The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	ユーザ指向型ワイヤレスエージェント通信方式に関する研究
Author(s)	森岡, 康史
Citation	大阪大学, 2009, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/621
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

ユーザ指向型
ワイヤレスエージェント通信方式に関する研究

森岡 康史

大阪大学大学院 工学研究科 電気電子情報工学専攻

2009年 1月

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小牧省三博士の御指導の下に，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．本研究の遂行にあたり，懇篤なる御指導，御鞭撻を賜った小牧省三教授に衷心より謝恩の意を表する次第である．

本論文をまとめるに際し，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，大阪大学大学院工学研究科電気電子情報工学専攻准教授塚本勝俊博士に懇切丁寧なる御教示，御助言を賜った．ここに深く感謝の意を表する次第である．

大阪大学大学院在学中より情報通信工学全般および本研究に関して御教示，御助言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教授滝根哲哉博士，同北山研一博士，同馬場口登博士，同井上恭博士，同河崎善一郎博士，ならびに大阪大学産業科学研究所教授鷲尾隆博士，同溝口理一郎博士をはじめとする諸先生方に厚く感謝申し上げる．

また，常日頃より熱心な御討論と貴重な御助言，御好意溢れる御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助教東野武史博士に心より感謝申し上げる．

また，研究の途上，有益な御助言と御協力，御激励を頂いた蓑田佑紀博士 (現パナソニック)，川口晃平氏 (現エヌ・ティ・ティ・ドコモ)，溝端竜也氏をはじめとする大阪大学大学院工学研究科電気電子情報工学専攻小牧研究室の諸兄に感謝申し上げる．

最後に，本研究遂行に際し，支え励ましてくれている家族ならびに関連の諸氏に感謝する所存である．

内容梗概

本論文は，ユーザに対して最適な無線通信リソースを提供することを目的としたユーザ指向型ワイヤレスエージェント通信方式に関する研究成果をまとめたものであり，以下の 6 章から構成される．

第 1 章は序論であり，本研究の背景および関連分野の研究動向について概説を行うとともに，本研究の占める位置と研究目的を明らかにする．

第 2 章では，ユーザ指向型ワイヤレスエージェント通信について説明を行う．まず，ユーザ指向の定義を行うことで，ユーザ指向型ワイヤレスエージェントが改善すべき指標を明らかにする．本論文で用いるユーザ指向の指標は，パケット損失率や遅延時間といった物理的なサービス品質である QoS (Quality of Service) と，サービスを受けるユーザがそのサービス品質に対して感じる満足度を表すユーザ体感品質，QoE (Quality of Experience) である．ユーザ指向型ワイヤレスエージェントはユーザに代わって適切に無線リソースを利用するエージェントであり，本論文で提案する 2 つの実現方法，無線端末に対して適切な接続先を選択し，無線リソースの獲得を行うアクセスポイント選択エージェントと，無線端末から送信されるパケット量を削減することで無線リソースの消費量を低減するパケット削減エージェントについて提案の背景と解決可能な問題点を述べる．

第 3 章では，アクセスポイント選択エージェントを提案する．本エージェントは複数のアクセスポイントから構成される大規模無線 LAN (Local Area Network) のサービスエリア内で異種アプリケーションサービスが混在する場合に，アプリケーションに応じて適切な無線リソースを獲得することでサービス品質の向上を実現する．異なるアプリケーションサービスが混在する場合，従来のようにそれぞれの特性と要求するサービス品質を考慮せずにアクセスポイントを選択すると，主に特定のアクセスポイントへ接続が集中することによって，パケット損失率や遅延時間の増加，スループットの低下といったサービス品質の著しい低下を招く．これに対してアクセスポイント選択エージェントはアプリケーションサービス毎の特性と要求するサービス品質を考慮してアクセスポイントを選択し，アクセスポイント間でアプリケーションサービスごとの負荷分散を行い，パケット損失率や遅延，スループットを改善することでそれぞれのサービス品質を改善する．本章では，計算機

シミュレーションを用いてサービス品質の評価を行い，本エージェントの有効性を示す．

第 4 章では第 3 章で提案したアクセスポイント選択エージェントの機能拡張を行い，複数のアクセスポイントから構成される大規模無線 LAN のサービスエリア内で異種アプリケーションサービスが提供される状況に加え，サービス品質を保証する機能を持つアクセスポイントと機能を持たないアクセスポイントが混在する場合でもそれぞれのアプリケーションサービスに適した機能を持つアクセスポイントを選択することでアクセスする無線端末が適切に無線リソースを獲得し，パケット損失率や遅延時間といったサービス品質の改善，そしてユーザ体感品質を向上するもう一つのアクセスポイント選択エージェントを提案する．異なるアプリケーションサービスと機能の異なるアクセスポイントが混在する場合には，アクセスポイント毎の機能の違いも考慮してアクセスポイントを選択する必要がある．例えば，高いサービス品質を要求するアプリケーションサービスに対しては，サービス品質の保証を行うことができるアクセスポイントを優先して選択すれば，一層のユーザ体感品質の向上が期待される．本章では，以上のような拡張型アクセスポイント選択エージェントを提案し，計算機シミュレーションを用いてユーザ体感品質とサービス品質の評価を行い，本エージェントの有効性を示す．

第 5 章では，無線端末毎の無線リソースの消費量を低減しつつ，ユーザ体感品質を向上するパケット削減エージェントを提案する．無線 LAN のアクセス制御方式である CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) では，輻輳時にパケットの送信が滞ることによりサービス品質が急激に低下するとともに，ユーザに対して均等に無線リソースが配分されないという問題が生じる．本エージェントは無線 LAN の輻輳を検出すると，送信するパケット量を削減することで無線リソースの消費量を低減し，サービス品質の急激な劣化を防ぐ．また，サービス品質の急激な劣化を防ぐことで，従来はユーザ体感品質が大きく劣化していたユーザに対して，ユーザ体感品質の向上を実現するとともに，一定の品質を維持しつつ収容可能な端末数の上限を改善する．計算機シミュレーションによるユーザ体感品質と収容端末数の上限について評価を行うことで，本エージェントの有効性を示す．

第 6 章は結論であり，本研究で得られた成果について総括を行う．

目 次

第 1 章 序論 1

1.1 ブロードバンドワイヤレス通信の現状 1

1.1.1 セルラ通信システム 2

1.1.2 WiMAX 通信システム 4

1.1.3 無線 LAN 通信システム 4

1.1.4 ワイヤレスエージェント技術 6

1.2 研究目的 7

1.3 論文構成 10

第 2 章 ユーザ指向型ワイヤレスエージェント 13

2.1 序言 13

2.2 ユーザ指向型ワイヤレスエージェントの概要 13

2.2.1 ユーザ指向の定義 13

2.2.2 ワイヤレスエージェントの概要 14

2.3 ユーザ指向型ワイヤレスエージェントの実現 17

2.3.1 アクセスポイント選択エージェント 17

2.3.2 パケット削減エージェント 18

2.4 結言 19

第 3 章 異種サービス混在環境におけるサービス品質向上のためのアクセスポイント選択エージェント 21

3.1 序言 21

3.2 異種サービス混在環境におけるアクセスポイント選択エージェント 23

3.2.1 アクセスポイント選択エージェントのシステム構成 23

3.2.2 アクセスポイント選択エージェントの動作 24

3.3 スループット公平性を考慮したリアルタイムサービス優先アルゴリズム 24

3.3.1 既存のアクセスポイント選択アルゴリズムの問題点 24

3.3.2 スループット公平性を考慮したリアルタイムサービス優先アルゴリズムのアクセスポイント選択基準 26
3.3.3 スループット公平性を考慮したリアルタイムサービス優先アルゴリズム 27
3.3.4 問題点の整理と考察 29
3.4 シミュレーションによる評価 34
3.4.1 シミュレーションモデル 34
3.4.2 非リアルタイムトラヒックのみが発生する場合における評価 (Case 1) 39
3.4.3 リアルタイムトラヒックのみが発生する場合における評価 (Case 2) 41
3.4.4 2 種類のトラヒックが等確率で発生する場合における評価 (Case 3) 44
3.5 結言 50

第 4 章 異種アクセスポイント混在環境におけるユーザ体感品質向上のためのアクセスポイント選択エージェント 53
4.1 序言 53
4.2 異種アクセスポイント混在環境におけるアクセスポイント選択エージェント 54
4.2.1 異種アクセスポイント混在環境におけるアクセスポイント選択エージェントのシステム構成 54
4.2.2 異種アクセスポイント混在環境におけるアクセスポイント選択エージェントの動作 55
4.3 ユーザ満足度指向アルゴリズム 56
4.3.1 異種アクセスポイント混在環境における既存のアクセスポイント選択アルゴリズムの問題点 56
4.3.2 ユーザ満足度指向アルゴリズムのアクセスポイント選択基準 57
4.3.3 ユーザ満足度指向アルゴリズム 59
4.4 シミュレーションによる評価 60

4.4.1 シミュレーションモデル 60
4.4.2 評価対象 64
4.4.3 均等トラヒック (Case 1) における平均 VoIP 推定 MOS 値評価 67
4.4.4 VoIP 中心トラヒック (Case 2) における平均 VoIP 推定 MOS 値評価 67
4.4.5 FTP 中心トラヒック (Case 3) における平均 VoIP 推定 MOS 値評価 68
4.4.6 平均 VoIP 推定 MOS 値の信頼区間評価 68
4.4.7 平均 VoIP パケットロス率と平均 VoIP 片方向遅延時間の評価 68
4.4.8 均等トラヒック (Case 1) における平均 FTP スループット評価 71
4.4.9 VoIP 中心トラヒック (Case 2) における平均 FTP スループット評価 73
4.4.10 FTP 中心トラヒック (Case 3) における平均 FTP スループット評価 73
4.4.11 平均 FTP スループットの信頼区間評価 74
4.5 結言 74

第 5 章 ユーザ体感品質向上のためのパケット削減エージェント 77
5.1 序言 77
5.2 パケット削減エージェント 78
5.2.1 パケット削減エージェントのシステム構成 78
5.2.2 パケット削減アルゴリズム 79
5.3 最大パケット抑制率の評価 80
5.3.1 パケットロス率と遅延時間に対する R 値の関係 81
5.3.2 端末数に対する平均パケットロス率と平均片方向遅延時間の評価 83
5.3.3 最大パケット抑制率の評価 86
5.4 シミュレーションによる評価 86
5.4.1 シミュレーション条件 86
5.4.2 平均パケットロス率の評価 88

5.4.3 平均片方向遅延時間の評価 88
5.4.4 平均 R 値の評価 91
5.4.5 収容端末数の評価 91
5.5 ハイブリッドパケット削減アルゴリズム 96
5.6 結言 97

第 6 章 結論 **99**

参考文献 **101**

本論文に関する原著論文 **111**
A 学会論文 111
B 国際会議発表 (査読有) 111
C 国内口頭発表 112
D 国内研究会発表 112

図 目 次

1.1 論文構成 11
2.1 ワイヤレスエージェントの概念 14
2.2 ワイヤレスエージェントの機能による分類 16
2.3 アクセスポイント選択エージェントの構造 17
2.4 パケット削減エージェントの構造 18
3.1 異種サービス混在環境におけるアクセスポイント選択エージェントのシステム構成 22
3.2 異種サービス混在環境におけるアクセスポイント選択エージェントの動作 23
3.3 既存のアクセスポイント選択アルゴリズムの問題点 25
3.4 スループット公平性を考慮したリアルタイムサービス優先アルゴリズムのフローチャート 27
3.5 異なる要求帯域を持つリアルタイムサービスが混在する場合の問題点 29
3.6 選択に収容端末数を用いる場合の問題点 32
3.7 シミュレーションエリアのモデル 34
3.8 接続される VoIP 端末数に対するパケットロス率と平均片方向遅延時間特性 37
3.9 非リアルタイムトラヒックのみが発生する場合の平均 FTP スループット 40
3.10 非リアルタイムトラヒックのみが発生する場合の FTP スループット公平性 40
3.11 リアルタイムトラヒックのみが発生する場合の平均 VoIP パケットロス率 42
3.12 提案アルゴリズムと既存アルゴリズムの重み付けの違い 43
3.13 リアルタイムトラヒックのみが発生する場合の平均 VoIP 片方向遅延時間 44
3.14 2 種類のトラヒックが等確率で発生する場合の平均 VoIP パケットロス率 (一様分布) 45

3.15 2種類のトラヒックが等確率で発生する場合の平均VoIP片方向遅延時間 (一様分布) 45
3.16 2種類のトラヒックが等確率で発生する場合の平均FTPスループット (一様分布) 47
3.17 2種類のトラヒックが等確率で発生する場合のFTPスループット公平性 (一様分布) 47
3.18 2種類のトラヒックが等確率で発生する場合の平均VoIPパケットロス率 (偏り分布) 49
3.19 2種類のトラヒックが等確率で発生する場合の平均VoIP片方向遅延時間 (偏り分布) 49
3.20 2種類のトラヒックが等確率で発生する場合の平均FTPスループット (偏り分布) 51
3.21 2種類のトラヒックが等確率で発生する場合のFTPスループット公平性 (偏り分布) 51
4.1 異種アクセスポイント混在環境におけるアクセスポイント選択エージェントのシステム構成 54
4.2 異種アクセスポイント混在環境におけるアクセスポイント選択エージェントの動作 55
4.3 機能の異なるアクセスポイントが混在する場合の問題点 56
4.4 QBSS Load Elementの構造 58
4.5 ユーザ満足度指向アルゴリズムのフローチャート 59
4.6 シミュレーションエリアのモデル 62
4.7 均等トラヒック (Case 1)，QAP比率低 (QAP 1/3) における平均VoIP推定MOS値 65
4.8 均等トラヒック (Case 1)，QAP比率中 (QAP 2/3) における平均VoIP推定MOS値 66
4.9 均等トラヒック (Case 1)，QAP比率高 (QAP 3/3) における平均VoIP推定MOS値 66
4.10 VoIP中心トラヒック (Case 2)，QAP比率低 (QAP 1/3) における平均VoIP推定MOS値 69

4.11 VoIP 中心トラヒック (Case 2)，QAP 比率中 (QAP 2/3) における平均 VoIP 推定 MOS 値 69
4.12 VoIP 中心トラヒック (Case 2)，QAP 比率高 (QAP 3/3) における平均 VoIP 推定 MOS 値 71
4.13 VoIP 中心トラヒック (Case 2)，QAP 比率高 (QAP 3/3) における平均 VoIP パケットロス率 72
4.14 VoIP 中心トラヒック (Case 2)，QAP 比率高 (QAP 3/3) における平均 VoIP 片方向遅延時間 72
4.15 VoIP 中心トラヒック (Case 2)，QAP 比率低 (QAP 1/3) における平均 FTP スループット 73
5.1 パケット削減エージェントのシステム構成 78
5.2 パケット削減アルゴリズムの状態遷移図 79
5.3 MAC-RTT の定義 80
5.4 パケットロス率と片方向遅延時間 T に対する R 値の関係 82
5.5 端末数に対する平均パケットロス率と平均片方向遅延時間の評価におけるシミュレーションモデル 84
5.6 端末数に対する平均パケットロス率と平均片方向遅延時間と両側 99% 信頼区間 85
5.7 性能評価のためのシミュレーションエリアのモデル 87
5.8 端末数に対する平均パケットロス率 89
5.9 端末数に対する平均片方向遅延時間 90
5.10 端末数に対する平均 R 値 92
5.11 端末数に対する QoS 達成端末率 93
5.12 RTS/CTS を用いる場合の R 値分布 94
5.13 RTS/CTS を用いない場合の R 値分布 94
5.14 パケット送出間隔ごとの QoS 達成端末率 96
5.15 ハイブリッドパケット削減アルゴリズムの QoS 達成端末率 97

表 目 次

3.1 各アクセスポイントの平均占有帯域と平均収容リアルタイムサービス端末数およびそれぞれの 99%信頼区間 31
3.2 IEEE802.11g のシミュレーションパラメータ 35
3.3 IEEE802.11e のシミュレーションパラメータ 35
3.4 各トラヒックのパラメータ 36
3.5 各 Case におけるアプリケーションに対する端末比と端末数 37
4.1 IEEE802.11g のシミュレーションパラメータ 61
4.2 IEEE802.11e のシミュレーションパラメータ 61
4.3 シチュエーションごとの AP と QAP の存在比 61
4.4 各フローのパラメータ 63
4.5 各 Case におけるトラヒックの存在比 63
4.6 均等トラヒック (Case 1) における平均 VoIP 推定 MOS 値の信頼区間最大値 70
4.7 VoIP 中心トラヒック (Case 2) における平均 VoIP 推定 MOS 値の信頼区間最大値 70
4.8 FTP 中心トラヒック (Case 3) における平均 VoIP 推定 MOS 値の信頼区間最大値 70
4.9 均等トラヒック (Case 1) における平均 FTP スループットの信頼区間最大値 75
4.10 VoIP 中心トラヒック (Case 2) における平均 FTP スループットの信頼区間最大値 75
4.11 FTP 中心トラヒック (Case 3) における平均 FTP スループットの信頼区間最大値 75
5.1 G.109 における R 値とユーザ満足度の関係 81
5.2 G.711 のシミュレーションパラメータ 82
5.3 片方向遅延時間に対し，$R \geq 80$ を満たすことのできる最大パケットロス率 82
5.4 IEEE802.11g のシミュレーションパラメータ 83

5.5 パケットロス率急増点における平均パケットロス率，平均片方向遅延時間とそれぞれの両側 99%信頼区間 85
5.6 パケットロス率急増点における平均パケットロス率と両側 99%信頼区間 89
5.7 パケットロス率急増点における平均片方向遅延時間と両側 99%信頼区間 90
5.8 パケットロス率急増点における平均 R 値と両側 99%信頼区間 92
5.9 パケットロス率急増点における QoS 達成端末率と両側 99%信頼区間 93
5.10 それぞれの手法における最大収容端末数 95
5.11 仮定するパケット送出間隔 95

略 語 表

3.5G	3.5th Generation
3.9G	3.9th Generation
3G	3rd Generation
3GPP	3rd Generation Partnership Project
3GPP2	3rd Generation Partnership Project 2
4G	4th Generation
AAC	Available Admission Capacity
AC	Access Category
ACK	Acknowledgement
AIFSN	Arbitration Inter Frame Space Number
Ajax	Asynchronous JavaScript + eXtended Markup Language
AP	Access Point
APSA	Access Point Selection Agent
ATC	Available Transmission Capacity
CDMA2000	Code Division Multiple Access 2000
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
CU	Channel Utilization
CUR	Channel Utilization Ratio
CW	Contention Window
DIFS	Distributed Inter Frame Space
EDCA	Enhanced Distributed Channel Access
eMOS	estimated MOS
EV-DO	Evolution Data Only（Optimized）
FCS	Frame Check Sequence
FTP	File Transfer Protocol
FWA	Fixed Wireless Access
HCCA	HCF Controlled Channel Access
HCF	Hybrid Coordination Function
HRFA	High Rate First Association
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access

HSPA+	High Speed Packet Access Evolution
ICT	Information Communication Technology
IFS	Inter Frame Space
IMT-2000	International Mobile Telecommunications - 2000
IMT-Advanced	International Mobile Telecommunications - Advanced
IP	Internet Protocol
IPv6	Internet Protocol version 6
ISM	Industrial Scientific and Medical
ITU	International Telecommunication Union
ITU-R	ITU – Radio communication sector
ITU-T	ITU – Telecommunication standardization sector
LAN	Local Area Network
LLC	Logical Link Control
LTE	Long Term Evolution
MAC	Media Access Control
MAC-RTT	Media Access Control layer Round Trip Time
MAC-SAP	Media Access Control – Service Access Point
MAN	Metropolitan Area Network
mAPSA	mixed AP environment supported APSA
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MoA	MOS oriented Association
MOS	Mean Opinion Score
MSPR	Maximum Suppression Packet Ratio
NRSTA	Non-Real-time service Station
NRT	Non-Real-Time
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OSI	Open Systems Interconnection
PCM	Pulse Code Modulation
PLCP	Physical Layer Convergence Protocol
PLR	Packet Loss Rate

PPS	Packet Per Second
PPTS	Periodic Packet Transmission Suppression
PRA	Packet Reduction Agent
QAP	QoS supported Access Point
QBSS	QoS Basic Service Set
QoE	Quality of Experience
QoS	Quality of Service
R	Transmission Rate
R_{max}	Maximum Transmission Rate
RPFA	Real-time Prioritized Fairness throughput Association
RSSI	Received Signal Strength Indication
RSTA	Real-time service Station
RT	Real-Time
RTS/CTS	Request To Send / Clear To Send
SaaS	Software as a Service
SC	Station Count
SIFS	Short Inter Frame Space
SIP	Session Initiation Protocol
SLA	Service Level Agreement
STA	Station
TCP	Transmission Control Protocol
TCP/IP	Transmission Control Protocol / Internet Protocol
TG	Task Group
UDP	User Datagram Protocol
VoIP	Voice over Internet Protocol
W-CDMA	Wide-band Code Division Multiple Access
w/ RTS/CTS	transmission with RTS/CTS
w/o RTS/CTS	transmission without RTS/CTS
WG	Working Group
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WWW	World Wide Web

第1章　序論

1.1　ブロードバンドワイヤレス通信の現状

無線通信技術は，その飛躍的な発展により，現代の情報通信社会において欠かせない通信技術の一つになっている．特に，高速で大容量の通信を実現するブロードバンドワイヤレス通信技術の発展と普及は，そのバックボーンを支えるネットワークの高速化，大容量化と相まってめざましいものがある．最も普及している携帯電話を例に取ると，これまでは回線交換を用いた音声通信が主に提供されてきたが，わが国では1999年にサービスを開始したi-modeサービス[1]を筆頭に，パケット交換を用いた高速なデータ通信サービスが広まっており，現在では数Mbpsの通信速度がサービスとして提供されている．またわが国における携帯電話の加入者数は2008年10月末で1億加入[2]を超えており，携帯電話は今や日常的に利用されているブロードバンドワイヤレス通信技術と言うことができる．その他にも，主なブロードバンドワイヤレス通信技術として，無線LAN (Local Area Network) [3]，WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) [4]などがあり，それぞれの特性に応じて様々に利用されている．

これらのブロードバンドワイヤレス通信技術の中ではフルIP (Internet Protocol) ネットワーク化が進められており，今後はコアネットワークからアクセス系に至るまでがIPというプロトコルでシームレスに接続されたネットワークが実現される[5]．とりわけアクセス系におけるブロードバンド化とIP化が進むにつれて，アクセス系に無線を利用したモバイル環境においても，インターネットを通じて提供されるサービスを有線環境と同様に利用できるようになると考えられる．インターネットで提供されるサービスは，ネットワークのブロードバンド化に伴って，従来のWWW (World Wide Web) や電子メールなどの，小容量のテキストベースサービスだけではなく，VoIP (Voice over Internet Protocol) やIP電話などのリアルタイム音声通信サービス，YouTubeやニコニコ動画などの動画配信サービスの利用が台頭し，さらにはWWWにおいてもリッチコンテンツやAjax (Asynchronous JavaScript + eXtended Markup Language) を用いたSaaS (Software as a Service)，そしてクラウドコンピューティングなど，様々な大容量マルチメディアサービスへと変化している．現在これらのサービスは主に有線通信もしくは無線LANといっ

た近距離のブロードバンドワイヤレス通信での利用が中心であるが，今後は携帯電話サービスなど広範囲でのブロードバンドワイヤレス通信のさらなる高速化・大容量化によって，あらゆるブロードバンドワイヤレス通信環境でも有線通信と同様の利用が可能となるものと考えられる．

これらのブロードバンドワイヤレス通信システムは，それらがサービスを展開するエリアのサイズによって大きく2つに分類することができる．1つは携帯電話で用いられるセルラ通信システムや，今後サービスの展開が見込まれる WiMAX などの都市規模，全国規模といった広範囲でサービスを展開するシステムであり，もう1つは無線 LAN などの局所的に比較的狭い範囲でサービスを展開するシステムである．

1.1.1 セルラ通信システム

ワイヤレス通信システムの中でも，最も広範囲のサービス展開を担うのが携帯電話で用いられるセルラ通信システムである．わが国における携帯電話の加入者は2008年10月末で1億513万加入を超え [2]，全世界でも2008年内に40億加入に達すると予測されており [6]，セルラ通信システムはわが国のみならず世界で最も普及しているワイヤレス通信システムであると言える．セルラ通信システムは元来，回線交換による音声通信サービスのみを提供するシステムであったが，その後パケット交換を用いたデータ通信サービスが提供されるようになった．セルラ通信システムにおけるデータ通信サービスは次々と高速化が行われ，現在わが国で主に利用されている IMT-2000 (International Mobile Telecommunications 2000) [7] と呼ばれる第3世代 (3rd Generation, 3G) のセルラ通信システムは，最大で数 Mbps のデータ通信速度を実現しており，広範囲でブロードバンドワイヤレス通信を提供できる．

IMT-2000 は ITU-R (International Telecommunication Union - Radio communication sector) [8, 9] にて世界共通規格として標準化が進められたが，最終的には単一の方式に統一されず，6方式が勧告されている．特にわが国では，3GPP (3rd Generation Partnership Project) [10] と呼ばれるプロジェクトでシステム仕様の検討がなされた W-CDMA (Wide-band Code Division Multiple Access) と 3GPP2 (3rd Generation Partnership Project 2) [11] と呼ばれるプロジェクトでシステム仕

様の検討がなされたCDMA2000 (Code Division Multiple Access 2000) の2方式を利用したサービスが提供されている．初期のW-CDMAで提供される通信速度は最大でも2Mbps程度であったが，その下りリンクのさらなる高速化を実現する3.5世代 (3.5th Generation, 3.5G) と呼ばれるHSDPA (High Speed Downlink Packet Access) 技術によって，最大で約14Mbpsの通信速度を実現できるようになった．その後HSDPA技術ではさらなる高速化が行われ，HSPA Evolution (High Speed Packet Access Evolution, HSPA+) と呼ばれる高速化技術によって，下りリンクで最大42Mbpsの提供が予定されている．また，CDMA2000においても，CDMA2000 1xEV-DO Rev.A (Evolution Data Only (Optimized) Revision A) と呼ばれる下りリンクの高速化技術によって最大3.1Mbpsの通信速度が実現できるようになり，最大40Mbpsの通信速度を持つモバイルWiMAXと併せた異種無線システム統合ネットワーク化が進められる予定である．

今後のセルラ通信システムは，3.5Gから3.9世代 (3.9th Generation, 3.9G) と呼ばれるLTE (Long Term Evolution) [12–14] へと移行が行われる予定である．LTEは3GPPの主導で標準化が進められており，3Gの周波数帯域内でOFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) やMIMO (Multiple Input Multiple Output) などの，WiMAX，無線LANあるいは次世代携帯電話システムである第4世代 (4th Generation, 4G) で用いられる技術を取り込むことによって，下りリンクで100Mbps以上，上りリンクで50Mbps以上の通信速度，また制御遅延が100ミリ秒以内，伝送遅延が片道5ミリ秒以内といった，高速かつ低遅延なアクセス系を目指して検討が進められている．LTEはパケット通信のみをサポートし，音声はVoIPとして提供される予定であり，コアネットワークからアクセス系に至るフルIPネットワークサービスとしてインターネットとの親和性がますます強くなるものと期待される．

また，LTEの後に4Gとして実現されるIMT-Advanced (International Mobile Telecommunications - Advanced) では，最大で1Gbps程度の超高速大容量通信の実現が予定されている．また，IPv6 (Internet Protocol version 6) にネイティブで対応することにより，他のブロードバンドワイヤレス通信システムとの連携が容易になり，異種無線システム統合ネットワークや後述のワイヤレスエージェント技術との親和性もますます高くなるものと期待されている．

1.1.2 WiMAX 通信システム

WiMAX は，セルラ通信システムより中規模の都市規模 (Metropolitan Area) の範囲の通信をカバーする無線 MAN (Metropolitan Area Network) のアクセスシステムとして登場した．WiMAX は IEEE802.16WG (Working Group) で標準化が進められ，都市部を中心としてブロードバンドワイヤレスアクセスの提供を可能とする固定系のワイヤレス通信技術 (Fixed Wireless Access, FWA) として標準化が行われた．その後 TG e (Task Group e) によって，IEEE802.16-2004 にモビリティ機能の追加が行われ，移動しながらでも WiMAX による通信が可能なモバイル WiMAX と呼ばれる IEEE802.16e の標準化が完成した．WiMAX は IEEE802.16-2004 と IEEE802.16e を併せることによって，静止状態から高速移動状態までをサポートするブロードバンドワイヤレス通信の実現を可能とする．FWA を提供する IEEE802.16-2004 準拠の固定 WiMAX では，最大で 37Mbps の通信速度が実現され，IEEE802.16e に準拠するモバイル WiMAX では，最大 75Mbps の通信速度が実現される．また，今後実現される次世代 WiMAX の IEEE802.16m では 130Mbps 以上の通信速度が目標とされている．

モバイル WiMAX は IMT-2000 の方式の 1 つとして勧告されており，また次世代 WiMAX も IMT-Advanced の一端を担う方式としてとして勧告される予定である．このことから，セルラ通信システムと WiMAX 通信システムの連携は既に容易なものとなっており，次世代のブロードバンドワイヤレス通信においては，セルラ通信システムと共存していくものと考えられる．

1.1.3 無線 LAN 通信システム

最も近距離のブロードバンドワイヤレスアクセスを提供するのが無線 LAN システムである．中でも IEEE802.11WG で標準化が進められた無線 LAN は広く普及しており，TG b, TG a, TG g で標準化された IEEE802.11b[15]，IEEE802.11a[16]，そして IEEE802.11g[17] が現在主に用いられている．

最も初期に標準化が完了した IEEE802.11b では，通信以外の産業科学医療用途として解放されていた ISM (Industrial Scientific and Medical) バンドの一つである 2.4GHz 帯を利用し，CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision

Avoidance) 方式のアクセス方式を用いて最大 11Mbps の通信速度を達成可能である．IEEE802.11b と同時期に標準化が完了した IEEE802.11a は 5GHz 帯で OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 技術を用いることにより，物理レイヤで最大 54Mbps の通信を実現する規格である．2.4GHz 帯でこの OFDM 技術を用い，IEEE802.11b との後方互換性を意識して標準化が行われたのが IEEE802.11g であり，IEEE802.11a と同様に 54Mbps の通信速度を実現している．

54Mbps という高速な通信速度を実現した IEEE802.11 系無線 LAN システムではあるが，有線通信のさらなるブロードバンド化，そして利用されるコンテンツのデータ量の増大に伴って，無線 LAN においてもさらなる通信速度の高速化が一つの課題として浮上した．そこで，2003 年に TG n が立ち上げられ，IEEE802.11n 標準 [18] としてさらなる高速化が検討されてきた．IEEE802.11n では MAC-SAP (Media Access Control - Service Access Point) において 100Mbps 以上のスループットを実現することを目指している．また，パーソナルコンピュータ以外への機器への適用も目的とされており，さらなる低消費電力化が行われる予定となっている．IEEE802.11n では，物理レイヤにおいて MIMO 技術を用いることで通信速度の高速化を実現するものと考えられる．

高速化のほかにも，無線 LAN に対する重要な課題として QoS (Quality of Service) 制御が挙げられる．初期の無線 LAN ではベストエフォート型のサービスが提供され，サービス品質 QoS については保証が行われてこなかった．しかし，インターネット，そして無線 LAN でのマルチメディアサービスの広まりに伴って，無線 LAN においても QoS の保証という要求が高まってきた．そこで，無線 LAN においてもユーザが要求する QoS を MAC (Media Access Control) プロトコルレベルで保証するために，IEEE802.11WG は 2005 年に IEEE802.11e[19] の標準化を行った．IEEE802.11e では新しい MAC レイヤプロトコルとして HCF (Hybrid Coordination Function) が規定されており，2 種類の QoS 制御方式が定められている．1 つは競合型のチャネルアクセスによって優先制御型 QoS 保証を行う EDCA (Enhanced Distributed Channel Access) であり，もう 1 つは非競合型のチャネルアクセスによってパラメータ保証型 QoS 保証を行う HCCA (HCF Controlled Channel Access) である．IEEE802.11e では，これらの制御に基づいて無線 LAN での QoS 保証を行うことが可能となっている．

無線LANは，セルラ通信システムやWiMAX通信システムに比べて出力が小さく，サービスエリアが狭い反面，手軽に敷設が可能であるとともに高速な通信速度が達成可能であるという特徴がある．さらに，免許が不要な周波数帯を利用しているため，大学やオフィス，家庭内でのネットワーキングや，空港やカフェなどの公共スペースで高速なインターネットへのアクセスを提供するホットスポットサービスへの適用が広がっている．

1.1.4 ワイヤレスエージェント技術

1.1.3節までに述べたように，ブロードバンドワイヤレス通信の拡大はめざましいものがある．それに伴って，電波資源の効率的な利用と複数のブロードバンドワイヤレス通信システムを柔軟に利用することの必要性が高まってきている．わが国のu-japan政策[20]でも述べられているように，ブロードバンドワイヤレス通信システムも含めたICT (Information Communication Technology) は今後ますます遍在化が進み，これまで通信機器とは思われていなかったものも含め，あらゆる人や物が結びつき，利用者のニーズや利便性に応じたネットワークの柔軟な利用が進むと考えられる．このように，ネットワークを柔軟かつ有効利用するために，エージェント技術と呼ばれる技術が提案されている[21]-[62]．特にワイヤレス通信において働き，複数のワイヤレスネットワークを協調させ，柔軟かつ公平にワイヤレスネットワークを利用することで電波リソースをはじめとする各種資源の有効利用を目指すとともに，ユーザ個人の満足度の最適化，ひいては社会全体の厚生の最大化を図るエージェントをワイヤレスエージェントと呼ぶ．

ワイヤレスエージェントはOSI (Open Systems Interconnection) 参照モデル[63, 64]における物理層からアプリケーション層まで遍く存在し，レイヤ間を協調させるものである．さらに，ワイヤレスエージェントが存在する場所も，ユーザの端末やサーバ，そしてネットワークに至るまで幅広く存在し，それぞれが分散協調関係にある．それらは機能面においても幅広い機能を持ち，例えば通信事業者の運用スタイルを定義するオペレーションスタイル，ユーザの満足度を高めるための運用方針を定義するユーザスタイル，そして電波の運用指針などを定義するレギュレーションスタイルのそれぞれのスタイルに対する支援を行うエージェントに分類できる．ワイヤレスエージェントは，ユーザの意志や好みから決定される行動規範とな

るユーザスタイルと，通信事業者の伝送容量，品質や料金によって定義されるオペレーションスタイルとの整合を行い，さらに電波の運用指針などを定義するレギュレーションスタイルとの間の整合，調整を行うものとして定義できる．

ワイヤレスエージェントは，様々な目的を持つエージェント群から構成されており，その目的や存在する位置によって分類，定義が行われている [23]．例えば主に OSI 参照モデルの物理レイヤ，MAC レイヤに位置し，各種周波数資源，無線帯域の運用と最適化を行う周波数資源エージェントや，ネットワークレイヤ以上に存在し，異種ネットワークの統合運用を行うネットワークエージェントやユーザの満足度を最大化することを目的とするユーザセントリックエージェント，そして全てのレイヤに渡ってクロスレイヤで協調した制御を行うワイヤレスシステムエージェントなどが存在する．

これらのワイヤレスエージェント技術を用いることにより，ネットワークの柔軟な利用，そして u-japan 政策で掲げられている，あらゆる人や物が結びつき，利用者のニーズや利便性に応じてユニバーサル，ユーザオリエンテッド，そしてユニークな ICT の実現が可能となると考えられる．

1.2 研究目的

前節までに述べた携帯電話や無線 LAN といったブロードバンドワイヤレス通信技術は既に広く普及しており，今後は WiMAX などの新たなブロードバンドワイヤレス通信技術の登場，またワイヤレスエージェントを用いた異種ワイヤレス通信システムの柔軟な利用によって，ユーザは場所や時間などにとらわれず適切なブロードバンドワイヤレス通信システムを利用できるようになると考えられる．

しかし，上記のようなブロードバンドワイヤレス通信システムの普及によるワイヤレス通信で利用されるサービスの多様化，そしてこれらのブロードバンドワイヤレス通信システムの柔軟な利用によるユーザのサービス利用状況の多様化は，ユーザの利便性と多様なニーズをより強く意識したサービス提供の必要性を生む．具体的には，ユーザオリエンテッドな QoS 保証，すなわちサービス品質に対するユーザの満足度を保証することが必要となる．

