

災害時通信モデルにおける無線アドホックネットワークの性能評価

Evaluation of Ad hoc Network Performance
on City Area Emergency Communication Models行田 弘一¹, ナム ホアン ニューエン², 岡田 和則², 滝澤 修²Koichi GYODA¹, Nam Hoang NGUYEN², Kazunori OKADA²
and Osamu TAKIZAWA²¹ 芝浦工業大学 通信工学科

Department of Electrical Communications, Shibaura Institute of Technology

² (独) 情報通信研究機構 防災・減災基盤技術グループ

Disaster Management and Mitigation Group, National Institute of Information and Communications Technology

The wireless ad hoc network is expected to be used as an alternative of the existing mobile communication network to make users communicate securely in a so-called emergency when a large-scale disaster occurs. In this paper, we propose a Real City model which is more practical as a user terminal movement model in the emergency case. Then we analyze the performance of wireless ad hoc networks in the Real City model by using the network simulator. From the simulation results, it is clarified that changing the routing protocol attribute value and increasing the number of mobile terminals that contributes to the communication route formation are necessary to improve the ad hoc network performance.

Keywords: emergency communication, ad hoc network, communication models, network simulator

1. はじめに

携帯電話システムに代表される既存の移動通信ネットワークは、ユーザ端末と基地局の間を接続するアクセスネットワークと、基地局を相互に接続する基幹ネットワークにより構成される。通常、アクセスネットワークは無線により構成され、基幹ネットワークは有線により構成される。このようなネットワークは地震等の大規模災害発生時において、基地局や基幹ネットワークが物理的な損壊や停電等により機能を失った場合、通信不能になる。物理的な損壊や停電等がない場合でも、災害発生直後には安否確認等を目的として多くのユーザ端末が一斉に基地局に対して接続要求を行うため、輻輳状態となり、通信を行うことが難しくなる。携帯電話会社等の移動通信ネットワークサービス事業者は、基地局や基幹ネットワークの物理的な損壊や停電に備え臨時基地局や非常電源等のバックアップ体制を整備するとともに、一旦災害が発生した場合は早急な復旧を目指した作業を行うが、復旧までの間、通信不能状態は続くことになる。また、災害発生直後の輻輳状態を回避するためには、基地局において接続可能なユーザ端末を制限する、いわゆる通話規制を行うことで対処しているが、規制がかかると多くのユーザ端末は通信不能となり、たとえ数時間であってもこの状態が続くことはユーザの不安につながる。

このような状況においても、ユーザが安心して通信を行うための手段として、無線アドホックネットワークを利用することが期待されている。無線アドホックネットワークはユーザ端末間の無線による通信を基本とする自律分散ネットワークであり、直接無線通信を行うことの

できない端末との通信は、無線通信が可能な他のユーザ端末が中継を行うことにより実現することができる。基地局を必要とせず、通信経路は中継端末の負荷の状況や端末自体の通信範囲外への移動に応じて他の通信可能な端末を用いるよう自動的に再構成されるため、大規模災害発生時の既存移動通信ネットワークの代替手段として有効であると考えられる。

本論文では、市街地において大規模災害発生時を想定したより実際的で適切な通信モデルについて検討し、この通信モデルを用いた場合の無線アドホックネットワークの性能をネットワークシミュレータにより解析し、評価した結果について示す。本論文で想定している通信は、災害時における携帯電話ネットワークを可能な限り補完することを目的とし、通話やテレビ電話等のリアルタイム性の高いものとする。第2節では、関連研究について示す。第3節では、市街地通信モデルとして実際に即した端末移動モデルを提案し、従来最も良く用いられてきた Random Waypointモデルとの比較を通じてシミュレーションの妥当性を確認するとともに、性能向上のための方策について検討する。第4節では、実際に災害が発生した場合を想定した通信モデルについて、アプリケーションが扱うデータを動画像等とし、それに応じたデータ量の通信を行った場合におけるネットワーク性能の詳細について評価を行う。第5節では、より実際の環境に近くなるよう、建物等の影響を考慮したネットワーク性能について評価を行う。第6節では、ネットワーク性能をさらに向上させるための方策として、領域内の中継端末数を増加させた場合についての評価を行う。第7節は本論文のまとめと結論である。

2. 関連研究

非常時における通信へのアドホックネットワークの適用に関する研究としては、文部科学省の「大都市大震災軽減化特別プロジェクト」において、災害時の情報支援システムに関し、ロバストな通信経路を選択するための手法に関する研究等が行われてきた¹⁾。このほか、災害時に生存している基地局と中継機能を持つ端末から構成される安否確認ネットワークに関する研究等が行われている²⁾。また、情報通信研究機構において、自営無線のための自律分散型マルチホップ通信に関する研究³⁾、被災地の状況把握用プラットフォームであるレスキュー用マイクロサバ間のマルチホップ/アドホック通信に関する研究⁴⁾が行われている。これらの研究は非常時における通信経路生成/選択、およびシステム開発に関するものが主であり、移動端末で構成される無線アドホックネットワークの性能評価という観点からの研究は行われていない。

高度道路交通システム(ITS)における利用を想定した車々間通信におけるアドホックネットワーク Vehicular Ad Hoc Network (VANET)に関する研究も盛んに行われており、道路に沿った車両の移動モデルに関する研究が行われている⁵⁾。実際の道路および通行車両等を模擬したモデルについては、交通工学の見地から様々な交通シミュレータが開発されており⁶⁾、これを用いることで渋滞等の車両の複雑な挙動もモデル化することが可能であるが、交通モデルをこのような交通シミュレータを用いて作成し、これとネットワークシミュレータを連携させることによって VANET の性能評価を行う研究が行われている⁷⁾。さらには地形データベースを用いたシミュレータに関する研究⁸⁾、車両に限らずユーザの挙動をモデル化した行動決定プロセスとそのユーザ間で用いられるネットワークをシミュレートするシミュレータに関する研究⁹⁾等が行われている。これらの研究は車々間通信を主眼においており、非常時における通信モデルに関する研究は行われていない。

3. 市街地通信モデルにおけるネットワーク性能評価

(1) 端末移動モデルの設定

無線アドホックネットワークは移動可能な端末で構成されているため、その性能を評価する場合には、ネットワークを構成する端末がどのように移動するかを無視できない。すなわち、端末の移動モデルとしてどのようなものを用いるかが重要である。

