

避難所間の物資の過不足解消を目指した運搬経路決定手法

佐藤 沙央[†] 大和田泰伯^{††} 高井 峰生^{†††,††††} 前野 誉^{†††††} 小口 正人[†]

[†] お茶の水女子大学 〒112-8610 東京都文京区大塚2-1-1

^{††} 情報通信研究機構 〒980-0812 宮城県仙台市青葉区片平2-1-3

^{†††} 大阪大学 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘1-1

^{††††} UCLA Computer Science Department 3803 Boelter Hall, Los Angeles, CA 90095-1596, USA

^{†††††} 株式会社スペースタイムエンジニアリング 〒101-0025 東京都千代田区神田佐久間町3-27-3

E-mail: [†]{g1420521,oguchi}@is.ocha.ac.jp, ^{††}yowada@nict.go.jp, ^{†††}mineo@ieee.org,

^{††††}tmaeno@spacetime-eng.com

あらまし 近年日本で多発している大規模な災害では、普段利用している通信インフラが切断されてしまった場合、インターネットにアクセスすることができず、情報交換ができなくなってしまう。多様な理由により避難所に避難できなかつた人には、救援物資情報は手に入れづらいという現状がある。そこでエッジサーバを利用し、各端末は情報をそこにアップロード、閲覧できるようにして、エッジサーバ同士が情報を同期しておくことで情報交換を可能にする環境構築を考える。この論文では、そのような環境において共有された物資の過不足情報をを利用して避難所間でそれを解消することを目指す。具体的には物資を持て余している避難所とその物資が不足している避難所を回る最適な経路についてコスト関数を用いて決定する。また避難所の位置は高知県香南市の実データを用いて評価を行った。

キーワード 情報共有、インターネット非接続, DTN, 運搬経路

1 はじめに

今日では、私達の生活には情報を得る手段としてインターネットが無くてはならないものになっており、小さな子どもから高齢者まで様々な世代で身近に利用されている。インターネットは世界中を結ぶことのできる情報交換・共有システムとして社会・経済のインフラともいえる役割を果たしており、私達の生活はネットワークに依存して成り立っている。しかし、近年では東日本大震災や熊本地震のような災害によって通信インフラが被害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ったことがあり、家族や友人の安否確認や災害情報等を受け取ることが一時困難であった。そういう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中断や切断が多発したり、大きな伝送遅延が生じたりする劣悪な環境になる可能性がある。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でき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使えなくなってしまう。そうなると、災害対策として提供されているにも関わらず、有用な利活用ができない。

実際に、そういう環境下における実験として、高知県香南市が実施しているものがある。高知県香南市では、スペースタイムエンジニアリング社と共同して、同様に劣悪な環境下において利用することが可能な災害医療用情報共有システムの構築と実証実験が行われている。この研究は、大規模災害時に通信インフラが利用できないような劣悪な環境においても、情報共有可能なネットワークを構築し、従来は紙やホワイトボードを

情報伝達ツールとして使用していたところを、情報通信システムを独自に設計し実装することで情報伝達の効率化を図っている。この情報共有システムに対する意見は概ね良好であり、効率化も果たされているという評価であった[1]。

そこで本研究では、地震などの大規模な災害によって地域的にインターネットが機能しないような劣悪な環境においても、部分的に稼働しているエッジサーバと Delay/Disruption Tolerant Network (DTN) 技術を利用した災害時通信システムを利用し、各避難所にある物資の過不足情報を集約し、避難所間で過不足を解消するための物資の運搬経路の決定手法を提案する。

2 救援物資提供の現状

近年発生している東日本大震災や熊本地震では家屋が多く倒壊し、多くの被災者が避難所へ身を寄せることになった。復興庁によると、東日本大震災のピーク時には2417箇所も設けられ、長期に渡って避難所に滞在せざるをえない状況にあったという[2]。その間避難した被災者は届けられる救援支援物資を頼りに生活することになるわけであるが、避難所のキャパシティを超える避難者がおり、当時は物資の提供に関しては物資の不足や多くの混乱があった。

さらに、実際に救援物資を提供する際には、近隣の広い一時的な保管所に一度に多種多量な物資が集められ、そこから各指定避難所に分配されて届けられる。しかし、指定避難所ではなくその一時的保管所にもらいに行く被災者が出てきてしまい、

