

令和7年度  
修士学位論文

災害時におけるトピックの動的な変化を  
考慮した Pub/Sub ベースの DTN 通信  
手法

Pub/Sub-Based DTN Communication Method  
Considering Dynamic Topic Changes During  
Disasters

多田 輝

指導教員 横山 和俊

2026年2月27日

高知工科大学大学院 工学研究科 基盤工学専攻  
情報学コース

# 要 旨

## 災害時におけるトピックの動的な変化を考慮した Pub/Sub ベースの DTN 通信手法

多田 輝

大規模災害発生直後には、被災地において迅速かつ確かな情報共有が求められるが、通信インフラの損傷により既存のネットワークが十分に機能しない状況が想定される。このような環境下でも情報伝達を可能とする技術として、遅延・中断耐性ネットワークである Delay Tolerant Networking(以下,DTN) が注目されており、不要な情報転送を抑制できる Publish/Subscribe(以下, Pub/Sub) モデルに基づく DTN ルーティング手法が提案されてきた。しかし、関連研究では、時間の経過に伴って被災者や支援者の情報ニーズが変化し、購読トピックが不定期に変化・増減する状況が十分に考慮されていないという課題がある。そのため、新たに必要となった情報が届かない、あるいは配信が遅延するといった問題が生じる可能性がある。

そこで本研究では、過去の購読履歴に着目し、ユーザ全体の購読変化の傾向を集計・確率化することで、将来の情報ニーズを予測し、トピックメッセージを事前にキャッシュする Pub/Sub ベースの DTN ルーティング手法を提案した。この手法により、購読内容や購読数が増減する環境においても、不要な通信を抑えつつ効率的な情報配信が可能となる。

THE ONE シミュレータを用いた評価の結果、提案手法を適用することで、平均トピックメッセージ配送率が約 3~10 % 向上し、平均トピックメッセージ遅延時間が約 100~260 秒短縮されることが確認できた。

**キーワード** DTN, Publish/Subscribe モデル

# Abstract

## Pub/Sub-Based DTN Communication Method Considering Dynamic Topic Changes During Disasters

Hikaru TADA

Immediately following a large-scale disaster, rapid and accurate information sharing is essential in the affected areas. However, it is anticipated that existing networks will fail to function adequately due to damage to communication infrastructure. Delay Tolerant Networking (DTN), a technology designed for intermittent connectivity, has gained significant attention for enabling communication in such environments. Furthermore, DTN routing methods based on the Publish/Subscribe (Pub/Sub) model have been proposed to suppress redundant data transfers.

Nevertheless, a challenge remains in related research: the dynamic nature of information needs among disaster victims and responders over time is not sufficiently considered. This results in situations where subscription topics change, increase, or decrease irregularly, potentially leading to critical new information failing to reach users or suffering from significant delivery delays.

To address this issue, this study proposes a Pub/Sub-based DTN routing method that focuses on historical subscription data. By aggregating and calculating the probability of subscription trends across the entire user base, the method predicts future information needs and pre-caches relevant topic messages. This approach enables efficient information delivery while minimizing unnecessary communication, even in environments where the content and number of subscriptions fluctuate.

The results of an evaluation using THE ONE simulator confirmed that the proposed method improves the average topic message delivery rate by approximately 3–10 % and reduces the average delivery delay by approximately 100–260 seconds, demonstrating its effectiveness against dynamic changes in information needs during disasters.

***key words*** DTN, Publish/Subscribe model

# 目次

<b>第 1 章</b>	<b>はじめに</b>	<b>1</b>
<b>第 2 章</b>	<b>関連技術</b>	<b>3</b>
2.1	Delay/Disruption Tolerant Networking(DTN) . . . . .	3
2.1.1	DTN の通信メカニズム . . . . .	4
2.1.2	DTN の経路制御手法 . . . . .	5
2.2	Publish/Subscribe モデル . . . . .	5
2.2.1	Topic-Based Publish/Subscribe モデル . . . . .	7
<b>第 3 章</b>	<b>関連研究</b>	<b>10</b>
3.1	災害時を考慮した DTN の実用に関する研究 . . . . .	10
3.2	Pub/Sub モデルに基づく DTN 通信手法に関する研究 . . . . .	11
<b>第 4 章</b>	<b>Pub/Sub モデルに基づく DTN 通信手法</b>	<b>13</b>
4.1	災害時での DTN 通信環境下の問題点 . . . . .	13
4.2	Topic-based Pub/Sub モデルの導入 . . . . .	14
4.3	Pub/Sub モデルに基づく DTN 通信の動作 . . . . .	14
4.4	ユーザの購読トピックが増減, 変化しない場合 . . . . .	16
4.5	ユーザの購読トピックが増減, 変化する場合 . . . . .	16
<b>第 5 章</b>	<b>提案手法</b>	<b>19</b>
<b>第 6 章</b>	<b>評価</b>	<b>22</b>
6.1	THE ONE シミュレータ . . . . .	22
6.2	シナリオ . . . . .	23
6.3	評価項目 . . . . .	25

## 目次

6.4	比較項目 . . . . .	25
6.5	結果・考察 . . . . .	26
6.5.1	Epidemic ルーティングとトピックが不変の Pub/Sub ルーティング との比較 . . . . .	26
6.5.2	トピックが不規則な時間に変化, 購読数が増減する場合での Pub/Sub ルーティングに提案手法を適用した場合とそうでない場合での比較 .	28
<b>第 7 章</b>	<b>おわりに</b>	<b>32</b>
7.1	まとめ . . . . .	32
7.2	今後の課題 . . . . .	33
	<b>謝辞</b>	<b>35</b>
	<b>参考文献</b>	<b>36</b>

# 目次

2.1	DTN の動作 . . . . .	4
2.2	DTN におけるデータの流れ . . . . .	5
2.3	エンドツーエンドの IP 通信 . . . . .	6
2.4	Pub/Sub モデルを使った場合の通信 . . . . .	6
2.5	Topic-Based Pub/Sub モデルの通信 . . . . .	8
4.1	Topic-based Pub/Sub モデルに基づく DTN 通信の動作 . . . . .	15
4.2	ユーザの購読トピックが増減, 変化する場合の動き . . . . .	18
5.1	ユーザの購読履歴 . . . . .	20
5.2	集計した購読履歴をもとに確率に算出 . . . . .	20
5.3	購読履歴のやりとり . . . . .	21
6.1	THE ONE シミュレータ GUI(デフォルト) . . . . .	23
6.2	購読トピック数が増えない場合の平均トピックメッセージ配送率 . . . . .	26
6.3	購読トピック数が増えない場合の平均トピックメッセージ遅延時間 . . . . .	27
6.4	購読トピック数が増える場合の平均トピックメッセージ配送率 . . . . .	29
6.5	購読トピック数が増える場合の平均トピックメッセージ遅延時間 . . . . .	29

# 表目次

6.1 シミュレーションパラメータ . . . . .	23
6.2 ユーザの購読トピックが変化する場合のパラメータ . . . . .	24

# 第 1 章

## はじめに

近年, 無線通信技術の進歩に伴って, 無線端末自体を中継器として機能させることで通信圏を拡張するマルチホップネットワークが注目されている. これは既存の基地局を介さず柔軟にネットワークを構築できるため, IoT デバイスの活用を含め多様な環境での運用が期待されている.

特に, 大規模な自然災害が発生した際, このネットワーク技術の重要性は極めて高くなる. 2011 年の東日本大震災や 2016 年の熊本地震, また, 2024 年に石川県能登半島で発生した地震など, 過去の事例からも明らかなように, 発災直後は基地局の損壊や停電によって従来の通信インフラが遮断され, 場所によってはほとんど情報が得られない状況になる可能性がある [1][2][3]. 迅速かつ的確な救助活動や支援物資の提供を行うためには, 被災地の状況や避難者の位置情報を共有することが不可欠である. しかし, 災害時には通信インフラが損傷し, インフラ依存型のネットワークではこうした要請に応えられない恐れがある. そのため, このような状況下では, マルチホップネットワークを迅速に構築し, 被災地の情報収集を行うことが想定されている. 一方で, マルチホップネットワークは複数の中継器を経由して通信を行うため, 通信遅延が生じやすく, 通信経路の切断によって通信の信頼性が低下するおそれがある.

このような基地局が機能しない, あるいは通信が不安定な環境下で確実に情報を伝達するための技術として遅延・中断耐性ネットワーク: Delay/Disruption Tolerant Networking (DTN) が提案されている [4]. DTN はネットワークが常に接続されていることを前提とせず, ノードの移動, ノード間の接触を利用してデータを一時的に蓄積し, 順次転送していくストア・アンド・フォワード方式を採用することで, 通信経路が断続的な環境下でも確実なデータ配信を可能にする.

この DTN において Publish/Subscribe(Pub/Sub) モデルを適用するルーティング手法の研究が進んでいる [5]. Pub/Sub モデルは特定のホストアドレスを指定するのではなく、情報の種類を示す「トピック」に基づいて配信を行う。そのため、名前解決が困難な動的環境においても、各ノードが必要な情報のみを効率的に取捨選択できるという利点がある。

関連研究 [5] では、配信されるトピックの内容や数が固定であることを前提としている。一方、実際の被災現場では、時間の経過や救助活動の進行に伴い、避難者や支援団体が必要とする情報の種類は刻一刻と変化する。このような環境では、ユーザの購読トピックの不定期な変化や、トピックの購読数が増減する状況が発生する。そのため、あらかじめ設定された固定的なトピックのみを扱う手法では、真に必要とされる情報流通を十分に考慮できない。結果として、従来の Pub/Sub 型 DTN ルーティングではトピック購読情報の変化に対応できず、新たに必要となった情報の配信遅延や、情報が利用者に届かないといった問題が生じる可能性がある。

そこで本研究では、ノードが保持するトピックが動的に変動する状況を想定し、そのような環境下でも効率的かつ確実に情報を配信するための最適なルーティング手法およびアルゴリズムを提案する。

## 第 2 章

# 関連技術

### 2.1 Delay/Disruption Tolerant Networking(DTN)

Delay/Disruption Tolerant Networking (DTN) は、ノード間で遅延や通信断が発生する環境下においても通信を継続できる特性を持つネットワークアーキテクチャである [4]. ノード間の常時接続が保証されない, あるいは極端に通信遅延やエラー率が高い環境下でのデータ転送を実現する.

