The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	コグニティブ無線による異種無線システム統合制御に関する研究
Author(s)	花岡, 誠之
Citation	大阪大学, 2010, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/1318
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

コグニティブ無線による
異種無線システム統合制御に関する研究

2010 年 7 月

大阪大学 大学院工学研究科
電気電子情報工学専攻

花岡 誠之

内容梗概

本論文は，著者が大阪大学大学院工学研究科電気電子情報工学専攻在学中に行ったコグニティブ無線による異種無線システム統合制御に関する研究成果をまとめたものである．

第１章では，本研究の背景となる研究分野に関して現状と問題点を述べ，本研究の位置づけを明確化する．

第２章では，まずヘテロジニアスネットワークにおける異種無線システム統合の意義を明確化する．次に異種無線システムが導入されている空間において各無線システムの伝送容量をどのように把握し，またどのように異なる無線システムの無線リソースを統合的に制御すべきかについて議論することにより，異種無線システム統合制御に向けた課題を明確にする．

第３章では，異種無線システムが導入されている空間における各無線システムの伝送容量の把握方法として，コグニティブ無線を活用した無線環境認識技術を提案する．提案方式では複数の無線通信システムの接続可能性と期待される伝送容量を無線環境と規定し，コグニティブ無線の考え方に基づいて，基地局あるいはアクセスポイント側で受信される端末からの受信信号強度による無線環境認識を行っている．また計算機シミュレーション及び WiMAX と無線 LAN で構成される基本実験機の屋内実験結果により，提案方式の有効性を明らかにする．

第４章では，ヘテロジニアスネットワークにおける異種無線システム統合を実現するためのリソース制御方式を提案する．提案方式では，アプリケーションに対する要求 QoS などを考慮した個々のユーザの通信品質向上とヘテロジニアスネットワークの伝送容量増大化の観点に基づきリソース利用率の平準化を図ることを特徴とする．さらにこの提案方式を実現するための高速システム切替プラットフォームを構築し，計算機シミュレーション及び WiMAX と無線 LAN で構成される基本実験機の屋内実験結果により，提案方式の有効性を明らかにする．

第5章では，第 3 章及び第 4 章で提案したリソース制御方式及び高速システム切替プラットフォームの商用ネットワーク構成での動作検証を目的とし，商用携帯電話システムのシステム構成及びネットワーク構成を踏襲してプラットフォームを構築する際の課題を明確にする．また，同一無線事業者によってヘテロジニアスネットワークが構築されることを想定し，WiMAX，無線 LAN，携帯電話のアクセスポイントを実装した実験機を構築し，実験機を用いた屋外実験結果により，提案方式は実伝搬路環境でも有効に動作することを明らかにする．

第6章は，本論文の結論であり，本研究で得られた結果の総括を行う．

謝辞

本論文は，大阪大学大学院工学研究科電気電子情報工学専攻教授三瓶政一博士のご指導の下，筆者が大阪大学大学院工学研究科電気電子情報工学専攻在学中に行った研究成果をまとめたものである．本研究を進めるにあたり三瓶教授から賜ったご懇意なる教示，ご鞭撻に対し，深甚なる感謝の意を表する次第である．

また，本研究を遂行するにあたり，大阪大学大学院工学研究科電気電子情報工学専攻教授滝根哲哉博士，ならびに同専攻准教授宮本伸一博士から賜ったご懇意なる教示，ご鞭撻に対し，深甚なる感謝の意を表する次第である．

さらに，筆者の大学院在学中，講義等を通じて電気電子情報工学の各分野ならびに本論文に関して多大なご指導を賜った大阪大学大学院工学研究科教授北山研一博士，同教授河崎善一郎博士，同教授小牧省三博士，同教授馬場口登博士，同教授井上恭博士，大阪大学産業科学研究所教授鷲尾隆博士，同教授溝口理一郎博士をはじめとする先生方に厚く感謝申し上げる．

また，筆者の大学院在学中，折に触れ有益なご助言と支援を賜った大阪大学大学院工学研究科電気電子情報工学専攻ワイヤレスシステム工学領域の諸兄に感謝申し上げる．

なお本研究は，(株)日立製作所において平成 17 年 12 月から平成 20 年 3 月まで行った総務省受託研究「コグニティブ無線通信技術の研究開発」を基と成しており，この間，本研究の機会を与えて頂き，またご指導，ご鞭撻を頂いた平田哲彦氏 (現 (株)日立製作所ネットワークソリューション事業部ネットワーク統括本部本部長)，西村信治博士 ((株)日立製作所中央研究所新 ICT プラットフォームプロジェクト部長)，三木和穂氏 (同研究所ネットワークシステム研究部部長) に心からお礼申し上げる．

また本研究を進めるにあたり，(株)日立製作所中央研究所ネットワークシステム研究部の吉澤聡氏と矢野正氏には，研究生活全般にわたりご指導頂くと共に本論文をまとめるに際し励ましを頂いた．同研究所の山本淳二博士，若山浩二氏，片岡幹雄氏，下川功氏，石川崇氏，故山岡綾史氏にはそれぞれ実験環境構築やデータ取得などを担当頂いた．また実験機開発にあたっては (株)日立製作所システム開発研究所，(株)日立コミュニケーションテクノロジー(現 日立製作所通信ネットワーク事業部)及び日立情報通信エンジニアリング(株)の各位に多大なるご協力を賜った．これらの方々に心から感謝申し上げる．

本研究の遂行及び論文の執筆は，以上の方々をはじめとする関係各位の多くの方々により支えられたものであり，ここに深甚なる感謝の意を表する次第である．

最後に，常日頃より私の健康に気遣い，寛大なる心をもって惜しみない援助と理解を頂いた私の家族に心より感謝する．

目次

第 1 章　序論 1

第 2 章　ヘテロジニアスネットワークにおける異種無線システム統合制御 7

2.1　緒言 7

2.2　異種無線システム制御例とその位置づけ 8

2.2.1　MIRAI アーキテクチャ 8

2.2.2　CWC (Cognitive Wireless Clouds) 10

2.2.3　IEEE P1900.4 12

2.3　異種無線システム統合制御の要求条件 15

2.4　異種無線システム統合制御の課題 18

2.5　結言 22

第 3 章　コグニティブ無線を活用した無線環境認識技術 23

3.1　緒言 23

3.2　各空間の伝送容量把握実現における課題 24

3.3　コグニティブ無線 25

3.4　コグニティブ無線基地局 27

3.4.1　ネットワーク主導センシング機能 27

3.4.2　ネットワーク主導無線環境認識機能 28

3.5　計算機シミュレーション 30

3.5.1　各空間における受信信号強度測定 30

3.5.1.1　シミュレーション諸元 30

3.5.1.2　シミュレーション結果 32

3.5.2　各空間における伝送容量 33

3.5.2.1　RSSI 値と伝送容量 33

3.5.2.2　シミュレーション諸元 34

3.5.2.3　シミュレーション結果 34

3.6　基本実験機による動作確認 35

3.6.1　基本実験機の諸元 *35*
3.6.2　動作確認結果 *38*
3.7　結言 39
第 4 章　ヘテロジニアスネットワークにおけるリソース制御技術 41
4.1　緒言 41
4.2　リソース制御における課題 41
4.3　無線システムにおけるリソース制御 42
4.4　ネットワーク主導リソース制御 43
4.4.1　ネットワーク主導リソース制御の基本ポリシー *43*
4.4.2　ネットワーク主導リソース制御の適用条件 *44*
4.4.3　ネットワーク主導リソース制御フロー *46*
4.5　異種システム間システム切替プラットフォーム 52
4.6　計算機シミュレーション 53
4.6.1　基本シミュレータによる動作確認 *53*
4.6.1.1　シミュレーション諸元 53
4.6.1.2　基本シミュレータの動作シナリオ 54
4.6.1.3　基本シミュレーション評価結果 55
4.6.2　システムシミュレータによる評価 *57*
4.6.2.1　シミュレーション諸元 57
4.6.2.2　シミュレータ動作シナリオ 59
4.6.2.3　伝送容量の期待値 59
4.6.2.4　シミュレーション結果（UDP) 60
4.6.2.5　シミュレーション評価結果（TCP) 67
4.7　基本実験機による動作確認 73
4.7.1　基本実験機システム構成 *73*
4.7.2　基本実験機諸元及び外観 *74*
4.7.3　動作確認シナリオ *75*
4.7.4　動作確認結果 *76*
4.8　結言 79
第 5 章　実験機による実証実験 81
5.1　緒言 81
5.2　実験機構成 82
5.2.1　携帯電話システムの追加における実装上の課題 *82*

5.2.1.1 サービスエリアと制御範囲 82
5.2.1.2 端末認証及び IP アドレス体系 82
5.2.1.3 セキュア通信 82
5.2.2 実装上の課題に対するアプローチ 83
5.2.2.1 サービスエリアと制御範囲 83
5.2.2.2 端末認証及び IP アドレス体系 83
5.2.2.3 セキュア通信 84
5.2.3 システム構成 84
5.2.4 制御フロー 85
5.2.4.1 端末認証及び IP アドレス付与方法 85
5.2.4.2 ネットワーク主導のシステム切替方法 87
5.2.4.3 パケットフォーマット 89
5.2.5 実験機諸元 91
5.2.5.1 システム仕様及び実験機外観 91
5.2.5.2 プロトコルスタック 93
5.3 実験機による評価 95
5.3.1 装置の動作確認 95
5.3.1.1 パケット伝送速度 95
5.3.1.2 伝送遅延 98
5.3.2 屋外環境の基礎データ取得 98
5.3.2.1 各空間における各無線システムの受信信号強度 98
5.3.2.2 各空間における各無線システムの PER 100
5.3.3 ユーザ移動に伴う切替動作 102
5.3.4 高速システム切替動作 104
5.3.5 ネットワーク主導リソース制御の動作 104
5.4 結言 105
第 6 章 結論 107
参考文献 109
本論文に関する原著論文 121

図目次

図 2.1 MIRAI アーキテクチャ 9
図 2.2 Cognitive Wireless Clouds の概念 10
図 2.3 Cognitive Wireless Clouds のシステム構成 11
図 2.4 IEEE 1900.4 のシステム構成 13
図 2.5 IEEE 1900.4 における DRRUO Use Case 14
図 2.6 ヘテロジニアスネットワークにおける伝送容量 16
図 2.7 異種無線システム制御における本論文の位置づけ 18
図 2.8 ユーザ移動に伴うリソース制御例（QoS 制御対応システムの場合） 19
図 2.9 ユーザ移動に伴うリソース制御例（QoS 制御未対応システムの場合） 20
図 3.1 各無線システムの使用状況と White Space の関係 26
図 3.2 既存の周波数運用に基づくコグニティブ無線の運用例 26
図 3.3 基地局における受信電力による各空間の無線環境把握 28
図 3.4 同一場所に機能を集約したコグニティブ無線基地局の実装例 29
図 3.5 機能を分散配置させたコグニティブ無線基地局 30
図 3.6 シミュレータ外観と端末移動経路 31
図 3.7 端末移動に伴う受信信号強度の変化 33
図 3.8 端末移動に伴う伝送速度の変化 35
図 3.9 基本実験機のシステム構成 36
図 3.10 基本実験機の外観 38
図 3.11 基本実験機による RSSI 値と伝送速度の測定結果 39
図 4.1 WiMAX システムにおけるリソース制御 43
図 4.2 ネットワーク主導リソース制御の適用範囲 46
図 4.3 システム切替推奨候補の無線システム数カウントフロー 48
図 4.4 切替推奨候補の無線システム数が 2 の場合の制御フロー 48
図 4.5 切替推奨候補の無線システム数が 1 の場合の制御フロー 49
図 4.6 切替推奨候補の無線システム数が 0 の場合の制御フロー 50
図 4.7 提案プラットフォーム 53

図 4.8 基本シミュレータの外観と端末の移動経路 55
図 4.9 提案リソース制御方式よる各ユーザの伝送容量 56
図 4.10 システムシミュレータの外観 58
図 4.11 EVDO における各ユーザの伝送速度算出方法 59
図 4.12 ヘテロジニアスネットワークにおける伝送容量 60
図 4.13 端末配置と各ユーザの移動経路（平均データ送出速度=104 kbps） 61
図 4.14 ユーザ伝送速度とシステム切替履歴例 （平均データ送出速度=104 kbps） 62
図 4.15 端末配置と各ユーザの移動経路（平均データ送出速度=416 kbps） 63
図 4.16 ユーザ伝送速度とシステム切替履歴例 （平均データ送出速度=416 kbps） 63
図 4.17 WiMAX 切替閾値と平均伝送速度との関係 65
図 4.18 切替閾値とユーザ伝送速度の関係（左:-83 dBm，右:-71 dBm） 65
図 4.19 無線 LAN 切替閾値と平均伝送速度との関係 66
図 4.20 無線システム切替閾値と平均伝送容量の関係 67
図 4.21 UDP 送信時（左）と TCP 送信時（右）の比較 （平均データ送出速度=104 kbps） 69
図 4.22 端末配置と各ユーザの移動経路 （平均データ送出速度=2.08 Mbps） 70
図 4.23 UDP 送信時（左）と TCP 送信時（右）の比較 （平均データ送出速度=2.08 Mbps） 70
図 4.24 WiMAX から EVDO への移動時における TCP 伝送速度 72
図 4.25 WiMAX から EVDO への移動時におけるウィンドウサイズ変化 72
図 4.26 基本実験機のシステム構成 73
図 4.27 基本実験機のシステム構成及び IP アドレス体系 74
図 4.28 基本実験機の外観 75
図 4.29 実験シナリオ 76
図 4.30 各ユーザの動作画面（スクリーンショット:左:ユーザ#1，右:ユーザ#2） 77
図 4.31 リソース制御方式の違いによる各ユーザの伝送速度比較 78
図 5.1 実験機のシステム構成 85
図 5.2 EVDO から無線 LAN へのシステム切替時に必要な構成 86
図 5.3 同一 IP アドレス付与方法 87
図 5.4 提案プラットフォームにおけるシステム切替方法 88
図 5.5 システム切替制御シーケンス 89
図 5.6 実験機のパケットフォーマット 90
図 5.7 各無線システムの電波放射エリア設計 91
図 5.9 実験機の外観 92
図 5.10 集約した装置の外観，及び同装置とシステム構成との関係 93
図 5.11 本実験機における EVDO のプロトコルスタック 94

図 5.12 本実験機における WiMAX のプロトコルスタック 94
図 5.13 本実験機における無線 LAN のプロトコルスタック 95
図 5.14 開発装置の動作確認系と伝送容量測定箇所 96
図 5.15 EVDO の RSSI 分布 99
図 5.16 WiMAX の RSSI 分布 99
図 5.17 無線 LAN の RSSI 分布 100
図 5.18 EVDO の PER 分布 101
図 5.19 WiMAX の PER 分布 101
図 5.20 無線 LAN の PER 分布 102
図 5.21 端末の移動経路 103
図 5.22 端末移動に伴うシステム切替の様子 103
図 5.23 高速システム切替の様子（100 ms でのシステム切替時) 104
図 5.24 システム利用効率平準化実現に向けたリソース制御動作 105

表目次

表 3.1 シミュレーション諸元 31
表 3.2 無線 LAN における各伝送容量実現に必要な受信電力 34
表 3.3 各無線システムのアクセスポイントから取得される主な無線情報 36
表 3.4 基本実験機諸元 37
表 4.1 シミュレーション諸元 54
表 4.2 各ユーザのアプリケーションと QoS 54
表 4.3 システムシミュレータの諸元 58
表 4.4 伝送容量比較（平均データ送出速度=104 kbps） 62
表 4.5 伝送容量比較（平均データ送出速度=416 kbps） 64
表 4.6 切替閾値最適化後の伝送容量比較（平均データ送出速度=416 kbps） 67
表 4.7 伝送容量比較（平均データ送出速度=104 kbps） 68
表 4.8 伝送容量比較（平均データ送出速度=2.08 Mbps） 70
表 4.9 基本実験機諸元 74
表 5.1 実験機システムの諸元 92
表 5.3 伝送容量測定箇所 96
表 5.4 各測定箇所における伝送容量 97
表 5.5 ランダムシステム切替時の伝送容量 97
表 5.6 End-to-End での遅延時間測定結果 98

略語

3GPP	Third Generation Partnership Project	
3GPP2	Third Generation Partnership Project 2	
AAA	Authentication, Authorization and Accounting	
AP	Access Point	アクセスポイント
ASN-GW	Access Service Network Gateway	
AT	Access Terminal	
BAC	Basic Access Component	
BAN	Basic Access Network	
BE	Best Effort	
BPSK	Binary Phase Shift Keying	
BS	Base Station	基地局
BSI	Base Station Interface	
CHAP	Challenge Handshake Authentication Protocol	
CCN	Common Core Network	共通コア ネットワーク
CNM	Cognitive Network Manager	
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance	
CTM	Cognitive Terminal Manager	
CWC	Cognitive Wireless Clouds	
DHCP	Dynamic Host Configuration Protocol	
DL	Downlink	下り回線
DRRUO	Distributed Radio Resource Usage Optimization	
DSA	Dynamic Spectrum Access	
EVDO	cdma2000 1x Evolution Data Optimized	
FA	Foreign Agent	
FDD	Frequency Division Duplex	周波数分割 複信
FTP	File Transfer Protocol	

GR	Gateway Router	
GRE	Generic Routing Encapsulation	
HA	Home Agent	
HSPA+	High Speed Packet Access +	
IEEE	The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.	
IKEv2	Internet Key Exchange version 2	
IP	Internet Protocol	
IPSec	Security Architecture for Internet Protocol	
ITU-R	International Telecommunication Union - Radiocommunication Sector	
LAN	Local Area Network	
LCNM	Local Cognitive Network Manager	
LOC	Locator	
LRM	Local Resource Manager	
MAC	Media Access Control	
MAN	Metropolitan Area Network	
MIP	Mobile IP	モバイル IP
MIRAI	Multimedia Integrated Network by Radio Access Innovation	
NF	Noise Figure	雑音指数
NI	Network Interface	
NRM	Network Reconfiguration Manager	
nrtPS	non-realtime Packet Service	
NS	Network Selector	
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing	
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access	
OSI	Open Systems Interconnection	
PAP	Password Authentication Protocol	
PDIF	Packet Data Interworking Function	
PDSN	Packet Data Serving Node	
PER	Packet Error Rate	
PF	Proportional Fairness	
PPP	Point-to-Point Protocol	
QAM	Quadrature Amplitude Modulation	

QoS	Quality of Service	
QPSK	Quaternary Phase Shift Keying	
RAN	Radio Access Network	
RAT	Radio Access Technologies	
RE	Radio Enabler	
RF	Radio Frequency	
RFC	Request for Comments	
RSM	RAN Static Manager	
RSSI	Received Signal Strength Indicator	受信信号強度
RTO	Retransmission Timeout	
rtPS	real-time Packet Service	
RTT	Round Trip Time	
SCC	Standards Coordinating Committee	
SIP	Session Initiation Protocol	
SNR	Signal to Noise Power Ratio	
SRTT	Smoothed Round Trip Time	
TCP	Transmission Control Protocol	
TDD	Time Division Duplex	時分割複信
TOS	Type of Service	
TRM	Terminal Reconfiguration Manager	
UDP	User Datagram Protocol	
UGS	Unconsolicited Grant Services	
USIM	Universal Subscriber Identity Module Card	
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access	

第1章

序論

近年インターネットにおいてはウェブ閲覧や電子メールといった従来の利用方法に加えて，金融取引や映像・音楽の視聴や配信等のリッチコンテンツまで幅広く利用されるようになるなどトラフィックが急速に増大している．無線通信システムにおいても今後大容量コンテンツを用いた多様なサービスの提供が行われると見込まれており，情報通信審議会 情報通信技術分科会 携帯電話等周波数有効利用方策委員会によれば 3.9 世代無線システムのサービスにおけるトラフィックは 2007 年に対して 2017 年では約 200 倍に増大すると試算している [1, 2].

携帯電話の歴史を振り返ると，無線システムにおいて増大するトラフィックを収容すべく 1979 年に開始された第 1 世代の自動車電話サービス以降，1993 年に導入された第 2 世代の携帯電話サービスでは 28.8 kbps，2001 年に導入された第 3 世代では 384 kbps，2003 年に導入された第 3.5 世代では 2.4 Mbps と，新世代のシステムの導入に伴い，周波数利用効率を向上させつつ最大伝送速度の向上を図ることでトラフィックの収容能力とユーザの伝送速度向上が行われてきた．今後もこの方向性は変わらないが，加速する最大伝送速度の向上とそれに伴うトラフィック量の増大に対応するべくその都度大規模な設備投資をして世代交代してきた従来の進め方は，世代交代までの期間が世代を追う毎に短縮している現状では，設備投資の回収期間も考慮すると今後ますます困難となる．また都市部の密集地域におけるトラフィック量と郊外におけるトラフィック量が異なるにも関わらず，郊外において都市部と同じサービスが提供可能な装置を導入することは設備投資効率の観点からも見合わなくなってきている．そこで第 3 世代以降は，設備投資する際，汎用性の高いハードウェア装置にソフトウェアでアップグレード可能なソフトウェアを組み合わせて動作するソフトウェア無線構成の装置を各無線装置として採用し，ユーザが密集している

地域では最新の仕様の導入によるトラフィック収容能力とユーザの伝送速度向上を図ると同時に，ユーザがあまり密集していない地域では世代更新の速度を鈍化させることで設備投資に伴う負担を軽減するなど，仕様の異なるシステムの混在を許容する形態でシステムを運用する方針に変わりつつある．

また今日 WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) [3-6] や無線 LAN (Local Area Network) に代表される，携帯電話とは異なる無線ブロードバンドシステムが，場所によっては携帯電話システムの代替として活用されることも可能になりつつある．そこで，携帯電話のみの単一システムによる全国展開ではなく，場所によっては異なる事業者で運用される異種システムを併用するアプローチを取ることで設備投資を低減しつつ，それぞれの場所に応じてユーザの満足するサービスを提供することも検討されている．これらの無線システムを取り巻く状況を踏まえると，将来の無線システムは，加速するトラフィック量の増大と場所によるトラフィックの偏在化の両方に対応するために，マイグレーションに伴う複数世代や複数仕様の携帯電話システムの併用に加えて WiMAX や無線 LAN などの異種無線システムを併用するヘテロジニアスネットワークとして運用していく必要がある．

ここでヘテロジニアスネットワークに関するこれまでの研究を振り返ると，マルチモード端末の使用による携帯電話システムと無線 LAN 間でのハンドオーバ，複数無線システムが使用可能な環境におけるユーザの嗜好に応じた無線システムの選択制御など，端末主導で行う技術の研究が行われてきた．一方で，端末側に対向するネットワーク側の視点に立つと，ネットワーク側では各ユーザがどの無線システムを利用可能か，またどの程度の伝送容量が実現可能かなどを把握することができ，さらにこれらの情報を統合して扱うことにより，ヘテロジニアスネットワークにおけるトラフィック分布も把握することが可能である．したがって，トラフィックの時間的変動や空間的偏在化に対処する課題の解決には，端末主導の制御より，ネットワーク主導の制御の方がより効果的であると考える．そこでヘテロジニアスネットワークを，複数の無線システムが互いに接続されている一つのネットワークと見なし，すべてのユーザの接続先であるネットワーク側の視点で捉え直してみる．

まずヘテロジニアスネットワーク全体の伝送容量に注目すると，ヘテロジニアスネットワークを構成する複数の無線システムのサービスエリアはそれぞれ異なることから，ヘテロジニアスネットワークは空間によって伝送容量が異なる無線ネットワークである．またヘテロジニアスネットワークでは，単一の無線システムにおいて無線リソースとして扱われてきた周波数や時間，電力等に加えて，空間的に偏在する，無線システムの切替制御も無線リソース制御の一部とみなすことができる．また，無線システムの切替をも含むヘテロジニアスネットワークの無線リソース制御によって，増大するトラフィックの無線システム間での分散化，あるいはヘテロジニアスネットワークの空間内で局所的に発生する異常トラフィックへの対

処なども期待できる．さらに無線システムの切替制御にとどまらず，これら複数の無線システムが同時に利用可能な環境において，一部のユーザに対して，複数の無線システムのリソースを配分することで個々のユーザの無線回線の伝送速度向上やシステムダイバシチによる無線回線の安定化を図るなど，ヘテロジニアスネットワーク全体の無線リソースの統合的制御に基づいてサービスを一層向上させる可能性もある．そこで本研究では，ネットワーク主導で複数の無線システムの無線リソースを統合的に制御する異種無線システム統合制御を提案する．

異種無線システム統合制御を実現する上での課題としては，まずヘテロジニアスネットワークにおける伝送容量を把握するため，異種無線システムが導入されている空間における無線環境を認識する必要がある．ヘテロジニアスネットワークにおける無線環境の認識は，その空間において使用可能な無線システムとその受信信号強度を検知することと等価であり，この方法としてコグニティブ無線が有効である．コグニティブ無線は対象となる無線周波数をセンシングすることで通信可能な空き無線周波数を認識し，その情報に基づき通信を行う方式であり，現在精力的に研究が行われている．このコグニティブ無線におけるセンシングの対象を単なる無線周波数の使用状況の検出ではなく，利用可能な無線システムをも含めた検出と捉え，これを活用することでヘテロジニアスネットワークにおける各空間の無線環境を正しく認識することが可能となる．

次にヘテロジニアスネットワークにおいて各ユーザが利用可能な伝送容量を各ユーザの無線リソースと定義する時，システムに接続されている全ユーザの無線リソースを把握した上で，ネットワーク主導の統合的制御に基づき，各ユーザに無線リソースを配分するためのプラットフォームが必要である．ここでヘテロジニアスネットワークにおいて，一部の無線通信システムに負荷が集中すると，各ユーザの無線システムの選択肢を減らすことになり，システム選択による柔軟な無線リソース制御という無線リソースの統合的制御の利点が損なわれることになるため，無線リソース統合制御の基本はシステム間でロードバランスを図ることにあると言える．ロードバランスを図る際，システム間の負荷を分散化するだけでは，多種多様なアプリケーションを利用するユーザに満足のいく通信品質での通信を提供できるとは限らないため，それぞれの空間における伝送容量増大化と共にいかに多くのユーザの要求を満たせるかという観点に基づく，システム間の利用効率の平準化が重要となる．そこでユーザアプリケーションの QoS (Quality of Service) をネットワーク側で把握し，この情報を考慮してロードバランスを実現する方法を提案する．さらに，時間と共に変動する無線リソースの状況に応じた制御を実現するためには，プラットフォームにおいて，ネットワーク主導の高速なシステム切替機能が必須であり，また，ユーザのアプリケーション利用の観点からは，このシステム切替をユーザに意識させないで済むようにしなければならない．そこで，複数の無線システムを切り替えるためのスイッチをネットワーク側に新規に配

置し，異種無線システム間の切替をネットワーク層で実装すると共に，無線システム切替スイッチのルーティングテーブルにヘテロジニアスネットワークにおける制御内容を反映させることによりネットワーク主導で高速切替制御することを提案する．

さらにこの提案プラットフォームの有効性を確認するため携帯電話システムと WiMAX と無線 LAN の三システムを実装した実験機を構築し，実環境における振る舞いを明らかにする．

以上，ヘテロジニアスネットワークにおける無線リソース制御の実現に向けて，空間によって異なる伝送容量をもつヘテロジニアスネットワークの伝送容量増大化制御をキーワードとし，本論文ではコグニティブ無線による異種無線システム統合制御方式の提案及び特性解析を行い，その有効性を明らかにする．

本論文の構成を以下に示す．

まず第 2 章では，ヘテロジニアスネットワークにおける異種無線システム統合の意義を明確化する．次に異種無線システムが導入されている空間における各無線システムの伝送容量をどのように把握し，またどのように異なる無線システムの無線リソースを統合的に制御すべきかについて議論することにより，異種無線システム統合制御に向けた課題を明確にする．

第 3 章では，異種無線システムが導入されている空間における各無線システムの伝送容量の把握方法として，コグニティブ無線を活用した無線環境認識技術を提案する．提案方式では複数の無線通信システムの接続可能性と期待される伝送容量を無線環境と規定し，コグニティブ無線の考え方に基づいて，基地局あるいはアクセスポイント側で受信される端末からの受信信号強度による無線環境認識を行っている．また計算機シミュレーション及び WiMAX と無線 LAN により構成される基本実験機の屋内実験結果により，提案方式の有効性を明らかにする．
[本論文に関する原著論文: A1, B1, C4, C7, D1]

第 4 章では，ヘテロジニアスネットワークにおける異種無線システム統合を実現するためのリソース制御方式を提案する．提案方式では，アプリケーションに対する要求 QoS などを考慮した個々のユーザの通信品質向上と伝送容量増大の観点に基づき，リソース利用率の平準化を図ることを特徴とする．さらにこの提案方式を実現するための高速システム切替プラットフォームを構築し，計算機シミュレーション及び WiMAX と無線 LAN で構成される基本実験機の屋内実験結果により，提案方式の有効性を明らかにする．

[本論文に関する原著論文: A2, B2, C2, C5, C7, C8, D3, D4]

第 5 章では，第 3 章及び第 4 章で提案した方式及び高速システム切替プラットフォームの商用ネットワーク構成での動作検証を目的とし，商用携帯電話システムのシステム構成及びネットワーク構成を踏襲してプラットフォームを構築する際の課題を明確にする．また，同一無線事業者によってヘテロジニアスネットワークが構築されることを想定し，WiMAX，無線 LAN，携帯電話のアクセスポイントを実装した実験機を構築し，実験機を用いた屋外実験結果により，提案方式は実伝搬路環境でも有効に動作することを明らかにする．
[本論文に関する原著論文: B3, C1, C3, C6, D2, D5]

最後に第 6 章では，本論文の結論として，本研究で得られた結果の総括を行う．

第2章

ヘテロジニアスネットワークにおける異種無線システム統合制御

2.1　緒言

第 1 章で述べた通り，将来の無線システムにおいて，加速するトラフィック量の増大と場所によるトラフィックの偏在化の両方に対応するためには，システムのマイグレーションに伴う複数世代や複数仕様の携帯電話システムの併用に加えて WiMAX や無線 LAN などの異種無線システムを併用するヘテロジニアスネットワークによる運用が必要となる．ヘテロジニアスネットワークに関する研究は従来よりなされているが，それらの多くは端末主導でアクセス可能なネットワークを適宜選択する技術の研究であった．一方で，端末側に対向するネットワーク側の視点に立つと，ネットワーク側では各ユーザがどの無線システムを利用可能か，またどの程度の伝送容量が実現可能かなどを把握することができ，さらにこれらの情報を統合して扱うことによりトラフィック分布も把握可能であることから，トラフィックの時間的変動や空間的偏在化に対処する課題の解決には，端末主導の制御より，ネットワーク主導の制御の方がより効果的であると考える．

そこで本章では，ヘテロジニアスネットワークに関するこれまでの研究をネットワーク側の視点で精査することで，異種無線システム統合制御の意義を明確にする．また，異種無線システムが導入されている空間における各無線システムの伝送容量をどのように把握し，どのように複数の無線システムの無線リソースを統合的に制御すべきかについて議論することにより，異種無線システム統合制御に向けた課題を明確化する．

2.2 異種無線システム制御例とその位置づけ

2.2.1 MIRAI アーキテクチャ

ヘテロジニアスネットワークに関する研究の一つとして，ネットワーク内のラスト 1 ホップである無線アクセスの部分に注目し，複数無線システムが使用可能な環境におけるユーザの嗜好に応じた無線システムの選択を支援するものに MIRAI (Multimedia Integrated Network by Radio Access Innovation) プロジェクトがある [7-9]. 図 2.1 に本プロジェクトにおいて採用されたシステム構成を示す.

同図に示されるように，MIRAI プロジェクトにおけるシステムは，端末 (Mobile Host)，無線アクセスネットワーク (RAN: Radio Access Network)，共通コアネットワーク (CCN: Common Core Network)，及び外部ネットワーク (External Network) の四つのブロックから構成される. 外部ネットワークの中に通信相手が存在する場合には，ゲートウェイルータ (GR: Gateway Router) を介して CCN と外部ネットワークが接続される. また CCN は基地局インタフェース (Base Station Interface) を介して各 RAN に接続されている. CCN 内には，複数の RAN のリソースを統合制御するためのリソースマネージャ (Resource Manager) と端末の移動を管理する移動マネージャ (Mobility Manager) が設けられており，これらによって，各端末に対して接続可能な無線システムに関する情報が作成される.

RAN としては，トラフィック通信用の RAN の他に，端末に対して CCN で作成された接続可能な無線システムの情報の通知を目的とした，基本アクセスネットワーク (BAN: Basic Access Network) と呼ばれる独立した RAN が設けられている.

トラフィック通信用の RAN 内に存在する BS ではネットワークインタフェース (NI: Network Interface) を介して端末との間の無線リンクが確立される. 一方 BAN では，基本アクセスコンポーネント (BAC: Basic Access Component) を介して，利用可能な無線システムの情報が端末に報知される.

端末においては，ローカルリソースマネージャ (LRM: Local Resource Manager) とネットワーク選択機能 (NS: Network Selector) により，BAN を介して得られた情報や，位置情報を提供するロケータ (LOC: Locator) の情報に基づいて，RAN の選択が行われる. なお，端末に設けられている，トラフィック通信用の RAN に接続する NI が一つである理由は，端末をソフトウェア無線技術 [10-20] で実現することを前提としており，選択された RAN で通信できるように端末の機能が再構築可能であると仮定しているためである.

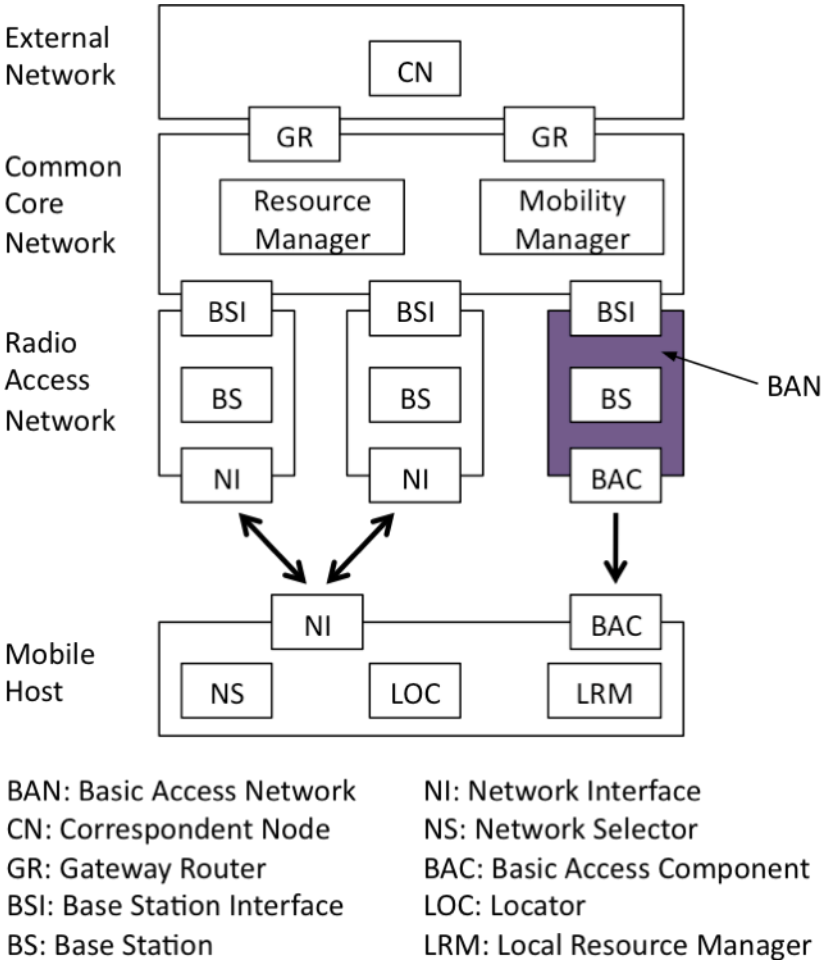


図 2.1 MIRAI アーキテクチャ

MIRAI プロジェクトのシステム構成において注目すべき点は，ネットワーク側に BAN を設けていること，及び，端末に NS があることである．すなわち，端末は BAN を介した通信により，アクセス可能な RAN の情報を容易に入手でき，またこの情報を用いて異種無線システム間の切替を端末主導で行うことにより，ユーザの移動に伴うシームレスなシステム間ハンドオーバ (垂直ハンドオーバ) を実現している．しかしながら，このシステム構成では，BAN を介して得られるアクセス可能な RAN の情報はネットワーク側のトラフィック状況に応じたものではなく，また，NS もネットワーク側の状況に応じた無線システム選択機能にはなっていない．したがって本システム構成はヘテロジニアスネットワークにおいて加速するトラフィック量の増大や場所によるトラフィック偏在化には対処できない．

2.2.2　CWC (Cognitive Wireless Clouds)

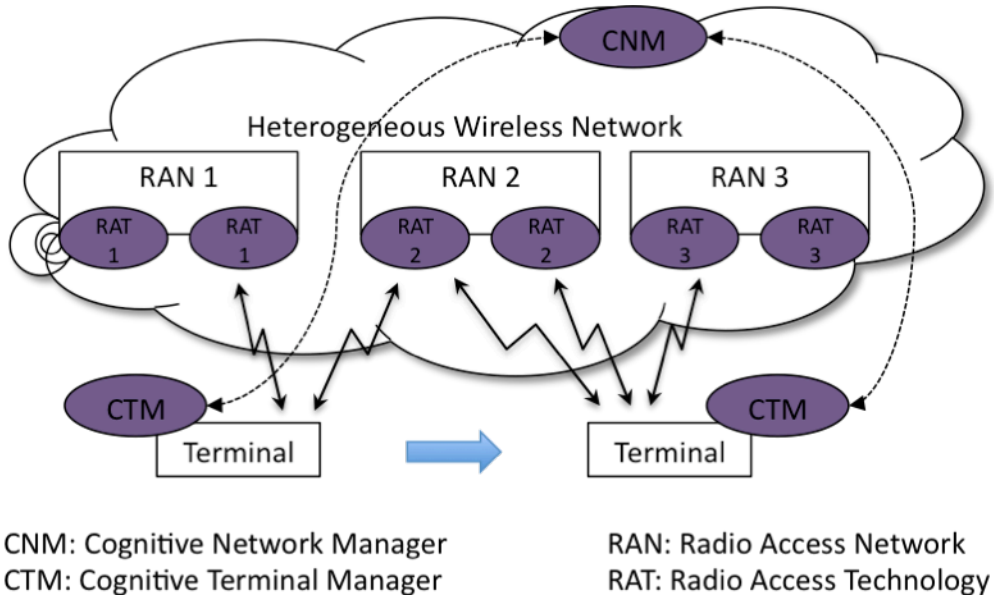


図　2.2　Cognitive Wireless Clouds の概念

MIRAI プロジェクトにおいては，端末のみで無線システムの選択が判断され，また，その判断はネットワーク側のトラフィック状況に応じたものではないため，ネットワーク側と端末側との連携が疎である．この点を補うためネットワーク側と端末側で互いに連携する機能を設け，ネットワーク側のトラフィック状況等に応じて最適な無線システムの選択をめざしたヘテロジニアスネットワークに関する研究の一つに CWC (Cognitive Wireless Clouds) がある [21-26].

