

卒業論文 2011年度(平成23年)

集中型 WiMAX マルチキャスト性能測定システムの設計と  
開発

慶應義塾大学 環境情報学部

能島 良和

## 集中型 WiMAX マルチキャスト性能測定システムの設計と開発

近年、スマートフォンやモバイル PC 等の普及に伴い、移動体通信における ALL-IP 化、電波帯域利用の効率化、最適化が望まれている。Mobile WiMAX はそのニーズに応える形で登場した技術の一つである。Mobile WiMAX では複数の受信ノードに対して同報的にデータを送信するために WiMAX MCBCS という無線レイヤでのマルチキャストが規格化されており、本研究で利用した藤沢地域 WiMAX ネットワークにおいて利用可能となっている。

IP ネットワークにおいては、IP 層が下位の層を抽象化することで、上位の層が下位層の状態を意識せずに通信することを可能にしているが、移動体通信のように環境要因によって品質が大きく変動する通信技術を下位層に利用する場合、アプリケーションが下位層の状態を理解し、適応的に動作することで、通信効率が良くなることが期待できる。こうしたクロスレイヤ通信制御の技術開発のためには、IP 層と下位層の性能を同時にかつ複数端末を扱う場合でも集中的に測定するシステムが必要である。

そこで、本研究では、WiMAX 層の状態を計測し、IP 層での通信の品質と比較することを可能にするシステムの設計と開発を行った。計測する項目は、実効スループット、欠落パケット数、連続パケット欠落数、ジッタ、RSSI、CINR、GPS による位置情報である。IPv6 マルチキャストに対応することで、IPv6 マルチキャストにマップされた藤沢地域 WiMAX の WiMAX マルチキャストの計測にも対応している。実装したシステムは、藤沢地域 WiMAX ネットワークで実際に運用して、その計測性能および機能を確認した。計測実験により、妨害波の混入による CINR 値の変化がパケットの欠落率に影響することや、WiMAX MCBCS でのマルチキャスト通信において、各受信ノードにおける受信パケットの欠落パターンは、相関関係にないことなどを定量化した。このように、本システムを用いると、無線レイヤに起因する IP 通信性能への影響を明らかにすることが出来き、クロスレイヤ通信技術の開発・検証を効率的に進めることが出来る。

### キーワード

1. WiMAX , 2. multicast, 3. 計測, 4. クロスレイヤ

<p>Centralized Performance Measurement System of WiMAX Multicast System</p>
---

Rapid growth and proliferations of smartphones and mobile PCs enhance the needs for all-IP mobile networks and the improvement of bandwidth efficiency. Mobile WiMAX is the technology developed to resolve this needs. In Mobile WiMAX, WiMAX MCBCS, which enables multicast communications among selected mobile stations group, is standardized. In Fujisawa WiMAX, which this research used as experiment environment, WiMAX MCBCS is ready to use.

IP layer works as an abstraction layer and enables upper layer to ignore the difference among lower layers. Application's adaptive behavior based on lower layers' state improves application's layer data transmission performance. This encourages many cross-layer communication technology development. In the course of development and evaluation of a cross-layer technology, a performance measurement system which can simultaneously measure the lower layer as well as IP layer is needed. Therefore, we developed WiMAX performance measurement system that measures WiMAX layer's state and IP layer's communication quality in both unicast and multicast. The developed system features simultaneous acquisition of effective throughput, packet loss rate, burst packet loss, jitter together with WiMAX RSSI and CINR. We can control measurement by a centralized management server node even for multiple mobile stations. The developed system is used in Fujisawa WiMAX to evaluate its performance and function. The degradation of packet loss due to CINR and the correlation of mobile station packet loss pattern subjected to WiMAX MCBCS were quantified. Those results reveal that the developed measurement system is effective to the development of cross layer mobile communications system.

Keywords :

1 . WiMAX, 2. Multicast, 3. Performance measurement 4. Cross layer

Keio University , Faculty of Environment and Information Studies

Yoshikazu Nojima

# 目次

<b>第1章</b>	<b>序論</b>	<b>1</b>
1.1	研究背景	1
1.2	本研究の目的	2
1.3	本論文の構成	2
<b>第2章</b>	<b>研究対象</b>	<b>3</b>
2.1	WiMAX	3
2.1.1	Mobile WiMAX	3
2.1.2	WiMAXの技術的特徴	4
2.1.3	地域WiMAX	4
2.1.4	藤沢地域WiMAX	4
2.1.5	WiMAX MCBCS	5
2.1.6	Reliable MCBCS	6
2.2	RACOWプロジェクト	6
2.3	IPv6 multicast	6
2.4	藤沢地域WiMAXにおけるWiMAXマルチキャスト	7
<b>第3章</b>	<b>既存研究</b>	<b>8</b>
3.1	ネットワーク測定ツールの分類	8
3.2	sperf	8
3.2.1	本研究との関係	8
3.3	RTCP RRパケットを利用した計測	9
3.3.1	本研究との関係	9
<b>第4章</b>	<b>設計</b>	<b>10</b>
4.1	WiMAXネットワーク測定ツールへの要求機能	10
4.1.1	パケット欠落パターンの計測	10
4.1.2	実験経過の出力	11
<b>第5章</b>	<b>実装</b>	<b>12</b>
5.1	概要	12
5.2	動作環境	12
5.2.1	送信ノード	12
5.2.2	CPE SNMP Agent	14

5.2.3	受信ノード	14
5.3	ストリームのトラフィックを模したダミーデータの送信	14
5.4	ダミーデータ受信時の状況記録	14
5.4.1	電波環境の記録	15
5.4.2	GPS 情報の記録	15
5.5	受信結果の収集	15
5.6	計測結果の計算方法	16
5.6.1	一秒毎平均の結果	16
5.6.2	RSSI、CINR 毎の結果	16
5.6.3	バーストパケット欠落率	16
5.6.4	複数受信ノード間の相関関係	16
5.7	結果の GUI 表示	17
5.7.1	各受信ノードの受信結果の経時変化グラフ	17
5.7.2	RSSI 値、CINR 値毎のパケット欠落率グラフ	17
5.7.3	マップへのオーバーレイ表示	17
<b>第 6 章</b>	<b>実験</b>	<b>21</b>
6.1	同軸ケーブル接続による実験環境での試験	21
6.1.1	実験環境	21
6.1.2	実験結果	21
6.1.3	結果の考察	22
6.2	信号レベルの変化が与える影響の評価	28
6.2.1	実験結果	28
6.2.2	結果からの考察	28
6.3	妨害波が与える影響の評価	29
6.3.1	実験環境	29
6.3.2	実験結果	29
6.3.3	結果からの考察	29
6.4	妨害波の影響によるパケット欠落の相関関係の計測	31
6.4.1	実験環境	31
6.4.2	実験結果	31
6.4.3	結果からの考察	31
6.5	実無線環境（静止環境）での計測試験	35
6.5.1	実験環境	35
6.5.2	実験結果	35
6.5.3	結果からの考察	35
6.6	実無線環境（移動環境）での計測試験	38
6.6.1	実験環境	38
6.6.2	実験結果	38
6.6.3	実験結果の考察	38

6.7	本章のまとめ	42
第7章	結論	43
7.1	結論	43
7.2	今後の課題	43
	謝辞	46

# 目 次

2.1	WiMAX 端末機器、サイネージ	5
5.1	WiMAX ネットワーク性能測定ツールのビルディングブロック図	13
5.2	JRC 製小型 CPE NJT-576	13
5.3	RTP パケットヘッダ	14
5.4	RSSI,CINR を表す OID の MIB 定義	18
5.5	GPS レシーバー (BU-353)	19
5.6	受信結果交換用データ型	19
5.7	ジッタの計算コード (C#)	19
5.8	結果の GUI 表示	20
6.1	同軸ケーブル接続での計測試験構成	22
6.2	信号レベルの変化が与える影響	28
6.3	妨害波を加えた場合の CINR とスループットの変化	29
6.4	信号発生器を加えた計測環境構成	31
6.5	各ノードの RSSI、CINR、スループット	32
6.6	基地局と計測地点の位置関係	35
6.7	移動中の RSSI、CINR、スループットの変化	38
6.8	計測結果の地図へのオーバーレイ	39

# 表 目 次

6.1	各ノードのスペック	21
6.2	200packets/sec での受信ノード A における受信結果	23
6.3	200packets/sec での受信ノード B における受信結果	24
6.4	200packets/sec での受信ノード C における受信結果	25
6.5	100packets/sec での受信ノード A における受信結果	26
6.6	100packets/sec での受信ノード B における受信結果	26
6.7	100packets/sec での受信ノード C における受信結果	27
6.8	200packets/sec での受信ノード A,B,C のパケット欠落パターンの相関係数	27
6.9	妨害波を加え、CINR を変化させた場合の受信結果 (抜粋)	30
6.10	妨害波を加え、CINR を低く抑えた場合の受信ノード A の受信結果 (抜粋)	32
6.11	妨害波を加え、CINR を低く抑えた場合の受信ノード B の受信結果 (抜粋)	33
6.12	妨害波を加え、CINR を低く抑えた場合の受信ノード C の受信結果 (抜粋)	33
6.13	妨害波によって CINR を下げた場合のパケット欠落パターンの相関係数	34
6.14	実無線環境 (静止環境) での計測結果 (抜粋)	36
6.15	実無線環境 (静止環境) での連続欠落パケットの一覧	37
6.16	移動環境下での受信ノード A の受信結果 (抜粋)	40
6.17	移動環境下での受信ノード B の受信結果 (抜粋)	40
6.18	移動環境下での受信ノード C の受信結果 (抜粋)	41
6.19	移動環境下でのパケット欠落パターンの相関係数	41

# 第1章 序論

## 1.1 研究背景

近年、スマートフォンやモバイルPCの普及が進んでいる。これに伴い、移動体通信におけるトラフィックが急増しており、電波利用の高度化、最適化が望まれている。このため、Mobile WiMAX や LTE に代表される、高速移動体通信技術が次々とサービスインしている。著者が学んでいる慶應義塾大学湘南藤沢キャンパス周辺において、慶應義塾大学を中心に、現在藤沢地域 WiMAX という地域 WiMAX サービスが行われており [1]、昨年度は RACOW プロジェクト [2] と呼ばれるプロジェクトも行われた。藤沢地域 WiMAX では、好条件下では、数 Mbps の実効転送速度を実現し、動画や音楽のストリーミング再生をするのに十分な転送速度を実現するが、伝送媒体が無線であることから、周辺の電波環境の影響を受けやすいという特徴がある。また一方で、動画や音楽のストリーミングを行う場合、同時に視聴するユーザーが多い場合は、放送型の配信を行った方が無線帯域の利用という観点から効率が良く、例えば WiMAX においては WiMAX MCBCS という技術によって無線レイヤでのマルチキャストが規格化されている [3]。RACOW プロジェクトにおいては、無線 (WiMAX) レイヤでのマルチキャストに IP Multicast トラフィックをマッピングする WiMAX MCBCS とは別に、無線レイヤでのユニキャストに IP Multicast をマッピングする方式の提案 (Reliable MCBCS) [4] が行われ、実際に基地局、端末への実装が行われ、計測実験が行われた。この際、ストリーム伝送能力の計測の為に、sperf [5] というツールを利用した。sperf では、単位時間当たりのスループットやジッタ、パケット欠落数などを計測することが出来る。しかし sperf は、汎用的なストリームの特性の計測ツールであり、電波環境や受信端末の位置情報などを同時に計測できないため、Mobile WiMAX を対象とした実験に用いにくいという問題があった。一例として、計測実験において、実験開始前に端末との通信で使用されている変調方式を記録し、その上でトラフィックを流すという実験が行われたが、その変調方式から想定される理論上のスループットを大幅に上回るレートでデータ転送が行えたケースがあった。これは、データ転送中の環境変化により、実際に適用されている変調方式が効率の良いものに引き上げられたことによるものと推測されている [6]。計測中の変調方式の変化も記録できた方が望ましい。また、sperf の仕様上、計測結果は受信端末側でしかわからず、マルチキャストで複数台の受信端末がある場合、計測後の結果の収集を行うための人員の配置が必要であり、実運用では問題となる場合がある。WiMAX ネットワークのネットワーク性能測定には、計測中の RSSI、CINR 値や変調方式の変化なども同時に記録出来る、WiMAX ネットワークに特化した自動化された計測ツールが望まれる。