もともと,DTN は惑星間インターネット (InterPlanetary Network) のような, 光速による長大な伝搬遅延や天体の遮蔽による断続的な通信環境を克服するために開発された経緯を持つ [6]. しかし, その特性は地上における特殊な通信環境にも非常に有効である. 特に, 移動体 (ドローン, 車両, 歩行者など) がデータを物理的に運ぶデータミュールとして機能するモバイルアドホックネットワーク (MANET) や, 本研究の主題である災害時の臨時ネットワーク構築において,DTN は既存インフラに依存しない堅牢な通信手段として位置付けられている [7].

従来の TCP/IP プロトコル群は, 送信元から宛先までのエンドツーエンドのパスが常に存在することを前提としている. しかし, 大規模災害によって通信インフラが物理的に破壊された環境や, 基地局の通信容量の超過が発生している状況下では, この前提が崩れるため通信が困難となる. これに対し,DTN はストア・アンド・フォワード (Store-and-Forward) 方式を拡張したメカニズムを採用している. 各ノードは受信したデータをバンドル (Bundle) と呼ばれる単位で一時的にストレージに蓄積し, 次ホップへの通信機会が確保されたタイミングで転送を行う.DTN では蓄積運搬転送方式 (パケツリレー方式) と呼ばれる通信方式を採用

## 2.1 Delay/Disruption Tolerant Networking(DTN)

しており、各ノードは受信したデータを一時的に蓄積し、隣接するノードとの通信が可能になった時点でデータの転送を行う。この方式では、ノードが移動することで他のノードへデータを運搬・転送できるため、常に安定した通信経路が確保できない環境においてもデータ通信が可能となる。蓄積運搬転送方式における通信の流れを図 2.1 に示す。まず、送信元ノードは通信範囲内に存在する移動ノードへデータを転送する。その後、データを受信した移動ノードは移動を続け、通信可能な無線ノードに遭遇するたびにデータの転送を繰り返し、最終的に宛先ノードへデータが届けられる。このように、宛先ノードと直接通信できない場合であっても、他ノードを介することでデータの転送を実現できる。

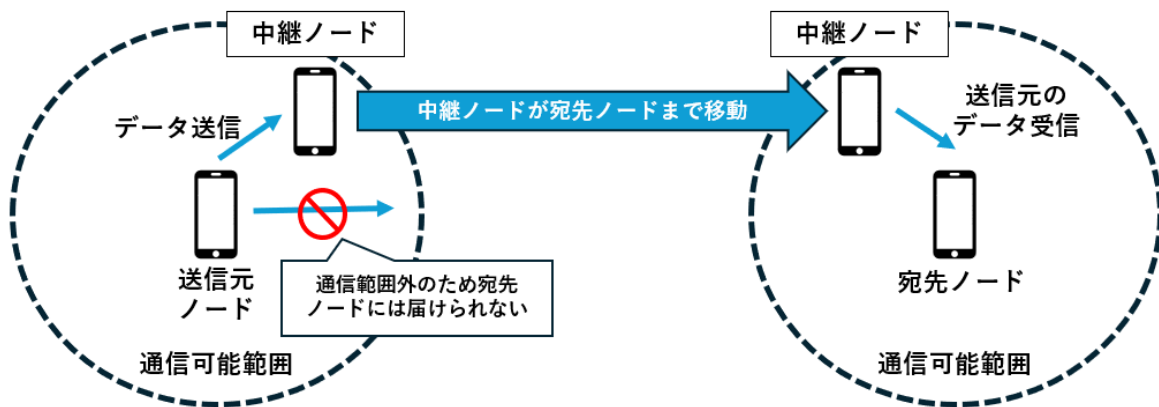


図 2.1 DTN の動作

### 2.1.1 DTN の通信メカニズム

DTN は TCP/IP の階層モデルにバンドル層 (Bundle Layer) および吸収層 (Convergence Layer) を定義することで通信を実現している [8]。バンドル層はアプリケーション層とトランスポート層の間に位置し、永続ストレージを保持することで、送信されてきた可変長のデータ (バンドル) を一旦蓄積し、他の端末と通信可能になった時点でデータを転送する役割を担う。転送されたデータは各ノードのバンドル層に蓄積されていく。また、吸収層はバンドル層のインターフェースを変更することなく、異種ネットワーク間の相互接続を実現する役割を果たしている。図 2.2 に DTN 通信でのデータの流れを示す。

## 2.2 Publish/Subscribe モデル

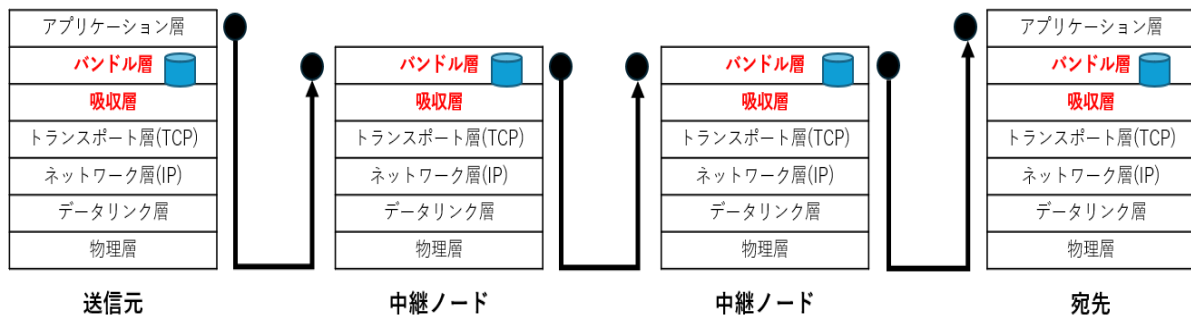


図 2.2 DTN におけるデータの流れ

### 2.1.2 DTN の経路制御手法

DTN の経路制御手法には複数の方式が存在するが、本研究ではその中でもデフォルトの通信手法である Epidemic ルーティングに着目する。Epidemic ルーティングは、メッセージを保持するノードが通信可能範囲内に存在するすべてのノードに対して複製メッセージを送信するシンプルな手法であり、メッセージを受信したノードも同様にデータを保持したまま移動し、通信可能となった他ノードへ複製を繰り返す [9]。これにより、複製されたメッセージはネットワーク全体に拡散され、少なくともいずれかが宛先へ到達する可能性が高く、宛先までの遅延時間は他の方式と比較して最も短い。一方で、1つのデータが大量に複製されるため、バッテリーやバッファなどの資源を多く消費するという課題がある。

## 2.2 Publish/Subscribe モデル

Publish/Subscribe モデルは情報の送信者 (Publisher) と情報の受信者 (Subscriber) を完全に分離する、非同期なメッセージング・パラダイムである [10]。従来のクライアント-サーバーモデルに代表される Request-Response 型通信が「宛先指定型 (Address-centric)」であるのに対し、Pub/Sub モデルは「データ中心型 (Data-centric)」の通信形態をとる。

本モデルにおいて、Publisher はメッセージの送信先を特定のノードとして指定するのではなく、メッセージの内容や属性に関連付けられた形式で情報を公開する。一方、Subscriber は、特定の情報に対する自身の関心 (Interest) をシステムに登録しておく。システムは、この情

## 2.2 Publish/Subscribe モデル

報の供給と需要を仲介（Broker）し、適切な宛先へ情報を配送する。送信者と受信者がエンドツーエンドで IP 通信を行う方式（図 2.3）では、各データを通信媒体ごとに個別に送信する必要があり、システム構成が複雑になりやすい。そのため、接続先が増加した場合には設定や管理の負担が大きくなり、拡張性に乏しいという課題が生じる。一方で、Pub/Sub モデルを導入した方式（図 2.4）では、これらの問題を解消できる。

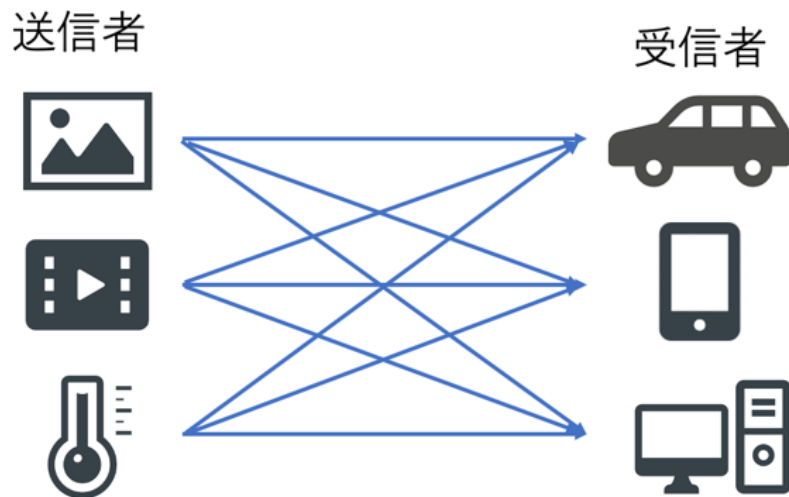


図 2.3 エンドツーエンドの IP 通信

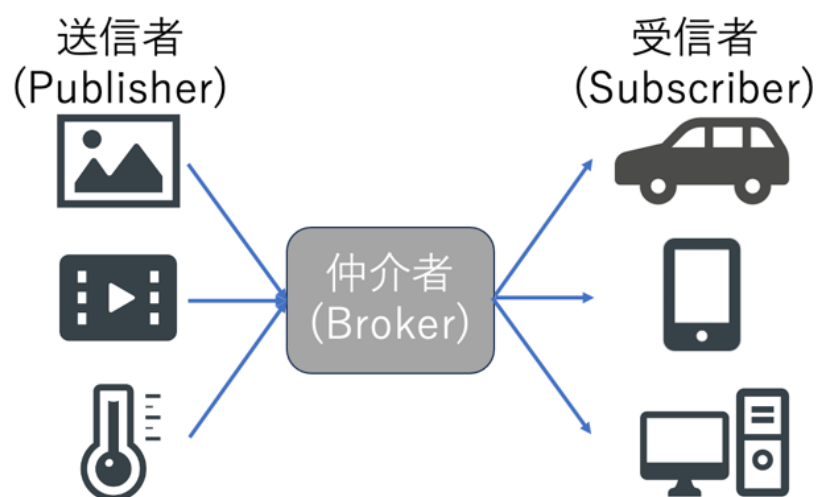


図 2.4 Pub/Sub モデルを使った場合の通信

## 2.2 Publish/Subscribe モデル

この抽象化により、通信の主体となるノード間には直接的な依存関係が排除され、システム全体の柔軟性と拡張性が大幅に向上する。

Pub/Sub モデルは Eugster らの「三つの次元における疎結合 (Decoupling)」の実現によって定義される [11].