CWC においては，利用可能な様々な無線システムを活用し，アプリケーションによっては複数の無線システムを同時に活用することも視野に入れたものであり，端末が高速に移動している環境でも，利用可能な RAN を適宜選択しながらシームレスに切り替える，あるいは，場合によっては同時に利用することを可能としている点が特徴である．このような複雑な RAN の切替を高速に行うためには，ネットワーク側と端末側との間で様々な情報を交換する必要がある．図 2.2 にこれらを踏まえた CWC の概念を，図 2.3 に CWC のシステム構成を示す．

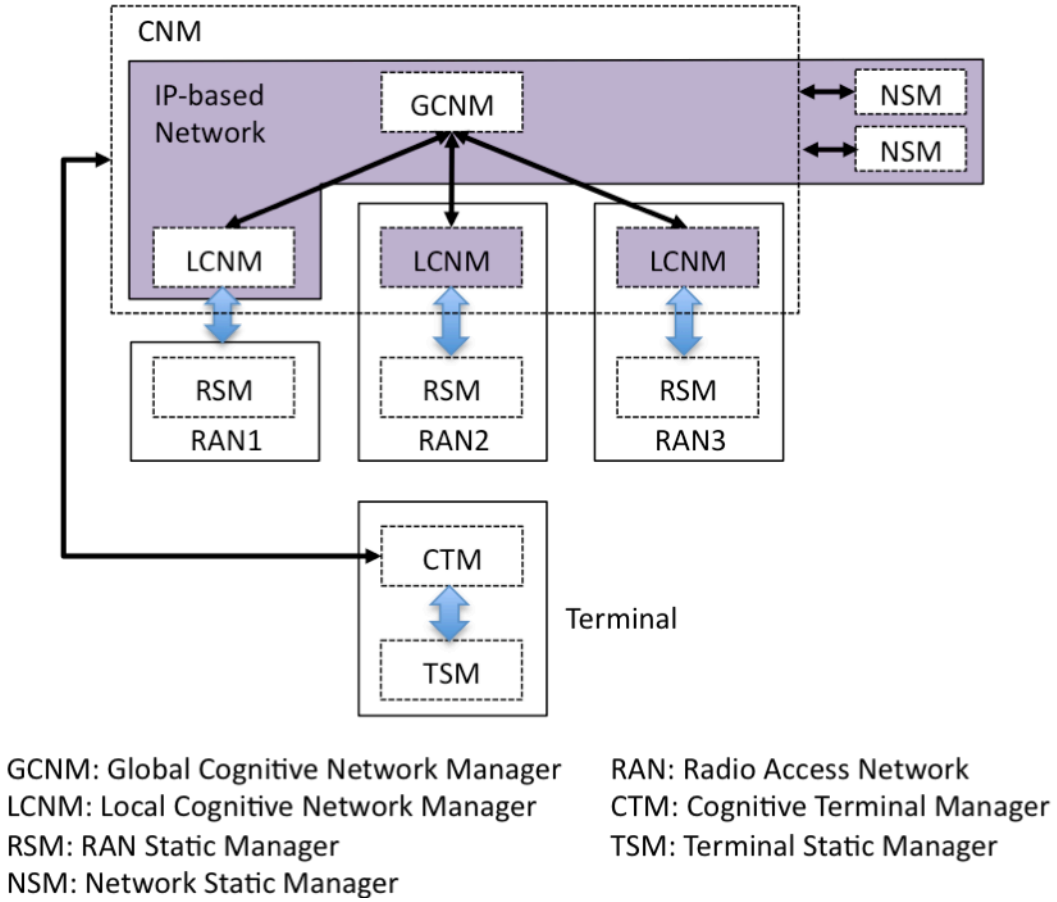


図 2.3 Cognitive Wireless Clouds のシステム構成

図 2.2 に示す通り，CWC では，コグニティブネットワークマネージャ (CNM: Cognitive Network Manager) が複数のネットワークの情報を管理し，コグニティブ端末マネージャ (CTM: Cognitive Terminal Manager) が端末側の情報を管理し，これらの間で情報を交換することにより，端末において自律分散的に最適なネットワークを選択している [24, 25]. また図 2.3 に示す通り，RAN の特性を制御する RSM (RAN Static Manager) が RAN 内の無線リソースの状況を把握し，LCNM (Local Cognitive Network Manager) が RSM からの情報を用いて，電波の型式に関する情報や，選択すべき無線システム候補の情報を端末に通知する.

このシステム構成において注目すべき点は三つある．一つ目はネットワーク側をヘテロジニアス無線ネットワークの名の下に一つの集合体として扱い，これらを制御する機能として CNM を配置している点，二つ目はネットワーク側において RAN 内の無線リソースの状況を把握可能な構成としている点，三つ目は端末側とネットワーク側で互いに情報を交換するインタフェースを備えたシステム構成を採用することにより，他のユーザや複数システムの状況を考慮した制御を可能としている点である.

これらのことは，最適な RAN の選択に際して，ネットワーク側のトラフィック状況を考慮し，その端末に最適と思われるRANをCNMが提案することも可能であることを示している．しかしながら現時点では，各端末側で自律分散的に RAN の選択を実行するユーザセントリックなアプローチの研究が先行して着手されており，端末と対向するネットワーク側における制御の CNM における具体的な制御方法等については，まだ具体化されていない部分も多い．

2.2.3　IEEE P1900.4

ヘテロジニアスネットワークに関する国際標準化の一つとして，2007 年 2 月に発足した IEEE (The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.) P1900.4 がある [27-31]．本標準化の目的は，複数の無線アクセス技術 (RAT: Radio Access Technologies) が存在する環境において無線システム全体の収容能力とサービス品質を向上させるために必要となるシステム構成，ネットワーク側，端末側それぞれに求められる機能を明確化し，それらの要求条件をまとめることにある．本標準化は2009年2月にその基本システム構成が策定され [28]，現在は策定されたシステム構成を前提に各機能エンティティ間のインタフェース及びプロトコルを規定する 1900.4.1 プロジェクトと，策定されたシステム構成を修正し周波数共用化が可能な周波数帯における周波数共用ネットワークの実現に向けた新しいシステム構成及びインタフェースを規定する 1900.4a プロジェクトの二つが進行中である [27]．

図 2.4 に IEEE 1900.4 において策定されたシステム構成を示す．IEEE 1900.4 では MIRAI プロジェクトにおけるシステム構成が拡張され，Radio Enabler と呼ばれる双方向の論理的な共通シグナリングをネットワーク側と端末側で構築する点が特徴である．IEEE 1900.4 ではこの Radio Enabler を介して，端末を制御する端末再構築マネージャ (TRM: Terminal Reconfiguration Manager) とネットワーク側を制御するネットワーク再構築マネージャ (NRM: Network Reconfiguration Manager) との間で，ネットワークを選択，再設定するための様々な情報がやりとりされる．

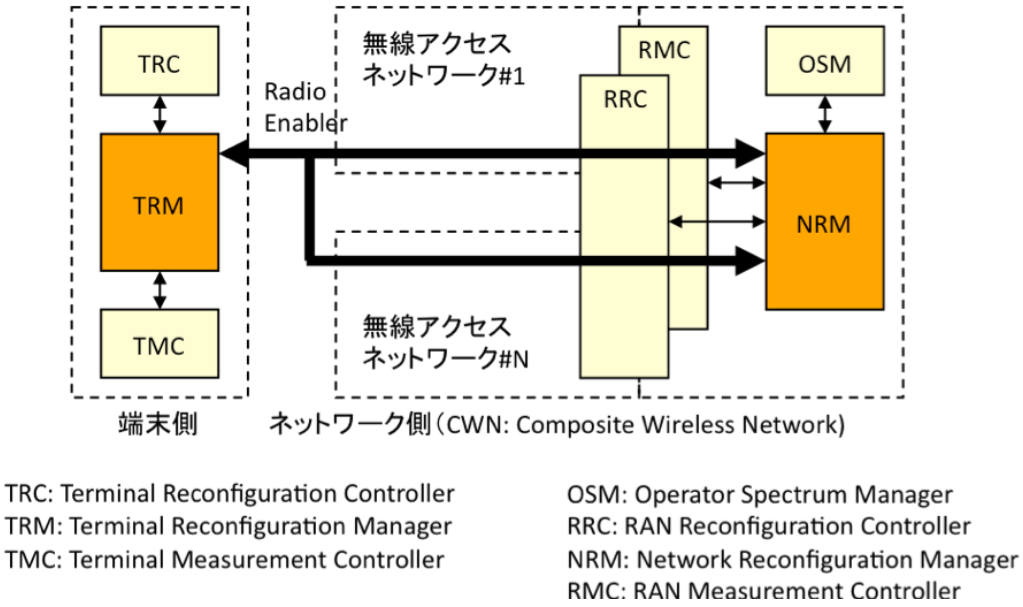


図 2.4 IEEE 1900.4 のシステム構成

Radio Enabler はヘテロジニアスネットワーク上にマッピングされる論理的なチャネルであるため，ユーザトラフィックを扱う RAN と同一の RAN (この形態を in-band と呼ぶ) で使用することも Radio Enabler 専用の RAN (この形態を out-band と呼ぶ) を使用することも可能である．2.2.1 節で述べた MIRAI プロジェクトのシステム構成における BAN は Radio Enabler 専用の RAN で，かつ，ネットワーク側から端末側への単一方向の通信をサポートする RAN である，と位置づけられる．

また本標準化におけるシステム構成は，その概念設計の段階から，2.2.2 節で述べた CWC において提案された概念を採用して標準化作業が行われており，CWC におけるコグニティブ端末マネージャが本標準化における TRM，コグニティブネットワークマネージャが本標準化における NRM に対応するなど，CWC との親和性は高い．ただし，NRM は，事業者による無線周波数の運用ポリシーに関わるエンティティである OSM (Operator Spectrum Manager) とのインタフェースをもち，無線周波数のより効率的な運用の実現に向け，OSM から出された基本運用ポリシーに基づき各無線システムが使用する無線周波数及びその具体的な運用方法を変更可能な機能をもっている．さらに NRM が決定した具体的な運用方法の情報を OSM にフィードバックする機能を有し，事業者に割り当てられた無線周波数のより柔軟な運用を可能としている．この点において NRM は，事業者によって一意に定められた無線周波数の基本運用ポリシーの下での動作を想定した CWC アーキテクチャのコグニティブネットワークマネージャとは異なる．

さて，IEEE 1900.4 では三つの運用形態を規定しているが，その中でヘテロジニアスネットワークの統合制御に最も関連の深いものとして，DRRUO (Distributed Radio Resource

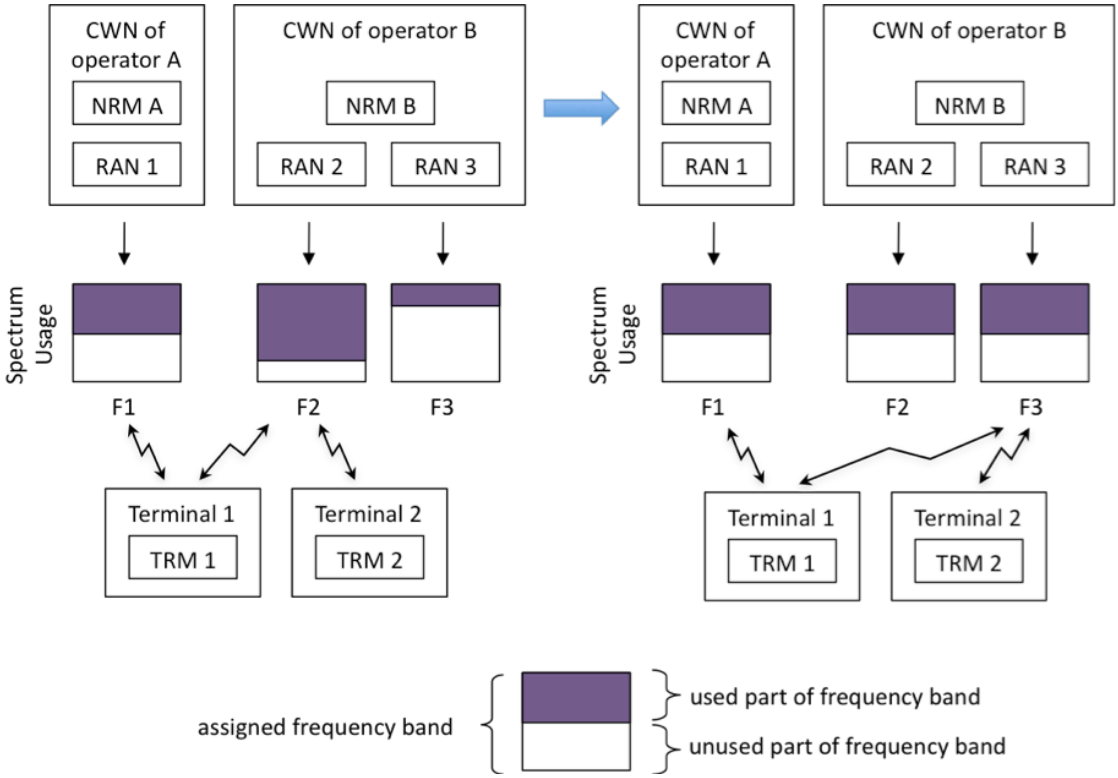


図　2.5　IEEE 1900.4 における DRRUO Use Case

Usage Optimization) がある．DRRUO は既存の RAN を対象とし，サービス品質の向上と無線リソースの最適化をめざすものであり，運用例を図 2.5 に示す．

図 2.5 の左側は，IEEE 1900.4 におけるリソース制御を行う前の三つの周波数帯の使用状態を示しており，端末 1 と端末 2 が事業者 B の RAN2 に接続されていることで RAN2 の周波数利用率が高い状態となっている．本標準化では，各端末が接続する RAN を変更することにより，図 2.5 の右側に示すように各周波数の使用状況を平準化することをめざしている．また DRRUO では，これを，NRM，TRM 単独で，もしくは NRM と TRM との連携により実現するとしている．しかし IEEE 1900.4 ではこのようなシステムを具体的に実現するための詳細規格の策定にまでは至っておらず，端末とネットワーク側が連携してヘテロジニアスネットワークにおけるリソース最適化をめざすというビジョンの提示にとどまっている．

ここで IEEE 1900.4 の示すビジョンは，ヘテロジニアスネットワークの概念を拡張し，使用可能な無線周波数が状況により変化することも視野に入れた上で，ネットワーク側の情報を活用したユーザセントリックな無線システム選択と，端末側の情報を活用したネットワークセントリックな無線システム選択など，ネットワーク側の視点に立った制御が可能であることを示唆している．またヘテロジニアスネットワークにおいて無線リソースの一つである無線

周波数の基本運用ポリシーを規定するOSMが，ヘテロジニアスネットワーク全体を見渡せるネットワーク側に配置され，またこれが NRM とのインタフェースをもつことからも，IEEE 1900.4 はネットワーク側における制御の必要性を示していると考える．

2.3 異種無線システム統合制御の要求条件

2.2.1 節で述べた MIRAI アーキテクチャはユーザの視点に立ち，BAN を介して報知される接続可能な RAN の情報や，端末内の LOC の情報に基づいて，ユーザのモビリティ確保や通信品質向上をめざしたものであるが，ヘテロジニアスネットワーク内の各空間におけるトラフィック量やトラフィック偏在化に注目した制御ではないため，必ずしもそれらに対する効果的対策技術とはなっていないと考える．一方，2.2.2 節，2.2.3 節で述べたCWC 及び IEEE 1900.4 はユーザの視点のみならず，トラフィック状況などネットワーク側の情報と連携するインタフェースを定義し，ネットワークと端末の協調による異種無線システムの統合を実現する概念を示している．ただし現段階では，ユーザ周辺の環境情報を取得しやすい端末側の検討が先行しており，ネットワーク側における具体的な制御方法についての検討はまだ十分にはなされていない．そこで本論文では，これらの概念に準拠しつつ，ネットワーク側での制御に焦点を絞り，ヘテロジニアスネットワークを，すべてのユーザの接続先であるネットワーク側の視点で捉え直す．

図 2.6 にヘテロジニアスネットワークの空間におけるシステム伝送容量の一例を示す．図 2.6 より，ヘテロジニアスネットワークでは，空間によって使用可能な無線システムが異なる，すなわち，空間によって伝送容量が異なる無線ネットワークが構築されていると見ることができる．

また単一の無線システムにおける無線リソース制御では周波数帯域幅や最大送信電力などの拘束条件下で周波数，時間，送信電力等を適応的に割り当ててきたのに対して，ネットワーク側の視点に立ったヘテロジニアスネットワークの無線リソース制御ではネットワーク全体のロードバランスを考慮した上での無線システムの切替制御も無線リソース制御の一部と捉えることで，増大するトラフィック量や場所によるトラフィック偏在化に対して，より柔軟に対処できると期待される．さらに無線システムの切替制御にとどまらず，これら複数の無線システムが同時に利用可能な環境において，一部のユーザに対して，複数の無線システムのリソースを配分することで個々のユーザの無線回線の伝送速度向上やシステムダイバシチによる無線回線の安定化を図るなど，ヘテロジニアスネットワーク全体の無線リソースの統合的制御に基づいて一層サービスを向上させる可能性もある．以上の議論から，複数の異種無線システムの無線リソースを，個々の無線システムのチャネル状況

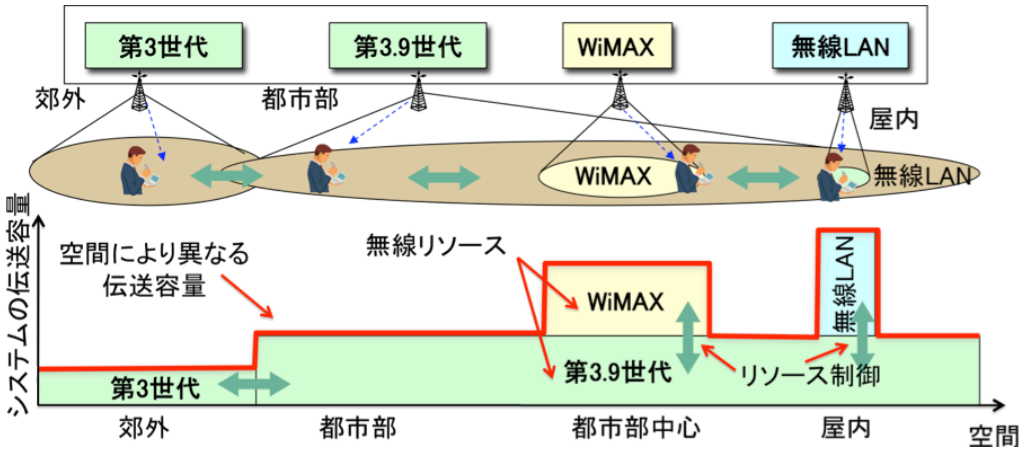


図　2.6　ヘテロジニアスネットワークにおける伝送容量

やユーザ嗜好だけで制御するのではなく，ネットワーク全体での視点で統合的に扱い，各無線システムの伝送容量やトラフィック状況なども踏まえ，ネットワーク主導で各ユーザに対する無線リソースを制御することが，ヘテロジニアスネットワークにおいて重要であると考える．

次に，ネットワーク側のどの階層でこれらの統合制御を実現するかについて検討する．伝送容量増大化をめざすにあたり，伝送容量は無線リソースの状況に依存するため，その制御は無線リソースの状況を最も把握しやすい物理層や MAC (Media Access Control) 層に近いところで実装すべきである．一方で物理層や MAC 層は無線システム毎に規定され互いに異なるものであり，ヘテロジニアスネットワークを構成する他の無線システムの状況も考慮したリソース制御を行うためにはネットワーク層，もしくはそれよりも上位の階層で実装せざるを得ない．一方，セッション層を中心としてこれらの統合が実現可能な SIP (Session Initiation Protocol) [32-37] の場合は，よりアプリケーションに近い階層での統合制御であり，ユーザ嗜好やアプリケーションの要求を制御に反映しやすく，ユーザのモビリティ確保や通信品質向上などユーザ視点での制御を実現しやすい反面，ヘテロジニアスネットワークにおける下位層の無線リソースの状況を常時把握するのは容易ではない．したがって SIP 等による統合制御はヘテロジニアスネットワークによってある程度安定した回線が提供される前提で運用されるべきであると考える．

トランスポート層においては異種無線システム間ハンドオーバにおいて安定した回線をセッション層に提供すべく，通常の TCP (Transmission Control Protocol) [38] を改良した Freeze-TCP [39] や M-TCP [40] などの技術も検討されている．しかしながら，これらの技術はユーザと通信相手間のセッションの安定性を図るものであり，トランスポート層においてヘテロジニアスネットワークにおける下位層の無線リソースの状況を常時把握した上で，ヘテロジニアスネットワーク内のすべてのユーザに対する無線システムの再配分も含めた

リソース制御を行うことは容易ではない．さらにネットワーク主導で頻繁にシステム切替等によるリソース再配分を行い，一部のユーザに対して複数の無線システムのリソースを同時に用いた無線回線の伝送速度向上を図ることをも考慮すると，ヘテロジニアスネットワークを構成する異種無線システムが互いに接続されているネットワーク層で統合することが望ましいと考える．

したがって，ヘテロジニアスネットワークにおける統合制御における要求条件として以下の三つがあると言える．

(1) 無線システムも無線リソースの一部と捉え，システムに接続している全ユーザの無線リソースを把握した上で，ネットワーク主導で各ユーザへの無線リソース配分が可能であること
(2) 空間によって異なるヘテロジニアスネットワークの伝送容量増大に向けた制御が可能であること
(3) ネットワーク主導の統合制御をネットワーク層で実現し，無線環境に応じたリソース再配分をユーザに意識させずに運用すると共に，ユーザ嗜好やアプリケーションの状況もリソース再配分に際して考慮可能なこと

図 2.7 にこれまで述べた異種無線システム制御に関する様々な研究，及び上記の要求条件の位置づけを示す．図 2.7 の縦軸は OSI (Open Systems Interconnection) 参照モデルにおける階層を，横軸には制御のアプローチの違いとしてユーザ主導とネットワーク主導の制御をそれぞれとっている．IEEE 1900.4 は，2.2.3 節で述べた通り，端末とネットワーク側が連携してヘテロジニアスネットワークにおけるリソース最適化をめざすというビジョンを提示しており，ネットワーク側における制御の必要性を示していることから，図 2.7 のすべてのエリアが制御の対象範囲となると考える．CWC は IEEE 1900.4 の示すビジョンにおいてネットワーク層以下での実装を想定しているため，図 2.7 におけるネットワーク層以下のエリアが制御の対象範囲となると考える．しかしながら，現時点では，2.2.2 節で述べた通り，ユーザ主導の研究が先行して行われており，端末と対向するネットワーク側における制御の CNM における具体的な制御方法等については，まだ具体化されていない部分も多い．ヘテロジニアスネットワークにおける統合的制御を実現する階層は，これまでに述べてきた通り，ネットワーク層で統合することが望ましいが，ヘテロジニアスネットワークにおける統合制御における要求条件でも述べた通り，無線環境に応じたリソース再配分の観点では物理層の情報が必要であり，ユーザ嗜好やアプリケーションの状況をリソース再配分に反映させるにはアプリケーション層の情報が欠かせない．そこで本論文では，図 2.7 に示す通り，IEEE 1900.4 の示すビジョンにおいて，ヘテロジニアスネットワークの伝送

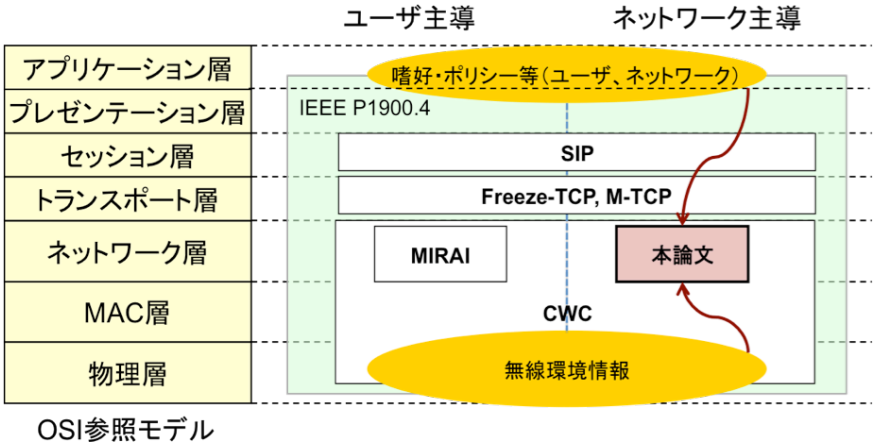


図 2.7 異種無線システム制御における本論文の位置づけ

容量増大化をめざし，無線環境やアプリケーションの状況など，他の階層の情報を考慮しつつ，ネットワーク主導で，かつ，ネットワーク層での統合制御を実現するための要素技術を確立することを目的とする．

2.4　異種無線システム統合制御の課題

2.3 節において，異種無線システム統合制御における要求条件を明確にした．本節ではこれらの要求条件を満たすために解決しなければならない課題について整理する．

まず，ヘテロジニアスネットワークの各空間における伝送容量を把握する必要がある．各無線システムにおける最大伝送容量は，使用する無線周波数の帯域幅や符号化方式，フレームフォーマット等，システムの規格によって規定されるが，これは伝搬路状況がよいエリアでの最大性能であり，基地局から遠ざかると無線システムが到達し得る伝送容量は低下するのが一般的である．また複数のユーザが同時に接続される場合，システムのもつ伝送容量を分け合うこととなる．すなわち，各空間における伝送容量は，受信信号電力や雑音電力，またシステムに同時接続しているユーザ数などの無線環境に依存する．したがって，各空間における伝送容量を把握するためには，まず各空間において，受信信号電力や雑音電力などの無線環境を把握する必要がある．

次に，伝送容量増大を実現するためのネットワーク主導のリソース制御の制御方針を明確にする必要がある．一部の無線通信システムに負荷が集中すると，各ユーザの無線システムの選択肢を減らすことになり，システム選択による柔軟な無線リソース制御という無線リソースの統合的制御の利点が損なわれることになるため，リソース制御の制御方針の基本はシステム間でロードバランスを図ることにある．ロードバランスを図る際，システム間

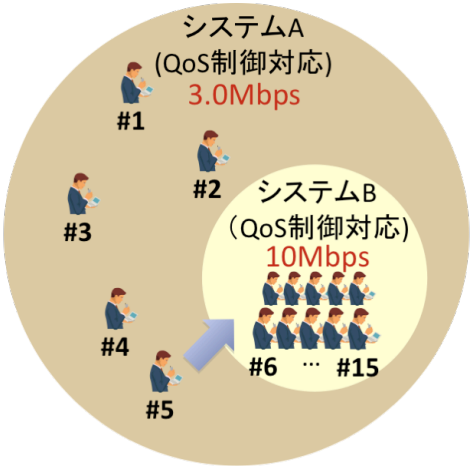


図 2.8 ユーザ移動に伴うリソース制御例 (QoS 制御対応システムの場合)

の負荷を分散化するだけでは，多種多様なアプリケーションを利用するユーザに満足のいく通信品質での通信を提供できるとは限らないため，いかに多くのユーザの要求を満たしつつ伝送容量を増大させるかという観点に基づく，システム間の利用効率の平準化が重要となる．例として，まず，図 2.8 に，複数システムが存在する場合にロードバランスの概念が必要となる例を示す．ここでは 3 Mbps の伝送容量をもつシステム A と 10 Mbps の伝送容量をもつシステム B の二つの異種無線システムをヘテロジニアスネットワークとして扱い，ユーザ#1 からユーザ#5 までの 5 ユーザがシステム A のエリア内に，ユーザ#6 からユーザ#15 までの 10 ユーザがシステム B のエリア内に位置し，システム A に位置するユーザ#5 のみが，システム B のエリアに移動する状況を仮定する．また，個々のユーザのアプリケーションに対する要求伝送速度は 500 kbps で同一アプリケーションの利用を仮定し，また，各ユーザの要求伝送速度を満たすよう，システム A もシステム B も QoS 制御に対応していると仮定する．ここで，ユーザ#5 がシステム A のエリア内にいる場合における各システムの利用状況を計算すると，システム A は 2.5 Mbps (500 kbps×5)，システム B は 5 Mbps (500 kbps×10) が使用されている状態である．各ユーザの伝送速度の総和の，無線システムが提供可能な最大伝送容量に対する割合をリソース利用率と定義すると，システム A では 3 Mbps の伝送容量に対して 2.5 Mbps が使用されているためリソース利用率は 0.83，システム B では 10 Mbps の伝送容量に対して 5 Mbps が使用されているためリソース利用率は 0.5 となる．ネットワーク主導のリソース制御では，システム A のリソース利用率が高いことからシステム A の負荷が高いと判断し，ユーザ#5 がシステム B のエリア内に移動し，システム B も利用可能な状態になった時，システム B への切替を行う．この結果，システム A の利用状況は 2.0 Mbps (500 kbps×4)，システム B の使用状況は 5.5 Mbps (500 kbps×11) となることから，システム A のリソース利用率を低くすることが可能となる．

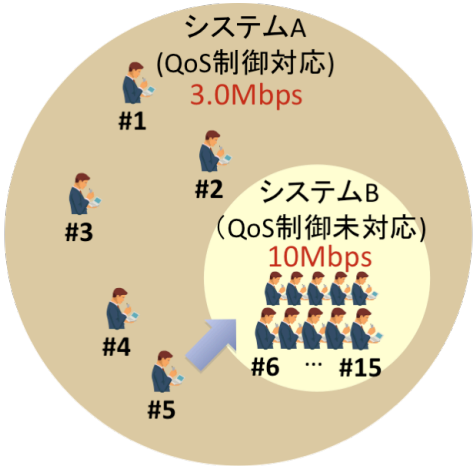


図 2.9　ユーザ移動に伴うリソース制御例 (QoS 制御未対応システムの場合)

このことは，システム A のリソースを，今後，リソース制御の候補として活用する可能性を高めることとなり，新規ユーザが接続を開始する際や，ユーザの移動に伴ってそのユーザのシステムを選択する際に，柔軟な無線リソース制御の可能性を増大させることができる．ここで各システムに接続されるユーザ数に注目すると，このリソース制御により，システム B への接続ユーザ数が 10 から 11 に増加している．すなわち，リソース制御におけるロードバランスとは，柔軟なリソース制御の可能性増大の観点から，複数システム間で単に接続ユーザ数を平準化させるものではなく，複数無線システム間におけるリソース利用率を平準化させるものである．次に，図 2.9 に，いかに多くのユーザの要求を満たせるかという観点に基づく，システム間のロードバランスの概念を示す．図 2.9 は図 2.8 と同一のシステム及びユーザ配置において，システム B のみが QoS 制御に対応しておらず，アプリケーションの要求する QoS に対する制御の異なるシステム間のリソース制御例を示している．図 2.8 と同様，各ユーザの要求伝送速度が 500 kbps である場合，ネットワーク主導のリソース制御では，システム A では 3 Mbps の伝送容量に対して 2.5 Mbps が使用されているのに対して，システム B では 10 Mbps の伝送容量に対して 5 Mbps が使用されているため，システム A の方が負荷が高いと判断される．しかし，図 2.8 の例とは異なり，システム B は QoS 制御に対応していないため，仮にユーザ#5 がシステム B にアクセス可能なエリアに入り，システム B の方がリソース利用率が低いと判断されたとしても，QoS は保証されない，という観点から，ユーザ#5 にとってシステム B に移行することは得策とは言えない．すなわち，アプリケーションの要求する QoS に対する制御が異なる異種システム間でロードバランスを行う際には，個々のユーザの通信品質を満足させる観点に基づいて行われなければならない．さらに，同じ図 2.9 を用いて，伝送容量を増大させる観点に基づく，システム間のロードバランスの概念を示す．ここでは図 2.9 において，システム A からシステム B に移動

するユーザ#5 が，ウェブ閲覧に代表されるような，要求伝送速度を特にもたないアプリケーションを利用する場合 (伝送速度が速ければ速いほど快適な場合) と仮定する．ユーザ#5 がシステム A のエリア内にいる場合，リソース制御では，システム A では 3 Mbps の伝送容量に対して 2 Mbps を他のユーザに割り当て，残りの 1 Mbps の範囲内でユーザ#5 にリソースを割り当てる．また，システム B では 10 Mbps の伝送容量に対して 5 Mbps を他のユーザに割り当てる．この場合，ユーザ#5 がシステム B のエリア内に移動した時，システム B に切り替えるとユーザ#5 の伝送速度向上が見込めることからシステム B への切替を行う方が得策と判断される．すなわち，要求伝送速度を特にもたないアプリケーション利用時においてロードバランスを図る際には，ヘテロジニアスネットワークにおける伝送容量増大の観点で行われることになる．以上の議論をまとめると，ヘテロジニアスネットワークにおけるネットワーク主導のリソース制御においては，個々のユーザのアプリケーションに対する要求 QoS 及び，無線システムの QoS 制御対応の有無を考慮し，各ユーザの通信品質向上とヘテロジニアスネットワークの伝送容量増大の観点に基づいて，システム間のロードバランスを図る必要があると言える．

次に，2.3 節の要求条件で示したネットワーク主導の統合的なリソース制御をネットワーク層で実現するための課題について述べる．ヘテロジニアスネットワークを構成する現在の無線システムのネットワークは，運用する事業者や IP アドレス体系が異なることから互いに独立に運用されており，無線システム間の連携も比較的疎である．しかしながらヘテロジニアスネットワークにおける統合的なリソース制御においては，無線環境の変化に応じてネットワーク主導で端末が接続すべき無線システムを適宜選択し，また複数の無線システムが利用可能な状況において無線リソースの再配分に伴う無線システムの切替を容易に実現しなければならない．このためには，ヘテロジニアスネットワークを構成する複数の無線システムが密に連携し，かつ，ヘテロジニアスネットワーク全体としての制御を可能とするためのプラットフォームを構築する必要がある．

以上の考察をまとめると，ヘテロジニアスネットワークにおける異種無線システム統合制御のための大きな課題は以下の二点であると考えられる．

(1) 空間により異なる伝送容量を把握するための無線環境認識技術の確立
(2) 各ユーザの通信品質向上とヘテロジニアスネットワークの伝送容量増大の観点に基づいてシステム間でのロードバランスを図るリソース制御技術の確立，及びこれを実現するためのプラットフォームの構築

2.5　結言

本章では，ヘテロジニアスネットワークに関するこれまでの研究や国際標準化を例に取り，ヘテロジニアスネットワークにおけるネットワーク主導の統合制御の必要性と本論文の意義を明確化した．またヘテロジニアスネットワークにおいては伝送容量増大の実現に向けてネットワーク主導で各ユーザへの無線リソース配分をネットワーク層で実装する必要があることを述べた．さらに，空間により異なる伝送容量を把握するための無線環境認識技術，及び，個々のユーザの通信品質向上とヘテロジニアスネットワークの伝送容量の増大の観点に基づいてシステム間でのロードバランスを図るリソース制御技術が解決すべき要素技術であること，ならびに，それらを実現するためのプラットフォーム構築が重要課題であることを明確化した．

第3章

コグニティブ無線を活用した無線環境認識技術

3.1　緒言

第 2 章において，ヘテロジニアスネットワークにおけるネットワークの視点に立った統合制御を実現するには，各空間において各ユーザがアクセス可能な無線システムの伝送容量をネットワーク側で把握し，各ユーザの通信品質向上とヘテロジニアスネットワークの伝送容量増大の観点から無線システム間のロードバランスを図る必要があることを述べた．そこで本章では，まず各空間における伝送容量の把握を実現するための課題を明確化する．次に，この課題を解決する方法として，端末側において周囲の無線環境を把握して通信を行うコグニティブ無線を活用した，ネットワーク主導の無線環境認識技術を提案する．提案方式では複数の無線通信システムの接続可能性と期待される伝送容量を無線環境と規定し，コグニティブ無線の考え方に基づいて，アクセスポイント側で受信される端末からの受信信号強度による無線環境認識を行っている．また計算機シミュレーション及び WiMAX と無線 LAN により構成される基本実験機の屋内実験結果により，提案方式の有効性を明らかにする．

3.2 各空間の伝送容量把握実現における課題

各無線システムにおける最大伝送容量は，使用する無線周波数の帯域幅や符号化方式，フレームフォーマット等，システムによって規定されている．例えば，セルラ方式の一つである EVDO (cdma2000 1x Evolution Data Optimized) rev.0 の場合， 16QAM (Quadrature Amplitude Modulation)，符号化率 R=1/3 を適用すると，1 slot (=1.66 ms) を用いて 4096 bits を送信することが可能であり，その最大伝送容量は，4096 bits / 13.33 ms = 2.457 Mbps となる [41]．しかしこの最大伝送容量が実現できるのは 16QAM が伝送可能となる伝搬路状況がよいエリアに限られ，基地局から遠ざかり 16QAM ではなく QPSK (Quaternary Phase Shift Keying) や BPSK (Binary Phase Shift Keying) を用いた通信を行うエリアでは伝送容量は低下する．さらにこの無線システムに複数のユーザが同時に通信する場合，システムのもつ伝送容量を共有するため，一人当たりの伝送容量は平均 300 kbps から 700 kbps 程度と言われている [42]．すなわち，各空間における伝送容量は，信号電力や雑音電力，またシステムに同時接続しているユーザ数などの無線環境に依存する．

したがって，ヘテロジニアスネットワークにおける伝送容量を把握するためには，まず異種無線システムが導入されている空間内の各場所における無線環境を把握する必要がある．具体的にはそれぞれの場所においてヘテロジニアスネットワークを構成する異種無線システムのいずれが使用可能であるか，また使用可能である場合にどの程度の受信信号電力かなどを把握する必要がある．

次に，上記の各空間における伝送容量をネットワーク側でいかにして把握するか明確にする必要がある．ユーザはヘテロジニアスネットワークを構成する異種無線システムのサービスエリア内のいずれかの空間に存在していると考えることができ，またヘテロジニアスネットワーク内には互いに独立した移動や通信を行う多数のユーザが存在するため，例えばユーザ端末と連携し端末周辺の無線環境をネットワーク側に通知することによりネットワーク側において各空間における伝送容量を把握可能である．しかしながら，この方法は無線回線の一部を端末周辺の無線環境情報の伝送に使用することになるため，少しでも多くのユーザの通信品質を満足させ，伝送容量の増大を図るという観点からは望ましいとは言えない．また，これらの情報を端末から通知している間はネットワーク主導での無線システム切替を行うことができないため，ヘテロジニアスネットワークにおける統合制御の自由度を損なうことにもなる．したがって，ネットワーク側だけで各空間の無線環境を把握する必要がある．

以上のことから，各空間の伝送容量把握を実現するためには，各空間の無線環境を把握する方法の確立，及び，この無線環境の把握をネットワーク側のみで実現する方法の

確立，の二つの課題があると言える．

3.3 コグニティブ無線

3.2 節で示した一つ目の課題である，各空間の無線環境を把握する方法の一つとして，コグニティブ無線の活用が挙げられる．そこで本節ではコグニティブ無線について述べ，これを活用することによりヘテロジニアスネットワークの各空間における無線環境の把握が可能であることを示す．

周波数及び時間軸において各無線システムの使用状況と White Space との関係を図 3.1 に示す．図 3.1 の横軸は周波数，奥行き方向の軸は時間，縦軸は各無線システムの使用状況をそれぞれ示しており，それぞれの無線システムが周波数毎に割り当てられ，それぞれの無線システムには電波を出している時間と電波を出していない時間が存在する．この時，無線システムが使用されていない時空間を総称して White Space と呼ぶ．コグニティブ無線はこの White Space を検知 (認知) し，これを有効に活用して無線通信を行う技術として J. Mitola III 氏により 1999 年に提唱され [43, 44]，以来盛んに研究が行われている [43-72]．なお White Space を検知するためには，空き周波数のセンシングが必要であり，コグニティブ無線を実現する上で欠かせない要素技術の一つとしてセンシング精度向上に向けた様々な研究が行われている [71, 72]．

コグニティブ無線の分野では周波数の空き情報を認識し，主となる無線システムに干渉を与えないレベルで別の無線方式を使用する「ダイナミックスペクトルアクセス (DSA: Dynamic Spectrum Access)」が精力的に研究されており [48-56]，その代表例が米国における TV 帯を用いたコグニティブ無線である IEEE 802.22 [53-56] である．しかしながら我が国の現行の電波政策では，コグニティブ無線のように周波数利用の優先権を設定した上での動的周波数共用は，まだ認められていない．そこで，本論文では，空きスペクトルを探してそれを利用する「周波数共用型コグニティブ無線」ではなく，利用可能な無線システムを探してそれを利用する「ヘテロジニアス型コグニティブ無線」を検討対象とする．

図 3.1 の概念に基づき，既存の周波数運用を想定した場合における，「ヘテロジニアス型コグニティブ無線」の運用形態例を図 3.2 に示す．図 3.2 では無線システム①，無線システム②，無線システム③の三つの無線システムが使用できる環境を想定している．端末 A,B,C はコグニティブ無線機能を有さない端末で，図 3.2 に示すように，あらかじめ決められた周波数帯のみを利用している．それに対して端末 D はコグニティブ無線機能を有しており，周波数帯の異なる複数の無線システムを動的に選択することができる．ここで端末 D

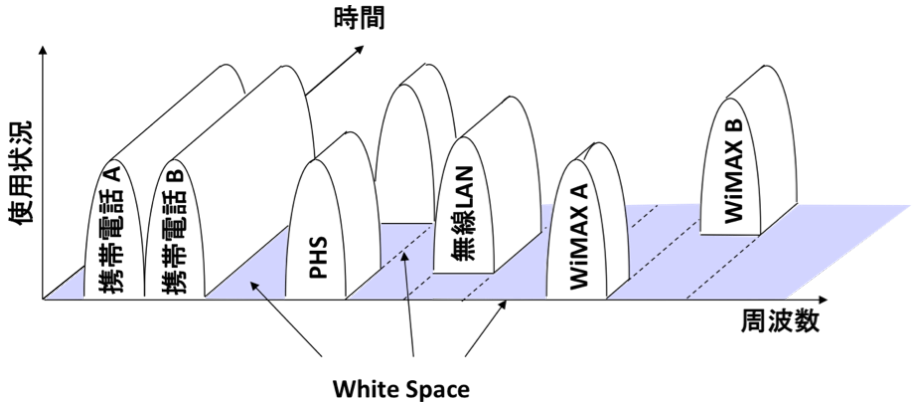


図 3.1 各無線システムの使用状況と White Space の関係

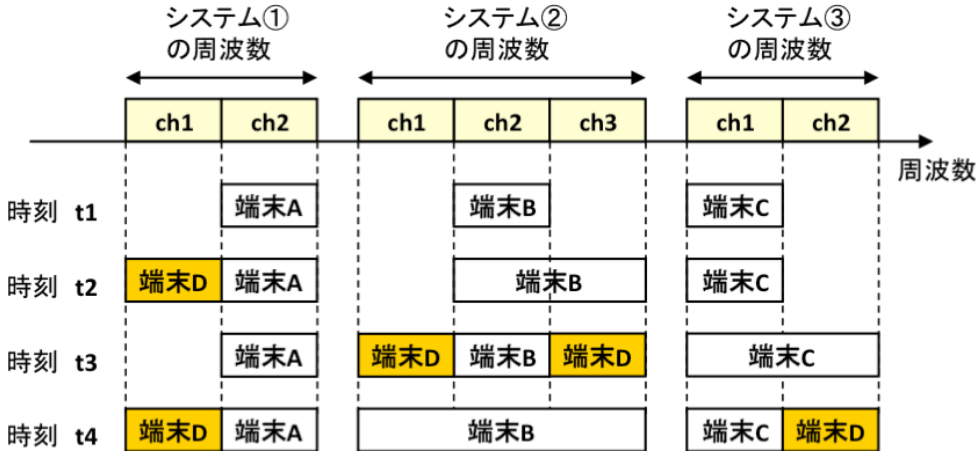


図 3.2 既存の周波数運用に基づくコグニティブ無線の運用例

に注目すると，端末 D はまずシステム①から③までを含む無線周波数をセンシングし，空いている無線システムのチャネルを把握する．これを適宜行うことで，例えば図 3.2 に示されるように，時刻 t=t2 においてはシステム①の周波数を用いて通信を行い，時刻 t=t3 にアプリケーションにより多くの帯域を要求された場合には，センシング結果に基づきシステム①ではなく，システム②の周波数を用いて通信を行う．ここで同一時刻において使用可能なシステムを一つに限定する必要はなく，時刻 t=t4 の場合のように複数のシステムに空き帯域が存在する場合には，システム①，③を同時に用いることも可能である．

