

災害時を想定したアドホックネットワーク
構築手法の検討

**Study of Construction Methods for
Ad-Hoc Network under Disaster**

2025 年 3 月 4 日

東京都立産業技術高等専門学校

ものづくり工学科 情報通信工学コース

末廣 隼人

指導教員 高崎 和之

目次

1. はじめに	1
2. 災害時の応用例	1
3. 理論	2
3.1. アドホックネットワークについて	2
3.2. ルーティングプロトコル	2
3.2.1. リアクティブ型	3
3.2.2. プロアクティブ型	5
3.2.3. ハイブリッド型	6
3.3. アドホックネットワークの技術的課題	6
3.3.1. 隠れ端末問題	7
3.3.2. さらし端末問題	7
3.4. Bluetooth	7
3.4.1. Bluetooth Classic	8
3.4.2. Bluetooth LE	8
4. 提案手法	9
4.1. シミュレーション仕様	9
4.1.1. アルゴリズム	10
4.1.2. 人口密度が低い場合	12
5. 結果	14
5.1. 人口密度の定義	14
5.2. 人口密度が高い地域の場合	14
5.3. 人口密度が低い地域の場合	15
6. 考察	17
参考文献	18

1. はじめに

日本では地震をはじめ、台風や豪雨などの自然災害が発生しており、その影響でネットワークが使用不能になる可能性がある。特に、大規模災害時に通信インフラへのアクセス集中や通信基地局の損壊等により、ネットワークが機能しない事例が確認されている^[1]。そのため、災害発生時においても迅速かつ確実に情報を伝達し、被災状況を把握するための手段として、アドホックネットワークの活用が注目されている。

アドホックネットワークは、通信インフラ設備を必要とせず、スマートフォン等の端末同士が直接通信を行うことで、その場限りのネットワークを即座に構築できる技術である。この特性により、災害発生直後の混乱した状況や通信設備が損壊した環境下でも、周囲の被災状況を迅速に情報共有が可能となる。そのため、被災者同士の連絡手段や、救助隊の情報伝達手段として有望視されている。しかし、実際の環境でアドホックネットワークを運用する場合、電波干渉の影響やノード数の制限、通信範囲の変動など、さまざまな課題が生じる。特に、都市部と地方部では人口密度が異なるため、ノードの配置や最適な経路選択に影響を与えることが考えられる。

近年、Bluetooth 技術の発展が著しく、1999 年に Bluetooth が初めて登場して以来、通信技術の進化が続いてきた。従来の Bluetooth Classic と比較して、大幅な省電力化を実現した Bluetooth Low Energy が 2010 年に発表され、広く普及するようになった。Bluetooth Classic と Bluetooth Low Energy の違いとして、Bluetooth Classic は高速なデータ転送を可能とし、オーディオ機器やワイヤレス周辺機器の接続に適している。一方、Bluetooth Low Energy は低消費電力での通信を重視し、IoT デバイスやセンサーネットワークなど、省電力が求められる用途での利用に適している。そのため、Bluetooth Low Energy はアドホックネットワーク構築の一手段としても有望視されており、特に電源供給が制限される災害時の環境において、その低消費電力特性が有効に機能すると考えられる。

本研究では、人口密度に応じた経路構築方法を考案し、その有効性をシミュレーションを用いて検証する。実際の環境ではノード数の制約や通信の不安定性が存在するため、シミュレーションを活用することで、最適なルーティング方式を検討し、安定した通信を実現するための条件を明らかにすることを目的とする。特に、人口密度の違いが通信経路の選択にどのような影響を与えるかを詳細に分析し、災害時のアドホックネットワーク構築における実用的な指針を提示する。

2. 災害時の応用例

災害時に使用するアドホックネットワークの応用例として、次が挙げられる。

- 無線通信機能を搭載した自動車を用いたアドホックネットワークの構築^[2]
災害時に通信インフラが使用できない環境下でも、無線通信機器を搭載した自動車が被災地域の各地点に配置することでネットワークの構築が可能。
- ネットワーク化された群ロボットによる被災者発見システム^[3]
自律移動ロボットを用いて災害救助を行う際、災害現場では建物による電波の減衰が発生し、ロボットへの指示が出せなくなる。そのため、他のロボットを経由することで現場内にいるロボットへ指示を出すことに用いられる。
- 災害時救急救命支援に向けた電子トリアージシステムの設計開発^[4] 患者の重症度を判別するトリアージシステムを、患者が装着しているセンサをアドホックを用いて取得し、患者の重症度とおおまかな位置の取得を目的としている。

などがある。本研究では、近年増加しているスマートフォンの保有率に注目し、人口密度に応じた経路構築方法を提案した。

3. 理論

3.1. アドホックネットワークについて

アドホックネットワークとは、中央の管理者やルータ、アクセスポイントなどの既存のインフラストラクチャを介さずに、端末 (以下では、ノードと呼ぶ) 同士が直接通信を行う一時的なネットワークのことである。電波が届かず直接情報を交換できないノード同士の場合、基地局を経由せずに途中のノードが中継するマルチホップ通信により情報交換が可能になる。

これらを踏まえると、ノードさえあればどのようなエリアでも即席にネットワークを形成することができるためとても便利だが、ノード移動に伴うネットワークトポロジや伝送品質の急激な変化、利用可能な無線周波数帯域の限界、バッテリー依存によるノードの消費電力などの制約といった厳しい条件がある。そのため、ルーティングやチャネルアクセスの制御、周波数帯域の有効活用、ノードの電力消費の節約等の多くの課題がある [5]。

アドホックネットワークに関する研究の歴史は長く、アドホックネットワークの第一世代である PRNET(Packet Radio Network) は、1972 年に米国の国防高等研究計画局によって開発され、軍事利用を目的とした研究のために開始された。次に、第二世代である NTDR(Near-term Digital Radio) も、米国により軍事目的で研究が行われ、1980 年代頃に実用化された。そして、第三世代である MANET(Mobile Ad hoc NETwork) を含む現在のアドホックネットワーク技術は、IEEE802.11 や Bluetooth などの近距離無線通信技術を活用し、民間でも使用できるアドホックネットワークが 2000 年頃から誕生した。加えて、同時期から災害時用ネットワークとしての活用に期待が高まっていた。

3.2. ルーティングプロトコル

アドホックネットワークには、ネットワークトポロジの急激な変化や消費電力の増加など、経路の構築前、構築後での課題が多く残っている。そのため、アドホックネットワークを効率的に構築、運用するために、ルーティングプロトコルが用いられている。図 1 にルーティングプロトコルの分類とプロトコルの代表例を示す。

ルーティングプロトコルは、大きくリアクティブ型、プロアクティブ型、ハイブリッド型の 3 つに分類される。それぞれ、経路探索のタイミングや管理方法が異なり、データ転送量 (以下では、スループットと呼ぶ) やオーバーヘッドなどに影響を与える。次項にそれぞれの特徴と簡単な概略図を用いて紹介を行う。

