

災害時におけるインフラレス避難支援マップ構築手法の検討

筒井 巽水^{1,a)} 松田 裕貴¹ 秦 恭史¹ 諏訪 博彦¹ 安本 慶一¹

概要: 近年、地方自治体では自然災害への備えとして、Web ベースの避難所共有サービスである災救マップなどの利用が広がっているが、通信インフラが断絶すると利用できないという問題がある。本研究では、自然災害により通信インフラが断絶された場合でも災救マップの利用を可能とするための、インフラレス避難支援マップの構築を検討する。提案手法では、既存の災救マップのエッジ化を行うことで、避難所内でローカル環境を構築し、通信インフラが断絶しても災救マップの提供を可能とする。さらに、避難所間での情報共有を効率的に行うために、遅延耐性ネットワーク (DTN) の手法を採用する。検証実験では、Raspberry Pi 4 を用いた簡易エッジサーバを構築し、提案手法の実現可能性を確認した。この実験により、通信インフラが断絶した状況でも、避難所間での情報共有が可能であることが示された。今後の展望として、各避難所にエッジ版の災救マップを導入したエッジサーバを設置し、実証実験を進める。さらに、参加型センシングによる街全体の災害情報収集を行うためのシステム検討も行う予定である。

キーワード: 災害通信 避難支援 DTN エッジサーバ

1. はじめに

近年、日本では地震や豪雨、台風、津波などの自然災害が多く発生している。国土面積は世界の 0.25% に過ぎないが、マグニチュード 6 以上の地震の発生回数の割合は 20.8% と極めて多い [1]。さらに、南海トラフ巨大地震や首都直下地震などの大地震も予想されており、南海トラフ巨大地震により、四国地方の建物被害による全壊及び焼失棟数は、約 940 千棟～約 2364 千棟、人的被害による死者数は、約 32 千人～約 226 千人と想定されている [2]。

地震による災害後は、津波による被害が想定されるため、人々は安全かつ、水や食料などの物資が揃っている避難所に移動する必要がある。そのため、状況に応じ別の避難所に移動する必要性が高い。迅速な避難を実現するためには、出来る限り早く他の避難所の避難情報を入手し、状況に応じて別の避難所へ誘導することが望ましい。

しかし、災害時には通信インフラが断絶する可能性がある。東日本大震災や熊本地震では、災害により通信インフラが影響を受けたことで、インターネットにアクセスすることができなくなり、家族や友人の安否確認や災害情報等の入手が一時的に困難であった。このような災害時には、情報の交換・共有が必要不可欠にも関わらず、通信を行う上で劣悪な環境になることが想定される。しかし、現在提

供されている災害に備えたサービスの多くは、インターネットにアクセスすることが前提で考えられているため、そのような劣悪な環境に陥ると離れた場所の情報の取得が難しい。

そこで本稿では、自然災害により通信インフラが断絶された場合でも、素早く避難所の状況を把握するためのインフラレス避難支援マップの構築を検討する。具体的には、各避難所にエッジサーバを設置し、避難所のサーバからデータ取得を行う。避難所間のデータ通信には、遅延耐性ネットワーク (以下、DTN) 技術を利用することでユーザの持っているスマートフォン同士で通信を行い、避難所間の情報共有を行う。

避難支援マップには、稲場らが開発した未来共生災害支援救助マップ (以下、災救マップ) [3] を利用する。災害時に利用できるツールとして、Yahoo! Japan の避難場所マップ [4] や、国土交通省の特別期間である国土地理院が避難場所のデータをまとめたウェブ地図 [5] が存在する。これらの地図は、台風や津波などそれぞれの災害時に避難するための避難場所が地図上に示されている。しかし、リアルタイムで避難所の収容人数や状況を把握することはできない。それに対し、災救マップはリアルタイムで避難所の状況を把握することができ、本研究に適しているため採用する。

本稿の構成は以下の通りとする。2 章では、災害支援の関連研究について述べる。3 章では、避難支援マップとし

¹ 奈良先端科学技術大学院大学
Nara Institute of Science and Technology
^{a)} tsutsui.tatsumi.tr2@is.naist.jp