各避難所に送る物資を仕分けるという作業に加えて、被災者に渡すという余分な作業が追加され、役割が増えてしまったことで現場が混乱してしまったという報告が上がっている。^[3]

更に、届いた救援物資がニーズの変化等で避難所で滞留してしまうことも問題となっている。災害が発生すると国や地方自治体から救援物資が届く。この場合、救援物資を避難所まで輸送する過程にはいくつか段階が存在している。まず一次物資集積拠点に救援物資が集められ、そこで仕分けられ、自治体が管理する各二次物資集積拠点に輸送される。さらにそこで物資は仕分けられ各避難所へと輸送される流れが基本となっている。それとは別に、個人や民間企業が直接避難所に救援物資を届けることが多い。こういった場合は国や自治体のコントロール下にならないため、需要以上の物資が届き在庫を抱えてしまうケースがある。そうなってしまうと他に需要のある物資があるにもかかわらず、救援物資管理場所の不足・混乱や、余分な物資の管理という作業の増加といった問題が出てきてしまう。しかし一方で、ある避難所ではニーズと異なり余っている物資も、他の避難所では必要とされている可能性がある。本研究ではそちらに注目し、一次物資集積拠点等を通さず、末端の避難所間で既に届いた物資の需要と供給を満たすことを考えた。過不足のある物資情報とニーズを避難所間で共有し、余っている物資を需要のある最適な避難所へと分けることが可能なシステムを構築していく。

3 研究背景

3.1 関連研究

災害時に情報共有する際に DTN 技術を利用する研究が多くなされている。

[4] では大規模災害時には船舶での救助活動が有用であり、そのため災害情報も手に入れやすいことから、通信環境が安定しないまたは使用できない状況において、船舶を拠点とした海上からの情報支援ができれば、被災者と支援者間の情報共有を促し、安否の確認、円滑な救援活動や二次災害の防止に貢献できる新たな手法として期待できるとして、DTN 技術を利用している。大規模災害発生時を想定し、船舶を拠点とした情報共有に着目した研究は少なく、珍しいものである。

[5] では DTN の距離の問題を解決するために移動中継ノードを導入し、フラッティングメッセージの削減とメッセージ到達時間の短縮を図っている。また、移動中継ノードを導入するに当たってはウェイポイントや通信方式の選定によってフラッディングメッセージや到達時間をある程度制御することが可能であることを示している。今後このアプリケーションを活用していくに当たってフラッティングメッセージ問題は考えなければならない問題である。

[6] では DTN 環境下でのデータ転送遅延と中継ノードのバッファ消費量のトレードオフの解消を課題としており、メッセージフェリーを用いたデータ転送方式及び回復手法を提案することで解決を図っている。

[7] ではメッセージフェリー方式を使用してクラスタ内のデータを収集するシステムを提案し、中でもクラスタ内の移動端末間の通信に対して、バッテリー残量情報を利用した通信方式の提案と、その手法をシミュレーションすることで従来手法との比較評価を行っている。フェリーノードであるスマートフォンのバッテリーを長く持たせることでネットワーク持続時間を高め、情報共有システムの有用性の向上を図っており、本研究でものちに参考になると考えられる。

また、有用なリクエストの同期方法を考察するにあたり、参考とした先行研究^[8]を紹介する。この先行研究では、NICT が力を入れてきた DTN の性質を持つネットワークシステムである NerveNet 上で、データベースの同期を取る方法についての検討を行っている。分散型地域無線ネットワークの基地局が有する情報処理機能、情報蓄積機能、及び情報同期機能を活用し、無線端末同士で構成されたグループ間で端末のアプリケーションデータベースを同期するための手法を提案している。本手法を用いることで、有限な基地局メモリ空間と無線リソースを活用し、特定のサーバを利用せずに多数の端末間での情報共有を可能とする。分散型無線基地局は NerveNet を想定し、NerveNet プロトコル及び端末間アプリケーションデータベース同期プロトコルとして、直接同期方式、基地局共有型、単独管理型、階層管理型の 4 方式について検討を行った。これらの方において、同期端末数が多い場合と少ない場合でトラフィック量、同期に要する時間、基地局でキャッシュするデータ量の 3 つの観点で定性的な評価を行ったところ、階層管理型が基地局でキャッシュするデータ量を抑えつつ多数の端末間同期が比較的早く行うことができ、トラフィック量も削減できる事を示している。

