

# 博 士 論 文

## MANET テストベッドの実装と評価： 屋内外環境下における OLSR プロトコルの性能評価

知能情報システム工学専攻

肥山 昌弘

2014 年 2 月 10 日

福岡工業大学大学院 工学研究科

# 目次

第 1 章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.2	関連研究	2
1.3	研究目的	3
1.4	特色と独創点	3
1.5	論文の構成	4
第 2 章	無線ネットワーク	5
2.1	無線通信規格	5
2.1.1	IEEE 802.11	5
2.1.2	IEEE 802.11a	6
2.1.3	IEEE 802.11b	7
2.1.4	IEEE 802.11g	7
2.1.5	IEEE 802.11n	7
2.1.6	IEEE 802.11ac/IEEE 802.11ad (WiGig)	7
2.1.7	IEEE 802.11af	8
2.1.8	Bluetooth (IEEE 802.15.1)	9
2.1.9	ZigBee (IEEE 802.15.4)	9
2.1.10	IrDA	10
2.2	通信サービス	10
2.2.1	WiMAX(IEEE 802.16a/REVd)	10
2.2.2	LTE	10
2.3	ネットワークトポロジ	11
2.3.1	バス型トポロジ	11
2.3.2	リング型トポロジ	11

2.3.3	ツリー型トポロジ . . . . .	12
2.3.4	スター型トポロジ . . . . .	13
2.3.5	メッシュ型トポロジ . . . . .	13
第 3 章	MANET . . . . .	15
3.1	Ad-hoc . . . . .	15
3.2	MANET . . . . .	15
3.3	応用技術 . . . . .	17
3.3.1	VANET . . . . .	17
3.3.2	センサネットワーク . . . . .	18
第 4 章	MANET 経路制御プロトコル . . . . .	20
4.1	位置情報利用型 . . . . .	20
4.2	トポロジ情報利用型 . . . . .	21
4.3	Proactive 型 . . . . .	22
4.4	Reactive 型 . . . . .	22
4.5	AODV . . . . .	23
4.6	B.A.T.M.A.N. . . . .	25
4.7	OLSR . . . . .	26
4.7.1	Hello メッセージ . . . . .	27
4.7.2	TC メッセージ . . . . .	29
4.7.3	MID メッセージ . . . . .	29
4.7.4	HNA メッセージ . . . . .	30
4.7.5	フラッドイング . . . . .	30
4.7.6	MPR 集合 . . . . .	31
4.7.7	MPR 集合の選択 . . . . .	32
4.8	OLSRd . . . . .	34
4.8.1	ETX アルゴリズム . . . . .	34
4.8.2	ETX_ff . . . . .	34
4.8.3	ETX_ffeth . . . . .	35
4.8.4	ETX_float . . . . .	35
4.8.5	ETX_fpm . . . . .	35
4.8.6	Fisheye . . . . .	36

<b>第 5 章</b>	<b>実験モデル</b>	<b>37</b>
5.1	MANET テストベッド . . . . .	37
5.2	各実験テーマの概要と詳細 . . . . .	38
5.3	屋内階段における周波数の利用率を考慮した実験モデル（実験 1） . . . . .	47
5.4	屋外階段を考慮した実験モデル（実験 2） . . . . .	47
5.5	水平方向と垂直方向のトポロジを考慮した実験モデル（実験 3） . . . . .	48
5.6	屋内と屋外階段を考慮した実験モデル（実験 4） . . . . .	48
5.7	屋内と屋外を考慮した実験モデル（実験 5） . . . . .	49
5.8	Hello パケットの通信間隔を考慮した実験モデル（実験 6） . . . . .	49
5.9	Hello パケットの有効時間を考慮した実験モデル（実験 7） . . . . .	49
5.10	ETX アルゴリズムを考慮した実験モデル（実験 8） . . . . .	50
<b>第 6 章</b>	<b>実験結果</b>	<b>51</b>
6.1	屋内階段における周波数利用率を考慮した実験モデル（実験 1） . . . . .	51
6.2	屋外階段を考慮した実験モデル（実験 2） . . . . .	56
6.3	屋内における水平方向と垂直方向のトポロジ考慮した実験モデル（実験 3） . . . . .	60
6.4	屋内通路と屋外階段を考慮した実験モデル（実験 4） . . . . .	64
6.5	屋内外の通路を考慮した実験モデル（実験 5） . . . . .	68
6.6	Hello パケットの通信間隔を考慮した実験モデル（実験 6） . . . . .	72
6.7	Hello パケットの有効時間を考慮した実験モデル（実験 7） . . . . .	78
6.8	ETX アルゴリズムを考慮した実験モデル（実験 8） . . . . .	84
<b>第 7 章</b>	<b>結論と今後の課題</b>	<b>90</b>
7.1	今後の課題 . . . . .	91
<b>謝辞</b>		<b>93</b>
<b>参考文献</b>		<b>94</b>
<b>業績リスト</b>		<b>97</b>



# 目次

1.1	本稿の構成 . . . . .	4
2.1	バス型トポロジ . . . . .	11
2.2	リング型トポロジ . . . . .	12
2.3	ツリー型トポロジ . . . . .	12
2.4	スター型トポロジ . . . . .	13
2.5	メッシュ型トポロジ . . . . .	14
3.1	無線ネットワークの端末問題 . . . . .	16
3.2	VANET のイメージ図 . . . . .	18
3.3	センサネットワーク . . . . .	19
4.1	代表的な MANET 経路制御プロトコルの分類 . . . . .	21
4.2	RREQ メッセージヘッダ . . . . .	25
4.3	RREP メッセージヘッダ . . . . .	25
4.4	RERR メッセージヘッダ . . . . .	26
4.5	OLSR のパケットフォーマット . . . . .	28
4.6	HELLO メッセージのパケットフォーマット . . . . .	29
4.7	TC メッセージのパケットフォーマット . . . . .	30
4.8	MID メッセージのパケットフォーマット . . . . .	30
4.9	HNA メッセージのパケットフォーマット . . . . .	30
4.10	フラッディング . . . . .	31
4.11	MPR 集合選択アルゴリズム . . . . .	33
5.1	MANET テストベッド . . . . .	38
5.2	各実験モデルのリスト . . . . .	40
5.3	実験 1 の端末の配置 . . . . .	41

5.4	実験 2 の端末の配置 . . . . .	42
5.5	実験 3 の端末の配置 . . . . .	43
5.6	実験 4 の端末の配置 . . . . .	44
5.7	実験 5, 6, 7, 8 の端末の配置 . . . . .	45
6.1	D 棟各階のチャンネルの使用状況 . . . . .	52
6.2	実験 1 の実験結果 (スループット) . . . . .	53
6.3	実験 1 の実験結果 (パケット棄却数) . . . . .	54
6.4	実験 1 の実験結果 (ジッター) . . . . .	55
6.5	実験 2 の実験結果 (スループット) . . . . .	57
6.6	実験 2 の実験結果 (パケット棄却数) . . . . .	58
6.7	実験 2 の実験結果 (ジッター) . . . . .	59
6.8	実験 3 の実験結果 (スループット) . . . . .	61
6.9	実験 3 の実験結果 (パケット棄却数) . . . . .	62
6.10	実験 3 の実験結果 (ジッター) . . . . .	63
6.11	実験 4 の実験結果 (スループット) . . . . .	65
6.12	実験 4 の実験結果 (パケット棄却数) . . . . .	66
6.13	実験 4 の実験結果 (ジッター) . . . . .	67
6.14	実験 5 の実験結果 (スループット) . . . . .	69
6.15	実験 5 の実験結果 (パケット棄却数) . . . . .	70
6.16	実験 5 の実験結果 (ジッター) . . . . .	71
6.17	実験 6 の STA モデルの実験結果 (スループット) . . . . .	73
6.18	実験 6 の MOV モデルの実験結果 (スループット) . . . . .	73
6.19	実験 6 の STA モデルの実験結果 (パケット棄却数) . . . . .	74
6.20	実験 6 の MOV モデルの実験結果 (パケット棄却数) . . . . .	75
6.21	実験 6 の STA モデルの実験結果 (ジッター) . . . . .	76
6.22	実験 6 の MOV モデルの実験結果 (ジッター) . . . . .	76
6.23	実験 7 の STA モデルの実験結果 (スループット) . . . . .	79
6.24	実験 7 の MOV モデルの実験結果 (スループット) . . . . .	79
6.25	実験 7 の STA モデルの実験結果 (パケット棄却数) . . . . .	80
6.26	実験 7 の MOV モデルの実験結果 (パケット棄却数) . . . . .	81
6.27	実験 7 の STA モデルの実験結果 (ジッター) . . . . .	82
6.28	実験 7 の MOV モデルの実験結果 (ジッター) . . . . .	82

6.29	実験 8 の STA モデルの実験結果（スループット） . . . . .	85
6.30	実験 8 の MOV モデルの実験結果（スループット） . . . . .	86
6.31	実験 8 の STA モデルの実験結果（パケット棄却数） . . . . .	87
6.32	実験 8 の MOV モデルの実験結果（パケット棄却数） . . . . .	87
6.33	実験 8 の STA モデルの実験結果（ジッター） . . . . .	88
6.34	実験 8 の MOV モデルの実験結果（ジッター） . . . . .	88

# 表目次

2.1	無線通信規格 . . . . .	6
2.2	Bluetooth の各クラスの電波到達距離 . . . . .	9
2.3	赤外線通信の各規格毎の通信距離と通信速度の関係 . . . . .	10
4.1	OLSR の各メッセージのデフォルト値 . . . . .	27
4.2	Willingness . . . . .	32
5.1	実験の共通パラメータ . . . . .	46
5.2	各実験の端末数と実験時間 . . . . .	46
6.1	実験 1 の平均スループット . . . . .	53
6.2	実験 1 の平均パケット棄却数 . . . . .	54
6.3	実験 1 の平均ジッター . . . . .	55
6.4	実験 2 の平均スループット . . . . .	57
6.5	実験 2 の平均パケット棄却数 . . . . .	58
6.6	実験 2 の平均ジッター . . . . .	59
6.7	実験 3 の平均スループット . . . . .	61
6.8	実験 3 の平均パケット棄却数 . . . . .	62
6.9	実験 3 の平均ジッター . . . . .	63
6.10	実験 4 の平均スループット . . . . .	65
6.11	実験 4 の平均パケット棄却数 . . . . .	66
6.12	実験 4 の平均ジッター . . . . .	67
6.13	実験 5 の平均スループット . . . . .	69
6.14	実験 5 の平均パケット棄却数 . . . . .	70
6.15	実験 5 の平均ジッター . . . . .	71
6.16	実験 6 の平均スループット . . . . .	74

---

6.17	実験 6 の平均パケット棄却数 . . . . .	75
6.18	実験 6 の平均ジッター . . . . .	77
6.19	実験 7 の平均スループット . . . . .	80
6.20	実験 7 の平均パケット棄却数 . . . . .	81
6.21	実験 7 の平均ジッター . . . . .	83
6.22	実験 8 の平均スループット . . . . .	85
6.23	実験 8 の平均パケット棄却数 . . . . .	86
6.24	実験 8 の平均ジッター . . . . .	89

# 第 1 章

## 序論

通信機器や通信技術の発達により，ユビキタス社会の実現に近いと言われている．近年，スマートフォンやタブレット端末などの低価格かつ高機能な端末が急速に普及している．また，これらの移動無線端末から無線 LAN や Wireless Fidelity (Wi-Fi) [1] などを利用してネットワークを利用する事はもはや一般的となっている．特に無線ネットワークに関しては，商店街や喫茶店，ファーストフード店などでも利用できるサービスも普及している．これらのユビキタスネットワークの重要な技術の一つとして，Mobile Ad-hoc Network (MANET) と呼ばれる技術が注目されており，活発に研究が行われている．MANET は，軍事目的で開発された技術であり，山中やルーラル地域などの通信インフラが整備されていない場所でも無線 LAN を搭載した端末のみでネットワークを構築し，通信を可能にする技術である．現在，MANET は，災害地での緊急的なネットワークの構築 [2] やイベント会場等の一時的なネットワーク構築の補助，さらには登山客のグループ内で情報の共有などへの応用が考えられている．また，他にもセンサネットワーク，VANET (Vehicular Ad hoc Network)[3] などそれぞれの環境に特化した技術へ応用されている．しかし，現段階では隠れ端末問題や，経路制御プロトコルの規定などの課題が多く残っている．そこで，我々は MANET 環境を実際に構築し，実環境に近い実験を異種環境下でのプロトコルの性能評価を行った．

### 1.1 研究背景

ユビキタスネットワークを世界的に見ると，One Laptop per Child (OLPC) の OLPC XO-1[4] やインテル社が発売するクラスメイト PC[5] などが開発途上国の子供向けの端末も登場しており，携帯端末の普及に貢献している．特に OLPC Z0-1 には無線メッシュネットワークが採用されているため，小学校や村などでの簡易的なネットワークの構築を通じた援助を手助けしている．ま

た、ウェアラブル端末と呼ばれる眼鏡や腕時計、ヘッドマウントディスプレイ (HDD) など様々な種類の身に着けられるコンピュータの研究・開発も進められている。

MANET はバケツリレーのように送信端末から中継端末へ、中継端末から目的の端末へと送り届けるマルチホップ機能をサポートしているが、現在は実験段階である。特にマルチホップ機能の中でも、経路制御プロトコルに関する研究が盛んに行われている。また、マルチホップ通信の主な問題点として、端末を経由する事による処理速度による影響、複数の通信フローを同時実行する場合の不公平性や衝突によるパケット棄却などが発生する事によるスループットの低下や他の端末と送受信を行うためセキュリティ面での問題が挙げられる。

## 1.2 関連研究

本稿のテストベッド同様に、これまでに様々なテストベッドが実装されている [6]。以前では、ネットワークシミュレータによる研究が多かったが、実際にテストベッドを構築した実験 [7] も進められている。文献 [8, 9] では、大規模アドホックネットワークテストベッド上で実験的にエンド・エンド間の通信で高スループットを実現する手法について検討し、一定のパケット配信率閾値を指標として設定することで高いスループットが得られたと報告されている。また、文献 [10] では The Network Simulator 2 (ns-2) と呼ばれる無料のネットワークシミュレータにより、通信が不安定になるグレーゾーンの影響や IEEE802.11 の特徴を報告している。

有線ネットワークで利用されている TCP プロトコルを MANET 環境下での応用や改良に向けた文献 [11] やマルチホップで利用する MAC プロトコルの限界を調査する事で無駄なオーバーヘッドを減らし、理論上の最適化を目指した研究 [12] やシミュレーションで考慮されないなかった異なる伝送レートとデータフレームの関係と異なる伝送範囲とキャリアセンスの範囲についての研究 [13] も行われている。さらに、文献 [14] では、MANET テストベッドを実装し、屋外環境における MANET 経路制御プロトコルの性能評価をしているが、Reactive 型の AODV [15] と DSR [16] の評価のみを行っている。アドホックネットワークの性能を評価する文献 [17] など研究は多岐にわたって行われている。

新潟大学では 2004 年 10 月に発生した新潟県中越地震でネットワークが断絶した山越村での一時的なネットワークを構築するための実験 [18] を行った。これは、中越地震によって通信インフラが断絶した新潟県長岡市旧山越村地方で、外部との連絡手段もなく、復旧作業にあたるレスキュー隊員やボランティアを繋ぐために用いられた。さらに、文献 [18] では気球に通信機器を吊るし、地上 50 から 100m の間で係留させてネットワークを構築した。空中では障害物が少ないた

め、通信距離を延ばす事が可能になる。この構想は、携帯基地局や中継局などを気球に搭載する先駆けとなる提案となった。最近では、2011年3月11日に起きた東北地方太平洋沖地震で通信インフラが破壊された宮城県東松島氏宮戸で断絶されたネットワークを無線マルチホップを用いたインターネット回線を再構築し、避難所通信サービスを提供した。

### 1.3 研究目的

従来の性能評価は主にシミュレーションを中心として研究が行われていた。本稿では経路制御プロトコルとして、Proactive型のOptimized Link State Routing (OLSR)[19]に注目し、MANETテストベッドに経路制御プロトコルを実装し、実環境下での性能評価を目的とした。

評価指標は、スループット、パケット棄却数、ジッターの3種類で行う。また、パケットサイズやパケットレートは低品質な動画の送受信を想定している。最近では動画圧縮規格であるH.264などを用いた高品質な動画が増加しているが、MANET環境下での使用はほとんど利用されないと想定し、除外した。これは、高品質な動画を送受信するために周辺の端末が大量のパケットを送信した場合、周辺のネットワークの帯域が占有され、ネットワークがダウンまたはスループットの大幅な低下が懸念されるためである。特に2.4GHz帯域は免許が不要なため、無線LANやBluetooth[20]などで多く利用されているため、他から影響を受けずに利用できる帯域は限られている。

### 1.4 特色と独創点

従来のMANETの研究では、無線伝搬モデルの影響について考慮しなかった。本研究では、多種のトポロジ、伝搬モデルを考慮し、新たなトレードオフ手法を提案し、MANETテストベッドを実装した。また、MACプロトコルと経路制御プロトコルの相互作用を考慮している点や使用周波数チャンネルの使用率を測定し、実環境における他の機器からの影響を軽減させた実験を行っている点などが、他の研究とは本質的に異なっている。これらの研究結果はMANETプロトコルの改良に向けたデータの蓄積や同じマルチホップ技術を利用する他の技術にも役に立つものであり、本研究の成果により、MANETプロトコルの標準化に貢献できる。



## 1.5 論文の構成

本稿の構成図を図 1.1 に示す。第 1 章では序論を述べ、第 2 章では無線ネットワーク、第 3 章では MANET、第 4 章では MANET 経路制御プロトコルについて述べる。また、第 5 章では各実験モデルの説明、第 6 章では各実験モデルの実験結果、最後に第 7 章では結論として各実験結果のまとめと今後の課題について述べる。

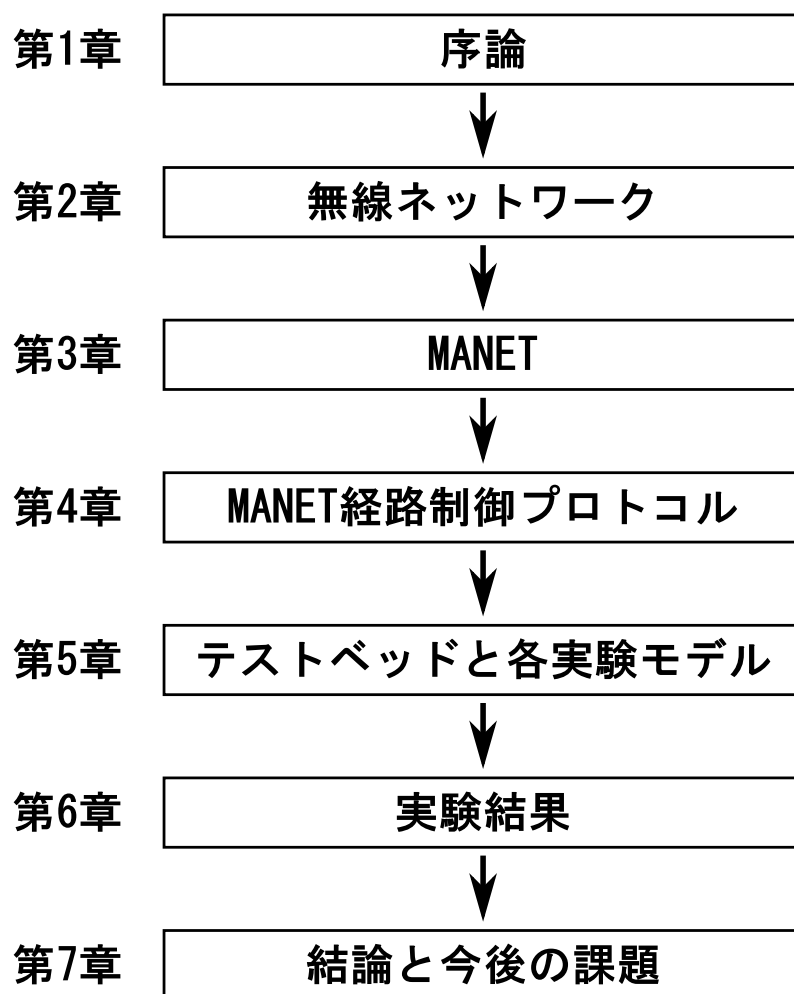


図 1.1 本稿の構成

## 第 2 章

# 無線ネットワーク

近年，ギガビット Wi-Fi と呼ばれる IEEE802.11ac を搭載した製品の登場や，Long Term Evolution (LTE) などのサービスが開始し，より高速大容量の無線通信が可能になった．さらに高速な通信を実現するため，現在使用している周波数とは異なる帯域の利用も検討し，技術の研究・開発が進められている．本章では，無線通信規格や通信サービスやネットワークトポロジの種類について説明する．

### 2.1 無線通信規格

現在，表 2.1 に示すように多くの無線通信規格が存在する．一般的に広く普及している無線 LAN は，The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. (IEEE) が策定した IEEE 802.11 が有名である．この IEEE 802.11a, b, g, n, ac などの無線通信規格を総称して Wi-Fi と呼ぶ．周波数帯域は，主に工業や科学，医療用として無免許で使用できる無線周波数帯域で 2.4GHz 帯の Industry-Science-Medica (ISM) バンドを使用するため，混線が多くチャンネル設定で重複に注意する必要がある．特に，無線 LAN の電波や電子レンジ，医療機器，Bluetooth 対応機器が電波干渉しやすく，通信速度の低下の原因になる．規格毎に周波数帯域や通信距離が異なるため，想定する実験モデルにより適切な選択が求められる．

#### 2.1.1 IEEE 802.11

IEEE 802.11 は，規格を統一された無線 LAN 規格である．免許不要で電波を利用できる ISM 帯の 2.4GHz 帯域を用いて，無線ネットワークを構築する事ができる．物理レイヤと MAC レイヤで構成され，1 つの MAC レイヤで複数の物理レイヤをサポートする．物理レイヤは，3 種類の方式を採用しており，スペクトル拡散方式 (DSSS・FHSS)，赤外線方式に対応している．

表 2.1 無線通信規格

規格	最大通信速度	周波数帯
IEEE 802.11	2Mbps	2.4～2.5GHz
IEEE 802.11a	54Mbps	5.15～5.35, 5.47～5.725GHz
IEEE 802.11b	11/22Mbps	2.4～2.5GHz
IEEE 802.11g	54Mbps	2.4～2.5GHz
IEEE 802.11n	600Mbps	2.4～2.5, 5.15～5.725GHz
IEEE 802.11ac (Draft)	6.93Gbps	5.15～5.35, 5.47～5.725GHz
IEEE 802.11ad	6.8Gbps	2.4～2.5GHz
Bluetooth	24Mbps (Ver.3)/1Mbps (Ver.4)	2.4～2.485GHz
ZigBee	250kbps (2.4GHz)	2.4GHz
WiMAX	64Mbps	2.3GHz, 2.5GHz, 3.3～3.8GHz
WiMAX 2	300Mbps	2.3GHz, 2.5GHz, 3.3～3.8GHz
LTE	325.1Mbps	

この直接拡散方式 Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) は、デジタル信号を小さな電力で広帯域に分散して同時送信する。低出力で送信するため、他の通信への影響も少ない。また、ノイズによる影響も復元時に拡散するため、通信の影響は少ない。後述する Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS) 方式より耐障害性に劣るが、伝送速度が速く多対一通信に適している。

一方、周波数ホッピング方式の FHSS では、短時間毎に送信する周波数を変更して方式である。これにより、特定の周波数でノイズが発生した場合でも、影響の少ない周波数を選択して送信が可能である。耐障害性や秘匿性が高く、多対多の大規模通信に適している。

MAC レイヤには、Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA) 方式が採用され、以下に示す IEEE802.11 系列の規格でも採用されている。CSMA/CA は、Listen Before Talk 方式を用いて、通信前に他の端末が通信をチェックする方式である。これは、干渉の無い独立チャンネルが少ない IMS 帯では重要な機能である。

### 2.1.2 IEEE 802.11a

無線 LAN 規格 IEEE 802.11 では伝送速度が最大 2Mbps だったが、IEEE 802.11a では高速化され、最大通信速度は 54Mbps になった。また、5.2GHz 帯の周波数帯域を使用している。従来の Frequency Division Multiplexing (FDM) 方式では、複数の回線を 1 つの回線として多重化す

るため、干渉してしまう。そこで、11a では Orthogonal Frequency Division Multiple (OFDM) 方式を採用し問題を解決した。各チャネルは Fast Fourier Transform (FFT) を利用し効率良く分離できる。

### 2.1.3 IEEE 802.11b

IEEE 802.11 High-Rate Direct Sequence (IEEE 802.11b) は、IEEE 802.11 の上位互換として開発された。通信距離は、50m から 100m の範囲にある端末間で通信を可能にする。

2.4GHz 帯を使用し、最大通信速度は 11Mbps となっている。オプションの設定では、22Mbps の通信が可能になる。

### 2.1.4 IEEE 802.11g

IEEE 802.11b の上位互換として開発された。2.4GHz 帯を使用し、最大通信速度は、IEEE 802.11b の 11Mbps から 54Mbps に高速化されている。11b 規格とのでは 11b に合わせ 11Mbps での通信が可能である。

### 2.1.5 IEEE 802.11n

IEEE 802.11n は、上記に示す IEEE 802.11b などの通信規格より高速かつ安定した無線 LAN の通信規格として、2009 年 9 月に正式認定された。最大の特徴は、IEEE 802.11a で使用していた 5GHz 帯を用いる事により、理論値では 600Mbps の高速通信を可能にする無線通信規格である。これには、スループットを増強するチャンネルボンディングと複数のアンテナを用いて通信品質を向上させる Multiple-Input and Multiple-Output (MIMO) の技術により実現している。チャンネルボンディングでは、隣のチャンネルを 1 つのチャンネルとして通信を行い、通信速度を向上させる技術である。特に 5GHz 帯では、1 つのチャンネルの帯域幅が 20MHz なので、40MHz で通信が可能になり、通信速度も 2 倍以上になる。

また、IEEE 802.11a, b, g との相互接続も可能になっている。

### 2.1.6 IEEE 802.11ac/IEEE 802.11ad (WiGig)

現在、世界各国で開発が進んでいるギガビット Wi-Fi と呼ばれる次世代規格である。802.11very high throughput (vht) は、2 種類の方法で、シングルリンク 500Mbps、デュアルリンク 1Gbps 以上の実現を目指している。また、情報技術研究機構 (NICT) が、60GHz 帯を用いた 3Gbps の

無線 LAN システムの開発に成功している。

802.11ac では、5GHz 帯を用いるため、現在利用されている 11n から移行しやすいというメリットがある。MIMO の技術を発展させた Multi User MIMO (MU-MIMO) などの技術を用いている。これにより MIMO では利用可能なアンテナ数が 4 本だったが、MU-MIMO では 8 本のアンテナ利用が可能である。この MU-MIMO では、MIMO での課題だった複数のアンテナを同時使用を可能にし、信号処理回路の高速化と省電力化を実現させた技術である。また、変調信号も従来の 6bit のデータを変換する 64QAM から、8bit の変換が可能な 256QAM が採用されている。

802.11ad は、60GHz 帯を用いて短距離間でギガビット通信を可能にする技術である。利用周波数が非常に高周波なため遮蔽物に弱く、通信距離も約 30m と短い、通信速度は通常で約 1Gbps、拡張仕様では 6.8Gbps となっている。これは、機器と機器の接続の無線化を目的としている。高周波は電波の制御が困難だが、11ad では無線 LAN より広帯域を用意する事により、通信の安定化を実現する。

### 2.1.7 IEEE 802.11af

IEEE 802.11af は、2014 年に規格策定を目標として研究が進められているスーパー Wi-Fi と呼ばれる、次世代の無線 LAN 規格である。帯域幅は 1 チャンネル 6MHz のため、最大 20Mbps の通信速度である。そのため、複数チャンネルを同時に利用し、高速通信への対応を検討している。

前述した無線 LAN の使用周波数は、ISM 帯の 2.4GHz 帯と 5GHz 帯を使用している。しかし、無免許で使用できる周波数帯域のため、多くの機器やネットワークで利用され混信が問題となっている。そこで、802.11af では Ultra High Frequency (UHF) 帯の地域で利用されていないテレビ放送電波用のホワイトスペースと呼ばれるチャンネルで通信を行う技術である。テレビ放送の周波数帯域は、470 から 710MHz の間で 6MHz 毎に 13 から 52 のチャンネルが利用可能である。しかし、各周波数帯域は総務省が利用目的が厳格に規定されているため、ホワイトスペース促進会議が開き、ホワイトスペースを利用した無線 LAN の利用について話し合いを予定している。

この技術を使用する際、本来の利用権利を持つテレビ放送のチャンネルに影響を与えない事が前提条件となる。そこで、放送局のアンテナの設置場所、地形や標高差、出力強度などから正確なテレビ電波の使用状況を算出し無ければならない。NICT では、既に実用化しているアメリカの連邦通信委員会 Federal Communications Commission (FCC) を基準に電波利用状況を把握可能なホワイトスペースデータベースを作成している。

現在、NICT はアクセスポイントと端末を開発し、実証実験を成功させている。このアクセスポ

表 2.2 Bluetooth の各クラスの電波到達距離

クラス	電波到達距離
Class1	100[m]
Class2	10[m]
Class3	1[m]

イントでは、従来の IEEE802.11a, b, g, n が利用できる通信モジュールを搭載し、通信モジュールを USB 接続すると、インターネットへの接続を可能にする。さらに、Registered Location Secure Server (RLSS) と呼ばれる干渉防止用のローカルサーバを用いて、各端末を別チャンネルで通信を行い、通信品質の劣化を防ぐ。アメリカの通信業者では、テレビ放送用電波のホワイトスペースを利用した長距離伝送可能な無線ブロードバンドとして既にサービスを提供している。

#### 2.1.8 Bluetooth (IEEE 802.15.1)

世界共通のデジタル機器の近距離無線通信規格である。通信は 2.4 から 2.485GHz を用いている。主な特徴として、ISM バンドを 79 個の周波数チャンネルに分け、周波数ホッピングを行う事である。この周波数ホッピングは、利用する周波数を短時間でランダムに変える事で、異なる周波数で通信したデータを基に修正する事でき、耐障害性が高くなる技術である。通信距離は 10m から 100m で、最大 24Gbps の無線通信が可能である。デメリットは、無線 LAN と同じ周波数帯を用いるため、干渉が発生してしまう事である。最新の Ver.4 では、通信速度を落とす代わりに、大幅な省電力化を可能にする低消費電力モード (Bluetooth Low Energy : BLE) に対応している。また、Bluetooth は、表 2.2 に示す電波強度によって規定されたクラスが 3 種類ある。さらに、機器の種類毎に決められたプロトコルをプロファイルと規定し、機器同士がプロファイルを所持していなければならない。

#### 2.1.9 ZigBee (IEEE 802.15.4)

ZigBee は、センサネットワークでの利用を目的とした近距離無線通信規格である。最大の特徴は、安価で低電力消費な事である。ZigBee 端末には中継機能があり、中継を繰り返す事で ZigBee 端末同士が通信を行える限り情報を伝える事が可能になる。しかし、デメリットとして転送距離が短く、転送速度も低速であるため、大量の端末が必要になり、用途が限られている。

表 2.3 赤外線通信の各規格毎の通信距離と通信速度の関係

規格名	通信距離	通信速度
IrDA DATA1.0	1[m]	115kbps
IrDA DATA1.1	1[m]	1Mbps / 4Mbps
IrDA DATA1.2	0.3[m]	115kbps
IrDA DATA1.3	0.3[m]	1Mbps / 4Mbps
IrDA DATA1.4	1[m]	16Mbps

