

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

題目(和文)	需要家向け高速マルチホップ無線通信ネットワークに関する研究
Title(English)	A Study on High-speed Multi-hop Wireless Communications System for Demand Side Area Network
著者(和文)	宮下充史
Author(English)	Michifumi Miyashita
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第9465号, 授与年月日:2014年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:高田 潤一,高橋 邦夫,山下 幸彦,荒木 純道,府川 和彦
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第9465号, Conferred date:2014/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

需要家向け高速マルチホップ無線通信ネットワーク  
に関する研究

A Study on High-speed Multi-hop Wireless  
Communications System for Demand Side Area Network

宮下 充史

東京工業大学大学院  
理工学研究科 国際開発工学専攻  
2014年3月

## 目 次

第 1 章 序論 .....	1
1.1 研究の背景 .....	1
1.2 論文の構成 .....	2
第 2 章 スマートメータと将来の電力系統 .....	4
2.1 スマートメータの概略 .....	4
2.2 将来の電力系統 .....	5
2.2.1 将来の電力系統における課題 .....	5
2.2.2 将来の電力系統におけるエネルギー管理 .....	7
2.2.3 デマンドレスポンスとリアルタイム料金 .....	7
2.3 将来の電力系統における通信ネットワークに求められる条件 .....	8
2.4 むすび .....	9
第 3 章 需要家向け通信ネットワーク .....	10
3.1 通信方式 .....	10
3.1.1 有線通信方式 .....	10
3.1.2 1 対 N 方式 .....	11
3.1.3 マルチホップ無線通信方式 .....	12
3.1.4 通信方式の得失 .....	14
3.2 ルーティング方式 .....	15
3.2.1 AODV .....	15
3.2.2 OLSR .....	16
3.2.3 RPL .....	16
3.3 検討対象方式 .....	17
3.4 むすび .....	17

第 4 章 高速マルチホップ無線の伝送特性評価 .....	19
4.1 マルチホップ無線 LAN の基礎伝送特性.....	19
4.1.1 IEEE 802.11g による装置構成 .....	19
4.1.2 基礎的な伝送特性の実験評価 .....	20
4.1.3 IEEE 802.11n によるマルチホップ無線の基礎的な伝送特性.....	26
4.2 家屋による影響評価.....	27
4.2.1 家屋による影響評価 .....	28
4.2.2 模擬遮蔽板による遮蔽効果 .....	30
4.3 電波干渉による影響評価.....	34
4.3.1 電波干渉に関する実験構成 .....	35
4.3.2 電波干渉下における通信特性 .....	36
4.4 無線 LAN のマルチレート制御による影響評価.....	37
4.4.1 マルチレート制御時の伝送特性.....	37
4.4.2 IEEE 802.11n におけるマルチレート制御 .....	38
4.4.3 固定送信レート時の伝送特性.....	39
4.4.4 マルチレート制御に伴う伝送特性劣化の改善方策 .....	42
4.5 むすび .....	46
第 5 章 大規模マルチホップ無線通信ネットワークの伝送特性評価 .....	47
5.1 計算機シミュレーション手法.....	47
5.1.1 計算機シミュレーションの前提条件 .....	48
5.1.2 ネットワークトポロジの決定方法 .....	50
5.2 接続先決定手法に関する考察.....	51
5.3 計算機シミュレーション結果.....	58
5.3.1 ランダムに配置・ランダムに起動する場合 .....	58
5.3.2 ランダムに配置・AP 近傍から起動する場合 .....	60
5.3.3 格子状に配置・AP 近傍から起動する場合 .....	63
5.4 接続先の再探索を考慮したシミュレーション .....	64
5.5 シミュレーション結果の考察.....	66
5.6 需要家向け高速マルチホップ無線通信ネットワーク設計における課題 .....	67
5.6.1 電波伝搬に関わる課題 .....	67
5.6.2 無線 LAN 機能に関わる課題.....	68

5.6.3	ルーティングに関わる課題.....	69
5.6.4	アプリケーションに関わる課題.....	70
5.7	むすび.....	71
第6章 結論.....		72
謝 辞.....		75
参考文献.....		76
本研究に関連した学会発表論文.....		81

# 第1章 序論

## 1.1 研究の背景

マルチホップ無線通信ネットワークは、一般的な無線通信ネットワークのように基地局と端末により構成されるのではなく、中継機能を有する端末のみにより構成される無線通信ネットワークであり、アドホックネットワーク[1]の要素技術の一つである。アドホックネットワークは元々軍事技術として研究が始まったが、1990年代より民生用途としての開発が進み、近年では災害時における一時的な通信ネットワークの構築や、構造モニタリングへの適用などが検討されている[2]-[5]。アドホックネットワークでは、新たに設置された端末は自動的に認識されネットワークに参入し、エンドツーエンドの中継経路はルーティング方式により決定される。アドホックネットワークを適用するシステムでは、多数の端末が広く面的に分布し、これらからの各種データを集約することを想定されることが多い。このようなシステムにおいては、広く面的に分布した端末を効率的に接続するための拡張性や、端末の増減に対して詳細な設定や接続手順を必要としない柔軟性が通信ネットワークに要求され、アドホックネットワーク（マルチホップ無線通信ネットワーク）の利用が適している。

近年、自動検針や使用電力の見える化による省エネ喚起、さらには柔軟な料金体系の実現を通じたデマンドレスポンスへの期待から、スマートメータの本格導入が検討されている[6]。従来の電力系統においては、発電所と変電所などの基幹系統に対しては光ファイバやマイクロ波無線回線などにより通信ネットワークが構築され、需給調整などに活用されてきている。一方、スマートメータは、これまで通信ネットワークが導入されていなかった需要家側に対するシステムである。膨大な数のメータを接続するための通信ネットワークの構築においては、構築コストを低減するとともに、メータの増減に対する柔軟性や、広く面的に分布するメータを接続するための拡張性の観点から、マルチホップ無線方式はスマートメータ用通信システム構築の重要な候補の一つと考えられる。このような需要家

側における無線通信システムの利用においては、メータの設置環境を考慮した伝送特性評価が重要であり、電力会社や自治体などにおいて様々な実証試験がなされているところである。

スマートメータをはじめ、マルチホップ無線通信ネットワークの適用が想定されているシステムにおいては、検針情報やセンサデータなど、比較的小容量のデータ伝送が主流である。今後、データ集約間隔の短時間化、詳細なセンシングデータの送受信を伴うシステムの制御、送受信データの大容量化などを想定すると、現状より高速な通信が要求されると考えられる。スマートメータなど大規模なマルチホップ無線通信ネットワークに対して高速通信技術が適用される場合、その伝送特性や実用化に向けた課題などは明らかになっていない。

本論文では、高速通信技術の一つとして、無線 LAN として広く利用されている IEEE 802.11 技術の適用を想定し、そのマルチホップ無線通信ネットワークの基礎的な伝送特性を明らかにする。また、無線 LAN 技術をマルチホップ無線通信ネットワークに適用する際の課題について論じる。

## 1.2 論文の構成

本論文の構成は以下のとおりである。

第2章では、高速マルチホップ無線通信ネットワークの適用を想定するシステムの一例であるスマートメータシステム、および将来の電力システムについて述べる。現在考えられているスマートメータでは自動検針などの実現が主目的であるが、将来、太陽光発電等の分散形電源が需要家側に大量導入した場合の電力システムにおける課題を本章にてまとめるとともに、このような電力システムにおける需要家側に対する通信ネットワークに求められる条件について述べる。

第3章では、需要家向け通信ネットワークにおける要素技術について述べる。現在、需要家向け通信ネットワークを構築するための通信方式として考えられる技術を有線通信方式、マルチホップ無線通信方式、および1対N方式についてまとめるとともに、各通信方式の得失を整理する。また、大規模なマルチホップ無線通信ネットワークにおいてエンドツーエンドでデータを中継するためのルーティング方式の概要についてまとめ、本論文に

において検討の対象とする通信方式，およびルーティング方式について述べる。

第4章では，高速マルチホップ無線ネットワークの伝送特性を評価した結果について述べる。IEEE 802.11 技術によるマルチホップ無線 LAN の基礎伝送特性に関する実験評価として，直列に端末が接続される場合の評価，および面的に端末が設置される場合の評価結果をまとめる。また，需要家向け無線通信ネットワークにおける電波伝搬特性に大きく影響を及ぼす家屋の影響に関する検討結果，周囲の無線 LAN による干渉電波の影響に関する検討結果をまとめる。さらに，無線 LAN において接続性を向上するために実装されるマルチレート制御機能が無線 LAN の通信に及ぼす影響についてまとめ，需要家向け通信ネットワークに対して無線 LAN 技術を用いたマルチホップ無線通信方式を適用する際の課題を述べる。

第5章では，第4章にて示した小規模なマルチホップ無線通信ネットワークの実験結果を参考に，端末数が数百からなる大規模なマルチホップ無線通信ネットワークの伝送特性を計算機シミュレーションにて評価した結果を示す。まず，計算機シミュレーションの方法をまとめ，次に，マルチホップ無線通信ネットワーク内の最大ホップ数および最低受信電力に関する計算機シミュレーション結果を，無線通信端末がランダムに配置された場合と格子状に配置された場合，および無線通信端末がランダム順に接続先を探索した場合とアクセスポイントに近い無線通信端末から接続先を探索した場合について示す。さらに，実験結果および計算機シミュレーション結果から大規模マルチホップ無線通信ネットワークの伝送特性を考察するとともに，このような通信ネットワークの設計に向けた課題をまとめる。

最後に，第6章において本論文をまとめる。

## 第2章 スマートメータと将来の電力系統

本章では、高速マルチホップ無線通信ネットワークの適用を想定するシステムであるスマートメータ、および需要側に双方向通信ネットワークが整備され、分散形電源の大量導入が想定される将来の電力系統について述べる。

### 2.1 スマートメータの概略

スマートメータとは、双方向通信機能を有した電子式メータであり、電力会社とメータとの間で情報をやり取りする。スマートメータのシステムイメージを図 2-1 に示す。スマートメータシステムは、主に、各需要家に設置されるスマートメータ、一定台数のスマートメータを集約して基幹系通信ネットワークに接続する集約局、および電力会社内に設置される各種システム（例えば MDMS : Meter Data Management System）のサーバやデータベ

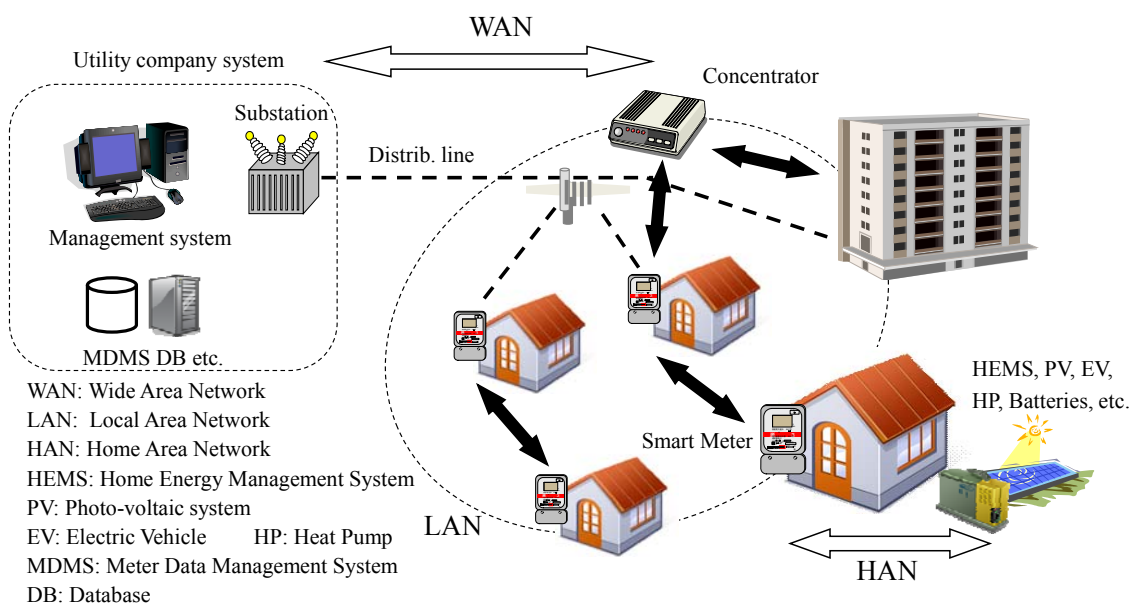


図 2-1 スマートメータシステムのイメージ

ースからなる。スマートメータから宅内向けの機器(例えば HEMS: Home Energy Management System) に対する通信ネットワークを HAN (Home Area Network), スマートメータから集約局までの通信ネットワークを LAN (Local Area Network), 集約局から電力会社までの通信ネットワークを WAN (Wide Area Network) と呼ぶ。文献[7]によると, スマートメータの満たすべき要件として以下が挙げられている。

- ・機能: 遠隔検針, 遠隔開閉
- ・情報: 電力使用量, 逆潮流値, 時刻情報, 粒度は 30 分
- ・提供先: 需要家および電力 (ガス) 会社双方
- ・提供のタイミング: 現時点では原則翌日まで

また, 文献[8]では, スマートメータと電力会社との間では検針値 (30 分値), 遠隔開閉信号の送受信, スマートメータと HEMS との間で電力使用量や潮流値を送受信することが想定されている。

## 2.2 将来の電力系統

現在の電力系統は, 大型発電所による集中形電源からの電力を送電網, 変電所, 配電網を介して需要家まで送電している。発電所から変電所間の系統保護制御システムや, 発電所と給電指令所間の需給制御システムなど, 基幹系統においてはマイクロ波無線回線や光ファイバなどによる通信ネットワークが構築されており, 需給調整や系統保護リレーなどに用いられている。また, 変電所から配電柱上開閉器間においては, 光ファイバやメタルによる通信ネットワークを用い, 配電自動化システムが運用されている。一方, 需要家側においては, 特別高圧需要家などには通信ネットワークが整備され, 遠隔検針やロードサーベイなどに用いられている[9]。一方, 低圧需要家側には通信ネットワークは整備されておらず, 今後のスマートメータの導入に伴い, 低圧需要家側の通信ネットワーク構築が進むと考えられる。

以下では, 需要家側へ分散形電源が大量導入した場合の, 将来の電力系統における課題やエネルギーマネジメントシステムについて述べる。

### 2.2.1 将来の電力系統における課題

地球温暖化対策, 省エネルギーや多様な電源の確保を目的として, 太陽光発電 (PV: Photo-voltaic system) を始めとする再生可能エネルギーによる分散形電源の家庭に対する導

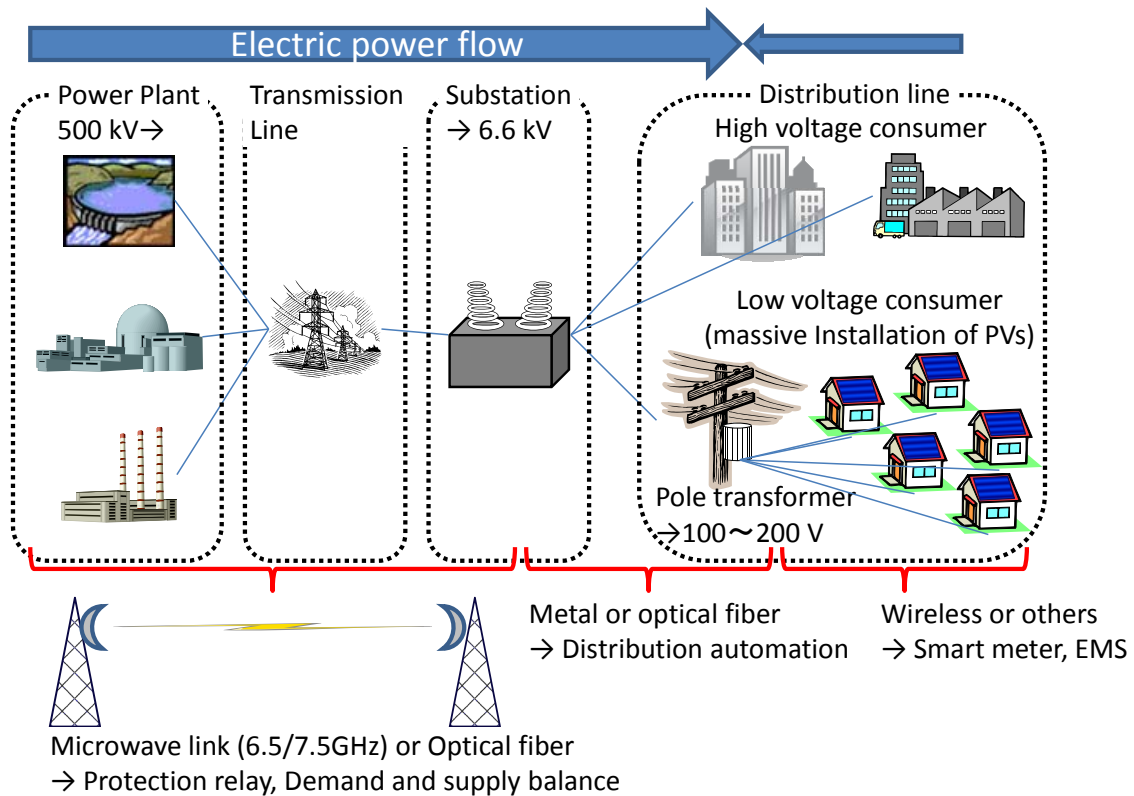


図 2-2 分散形電源大量導入時の電力系統のイメージ

入が進みつつある。長期エネルギー需給見通し（2008 年度時点）[10]では 2030 年における最大導入量として 5300 万 kW が想定されており，将来的には PV が需要家側へ大量導入されると考えられる。PV の大量導入時における電力系統のイメージを図 2-2 に示す。

PV は配電線に接続され，家庭からの余剰電力は配電網に流れる。発電量が天候に大きく左右されるため，悪天候により PV 出力が見込めない時期に電力を供給するためのバックアップ用火力発電所や，時間オーダーの出力変動を吸収するための揚水発電所等の制御が必要となる。さらに，PV 出力変動の増大に伴い，商用電源の周波数（50/60 Hz）の調整能力が低下するため，秒～分オーダーの PV 出力変動に対して周波数が許容値を超えて変動してしまう可能性がある。また，例えば天候のよい大型連休など，電力消費が少ないにもかかわらず発電量が多いと，家庭側から配電網に対する電力の流入量が大きくなり，余剰電力が発生する問題もある。PV の導入台数が少ない場合には問題とはならないが，PV が大量に導入されると，図 2-2 に示すように変電所を超えて上位系統に対する逆潮流が生じるなど，電力系統の管理上問題となる可能性がある。個々の PV からの逆潮流が多いと，配電系統の電圧が電圧基準（ $101 \pm 6$  V）を逸脱する可能性がある[11]。このような周波数や電圧の変動

が生じると、工場の生産ラインにおける品質に影響が出るといった問題が生じる可能性があるため、これらを防止するための様々な研究開発がなされている[12]-[14]。将来技術として、ローカルで出力変動を平滑化するために需要家向けの通信網を利用してPVの出力制御やローカルでの需給調整をすることも考えられる[15]。

現在の配電系統では、配電線に事故が生じた場合、時限順送方式により事故区間の検出、及び停電区間の最小化が図られており、停電区間における復旧作業ののち作業員により通電が開始される。停電区間の配電線にPVが接続されている場合、停電区間であるにもかかわらず配電線が充電状態となるため、復旧作業に関わる保安面の観点から問題となる。そのため、PVの単独運転検出機能に関する開発[16]がなされているが、自律的な検出機能に加えて、通信を利用した単独運転検出を行うことで、保安確保の向上を測ることも重要と考えられる。

### 2.2.2 将来の電力系統におけるエネルギー管理

将来の電力系統においては、従来の集中形電源に加えて、PV等の分散形電源が需要家側に大量に導入されることが想定される。このような電力系統においては、2.2.1項にて述べたような電力系統管理上の問題を解決するとともに、エネルギー管理の最適化によるエネルギーの利用効率向上が望まれる。

家庭内におけるエネルギー管理としては、HEMSによる家庭内電力機器の制御が考えられる。照明や空調など需要側機器とともに、PV、EV (Electric Vehicle)、HP (Heat Pump)、燃料電池など、発電、蓄電機器の制御により家庭内のエネルギー管理を最適化する。同様に、ビルや工場においてはBEMS (Building Energy Management System) やFEMS (Factory Energy Management System) により温度管理や稼働機器スケジューリングなどの最適化を実現する。さらに、地域内のHEMS、BEMS、FEMSを管理するCEMS (Community Energy Management System) により、地域内のエネルギー管理の最適化や、電力会社、地域間における電力融通、需給調整を実現することで、電力システム全体としてエネルギー利用の最適化することが期待される[9]。将来におけるエネルギー管理システムのイメージを図2-3に示す。

### 2.2.3 デマンドレスポンスとリアルタイム料金

一日におけるピーク電力を下げ、負荷を平準化することで、発電設備数の適正化を図り、

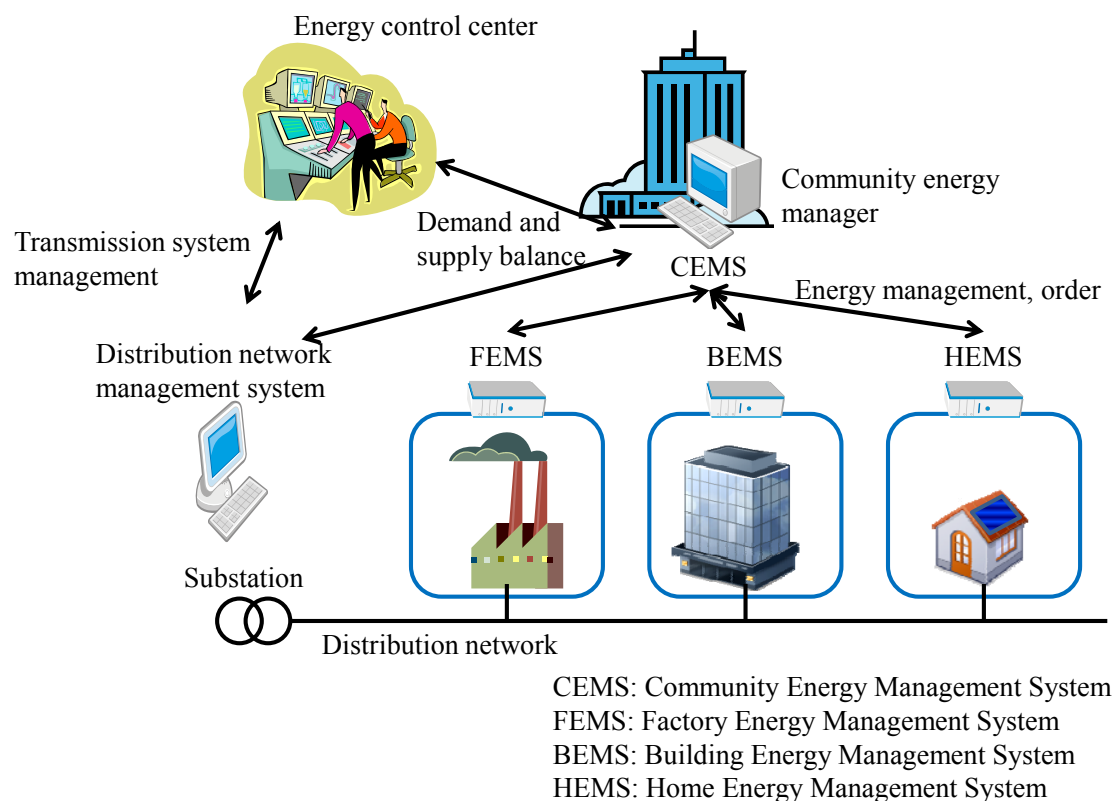


図 2-3 将来のエネルギー管理

発電コストを低減することが期待される。現在，需要のピークが最大供給力を超えることが想定される場合に，使用電力の一定量を削減する調整契約が特別高圧需要家を中心に行われているが，低圧需要家に対しては広がっていない。ピーク時間帯においては料金が高くなるなど，多様な料金プランが設定され，時間に応じて需要家がこれを選択することで，ピーク電力の低減を図るデマンドレスポンスが，スマートメータの導入とともに検討されている[6][17]。さらに，需要と供給に合わせて料金を時々刻々と変動させるリアルタイム料金がある[18]。この場合，事業者側から料金情報が数分～1 時間の間隔で提供され[7][18]，これに応じて需要家が使用電力削減の実施判断を行う。

### 2.3 将来の電力系統における通信ネットワークに求められる条件

2.2.2 項で述べたようなエネルギー最適化を実現するためには，電力会社や CEMS と HEMS, BEMS, FEMS 間において需要量，供給量などに関する情報を送受信する必要があり，この情報を基に需給調整に関する制御を実施することが考えられる。また，2.2.3 項に