周波数の時間利用率を「測定時間中におけるその周波数が利用されている時間の割合」と定義すると，各周波数の時間利用率は，場所，曜日，時間帯，無線システム，通信事業者等によって大きく異なる．したがって，図 3.2 に示したように，各システムの運用状況を判断しつつ，コグニティブ無線機能を有する端末に対して，利用可能な無線システム

を動的に割り当てることで，周波数の時間利用率を高め，ヘテロジニアスネットワーク全体の伝送容量を有効に活用することが可能となる．

3.4 コグニティブ無線基地局

本節においては 3.2 節で示した各空間の伝送容量把握を実現するためのもう一つの課題である，ネットワーク側だけで無線環境を把握する方法について検討する．3.3 節において無線環境の把握にはコグニティブ無線が有効な技術の一つであることを示した．本節ではこれを活用し，コグニティブ無線の機能をネットワーク側のどの場所に，どのように実装すればよいか明確にする．ここではコグニティブ無線を実現する上で特に重要なセンシング機能と，無線環境認識機能の二つについて考える．

3.4.1 ネットワーク主導センシング機能

コグニティブ無線におけるセンシング機能の配置場所としては各無線システムの基地局もしくはアクセスポイントが最適である．これはヘテロジニアスネットワークにおいて，各空間に存在する装置が各無線システムの基地局もしくはアクセスポイントであること，及びヘテロジニアスネットワークにおいて無線リンクの確立や制御などを司り，伝送容量を左右する無線環境に最も近い位置に存在し，測定が容易であるためである．

次にセンシング機能のヘテロジニアスネットワークへの実装方法について議論する．まず，センシングする情報として，ネットワーク側だけでの無線環境認識を実現するため，各無線システムの基地局が端末から受信する上り回線の受信信号強度を用いることを提案する．以下，具体的に説明する．

ある無線システムに対応した基地局は，対応した無線システムを用いて端末から送信された上り回線の信号を受信することは可能である．図 3.3 に基地局と端末 A，B における送信電力と受信電力の関係を示す．図 3.3 の横軸は基地局と端末それぞれの位置及びそれらの互いの距離を，縦軸は送信電力及び受信電力を示している．電波は距離減衰等の影響により，基地局からの距離が離れると基地局と端末間の距離に応じた 2 乗から 4 乗程度の減衰が生じるため [73, 74]，図 3.3 に示すように，基地局に近い端末 B から送信された信号の基地局での受信電力 Rx_Tb は，基地局から遠い端末 A から送信された信号の受信電力 Rx_Ta よりも大きいと考えられる．またこの受信電力と雑音電力 N との比により

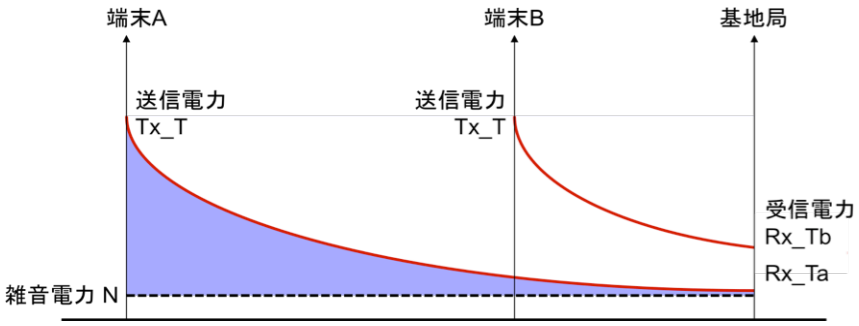


図 3.3 基地局における受信電力による各空間の無線環境把握

その端末との通信回線の SNR (Signal to Noise Power Ratio) が決まり，SNR が大きいとより高速な伝送容量での通信が可能となるため，受信電力の値は端末の位置する空間の無線環境を把握するための情報として有効である．本論文では，これを各端末の無線環境の把握のために用いる．またコグニティブ無線においては，単なる受信信号強度の大きさに基づいた無線周波数の利用可否の検出のみならず，当該無線周波数を利用している無線システムの特定も必要となる．そこで提案方式では，無線周波数毎の受信信号強度を直接測定するのではなく，ヘテロジニアスネットワークを構成する各無線システムの受信機能を用いて受信電力を測定することで，無線システムの利用可能性も含めたセンシングを実現する．

3.4.2 ネットワーク主導無線環境認識機能

ヘテロジニアスネットワーク内の各無線システムの基地局は，設置時に定めた一つの無線システムのみに対応しているのが一般的である．ここで，異種無線システムの一つの実装形態として，セルラシステム，WiMAX，無線 LAN，及び，それらの無線環境を認識する無線環境認識サーバから構成されるものをコグニティブ無線基地局と定義し，図 3.4 にこれらを同一場所に集約して実装する場合の実装例を示す．この場合，コグニティブ無線基地局を中心として，それぞれの無線システムのサービスエリアが形成される．しかしながら各無線システムの電波の到達範囲は異なるため，ヘテロジニアスネットワーク内において周波数状況を把握可能なエリアはコグニティブ無線基地局周辺のエリアに限定され，現実的な実装方法とは言えない．

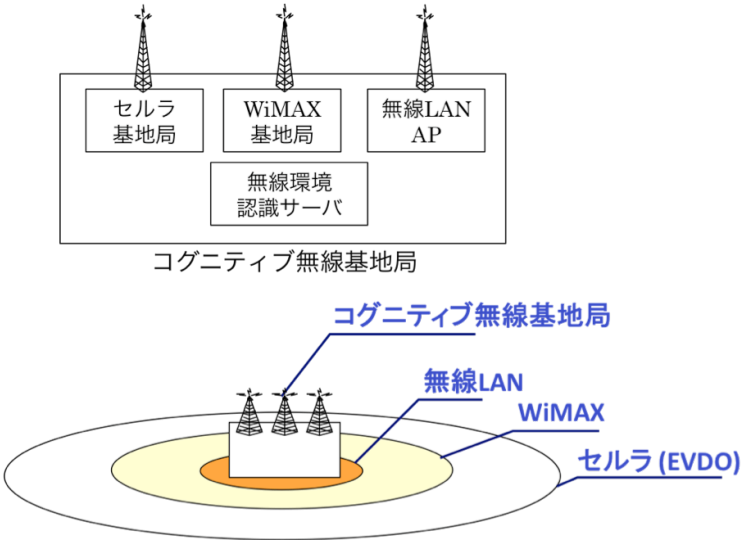


図 3.4 同一場所に機能を集約したコグニティブ無線基地局の実装例

そこで，ヘテロジニアスネットワークの各空間の周波数状況をより広範囲なエリアで把握可能となるよう，コグニティブ無線基地局を構成するセルラシステム，WiMAX，無線 LAN のアクセスポイントをヘテロジニアスネットワーク内に偏在して設置する実装を考える．また，無線環境認識サーバをアクセスポイントごとに設置してもそのアクセスポイントの対応する無線システムのみの周波数状況しか得られないため，無線環境認識サーバは，ヘテロジニアスネットワーク内において，各無線システムの基地局と接続可能なコアネットワーク側のいずれかの場所に設置し，複数の無線システムの情報を集約する実装を考える．

図 3.5 にこの実装に基づくコグニティブ無線基地局の実装例を示す．図 3.5 に示す通り，各無線システムの基地局を中心として，それぞれの無線システムのサービスエリアが形成され，これらのサービスエリアの集合体が，コグニティブ無線基地局のサービスエリアとなっている．この実装では，コアネットワーク側に設置された無線環境認識サーバはヘテロジニアスネットワークを構成する各無線システムの基地局と有線回線で接続されており，各無線システムの無線環境を各無線システムの基地局設置場所に依存することなく把握することが可能となる．実際，商用のサービスにおいてもセルラシステムの基地局の設置されている場所に WiMAX のアクセスポイントや無線 LAN のアクセスポイントが設置できるとは限らず，また電波の放射範囲は無線システム毎に異なることから，図 3.5 の実装は，より現実に即したものであると言える．

以上の議論から，ヘテロジニアスネットワークにおける，コグニティブ無線のセンシング機能は各無線システムの基地局に分散して配置され，無線環境認識機能はヘテロジニアスネットワークに一つ配置されることになる．

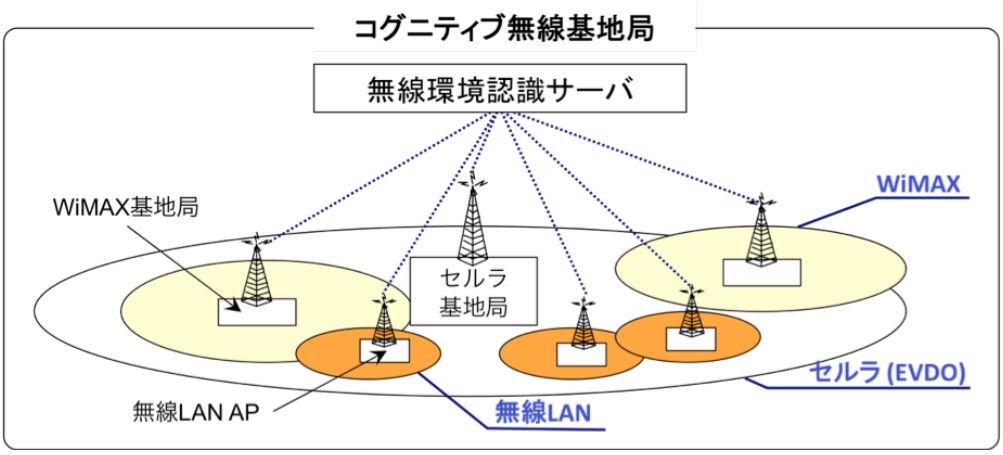


図 3.5 機能を分散配置させたコグニティブ無線基地局

最後に無線環境認識機能の実装方法については，ユーザトラフィックを圧迫しないよう，ユーザトラフィックを伝送する通信回線とは別に，各基地局と無線環境認識サーバとの間は有線回線で接続され，各無線システムの基地局におけるセンシング結果を定期的に収集，集約する．ここで無線システムにおいては，一般的に，所望信号の受信信号電力が雑音電力及び干渉電力の和より大きいほど高い伝送容量が期待できるが，受信信号電力は所望信号のみならず干渉電力なども含めた総和の値として測定されることから，受信信号電力値が高くても伝送容量が高いとは限らない．そこで，各空間における無線環境の認識精度を高めるため，受信信号強度だけでなく，基地局に接続している端末数などの情報もヘテロジニアスネットワーク内の各空間における無線環境認識に必要な情報として基地局から収集する必要がある．なおこれらの収集された情報をリソース制御に反映する方法については第 4 章で述べる．

3.5 計算機シミュレーション

3.5.1 各空間における受信信号強度測定

3.5.1.1 シミュレーション諸元

コグニティブ無線を活用した無線環境認識技術により，ネットワーク側において各空間における伝送容量を把握する提案方式の有効性を確認するため，OPNET [75] をベースに，WiMAX と無線 LAN により形成されるヘテロジニアスネットワーク内の空間を，両方式の通信機能を有する端末が移動する状況を模擬するシミュレータを構築した．図 3.6 にシミュレータの外観と端末の移動経路を示す．

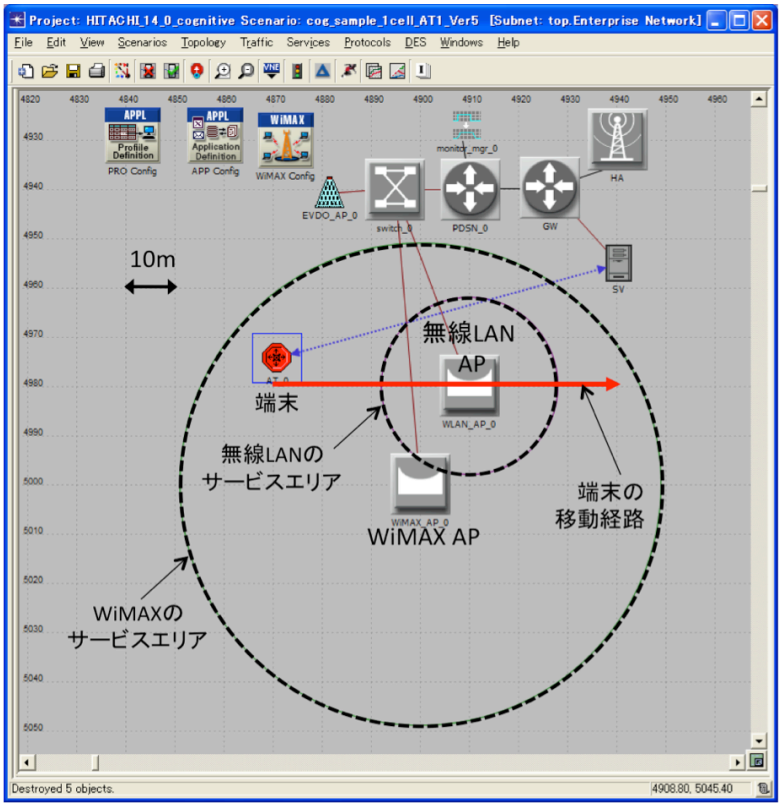


図 3.6 シミュレータ外観と端末移動経路

表 3.1 シミュレーション諸元

項目	仕様	
WiMAX	準拠方式	IEEE 802.16e
	周波数帯	2.5 GHz
	送信電力	20 dBm
	雑音指数+実装損失	13 dB [5]
	受信感度	−97 dBm
無線 LAN	準拠方式	IEEE 802.11g
	周波数帯	2.4 GHz
	送信電力	0 dBm
	雑音指数+実装損失	15 dB [76]
	受信感度	−90 dBm
伝搬路	ITU-R M.1225 Pedestrian モデル [74]	
端末移動速度	4 km/h (歩行を想定)	
端末移動時間	60 秒間 (移動経路は図 3.6 に示す通り)	

図 3.6 に示す通り，端末は，WiMAX のみがサービスされるエリア内から移動経路に沿って速度 4 km/h で移動し，WiMAX と無線 LAN の双方がサービスされるエリアを通過した後，再び WiMAX のみがサービスされるエリアに入り，移動を終了するものとする．この間の移動時間は 60 秒である．伝搬路は ITU-R (International Telecommunication Union - Radiocommunication Sector) 勧告 M.1225 [74] に基づいた距離特性と対数正規分布に従うシャドウィング (分散は 10 dB) に設定した．また，各無線システムの受信感度については，IEEE802.16e-2005 仕様書 [4] 及び IEEE802.11g 仕様書 [76] に記載された定義，及び，雑音指数 (NF: Noise Figure) と許容される実装損失の値を用いて設定した．具体的には，WiMAX の場合，下り回線 380 kbps，上り回線 140 kbps の最低伝送速度 (QPSK, 符号化率=1/2，繰り返し数=6) でパケットを送信した時に，ビット誤り率 10^{-6} 未満を実現するために必要な受信電力と定義され，−97 dBm となる．無線 LAN の受信感度は，1 Mbps の最低伝送速度で 1000 Byte のパケットを送信した時にパケット誤り率 10 %未満を実現するために必要な受信電力と定義され，−90 dBm となる．以上に基づくシミュレーション諸元を表 3.1 に示す．

3.5.1.2 シミュレーション結果

図 3.7 にネットワーク側において測定された WiMAX 及び無線 LAN の受信信号強度のシミュレーション結果を示す．グラフの横軸は端末が移動した 60 秒間にわたる時間経過を，縦軸はその時刻においてネットワーク側で測定された各無線システムの受信信号強度を示している．

図 3.7 より端末の移動に応じて，各空間における無線環境の一つである受信信号強度 (RSSI: Received Signal Strength Indicator) がネットワーク側において測定されることがわかる．今回のシミュレーションでは 5 秒周期で RSSI 値を取得しているため，図 3.7 右側に示す無線 LAN 受信信号レベルはアクセスポイント近傍を通過する時刻を中心とする左右対称な形状とはなっていないが，図 3.6 に示す経路において，端末が WiMAX アクセスポイントに最も近づく時刻はシミュレーション開始から 30 秒後，端末が無線 LAN アクセスポイントに最も近づく時刻はシミュレーション開始から 40 秒後であり，それぞれの無線システムのアクセスポイントに近づくほど RSSI 値が高くなる様子が測定されていることがわかる．ここで，いずれの方式も受信信号強度が 3.5.1.1 節で述べた受信感度を上回っていれば最低伝送速度での通信が可能であることから，これをもって各無線システムの通信可能性を判断すればよいと考えられる．さらに，ネットワーク側で端末からの信号を受信することで各システムの通信可能性に加えて伝送容量の判断も可能となる．それについては 3.5.2.1 節で説明する．

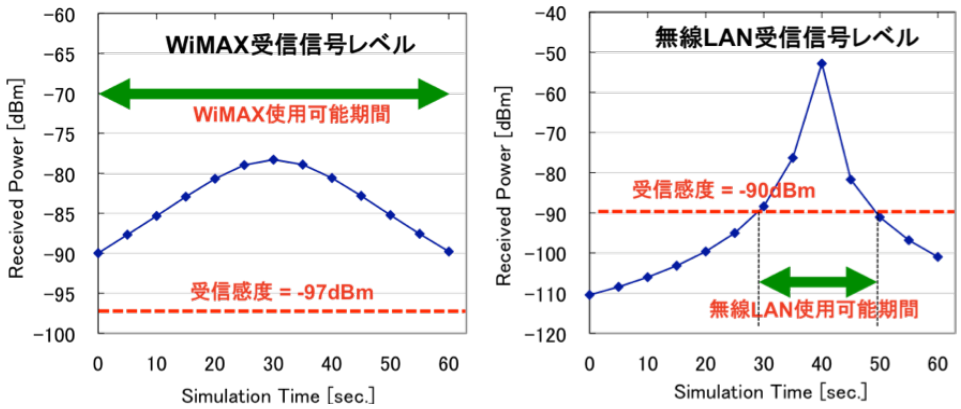


図 3.7 端末移動に伴う受信信号強度の変化

3.5.2 各空間における伝送容量

3.5.2.1 RSSI 値と伝送容量

無線システムにおける伝送容量は，使用する無線周波数の帯域幅や符号化方式，フレームフォーマット等により規定されており，また各伝送容量を実現するために必要な受信電力についても同様に規定されている．例として表 3.2 に，無線 LAN において規定されている，各伝送容量を実現するための所要受信電力を示す [76].

表 3.2 において示される各伝送容量と所要受信電力の関係は，受信電力を測定することができれば，その値から，実現可能な伝送容量を判断することが可能であることを示唆している．例えば，ネットワーク側で測定される受信信号強度が −74 dBm である場合，端末の位置する空間において 24 Mbps の伝送容量が得られる，とネットワーク側で判断することができる．

以上のことから，各無線システムの RSSI 値を各端末から受信することにより，この値に基づいて各空間における伝送容量をネットワーク側において判断することが可能となると考えられる．

なお，各伝送容量と所要受信電力の関係と，ネットワーク側で測定される受信信号強度とを用いて導かれる伝送容量は，物理層の情報としてネットワーク側が判断可能な情報であり，無線システムをその端末が一人で占有した場合の最大伝送速度に相当する．実際にその空間における，端末の伝送速度を推定するためには，接続ユーザ数などの MAC 層の情報やアプリケーションの情報を考慮する必要がある．これについては 4.4.3 節で述べる．

表 3.2 無線 LAN における各伝送容量実現に必要な受信電力

通信方式 (変調方式)	伝送容量	所要受信電力
IEEE 802.11b (DSSS)	1 Mbps	−90 dBm
	2 Mbps	−87 dBm
	5.5 Mbps	−85 dBm
	11 Mbps	−82 dBm
IEEE 802.11g (OFDM)	6 Mbps	−82 dBm
	9 Mbps	−81 dBm
	12 Mbps	−79 dBm
	18 Mbps	−77 dBm
	24 Mbps	−74 dBm
	36 Mbps	−70 dBm
	48 Mbps	−66 dBm
	54 Mbps	−65 dBm

3.5.2.2 シミュレーション諸元

端末からの信号を受信し RSSI 値測定に基づく，ネットワーク側での伝送容量の判断が妥当かを確認するため，端末においてデータ通信を行い，伝送速度を合わせて測定することとした．シミュレーションでは 3.5.1.1 節のシミュレータを用い，同一シミュレーション諸元，同一シナリオで端末を移動させ，その時の伝送速度を測定する．3.5.1.2 節において，複数の無線システムの無線環境を測定可能であることを確認済であることから，無線 LAN に注目し， アプリケーションとしては 600 kB のデータを 600 個/秒の一定間隔に送信し (アプリケーションの平均データ送出速度は 28.8 Mbps)，トランスポートプロトコルには UDP (User Datagram Protocol) を用いて伝送を行うこととする．

3.5.2.3 シミュレーション結果

図 3.8 に端末の移動に伴い，ネットワーク側において測定された無線 LAN の伝送速度を示す．図 3.8 の横軸は今回のシミュレーションにおける時間経過を示し，縦軸は無線 LAN の伝送速度となっている．

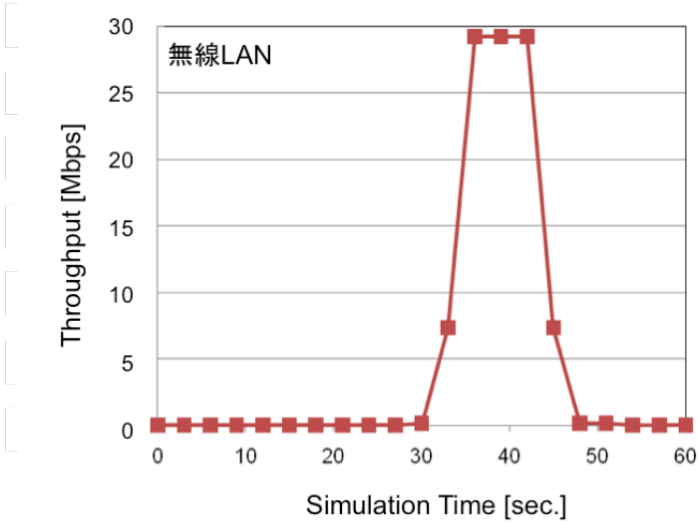


図 3.8 端末移動に伴う伝送速度の変化

図 3.8 より，図 3.7 で示した端末の移動に伴う受信信号強度の変化に伴って，無線 LAN の受信電力が受信感度 (−90 dBm) 以上となる時間 (30 秒から 48 秒) において，無線 LAN での通信が行われており，受信感度をもって無線 LAN の通信可能性を判断することが妥当であることを確認できた．また，RSSI 値より判断される伝送容量以下の伝送速度での通信が行われていることがわかる．例えば，図 3.7 において −70 dBm となる時刻 (36 秒) に注目すると，表 3.2 に基づき最大で 36 Mbps の伝送容量が実現可能とネットワーク側で判断され，この伝送容量以下である 28.8 Mbps の伝送速度で通信が行われている．すなわち，ネットワーク側で端末からの信号を受信することで各システムの通信可能性に加えて，その空間における伝送容量の判断も可能となることを確認できた．

3.6 基本実験機による動作確認

3.6.1 基本実験機の諸元

3.5 節におけるシミュレーション評価により，ネットワーク側において無線環境を認識し，これをもとに各空間における伝送容量を把握可能であることを示した．本節では，提案方式の実機における動作検証のため，WiMAX と無線 LAN から構成される基本実験機を構築し，屋内実験を行った．

図 3.9 に基本実験機の構成を示す．

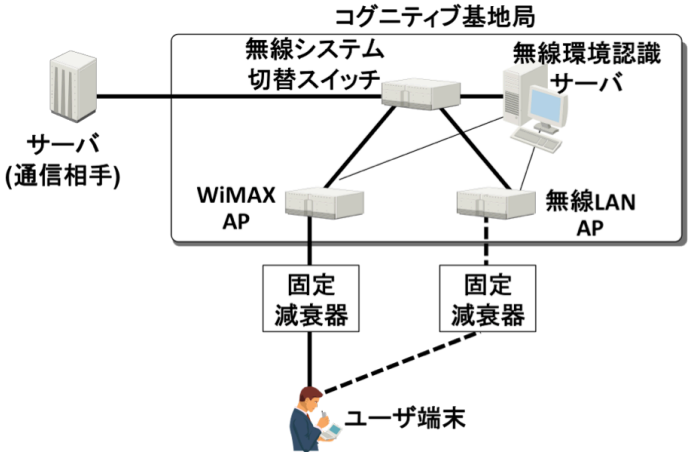


図 3.9 基本実験機のシステム構成

表 3.3 各無線システムのアクセスポイントから取得される主な無線情報

無線システム	無線情報	
WiMAX	Downlink	RSSI (接続端末毎)
		伝送方式 (接続端末毎)
		伝送速度 (接続端末毎)
	Uplink	RSSI (接続端末毎)
		伝送方式 (接続端末毎)
		伝送速度 (接続端末毎)
	接続端末数	
無線 LAN	通信方式 (11a/b/g)	
	送信電力	
	使用チャネル	
	RSSI	
	伝送速度	
	送信パケット数	
	受信パケット数	
	接続端末数 (アソシエーション数)	

実験機においては無線環境を収集するための機能をネットワーク側に追加する必要がある．そこで WiMAX については，WiMAX システムの運用管理に用いる専用ソフトウェアを介してアクセスポイント内の無線情報を抽出することとし，無線 LAN についてはデバイスドライバを改造し，チップ内で処理されている RSSI 等の無線情報を収集する機能を実装

表 3.4 基本実験機諸元

無線システム	仕様	
WiMAX	準拠方式	IEEE 802.16 (802.16-2004)
	周波数帯	3.5 GHz
	帯域幅	3.5 MHz
	送信電力	28 dBm
	受信 RSSI 値 設定範囲	－95 dBm～－69 dBm
無線 LAN	準拠方式	IEEE 802.11b/g
	周波数帯	2.4 GHz
	帯域幅	22 MHz
	送信電力	18 dBm
	受信 RSSI 値 設定範囲	－95 dBm～－65 dBm
伝搬路	RF ケーブル接続 (可変抵抗器挿入)	
データ伝送	動画ストリーミング (UDP, 2, 4, 8 Mbps)	

した. 表 3.3 に基本実験機の各無線システムのアクセスポイントに実装された, 収集が可能な情報を示す.

また今回の実験では実際に無線電波を放射しての実験に先立ち, 各無線システムのアクセスポイントと端末を RF (Radio Frequency) ケーブルにて接続し, WiMAX, 無線 LAN それぞれに可変抵抗器を挿入して, 可変抵抗器による操作により受信信号強度を減衰させ伝搬路減衰を模擬することとした. 表 3.4 に, 実験に用いたそれぞれの無線システムの仕様を, 図 3.10 に WiMAX と無線 LAN を対象システムとした今回の基本実験機の外観を示す.

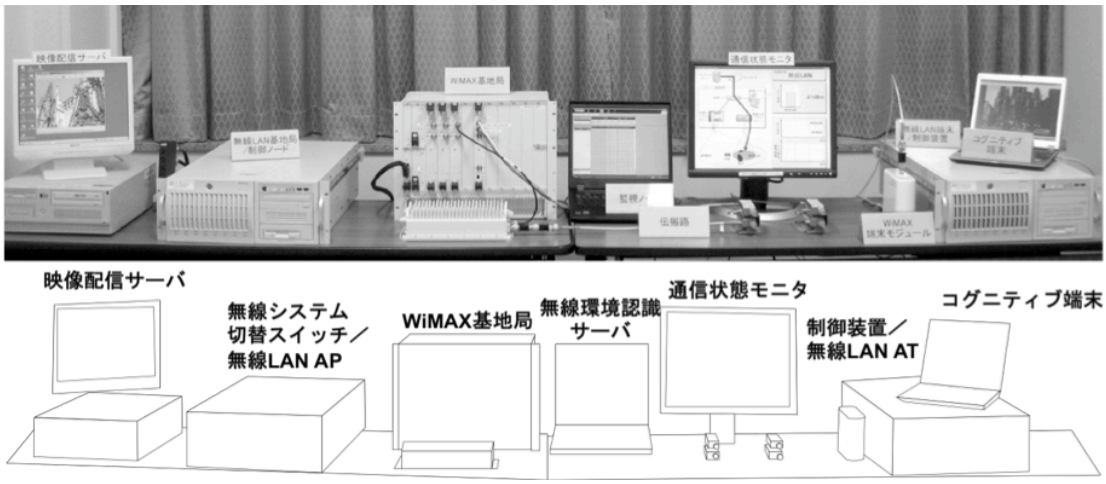


図 3.10 基本実験機の外観

3.6.2 動作確認結果

可変抵抗器の値を変え，各無線システムにおいてデータ通信のコンテンツの伝送速度を 2 Mbps, 4 Mbps, 8 Mbps に設定して基本実験機を動作させた．図 3.11 に各無線システムにおいて取得した RSSI 値と伝送速度の値との関係を示す．

図 3.11 より，WiMAX (IEEE 802.16-2004)では仕様 [3] に規定されている 2 Mbps 通信を実現するための受信感度 (−94 dBm) に対して本実験機は −94 dBm で 2 Mbps を達成しており，規定を満足している．一方無線 LAN (IEEE 802.11b/g) では，表 3.2 に示す通り 2 Mbps 通信に対する所要受信電力が −87 dBm であるのに対し −90 dBm，6 Mbps 通信に対する所要受信電力が −82 dBm であるのに対し −87 dBm と，と 3 dB から 5 dB 低い受信電力で通信できていることがわかる．これは IEEE 802.16-2004 の規格において雑音指数と実装損失を合わせて 12 dB を仮定しているのに対し基本実験機の WiMAX 装置もほぼ同じ損失となっていること，IEEE 802.11g の規格において雑音指数と実装損失を合わせて 15 dB を仮定しているのに対して基本実験機の無線 LAN 装置ではこれらの損失が 3 dB から 5 dB 程度低く抑えられているためと考えられる．

以上により，実機においても RSSI 値を取得可能であり，また，これをネットワーク側で把握することにより伝送容量の判断が可能となることを確認した．さらに，実機においては，雑音指数と実装損失が装置毎に異なり，各無線システムの規格で規定されている受信電力と同じもしくはそれよりも低い受信電力で動作するため，ヘテロジニアスネットワークにおける統合制御を実機に実装する際には，各無線システム装置の雑音指数と実装損失を考慮する必要があることを確認した．

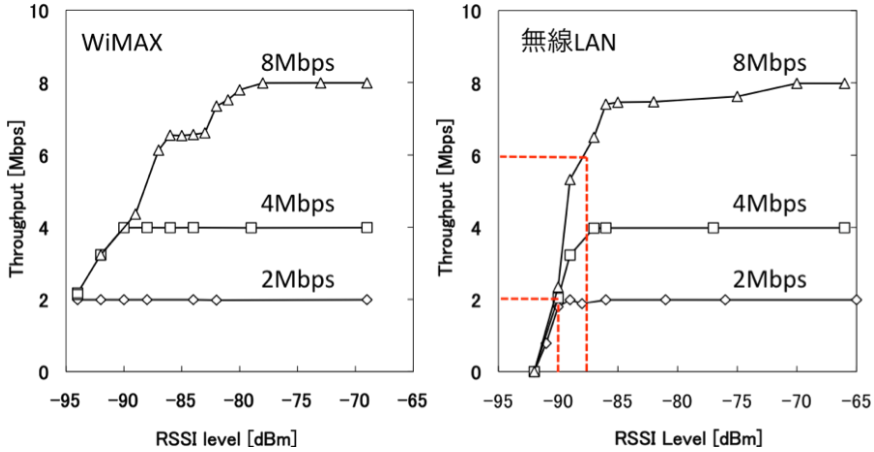


図 3.11 基本実験機による RSSI 値と伝送速度の測定結果

3.7 結言

本章では，ヘテロジニアスネットワークにおける伝送容量増大実現に向け，その要素技術の一つである各空間における伝送容量把握のための無線環境認識技術を提案した．また，計算機シミュレーション及び基本実験機により，ネットワーク側のみで各空間における各システムの通信可能性に加えて，その空間における伝送容量の把握が可能であることを示し，提案技術の有効性を確認した．

第4章
ヘテロジニアスネットワークにおけるリソース制御技術

4.1　緒言

ヘテロジニアスネットワークにおいてネットワーク主導の統合制御を実現するため，第 3 章では，ヘテロジニアスネットワークを構成する各空間における伝送容量を把握するための技術について議論した．それに対して本章では，ヘテロジニアスネットワークにおいて，異種システム間のロードバランスとヘテロジニアスネットワークの伝送容量増大の両立を目的としたリソース制御方式を議論する．具体的には，ヘテロジニアスネットワークにおいてアプリケーションに対する要求 QoS などを考慮した個々のユーザの通信品質向上と伝送容量増大を実現する観点でのロードバランスを図るためのリソース制御方式及び，このリソース制御方式を実現するための高速システム切替プラットフォームを提案する．また計算機シミュレーション及び第 3 章で構築した基本実験機の屋内実験結果より，提案制御方式の有効性を明らかにする．

4.2　リソース制御における課題

ヘテロジニアスネットワークにおいて各ユーザが利用可能な伝送容量を，各ユーザの無線リソースと定義する時，システムに接続されている全ユーザの無線リソースを把握した上で，ネットワーク主導の統合的制御に基づき，各ユーザに無線リソースを配分することは，無線リソース制御の柔軟性の一層の向上に不可欠である．ただしその際には，第 2 章で述べた通り，アプリケーションが要求する QoS なども考慮した無線リソース制御でなければならない．

また，ヘテロジニアスネットワークを構成する複数の異種無線システムは，それぞれ，無線システム内に閉じた，送信電力制御やアドミッション制御等のリソース制御も同時に行われていることから，統合的制御の観点に基づくリソース配分に基づく制御と，無線システム内に閉じたリソース制御が両立する条件で運用されなければならない．言い換えると，ヘテロジニアスネットワークにおいて，ネットワーク主導の統合的制御を適用可能な条件を明確にする必要がある．

さらに，ネットワーク主導の統合制御では，無線リソースの再配分により，ユーザが移動しない状況においても，ネットワーク側からの指示により使用する無線システムが頻繁に切り替わる可能性がある．したがって，統合制御におけるリソース制御を実現するため，ネットワーク主導での高速な無線システム切替を可能とするプラットフォームを構築する必要がある．

これらのことから，ヘテロジニアスネットワークにおける統合制御におけるリソース制御の課題をまとめると以下の三つとなる．

1. ネットワーク主導の無線リソース制御ポリシーの明確化
2. ネットワーク主導の無線リソース制御の適用条件の明確化
3. コグニティブ無線を活用して認識した各空間の無線環境に基づき，ネットワーク主導の統合的制御を行い，アプリケーションが要求する QoS なども考慮して各ユーザへの無線リソース配分を可能とするプラットフォームの構築

4.3　無線システムにおけるリソース制御

統合制御におけるリソース制御について述べる前に各無線システムにおけるリソース制御について述べる．EVDO 及び無線 LAN の場合，アプリケーションに応じた IP パケットの TOS (Type of Service) 値が記載されていても無線回線ではすべての IP パケットを平等に扱うことが一般的であり，無線回線は，EVDO では PF (Proportional Fairness) によるリソース制御，無線 LAN では CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) 制御のように無線回線の状況に応じた制御が行われている．一方 WiMAX の場合は，有線回線における IP パケットの TOS 値をもとに音声，ストリーミング，FTP (File Transfer Protocol)，その他データ通信の四種類に分類し，これを無線区間における四つの QoS クラス (それぞれ UGS (Unconsolicited Grant Services), rtPS (realtime Packet Service), nrtPS (non-realtime Packet Service), BE (Best Effort)) と対応づけ，それぞれの QoS クラスに優先度を設定した上でリソース割り当て制御を行っている．図 4.1 に WiMAX における QoS 制御を含むリソース制御の概念図を示す．

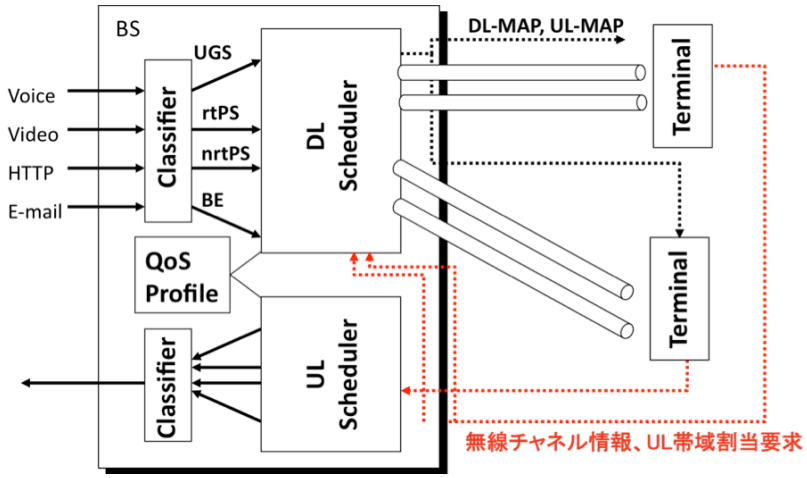


図 4.1 WiMAX システムにおけるリソース制御

このように WiMAX においてはアプリケーションの QoS を満たす可能性を高めるための仕組みが採用されている．また，無線システムにおいては無線回線の使用率が高い場合に呼の受付を拒否するアドミッション制御も実装されている．したがって，異なる無線システムの無線リソースをネットワーク主導で統合制御する場合には，それぞれのシステムが備えている無線リソース制御や，そこに含まれる QoS 制御などを制御ポリシーに反映させる必要がある．

4.4 ネットワーク主導リソース制御

4.4.1 ネットワーク主導リソース制御の基本ポリシー

4.2 節で述べた制御目標のためのリソース制御のあり方について検討する．複数の無線システムが存在する空間において特定の無線システムのトラフィックが集中すると，新規に通信を開始するユーザの無線システムの選択肢を減らすことになり，システム選択による柔軟な無線リソース制御という無線リソースの統合的制御の利点が損なわれることになるため，無線リソース統合制御の基本はシステム間でロードバランスを図ることにあると言える．ただし，ロードバランスを図る際，システム間の負荷を単に分散化させるだけでは，必ずしも多種多様なアプリケーションを利用するユーザに満足のいく通信品質での通信を提供することにつながるとは限らないため，ユーザの通信品質向上とロードバランスをどのように両立させるのかが課題となる．そこで，4.3 節で示した通り，個々の無線システムにおけるリソース制御は既に確立されていることから，個々の無線システムにおけるリソース制御

はそのまま活用し，ユーザが使用するアプリケーションに応じたQoSクラスをネットワーク側で把握する機能を加えた上で，システム間のロードバランスを実現する方法を提案する．

具体的には，まず，コグニティブ無線を活用した各空間における無線環境の認識に加え，ネットワーク側において各無線システムの各アクセスポイントに接続されている端末数等の情報や，TOS値に代表されるアプリケーションに応じたQoSクラスの情報，無線システムのQoS 制御対応の有無に関する情報を収集する．特に各アクセスポイントに接続されている端末数の情報は端末側においては知り得ることのできない情報であり，ネットワーク主導で異種無線システム間のリソース利用率の平準化を図る観点からも有用な情報であると考える．次に，収集したこれらの情報をもとに，個々のユーザの通信品質向上とヘテロジニアスネットワークの伝送容量増大化の観点に基づき，異種システム間のリソース利用率の平準化を図るためのシステム切替制御を行う．個々のユーザの通信品質向上の観点からは，要求 QoS を有するリアルタイム系のアプリケーションを利用しているユーザに対しては，その通信品質確保をめざすよう制御を行う．またウェブ閲覧や FTP によるファイル転送など，要求 QoS をもたない非リアルタイム系のアプリケーションを利用しているユーザに対しては，伝送容量増大をめざすことになる．さらに，異種システム間のリソース利用率の平準化の観点からは，ユーザが接続する無線システムに複数の候補があった場合に，空き帯域のより大きい方の無線システムに，切り替えることで，空き帯域が少なくリソース利用率が高いシステムにユーザが集中しないように制御する．

