

## 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

高橋 義彦<sup>†</sup> 大和田泰伯<sup>†</sup> 須田 利章<sup>††</sup> 間瀬 憲一<sup>†</sup>

## A Large Scale Wireless Ad Hoc Network Testbed

Yoshihiko TAKAHASHI<sup>†</sup>, Yasunori OWADA<sup>†</sup>, Toshiaki SUDA<sup>††</sup>, and Kenichi MASE<sup>†</sup>

あらまし 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。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。本テストベッド上でOLSRをルーチングプロトコルとして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。

キーワード アドホックネットワーク、テストベッド、無線LAN、ルーチングプロトコル、OLSR

## 1. ま え が き

モバイルアドホックネットワーク (MANET) は本質的にはワイヤレストランシーバをもつ端末 (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よい、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に依存して作り込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 [1]~[8]。

アドホックネットワークのためのルーチ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 [9] が進めており、いくつかのルーチ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

<sup>†</sup> 新潟大学大学院自然科学研究科, 新潟市

Graduate School of Science and Technology, Niigata University, 8050 2nocho, Ikarashi, Niigata-shi, 950-2181 Japan

<sup>††</sup> 日本テレコム株式会社, 東京都

Nihon Telecom Co. Ltd., 9-1 Higashishinbashi 1-chome, Minato-ku, Tokyo, 105-7316 Japan

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ほとんどはノード数が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おそれがある。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百mとし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、本論文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。

2. においてテストベッドの課題と指針を述べる。3. において本テストベッドの概要を述べ、4. 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。5. でいくつかの実験結果と考察を示し、6. において指針の有効性を検証する。7. に結論を述べる。

## 2. 大規模アドホックネットワーク構築の課題と指針

### 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、減衰特性などをもとに、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)。

### 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、埋込形OSタイプ小型コンピュータの選択が望ましい(指針3)。

### 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プレイ構成が望ましい(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ほか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 $-10^{\circ}\text{C}$ 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 $50^{\circ}\text{C}$ 程度までの周囲温度条件や湿度条件に適應できる装置が望ましい(指針5)。

### 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)。

### 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てい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挙げられる。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 [18]、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)。

### 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)。

### 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)。

### 2.8 実験稼動

ノードの持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、人はほとん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、ノードの初期設定及び変更設定、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、極力無人化及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)。

## 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]

### 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 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。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 [14] を新潟大学構内に当てはめた場合、地上高 2 m 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 20 m 以上確保できることから電波到達距離も 1 km 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 900 m 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おおむね 1000 (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

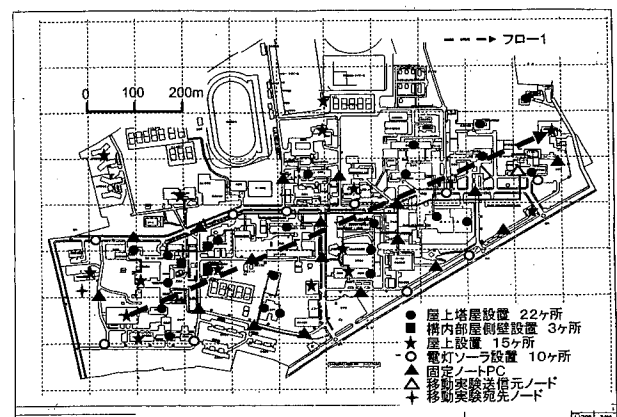


図 1 大規模テストベッドのノード配置  
Fig. 1 Node placement for the test bed.

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しゅん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。

### 3.2 ノード装置

指針3~6に基づき、ノードとして組込み型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、64MByteのCFメモリと512MByte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。64MByteのCFメモリはツールやルーティング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。512MByte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換え可能であり、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。

### 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

表1 ノード装置諸元

Table 1 Node equipment specification.