3.2 DTN

ここではデータの転送方法として採用する DTN 技術について簡単に説明する^[9]。DTN は遅延耐性ネットワークとも呼ばれ、物理的なリンクの切断やデータの送受信遅延に対応していない TCP/IP 技術を拡張させた「中継転送技術」である。この手法には、「届きそうな」端末にデータを送信し、端末間でデータをホップさせていくものや、メッセージ転送を目的とした移動端末（以下、フェリーノードと呼ぶ）を用いて、端末とフェリーノード間で通信を行うことでデータ転送を可能とするメッセージフェリー方式というものがある。こうした手法により、中断や切断が多発したり、極端に長い通信遅延が生じたりするような劣悪な通信環境下でもデータ転送を実現することができる。今回構築しているアプリケーションは、避難者が所有しているスマートフォンを主なフェリーノードとするメッセージフェリー方式の技術を利用して情報共有することができる環境があると想定し、そこで運用できるものを実装する。フェリーノードは定期的に動くことが予想されることから、時間的遅延の対処のために物資を運搬するトラック等の車も採用することを検討している。

4 システムの形態

本論文の避難所間で物資の過不足を補うためのシステムは、災害等によってネットワークの切断や遅延など劣悪な環境下でも情報共有できるような DTN 技術を利用したネットワークで運用することを前提にして構築していく。この場合のネットワークとはインターネットだけでなく、ローカルに構築されているネットワークも含んでいる。このシステムはインターネットにアクセスできないようであれば、各避難所にあらかじめ設置されていると想定したエッジサーバを利用し各サーバ同士が Wi-Fi をを利用して通信することでデータを共有し、もしインターネットにアクセスできた場合にはすべてのデータアクセスと機能を利用可能にする多層構造を目指す。(図 1)

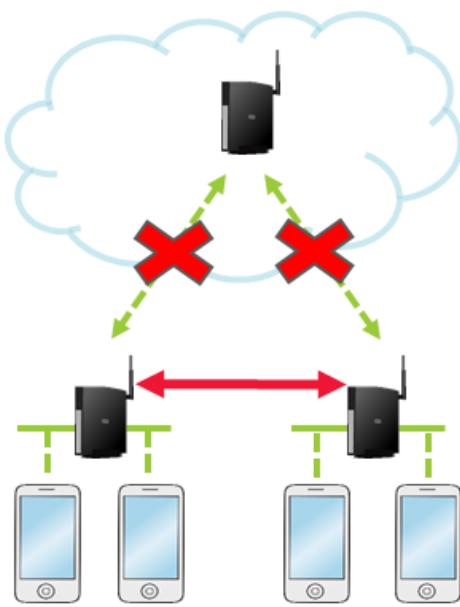


図 1 エッジサーバの形態

前述の通り、救援物資輸送の流れは以下の図 2 で示すような流れが基本となっている。

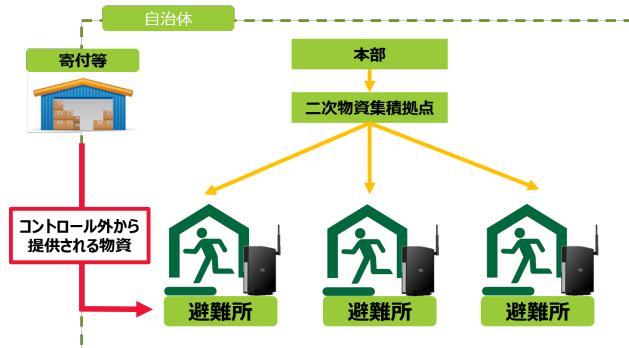


図 2 基本的な救援物資輸送の流れ

本部から救援物資の調達依頼を受けて、一次物資集積拠点か

ら二次物資集積拠点に輸送される。そこから各避難所に向けて物資が仕分けられ輸送される。この流れの外から入ってくる物資が存在し、そういう物資は特定の避難所に届けられるため、物資の在庫を抱えてしまうことがある。そうなると、作業が増加する、物資が消費しきれず無駄にしてしまうといった問題が出る。しかし一方でその余剰物資を必要としている避難所も存在する可能性があり、そこに届けることができれば最適に物資を供給することができる。しかし現状ではその問題を解決する手段が用意されていない。そこで本研究では各避難所間で物資の過不足情報とニーズの情報を共有し、需要と供給を最適に満たすシステムを提案する。