なお，インターネット上のトラフィックを計測した統計的結果に基づく3GPP2のシステム評価指標 [77] によれば，全トラフィックのうちの約 9 割が非リアルタイム系のアプリケーションで，残りの約 1 割がストリーミングなどのリアルタイム系アプリケーションであると記載されている．すなわち，ヘテロジニアスネットワークにおけるリソース制御における効果の多くは，非リアルタイムのアプリケーションを利用しているユーザに依存し，これらのユーザに対しては伝送容量増大をめざすことから，個々のユーザのリソース制御によりヘテロジニアスネットワークにおける伝送容量増大が期待できる．

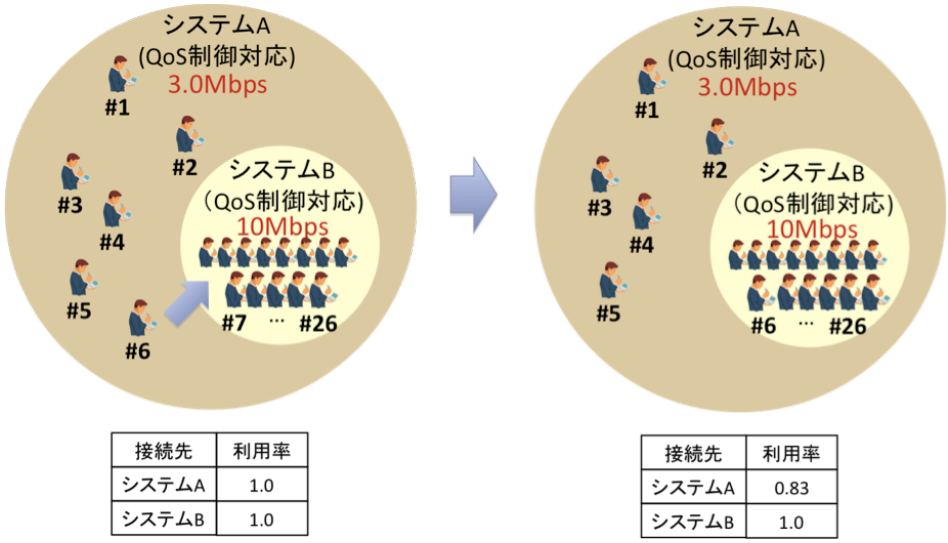
4.4.2　ネットワーク主導リソース制御の適用条件

4.4.1 節で述べた通り，無線リソース統合制御の基本はシステム間でロードバランスを図ることにある．したがって，これを可能とするためには，ネットワーク主導の統合的制御に基づくリソース配分は，無線システム内のリソース制御と矛盾しないように行われなければならない．そこで本論文におけるリソース制御においては，ネットワーク主導の統合的制御に基づくシステム切替が行われる時，切替先の無線システムはシステム切替の対象となるユーザのリソースを確保可能であり，また，切替先の無線システムに接続され，要求QoSをも

つアプリケーションを利用しているユーザの通信品質は，切替に伴って低下しない，という条件下で運用されることを条件とする．言い換えると，システム切替の対象となるユーザが切替先の無線システムに収容される場合に，個々の無線システム内のリソース制御においてアドミッション制御が行われる状況や，要求 QoS をもつアプリケーションを利用しているユーザに影響を及ぼすような状況は，本リソース制御の適用条件として想定しない．図 4.2 を用いて，リソース制御の適用条件を上記のように定めた理由を説明する．

図 4.2 では，3 Mbps の伝送容量をもつシステム A と 10 Mbps の伝送容量をもつシステム B の二つの異種無線システムをヘテロジニアスネットワークとして扱い，ユーザ#1 からユーザ#6 までの 6 ユーザがシステム A のエリア内に，ユーザ#7 からユーザ#26 までの 20 ユーザがシステム B のエリア内に位置し，システム A に位置するユーザ#6 のみが，システム B のエリアに移動する状況を仮定する．また，図 4.2 では個々のユーザのアプリケーションに対する要求伝送速度は 500 kbps で同一アプリケーションの利用を仮定し，また，各ユーザの要求伝送速度を満たすよう，システム A もシステム B も QoS 制御に対応していると仮定する．図 4.2 の左側に示すように，ユーザ#6 がシステム A のエリアにいる場合，システム A もシステム B も共にリソース利用率が 1.0 の状態であり，図 4.2 の右側に示すようにユーザ#6 がシステム B に移動してもヘテロジニアスネットワークによる伝送容量増大の利点や，システム選択による柔軟なリソース制御の利点を見いだせない．さらに，システム B のリソース利用率が 1.0 の状態では，ネットワーク主導の統合的制御に基づき，ユーザ#6 に対してシステム B への切替を指示しても，システム B にそれを収容するだけの空きリソースがないため，これを無線システム B 内のリソース制御に反映することができず，ユーザ#6 をシステム B に収容することができない．

ここで，システム B 内のリソース制御によっては，システム B のリソース利用率が 1.0 の状況において図 4.2 の右側に示すように，ユーザ#6 をシステム B に収容すべく，既に接続しているユーザ#7 からユーザ#26 のいずれかの接続をアドミッション制御により切断してユーザ#6 の接続を受け付け，あるいはシステム B に接続中の他のユーザの伝送速度低下を許容してユーザ#6 の接続を受け付け，システム B を合計 21 ユーザで運用しリソース利用率 1.0 を維持する制御もあり得る．このようなシステム B 内のリソース制御を活用すればシステム A のリソース利用率を低下させることが可能となることから，これもヘテロジニアスネットワークにおける統合的制御の一形態と捉えることが可能である．しかしながら，前者のリソース制御の場合，いずれかのユーザの接続を切断して新たにユーザ#6 の接続を受け付けても，システム B 内のリソース制御によるリソース再配分にとどまり，ネットワーク主導によるヘテロジニアスネットワークの伝送容量増大にはつながらず，また切断すべきユーザをいかにして選択すべきかは，ヘテロジニアスネットワークのみで生じる課題ではなく，単一の無線システム内におけるアドミッション制御の課題でもある．また，後者のリソース制御の場



接続先	利用率
システムA	1.0
システムB	1.0

接続先	利用率
システムA	0.83
システムB	1.0

図　4.2　ネットワーク主導リソース制御の適用範囲

合，いずれかのユーザもしくは全員が 500 kbps の要求伝送速度を満たせなくなり，ユーザの通信品質向上の観点から望ましいとは言えない．したがって，図 4.2 の例に示すように，システム切替の対象となるユーザのリソースを確保できない状況や，対象となるユーザの切替に伴って，切替先無線システムに接続され，要求 QoS をもつアプリケーションを利用しているユーザの通信品質が低下するような状況については本論文のリソース制御の効果を検証する対象とはしない．

4.4.3　ネットワーク主導リソース制御フロー

4.4.1 節で述べた制御ポリシーに基づき，ネットワーク主導のリソース制御について，一人のユーザ (端末) に対する制御に着目して具体的に述べる．ここでは第 3 章において定義したコグニティブ無線基地局が，EVDO，WiMAX，無線 LAN の三つの無線システムから構成され，WiMAX のみがユーザが使用するアプリケーションに応じた QoS クラスに応じたリソース制御に対応し，EVDO と無線 LAN は，どのアプリケーションも同じ優先度で扱うと想定する．また WiMAX，無線 LAN の受信感度をそれぞれ *Sensitivity_wimax*，*Sensitivity_wlan* と定義する．さらに WiMAX へシステムを切り替えるための (あるいは WiMAX から EVDO へ切り替えるための) システム切替閾値を *Threshold_RSSI_wimax*，同様に無線 LAN へシステム切替を行う (あるいは無線 LAN から EVDO へシステム切替を行う) システム切替閾値を *Threshold_RSSI_wlan* と定義し，これらの閾値の値はそれぞれの無線システムの受信感度以上の値を設定することとする．

提案リソース制御方式では，まず，ヘテロジニアスネットワークの各空間における無線環境を認識するため，各無線システムの基地局もしくはアクセスポイントから各端末の RSSI 値を取得する必要がある．そこで WiMAX のアクセスポイントから取得されるこの端末の RSSI 値を *RSSI_wimax_ct*，無線 LAN のアクセスポイントから取得されるこの端末の RSSI 値を *RSSI_wlan_ct* とする．次にそれぞれのシステムにおいて，RSSI 値と，システム切替閾値との比較を周期的に行い，その無線システムへの切替可能性を判断する．次に，システム切替の候補となる無線システムを特定するため，そのユーザのシステム切替後の伝送容量，及び，無線システムの空き伝送容量を推定する．空き伝送容量は各アクセスポイントに接続されている端末のアプリケーションの情報や，アクセスポイントに接続されている端末数等の情報をもとに推定する．また，3.5.2.1 節で述べた通り，測定した受信電力強度をもとに，WiMAX に切替後に期待される伝送容量 (*Ex_throughput_wimax*)，無線 LAN に切替後に期待される伝送容量 (*Ex_throughput_wlan*) をそれぞれ推定する．当該ユーザの伝送容量が，切替後に増大することが期待でき，かつ，切替後に期待される当該ユーザの伝送容量が切替先のシステムの空き伝送容量よりも小さい場合には，システム切替推奨の候補に入れる．逆に切替後に期待される当該ユーザの伝送容量が，現状の伝送容量よりも小さい場合，あるいは，システム切替後に期待される当該ユーザの伝送容量が，切替先のシステムの空き伝送容量よりも大きい場合には，システム切替推奨の候補には入れないようにする．

以上述べた観点に基づき，ヘテロジニアスネットワーク側において，システム切替推奨候補となる無線システムの数をカウントする．このフローを図示すると図 4.3 に示す通りとなる．コグニティブ無線基地局のサービスエリアは，対象とする異種無線システムの中に携帯電話システムである EVDO が含まれる場合，端末はヘテロジニアスネットワーク内のいずれの場所においても，少なくとも EVDO を用いた通信が可能であると考える．そこで EVDO に対してシステム切替の推奨候補にするか否かの計算は不要とし，図 4.3 に示すように WiMAX 及び無線 LAN がシステム切替の推奨候補となるか否かについて判断している．

図 4.3 のフロー実施後，切替推奨候補となる無線システムの数は，”2” (WiMAX と無線 LAN の両方とも切替推奨候補) の場合と，”1” (WiMAX のみが切替推奨候補，あるいは，無線 LAN のみが切替推奨候補) の場合と，”0” (WiMAX と無線 LAN が共に切替推奨候補とならない) 場合に分けられる．ユーザが利用するアプリケーションの QoS を可能な限り満たしつつ，異種システム間のロードバランスと伝送容量増大の両立を実現するために，切替推奨候補の無線システム数に応じて以下の指針で無線システムを選択する．

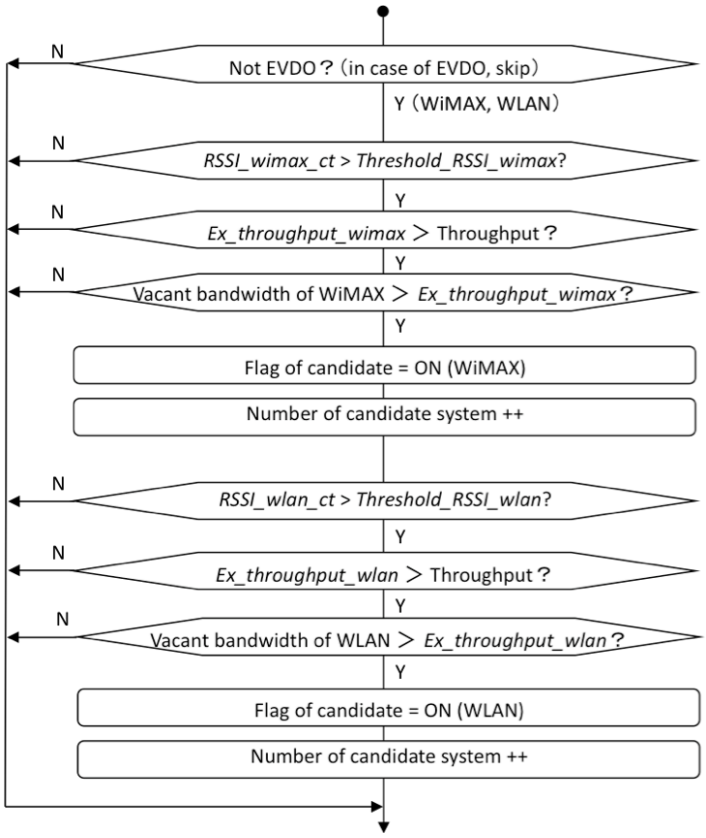


図 **4.3** システム切替推奨候補の無線システム数カウントフロー

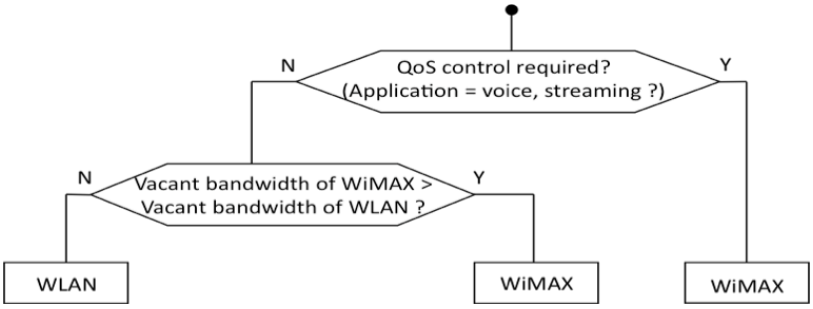


図 **4.4** 切替推奨候補の無線システム数が **2** の場合の制御フロー

(1) 切替推奨候補の無線システム数が 2 の場合，ユーザのアプリケーションに対する要求 QoS と異種システム間のリソース利用効率の平準化の両立を図ることが可能であると考え，音声やストリーミングなどリアルタイム系のアプリケーションの場合には QoS 制御に対応可能な WiMAX を選択，それ以外のアプリケーションの場合には WiMAX と無線 LAN のうち現在の空き帯域の大きい方のシステムに切り替える．図 4.4 にこの場合における制御フローを示す．

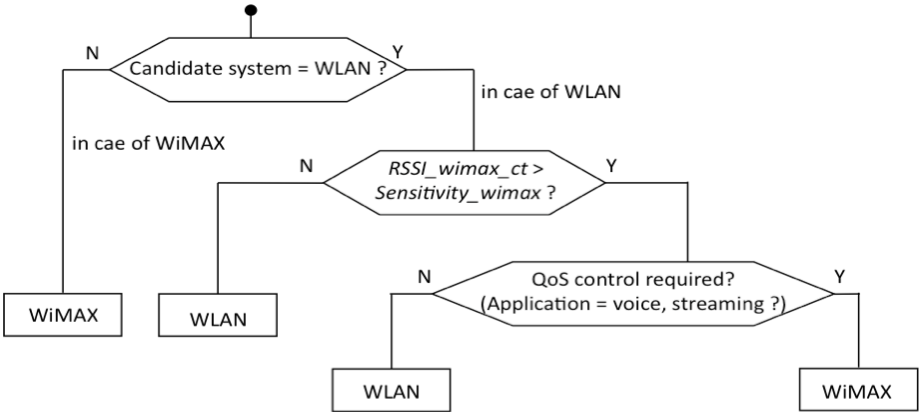


図 4.5 切替推奨候補の無線システム数が 1 の場合の制御フロー

(2) 切替推奨候補の無線システム数が 1 の場合には，端末のモビリティ確保と伝送容量向上が可能と考える．この場合，切替推奨候補となった無線システムが WiMAX か無線 LAN かによって制御フローが異なり，図 4.5 に制御フローを示す．図 4.5 に示す通り，切替推奨候補システムが WiMAX である場合，アプリケーションに対する要求 QoS を満足する可能性の高い WiMAX を選択する．一方，切替推奨候補システムが無線 LAN である場合，WiMAX の RSSI 値を WiMAX の *Sensitivity_wimax* と比較する．WiMAX の RSSI 値が，*Sensitivity_wimax* よりも小さい場合，WiMAX を用いた通信は不可能であることから，推奨された切替候補に従い，無線 LAN を選択する．一方，WiMAX の RSSI 値が *Sensitivity_wimax* よりも大きい場合，品質を満たせるとは限らないが WiMAX での通信が可能であることから，推奨候補とはならなかった WiMAX をシステム切替の候補として入れる．この理由は，WiMAX は QoS 制御に対応しており，無線 LAN よりも低遅延な通信を見込める可能性があるためである．この観点に基づき，ユーザのアプリケーションが音声やストリーミングなどリアルタイム系のアプリケーションの場合には QoS 制御に対応する WiMAX を選択して，低遅延な通信の可能性に期待し，非リアルタイム系のアプリケーションの場合には，切替推奨候補に挙げられていた無線 LAN を選択する．

(3) 切替推奨無線システム数が 0 の場合，ユーザの通信品質向上は満たせないが，アプリケーション利用の継続化を図るため，受信感度を上回る受信信号強度の無線システムの有無を確認する．都市部などの限られた地域では WiMAX や無線 LAN エリアも普及しつつあるが，ヘテロジニアスネットワークのエリア内において EVDO 利用可能エリアが他の無線システムと比較して一番広いため，様々なユーザがヘテロジニアスネットワーク内の空間を移動することを考えると，EVDO 利用可能エリアに存在する

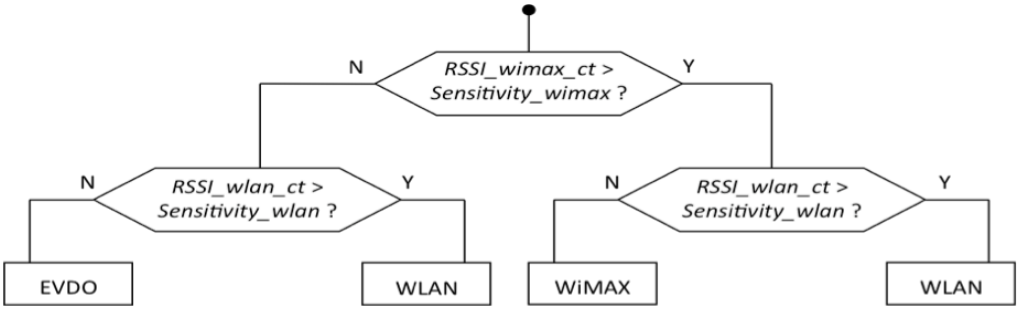


図 4.6 切替推奨候補の無線システム数が 0 の場合の制御フロー

確率は他の無線システムと比較して大きいと考える．また 2009 年 11 月現在，EVDO を採用している au (KDDI) の加入者が約 3126 万人に対して WiMAX を採用しているUQコミュニケーションズは約2万人であることから [78]，ヘテロジニアスネットワーク環境においては EVDO 接続ユーザが多い状況であると考えられる．そこで，切替推奨無線システム数が 0 の状況においても EVDO の利用率減少を図ることがシステム間の利用率平準化につながる可能性が高いと考え，受信感度を上回る受信信号強度をもつ無線システムが存在する場合には，その無線システムへ切り替える．WiMAX と無線 LAN の両システムの受信信号強度が共に受信感度を上回る場合，EVDO に次いで利用可能なエリアの広い WiMAX の利用率減少を，EVDO の場合と同様の理由により図り，無線 LAN に切り替える．WiMAX の受信信号強度のみが受信感度を上回る場合には WiMAX に切り替え，無線 LAN の受信信号強度のみが受信感度を上回る場合には無線 LAN に切り替える．受信感度を上回る受信信号強度をもつ無線システムが存在しない場合には，EVDO での通信を行う．図 4.6 にこの制御フローを示す．

これらの一連の制御フローにおいてRSSI値がシステム切替閾値近辺の値となる場合，リソース制御を行うたびにシステムが切り替わることで通信相手までパケットが到達せず，パケットロスが発生する問題がある．この問題に対し，システム切替閾値を二つ設け，RSSI 値が二つの閾値内に収まる場合にはシステム切替を実施しないなどの方法により，システム切替頻度を軽減する必要がある．本論文ではシステム切替頻度を軽減する観点について以下の通り考える．まずパケットロスを軽減するための前提として，提案リソース制御はネットワーク層に実装し，また，受信感度以上の値をシステム切替閾値に設定することで，システム切替前後においても少なくとも一つの無線システムとの通信回線との接続は常時保証されている状態とし，End-to-End での TCP コネクションを保持することとする．この場

合，消失したパケットはシステム切替に起因するもの，無線区間における伝送誤りによるもの等の発生理由を問わず，TCP の再送制御により再送されて通信相手に到達可能と考え，無線システム切替閾値にはヒステリシスは設けず，無線システム毎に一つの切替閾値としている．

次に，無線システムの切替頻度に深く関わる無線システム切替の最短周期ついて述べる．TCP のパケットロスに対する再送制御のタイマ RTO (Retransmission Timeout) は RFC793 [38] において RTT (Round Trip Time) の関数として規定され，Microsoft Windows の RTO 初期値は 3 秒 [79], Linux における RTO 最小値は 200 ms となっている [80]. しかし無線システムを想定した場合，RTT は 100 ms 程度であり [81]，無線システムにおいて 100 ms から数 100 ms の RTT を前提とした TCP などの通常のトランスポートプロトコルの動作実績が既にある状況となっている．ここで，RFC793 [38] における RTO は，RTT を平滑化した SRTT (Smoothed Round Trip Time) をもとに式 (4.1) (4.2) により求められ，最小の再送時間を *LBOUND*，最大の再送時間を *UBOUND* とし，設定例として *UBOUND* = 1 分，*LBOUND*=1 秒，β=1.3〜2.0 が紹介されている．

$$SRTT = (\alpha \times SRTT) + ((1-\alpha) \times RTT) \tag{4.1}$$

$$RTO = \min\,[UBOUND, \max[LBOUND, (\beta \times SRTT)\,]\,] \tag{4.2}$$

現在国際標準化が進行中である第 3.9 世代の HSPA+ (High Speed Packet Access +) では RTT=30 ms をめざしており，β=2 とすると，RTT の約 2 倍の値を RTO として設定することが可能であることから，RTT の観点に基づくと無線システムにおける RTO 最小値は 60 ms 程度が限度であると考えられる．また TCP では再送制御を行うにあたり経過時間等を計測するタイマが必要であり，TCP のタイマ精度を 50 ms, 100 ms とした場合，RTO を 500 ms に設定可能との検討例 [82] があり，TCP タイマの精度の観点に基づくと，通常の TCP 動作は 50 ms が限度であると考えられる．さらに，提案リソース制御の実装上の観点に基づくと，基地局から収集される無線環境の情報の最短の取得周期は例えばフレーム単位(EVDO の場合，26.6 ms) となるが，瞬時変動の影響を軽減するため数フレームにわたってこれらの情報を平均化 (もしくは重み付け) した上で使用するべきであり，無線環境認識サーバに収集される無線環境情報の更新周期も 100 ms 程度とならざるを得ない．

以上述べた観点に基づき，通常のトランスポートプロトコルを用いて通信が行えるよう，本提案リソース制御においては，システム切替の最短周期として 100 ms を想定する．

なお，100 ms よりも早い周期でのシステム切替に伴うパケットロスに対する対策技術としては，トランスポート層と連携した制御が必要と考える．まず UDP の場合は再送制御がないため，上述した通り提案リソース制御におけるシステム切替閾値を複数設けるなどしてシステム切替の切替頻度を 100 ms のオーダーに軽減する技術が必要と考える．TCP 制御の場合，無線システムの基地局間ハンドオーバや，無線システム間の垂直ハンドオー

バにおいてパケットロス増加に伴う再送制御による伝送速度低下を改善する技術として，Freeze-TCP [39] や M-TCP [40] などが提案されている．これらの技術ではミリ秒単位でのパケットロスが頻繁におきても，伝送速度改善が図られており [39]，これらトランスポート層における技術と連携した制御を行うことでネットワーク層においてミリ秒単位の切替を行うことも可能となると考える．しかしながら，本提案リソース制御では通常のトランスポート層の使用を前提とした上でネットワーク層における統合制御に焦点を絞り，複数のシステム切替閾値を設けることや，Freeze-TCP などの TCP 改良技術との連携を含めた伝送容量向上は本論文では対象外とする．

4.5　異種システム間システム切替プラットフォーム

4.4 節で述べたヘテロジニアスネットワークにおけるネットワーク主導の統合リソース制御を実現するためには，プラットフォームとしてネットワーク主導の高速なシステム切替機能が必須であり，同時にユーザのアプリケーション利用の観点からこのシステム切替をユーザが意識しなくて済むようにしなければならない．そこで，図 4.7 に示すプラットフォームを提案する．まず複数の無線システムを切り替えるための無線システム切替スイッチをネットワーク側に新規に配置し，異種無線システム間の切替をネットワーク層で実装する．ネットワーク主導のシステム切替のためには第 3 章で述べた各空間におけるコグニティブ無線を活用した無線環境認識技術が必要であり，各無線システムのアクセスポイントから受信信号強度などの情報を収集する無線環境認識サーバもネットワーク側に配置する．ここでユーザのアプリケーションに対する QoS と伝送容量増大化を考慮したシステム間のリソース利用率の平準化を実現するため，それぞれの無線システムに接続しているユーザ数などの MAC 層の情報や，ユーザアプリケーションの情報も無線環境認識サーバに収集させることとする．そして収集されたこれらの情報を用いて，制御方針を無線システム切替スイッチ内のルーティング情報に反映させることにより高速なシステム切替を行い，ネットワーク主導の統合的なリソース制御を実現する．

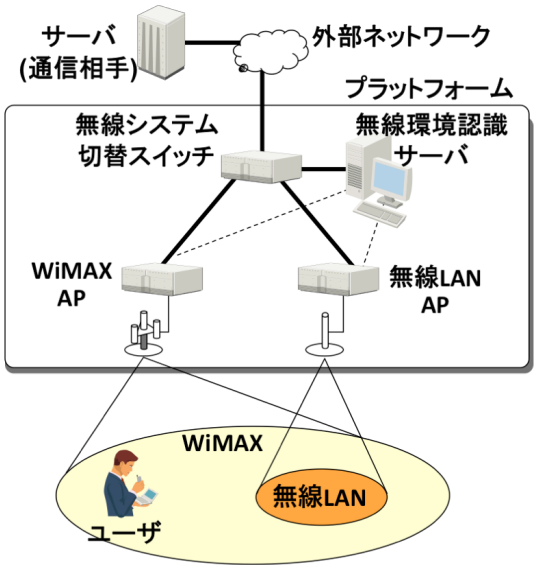


図 4.7 提案プラットフォーム

4.6 計算機シミュレーション

4.6.1 基本シミュレータによる動作確認

4.6.1.1 シミュレーション諸元

受信信号強度 (RSSI) による各空間の伝送容量把握結果に基づき，アプリケーションに応じたQoSを考慮した無線システム間の平準化を行う，提案リソース制御方式の有効性を確認するため，OPNET をベースに WiMAX と無線 LAN により形成されるヘテロジニアスネットワーク内の空間を端末が移動する状況を模擬するシミュレータを構築した．表 4.1 にシミュレーション諸元を，表 4.2 にユーザが利用するアプリケーションの仕様を示す．なお同表に示す通り，ユーザ#2 については特に QoS を必要とするアプリケーションではなく，アプリケーションが要求する帯域は特にないが，伝送容量に着目するため，アプリケーションとして 28.8 Mbps の平均データ送出速度を有する固定長データを周期的に送信することとし，トランスポートプロトコルとしてUDPを用い，無線回線におけるパケットロスを許容することとした．

表 4.1 シミュレーション諸元

項目	仕様	
WiMAX	準拠方式	IEEE 802.16e
	周波数帯	2.5 GHz
	対応 QoS クラス	rtPS, BE
	送信電力	20 dBm
	雑音指数+実装損失	13 dB [4]
	受信感度	−97 dBm
無線 LAN	準拠方式	IEEE 802.11g
	周波数帯	2.4 GHz
	送信電力	0 dBm
	雑音指数+実装損失	15 dB [76]
	システム切替閾値	−90 dBm
	受信感度	−90 dBm
伝搬路	ITU-R M.1225 Pedestrian モデル [74]	
端末移動速度	4 km/h (歩行を想定)	
端末移動時間	60 秒間 (移動経路は図 3.6 に示す通り)	

表 4.2 各ユーザのアプリケーションと QoS

ユーザ	アプリケーション	対応 QoS	TOS 値	トランスポート層	要求帯域
# 1	動画ストリーミング	rtPS	7	UDP	4.8 Mbps
# 2	ファイルダウンロード	BE	0	UDP	なし

4.6.1.2 基本シミュレータの動作シナリオ

図 4.8 にシミュレータの外観と端末の移動経路を示す．基本的には 3.5 節と同一のシミュレーション諸元，同一のシナリオを用い，WiMAX のみがサービスされるエリア内から移動経路に沿って速度 4 km/h で移動し，WiMAX と無線 LAN の双方がサービスされるエリアを通過した後，再び WiMAX のみがサービスされるエリアに入り，移動を終了するものとする．この間の移動時間は 60 秒である．ここで本節の動作シナリオが 3.5 節と異なる点は，この移動経路に沿って移動するユーザを複数配置していることのみである．また表 4.2 に示されるように，QoS については，ユーザ#1 の利用するアプリケーションにおいてリアルタイム性を求められることから，ユーザ#2 より優先度の高い QoS が設定されている．なお，

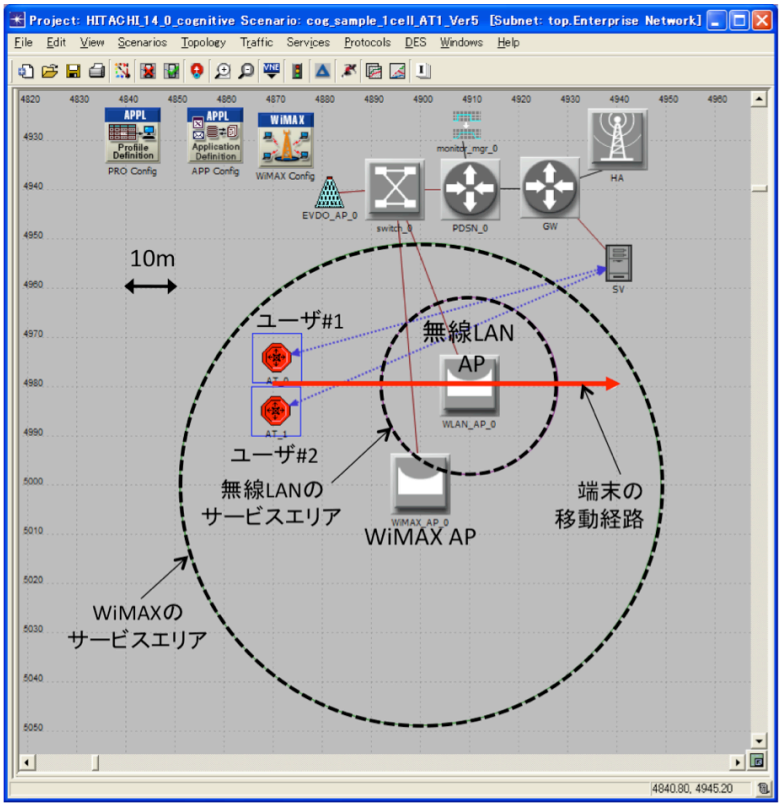


図 4.8 基本シミュレータの外観と端末の移動経路

WiMAX におけるリソース制御では表 4.2 に示す TOS 値が適用される.

評価にあたっては, アプリケーションに応じた QoS クラスをリソース制御において考慮することの有効性の度合いを把握するため. QoS クラスをリソース制御において考慮せず受信信号強度 (RSSI) のみを用いて切替制御を行う方式 (以下,「RSSI 値に基づく制御方式」) の伝送容量も合わせて取得し, 比較を行う.

4.6.1.3 基本シミュレーション評価結果

図 4.9 に各制御方式における各ユーザの伝送容量のシミュレーション結果を示す. 図 4.9 の横軸は端末の移動経過時間, 縦軸はそれぞれのリソース制御方式で制御した場合の伝送容量を示しており, 左が RSSI 値に基づく制御方式, 右が提案リソース制御方式による伝送容量を示している.

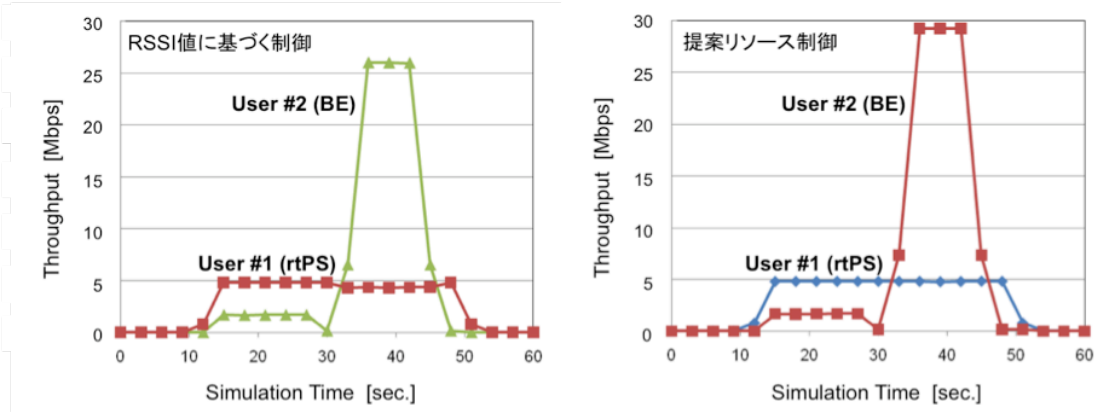


図 4.9　提案リソース制御方式よる各ユーザの伝送容量

端末移動開始時刻 (t=0 秒) においてアプリケーションを起動し，無線回線の確立手順を経て，WiMAX を用いて通信が開始される時刻 (t=12 秒) から無線 LAN を検出する時刻 (t=30 秒) までの間は WiMAX のみが使用可能であると判断され，2 ユーザ共に WiMAX を使用して通信を行っている．この際，WiMAX における QoS 制御により，ユーザ#1 のストリーミングの優先度が高く設定され，ユーザ#1 の伝送速度は 4.8 Mbps に保持されているが，残りの伝送容量をユーザ#2 が使用することとなり，ユーザ#2 の伝送速度は 1.4 Mbps 程度となっている．無線 LAN 検出時刻 (t=30 秒) において無線 LAN も使用可能であると判断され， RSSI 値に基づくリソース制御方式では，このタイミングで無線 LAN の RSSI 値が受信感度を上回るため，2 ユーザ共に無線 LAN に接続される．ただしその際，無線 LAN ではユーザのアプリケーションに対する QoS は特に考慮されないため，2 ユーザで無線 LAN の伝送容量を配分することとなる．この時刻におけるシミュレーション結果では，ユーザ#1 の平均伝送速度は約 4.2 Mbps となり，ストリーミングが要求する 4.8 Mbps の伝送速度を満たせていないが，ユーザ#2 は WiMAX と比較して伝送容量の大きい無線 LAN を選択したことで伝送速度は向上している．

一方，提案リソース制御方式では，端末移動開始時刻 (t=0 秒) から無線 LAN を検出する時刻 (t=30 秒) までは共に WiMAX で通信を行っていることから，WiMAX 基地局に接続する端末数が 2，無線 LAN アクセスポイントに接続する端末数が 0 の状態であり，これらの情報等から図 4.3 における空き伝送容量を求めた結果，無線 LAN の空き伝送容量が大きい状態となっている．無線 LAN のエリアに移動し無線 LAN 検出時刻 (t=30 秒) になると，2 ユーザ共に無線 LAN が切替推奨候補システムとなり，図 4.4 に基づき，動画ストリーミングを利用しているユーザ#1 は，QoS 制御に対応しているシステムである WiMAX を選択し，ファイルダウンロードを利用しているユーザ#2 は無線 LAN を選択することで，アプリケーションに応じた QoS を考慮しつつ無線システムのリソース利用率の平準

化を行う. この結果, ユーザ#1 はこの時刻においても WiMAX での通信を継続することで 4.8 Mbps のストリーミングを安定した品質で受信し, ユーザ#2 も無線 LAN の伝送容量を一人で占有することで, RSSI 値に基づく制御方式と比較してさらに伝送速度が向上し, 個々のユーザの通信品質向上とヘテロジニアスネットワークの伝送容量増大を実現していることがわかる.

以上の結果から, 提案リソース制御方式により, ユーザが利用するアプリケーションの通信品質向上と伝送容量増大の観点でシステム間のロードバランスを図ることが可能であり, 本提案制御方式の有効性を確認することができた.

4.6.2 システムシミュレータによる評価

本提案リソース制御が, より一般的な環境, かつ, より多くのユーザの存在する環境で有効であることを確認するため, WiMAX と無線 LAN のみならず, 携帯電話システムの EVDO をヘテロジニアスネットワークを構成する無線システムとして加えたシステムシミュレータを開発し, ユーザの初期位置, 移動速度, 及び, 移動方向をランダムに設定した場合の提案リソース制御方式の動作を確認する.

4.6.2.1 シミュレーション諸元

EVDO, WiMAX, 無線 LAN の三つの無線システムを対象としたシミュレータの開発にあたっては OPNET を開発環境として用いた. 図 4.10 にシミュレータの外観を, 表 4.3 にシミュレータの諸元を示す.

