

## 避難所の耐震強度と収容可能人数に基づく通信経路構築手法の提案

大瀧 龍<sup>†</sup> 重安 哲也<sup>††</sup> 浦上 美佐子<sup>‡</sup> 松野 浩嗣<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 山口大学大学院 理工学研究科 <sup>††</sup> 広島国際大学 工学部 <sup>‡</sup> 大島商船高等専門学校

地震などの災害発生時、被災地救援活動の際に必要な情報の一つに被災地域住民の安否情報がある。そこで我々はこれまでに被災地域での安否情報の収集・提供に主眼を置いた被災情報提供システムを提案してきた。本稿では、避難所間距離や標高などの地理的条件、収容可能人数や耐震強度などの避難所の詳細情報、周囲の山・建物等の遮蔽物を考慮した上で避難所間ネットワーク構築案を自動生成するためのアルゴリズムを提案する。

### A Method for Constructing Shelter Network Based on Shock-Proof Residence and Capacity for Evacuee

Ryo Ohtaki<sup>†</sup> Tetsuya Shigeyasu<sup>††</sup> Misako Urakami<sup>‡</sup> Hiroshi Matsuno<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Science and Engineering, Yamaguchi University

<sup>††</sup> Faculty of Engineering, Hiroshima International University

<sup>‡</sup> Oshima National College of Maritime Technology

Once disasters have happen, damage information at a distressed area should be recorded prior to other information. We have been developing an autonomous disaster information exchanging system using wireless networks, which will be set up after the occurrence of disaster, providing safety information of evacuee to the disaster countermeasure office. This paper proposes an algorithm to give a plan of network design based on geographical factors such as distances between emergency shelters in addition to the conditions such as capacity and shock-proof resident of shelters.

#### 1 はじめに

近年、地震や津波をはじめとした大規模自然災害が世界各地で発生している [1]。これらの大規模災害が一度発生すると、建築物の倒壊や地形変化に起因する公衆回線の切断や通信機器の故障、さらには、公衆通信網では遠隔地から発信された安否情報確認のためのアクセスが集中することによる輻輳の発生が予想されるため、既存の通信システムでは必要な被災状況を十分に把握できない。

そこで我々は、これまで、災害の影響を受けずに避難所間に無線ネットワークを構築し、避難所間で安否情報を自律的に提供・共有する被災情報提供システムの提案を行ってきた [2-6]。

本提案システムでは、災害発生後の影響を受けない独自の通信回線を構築することで、避難所間の安否情報を自律的に提供・共有するという特徴を有している。これまでの研究成果としては、避難所間を接続する通信経路を決定するための方針と各避難所に適したアンテナ必要最低高の検討 [2]、GIS (Geographic Information System) を用いた安否情報のリアルタイム表示の検討 [3]、避難所間での安否情報交換アルゴリズムの検討 [4, 5]、中継経路を含んだ避難所間ネットワーク構築 [6] のそれぞれについて研究を進めてきた。

本稿では、余震や二次、三次災害の影響を受けにくい、より強固な避難所間ネットワークを実現するための避難所間ネットワーク構築アルゴリズムについて検討する。具体的には、被災地域に点在する避難所の中から、耐震強度の高い建物群を通信設備を設置すべき重要な避難所として選択する。また、これらの中から特に耐震強度の高い建物を通信を中継する機能を担う中核的な避難所として選択することで、ネットワークが切断しにくい強固な基幹回線を構築する自動生成アルゴリズムを提案する。

本稿で提案する耐震強度を考慮したアルゴリズムによって幹線基地局でカバーできる避難者数の向上することが確認できた。幹線基地局は耐震強度が高く、災害の影響を受けにくいので、より多くの避難者をカバーし、被災地域の避難者の安否等の情報を、より効率的に得ることができ、ネットワーク全体の有効性の向上も期待できる。