さて、藤沢地域 WiMAX ネットワークにおいては、マルチキャスト通信が可能である

と述べたが、マルチキャスト通信下では一つの送信ノードが送信したパケットを多数の受信ノードが受信する構成となるため、パケットの欠落時に再送制御を行うことが難しく、特に一定の再生ペースを保つ必要がある動画や音楽のストリーミング再生においては、再送制御ではなく、前方誤り訂正や誤り隠蔽によってパケットの欠落のカバーが行われる [7]。しかし、一口にパケットの欠落と言っても、様々なパターンが考えられる。例えば、同数のパケットが欠落する場合であっても、散発的に欠落する場合と、集中的に欠落する場合では、例えばフレーム間予測を行った動画ストリームを流した場合に、視聴体験に大きな差が出ることが考えられる。これらのパケットの欠落をカバーする手法を選択するにあたっては、どのようなパターンでパケットが欠落するかを把握することがより効率的なパケットの転送に必要である。IP(Internet Protocol) ネットワークにおいては、IP レイヤが下位のレイヤを抽象化することによって上位のプロトコルが IP レイヤより下のレイヤを意識せずに通信することを可能にしたが、レイヤーバイオレーション、この場合は WiMAX 層の状態をアプリケーション層が理解し適応的に動作した方が、簡便さは失われるにせよ効率は良くなることが期待される。

## 1.2 本研究の目的

本研究では WiMAX ネットワークにおいて電波環境がどのように IP パケットの転送特性に影響を及ぼすかを調べるシステムを開発すること、およびそのシステムを用いて WiMAX ネットワークの無線レイヤの特性に応じた IP 通信性能の計測および、複数移動局に対する同時測定を実現することが目的である。

## 1.3 本論文の構成

本論文は全 7 章で構成される。

第 2 章では本研究が扱う、Mobile WiMAX、藤沢地域 WiMAX などについて述べる。第 3 章では参考にした既存のツールについてその測定方式と評価を述べる。第 4 章では本研究において実装した計測ツールの設計について述べる。第 5 章では本研究において実装した計測システムの実装について述べる。第 6 章では行った実験の結果と考察を述べる。第 7 章では結論と今後の課題をまとめる。

## 第2章 研究対象

本章では、本研究に関連する事柄について説明する。

### 2.1 WiMAX

WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) は、LTE (Long Term Evolution) と並び、次世代の高速無線通信技術として期待されている技術である。無線通信技術をカバレッジの観点から整理すると、無線短距離通信網 (PAN: Personal Area Network)、無線構内通信網 (LAN: Local Area Network)、無線都市域通信網 (MAN: Metropolitan Area Network)、無線広域通信網 (WAN: Wide Area Network) の四つに分類でき、WiMAX はこのうち無線 MAN に位置づけられる。一つの基地局あたりのカバレッジは携帯電話とほぼ同等だが、全国規模のカバレッジを想定するというより、ある特定の都市域でのサービス提供を行うことを目的とした技術であるとされる [3]。PHY および MAC 層の標準化は IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers)、無線 MAN を扱う 802.16WG [8] において行われている。WiMAX は当初、端末が移動しないモデル (FWA: Fixed Wireless Access) 技術として始まった。この FWA の規格が IEEE 802.16-2004 であるが、多様な必須機能、オプション機能が規定されており、これらすべてを実装することは実用上、経済上、合理的ではなく、標準規格に基づく機器の相互運用性を確保するために、標準規格で規定された多様な必須機能、オプション機能の中から実装機能を規定したプロファイルを作成する必要があった。WiMAX Forum という業界団体がこれに取り組んでおり、規定された規格が WiMAX である [3]。

#### 2.1.1 Mobile WiMAX

IEEE 802.16-2004 は前述の通り、FWA としての利用を想定した技術だった。これを移動端末でも利用できるよう、基地局やセンター間でのハンドオーバーもサポートするように拡張した規格が IEEE 802.16e-2005 規格であり、120km/h でのハンドオーバーもサポートしている。IEEE 802.16e-2005 に対して WiMAX Forum 側の対応する規格が Mobile WiMAX である。IEEE 802.16 規格の改訂はその後も続いており、IEEE 802.16-2009、IEEE 802.16m が策定されている。

### 2.1.2 WiMAX の技術的特徴

Mobile WiMAX の技術的特徴を表すキーワードとして、ALL IP、OFDMA、MIMO が挙げられる。Mobile WiMAX は無線を用いたブロードバンドアクセスネットワーク環境を提供するが、今までの携帯電話網とは異なり、ALL IP でサービスを提供することが明記されている。これは、認証やネットワークの運用まで含まれており、旧来の交換機などを用いられず、ルータやスイッチを用いることになる [3]。これにより、コストの低減および、他 WiMAX システムとの相互接続、異なる無線技術との連携の容易化が図られている。

OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) は高速なデータを複数の低速なデータに分割し、複数のサブキャリアを用いて並列伝送を行うことで、マルチパス伝搬環境下で高速なデータ通信を実現する技術であり、OFDMA(Orthogonal Frequency Division Multiple Access) は、OFDM をベースに、全てのサブキャリアを電ユーザーが共有し、特定の複数のサブキャリアをサブチャンネルと位置づけ、特定の時間タイミングで各ユーザーにサブチャンネルを適応的に割り当てることで多元接続を実現する技術である [3]。

MIMO(Multi Input Multi Output) は複数のアンテナを組み合わせ、複数のデータストリームを多重して伝送することでスループットの向上を図る技術である。

### 2.1.3 地域 WiMAX

日本における WiMAX に対する周波数の割り当てとして、総務省は全国バンドと地域バンドに分けて割り当てを行っている。全国バンドは UQ コミュニケーションズ社に割り当てがなされ、UQ WiMAX というサービス名でサービスが行われており、地域バンドは原則市町村単位での割り当てが行われている。これは、無線 MAN という本来の特徴に則り、地域が主体となって当該地域の特性、ニーズに応じたブロードバンドサービスを提供することにより、デジタル・デバイドの解消、地域の公共サービスの向上等、当該地域の公共の福祉の増進に寄与することを目的としており、地域に特化した様々なサービスが行われることが期待されている [9]。

### 2.1.4 藤沢地域 WiMAX

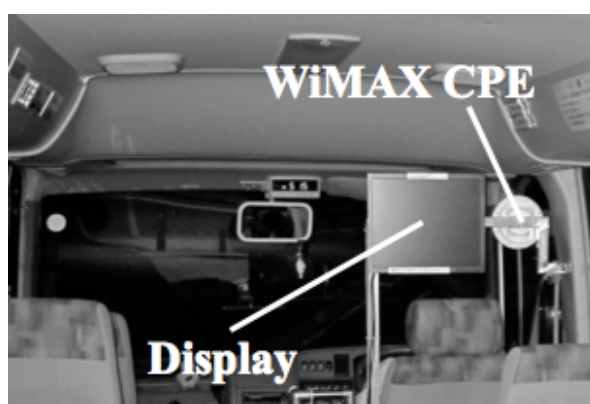
現在、藤沢市湘南台地区において藤沢地域 WiMAX という地域 WiMAX サービスが行われており、慶應義塾大学を中心に設立されたオープンワイヤレスプラットフォーム合同会社によって運営がされている。このネットワークを利用して、図 2.1 に挙げたサイネージの実験や次項で説明する RACOW プロジェクトの実験が行われ、本研究もこのネットワークを利用して行われた。

## 2.1. WiMAX



(a) JRC 屋外型 WiMAX CPE

(b) WiMAX を利用した屋外設置サイネージ



(c) 大学キャンパス周回バス設置サイネージ

図 2.1: WiMAX 端末機器、サイネージ

### 2.1.5 WiMAX MCBSC

ネットワークにおける通信は、受信ノードの形態によって、3つに分類することが出来る。ユニキャスト、マルチキャスト、ブロードキャストである。ユニキャストは受信ノードが1つに限定される場合、マルチキャストは複数の場合、ブロードキャストはネットワーク上の全てのノードの場合である。なお、ブロードキャストはマルチキャストに包含して扱われる場合がある。マルチキャストは同一のデータを複数の受信者に対して同時に配信する技術である。ネットワーク内の中継装置がそのデータを複製して受信者に配送するため、送信者やネットワークの負担が、ユニキャストで個別に通信する場合と比べて大幅に軽減されるという特徴がある。WiMAXにおいてもマルチキャストが導入され、2009年にWiMAX Forumにおいて規格化されたWiMAX MCBSCと呼ばれる技術がそれである。複数の受信端末でマルチキャストデータの無線チャンネルを共有することで、使用帯域の削減に繋がるため、帯域が逼迫しがちな無線通信において同報的なデータ通信に非常に有効な技術である。

### 2.1.6 Reliable MCBCS

WiMAX MCBCS は、マルチキャストデータの通信に使用するチャンネルを共有することで使用帯域を削減する技術であるが、受信端末の間でチャンネルを共有するためには変調符号化方式も揃える必要があり、無線環境の良い場所にいる端末と、無線環境の悪い場所にいる端末が一つのマルチキャストグループに混在した場合、無線環境の悪い場所にいる端末にあわせて変調方式を決定する必要があり、効率が悪化することが懸念される。そこで、WiMAX レイヤとしては、無線チャンネルを共有しない別々のコネクションとし、その上に IP Multicast をマッピングする方式が後述の RACOW プロジェクトにおいて提案され、実際に藤沢地域 WiMAX のネットワークに実装された。

## 2.2 RACOW プロジェクト

RACOW プロジェクトは、IPv6 対応のインターネットに接続された多数の家電やセンサデバイスから情報を収集し、その情報を用いて家電を制御するネットワーク統合制御システムを開発し、システム構築に必要な技術規格の標準化を推進するとともに、家電やセンサデバイスの情報を利用し機器の協調制御等のサービスを実現することにより環境負荷を低減することを目的とするプロジェクト [10] である。多数のノードの End to End での接続を可能にする IPv6 インターネットを限られた期間で面的に展開するために、藤沢地域 WiMAX を用い、産学連携で進められた。本研究では、この RACOW プロジェクトを通じて開発された CPE(Customer-provided equipment) や WiMAX MCBCS 対応機能、IPv6 対応対応が行われた藤沢地域 WiMAX ネットワークを利用して行った。

## 2.3 IPv6 multicast

IPv6 においてマルチキャストはオプションとしての扱いを外れ、完全なサポートを義務付けられ、近隣探索などに使われている。マルチキャストパケットを配送する際、マルチキャスト経路表が構成されるが、構成には、ルータ・ノード間は MLD、ルータ・ルータ間は Protocol Independent Multicast(PIM) というプロトコルが使われている。藤沢地域 WiMAX で CPE-BS 間で使われている MLDv2 についてここでは説明する。MLDv2 には MLDv2 Query と MLD v2 Report というメッセージが存在し、ルータからは ff02::1 宛に MLDv2 Query が送信される。これを受信したノードは MLDv2 Report というメッセージフォーマットに沿って受け取ったインターフェイスで購読しているマルチキャストアドレスを広告する。また、一定時間 MLD v2 Report を返さないノードは、マルチキャストグループから削除される。

### 2.4 藤沢地域 WiMAX における WiMAX マルチキャスト

WiMAX MCBCS および Reliable MCBCS は RACOW プロジェクトを通じて、藤沢地域 WiMAX のネットワークにおいてサポートされるようになった。マルチキャストサービスや加入者の管理を行う MCBCS サーバー機能を提供する CNS-Lite と呼ばれるサーバーソフトウェアと、MLD Proxy ルータとしてふるまう基地局装置 (BS)、CPE の三つの連携によってサービスが行われている。

MCBCS サーバーは、マルチキャストグループに加入を許可する CPE の MAC アドレスのリストを、マルチキャストアドレスと紐づける形で保持している。BS はマルチキャストパケットが届いた場合、接続している CPE の中で、そのマルチキャストグループへの加入が許可されており、更にそのマルチキャストアドレスに対して CPE 以下に接続されたホストから MLD が出ている CPE に対してのみ、マルチキャストパケットを配送する。

なお、IPv6 パケットは、BS の設計上の都合により、WiMAX 区間は IPv4 上に構成されたトンネルを通して配送が行われる。このトンネルは BS と CPE の間で自動的に構成されるため、利用者の端末が意識することは基本的にない。

## 第3章 既存研究

この章では、既存研究、実装について述べる。

### 3.1 ネットワーク測定ツールの分類

川上 [5] は、ネットワーク測定ツールの測定方式について、アクティブ測定方式と、パッシブ測定方式に二つに分類し、アクティブ測定方式をさらにサンプル推定方式とトラフィック生成方式の二つに分類している。アクティブ測定方式は、測定ツールが測定用のパケットを送出し、受信した情報をもとに測定値を導出する方式である。少数のパケットをサンプルとして計測する方式をサンプル推定方式と呼び、この方式の特徴として、ネットワークへの負荷は小さいが、測定値の精度で劣る点を挙げている。大量のトラフィックを生成し、単位時間に転送できたパケットから測定を行う方式をトラフィック生成方式と呼び、特徴として、サンプル推定方式より精密な測定値が得られることとネットワークへの負荷が高いことを挙げている。