このシステムの形態については以下の図 3 で詳しく説明する。

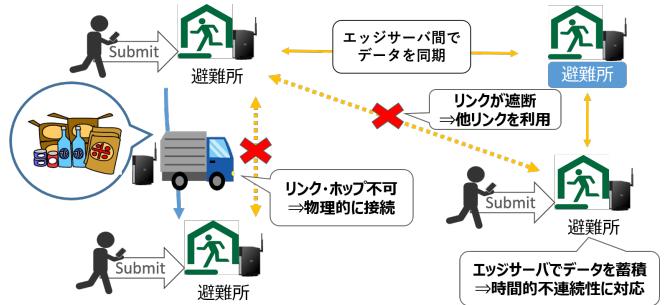


図 3 システムの形態

各指定避難所には平時からエッジサーバが設けられおり、インターネットが生きている状況では、各エッジサーバがクラウドに接続して稼働していることを想定する。発災後インターネットとの接続が途切れ通信が困難になった場合は、各エッジサーバは Wi-Fi で通信して互いにリンクを生成しデータを共有してアップデートする。さらに一部でリンクを生成できなかった、あるいは遮断されてしまった場合には DTN 技術を用いて自動で別のリンクを利用して、データをホップさせていくことで、遠回りをしてもいずれ全てのエッジサーバにデータが共有される。

被災者や指定避難所の管理者がエッジサーバにアクセスして物資のニーズや過不足情報を登録する。そこに登録された情報は前述の方法によって共有される。また、リンクが途絶えエッジサーバが孤立しており、データのホップができない場合は、車を中継ノードとして物理的に接続して他のエッジサーバに共有する。その際車に物資を共に積めば情報と物資を同時に運搬することができると考えている。さらにエッジサーバでデータを蓄積することにより、通信遅延などですぐに共有することができないという時間的不連続性にも対応することができる。

5 最適な経路の決定手法

本論文では、既に前述のシステムによって物資の過不足情報とニーズのデータが得られていると仮定している。また、あらかじめ各避難所の緯度経度と各間の実際の距離・所要時間を Google Cloud Platform を利用し事前に取得した。さらにそれらの情報を用いて一台の車で一種類の物資の過不足を解消する

ために、荷物を拾ったり下ろしたりしながら最適な経路を決定する。経路を決定する際には巡回セールスマン問題に落とし込み、以下の条件を設定してコスト関数を作成しそのコストが最小となる経路を最適とする。ノードを避難所、エッジの重みを避難所間の距離または所要時間とする。現状はコストは経路の総距離または総所要時間である。また物資の余剰を持つ避難所を Depo と呼ぶこととする。

- Depo からスタートし、他の避難所をすべて一度だけ通り最初の Depo に帰る
- Depo 以外の避難所を一つ通ると荷物を一つ下す
- 車の最大積載量を設定し、それ以下であれば車に荷物がまだあっても Depo を通った際に車に載せる
- 車の荷物が全て無くなったら避難所から最寄りの Depo に取りに行く
- 必ず全ての避難所に荷物を下すことができる

経路を決定するにあたり、巡回セールスマン問題の解決法としてよく知られる手法である 2-opt 法と遺伝的アルゴリズム (GA) を採用した。また初期値として与える経路をランダムなものと nearest neighbor 法 (NN 法) を用いた。また、巡回アルゴリズムを解く際には python で Vc opt という最適化パッケージを利用した。

6 実験結果

避難所の情報は香南市の指定避難所 48 か所の情報を利用した^{??}。そのうちの 5 か所を Depo とし、車の最大積載量を 16、各避難所で得られる物資量は一定として 9 とした。始点を固定し、以下の 4 つの手法で得た経路の計算時間とコストを比べた。

- ランダムな初期経路を与える 2-opt 法
- ランダムな初期経路を与える GA
- NN 法で作った初期経路を与える 2-opt 法
- NN 法で作った初期経路を与える GA

