

博士論文

大規模無線アドホックネットワーク
テストベッドの構築・運用に関する研究

新潟大学大学院自然科学研究科情報理工学専攻

高橋 義彦

2007年 3月

間瀬 憲一 教授
(主 査)

仙石 正和 教授

山口 芳雄 教授

牧野 秀夫 教授

菊池 久和 教授

中野 敬介 助教授

目 次

| | | |
|-------|---------------------------|----|
| 1 | 序論 | 1 |
| 1.1 | 研究の背景 | 1 |
| 1.2 | 研究の意義 | 2 |
| 1.3 | 研究のアプローチ | 3 |
| 1.3.1 | 改善目標 | 3 |
| 1.3.2 | 研究のアプローチ | 5 |
| 2 | アドホックネットワーク | 11 |
| 2.1 | アドホックネットワークの特徴 | 11 |
| 2.2 | ブロードバンドアクセスの技術動向 | 13 |
| 3 | アドホックネットワークの通信実験 | 18 |
| 3.1 | 実験目的 | 18 |
| 3.2 | 実験方法と条件, 使用測定ツール | 18 |
| 3.3 | 実験結果と分析 | 20 |
| 3.4 | まとめ | 22 |
| 4 | 大規模無線アドホックネットワークテストベッドの開発 | 29 |
| 4.1 | 研究の背景 | 29 |
| 4.2 | 大規模アドホックネットワーク構築の課題と指針 | 31 |

| | | |
|-------|---------------------------------------|----|
| 4.2.1 | 大規模アドホックネットワーク | 31 |
| 4.2.2 | 制御装置 | 32 |
| 4.2.3 | 長期間連続運転 | 32 |
| 4.2.4 | OS | 33 |
| 4.2.5 | 無線 LAN 方式 | 33 |
| 4.2.6 | アンテナ | 34 |
| 4.2.7 | 電力供給 | 34 |
| 4.2.8 | 実験稼動 | 34 |
| 4.3 | 大規模アドホックネットワークテストベッドの概要 | 35 |
| 4.3.1 | ノード配置 | 35 |
| 4.3.2 | ノード装置 | 36 |
| 4.3.3 | 電力供給 | 37 |
| 4.3.4 | ルーチングプロトコル | 37 |
| 4.3.5 | 有線 LAN との接続 | 38 |
| 4.4 | 実験手順とサポートツール | 39 |
| 4.4.1 | 実験手順 | 39 |
| 4.4.2 | シナリオセット送信ツール (TRIGGER) | 41 |
| 4.4.3 | 自動実行ツール (AUTO) | 42 |
| 4.4.4 | ストリーム生成ツール (STREAM) | 42 |
| 4.4.5 | パケットキャプチャーツール (ANALYZE) | 42 |
| 4.4.6 | 無線インタフェース情報収集ツール (W_INFO) | 43 |
| 4.4.7 | ログ収集ツール (AUTO_LOG_COLLECT) | 44 |
| 4.4.8 | シナリオファイル配布スクリプト (DISTRIBUTE_SCRIPT) | 45 |
| 4.4.9 | ネットワークトポロジ表示ツール (GULANALYZE) | 45 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 4.5 | 実験例 | 46 |
| 4.5.1 | BSSID 不一致問題 | 46 |
| 4.5.2 | リンク状態 | 47 |
| 4.5.3 | ルーチングプロトコル動作実験 | 50 |
| 4.6 | 大規模アドホックネットワーク構築指針の有効性 | 57 |
| 4.7 | まとめ | 59 |
| 5 | 無線メッシュネットワークにおける高スループット経路選択に関する実験的検証 | 65 |
| 5.1 | リンクフィルタリング | 66 |
| 5.1.1 | リンクフィルタリング | 66 |
| 5.1.2 | フィルタリング手法と結果 | 67 |
| 5.2 | スループット実験 | 68 |
| 5.2.1 | 実験方法 | 68 |
| 5.2.2 | 実験結果 | 69 |
| 5.2.3 | リンクフィルタリングパラメータの設定指針 | 73 |
| 5.3 | まとめ | 73 |
| 6 | 多層メッシュネットワークにおけるルーチング方式に関する検討 | 79 |
| 6.1 | 研究の背景 | 79 |
| 6.2 | 提案アルゴリズムのコンセプト | 80 |
| 6.3 | メカニズム | 81 |
| 6.4 | シミュレーション条件 | 84 |
| 6.5 | シミュレーション結果 | 85 |
| 6.6 | まとめ | 87 |

| | | |
|----------|-----------------------------|------------|
| 7 | マルチホップ無線ネットワークの設計技法 | 91 |
| 7.1 | 研究の背景 | 91 |
| 7.2 | ISP 事業者から見た設計ポイント | 91 |
| 7.3 | 前提条件 | 93 |
| 7.4 | マルチホップネットワーク設計手法 | 95 |
| 7.4.1 | 中継設計アルゴリズム | 95 |
| 7.4.2 | 信頼性設計アルゴリズム | 96 |
| 7.5 | シミュレーション評価 | 98 |
| 7.5.1 | シミュレーション条件 | 98 |
| 7.5.2 | シミュレーション評価 | 100 |
| 7.6 | まとめ | 101 |
| 8 | 結論 | 107 |

表 目 次

| | | |
|-----|--------------------------------|----|
| 3.1 | 実験機材主要緒元 | 25 |
| 4.1 | ノード装置の主要緒元 | 60 |
| 5.1 | フィルタリング条件とリンク総数 | 68 |
| 5.2 | 各フィルタリング条件における最多使用経路 | 72 |
| 5.3 | フィルタリング条件 f の経路変遷 | 75 |
| 5.4 | フィルタリング条件 h の経路変遷 | 76 |

目 次

| | | |
|------|-----------------------------------|----|
| 1.1 | 無線 LAN 方式の改善点 | 2 |
| 1.2 | 論文の全体構成 | 9 |
| 2.1 | 無線アドホックネットワーク | 12 |
| 3.1 | 受信電力測定方法 | 19 |
| 3.2 | 受信電力の距離特性 (2003/9/7 測定) | 21 |
| 3.3 | 高さ h1 のパケット到達率距離特性 (2003/9/7 測定) | 22 |
| 3.4 | 高さ h2 のパケット到達率距離特性 (2003/10/8 測定) | 23 |
| 3.5 | 受信電力を媒介とした距離とパケット配信率の関係 | 24 |
| 3.6 | 高さ h1 の受信電力の分散 (2003/10/14 測定) | 24 |
| 3.7 | 高さ h2 の受信電力の分散 (2003/10/14 測定) | 26 |
| 3.8 | AODV の到達パケットのホップ数 (1 回目) | 26 |
| 3.9 | AODV の到達パケットのホップ数 (2 回目) | 26 |
| 3.10 | AODV の到達パケットのホップ数 (3 回目) | 27 |
| 4.1 | 大規模テストベッドのノード配置 | 35 |
| 4.2 | テストベッドシステムの全体構成 | 39 |
| 4.3 | 実験サポートツール | 40 |
| 4.4 | ANALYZE 動作概念 | 43 |

| | | |
|------|---|----|
| 4.5 | GUI ANALYZE 動作例 | 46 |
| 4.6 | BSSID 不一致問題 | 48 |
| 4.7 | SNR と TSR の相関 | 49 |
| 4.8 | 短時間 RSS 変動 | 50 |
| 4.9 | 短時間 NL 変動 | 51 |
| 4.10 | パケット配信率 (RTS/CTS 制御なし) | 53 |
| 4.11 | 経路変化数 (RTS/CTS 制御なし) | 54 |
| 4.12 | スループット (RTS/CTS 制御なし) | 55 |
| 4.13 | パケット配信率とホップ数 | 56 |
| 4.14 | 移動シナリオにおけるパケット受信数とホップ数 | 57 |
| 4.15 | 移動シナリオにおけるパケット受信数とホップ数 (ノード増設後) | 58 |
| 5.1 | スループット測定結果 | 70 |
| 5.2 | 平均ホップ数 | 71 |
| 6.1 | トラヒック集中 | 81 |
| 6.2 | マルチランシーバによる多層化 | 81 |
| 6.3 | MAC キュー選択方式 | 82 |
| 6.4 | Normal モデル | 82 |
| 6.5 | Single-2 モデル | 83 |
| 6.6 | Single-3 モデル | 83 |
| 6.7 | Multiple モデル | 84 |
| 6.8 | パケット配信率 | 87 |
| 6.9 | パケット配信時間 | 88 |
| 6.10 | 制御パケットオーバーフロー数 | 89 |

| | | |
|------|-------------------------------|-----|
| 6.11 | オーバーフロー数 | 89 |
| 7.1 | ネットワーク設計手法の現状 | 93 |
| 7.2 | ネットワーク設計時に考慮する事項 | 94 |
| 7.3 | グループ構成 | 97 |
| 7.4 | グループ間の接続と中継設計(1) | 97 |
| 7.5 | グループ間の接続と中継設計(2) | 98 |
| 7.6 | 信頼性設計 | 98 |
| 7.7 | 隣接ノードによるグループ構成 | 101 |
| 7.8 | 中継設計後のネットワーク | 102 |
| 7.9 | 信頼設計後のネットワーク | 103 |
| 7.10 | 無線距離を 300m にした場合の信頼設計後のネットワーク | 104 |
| 7.11 | 無線距離を 400m にした場合の信頼設計後のネットワーク | 104 |
| 7.12 | 無線距離と平均独立グループ数推移 | 105 |
| 7.13 | 無線到達距離と平均中継ノード数推移 | 105 |
| 7.14 | 設計ステップと最大ホップ数推移 | 105 |
| 7.15 | 設計ステップと最小平均ホップ数推移 | 106 |
| 7.16 | 設計ステップと総ノード数推移 | 106 |

第1章 序論

1.1 研究の背景

近年のわが国の ICT 利用は着実に進展し，平成 16 年末におけるインターネット利用人口は 7,948 万人（対前年比 2.8%増）と推計され，人口普及率は 62.3%にいたる [1]．また，年代別の利用率について平成 13 年末と平成 16 年末を比較すると，すべての年代において利用率が上昇しており，特に 60 歳以上の高齢者の利用率が 2.43 倍と大幅に伸びている [1]．

端末別の利用者数についても平成 13 年末と平成 16 年末を比較すると，携帯電話や PHS，通信機能付きの形態情報端末（携帯電話等）からの利用者が 2.3 倍と大幅に伸びている．またパソコンのみからの利用者数が 3 割の減少となっているのに対し，パソコンと携帯電話等の両端末からの利用者数は 2.4 倍と大幅に伸びている．パソコン単独での利用から，パソコンと携帯電話等の両端末からの利用へと変化していることがわかる [1]．無線情報通信ネットワークは，このように日常生活におけるインフラとして欠かせないものとなっている一方，モバイル高速ピアツーピア通信，ITS 車々間通信のような現在の集中型無線ネットワーク技術に適さないニーズも顕在化してきている．このようなニーズに対応できる技術として，アドホックネットワークが注目を浴び，重要となってきている．

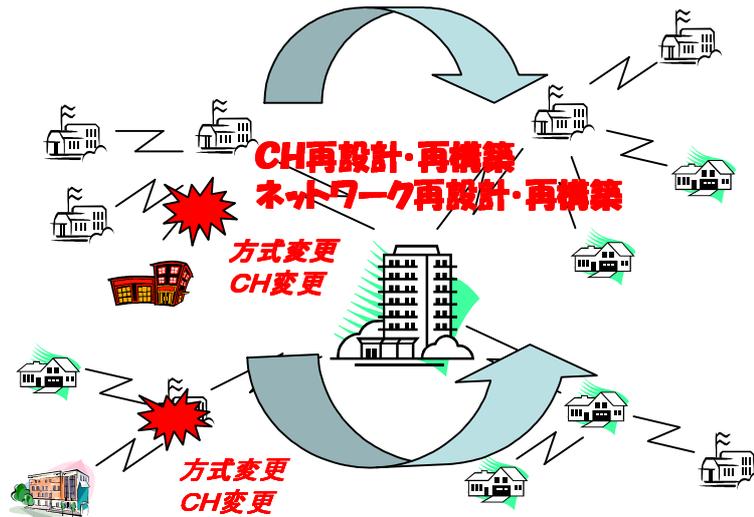


図- 1.1: 無線 LAN 方式の改善点

1.2 研究の意義

現状の無線 LAN ネットワークを構築するには事前の電波環境状態測定と電波経路の見通し確保が必須であり、手設計が現状である。このため、ネットワークの初期構築コストを下げるのが難しい。また、周波数帯が免許制の周波数配分で無いため運用フェーズに入ってから、後天的な電波状態変動や電波干渉、見通し障害物に対応できず信頼性に欠けるため、システムの再構築等により運用コストを押し上げる（図1.1）。

これら現状の無線 LAN システムが抱える問題点として、①電波干渉源に対する脆弱さ ②見通し障害物に対する脆弱さ ③CH 先取優先の不公平なシステム構築 ④運用後の後天的障害耐性の低さ ⑤スループット確保の難しさ があげられる。これらの問題点に対して改善を行う必要がある。

1.3 研究のアプローチ

1.3.1 改善目標

1.2項で述べた問題点の解消において3つの改善目標を設定し、各目標毎に必要な事項を明確にする。

(1) 改善目標1：安定したネットワークの実現

[1] チャネル競合回避

有限な資源である電波の有効利用方法として異なるネットワーク間の協調接続による拡張が必要

[2] 電波干渉源回避

移動無線機や木材・農作物乾燥機等ネットワークの利用する周波数帯への電波干渉源に対する耐性の確保が必要

[3] 見通し障害回避

ネットワーク構築後のビル建築や木々の枝葉による季節変動等後天的に発生する障害に対する耐性の確保が必要

(2) 改善目標2：安心・快適なネットワークの実現

[1] いつでも繋がるネットワーク

故障や電波障害、災害等でインフラ設備がダメージを受けたときでも自律分散的にネットワーク作成・継続利用が可能な仕組みが必要

[2] 切れないネットワーク

同様にネットワークの擾乱に対し、複数経路の確保と自動経路変更によりネットワークに不稼働時間を発生させない仕組みが必要

[3] セキュリティの確保

ユーザデータの秘匿性を確保でき、情報漏洩の無いセキュリティ確保が必要

[4] 柔軟性・独立性の確保

複数事業者が入り組んだ複雑なサービスエリアをカバーする様なケースでは各々の事業者が構築するネットワークで排他的に CH 独占を行うのではなく、相互のネットワークリソースを協調して利用でき、かつ、各事業者の提供するサービスの独立性を保障できる仕組みが必要

[5] 帯域の確保

VoIP、ストリーミング等のブロードバンドサービスを提供するには高スループットの実現が必要

(3) 改善目標 3：ネットワーク設計・構築，運用・維持コストの低減

[1] 初期ネットワークの自動設計

最低限の現地調査項目と 3D 地理情報等の組み合わせで最適コストとなる自動設計が行え、将来的なシミュレーション設計が繰り返し行える自動設計システムによる省力化・初期設計期間短縮によるコスト低減が必要

[2] 運用中ネットワークのトポロジー変更自動設計

サービス提供後のサービス未提供エリアにおける潜在ユーザの顕在化に対応するためのエリア追加や、既提供エリアの潜在ユーザ顕在化による中継ノード追加に対応させたトポロジー変更に対する省力化・設計期間短縮による低コスト化が必要

[3] ユーザノード，中継ノードの自動接続

トポロジー変更に対応した収容ユーザの接続設定や経路設定を自動で行い、人手による設定稼働や設計変更の稼働を削減することでコストの低減化を

図ることが必要

[4] 品質測定，課金制御，QoS 制御

サービス利用者にベストパフォーマンスを提供でき，サービスコミットメントを履行できるよう品質測定の仕組みとそのフィードバック，また，サービスに対する課金制御とクオリティ制御のための仕組みが必要

1.3.2 研究のアプローチ

本改善目標を実現するための研究のアプローチを以下に示す．

(1) 安定したネットワークの構築，安心・快適なネットワークの実現

[1] 着目点

以下の点からアドホックネットワークとの親和性に着目した．

- 1) 自律分散的に動作
- 2) 途中のノードが中継（マルチホップ無線通信）

[2] 関連研究の現状

これまでのアドホックネットワークの機能高度化提案の検証方法は以下の理由からシミュレーションによる検証が多い．

- 1) パラメータ設定で様々な状況下のシミュレーションを容易に実行が可能である
- 2) 様々なレイヤのプロトコルがあらかじめ実装されており，提案手法に関する部分を実装するだけで良い

しかしシミュレーションは，

- 1) 実空間における電波環境のモデル化が難しい

2) プロトコルの詳細な取り込みが難しい

ため、実験による実環境での評価を行う必要があるが、現状では広大な実験場所の確保が難しく殆どが数～20 ノード程度のシステムと小規模であり、

- 1) 規模の違いからくる運用・監視ツールへの要求要件を明確にできない
- 2) 屋内設置で無線 LAN 出力を落とし送信距離を短縮するまたはソフト的なノード間リンク有無制御で擬似マルチホップを実現しているため実環境での実装上の問題点の抽出が難しい
- 3) 標準規格に未規定の項目が存在し製造メーカーに依存することから、
 - i. 予期せぬ事象の発生
 - ii. 現状製品の実装上の問題点の抽出が難しい
 - iii. 次世代製品開発への要求要件の抽出が難しい

という問題点が上げられる。

[3] 研究のアプローチ

以上を踏まえアドホックネットワークの自動経路設定機能の高度化や高スループットの実現を図っていく必要があるが、このためには、実環境における実証実験システムでの検証を行い改良点へのフィードバックを図る目的で大規模無線アドホックネットワークのテストベッドシステムの開発が急務である。

(2) ネットワーク設計・構築コストの低減，運用コスト，維持コストの低減

[1] 着目点

無線受信電力に基づく幾何配置設計に着目した。このとき最適なネットワーク構築コストとなるようにアンテナ地上高と電波到達距離の相関を用いて

ノード配置の物理設計を行い，見通し障害物への対応と複数経路確保による信頼性を確保する必要がある．

[2] 関連研究の現状

これまでアドホックネットワークの設計に関する研究はセンサーノードにおけるトポロジー設計方法等が多数を占め，無線局の物理配置設計についての報告は多くない．

また，大規模ネットワークの自動設定やデータ収集，性能測定を行い，それを評価できるツールについての報告についても同様である．

[3] 研究のアプローチ

大規模無線ネットワークを最適な状態を維持しつつ最小のコストで運用するためには機器設定誤り等の人的ミスを防止し，ネットワーク機器の動作状態を監視でき，各機器から出力されるアラームやログ情報等を自動的に収集する等の各種自動運用ツールを開発する必要がある．また，無線アドホックネットワークの自動置局設計手法の提案や高スループットの実現方法について検討を行う必要がある．しかし，これらの項目は実環境での性能評価をベースに行うことが必要で，そのためには各種評価・試験を行うための大規模無線アドホックネットワークテストベッドの開発が急務である．

本論文ではこれら研究のアプローチに基づいた検討内容を記述する．本論文の全体構成を図 1.2 に示す．第 2 章ではアドホックネットワークの現状について述べ，第 3 章ではアドホックネットワークの通信実験について述べる．第 4 章では設計指針を定め具体的な大規模無線アドホックネットワークテストベッドの開発について述べ，その有効性を検証する．第 5 章では構築したテストベッドシステムを実際に使用した実験により無線メッシュネットワークにおける高スループット経路選択に関する実験的検証について述べる．また，関連研究として第 6 章でネットワークにおける高スループッ

ト化の一手法の検討として多層メッシュネットワークにおけるルーティング方式に関する検討をシミュレーション評価で行い，第7章ではアドホックネットワークの設計・管理に関する検討について述べ，マルチホップ無線ネットワークの設計技法を提案する．最後に第8章で結論について述べる．

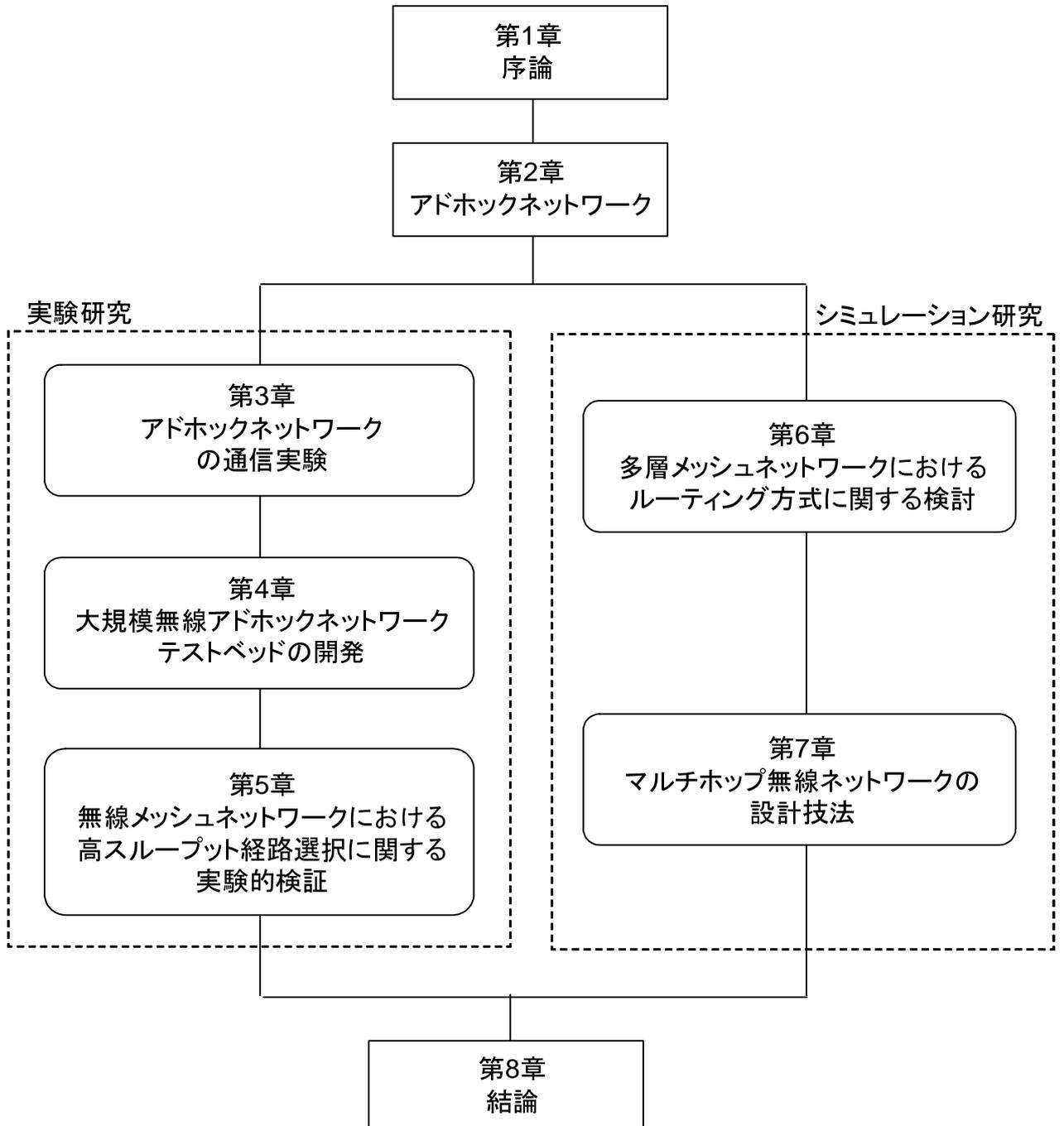


図- 1.2: 論文の全体構成

参考文献

- [1] 総務省「情報通信白書平成 17 年版」, <http://www.johotsusintokei.soumu.go.jp/whitepaper/ja/cover/index.htm>

第2章 アドホックネットワーク

2.1 アドホックネットワークの特徴

21世紀のコビキタスネットワーク社会実現のための一つのアプローチとして、従来の移動通信ネットワークとは異なるアドホックネットワーク利用の研究が進められている。アドホックネットワークは、

- (1) 従来方式と違い基地局とそれらを結ぶ有線網に依存しない
- (2) モバイル端末は互いに対等であり自律分散的に動作する
- (3) モバイル端末同士が無線通信により直接情報を交換する
- (4) 電波が届かず直接情報を交換できないモバイル端末同士も、途中のモバイル端末が中継をするマルチホップ無線通信により情報交換が可能である

等の特徴をもつことから、エリアを限定しないネットワーク構築が可能となり、より広範な地域でのインターネットアクセスサービスの提供や災害時の非常無線ネットワークの構築等に即応できるネットワークである [1] (図 2.1)。

一方、現状の無線によるインターネットアクセス方式には、通常の無線ブリッジで建物間を接続して無線ネットワークを構築し、それをインターネットアクセスに利用させる地域インターネットシステムや通信事業者がインターネットアクセスサービスの加入者線区間を無線方式で提供する FWA 方式がある。地域インターネットの無線

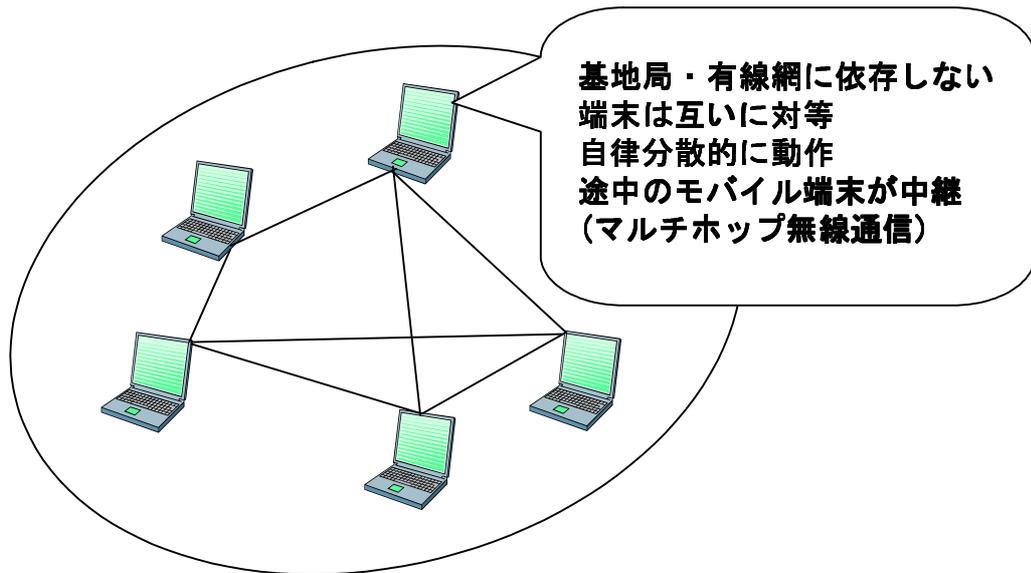


図- 2.1: 無線アドホックネットワーク

LAN 方式は固定無線局に無線ブリッジを配置して1対1または1対多接続の無線ネットワークを構築し、インターネットアクセスやメール交換とスケジュール管理等のグループウェア利用を行っている。しかし、これら固定配置無線ブリッジ方式でのネットワーク構成は、ネットワーク構築時に存在しなかった電波伝搬路上の障害物発生や周囲に発生する電波干渉源の発生、気象変化等への追従が難しく、スループットの低下やサービス断等品質劣化への対応が即座にできない状況が現実である。

このような状況の中、固定無線局方式へアドホックネットワーク技術を適用し無線マルチホップ通信による経路変更を柔軟に行えれば、地域無線 LAN 方式の品質向上が望めるとともに通信速度の向上やネットワーク管理手法の向上、ネットワーク設計手法の向上との相乗効果で、より安価で快適かつ高品質なインターネットアクセスサービスの提供や地域情報化のための情報発信システム構築、エリアフリーの構内 LAN システムの構築が期待できる。

ネットワークの一例としては、下記のもの挙げられる [2]。

(1) 「MeshNetwork」

米 Motorola 社によるモバイル PC , 自動車などの移動端末と電柱などの電力が安定して供給されるところに設置された無線ルータ間で通信を行うネットワークで , 通常のスPEEDで移動するユーザ (歩行者など) は最大 6Mbps , 高速に移動する車などは最大 2Mbps のスループットのユーザ・ユーザ間通信サービスやインターネットアクセスサービスを提供する .