### 3.2 sperf

sperf は広島市立大学大学院 川上氏によって開発された、トラフィック生成方式でのネットワークのストリーム伝送特性評価ツールである [5]。sperf は CBR(Constant Bit Rate) の RTP/UDP ストリームを測定用のダミートラフィックとして用いる。測定項目としては、有効帯域、パケット欠落率、到着順序エラー、ジッタ、RTT、パケットのバースト欠落検出、連続して欠落したパケットの最大数の計測などが可能である。計測結果の表示を GUI で行えること、IPv6 対応であること、送信ホスト間で双方向同時にストリームを送信する双方向同時測定、マルチキャストを用いた一対多測定が出来ることが特徴となっている。

#### 3.2.1 本研究との関係

本研究で実現する計測システムは sperf では扱われていない GPS の位置情報や、RSSI、CINR、変調方式の同時取得、マルチキャストでの計測実験における計測結果の複数受信ノードからの自動収集機能、複数受信ノード間のパケット欠落パターンの相関分析機能の実装を行った点が独自点である。これらについては、次章で述べる。

## 3.3 RTCP RR パケットを利用した計測

RTP には制御プロトコルとして RTCP (Real-time Transport Control Protocol) が定義されており、RTCP にはパケットタイプフィールドによって区別される複数のタイプのパケットが存在する。その一つとして、受信者レポート (Receiver Reports, RR) があり、レポート内容としては、累積欠落パケット数や欠落率、ジッタが存在する。RTP、RTCP を利用するアプリケーションによって生成されたトラフィックや RTCP RR パケットを Pcap 等でキャプチャすることによって、動作中のアプリケーションの品質を計測することが出来る。

### 3.3.1 本研究との関係

動作中のアプリケーションの品質計測が出来る点は魅力的ではあるが、UDP のパケットである RTCP RR パケットを利用する場合、RR パケット自体が欠落し、正確な計測が出来ない恐れがある。また、RR パケットに含まれない、各パケットそれぞれの欠落情報についても計測を行うことで、各受信ノード間での受信品質の相関関係について計測したいこと、リアルタイムな結果の収集は必要ではなく、一定の測定時間後に計測結果をまとめて収集する方法で十分なことから、本実装では、RR パケットのジッタの計算方式を利用し、ダミーパケットのフォーマットを RTP に揃えるにとどめた。

## 第4章 設計

この章では WiMAX ネットワーク測定ツールに必要とされる機能を検討する。

### 4.1 WiMAX ネットワーク測定ツールへの要求機能

#### 4.1.1 パケット欠落パターンの計測

WiMAX ネットワーク測定ツールを実装する目的は WiMAX 上でストリームデータを流した際に、WiMAX レイヤの環境がどのように IP パケット転送に影響を与えるかを計測することにある。パケットの欠落の有無やパターンは WiMAX ネットワーク上で動くアプリケーションの使用感を大きく左右するものであり、大きな関心事である。そこで、以下の三点をパケット欠落パターンの要求機能として挙げる。

##### バーストパケット欠落の測定

パケットが欠落する場合、欠落数が同じであっても、欠落パターンによって、そのネットワーク上で動作するアプリケーションの使用感は大きく異なる。パケットが一様に欠落するのに比べ、集中的に欠落した場合の方が、動画や音声のストリーミングを流す場合、ノイズやフレームの欠落を引き起こし、影響は大きい。そこで、集中的なパケットの欠落を計測する機能を実装する。

##### マルチキャスト計測時のパケット欠落パターンの相関関係の把握

WiMAX マルチキャスト上でストリーミングデータを送信した場合に、各受信ノードにおけるパケットの欠落パターンにどのような相関関係があるかを把握したい。各受信ノード間の欠落状況の相関係数を求める機能を実装する。

##### RSSI 値、CINR 値とパケット欠落率の関係の把握

RSSI 値、CINR 値によってパケット欠落率がどの程度影響を受けるのかを把握したい。そこで、受信時の RSSI 値毎にパケット欠落率を計算し、出力する機能を実装する。

### 4.1.2 実験経過の出力

実験においては一分程度連続してダミートラフィックを流すが、その流したトラフィックの欠落率やRSSI、CINRがどのようなパターンで推移したか、経過時間によってパターンが変化したかを表形式で出力する機能を実装する。

## 第5章 実装

この章では、今回実装した WiMAX ネットワーク性能測定ツールの実装について述べる。

### 5.1 概要

#### ビルディングブロック図

まず、図 5.1 に今回実装した WiMAX ネットワーク性能測定ツールの全体の設計の概要を示すためにビルディングブロック図を示した。

#### 動作概要

送信ノードはストリーミングのトラフィックを模したダミートラフィックを一定の期間送信する。受信ノードは CPE から RSSI 値と CINR 値を、GPS レシーバーから GPS 情報を受信しており、ダミートラフィックの packets を受け取ると現在の位置情報、RSSI、CINR の値と共に記録する。一定の送信期間が終了すると、送信ノードは各受信ノードに対して計測結果の問い合わせを行い、送信記録と各ノードの受信結果を突き合わせることで、計測結果を生成し、GUI に出力する。計測結果の問い合わせについては、長時間の計測によってデータ量が多い場合も考慮し、受信ノード側でファイルに保存し、ネットワークを経由せず USB メモリ等で送信ノードとやり取りすることも出来るよう実装した。

### 5.2 動作環境

この節では各コンポーネントの動作環境、依存コンポーネントを述べる。

#### 5.2.1 送信ノード

送信ノードは結果の GUI 表示に Excel 2010 を利用するために Windows 上での動作を前提とした。そのため、Linux 上での Mono を利用した動作はサポートされない。

Microsoft Windows XP 以上  
.NET Framework 4.0 Client Profile  
Microsoft Office Excel 2010

## 5.2. 動作環境

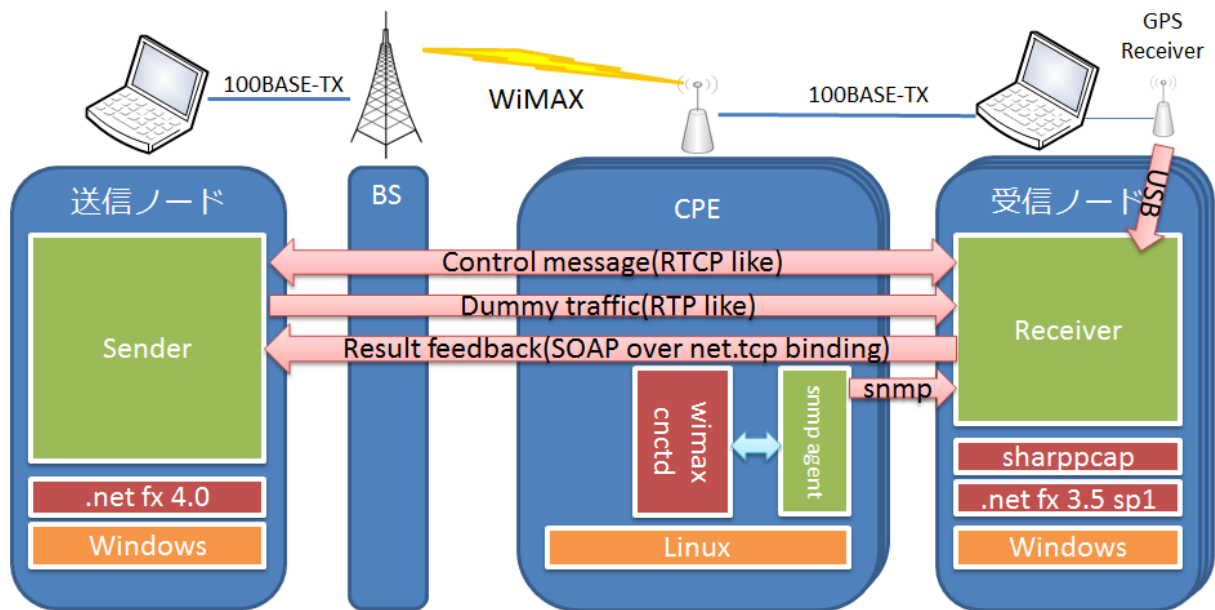


図 5.1: WiMAX ネットワーク性能測定ツールのビルディングブロック図

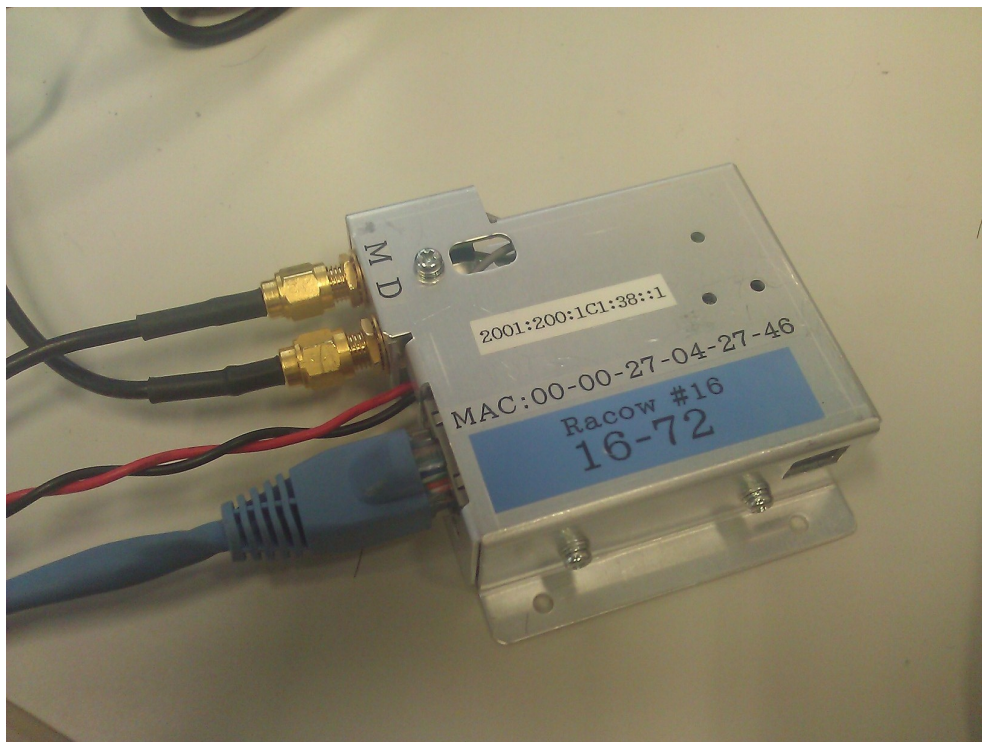


図 5.2: JRC 製小型 CPE NJT-576

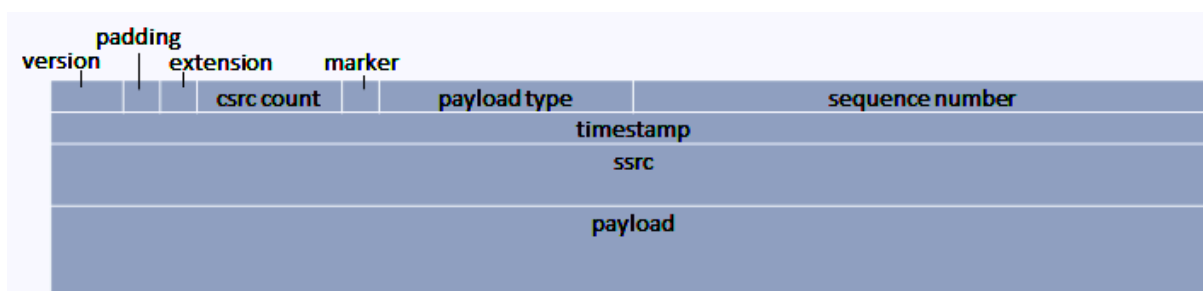


図 5.3: RTP パケットヘッダ

### 5.2.2 CPE SNMP Agent

藤沢地域 WiMAX で WiMAX マルチキャストを利用するには JRC 製小型 CPE NJT-576 (図 5.2) の利用が必要であるため、本研究でもこれを利用した。

### 5.2.3 受信ノード

受信ノードは GUI ツールキットに WPF ( Windows Presentaion Foundation ) を利用しているため、Linux 上での Mono を利用した動作はサポートされない。

Microsoft Windows XP 以上  
.NET Framework 4.0 Client Profile  
WinPcap 4.1.0 以上

## 5.3 ストリームのトラフィックを模したダミーデータの送信

送信ノードはストリームのトラフィックを模したダミーデータを送信するが、送信するパケットのフォーマットとして、今回の実装では音声や映像のリアルタイムな送信を念頭に、RTP パケットを模すことにした。RTP パケットのフォーマットは図 5.3 の通りで、このパケットを一定間隔で送信を行う。

## 5.4 ダミーデータ受信時の状況記録

受信ノードはダミーデータを受信したとき、ダミー RTP パケットのヘッダ、受信時刻の他に、電波環境を示す RSSI、CINR 値、GPS レシーバーからの位置情報を記録する。

