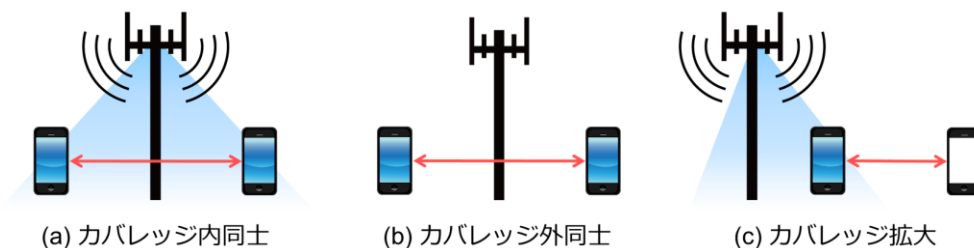


図 6 D2D シナリオ
Figure 6 D2D Scenarios

2.2.1 ProSe の基本構成

ProSe のネットワークアーキテクチャを図 7 に示す. 端末は EPC (Evolved Packet Core) 上の論理機能である ProSe Function を介して D2D 通信が行われ, セルサーチと同様な処理を行った後に D2D 通信が可能となる. セルサーチとは, 端末が接続先として最適なセルを探索する処理を指し, 端末の電源を入れたときや端末がカバレッジ外へ移動したときに行われる. セルサーチの簡易手順として, 端末は eNB から送信される同期信号の PSS/SSS (Primary/Secondary Synchronization Signal) を検知し, コアネットワークの HSS (Home Subscriber Server) に端末情報を登録する. このセルサーチと同様に, ProSe Function は HSS を用いて端末の認証を行い, SLP (SUPL (Secure User Plane Location) Location Platform) を用いて端末の位置に応じた適切な通信用設定の配布を行う. また, 通信可能範囲は都市部では約 100m, 見通しのいい場所では約 300m であると想定されている[11].

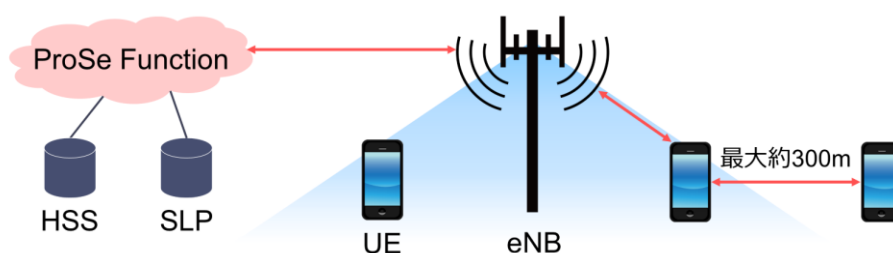


図 7 ProSe のネットワークアーキテクチャ
Figure 7 ProSe network architecture

2.2.2 Direct communication

Direct communication における eNB と端末間や端末同士の同期方法について図 8 に示す. eNB とカバレッジ内端末では, eNB が送信する同期信号 PSS/SSS と同期して D2D 通信の送受信を行う. カバレッジ内の端末とカバレッジ外の端末間やカバレッジ外の端末同士では, カバレッジ内外の端末が 40ms 周期で送信する PSSS/SSSS (Primary/Secondary Sidelink Synchronization Signal) と同期して D2D 通信の送受信を行う. カバレッジ内の端末が eNB の同期タイミングに基づき PSSS/SSSS を送信することで, カバレッジ外の端末も eNB の同期タイミングと同様のタイミングで Direct communication を行うことができる. Direct communication では, PSSS/SSSS とともに PSBCH (Physical Sidelink Broadcast Control Channel) を用いて D2D 用フレーム番号やシステム帯域幅, TDD (Time Division Duplex) UL/DL サブフレーム構成などを通知する.

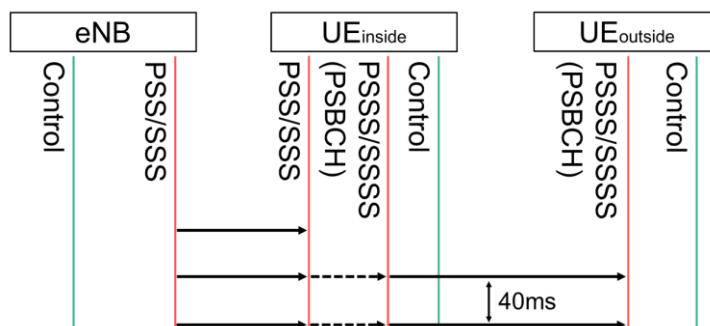


図 8 ProSe における端末間の同期方法
Figure 8 Synchronization between UEs at ProSe

第3章 関連研究

中継配信による同報メッセージの拡散，同報メッセージの拡散における配信領域の指定，端末負荷を考慮した中継端末の選定，これら3つの観点から関連研究を言及し，災害時同報配信システムとして運用するための課題を考察する。

3.1 中継配信による同報メッセージの拡散

災害時に eNB が機能停止している状況で，D2D 通信やアドホック通信による代替ネットワークに関する研究が報告されている。

3.1.1 MANET と DTN を混合させた情報共有

西山らは，情報収集や情報発信のために，Mobile Ad-hoc NETwork (MANET) と Delay Tolerant Network (DTN) を混合させたネットワークを用いたマルチホップ D2D 通信システムを提案している[12]。このシステムでは，Wi-Fi Direct による約 100m のマルチホップ D2D 通信を利用した情報転送を想定している。宛先までの経路が見つからないときや，電池残量が一定以下のとき，あるいは加速度センサの取得データから移動が激しい端末であると判断される状況では DTN を用いた通信を行う。それ以外の宛先までの経路が見つかる状況では MANET を用いる。また，メッセージを保持した端末が MANET に合流する状況では，宛先までの経路の中で最もホップ数が少ない経路を自動的に選択する。このシステムについて仙台市街地で実機を使った実験を実施した結果，スマートフォン 27 台を経由して，総距離 2.5km 先の端末へのメッセージの送信に成功している。

3.1.2 すれ違い通信による避難誘導システム

藤原らは，各避難者に迅速かつ安全な避難経路を提示するために，DTN によるすれちがい通信を用いた避難誘導システムを提案している[13]。この避難誘導システムは，避難者同士が遭遇するときにすれちがい通信を行い，互いの持っている通行不能道路に関する情報を自動的に共有することで，避難者に対する避難所までの経路案内を行う。具体的には，DTN の蓄積・運搬・転送 (Store-carry-forward) 通信方式を採用し，Bluetooth による数メートル～数十メートルの範囲内のすれちがい通信を想定している。被災地情報共有の方法として epidemic routing を採用している。epidemic routing とは，出会った際に互いの持っていない情報をすべて共有する手法であり，不特定多数の相手に対して情報拡散を行うことに優れている。このシステムについて，渋滞を考慮しない場合と，渋滞を考慮した場合についてシミュレータを用いた性能評価を行っている。その結果，すれちがい通信による情報共有の効果により，平均・最大避難時間の両方が減少することを確認している。

3.2 同報メッセージ拡散における配信領域の指定

同報メッセージの拡散において配信領域を指定するためには，地理的な条件に基づくマルチキャスト手法である geocast の活用が考えられる。

3.2.1 Directed Flooding

Flooding ベースの geocast として図 9 に示すような Location Based Multicast (LBM) が挙げられる。LBM は各端末が GPS などを利用して位置情報を所持していることが実現のための条件である。LBM にはいくつかのアルゴリズムがあり、最も基本的なアルゴリズムは static zone scheme[8] である。static zone scheme は、destination region と forwarding zone を設定することで、destination region までメッセージを転送する方式である。forwarding zone 内でメッセージを受信した端末は、メッセージの中継端末となりメッセージの拡散を行う。destination region 内でメッセージを受信した端末は、メッセージの拡散と通知を行う。それ以外の領域でメッセージを受信した場合は、メッセージを破棄する。

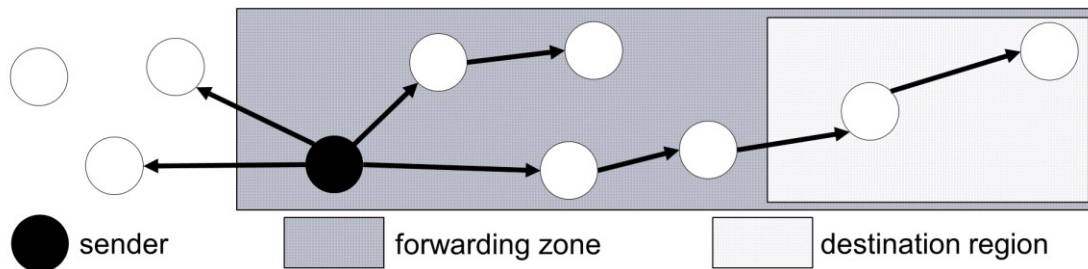


図 9 Location Based Multicast 手法を用いた geocasting
Figure 9 Geocasting by Location Based Multicast

3.2.2 No Flooding

Flooding を行わない geocast として図 10 に示すような greedy forwarding[14]が挙げられる。greedy forwarding では、送信元端末の通信可能範囲に存在する端末のうち、目的地に最も近付いている中継端末にメッセージを転送し、中継端末も同様にメッセージの転送を繰り返す、目的地までメッセージを転送する方式である。この方式では、迂回するような通信が発生しないため、図 10 (B) のような中継端末不足で目的地までメッセージが到達しない可能性も考えられる。

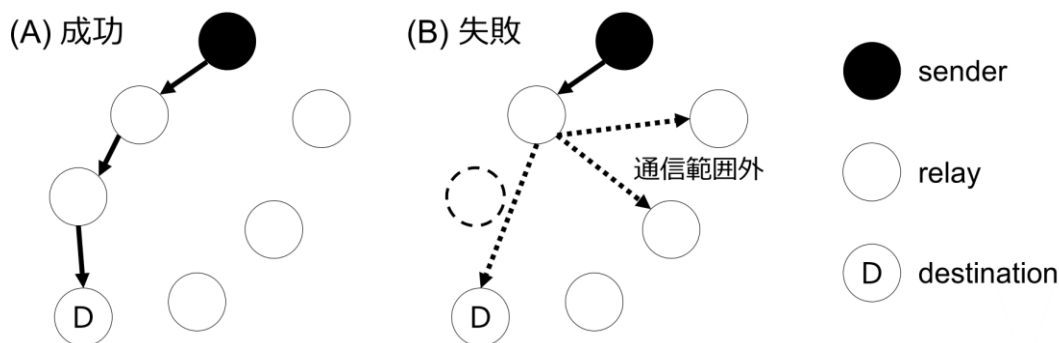


図 10 Greedy forwarding 手法を用いた geocasting
Figure 10 Geocasting by greedy forwarding

3.3 中継端末の選定

災害時において端末のバッテリー資源はとて貴重であるため、D2D 通信の中継効率や端末負荷を考慮した研究が報告されている。

3.3.1 マルチホップ D2D 通信の到達性分析

上山らは、マルチホップ D2D 通信の効果を最適化させるために、マルチホップ D2D 通信成功確率を分析した結果を報告している[15]。マルチホップ D2D 通信成功確率の簡易な近似式を導出し、東京都の新宿区を想定した震災発生時の人々の避難行動をマルチエージェントシミュレーション (MAS) で再現した上で、MAS で得られた携帯端末の位置と通信データを用いて、マルチホップ D2D 通信成功確率の分析を行っている。その結果、マルチホップ D2D 通信の疎通性とトラヒックオフロード効果を最大化させるためには、D2D 通信携帯端末の比率、最大許容ホップ長のパラメータ設定が重要であることを報告している。