て示したデマンドレスポンスやリアルタイム料金の実現においては、需要家間の公平性も重要な課題である。エネルギー管理やデマンドレスポンスのために通信ネットワークを構築することも考えられるが、社会的コストを最小化するためにも、各需要家に設置されるスマートメータの通信機能を利用することが想定される。従って、このようなシステムに対しては、通信ネットワークの信頼性、即時性に関して、2.1節にて述べたスマートメータに要求される条件よりも厳しくなる。将来的にこのようなシステムに対してもマルチホップ無線が用いられることを想定すると、より高速な無線方式の適用が必要となると考えられる。

## 2.4 むすび

本章では、現在本格導入が検討されているスマートメータの概略を述べるとともに、スマートメータにより実現される機能についてまとめた。また、将来の電力系統の想定される構成を示すとともに、PV出力変動に伴う配電系統管理の課題、エネルギーの最適利用を実現するための各家庭から地域単位におけるエネルギー管理システムや、既存の電力系統との協調、またこれらを実現するにあたり求められる通信ネットワークの高速化についてまとめた。

## 第3章 需要家向け通信ネットワーク

本章では、一般的なマルチホップ無線通信システムの通信方式、及びルーティング方式に関する技術について取りまとめ、最後に本論文にて取り扱う方式について述べる。

### 3.1 通信方式

スマートメータ用通信ネットワークなど、需要家向け通信においては、膨大な数の需要家を収容するための通信ネットワークが必要となる。通信ネットワークの構築には無線方式や有線方式、その中でも多数の選択肢がある。本節では、需要家向け通信ネットワークにおける LAN を構築する場合に想定される主な通信方式の概要および得失をまとめ、このような通信ネットワークの構築にマルチホップ無線方式が適していることを述べる[19]。

#### 3.1.1 有線通信方式

電力会社側に設置する管理サーバ等と各端末（スマートメータ）とが有線伝送路により接続されるため、外部からの雑音・干渉の影響が少なく、また信号の盗聴に対するリスクも低い。一方、事故等による伝送路断の場合、復旧に時間がかかるといったリスクがある。

ここでは、有線ネットワークを利用した場合の例として、光ファイバ通信、PLC について述べる。

##### (1) 光ファイバ通信

各家庭への大容量インターネット回線として FTTH（Fiber To The Home）サービスが進展している。平成 25 年の FTTH 契約数世帯比は 43.5 % [20] であり、図 3-1 に示すように契約数は増加を続けている。伝送路が光ファイバであるため、非常に安定した高速通信が可能である。FTTH においては、PON（Passive Optical Network）方式が用いられ、OLT（Optical Line Terminal）からの光ファイバをスターカプラにより 32 分岐し、各末端に ONU（Optical Network Unit）を接続する。分岐数は 64 や 128 の製品もあるが、分岐数に応じて光伝送距

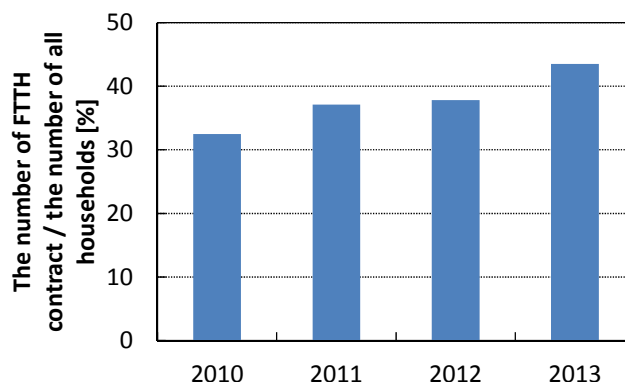


図 3-1 FTTH 契約数世帯比

離が短くなる。OLT 当りの ONU 数が一定であるため、端末の増減に対する通信ネットワークの柔軟性が低い。また、光ファイバを各端末まで敷設する工事が必要となるため、通信ネットワークの構築コストが高くなる難点がある。

## (2) PLC (Power Line Communication)

PLC は電力線に通信用の信号を送る技術である。伝送路が電力線であるため、FTTH のように伝送路を構築する工事が不要であるという利点がある。PLC は低速（数 kbps～100 kbps 程度）だが屋外でも利用可能な kHz 帯 PLC と、高速（～200 Mbps 程度）だが現状では屋外利用が電波法により制限されている MHz 帯 PLC がある。欧州では配電系統の構成上の利点よりスマートメータ用通信ネットワークに kHz 帯 PLC が利用される事例が多いが、日本では柱上変圧器当りの需要家数が 10～20 軒程度と少なく、また、PLC の信号が柱上変圧器により減衰するため、これを補償するための中継装置が必要となるなど、端末の収容効率が必ずしも高くない可能性がある。

### 3.1.2 1 対 N 方式

通信事業者のモバイル通信サービスを利用する場合、端末からのデータが基地局を介し、通信事業者の通信ネットワークを経由して電力会社間で伝送される。この時、1 台の基地局と複数台の端末が直接接続されるため 1 対 N のトポロジとなる。1 対 N 方式を需要家向け通信ネットワークに適用した場合のイメージを図 3-2 に示す。通信事業者サービスを利用せず自営通信ネットワークでも 1 対 N のトポロジを構築可能であるが、ここでは、1 対 N 方式とは通信事業者サービスを用いる場合とする。以下では、IEEE 802.16, LTE について述べる。

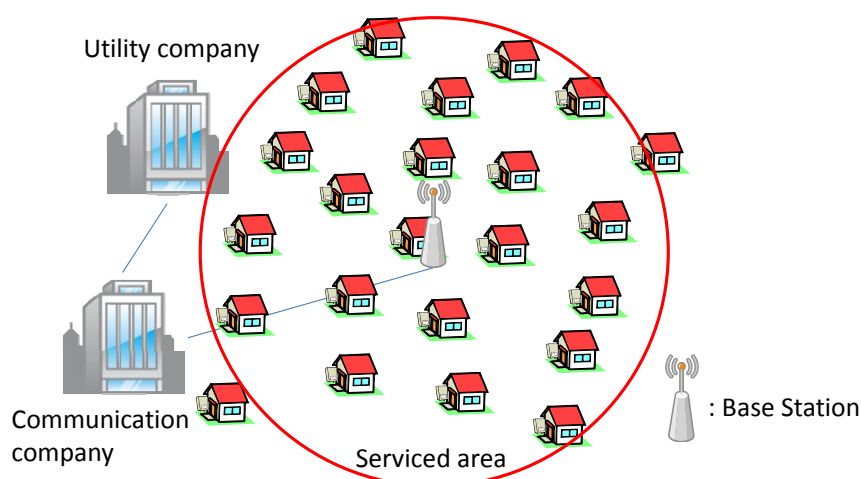


図 3-2 1対N方式システムのイメージ

## (1) IEEE 802.16

IEEE 802.16 は MAN (Metropolitan Area Network) として標準化された技術であり, WiMAX の物理層・MAC 層に利用されている[21][22]。WiMAX は 2.5 GHz 帯を利用し, 最大伝送速度は上り/下りが 15.4/40 Mbps (WiMAX2+では 10/110 Mbps) と高速なサービスである。人口カバー率は 90 %を超えているが, スマートメータのように端末が固定的に設置される場合, 遮蔽やマルチパスフェージングによる影響により接続が困難となる可能性があるため, 特に郊外部等への適用においては接続の可否に関して注意が必要となる。WiMAX において最大 2 ホップまでの中継機能を提供するための IEEE 802.16j[23]が規格化されており, これを適用することで接続率の向上を図ることも考えられる。

## (2) LTE (Long Term Evolution)

LTE は, 携帯電話システムに関する標準化団体である 3GPP (3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project) [24]および 3GPP2[25]により規格化されている。800 MHz~2 GHz 帯を用い, 最大伝送速度は上り/下りが 50/150 Mbps と高速なサービスである。人口カバー率が 90 %を超えているサービスもあるが, WiMAX と同様に接続可否に関する注意が必要である。

## 3.1.3 マルチホップ無線通信方式

集約局からの電波が直接届かない端末でも, 各端末が中継機能を有することで, 集約局に接続可能となる。これにより, 無線局免許が不要である特定小電力無線など, 無線出力が小さい無線装置でも集約局として利用できるようになる。また, 中継経路に不具合が生じた場合には自動的に迂回路を構築することが可能なため, 例えば, コンセントレータの

障害時において、自動的に他のコンセントレータに接続先を変更することが可能である。マルチホップ無線通信を適用した場合の需要家向け通信ネットワークのイメージを図 3-3 に示す。ここでは、マルチホップ技術を適用可能な無線通信方式として、IEEE 802.11, IEEE 802.15.4, その他の方式について述べる。

(1) IEEE 802.11

IEEE 802.11[26]は無線 LAN として家庭内やオフィスにおける通信ネットワーク構築に広く利用されている。屋外では 2.4 GHz 帯と 5.6 GHz 帯が利用可能であり、QoS 制御 (IEEE 802.11e), セキュリティ (IEEE 802.11i), 高速化 (IEEE 802.11n), メッシュ対応 (IEEE 802.11s) など様々な規格が追加されている。近年では、超高速化 (IEEE 802.11ac/ad), 管理フレームの優先制御 (IEEE 802.11ae), TV 帯のホワイトスペース利用 (IEEE 802.11af), 1 GHz 未満の利用 (IEEE 802.11ah), 高効率利用 (IEEE 802.11 HEW (High Efficiency Wireless LAN) Study Group) などの標準化活動が進められている。

無線 LAN は最大 300 Mbps (IEEE 802.11n の場合) など高速な通信が可能であり、また、IEEE 802.11s の他にも中継機能に関する様々な研究・開発がなされている[27][28]。一方、無線 LAN は家庭やオフィスに加えて、ホットスポットサービスとしても利用されており、これらが同一の周波数帯を共有するため干渉の影響が懸念される。

(2) IEEE 802.15.4

IEEE 802.15.4[29]はセンサやリモコンなどの小容量データの短距離通信を目的とした

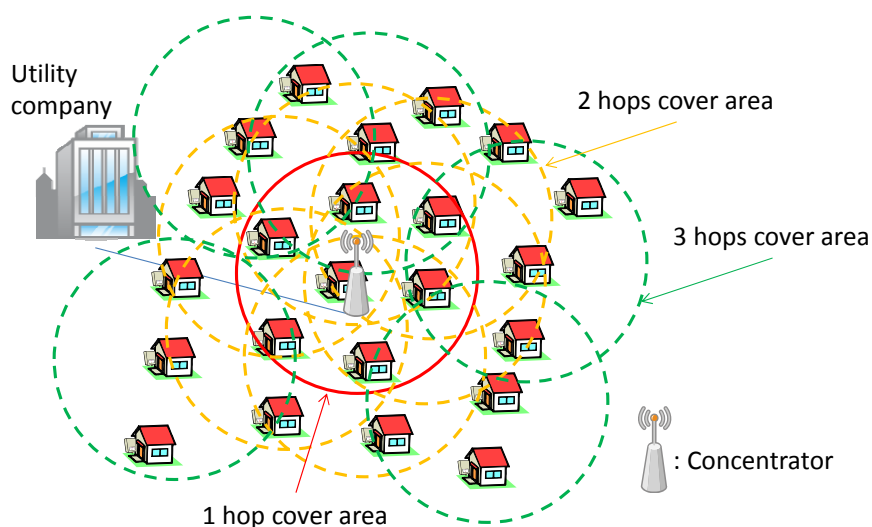


図 3-3 マルチホップ無線通信方式のイメージ

PAN (Personal Area Network) として標準化された技術であり、無線センサネットワークでは ZigBee[30]の物理層・MAC 層に利用されている。また、IEEE 802.15.4g は SUN (Smart Utility Network) のための規格であり、スマートメータへの適用が想定されている[31][32]。

ZigBee は 2.4 GHz 帯を利用し、250 kbps の伝送速度を実現するものである。一方、SUN は 920 MHz 帯を利用し、基本機能としては最大 100 kbps の伝送速度を実現するものである。920 MHz 帯は 2.4 GHz 帯に比べると電波の回り込みが期待できるため、遮蔽や回折の多い住宅環境においては接続率の向上が見込める。さらに、2.4 GHz 帯では無線出力は最大 10 mW であるが、電波法の改正により 920 MHz 帯では 20 mW まで出力可能となったため、スマートメータ用無線通信ネットワークへの 920 MHz 帯 IEEE 802.15.4g の適用は有効であると考えられる。一方、伝送速度が 100 kbps と無線 LAN に比べると低速であるため、データの送信頻度、集約局あたりの端末数などに制限が生じる可能性がある。

### (3) その他

PHS (Personal Handy-phone System) の子局間通信を利用するシステムの開発がなされている[33]。また、400 MHz 帯の特定小電力無線を利用するものなども考えられる[34]。これらは 2.4 GHz 帯と比べると電波干渉が少なく、また周波数が低いため電波伝搬の観点では有利となる可能性があるが、伝送速度がそれぞれ 32 kbps、4.8 kbps と低速であるため、集約する端末数等に対する制限が生じる可能性がある。

## 3.1.4 通信方式の得失

需要家向け通信ネットワークの構築において想定される各種通信方式について、通信速度、端末増減に対する通信ネットワークの柔軟性、サービスエリアの拡張性、電波干渉の有無、通信ネットワークの耐障害性の観点より得失を比較した結果を表 3-1 に示す。需要家向け通信ネットワークに対する各方式の得失は、住宅地、郊外地、農村地などの環境や、戸建て住宅、集合住宅などの適用箇所によって変わるため、一意に特定の方式に対する優位性を述べることは困難であるが、ここでは、スマートメータが密集して設置される住宅地を対象として評価する。

伝送速度は方式により大きく異なるが、通信の安定性については無線通信方式の場合はマルチパスフェージング等の影響や、カバーエリア端において低受信電力の端末があることを想定すると有線通信方式と比べると不安定といえる。一方、伝送路が一意に固定されないため、柔軟性や拡張性の観点からは無線通信方式は有意である。無線通信方式の中で

表 3-1 需要家向け通信ネットワークの構築に対する通信方式の得失

	伝送速度	安定性	柔軟性	拡張性	電波干渉	耐障害性
光ファイバ	○	○	×	×	○	×
kHz 帯 PLC	△	○	○	△	○	×
WiMAX, LTE	○	△	○	△	△	×
無線 LAN	○	△	○	○	×	○
ZigBee	△	△	○	○	×	○
SUN	△	△	○	○	△	○
429 MHz 特小	△	△	○	○	△	○

も、2.4 GHz 帯を用いるものは他の通信機器からの電波干渉の影響が大きく、また、それ以外の周波数帯の方式でも専用に周波数を割り当てられているものではないため、少なからず干渉の影響は生じる。事故時においては有線通信方式では復旧まで時間がかかるが、マルチホップ無線通信方式の場合には自動的に迂回路を形成することが可能であるため事故に対する耐性は高くなる。本論文では、将来の需要家向け通信ネットワークにおいて必要となると考えられる高速性と、多数の端末を効率よく収容するために必要な通信ネットワークの柔軟性・拡張性を同時に達成可能である無線 LAN によるマルチホップ無線通信ネットワークを評価の対象とする。

## 3.2 ルーティング方式

マルチホップ通信ネットワークにおいては、エンドツーエンドの中継経路をルーティング方式により決定する。ルーティング方式は主に IETF (Internet Engineering Task Force) において標準化されており、標準化された方式は公開されている[35]。ルーティング方式は、データ送信の直前に中継経路を決定するリアクティブ型、通信に先立ってあらかじめ中継経路を決定しておくプロアクティブ型、およびこれらを使い分けるハイブリッド型がある。本節では、代表的なルーティング方式の概要をまとめるとともに、本論文において検討に用いる方式について述べる。

### 3.2.1 AODV

AODV (Ad hoc On-Demand Vector routing) [36]では、中継経路の構築に RREQ (Route Request), RREP (Route Reply), RERR (Route ERRor) のメッセージが用いられる。これらのメッセージは UDP/IP により伝送される。新たな宛先への経路が必要となった時、送信ノ

ードは宛先ノードを発見するために RREQ をブロードキャストする。RREQ を受信した宛先ノードがユニキャストにより送信ノード宛に RREP を送信し、各ノードが RREQ に対する経路のキャッシュに応じて中継することで、中継経路が決定される。各ノードはルート上の次ホップとのリンク状態をモニタし、リンク断が検出されたら RERR を用いて周囲のノードにこれを通知する。また、宛先に対するシーケンス番号が各ノードのルートテーブルにおいて管理され、ループ経路の回避や使用不能ルートの無効化に用いられている。

AODV は、数 10 程度の少数ノードで構築され、ノードが移動するなどリンクの状態が頻繁に変わりうる場合に適している。

### 3.2.2 OLSR

OLSR (Optimized Link State Routing protocol) [37]では、MPR (MultiPoint Relay) ノードのみが制御用メッセージをフラッディング (ブロードキャスト) することで、制御用メッセージが大量に流れてオーバーヘッドとなってしまう通常のフラッディングと比べて、制御用メッセージの伝送に伴うオーバーヘッドを低減している。

各ノードは、MPR ノードとして選択した MPR ノード集合を管理する。MPR ノード集合は、あるノード (例えばノード N) から見て全ての 2 ホップ先のノードがブロードキャストメッセージを受信できるように選択される。2 ホップ先のノードに関する情報は、各ノードが周期的に送信する Hello メッセージにより得られる。Hello メッセージは再送されない。ノード N から宛先ノードまでの経路を算出するために、トポロジ制御 (TC: Topology Control) メッセージがフラッディングされる。この情報を用い、各ノードにおいてトポロジ制御テーブルおよびルーティングテーブルが構築される。

OLSR は数 100 程度の多数ノードが密に設置されるようなネットワークに適している。

### 3.2.3 RPL

RPL (IPv6 Routing Protocol for Low-power and lossy networks) [38]は省電力で、損失の多いネットワークにおいても有効に動作するためのルーティングプロトコルとして標準化されており、スマートメータ用マルチホップネットワークへの適用も検討されている。

RPL は、DAG (Directed Acyclic Graph : 非循環有向グラフ) により 1 対多のツリートポロジネットワークを構築する[39]。従って、各端末から集約局に向けたトラヒックとなるスマートメータには適したルーティング方式となる。RPL では、RPLInstanceID, DODAGID,

DODAGVersionNumber, Rank を用いてトポロジを維持する。RPLInstanceID は DODAG (Destination Oriented DAG : ルートが一つの場合の DAG) の集合を識別する ID, DODAGID は RPLInstanceID 中の DODAG を識別する ID, DODAGVersionNumber は DODAGID で識別される DODAG のバージョン, Rank は DODAG ルートに対する各ノードの位置を決定する。

Rank の値は DODAG ルートから遠いほど大きくなり, パス/ノードメトリックにより算出される。メトリックは文献[40]に規定され, また文献[41]においては信号強度低下率および再送率を用いたメトリックが示されている。算出された Rank を用い, Rank が最小となるパスが選択される。

### 3.3 検討対象方式

マルチホップ無線通信ネットワークは, 適用する通信方式, およびルーティング方式により特性が決まる。3.1.4 項にて述べたように, 将来の需要家向け通信ネットワークにおいて要求されると考えられる高速性の観点より, 通信方式は無線 LAN を評価の対象とする。ルーティングプロトコルについては, 伝送遅延やスループットといったエンドツーエンドのパスメトリックを用いるルーティング方式 (L3 (Layer 3) ルーティング) の場合には端末数の多い需要家向け通信ネットワークにおいてはメトリック値の測定および管理が煩雑になることを勘案し, ここでは, リンクメトリックとして端末間の受信電力および集約局からのホップ数を用いたルーティング方式 (L2 ルーティング) を評価の対象とする。これにより構築されるネットワークトポロジは, DODAG ルートからのホップ数をメトリックとした RPL と同等となる。

### 3.4 むすび

本章では, 需要家向け通信ネットワークを構成するための要素技術として, 通信方式, およびルーティング方式についてまとめた。まず, 需要家向け通信ネットワークの構成を示すとともに, 適用が想定される各通信方式の概略をまとめ, 需要家向け通信ネットワークを構築するにあたっての各通信方式の得失を示した。次に, ルーティング方式として, リアクティブ型とプロアクティブ型のそれぞれについて標準化された主な方式の概要を示すとともに, 需要家向け通信ネットワークへの適用が想定されるルーティング方式として RPL の概略をまとめた。最後に, 本論文では, 通信方式としてマルチホップ無線 LAN, ル

---

ーティング方式としてL2ルーティングを検討の対象とすることを述べた。

## 第4章 高速マルチホップ無線の伝送特性評価

本章では、将来の需要家向け通信ネットワークに対するマルチホップ無線 LAN の適用性を評価するために、基礎的な伝送特性を実験評価した結果をまとめる。また、需要家向け無線通信において電波伝搬に影響を与える主要な構造物である木造家屋による影響に関する評価結果をまとめる。さらに、無線 LAN における高速化のための機能が通信特性に与える影響について実験結果を基に考察し、伝送特性を向上するための方策について検討した結果をまとめる。

### 4.1 マルチホップ無線 LAN の基礎伝送特性

本節では、マルチホップ無線 LAN の基礎的な伝送特性として、ホップ数に対する TCP スループットおよび ping コマンドによる RTT (Round Trip Time) を測定した結果についてまとめるとともに、中継装置がマルチホップ無線通信ネットワーク全体に与える影響について述べる。

#### 4.1.1 IEEE 802.11g による装置構成

無線 LAN によるマルチホップ無線通信ネットワークの基礎的な伝送特性を実験評価するために用いた装置の諸元を表 4-1 に示す[42]。本装置はノート PC に無線 LAN カード (IEEE 802.11g) を装着した構成で、無線 LAN ドライバは Linux 無線 LAN SDK により開発したものをを用いた。ドライバの設定により、アクセスポイント (AP: Access Point) もしくはリピータ (RP: RePeater) として動作する。AP として動作する場合には、ノート PC の RJ-45 モジュラージャックと無線 LAN カード間をブリッジ接続することで、有線ネットワークとの接続が可能となる。一般的な AP と同様に動作し、RP 等の端末からの接続要求を待ち、自身の存在を周知するためのビーコンを一定間隔で送出する。RP として動作する場合には、起動後にまず端末 (STA: Station) として動作し AP を検索する。AP に接続した後、接続を保持

表 4-1 マルチホップ無線 LAN 実験装置 (IEEE 802.11g 版) の諸元

Apparatus	Notebook PC
CPU	Celeron900 (2.2 GHz)
OS	OpenSuse Linux (11.1)
Wireless LAN Card	Aterm WL54AG (NEC Corp.)
Standard	IEEE 802.11g
Encryption	WPA2-AES
Antenna	PA-WL/ANT3 (NEC Corp.) Gain 2.2 dBi
Wireless LAN Driver	Linux Wireless LAN SDK (EmPacket Corp., NTT-AT Corp.)