### 5.4.1 電波環境の記録

RSSI、CINR 値を WiMAX ネットワーク性能測定ツールで取得するために、日本無線株式会社製小型 CPE NJT-576 に対して製造元である日本無線株式会社での工場実習中に RSSI、CINR 値を取得可能にする SNMP Agent 機能の組み込みを行った。

#### CPE で動作するソフトウェアの開発環境

本 CPE は Marvell 社製 ARM CPU で動いており、OS として Linux が使われている。本 CPE 上で動作するソフトウェア開発は、Marvell 社提供の gcc ベースの SDK を利用して行うことが出来る。今回は、VirtualBox 4.0 上に SDK で動作確認 OS として保証されている Ubuntu Desktop 8.04 をインストールし、その上に SDK をインストールし CPE 向けにクロスコンパイルを行い、バイナリにしてから CPE に配置した。

SNMP Agent 機能の実装には、NET-SNMP ライブラリ [11] を用いて行った。NET-SNMP で提供される標準化 MIB と拡張標準 MIB の他に、RSSI、CINR を表す独自 MIB の定義を行い、実装した。IEEE 802.16-2009 標準においても RSSI や CINR を表す MIB は定義されているが、実装の簡単さのために、独自 MIB を定義して利用した。定義した MIB を図 5.4 に示した。

以上のようにして取得可能になった RSSI、CINR 値を SNMP を通じて取得する機能 (SNMP Manager 機能) を受信ノードに実装した。実装に当たっては、SharpSNMP ライブラリ [12] を利用した。

### 5.4.2 GPS 情報の記録

測定時の受信ノードの位置情報を記録するために、USB 接続の GPS レシーバー (BU-353 (図 : 5.5)) から NMEA 0183 GGA,GSA,RMC,(VTG,GLL Opt.) 形式で位置情報を取得する機能を受信ノードに実装した。

## 5.5 受信結果の収集

WiMAX マルチキャストの計測を行う場合、受信ノードが複数となる。受信結果を一括して管理、表示するために、送信ノードに受信結果の収集機能を実装した。データの送受信プロトコルには、WCF (Windows Communication Foundation) の net.tcp binding を用い、WSDL ファイルの HTTP 経由での公開を行うことで再利用性を考慮している。データ型は単純な getter、setter を中心に持つシンプルなクラスとして設計した。図 5.6 にクラス図を示す。

## 5.6 計測結果の計算方法

送信ノードは、各受信ノードから受信結果データを収集し、送信ノードに残る送信記録と突き合わせて計測結果データを生成する。

### 5.6.1 一秒毎平均の結果

実験経過の把握のため、受信ノード毎に一秒毎のジッタ、緯度、経度、RSSI、CINR の平均値、それにスループット、パケット欠落数、変調方式を出力する。

#### ジッタの計算

本実装では、ジッタの計算に RFC 3550 の定義を用いた。RFC 3550 ではジッタを以下のように定義している。

$$D_{[i,j]} = (R_{[j]} - R_{[i]}) - (S_{[j]} - S_{[i]}) = (R_{[j]} - S_{[i]}) - (R_{[i]} - S_{[i]})$$

$$J_{[i]} = J_{[i-1]} + (|D_{[i-1,i]}| - J_{[i-1]})/16$$

$S_{[i]}$  : RTP パケットの送信タイムスタンプ値

$R_{[i]}$  : RTP パケットの受信タイムスタンプ値

$J_{[i]}$  : ジッタ

C#のコードとしては図 5.7 のように記述した。

### 5.6.2 RSSI、CINR 毎の結果

RSSI、CINR 値の変化によってパケット欠落率がどのように変化するかを調べるため、秒毎の受信結果を RSSI、CINR 値によってグループ化し、RSSI、CINR 値毎に送信パケット数、パケット欠落数、パケット欠落率、それにジッタ、緯度、経度、RSSI、CINR、変調方式の平均値を表示する。

### 5.6.3 バーストパケット欠落率

欠落したパケットについて、それぞれ、シーケンス番号を元に、連続で何個欠落したかを表示する機能を実装した。

### 5.6.4 複数受信ノード間の相関関係

WiMAX MCBCS では無線レイヤとしてマルチキャスト通信を行うが、WiMAX MCBCS で通信中のパケットの欠落に、複数ノード間での相関関係が見られるかを検証するために、欠落パケットパターンの相関関係を計算する機能を実装した。計算の手順としては、各ノードから収集したパケットの受信成否データをシーケンス番号毎に整理し、比較する

二つのノードのどちらかで欠落したパケットについて、二つのノード両方で欠落したパケットを相関あり、片方のノードでしか欠落しなかったパケットを相関なしとし、相関係数を求めた。

## 5.7 結果の GUI 表示

計測結果の視覚的な理解を助けるために、送信ノードに集計された計測結果の GUI 表示機能を実装した。実装に当たっては、Microsoft Office Excel ブックに対する VSTO ソリューションとして送信ノードを開発することにより、Excel ブックをフロントエンドとする形で開発した。これにより、結果をわかりやすく、またセル参照により再利用、再加工が容易な形で出力することを可能とした。

### 5.7.1 各受信ノードの受信結果の経時変化グラフ

各受信ノードの位置情報、RSSI 値、CINR 値、スループット、ジッタを秒毎に集計しグラフ化する機能を実装した ( 図 5.8(a) )。

### 5.7.2 RSSI 値、CINR 値毎のパケット欠落率グラフ

RSSI 値、CINR 値毎にパケット欠落率を集計し、グラフ化する機能を実装した ( 図 5.8(b) )。

### 5.7.3 マップへのオーバーレイ表示

受信結果を地図にオーバーレイ表示する機能を、Silverlight4+Bing Maps Silverlight Control SDK を用いて開発した。これにより、地点による受信結果の変化をわかりやすく、表示することが可能になった ( 図 5.8(c) )。

```

WMAN-PRIVATE-MIB DEFINITIONS ::= BEGIN
  IMPORTS
    MODULE-IDENTITY,
    OBJECT-TYPE,
    NOTIFICATION-TYPE,
    Integer32
  FROM SNMPv2-SMI
    OBJECT-GROUP,
    MODULE-COMPLIANCE,
    NOTIFICATION-GROUP
  FROM SNMPv2-CONF;

wmanPriMib MODULE-IDENTITY
  LAST-UPDATED "201008025000Z" -- August 25, 2010
  ORGANIZATION "Keio Univ."
  CONTACT-INFO
    "Developer: Yoshikazu Nojima
    E-mail: nojima@sfc.wide.ad.jp"
  DESCRIPTION
    ""
    REVISION "201008250000Z"
    DESCRIPTION
    "The first version of WMAN-PRI-MIB module."
  ::= { iso org(3) dod(6) internet(1) private(4) enterprises(1)jrc(1234567) 123
    }

wmanPriMibObjects OBJECT IDENTIFIER ::= { wmanPriMib 1 }
wmanPriSsRssi OBJECT-TYPE
  SYNTAX INTEGER (200..0)
  MAX-ACCESS read-only
  STATUS current
  DESCRIPTION
    ""
  ::= { wmanPriMibObjects 1 }

wmanPriSsCinr OBJECT-TYPE
  SYNTAX INTEGER (-200..0)
  MAX-ACCESS read-only
  STATUS current
  DESCRIPTION
    ""
  ::= { wmanPriMibObjects 2 }
END

```

図 5.4: RSSI, CINR を表す OID の MIB 定義

## 5.7. 結果の GUI 表示



図 5.5: GPS レシーバー (BU-353)

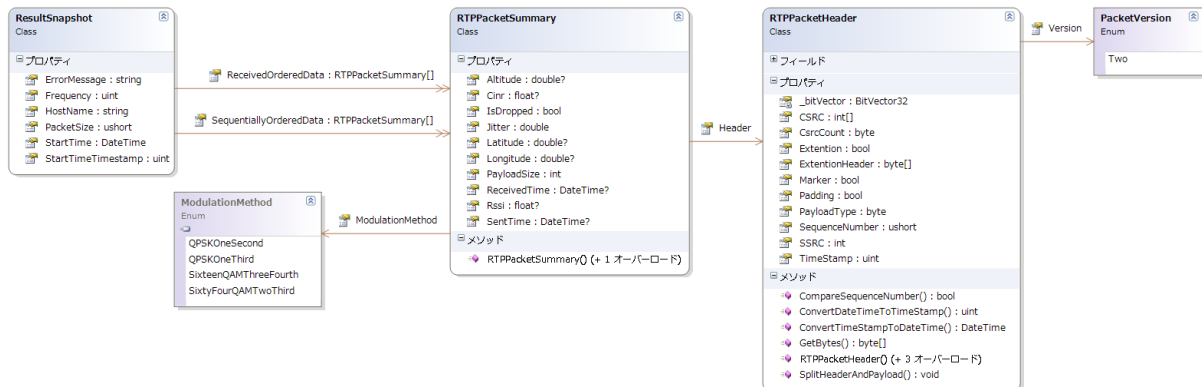


図 5.6: 受信結果交換用データ型

```
double d = ((long)receivedTimeStamp - data[i].Header.Timestamp) - ((long)
    prevReceivedTimeStamp - data[i - 1].Header.Timestamp);
data[i].Jitter = (data[i-1].Jitter + (Math.Abs(d) - data[i-1].Jitter
    )/16);
```

図 5.7: ジッタの計算コード (C#)

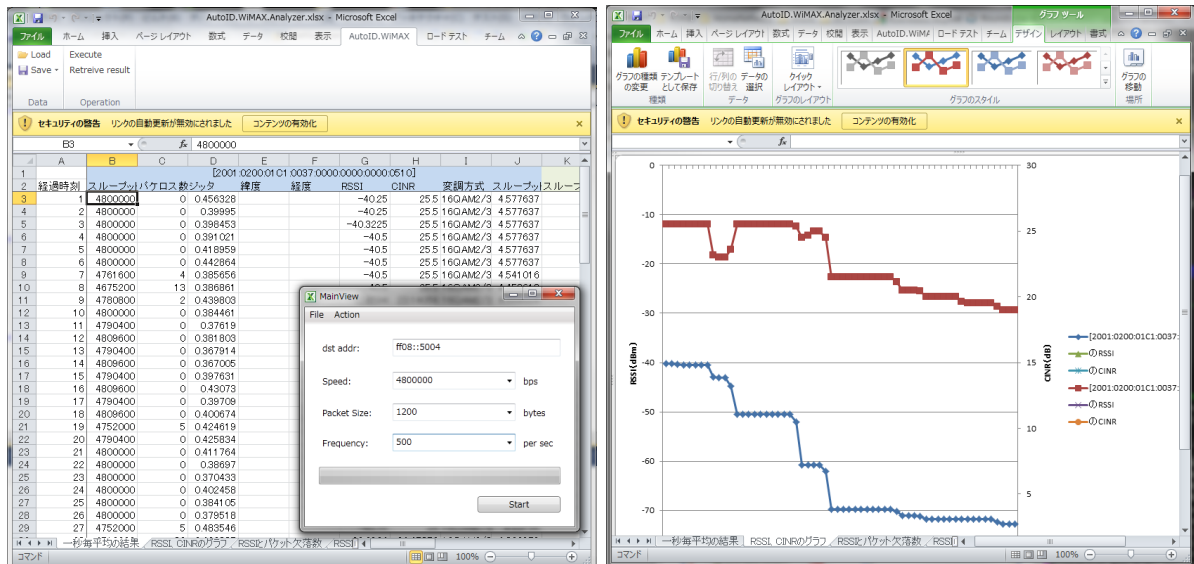


図 5.8: 結果の GUI 表示

## 第6章 実験

本章では本研究において実装した WiMAX ネットワーク特性計測ツールを用いて、実際に WiMAX の転送特性を計測し、どのような特性を持っているかを実験する。

### 6.1 同軸ケーブル接続による実験環境での試験

まず、基本的な動作の確認として、外部からの妨害波の影響を避けるために、実験用の基地局と CPE をアッテネータを挟む形で同軸ケーブルで接続し、一定の間隔で送信ノードからマルチキャストパケットを流し続け、A、B、C の3台の受信用端末で受信し計測する実験を行った。送信するパケットの流量は、200packets/sec、100packets/sec の2通りで計測を行った。

#### 6.1.1 実験環境

試験環境の構成を、図 6.1 に示す。

各ノードの PC のスペックを表 6.1 に示す。

表 6.1: 各ノードのスペック

	CPU	Memory	NIC
送信ノード	Core 2 Duo T5500 1.66 GHz	2GB	100Base-TX 対応
受信ノード A	Corei7-640LM 2.13GHz	8GB	1000Base-T 対応
受信ノード B	Corei5-520M 2.40GHz	2GB	1000Base-T 対応
受信ノード C	Core 2 Duo T9400 2.53GHz	2GB	1000Base-T 対応