### 1. 空間的疎結合

通信の両当事者は IP アドレスやポート番号などの識別子などによって互いの存在を認識する必要がない。Publisher は誰が受信するかを知らず、Subscriber は誰が送信したかを知る必要がない。これにより、ノードの動的な参加や脱退、構成変更に対して高い耐性を持つ。

### 2. 時間的疎結合

通信の両当事者が同時にオンラインである必要はない。Publisher がメッセージを送信した瞬間に Subscriber がアクティブである必要はなく、またその逆も同様である。メッセージ指向ミドルウェアなどの Broker がメッセージを一時的に保持・蓄積することで非同期な情報交換が可能となる。

### 3. 同期疎結合

通信処理が実行ユニットの制御フローをブロックしない。Publisher はメッセージを発行した後、受信側からの応答を待たずに即座に自身の処理を続行できる（非同期送信）。同様に、Subscriber は別の処理を実行しながら、メッセージの到着をコールバック関数やイベントハンドラを通じて通知される。

## 2.2.1 Topic-Based Publish/Subscribe モデル

Topic-Based Publish/Subscribe モデルはメッセージのルーティングを「トピック (Topic)」と呼ばれる一意の識別子に基づいて行う方式である。本モデルにおいて、ネットワークを流れる各メッセージは特定のトピックに論理的に分類され、Publisher はメッセージ送信時にそのトピック名をメタデータとして付与する。

## 2.2 Publish/Subscribe モデル

Subscriber は特定のトピックに対する購読 (Subscription) を Broker に登録する。Broker は到着したメッセージのトピック名と保持している購読リストを照合し、一致する Subscriber に対してのみメッセージを配信する。このプロセスにおいて、Broker はメッセージの内容 (ペイロードという) を解析する必要がなく、トピック名という外部属性のみに基づいて転送判断を行う点が特徴である。図 2.5 に Topic-Based Pub/Sub モデルの通信の例を示す。

多くの実装では、トピックは単なるフラットな文字列ではなく、階層構造を持つ。例えば、”sensors/building1/floor2/temperature” のようにスラッシュなどの区切り文字を用いたパス形式で記述される。

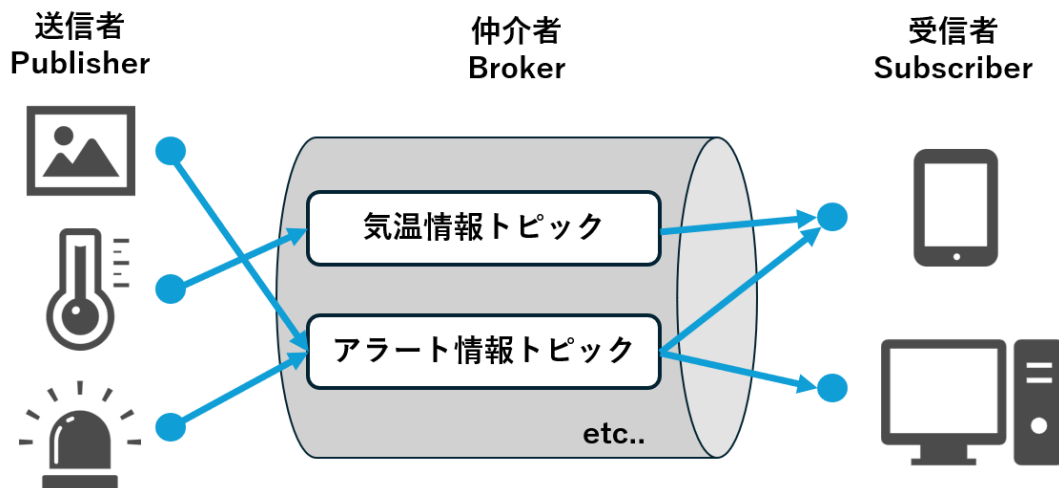


図 2.5 Topic-Based Pub/Sub モデルの通信

この階層構造により、以下の柔軟な購読が可能となる。

### 1. 完全一致 (Exact Match)

特定の単一ノードのデータのみを購読する。

### 2. ワイルドカード

sensors/+/floor2/# のような特殊記号を用いることで特定の階層以下の全トピックや、中間階層が異なる複数のトピックを、一括して購読対象に含めることができる。これにより、動的に増加するデバイスを効率的に管理できる。

Topic-Based Pub/Sub モデルの主な利点としては以下の通りである。

## 2.2 Publish/Subscribe モデル

### 1. 低計算負荷・高スループット

トピックベースの方式は文字列一致やハッシュ参照のみで情報を照合できるため CPU 負荷が低くなり、低遅延が求められるリアルタイム処理や大量メッセージ処理において高いスループットを実現できる。

### 2. 実装の容易さと相互運用性

Publisher と Subscriber はトピック名のみを共有することで運用することができる。このため、異なる言語やプラットフォーム間でも相互運用性を確保しやすく、MQTT などの標準化も容易である。

### 3. 論理的なリソース分離

トピック階層や接頭辞を用いることにより、同じシステム上でもアプリケーションやユーザごとにデータを論理的に分離することができ、トピック単位でのアクセス制御が可能となる。

### 4. 高いスケーラビリティ性

トピック単位で処理を分割できるため、Broker のクラスタリングや負荷分散が容易であり、システム規模の拡大に柔軟に対応できる。

## 第 3 章

# 関連研究

### 3.1 災害時を考慮した DTN の実用に関する研究

災害時における DTN の実用化に関する先駆的な研究として、東北大学にて提案された「スマホ de リレー」が挙げられる [12][13].

研究の背景には、東日本大震災において既存の通信インフラが広範囲にわたり損壊し、被災者の安否確認や救助要請が困難を極めたというものがある。従来の集中管理型ネットワークの脆弱性が露呈した一方で、多くの被災者が通信機能を備えたスマートフォンを保持していたことに着目し、基地局や電源供給に依存せず、被災者が所有する端末のリソースを相互に活用することで情報の伝達を維持するインフラフリーな通信手段の確立を目的として着手された。

特別なハードウェアを追加することなく、汎用的なスマートフォン上で動作するアプリケーションとして DTN 技術を実装した。仙台市などでの大規模なフィールド実証実験を通じて、端末を携行する利用者の移動と、Wi-Fi や Bluetooth を用いた端末間通信 (D2D) の組み合わせにより、インフラ途絶環境下でもメッセージが目的地やインターネット接続点 (ゲートウェイ) まで到達することを実証した。

特に実用面での成果として、ICT カーや小型無人航空機中継システムなどの耐災害 ICT システムとの相互接続実験を行い、自動車、ドローン、無人航空機といった移動体への搭載実験にも成功した。さらに、その過程で特許出願を行うとともに、国連下部組織である ITU-T や AWG へ寄書を提出するなど、国際標準化活動にも貢献した。2014 年頃からは、スマートフォンアプリケーション向けに特化した通信制御技術の実現を目的とした第 2 世代の研究開発

### 3.2 Pub/Sub モデルに基づく DTN 通信手法に関する研究

が本格化し、2015 年には、ほぼ完成したベータ版の「スマホ de リレー」が東北大学総合防災訓練における実証実験で活用された。本研究は、理論上の概念であった DTN を、実際の災害シナリオと一般的なモバイル端末の制約条件に即して実装・検証した点で、災害時通信研究における重要なベンチマークとなっている。

## 3.2 Pub/Sub モデルに基づく DTN 通信手法に関する研究

本研究に関連する DTN と Pub/Sub モデルを組み合わせに着目した研究について述べる [5].