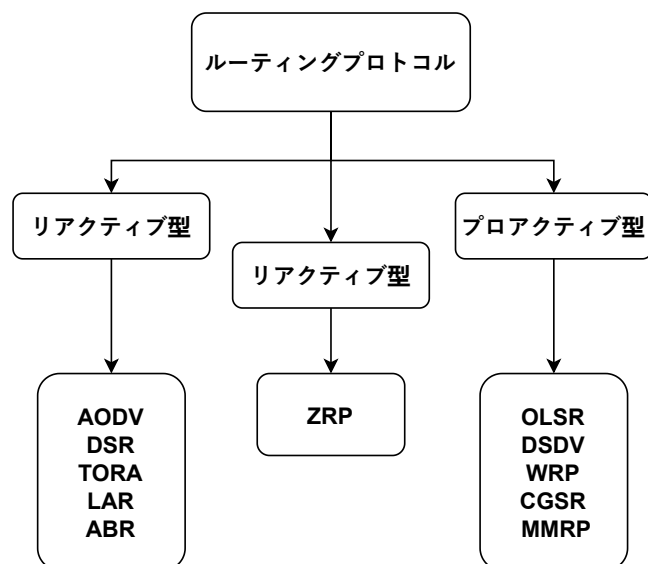


図 1 ルーティングプロトコルの分類

3.2.1. リアクティブ型

あるノードが通信要求を行なった時にルーティングプロトコルに基づいて電波をフラッディングし、近隣のノードとその場で情報のやり取りを行い経路生成を行う。通信要求がなされた時に作成されるため、実際に通信が開始されるまでにラグが発生する。

このようにする理由として、アドホックネットワークを構築するノードのデバイスがバッテリーなどで駆動することが多いため、むやみやたらに電波をフラッディングしてしまうと、電池の消費速度が速くなってしまふからである。加えて、ノードの移動により、ネットワークが動的に変化変化するため、数分前に構築された経路表の有効性が失われる場合が多い。したがって、通信直前に経路表を生成することで電波のフラッディング回数を減らし、駆動時間の長時間化が行われる。それゆえに、通信開始が遅くても良い環境で用いられている。

リアクティブ型での動作イメージを図2に示した。ノードA～Eが図のようにある時、ノードAとEが通信を行う場合を考える。次に、リアクティブ型での経路構築の手順を示す。

- ① ノードAが自身のIDと宛先ノードの情報を載せてフラッディングを行う。
- ② ①の情報を受信したノードは、送信元を記録してから、宛先を確認する。今回の場合、宛先が違うため①と同様の情報を載せてフラッディングを行う。
宛先のノードに辿り着くまで行う。
- ③ ②の情報を受信したノードEは、今回の宛先であるため、これまでの経路を逆順に辿って行き、発信元のノードAに経路が生成されたことを伝達し、経路表をもとに通信を行う。

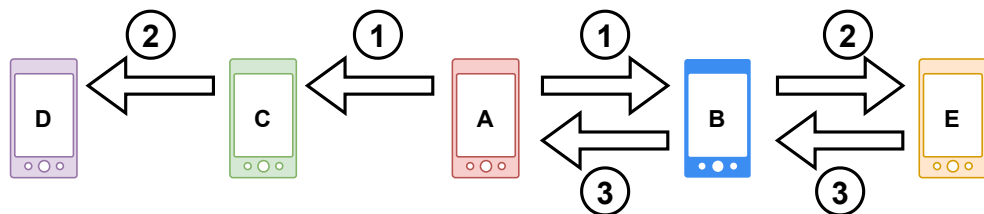


図2 リアクティブ型の動作イメージ図

ノードC, Dはノードが存在する限りフラッディングを行なってしまうため、現在の情報にフラッディングをする回数も同時に送信し、回数が0になったら、これ以上の探索は実施しないという対策が必要となる。

代表的なプロトコルとしてAODV, DSR, TORA, LAR, ABRなどがある。次にそれぞれの特徴について概説する。

- AODV(Ad hoc On-Demand Distance Vector)^[6]
AODVとは、アドホックネットワークの構築と維持を望むノード間で動的かつ自己開始型のマルチホップルーティングを可能とするプロトコルである。
AODVでは、ノードが新たな宛先への経路を要求した際に即座に経路を構築し、ネットワークに参加していないノードの経路情報を保持しないという特徴がある。加えて、ネットワークトポロジの変化に適応し、接続の断絶や変更に対して即時に対応が可能である。各ノードは、次ノードの情報を保持するため、接続が切れても周辺のノードにしか影響が行かないため、オーバーヘッドが少ない。しかし、遠くのノードの存在を知ることができないためループが発生しても検知ができない。そのため、フラッディングする情報の中にシーケンス番号を入れ、情報に有効期限を持たせループを回避する。
- DSR(Dynamic Source Routing)^[7]
DSRとは、AODVと同様な必要時に経路を構築と維持を行う動的なプロトコルである。加えて、一度生成された経路を基に通信を行う、キャッシュを利用した手段もある。
DSRでは、アドホックネットワークの経路構築と維持を行うにあたって、ルートディスカバリーとルートメンテナンスの2つの主要なメカニズムで構成されている。AODVでは、各ノードが次ホップ情報を管理しているため、オーバーヘッドは少ないが、DSRでは、送信元ノードが経路情報を管理するため、オーバーヘッドが大きくなってしまふ。しかし、再度通信を行うとき、一度通信をした

記録があれば即座に通信を行うことができる。加えて、送信元ノードが経路情報を保持しているため、同じノードを経由したとき、それ以上のループを行わないようにすることが可能になる。

- TORA(Temporally-Ordered Routing Algorithm)^[8]

TORA とは、動的なネットワークトポロジの変化に適応することを目的とした分散型ルーティングプロトコルである。

TORA では、ネットワークトポロジの変化に適応するために、参加したノードや接続が切断されたノードの通知を局所的に行い、広範囲な更新を行わないことで、通信のオーバーヘッドを抑え、ネットワーク規模が拡大しても対応可能になる。また、これまでのプロトコルでは、宛先までの単一方向の経路情報しか保持しなかったが、TORA では、各ノードは隣接ノードのみの情報を保持するため、送信元に戻る選択肢がなくなり、ループが抑制可能になる。加えて、複数の経路表を作成することも可能となり、経路表の中で接続が切断されたノードが発生しても、予備の経路を使うことで通信を維持することが可能となる。

- LAR(Location-Aided Routing)^[9]

LAR とは、ノードの地理的な位置情報を活用することで、ルーティングの探索範囲を制限し、通信のオーバーヘッドを削減することを目的としたプロトコルである。

従来のリアクティブ型プロトコルでは、宛先ノードを発見するためにネットワーク全体に情報をフラッディングするため、不要なリクエスト情報が大量に発生し、ネットワークの帯域を圧迫していた。しかし、LAR では、GPS(Global Positioning System) 等で各ノードの位置情報を取得し、ルート探索の際に情報をフラッディングするノードを限定することで帯域の圧迫を阻止することで可能となる。

探索方法として、送信元は他ノードとの事前のやり取りで宛先ノードの大まかな位置情報を取得しており、経路探索を行う際に、宛先ノードの最終位置と移動速度を元に宛先ノードが存在する可能性が高い領域、期待領域を計算により求め、宛先ノードが移動する可能性のある範囲を推測する。また、フラッディングの拡散を制限するために、経路探索の範囲をリクエスト領域を設定する。これは、送信元と期待領域が含まれるように設定される。

これらの設定が完了した後、送信元がリクエスト領域に情報をフラッディングし、領域内にいるノードのみが中継行う。そして、宛先に到達したら、送信元にこれまでの経路を送信し、最適な経路を構築させる。また、宛先に到達しなかった場合、リクエスト領域の範囲を拡大させ再度経路探索を行う。

これにより、過剰なフラッディングを抑制かつ経路構築の高速化が可能となる。しかし、全てのノードが GPS を搭載している必要がある。また、リクエスト領域を正しく設定を行わないと、再探索が発生するため、通常より長い遅延が発生する可能性がある。

- ABR(Associativity-Based Routing)^[10]