#### 2 被災情報提供システム

##### 2.1 既存システムの問題点

大規模災害発生後に安否情報を収集・提供することを目的とした安否情報提供システムの研究・実装はすでに行われている [7,8]。しかし、それらは災害発生に伴

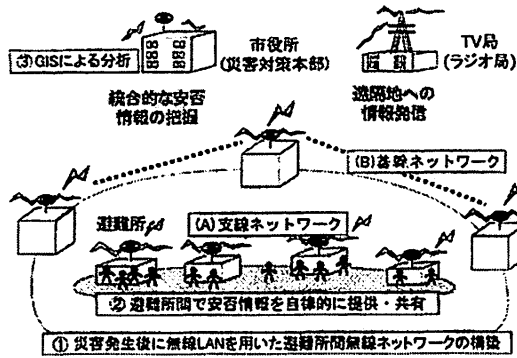


図 1: 提案システムの構想図

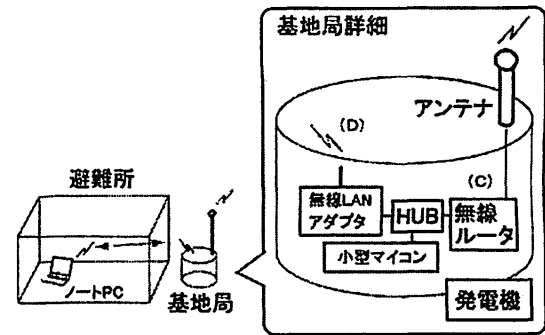


図 2: 基地局の構成図

う地形変化や電力供給路の切断の影響については考慮されていない。また、避難所で利用するシステムの具体的な通信回線の確保に関する議論は行われていない。

そこで本研究では、これらを考慮し、災害の影響を受けずに確実に被災者情報を交換できる、強固な被災者情報交換システムの提案を行う。以下では、提案システムとそれを満たす提案システムの特徴を述べる [2]。

## 2.2 提案システムの要求条件

これまでの我々の検討により、提案システムが満たすべき条件としては、次の3点が挙げられる。

- (1) 回線切断に強いネットワークが構築できること
- (2) 被災者の安否と所在、全避難所の状況が災害対策本部において迅速に把握できること
- (3) 遠隔地に向けた安否情報の提供機能も考慮すること

## 2.3 提案システムの特徴

要求条件を満たす提案システムは大きく分けて3つの特徴がある。

- (イ) 災害発生後に無線LANを用いて避難所間無線ネットワークを構築する
- (ロ) 避難所間で安否情報を自律的に提供・共有する
- (ハ) 収集した安否情報をGISにより視覚的にわかりやすく表示する

また、2.3.1 から 2.3.3 では以上にあげた特徴を詳しく説明する。

### 2.3.1 避難所間無線ネットワークの構築

(イ) では、避難所に無線LAN基地局とアンテナを設置し、避難所間で無線ネットワークを構築する(図1①)。具体的には、耐震強度の高い建物間で、被災地域全体をカバーするバックボーン回線となる基幹ネットワーク(図1(B))と基幹ネットワークを構成するそ

れぞれの基地局が周辺の中・小規模の避難所から構成する支線ネットワーク(図1(A))を構成する。これにより常設の公衆回線と異なり、災害発生時の影響を極力少なくしたネットワークを構築できる。また、提案システムでは、被災救援活動に必要な情報の交換を行うことを第一の目的としているため、被災地区外からの安否情報照会などの通信トラフィックは直接流入しないよう設計する。そのため、遠隔地からの呼の集中に起因する輻輳も回避できると考えられる。

### 2.3.2 安否情報の自律的な提供・共有

(ロ) では、各避難所で収集した情報をその他の避難所と自律的に交換・共有する小型マイコンを基地局に搭載する(図1②)。図2には避難所に設置する基地局の構成図を表している。この基地局には隣接した避難所間で通信するための無線ルータ(図2(C))と、避難所内にあるノートPCやPDAなどの端末と通信するための無線LANアダプタ(図2(D))の2種類の無線LANシステムが搭載されている。ここで、提案システムで使用する無線ルータはルート株式会社と合同開発を行っている。この無線ルータの特徴は小型、回線自動選択機能、低電力で動作が可能という利点を有するため、大規模災害が発生したときに対応できる仕様である。