ネットワークの分断が頻発し、安定した通信経路の確保が困難な DTN 環境において、情報のトピックに基づいた柔軟な通信を可能にする Publish/Subscribe モデルの適用が注目されている。Abe らは、従来のホストアドレス依存のルーティングが抱える名前解決の困難さを克服するため、各ノードが Publisher, Subscriber, およびメッセージを中継するイベント Broker の全機能を備えるルーティング手法を提案した。

本手法の独自性は、単なる購読トピックの一致確認に留まらず、ノード間の接触特性を考慮した動的な転送優先順位制御を導入した点にある。各ノードは自身が関心を持つトピックの「購読リスト (Subscription List)」に加え、他ノードとの過去の接触時間や接触間隔の平均値から算出される接触条件指標  $V_{contact}$  を定義する「接触リスト」を保持する。ノード同士が接触した際、この  $V_{contact}$  が大きいノード（通信機会が豊富なノード）には配送確率の高いメッセージを優先的に託し、逆に指標が小さいノードには配送確率の低いメッセージを中継させることで、ネットワーク全体へのメッセージの公平かつ迅速な拡散を図っている。

THE ONE シミュレータを用いた評価の結果、提案された手法は従来の伝染型伝送手法である Epidemic ルーティングや単純な購読ベースの手法 (SBR) と同等の 99 % 以上の高い到達率を維持しつつ、配送遅延を約 80~100 秒短縮することに成功している。また、トピックごとの購読者数の違いによる配送性能のばらつき (標準偏差) も小さく抑えられており、特定の人気トピックに依存しない安定した配信性能が実証されている。このように、ノードの移

### 3.2 Pub/Sub モデルに基づく DTN 通信手法に関する研究

動特性を考慮した優先度制御は、リソースが制限された DTN 環境におけるトピックベース通信の効率を最大化する上で極めて有効なアプローチであると言える。

## 第 4 章

# Pub/Sub モデルに基づく DTN 通信手法

### 4.1 災害時での DTN 通信環境下の問題点

災害時などの不安定なネットワーク環境下で利用される DTN において、従来のルーティング手法や通信モデルには以下の二つの大きな課題が存在する。

#### 1. 情報選択の柔軟性の欠如

既存の DTN 通信モデルである Epidemic Routing では、ノード間で遭遇した際に保持している全データを交換する方式が一般的である。しかし、この方式ではユーザ個別のニーズを考慮した情報の選別が行なわれない。その結果、限られた帯域幅やストレージリソースが、ユーザにとって不要な情報の転送・保持に消費され、ネットワーク全体の輻輳や配信遅延を招く要因となっている。

#### 2. 名前解決の困難性

DTN 環境はノードの移動や電源断によりリンクが頻繁に切断されるため、IP アドレスの動的割り当てや DNS といった既存の集中管理型インフラの利用を前提とした名前解決が極めて困難である。送信者が特定の受信者のホストアドレスを事前に特定し、通信を確立することはあまり現実的ではなく、エンドツーエンドの通信を困難にする障壁となっている。

## 4.2 Topic-based Pub/Sub モデルの導入

上述の課題を解決するため、本研究では DTN に Topic-based Pub/Sub モデルを統合した情報伝達システムを取り上げる。本モデルの導入により、従来のホスト中心の通信からコンテンツ中心の通信へと転換することで以下のように問題点を解決することができると思われる。

### 1. 購読による選択的受信による柔軟性

このシステムでは、ユーザ（ノード）はあらかじめ自身の関心に対応するトピックを購読する。情報はトピックごとに識別され、各ノードは購読しているトピックに関連するデータのみを選択的に受信・中継する。これにより、不要なトラフィックの抑制とストレージの効率的な利用が可能となり、災害時のようなリソース制約の厳しい環境下でも、必要な情報を優先的に配信できる柔軟性を確保する。

### 2. トピック識別子を用いたインフラフリーな名前解決

Pub/Sub モデルでは、通信の識別をホストのアドレスではなくトピック名に基づいて行う。送信者は受信者の IP アドレスや所在地を特定する必要はなく、トピックを指定して情報を送信するだけでよい。この名前（トピック名）に基づいたデータ転送は、既存の DNS などのインフラに依存しないため、トポロジが動的に変化する DTN 環境においても、宛先の特定に制約されない通信を実現する。

## 4.3 Pub/Sub モデルに基づく DTN 通信の動作

Pub/Sub モデルに基づく DTN 通信におけるメッセージの生成から到達までのプロセスは、各ユーザが Publisher, Broker, Subscriber の機能を備えており、その役割を動的に切り替えることで実現される。具体的な動作フローを以下に示す。

### 4.3 Pub/Sub モデルに基づく DTN 通信の動作

#### 1. メッセージの生成と公開 (Publisher の動作)

あるユーザ (ユーザ 1) が特定のトピックに関するメッセージを生成した際、ユーザ 1 は Publisher として動作する。生成されたメッセージは即座に送信されるのではなく、自身のローカルストレージ (バッファ) に一時的に保存され、他ユーザとの接触を待つ。

#### 2. 接触とメッセージの中継 (Broker の動作)

ユーザ 1 が通信範囲内に他のユーザ (ユーザ 2) を検知すると、両者は購読情報の交換を行う。この際、ユーザ 2 は Broker として動作し、ユーザ 1 からメッセージを受信する。

#### 3. トピックに基づく配送 (Subscriber への到達)

メッセージを保持して移動するユーザ 2 が、当該トピックを購読しているユーザ 3 の通信圏内に入ると、トピックの判定が行なわれ、ユーザ 3 は Subscriber として購読しているメッセージを Broker であるユーザ 2 から受信する。

以上の動作フローを図 4.1 に示す。

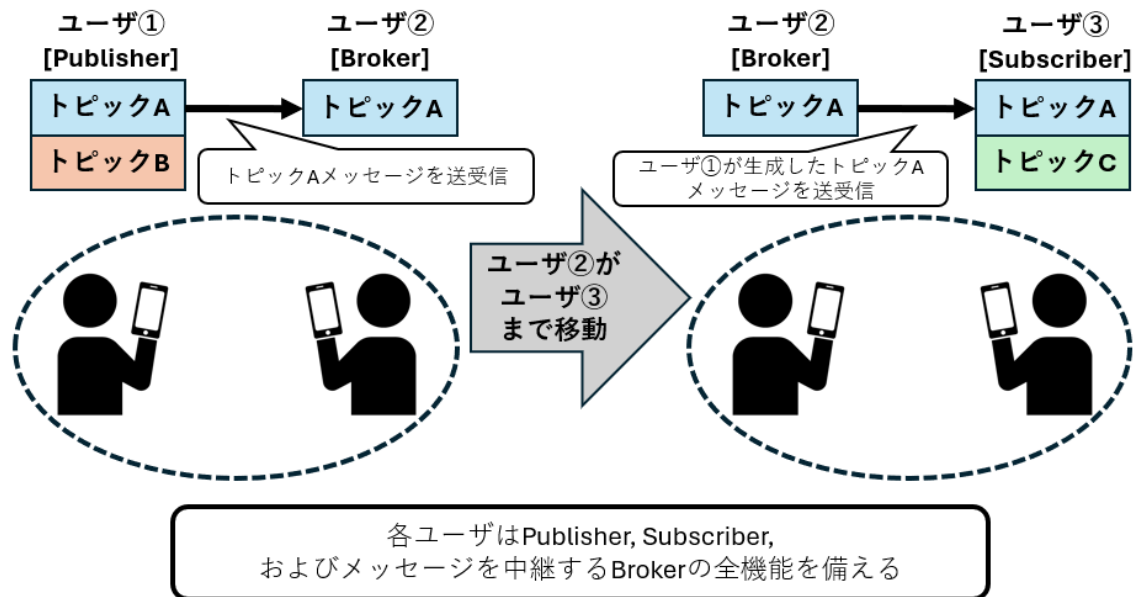


図 4.1 Topic-based Pub/Sub モデルに基づく DTN 通信の動作

#### 4.4 ユーザの購読トピックが増減, 変化しない場合

また, 以下の条件を満たすメッセージはやりとりしない.

- ユーザが購読していないメッセージの場合
- 全く同じトピックメッセージを所持している場合
- TTL が切れている古いメッセージの場合

#### 4.4 ユーザの購読トピックが増減, 変化しない場合

Pub/Sub モデルに基づく DTN 通信において, 通信期間中各ユーザの情報ニーズが変化しない場合を説明する. これは各ノードが購読しているトピックの数が一定であるため, ノード同士が遭遇した際のトピック照合やトピックメッセージのやりとりを安定して行なうことができる.

このように情報ニーズが固定されている環境では, 生成されたトピックメッセージはそのトピックを購読しているユーザに受信・中継しやすいため, 配信の柔軟性を確保することが容易である. そのため, DTN 環境ではノードのバッファ容量や通信帯域といったリソースが限られているが, 関心のないメッセージを無駄に複製・転送する処理を抑えることができる.

その結果, ネットワーク全体の混雑を防ぎつつ, 必要な情報だけを目的の Subscriber へ確実に届けることが可能となる. 情報の取捨選択が自律的に行われ, 限られたリソースを有効に活用した高効率かつ低負荷なデータ配信基盤を実現できると考える.

#### 4.5 ユーザの購読トピックが増減, 変化する場合

前節で述べたような情報ニーズが一定である環境とは異なり, 特に災害発生後の被災現場ではユーザが必要とする情報や関心の対象は時間の経過とともに動的に変化する. 内閣府の復旧・復興ハンドブック [14] では, 発災直後の初動段階では, 自身の安全確保や家族の安否確認, 最寄りの避難所に関する情報など, 緊急性の高い情報へのニーズが中心となる. そして, 復旧段階に移行するにつれて, 食料や飲料水といった物資供給情報, 仮設住宅の申請手続き, 医療機関の稼働状況など, 生活維持や復旧支援に関する情報へと関心が多様化・変化して

#### 4.5 ユーザの購読トピックが増減, 変化する場合

いく.

このような求められる情報が劇的に変化していく環境では, 各ユーザが保持する購読トピックは通信期間中に不定期に更新され, 購読するトピックの数自体も増減する. しかし, Pub/Sub 型 DTN ルーティング手法に着手している関連研究 [5] では, 各ノードの購読トピック数が固定であることを前提として設計されており, 通信の途中で情報ニーズが変化する状況を十分に考慮していない. また, 想定しているトピック数も 3 個と限定的であり, 大規模災害時に発生する多様かつ複雑な情報ニーズを十分に反映できているとは言い難い.

このような状況下で Pub/Sub ルーティングを適用した場合, 主に配信遅延の増大および不達が大きな問題となる. 以下に問題が生じる原因を示す.

##### 1. トピックメッセージごとの配送率, 遅延の差

各ユーザが購読トピックの増減・変化を行なっていくにつれ, トピックごとに購読しているユーザの数に差が大きくなる. 例えば, ユーザの多くがトピック A を購読しているならば, 中継されやすいため, そのトピック A のメッセージの配送率, 遅延時間ともに良くなる. しかし, トピック B があまり購読されていない場合, その少ないユーザの中で中継しなければいけないため, 配送率, 遅延時間ともに悪くなってしまう. トピック数が 30, ユーザの購読トピック数が 15 のと値が固定の場合でも購読の差 (需要) は存在すると考えるが, ユーザの購読トピックが増減, 変化する場合は時間が進むにつれ, トピックの購読の差は変化し続けるため, 配送がより困難となる.