無線アドホックネットワークの性能評価に用いられる端末の移動モデルとして最も基本的で良く用いられるものは、Random Waypoint モデルと呼ばれるものであり、ネットワークを構成する端末の移動は以下のように規定される。

- 各端末の初期位置と目的位置を定められた領域内でランダムに決定する。
- 各端末は初期位置から目的位置に向かって一定速度で直線的に移動する。速度は 0 から最大速度の間でランダムに決定する。
- 目的位置に達すると、ランダムな時間休止した後、新たにランダムに決定された目的位置に向かって新たにランダムに決定された一定速度で移動する。

- シミュレーション時間中、上記動作を繰り返す。

Random Waypoint モデルはネットワークプロトコル自体の性能評価を目的としたプラットフォームとしては有用であるが、実際の利用を想定した無線アドホックネットワークの性能評価を行うためには、Random Waypoint モデルとは異なる、より実際に近い端末の移動を模擬したモデルを用いる必要がある。

そのため、端末の移動モデルとして、実際の市街地における道路を模擬し、端末がこの道路に沿って移動するモデルを作成し、これを利用することを提案する。以後このモデルを Real City モデルと呼ぶ。

Real City モデルが模擬する対象となる市街地の選定にあたっては、文献¹⁰⁾を参考に、Random Waypoint モデルとの比較ならびにシミュレーションの容易さの面から以下の点に留意した。

- 一辺が約 500m の正方形の領域をもつこと。
- 道路がなるべく格子状に交差していること。

以上の点から、図 1 に示す宮城県仙台市青葉区の一隅(黒枠内)を模擬した Real City モデルを作成した。



図 1 Real City モデルが模擬する市街地の地図

Real City モデルでは道路を「狭い」道路と「広い」道路の二種類にモデル化した。「狭い」道路では端末は道路の中央にのみ存在し両方向に移動可能であると定義し、「広い」道路では端末は 15m 間隔の平行線上を互いに異なる方向へ一方通行で移動するものと定義した。交差点および T 字路における端末の進行方向の選択確率については、都市部における移動通信の伝搬モデルとして標準化されているマンハッタンモデル¹¹⁾に基づき、図 2 に示す通りに設定した。端末移動度(端末移動速度の最大値)は 0m/秒, 1m/秒, 2m/秒, 4m/秒, 8m/s 秒, 10m/秒の 6 種類とした。ここで、災害時における道路の状況や混雑等を考慮した場合、自動車や自動二輪でも徐行が必要等、様々な移動速度が考えられるため、各端末においては端末移動度の最大値以下のランダムな移動速度を初期値として与えられ、その速度で移動するものとした。具体的には、端末移動度の値はそれぞれ以下のような端末移動を想定している。

- (1)0m/秒の場合：端末は移動せず固定
- (2)1m/秒の場合：徒歩
- (3)2m/秒の場合：徒歩と自転車等軽車両の混在

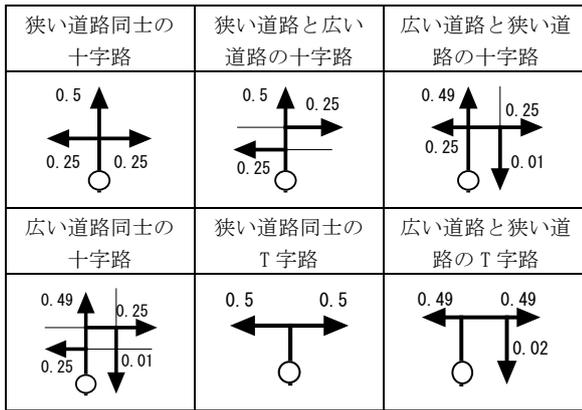


図2 交差点/T字路における端末の進行方向選択確率

(4)4m/秒の場合：2m/秒の場合に加え極低速車両が混在
 (5)8m/秒の場合，4m/秒の場合に加え低速度車両が混在
 (6)10m/秒の場合：8m/秒の場合に加え中速度車両が混在
 なお，Real City モデルにおいては一部道路について位置を変更もしくは実際にない道路を追加しているため，実際の道路と完全には一致していない。

(2) 端末移動モデルの差異によるシミュレーション結果および考察

Random Waypoint モデルと Real City モデルを用いた場合のそれぞれについて，ネットワークシミュレータを用いて無線アドホックネットワークの性能評価を行った。シミュレーションでは，一般的に広く用いられている 2.4GHz 帯の無線 LAN の使用を想定し，無線 LAN のプロトコルとしては IEEE802.11b/g (11Mbps) を用い，無線の到達距離は 100m とした。

ルーチング（経路制御）プロトコルとしては，無線アドホックネットワークのルーチングプロトコルとして代表的な Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing Protocol (AODV) ¹²⁾ および Optimized Link State Routing Protocol (OLSR) ¹³⁾ を用い，データ送受信のプロトコルとしては，リアルタイム性を考慮し UDP を用いることとした。性能評価のパラメータとしては，すべての端末で受信したデータ量の合計と，送信されたデータ量の合計の比であるデータ配信率を用いることとした。

ある端末 T_1 が通信を開始する場合， T_1 を中心とした無線到達距離を半径とする円の領域内にある他の端末 T_2, T_3, \dots が通信可能とみなされる。最終的な通信相手端末 T_n が通信可能な端末であれば直接経路が作成されたものとし，通信可能な端末でなければ T_2, T_3, \dots をはじめとする他の端末を経由した T_n への経路が作成された上で T_1 と T_n の間でデータの送受信が行われる。端末の移動により経路は生成/変更/消滅を繰り返す，これにより T_n における受信データ量が変化するため，データ配信率も変化する。なお，2点間の伝搬損失 L_{dB} は，2点間の距離を d ，用いる周波数の波長を λ とすると，自由空間伝搬損失を求めると

$$L_{dB} = 20 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) \quad [1]$$

により決定されるので，本シミュレーションにおいて，通信可能となる伝搬損失の閾値は前述の条件より [1] 式に $d=100\text{m}$ ， $\lambda=0.125\text{m}$ を代入して得られる $L_{dB}=80\text{dB}$ である。