(2) 「RoofTopNetwork」

フィンランド Nokia 社が提供するネットワークで家庭の屋根などに設置された無線ルータによりネットワークを構築し , ユーザにマルチホップ無線インターネットアクセスを提供する .

2.2 ブロードバンドアクセスの技術動向

地域インターネットシステムや家庭のインターネットアクセス方式におけるインターネットブロードバンドアクセス方式の技術進展は ①光ファイバー方式 ②CATV 方式 ③DSL 方式 ④FWA 方式と目覚しいものがある . この中でも , FWA 方式は無線方式の特徴である加入者区間通信路設備コストが低減できるという利点からインターネットブロードバンドアクセスサービスの普及拡大の可能性を持っているが , 現状では契約ユーザ専用アクセスラインとしての位置付けによる設計・構築 , 運用のため , 比較的高コストサービスとなっている . そこで新しく第 5 のインターネットブロードバンドアクセス方式として , ①加入者区間通信路設備のコスト削減が期待でき , ②GHz 周波数帯を利用した広帯域データ通信が可能であり , ③メッシュ的に通信路を接続し長いスパンでもマルチホップで通信経路を確保できる , ④現状で最も普及している IEEE802.11b 無線技術及びその発展型の将来方式との融合で安価に実現できる等の特徴を有する無

線アドホックネットワークによるインターネットブロードバンドアクセス方式実現は学術的、技術的にも興味深い。しかし無線ネットワークには電波干渉や電波伝搬路上の障害物に対する無線通信障害の問題があり、ビル間及びアクセスライン用無線ネットワーク構築時の先行他無線システムとの競合回避や乾燥機等のノイズ源回避等の柔軟性を確保できるとともに、周囲環境の経時変化においても柔軟に対応できる無線通信路の確保が可能な無線ネットワークの実現が急務である。無線アドホックネットワークの実現手段として MANET で検討が進められているパケット無線方式の IEEE802.11, 11b 等の無線 LAN 仕様の標準規格を用いた方式では様々なルーチングプロトコルが検討されている [1][3]。大きくはテーブル駆動方式とオンデマンド方式に分類され、テーブル駆動方式のルーチングプロトコルとしては DSDV, WRP, CGSR, OLSR, MMRP, TBRPF があげられオンデマンド方式のルーチングプロトコルとしては AODV, DSR, TORA, RDMAR, ABR, CBRP があげられる [1]。これらのプロトコルはいずれもすべてのノードが自律分散的に動作することを想定しており、集中管理を行うノードを必要としない。IETF の MANET ではテーブル駆動方式（プロアクティブ形）の OLSR, TBRPF, オンデマンド方式（リアクティブ形）の DSR と AODV について標準化が進展しており、AODV 及び OLSR の RFC が発行されている [4][5]。また、種々のルーチングプロトコルのソースコードが各機関によりインターネット上に公開されている [6][7]。さらに動的で柔軟な無線網「メッシュ・ネットワーク」の開発が米国で活発になっている。米 IEEE802 LAN / WAN Standard Committee の本会議（2004/03/14～19, 米フロリダ州オーランド市）において、これまで活動の中心だった「MES Working Group」が「IEEE802.11s Mesh Networking」と呼ぶ正式な Task Group に昇格し、この Task Group が主導する形で IEEE802.11 向けのメッシュネットワーク機能の標準規格を策定していくことになる [8]。一方、無線を用いてブロードバンドインターネット接続を実現する FWA サービスには、主に事業者向けに用いられ 2 地点間を無線で接続

する P-P (Point to Point : 対向) システムと , SOHO や一般家庭向けに用いられ 1 つの基地局で複数の加入者に対してインターネットアクセスを提供できる P-MP (Point to Multi-Point : 1 対多対向) システムがある . 最近の動向では IEEE802.16 の研究開発が活発化している [9] . IEEE 802.16 (" Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems ") は , 固定ブロードバンド無線アクセス・システムをサポートする仕様であり , 費用効率が高く相互運用性のあるさまざまなベンダーのブロードバンド無線アクセス製品が全世界で迅速に普及するのを可能にするとされる . 同仕様は , 2001 年 12 月に IEEE 標準として承認され , 2002 年 4 月に発行された . IEEE 802.16a は , この当初仕様を補完する修正仕様として , 2003 年 1 月に IEEE 標準として承認され , 2003 年 4 月 1 日付けで発行された . 当初仕様では , ライセンスが必要な 10GHz ~ 56GHz の周波数帯を使うことになっているが , 修正仕様では , Wi-Fi ホットスポットへの接続に適した 2GHz ~ 11GHz の周波数帯をカバーしている . 通信範囲 31 マイル (半径約 50km) , ピーク共用データ速度 70Mbps の無線 MAN 規格 「 IEEE 802.16 」 および 「 IEEE 802.16a 」 が DSL やケーブルテレビ網経由のインターネット接続が利用できない場所での無線によるラストマイル・ソリューションとして宣伝されている . IEEE802.16e は , MWMAN (Mobile Wireless Metropolitan Area Network) と呼ばれ , 2 GHz から 6 GHz のライセンスドバンドを使用する IEEE802.16a との互換性の確保に主眼をおいた標準である . IEEE802.16a は , 移動についてまったく考慮されていないが , IEEE802.16e は移動通信にも対応させ 802.16a との互換性を保つことを目標としており , 一枚のノート PC 用通信カードで , 自宅では IEEE802.16a で超高速通信 (~ 70Mbit/s) を行い , 出先では IEEE802.16e で高速移動通信 (数 Mbit/s) を実現することも可能な仕様である [10]-[13] .

参考文献

- [1] 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”，電子情報通信学会誌 vol.84 No.2 pp.127-134 2001年2月。
- [2] 村上 卓史，間瀬 憲一，”マルチホップ無線を用いたインターネットアクセス方式の現状と性能評価”，信学技報 TECHNICAL REPORT OF IEICE. CS2002-106(2002-11)。
- [3] The Internet Engineering Task Force, Mobile Ad-hoc Networks (manet), <http://www.ietf.org/html.charters/manet-charter.html>
- [4] C. Perkins, ” Ad Hoc On Demand Distance Vector (AODV) Routing, ” IETF RFC 3561, July 2003
- [5] T. Clausen and P. Jacquet, ” Optimized Link State Routing Protocol, ” IETF RFC 3626 , October 2003
- [6] INRIA, Implementation code of Optimized Link State Routing, <http://menetou.inria.fr/olsr/#code>
- [7] Uppsala University, AdHoc@UU : ImplementationPortal, <http://core.it.uu.se/adhoc/ImplementationPortal>

- [8] IEEE P802.11 TASK GROUP S, ESS Mesh Networking : , http://grouper.ieee.org/groups/802/11/Reports/tgs_update.htm
- [9] The IEEE 802.16 Working Group on Broadband Wireless Access Standards, <http://grouper.ieee.org/groups/802/16/>
- [10] <http://www.ieee802.org/16/pubs/80216-2001.html>
- [11] <http://www.ieee802.org/16/pubs/80216a-2003.html>
- [12] <http://www.ieee802.org/16/pubs/80216-2004.html>
- [13] <http://www.ieee802.org/16/pubs/80216e.html>

第3章 アドホックネットワークの通信実験

3.1 実験目的

オール無線でのブロードバンドアクセス方式をマルチホップルートの自動構築で実現することは、FWA方式 [4]-[8] とは異なるメカニズムを追求する必要がある、物理層から応用層まで、新たな課題を含んでいると思われる。室内実験やシミュレーションでは、本質的な問題を見逃す恐れがあり、実ネットワーク環境下で実験をベースに検討を進める必要がある。そこで、本実験では、動作比較対象の無線アドホックネットワークプロトコルとしてプロアクティブ形プロトコルのOLSR[1] とリアクティブ形の経路制御プロトコルのAODV[2] を選定し、これらについて経路固定ルーチング方式特性をベースに比較・検証することとした。また、実験の評価指標として無線端末が設置されている環境について受信電力を指標として定量的に測ることとし、パケット送信端末の設置位置からの距離及び各無線端末の地上高をパラメータとして、受信電力・パケット到達率の特性を測定した。

3.2 実験方法と条件，使用測定ツール

これまでに行ってきた室内実験の過去データとの整合性、パケットの送信・受信・中継を行う各端末の処理性能及び無線LAN 端末等による電波干渉の影響が無い事を考慮して、パケット配信率測定用無線チャネル(以下CH)を6とし、パケット長を64byte

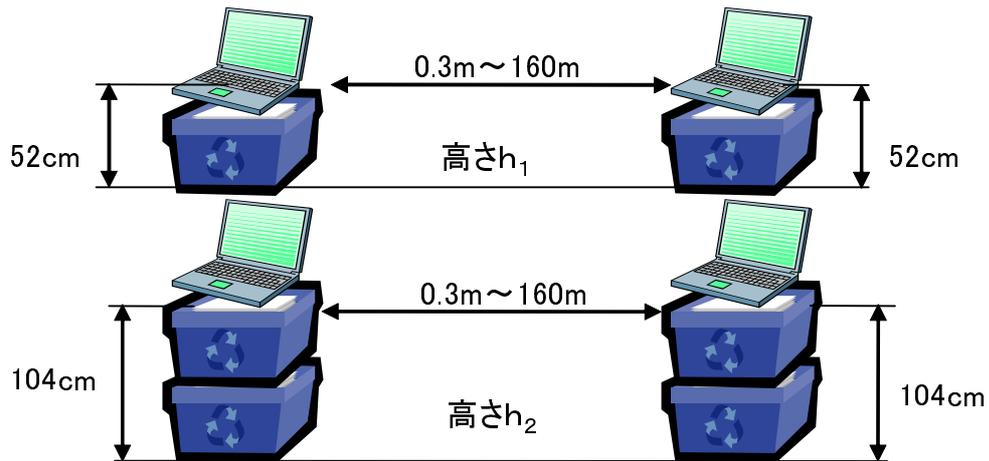


図- 3.1: 受信電力測定方法

固定，パケット送信間隔を4パケット/秒，100パケット/秒の2種類で測定した．また，送信パケット数は500パケット（4パケット/秒），10,000パケット（100パケット/秒）とした．

また，受信電力はパケット配信率測定端末とは別に1組の対向端末を用意し，電波干渉を避けるため周囲に他システムの無線LAN端末等がないことを測定器で確認した．CH=12（2.467GHz）に設定してICMPパケットまたはUDPパケットを10回送信して受信電力（dBm）を測定し，その平均値を求めた（図3.1）．

(1) 高さ条件

高さ h_1 （52cm：椅子に座った時の膝位置の高さを想定），高さ h_2 （104cm：人が直立で端末を操作する腰の位置の高さを想定）の2つの高さで測定した．

(2) 動作条件

無線LANカードの設定条件としてデバイスドライバレベルでビーコン間隔を100ms（デフォルト），basic-rate/operation-rate（2M/2M）で測定した．

(3) 端末の向き

データ送信端末とデータ受信端末はお互いのディスプレイの背面が向き合うよう設置し測定した。

また、複数ホップ時の中継端末はデータ送信端末に中継端末のディスプレイの背面が向き合う向きで設置した。

(4) 実験空間

実験空間として広大な駐車場 (300m × 250m) を確保し、通信端末間の通信路上に見通しを阻害する物体のない平面空間で行った (ただし、若干の金属ポールや電線は存在するが、直接波が通過する電波伝搬路上に妨害が発生しない位置となるように設置した) また、路面はアスファルト処理されている。

(5) 測定ツール

汎用端末での実験を実現するため実験機材を DOS/V ノート型パソコンで構成した。また、受信電力測定ツールは機材手配の関係で PDA タイプ機器と LaptopPC タイプ機器の 2 種類の混在となったが、取得されたデータについてはどちらも同じ電力値を示したことからデータの継続性が確認できている。実験機材主要諸元を表 3.1 に示す。

3.3 実験結果と分析

高さ h_1 (送受信 52cm)、高さ h_2 (送受信 104cm) における受信電力の推移を図 3.2 に示す。また、これと並行して行われたパケット送受信ツールによるパケット配信率の距離特性を図 3.3、図 3.4 に示す。

図 3.2 より高さ h_1 の距離特性は概ね理論式 [3] より 48m 付近を境に 0-48m 区間は自由空間モデル適用による距離の 2 乗に反比例する変化曲線を描き、48m 以降では距離

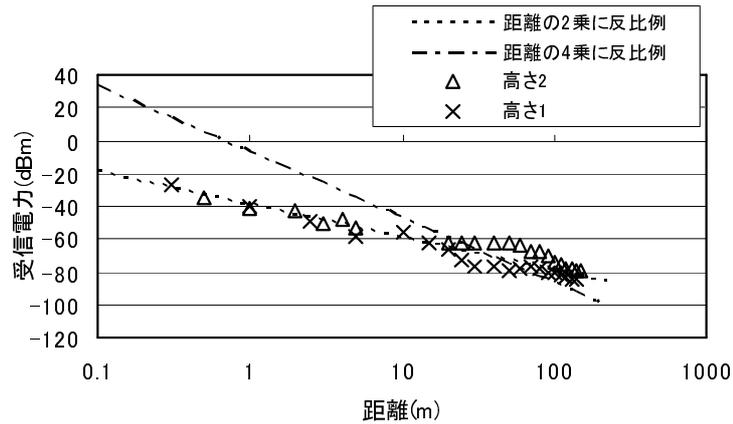


図- 3.2: 受信電力の距離特性 (2003/9/7 測定)

の4乗に反比例する変化曲線に従う傾向にあることが確認できる。図3.3より高さh1の packets 配信率測定結果で配信率が100%から下がり始める距離は概ね80m付近と求まるが、この時の受信電力を図3.2から求めると概ね-79dBmの付近であることがわかる。これから同じく図3.2で高さh2の受信電力特性から-79dBmとなる距離を求めると概ね160m付近となり、これは図3.4に示す高さh2で測定した配信率の距離特性にほぼ一致することが確認できた。この関係を図3.5に示す。ただし、図3.4は10/08に測定した2ホップ経路の2ホップめの配信率を適用しており、本配信率は1ホップ及び2ホップめの配信率の合成となること及び測定日時が違ふことで厳密に言えば誤差を含んでいるが、それほど大きな誤差ではないと考える。図3.6、図3.7に10/14に測定した高さh1及び高さh2の受信電力の分散状況を示す。これは同一距離で複数回受信電力を測定したときに、受信電力が変動していることを示す。

また、10/14に測定した1回の送受信単位である10,000パケット中でも受信電力が30dBm程度と大きく変動していることもわかった。受信電力が変動する要素として、測定日時や天候等環境条件による変動やPCの電力制御等が考えられるが、これらの特定については今後の検証が必要である。また、10/08の実験ではAODVを用いて2

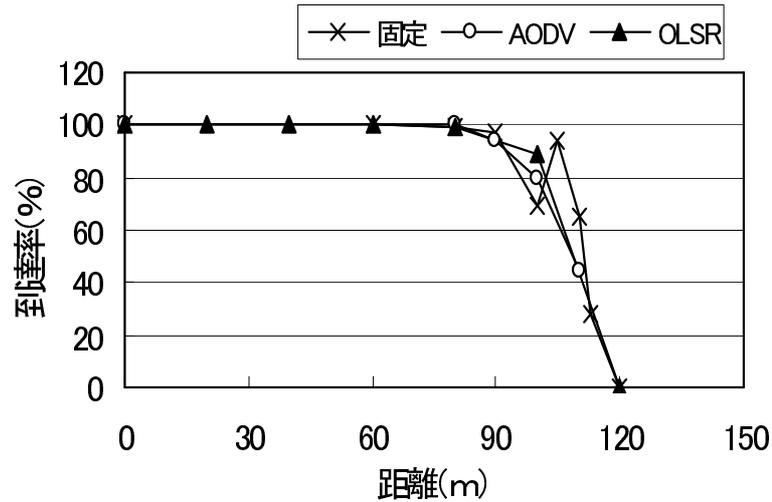


図- 3.3: 高さ h1 のパケット到達率距離特性 (2003/9/7 測定)

ホップ経路のパケット送信実験を行っているが、到達率が変動するため同一距離で何回か測定を繰り返し行っている。その測定結果から、1 ホップ距離が 140m、2 ホップめの距離が 50m で送信端末と受信端末の総距離が 190m となる時の受信端末に到達したパケットのホップ数を図 3.8、図 3.9、図 3.10 に示す。この場合、かろうじて 1 ホップ (190m) でもパケット受信できる距離であることから 2 ホップでのデータ到達と 1 ホップでのデータ到達を示すグラフとなっている。しかし、1 ホップでは品質が悪いためデータの到達率が悪く殆どが欠落している様子が見られる (ホップ数 0 が欠落を示す) が、2 ホップで到達するパケットはほとんど欠落していないことがわかる。本傾向は AODV、OLSR でも変わらない。アドホックネットワークのルーティングプロトコルの経路選択方法に受信電力による経路品質評価指標が必要であると考えられる。

3.4 まとめ

本実験結果から、パケット配信率は受信電力との相関をもち、受信電力値は距離との相関を持つことから、安定して高パケット配信率を維持できる受信電力値を求めら

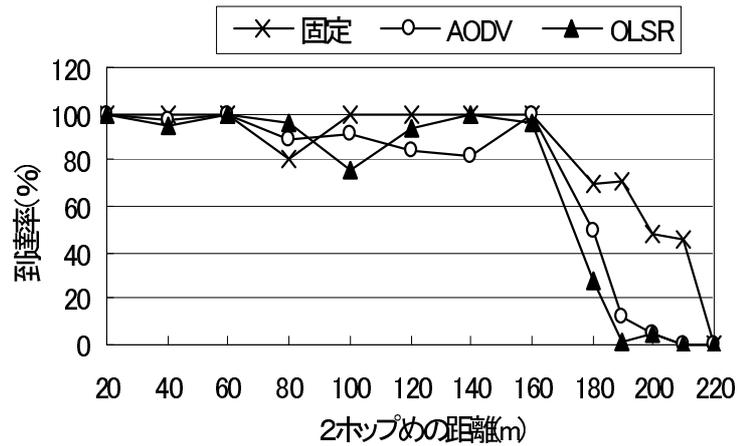


図- 3.4: 高さ h2 のパケット到達率距離特性 (2003/10/8 測定)

れることを示した．この際に受信電力の距離特性は自由空間モデルの距離の 2 乗に反比例する特性と直接波と反射波の 2 波を考慮した距離の 4 乗に反比例する特性の組み合わせで近似できることが確認できた．しかし，固定無線局方式のような端末間距離を一定に保った状態であっても受信電力が変動することが確認された．受信電力の変動要素の検討については今後の課題とするが，本実験で得られた結果から受信電力を一定以上で確保するために，受信電力値が求まるモデル式から送信電力を最適化できれば安定したネットワークの構築が可能であり，また，高パケット配信率を維持できる高品質なネットワークを形成することが可能となる．これにより新しいネットワーク設計手法及び経路管理手法を実現できることを示唆している．

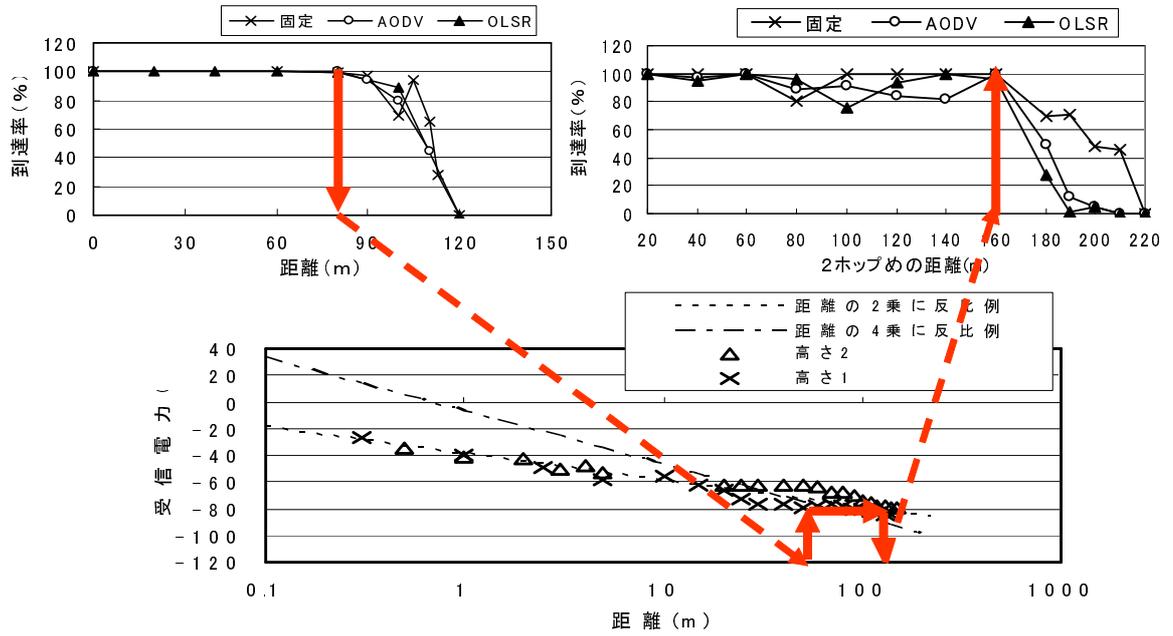


図- 3.5: 受信電力を媒介とした距離とパケット配信率の関係

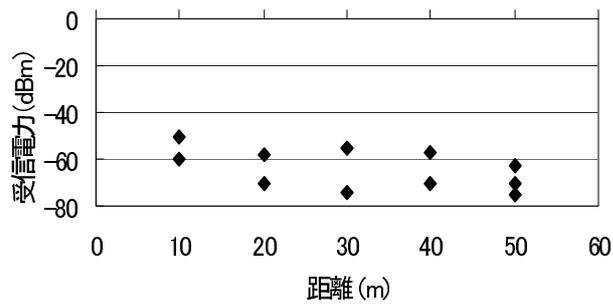


図- 3.6: 高さ h1 の受信電力の分散 (2003/10/14 測定)

表- 3.1: 実験機材主要緒元

| | パケット送信・中継・受信端末 | 受信電界強度測定端末 |
|-----------------|---|--|
| CPU | Celeron 733MHz | Celeron 1.06GHz (Laptop) |
| メモリ | 256MB | 128MB (Laptop) |
| HDD | 30GB | 30GB (Laptop) |
| PCMCIA | Type2 | Type2 (Laptop, PDA) |
| 無線 LAN カード | 802.11b | 802.11b (Laptop, PDA) |
| 電源 | カーバッテリーからインバータで AC100V 変換し, これにパソコン用 AC アダプターを接続し電力を安定供給した. | |
| OS | TurboLinux8.0 | WindowsCE (PDA) / Windows2000Professional (Laptop) |
| PCMCIA モジュール | PCMCIA CS3.2.4 Linux wlan-ng0.2.1pre10 | - |
| その他 | <p>①AODV AODV-UU 0.7.2 Uppsala University AODV draft13 準拠</p> <p>②OLSR INRIA implementation in C, OLSRv3 INRIA OLSR draft3 準拠</p> <p>③経路固定 TurboLinux8.0 標準</p> <p>④パケット送受信 ツール 新潟大学自作ツール. UDP を用いた パケット送受信ツール. パケット長, パケット送信間隔を可変可能.</p> <p>⑤パケットキャプチャリングツール 新潟大学自作ツール. DL 層の送受信フ レームバッファからフレーム単位で抽 出可能. ライブラリ Libpcap 0.7.1</p> | 受信電力測定プログラム AirMagnet (PDA, Laptop) |

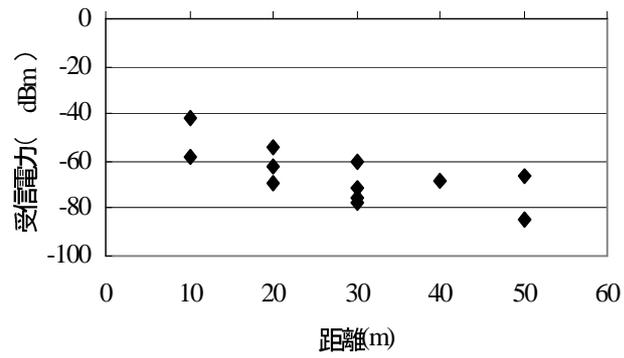


図- 3.7: 高さ h2 の受信電力の分散 (2003/10/14 測定)

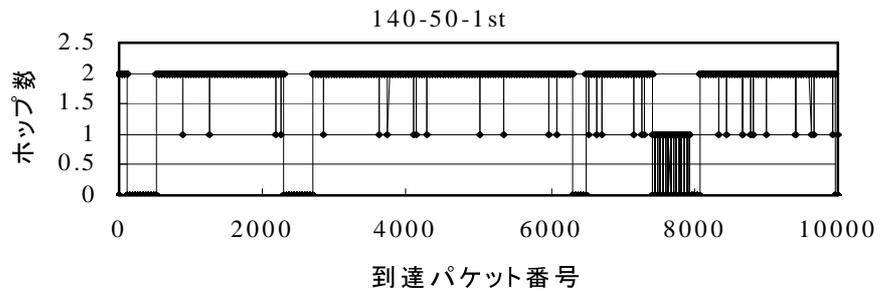


図- 3.8: AODV の到達パケットのホップ数 (1回目)