3.3.2 ビデオパケットの中継端末選定

大辻らは、カバレッジ外に位置する端末からの映像伝送を実現するために、上り通信と D2D 通信の無線品質およびリソース量を考慮に入れた中継パスの実行スループットに基づく中継端末選定方式を提案している[16]。仮定する環境として、救助隊員のいる火災現場の建物の周囲に消防車が配置された環境を想定しており、はしご消防車に搭載する車載端末を中継端末とすることとし、アンテナ高 10m、最大送信電力 33dBm を仮定している。3GPP 標準の中継端末選択方式では、送信元端末は D2D 通信の電力に基づき中継端末を選択するため、D2D 通信の受信電力は最も高いものの、eNB における上り通信の受信電力が高くない端末を選択してしまう可能性がある。そして、シミュレーション評価により、大辻らが提案する方式は 3GPP の標準方式と比較して、セル半径 10km 以上においても所望伝送速度 (1Mbps) を達成する端末の割合が高いことを示した。

3.4 研究課題

これまで述べた関連研究をもとに、災害時同報配信システムとして運用するための 3 つの課題を述べる。

3.4.1 利用者に依存したネットワーク形成

文献[12]や文献[13]のシステムは、利用者が各自でアプリケーションを起動するシステム構成である。一方、ETWS における同報配信システムは利用者の操作の介在なしに自動的に動作する。配信システムの構成において利用者の操作を待つ受動的なステップを加えてしまうと、操作の遅れや操作漏れによってカバレッジの拡大を妨げる要因となってしまう。したがって、端末側が能動的にアプリケーションを起動するような工夫が必要である。

3.4.2 同報メッセージ拡散における配信領域の指定

地方公共団体が配信元として災害・避難情報のような緊急速報を送信する場合、配信元とは異なる地方公共団体の行政区域に属する端末が、本来受信すべきメッセージとは異なる緊急速報を受信してしまう可能性がある。このような状況は行政境界付近で eNB が停止した場合に発生する。例えば、図 11 のように、端末の現在位置が属する行政区域と緊急速報を配信する配信元 eNB が属する行政区域が一致していない場合である。さらに、各地方公共団体が配信するタイミングによっては、本来とは異なる緊急速報を先に受信してしまい、受信者の混乱を招

く恐れがある。例えば、避難が必要でない地域の住民にまで避難指示が配信される場合や、複数の地方公共団体からの災害・避難情報を受信し別々の避難指示を受けた場合などが考えられる。したがって、3.2.1節で述べたような拡散性を保つことが可能である flooding ベースの geocast を活用し、行政境界を越えないような配信範囲制御を行う必要がある。



図 11 行政境界付近で発生する問題

Figure 11 Problems occurring near administrative boundaries

前段のように geocast を適用し配信範囲を制御した際、境界付近で中継に参加するノードが減少することにより中継経路が減少し、メッセージの到達率および到達完了時間が悪化してしまう可能性がある。行政境界を越えないように配信するためには、図 12 左のように、1つの eNB から緊急速報を配信する必要がある。宛先までの中継端末が、互いの通信可能範囲内に含まれていれば問題は発生しない。しかし、図 3 左の端末 R が存在しなかった場合、destination region までメッセージを中継することが不可能である。配信制御を行わないときに利用可能であった、図 12 右に示すような、行政境界を越えながら中継するような迂回経路や、本来異なる地方公共団体に属する eNB から中継配信が可能であれば到達率と到達完了時間の悪化を補うことができる可能性がある。

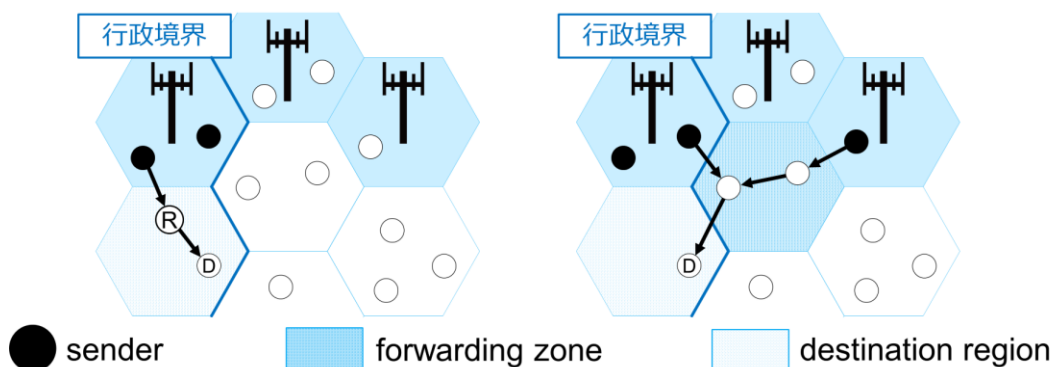


図 12 配信範囲制御による中継経路の損失問題

Figure 12 Loss problem of relay route by the delivery scope control scheme

3.4.3 中継配信を行う中継端末の選定

文献[15]や文献[16]で D2D 通信携帯端末の比率や中継端末選定が重要であることが明らかであるため、中継端末の選定方法を改善し、配信時間を悪化させずにトポロジ全体の送信回数を軽減させる必要がある。緊急速報の拡散方法として、マルチホップ D2D 通信や DTN による epidemic routing を採用し、図 13 左のように中継端末は選定せずカバレッジ内であれば参加することを想定していた。しかし、図 13 右のように eNB 付近の端末からの中継配信が無くても、カバレッジ境界付近の端末による中継配信とカバレッジ外端末による中継配信で十分な可能性がある。

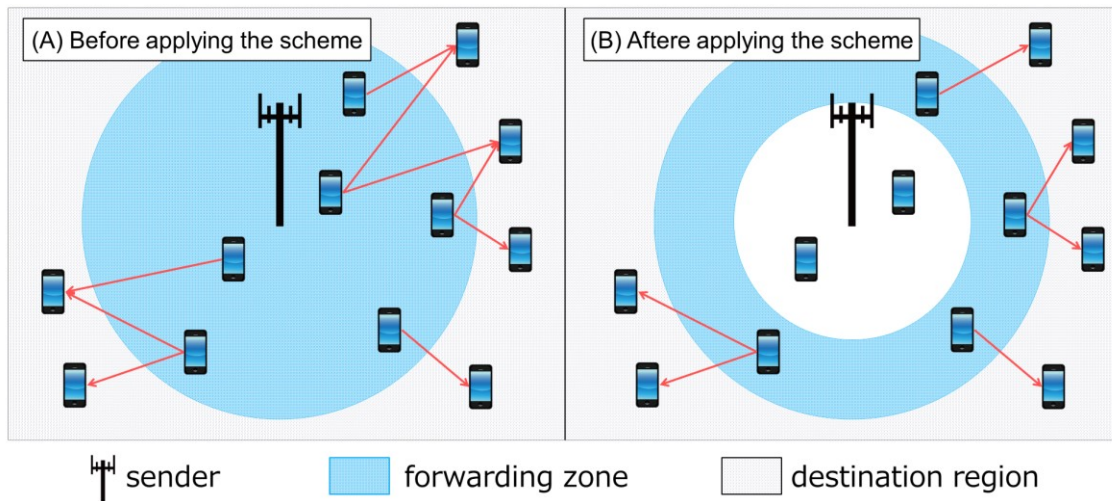


図 13 カバレッジ拡大に不要な中継配信

Figure 13 Unnecessary relay delivery for coverage expansion

第4章 提案システム

本研究では、中継配信による同報メッセージ拡散の実現のために ETWS へ ProSe の統合をした災害時同報配信システムを提案する。3.4.1 節の課題について、中継配信の迅速性を低下させないために、ProSe の能動化方式を提案する。また、3.4.2 節の課題について、行政境界と端末の位置関係に基づく拡散経路最適化方式を提案する。さらに、3.4.3 節の課題について、eNB と端末の位置関係に基づく中継端末選定方式を提案する。

図 14 は、本提案システムの全体像として地方公共団体 A に属する端末に向けて緊急速報が発令された状況を表しており、地方公共団体 A に属する eNB が緊急速報を配信し、geocast を利用したマルチホップ通信を運用することで配信範囲の制御を可能とした同報配信システムが実現する。さらに、本来の配信元には選択されていない地方公共団体 B に属する eNB も緊急速報を配信することで、速報性や配信率の向上が可能になる。また、カバレッジ拡大には不要な中継配信を抑制することで、端末の貴重なバッテリー資源の節約を図る。

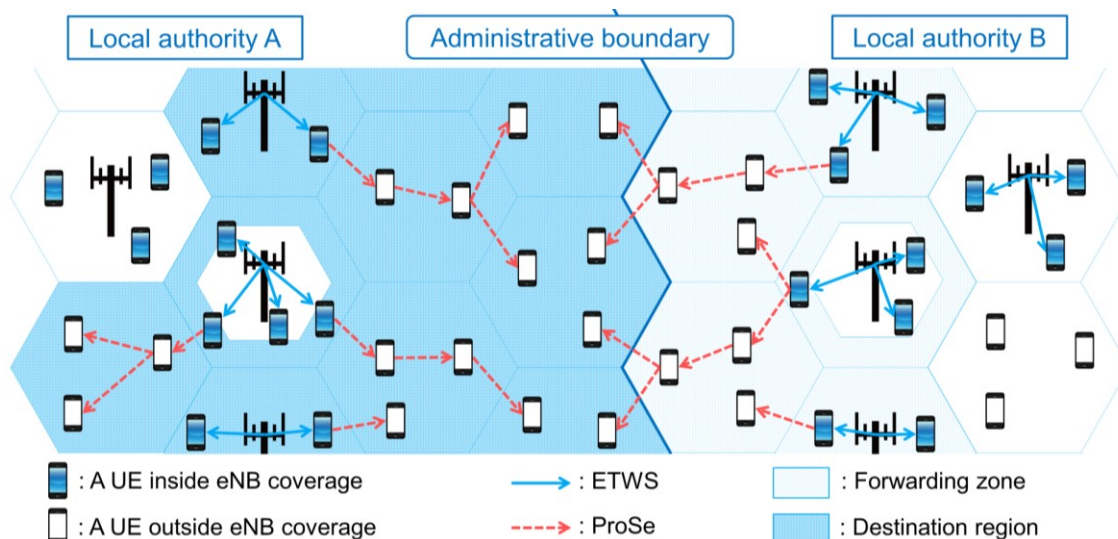


図 14 ETWS に ProSe を統合した災害時同報配信システム
Figure 14 Emergency warning system integrating proximity services

4.1 ETWS へ ProSe の統合

ETWS に ProSe を統合させた同報配信システムの配信方式を図 15 に示し、カバレッジ外の端末 (UEoutside) へ緊急速報の中継配信が完了するまでの流れを説明する。従来の ETWS と同様に、MME は Write-Replace Warning Request を配信エリアに該当する eNB へ送信する。Write-Replace Warning Request を受信した eNB は配信エリアを決定し、カバレッジ内の端末 (UEinside) へ緊急速報を同報配信する。ここで、カバレッジ内の端末はカバレッジ外の端末とチャンネルが確立されていれば、PSBCH を用いて緊急速報である SIB10 および SIB11 をカバレッジ外の端末へ中継配信する。したがって、カバレッジ外の端末も緊急速報を受信することが可能になる。

しかし、ETWS による緊急速報の配信は数秒程度しか行われていないため、緊急速報の配信終了後に緊急速報を受信していない端末に遭遇しても、緊急速報を送信することが不可能である。そのため、Kill Request によって ETWS による配信が解除された後も、避難のための人間の