CPU	Rnesus tec. SH7727 144MHz	
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
PCcard インタ フェース	16bit PC Card (based on PCMCIA2.1)	
	サポート デバイス	Wireless LAN card (PCMCIA based on 802.11)
CFcard インタ フェース	Compact Flash type I, type II (1 slot)	
	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) X 71(H) X 80(D)	
重量	約 350g	
環境条件	温度	-10~60°C
	湿度	5~90%RH

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換え、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もつ製品を適用した。

### 3.4 ルーティングプロトコル

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)をはじめいくつかのルーティングプロトコルを実装し、5.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した結果から、経路損、経路切替以外の原因によるパケット損(無線リンクでのパ

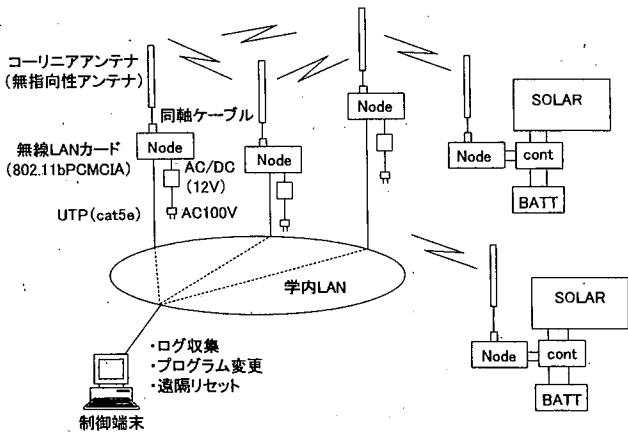


図 2 テストベッドシステムの全体構成

Fig. 2 The overall test bed system configuration.

ケット転送失敗など)の割合は固定ルーチングと同程度であることも確認できた。

### 3.5 有線 LAN との接続

図 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) を経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もつノードから無線 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。

## 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様々なツールシステムを開発した(図 3) [16]。ルーチングソフトウェア、無線 LAN ドライバー及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。

### 4.1 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フィックパターン(フロー数、各フローの送信元及びあて先、送信パケット数、UDP ペイロードサイズ、パケット

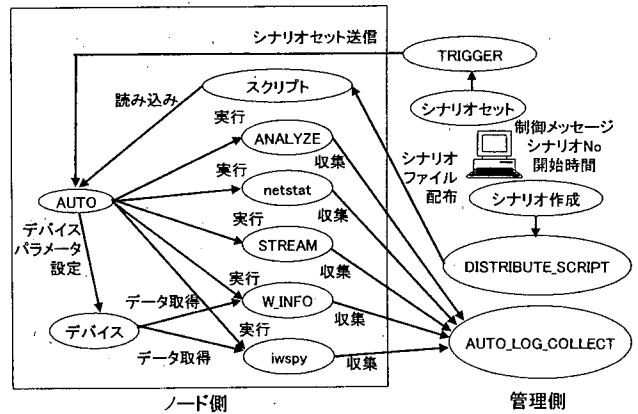


図 3 実験サポートツール

Fig. 3 Experiment support tools.

送信間隔、その他)、ルーチングソフトウェア、及び無線 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齐に切り換える。これを「シナリオ同期」と呼ぶ。シナリオ同期をとるため(3)で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。時刻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 30 MByte 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。

#### 4.2 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。

#### 4.3 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、本ツールはすべてを新規開発した。

#### 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、あて先 IP アドレス、あて先ポート番号、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。本ツールはあて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 [13] 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。

#### 4.5 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が可能である (図 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

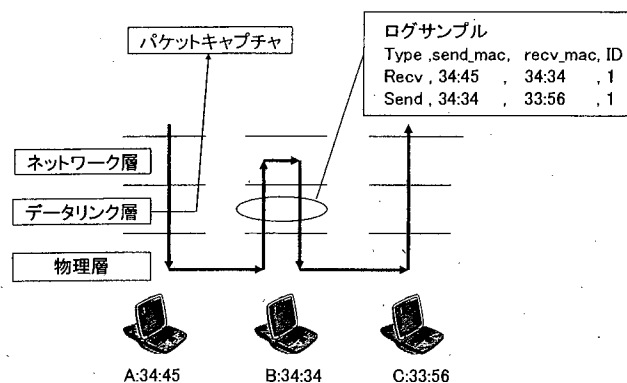


図 4 ANALYZE 動作概念

Fig. 4 Operation concept of ANALYZE.