支線基地局は最も近い幹線基地局と情報を提供・共有し、幹線基地局は隣接した幹線基地局と情報を提供・共有する。隣接した幹線基地局同士でデータを交換・共有することで各避難所は被災地域全体のデータを取得・共有する。このように、幹線基地局、支線基地局が全避難所の安否情報を保持することによって、被災地域の被災者は各避難内において地域全体の被災状況が把握できる。

### 2.3.3 GISによる安否情報の視覚的な表示

(ハ) では、災害対策本部を避難所間ネットワークに組み入れ、各避難所から提供された安否情報を統合することでGISの画面上に分析された結果を表示する(図1③)。これに関する分析例として図3に避難完了人数の割合をGISに表示した画面を示す。この機能を災害

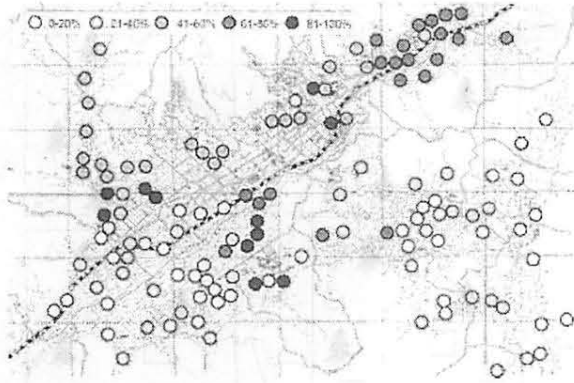


図 3: 避難状況を表示した GIS 画面

対策本部で使用することで、リアルタイムに各避難所の状況が把握できる。これにより、各避難所への救助物資支給等の迅速な対応が可能になる。また、GISへ表示することにより要救地域を視覚的に特定しやすいという利点もある。

### 3 ネットワーク生成プログラム (SNCP)

本節では、避難所間ネットワークを自動生成する SNCP (Shelter Network Construction Program) [6] アルゴリズムについて述べる。

SNCP では、避難所データ (位置座標・標高・収容可能人数) と遮蔽物データ (位置座標・標高) が必要となるため、3.1 では、避難所データ・遮蔽物データの取得方法を記載する。

#### 3.1 避難所・遮蔽物データ

##### 3.1.1 避難所データ取得方法

避難所の位置座標 (経度・緯度)、標高を調査するために、ゼンリン電子地図帳 [9] (図 4) を用いた。

なお、本地図データに表示される標高には、建物の高さに関するデータが含まれていないため、これについては避難所の階数から、建築基準法施行令 [10] に基づいた高さを算出した値を用いることにした。

避難所の収容可能人数は各地域を管轄する市役所の防災関係係からの資料を用いる。

##### 3.1.2 遮蔽物データ取得方法

無線 LAN において、屋外伝搬を行う際は、送受信機のアンテナ間での見通しが確保できるかどうか重要となる。そのため、各避難所間に位置する山・建物等の遮蔽物の調査を行った。

##### 3.1.3 地形の標高

山などの標高データはカシミール 3D [11] を用いて取得した。カシミール 3D を用いると、避難所の位置座標から避難所間の断面図を表示でき、避難所間に存在する複数の遮蔽物 (山などの地形的な遮蔽物) の標高を考慮した見通しの確保の可否が一度に判断できる。

カシミール 3D による避難所間の断面図を表示した



図 4: ゼンリン電子地図帳の平面表示画面

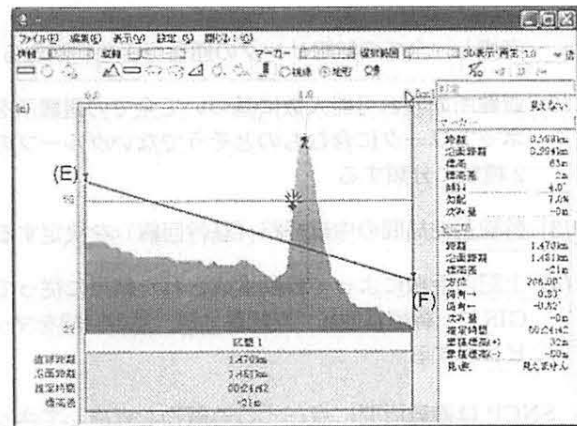


図 5: カシミール 3D による避難所間の断面図

例を図 5 に示す。断面図を測定したい避難所の経度、緯度 (図 5 (E) および (F)) を入力することでその避難所間の通信可否を判断する。

##### 3.1.4 建物による遮蔽物データ

建物による遮蔽は 3.1.1 節と同様にゼンリン電子地図帳の 3D 機能により判断する (図 6)。この 3D 機能を用いると、避難所間に存在する他の建物の高さ、階数が把握できる。ここで建物の高さは、やはり建物の階数から建築基準法施行令に基づいて算出する。