### 2.1.10 IrDA

Infrared Data Association (IrDA) は、赤外線通信の規格である。最大 4Mbps で主に一対一通信を行う IrDA DATA と最大 75km で 8 台の周辺機器との接続可能な双方向通信の IrDA Control がある。表 2.3 に示すように規格毎に通信距離や通信速度が異なる。最新の IrDA DATA 1.4 では、1.0m の距離で 16Mbps での通信が可能である。Giga-IR では、レーザーを採用する事により、最大 1.0Gbps の高速通信が可能である。現在は、さらに Universal Serial Bus (USB) を無線化する IrUSB や、可視光などの技術を応用し、伝送速度をさらに高速化させ 10Gbps を目指した研究が進められている。

## 2.2 通信サービス

### 2.2.1 WiMAX(IEEE 802.16a/REVd)

WiMAX[21] は、IEEE 802.16e-2005 をベースに開発された技術である。無線 LAN では数百 m 程度の距離をカバーしていたが、WiMAX では数 km から数十 km をカバーすることができる。さらに、20MHz 帯を利用時には最大 74.81Mbps という高速な通信が可能である。また、時速 120km の高速移動時にも使用できる。

### 2.2.2 LTE

LTE は、3rd Generation (3G) から 4th Generation (4G) への変更をスムーズに行うための技術である。そのため、3.9G とも言われる。4G では高速移動時は 100Mbps、低速移動中は 1Gbps を目標としている通信技術である。

現在の 3G では、高速移動時は 144kbps、低速移動時は 384kbps の通信が可能となっており、

4G とは大きな差が生じている．そこで，3G と 4G の技術の橋渡しをする技術として LTE が開発された．LTE の技術を使用した無線通信サービスとして，株式会社エヌ・ティ・ティ・ドコモから Xi（クロッシィ）が 2010 年 12 月 24 日から開始された．Xi では屋外で下り最大 37.5Mbps、屋内では最大 75Mbps の速度を提供する．なお，LTE は 3G に含まれ，周波数も 3G の帯域と今後 3G 用に追加される帯域を使用する．

## 2.3 ネットワークトポロジ

ネットワークトポロジとは，ネットワークの接続形態である．ネットワークを構築するには，環境やコストネットワークの品質や特性などを考慮し，適したネットワークトポロジを選択する必要がある．そのネットワークトポロジを説明する．

### 2.3.1 バス型トポロジ

図 2.1 に示すバス型トポロジはノイズに強く，伝送損失が少ない 1 本の同軸ケーブルに複数の端末を接続するトポロジである．また，機器に障害が発生した場合もネットワークに影響を与えない．しかし，電気信号は全端末に送信されるため，ケーブルの両端にターミネータ（抵抗器）を付けて，信号の反射や乱れなどを防ぐ必要がある．また，1 本のケーブルを共有しているため，同時にトラフィックが発生した場合，電気信号が衝突し，通信不可能になる．さらに，ケーブルに障害が発生した場合も，ネットワーク全体に影響が出てしまい，通信が不可能になるという冗長性の低さが挙げられる．

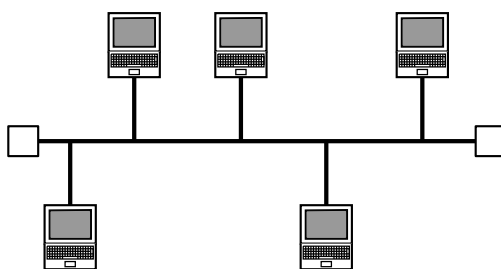


図 2.1 バス型トポロジ

### 2.3.2 リング型トポロジ

図 2.2(a) のように 1 本のケーブルの両端をつなぎ，複数の端末をリング状に接続する形態をリング型トポロジと呼ぶ．また，電気信号は一方向にのみ流れるため，衝突が発生しない．ネット



ワーク内にはトークンと呼ばれる情報が流され、送信端末はこのトークンを獲得しなければならない。リング型トポロジは、端末やケーブルに障害が発生した場合、ネットワーク全体が使用不可能になる。そのため、図 2.2(b) 冗長性を持たせた二重リング型トポロジと呼ばれる形式も存在する。

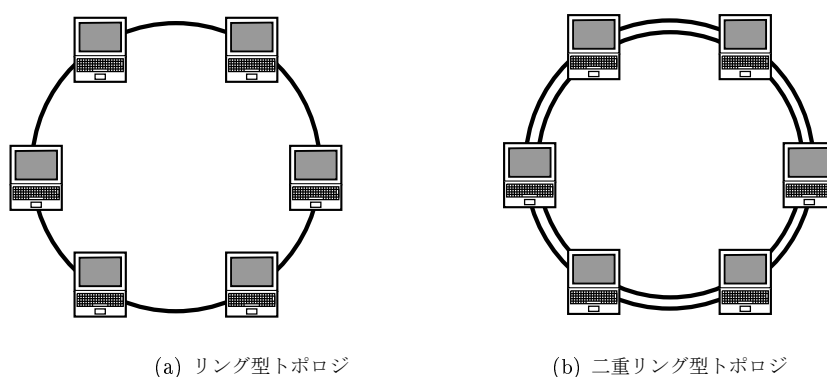


図 2.2 リング型トポロジ

### 2.3.3 ツリー型トポロジ

図 2.3 に示すツリー型トポロジは、階層構造でネットワークを構築する形態である。下の階層と P2P(Point to Point) で接続し、中心となるルート端末を第一レベルと呼び、その端末から P2P で接続された端末を第二レベル、その下を第三レベルとする。ツリー型の特徴として、末端の端末の故障がネットワークに与える影響は少ないが、中心となる第一端末が故障した場合、ネットワーク全体に影響が出てしまう。そのため、利用するためには冗長性を持たせる必要がある。

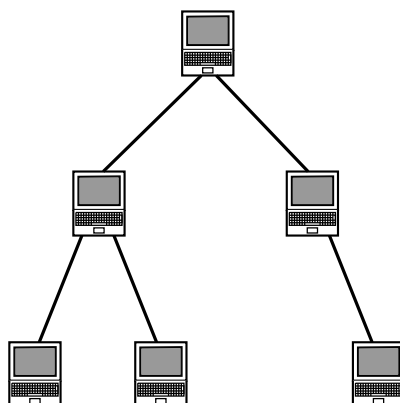


図 2.3 ツリー型トポロジ

### 2.3.4 スター型トポロジ

図 2.4(a) に示すスター型トポロジは、1 個の集線装置であるネットワークデバイスに他の端末が接続するネットワークトポロジである。これにより、ケーブルに障害が発生した場合でも、他の端末には影響が出ない。そのため、バス型やリング型より冗長性が高く、安定した通信が可能になる。しかし、ネットワークデバイスに障害が発生した場合、全ての端末に影響が出るというデメリットを抱えている。現在の有線 LAN の構築では、このスター型トポロジが多く利用されている。実際にスター型トポロジを用いる場合はネットワークデバイスを複数接続し、図 2.4(b) に示す拡張スター型トポロジと呼ばれるネットワークトポロジになる事が多い。

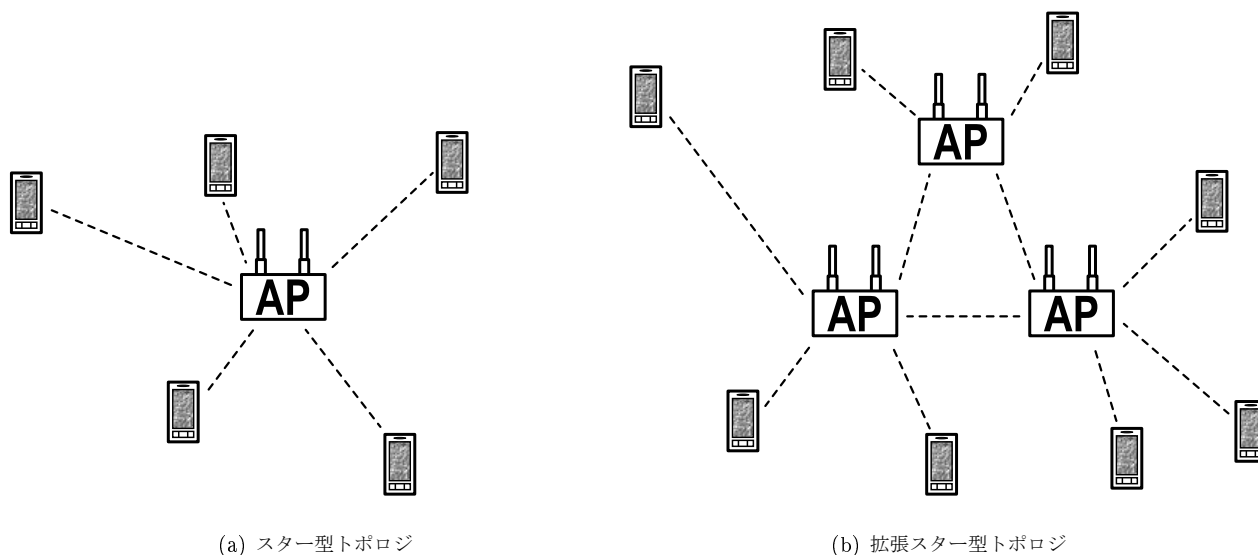


図 2.4 スター型トポロジ

### 2.3.5 メッシュ型トポロジ

図 2.5 に示すメッシュ型は、通信機能を持った端末同士が相互に通信を行う事による網目（Mesh）上に形成されたネットワークトポロジの事である。図 2.5(a) に示す全ての端末同士で相互に接続しているトポロジをフルメッシュ型、図 2.5(b) に示す複数の接続を持つが完全なメッシュ型ではない部分メッシュ型（パーシャルメッシュ型）と呼ぶ。フルメッシュ型は、堅牢なネットワークを構築する事が出来るが、端末数が増える際のコストやメンテナンス等が困難なため、一般的にメッシュ型と呼ぶ場合は、後者を指す。

このメッシュ型の最大の特徴は、非情に高い冗長性を持つ事である。複数の経路を保持してい

るため、経路に問題が発生しても代替の経路を用いる事により、ネットワーク全体の障害（Single Point of Failure:SPF）を回避し、柔軟なネットワークの構築が可能である。また、メッシュネットワークに参加するそれぞれの端末は隣接する端末と通信を行うため、低出力で良いという利点がある。さらに、端末の故障や中継端末が通信距離外に移動した場合、代替経路の確保が容易という利点が挙げられる。しかし、メッシュネットワークには全ての端末が平等に扱われるため中心と呼べる物が存在しないため、通信経路の探索や無限ループの防止といった伝送制御を適切に行うための高度な経路制御技術が必要とされる。また、セキュリティの面でも悪意を持った外部の第三者がメッシュネットワークに参加し、情報漏洩やデータの破壊を行うなどの危険性もある。この問題は、ユーザ認証などのセキュリティ面を強化し、端末の制限を対策を行う事が必要である。実際の使用例として、ギリシャでは Athens Wireless Metropolitan Network (AWMN) [22] と呼ばれる屋上アンテナを用いたメッシュネットワークを有志が構築し、スペインの田舎町などヨーロッパを中心に普及が進んでいる。

このような自由にネットワークを構築するメッシュ型トポロジの特徴を MANET で利用し、従来のネットワークより柔軟なネットワーク構築を可能にする。

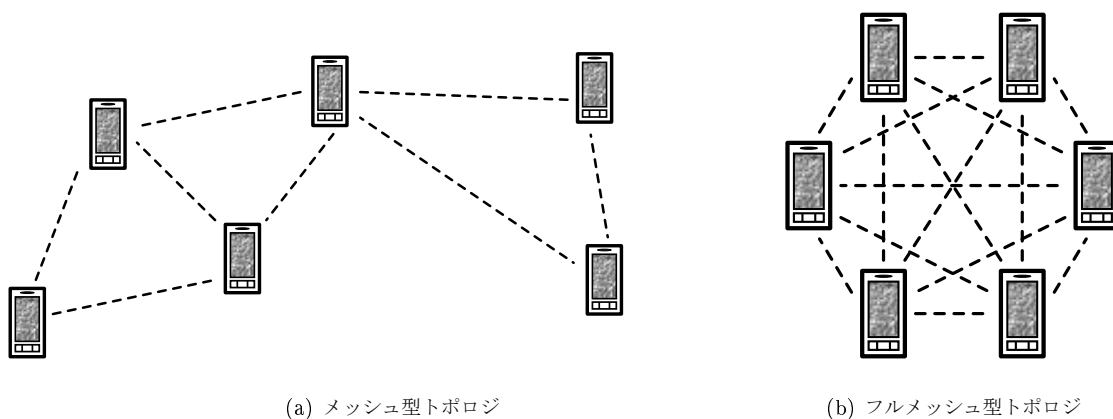


図 2.5 メッシュ型ポロジ

## 第 3 章

# MANET

MANET は、元々は通信インフラの整っていない戦場で通信を可能にする事を目的とした軍事技術だった。しかし、そのネットワークの特性から、ルーラルエリアでの通信の補完を目的とした民生用として 2015 年の実現を目標に、現在研究が進められている。高度道路交通システム (ITS)、工場や建築現場、農場、商品倉庫、港湾など様々な利用先が考えられる。また、緊急時の一時的なネットワークとしても期待されている。応用技術として、前述した VANET やセンサネットワークなど、それぞれの利用環境に特化したネットワーク技術の開発も進められている。

### 3.1 Ad-hoc

アドホックネットワークとは、無線ネットワークの一種で無線端末同士で通信を行うネットワーク技術の事である。後述する MANET の前身となるネットワーク技術である。各端末がルータの機能を持ち、端末同士は直接通信を行い、バケツリレーの要領で目的の端末までパケットを送信する。これにより自端末と目的の端末が直接通信を行えなくても通信を行う事ができる。また、構築したネットワークの中に 1 台でも WAN に接続されていれば、その端末を経由して外部へと接続も可能となる。

### 3.2 MANET

MANET では、ネットワークの盗聴から周囲の端末と可能な限り通信可能な状態にするため、無指向性アンテナを使用する。また、アクセスポイントなどの通信機器を利用せずに直接通信可能な機能が必要である。MANET の利用環境では、ノート PC やスマートフォンなどの様々な通信端末だと想定されるため、それぞれの機器がチャンネルの設定や選択を行う機能も必要となる。つまり、簡易的なルータの機能が求められる。

無線ネットワーク特有の問題として、図 3.1 に示す隠れ端末問題とさらし端末問題がある。隠れ端末問題は、図 3.1(a) に示す端末 A と B の 2 台の端末が通信を行っている際に、それを知らずに端末 C が端末 B に電波を送信する事により、衝突が起きる問題である。

さらし端末問題は、図 3.1(b) に示す端末 AB 間で通信をしている場合、端末 C が端末 D に電波を送信する際に、AB 間の通信を妨害しないように送信を保留する。しかし、端末 B から A の送信と端末 C から端末 D への送信は同時に行う事が出来る。この端末 C を端末 AB 間に対するさらし端末、この問題をさらし端末問題という。

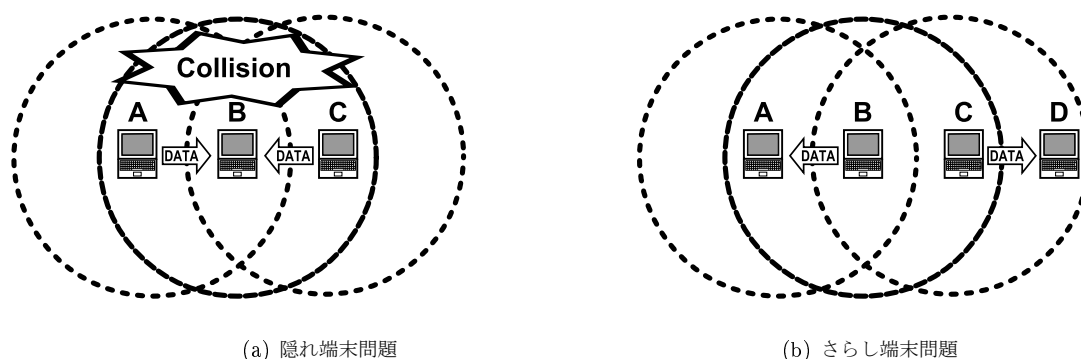


図 3.1 無線ネットワークの端末問題

トポロジ情報を利用した経路制御プロトコルは、Proactive 型と Reactive 型、Hybrid 型の 3 種類に分類できる。MANET だけの接続形態をスタンドアローン型 MANET、インターネットと接続する形態を接続型 MANET と呼ぶ。

OSI 参照モデルの第 2 層のデータリンク層は、物理層に近い層から MAC 副層、LLC 副層に細分化できる。MAC は物理媒体を複数の端末が共有して通信する際に必要な技術である。無線ネットワークでは、どの端末がどのタイミングで信号を出すのかを MAC で制御する必要がある。移動性は、無線を使って確保する事が一般的であるため、MAC の性能がネットワーク全体の性能に大きな影響を与える。MAC の効率化は、物理媒体の空き時間を小さくしつつ、衝突を抑える制御が必要になる。MANET 環境下では、衝突や物理層のエラーによる再送により、常に最適なスケジュールを維持するのは非常に困難である。前述した CSMA/CA では、キャリアセンスと呼ばれる他の端末が信号を出していないかチェックを行う。検出しなかった場合のみ信号を送信する。

アドホックネットワークのデータリンク層は、IEEE 802.11 を基本とするものが多い。そのため、CSMA/CA による衝突回避、Request To Send (RTS) 交換による隠れ端末回避、Duration による送信待機時間の通知の特徴を持つ。文献 [23] では CSMA/CA と RTS/CTS の違いによるスループットの性能評価について報告している。

アドホックネットワークの MAC では，時間利用効率を上げる方法として，

- 複数のレートを適応的に制御する方式 (ARF[24], RBAR[25])
- ネットワークコーディングを考慮する方式 (coop[26])
- 空間利用効率を上げる方法として，スマートアンテナや指向性アンテナを利用する方式 (DMAC[27], SWAMP[28])
- 送信電力制御を行う方式 (COMPOW[29])
- 周波数利用効率を挙げる方法として，複数チャンネルを利用する方式 (DCA[30], MMAC[31])

などが開発されている．

### 3.3 応用技術

#### 3.3.1 VANET

Vehicle Ad Hoc Network(VANET)[32] とは，車々間ネットワークの事である．図 3.2(a) に VANET のイメージ図を示す．VANET は，自動車に各種センサ機能を搭載し，自動車内部，各自動車同士や外部との通信手段を持たせる技術の事である．この技術は，自動車のメンテナンスなどに役立てる保守や点検の情報，交通事故や渋滞を防ぐための危険・効率化の情報やドライバーや同乗者への情報収集や映画等の娯楽提供の情報などを配信する事を目的としている．自動車が移動している状態での通信が求められるため，VANET には MANET の技術が応用されている．VANET の特徴として以下のようなものが挙げられる．

- 広大なエリアに散在
- 移動範囲は，道路に沿うため，ある程度限られる
- 端末の密度と速度は，場所と時間によりある程度予想できる
- 電力供給が可能

また，VANET を応用した物として，図 3.2(b) のように車と歩行者との事故防止を目的とする技術も研究されている．現在は，交差点などの事故が想定される場所で複数のカメラを用いて自動車の危険を知らせる路車間通信と呼ばれる技術も研究されている．ITS と呼ばれる高度交通システムへの応用も考えられている．

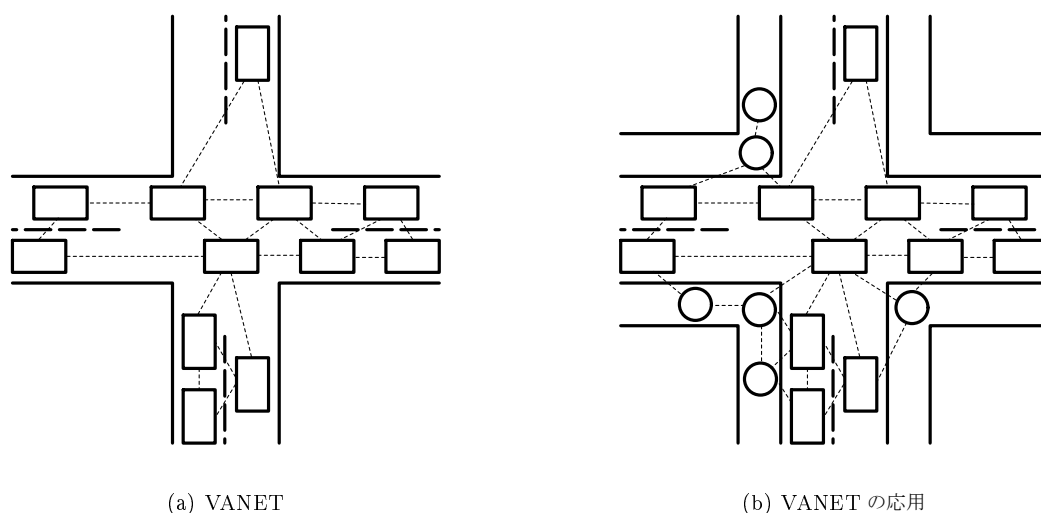


図 3.2 VANET のイメージ図

### 3.3.2 センサネットワーク

無線センサネットワークは、温度センサや照度センサ、加速度センサなどを無線で接続してネットワークを構築する。また、センサ端末はセンサや無線チップ、マイクロプロセッサ、電源で構成され、使用周波数は無線 LAN や Bluetooth などと同じく ISM 帯域の 2.4GHz 帯を用いる。

元々は戦闘地域の監視など軍事目的のために開発された技術だが、現在では自然保護や交通状態などのモニタリングを目的とした民生利用の研究が進められている。しかし、センサネットワークでは利用環境から、安価で小型の端末が求められ、さらにバッテリー問題の解決が非常に重要な課題として挙げられている。これは、電源供給が困難な場所での利用や数百個から数千個を用いた大規模なネットワークの構築を行う場合が想定され、可能な限り消費電力を抑える必要があるためである。

そのため、LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) プロトコル [33] ではクラスタリングと呼ばれる手法を用いて、省電力化を目的とした研究も進んでいる。これは、観測領域でクラスタと呼ばれる細かいグループを作成し、中心端末であるクラスタヘッドを選択する (図 3.3 参照)。そして、周囲の一般端末はクラスタヘッドに選択された端末に収集したデータを送信し、データを受信したクラスタヘッドが情報収集を行うシンクへと送信を行う。これにより、多くの端末が付近に存在するクラスタヘッドへの送信で済むため、通信距離の軽減によるネットワーク全体の省電力化を実現する。

また、異なるプロトコルによる省電力化を目指した研究も進められている。電力残量を考慮し

ネットワーク全体の維持を目的とした HEED (Hybrid Energy-Efficient Distributed clustering) プロトコル [34] やマルチホップ通信で電波干渉や通信電力を削減する HIT (Hybrid Indirect Transmission) プロトコル [35], クラスタを階層的に構築する事による電波干渉の軽減する MR-LEACH (Multi-hop Routing with LEACH) プロトコル [36] がある. さらにハード面でも, 小型ソーラー電源を搭載し, センサ端末の長期稼働を目的とした端末も開発されている.

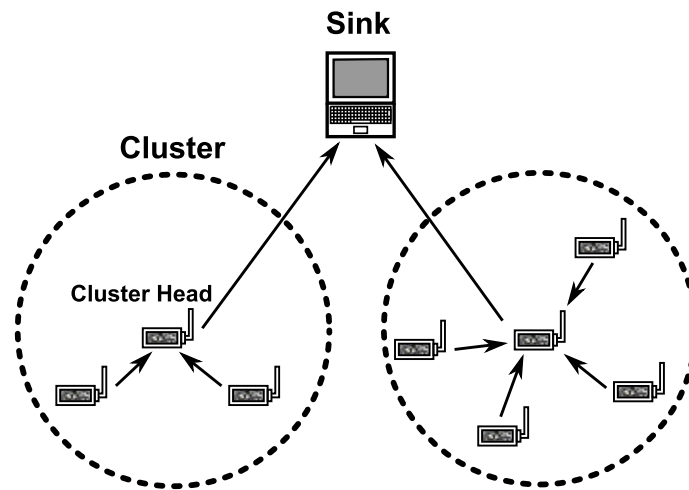


図 3.3 センサネットワーク



## 第 4 章

# MANET 経路制御プロトコル

MANET 経路制御プロトコルは、MANET 環境下で経路制御を行うためのプロトコルである。MANET 経路制御プロトコルは、位置情報を利用するプロトコルとトポロジ情報を利用するプロトコルに分類される。

### 4.1 位置情報利用型

位置情報利用経路制御プロトコルは、端末の物理的な位置を各端末が把握・管理し、経路制御を行う事で、オーバーヘッドの削減やスループットの向上を目的としている。位置情報利用経路制御プロトコルは、さらに次ホップ転送方式と指向型フラッドイング方式に分類できる。次ホップ転送方式は、各端末は終点端末への前進距離が最も大きい、あるいは終点端末に近い場所にある端末を次ホップ端末として選択する方式である。この方式では、転送途中の端末が次の転送先の端末が見つからない場合、経路の再探索手法として様々な手法が提案されている。指向型フラッドイング方式は、終点端末へ向かって中継端末がブロードキャストを繰り返すことにより、パケットを配信する方式である。端末の配置場所によってブロードキャストを行うかどうかを決定する事で、不要なブロードキャストを削減する。

また、位置情報利用経路制御プロトコルの一形態として、ジオキャスト経路制御プロトコルがある。特定の地域・領域に配置された端末群のいずれかの端末に対して経路制御を行い、始点端末と終点領域間での通信を行う事で実現されるアプリケーションにおいて有効である。リンクがアドホック的にしか存在せず、端末の物理的位置情報の存在を前提とした経路制御プロトコルである。GPS などを利用したロケーションサービスに基づき、各端末は自身の物理的な位置情報を知る事が出来る事が前提となる。

ジオキャスト経路制御は、Greedy Forwarding (GF) [37] や Location Based Multicast (LBM)

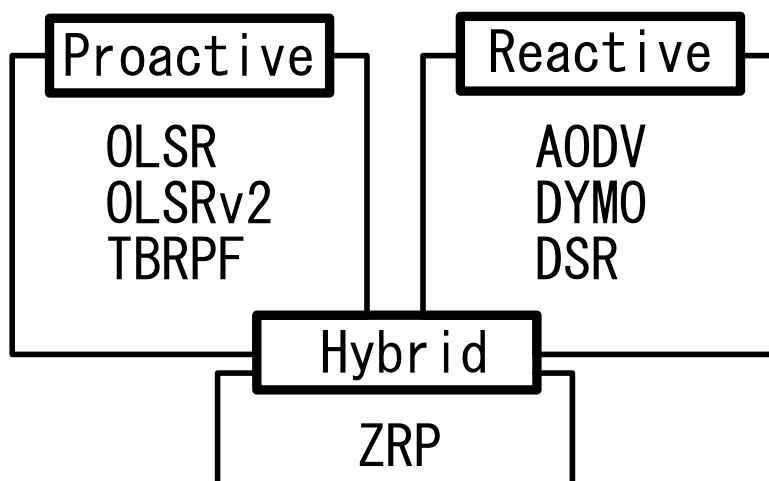


図 4.1 代表的な MANET 経路制御プロトコルの分類

[38] が提案されている。GF はデータの送信や転送を行う場合、自端末の周囲に存在する端末群から宛先端末に最も近い端末にデータを送信する。また、データを受信した端末は、宛先端末に届くまで最も近い端末に送信を繰り返す事で伝送する。

## 4.2 トポロジ情報利用型

一方、2種類のトポロジ情報を利用する経路制御プロトコルの Reactive 型と Proactive 型も活発に研究されている。図 4.1 に代表的な MANET 経路制御プロトコルを示す。Reactive 型では AODV, Dynamic MANET On-demand Protocol (DYMO) [39], DSR, Proactive 型では OLSR, Optimized Link State Routing ver. 2 (OLSRv2) [40], Optimized Link State Routing daemon[41], Topology Broadcast Based on Reverse-Path Forwarding (TBRPF) [42], Better Approach To Mobile Ad-hoc Networking (B.A.T.M.A.N.) [43] Hybrid 型では, Zone Routing Protocol(ZRP)[44] が代表例である。

Hybrid 型の経路制御プロトコルは、Proactive 型と Reactive 型の両方の特徴を持っている。近距離通信では、経路表を保持する Proactive 型を利用し、遠距離通信では、電力消費を抑える Reactive 型を使用する。しかし、現在は Hybrid 型経路制御プロトコルは活発ではないため、本稿では説明を割愛する。

### 4.3 Proactive 型

Proactive 型では常に通信を行えるように周囲の端末と情報交換を行う経路制御プロトコルである。即座に通信を行える代わりに、データのやりとりを頻繁に行うため電力消費問題が発生してしまう。

OLSR は、Proactive 型の欠点である電力消費を改善しているプロトコルである。これは Multi Point Relay (MPR) 集合と呼ばれる端末だけがパケットをフラッディング・再送信をする事により、帯域を有効に活用し、電力消費を抑制している。

OLSRv2 は、OLSR をベースに改良した MANET 経路制御プロトコルである。改良点は、IPv4 と IPv6 のデュアルサポートに対応。また、TLV を用いた拡張性のあるメッセージフォーマットである。さらに、アドレスのアグリゲーションを用いた経路の配布ができるため、経路数が増えた場合への対応が可能である。

PacketBB は、OLSR をベースにして拡張されたプロトコルである。1つのパケットに複数のメッセージを追加する事によりパケットサイズの削減を行う。また、既存のメッセージにメッセージ TLV とアドレスブロック TLV を追加することができ、新しい TLV タイプ、Value フィールド、メッセージタイプを定義し、再利用する事が出来る。

### 4.4 Reactive 型

Reactive 型のプロトコルの特徴は、通信要求が来たら情報交換を行うプロトコルである。Reactive 型のプロトコルは、電力消費を抑制し、端末やネットワークを長時間利用する事を目的として作成されている。特徴として、通信要求が来たら周囲の端末と情報交換を行う。通信要求が無ければ、そのまま何も行わない。自端末が通信要求を出したり、隣接端末から通信要求が来ると、経路制御プロトコルが動作する。そして、周囲の端末と情報交換を行い、経路表を作成して、通信可能な状態になる。このような方法で経路表が作成されるので、通信要求から実際に通信が可能になる状態までに時間差が生じる。これは、MANET ではノート PC やタブレット端末、携帯電話などの携帯端末を想定しているためである。それらの端末はバッテリーで稼働しており、有限である。よって、無駄な電波を発信すればするほど無駄な電力を消費し、稼働時間の短命に繋がる。つまり、Reactive 型は電力消費を可能な限り抑制する事を目的に作られたプロトコルと言ってよい。次にそれぞれのプロトコルの説明をする。

AODV は、Reactive 型で使用されている Hello メッセージを使用できる。制御メッセージは、

RREQ (Route Request), RREP (Route Reply), RERR (Route Error), RREP-ACK (Route Reply Acknowledgment) の4種類を使用している。また、経路表によるパケット転送を実現している。これにより、パケットには転送されるべき経路が記録されていない。各端末はシーケンス番号を管理し、経路制御に積極的に利用している。さらに、各経路表のエントリーには Precursor List があり、リンク障害があった時に利用される。

DYMO は、AODV をベースにして開発された MANET のプロトコルである。特徴は IPv4 と IPv6 の両方をデュアルサポートしていることである。また、Type Length Value (TLV) を用いた、拡張性のある経路制御プロトコルメッセージの定義がされている。さらに、インターネット接続性のサポートがされている。しかし、現在もアドレス定義 (DYMO Cast) やメッセージのフォーマットが完全ではなく、標準化はまだ行われていない。

DSR は、パケットの発信元があらかじめ全体の経路を指定するソース経路制御プロトコルである。各端末に蓄積されている Route Cache を利用し、頻繁に使用する。