#### 6.1.2 実験結果

表 6.2、表 6.3、表 6.4 に 200packets/sec での受信ノード A、B、C それぞれの受信結果を示す。表 6.5、表 6.6、表 6.7 に 100packets/sec での受信ノード A、B、C それぞれの受信結果を示す。表 6.8 に 200packets/sec での各受信ノードにおけるパケットの欠落パターンの相関係数を示す。

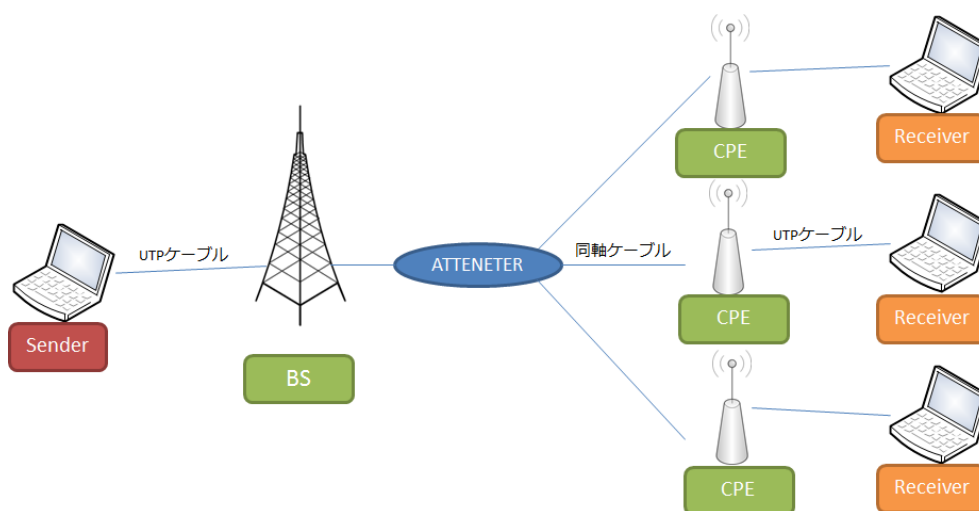


図 6.1: 同軸ケーブル接続での計測試験構成

### 6.1.3 結果の考察

200packets/sec では、平均90packets/sec 程の欠落が見られ、実効スループットは1.05Mbpsであった。100packets/sec ではパケットの欠落は見られなかった。200packets/sec での欠落パターンは各受信ノード間の相関係数が1.0と、完全に一致していた。変調符号化方式としてQPSK1/2を利用するWiMAX MCBCSのスループットの理論値は1.1Mbpsであり、欠落パケットは、変調符号化方式からくる最大転送可能スループットを超えたためにBSで破棄されたものと思われる。

## 6.1. 同軸ケーブル接続による実験環境での試験

表 6.2: 200packets/sec での受信ノード A における受信結果

時刻	スループット	パケット欠落数	ジッタ	RSSI	CINR
20:12:06	1046400	90	0.786	-49.75	24.50
20:12:07	1046400	92	0.646	-49.75	24.97
20:12:08	1036800	92	0.882	-49.75	25.00
20:12:09	1046400	90	0.616	-49.75	25.00
20:12:10	1046400	91	0.624	-49.75	25.00
20:12:11	1046400	92	0.640	-49.75	25.36
20:12:12	1046400	90	0.746	-49.75	25.50
20:12:13	1036800	92	0.760	-49.75	25.50
20:12:14	1065600	93	0.696	-49.75	25.50
20:12:15	1046400	91	0.782	-49.75	25.50
20:12:16	1036800	92	0.801	-49.75	25.50
20:12:17	1046400	91	0.751	-49.75	25.28
20:12:18	1046400	91	0.786	-49.75	25.00
20:12:19	1046400	91	0.778	-49.75	24.62
20:12:20	1046400	91	0.667	-49.75	24.00
20:12:21	1046400	90	0.580	-49.75	24.00
20:12:22	1046400	92	0.710	-49.75	24.00
20:12:23	1036800	92	0.693	-49.75	24.11
20:12:24	1046400	91	0.699	-49.75	24.50
20:12:25	1046400	91	0.730	-49.75	24.50
20:12:26	1036800	92	0.706	-49.75	24.50
20:12:27	1056000	90	0.794	-49.75	24.50
20:12:28	1036800	92	0.717	-49.75	24.97
20:12:29	1046400	90	0.756	-49.75	25.00
20:12:30	1046400	92	0.647	-49.75	25.00
20:12:31	1046400	90	0.671	-49.75	25.00
20:12:32	1046400	91	0.740	-49.75	25.00
20:12:33	1036800	92	0.730	-49.75	25.00
20:12:34	1046400	91	0.562	-49.75	25.00
20:12:35	1046400	92	0.793	-49.75	25.00
20:12:36	1046400	91	0.709	-49.75	25.00
20:12:37	1046400	90	0.654	-49.75	25.00
20:12:38	1036800	93	0.652	-49.75	25.00
20:12:39	1046400	90	0.677	-49.75	25.00
20:12:40	1056000	91	0.771	-49.75	25.00
20:12:41	1036800	92	0.679	-49.75	25.00
20:12:42	1046400	91	0.676	-49.75	25.00
20:12:43	1046400	91	0.624	-49.75	25.00
20:12:44	1046400	90	0.741	-49.75	25.00
20:12:45	1046400	92	0.746	-49.75	25.00
20:12:46	1036800	92	0.574	-49.75	24.95
20:12:47	1046400	90	0.727	-49.75	24.50
20:12:48	1046400	91	0.722	-49.75	24.50
20:12:49	1036800	93	0.745	-49.75	24.50
20:12:50	1056000	89	0.814	-49.75	24.50
20:12:51	1036800	92	0.774	-49.75	24.50

表 6.3: 200packets/sec での受信ノード B における受信結果

時刻	スループット	パケット欠落数	ジッタ	RSSI	CINR
20:12:06	1046400	90	0.649	-50.00	25.50
20:12:07	1046400	92	0.655	-50.00	25.50
20:12:08	1036800	92	0.718	-50.00	25.50
20:12:09	1046400	90	0.642	-50.00	25.50
20:12:10	1046400	91	0.710	-50.00	25.50
20:12:11	1046400	92	0.609	-50.00	25.54
20:12:12	1046400	90	0.577	-50.00	26.00
20:12:13	1036800	92	0.688	-50.00	26.00
20:12:14	1065600	93	0.686	-50.00	26.00
20:12:15	1046400	91	0.664	-50.00	26.00
20:12:16	1036800	92	0.656	-50.00	25.56
20:12:17	1046400	91	0.629	-50.00	25.50
20:12:18	1046400	91	0.666	-50.00	25.50
20:12:19	1046400	91	0.742	-50.00	25.50
20:12:20	1046400	91	0.711	-50.00	25.50
20:12:21	1046400	90	0.647	-50.00	25.50
20:12:22	1046400	92	0.729	-50.00	25.50
20:12:23	1036800	92	0.706	-50.00	25.50
20:12:24	1046400	91	0.615	-50.00	25.50
20:12:25	1046400	91	0.651	-50.00	25.50
20:12:26	1036800	92	0.740	-50.00	25.50
20:12:27	1056000	90	0.766	-50.00	25.50
20:12:28	1036800	92	0.796	-50.00	25.38
20:12:29	1046400	90	0.690	-50.00	25.00
20:12:30	1046400	92	0.747	-50.00	25.00
20:12:31	1046400	90	0.653	-50.00	25.00
20:12:32	1046400	91	0.805	-50.00	25.00
20:12:33	1036800	92	0.676	-50.00	25.00
20:12:34	1046400	91	0.611	-50.00	25.00
20:12:35	1046400	92	0.676	-50.00	25.00
20:12:36	1046400	91	0.721	-50.00	25.00
20:12:37	1046400	90	0.712	-50.20	24.59
20:12:38	1036800	93	0.603	-50.25	24.50
20:12:39	1046400	90	0.590	-50.07	24.50
20:12:40	1056000	91	0.778	-50.00	24.50
20:12:41	1036800	92	0.767	-50.00	24.50
20:12:42	1046400	91	0.638	-50.00	24.50
20:12:43	1046400	91	0.585	-50.00	25.02
20:12:44	1046400	90	0.720	-50.00	25.50
20:12:45	1046400	92	0.738	-50.00	25.50
20:12:46	1036800	92	0.736	-50.00	25.50
20:12:47	1046400	90	0.774	-50.00	25.50
20:12:48	1046400	91	0.762	-50.00	25.50
20:12:49	1036800	93	0.707	-50.00	25.40
20:12:50	1056000	89	0.803	-50.00	25.00
20:12:51	1036800	92	0.722	-50.00	25.04

## 6.1. 同軸ケーブル接続による実験環境での試験

表 6.4: 200packets/sec での受信ノード C における受信結果

時刻	スループット	パケット欠落数	ジッタ	RSSI	CINR
20:12:06	1046400	90	0.781	-50.50	25.40
20:12:07	1046400	92	0.650	-50.50	24.50
20:12:08	1036800	92	0.918	-50.50	24.50
20:12:09	1046400	90	0.600	-50.50	24.96
20:12:10	1046400	91	0.657	-50.50	25.00
20:12:11	1046400	92	0.591	-50.50	25.00
20:12:12	1046400	90	0.727	-50.50	25.00
20:12:13	1036800	92	0.705	-50.50	24.63
20:12:14	1065600	93	0.689	-50.50	24.50
20:12:15	1046400	91	0.663	-50.50	24.50
20:12:16	1036800	92	0.757	-50.50	24.50
20:12:17	1046400	91	0.680	-50.50	24.50
20:12:18	1046400	91	0.734	-50.50	24.50
20:12:19	1046400	91	0.731	-50.50	24.50
20:12:20	1046400	91	0.672	-50.50	24.50
20:12:21	1046400	90	0.591	-50.50	24.67
20:12:22	1046400	92	0.758	-50.50	25.00
20:12:23	1036800	92	0.705	-50.50	25.00
20:12:24	1046400	91	0.656	-50.50	25.00
20:12:25	1046400	91	0.715	-50.50	25.00
20:12:26	1036800	92	0.703	-50.50	25.00
20:12:27	1056000	90	0.714	-50.50	25.00
20:12:28	1036800	92	0.714	-50.50	25.00
20:12:29	1046400	90	0.668	-50.50	25.00
20:12:30	1046400	92	0.696	-50.50	24.56
20:12:31	1046400	90	0.684	-50.50	24.50
20:12:32	1046400	91	0.809	-50.50	24.50
20:12:33	1036800	92	0.771	-50.50	24.50
20:12:34	1046400	91	0.576	-50.50	24.50
20:12:35	1046400	92	0.756	-50.50	24.50
20:12:36	1046400	91	0.691	-50.50	24.50
20:12:37	1046400	90	0.649	-50.50	24.50
20:12:38	1036800	93	0.675	-50.50	24.50
20:12:39	1046400	90	0.629	-50.50	24.50
20:12:40	1056000	91	0.799	-50.50	24.50
20:12:41	1036800	92	0.712	-50.50	24.50
20:12:42	1046400	91	0.697	-50.50	24.62
20:12:43	1046400	91	0.623	-50.50	25.00
20:12:44	1046400	90	0.786	-50.50	24.89
20:12:45	1046400	92	0.735	-50.50	24.50
20:12:46	1036800	92	0.572	-50.50	24.50
20:12:47	1046400	90	0.660	-50.50	24.50
20:12:48	1046400	91	0.819	-50.50	24.50
20:12:49	1036800	93	0.718	-50.50	24.98
20:12:50	1056000	89	0.833	-50.50	25.00
20:12:51	1036800	92	0.771	-50.50	25.00

表 6.5: 100packets/sec での受信ノード A における受信結果

時刻	スループット	パケット欠落数	ジッタ	RSSI	CINR
17:12:47	960000	0	0.545	-49.75	24.81
17:12:48	960000	0	0.577	-49.75	24.50
17:12:49	960000	0	0.624	-49.75	24.50
17:12:50	960000	0	0.544	-49.75	24.50
17:12:51	960000	0	0.570	-49.87	24.74
17:12:52	960000	0	0.500	-50.00	25.00
17:12:53	960000	0	0.552	-50.00	25.00
17:12:54	960000	0	0.546	-50.00	25.00
17:12:55	969600	0	0.487	-50.00	25.14
17:12:56	940800	0	0.533	-50.00	25.50
17:12:57	960000	0	0.544	-50.00	25.50
17:12:58	960000	0	0.521	-50.00	25.50