ABR とは、アソシアティビティ (持続の安定性) の概念を活用しており、長時間接続が維持されるノードを優先的に利用することで、頻繁な経路の再構築を抑制するプロトコルである。

ABR では、アソシアティビティティック (Associativity Ticks), いわゆる接続安定度と呼ばれる数値が定義されている。また、このプロトコルでは、ノードが移動している移動期間とノードが静止している安定期間と呼ばれる二つの状態が定義されている。そして、この二つの期間の境界を示す閾値をアソシアティビティ閾値と定義された。

ノードが移動中の場合、ティックは低い値となり、静止している場合、高い値を示す。ティックの数値がアソシアティビティ閾値を超えたとき、そのノードは安定しているとみなされ、通信時の中継ノードとして利用される。このため、ノードは定期的に隣接ノードとやり取りを行い、隣接ノードのティックを更新する。

これにより、不要な経路を保持しないため、オーバーヘッドの削減やその経路の信頼性が向上する。

3.2.2. プロアクティブ型

リアクティブ型では通信要求が発生してから経路表が作成されるのに対し、プロアクティブ型では近隣のノードと周期的に情報のやり取りを行い、通信要求が発生したらすぐに通信を開始することができる。しかし、リアクティブ型と比べ頻繁に情報のやり取りを行うため、電池の消費が早い。常に新鮮な経路表を保持しているためノードの入れ替わりが激しい環境では有効的である。

以下にリアクティブ型での動作イメージを図3に示した。各ノードは常に近隣のノードと情報をやり取りしているため、通信の開始が早く、また、近隣のノードが接続が不可能になったとしても、すぐに新たな経路を生成することが可能であり安定した通信を行うことができる。

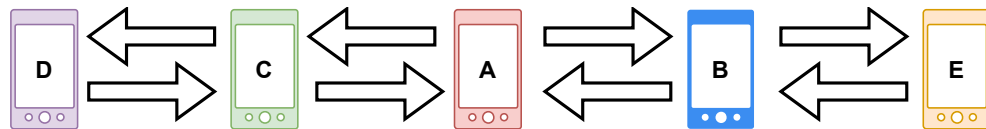


図3 プロアクティブ型の動作イメージ図

代表的なプロトコルとして OLSR, DSDV, WRP, CGSR, MMRP などがある。次にそれぞれの特徴について概説する。

- OLSR(Optimized Link State Routing)^[11]

OLSR とは、定期的に行われる通信で得たネットワーク全体のトポロジ情報を元に最適経路を求めるプロトコルである。経路を求める方法として、有線 LAN で使用される OSPF(Open Shortest Path First) で計算される。

このプロトコルでは、ネットワークトポロジ情報の更新時、効率的に行うために MPR(MultiPoint Relay) 集合と呼ばれるものを用いるのが特徴である。

通常のフラッディングの場合、初めて情報を受信したノードは必ず一度は近隣ノードに情報をフラッディングする。しかし、近隣ノードの中にすでに同じ情報を受け取っているノードがいる可能性があるため、無駄な通信が発生する。そして、これを防ぐために MPR 集合を用いて中継ノードを決定し、効率的な情報の伝搬を行う。

- MPR 集合とは、1 ホップ内の隣接ノードと 2 ホップ内の隣接ノードがある場合、1 ホップ内の隣接ノードの中から 2 ホップ内の隣接ノードをカバーできる 1 ホップ内のノードを MPR ノードとして選定し、MPR ノード以外はフラッディングをしない。そして、3 ホップ、4 ホップ、...、と数が増えても同様に MPR ノードを選択を行う。このノードの集合を MPR 集合という。

- DSDV(Destination-Sequenced Distance-Vector)^[12]

DSDV とは、リアクティブ型の AODV と同様なアルゴリズムであり、シーケンス番号でループを回避するが、近隣ノードと定期的に通信を行うため、ノードの接続が切断された場合でも、予備の経路を構築でき、AODV より安定した通信を実施が可能である。

しかし、ネットワークトポロジの規模大きいまたは変化が激しい環境では、トポロジ更新によるオーバーヘッドが大きくなり、経路更新の効率が低下してしまう。

- WRP(Wireless Routing Protocol)^[13]

WRP とは、DSDV プロトコルの問題を改善し、ループを回避しつつ、より効率的な経路更新を行うプロトコルである。

WRP では、距離テーブル、ルーティングテーブル、リンクコストテーブル、メッセージ再送テーブルの 4 つのテーブルを各ノードが管理し、ループを回避し、効率的な経路構築を行う。次に、各テーブルの機能を示す。

- 距離テーブル：各隣接ノードが把握している経路情報を記録。最適な経路を構築する際に使用。
- ルーティングテーブル：実際に使用する経路情報のホップ数などを記録。
- リンクコストテーブル：隣接ノードとの品質、安定度を記録。
- メッセージ再送テーブル：経路更新メッセージを管理。更新メッセージが未応答のノードに対して確認メッセージの再送を行う。

- CGSR(Cluster-head Gateway Switch Routing)^[14]

CGSR とは、クラスタと呼ばれるノードの集合を動的に生成し、クラスタ間で別チャンネルを用いて通信を行うことで、情報の衝突を防ぐプロトコルである。

CGSR では、クラスタ内でノードがヘッダ、メンバ、ゲートウェイのどれかに割り当てらる。

- クラスタヘッダ：クラスタ間の通信を管理するノード
- クラスタメンバ：一つのクラスタヘッドに属するノード。他ノードと通信する際、クラスタヘッドを経由して通信を行う。
- クラスタゲートウェイ：複数のクラスタに所属しているノード。クラスタ間の通信の際、チャンネルを変更する中継処理の役割を持つ。

このプロトコルでは、クラスタ単位でノードを管理するためネットワークの規模が拡大しても管理他のに比べ、容易である。しかし、クラスタヘッドが通信時に経路されるため、他ノードと比較して電力を多く消費する。その結果、ネットワーク全体の寿命が短い。

- MMRP(Mobile Mesh Routing Protocol)^[15]

MMRP とは、ネットワークトポロジをメッシュ型で構築するプロトコルである。

MMRP では、ノードが移動により接続が切断された場合、切断されたノード間の経路を他ノードを経由するように切り替えるため、通信経路を確立でき通信が安定する。しかし、ノードが移動中での通信は頻繁に接続するノードが変化するため、移動ノードの通信は安定しない。

3.2.3. ハイブリッド型

リアクティブ型とプロアクティブ型の長所を組み合わせたプロトコルである。代表的なプロトコルとして ZRP(Zone Routing Protocol)^[16] がある。

図 4 に ZRP の動作イメージを示す。ZRP では、ゾーンと呼ばれる範囲で使用するプロトコルを分ける。この図では、ノード A を中心としてホップ数を 1 とした場合のゾーン半径を示す。そして、ゾーン内に存在するノードはプロアクティブ型でネットワークを構築する。また、ゾーン外のノードには、リアクティブ型で通信要求が発生した時に経路構築を行う。

メリットとして、ゾーン内では短距離通信の遅延が最小化され、ゾーン外では不要な情報のやり取りを減らすことが可能となる。また、ネットワークが大規模になったとしても全ての経路情報を保持しなくて良いため効率的に運用することが可能である。しかし、デメリットとして、ゾーン半径の設定が困難なことである。ゾーン半径が小さい場合、遠距離通信が頻繁に発生する。また、ゾーン半径が大きい場合、ゾーン内に存在するノードが多数になり計算コストとメモリ消費が増大する。