て使用する災救マップについて述べる。4章では、提案システムについて述べる。5章では、検証実験について述べ、6章では本稿のまとめについて述べる。

2. 関連研究

本章では、提案システム実現のために、災害に関連するアプリケーション開発事例について概観する。

2.1 通信環境下でのアプリケーションの開発事例

関口らの研究 [6] では、被災地でのボランティアの受付やマッチングの作業が全て手作業で行われており、災害ボランティアセンターで多くの時間が使われていることを背景に、災害ボランティアセンターの運営を補助するアプリケーション設計の検討が行われている。本アプリケーションの実装は、Monaca という開発ツールを用いて実装されており、Cordova 開発環境が利用されている。設計としては、災害ボランティア依頼と災害ボランティア登録を分けており、ボランティアセンターとボランティア希望者のマッチングからグループ作成まで行うことで、当日の作業負担を軽減することを目的としている。

Jawahir らの研究 [7] では、災害後の救援活動を支援するための地理情報システム (GIS) ベースのモバイルアプリケーション「E-Trip」を提案している。このアプリケーションは、地震、洪水、土砂崩れなどの災害後の行動をガイドするもので、国家災害管理機関、地域保健センター、および民間病院と連携している。主な機能としては、災害に遭った住民が写真などで、災害地点や周りの情報を提供できるようになっており、政府や救援団体による効率的な支援活動が可能となることが期待されている。

2.2 オフライン環境でのアプリケーション開発事例

西山らの研究では、自律分散ネットワークの制御を行い、スマートフォンアプリの「スマホ de リレー」の開発を行なっている [8]。自律分散ネットワークとは、スマートフォンに代表されるモバイル端末のみを用いて通信ネットワークを構築する技術である。また、スマホ de リレーは、Wi-Fi Direct や Bluetooth などのスマートフォン同士の直接通信手段を駆使して通信をリレー (中継) することで、通信インフラがない場所でもスマートフォン同士のコミュニケーションを可能とする。これにより、インターネットに接続していない状態でも相互にコミュニケーションをとることが可能なチャットアプリを実現できる。また、本アプリケーションは高知県で導入されており、避難者情報の伝達・収集のために利用されている。

Muhammad らの研究 [9] では、火山災害における緊急医療対応の一環として、DTN を用いた医療画像配信サービスが提案されている。このサービスは、災害地域から都市の病院へ被災者の目の怪我に関する画像データを効率的に

送信することを目的としている。専門医は、受け取った画像を基に目の怪我のタイプと重症度を診断し、適切な医療指示を医療従事者に提供する。この研究では、画像は高優先度と低優先度の部分に分割され、それぞれの優先度付けにより、重要な医療画像がより迅速に送信される。また、このシステムは Android デバイス用のアプリケーションとして設計・実装が行われている。

Edgar らの研究 [10] では、災害による通信インフラが崩壊した時を想定し、災害時におけるデジタル歩行者地図作成システムの提案を行なっている。提案手法では、主に三つの主要な課題に対処しており、最初に、GPS トレースを用いて地図データを収集し、災害地域に設置されたエッジノードで処理を行う。次に、遅延耐性ネットワークとエピソード通信を用いて、断続的な通信環境でもデータを共有できるようにしている。最後に、負荷バランスのヒューリスティックを提案し、地図生成タスクの効率を向上させている。このシステムは、大量のデータを処理する極端なケースで地図の生成と配信時間を約 2 時間短縮できることが確認されている。

2.3 関連研究の課題

従来の研究では、災害時に通信環境が整っていることを前提とした研究が多く、災害時に通信が途絶えたことを想定したアプリ開発はあまり行われていない。また、オフラインでの利用を想定したアプリケーションの開発も行われているが、これらは 1 対 1 での通信で情報を相手に届けることが目的となっており、多人数のユーザへの情報の拡散は行われていない。これら問題点を踏まえ、本研究では、災害時に既存の通信インフラが途絶えた状態でも避難所情報の拡散が行えるシステムの開発を目指す。