表 6.6: 100packets/sec での受信ノード B における受信結果

時刻	スループット	パケット欠落数	ジッタ	RSSI	CINR
17:12:47	960000	0	0.520	-50.00	25.00
17:12:48	960000	0	0.429	-50.00	25.00
17:12:49	960000	0	0.464	-50.24	25.00
17:12:50	960000	0	0.454	-50.25	25.00
17:12:51	960000	0	0.479	-50.25	25.00
17:12:52	960000	0	0.528	-50.25	25.00
17:12:53	960000	0	0.603	-50.44	24.63
17:12:54	960000	0	0.534	-50.50	24.50
17:12:55	969600	0	0.507	-50.50	25.52
17:12:56	940800	0	0.567	-50.50	26.00
17:12:57	960000	0	0.531	-50.50	26.00
17:12:58	960000	0	0.549	-50.50	26.00

## 6.1. 同軸ケーブル接続による実験環境での試験

---

表 6.7: 100packets/sec での受信ノード C における受信結果

時刻	スループット	パケット欠落数	ジッタ	RSSI	CINR
17:12:47	960000	0	0.331	-49.50	24.50
17:12:48	960000	0	0.416	-49.50	24.50
17:12:49	960000	0	0.393	-49.50	24.50
17:12:50	960000	0	0.382	-49.50	24.50
17:12:51	960000	0	0.400	-49.67	24.50
17:12:52	960000	0	0.352	-49.75	24.50
17:12:53	960000	0	0.318	-49.75	24.50
17:12:54	960000	0	0.326	-49.75	24.50
17:12:55	969600	0	0.427	-49.75	24.75
17:12:56	940800	0	0.332	-49.75	25.00
17:12:57	960000	0	0.320	-49.75	24.63
17:12:58	960000	0	0.319	-49.75	24.00

表 6.8: 200packets/sec での受信ノード A,B,C のパケット欠落パターンの相関係数

		相関係数
A	B	1.0
A	C	1.0
B	C	1.0

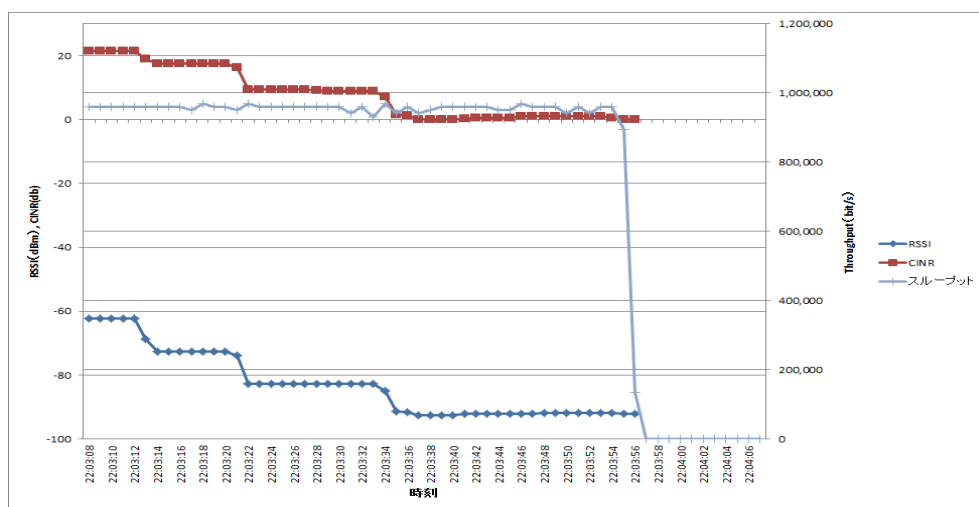


図 6.2: 信号レベルの変化が与える影響

## 6.2 信号レベルの変化が与える影響の評価

同じ実験環境を用いて、アッテネータにより信号レベルを減衰させたときにどのようにパケットの欠落パターンに影響がみられるかを試験した。変化のさせ方としては、アッテネータにより 10dB ずつ信号レベルを下げ、最後は 1dB ずつ下げていった。

### 6.2.1 実験結果

図 6.2 に信号レベルを変化させた場合の RSSI 値、CINR 値、スループットの変化を示した。信号レベルの変化に伴ってパケット欠落数が増えることはなく、図 6.2 の 22:03:54 を超えたところで接続が切断され、全パケットが欠落するようになった。

### 6.2.2 結果からの考察

信号レベルの変化に伴い、パケットの欠落という予兆が起きることなく、突然の接続の切断が発生するという結果になったが、これは、この実験で計測対象としている downlink 側にパケットの欠落という形で影響が出る前に、uplink 側でパケットの欠落が発生し、それによって接続が切断されたためだと思われる。

### 6.3. 妨害波が与える影響の評価

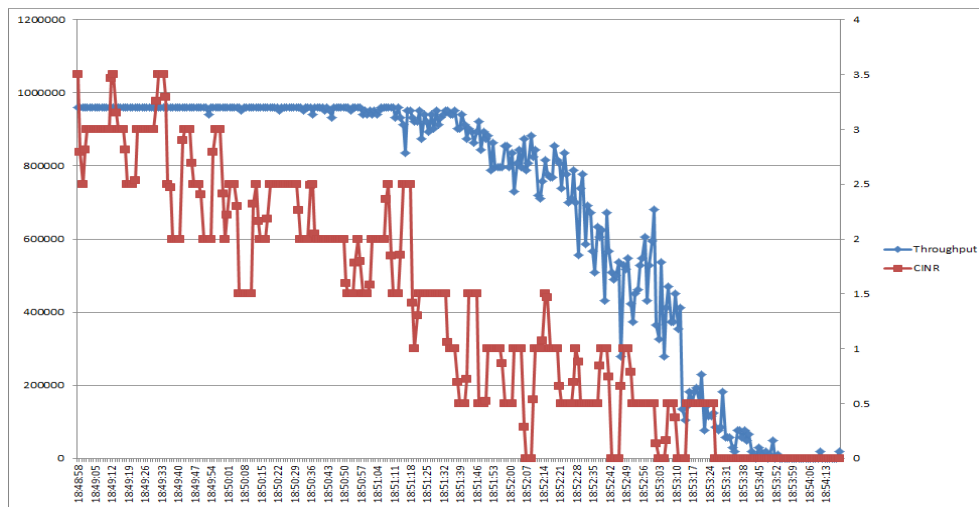


図 6.3: 妨害波を加えた場合の CINR とスループットの変化

## 6.3 妨害波が与える影響の評価

信号発生器で生成した妨害波を前節の実験環境に混入させ、CINR を変化させたときにどのようにパケットの欠落パターンに影響がみられるかを試験した。

### 6.3.1 実験環境

妨害波は、信号発生器で中心周波数 2.587 GHz、Bandwidth 100MHz の AWGN ( Additive White Gaussian Noise ) として発生させ、Amplitude -74dBm から開始し、10 秒毎に 0.10dBm づつ増加させた。

### 6.3.2 実験結果

図 6.3 に信号レベルを変化させた場合の CINR 値、スループットの変化を示した。表 6.9 にその際の結果の抜粋を示した。

### 6.3.3 結果からの考察

図 6.3 から、妨害波の信号レベルを上げていくにしたがって、パケットの欠落が増えていくことが確認できた。

表 6.9: 妨害波を加え、CINR を変化させた場合の受信結果 (抜粋)

時刻	スループット	パケット欠落数	ジッタ	RSSI	CINR
18:52:09	883200	8	0.613	-74.00	0.00
18:52:11	844800	12	0.732	-74.00	1.00
18:52:13	710400	26	0.713	-74.00	1.00
18:52:15	816000	15	0.724	-74.00	1.50
18:52:17	768000	20	0.690	-74.25	1.00
18:52:19	854400	11	0.658	-74.25	1.00
18:52:21	806400	16	0.642	-74.25	0.65
18:52:23	835200	13	0.726	-74.25	0.50
18:52:25	700800	27	0.655	-74.25	0.50
18:52:27	787200	18	0.759	-74.15	0.70
18:52:29	556800	42	0.617	-74.00	0.88
18:52:31	777600	19	0.743	-74.00	0.50
18:52:33	691200	28	0.755	-74.00	0.50
18:52:35	566400	41	0.732	-74.00	0.50
18:52:37	633600	34	0.649	-74.00	0.50
18:52:39	624000	35	0.577	-74.00	1.00
18:52:41	672000	30	0.782	-74.25	1.00
18:52:43	508800	47	0.625	-74.25	0.00
18:52:45	499200	48	0.801	-74.25	0.00
18:52:47	278400	71	0.588	-74.09	0.66
18:52:49	518400	46	0.567	-74.00	1.00
18:52:51	422400	56	0.574	-74.00	0.78
18:52:53	451200	53	0.615	-74.00	0.50
18:52:55	528000	45	0.683	-74.00	0.50
18:52:57	604800	37	0.628	-74.00	0.50
18:52:59	528000	45	0.681	-74.00	0.50
18:53:01	681600	29	0.764	-74.00	0.50
18:53:03	326400	66	0.569	-74.00	0.00
18:53:05	278400	71	0.659	-74.00	0.00
18:53:07	470400	51	0.525	-74.00	0.50
18:53:09	374400	61	0.783	-74.00	0.50
18:53:11	355200	63	0.683	-74.00	0.00
18:53:13	134400	86	0.621	-74.00	0.00
18:53:15	144000	85	0.776	-74.00	0.50
18:53:17	153600	84	0.720	-74.00	0.50
18:53:19	192000	80	0.634	-74.00	0.50
18:53:21	230400	76	0.687	-74.00	0.50
18:53:23	144000	85	0.650	-74.00	0.50
18:53:25	115200	88	0.569	-74.00	0.50
18:53:27	86400	91	0.529	-74.00	0.00
18:53:29	86400	91	0.509	-74.00	0.00
18:53:31	57600	94	0.640	-74.00	0.00

## 6.4. 妨害波の影響によるパケット欠落の相関関係の計測

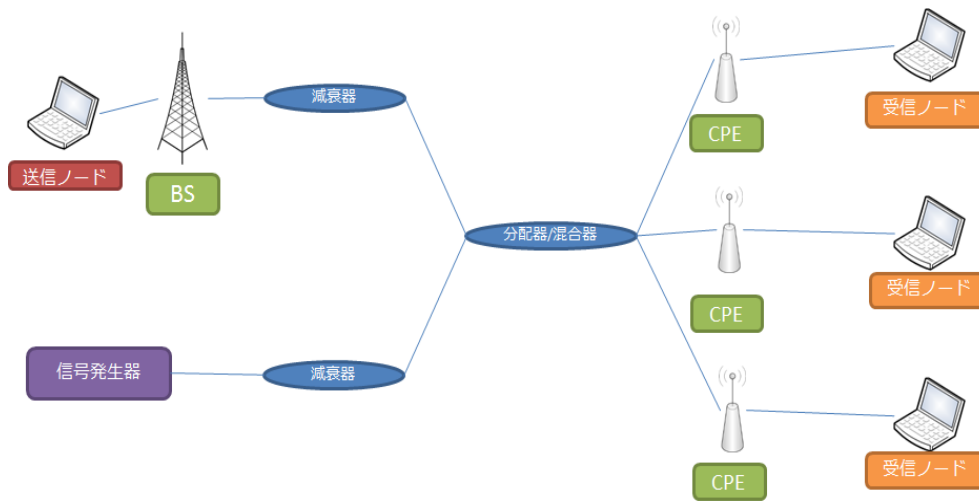


図 6.4: 信号発生器を加えた計測環境構成

## 6.4 妨害波の影響によるパケット欠落の相関関係の計測

実験環境において、信号発生器で生成した妨害波を加える実験を行い、用意した3台の受信ノード間におけるパケットの欠落パターンの相関係数を計測した。

### 6.4.1 実験環境

計測環境構成を図 6.4 に示した。妨害波は、信号発生器で中心周波数 2.587 GHz、Bandwidth 100MHz の AWGN として発生させた。

### 6.4.2 実験結果

図 6.5 に各ノードの RSSI、CINR、スループットのグラフを示す。表 6.10、表 6.11、表 6.12 に受信ノード A、B、C の受信結果の抜粋を示す。表 6.13 に受信ノード間のパケット欠落パターンの相関係数を示す。

### 6.4.3 結果からの考察

一定の妨害波を入れることでパケットの欠落を起こした場合、そのパケット欠落パターンの相関係数は 0.01 以下と非常に低い値を示し、全く相関関係にないことが分かった。