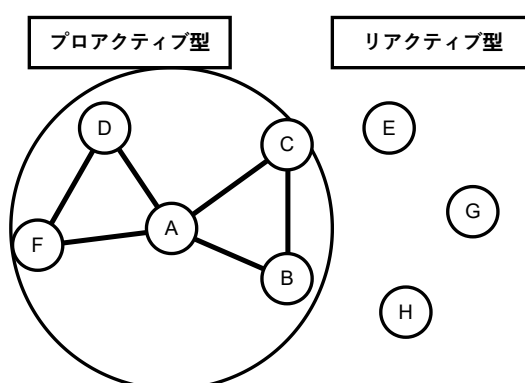


図 4 ハイブリッド型の動作イメージ図

3.3. アドホックネットワークの技術的課題

3.1 節で述べた課題のほかに、隠れ端末問題とさらし端末問題があり、これらがアドホックネットワークが一般的に普及されていない原因の一つとも言える^[17]。次項にそれぞれの問題について説明する。

3.3.1. 隠れ端末問題

図 5 に隠れ端末問題を表した図を示す。図 5 では、スマートフォンがノード、その周りにある円がノードからの通信距離を表している。ノード B の円は見やすさの都合上省略している。

隠れ端末問題とは、ノード A と C がノード B に接続を行うとき、ノード A、C は互いに通信可能距離外にあるため互いの存在が隠れてしまい、ノード B が誰とも通信をしてないと判断してしまう。そして、ノード A、C が同時にデータをノード B に送信した場合、電波干渉やデータの衝突する問題が発生がある。この問題により通信制御のスループット (処理能力) の低下が発生し、通信に遅延が生じる。

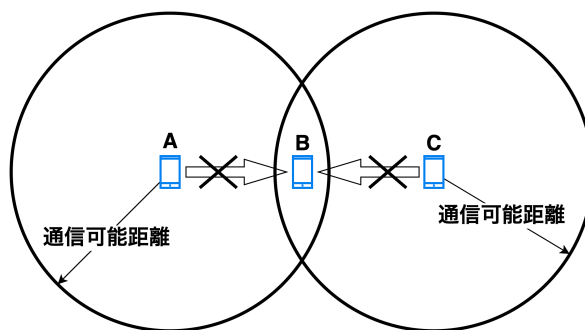


図 5 隠れ端末問題

3.3.2. さらし端末問題

図 6 にさらし端末問題の図を示す。図 6 で表されているスマートフォンや円は隠れ端末の場合と同様の意味である。

さらし端末問題とは、他ノードからの過剰な通信抑制による伝送速度や通信品質の低下が発生する問題である。図のように、ノード A と D が通信を行い、ノード B と C が通信を行う場合を考える。ノード A と B が互いに通信可能範囲内にいるとき、お互い別のノードと通信しているのにも関わらず、お互いに通信を開始しないように通信抑制が頻繁に行われ、結果的に伝送速度が低下してしまう。

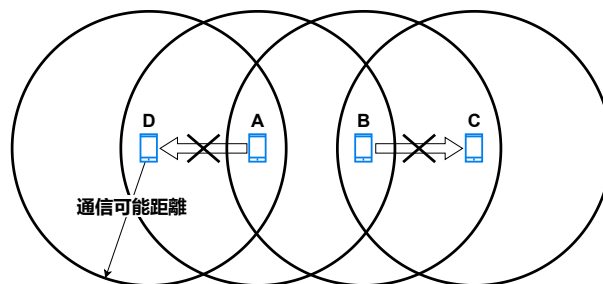


図 6 さらし端末問題

3.4. Bluetooth

Bluetooth とは、デジタル機器用の近距離無線通信規格の一つであり、数メートルから数十メートル程度での距離間で電波を用いて簡易的な情報のやり取りを行う。加えて、免許を必要としない 2.4GHz の周波数帯を使用するため PC のマウスやキーボード、ワイヤレスイヤホン、スマートウォッチなど生活の身近に使用されている。IEEE の規格名は IEEE802.15.1 である。

1994 年、スウェーデンの Ericsson 社が近距離無線通信規格の開発をはじめ、1998 年に Promoter5 社 (Ericsson, Intel, IBM, Nokia, 東芝) により Bluetooth SIG (Special Interest Group) が設立され、Bluetooth の規格策定が行われている。そして、現在まで公開されている仕様として、Bluetooth Classic と Bluetooth Low Energy (LE) の 2 種類に分けることができる。表 1 にそれぞれの特徴を示した。

表 1 Bluetooth Classic と BLE の特徴 ^[18]

	Bluetooth Classic	BLE
周波数帯	2.4GHz (2.402 ~2.480GHz)	
チャンネル利用	周波数ホッピングスペクトラム拡散 (FHSS)	
チャンネル数	1MHz 間隔で 79 チャンネル	2MHz 間隔で 40 チャンネル (3 つはアドバタイジング用チャンネル)
転送速度	3, 2, 1 Mbps	2, 1 Mbps, 500, 125 kbps
同時接続台数	最大 7 台	仕様上無限
消費電力	1W	0.01W ~0.5W
通信トポロジ	スター型	スター型, メッシュ型
主な用途	マウス, イヤホンなど	IoT センサ, スマートウォッチなど

3.4.1. Bluetooth Classic

Bluetooth Classic とは, 1999 年に一般公開された Bluetooth 1.0 から 3.0 までのバージョンを指す.

デバイスには, 接続要求を行う親機 (Master) と接続要求を受ける子機 (Slave) の 2 種類ある. Master はいわゆるスマートフォン, Slave はワイヤレスイヤホン等のガジェットに相当するものである. この時, Master は同時に最大 7 台の Slave と接続が可能. また, Bluetooth で位置検出を行う研究が行われている ^[19].

通信距離は Class1~3 のように電波強度で分類され表 2 のようになっている.

表 2 Bluetooth Classic の場合 ^[20]

Class 1	最大 100m (4dBm 超 ~20dBm)
Class 2	最大 10m (0dBm 超 ~4dBm)
Class 3	最大 1m (0dBm)

3.4.2. Bluetooth LE

Bluetooth LE とは, 2010 年のに公開された Bluetooth 4.0 以上のバージョンを指し, このバージョンから低消費電力デバイス向けに, より省電力に特化した機能が追加された.

Bluetooth LE のデバイスでは, 親機を Central, 子機を Peripheral と呼称が変わる. 先ほどとデバイスの意味合いは同じだが, Central が同時に接続できる Peripheral の数は仕様上無限という違いがある. しかし, Bluetooth チップ等のデバイスに依存する. また, Bluetooth 5 からは多対多のメッシュネットワークを構築できるようになり, アドホックネットワーク利用への期待が高まっている. 本研究では, 災害時いつインフラが回復するか不明の状況を想定しているため, 長時間駆動に特化した Bluetooth LE を搭載したノードを用いた場合でシミュレーションを行った.

通信距離はデータ転送速度で異なり, 表 3 のようになっている.