移動行動に基づく DTN の epidemic routing を利用し、緊急速報をさらに拡散させることが望ましいと考えられる。このような DTN 運用時に不要なメッセージを散在させない工夫が必要であるため、Write-Replace Warning Request が Kill Request によって解除された後、中継端末が自律的に中継配信を停止可能なように、緊急速報に D2D 通信用の有効期限 (Timeout 値) を加える。これにより、価値のなくなった古いメッセージを自動的に破棄することが可能となるため、不要な緊急速報の散在を防ぐことができる。このような形で DTN を運用することで、緊急速報の鮮度を保つことを可能とした拡散システムが運用可能となり、eNB からのメッセージを受信できていない端末へ緊急速報の配信率向上に期待できる。

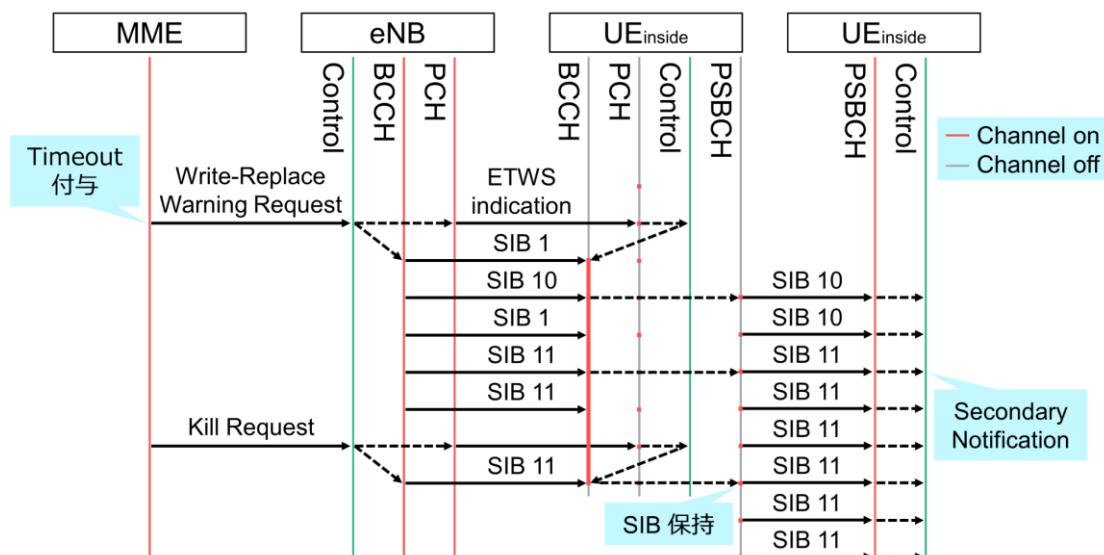


図 15 ETWS に ProSe を統合したシステムの配信方式

Figure 15 Delivery sequence of an early warning using the proposed system

4.2 ProSe の能動化方式

利用者による操作の介入なしに端末側で ProSe が能動的に動作するような方式を提案システムに組み込む。4.2.1 節で能動化における課題を考察し、4.2.2 節で能動化の手順を説明する。

4.2.1 ProSe の能動化における課題

ProSe を用いてメッセージ等の送受信を行うためには、D2D 用の同期信号である PSSS/SSSS の送受信を行う必要がある。しかし、ProSe の具体的な運用方法が決まっておらず、3.4.1 節で述べたように緊急速報の拡散効率を低下させないために、端末が PSSS/SSSS を能動的に送受信可能な方式の検討が必要である。以下、能動化方式の検討における課題を列挙する。

同期信号の送信元端末は、適宜 PSSS/SSSS を送信することで、D2D の中継端末の役割を果たせる。しかし、セルサーチが無事に完了しているカバレッジ内の端末は、周辺の端末がセルサーチに成功しているか否かを自律的に判断できないため、PSSS/SSSS を送信するためのトリガーが必要である。

一方、同期信号の受信元端末は、セルサーチと同時に PSSS/SSSS を探索することで、PSS/SSS を受信できなかった場合に D2D 通信へ切り替えることができる。しかし、この探索方法では、災害が発生していない状況で、山間部やトンネル内など、電波状況が劣悪な環境に移動した場合にも、PSSS/SSSS の探索を開始してしまい、端末の負荷が増加するため望ましくない。した

がって、山間部やトンネルなどでセルラーネットワークの電波を受信できていない場合と、災害などが原因でセルラーネットワークの電波を受信できていない場合を端末が自律的に判断する必要がある。

4.2.2 ProSe 能動化方式の手順

同期信号を送信するためのトリガーと手順について説明する。eNB が緊急地震速報を配信した場合、図 4 (xi) に示すように Write-Replace Warning Confirm を MME に送信する。しかし、災害によって eNB が機能停止した場合は、図 16 (i) に示すように、Write-Replace Warning Confirm を送信することが不可能である。そのため、MME は Confirm の応答が無いことをトリガーとし、該当する eNB を機能停止した eNB と判断する。この情報を ProSe Function が集約し、図 16 (ii~iv) に示すように、機能停止した eNB のセルに合わせて、同期信号を送信するように端末へ Request を送信する。

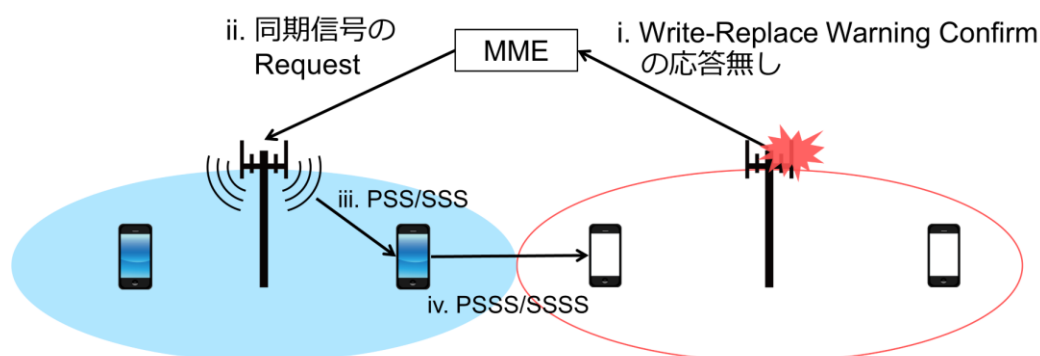


図 16 ProSe の能動化方式
Figure 16 Activation scheme of ProSe

同期信号を受信するためのトリガーと手順について説明する。提案システムでは、緊急地震速報が配信された後の津波警報や災害・避難情報の配信を想定している。そのため、端末は緊急地震速報の受信をトリガーとし、PSS/SSS だけでなく、PSSS/SSSS の受信も一定期間行うようにする。これらの同期信号送受信方式を適用することで、端末が能動的に D2D 通信へ切り替えることが可能である。

4.3 行政境界と端末の位置関係に基づく拡散経路最適化方式

geocast を利用した配信範囲制御方式と ETWS の配信エリア変更方式を組み合わせ、不要なメッセージ拡散を抑制するための拡散経路最適化方式を提案する。4.3.1 節で緊急速報を中継配信するために有効な geocast の領域設定方法を検討し、4.3.2 節で geocast を適用した際の配信完了速度を維持するために有効な配信エリア変更方法を検討する。4.3.3 節では、それらの実現方法を説明する。

4.3.1 geocast を利用した配信範囲制御方式

配信が必要である領域では緊急速報をできる限り拡散し、配信が必要でない領域では緊急速報を破棄する。そこで、geocast の directed flooding 方式である static zone scheme algorithm を検

討する. geocast を ETWS に適合させる場合の動作と設定方法を述べる. geocast を用いて緊急速報を中継する場合, 無関係の端末までアラートとポップアップとでユーザに通知してしまうことが考えられるため, 以下のような動作に改良する. forwarding zone 内でメッセージを受信した端末は, メッセージの中継端末となりメッセージの拡散のみを行う. destination region 内でメッセージを受信した端末は, メッセージの拡散とポップアップ通知を行う. それ以外の領域でメッセージを受信した場合は, ユーザに通知せずにメッセージを破棄する. この動作方法をもとに配信範囲を制御するため, 配信元 eNB のセルと機能停止した配信元 eNB のセルを destination region に設定することで, 行政境界を越えた不要なメッセージの拡散を抑制可能である.

図 17 を用いて地方公共団体 B の eNB がメッセージを配信する状況を例に geocast の設定方法を述べ, その有効性を考察する. 左右を区切る青線が 2 つの行政区域の境界を表しており, 制御すべき配信エリアの境界である. 青色のセル A が地方公共団体 A の配信エリアに割り当てられているセルを示し, 橙色のセル B が地方公共団体 B の配信エリアに割り当てられているセルを示す. 赤色のセル A は地方公共団体 A に属していた機能停止しているセルを示す. 緑色のセル B は地方公共団体 B に属していた機能停止しているセルを示す. セルの領域に geocast が適用された際は, forwarding zone をセル F, destination region をセル D と示す. 赤色の矢印はセル B から配信されるメッセージの中継経路を示す. 図 17 (i) は geocast 適用前の配信例を表しており, 配信範囲を制御していないため, 地方公共団体 B が配信する緊急速報をセル A に存在する端末へ拡散してしまう. 一方, 図 17 (ii) は geocast 適用後の配信例を表しており, 地方公共団体 B のメッセージを配信する eNB のセル B と, 地方公共団体 B に属していた機能停止しているセル B を destination region に設定することで, セル A に存在する端末への拡散を防ぐことが可能になる.

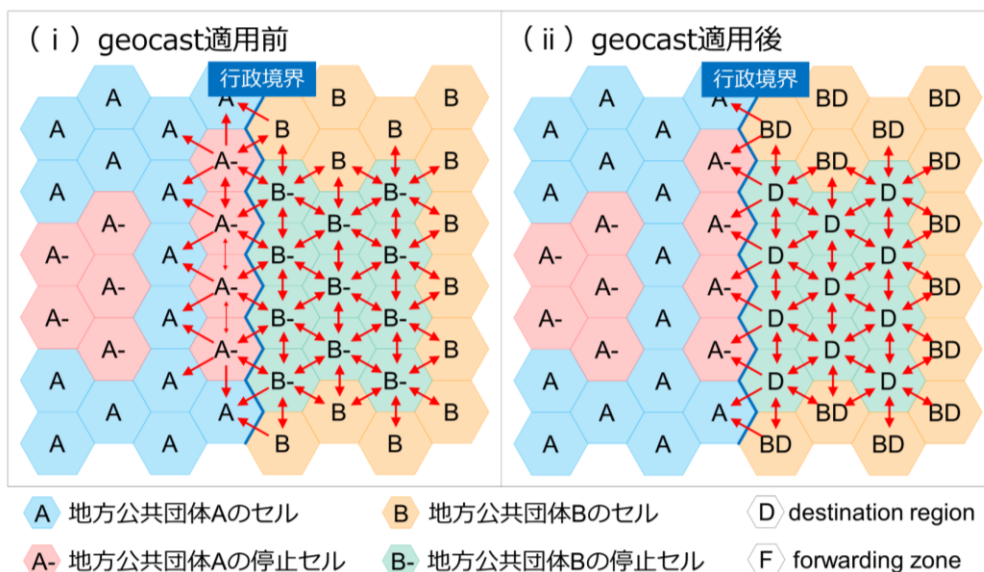


図 17 geocast による配信範囲制御例

Figure 17 Example of delivery scope control by geocast

4.3.2 ETWS の配信エリア変更方式

前節のような単純な geocast を適用の際、3.4.2 節で述べたように、状況によっては緊急速報の配信率や配信完了速度が悪化する可能性がある。配信範囲を制御しない従来の手法では、行政境界付近の destination region へ全方向からメッセージが流入していたのに対し、配信範囲を制御したことにより行政境界付近の destination region へのメッセージ流入数が減少してしまい、特に機能停止範囲が広い場合には行政境界付近の端末へのメッセージ配信率および配信完了速度の悪化が予想される。このことは、図 17 (ii) において行政境界付近の destination region に向かって流れているメッセージ（赤色の矢印）が、図 17 (i) と比べて少ないことからわかる。