## 4.5 AODV

AODV はアドホックネットワーク環境下でのモバイル端末による使用を想定されている。また、端末同士は相互に信頼ができる環境下での利用が前提である。AODV では、端末が新しい宛先端末への経路を迅速に得る事ができる。そのため、頻繁に通信を行っていない宛先端末への経路を維持する必要がある。リンクの切断時には、そのリンクを使用している経路を無効化するため端末に通知する。宛先端末への経路が2つ以上存在する場合、送信元端末はシーケンス番号の大きい経路を選択する。このシーケンス番号は宛先端末によって生成される。また、このシーケンス番号を使用することによりネットワークのループを防ぐ事ができる。

AODV の特徴として、次のような点があげられる。

- 各端末はシーケンス番号を管理し、経路制御に積極的に利用
- 各端末は非常に短い間有効な経路表を持ち、データパケットはそれを用いて転送
- リンクに障害時に Precursor List を利用
- Proactive 型で使用する Hello メッセージを利用

AODV では、RREQ, RREP, RERR, RREP-ACK の4種類のメッセージが使用され、UDP の654番ポートに送信される。また、AODV は第4.7.1節で説明する Hello メッセージを RREP として実現している。図4.2, 4.3, 4.4にそれぞれのパケットフォーマットを示す。AODV では

経路表を利用した送受信を行うため、各端末がどの端末に送信するか判断する。つまり、パケットの中に経路に関する情報は無い。

送信先端末への経路が存在する時、AODV は特に何もしない。新しい送信先への経路が必要になった時、その経路を見つけるために、RREQ メッセージをブロードキャストする。目的の送信先端末は RREQ メッセージを受信すると、送信元端末へユニキャストで RREP メッセージを送信する。その結果この経路が使用可能になる。また、この経路の中間にある端末はこの経路表をキャッシュし、再度この経路が使用される場合に送信先端末の代わりに RREP メッセージを返信する。これにより、ブロードキャストする回数を減らし、RREQ メッセージがネットワークを占有する事を防ぐ。端末は、経路の次ホップのリンク状態を監視し、切断を検知した場合に影響する端末に RERR メッセージを送信する。このため、各端末は次ホップである隣接端末の IP アドレスが記載された Precursor List を利用する。

シーケンス番号は、自端末のシーケンス番号と宛先シーケンス番号がある。RREQ, RREP, RERR から新しい情報を得ると、常に更新され、最新の状態に保たれる。自端末のシーケンス番号の更新条件を以下に示す。

- 端末が経路探索を行う直前
- 宛先端末が RREQ に対して RREP を生成する直前

また、宛先端末への経路の宛先シーケンス番号の更新条件は以下のようになっている。

- 自端末が宛先端末となり、新しい経路を配布する時
- 宛先端末への新しい情報を得た時
- 宛先端末への経路が切断、または寿命の時

宛先端末への経路が必要で経路が存在しない場合、端末は RREQ をブロードキャストする。宛先端末への、無効の経路が存在する場合宛先端末への経路が無効、切断されている場合、RREQ を生成する。これは、最後に利用された宛先シーケンス番号を用いる。宛先シーケンス番号が不明の場合は、Unknown Sequence Number フラグをセットする。RREP-ACK は、RREP の A フラグがセットされた場合に送信される。これは、経路探索サイクルの完成を防ぐ片方向リンクの危険が行われる場合に行われる。

タイプ=1 (8)	J	R	G	D	U	予約 (11)	ホップ数 (8)
RREQ ID (32)							
送信先IPアドレス (32)							
送信先シーケンス番号 (32)							
起点IPアドレス (32)							
送信元シーケンス番号 (32)							

J:Join フラグ  
 R:Repair フラグ  
 G:Gratuitous RREP フラグ  
 D:Destination Only フラグ  
 U:未知シーケンス番号

図 4.2 RREQ メッセージヘッダ

タイプ=2 (8)	R	A	予約 (8)	Prefix (5)	ホップ数 (8)
送信先IPアドレス (32)					
送信先シーケンス番号 (32)					
送信元IPアドレス (32)					
生存時間 (32)					

R:Repair フラグ  
 A:Acknowledgement フラグ

図 4.3 RREP メッセージヘッダ

## 4.6 B.A.T.M.A.N.

B.A.T.M.A.N. プロトコルは、単純でロバスト性を考慮したマルチホップ経路を選択するアプローチで設計されている Proactive 型ルーティングプロトコルである。特徴は、低プロセスと低コストトラフィックで適応的で Loop-free な経路選択を保障する。メッシュネットワークの各端末は、End-to-End (E2E) の最良な経路に関する情報を分割管理し、次の最良ホップに関する情報だけを管理する。その結果、ローカルなトポロジ変化に関する情報のみで、全体のテーブル情報を知る必要性は無い。さらに、イベント型にもかかわらず、制御トラフィックのオーバーヘッドを避けると主に、異なるトポロジ情報に関するメッセージのフラッディング量をある程度防ぐ事ができる。また、アルゴリズムは信頼できないリンクで形成するネットワークにでも対応できる

タイプ=3 (8)	N	予約 (15)	宛先先数 (8)
不達送信先IPアドレス (32)			
不達送信先シーケンス番号 (32)			
不達送信先IPアドレス (32)			
不達送信先シーケンス番号 (32)			

N:No Delete フラグ

図 4.4 RERR メッセージヘッダ

ように設計されている。

各端末は、それぞれ隣接端末に生存情報をブロードキャストメッセージ (OGMs) を利用し広告する。この隣接端末は特定の規則に従って OGMs を再ブロードキャストを行う事で、メッセージをフラッディングしていく。OGMs は小さく、IP および UDP を含み 52bytes のパケットサイズでパケットフォーマットとして、送信元端末のアドレス、中継端末のアドレス、TTL、シーケンス番号で構成する。OGMs は高速および信頼できる経路でパケットを転送する。各端末は現在の最良ホップ隣接端末から広告される OGMs のみ再ブロードキャストする。OGM を一度受信するか、数回受信したのかをシーケンス番号で判断する。

例えば、ある端末 X は端末 Y の OGMs を受信する事で存在を確認する。端末 Y は、OGMs が 1 ホップの隣接端末まで再ブロードキャストする。もし、端末 X が端末 Y から見て、1 ホップ隣接端末以上のように遠方端末にデータを送信する場合、送信元からのメッセージ数や速さを基準にする事で、隣接端末を選択する。つまり、B.A.T.M.A.N. アルゴリズムは、メッセージの送信元から最良隣接端末を選択する経路表を作成する事で、マルチホップ通信を実現させる。

## 4.7 OLSR

OLSR は、現在もバージョンアップを繰り返し、研究・改良 [45] が進められている Proactive 型の MANET ルーティングプロトコルである。長所として、常に経路表を維持するため、通信要求を受け取るとすぐに通信を開始する事が可能である。しかし、短所は経路表を常に管理するため、パケット送受信に伴う電力消費が問題となる。特に MANET では、主に携帯端末を利用する環境が想定されているため、バッテリー問題は非常に重要である。そこで、OLSR は MPR と呼ばれる端末を選択し、その端末を中心にネットワーク全体の MPR 端末を管理し、フラッディングを行う事で無駄なパケットを削減している。これにより、帯域を有効活用する事ができ、かつ、端末

表 4.1 OLSR の各メッセージのデフォルト値

パラメータ	時間 (sec)
Hello Interval	2.0
Hello Validity Time	20.0
TC Interval	5.0
TC Validity Time	300.0
MID Interval	5.0
MID Validity Time	300.0
HNA Interval	5.0
HNA Validity Time	300.0

の無駄な消費電力を抑える事ができる。周囲の端末と Hello, Topology Control (TC), Multiple Interface Declaration (MID) と Host and Network Association (HNA) メッセージを使用し、経路表を作成する。最後に HNA メッセージでは、端末がゲートウェイとして機能する場合に使用する補助的なメッセージである。それぞれのメッセージの初期値を表 4.1 に示す。また、OLSR ではヒューリスティックな MPR 端末の選定を行う。OLSR のパケットフォーマットを図 4.5 に示す。

OLSR の特徴として以下のようなものが挙げられる。

- MPR 集合による効率的なフラッドイング
- 無駄なパケットの削減による電力消費の抑制

#### 4.7.1 Hello メッセージ

図 4.6 に HELLO メッセージのパケットフォーマットを示す。この HELLO メッセージとは、各端末が持っている情報を定期的に配信する基本的なメッセージの事である。各端末は、周辺端末から HELLO メッセージを受信して自端末とのリンク、隣接端末、MPR 集合などの情報を収集している。もし、受信できない場合は、周辺にある端末を判断できないため、通信を行う事が出来ない。各端末には、ローカルリンク情報が管理されている。HELLO メッセージの役割は、このローカルリンク情報の構築や送信を行うためのメッセージを配信することである。ローカルリンク情報には 5 つの集合がある。



パケット長 (16)		パケットシーケンス番号 (16)
メッセージタイプ (8)	有効時間 (8)	メッセージサイズ (16)
発信元アドレス (32)		
TTL (8)	ホップ数 (8)	メッセージシーケンス (16)
メッセージ		
メッセージタイプ (8)	有効時間 (8)	メッセージサイズ (16)
発信元アドレス (32)		
TTL (8)	ホップ数 (8)	メッセージシーケンス (16)
メッセージ		

図 4.5 OLSR のパケットフォーマット

- リンク集合
- 隣接ノード集合
- 2 ホップ隣接ノード集合とそれらのノードのリンク集合
- MPR 集合
- MPR セレクタ集合

リンク集合は、直接電波が届く隣接端末の集合へのリンクの事である。各リンクは2 端末間のアドレスの組と有効時間によって表現されている。有効時間は、そのリンクが単方向か双方向なのかを判断する事にも使われている。

隣接ノード集合は、各隣接端末のアドレスやその端末の再送信への積極度を表す Willingness などによって構成されている。その他、隣接ノード集合のさらに先に存在するノード集合、MPR として選択された隣接ノードの集合である。もし、自身が MPR として選択されている場合には自分を MPR として選択しているノードの集合である MPR セレクタ集合などの情報がローカルリンク情報として各端末に存在している。

予約(16)		HELLO発生間隔(8)	Willingness(8)
リンクコード(8)	予約(8)	リンクメッセージサイズ(16)	
近隣端末のインターフェースアドレス(32)			
近隣端末のインターフェースアドレス(32)			
リンクコード(8)	予約(8)	リンクメッセージサイズ(16)	
近隣端末のインターフェースアドレス(32)			
近隣端末のインターフェースアドレス(32)			

図 4.6 HELLO メッセージのパケットフォーマット

#### 4.7.2 TC メッセージ

上記のような流れでフラッディングの基盤を作成する。しかし、まだ経路表を作成していない。次に経路表を作成する流れを下記に記す。OLSR では、Hello メッセージの他に TC メッセージも頻繁に使用されている。TC メッセージのパケットフォーマットを図 4.7 に示す。HELLO メッセージは、隣接端末にのみ配信されるが、TC メッセージはネットワーク全体へフラッディングされるメッセージである。このフラッディングには上記に記した MPR 集合が使用される。TC メッセージの主な役割は、ネットワーク全体にトポロジを各端末に配信する事である。トポロジを基に各端末が実際の通信経路を計算し、経路表を作成する。このトポロジは基本的には各端末の MPR セレクタ集合から作成されるトポロジであるため、管理するリンクは実際のリンク数より非常に少ない。TC メッセージは MPR 集合として選択されている全端末が定期的に発信する。その配信されるパケットの中身には、最低限でも自端末と MPR セレクタ集合間のリンクが含まれている。これにより、ネットワーク上にある全端末は MPR 集合と MPR セレクタ集合を把握する事ができ、それを基にネットワーク全体のトポロジを把握できる。そして、さらに各端末が把握したトポロジを用いて最短経路を計算し、経路表を作成する。このような流れで、各端末が全端末と通信を行う事ができるようになる。

#### 4.7.3 MID メッセージ

MID メッセージは、複数のインターフェースを持つ時に使用されるメッセージである。MPR 集合を用いたフラッディングにより効率的に周囲の端末に複数のインターフェースの設定を通知する。MID メッセージパケットフォーマットを図 4.8 に示す。パケットヘッダのメッセージタイ

近隣広告シーケンス番号 (16)	予約 (16)
近隣広告アドレス (32)	
近隣広告アドレス (32)	

図 4.7 TC メッセージのパケットフォーマット

OLSRインターフェースアドレス (32)
OLSRインターフェースアドレス (32)

図 4.8 MID メッセージのパケットフォーマット

ネットワークアドレス (32)
ネットマスク (32)

図 4.9 HNA メッセージのパケットフォーマット

プには MID メッセージパケットフォーマットを表す 3 を格納する。

#### 4.7.4 HNA メッセージ

図 4.9 に示す HNA メッセージは、端末がゲートウェイの機能を用いる時に使用されるメッセージである。その機能は、ホストとネットワークを関連付けを行うため、各端末のネットワークマスクと MAC アドレスをネットワークにフラッディングする事である。そして、HNA メッセージは各端末の MAC アドレスからの IP アドレスへの変換テーブルを埋める。

#### 4.7.5 フラッディング

OLSR の突出した特徴として、フラッディングの効率化がある。フラッディングとは、特定の端末からネットワーク上にある全端末に同一パケットを送信する事である。

一般的なネットワークのフラッディングを行う場合、以下のようなアルゴリズムが使用される。

- 送信元端末は自端末に繋がる全端末にパケットを送信
- 各端末は受信したパケットを自端末以外の全端末に再送信
- 一度送信したパケットを再度受信した場合は廃棄

つまり、最低でも全端末が一度は送信を行う事になる。しかしこの時、図 4.10(a) に示すような一般的なフラッディングでは、全ての隣接端末がフラッディングを繰り返す事によるブロードキャストストームが発生する。このブロードキャストストームとは、送信元端末がブロードキャストで送信を行った際にそのブロードキャストが延々とネットワークを巡り続ける現象である。最悪の場合、帯域がブロードキャストの packets に占有されてしまい通信が不可能になる。生成された制御情報を乗せた packets は、ネットワークに参加している全端末に配信される事が多いため、フラッディングのアルゴリズムが経路制御プロトコルの重要な機能である事がわかる。

#### 4.7.6 MPR 集合

OLSR では図 4.10(b) に示すように MPR と呼ばれる端末のみが再フラッディングを行うことにより、ブロードキャストストームを防ぎ、さらに packets の削減を図る。このフラッディングメカニズムを MPR フラッディングと呼ぶ。OLSR では Hello メッセージとは別に TC メッセージを用いて、ネットワーク全体のトポロジ情報を各ノードへ伝えている。トポロジは、実際に存在する全てのリンクから構成するネットワークとは異なり、各ノードの MPR セレクタ集合から構築されるため、管理するリンク数は実際のリンク数よりも非常に少ない。また、OLSR は、ヒューリスティックな MPR ノード選定を行う。一般的には、全てのノードは最短経路を単純な Dijkstra アルゴリズムで決定するが、最短経路を求めるのは packets 棄却率の観点から見て得策とは考えにくい。

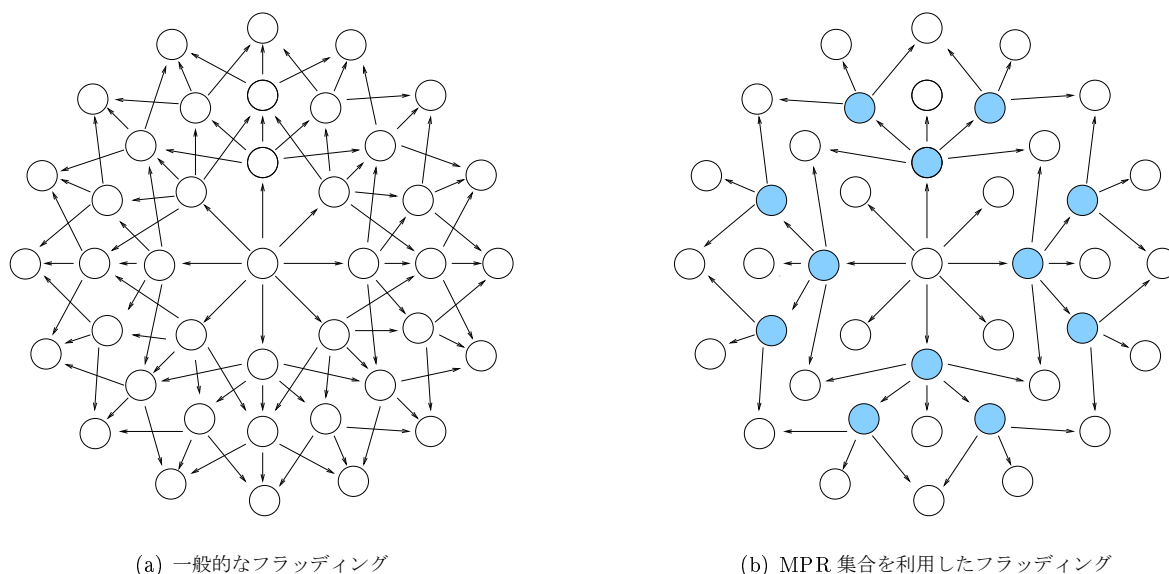


図 4.10 フラッディング

#### 4.7.7 MPR 集合の選択

OLSR の特徴であるフラッディングを効率よく行うための MPR 集合は、表 4.2 に示す各端末が持つ Willingness という 0 から 7 の範囲の値で選択される。これは HELLO メッセージによって送信されるので、周辺の端末はどの端末がどれだけ再送信に対して積極的であるかを把握することができる。0 の場合は MPR に選ばれる事はなく、7 の場合は積極的に選択される。通常の場合は 3 である。また、各値に名前が付けられている。

隣接端末集合の 1 ホップ先に存在する全ての端末にパケットが転送されるように、最小数の端末で MPR 集合を構成することが理想である。しかし、本当に最適な MPR 集合を見つけるためには、時間と優秀なコンピュータが必要になってしまう。そこで、実用に耐えうるレベルで MPR 集合を選択する高速なアルゴリズムを提案している。

表 4.2 Willingness

定数名	値
WILL_NEVER	0
WILL_LOW	1
WILL_DEFAULT	3
WILL_HIGH	5
WILL_ALWAYS	7

図 4.11 に MPR 集合に選ばれる流れを示す。各端末では、HELLO メッセージを送受信して隣接端末の 1 ホップ先に繋がっている端末の状態まで把握している。そこで、図 4.11(a) に示すように自端末は 2 つの集合を作る。それを N1 と N2 と呼ぶことにする。N1 は送信元端末と双方向リンクを持った隣接端末の集合の事である。直接通信ができる集合と言い変える事も出来る。N2 は N1 からさらに双方向リンクで繋がっている端末の集合である。ただし、自端末と N1 に含まれる端末は除外される。また、Willingness が WILL\_NEVER となっている端末も除外される。図 4.11(b) に MPR 集合の除外を示す。これらの集合は、N1 が MPR となる端末の候補で、N2 は N1 の集合で MPR 集合が選択されていないためにパケットが届かない端末という意味である。

次に、N1 の中から WILL\_ALWAYS の端末を MPR 集合として選択する。選択した端末から N2 に含まれる端末をパケットを受信できるようになったので、N2 から削除する。図 4.11(c) に MPR の選択と削除を示す。その後は、N1 の中から Willingness の最も大きい端末を MPR 集合として選択する。ただし、N2 へのリンクがない端末は除外する。もし、Willingness の値が同じ場

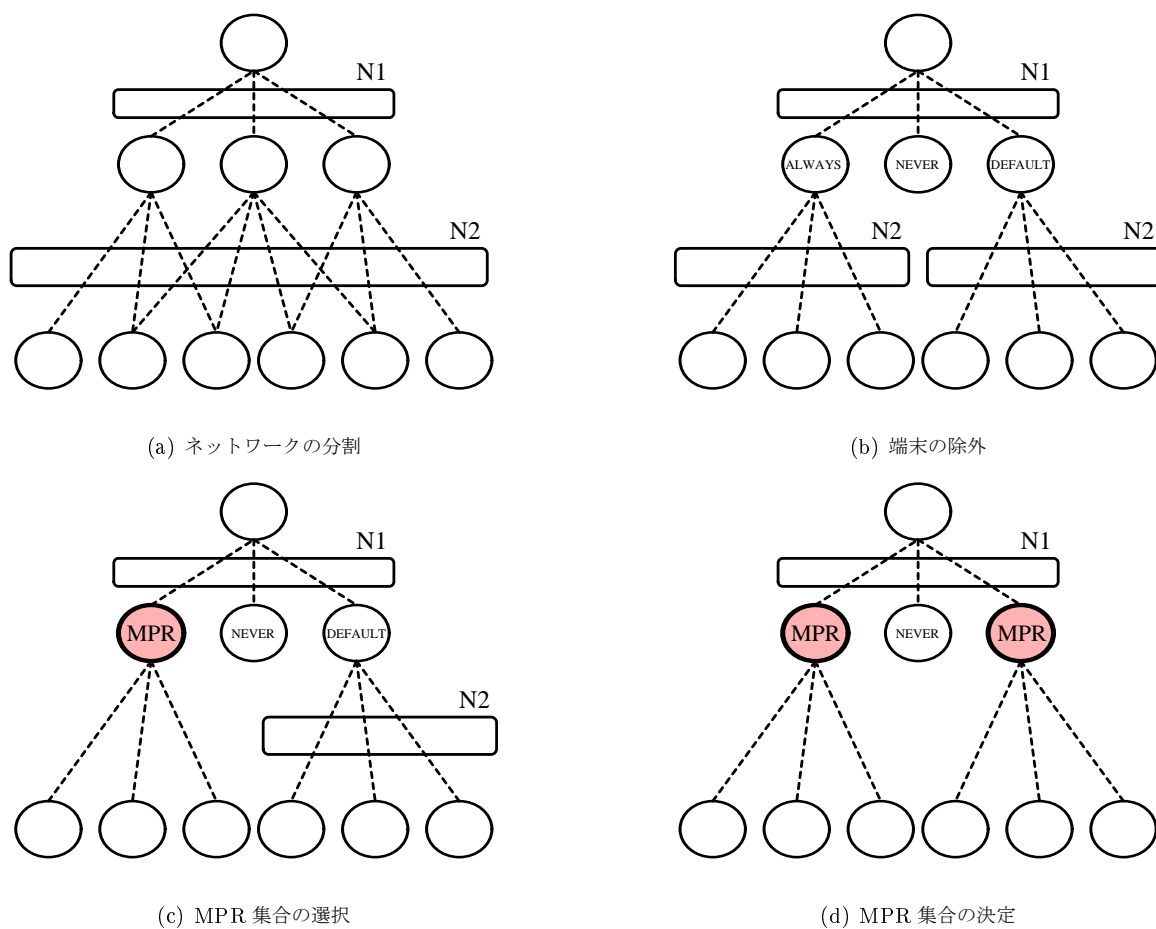


図 4.11 MPR 集合選択アルゴリズム

合には、N2 内にある端末に一番多くのパケットを届けられる端末を選択する。つまり、MPR 集合に選択された時により多くの端末をカバーできるような端末を選択するという事である。こうやって、MPR 集合に選ばれた端末から受信できるようになった端末を N2 から削除していく。この流れを N2 から全ての端末が削除されるまで繰り返す。そして、図 4.11(d) に示すように、MPR 集合が決定される。

MPR 集合の計算が終了すると、MPR 集合に含まれる端末は、自端末から発せられる HELLO メッセージによって、自端末の MPR 集合として選択された事を知る。これ以降、自端末から配信されるパケットは、MPR 集合に選択された端末を経由して N2 全体に再送信される N2 に含まれる端末をそれぞれが MPR 集合を決定しているので、さらにその先へと連鎖的にパケットが再送信されて、全体に行き渡る。

## 4.8 OLSRd

OLSR では、Willigness をメトリックとしているが、柔軟なネットワークを構築するには効率的であるとは言えない。そこで、OLSR daemon (OLSRd) では、OLSR に Link Quality (LQ) が拡張されている。これにより、パケット棄却率の平均をメトリックとした最短経路アルゴリズムを用いる。これは、Expected Transmission Count (ETX) [46, 47, 48] を計算で求める。これは、MANET 使用環境下では様々な携帯端末で IEEE 802.11b や n などの様々な無線 LAN 規格を利用し、さらにノイズが多い屋外での使用が多いと想定される MANET 環境下では、より一層確実な通信が求められるためである。なお、最新のバージョンでは IEEE 802.11g での通信にも対応し、アンドロイド端末や iOS 端末への実装を目指している。

本論文では、低動画の配信・受信を想定しているため、Reactive 型の AODV や Proactive 型の OLSR, B.A.T.M.A.N. より確実な通信を行う OLSRd を採用した。

### 4.8.1 ETX アルゴリズム

ETX は、マサチューセッツ工科大学で開発されたアルゴリズムである。式 4.1 のように定義される。

$$ETX = \frac{1.0}{(LQ * NLQ)} \quad (4.1)$$

この式には Link Quality (LQ) と Neighbor Link Quality (NLQ) と呼ばれる各リンクのコストを整数値によって表現している。LQ は自端末のパケット棄却率、NLQ は隣接端末のパケット棄却率を示す。パケット棄却率が低いほど ETX は高くなり経路選択時のプライオリティが高い経路となる。つまり、OLSRd では自端末と隣接端末のパケット棄却率をメトリックとする事で信頼性の高い経路を選択する事ができ、より確実に通信を行える。

ETX アルゴリズムには、ETX\_ff, ETX\_ffeth, ETX\_float と ETX\_fpm の 4 種類がある。

### 4.8.2 ETX\_ff

現在 OLSRd プロトコルのデフォルトの LQ アルゴリズムは ETX Funkfeuer/Freifunk (ETX\_ff) である。このアルゴリズムは、OLSR パケットのシーケンス番号を基にパケットロス率を決定する。また、ETX\_ff は LQ と NLQ 値の小さな変動を抑制するためにヒステリシス機構を含む。もし、隣接端末からパケットを受信できない場合、次のパケットを受信するまで LQ

の値を下げ続ける。整数演算で LQ の計算をするため、浮動小数点演算処理装置 (FPU) を持たない組み込みハードウェアでも動作可能である。さらに、Hello メッセージだけでなく、OLSR の全トラフィックを用いて計算するため、正確な計算を可能にしている。

#### 4.8.3 ETX\_ffeth

ETX\_ffeth は、ETX\_ff と互換性がない。他の ETX アルゴリズムの共通の問題を解決するために考案されたアルゴリズムである。これは、ETX の値が 1.0 より小さい場合、イーサネットリンクとワイヤレスリンクを同じ値として計算してしまう問題である。これにより、ETX=1.5 のシングルワイヤレスリンクの経路と ETX=1.0 のイーサネットリンクと ETX=1.0 のワイヤレスリンクを組み合わせた 2 ホップの経路では、後者の経路が選択されてしまう。そこで、ETX\_ffeth では、パケットロスがないイーサネットリンクには特殊な LQ エンコーディング値 (ETX=0.1) を用い、この問題の解決している。このように、他の ETX アルゴリズムとは異なるエンコーディングを行っているため、互換性は無い。

#### 4.8.4 ETX\_float

初期段階の ETX アルゴリズムが ETX\_float である。指数関数を用いた計算を行い、より良い経路制御を可能にするために開発された。Hello パケットのみを計算に用いる事により、素早い計算を可能にしている。

また、ETX\_float では、Link Quality Aging を利用している。Aging では、パラメータ値を 0.05 から 1.0 (最大) にする事により、計算スピードを高速化する。

現在は、ETX\_ff が主流となり、ETX\_float はあまり使用されていない。

#### 4.8.5 ETX\_fpm

ETX\_float の計算の高速化に特化した ETX アルゴリズムが、ETX\_fpm である。ETX\_float では、指数関数を用いた高精度の計算を行っているが、ETX\_fpm ではリアルタイム性に重点を置き、固定小数演算を実装している。そのため、素早い経路制御を可能にしている。また、ETX\_float と ETX\_ff に互換性がある。



#### 4.8.6 Fisheye

OLSR のフラッディングは、TC メッセージによりすべてのメッシュネットワークに存在するルーターが大規模なメッシュのためのオーバーヘッドを作成する事が出来る。TC メッセージの更新間隔を長くさせる事によるオーバーヘッドの削減が可能だが、ルート変更や経路制御テーブル内のエラーの修正に遅延が発生してしまう。そこで、Fisheye メカニズムではバランスの良い妥協点を見つけるためのアルゴリズムを実装している。多くの TC は TTL を減らし、隣接ルータに伝達させる。

## 第 5 章

# 実験モデル

この章では、MANET テストベッドの詳細な説明や各パラメータについて述べる。また、それぞれの実験モデルの詳細や実際の端末の配置などモデル図や写真を交えて説明する。

### 5.1 MANET テストベッド

図 5.1 に MANET テストベッドの概念図を示す。インターネットとのゲートウェイであるデスクトップ PC に WEB サーバと DNS サーバを稼働させている。また、WEB インタフェースを実装し、WEB ブラウザ上から離れた場所にある端末を操作する事ができる。DNS サーバを稼働させた理由は、各ホストネームを管理するためである。MANET を形成する端末はノートパソコンを利用し、無線 LAN も各端末に搭載されている物利用する。また、Windows OS を用いた MANET 環境の構築は可能だが、Linux 系 OS での利用を主に想定されているため、エラーも多く機能を十分に発揮できない。さらに、Linux OS は、OS のバージョンアップの更新が非常に速いため、プログラムの未対応や不具合の発生が多発してしまう。そのため、各端末には比較的多くの MANET 経路制御プロトコルの動作が確認できた Fedora Core 10.04 をインストールした。

評価指標として、スループット、パケット棄却数、ジッターを用いる。これらの測定データは Distributed Internet Traffic Generator (D-ITG) [49] を用いて取得する。トランスポートプロトコルは UDP のみを用いた。UDP は高速化を実現するため、パケットの損失を考慮していない。この特徴により UDP は多少のデータの損失が影響せず、リアルタイム性が重視される動画などで用いられる。よって、データの信頼性が重要になる FTP などのアプリケーションでは用いられない。一方、TCP は UDP と比べオーバーヘッドが大きいため、速度が低下するが、コネクションを確立するスリーウェイハンドシェイク機能により、パケットの損失を検知するとパケットの再送を行いデータの信頼性が高まる。よって、データの信頼性が重要な FTP などのアプリケーショ

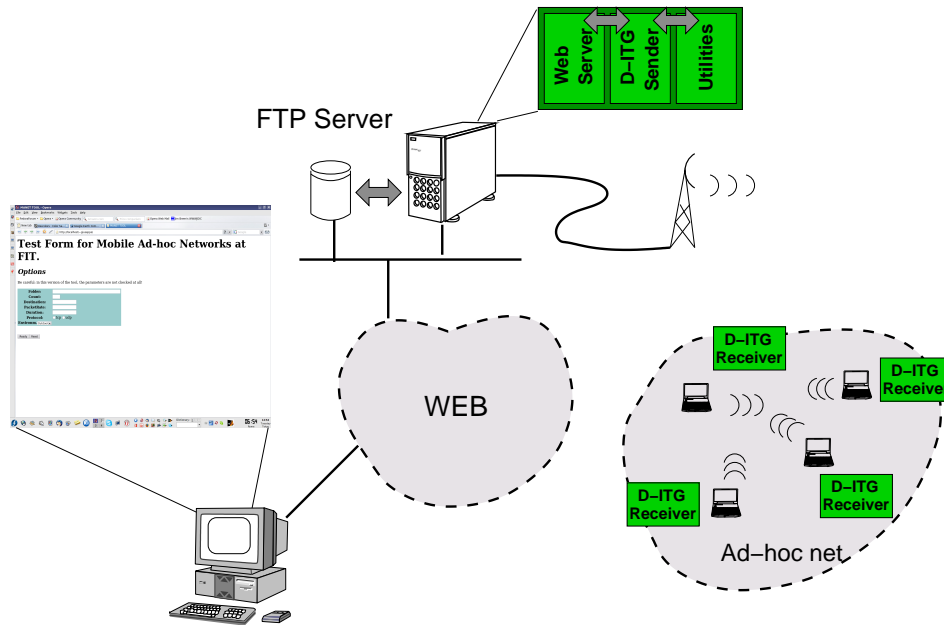


図 5.1 MANET テストベッド

ンで用いられる。しかし、端末の移動によりトポロジが常に変化し、また無線通信を主に利用する MANET 環境では、相性が非常に悪く、通信が不可能になる事が多々発生するため、MANET 環境下での TCP の利用は考えられていない。Link Quality Window Size (LQWS) は、以前の研究結果 [50] から 10 に固定している。