表 3 BLE(最大出力が 20dBm) の場合 ^[20]

2Mbps	最大 100m
1Mbps	最大 100m
125kbps	最大 400m

4. 提案手法

本研究では、人口密度に基づくアドホックネットワークの構築方法を提案する。

まず、アドホックネットワークを用いる場面として、地震等の大規模災害による基地局の損壊や停電等によりネットワークにアクセスができない場面だと考えられる。また、通信インフラが機能しない状況では、基地局の停電が復旧するまでの間、生き残っている基地局にアクセスが集中することで回線が混雑し、家族や知人の安否確認ができなくなり、救助を必要としている人の声が救急隊まで届かない。加えて、ネットワークにアクセスができないため、現在の被災状況を知ることができないなど、被災者の精神的負担が大きくなってしまう。この事態を避けるために、被災地域限定でアドホックネットワークを通信インフラが復旧するまでの間利用することで、現在の被災状況や避難場所、安否確認等を行え、被害の拡大防止や被災者の不安を和らげることが可能になると考えられる。

しかし、先ほどのような被災状況でアドホックネットワークを構築する際、重要になってくるのがノードの密度である。なぜなら、ノードの通信範囲内にノードが存在しなければネットワークを拡大することができないからだ。その上、自然災害は予測不能であり、被災地の通信環境は地域ごとに大きく異なる。特に、人口密度が低い地域の場合、ノード数が少なく、間隔も広がるためアドホックネットワークを構築するのが困難になる。これを解決するために、初めに各都道府県に対して今回作成したシミュレーションを実行し、本研究内での人口密度が高い、低い地域を選定する。この結果を元に、人口密度が低い地域に対して、公共物である電柱にノードを追加した場合のシミュレーションを実施し、その有効性について検証する。

4.1. シミュレーション仕様

シミュレーションで使用するノードは、消費電力が少ない Bluetooth LE とし、その接続目安距離である 30m を最大通信距離とした。また、実施する範囲は 1km 四方の平面上で、その範囲内にノードをランダムで生成する。生成するノード数は、2024 年 10 月 1 日現在の各都道府県の人口密度^[21]にスマートフォンの所有率 88.6%^[22]を乗じた数とした。表 4 に各都道府県の人口密度とノード数を左から降順に示す。

表 4 各都道府県の人口密度^[21]

地名	人口密度	ノード数	地名	人口密度	ノード数	地名	人口密度	ノード数
東京都	6451	5716	広島県	320	284	大分県	171	152
大阪府	4603	4078	宮城県	309	274	新潟県	167	148
神奈川県	3817	3382	長崎県	303	268	鹿児島県	167	148
埼玉県	1930	1710	群馬県	297	263	徳島県	165	146
愛知県	1443	1278	三重県	296	262	鳥取県	151	134
千葉県	1217	1078	栃木県	294	260	長野県	147	130
福岡県	1022	905	石川県	262	232	宮崎県	133	118
沖縄県	643	570	岡山県	257	228	福島県	126	112
兵庫県	635	563	富山県	234	207	青森県	121	107
京都府	547	485	熊本県	229	203	山形県	108	96
香川県	489	433	愛媛県	225	199	島根県	96	85
茨城県	461	408	山口県	209	185	高知県	92	82
静岡県	453	401	和歌山県	186	165	秋田県	77	68
滋賀県	349	309	岐阜県	180	159	岩手県	75	66
奈良県	348	308	山梨県	177	157	北海道	64	57
佐賀県	322	286	福井県	176	156			

4.1.1. アルゴリズム

ここでは、埼玉県の人口密度 1930 人/km²、ノード数 1710 個を用いてアルゴリズムの説明を行う。

前提として、全てのノードが周辺にいるノードと接続するようにアドホックネットワークを構築してしまうと、経路全体の複雑化や冗長化になり、通信速度や品質が低下してしまう。この課題を解決するために経路を単純化する必要があると考えた、そこで、ノードの接続条件を次のように定めた。

- ① 情報を送信するノード (以下、上流ノードと呼ぶ) が情報を受け取るノード (以下、下流ノードと呼ぶ) に対して hello メッセージと自身の MAC アドレスをフラッディングする。
- ② 受信した下流ノードは reply メッセージと自身の MAC アドレスを上流ノードに返す。但し、他ノードと接続済みの下流ノードは上流ノードの hello メッセージを無視する。
- ③ 上流ノードは hello メッセージの返信数で下流ノードの数を認識する。
- ④ 下流ノード数が閾値 X より大きいなら下流ノードの中からランダムで 1 つ選択し、そうでないならランダムで 2 つ、下流ノード数が 2 以下ならそのノードと接続する。

$$\text{接続ノード数} = \begin{cases} \text{下流ノード数} > X \rightarrow 1, \\ \text{下流ノード数} \leq X \rightarrow 2, \\ \text{下流ノード数} \leq 2 \rightarrow \text{下流ノード数} \end{cases}$$

X はノード密度の閾値である。 X を大きくすると接続ノード数が増加し、小さくすると接続ノード数が減少する。

次に、先ほどの条件を閾値 $X = 5$ としてシミュレーションした場合について、より具体的に説明を行う。

(1) 初期状態

図 7 にシミュレーションの初期状態を示す。

この図において、黄色の点はノード未接続ノード、赤色の点はスタートノードおよびターゲットノードを示している。また、中心に最も近い赤色のノードをスタートノード、中心から最も遠い位置にある赤色のノードをターゲットノードとし、接続の成功を判断する指標とした。

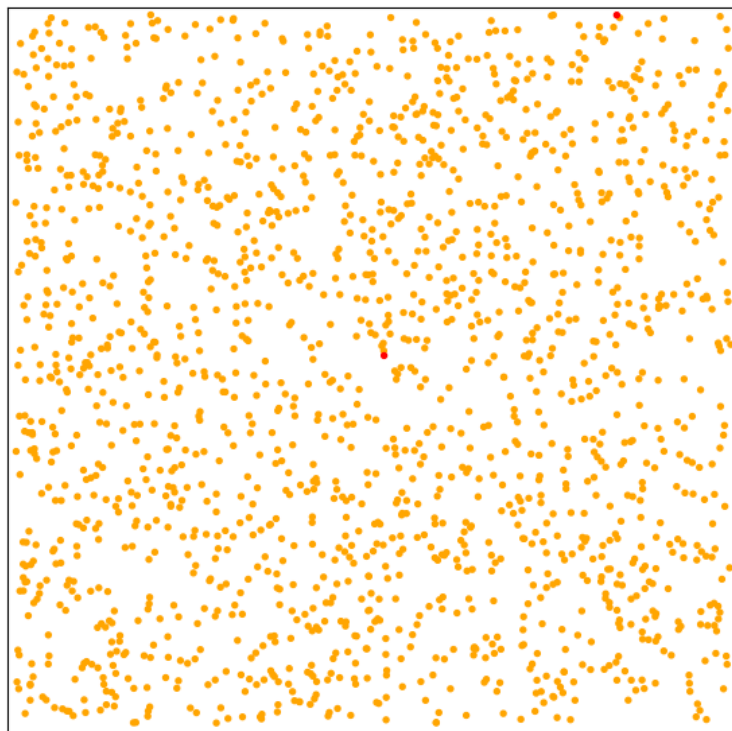


図 7 初期状態図

(2) 接続可能ノードの探索

図7のスタートノードに注目し拡大した図を図8に示す。この図で青の円は、スタートノードを中心とした通信可能範囲を示しており、①のように、通信可能範囲内に存在するノードへ情報を送信している状態である。また、ノードの接続条件において、上流ノードはスタートノードに相当する。シミュレーションでは、②、③の過程をこの時に同時に行っており、上流ノードは接続可能な下流ノードの数を保持している。