3. 災救マップ

本章では、避難支援マップとして利用する災救マップについて述べる。

3.1 災害救助マップの概要

災救マップは、避難所情報を共有するためのウェブ情報システムである。本システムは、寺社などの宗教施設と、学校や公民館などの指定避難所や緊急避難場所を合わせた約 30 万件の施設情報を集約し、インターネット上で公開している。また、災救マップは、防災の取り組みを通して、自治体、自治会、学校、寺社、教会等の宗教施設、NPO などによる平常時からのつながり、コミュニティ作りに寄与し、災害時には救援活動の情報プラットフォームとなる。

3.2 システム構成

災救マップは、一般ユーザ向けに公開されている「災救マップ」と、市区町村・組織用の「管理画面」という 2 つの

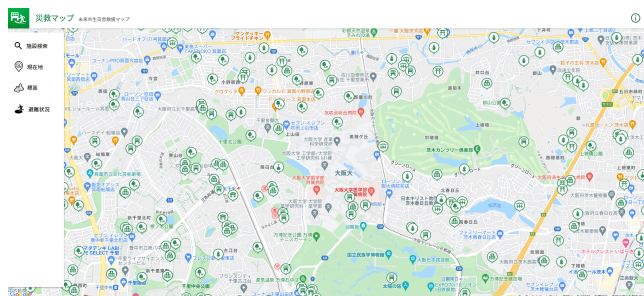


図 1 災救マップ画面

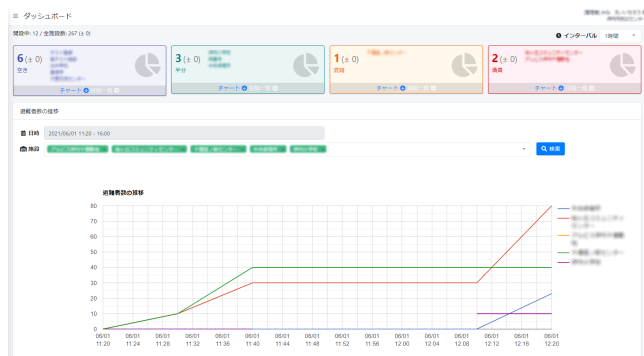


図 2 管理画面



図 3 施設の種類の種類

システムで構成されている。「災救マップ」は、投稿にユーザ登録が必要となるが、閲覧は登録などの必要はなく、誰でもすることができる。「管理画面」は、市区町村や組織などが利用し、避難状況の投稿だけでなく、施設情報の登録・編集が可能となる。また、避難者数の推移をグラフで閲覧することができる。「災救マップ」と「管理画面」の画面を図 1、図 2 に示す。

3.3 利用可能コンテンツ

災救マップでは、アイコン等を用いて、様々な情報を表示することができる。凡例を下記に示す。

まず、図 3 のように施設の種類の表示が可能である。学校、公民館、公園、寺社等の宗教施設など、施設の種類に応じて 8 つの異なるアイコンでマップ上に表示することが



図 4 画像の投稿



図 5 避難所との距離

できる。続いて、図 4 のように避難状況を投稿する際に、画像を添付することができる。ユーザの周りの環境をユーザは随時投稿することが可能となっている。さらに、図 5 のようにスマートフォンの GPS を用いて、現在地から避