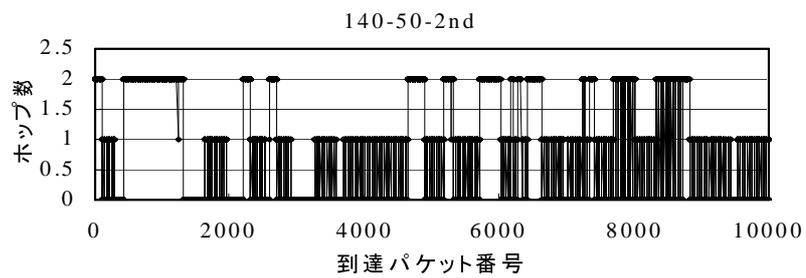


図- 3.9: AODV の到達パケットのホップ数 (2回目)

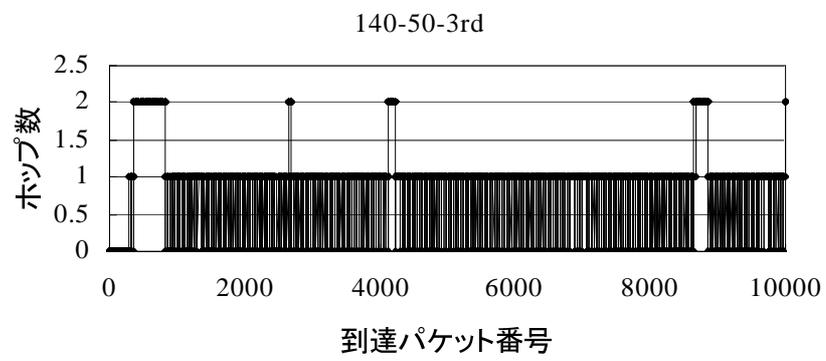


図- 3.10: AODV の到達パケットのホップ数 (3 回目)

参考文献

- [1] INRIA, Implementation code of Optimized Link State Routing, <http://menetou.inria.fr/olsr/#code>
- [2] Uppsala University, AdHoc@UU : ImplementationPortal, <http://core.it.uu.se/adhoc/ImplementationPortal>
- [3] T. S. Rappaport, " WIRELESS communications Principles & Practice, " IEEE PRES pp69-90
- [4] The IEEE 802.16 Working Group on Broadband Wireless Access Standards, <http://grouper.ieee.org/groups/802/16/>
- [5] <http://www.ieee802.org/16/pubs/80216-2001.html>
- [6] <http://www.ieee802.org/16/pubs/80216a-2003.html>
- [7] <http://www.ieee802.org/16/pubs/80216-2004.html>
- [8] <http://www.ieee802.org/16/pubs/80216e.html>

第4章 大規模無線アドホックネットワークテストベッドの開発

[24]

4.1 研究の背景

モバイルアドホックネットワーク (MANET) は本質的にはワイアレスランシーバを持つ端末 (ノード) だけから構成され, 基地局と固定ネットワークなどの通信インフラストラクチャーを必要としない. ノードは携帯端末として移動する形態もあるが, 固定的に設置される利用形態もある. 以下ではこのような固定ノードも含めて MANET として呼ぶ. これまで本技術は主に軍事利用を目的として開発されてきたが, 近年の急速な LSI 技術の進歩と標準化の進展によりコンピュータ機器や通信機器の価格と大きさが大幅かつ継続的に減少しており, アドホックネットワークの商業的利用が促進されると期待される. このような背景のもと, アドホックネットワークはユビキタスネットワークを実現するために不可欠で重要な技術として認識されてきている. 地域コミュニティネットワークの構築やイベント会場での即席ネットワーク構築, センサーネットワーク構築には大規模・高密度のアドホックネットワークが必要になる. 従来アドホックネットワークの研究ではシミュレーションを用いる場合が多いが, 実環境でアドホックネットワークの性能を検証するテストベッドの必要性も大きい. シミュ

レーションには、①評価環境の構築に必要なパラメータを設定することで、様々な規模や状況下における性能評価を容易に実行できる、②各レイヤの基本的なプロトコルがあらかじめ実装されているため、提案手法に関する部分を実装するだけで良い、などの利点があるが、一方①実空間における電波環境のモデル化やプロトコルの詳細取り込みに限界があり、実験に基づく性能検証が必要である、②標準規格に細かく規定されていない項目で製造メーカーに依存して作りこまれる部分により予期せぬ事象が発生することがあり、現状の製品の実装上の問題点と次世代製品開発への要求要件を明確にするためテストベッドの開発が有効である。また、テストベッドの構築はアドホックネットワークの管理やオペレーションの問題を研究するにも有効である。初期の実験的研究では独自の無線機器を用いた実験が行われてきた。近年、IEEE802.11 無線 LAN 製品が普及し、アドホックネットワーク用の MAC 層と物理層を担当する機器として一般的に使われるようになってきている [2] ~ [9]。アドホックネットワークのためのルーティングプロトコルの開発は多くの機関で進められており、一部は製品化されている。標準化は IETF MANET ワーキンググループ [10] が進めており、いくつかのルーティングプロトコルの実装がオープンソースとして入手可能である。これらを使い、多くのアドホックネットワークテストベッドがこれまで開発されている。しかし、これらのテストベッドの殆どはノード数が 20 以下と小規模でノードにラップトップコンピュータを使う場合が多い。少数ノードで構成するネットワークでは、大規模ネットワーク特有の問題を見逃す恐れがある。また、設定誤り等人的ミスやノード間の動作競合による不具合が比較的発生しにくく運用ツールや監視ツールへの要求要件を明確にできない可能性がある。しかし、実際の無線 LAN 製品を使用して多数のノードからなる大規模アドホックネットワークテストベッドを構成すると通信距離が数 100m としなくてもマルチホップを実現するため広大なエリアが必要となる。これを避けるため、多数のノードを屋内に設置し、無線 LAN の出力を落として送信距離を短縮させるか、ソ

フト的にノード間のリンクの有無を制御することにより、擬似的にマルチホップする形のテストベッドがある [17]。しかし、これでは実際的な環境の実現に限界がある。そこで、将来きたるべきユビキタスネットワークにおけるアドホックネットワークの機能と潜在力を検証し研究開発を推進させるため、本研究では大規模アドホックネットワーク用テストベッドの構築指針を示す。また、この指針に基づき、屋外で長期間運用可能な世界最大規模のテストベッドを構築し、いくつかの実験によりその有効性を確認した。4.2 項においてテストベッドの課題と指針を述べる。4.3 項において本テストベッドの概要を述べ、4.4 項ではテストベッドで使用するサポートツールについて述べる。4.5 項でいくつかの実験結果と考察を示し、4.6 項において指針の有効性を検証する。4.7 項にまとめを述べる。

4.2 大規模アドホックネットワーク構築の課題と指針

4.2.1 大規模アドホックネットワーク

コミュニティネットワークなどへのアドホックネットワークの適用を想定し、対象エリアをカバーするように固定ノードを配置する形態のテストベッドを検討する。この場合エリア内のモバイルノードは固定ノードを経由して、通信を行うことができる。実際の環境では、建物や木などにより見通しも異なり、電波の吸収、反射要因も複雑である。固定ノードの孤立を防止するため、電波の見通し範囲、減衰特性などを基に、ノードの設置場所、高度を適切に設定することが必要である（指針 1）。一方、シミュレーションや屋内設置型のテストベッドは環境を制御しやすい利点がある。実際の環境を用いたテストベッドでは環境の制御は困難であり、性能評価における再現性が問題となる。この点を考慮したテストベッド構築が望ましい（指針 2）。

4.2.2 制御装置

大規模アドホックネットワークを構築する上でハウジングの問題を考慮すると、より小型の制御装置であることが望ましい。例えばノードを民家の軒先に設置するような場合一般的にノード装置は裸体で設置されることはなく、いたずら防止や気象変化等外的要因から防護するため収納BOX内に設置されることが想定される。この場合収納BOXはノード装置以外の周辺機器や配線も収納することを考慮するとノード装置の数倍以上の容積となる。従来のテストベッドで一般的に利用されるラップトップコンピュータをノードに選定する場合、小型化、軽量化、省電力化、低コスト化に限界があり、埋め込み型OSタイプ小型コンピュータの選択が望ましい(指針3)。

4.2.3 長期間連続運転

屋外実験では時間の経過による季節変化、気象変化や人や車の通行状況変化の影響を測定するため長期間運用できるテストベッドが必要である。テストベッドに使用される無線ノードは1日数時間以上で長期間稼働状態となる。そのため、無線ノードを構成するコンピュータ部品の故障がテストベッドの運用に影響を与えないように、できる限り駆動部品のないディスクレス構成が望ましい(指針4)。また、長期間稼働し続ける場合は日中帯/夜間帯の時間変動の他にも季節変動による周囲環境条件の変動に耐えられることが求められる。基本的には冬の極寒時の気温条件として-10 程度から夏の直射日光による筐体内温度上昇を見込んで50 程度以上の周囲温度条件や湿度条件に適応できる装置が望ましい(指針5)。

4.2.4 OS

Linux を利用することでオープンソースによるフリーウェアの利用が可能でソフトウェアライセンスのコスト圧縮が望める。近年，Linux ユーザ数も飛躍的に増大し，新デバイスのサポートも比較的短期間で整備される状況になりつつあり，一般的な無線 LAN カードを特別な開発を伴わずに利用できる状況にある。OS 領域のメモリサイズ等組み込み駆動型に対する適応性が高く，既製品ルータ等での組み込み型 Linux の実績は大きい。アドホックネットワークのルーティングプロトコルの実装においても Linux ベースの実装ファイルが多く開発されている。また，大規模アドホックネットワークテストベッドでは IPv4 での通信実験はもちろん IPv6 による通信実験にも対応できる OS が望ましく Linux ではこれをサポートしている。ソフトウェアライセンスのコスト圧縮，新デバイスのサポート，ルーティングプロトコルの実装，IPv6 サポートを満足する OS として Linux の選択が有利である（指針 6）。

4.2.5 無線 LAN 方式

大規模アドホックネットワークテストベッドに用いる無線 LAN 方式としては法的制約がなく，製品単価が安価で安定した動作が可能なデバイスドライバが供給されることが要求される（指針 7）。汎用的な無線 LAN カードとして IEEE802.11b/g 製品が対象製品として上げられる。IEEE802.11a の屋外利用は気象衛星通信との電波干渉から日本では制限されていたが最近の電波法改正で開放されたため，新 IEEE802.11a 規格としてテストベッドでの利用が可能となった。今後は IEEE802.11n ベースの製品化も見込まれ，テストベッドでの実装も考えられる。また，無線通信距離はアンテナ地上高に比例し [1]，無線ノード間の見通し確保の観点からもアンテナ地上高を適切に設定できる外部アンテナ接続端子が内蔵された無線 LAN カードの選択が望ましい（指針 8）。

4.2.6 アンテナ

大規模アドホックネットワークが利用される環境ではノードの設置場所やアンテナの方向を常に適切に計画・設計できるとは限らない。このため、屋外設定用の無指向性アンテナの利用が望ましい（指針9）。電力供給等の理由でノードの設置位置とアンテナ設置位置が離れ同軸ケーブルの損失が無視できなくなる場合があり高利得型の無指向性アンテナの選択が望ましい（指針10）。

4.2.7 電力供給

長期間連続実験ではバッテリー駆動による運用が難しく、ノードを動作させるのに必要な電力は屋内電気コンセントから AC アダプター等で供給する必要がある。ノードを街路設置する場合、給電ケーブル配線の工事コストが大きくテストベッド構築コストを大きく引き上げる。そこで、ソーラー発電や風力発電等の自己発電供給方式を検討する必要がある（指針11）。

4.2.8 実験稼働

ノードの持ち込みによる一時的な大規模テストベッドの場合、人がノードに付き添って実験を行うことになる。また、夜間や無人時のいたずら防止やノードの不具合に対処するため人は殆どノードから離れることができない状態となる。更にノードの配置、ノードの初期設定および変更設定、実験終了後のログ収集等の人的コストを増大させる。よって、極力無人化および省力化を図れるようにノードを BOX に収納・設置し、遠隔で設定・変更・ログ収集が行えるよう制御線を設ける必要がある（指針12）。

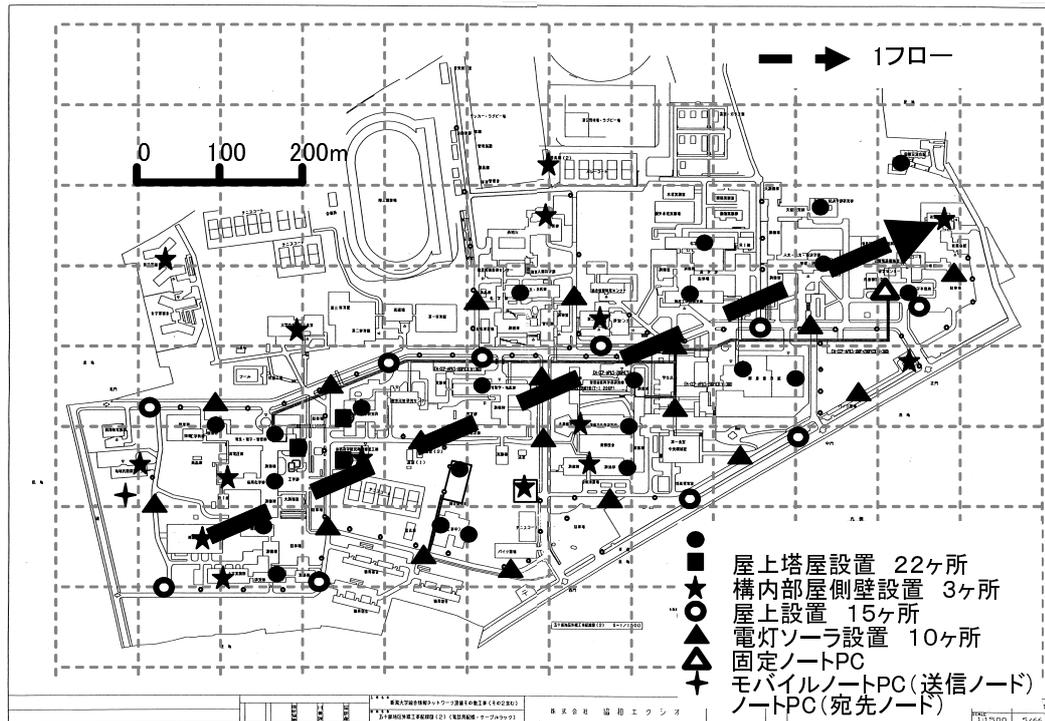


図- 4.1: 大規模テストベッドのノード配置

4.3 大規模アドホックネットワークテストベッドの概要

[15]

4.3.1 ノード配置

広大なエリアで比較的安定な環境が確保可能であることから新潟大学キャンパスをテストベッド構築場所として選定した(図4.1)。

ノード数を50とし,指針1に基づきキャンパス内のノード(アンテナ)配置を検討した。第3章で述べたIEEE802.11bを用いた通信実験結果による地上高と無線伝送距離の相関関係を新潟大学構内に当てはめた場合,地上高2m程度の街路設置では50ノードで学内全体をカバーすることはできない。これは,キャンパス内に5~6階建ての各

学部棟がかなり密に立ち並び見通しが路上の直線範囲などに限られるためである。屋上設置の場合は、5階建てビルの場合で地上高が20m以上確保できることから電波到達距離も1km以上確保できる計算である。実際にキャンパス内の両端に位置する工学部A棟と本部棟間距離は約900mあるが、見通しがあり、無線LANによる直接通信が可能であることを確認した。新潟大学キャンパスは概ね1,000(m)×600(m)の範囲内に有人ビルが建立されており、キャンパスの中心位置に1個とキャンパスの端に位置するビル4箇所程度にノードを設置すれば計算上は各ノード間で直接通信が可能になる。しかし、200m程度しか離れていなくても直接通信ができないビルが存在した。これは建物の形状や屋上設置物等によるアンテナ間の見通し障害と、アンテナ地上高の急峻な高低差によるもので、別の経路がとれるようノード配置を計画する必要がある。学内には5階建て以上の有人ビルが46ある。実際に各ビルの屋上間で通信試験を行い、無線リンクの状態を確認した。この結果に基づき、キャンパス全体をカバーするようにノードを配置し、任意のノード間に複数の経路を確保するため、37ビルにノードを設置した。また、モバイル実験用にキャンパス内の本部棟前から工学部棟前道路沿いと中門前の一般道路沿いで車や人の移動実験を行えるよう街路ノードを10個及び建物側面に3個ノード配置することとした。街路ノードは街路灯柱と新規に設置した補助柱を用いて地上高1.5mの高さに固定設置した。一定数のノードを屋上設置したもう一つの理由は指針2である。屋上は歩行者や車による電波の吸収、反射の影響が少なく、安定した環境の実現に適していると考えられ、実験データの再現性を期待できる。

4.3.2 ノード装置

指針3~6に基づき、ノードとして組み込み型Linuxを搭載したディスクレス小型BOX形状のコンピュータを採用した。主な諸元を表4.1に示す。本ノードに外部アン

テナ接続コネクタが内蔵され、Linux デバイスドライバでアドホックモード動作がサポートされた IEEE802.11b 無線 LAN カード（指針 6～8）を PCMCIA カードインタフェースに挿入し、64MB の CF メモリと 512MB の USB メモリをそれぞれ CF カードインタフェースと USB インタフェースに挿入する。64MB の CF メモリはツールや AODV、OLSR 等のプロトコル実装ファイルの格納場所として使用する。これにより、各ファイルのバージョンアップ等が簡単に行える。512MB の USB メモリは実験中に出力されるログファイルの格納場所として使用する。これらは、必要に応じて適正な容量のメモリに入れ替え可能であり、柔軟な拡張性を有している。また、指針 8～10 に基づき、7dBi の高利得無指向性コーリニアアンテナを同軸ケーブルで無線 LAN カードと接続した。

4.3.3 電力供給

指針 11 に基づき街路設置ノードはソーラー発電を利用する。ソーラーパネルからは充電コントローラを通してノード装置に電力を供給する。充電コントローラにはバッテリーが接続されており、夜間等日照が確保できないときは充電コントローラがバッテリー運用に自動で切り替え、また、バッテリーからソーラーパネルへ電流が逆流しないような制御機構も併せ持つ。バッテリーとして満充電時において冬場等で日照が全く確保できないような気象条件でも負荷に対し 5 日間程度の電力供給が可能な容量を持つ製品を適用した。

4.3.4 ルーチングプロトコル

オンデマンド型の AODV (aodv-uu0.8.1)、プロアクティブ型の OLSR (unik-olsrd 0.4.9) を始めいくつかのルーチングプロトコルを実装し、4.5 項に示す実験に先立ち、

ルーティングプロトコルの動作確認のため、パケット送信実験を行った。その結果、各ノードで瞬時的な経路損失や経路切替が生ずる場合があるが、その頻度や使用経路の比率は長時間運用しても変わらず、ルーティングプロトコルが安定して動作していることが制御パケット、ルーティングテーブルなどのログ解析から検証できた。経路損失や経路切替が生ずる原因は制御パケットの無線リンクでの転送失敗、経路エントリのタイムアウトなどによるものであり、ルーティングプロトコルの動作としては正常である。また、各ノードで送受信パケットをモニターした結果から、経路損失、経路切替以外の原因によるパケット損失（無線リンクでのパケット転送失敗など）の割合は固定ルーティングと同程度であることも確認できた。

4.3.5 有線 LAN との接続

図 4.2 にテストベッドシステムの全体構成を示す。指針 12 に基づき、本テストベッドでは制御端末とノード間に極力学内有線 LAN（以降学内 LAN）を經由した制御パスを確保し、直接の有線インタフェース接続が不可能な場合でも直近の有線インタフェースを持つノードから無線 1 ホップで当該ノードに制御パスが確立できるように設計した。建物に設置される無線ノード数は 40 ノードであり、このうち 32 ノードはイーサネットインタフェースで学内 LAN と直接接続される（直収ノード）。他 8 ノードは学内 LAN へ直接接続ができない場所に設置されるが、直収ノードへ 1 ホップ無線リンクで接続可能である。また、街路設置のソーラー電力供給タイプノード 10 台についても各々直収ノードへ 1 ホップ無線リンクで接続可能である。

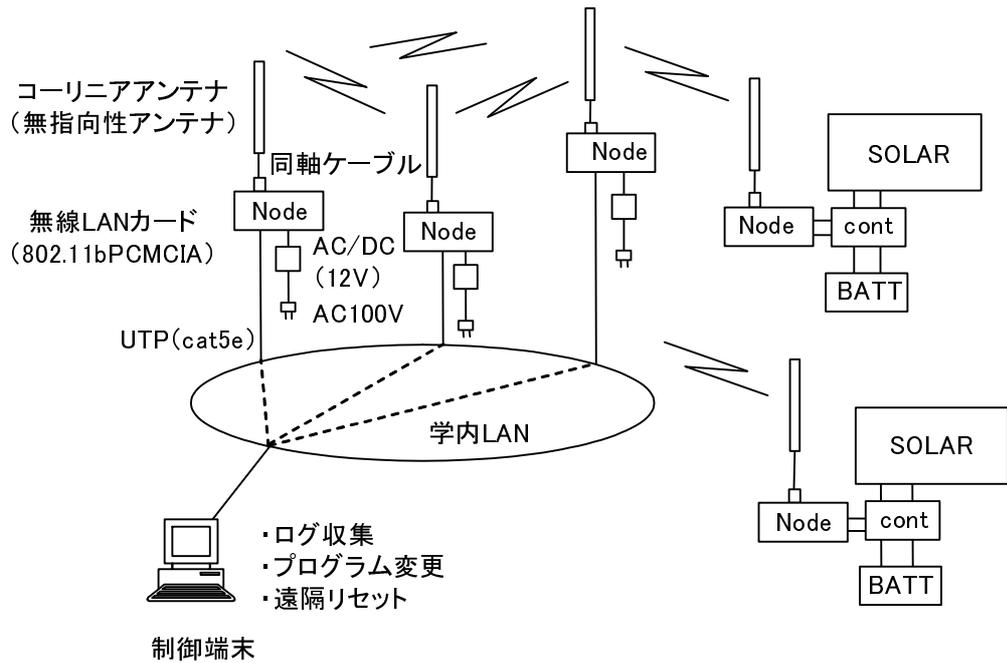


図- 4.2: テストベッドシステムの全体構成

4.4 実験手順とサポートツール

指針 12 に基づきテストベッドの遠隔操作を行うための手順を規定し、それをサポートするさまざまなツール・システムを開発した (図 4.3) [16]。ルーチングソフトウェア、無線 LAN ドライバーおよび実験サポートツールを含むすべてのソフトウェアは遠隔で各ノードにロードさせることができる。

4.4.1 実験手順

本テストベッドではシナリオによる自動実験運用方式を採用している。シナリオは実験条件とトラヒックパターン (フロー数、各フローの送信元および宛先、送信パケット数、UDP ペイロードサイズ、パケット送信間隔、その他)、ルーチングソフトウェア、および無線 LAN 設定パラメータなどのパラメータセットである。各シナリオを識

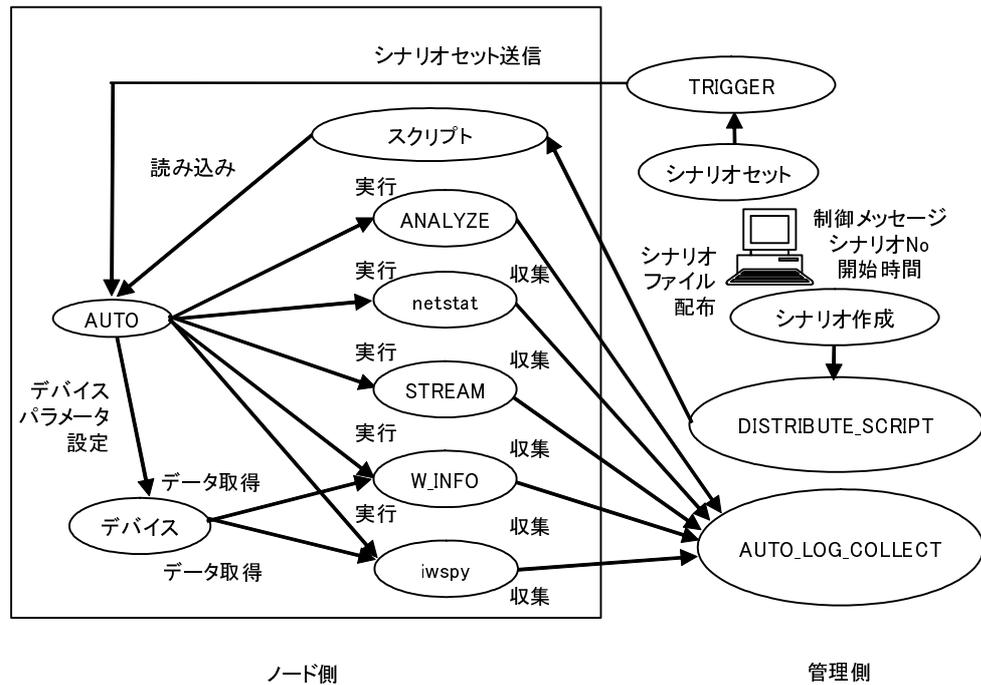


図- 4.3: 実験サポートツール

別するためシナリオ番号を使用する．実験開始前にルーチングソフトウェアと実験サポートツールを各ノードに配布する．あらかじめ実験計画に基づき選定された実験参加ノードを制御端末上の実験参加ノードリストファイルに登録する．実験操作は以下のステップで示される．

- (1) 実験に用いる複数のシナリオ（シナリオファイル）を設計する．
- (2) 各ノードにシナリオファイルを配布する．
- (3) 各ノードの時刻を同期させる．
- (4) 一連のシナリオ番号と各シナリオの開始時刻の組（シナリオセット）を全ノードに対し送信する．
- (5) 実験を自動実行する．

- (6) 各ノードからログファイルを収集する。
- (7) ログファイルから得られたデータを分析する。

実験参加全ノードは、シナリオセットに従って各シナリオを指定時刻に起動しシナリオ内容に従ってフロー送信実験を行い、現シナリオを終了すると次シナリオに一斉に切り換える。これを「シナリオ同期」と呼ぶ。シナリオ同期を取るため各ノードのローカルタイムを自動的にNTPプロトコルにより制御端末のローカルタイムに強制一致させる。時間同期は各ノードのクロック差のため完全には一致できないが、シナリオ間に適切な時間マージンを挿入することにより1日程度のシナリオ同期を維持できる。シナリオ同期が維持できている状態であれば、各ノードのログファイルを収容するメモリ容量が満杯にならない限り実験を続けることが可能である。各ツールは実験中に大量のログデータをダンプする。約1時間程度の通信実験で約30MBのログデータがダンプされることからメモリ容量を考慮すると、1回で15時間の実験を連続して実施することが可能である。ステップ(2)-(4)と(6)は制御端末を通して遠隔制御される。

4.4.2 シナリオセット送信ツール (TRIGGER)

本ツールは制御端末の実験参加ノードリストファイルを読み込み、実験参加ノードへシナリオセットを送信する。未応答ノードに対し再送を行い、応答が返らない場合は、実験参加全ノードへシナリオセットキャンセル指示を送信する。AUTOとセットで使うことから新規に開発した。