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。したがって、実験後にログデータを集計すること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。

#### 4.6 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様々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。

#### 4.7 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できるように工夫した。ログ収集手順を以下に示す。これらの処理をすべ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 でセンタサーバへファイルを転送

(6) telnet をログアウト

#### 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

#### 4.9 ネットワークトポロジ表示ツール (GULANALYZE)

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 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が、端末の配置位置は考慮されておらず、またホップ数も分からない。本ツールは収集したログから

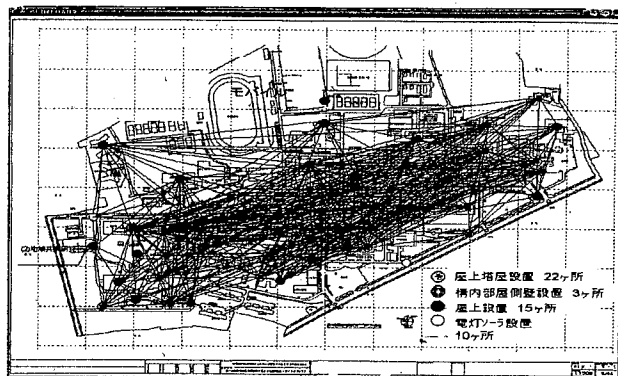


図 5 GULANALYZE 動作例  
Fig. 5 Operation example of GULANALYZE.

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分かるようになっている。

## 5. 実験例

### 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 6 に示す。このスナップショットは無線 LAN カードを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 Beacon 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 がいったん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

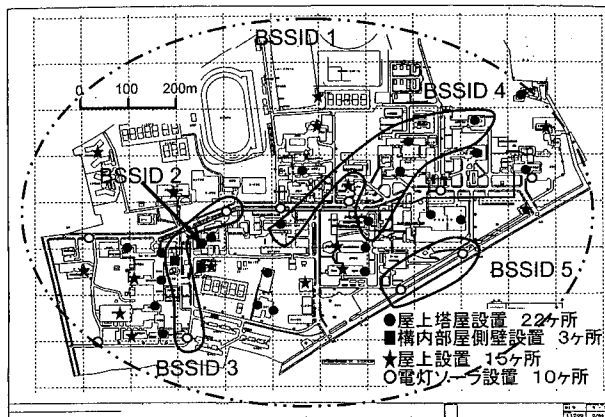


図 6 BSSID 不一致問題

Fig. 6 BSSID un-matching problem.

認められなかった。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必要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” [20] にセットした。IEEE802.11 では MAC フレームタイプ [19] 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 Beacon, 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。

### 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 (1000, 1, 0.25) を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一つである受信電力取得機能をも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 [10] 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 7 はすべ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

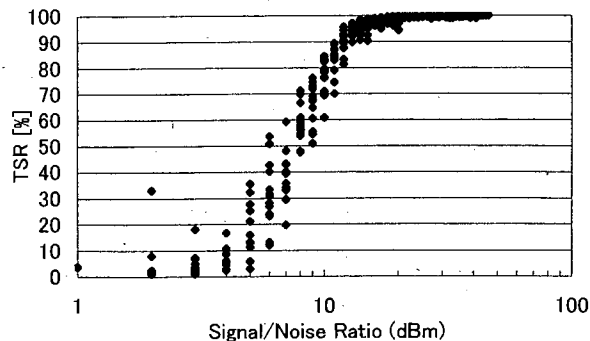


図 7 SNR と TSR の相関

Fig. 7 Correlation of SNR and transmission success ratio.

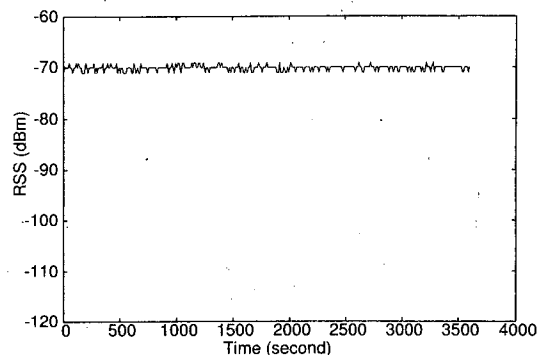


図 8 短時間 RSS 変動

Fig. 8 Short-term RSS variation.