##### 3.1.5 山口市における避難所・遮蔽物データ

上記の手順により、実際に山口市における避難所・遮蔽物データを取得した。取得した避難所データは 136 箇所、建物による遮蔽物データは 2901 箇所、山による遮蔽物データは 655 箇所であった。

### 3.2 SNCP のアルゴリズム

SNCP のアルゴリズムを以下に示す。

- (1) 全ての避難所間に存在する山・建物等の遮蔽物を

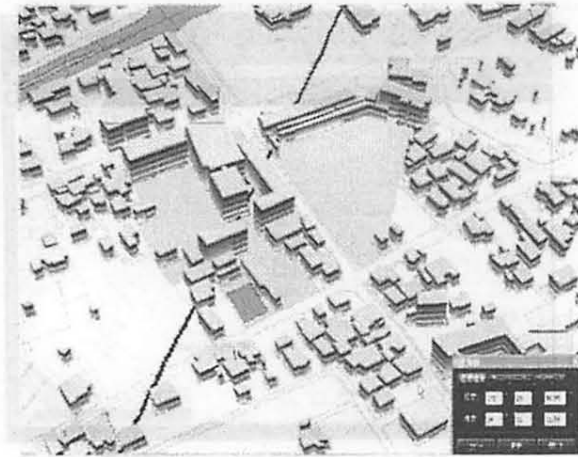


図 6: ゼンリン電子地図帳の 3D 表示画面

- 考慮し、全ての無線リンクの通信可否を判断する<sup>1</sup>
- (2) 避難所の収容可能人数に基づいて全ての避難所をネットワークに含むものとそうでないグループの 2 種類に分類する
  - (3) 幹線基地局間の中継経路（基幹回線）を決定する
  - (4) 上記の手順によって自動生成された結果に従って GIS に、幹線基地局、支線基地局、基幹回線をマッピングする

SNCP は避難所間に点在する遮蔽物を考慮してネットワークを構築するため、3.1 の避難所データ、遮蔽物データが必要となる。

手順 (1) では、避難所データ、遮蔽物データから無線リンクの通信可否を判断する。また、避難所間距離が無線 LAN の最大伝送距離 ( $D_{max}$ ) よりも大きい場合は、データ通信が保障されない可能性が高いため、避難所間距離が  $D_{max}$  よりも大きい場合はその避難所間での通信は不可能とする。

手順 (2) では、収容可能人数に基づいて全ての避難所をネットワークに含むものとそうでないグループの 2 種類に分類する。また、ネットワークに含むグループに対しては、以下に述べる手順 (3) で、さらに幹線基地局と支線基地局に分類する。

具体的には、手順 (3) では、全ての端末に対しダイクストラ法 [12] を用いて中継回数を算出する。ここで、中継回数とは、他の避難所間の通信経路にその端末が何回中継局として選択されたかを示す回数とする。そして、この中継回数がある一定数 (RelayLimit) を超える場合、その端末は幹線基地局とし、他の基地局と比べて、高い通信信頼性を要する基地局として取り扱う。また、幹線基地局以外の基地局は、支線基地局として取り扱う。さらにその後、クラスカル法 [12] を用