4.4.3 自動実行ツール (AUTO)

本ツールはシナリオセットに設定された実験のスケジュールに従いシナリオファイルを読み込み、各シナリオを実行する。なお、既存で同様なツールはないため、本ツールは全てを新規開発した。

4.4.4 ストリーム生成ツール (STREAM)

本ツールはフローの送信元 IP アドレス、宛先 IP アドレス、宛先ポート番号、送信パケット数、UDP ペイロードサイズ、パケット送信間隔などのパラメータを与えることにより、CBR (Constance Bit Rate) タイプのフローを生成可能であり、配信率などのデータを取得することが可能となる。以下では送信パケット数 x パケット、UDP ペイロードサイズ y バイト、パケット送信間隔 z 秒のフローをフロー (x, y, z) で表す。本ツールは宛先アドレスにブロードキャストアドレスを指定すればブロードキャスト送信、ユニキャストアドレスを指定すればユニキャスト送信が可能である。Netperf [14] などの既存のスループット解析ツールでは、計測時間を固定して送信できたパケット数でスループットを求めるため送信パケット数を直接指定できない。また、既存のスループット解析ツールはブロードキャストには対応していない。これらの理由から本ツールを新規に開発した。STREAM ではパケットにシーケンスナンバーを付与し、何番目のパケットを受信できたかを判断でき、パケットの到着順や損失がどのように起きたかを解析できる。

4.4.5 パケットキャプチャツール (ANALYZE)

本ツールは Libpcap ライブラリを利用したパケットキャプチャツールであり、パラメータを設定することで指定したパケットをデータリンク層からキャプチャすること

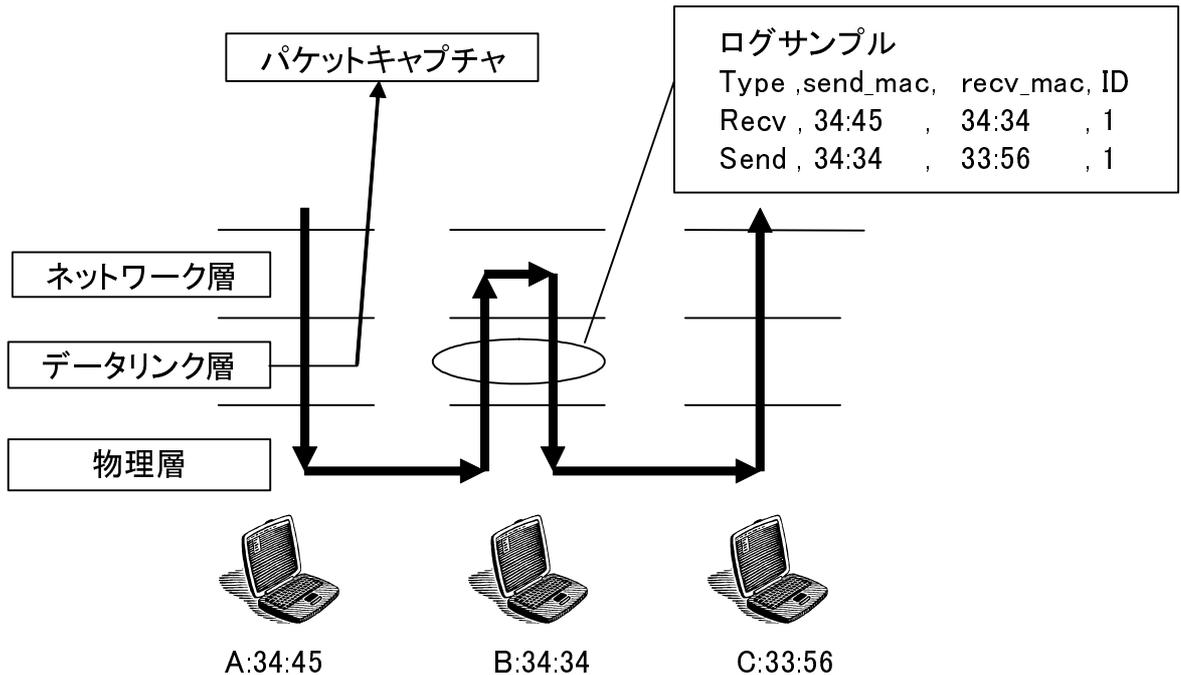


図- 4.4: ANALYZE 動作概念

が可能である (図 4.4)。既存ツールではネットワークアナライザとして Ethereal などが有名であるが、STREAM と組み合わせて使用することでデータ収集後に通信経路の追跡が可能となるよう ANALYZE を新規に開発した。ANALYZE ではデータリンク層を経由するパケットをキャプチャしログとしてデータを出力する。中継ノードでは正常にパケットをルーティングした際にはデータリンク層を入力・出力と 2 回経由する。従って、実験後にログデータを集計する事で経路が見つからずパケットが損失したのか、伝送中にパケットが損失したのかが判断できる。

4.4.6 無線インタフェース情報収集ツール (W_INFO)

本ツールは 802.11b 準拠の無線インタフェース情報を入手するツールである。アドホックネットワークでは無線通信を利用するため、通信品質がプロトコル以外のさ

さまざまな要因により変化することが多々あり，それらの影響を調べるために無線 LAN インターフェースの BSSID，チャンネル，送信レート等の情報を入手することが必要である．また，現行の 802.11 規格では送受信ノードの BSSID が同一の場合にしか通信が行えないが，カードチップやドライバにより BSSID の同期方法が異なるといった問題がある．そのため大規模なネットワークを構築する際に同期問題が発生する可能性があるが，本ツールを利用することでそれらの特性に関しデータを取得することが可能である．本ツールは既存ツールとして wireless-tools の iwconfig を流用し，新規に実行部分のシェルスクリプトを開発した．これにより，無線 LAN インターフェースの情報を取得する iwconfig を実験の間，連続起動させることが可能となった．

4.4.7 ログ収集ツール (AUTO_LOG_COLLECT)

本ツールは実験終了後に各ノードからログファイルを収集する．データ収集用スクリプトは Linux の基本ツールである ftp，expect，telnet，tar，zip を利用して作成した．既存ツールである ftp 等を使えばリモートにあるログは収集可能であるが，大規模テストベッドで多くのノードからログを手動収集する事は人的稼働がかかるとともに収集抜け等の人的ミスも考えられる．本ツールでは全ノードに対し一斉にログ回収を行えるようにログ収集の動作を記述した．また複数プロセスで実行することで順次実行型よりも早くログ収集が出来るよう工夫した．ログ収集手順を以下に示す．これらの処理を全てのノードに対して自動で行う．

- (1) 実験参加ノードリストファイルを制御端末から読み込む
- (2) telnet により実験参加ノードへログイン
- (3) ログ保存フォルダ内を zip 圧縮する
- (4) 圧縮ファイル群を tar コマンドで一つにまとめる

- (5) ftp でセンターサーバへファイルを転送
- (6) telnet をログアウト

4.4.8 シナリオファイル配布スクリプト (DISTRIBUTE_SCRIPT)

本ツールはシナリオファイルを ftp , expect , telnet , tar , zip を利用し制御端末から各ノードに配布する . 複数プロセスで実行することで早い動作を可能とした . 配布手順を以下に示す .

- (1) 実験参加ノードリストファイルを読み込む
- (2) 制御端末の指定フォルダ内部にある参加ノードに必要なファイルを tar ファイルで圧縮
- (3) FTP で各ノードへファイルを転送
- (4) telnet でログイン
- (5) 転送ファイルを展開し , スクリプトファイルの設置場所へ移動させる
- (6) telnet ログアウト

4.4.9 ネットワークトポロジ表示ツール (GUI_ANALYZE)

アドホックネットワークでは各端末が自律分散的にネットワークを構築するため , ネットワークトポロジの把握が難しいといった問題がある . そこでトポロジを直感的に把握できるように , 各端末で記録したルーチングテーブルの情報を集め解析することでグラフィカルにネットワークトポロジを表示するソフトを開発した (図 4.5) . 既存ツールである Etherape などはネットワークのつながりをグラフィカルに表示できる

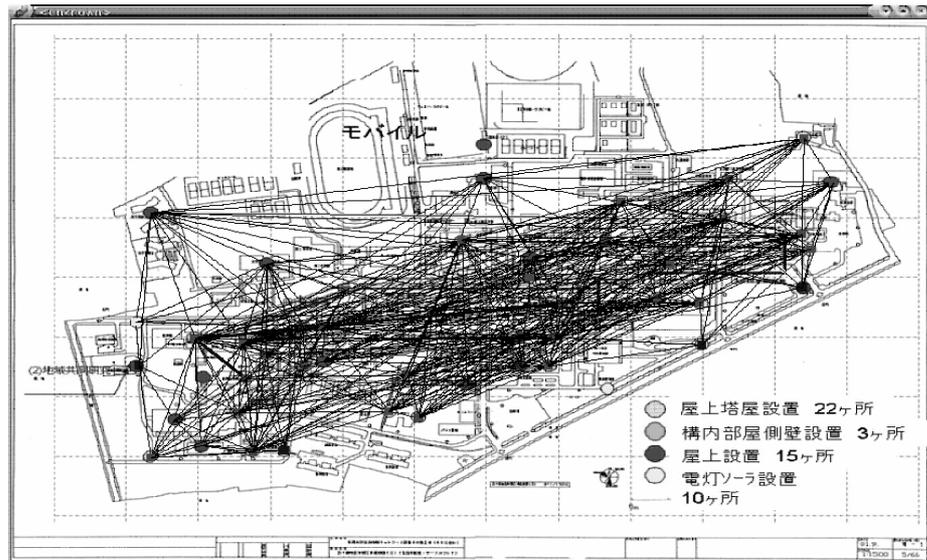


図- 4.5: GUI ANALYZE 動作例

が、端末の配置位置は考慮されておらず、またホップ数もわからない。本ツールは収集したログからネットワークがどのようにつながり、またSTREAMのパケットがどの端末を経由したかをグラフィカルに表示できるように gtk ライブラリを利用して新規に開発した。また地図とその座標点を用いることによりパケットがどの程度離れた端末まで直接配信されたかがわかるようになっている。

4.5 実験例

4.5.1 BSSID 不一致問題

多くのノードが同時に無線 LAN インタフェースを動作させると、使用した製品のアドホックモードでは BSSID 不一致問題が発生することを確認した。テストベッドの 50 ノード内で数個の“ BSSID グループ ”が出現している状態のスナップショットを図 4.6 に示す。このスナップショットは無線 LAN カードをチャンネル 11 で同時に起動して

から 26 分後に取得したものである。起動された各ノードの無線 LAN カードはビーコンフレームにより周囲の BSSID を検索し、同期する。しかし、広いエリア内で複数無線 LAN カードが同時に起動される場合、BSSID の同期プロセスが同時進行し、あるノード群の BSSID が一旦収束するとそのまま固定されるため、別のノード群の BSSID と異なる結果を生じる。BSSID 制御アルゴリズムは IEEE802.11 仕様において規定がなく、この機能の実装はメーカーに依存するため、異なるメーカーの製品では本現象が発生しないことも考えられる。この仮説を確認するため、ノート PC と無線 LAN カードで構成した 4 台のノードを直線状に隣接ノードのみが通信範囲となるように間隔を空けて配置して、同時起動実験を行った。無線 LAN カードは 2 社の製品を用いた。この結果、BSSID 不一致問題はテストベッドと同一の LAN カードでは確認されたが、他製品を用いた無線 LAN カードでは確認されなかった。このようにアドホックネットワークの実現性そのものが無線デバイスやドライバの実装に依存する可能性があることに十分留意する必要がある。本テストベッドでは BSSID 不一致を避けるため無線 LAN カードを 'アドホックデモモード' [19] にセットした。IEEE802.11 では MAC フレームタイプ [18] の管理フレームの中の一つとして、移動無線局が BSS の抽出と認識を可能とするために周期的に送られるビーコン、迅速に IEEE802.11 無線 LAN を探索するため移動無線局によって送られる ProbeRequest とその応答である ProbeResponse が定義される。アドホックデモモードは規格外のモードでありこれらを使わず BSSID は 00:00:00:00:00:00 に設定される。

4.5.2 リンク状態

リンク品質を評価するため信号対雑音比 (SNR) に着目し実験を行った。送信ノードは STREAM を用いてフロー (1,000, 1, 0.25) をチャンネル 11 でブロードキャストする。各ノードで、Linux でサポートされるワイヤレスツールの 1 つである受信電力取得

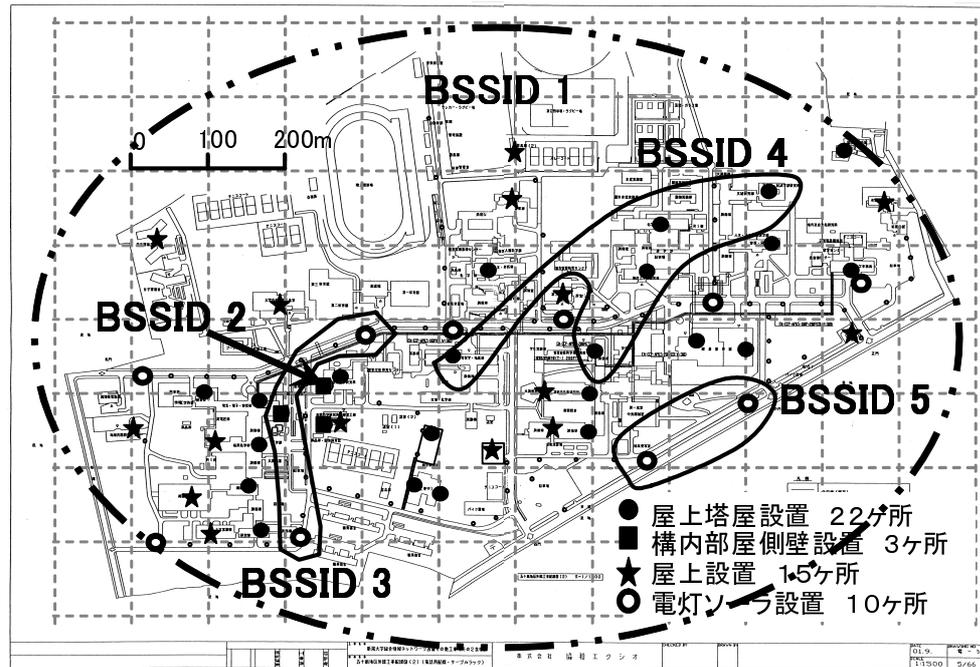


図- 4.6: BSSID 不一致問題

機能を持つデバイスドライバが動作し、無線 LAN カードから出力される受信信号強度を示す RSSI を受信レベル (以下 RSS (dBm)) へ、雑音強度を雑音レベル (以下 NL (dBm)) へ変換し、ログとして記録する。1 秒おきに iwspy[11] を起動しログ情報を取得する。この結果 $SNR = RSS - NL$ により SNR が求まる。また、STERAM により送信されたパケットの受信結果より、リンクごとのパケット送信成功率 TSR (Transmission Success Ratio) を測定できる。すべてのノードを順次送信ノードとして選択し、同じ実験を 10 回繰り返した。図 4.7 は全てのリンクの平均的な TSR と平均的な信号対雑音比 (SNR) の関係を示す。SNR と TSR が相互に強く依存することが見られ、SNR が 20dBm 以上でほぼ 100% の TSR を安定的に維持できることが確認できた。TSR は SNR 減少とともに悪化することからルーティングプロトコルは低 SNR リンクの使用を避けるべきである。次に高い TSR を維持する平均 SNR が約 20dBm 以上のリンクに着目し、当該リンクを構成する一方のノードから ICMP エコー要求パケットを毎秒送信

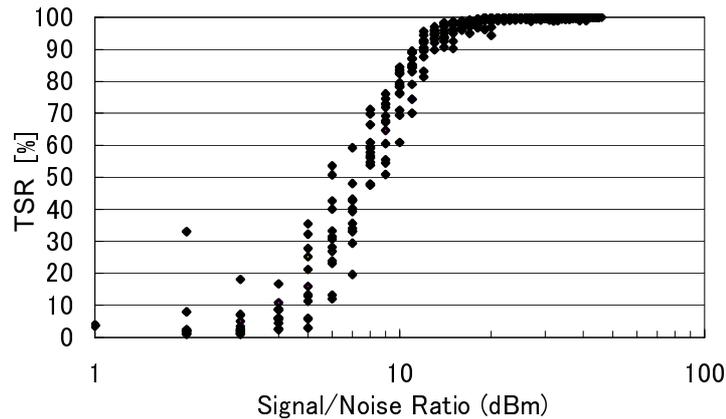


図- 4.7: SNR と TSR の相関

し、ICMP エコー応答パケットの SNR 情報を 10 秒ごとに記録した。1 例を図 4.8、図 4.9 に示す。大多数のノード間では図 4.8 のように受信信号レベルはほとんど一定であり変動幅は $\pm 2\text{dBm}$ 以内であった。しかし特定ノード間では受信電力が断続的に急峻に $-15 \sim -20\text{dBm}$ 程度低下する現象が観測された。この現象の原因は解明できていないが、特定の 2 ノード間のみで生じ、ノードの機材を入れ替えても同様の現象が再現することから、マルチパスフェージングの影響など、環境に原因があると考えられる。一方、雑音レベルについてはどのノード間でも定常的に最大 $20 \sim 30\text{dBm}$ 程度変動する現象が観測された。室内で外部アンテナを外して実験した場合と電波暗室で同様の実験を行うと雑音レベルの変動幅は 7dBm 程度であった。これらの結果からノード自体と環境に定常的な雑音レベルの変動要因があることが推察される。このように主として雑音レベルの定常的な変動に起因して SNR が定常的に変動することがわかった。ルーチングプロトコルでは、このような SNR 変動による経路切替を抑制する仕組みが必要である。

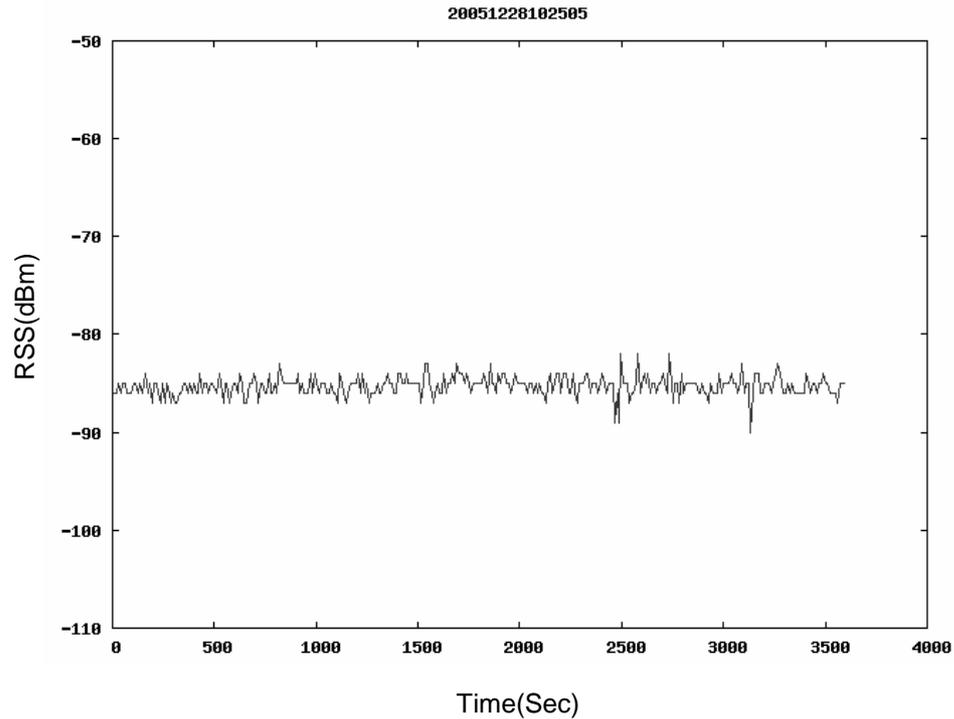


図- 4.8: 短時間 RSS 変動

4.5.3 ルーティングプロトコル動作実験

4.5.3.1 実験条件

テストベッドを使い，ルーティングプロトコル OLSR[12] を動作させ，STREAM によるフロー (1,000, 512, 0.25) 送信実験を行い性能を評価した．OLSR にはいくつかの独立の実装が存在するが，RFC に完全準拠し IPv4 と IPv6 の両方をサポートする UniK-OLSR [13] を選択した．今回はすべての実験を IPv4 で実施した．特定の 2 ノードを図 4.1 のように送信元と宛先として選び，ここに加えるフローをフロー 1 と呼ぶ．複数フロー実験では，フロー 1 に加えていくつかの追加のフローを同時に送信する．各シナリオを 10 回繰り返し実験を行い，パケット配信率 PDR (Packet Delivery Ratio)，経路変化数 RCC (Route Change Count)，UDP スループットを測定し，平均値を結

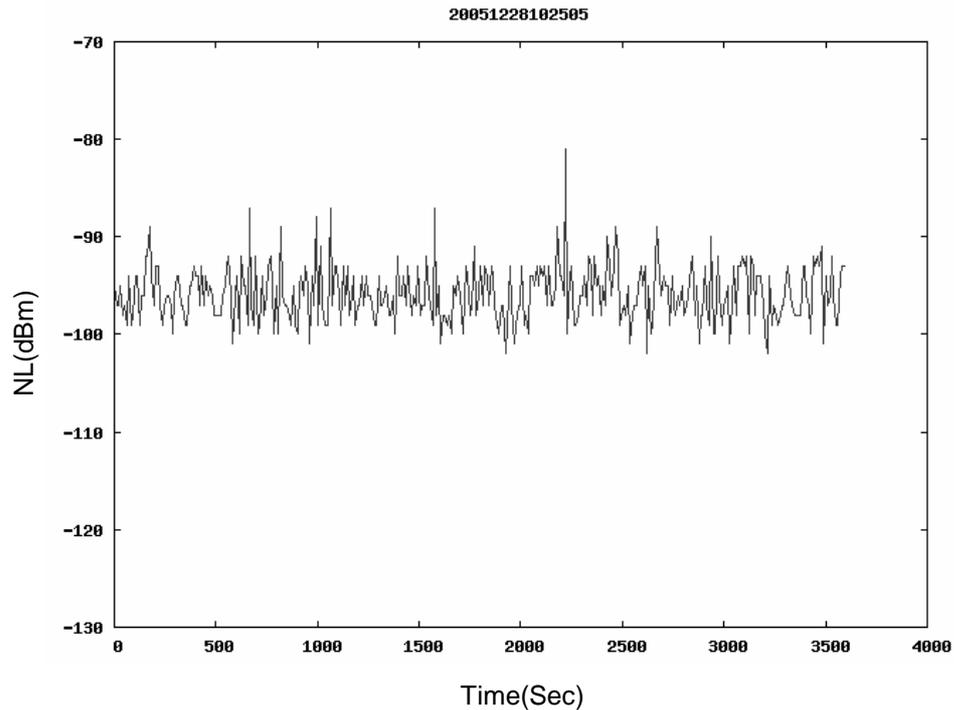


図- 4.9: 短時間 NL 変動

果とした．ここで，PDR は1 シナリオ当たりの宛先ノードにおける受信パケット数の送信元ノードからの送信パケット数に対する割合，RCC は1 シナリオ当たりの送信元ノードから宛先ノードまでの間で経路が切り替わった回数を示す．なお，4.5.3.4 項を除く単一チャンネルで行った実験はチャンネル 11 を用いた．以降の図ではフロー 1 に関する結果を示す．

4.5.3.2 ルーチング性能

リンク状態が頻繁に変化するため，ルーチングプロトコルのパラメータは，安定リンクを選ぶよう調整が必要になる．OLSR はHYST_THRESHOLD_HIGH，HYST_THRESHOLD_LOW，およびHYST_SCALING の3つのパラメータからなるリンクヒステリシス [12] と名付けられた機能を持っている．OLSR は，隣接ノードの各リンクについて

これらの3つのパラメータからリンク品質を HELLO_INTERVAL 毎に計算する。1 フロー実験では、HYST_THRESHOLD_HIGH と HYST_SCALING (以降「H_threshold」と「scaling」)の2つのパラメータを変更し、どのようにルーティング性能に影響するかを測定した。無線 LAN の伝送速度は、オートレートまたは 2Mbps 固定レートにセットした。結果を図 4.10, 図 4.11 に示す。詳細は割愛するが、複数の 3~4 ホップのマルチホップ経路が随時切り替わり、パケットが配送される。図 4.10, 図 4.11 より H_threshold の減少に伴い PDR がわずかずつ劣化し、経路変化数が増加する傾向にある。また、scaling が大きくなるほど PDR が減少し経路変化数が増加する傾向を示す。これは、scaling=0.1 が scaling=0.5 より長い過去の情報を含めてリンク品質を決定するため、より正確に安定した経路を選び経路変化数が減少するためである。本テストベッドはノードが固定配置であり長時間でのリンク品質変動はなく、過去のリンク情報は正確にリンク品質を評価するために有効である。また H_threshold=1 はパケットを連続 100%受信できるリンクを選定対象とし、H_threshold が減少するに従いパケット損失率がより劣化した低品質のリンクも選定可能となるため PDR が減少する。次にオートレートと 2Mbps 固定レートを比べるとオートレートの PDR が若干低くなっている。オートレートでは最大通信レートを探索するアルゴリズムの影響により PDR を押し下げているのではないかと思われるが、アルゴリズムの実装詳細は不明である。次に Netperf を用いてフロー 1 の UDP スループットを求めた。送信元ノードから Netperf のオプションである UDP_STREAM を用いて 10 秒間 1,472 バイトの UDP パケットを宛先ノードへ送る。これを 10 回繰り返し平均値を求めた。平均スループットを図 4.12 に示す。Scaling が小さく H_threshold が大きいほどスループットが向上するが、これは図 4.10 の PDR の場合と同様である。一方オートレートのほうが 2Mbps 固定レートよりスループットを高くできる。これは 2~11Mbps で可変のオートレートでは当然と言えるが、ルーティングプロトコルが受信電力が小さい長いリンクを選択した場合に

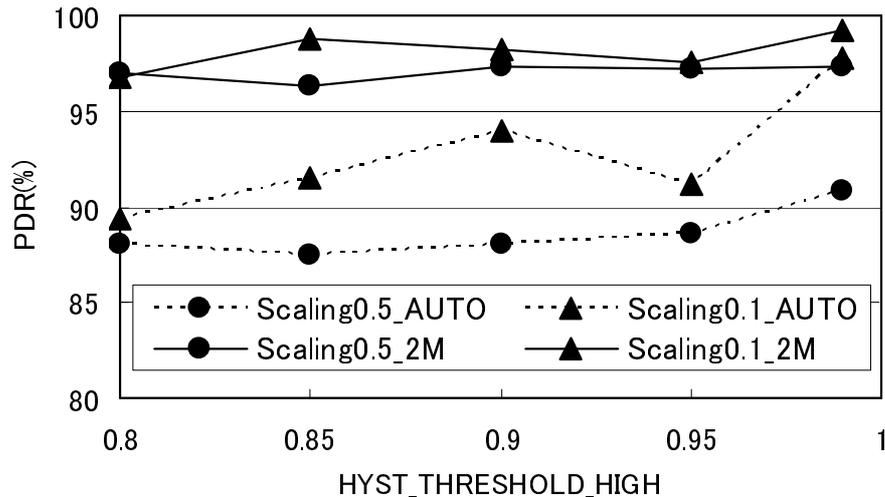


図- 4.10: パケット配信率 (RTS/CTS 制御なし)