依存することが見られ、SNR が 20 dBm 以上ではほぼ 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チ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 20 dBm 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し、ICMP エコー応答パケットの RSS と NL の情報を 10 秒ごとに記録した。一例を図 8, 図 9 に示す。大多数のノード間では図 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  $\pm 2$  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しゅんに  $-15 \sim -20$  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換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 20~30 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



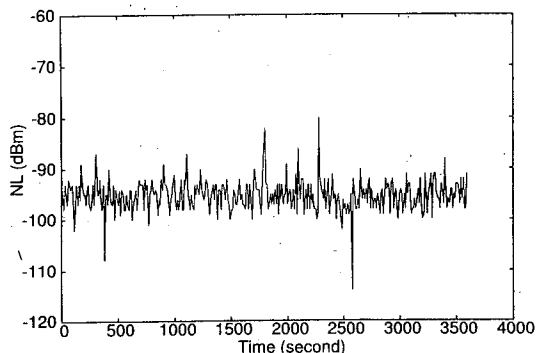


図9 短時間NL変動  
Fig.9 Short-term noise level variation.

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分かった。ルーチングプロトコルでは、このようなSNR変動による経路切換を抑制する仕組みが必要である。

### 5.3 ルーチングプロトコル動作実験

#### 5.3.1 実験条件

テストベッドを使い、ルーチングプロトコル OLSR [11] を動作させ、STREAMによるフロー(1000, 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 [12] 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1のように送信元とあて先として選び、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、平均値を結果とした。ここで、PDRはフローのあて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は送信元ノードからあて先ノードまでの間でフロー転送中に経路が切り変わった回数を示す。以降の図ではフロー1に関する結果を示す。

#### 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, 及びHYST\_SCAL-

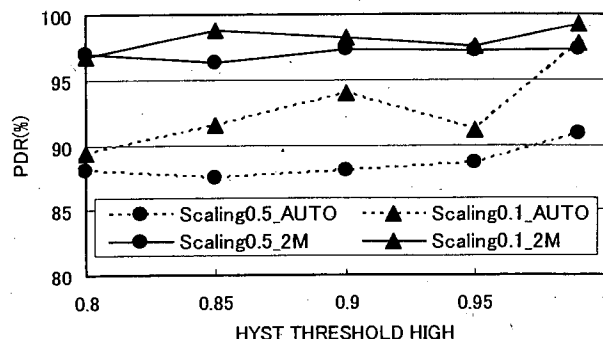


図10 パケット配信率 (RTS/CTS 制御なし)  
Fig.10 Packet delivery ratio without RTS/CTS.

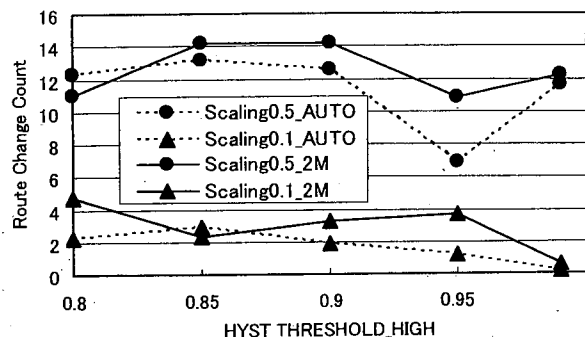


図11 経路変化数 (RTS/CTS 制御なし)  
Fig.11 Rout change count without RTS/CTS.