<sup>1</sup>本アルゴリズムでは、各避難所間の見通し内で伝搬が確保できる場合に通信可能とした

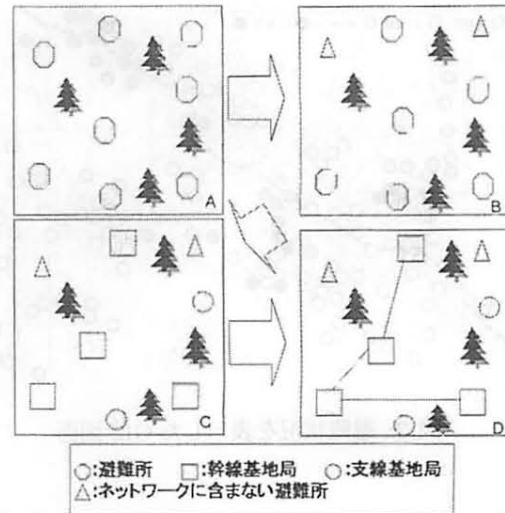


図 7: SNCP の流れ

いて、全ての幹線基地局を閉路を含まない最小経路で接続する。

手順 (4) では、以上の手順によって自動生成された避難所間ネットワークを GIS 上に表示する。

図 7 はアルゴリズムの概要を図示したものである。A は被災地域の避難所を示し、B はネットワークに含まれない避難所を決定し、C はネットワークに含む避難所を幹線基地局、支線基地局に分類し、D は幹線基地局の経路構成を表した図である。図中において A から B は手順 (1)(2) に対応し、B および C から D は手順 (3) に対応している。

### 3.3 SNCP で得られた避難所間ネットワーク

3.1.5 節では、136 箇所の避難所を対象に避難所情報を得たが、まず、狭い地域に限定して避難所間ネットワークを求めた。具体的には、山口市中心地域における 47 箇所の避難所を対象として、図 8 に示すような SNCP のアルゴリズムによる避難所間ネットワークを生成した。

### 3.4 SNCP の問題点

前述のように SNCP は中継回数を基に幹線基地局の選定を行う。以下では、同手法の抱える問題点を述べる。

まず、SNCP では中継回数を基準に幹線基地局を決定するが、この方式では耐震強度の低い避難所を幹線基地局として選択する可能性がある。耐震強度が低い避難所は災害の影響を受けやすい。また、概して、これらの耐震強度の低い避難所は、小規模かつ収容可能人数も少ないことが多い。従って、このような避難所を幹線基地局に選択すると、設置する無線機一台がカバーする被災者数が少なくなると考えられる。

また、そもそもこれらの耐震強度に欠ける避難所では、あらかじめ導入した無線機材が被災時に有効に機能しない可能性がある。



図 8: SNCP によって生成された避難所間ネットワーク

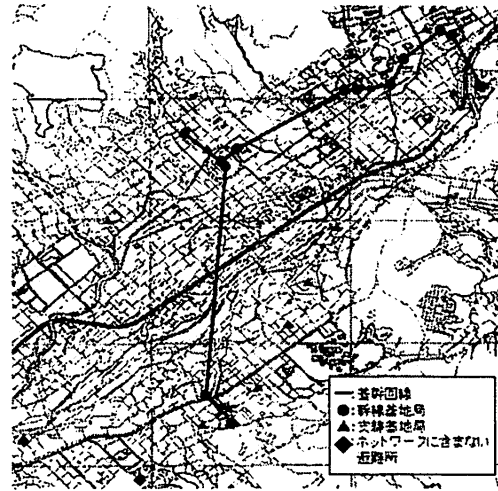


図 9: SNCP2 によって生成された避難所間ネットワーク

さて、幹線基地局は、その他の支線基地局に対してネットワークアクセスを提供する機能も担うため、幹線基地局の信頼性低下は、避難所間ネットワーク全体の有効性を著しく低下させることに繋がる。

そこで、本稿では、新たに耐震強度ならびに収容可能人数の二点を考慮し避難所を選定するアルゴリズムとして SNCP2 を提案する。

SNCP2 では、耐震強度を考慮することによって、より災害の影響を受けにくい強固なネットワークを構築すること、また、収容可能人数に応じて避難所の役割を分類することで幹線基地局がカバー可能な被災者数を増加することの二点を狙いとす。

#### 4 SNCP2 アルゴリズム

##### 4.1 SNCP2 アルゴリズムの詳細

以下に SNCP2 の動作を述べる。

- (1) 避難所の収容可能人数に基き、全ての避難所を i) 幹線基地局, ii) 支線基地局, iii) ネットワークに含まない避難所に分類する。また、幹線基地局の中継回数も算出する
- (2) 幹線基地局間の山・建物等の遮蔽物、幹線基地局間の高低差を考慮して、通信可否を判断する
- (3) 幹線基地局間の経路構成を決定する
- (4) 上記の手順で自動生成された結果に従い、GIS に幹線基地局、支線基地局、基幹回線をマッピングする