ネットワークシミュレータとしては，マサチューセツ

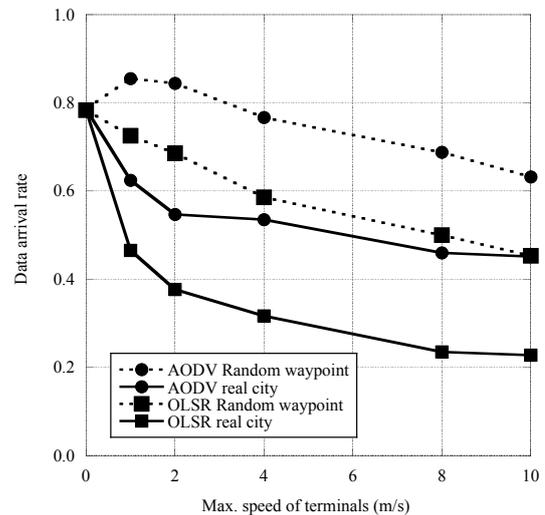


図3 端末移動度に対するデータ配信率の変化

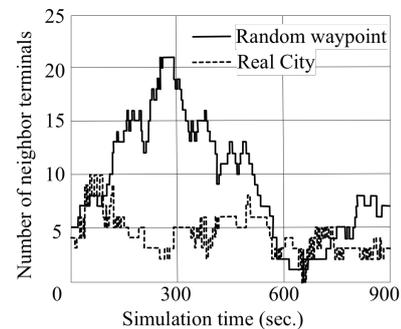


図4 通信可能な端末数の変化例

ツ工科大学で開発され，1987年に初の商用ネットワークシミュレータとして登場以来，業界標準ツールとして世界中で使用されている OPNET¹⁴⁾を用いた。

端末数を 50 とし，この 50 台の端末すべてが 64 バイト (=512 ビット) のデータを 0.25 秒間隔でランダムな相手端末に対し 900 秒間送信した場合の，端末移動度に対するデータ配信率の変化を図 3 に示す。このとき，端末 1 台が送信するデータは 2,048 ビット/秒であり，ネットワーク全体で送信されるデータは 102,400 ビット/秒である。各端末から送出されるデータの衝突を避けるため，データの送出開始時間はシミュレーション開始時から 1 秒以内のランダムな時間とした。なお，シミュレーションは 5 種類の異なる端末の初期位置の場合について行い，データ配信率はそれぞれのシミュレーションで得られたデータ配信率の平均値とした。また，Real City モデルとの比較のため，Random Waypoint モデルにおいて，端末の休止時間は 0 とした。

図 3 から以下の事項が明らかとなった。

- ・ 端末移動度が 0m/秒の場合のデータ配信率は端末の移動モデルにかかわらず等しい。これは端末が移動しないため，端末間の通信可能/不可能の関係が初期位置により決定され，かつ時間によって変化しないことによる。
- ・ 端末移動度が 0m/秒以外の場合，端末の移動モデルの差異にかかわらず，AODV より OLSR の場合のデータ配信率が低い。これは，リアクティブ型プロトコルである AODV に比べ，プロアクティブ型プロトコルである OLSR が常に隣接端末情報を

やりとりしているため、そのオーバーヘッドが大きいことによると考えられる。

- 端末移動度が 0m/秒以外の場合、端末移動度が増加するにつれてデータ配信率は低下している。これは、端末が移動することにより端末間の通信可能／不可能の関係が時間に応じて変化し、また端末の移動度が増加することにより、経路再構成の機会も増加し、これによりデータが不到達となる可能性が増えることによると考えられる。
- AODV Random Waypoint の場合のみ、端末移動度が 0m/秒の場合より 1m/秒および 2m/秒の方がデータ配信率が高い。これは、初期配置から端末が移動することにより形成された経路が、端末移動度が低い場合には比較的長く保持されることによるものであると考えられる。一方、同じ端末移動度における OLSR Random Waypoint の場合、隣接端末情報を交換するためのオーバーヘッドがデータ配信率を低下させていると考えられる。
- 端末移動度が 0m/秒以外の場合、AODV、OLSR いずれの場合においても、Random Waypoint モデルより Real City モデルの場合のデータ配信率が低い。この原因を解明するため、シミュレーション実行時に任意の 1 つの端末に注目し、その端末を中心とした周囲 100m 四方の領域内に存在する端末数を 1 秒おきに取得した。一例として、端末移動度 1m/秒の場合のシミュレーション時間と領域内の端末数の関係を図 4 に示す。図 4 から明らかなように、Random Waypoint モデルの場合の方が Real City モデルに比べ領域内端末数が多く、その結果データ配信率が高くなったと考えられる。なお、端末移動度が 2m/秒、4m/秒、8m/秒の場合においても同様な傾向が見られた。

(3) データ配信率向上のためのプロトコル属性値変更に関する検討

データ配信率の向上を目的とし、ルーティングプロトコルとして用いた AODV および OLSR のそれぞれについて、プロトコル属性のデフォルト値を変更してシミュレーションを行った。AODV については、生成した経路の生存時間である Active Route Timeout (ART) を変更し、OLSR については近隣端末との接続状態を把握し更新するために必要な Hello Interval, Topology Control Interval, Neighbor Hold Time, Topology Hold Time の 4 つを変更した。変更前と変更後の各属性値を表 1 に示す。なお、シミュレーションは第 3 節(2)と同様、5 種類の異なる端末の初期位置の場合について行い、データ配信率はこれらの平均値とした。

プロトコル属性値変更後の端末移動度に対するデータ配信率の変化を図 5 に示す。

図 5 と図 3 を比較すると、端末移動度が 0m/秒以外の場合において、プロトコル属性値を変更することによりデータ配信率が向上している。これは、AODV では ART を小さくすることにより常に有用な経路が更新されるためであり、同様に、OLSR でも 4 つの属性値を小さくすることにより、近隣端末との接続状態の更新頻度が高くなるためである。しかし、それでも Real City モデルにおけるデータ配信率は AODV で 0.7 以下、OLSR で 0.5 以下にとどまる。また、一方でこれら属性値を変更することにより、経路制御用パケット数は増大するため、端末の消費電力が増大し、使用可能な時間が短くなってしま