##### 2. 最適な配送経路が存在しない

かつてトピック A の Subscriber に頻繁に遭遇していたユーザは「トピック A を運ぶのに適したユーザ」と見なされますが, Subscriber の購読がトピック B に変化, または解除した瞬間, そのユーザに対する中継価値は事実上ゼロになってしまう. また, ユーザが新たに特定のトピックを購読した場合でも, ネットワーク内の他の中継を担うユーザ (Broker) がそのトピックメッセージが求められていることを即座に把握できず, 中継されるまで非常に時間がかかってしまう. このように, ユーザの関心が増減・変化すると,

#### 4.5 ユーザの購読トピックが増減, 変化する場合

あるメッセージを配送・中継するための最適なユーザ, 経路が存在しなくなってしまう.

ユーザの購読トピックが増減, 変化する場合のメッセージのやりとりの動作を図 4.2 に示す.

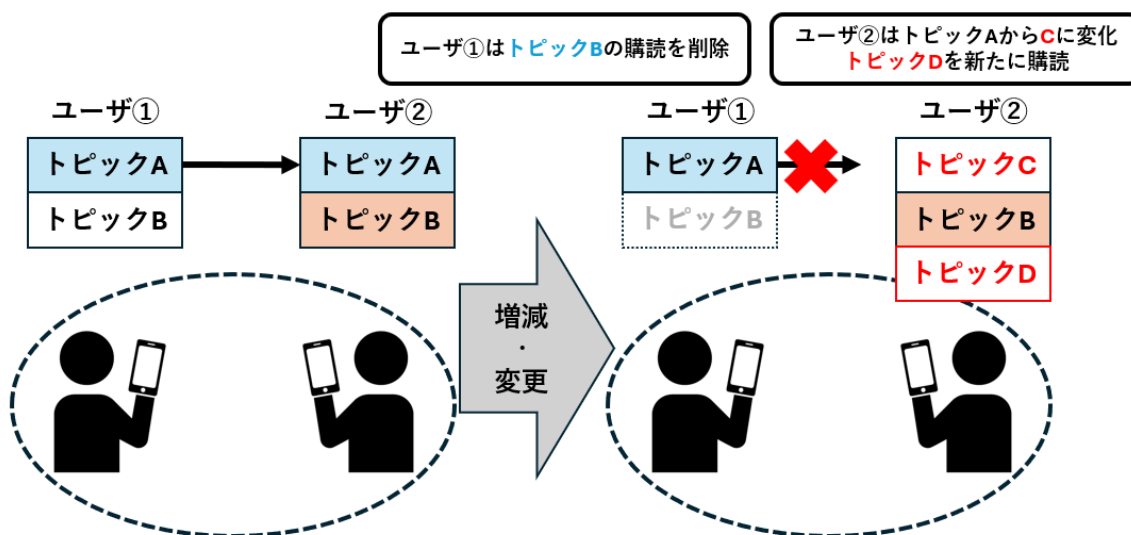


図 4.2 ユーザの購読トピックが増減, 変化する場合の動き

以上より, メッセージが適切に中継されず, 必要な情報がユーザに届くまでに大きな遅延が生じる, あるいは最終的にメッセージが届かず破棄される可能性がある. 本提案手法では被災現場のように状況が刻々と変化 (購読トピックの増減・変化) する環境に対応するためには, 多種多様なトピックが存在する環境下においても, 高いメッセージ配送率と低遅延性を両立することを目指す.

## 第 5 章

# 提案手法

前章で示した問題に対し、本研究では、ユーザの過去の購読履歴を利用して将来必要となる可能性が高いトピックを事前に予測し、メッセージを先行的に配送・保持するルーティング手法を提案する。本手法の特徴は、特定のユーザ単位で予測を行うのではなく、ネットワーク内で遭遇した複数ユーザの購読履歴を集計して利用する点にある。これにより、個人の一時的な行動変化に起因するノイズを抑え、ネットワーク全体における情報ニーズの傾向（トレンド）を安定的に把握することが可能となる。

以下に、提案手法におけるメッセージ管理および転送の具体的な動作アルゴリズムを示す。

### 1. 履歴情報の交換と集計

ノード同士が遭遇した際、各ノードは現在購読しているトピックメッセージの交換に加え、自身の「過去の購読変化履歴」を互いに交換・集計する。これにより、各ノードは自律的にネットワーク内におけるトピック需要の変遷を学習する。

### 2. トピック遷移確率の算出

集計された履歴情報に基づき、各トピックの重要度を確率モデルとして算出する。具体的には、現在選択されているトピックを  $j$  とし、次にトピック  $i$  が選択された回数を  $C_{ji}$  としたとき、トピック  $j$  から  $i$  への遷移確率（将来的な情報ニーズの重要度）  $P_{ji}$  を以下の式で定義する。

$$P_{ji} = \frac{C_{ji}}{\sum_{k=1}^n C_{jk}}$$

ここで、分母の  $\sum_{k=1}^n C_{jk}$  は、現在のトピック  $j$  から他のトピック（自身を含む）へ変化した回数の合計を表す。例えば、過去の履歴を集計した結果、「避難所情報」というト

ピックから、「避難所情報」が1回、「物資情報」が3回、「医療情報」が2回と購読変化されていた場合、変化回数の合計は6回となる。「避難所情報」をトピックA、「物資情報」をトピックB、「医療情報」をトピックCとしたときのユーザ購読履歴を図5.1に示す。このとき、集計結果をもとにし確率モデルを用いて算出した場合、「避難所情報」は0.17、「物資情報」は0.5、「医療情報」は0.33の確率を持つトピックとして扱う。図5.1の購読履歴をもとに確率に算出したものを図5.2に示す。

変化後購読トピック				
	トピックA	トピックB	トピックC	
変化前	トピックA	1	3	2
	トピックB	1	0	5
	トピックC	2	2	2

図 5.1 ユーザの購読履歴

変化後購読トピック				単位	%
	トピックA	トピックB	トピックC		
変化前	トピックA	17	50	33	
	トピックB	17	0	83	
	トピックC	33	33	33	

図 5.2 集計した購読履歴をもとに確率に算出

### 3. 予測に基づく優先的キャッシング

一定時間の学習期間を経た後、算出された確率  $P_i$  が高いトピックを将来的な情報ニーズが高いと判断し、それらのメッセージを優先的にキャッシュする。

予測に基づいてキャッシュされたメッセージは、即座に通信帯域を占有して転送されるのではなく、現在購読中のトピックメッセージの送受信が完了した後の空き帯域を用いて転送される(図5.3)。これにより、現時点で必要とされる情報の確実な配信を維持しつつ、将来のニーズ変化に備えたメッセージ配置が可能となる

本方式では、現時点では需要の少ないトピックであっても、将来の需要を予測してユーザが

事前にメッセージを保持する。その結果、実際にニーズが発生した際の配信遅延を大幅に短縮できるとともに、効率的な情報配信を実現する。

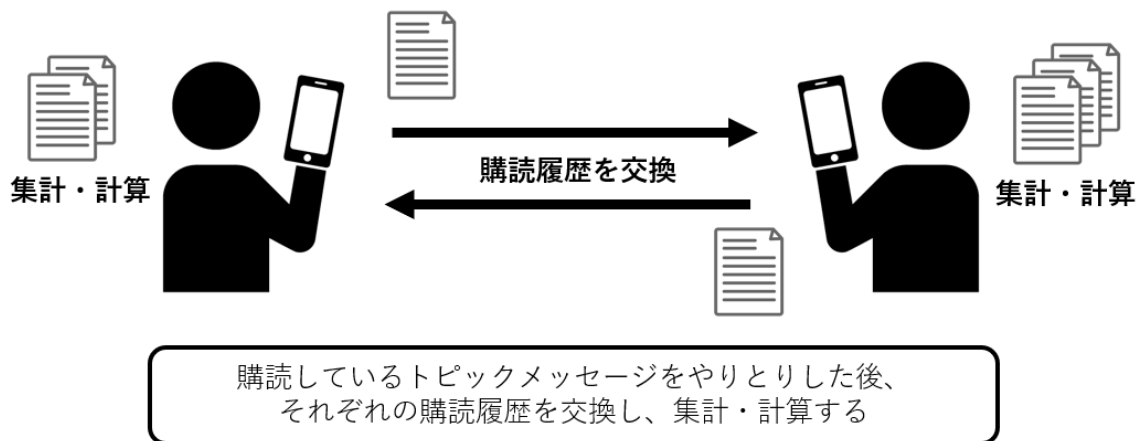


図 5.3 購読履歴のやりとり

# 第 6 章

## 評価

### 6.1 THE ONE シミュレータ

本研究では、DTN 環境における通信方式の性能を評価するため、THE ONE (Opportunistic Network Environment) シミュレータ [15] を用いて実験を行なった。THE ONE シミュレータは、移動体ノード間の断続的な通信を想定したネットワークシミュレータであり、災害時通信やモバイル環境など、常時接続が保証されない通信環境を再現可能である。

THE ONE シミュレータでは、各ノードの移動モデル、通信範囲、通信機会を設定することで、ノード同士が一定時間のみ通信可能となる状況を詳細に模擬できる。また、メッセージはノード内のバッファに一時的に蓄積され、通信可能となった際に他ノードへ転送されるため、DTN 特有のストア・アンド・フォワード方式の通信動作を忠実に再現できる。THE ONE シミュレータにおけるノード配置や通信状況の例として、デフォルト設定時の GUI 画面を図 6.1 に示す。

さらに、THE ONE シミュレータは Epidemic ルーティングをはじめとする各種 DTN ルーティング方式を実装しており、配送率、遅延、オーバーヘッドなどの指標を用いた性能評価が可能である。このため、比較実験や新たに提案するルーティング方式・通信制御方式の有効性検証に適している。