したまま AP としての動作を開始し、他の RP (もしくは STA) からの接続要求を待つ。本装置では、AP をルートとしたツリートポロジが構成される。本装置において、各 RP は同一のチャネルを用いる。また、接続に不具合が生じてリンク断を検出した場合には、速やかに新たな接続先を検索する。本装置では、マルチホップ無線ネットワークの基礎的な特性を検証するために、RPL など標準に準拠したルーティング方式は実装していない。

#### 4.1.2 基礎的な伝送特性の実験評価

まず、本実験装置の対向 (1 ホップ) の基礎伝送特性として、距離に対する受信電力およびスループットを測定した結果を図 4-1 に示す。測定場所は一般財団法人電力中央研究所狛江事業所の屋外通路であり、周囲には 2~6 階建ての建物はあるが、送受信間は見通し環境である。一方を AP、他方を RP とし、これらの間隔に対する受信電力および TCP スループットを測定した。ここで受信電力は無線 LAN ドライバからの出力値、TCP スループットの測定はフリーソフトである Iperf[47]を用いた。図 4-1 には参考のために大地反射のみを

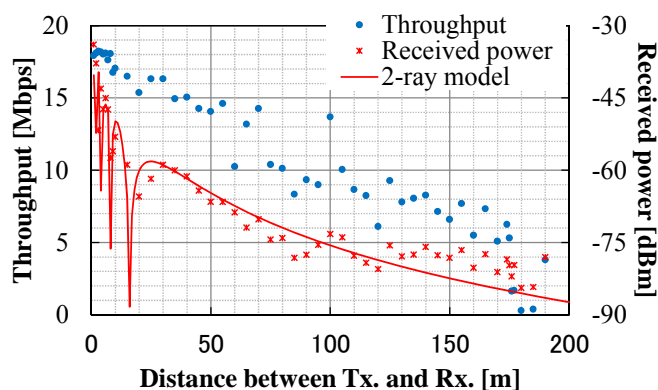


図 4-1 マルチホップ無線 LAN (IEEE 802.11g) 距離特性

考慮する2波モデル[43]による受信電力の計算値を示している。距離が離れるに従い受信電力、およびTCPスループットは低下し、見通し環境であるため受信電力は2波モデルによる計算結果と概ね一致している。

(1) 中継区間が短距離の場合の伝送特性

中継動作による伝送特性への影響を把握するため、12台の機器を用い、1台をAP (AP1)、11台をRP (RP2~12) として動作させ、図4-2に示す屋内環境において各機器を2m間隔で設置した場合の伝送特性を測定した。隣り合うRPが接続されるように設定し、ホップ数に対するTCPスループットおよびRTTを測定した結果を図4-3に示す。横軸はホップ数(中継段数)であり、ホップ数1はRP12(送信)→RP11(受信)、ホップ数2はRP12(送信)



図4-2 中継区間が短距離の場合(屋内)の測定環境

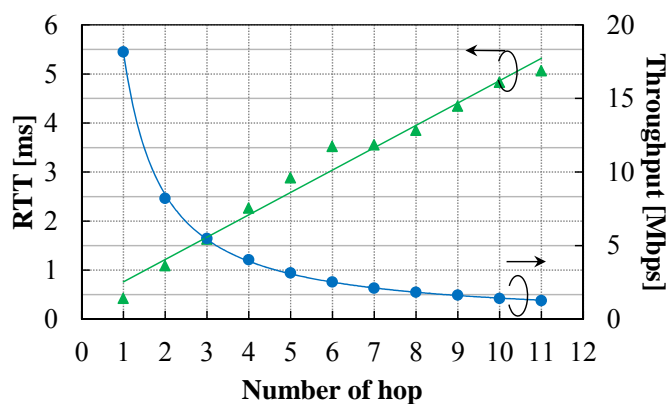


図4-3 中継区間が短距離の場合の伝送特性

→RP11 (中継) →RP10 (受信) を示す。図 4-3 の実線は TCP スループット, および RTT の特性を最小二乗近似した結果であり, それぞれ以下の式により表される。

$$Thr = 18.215Nh^{-1.104} \dots\dots\dots (1)$$

$$RTT = 0.456Nh + 0.3056 \dots\dots\dots (2)$$

ここで,  $Thr$  は TCP スループット [MHz],  $Nh$  はホップ数,  $RTT$  はラウンドトリップタイム [ms] である。ホップ数に応じて, TCP スループットは単調に低下し, RTT は単調に増加する。これは, すべての機器が同一チャネルを共有するため, 中継のためにある RP が電波を発している間, 送信側において CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) によりキャリアが検出され, 次のデータを送信できずに待ち状態となるためである。チャネルを共有するマルチホップ無線ネットワークにおいては, エンドツーエンドの距離に関わらず, ホップ数が多いとエンドツーエンドの伝送特性が低下することに注意が必要である。例えば, 図 4-3 においてホップ数が 11 (RP12 (送信) →AP1 (受信)) の場合, 送受信間の直接距離は 22 m であるにもかかわらず, TCP スループットは 1.26 Mbps しか得られていない。

#### (2) 中継区間が長距離の場合の伝送特性

中継区間が長距離の場合の特性を把握するために, 一般財団法人電力中央研究所赤城試験センターにおける試験用配電線沿いに機器を配置した。測定環境を図 4-4 に, 機器の設置位置を図 4-5 に示す。各中継区間は 50 m (RP6, RP7 間は 12.5 m) であり, 隣り合う RP がそれぞれ接続される設定とした場合の, ホップ数に対する伝送特性を取得した結果を図 4-6 に示す。図 4-6 における実線は TCP スループット, および RTT の特性を最小二乗近似



図 4-4 中継区間が長距離 (屋外) の場合の測定環境

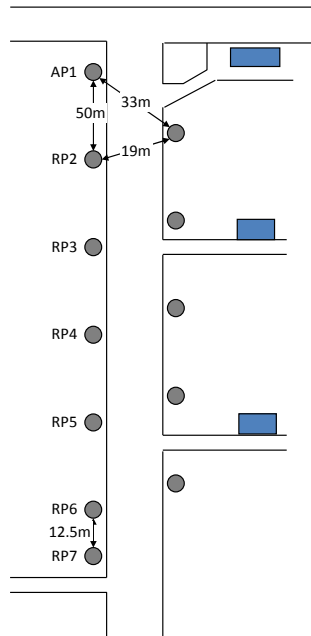


図 4-5 中継区間が長距離の場合の機器設置位置

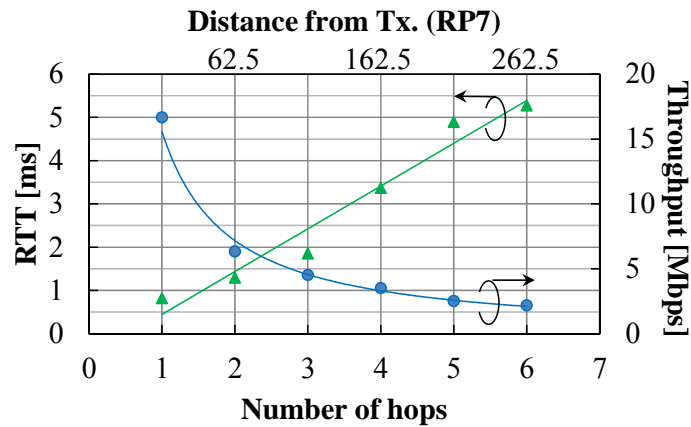


図 4-6 中継区間が長距離（50 m）の場合の伝送特性

した結果であり、それぞれ以下の式により表される。

$$Thr = 15.545Nh^{-1.117} \dots\dots\dots (3)$$

$$RTT = 0.9878Nh - 0.5411 \dots\dots\dots (4)$$

図 4-6 も図 4-3 と同様に、ホップ数に対して TCP スループットは単調に減少、RTT は単調に増加する特性が得られている。ホップ数が 6 (RP7 (送信) → AP1 (受信)) の時、送受信間の直接距離は 262.5 m であり図 4-1 より直接通信は望めない距離であるが、2.17 Mbps の TCP スループットが得られており、マルチホップ通信によるエリア拡張に対する有効性が

示されている。

次に、RP2, RP4, RP6 を停止し、中継距離を 100 m とした場合の特性を図 4-7 に示す。隣り合う区間が長くなり、区間当りの通信品質が低下しているため、送信が RP7, 受信が AP1 の場合のスループットは 1.02 Mbps と中継区間が 50 m の場合の約半分となっている。一方、ホップ数が少なくなったため、同区間の RTT は 5.27 ms から 3.03 ms に短くなっていることがわかる。これより、このような環境下においては、大容量通信を要するアプリケーションに対しては 50 m 程度の中継区間によりホップ数を増やした方が、一方、小容量データで応答性を要するアプリケーションに対しては 100 m 程度の中継区間でホップ数を減らした方が望ましいことがわかる。

### (3) 面的に配置された場合の伝送特性

各機器を面的に配置した場合の特性を把握するために、一般財団法人電力中央研究所赤城試験センターの受電変電所構内に各機器を配置し、伝送特性の測定を行った。測定環境を図 4-8 に、機器の設置位置を図 4-9 に示す。断路器の架台付近に AP1 を設置し、機械室陰に RP10 を設置することで、非見通し環境の特性を取得した。AP1 と、いずれかの RP 一台のみを起動させ、AP-RP 間の直接通信時における TCP スループットおよび RTT を測定した結果を図 4-10 の白抜きマーカーにより示す。RP の設置場所に応じて TCP スループット、および RTT は変動しているが、AP1 に対して非見通しである RP10 以外の特性は概ね同一であった。RP10 から AP1 に対する TCP スループットは 1.2 Mbps、RTT は 8.5 ms であった。ここで、RP10 と AP1 の両方に対して見通し位置にある RP9 を起動し、RP10 に対して中継装置として動作させたところ、RP10 から AP1 に対する TCP スループットは 6.7 Mbps、

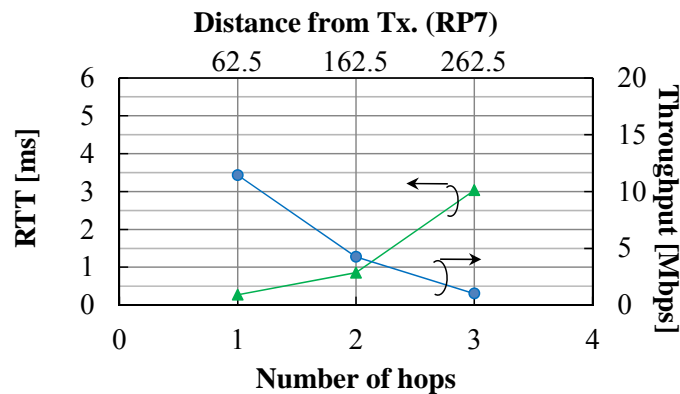


図 4-7 中継区間が長距離 (100 m) の場合の伝送特性



図 4-8 面的に設置した場合の測定環境

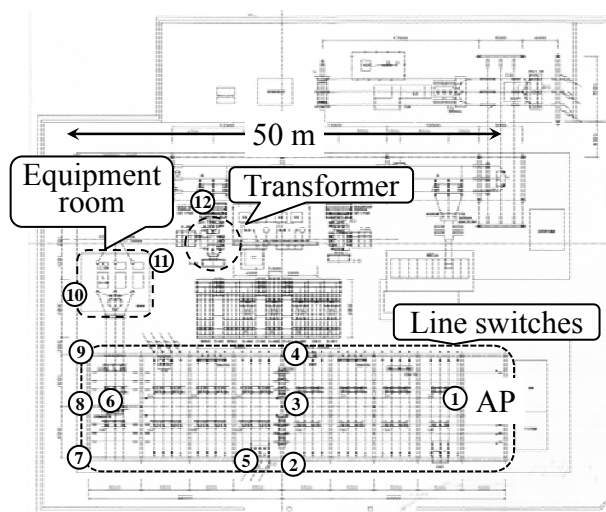
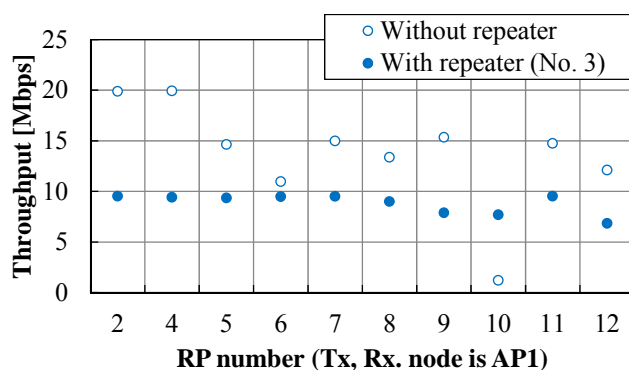


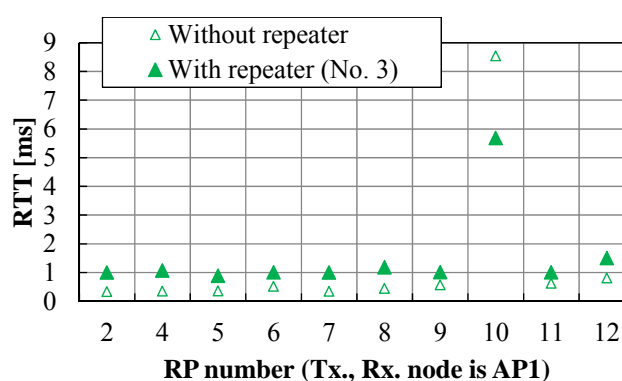
図 4-9 面的に設置した場合の機器位置

RTTは1.1 msと改善し、非見通し環境である不感地帯の解消にマルチ無線通信が有効であることが示された。

次に、全てのRPに対して、RP3が常に中継装置として動作するように設定した場合の伝送特性を測定した結果を図4-10の塗りつぶしマーカーにより示す。全てのRPがAP1に対して2ホップの通信を行うため、AP1に対して非見通し位置にあるRP10の特性は改善しているが、それ以外の全てのRPの伝送特性が低下していることがわかる。従って、中継装置の存在により全体としてホップ数が増加する場合、マルチホップ無線通信ネットワーク全体としての特性は低下することに注意が必要である。



(a) TCPスループット



(b) RTT

図 4-10 面的に設置した場合の通信特性

#### 4.1.3 IEEE 802.11n によるマルチホップ無線の基礎的な伝送特性

IEEE 802.11g よりも高速な無線 LAN である IEEE 802.11n を用いた場合のマルチホップ無線 LAN 装置を開発した[44]。IEEE 802.11n では、高速化のために MIMO (Multiple Input Multiple Output) 技術を適用するため、4.1.1 項で示した機器のように外付けアンテナを設置することは困難であるため、無線 LAN カード内臓のアンテナを用いるが、基本的には表 4-1 に示した機器構成と同じである。IEEE 802.11n の場合に用いた無線 LAN カードは NEC 製 Aterm WL300NC である。

屋内の見通し環境で、図 4-11 に示すように中継距離が 30 m となるように設置し、TCP スループットを測定した結果を図 4-12 に示す。この時、AP は無線 LAN SDK により構築したのではなく、市販の AP (NEC 製 Aterm WR8370N) を用い、これに接続した PC との間

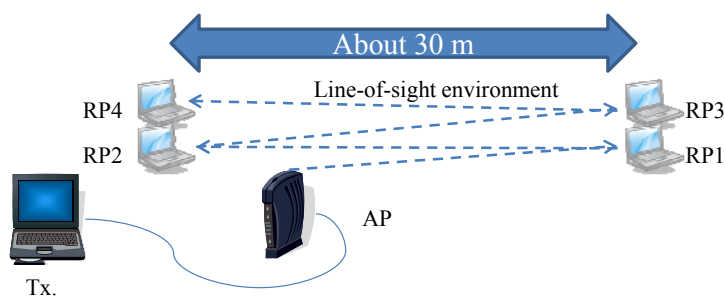


図 4-11 IEEE 802.11n による基礎特性の測定イメージ

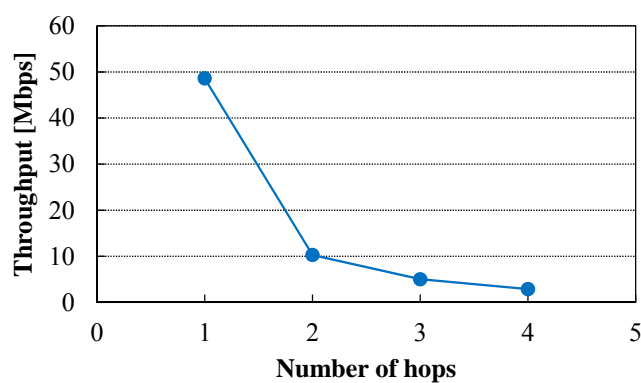


図 4-12 IEEE 802.11n による TCP スループット特性

で TCP スループットを測定している。1 ホップ目の TCP スループットが他と比べて良好なのは、AP が市販品であるため、無線 LAN カード内臓のアンテナよりも特性が良いためと考えられるが、基本的な特性としては IEEE 802.11g の場合と同様であり、中継動作によりエンドツーエンドの TCP スループットが低下していることがわかる。

## 4.2 家屋による影響評価

需要家向け無線通信ネットワークにおいては、需要家の壁近辺に設置される電力メータが無線通信を行うため、電波伝搬に影響を与える主な地物は一般家屋になる。本節では、家屋による遮蔽量の影響について実験検討を行った結果を示すとともに、家屋に用いられる壁材を用いた模擬遮蔽板による遮蔽効果に関する検討結果をまとめる。

#### 4.2.1 家屋による影響評価

家屋による影響量を見積もるために、一般財団法人電力中央研究所赤城試験センターの実験用家屋を対象として、電波伝搬特性の評価を行った[45]。評価した家屋の外観を図 4-13 に、諸元を表 4-2 に示す。本家屋の周辺には試験用配電線があり、図 4-14 に示す位置の配電柱上（高さ約 5 m）に市販の無線 LAN AP を 2 台（AP1, AP2）設置した。これらの AP は、需要家向けマルチホップ無線通信ネットワークにおける集約局を想定したものである。また、地上高 1 m の地点にも無線 LAN SDK により構築した AP を 2 か所に設置した。一方（AP\_SDK）は隣接家屋に設置された無線 LAN 装置との間の通信を想定したものであり、他方（AP\_SDK0）は当該家屋に設置された無線 LAN 装置による受信電力の特性を評価するためのものである。

図 4-13 における家屋周囲の各位置に、高さ 1 m の位置に RP（IEEE 802.11n 版）を置き、各 AP との間の受信電力を測定した結果を図 4-15 に示す。横軸は AP-RP 間の水平距離であり、○、▲、×はそれぞれ AP からみて RP 位置が見通し、1 回回折、遮蔽の状態であること示している。また、図 4-15 における実線は自由空間伝搬損失のみを考慮した場合の受



図 4-13 実験用家屋外観

表 4-2 実験用家屋諸元

The number of floors	1 (a one-storied house)
Hight	Max. 5.36 m
Area	8175 x 11775 mm
Main structure	A lightweight steel frame
Outer wall	Fly-ash cement panel (12 mm)
Thermal insulation	Glass wool (100 mm)

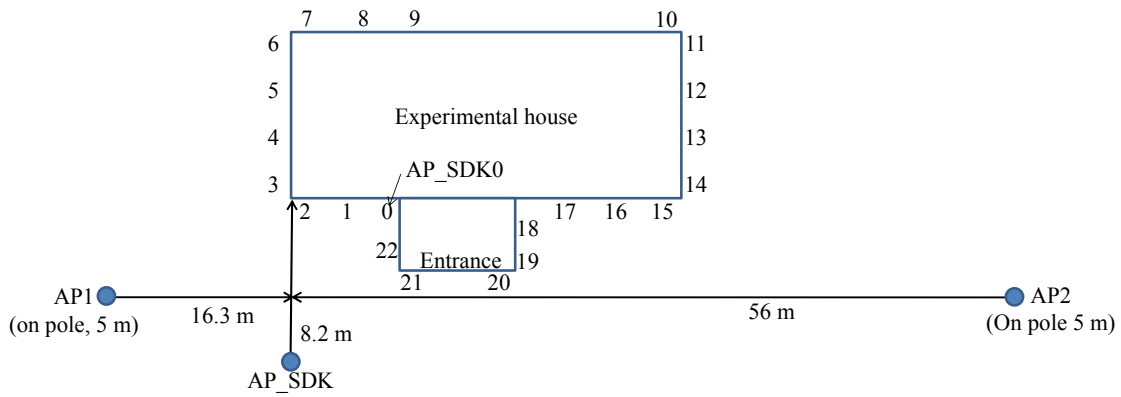
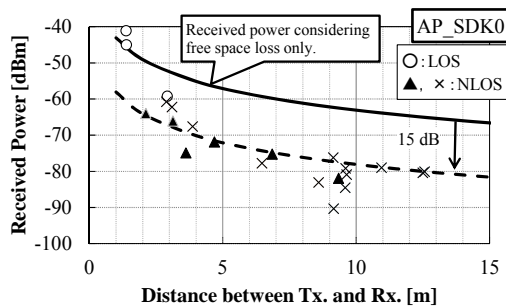
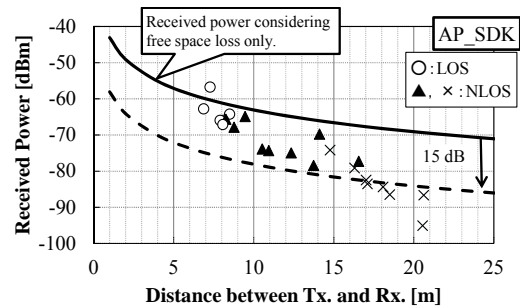


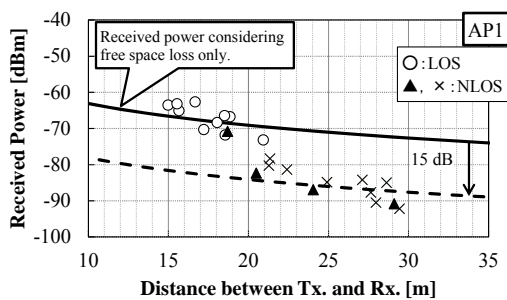
図 4-14 実験用家屋周辺における測定箇所



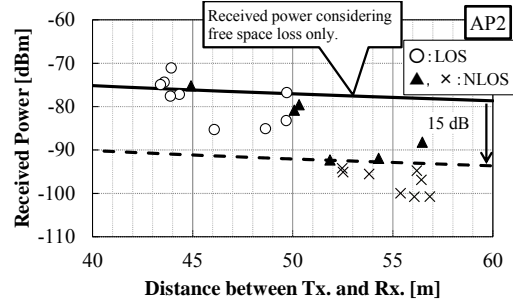
(a) AP\_SDK0



(b) AP\_SDK



(c) AP1



(d) AP2

図 4-15 実験用家屋周辺における受信電力特性

信電力の計算値である。図 4-16 は、1 回回折、遮蔽位置 (AP から非見通し箇所) の測定値に対して、自由空間伝搬損失に付加損失を加えた場合の、実測値と計算値との誤差分布を示している。付加損失として 15 dB の時が最も誤差が小さくなる。図 4-15 における点線は、自由空間伝搬損失に 15 dB を付加損失として加算した場合の受信電力である。

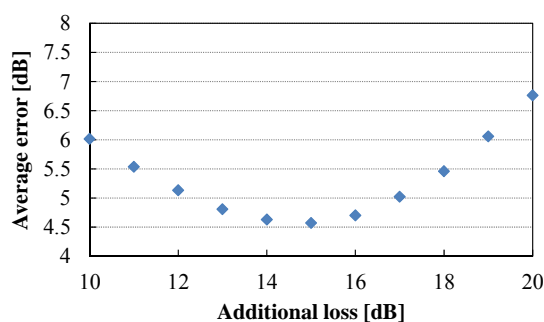


図 4-16 付加損失に対する誤差分布

図 4-15 からわかる通り、電波伝搬における遮蔽損失値は送受信機の場所、高さ、周囲環境により大きく変動するため、一意に遮蔽損失を決めることは不可能であり、遮蔽の特徴を把握するとともに平均的な遮蔽損失値を見積り、これを基に無線装置、および無線通信ネットワークを設計することが実用的である。本検討結果から、家屋による遮蔽損失は平均的に約 15 dB と言える。

#### 4.2.2 模擬遮蔽板による遮蔽効果

無線通信機器の基礎的な伝送特性を評価するためには、周囲の地物による反射等の影響が少ない電波伝搬環境である所謂オープンサイトにおける実測評価が重要である。一方、需要家向け通信ネットワークに用いる無線通信機器においては、家屋による遮蔽等を考慮した特性評価も重要と考えられるが、オープンサイトにおいてそのような遮蔽領域を確保することは困難である。ここでは、4.2.1 項にて評価した平均的な遮蔽量を模擬することを目的として、家屋の壁材として一般的に用いられることの多い部材を用いた模擬遮蔽板を作成し、その遮蔽特性を評価した結果をまとめる[46]。

作成した模擬遮蔽板は以下の 3 種類であり、大きさはすべて同一で  $900 \times 1800 \times 12$  mm である。

- ① ベニヤ板のみ
- ② ベニヤ板+ラス網
- ③ ベニヤ板+ガルバリウム鋼板

ラス網とはモルタル壁の下地に用いられる金網であり、今回使用したものは開口が約 2 cm のスチール製の金網である。また、ガルバリウム鋼板は厚さ 0.8 mm の鋼板であり、一

般に壁材や屋根材として用いられる。自立し、移動が容易なように木枠により固定している。図 4-17 に作成した模擬遮蔽板の外観を示す。

各遮蔽板の遮蔽特性を把握するために、図 4-18 に示す実験系において受信電力を測定した。AP および RP を 3 m の間隔で設置し、RP を同心円状において  $30^\circ$  ずつ位置を変えて、AP からの受信電力を測定した。遮蔽板のない状態、および AP の真横 ( $180^\circ$  方向) に遮蔽板をそれぞれ設置した場合の受信電力の特性を図 4-19 に示す。遮蔽板のない状態と比べると、それぞれの遮蔽板により受信電力が低下している様子が見て取れる。一方、反射側においては最大 3 dB 程度受信電力が上昇している。これは、遮蔽板による反射の影響である。また、例えば  $240^\circ$  方向のように、遮蔽板の種類に関わらず受信電力が低下しているのは、遮蔽板のエッジにおける回折波の干渉と考えられる。完全に AP と RP とが遮蔽される  $180^\circ$  方向において、遮蔽板のない場合の受信電力から、各遮蔽板を設置した場合の受信電力を引くことにより、各遮蔽板による付加損失を算出した結果は以下のとおりである。