携帯電話のような端末–基地局間を単一オペレータが集中的に管理できるネットワークの場合，オペレータがユーザに対してサービス品質とそのサービスに対する

満足度を保証することは比較的容易であった．しかし，複数のワイヤレス通信ネットワークを柔軟に組み合わせて運用する，いわゆるヘテロジニアスネットワークと呼ばれる運用形態では，単一オペレータがすべてのワイヤレスネットワークを集中管理することはできず，自律分散制御に基づいてサービス品質とその満足度を保証することが必要である．また同時に，ヘテロジニアスネットワークでは複数のワイヤレスシステムが運用されることから，ネットワーク内で取り扱われる端末数が膨大になり，集中管理が難しいという理由も同時に挙げられる．その他にも，TCP/IP (Transmission Control Protocol / Internet Protocol) [63, 64] を用いた通信では分散制御が基本となり，ネットワークのフル IP サービス化に伴って，用いられる通信プロトコル自体も自律分散制御を主体としたものに移行すると考えられるため，やはり自律分散制御に基づいたサービス品質，満足度の保証が必要である．

ワイヤレス通信システムにおいて，ユーザが享受するサービス品質を向上させるためには，無線リソースが必要である．無線リソースとはユーザが利用することのできる電波の資源であり，具体的には電波の周波数帯域と送信電力，またその利用時間によって定義される [23]．一般的に，ユーザ 1 人に割り当てられる無線リソースが大きければ大きいほど，画像や動画像の再生品質，音声通話品質やダウンロードに要する時間など，そのユーザが享受する通信サービスの品質は高くなる．しかし，ワイヤレス通信システムでは多数のユーザが一つの無線リソースを共有しているため，1 人のユーザが利用可能な量は限られる．そこで，できるだけ多くのユーザが高品質な通信サービスを享受できるように無線リソースの獲得を行う，無線リソースマネジメントが必要となる．

一方で，ユーザが所望するサービス品質や，そのサービス品質に対する満足度は主観的なものであり，ユーザが使用しているアプリケーションやユーザ自身の嗜好に依存する [48, 59]．また，その品質はユーザが利用できるワイヤレス通信システムの状況や，ユーザが通信を行っている環境に依存する [65, 66]．従って，ワイヤレス通信環境においてユーザの満足度を向上させるためには，ユーザの置かれた状況，周囲の環境，そしてそのとき使用しているアプリケーションに対するユーザの要求満足度に応じた適切な無線リソースをそれぞれのユーザが獲得する必要がある．

しかし，ユーザの要求満足度といった情報は，OSI 参照モデルの第 7 層であるアプリケーションレイヤでしか得ることができない．これに対して，ユーザが利用で

きるワイヤレス通信システムの状況といった情報は，ほとんどが第2層であるデータリンクレイヤ以下を対象としているため，それぞれのレイヤを個別に対象にすると適切な無線リソースマネジメントを行うことができない．

そこで，1.1.4節で述べた，すべてのレイヤに渡ってクロスレイヤで協調した制御を行うワイヤレスエージェント技術を用いてユーザ指向の通信を実現する，ユーザ指向型ワイヤレスエージェントを提案する．ワイヤレスエージェントはネットワーク内でユーザの期待するサービスの種類や要求品質，要求満足度を理解し，提供されるサービスがユーザにとって満足のいくものとなるよう様々な処理と制御，調整を自律分散的に行うもので，その主体はソフトウェアプログラムである [22, 23]．また，ユーザ指向とはパケット損失率や遅延時間といった物理的パラメータによって定義されるサービス品質を向上させることで，ユーザが体感するサービスの主観的な品質を表す QoE (Quality of Experience) [67] を向上させることを意味する．

本論文では，ユーザ指向型ワイヤレスエージェントとして，無線リソースの効率的な獲得を行うアクセスポイント選択エージェントと，無線リソースの効率的な利用を行うパケット削減エージェントの2つを新たに提案する．これらの提案エージェントは，ヘテロジニアスネットワークのように自律分散的に運用されるワイヤレスネットワークに対して適用する．

アクセスポイント選択エージェントは端末においてユーザの通信路環境や利用アプリケーション，アクセスポイントの機能に応じて接続先のアクセスポイントあるいは基地局を選択することで無線リソースの効率的かつ高品質な獲得を行い，サービス品質そして QoE を向上するものである．まず，ユーザが利用するサービスの違いを考慮してサービス品質の向上を実現するため，異なるサービスが混在して運用される場合のアクセスポイント選択エージェントを提案する [50, 53, 54]．本エージェントは，利用されるサービスに応じた適切なアクセスポイントを選択して接続を行うことで，サービス品質を向上することを可能とする．

次に，異なるサービスに加えて異なる機能を持つアクセスポイントが混在して運用される場合に QoE を向上するためのアクセスポイント選択エージェントを提案する [49, 52, 56, 58]．このエージェントはユーザが利用するサービスに応じて，異なる機能を持つアクセスポイントの中から適切なアクセスポイントを選択して接続を行うことで，サービス品質を向上するとともに，QoE を向上する．

さらに，無線リソースを多くのユーザで効率的に使うために，1ユーザあたりの無線リソースの使用量を削減するためのパケット削減エージェントを提案する[55, 57]．このエージェントはユーザが送信するパケットの量を，QoEを損なわない範囲で削減することで，無線リソースの使用量を削減し，無線リソースを共有する多くのユーザで効率的に使用することを可能とする．これらのユーザ指向型ワイヤレスエージェントを用いて通信を行うことで，ユーザが要求するサービスに対して満足度を向上させる高品質な通信を提供しながら，効率的な通信を実現することができる．

1.3 論文構成

本論文では，ユーザに対して最適な無線通信リソースを提供することを目的としたユーザ指向型ワイヤレスエージェント通信方式に関する研究成果を以下の5章にまとめる．また，その構成を図1.1に示す．

第2章では，ユーザ指向型ワイヤレスエージェント通信について説明を行う．まず，ユーザ指向の定義を行うことで，ユーザ指向型ワイヤレスエージェントが改善すべき指標を明らかにする．本論文で用いるユーザ指向の指標は，パケット損失率や遅延時間といった物理的なサービス品質であるQoSと，サービスを受けるユーザがそのサービス品質に対して感じる満足度を表すユーザ体感品質，QoEである．ユーザ指向型ワイヤレスエージェントはユーザに代わって適切に無線リソースを利用するエージェントであり，本論文で提案する2つの実現方法，無線端末に対して適切な接続先を選択し，無線リソースの獲得を行うアクセスポイント選択エージェントと，無線端末から送信されるパケット量を削減することで無線リソースの消費量を低減するパケット削減エージェントについて提案の背景と解決可能な問題点を述べる．

第3章では，アクセスポイント選択エージェントを提案する．本エージェントは複数のアクセスポイントから構成される大規模無線LANのサービスエリア内で異種アプリケーションサービスが混在する場合に，アプリケーションに応じて適切な無線リソースを獲得することでサービス品質の向上を実現する．異なるアプリケーションサービスが混在する場合，従来のようにそれぞれの特性と要求するサービス品質を考慮せずにアクセスポイントを選択すると，主に特定のアクセスポイントへ

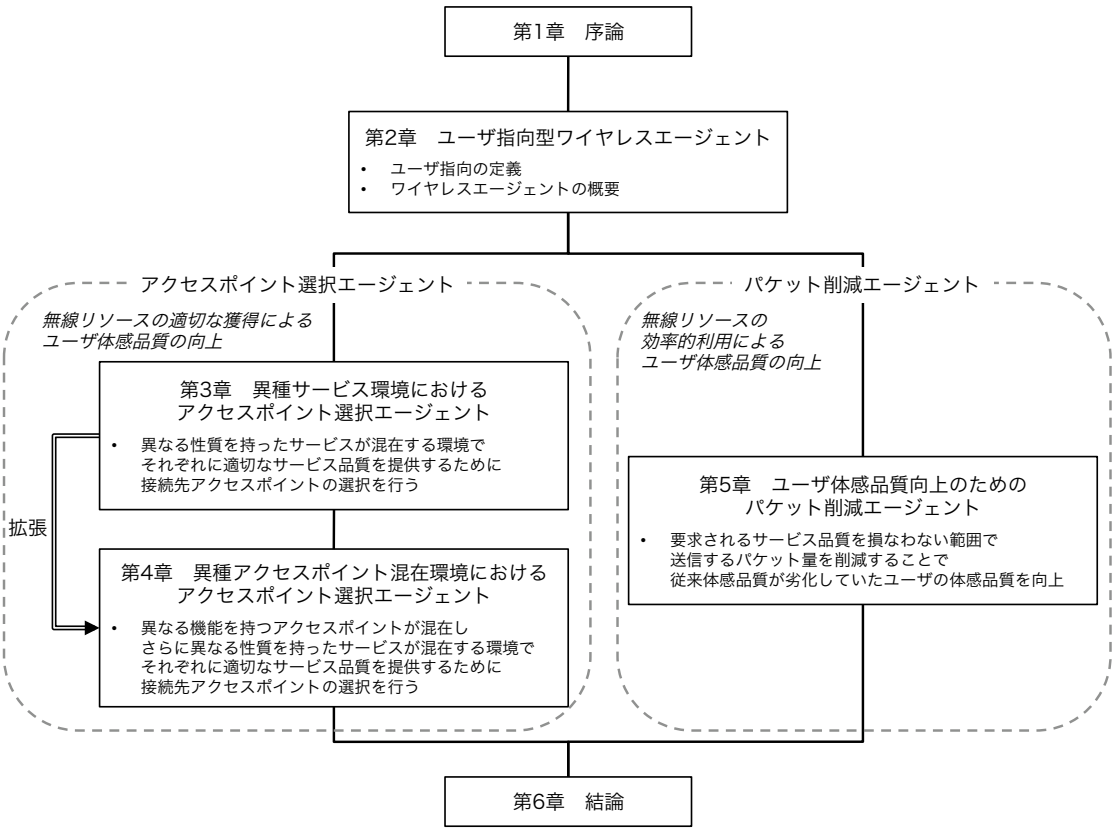


図 1.1: 論文構成

接続が集中することによって，パケット損失率や遅延時間の増加，スループットの低下といったサービス品質の著しい低下を招く．これに対してアクセスポイント選択エージェントは，アプリケーションサービス毎の特性と要求するサービス品質を考慮してアクセスポイントを選択することで，アクセスポイント間でアプリケーションサービスごとの負荷分散を行い，パケット損失率や遅延，スループットを改善することでそれぞれのサービス品質を改善する．本章では，計算機シミュレーションを用いてサービス品質の評価を行い，本エージェントの有効性を示す．

第 4 章では第 3 章で提案したアクセスポイント選択エージェントの機能拡張を行い，複数のアクセスポイントから構成される大規模無線 LAN のサービスエリア内で異種アプリケーションサービスが提供される状況に加え，サービス品質を保証する機能を持つアクセスポイントと機能を持たないアクセスポイントが混在する場合でもそれぞれのアプリケーションサービスに適した機能を持つアクセスポイント

を選択することでアクセスする無線端末が適切に無線リソースを獲得し，パケット損失率や遅延時間といったサービス品質の改善，そしてユーザ体感品質を向上するもう一つのアクセスポイント選択エージェントを提案する．異なるアプリケーションサービスと機能の異なるアクセスポイントが混在する場合には，アクセスポイント毎の機能の違いも考慮してアクセスポイントを選択する必要がある．例えば，高いサービス品質を要求するアプリケーションサービスに対しては，サービス品質の保証を行うことができるアクセスポイントを優先して選択すれば，一層のユーザ体感品質の向上が期待される．本章では，以上のような拡張型アクセスポイント選択エージェントを提案し，計算機シミュレーションを用いてユーザ体感品質とサービス品質の評価を行い，本エージェントの有効性を示す．

第 5 章では，無線端末毎の無線リソースの消費量を低減しつつ，ユーザ体感品質を向上するパケット削減エージェントを提案する．無線 LAN のアクセス制御方式である CSMA/CA では，輻輳時にパケットの送信が滞ることによりサービス品質が急激に低下するとともに，ユーザに対して均等に無線リソースが配分されないという問題が生じる．本エージェントは無線 LAN の輻輳を検出すると，送信するパケット量を削減することで無線リソースの消費量を低減し，サービス品質の急激な劣化を防ぐ．また，サービス品質の急激な劣化を防ぐことで，従来はユーザ体感品質が大きく劣化していたユーザに対して，ユーザ体感品質の向上を実現するとともに，一定の品質を維持しつつ収容可能な端末数の上限を改善する．計算機シミュレーションによるユーザ体感品質と収容端末数の上限について評価を行うことで，本エージェントの有効性を示す．

第 6 章は結論であり，本研究で得られた成果について総括を行う．

第2章　ユーザ指向型ワイヤレスエージェント

2.1　序言

本章では，ユーザ指向型ワイヤレスエージェントの概念，目標とするところ，ならびにそれらの実現に必要な機能について説明を行う．まず，“ユーザ指向”の定義とワイヤレスエージェントの概要について述べ，その後ユーザ指向型ワイヤレス通信を実現するユーザ指向型ワイヤレスエージェントとして，本論文で提案する無線リソースの適切な獲得を行うアクセスポイント選択エージェントと，無線リソースの消費量を低減するパケット削減エージェントについて，それぞれの提案に至った背景ならびに機能の概要，そして第3章から第5章との関連を述べる．

2.2　ユーザ指向型ワイヤレスエージェントの概要

2.2.1　ユーザ指向の定義

ユーザ指向，とりわけユーザ指向の通信とはユーザの状況や要望に応じて行われる柔軟な通信という意味であり，ユーザセントリック，あるいはユーザオリエンテッドと呼ばれることもある [20, 68]．ユーザ指向であることの評価方法として，ユーザ体感品質である QoE (Quality of Experience) やユーザ効用を用いた評価が提案されている．本研究では QoE とは例えば画像の再生品質の良さ，音声通話品質の良さ，コンテンツのダウンロードの速さといったユーザエンドでのアプリケーションの品質によって評価されるものであり，ユーザ効用はこれらの品質を個々のユーザの嗜好やコンテンツの内容までを加味した満足度で評価する指標 [23] であるとする．

ユーザ指向の評価指標としては，主に通話品質を評価する主観的手法である MOS (Mean Opinion Score) が用いられている．一方，サービス品質 (Quality of Service, QoS) の評価方法としては，音声であればR値 [69]，動画像であればITU-T J.247[70] といった客観的指標が用いられているが，これらのサービス品質の指標からユーザ指向の評価指標である MOS を推定することが可能となっている．

本研究では，ユーザ指向を “QoS の指標を改善すると共に QoE の指標である MOS 値の改善を目的とすること” と定義する．

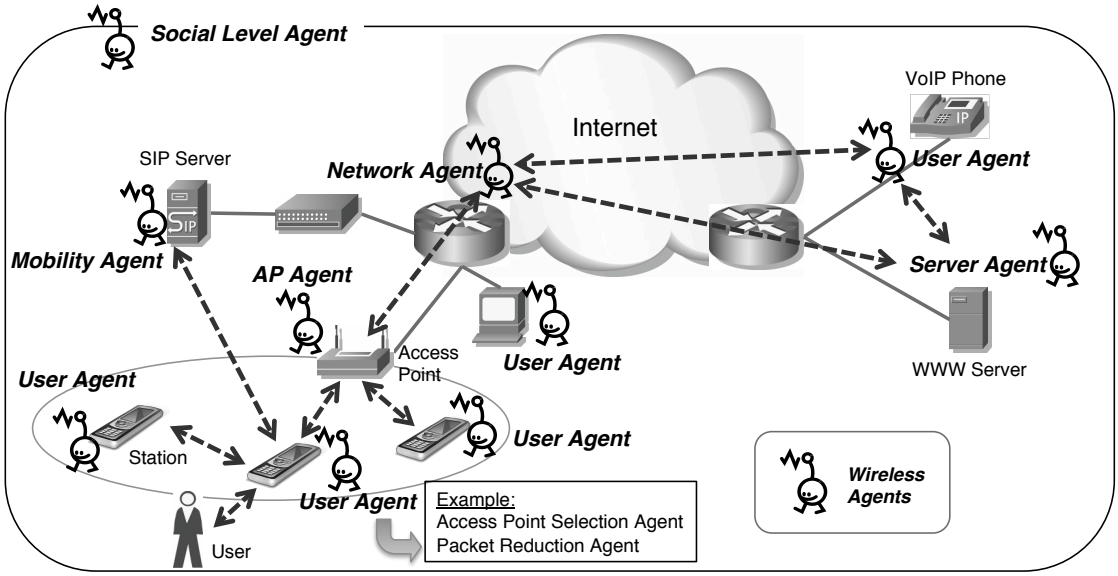


図 2.1: ワイヤレスエージェントの概念

2.2.2 ワイヤレスエージェントの概要

様々なブロードバンドワイヤレス通信の利用が進む中で，電波資源の効率的な利用，各種ブロードバンドワイヤレス通信の柔軟かつ安定な利用，そしてユーザの満足度の向上と社会厚生の向上のために，複数のワイヤレスネットワークが協調し，無線リソースをはじめとする各種リソースの有効利用を目指すものがワイヤレスエージェントである．ワイヤレスエージェントは無線アクセス部分に存在するにとどまらず，OSI (Open Systems Interconnection) 参照モデル [63, 64] の物理レイヤからアプリケーションレイヤあるいはそれ以上のレイヤに至るまで幅広く存在する．ワイヤレスエージェントはこれらのレイヤ間を協調させるように動作し，また存在場所，そして機能に至るまで分散協調関係で動作する．その概念を図 2.1 に示す．

ワイヤレスエージェントは主にユーザの “代理人” として動作するソフトウェアプログラムである．サービスを利用するユーザはそれぞれ，意思や好みを有しており，その意思や好みに応じた行動規範を “ユーザスタイル” と呼ぶ．一方で，サービスを提供する通信事業者もそれぞれ異なった伝送容量，品質，遅延時間や料金体系といった運用指針を有しており，これを “オペレーションスタイル*” と呼ぶ．従

*各通信事業者が開示する SLA (Service Level Agreement) はこの一種と考えられる

来，ユーザは自身のユーザスタイルに沿ったオペレーションスタイルを持つ通信事業者をユーザ自身で選択していたが，今後ワイヤレスネットワークの多様化が進むにつれて，高速かつ自動的にユーザスタイルとオペレーションスタイル間の整合を行う必要があり，ユーザに代わってその処理を行う代理人がワイヤレスエージェントである．

図 2.1 ではインターネットを介して無線 LAN (Local Area Network) システムと有線システムが接続されている．無線端末と有線端末には User Agent が実装され，通信に際してユーザの意思に基づいてスタイルの最適化を行う．User Agent として端末に実装されるエージェントの一部として，本論文ではアクセスポイント選択エージェント (Access Point Selection Agent) とパケット削減エージェント (Packet Reduction Agent) を扱う．User Agent は端末に実装されるが，その端末自身で動作が完結することは少なく，周囲の環境を把握するために他の User Agent やアクセスポイント (Access Point, AP) に実装されている AP Agent (Access Point Agent) と協調して情報を入手し，必要であれば SIP (Session Initiation Protocol) サーバ等に実装される Mobility Agent を介して無線アクセス環境の変更とネットワークの移動を行う．また，AP より先のネットワーク経路に対しては各ルータなどのネットワークエレメントに配置される Network Agent を通じて最適経路を確保するとともに，サービスを提供するサーバに実装される Server Agent との間で最適なサービス提供の形態についてのネゴシエーションを行うことで，ユーザスタイルとオペレーションスタイルとの整合を実現する．

ワイヤレスエージェントを受け持つ機能によって分類すると，図 2.2 のように示すことができる．周波数資源エージェントは，図 2.1 における User Agent と AP Agent の機能に相当し，ヘテロジニアスネットワークにおける各種無線リソースの一体運用とリソースの利用効率の最適化を目指すものである．特に集中管理が難しいユビキタスかつヘテロジニアスなワイヤレスネットワークにおいて，各ノードが自律分散的に無線リソースを獲得し，高品質かつ効率的な無線リソースの利用を目指すものである．ネットワークエージェント，移動エージェントは異種ネットワークを移動しながらサービスを利用する際に，ハンドオーバを用いてシームレスかつ高品質なサービスの継続を目指すものであり，図 2.1 における User Agent, AP Agent，Mobility Agent の機能に相当する．ネットワークエージェント，移動

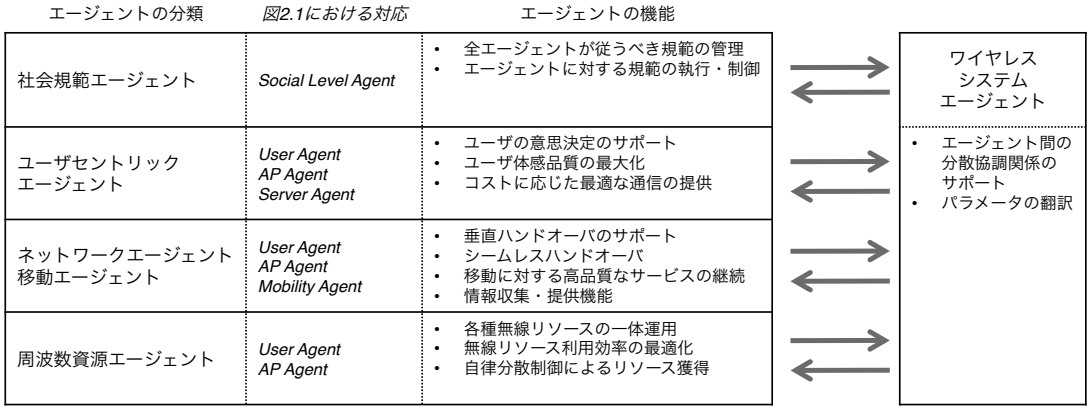


図 2.2: ワイヤレスエージェントの機能による分類

エージェントが目指すものの一部分として，IEEE802.21[71] で規格化されているメディア独立ハンドオーバ機能や，IEEE P1900.4[72] で規格化が進められている最適なネットワーク選択のための情報収集と情報提供機能といったものが相当する．さらにユーザ寄りに位置するのが，ユーザセントリックエージェントと呼ばれるものであり，図 2.1 における User Agent，AP Agent，Server Agent の機能に相当する．ユーザセントリックエージェントは，ユーザの状況や嗜好に応じた意思決定をサポート [73] し，ユーザ指向のサービスを実現するためのエージェントである．ユーザセントリックエージェントの目的は，オペレータスタイルとユーザスタイルの整合や協調を行うことにあり，具体的な目的の一つとして，ユーザに対するコストや無線リソースを提供するオペレータに対するコストなどを考慮して，ユーザに最適な方法でサービスを提供することが挙げられる．さらに上位に位置するのが社会規範エージェントと呼ばれるエージェントであり，図 2.1 における Social Level Agent に相当する．このエージェントはユーザやオペレータの規範となる情報を管理し，それぞれのエージェントが規範に則って動作するように制御を行うことを目指す．また，これらの上位レイヤから下位レイヤに渡るエージェントの協調関係を管理するのがワイヤレスシステムエージェントと呼ばれるエージェントであり，それぞれのエージェントが認識するパラメータを，他のエージェントが理解できるパラメータに翻訳することでそれぞれの分散協調関係をサポートする．

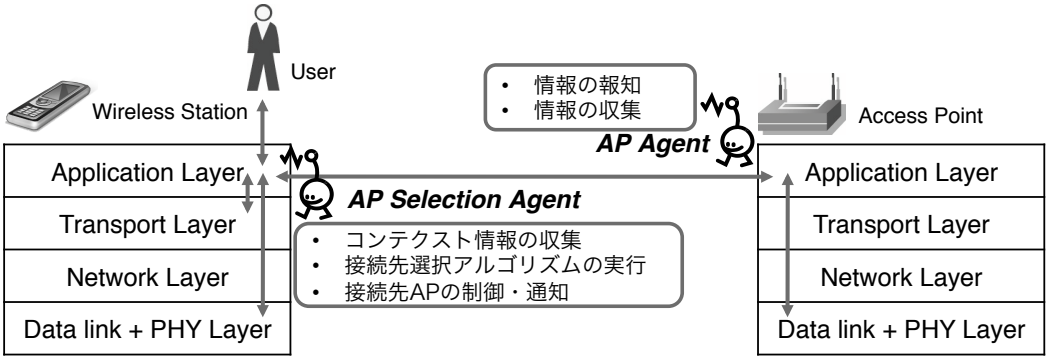


図 2.3: アクセスポイント選択エージェントの構造

2.3 ユーザ指向型ワイヤレスエージェントの実現

2.3.1 アクセスポイント選択エージェント

図 2.3 に端末にて適切な無線リソースの獲得を行うアクセスポイント選択エージェント (AP Selection Agent) の構造を示す．提案するアクセスポイント選択エージェントは図 2.1 における User Agent の一部として実装され，図 2.2 におけるユーザセントリックエージェントと周波数資源エージェントの機能を持つ．図 2.3 に示すように，アクセスポイント選択エージェントは下位レイヤが理解できないユーザの状況，サービスの種類などの上位レイヤのコンテクスト情報を下位レイヤが理解できるパラメータに翻訳することで無線リソースの獲得を行う．アクセスポイント選択エージェントは端末に存在し，自律分散的に AP の選択を行うが，選択のための情報を得るために AP に実装されるエージェントであるアクセスポイントエージェント (AP Agent) と協調して動作する．

アクセスポイント選択エージェントには入力情報となる AP の状況や AP がサポートする機能，またユーザが利用するサービスの種類に応じたアクセスポイント選択アルゴリズムが必要である．本論文では第 3 章でユーザの利用するサービスに応じて無線 LAN のアクセスポイントの選択を行うアクセスポイント選択エージェントとそのアルゴリズムを提案する．一方，第 4 章ではユーザの利用するサービスに加えて，AP がサポートする機能に応じて無線 LAN の AP を選択するアクセスポイント選択エージェントとそのアルゴリズムを提案する．これらのアクセスポイ

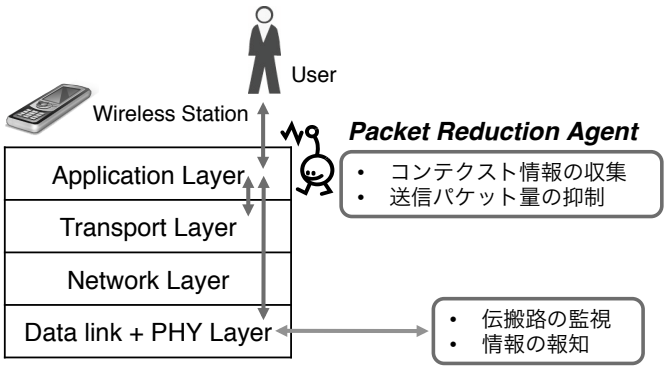


図 2.4: パケット削減エージェントの構造

ント選択エージェントは端末に適切な無線リソースの獲得を指示することで，QoS の向上，QoE の向上を達成する．

2.3.2 パケット削減エージェント

図 2.4 に無線リソースの消費量の低減を行うパケット削減エージェントの構造を示す．提案するパケット削減エージェントは図 2.1 における User Agent の一部として実装され，図 2.2 における周波数資源エージェント，ユーザセントリックエージェントとワイヤレスシステムエージェントの機能を持つ．図 2.4 に示すように，端末のアプリケーション層に実装されるエージェントであるパケット削減エージェント (Packet Reduction Agent) は，自身の無線インターフェースの情報を周囲にコンテクストとして通知すると共に，周囲の状況とサービスの種類といった上位レイヤのコンテクスト情報に基づいてパケットの送信削減量を決定する．その後，決定した情報を下位のレイヤであるデータリンクレイヤが理解できるパラメータに翻訳して制御を行い，無線リソースの消費量の低減を行う．

第 5 章では無線 LAN に適用可能なパケット削減エージェントを提案する．無線 LAN では CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) による制御のため，輻輳時にパケットの送信が滞り，サービスの品質が急激に低下する問題が発生する．提案するパケット削減エージェントは，サービスの種類に応じて適切な量の送信パケットを削減することで全体の無線リソースの消費量を低減させ，従来無線リソースを獲得できなかったユーザに無線リソースを提供することで

QoE を向上させ，収容端末数を向上させる．

2.4 結言

本章ではユーザ指向型ワイヤレスエージェントの概要として，ユーザ指向の定義，ワイヤレスエージェントの概念について説明を行った．また，ユーザ指向型ワイヤレス通信を実現するワイヤレスエージェントとして，本論文で提案する無線リソースの適切な獲得を行うアクセスポイント選択エージェントと，無線リソースの消費量の低減を行うパケット削減エージェントについて，それぞれの提案に至った背景ならびに機能の概要，そして第 3 章から第 5 章との関係について述べた．

第3章　異種サービス混在環境におけるサービス品質向上のためのアクセスポイント選択エージェント

3.1　序言

大規模無線 LAN (Local Area Network) で負荷分散を行い，端末 (Station, STA) の集中による QoS (Quality of Service) の低下を防ぐために，様々な方式が提案されており，ネットワーク内に存在する制御用のサーバなどを用いて STA のアソシエーションを制御する集中制御方式 [74–78] と，STA が自律分散的にアソシエーション先のアクセスポイント (Access Point, AP) を選択する分散制御方式 [52, 53, 79–85] に大別することができる．しかし，これらの手法はいずれのサービスに対してもトランスポート層プロトコルとして UDP (User Datagram Protocol) を用いる場合を対象としている．一般に，VoIP (Voice over Internet Protocol) などの RT (Real-Time) サービスは UDP を用いて伝送されることが多いが，データ転送などの NRT (Non-Real-Time) サービスは UDP ではなく TCP (Transmission Control Protocol) を用いて伝送されることが多い．TCP はウィンドウ制御によって，可能な範囲で伝送速度が上がるように動作する．そのため無線 LAN においてはウィンドウ制御の結果として TCP は AP の空き帯域を埋め尽くすように動作し，AP に TCP サービスが 1 つでも接続されている場合は，その AP の空き帯域はほぼ 0 を示すことになる．しかし実際には TCP サービスの存在によって AP の空き帯域が 0 を示している場合であっても，新たな TCP サービスや UDP サービスの接続は可能であり，その場合には既に存在している TCP サービスと新たに接続するサービスの間で帯域を分け合うことになる．AP の選択に空き帯域の情報を用いる既存の手法では，空き帯域が 0 を示している AP に対してはそれ以上の接続を試みることができず，TCP サービスが存在によって空き帯域が 0 を示している場合には適切な AP を選択することができない．

そこで本章では VoIP に代表される UDP を用いた RT サービスと，FTP (File Transfer Protocol) に代表される TCP を用いた NRT サービスが混在した環境で，双方に対して適切な QoS を提供するために適切な AP を選択するアクセスポイント選択エージェント (Access Point Selection Agent, APSA) とその AP 選択アルゴリ

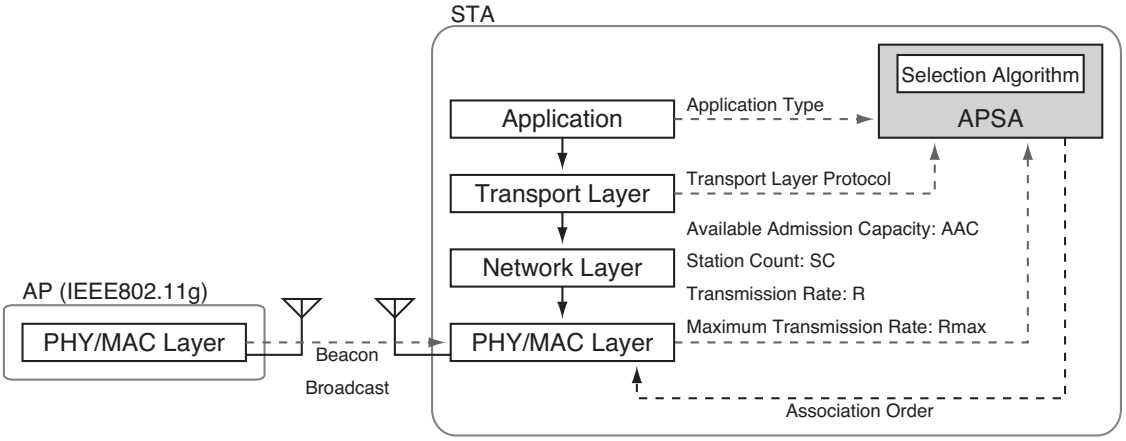


図 3.1: 異種サービス混在環境におけるアクセスポイント選択エージェントのシステム構成

ズムである RPFA (Real-time Prioritized Fairness throughput Association) アルゴリズムを提案する．本章では，RT サービスの QoS の指標として PLR (Packet Loss Rate) と遅延時間，NRT サービスの QoS の指標としてスループットを用いる．異なるサービスに対してそれぞれ QoS を考慮するために，提案 APSA は IEEE802.11e に準拠した複数の AP から構成される無線 LAN を適用先とし，RT サービスでは RT サービスに対する空き帯域と AP の伝送レート，NRT サービスでは RT サービスに対する空き帯域と収容 STA 数，AP の伝送レートに基づいて AP の選択を行うことで，従来想定されていなかった，TCP を用いた NRT サービスが混在する環境でも RT サービス，NRT サービス双方に対して適切な QoS 保証を実現する．また，提案 APSA は分散制御方式であり，STA が自律分散的に AP を選択する．以下の節では APSA と RPFA アルゴリズムの説明を行うとともに，その有効性を QualNet[86] を用いた計算機シミュレーションより示す．

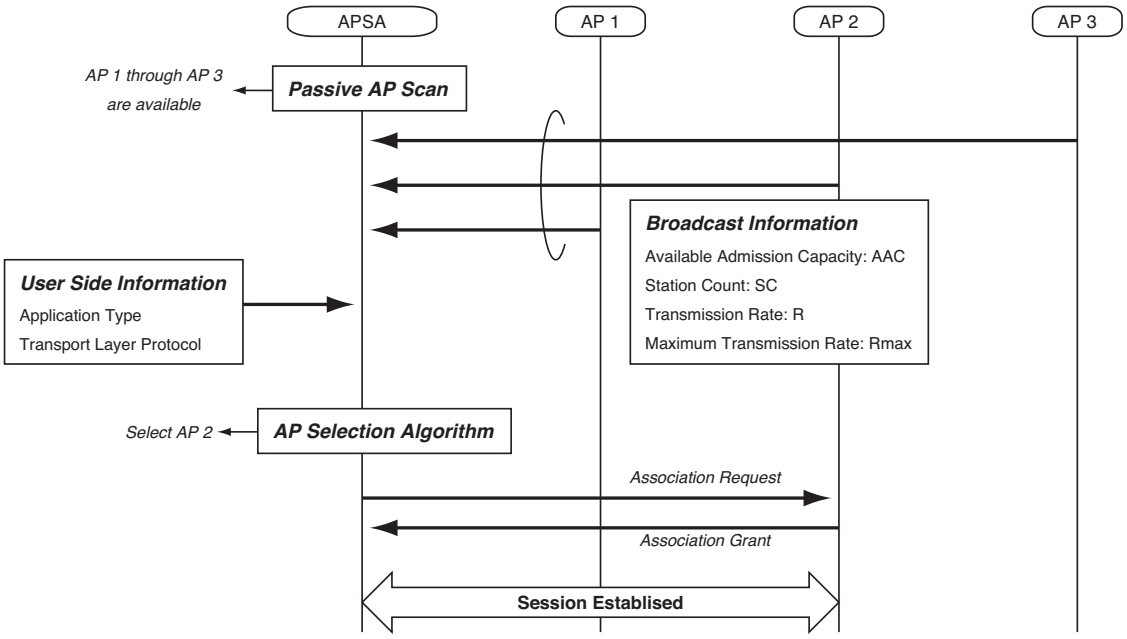


図 3.2: 異種サービス混在環境におけるアクセスポイント選択エージェントの動作

3.2 異種サービス混在環境におけるアクセスポイント選択エージェント

3.2.1 アクセスポイント選択エージェントのシステム構成

図3.1に異種サービス混在環境におけるアクセスポイント選択エージェントAPSAのシステム構成を示す．IEEE802.11eが実装されたAP (QoS supported Access Point, QAP) は定期的にビーコンフレームによって自身のMAC (Media Access Control) レイヤ，物理レイヤに関する情報をブロードキャストしており，STAはその情報を受信した上でAPSAに伝える．ここで，ブロードキャストされる情報は受け入れ可能なリアルタイム系トラヒック量を示すAvailable Admission Capacity (AAC)，接続している端末数を示すStation Count (SC)，そして伝送に利用できるレートを示すTransmission Rate (R) と，APが持つ最大の伝送レートであるMaximum Transmission Rate (R_{max}) である．AAC，SCについてはIEEE802.11eのQBSS (QoS basic service set) Load Elementを用いて報知され，RとR_{max}についてはBeacon FrameのSupported Ratesフィールドを用いて報知される．加えて，APSAは端末で利用されているアプリケーションからアプリケーションの種類