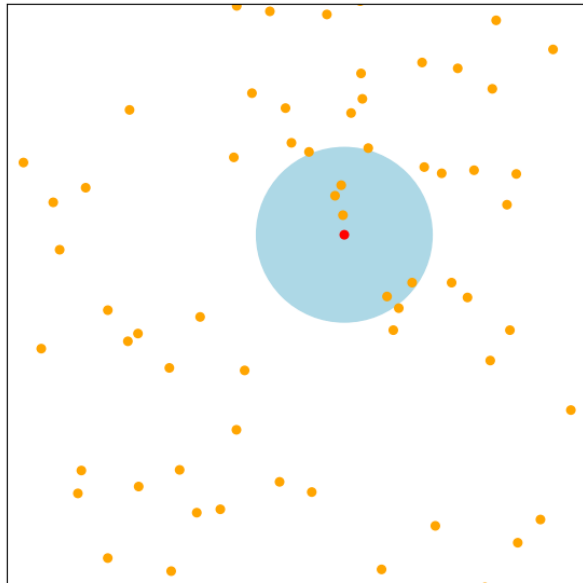


図8 接続可能ノードの探索図

(3) ノード接続

図9に上流ノードが下流ノードとランダムに接続した様子を示す。今回の場合では、下流ノード数が5であるため、接続ノード数は2となる。そして、接続されたノードは青色の点で示した。次に、今回選ばれたノードが上流ノードとなり、(2)と同様に隣接ノードを探索し、未接続ノードがいなくなるまで行う。

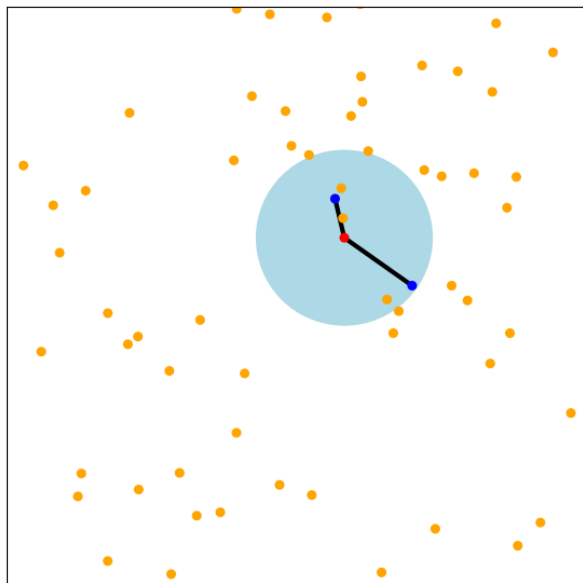


図9 ノード接続図

(4) 経路完成

図 10 に探索が終了した際の図を示す。赤線はスタートノードからターゲットノードまでの経路を示している。結果では、青ノードをノードの総数で割り、通信成功割合を元に人口密度の高低を定める。通信成功割合の計算式を次に示す。

$$\text{通信成功割合}[\%] = \frac{\text{接続成功ノード数}}{\text{ノード総数}} \times 100 \quad (1)$$

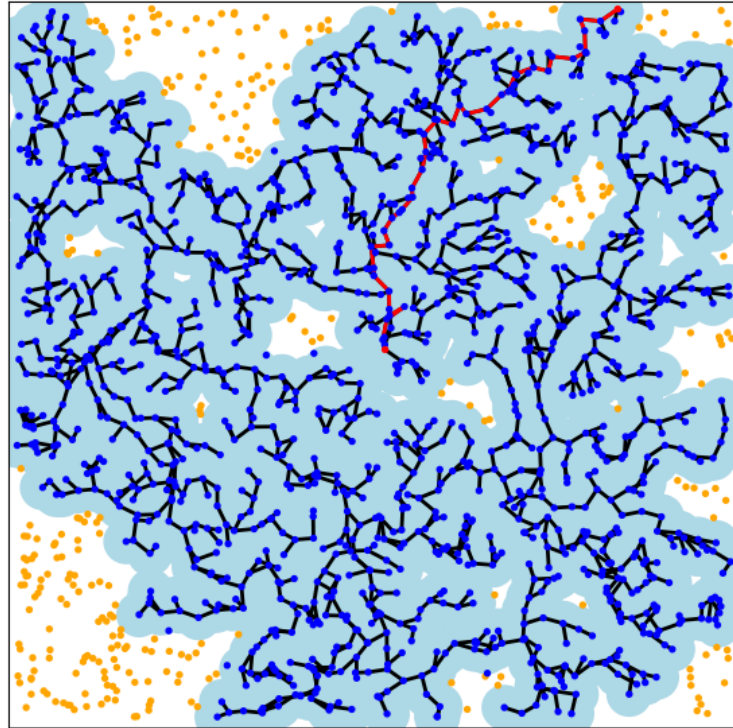


図 10 経路完成図

4.1.2. 人口密度が低い場合

4.1.1 項で述べたアルゴリズムでは、人口密度が低い地域ではノード間の距離が広がり、通信可能範囲内に他のノードが存在しないため、人口密度が高い地域でのみ機能することが考えられる。そこで、人口密度が低い地域においても通信が可能となるよう、公共物などにノードを設置し、ノード密度を増加させることで、人口密度が高い地域と類似した環境を構築することとした。特に、設置対象としては、移動せずかつ一定の間隔で配置される構造物が、ルーティングの設計や実装の観点から有利である。この要件を満たすものとして、本研究では電柱へのノード設置を想定した。本シミュレーションでは、電柱間の距離を 50m とし^[23]、電柱間の通信は無線 LAN 等を用いた直接通信が可能であると仮定する。ただし、電柱間の通信はメッシュネットワークとして構成されない。

図 x に、福島県の人口密度 126 人/km²、ノード数 112 個の条件で電柱を追加した場合のシミュレーション結果を示す。

(1) 初期状態

図 11 に電柱を追加した場合の初期状態を示す。赤色と黄色の点の意味は先ほどと同様である。今回新たに追加された緑色の点は電柱に設置されたノード (以下、電柱ノードと呼ぶ) を示している。さらに、電柱間は直接通信を行えることを示すためにピンク色の線を用いて、電柱ノードの接続状況を示した。

経路構築する際、電柱ノードは他の電柱ノードと直接通信を行えるため、下流ノードに電柱ノードが含まれる場合、優先的に接続を行う。それ以外の動作は 4.1.1 項と同様に行う。

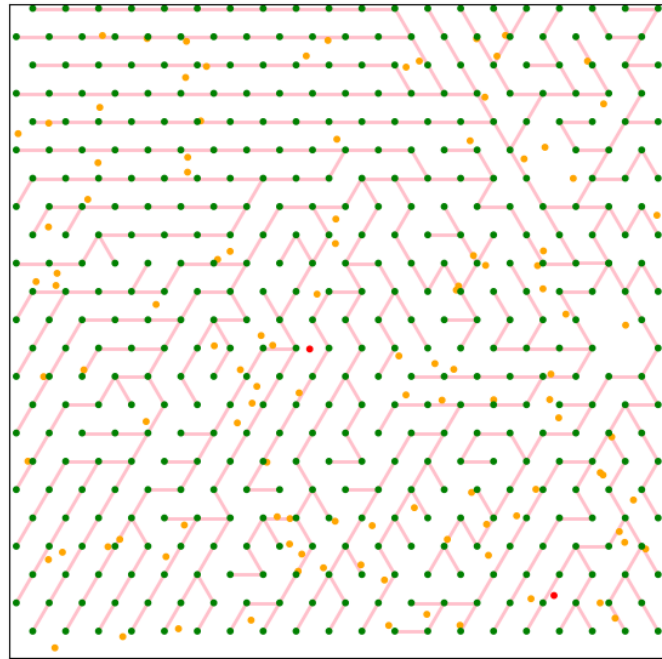


図 11 電柱にノードを追加した場合の初期状態図

(2) 経路完成

図 12 に、電柱ノードを追加した場合の経路完成図を示す。視認性を確保するため、ピンク色の線は省略しているが、接続状況に変更はない。

この図より、ほぼ全てのノードがネットワークに参加できていることが確認できる。これにより、ネットワークの接続性が確保され、通信が可能な状態であることが示されている。そこで、シミュレーションの評価指標として、スタートノードからターゲットノードまでのホップ数と、追加した電柱ノードの数を測定することとした。