各実験で得られた結果はグラフと表で示す。グラフは縦軸が各パラメータの値、横軸は時間 (sec) を表す。各端末毎の実験データの外れ値を除いたデータのみで平均化を行い、2 秒毎のタイムライン形式でグラフ化する。また、表では実験の各端末の 1 秒毎の平均値を表す。

## 5.2 各実験テーマの概要と詳細

図 5.2 に示す複数の実験モデルを用いて、評価を行う。本論文では、複数の実験モデルを定義するが、基本となるトポロジは大別すると、3 種類に分類する事ができる。

1. 階段における 6 台から構成するトポロジ
2. 階段と通路を組み合わせた 6 台から構成するトポロジ
3. 屋内外通路における 5 台から構成するトポロジ

全 8 種類の実験モデルを以下に示す。

1. 屋内階段における周波数の利用率を考慮した実験モデル (実験 1)

2. 屋外階段を考慮した実験モデル (実験 2)
3. 屋内における水平方向と垂直方向のトポロジ考慮した実験モデル (実験 3)
4. 屋内通路と屋外階段を考慮した実験モデル (実験 4)
5. 屋内外の通路を考慮した実験モデル (実験 5)
6. Hello パケットの通信間隔を考慮した実験モデル (実験 6)
7. Hello パケットの有効時間を考慮した実験モデル (実験 7)
8. ETX アルゴリズムを考慮した実験モデル (実験 8)

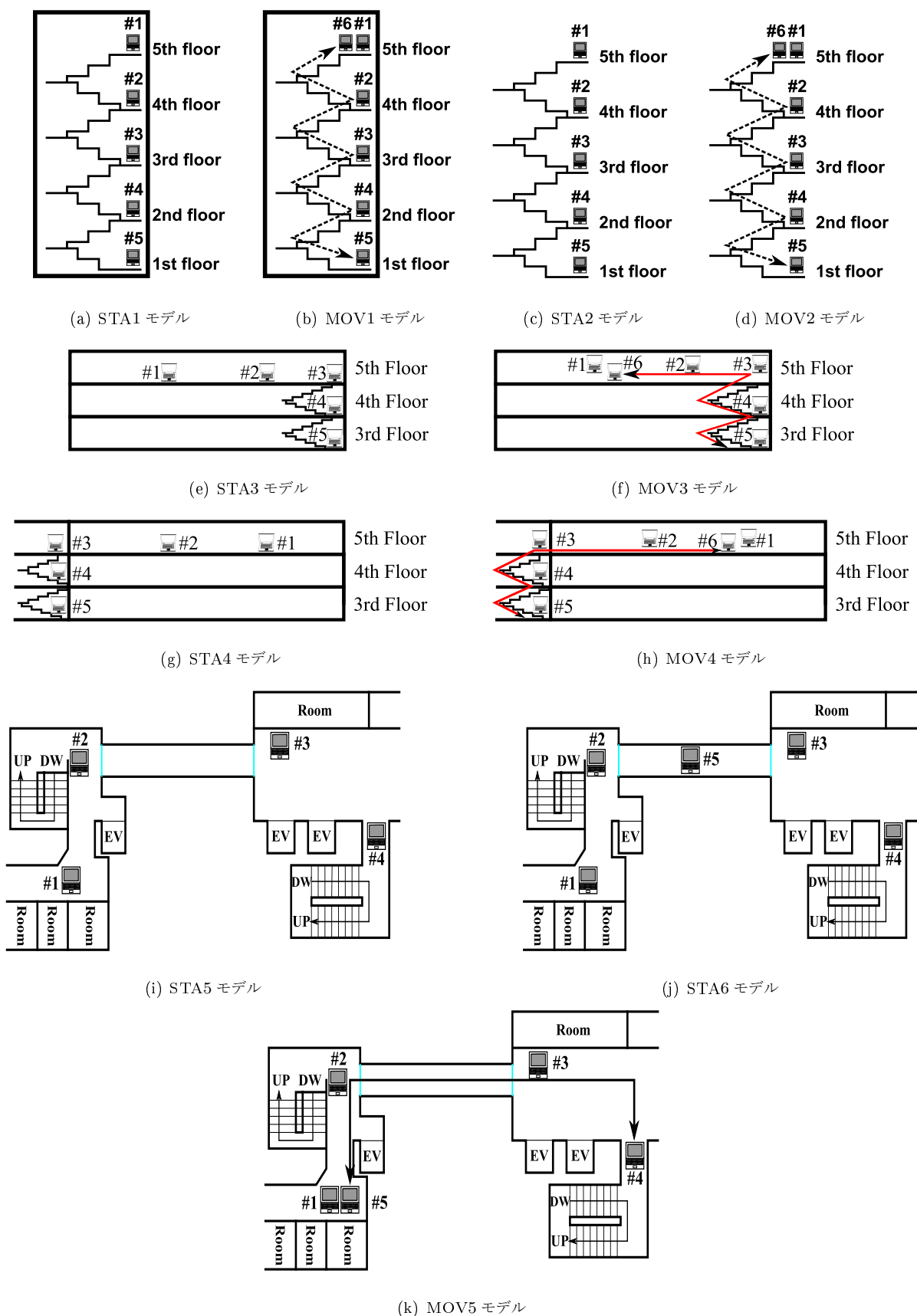


図 5.2 各実験モデルのリスト



(a) 端末 1 (5 階)



(b) 端末 2 (4 階)



(c) 端末 3 (3 階)



(d) 端末 4 (2 階)



(e) 端末 5 (1 階)



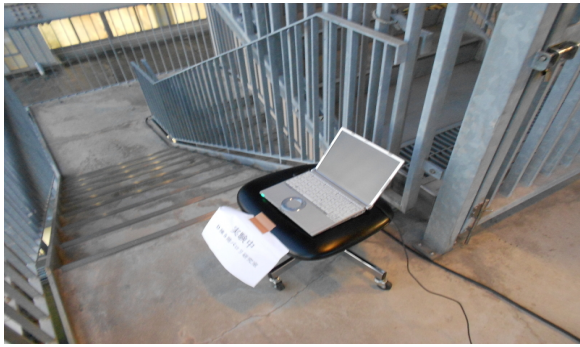
(f) 端末 6 (移動端末)

図 5.3 実験 1 の端末の配置

端末は以下のルールに則って実験を行う。

- 端末は市販のノートパソコンを利用
- 送受信端末は背もたれの無い椅子に配置
- 送信端末は移動しない
- 移動端末は人間が端末を持ち上げ、一定の速度を保って移動
- 折り返し地点では、3 秒間停止





(a) 端末 1 (5 階)



(b) 端末 2 (4 階)



(c) 端末 3 (3 階)



(d) 端末 4 (2 階)



(e) 端末 5 (1 階)



(f) 端末 6 (移動端末)

図 5.4 実験 2 の端末の配置



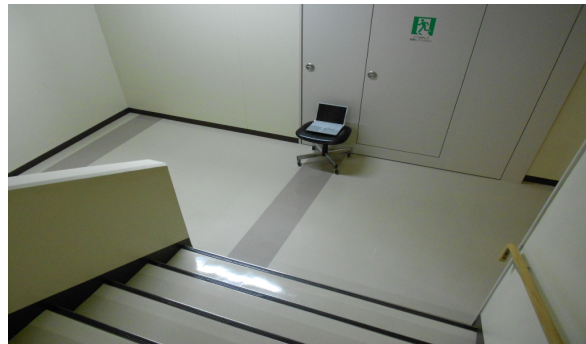
(a) 端末1 (5階)



(b) 端末2 (5階)



(c) 端末3 (5階)



(d) 端末4 (4階)



(e) 端末5 (3階)



(f) 端末6 (移動端末)

図 5.5 実験3の端末の配置





(a) 端末 1 (5 階)



(b) 端末 2 (5 階)



(c) 端末 3 (5 階)



(d) 端末 4 (4 階)



(e) 端末 5 (3 階)



(f) 端末 6 (移動端末)

図 5.6 実験 4 の端末の配置



(a) 端末 1



(b) 端末 2



(c) 端末 3



(d) 端末 4



(e) 端末 5 (移動端末)

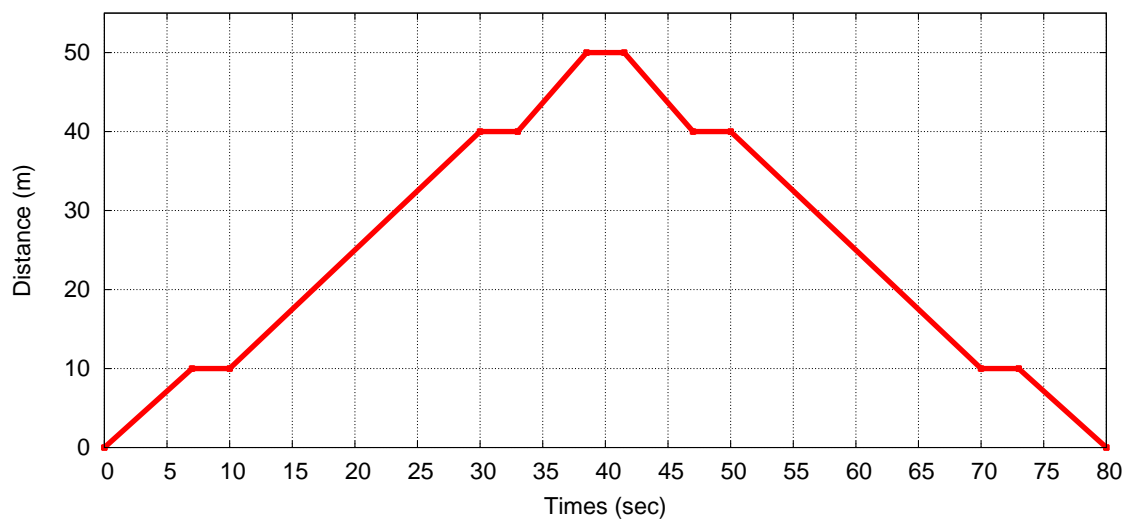
図 5.7 実験 5, 6, 7, 8 の端末の配置

表 5.1 実験の共通パラメータ

パラメータ	項目
移動端末	0 or 1
ロジカルリンク	メッシュ
MAC	IEEE 802.11b
トラフィックジェネレータ	D-ITG
フロータイプ	CBR
パケットレート	122 pps
パケットサイズ	512 bytes
スループット	299.712 bytes
実験回数	10
経路制御プロトコル	OLSRd
無線 LAN チャンネル	1
LQWS of OLSR	10

表 5.2 各実験の端末数と実験時間

実験名	端末数	実験時間 [sec]
実験 1	6	180
実験 2	6	180
実験 3	6	180
実験 4	6	180
実験 5	5	80
実験 6	5	80
実験 7	5	80
実験 8	5	80



(a) 送信端末と移動端末間の距離 (実験 5, 6, 7, 8)

### 5.3 屋内階段における周波数の利用率を考慮した実験モデル（実験 1）

MANET の実用化後の利用環境は、無線端末に搭載された無線 LAN を用いた 2.4GHz 帯を主に用いる。一般的に、ルーターや無線端末は既に使用されている周波数に影響を与えないために、自動的に離れた周波数帯を使う。そのため、利用者は意識せずに影響の少ない周波数帯を使った通信を可能にする。しかし、実際に影響を与えずに通信が行えるのは 3ch しか用意されておらず、互いに干渉をしながら通信せざるを得ない。さらに、近年のスマートフォンやタブレット端末の普及や通信機器の無線化により、2.4GHz 帯を利用した通信が急速に増え、干渉はもはや避けられない。

我々が行ってきた従来の実験 [51, 52, 53] では、周波数帯域の使用チャンネルを簡易的な測定を行い、干渉を抑えながら実験を行ってきた。そのため、使用周波数帯域の利用状況とその影響について調査が必要だと考え、本実験では周波数利用率を計測し、周波数利用率の影響を調査した。

ビルなどの建築物内で無線 LAN を使用する場合、お互いの干渉を軽減するために各階でチャンネルを離すのが一般的である。実際、本校の無線 LAN の仕様チャンネルを調べると、各階のアクセスポイントのチャンネルは離れている事を確認した。

実験は本学の D 棟にある屋内階段に端末を各階にノート PC を 1 台ずつ配置して行った。送信端末は 5 階の端末とし、各階に配置したそれぞれの端末にパケットを送信する。また、送信端末の隣に配置された端末 6 は、実験開始と同時に動き始め、180 秒後には最初の地点まで戻る。実験のモデル図を図 5.2(a) と 5.2(b) に示す。さらに、実際の端末の配置場所を図 5.3 に示す。全端末が静止した STA1 モデルと移動端末を考慮した MOV1 モデルの 2 種類で実験を行った。

### 5.4 屋外階段を考慮した実験モデル（実験 2）

我々の従来の実験 [54] では、屋内実験を中心に行ってきた。しかし、MANET は周囲の環境に縛られない柔軟なネットワークの構築を目的としている。以前行った屋内階段の実験では、立体的な建物による電波の反射や回折でスループットの低下やパケット棄却数の増加を発見した。だが、低速度な通信は可能であると判断した。そこで、我々はより通信が困難な利用場所と考えられる屋外階段で実験を行い、MANET の技術的課題やルーディングプロトコルの解決すべき問題点を考察する。

本実験は、本校の D 棟西側にある非常用屋外階段の 1 階から 5 階で実験を行った。5 階の端末を送信端末とし、各階に端末をそれぞれ 1 台ずつ配置した。実際の端末の配置場所を図 5.4 に

示す.

まず, 図 5.2(c) に示す STA2 モデルは全 5 台の端末で静的なネットワークを構築した. 次に, 図 5.2(d) に示す MOV2 モデルでは移動端末として端末 6 を 1 台追加した. この移動端末は, 送信端末である 5 階の端末の隣に配置し, 実験開始と同時に人が持ち上げ, 1 階の端末まで移動し, 再度 5 階の送信端末の隣まで戻る. 1 往復にかかる時間は約 180 秒であるため, 実験時間も表 5.2 に示すよう 180 秒としている. このように STA2 モデルと MOV2 モデルを比較する事により移動端末による影響を調査する.

## 5.5 水平方向と垂直方向のトポロジを考慮した実験モデル (実験 3)

従来の実験では, 屋内の 1 フロアを用いて端末が水平移動を行う実験や屋内外の階段を用いた垂直方向の移動を行う実験を行ってきた. しかし, 実際の屋内での利用環境では, 様々な利用場所や端末の移動が想定される. そこで, 本実験では水平方向と垂直方向に端末が移動を行い, よりダイナミックにトポロジが変化する環境でネットワークを構築した. 実験のモデル図を図 5.2(e) と図 5.2(f) に示す. 図 5.2(e) は, 全ての端末が静止した STA3 モデル, 図 5.2(f) は移動端末が 1 台追加された MOV3 モデルとする. 実験は, 本校の D 棟の 3 階から 5 階で行い, 5 階には送信端末を含んだ 3 台の端末を配置し, 4 階と 3 階にはそれぞれ 1 台の受信端末を配置した. 移動端末である端末 6 は, 送信端末の隣から移動を開始し, 3 階の受信端末の前まで歩いて移動し, 再度送信端末の隣まで戻るまでを 1 往復と設定した. 実際の端末の配置を図 5.5 に示す. また, 実験時間は, 表 5.2 に示したように, 180 秒とする.

## 5.6 屋内と屋外階段を考慮した実験モデル (実験 4)

これまでの実験は, 屋内と屋外の片方の実験環境を想定していた. しかし, 実環境下では屋内外を問わず, 通信を行う可能性が高い. そこで, 比較的通信が容易な屋内環境と劣悪な環境である屋外階段を考慮した実験を行った. 実験のモデル図は図 5.2(g) の STA4 モデルと 5.2(h) に示す MOV4 モデルの 2 種類で行う. 実験は, 5 階に送信端末を含め 3 台配置する. その内 1 台は屋外階段に配置する. そして, 屋外階段の各階に 1 台ずつ配置する. 送信端末の端末 1 からそれぞれの受信端末にパケットを送信し, 性能評価を行う. 実際の端末の配置を図 5.6 に示す. 本実験時間は, 中継端末の 1 往復にかかる時間と同じ 180 秒とする.



## 5.7 屋内と屋外を考慮した実験モデル（実験 5）

以前の実験では、屋内モデルを中心した実験モデルを行ってきた。実験 4 のような実験環境は、特殊な実験モデルであり、その実験結果は実環境への応用が出来ないという指摘を受けたため、本実験では平坦な場所で屋内外環境を構築し、より実環境に近いモデルを考案した。実験は、本校の C 棟と D 棟の 5 階を繋ぐ渡り廊下を利用した実験を行った。図 5.2(i) と 5.2(j) と 5.2(k) に示す、STA5 モデル、STA6 モデル、MOV5 モデルの 3 種類のシナリオで実験を行った。この実験モデルでは、これまでの実験と比較して通信範囲が狭いため、端末 4,5 台を用いた。実際の端末の配置を図 5.7 に示す。また、送信端末と移動端末の距離を図 5.2 に示す。これは、以降に行う実験 6, 7, 8 も同じである。

## 5.8 Hello パケットの通信間隔を考慮した実験モデル（実験 6）

これまでの実験では、周囲の環境が MANET 環境下のネットワークに与える影響について調査を行っていた。しかし、OLSRd のパラメータの変更を行わず、初期設定のまま実験を行っていた。その結果、多くの実験で移動端末との通信が一時的に切断される事が明らかになった。しかし、移動端末への通信が一定時間でできず、スループットの低下を課題としていた。これは移動端末が送信端末から直接電波が届かなくなり、リンクが切断されてしまう事が原因と考えられる。そこで、アルゴリズムを変更せずに済み、比較的調整しやすい OLSR のパラメータを変更し、対応する事を試みた。これは、HELLO パケットの更新時間を早める事により、接続が切断された後も、別ルートを用いる事が可能になり、再接続の時間を短縮する事ができると考えたためである。

HELLO パケットの通信間隔の初期値は 2.0 秒である。そこで、HELLO パケットの通信間隔を 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 秒の 5 段階に変更し、通信間隔の変更による影響を比較調査する。実験は、実験 5 の図 5.2(i) と図 5.2(k) に示す STA5 と MOV5 の 2 種類のモデルで行った。

## 5.9 Hello パケットの有効時間を考慮した実験モデル（実験 7）

実験 6 では、HELLO パケットの通信間隔を短くし、スループットの低下を若干抑える事ができたが、再接続の時間短縮には大きな変化は見られなかった。そこで、今回の実験では、HELLO パケットの有効時間を変更した実験を行った。この有効時間とは、端末が受信した経路情報を保持しておく時間の事である。なお、生存時間は通信間隔より長く設定しないといけない。経

路が切断された後、有効時間内の場合、有効な経路として選択されてしまうため、通信経路の変更が行われない。そこで、実験では HELLO パケットの有効時間の初期値である 20 秒から、10 秒と 30 秒に変更し、データを収集した。HELLO パケットの中身は制御情報のため、頻繁に更新を行うと実際の通信データの送受信を圧迫してしまうため、少ない方が良い。そのため、HELLO パケットの通信間隔は、初期値である 2.0 秒とした。また、実験結果の比較を容易に行うため、実験 5 と同じ屋内外実験モデルで行った。

### 5.10 ETX アルゴリズムを考慮した実験モデル（実験 8）

これまでの研究で、中継端末がネットワークから離脱した後、再接続の際に時間がかかりスループットの低下やパケット棄却の増加が課題となった。しかし、HELLO メッセージの更新間隔や有効時間の変更では、若干の性能向上に繋がったが、柔軟な切り替えが出来てるとは言い難い。そこで、新しいアプローチとして、本実験では最新の ETX アルゴリズムである ETX\_ff とレガシーな技術である ETX\_float の性能を比較するため、それぞれで HELLO パケットの送信間隔を変更して実験を行った。ETX\_ff では全てのパケットを基に経路選択を行うが、ETX\_float では HELLO パケットのみで経路選択を行う事に注目した。一方、ETX\_ff はドイツの無線 LAN 規格で利用するために互換性を考慮されたアルゴリズムである。その結果、レガシーな技術となった ETX\_Float アルゴリズムだが、HELLO パケットのみを経路選択時の指標にするため、調整が容易で頻繁にトポロジが変化する環境に適していると考え、実験を行った。

ETX アルゴリズムの与える影響について調査するため、実験モデルは図 5.2(i) と図 5.2(k) に示す実験 5 の実験モデルである STA5 と MOV5 の 2 モデルを再び採用した。実験端末の配置も同じく図 5.2(i) と図 5.2(k) と同じとする。送信端末の端末 1 から各受信端末にパケットを送信し、経路制御プロトコルの性能評価を行った。全端末の ETX アルゴリズムを変更し、実験毎に HELLO メッセージの更新間隔を変更した。

## 第 6 章

# 実験結果

この章では、それぞれの実験毎に時間軸表示のグラフと各実験の平均値の表を用いた実験結果の説明を行う。また、グラフや表の実験結果から問題点などを考察する。

### 6.1 屋内階段における周波数利用率を考慮した実験モデル（実験 1）

図 6.1 に実験開始直前の各階に配置した各階の端末付近の周波数の使用率を示す。図 6.2, 6.3, 6.4 に各評価指標毎の実験結果を示す。さらに、表 6.1, 6.2, 6.3 にそれぞれの平均値をまとめた実験結果を示す。

近距離にある端末 2 では、パケット棄却やジッターなどもほぼ測定されず、両実験モデルで理論値が得られている。周波数利用率のグラフを見ると、5 から 4 階ではチャンネル 1 (2401~2423MHz) があまり利用されておらず、影響が少ない事がわかる。利用率が 15% 程の 3 階では、スループットが約 40% 低下した。特に利用率が 30% 程度の端末 4 (2 階) では端末 3 (3 階) の結果からさらに 35% 低下し、理論値の 45% 程度に低下している。端末 5 では、端末 4 の結果から低下し、理論値の 70% 低下した。結果として、使用周波数が 10% を超える 3 階より下の階では約 30 から 40% 程低下している事が確認できた。MOV1 モデルでは、直接通信が可能な端末 2 では理論値が得られている。しかし、直接通信ができない端末 3 の結果は大幅な低下をしており、理論値の 45% 程に低下している。STA1 モデルの端末 4 の結果に近い。MOV1 モデルの端末 4 の実験結果の振れ幅が大きく、不安定な結果となっている。端末 5 では、STA1 モデルと MOV1 モデルのグラフは非常によく似たグラフのため、移動端末を経由せずに通信を行っている事が読み取れる。

使用周波数が 10% を超えるとスループットの低下が見られるため、やはり利用されていないチャンネルで通信を行うべきである。本実験では、低画質動画を考慮した実験モデルのため、通信



に与える影響が最低限に抑えられたと考えられる。より高スループットの通信の場合、本実験結果より大きな影響を受け、通信速度の低下が問題になると思われる。今回の実験結果を受け、実験2以降では、実験開始前に使用周波数を調査し、可能な限り影響の少ないチャンネルで実験を行っている。

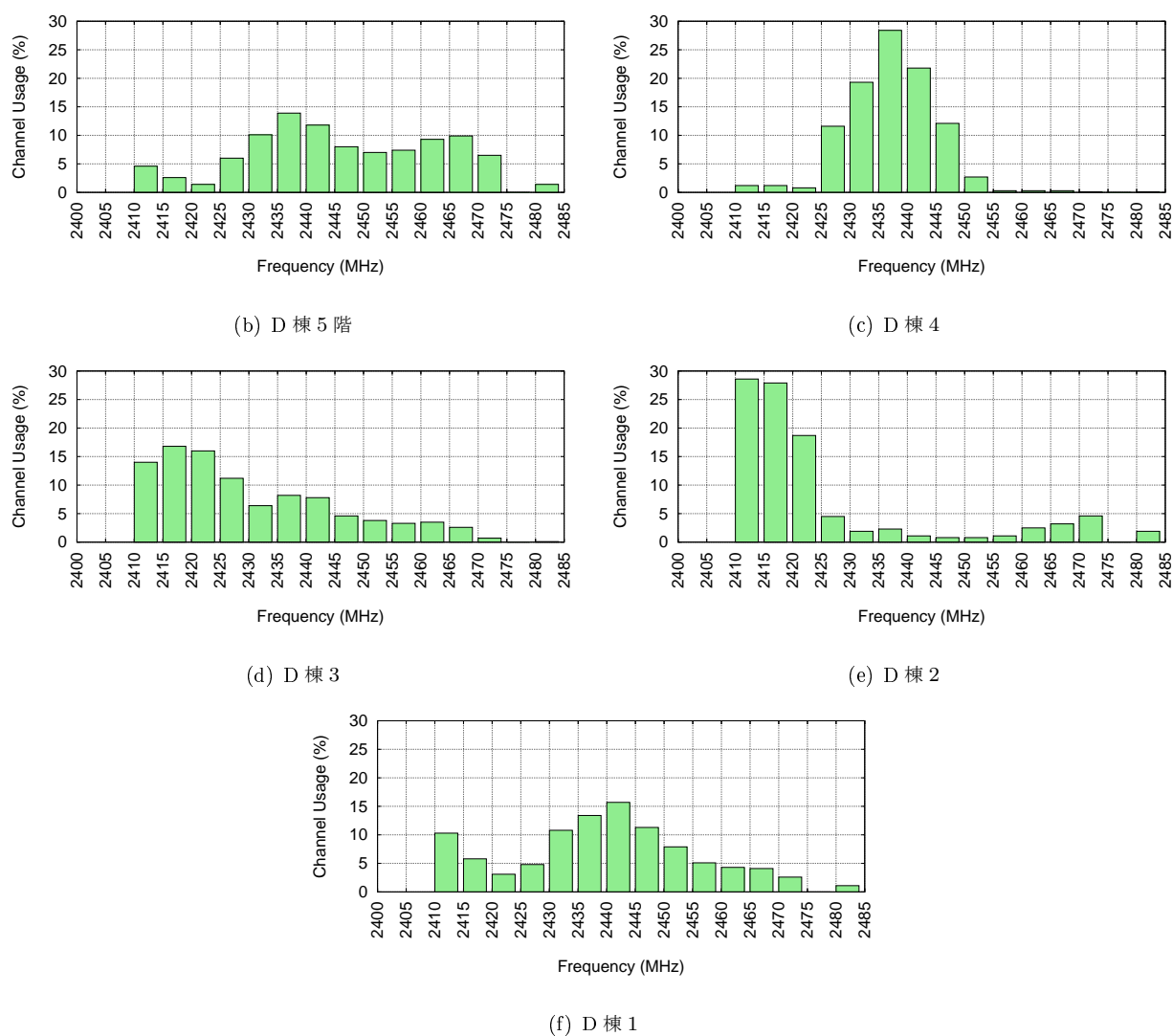
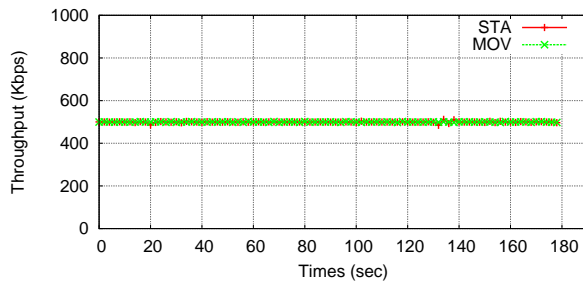
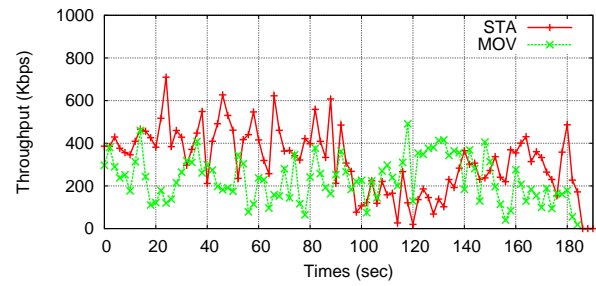


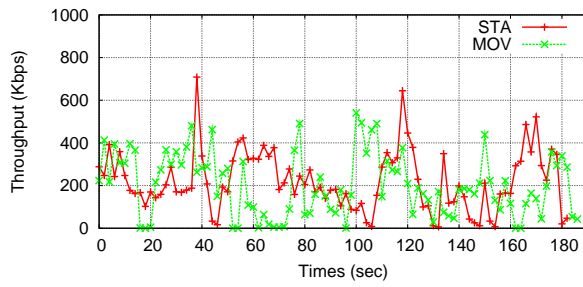
図 6.1 D 棟各階のチャンネルの使用状況



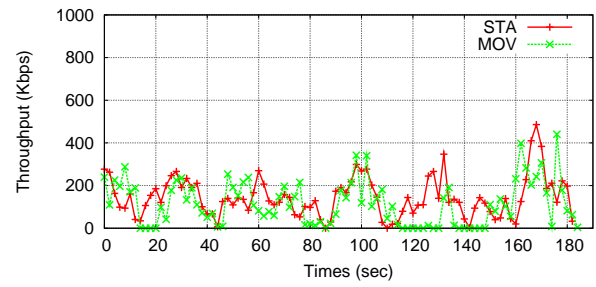
(a) 実験1のスループット (端末2:4階)



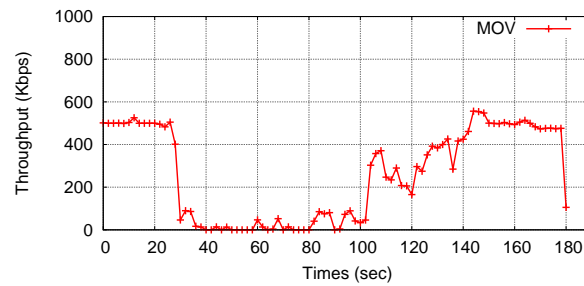
(b) 実験1のスループット (端末3:3階)



(c) 実験1のスループット (端末4:2階)



(d) 実験1のスループット (端末5:1階)

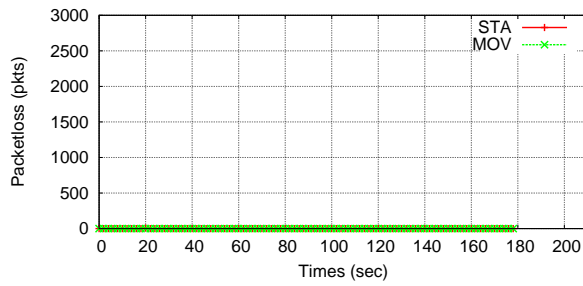


(e) 実験1のスループット (端末6:移動端末)

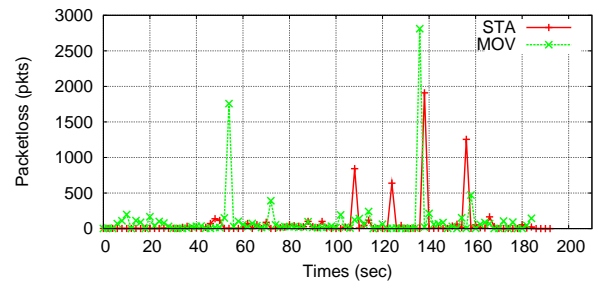
図 6.2 実験1の実験結果 (スループット)