この問題に対し、destination region へのメッセージ流入数を減少させずに配信範囲を制御するため、節で述べた geocast を利用した配信範囲制御手法に対し、機能停止した eNB の位置情報に基づく ETWS の配信エリア変更方式を適用させることを検討する。配信エリア変更方式の設定方法を述べる。(1) 配信元 eNB のセルと機能停止した配信元 eNB のセルは 4.3.1 節と同様に destination region と設定する。(2) 行政境界に隣接する destination region 周囲のセルに対し、正常運転している eNB を ETWS の配信エリアおよび forwarding zone、機能停止している eNB のセルを forwarding zone と設定する。このとき、正常運転している eNB が存在しない場合は、(2) で設定した forwarding zone を中心に、(2) の設定を正常運転している eNB が存在するまで繰り返す。このような配信エリア変更方式によって、図 18 (ii) のように、機能停止している配信元 eNB の周囲を、配信可能な eNB と中継端末が囲むように設定される。

図 18 を用いて地方公共団体 B が緊急速報を配信する状況を例に配信エリア変更方式の有効性を考察する。図 18 (i) は geocast のみを適用した場合の配信例を表しており、destination region に対するメッセージ流入数が減っている状態である。図 18 (ii) は geocast 適用後に配信エリアを変更した場合の配信例を表しており、地方公共団体 A に属していた機能停止しているセル A- を forwarding zone、その周囲の正常運転している eNB のセルを配信エリアおよび forwarding zone に設定することで、地方公共団体 A への拡散を防ぎつつ、緑色のセル D へのメッセージ流入数を増加させることが可能となる。

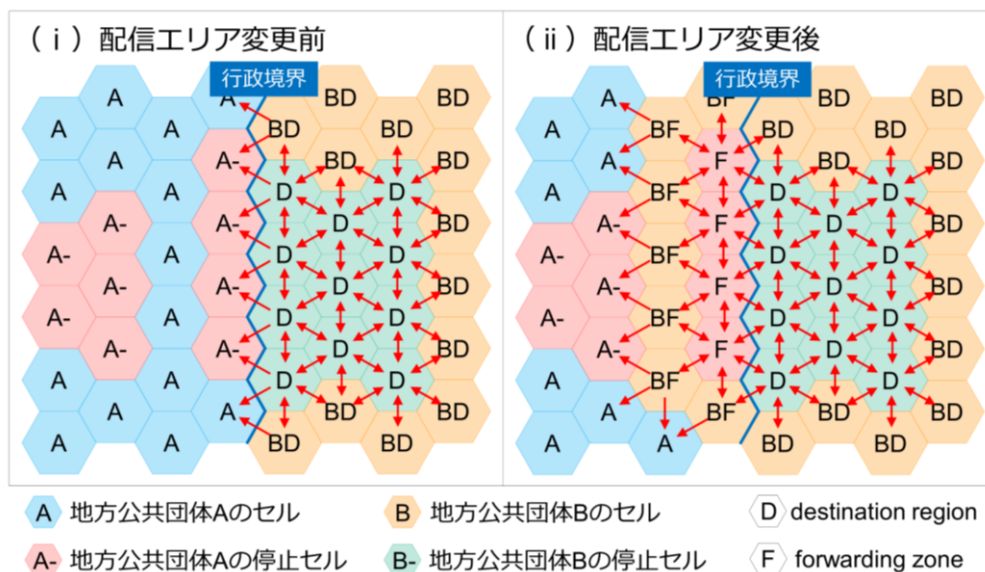


図 18 配信エリア変更方式による拡散経路最適化例

Figure 18 Example of relay route optimization by distribution area optimization scheme

4.3.3 配信範囲制御方式と配信エリア変更方式の適用方法

4.3.1 節の geocast 適用方式および 4.3.2 節の配信エリア変更方式の技術的課題を説明し、それらの適用方法を述べる。geocast を適用する際は forwarding zone と destination region の情報を対象セルの端末へ、配信エリア変更方式を適用する際は配信エリア変更情報を変更対象エリアの eNB へ伝達する必要がある。その伝達手順を図 19 を用いて説明する。

図 19 は、図 4 に示す緊急速報の配信方式を拡張したシーケンス図であり、(xii) 以降が拡張した処理となっている。ETWS の配信エリア特定は CBC が行っているため、提案システムによるエリア変更処理も CBC で行うのが妥当である。拡張した処理として、機能停止した eNB の情報を収集するため、(xii) MME は Write-Replace Warning Confirm の有無をもとに、機能停止している eNB の位置情報を eNB fault list として集約し、(xiii) CBC へ送信する。(xiv) CBC は eNB fault list をもとに配信エリアを再設定する。その際、geocast の領域情報も算出することで、対象 eNB への geocast 情報を含めた緊急速報メッセージが生成可能になる。したがって、緊急速報を配信する際に、対象の eNB へ算出した情報を合わせて配信することで、配信範囲を制御した緊急速報が配信可能となる。

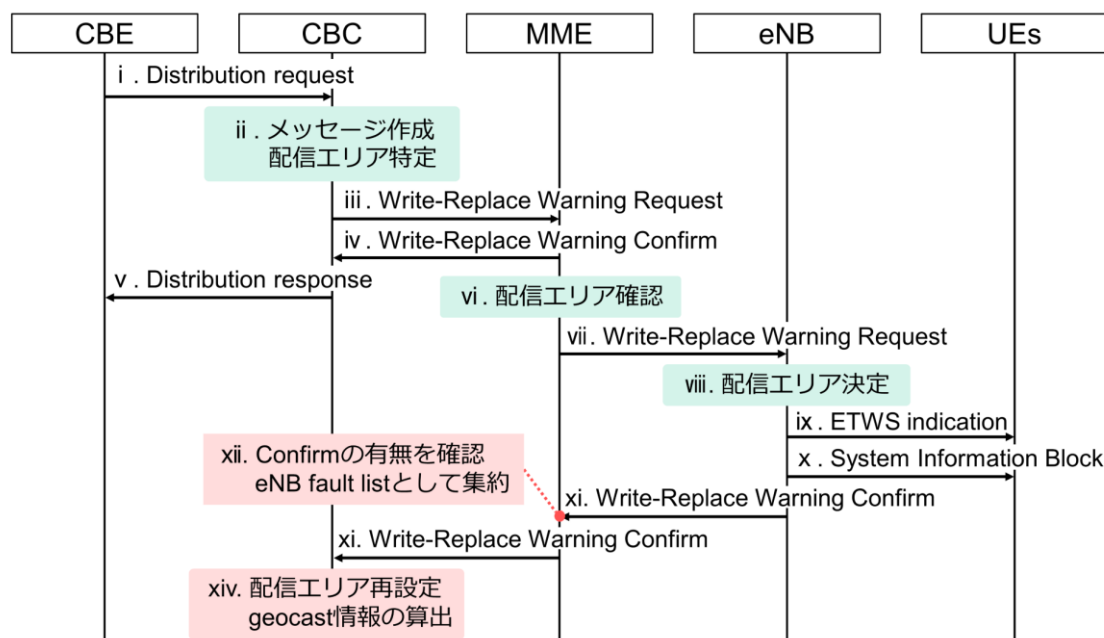


図 19 配信エリアの再設定および geocast 情報の算出手順

Figure 19 Procedure for resetting distribution area and calculating geocast information

4.4 eNB と端末の位置関係に基づく中継端末選定方式

端末のバッテリー資源節約を図るために、eNB と端末の位置関係に基づく中継端末選定方式を提案システムに組み込む。4.4.1 節で提案方式の検討事項と前提条件を説明し、4.4.2 節で提案方式の適用条件を数学的に導出する。そして、4.4.3 節で提案方式の有効性をシミュレーションで示すための簡易的なアルゴリズムを説明する。

4.4.1 検討事項と前提条件

端末のバッテリー資源を節約するためには、不要な中継配信を行っている端末を中継配信から除外すれば良いことが明らかである。3.4.3 節で述べたように、カバレッジ中心付近の端末が中継配信を行っても拡散効率が上昇しない場合が考えられる。そのため、カバレッジ境界線付近の端末を中継端末に選定し、カバレッジ拡大への貢献が少ないカバレッジ中心付近の端末は中継端末への参加を制限すれば良い。すなわち、カバレッジ境界線付近を forwarding zone と定義し、forwarding zone 内に含まれる端末を中継端末とすることで、中心付近の端末の無益な送信を削減できると考えられる。この提案方式は、適切なパラメータ設定を施すことで無益な通信を削減できると考えられる。例えば、端末密度が高く forwarding zone が広い設定では、無益な通信が多く発生してしまうと考えられる。また、端末密度が低く、forwarding zone が狭い設定では、拡散配信が不足してしまうと考えられる。したがって、端末密度や端末の配置から forwarding zone の範囲を適切に決定する必要があり、シミュレーションによって条件を明らかにする。

eNB と端末の位置関係に基づく中継端末選定方式で用いるパラメータに関して図 20 を用いて説明する。eNB は ProSe function を用いて通信用設定の配布および端末の位置情報を取得できるものとする。eNB の最大伝送距離を MaxRange (MR) と定義し、拡散配信に不要な UE が存在する範囲の半径を HalfwayRange (HR) と定義する。また、eNB のカバレッジは同心円状とは限らないことを考慮し、カバレッジを等分割した扇形ごとに HR を決められることとする。UEn は拡散配信が不要である eNB カバレッジ中心付近の UE, UEr は拡散配信をさせたい eNB カバレッジ境界線付近の UE, UEo は eNB カバレッジ周辺の UE と定義する。

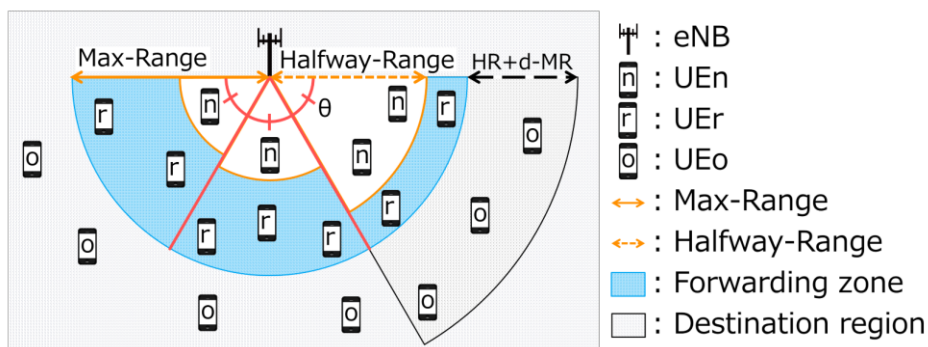


図 20 eNB カバレッジ周辺端末選定方式の前提条件

Figure 20 Precondition of UEs around eNB's coverage selection scheme

4.4.2 数学的分析による適用条件

UEr, UEo がそれぞれ存在する状況で, UEn が存在する場合に, UEn を削減することで効果が得られる. D2D transmission range を d と定義し, 端末が一様分布に配置されていると仮定すると, 端末が存在する十分条件は端末密度と面積の積から導出できる. 削減対象エリアの面積 S_{HR} , forwarding zone の面積 S_{MR-HR} , destination region の面積 $S_{HR+d-MR}$ に対して一様に配置された端末の密度 D を掛けることでそれぞれの場所に存在する端末数が求められる. つまり, 削減対象となる端末の存在条件 (1) と, 周辺端末によるカバレッジ拡大成功条件 (2) が同時に成立するとき適用可能である.

$$D \cdot S_{HR} \geq 1 \quad (1)$$

$$D \cdot S_{MR-HR} \geq 1 \ \&\& \ D \cdot S_{HR+d-MR} \geq 1 \quad (2)$$

4.4.3 Halfway-Range の最大化アルゴリズム

数学的分析により適用条件を導出したが, UE 密度が極端に低い場合や避難経路などにより一様分布の前提が成立しない場合のほうが多いと考えられる. 本研究ではカバレッジ拡大においてカバレッジ境界線付近の端末のみを中継端末に選択することが有効であるという仮説を明らかにするため, $\theta=\pi/6$ の下で HalfwayRange を最大化する方法についてのアルゴリズムを定義し, シミュレーションにより提案手法の有効性を考察する. 本提案方式のアルゴリズムステップを以下に示す.