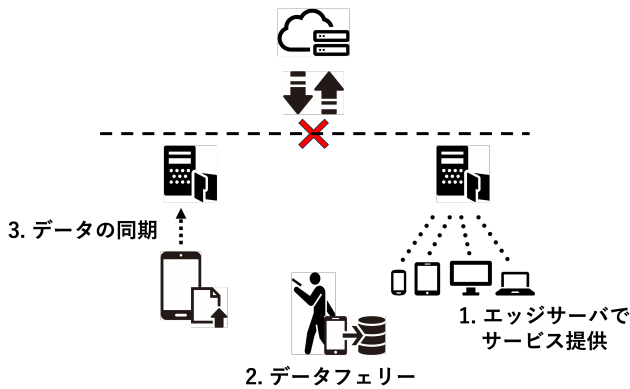


図 6 提案システム概要図

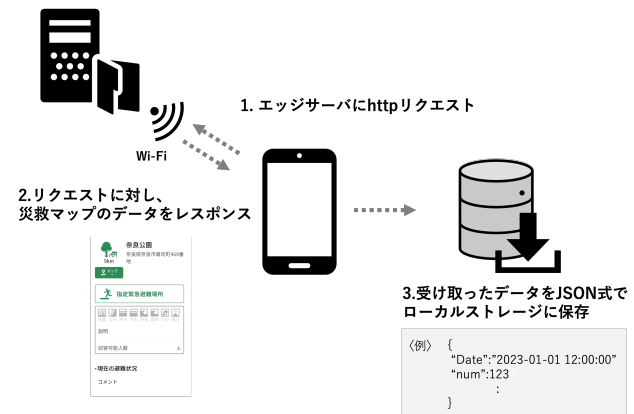


図 7 サービスの閲覧及び保存

難所までの距離を表示することもできる。

その他に、インフラの稼働状況の表示や現在地から避難所までの距離の表示も可能である。表示コンテンツをまとめたものを下記に示す。

- 避難所の種類の表示
- 施設を使用することができる災害の種類の表示
- 施設の種類の表示
- 施設の使用状況の表示
- インフラの稼働状況の表示
- 画像の投稿と表示
- コメントによる避難状況の補足説明の投稿と表示
- 現在地から避難所までの距離の表示
- 標高の表示

4. 提案システム

本章では、提案システムの概要とその実装について述べる。

4.1 提案手法の概要

本提案手法では、災害時に通信インフラが断絶した場合でも災害マップの利用を可能とするための、インフラレス避難支援マップの構築を提案する。実際に使用する機器は、どの避難所でも使用できることを想定し、避難所に設置するエッジサーバ、ネットワーク機器とユーザが利用するスマートフォンのみで構築を行う。提案システムの概要図を図 6 に示す。主な流れとしては、避難所のエッジサーバで災害マップを提供し、そのデータをユーザが別の避難所に運ぶことでデータの同期を行う。通常時には、各避難所に設置された機器はフリー Wi-Fi として機能するが、クラウドとの通信が切断された緊急時には、エッジサーバとして災害マップを提供する。

このシステムは主に DNS サーバとして動作し、ローカルネットワーク内のデバイス（スマートフォン、PC など）からの DNS クエリを受け付ける。受け取った DNS クエリは、インターネット上の他の DNS サーバに転送され、正

確な IP アドレスが取得される。これにより、目的のウェブサイトやオンラインサービスへの接続が可能となる。また、スマートフォンでは、ネイティブアプリを経由することで特定のエッジサーバへの接続の自動化や、災害マップのデータをローカルストレージに保存する。このローカルストレージに保存したデータは、他のエッジサーバへのデータの同期に利用される。詳しくは、次節で述べる。

4.2 提案システムのデータフロー

通信インフラが断絶した状況では、エッジサーバは災害マップを提供するために、ローカル上のマスターサーバとして動作する。この状態では、DNS サーバはインターネット上の他の DNS サーバとの通信ができないため、ローカルネットワーク内で完全に独立して動作する。具体的には、ローカルネットワーク内のユーザデバイスから送られた DNS クエリに対して、事前に設定されたエッジサーバのデフォルトのホームページをユーザに提供する。本提案手法では、災害マップを表示させる。本システムのデータフローの詳細に関して、4.2.1 項から 4.2.3 項に示す。

4.2.1 エッジサーバへのアクセス

災害マップへのアクセスに関するフロー図を図 7 に示す。通信インフラ崩壊後、各避難所はエッジ版の災害マップのサービス提供のための Wi-Fi を提供する。ユーザは、この Wi-Fi を経由することでエッジサーバ内の災害マップにアクセスし、避難所の状況を確認する。さらに、アプリケーションを所有しているユーザの場合は、受け取ったデータをローカルストレージに保存する。保存されるデータには、災害マップで提供されるパラメータである避難所の人数、インフラ設備の状況やアクセスした日にちなどを用いる。また、アプリケーションを持たないユーザも災害マップへのアクセスは可能だが、データの保存は行われな