(Application Type) を，トランスポートレイヤからは利用しているトランスポートレイヤプロトコル (Transport Layer Protocol) を取得し，AP 選択アルゴリズム (AP Selection Algorithm) を用いて接続先の AP を判断した上で，MAC レイヤに対して接続先 AP へのアソシエーション要求を伝える．

3.2.2　アクセスポイント選択エージェントの動作

図 3.2 に APSA の具体的な動作を示す．APSA はまず，MAC レイヤに対して周囲の AP をスキャンするように命じ，どの AP が利用可能かを取得する．次に，利用可能と判断した AP からブロードキャストされる情報を収集し，AP の利用状況や利用可能な伝送レートについての情報を取得する．その後，ユーザが利用する STA の情報として，利用されているアプリケーションの種類，またトランスポートレイヤのプロトコルを取得し，それらの情報を総合して，AP 選択アルゴリズムが接続先の AP を判断する．図 3.2 の例では AP 2 を選択し，その後選択した AP に対して接続要求を送信し，接続が受け入れられた後にセッションを開始する．

3.3　スループット公平性を考慮したリアルタイムサービス優先アルゴリズム

前節で述べた APSA 上で動作する AP を選択するためのアルゴリズムとして，本節ではスループット公平性を考慮したリアルタイムサービス優先アルゴリズムである RPFA アルゴリズムを提案する．RPFA アルゴリズムは，RT サービスの QoS 保証を優先しつつ，NRT サービスに対してはスループットの公平性を実現する．

以下の節で既存の AP 選択アルゴリズムの問題点を明らかにし，その問題点を解決する RPFA アルゴリズムについて述べる．

3.3.1　既存のアクセスポイント選択アルゴリズムの問題点

図 3.3 を用いて既存の AP 選択アルゴリズム [52, 53, 79–85] を RT サービスと TCP を用いた NRT サービスの混在環境で用いる場合に生じる問題点について述べる．RT サービスのトラヒックとして固定サイズの UDP トラヒック，NRT サービスのトラヒックとして TCP トラヒックを仮定する．AP に十分な帯域の余裕があれば

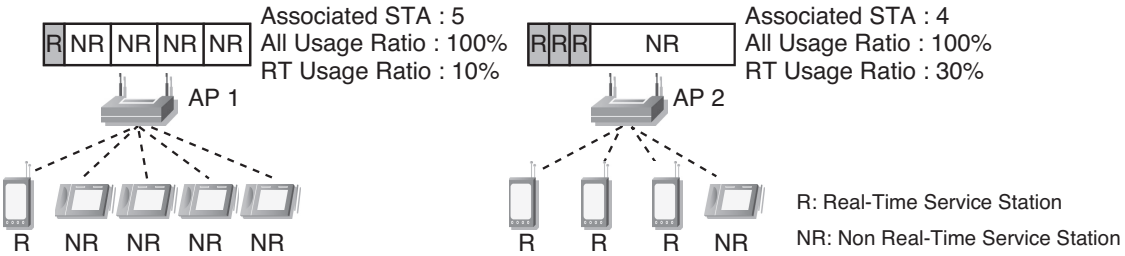


図 3.3: 既存のアクセスポイント選択アルゴリズムの問題点

UDP トラヒックには要求した帯域だけを割り当てられる．一方，TCP トラヒックは UDP トラヒックが割り当てられた帯域の残りを，TCP トラヒックを用いる STA の間で均等に分けるように動作する．ここで，各 AP で RT サービスのトラヒックが占有する合計の帯域の割合を RT 利用率 (RT Usage Ratio)，全てのトラヒックが占有する合計の帯域の割合を全体利用率 (All Usage Ratio) と定義する．

図 3.3 に示す状況では，AP 1 が収容する STA 数 (Associated STA) は 5，AP 2 が収容する STA 数は 4 であり，AP 1 の RT 利用率は 10%，全体利用率は 100%である．一方，AP 2 の RT 利用率は 30%，全体利用率は AP 1 と同じく 100%である．

収容 STA 数に基づいて AP を選択するアルゴリズム [81, 82] を用いると，RT サービスを利用する STA (RSTA) と NRT サービスを利用する STA (NRSTA)，そのどちらに対しても AP 2 を選択する．しかし RT サービスの負荷分散という点では，RSTA は AP 1 に収容するのが適切である．新たに発生した RSTA を AP 1 に収容することで，AP 1 の RT 利用率は 20%となり，AP 間の RT サービスの負荷分散を実現できる．一方で NRT サービスの負荷分散という点では，NRSTA は収容 STA 数の少ない AP 2 に収容するのが適切である．新たに発生した NRSTA に割当が見込める帯域は AP 1 で 18%，AP 2 で 30%であり，AP 2 に収容することで NRSTA はより多くの帯域の割当が見込める．

HRFA (High Rate First Association) [85] や，空き帯域に基づいて AP を選択するアルゴリズム [52, 53] は，RT サービスと NRT サービスのどちらもが固定レートの UDP トラヒックであると仮定し，RT サービスに対しては RT 利用率を基準として用い，NRT サービスに対しては全体利用率を基準として用いる．これらのアルゴリズムを FTP のような可変レート TCP トラヒックを生じる NRT サービスが存

在する環境で用いた場合，RSTAに対しては適切なAP 1を選択できるが，NRSTAに対してはAP 1，AP 2のいずれもが全体利用率100%を示すため，適切に収容先のAPを選択できない．

このことからTCPを用いたNRTサービスが混在する環境でAPを選択する際には，RSTAに対してはRT利用率を主な基準として選択することが適切であり，一方NRSTAに対してはRT利用率から計算されるNRTサービスが利用可能な帯域と収容NRSTA数を主な基準として選択することで，NRSTAに対しても適切なAPを選択できる．

3.3.2　スループット公平性を考慮したリアルタイムサービス優先アルゴリズムのアクセスポイント選択基準

提案するRPFAアルゴリズムは，前節で明らかにした問題を解決し，既存のアルゴリズムでは対応できなかった，FTPに代表される可変レートのTCPトラヒックを生じるNRTサービスと，VoIPに代表される固定レートのUDPトラヒックを生じるRTサービスが混在する環境で双方に適切なQoSを提供することを目的とする．

以上の目的を達成するために，RPFAアルゴリズムではRSTAに対して，

- RT利用率,
- APの伝送レート,

NRSTAに対して，

- RT利用率,
- 収容NRSTA数,
- APの伝送レート,

を選択基準として用いることが望ましい．RT利用率はIEEE802.11eのビーコンフレームを構成するQBSS Load Elementに含まれるAACフィールドから取得する．AACフィールドはRTサービスのトラヒックについて，1秒あたり収容可能な残り時間を32μs単位で通知する．すなわち，AAC=0は1秒あたり収容可能なRTサービスに対する残り時間は0秒で，これ以上RTサービスは収容できないことを表し，

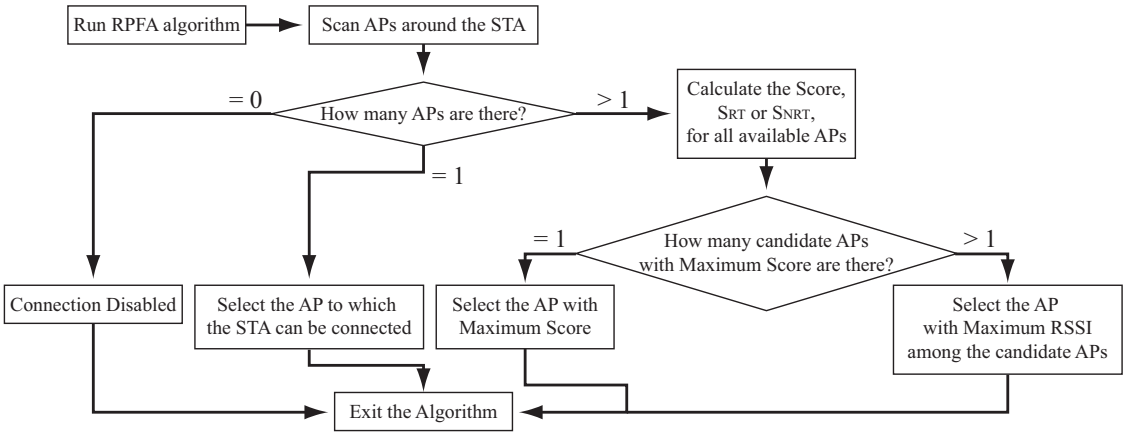


図 3.4: スループット公平性を考慮したリアルタイムサービス優先アルゴリズムのフローチャート

AAC=31250 は 1 秒すべてに RT サービスを収容可能であることを表す．NRSTA の選択基準に用いる収容 NRSTA 数は IEEE802.11e の規定のビーコンからは取得できず，新たなビーコンを実装する必要がある．そこで，RPFA アルゴリズムでは収容 NRSTA 数の代わりに収容 STA 数を選択基準として用いる．収容 STA 数は同じく QBSS Load Element に含まれる SC フィールドから取得できる．これらの情報は AP がビーコンフレームを送出する間隔で送出され，STA で取得できる．また，無線の伝搬環境に応じて AP の伝送レートを変化させるマルチレート環境に対応するために，RSTA，NRSTA のどちらに対しても AP の伝送レートを選択基準として用いる．

3.3.3 スループット公平性を考慮したリアルタイムサービス優先アルゴリズム

図 3.4 に RPFA アルゴリズムのフローチャートを示す．アルゴリズムが起動すると，まず周囲にある AP の状況をスキャンし，利用可能な AP をアソシエーション候補 AP とする．アソシエーション候補 AP が複数ある場合には各 AP に対して次に述べるスコアを計算し，最大のスコアを持つ AP を選択する．また，最大スコアを持つ AP が複数発生した場合は，その中で RSSI (Received Signal Strength Indication) 値が最も高い AP を選択する．

RPFA アルゴリズムではアソシエーション候補 AP が複数ある場合，M 個のア

ソシエーション候補AP，AP$[i]$ $(1 \leq i \leq M)$ に対してスコアを計算する．RSTAに対しては式(3.1)でスコア $S_{RT}[i]$ を計算し，最大となるAPを選択する．

$$S_{RT}[i] = \frac{AAC[i]+1}{31251} \cdot \frac{R[i]}{R_{\max}} \tag{3.1}$$

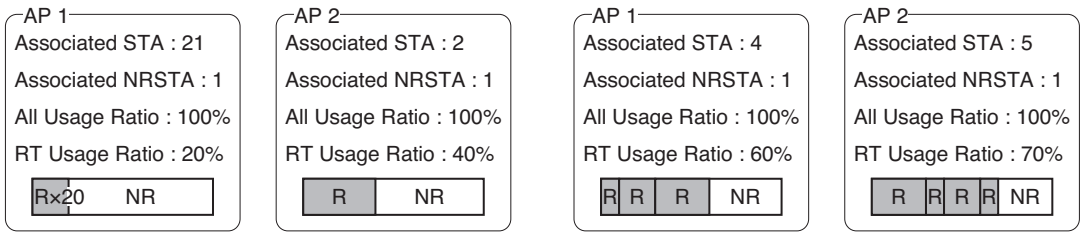
ここで，$AAC[i]$ はAP$[i]$ におけるAACフィールドの値 $(0 \leq AAC[i] \leq 31250)$ を示し，$R[i]$ はAP$[i]$ で利用可能な最大の伝送レート，$R_{\max}$ はアソシエーション候補APの中で利用可能な最大の伝送レート，$R_{\max} = \max(R[i] \mid 1 \leq i \leq M)$ を表す．式(3.1)の前半，$AAC[i]$ に関する項はRTトラヒックの収容可能時間による重みを表す．ここで分子を $AAC[i]+1$ とするのは，$AAC[i]=0$ の場合も後半の項で計算される伝送レートによる重みを反映させるためである．また，分子 $AAC[i]+1$ をその最大値である31251で除することで重みを正規化する．式(3.1)の後半はAPの伝送レートによる重みを表し，$R[i]$ を $R_{\max}$ で除することでアソシエーション候補APの中でのAP$[i]$ の伝送レートを正規化する．

一方，NRSTAについても同様にスコア $S_{NRT}[i]$ を計算し，最大となるAPを選択する．$S_{NRT}[i]$ は割当を期待できる最小の帯域を表し，式(3.2)，(3.3)で与えられる．

$$\begin{aligned} \text{For } AAC[i] &= 31250 \\ S_{NRT}[i] &= \frac{R[i]}{R_{MAX}} \cdot \frac{1}{N_{STA}[i]+1} \end{aligned} \tag{3.2}$$

$$\begin{aligned} \text{For } AAC[i] &< 31250 \\ S_{NRT}[i] &= \frac{AAC[i]+1}{31251} \cdot \frac{R[i]}{R_{MAX}} \cdot \frac{1}{N_{STA}[i]} \end{aligned} \tag{3.3}$$

$AAC[i], R[i], R_{MAX}$ は $S_{RT}[i]$ と同様であり，$N_{STA}[i]$ はAP$[i]$ の収容STA数を表す．式(3.2)に示す，$AAC[i]=31250$，すなわちRSTAが存在せず，すべての帯域をNRSTAが利用可能なとき，新たに接続を試みるNRSTAが割当を期待できる帯域は全帯域を $N_{STA}[i]+1$ で除したものとなる．一方，式(3.3)に示す $AAC[i]<31250$，すなわち1端末以上のRSTAが存在する場合，NRSTAはRSTAが利用している以外の帯域を利用可能である．IEEE802.11eのビーコンからはRSTA数は取得できないため，APの収容STAのうちRSTAが1端末であり，残りが全てNRSTAであると仮定して得られる，新たに接続するNRSTAが割当を期待できる帯域の最小値，すなわち最悪値を用いると，NRTサービスが利用可能な帯域を $N_{STA}[i]$ で除したも



(a) 特に小さい要求帯域を持つリアルタイムサービスが偏在する場合　(b) 各リアルタイムサービスがほぼ等しく分配される場合

図 3.5: 異なる要求帯域を持つリアルタイムサービスが混在する場合の問題点

のとなる．最悪値を用いることで NRSTA は自身の QoS を悪化させることのない AP を選択できるため，NRSTA はこの値を期待できる伝送速度の重みとして利用する．また，伝送レートによる重み付けは $S_{RT}[i]$ と同様である．RPFA アルゴリズムは，RSTA に対しては RT 利用率と伝送レートに基づいて AP を選択し，NRSTA に対しては RT 利用率と収容 STA 数，伝送レートに基づいて選択することで，前節で述べた問題点を解決する．

しかしながら，RPFA アルゴリズムはアソシエーション時に異なる要求帯域を持つ RT サービスが混在し，特に小さい要求帯域を持つ RT サービスが混在する場合に適切な AP 選択ができない可能性がある．また，NRSTA に対して収容 NRSTA 数ではなく収容 STA 数を選択基準として用いるため，適切な AP 選択ができない可能性がある．加えて，接続後には新たな STA が接続することによる環境の変化や，外乱による通信環境の変化によって，最初に選択した AP が適切ではなくなる可能性がある．これらの問題に対する検討を次節以降で行う．

3.3.4 問題点の整理と考察

異なる要求帯域を持つリアルタイムサービスが混在する場合の問題点

図 3.5 に示すように，RPFA アルゴリズムでは異なる要求帯域を持つ RSTA が混在し，RT 利用率が低いにも関わらず収容 STA 数が多い場合に問題が生じる可能性がある．図 3.5(a) のように，特に小さい要求帯域を持つ RSTA が混在し，AP 1 の RT 利用率が低く，かつ収容 STA 数が多い場合を仮定する．RPFA アルゴリズムにおいて，RSTA は収容 STA 数に依存せず，RT 利用率を用いて選択を行うため，AP 1 の収容 STA 数が多い場合にも利用できる帯域の大きい適切な AP を選択

することができる．一方NRSTAは収容STA数も考慮し，NRTサービスが利用可能な帯域を収容STA数で除したスコアに基づいて選択を行うため，RPFAアルゴリズムは収容STA数の多いAP 1のスコアを実際より低く評価してしまい，AP 1でNRSTAが割当を期待できる帯域が大きいにも関わらずAP 2を選択し，適切なAPを選択できない．

一方，図3.5(b)のようにRTサービスがほぼ等しく分配され，AP 1とAP 2のRT利用率と収容RSTA数に著しい偏りがなければ，RPFAアルゴリズムはNRSTAについて，それぞれのAPのスコアは空き帯域を正しく表すことになり，利用できる帯域が大きい適切なAPを選択することができる．このように，要求帯域が異なる各RSTAがそれぞれのAPにほぼ等しく分配される場合にはNRSTAについて誤選択の問題は生じない．よって，異なる要求帯域を持つRSTAが混在する場合にRPFAアルゴリズムが式(3.1)を用いてRSTAを等しく分配し，RT利用率と収容RSTA数をAP間で平均化することができるならば，NRSTAの誤選択の問題を回避できる．

異なる要求帯域を持つRSTAが混在する場合でもRPFAアルゴリズムを用いることでRT利用率とRSTA数がAP間で分散され，同等の値となることを示すために，計算機シミュレーションを行った．要求帯域がそれぞれ10kbps，100kbps，1Mbpsである3種類のRSTAがあわせて300端末存在すると仮定し，それぞれの種類のRSTAは等確率でランダムに発生するものと仮定した．また，3台のAPを仮定し，それぞれのAPの持つ帯域は無限大で，任意の台数のRSTAを収容できるものとした．このとき，理想的には各種類のRSTAが100端末ずつ発生し，各APの占有帯域は300端末の要求帯域の合計を3で割ることで，それぞれ37Mbpsとなる．また，理想的な各APの収容RSTA数はそれぞれ100となる．以上の条件の下で，10000回の試行を行った結果の各APの占有帯域とRSTA数の平均および99%信頼区間を表3.1に示す．

表3.1の結果より，異なる要求帯域を持つRSTAが混在する場合にも，それぞれが等確率で発生する場合には，RPFAアルゴリズムはRSTAを各APにほぼ等しく分配することができる．その結果，図3.5(a)に示す場合が生じる可能性は非常に低いため，NRSTAに対する誤選択は発生せず，異なる要求帯域を持つRSTAが混在する場合にも，RPFAアルゴリズムはRSTAとNRSTAの双方に対して適切なAP

表 3.1: 各アクセスポイントの平均占有帯域と平均収容リアルタイムサービス端末数およびそれぞれの 99%信頼区間

	占有帯域		収容 RSTA 数	
	平均	信頼区間 (下限, 上限)	平均	信頼区間 (下限, 上限)
AP 1	37.03	36.92, 37.15	99.89	99.43, 100.35
AP 2	37.02	36.91, 37.14	99.86	99.39, 100.32
AP 3	37.02	36.91, 37.14	100.25	99.80, 100.71

を選択できる．

選択に収容端末数を用いる場合の問題点

3.3.1 節で考察したように，NRSTA が最適な AP を選択するためには，NRSTA が割当を期待できる帯域を NRT サービスが利用可能な帯域を収容 NRSTA 数で除して計算することが望ましいが，IEEE802.11e のビーコンの SC フィールドからは収容 NRSTA 数に関する情報を取得できない．そこで，RPFA アルゴリズムでは収容 NRSTA 数の代わりに SC フィールドから取得可能な収容 STA 数を用いる．RPFA アルゴリズムが収容 NRSTA 数に代わって収容 STA 数を用いても適切な AP 選択が可能であることを，図 3.6 を用いて示す．本節では RT サービスと NRT サービス，それぞれ 1 種類のアプリケーションを仮定する．

図 3.6(a) のように RSTA 数のみに偏りがある場合，収容 STA 数が多いことは収容 RSTA 数が多いことを表し，このとき NRSTA が利用できる帯域は少なくなる．そのため，収容 STA 数によって NRSTA が利用できる帯域の推定が可能となり，NRSTA が利用できる帯域の大きい適切な AP の選択が可能となる．

次に，図 3.6(b) のように NRSTA 数のみに偏りがある場合，収容 STA 数が多いことは収容 NRSTA 数が多いことにつながり，このとき NRSTA が端末あたりに利用できる帯域が少なくなる．よって，収容 STA 数から NRSTA が端末あたりに利用できる帯域の推定が可能となり，NRSTA が利用できる帯域の大きい適切な AP の選択が可能となる．

しかし，図 3.6(c) のように，RSTA 数，NRSTA 数共に AP 間で偏りがある場

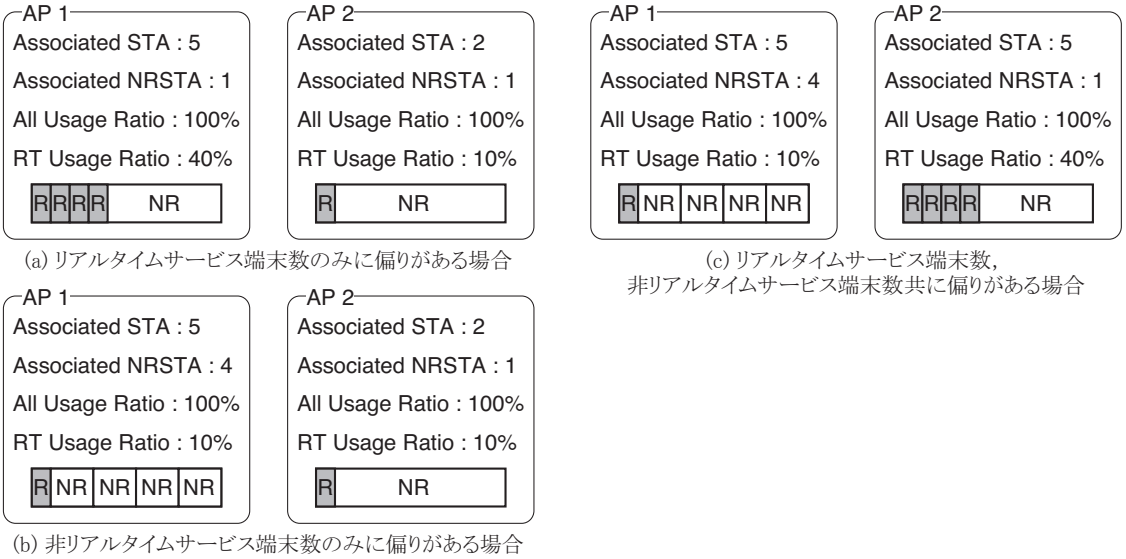


図 3.6: 選択に収容端末数を用いる場合の問題点

合，特に一方の AP に RSTA，もう一方の AP に NRSTA が偏り，かつ両 AP の収容 STA 数が同数の場合には，NRSTA の利用可能帯域の推定ができない．そのため，図 3.6(c) の場合には RPFA アルゴリズムは適切に AP を選択できない．しかし，RSTA については前節で示したように，RPFA アルゴリズムによって AP 間でほぼ偏りがないように分散されるため，RSTA 数と NRSTA 数ともに偏りが発生する図 3.6(c) の状況が発生する確率は非常に低い．そのため，RPFA アルゴリズムは NRSTA 数の代わりに STA 数を用いても適切な AP を選択できる．

接続後に環境が変化する場合の問題点

ある STA が適切な AP を選択し，接続を行った後に，新たな STA の接続や干渉源などの外乱によって，次のような環境の変化が生じ，STA が選択した AP が適切ではなくなる可能性がある．

1. 新たな STA の接続により AP の帯域が逼迫し，QoS の低下が生じる
2. 干渉源からの干渉により，伝送レートの低下が生じる
3. AP が停止し，切断が生じる

以上の 3 点について RPFA アルゴリズムでの対応を以下に述べる．

1. 新たな STA の接続により AP の帯域が逼迫する問題

RPFA アルゴリズムは STA が AP を選択する時に，STA 自身にとって適切な AP を選択するとともに，負荷分散を行うことで特定の AP へのトラヒックの集中を避け，他の STA への影響ができるだけ小さくなるように AP を選択する．よって，選択できる全ての AP の帯域が逼迫しない限り，新たな接続により AP の帯域が逼迫し，QoS の低下が生じることはない．

2. 干渉源からの干渉により，伝送レートの低下が生じる問題

RPFA アルゴリズムのみでは対応できず，文献 [81] で示されているように，APSA において使用する AP を切り替えるハンドオーバと併用することが必要となる．特に RT サービスに対してハンドオーバを併用する場合には，ハンドオーバによる切断時間が QoS の低下を招くため，切断時間を短縮することができるシームレスハンドオーバ [45, 87] との併用が必要となる．伝送レートの低下は RSSI の監視によって検出できるため，閾値を設定した上で RSSI 値を定期的に監視し，閾値を超える伝送レートの低下を検出した場合はハンドオーバ処理を行い，再度 RPFA アルゴリズムを適用することで対応できる．ただし，ハンドオーバを併用する場合には，頻繁なハンドオーバによるパフォーマンスの低下を避けるために，ハンドオーバを判断するインターバルの設定が重要となる．

3. AP の停止により切断が生じる問題

この問題に対しても APSA においてハンドオーバを併用することが必要となる．STA は AP からのビーコンを受信することにより周囲の AP を検出しているが，選択した AP が検出できなくなった場合にハンドオーバ処理を実行し，再度 RPFA アルゴリズムを適用することにより AP の停止問題に対応できる．この場合，AP の停止は予期できないことが多いため，シームレスハンドオーバの適用は難しく，ハンドオーバの切断時間により QoS の低下が生じる．この問題に対しては，APSA に予め認証を行っておく機能 [88] を実装することで，切断時間の短縮が可能である．

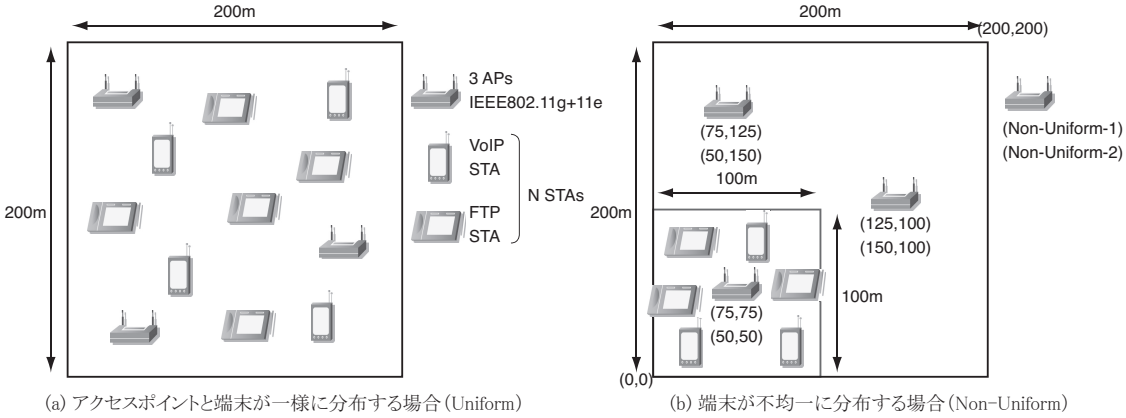


図 3.7: シミュレーションエリアのモデル

3.4　シミュレーションによる評価

3.4.1　シミュレーションモデル

UDPトラヒックを生じるRTサービスとTCPトラヒックを生じるNRTサービスが混在する場合のRPFAアルゴリズムの有効性を示すために，QualNet[86]を用いた計算機シミュレーションを行った．加えて既存のアルゴリズムが対象とする，TCPトラヒックが単独で利用される場合とUDPトラヒックが単独で利用される場合のそれぞれについても，RPFAアルゴリズムが有効であることを示すために計算機シミュレーションを行った．

図3.7にシミュレーションエリアのモデルを示す．シミュレーションエリアは200m×200mの正方形を仮定し，その中に3個のAPとN個のSTAが収容されている状況を仮定する．図3.7(a), (b)に示すように，本シミュレーションではSTAの分布について2通りのシミュレーションを行った．図3.7(a)はSTAとAPがエリア内に一様な確率分布に従ってランダムに配置される場合 (Uniform)，一方図3.7(b)はAPを図中の2通りの位置に固定し，STAがサービスエリアの一部の中に一様に分布する場合 (Non-Uniform) である．ここで図3.7(b)のAPの下に記した数字は，左下を基準としたAPの座標を示し，AP間の距離が近い場合 (Non-Uniform-1) の座標を上段に，AP間の距離が離れている場合 (Non-Uniform-2) の座標を下段に示す．APやSTAの分布によらず，STAでのサービスの発生はSTA間で互いに独立であり，また，2種類のサービスのうち1種類が各STAにおいて等確率で発生す

表 3.2: IEEE802.11g のシミュレーションパラメータ

Frequency	2.412 GHz, 2.437 GHz, 2.462 GHz		
PLCP Preamble	16 μsec	PLCP Header (Signal)	1 Symbol
PLCP Header (Service)	16 bit	MAC Header	24 Octet
LLC Header	8 Octet	FCS	4 Octet
PLCP Tail	6 bit	Symbol Length	4 μsec
MAC ACK Length	10 Octet	Slot Time	9 μsec
SIFS	16 μsec	DIFS	34 μsec
CWmin	15	CWmax	1023

表 3.3: IEEE802.11e のシミュレーションパラメータ

Access Category	CWmin	CWmax	AIFSN
Background (AC_BK)	31	1023	7
Voice (AC_VO)	7	15	2

るものとした．Uniform と Non-Uniform-1，Non-Uniform-2 のそれぞれの場合に対する試行回数は 10000 回とし，その平均をとることで，それぞれの分布で RT サービスに対して平均 PLR と平均片方向遅延時間，NRT サービスに対して平均スループットとその公平性の評価を行った．

AP が使用する MAC 層プロトコルは IEEE802.11g を仮定し，QoS サポートのための拡張 MAC 層プロトコルとして IEEE802.11e を仮定する．IEEE802.11g[17] と IEEE802.11e[19] のパラメータを表 3.2 と表 3.3 に示す．これらは周波数を除いてそれぞれの規格書で示されている標準的な値とする．また，周波数は 3 つの AP がお互いに干渉を生じない周波数を仮定する．本シミュレーションでは適応変調によるマルチレートを考慮し，IEEE802.11g の伝送レートは最大で 54Mbps とする．

本シミュレーションでは UDP の固定レートトラヒックと TCP の可変レートトラヒックを生じる 2 種類のアプリケーションを仮定し，そのパラメータを表 3.4 に示す．1 つは VoIP アプリケーション (VoIP) として，G.711 コーデック [89] によ

表 3.4: 各トラヒックのパラメータ

Application	VoIP	FTP
Transport Layer Protocol	UDP	TCP
Payload Size	160 Byte	1460 Byte
Interval	20 ms	
Required Data Rate	64 kbps	Best-Effort
Direction	UP	DOWN
	DOWN	
Access Category	AC_VO	AC_BK

る双方向音声通信を仮定する．もう1つはFTPアプリケーション (FTP) として，Ethernet[90] を通じて伝送される片方向データ通信を仮定する．

本シミュレーションでは各アプリケーションが単独で利用される場合と混在する場合のそれぞれに対して評価を行うために，アプリケーションを利用するSTAの比を，表3.5に示すように3通り仮定した．Case 1はVoIPとFTPとの比が0:1の場合，すなわち N STA全てがFTPを利用する場合である．3.3.1章で議論したように，NRSTAに対しては，収容STA数で選択するアルゴリズムが有効であると考えられる．そこで，Case 1ではRPFAアルゴリズムのFTPスループットをSTA数で選択するアルゴリズムと比較する．Case 2はVoIPとFTPの比が1:0の場合，すなわち N STA全てがVoIPを利用する場合である．RSTAに対しては，HRFAのような空き帯域で選択するアルゴリズムが有効であることは3.3.1章で述べた．そこで，Case 2ではRPFAアルゴリズムのVoIPのPLRおよび平均片方向遅延時間をHRFAと比較する．Case 3はVoIPとFTPの比が1:1の場合，すなわち N STAのうち半数がVoIPを利用し，もう半数がFTP利用する場合である．Case 3では，RPFAアルゴリズムが対象とする，異なるアプリケーションを利用するSTAが混在している環境で，VoIPのPLRおよび平均片方向遅延時間とFTPのスループットを既存アルゴリズムと比較する．

ここで，エリア内のSTA数の範囲を表3.5に示すように設定する．本シミュレーションで仮定したFTPはペイロードサイズが1460バイトのTCPトラヒックであ

表 3.5: 各 Case におけるアプリケーションに対する端末比と端末数

	端末比		端末数
	VoIP	FTP	
Case 1	0	1	$2 \leq N \leq 30$
Case 2	1	0	$30 \leq N \leq 60$
Case 3	1	1	$60 \leq N \leq 120$

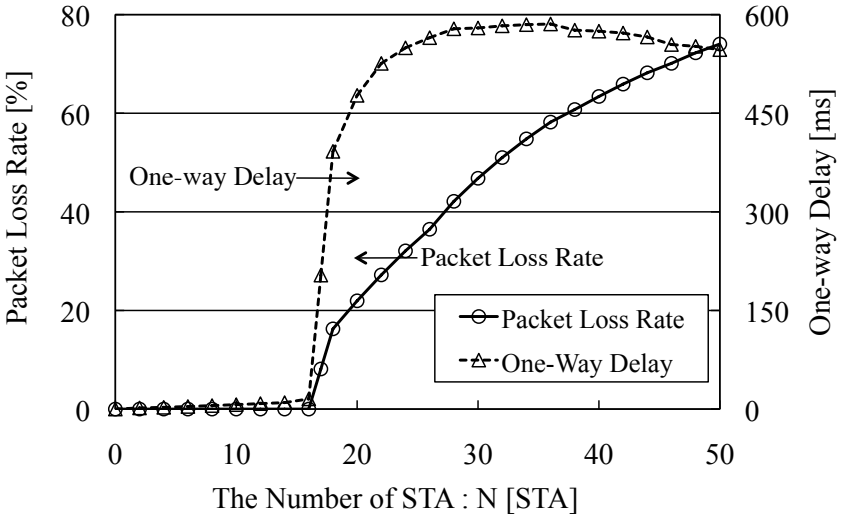


図 3.8: 接続される VoIP 端末数に対するパケットロス率と平均片方向遅延時間特性

り，IEEE802.11g で 54Mbps の伝送レートを持つ 1 つの AP において得られる最大の理論スループットは 22.7Mbps である [3]．シミュレーションエリア内には 3 つの AP が存在し，合計で得られる最大の理論スループットは 68.1Mbps である．各 AP に接続されている全 STA が 54Mbps の伝送レートで通信でき，かつ各 AP に均一に STA が接続されている理想的な状態では，STA あたりのスループットは最大理論スループットを STA 数で等分したものとなる．Case 1 では，この理想的な STA あたりのスループットが 2Mbps 以上となる範囲を STA 数の範囲と定め，STA 数 N を $2 \leq N \leq 30$ に設定した．

一方，IEEE802.11e に対応した 54Mbps のレートで通信可能な 1 つの AP に対し

て，本シミュレーションで仮定したVoIPの接続端末数を増やしていくと，図3.8に示す結果が得られる．ここで，1端末は1対のVoIPフローを送受信するものとする．図3.8に示すように，1つのAPに対して接続されるVoIP端末数が16を超えると急激にPLRおよび遅延時間が増加する．これはIEEE802.11eにおけるVoIPのAC (Access Category) のCW (Contention Window) サイズが小さく，STA数の増加に伴いパケットの衝突が頻発するためである．同図から54Mbpsのレートを用いた場合に1つのAPあたりパケットロスを生じずに収容可能なVoIPの最大数は16であり，3つのAPから構成される本シミュレーションでは，全てのSTAが54Mbpsのレートで通信でき，3つのAP間で干渉がない理想的な場合にはVoIPを最大48端末収容できる．VoIPを48端末より多く収容した場合，APが収容可能なSTA数の限界を超えるため，負荷分散だけではPLRを0に抑えることは不可能である．

Case 2ではVoIPのみを収容するため，STA数を3つのAPを用いた場合にパケットロスを生じないと考えられる$N = 30$から，大きなパケットロスを生じると考えられる$N = 60$まで，$30 \leq N \leq 60$の範囲に定めた．

Case 3では全STAにおけるVoIPとFTPの比が1:1であるから，理想的には$N \leq 96$ならばパケットロスを生じることなくVoIPを収容可能であると考えられる．そこで，評価対象のSTA数をCase 2の2倍，$60 \leq N \leq 120$に設定した．