はレートが低下するため、スループットの増加倍率はそれほど高くない。本実験結果は、本テストベッドのようなノードが固定配置される実ネットワークにおいても $H_threshold$ 、 $scaling$ などのルーチングパラメータや無線 LAN のレート設定を適切に設定することが必要であることを示している。

4.5.3.3 RTS/CTS 問題

RTS/CTS の使用によるルーチングプロトコル性能を計測するため、無線 LAN を RTS/CTS を使用するようにセットし、前項と同一の 1 フロー実験を行った。紙面の都合で図面は省略するが、2Mbps 固定レート時の PDR、RCC、スループットはほとんど図 4.10、図 4.11、図 4.12 の RTS/CTS なしと同じであった。しかし、オートレート設定時の PDR がきわめて低く、スループットについては計測さえできなかった。パケット損失の原因を W_INFO で分析したところ、長距離リンクで低品質であっても 11Mbps のレートでデータフレームを送信していることが判明した。他の無線 LAN カードでは、このレート不整合問題は起きなかったことから無線 LAN カードの特性によるものと思

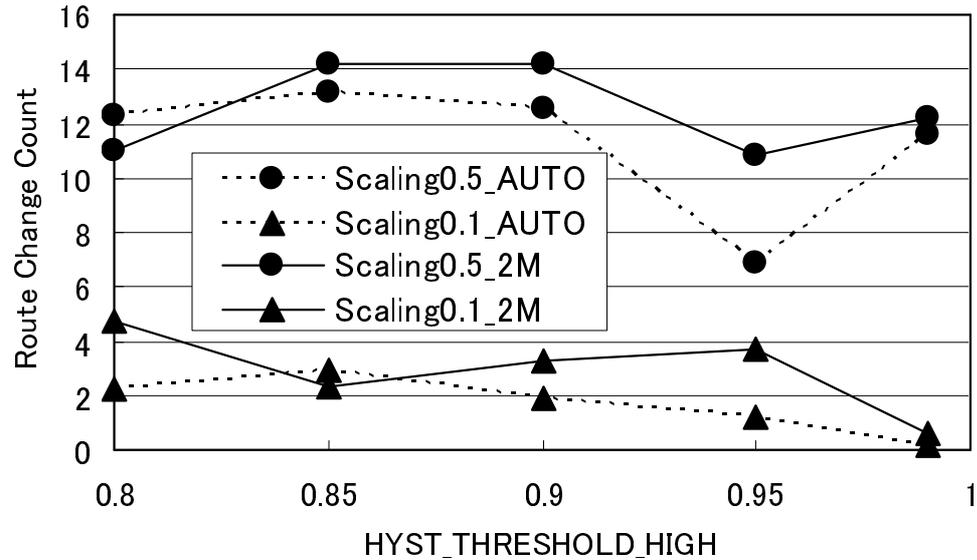


図- 4.11: 経路変化数 (RTS/CTS 制御なし)

われる．このように RTS/CTS の設定についても実装上の問題には留意が必要である．

4.5.3.4 複数チャンネルの使用

通常，MANET は単一のチャンネルによって運用される．これまで説明してきた実験は単一チャンネルでのルーチングプロトコル性能評価である．もし複数チャンネルが利用可能ならば，1 チャンネルあたりの負荷が減少し，より高い性能が得られることは予想できる．そこで，単一チャンネルの MANET 性能を複数チャンネルの MANET 性能と比較するためテストベッドのノードをエリアから均一に選んで 2 または 3 グループに分け，各グループに互いに干渉の無い異なるチャンネルを割り当てた．各グループを接続するためには別のインタフェースが必要である．本テストベッドではノードはイーサネットインタフェースを持っており，32 ノードは学内 LAN に直収されている．大学キャンパスのほぼ中央に位置する 1 ノード（グループヘッドと呼ぶ）を各グループから選ぶ．各グループヘッドを相互に学内 LAN 経由の直通リンクで接続する．OLSR には複数イ

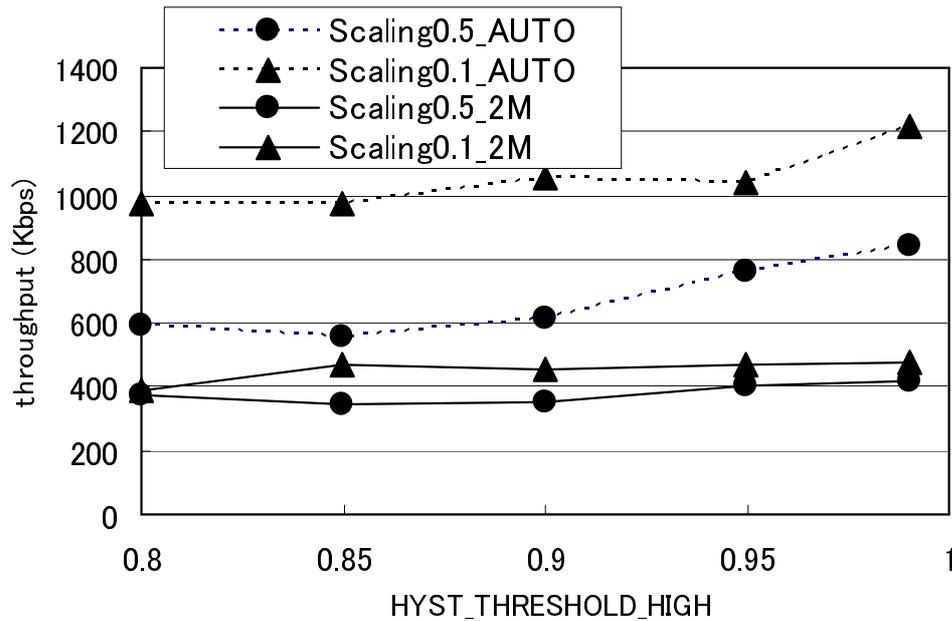


図- 4.12: スループット (RTS/CTS 制御なし)

インタフェース宣言 (MID) メッセージを使い、複数のインタフェースをサポートする機能がある。これにより、2 または 3 つのグループが全体で 1 つの MANET になり、グループが異なる 2 ノードがグループヘッドと直通リンクを経由するルートを経由して通信することが可能となる。3 つのケースをこれらの実験で比較した。ケース 1 はチャンネル 1 を用いた単一グループモデルであり、ケース 2 はチャンネル 1 と 14 を使った 2 グループモデルであり、ケース 3 はそれぞれチャンネル 1, 7, および 14 を使う 3 グループモデルである。OLSR パラメータは、デフォルトにセットし、前の実験で安定した性能が得られることから無線 LAN のビットレートは 2Mbps 固定とし、RTS/CTS はなしに設定した。フロー 1 の送信元ノードと宛先ノードを互いに違うグループに所属させ、グループ間での通信を実現した。背景フローとして送信元ノードと宛先ノードを無作為に選び 9 個と 19 個のフローを生成する。これらの実験を通して、フロー 1 の PDR とホップ数を評価した。結果を図 4.13 に示す。フローが 2 つのグループヘッド経由で伝送されるので、複数チャンネルのホップ数は単一チャンネルのホップ数より高いことが

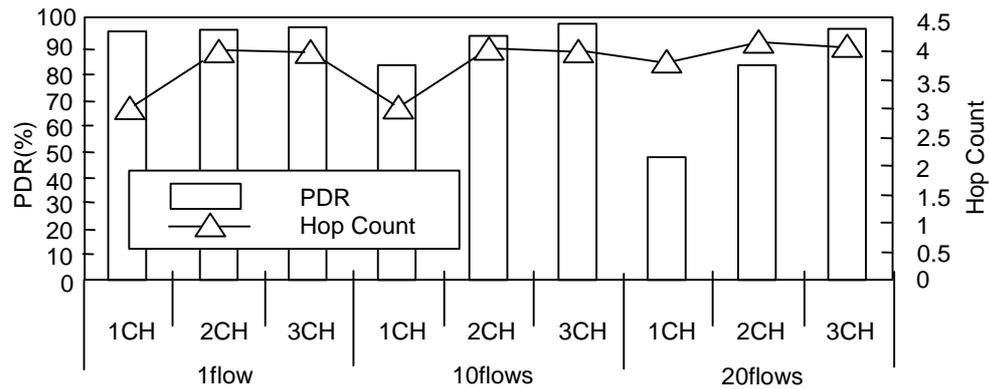


図- 4.13: パケット配信率とホップ数

わかる．背景フロー数の増大に伴い単一チャンネルのPDRが大きく減少していくが，複数チャンネルのPDRは減少の幅が小さく，3チャンネルのケース3では殆どPDRが劣化していないことがわかる．これらの実験を通して，複数チャンネルMANETをOLSRのMIDメッセージを使って構築・運用を行うことができ，複数チャンネル使用によりチャンネル別の負荷が低減し高性能が達成できることを確認した．

4.5.3.5 移動度の考慮

ルーティングの移動耐性を評価するため，簡単なモバイルシナリオを実験した．2つのラップトップPCを送信元/宛先ノードとしてテストベッドに加える．送信元のノードはSTREAMを用いてフロー(3,000, 512, 0.25)で宛先ノードへ送信し，その間にキャンパスの一方から反対側まで宛先ノードに近づきながら移動する．ルーティングプロトコルとしてOLSRをデフォルトパラメータで使用し，RTS/CTSをなしに設定した．モバイルノードの移動スピードは歩行速度である．結果を図4.14に示す．ホップ数0は，パケットが欠落していることを意味している．この図に示すように，多くのパケットが欠落している．これはキャンパス内のデッド・スポットによって起きる．無指向性アンテナを持つ50ノードのうち，ほとんどはアンテナが建物の屋上に設置され

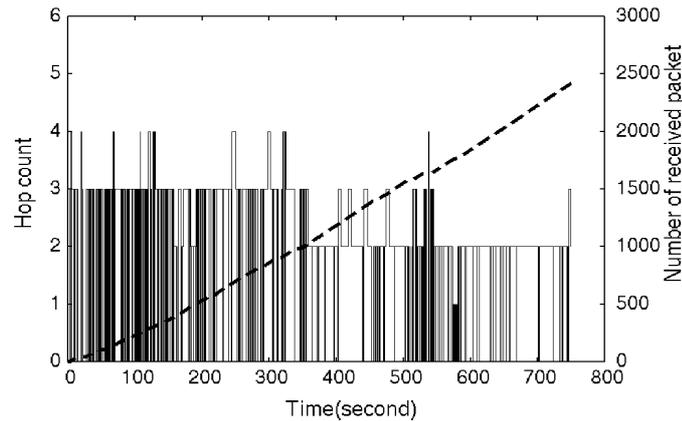


図- 4.14: 移動シナリオにおけるパケット受信数とホップ数

ているため、見通し線が建物屋上のアンテナとモバイルノード間でしばしば見失われる。また、無指向性アンテナの垂直方向の電波伝搬特性により見通し角度によって変化する電波状態にも影響を受けると考えられる。これらのデッド・スポットをカバーするために追加の 20 ノード（ノート PC）を図 4.1 に示す位置、地上高 52cm の台上に設置し同様の実験を行った。70 ノードでの結果を図 4.15 に示す。結果として接続性がかなり高められほぼ 90% のパケット配信率が達成された。ノード密度が高くなり高品質無線リンクの確保によりパケット配信率が向上したと思われる。本結果は、高いパケット配信率を実現する実アドホックネットワークを設計する時には、単純な電波到達距離による平面的設計では高低差による見通し確保の条件が欠落するため、平面的設計に加えて立体的設計を行う必要があることを示している。

4.6 大規模アドホックネットワーク構築指針の有効性

4.2 項に示した 12 項目の指針に基づき、4.3 項、4.4 項 に述べたように実際にアドホックネットワーク・テストベッドを設計・構築した。テストベッドの設計・構築は 2004 年 8 月に開始し、2004 年 11 月には運用を開始した。このように短期間でテストベッド

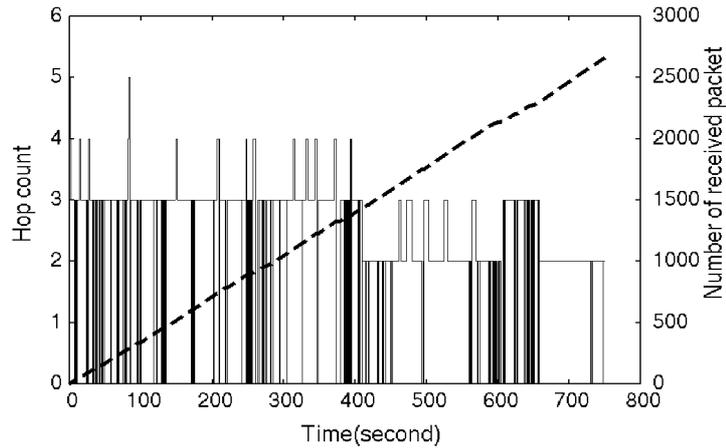


図- 4.15: 移動シナリオにおけるパケット受信数とホップ数（ノード増設後）

を構築できたことは指針によるところが大きい。特に，指針 3, 4, 5, 6, 7, 8 はノード開発に利用するソフト，ハードを的確に選定するのに有効であった。指針 1, 8, 9, 10, 11 により，ノード間の接続性は十分保証されており，4.5 項に述べた種々の実験が可能になった。数 10 ノード以上の実規模アドホックネットワークの実験をこのようなテストベッドを用いずに行った例もあるが，極めて多くの稼働と時間を要する [23]。本テストベッドは指針 12 に基づき，多くの実験メニューを連続的に自動実行可能であり，オペレータ 1 人ですべての実験の実行管理が可能である。このため，同一の実験を時間帯や日を変え，繰り返し行うことによる実験結果の再現性の検証も容易である。4.5 項に述べた実験例も時間帯や日を変え，複数回実行し，同様の傾向が得られることを確認している。精度の高い再現性の検証が要求される場合には，歩行者や走行車両などの影響を排除することが有効である。このためには歩行者や走行車両の影響の少ない屋上ノードのみを利用して実験を行うか，実験時間帯として休日，深夜を選択することも考えられる。本テストベッドは指針 2, 4, 5, 12 に基づき，これらを可能としている。指針 3 により低消費電力の小型コンピュータをノード本体に使用しているため，商用電源による電力供給を確保できない場所でも指針 11 に基づくソーラー発電に

より長時間連続実験が可能になった．本テストベッドは冬季でも問題なく稼動しており，指針 5 の有効性を示している．テストベッドはその後，いくつかのノードや機能の追加を行い，現在まで有効に活用されている．また，本論文の関係者だけでなく他機関の研究者によっても活用され，その有効性が明らかになっている [20][21][22]．4.2 項の指針は特定の場所，製品，条件などを想定したものではない．従って，テストベッド構築だけでなく，コミュニティーネットワークや災害復旧時の臨時ネットワーク構築などにも広く有効と考えられる．

4.7 まとめ

大規模アドホックネットワーク構築の必要性，課題と指針を示した．実際に本指針に基づいて埋め込み型 OS として Linux を用い小型コンピュータと IEEE802.11b 無線 LAN カード，コーリニアアンテナを使用して新潟大学に大規模アドホックネットワークテストベッドを構築し指針の有効性を確認した．本テストベッドでは実験を自動で行えるようシナリオ運用方式とし各種サポートツールを開発した．本ツールにより大規模テストベッドでも少人数で一連の実験を継続して行え，データを解析できることを示し，ツールの効果を確認した．本テストベッド上で通信実験を行いネットワークの稼動を確認した．これらの実験を通して，BSSID 不一致，オートレートと RTS/CTS の実装問題などいくつかの問題が確認された．OLSR のリンク品質パラメータがルート選択をより安定させ，パケット配信率とスループットを改善できることを示した．複数チャンネル使用によるチャンネル負荷低減効果を実験的に示した．移動シナリオにおいて約 90% のパケット配信率を達成できることを確認した．これらの結果からテストベッド構築指針の有効性を確認するとともに実環境で高性能なアドホックネットワークを構築する際に考慮が必要な事項を示した．

表- 4.1: ノード装置の主要緒元

| | | |
|-------------|--|---|
| CPU | Rnesus tec. SH7727 144 MHz | |
| OS | Montabista Linux (Kernel 2.4.17) | |
| メモリ | FROM | 16MB |
| | SDRAM | 64MB |
| | FeRAM | 32kB |
| USB | USB1.1 Host Interface (1 port) | |
| LAN | Ethernet | 10BASE-T/100BASE-TX RJ45 connector |
| PC card | 16bit PC Card (based on PCMCIA2.1) | |
| インタ フェース | サポート デバイス | Wireless LAN card (PCMCIA based on 802.11) |
| CF card | Compact Flash type 1 , type 2 (1 slot) | |
| インタ フェース | サポート デバイス | Compact flash memory card Wireless LAN card (based on 802.11) |
| | | |
| 電源 | 入力電圧 | DC 12V \pm 15% |
| 大きさ | 110(W) \times 71(H) \times 80(D) | |
| 重量 | 約 350g | |
| 環境条件 | 温 度 | -10 ~ 60 |
| | 湿 度 | 5 ~ 90%RH |

参考文献

- [1] T. S. Rappaport, " WIRELESS communications Principles & Practice, " IEEE PRES pp.69-90
- [2] D. A. Maltz, J. Broch, and D. B. Johnson, " Quantitative Lessons From a Full-Scale Multi-hop Wireless Ad Hoc Network Testbed, " In Proceedings of IEEE Wireless Communications and Network Conference 2000, September 2000.
- [3] B. A. Chambers, " The Grid Roofnet: a Rooftop Ad Hoc Wireless Network, " Master's Thesis, June 2002; , <http://www.pdos.lcs.mit.edu/grid/>
- [4] N. Tsarmpopoulos, I. Kalavros and S. Lalis, " A Low-Cost and Simple-to-Deploy Peer-to-Peer Wire-less Network based on Open Source Linux Routers, " The first International Conference on Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks and Communities (Tridentcom 2005), pp.92-97, February 2005.
- [5] C. -K. Toh , R. Chen , M. Delwar , and D. Allen, " Experimenting with an Ad Hoc Wireless Network on Campus : Insights and Experiences, " ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review, 28 (3) : 21-29, December 2000.

- [6] Y-Z. Lee, J. Chen, X. Hong, K. Xu, T. Breyer, M. Gerlla, " Experimental Evaluation of LANMAR , a Scalable Ad-Hoc Routing Protocol, " IEEE Vehicular Technology Conference 2005 spring, May, 2005.
- [7] R. Draves, J. Padhye, B. Zill, " Comparison of Routing Metrics for Static Multi-Hop Wireless Networks, " SIGCOMM '04, Aug.30-Sep.3, 2004.
- [8] H. Lundgren, D. Lundberg, J. Nielsen, E. Nordstrom, and C. Tschudin, " A Large-scale Testbed for Reproducible Ad hoc Protocol Evaluations, " In Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Orlando, USA, March 2002.
- [9] C. Tschudin, H. Lundgren, and E. Nordstrom, " Embedding MANETs in the Real World, " in Proceeding of Personal Wireless Communications 2003, Venice, Italy, September 2003, pp.578-589.
- [10] <http://www.ietf.org/html.charters/manet-charter.html>
- [11] <http://www.hpl.hp.com/personal/JeanTourrilhes/Linux/Tools.html>
- [12] T. Clausen and P. Jacquet, " Optimized Link State Routing Protocol, " IETF RFC 3626, October 2003.
- [13] UniK-OLSR, <http://www.olsr.org/index.cgi?action=download>
- [14] Netperf Homepage, <http://www.netperf.org/netperf/NetperfPage.html>
- [15] Y. Owada, T. Suda, Y. Takahashi, H. Terui, F.Taki, T. Yagi, K. Mase, " A Large Scale Wireless Mobile Ad Hoc Network Testbed, " Vehicular Technology Conference (VTC) 2005 Fall, 1-I-6, Sep.2005.

- [16] 須田利章, 瀧史好, 朴鍾甲, 間瀬憲一, "大規模アドホックネットワークテストベッド用実験サポートツール," 電子情報通信学会ソサイエティ大会 2004, BS-7-4, pp. 72
- [17] D. Raychaudhuri, M. Ott, and I. Secker, " ORBIT Radio Grid Testbed for Evaluation of Next-Generation Wireless Network Protocols," Tridentcom 2005 Demo Session February 23-25, 2005::Trento, Italy, pp.308-309
- [18] IEEE802.11 Handbook A Designer's Companion Standards Information Network IEEE Press p56
- [19] <http://www.proxim.com/support/techbulletins/TB-040.pdf>
- [20] 清水淳史, 門田和也, 佐藤弘起, 山本淳二, 正村雄介, 林正人, 松井進, 吉澤聡, "モバイルアドホックネットワークとIP モビリティの融合方式の機能検証と性能測定," 電子情報通信学会アドホックネットワーク時限研究専門委員会第2回アドホックネットワーク・ワークショップ, 2005年5月23・24日, B-5
- [21] 長谷川淳, 板谷聡子, 長谷川晃朗, Peter Davis, "電波強度変動を考慮した経路制御方式の提案と評価実験," アドホックネットワークプラットフォームに関するコンソーシアム アドホックコンソーシアム 第2回シンポジウム, 2005年10月24日, pp. 63-65
- [22] 八木啓之, "アドホックネットワーク・テストベッド共同実験速報," アドホックネットワークプラットフォームに関するコンソーシアム アドホックコンソーシアム 第2回シンポジウム, 2005年10月24日, pp. 57-62

- [23] 間瀬憲一, "次世代アドホックネットワーク基盤技術の研究開発, "明日を拓く高度情報通信シンポジウム, 2004年11月18日, <http://flower.gs.niigatau.ac.jp/ise/iicerc/mase.pdf>
- [24] 高橋義彦, 大和田泰伯, 須田利章, 間瀬憲一, "大規模無線アドホックネットワークテストベッドの開発", 電子情報通信学会論文誌 B, Vol.J89-B, No.6, Jun.2006., pp.836-848

第5章 無線メッシュネットワークにおける高スループット経路選択に関する実験的検証

[6]

アドホックネットワークの用途はセンサーネットワーク, 家電製品ネットワーク, 公衆無線 LAN などこれまでの軍事利用目的から商用目的へ移行してきている。ノードが移動せずに固定的に配置される利用形態として地域コミュニティネットワークの構築やワイヤレスブロードバンドインターネットアクセスサービスの提供などがメッシュネットワークとして実際にサービスを開始してきている [1]。この場合, アドホックネットワークに比べより高性能化が期待できるが, 従来のルーチングプロトコルは経路選択指標として最短ホップ数を用いるのが基本であるため, リンクの性能/品質を考慮しないとスループットの向上が見込めない。このため, ETX[2], EDR[3] 等のリンクメトリックが提案されている。しかし, ETX は無線リンクのレートを考慮せず IEEE802.11a/b/g のような可変レートの特性を反映できない。レートを考慮したリンクメトリックとしては MTM[4], PARMA[5] などが提案されている。しかし, これらのメトリックの測定方法の詳細は明確ではない。各レートでのプローブパケットの周期的 (数秒間隔) なブロードキャストが必要と考えられるが, 貴重な無線帯域を消費する。また, MAC 層でのオートレート制御を前提とし, その情報をネットワーク層で利用する方法も考えられるが, オートレート制御アルゴリズムは実装依存のため, その最適性は保証されず,

MAC層の情報をネットワーク層で利用する標準インタフェースも確立されていない。

本研究では、ノードが固定の場合はネットワーク層での測定に基づき、あらかじめ、リンクの最適レートを求め、レートを固定することで、スループット向上の可能性が あることに着目する。具体的にはレート/品質の低いリンクをソフト的に切り、残りの リンクの中からルーチングプロトコルが最短経路を選択する方法（リンクフィルタリ ング）を検討する。そして、その効果を大規模テストベッドで評価する。

提案方法はルーチングプロトコル、MACの実装方法に関わらず利用可能である。従 来方法のように数秒オーダーでのリンクメトリックの変化をとらえようとするものでは なく、より長い時間でのリンク状態の大きな変化をとらえ、それに対応しようとする ものであり、例えば数10分～数時間に1回程度でリンクの最適レートの測定を行う ことも考えられる。また、提案方法は従来方法の対案ではなく、従来方法と組み合わ せて利用することも可能である。

5.1 リンクフィルタリング

5.1.1 リンクフィルタリング

リンク性能/品質指標としてリンクごとのユニキャスト配信率（以下 UDR：Unicas- tDeliveryRatio，ネットワーク層における送信パケット数（ a ），受信パケット数（ b ） の比（ b/a ）で求める。MAC層での再送あり。）を用い、閾値に基づきリンクの良否を 判断することにより各レートで利用可能なリンクを絞り込むことが可能になる。そこ で、本実験では各レートにおいて UDR を 90%と 99%に設定し、各閾値以上の配信率 となるリンクのみを用いたネットワークでスループットがどのように変化するかを検 討することとした。また、2Mbps ブロードキャストについては、ブロードキャスト配 信率（以下 BDR：BroadcastDeliveryRatio，ネットワーク層における送信パケット数

(a) と受信パケット数 (b) の比 (b/a) で求める。MAC 層での再送なし。) を指標として 80% と 90% に設定し、同様にスループットに与える影響を検討した。設定した閾値未満のリンクを不良リンクとする。設定した閾値以上の配信率である良リンクのみで構成されるネットワークの特定の 1 フローに対するスループットを計測し評価する。

5.1.2 フィルタリング手法と結果

各ノードでは Linux の標準機能である iptables コマンドを用いてソフト的に不良リンクを削除することで、良リンクのみで経路が構成されるリンクフィルタリングを行う。iptables は Linux カーネルの IP パケットフィルタリングのテーブルを設定・管理・検査するために使われるコマンドである。本実験では iptables を以下のコマンドフォーマットで使用する。

```
iptables -A chain -s address -p protocol -dport port_no -j target
```

"-A chain" は無線 LAN カードから入力されるパケットの処理ルールへ本フィルタリングルールを追加するため "INPUT" を指定する。次に "-s address, -p protocol, -dport port_no, -j target" の各パラメータは処理を行う対象ノードの送信元アドレス、対象プロトコル種別、宛先ポート番号、処理内容を指定する。また、宛先ポートは OLSR の制御メッセージで使用するポートを対象として "698" を設定する。これにより、"-s 192.168.50.3, -p udp, -dport 698, -j DROP" のように指定した。本コマンドをフィルタリング処理対象全ノードについてノード単位で実行することで、フィルタリングが実現する。フィルタリングの条件と、その条件における対象リンク数を表 5.1 に示す。