表 1 AODV および OLSR の属性値 (単位: 秒)

プロトコル	属性名	変更前 (デフォルト)	変更後
AODV	Active Route Timeout	3	0.25
OLSR	Hello Interval	2	0.5
	Topology Control Interval	5	1.25
	Neighbor Hold Time	6	1.5
	Topology Hold Time	15	3.25

う可能性がある。消費電力を抑えつつデータ配信率を向上させるための技術開発が必要であり、これらの検討については今後の課題である。

なお、端末移動度が 0m/秒の場合、経路の時間的な変化はないが、プロトコル属性値を変更することにより経路更新や接続状態の更新のためのパケットが増大し、その結果データ配信率は低下する。低下の度合いは AODV では約 3%とわずかであるが、OLSR では約 19%と比較的大きい。

4. 災害時通信モデルにおけるネットワーク性能評価

(1) 災害時通信モデルの設定

前節ではすべての端末が移動しながら通信することを想定し、すべての端末がランダムな相手端末に対し比較的少量のデータを送信した場合のネットワーク全体のデータ配信率について検討したが、本節では実際に災害が発生した場合を想定した通信モデルについて、アプリケーションが扱うデータを動画像等とし、それに応じた比較的大量のデータを送信する場合におけるネットワーク性能の詳細についてシミュレーションを行った。

通信モデルの一例として、市街地において大規模な災害が発生し、既存インフラネットワークが一時的に使用不能になった場合、無線アドホックネットワークを用いてレスキュー部隊等による被災現場での救援活動に必要なデータ通信を既存インフラネットワークが利用可能な地点まで確保する場合を想定する。

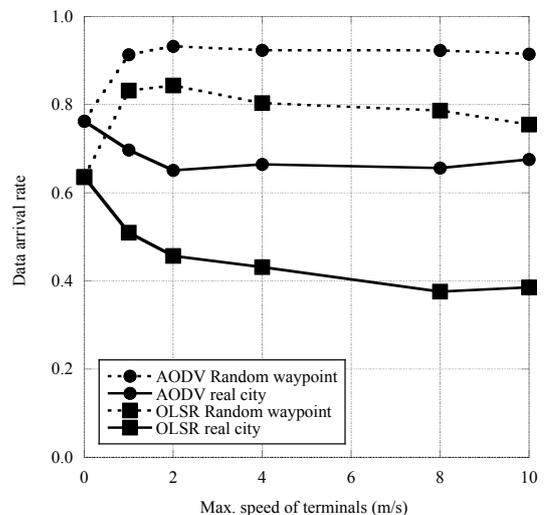


図 5 ルーティングプロトコル属性を変更した場合の端末移動度に対するデータ配信率の変化

被災現場が 500m 四方の領域のほぼ中央にあり、既存インフラネットワークが利用可能な地点がこの領域の右下角にあるとする。領域の中心と右下角にそれぞれ固定端末を配置し、この 2 台の端末間通信を実現するための無線アドホックネットワークを構成する中継端末は道路上を移動しているものとする。中継端末の移動モデルとして Real City モデルを用い、無線 LAN の設定は前節のシミュレーションと同一とする。また、前節では AODV と OLSR のプロトコル属性値を変更した場合について検討を行ったが、本節では基礎データを得ることを目的とし、属性値はデフォルトとする。

アプリケーションが扱うデータとしてはリアルタイム性を考慮した動画像等を想定し、2 台の固定端末間では、それぞれ相手端末に対し、17,280 バイト (=138,240 ビット) のデータを 1 秒ごとに UDP を用いて送信することとした。これは OPNET においてデフォルトで用意されているビデオストリームデータのうち、128×120 ピクセルのフレームを 1 フレーム/秒で送信することに相当するが、実際のビデオストリーム送受信に必要な初期化処理等については省略した。

(2) 端末初期位置の差異によるシミュレーション結果および考察

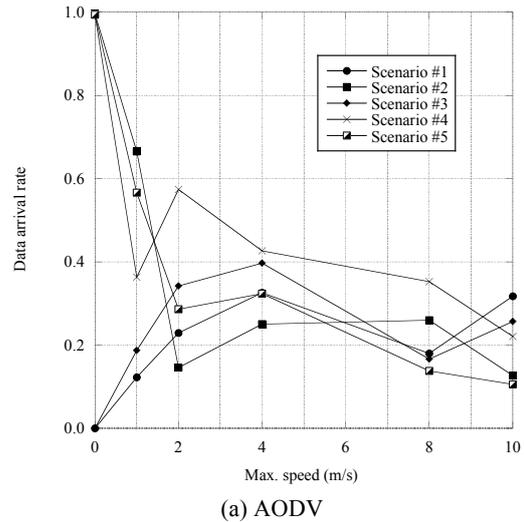
50 台の端末のうち、移動可能な 48 台の端末の初期位置のみをランダムに設定し、それ以外については条件を同じにした 5 種類のシナリオについて、端末移動度に対するデータ配信率の変化を図 6 に示す。なおここでは 48 台の移動端末は固定端末間の通信のためのデータを転送するだけで、自らはデータを発生させていないものとし、データ配信率はシミュレーション時間内に固定端末が受信したデータ量と送信されたデータ量の比とする。

最大移動速度が 0m/秒の場合についてはネットワークポロジの初期値によって決定された固定端末間の経路の有無が時間によって変化しないことから、データ配信率は 1 (経路が形成された場合) または 0 (経路が形成されなかった場合) のいずれかの値をとるが、最大移動速度が 1m/秒以上になると、初期値では固定端末間の経路がない場合でも時間の経過により経路が形成され、これによってデータ配信が行われるので、データ配信率は 0 より大きな値をとる。また、無線アドホックネットワークプロトコルとして AODV を用いた場合の方が OLSR を用いた場合より同じ条件におけるデータ配信率が高い。しかし、データ配信率の絶対値は非常に低く、移動端末を中継端末として用いた場合に、映像データが十分配信可能であるとは言えない。