シミュレータの開発において, EVDO についてはアプリケーションの QoS に応じた優先制御機能をもたないことから, 各ユーザへ同一の優先度で, 無線環境を考慮してリソースを配分すればよいと考え, ユーザの位置, 及び EVDO アクセスポイントに接続しているユーザ数をもとにそのユーザの伝送速度を算出する簡易実装とした. 具体的にはまず, ユーザの位置と基地局との距離に基づき受信電力を計算し, その値に基づいてそのユーザが伝送可能な最大伝送容量を求める. 次に EVDO に接続するすべてのユーザに対して通信機会が均等に与えられるラウンドロビン方式で通信時間を配分すると仮定して, 各ユーザの伝送速度を求める. 図 4.11 を用いて, この実装方法を具体的に説明する. 図 4.11 は EVDO エリアに 2 ユーザが存在する状況を示しており, まずそれぞれのユーザの位置から, そのユーザが伝送可能な最大伝送容量を求める. ユーザ#1 は基地局に近く, 一人で EVDO システムを占有した場合に 2.4 Mbps の通信が可能, ユーザ#2 は基地局から遠く, 一人で EVDO システムを占有しても最大 153.6 kbps の通信が可能と算出する. 次

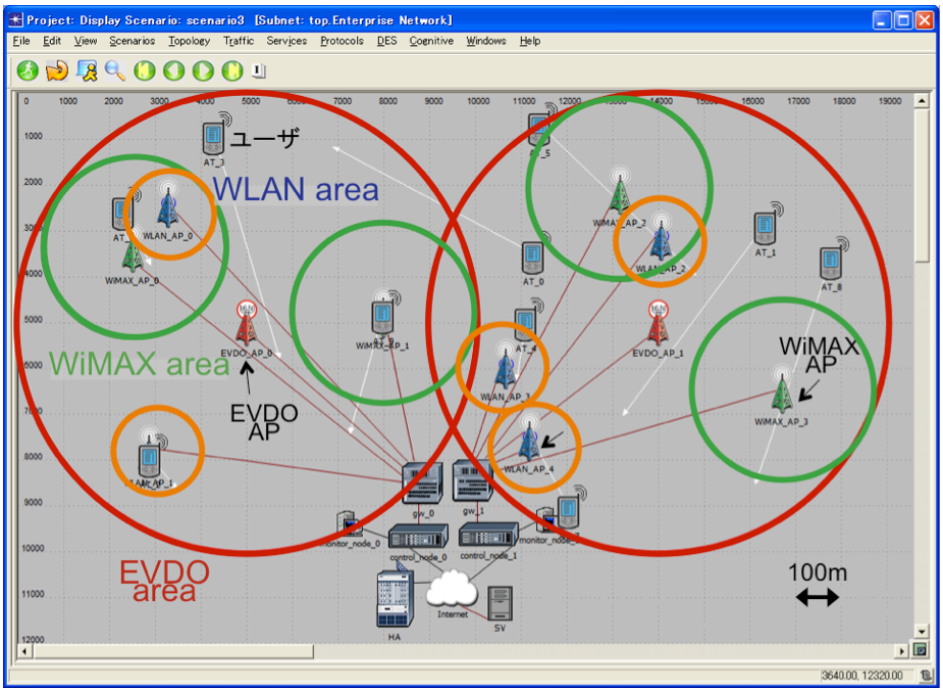


図　4.10　システムシミュレータの外観

表　4.3　システムシミュレータの諸元

システム	仕様	
EVDO	方式	1xEVDO Rev.0 (簡易実装)
	周波数帯	2.0 GHz
	送信電力	40 dBm
	セル半径	500 m
WiMAX	方式	IEEE 802.16e
	周波数帯	2.5 GHz
	送信電力	37 dBm
	雑音指数＋実装損失	13 dB
	受信感度	−97 dBm
	システム切替閾値	−80 dBm
	セル半径	200 m
WLAN	方式	IEEE 802.11g
	周波数帯	2.4 GHz
	送信電力	27 dBm
	雑音指数＋実装損失	15 dB
	受信感度	−90 dBm
	システム切替閾値	−80dBm
	セル半径	100 m
伝搬路		Pedestrian (ITU-R M.1225)

に，ユーザが利用するアプリケーションに関わらず，この 2 ユーザに対して均等な通信機会をラウンドロビン方式で配分し，ユーザ#1，ユーザ#2 の通信機会をそれぞれ 1/2 とする．これらの情報に基づき，各ユーザの伝送速度を算出し，この状況においては，ユーザ#1 の伝送速度は 1.2 Mbps，ユーザ#2 の伝送速度は 76.8 kbps となる．

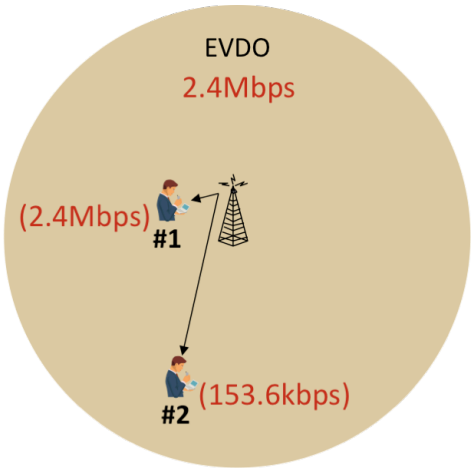


図 4.11 EVDO における各ユーザの伝送速度算出方法

なお WiMAX についてはアプリケーションに応じた優先制御等を考慮する必要があること，無線 LAN については CSMA/CA による送信停止の時間等を考慮する必要があることから，シミュレータ上で実際にパケットを送受信して，単位時間あたりのパケット伝送量を測定することで伝送速度を算出している．

4.6.2.2 シミュレータ動作シナリオ

ユーザ位置や移動の偏りの平滑化を図るため，シミュレーションエリア内には試行毎に 10 人のユーザをランダムに配置し，ユーザ毎にランダムな方向に，かつ，異なる速度で直進することとした．なお 10 人のユーザのアプリケーションはすべて同一とし，アプリケーションにおけるデータ送出速度も同一とした．

4.6.2.3 伝送容量の期待値

本節では開発したシミュレータのシミュレーション環境における伝送容量の期待値について算出する．図 4.12 に l 箇所の EVDO エリアの中に m 箇所の WiMAX エリア，n 箇所の無線 LAN が混在するヘテロジニアスネットワークの例を示す．ここで一つの WiMAX エリアのエリア率 (EVDO を 1 とした場合の相対的なエリア面積の割合) を L_{wimax}，無線 LAN のエリア率を L_{wlan} とし同時通信しているユーザを k 人とすると，平均ユーザ伝送容量はそれぞれの無線システムのアクセスポイントが有する最大伝送速度とそのエリア率から

$$\text{伝送容量 [bps]} = (2.4\ \mathrm{M} \times l + 11.3\ \mathrm{M} \times m \times L_{\mathrm{wimax}} + 54\ \mathrm{M} \times n \times L_{\mathrm{wlan}}) / k \quad (4.3)$$

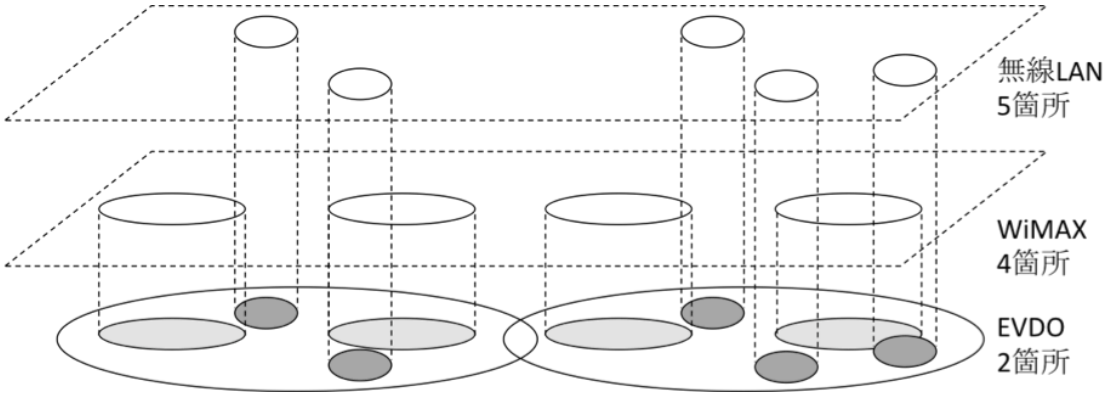


図 **4.12**　ヘテロジニアスネットワークにおける伝送容量

となる．今回のシミュレーションでは，半径 500 m の EVDO エリアが 2 箇所，そのエリア全体の中に半径 200 m の WiMAX エリアが 4 箇所，半径 100 m の無線 LAN エリアが 5 箇所ある環境に，ユーザが 10 人いることから，l=2，m=4，n=5，k=10 であり，L_{wimax}= 0.16，L_{wlan}= 0.04 となるため，伝送容量期待値は 2.28 Mbps となる．

この期待値は，4.6.2.4 節及び 4.6.2.5 節のシミュレーション環境において到達可能な平均伝送容量であり，伝送容量増大の観点からは，4.6.2.4 節及び 4.6.2.5 節のシミュレーション環境において，提案リソース制御により実現できる平均伝送容量を，この期待値に近づけることが目標となる．

4.6.2.4 シミュレーション結果 (UDP)

4.6.2.4.1 アプリケーション平均データ送出速度=104 kbps の場合

ユーザが使用するアプリケーションには様々なものがあるが，伝送容量の観点に注目するため，シミュレーション評価にあたってはアプリケーションとして，13 回／秒の一定間隔で固定長データを送信するものを想定した．まず，音声通信やメール送受信等，ユーザのアプリケーションに対する要求が比較的緩い場合，上記アプリケーションにおいて 1000 Byte の固定長データを送信することとし，10 人のユーザのアプリケーションに対する平均データ送出速度を 104 kbps (1000×8×13=104 kbps) とした．トランスポートプロトコルとしては UDP (User Datagram Protocol) を用い，WiMAX と無線 LAN へのシステム切替閾値は受信感度よりも 10dB 程度大きい値とし，それぞれ −80 dBm としてシミュレーションを行った．なお提案リソース制御方式による伝送容量増大の効果の度合いを確認するため，ユーザの初期位置における無線システムのみで通信を継続する制御を従来システム (Legacy System) と呼ぶことにし，この制御による伝送速度も測定し，比較を行った．

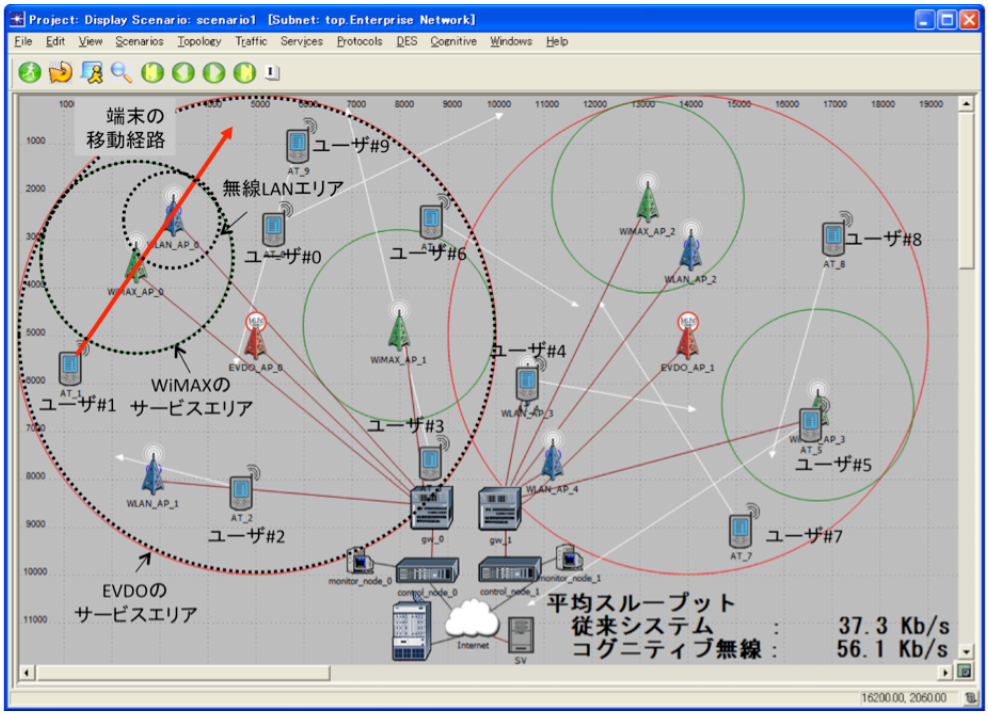


図 4.13 端末配置と各ユーザの移動経路 (平均データ送出速度=104 kbps)

図 4.13 に本シミュレーションを実行した際に設定された各端末の初期位置及び移動経路を示す．またシミュレーション結果として出力される各ユーザの伝送速度及びシステム切替履歴のうち，WiMAX と無線 LAN のエリアを通過するユーザ#1 に注目し，図 4.14 にユーザ#1 の伝送速度及びシステム切替の履歴を示す．

図 4.13 に示す通り，ユーザ#1 は初期位置において EVDO で通信を行い，続いて WiMAX のエリア，次いで無線 LAN のエリアを通過し最終的に EVDO のエリアに向かうルートで進行する．図 4.14 の横軸はシミュレーションにおける経過時間を，上側のグラフはその時刻におけるユーザ#1 の伝送速度 (bps) を，下のグラフはその時刻において選択された無線システムをそれぞれ示している．なおこのユーザの場合における比較対象である従来システムは，初期位置である EVDO で通信を開始してからシステム切替を行わずに最後まで EVDO で通信を行うものである． 図 4.14 より提案リソース制御方式ではユーザ#1 が EVDO のエリアから WiMAX，無線 LAN のエリアに入り再び EVDO のエリアに移動する際にそれぞれ無線システム切替が行われ (時刻 t=約 10 分，t=約 15 分，t=約 23 分)，また WiMAX や無線 LAN に切り替えることにより伝送速度が増大していることがわかる．また提案リソース制御方式と従来システム，それぞれの場合における 10 人のユーザの平均伝送容量を**表 4.4** に示す．**表 4.4** に示す通り，本提案リソース制御を用いることにより，初期位置における無線システムでの通信を継続する従来システムと比較して，約 1.5 倍の伝送容量増大効果が得られ，提案リソース制御が有効であることを確認できた．

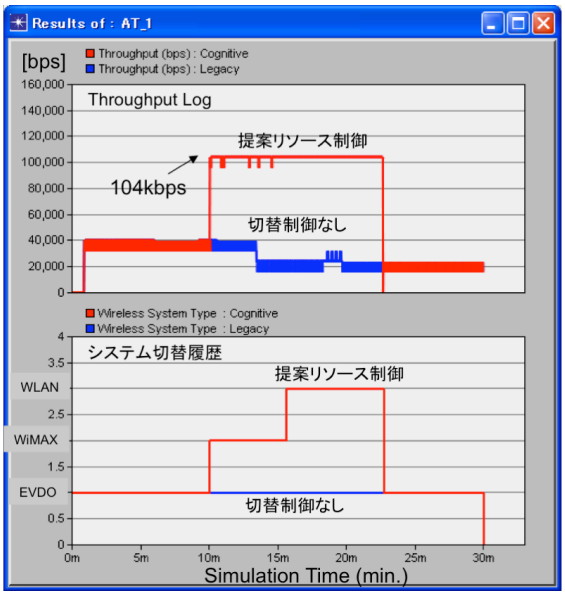


図 4.14　ユーザ伝送速度とシステム切替履歴例
(平均データ送出速度=104 kbps)

表 4.4　伝送容量比較 (平均データ送出速度=104 kbps)

制御方式	平均伝送容量
切替制御なし (従来システム)	37.3 kbps
提案リソース制御方式	56.1 kbps

4.6.2.4.2　アプリケーション平均データ送出速度=416 kbps の場合

次に，比較的大きい容量のデータ通信が行われた場合においても提案リソース制御が有効であることを検証するため，同じ UDP プロトコルをベースとする同一のアプリケーションにおいて 4000 Byte の固定長データを送信することとし，10 人のユーザの平均的なアプリケーションに対する平均データ送出速度を 416 kbps に設定した上で，WiMAX と無線 LAN へのシステム切替閾値は先ほどと同様，それぞれ −80 dBm を設定してシミュレーションを実行した．

図 4.15 に本シミュレーションを実行した際に設定された各端末の初期位置及び移動経路を示す．また図 4.16 にシミュレーション結果として出力される各ユーザの伝送速度及びシステム切替履歴のうち，例としてユーザ#5 とユーザ#9 の伝送速度及びシステム切替の履歴を示す．ユーザ#5 は図 4.15 に示す通り，EVDO のエリアを初期位置とし，WiMAX と無線 LAN のエリアを通過して再び EVDO のエリアに移動するユーザであり，このユーザの伝送速度及びシステム切替履歴を図 4.16 の左側に示す．このシミュレーション結果に

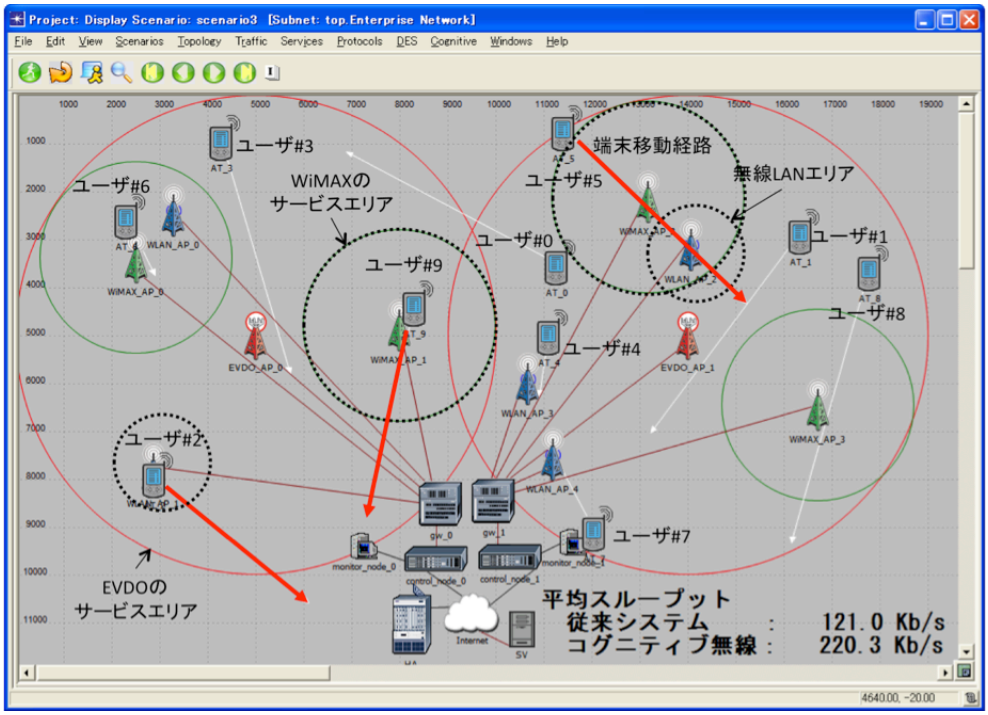


図 4.15 端末配置と各ユーザの移動経路 (平均データ送出速度=416 kbps)

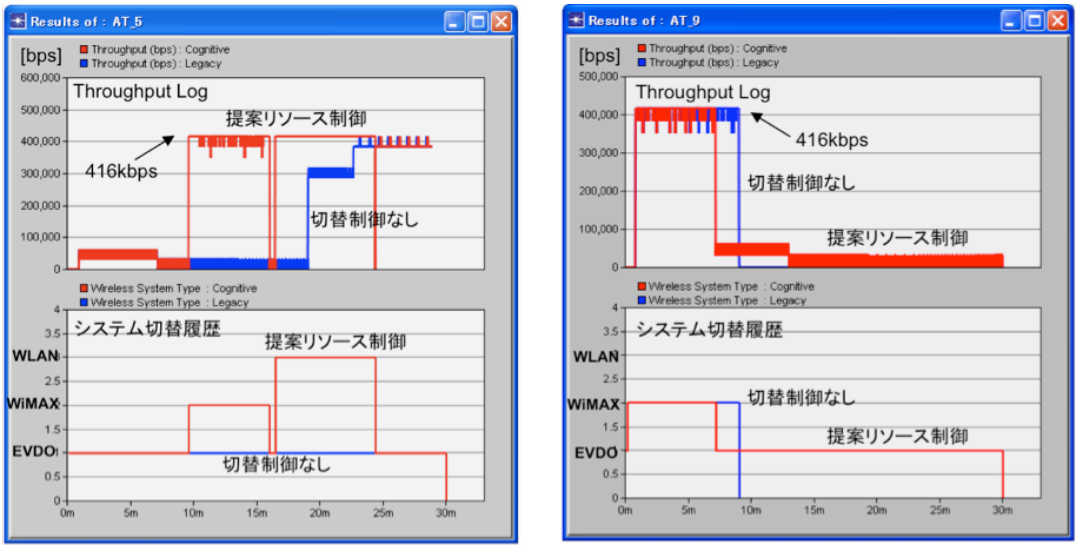


図 4.16 ユーザ伝送速度とシステム切替履歴例
(平均データ送出速度=416 kbps)

おいても 4.6.2.4.1 節の結果と同様，システム切替を行うことにより伝送容量が向上することがわかる．

一方，図 4.15 に示す通り，同じ試行において WiMAX を初期位置とし WiMAX のエリアから EVDO のエリアに移動するユーザ#9 のシミュレーション結果は図 4.16 の右側に示

表 4.5 伝送容量比較 (平均データ送出速度=416 kbps)

制御方式	平均伝送容量
切替制御なし (従来システム)	121.0 kbps
提案リソース制御方式	220.3 kbps

す通りとなる. このユーザの場合, 比較対象の従来システムは, 初期位置である WiMAX で通信を開始してからシステム切替を行わずに WiMAX のエリアにいる間 WiMAX で通信を行い, EVDO エリアでは WiMAX のアクセスポイントからの距離が遠いために WiMAX のリンクが切断して通信できないものになる.

図 4.16 より, WiMAX から EVDO に切り替える (時刻 t=7 分) 提案リソース制御よりも圏外になるまで (時刻 t=9 分) WiMAX で通信を継続する従来システムの方が伝送速度が速い結果となっており, 端末の場所や移動状況によっては提案リソース制御の方が伝送速度を低下させる可能性もある.

提案リソース制御方式と従来システムそれぞれの場合における 10 人のユーザの平均伝送容量を表 4.5 に示す. 表 4.5 に示す通り, ヘテロジニアスネットワーク全体として統合的な制御を行う提案リソース制御により伝送容量は 2 倍程度向上しており, また, 無線システム間のリソース利用率平準化に伴い, ヘテロジニアスネットワークを構成する EVDO よりも伝送容量が大きい WiMAX や無線 LAN を積極的に利用した効果により, 低速なデータ送出速度の場合よりも, その向上の度合いが大きくなっていることがわかる.

4.6.2.4.3 提案リソース制御方式における切替閾値の最適化

提案リソース制御方式においてはこれまで述べた通り, 各無線システムにおける受信感度を用いた利用可能なシステムの検出に加え, システム切替を行うための閾値を設けている. システム切替後にその無線システムで安定した通信が継続できるよう, システム切替閾値はそれぞれの無線システムの受信感度よりも大きい値を設定している. ここでシステム切替閾値を大きい値に設定すると, 切替後に安定した通信品質が見込めるが, システム切替制御が可能なエリアが狭くなる. また一方, システム切替閾値を低く設定すると, システム切替制御が可能なエリアは広くなるが, 伝搬路変動の影響を受け無線回線が切断される確率が高くなり, また WiMAX や無線 LAN を選択する確率が増えることで一つの無線システムに負荷が集中し, ヘテロジニアスネットワーク全体の伝送容量が低下する可能性もある. したがって, 伝送容量増大の観点でシステム切替閾値をどの値に設定すべきか評価しておく必要がある.

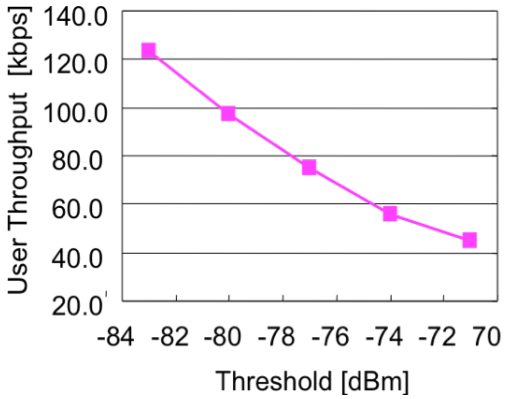


図 4.17 WiMAX 切替閾値と平均伝送速度との関係

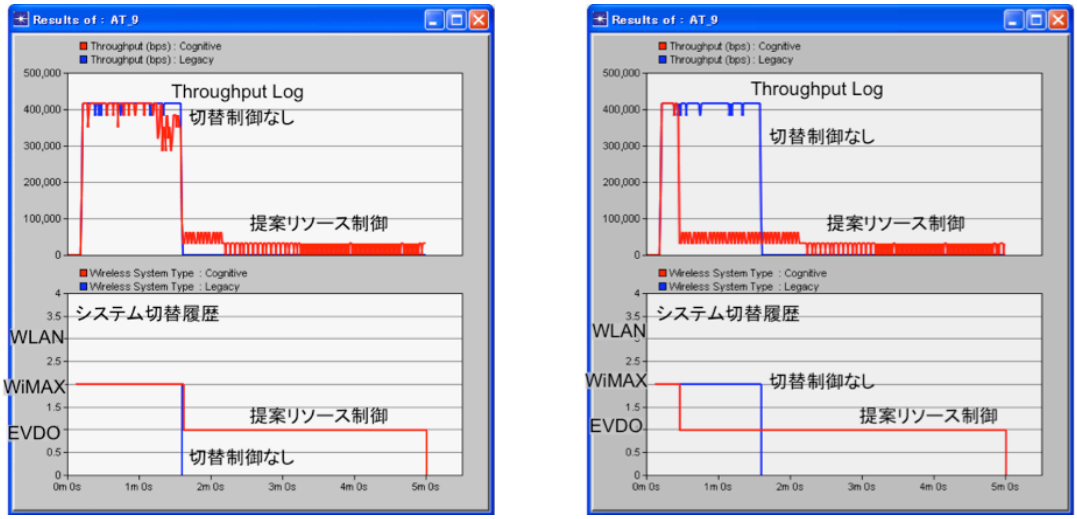


図 4.18 切替閾値とユーザ伝送速度の関係 (左:-83 dBm, 右:-71 dBm)

そこで図 4.16 で抽出した，WiMAX を初期位置とし WiMAX のエリアから EVDO のエリアに移動するユーザ#9 に注目し，まず無線 LAN 閾値 (*Threshold_RSSI_wlan*) を −80 dBm に固定し，WiMAX の切替閾値 (*Threshold_RSSI_wimax*) を −83 dBm から −71 dBm まで変化させた場合の伝送速度を評価した．図 4.17 にシミュレーション結果を示す．グラフの横軸は設定した WiMAX へのシステム切替閾値，縦軸はその時の伝送速度を示している．図 4.17 より，WiMAX の切替閾値が最も小さい −83 dBm である状況において最も伝送容量が増大していることがわかる．すなわち，WiMAX 切替閾値を下げ WiMAX を選択する可能性を高めることにより伝送容量の向上が図れることがわかる．

時間経過に伴う，このユーザ#9 における切替閾値= −83 dBm の場合の伝送速度と切替閾値= −71 dBm の場合の伝送速度及びシステム切替履歴のシミュレーション結果を図 4.18 に示す．提案リソース制御において，可能な限り WiMAX を使用するように無線システム切替閾値を設定することにより伝送容量の向上が見込めることが，この図からわかる．

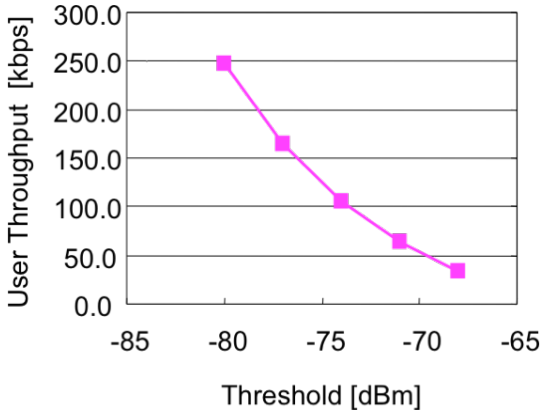


図 4.19　無線 LAN 切替閾値と平均伝送速度との関係

同様に無線 LAN を初期位置とし他システムのエリアへ移動する，図 4.15 中に示すユーザ#2 に注目し，今度は WiMAX 閾値 (*Threshold_RSSI_wimax*) を，先ほどのシミュレーション結果に基づき最も伝送速度向上が見込める −83 dBm に固定し，無線 LAN の切替閾値 (*Threshold_RSSI_wlan*) を −80 dBm から −68 dBm まで変化させた場合の伝送容量を評価した．

図 4.19 にシミュレーション結果を示す．横軸は設定した WiMAX へのシステム切替閾値，縦軸はその時の伝送速度を示している．この場合も WiMAX の場合と同様，無線 LAN の切替閾値が −80 dBm である状況において最も伝送容量が増大しており，無線 LAN 切替閾値を下げ無線 LAN を選択する可能性を高めることにより，伝送容量の向上が図れることがわかる．

これまでは，ある特定のユーザに注目した切替閾値の最適化につき評価を行ったが，これらの切替閾値は結果として提案リソース制御における WiMAX や無線 LAN を用いた通信を選択するエリアが変わることになるため，ランダムな位置にいるすべてのユーザの平均伝送容量を評価しておく必要がある．そこで，WiMAX 及び無線 LAN の切替閾値をそれぞれパラメータとした場合の平均伝送容量を評価した．シミュレーション結果を図 4.20 に示す．

図 4.20 の X,Y 軸はそれぞれの無線システム切替閾値，Z 軸 (縦軸) はその時の平均伝送容量を示している．図 4.20 より WiMAX と無線 LAN それぞれにおいて無線システム切替閾値を低く設定し，WiMAX と無線 LAN の選択確率を高めることで伝送容量の増大が図れることがわかる．このように切替閾値をユーザの平均伝送容量増大の観点で最適化した場合の平均伝送容量を表 4.6 に示す．表 4.5 で設定した切替閾値 (WiMAX 切替閾値) で動作させた提案リソース制御の平均伝送容量よりもさらに 10 %程度伝送容量が増大していることがわかる．

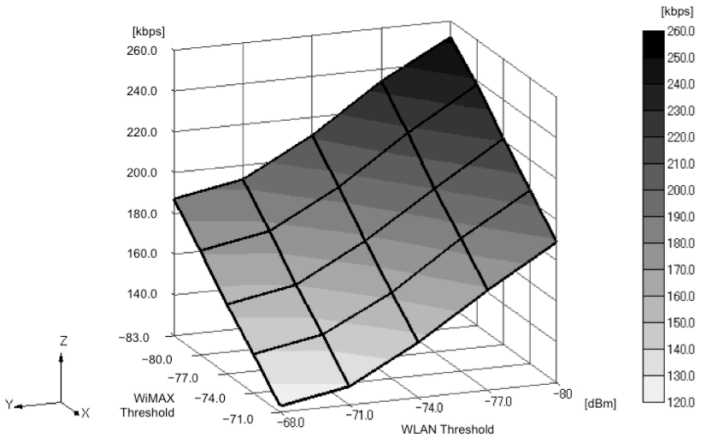


図 **4.20** 無線システム切替閾値と平均伝送容量の関係

表 **4.6** 切替閾値最適化後の伝送容量比較 (平均データ送出速度=416 kbps)

制御方式	平均伝送容量
切替制御なし (従来システム)	138.8 kbps
提案リソース制御方式	252.1 kbps

以上のことから，WiMAX と無線 LAN の選択確率を高めるようにシステム切替閾値を設定して提案リソース制御を行うことにより，ユーザが初期位置での無線システムを用いて通信を継続する従来システムと比較して，1.5 倍～2 倍程度の伝送容量増大が見込めることを示した．

4.6.2.5 シミュレーション評価結果 (TCP)

4.6.2.4 節の議論では，システム切替制御に注目し，パケット再送制御のない UDP 伝送時において伝送容量増大が可能であることを示した．ヘテロジニアスネットワークの運用時には FTP 等，再送制御が行われる TCP パケットも送信されること，またヘテロジニアスネットワークにおける異種無線システムの混在状態も様々でありネットワーク層で無線システム切替を含めたリソース制御を行いつつ，上位層であるトランスポート層での制御が機能するか評価する必要があることから，TCP 伝送時のシミュレーション評価を行う．なお本節におけるシミュレーション評価では，TCP によるネットワーク層以下で破棄されたパケットの再送や輻輳制御による伝送容量増大効果を UDP の場合と比較して評価することに焦点を絞り，アプリケーションは UDP の場合と同一のアプリケーションで統一した．

4.6.2.5.1 アプリケーション平均データ送出速度=104 kbps の場合

ユーザのアプリケーション，シミュレーション諸元及びシナリオは 4.6.2.4.1 節における UDP 送信時と同一とする．なお提案リソース制御との比較のためにユーザの初期位置における通信システムで通信を継続する従来システムにおける伝送容量も同時に測定し，またトランスポートプロトコルの違いによる特性比較のために同一環境にて UDP パケットを送信するシミュレーションも行った．

10 人のユーザの平均伝送容量を表 4.7 に示す．表 4.7 に示す通り，TCP を用いることにより伝送容量がさらに向上していることがわかる．これは UDP 送信時と比較して TCP による再送制御等の効果によりこれまで破棄されていたパケットを救済できるためと考えられる．

ここで破棄されたパケットの再送が行われているかを確認するため個々のユーザの瞬時伝送速度に注目する．本試行における 10 人のユーザの初期位置及び移動経路は図 4.13 と同一であり，例えば図 4.13 に示す通り初期位置において EVDO で通信を行い，続いて WiMAX のエリア，次いで無線 LAN のエリアを通過し最終的に EVDO のエリアに向かうユーザ#1 を例に取り，このユーザの UDP 送信時と TCP 送信時の伝送速度及びシステム切替履歴のシミュレーション結果を図 4.21 に示す．

図 4.21 左側が UDP 送信時，右側が TCP 送信時のシミュレーション結果であり，グラフの横軸は端末の移動経過時間，縦軸は伝送速度とシステム切替履歴をそれぞれ示している．このユーザの場合，UDP 送信時には図 4.21 左側の図に示す通り，初期位置である EVDO で通信を開始している間にコンテンツのデータ送出速度を満足せずパケットのいくつかが破棄され，WiMAX 切替時に帯域が広く確保された場合も WiMAX 回線による伝送速度はアプリケーションにおける平均データ送出速度である 104 kbps にとどまっている．しかし TCP 送信時には図 4.21 の右側の図に示す通りこれらのパケットは破棄されず，WiMAX へ切替を行い，帯域が広く確保できる状態となった時にこれまで溜まったパケットの送信を行うため，3 Mbps 程度にまで通信速度が上がり，結果としてこれが伝送容量向上に寄与していることがわかる．

表 4.7 伝送容量比較 (平均データ送出速度=104 kbps)

種別	従来システム	提案制御方式 (UDP)	提案制御方式 (TCP)
平均伝送容量	37.3 kbps	56.1 kbps	62.2 kbps

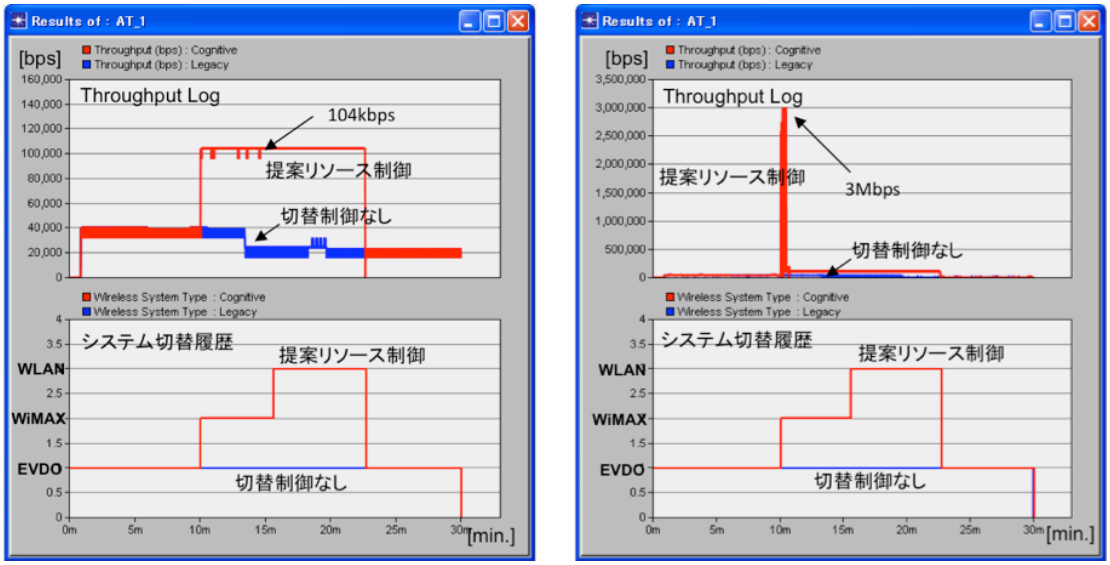


図 4.21 UDP 送信時 (左) と TCP 送信時 (右) の比較
(平均データ送出速度=104 kbps)

4.6.2.5.2 アプリケーション平均データ送出速度=2.08 Mbps の場合

ヘテロジニアスネットワークにおける統合制御は異種無線システムをネットワーク主導で制御することにより伝送容量増大を狙うものであり，ファイル送受信など比較的高速な通信が求められ，比較的ネットワークの負荷が高い環境においても，効果が得られなければならない．

そこで TCP 送信における 10 人のユーザのアプリケーションとしてはこれまでと同一のものを用い，20000 Byte の固定長データを一定間隔で送信することで，アプリケーションの平均データ送出速度を約 2 Mbps に設定した上で，シミュレーションを実行した．なおトランスポートプロトコルの違いによる特性比較のために同一環境にて UDP パケットを送信するシミュレーションも行った．

図 4.22 に本シミュレーションを実行した際に設定された各端末の初期位置及び移動経路を示す．ここで，図 4.22 に示す通り，EVDO のエリアを初期位置とし，WiMAX と無線 LAN のエリアを通過して再び EVDO のエリアに移動するユーザ#5 に注目し，図 4.23 の左側にユーザ#5 において UDP を用いた場合の伝送容量測定結果を，図 4.23 の右側にユーザ#5 において TCP を用いた場合の伝送容量測定結果を示す．

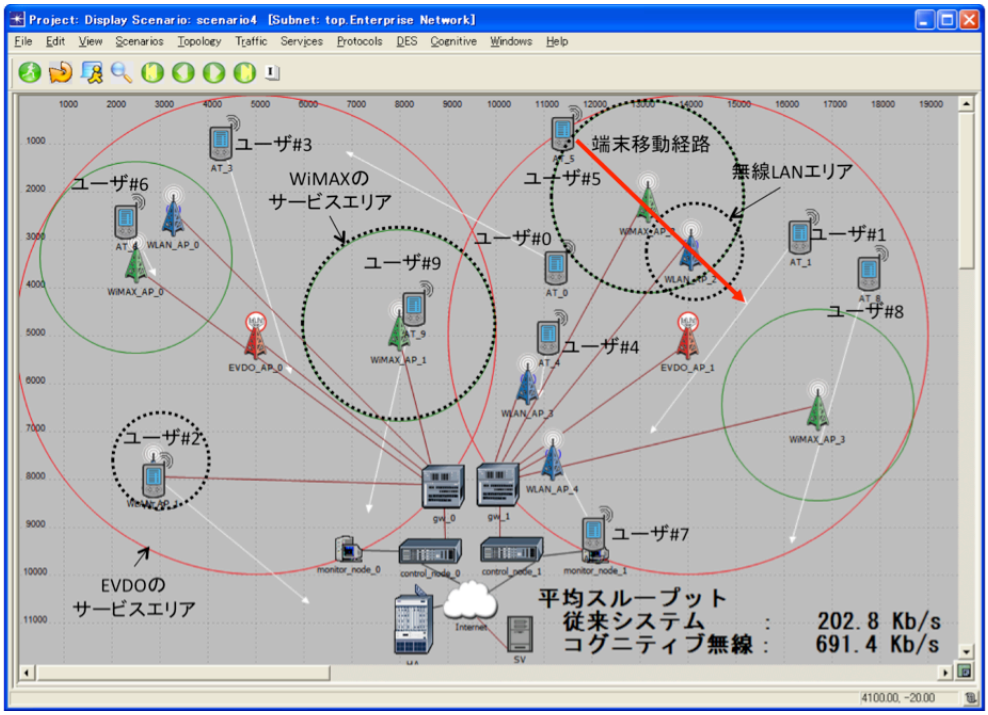


図　4.22　端末配置と各ユーザの移動経路

(平均データ送出速度=2.08 Mbps)

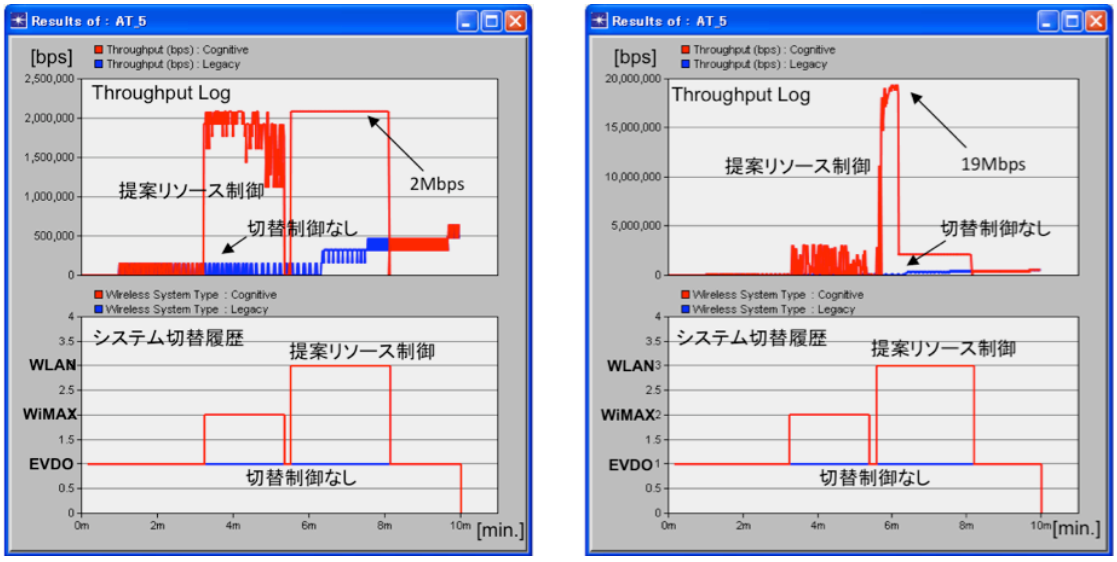


図　4.23　UDP 送信時（左）と TCP 送信時（右）の比較

(平均データ送出速度=2.08 Mbps)

表　4.8　伝送容量比較（平均データ送出速度=2.08 Mbps)

種別	従来システム	提案制御方式 (UDP)	提案制御方式 (TCP)
平均伝送容量	202.8 kbps	691.4 kbps	804.2 kbps

図 4.23 より，UDP 送信時には 2 Mbps の要求速度を満たさないパケットは破棄されるため，図 4.23 の左側に示す通り，帯域が十分に確保されているはずの無線 LAN にシステムを切り替えた時 (時刻 t=5.5 分) ，2.08 Mbps での通信が維持されている．一方 TCP 送信時には図 4.23 の右側に示すように，無線 LAN にシステムを切り替えた時，これまで溜まっていたパケットを送信するため一時的に伝送速度は 19 Mbps 近くまで上昇し，これらのパケット送信完了後に 2.08 Mbps での通信を維持する．この点が TCP 送信時の伝送容量向上に寄与していると考えられる．

次に 10 ユーザの平均伝送容量を表 4.8 に示す．4.6.2.5.1 節の結果と同様，TCP 送信時は UDP パケット送信時と比較しさらに伝送容量が向上することがわかる．データ送出速度が高くなると単位時間あたりに扱うパケット量が多くなることからコグニティブ無線基地局に溜まるパケットも多くなるが，図 4.23 の右側で示した通りシステム切替に伴ってより広帯域なシステムに切り替えることができた場合に溜まっていたパケットが送信されるため，伝送容量の増大効果も大きくなり，4.6.2.3 節で算出した伝送容量期待値に近づいていることがわかる．

さて，TCP プロトコルでは ACK によるパケット再送に際し，Fast Retransmit アルゴリズムを用いた輻輳制御により帯域の動的な割当が行われるため，提案リソース制御に影響を与える可能性がある．そこでシステム切替時の TCP 送信の挙動を詳しくみるため，Fast Retransmit アルゴリズムによる輻輳制御の下，端末が WiMAX エリアから EVDO エリアに移動して 10 分後にシステム切替を行う場合の伝送速度を取得した．なお本 TCP 送信における挙動を UDP 送信と比較して把握することが目的であるため，アプリケーションとしては低速なものを仮定し，アプリケーションの平均データ送出速度は 13 kbps とした．