Algorithm 1 Find Halfway-Range ($\theta = 30^\circ$)

```

if  $D \cdot \frac{1}{12} S_{MR} \geq 2$  then
    HR  $\leftarrow$  MR // Set the value of MR to HR
    while ( $D \cdot S_{MR-HR} \geq 1$ ) do
        HR  $\leftarrow$  HR - 1 // Decrease the value of HR
    end while
end if

```

第5章 評価・考察

本研究では、ネットワークシミュレータ ns-3[17]を用いて函館市と北斗市に震災が起きた状況で提案システムを運用した状況を再現し、提案システムについての評価を4回に分けて行う。評価実験1と評価実験2では、メッセージ拡散配信のためのD2D通信規格選定の観点から、ProSeの有効性および提案システムの性能を評価する。評価実験3と評価実験4では、追加機能である拡散経路最適化方式および中継端末選定方式の有効性を評価する。また、2018年8月よりアメリカ国立標準技術研究所(NIST)がLTE D2Dのシミュレーションプログラム[18]を公開したため、実験の妥当性について考察する。

5.1 評価モデル

ネットワークシミュレータにて再現するシミュレーションシナリオおよび実験環境設定、eNBの運転箇所、D2D通信のパラメータ設定について詳細に説明する。

5.1.1 シミュレーションシナリオと実験対象環境

シミュレーションシナリオとして、北海道函館市と北斗市の行政境界に津波が到達することを想定し、地震によって一部のeNBが機能停止している環境で緊急速報を配信する状況を再現する。緊急速報を受信した端末は徒歩で津波避難施設へ移動する行動を再現し、後述する評価実験を行う。

本実験の対象エリアは、北海道の函館市と北斗市の行政境界近辺を想定し、その周辺地図を図21に示す。青線は行政境界、赤線は津波到達境界を示している。行政境界よりも西側が北斗市であり、東側が函館市である。また、各地に点在している緑印は津波避難施設を示す。eNBは5.1.2節で後述するように、通信可能範囲が半径250mのeNBを等間隔に敷き詰める。函館市の端末配置数は、LTE対応スマートフォンの普及率は70%であり、函館市の人口密度は389人/km²であるため、eNB1台あたり68個を歩道上に一樣分布に配置する。北斗市の端末配置数は、北斗市の人口密度は118人/km²であるため、eNB1台あたり21個を歩道上に一樣分布に配置する。端末の移動モデルはGoogle Maps APIのwalkingモードを利用し、緊急速報を受信すると最寄りの避難所へ最短経路で移動する[19]。



図 21 実験エリアの地図

Figure 21 Experiment area map

5.1.2 eNB の配置パターン

評価実験 1 および評価実験 3 についての eNB 配置は、通信可能範囲が半径 250m の eNB を図 22 のように配置する。0 から 14 番のセルが北斗市の配信エリア、15 から 30 番のセルが函館市の配信エリアに割り当てられているとする。大規模災害により一部の eNB が機能停止していることを想定しているため、約 50% の eNB が運転している状態で実験を行う。実験の網羅性のために表 5 のような残存 eNB の配置状況を再現する。配置 A と B は、残存 eNB が函館市のみ、北斗市のみ運転している状況を再現する。配置 C～G は、行政境界付近で多数の eNB が機能停止した状況を再現させているため、ETWS の配信エリア変更方式の効果が期待できる。配置 H～K は、疎らに停止した状況を再現する。

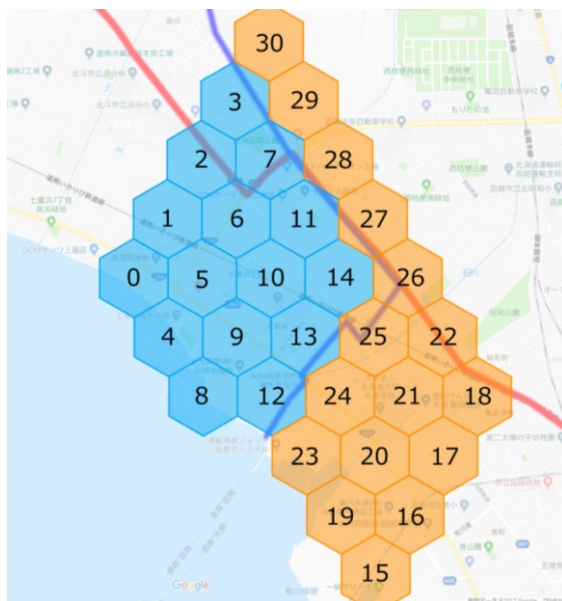


図 22 評価実験 1 と評価実験 3 における eNB の配置パターン
 Figure 22 eNB arrangement of experiment 1 and experiment 3

表 5 残存 eNB の配置パターン
 Table 5 eNB operating points

配置	残存 eNB 番号
配置 A	0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14
配置 B	15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30
配置 C	0,1,4,5,8,9,12,13,16,17,20,21,24,25,28,29
配置 D	2,3,6,7,10,11,14,15,18,19,22,23,26,27,30
配置 E	0,1,2,3,4,5,6,7,16,17,18,19,20,21,22,23
配置 F	0,4,8,12,15,18,19,22,23,26,27,28,29,30
配置 G	0,1,2,3,4,5,6,7,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,30
配置 H	0,2,4,6,8,10,12,14,16,18,20,22,24,26,28,30
配置 I	1,3,5,7,9,11,13,15,17,19,21,23,25,27,29
配置 J	0,1,2,3,8,9,10,11,16,17,18,19,24,25,26,27
配置 K	4,5,6,7,12,13,14,15,20,21,22,23,28,29,30

評価実験 2 および評価実験 4 についての eNB 配置は、通信可能範囲が半径 250m の eNB を図 23 のように配置する。評価実験 2 および評価実験 4 は、行政境界を考慮しない実験であり、人口密度を適宜変更することから、以下の 2 パターンで良いと考えられる。配置 A は、隣り合う eNB が連続的に停止した状況を再現する。配置 B は、eNB が疎らに停止した状況を再現する。

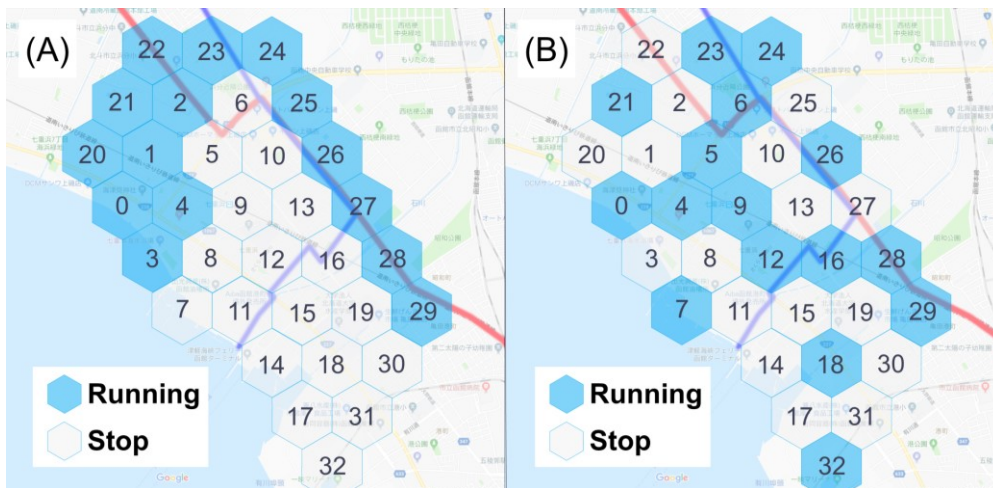


図 23 評価実験 2 と評価実験 4 における eNB の配置パターン
 Figure 23 eNB arrangement pf experiment 2 and experiment4

5.1.3 LTE D2D のパラメータ設定

ns-3 では ProSe プロトコルは未実装であるため、多重アクセス方式を考慮し、Wi-Fi Direct 規格のパラメータを表 6 のように変更して代用して評価する。このシミュレーションパラメータを利用したときのパケット転送成功率を 5.6 節に後述する。ProSe は、カバレッジ内であれば eNB がオペレータとなり輻輳を制御するような動作が可能であり、カバレッジ外であれば CSMA/CA のような衝突回避方法が運用できると考えられる。また、緊急速報以外の電波ノイズを考慮していないこと、実験の規模から輻輳の発生は考えにくいことから、評価に影響はないと考えられる。

表 6 ProSe のシミュレーションパラメータ

Table 6 Simulation parameters of ProSe

パラメータ	仮定
D2D Frequency	700 MHz
Pathloss model 1 (PM1)	RangePropagationLossModel
PM1: MaxRange	350 m
Pathloss model 2 (PM2)	NakagamiPropagationLossModel
PM2: Distance1	170
PM2: Distance2	250
PM2: m0-m1-m2	3-2.5-2
Pathloss model 3 (PM3)	LogDistancePropagationLossModel
PM3: Exponent	2.7
PM3: ReferenceDistance	1
PM3: ReferenceLoss	46.6777

5.2 評価実験 1 : ProSe の有効性

評価実験 1 では, D2D 通信を行うための規格選定の観点から, D2D の通信可能範囲をパラメータとして提案システムを再現し, ProSe の有効性について評価する.

5.2.1 実験方法

気象庁が端末へ津波警報を配信することを想定し, 各 D2D 通信可能範囲において, 津波警報の配信率が 100%になるまでの配信完了時間と最大ホップ数を計測する. D2D の通信可能範囲は文献[11]を参考に表 7 のように定義する. 評価実験 1 では, 5.1.3 節で述べた pathloss model 2 と pathloss model 3 を設定せずに, pathloss model 1 の通信可能範囲のみを適宜変更して実験を行う. なお, Timeout 値を 600 秒に設定し, 配信開始から 600 秒経った時点で緊急速報の有効期限を超過したと見なし実験を打ち切る. この実験について, 実環境の密度で 3 パターンの生成, 表 5 に示した eNB 配置 11 パターン, 表 7 に示した D2D 通信可能範囲に関して 5 パターンをそれぞれ組み合わせ, 合計で 165 パターンの実験を行う.