表 6.1 実験1の平均スループット

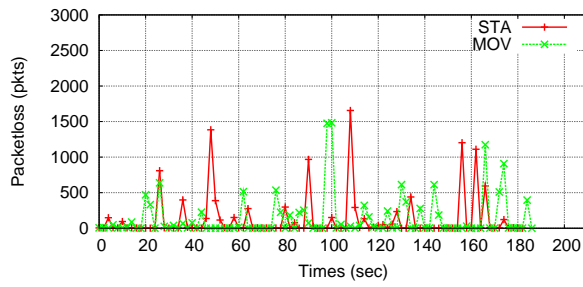
実験モデル	送信端末 → 受信端末				
	1→2	1→3	1→4	1→5	1→6
STA	499.56	315.23	221.01	144.66	-
MOV	499.72	232.24	202.83	114.26	263.93



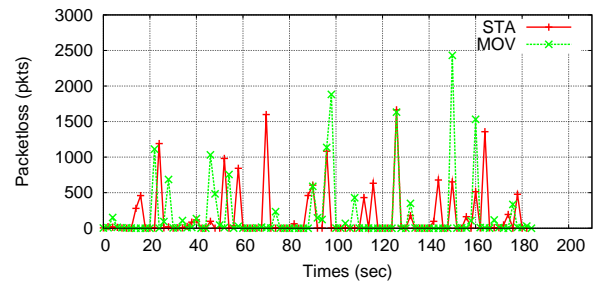
(a) 実験 1 のパケット棄却数 (端末 2 : 4 階)



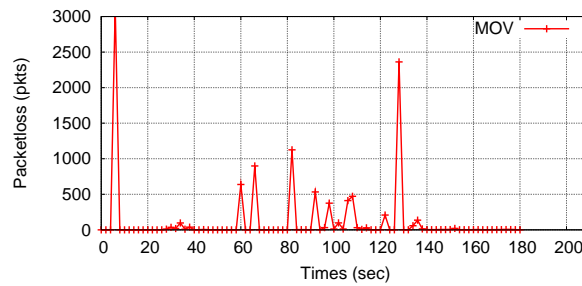
(b) 実験 1 のパケット棄却数 (端末 3 : 3 階)



(c) 実験 1 のパケット棄却数 (端末 4 : 2 階)



(d) 実験 1 のパケット棄却数 (端末 5 : 1 階)

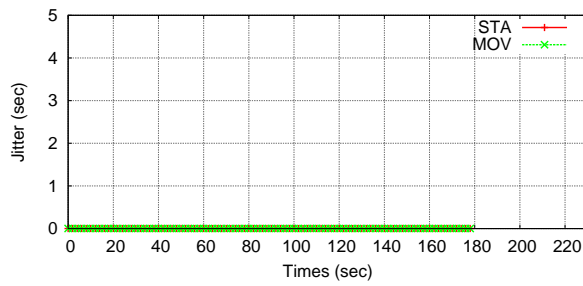


(e) 実験 1 のパケット棄却数 (端末 6 : 移動端末)

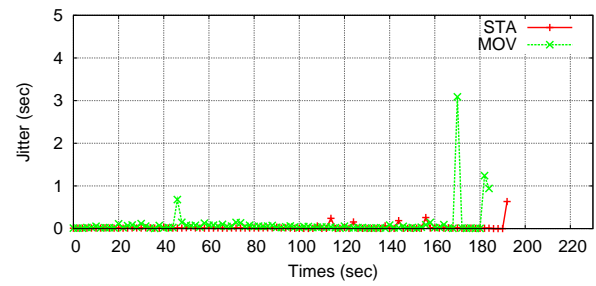
図 6.3 実験 1 の実験結果 (パケット棄却数)

表 6.2 実験 1 の平均パケット棄却数

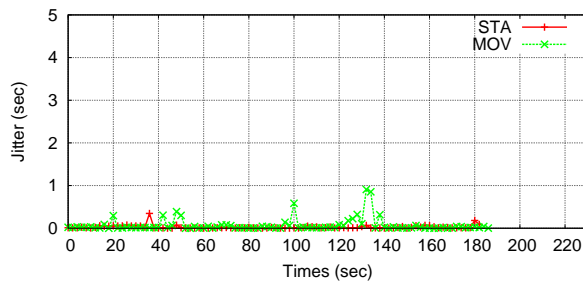
実験モデル	送信端末 → 受信端末				
	1→2	1→3	1→4	1→5	1→6
STA	0.01	67.31	126.07	165.38	-
MOV	0.00	103.99	138.79	171.53	119.71



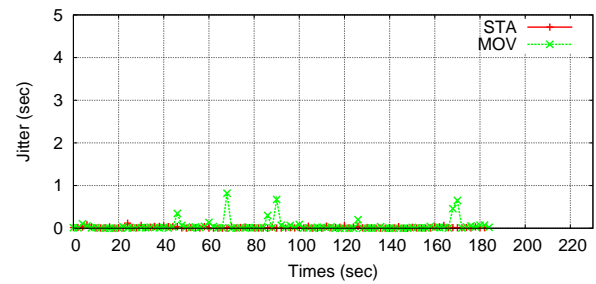
(a) 実験 1 のジッター (端末 2 : 4 階)



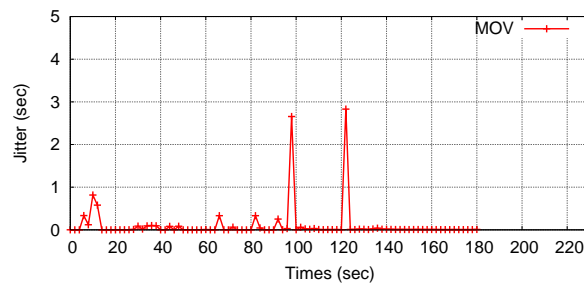
(b) 実験 1 のジッター (端末 3 : 3 階)



(c) 実験 1 のジッター (端末 4 : 2 階)



(d) 実験 1 のジッター (端末 5 : 1 階)



(e) 実験 1 のジッター (端末 6 : 移動端末)

図 6.4 実験 1 の実験結果 (ジッター)

表 6.3 実験 1 の平均ジッター

実験モデル	送信端末 → 受信端末				
	1→2	1→3	1→4	1→5	1→6
STA	0.00	0.03	0.03	0.02	-
MOV	0.00	0.11	0.07	0.06	0.10

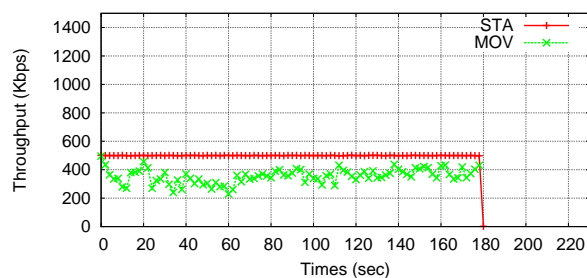
## 6.2 屋外階段を考慮した実験モデル（実験 2）

各評価指標毎の実験結果を図 6.5, 6.6, 6.7 に示し、平均値を表 6.4, 6.5, 6.6 にそれぞれ示す。

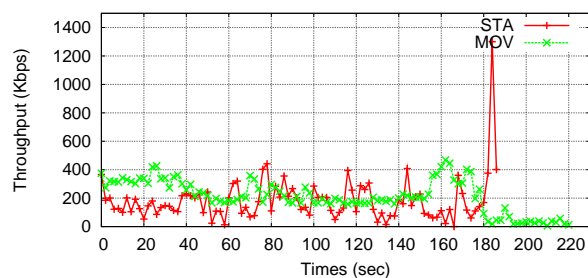
STA2 モデルでは、実験 1 の屋内階段より良い結果が得られ振れ幅の少ない比較的安定した通信を行っている。MOV2 モデルでは、大幅なスループットの低下が確認できる。これは、周囲の影響が大きいと考えられる。特にこの屋外階段はコンクリート製に遮られた位置にそれぞれの端末があり、垂直方向の通信が非常に通信が難しい。

端末 5 は、STA2 と MOV2 モデルは、非常によく似たグラフで中継端末を経由していない事がわかる。これは、今回の実験環境を構築した屋外階段では周囲に高い建築物が無いため、反射波を利用した通信が困難な事が考えられる。また、屋外では非常に多くの電波や環境の変化による影響を受けている。実際、実験中に周囲の電波を測定すると、屋内より非常に多くの利用中の電波が測定された。実験 1 の屋内階段では理論値が得られていた近距離の端末 2 の結果も、STA2 モデルでは安定しているが、MOV2 モデルの結果が低下している。この事から、屋外での 2.4GHz 帯を用いた通信の困難さがわかる。さらに、端末 3 では STA2 モデルの結果がより低下している。これは、移動による影響だけでなく、雑音等の影響が非常に強い事が考えられる。

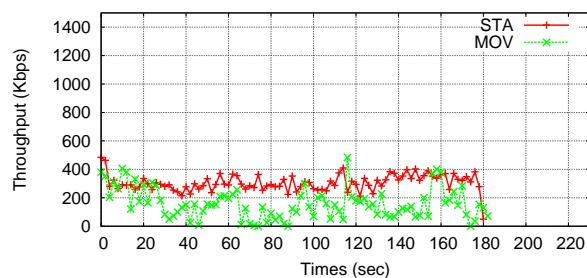
実験 1 の屋内階段での実験に比べ、全体的に不安定な結果が確認できる。表 6.4 に示す平均スループットの結果からもその結果が見て取れる。特に、ジッターの大幅な増加が顕著である。屋内階段で行った実験 1 より最大 16 倍以上の差がみられた。つまり、通信が不安定になっている。これらの結果から、屋外階段は MANET 環境にとって非常に劣悪な環境であり、屋内のネットワークを中心とした方が良いと考えられる。これは屋外階段という劣悪な環境下での実験が原因だと考えられる。



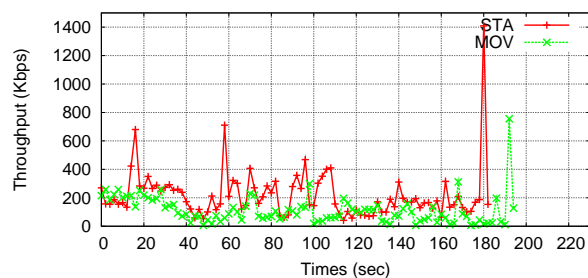
(a) 実験 2 のスループット (端末 2 : 4 階)



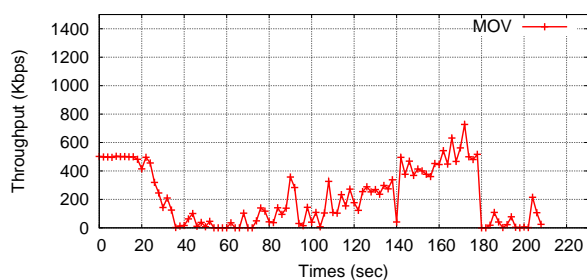
(b) 実験 2 のスループット (端末 3 : 3 階)



(c) 実験 2 のスループット (端末 4 : 2 階)



(d) 実験 2 のスループット (端末 5 : 1 階)

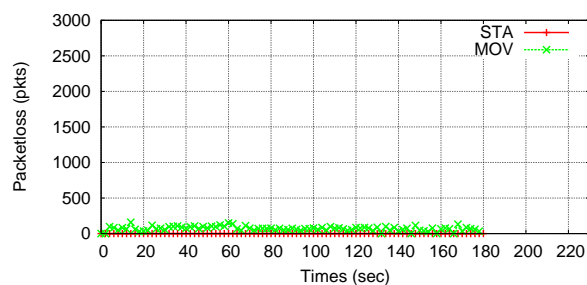


(e) 実験 2 のスループット (端末 6 : 移動端末)

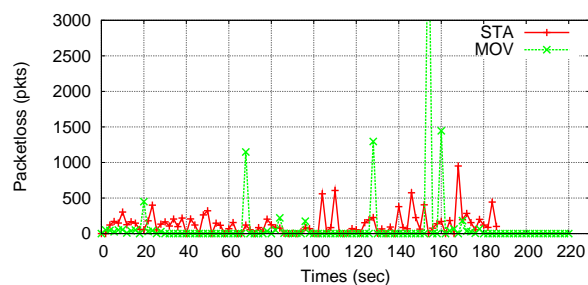
図 6.5 実験 2 の実験結果 (スループット)

表 6.4 実験 2 の平均スループット

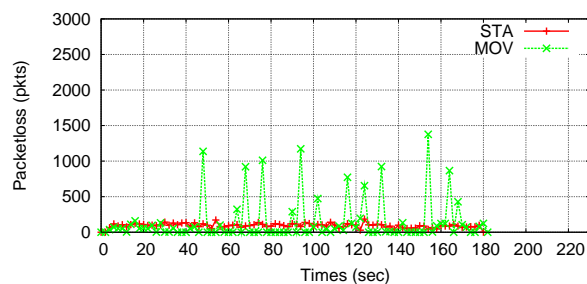
実験モデル	送信端末 → 受信端末				
	1→2	1→3	1→4	1→5	1→6
STA	494.24	183.18	305.10	217.20	-
MOV	356.03	213.76	158.70	111.35	219.96



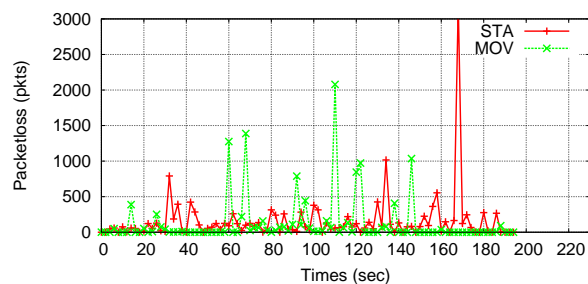
(a) 実験 2 のパケット棄却数 (端末 2 : 4 階)



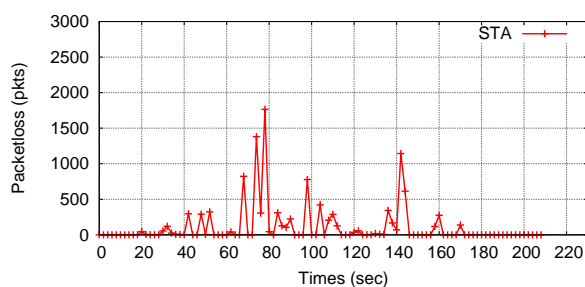
(b) 実験 2 のパケット棄却数 (端末 3 : 3 階)



(c) 実験 2 のパケット棄却数 (端末 4 : 2 階)



(d) 実験 2 のパケット棄却数 (端末 5 : 1 階)

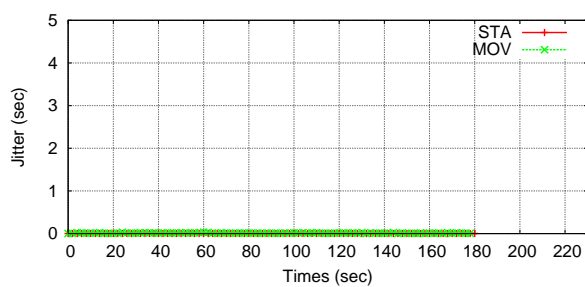


(e) 実験 2 のパケット棄却数 (端末 6 : 移動端末)

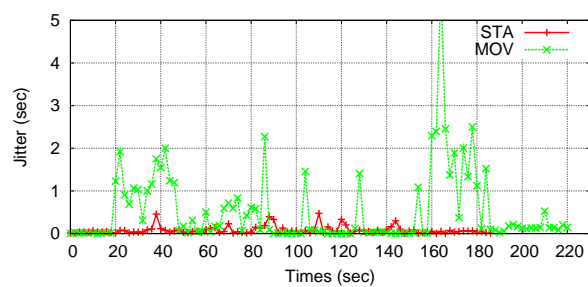
図 6.6 実験 2 の実験結果 (パケット棄却数)

表 6.5 実験 2 の平均パケット棄却数

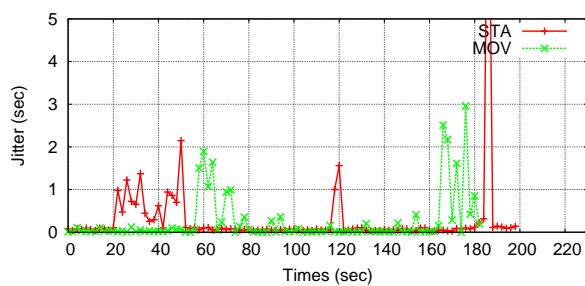
実験モデル	送信端末 → 受信端末				
	1→2	1→3	1→4	1→5	1→6
STA	0.00	131.51	92.32	153.43	-
MOV	70.16	94.73	141.96	121.48	105.97



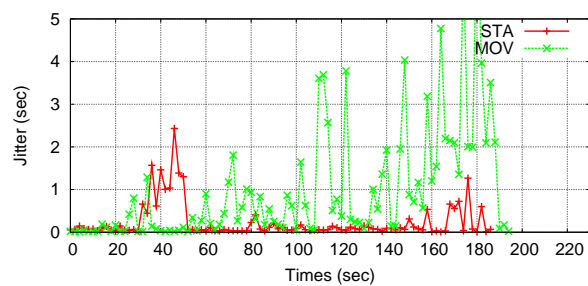
(a) 実験 2 のジッター (端末 2 : 4 階)



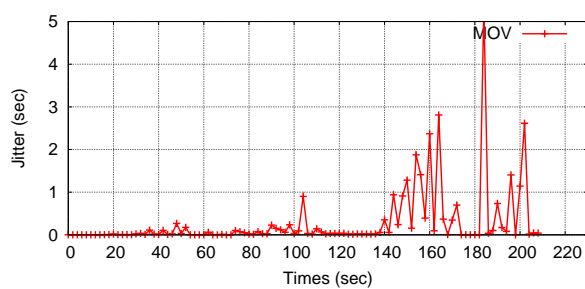
(b) 実験 2 のジッター (端末 3 : 3 階)



(c) 実験 2 のジッター (端末 4 : 2 階)



(d) 実験 2 のジッター (端末 5 : 1 階)



(e) 実験 2 のジッター (端末 6 : 移動端末)

図 6.7 実験 2 の実験結果 (ジッター)

表 6.6 実験 2 の平均ジッター

実験モデル	送信端末 → 受信端末				
	1→2	1→3	1→4	1→5	1→6
STA	0.00	0.08	0.31	0.24	-
MOV	0.01	0.52	0.25	0.99	0.20



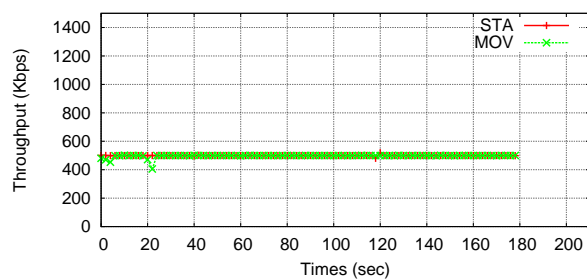
### 6.3 屋内における水平方向と垂直方向のトポロジ考慮した実験モデル（実験3）

図 6.8, 6.9, 6.10 に各性能指標毎の結果を示し、表 6.7, 6.8, 6.9 にそれぞれの平均値を示す。

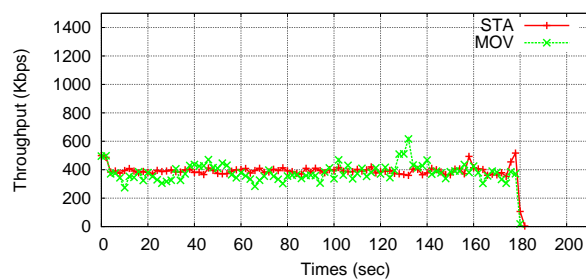
STA3 と MOV3 の両モデル共に、屋内かつ近距離に配置されている端末 2 と 3 は非常に安定した結果が得られている。階層が違う端末 4 と 5 も、スループットの低下は見られるが、実験 2 と異なり、安定した結果を得ている。しかし、MOV3 モデルの中継端末である端末 6 は、実験開始から約 40 秒後、移動端末に直接電波が届かなくなるため、リンクが切断されている事が図 6.8(e) から確認できる。また、再接続に約 20 秒間必要なため、平均スループットの低下やパケット棄却が増大している事が表 6.7 や 6.8 から読み取れる。再接続後は、中継端末を経由した不安定になり、約 140 秒から再度直接通信が可能になり、スループットの改善がみられる。しかし、ジッターは直接通信を再開する約 140 秒頃から、大幅に増加している。これは、移動端末が送信端末に接近し、直接通信が可能になったが、トポロジの変化に対応が送れたため、通信の精度が低下したためと考えられる。

今回 STA3 モデルと MOV3 モデルの比較を行ったが、図 6.8, 6.9 に示したグラフからは、モデルの違いによる大きな差は見られない。これは、屋内での実験のため比較的電波が届きやすいためである。壁が簡易的な導波路になるため、屋外に比べ遠距離の端末とも良好な通信が可能である事が理由と推察してしまう。

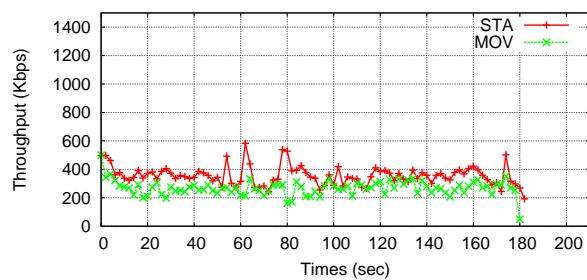
しかし、表 6.8 の平均パケット棄却数を見ればわかるように、平均値にすると MOV3 モデルの方が STA3 モデルの約 1.4 倍の増加している。また、図 6.10 (d) では、MOV3 モデルの一時的な増加などがみられる。これらの結果から、移動端末を増設する事で、トポロジが動的に変更され、ネットワーク全体に影響を及ぼす事がわかった。また、水平な環境で行った実験モデル 1 と比較すると、階段を利用した垂直方向の通信では、通信の不安定さがみられる。そのため、現段階の MANET 端末では移動端末より静止端末を優先的に中継する事で、より良い通信を可能にする。屋内で階段などの垂直方向に通信を行う際には、有線ネットワークなどの代替経路が利用すると、より安定した結果が得られると推察できる。



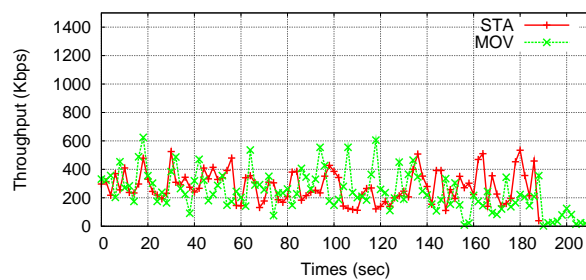
(a) 実験3のスループット (端末2:5階)



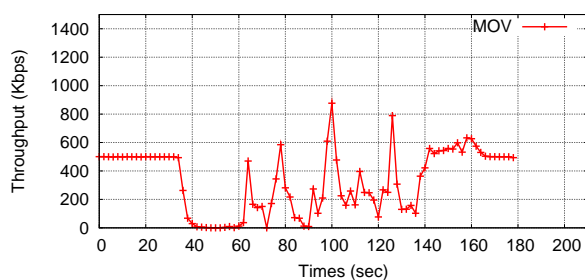
(b) 実験3のスループット (端末3:5階)



(c) 実験3のスループット (端末4:4階)



(d) 実験3のスループット (端末5:3階)

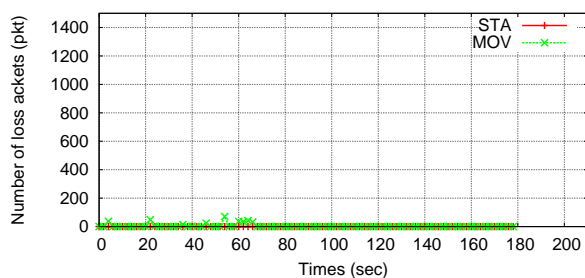


(e) 実験3のスループット (端末6:移動端末)

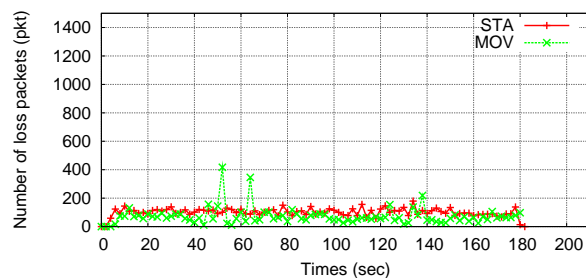
図6.8 実験3の実験結果 (スループット)

表6.7 実験3の平均スループット

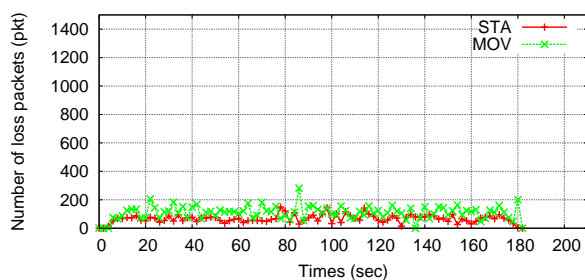
実験モデル	送信端末 → 受信端末				
	1→2	1→3	1→4	1→5	1→6
STA	499.71	386.73	355.98	279.97	-
MOV	498.08	377.80	268.03	214.84	331.39



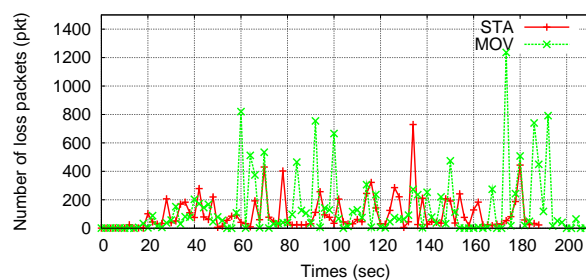
(a) 実験3のパケット棄却数 (端末2:5階)



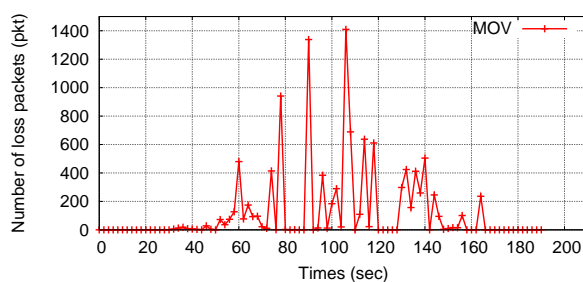
(b) 実験3のパケット棄却数 (端末3:5階)



(c) 実験3のパケット棄却数 (端末4:4階)



(d) 実験3のパケット棄却数 (端末5:3階)

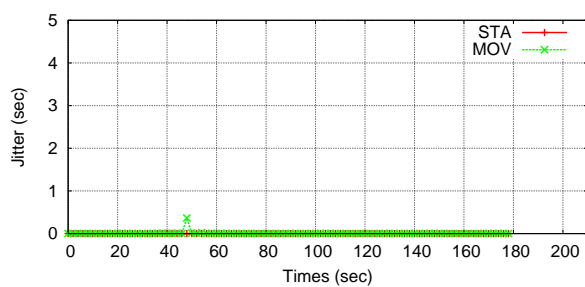


(e) 実験3のパケット棄却数 (端末6:移動端末)

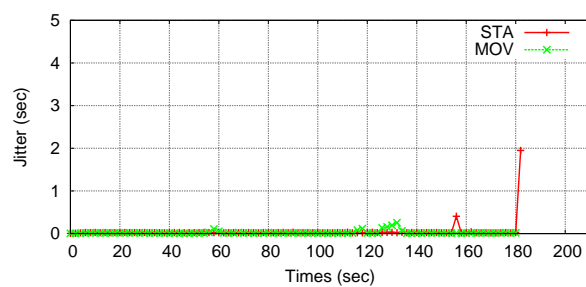
図6.9 実験3の実験結果 (パケット棄却数)

表6.8 実験3の平均パケット棄却数

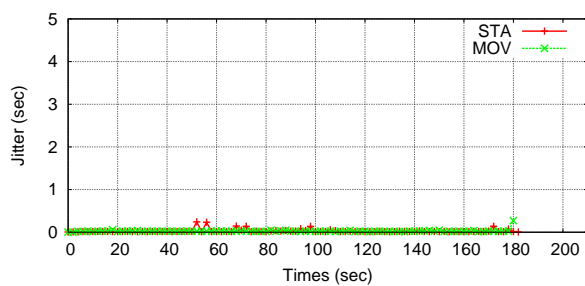
実験モデル	送信端末 → 受信端末				
	1→2	1→3	1→4	1→5	1→6
STA	0.00	50.64	65.86	96.16	-
MOV	3.88	71.49	109.50	133.46	116.74



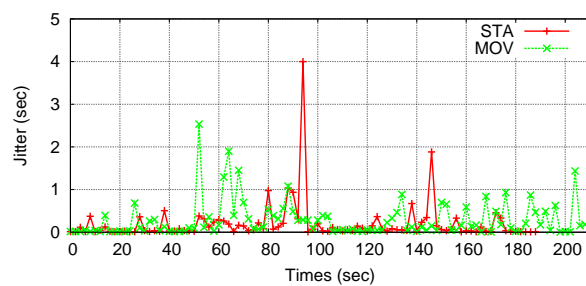
(a) 実験3のジッター (端末2:5階)



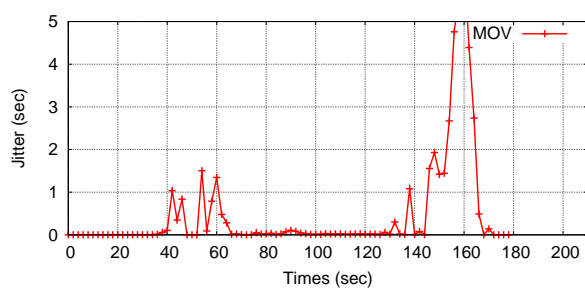
(b) 実験3のジッター (端末3:5階)



(c) 実験3のジッター (端末4:4階)



(d) 実験3のジッター (端末5:3階)



(e) 実験3のジッター (端末6:移動端末)

図 6.10 実験3の実験結果 (ジッター)

表 6.9 実験3の平均ジッター

実験モデル	送信端末 → 受信端末				
	1→2	1→3	1→4	1→5	1→6
STA	0.00	0.05	0.03	0.20	-
MOV	0.00	0.03	0.03	0.29	0.48

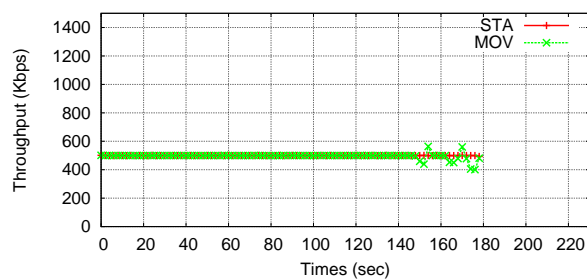
## 6.4 屋内通路と屋外階段を考慮した実験モデル（実験 4）

図 6.11, 6.12, 6.13 に実験結果を示し, 表 6.10, 6.11, 6.12 に各平均値を示す.

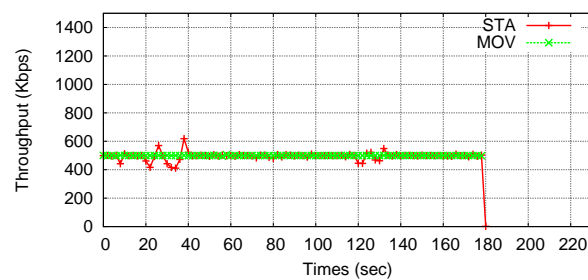
屋内通路に配置されている端末 2 では, 近距離かつ屋内通路による導波路効果もあり, STA4 モデルと MOV4 の両モデル共に理論値が得られた.