4.2.2 データフェリー

災害マップは、通常時はクラウド上でサービスの提供が

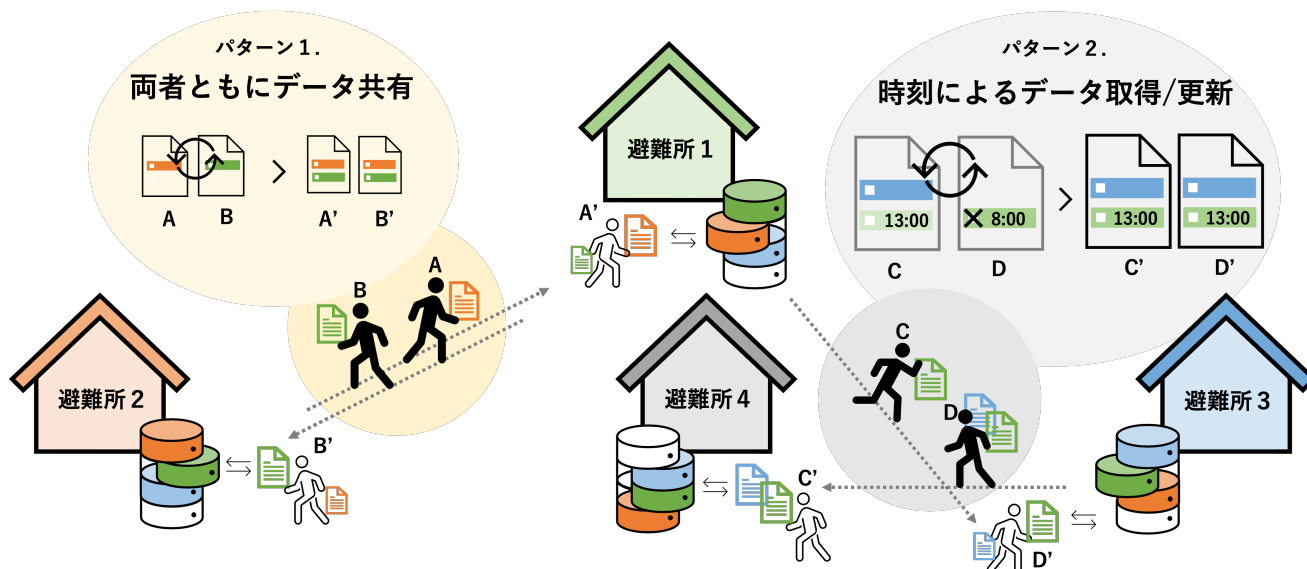


図 8 避難所間のデータ共有

行われているため、どこからでも避難所の状況を把握することができる。しかし、災害後に各避難所のエッジサーバでサービス提供を行うと、避難所の現状（人数、物資、施設の状態など）のアップロードが各避難所で行われるため、避難所間のデータに差分が生じる。これらの差分をできる限り無くすために、避難所間でのデータのマージが必要となる。その際には、現在のエッジサーバから情報を得た避難者や避難所のスタッフがデータフェリーとして、他の避難所にデータを運ぶことが方法の1つとして挙げられる。

このシステムを実装するために、DTNを活用する。DTNは、通信環境が不安定な場合でもデータを効率的に転送が行え、避難者や地方自治体のスタッフが移動する際に、モバイルデバイスでエビデミック通信を利用して、すれ違った他のユーザとデータを自動的に交換する。エビデミック通信は、データをランダムに複数のデバイスに拡散させる方法で、これにより必要なデータを確実に目的地に届けられ、他の避難所への情報拡散が可能となる。