表- 5.1: フィルタリング条件とリンク総数

| ラベル | フィルタリング条件 | リンク数 |
|-----|---------------------|-------|
| a | フィルタリングなし | 1,118 |
| b | 2Mbps , UDR 90%以上 | 851 |
| c | 2Mbps , UDR 99%以上 | 802 |
| d | 5.5Mbps , UDR 90%以上 | 666 |
| e | 5.5Mbps , UDR 99%以上 | 522 |
| f | 11Mbps , UDR 90%以上 | 477 |
| g | 11Mbps , UDR 99%以上 | 359 |
| h | 2Mbps , BDR 80%以上 | 653 |
| i | 2Mbps , BDR 90%以上 | 528 |
| j | 固定経路 | - |

UDR : ユニキャスト配信率 (再送あり)

BDR : ブロードキャスト配信率 (再送なし)

5.2 スループット実験

5.2.1 実験方法

本実験では netperf を用いてスループットを測定した。また、各ノードでは sniffer を起動し、パケットの通過経路を解析できるようにした。送信元ノードと宛先ノードの組としては、過去の実験データと比較ができ、また、距離が約 980m と比較的離れているノード 18 ノード 46 間を対象とした。設定パラメータは、トランポート層を UDP、パケットサイズを 1,472Byte、性能種別をデータ転送性能 (STREAM) とし、CH11 で

10 秒間送信する．10 回測定において得られた測定値の平均値を結果とした．ルーチングプロトコルは Unik-OLSR を使用した．

netperf では送信ノード側から受信ノードへ TCP セッションを確立し，その TCP セッション上で情報の授受を行うことでスループットを計測する．このため，netperf の tcp セッションが確立できないときはスループットの結果が取得できなくなり計測不能となる場合があった．計測不可が 1，2 回以下の場合 でプロット，それ以上計測不可が多い場合 でプロットした．

5.2.2 実験結果

図 5.1-図 5.2 および表 5.2 に測定結果を示す．図 5.1 において，フィルタリング条件 j は，最もスループットの高かったフィルタリング条件 f で最も利用された経路（18 2 34 46）を固定経路として設定し測定したスループット値である．本スループット値が本フローで達成される最高性能であると考えられる．フィルタリング条件 i を除き，全てのケースで 11Mbps レートに設定したほうが高いスループット値を示すことがわかる．オートレートは 5.5Mbps レートとほぼ同様の値と傾向を示す．2Mbps レートはフィルタリング条件 i を除き最低の性能しか示せないことがわかる．最もスループットが高いケースは 11Mbps レートでフィルタリング条件 f であり，最も単体リンクの性能が高いと思われるフィルタリング条件 g のスループットはレートが 5.5Mbps のフィルタリング条件 e よりも低くなっている．単純に UDR を高くした厳しいリンク絞込み条件で設定し，より単体性能が高いリンクを選択しても，リンク間距離が短くなりホップ数が増加する（図 5.2）ため，必ずしもスループット性能が高くないことがわかる．

また，図 5.2 より，フィルタリング条件 g とフィルタリング条件 h では平均ホップ数がフィルタリング条件 g がフィルタリング条件 h より高いが，スループットはフィル

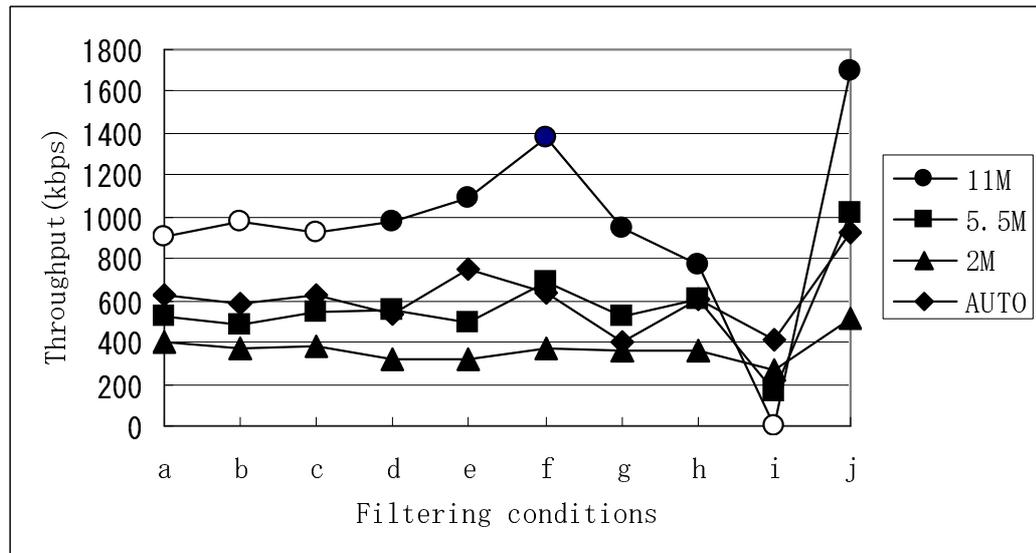


図- 5.1: スループット測定結果

タリング条件 g がフィルタリング条件 h より高い。これはフィルタリング条件 h では高レートを考慮していないため、高レート時に低品質のリンクが含まれることによる。

5.1 項に述べたように、フィルタリング条件 a, b, c, i では 10 回の計測全てにおいて有効な 11Mbps レートスループット測定ができたわけではなく、順に 5 回, 2 回, 2 回, 0 回であった。OLSR では制御パケットを 2Mbps で送信するため、データパケットの転送速度が 11Mbps レートである場合無線到達距離に差が生じグレーゾーン問題が発生するため経路が不安定となり、データ計測可能回数が激減したと考えられる。

フィルタリング条件 i の総リンク数は 528 であったが、この中で 11Mbps レート UDR の閾値 90% 以上のリンク数は 388 リンクであった。フィルタリング条件 f のリンク数が 477 であったことから UDR90% 以上のリンクが 89 リンク削られ、逆に UDR90% 以下のリンクが 140 リンク含まれたことになる。このことから OLSR で経路を構築する際に不良リンクを含んだ経路が選定される確率が高くなり、また、グレーゾーンの影響と合わせて 11Mbps レートでの測定結果が得られる回数が 0 となったと考えられる。

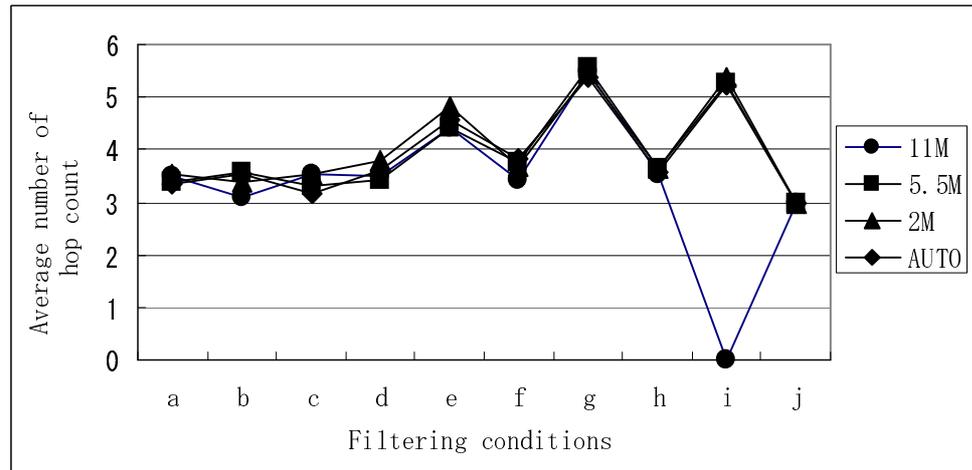


図- 5.2: 平均ホップ数

同様に、フィルタリング条件 h で該当する総リンク数は 653 あるが、このうち 11Mbps レート UDR の閾値 90%以上のリンク数は 434 リンクであった。フィルタリング条件 f でのリンク数が 477 であることから UDR90%以上のリンクが 43 リンク削られ、逆に UDR90%以下のリンクが 219 リンク含まれたことになり、スループットが低下していると考えられる。

表 5.2 に 11Mbps レートユニキャストの各フィルタリング条件における最多使用経路を示す。固定経路 18 2 34 46 で最大スループットを示していることから、本経路を各フィルタリング条件で多く使えるほどスループットが高い傾向を示すと考えられる。フィルタリング条件 a, b, c は経路が安定していないため比較対象から除外すると、フィルタリング条件 d, e, f, h でほぼ同じ経路使用率を示しているが、フィルタリング条件 d, e, f の中では経路 18 2 34 46 の使用頻度が最も高いフィルタリング条件 f が最も高いスループットを示している。

フィルタリング条件 f と h では経路使用頻度とスループットが反転している。フィルタリング条件 f と h における宛先ノード 46 でのパケット受信数を比べると、netperf は同一条件で作動させたにもかかわらず、f が 8,978 であるのに対し h では 4,365 であり、

表- 5.2: 各フィルタリング条件における最多使用経路

| ラベル | 最多使用経路 | 使用率 |
|-----|------------------|--------|
| a | 18 2 34 46 | 59.66% |
| b | 18 2 34 46 | 89.16% |
| c | 18 2 34 46 | 57.46% |
| d | 18 2 34 46 | 63.62% |
| e | 18 2 34 46 | 63.62% |
| f | 18 2 34 46 | 64.45% |
| g | 18 2 24 38 43 46 | 27.33% |
| h | 18 2 34 46 | 66.07% |
| i | 観測不能 | - |

h の品質はかなり悪いことがわかった．この時の各フィルタリング条件での経路の変遷を表 5.3 と表 5.4 に示す．表は当該経路が最初に現れる順に表示した．本データよりフィルタリング条件 f は最初に 18 2 34 46 の経路を構成することを示す．一方フィルタリング条件 h は何度か経路 18 2 34 46 とは違う経路でパケット送信を行い，8 番目の経路選択で経路 18 2 34 46 にたどりつく．この間，3 番目に出現する経路選定で UDR が 92% のリンク 19 42 が含まれていた．また，9 番目に出現する経路選定では UDR が 73% のリンク 2 21 を含んでいた．このように，5.2 項でも述べたが，h では高レートを考慮していないため 11Mbps レートの場合に低品質のリンクが含まれるためである．

フィルタリング条件 a (フィルタリングなし) では 11Mbps レートの場合 10 回の測定中 5 回しか測定できないことから安定した通信経路とは言えず，オートレートの場合のスループット値 632.25kbps が最大性能となる．一方，フィルタリング条件 f のス

ループット値は11Mbps レートで1375.62kbps であることから2倍以上のスループットを達成しており、高速レート設定とリンク絞込みによる効果が実証できたと考える。

5.2.3 リンクフィルタリングパラメータの設定指針

実験結果に基づき、リンクフィルタリングパラメータの設定指針を以下に示す。

- (1) 高速レートを有効に利用しスループット向上効果を得るため、高速レート(5.5Mbps, 11Mbps)を使用したフィルタリングを行う必要がある。
- (2) 閾値をどの程度に選ぶかはネットワークの構成(ノードの分布状態, 密度など)によるので、一概には言えないが、ユニキャストの場合はMAC層に再送機能があることを考慮すると、閾値を比較的高い水準(90%以上)にとることが望ましい。
- (3) 但し極端に高め(99%など)に設定すると、ホップ数が増えてスループットが減少する可能性があることに注意する必要がある。
- (4) さらに、閾値に関していくつかの値を試行し、スループットを検証することにより大きなスループット改善効果が得られる。
- (5) このような評価をメッシュネットワークの遠距離のノードペアのいくつかについて実施し、適切なフィルタリング条件を設定する必要がある。

5.3 まとめ

本実験では、各リンクごとのUDRを用い、一定の閾値を指標としてリンクをフィルタリングし、適切レートを設定することで高いスループットが得られることを示した。今後の課題を以下に示す。

- (1) ネットワーク条件を変更した場合の指針の妥当性の検証
- (2) リンクフィルタリング条件の最適化手法
- (3) netperf に代わる安定なスループット測定法
- (4) 複数フローを加えた場合のスループット特性評価

表- 5.3: フィルタリング条件 f の経路変遷

| 経路 | | | | | | | 使用率 |
|----|----|----|----|----|----|----|---------|
| 18 | 2 | 34 | 46 | | | | 64.45% |
| 18 | 2 | 14 | 42 | 34 | 46 | | 0.58% |
| 18 | 2 | 14 | 34 | 46 | | | 23.07% |
| 18 | 2 | 19 | 15 | 34 | 46 | | 1.83% |
| 18 | 2 | 19 | 15 | 34 | 43 | 46 | 0.10% |
| 18 | 2 | 34 | 43 | 46 | | | 1.35% |
| 18 | 2 | 14 | 34 | 43 | 46 | | 1.72% |
| 18 | 20 | 14 | 34 | 43 | 46 | | 1.48% |
| 18 | 20 | 14 | 34 | 46 | | | 0.37% |
| 18 | 20 | 2 | 34 | 46 | | | 2.91% |
| 18 | 20 | 2 | 14 | 34 | 46 | | 0.17% |
| 18 | 20 | 16 | 15 | 34 | 46 | | 0.56% |
| 18 | 2 | 34 | 47 | 46 | | | 1.23% |
| 18 | 2 | 14 | 34 | 47 | 46 | | 0.19% |
| 18 | 2 | 16 | 15 | 11 | 45 | 46 | 0.02% |
| 合計 | | | | | | | 100.00% |

表- 5.4: フィルタリング条件 h の経路変遷

| 経路 | | | | | | | 使用率 |
|----|---|----|----|----|----|----|---------|
| 18 | 2 | 24 | 34 | 46 | | | 16.06% |
| 18 | 2 | 21 | 34 | 47 | 46 | | 0.73% |
| 18 | 2 | 19 | 42 | 34 | 46 | | 9.62% |
| 18 | 2 | 19 | 36 | 34 | 46 | | 0.14% |
| 18 | 2 | 19 | 36 | 34 | 47 | 46 | 0.09% |
| 18 | 2 | 16 | 39 | 34 | 47 | 46 | 3.71% |
| 18 | 2 | 24 | 34 | 47 | 46 | | 0.18% |
| 18 | 2 | 34 | 46 | | | | 66.07% |
| 18 | 2 | 21 | 34 | 46 | | | 2.89% |
| 18 | 2 | 34 | 47 | 46 | | | 0.48% |
| 18 | 2 | 21 | 41 | 47 | 46 | | 0.02% |
| 合計 | | | | | | | 100.00% |

参考文献

- [1] <http://global.locustworld.com/> .
- [2] D. S. J. De Couto, D. Aguayo, J. Bicket, R. Morris, " A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing, " Proceedings of the 9th annual international conference on Mobile computing and networking, San Diego, CA, USA, SESSION: Routing optimizations , pp.134 -146, 14-19 September 2003.
- [3] J. C. Park, S.K.Kasera, " Expected data rate:an accurate high-throughput path metric for multihop wireless routing, " Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, 2005. IEEE SECON 2005. 2005 Second Annual IEEE Communications Society Conference on Volume, Issue, pp.218-228, 26-29 Sept. 2005.
- [4] B. Awerbuch, D. Holmer, H. Rubens, " The Medium Time Metric:High Throughput Route Selection in Multirate Ad Hoc Wireless Networks, " Lecture Notes in Computer Science Publisher, Springer Berlin / Heidelberg, ISSN: 0302-9743, Subject:Computer Science Volume 2928 / 2003, Title:Wireless On-Demand Network Systems, ISBN: 3-540-20790-2, DOI: 10.1007/b94064, Chapter: pp.253-270.
- [5] S. Zhao, Z. Wu, A. Acharya, D. Raychaudhuri, " PARMA: A PHY/MAC Aware Routing Metric for Ad-Hoc Wireless Networks with Multi-Rate Radios, " IEEE

International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM 2005), June 2005.

- [6] 高橋義彦, 兼子陽市郎, 間瀬憲一, "無線メッシュネットワークにおける高スループット経路選択に関する実験的検証", 電子情報通信学会論文誌 B, Vol.J90-B, No.3, pp.311-314, Mar. 2007 .

第6章 多層メッシュネットワークにおけるルーチング方式に関する検討

6.1 研究の背景

ブロードバンドインターネットサービスを提供するためのアクセスネットワーク構築において、有線方式では加入者線路や伝送設備等の設備コストが高くサービス需要がある程度以上のエリアでないと事業として成立しないため、容易にサービスエリアの拡大を図ることが難しい。このため、無線方式によるアクセスネットワーク構築がラストワンマイルソリューションとして注目を集めている。無線方式によるアクセスネットワークにはインフラストラクチャ無線 LAN 方式と FWA 方式 [3]-[7] および無線メッシュネットワーク方式 [8] がある。インフラストラクチャ無線 LAN 方式はエリアを限定した特定の場所でインターネットサービスを提供するホットスポットサービスや SOHO-LAN、家庭 LAN 等で主に利用され、広いエリアでたくさんのユーザを収容できるサービスとは言い難い。一方 FWA 方式は基地局と対向する中継ノードの間で指向性アンテナを用いて構成されるスター型ネットワークの固定無線方式である。FWA 方式は特定の加入者を対象にしたサービスとなるため設備コストが高くなり、ネットワーク構築後に無線経路上に電波障害物が発生した場合は自動経路保全ができないため比較的導入エリアが限定される。無線メッシュネットワークはエリアを限定せずより広範な地域でのインターネットアクセスサービスの提供や災害時の非常無線ネット

ワークの構築等に即応でき，ユーザ当たりのサービスコストが安く実現できる．これにより過疎地等でのインターネットアクセスネットワーク構築への適用性が高く，ホットゾーンサービスやISPによる広域インターネットアクセスサービス，同一行政エリア内の住民向けの広域インターネットコミュニティネットワーク作り等豊富なアプリケーションに最適な方式になりえる技術である．無線メッシュネットワークは有線でインターネットと接続される基地局と中継ノードで構成され，ユーザが使う端末からの通信は中継ノードを経由して行われる．中継ノードは無線アドホックネットワークを利用してマルチホップで基地局へ到達するよう作動する．このため必要なコンポーネントがアドホックネットワークルーティングプロトコル，IEEE802.11MACプロトコル，WEPセキュリティなどの技術で既に利用可能であるので無線メッシュネットワークを構築するのはそれほど難しくはないが，まだかなりの改善・高度化等の研究が必要である．[1]

6.2 提案アルゴリズムのコンセプト

一般的なアドホックネットワークは無指向性アンテナを用いた1チャンネルで接続されるネットワークで構成される．このため，基地局には各中継ノードからのトラフィックが集中し基地局に近接するほど高トラフィックとなりユーザ密度の高いエリアには適応しづらい（図6.1）．しかし最近ではトランシーバの価格が安くなってきており，メッシュネットワークを構成する技術としてマルチトランシーバを実装する研究が進められている．マルチトランシーバによりメッシュネットワークを多層化すれば基地局へ近くなるほど多くの層を利用できるようにすることでトラフィックの分散を図る方式が実現できる．本研究ではマルチトランシーバによる多層メッシュネットワークの構成方法を提案する（図6.2）

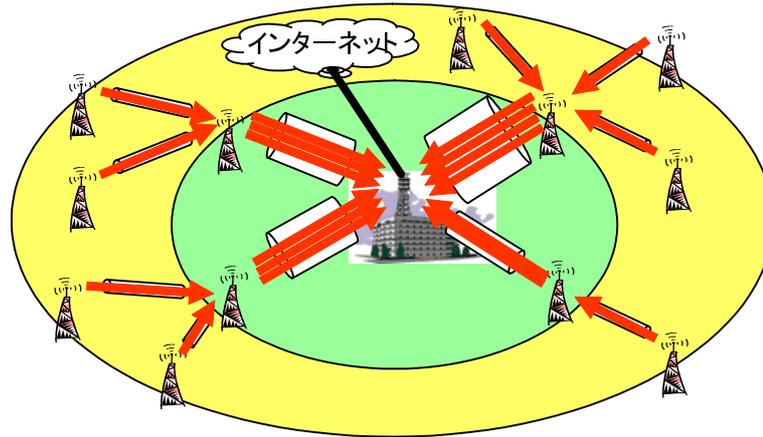


図- 6.1: トラフィック集中

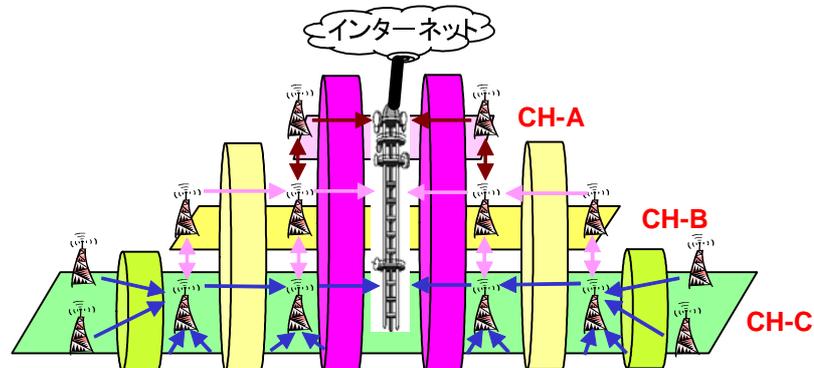


図- 6.2: マルチトランシーバによる多層化

6.3 メカニズム

本研究ではメッシュネットワークを構成するルーチングプロトコルとしてアドホックルーチングプロトコルである OLSR[2] にマルチトランシーバを実装させ評価する。OLSR はプロアクティブ型ルーチングプロトコルでコントロールメッセージを伝達するために MPR (multipoint relay) と呼ばれる選ばれたノードだけを使い、コントロールトラフィックのフラッディングにおけるオーバーヘッドを最小化する。MPR 集合を決めればそれによりルーチングに必要な様々な情報をフラッディングする。OLSR では

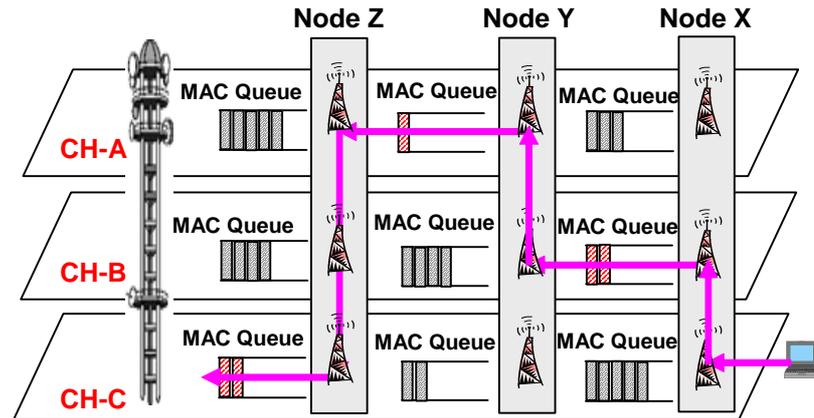


図- 6.3: MAC キュー選択方式

Normal (シングルランシーバモデル)
比較ベースモデル

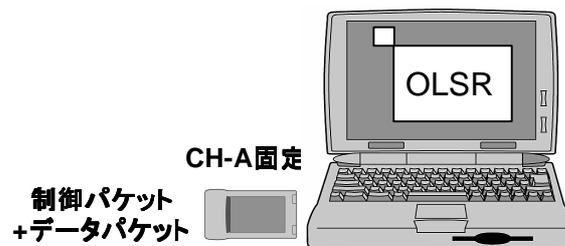


図- 6.4: Normal モデル

すべてのノードがネットワークのトポロジを取得するが、各ノードではトポロジを基にして経路を計算し、最短経路で経路表を作成する [2]。本研究ではマルチランシーバを実装したノード上でOLSRを動作させた多層メッシュネットワークで、中継先MPRへ接続されるランシーバのMACキューを選択する方式として最小待ち行列方式によるデータパケット送信メカニズムを3つのモデルで構成し比較する(図6.3)。比較に用いたネットワークのメカニズムは以下のとおりである(図6.4-図6.7)。

- (1) Normal シングルランシーバモデルでチャンネルは1チャンネル固定とし、一般的なメッシュネットワークの性能として比較のベースモデルとした。

Single-2(マルチトランシーバモデル)

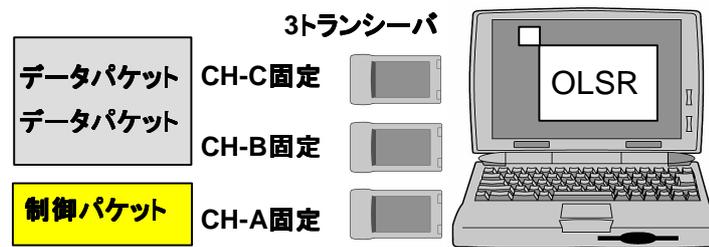


図- 6.5: Single-2 モデル

Single-3(マルチトランシーバモデル)

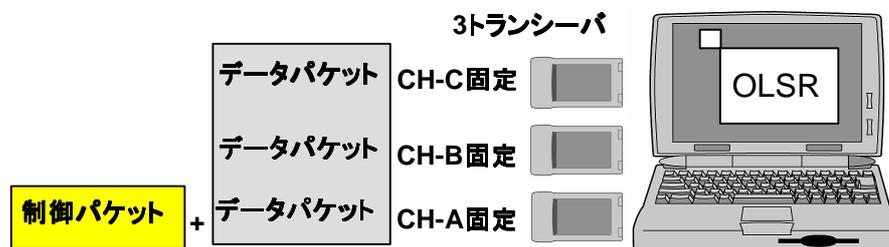


図- 6.6: Single-3 モデル

- (2) Single-2 マルチトランシーバモデルで3トランシーバとした．各トランシーバは固定でトランシーバごとに別の1チャンネルを割り当てる．制御パケット専用で1トランシーバを割り付け，残りの2トランシーバでデータパケット専用で送信するモデルとした．Multiple とインタフェース数を同一にして比較するモデルである．
- (3) Single-3 マルチトランシーバ方式で3トランシーバとした．single-2 と同様に各トランシーバは固定でトランシーバごとに別の1チャンネルを割り当てる．1トランシーバは制御パケットおよびデータパケット共用に割り付け，残りの2トランシーバはデータパケット専用で送信するモデルである．
- (4) Multiple マルチトランシーバ方式で3トランシーバとした．トランシーバはチャンネル固定でトランシーバごとに別の1チャンネルを割り当てる．本モデルでは各ト

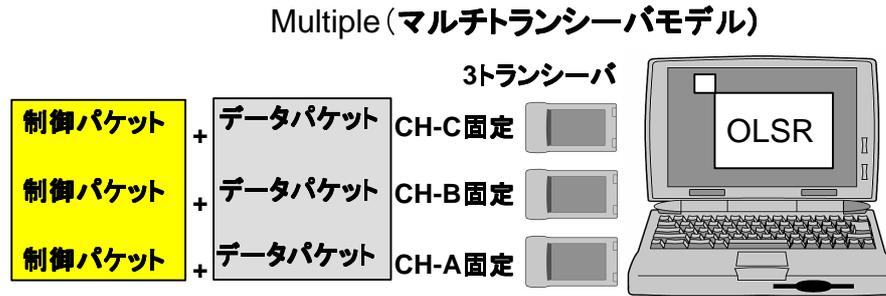


図- 6.7: Multiple モデル

ランシーバで制御パケットおよびデータパケットの両方を送受信し、データパケットの各層への乗り入れに制限を設けない。

また、ネットワークの構成条件は以下のとおりとした。

- (1) エリアは $1,200\text{m} \times 1,200\text{m}$ とし、エリアの中心位置に有線接続を持つ基地局を設置し、エリア内の各中継ノードは基地局へ接続を行う。
- (2) 各中継ノードは格子状のエリア内に配列される。
- (3) 各ノードはルーチングプロトコルとして OLSR が稼動する。
- (4) 中継ノード数は 8×8 (64) とした。
- (5) 無線伝送距離は 8×8 (64) の配置最大間隔である 424m をカバーするため、無線伝送距離は 461m とした。これはこれまで新潟大学で行ってきた実験で得られたアンテナ地上高 6m における無線伝送距離に相当する。

6.4 シミュレーション条件

シミュレーション条件は以下とした。

- (1) シミュレーションソフトは GloMoSim を使用する .
- (2) 各中継ノードは格子で区切ったエリア内でランダムに配置される .
- (3) ルーチングプロトコルは新潟大学で実装した OLSR を使用する .
- (4) 無線方式は IEEE802.11b とする .
- (5) 各中継ノードの無線 LAN カードは同一とし , 動作性能は全て同一であるとする .
- (6) 各中継ノードからゲートウェイ基地局へ送信される送信パケット長は 1,500 バイト , パケット送信間隔を 10 パケット / 秒 , パケット送信時間を 900 秒とした .
- (7) 始点ノードはランダムに選定する .
- (8) シミュレーション回数は 3 回とした .