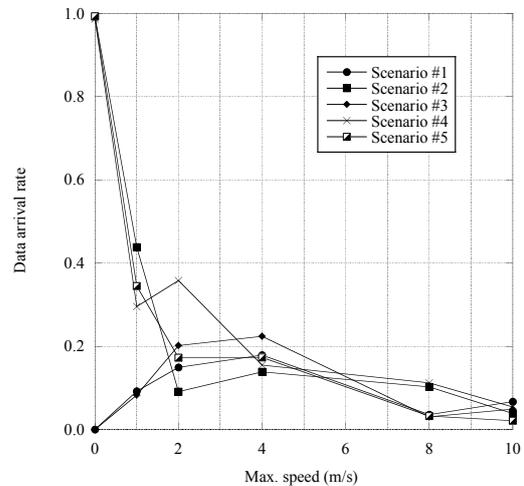
(3) シナリオ例におけるネットワーク性能詳細

一例として、図 6 におけるシナリオ#2 について、最大移動速度が 1m/秒および 8m/秒の場合の領域右下端に置かれた固定端末における受信パケット数、受信パケットが通った経路のホップ数、ならびにパケット遅延の時間変化をそれぞれ図 7、図 8、図 9 に示す。

図 7 からは、1 秒毎に 138,240 ビットのデータパケットが受信される様子がわかる。AODV の場合は遅れて到着するパケットが存在し、その結果 1 秒あたりの受信パケットが倍の 276,480 ビットとなっている点が若干見られるが、OLSR の場合には見られない。いずれの場合も、端末の移動速度が大きくなるほど、受信データパケットが 0 となる (すなわち受信できない) 時間が増加している。図 8 からは、速度が 1m/秒の場合においても受信パケッ



(a) AODV



(b) OLSR

図 6 シナリオ毎の端末移動度に対するデータ配信率

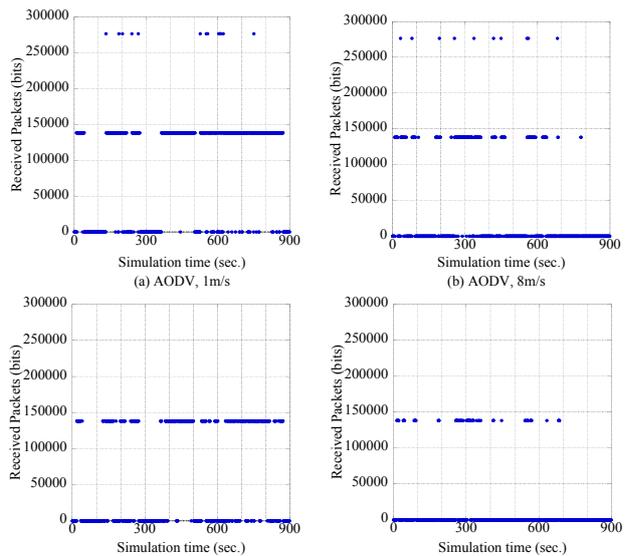


図 7 シナリオ#2 におけるパケット到着量の変化

トのホップ数の変化が激しい様子が見て取れる。図中、ホップ数の一部が整数以外の値をとっているが、これはホップ数の定義を 1 秒間に受信したパケットのホップ数

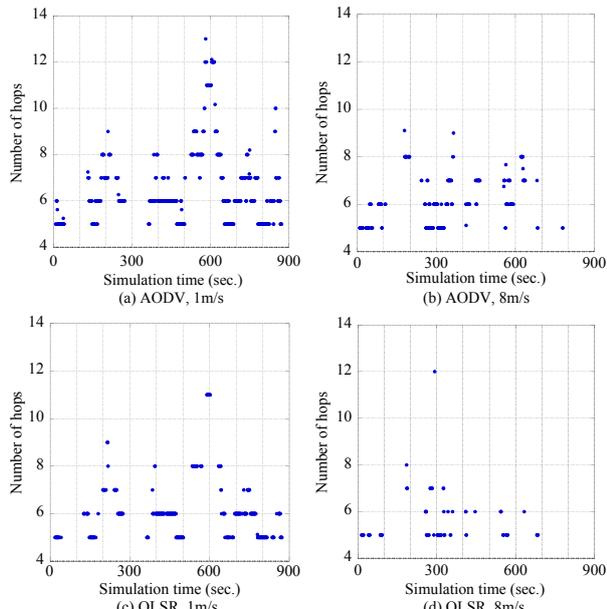


図8 シナリオ#2における経路のホップ数の変化

の平均としていることから、先に述べた AODV の場合に見られる、遅れて到着するパケットのホップ数と通常通り到着するパケットのホップ数が異なり、平均が整数にならないことによるものである。

図9からは、AODVの場合0.1秒を大きく超えるパケット遅延が存在するのに対し、OLSRの場合はほとんど0.1秒以内であることがわかる。即ち、パケット遅延については無線アドホックネットワークワークプロトコルとしてOLSRを用いた場合の方がAODVを用いた場合より優れているが、一方で先に述べた通りデータ配信率ではAODVの方がOLSRより優れているため、アプリケーションレベルで要求される通信品質により最適なプロトコルは異なると言える。

5. 建物等の影響を考慮した性能評価

(1) 建物等の影響を考慮した通信モデル

前節まで用いてきた Real City モデルでは、市街地における道路の形状（幅及び配置）については考慮したが、領域内に存在する建物等の影響は考慮しておらず、シミュレーションにおいては、ある端末が通信を開始する場合、その端末を中心として半径が無線の到達距離の円形の領域内に存在する端末を通信可能な端末としていた。しかし、実際には建物等の影響により、この円形の領域内にある端末のすべてが通信可能であるとは限らない。本節では、より実際に近い場合を考慮したモデルを作成し、検討を行う。

本モデルにおいては道路以外の全ての場所に建物等が存在すると仮定し、ある端末が通信を開始する場合、その端末の周囲に存在する端末について、その位置関係より伝搬損失を計算し、その値が定められた閾値より小さいもののみを通信可能な端末とした。伝搬損失は建物等による見通しの有無を判定した上で、見通しのない場合は建物等による回折を考慮し、自由空間伝搬損失を求め式[1]を拡張した式[2]-[4]により求めた¹⁵⁾。