具体的には、スタートノードからターゲットノードまでの経路における平均ホップ数を算出し、通信の効率性を評価する。また、ネットワーク全体の通信において必要となる電柱ノード数を測定することで、電柱に設置するノード数の概算を得ることができる。

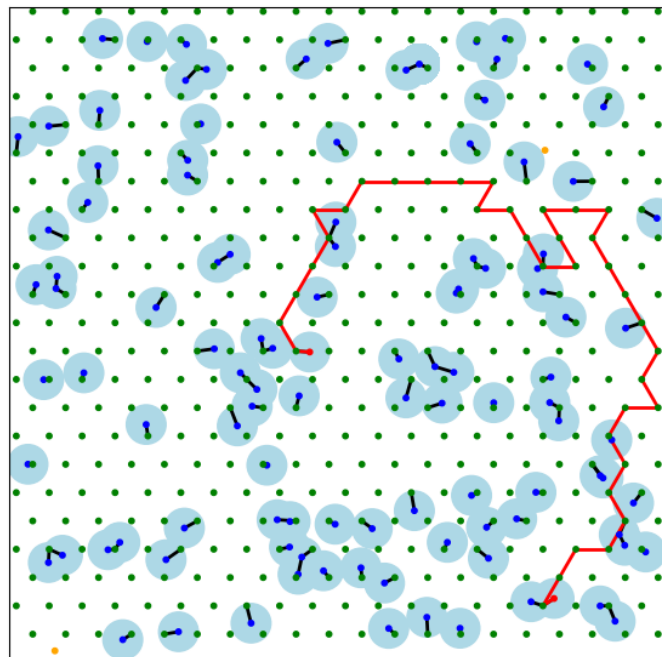


図 12 電柱にノードを追加した場合の経路完成図

5. 結果

5.1. 人口密度の定義

表 4 に示した各都道府県の人口密度に対して、4.1.1 項で述べたアルゴリズムを用いてシミュレーション 10 回実施し、その平均値の結果を図 13 に示す。この図では、縦軸に通信成功割合を、横軸に人口密度を設定し、人口密度が低い順に左から昇順で並べている。

図 13 より、急激に数値が変化した埼玉県を基準として人口密度の高低を分類する。本研究では、埼玉県より左に位置する都道府県を人口密度が低い地域とし、埼玉県を含む右の都道府県を人口密度が高い地域と定義する。

次に、人口密度が高い地域において、各地域ごとの閾値 X の最適値について分析し、低い地域においては、電柱ノードの必要本数および平均ホップ数に関する結果について述べる。

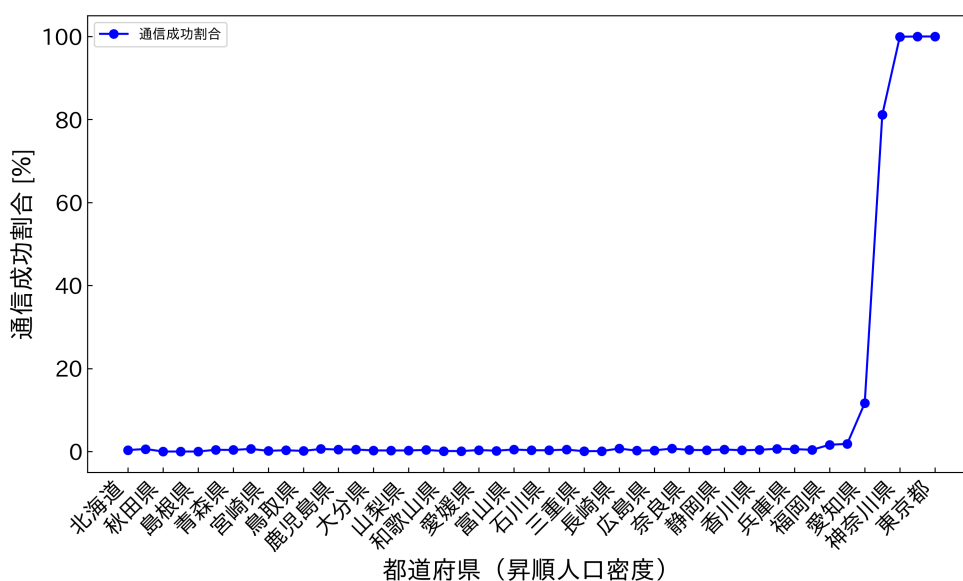


図 13 各都道府県の通信成功割合

5.2. 人口密度が高い地域の場合

図 x に東京都、大阪府、神奈川県、埼玉県のそれぞれに対して閾値 X を 2~9 で変化させ、各設定ごとに 10 回のシミュレーションを実施した結果の平均値を示す。

図より、埼玉県の場合では、閾値 X が大きくなるごとに通信成功割合が増加し、 X が 5 以上のとき割合の大きな変化は見られなかった。

埼玉県以外の地域では、閾値 X が 2 の時若干通信成功割合が落ちたが、それ以外ではほぼ 100% を維持していることが確認できた。

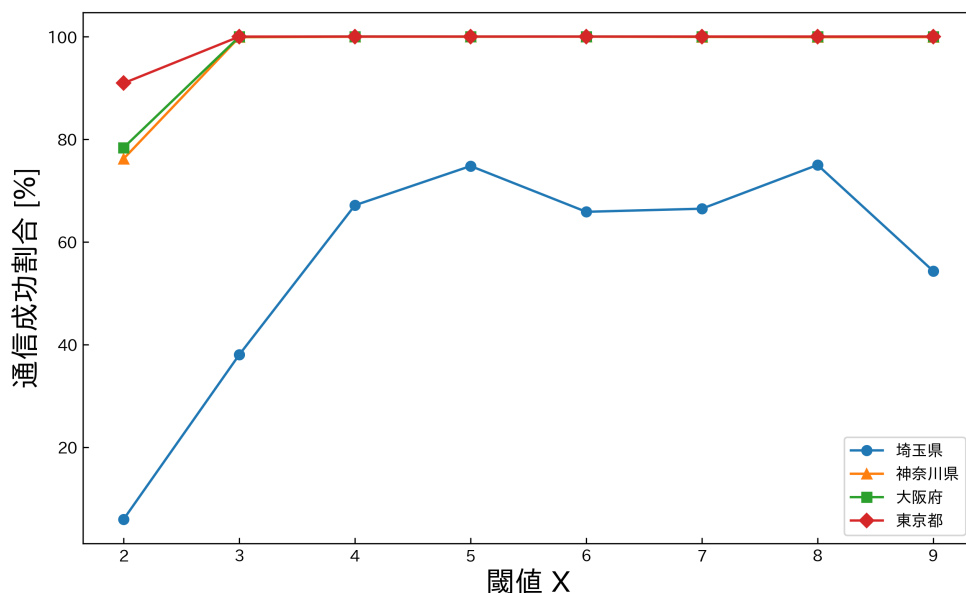


図 14 閾値 X を 2~9 まで変化させた場合の割合 (仮)