INGの三つのパラメータからなるリンクヒステリシス[11]と名づけられた機能をもっている。OLSRは、隣接ノードの各リンクについてこれらの三つのパラメータからリンク品質をHELLO\_INTERVALごとに計算する。1フロー実験により、HYST\_THRESHOLD\_HIGHとHYST\_SCALING(以降「H.threshold」と「scaling」)の二つのパラメータを変更し、どのようにルーチ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2Mbit/s固定レートにセットした。結果を図10, 図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換わり、パケットが配送される。図10, 図11よりH.thresholdの減少に伴いPDRがわずかず劣化し、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

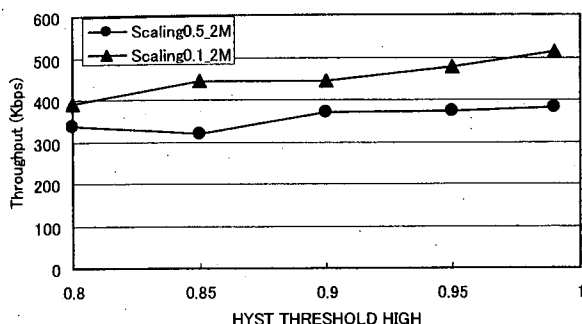


図 12 スループット (RTS/CTS 制御なし)  
Fig.12 Throughput without RTS/CTS.

信できるリンクを選定対象とし、 $H_{\text{threshold}}$  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 2 Mbit/s 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 1472 バイトの UDP パケットをあて先ノードへ送る。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 12 に示す。Scaling が小さく  $H_{\text{threshold}}$  が大きいほどスループットが向上するが、これは図 10 の PDR の場合と同様である。一方オートレートの方が 2 Mbit/s 固定レートよりスループットを高くできる。これは 2~11 Mbit/s で可変のオートレートでは当然といえるが、ルーチ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  $H_{\text{threshold}}$ , 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。

### 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、2 Mbit/s 固定レート時の PDR, RCC, スループットはほとんど図 10, 図 11, 図 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 が極めて低く、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 11 Mbit/s 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。

### 5.3.4 複数チャネルの使用

通常、MANET は単一のチャ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。もし複数チャネルが利用可能ならば、1 チャネル当りの負荷が減少し、より高い性能が得られることは予想できる。そこで、単一チャネルの MANET 性能を複数チャネルの 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ない異なるチャネルを割り当てた。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もっており、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、二つまたは三つのグループが全体で一つの MANET になり、グループが異なる 2 ノードは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。三つのケースをこれらの実験で比較した。ケース 1 はチャネル 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 はそれぞれチャネル 1, 7, 及び 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 2 Mbit/s 固定とし、RTS/CTS はなしに設定した。フロー 1 の送信元ノードとあて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あて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 13 に示す。フローが二

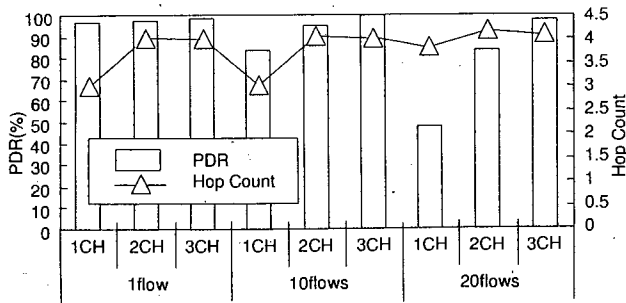


図 13 パケット配信率とホップ数

Fig. 13 Packet delivery ratio versus the number of hops.

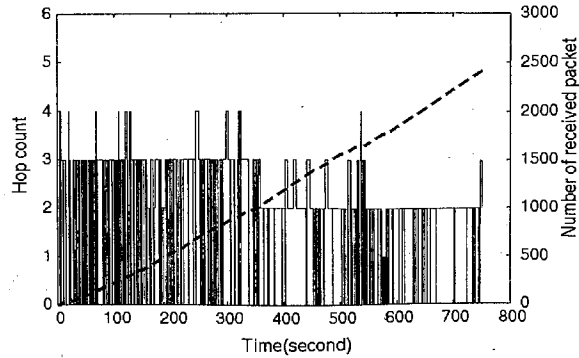


図 14 移動シナリオにおけるパケット受信数とホップ数  
Fig. 14 Number of received packets and number of hops under a mobile scenario.