図 4-17 模擬遮蔽板（ガルバリウム鋼板）の外観

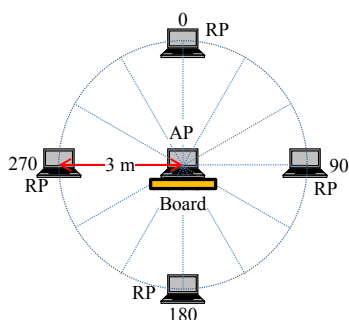


図 4-18 模擬遮蔽板の影響測定系

- ① ベニヤ板のみ：1.4 dB
- ② ベニヤ板+ラス網：6.4 dB
- ③ ベニヤ板+ガルバリウム鋼板：16.9 dB

これより、家屋による平均的な遮蔽損失を簡易に模擬するためには、ガルバリウム鋼板を用いた模擬遮蔽板を用いる必要があることがわかった。本特性は送受信間隔を3 mと固定した場合の一例であり、大地反射の影響や、設置に起因する誤差等が含まれる。遮蔽量をマクロ的に評価するため、ガルバリウム鋼板を用いた遮蔽板による電波伝搬距離特性に対する遮蔽影響について検討した。RPを遮蔽するようにAPの真横に遮蔽板を設置し、RP位置に対して受信電力を測定した結果を図4-20に示す。実線は受信電力の測定値、点線は自由空間伝搬損失を考慮した算出した受信電力である。遮蔽板のない状況においては大地反射の影響により送受信間が25 m以下の範囲では理論値との誤差が若干大きい

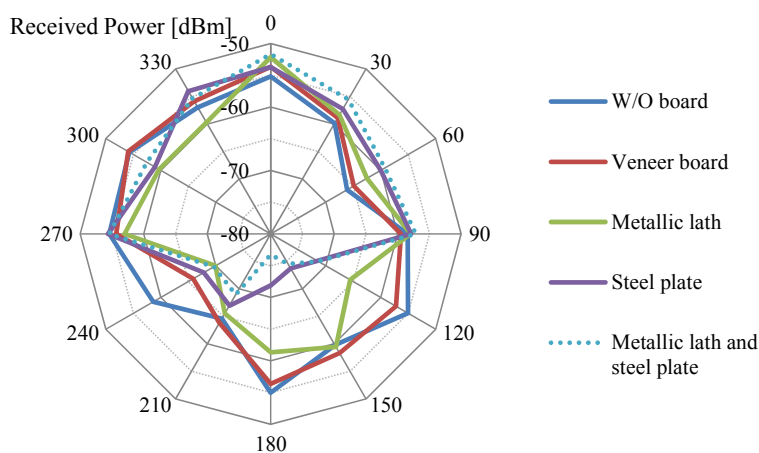


図 4-19 各遮蔽板を設置した場合の受信電力

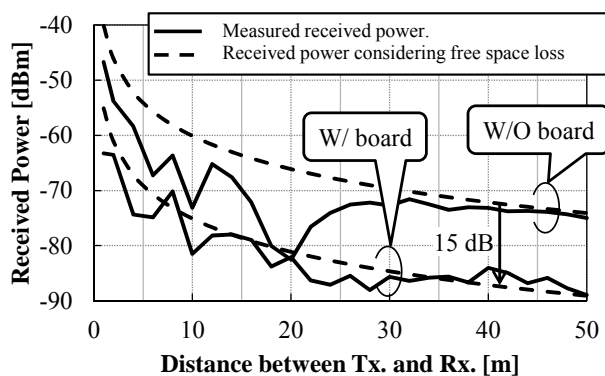


図 4-20 遮蔽時の受信電力距離特性

設置した場合の受信電力は、遮蔽板のない場合から約 15 dB 低下した計算値と非常によく一致している。従って、家屋による平均的な遮蔽量を模擬するために、ガルバリウム鋼板を用いた遮蔽板が有効であることが示された。

次に、AP と RP を 1 m 離隔で設置し、その中央にガルバリウム鋼板を用いた遮蔽板を置き、遮蔽板に対して水平方向に RP を移動した場合の遮蔽板による付加損失を算出した結果を図 4-21 に示す。送受信機が遮蔽板に近い付加損失が図 4-20 より大きくなっている。また、図 4-21 における実線は、RapLab[48]を用いたレイトレースシミュレーション[43]による付加損失の算出値であり、実測値とよく一致していることがわかる。一方、ラス網については、その電気的特性が不明であり、また、これを測定するためには電波暗室における大がかりな測定が必要となる。ここでは、ガルバリウム鋼板に対するレイトレースシミュレーション結果が良好に一致することを利用して、ラス網の電気的特性を推定することを考える。これにより、ラス網が設置される場合の壁に対するレイトレースシミュレーションが可能となると考えられる。AP と RP を 1 m 離隔で設置した場合のガルバリウム鋼板による付加損失量は約 21 dB、ラス網を用いた遮蔽板の場合は約 10 dB であり、これらの差は約 11 dB であった。この遮蔽量の違いを用いて、ガルバリウム鋼板の電気的特性からラス網の電気的特性を推定する。

ガルバリウム鋼板は導電率が高く、受信電力に対する透過波の寄与は非常に小さい。一方、ラス網では付加損失量が低減していることから、透過波が一定量寄与していると考えられる。図 4-22 はガルバリウム鋼板の導電率 ( $\sigma=1.03 \times 10^7$  S/m) を基準として、 $\sigma$  を徐々に下げた場合の受信電力特性を算出した結果である。これより、 $\sigma$  が木材と同等 ( $3 \times$

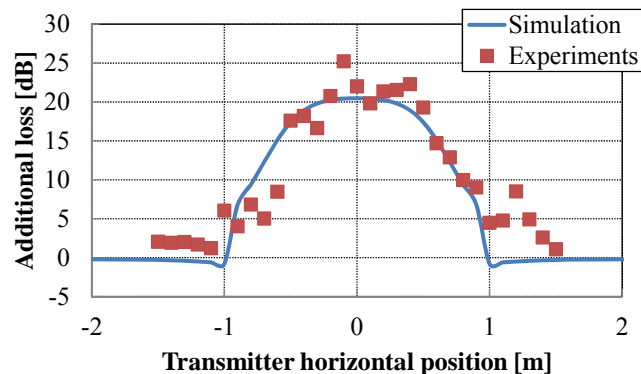
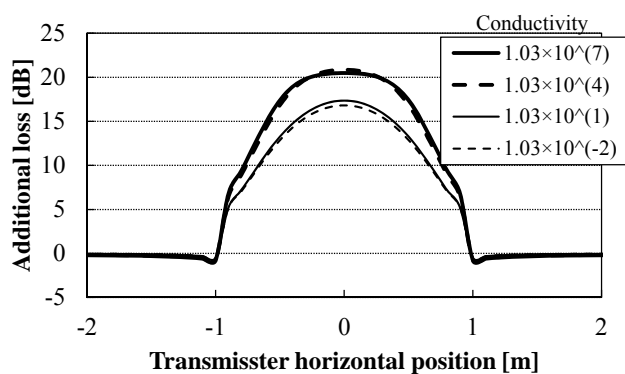
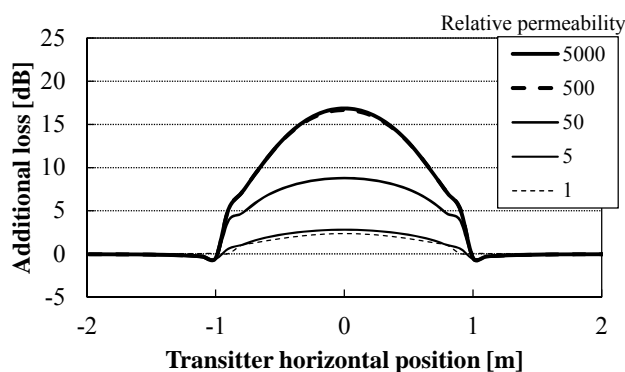


図 4-21 遮蔽板に対する水平位置付加損失特性



(a) 導電率を変化した場合



(b) 非透磁率を変化した場合

図 4-22 電気的特性を変えた場合の付加損失特性

$10^{-2}$  S/m) でも、11 dB の付加損失値低減は見込めないことがわかる。は、 $\sigma$  を木材と同等として、比透磁率 ( $\mu$ ) を変えた場合の付加損失算出結果であり、導電率に加えて透磁率を適切に設定することで、ラス網と同等の付加損失が算出されることがわかる。 $\sigma$  が  $3 \times 10^{-2}$  S/m の場合には  $\mu$  は 50 とすることが適当である。また、 $\mu$  が 1, 10 の場合には  $\sigma$  は 1, 0.1 が適しており、これらの結果から、ラス網の電気的特性は、ガルバリウム鋼板の場合を参考にして、 $\sigma \cdot \mu \sim 1$  を満足するように選択すればよいことがわかった。これにより、ラス網が用いられている壁に対して、レイトレースシミュレーションが可能となる。

### 4.3 電波干渉による影響評価

無線方式により需要家向け通信ネットワークを構築する場合、専用帯域でない限りにおいては電波干渉の影響がある。特に、2.4 GHz 帯は ISM (Industrial Science and Medical) バ

ンドであり、無線 LAN を始めとして様々なシステムに利用されているため、干渉源が多い。このような帯域においてマルチホップ無線通信ネットワークを構築する場合、検針データや制御信号の欠損、伝送遅延増加などが生じると考えられる。本節では、同一チャネル干渉による需要家向け通信ネットワークの伝送特性への影響について実験評価した。

#### 4.3.1 電波干渉に関する実験構成

5 台の RP を 5 m 間隔で設置し、AP から各 RP が縦列に接続された場合のマルチホップ無線通信ネットワークを構築した。ここで、AP はノート PC と無線 LAN カードによる構成のものを用いた。一方、需要家に設置されるマルチホップ無線通信機器はノート PC のような高性能機器ではなく、小型化・低コスト化のために、処理能力の低い組込み機器などで構築されることが考えられる。そこで、組込み型のマルチホップ無線 LAN 装置を開発し、RP として用いた。組込み型マルチホップ無線 LAN 装置の外観を図 4-23 に、諸元を表 4-3 に示す。本 RP は、上位システムからのデータ要求に対し、データを返信する形式の通信手順に従って動作する。

マルチホップ無線通信ネットワークのごく近傍に干渉源が存在する最悪ケースを想定し、



図 4-23 組込み型マルチホップ無線 LAN 装置の外観

表 4-3 組込み型マルチホップ無線 LAN 装置の諸元

Circuit board	T-Engine/VR5701 development kit (Personal Media Corp.)
OS	eT-Kernel (eSOL Co., Ltd.)
CPU	VR5701 (MIPS IV, Max. 333 MHz) (Renesas Electronics Corp.)
Memory	Flush: 16 MB, SDRAM: 128 MB
Wireless LAN	Aterm WL300NC (NEC Corp.)
Wireless LAN Driver	Linux Wireless LAN SDK for eT-Kernel (EmPacket Corp., NTT-AT Corp.)

RP2 の横 25 cm の位置に別の無線 LAN 通信系を一組設置し、Web ダウンロード等を模擬して常に 30~40 Mbps の TCP スループットとなる通信を、マルチホップ無線 LAN と同一チャネルにより行った。電波干渉下における応答時間の測定系のイメージを図 4-24 に示す。

#### 4.3.2 電波干渉下における通信特性

AP に有線接続された上位システムに相当する PC から、データ送信要求を各 RP に対して連続的に（各 RP からの応答を待たずに）送信し、RP1 に対するデータ送信要求から各 RP からのデータを上位システムが受信するまでの時間を計測した。応答時間評価系の概略を図 4-25 に示す。

電波干渉源の有無による応答時間の違いを図 4-26 に示す。電波干渉のない場合、各 RP に対する応答時間は、測定の範囲内においては直線状に増加し、RP5 からのデータを受信するまで 62 ms を要した。一方、電波干渉の影響により応答時間特性は劣化し、平均的に応答時間は約 1.7 倍に増加し、RP5 からのデータを受信までの時間は 98 ms に増加した。その反

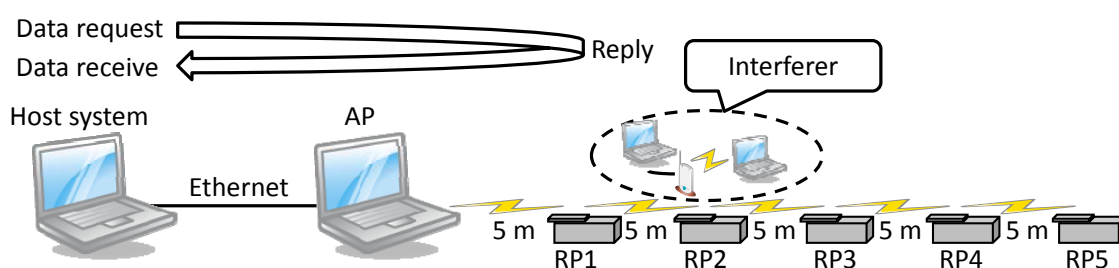


図 4-24 干渉影響の測定系

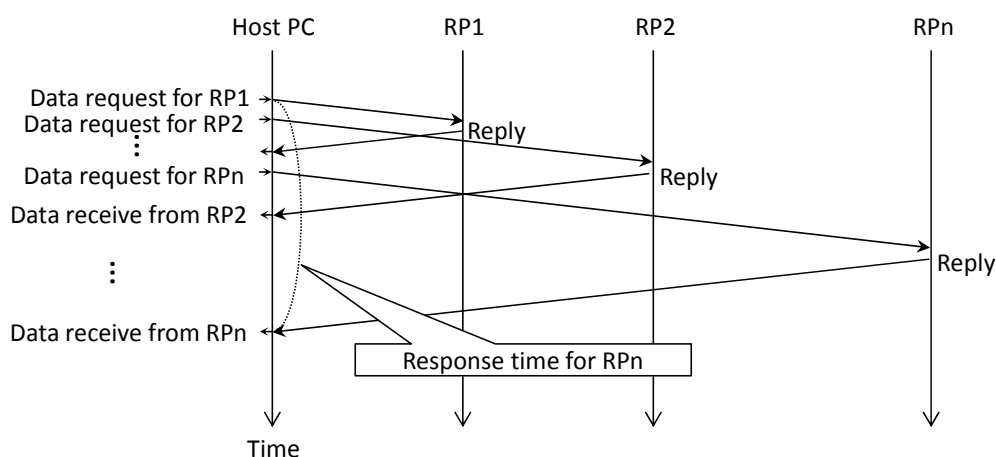


図 4-25 応答時間評価系

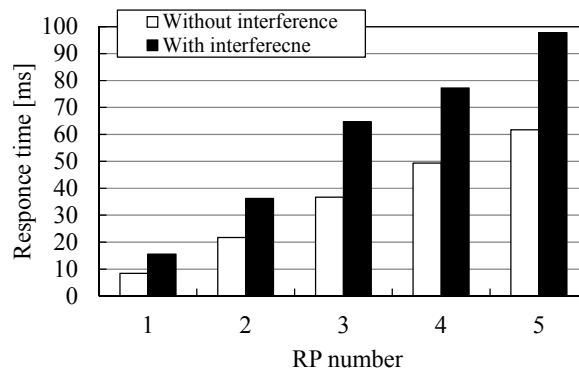


図 4-26 応答時間に対する同一チャネル干渉の影響

面、このような劣悪な電波干渉下においても CSMA/CA が有効に機能し、データの送受信は可能であることが示されている。需要家向け無線通信ネットワークの設計においては、電波干渉の発生個所を一意に決めることは不可能であるため、所要応答時間に対してマージンを見込んで設計することが現実的である。本検討結果を基準にすると、理想環境下における応答時間に対して 1.7 倍の応答時間がかかることとし、通信ネットワークを設計すればよいことになる。

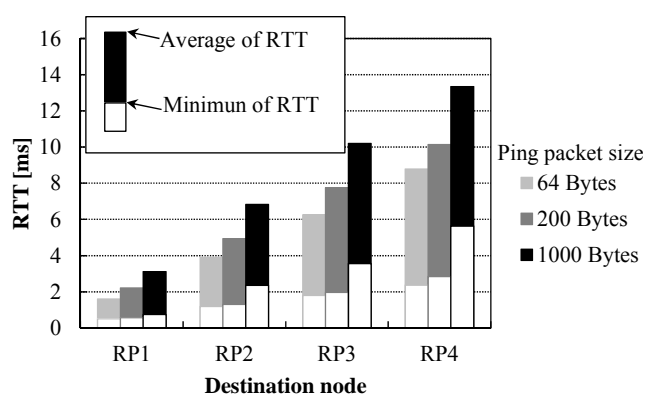
#### 4.4 無線 LAN のマルチレート制御による影響評価

本節では、IEEE 802.11 の機能であるマルチレート制御が伝送特性に与える影響について、実験結果に基づいて考察する。

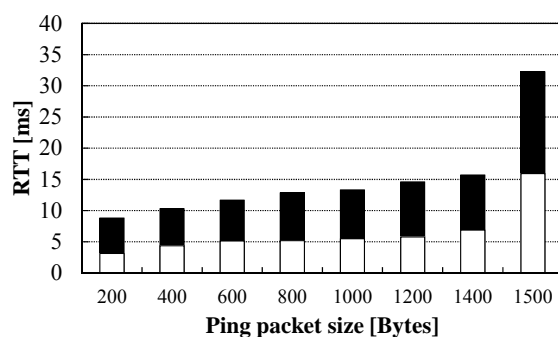
##### 4.4.1 マルチレート制御時の伝送特性

図 4-11 に示す実験系により、IEEE 802.11n によるマルチホップ無線 LAN において、ホップ数およびパケットサイズに応じて、ping コマンドの RTT を測定した結果を図 4-27 に示す [44]。これまで示されている通りホップ数が増えるに応じて RTT は線形的に増加し、また ping コマンドパケットサイズが大きくなるにしたがって RTT が大きくなることが示されている。図 4-27 には、白抜きと塗りつぶしのグラフが示されているが、白抜きグラフは RTT の最小値であり、塗りつぶしグラフは RTT の平均値である。

図 4-27 より、RTT の最小値に比べて平均値が 3 倍程度大きな値であることがわかる。RTT の最小値とは、何らかの外乱により ping パケットの欠損や IEEE 802.11n の MAC 層における再送といった影響がほとんどない状態で応答が得られた状況における RTT と考えられる。



(a) ホップ数による特性



(b) ping パケットサイズによる特性 (宛先: RP4)

図 4-27 マルチレート時の RTT

一方、RTT の平均値が大きいことは、上記の影響が平均的に生じていることを示唆している。ここで外乱とは、同一周波数干渉、人や車の通行による影響、もしくは無線 LAN の動作に起因するものなどが考えられる。今回の測定箇所においては他の無線 LAN がないことを確認しており、また、実験中に人の移動を含めて周囲の環境が変化することはなかった。従って、この影響は無線 LAN の動作に起因するものであることが推測される。

#### 4.4.2 IEEE 802.11n におけるマルチレート制御

無線 LAN に限らず、高速無線通信システムにおいては、電波伝搬状態に応じて送信レートを適応的に選択するマルチレート制御が用いられる。これにより、電波伝搬距離が短く伝搬状態が良好な場合には速い送信レートを適用し、電波伝搬距離が長い、マルチパスリッチな環境であるなど伝搬状態が悪い場合には遅い送信レートに変更して通信の継続性を維持することが可能となる。

IEEE 802.11n においては、伝送帯域幅が 20 MHz の場合、表 4-4 に示す 16 通りの送信レートが規定されている。このなかでは、変調方式と符号化率の組み合わせにより送信レートが決定され、この組み合わせを MCS (Modulation and Coding Scheme) インデックスとして管理している。MCS0~7 は 1 ストリーム伝送、MCS8~15 は 2 ストリーム伝送である。さらに、IEEE 802.11g の送信レートである 54, 48, 36, 24, 18, 12, 9, 6 Mbps と、IEEE 802.11b の送信レートである 11, 5.5, 2, 1 Mbps がサポートされる。

マルチレート制御の実装方法はベンダに依存するが、PER (Packet Error Rate) を観測し、PER の状態に応じて送信レートを変更する手法[49]が用いられることが多い。現在使用されている送信レートにおける PER が設定された閾値を下回れば一つ上 (高速) の送信レートに変更し、また他の閾値を上回れば一つ下 (低速) の送信レートとする。このように制御することで、スループットの最大化を実現している一方、若干の PER を許容する制御であるため、常にパケット損失に起因する再送が発生している状況であることが想像できる。

IEEE 802.11n のマルチレート制御に関しては、ストリームの選択手法[50]、MCS の使用頻度やチャンネルボンディングによるスループット向上に関する検討[51]、送信レート変更のための PER 観測時間に関する検討[52]などがなされている。

今回用いた IEEE 802.11n 無線 LAN チップは Atheros 社 (現、Qualcomm atheros 社) 製であり、選択される送信レートは MCS15, 14, 13, 12, 11, 4, 3, 2, 1, 0 であった。一方、Broadcom 社製の無線 LAN チップでは、MCS15, 14, 13, 12, 11, 10, 9, 2, 1, 0 であり、ベンダにより選択される MCS の実装も異なっている。

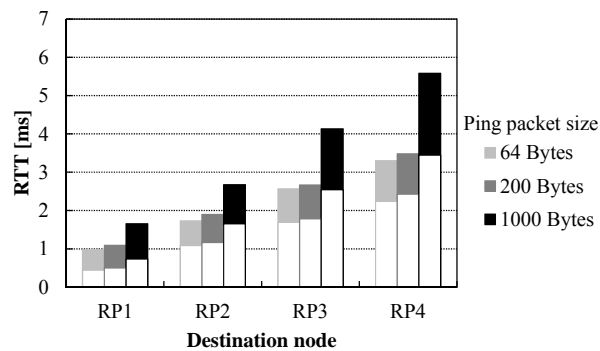
#### 4.4.3 固定送信レート時の伝送特性

図 4-27 に示した RTT は、マルチレート制御が用いられた場合の測定結果である。無線

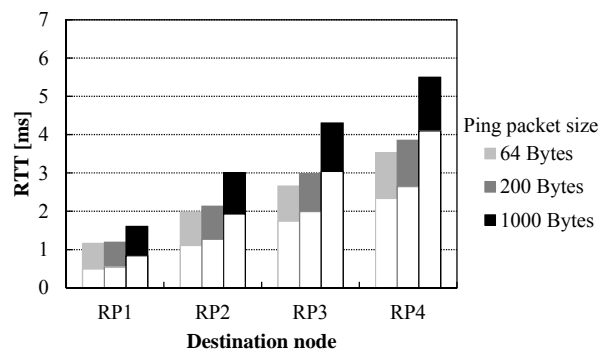
表 4-4 IEEE 802.11n の送信レート (帯域幅 20 MHz 時)

MCS index	Transmission rate, Modulation, Coding rate	MCS index	Transmission rate, Modulation, Coding rate
0	6.5 Mbps, BPSK, 1/2	8	13 Mbps, BPSK, 1/2
1	13 Mbps, QPSK, 1/2	9	26 Mbps, QPSK, 1/2
2	19.5 Mbps, QPSK, 3/4	10	39 Mbps, QPSK, 3/4
3	26 Mbps, 16-QAM, 1/2	11	52 Mbps, 16-QAM, 1/2
4	39 Mbps, 16-QAM, 3/4	12	78 Mbps, 16-QAM, 3/4
5	52 Mbps, 64-QAM, 2/3	13	104 Mbps, 64-QAM, 2/3
6	58.5 Mbps, 64-QAM, 3/4	14	117 Mbps, 64-QAM, 3/4
7	65 Mbps, 64-QAM, 5/6	15	130 Mbps, 64-QAM, 5/6

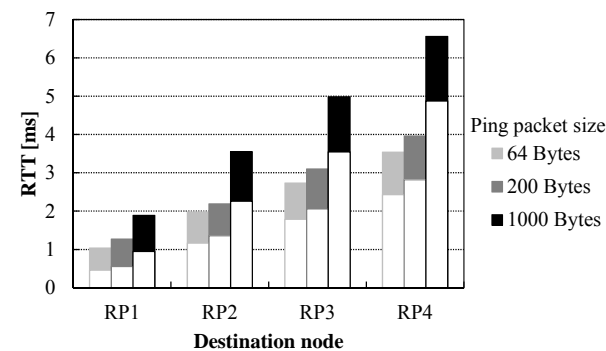
LAN 装置の機能により送信レートを固定した場合の RTT を，図 4-11 に示す実験系により測定した結果を図 4-28 に示す。この時送信レートを，MCS7，MCS4，MCS3，および IEEE 802.11b の 5.5 Mbps，1 Mbps とした。図 4-28 においても，白抜きグラフは RTT の最小値，塗りつぶしグラフは RTT の平均値を示している。マルチレート制御を用いた場合の RTT では，最小値に対して平均値が 3 倍程度であったのに対し，固定送信レートにすることで RTT の平均値が最小値の 2 倍未満にまで小さくなっていることがわかる。また，送信レートが



