

# 修士論文

無線LAN VoIP ハンドオーバー時における  
最適AP選択手法の検討

A Method for Managing Handoff for  
Keeping Speech Quality of VoIP over Wireless LAN

2008 年 1 月 29 日

指導教員 相田 仁 教授



東京大学大学院  
新領域創成科学研究科 基盤情報学専攻

66339 藤原 直弘

# 内容梗概

---

近年、ブロードバンド接続環境の普及とともに、IP 電話 (VoIP) や無線 LAN の導入が進み、無線 LAN を媒介とした VoIP(無線 VoIP) が、企業や大学などを中心に広まりつつある。しかし、VoIP は回線交換式の電話に比べ通話の品質を保つことが難しく、特に無線 LAN を媒介とする場合は品質が低下しやすい。現在の無線 LAN 標準規格である IEEE 802.11a/b/g では、一部のアクセスポイント (AP) に接続が集中した際のアクセス制御が実装されておらず、ハンドオーバー時には特に通話品質の劣化が起きやすい。

そこで本研究では、無線 VoIP のハンドオーバーに焦点を当て、通話品質が劣化しにくい接続先 AP を選択する手法を提案する。その際、ハンドオーバーが起きる端末のみでなく、周辺エリアに存在する全ての端末の品質を向上させるため、AP ごとに接続中の端末の平均片方向遅延を求め、最も遅延時間の小さい AP が最も負荷の少ない AP であると推定し、そこへハンドオーバーさせる。

本研究で提案するハンドオーバー時における最適 AP 選択手法により、端末が一斉に移動し、従来手法では一部の AP へ接続が集中して通話品質が悪化するような状況であっても、最適な接続先 AP を選択することで、周辺エリアの端末も含めた通話品質の向上が可能であることがシミュレーションにより確かめられた。

# 目次

---

第1章	序論	1
1.1	はじめに	2
1.2	本論文の構成	3
第2章	研究の背景	4
2.1	VoIPの概要	5
2.1.1	音声データ符号化方式	5
2.1.2	シグナリング処理プロトコル	6
2.2	無線LANの概要	7
2.2.1	プロトコル構成	7
2.2.2	無線LAN規格 (IEEE 802.11a/b/g)	7
2.2.3	MAC層における機能	9
2.2.4	ハンドオーバー手順	12
2.3	関連研究	13
2.3.1	接続開始時のAP選択に関する研究	13
2.3.2	呼受付制御に関する研究	15
2.3.3	ハンドオーバー時における呼受付制御に関する研究	16
第3章	ハンドオーバー時における最適AP選択手法の提案	19
3.1	提案手法の概要	20
3.2	AP選択アルゴリズムの詳細	20
3.3	関連研究との比較	23
第4章	評価方法	25
4.1	シミュレーションモデル	26
4.2	評価指標	27
4.2.1	VoIP通話品質の決定要素	27
4.2.2	R値	28
4.2.3	MOS値	28
4.2.4	本研究での評価指標	29
第5章	評価結果と考察	30
5.1	はじめに	31

5.2	端末数が16台の場合のシミュレーション結果 . . . . .	31
5.2.1	4台の端末が同時にAP1から中心付近へ移動する場合(実験A-1) . . . .	31
5.2.2	4台の端末が同時にAP1からAP4付近へ移動する場合(実験A-2) . . . .	34
5.2.3	全端末が同時にAP付近から中心付近へ移動する場合(実験A-3) . . . .	36
5.3	端末数が16台の場合の考察 . . . . .	39
5.4	端末数が20台の場合のシミュレーション結果 . . . . .	39
5.4.1	5台の端末が同時にAP1から中心付近へ移動する場合(実験B-1) . . . .	39
5.4.2	5台の端末が同時にAP1からAP4付近へ移動する場合(実験B-2) . . . .	42
5.4.3	全端末が同時にAP付近から中心付近へ移動する場合(実験B-3) . . . .	45
5.4.4	初期位置が各AP付近でRandom Waypointに基づき移動する場合(実験B-4) . . . . .	48
5.4.5	初期位置が中心付近でRandom Waypointに基づき移動する場合(実験B-5) . . . . .	51
5.5	考察 . . . . .	54
5.5.1	端末の動き方に関する考察 . . . . .	54
5.5.2	片方向遅延を用いることの是非に関する考察 . . . . .	54
5.5.3	端末数が16台の場合と20台の場合の違いに関する考察 . . . . .	55
5.5.4	RTPジッタの定義及び片方向遅延値との関係に関する考察 . . . . .	55
5.5.5	従来手法と提案手法での動作の違いに関する考察 . . . . .	56
5.5.6	ハンドオーバーにかかる時間に関する考察 . . . . .	59
第6章	まとめと今後の課題 . . . . .	60
6.1	まとめ . . . . .	61
6.2	今後の課題 . . . . .	61
6.2.1	実環境による評価 . . . . .	61
6.2.2	VoIP以外のトラフィックが存在する場合の考慮 . . . . .	61
6.2.3	動きが多いシナリオでの通話品質改善 . . . . .	61
6.2.4	片方向遅延及びRTPジッタの値の改善 . . . . .	62
参考文献		64
発表文献		66