本シミュレーションでは，既存のアルゴリズムが対象とする，TCPトラヒック，UDPトラヒックそれぞれが単独で利用される場合 (Case 1, Case 2) にもRPFAアルゴリズムの特性を明らかにするとともに，RPFAアルゴリズムの適用範囲であるTCPトラヒックとUDPトラヒックが混在している場合 (Case 3) の特性も明らかにする．また，全てのCaseに対してAPとSTAがエリア内にランダムに分布する場合 (Uniform) の評価を行うとともに，特にRPFAアルゴリズムの適用範囲となるCase 3ではSTAが不均一に分布する場合 (Non-Uniform) に対する評価も行う．そのために，本シミュレーションではCase 1，Case 2に対して一様分布 (Uniform)，Case 3に対して一様分布と不均一分布 (Non-Uniform-1, Non-Uniform-2) の場合の計5通りについて，VoIPアプリケーションに対して平均PLRと平均片方向遅延時間の評価を行い，FTPアプリケーションに対して平均スループットとその公平性の評価を行った．従来アルゴリズムとして，STA数に基づいてAPの選択を行うア

ルゴリズム (NSTA)，RT サービスに対しては RT 利用率，NRT サービスに対しては全体利用率に基づいて AP の選択を行うアルゴリズム (HRFA)，電力に基づいて AP の選択を行うアルゴリズム (RSSI) の 3 つのアルゴリズムについても評価を行い，RPFA アルゴリズム (RPFA) との比較を行った．

3.4.2 非リアルタイムトラヒックのみが発生する場合における評価 (Case 1)

Case 1 における FTP スループットを図 3.9 に示す．同図から RPFA は端末数にかかわらず他のアルゴリズムに比べて高い平均スループットを達成し，従来の FTP に対して有効なアルゴリズムである NSTA が達成するスループットと比較して，$N = 6$ の時に 19.5%高いスループットを達成し，$N = 20$ の時に 18.4%高いスループットを達成する．これは RPFA が FTP に対して STA 数を用いた負荷分散を行うことにより，STA を適切に各 AP に振り分けることができるためである．ここで，同じく STA 数を用いて負荷分散を行う NSTA に対して RPFA がより有効であるのは，NSTA が伝送レートを考慮した重み付けを行っていないためである．一方で RPFA は伝送レートを重みとして用いることで，STA 数が少なく，かつ伝送レートが高い AP を利用するように動作するため，NSTA と比較して高レートの AP を優先しながら負荷分散を行うことができ，高いスループットを達成する．

また，FTP スループットの公平性の指標である Fairness Index の評価を図 3.10 に示す．Fairness Index，FI は次の式より計算される公平性の指標で，端末数が n の時，Fairness Index が 1 に近いほど公平性が達成されており，公平性が低くなるに従って $1/n$ に近づく．

$$FI = \frac{\{\sum_{i=0}^{n-1} t_i\}^2}{n \sum_{i=0}^{n-1} t_i^2} \tag{3.4}$$

ここで，t_i は端末 $i(0 \leq i \leq n-1)$ におけるスループットである．図 3.10 に示すとおり，RPFA は他の 3 つの既存アルゴリズムと比較して，全域において高い公平性を維持することが可能である．RPFA は FTP に対して有効な NSTA と比較して Fairness Index を 12%改善し，また HRFA と比較すると 26 倍の改善を得る．

以上より，RPFA アルゴリズムは既存のアルゴリズムが対象とする FTP のみが利用される環境において，スループットとその公平性の点で有効である．

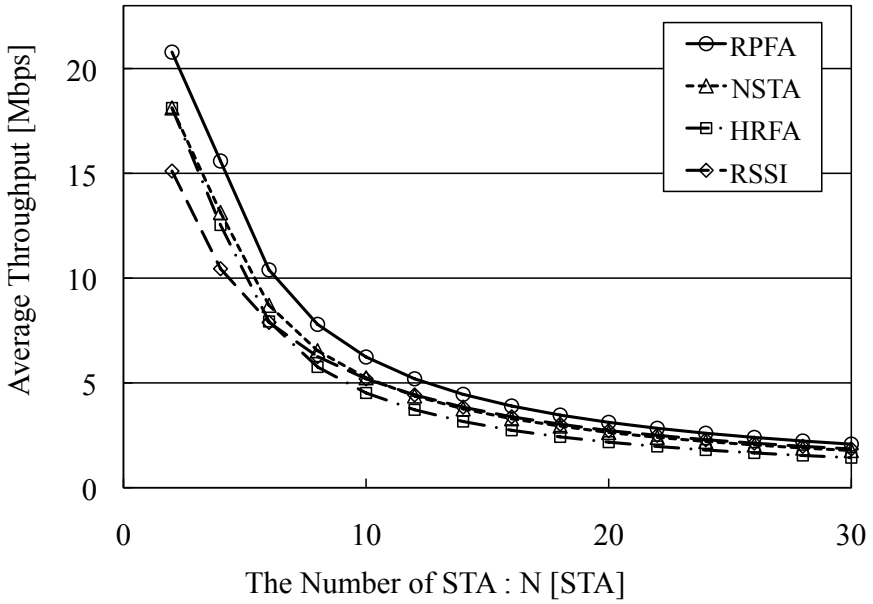


図 3.9: 非リアルタイムトラヒックのみが発生する場合の平均 FTP スループット

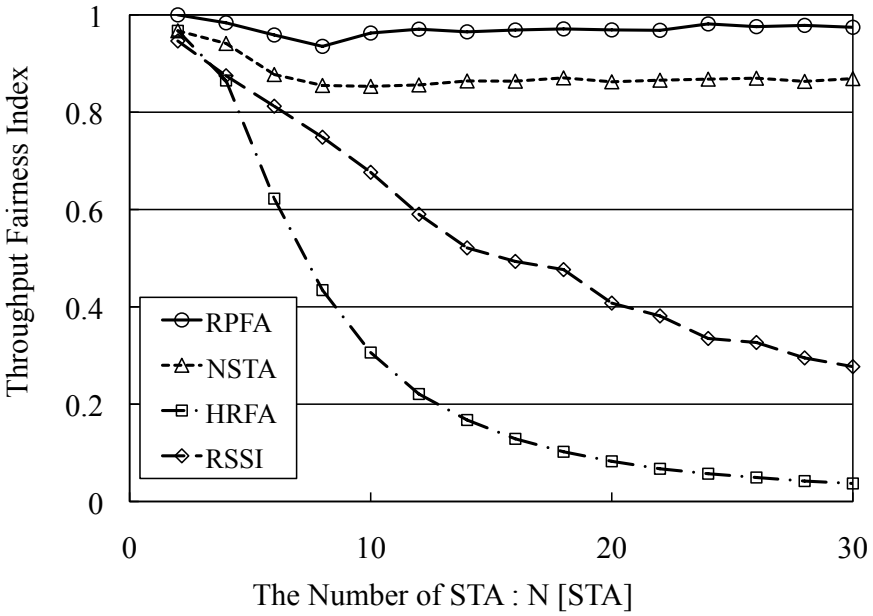


図 3.10: 非リアルタイムトラヒックのみが発生する場合の FTP スループット公平性

3.4.3 リアルタイムトラヒックのみが発生する場合における評価 (Case 2)

Case 2 における VoIP の PLR を図 3.11 に示す．同図からわかるように，$N \leq 42$ の範囲で RPFA は VoIP に対して有効な HRFA と同等の低い PLR を達成する一方，$N > 42$ では HRFA に対して PLR を改善し，$N = 46$ で PLR を 45%改善すると共に，PLR が 5%以下で収容できる端末数を 5%改善する．これは必要最低限の品質を維持して収容できる端末数に相当する．すなわち，RPFA は VoIP のみの環境において，より大きな負荷に対して有効である．これは，RPFA と HRFA の伝送レートに対するスコアの重み付けの違いによるものである．RPFA と HRFA は共に，VoIP に対しては AP における RT 利用率と AP の伝送レートを考慮して選択を行うが，RPFA はより高レートの AP を優先して選択し，AP あたりの収容 STA 数の向上を実現する．RPFA の伝送レートに対する重み付けは，式 (3.1) から式 (3.3) に示したように，アソシエーション候補 AP の中で最大の伝送レート $R_{\max}$ と対象の AP における伝送レート $R[i]$ の比として計算される．一方，HRFA の伝送レートに対する重み付け w は，式 (3.5)，式 (3.6) に従って各レートにおけるフレームの伝送にかかる時間の比として計算される．

$$w = \frac{T_{\max}}{T_{rh}} \tag{3.5}$$

$$T_{\max} = \max(T_{rh} | 0 \leq h \leq H-1) \tag{3.6}$$

T_{rh} はあるフレームを伝送レート r_h で送信するときに必要となる，物理層，MAC 層のヘッダも考慮した時間であり，T_{max} は H 個の使用できる伝送レートの中で最小のものを用いてフレームを送信するときに必要な時間である．図 3.12 に RPFA と HRFA における伝送レートに対する重みを，54Mbps のレートの重みで正規化した値で示す．HRFA の重みは表 3.2，表 3.3 と表 3.4 の VoIP のパラメータを用いて計算した．図 3.12 に示すように，RPFA は伝送レートの重みを HRFA に比べて低く見積り，負荷が大きくなった場合にも高い伝送レートの AP を優先して選択する．

例として，54Mbps の伝送レートを持つ AP 1 と 36Mbps の伝送レートを持つ AP 2 が存在し，利用可能なレートのうち最低のレートが 1Mbps であると仮定する．このとき，図 3.12 より RPFA の伝送レートによる重み w_R は AP 1 に対して $w_R(\mathrm{AP1}) = 1.0$，AP 2 に対して $w_R(\mathrm{AP2}) = 0.67$ となり，HRFA の重み w_H は AP 1 に対して $w_H(\mathrm{AP1}) = 1.0$，AP 2 に対して $w_H(\mathrm{AP2}) = 0.93$ となる．RPFA

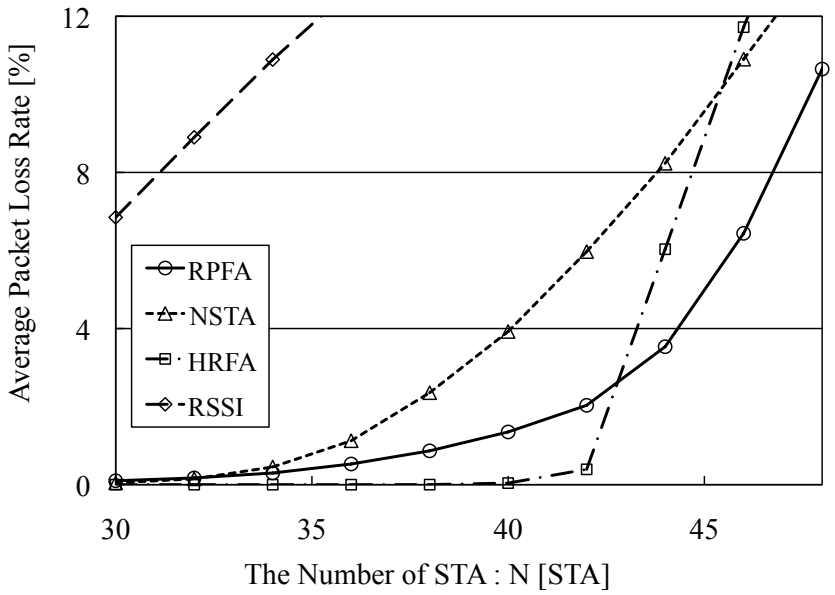


図 3.11: リアルタイムトラヒックのみが発生する場合の平均 VoIP パケットロス率

と HRFA はどちらも，RT サービスに対するスコアを RT サービスに対する空き帯域と伝送レートによる重みの積で算出するため，AP 1 の RT 利用率が 50%のとき，RPFA と HRFA によって重み付けされた AP 1 のスコアはどちらもおおよそ $(100\% - 50\%) \times 1.0 = 0.50$ となる．ここで，AP 1 に比べて伝送レートの低い AP 2 のスコアを AP 1 より大きくしようとすると，AP 2 の RT 利用率は RPFA で $(100\% - x\%) \times 0.67 > 0.5$ より 25%未満，HRFA で 46%未満でなければならない．すなわち，HRFA は AP 2 の利用率が 46%未満であれば AP 2 を選択するのに対し，RPFA は AP 2 の利用率が 25%未満でなければ AP 2 を選択しない．よって，RPFA は HRFA に比べて高い伝送レートを持つ AP を優先的に利用する．

次に，Case 2 における平均片方向遅延時間を図 3.13 に示す．平均片方向遅延時間に関しても RPFA は $N \leq 42$ の範囲で HRFA と同等の低い遅延時間を達成しながら，$N > 42$ では HRFA と比較してより低い遅延時間を達成し，$N = 46$ のとき平均片方向遅延時間を 45%短縮する．

一方，図 3.11，3.13 からわかるように，$32 \leq N \leq 42$ の範囲で，PLR が $N = 42$ のときに HRFA が 0.39%に対して RPFA が 2.0%と増加し，平均片方向遅延時間も $N = 42$ のときに HRFA が 24 ミリ秒に対して RPFA が 57 ミリ秒と増加している．

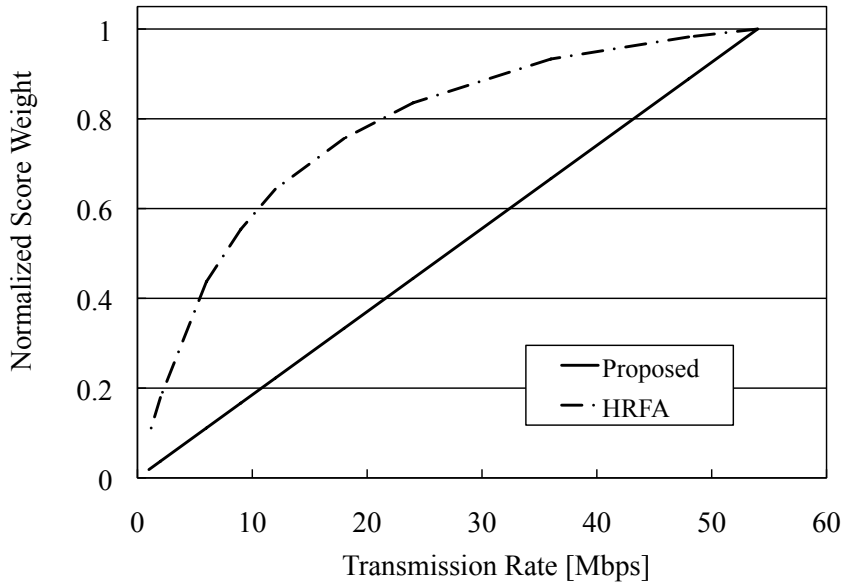


図 3.12: 提案アルゴリズムと既存アルゴリズムの重み付けの違い

これも RPFA と HRFA の伝送レートの重み付けの違いに起因する．図 3.12 に示したように，RPFA は HRFA と比較して伝送レートの重みを低く見積もる．その結果，HRFA は早い段階から低レートの AP に STA を分散させるが，一方で RPFA は高レートの AP を選択し続け，HRFA に比べてわずかに STA の集中を引き起こす．そのため，負荷が比較的小さい範囲では HRFA が良い性能を示す．しかし，これは音声の品質という点では大きな影響を及ぼさない．ITU-T の G.107 勧告 [69] で示され，主に PLR と遅延時間から算出される音声の品質についての客観的な指標である R 値を用いると，RPFA が $R = 83.7$，HRFA が $R = 89.7$ と計算される．同じく G.109 勧告 [91] で示される，通話品質カテゴリの定義ではどちらも “High” かつユーザの満足度は “Satisfied” であり，音声品質に大きな差はない．

ここで，理想的な収容 STA 数の限界が 48 であるのに対し，Case 2 において $N = 48$ まで収容できないのは，本シミュレーションにおいて，全ての STA が必ずしも 54Mbps のレートで通信できるとは限らないためである．図 3.8 では全ての STA が AP と 54Mbps のレートで通信が可能であると仮定して理想的な収容 STA 数を求めたが，54Mbps より小さいレートで通信を行う STA が存在する場合には，収容 STA 数は図 3.8 で求めた理想的な値と比較して小さくなる．本シミュレーションでは各

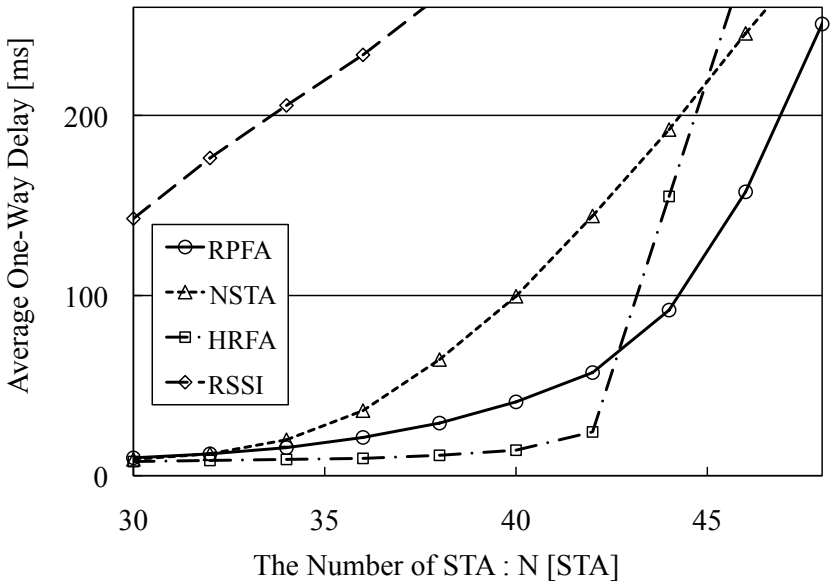


図 3.13: リアルタイムトラヒックのみが発生する場合の平均VoIP片方向遅延時間

試行においてSTAとAPはそれぞれランダムに配置されるため，常に全てのSTAが54Mbpsのレートで通信可能であるとは限らない．そのため，収容STA数は理想的な値と比較して小さくなる．

3.4.4　2種類のトラヒックが等確率で発生する場合における評価 (Case 3)

一様分布　Case 3 (Uniform) におけるVoIPの平均PLRと平均片方向遅延時間，FTPの平均スループットを図3.14から図3.16にそれぞれ示す．

図3.14に示すように，RPFAはNSTAに対して平均PLRを$N = 72$で約6分の1に改善し，HRFAに対して$N = 90$で約半分，RSSIに対しては端末数に関わらず大幅に改善する．また，HRFAに対してPLRが5%以下で収容できる端末数を5%改善する．Case 2の場合と同様に，$N \leq 84$の範囲ではRPFAはHRFAと同等の低いPLRを達成し，$N > 84$ではPLRを改善する．すなわち，RPFAはVoIPとFTPが混在した環境においても高負荷時に有効である．これは異種のサービスが混在している環境においてもRPFAはRSTAに対して適切なAPを選択できるためである．また，Case 2と同様にRPFAは既存アルゴリズムと比較して高レートのAPを優先して選択することで収容STA数を向上し，高負荷時のPLRと遅延時

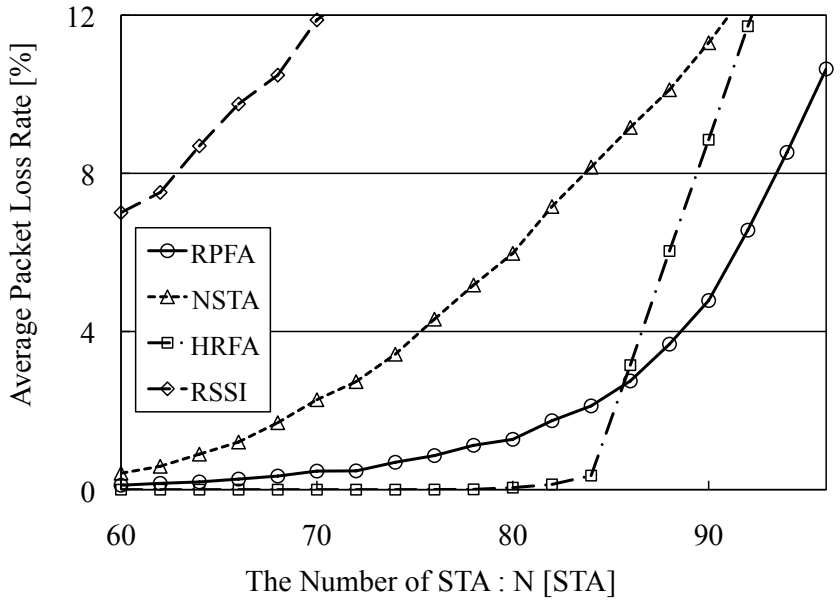


図 3.14: 2 種類のトラヒックが等確率で発生する場合の平均 VoIP パケットロス率 (一様分布)

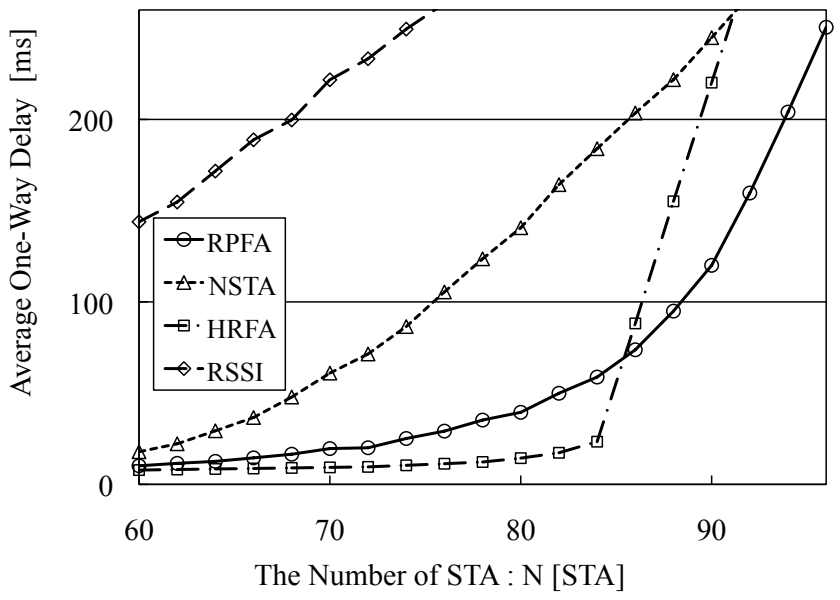


図 3.15: 2 種類のトラヒックが等確率で発生する場合の平均 VoIP 片方向遅延時間 (一様分布)

間の急増を抑える．

また，図3.15に示すように，RPFAはNSTAに対して平均片方向遅延時間を$N = 76$で72.3%，HRFAに対して$N = 90$で45.5%，RSSIに対しては最大で10分の1以下に改善する．

一方$60 \leq N \leq 84$の範囲で，RPFAはHRFAと比較してPLRと遅延時間が劣化し，最大でそれぞれ2.1%，58ミリ秒という値になっている．これはCase2と同様の理由で，負荷が比較的小さい範囲ではRPFAが高い伝送レートを持つAPを優先して選択し，わずかなSTAの集中を引き起こすためである．Case 2と同様にR値を用いた評価を行うと，$N = 84$のときRPFAが$R = 83.4$，HRFAが$R = 89.9$となり，通話品質カテゴリは“High”に分類される．よって，この場合も両者に大きな音声品質の差はない．

図3.16に示すFTPの平均スループットでは，$N \leq 64$ではRPFAが最大のスループットを達成し，非リアルタイムサービスで有効なNSTAと比較して23.8%高いスループットを達成する．$N > 64$ではRSSIが最大のスループットを達成し，$N = 92$でRPFAと比較して78%高いスループットを達成するが，このとき，VoIPのPLRはRPFAと比較して78%劣化し，遅延時間は65%増大する．これはR値に換算すると約30の差となり，無視できない音声品質の劣化を引き起こす．すなわち，RSSIのスループットはVoIPの品質を犠牲にして達成したものである．NSTAに対しては$N \leq 86$で高いスループットを達成する一方，$N > 86$ではわずかに逆転される．これは高負荷時にはRPFAがVoIPの品質を改善するために，FTPのスループットを犠牲にしているためである．RPFAはNSTAに対してFTPスループットを$N = 90$で28%劣化するが，その一方でNSTAに対してVoIPのPLRを2.4倍改善する．また，HRFAはSTA数にかかわらず最小のスループットしか達成していない．これは，3.3.1章で議論したように，RSTAとNRSTAが混在した場合にはHRFAは正しくNRSTAのアソシエーション先を決定できないためである．

また図3.17に示すFTPスループットの公平性についても，RPFAは他の既存アルゴリズムと比較して高い公平性を達成する．RPFAは既存アルゴリズムの中で最も高い公平性を達成するNSTAと比較しても最大で5倍，HRFAに対しては300倍以上のFairness Indexの向上を達成する．

以上より，RPFAは既存のアルゴリズムでは対応できなかったVoIPとFTPが混

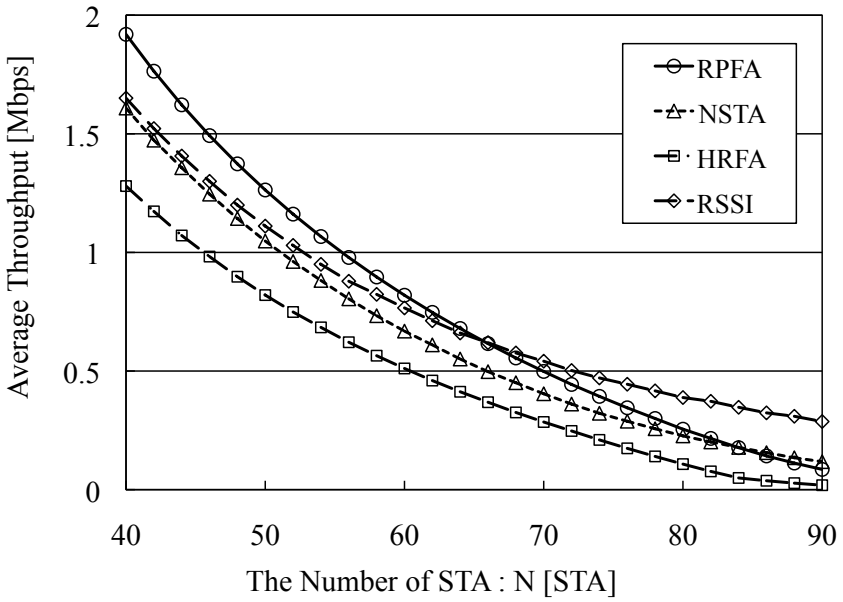


図 3.16: 2 種類のトラヒックが等確率で発生する場合の平均 FTP スループット (一様分布)

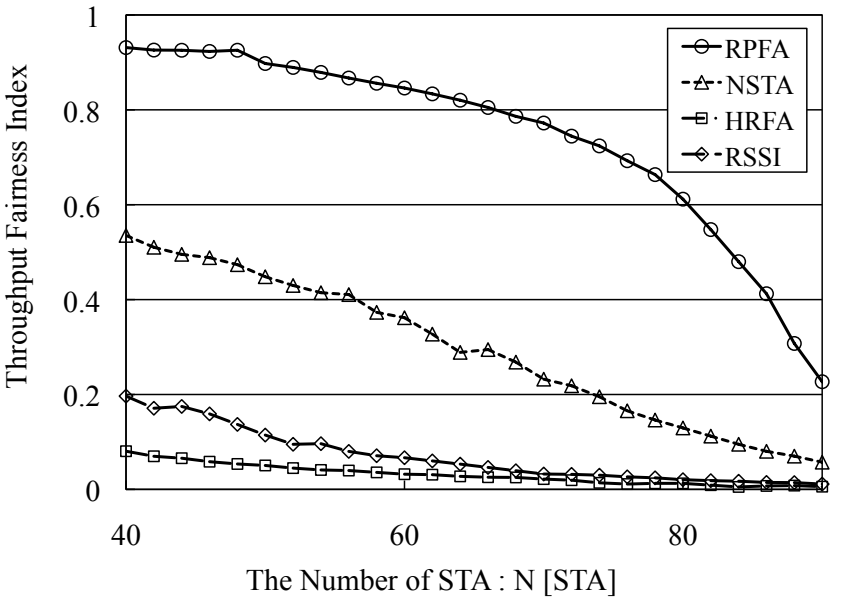


図 3.17: 2 種類のトラヒックが等確率で発生する場合の FTP スループット公平性 (一様分布)

在した環境において，どのようなSTA分布に対しても既存アルゴリズムと比較して平均的にVoIPのPLRと遅延時間，FTPのスループットおよびその公平性に対して有効である．

偏り分布　Case 3 (Non-Uniform) におけるVoIPの平均PLRと平均片方向遅延時間，FTPのスループットとその公平性を図3.18から図3.21にそれぞれ示す．AP間の距離が近いNon-Uniform-1とAP間の距離が遠いNon-Uniform2で，VoIPの平均PLRと平均片方向遅延時間，FTPの平均スループットに対してRPFAでは差が見られたが，他のアルゴリズムでは差が見られなかった．

AP間の距離が近いNon-Uniform-1では，図3.18に示すように，RPFAはNSTAに対してPLRを最大10^4分の1，HRFAに対して最大39.3%，RSSIに対しては最大10^5分の1に改善する．また，HRFAに対してPLRが5%以下で収容できる端末数を3%改善する．これは，RPFAが高レートのAPを優先して用いることで，APの収容STA数を既存アルゴリズムと比較して向上し，高負荷時のPLRと遅延時間の急増を抑えるためである．また，図3.19に示すように，RPFAはNSTAに対して平均片方向遅延時間を最大で30分の1に短縮し，HRFAに対しては最大で2%，RSSIに対しては最大で100分の1に短縮する．一方で，$80 \leq N \leq 84$でRPFAのPLRと遅延時間はHRFAと比較してわずかに劣化し，PLRが0.04%，平均片方向遅延時間が11ミリ秒となるが，R値に換算すると$R = 92.8$となり，品質に大きな影響は及ぼさない．

図3.20に示すFTPのスループットでは，$N \leq 82$ではRPFAが最大のスループットを達成するが，$N \geq 84$ではNSTAが最大のスループットを達成する．しかし，$N = 84$でRPFAはNSTAに対して，PLRを48倍，遅延時間を最大で171分の1に短縮する．これはR値に換算すると約85の差となり，NSTAはRPFAに対して無視できない音声品質の劣化を引き起こす．すなわち，NSTAのスループットはVoIPの品質を犠牲にして達成したものである．

AP間の距離が遠いNon-Uniform-2では，図3.18と図3.19に示すように，RPFAではVoIPの平均PLRと平均片方向遅延時間が，HRFAに比べて大きく増大する．これはRPFAの伝送レートの重み付けに起因するもので，AP間の距離が遠く，かつSTAが1つのAPの周囲に集中して分布する場合には，HRFAではSTAは遠い

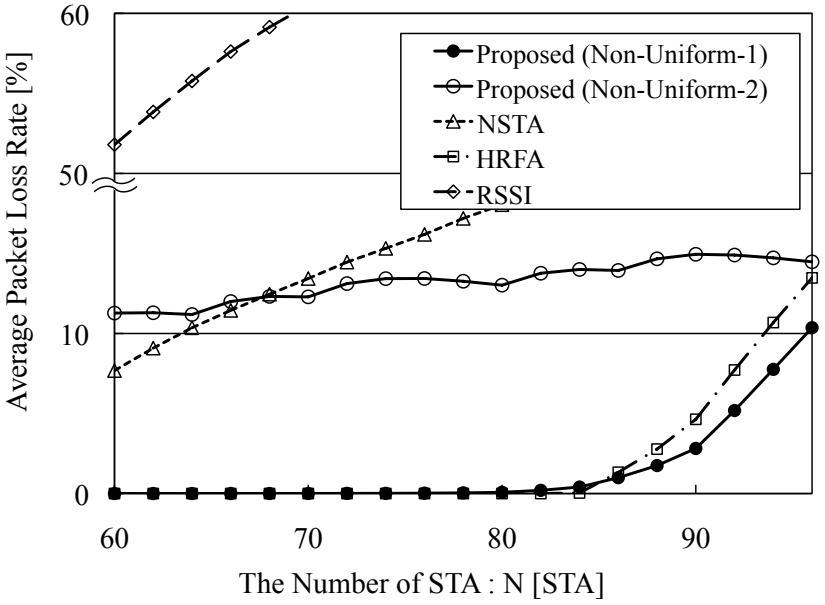


図 3.18: 2 種類のトラヒックが等確率で発生する場合の平均 VoIP パケットロス率 (偏り分布)

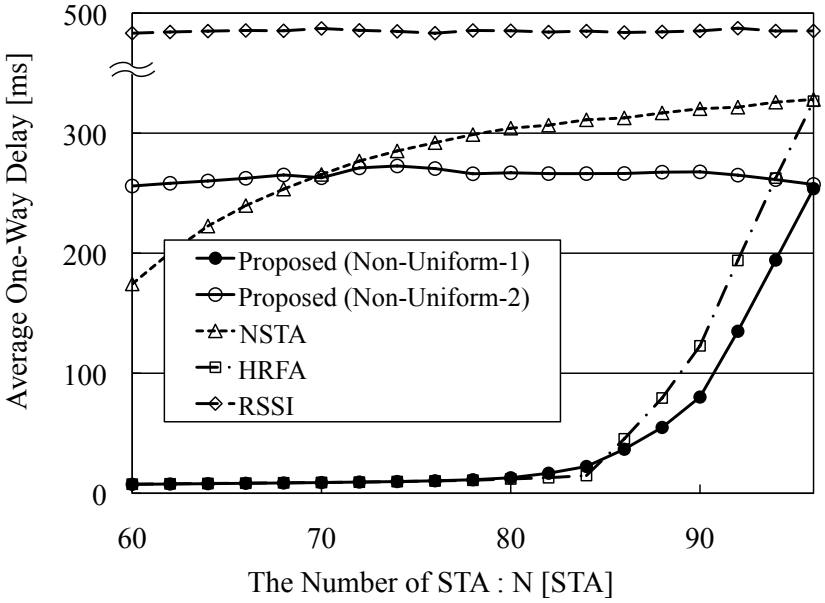


図 3.19: 2 種類のトラヒックが等確率で発生する場合の平均 VoIP 片方向遅延時間 (偏り分布)

距離にある低レートのAPを積極的に利用できるのに対し，RPFAではSTAは近い距離にある高レートのAPを優先して利用するため，1つのAPに対してSTAの集中を引き起こし，品質の劣化を生じるためである．また，図3.20に示すように，FTPスループットについてもNSTAに対して劣化する．これも同様にRPFAの伝送レートの重み付けによって，1つのAPに対してSTAの集中を引き起こすためである．

また，図3.21に示すNon-UniformにおけるFTPスループットのFairness Indexでは，AP間の距離が近いNon-Uniform-1でRPFAは常に最も高い公平性を達成し，既存アルゴリズムの中で最も高い公平性を実現するNSTAと比較して，最大で1.8倍高い公平性を実現する．一方，AP間の距離が遠いNon-Uniform-2では，負荷が小さい範囲ではRPFAが高い公平性を達成し，最大でNSTAと比較して1.6倍高い公平性を実現するが，負荷が大きい範囲ではNSTAに逆転される．このことから，RPFAはAP間の距離が遠い場合にはNSTAと比較して高負荷域でスループットの公平性を損なうことがわかった．これは，AP間の距離が遠い場合にRPFAで生じるSTA集中問題に起因する．しかし，NSTAを除く2つの既存アルゴリズムに対してはNon-Uniform-1，Non-Uniform-2のいずれに対してもRPFAは高い公平性を維持できることがわかった．

以上より，RPFAはSTAが不均一に分布する場合，AP間の距離が近い場合にはHRFA，NSTAと比較してVoIPの平均PLRと平均片方向遅延時間，FTPの平均スループットに対して有効であるが，AP間の距離が遠い場合にはHRFA，NSTAと比較してVoIPの平均PLRと平均片方向遅延時間を劣化し，NSTAと比較してFTPの平均スループットを劣化する場合がある．しかし，RSSIと比較した場合にはRPFAは十分に優位性があり，RSSIで生じるSTA集中問題に対しては十分有効である．また，スループットの公平性については，NSTAと比較した場合に，AP間の距離によって公平性が劣化する場合があるものの，多くの場合，RPFAは最も高い公平性を実現することが可能である．