屋外に配置された端末 3 は, 図 5.6 から読み取りづらいが, ガラス製のドアを挟んで配置されている. しかし, 大きな減衰も無く良好な各実験結果が得られ, ガラスから受ける影響は非常に小さいと判断できる. 同じく屋外階段で行った実験 2 では, 5 階からの各階へのスループットの大幅な低下がみられる. 本実験でも 4 階に配置した端末 4 では, 50% の低下が確認できる. また, STA4 モデルの方が MOV4 より大幅な低下がみられ, MOV4 モデルでは, 40% の大幅な低下がみられた. パケット棄却数もスループット結果と対応するように屋外に配置されている端末 4, 5, 移動端末で大幅な増加がみられる. 一方, ジッターの実験結果では, 実験 2 と比べて, 比較的安定している. しかし, STA モデルの端末 4 では, 大きな増加が確認できる. 平均ジッターで比較すると, 端末 4 の STA4 モデルの方が MOV4 モデルに比べ約 10 倍になっており, 図 6.13 グラフからも読み取れる. 実験は, 実験 1 の結果を受け, 同周波数による干渉を避けるため, 変更を行っている. これらの結果から, 屋外階段の周囲環境から受ける影響が非常に大きい事がわかる.

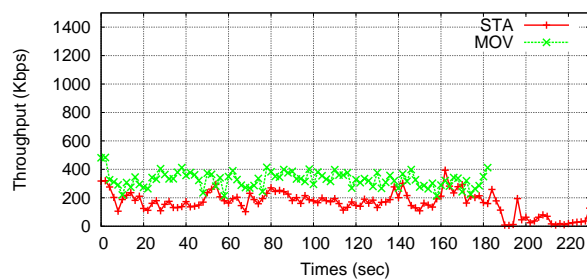
これまでの実験結果から, やはり屋外階段での MANET 環境の構築は, 屋内ネットワークを中心とする事で安定したネットワークを実現できる. また, 一般的な建物で階層が異なる通信では, 有線ネットワークなどの代替経路を用意するとより高品質な通信が可能になると考えられる.



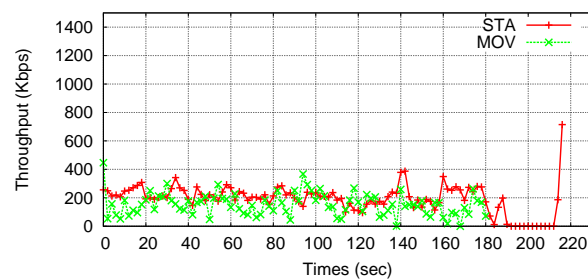
(a) 実験4のスループット (端末2:5階)



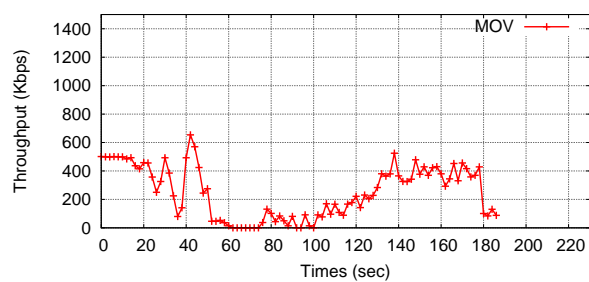
(b) 実験4のスループット (端末3:5階)



(c) 実験4のスループット (端末4:4階)



(d) 実験4のスループット (端末5:3階)

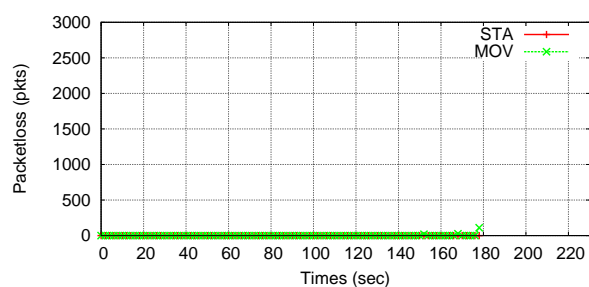


(e) 実験4のスループット (端末6:移動端末)

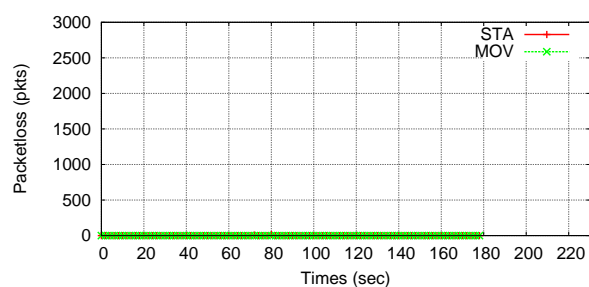
図 6.11 実験4の実験結果 (スループット)

表 6.10 実験4の平均スループット

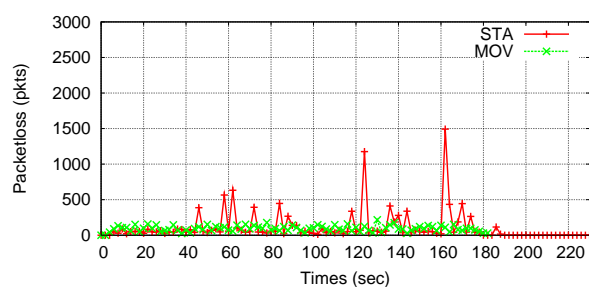
実験モデル	送信端末 → 受信端末				
	1→2	1→3	1→4	1→5	1→6
STA	499.71	490.35	258.00	193.13	-
MOV	496.10	499.72	302.81	152.01	252.21



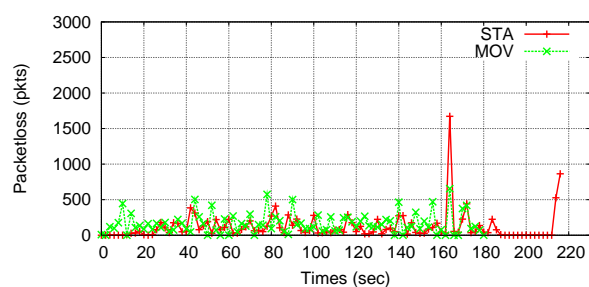
(a) 実験 4 のパケット棄却数 (端末 2 : 5 階)



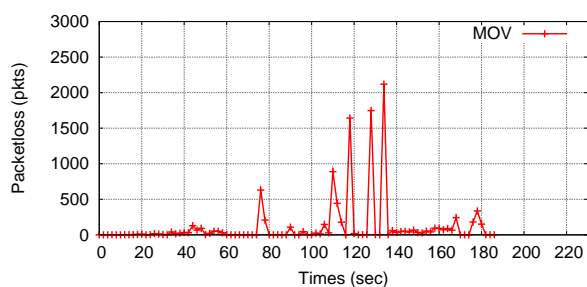
(b) 実験 4 のパケット棄却数 (端末 3 : 5 階)



(c) 実験 4 のパケット棄却数 (端末 4 : 4 階)



(d) 実験 4 のパケット棄却数 (端末 5 : 3 階)

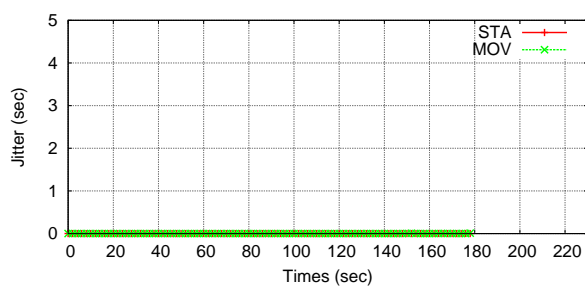


(e) 実験 4 のパケット棄却数 (端末 6 : 移動端末)

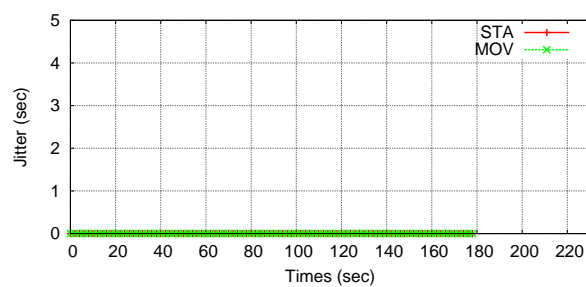
図 6.12 実験 4 の実験結果 (パケット棄却数)

表 6.11 実験 4 の平均パケット棄却数

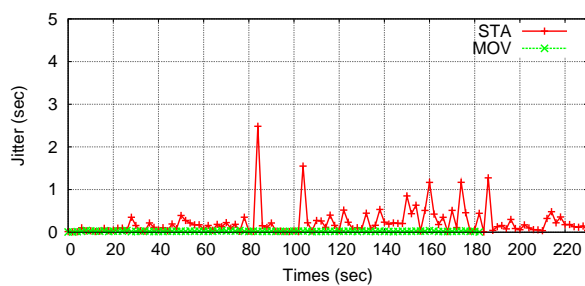
実験モデル	送信端末 → 受信端末				
	1→2	1→3	1→4	1→5	1→6
STA	0.00	0.33	103.03	116.42	-
MOV	1.76	0.00	93.47	161.68	117.28



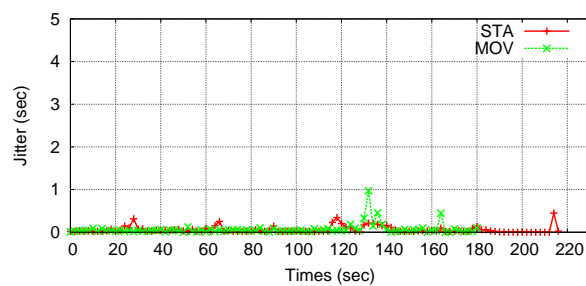
(a) 実験 4 のジッター (端末 2 : 5 階)



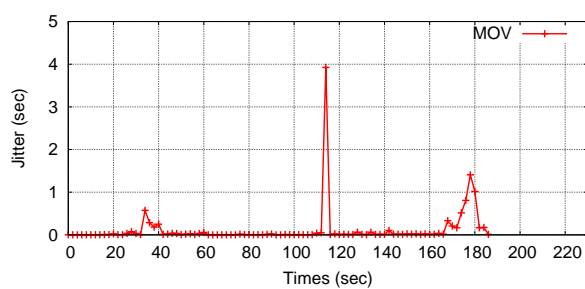
(b) 実験 4 のジッター (端末 3 : 5 階)



(c) 実験 4 のジッター (端末 4 : 4 階)



(d) 実験 4 のジッター (端末 5 : 3 階)



(e) 実験 4 のジッター (端末 6 : 移動端末)

図 6.13 実験 4 の実験結果 (ジッター)

表 6.12 実験 4 の平均ジッター

実験モデル	送信端末 → 受信端末				
	1→2	1→3	1→4	1→5	1→6
STA	0.00	0.00	0.23	0.06	-
MOV	0.00	0.00	0.02	0.07	0.12



## 6.5 屋内外の通路を考慮した実験モデル（実験5）

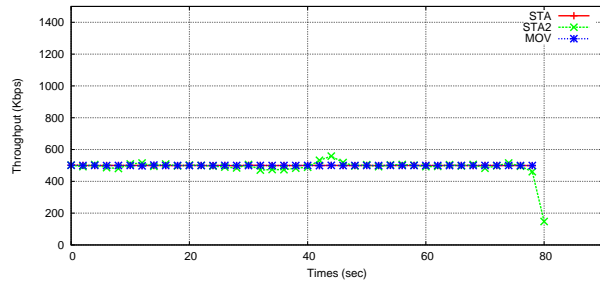
実験結果を図 6.14, 6.15, 6.16 に示す。また、表 6.13, 6.14, 6.15 に各平均値を示す。

両モデル共に、近距離にある端末 2 やガラス製の自動ドアを挟んだ端末 3 では理論値に近い値が得られている。ガラスを通した通信が与える影響が小さいことは実験 4 で確認している。端末 4 の結果も、STA5 と STA6 で安定した結果が得られている。だが、移動端末が直接通信が可能になる 65 秒付近で、パケット棄却数が増加している。そのため、表 6.13 では、STA6 モデルの結果が STA5 の結果に比べ、約 10% のスループットの低下している。

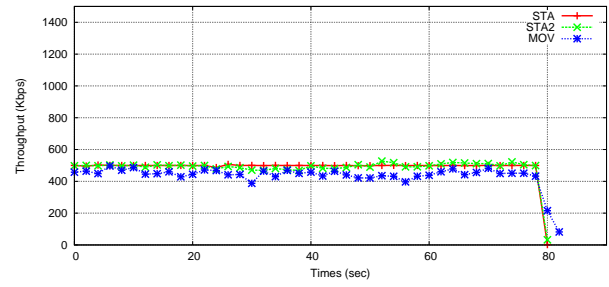
また、MOV5 モデルではスループットの理論値の 50% 以下まで低下が確認できる。MOV5 の端末 5 は、移動して直接電波が届かなくなる 25 秒から 50 秒の間、通信ができない。そのため、表 6.13 の MOV5 モデルでは他の実験モデルよりパケット棄却数が大幅に増加している。その後は再接続が行われ、通信を再開し、比較的安定した結果が得られている。しかし、端末 4 と同じく直接通信が可能になる 50 秒付近で大量のパケット棄却が確認できる。これは、表 6.14 から確認できる。また、図 6.16 の端末 5 のみ、ジッターの増加が 25 秒と 50 秒付近でみられる。これもネットワークの切断と再接続による影響だと推測できる。

この実験から屋外通路を使った MANET 環境下では良好な結果が得られる事がわかった。特に STA5 モデルでは、目立った悪影響も受けなかった。また、実験 4 と同じく、自動ドアなどのガラス越しの通信を行っても、影響がとても小さい事を確認した。しかし、MOV5 モデルでは、移動端末の移動によるネットワークの切断と再接続の際には、スループットの低下や再接続の遅さが目立った。

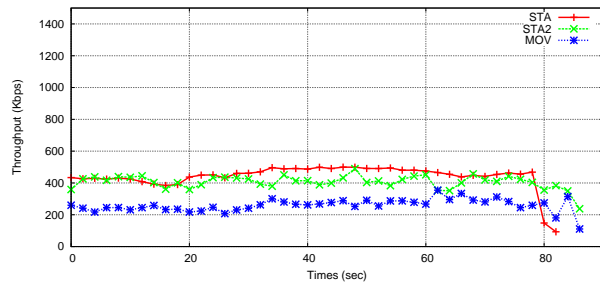
最後に、STA6 の実験は、外部の影響を調査するために行ったが、STA5 の結果と比較しても大きな変化がみられないため、今後の同実験モデルでは採用していない。



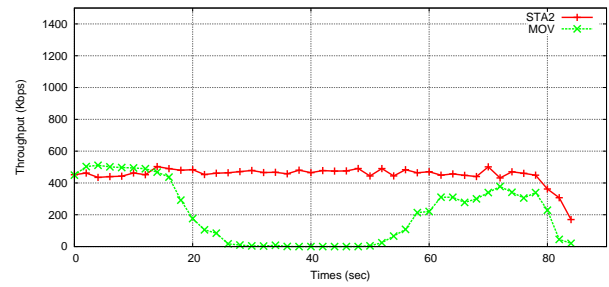
(a) 実験 5 のスループット (端末 2)



(b) 実験 5 のスループット (端末 3)



(c) 実験 5 のスループット (端末 4)

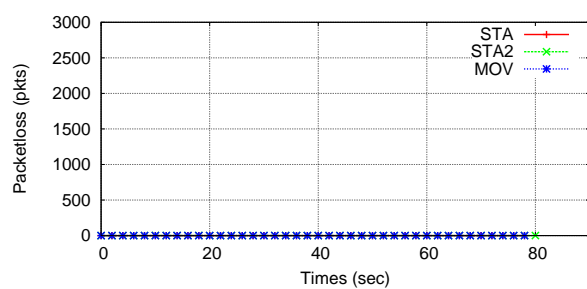


(d) 実験 5 のスループット (端末 5 : 移動端末)

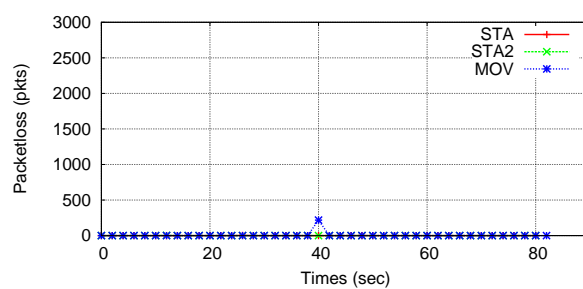
図 6.14 実験 5 の実験結果 (スループット)

表 6.13 実験 5 の平均スループット

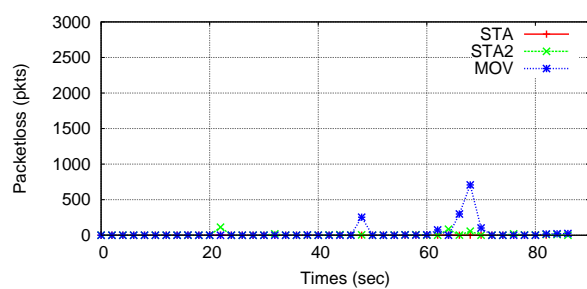
実験モデル	送信端末 → 受信端末			
	1→2	1→3	1→4	1→5
STA	499.71	487.34	440.40	-
STA2	489.45	485.20	405.97	451.83
MOV	499.71	434.44	260.02	206.64



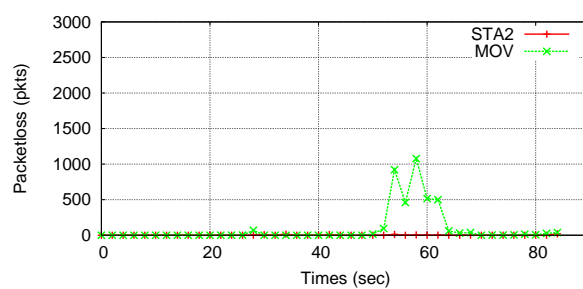
(a) 実験 5 のパケット棄却数 (端末 2)



(b) 実験 5 のパケット棄却数 (端末 3)



(c) 実験 5 のパケット棄却数 (端末 4)

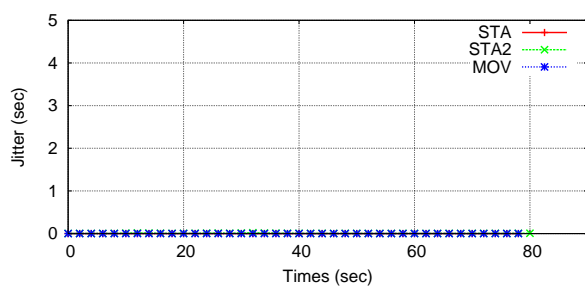


(d) 実験 5 のパケット棄却数 (端末 5 : 移動端末)

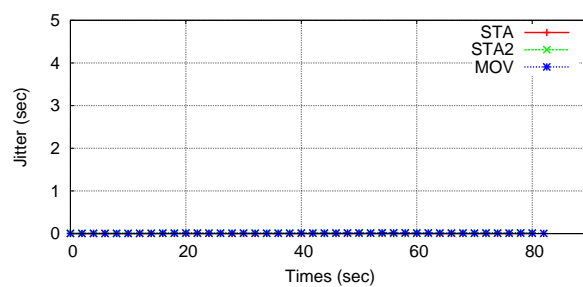
図 6.15 実験 5 の実験結果 (パケット棄却数)

表 6.14 実験 5 の平均パケット棄却数

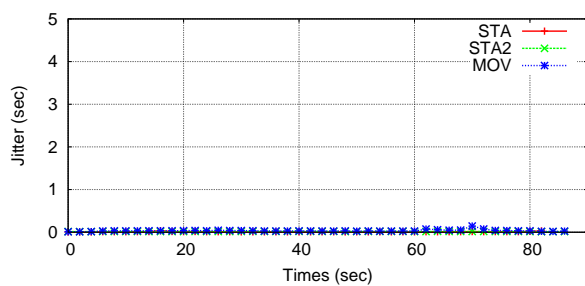
実験モデル	送信端末 → 受信端末			
	1→2	1→3	1→4	1→5
STA	0.00	0.09	0.41	-
STA2	0.44	0.22	8.26	1.73
MOV	0.00	5.24	34.44	90.21



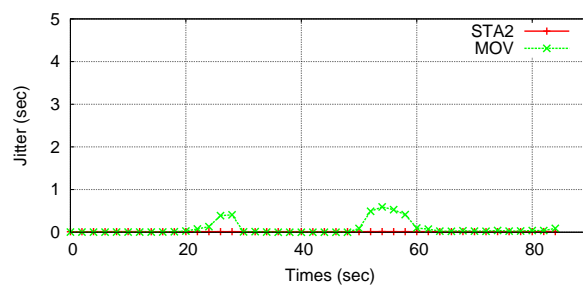
(a) 実験 5 のジッター (端末 2)



(b) 実験 5 のジッター (端末 3)



(c) 実験 5 のジッター (端末 4)



(d) 実験 5 のジッター (端末 5 : 移動端末)

図 6.16 実験 5 の実験結果 (ジッター)

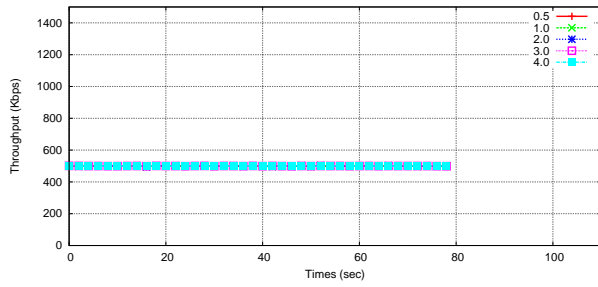
表 6.15 実験 5 の平均ジッター

実験モデル	送信端末 → 受信端末			
	1→2	1→3	1→4	1→5
STA	0.00	0.00	0.01	-
STA2	0.01	0.01	0.02	0.01
MOV	0.00	0.01	0.04	0.09

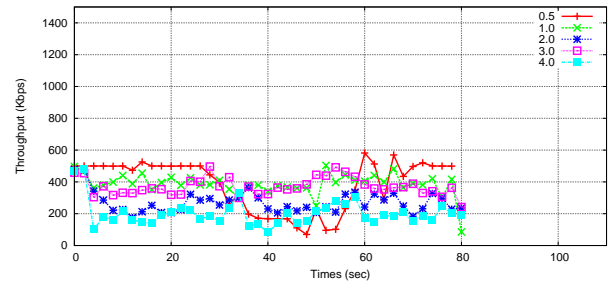
## 6.6 Hello パケットの通信間隔を考慮した実験モデル（実験 6）

図 6.17, 6.18, 6.19, 6.20, 6.21, 6.22 に STA5 と MOV5 モデル毎のスループットとパケット棄却数、ジッターのグラフを各通信間隔毎に示す。また、表 6.16, 6.17, 6.18 にそれぞれの平均値を示す。

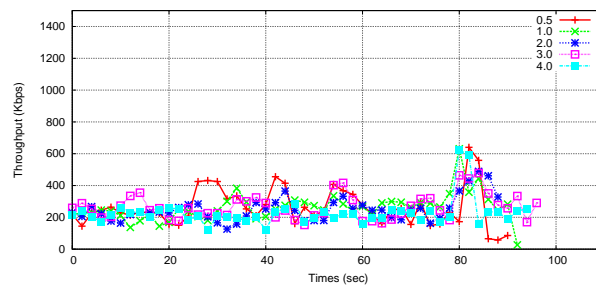
STA モデルの直接通信距離の範囲内にある端末 2 への通信は理想値に近い結果が得られている。図 6.17 から、40 秒から 65 秒付近にて不自然なパケット棄却が確認できる。また、表 6.16 の STA5 モデル端末 3 の通信間隔 2.0 秒と 4.0 秒の際にスループットの大幅な低下がみられる。図 6.17 から実験開始直後からスループット低下しており、実験値は理論値の 50% 以下となった。図 6.19 と表 6.16 のパケット棄却数からも読み取れる。一方で、ジッターは端末 3 の通信間隔が 4.0 秒の実験開始から 35 秒付近で非常に大きなジッターが確認され、強い影響を受けた事を示している。また、同環境の通信間隔 2.0 秒の実験では、実験 5 と比較するとジッターが約 2 倍に増加しているため、周囲の影響が強くなった事を表している。MOV モデル結果では、MOV5 モデルの通信間隔 2.0 秒場合のみスループットが不安定な結果になっている。これは、前回の実験 5 と同じ実験環境かつ近距離通信なので、同一チャンネルの通信による干渉など周囲の環境変化による通信への影響が大きくなったと推測出来る。グラフからは、他の HELLO パケットの通信間隔の違いによる影響は読み取りづらいが、表 6.16 に示すスループットの平均値の結果から通信間隔が長い程、スループットの低下がみられる。これは特に MOV5 モデルで顕著にみられる。特に、端末 3 の場合、通信間隔が 0.5 秒と 4.0 秒の結果を比較すると、約 50% 程スループットが低下している事が確認できる。そのため、移動端末を考慮する場合には、HELLO パケットの更新間隔を短くし、より素早く周囲の経路を把握する事によりスループットの減少を防ぐ事が出来ると考えられる。移動しない STA5 モデルの端末 3 と 4 の結果を実験 5 と比較すると、HELLO パケットの更新間隔の影響ではなく、送信端末である端末 1 と端末 2 がある D 棟内では MOV モデルの 2.0 秒の結果を除き理想的な結果が得られている。屋外での影響が強くなった場合、MOV5 モデルの端末 5 の結果が著しい低下を示すはずだが、実験 5 と非常によく似たグラフになっている。そのため、問題があるのは端末 3 と端末 4 を配置している C 棟で同一チャンネルが使用され、通信に悪影響が出た物と推測される。さらに、図 6.18 に示すグラフを見ると、端末の移動による切断や再接続の対応が出来たとは言い難い。これは、HELLO パケットの更新間隔による影響だけでなく、HELLO パケットの有効時間や TC メッセージの更新間隔、有効時間などの他のパラメータによる影響も多いと考えられる。



(a) 実験 6 のスループット (端末 2)

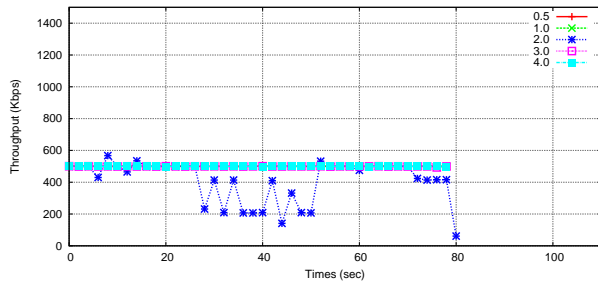


(b) 実験 6 のスループット (端末 3)

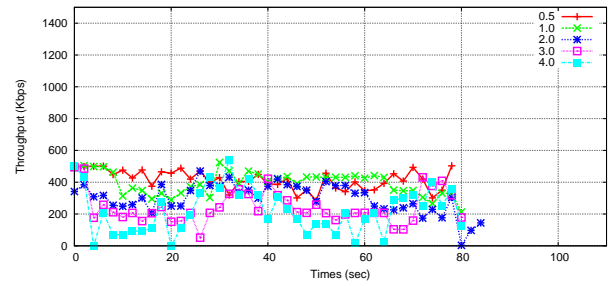


(c) 実験 6 のスループット (端末 4)

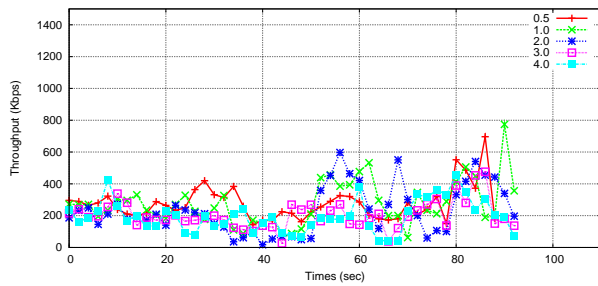
図 6.17 実験 6 の STA モデルの実験結果 (スループット)



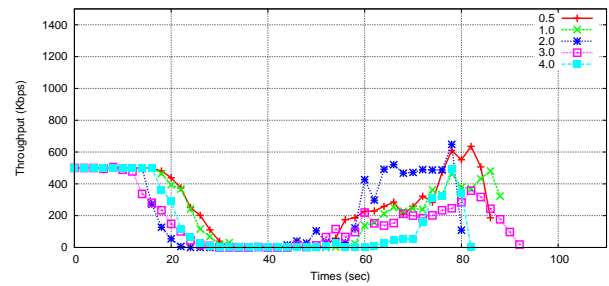
(a) 実験 6 のスループット (端末 2)



(b) 実験 6 のスループット (端末 3)



(c) 実験 6 のスループット (端末 4)

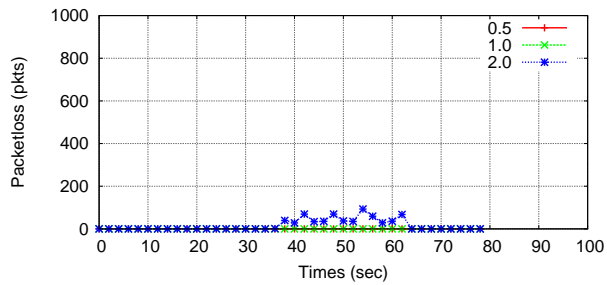


(d) 実験 6 のスループット (端末 5: 移動端末)

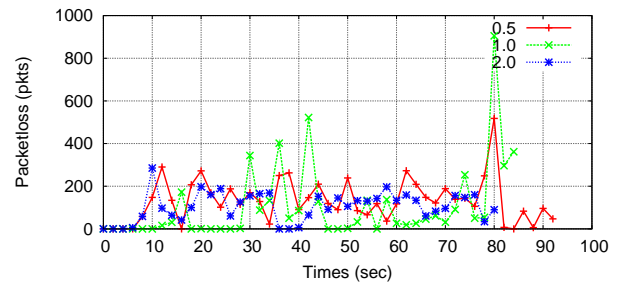
図 6.18 実験 6 の MOV モデルの実験結果 (スループット)

表 6.16 実験 6 の平均スループット

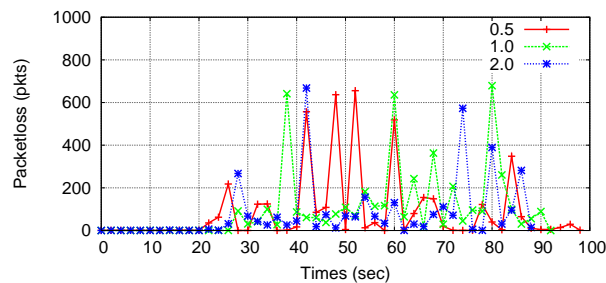
実験モデル	HELLO メッセージの通信間隔 (sec)	送信端末 → 受信端末			
		1→2	1→3	1→4	1→5
STA	0.5	499.70	384.67	261.15	-
STA	1.0	499.71	386.78	262.83	-
STA	2.0	499.71	270.89	251.17	-
STA	3.0	499.71	371.33	266.78	-
STA	4.0	499.71	202.96	228.03	-
MOV	0.5	499.71	415.63	276.40	269.97
MOV	1.0	499.71	393.62	276.05	241.35
MOV	2.0	412.70	298.79	231.23	238.20
MOV	3.0	499.55	244.90	204.68	179.84
MOV	4.0	499.71	221.83	196.63	172.48



(a) 実験 6 のパケット棄却数 (端末 2)

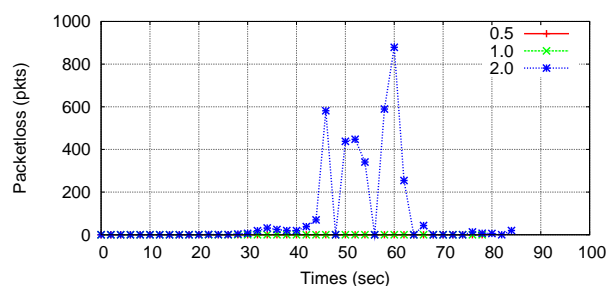


(b) 実験 6 のパケット棄却数 (端末 3)

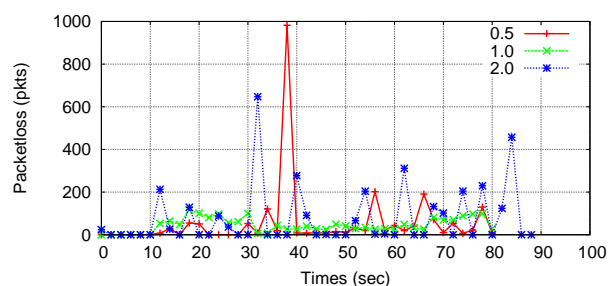


(c) 実験 6 のパケット棄却数 (端末 4)

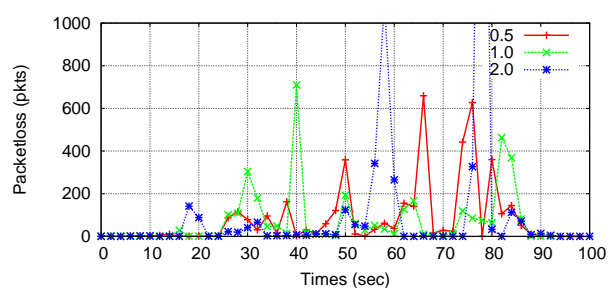
図 6.19 実験 6 の STA モデルの実験結果 (パケット棄却数)



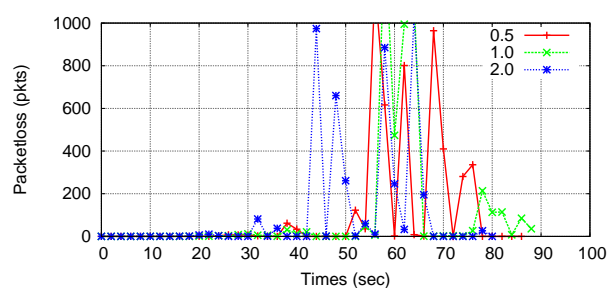
(a) 実験 6 のパケット棄却数 (端末 2)



(b) 実験 6 のパケット棄却数 (端末 3)



(c) 実験 6 のパケット棄却数 (端末 4)



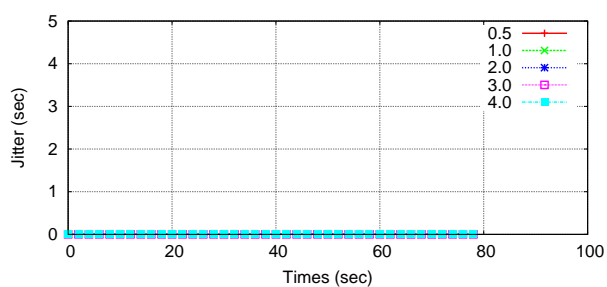
(d) 実験 6 のパケット棄却数 (端末 5 : 移動端末)

図 6.20 実験 6 の MOV モデルの実験結果 (パケット棄却数)

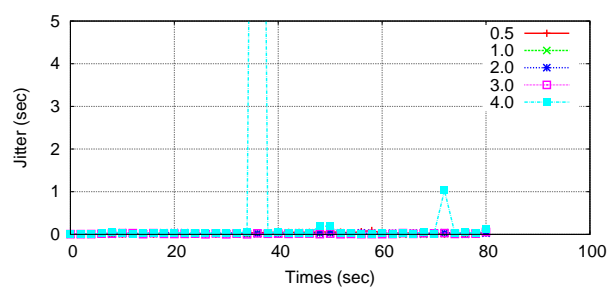
表 6.17 実験 6 の平均パケット棄却数.