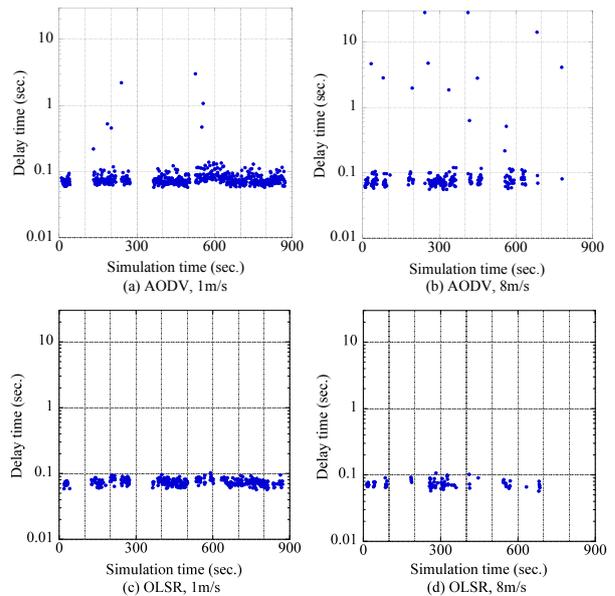


図9 シナリオ#2におけるパケット遅延の変化

$$L_{dB} = 20 \log \left(\frac{4\pi d_n}{\lambda} \right) \quad [2]$$

$$\begin{cases} k_j = k_{j-1} + d_{j-1} \cdot q_{j-1}, & k_0 = 1 \\ d_j = k_j \cdot s_{j-1} + d_{j-1}, & d_0 = 0 \end{cases} \quad [3]$$

$$q_j(\theta_j) = \left(\theta_j \cdot \frac{q_{90}}{90} \right)^v, \quad q_{90} = 0.5, \quad v = 1.5 \quad [4]$$

ここで、最大回折数 $n=3$ とした。

なお、本モデルでは端末が建物高に比べ低い位置にあることを想定し、見通し判定は二次元（水平面方向）のみで行い、高さ（垂直面）方向の回折は考慮しない。また、伝搬損失の閾値は第3節(2)と同様、80dBとした。

(2) 固定された2端末が通信を行う場合のシミュレーション結果および考察

前節では比較的大量のデータを送信する場合についてシミュレーションを行ったが、本節では再び比較的少量のデータの場合についてシミュレーションを行う。50台の端末のうち、1台を領域中央に、1台を領域右下に固定し、固定端末間同士は64バイトのパケットを0.25秒間隔でUDPを用いて送信し、残る48台の移動端末は移動しながら固定端末間のパケット中継のみを行う場合を考慮する。この場合の、固定端末におけるデータ配信率（5つのシナリオの平均値）と移動端末の最大移動速度の関係を、建物等の影響を考慮しない場合の値と比較した結果を図10に示す。図10より、建物等の影響を考慮しない場合においてある程度のデータ配信率があっても、建物等の影響を考慮することによりAODV、OLSRともデータ配信率は非常に低くなり、ほとんどデータが配信されないことがわかった。

(3) データ配信率向上のためのプロトコル属性値変更に関する検討

データ配信率の向上を目的とし、ルーティングプロトコルとして用いたAODVおよびOLSRのそれぞれについて、プロトコル属性値を変更してシミュレーションを行った。変更前と変更後の各属性値は第3節と同様、表1の通り

である。プロトコル属性値変更後の端末移動度に対するデータ配信率（5つのシナリオの平均値）の変化を図11に示す。図10と図11より、プロトコル属性値を変更することで建物等の影響を考慮しない場合においてはある程度データ配信率の向上が見られるが、建物等の影響を考慮した場合はプロトコル属性値を変更してもデータ配信率はほとんど変わらず非常に低いままであることがわかった。

6. 端末数を増加させた場合の性能評価

(1) 固定された2端末が通信を行う場合のシミュレーション結果および考察

前節に示した通り、固定された2端末間の通信において、建物の影響を考慮した場合はルーチングプロトコル属性値を変更してもデータ配信率の向上は見られなかった。この原因としては、固定された2端末間の経路作成に寄与する中継端末の数が少ないことが考えられる。従って、領域内を移動する端末数を増加させることによりデータ配信率の向上が期待できる。

前節と同様な通信モデルにおいて、領域内の総端末数

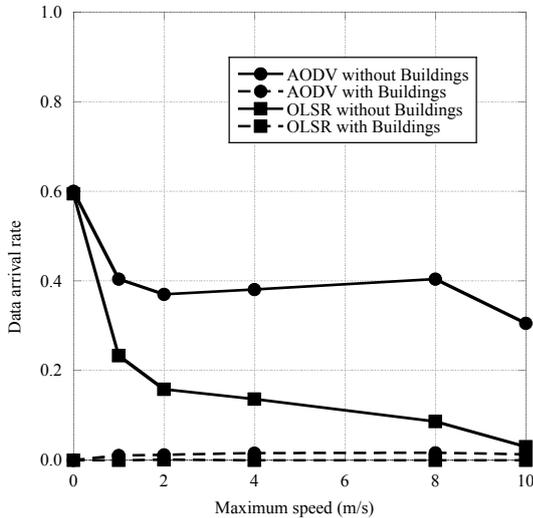


図10 固定された2端末が通信を行う場合の端末移動度に対するデータ配信率の変化

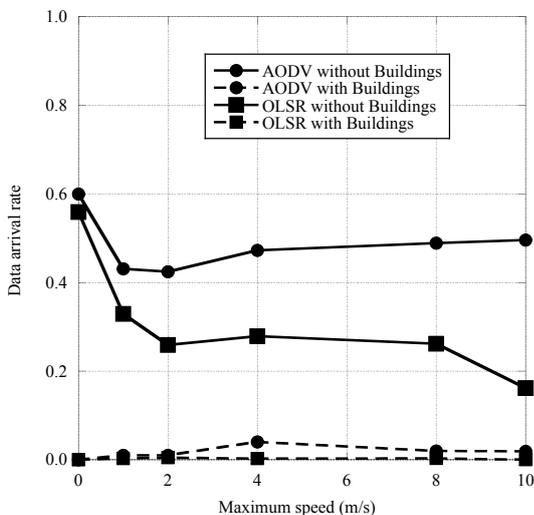


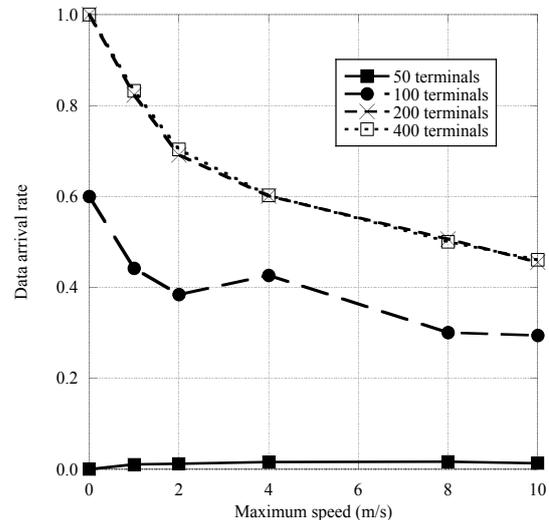
図11 ルーチングプロトコル属性を変更した場合の端末移動度に対するデータ配信率の変化