以上の理由から、本研究では DTN 環境下における提案手法の性能を定量的に評価するため、THE ONE シミュレータを採用した。

## 6.2 シナリオ

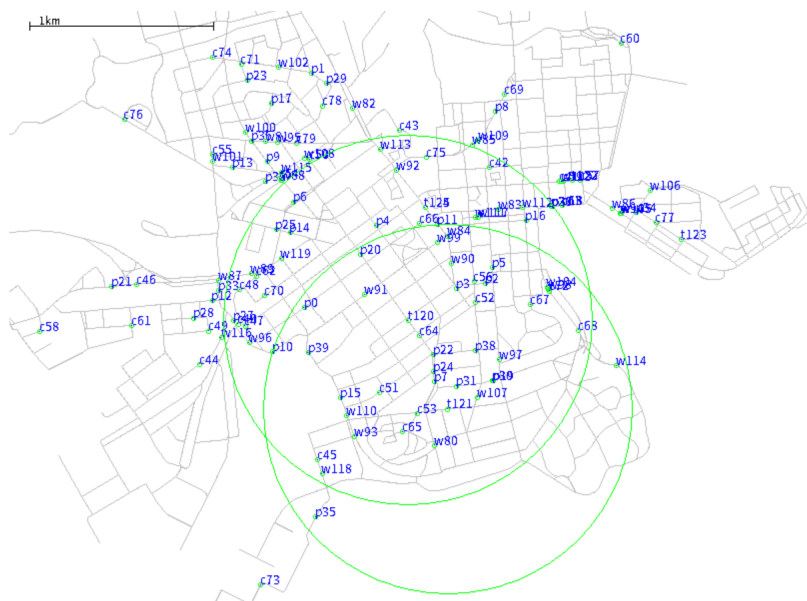


図 6.1 THE ONE シミュレータ GUI(デフォルト)

## 6.2 シナリオ

想定シナリオとして、大規模災害発生後に形成される小規模の避難区域内を想定する。

以下の表 6.1, 表 6.2 はシミュレーションで用いたパラメータである。

表 6.1 シミュレーションパラメータ

パラメータ	値
マップサイズ	200m × 200m
ユーザ数	100 人
メッセージ送信可能距離	10m
メッセージ送信量	2Mbps
生成メッセージサイズ	500K ~ 20MB
ユーザの移動速度	2.6 ~ 5.4km
ユーザ待機時間	0 ~ 120 秒
バッファサイズ	8GB
TTL	600 秒

## 6.2 シナリオ

表 6.2 ユーザの購読トピックが変化する場合のパラメータ

パラメータ	値
トピック数	30
初期購読トピック数	10
購読するトピック数の幅	5 ~ 30
購読トピック変化・増減時間	120 ~ 300 秒
購読トピック数上限値・下限値	5, 30

本実験におけるシミュレーションパラメータは、近年のスマートフォンの性能向上を踏まえて設定した。通信速度については、一般的に利用されている Bluetooth 5.0 を想定し、その最大通信速度である 2Mbps と定義した。また、端末の記憶容量の増大を考慮し、バッファサイズは十分に確保できるものとした。さらに、取り扱うデータの種類については、従来想定されてきたメール、写真、音声、ファイル共有、Web コンテンツに加え、近年の情報共有形態を反映し、最大約 30 秒程度の動画データも対象に含めた。また、ユーザの移動速度は災害時の避難に関する研究で使用されている値を参照した [16]。

本研究では、大規模災害発生直後の避難所を想定したシミュレーション環境を構築した。具体的には、地域の避難拠点となる学校等の公共施設を通信範囲とし、その拠点内においてユーザ同士が情報をやり取りする「拠点内通信」をモデル化している。本シミュレーションにおけるノード（移動ユーザ）は、一般的な避難者ではなく、その拠点を管理・運営する拠点スタッフを想定している。スタッフは、救護、物資管理、安否確認といった業務に従事するため、施設内の各所（受付、教室、体育館、備蓄倉庫等）を頻繁に往来する。そのため、通常の避難者と比較して高い移動性を持ち、かつ業務上の重要なトピックメッセージを頻繁に送受信する特性を持つ。また、本実験における各ノードのトピック購読数は、最小 5 個から最大 30 個の範囲で動的に変化するように設定した。トピック購読数の下限を 5、上限を 30 とした理由は、避難所運営に従事するスタッフが、職能に応じて複数の情報（救護、物資、運営等）を横断的に収集する実態を模したためである。また、本実験における購読ト

## 6.3 評価項目

ピックの動的な変化や増減については、単純なランダム抽出による変更ではなく、現実的な情報ニーズの偏りを反映させるため、購読傾向に恣意的な設定を導入した。具体的には、各スタッフには特定の役割（医療担当、物資担当等）に応じた「購読しがちなトピック」があらかじめ定義されている。これにより、時間の経過に伴って発生するトピックの変更や増減が、特定の論理的な関連性や需要の傾向を持って推移するように制御し、より実環境に近い動的なニーズの変化を再現した。

## 6.3 評価項目

以下の2つを評価項目として、実験を行なう。

### 1. トピック平均メッセージ配送率

生成された各トピックメッセージを受信した購読ユーザの割合

### 2. 平均トピックメッセージ遅延時間

各トピックメッセージの生成時から到着時までの平均時間

メッセージ生成時間が長くなると、各メッセージの伝搬時間も長くなるため、配送率の向上と遅延時間が短縮される。それを踏まえて、メッセージ生成時間を1,2,3,4,5,6分ごとに検証を行なった。

メッセージ生成回数を100回とする。そのため、シミュレーション時間（シミュレーター内の時間）はメッセージ生成時間が1分であれば、100分、2分であれば200分となる。

## 6.4 比較項目

主に以下の2つの比較を行ない評価する。

### 1. 購読トピック数が変化しない場合

DTNの標準ルーティング方式であるEpidemicルーティングと購読トピックが固定のPub/Subルーティングを比較する。各ユーザの購読トピック数を20とする。

## 6.5 結果・考察

### 2. 購読トピック数が変化する場合

不定期的な時間に購読トピックの変化, 数が増減する環境において、将来のニーズを予測してメッセージをキャッシュする『提案手法』を適用した Pub/Sub 型 DTN ルーティングと、購読情報の変化を考慮せず、その時点で購読しているトピックのみを送受信する従来の Pub/Sub 型 DTN ルーティングの比較を行なう。

## 6.5 結果・考察

### 6.5.1 Epidemic ルーティングとトピックが不変の Pub/Sub ルーティングとの比較

実験結果は以下の図 6.2, 図 6.3 となった。

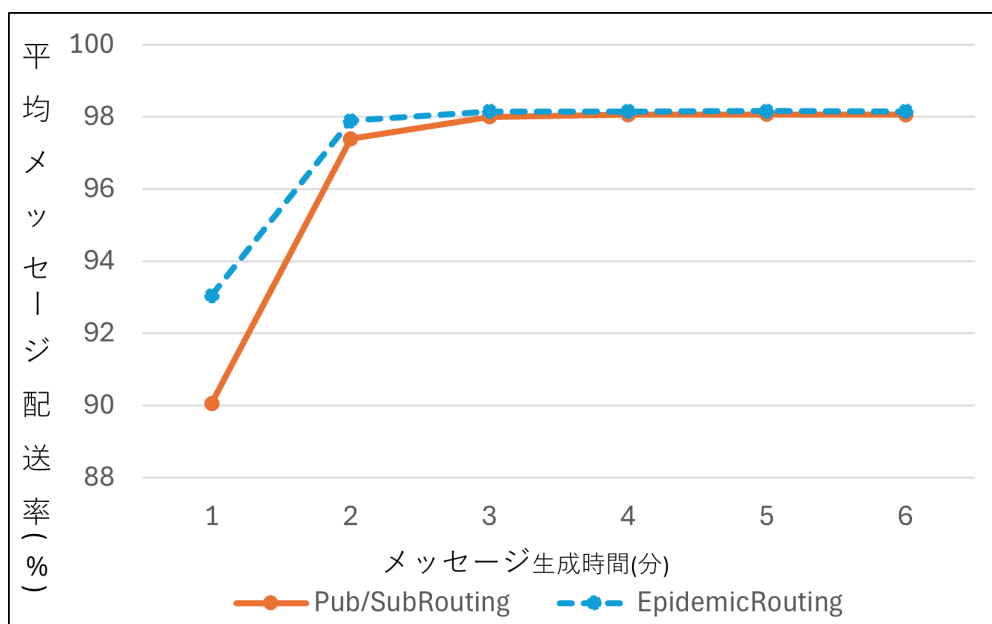


図 6.2 購読トピック数が変化しない場合の平均トピックメッセージ配送率

## 6.5 結果・考察

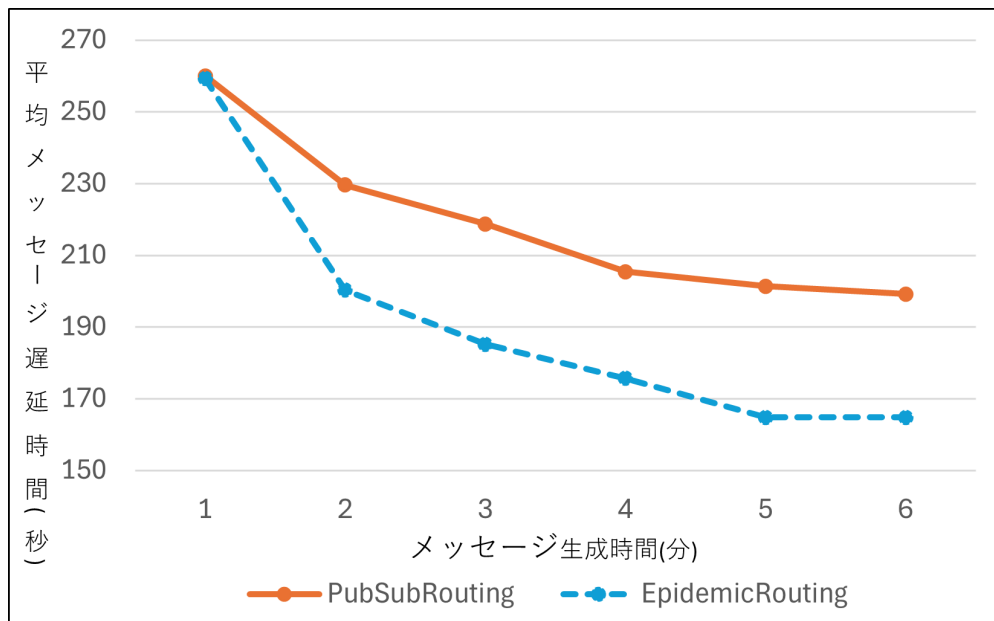


図 6.3 購読トピック数が変化しない場合の平均トピックメッセージ遅延時間

平均トピックメッセージ配送率では、メッセージ生成間隔 1 分において、Epidemic ルーティングと Pub/Sub ルーティングはそれぞれ 93.05 %と 90.06 %であり、Epidemic ルーティングが約 3 ポイント上回った。しかし、生成間隔 2 分では両者とも 97 %台に達し、その差は 0.5 ポイントに縮小した。生成間隔 3 分以降では、両ルーティング方式ともに 98 %前後で安定し、配送率の差はほぼ見られなくなった。