6.5 シミュレーション結果

シミュレーション結果を図 6.8 ~ 図 6.11 に示す . Normal モデルが 20 フロー以上でパケット配信率 , パケット配信時間 , オーバフロー数が急激に劣化して行くのに対し , マルチトランシーバモデルではいずれも配信率 , 配信時間の劣化は少ない . マルチトランシーバモデルの中では Single-2 モデルがフロー数 40 以上から劣化していくが , Single-3 と Multiple はほぼ同等の性能を示している . これは Single-2 モデルがデータパケット送信トランシーバ数=2 のためデータパケット送信トランシーバ数=3 の Single-3 および Multiple に比べ劣化しやすいためである . Normal モデルではフロー数 35 でパケット配信率が落ち込んだカーブとなっている . これはフローごとにシミュレーションを開始する際 , 始点ノードはすべてランダムに選定し直していることにより発生しているものと考えられる . フロー数 30 のときの始点ノードに新たに 5 個始点を追加してフ

ロー数 35 のシミュレーションを行えば少なくともフロー数 30 のパケット配信率より低下するはずであり、これをフロー数 40 にあてはめればフロー数 35 より低下するはずである。だが、フロー数 40 がフロー数 35 に比べ配信率が上昇するのはフローごとにランダムにノードを選択しているためこのような現象が起きたと思われる。

Single-3 と Multiple モデルの制御パケット数は Multiple が 3 トランシーバ個々に制御を行うため突出しているが 1 層あたりの制御パケット数で見るとほぼ同等数であり、フロー数の変化に伴って変動する制御パケット数の変化も Normal, Single-2, Single-3 と同じ傾向を示している。また、配信率、配信時間については Multiple と Single-3 で差が出ない。これは OLSR がもともと制御パケットを抑止するプロトコルであり、全体としてデータパケットへ与える影響が少ないためと思われる。このような中継ノードおよび基地局が固定配置されるネットワークでは各トランシーバで構築されるルーティングテーブルの MPR 集合に変化が起きにくいいためほぼ同一のトポロジーで経路が構成され、Multiple のように各トランシーバが個々に独立して制御パケットをフラッディングしてルーティングテーブルを構築したとしても、Single-3 のように同一トランシーバ数でデータ送信専用トランシーバを持つ構成のネットワークと同等の性能を示すことがわかる。しかし、Single-3 はデータ送信専用トランシーバが使用するチャンネルに電波干渉が発生した場合、当該トランシーバの層で構築される MPR 集合が無効となってもそれを検知できないため当該トランシーバの MAC キューにたまったデータパケットを送信できなくなる可能性がある。また、逆に制御トランシーバの層で電波干渉源等の障害物が発生した場合データ専用トランシーバ層に影響がなくても経路変更を生じネットワークに擾乱を発生し品質を劣化させる可能性がある。一方、Multiple は各トランシーバごとに制御を行うため電波障害を回避できることと、データパケット専用トランシーバを持つノードと同等の性能を発揮できることから Multiple モデルが優れている。なお、図 6.8 はエリア条件、無線方式、無線伝送距離、ノード数とトラヒック

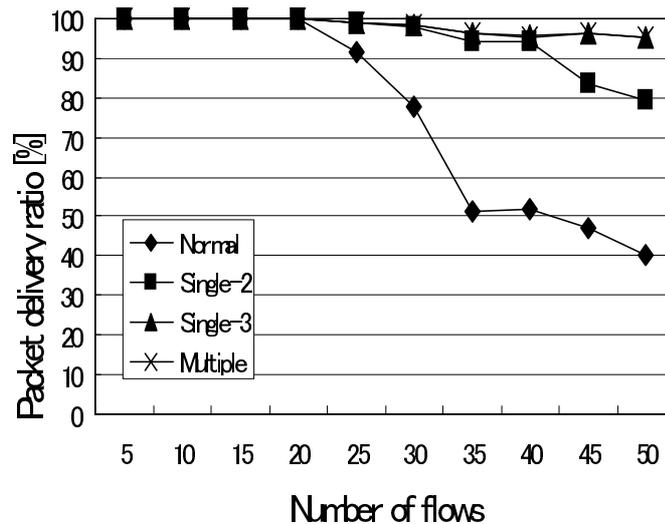


図- 6.8: パケット配信率

条件が揃えば一定以上のパケット配信率を維持するのに必要なトランシーバ数が推測できることを示している。

6.6 まとめ

最小待ち行列 MAC キューへデータパケット送信するマルチトランシーバモデルのネットワーク性能を評価し、各トランシーバが独立して制御とデータ送信を行うモデルの優位性を示した。Normal モデルのフロー数推移に伴うパケット配信率の変化で今回のシミュレーションでフロー数 35 が特異点となっている点については、今後も検討を行う必要がある。OLSR には複数インタフェースの宣言メッセージである MID メッセージ機能を有しているが、これについても本提案と比較する必要がある。本提案は電波障害の無い静的な環境でシミュレーションを行ったが、ランダムに各インタフェースに電波障害が発生した場合の評価を行う必要がある。最小待ち行列 MAC キューへのデータパケット送信方式を評価したが、電波干渉源が定常的ではないが断続的に発生す

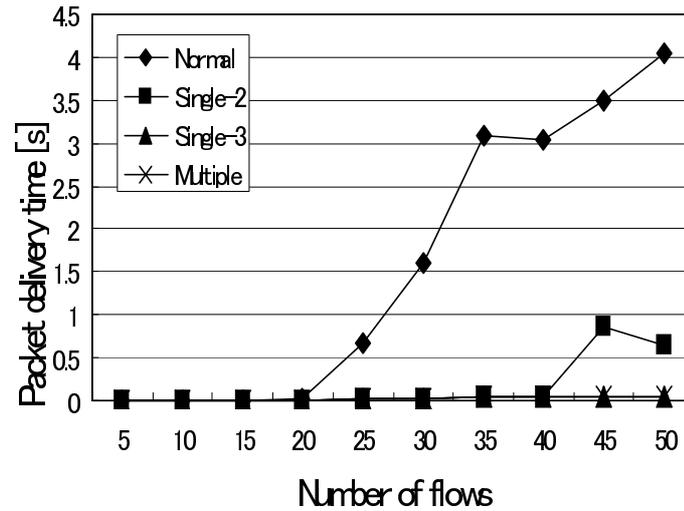


図- 6.9: パケット配信時間

る場合や距離が長い等の品質の悪い無線リンクを構成するトランシーバのMACキューは最小待ち行列だけでは排除できないと考える。そこで、RTT等の他品質評価項目やMPR選定要素であるWillingness等を組み合わせてゲートウェイ基地局への最適経路を図る拡張も今後進めて行く必要がある。また、エリア条件、無線方式、無線伝送距離、ノード数とトラヒック条件から必要インタフェース数を求める検討も進めていく必要がある。

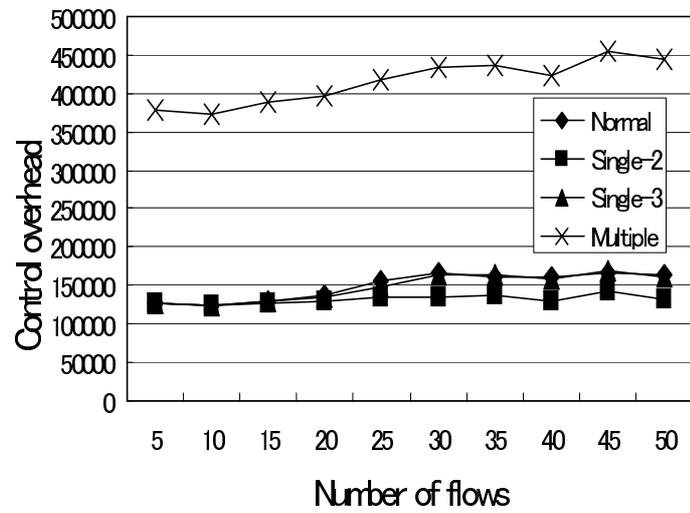


図- 6.10: 制御パケットオーバーフロー数

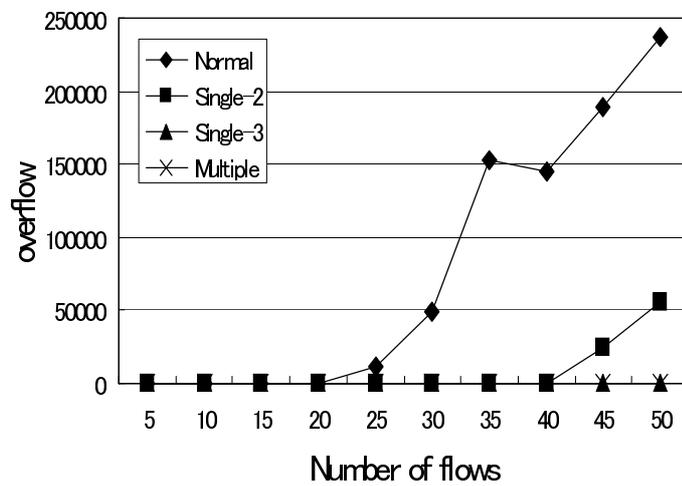


図- 6.11: オーバーフロー数

参考文献

- [1] I. F.Akyildiz, X. Wang, W. Wang, " Wireless mesh networks: a survey, " Elsevier B.V., pp.1 - 43, Computer Networks (2005).
- [2] T. Clausen and P. Jacquet, " Optimized Link State Routing Protocol, " IETF RFC 3626, October 2003
- [3] The IEEE 802.16 Working Group on Broadband Wireless Access Standards, <http://grouper.ieee.org/groups/802/16/>
- [4] <http://www.ieee802.org/16/pubs/80216-2001.html>
- [5] <http://www.ieee802.org/16/pubs/80216a-2003.html>
- [6] <http://www.ieee802.org/16/pubs/80216-2004.html>
- [7] <http://www.ieee802.org/16/pubs/80216e.html>
- [8] IEEE P802.11 TASK GROUP S, ESS Mesh Networking:, http://grouper.ieee.org/groups/802/11/Reports/tgs_update.htm

第7章 マルチホップ無線ネットワークの設計 技法

7.1 研究の背景

激甚災害時は即席性のある災害対策ネットワークやライフライン確保が非常に重要であり、VoIP 技術と融合させたまさに簡易でタイムリーかつ安価な無線方式によるネットワーク構築の実現が望まれるところである。本研究では、現状の無線 LAN 方式では容量的に不十分であるが、製品の市場入手性、価格の低廉性から無線 LAN 方式を用いたマルチホップ無線ネットワークによる低廉で安定したネットワーク構築を目的にその設計手法を提案する。

7.2 ISP 事業者から見た設計ポイント

インターネット接続事業者 (ISP: Internet Service Provider) として需要が顕在化した地域を中心に事業立ち上げを行うためには、早急に需要を基にサービス提供エリアの決定とエリア内のネットワーク設備投資計画、サービス品質設計、料金設定を完了する必要がある (図 7.1)。また、サービス提供時点での顕在需要だけでなく設備の効率的な構築と有効利用を図るため設備種別に応じて 3~10 年程度先の需要予測を取り込む必要がある (図 7.2)。基地局は ISP 設備として有線インターネット接続回線や各ユー

ザノードと通信する基地局無線装置およびセキュリティ機器やネットワーク機器等の各種付帯装置が複数必要となるが、これらを設置する局舎は将来にわたり十分なスペースが確保できないと局舎改築・改修または移転等の費用が発生しトータル的にコストを押し上げるため10年程度の需要予測値を用いた選定を行う必要がある。しかし、当初から顕在需要数以上の無線装置や付帯装置を稼働させたのでは運用コストアップの要因となるが、ISP事業の競争に耐えるためには新規ユーザ申し込みに即応したサービス提供を行う必要があり、無線装置等機器は3年程度の需要を加味した設備量・配置とする必要がある。また、顕在需要ユーザだけでネットワークを構築し、その際に無線到達距離以上に離れたユーザを収容するために必要となる中継ノード等を配備した場合、潜在ユーザが顕在化した時のコストミニマムネットワーク構成との差が生じ、構築コスト+以降の運用コストに反映されることになる。また、サービス約款の内容にもよるが、通常有償でサービスを提供するのであれば品質の高いサービス提供をユーザから求められ、通信品質が高く安定したネットワークの構築が求められる。このため、基地局への独立経路が1経路のネットワークでは経路障害時のサービス中断が発生するため、迂回経路を取れるネットワーク構成が望ましい。ネットワークを流れるトラフィックに関しても、ユーザに提供するサービス品目の帯域保証項目として管理していかなければならない。インターネットアクセスサービスはベストエフォート型サービスが多いが、最近のネットワーク利用内容はストリーミング系のコンテンツ利用が多く、それに対応した帯域の確保がユーザ要望として見込まれる。家庭を対象とした無線インターネットアクセス方式のデータ通信速度は基地局に接続される有線インターネットアクセス速度に比較して低速であることから、ISPサービスとして1ユーザに提供できるデータ通信速度のボトルネックは無線方式の通信速度となり、最低通信速度は無線区間のデータ通信速度を無線方式に収容するユーザ数で割った速度となる。収容ユーザ数が多くなるとそれだけ最繁忙における1ユーザ当たりの利用可能通信速度

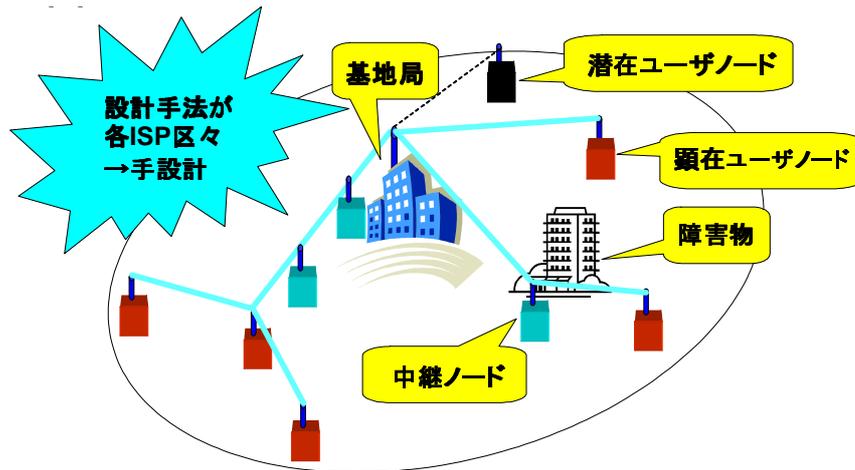


図- 7.1: ネットワーク設計手法の現状

が小さくなり、ユーザ収容効率とユーザ提供サービス品質のトレードオフでISPの事業戦略として決定される。しかし、1基地局収容ユーザ数に対し需要数が超過する場合は、同一エリアを複数CHで階層分割してサービスを提供することも可能である。

7.3 前提条件

本研究では事業者としての設計手法に関して、以下を条件として、1基地局内のネットワークトポロジー設計手法を提案する。

- (1) ISP サービス提供エリアは既決である。
- (2) 1基地局のユーザ収容数は既決である。
- (3) ユーザに提供する帯域は確保済みである。
- (4) 各ユーザ宅に設置するアンテナおよびルータ機能を持った無線ノードまでをISPで設置することとし、無線ノードをユーザ設備との責任分界点とする。

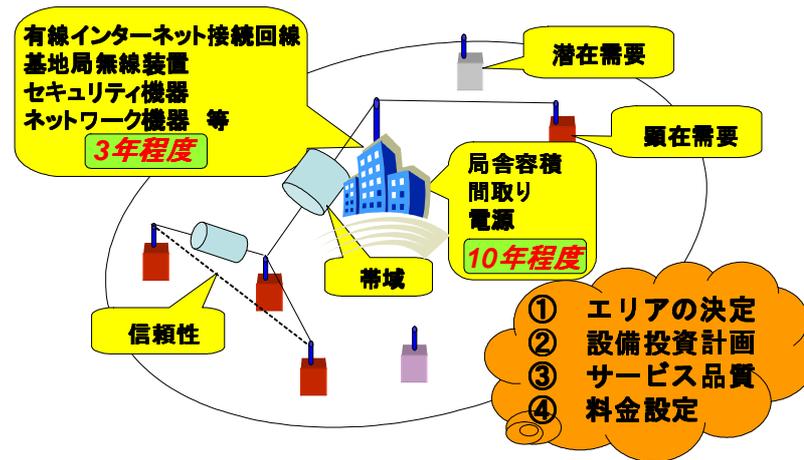


図- 7.2: ネットワーク設計時に考慮する事項

- (5) ユーザへは個々のアンテナ及びルータ設置工事費用を直接反映（請求）させず，プロバイダのサービス料金で回収する（ユーザ個々に費用の変動を発生させない）。
- (6) 無線ノードは基地局のほかユーザノードと中継専用ノードの2種類を設置する。
- (7) ユーザノードは中継機能も具備する。
- (8) 各ノードの送信電力は一定とし，ユーザノードに設置するアンテナ高と中継ノードのアンテナ高は同じとする。また，基地局のアンテナ高はユーザノードより高いとした。
- (9) 基地局はサービスエリアに1個設置するものとし，エリアの中心位置に設置する。基地局の有線インターネットインタフェースは十分な帯域を見込む。
- (10) 無線デバイスはアドホックモードをサポートした機器とし，無線速度は既知のものである。

7.4 マルチホップネットワーク設計手法

ユーザノードおよび基地局ノード間で無線到達距離以上のノード間距離がある場合やノード間の見通しを阻害する建造物が経路上に存在する場合に中継ノードを設置して各ノード間を接続する設計手法を考案し、シミュレーションを行い検討した。本方式は以下の2つのトポロジー設計アルゴリズムからなる(図7.3-7.6)。

7.4.1 中継設計アルゴリズム

本アルゴリズムは基地局への到達性を保証するためのトポロジー設計を行うものであり、以下のステップからなる。

- (1) エリア内に配置された基地局と全ユーザノードを対象として各ノードのアンテナ高に応じた無線到達距離の範囲内にあるノードの隣接ノードを抽出する。
- (2) 隣接ノード間のリンクにより接続されるノード群でグループを構成する。本グループはアドホックモードで相互に通信が行えるグループとなる。
- (3) 基地局を含むグループを $grp(0)$ とし、ユーザグループが $grp(n)$ ($n > 0$) 個あったとき、 $grp(1)$ から $grp(n)$ まで全グループについて以下の処理を繰り返す。
- (4) $grp(0)$ と $grp(i)$ で最短距離にあるノード組を抽出する。
- (5) このとき、抽出したノード間の経路上に障害物が存在するため見通しが無く通信ができない場合は(7)へ移行する。
- (6) 選択された $grp(0)$ と $grp(i)$ のノード間距離を無線方式の到達距離 $r(m)$ 以内で均等に分割し、そこを中継ノードの設置ポイントとする。

- (7) grp (0) ~ grp (i) 間で途中で存在する障害物により直接経路が構成できない場合，障害物の角に直近の位置で障害物を挟んで最短距離にある grp (0) および grp (i) のノードの両方から見通しがある位置を中継ポイントに設定する．
- (8) 障害物の角の直近の位置に設置された中継点と grp (i) のノード群中で最短距離となる grp (i) のノードを抽出し，その距離を無線方式の到達距離 $r (m)$ 以内で均等に分割し，そこに中継ノードを設置する．
- (9) 障害物の角の直近の位置に設置された中継ノードと grp (0) のノード群中で最短距離となる grp (0) のノードを抽出し，そのノード間距離を無線方式の到達距離 $r (m)$ 以内で均等に分割し，中継ノードを設置し，次のグループへ移行する．

7.4.2 信頼性設計アルゴリズム

本アルゴリズムは基地局への独立な 2 経路を保証するためのトポロジー設計を行うものであり，以下のステップからなる．

- (1) 構築されたユーザノード，中継ノードについて基地局ノードからの最短ホップ数をカウントし，基地局から近い順に基地局を 0 としてレベル数を各ノードに付加する．
- (2) 最高レベルを持ち基地局に最大距離にあるノードを抽出し，このノードから基地局まで最短ホップ経路をたどり，経路途中のノードに A ラベルを付加する．
- (3) 経路途中ノードが既に経路ラベル A を付加されている場合は，それ以降 A 経路で基地局までの経路が保証されるため，経路探索を中止し (5) へ進む．
- (4) 途中経路ノードが既に全て経路ラベル B を付加されている場合は，A 経路で基地局までの経路を確保するため，B 経路以外のラベルで当該ノードから見て基地局

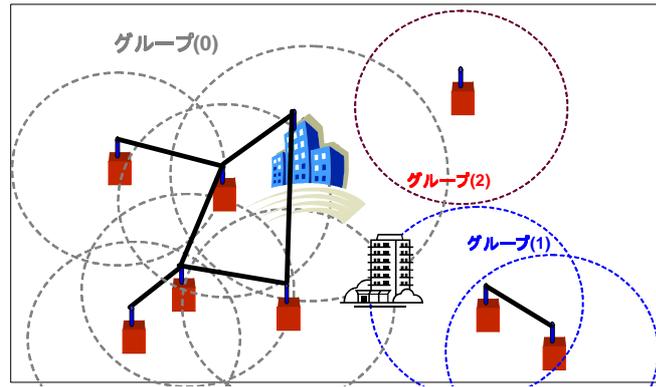


図- 7.3: グループ構成

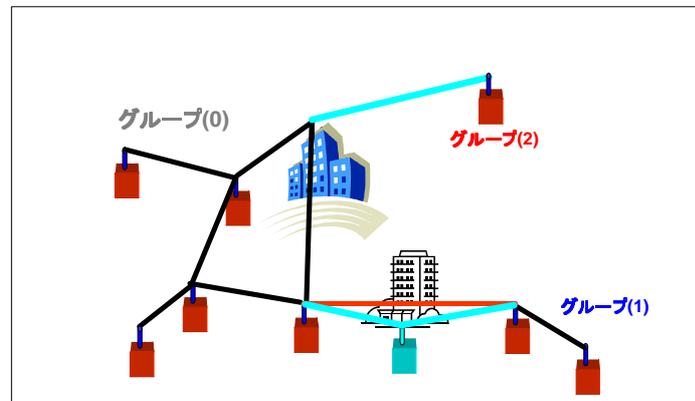


図- 7.4: グループ間の接続と中継設計 (1)

側にあつて最短距離のノードを抽出し、そのノードまでの距離を無線到達距離の範囲内で均等に分割し中継ノードを設置する。

- (5) 基地局への2経路目を確保するため、同一ノードについてA経路と同様の処理でB経路探索を行う。

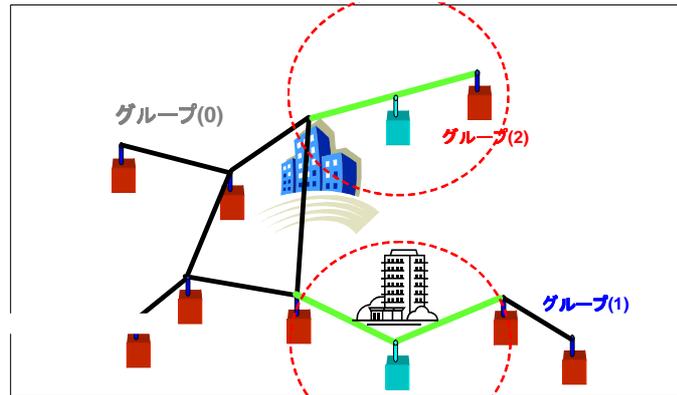


図- 7.5: グループ間の接続と中継設計 (2)

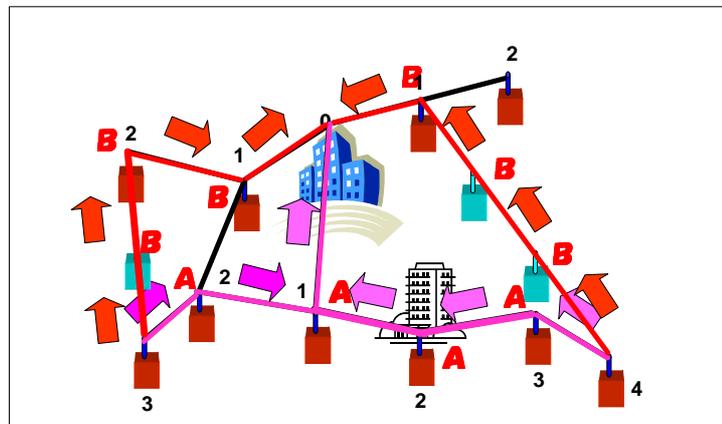


図- 7.6: 信頼性設計

7.5 シミュレーション評価

7.5.1 シミュレーション条件

シミュレーション条件は以下のとおりである。

- (1) 基地局の提供する1サービスエリアの範囲を2,000m × 2,000mと見込み，この範囲でユーザ宅はランダムに配置されるとした．基地局はエリアの中心に位置する．
- (2) ユーザノード数は100および150ユーザに設定した．これに基地局を加えたノー