つのグループヘッド経由で伝送されるので、複数チャネルのホップ数は単一チャネルのホップ数より高いことが分かる。背景フロー数の増大に伴い単一チャネルの PDR が大きく減少していくが、複数チャネルの PDR は減少の幅が小さく、3 チャネルのケース 3 ではほとんど PDR が劣化していないことが分かる。これらの実験を通して、複数チャネル 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、複数チャネル使用によりチャ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。

### 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。二つのラップトップ PC を送信元/あて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 (3000, 512, 0.25) をあて先ノードへ送信し、その間にキャンパスの一方から反対側まであて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 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もつ 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 1 に示す位置、地上高 52cm の台の上に設置し同様の実験を行った。70 ノードでの結果を図 15 に示す。

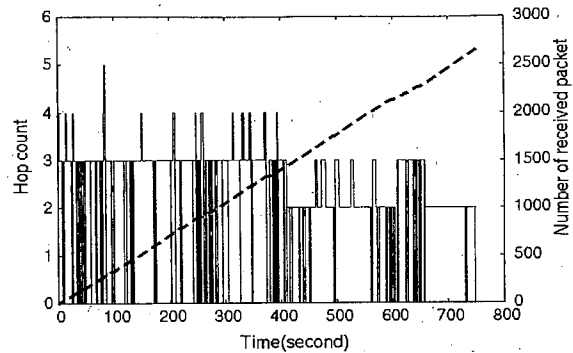


図 15 移動シナリオにおけるパケット受信数とホップ数 (ノード増設後)  
Fig. 15 Number of received packets and number of hops under a mobile scenario with augmented nodes.

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ときには、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。

## 6. 大規模アドホックネットワーク構築指針の有効性

2. に示した 12 項目の指針に基づき、3., 4. 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、5. に述べた種々の実験が可能になった。数十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、極めて多くの稼動と時間を要する [24]。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。5. 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 [21]~[23]。2. 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。したがって、テストベッド構築だけでなく、コミュニティ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。

## 7. むすび

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込形 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。複数チャネル使用によるチャ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。

謝辞 本論文の作成にあたり実験データの採取及び分析に御協力を頂いた新潟大学大学院自然科学研究科の八木啓之君、瀧史好君、照井宏康君、土田健太君に感謝の意を表す。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の共同実験 (2005 年 3 月) のデータを一部使用させて頂いた。関係各位に感謝の意を表す。本テストベッドの構築は総務省戦略的情報通信研究開発推進制度 (SCOPE) の国際技術獲得型研究開発プログラム「次世代アドホックネットワーク基盤技術に関する研究開発」に基づき行った。

## 文 献

- [1] D.A. Maltz, J. Broch, and D.B. Johnson, "Quantitative lessons from a full-scale multi-hop wireless ad hoc network testbed," Proc. IEEE Wireless Communications and Network Conference 2000, pp.23-28, Sept. 2000.
- [2] B.A. Chambers, The Grid Roofnet: a Rooftop Ad Hoc Wireless Network, Master's Thesis, June 2002; <http://www.pdos.lcs.mit.edu/grid/>
- [3] N. Tsarmpopoulos, I. Kalavros, and S. Lalis, "A low-cost and simple-to-deploy peer-to-peer wireless 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, Feb. 2005.
- [4] 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, vol.28, no.3, pp.21-29, Dec. 2000.
- [5] Y.-Z. Lee, J. Chen, X. Hong, K. Xu, T. Breyer, and M. Gerla, "Experimental evaluation of LANMAR, a scalable ad-hoc routing protocol," IEEE Veh. Technol. Conf. 2005 Spring, pp.2032-2037, March 2005.
- [6] R. Draves, J. Padhye, and B. Zill, "Comparison of routing metrics for static multi-hop wireless

networks," SIGCOMM '04, pp.133-144, Aug.-Sept. 2004.

[7] H. Lundgren, D. Lundberg, J. Nielsen, E. Nordstrom, and C. Tschudin, "A large-scale testbed for reproducible ad hoc protocol evaluations," Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference, pp.412-418, Orlando, USA, March 2002.