また、DTNで通信を行った際には、データの競合が起こることが想定される。本サービスでは、常に最新の情報の優先度が高いため、ローカルストレージに保存している日付と避難所の情報から、最新の情報は上書きを行い、古い情報は破棄するようにする。DTNによるデータの共有の概要図を図8に示す。パターン1では、両者ともに異なる避難所のデータを持っているため、お互いの避難所データを共有する。ただし、図の例だとユーザAは、すれ違ったユーザBが元々いた避難所1のデータももらっているため、避難所1に到達した際に避難所2のデータのみをアップロードし、自分の所持している避難所1のデータのアップロードは行わない。また、パターン2では、ユーザCはユーザDとデータを共有するが、時刻情報から自分の保持しているデータの方が新しいため、データの更新は行わ

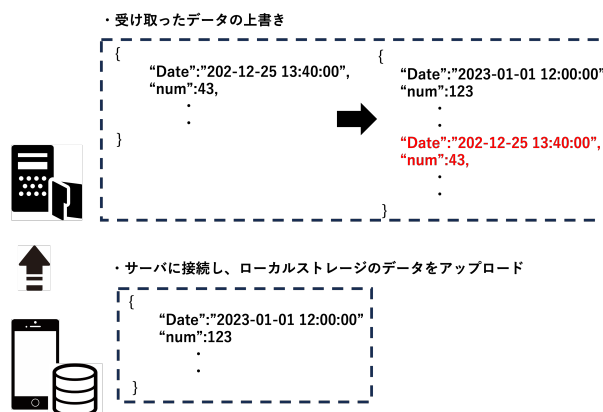


図 9 データアップロード

ない。逆にユーザDは、持っていない避難所情報の取得を行い、古い避難所のデータを新しいものにアップデートする。これらのデータの更新は避難所でも同様であり、常に最新の情報を避難所は保持する。

4.3 避難所のデータ同期

データのアップロード例を図9に示す。ユーザは、ローカルストレージのデータをサーバにアップロードすることで、避難所のデータの更新を行う。サーバ側は、それらの得た情報から最新のものにアップロードしたものをユーザに提供する。

5. 検証実験

本章では、エッジサーバから受け取ったデータローカルストレージを通じて別のエッジサーバに保存、上書きができるか確認するための検証実験を行った。

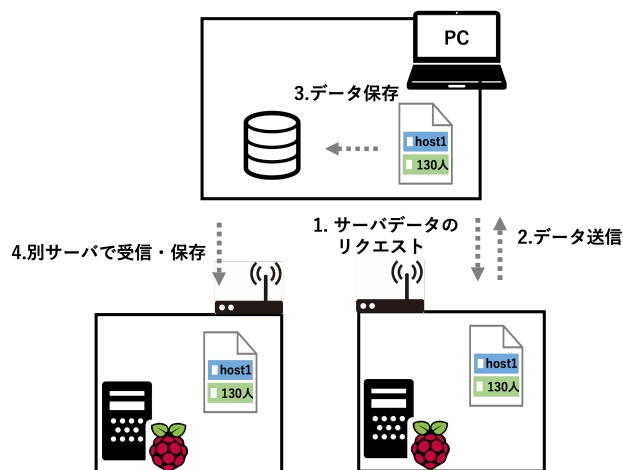


図 10 実験概要図

5.1 事前準備

本実験においては、Raspberry Pi 4 Model B と M2 MacBook Air をそれぞれサーバとクライアント PC として使用する。Raspberry Pi には Raspbian OS (Bullseye バージョン) をインストールし、SSH を有効化してリモートアクセスを可能とした。Apache Web サーバと Python のパッケージマネージャや Flask フレームワークは全て pip コマンドでインストールを行った。

5.2 実験方法

Raspberry Pi サーバは、特定の HTTP エンドポイントを通じて、クライアント側の PC に JSON 形式でサーバ情報を提供する。実験の概要を図 10 に示す。図のように、クライアント側の PC では、Python スクリプトを用いて Raspberry Pi サーバに HTTP GET を送信する。送信されたリクエストに対するレスポンスとして返される JSON 形式のデータは、ローカルストレージに保存し、別の Raspberry Pi サーバにアップロードする。Apache Web サーバは、Raspberry Pi 上で稼働する Flask アプリケーションを外部ネットワークに公開する役割を果たす。詳細を下記に示す。