5.3. 人口密度が低い地域の場合

図 y に、人口密度が低い地域に対して、電柱ノードを追加前および追加後の結果を示す。数値は 10 回のシミュレーションを実施した結果の平均値を採用した。青棒は電柱ノード追加前の通信成功割合、赤棒は電柱ノード追加後の通信成功割合を示す。

図より、ほぼ 0% に近い通信成功割合が電柱ノードを追加することで、全地域で 99%(最低値を書く) 以上の通信成功割合になった。

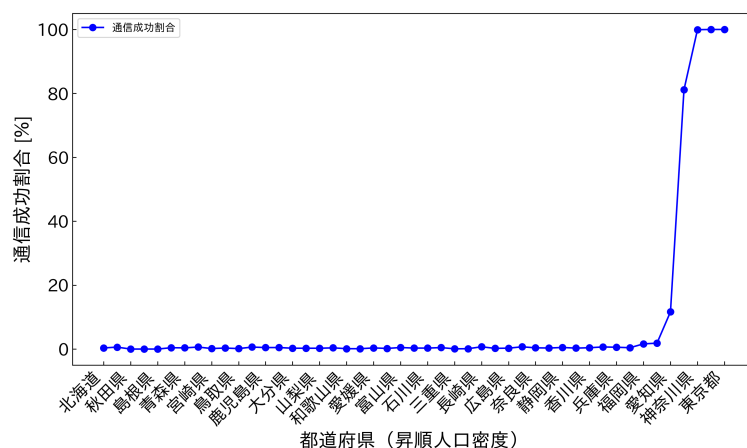


図 15 電柱ノードを追加前および追加後の通信成功割合 (仮)

次に、表 z に福島県の人口密度でシミュレーションを実施した場合の平均ホップ数および必要電柱ノード数を示す。

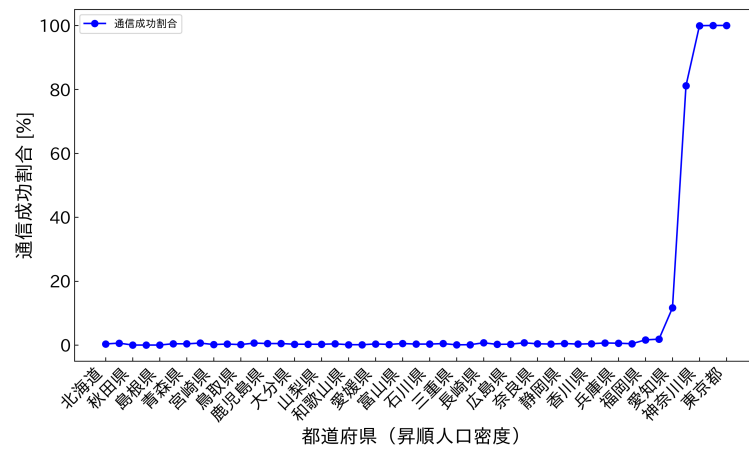


図 16 平均ホップ数 (表になる予定)

6. 考察

参考文献

- [1] 総務省. 通信インフラへの被害. <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r06/pdf/n1120000.pdf> 最終アクセス日: 2025-2-23.
- [2] 総務省. 非常時のアドホック通信ネットワークの活用に関する研究会. https://www.soumu.go.jp/main_content/000427382.pdf 最終アクセス日: 2025-2-25.
- [3] 杉山久佳, 辻岡哲夫, 村田正ほか. ネットワーク化された群ロボットによる被災者発見システム. 情報処理学会論文誌, Vol. 46, No. 7, pp. 1777–1788, 2005.
- [4] 木山昇, 楠田純子, 藤井彩恵, 内山彰, 廣森聡仁, 梅津高朗, 中村嘉隆, 大出靖将, 田中裕, 山口弘純ほか. 災害時救急救命支援に向けた電子トリアージシステムの設計開発. 情報処理学会論文誌, Vol. 51, No. 9, pp. 1916–1929, 2010.
- [5] 間瀬憲一, 中野敬介, 仙石正和, 篠田庄司. アドホックネットワーク. 信学誌, Vol. 84, No. 2, pp. 127–134, 2001.
- [6] Samir R. Das, Charles E. Perkins, and Elizabeth M. Belding-Royer. Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing. RFC 3561, July 2003.
- [7] Yih-Chun Hu, Dave A. Maltz, and David B. Johnson. The Dynamic Source Routing Protocol (DSR) for Mobile Ad Hoc Networks for IPv4. RFC 4728, February 2007.
- [8] Vincent D. Park and Dr. Scott M. Corson. Temporally-Ordered Routing Algorithm (TORA) Version 1 Functional Specification. Internet-Draft draft-ietf-manet-tora-spec-04, Internet Engineering Task Force, July 2001. Work in Progress.
- [9] Young - BaeKo, Nitin H. Vaidya. Location - aided routing (lar) in mobile ad hoc networks. *Wirel. Netw.*, Vol. 6, No. 4, p. 307–321, September 2000.
- [10] Chai Keong Toh. Associativity-based routing for ad hoc mobile networks. *Wireless Personal Communications*, Vol. 4, pp. 103–139, 1997.
- [11] Thomas H. Clausen and Philippe Jacquet. Optimized Link State Routing Protocol (OLSR). RFC 3626, October 2003.
- [12] Charles E. Perkins and Pravin Bhagwat. Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing (dsv) for mobile computers. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, Vol. 24, No. 4, p. 234–244, October 1994.
- [13] Shree Murthy and J. J. Garcia-Luna-Aceves. An efficient routing protocol for wireless networks. *Mob. Netw. Appl.*, Vol. 1, No. 2, p. 183–197, October 1996.
- [14] Ching-Chuan Chiang, Hsiao-Kuang Wu, Winston W. Liu, and Mario Gerla. Routing in clustered multihop, mobile wireless networks with fading channel. 1997.
- [15] Kevin H. Grace. Mobile Mesh Routing Protocol. Internet-Draft draft-grace-manet-mmrip-00, Internet Engineering Task Force, September 2000. Work in Progress.
- [16] Z. HAAS. The zone routing protocol (zrp) for ad hoc networks. *IETF Internet Draft, draft-ietf-manet-zone-zrp-01.txt*, 1998.
- [17] 松井進. アドホックネットワークの実用化に向けた課題と実用化動向 (クリティカル応用のための通信技術). 日本信頼性学会誌 信頼性, Vol. 34, No. 8, pp. 532–539, 2012.
- [18] Bluetooth®. Bluetooth 技術概要. <https://www.bluetooth.com/ja-jp/learn-about-bluetooth/tech-overview/> 最終アクセス日: 2025-2-11.
- [19] 勝野恭治, 相原達, 水谷晶彦, 玉川憲. Bluetooth による位置検出. 日本ソフトウェア科学会大会講演論文集, Vol. 19, pp. 4B4–4B4, 2002.
- [20] 東芝情報システム株式会社. Bluetooth とは何か? https://www.tjsys.co.jp/focuson/clme-bluetooth/index_j.htm 最終アクセス日: 2025-2-11.
- [21] 都道府県市区町村. 都道府県 人口・面積・人口密度ランキング. https://uub.jp/rnk/p_j.html 最終アクセス日: 2025-1-30.
- [22] 総務省. 通信利用動向調査. <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r04/html/nd238110.html> 最終アクセス日: 2025-1-30.
- [23] 東京電力. 全国の「位置情報データ」の代理店販売の概要. <https://www.tepco.co.jp/pg/company/press-information/press/2019/pdf/190808j0101.pdf> 最終アクセス日: 2025-1-30.