避難所間の距離と所要時間それぞれをエッジの重みとして経路を決定し、計算時間と経路を比較した。図には香南市の指定避難所の緯度経度を利用してマッピングしており、マップ上の青いピンは荷物を卸す避難所、赤いピンが Depo、白抜きの赤いピンが経路の始点及び終点の Depo である。各エッジはある避難所 2 カ所間の Google Map で推奨される経路の距離または所要時間が重みとなっており、グラフでは直線で表現してある。実際の経路は曲折したり山道であったりしており直線ではない。また、経路を決定する際に距離データと所要時間データでは法定速度や実際の交通状況によって経路に差が出る可能性があるため距離と所要時間ぞれぞれで実験を行った。

表 1 手法ごとの計算時間と総距離

手法	2-opt	GA	NN+2-opt	NN+GA
計算時間 (sec)	47.1	3570.5	9.1	3110.4
総距離 (km)	77.6	65.2	69.0	67.1

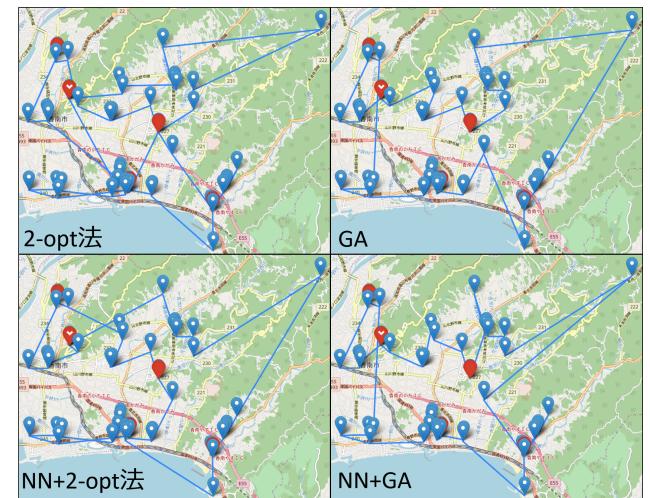


図 4 距離をエッジの重みとした 4 つの手法の最短経路の比較

表 2 手法ごとの計算時間と所要時間

手法	2-opt	GA	NN+2-opt	NN+GA
計算時間 (sec)	49.6	3822.3	11.4	3774.8
所要時間 (分)	186.9	170.7	164.3	169.5

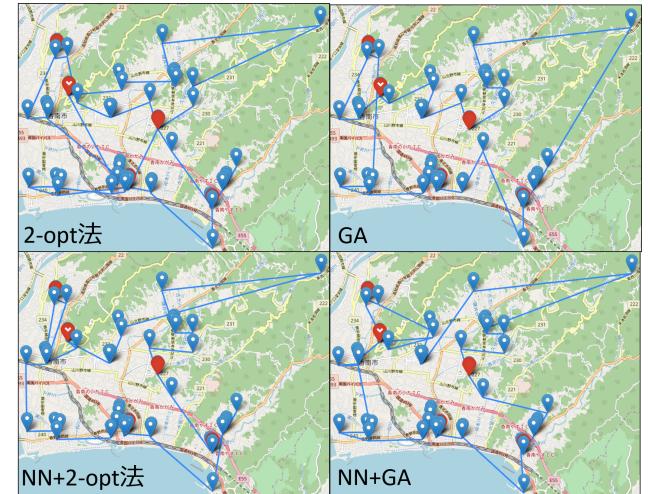


図 5 所要時間をエッジの重みとした 4 つの手法の最短経路の比較

表 1・表 2 を見ると、NN 法で作った初期経路を与える 2-opt 法が計算時間が短く、総距離・所要時間ともに小さくなることが分かる。ランダムな初期経路が与えられた 2-opt 法は局所的最適解に陥りやすいアルゴリズムであり、実行を繰り返した際に、非常に初期経路に精度が左右されやすかった。また GA に比べ実行時間は短くなりコストもある程度小さくはできるものの他の手法より小さくすることは極めて困難であると予想される結果であった。しかし、香南市の指定避難所においては初期

経路に NN 法を用いることでコストが小さくなるような結果が表れやすいことが分かった。NN 法を使うことによって近くの避難所や Depo に寄りながら全てを巡回するということが経路を決定する際に考慮することができていると考えられる。