表 7 D2D の通信可能範囲の定義
Table 7 Definition of D2D transmission range

	都市部見通し悪	都市部見通し良	郊外
Wi-Fi	—	100 m	150 m
ProSe	170 m	250 m	350 m

5.2.2 結果と考察

各 D2D 通信可能範囲における平均配信率の計測結果を図 24 に示し, 配信率が最大になるまでにかかった配信完了時間と最大ホップ数の平均結果を図 25 に示す. D2D 通信可能範囲が 100m の場合は, 配信率が 74.5%, 平均配信完了時間が 377.9 秒であったことから, 十分にメッセージを拡散できていないことがわかる. 通信可能範囲 150m・170m と比較しても平均最大ホップ数が少ないまま平均配信率が向上しないことから, 避難行動に従った DTN の利用が UE の通信可能範囲の小ささをカバーできていないと考えられる. 次に, D2D 通信可能範囲が 150m と 170m の場合は, 配信率が 98%から 99.1%, 平均配信完了時間が 206.3 秒から 62.5 秒であったことから, ある程度メッセージを拡散できていることがわかる. また, 平均最大ホップ数が最も多くなっており, 避難行動と DTN を利用したメッセージ拡散が行われていたと考えられる. 最後に, D2D 通信可能範囲が 250m 以上の場合は, 配信率が 100%, 平均配信完了時間が 0.026 秒以下であったことから, 十分にメッセージを拡散できていることがわかる. 平均最大ホップ数が最も少ないにもかかわらず配信率が 100%に達していることから, 避難行動を利用せずともマルチホップ D2D 通信のみでメッセージを拡散できていると考えられる. これらの結果から, 通信可能範囲の点で有利な ProSe は中継配信によるメッセージ拡散機能において有効であることが示された.

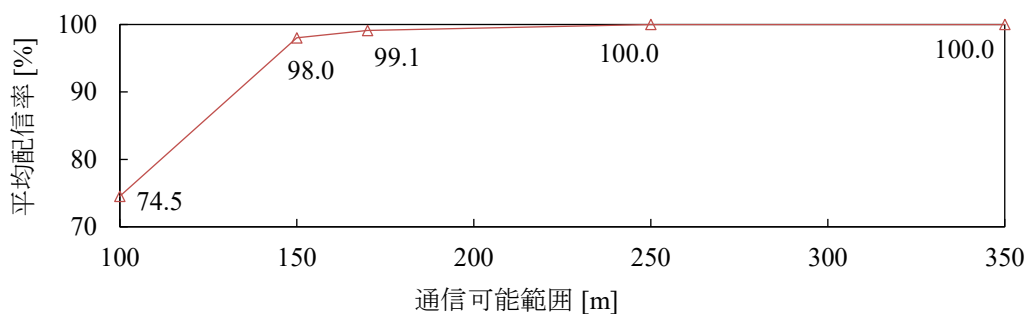


図 24 通信可能範囲に対する平均配信率

Figure 24 Delivery rate for each D2D transmission range

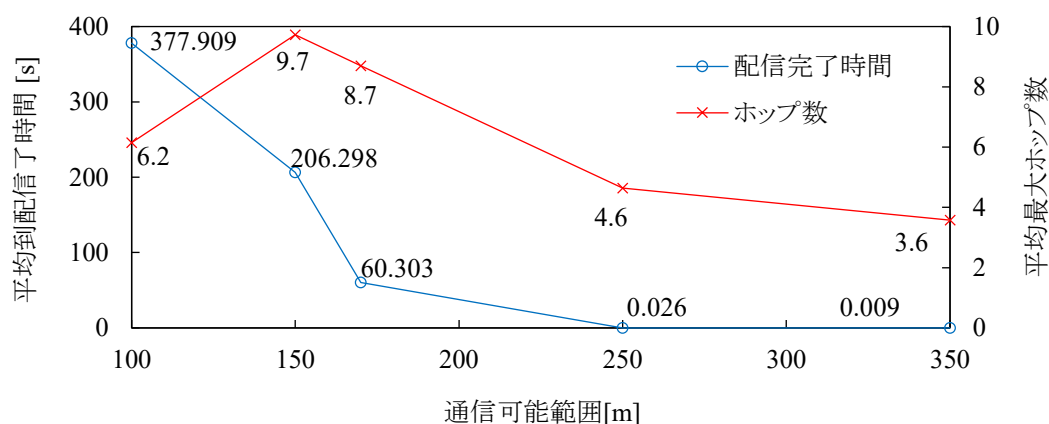


図 25 通信可能範囲に対する平均配信完了時間と平均最大ホップ数

Figure 25 Delivery completion time and maximum number of hops for each D2D transmission range

5.3 評価実験 2：提案システムにおける人口密度の限界値

評価実験 2 では、現実世界で運用するための観点から、さまざまな人口密度に対して提案システムを運用した状況を再現し、提案システムの性能を評価する。

5.3.1 実験方法

気象庁が端末へ津波警報を配信することを想定し、各 UE 密度において配信率が 100%になるまでの配信完了時間を計測する。ProSe のシミュレーションパラメータは表 6 のように設定する。UE 密度は、120UEs/km²から配信率が 100%に満たなくなるまで 4UEs/km²刻みで減らす。この実験について、UE 密度が最大 30 パターン、各 UE 密度で 9 パターンの生成、図 23 に示した eNB 配置 2 パターンをそれぞれ組み合わせ、合計で最大 540 回の実験を行う。

5.3.2 結果と考察

各 UE 密度において配信率が 100%になるまでにかかった平均配信完了時間を図 26 に示す。UE 密度が 28UEs/km²以上の場合は、配信率が 100%になるまでに 1 秒かからなかった。これは、すべての端末がお互いの通信可能範囲内に位置していたため、マルチホップ D2D 通信のみで通

信が行われていたと考えられる。また、24UEs/km²から20UEs/km²の場合は、配信率が100%になるまでに1秒以上かかっていることが確認できた。これは、端末が移動することによってデータ通信が行われていると考えられる。一方、20UEs/km²未満の場合は配信率が100%に満たすことができなかった。これは、半径250mのeNBに端末が各4台以下となってしまう、すべての端末がお互いのD2D通信範囲内に含まれていなかったことで発生したと考えられる。これらの結果から、この提案システムの限界性能は人口密度が20UEs/km²以上のときに有効的であると明らかとなった。これを現実世界に置き換えても十分に実用できると考えられる。

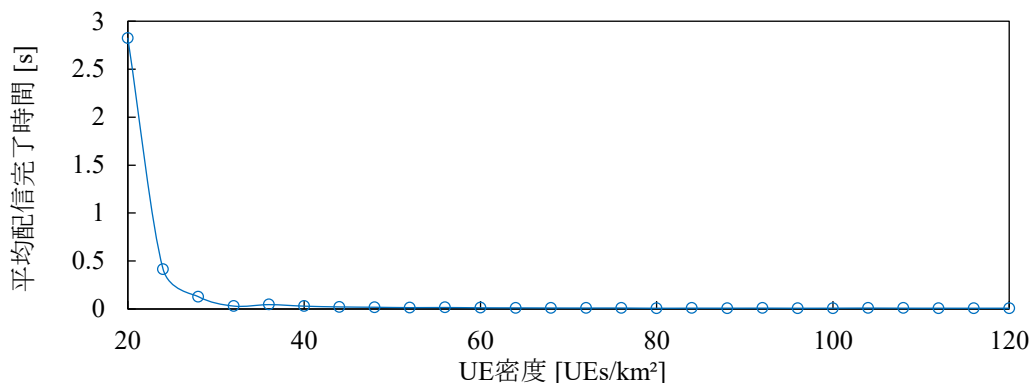


図 26 UE 密度に対する平均配信完了時間

Figure 26 Delivery completion time for each UE density

5.4 評価実験 3 : 拡散経路最適化方式の有効性

評価実験 3 では、4.3 節で述べた拡散経路最適化方式を適用する前から配信率の維持を軸に考え、geocast を利用した配信範囲制御方式と ETWS の配信エリア変更方式を同時に適用した際の有効性を評価する。

5.4.1 実験方法

気象庁が端末へ災害・避難情報を配信することを想定し、各配信方式において配信率が100%になるまでの配信時間等を計測する。拡散経路最適化方式を評価するため、具体的には、システム拡張前の既存配信方式 A, geocast を利用した配信範囲制御方式のみを適用した配信方式 B, geocast を利用した配信範囲制御方式と ETWS の配信エリア変更方式を同時に適用した本提案配信方式 C の3 つについて比較実験を行う。ProSe のシミュレーションパラメータは表 6 のように設定する。各配信方式において、配信開始から1秒経過後までのメッセージ配信率、メッセージ超過率、配信完了時間、最大ホップ数および総送信回数を計測する。北斗市が災害・避難警報を配信した際に、北斗市に存在する端末が緊急速報を受信し、利用者へ正しくポップアップ通知を行った数の割合をメッセージ配信率と定義し、函館市に存在する端末が緊急速報を受信し、利用者へ誤ってポップアップ通知を行った数の割合をメッセージ超過率と定義する。従来方式ではカバレッジ外の全端末に配信されることになるため、その場合のメッセージ超過率は函館市側のカバレッジ外端末の比率に等しくなる。送信回数は中継端末によるメッセージ送信試行総数と定義する。この実験について、実環境の密度で3パターンの生成、表 5 に示した eNB 配置のうち配置 C から配置 K の9パターン、配信方式に関して3パターンをそれぞれ組み合わせ、合計で81パターンの実験を行う。eNB の配置 A は残存 eNB が北斗市のみ、eNB の配置 B は残存 eNB が函館市のみであり、配信範囲制御の効果が表れないため実験から除外する。

5.4.2 結果と考察

各配信方式における、配信完了時間、メッセージ配信率、メッセージ超過率、およびホップ数削減率の平均結果を図 27 に示し、本提案方式である配信方式 C の配信制御性能および迅速性を考察する。すべての配信方式で配信率が 100%に達し、システム拡張による配信率の低下は発生しなかったことが確認できた。配信方式 A のメッセージ超過率が 36.8%であったが、配信方式 B および配信方式 C で 0%へ削減可能ことが確認できた。これは、配信方式 A と配信方式 B を比較すると、ホップ数が短縮されていることが確認でき、メッセージが不要な領域への中継配信を抑制していると考えられ、利用者へ誤った通知をすることのない配信範囲制御が可能となっていると考えられる。次に、配信方式 C の配信完了時間は、配信方式 A よりも 28%短縮することが確認できた。これは、配信元 eNB を増加させることで、双方向からの中継配信が行われ、ホップ数の短縮が可能となったためであると考えられる。

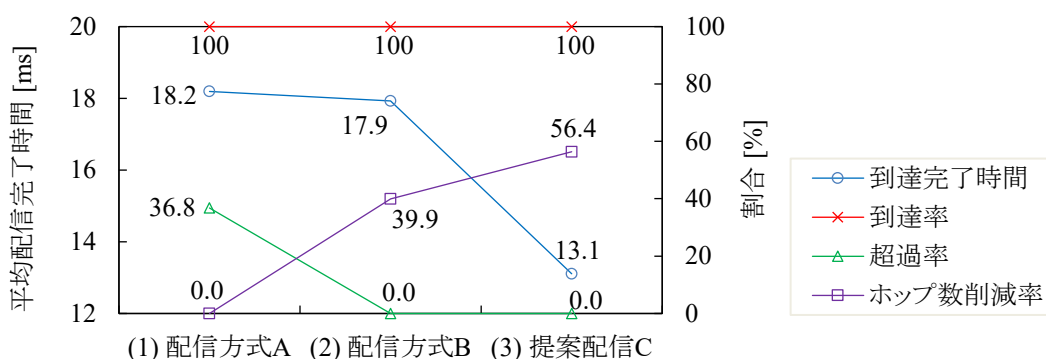


図 27 各配信方式に対する配信完了時間、配信率、超過率及びホップ数削減率

Figure 27 Delivery completion time, delivery rate, excess rate and hop count reduction rate for each delivery scheme