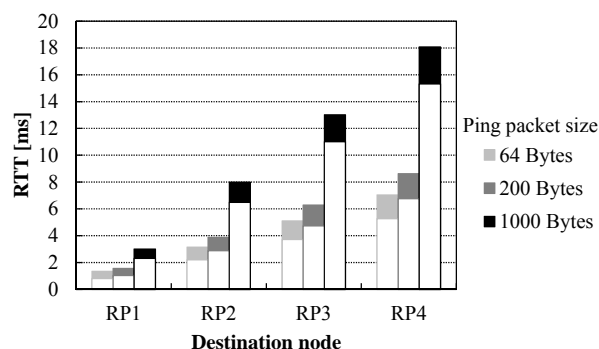
(a) MCS7 (65 Mbps)



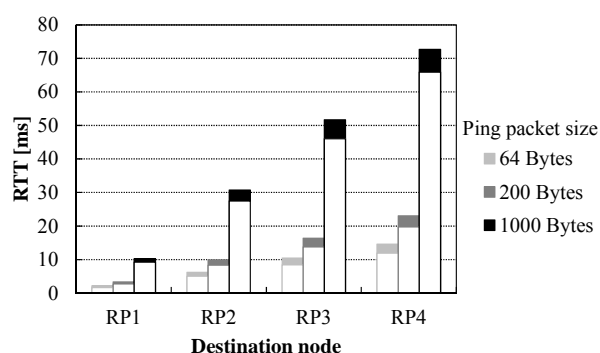
(b) MCS4 (39 Mbps)



(c) MCS3 (26 Mbps)



(d) 5.5 Mbps



(e) 1 Mbps

図 4-28 固定送信レート時の RTT

遅くなるに従い RTT の最小値と平均値の差が小さくなっていることもわかる。特に 1 Mbps など低レートの場合には、RTT の最小値に対して平均値は高々 1.3 倍である。これらより、送信レートを固定することでパケット損失の発生が抑えられ非常に安定した通信特性となり、これに起因していた再送回数が大きく減少したことが示されている。この時の IEEE 802.11n の無線パケットを AirMagnet[53]によりキャプチャしたところ、再送フラグの立っているパケットが大きく減少していることが確認された。

一方、MCS7, MCS4, MCS3 の場合は ping パケットサイズに対して送信レートが十分速いため、伝送レートの低下に伴う RTT の増加は非常に小さいが、5.5 Mbps または 1 Mbps では送信レートが遅いため、RTT が全体として増加してしまっている。さらに、送信レートが低い場合には、ホップ数に応じて RTT が増加する傾きが大きいくとも注意が必要である。すなわち、MCS7 の場合には、4 ホップ（宛先が RP4）時の RTT は 1 ホップ（宛先が RP1）時の 3 倍程度であるが、5.5 Mbps の場合は 6 倍程度、1 Mbps の場合には 7 倍程度と中継に伴う伝送特性の低下を考慮する必要がある。

送信レートを固定した場合の TCP スループットを測定した結果を図 4-29 に示す。AP は市販品を用いており、送信レートを固定できなかったため、1 ホップ目の TCP スループットが非常に高くなっている。図 4-29 より、マルチレート制御を用いた場合(図中の All rates)の TCP スループットと、MCS7 (65 Mbps), MCS4 (39 Mbps) に固定した場合のスループットは遜色がなく、むしろ若干特性が改善していることがわかる。これらより、MCS7 以下の低い送信レートをを用いた場合、マルチレート制御を用いる場合と比べて TCP スループットを大きく低下させることなく、RTT を大幅に改善可能であることが示された。

#### 4.4.4 マルチレート制御に伴う伝送特性劣化の改善方策

前項において示した結果は、送信レートを固定することを推奨するものではなく、マルチレート制御において高い送信レートを過度に使用することを避けることで特性を大きく改善可能であることを示している。以下では、屋外環境にて測定した結果より、使用を控えるべき送信レートにおける伝送特性の状況を考察する。

IEEE 802.11n のマルチホップ無線 LAN 装置を図 4-4 に示す屋外環境における試験用配電線沿いに、地上高約 1.5 m の位置に 6 台 (AP, RP1~RP5) 設置した。各装置間の距離は約 50 m であり、隣り合う装置同士が接続されている。AP より各 RP に対する RTT, および各区間における TCP スループットを測定した結果を図 4-30 に示す。マルチレート制御使用時の結果であり、RTT の最小値に比べて平均値が大きい様子が見て取れる。図 4-30 (a) より、RP1 に対する RTT に比べて、RP2 以降に対する RTT はバイアスがかかったように見える。図 4-30 (b) の TCP スループット特性を見ると、RP1 と RP2 間の電波伝搬状況が他のリンクに比べて悪く、TCP スループットが低いことがわかる。従って、マルチホップのパス内

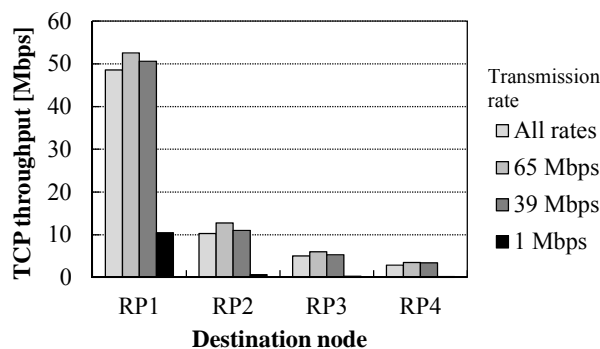
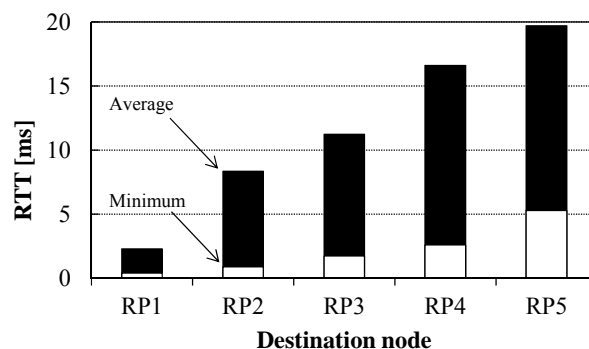
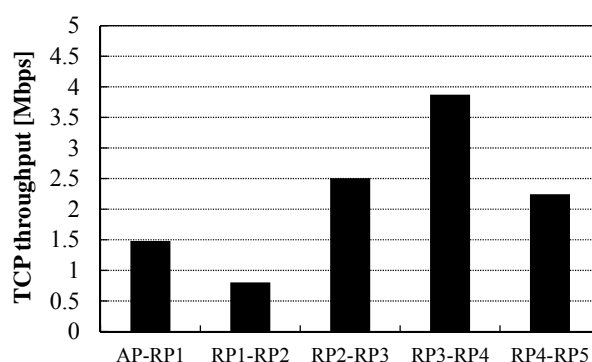


図 4-29 固定送信レート時の TCP スループット



(a) RTT

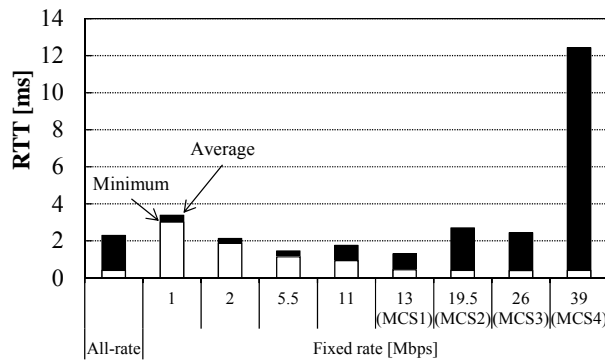


(b) TCP スループット

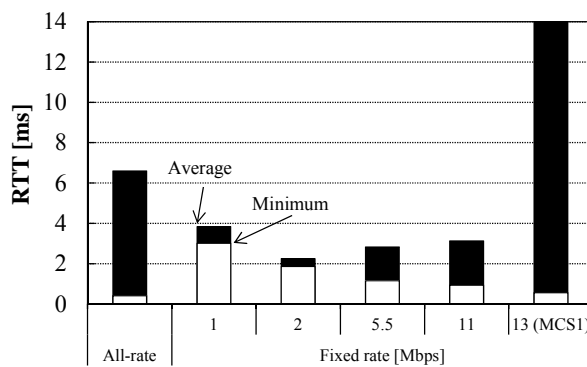
図 4-30 屋外環境におけるマルチレート制御時の伝送特性

に状態の悪いリンクが存在すると、それ以降全ての端末に対して応答時間特性が劣化するという影響が生じる。

次に、AP-RP1, RP1-RP2 のみを対象として、送信レートを固定した場合の RTT を測定した結果を図 4-31 に示す。AP-PR1 リンクにおいては 39 Mbps, RP1-RP2 リンクでは 13 Mbps から急激に RTT が増加している。また、図 4-31 (a), (b) より、RP1-RP2 リンクの 5.5 Mbps, 11 Mbps 時の平均 RTT は、AP-RP1 リンクよりも大きいことから、AP-RP1 リンクより RP1-RP2 リンクの電波伝搬状態が悪く、同じ送信レートでもパケット損失が増加し、再送による遅延が生じていることがわかる。図 4-31 では、各リンクにおいてマルチレート制御を用いた場合の RTT も合わせて示している。AP-RP1 リンクでは、マルチレート制御時の RTT は 26 Mbps の送信レートを固定的に用いた場合よりも低く、主に、26 Mbps 以下の送信レートが自動的に選択されていたと考えられる。一方、RP1-RP2 リンクでは、マルチレート制御時の RTT は 11 Mbps 以下の送信レートを固定的に用いた場合よりも高く、13 Mbps も積極的に選択されていたことが伺える。



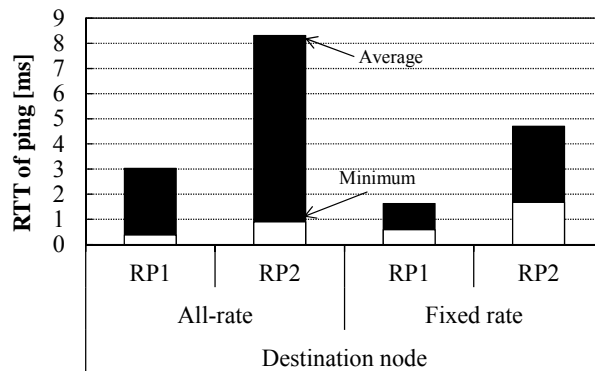
(a) AP-RP1 リンク



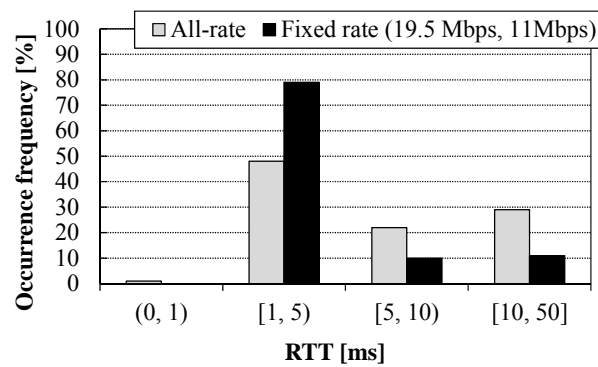
(b) RP1-RP2 リンク

図 4-31 屋外環境における固定送信レート時の RTT 特性

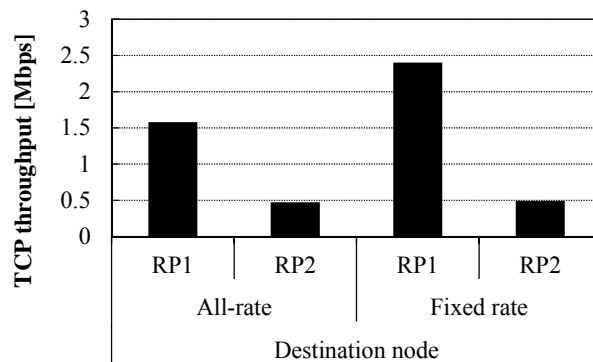
屋外マルチホップ環境下において、マルチレート制御が伝送特性へ与える影響を把握するため、AP-PR1-RP2の2ホップネットワークにおいて、送信レートを固定した場合について RTT を測定した結果を図 4-32 に示す。図 4-31 の考察結果より、AP-RP1 リンクでは 19.5 Mbps, RP1-RP2 リンクでは 11 Mbps を固定的に用いた。この時、RP1 の送信レートは低い側に合わせて 11 Mbps とした。図 4-32 (a) より、マルチレート制御時に比べて、それぞれのリンクで 19.5 Mbps, 11 Mbps を固定的に用いた場合の方が RTT を半分程度に低減できていることがわかる。図 4-32 (b) は RTT の発生頻度分布を示しており、マルチレート制御時には 5 ms 未満の RTT は 5 割程度であるのに対し、送信レートを固定することで 5 ms 未満の RTT が 8 割程度まで増加している。これは、AP-RP1 リンクでは 39 Mbps, RP1-RP2 リンクでは 13 Mbps を選択せず、より高い送信レートにチャレンジすることによるパケット損失の増加を抑止したためである。また、図 4-32 (c) に示すように、送信レートを固定することで TCP スループットが改善していることがわかる。これより、隣り合う送信レート間で伝送特性が急激に劣化し、劣化した送信レートを積極的に選択すると、



(a) RTT



(b) RTT の発生頻度分布



(c) スループット

図 4-32 屋外 2 ホップネットワークにおける固定送信レート時の RTT 特性

RTT の増加のみならず、TCP スループットの低下も引き起こしていることが明らかになった。従って、パケット損失の多い MCS が検出された場合、なるべくこの MCS 未満の送信レートを選択するアルゴリズムを実装することで、マルチホップ無線通信ネットワーク全体としての伝送特性向上が期待できる。

## 4.5 むすび

本章では，需要家向け高速無線通信ネットワークを構築する技術として，IEEE 802.11 技術を用いたマルチホップ無線通信ネットワークに関する実験評価結果をまとめた。

まず，中継距離の短い屋内環境，中継距離の長い屋外環境における基礎的な伝送特性を示し，面的に通信端末を配置した場合の課題について，実験結果を踏まえて述べた。次に，需要家向け無線通信ネットワークにおいて，電波伝搬に影響を与える主要な地物である家屋について，実験用家屋を対象とした遮蔽特性を実験評価した結果，家屋による平均的な遮蔽量が 15 dB であることを示した。また，オープンサイトにおいてマルチホップ無線通信機器の基礎伝送特性を評価する際に，簡易に家屋による遮蔽を模擬するために実験機材として，ガルバリウム鋼板を用いた模擬遮蔽板を作成し，この遮蔽特性を評価した結果，家屋の遮蔽を模擬するために十分な特性が得られることを示した。さらに，電気的特性が不明であり，一般的に家屋の壁材として用いられるラス網について，レイトレースシミュレーション結果をベースに電気的特性を推定し，これを用いることでラス網による影響を考慮した電波伝搬シミュレーションが可能であることを示した。次に，需要家向け通信ネットワークに無線方式を用いる際に問題となると考えられる電波干渉の影響について，マルチホップ無線通信ネットワークのごく近傍で同一チャネル干渉を発生させた場合に関する実験結果を示し，伝送遅延の増加はあるものの通信自体は可能であるため，伝送遅延に関しては干渉のない場合の遅延時間に対し約 1.7 倍のマージンを見込んで設計する方法についてまとめた。最後に，高速無線通信方式に実装されているマルチレート制御機能において，高い送信レートを利用するために生じるパケット損失が伝送特性に与える影響を実験評価した結果を取りまとめるとともに，伝送特性が急激に悪くなる送信レートより少し遅い送信レートを使用することで，TCP スループットを低下させることなく，伝送遅延を大幅に改善可能であることを示した。

## 第5章 大規模マルチホップ無線通信ネットワークの伝送特性評価

本章では、第4章にて示した小規模なマルチホップ無線通信ネットワークの伝送特性実驗評価結果に基づき、数100台の端末からなる大規模なマルチホップ無線通信ネットワークの伝送特性について、計算機シミュレーションにより評価した結果についてまとめる。計算機シミュレーションの手法について述べ、中央にAPが設置され、RPが一定範囲内でランダムに配置された場合、および格子状に配置された場合に関する計算機シミュレーション結果を示すとともに、ネットワーク内における最大ホップ数および最低受信電力に関して考察を行う。

### 5.1 計算機シミュレーション手法

需要家向け通信ネットワークにおいては、各需要家位置に設置される無線通信端末間がマルチホップ無線通信ネットワークを構築し、数百台以上の無線通信端末が一台の集約局に接続されることが想定される。このような大規模な無線通信ネットワークの伝送特性を評価するとともに、これを設計するための特性を把握するために、実フィールドにおける実測評価を行うことは非常に困難である。ここでは、数百台程度の無線通信端末（RP）が面的に配置された場合におけるマルチホップ無線通信ネットワークの特性を評価するために、計算機シミュレーションを用いる。

無線通信ネットワークの計算機シミュレーションにおいては、

- 電波伝搬シミュレーション
- PHY, MAC層の挙動を考慮したシミュレーション
- ネットワーク層以上のトラフィックを考慮したシミュレーション
- アプリケーション層プロトコルを考慮したシミュレーション

などが考えられ、これら全てを考慮した計算機シミュレーションを実施することは非常に困難である。ここでは、マルチホップ無線通信技術の要素を考慮し、大規模なマルチホップ無線通信ネットワークにおける最大伝送遅延を見積もるための計算機シミュレーションを実施することとする。

マルチホップ無線通信ネットワークにおいては、4.1 節にて実験評価結果を示した通り、ホップ数による伝送遅延への影響が支配的となる。ホップ数の算出にあたっては、用いるルーティング方式や、ルーティング方式においてエンドツーエンドの中継経路決定に適用するメトリックによっても結果が異なることが想定される。また、3.2.3 項にて触れたように、標準化されたルーティング方式でも使用可能なメトリックは様々であるとともに、ベンダ独自開発のメトリックを適用することにより機能向上を図っていることがほとんどである。従って、様々なメトリックを詳細に評価することは得策ではない。

需要家向けマルチホップ無線通信ネットワークにおいては、ルーティング方式に関わらず基本的には集約局をルートとしたツリートポロジが構築され、集約局からのホップ数がマルチホップ無線通信ネットワークの伝送特性を特徴づけると言える。本論文では、ツリートポロジを構築するための原理的なメトリックのみを取扱うとともに、これをパラメータとして用いることで、大規模マルチホップ無線通信ネットワークの基本的な特徴を把握することを目的とした計算機シミュレーション手法を開発した。以下に計算機シミュレーション手法の概略をまとめる。

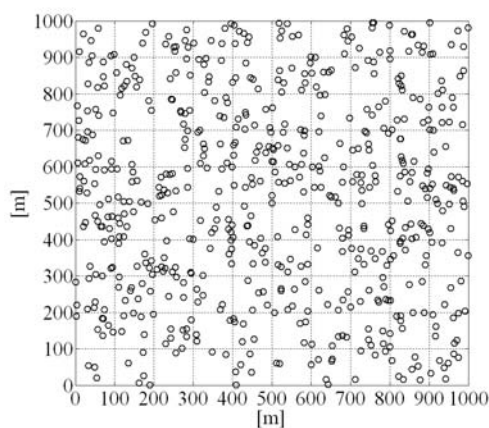
### 5.1.1 計算機シミュレーションの前提条件

需要家向け無線通信ネットワークでは、広く面的に分布している通信端末（スマートモータ）を、必要最小限の集約局数により効率的に収容することが求められる。最終的には、集約局の最適置局設計などを実現することが望まれ、この際には、実環境を模擬した電波伝搬シミュレーションや、データ収集時間などアプリケーションの所要条件を満足するためのマルチホップ無線通信ネットワーク構成の評価などが必要となると考えられる。

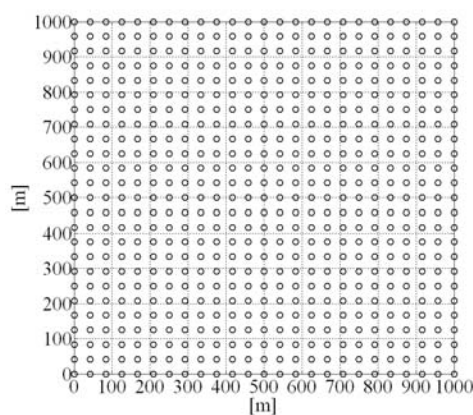
計算機シミュレーションの前提条件として、大規模なマルチホップ無線通信ネットワークの基礎的な伝送特性評価のために、電波伝搬環境については建物の影響を考慮せず、2 波モデルにより大地反射のみを考慮することとし、通信端末が設置される地域特性に応じた伝送特性を評価するために、通信端末の密度をパラメータとして扱うこととした。また、複数の集約局による効率的な集約手法開発の前段として、一つの集約局に対して接続する

通信端末数をパラメータとして、通信端末数が異なる場合の伝送特性を評価することとした。

需要家向け通信ネットワークにおいては、通信端末は移動せず、各家屋の壁面近傍に設置される。家屋は道路沿いに整然と建築される場合や、不規則に建設される場合などさまざまである。従って、本計算機シミュレーションにおいて通信端末は一定の正方区画内に格子状に配置される場合と、ランダムに配置される場合とを検討することとした。また、正方区画の面積を変更することで、端末密度を変え、地域差による影響を評価することとした。端末の配置イメージを図 5-1 に示す。このような位置に端末が設置され、初期状態としてはすべての端末が起動しておらず、一台ずつ順番に起動し、ネットワークを構築していくこととした。これは、新規に需要家向け通信ネットワークを構築した場合や、ネッ



(a) ランダム配置



(b) 格子状配置

図 5-1 端末配置イメージ

トワークのメンテナンスや停電等により全ての接続が切れた後のネットワーク構築状況を模擬していることになる。

### 5.1.2 ネットワークトポロジの決定方法

ルーティング方式については、特定の方式を評価するのではなく、原理的なメトリックのみを用いて集約局からのツリートポロジを構築し、伝送特性を評価することとした。

一般的に、マルチホップ無線通信ネットワークのルーティングにおいてよく用いられるメトリックとしては、受信電力、パケット損失、ホップカウント、スループット、エンドツーエンドの伝送遅延などがある。受信電力はビーコンやハローパケットなどのマルチホップ無線通信ネットワークを維持するために用いられる制御用パケットの受信電力を利用することで実現可能であり、一番簡易な手法である。また、受信電力をコスト（例えば 0～7 の整数値）に置き換えて、これを参照することで宛先までのコストが最小の中継経路を選択するといった手法もある。パケット損失は、上記制御用パケットや、データ伝送用パケットを利用して、周囲の端末との間のパケット損失を観測する手法が考えられる。ホップカウントは宛先に対する接続要求パケット（AODV であれば RREQ）を利用することで、経路別に宛先までのホップカウントを計測することができる。このうち、最もホップカウントの少ない経路を選択することが考えられる。スループットは、制御用パケットやデータ伝送用パケットの受信状況からスループットに換算し、最も状態の良いリンクを管理する手法が考えられる。またエンドツーエンドの伝送遅延は、接続要求パケットにタイムスタンプを付けることで実際に測定する手法や、伝送速度とデータ長などから類推することが考えられる。

ホップカウントや伝送遅延など、接続要求パケットによりエンドツーエンドの経路評価を要する場合、データ送信頻度や無線経路の不安定性によっては、大規模なマルチホップ無線通信ネットワークにおいては接続要求パケットの量が増大して、通信帯域を圧縮する可能性が高いと考えられる。従って、ビーコン等により周囲の端末間のリンク情報を基準とすることが効率的と考えられる。ここでは、エンドツーエンドの経路評価を要するルーティング手法を L3 ルーティング、周囲のリンク情報のみに基づくものを L2 ルーティングと呼ぶ。L2 ルーティングにおいては、周囲のリンク情報しか得られないため、フルメッシュのネットワークに対して適用すると、宛先端末の方向がわからないため正常に動作しないと考えられる。一方、需要家向けマルチホップ無線通信ネットワークでは、宛先が集約