シミュレーション結果を図 4.24 に示す．図 4.24 の横軸は時間経過を縦軸は伝送速度を示している．図 4.24 より，通信開始時刻 (t=0 分) からシステム切替が行われる時刻 (t=10 分) までの間は WiMAX を用いた TCP 通信で特にパケットロスはなく 13 kbps の伝送速度で通信が行われているが，切替直後に伝送速度が一旦急激に低下し (0 kbps) ，その後急上昇して (17 kbps) ，その後 13 kbps となっていることがわかる．

TCP 送信ではウィンドウ制御を用いて一度に送信するパケット量を調整することが可能であり，送信に成功すると送信パケット量を増加させ，失敗する送信パケット量を減らしている．今回の評価ではシステム切替前後でシステム切替に伴う再送タイムアウトが発生し，これが伝送速度変動の原因になっていると考えられる．そこで図 4.24 における TCP 伝送速度測定と同時にウィンドウサイズを測定した．その結果を図 4.25 に示す．図 4.25 の横軸は時間経過を，縦軸はその時刻におけるウィンドウサイズを示している．

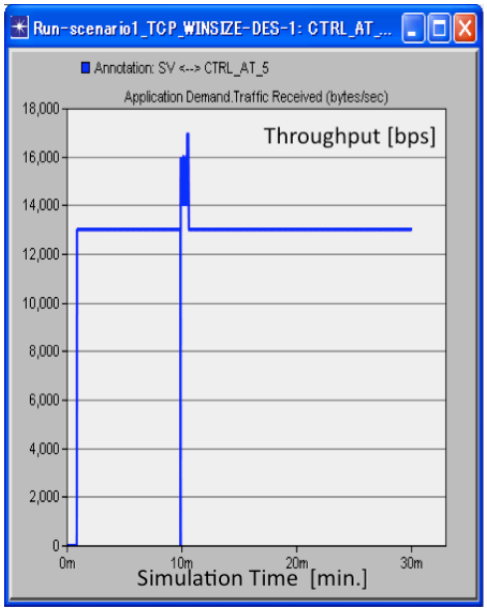


図 4.24　WiMAX から EVDO への移動時における TCP 伝送速度

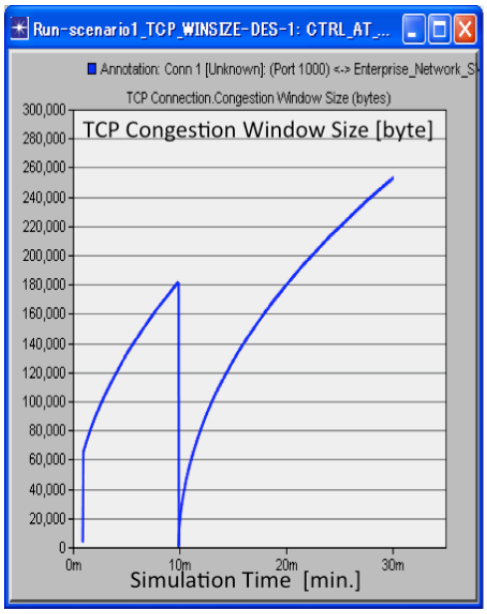


図 4.25　WiMAX から EVDO への移動時におけるウィンドウサイズ変化

図 4.25 より時刻 t=10 分のタイミングでシステム切替が行われた際に一度ウィンドウサイズがリセットされており，これが時刻 t=10 分での急激な伝送速度低下の原因となっていることがわかる．

なお，図 4.24，図 4.25 に示したシミュレーション評価は単一ユーザ環境での評価であったため，切替後に要求伝送速度 (13 kbps) よりも高速な 17 kbps での通信が可能であったが，マルチユーザが同時に通信を行っている場合には必ずしもこのようなウィンドウ制御による動的な帯域割当が可能とは限らず，システム切替時の制御の容易さとリソース利

用率算出の精度の観点からはウィンドウサイズのリセットによる帯域変動を軽減するなど，トランスポート層と連携した制御が必要と考える．具体的には 4.4.2 節で述べた通り，無線システムの基地局間ハンドオーバや，無線システム間の垂直ハンドオーバにおいてパケットロス増加に伴う再送制御による伝送容量改善技術として Freeze-TCP [39] や M-TCP [40] などがあり，これらと連携した制御を行うことでさらなる伝送容量増大が可能となると考える．

以上，ユーザが利用する様々なアプリケーションを想定して様々なアプリケーションの平均データ送出速度を想定した時の平均伝送容量をシミュレーション評価した結果，アプリケーションの平均データ送出速度が低い場合，高い場合のいずれの場合においても提案リソース制御により，伝送容量増大効果が得られることが確認できた．

4.7 基本実験機による動作確認

4.7.1 基本実験機システム構成

提案リソース制御が実機においても有効に動作するかどうかを検証するため，WiMAX と無線 LAN の 2 システムを対象とする基本実験機を構築した．システム構成は 4.5 節で示した提案プラットフォームを採用し， WiMAX 基地局 1 台，無線 LAN アクセスポイント 1 台とし，複数のユーザに対するリソース制御を検証する必要があることから，端末は 2 台とした．図 4.26 にこれらの装置により構成されるシステム構成を示す．また図 4.27 に基本実験機における IP アドレス体系を示す．

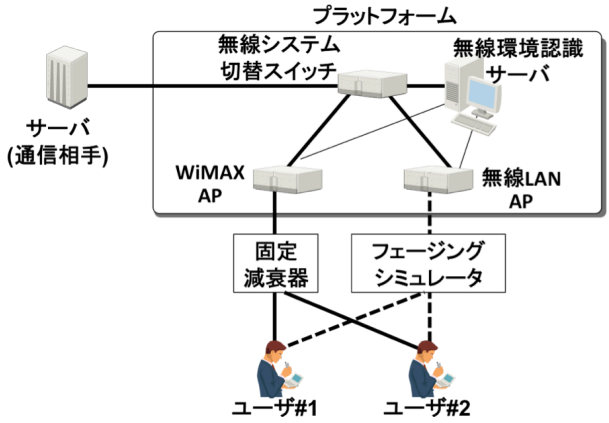


図 4.26 基本実験機のシステム構成

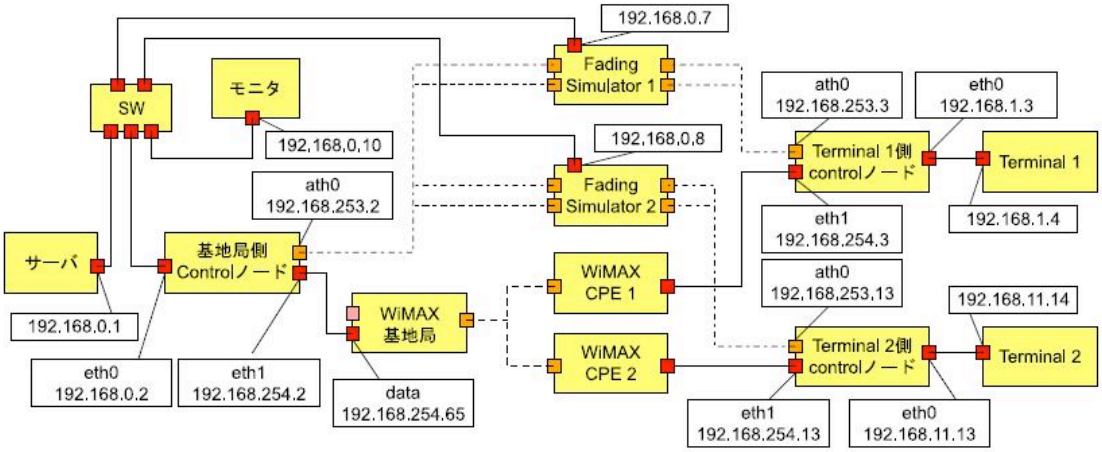


図　4.27　基本実験機のシステム構成及び IP アドレス体系

4.7.2　基本実験機諸元及び外観

今回の基本実験機では，基地局側と端末側をRFケーブルにて接続し，WiMAX系は広いエリアをカバーするシステムとみなし固定減衰器を挿入するにとどめ，無線 LAN 系についてはフェージングシミュレータを用意して各端末の移動に応じて減衰量を随時変化させることにより伝搬路減衰を模擬することとした．表 4.9 に基本実験機の諸元を，図 4.28 に基本実験機の外観を示す．

表　4.9　基本実験機諸元

無線システム	仕様	
WiMAX	準拠方式	IEEE 802.16e (OFDM/TDD)
	周波数帯	2.5 GHz　(帯域幅 5MHz)
	送信電力	36 dBm
無線 LAN	準拠方式	IEEE 802.11g
	周波数帯	2.4 GHz　(帯域幅　22MHz)
	送信電力	18 dBm
伝搬路	RF ケーブル接続 WiMAX－可変減衰器挿入 無線 LAN－フェージングシミュレータにて減衰量可変	
データ伝送	・動画ストリーミング　(UDP, 4.0 Mbps) ・ファイルダウンロード　(TCP)	

図 4.28 基本実験機の外観

なお屋外での送信，及び WiMAX の商用サービス形態を視野に入れ，WiMAX 装置における送信電力は 36 dBm，準拠方式は実験機開発時において商用サービスへの採用が検討されていた OFDM/TDD (Orthogonal Frequency Division Multiplexing / Time Division Duplex) とし，周波数帯を 2.5 GHz 帯，帯域幅を 5 MHz とした．

4.7.3 動作確認シナリオ

図 4.29 に実験シナリオを示す．複数ユーザ環境下で，アプリケーションをより現実的なものを想定して実験を行うため，2 ユーザがヘテロジニアスネットワークの空間内にいると仮定し，ユーザ#1 はトランスポートプロトコルとして UDP を用い動画ストリーミング受信等のリアルタイム性を有するアプリケーションを行い，ユーザ#2 はトランスポートプロトコルとして TCP を用いファイルダウンロード等リアルタイム性を必要としないアプリケーションを行う．またユーザ#1 とユーザ#2 の移動は初期状態として WiMAX エリアの同一位置に配置し，同一速度，同一方向にて無線 LAN のエリアに向かって移動し，無線 LAN エリア到達後は同一速度にて再び初期状態の位置へ移動する動作を繰り返す．なお切替制御方法としては以下の三つを想定し，そのそれぞれについて上記シナリオに基づいて端末を移動させ実験を行う．一つ目は無線環境情報として何も使用しない従来システムにおける制御 (従来システム)，二つ目は無線環境情報として RSSI 値を用いた切替制御 (RSSI 値に基づく制御方式)，三つ目は無線環境情報として RSSI 値に加えアプリケーションの QoS を考慮してユーザの通信品質向上とシステム利用効率の平準化の両立を図る，提案リソース制御方式である．

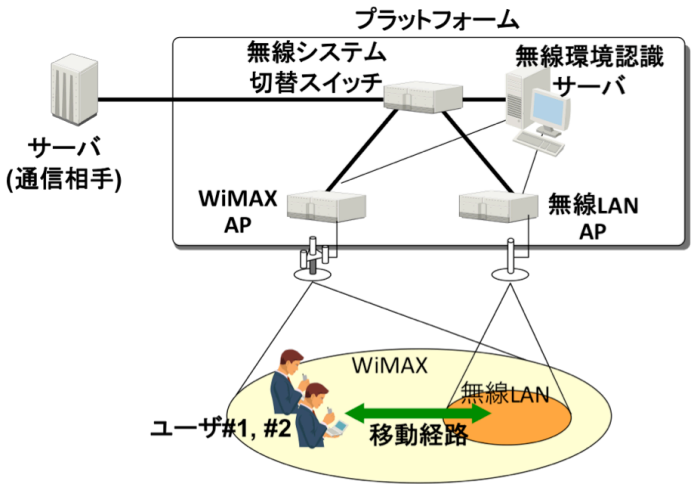


図　4.29　実験シナリオ

4.7.4　動作確認結果

4.7.3 節に述べたシナリオに基づき基本実験機を動作させた結果を図 4.30 に示す.

図 4.30 の左側はユーザ#1 の端末画面のスクリーンショット, 図 4.30 の右側はユーザ#2 の端末画面のスクリーンショットであり, それぞれの画面の左側がストリーミング映像やファイルダウンロードの様子を, 画面の右側が伝送速度の履歴を示している. 映像コンテンツの著作権の制限により, 図 4.30 においてはユーザ#1 が実際に受信した映像を表示していないが, 本実験において RSSI 値に基づく制御方式, 提案リソース制御方式のいずれの制御方法においてもユーザ#1 はシステム切替の有無に関わらず途切れることなくストリーミング映像を受信できることを確認した. またユーザ#2 についても, End-to-End でのセッションが保持され, またシステム切替が行われる前には切替先の無線回線との接続が完了している状態とすることで RSSI 値に基づく制御方式, 提案リソース制御方式のいずれの制御方式においてもシステム切替の有無に関わらず再接続を端末側から行う必要なく, ファイルダウンロードを継続可能なことを確認した. 以上の結果から, 複数ユーザ環境下で提案プラットフォームが動作すること, またシステム切替を意識することなくユーザは通信可能であることを確認した.

次にそれぞれの制御方式によるユーザ伝送速度の測定を行った. 制御方式の違いは, WiMAX しか通信できないエリアでは現れず, WiMAX と無線 LAN の両方が利用可能なエリアにて発生する. そこで, 制御方式は実験機の動作中に変更 (設定) することが可能であることを利用し, ユーザ#1 及びユーザ#2 を WiMAX と無線 LAN の両方が利用可能なエリアに静止させ, 実験の最初の時間は従来システムで動作させ, 実験中盤で RSSI 値

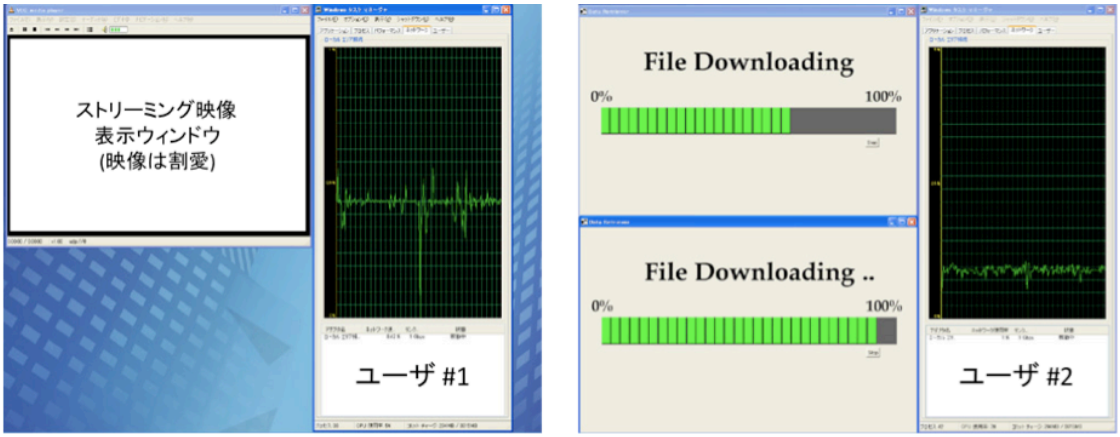


図 4.30 各ユーザの動作画面 (スクリーンショット:左:ユーザ#1, 右:ユーザ#2)

に基づく制御で動作させ，実験の最後の時間は提案リソース制御で動作させ，その時間経過に伴う伝送速度の変化を測定した．図 4.31 に測定結果を示す．図 4.31 の横軸は時間，縦軸は伝送速度を示しており，図 4.31 の左側はユーザ#1 の伝送速度の変化，右側はユーザ#2 の伝送速度の変化を示している．

まず従来システムではユーザ#1,ユーザ#2 が無線 LAN エリアにいても無線環境情報として無線 LAN の RSSI 値を参照しないため，無線 LAN の存在に気づかず両方とも WiMAX で通信を行っている．WiMAX は QoS 制御に対応するシステムであり，リアルタイム性を要するアプリケーションを実施しているユーザ#1 の帯域を保証する．したがってユーザ#1 の伝送速度は 4.0 Mbps 程度で一定となっており，ユーザ#2 は WiMAX でユーザ#1 で使用したリソースの残りを使用することとなり高速通信ができずに 2.6 Mbps 程度の伝送速度に抑えられている．

次に RSSI 値に基づく制御方式で動作させ，ユーザ#1，ユーザ#2 が無線 LAN のエリアにいる場合，無線環境情報として無線 LAN の RSSI 値を測定し，無線 LAN の RSSI 値が高いと判断した場合には無線システムとして大きい伝送容量をもつ無線 LAN へ切り替える．この場合ユーザ#1,ユーザ#2 両方とも無線 LAN に切り替わり，ユーザ#2 は無線 LAN の有する伝送容量のうち，ユーザ#1 で使用した残りの伝送容量を使用することが可能なため伝送速度は大きく向上する．しかしながらユーザ#1 はほぼ同じ伝送速度をめざすも無線 LAN が無線システムといてリアルタイム性を必ずしも保証するものではないため，図 4.31 に示す通り伝送速度の変動が激しくなり，この結果，ユーザ#1 のストリーミング映像にはブロックノイズが発生する．

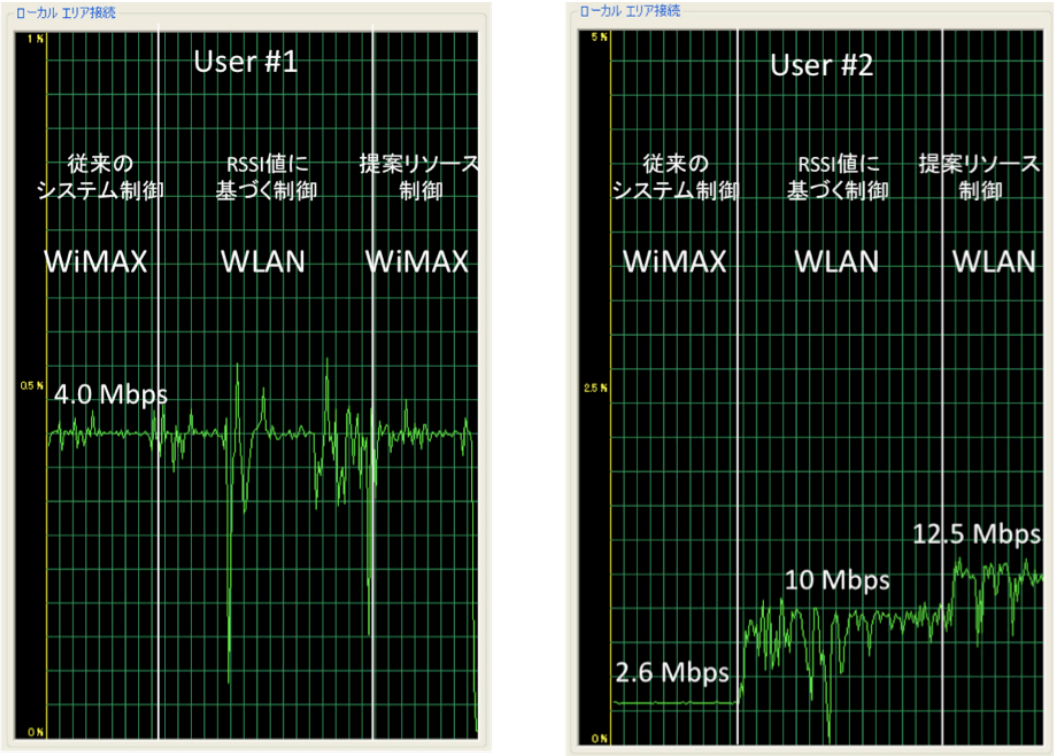


図　4.31　リソース制御方式の違いによる各ユーザの伝送速度比較

さらに提案リソース制御方式で動作させ，ユーザ#1,ユーザ#2 が無線 LAN のエリアにいる場合，無線 LAN の RSSI 値に加え各ユーザのアプリケーションに応じた QoS クラスを考慮して各システムの利用率の平準化を図るリソース制御により，無線 LAN が使えるエリアであるにも関わらずユーザ#1 には WiMAX で通信をするように (無線 LAN に切替しないように) 制御する．この制御により無線 LAN が使えるエリアにおいてユーザ#1 は WiMAX の有する QoS サポートによりリアルタイム性が保証され，コンテンツを一定の品質で楽しむことができる．一方，ユーザ#2 には無線 LAN で通信するように制御し，この場合，ユーザ#2 は無線 LAN のリソースを一人で占有することができるため，伝送速度は 12.5 Mbps 程度と RSSI 値に基づく制御方式と比較してさらに向上する．

以上の実験結果から，ヘテロジニアスネットワークにおいてネットワーク主導でシステム切替を実施する提案リソース制御方式により，個々のユーザの通信品質の維持向上と伝送容量増大の観点からシステム間のロードバランスを図ることが可能であることを実機においても確認でき，提案リソース制御方式の有効性を確認した．さらにこれらのリソース制御に伴うシステム切替をユーザが意識せず，通信が継続されていたことから，提案リソース制御のためのプラットフォームが動作することを確認できた．

4.8 結言

本章では，ヘテロジニアスネットワークにおけるネットワーク主導の統合的制御を実現するためのリソース制御方式及びプラットフォームを提案した．具体的には，アプリケーションに対する要求 QoS などを考慮した個々のユーザの通信品質向上と伝送容量増大の観点に基づいて，システム間のロードバランス化を図るリソース制御方式を提案し，またこのリソース制御を実現するため，システム切替をユーザに意識させずにネットワーク層でシステム切替を行う高速システム切替プラットフォームを構築した．計算機シミュレーション及び WiMAX と無線 LAN を対象とした基本実験機による屋内実験の結果，提案リソース制御を用いることで複数ユーザの通信品質向上とヘテロジニアスネットワークの伝送容量増大の観点に基づいてシステム間のロードバランスを図ることが可能であることを示し，提案リソース制御方式，及び，この制御を実現するためのプラットフォームの有効性を示した．

第5章

実験機による実証実験

5.1　緒言

ヘテロジニアスネットワークにおける伝送容量増大化に向けたネットワーク主導の統合制御にはコグニティブ無線を活用した無線環境認識技術と，個々のユーザの通信品質向上と伝送容量増大の観点からロードバランスを図るリソース制御技術が要素技術であり，第 3 章及び第 4 章において WiMAX と無線 LAN を対象とした基本実験機を用いてその有効性を確認した．しかしこれらの基本実験機はあくまでも要素技術の有効性確認を主眼とした基本的な構成を採用しており，商用サービスにおける実際のネットワーク構成とは異なる点も多い．

そこで本章では，第 3 章及び第 4 章で提案した方式が商用のネットワーク構成においても有効であることを実証するため，対象システムに商用ベースの携帯電話システムを加えた場合において提案プラットフォームを実装する際の課題を明確にした上で，同一無線事業者によってヘテロジニアスネットワークを構築することを想定した実験機を構築し，実伝搬路環境で提案技術の動作を確認する．

5.2　実験機構成

5.2.1　携帯電話システムの追加における実装上の課題

5.2.1.1　サービスエリアと制御範囲

まず第 4 章で提案したネットワーク主導の統合制御を行うためのプラットフォームにつき，どの範囲の空間を一つのヘテロジニアスネットワークとして扱うかについても明確にする必要がある．これは提案プラットフォームにおいて新規にネットワーク側に設置される無線システム切替スイッチと無線環境認識サーバをどこに設置するか明確にすることと等価である．

また，これら新規に追加される機能は，将来の無線システムがヘテロジニアスネットワークとして運用される必要があることを鑑みるといずれかの無線事業者が設置し，運用する方向に進むと考えるのが妥当であるが，将来の商用サービスを想定し，どのような事業者が設置すればよいかについて明確化する必要がある．

5.2.1.2　端末認証及び IP アドレス体系

実際の商用サービスでは，ユーザがデータ通信を行う前に，接続するユーザ及び端末装置が正規に登録されかつ利用可能であるか否かを確認する端末認証のプロセスが必要である．具体的には，各無線システムにはこれらのユーザや端末管理のためのデータベースとして AAA (Authentication, Authorization and Accounting) サーバが設置されており，端末との通信開始時にこのサーバとの通信を行い，認証が成立した端末のみにユーザトラフィック通信のための IP (Internet Protocol) アドレスが付与される．また商用の無線システムにおいてはそれぞれの事業者毎に異なる IP アドレス体系をもっていることから，認証及び IP アドレス体系を考慮した上で，ユーザがシステム切替を意識しないようにプラットフォームを設計する必要がある．

5.2.1.3　セキュア通信

実際の商用サービスでは，個々のユーザとの通信においてプライバシー保護の目的で IPSec (Security Architecture for Internet Protocol) などを用いたセキュアな通信を保証し，またアクセスポイント間のハンドオーバを容易に実現するため，アクセスポイントとその上位局である制御局もしくはゲートウェイとの間におけるトンネリング技術も実装しなければならない．

5.2.2 実装上の課題に対するアプローチ

5.2.2.1 サービスエリアと制御範囲

コグニティブ無線基地局のサービスエリア及びヘテロジニアスネットワークにおける制御範囲を明確にするため，第3章において定義したコグニティブ無線基地局と第4章において提案したプラットフォームとの整合を取る必要がある．具体的には，システム切替をネットワーク層で行う無線システム切替スイッチを，無線環境認識サーバと同様，ヘテロジニアスネットワーク内の，各無線システムの基地局装置と接続可能なコアネットワーク側のいずれかの場所に設置し，これを，コグニティブ無線基地局を構成する装置に含める．

次に無線システム切替スイッチや無線環境認識サーバ等をどの事業者が設置し，ヘテロジニアスネットワークにおける統合制御をどのような事業者が運用するかについて述べる．現在の異なる無線事業者間でのローミングを例に述べると，通常，自社のサービスエリアと他社のサービスエリアが重複しない場合，互いのサービスエリアを補完し合えることから，無線事業者間で何らかの連携が行われている．しかし，自社のサービスエリアと他社のサービスエリアが重複する場合には，自社のユーザやトラフィックの他社への流出を防ぐ必要があることから，無線事業者間の連携は疎となっている．一方で，ヘテロジニアスネットワークにおける統合制御による伝送容量の増大は，異種無線システムそれぞれのサービスエリアが重複しているエリアが多いほどその効果が見込まれるため，無線事業者間での連携が行える方が望ましい．これらを踏まえると異種無線システムの重複するサービスエリアを許容しかつ既存無線事業とも親和性が高い運用形態は異種無線システムを同一事業者が運用する場合であると考える．したがって本論文ではヘテロジニアスネットワークを構成する異種無線システムを同一無線事業者が運用すると想定する．また，無線システム切替スイッチなどを含むプラットフォームも，異種無線システムを運用する無線事業者と同一事業者がヘテロジニアスネットワークの運用のために設置・運用することとする．

5.2.2.2 端末認証及び IP アドレス体系

現在の IP アドレスは，端末の特定と，所属するネットワークの特定の二つの意味をもっている．すなわち，事業者毎に異なる IP アドレス体系をもつシステム間において高速なシステム切替をユーザに意識させずに実行するためには，これらを意識させない仕組みを IP 層よりも上位層に新たに構築するか，もしくはヘテロジニアスネットワークとして統一された IP アドレス体系を構築する必要がある．

ヘテロジニアスネットワークを構成する異種無線システムを同一無線事業者が運用する場合，各無線システムの IP アドレス体系を統一して運用することが可能であり，また 5.2.2.1 節における既存無線事業を踏まえた運用形態との親和性の観点からも，その実現

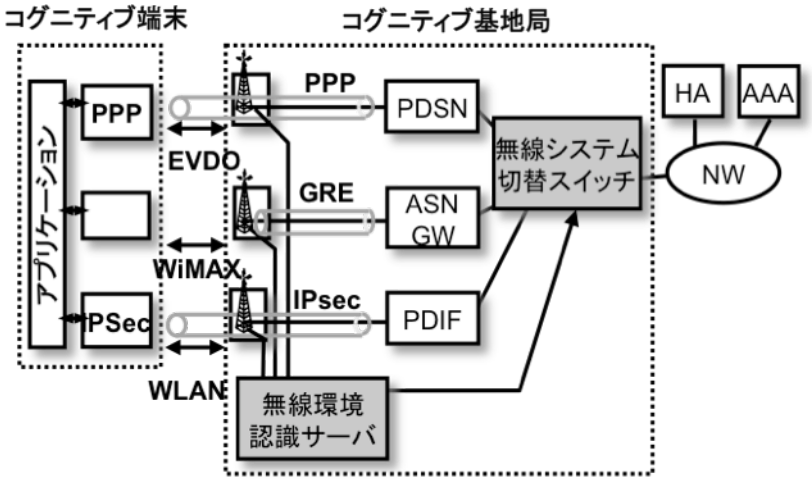
性は高い. したがって本論文ではヘテロジニアスネットワークとして統一された IP アドレス体系を構築することとする. またこれを実現するため, 無線システム毎に設置されている AAA サーバは共通化を図るか, あるいは互いに連携し, 同一端末からの接続要求に対しては同一の IP アドレスを付与するように設計する.

5.2.2.3 セキュア通信

商用サービスに準じるセキュアな通信を実現するため, セルラシステムの一つである EVDO においては, 3GPP2 (Third Generation Partner Project 2) 仕様に基づき, 複数の基地局を制御するゲートウェイ (PDSN: Packet Data Serving Node) と端末との間で PPP (Point-to-Point Protocol) によるコネクションが確立される. WiMAX においては, アクセスポイントと複数のアクセスポイントを制御するゲートウェイ (ASN-GW: Access Service Network Gateway) との間で GRE (Generic Routing Encapsulation) トンネリングが行われる. さらに無線 LAN においては商用サービスであるセルラ網と接続する観点から無線 LAN のアクセスポイントの上位局として 3GPP2 で規定されている PDIF (Packet Data Interworking Function) [83] を設置し, この PDIF が無線 LAN 端末からのアクセス時に 5.2.2.2 節で述べた端末認証を代行すると共に, 端末と PDIF 間で IPSec トンネルを構築する.

5.2.3 システム構成

図 5.1 に, これらの課題に対するアプローチを踏まえて検討した実験機の構成を示す. 複数システムとしては広範囲なエリアをカバーするセルラシステムとして EVDO (2GHz 帯), 都市部などにおけるワイヤレスブロードバンドシステムとして WiMAX (2.5GHz 帯), 及びオフィスや屋内などにおける無線通信として無線 LAN (2.4GHz 帯) を対象とする. コグニティブ無線基地局は, 商用のネットワーク構成を踏まえると EVDO, WiMAX, 無線 LAN の各アクセスポイント機能に加え, EVDO の AP (Access Point) を収容する PDSN, 複数の WiMAX の AP を収容する ASN-GW, 複数の無線 LAN AP を収容する PDIF を構成要素として含むことになり, これら PDSN, ASN-GW, PDIF が各無線システムを終端する. またその上位側にネットワーク主導で高速にシステムを切り替えるためのプラットフォームとして無線システム切替スイッチを設け, 無線環境認識サーバからの情報に基づきシステムを切り替える. 提案プラットフォームでは無線環境の定期的かつ頻繁な情報収集が必要であることから, 無線環境の伝送にネットワーク側の回線のリソースを定期的かつ頻繁に使用する. そこで, これらの無線環境情報の伝送が既存無線システムにおけるユーザトラフィック



PDSN: Packet Data Serving Node
ASN-GW: Access Service Network Gateway
PDIF: Packet Data Interworking Function
HA: Home Agent
AAA: Authentication, Authorization and Accounting

図 5.1 実験機のシステム構成

伝送用回線に影響を与えないよう，無線環境認識サーバはユーザトラフィック伝送とは別に用意された回線で各無線システムと接続され， RSSI などの無線環境情報に加え，第 4 章で述べた通り，アクセスポイントにおいて把握可能な MAC 層の情報をも取得する．

5.2.4 制御フロー

5.2.4.1 端末認証及び IP アドレス付与方法

コグニティブ無線システムにおける端末 (コグニティブ端末) はコグニティブ無線基地局内において使用する無線システムが頻繁に変わるため，5.2.2.2 節で述べた通り，ヘテロジニアスネットワークにおける IP アドレス体系を統一し，コグニティブ端末に対して単一の IP アドレスを付与する．そこでまず複数無線システムをサポートするコグニティブ端末に対してシステム切替時に単一の IP アドレスを付与する方法について，セルラ (EVDO) から無線 LAN のサービスエリアに移動した場合を例にして述べる．図 5.2 にこの例において必要な構成を示す．なお下記 IP アドレス割当手順は新たな無線システムのサービスエリアに入った時に一度だけ行われる．

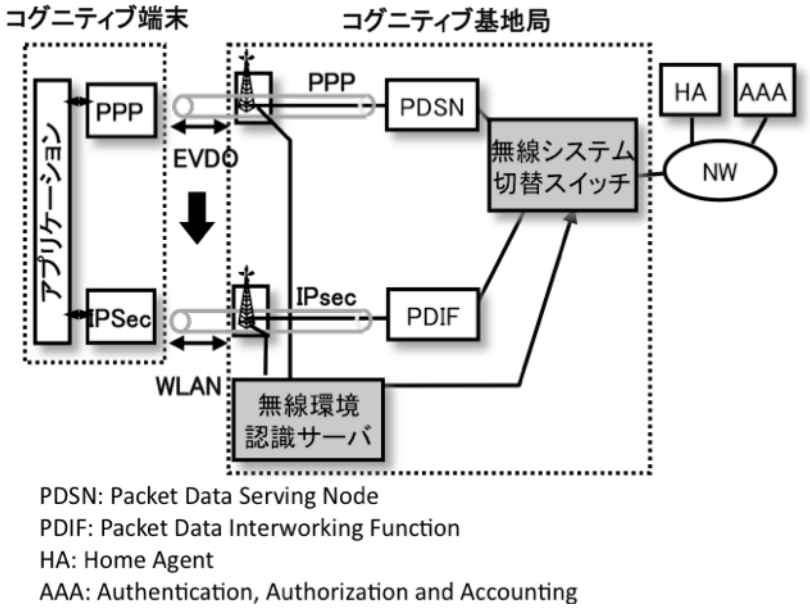


図 5.2　EVDO から無線 LAN へのシステム切替時に必要な構成

図 5.2 におけるシステム切替時の IP アドレス割当シーケンスを図 5.3 に示す．まずセルラ (EVDO) にて通信開始時には端末と PDSN 間で PPP によるコネクションが確立され，PAP/CHAP (PAP: Password Authentication Protocol, CHAP: Challenge Handshake Authentication Protocol) による端末の認証が行われる．ここでの認証終了後 PDSN から AAA に対して Access Request が行われ，AAA において端末に対する IP アドレスや HA (Home Agent) の情報等が端末に伝送される．

端末の移動や無線環境の変化に伴い，新たに無線 LAN サービスエリアに入った場合，セルラの場合と同様まず端末と PDIF 間において IKEv2 (Internet Key Exchange version 2) 端末認証が行われ，その後 PDIF から AAA に対して Access Request を行う．従来は無線 LAN システムにおける AAA はセルラシステムの AAA と独立に構成されているが，IP アドレス体系の統一化を図るためには，5.2.2.2 節において述べた通り，無線 LAN システムにおける AAA とセルラで用いる AAA の共通化，あるいは個別システムの AAA 間の連携を実装しなければならない．そこで本実験機では，AAA の共通化を図り，AAA では PDIF からの Access Request に対して，その Request が同一のコグニティブ端末からのものであるかを端末の製造番号や USIM (Universal Subscriber Identity Module Card) 番号等の情報により識別し，同一のコグニティブ端末からの Request である場合には，先に EVDO で割り当てた IP アドレス (IP=a.b.c.d) と同一のアドレスを載せて端末に伝送する．この方法により無線システム切替後も同一の IP アドレスを継承することが可能となる．

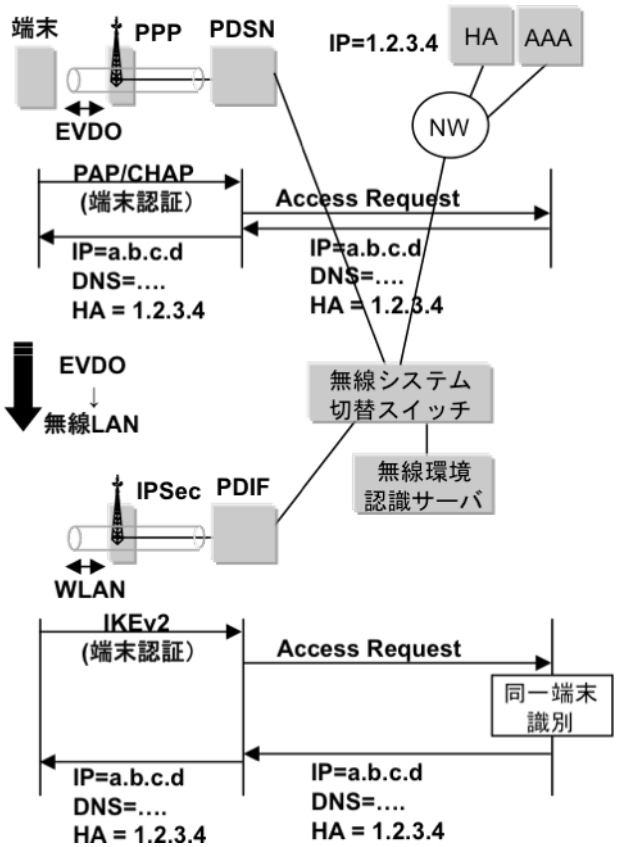


図 5.3 同一 IP アドレス付与方法

5.2.4.2 ネットワーク主導のシステム切替方法

本節では 5.2.4.1 節の制御フローに基づき，端末に対して単一の IP アドレスを付与した状態において，高速にシステム間の切替を実現する方法について述べる．

提案プラットフォームにおける高速システム切替方法を図 5.4 に示す．まず通信相手先からの IP データは HA のテーブルにより，コグニティブ端末が使用している無線システムに関わらずこれらを終端している無線システム切替スイッチの IP アドレス (IP=v.v.v.v) に転送される．ここで無線システム切替スイッチは HA に対して FA (Foreign Agent) として機能する．同時に無線システム切替スイッチは FA 機能として動作する各無線システムを終端する PDSN や PDIF に対する HA として機能する．すなわちコグニティブ端末の IP アドレス (IP=a.b.c.d) に対する FA として PDSN の IP アドレス (IP=x.x.x.x) と PDIF の IP アドレス (IP=z.z.z.z) の両方が登録されるように対応づけを行っている．無線システム切替スイッチとしては候補となり得る無線システムの FA の IP アドレスはすべてテーブルとして保持され，どちらの FA に対して IP データを転送するかは各無線システムのアクセスポイント

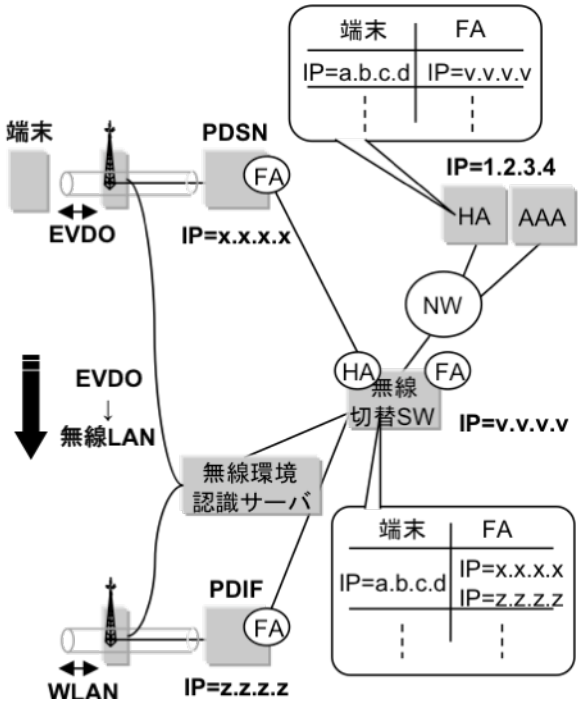


図 5.4　提案プラットフォームにおけるシステム切替方法

から収集された無線情報やアプリケーションの QoS などに基づき，提案リソース制御方式による決定により切り替える．

従来のルーティング技術では一つの端末の IP アドレスに対して一つの FA を対応づけるのが一般的であるが，高速なシステム切替を実現するため本実験機では無線システム切替スイッチにおいて一つの端末 IP アドレスに対して複数の FA を対応づけることとし，なおかつ対応づけられた FA を無線環境認識サーバからの情報に基づいて随時切り替えてパケットのルーティングを行う方式を新たに実装している．ルーティングテーブルの書き換えという形で無線システム切替スイッチにおいて転送先の FA を切り替えるだけでよいため IP パケット毎に通信に用いる無線システムを切り替えることが期待できる．

5.2.4.1 節，及び，5.2.4.2 節においては EVDO と無線 LAN を対象システムとして説明したが，構築した実験機では上述の EVDO，無線 LAN に加え WiMAX も対象システムとしている．図 5.5 に WiMAX を加えた実験機におけるシステム切替方法 (制御シーケンス) を示す．図 5.5 の手順 1～3 が EVDO システムとの接続や認証手順，手順 4～5 が WiMAX システムとの接続や認証手順，手順 6～7 が無線 LAN システムとの接続や認証手順であり，複数システムのセッションが確立された後は手順 8～10 において各無線システムのアクセスポイントから無線情報を取得し無線環境認識サーバにおいてこれらの情報を無線システム切替スイッチに通知する (手順 11)．無線システム切替スイッチでは無線

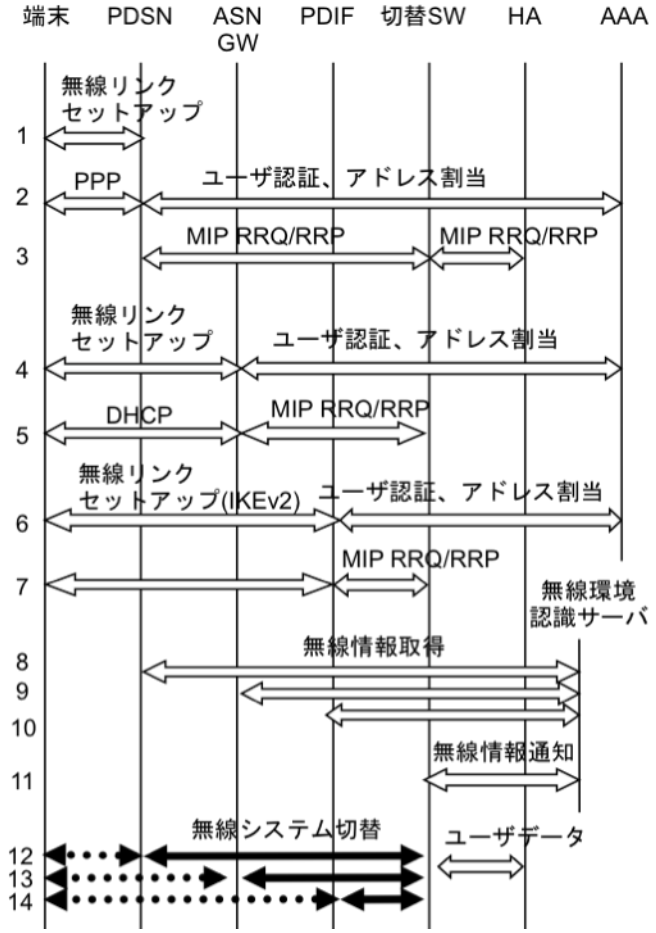


図 5.5 システム切替制御シーケンス

環境認識サーバの情報に従い使用する無線システムをパケット毎に切り替える. ここで無線環境やアプリケーションに応じた QoS クラスに応じたリソース制御を実現するため, 手順 8～10 の無線情報取得は周期的に行われ, 無線環境やユーザの要求帯域, 各システムのリソース利用率の変化などの状況に応じて手順 11 が適宜行われる.