ド数が初期ノード数となる。

- (3) ユーザ宅は2階建て木造家屋とし、屋根の地上高は6mとした。この上にアンテナを設置するため、ユーザノード及び中継ノードのアンテナ高は6mで統一した。また、基地局の地上高はユーザノードおよび中継ノードからの見通し区間を確保しやすいように10mに設定した。
- (4) アンテナは全ノードに高利得無指向性アンテナ設置とした（アンテナ利得 $G_t = G_r$ とした。）
- (5) 無線通信距離は見通し距離 200m ~ 500m で変化させシミュレーションを行った。無線方式が変わり送信電力やアンテナ利得が変わるかアンテナ地上高が変わる事により受信電力が変化することから一定の packets 配信率を確保できる無線到達距離は第3章より以下の式 7.1 で求められる。

$$r = k\sqrt{h_1 h_2} \quad (7.1)$$

(r : 無線到達距離 h_1, h_2 : アンテナ地上高 k : 無線方式により定まる定数)

- (6) エリア内にはユーザノードおよび中継ノード間の見通しを阻害する地上高が十分高く広い面積を持つ建造物が5個配置された場合のシミュレーションを行った（図 7.7）。電波発信源から障害物を見た方向で障害物の幅に沿って放射状に広がる障害物から背後のエリアは見通しが無く電波が到達しないとした。
- (7) シミュレーション回数は10回とし、シミュレーション結果は平均値を用いて評価した。

7.5.2 シミュレーション評価

図 7.8 にノード数 100 (ユーザノード数:99, 基地局:1), 無線到達距離 200m, 障害物 5 個の場合における中継設計ネットワークを示す。本シミュレーションでの中継設計前のネットワークは 21 グループに分断されていたが, 中継設計アルゴリズムにより中継ノードを 43 個配置することで基地局との接続を保証した。更に信頼性設計アルゴリズムで中継ノード 21 個を追加することにより基地局までの独立経路数 2 を確保しており, 最終ノード数は 164 個で本ネットワークは構成されている (図 7.9)。サービス提供エリア内に ISP サービスを受けられないユーザノードが出現した場合, ISP としては分断したグループをサービスに加入させるため基地局を分断グループの近傍に増設するか中継ノードを増設してネットワークを構築する必要がある。基地局ノードの収容可能ユーザ数が十分にありまだ基地局の性能を使いきっていない場合, 有線回線や付帯設備等のコストを小グループのために配置するのはコストが見合わない。よって中継ノードを増設することになり, この配置状態で提案設計技法が有効に作用していることが確認できた。図 7.12 に初期に分断されたネットワークの平均グループ数を示す。無線到達距離が大きくなると, 直接ユーザノードにたどり着く確率が高くなるため独立したグループ数は減少するが, 無線方式を長距離タイプの方式に変更したりアンテナ設置高を高くしてコストをかけても障害物による見通し障害を完全にクリアできない。そこで, 見通し障害対策として中継ノードが必要になる。図 7.13 は無線到達距離と平均中継ノード数の関係をグラフに示した。図 7.12 同様無線到達距離が長くなれば中継ノード数は減少するが, コストとのバランスを見る必要がある。図 7.14 は最大ホップ数の平均値推移を示す。信頼性設計により増設される中継ノードによる経路数増加が最大ホップ数に影響を与えていないことがわかる。図 7.15 は各設計ステップでの最小平均ホップ数の推移を示す。信頼性設計により増設される中継ノードによる経路数増加はむしろ平均ホップ数減少に寄与する傾向にある。図 7.16 には平均総ノード

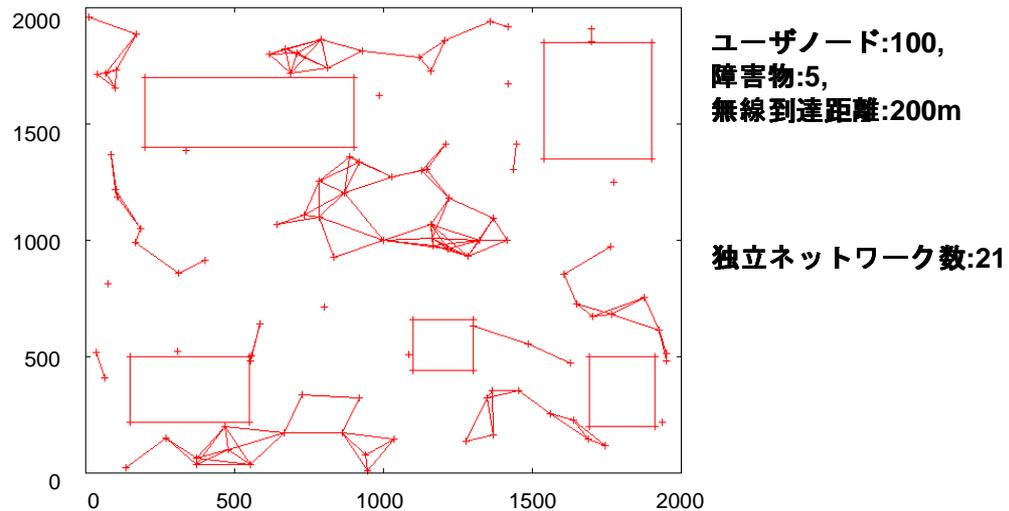


図- 7.7: 隣接ノードによるグループ構成

ド数を示した．無線到達距離が長いほど直接ユーザノード間で通信が可能となる確率が高いため必要となる中継ノード数が減少し，無線到達距離 400m ではユーザノード数によらず総ノード数に変化がない (図 7.10，図 7.11)．一方，無線到達距離が短い場合ユーザノード数が少ないと無線到達距離範囲内で他ユーザノードと直接通信ができない確率が高いため必要となる中継ノード数の増加が大きい．信頼性設計アルゴリズムのステップではユーザノード数が 100 と 150 でほぼ同様の増加率で中継ノード数が増えている．

7.6 まとめ

新しいネットワークの設計法を提案し，ネットワーク構築の際に，ノード間距離と途中障害物を考慮した中継ノード設置を導入し，経路障害時迂回経路を確保できるネットワーク構築が可能であることを示した．ネットワークの構築コストはネットワークを構成するノード数と無線到達距離で最適化を図ることができる．無線到達距離は

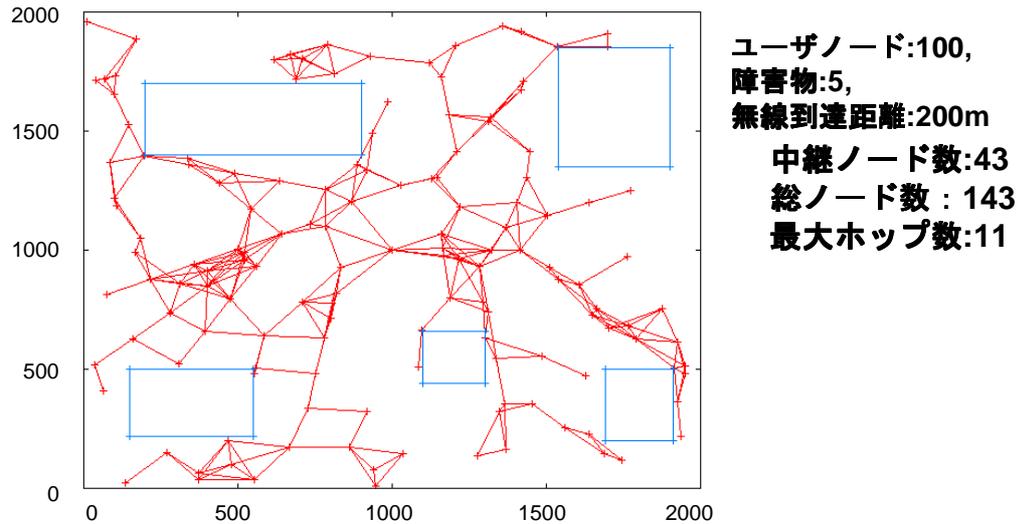


図- 7.8: 中継設計後のネットワーク

IEEE802.11b/g 等無線方式とアンテナの地上高で変化するため、各ノードの機器コストとアンテナ建設コストを勘案する必要がある。ユーザノード密度がある程度以上あれば障害物があっても、マルチホップによる無線到達範囲内にノードが存在する確率が高くなり中継ノードを必要としない傾向にある。しかし、どうしても電波経路直線上で見通しの効かないユーザノードが存在する場合は中継ノードを増設する必要性があり、本設計法ではこれに対応した。また、中継ノードの増設はネットワーク構築コストを押し上げるが、中継ノードの増設を抑えるために無線到達距離を増加させる場合でも対応無線方式機器の見直し、アンテナ地上高の上昇とネットワーク構築コスト上昇の要因となる。また、基地局までの経路を適正なホップ数に制限するために中継ノードが必要となる場合もありえる。そこで、中継ノードの設置コストと無線到達距離の延長化コストの各コスト関数を重ねたミニマム点がネットワーク構築の最適点となることがわかる。本設計手法はこれまでの人手を使った設計手法を自動化することで省力化、効率化、正確性の実現を図りつつコストの最適化の実現を図ることを目的としているが、最終的な中継ノード設置箇所などの設計内容の確定判断は人間の

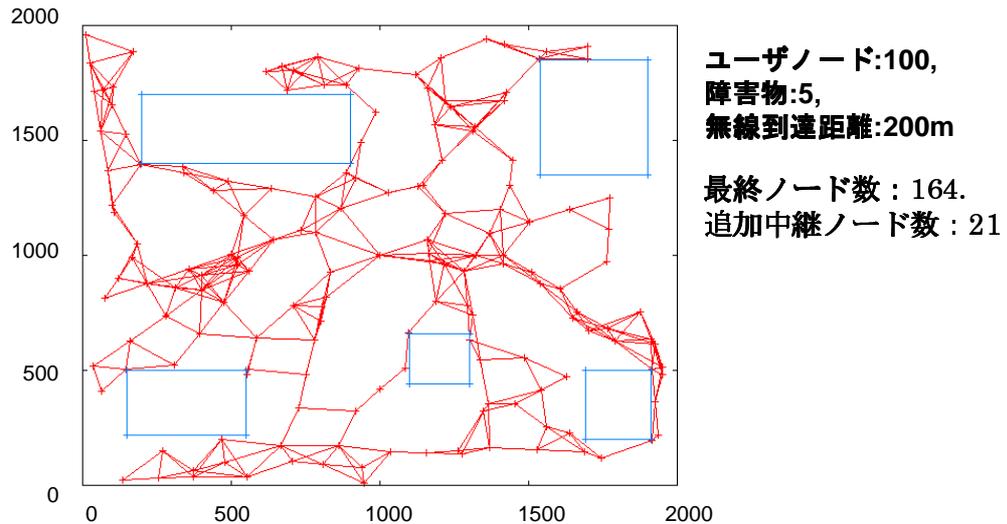


図- 7.9: 信頼設計後のネットワーク

手で行われることを前提にしている．戦略的な投資効果を確認するための設計は機械的な判断だけでは難しいと考える．本モデルは住宅エリアの比較的ノード密度が低いモデルであるため，高密度の都市部の住宅地に適用した場合の検討が必要である．この場合，高密度の収容ユーザ数に対応するため，マルチチャネルによるサービス提供方式も検討する必要がある．この時，同一サービスエリア内を階層化してCH分けする方式も考えられる．また，中継トラヒックと自ノード配下のトラヒックの最適流量制御手法を確立する必要があり，これを元に契約ユーザに対するサービスアグリーメントとして契約約款（サービス提供技術条件）を制定する必要がある．

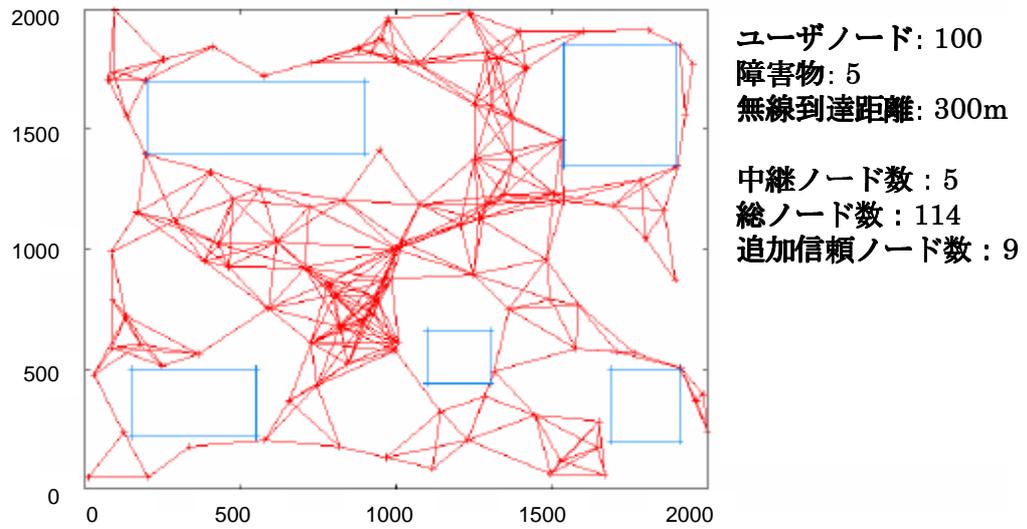


図- 7.10: 無線距離を 300m にした場合の信頼設計後のネットワーク

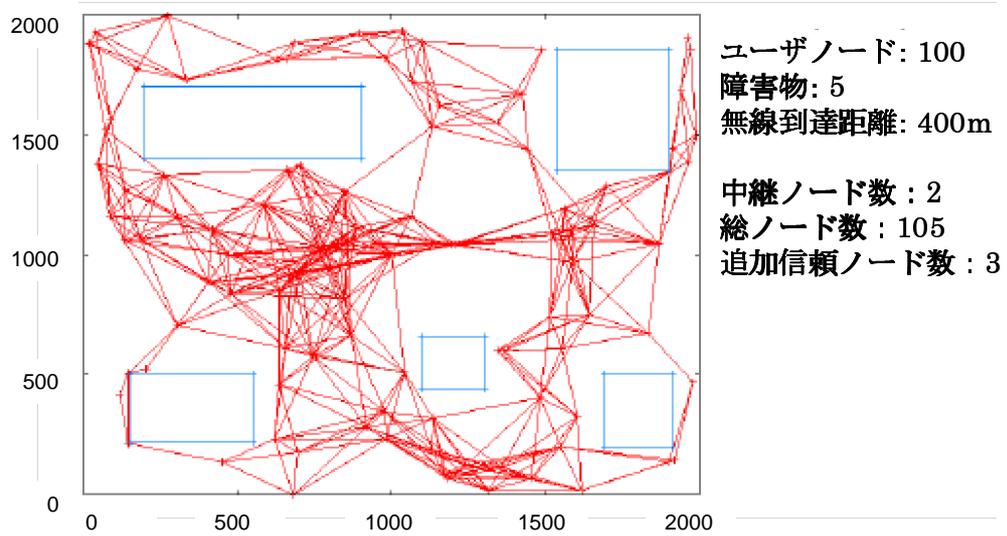


図- 7.11: 無線距離を 400m にした場合の信頼設計後のネットワーク

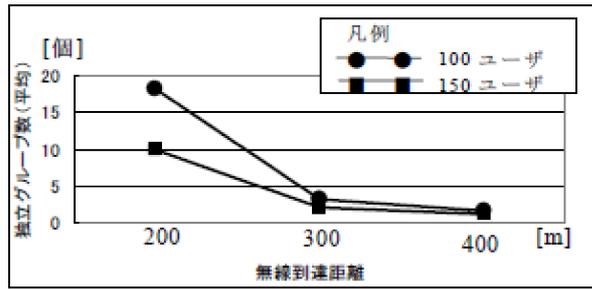


図- 7.12: 無線距離と平均独立グループ数推移

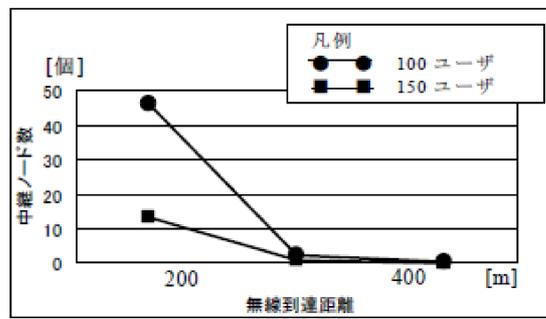


図- 7.13: 無線到達距離と平均中継ノード数推移

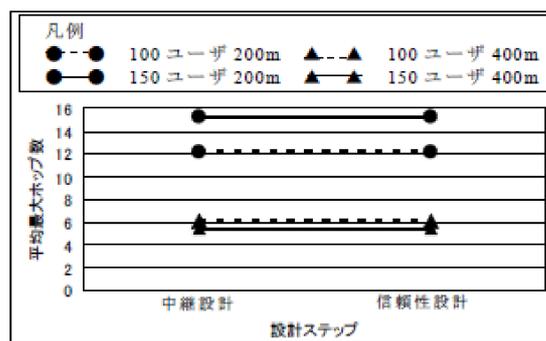


図- 7.14: 設計ステップと最大ホップ数推移

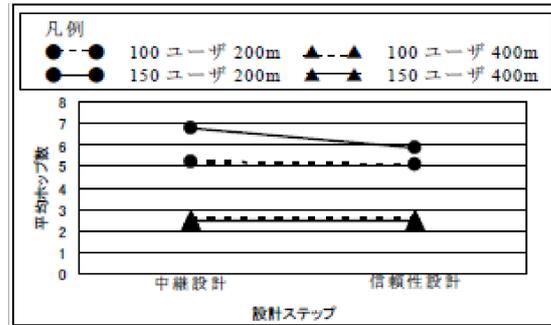


図- 7.15: 設計ステップと最小平均ホップ数推移

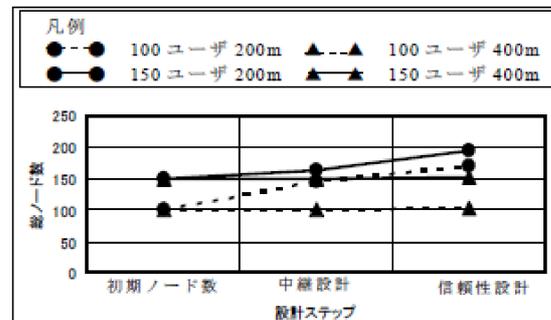


図- 7.16: 設計ステップと総ノード数推移

第8章 結論

モバイルアドホックネットワーク (MANET) は本質的にはワイアレストランシーバを持つ端末 (ノード) だけから構成され, 基地局と固定ネットワークなどの通信インフラストラクチャーを必要としない. ノードは携帯端末として移動する形態もあるが, 固定的に設置される利用形態もある. アドホックネットワークはユビキタスネットワークを実現するために不可欠で重要な技術として認識されてきている. 本研究では, 無線アドホックネットワークについて室内実験やシミュレーションでは本質的な問題を見逃す恐れがあり, 実ネットワーク環境下で実験をベースに検討を進める必要があることから, 世界にも類を見ない大規模な無線アドホックネットワークテストベッドの構築について設計指針の検討を行った. また, 指針に従って構築されたテストベッドで通信実験を行い, 指針の有効性を検証するとともにアドホックネットワークの性能改善の検討を行った.

第1章では現状の無線 LAN システムが抱える問題点を明確にし, これら問題点の解消のための改善目標を定め, 研究の目的を示した.

第2章ではアドホックネットワークの特徴を述べ, ブロードバンドアクセスの技術動向を示した.

第3章ではアドホックネットワークの通信実験を行い, AODV, OLSR とスタティックルーティングのルーティングプロトコルを使用したパケット伝送実験について記述した. パケット配信率と受信電力を測定し, 高パケット配信率を達成するために必要な電力

を求めた。

第4章では大規模アドホックネットワーク構築の課題と指針を示し、本指針に基づき新潟大学に大規模アドホックネットワークテストベッドを構築したことについて記述した。実験を自動で行えるようシナリオ自動実行方式とし、大規模テストベッドでも少人数で一連の実験を継続して行え、データを解析できるよう各種サポートツールを開発した。本テストベッド上にルーティングプロトコルOLSRを実装し各種の通信実験を行い、ネットワークの稼働を確認するとともに実環境で高性能なアドホックネットワークを構築する際の通信特性、課題を示し、指針の有効性について述べた。

第5章では無線メッシュネットワークにアドホックルーティングプロトコルを適用し、高スループットを達成する方法を検討した。具体的にはリンク性能/品質の測定に基づき不要なリンクを削除するリンクフィルタリングを提案し、テストベッド上で実証実験を行い、高いスループットが得られることを示した。

第6章ではインターネットアクセス利用の目的で各ノードと基地局の相互間でパケットを送信するためアドホックネットワークルーティングプロトコルを使用し、各ノードが互いに違うチャンネルに設定された複数の無線トランシーバを実装した多層メッシュネットワークについて検討した。このネットワークの中でいくつかのパケット転送方法を検討し、コンピュータシミュレーションにより性能を評価した。各層は独立にルーティングプロトコルをサポートするが、各ノード各層の負荷状態によってデータパケットが違う層に転送される場合もある。本多層化アプローチにより、高性能なアドホックマルチホップ無線アクセスネットワークを構築できる見込みを示した。

第7章では基地局およびユーザ・ノードの位置が与えられるアクセス・ネットワーク用マルチホップ無線通信ネットワークのトポロジーを設計する手法を示した。トポロジーの設計方法は、到達保証設計アルゴリズムと信頼度設計アルゴリズムの2つのアルゴリズムから構成される。前者は、各ユーザ・ノードから基地局への到達度を保証す

るため、与えられた無線到達範囲内でどこに中継ノードを置くべきかを定める。後者は、各ユーザ・ノードから基地局へ独立の2経路を保証するためにどこに追加の中継ノードを置くべきかを定める。シミュレーションにより中継ノード数および基地局への最小ホップ数について提案したアルゴリズムの実行を評価した。基地局への見通しを阻害する障害物があっても、エリア・サイズに依存した合理的な中継ノード数、ユーザノード数および無線到達距離を設計することにより、到達度と信頼性を確立することができることを確認した。

今後の課題として、

- (1) 街路設置ノードへの自己発電供給方式の高度化として、ソーラーと組み合わせた風力発電方式等の適用
- (2) リンクフィルタリング自動運用等、ネットワーク運用監視・制御ツールの開発と既存ツールの機能高度化
- (3) テストベッドに用いたノードのマルチランシーバ機能対応等ハードウェア拡張
- (4) 本テストベッドで得られた実験データの反映によるシミュレーションソフトの精度向上
- (5) 都市型エリアや過疎地エリア等のエリア特性に対応させたテストベッドの環境特性設定

などが挙げられる。

本研究で構築したテストベッドは新潟大学における今後の研究のための有用なツールとなったが、本研究で示したテストベッド構築の指針は1機関のテストベッド構築に留まらず広く一般的な大規模アドホックネットワークの構築にも有用であると考えられる。

謝辞

本論文をまとめるにあたり，終始懇意なる御指導と御配慮を賜りました指導教官である新潟大学大学院自然科学研究科 間瀬憲一教授に深甚なる感謝の意を表します．先生の様々なアドバイスや叱咤激励により，社会人学生としてここまで博士論文をまとめあげる大事業を成し遂げることができたと思います．重ねて御礼申し上げます．

また，本研究を進める中で貴重なご助言をいただいた新潟大学仙石正和教授，牧野秀夫教授，山口芳雄教授，菊池久和教授，山田寛喜助教授，中野敬介助教授の各位に厚く御礼を申し上げます．

さらにミーティング等を通して様々なアドバイスを賜った岡田啓助教授，柄沢直之助手ならびに間瀬・柄沢研究室の皆様には感謝致します．

社会人学生のため，ほとんど学校に姿をあらわさず研究活動以外にも様々なご迷惑をおかけしたことをお詫びするとともに，本研究をまとめることができたのは皆様の有益な助言によるものであると感謝しております．

この成果を一つの通過点として，さらなる目標に向けて頑張りたいと思います．

最後に，本研究を遂行するにあたり，総務省戦略的情報通信研究開発推進制度(SCOPE-C)を使用致しました．心より感謝致します．

業績一覧（論文誌）

- [1] 高橋義彦，大和田泰伯，須田利章，間瀬憲一，”大規模アドホックネットワークテストベッドの開発”，電子情報通信学会論文誌 B，Vol.J89-B，No.6，pp.836-848．
2006年6月．
- [2] 高橋義彦，兼子陽市郎，間瀬憲一，”無線メッシュネットワークにおける高スループット経路選択に関する実験的検証”，電子情報通信学会論文誌 B，Vol.J90-B，No.3，
pp.311-314，Mar. 2007．

外部発表（国内発表）

- [1] 高橋義彦，大和田泰伯，滝史好，阿達透，間瀬憲一，”アドホックネットワークの通信実験 環境要因の影響評価”，”2003年電子情報通信学会，技術研究報告，情報ネットワーク研究会，IN2003 - 130，vol.103No.421，pp.101-106，2003年11月.
- [2] 高橋義彦，滝史好，大和田泰伯，間瀬憲一，”マルチホップ無線ネットワークの設計技法”，”2004年電子情報通信学会，情報ネットワーク研究会，技術研究報告，IN2004 - 114，vol.104No.438，pp.37-42，2004年11月.
- [3] 大和田泰伯，高橋義彦，須田利章，八木啓之，瀧史好，照井宏康，土田健太，間瀬憲一，”アドホックネットワークの大規模テストベッド構築”，”2005年電子情報通信学会 総合大会，2005年3月.
- [4] 高橋義彦，後藤真人，吉田聡太，滝史好，間瀬憲一，”多層メッシュネットワークにおけるルーティング方式に関する検討”，”2005年電子情報通信学会 コミュニケーションクオリティ，無線通信システム研究会，CQ2005-4，技術研究報告，Vol.105，No.16，pp.19-22，2005年4月.
- [5] 高橋義彦，兼子陽市郎，間瀬憲一，”無線メッシュネットワークにおける高スループット経路選択に関する実験的検証”，”2005年電子情報通信学会，情報ネットワーク，

無線通信システム研究会，IN2006-5，技術研究報告，Vol.106，No.42，pp.25-30，
2006年5月.

- [6] 大和田泰伯，高橋義彦，間瀬憲一，”新潟大学テストベッドと実測例，”2006年電子情報通信学会ソサエティ大会，BP-4-3，pp.SS8-SS9，2006年9月．

外部発表（国際会議）

- [1] Y. Owada , T. Suda , Y. Takahashi , H. Terui , F. Taki , T. Yagi , K. Mase , "A Large Scale Wireless Mobile Ad Hoc Network Testbed , " IEEE Vehicular Technology Conference 2005 fall (VTC2005fall) , 1I-6 , pp.324-328 , Sep. 2005.
- [2] H. Okada , Y. Owada , Y. Takahashi , K. Mase , "A Large-Scale Testbed for Wireless Mobile Ad Hoc Networks , " The First ACM International Workshop on Wireless Network Testbeds , Experimental evaluation and CHaracterization , pp.91-92 , Sep. 2006.