[8] C. Tschudin, H. Lundgren, and E. Nordstrom, "Embedding MANETs in the real world," Proc. Personal Wireless Communications 2003, pp.578-589, Venice, Italy, Sept. 2003.

[9] <http://www.ietf.org/html.charters/manet-charter.html>

[10] [http://www.hpl.hp.com/personal/Jean\\_Tourrilhes/Linux/Tools.html](http://www.hpl.hp.com/personal/Jean_Tourrilhes/Linux/Tools.html)

[11] T. Clausen and P. Jacquet, "Optimized link state routing protocol," IETF RFC 3626, Oct. 2003.

[12] UniK-OLSR <http://www.olsr.org/index.cgi?action=download>

[13] Netperf Homepage <http://www.netperf.org/netperf/NetperfPage.html>

[14] 高橋義彦, 大和田泰伯, 瀧 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," 信学技報, IN2003-130, MoNuC2003-77, MVE2003-101, Nov. 2003.

[15] Y. Owada, T. Suda, Y. Takahashi, H. Terui, F. Taki, T. Yagi, and K. Mase, "A large scale wireless mobile ad hoc network testbed," IEEE Veh. Technol. Conf. (VTC) 2005 Fall, 1-I-6, Sept. 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," 2004 信学ソ大 (通信), BS-7-4, pp.72-73, 2004.

[17] D. Raychaudhuri, M. Ott, and I. Secker, "ORBIT radio grid testbed for evaluation of next-generation wireless network protocols," Tridentcom 2005 Demo Session, pp.308-309, Trento, Italy, Feb. 2005.

[18] T.S. Rappaport, Wireless Communications: Principles and Practice, pp.70-138, IEEE Press, 2002.

[19] IEEE802.11, Handbook a Designer's Companion Standards Information Network, p.56, IEEE Press.

[20] <http://www.proxim.com/support/techbulletins/TB-040.pdf>

[21] 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, B-5, May 2005.

[22] 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, pp.63-65, Oct. 2005.

[23] 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, pp.57-62, Oct. 2005.

[24] 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.niigata-u.ac.jp/ise/iicerc/mase.pdf>  
(平成 17 年 10 月 5 日受付, 18 年 1 月 12 日再受付)



高橋 義彦 (正員)

昭 55 武蔵工大・工・電子通信卒, 同年日本電信電話公社入社. 平 15 新潟大大学院入学. 平 17 (株)NTT 東日本—新潟・法人営業部・SE 部門・セールスエンジニア担当に所属. 現在 SI 業務に従事.



大和田泰伯 (学生員)

平 14 新潟大・工・福祉人間工卒. 平 16 同大大学院修士課程了. 同年, 同大学院・自然科学研究科入学. 現在, 在学中. 平 14 年度第 65 回本学会学術奨励賞受賞. 平 15 VTC2003-spring Student Encourage Award 受賞. 平 17 VTC2005-fall Student Paper Award 受賞.



須田 利章

平 15 新潟大・工・情報卒. 平 17 同大大学院修士課程了. 同年, 日本テレコム (株) 入社. 現在, サービスプラットフォーム事業本部マネージドサービス事業部に所属. 現在データセンターにおけるネットワーク開発に従事.



間瀬 憲一 (正員:フェロー)

昭 45 早大・理工・電気通信卒. 昭 47 同大大学院修士課程了. 同年電電公社武蔵野電気通信研究所入所. 以来, 通信網構成法, ダイナミックルーティング, ネットワーク設計法, 通信品質, コンピュータネットワーク, マルチホップ無線ネットワーク等の研究に従事. 昭 53-54 米国コロンビア大客員研究員. 平 11-15 新潟大学工学部情報工学科教授. 平 16 より新潟大学大学院自然科学研究科教授, 国際情報通信教育研究センター長. 工博. 平 5 年度本学会論文賞受賞. 平 9 年度第 13 回電気通信普及財団テレコムシステム技術賞受賞. 著書「マルチメディアネットワークとコミュニケーション品質」, 「無線 LAN とユビキタスネットワーク」など.