平均トピックメッセージ遅延時間において、メッセージ生成間隔 1 分では、両方式ともに約 260 秒の遅延を示し、ほぼ同等であった。しかし、生成間隔が長くなるにつれて両者の差が顕著になり、生成間隔 6 分では、Epidemic ルーティングが 164.81 秒であるのに対し、Pub/Sub ルーティングは 199.18 秒と、約 34 秒の差が生じた。全体として、Epidemic ルーティングの方が遅延時間が低い。

配送率に関して、Pub/Sub ルーティングは、Epidemic ルーティングとほぼ同等の性能を達成した。特に、メッセージ生成間隔が 3 分以降では、両者の配送率の差はほとんど見られなくなった。この結果は、Pub/Sub 方式が興味関心に基づく選択的配送により必要なノードへ効率的にメッセージを届けられることを示している。さらに、生成間隔が長いほど、ネットワーク内でのメッセージ伝播に十分な時間が確保され、目的のトピック購読者への到達が十分に

## 6.5 結果・考察

実現されるためだと考えられる。メッセージ生成間隔 1 分において,Epidemic ルーティングの配送率がわずかに高かった理由は,Epidemic ルーティングがすべてのノードにメッセージを配送する戦略を取るため,短時間でより広範囲にメッセージを拡散できることにあると推測される。一方,Pub/Sub ルーティングは購読者のみを対象とするため,初期段階では配送経路の確立に時間を要する可能性がある。しかし,生成間隔が長くなると,この差は解消され,選択的配送の効率性が発揮される。

遅延時間に関しては,Epidemic ルーティングがより優れた性能を示した。これは,Epidemic ルーティングが出会ったすべてのノードにメッセージを複製するため,多数の配送経路が並行して形成され,最短経路でのメッセージ到達が実現されやすいためである。対照的に,Pub/Sub ルーティングは購読者への選択的配送を行うため,配送経路が限定され,結果として平均遅延時間が長くなる傾向がある。ただし,本実験ではバッファサイズを 8GB と潤沢に設定しているため,Epidemic ルーティングの欠点である大量のメッセージ複製によるバッファ枯渇の問題が顕在化していない。リソース制約が厳しい環境では,Pub/Sub ルーティングの選択的配送による効率性がより重要になると考えられる。総合的に,Pub/Sub ルーティングは配送率において Epidemic ルーティングと同等の性能を達成しつつ,トピックに基づく選択的配送により,将来的なスケーラビリティとリソース効率の面で優位性を持つことが示唆された。

### 6.5.2 トピックが不定期的な時間に変化,購読数が増減する場合での Pub/Sub ルーティングに提案手法を適用した場合とそうでない場合での比較

実験結果は以下の図 6.4, 図 6.5 となった。

## 6.5 結果・考察

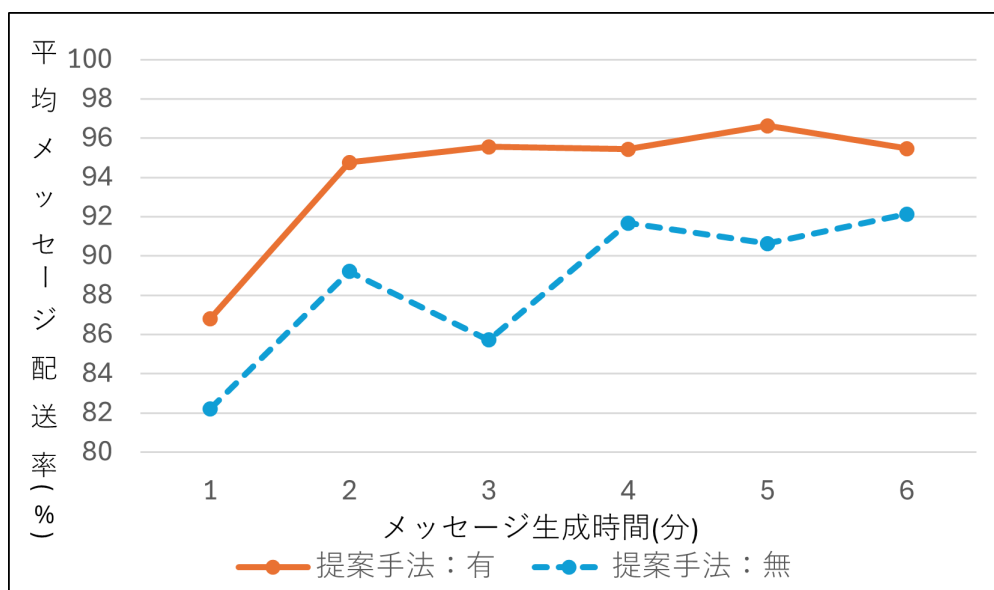


図 6.4 購読トピック数が変化する場合の平均トピックメッセージ配送率

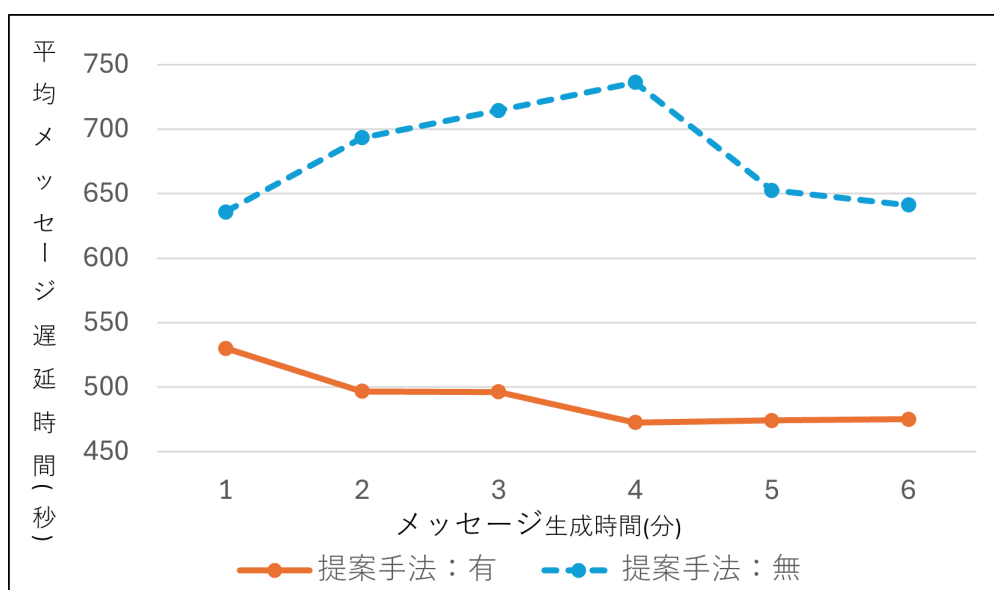


図 6.5 購読トピック数が変化する場合の平均トピックメッセージ遅延時間

平均トピックメッセージ配送率では、提案手法: 無の場合、メッセージ生成間隔 1 分で 82.22 %、6 分で 92.14 % と、購読トピック数が変化しない場合の Pub/Sub ルーティングと比べて全体的に低い配送率を示した。注目すべき点として、生成間隔の増加に伴う配送率の向上が不安定であり、2 分で 89.21 %、3 分で 85.72 % と一旦低下するなど、変動が大きい結果となった。一方、提案手法: 有の場合、生成間隔 1 分で 86.8 %、6 分で 95.47 % と、すべての生成

## 6.5 結果・考察

間隔において提案手法: 無を上回った. 配送率の向上幅は約 3~10 ポイントであり, 特に生成間隔 3 分では 9.84 ポイントの差が見られた. また, 提案手法: 有では生成間隔の増加に伴って配送率が比較的安定して向上する傾向が確認された.

平均トピックメッセージ遅延時間では, 提案手法: 無の場合, 遅延時間は 635.9 秒から 741.47 秒の範囲で大きく変動し, メッセージ生成間隔が長くなっても遅延が短縮されるという一般的な傾向は見られなかった. それだけでなく, 生成間隔 3 分で 714.47 秒, 4 分で 736.13 秒と, 遅延が増加する現象も観測された. 対照的に, 提案手法: 有の場合, 遅延時間は 530.02 秒から 472.65 秒へと比較的安定して減少し, 提案手法: 無と比較して約 100 260 秒の短縮を実現した.

提案手法により, 平均トピックメッセージ配送率が向上し, 平均トピックメッセージ遅延時間が短縮された. この性能向上は, 提案手法の有効性を示していると考ええる.