局と決まっているため、その情報を利用することでL2ルーティングでも効率的にツリートポロジが構築可能となる。従って、フルメッシュの無線ネットワークでは接続要求パケットが必要であったホップカウントも、需要家向けマルチホップ無線通信ネットワークにおいては周囲の通信端末における集約局からのホップカウントを参照することで、L2ルーティングのメトリックとして用いることが可能となる。パケット損失やスループットは、最も電波伝搬環境の良いリンクを選択可能となるため伝送品質を向上するうえでは有効なメトリックと考えられる。しかし、マルチレート制御を有する高速無線通信方式を用いる場合、適用する送信レートにより算出される中継経路が大きく異なることが容易に推測されるため、これをメトリックとして用いるためには工夫が必要となる。ここでは、マルチホップ無線通信ネットワークの特性を基礎的に評価するために、受信電力、およびホップカウントを検討の対象とする。

受信電力、およびホップカウントによりツリートポロジを構築するイメージを図 5-2 に示す。受信電力の場合、周囲の端末のうち最も受信電力の高い端末を接続先として選択することとする。ホップカウントは集約局からのホップ数が最小の端末を接続先とするが、単純にホップ数のみに着目すると受信感度近辺の遠方端末と接続されてしまい、無線 LAN を用いるメリットが損なわれてしまう。そこで、受信電力に閾値を設け、一定の受信電力以上の端末のうち、集約局からのホップ数が最小の端末を接続先とすることとした。

## 5.2 接続先決定手法に関する考察

5.1 節にて示したシミュレーションを実施するためのプログラムを MATLAB[54]により開発した。大規模マルチホップ無線通信ネットワークの伝送特性を評価するために用いた主な諸元を表 5-1 に示す。ここで、ホップカウントメトリックにより接続先を決定する場合に用いる受信電力の閾値を $-65$  dBm とした。これは図 4-1 より、一区間が約 50 m となる場合の受信電力であり、十分高いスループットが見込めるため、無線 LAN による高速マルチホップ無線通信ネットワークの構築に適していると考えたためである。以下の条件により、マルチホップ無線通信ネットワーク内における最大ホップ数、および最低受信電力を算出した結果を図 5-3 に示す[42]。

- 通信端末 (RP) 数 : 624
- 端末配置 : 一様分布に従ったランダム配置

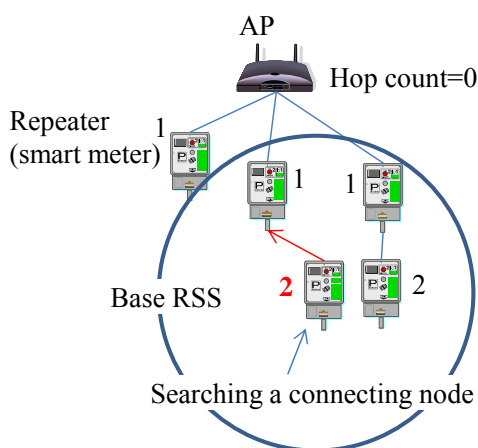
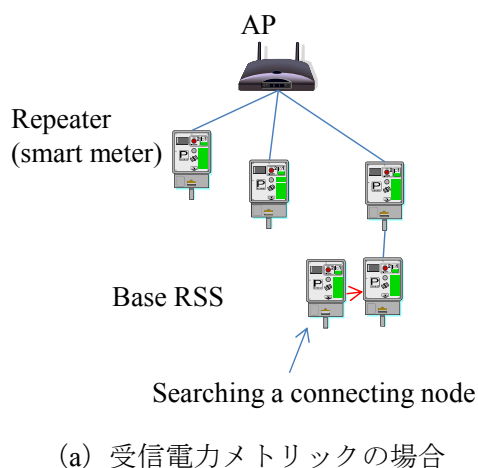
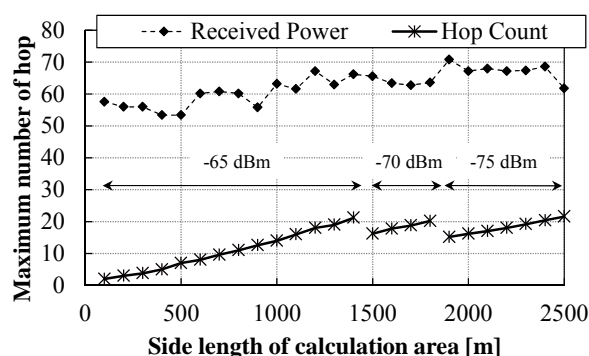


図 5-2 ツリートポロジの構築手法

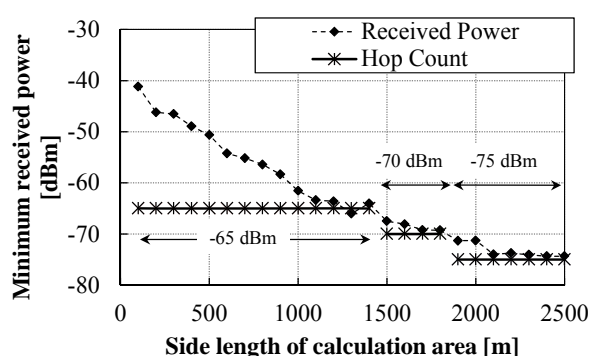
表 5-1 シミュレーションの主な諸元

Propagation circumstance	Line-of-Sight
Frequency	2412 MHz (CH 1)
Propagation model	2-ray model
Ground reflection	Perfectly
Node position	Even interval or uniform distribution
Node height	1 m
Threshold of received power	-65 dBm

- AP : 正方形画の角
- ここでは、簡単のため、ランダムに配置された RP は、AP に近い位置の RP から順番に起動することとした。ランダム位置の RP から起動する場合には後述する。横軸は端末を配置する正方形画の一辺の長さであり、端末数が 624 と一定のため、一辺の長さが短いと端末が密に設置され、長いと疎に設置されていることを示す。受信電力をメトリックとし



(a) 最大ホップ数



(b) 最低受信電力

図 5-3 ランダム分布・AP 近傍から起動した場合の特性①

て用いる場合、受信電力が高い近隣の端末と接続され、さらに、AP の方向を示すメトリックを採用していないため、ホップ数が非常に多くなる。一方、ホップカウントをメトリックとして用いる場合、隣接する端末ではなく受信電力の閾値程度となる遠方の端末と接続され、かつ、AP からのホップカウントにより AP の方向がわかるため、非常に少ないホップ数でツリーネットワークトポロジが構築されていることがわかる。端末が密に設置されると、一番端の端末でも AP に直接接続可能であり、正方区画の一辺の長さが長くなり端末間距離が長くなるにつれて、最大ホップ数が徐々に増加する。一方、マルチホップ無線通信ネットワーク内に構築された全てのリンクにおける最低受信電力は、ホップカウントメトリックの場合、ある程度の端末密度となるまで、受信電力の閾値程度となる。

図 5-3 において、ホップカウントをメトリックとした場合の結果が不連続となっているのは、受信電力の閾値を $-65$  dBm としたため、周囲の全ての端末からの受信電力が閾値以下の場合があったため、この閾値を変更して再計算したためである。変更後の閾値を図 5-3 に記載している。ここでは受信電力の閾値を手動にて変更し再計算したが、各端末におい

て自律的に変更することが考えられる。そこで、図 5-4 のフローにより受信電力の閾値を変更することを考える[55]。測定した受信電力が受信電力の閾値 (Base RSS) より低い場合、閾値を  $\alpha$  dB だけ下げて再度接続端末を検討する。

ここで、受信電力の閾値の変更ステップの  $\alpha$  について考察する[56]。受信電力の閾値を変更するイメージを図 5-5 に示す。中央下部端末が接続先を探索しているとし、周囲に端末①～⑤が存在し、これらからの受信電力を等高線にて示している。閾値が  $-65$  dBm の場合、周囲の端末全ての受信電力が  $-65$  dBm より低いため、接続先が見つからない。次に、 $-65$  dBm から  $\alpha$  dB だけ閾値を下げると、端末①だけが接続先の候補となるため、端末①が接続先として決定される。この場合、端末①のホップカウントが 5 であることから、接続端末のホップカウントは 6 となる。一方、 $\beta$  dB 低減することで、端末①、②、③のうちから接続先を選択可能となる。この場合、これらのうち最もホップカウントの少ない端末③を選択し、

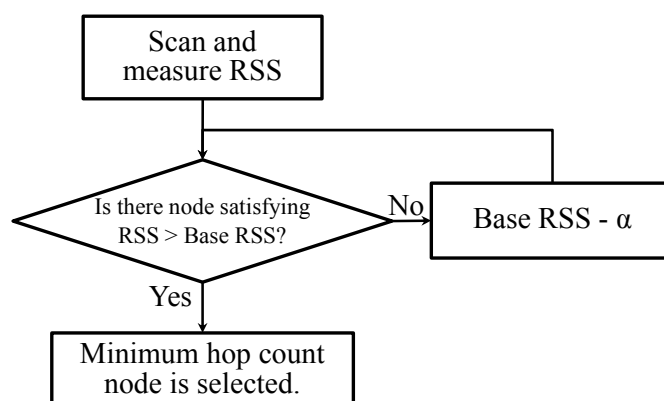


図 5-4 受信電力の閾値変更フロー

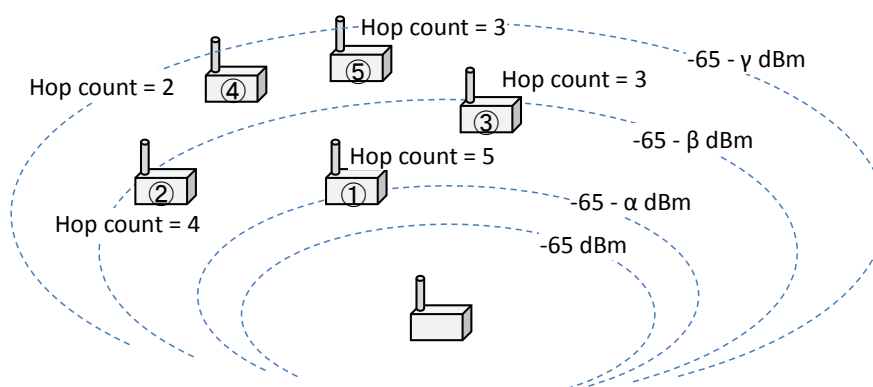
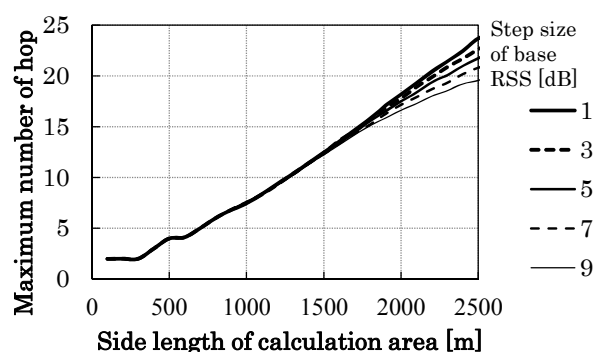


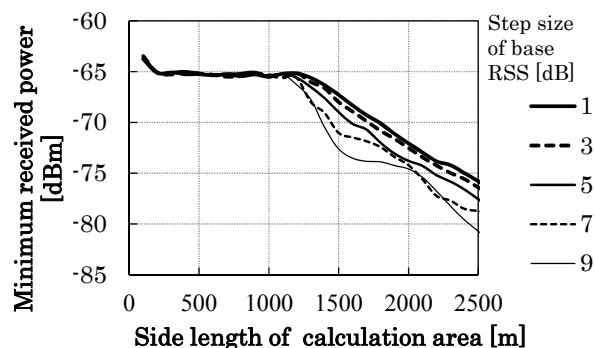
図 5-5 受信電力閾値変更のイメージ

接続端末のホップカウントは4となる。従って、受信電力の閾値低減量を $\beta$ とすることで、よりホップ数の少ないパスを構築可能となり、伝送特性の向上に寄与できたといえる。さらに、 $\gamma$  dB 低減することで、端末①～⑤のうちから接続先を選択し、ホップカウントの最も少ない端末④が選択され、接続端末のホップカウントは3となる。この時、端末④までの伝送距離が長くなるため、受信電力が低下することに起因する伝送特性の低下に気を付ける必要がある。従って、受信電力を段階的に低減する量により、マルチホップ無線通信ネットワーク全体としての伝送特性に影響が表れると考えられる。

受信電力閾値の低減量をパラメータとして、マルチホップ無線通信ネットワーク内における最大ホップ数と最低受信電力を算出した結果を図 5-6 に示す。低減量が多いと、特に端末密度が疎であり、ホップ数が多くなりがちなエリアにおける最大ホップ数低減に有効であることが示されている。その反面、最低受信電力が大きく低減していることもわかる。図 4-1 より、受信電力が $-65$  dBm から $-75$  dBm に変わるとスループットは約 15 Mbps から 10 Mbps に低下し、端末間距離は 50 m から 100 m まで長距離化する。また、受信電力が $-70$



(a) 最大ホップ数



(b) 最低受信電力

図 5-6 受信電力閾値を変更した場合の特性

dBm の場合には、スループットが約 12 Mbps, 端末間距離が約 70 m である。実態としては、電波伝搬距離が長距離になると周囲からの反射等の影響により通信状態が不安定になりやすく、またスループットの低下は無線 LAN をマルチホップシステムに用いる利点を損なうことになる。従って、ここでは 5 dB より大きく受信電力の閾値を変えることを不適切と判断し、それ以下の範囲において検討する。

次に、受信電力の閾値を変えた場合の、接続先の候補数に関して考察する。図 5-5 にて示したように、接続先の候補は多い方が、より AP からのホップ数の少ない条件の良い条件を選択することが可能となる。図 5-3 (b) より、端末数が 624 台の場合、正方形区画の辺の長さが 1500 m 付近から受信電力の閾値変更が必要となると考えられる。そこで、辺の長さを 1500, 2000, 2500 m とし、端末密度が異なる状況において平均接続先候補数を算出した結果を図 5-7 に示す。これより、受信電力の閾値低減量を大きくするに従い、選択可能となる端末数が増加していることがわかる。また、端末密度が高い（正方形区画の辺の長さが短い）方が、より多くの接続先を候補とできることが示されている。

選択の幅を広げる観点より、接続先の候補数としては 2 以上を確保することが望ましい。受信電力の閾値低減量を 1 dB もしくは 2 dB とすると、図 5-7 におけるほとんどの場合において、2 つの接続先候補を確保することが困難である。低減量を 3 dB とすると、端末密度が高い場合には 2 つの接続先候補を確保できるが、密度が低い場合には複数の接続先候補を確保することが困難である。いずれの場合においても、少なくとも 2 以上の接続先候補を確保可能な受信電力低減量として、図 5-7 より 5 dB が適しているといえる。

接続候補先の選択状況について、一例を示す。表 5-2 は、正方形区画の一辺の長さが 1500 m 時における、ある時点における接続先候補の一覧である。接続先探索端末 (No. 502) に対

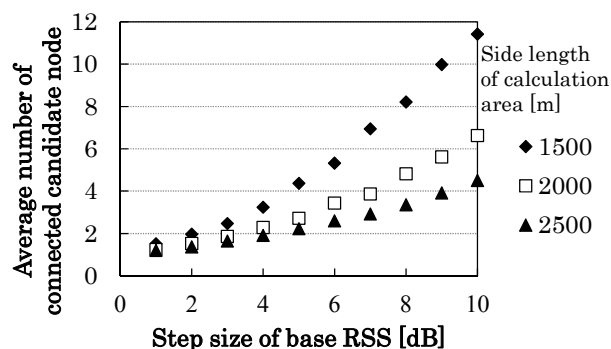


図 5-7 受信電力の閾値に対する接続先候補数

表 5-2 接続先候補算出の一例

Received power [dBm]	Number of hop	Node number	Required step of base RSS [dB]
-65.9	3	604	1
-66.6	2	206	2
-68.9	2	201	4
-68.9	2	218	4
-69.3	1	88	5
-70.4	1	539	6
-71.0	2	51	7
-71.6	2	129	7
-72.2	1	194	8
-74.1	2	11	10
-74.2	3	162	10
-74.3	3	592	10
-74.6	2	388	10
-74.7	2	594	10
-74.7	1	198	10
-74.8	2	379	10
-74.9	1	360	10
-76.1	3	59	11
-78.5	0	1	14

する受信電力，APからのホップ数，および各端末を接続先とするために必要な受信電力閾値の低減量を示している。No. 1はAPである。周囲の端末について，受信電力の高い順にソートした結果であり，最も受信電力の高い端末（No. 604）でも-65.9 dBmと受信電力閾値の初期値（-65 dBm）を下回っている。ここで，受信電力の閾値を1 dBだけ下げると，No. 604だけが接続先候補となるため，これが選択され，No. 502のAPからのホップ数は4となる。もしくは，受信電力の閾値を3 dB下げると，No. 206も候補となる。No. 604とNo. 206のうち，APからのホップ数が少ないNo. 206が接続先として選択されるため，No. 502のAPからのホップ数は3となり，受信電力の閾値を1 dBだけ下げた場合より，APまでのホップ数を1減らすことができる。受信電力の閾値を5 dB下げると，No. 604, No. 206, No. 201, No. 218, No. 88が接続先の候補となり，この中からNo. 88が選択される。この場合，No. 502のAPからのホップ数は2となり，さらに1ホップ少ない中継経路を選択可能となる。仮に受信電力の閾値を10 dB下げたとしても，APには直接届かず，No. 502のAPからのホップ数は2となる。

以上より，以下の計算機シミュレーションにおいては， $\alpha=5$  dBとして評価する。

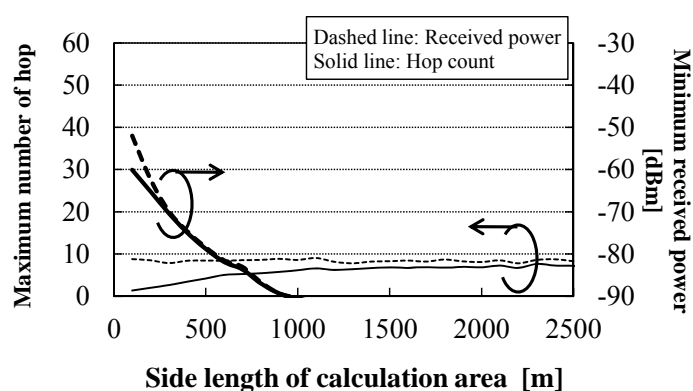
### 5.3 計算機シミュレーション結果

5.1 節、および 5.2 節にて述べたマルチホップ無線通信ネットワークのシミュレーション手法を用い、マルチホップ無線通信ネットワークにおける伝送特性を特徴づける最大ホップ数に関して、端末の配置、起動順の観点から評価した結果をまとめる[57]。

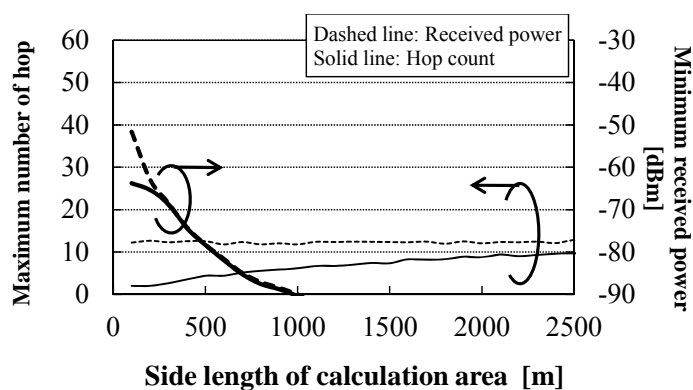
#### 5.3.1 ランダムに配置・ランダムに起動する場合

需要家に設置される通信端末の位置が図 5-1 (a) のようにランダムであると想定し、中央に AP が設置され、通信端末の位置に関わらずランダムに起動して接続先の探索を開始した場合の、正方形画の一辺の長さ（端末密度に相当）に対するマルチホップ無線通信ネットワーク内における最大ホップ数、および最小受信電力を算出した結果を図 5-8 に示す。通信端末の起動に対して特段の制御をせず、通信端末の位置もランダムであり、通常想定される運用形態と考えられる。正方形画内に設置する通信端末の数は 120 台、624 台、1224 台とした。

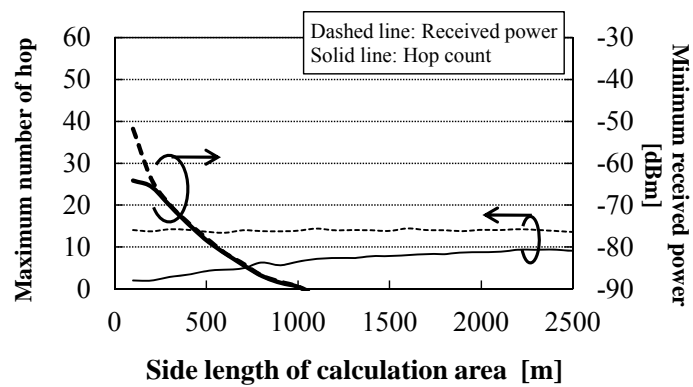
図 5-8 より、AP からのホップカウントをメトリックとして接続先を決定する場合の最大ホップ数は、受信電力のみをメトリックとする場合より常に少なく、効率的にツリートポロジが構築できていることを示している。さらに、ホップカウントをメトリックとした場合の最大ホップ数は、通信端末数によらず同等の特性を示している。これは、AP の方向に対して、受信電力の許容範囲内でより遠方の端末と接続しやすくなるためである。これにより、AP と通信端末間の距離に応じて、ホップ数が概ね一定となる。この特性は、全てのリンクについて受信電力が同程度とすることが可能であることを示している。4.4 節にて示したように、無線 LAN によるマルチホップ無線通信ネットワークにおいてはリンク間の特性が異なると、状態の悪いリンクの伝送特性にパス全体が影響され、マルチホップ無線通信ネットワーク全体として特性が低下してしまう。受信電力に閾値を設けたホップカウントメトリックは、このようなリンクを受信電力の観点から排除し、リンクの特性を一定に揃えることが可能となるため、マルチレート制御を伴う高速無線通信方式を用いたマルチホップ無線通信ネットワークには適したメトリックであるといえる。一方、受信電力のみをメトリックとした接続先決定方法では、通信端末密度によらず最大ホップ数はほぼ一定であり、通信端末数に応じて増加する傾向がある。これは、通信端末の密度に関わらず、受信電力の高い近隣の通信端末を接続先として選択しやすいためである。



(a) 端末数 : 120



(b) 端末数 : 624



(c) 端末数 : 1224

図 5-8 ランダム配置・ランダム起動時の特性

いずれの場合においても一辺の長さが 1000 m 付近で、最低受信電力が -90 dBm を下回る結果となった。ここで、通信端末の受信感度を -90 dBm とし、これ未満の受信電力では受信不能と想定する。これは、一辺の長さが 1000 m 以上の場合には周囲のいずれの通信端末も受信感度以下の受信電力しか得られず、マルチホップ無線通信ネットワークに参入できない通信端末が存在することを示している。ランダム順番に起動する場合には、最初に起動した通信端末が AP の遠方であれば、接続先の決定方法に関わらず、ネットワークに参入

できない。なお、図 5-8 は各通信端末からの接続要求は 1 回のみ結果であり、通常、接続先が見つからなかった場合は一定時間後に再度接続要求を行う。このような場合に関する特性については後述する。

接続先選択のためのメトリックによる最大ホップ数への影響を示すため、受信電力が $-90$  dBm の時の最大ホップ数を図 5-9 に示す。これより、ホップカウントをメトリックとして用いる場合のマルチホップ無線通信ネットワーク内の最大ホップ数は、受信電力をメトリックとした場合に比べて 30~50 %低減可能であることがわかる。さらに、通信端末数によらず最大ホップ数を一定とすることができ、マルチホップ無線通信ネットワークの事前設計時においても特性把握が容易であると言える。

### 5.3.2 ランダムに配置・AP 近傍から起動する場合

需要家に設置される通信端末の位置が図 5-1 (a) のようにランダムであると想定し、中央に AP が設置され、AP に近い通信端末から順番に起動して接続先の探索を開始した場合の、正方形区画の一辺の長さ（端末密度に相当）に対するマルチホップ無線通信ネットワーク内における最大ホップ数、および最小受信電力を算出した結果を図 5-10 に示す。AP に近い通信端末から起動するのは、AP との接続性向上が目的である。このような制御を実現するためには、例えば、各通信端末に個別のタイマを持たせて、電源投入後に接続先探索開始までの時間を、AP から送出されるビーコンの強度により自律的に調整するといった方法などが考えられるが、ここでは理想的に順番を決めて起動した。また、正方形区画内に設置する通信端末の数は 120 台、624 台、1224 台とした。