3.5　結言

本章では，従来の手法では解決できなかった，リアルタイムサービスと非リアルタイムサービスが混在した環境下で双方に対して適切なサービス品質を保証する問

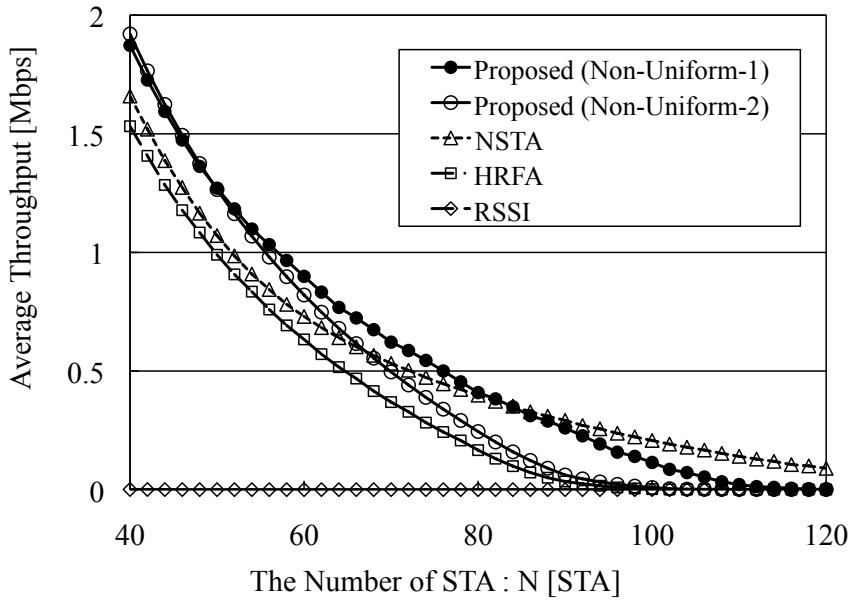


図 3.20: 2 種類のトラヒックが等確率で発生する場合の平均 FTP スループット (偏り分布)

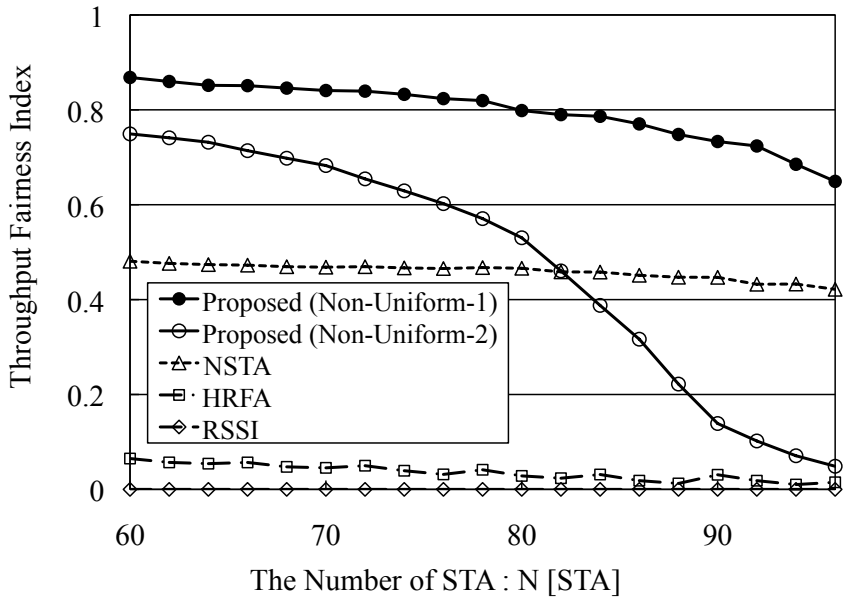


図 3.21: 2 種類のトラヒックが等確率で発生する場合の FTP スループット公平性 (偏り分布)

題を解決するためのエージェントであるアクセスポイント選択エージェントAPSAと，そのアクセスポイント選択エージェントで動作するアルゴリズムであるスループット公平性を考慮したリアルタイムサービス優先アルゴリズムRPFAを提案し，その評価を行った．この問題は端末の分布とは関係なく生じる問題であり，端末の分布を変化させて計算機シミュレーションによる評価を行うことで，RPFAアルゴリズムはリアルタイムサービスと非リアルタイムサービスが混在した環境において，端末の分布に関わらず平均的に有効であり，端末数に関わらず既存のNSTAアルゴリズムに対してリアルタイムサービスの平均パケットロス率を最大で約6分の1改善するとともに平均片方向遅延時間を最大で72%短縮した．また非リアルタイムサービスの平均スループットを最大で23.8%向上すると共に，スループットの公平性の指標であるFairness Indexを最大で約5.1倍に改善した．既存のHRFAアルゴリズムに対しては端末数が84以上の場合にリアルタイムサービスの平均パケットロス率，平均片方向遅延時間をそれぞれ約半分に改善すると共に，一定の品質で収容可能な端末数を5%改善した．一方端末数が84未満の場合には平均パケットロス率と平均片方向遅延時間の劣化が生じるが，R値による評価からその品質に差はないことがわかった．また，RPFAアルゴリズムは既存のアルゴリズムが解決の対象とする非リアルタイムサービスのみ，リアルタイムサービスのみが存在する環境それぞれにおいても，既存のアルゴリズムと比較して性能を改善し，非リアルタイムサービスのみが存在する環境で有効とされるNSTAアルゴリズムと比較して非リアルタイムサービスの平均スループットを最大19.5%，リアルタイムサービスのみが存在する環境で有効とされるHRFAアルゴリズムと比較してリアルタイムサービスの平均パケットロス率と平均片方向遅延時間を約半分に改善した．

加えて，特に端末が1つのアクセスポイントの周囲に集中して分布する場合のRPFAアルゴリズムの有効性は，アクセスポイントの配置に依存することを示した．アクセスポイント間の距離が近く，サービスが混在している場合に，RPFAアルゴリズムはリアルタイムサービスの平均パケットロス率を既存のHRFAアルゴリズムと比較して39.3%，NSTAアルゴリズムと比較すると最大10^3分の1に改善し，また平均片方向遅延時間についてもHRFAと比較して2%，NSTAと比較して最大で30分の1に短縮し，アクセスポイント間の距離が近い場合には十分に有効性が得られることを示した．

第4章　異種アクセスポイント混在環境におけるユーザ体感品質向上のためのアクセスポイント選択エージェント

4.1　序言

第3章では，すべてのアクセスポイント (Access Point, AP) がIEEE802.11eに対応しQoS (Quality of Service) 保証をサポートするQAP (QoS supported AP) である環境で，異なるサービスに対してQoSを保証することのできるAP選択エージェント (Access Point Selection Agent, APSA) について述べた．しかしながら，とりわけ大規模無線LAN (Local Area Network) においては，IEEE802.11eに対応したQAPと対応していないAPが混在して運用されている環境が想定される．このような環境では，従来のIEEE802.11eをサポートしないAPのみを対象にしたアルゴリズム [76–83] や，HRFA (High Rate First Association) [84, 85] のようなQAPのみを対象にしたアルゴリズムは正しく動作しない．そのため，異なる機能を持つAPが混在した環境においても正しく動作するアルゴリズム，またそのアルゴリズムの動作プラットフォームとなるAPSAが必要となる．

そこで本章では，IEEE802.11eをサポートするQAPと未サポートのAP間でロードバランシングを行い，異なるサービスに対してQoS保証を行うためのAPSAである異種AP混在環境におけるAPSA (mixed AP environment supported APSA, mAPSA) とそのアルゴリズムであるMoA (Mean opinion score oriented Association) アルゴリズムを提案する．MoAアルゴリズムは無線LANにおいて，ユーザの利用しているサービスとAPの機能に応じて，そのAPで得られるサービス品質の推定を行い，より高いサービス品質が得られるAPに接続することでサービス品質の向上を行い，ユーザ体感品質QoE (Quality of Experience) を向上する．本章ではQualNet[86] を用いた計算機シミュレーションによって，提案するMoAアルゴリズムを用いたmAPSAの有効性を示す．

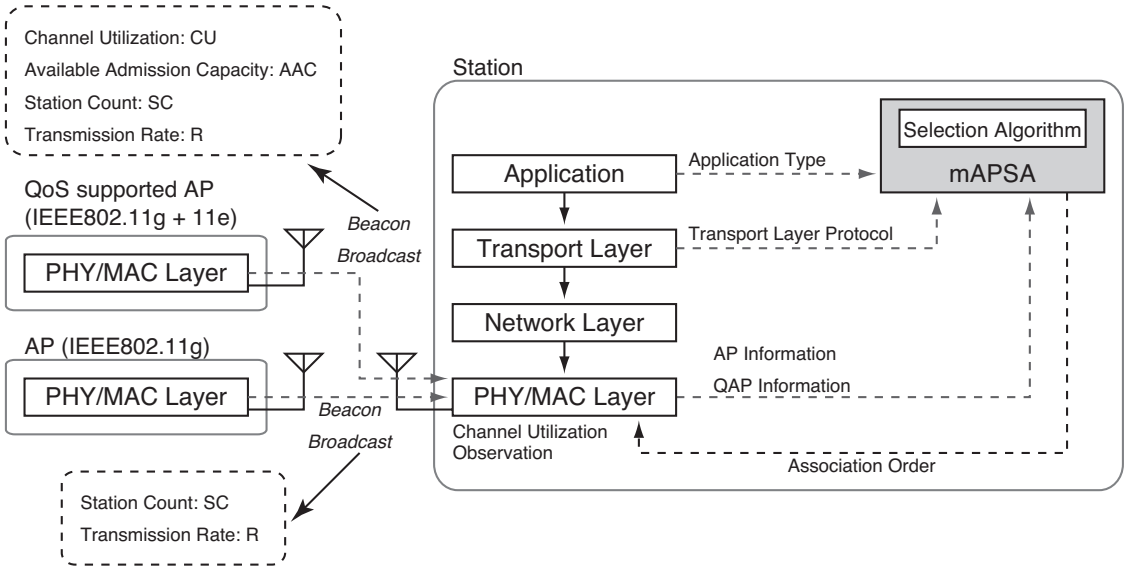


図 4.1: 異種アクセスポイント混在環境におけるアクセスポイント選択エージェントのシステム構成

4.2　異種アクセスポイント混在環境におけるアクセスポイント選択エージェント

4.2.1　異種アクセスポイント混在環境におけるアクセスポイント選択エージェントのシステム構成

図 4.1 に mAPSA のシステム構成を示す．AP は定期的にビーコンフレームによって自身の MAC (Media Access Control) レイヤ，物理レイヤに関する情報をブロードキャストしており，端末はその情報を受信して mAPSA に伝える．QoS をサポートしないレガシーな AP はブロードキャストできる情報が限られているため，端末側で観測を行うことにより，チャネル利用率などの情報を取得し，mAPSA に伝える．QAP がビーコンフレームで伝えることができる情報はチャネルの利用率を表す Channel Utilization (CU)，受け入れ可能なリアルタイム系トラヒック量を示す Available Admission Capacity (AAC)，接続している端末数を示す Station Count (SC)，そして伝送に利用できるレートを示す Transmission Rate (R) と，アクセスポイントが持つ最大の伝送レートである Maximum Transmission Rate (R_{max}) である．

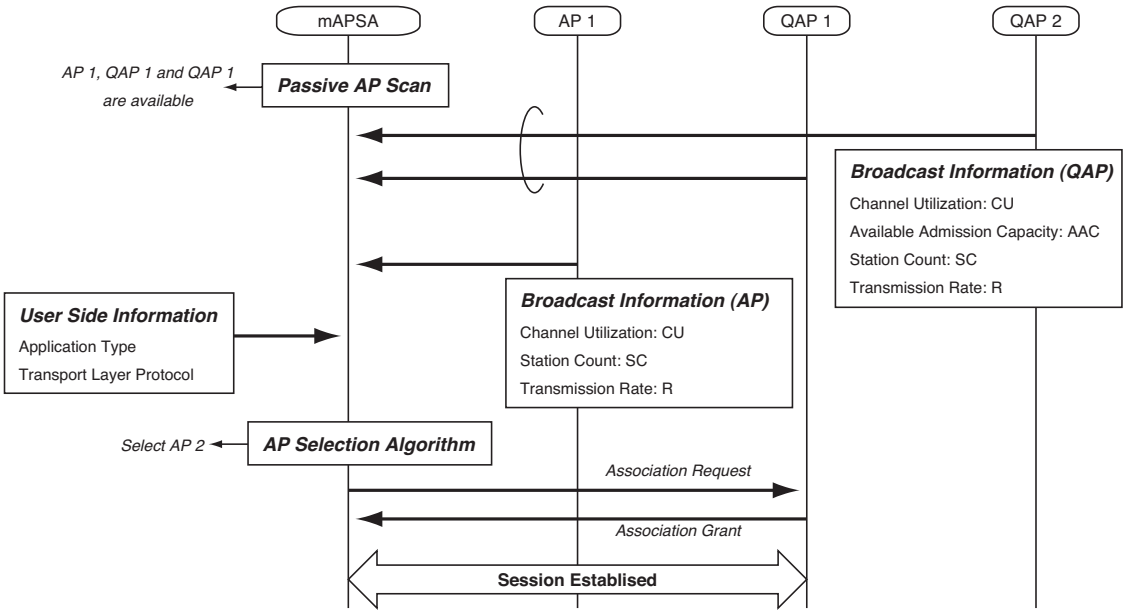


図 4.2: 異種アクセスポイント混在環境におけるアクセスポイント選択エージェントの動作

一方，QoS をサポートしないレガシーな AP がビーコンフレームで伝えることができる情報は，接続している端末数を示す Station Count (SC) と伝送に利用できるレートを示す Transmission Rate (R) である．レガシーな AP については端末側で CU を観測し，利用する．

4.2.2　異種アクセスポイント混在環境におけるアクセスポイント選択エージェントの動作

図 4.2 に mAPSA の具体的な動作を示す．mAPSA はまず，MAC レイヤに対して周囲の AP をスキャンするように命じ，どの AP または QAP が利用可能かを取得する．次に，利用可能と判断した AP からブロードキャストされる情報を収集し，AP の利用状況や利用可能な伝送レートについての情報を取得する．また，情報が取得できない AP に対しては端末自身が環境を観測することにより部分的に情報を取得し，利用する．その後，ユーザが利用する端末の情報として，利用されているアプリケーションの種類，またトランスポートレイヤのプロトコルを取得し，それらの情報から接続先の AP を AP 選択アルゴリズムを用いて判断する．図 3.2 の例

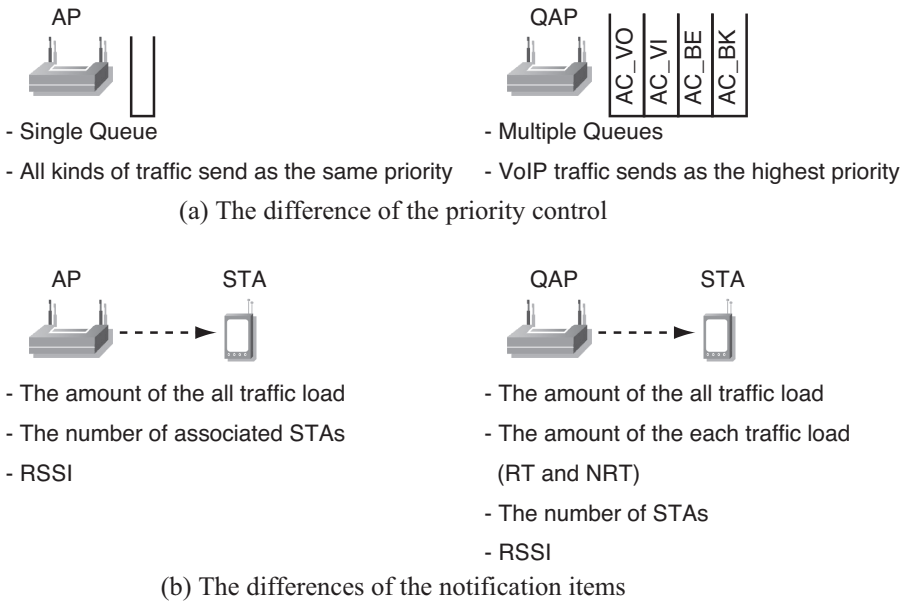


図 4.3: 機能の異なるアクセスポイントが混在する場合の問題点

では QAP 1 を選択し，その後選択した AP に対して接続要求を送信し，接続が受け入れられた後にセッションを開始する．

4.3　ユーザ満足度指向アルゴリズム

前節で提案した mAPSA における AP 選択アルゴリズムとして，本節ではユーザ満足度指向アルゴリズム，MoA アルゴリズムを提案する．MoA アルゴリズムは特に音声トラヒックに対して体感品質である MOS (Mean Opinion Score) を保証することを目的とする．

以下の節で既存の AP 選択アルゴリズムを異なる機能を持つ AP が混在する環境で用いる場合の問題点を明らかにし，その問題点を解決する MoA アルゴリズムについて述べる．

4.3.1　異種アクセスポイント混在環境における既存のアクセスポイント選択アルゴリズムの問題点

図 4.3 を用いて AP と QAP が混在する環境における既存アルゴリズムの問題点について述べる．

図4.3(a)ではAPとQAPの優先制御の違いを示している．IEEE802.11eのEDCA (Enhanced Distributed Channel Access) に準拠したQAPは複数のキューを持ち[19]，トラヒックフローの優先度に応じてパケットの送信タイミングを変化させることにより，例えば音声のような高優先トラヒックの品質を高く維持できる．一方でIEEE802.11eをサポートしないレガシーなAPでは，単一のキューしか存在せず，すべてのトラヒックが同じキューで処理される．そのため，要求品質が異なるトラヒックが混在する場合には，それぞれに対して適切なQoSを保証することができない．

また，図4.3(b)ではAPとQAPで通知される情報の違いを示している．図4.3(a)で示したとおり，QAPには優先度に応じて複数のキューが存在するが，レガシーなAPでは単一のキューしか存在しない．そのため，QAPからはそれぞれのキューでの負荷情報を得ることができる一方，レガシーなAPではすべての優先度のトラヒックをまとめた負荷情報しか取得することができない．

既存のHRFA[85]のようなアルゴリズムでは，QAPから通知される情報を用いることを前提としており，QAPのみで構成される無線LANでは有効であるが，QAPとレガシーなAPが混在する無線LAN環境では利用することができない．そこで本章では，異なる機能を持ったAPが混在する環境における問題を解決対象とする．

4.3.2 ユーザ満足度指向アルゴリズムのアクセスポイント選択基準

提案するMoAアルゴリズムは，以下の4つの基準を用いてAPを選択する．

- APに接続されている端末数
- チャネルの利用率
- リアルタイムトラヒックの受け入れ可能時間 (QAPのみ)
- APと端末間の距離

APに接続されている端末数はAPやQAPが定期的に送信しているビーコンフレームを使って取得することができる．ただし，レガシーなAPに関しては文献[79, 81]に示されているような拡張ビーコンフレームや，文献[53]に示されているようなSIP (Session Initiation Protocol) のプレゼンス機能等を用いて接続している端末数を通知する必要がある．QAPに関してはIEEE802.11e標準で規定されてい

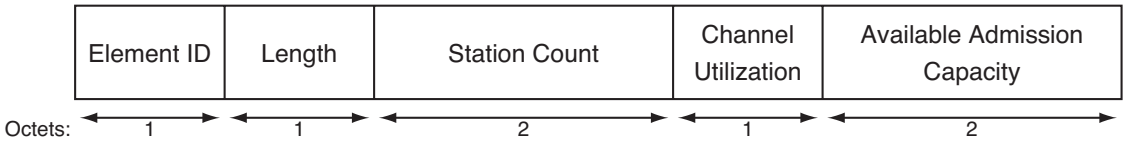


図 4.4: QBSS Load Element の構造

る，ビーコンフレームの一つである QBSS (QoS Basic Service Set) Load Element の Station Count フィールドによって端末数を通知することができる．QBSS Load Element の構造を図 4.4 に示す．レガシーな AP と QAP のどちらについても，これらの方法によって，端末は AP に接続している端末数についての情報を取得することができる．

本章ではチャネルの利用率を CUR (Channel Utilization Ratio) として定義する．レガシーな AP の CUR は CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) のキャリアセンス・メカニズムによって取得できる．キャリアセンスによってどれだけの時間チャネルが占有されているかを測定することにより，CUR を計算する．一方 QAP の CUR は端末数と同じく，QBSS Load Element の Channel Utilization フィールドで通知される．QAP の CUR もレガシーな AP と同様，どれだけの時間チャネルが占有されているかを示している．よって，端末はどちらの AP についてもチャネルの利用率を取得することができる．

リアルタイムトラヒックの受け入れ可能時間は QAP からのみ取得し，QBSS Load Element の AAC フィールドから取得する．IEEE802.11e の AAC フィールドでは，AP が受け入れ可能なリアルタイムトラヒックの残り時間を 32 マイクロ秒単位で通知する．QAP については，TCP (Transmission Control Protocol) トラヒックに対する伝送帯域の余裕をこの AAC を用いて計算する．AAC が大きいことはすなわちリアルタイムトラヒックが使用している伝送帯域が少なく，非リアルタイムトラヒックである TCP トラヒックが使用できる帯域が大きいことを示す．レガシーな AP はリアルタイムトラヒックと非リアルタイムトラヒックの区別をすることができないため，リアルタイムトラヒックの受け入れ可能時間はレガシーな AP からは取得できない．

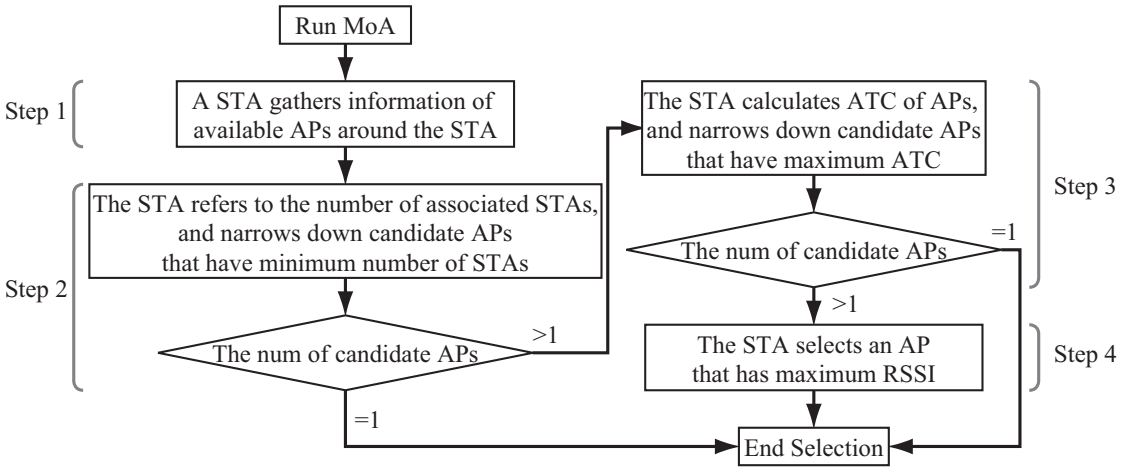


図 4.5: ユーザ満足度指向アルゴリズムのフローチャート

AP と端末間の距離は，端末で受信される AP からの平均電力に基づいて端末が推定する．平均電力が大きければ大きいほど端末と AP の距離が近いものとして判断する．

4.3.3 ユーザ満足度指向アルゴリズム

図 4.5 に MoA アルゴリズムのフローチャートを示し，以下で MoA アルゴリズムの動作について述べる．

Step 1 MoA アルゴリズムはまず，周囲で利用可能な AP のスキャンを行う．

Step 2 次に利用可能な各 AP，QAP に接続している端末数を取得し，接続先候補となる AP 数の絞り込みを行う．TCP トラヒックと UDP (User Datagram Protocol) トラヒックが混在する環境では，接続している端末数が少ない AP ほど，伝送帯域に余裕があると推定することができる．

Step 3 その後，MoA アルゴリズムは伝送のために利用できる帯域に関する指標として ATC (Available Transmission Capacity) を計算する．ATC は CUR と AAC から計算され，0 から 100 の範囲の値を示す．$ATC = 100$ は AP の伝送帯域すべてを利用できることを示し，逆に $ATC = 0$ は AP の伝送帯域の余裕がないことを示

す．i 番目の AP である AP_i についての ATC_i は，次のように計算される．

$$ATC_i = \begin{cases} (1 - CUR_i/100) \cdot w_i & \text{forAP} \\ AAC_i \cdot w_i & \text{forQAP} \end{cases}, \tag{4.1}$$

ここで，AAC_i は AAC フィールドから得られるリアルタイムトラヒックの受け入れ可能時間を示す．また，w_i は伝送レートによる重みを示しており，次のように定義される．

$$w_i = \frac{1}{t_i}, \tag{4.2}$$

ここで，t_i は 1 つのパケットを伝送するときに要する時間で，フレームのサイズやヘッダサイズ，IFS (Inter Frame Space) を考慮して計算される．QAP では IFS 時間がレガシーな AP に比べて短くなる傾向があるため，QAP の伝送レートによる重みはレガシーな AP の伝送レートによる重みに比べて高く計算される．

Step 4　もし ATC を用いても接続先の AP を決定できない場合は，MoA アルゴリズムは候補の中で最も近距離にあると推定される AP へ接続する．

4.4　シミュレーションによる評価

4.4.1　シミュレーションモデル

図 4.6 に，本節でのシミュレーションエリアのモデルを示す．シミュレーションエリアの大きさは 70 メートル平方の正方形を仮定し，使用する無線 LAN の規格として IEEE802.11g[17]，QoS 保証のためのプロトコルとして IEEE802.11e[19] を仮定する．それらのパラメータは，周波数を除いてそれぞれの規格書で示されている標準的な値とし，IEEE802.11g のパラメータを表 4.1 に，IEEE802.11e のパラメータを表 4.2 にそれぞれ示す．

シミュレーションエリア内には 3 台の AP が存在し，すべての AP が利用するデータレートは 54Mbps を仮定する．これらの AP はシミュレーションエリア内に一様な確率分布に従って試行ごとにランダムに配置されるものとする．本節では，MoA アルゴリズムが QAP の存在比率によって大きく影響を受けないことを示すために，QAP の存在比率が異なる 3 つのシチュエーションを仮定した．そのシチュエーショ

表 4.1: IEEE802.11g のシミュレーションパラメータ

Frequency	2.412 GHz, 2.437 GHz, 2.462 GHz		
PLCP Preamble	16 μsec	PLCP Header (Signal)	1 Symbol
PLCP Header (Service)	16 bit	MAC Header	24 Octet
LLC Header	8 Octet	FCS	4 Octet
PLCP Tail	6 bit	Symbol Length	4 μsec
MAC ACK Length	10 Octet	Slot Time	9 μsec
SIFS	16 μsec	DIFS	34 μsec
CWmin	15	CWmax	1023

表 4.2: IEEE802.11e のシミュレーションパラメータ

Access Category	CWmin	CWmax	AIFSN
Background (AC_BK)	31	1023	7
Best Effort (AC_BE)	31	1023	3
Video (AC_VI)	15	31	2
Voice (AC_VO)	7	15	2

表 4.3: シチュエーションごとの AP と QAP の存在比

Situation	legacy AP	QAP
QAP 比率低 (QAP 1/3)	2	1
QAP 比率中 (QAP 2/3)	1	2
QAP 比率高 (QAP 3/3)	0	3

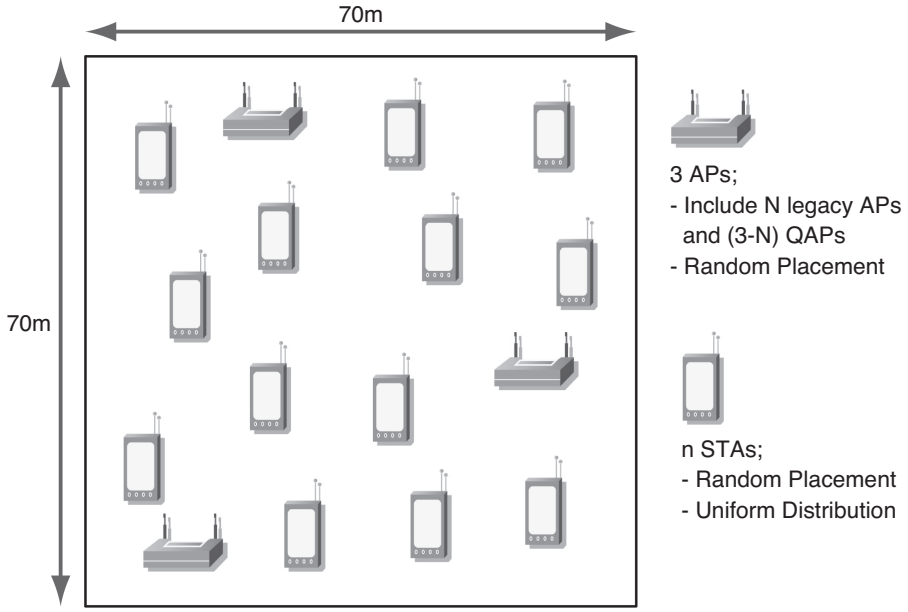


図 4.6: シミュレーションエリアのモデル

ンを表 4.3 に示す．QAP 比率低 (QAP 1/3) は，3 台の AP のうち，1 台が QAP，残りの 2 台がレガシーな AP であるシチュエーションであり，QAP 比率中 (QAP 2/3) は 3 台のうち 2 台が QAP，QAP 比率高 (QAP 3/3) は 3 台すべてが QAP のシチュエーションである．

さらに，本シミュレーションでは 2 種類のトラヒックフローの存在を仮定した．1 つは音声通信サービスを提供する音声フローであり，もう 1 つはデータ通信サービスを提供するデータフローである．音声フローとして VoIP (Voice over Internet Protocol) アプリケーションから発生するフローを仮定する．そのトランスポート層プロトコルは UDP，ペイロードサイズは 160 バイトであり，パケット発生間隔は 20 ミリ秒とする．また，IEEE802.11e におけるアクセスカテゴリ (Access Category, AC) は最優先のパケットを表す AC_VO とする．この値は PCM (Pulse Code Modulation) 音声の標準である G.711[89] における一般的な値である．一方，データフローとしては FTP (File Transfer Protocol) アプリケーションから発生するフローを仮定する．そのトランスポート層プロトコルは TCP，ペイロードサイズは 1460 バイトを仮定する．このペイロードサイズは Ethernet[90] を通じて伝送できる最大のペイロードサイズである．また，AC はバックグラウンドのパケットを表

表 4.4: 各フローのパラメータ

Application	VoIP	FTP
Transport Layer Protocol	UDP	TCP
Payload Size	160 Byte	1460 Byte
Interval	20 ms	
Required Data Rate	64 kbps	Best-Effort
Direction	UP DOWN	DOWN
Access Category	AC_VO	AC_BK

表 4.5: 各 Case におけるトラヒックの存在比

	均等トラヒック Case 1	VoIP 中心トラヒック Case 2	FTP 中心トラヒック Case 3
VoIP	1	3	1
FTP	1	1	3

す AC_BK とする．これらのパラメータを表 4.4 に示す．

MoA アルゴリズムがトラヒックフローの存在比にも大きく影響されないことを示すために，トラヒックフローの存在比についても Case 1 から Case 3 までの 3 通りの場合を仮定した．均等トラヒック (Case 1) は VoIP と FTP の比が 1:1 の場合であり，それぞれが均等に発生する．VoIP 中心トラヒック (Case 2) は VoIP と FTP の比が 3:1 の場合であり，FTP と比較して VoIP が多く発生する状況である．FTP 中心トラヒック (Case 3) はその逆であり，VoIP と FTP の比が 1:3 であり，VoIP と比較して FTP が多く発生する状況である．それぞれの場合におけるトラヒックフローの存在比を表 4.5 に示す．

MoA アルゴリズム (MoA) の有効性を示すために 3 つの既存アルゴリズムとの比較を行った．1 つめは RSSI (Received Signal Strength Indication) に基づいて最も電力の大きい AP を選択するアルゴリズム (RSSI) で，現在最も一般的に用いら

れているものである．2 つめは AP に接続している端末数に基づいて，もっとも端末数が少ない AP を選択するアルゴリズム (NumSTA) [79, 81] であり，3 つめは利用するアプリケーションに応じて QAP とレガシーな AP を使い分けるアルゴリズム (APP) であり，HRFA[85] に似た動作をするアルゴリズムである．APP アルゴリズムは RT (Real-Time) フローである VoIP に対しては QAP の AAC フィールドを取得して接続先を判断し，NRT (Non-Real-Time) フローである FTP に対しては QAP の CU フィールドとレガシーな AP の CUR から接続先を判断する．AAC フィールドは QAP からしか得られないため，RT フローは QAP にのみ接続される．一方，CU フィールドと CUR は QAP とレガシーな AP のどちらからも得られる．もしいずれの CUR も最大で，CUR からは接続先が判断できない場合，APP は RSSI に従って最も平均電力の大きい AP を選択する．

シミュレーションエリア内に存在する端末の数は 50 端末から 120 端末の間で変化させる．IEEE802.11g における理論的なスループット解析の結果から，本シミュレーションで仮定する VoIP フローに対する 3 つの AP の合計のキャパシティは，すべての AP が 54Mbps のデータレートを用いることができると仮定すれば，17.18Mbps となる [3]．すなわち，VoIP フローが 67 フロー存在するとき 3 つの AP の合計のキャパシティの半分を消費することになる．また別のシミュレーションより，キャパシティの半分を消費すると VoIP の PLR (Packet Loss Rate) が 30%程度になることが知られている [50]．これは上り方向でパケットの衝突が頻発するためであるが，特に IEEE802.11e を用いた VoIP パケットの伝送の場合，パケットの送出までのランダムな待ち時間が短くなる傾向にあるため，より衝突が頻発する．以上の理由により，端末数の上限は 3 つの AP が合計のキャパシティの半分程度の 60 端末まで VoIP を増やすものとする．VoIP が 60 端末存在することは，Case 1 では 120 端末がシミュレーションエリア内に存在することに相当する．

それぞれのシミュレーションにおける試行回数は 3000 回とした．

4.4.2　評価対象

本章のシミュレーションでは主に 2 つの対象について評価を行った．VoIP フローに対しては平均推定 MOS 値 (estimated MOS, eMOS)，FTP フローに対しては平均スループットによる評価を行った．

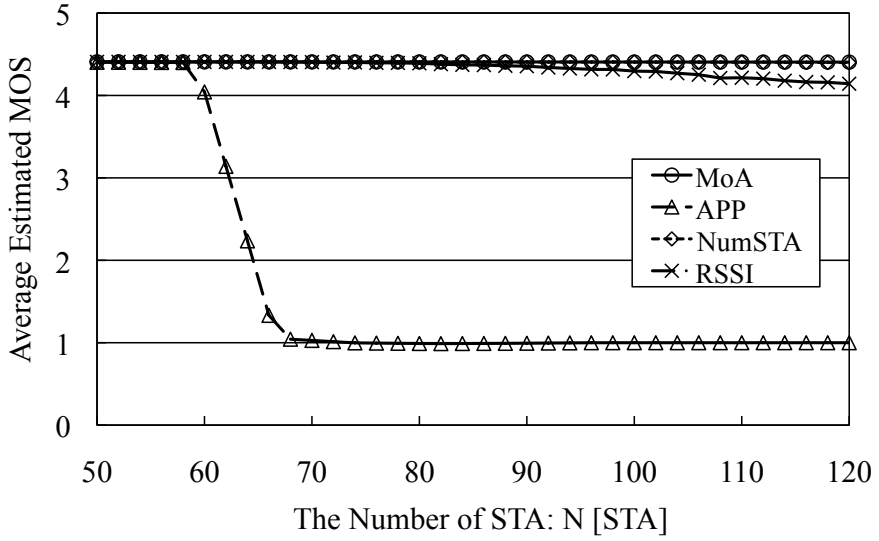


図 4.7: 均等トラヒック (Case 1)，QAP 比率低 (QAP 1/3) における平均 VoIP 推定 MOS 値

平均 eMOS 値はユーザの QoE の評価指標の一つであり，ITU-T の G.107 勧告 [69] で規定されている，音声の回線品質に対してユーザがどれだけ満足できたかを推定することができる指標である．eMOS 値のそのほかの特長として，PLR と遅延時間を一括で取り扱うことができるため，PLR と遅延時間を総合的に評価することができることが挙げられる．VoIP の通信においては，eMOS 値が 4.0 以上であればクラス A として定めることができ，これは有線での音声通信と同等の品質としてとらえることができる．また，eMOS 値が 3.6 以上であればクラス B として定めることができ，これは携帯電話並の品質としてとらえることができる [92]．eMOS 値は R 値 [69] から計算することができる．R 値は音声通信の QoS に関する指標であり，平均 PLR と平均遅延時間などから計算することができる．QoS の指標である R 値を QoE の指標である MOS 値として表すために，G.107 で示されている手法を用いて R 値を eMOS 値に変換した．加えて，この平均 eMOS 値の改善を別の側面から見るために，QAP 3/3 の Case 2 では平均 PLR と平均片方向遅延時間による評価も行った．