一方で GA は総距離や所要時間が小さくなることが分かるが、実行時間が非常に大きくなってしまった。実際災害時に運用するにはこの計算時間は非現実的である。GA では全通りの経路を調べるには時間が掛かりすぎてしまうため、一定の世代にならざるを得ない。そのためより深く調べればより小さな値は求め得る。しかし、この結果を見ると運用する際には NN 法で初期経路を与え、2-opt 法で経路を求めることが総距離や所要時間を早く適度に小さくできると考えられる。しかし GA を使った場合のほうがコストが小さくなりやすく、総距離の差が 2km ほど離れていた場合それを良しとして NN+2-opt 法を採用するかどうか議論の余地がある。

また距離と所要時間それぞれで経路を見てみると(図 4, 図 5), 同じ手法でも経路が異なることが分かる。Google Map から実際の距離と所要時間を使うことで、その差を見つけることができた。この経路の差の原因は実際の法定速度や信号の多さ等で変化すると考えられる。また距離データで得た経路の所要時間を計算してみると、同じ条件・同じ手法で所要時間データを使って得た経路よりも短時間な経路になることがある。逆に所要時間データで得た経路の方が同条件の距離データよりも総距離が小さくなることもあるため、比較して最適な方を利用するようにしてもよい。また人手や燃料の量などの制約によって距離データと所要時間の現場のニーズに合った方を利用するよう、場合分けができるとより有用になると考えられる。

7まとめと今後の課題

近年日本で多発している大規模災害時では救援物資の不足問題に加え、余った物資が避難所に滞留して管理等にリソースを割かないといけないという問題が発生している。避難所間だけで救援物資の過不足を補えれば救援物資を効率的に有効活用できる。そこで本論文では実際の指定避難所間で物資を共有する際に物資を拾ったり下ろしたりしながらコストが小さくなるような運搬経路決定手法を提案し、比較した。今後は Depo ごと、避難所ごとに任意の物資数を設定し、最適な経路を決定できるか実験する。また、現在は一種類の物資に限定しているが複数の種類の物資を同時に運搬するような決定手法を検討していく。

謝 辞

本研究の一部はお茶の水女子大学と情報通信研究機構との共同研究契約に基づくものである。また、本研究は一部、JST CREST JPMJCR1503 の支援を受けたものである。

通信インフラに依存しない災害医療救護活動用情報共有システムの実証実験”, IT ヘルスケア, 第 12 卷 1 号, May 27-28, 2017

- [2] 復興庁, ”避難所生活者・避難所の推移（東日本大震災、阪神・淡路大震災及び中越地震の比較）”
- [3] 内閣府防災情報のページ, ”避難に関する総合的対策の推進に関する実態調査結果報告書”, 平成 25 年
- [4] 霜田 一将, 植田 啓文, 木下 峻一, 加藤 浩, ”大規模災害時ににおける DTN 技術を用いた複合的な船陸間災害情報共有ネットワークの提案と評価－可搬型 DTN 基地局による検討－”, 日本航海学会論文集, 132 卷 (2015), p. 71-77
- [5] 多氣真之輔, 小板隆浩, ”移動中継ノードを利用した災害支援用 DTN の提案”, 2014 年度 情報処理学会関西支部 支部大会 講演論文集
- [6] 阿部涼介, 舟橋知論, 中村嘉隆, 白石陽, 高橋修, ”DTN 環境におけるメッセージフェリーを用いた効率的なデータ転送方式”, 第 74 回全国大会講演論文集, 2012, 1 号, p.97 - 98
- [7] 金田知展, 中村嘉隆, 高橋修, ”DTN を用いた災害時通信システム構築法の提案”, マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム 2013 論文集, p.964 - 969
- [8] 大和田泰伯, 井上真杉, 森岡和行, 原井洋明, ”NerveNet による端末間データベースの同期手法に関する検討”, 信学技報, vol. 111, no. 477, AN2011-88, pp. 25-30, 2012 年 3 月
- [9] 鶴正人, et al. ”DTN 技術の現状と展望” 通信ソサイエティマガジン, No.16[春号], pp.57-68, 2011.
- [10] 香南市, ”香南市地域防災計画の改訂 資料編 (P169 - P330)”, 2018 年

文 献

- [1] 高井峰生, 前野誉, 守屋充雄, 川渕雅恵, 久保雅裕, 福本昌弘, ”