手順 1～7 において各無線システムの無線回線は確立された状態となっているため, 手順 11 による無線情報通知に基づき, 手順 12～14 において, 無線システム切替スイッチのルーティングテーブル書き換えにより FA の切替を行い, ユーザトラフィックを伝送する無線システムの切替を行う.

5.2.4.3 パケットフォーマット

ユーザに意識させない高速なシステム切替を実現するため IP カプセル化の概念を用いたパケットフォーマットを採用し, これを実験機に実装した. 図 5.6 にパケットフォーマット

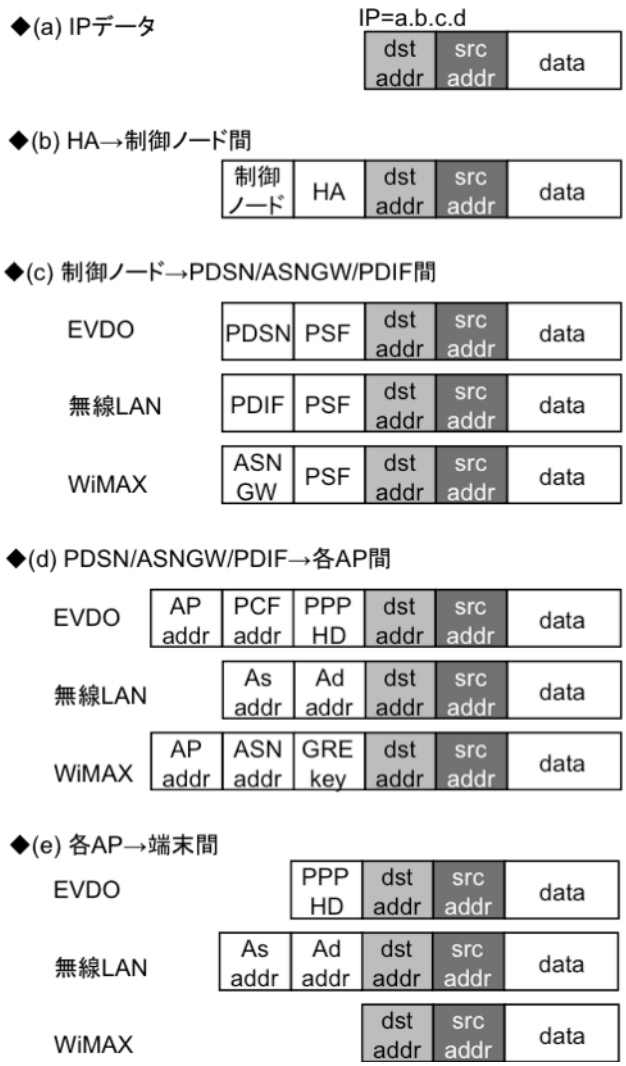


図　5.6　実験機のパケットフォーマット

を示す．図 5.6 では IP データのフォーマットの中で実験機の実装に深く関わる，送信元アドレス (Src Addr: Source Address) と送信先アドレス (Dst Addr: Destination Address) とユーザデータの三つのフィールドを記載している．

図 5.6 (b)，図 5.6 (c) では HA－FA 間でのデータ転送のため IP データの前部に送信先アドレスと送信元アドレスを付与しており，このアドレス情報をもとにデータが振り分けられる．図 5.6 (d) では各無線システムに固有のヘッダがさらに付与される．例えば無線 LAN の場合には IPSec のヘッダが付与され，WiMAX の場合には ASN-GW に接続されている複数の AP のうちどの AP に転送するかの情報や，ASN-GW と WiMAX AP 間での GRE トンネルのキーが付与される．

端末に到達するパケットは図 5.6 (e) に示す通りであり EVDO では PPP コネクションを端

末で終端するため PPP ヘッダが付与された形で端末に到達する．無線 LAN の場合には IPSec を用いると IPSec のアドレス解決は端末で行うため無線 LAN アクセスポイントでは特にフォーマット変換は行われず，IPSec 関連の情報が付与されたまま端末に到達する．WiMAX の場合には ASN-GW と WiMAX アクセスポイント間で GRE トンネリングが実装されているが，端末との間では特にトンネリングされないため IP データがそのまま端末に到達することになる．

5.2.5 実験機諸元

5.2.5.1 システム仕様及び実験機外観

提案リソース制御方式及び提案プラットフォームの有効性を実証するためには，屋外環境で実際に電波を放射して，実環境での評価が必要である．そこで今回の実験機においては，屋外実験を行うために必要な実験局の免許を取得することとした．免許の取得には電波放射エリア設計を行う必要があり，不必要なエリアに電波を放射することのないよう，実験エリア内にその電波放射範囲を制限するように設計を行った．図 5.7 に電波放射エリアの設計結果を示す．なお WiMAX に関しては商用の WiMAX サービスとの干渉を避ける必要があったため，西方向のセクタのみの放射としている．

実験機の諸元を表 5.1 に示す．各無線システムにおける最大送信電力は実験局免許を取得した際の各無線システムの基地局及び端末から送信可能な最大送信電力を記載し

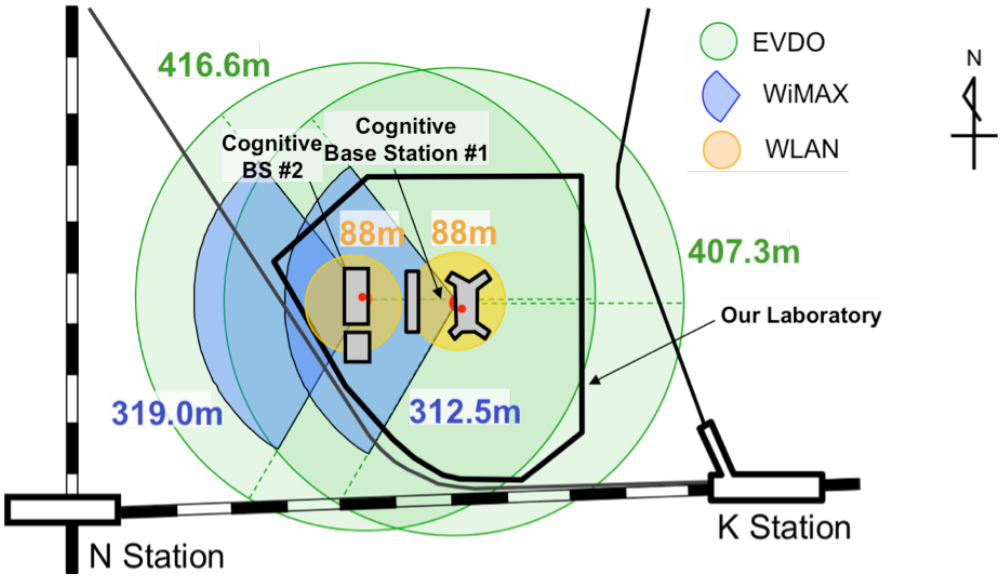


図 5.7 各無線システムの電波放射エリア設計

表 5.1　実験機システムの諸元

System	Specifications	
EVDO (Cellular)	Based on	1xEVDO Rev.A
	Frequency	2.0 GHz
	Max. Rate	3.1 Mbps
	Max. Tx Power	AP: 5 dBm, AT: 24 dBm
WiMAX	Based on	IEEE 802.16e (OFDM/TDD)
	Frequency	2.5 GHz
	Max. Rate	6.2 Mbps (for Downlink)
	Max. Tx Power	AP: 26 dBm, AT: 14 dBm
WLAN	Based on	IEEE 802.11g
	Frequency	2.4 GHz
	Max. Rate	54 Mbps
	Max. Tx Power	AP: 16 dBm, AT: 16 dBm

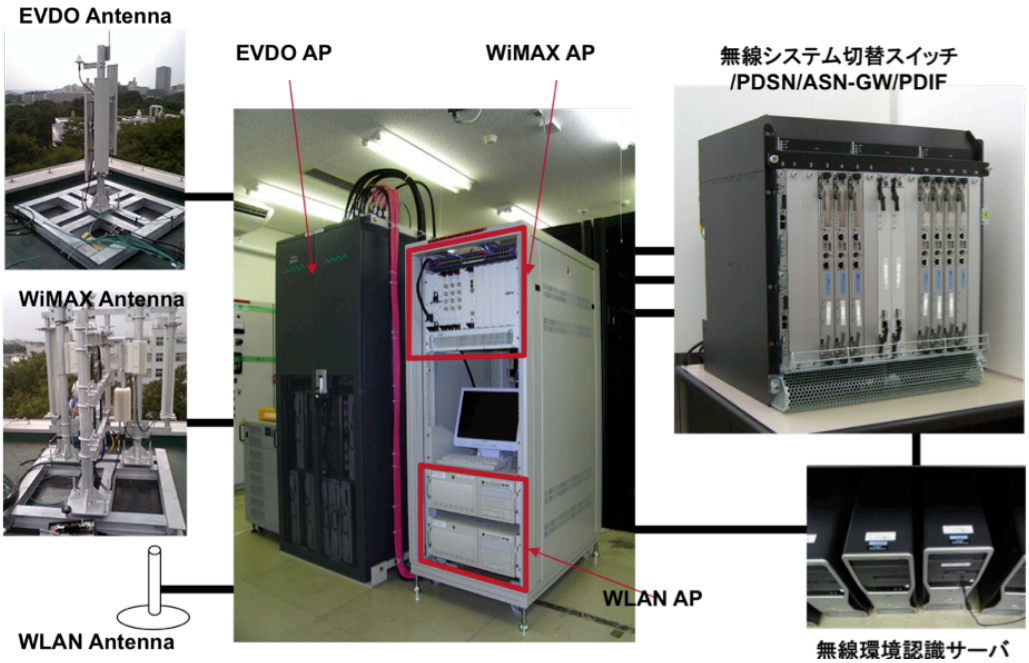


図 5.8　実験機の外観

ている．また WiMAX の仕様に関しては，2009 年の商用サービスに最終的に採用された OFDMA/TDD (Orthogonal Frequency Division Multiple Access / Time Division Duplex) ではなく，実験機開発時において採用が検討されていた OFDM/TDD に準拠している．

また図 5.8 に実験機 (ネットワーク側) の外観を示す．図 5.8 の写真では EVDO の基地局アンテナと WiMAX の基地局アンテナを別々に掲載しているが，実際には屋上内のほぼ同じ位置に各無線システムの基地局アンテナを設置している．

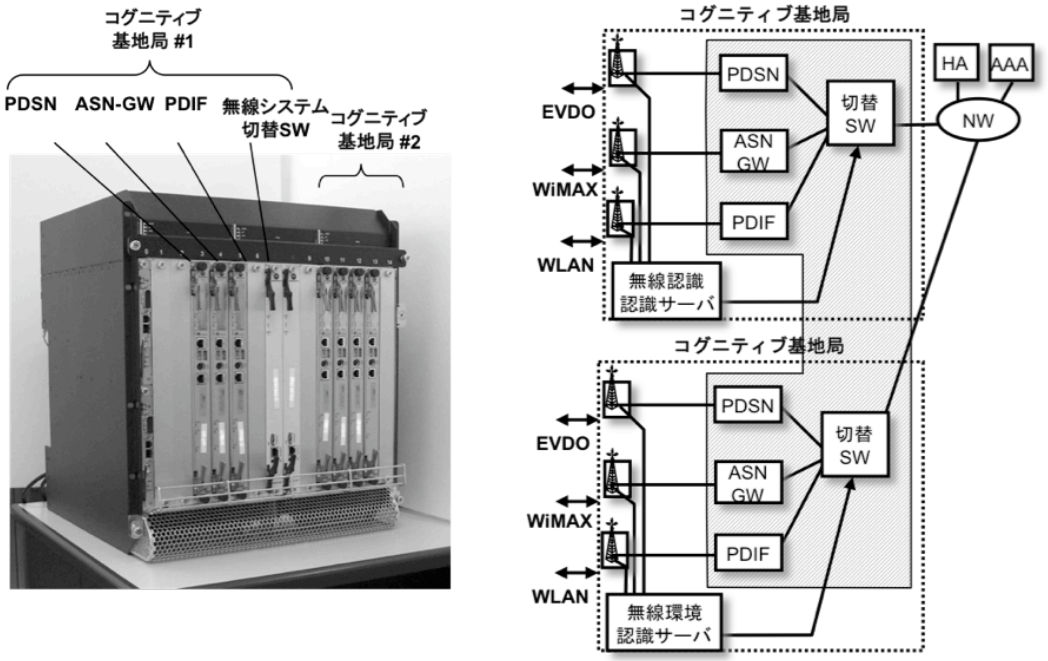


図 5.9 集約した装置の外観，及び同装置とシステム構成との関係

実験機における各無線システムの基地局やアクセスポイントと，ゲートウェイの間は Ethernet による接続であるため，無線区間と比較して短い遅延時間が見込める．この特性を活かし，実験機のうち，各無線システムの基地局やアクセスポイントを除く，コグニティブ無線基地局 2 局分の PDSN，ASN-GW，PDIF 及び無線システム切替スイッチを一つの筐体に収容する構成を採用した．実験機の実装上の構成とシステム構成との関係を図 5.9 に示す．この構成を採用した理由は，図 5.9 右側の図の網掛け部分に含まれる装置の配下にはそれぞれの空間やエリア設計に応じて設置された無線システムの基地局もしくはアクセスポイントのみが接続されることから，空間的に偏在する機能とそれ以外の機能を分割することができ，また，空間的に偏在させる必要のない装置をすべて一箇所に集約させることでメンテナンス性の向上を実現することができるためである．

5.2.5.2 プロトコルスタック

5.2.5.2.1 EVDO プロトコルスタック

実験機において EVDO 経由で端末と接続されている場合のプロトコルスタックを図 5.10 に示す．端末と PDSN 間で PPP コネクションを確立し，また PDSN と基地局間で GRE トンネリングを実装している．

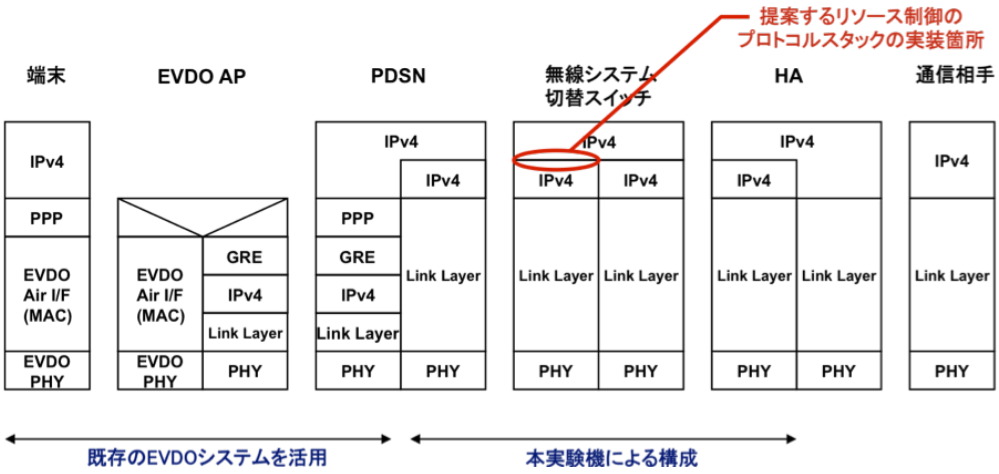


図　5.10　本実験機における EVDO のプロトコルスタック

5.2.5.2.2　WiMAX プロトコルスタック

実験機において WiMAX 経由で端末と接続されている場合のプロトコルスタックを図 5.11 に示す．EVDO と同様，ASN-GW とアクセスポイント間で GRE トンネリングを実装している．

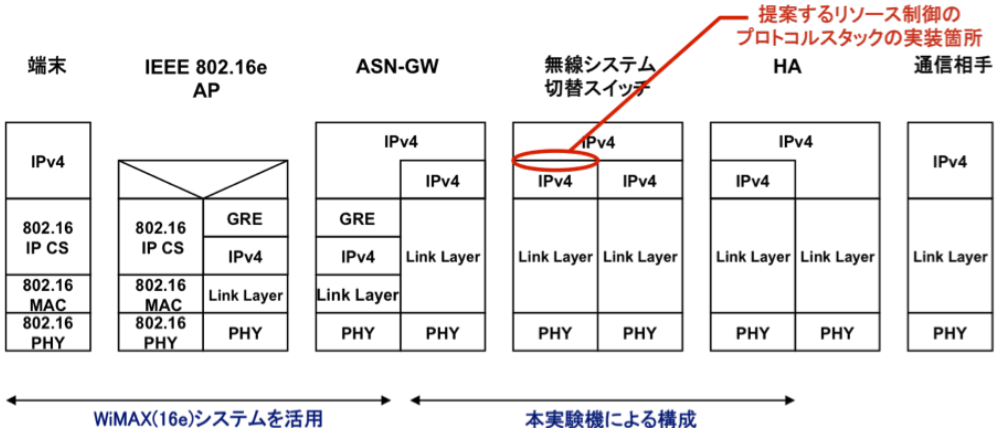


図　5.11　本実験機における WiMAX のプロトコルスタック

5.2.5.2.3　無線 LAN プロトコルスタック

実験機において WiMAX 経由で端末と接続されている場合のプロトコルスタックを図 5.12 に示す．商用のセルラシステムとの接続を考慮し端末と PDIF 間で IPSec を実装している．

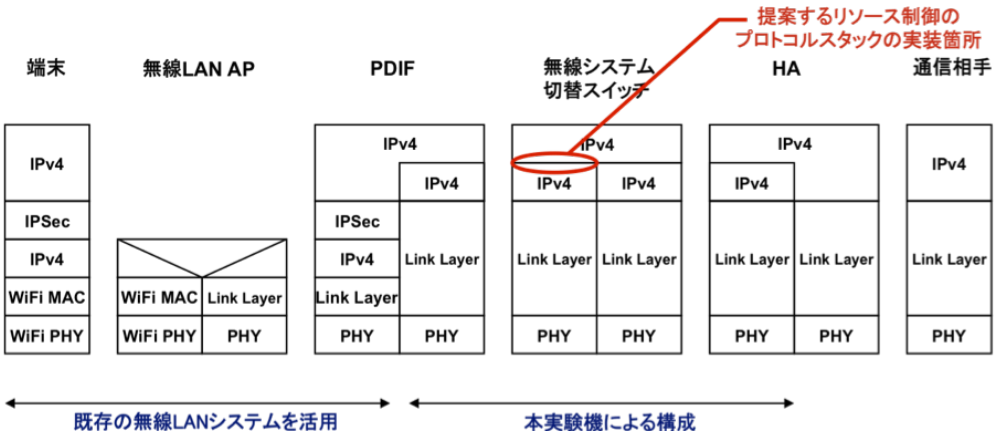


図 5.12 本実験機における無線 LAN のプロトコルスタック

5.3 実験機による評価

5.3.1 装置の動作確認

5.3.1.1 パケット伝送速度

実験機では無線 LAN を用いた伝送経路の場合，使用される装置は HA から無線システム切替スイッチ，PDIF，無線 LAN AP，端末 (AT: Access Terminal) に至るまで複数の装置それぞれの内部処理及び装置間の連携によりはじめてパケット伝送が行われるため，まず HA から下り回線の UDP パケットを送信し基本シーケンスの確認を行った．この結果，端末認証や IP アドレスの割当などの制御フローが動作していること，パケット伝送が行われ端末側で受信できることを確認した．

次に各装置の基本性能を把握するため， HA から UDP パケットを送信した場合の各装置の伝送容量 (転送速度) の測定を行った．本実験におけるシステム構成を図 5.13 に，また伝送容量測定箇所を表 5.2 に示す．

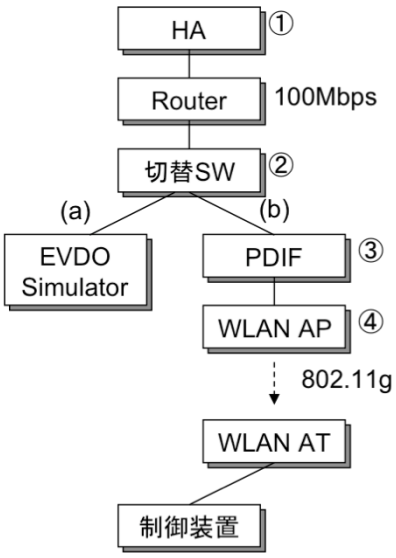


図 5.13　開発装置の動作確認系と伝送容量測定箇所

表 5.2　伝送容量測定箇所

番号	伝送容量測定箇所
①	HA→無線システム切替スイッチへの情報伝送速度
②	無線システム切替スイッチ→PDIF への転送速度 (無線システム切替スイッチ処理後の伝送容量)
③	PDIF→無線 LAN AP への転送速度 (PDIF 処理後の伝送容量)
④	無線 LAN AP→AT の伝送容量

サーバからの UDP パケットの情報伝送速度が 3.8 Mbps の低負荷の場合と 115 Mbps の高負荷の場合の 2 パターンについて伝送容量を測定した. 表 5.3 に測定結果を示す.

表 5.3 より低負荷時においては無線システム切替スイッチによる処理はパケットロスすることなく処理が間に合っているが PDIF による IPSec による処理により転送速度が若干低下していることがわかる. 高負荷時にはこの現象は顕著に現れている. PDIF の動作ログを解析したところ, 低負荷時, 高負荷時いずれの場合においても PDIF 内部においてパケット棄却が行われていなかった. 転送速度の低下は IPSec の処理における認証プロセス及び暗号化にかかる時間が測定時間中に含まれるためであることも報告されており [84], 本実験における転送速度の低下もこれらが原因であると考えられる. PDIF による IPSec 処理の高速化については本論文の課題ではないためここでは扱わない. また表 5.3 に示す通り, 高負荷時において無線 LAN のアクセスポイントには 45.1 Mbps で入力されるのに対し

表 5.3 各測定箇所における伝送容量

	低負荷時	高負荷時
①HA→無線システム切替スイッチ	3.8 Mbps	117.9 Mbps
②無線システム切替スイッチ→PDIF	3.8 Mbps	94.6 Mbps
③PDIF→無線 LAN AP	3.66 Mbps	45.1 Mbps
④無線 LAN AP→AT	3.66 Mbps	35.2 Mbps

表 5.4 ランダムシステム切替時の伝送容量

(高負荷時:117.9 Mbps)	無線 LAN 100 %選択	無線 LAN 50 %選択
①HA→無線システム切替スイッチ	117.9 Mbps	117.9 Mbps
②無線システム切替スイッチ→PDIF	94.6 Mbps	42.1 Mbps
③PDIF→無線 LAN AP	45.1 Mbps	22.6 Mbps
④無線 LAN AP→AT	35.2 Mbps	18.5 Mbps

無線 LAN のアクセスポイントから端末へは 35.2 Mbps でデータが伝送されている. この特性劣化要因としては無線 LAN アクセスポイントの内部処理などが追いついていないためと考えられる. なお高負荷時について今回は HA と無線システム切替スイッチ間を 100 Mbps 対応のルータを介して接続したため, ルータにおける処理限界を超える情報伝送を行ったため装置仕様上の制限により伝送速度が 95 Mbps 程度に低下している. この点については高負荷時の情報伝送速度に対応した装置の調達や高負荷時の設定調整などにより解決できる問題であり, 実験機による屋外実験にあたっては本質的な問題ではないと考える.

次に無線システム切替スイッチにおけるシステム切替を確認するため擬似的に無線環境認識サーバから EVDO と無線 LAN の切替頻度がほぼ 50 %ずつとなるように (図 5.13 の (a) と (b) の選択頻度がほぼ 1:1 となるように) ランダムに切替指示を行い, 無線 LAN 側の伝送容量を表 5.3 の無線 LAN のみを選択している場合の伝送容量との比較により評価を行った. 表 5.4 に測定結果を示す.

表 5.4 より EVDO と無線 LAN の選択頻度がほぼ 1:1 の場合には PDIF 入力時の伝送容量や PDIF 処理後の伝送容量が無線 LAN のみを選択していた場合の約半分の値となっていることがわかる. 無線環境認識サーバの指示に従い無線システム切替スイッチにおいてパケットが EVDO と無線 LAN それぞれの選択頻度に応じて伝送されていることから,

無線システム切替パケットスイッチに切替に対する偏り等の不具合はないと考えられ，無線システム切替パケットスイッチにおける複数の無線システムの切替基本動作を確認することができた．

5.3.1.2 伝送遅延

端末にデータが到達するまでに基地局やゲートウェイなど複数の装置を介することから End-to-End の遅延が大きくなる可能性があることから，実験機における遅延時間を把握するため，無線 LAN のみを選択した場合の End-to-End 遅延時間の評価を行った．その結果を表 5.5 に示す．IP カプセル化や IPSec 処理を施しても End-to-End での遅延時間は数 ms 程度であり，基地局やゲートウェイなど複数の装置から構成される今回の実験機においても短い遅延時間でパケットが伝送できることを確認し，実験機構成上の遅延は，特に問題ないことがわかった．

表 5.5 End-to-End での遅延時間測定結果

情報伝送速度	遅延時間 (平均)
1 Mbps	2.30m 秒
11 Mbps	1.69m 秒
31 Mbps	1.85m 秒

5.3.2 屋外環境の基礎データ取得

5.3.2.1 各空間における各無線システムの受信信号強度

実験エリア内の複数箇所それぞれに端末を移動させた場合の各測定点における各無線システムの伝送容量把握のため，実際に各無線システムの電波を放射し，各空間の無線環境として受信信号強度 (RSSI) を測定した．図 5.14 に EVDO の測定結果を，図 5.15 に WiMAX の測定結果を，図 5.16 に無線 LAN の測定結果をぞれぞれ示す．なお，図中における白い○印は，その地点において測定を行った結果，受信信号強度の検出が不能であったことを示している．

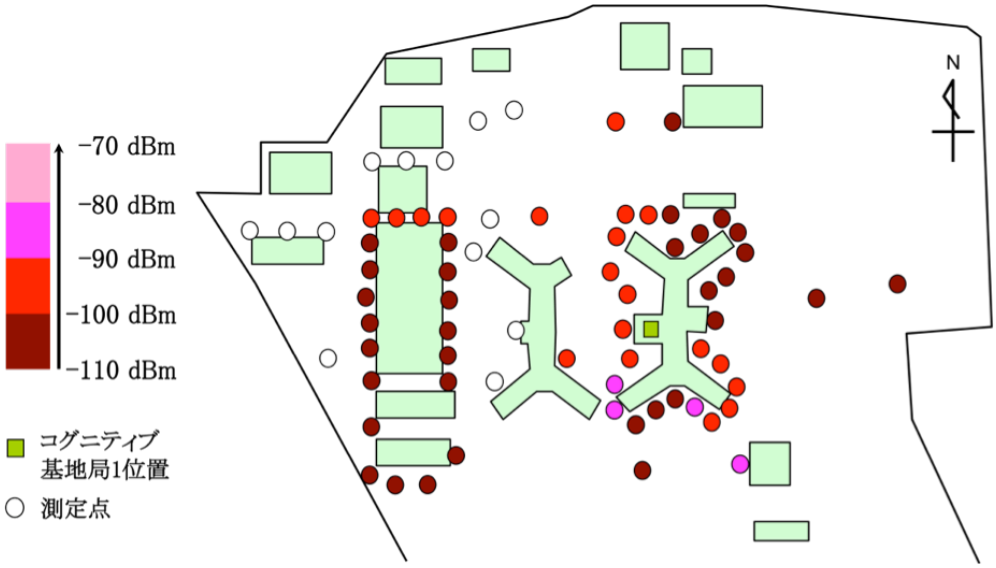


図 5.14 EVDO の RSSI 分布

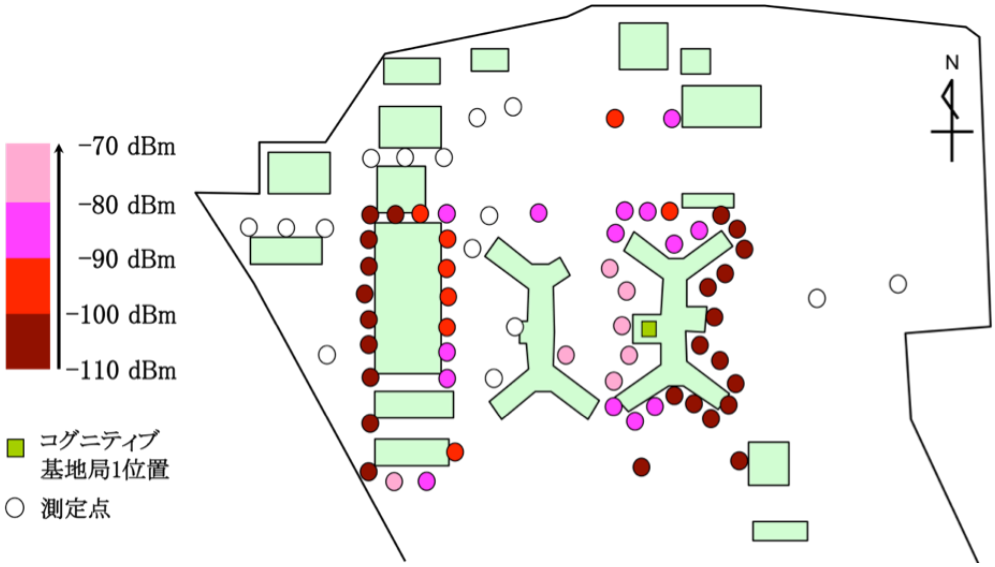


図 5.15 WiMAX の RSSI 分布

今回の実験機では各無線システムの基地局 (アクセスポイント) の設置制限から，アンテナがほぼ同じ位置に設置されたため，アンテナ周辺の受信信号強度は高いが，アンテナから距離が離れるほど受信信号強度は低くなっている．また WiMAX の場合は，前述の通り西方向のセクタのみの放射が許可されたため，アンテナの東側の位置では受信信号強度は低い．さらに無線 LAN の場合，アンテナを設置した位置から西方向のごく一部のエリアのみが比較的受信信号強度が高く，それ以外のエリアでは受信信号強度が低くなっており，建物の構造の影響により，エリア設計時に想定していた範囲よりも実際の電波到達範囲は狭くなっていることがわかった．

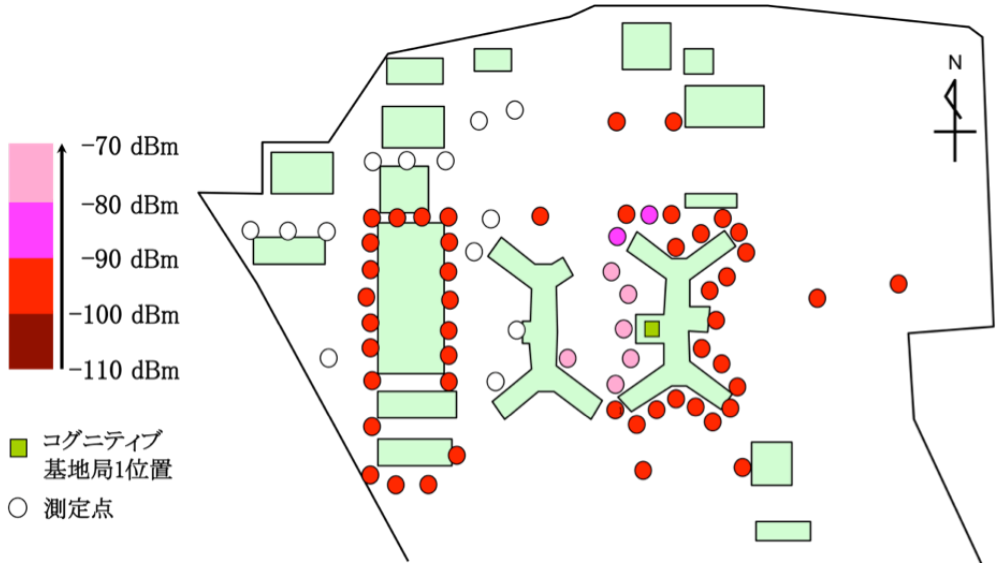


図 5.16　無線 LAN の RSSI 分布

5.3.2.2　各空間における各無線システムの PER

5.3.2.1 節において各測定点におけるRSSI値を取得し，この情報によりどのエリアで通信が可能かの見通しを得たが，各測定点における無線通信回線の安定性を把握するため，実際に各無線システムの電波を放射し，実験エリア内の複数箇所それぞれに端末を移動させた場合の各観測点におけるパケット誤り率 (PER: Packet Error Rate) を測定した．EVDO の測定結果を図 5.17 に，WiMAX の測定結果を図 5.18 に，無線 LAN の測定結果を図 5.19 にそれぞれ示す．

今回の実験機では各無線システムの基地局 (アクセスポイント) の設置制限から，アンテナがほぼ同じ位置に設置されたため，アンテナ周辺ではいずれの無線通信システムにおいても通信可能であったが，5.3.2.1 節の受信信号強度の測定結果と同様の傾向が見られ，アンテナから距離が離れるほど PER は高くなり，特に今回の実験エリアの中で無線 LAN の通信可能なエリアは，アンテナの西方向のごく一部のエリアに限られることがわかった．

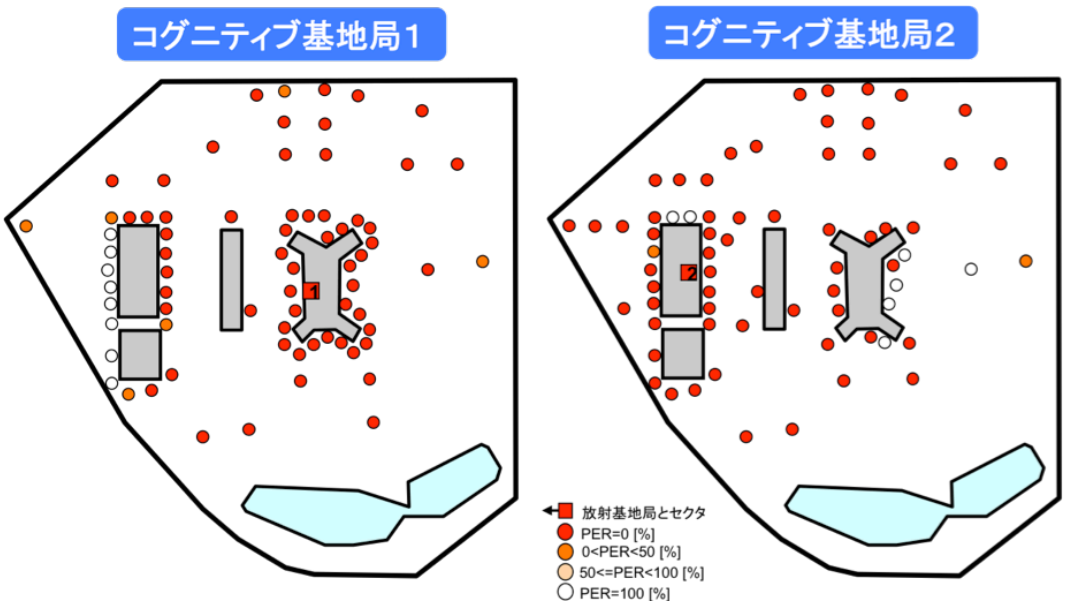


図 5.17 EVDO の PER 分布

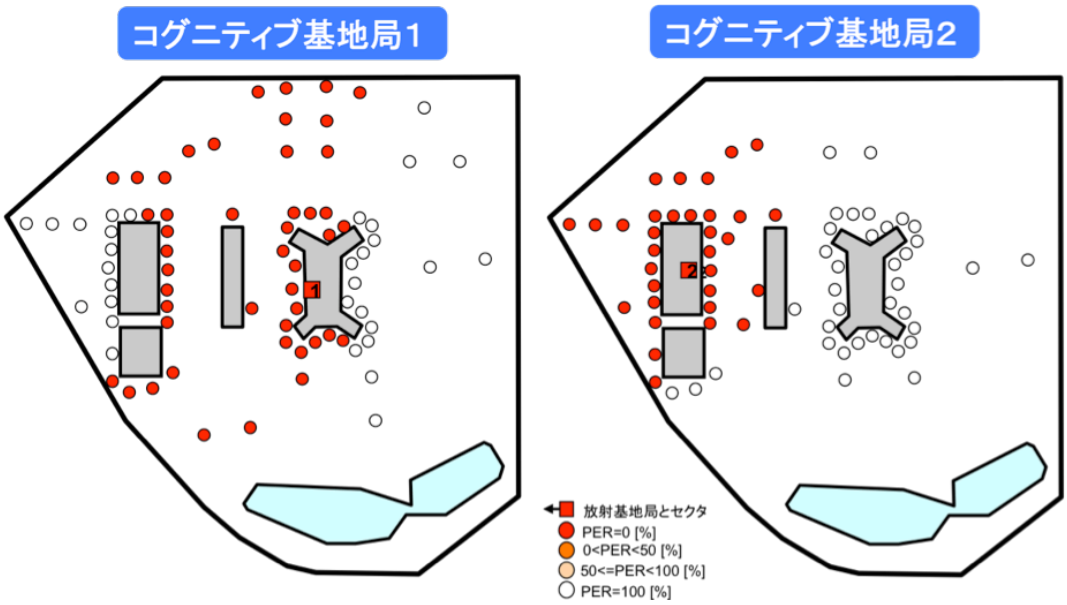


図 5.18 WiMAX の PER 分布

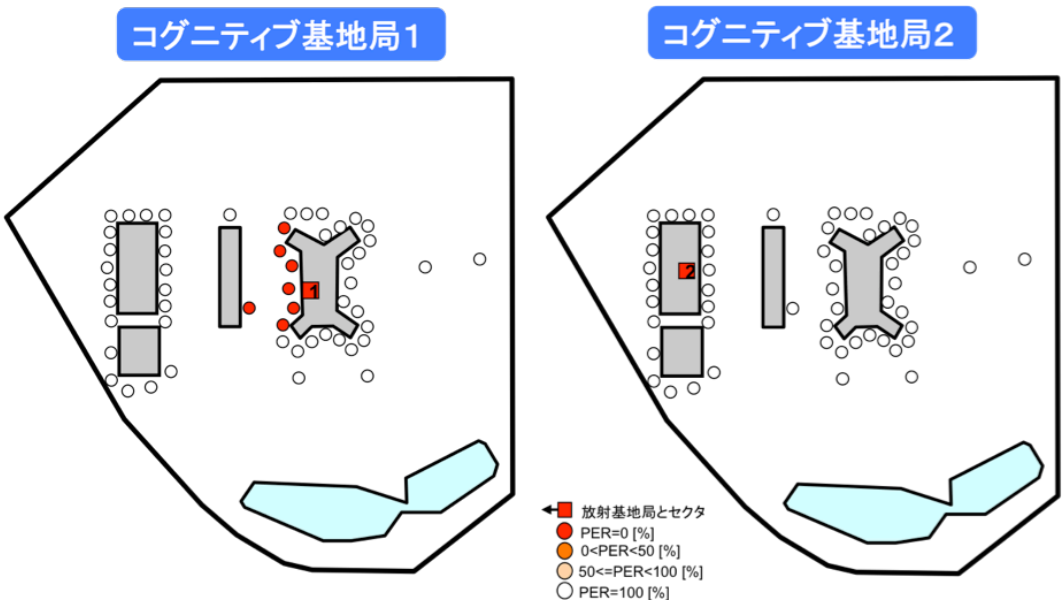


図 5.19　無線 LAN の PER 分布

5.3.3　ユーザ移動に伴う切替動作

コグニティブ無線による無線環境認識と，ネットワーク主導のリソース制御の一連の制御が実環境で正しく動作するか確認するため，設定したシステム切替閾値に基づいて無線システムの切替が正しく行われるかどうか確認した．具体的には 5.3.2 節の測定結果に基づき，実験エリア内において端末を移動させ，無線 LAN のアクセスポイントから遠ざかることによる受信電力レベル値の低下に応じて EVDO へネットワーク主導でシステムが切り替わるか確認した．図 5.20 に実験エリア内の端末の移動経路を示す．なお本実験機における無線 LAN 装置の受信感度は図 3.11 より，−91 dBm であることから，これよりもある程度大きな RSSI 値の場合には無線回線における伝送速度の向上や無線回線としての安定性が期待できると考え，無線 LAN のシステム切替閾値を −83 dBm に設定した．この場合，受信信号強度が −83 dBm 未満の場合には EVDO に接続され，−83 dBm 以上の場合には無線 LAN に接続されることになる．

図 5.21 に動作している様子を時系列に示す．図 5.21 左側の図は端末移動始点において，コグニティブ端末の接続先のシステム名，及びそれぞれのシステムの受信信号強度が表示されている様子を示している．この図から端末移動始点においてコグニティブ端末は，無線 LAN にて通信を行っていることがわかる．

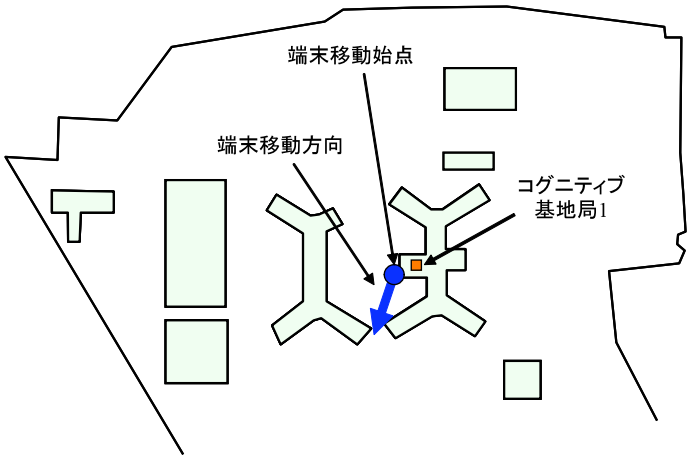


図 5.20 端末の移動経路

図 5.21 端末移動に伴うシステム切替の様子

(左:無線 LAN での通信, 中央:受信レベル劣化, 右:EVDO での通信)

次に, コグニティブ端末を移動させていくと, 無線 LAN の RSSI 値が低下しコグニティブ端末が無線 LAN のサービスエリア外へと移動していくため, 図 5.21 中央の図に示すように無線 LAN の無線環境が悪化したことが表示される. 基地局における無線環境認識サーバでは, RSSI 値が設定したシステム切替閾値である −83 dBm を下回ったことを検知し, 基地局の無線システム切替スイッチにシステム切替を指示し, ネットワーク主導にてシステム切替が実施されている.