まず、手順 (1) では避難所の分類を行う。ここで、小学校、中学校、高等学校などの施設は、収容可能人数も多く、耐震強度が高いと考えられる。そのため、SNCP2 での避難所の分類は収容可能人数を基準に判断する。なお、中継回数は、幹線基地局が充実した設備の必要な基地局であるかどうかを判断する際の指標として用いる。

次に、(2) では幹線基地局間の通信可否を判断する。ここで、山・建物等による遮蔽物を考慮して通信可否を調査するのは既存の SNCP と同じであるが、これまでの我々の調査結果から、アンテナ高に 10m 以上の高低差がある場合は、通信品質が低下することを確認している [4]。従って、SNCP2 では、高低差が 10m 以上の避難所間では通信不可能と判断した。また、計算時間を短縮するため、全避難所間の通信可否を判断するのではなく、幹線基地局に関係する経路のみの通信可否を調査することにより遮蔽物データ取得に要する時間、アルゴリズムに入力する遮蔽物データ量の削減を行う。

(3) では基幹回線の決定を行うために、SNCP と同様にクラスカル法を用いて、幹線基地局間を閉路を含まない最小経路で接続する。

最後に (4) では、SNCP と同様に、避難所間ネットワークのマッピングを GIS を用いて行う。

##### 4.2 SNCP と SNCP2 の違い

SNCP を使用してネットワークを構築した場合は、単に中継回数が多いという理由のみで基幹回線の基地局が選定される。しかし、これでは選ばれた幹線基地局の中に耐震強度が低い避難所が選択されている場合がある。そのため、この幹線基地局が災害の影響を受け通信不可になると、ネットワークアクセスが不可能となる避難所が発生し、被災情報の取得の妨げとなる。これに対し、SNCP2 では収容可能人数で避難所の分類を行うので、耐震強度が高い避難所が幹線基地局となる。しかしながら、SNCP で導入した中継回数の概念は、ネットワークのリーチャビリティを強固する上で重要な要素となる。そこで SNCP2 では、中継回数を求めることにより、ネットワークの重要な幹線基地局には充実した設備を搭載する幹線基地局を決定する指標とする。



## 5 SNCP2 で得られた避難所間ネットワーク

図 8 の SNCP に対する比較として SNCP2 によって生成されたネットワークを図 9 に示す。

### 5.1 計算機シミュレーション

本節では、幹線基地局がカバーする収容可能人数の割合についての評価を行う。幹線基地局がカバーする収容可能人数の割合とは、被災地域における全避難所の総収容可能人数に対して、幹線基地局が、被災地域の避難所の収容可能人数をカバーする割合である。

#### 5.1.1 SNCP と SNCP2 で得られたネットワーク

SNCP、SNCP2 による生成されたネットワーク (図 8, 9) を比較する。図 9 から見てわかる通り、SNCP は、少ない幹線基地局数で被災地域全体をカバーしていることがわかる。また、SNCP2 で選択された幹線基地局は耐震強度が高い建物であるため、災害の影響を受けにくいネットワークであると考えられる。

さて、図 9 の点線の円で囲んだ部分は、非常に隣接した避難所が幹線基地局として選ばれている。しかし、アンテナやパソコンなどの設置やそれに伴うスタッフの確保などを考えると非常に隣接した避難所を幹線基地局として選ぶ必要はなく、どちらか一方を支線基地局とする方が現実的であると考えられる。隣接した避難所では、中継回数がほぼ同じ値になるため、中継回数で判断するのではなく、災害発生前にネットワークを構築し、パケットの LOSS 率の高い避難所を支線基地局とする等の解決策が考えられる。

#### 5.1.2 幹線基地局

幹線基地局がカバーする被災地区の避難所の総収容可能人数の割合を評価した。同結果を図 10 に示す。SNCP2 は SNCP と比較すると、幹線基地局数を同数設置した場合にもより多くの被災者を幹線基地局でカバーしていることが確認できる。