を100, 200, 400とした場合について、シミュレーションを行った。固定端末におけるデータ配信率と移動端末の最大移動速度の関係を図12に示す。ただし、OLSRの端末数400の場合については、シミュレーションに非現実的な実行時間を必要とするため結果が得られなかった。

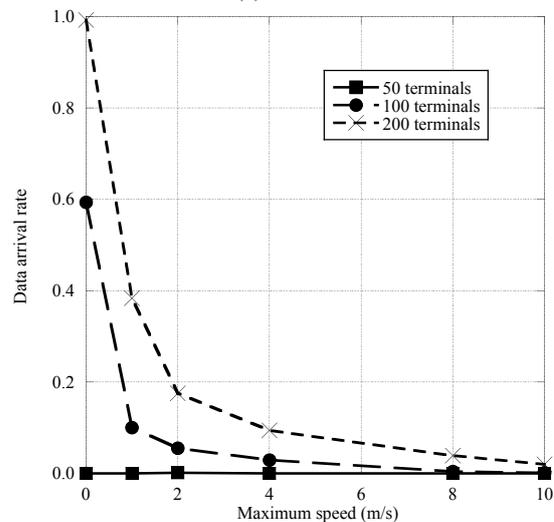
AODVの場合、端末数を50から100に増加させることによりデータ配信率は劇的に向上し、200に増加させることによりさらに向上する。しかし、端末数が400の場合のデータ配信率は200の場合とほとんど変化がない。OLSRの場合においても端末数を200まで増加させることによりデータ配信率は向上するが、移動度が大きい場合についてはデータ配信率の絶対値は低いままである。

(2) ルーチングプロトコル属性値の最適化

AODVおよびOLSRのそれぞれについて、プロトコル属性値を変更してシミュレーションを行った。変更前と変更後の各属性値はこれまでと同様、表1の通りである。プロトコル属性値変更後の端末移動度に対するデータ配信率（5つのシナリオの平均値）の変化を図13に示す。AODVの場合、端末数が50の場合のデータ配信率は非常に低いが、端末数を増加させることにより、配信率は増加し、図13(a)と図12(a)との比較から明らかなように、

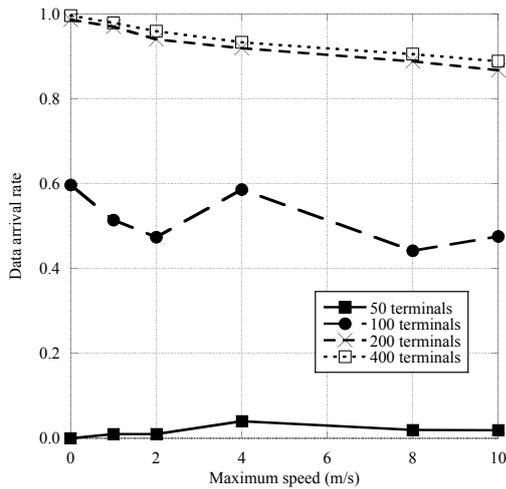


(a) AODV

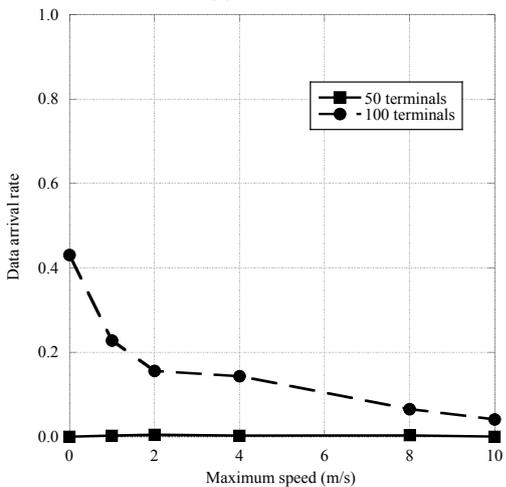


(b) OLSR

図12 端末数を増加させた場合の端末移動度に対するデータ配信率



(a) AODV



(b) OLSR

図 13 パラメータ属性を変化させた場合の
端末移動度に対するデータ配信率

プロトコル属性値変更前に比べても高い配信率となった。端末数を 200 とした場合、最大移動速度が 4m/秒以下において 9 割以上のデータ配信率が得られ、端末数を 400 以上とした場合、最大移動速度が 10m/秒以下において 9 割以上のデータ配信率が得られた。

総務省による平成 20 年通信利用動向調査報告書（世帯編）¹⁶⁾によれば、6 歳以上の個人における携帯電話の利用率は 75.4%であり、我々が想定した区画が存在する宮城県仙台市青葉区における 6 歳以上の人口密度は仙台市の統計情報¹⁷⁾によれば平成 21 年 10 月現在で 861 人/ km²であることから、想定した 500m 四方の領域内に実際に存在する利用可能な携帯電話数は約 162 と見積もることができる。従って、普段人々が使用している携帯電話に無線アドホックネットワーク機能を実装することにより、ある程度の通信を行うことが可能であると予測できるが、非常時においてこれらの携帯端末がすべて無線アドホックネットワーク構築に用いられたとしても、データ配信率は必ずしも十分高いとは言えない。データ配信率を向上させるためには、これらの携帯端末を利用するのみならず、予め中継に資する端末を準備しておく、非常時にこれらを稼働させる等の方策を取ることが考えられる。