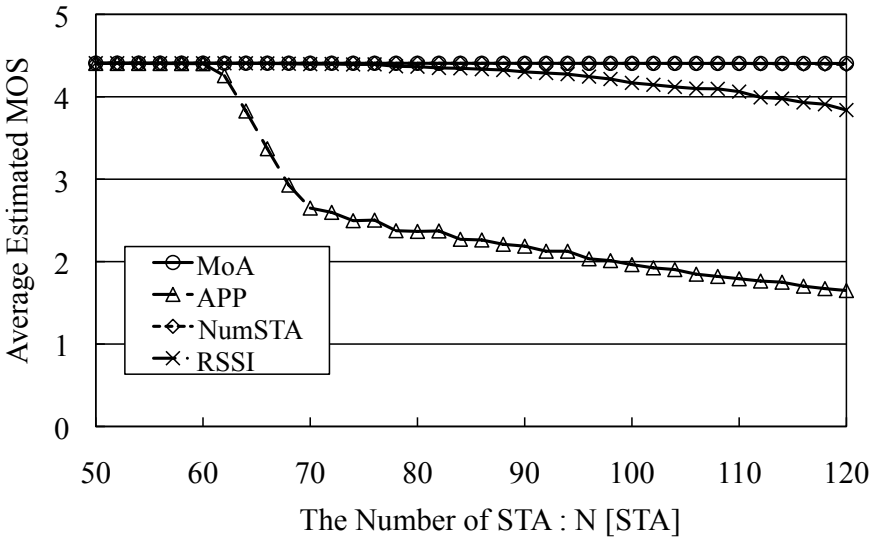


図 4.8: 均等トラヒック (Case 1)，QAP 比率中 (QAP 2/3) における平均 VoIP 推定 MOS 値

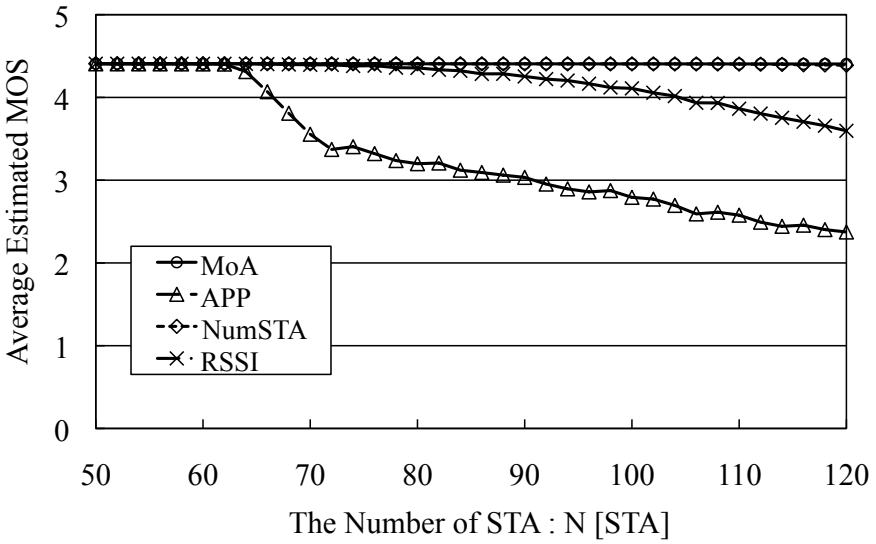


図 4.9: 均等トラヒック (Case 1)，QAP 比率高 (QAP 3/3) における平均 VoIP 推定 MOS 値

4.4.3 均等トラヒック (Case 1) における平均 VoIP 推定 MOS 値評価

図 4.7 から図 4.9 に均等トラヒック (Case 1) における VoIP の平均 eMOS 値の評価を示す．図 4.7 と図 4.8 はそれぞれ，QAP 比率低 (QAP 1/3) と QAP 比率中 (QAP 2/3) のシチュエーションにおける評価を示す．これらのシチュエーションでは，MoA と NumSTA は端末数に関わらず eMOS 値 4.5 を保っている．一方で，APP と RSSI では eMOS 値の劣化が見られる．RSSI は 120 端末に近づくにつれてわずかに eMOS 値が劣化しているが，依然としてクラス A の品質は保つことができている．一方で，APP は端末数が 60 を超えると急激に eMOS 値が劣化し，非常に悪い QoE となる．図 4.9 に示す，QAP 比率高 (QAP 3/3) のシチュエーションでは，MoA と NumSTA は同様に端末数に関わらず eMOS 値 4.5 を保っており，高い QoE を維持できている．一方で RSSI と APP は同様に eMOS 値が劣化しており，RSSI では 102 端末まではクラス A の品質を維持できているが，102 端末を超えると QoE が劣化し，クラス B の品質となっている．APP では品質の劣化はさらに顕著となり，クラス A の品質は 66 端末までしか保つことができず，クラス B の品質も 70 端末までしか保つことができない．

これは提案する MoA アルゴリズムを用いた APSA が VoIP フローに関してレガシーな AP より QAP に優先的に接続を行っているためである．その一方で，VoIP フローを QAP のみに接続する APP の品質が著しく劣化しているのは，FTP フローによる影響を考えずに VoIP フローを QAP に接続しているためである．そのため APP は混雑した AP に対して VoIP フローの接続を指示する可能性があり，平均 eMOS 値の劣化を招く．

4.4.4 VoIP 中心トラヒック (Case 2) における平均 VoIP 推定 MOS 値評価

図 4.10 から図 4.12 に VoIP 中心トラヒック (Case 2) における VoIP の平均 eMOS 値の評価を示す．図 4.10 は QAP 比率低 (QAP 1/3) のシチュエーションにおける評価を示し，このとき MoA は端末数に関わらずクラス A の品質を維持できていることが分かる．NumSTA は 112 端末まで，RSSI では 88 端末までクラス A の品質を維持できているが，APP については全域で非常に悪い品質となっている．このことから，QAP 1/3 のシチュエーションにおいて，MoA は NumSTA と比較して，

クラス A で収容できる端末数を 7%以上改善することがわかった．図 4.11 と図 4.12 はそれぞれ，QAP 比率中 (QAP 2/3) と QAP 比率高 (QAP 3/3) のシチュエーションにおける VoIP の eMOS 値の評価を示している．これらの場合，いずれのアルゴリズムも eMOS 値の劣化が見られるが，MoA はいずれの場合においても既存のアルゴリズムと比較して高い eMOS 値を維持している．QAP 1/3 の場合と同様に，クラス A で収容できる端末数で比較を行うと，既存のアルゴリズムの中で最も収容できる端末数が多い NuMSTA に対して QAP 2/3 と QAP 3/3 の場合それぞれにおいて，10%，14%の改善が得られた．また，QAP 3/3 の場合には，$N = 116$ において MoA は NumSTA と比較して eMOS 値を 1.2 倍に改善する．

これは提案する MoA アルゴリズムを用いた APSA が FTP フロー混在時に，端末数と AAC を同時に考慮することによって，特定の AP に FTP フローが集中する問題を解決できるためである．よって，Case 2 において MoA は既存のアルゴリズムと比較して有効であると言える．

4.4.5　FTP 中心トラヒック (Case 3) における平均 VoIP 推定 MOS 値評価

FTP 中心トラヒック (Case 3) では VoIP の平均 eMOS 値の特性はすべてのアルゴリズムで大きく変わることはなく，すべてのアルゴリズムが全域で eMOS 値 4.0 以上を達成した．

4.4.6　平均 VoIP 推定 MOS 値の信頼区間評価

表 4.6 から表 4.8 にそれぞれの Case における両側 95%信頼区間の最大値を示す．これらの信頼区間は各評価点に対して t 分布を用い，要素数を 3000 として導出した [93]．

評価結果から，eMOS 値の平均は十分に収束しており，提案する MoA アルゴリズムと既存のアルゴリズムには有意な差があるといえる．

4.4.7　平均 VoIP パケットロス率と平均 VoIP 片方向遅延時間の評価

平均 eMOS 値についての評価を別の側面からも評価するために，図 4.13 と図 4.14 に示すとおり，VoIP の平均 PLR と平均片方向遅延時間による評価を行った．評価は特に MoA の効果が大きかった VoIP 中心トラヒック (Case 2) の QAP 比率高 (QAP

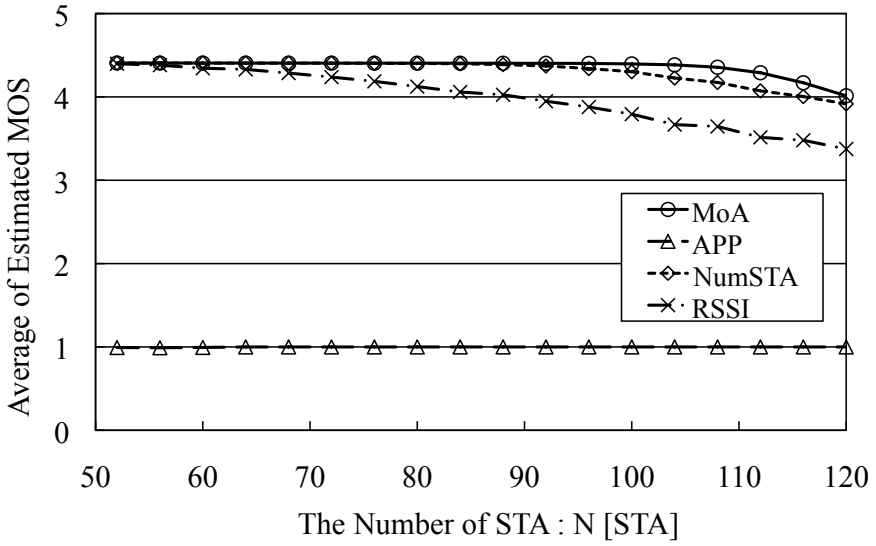


図 4.10: VoIP 中心トラヒック (Case 2)，QAP 比率低 (QAP 1/3) における平均 VoIP 推定 MOS 値

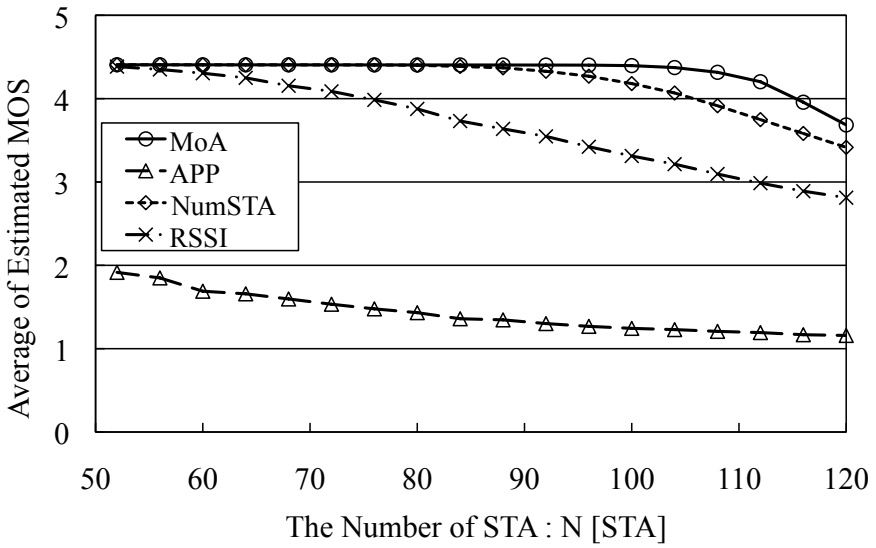


図 4.11: VoIP 中心トラヒック (Case 2)，QAP 比率中 (QAP 2/3) における平均 VoIP 推定 MOS 値

表 4.6: 均等トラヒック (Case 1) における平均 VoIP 推定 MOS 値の信頼区間最大値

	QAP 1/3	QAP 2/3	QAP 3/3
MoA	$\pm 3.86 \times 10^{-5}$	$\pm 1.38 \times 10^{-4}$	$\pm 4.94 \times 10^{-4}$
APP	$\pm 1.05 \times 10^{-3}$	$\pm 5.97 \times 10^{-2}$	$\pm 5.18 \times 10^{-2}$
NumSTA	$\pm 2.79 \times 10^{-3}$	$\pm 4.29 \times 10^{-3}$	$\pm 4.65 \times 10^{-3}$
RSSI	$\pm 2.29 \times 10^{-2}$	$\pm 3.30 \times 10^{-2}$	$\pm 3.86 \times 10^{-2}$

表 4.7: VoIP 中心トラヒック (Case 2) における平均 VoIP 推定 MOS 値の信頼区間最大値

	QAP 1/3	QAP 2/3	QAP 3/3
MoA	$\pm 2.95 \times 10^{-2}$	$\pm 3.71 \times 10^{-2}$	$\pm 3.99 \times 10^{-2}$
APP	$\pm 3.15 \times 10^{-6}$	$\pm 6.05 \times 10^{-2}$	$\pm 5.93 \times 10^{-2}$
NumSTA	$\pm 3.66 \times 10^{-2}$	$\pm 4.78 \times 10^{-2}$	$\pm 5.26 \times 10^{-2}$
RSSI	$\pm 4.58 \times 10^{-2}$	$\pm 5.46 \times 10^{-2}$	$\pm 5.85 \times 10^{-2}$

表 4.8: FTP 中心トラヒック (Case 3) における平均 VoIP 推定 MOS 値の信頼区間最大値

	QAP 1/3	QAP 2/3	QAP 3/3
MoA	$\pm 2.33 \times 10^{-5}$	$\pm 2.60 \times 10^{-5}$	$\pm 2.84 \times 10^{-5}$
APP	$\pm 9.93 \times 10^{-4}$	$\pm 5.81 \times 10^{-4}$	$\pm 8.16 \times 10^{-5}$
NumSTA	$\pm 2.77 \times 10^{-5}$	$\pm 3.04 \times 10^{-5}$	$\pm 3.31 \times 10^{-5}$
RSSI	$\pm 5.17 \times 10^{-5}$	$\pm 5.53 \times 10^{-5}$	$\pm 5.95 \times 10^{-5}$

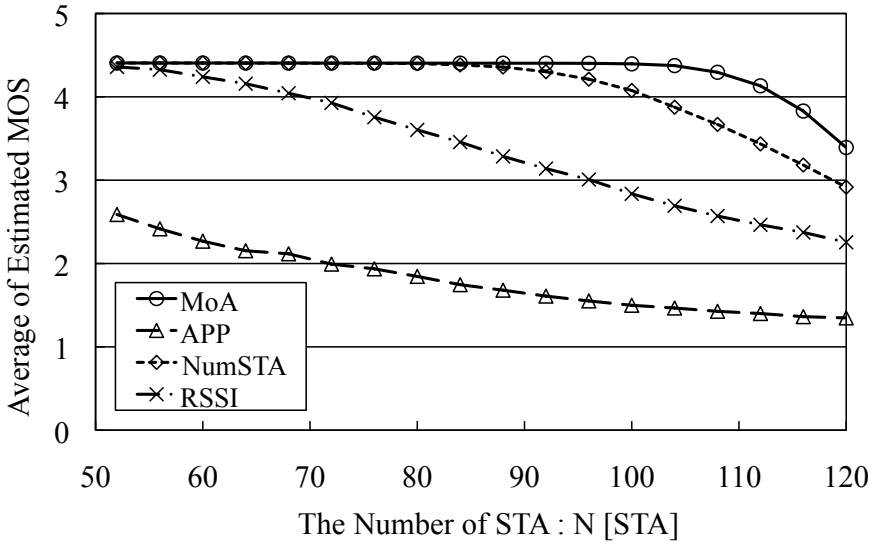


図 4.12: VoIP 中心トラヒック (Case 2)，QAP 比率高 (QAP 3/3) における平均 VoIP 推定 MOS 値

3/3) について行った．図 4.13 と図 4.14 に示すように，MoA は平均 PLR と平均片方向遅延時間のいずれも他の既存アルゴリズムと比較して大きく改善し，NumSTA に対して $N = 100$ で PLR を 50 分の 1 に低減し，遅延時間を 5 分の 1 に短縮する．また，図 4.12 の 84 端末において，MoA は eMOS 値を RSSI と比較して 1 改善しているが，このとき MoA は RSSI の 6.5%の PLR に対して 0%を達成するとともに，遅延時間を 17 分の 1 に短縮する．

4.4.8 均等トラヒック (Case 1) における平均 FTP スループット評価

均等トラヒック (Case 1) のいずれのシチュエーションにおいても，MoA は NSTA，RSSI と同等のスループットを達成する一方，90 端末以下の範囲において MoA は APP に対して $N = 60$ で約 17%のスループットの改善を得た．しかし，90 端末を超える範囲では APP に対して約 20%低いスループットとなった．

よって，MoA は APP に対して高負荷域でスループットの劣化を引き起こすが，VoIP での品質の改善量を鑑みた場合，APP の PLR が 50%を超えるのに対し，MoA では 0%に抑えられており，スループットの劣化以上に VoIP の品質を大幅に改善できる．

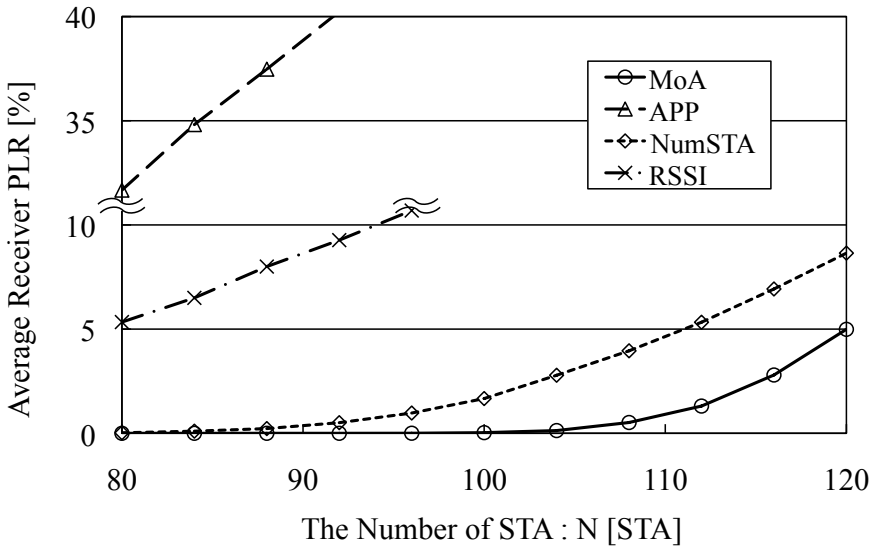


図 4.13: VoIP 中心トラヒック (Case 2)，QAP 比率高 (QAP 3/3) における平均 VoIP パケットロス率

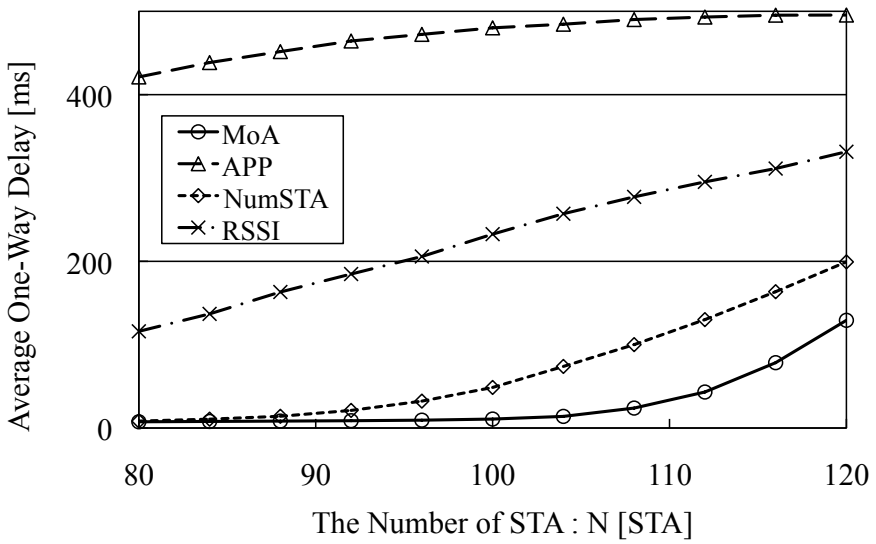


図 4.14: VoIP 中心トラヒック (Case 2)，QAP 比率高 (QAP 3/3) における平均 VoIP 片方向遅延時間

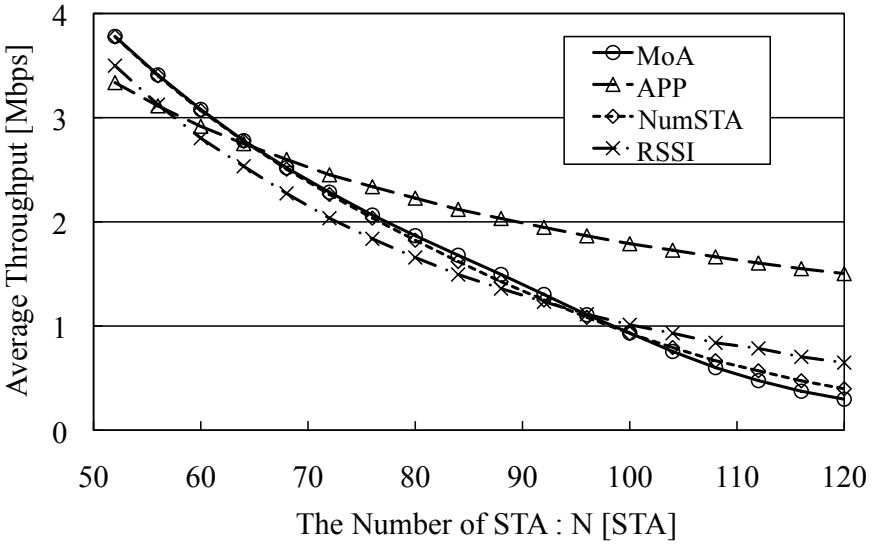


図 4.15: VoIP 中心トラヒック (Case 2)，QAP 比率低 (QAP 1/3) における平均 FTP スループット

4.4.9 VoIP 中心トラヒック (Case 2) における平均 FTP スループット評価

図 4.15 に VoIP 中心トラヒック (Case 2) の QAP 比率低 (QAP 1/3) における FTP の平均スループットの評価を示す．QAP 比率中 (QAP 2/3) の場合と QAP 比率高 (QAP 3/3) の場合にも平均スループットは同様の特性を示す．QAP 1/3 と QAP 2/3 の場合には，64 端末以上と 60 端末以上の範囲で APP がすべてのアルゴリズムと比較して最大で約 2 倍のスループットを達成する．これは APP が FTP フローをレガシーな AP にのみ接続するため，他のアルゴリズムに比べて FTP を伝送するための帯域の余裕を確保しやすいことに起因する．QAP 3/3 の場合にもやはり APP が他のアルゴリズムと比較して約 2.5 倍のスループットを達成する．しかし，VoIP の評価では APP は低い品質しか達成していないことから，APP の高いスループットは VoIP の品質を犠牲にして達成したものであると言うことができる．

4.4.10 FTP 中心トラヒック (Case 3) における平均 FTP スループット評価

FTP 中心トラヒック (Case 3) のいずれのシチュエーションにおいても，MoA は APP を除く 3 つのアルゴリズムと比較して ±1% 以内のほぼ同等のスループットを

達成し，APP に対しては 15%高いスループットを達成した．

よって，MoA は既存のアルゴリズムのうち，APP に対しては FTP スループットの点で有効であるとともに，NumSTA と RSSI に対しては FTP スループットを同等に保つことができる．

4.4.11　平均 FTP スループットの信頼区間評価

表 4.9 から表 4.11 に t 分布を用いて計算した FTP スループットの平均値の両側 95%信頼区間の最大値を示す．

均等トラヒック (Case 1) では MoA と APP の間に，QAP 比率低 (QAP 1/3) で 50 端末から 76 端末の間，QAP 比率中 (QAP 2/3) で 50 端末から 68 端末の間と 110 端末から 120 端末の間，QAP 比率高 (QAP 3/3) で 102 端末から 120 端末の間で有意な差が見られた．Case 1 のそれ以外の範囲，それ以外のアルゴリズムに対しては有意な差が見られなかった．VoIP 中心トラヒック (Case 2) では MoA と APP の間に 100 端末以上の範囲のすべてのシチュエーションで有意な差が見られ，それ以外の範囲とそれ以外のアルゴリズムに対しては有意な差が見られなかった．FTP 中心トラヒック (Case 3) では MoA と APP の間に QAP 1/3 と QAP 2/3 で 60 端末から 92 端末の間で有意な差が見られたが，それ以外の範囲とそれ以外のアルゴリズムに対しては有意な差が見られなかった．

4.5　結言

本章では，異なる機能を持ったアクセスポイントと異なるサービスが混在する環境で適切なアクセスポイントを選択するためのアクセスポイント選択エージェントである mAPSA と，そのアルゴリズムとしてユーザ満足度指向アルゴリズムである MoA アルゴリズムを提案した．

提案した MoA アルゴリズムは単一サービス環境で有効とされる既存方式 NumSTA に対して，サービス混在環境で，リアルタイムサービスである音声通話サービスのユーザ体感品質の指標となる eMOS 値を最大で 1.2 倍改善するとともに，クラス A といった高品質で収容可能な端末数を最大 14%向上し，また，サービス品質の指標であるパケットロス率を最大で 50 分の 1 に抑え，遅延時間を最大で 5 分

表 4.9: 均等トラヒック (Case 1) における平均 FTP スループットの信頼区間最大値

	QAP 1/3	QAP 2/3	QAP 3/3
MoA	$\pm 1.92 \times 10^{-2}$	$\pm 1.90 \times 10^{-2}$	$\pm 1.30 \times 10^{-2}$
APP	$\pm 1.28 \times 10^{-1}$	$\pm 1.08 \times 10^{-1}$	$\pm 9.32 \times 10^{-2}$
NumSTA	$\pm 2.74 \times 10^{-2}$	$\pm 2.53 \times 10^{-2}$	$\pm 2.29 \times 10^{-2}$
RSSI	$\pm 1.29 \times 10^{-1}$	$\pm 1.26 \times 10^{-1}$	$\pm 1.24 \times 10^{-1}$

表 4.10: VoIP 中心トラヒック (Case 2) における平均 FTP スループットの信頼区間最大値

	QAP 1/3	QAP 2/3	QAP 3/3
MoA	$\pm 8.11 \times 10^{-2}$	$\pm 7.30 \times 10^{-2}$	$\pm 5.51 \times 10^{-2}$
APP	$\pm 2.15 \times 10^{-1}$	$\pm 1.90 \times 10^{-1}$	$\pm 1.52 \times 10^{-1}$
NumSTA	$\pm 9.42 \times 10^{-2}$	$\pm 8.41 \times 10^{-2}$	$\pm 6.95 \times 10^{-2}$
RSSI	$\pm 1.86 \times 10^{-1}$	$\pm 1.78 \times 10^{-1}$	$\pm 1.67 \times 10^{-1}$

表 4.11: FTP 中心トラヒック (Case 3) における平均 FTP スループットの信頼区間最大値

	QAP 1/3	QAP 2/3	QAP 3/3
MoA	$\pm 7.51 \times 10^{-3}$	$\pm 6.64 \times 10^{-3}$	$\pm 4.17 \times 10^{-3}$
APP	$\pm 8.22 \times 10^{-2}$	$\pm 7.39 \times 10^{-2}$	$\pm 6.33 \times 10^{-2}$
NumSTA	$\pm 1.25 \times 10^{-2}$	$\pm 1.18 \times 10^{-2}$	$\pm 1.08 \times 10^{-2}$
RSSI	$\pm 9.61 \times 10^{-2}$	$\pm 9.48 \times 10^{-2}$	$\pm 9.06 \times 10^{-2}$

の 1 に短縮することを示した.

一方，既存方式 APP に対しては，サービス混在環境で非リアルタイムサービスであるデータ転送サービスのスループットを最大で 17%向上することを示した.

本解析では異なるサービスを有する無線 LAN ネットワークを中心に取り扱っているが，異なるサービス約款 (Service Level Agreement, SLA) を有する移動通信ネットワークの基地局選択の問題に対しても本手法は同様に適用可能である.

第5章　ユーザ体感品質向上のためのパケット削減エージェント

5.1　序言

IEEE802.11 系の無線 LAN (Local Area Network) において多数の VoIP (Voice over Internet Protocol) 端末を収容する場合，CW (Contention Window) の値次第では QoS (Quality of Service) が著しく低下する問題が発生する．IEEE802.11 系の無線 LAN では，CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) を用いて，0 から CW 値の範囲からフレーム送出までのバックオフ時間をランダムに選び，チャネルがアイドル状態の時にバックオフ時間を減算することでフレームの送信タイミングを決定するが，多数の端末が収容される場合，小さな CW 値によって端末に小さなバックオフ時間が設定される時には他の端末が送出するフレームとの衝突の可能性が高くなり，パケットロス率 (Packet Loss Rate, PLR) の増大をもたらす．また，多数の端末が収容される場合にはチャネルがビジー状態である時間が長いために，大きな CW 値によって大きなバックオフ時間が設定されるときにはバックオフ時間の減算が進まないことで遅延時間の増大をもたらす．すなわち，QoS を保証して収容できる端末数は CW 値によって制限される．

本章では回線品質の指標となる R 値を $R \geq 80$ に保ちながら，各端末から送信されるパケットの伝送を故意に一定の割合で抑制することでパケット量を削減し，QoS を維持したまま収容端末数の上限を向上させるパケット削減エージェント，PRA (Packet Reduction Agent) を提案する．PRA は高品質で所要 QoS を十分に満たしている端末の QoS を，サービスの所要 QoS を満たす範囲で劣化させることで，低品質で所要 QoS を満たしていない端末に対してパケットの送信機会を与え，低品質の端末の QoS を向上させる．すなわち，QoS の評価基準である R 値の平均値を維持しながら端末間の R 値の格差を縮めることで R 値の平均化を図り，全ての収容端末が所要 QoS を満たすようにし，ユーザ体感品質の向上と収容端末数の拡大を達成する．

以下ではまず，パケット削減エージェントである PRA と，パケット削減エージェントが用いるユーザ体感品質向上と収容端末拡大のための具体的なパケット削減ア

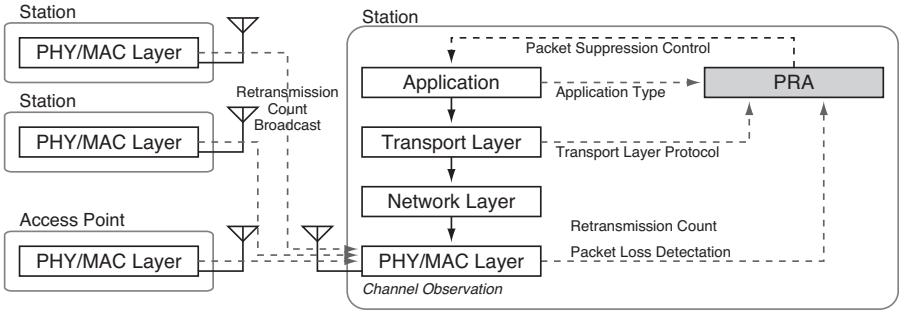


図 5.1: パケット削減エージェントのシステム構成

ルゴリズムである PPTS (Periodic Packet Transmission Suppression) アルゴリズムについて述べる．その後，R 値について音声の QoS についてユーザの満足度を “Satisfied” に保つことができる $R \geq 80$ を維持可能な許容パケットロス率について評価を行い，伝送を抑制可能なパケットの最大の割合を示す最大パケット抑制率を明らかにした上で，計算機シミュレーションによりその有効性を示す．

5.2 パケット削減エージェント

多数の端末を収容する無線 LAN では，CW 値から決定されるバックオフ時間のために，ある端末数を超えるとフレームの衝突が頻発し，急激に平均 PLR，平均遅延時間が増大する．この収容端末数の上限を改善するために，パケット削減エージェント，PRA を提案する．PRA は AP (Access Point) の伝送帯域が逼迫した状況において，収容されている端末から送信されるパケットの量を削減することで伝送帯域に余裕を生み，端末間の QoS の格差を是正することで所要 QoS を満たしたまま収容端末数の拡大を図る．PRA は主に 5.2.2 節で述べるようなパケットの送信を抑制するアルゴリズムを用いてパケット量の削減を行うが，従来検討されてきた効率的なスケジューリング [94, 95] やパケットアグリゲーション [96–98] などの手法とも組み合わせてパケット量を削減することも可能である．

5.2.1 パケット削減エージェントのシステム構成

図 5.1 に，PRA のシステム構成を示す．端末 (Station, STA) は定期的に接続しているアクセスポイントとの通信チャネルの監視を行い，周囲の端末のパケットの

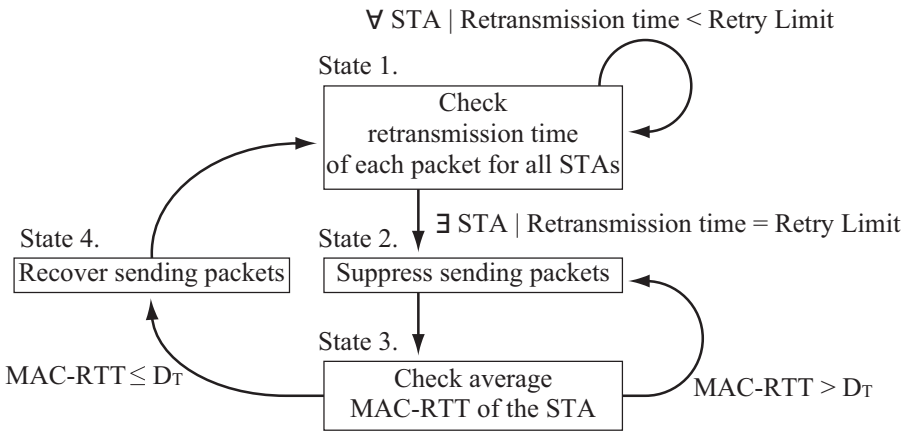


図 5.2: パケット削減アルゴリズムの状態遷移図

再送回数と，パケット衝突によるパケットロスの有無についての情報を取得する．この取得した情報は PRA に渡され，さらに PRA はアプリケーションレイヤから得られる利用アプリケーションタイプと，トランスポートレイヤから得られるトランスポート層プロトコルを取得し，MAC (Media Access Control) レイヤに対して適切なパケット削減量を指示する．指示を受けた MAC レイヤは，削減量に基づいて周期的にパケットの送信を間引き，送信パケット量の削減を図る．

5.2.2 パケット削減アルゴリズム

図 5.2 を用いて PRA で用いるパケット削減アルゴリズムである PPTS アルゴリズムについて具体的に述べる．

状態 1 端末は通信を行っている全ての端末から，フレームの再送回数に関する情報をチャネルのスキャンを通じて得る．各端末はそれぞれフレームの再送回数を送信フレームに重畳して送信することにより，周囲の端末に対してフレーム再送回数を通知する．通信を行っている全ての端末のフレーム再送回数に関する情報を得た後，その再送回数の最大値が規定される Retry Limit 未満であれば，そのままスキャンを続行し，状態 1 に戻る．一方，再送回数が Retry Limit に達している端末が 1 つでも存在した場合，端末は今後輻輳が発生すると判断し，状態 2 へ遷移する．