図 5-10 より、AP からのホップカウントをメトリックとして接続先を決定する場合の最

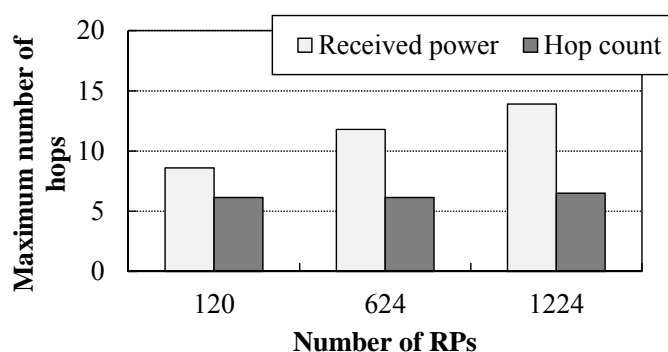
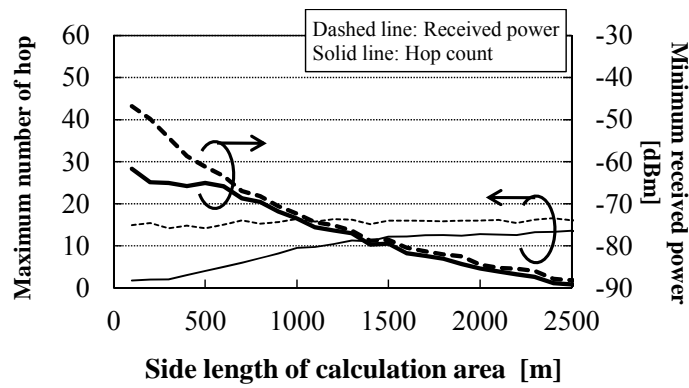
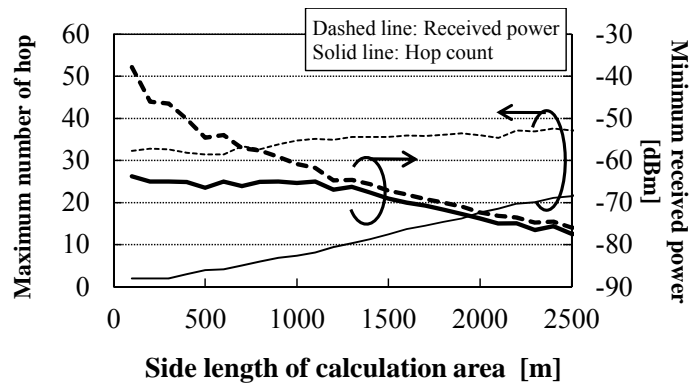


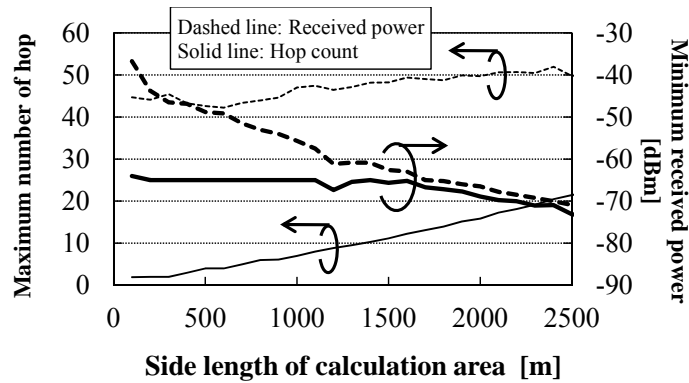
図 5-9 ランダム配置・ランダム起動時の最大ホップ数（受信電力 $-90$  dBm）



(a) 端末数 : 120



(b) 端末数 : 624



(c) 端末数 : 1224

図 5-10 ランダム配置・AP 近傍から起動時の特性

大ホップ数は、受信電力のみをメトリックとする場合より常に少なく、効率的にツリートポロジが構築できていることを示している。図 5-8 の場合と同様に、ホップカウントをメトリックとして用いる場合には、通信端末密度がその状況下では若干の差が出ているものの、通信端末数によらず同程度の最大ホップ数が実現可能であることが示されている。一方、受信電力のみをメトリックとした接続先決定方法では、通信端末数の増加に伴い、最

大ホップ数が急増している。これは、APに近い通信端末から理路整然と接続先を探索したため、接続先を探索している通信端末のごく近傍の通信端末が起動している可能性が極めて高く、近傍の通信端末同士が接続された結果である。図 5-8 の場合、各通信端末はランダムに起動したため、接続先を探索している通信端末の近傍の通信端末が常に起動しているとは限らず、結果として最大ホップ数は少なくなっていた。

マルチホップ無線通信ネットワーク内におけるリンクの最低受信電力の特性を見ると、AP付近の通信端末から接続先を探索したことでマルチホップ無線通信ネットワーク全体として接続性が飛躍的に向上し、通信端末密度が疎の場合においても、最低受信電力が受信感度を下回することはなかった。また、受信電力に閾値を設けたホップカウントメトリックを用いた場合、通信端末密度がある程度疎になるまで、最低受信電力が閾値程度に一定となっていることが示されており、それ以降閾値を 5 dB ずつ低下させると、受信電力のみをメトリックとして用いる場合と同程度の最低受信電力となっている。

接続先選択のためのメトリックによる最大ホップ数への影響を示すため、それぞれのメトリックを用いた場合における受信電力が、同程度の $-65$  dBm となった時の最大ホップ数を図 5-11 に示す。図 5-9 の場合よりも最大ホップ数の削減効果が大きく、ホップカウントをメトリックとして用いる場合の最大ホップ数は、受信電力をメトリックとした場合に比べて 70 %程度低減可能であることがわかる。この場合、ホップカウントをメトリックとした時も通信端末数に応じて最大ホップ数が増加しているのは、各メトリックを用いた場合の最低受信電力が同一になる通信端末密度が異なるためである。図 5-10 に示されている通り、端末数によらず、計算エリアに対して最大ホップ数は同程度の特性を示しており、事前設計の容易性は変わらない。

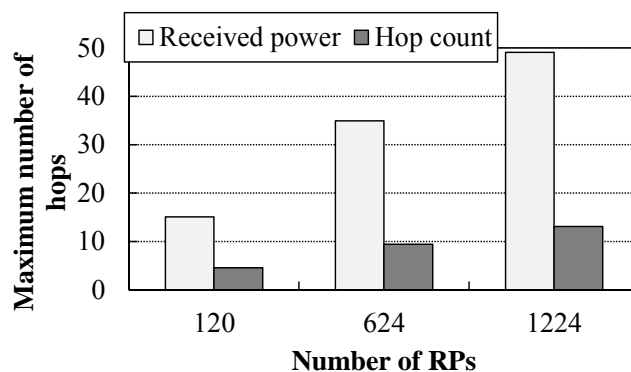


図 5-11 ランダム配置・AP 近傍から起動時の最大ホップ数（受信電力 $-65$  dBm）

### 5.3.3 格子状に配置・AP 近傍から起動する場合

需要家に設置される通信端末の位置が図 5-1 (b) のようにランダムであると想定し、中央に AP が設置され、通信端末の位置に関わらずランダムに起動して接続先の探索を開始した場合の、正方区画の一边の長さ（端末密度に相当）に対するマルチホップ無線通信ネットワーク内における最大ホップ数、および最小受信電力を算出した結果を図 5-12 に示す。通信端末は AP 近傍のものから起動することとし、正方区画内に設置する通信端末の数は 624 台とした。

受信電力のみをメトリックとして用いる場合の最低受信電力が、正方区画の一边の長さが 500 m 付近において大きく変動しているのは、2 波モデルの影響により、近くの通信端末より遠くの通信端末の受信電力の方が高い場合があったためである。通信端末が格子状で等間隔に設置される場合、通信端末密度が疎の状況においては、受信電力のみをメトリックとして用いる場合と、ホップカウントをメトリックとして用いる場合の特性は同じになる。これは、ホップカウントをメトリックとする場合において、図 5-4 に示したフローに従って最初に接続先として決定される通信端末が、確定的に隣接する通信端末となるからである。また、この場合の最低受信電力は、通信端末密度が一定程度疎になるとともに、受信電力の閾値が変更されるため、図 5-4 のフローに従って低下する。図 5-12 において最低受信電力が低下し始める通信端末密度は、図 5-10 (b) の場合よりも疎であることから、受信電力に閾値を設けたホップカウントメトリックは、通信端末の設置位置が均一であるほうが、通信端末密度に対して適用範囲が広いと言える。

AP に直接接続される無線通信端末は、その配下にある無線通信端末数からのパケットを必ず中継するため、配下の無線通信端末数が多いと、この無線通信端末における中継動作

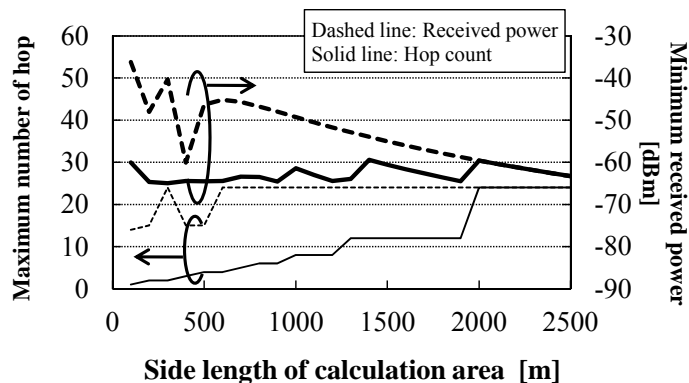


図 5-12 格子状配置・AP 近傍から起動時の特性

回数が増加し、データ送信頻度によってはボトルネックとなりうる。そこで、格子状の無線通信端末配置における、マルチホップ無線通信ネットワーク内におけるホップ数の分布を算出した結果を図 5-13 に示す。ランダム配置の場合のホップ数分布も、同様の傾向となる。これより、1 ホップで AP に接続している無線通信端末数は、受信電力のみをメトリックとして用いる場合には 4、受信電力に閾値を設けたホップカウントをメトリックとして用いる場合には 20 である。これらの無線通信端末一台当たりの配下にある無線通信端末数は、それぞれ 155、30.2 台であり、受信電力に閾値を設けたホップカウントメトリックはマルチホップ無線通信ネットワークにおける負荷分散にも寄与すると言える。ここで、各無線通信端末および AP には複数の無線通信端末が接続されるため、これらが同時にデータを送受信する場合、無線パケットの衝突増加に起因するスループットの低下、伝送遅延の増大が生じる可能性がある。これは、ポーリングによるユニキャスト通信を行うことで回避することが可能である。

#### 5.4 接続先の再探索を考慮したシミュレーション

5.3.1 項にて示した無線通信端末がランダムに配置され、接続先の探索をランダムの順番で開始する状況は、最も現実的なシナリオである。その反面、図 5-8 に示したマルチホップ無線通信ネットワーク内における最大ホップ数、および最小受信電力の特性は、受信感度以下のリンクが多発することを示唆しており、実用上問題があるように見える。

本計算機シミュレーションの結果は、各無線通信端末が接続先を探索する回数を 1 回とし、その状況で接続先を決定できなければ、受信電力に閾値を設けたホップカウントメト

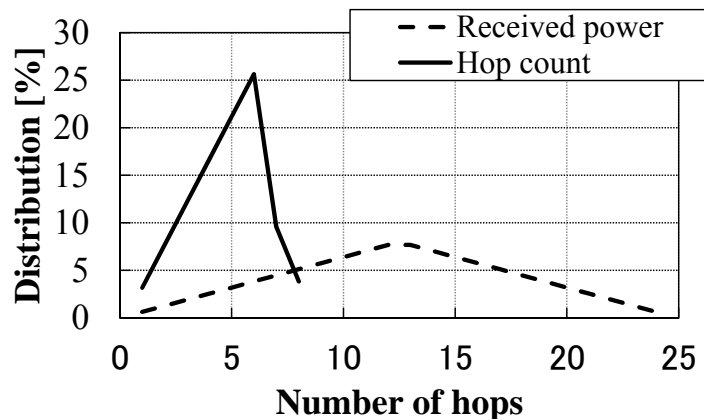


図 5-13 格子状配置・AP 近傍から起動時におけるホップ数分布

リックを用いる場合においては、図 5-4 のフローに従って受信電力の閾値を接続先が決まるまで下げた。そのため、非常に低い受信電力の無線通信端末とのリンクが多くなり、図 5-8 のグラフとなった。

そこで、接続先の探索において接続先が決定できなかった場合、一定時間の後に再度接続先の探索を実施するシナリオにより、同様の計算機シミュレーションを実施した。これにより、他の無線通信端末が先に AP 等と接続を完了していれば、接続先が決定できなかった無線通信端末に対しても接続先の候補が増えるため、特性が改善すると考えられる。

無線通信端末は図 5-1 (a) のようにランダムであると想定し、中央に AP が設置され、無線通信端末の位置に関わらずランダムに起動して接続先の探索を開始することとして、初めての接続先探索時に接続先が決定できない場合には図 5-4 のフローに従って受信電力の閾値を低下させることなく、他の全ての無線通信端末の接続先探索が終了するまで待ち、再度接続先の探索を実施することとした。また、2 度目の接続先探索時にも接続先が決定できなかった場合には、図 5-4 のフローに従って受信電力の閾値を低下させ、遠方の無線通信端末との接続を試みることにした。受信電力に閾値を設けたホップカウントをメトリックとして用いた場合の、マルチホップ無線通信ネットワーク内における最大ホップ数、および最小受信電力をシミュレーションした結果を図 5-14 に示す。無線通信端末台数は 624 であり、図 5-8 (b) に相当する。無線通信端末密度が高い状況下においては、図 5-10 (b) の AP 近傍の無線通信端末から接続先を探索した場合と同程度の特性が得られていることがわかる。一方、正方区画の一辺の長さが 1400 m を超えると、図 5-4 のフローに従って受信電力の閾値を低下させ始めている。この際、急激に最低受信電力が低下し、受信感度未達の無線通信端末が生じているのは、2 度目の接続先探索から図 5-4 のフローを用いている

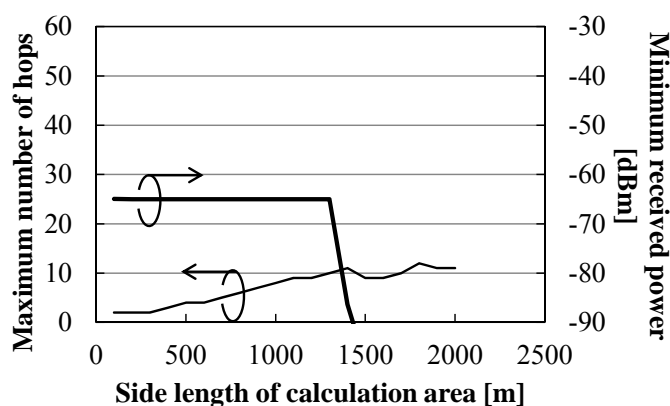


図 5-14 ランダム配置・ランダム起動・再探索動作時の特性

ため、無線通信端末密度がある程度疎になると遠方の通信端末に接続を試みてしまっているためである。これは、複数回の接続先探索まで図 5-4 のフローを用いない、もしくは受信電力の閾値低減量に制限を設けることで改善可能と考えられる。従って、ランダムに接続先を探索した場合においても、探索を複数回繰り返すことで、徐々に、AP 近傍の無線通信端末から探索を開始した特性に近づくことがわかる。

## 5.5 シミュレーション結果の考察

大規模なマルチホップ無線通信ネットワークにおいては、宛先までの経路要求のための制御用パケット伝送が発生すると、これが通信帯域を圧迫する恐れがある。需要家向け無線通信ネットワークにおいては AP をルートとしたツリートポロジが基本となることを利用して、リンク間の情報のみにより AP までの経路を決定する L2 ルーティングが有効と考えられる。5.3 節にて示した計算機シミュレーションでは、受信電力に閾値を設けるとともに AP からのホップカウントを利用することで、効率的に L2 ルーティングを実現可能であることを示した。また、電波伝搬状態の悪いリンクがあると、無線 LAN などの高速無線通信方式においてはマルチレート制御により送信レートを下げるため、低い送信レートにおけるパスの伝送特性によりエンドツーエンドの伝送特性が低下する。従って、各リンクはなるべく同一の伝送特性となることが望ましいが、上記 L2 ルーティングはリンク間の特性を同一にすることにも有効であることを示した。なお、リンク間の特性が大きく異なるのは高速無線通信方式を適用したためであり、例えば IEEE 802.15.4g など、単一変調方式の低速無線通信方式の場合には、マルチパス環境により多少の差はあるが、受信感度まで伝送特性は同一と考えることができる。従って、ここで議論したような問題は生じない。

5.3.2 項では、図 5-11 において最低受信電力が $-65$  dBm となる場合の、マルチホップ無線通信ネットワーク内における最大ホップ数を示した。これによると、無線通信端末数が 120 台の時は 4.6 ホップ、624 台の時は 9.5 ホップ、1224 台の時は 13.1 ホップである。最低受信電力が $-65$  dBm であることから、図 4-1 より本特性は伝搬距離が 50 m の場合に相当する。そこで、中継区間が 50 m 時のホップカウントに対する TCP スループット、および RTT の実験式 (3)、(4) を用いると、無線通信端末数が 120 台の時の最低 TCP スループットは 3.4 Mbps、RTT の最大値は 2.4 ms が得られることがわかる。同様に、無線通信端末数が 624 台時の最低 TCP スループットは 1.5 Mbps、最大 RTT は 4.6 ms、1224 台時の最低 TCP スルー

プットは 1.1 Mbps, 最大 RTT は 6.3 ms と算出される。このように, 大規模なマルチホップ無線通信ネットワークにおける最大ホップ数等を計算機シミュレーションにより求め, 小規模なマルチホップ無線通信ネットワークにおける基礎的な伝送実験結果に基づき, 大規模なマルチホップ無線通信ネットワークの伝送特性を見積もることが可能となる。また, 本計算機シミュレーションにおいては, 各リンクの受信電力, 各無線通信端末から AP までの中継経路などがわかるため, 各無線通信端末からのデータを集約するために要する時間の見積もりや, 制御信号伝送に対する所要伝送遅延の満足可否判定なども可能となる。実験式の適用においては, AP 側からのデータ送信要求に応じて特定の通信端末がデータを送信するポーリング型を想定し, システム内の電波干渉や隠れ端末問題等の影響がない場合であることを注意が必要である。

## 5.6 需要家向け高速マルチホップ無線通信ネットワーク設計における課題

需要家向け高速マルチホップネットワークは, デマンドレスポンスやリアルタイム料金などによるピーク電力の低減, PV 等分散形電源の適正管理, さらには配電系統管理や地域単位のエネルギー管理など, 将来の電力系統における各種課題を通信技術によりサポートする際に必要となると想定している。現在本格導入の検討が進められているスマートメータ用無線通信ネットワークの次世代版と位置付けると, 今後 10~20 年後が本格導入時期になると考えられる。

このような需要家向け高速マルチホップ無線通信ネットワークは, 高速通信を実現するための各種技術を適用しているがゆえに, 現在のスマートメータ用無線通信ネットワークでは想定されない様々な課題がある。以下では, 本論文における検討結果から明らかになった課題を中心に, 需要家向け高速マルチホップ無線通信ネットワークの設計における課題をまとめる。

### 5.6.1 電波伝搬に関わる課題

需要家向けマルチホップ無線通信ネットワークにおいては, スマートメータとして通信端末が設置されることを想定すると, 家屋の壁際に無線装置が設置されることになる。また, 一般的にメータ高は 2 m 前後の場合が多く, これらがマルチホップネットワークを構築する場合, 家屋の遮蔽影響が支配的になる。家屋の遮蔽を考慮した電波伝搬特性をシミュレーションするためにはレイトレースシミュレーションが有効と考えられるが, 需要家

向けマルチホップ無線通信ネットワークのように、集約局あたり数百台の通信端末が接続される環境を想定すると、これらの電波伝搬環境シミュレーションにレイトレース法を適用することは計算時間の観点から困難と考えられる。レイトレース法において、建物の高さ・形状は考慮しつつ、主要な伝搬パスを簡易に抽出し、計算時間を大幅に削減可能なレイトレースシミュレーション手法の開発が望まれる。

本論文では、4.2.1 項において、家屋一軒当たりの平均的な遮蔽損失が約 15 dB であることを示した。これを基に、隣接家屋間リンクの概略設計が可能となる。また、文献[58]においては、スマートメータ用無線通信の簡易な電波伝搬モデルを、実測値をベースに開発している。このモデルでは送受信間の建物の個数と距離のみをパラメータとしており、非常に簡易ではあるが、大規模な需要家向け無線通信ネットワークの概略設計には有効と考えられる。このような簡易な電波伝搬モデルと、レイトレース法のような詳細なシミュレーション手法を設計用途に応じて使い分けることが重要である。

### 5.6.2 無線 LAN 機能に関わる課題

無線 LAN に限らず、高速な無線装置においては、無線通信端末の移動に伴う通信の継続性を維持しつつ、スループットを最大化するためにマルチレート制御機能が実装されている。4.4 節にて示したように、マルチレート制御方式では各 MCS における PER を観測し、一定の packets 損失を許容しつつ送信レートを決定している。そのため、マルチレート機能を用いる場合には packets 損失が発生しやすく、これに伴い特性が低下していることが明らかになった。PER 観測結果から使用可能と判断される送信レートより一つ低い送信レートを使用するだけで、伝送特性が大幅に向上することがわかったため、このような送信レート制御方式を開発することが望ましい。

また、無線方式を使用する際には、常にセキュリティの問題が注目される。特に無線 LAN は汎用技術であり、広く一般に使用されているため、傍受、なりすまし、DoS (Denial of Service) 攻撃などが懸念される。傍受に対しては、Wi-Fi アライアンスにおいて、IEEE 802.11i に準拠して標準化されている WPA2/AES による暗号化に相当する技術を適用することが必須である。なりすましに関しては、各無線通信端末に対して IEEE 802.1X 等による認証機能を実装することなどが必要となる。一方、DoS 攻撃は、スマートメータ付近で強力な電磁雑音を発生させるなど、無線通信を意図的に妨害することを含み、これを技術的に防ぐことは不可能である。他の無線システムからの同一チャネル間干渉を含み、DoS 攻撃等に対して

は、これをいち早く検知することが重要と考えられる。そのためには、無線通信の状態からマルチホップ無線通信ネットワークのリンク状態を推定する手法[59][60]の需要家向け無線通信ネットワークへの適用などを検討する必要がある。

需要家向けマルチホップ無線通信ネットワークにおいては、多数の通信端末がデータを送信するとともに、これらの中継するために常時多数の通信端末が通信状態となることが予想される。この際、各通信端末の消費電力が1Wと想定すると、通信端末が1000万台あれば1MWと小型発電所の定格出力並になるため、通信端末および通信ネットワークの低消費電力化も重要な課題である。マルチホップ無線通信システムにおいてはウェイクアップとスリープ状態を繰り返すことで低消費電力化を実現することが可能であるが、電力系統の事故除去など緊急時における通信が重要なアプリケーションの一つと考えられる将来の電力系統への適用においては、中継動作を担保しつつ低消費電力化を実現することが重要となる。文献[61]においては、中継動作に影響しない通信端末を適切に選択しスリープ状態とすることで、ネットワーク全体としての低消費電力化を実現する手法が検討されている。

本論文において高速無線通信方式の一つとして評価の対象とした無線LANは汎用的な技術であり、無線通信システムの開発コスト低減が見込めるといったメリットがあるが、ISM帯であるため他の無線LANからの干渉により伝送特性が劣化するという問題がある。専用周波数帯を用いるシステムであればこのような問題は生じないが、専用に無線通信システムを開発する必要があり、また、現状の電波法では無線局免許を取得するため、その管理が煩雑となるといった課題もある。周波数帯の専用/共用に関わらず、高速無線通信方式を用いる場合のマルチホップ無線通信ネットワークにおいては上記のマルチレート制御、セキュリティ、低消費電力化などは共通課題である。

### 5.6.3 ルーティングに関わる課題

需要家向けマルチホップ無線通信ネットワークにおいては、集約局あたりに接続する端末数が非常に多いため、中継経路を構築するために経路要求等の制御用パケットをエンドツーエンドで送受信するルーティング法においては、制御用パケットが通信帯域を圧迫する懸念がある。本論文では、5.3節において、エンドツーエンドでの制御用パケットの送受信を要しないL2ルーティングについて検討し、無線LANのようなマルチレート制御を伴う無線方式を用いる場合、受信電力に閾値を設けてAPからのホップカウントをメトリック

する手法の有効性を示した。RPL ではメトリックの実装はベンダ依存ではあるが、基本的な動作はL2ルーティングと同等と考えられるため、本論文における解析結果を参考に、大規模マルチホップ無線通信ネットワークの伝送特性を評価することが可能である。その際における、実装したメトリックによる伝送特性への影響評価手法が必要となる。リンクメトリックの例としては、ホップカウントの他RSSI、データパケットを利用したリンク間スループット推定値、使用した送信レートと再送回数の統計値などが考えられる。