さて、前述したように、幹線基地局は、その他の局に比べて、より高性能かつ信頼性の高い無線設備を設置する予定である。従って、SNCP2 がより多くの割合の被災者を幹線基地局でカバーできていることは、避難所間ネットワーク全体の信頼性の向上に大きく寄与する結果であると考えられる。

## 6 おわりに

本稿では、避難所の耐震強度を考慮することで、耐震強度の高い避難所を幹線基地局として選択するアルゴリズム SNCP2 を提案した。

SNCP2 では従来の手法に比べて、幹線基地局が高い割合で被災者情報をカバー可能であることを確認した。

今後は、基幹回線の切断による幹線基地局の孤立化の発生に対処するために、バックアップ経路の構築を検討する。そして、SNCP2 が避難所間ネットワークを求める最適なアルゴリズムかどうかを調べるためにより多くのサンプルネットワークを構築し、ネットワーク

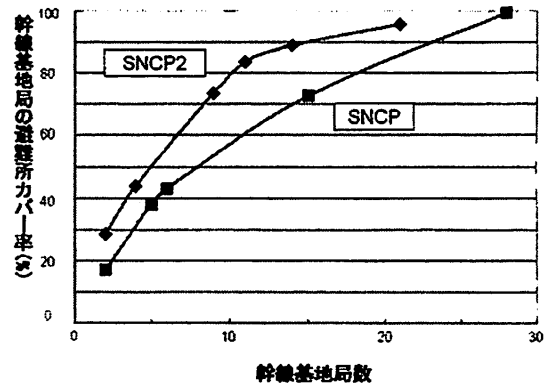


図 10: 幹線基地局の数と幹線基地局の避難所カバー率

内の収容可能人数分の安否情報等が全避難所でカバーできることを確認する実験を行う予定である。

### 謝辞

本研究の一部は、総務省消防庁消防防災科学技術研究推進制度 (平成 20 年度採択) の援助を受けている。

### 参考文献

- [1] 平成 19 年度版 防災白書 内閣府編
- [2] 亀川誠, 河本麻衣, 重安哲也, 浦上美佐子, 松野浩嗣, “自律的無線ネットワークによる被災情報提供システム～システムの構築と市街地におけるフィールド実験～,” マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2004) シンポジウム論文集, pp.547-550, 2004.
- [3] 河本麻衣, 亀川誠, 重安哲也, 浦上美佐子, 松野浩嗣, “自律的無線ネットワークによる被災情報提供システム～情報の共有化と GIS によるリアルタイム表示～,” マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2004) シンポジウム論文集, pp.551-554, 2004.
- [4] 亀川誠, 河本麻衣, 重安哲也, 浦上美佐子, 松野浩嗣, “自律的無線ネットワークによる被災情報提供システム～安否情報交換プログラムの実装と評価～,” 電気情報関連学会中国支部第 55 回連合大会講演論文集, pp337-338, 2004.
- [5] 武田理恵子, “被災者情報データフォーマットと小型マイコン間伝送プログラムの作成,” 山口大学理学部, 平成 19 年度卒業論文, 2008.
- [6] 坂本佳那恵, 浦上美佐子, 重安哲也, 松野浩嗣, “自律的無線ネットワークによる被災情報提供システム～避難所間ネットワーク構築アルゴリズムとフィールド実験～,” マルチメディア通信と分散処理ワークショップ論文集 pp.237-242, 2007.
- [7] WIDE Project, “IAA Alliance,” <http://www.iaa-alliance.net>
- [8] “岐阜県防災モバイルネットワークシステム,” <http://www.pref.gifu.lg.jp/pref/s11117/portal/06system.htm>
- [9] ゼンリン, <http://www.zenrin.co.jp/product/z10.html>
- [10] 建築基準法施行令, <http://law.e-gov.go.jp/htmldata/S25/S25SE338.html>, 1950
- [11] カシミール 3D, <http://www.kashmir3d.com/>
- [12] 平田富夫, “電気工学入門シリーズ アルゴリズムとデータ構造 -改訂 C 言語版-,” 森北出版株式会社, 2002.