状態 2 端末は伝送するパケットのうち，α%のパケット伝送を周期的に抑制する制

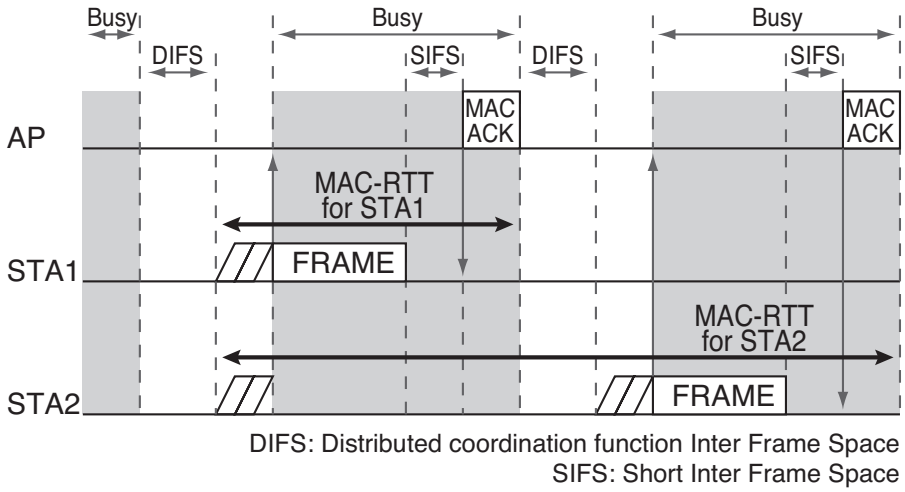


図 5.3: MAC-RTT の定義

御を行い，状態 3 へ遷移する．

状態 3 端末は自身が送出するフレームの MAC-RTT (Media Access Control layer Round Trip Time) の観測を行う．本章では MAC-RTT を図 5.3 のように定義し，端末がパケットを送信する際にバックオフのカウントダウンの開始から MAC ACK (Acknowledgement) を受信するまでの時間とする．端末は一定時間の観測を行い，MAC-RTT の平均値が一定の閾値 D_T 以上の場合はそのまま観測を続行し，状態 3 に戻る．一方，その平均値が閾値未満である場合，端末は輻輳状態が緩和されたと判断し，状態 4 へ遷移する．

状態 4 端末はパケット伝送の抑制を解除し，状態 1 へ遷移する．

5.3 最大パケット抑制率の評価

本節では音声の客観的 QoS 評価基準として用いられる R 値の観点から，VoIP においてユーザの満足度を “Satisfied” に保つことができる PLR の限界を評価し，品質維持可能な最大パケット抑制率 MSPR (Maximum Suppression Packet Ratio) を明らかにする．ここでパケット抑制率を，端末において伝送を抑制するパケットの割合を示す指標として定義し，MSPR を所要 QoS を満たすことのできる最大のパケット抑制率として定義する．R 値は音声の QoS を客観的に評価できる指標の一つ

表 5.1: G.109 における R 値とユーザ満足度の関係

R-value (lower limit)	User satisfaction
90	Very satisfied
80	Satisfied
70	Some users dissatisfied
60	Many users dissatisfied
50	Nearly all users dissatisfied

で，その計算は ITU-T の G.107 勧告 [69] で規定された E-model と呼ばれる計算式を用いて計算する．R 値を求めるパラメータは全部で 20 個存在するが，それぞれのパラメータを全て測定するのは困難であるため，本章では遅延時間と PLR，コーデックの特性のパラメータである Equipment Impairment Factor，I_e と Packet-Loss Robustness Factor，Bpl を考慮し，他のパラメータは G.107 で規定されたデフォルトの値を用いる．また，R 値の品質クラス分類として，G.109[91] では表 5.1 に示す分類がなされており，本章ではユーザの満足度を “Satisfied” に保つことができる $R \geq 80$ を達成することを目標とする．

まず初めに PLR と片方向遅延時間に対する R 値の関係を明らかにし，その後 IEEE802.11g[17] の無線 LAN における端末数に対する平均 PLR と平均片方向遅延時間の関係を明らかにする．その後，収容端末数が多い状態での最大許容 PLR を評価し，品質維持可能な MSPR を明らかにする．

5.3.1 パケットロス率と遅延時間に対する R 値の関係

VoIP の音声コーデックとして，ITU-T 勧告の G.711[89] で規定される PCM (Pulse Code Modulation) コーデックを仮定し，そのパラメータを表 2 に示す．表 2 には同時に，G.113[99] で規定される G.711 の，Equipment Impairment Factor，Ie と Packet-Loss Robustness Factor，Bpl を示す．

以上のパラメータを用いて G.107[69] の E-model を用いて計算した PLR と片方向遅延時間に対する R 値の関係を図 5.4 に示すとともに，表 5.3 に，E-model を用いて計算した，片方向遅延時間 T[ms] に対して R $>$ 80 を達成できる最大の許容

表 5.2: G.711 のシミュレーションパラメータ

Transport Layer Protocol	UDP
Payload Size	160 Byte
Interval	20 ms
Average Packet Arrival Rate	50 packets/sec
Required Data Rate	64 kbps
Direction	UP/DOWN
Equipment Impairment Factor, I_e	0
Packet-Loss Robustness Factor, Bpl	4.8

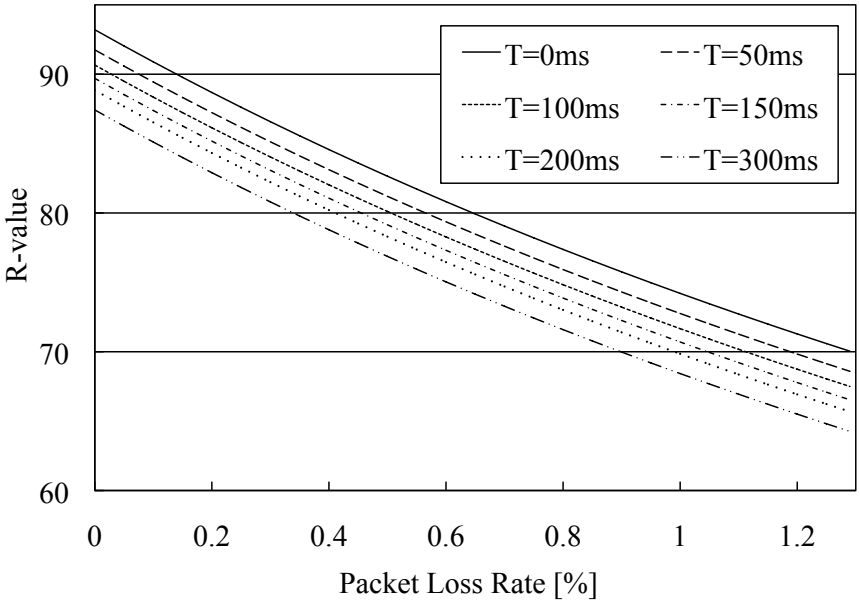


図 5.4: パケットロス率と片方向遅延時間 T に対する R 値の関係

表 5.3: 片方向遅延時間に対し，$R \geq 80$ を満たすことのできる最大パケットロス率

片方向遅延時間 T[ms]	0	50	100	150	200	300
最大許容 PLR [%]	0.65	0.55	0.50	0.45	0.41	0.33

表 5.4: IEEE802.11g のシミュレーションパラメータ

Frequency			2.412 GHz
PLCP Preamble	16 μsec	PLCP Header (Signal)	1 Symbol
PLCP Header (Service)	16 bit	MAC Header	24 Octet
LLC Header	8 Octet	FCS	4 Octet
PLCP Tail	6 bit	Symbol Length	4 μsec
MAC ACK Length	10 Octet	Slot Time	9 μsec
SIFS	16 μsec	DIFS	34 μsec
CWmin	15	CWmax	1023

PLR[%] を示す．表からわかるように，T が増加するにつれて最大許容 PLR は減少する．

5.3.2 端末数に対する平均パケットロス率と平均片方向遅延時間の評価

無線 LAN として IEEE802.11g[17] を仮定し，そのパラメータは標準的なものを仮定し，その値を表 5.4 に示す．また，VoIP は G.711 を用いるものとし，そのパラメータは表 5.2 に示したものを仮定する．1 つの AP に接続される端末数に対する平均 PLR と平均片方向遅延時間の特性を明らかにするために，図 5.5 に示すシミュレーションモデルを仮定し，端末数 N を 2 から 35 まで変化させてシミュレーションを行った．また，RTS/CTS (Request To Send / Clear To Send) の状態について 2 通りを仮定した．1 つは RTS/CTS を用いて伝送を行う場合 (w/ RTS/CTS) であり，これにより隠れ端末問題 [3] を回避することが可能となる．もう 1 つは RTS/CTS を用いないで伝送を行う場合 (w/o RTS/CTS) であり，隠れ端末問題が生じる可能性が高くなる代わりに，特に小さなサイズのパケットを伝送するときに，その伝送効率を大幅に向上することができる [95]．すべての端末は 100m × 100m のシミュレーションエリア内に，試行ごとに一様分布の確率分布に従ってランダムに配置されるものとし，AP はシミュレーションエリアの中央に配置する．試行回数は 1000 回とし，QualNet[86] を用いたシミュレーションを行った．

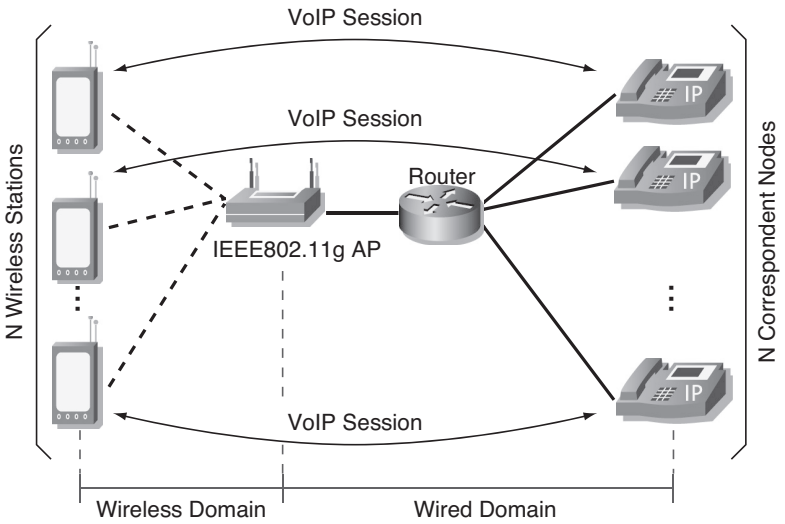


図 5.5: 端末数に対する平均パケットロス率と平均片方向遅延時間の評価におけるシミュレーションモデル

シミュレーション結果を図5.6と表5.5に示す．表5.5では，図5.6において平均PLRと平均片方向遅延時間が急増する前後の平均PLRと平均片方向遅延時間を示しており，具体的にはRTS/CTSを用いる場合で$N = 22, 23$，RTS/CTSを用いない場合で$N = 27, 28$となる．また，図5.6と表5.5では，それぞれの両側99%信頼区間も示している．これらの信頼区間はサンプル数を1000としてt分布によって計算した．

RTS/CTSを用いる場合では，$N = 22$で平均PLRが0.43%であるが，$N = 23$で6.47%に急増する．これは主に上り方向のフレーム衝突によるものである．多数の端末からAP方向へフレームが送信される場合，CWの値から決定されるバックオフ時間がフレーム間で重複することによってフレームの衝突が発生し，結果として多くのフレームが送信に失敗する．また，平均片方向遅延時間も増大し，$N = 23$で135ミリ秒となる．これは大きなバックオフ時間による遅延に加えて，衝突を起こしたフレームの再送制御により，フレームを送信するまでに必要な時間が増大することに起因する．

RTS/CTSを用いない場合にも同様に，平均PLRは$N = 27$での0.24%から，$N = 28$で7.15%へ急激に増加する．また，平均片方向遅延時間も増大し，$N = 28$で113ミリ秒となる．これらの原因も同様に，上り方向のフレーム衝突によるもの

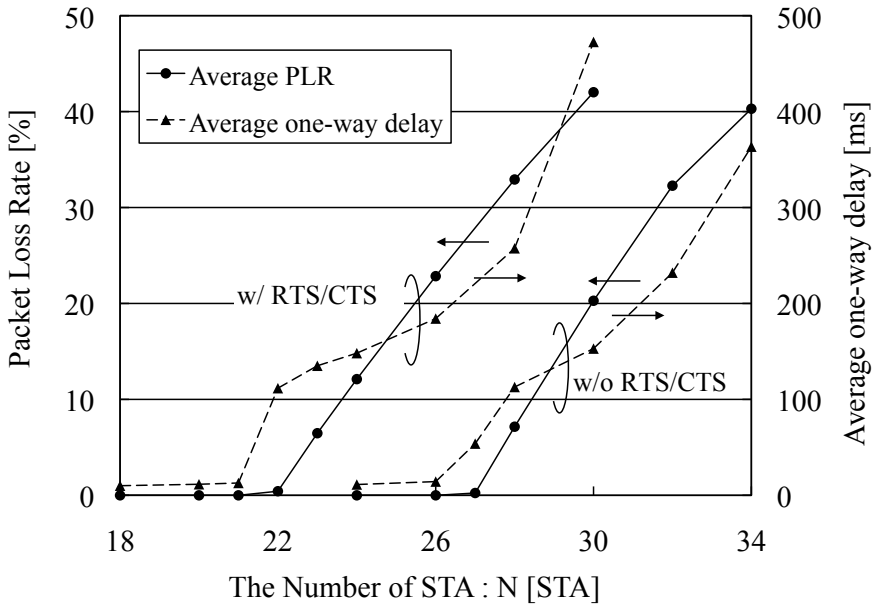


図 5.6: 端末数に対する平均パケットロス率と平均片方向遅延時間と両側 99%信頼区間

表 5.5: パケットロス率急増点における平均パケットロス率，平均片方向遅延時間とそれぞれの両側 99%信頼区間

(a) RTS/CTS を用いる場合

	Average PLR	Average one-way delay
$N = 22$	$0.43 \pm 9.04 \times 10^{-5}$ %	112 ±1.14 [ms]
$N = 23$	$6.47 \pm 1.27 \times 10^{-2}$ %	135 ±1.35 [ms]

(b) RTS/CTS を用いない場合

	Average PLR	Average one-way delay
$N = 27$	$0.24 \pm 1.00 \times 10^{-4}$ %	54 ±1.26 [ms]
$N = 28$	$7.15 \pm 1.40 \times 10^{-2}$ %	113 ±1.50 [ms]

である．

5.3.3 最大パケット抑制率の評価

図5.6と表5.5より，IEEE802.11gを用いたVoIP伝送でパケットロスが発生するのは$N \geq 27$であり，特に$N \geq 28$ではPLRが急増する．$N = 27$の時，平均PLRは0.24%である．表5.2のVoIPのパラメータから，1秒あたりに送出されるパケット数は50なので，$N = 27$で1端末が1秒あたりに平均的に伝送に失敗するパケットの数は0.12パケットとなり，27端末では1秒あたり3.24パケットが伝送に失敗する．$N = 27$では平均片方向遅延時間は54ミリ秒であるから，表3より平均片方向遅延時間$T = 50$[ms]の場合に$R \geq 80$を満たすことのできる0.50%のパケットの伝送を故意に抑制することを考える．すると伝送を抑制されるパケットの数は1端末で1秒あたり0.25パケット，27端末で6.75パケットとなり，既存のVoIP伝送でパケットロスとなったパケットを送るための余裕を確保し，$R \geq 80$のQoSを維持したまま収容端末数を拡大することが可能である．

一方$N = 28$では1秒あたり100.1パケットが伝送に失敗する．$N = 28$では平均片方向遅延時間は113ミリ秒であるから，$T = 100$[ms]の場合に$R \geq 80$を満たすことのできる0.50%のパケットの伝送を故意に抑制することを考える．すると伝送を抑制されるパケットの数は28端末で1秒あたり7パケットとなり，既存のVoIP伝送でパケットロスとなったパケットを送るための余裕を確保することができないため，$R \geq 80$のQoSを維持したまま収容端末数を拡大することはできない．そこで，本章ではパケット伝送抑制制御を行うことで収容端末数の拡大が見込める$N = 27$で有効性を示すことを目標とする．このとき平均片方向遅延時間は54ミリ秒であり，$T = 50$[ms]の場合に$R \geq 80$を満たすことのできる最大許容PLRは0.55%であることから，MSPRを0.50%と定め，評価を行う．

5.4 シミュレーションによる評価

5.4.1 シミュレーション条件

従来のIEEE802.11gによるVoIP伝送を従来方式 (Legacy) とし，IEEE802.11gでパケット伝送抑制手法を用いた場合のVoIP伝送を提案方式 (PPTS) として評価

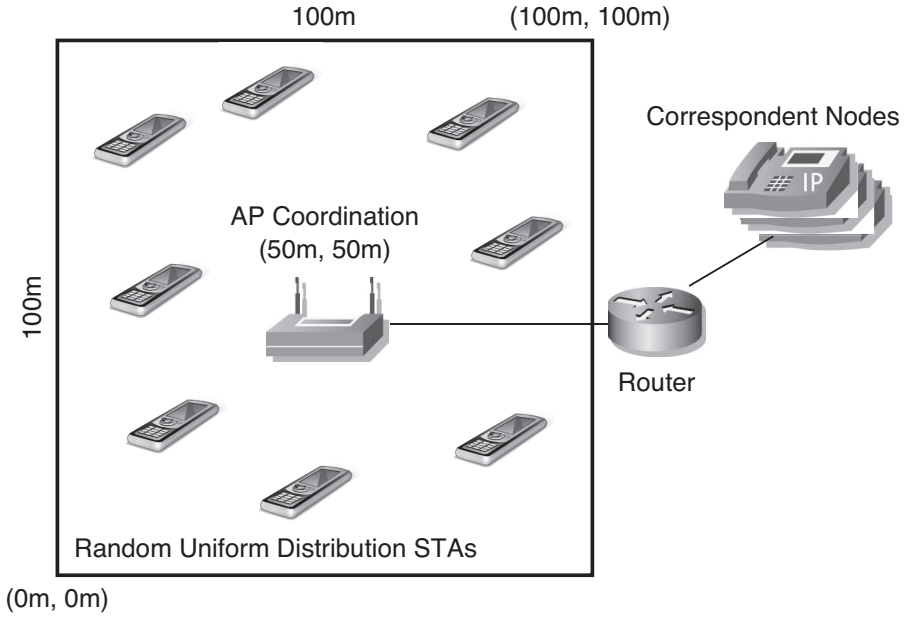


図 5.7: 性能評価のためのシミュレーションエリアのモデル

を行う．パケット抑制率を α%とし，5.3.3 節で検討した MSPR から，$\alpha = 0.50\%$ として評価を行った．シミュレーションエリアは図 5.7 に示すモデルを仮定し，VoIP のパラメータは表 5.2，IEEE802.11g のパラメータは表 5.4 に示す値を用いる．再送回数を通知するために付加する情報の大きさは，表 5.4 に示すパラメータを用いた場合の再送回数の上限である 7 を通知するのに十分な大きさとして，1 オクテットを仮定する．

評価は平均 PLR，平均片方向遅延時間，収容端末数について行った．収容端末数についてはまず，R 値の観点から，VoIP におけるユーザの満足度を “Satisfied” に保つことのできる，$R > 80$ を満たす端末を VoIP の所要 QoS を達成する端末，QoS 達成端末と定義した．全端末に占める QoS 達成端末の割合である QoS 達成端末率が 95%以上を満たす最大の端末数を最大収容端末数 [95] と定義し，この最大収容端末数により評価を行った．

試行回数は 1000 回とし，両側 99%信頼区間についても評価を行った．

5.4.2 平均パケットロス率の評価

図5.8に端末数に対する平均PLRとその両側99%信頼区間を示し，また表5.6にRTS/CTSを用いる場合の$N = 22, 23$と，RTS/CTSを用いない場合の$N = 27, 28$における平均PLRの値とその信頼区間を示す．

平均PLRの観点では，RTS/CTSを用いる場合，RTS/CTSを用いない場合のいずれにおいてもLegacyとPPTSの間に大きな差は見られなかった．RTS/CTSを用いる場合における$N \leq 21$の範囲，RTS/CTSを用いない場合における$N \leq 26$の範囲ではPPTSとLegacyは同じ動作をするため，両者に差は見られない．一方RTS/CTSを用いる場合における$N \geq 22$の範囲，RTS/CTSを用いない場合における$N \geq 27$の範囲では，PPTSはパケットの送信を抑制する動作をするが，MSPRの値は0.50%と小さいため，両者の差は非常に小さいものとなる．

よって，PPTSはLegacyに比べて送信するパケット量を削減するが，そのPLRについてはLegacyに比べて劣化することはないことがわかった．

5.4.3 平均片方向遅延時間の評価

図5.9に端末数に対する平均片方向遅延時間とその両側99%信頼区間を示し，また表5.7にRTS/CTSを用いる場合の$N = 22, 23$と，RTS/CTSを用いない場合の$N = 27, 28$における平均片方向遅延時間の値とその信頼区間を示す．

RTS/CTSを用いる場合における$N = 22$，RTS/CTSを用いない場合における$N = 27$では，PPTSはLegacyに比べて，それぞれ61%と48%の平均片方向遅延時間の短縮を達成する．PPTSは$N = 22$と$N = 27$において，Legacyより送信するパケット数が少ないため，遅延時間の最も大きな要因である衝突による再送回数による待ち時間を減らすことができ，平均片方向遅延時間の短縮を達成する．

一方で，RTS/CTSを用いる場合における$N \geq 24$の範囲，RTS/CTSを用いない場合における$N \geq 28$の範囲においてもPPTSは10%程度の平均片方向遅延時間の短縮を実現する．これもまた，先と同様の理由である．

そのほかの範囲，特にRTS/CTSを用いる場合の$N \leq 21$の範囲と，RTS/CTSを用いない場合の$N \leq 26$の範囲においてはPPTSとLegacyに平均片方向遅延時間の差は見られない．これは，上記の範囲においてPPTSはパケット抑制制御を行

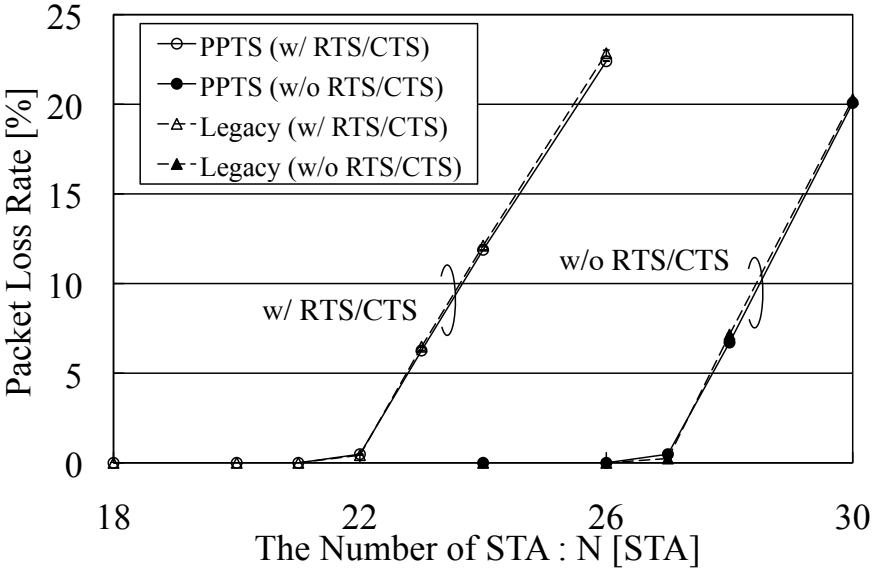


図 5.8: 端末数に対する平均パケットロス率

表 5.6: パケットロス率急増点における平均パケットロス率と両側 99%信頼区間

(a) RTS/CTS を用いる場合

	PPTS	Legacy
$N = 22$	$0.481 \pm 6.96 \times 10^{-20}\%$	$0.427 \pm 9.04 \times 10^{-5}\%$
$N = 23$	$6.26 \pm 2.76 \times 10^{-7}\%$	$6.47 \pm 1.27 \times 10^{-2}\%$

(b) RTS/CTS を用いない場合

	PPTS	Legacy
$N = 27$	$0.481 \pm 7.65 \times 10^{-20}\%$	$0.241 \pm 1.00 \times 10^{-4}\%$
$N = 28$	$6.71 \pm 3.00 \times 10^{-7}\%$	$7.15 \pm 1.40 \times 10^{-2}\%$

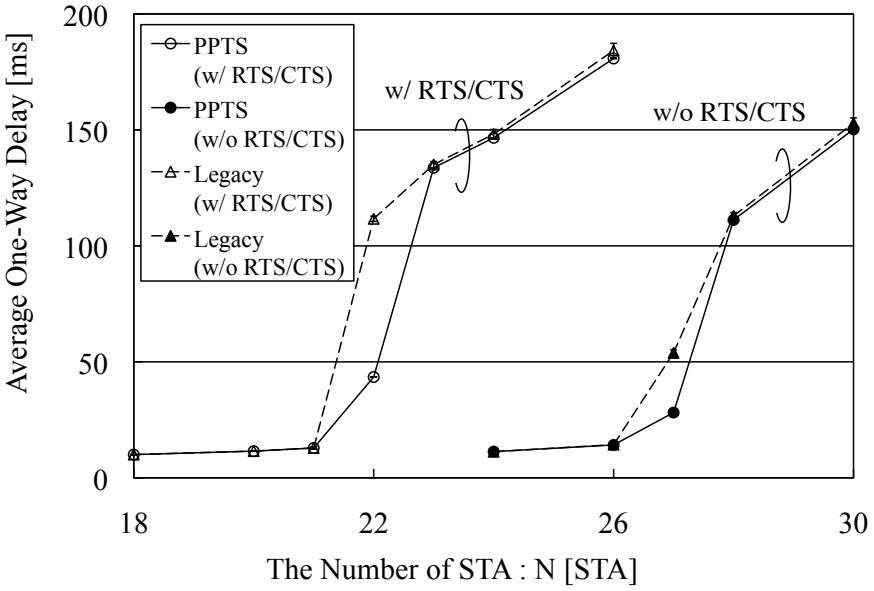


図 5.9: 端末数に対する平均片方向遅延時間

表 5.7: パケットロス率急増点における平均片方向遅延時間と両側 99%信頼区間

(a) RTS/CTS を用いる場合

	PPTS	Legacy
$N = 22$	$43.5 \pm 6.22 \times 10^{-2}$ ms	111.7 ± 1.14 ms
$N = 23$	$133.7 \pm 1.38 \times 10^{-2}$ ms	135.0 ± 1.35 ms

(b) RTS/CTS を用いない場合

	PPTS	Legacy
$N = 27$	$28.2 \pm 6.84 \times 10^{-2}$ ms	53.9 ± 1.26 ms
$N = 28$	$111.2 \pm 1.50 \times 10^{-2}$ ms	112.3 ± 1.50 ms

わず，Legacy と同様の動作をするためである．

5.4.4 平均 R 値の評価

図 5.10 に端末数に対する平均 R 値とその両側 99%信頼区間を示し，また表 5.8 に RTS/CTS を用いる場合の $N = 22, 23$ と，RTS/CTS を用いない場合の $N = 27, 28$ における平均 R 値とその信頼区間を示す．

RTS/CTS を用いる場合における $N \leq 21$ と RTS/CTS を用いない場合における $N \leq 26$ の範囲では，PPTS と Legacy は同じ R 値を達成する．これは，PPTS がその範囲ではパケット抑制制御を行わず，Legacy と同じ動作をするためである．

一方，RTS/CTS を用いる場合における $N \geq 22$ と RTS/CTS を用いない場合における $N \geq 27$ の範囲では，Legacy と比較して PPTS では最大 8%の R 値の劣化が見られる．これは，R 値が主に PLR によって影響を受けるためであり，パケット抑制制御によって送信パケット数を削減している PPTS では，送信パケット数を削減しない Legacy と比較して R 値を劣化しやすいと言える．PPTS では平均 R 値の劣化が見られるが，収容端末数の点では Legacy と比較して改善が得られる．これについては次節で議論をおこなう．

5.4.5 収容端末数の評価

図 5.11 と表 5.9 に QoS 達成端末率とその信頼区間，表 5.10 に最大収容端末数をそれぞれ示す．RTS/CTS を用いる場合では，PPTS は 22 端末までは 95%以上の QoS 達成端末率を達成しているが，Legacy では 21 端末までにとどまっている．一方，RTS/CTS を用いない場合においても PPTS は 27 端末まで 95%以上の QoS 達成端末率を達成し，Legacy では 26 端末までにとどまっている．よって，PPTS は Legacy と比較して 95%以上の QoS 達成端末率を満たす最大の端末数で定義される収容端末数を，Legacy と比較して RTS/CTS を用いる場合と RTS/CTS を用いない場合のそれぞれにおいて 5%と 4%の改善することがわかった．

これは PPTS が端末間で R 値を公平に保ち，極端に低い R 値を持つ端末が出現するのを防ぐためである．図 5.12 と図 5.13 に，RTS/CTS を用いる場合，RTS/CTS を用いない場合それぞれにおける R 値の分布を示す．R 値の分布を見ると，Legacy では多くの端末が $R = 90$ 前後の高い R 値を達成する一方で，$R = 70$ や $R = 49$ と

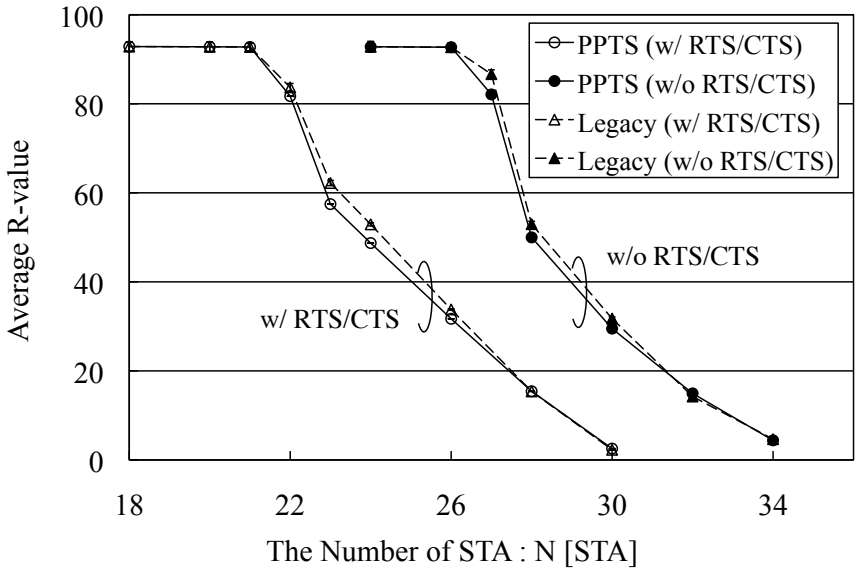


図 5.10: 端末数に対する平均 R 値

表 5.8: パケットロス率急増点における平均 R 値と両側 99%信頼区間

(a) RTS/CTS を用いる場合

	PPTS	Legacy
$N = 22$	$81.7 \pm 4.92 \times 10^{-5}$	$83.7 \pm 8.72 \times 10^{-1}$
$N = 23$	$57.5 \pm 4.52 \times 10^{-5}$	$62.2 \pm 5.90 \times 10^{-1}$

(b) RTS/CTS を用いない場合

	PPTS	Legacy
$N = 27$	$82.1 \pm 5.40 \times 10^{-5}$	86.7 ± 1.00
$N = 28$	$50.0 \pm 5.00 \times 10^{-5}$	$53.0 \pm 6.50 \times 10^{-1}$

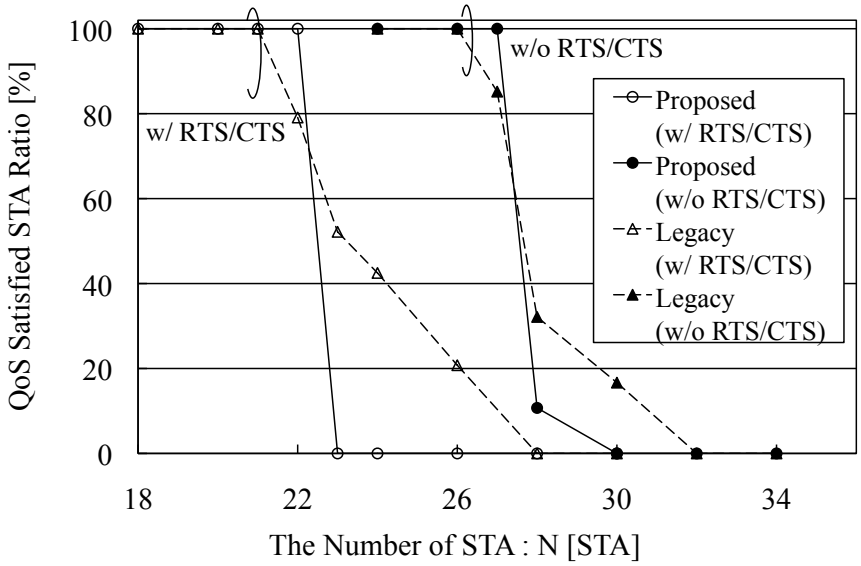


図 5.11: 端末数に対する QoS 達成端末率

表 5.9: パケットロス率急増点における QoS 達成端末率と両側 99%信頼区間

(a) RTS/CTS を用いる場合

	PPTS	Legacy
$N = 22$	100.0 ±0%	79.1 $\pm 4.97 \times 10^{-5}$%
$N = 23$	0.00 ±0%	52.2 $\pm 1.32 \times 10^{-5}$%

(b) RTS/CTS を用いない場合

	PPTS	Legacy
$N = 27$	100.0 ±0%	85.2 $\pm 5.21 \times 10^{-1}$%
$N = 28$	10.71 ±0%	53.0 $\pm 4.25 \times 10^{-1}$%

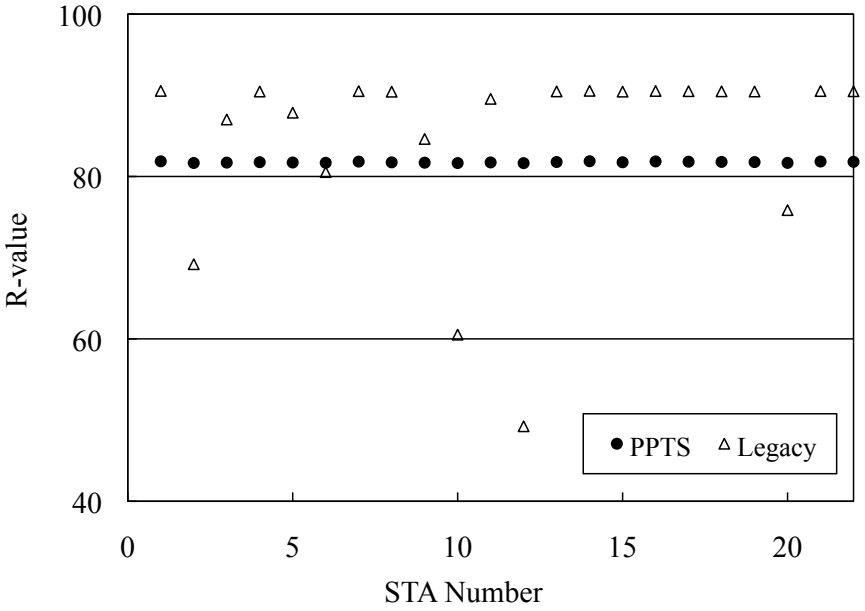


図 5.12: RTS/CTS を用いる場合の R 値分布

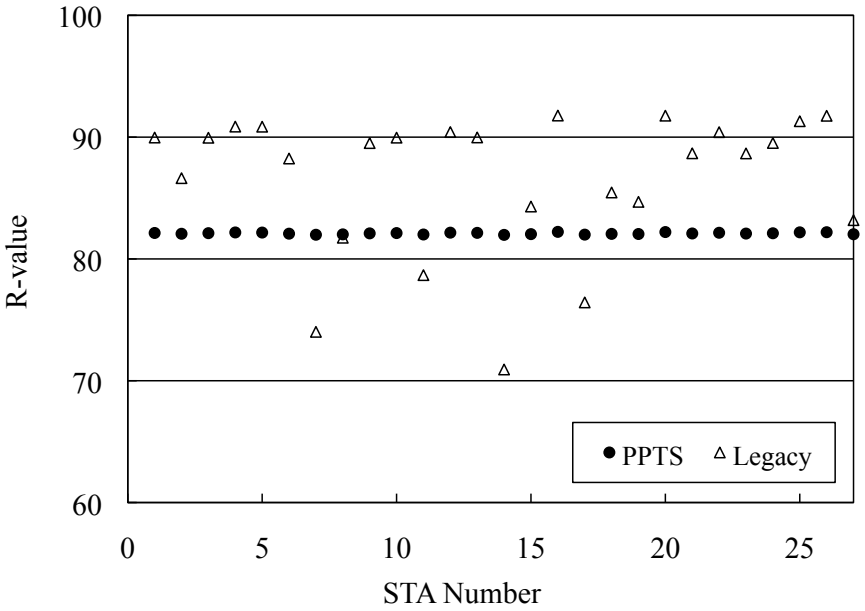


図 5.13: RTS/CTS を用いない場合の R 値分布

表 5.10: それぞれの手法における最大収容端末数

Method	VoIP session capacity
PPTS (w/ RTS/CTS)	22
Legacy (w/ RTS/CTS)	21
PPTS (w/o RTS/CTS)	27
Legacy (w/o RTS/CTS)	26