- (1) エッジサーバ (ユーザ名: test1) からデータを取得するため、サーバに HTTP GET を送信 (<http://192.168.3.38:5002/info>)
- (2) サーバ側では、現状の時間、ユーザ名、仮の避難者人数を応答
- (3) クライアントは、受け取ったデータをファイル (server_info.json) に保存
- (4) 別のエッジサーバ (ユーザ名: test2) に HTTP POST を送信 (http://192.168.3.44:5002/receive_data)
- (5) エッジサーバ上でデータの保存を確認する

5.3 実験結果

最終的に、データを送信・受信したエッジサーバのそれ

送信サーバ (ユーザ名:test1)

```
test1@raspberrypi:~$ python3 app2.py
* Serving Flask app "app2" (lazy loading)
* Environment: production
WARNING: This is a development server. Do not use it in a production deployment.
Use a production WSGI server instead.
* Debug mode: off
* Running on http://192.168.3.38:5002/ (Press CTRL+C to quit)
[Current time on Raspberry Pi: '2023-08-28 16:22:37', 'Username': 'test1', 'Number of people in shelter': 130]
192.168.3.15 - - [28/Aug/2023 16:22:37] "GET /info HTTP/1.1" 200 -
```

送信サーバ (ユーザ名:test2)

```
test2@raspberrypi:~$ python3 app.py
* Serving Flask app "app" (lazy loading)
* Environment: production
WARNING: This is a development server. Do not use it in a production deployment.
Use a production WSGI server instead.
* Debug mode: off
* Running on http://192.168.3.44:5002/ (Press CTRL+C to quit)
Received data: ('Current time on Raspberry Pi: '2023-08-28 16:22:37', 'Number of people in shelter': 130, 'Username': 'test1')
192.168.3.15 - - [28/Aug/2023 16:22:48] "POST /receive_data HTTP/1.1" 200 -
```

同一のデータ

図 11 送受信結果

それぞれのデータを図 11 に示す。送信元のサーバが保持していた情報 (現在時刻, ユーザ名, 避難者人数) と受信したサーバの保持している情報が両方とも一致していることがコンソール出力から読み取れる。これより、エッジサーバと見立てた Raspberry Pi 間の情報共有を PC を経由することで行えることを確認できた。

5.4 今後の展望

今後の展望は、大きく分けて 2 つある。

まず、今回行った検証実験を本番環境で行うための開発を進める。今回の検証実験では、Raspberry Pi を利用した仮想的な実験であったため、今後は実際に避難所に設置するための機器の選定を行い、避難所に設置するサーバの環境構築を行う。さらに、エッジ化された災救マップも導入する予定である。これにより、通信インフラが断絶した状態でも災救マップが閲覧可能か確認し、防災訓練などで本システムを使用して性能評価を行う。

次に、ユーザ型センシングを利用した、街全体の被災情報の収集を行うことを検討する。ユーザ参加型センシングとはコミュニティがセンシング情報を提供し、知識体系を形成するという概念である [11]。これは、都市や町に散在する一般の人々がセンシング活動に参加することにより、都市のさまざまな事象を対象としたデータ収集が可能となる。例として、町の中の騒音レベル [12]、夜道の照明の明るさ [13]、桜の開花の状態 [14] など、さまざまな事象に関する情報が網羅的に集めることができる。

本システムは、主に避難所の情報をユーザに共有するシステムである。これに加え、町の土砂災害情報や通行情報をユーザから収集することで、よりスムーズな避難誘導が行えると考えられる。そのため、今後はユーザ参加型センシングによる街全体の被災情報を収集するためのシステム検討を行う。

6. おわりに

本稿では、災害時に通信インフラが断絶した場合でも災救マップの利用を可能とするために、インフラレス避難支援マップ構築の検討を行った。本提案手法では、最初に各避難所にエッジサーバの設置を行い、エッジサーバの中に