ETWS の配信エリア変更方式の効果を詳細に分析するため、残存 eNB の配置別に考察する。効果が大きく期待できる配置 C~配置 G、効果が少ないと考えられる配置 H~配置 K それぞれのパターンにおける配信完了時間と最大ホップ数の平均結果を図 28 に示す。配置 C~配置 G において、配信完了時間が 29%短縮していることを確認した。一方、配置 H~配置 K において、配信完了時間が 3%しか短縮していないことを確認した。これは、配信方式 B の最大ホップ数の値が関係しており、eNB が疎らに機能停止している環境では、ホップ数を短縮する状況が発生しにくいいため、配信完了時間の短縮がわずかであったと考えられる。しかし、人口密度や通信環境によっては、3.4.2 節で述べたように迂回経路の損失が考えられるため、メッセージ配信率を悪化させないためにも、ETWS の配信エリア変更方式を適用することが望ましい。

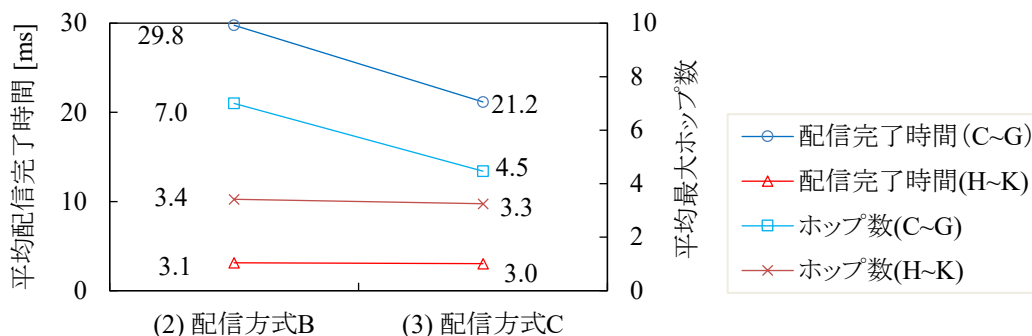


図 28 各配信方式に対する配信完了時間と最大ホップ数 (eNB 配置パターン別)

Figure 28 Delivery completion time and number of hops for each delivery scheme (by each pattern of eNB operating points)

ETWS の配信エリア変更方式を適用する際に増加するメッセージ送信回数について考察する。各配信方式における、総送信回数および端末 1 台あたりの平均送信回数の平均結果を図 29 と図 30 に示す。総送信回数について、配信方式 A におけるメッセージ超過率の値によって、2 つの傾向が見られた。図 29 は、メッセージ超過率が 40%以上の環境における、総送信回数および平均送信回数を示しており、配信方式 C の総送信回数について配信方式 A と比較すると、19%削減していることを確認した。配信方式 C の総送信回数が配信方式 B の総送信回数よりも増加していることが明らかであるが、図 27 において配信完了時間が短縮していることから、ETWS の配信エリア変更方式によるメッセージ流入数を増加させることで、メッセージ拡散性能が上がったと考えられる。配信方式 C の総送信回数が増加しているが、各配信方式で端末 1 台あたりの平均送信回数が 2.7~2.9 回に抑えられており、ETWS の配信エリア変更によるメッセージ増加量は許容できるものと考えられる。

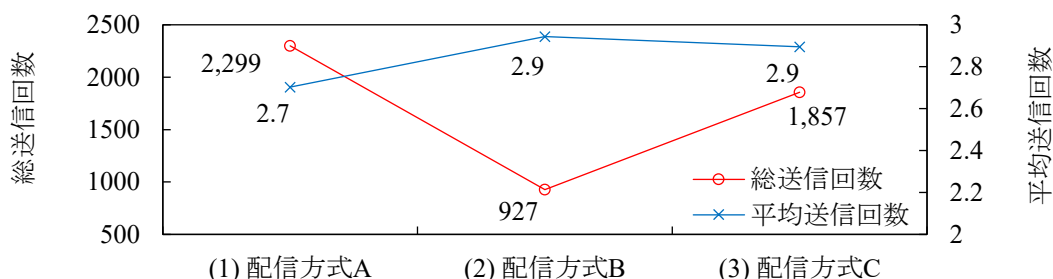


図 29 各配信方式に対する総送信回数と平均送信回数 (超過率 40%以上)

Figure 29 Total number of transmissions and average number of transmissions for each delivery scheme (Excess rate is over 40%)

図 30 は、メッセージ超過率が 40%未満の環境における、総送信回数および平均送信回数を示しており、メッセージ超過率が 40%を超えるとときと同様に、ETWS の配信エリア変更方式によるメッセージ流入数を増加させることで、メッセージ拡散性能が向上したと考えられる。しかし、配信方式 C の総送信回数について配信方式 A と比較すると、16%増加していることを確認した。これは、ETWS の配信エリア変更方式を適用する際に、forwarding zone として設定したセルの数が、配信方式 A で不要なメッセージが拡散していたセルの数よりも増加してしまったからである。つまり、行政境界に隣接している配信元ではない地方公共団体のセルが連続的に機能停止している場合に、総送信回数を大きく削減できていると考えられる。総送信回数が増加しているが、速報性を最も重視する緊急速報の配信においては 16%の送信量増加のコスト

を前提としても ETWS の配信エリア変更方式を適用することが望ましいと考える。

これらの結果から、残存 eNB の状況別に、geocast を利用した配信範囲制御方式と ETWS の配信エリア変更方式を組み合わせた拡散経路最適化方式の有効性を示した。

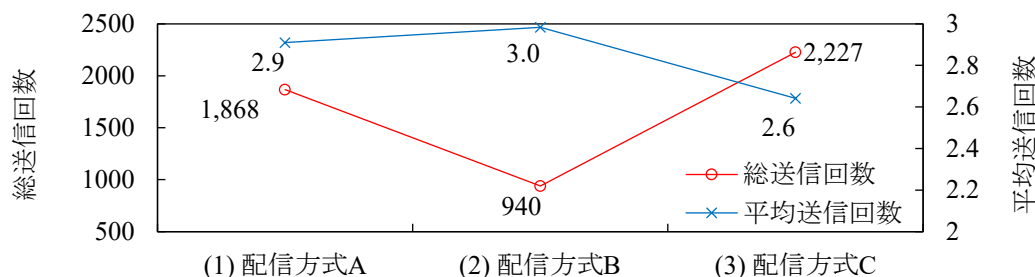


図 30 各配信方式に対する総送信回数と平均送信回数（超過率 40%未満）

Figure 30 Total number of transmissions and average number of transmissions for each delivery scheme (Excess rate is less than 40%)

5.5 評価実験 4：中継端末選定方式の有効性

評価実験 4 では、4.4 節で述べた eNB と端末の位置関係に基づく中継端末選定方式を適用した際に、配信完了時間を悪化させずにトポロジ全体の送信回数を軽減させることで有効性を確認する。また、実環境を想定したシミュレーションを行うことで、中継端末選定方式の適用条件を導出する。

5.5.1 実験方法

気象庁が端末へ津波警報を配信することを想定し、各 UE 密度において配信率が 100%になるまでの配信完了時間と“Timeout”が来るまでにトポロジ全体で発生した送信回数を計測する。ProSe のシミュレーションパラメータは表 6 のように設定する。送信回数は、UE 密度が 31UEs/km²以上の場合は DTN の利用が無いいため Timeout 値を 1 秒、UE 密度が 31UEs/km²未満の場合は DTN の利用があるため Timeout 値を 120 秒に設定し、その間に発生した中継配信の送信回数を計測する。UE 密度の変域は、評価実験 2 より得られた UE 密度の限界値より、120UEs/km²から 20UEs/km²まで 4UEs/km²ずつ減らす。この実験について、UE 密度が 26 パターン、各 UE 密度で 9 パターンの生成、図 23 に示した eNB 配置 2 パターンをそれぞれ組み合わせ、合計で最大 468 回の実験を行う。

5.5.2 結果と考察

中継端末選定方式を適用した場合とそうでない場合について、配信率が 100%になるまでにかかった平均配信完了時間と、送信回数の削減率を図 31 に示す。UE 密度が 24UEs/km²以上の場合は、平均配信完了時間をある程度維持しつつ平均送信回数を平均 26%削減した。一方、UE 密度が 24UEs/km²未満の場合は、平均送信回数を削減できたものの、平均配信完了時間に大きな劣化が見られた。これらの結果から、UE 密度が 24UEs/km²以上のときに中継端末選定方式が有効的であり、適用条件が導出された。また、中継端末選定方式を用いることで不要な配信を行っている端末を仲介端末から除外し、より効率的なメッセージの拡散が行われていることが

確認できたため、中継端末選定方式の有効性が確認できた。

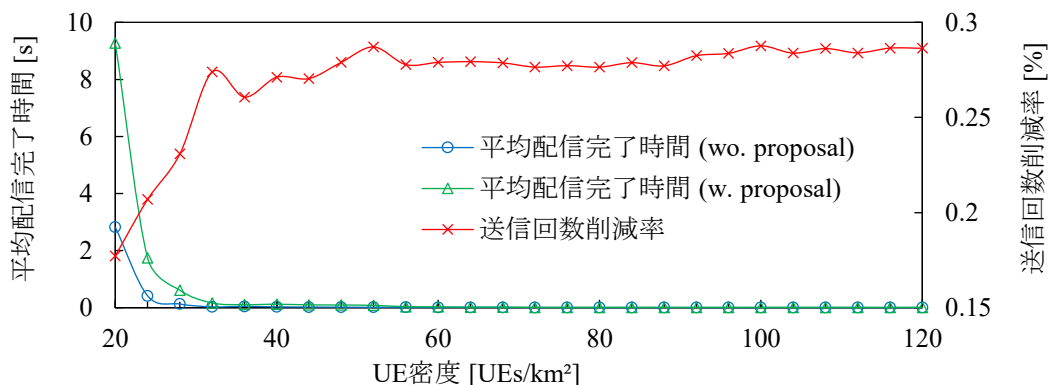


図 31 UE 密度に対する配信完了時間と送信回数削減率

Figure 31 Delivery completion time and Number of transmissions reduction rate v.s. UE density

5.6 評価実験 5：シミュレーションの妥当性

5.1.3 節の表 6 に示した ProSe のシミュレーションパラメータと、NIST が公開した ProSe のシミュレーションパラメータ[18]を比較し、評価実験 2 から評価実験 4 までの妥当性を検証する。以下では、通信可能範囲によるパケット転送成功率を比較し、妥当性を評価する。

5.6.1 実験方法

送信元ノードから 360m 先までの場所に宛先ノードを 1m 間隔で設置する。そして、各ノードにパケットを 100000 回送信したときのパケット転送成功率を計測する。この実験について、5.1.3 節の表 6 のように設定した ProSe のシミュレーションパラメータと、NIST が公開している ProSe のシミュレーションパラメータ[18]の 2 パターンを行う。

5.6.2 結果と考察

各通信距離に対するパケット転送成功率を図 32 に示す。本研究で設定したパラメータでは、100m 先までのノードに対してパケット転送成功率が約 100%になるように設定していた。そして、350m 先までのノードに対してパケット転送成功率が 0%になるように、なだらかに低下するように設定していた。NIST が公開したパラメータを用いた場合、280m 先までのノードに対してパケット転送成功率が 100%であった。そして、318m 先のノードに対してパケット転送成功率が 0%に収束した。これらの結果から、宛先ノードが常に 100m 以内にいるような高密度な環境下では、実験結果にほとんど変化がないと考えられる。一方、宛先ノードが 318m 先にしか存在しないような低密度な環境下では、DTN による通信が必要となるため、配信完了時間に遅延が出る可能性が考えられる。しかし、現実世界ではそのような状況はほとんど考えられなく、図 24 と図 25 において通信可能範囲が 350m から 250m へ縮めた場合の配信率と配信完了時間への影響は微量であったため、これまでの実験は十分に妥当であると考えられる。