表 5.11: 仮定するパケット送出間隔

	Packet Arrival Rate	Payload Size	Data Rate
80 PPS	80 packets/sec	160 Bytes	102.4 kbps
50 PPS	50 packets/sec	160 Bytes	64 kbps
40 PPS	40 packets/sec	160 Bytes	51.2 kbps

いった極端に低い R 値を持つ端末が存在し，QoS 達成端末率の低下を招く．一方 PPTS では， $R = 90$ といった高い R 値を持つ端末は存在しないが，極端に低い R 値を持つ端末も存在せず，全ての端末がほぼ $R = 80$ を達成している．そのため，PPTS は QoS 達成端末率を維持することができ，最大収容端末数を改善することができる．

これは，PPTS がパケットの伝送を抑制することで，極端に高い R 値を持つ端末のパケット伝送を，QoS を損なわない範囲で抑制し，伝送帯域に余裕を生む一方で，極端に低い R 値を持つ端末に対してその伝送帯域を割り当てることで，従来手法で生じていた PLR を抑えるとともに，遅延時間を短縮することで R 値を向上させ，全体として R 値の平均化を行うためである．

また，PPTS アルゴリズムの送信するパケットの送出間隔に対する影響を明らかにするために，表 5.11 に示すようにパケットの送出間隔を変化させたシミュレーションを行った．評価は特に RTS/CTS を用いない場合について行い，その結果を図 5.14 に示す．図 5.14 から分かるように PPTS アルゴリズムは送出間隔が短くなればなるほど効果が大きく，送出間隔が長い場合には効果が小さいことがわかった．

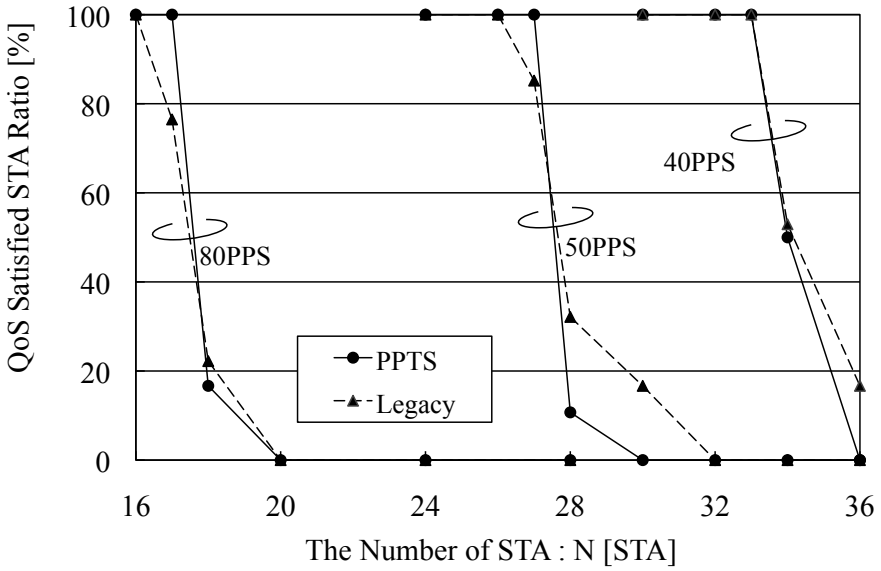


図 5.14: パケット送出間隔ごとの QoS 達成端末率

5.5 ハイブリッドパケット削減アルゴリズム

図 5.11 に示すようにパケット削減アルゴリズム PPTS は Legacy に比べて QoS 達成端末率の劣化が急激なものとなる．PPTS は送信するパケット量を削減することによって，高負荷時の QoS 達成端末率を改善しているが，QoS を達成できる限界までパケットの送信量を削減しているため，わずかな PLR の発生によって急激に全体の端末の QoS が劣化するという問題が発生する．そのため，QoS を達成できない端末が存在したとしても，他の大部分の端末に対しては QoS を保証しておきたいという要求が発生した場合には，PPTS に比べて Legacy の方が有利となる．そこで，PPTS と Legacy の長所を組み合わせることによりこの PPTS の問題を克服する，ハイブリッド PPTS アルゴリズムを提案する．

ハイブリッド PPTS アルゴリズムは PPTS アルゴリズムの状態 3 に，以下の状態遷移を付加することで実現できる．

状態 3 端末は自身のパケットロスを監視し，輻輳によるパケットロスを検出した場合には，これ以上パケット抑制制御によって QoS を維持することは不可能であると判断し，パケット抑制制御を停止し，状態 4 に遷移する．

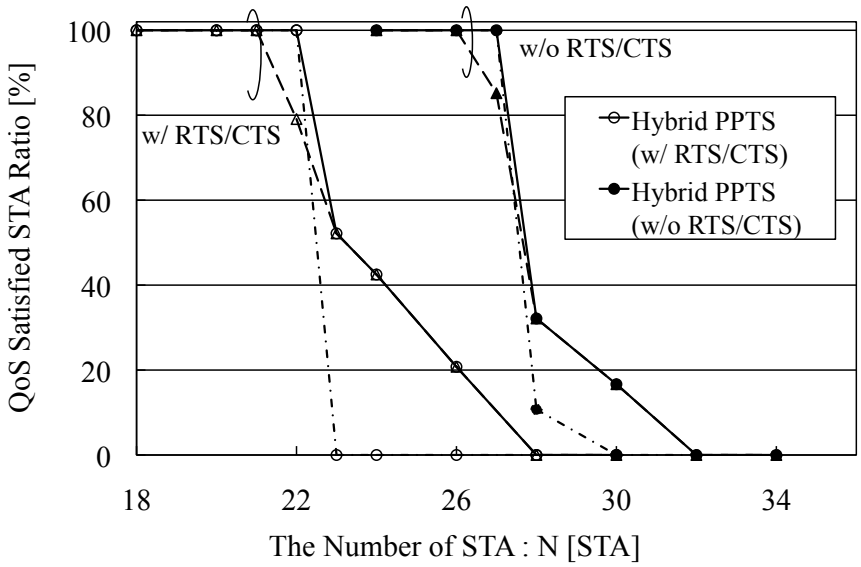


図 5.15: ハイブリッドパケット削減アルゴリズムの QoS 達成端末率

ハイブリッド PPTS アルゴリズムは Legacy で QoS が劣化していた範囲ではパケット抑制制御を用いることで QoS 保証を実現し，PPTS で QoS が劣化していた範囲ではパケット抑制制御を停止することによって，いくつかの端末の QoS を犠牲にしてでも大部分の端末の QoS 保証を実現する．

ハイブリッド PPTS アルゴリズムを用いてシミュレーションを行った結果を図 5.15 に示す．図 5.15 に示す実線がハイブリッド PPTS アルゴリズム (Hybrid PPTS) による結果である．図 5.15 からわかるように，ハイブリッド PPTS アルゴリズムは PPTS と Legacy に比較して有効である．

5.6 結言

本章では，多くの端末を収容する無線 LAN において，VoIP サービスを利用する際に故意にパケットの伝送を抑制することで送信されるパケット量を削減し，収容端末数を拡大するパケット削減エージェント PRA を提案した．計算機シミュレーションにより，提案したパケット削減アルゴリズム PPTS をパケット削減エージェントで用いて各端末でパケット伝送を抑制する割合を 0.5%に設定することで，RTS/CTS を用いない場合に収容端末数を 5%拡大できると共に，端末間で均一なサービス品

質を達成できることを示した．また，パケット削減アルゴリズム PPTS はパケットロス率と遅延時間について，パケットを削減しない方式と同等の特性を達成することを示した．

またハイブリッドパケット削減アルゴリズムによって，パケット削減アルゴリズム PPTS で生じる，端末数の増加に伴って急激にサービス品質が劣化する問題を改善できることを示した．

第6章　結論

本論文では，ユーザに対して最適な無線通信リソースを提供することを目的としたユーザ指向型ワイヤレスエージェント通信方式に関する研究成果をまとめた．以下に，本研究で得られた成果をまとめる．

第3章では，異種のサービスが混在した環境で双方に対して適切なサービス品質を保証するアクセスポイント選択エージェントを提案した．本エージェントはユーザが利用するサービスと周囲のアクセスポイントの負荷状況に応じて利用可能なアクセスポイントの中から接続するアクセスポイントを決定し，特に音声のようなリアルタイムサービスに対してサービス品質を改善できる．本章では無線 LAN (Local Area Network) を対象とした計算機シミュレーションを行い，サービス品質の指標となるパケットロス率，遅延時間，および収容端末数，スループットについて評価を行った．その結果，

- 提案方式を用いると，異種サービスが混在した環境下で，リアルタイムサービスに対して有効とされる既存方式 HRFA と比べてリアルタイムサービスである音声通話サービスのパケットロス率を最大で約 46%低減し，遅延時間も最大で約 45%短縮すると共に，品質を維持して収容可能な端末数を 5%向上することを明らかにした．
- 提案方式を用いると，異種サービスが混在した環境下で，非リアルタイムサービスに対して有効とされる既存方式 NSTA と比べて非リアルタイムサービスであるファイル転送サービスのスループットを最大で 23.8%向上すると共に，スループットの公平性の指標である Fairness Index を最大で約 5.1 倍に改善することを明らかにした．
- 提案方式は特に端末が偏って分布している場合にも効果が認められ，リアルタイムサービスに対して有効とされる既存方式 HRFA と比較してパケットロス率を 39.3%低減し，遅延時間を 2%短縮することを明らかにした．

第4章では，異なる機能を持ったアクセスポイントと異種のサービスが混在する環境で双方のサービスに対して適切なサービス品質を提供するアクセスポイント選択エージェントを提案した．本エージェントはユーザが利用するサービス，アクセ

スポイントに接続している端末数とアクセスポイントの空き帯域の情報に基づいて接続するアクセスポイントを決定し，それぞれのサービスのサービス品質を改善できる．本章では無線 LAN を対象とした計算機シミュレーションを行い，ユーザ体感品質の指標となる推定 MOS (estimated Mean Opinion Score, eMOS) 値と収容端末数について評価を行った．その結果,

- 提案方式を用いると，単一サービス環境で有効とされる既存方式 NumSTA に対してリアルタイムサービスである音声通話サービスのユーザ体感品質の指標である推定 MOS 値を最大で 1.2 倍改善するとともに，高品質で収容可能な端末数を最大 14%向上できることを明らかにした．
- 提案方式を用いると，単一サービス環境で有効とされる既存方式 NumSTA に対してリアルタイムサービスである音声通話サービスのサービス品質の指標であるパケットロス率を最大で 50 分の 1 に抑えるとともに，遅延時間を最大で 5 分の 1 に短縮した．
- 提案方式を用いると，単一サービス環境で有効とされる既存方式 APP に対して非リアルタイムサービスであるデータ転送サービスのスループットを最大で 17%向上した．

第 5 章では，音声通話サービスを利用する場合に伝送路の状況に応じてパケットの伝送を抑制することで，収容端末数を拡大するパケット削減エージェントを提案した．本エージェントはユーザが利用している音声コーデック，そして収容先のアクセスポイントでの輻輳の有無に応じて送信するパケット量を削減することにより，全体の無線リソースの利用量を低減する．その結果全体のサービス品質の劣化を防ぎ，収容端末数を向上する．本章では無線 LAN を対象とした計算機シミュレーションを行い，一定の品質を満足して収容可能な端末数について評価を行った．その結果,

- 提案方式で行うパケット量削減により，RTS/CTS を使わない場合に収容端末数を 5%改善すると共に，端末間で均一なサービス品質を達成できることを明らかにした．
- 提案方式はパケット量の削減を行わない既存方式と比較して，パケットロス率と遅延時間について同等の特性を達成可能であることを明らかにした．

参考文献

[1] “i モードサービス特集,” NTT DoCoMo テクニカルジャーナル, vol.7, no.2, pp.6-32, July 1999.

[2] 社団法人 電気通信事業者協会 (TCA), 携帯電話・PHS 契約数, http://www.tca.or.jp/database/ . (最終アクセス: 2009 年 1 月 5 日)

[3] 守倉正博, 久保田周治, インプレス標準教科書シリーズ 改訂三版 802.11 高速無線 LAN 教科書, インプレス R&D, 2008.

[4] 庄納崇, ワイヤレス・ブロードバンド時代を創る WiMAX, インプレス R&D, 2007.

[5] 服部 武, 藤岡 雅宣, インプレス標準教科書シリーズ 改訂三版 ワイヤレス・ブロードバンド教科書 高速 IP ワイヤレス編, インプレス R&D, 2008.

[6] Press Release International Telecommunication Union For immediate release, “Worldwide mobile cellular subscribers to reach 4 billion mark late 2008 -ITU estimates over 60 per cent penetration driven mainly by BRIC economies-,” International Telecommunication Union, http://www.itu.int/newsroom/press_releases/2008/29.html, 2008. (最終アクセス: 2009 年 1 月 5 日)

[7] International Telecommunication Union, “ITU Activities on IMT-2000,” http://www.itu.int/home/imt.html, 2006. (最終アクセス: 2009 年 1 月 5 日)

[8] International Telecommunication Union Radio communication sector, http://www.itu.int/ITU-R/. (最終アクセス: 2009 年 1 月 5 日)

[9] ITU-R, Recommendation M.1645, Framework and overall objectives of the future development of IMT-2000 and systems beyond IMT-2000, 2003.

[10] The 3rd Generation Partnership Project (3GPP), http://www.3gpp.org/. (最終アクセス: 2009 年 1 月 5 日)

[11] The 3rd Generation Partnership Project 2 (3GPP2), http://www.3gpp2.org/. (最終アクセス: 2009 年 1 月 5 日)

[12] 堀越功, “LTE が世界を覆う,” 日経コミュニケーション 2008 年 6 月 1 日号, no.511, pp.28-39, 日経 BP 社, 2008.

[13] 3GPP TR25.913, Requirement for Evolved Universal Terrestrial Radio Access (UTRA) and Universal Terrestrial Radio Access Network (UTRAN), 2006.

[14] 3GPP TR25.912, Feasibility study for evolved Universal Terrestrial Radio Access (UTRA) and Universal Terrestrial Radio Access Network (UTRAN) (Release 7), 2007.

[15] IEEE, IEEE Std 802.11b-1999: Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Higher-Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz band, 1999.

[16] IEEE, IEEE Std 802.11a-1999: Part11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications, High-speed Physical Layer in the 5 GHz Band, 1999.

[17] IEEE, IEEE Std 802.11g-2003: Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, Amendment 4: Further Higher Data Rate Extension in the 2.4 GHz Band, 2003.

[18] IEEE, IEEE P802.11n/D.3.00: Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications, Amendment 4: Enhancements for Higher Throughput, 2007.

[19] IEEE, IEEE Std 802.11e-2005: Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications, Amendment 8: Medium Access Control (MAC) Quality of Service Enhancements, 2005.

[20] 総務省, u-japan 政策, http://www.soumu.go.jp/menu_02/ict/u-japan/index.html, 2006. (最終アクセス: 2009 年 1 月 5 日)

[21] 小牧省三, “マルチメディアの現状と展望—電波の有効利用—,” 日本マルチメディアフォーラム, 1998.

[22] 小牧省三, 間瀬憲一, 松江英明, 守倉正博, 無線 LAN とユビキタスネットワーク, 丸善, 2004.

[23] 小牧省三 (編), 北村泰彦, 小舘亮之, 小牧省三, 三瓶政一, 新熊亮一, 塚本勝俊, 長谷川幹雄 (著), ワイヤレスエージェント技術, 丸善, 2008.

[24] 小牧省三ほか, “ワイヤレスエージェント通信システムに関する研究,” 平成 14 年度〜平成 17 年度科学研究費補助金 (基盤研究 (B)) 研究成果報告書, 2006.

[25] Shozo Komaki, “Microwave Technologies for Software Radio Networks,” APMC 2003, vol.3 pp.1780-pp.1785, Nov. 2003.

[26] 新熊亮一, “電波エージェントを用いた無線リソースマネジメントに関する研究,” 大阪大学大学院 工学研究科 通信工学専攻 学位論文, 2003 年 1 月.

[27] Ryoichi Shinkuma, Minoru, Okada and Shozo Komaki, “Adaptive Transmission Scheme for Web Prefetching in Wireless Environment,” IEICE Trans., Electron., Special Issue on Signals, Systems and Electronics Technology, vol.E85-C, no.3, pp.485-491, Mar. 2002.

[28] Ryoichi Shinkuma, Minoru, Okada and Shozo Komaki, “A New Resource Management Scheme for Multiple Video Transmission in Wireless Environment,” IEICE Trans., Commun., Special Issue on Mobile Multimedia Communications, vol.E85-B, no.10, pp.2153-2160, Oct. 2002.

[29] Yuki Minoda, Katsutoshi Tsukamoto and Shozo Komaki, “Adaptive Wireless Transmission Scheme considering Stay Time in Spot mobile access,” IEICE Trans., Commun., Special Section on Mobile Multimedia Communications, vol.E87-B, no.5, pp.1235-1241, May 2004.

[30] Yuki Minoda, Ryoichi Shinkuma, Katsutoshi Tsukamoto and Shozo Komaki, “Radio Resource Management Scheme for Road-to-Vehicle Spot Communication System,” Proc. of ITST2002, pp.367-372, Seoul, Korea, Nov. 2002.

[31] Yuki Minoda, Katsutoshi Tsukamoto and Shozo Komaki, “Dwell Time Priority Algorithm for Adaptive Resource Allocation in Spot Type Road-to-Vehicle Communication System,” Proc. of ITST2004, Singapore, July 2004.

[32] 蓑田佑紀, 新熊亮一, 塚本勝俊, 小牧省三, “ホットスポット通信における滞在時間に適応したリソースマネジメントを行う電波エージェント,” 電子情報通信学会 2002 年総合大会, B-15-8, p.798, Mar. 2002.

[33] 蓑田佑紀, 新熊亮一, 塚本勝俊, 小牧省三, “スポット無線通信における滞在時間に適応したリソースマネジメント方式,” 信学技報, MoMuC2002-05, pp77-82, May 2002.

[34] 蓑田佑紀, 塚本勝俊, 小牧省三, “無線スポットアクセスにおける滞在時間優先度に基づいたリソースマネジメント方式,” 信学技報, MoMuC2004-01, pp15-20, Jan. 2004

[35] Yuki Minoda, Katsutoshi Tsukamoto and Shozo Komaki, “Adaptive Resource Allocation for Video Stream Based on Video Stream Character and User Mobility in Wireless LAN,” IEICE Trans. Fund., Special section on Multi-dimensional Mobile Information Networks, vol.E88-A, no.7, pp.1881-1888, July 2005.

[36] Yuki Minoda, Takanori Kaji, Yuji Handa, Katsutoshi Tsukamoto and Shozo Komaki, “Radio Agent Realizing User Utility-based Resource Allocation for Spot RVC system,” Proc. of ITST 2005, pp.273-276, June 2005.

[37] Yuki Minoda, Katsutoshi Tsukamoto and Shozo Komaki, “Radio Network Agent for Simultaneous Use of Multiple RANs with SIP and Multihoming,” Proc. of WPMC 2005, pp.1474-1477, Denmark, Sep. 2005.

[38] Takanori Kaji, Yuki Minoda, Katsutoshi Tsukamoto and Shozo Komaki, “Radio agent realizing user utility-based resource allocation in wireless spot access,” Proc. of International Symposium on Communications and Information Technologies 2004 (ISCIT2004), pp.286-289, Sapporo, Japan, Oct. 2004.

[39] 梶孝規, 蓑田佑紀, 塚本勝俊, 小牧省三, “無線 LAN スポットアクセスにおけるデータサイズを考慮した周波数割り当て方式,” 信学技報, MoMuC2003, vol.103, no.289, pp.31-36, Sep. 2003.

[40] 梶孝規, 蓑田佑紀, 新熊亮一, 塚本勝俊, 小牧省三, “スポット WWW アクセスにおける待ち時間短縮のための無線リソースマネジメント方式,” 信学総大, Mar. 2003.

[41] Kouhei Kawaguchi, Yuki Minoda, Katsutoshi Tsukamoto and Shozo Komaki, “An Idea of Handover Algorithm for Adaptive selection Agent of Wireless Service with SIP,” Proc. of APWCS 2005, pp.100-104, Sep. 2005.

[42] 川口晃平, 蓑田佑紀, 塚本勝俊, 小牧省三, “SIP プリファレンスを利用した無線メディア選択エージェントの提案,” 信学総大, B-15-29, pp.822, Mar. 2004.

[43] 川口晃平, 蓑田佑紀, 塚本勝俊, 小牧省三, “SIP プリファレンスを利用した無線メディア選択エージェントの一検討,” 信学技報, MoMuC 2004-42, pp.13-18, July. 2004.

[44] 植田泰輔, 蓑田佑紀, 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,” 信学総大, B-15-3, pp.704, Mar. 2005.

[45] 植田泰輔, 蓑田佑紀, 川口晃平, 塚本勝俊, 小牧省三, “メディアハンドオーバを実現する SIP を用いた無線メディア選択エージェント,” 信学技報, MoMuC 2005-11, pp.57-62, May. 2005.

[46] 田嶋克行, 蓑田佑紀, 梶原亮, 塚本勝俊, 小牧省三, “WoIP 内線システムのハンドオーバ時間と通話品質測定実験,” 信学総大, B-15-4, pp.705, Mar. 2005

[47] 田嶋克行, 蓑田佑紀, 梶原亮, 塚本勝俊, 小牧省三, “無線 LAN で構築した WoIP システムのハンドオーバ時間に関する一検討,” 信学技報, MoMuC 2005-02, pp.7-12, May. 2005.

[48] 飯田有慈, 出雲伸幸, 東野武史, 塚本勝俊, 小牧省三, “個人利用者に対する SLA 適用の提案と SLA 設定に必要な効用関数の測定,” 情報通信学会年報, pp.49-59, 2007.

[49] Yasufumi Morioka, Takeshi Higashino, Katsutoshi Tsukamoto and Shozo Komaki, “AP Selection Algorithm for Real-Time Communications through Mixed

WLAN Environment," IEICE Trans. Commun. Special Section on Next-Generation Mobile Multimedia Communications, Vol.E91-B, No.10, pp.3077-3084, Oct. 2008.

[50] 森岡康史, 東野武史, 塚本勝俊, 小牧省三, "異種サービス混在環境における無線LANアクセスポイント選択アルゴリズム," 情報処理学会論文誌「サービス融合を支えるネットワークアーキテクチャの新展開」特集, 2009年2月.

[51] Yasufumi Morioka, Takeshi Higashino, Katsutoshi Tsukamoto and Shozo Komaki, "VoIP Session Capacity Expansion with Packet Transmission Suppression Control in Wireless LAN," IEICE Transactions on Communications, Special Section on Internet Technology and its Architecture for Ambient Information Systems, Vol.E92-B, No.4, April 2009.

[52] Yasufumi Morioka, Yuki Minoda, Takeshi Higashino, Katsutoshi Tsukamoto and Shozo Komaki, "Proposal of AP Selection Scheme for QoS Guarantee in Wireless LAN," Proc. COIN-NGNCON2006, July 2006.

[53] Yasufumi Morioka, Yuki Minoda, Takeshi Higashino, Katsutoshi Tsukamoto and Shozo Komaki, "Proposal of SIP based AP selection agent system in Wireless LAN," Proc. pimrc '07, Sept. 2007.

[54] Yasufumi Morioka, Takeshi Higashino, Katsutoshi Tsukamoto and Shozo Komaki, "AP Selection Algorithm for VoIP Services in Mixed Traffic WLAN Environment," Proc. of The 1st IFIP Wireless Days Conference 2008, Nov. 2008.

[55] Yasufumi Morioka, Takeshi Higashino, Katsutoshi Tsukamoto and Shozo Komaki, "VoIP Capacity Expansion with Periodical Frame Transmission Suppression Control in Wireless LAN," Proc. of 2009 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS2009), Jan. 2009.

[56] 森岡康史, 東野武史, 塚本勝俊, 小牧省三, "無線LANにおけるAP選択エージェントシステムの提案," 信学技報, MoMuC2007-5, pp.21-26, 2007年5月.

[57] 森岡康史, 東野武史, 塚本勝俊, 小牧省三, “パケット伝送抑制制御による VoIP 収容端末拡大手法,” 信学技報, MoMuC2008-51, pp.51-56, 2008 年 9 月.

[58] 森岡康史, 川口晃平, 蓑田佑紀, 東野武史, 塚本勝俊, 小牧省三, “基地局 QoS 機能を考慮した無線メディア選択エージェントの提案,” 信学総大, B-15-12, 2006 年 3 月.

[59] 片山洋明, 出雲伸幸, 東野武史, 塚本勝俊, 小牧省三, “携帯電話サービス利用料金に対するユーザ効用の測定とユーザ効用に応じた無線リソースマネジメントの提案,” 信学技報, MoMuC2007-35, pp.61-66, 2007 年 7 月.

[60] 坂本学, 東野武史, 塚本勝俊, 小牧省三, 熊本和夫, 安川交二, 稲垣恵三, “異種無線システム間通信におけるコーデック選択エージェントの実験的評価,” 信学技報, MoMuC2007-38, pp.79-84, 2007 年 7 月.

[61] 溝端竜也, 森岡康史, 東野武史, 塚本勝俊, 小牧省三, “無線 LAN におけるチャネル重複を考慮した AP 選択手法,” 2008 信学総大, B-5-167, 2008 年 3 月.

[62] 溝端竜也, 森岡康史, 東野武史, 塚本勝俊, 小牧省三, “無線チャネルのトラヒックロードに基づく無線 LAN アクセスポイント選択方式,” 信学技報, MoMuC2008-49, pp.39-44, 2008 年 9 月.

[63] 竹下隆史, 村山公保, 荒井透, 苅田幸雄, マスタリング TCP/IP 入門編 第 3 版, pp.22-25, オーム社開発局, 2005.

[64] William Richard Stevens, TCP/IP Illustrated, Volume 1 -The Protocols, Addison-Wesley, Jan. 1994.

[65] 矢守恭子, 野村一智, 富田健, 田中良明, “配信待ち時間と効用の関係におけるコンテンツ属性の主要因分析,” 信学技報, NS2002-169, pp49-52, Nov. 2002.

[66] Kazutomo Nomura, Kyoko Yamori, Eiji Takahashi, Takumi Miyoshi and Yoshiaki Tanaka, “Waiting Time versus Utility to Download Images,” AP-SITT2001, pp.128-132, Nov. 2001.

[67] ITU-T, “P.10/G.100 Appendix I,” Jan. 2007.

[68] Wolfgang Kellerer, 野田千恵, Marco Sgroi, Anthony Tarlano, Srisakul Thakolsri, Matthias Wagner, Hendrik Berndt, “ユーザセントリック移動通信技術特集：欧州研究所における研究アクティビティ (1) 将来のサービス基盤とミドルウェア技術,” NTT DoCoMo テクニカルジャーナル, Vol.12, No.1, 2004 年 6 月.

[69] ITU-T, Recommendation G.107: The E-model, a computational model for use in transmission planning, 2005.

[70] ITU-T, Recommendation J.247: Objective perceptual multimedia video quality measurement in the presence of a full reference, 2008.

[71] IEEE, IEEE 802.21: Media Independent Handoff, http://www.ieee802.org/21/ . (最終アクセス: 2009 年 1 月 5 日)

[72] IEEE 1900.4 Working Group on Architectural Building Blocks Enabling Network-Device Distributed Decision Making for Optimized Radio Resource Usage in Heterogeneous Wireless Access Networks, http://www.scc41.org/. (最終アクセス: 2009 年 1 月 5 日)

[73] Thomas L. Saaty, The Analytic Hierarchy Process, McGraw–Hill, 1980.

[74] Tomoya Yoshida, Goh Miyamoto, Masahiro Kuroda and Susumu Ishihara, “Load balancing of Wireless LAN with network triggered Handover,” Proc. WPMC’05, pp.1434-1438, 2005.

[75] 吉田智哉, 宮本剛, 石原進, “電波強度による可変ビットレートを考慮したネットワーク主導強制ハンドオーバによる無線 LAN 負荷分散,” 信学総大, B-15-13, 2006.

[76] 齊藤智也, 稲井寛, “無線 LAN における動的なアクセスポイント選択方式,” 信学技報 NS2003-138, Vol.103, No.386, pp.33–36, 2003.

[77] Alex Hills and Bob Friday, “Radio Resource Management in Wireless LANs,” IEEE Communications Magazine, Vol.42, No.12, pp.S9–S14, 2004.

[78] Yigal Bejerano, Seung-Jae Han and Li Erran Li, “Fairness and Load Balancing in Wireless LANs Using Association Control,” IEEE/ACM TRANSACTIONS ON NETWORKING, Vol.15, No.3, pp.560–573, 2007.

[79] Ioannis Papanikos and Michael Logothetis, “A study on dynamic load balance for IEEE802.11b wireless LAN,” Proc. COMCON 2001, 2001.

[80] Shiann-Tsong Sheu and Chih-Chiang Wu, “Dynamic Load Balance Algorithm (DLBA) for IEEE 802.11 Wireless LAN,” Tamkang Journal of Science and Engineering, Vol.2, No.1, pp.45–52, 1999.

[81] Yutaka Fukuda and Yuji Oie, “Decentralized access point selection architecture for wireless LANs Deployability and robustness,” Proc. IEEE VTC 2004-Fall, pp.1103–1107, Sept. 2004.

[82] 阿部貴充, 福田豊, 尾家祐二, “Wireless LAN におけるアクセスポイント選択方式の提案とその評価,” 信学技報 IN2002-206, Vol.102, No.693, pp.23–28, 2002.

[83] 金子仁, 福田豊, 尾家祐二, “無線 LAN における干渉を考慮した Access Point 選択方式の提案と評価,” 信学技報 IN2005-205, Vol.105, No.628, pp.287–292, 2005.

[84] 清水祐亮, 山口実靖, 淺谷耕一, “情報転送モードを考慮した IEEE802.11e 無線 LAN における最適 AP 選択方式の検討,” 信学総大, pp.B–5–179, 2007.

[85] 竹内彰次郎, 瀬崎薫, 安田靖彦, “IEEE802.11e WLAN network におけるアクセスポイント選択手法,” 信学論 (B), Vol.J89-B, No.4, pp.431–442, 2006.

[86] 構造計画研究所, QualNet 4.5, http://www4.kke.co.jp/qualnet/ . (最終アクセス: 2009 年 1 月 5 日)

[87] Shigeru Kashihara, Kazuya Tsukamoto, Yuji Oie, “Service-oriented mobility management architecture for seamless handover in ubiquitous networks,” IEEE Wireless Communications, Vol.14, No.2, pp.28–34, 2007.

[88] Takashi Matsunaka, Haruki Izumikawa, Keizo Sugiyama, “An Effective Authentication Procedure Considering User Expiry Time During Handover,” Proc. pimrc’06, pp.1–5, 2006.

[89] ITU-T, Recommendation G.711: PULSE CODE MODULATION (PCM) OF VOICE FREQUENCIES, 1989.

[90] IEEE, IEEE Std 802.3-2005, Part 3: Carrier sense multiple access with collision detection (CSMA/CD) access method and physical layer specifications, 2005.

[91] ITU-T, Recommendation G.109: Definition of categories of speech transmission quality, 1999.

[92] 総務省, IP 電話の品質, http://www.soumu.go.jp/s-news/2001/011226_3_e.html, 2001. (最終アクセス: 2009 年 1 月 5 日)

[93] 稲垣宣生, 山根芳知, 吉田光雄, 統計学入門, 裳華房, 2003.

[94] 五十嵐圭, 山田曉, 藤原淳, 杉山隆利, “マルチセル環境における無線 LAN VoIP 通信品質向上に関する検討,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-5-138, Sept. 2006.

[95] 金清敏幸, 比嘉征規, 古川浩, “無線 LAN マルチセル環境下での VoIP 伝送特性,” 信学論 (B), vol.J91-B, no.1, pp.14-21, Jan. 2008.

[96] Youngsoo Kim, Sunghyun Choi, Kyunghun Jang and Hyosun Hwang, “Throughput Enhancement of IEEE802.11 WLAN via Frame Aggregation,” Proc. IEEE VTC 2004-Fall, pp.3030-3034, 2004.

[97] Kyungtae Kim, Samrat Ganguly, Rauf Izmailov and Sangjin Hong, “On packet aggregation mechanisms for improving VoIP quality in mesh networks,” Proc. IEEE VTC 2006-Spring, pp.891-895, 2006.

[98] Begonya Otal, Jorg Habetha, “Power Saving Efficiency of a novel Packet Aggregation Scheme for high-throughput WLAN stations at different data rates,” Proc. IEEE VTC 2005-Spring, pp.2041-2045, 2005.

[99] ITU-T, Recommendation G.113: Appendix I: Provisional planning values for the equipment impairment factor Ie and packet-loss robustness factor Bpl, 2002.

本論文に関する原著論文

A　学会論文

1. Yasufumi Morioka, Takeshi Higashino, Katsutoshi Tsukamoto and Shozo Komaki, “AP Selection Algorithm for Real-Time Communications through Mixed WLAN Environment,” IEICE Transactions on Communications, Special Section on Next-Generation Mobile Multimedia Communications, Vol.E91-B, No.10, pp.3077-3084, October 2008.
2. 森岡康史, 東野武史, 塚本勝俊, 小牧省三, “異種サービス混在環境における無線 LAN アクセスポイント選択アルゴリズム,” 情報処理学会論文誌, サービス融合を支えるネットワークアーキテクチャの新展開特集, Vol.50, No.2, 2009 年 2 月. (採録決定)
3. Yasufumi Morioka, Takeshi Higashino, Katsutoshi Tsukamoto and Shozo Komaki, “VoIP Session Capacity Expansion with Packet Transmission Suppression Control in Wireless LAN,” IEICE Transactions on Communications, Special Section on Internet Technology and its Architecture for Ambient Information Systems, Vol.E92-B, No.4, April 2009. (採録決定)

B　国際会議発表 (査読有)

1. Yasufumi Morioka, Yuki Minoda, Takeshi Higashino, Katsutoshi Tsukamoto and Shozo Komaki, “Proposal of AP Selection Scheme for QoS Guarantee in Wireless LAN,” The Joint International Conferences on Optical Internet and Next Generation Network (COIN-NGNCON 2006), pp.30-32, Jeju, Korea, July 2006.
2. Yasufumi Morioka, Takeshi Higashino, Katsutoshi Tsukamoto and Shozo Komaki, “PROPOSAL OF SIP BASED AP SELECTION AGENT SYSTEM IN WIRELESS LAN,” Proc. of The 18th Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor Radio Communications (pimrc ’07), Athens, Greece, September 2007.

3. Yasufumi Morioka, Takeshi Higashino, Katsutoshi Tsukamoto and Shozo Komaki, “AP Selection Algorithm for VoIP Services in Mixed Traffic WLAN Environment,” Proc. of The 1st IFIP Wireless Days Conference 2008 (WD 2008), Dubai, UAE, November 2008.
4. Yasufumi Morioka, Takeshi Higashino, Katsutoshi Tsukamoto and Shozo Komaki, “VoIP Capacity Expansion with Periodical Frame Transmission Suppression Control in Wireless LAN,” Proc. of 2009 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS 2009), San Diego, CA, USA, January 2009.

C 国内口頭発表

1. 森岡康史, 川口晃平, 蓑田佑紀, 東野武史, 塚本勝俊, 小牧省三, “基地局 QoS 機能を考慮した無線メディア選択エージェントの提案,” 電子情報通信学会 2006 年総合大会, B-15-12, 2006 年 3 月.
2. 溝端竜也, 森岡康史, 東野武史, 塚本勝俊, 小牧省三, “無線 LAN におけるチャネル重複を考慮した AP 選択手法,” 電子情報通信学会 2008 年総合大会, B-5-167, 2008 年 3 月.

D 国内研究会発表

1. 森岡康史, 東野武史, 塚本勝俊, 小牧省三, “無線 LAN における AP 選択エージェントシステムの提案,” 電子情報通信学会技術報告, MoMuC2007-5, pp.21-26, 2007 年 5 月.
2. 森岡康史, 東野武史, 塚本勝俊, 小牧省三, “パケット伝送抑制制御による VoIP 収容端末拡大手法,” 電子情報通信学会技術報告, MoMuC2008-51, pp.51-56, 2008 年 9 月.
3. 溝端竜也, 森岡康史, 東野武史, 塚本勝俊, 小牧省三, “無線チャネルのトラヒックロードに基づく無線 LAN アクセスポイント選択方式,” 電子情報通信学会技術報告, MoMuC2008-49, pp.39-44, 2008 年 9 月.