実験モデル	HELLO メッセージの通信間隔 (sec)	送信端末 → 受信端末			
		1→2	1→3	1→4	1→5
STA	0.5	0	110.62	71.57	-
STA	1.0	0	76.70	68.97	-
STA	2.0	0	72.90	46.52	-
STA	3.0	0	13.20	46.23	-
STA	4.0	0	85.97	95.89	-
MOV	0.5	0	0.12	70.55	78.25
MOV	1.0	0	34.65	77.33	72.52
MOV	2.0	71.12	12.67	59.95	51.15
MOV	3.0	0	70.77	87.52	69.23
MOV	4.0	0	75.25	69.23	97.03

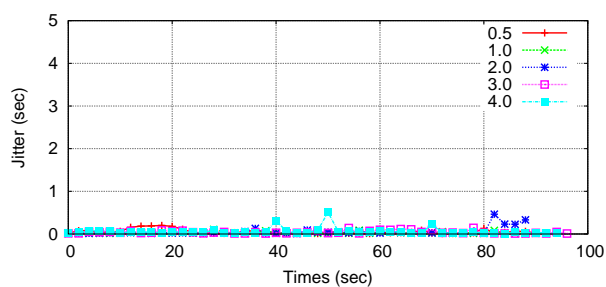




(a) 実験 6 のジッター (端末 2)

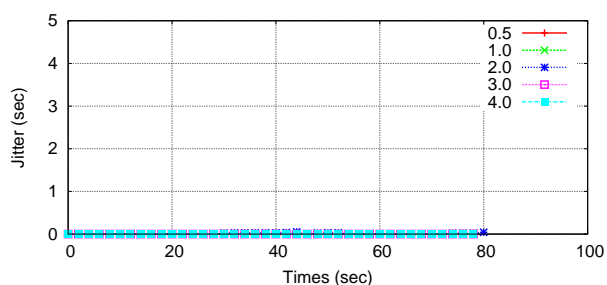


(b) 実験 6 のジッター (端末 3)

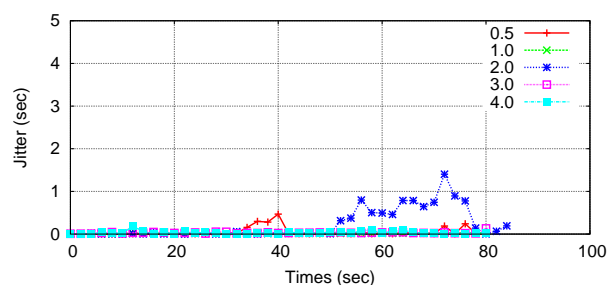


(c) 実験 6 のジッター (端末 4)

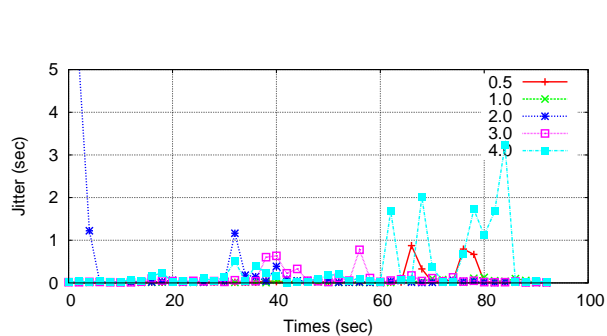
図 6.21 実験 6 の STA モデルの実験結果 (ジッター)



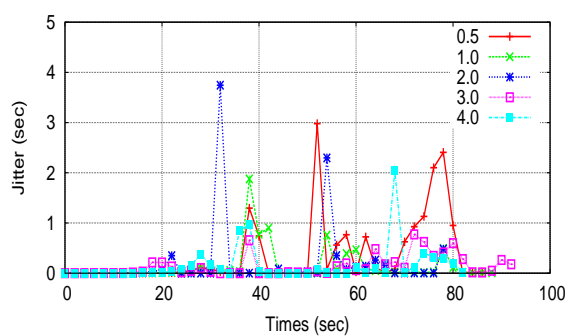
(a) 実験 6 のジッター (端末 2)



(b) 実験 6 のジッター (端末 3)



(c) 実験 6 のジッター (端末 4)



(d) 実験 6 のジッター (端末 5 : 移動端末)

図 6.22 実験 6 の MOV モデルの実験結果 (ジッター)

表 6.18 実験 6 の平均ジッター

実験モデル	HELLO メッセージの通信間隔 (sec)	送信端末 → 受信端末			
		1→2	1→3	1→4	1→5
STA	0.5	0.00	0.02	0.05	-
STA	1.0	0.00	0.01	0.03	-
STA	2.0	0.00	0.03	0.06	-
STA	3.0	0.00	0.02	0.04	-
STA	4.0	0.00	0.80	0.06	-
MOV	0.5	0.00	0.05	0.08	0.36
MOV	1.0	0.00	0.02	0.03	0.29
MOV	2.0	0.01	0.23	0.07	0.21
MOV	3.0	0.00	0.03	0.10	0.14
MOV	4.0	0.00	0.03	0.34	0.15

## 6.7 Hello パケットの有効時間を考慮した実験モデル（実験 7）

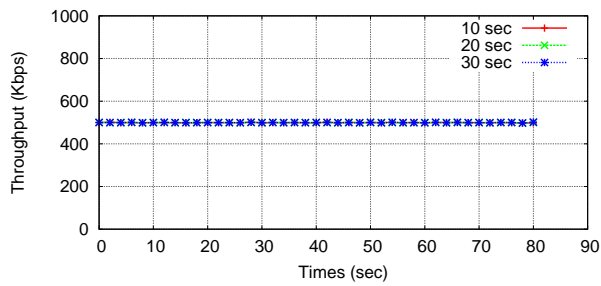
実験結果を図 6.23, 6.24, 6.25, 6.26, 6.27, 6.28 に示し, 表 6.19, 6.20, 6.21 にそれぞれの平均値を示す.

STA5 モデルの端末 2, 3 では, どの有効時間でも理論値が得られ, 良好な実験結果が得られた. また, 端末 4 でも若干のデータの振れ幅があり, パケット棄却数も確認されているが, 実験 5 と 6 の結果と比較すると, 安定した結果と言える. そのため, トポロジ変化の少ない STA モデルでは, 有効時間の違いによる影響はほぼ読み取ることができない.

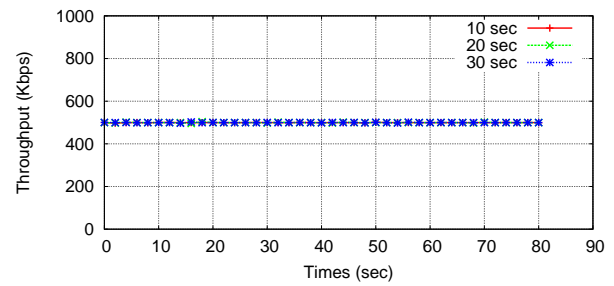
一方, トポロジ変化が起きやすい MOV5 モデルの結果では, 有効時間が短い程良い結果が得られている. 特に端末 5 の 30 秒の時には, より早い切断と再接続の遅さが読み取れる. これは, 有効時間が 20 秒の場合, 10 秒の時より数秒遅れて再接続するため, スループットの不安定化につながる. 表 6.19 に示すスループットの平均値にも約 10% の差として表れている. STA5 モデルと比べ, 端末 3 と端末 4 で非常に不安定な結果が得られている.

図 6.24 では, 実験開始直後から端末 3 と端末 4 で非常に不安定な結果になっている. これは, 図 6.26 から読み取れる. 不安定な結果となった実験 5 よりもパケット棄却が確認できる. また, 端末 5 の有効時間が 10 秒の時, 実験開始直後から急激なジッターの増加が確認でき, 周囲環境からの影響が非常に大きい事を示している. 有効時間が 30 秒の時は, 実験開始 60 秒程からジッターが急増している.

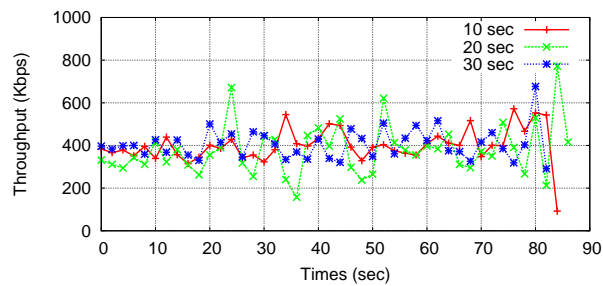
同環境であるはずの実験 6 通信間隔 2.0 秒の実験と実験 7 の有効時間 20 秒の実験では, 大きな差が出た事は非常に大きな疑問点である. しかし, 端末のそれぞれの配置や端末の向きなどの若干の誤差が必ず発生してしまう事が原因だと考えられる. さらに, 天候や気温, 湿度, 使用周波数の状況や人の移動など多くのランダム要素が含まれるため, 原因の追究は非常に困難を極める. そのため, より正確な環境の測定や知識習得などが今後の研究に必要だと考える.



(a) 実験7のスループット (端末2)

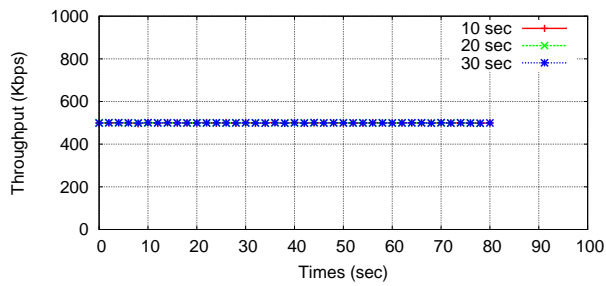


(b) 実験7のスループット (端末3)

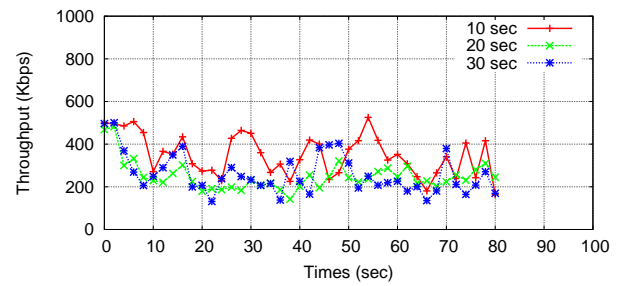


(c) 実験7のスループット (端末4)

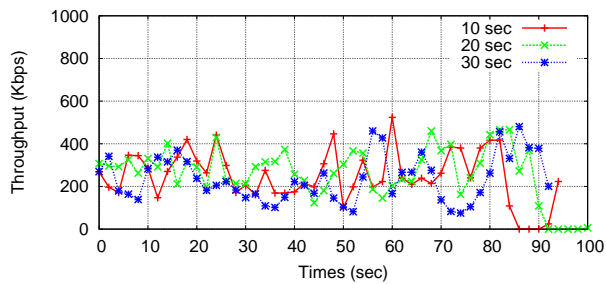
図6.23 実験7のSTAモデルの実験結果 (スループット)



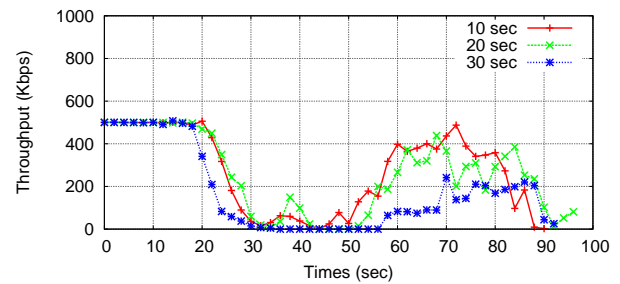
(a) 実験7のスループット (端末2)



(b) 実験7のスループット (端末3)



(c) 実験7のスループット (端末4)

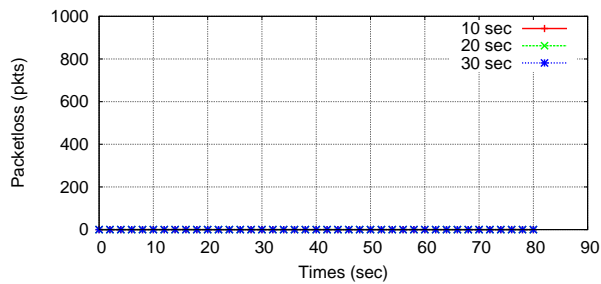


(d) 実験7のスループット (端末5: 移動端末)

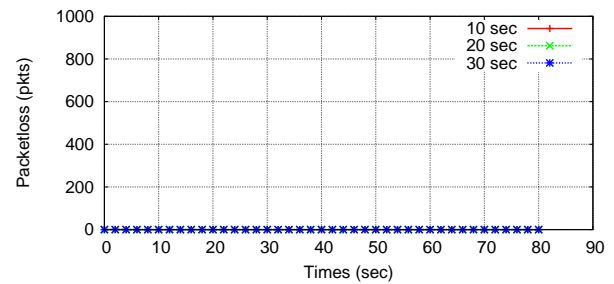
図6.24 実験7のMOVモデルの実験結果 (スループット)

表 6.19 実験 7 の平均スループット

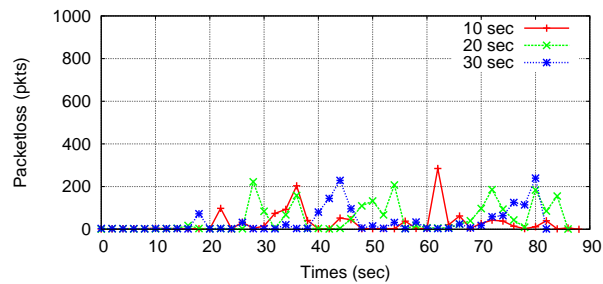
実験モデル	HELLO パケットの有効時間 (sec)	送信端末 → 受信端末			
		1→2	1→3	1→4	1→5
STA	10	499.56	499.64	400.62	-
STA	20	499.71	489.71	377.84	-
STA	30	499.71	499.71	405.20	-
MOV	10	487.64	349.51	248.00	272.15
MOV	20	499.71	156.22	262.25	252.93
MOV	30	499.71	259.32	236.99	160.00



(a) 実験 7 のパケット棄却数 (端末 2)

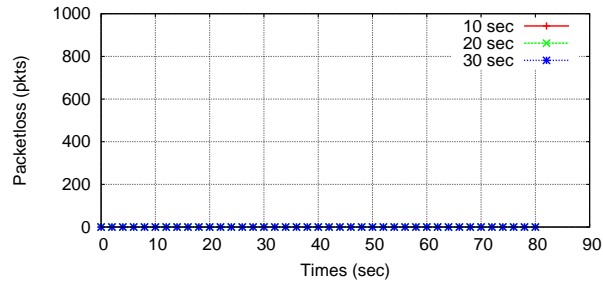


(b) 実験 7 のパケット棄却数 (端末 3)

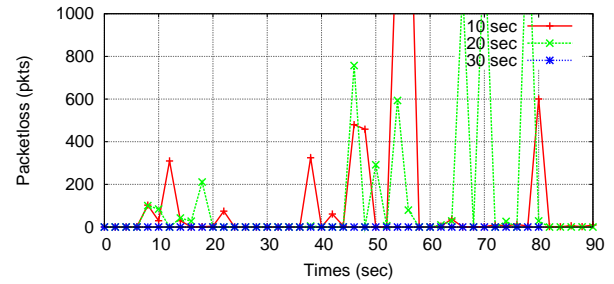


(c) 実験 7 のパケット棄却数 (端末 4)

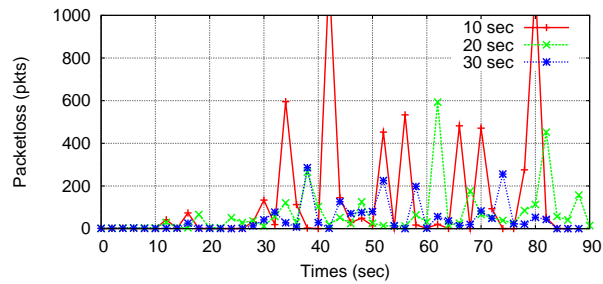
図 6.25 実験 7 の STA モデルの実験結果 (パケット棄却数)



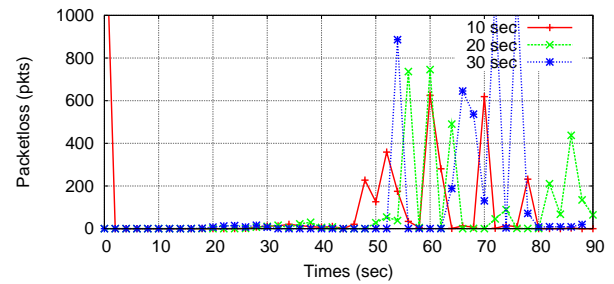
(a) 実験 7 のパケット棄却数 (端末 2)



(b) 実験 7 のパケット棄却数 (端末 3)



(c) 実験 7 のパケット棄却数 (端末 4)

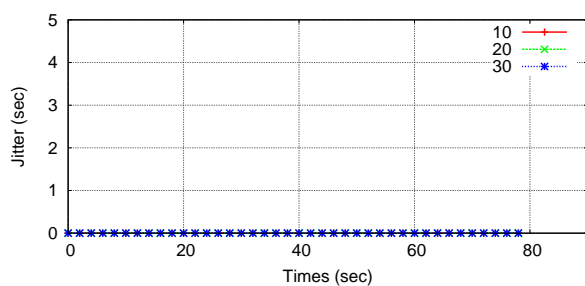


(d) 実験 7 のパケット棄却数 (端末 5 : 移動端末)

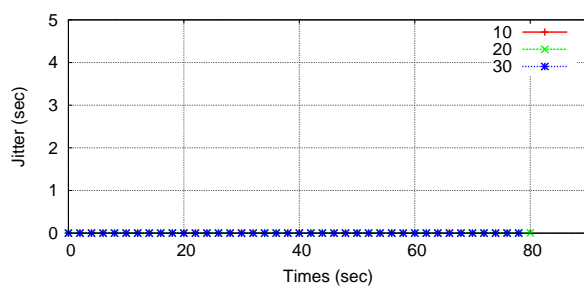
図 6.26 実験 7 の MOV モデルの実験結果 (パケット棄却数)

表 6.20 実験 7 の平均パケット棄却数

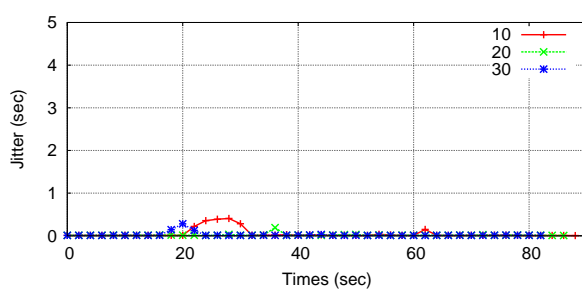
実験モデル	HELLO パケットの有効時間 (sec)	送信端末 → 受信端末			
		1→2	1→3	1→4	1→5
STA	10	0.05	0.03	29.00	-
STA	20	0.00	0.00	48.30	-
STA	30	0.00	0.00	35.21	-
MOV	10	0.01	67.34	90.71	89.70
MOV	20	0.00	56.88	61.41	86.52
MOV	30	0.00	110.82	97.88	106.46



(a) 実験 7 のジッター (端末 2)

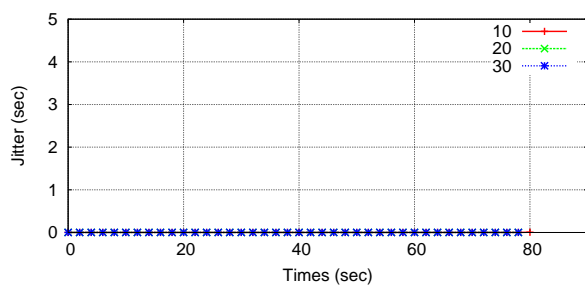


(b) 実験 7 のジッター (端末 3)

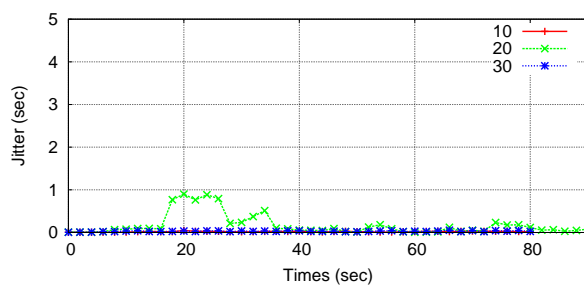


(c) 実験 7 のジッター (端末 4)

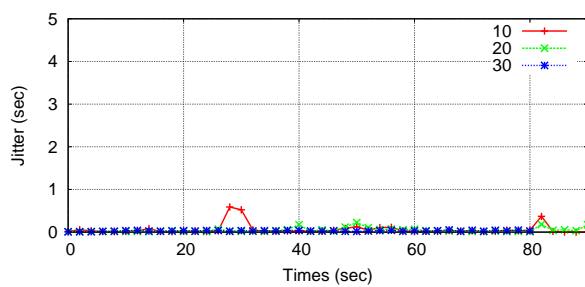
図 6.27 実験 7 の STA モデルの実験結果 (ジッター)



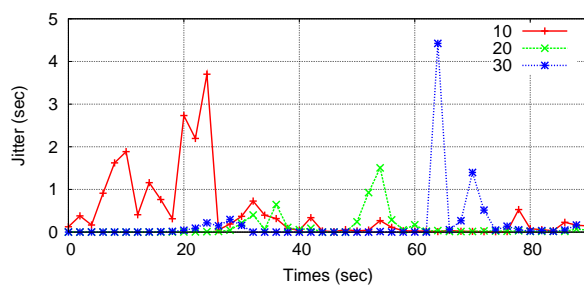
(a) 実験 7 のジッター (端末 2)



(b) 実験 7 のジッター (端末 3)



(c) 実験 7 のジッター (端末 4)



(d) 実験 7 のジッター (端末 5 : 移動端末)

図 6.28 実験 7 の MOV モデルの実験結果 (ジッター)

表 6.21 実験 7 の平均ジッター

実験モデル	HELLO パケットの有効時間 (sec)	送信端末 → 受信端末			
		1→2	1→3	1→4	1→5
STA	10	0.00	0.00	0.05	-
STA	20	0.00	0.00	0.02	-
STA	30	0.00	0.00	0.02	-
MOV	10	0.00	0.02	0.08	0.41
MOV	20	0.00	0.17	0.06	0.12
MOV	30	0.00	0.03	0.03	0.18



## 6.8 ETX アルゴリズムを考慮した実験モデル（実験 8）

図 6.29, 6.30, 6.31, 6.32, 6.33, 6.34 と表 6.22, 6.23, 6.24 に実験結果の平均値を示す。

図 6.29 と図 6.30 に示したグラフからも、近距離の端末 2 は両モデルで良好な結果が得られている。しかし、端末 3 と端末 4 では実験開始直後から非常に不安定な結果となっている。特に STA モデルでのスループットの低下は著しい。中継端末である端末 5 の結果は、これまでの実験結果と同じ傾向が出ている。

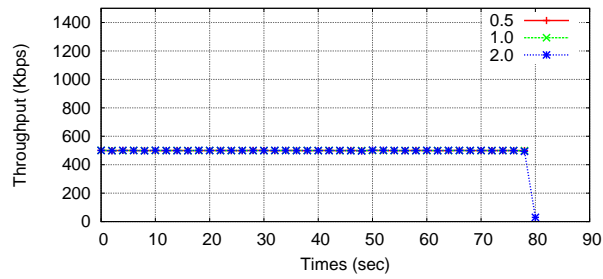
また、パケット棄却数もスループットの結果を裏付けるように、非常に多い事が表 6.31 と 6.32 から確認できる。

表 6.22 の平均値では、端末 3 の STA5 モデルと MOV5 モデルでまったく異なる結果が得られている。STA5 モデルでは、更新間隔が速い程、スループットの低下がみられる。一方、MOV5 モデルでは、更新間隔が遅い程、スループットの低下がみられる。これは、MOV5 モデルでは、中継端末の移動により遅延時間が増幅し、通信が不安定になり、

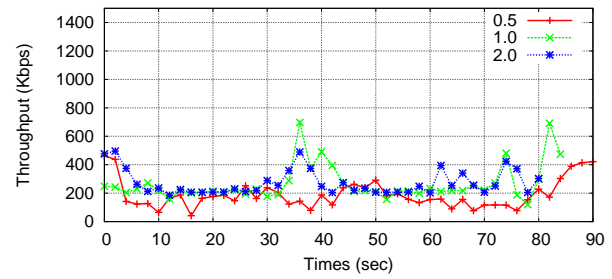
今回の実験結果は、実験 5 の実験と比較が可能な HELLO パケットの更新間隔が 2.0 秒の結果では大きな違いが見られた。実験 5 では、実験時間で STA5 モデルの端末 4 と MOV5 モデルの端末 3 のスループットが大幅な低下がみられる。

以上から、原因は ETX アルゴリズムと周囲の環境の変化が挙げられる。

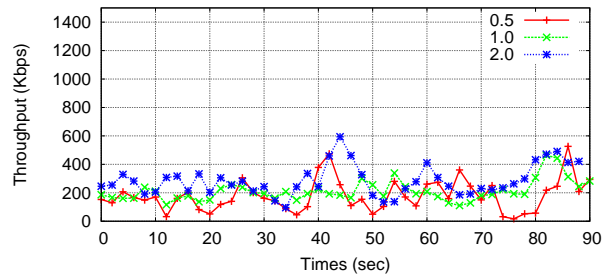
ETX の計算速度が向上した結果、それぞれの経路の信頼性が低下した。これは、ETX\_ff では、より多くのパケットの棄却数を判断するが、ETX\_float では HELLO メッセージのみで判断しているデメリットである。そして、メリットである素早い経路の切り替えもスムーズに行えず、結果として ETX\_ff アルゴリズムの方が優れている事の確認だけにとどまった。



(a) 実験 8 のスループット (端末 2)



(b) 実験 8 のスループット (端末 3)

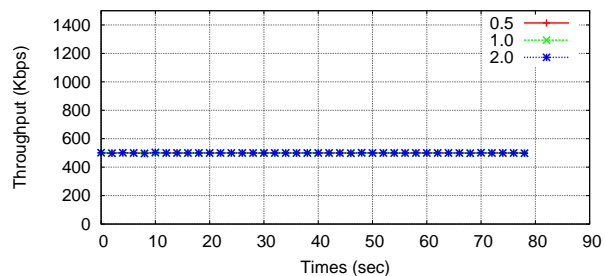


(c) 実験 8 のスループット (端末 4)

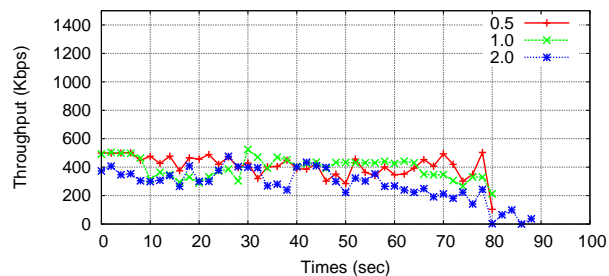
図 6.29 実験 8 の STA モデルの実験結果 (スループット)

表 6.22 実験 8 の平均スループット

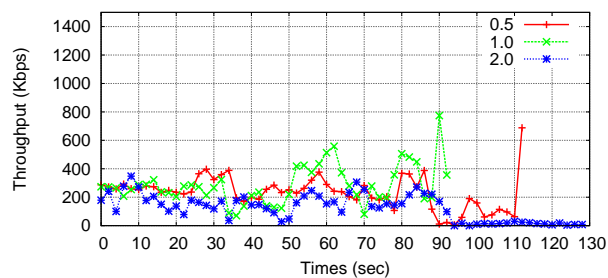
Scenario	Hello Interval (sec)	送信端末 → 受信端末			
		1→2	1→3	1→4	1→5
STA	0.5	499.71	228.67	234.96	-
STA	1.0	499.71	391.88	285.12	-
STA	2.0	499.71	445.13	269.57	-
MOV	0.5	499.71	355.16	281.36	137.17
MOV	1.0	499.71	324.00	255.32	122.24
MOV	2.0	499.71	244.10	264.74	197.73