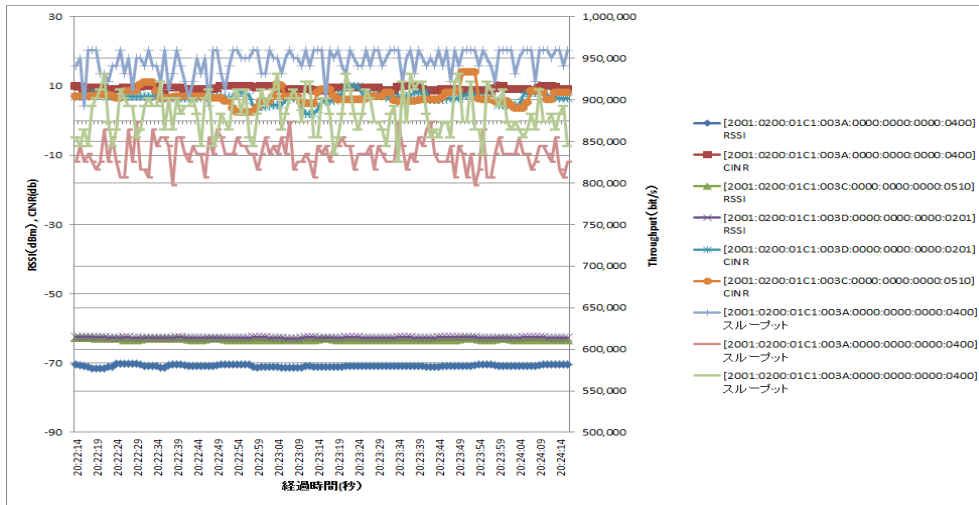


図 6.5: 各ノードの RSSI、CINR、スループット

表 6.10: 妨害波を加え、CINR を低く抑えた場合の受信ノード A の受信結果 (抜粋)

時刻	スループット	パケット欠落数	ジッタ	RSSI	CINR
20:22:14	940800	2	0.675	-70.50	10.00
20:22:15	950400	1	0.677	-70.60	9.59
20:22:16	892800	7	0.638	-70.75	9.00
20:22:17	960000	0	0.731	-71.04	9.19
20:22:18	960000	0	0.711	-71.50	9.50
20:22:19	960000	0	0.646	-71.50	9.50
20:22:20	931200	3	0.708	-71.50	9.50
20:22:21	931200	3	0.674	-71.45	9.45
20:22:22	921600	4	0.744	-71.00	9.00
20:22:23	940800	2	0.744	-70.98	9.00
20:22:24	940800	2	0.700	-70.25	9.00
20:22:25	960000	0	0.716	-70.25	9.00
20:22:26	931200	3	0.665	-70.25	9.37
20:22:27	950400	1	0.695	-70.25	9.50
20:22:28	912000	5	0.716	-70.25	9.50
20:22:29	950400	1	0.692	-70.25	9.50
20:22:30	950400	1	0.668	-70.46	9.71

#### 6.4. 妨害波の影響によるパケット欠落の相関関係の計測

表 6.11: 妨害波を加え、CINR を低く抑えた場合の受信ノード B の受信結果 (抜粋)

時刻	スループット	パケット欠落数	ジッタ	RSSI	CINR
20:22:14	825600	14	0.593	-62.75	7.00
20:22:15	844800	12	0.684	-62.75	7.00
20:22:16	825600	14	0.689	-62.75	7.00
20:22:17	835200	13	0.645	-62.75	7.00
20:22:18	825600	14	0.616	-62.75	7.00
20:22:19	816000	15	0.617	-62.88	7.26
20:22:20	825600	14	0.596	-63.00	7.50
20:22:21	864000	10	0.656	-63.00	7.50
20:22:22	825600	14	0.749	-63.00	7.50
20:22:23	854400	11	0.686	-63.00	7.21
20:22:24	825600	14	0.625	-63.00	6.50
20:22:25	806400	16	0.693	-63.00	6.50
20:22:26	806400	16	0.633	-63.25	8.48
20:22:27	864000	10	0.664	-63.25	8.50
20:22:28	825600	14	0.698	-63.25	8.50
20:22:29	873600	9	0.639	-63.25	8.50
20:22:30	816000	15	0.670	-63.07	10.29

表 6.12: 妨害波を加え、CINR を低く抑えた場合の受信ノード C の受信結果 (抜粋)

時刻	スループット	パケット欠落数	ジッタ	RSSI	CINR
20:22:14	854400	11	0.600	-62.50	7.00
20:22:15	844800	12	0.771	-62.50	7.00
20:22:16	864000	10	0.758	-62.50	7.00
20:22:17	844800	12	0.682	-62.50	7.20
20:22:18	892800	7	0.731	-62.50	8.00
20:22:19	902400	6	0.659	-62.50	8.00
20:22:20	912000	5	0.729	-62.50	8.00
20:22:21	931200	3	0.629	-62.50	8.00
20:22:22	873600	9	0.706	-62.75	7.00
20:22:23	844800	12	0.718	-62.75	7.00
20:22:24	864000	10	0.611	-62.75	7.00
20:22:25	912000	5	0.749	-62.75	7.00
20:22:26	902400	6	0.623	-62.56	7.00
20:22:27	892800	7	0.636	-62.50	7.00
20:22:28	892800	7	0.685	-62.66	7.00
20:22:29	854400	11	0.536	-62.75	7.00
20:22:30	864000	10	0.650	-62.75	7.00

表 6.13: 妨害波によって CINR を下げた場合の packets 欠落パターンの相関係数

		相関係数
A	B	-0.010680
A	C	-0.003074
B	C	-0.001252

## 6.5. 実無線環境（静止環境）での計測試験



図 6.6: 基地局と計測地点の位置関係

## 6.5 実無線環境（静止環境）での計測試験

### 6.5.1 実験環境

実無線環境での計測試験として、大学構内の建物内（館一階ロビー）にCPEを設置し、計測試験を行った。なお、建物内であるため、GPSでの位置計測は行わなかった。位置関係は図 6.6 に示す。計測は 20 分程行った。

### 6.5.2 実験結果

実験結果の最初 45 秒の結果を抜粋して表 6.14 に示す。また、計測全区間における全欠落パケットの連続欠落数を表 6.15 に示す。計測全区間における送信パケット数は 965207 個であり、合計欠落数が表 6.15 の通り 55 個なので、パケット欠落率は 0.045%であった。

### 6.5.3 結果からの考察

パケットの欠落率が 0.045%と非常に低く、また連続欠落パケットも最大で 7 個と、安定した通信が行えていることが計測できた。

表 6.14: 実無線環境（静止環境）での計測結果（抜粋）

時刻	スループット	パケット欠落数	ジッタ	RSSI	CINR
15:40:00	960000	0	0.616	-66.50	19.50
15:40:01	960000	0	0.616	-66.50	19.50
15:40:02	960000	0	0.561	-66.36	20.31
15:40:03	960000	0	0.479	-66.25	21.00
15:40:04	960000	0	0.523	-68.09	19.62
15:40:05	960000	0	0.481	-70.25	18.00
15:40:06	960000	0	0.516	-70.25	18.00
15:40:07	960000	0	0.484	-70.25	18.00
15:40:08	960000	0	0.480	-69.88	18.25
15:40:09	960000	0	0.480	-68.75	19.00
15:40:10	960000	0	0.480	-68.75	19.00
15:40:11	960000	0	0.497	-68.75	19.00
15:40:12	960000	0	0.464	-68.73	19.02
15:40:13	960000	0	0.480	-67.75	20.00
15:40:14	960000	0	0.480	-67.75	20.00
15:40:15	960000	0	0.480	-67.52	20.00
15:40:16	960000	0	0.500	-67.50	20.00
15:40:17	960000	0	0.480	-67.50	20.41
15:40:18	960000	0	0.480	-67.50	20.50
15:40:19	960000	0	0.460	-67.50	20.50
15:40:20	960000	0	0.500	-67.50	20.50
15:40:21	960000	0	0.499	-65.90	20.79
15:40:22	960000	0	0.461	-64.75	21.00
15:40:23	960000	0	0.508	-64.75	21.00
15:40:24	960000	0	0.491	-64.75	21.00
15:40:25	960000	0	0.464	-65.56	20.82
15:40:26	960000	0	0.496	-67.00	20.50
15:40:27	960000	0	0.423	-67.00	20.50
15:40:28	960000	0	0.493	-67.00	20.50
15:40:29	960000	0	0.464	-66.89	20.50
15:40:30	960000	0	0.508	-66.25	20.50
15:40:31	960000	0	0.454	-66.34	20.42
15:40:32	960000	0	0.440	-68.00	19.00
15:40:33	960000	0	0.480	-68.00	19.00
15:40:34	960000	0	0.441	-68.00	19.00
15:40:35	960000	0	0.476	-68.00	19.00
15:40:36	960000	0	0.480	-65.66	21.98
15:40:37	960000	0	0.496	-65.25	22.50
15:40:38	960000	0	0.481	-65.25	22.50
15:40:39	960000	0	0.445	-65.25	22.50
15:40:40	960000	0	0.498	-65.25	22.50
15:40:41	960000	0	0.480	-65.25	22.50
15:40:42	960000	0	0.488	-65.88	21.50
15:40:43	960000	0	0.474	-66.50	20.50
15:40:44	960000	0	0.496	-65.92	21.08

## 6.5. 実無線環境（静止環境）での計測試験

---

表 6.15: 実無線環境（静止環境）での連続欠落パケットの一覧

時刻	連続パケット欠落数
15:39:29:294	2
15:39:29:435	4
15:39:29:638	3
15:43:51:260	5
15:43:51:338	1
15:43:51:479	1
15:45:01:025	2
15:45:01:212	5
15:45:01:275	1
15:46:10:992	1
15:46:11:149	7
15:46:11:352	2
15:47:21:085	2
15:47:21:117	5
15:53:51:033	3
15:53:51:221	4
15:55:00:907	2
15:55:01:052	1
15:55:01:088	2
15:55:01:123	2

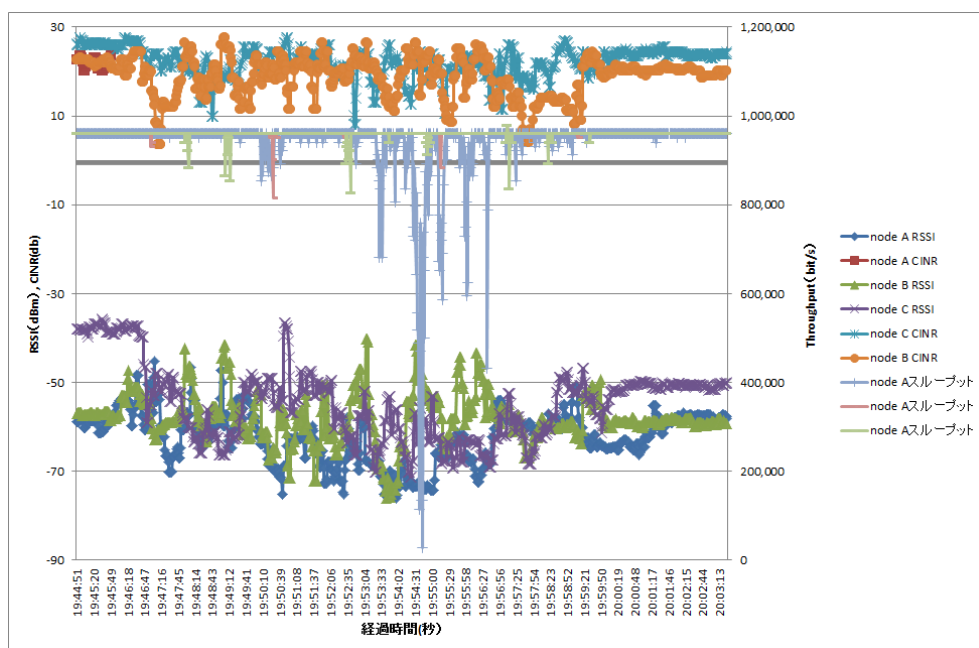


図 6.7: 移動中の RSSI、CINR、スループットの変化

## 6.6 実無線環境（移動環境）での計測試験

### 6.6.1 実験環境

三台の自動車に CPE と計測用のラップトップ PC を載せ大学キャンパス構内を 10km/h 程度で走行し、計測実験を行った。

### 6.6.2 実験結果

図 6.7 に実験中の RSSI、CINR、スループットの変化を示す。表 6.16、表 6.17、表 6.18 に計測結果の抜粋を示す。表 6.19 に各ノード間のパケットの欠落パターンの相関係数を示す。図 6.8 に計測結果を地図にオーバーレイ表示したものを示す。実験中に確認できたこととして、接続が一度切断されると、再接続まで最短でも十数秒かかることがわかった。また、他の場所から接続を維持したまま移動してきた場合接続を維持することは出来ても、新たにその場所で接続を開始することが出来ない場所も多くあることがわかった。

### 6.6.3 実験結果の考察

表 6.16、表 6.17、表 6.18 が示す通り、実無線環境下で複数台の端末の毎秒の実効スループット、受信端末の GPS 情報、RSSI、CINR を取得することが出来た。表 6.19 が示す通り、各ノード間で相関係数を計算することが出来た。静止環境とは基地局からの距離な