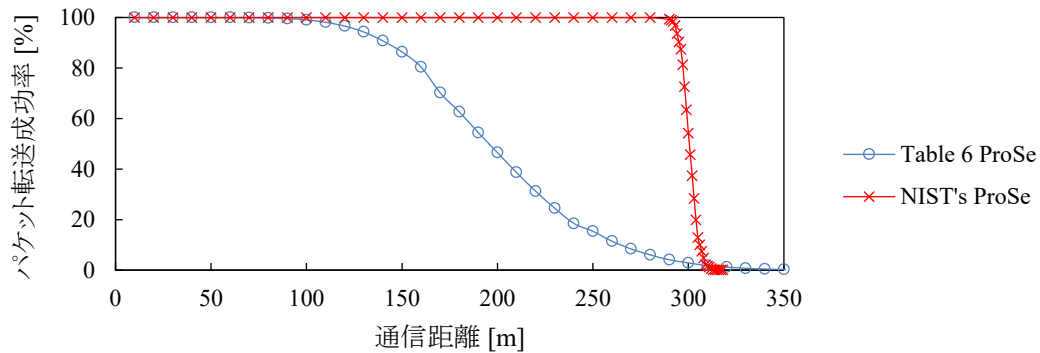


図 32 各通信距離に対するパケット転送成功率
Figure 32 Packet transfer success rate to communication distance

第6章 結言

6.1 まとめ

本研究では、災害時に速報性が要求されるメッセージをカバレッジ外に拡散可能な災害耐性ネットワーク・システムの実現を目的として、ETWSにLTE D2Dを統合した災害時同報配信システムを提案した。D2D通信における通信規格の選定として、ETWSとの親和性が高いProSeを採用し、配信時間が大幅に向上することから、ProSeを用いたマルチホップD2D通信システムの有効性を示した。さらに、本提案システムに3つの機能を加えることで災害時同報配信システムとしての課題を満たした。1つ目は、端末側が能動的にD2Dモードへ切り替えられる機能を加えることで、カバレッジ拡大効率を最大限に引き出すことが可能となり、鮮度の高い情報を提供可能になると考えられる。2つ目は、配信領域を指定可能にする機能を加えることで、より正確な避難指示を迅速に配信することが可能となり、安全性が保たれた情報提供が可能になると考えられる。3つ目は、eNBがカバレッジ境界線付近の端末をD2D通信端末として指定可能な機能を加えることで、端末の貴重なバッテリー資源を節約することが可能となり、災害時における運用の可能性が広がったと考えられる。これら追加機能についても、災害時の状況を再現したシミュレーション評価によって本提案システムの有効性を示した。

6.2 今後の展望

今後の展望として、本研究で提案するeNBと端末の位置関係に基づく中継端末選定方式に加え、カバレッジ外端末同士の通信効率やLTE D2Dの特性を最大限に引き出した中継端末選定方式を検討することで、災害時における貴重なバッテリー資源の節約が可能となり実現性の向上に期待できる。また、LTE D2Dに関する研究は近年急激に上昇しておりPS-LTEに加えて、V2X (Vehicle to everything)にも焦点を当てた研究[20]も行われており、本研究で扱う課題の一般性は広がるものと思われる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、指導教員の中村嘉隆准教授、副指導教員の稲村浩教授には、お忙しい中にも関わらず、研究に関する助言をはじめ、熱心にご指導していただきました。幾重に重なる研究指導によって、数多くの研究発表を行うことができ、貴重な経験となりました。ここに深く感謝申し上げます。また、本論文の審査を担当して頂いた姜暁鴻教授には、国際会議論文を投稿する際など、以前からお世話になっており、深く感謝申し上げます。最後に、ゼミや研究室での活発な議論で様々な視点から多くのアドバイスを下さった中村研究室と稲村研究室の皆様に重ねて感謝申し上げます。

発表・採録実績

発表

- [I] 六平豊, 中村嘉隆, 稲村浩, “カバレッジ外の端末へ緊急速報を配信するための Proximity Services を用いた同報配信システム,” マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム 2017 論文集, pp. 955-962, June 2017.
- [II] 六平豊, 中村嘉隆, 稲村浩, “Proximity Services を統合した災害時同報配信システムにおける通信量削減に関する検討,” 研究報告モバイルコンピューティングとパーベイシブシステム (MBL), vol. 2018-MBL-86, no. 23, pp. 1-8, February 2018.

学術論文等(査読付き)

- [I] Y. Musaka, Y. Nakamura, and H. Inamura, “A Broadcast Distribution System for Delivering Emergency Bulletins to User Equipment Outside of eNBs Coverage,” Proceedings of the 10th International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Networking (ICMU2017), pp. 164-169, October 2017.
- [II] Y. Musaka, Y. Nakamura, H. Inamura, and X. Jiang, “Relay UE Selection Scheme in an Emergency Warning System Integrating Proximity Services,” Proceedings of the 16th IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC2019), pp. 752-753, January 2019.
- [III] 六平豊, 中村嘉隆, 稲村浩, “緊急速報をカバレッジ外へ拡散するための Proximity Services を統合した災害時同報配信システム,” 情報処理学会論文誌, vol. 60, no. 2, pp. 514-526, February 2019.

参考文献

- [1] 3GPP, TS 23.041 (V15.1.0), “Technical realization of Cell Broadcast Service (CBS) (Release 15),” March 2018.
- [2] 3GPP, TS 22.268 (V16.0.0), “Public Warning System (PWS) requirements (Release 16),” March 2018.
- [3] 3GPP, TS 22.168 (V9.0.0), “Earthquake and Tsunami Warning System (ETWS) requirements; Stage 1 (Release 9),” June 2008.
- [4] Ministry of Internal Affairs and Communications, “Information and Communications in the Aftermath of the Great East Japan Earthquake,” [online]. Available: <http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/eng/WP2011/part1.pdf>
- [5] “Public Safety LTE Demo Network at the 2015 FIS Alpine World Ski Championships,” [online]. Available: <https://www.firstnet.gov/newsroom/blog/public-safety-lte-demo-network-2015-fis-alpine-world-ski-championships>
- [6] 3GPP, TR 22.803 (V12.1.0), “Feasibility study for Proximity Services (ProSe) (Release 12),” March 2013.
- [7] 飯塚留美：諸外国の PS-LTE の導入状況”，総務省（オンライン），入手先〈http://www.soumu.go.jp/main_content/000519765.pdf〉（参照 2018-04-25）。
- [8] Y.-B. Ko, and N. H. Vaidya, “Flooding-Based Geocasting Protocols for Mobile Ad Hoc Networks,” *Mobile Networks and Applications*, vol. 7, no. 6, pp. 471-480, December 2002.
- [9] I. Tanaka et al., “Advanced Warning Message Distribution Platform for the Next-generation Mobile Communication Network,” *NTT DOCOMO Technical Journal*, vol. 11, no. 3, pp. 20-26, December 2009.
- [10] S. Yasukawa et al., “D2D Communications in LTE-Advanced Release 12,” *NTT DOCOMO Technical Journal*, vol. 17, no. 2, pp. 56-64, October 2015.
- [11] Qualcomm, “LTE Direct Workshop White Paper,” [online]. Available: <https://www.qualcomm.com/media/documents/files/lte-direct-whitepaper.pdf>
- [12] H. Nishiyama, M. Ito, and N. Kato, “Relay-by-smartphone: realizing multihop device-to-device communications,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 4, pp. 56-65, April 2014.
- [13] A. Fujiwara, and H. Miwa, “Real-Time Disaster Evacuation Guidance Using Opportunistic Communications,” in *proc. SAINT 2012*, pp. 326-331, July 2012.
- [14] H. Takagi and L. Kleinrock, “Optimal Transmission Ranges for Randomly Distributed Packet Radio Terminals,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 32, no. 3, pp. 246-257 March 1984.
- [15] N. Kamiyama et al., “Reachability Analysis of Multi-hop D2D Communications at Disaster,” *IEICE Transactions on Communications*, vol. E101-B, no. 8, August 2018.
- [16] T. Ohtsuji et al., “Relay Selection Scheme Based on Path Throughput for Device-to-Device Communication in Public Safety LTE,” *IEICE Transactions on Communications*, vol. E101-B, no. 5, pp. 1319-1327, May 2018.
- [17] “ns-3,” [online]. Available: <https://www.nsnam.org/>
- [18] R. Rouil et al., “Implementation and Validation of an LTE D2D Model for ns-3,” in *proc. WNS '17*, pp. 55-62 June 2017.

- [19] C. Tiago, and A. Michele, "RoutesMobilityModel: easy realistic mobility simulation using external information services," in proc. WNS '15, pp. 46-50 May 2015.
- [20] L. Gallo, and J. Haerri, "Unsupervised Long- Term Evolution Device-to-Device: A Case Study for Safety-Critical V2X Communications," IEEE Vehicular Technology Magazine, vol. 12, no. 2, pp. 69-77, June 2017.

図目次

図 1	提案システムの概略図	2
図 2	ETWS のネットワークアーキテクチャ	4
図 3	ETWS の配信エリア指定方法	6
図 4	緊急速報の配信方式	6
図 5	eNB と UE 間のチャンネル動作.....	7
図 6	D2D シナリオ	7
図 7	ProSe のネットワークアーキテクチャ	8
図 8	ProSe における端末間の同期方法.....	8
図 9	Location Based Multicast 手法を用いた geocasting	10
図 10	Greedy forwarding 手法を用いた geocasting.....	10
図 11	行政境界付近で発生する問題	12
図 12	配信範囲制御による中継経路の損失問題	12
図 13	カバレッジ拡大に不要な中継配信	13
図 14	ETWS に ProSe を統合した災害時同報配信システム	14
図 15	ETWS に ProSe を統合したシステムの配信方式.....	15
図 16	ProSe の能動化方式.....	16
図 17	geocast による配信範囲制御例	17
図 18	配信エリア変更方式による拡散経路最適化例.....	18
図 19	配信エリアの再設定および geocast 情報の算出手順.....	19
図 20	eNB カバレッジ周辺端末選定方式の前提条件	20
図 21	実験エリアの地図	22
図 22	評価実験 1 と評価実験 3 における eNB の配置パターン	23
図 23	評価実験 2 と評価実験 4 における eNB の配置パターン	24
図 24	通信可能範囲に対する平均配信率	26
図 25	通信可能範囲に対する平均配信完了時間と平均最大ホップ数.....	26
図 26	UE 密度に対する平均配信完了時間	27
図 27	各配信方式に対する配信完了時間, 配信率, 超過率及びホップ数削減率.....	28
図 28	各配信方式に対する配信完了時間と最大ホップ数 (eNB 配置パターン別)	29
図 29	各配信方式に対する総送信回数と平均送信回数 (超過率 40%以上)	29
図 30	各配信方式に対する総送信回数と平均送信回数 (超過率 40%未満)	30
図 31	UE 密度に対する配信完了時間と送信回数削減率	31
図 32	各通信距離に対するパケット転送成功率	32

表目次

表 1 messageIdentifier のパラメータ	5
表 2 Warning Type parameter の表現.....	5
表 3 Warning Type Value のパラメータ	5
表 4 緊急ユーザ警告およびポップアップ表示	5
表 5 残存 eNB の配置パターン	23
表 6 ProSe のシミュレーションパラメータ	24
表 7 D2D の通信可能範囲の定義	25