提案手法: 無の場合, 刻々と購読トピックが変化する動的な環境において, 配送率と遅延時間の両方で不安定な結果となった. 通常, メッセージ生成間隔が延びると, ネットワーク内のメッセージ伝播に十分な時間が確保され, トピック不変時のように配送率が徐々に上がり遅延時間が下がるという傾向が期待される. しかし, 本実験ではそのような安定した改善は見られず, 配送率が 85.72 %から 91.68 %へと上下動し, 遅延時間も 600 秒台から 700 秒台へと増加する場合もあった. これは, 購読トピックの変化によって配送経路が頻繁に再構築される必要があり, ノードが接触した時点で相手が必要とするメッセージを保持していない可能性が高まるためである. 特に, ユーザが新たなトピックを購読し始めた直後は, そのトピックのメッセージがまだネットワーク内で十分に伝播していないため, 配送の失敗や遅延が発生しやすいと考える. 本研究では, これらの初期配置や移動シナリオ, トピックの変化パターンを複数回変更して実験を重ねたが, いずれの条件下においても同様の変動傾向が確認された. 通常, こうした評価では複数回の試行結果の平均値を提示することが一般的であると考ええる. しかし, 複数回の試行の平均をとると, 個別のトピック変化タイミングに伴う一時的な性能の変動が平滑化され, 提案手法の強みである「変化に対する対応力」が評価しにくくなる. そのため, 本節では特定のシナリオにおける時系列の挙動を詳細に解析し, トピック

## 6.5 結果・考察

変化の瞬間に提案手法がどのように機能しているかを示した。

提案手法: 有の場合は, メッセージ生成間隔の増加に伴って配送率が比較的安定して向上し, 遅延時間も安定して減少することができた. この安定性した結果は, 提案手法がユーザ全体の購読変化履歴を集計し, 情報ニーズの全体的傾向を把握することで実現できたと考える. さらに, 現在購読しているトピックメッセージを送受信するだけでなく, 予測キャッシュを行う機能が加わることで, 現在のニーズへの対応を優先しつつ, 将来のニーズに備えることにより, 購読変化が発生した際に即座に対応でき, 配送率の向上と遅延時間の短縮に寄与したと考えられる. しかし, トピック購読数が不変の場合と比較すると, 提案手法を用いても遅延時間は大幅に増加している. メッセージ生成間隔 6 分において, 不変の Pub/Sub ルーティングでは 199.18 秒であったのに対し, 提案手法では 475.09 秒と約 2.4 倍の遅延となった. これは, トピック (ニーズ) の変化に伴う配送経路の劇的な変化や増減が影響だと考えられる.

しかし, 提案手法: 無と比較した場合の大幅な性能改善は明確であり, 動的に変化する購読パターンを持つ DTN 環境において, 履歴に基づく予測を行なった情報配信が有効であることが実証された. 特に, 配送率の安定性向上は, ユーザ体験の質を左右する重要な要素であり, 提案手法の実用的価値を示している. 今後は, 予測精度のさらなる向上を行なうことで, 不変環境に近い遅延時間の達成を目指すことが課題となる.

# 第7章

## おわりに

### 7.1 まとめ

本研究では、大規模災害時における通信インフラ途絶下での情報共有を想定し、被災者や支援者の動的な情報ニーズの変化に対応可能な、Pub/Sub モデルに基づく新たな DTN ルーティング手法を提案した。

特に、時間の経過に伴って被災者や支援者の情報ニーズが変化し、購読トピックが不定期に変化・増減する状況に着目し、関連研究 [5] では十分に対応できていない点を課題とした。これらの課題に対し、本研究では、ユーザの過去の購読履歴を基に購読変化の傾向を集計・確率化し、将来の情報ニーズを予測した上でトピックメッセージを事前にキャッシュする、Pub/Sub ベースの DTN ルーティング手法を提案した。本手法により、購読内容や購読数が動的に変化する環境においても、不要な通信を抑制しつつ、必要な情報を効率的に配信できることを目指した。

THE ONE シミュレータを用いた評価実験により、以下の結果を確認することができた。

- 配信性能の向上：提案手法を適用することで、従来のルーティング手法と比較して平均トピックメッセージ配送率を約 3～10 % 向上させることができた。
- 遅延の抑制：平均トピックメッセージ遅延時間を約 100～260 秒短縮し、変化する情報ニーズに対してより迅速な配信が可能であることを確認した。
- 効率的なリソース活用：将来のニーズを予測してキャッシュすることで、不要な通信を抑制しつつ、動的な環境下での効率的かつ安定した情報配信を実現した。

## 7.2 今後の課題

以上の結果から、提案手法は災害時のような不確実かつ動的な環境において、被災者のニーズに即した情報伝達を支援する方法として有効であると言える。

## 7.2 今後の課題

今後の課題として、以下の4点が挙げられる。

1つ目は、予測精度のさらなる向上が必要である。現在の手法では、トピックごとの変化回数を単純に確率化しているが、この方式では時系列的な変化パターンや変化の周期性を十分に捉えられていない可能性がある。より高度な学習手法を導入することで、ユーザの購読変化をより正確に予測し、キャッシュの有効性を高めることが期待される。

2つ目は、時間帯によるニーズの変化を考慮した予測手法の導入が挙げられる。災害時において、ユーザの情報ニーズは時間帯によって大きく変化することが予想される。例えば、朝の時間帯には避難所の開設情報や朝食の配給情報、昼の時間帯には物資の配布情報や復旧作業の進捗情報、夜の時間帯には夜間の安全情報や翌日の予定に関する情報など、それぞれ異なるトピックへの需要が高まると考えられる。これにより、時間帯特有の情報ニーズに対する応答性が向上し、より実用的なシステムの構築が期待できる。

3つ目は、より現実的な移動環境を考慮したシミュレーション評価が必要である。本研究では避難所内での人の移動を想定したシナリオで評価を行なったが、実際の災害時には避難所間の移動や、道路沿いでの移動、建物による通信遮蔽など、より複雑な環境要因が存在する。特に、道路ネットワークに制約された移動パターンでは、ノード間の接触機会や接触頻度が大きく変化するため、提案手法の性能も異なる結果を示す可能性がある。より現実的な都市環境モデルや移動モデルを用いた評価により、提案手法の実環境における有効性を検証し、必要に応じて手法の改良を行なうことが今後の重要な課題である。

4つ目は、避難拠点間での通信の想定である。本研究では、避難拠点内という比較的限定された範囲における「拠点内通信」を想定し、スタッフ間での効率的な情報共有を目的とした評価を行ってきた。しかし、実際の広域災害においては、一つの拠点内での完結した通

## 7.2 今後の課題

信だけでなく、近隣の避難拠点や、自治体の災害対策本部といった外部組織との間での情報連携、すなわち「拠点間通信」の実現が不可欠となる。今後は、本提案手法で培った購読履歴に基づく需要予測アルゴリズムを拡張し、拠点間を移動する車両やドローンなどをデータミュールとして活用することで、断絶された拠点間を跨いでトピックメッセージを効率的に配送する手法について検討する必要がある。特に、拠点ごとに異なる情報ニーズの傾向をどのように集計・共有し、広域的なキャッシュ配置を最適化するかが、今後の重要な研究課題である。

# 謝辞

本研究を進めるにあたり，指導教員ならびに主査である高知工科大学情報学群の横山和俊教授には，多大なるご指導を賜り，心より感謝申し上げます。また，同学コースの高田喜朗教授，松崎公紀教授には副査として本研究をご担当いただき，貴重なご指摘とご助言を頂戴しましたことに深く感謝申し上げます。最後に，同研究室の皆様および友人には，日頃より研究活動の支えと励ましをいただきましたことをここに感謝いたします。

# 参考文献

- [1] 総務省. ”情報通信白書平成 23 年版 第 1 部 東日本大震災における情報通信の状況”. 2011.
- [2] 総務省. ”熊本地震における ict 利活用状況に関する調査結果 (概要)”. 2017.
- [3] 総務省. ”令和 6 年能登半島地震における情報通信の状況”. 2024.
- [4] V. Cerf, et al. ”Delay-Tolerant Networking Architecture,” RFC 4838, 2007.
- [5] Ryosuke Abe, Yoshitaka Nakamura, and Osamu Takahashi: A DTN Routing Scheme Based on Publish/Subscribe Model, International Journal of Informatics Society, VOL.6, NO.2, pp.49-56, 2014.
- [6] S. Burleigh, et al., ”The Interplanetary Internet: A Networked Infrastructure for Space Exploration,” IEEE Computer, VOL.36, NO.8, pp. 37–45, 2003.
- [7] J. P. Macker and M. S. Corson, ”Mobile ad hoc networking and the IETF,” ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, VOL.2, NO.1, pp. 7–9, 1998.
- [8] A. Rumpold, ”Transmission Protocols for Delay-Tolerant Networks,” Seminar FI & IITM, Network Architectures and Services, pp.137–140, 2011.
- [9] A. Vahdat and D. Becker. ”Epidemic routing for partially-connected ad hoc networks”. Technical report, CS-200006, 2000.
- [10] Muhl, G., Fiege, L., & Pietzuch, P, ”Distributed Publish/Subscribe Systems: Foundations, Algorithms and Applications”, Springer Science & Business Media, 2006.
- [11] Eugster, P. T., Felber, P. A., Guerraoui, R., & Kermarrec, A. M., ”The many faces of publish/subscribe.” ACM Computing Surveys (CSUR), 35(2), pp.114-131, 2003.
- [12] 通信方式分野, ”スマホ de リレー”, [https://web.tohoku.ac.jp/cs/lab/?page\\_id=89](https://web.tohoku.ac.jp/cs/lab/?page_id=89), (2025 年 12 月閲覧).

## 参考文献

- [13] 構造計画研究所, ”スマホ de リレー”, <https://www.smart-relay.kke.co.jp/>, (2025 年 12 月閲覧).
- [14] 内閣府 (防災担当), ”復旧・復興ハンドブック”, <https://www.smart-relay.kke.co.jp/>, (2026 年 1 月閲覧).
- [15] The ONE,”The Opportunistic Network Environment simulator(online)”, <https://akeranen.github.io/the-one/>, (2025 年 4 月閲覧).
- [16] 孟 楽, 三谷 泰浩, 川野 浩平, 韓 子双, 菅原 巧, 谷口 寿俊, 本田 博之,”避難所要時間による定量的災害リスク評価と非難判断支援への適用”, 地域安全学会論文集,VOL43,pp.9-17, 2023.