# 目次

---

1.1	IP 電話契約件数の推移 . . . . .	2
2.1	RTP プロトコルスタック . . . . .	5
2.2	H.323 プロトコルスタック . . . . .	6
2.3	SIP プロトコルスタック . . . . .	7
2.4	無線 LAN のプロトコル構成と OSI 参照モデル . . . . .	8
2.5	IFS による優先制御 . . . . .	10
2.6	IEEE 802.11e の MAC 参照モデル . . . . .	11
2.7	HCCA アクセスコントロールのシーケンス例 . . . . .	12
2.8	ARROW 方式における TXOP 設定方法 . . . . .	16
3.1	想定するネットワーク構成 . . . . .	21
3.2	AP 選択アルゴリズム . . . . .	22
3.3	端末の接続例 . . . . .	23
4.1	シミュレーションモデル . . . . .	26
5.1	端末の動き方 (実験 A-1) . . . . .	31
5.2	平均 MOS 値の結果 (実験 A-1) . . . . .	32
5.3	平均片方向遅延の結果 (実験 A-1) . . . . .	33
5.4	平均 RTP ジッタの結果 (実験 A-1) . . . . .	33
5.5	端末の動き方 (実験 A-2) . . . . .	34
5.6	平均 MOS 値の結果 (実験 A-2) . . . . .	35
5.7	平均片方向遅延の結果 (実験 A-2) . . . . .	35
5.8	平均 RTP ジッタの結果 (実験 A-2) . . . . .	36
5.9	端末の動き方 (実験 A-3) . . . . .	37
5.10	平均 MOS 値の結果 (実験 A-3) . . . . .	37
5.11	平均片方向遅延の結果 (実験 A-3) . . . . .	38
5.12	平均 RTP ジッタの結果 (実験 A-3) . . . . .	38
5.13	端末の動き方 (実験 B-1) . . . . .	40
5.14	平均 MOS 値の結果 (実験 B-1) . . . . .	41
5.15	平均片方向遅延の結果 (実験 B-1) . . . . .	41
5.16	平均 RTP ジッタの結果 (実験 B-1) . . . . .	42
5.17	端末の動き方 (実験 B-2) . . . . .	43

5.18 平均 MOS 値の結果 (実験 B-2) . . . . .	43
5.19 平均片方向遅延の結果 (実験 B-2) . . . . .	44
5.20 平均 RTP ジッタの結果 (実験 B-2) . . . . .	44
5.21 端末の動き方 (実験 B-3) . . . . .	45
5.22 平均 MOS 値の結果 (実験 B-3) . . . . .	46
5.23 平均片方向遅延の結果 (実験 B-3) . . . . .	46
5.24 平均 RTP ジッタの結果 (実験 B-3) . . . . .	47
5.25 端末の動き方 (実験 B-4) . . . . .	48
5.26 平均 MOS 値の結果 (実験 B-4) . . . . .	49
5.27 平均片方向遅延の結果 (実験 B-4) . . . . .	50
5.28 平均 RTP ジッタの結果 (実験 B-4) . . . . .	50
5.29 端末の動き方 (実験 B-5) . . . . .	51
5.30 平均 MOS 値の結果 (実験 B-5) . . . . .	52
5.31 平均片方向遅延の結果 (実験 B-5) . . . . .	53
5.32 平均 RTP ジッタの結果 (実験 B-5) . . . . .	53
5.33 端末ごとの接続先 AP(従来手法) . . . . .	57
5.34 端末ごとの接続先 AP(提案手法) . . . . .	57
5.35 端末ごとの MOS 値 . . . . .	58
5.36 端末ごとの片方向遅延 . . . . .	58
5.37 ハンドオーバー時の MOS 値変化 (提案手法) . . . . .	59
5.38 ハンドオーバー時の MOS 値変化 (従来手法) . . . . .	59