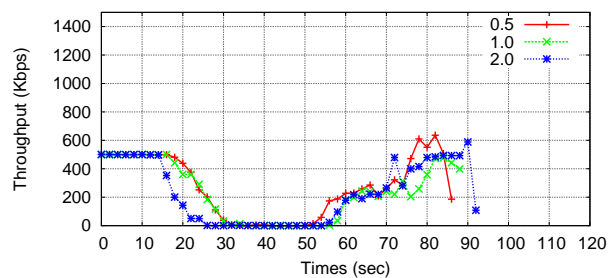
(a) 実験 8 のスループット (端末 2)



(b) 実験 8 のスループット (端末 3)



(c) 実験 8 のスループット (端末 4)

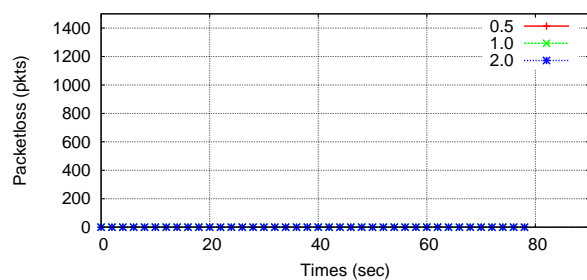


(d) 実験 8 のスループット (端末 5: 移動端末)

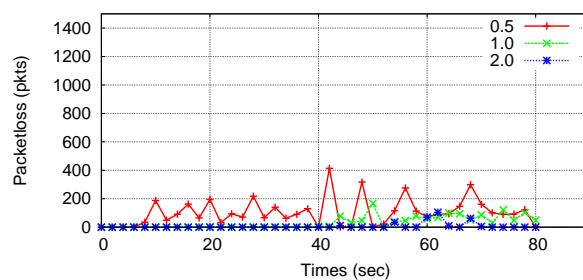
図 6.30 実験 8 の MOV モデルの実験結果 (スループット)

表 6.23 実験 8 の平均パケット棄却数

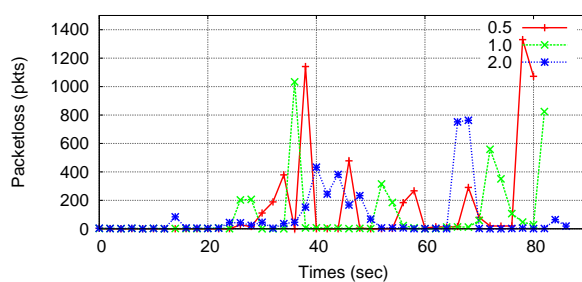
Scenario	Hello Interval (sec)	送信端末 → 受信端末			
		1→2	1→3	1→4	1→5
STA	0.5	0.00	123.97	116.00	-
STA	1.0	0.00	46.26	85.13	-
STA	2.0	0.00	20.70	93.74	-
MOV	0.5	0.00	42.93	82.59	131.27
MOV	1.0	0.00	70.39	106.41	129.22
MOV	2.0	0.00	118.86	102.78	134.60



(a) 実験 8 のパケット棄却数 (端末 2)

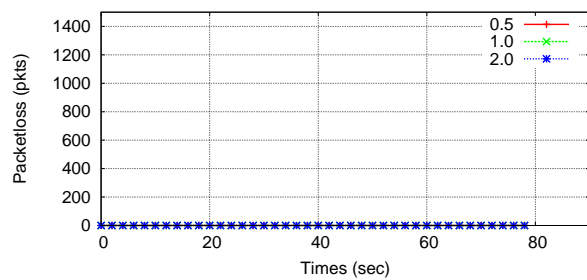


(b) 実験 8 のパケット棄却数 (端末 3)

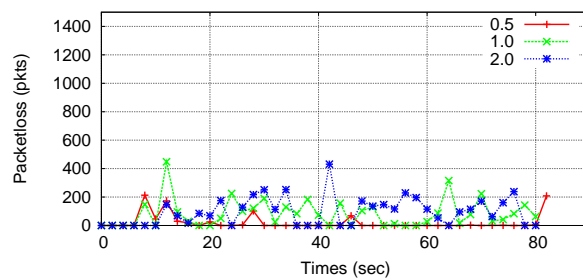


(c) 実験 8 のパケット棄却数 (端末 4)

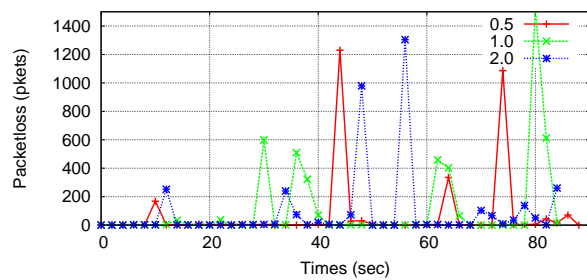
図 6.31 実験 8 の STA モデルの実験結果 (パケット棄却数)



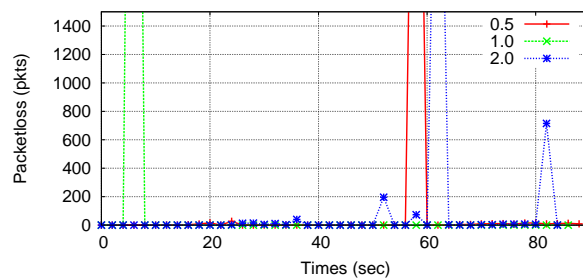
(a) 実験 8 のパケット棄却数 (端末 2)



(b) 実験 8 のパケット棄却数 (端末 3)

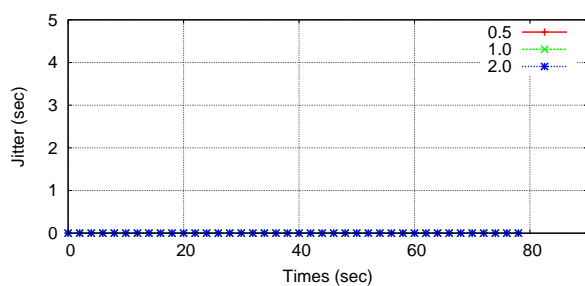


(c) 実験 8 のパケット棄却数 (端末 4)

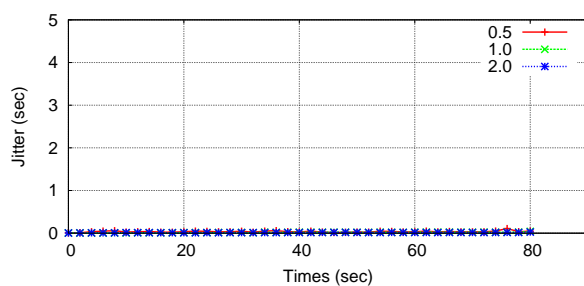


(d) 実験 8 のパケット棄却数 (端末 5 : 移動端末)

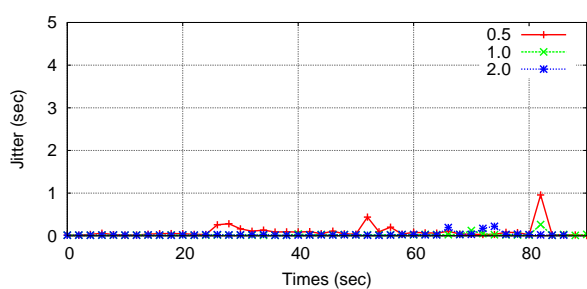
図 6.32 実験 8 の MOV モデルの実験結果 (パケット棄却数)



(a) 実験 8 のジッター (端末 2)

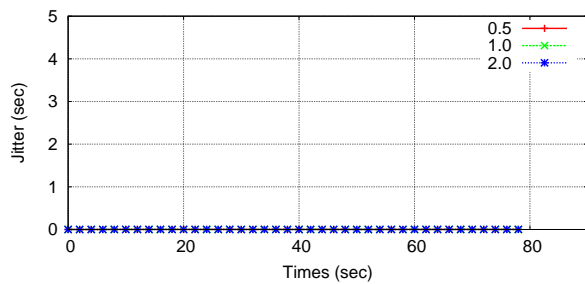


(b) 実験 8 のジッター (端末 3)

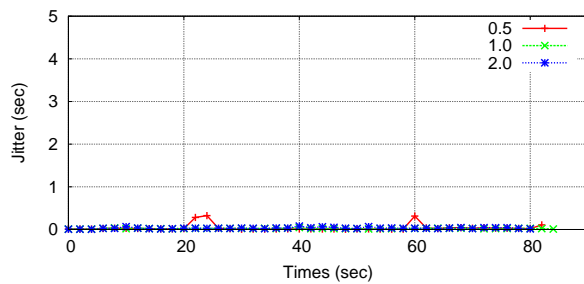


(c) 実験 8 のジッター (端末 4)

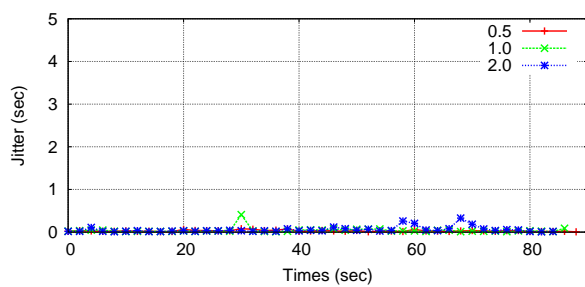
図 6.33 実験 8 の STA モデルの実験結果 (ジッター)



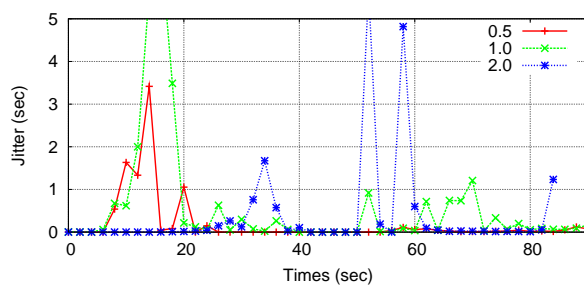
(a) 実験 8 のジッター (端末 2)



(b) 実験 8 のジッター (端末 3)



(c) 実験 8 のジッター (端末 4)



(d) 実験 8 のジッター (端末 5 : 移動端末)

図 6.34 実験 8 の MOV モデルの実験結果 (ジッター)

表 6.24 実験 8 の平均ジッター

Scenario	Hello Interval (sec)	送信端末 → 受信端末			
		1→2	1→3	1→4	1→5
STA	0.5	0.00	0.04	0.09	-
STA	1.0	0.00	0.02	0.03	-
STA	2.0	0.00	0.01	0.03	-
MOV	0.5	0.00	0.04	0.03	0.20
MOV	1.0	0.00	0.02	0.04	0.57
MOV	2.0	0.00	0.03	0.06	0.39

## 第 7 章

# 結論と今後の課題

本研究では、多種のトポロジモデルを想定し、屋内と屋外を考慮した MANET テストベッドを実装した。以下に 8 種類の実験モデルを示す。

1. 屋内階段における周波数の利用率を考慮した実験モデル（実験 1）
2. 屋外階段を考慮した実験モデル（実験 2）
3. 屋内における水平方向と垂直方向のトポロジ考慮した実験モデル（実験 3）
4. 屋内通路と屋外階段を考慮した実験モデル（実験 4）
5. 屋内外の通路を考慮した実験モデル（実験 5）
6. Hello パケットの通信間隔を考慮した実験モデル（実験 6）
7. Hello パケットの有効時間を考慮した実験モデル（実験 7）
8. ETX アルゴリズムを考慮した実験モデル（実験 8）

屋内階段における周波数の利用率を考慮した実験モデルでは、実験結果から、同周波数帯域を多く使用していた 3 階で、スループットの低下、パケット棄却数が増加し、悪影響が確認できた。また、使用周波数が 10% を超えていると、悪影響が出ると判断した。実験 1 は、低画質動画を想定した実験のため、通信に与える影響が最低限に抑えられたと考えられる。より高速な通信を行う場合は、大きな影響を受ける事が懸念される。そのため、より良い通信を行うには、可能な限り影響の少ないチャンネルで通信を行う方が良い事を確認した。

屋外階段を考慮した実験モデルでは、近距離の端末でもスループットの低下がみられ、屋外階段での通信は非常に困難という結果になった。原因は階段がコンクリート製で垂直方向の通信が困難な事が挙げられる。さらに、周囲の環境による影響も強く受けるためだと考えられる。

屋内における水平方向と垂直方向のトポロジを考慮した実験モデルでは、安定した結果が得られた。これは、屋外階段とは異なり、電波が反射する事で垂直方向の通信が容易に出来たと考えられる。一方、移動端末は直接通信が届かないと切断され、再接続後は不安定な結果となった。

屋内通路と屋外階段を考慮した実験モデルでは、屋外階段を考慮した実験モデルの結果より安定した結果が得られた。これは、実験後に行った調査の結果だが、学生が多い時間帯より、少ない時間帯の方がより良い結果が得られる事がわかった。つまり、条件を整えば屋外階段のような劣悪な環境下でも実験4のような安定した通信が可能という事である。

屋内外の通路を考慮した実験モデルはガラス製の自動ドアの影響はほぼ受けず、良い結果が得られた。しかし、移動端末のルーティングテーブルの更新が間に合わず、直接電波が届かない場所に移動し、リンク切断後、再接続にかかる時間が長い事を確認した。

HELLO パケットの更新間隔の実験では、HELLO パケットの更新間隔を短くする事により、直接通信の届かないマルチホップ通信時にある程度の改善が見られた。しかし、移動端末の受信についてはトポロジ情報の更新間隔などが原因と見られるネットワークの切断がみられる。端末の移動にスムーズに対応しているとは言い難い、という結論を出した。HELLO パケットを頻繁に通知する事でより正確な通信を可能にし、より良い通信が出来る事が可能がわかった。

HELLO パケットの有効時間を考慮した実験モデルでは、有効時間が短い程、移動端末に対応できたが、再接続の時間はあまり短縮できなかった。

ETX アルゴリズムを考慮した実験モデルでは、ETX\_float を利用すると不安定な実験結果となる事を確認した。

## 7.1 今後の課題

今後の課題として、本稿の実験結果と障害物を考慮できる高性能なネットワークシミュレータで比較を行いたい。また、現在安価で普及しているスマートフォンやタブレット端末などで利用が想定される実環境により近い MANET テストベッドを構築し、搭載しているアンテナや無線 LAN の影響について調査するための実験を行う必要がある。本稿では、HELLO パケットの更新間隔の変更などパラメータの変更による実験を行ったので、他のパラメータを考慮した比較を行いたい。特に TC メッセージの更新間隔や有効時間のによる影響を調査し、それらの結果から安定し、通信品質の良いパラメータの設定が導けると考える。さらに、これまでトポロジ型の経路制御プロトコル中心に実験を行っていたので、位置情報利用型のプロトコルを用いた性能比較についても実験を行う必要がある。



最後に、無線 LAN の新技術では利用されていないテレビ周波数帯域の利用も提案されているが、現状の MANET では想定されていないため、より実用的な MANET の普及や利用にはさらに多くの研究が必要になると考える。

## 謝辞

この研究をするにあたり指導教官のバロリ レオナルド 教授には，MANET テストベッドの構築から無線ネットワークの理論を丁寧かつ熱心なご指導を賜り，研究を行う事が出来ました．内田 一徳 教授には，電波の影響や材質の違いによる減衰率などをご教授頂き，研究の幅が広がりました．池田 誠 助教授には，MANET テストベッドの基礎や実験モデルの助言を数多く頂き，参考になりました．また，同僚の Elis Kulla 氏と Evjola Spaho 氏には，ネットワークシミュレータによる比較や他の無線ネットワーク，プロトコルなどの議論を活発にさせて頂きました．後輩の安藤 洋規 氏，池端 拓 氏，緒方 雄一 氏，小田 哲也 氏には実験の手伝いや実験に関する有益な情報交換を行い，研究をスムーズに実施する事が出来ました．実験や海外発表など多くの協力をして頂いた皆様へ心から感謝の気持ちと御礼を申し上げたく、謝辞にかえさせていただきます．

## 参考文献

- [1] Wi-Fi ALLIANCE: The How and Why of Wi-Fi, [http://www.wi-fi.org/knowledge\\_center/kc-howandwhyofwi-fi](http://www.wi-fi.org/knowledge_center/kc-howandwhyofwi-fi).
- [2] 間瀬 憲一, “大規模災害時の通信確保を支援するアドホックネットワーク”, 電子情報通信学会学会誌, Vol. 89, No. 9, pp. 796 - 800, September 2006.
- [3] First ACM Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks (VANET 2004): <http://www.path.berkeley.edu/vanet/>
- [4] One Laptop Per Child, <http://one.laptop.org/>
- [5] Intel classmate PC - Clamshell, <http://www.intel.com/content/www/us/en/education-solutions/classmatepc-clamshell.html>
- [6] W. Kiess and M. Mauve, “A Survey on Real-world Implementations of Mobile Ad-hoc Networks”, Ad Hoc Networks, Vol. 5, No. 3, pp. 324 - 339, 2007.
- [7] D. Johnson and G. Hancke, “Comparison of Two Routing Metrics in OLSR on a Grid based Mesh Network”, Ad Hoc Networks, Vol. 7, No. 2, pp. 374-387, March 2009.
- [8] Y. Takahashi, Y. Kaneko, K. Mase, “Experiments on Route Selection for Achieving High Throughput in Wireless Mesh Networks”, IEICE Technical Report, Vol. 106, No. 42, pp. 25 - 30, 2006.
- [9] Y. Owada, Y. Takahashi, T. Suda, H. Terui, F. Taki, T. Yagi, K. Mase, “A Large Scale Wireless Mobile Ad Hoc Network Testbed”, IEEE Vehicular Technology Conference, pp. 324 - 328, 2005.
- [10] H. Lundgren, E. Nordstrom, and C. Tschudin, “Coping with Communication Gray Zones in IEEE 802.11b based Ad Hoc Networks”, Proc. of the 5-th ACM International Workshop on Wireless Mobile Multimedia (WOWMOM-2002), pp. 49-55, 2002
- [11] V. Kawadia and P. R. Kumar, “Experimental Investigations into TCP Performance over Wireless Multihop Networks”, Proc. of E-WIND-2005, pp. 29-34, 2005.
- [12] M. Durvy, P. Thiran, "Understanding the Gap between the IEEE 802.11 Protocol Performance and the Theoretical Limits", Proc. of SECOM-2006, pp. 324-339
- [13] G. Anastasi, E. Borgia, M. Conti, and E. Gregori, “IEEE 802.11b Ad Hoc Networks: Performance Measurements”, Cluster Computing, Vol.8, No. 2-3, pp. 135-145, 2005.
- [14] D. A. Maltz, J. Broch, and D. B. Johnson, “Lessons from a Fullscale Multihop Wireless Ad Hoc Network Testbed”, IEEE Personal Communications, Vol. 8, No. 1, pp. 8-15, February 2001.
- [15] C. Perkins, E. Belding-Royer, S. Das, “Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing”, RFC3561 (Experimental), July 2003.
- [16] D. Johnson, Y. Hu, D. Maltz, “The Dynamic Source Routing Protocol (DSR) for Mobile Ad Hoc Networks for IPv4”, Internet Draft draft-ietf-manet-dsr-10.txt, July 2004.
- [17] G. De Marco, M. Ikeda, T. Yang, and L. Barolli, “Experimental Performance Evaluation of a Pro-active Ad-hoc

- Routing Protocol in Outdoor and Indoor Scenarios” , Proc. of IEEE AINA-2007, pp. 7-14, May 2007.
- [18] 鈴木 裕和, 兼子 陽市郎, 間瀬 憲一, 山崎 重光, 牧野 秀夫, “大規模災害復旧時のアドホック通信システム：スカイメッシュ”, 電子情報通信学会総合大会講演論文集, Vol. 2006, No. 2, pp. 605, 2006
- [19] T. Clausen, P. Jacquet, “Optimized Link State Routing Protocol (OLSR)” ,Request for Comments, RFC 3626 (Experimental),IETF, Internet Engineering Task Force,2003.
- [20] Haartsen, J.C., “The Bluetooth radio system” , Personal Communications, IEEE, vol.7, no.1, pp.28 - 36, Feb. 2000
- [21] ITpro:モバイル WiMAX とは, <http://itpro.nikkeibp.co.jp/article/Keyword/20071126/287937/?ST=keitai>.
- [22] Athens Wireless Metropolitan Network, <https://www.awmn.net/forum.php>
- [23] Bianchi, G., “Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function” , Selected Areas in Communications, IEEE Journal on, vol.18, no.3, pp.535 - 547, March 2000
- [24] A. Kamerman and L. Monteban, “WaveLAN II: A high-performance wireless LAN for the unlicensed band” , Bell Labs Tech. J., pp.118-133, 1997
- [25] G. Holland, N. Vaidya, and P. Bahl, “A rate-adaptive MAC protocol for multi-hop wireless networks” , in Proc. ACM/IEEE MobiCom’ 01, Jul. 2001.
- [26] J. N. Laneman, G. W. Wornell, “Distributed space-time coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless networks” , IEEE GLOBECOM’ 02, 2002.
- [27] R. R. Choudhury, X. Yang, R. Ramanathan, and N. H. Vaidya, “Using directional antennas for medium access control in ad hoc networks,” Proc. ACM MobiCom, pp.59-70, Sep. 2002.
- [28] M. Takata, K. Nagashima, T. Watanabe, “A Dual Access Mode MAC Protocol for Ad Hoc Networks Using Smart Antennas,” IEEE International Conference on Communications (ICC2004), pp.4182-4186, Jun. 2004.
- [29] Kawadia, V.; Narayanaswamy, S.; Rozovsky, R.; Sreenivas, R.S.; Kumar, P.R., "Protocols for media access control and power control in wireless networks," Decision and Control, 2001. Proceedings of the 40th IEEE Conference on , vol.2, no., pp.1935,1940 vol.2, 2001
- [30] S.L. Wu, C.Y. Lin, Y.C. Tseng, J.L. Sheu, “A new multi-channel MAC protocol with on-demand channel assignment for multi-hop mobile ad hoc networks, Parallel Architectures, Algorithms and Networks,” I-SPAN 2000, 2000.
- [31] J. So, N. H. Vaidya, “Multi-channel mac for ad hoc networks: handling multi-channel hidden terminals using a single transceiver,” Proceedings of the 5th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing (Mobihoc), 2004.
- [32] S. Eichler, C. Schroth, J. Eberspacher, “Car-to-Car Communication”, VDE-Kongress - Innovations for Europe (Aachen), pp. 6, 2006.
- [33] Fan Xiangning, Song Yulin, “Improvement on LEACH Protocol of Wireless Sensor Network” , International Conference on Sensor Technologies and Applications SENSORCOMM 2007, pp.260-264, Oct, 2007
- [34] Ossama Younis, Sonia Fahmy, “HEED: A Hybrid, Energy-Efficient, Distributed Clustering Approach for Ad-hoc Sensor Networks”
- [35] B. J. Culpepper, L. Dung, M. Moh, “Design and Analysis of Hybrid. Indirect Transmissions (HIT) for Data Gathering in Wireless Micro Sensor. Networks” , ACM Mobile Computing and Communications Review, vol.3, pp.61 - 83, Nov. 2004
- [36] M.O.Farooq, A. B. Dogar, G.A. Shah, “MR-LEACH: Multi-hop Routing with Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy” , Fourth International Conference on Sensor Technologies and Applications, pp. 262 - 268, 2010

- [37] Avallone, Stefano; Akyildiz, I.F.; Ventre, Giorgio, "A Channel and Rate Assignment Algorithm and a Layer-2.5 Forwarding Paradigm for Multi-Radio Wireless Mesh Networks", *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, vol.17, no.1, pp.267,280, Feb. 2009
- [38] Young-Bae Ko; Vaidya, N.F., "Geocasting in mobile ad hoc networks: location-based multicast algorithms," *Mobile Computing Systems and Applications*, 1999. Proceedings. WMCSA '99. Second IEEE Workshop on , vol., no., pp.101,110, 25-26 Feb 1999
- [39] I. D. Chakeres, C. E. Perkins, "Dynamic MANET On-demand Routing Protocol", *IETF Internet - Draft*, draft-ietf-manet-dymo-12.txt, February 2008.
- [40] T. Clausen, C. Dearlove, P. Jacquet, "The Optimized Link State Routing Protocol version 2", *Internet - Draft* draft-ietf-manet-olsrv2-11, April 2010
- [41] A. Tonnesen, "OLSRd:Implementation Code of the OLSR", <http://www.olsr.org/>.
- [42] R. Ogier, F. Templin, M. Lewis, "Topology Dissemination Based on Reverse-Path Forwarding (TBRPF)", *SRI International*, February 2004.
- [43] Welcome to Open Mesh, <http://www.open-mesh.org/projects/open-mesh/wiki>
- [44] M. Pearlman and Z. Haas, "The Zone Routing Protocol (ZRP) for Ad Hoc Networks", *Internet - Draft* draft-zone-routing-protocol-01.txt, August 1998.
- [45] T. Clausen, G. Hansen, L. Christensen, and G. Behrmann, "The Optimized Link State Routing Protocol, Evaluation through Experiments and Simulation", *Proc. of IEEE Symposium on Wireless Personal Mobile Communications*, Available on line at <http://hipercom.inria.fr/olsr/wpmc01.ps>, September 2001.
- [46] D. De Couto, D. Aguayo, J. Bicket, and R. Morris, "A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing", *MobiCom '03*, pp. 134-146, 2003.
- [47] D. De Couto, "High-Throughput Routing for Multi-Hop Wireless Networks", *PHD thesis*, Massachusetts Institute of Technology, USA, 2004.
- [48] R. Draves, J. Padhye and B. Zill, "Comparison of routing metrics for static multi-hop wireless networks", *SIGCOMM 04*, pp. 133-144, 2004.
- [49] Distributed Internet Traffic Generator, <http://www.grid.unina.it/software/ITG/>.
- [50] M. Hiyama, M. Ikeda, E. Kulla, L. Barolli, M. Takizawa, "Performance Analysis of Multi-hop Ad-hoc Network Using Multi-flow Traffic for Indoor Scenarios", *Journal of Ambient Intelligence & Humanized Computing (AIHC)*, Springer, Vol. 1, No. 4, pp. 283 - 294, 2010.
- [51] 肥山 昌弘, 池田 誠, バロリ レオナルド, "屋内におけるモビリティを考慮したアドホック・ネットワーク・テストベッドの性能評価", 第 61 回電気関係学会九州支部連合大会, 11-2A-11, September 2008.
- [52] 肥山 昌弘, 池田 誠, バロリ レオナルド, "トポロジの変化を考慮した MANET テストベッドの性能評価", 情報処理学会研究報告, 2009-DPS-138, Vol. 2009, No. 20, pp. 139 - 144, March 2009.
- [53] M. Hiyama, M. Ikeda, L.Barolli, G. De Marco, F. Xhafa, A. Durresi, "Mobility Effects in Mobile Ad hoc Networks", *Proc of NTCAA-2009*, Vol. 2, pp. 679 - 684, 2009.
- [54] 肥山 昌弘, 池田 誠, バロリ レオナルド, 小山 明夫, "MANET テストベッドにおける見通し外通信による影響", 情報処理学会研究報告, 2010-DPS-142, CSEC-48, Vol. 2010, No. 29, pp. 1 - 7, February 2010.

## 業績リスト

### 査読付論文

1. M. Hiyama, M. Ikeda, L. Barolli, M. Takizawa, "Performance Analysis of Multi-hop Ad-hoc Network Using Multi-flow Traffic for Indoor Scenarios" , Journal of Ambient Intelligence and Human Computing, Springer, Vol. 1, No. 4, pp. 283-294, 2010.
2. M. Ikeda, L. Barolli, M. Hiyama, E. Kulla and M. Takizawa, "Performance Evaluation of MANET Routing Protocols: Simulations and Experiments", Computing and Informatics (CAI), Vol. 30, No. 6, pp. 1147-1165, 2011.
3. M. Hiyama, E. Kulla, T. Oda, Ikeda and L. Barolli, "Application of a MANET Testbed for Horizontal and Vertical Scenarios: Performance Evaluation Using Delay and Jitter Metrics", Human-centric Computing and Information Sciences (HCIS) Journal, Springer, Vol. 1, No. 3, pp. 1-14, 2011.
4. M. Hiyama, E. Kulla, M. Ikeda, L. Barolli, "Evaluation of MANET Protocols for Different Indoor Environments: Results from a Real MANET Testbed" , International Journal of Space-Based and Situated Computing (IJSSC), Vol. 2, No. 2, pp. 71-82 2011.

### 国際会議

1. M. Hiyama, E. Kulla, M. Ikeda and L. Barolli, "Performance Evaluation of a MANET Testbed for Different Indoor Scenarios: A Comparison Study", The Fifth International Conference on Complex, Intelligent, and Software Intensive Systems (CISIS 2011), pp. 420 - 425, Seoul, June 2011.
2. M. Hiyama, E. Kulla, M. Ikeda, L. Barolli and A. Durresi, "Comparison Evaluation of Horizontal and Vertical Scenarios for Delay and Jitter Metrics Using a MANET Testbed", The 2-nd International Conference on Emerging Intelligent Data and Web Technologies 2011 (EIDWT 2011), pp. 6-13, Tirana, September 2011.

3. M. Hiyama, E. Kulla, M. Ikeda and L. Barolli, "Investigation of Channel Usage and Packetloss in a MANET Testbed for Stairs Indoor Scenarios", The 2-nd International Workshop on Methods, Analysis and Protocols for Wireless Communication (MAPWC 2011), pp. 499-504, Barcelona, October 2011.
4. M. Hiyama, E. Kulla, M. Ikeda, L. Barolli and J. Iwashige, "Performance Evaluation of MANET Testbed in a Mixed Indoor and Outdoor Environment" , The Second International Workshop on Computational Intelligence for Disaster Management 2011 (CIDM 2011), pp. 771-776, Fukuoka, November - December 2011.
5. M. Hiyama, E. Kulla, T. Oda, M. Ikeda and L. Barolli, "Experimental Results of a MANET Testbed in a Mixed Environment Considering Horizontal and Vertical Topologies", The 26th IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA 2012), pp. 884-889, Fukuoka, March 2012.
6. M. Hiyama, E. Kulla, T. Oda, M. Ikeda, L. Barolli and M. Takizawa, "Performance Investigation of a MANET Testbed in Outdoor Stairs Environment for Different Scenarios", The Sixth International Conference on Complex, Intelligent, and Software Intensive Systems (CISIS 2012), pp. 284-289, Palermo, Italy, July 2012.
7. M. Hiyama, E. Kulla, M. Ikeda, L. Barolli and M. Younas, "A Comparative Study of a MANET Testbed Performance in Indoor and Outdoor Stairs Environment", The 15th International Conference on Network-Based Information Systems (NBIS 2012), pp.134-140, Melbourne, Australia, September 2012.
8. M. Hiyama, E. Kulla, M. Ikeda and L. Barolli, "Performance Evaluation of a MANET Testbed in Heterogeneous Environment: Experimental Results", The Seventh International Conference on Broadband, Wireless Computing, Communication and Applications (BWCCA 2012), pp. 60-65, Victoria, Canada, November 2012.
9. M. Hiyama, E. Kulla, M. Ikeda L. Barolli and M. Takizawa, "Investigation of OLSR Behavior for Different Hello Packets Intervals in a MANET Testbed", The 27th IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA 2013), pp. 183-188, Barcelona, Spain, March 2013.
10. M. Hiyama, E. Kulla, M. Ikeda, L. Barolli and M. Takizawa, "Performance Analysis of OLSR with ETX\_ff for Different HELLO Packet Interval in a MANET Testbed," Lecture

- Notes in Electrical Engineering: Information Technology Convergence, Security, Robotics, Automations and Communication, Springer, Vol. 253, No. 1, pp. 77-88, Fukuoka, Japan, July 2013.
11. M. Hiyama, E. Kulla, S. Sakamoto, M. Ikeda, L. Barolli and M. Takizawa, "Investigating the Effect of HELLO Validity Time of OLSR in a MANET Testbed", The Eighth International Conference on Broadband, Wireless Computing, Communication and Applications (BWCCA 2013), pp. 296-301, Compiègne, France, October 2013.