#### 5.6.4 アプリケーションに関わる課題

スマートメータにおいては、自動検針、遠隔開閉制御、ファームウェアの更新などが基本的なアプリケーションとして想定されている。これらの情報を伝送するデータフォーマットに対する国際標準があり、例えば自動検針についてはIEC 62056[62]がある。用いるデータフォーマットに応じて、伝送するデータサイズや項目が異なるため、伝送特性に影響を与える。従って、アプリケーションプロトコルを考慮したマルチホップ無線通信ネットワークの伝送特性評価が重要である[63][64]。また、大規模マルチホップ無線通信ネットワークの伝送特性を評価する際には、実規模の実証試験を行うことが有効であるが、時間、コスト、対策検討後の実装など困難が多い。計算機シミュレーションにより机上検討することが業務効率化のために有効と考えられるが、需要家向け無線通信ネットワークの伝送特性評価ツールには、電波伝搬シミュレーション機能、ルーティング評価機能などの無線通信に関わるシミュレーションとともに、アプリケーションプロトコルを考慮した評価機能が重要となる[65]。計算機シミュレーション結果に基づき、所要伝送遅延、所要データ集約時間、所要データ欠損率等に対する伝送品質評価が効果的と考えられ、これを実現するツールの開発が重要である。また、需要家向け通信ネットワークの実運用後には、端末位置の管理や位置推定、通信障害の早期検出など[66][67]、運用をサポートする機能を有するツール開発も重要と考えられる。

無線通信方式では電波伝搬環境に応じてパケット損失が発生しやすく、MAC層の再送だけでは受信できない場合がある。30分検針値など、即時性を要しないデータについては、アプリケーションレベルでの再送、過去のデータとの連送、複数回の送信などによりデータ到達率が大幅に改善することが考えられる[68]-[70]。データ欠損に対する効率的な補償方法の検討が必要と考えられる。

## 5.7 むすび

本章では、大規模マルチホップ無線通信根とワークの伝送特性を計算機シミュレーションにより評価した結果をまとめた。まず、計算機シミュレーション手法の前提について示した。本計算機シミュレーションにおいては、経路要求のために制御用パケットのエンドツーエンドにおける送受信を要しないL2ルーティングを対象とすることとし、接続先を決定するメトリックとして受信電力に閾値を設けたAPからのホップカウントを評価の対象とした。受信電力のみをメトリックとして用いた場合との比較を通じ、ホップカウントのメトリックではマルチホップ無線通信ネットワーク内における最大ホップ数を効果的に低減するとともに、電波伝搬状態の悪いリンクにおいて無線LANのマルチレート制御機能により低い送信レートとなる状況を防ぎ、全てのリンクを同程度の状態にすることが可能であることを示した。また、AP近傍から接続先を探索するように制御する場合に、無線通信端末数や無線通信端末密度によらず効率的なネットワークトポロジが構築可能であることを示すとともに、ランダムに接続先を探索した場合においても、複数回探索を繰り返すことでこれと同等のネットワークトポロジが構築できることを示した。さらに、小規模マルチホップ無線通信ネットワークの実験結果と、大規模マルチホップ無線通信ネットワークのシミュレーション結果より、大規模マルチホップ無線通信ネットワークにおけるエンドツーエンドにおける最小限のスループットや最大限の伝送遅延を見積る例を示した。最後に、需要家向け高速マルチホップ無線通信ネットワークの設計における課題を、電波伝搬、無線LAN機能、ルーティング、アプリケーションの観点から整理した。

## 第6章 結論

本論文では、需要家向け高速マルチホップ無線通信ネットワークに関する研究として、将来の電力システムにおける需要家向け通信ネットワークに対して、マルチホップ無線 LAN の適用を想定した検討結果をまとめた。

第 1 章では、本研究の背景と論文構成をまとめた。

第 2 章では、現在本格導入が検討されているスマートメータの概略を述べるとともに、スマートメータにより実現される機能についてまとめた。また、将来の電力システムの想定される構成を示すとともに、PV 出力変動に伴う配電システム管理の課題、エネルギーの最適利用を実現するための各家庭から地域単位におけるエネルギー管理システムや、既存の電力システムとの協調、またこれらを実現するにあたり求められる通信ネットワークの高速化についてまとめた。

第 3 章では、需要家向け通信ネットワークを構成するための要素技術として、通信方式、およびルーティング方式についてまとめた。まず、需要家向け通信ネットワークの構成を示すとともに、適用が想定される各通信方式の概略をまとめ、需要家向け通信ネットワークを構築するにあたっての各通信方式の得失を示した。次に、ルーティング方式として、リアクティブ型とプロアクティブ型のそれぞれについて標準化された主な方式の概要を示すとともに、需要家向け通信ネットワークへの適用が想定されるルーティング方式として RPL の概略をまとめた。最後に、本論文では、通信方式としてマルチホップ無線 LAN、ルーティング方式として L2 ルーティングを検討の対象とすることを述べた。

第 4 章では、需要家向け高速無線通信ネットワークを構築する技術として、IEEE 802.11 技術を用いたマルチホップ無線通信ネットワークに関する実験評価結果をまとめた。まず、中継距離の短い屋内環境、中継距離の長い屋外環境における基礎的な伝送特性を示し、面的に通信端末を配置した場合の課題について、実験結果を踏まえて述べた。次に、需要家向け無線通信ネットワークにおいて、電波伝搬に影響を与える主要な地物である家屋につ

いて、実験用家屋を対象とした遮蔽特性を実験評価した結果、家屋による平均的な遮蔽量が 15 dB であることを示した。また、オープンサイトにおいてマルチホップ無線通信機器の基礎伝送特性を評価する際に、簡易に家屋による遮蔽を模擬するために実験機材として、ガルバリウム鋼板を用いた模擬遮蔽板を作成し、この遮蔽特性を評価した結果、家屋の遮蔽を模擬するために十分な特性が得られることを示した。さらに、電気的特性が不明であり、一般的に家屋の壁材として用いられるラス網について、レイトレースシミュレーション結果をベースに電気的特性を推定し、これを用いることでラス網による影響を考慮した電波伝搬シミュレーションが可能であることを示した。次に、需要家向け通信ネットワークに無線方式を用いる際に問題となると考えられる電波干渉の影響について、マルチホップ無線通信ネットワークのごく近傍で同一チャネル干渉を発生させた場合に関する実験結果を示し、伝送遅延の増加はあるものの通信自体は可能であるため、伝送遅延に関しては干渉のない場合の遅延時間に対し約 1.7 倍のマージンを見込んで設計する方法についてまとめた。最後に、高速無線通信方式に実装されているマルチレート制御機能において、高い送信レートを利用するために生じるパケット損失が伝送特性に与える影響を実験評価した結果を取りまとめるとともに、伝送特性が急激に悪くなる送信レートより少し遅い送信レートを積極的に使用することで、TCP スループットを低下させることなく、伝送遅延を大幅に改善可能であることを示した。

第5章では、大規模マルチホップ無線通信根とワークの伝送特性を計算機シミュレーションにより評価した結果をまとめた。まず、計算機シミュレーション手法の前提について示した。本計算機シミュレーションにおいては、経路要求のために制御用パケットのエンドツーエンドにおける送受信を要しない L2 ルーティングを対象とすることとし、接続先を決定するメトリックとして受信電力に閾値を設けた AP からのホップカウントを評価の対象とした。受信電力のみをメトリックとして用いた場合との比較を通じ、ホップカウントのメトリックではマルチホップ無線通信ネットワーク内における最大ホップ数を効果的に低減するとともに、電波伝搬状態の悪いリンクにおいて無線 LAN のマルチレート制御機能により低い送信レートとなる状況を防ぎ、全てのリンクを同程度の状態にすることが可能であることを示した。また、AP 近傍から接続先を探索するように制御する場合に、無線通信端末数や無線通信端末密度によらず効率的なネットワークトポロジが構築可能であることを示すと同時に、ランダムに接続先を探索した場合においても、複数回探索を繰り返すことでこれと同等のネットワークトポロジが構築できることを示した。さらに、小規模マ

ルチホップ無線通信ネットワークの実験結果と、大規模マルチホップ無線通信ネットワークのシミュレーション結果より、大規模マルチホップ無線通信ネットワークにおけるエンドツーエンドにおける最小限のスループットや最大限の伝送遅延を見積る例を示した。最後に、需要家向け高速マルチホップ無線通信ネットワークの設計における課題を、電波伝搬、無線 LAN 機能、ルーティング、アプリケーションの観点から整理した。

本論文では、高速マルチホップ無線通信ネットワークに関して、実験評価、および計算機シミュレーション評価結果を数多く示している。また、高速マルチホップ無線通信ネットワークに対する L2 ルーティングに関して、受信電力に閾値を設けた AP からのホップカウントが有効であることを示している。将来の電力系統を安定に維持するとともにエネルギーの有効利用を実現するための需要家向け高速マルチホップ無線通信ネットワークの構築に、本論文の知見が活きると幸いである。

## 謝 辞

本論文をまとめるにあたり，懇切丁寧な御指導を賜りました東京工業大学大学院理工学研究科国際開発工学専攻高田潤一教授に謹んで感謝の意を表します。同じく，大変有益な議論，御助言を頂きました同専攻高橋邦夫教授，山下幸彦准教授，同研究科電気電子工学専攻荒木純道教授，同研究科通信情報工学専攻府川和彦准教授に深く感謝いたします。また，有意義な議論を頂きましたにも金ミンソク助教をはじめとする高田研究室の諸兄にも深謝いたします。

本研究は，筆者が一般財団法人電力中央研究所において実施した内容を取りまとめたものであり，本研究を遂行するにあたり多大なる助言，協力を頂きました同研究所システム技術研究所井上俊雄所長，芹澤善積副所長，黒野正裕通信システム領域リーダー，大場英二上席研究員，および関係各位に深く御礼致します。

最後に，常に協力を惜しまず，本論文作成に理解を示してくれた妻明子，娘永萌，惺子に敬意を表するとともに，最大なる感謝を捧げます。

## 参考文献

- [1] Kenichi Mase, Masakazu Sengoku, and Shoji Shinoda, “A Perspective on Next-Generation Ad Hoc Networks –A Proposal for an Open Community Network–,” IEIEC Trans. Fundamentals, Vol. E84-A, No. 1, pp. 98-106, Jan. 2001
- [2] 間瀬憲一, 斎藤卓也, 高靖, “電気自動車を利用する大規模災害時の通信確保及び被災地モニタリング,” 信学論 B, Vol. J96-B, No. 6, pp. 562-571, Jun. 2013
- [3] 萩生田研一, 宮下充史, “長距離マルチホップ無線 LAN による災害復旧支援通信システムの基礎検討,” 電力中央研究所研究報告 R13001, Aug. 2013
- [4] 池川洋二郎, 細谷真一, “斜面モニタリング用の無線センサネットワークの開発と検証,” 電力中央研究所研究報告 N07035, May 2008
- [5] 宮下充史, 星康一, 齋藤潔, 矢花修一, “配電設備を対象とした災害時の早期異常検知システムの提案 (その 2) –配電柱間マルチホップ通信システムの試作と評価–,” 電力中央研究所研究報告 R08007, May 2009
- [6] 資源エネルギー庁 総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会, エネルギー基本計画に対する意見, Dec. 2013
- [7] 経済産業省, スマートメータ制度検討会報告会報告書, Feb. 2010
- [8] 資源エネルギー庁 電力・ガス事業部, “スマートメーターの導入促進に伴う課題と対応 (案),” 第 13 回スマートメータ制度検討会, Nov. 2013
- [9] 芹澤善積, “次世代電力網のための情報通信技術,” 電気評論 2012 年夏季増刊号, Vol. 576, 2012
- [10] 経済産業省, 長期エネルギー需給見通し, May 2008
- [11] 八太啓行, “太陽光発電出力予測を用いた需要地系統の翌日運用計画法–需給一体化制御による余剰電力活用効果–,” 電力中央研究所研究報告 R10001, Jul. 2010
- [12] 浅利真宏, 所健一, “需要家機器との連携制御を用いた太陽光発電逆潮流制御方式–予

- 測の不確実性を考慮したヒートポンプ式給湯器の運用計画法-,” 電力中央研究所研究報告 R08025, Aug. 2009
- [13] 上村敏, “住宅用太陽光発電の不均衡大量連系による配電系統の電圧管理への影響,” 電力中央研究所研究報告 R11026, Jun. 2012
- [14] “愛知サイト、京丹後サイト及び八戸サイトの新エネルギー等地域集中実証研究にかかるユースケース作成業務,” 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 平成 23 年度成果報告書, 管理番号 20120000000892, Dec. 2011
- [15] 宮下充史, “電力業界における高信頼制御情報通信によるアプリケーション,” 信学総大, AS-3-1, Mar. 2013
- [16] 岡田有功, 上村敏, 谷口真一郎, 高木道夫, 小林広武, “分散形電源の単独運転検出方式の不感帯回避手法の開発,” 電力中央研究所研究報告 R10040, Aug. 2010
- [17] “需要設備向けスマートグリッド実用化技術,” 電気学会技術報告, No. 1283, May 2013
- [18] 山口順之, 今中健雄, 浅野浩志, “米国における需要反応プログラムの実態と課題,” 電力中央研究所調査報告 Y05028, May 2006
- [19] 宮下充史, 森村俊, 小川理, 木内舞 “需要地系セキュア通信ネットワークの物理網構成と技術課題”, 電力中央研究所調査報告, R10012, May 2011
- [20] 総務省, 平成 25 年版情報通信白書
- [21] IEEE Std 802.16-2009, May 2009
- [22] WiMAX Forum ホームページ, <http://www.wimaxforum.org/>
- [23] IEEE Std. 802.16j-2009, Jun. 2009
- [24] 3GPP ホームページ, <http://www.3gpp.org/>
- [25] 3GPP2 ホームページ, <http://www.3gpp2.org/>
- [26] IEEE Std 802.11-2012, Mar. 2012
- [27] 大和田泰伯, 照井宏康, 間瀬憲一, 今井博英, “マルチホップ無線 LAN の提案と実装,” 信学論 B, Vol. J89-B, No. 11, pp. 2092-2102, Nov. 2006
- [28] 柳生健吾, 萩原淳一郎, 大矢智之, “無線 LAN マルチホップネットワークにおけるスループットの解析および実験,” NTT DOCOMO テクニカルジャーナル, Vol. 16, No. 3, pp. 51-54, Oct. 2008
- [29] IEEE Std 802.15.4-2011, Jun. 2011
- [30] ZigBee alliance ホームページ, <http://www.zigbee.org/>

- [31] IEEE Std 802.15.4g-2012, Apr. 2012
- [32] Wi-SUN alliance ホームページ, <http://www.wi-sun.org/>
- [33] 小野健一, 杉立好正, 奥田悟司, “PHS 自動検針システムの開発-PHS への自動ルーティングプロトコルの実装について-,” OMURON TECHNICS, Vol. 41, No. 1, pp. 50-56, 2001
- [34] “スマートグリッド実証実験「自動検針用無線メッシュネットワーク技術」,” 三菱電機株式会社 2011 年 2 月 16 日ニュースリリース
- [35] IETF ホームページ, <http://www.ietf.org/>
- [36] C. Perkins, E. Belding-Royer and S. Das, “Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing,” IETF, RFC 3561, Jul. 2003
- [37] T. Clausen and P. Jacquet, “Optimized Link State Routing Protocol (OLSR),” IETF, RFC 3626, Oct. 2003
- [38] T. Winter, P. Thubert, A. Brandt, J. Hui, R. Kelsey, P. Levis, K. Pister, R. Struik, JP. Vasseur and R. Alexander, “RPL: IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks,” IETF, RFC 6550, Mar. 2012
- [39] 岡庭勝広, 福永茂, 川本康貴, 野崎正典, 八百健嗣, “日本国内における 920 MHz 帯の ZigBee IP 仕様,” OKI テクニカルレビュー, Vol. 221, No. 80, pp. 70-73, May 2013
- [40] JP. Vasseur, M. Kim, K. Pister, N. Dejean and D. Barthel, “Routing Metrics Used for Path Calculation in Low-Power and Lossy Networks,” IETF, RFC 6551, Mar. 2012
- [41] 米山清二郎, 中野健治, 小林崇裕, “低コストで安定したスマートグリッド通信を実現するスマートメータ用無線メッシュネットワーク通信ユニット,” 東芝レビュー, Vol. 67, No. 7, pp. 28-32, Jul. 2012
- [42] 宮下充史, 黒野正裕, 高田潤一, “マルチホップ無線 LAN の伝送特性に関する基礎検討,” 平成 22 年電気学会電子・情報・システム部門大会予稿集, GS9-2, Sep. 2010
- [43] 細谷良雄監修, 電波伝搬ハンドブック, リアライズ社, 1999
- [44] Michifumi Miyasita and Jun-ichi Takada, “Influence of Multi-rate Control Function on the End-to-End Latency of Multi-hop Wireless LAN,” Proc. of the 27<sup>th</sup> International Conf. on Information Networking (ICOIN) 2013, P2-11, Jan. 2013
- [45] 宮下充史, 高田潤一, “実験用木造家屋を用いた無線 LAN への遮蔽量評価,” 電子情報通信学会短距離無線通信研究会技報, SRW2011-30, Mar. 2012

- [46] 宮下充史, 高田潤一, “オープンサイトにおける遮蔽領域の形成,” 電学論 C, (掲載予定)
- [47] Iperf ホームページ, <http://iperf.ft/>
- [48] 株式会社構造計画研究所ホームページ, <http://www.kke.co.jp/products/raplab/>
- [49] I. Haratcherev, J. Taal, K. Langendoen, R. Ragendijk, and H. Sips, “Automatic IEEE 802.11 Rate Control for Streaming Applications,” Wiley, Wireless Commun. and Mobile Computing, vol. 5, no. 4, pp. 421-437, 2005
- [50] S. Lakshmanan, S. Sanadhya, and R. Sivakumar, “On link rate adaptation in 802.11n WLANs,” Proc. 13th IEEE Intl. Conf. on Computer Communications (IEEE INFOCOM), pp. 366-370, Shanghai, China, Apr. 2011
- [51] J Friedrich, A Frohn, S. Gübner, and C. Lindemann, “Understanding IEEE 802.11n Multi-hop Communication in Wireless Networks,” 9th Intl. Symp. on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks (WiOpt), pp. 321-326, Princeton, USA, May 2011
- [52] N. Saxena, and A. Roy, “A New Channel – Aware Rate Adaptation in High Speed WLANs,” IEICE Trans. Commun., Vol. E92-B, No. 6, pp. 2345-2348, Jun. 2009
- [53] 株式会社東陽テクニカホームページ, <http://www.toyo.co.jp/airmagnet/>
- [54] Mathworks ジャパンホームページ, <http://www.mathworks.co.jp/>
- [55] 宮下充史, 黒野正裕, 高田潤一, “マルチホップ無線 LAN の伝送特性および経路構築に関する一考察,” 電子情報通信学会短距離無線通信研究会技報, SRW2010-24, Dec. 2010
- [56] 宮下充史, 黒野正裕, 高田潤一, “L2 ルーティングを用いたマルチホップ無線 LAN の伝送特性向上手法,” 電気学会通信研究会予稿集, CMN-11-007, Jan. 2011
- [57] 宮下充史, 黒野正裕, 高田潤一, “L2 ルーティングを用いた大規模マルチホップ無線 LAN の伝送特性に関する考察,” 電学論 C, Vol. 131, No. 10, pp. 1737-1744, Oct. 2011
- [58] 土屋弘昌, 三上満, 黒野正裕, “スマートメータ用無線通信回線における電波伝搬特性のモデル化,” 平成 25 年電気学会電子・情報・システム部門大会予稿集, GS4-2, Sep. 2013
- [59] Takahiro Matsuda, Masaaki Nagahara, and Kazunori Hayashi, “Link Quality Classifier with Compressed Sensing Based on l1-l2 Optimization,” IEEE Comm. Letters, Vol. 15, Issue 10, pp. 1117-1119, Oct. 2011

- [60] Yongyi Mao, Frank R. Kschischang, Baochun Li, and Subbarayan Pasupathy, "A Factor Graph Approach to Link Loss Monitoring in Wireless Sensor Network," IEEE Journal on Selected Area in Communications, Vol. 23, No. 4, pp. 820-829, Apr. 2005
- [61] 柳原健太郎, 野崎正典, "スマートコミュニティ向け無線マルチホップ通信における消費電力削減技術," OKI テクニカルレビュー, 第 219 号, Vol. 79, No. 1, pp. 16-19, Apr. 2012
- [62] IEC: "Electricity metering – Data exchange for metering reading, tariff and load control –Part 53: COSEM application layer," IEC 62056-53 Ed. 2, 2006
- [63] 宮下充史, 大谷哲夫, "需要家向け通信における伝送特性評価-自動検針用国際標準プロトコルと無線 LAN による応答時間の評価-, " 電力中央研究所研究報告, R12004, Jun. 2011
- [64] 宮下充史, 大谷哲夫, "IEEE 802.15.4g によるスマートメータ用無線通信の基礎伝送特性," 電気学会電子・情報・システム部門大会予稿集, GS4-1, Sep. 2013
- [65] 宮下充史, 大谷哲夫, "920 MHz 帯マルチホップ無線と IEC 62056 によるスマートメータ用通信に関する基礎検討," 電力中央研究所研究報告, R12004, Mar. 2013
- [66] 宮下充史, 黒野正裕, 大谷哲夫, 遊佐博幸, "設備保全用無線センサネットワークにおける端末位置推定に関する一検討," 電子情報通信学会高信頼制御通信研究会技報, RRRRC 2013, Jul. 2013
- [67] 宮下充史, 黒野正裕, "設備保全フィールドセンサネットワークの構成手法 (その 3) –無線センサノードの位置推定に関する基礎検討-, " 電力中央研究所研究報告, R13005, Jan. 2014
- [68] 宮下充史, 土屋弘昌, 黒野正裕, 杉森淳一, 大嶋慶一, 宇野真, "水力発電所内センサの無線化に関する一検討," 電学全大講演論文集, Vol. 2011, No. 3, pp. 36, Mar. 2011
- [69] 宮下充史, 土屋弘昌, 黒野正裕, 奥野光雄, 奥出邦夫, 安藝克典, 古川剛, 内山忠, "水力発電所内センサの無線化に関する一検討 (その 2) –通信特性の簡易安定化手法-, " 電学全大講演論文集, Vol. 2012, No. 3, pp. 8, Mar. 2012
- [70] Michifumi Miyashita, Hiroaki Tsuchiya, Masahiro Kurono, Mitsuo Okuno, Kunio Okude, Katsunori Aki, Go Furukawa and Tadashi Uchiyama, "A Study on Applicability of Wireless Sensor System to Hydroelectric Plant," Proc. of the International Conference on Electrical Engineering (ICEE) 2012, Jul. 2012

## 本研究に関連した学会発表論文

### 【論文】

- 宮下充史, 黒野正裕, 高田潤一, “L2 ルーティングを用いた大規模マルチホップ無線 LAN の伝送特性に関する考察,” 電学論 C, Vol. 131, No. 10, pp. 1737-1744, Oct. 2011

### 【レター】

- 宮下充史, 高田潤一, “オープンサイトにおける遮蔽領域の形成,” 電学論 C, (掲載予定)

### 【国際会議】

- Michifumi Miyasita and Jun-ichi Takada, “Influence of Multi-rate Control Function on the End-to-End Latency of Multi-hop Wireless LAN,” Proc. of the 27<sup>th</sup> International Conf. on Information Networking (ICOIN) 2013, P2-11, Jan. 2013

### 【研究会・全国大会】

- 宮下充史, 黒野正裕, 高田潤一, “マルチホップ無線 LAN の伝送特性に関する基礎検討,” 平成 22 年電気学会電子・情報・システム部門大会予稿集, GS9-2, Sep. 2010
- 宮下充史, 黒野正裕, 高田潤一, “マルチホップ無線 LAN の伝送特性および経路構築に関する一考察,” 電子情報通信学会短距離無線通信研究会技報, SRW2010-24, Dec. 2010
- 宮下充史, 黒野正裕, 高田潤一, “L2 ルーティングを用いたマルチホップ無線 LAN の伝送特性向上手法,” 電気学会通信研究会予稿集, CMN-11-007, Jan. 2011
- 宮下充史, 高田潤一, “実験用木造家屋を用いた無線 LAN への遮蔽量評価,” 電子情報通信学会短距離無線通信研究会技報, SRW2011-30, Mar. 2012

- 宮下充史, 高田潤一, “マルチホップ無線 LAN における伝送遅延抑圧について,” 電子情報通信学会高信頼制御通信研究会技報, RRRC 2012-14, Oct. 2012