エッジ化した災救マップの導入を行うことで、避難所周辺でのサービス提供を実現する。さらに、避難所間のデータ共有を行うために、DTNを利用しスマートフォンを持ったユーザがデータフェリーとして移動することで避難所間のデータ共有を行う。

今後の展望としては、検証実験で行ったことをベースに、実際の災害環境で利用するための機器の選定、システムの改善、災救マップのエッジ化を行っていく。さらに、ユーザからの情報を集めることで、街全体の災害状況の把握を行うためのシステムの開発も検討する。この実証実験には、ユーザ参加型センシングを用いることで、性能評価を行う予定である。

参考文献

- [1] 災害を受けやすい日本の国土：防災情報のページ - 内閣府. <https://www.bousai.go.jp/kaigirep/hakusho/h18/bousai2006/html/honmon/hm01010101.htm>. (Accessed on 07/17/2023).
- [2] 南海トラフ巨大地震対策 — 防災 — 国土交通省 関東地方整備局. <https://www.ktr.mlit.go.jp/bousai/bousai00000135.html>. (Accessed on 07/16/2023).
- [3] 圭信稲場, 亮川端, 文潔王, 誠一郎小島, 英一郎峯. 災害時の避難所情報共有システム「災救マップ」の活用. マルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム 2022 論文集, 第 2022 巻, pp. 445–445, jul 2022.
- [4] 避難場所マップ - yahoo!天気・災害. <https://crisis.yahoo.co.jp/map/>. (Accessed on 08/25/2023).
- [5] 地理院地図 / gsi maps | 国土地理院. <https://maps.gsi.go.jp/#10/35.361616/138.733978/&base=std&ls=std&disp=1&vs=c1g1j0h0k0l0u0t0z0r0s0m0f0&d=m>. (Accessed on 08/25/2023).
- [6] 関口穂波, 高井峰生, 大和田泰伯, 小口正人ほか. 災害ボランティアの課題とアプリケーションの設計. マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム 2021 論文集, Vol. 2021, No. 1, pp. 495–500, 2021.
- [7] J Jawahir, Dedy Prasetya Kristiadi, and S Sutrisno. E-trip: Mobile application of map integrated for post-disaster relief needs. *IJISTECH (International Journal of Information System and Technology)*, Vol. 5, No. 6, pp. 672–679, 2022.
- [8] スマホ de リレーとは. <https://www.smart-relay.kke.co.jp/about>. (Accessed on 07/17/2023).
- [9] Muhammad Ashar, Hirohiko Suwa, Yutaka Arakawa, and Keiichi Yasumoto. Priority medical image delivery using dtn for healthcare workers in volcanic emergency. *Scientific Phone Apps and Mobile Devices*, Vol. 2, pp. 1–13, 2016.
- [10] Edgar Marko Trono, Manato Fujimoto, Hirohiko Suwa, Yutaka Arakawa, and Keiichi Yasumoto. Generating pedestrian maps of disaster areas through ad-hoc deployment of computing resources across a dtn. *Computer Communications*, Vol. 100, pp. 129–142, 2017.
- [11] Jeffrey A Burke, Deborah Estrin, Mark Hansen, Andrew Parker, Nithya Ramanathan, Sasank Reddy, and Mani B Srivastava. Participatory sensing. 2006.
- [12] Eiman Kanjo. NoiseSPY: A Real-Time Mobile Phone Platform for Urban Noise Monitoring and Mapping. *Mobile Networks and Applications*, Vol. 15, pp. 562–574, 2010.
- [13] 松田裕貴, 新井イスマイル. スマートフォン搭載照度セン

- サの集合知による網羅的な街灯情報収集システムの開発. 情報処理学会論文誌, Vol. 55, No. 2, pp. 750–760, 2014.
- [14] Shigeya Morishita, Shogo Maenaka, Daichi Nagata, Morihiko Tamai, Keiichi Yasumoto, Toshinobu Fukukura, and Keita Sato. SakuraSensor: quasi-realtime cherry-lined roads detection through participatory video sensing by cars. In *Proceedings of the 2015 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, pp. 695–705, 2015.