# 表目次

---

2.1	IEEE 802.11 無線 LAN 規格 . . . . .	9
3.1	関連研究との比較 . . . . .	24
4.1	シミュレーションシナリオ . . . . .	27
4.2	MOS 値の基準 . . . . .	28

# 第1章

---

## 序論



## 1.1 はじめに

近年、ブロードバンド接続環境が急速に普及し、多くの人が高速でインターネットに接続出来る環境が整ってきている。それに伴い、一般電話に比べコストの低いIP電話(VoIP)も広く普及してきており、総務省の調査によると、2007年9月末時点で、約1595万契約の利用がある(Fig. 1.1、出典：[20])。

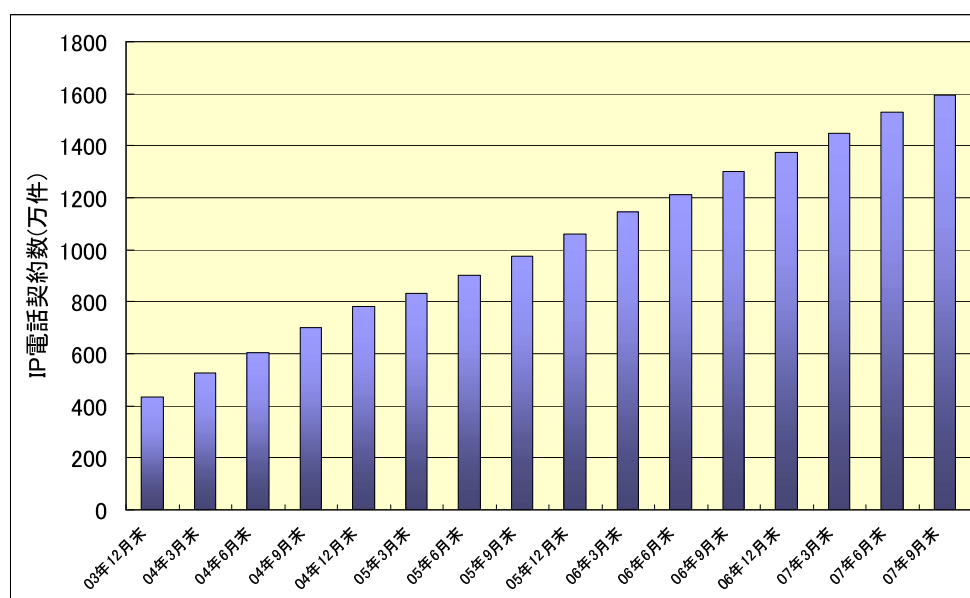


Fig. 1.1: IP 電話契約件数の推移

また、インターネット接続の手段として、有線に比べて配線コストを削減でき、配置場所を柔軟に選べるという特徴を持つ無線 LAN(Local Area Network) が広く普及してきており、企業、大学をはじめ、駅や空港などの公共の場所でも広く利用されるようになってきている。

これらを背景として、無線 LAN を媒介とした IP 電話 (以下、無線 VoIP と記す) が企業を中心に導入され始めている。しかし、VoIP は回線交換式の電話に比べ通話の品質を保つことが難しく、特に無線 LAN を媒介とする場合は品質が低下しやすい。実際に無線 VoIP を大量に導入した企業の中には、満足な品質が得られず、ほとんど使われなくなったという例もある [17]。

無線 VoIP で通話品質の問題が起きやすい原因の一つとして、現在広く普及している無線 LAN 標準規格である IEEE 802.11a/b/g では接続制御がサポートされていないという点が挙げられる。接続制御とは、端末がアクセスポイント (AP) に接続しようとした際、十分な品質を確保できるかどうか AP、もしくは端末が判断し、接続の可否を決定する制御のことである。現在用いられている無線 LAN 標準規格では、各端末が受信電波強度 (Received Signal Strength Indicator:RSSI) のみに基づいて接続先 AP を決定する。そのため、複数の AP が設置されていても、特定の AP の近くに端末が偏在する場合は、それらの端末は電波強度の強い近くの AP に接続してしまい、帯域不足により通話品質が悪化する。その結果、

端末が特定の場所に偏りやすいホテルのロビーや駅構内、展示会場といった使用環境では、電波強度のみを指標にすると、無線資源を有効かつ公平に利用できないことが報告されている [2] [9]。また、特に駅構内や展示会場など、大勢の人が移動する環境においては接続先 AP の自動切り替えであるハンドオーバーが頻繁に起きるため、その際の AP 選択方法が非常に重要になる。