## 6.6. 実無線環境（移動環境）での計測試験



図 6.8: 計測結果の地図へのオーバーレイ

どの環境が異なるため、比較は出来ないが、連続パケット欠落数、パケット欠落総数が多く、通信が安定しないことが分かった。

表 6.16: 移動環境下での受信ノード A の受信結果 (抜粋)

時刻	スループット	パケット欠落数	ジッタ	緯度	経度	RSSI	CINR
19:53:50	960000	0	0.801	35.38654887	139.4265742	-70.73	19.00
19:53:51	931200	3	0.799	35.38654405	139.4265821	-71.00	19.00
19:53:52	940800	2	0.847	35.38654051	139.4265918	-71.00	19.00
19:53:53	960000	0	0.779	35.3865357	139.4266034	-71.00	19.00
19:53:54	950400	1	0.769	35.3865336	139.4266134	-70.87	18.20
19:53:55	931200	3	0.814	35.38652715	139.4266227	-70.75	17.50
19:53:56	950400	1	0.772	35.38651901	139.4266279	-70.75	17.50
19:53:57	806400	16	0.916	35.38651079	139.4266298	-70.75	17.50
19:53:58	921600	4	0.876	35.3865021	139.42663	-72.50	16.33
19:53:59	960000	0	0.792	35.38649702	139.42663	-76.00	14.00
19:54:00	931200	3	0.818	35.38649514	139.42663	-75.46	14.49
19:54:01	960000	0	0.862	35.38649965	139.4266331	-73.25	16.50
19:54:02	960000	0	0.825	35.3865093	139.4266411	-73.25	16.50
19:54:03	940800	2	0.787	35.38652083	139.4266571	-73.25	16.50
19:54:04	960000	0	0.789	35.38653228	139.4266811	-73.25	16.50
19:54:05	960000	0	0.766	35.38654395	139.4267091	-73.25	16.50
19:54:06	960000	0	0.708	35.38655242	139.4267399	-73.25	16.50
19:54:07	960000	0	0.759	35.38655793	139.4267771	-69.33	18.67

表 6.17: 移動環境下での受信ノード B の受信結果 (抜粋)

時刻	スループット	パケット欠落数	ジッタ	緯度	経度	RSSI	CINR
19:53:50	960000	0	0.747	35.38788833	139.4256655	-75.23	12.13
19:53:51	960000	0	0.744	35.38788678	139.4256573	-73.75	12.50
19:53:52	960000	0	0.721	35.3878852	139.4256523	-73.75	12.50
19:53:53	960000	0	0.699	35.387885	139.4256486	-73.75	12.50
19:53:54	960000	0	0.644	35.387885	139.4256483	-73.75	12.50
19:53:55	960000	0	0.641	35.3878881	139.4256499	-74.25	11.00
19:53:56	960000	0	0.679	35.3878993	139.4256547	-74.25	11.00
19:53:57	960000	0	0.717	35.3879188	139.4256597	-74.25	11.00
19:53:58	960000	0	0.700	35.3879467	139.425663	-74.25	11.00
19:53:59	960000	0	0.680	35.38798335	139.4256648	-72.65	13.80
19:54:00	960000	0	0.660	35.38803153	139.4256666	-72.25	14.50
19:54:01	960000	0	0.661	35.38807732	139.4256697	-72.25	14.50
19:54:02	960000	0	0.661	35.38812613	139.4256746	-72.25	14.50
19:54:03	960000	0	0.640	35.3881766	139.4256817	-67.68	16.86
19:54:04	960000	0	0.645	35.38822167	139.42569	-64.50	18.50
19:54:05	960000	0	0.676	35.38826413	139.4256976	-64.00	18.50
19:54:06	960000	0	0.638	35.3883094	139.4257071	-63.50	18.50
19:54:07	960000	0	0.622	35.388359	139.4257186	-63.50	19.16

## 6.6. 実無線環境（移動環境）での計測試験

表 6.18: 移動環境下での受信ノード C の受信結果 (抜粋)

時刻	スループット	パケット欠落数	ジッタ	緯度	経度	RSSI	CINR
19:53:50	960000	0	0.651	35.38742893	139.4294865	-61.75	21.50
19:53:51	960000	0	0.685	35.38743288	139.4294486	-61.75	21.50
19:53:52	960000	0	0.551	35.38744332	139.4294125	-61.75	21.50
19:53:53	960000	0	0.609	35.38744975	139.4293723	-59.81	21.87
19:53:54	960000	0	0.525	35.38744167	139.42934	-56.50	22.50
19:53:55	960000	0	0.512	35.3874203	139.4293123	-56.50	22.50
19:53:56	960000	0	0.644	35.38739167	139.4292883	-56.50	22.50
19:53:57	960000	0	0.579	35.387362	139.4292691	-56.40	22.50
19:53:58	960000	0	0.544	35.3873271	139.4292512	-56.00	22.50
19:53:59	960000	0	0.637	35.38729273	139.4292364	-56.00	22.61
19:54:00	960000	0	0.571	35.38726333	139.4292233	-56.00	23.50
19:54:01	960000	0	0.681	35.38723613	139.4292073	-56.00	23.50
19:54:02	960000	0	0.640	35.38720978	139.4291933	-60.50	22.00
19:54:03	960000	0	0.678	35.38718202	139.4291787	-60.50	22.00
19:54:04	960000	0	0.729	35.38715	139.4291667	-60.50	22.00
19:54:05	960000	0	0.747	35.38712365	139.4291574	-60.50	22.00
19:54:06	960000	0	0.872	35.38709257	139.4291486	-62.48	20.56
19:54:07	960000	0	0.841	35.38706378	139.429139	-63.25	20.00

表 6.19: 移動環境下でのパケット欠落パターンの相関係数

		相関係数
A	B	0.01155782
A	C	0.00088435
B	C	-0.00064720

## 6.7 本章のまとめ

本章では本研究で実装した WiMAX ネットワーク性能測定ツールを用いて行った実験を説明した。実装した性能測定ツールによって実効スループット、受信端末の GPS 情報、RSSI、CINR、変調方式を取得することが出来ることが示され、CINR 値がパケット欠落率に大きく影響することが確認できた。また、WiMAX マルチキャスト上で IP マルチキャスト送信を行った場合での、パケットの欠落パターンの各受信ノード間の相関係数の計算を行えることが示され、屋外実無線環境、同軸ケーブル接続による試験環境の両方において、各受信ノードのパケット欠落パターン間で相関関係にないことが示された。

次章では本論文をまとめ、今後の課題について述べる。

## 第7章 結論

本章では本研究の結論と今後の課題について述べる。

### 7.1 結論

Mobile WiMAX は環境要因によって通信品質が大きく変動する通信技術である。また、IP ネットワークにおいては、IP 層が下位の層を抽象化することで、上位の層が下位層を意識せずに通信することを可能にしているが、下位層の状態をアプリケーションが理解し適応的に動作することで通信効率が良くなることが期待される。こうしたクロスレイヤな通信制御の技術開発には IP 層と下位層の性能を同時に測定するシステムが必要である。本研究では、WiMAX ネットワーク性能測定システムの要件について検討し、開発を行った。また、著者が学ぶ慶應義塾大学湘南藤沢キャンパス周辺で展開されている藤沢地域 WiMAX を用いて、本 WiMAX ネットワーク性能測定システムの実験を行い、スループット、RSSI、CINR、位置情報を計測できることを確認し、また、CINR 値がパケットの欠落率に影響を及ぼすこと、WiMAX MCBCS を利用したマルチキャスト通信において、WiMAX 区間で起きたパケットの欠落は各ノード間で相関関係を持たないことが実験で示された。これらのことから、クロスレイヤでのネットワーク性能測定システムは有用である。

### 7.2 今後の課題

本節では、本研究の今後の課題として以下の事項を挙げる。

#### 計測するパラメータの拡大

本研究では、CPE から取得する WiMAX の状態を示すパラメータとして RSSI 値と CINR 値のみしか扱えていないが、より多くの、WiMAX のレイヤの情報を反映したパラメータを計測することで、より正確で有用なツールと出来ると考えている。

#### WiMAX レイヤの情報を活用したアプリケーション制御

アプリケーションレイヤでそれらのパラメータを用い、現在の環境の WiMAX 転送特性を把握し、アプリケーションレイヤと WiMAX レイヤでレイヤーバイオペレーションすることで、より効率的なデータ転送が出来ないか検討をする。

#### 計測されたネットワーク品質と主観的なネットワーク品質の比較

実装したシステムによって計測されたネットワーク品質と、アプリケーションの利用者が主観的に感じるネットワーク品質を比較し、どの程度のネットワーク品質であれば不快感を覚えることなく利用できるかを示し、WiMAX レイヤの情報を活用したアプリケーション制御に活かす。

## 参考文献

- [1] オープンワイヤレスプラットフォーム合同会社 – Open Wireless Platform Lab. <http://www.openwp.net/>. 1.1
- [2] RACOW.net. <http://www.racow.net/>. 1.1
- [3] 庄納 崇. *WiMAX教科書*. 2008. 1.1, 2.1, 2.1.2
- [4] 吉田憲史 and 吉田憲史 and 洞井裕介 and 吉田成志 and 佐藤克彦 and 青木伸行 and 松本伸史 and 三次 仁. WiMAXにおける信頼性マルチキャスト手法の提案. 信学技報, vol. 111, no. 68, RCS2011-27, pages 47–52, 2011. 1.1
- [5] 川上貴宏. IP ストリーム伝送性能の測定ツール Sperf の開発. 平成 16 年度 広島市立大学 修士論文, 2005. 1.1, 3.1, 3.2
- [6] 日本無線株式会社. 平成 21 年度第 2 次補正予算 0155-0101 「ネットワーク統合制御システム標準化等推進事業」(環境負荷低減を実現するためのワイヤレスシステムに関する要件)のうち「WiMAX を利用したデータ収集システム」に関する開発・実証成果報告書. Technical report, 2011. 1.1
- [7] Colin Perkins. マスタリング *TCP/IP RTP* 編. 2004. 1.1
- [8] The IEEE 802.16 Working Group. <http://www.ieee802.org/16/>. 2.1
- [9] 地域 WiMAX 推進協議会 — 地域 WiMAX とは. <http://www.chiiki-wimax.jp/about/index.html>. 2.1.3
- [10] 慶應義塾大学. 平成 21 年度第 2 次補正予算 0155-0101 「ネットワーク統合制御システム標準化等推進事業」(環境負荷低減を実現するためのワイヤレスシステムに関する要件)のうち「WiMAX を利用したデータ収集システム」に関する開発・実証成果報告書. Technical report. 2.2
- [11] Net-SNMP. <http://www.net-snmp.org/>. 5.4.1
- [12] C# Based Open Source SNMP for .NET and Mono. <http://sharpsnmplib.codeplex.com/>. 5.4.1

# 謝辞

本論文の作成にあたり、御助言をいただきました慶應義塾大学環境情報学部教授村井純博士、同学部教授中村修博士、同学部准教授楠本博之博士、同学部専任講師 Rodney D. Van Meter III 博士、同学部准教授植原啓介博士、同学部教授武田圭史博士に感謝します。

また、常にご指導頂いた環境情報学部准教授 三次仁博士、政策メディア研究科特別専任講師 羽田久一博士、同研究科特別研究助教 鈴木茂哉氏、中根雅文氏に感謝いたします。

Auto-ID でお世話になりました神奈川工科大学 情報工学科 准教授 稲葉達也博士、慶應義塾大学 SFC 研究所 松本伸史氏、株式会社ブロードバンドタワー 青木伸行氏、株式会社日放電子 白石雅彦氏、株式会社 KDDI 神谷尚保氏、田村哲朗氏、株式会社インターネットイニシアティブ 佐藤泰介氏、佐藤龍氏、慶應義塾大学 SFC 研究所 金仙麗氏に感謝致します。特に、松本伸史氏には、本研究を進めるにあたって欠くことのできない御助力を頂きました。Auto-ID で研究生生活を共にした慶應義塾大学政策メディア研究科博士課程、鈴木詩織氏、同修士課程 江村圭吾氏、山口修平氏、米村茂氏、宮崎圭太氏、株式会社インターネットイニシアティブ 山田真弘氏、日本電信電話株式会社 富田千智氏、東京大学大学院 学際情報学府 学際情報学専攻 広石達也氏、慶應義塾大学環境情報学部 佐藤友紀氏、横石 雄大氏、Doan Hoai Nam 氏、五十嵐祐貴氏、吉田守氏、三樹良亮氏、総合政策学部 小澤みゆき氏、張駿翔氏に感謝いたします。

そして徳田・村井・楠本・中村・高汐・重近・バンミーター・植原・三次・中澤・武田 合同研究プロジェクトの諸氏皆々様に感謝致します。

最後に、23 年間ここまで育て上げてくれた、父、能島弘光、母、能島和美、姉、能島仁美に心から感謝いたします。

以上を持って謝辞とさせていただきます。ありがとうございました。