今回の実験において, 無線 LAN の RSSI 値が設定したシステム切替閾値以下になった時, ネットワーク側において自動的に EVDO への切替を実施し, コグニティブ端末は EVDO からパケットを受信するようになった. また図 5.21 右側の図に示すように, 選択しているシステムが EVDO に変更されたことも画面上で確認できた.

なお, システム切替の前後においても端末と通信相手との間の通信が途切れないことを確認し, 実装したプラットフォームを用いることにより, 無線環境に応じたシステム切替が屋

外環境においても動作可能であること，またユーザ (端末) はシステム切替を意識せずに通信可能であることを実証した．

5.3.4　高速システム切替動作

構築したプラットフォームが無線環境の変動に応じた高速なシステム切替に対応可能であるか確認するために，EVDO，WiMAX，無線 LAN すべての無線システムでの通信が可能なエリアに端末の位置を固定させ，各無線システムの受信信号強度に関わらず，無線環境認識サーバから 100 ms の周期でルーティングテーブルを更新し，システム切替を強制的に指示した場合の動作を確認した．提案プラットフォームによるネットワーク主導のシステム切替はエリア内に収容されている全ユーザ分のルーティング情報を記載したルーティングテーブルの更新により行われるため，複数ユーザを扱う場合であってもその制御動作は同一であるため，今回の実験ではそのうちの一人のユーザの動作に注目することとした．動作は端末の選択したシステムのログ情報を表示させて確認することとした．図 5.22 に実験結果を示す．実験の結果 100 ms の一定間隔で周期的に無線システムが切り替わっていること，またシステムが頻繁に切り替わった場合でも通信は途切れることがないことを確認し，無線状況の変化に応じた柔軟なシステム切替が実現可能であることを実証した．

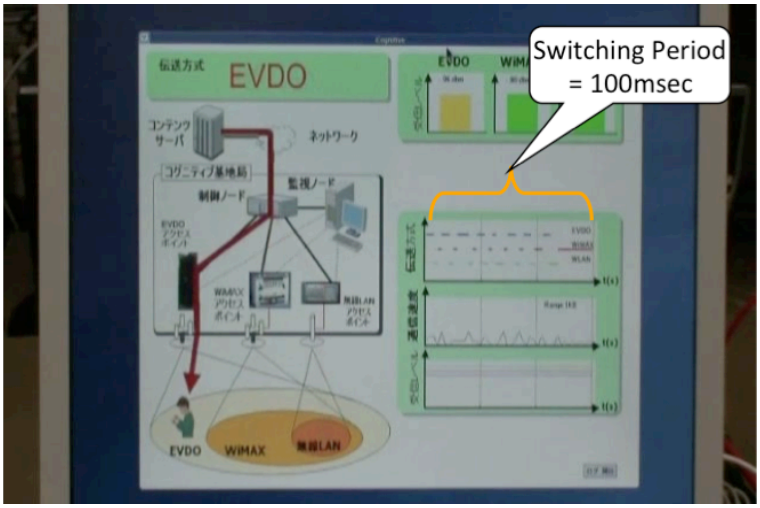


図 5.22　高速システム切替の様子 (100 ms でのシステム切替時)

5.3.5　ネットワーク主導リソース制御の動作

ヘテロジニアスネットワークのネットワーク主導リソース制御における特徴である，リソース利用率の平準化の観点でのロードバランス制御が，正しく動作するかどうかを確認するた

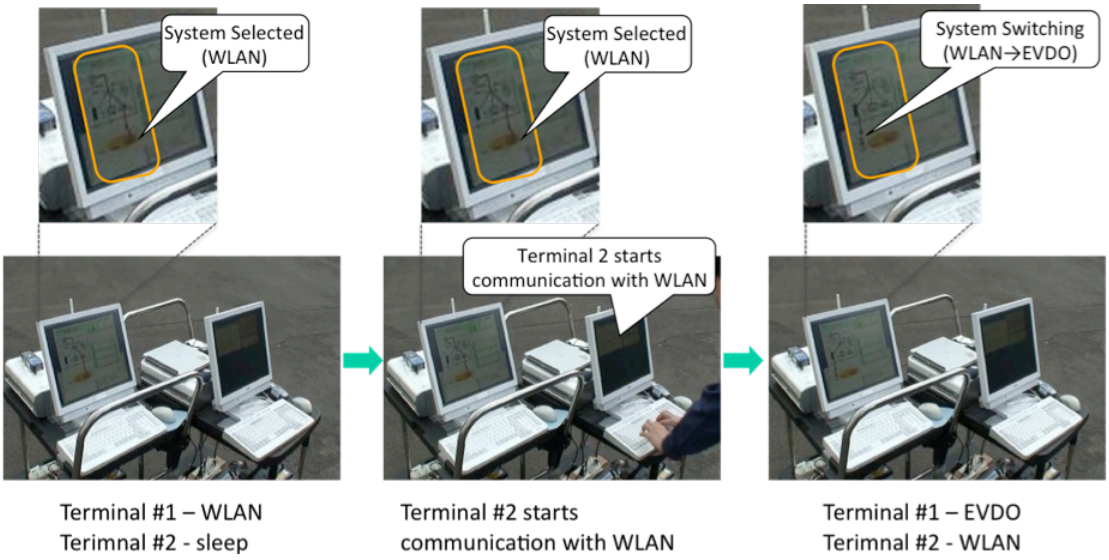


図 5.23 システム利用効率平準化実現に向けたリソース制御動作

め，2 ユーザ分の端末を用意し，EVDO と無線 LAN が利用可能なエリアにおいて，ユーザ#1 が無線 LAN を用いた通信を行っている最中に，ユーザ#2 の電源を投入して無線 LAN での通信を開始した場合の動作を確認した．図 5.23 にそれぞれの端末の様子を時系列に示す．

図 5.23 に示す通り，当初無線 LAN を用いて通信を行っていたユーザ#1 の端末は，ユーザ#2 の端末の通信が無線 LAN で開始されたことに伴い，システム間の利用効率の平準化を図るべく，無線 LAN から EVDO にネットワーク主導で自動的にシステム切替が行われることを確認し，異種システム間のロードバランスを含めてネットワーク側におけるリソース制御が実環境においても正しく動作することを実証した．

5.4 結言

本章では，第 3 章及び第 4 章で提案した無線環境認識技術と提案プラットフォーム及び提案リソース制御技術の有効性を実証するため，まず商用の携帯電話システムに適用する場合の課題と解決に向けたアプローチを述べた．次にこのアプローチに基づき，商用ベースの WiMAX と無線 LAN に加え，携帯電話システムの一つである EVDO を対象システムとした実験機を構築し，実験局の免許を取得して実環境における動作を確認した．商用サービスでは事業者毎に異なる IP アドレス体系をもつため，実験機では同一事業者が

ヘテロジニアスネットワークを運用すると想定し，ヘテロジニアスネットワークで統一された IP アドレス体系を採用した．屋外実験の結果，提案技術が商用をベースとしたシステム構成の下，屋外環境においても正しく動作することが確認でき，提案技術がヘテロジニアスネットワークにおけるネットワーク側の統合制御を実現する上で有効であることを実証した．

第6章

結論

本論文は，著者が大阪大学大学院工学研究科電気電子情報工学専攻在学中に行ったコグニティブ無線による異種無線システム統合制御に関する研究成果をまとめたものである．以下に本研究で得られた成果を総括する．

1. ヘテロジニアスネットワークに関するこれまでの研究として MIRAI アーキテクチャや CWC，国際標準化として IEEE 1900.4 を例に取り，ヘテロジニアスネットワークにおけるネットワーク主導の統合制御の必要性を明確化した．またヘテロジニアスネットワークにおいては伝送容量増大の実現に向けてネットワーク主導で各ユーザへの無線リソース配分が必要であることを述べ，空間により異なる伝送容量を把握するための無線環境認識，及び，システム間での無線リソースの利用効率の平準化に向けたリソース制御の，二つの要素技術確立が課題であることを明確化した．

2. ヘテロジニアスネットワークにおける伝送容量増大実現に向け，その要素技術の一つとして，異種無線システムが導入されている空間における伝送容量把握のための無線環境認識技術を提案した．提案技術は複数の無線通信システムの接続可能性と期待される伝送容量を無線環境と規定し，コグニティブ無線の考え方に基づいて，基地局あるいはアクセスポイント側で受信される端末からの受信信号強度による無線環境認識を行うことを特徴とする．計算機シミュレーション及び WiMAX と無線 LAN で構成される基本実験機の屋内実験結果により，ネットワーク側のみで各空間における無線環境の把握が可能であることを示し，提案技術の有効性を確認した．

3. ヘテロジニアスネットワークにおけるネットワーク主導の統合的制御を実現するためのリソース制御方式及びプラットフォームを提案した．具体的には，ユーザのアプリケーションに応じた QoS クラスを考慮し，個々のユーザの通信品質向上と伝送容量増大の観点に基づいてシステム間の利用効率の平準化を図るリソース制御方式を提案し，またこのリソース制御を実現するため，システム切替をユーザに意識させずにネットワーク層でシステム切替を行う高速システム切替プラットフォームを構築した．計算機シミュレーション及び WiMAX と無線 LAN により構成される基本実験機の屋内実験結果により，提案リソース制御によるロードバランスにより個々のユーザの通信品質向上とヘテロジニアスネットワークの伝送容量を増大させることが可能であることを示し，提案リソース制御方式の有効性を示した．

4. 提案した無線環境認識技術とリソース制御技術の商用ネットワーク構成での動作検証を目的とし，商用携帯電話システムのシステム及びネットワーク構成を踏襲し，これに EVDO, WiMAX，無線 LAN のアクセスポイントを実装した実伝搬路環境での評価のための実験機を構築した．屋外実験の結果，提案技術が商用をベースとしたシステム構成の下，実伝搬路環境でも有効に動作することが確認でき，提案技術がヘテロジニアスネットワークにおけるネットワーク側の統合制御を実現する上で有効であることを実証した．

上記に述べた研究成果により，本論文ではネットワークと端末が協調してヘテロジニアスネットワークの統合制御を実現する将来ビジョンの中でネットワーク側の制御に対象を絞り，コグニティブ無線を活用した無線環境認識技術とネットワーク主導リソース制御技術の二つをヘテロジニアスネットワークにおける伝送容量増大化のための要素技術として提案し，その有効性を実証した．

今後ヘテロジニアスネットワークは，様々な無線システムや無線デバイスの誕生，及び，社会生活への浸透に伴い，単にトラフィック量の増大や場所によるトラフィック偏在への対応だけでなく，いつでも当たり前のように使える社会基盤としての役割を担い，ヘテロジニアスネットワークの安定性及び信頼性実現の観点からネットワーク主導の統合制御の必要性はますます高まってくるはずである．本研究の成果がヘテロジニアスネットワークの統合制御の実用化するための一助となることを祈念する．

参考文献

[1] 総務省, 電波新産業創出戦略～電波政策懇談会報告書～, 2009 年 7 月.

[2] 総務省, 諮問第 7 号答申, 中長期における電波利用の展望と行政が果たすべき役割 −電波ビジョン, 2003 年 7 月.

[3] IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems, IEEE Computer Society and the IEEE Microwave Theory and Techniques Society, Oct. 2004.

[4] IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems, Amendment 2: Physical and Medium Access Control Layers for Combined Fixed and Mobile Operation in Licensed Bands, IEEE Computer Society and the IEEE Microwave Theory and Techniques Society, Feb. 2006.

[5] C. Eklund, R. B. Marks, S. Ponnuswamy, K. L. Stanwood and N. J. M. van Waes, WirelessMAN - Inside the IEEE 802.16 Standard for Wireless Metropolitan Networks, IEEE Press, 2006.

[6] L. Nuaymi, WiMAX - Technology for Broadband Wireless Access, John Wiley and Sons, Ltd., 2007.

[7] G. Wu, M. Mizuno and P. J. M. Havinga, “MIRAI Architecture for Heterogeneous Network,” IEEE Communications Magazine, Vol. 40, No. 2, pp. 126-134, Feb. 2002.

[8] M. Inoue, G. Wu, K. Mahmud, H. Murakami and M. Hasegawa, “Development of MIRAI System for Heterogeneous Wireless Networks,” Proc. of the 13th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2002), pp. 69-73, Sep. 2002.

[9] M. Hasegawa, M. Inoue and H. Morikawa, “Service Mobility in MIRAI Architecture,” Proc. of International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC 2005), pp. 349-353, Sep. 2005.

[10] H. Shiba, T. Shono, Y. Shirato, I. Toyoda, K. Uehara and M. Umehira, “Software Defined Radio Prototype for PHS and IEEE 802.11 Wireless LAN,” IEICE Trans. on Communications, Vol. E85-B, No. 12, pp. 2694-2702, Dec. 2002.

[11] R. Lackey and D. Upmal, “SPEAKeasy: The Military Software Radio,” IEEE Communications Magazine, Vol. 33, No. 5, pp. 56-61, May 1995.

[12] P. Cook and W. Bonser, “Architectural Overview of the SPEAKeasy System,” IEEE J. Select. Areas in Communications, Vol. 17, No. 4, pp. 650-661, Apr. 1999.

[13] 原田博司, 藤瀬雅行, “高度道路交通システムに対応した小型ソフトウェア無線端末の開発−概要とシステム構成,” 電子情報通信学会ソフトウェア無線研究会, SR2001-15, pp. 55-62, 2001 年 10 月.

[14] T. Yokoi, Y. Iki, J. Horikoshi, K. Miwa, Y. Karasawa, A. Fukuda, J. Takada, Y. Kuroda, T. Shiokawa, Y. Furuya, S. Suzuki, Y. Senba, Y. Yamada, H. Harada, Y. Suzuki and K. Araki, “Software Receiver Technology and Its Applications,” IEICE Trans. on Communications, Vol. E83-B, No. 6, pp. 1200-1209, Jun. 2000.

[15] K. Tsunehara, H. Ishii, T. Ishikawa and M. Kawabe, “Development of Software Defined Radio Platform,” Proc. of SDR '05 Technical Conference (Online), Nov. 2005.

[16] J. Lotzet , S. A. Fahmyt, J. Noguera, L. Doylet and R. Esser, “An FPGA-based Cognitive Radio Framework,” Proc. of IEEE Signals and Systems Conference 2008 (ISSC 2008), pp. 138-143, Jun. 2008.

[17] T. Shono, K. Uehara and S. Kubota, “Proposal for System Diversity on Software Defined Radio,” IEICE Trans. on Fundamentals, Vol. E84-A, No. 9, pp. 2346-2358, Sep. 2001.

[18] T. Shono, Y. Shirato, H. Shiba, K. Uehara, K. Araki and M. Umehira, “IEEE 802.11 Wireless LAN Implemented on Software Defined Radio with Hybrid Programmable

Architecture," IEEE Trans. on Wireless Communications, Vol. 4, No. 5, pp. 2299-2308, Sep. 2005.

[19] H. Harada, M. Kuroda, H. Morikawa, H. Wakana and F. Adachi, "The Overview of the New Generation Mobile Communication System and the Role of Software Defined Radio Technology," IEICE Trans. on Communication, Vol. E86-B, No. 12, pp. 3374-3384, Dec. 2003.

[20] H. Harada, "Software Defined Radio Prototype for W-CDMA and IEEE802.11a Wireless LAN," Proc. of IEEE 60th Vehicular Technology Conference 2004 (VTC 2004 Fall), Vol. 6, pp. 3919-3924, Nov. 2004.

[21] H. Harada, H. Murakami, K. Ishizu, S. Filin, Y. Saito, H. N. Tran, G. Miyamoto, M. Hasegawa, Y. Murata and S. Kato, "A Software Defined Cognitive Radio System – Cognitive Wireless Clouds," Proc. of IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM) 2007, pp. 294-299, Nov. 2007.

[22] H. Harada, M. Murakami, G. Miyamoto, K. Ishizu, Y. Saito, H. N. Tran, S. Filin, M. Hasegawa, Y. Murata and S. Kato, "Research on User-centric Distributed Resource Management for Cognitive Wireless Clouds - (1) Overview-," IEICE Society Conference, B-17-30, Sep. 2007.

[23] H. N. Tran, H. Murakami, G. Miyamoto, K. Ishizu, S. Filin, H. Harada, S. Kato, M. Hasegawa and Y. Murata, "A Study of Distributed Architecture of Cognitive Network Manager for Cognitive Wireless Clouds," IEICE Technical Report SR2007-47, pp. 9-14, Nov. 2007.

[24] 原田博司, "コグニティブ無線技術," 第 3 回ユビキタス ITS シンポジウム資料, pp. 1-46, 2008 年 2 月.

[25] 長谷川幹雄, "リコンフィグラブル垂直ハンドオーバエージェント," 大阪大学大学院工学研究科極限コミュニケーションラボラトリ 2007 年度ワークショップ資料, pp. 1-21, 2007 年 9 月.

[26] H. Harada, "CWC and ASTRA: Projects to Realize Heterogeneous and Spectrum Sharing Types Cognitive Wireless Networks, " 第 2 回 日本・EU 新世代ネットワークに関するシンポジウム, (online), Oct. 2009.

[27] IEEE 1900.4, http://grouper.ieee.org/groups/scc41/4/index.htm

[28] IEEE Standard for Architectural Building Blocks Enabling Network-Device Distributed Decision Making for Optimized Radio Resource Usage in Heterogeneous Wireless Access Networks (IEEE Std 1900.4-2009), Feb. 2009.

[29] M. Sherman, A. N. Mody, R. Martinez, C. Rodriguez and R. Reddy, “IEEE Standards Supporting Cognitive Radio and Networks, Dynamic Spectrum Access, and Coexistence,” IEEE Communications Magazine, Vol. 46, No. 7, pp. 72- 79, Jul. 2008.

[30] S. Buljore, H. Harada, S. Filin, P. Houze, K. Tsagkaris, O. Holland, K. Nolte, T. Farnham and V. Ivanov, “Architecture and Enablers for Optimized Radio Resource Usage in Heterogeneous Wireless Access Networks: The IEEE 1900.4 Working Group,” IEEE Communications Magazine, Vol. 47, No. 1, pp. 122-129, Jan. 2009.

[31] 原田博司, “コグニティブ無線の標準化動向,” 電子情報通信学会通信ソサイエティマガジン, No. 5, pp. 46-56, 2008 年 5 月.

[32] J. Rosenberg, H. Schulzrinne, G. Camarillo, A. Johnston, J. Peterson, R. Sparks, M. Handley and E. Schooler, “SIP: Session Initiation Protocol,” [RFC3261], Jun. 2002.

[33] E. Wedlund and H. Schulzrinne, “Mobility Support Using SIP,” Proc. of the 2nd ACM International Workshop on Wireless Mobile Multimedia, pp. 76-82, Aug. 1999.

[34] 川口晃平, 蓑田祐紀, 塚本勝俊, 小牧省三, “SIP を用いた無線メディア選択エージェントにおける一検討,” 電子情報通信学会モバイルマルチメディア通信研究会, MoMuC2004, pp. 13-18, 2004 年 6 月.

[35] 植田泰輔, 蓑田祐紀, 川口晃平, 塚本勝俊, 小牧省三, “SIP を用いた無線メディア選択エージェントへのメディアハンドオーバ機能の実装と評価,” 電子情報通信学会総合大会, B-15-3, 2005 年 3 月.

[36] G. Camarillo, SIP 入門, 翔泳社, 2002 年 12 月.

[37] 小牧省三編, ワイヤレスエージェント技術, 丸善出版事業部, 2008 年 7 月.

[38] IETF, RFC 793, “Transmission Control Protocol,” Sep. 1981.

[39] T. Goff, J. Moronski, D. S. Phatak and V. Gupta, “Freeze-TCP: A True End-to-end TCP Enhancement Mechanism for Mobile Environment,” Proc. of the 9th Annual

Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2000), Vol. 3, pp. 1537-1545, Mar. 2000.

[40] K. Brown and S. Singh, "M-TCP: TCP for Mobile Cellular Networks," ACM Computer Communication Review (Online), Jul. 1997.

[41] 3GPP2 C.S0024 version 4, "cdma2000 High Rate Packet Data Air Interface Specification, " Oct. 2002.

[42] CDG (CDMA Development Group), 3G CDMA2000 1xEV-DO Technologies, http://www.cdg.org/technology/3g_1xEV-DO.asp

[43] J. Mitola III, "Cognitive Radio for Flexible Mobile Multimedia Communications," Proc. of 1999 IEEE International Workshop on Mobile Multimedia Communications Digest, pp. 3-10, Nov. 1999.

[44] J. Mitola III and G. Q. Maguire, Jr., "Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal," IEEE Personal Communication, Vol. 6, No. 4, pp. 13-18, Aug. 1999.

[45] Ofcom, Cognitive Radio Final Report, Feb. 2007.

[46] 三瓶政一, "コグニティブ無線の動向と展開", 電子情報通信学会通信ソサイエティマガジン, No. 5, pp. 35-45, 2008 年 5 月.

[47] 吉野仁, " [パネル討論] ITU-R におけるコグニティブ無線の標準化活動の状況," 電子情報通信学会ソフトウェア無線研究会, SR2006-58, pp. 117-125, 2006 年 11 月.

[48] S. Sampei, S. Miyamoto and S. Ibi, "Spectrum Loading Type Dynamic Spectrum Allocation Technique for Cognitive Radio System," Proc. of Second International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CROWNCOM '07) (in CD-ROM), Aug. 2007.

[49] S. Haykin, "Cognitive Radio: Brain Empowered Wireless Communications," IEEE J. Select. Areas in Communications, Vol. 23, No. 2, pp. 201-220, Feb. 2005.

[50] Q. Zhao and B. M. Sadler, "A survey of dynamic spectrum access," IEEE Signal Processing Magazine, Vol. 24, No. 3, pp. 79-89, May 2007.

[51] D. Willkom, S. Machiraju, J. Bolot and A. Wolisz, “Primary User Behavior in Cellular Networks and Implications for Dynamic Spectrum Access,” IEEE Communications Magazine, Vol. 47, No. 3, pp. 88-95, Mar. 2009.

[52] C. Sun, H. N. Tran, Y. D. Alemseged and H. Harada, “IEEE P1900.6 Standard for Sensing Information Exchange of Cognitive Radio System,” Proc. of the 12th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC 2009) (in USB-Memory), Sep. 2009.

[53] FCC, “Notice of Proposed Rule Making: Unlicensed Operation in the TV Broadcast Bands,” ET Docket No. 04-186, May 2004.

[54] E. Visotsky, S. Kuffner and R. Peteron, “On Collaborative Detection of TV Transmissions in Support of Dynamic Spectrum Sharing,” Proc. of the IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN 2005), pp. 338-345, Nov. 2005.

[55] C. R. Stevenson, G. Chouinard, Z. Lei, W. Hu, S. J. Shellhammer and W. Caldwell, “IEEE 802.22: The First Cognitive Radio Wireless Regional Area Network Standard,” IEEE Communications Magazine, Vol. 47, No. 1, pp. 130-138, Jan. 2009.

[56] 佐々木重信, “ [パネル討論]　IEEE802.22 における標準化動向,” 電子情報通信学会ソフトウェア無線研究会, SR2006-59, pp. 127-133, 2006 年 11 月.

[57] D. Bourse, K. El-Khazen, G. Vivier, Y. Denif, T. Wiebke, M. Dillinger, J. Brankensiek, K. Moessner and N. Alonistioti, “E2R Project: Major European Initiative on Reconfigurability,” Proc. of SDR 2004 Technical Conference (Online), Nov. 2004.

[58] H. Harada, “A Study on Cognitive Radio and Its Applications,” IEICE Technical Report, SR2005-18, May 2005.

[59] S. Yoshizawa, S. Hanaoka, M. Kuwahara, M. Yano and T. Hirata, “A Study of Cognitive Radio –System Concept for Multi-System Integration,” IEICE General Conference 2006, B5-124, Mar. 2006.

[60] J. Kim, S. Hyeon, S. Choi, “Utilization of Graphic Processing Unit as a Modem for SDR/CR System,” Proc. of the 12th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC 2009) (in USB-Memory), Sep. 2009.

[61] J. Kim, H. Shigeno, A. Yamaguchi and S. Obana, “Airtime-Based Link Aggregation at the Co-Existence of WiMAX and WiFi,” Proc. of the 18th Annual IEEE Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2007) (in CD-ROM), Sep. 2007.

[62] 滝沢泰久, 谷口典之, 山中佐知子, 山口明, 小花貞夫, “コグニティブ無線ネットワークにおけるマルチホップアクセス経路トラフィック制御方式,” 情報処理学会論文誌, Vol. 48, No. 7, pp. 2419-2433, 2007 年 7 月.

[63] 金子尚史, 野本真一, 植田哲郎, 野村眞吾, 竹内和則, “コグニティブ無線における無線環境情報の推移とその予測可能性に関する一検討,” 電子情報通信学会ソフトウェア無線研究会, SR2007-51, pp. 35-41, 2007 年 11 月.

[64] 久世俊之, 内田繁, 澤健太郎, 大塚晃, 石津文雄, “ [技術展示] コグニティブ無線通信技術に関する研究開発−コグニティブ無線チャネル創造技術−,” 電子情報通信学会ソフトウェア無線研究会, SR2007-20, pp. 5-8, 2007 年 7 月.

[65] 小泉純子, “ [パネル討論] 総務省の電波政策と最近の動向,” 電子情報通信学会ソフトウェア無線研究会, SR2006-60, pp. 135-139, 2006 年 11 月.

[66] P. F. Marshall, “Cognitive Radio as a Mechanism to Manage Front-End Linearity and Dynamic Range,” IEEE Communications Magazine, Vol. 47, No. 3, pp. 81-87, Mar. 2009.

[67] K. Takeuchi, T. Fukuhara, S. Nomura and S. Yamamoto, “Cognitive Radio Using Multi-transmission Links - A Novel Approach Effective in Metropolitan Areas,” Proc. of Second International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CROWNCOM ’07) (in CD-ROM), Aug. 2007.

[68] Y. Noishiki, M. Sasaki, A. Idoue and K. Takeuchi, “Topology Management and Route Establishment Method for Base Station Networks Using Cognitive Radio,” IEICE Trans. on Communications, Vol. E91-B, No. 1, pp. 29-37, Jan. 2008.

[69] Q. H. Mahmoud, Cognitive Networks - Towards Self-Aware Networks, John Wiley and Sons, Ltd., 2007.

[70] F. H. P. Fitzek and M. D. Katz, Cognitive Wireless Networks, - Concepts, Methodologies and Visions Inspiring the Age of Enlightenment of Wireless Communications, Springer, 2007.

[71] H. Uchiyama, K. Umebayashi, T. Fujii, F. Ono, K. Sakaguchi, Y. Kamiya and Y. Suzuki, "Study on Soft Decision Based Cooperative Sensing for Cognitive Radio Networks," IEICE Trans. on Communications, Vol. E91-B, No. 1, pp. 95-101, Jan. 2008.

[72] K. Kashiki, M. Nohara, S. Imata and Y. Kishiki, "Location and Propagation Status Sensing of Interference Signals in Cognitive Radio," IEICE Trans. on Communications, Vol. E91-B, No. 1, pp. 77-84, Jan. 2008.

[73] 奥村善久, 進士昌明, 移動通信の基礎, 電子情報通信学会, 1986 年 10 月.

[74] ITU-R, Recommendation M.1225, "Guidelines for Evaluation of Radio Transmission Technologies for IMT-2000," Feb. 1997.

[75] OPNET, http://www.opnet.com

[76] IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, Amendment 4: Further Higher Data Rate Extension in the 2.4GHz Band, IEEE Computer Society and the IEEE Microwave Theory and Techniques Society, Jun. 2003.

[77] 3GPP2 Working Group 3 DO Ad Hoc Group, "1xEV-DO Evaluation Methodology (V1.4)," C30-DOAH-20030807-004, Aug. 2003.

[78] 電気通信事業者協会, 事業者別契約数 (2009 年 11 月末現在), http://www.tca.or.jp/database/2009/11/

[79] マイクロソフトサポートオンライン, http://support.microsoft.com/kb/170359/ja

[80] K. Wehrle, F. Pählke, H. Ritter, D. Müller and M. Bechler, The Linux Networking Architecture: Design and Implementation of Network Protocols in the Linux Kernel, Aug. 2004.

[81] 泉川晴紀, 福家直樹, 杉山敬三, 野原光夫, “CDMA2000 1xEV-DO/無線 LAN 中継装置を用いた TCP・PPP セッション保持手法および評価,” 電子情報通信学会モバイルマルチメディア通信研究会, MoMuC2004-99, pp. 69-74, 2005 年 1 月.

[82] N. Seddigh and M. Devetsikiotis, “Studies of TCP's retransmission timeout mechanism,” Proc. of IEEE International Conference on Communications 2001 (ICC 2001), Vol. 6, pp. 1834-1840, Jun. 2001.

[83] 3GPP2 X.S0028-200-0 version 1.0, cdma2000 Packet Data Services; Wireless Local Area Network (WLAN) Interworking, Mar. 2007.

[84] 西日本電信電話株式会社, インターネット基盤技術の高度化 (e! プロジェクトの推進) に関するシステムの実証及び調査研究―地方行政分野における IT 利活用の在り方について―調査報告書, (Online), 2003 年 3 月.

[85] K. Taniuchi, Y. Ohba, V. Fajardo, S. Das, M. Tauil, Y. H. Cheng, A. Dutta, D. Baker, M. Yajnik and D. Famolari, “IEEE 802.21: Media Independent Handover: Features, Applicability, and Realization,” IEEE Communications Magazine, Vol. 47, No. 1, pp. 112-120, Jan. 2009.

[86] 小川猛志, 伊東匡, “DHCP をベースとしたシームレスハンドオーバ方法の研究,” 電子情報通信学会論文誌, Vol. J88-B, No. 11, pp. 2228-2238, 2005 年 11 月.

[87] 藤澤俊之, 稲村勝樹, 田中俊昭, “異種無線ネットワーク環境におけるサービス移動透過性のためのハンドオーバ認証方式の検討,” 電子情報通信学会モバイルマルチメディア通信研究会, MoMuC2008-3, pp. 13-18, 2008 年 5 月.

[88] R. Walsh, L. Xu and T. Paila, “Hybrid Networks - A Step Beyond 3G,” Proc. of 3rd International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC 2000), pp. 109-114, Nov. 2000.

[89] Software Defined Radio Forum (SDR Forum), http://www.sdrforum.org/

[90] 藪崎正実, All-IP モバイルネットワーク, オーム社, 2009 年 5 月.

[91] 戸田巖, 詳解ネットワーク QoS 技術, オーム社, 2001 年 5 月.

[92] W. Xiaoyi and Q. Yajiang, “Enhanced Proportional Fair Scheduling for cdma2000 1xEV-DO Reverse Link,” Proc. of the 3rd International Conference on Wireless and Optical Communications Networks (WOCN 2006) (Online), Apr. 2006.

[93] J. Yang, Z. Yifan, W. Ying and Z. Ping, “Average Rate Updating Mechanism in Proportional Fair Scheduler for HDR,” Proc. of IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM) 2004, Vol. 6, pp. 3464-3466, Nov. 2004.

[94] M. Andrews, “Instability of the Proportional Fair Scheduling Algorithm for HDR,” IEEE Trans. on Wireless Communications, Vol. 3, No. 5, pp. 1422-1426, Sep. 2004.

[95] モバイル IT フォーラム, モバイル IT フォーラム 4G 技術調査報告書 (システムインフラストラクチャ編) (ver. 1.1) , 2006 年 3 月.

[96] B. O’hara and A. Petrick, The IEEE 802.11 Handbook … A Designer’s Companion Second Edition, IEEE Press, Apr. 2005.

[97] W. Hansmann and M. Frank, “On Things to Happen During a TCP Handover,” Proc. of the 28th IEEE International Conference on Local Computer Networks, pp. 109-118, Oct. 2003.

[98] Y. Taenaka, K. Tsukamoto, S. Kashihara, S. Yamaguchi and Y. Oie, “Design and Implementation of an Inter-Domain TCP Handover Management Method in Ubiquitous WLANs,” Proc. of IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing 2009 (PACRIM ’09), pp. 539-544, Aug. 2009.

[99] K. Daoud and B. Sayadi, “HAD: A Novel Function for TCP Seamless Mobility in Heterogeneous Access Networks,” Proc. of IEEE 66th Vehicular Technology Conference 2007 (VTC-2007 Fall), pp. 1451-1455, Sep. 2007.

[100] 宇野新太郎, “ユビキタス環境におけるシームレス通信サービスとその実現技術,” 電子情報通信学会論文誌, Vol. J89-B, No. 8, pp. 1334-1346, 2006 年 8 月.

[101] 尾上裕子, 萩野浩明, 宮崎雄一朗, 渥美幸雄, 駒木寛隆, 村尾高秋, 山内長承, “シームレス通信環境におけるモビリティ拡張型マルチメディアセッション制御機構,” 電子情報通信学会論文誌, Vol. J86-B, No. 8, pp. 1379-1388, 2003 年 8 月.

[102] A. K. Singh and S. Iyer, “ATCP: Improving TCP Performance over Mobile Wireless Environments,” Proc. of the 4th International Workshop on Mobile and Wireless Communications Network, pp. 239-243, Sep. 2002.

本論文に関する原著論文

A. 論文

1. S. Hanaoka, M. Yano and T. Hirata, "Testbed System of Inter-Radio System Switching for Cognitive Radio," IEICE Trans. on Communications. Vol. E91-B, No. 1, pp. 14-21, Jan. 2008.

2. S. Hanaoka, J. Yamamoto and M. Yano, "Platform for Load Balancing and Throughput Enhancement with Cognitive Radio," IEICE Trans. on Communications. Vol. E91-B, No. 8, pp. 2501-2508, Aug. 2008.

B. 国際会議

1. S. Hanaoka, J. Yamamoto, K. Wakayama, S. Yoshizawa and T. Hirata, "Simulation and Basic Experiment of Inter Radio System Handover for Cognitive Radio," Proc. of the 18th Annual IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2007) (in CD-ROM), Sep. 2007.

2. S. Hanaoka, M. Yano and S. Nishimura, "Simulation Results of Inter Radio System Handover for Cognitive Radio," Proc. of Taiwan Japan Joint Conference on Communications Technology (TJCC '07) (in CD-ROM), Nov. 2007.

3. S. Hanaoka and M. Yano, "Testbed System of Heterogeneous Wireless Network with Cognitive Radio," Proc. of the 12th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC 2009) (in USB Memory), Sep. 2009.

C. 研究会発表

1. 花岡誠之, 中原成人, 矢野正, 吉澤聡, 平田哲彦, "コグニティブ無線のための複数システム切替方式の提案," 電子情報通信学会ソフトウェア無線研究会, SR2006-42, pp. 5-10, 2006 年 11 月.
2. 花岡誠之, 山本淳二, 若山浩二, 吉澤聡, 平田哲彦, "コグニティブ無線による複数システム切替方式の基本実験," 電子情報通信学会無線通信システム研究会, RCS2006-215, pp. 121-125, 2007 年 1 月.

3. 花岡誠之, 山本淳二, 山岡綾史, 若山浩二, 吉澤聡, 平田哲彦, “コグニティブ無線による複数システム切替方式の基本評価,” 電子情報通信学会ソフトウェア無線研究会, SR2006-66, pp. 1-6, 2007 年 3 月.

4. 花岡誠之, 山本淳二, 山岡綾史, 若山浩二, 吉澤聡, 平田哲彦, “コグニティブ無線による複数システム切替方式のシミュレーション評価,” 電子情報通信学会ネットワークシステム研究会, NS2006-205, pp. 241-246, 2007 年 3 月.

5. 花岡誠之, 矢野正, “ [技術展示] コグニティブ無線通信技術に関する研究開発－コグニティブ無線通信における無線リソース制御技術－,” 電子情報通信学会ソフトウェア無線研究会, SR2007-21, pp. 9-12, 2007 年 7 月.

6. 花岡誠之, 山本淳二, 矢野正, 西村信治, “システム負荷を考慮したコグニティブ無線システムの評価,” 電子情報通信学会ソフトウェア無線研究会, SR2007-100, pp. 103-108, 2008 年 3 月.

7. 花岡誠之, 矢野正, 西村信治, “コグニティブ無線システムにおけるスループットのシミュレーション評価,” 電子情報通信学会ソフトウェア無線研究会, SR2008-19, pp. 7-13, 2008 年 7 月.

8. 花岡誠之, 矢野正, 西村信治, 三瓶政一, “コグニティブ無線システムにおける TCP スループットのシミュレーション評価,” 電子情報通信学会ソフトウェア無線研究会, SR2008-60, pp. 151-157, 2008 年 10 月.

D. 大会発表

1. 花岡誠之, 玉木諭, 桑原幹夫, 吉澤聡, 平田哲彦, “複数システムを統合するコグニティブ無線技術－無線 LAN ベースの環境認識技術についての検討－,” 電子情報通信学会総合大会, B-5-125, 2006 年 3 月.

2. 花岡誠之, 中原成人, 矢野正, 吉澤聡, 平田哲彦, “複数システムを統合するコグニティブ無線技術－実験機システムの基本構成－,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-17-6, 2006 年 9 月.

3. 花岡誠之, 山本淳二, 山岡綾史, 若山浩二, 吉澤聡, 平田哲彦, “複数システムを統合するコグニティブ無線技術－シミュレーションによる遅延時間評価－,” 電子情報通信学会総合大会, B-17-30, 2007 年 3 月.

4. 花岡誠之, 石川崇, 下川功, 片岡幹雄, 山本淳二, 矢野正, “複数システムを統合するコグニティブ無線技術－シミュレーション評価－,” 電子情報通信学会総合大会, B-17-30, 2008 年 3 月.

5. 花岡誠之, “異種無線システム統合制御のためのコグニティブ無線技術,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, BT-3-4, 2009 年 9 月.