OLSR の場合、端末数が 50 の場合のデータ配信率はいずれの最大移動速度においてもほぼ 0 であった。端末数

を 100 とすることにより、端末数 50 の場合に比べデータ配信率を向上させることができ、図 13(b)と図 12(b)との比較から明らかなように、移動度 0m/秒の場合を除きプロトコル属性値変更前に比べても高い配信率となった。しかし、端末数が同じ 100 の AODV の場合と比較すると、いずれの最大移動速度においても AODV の場合に比べ低い配信率を示した。端末数 200 および 400 の場合についてのシミュレーションは非現実的な実行時間を必要とするため結果が得られなかったが、OLSR の性質上、常にルーチング情報を交換するのに多大なパケット送受信を必要とするため、端末数をこれ以上増加させてもデータ配信率の大幅な向上は見込めず、AODV を上回るデータ配信率を得ることは難しいと思われる。

7. まとめ

非常時における無線アドホックネットワークの実用化に向けて、大規模災害発生時を想定したより実際の適切な通信モデルについて検討し、リアルタイム通信を想定した通信モデルを用いた場合の無線アドホックネットワークの性能をネットワークシミュレータにより解析し、評価した。市街地災害時における端末移動モデルとして実際の市街地における道路を模擬し、端末がこの道路に沿って移動する Real City モデルを提案し、従来最も良く用いられてきた Random Waypoint モデルとの比較を行った。Real City モデルのデータ配信率が Random Waypoint モデルのデータ配信率より低い値となることを示すとともに、ルーチングプロトコル属性値をデフォルトから変更することによりデータ配信率の向上が可能であることを示した。次に、Real City モデル上で、災害が発生した場合を想定しアプリケーションが扱うデータを画像等とし、それに応じたデータ量の通信を行った場合におけるネットワーク性能の詳細について評価を行った。さらに、より実際の環境に近くなるよう、建物等の影響を考慮したネットワーク性能について評価を行い、この状況下でネットワーク性能を向上させるには、中継に資する移動端末数を増加させることが有効であることを明らかにした。しかし、シミュレーション結果からは、普段人々が使用している携帯電話に無線アドホックネットワーク機能を実装したとしても、現時点では既存通信網並の品質の通信を行うことは難しいと言える。より高い品質の通信を実現するためには、ルーチングプロトコル属性値についてさらなる検討を行い、状況に応じた最適値を求めると同時に、予め中継に資する端末を準備しておく、非常時にこれらを稼働させることにより、安定した経路を確保する方策が必要であると考えられる。今後はこれらの方策についてさらなる詳細検討を行うとともに、データ配信率がある程度の値しか得られない状況においても、非常時に必要な情報を確実に届けることを可能にするための具体的な方策について、アプリケーションレベルまで含めた研究を進める予定である。

謝辞：シミュレーションに協力頂いた（株）情報工房に感謝する。本研究の一部は総務省戦略的情報通信研究開発推進制度(SCOPE)の支援を受けて実施した。

参考文献

- 1) 篠田孝祐, 野田五十樹, 太田正幸, "ロバストな通信経路選択による災害時情報支援システム", Proc. of DICO2002, pp. 543-546, Jul. 2002.
- 2) 織田将人, 上原秀幸, 横山光雄, 伊藤大雄, "端末の packets 中継機能を用いた安否確認ネットワークの検討", 信学論(B), Vol.J85-B, No.12, pp.2037-2044, Dec. 2002.
- 3) 児島史秀, 菅田明則, 藤瀬雅行, 大山 卓, 清水 聡, 徳田清仁, "自営無線のための自律分散型マルチホップ端末の開発", 2004年信学総大, B-5-261, Mar. 2004.
- 4) 滝澤修, "ユビキタス通信技術の減災応用研究", 情報通信研究機構季報, Vol.51, Nos.1/2, pp.227-246, Mar./Jun. 2005.
- 5) David R. Choffnes, Fabián E. Bustamante, "An Integrated Mobility and Traffic Model for Vehicular Wireless Networks", Proc. of the 2nd ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks (VANET), pp.69-78, Sep. 2005.
- 6) 交通シミュレーションクリアリングハウス, <http://www.jste.or.jp/sim/index.html>
- 7) 亀山真吾, 高野朗, 間瀬憲一, "車々間アドホックネットワークにおけるデジタルマップの利用", 信学総大, B-21-50, Mar. 2006.
- 8) Rahul Mangharam, Daniel Weller, Ragunathan Rajkumar, Daniel Stancil, Jayendra S. Parikh, "GrooveSim: A Topography-Accurate Simulator for Geographic Routing in Vehicular Networks", Proc. of the 2nd ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks (VANET), pp.59-68, Sep. 2005.
- 9) 佐藤和基, 前田久美子, 山崎亜希子, 内山彰, 山口弘純, 安本慶一, 東野輝夫, "現実的な環境下で MANET システムを性能評価するための無線ネットワークシミュレータ MobiREAL", Proc. of DICO2005, pp. 589-592, Jul. 2005.
- 10) 小牧省三編, "無線 LAN とユビキタスネットワーク", pp.175-180, 丸善, 2004.
- 11) ARIB IMT-2000 Study Committee, "Evaluation Methodology for IMT-2000 Radio Transmission Technologies (Version 1.1)", pp. 35 - 37, Sep. 1998.
- 12) C. Perkins, E. B. Royer and S. Das, "Ad Hoc On Demand Distance Vector (AODV) Routing", IETF RFC 3561, Jul. 2003.
- 13) T. Clausen and P. Jacquet, "Optimized Link State Routing Protocol (OLSR)", IETF RFC 3626, Oct. 2003.
- 14) OPNET Technologies, <http://www.opnet.com/>
- 15) J.-E.Berg, "A Recursive Method For Street Microcell Path Loss Calculations", Proc. of PIMRC'95, Vol.1, pp. 140-143, Sep. 1995.
- 16) 総務省通信利用動向調査報告書 (世帯編) http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/statistics/pdf/HR200800_001.pdf
- 17) 仙台市町名別年齢 (各歳) 別住民基本台帳人口データ <http://www.city.sendai.jp/kikaku/seisaku/toukei/jinkou/kakusai/h2110.xls>

(原稿受付 2009.8.30)
(登載決定 2010.1.08)