そこで本研究では、無線 LAN VoIP のハンドオーバーに焦点を当て、端末が AP 間を移動する際に、移動中の端末のみでなく、その周辺エリアの全端末の通話品質が最も良くなるよう、接続先 AP を選択する手法を提案する。具体的には、接続先 AP を選択する際の基準として、端末の片方向遅延 (one way delay) を中心に、受信電波強度とパケットエラーレートといった指標も利用し、最も条件の良い AP を選択してハンドオーバーを行う。

## 1.2 本論文の構成

本論文は、6つの章から構成されている。以下に各章の構成を示す。

### 第1章

序論として、背景及び研究の動機、目的を説明し、本論文の構成について述べる。

### 第2章

無線 LAN VoIP を実現するための VoIP 符号化技術、各無線通信技術について概説する。また、無線 LAN VoIP の通話品質向上に関する現在の研究動向について述べる。

### 第3章

本論文で提案する無線 LAN VoIP ハンドオーバー時における最適 AP 選択手法について、その詳細を述べる。

### 第4章

シミュレーションによる評価方法及び評価指標について述べる。

### 第5章

シミュレーションによる実験を行い、提案手法の有効性を検証する。

### 第6章

本論文のまとめを行い、今後の課題について述べる。

## 第2章

---

### 研究の背景

## 2.1 VoIPの概要

VoIP プロトコルは、大きく分けて、実際の音声データの符号化処理を行う音声データ符号化方式と、コネクションの確立やルータ間通信を行うシグナリング処理プロトコルの2種類に分類される。本節では、それらの概要を述べる。

### 2.1.1 音声データ符号化方式

本節では、VoIPの音声データ符号化方式のうち、現在広く用いられている RTP、CRTP、RTCP について概要を述べる。

#### RTP

RTP(Real Time Protocol) とは、音声や動画などのデータをリアルタイムに配送するために利用されるデータ伝送プロトコルである。RFC3550で規定され、ほとんどのシグナリング処理プロトコルで利用可能である。Fig. 2.1 に RTP プロトコルスタックを示す。

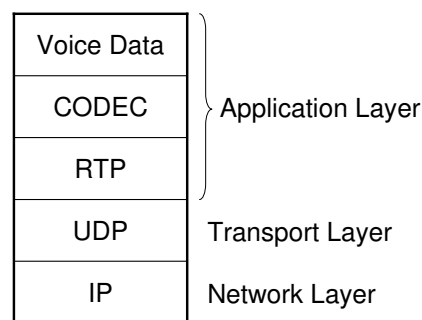


Fig. 2.1: RTP プロトコルスタック

RTP パケット内には、会話で使われる音声細切れが入っている。RTP は UDP (User Datagram Protocol) パケットでやりとりされるが、UDP には再送機能がないため、障害や輻輳が発生した場合、RTP パケットが経路途中で失われても再送されない。また、RTP フレームには、タイムスタンプ/シーケンス番号/会話同期送信元情報などが管理情報として、ヘッダに含まれている。

#### CRTP

CRTP (Compressed RTP) とは、圧縮リアルタイムプロトコルのことである。CRTP は RFC2508 で規定される RTP の一種で、パケットヘッダを圧縮し、ネットワーク上で効率的なパケット転送を可能にする。RTP の場合、IP ヘッダ/UDP ヘッダ/RTP ヘッダを合わせて 40 バイトのヘッダ長だったものが、CRTP の場合は、これらを合わせても 2-4 バイト程度に圧縮されている。CRTP を使うことにより、RTP に比べて約 2 倍の通話を扱えるようになり、低速回線の CODEC とともに利用されている。

## RTCP

RTCP(Real-Time Control Protocol)とは、RTPと共に利用されるデータ伝送プロトコルである。通話品質向上のため、通信の接続状況についての統計情報を収集し、ネットワークの流れを動的に調整して最適化するために使われる。音声不具合のトラブル解決を行う際も、RTPのみでは、経路上のある点で収集したパケットのみを基に解析する必要があるが、RTCPを使うことによって、End-to-Endの品質を確認できるため、原因解明に役立つ。

### 2.1.2 シグナリング処理プロトコル

本節では、VoIPにおいて、通話経路を確立し、通話接続を実施するために使われるシグナリング処理プロトコルのうち、H.323とSIPについて概要を述べる。

## H.323

H.323はインターネット上で音声と動画をやりとりするためにITU-Tで制定され、初期のVoIPから広く使われているプロトコルである。広義のH.323はプロトコル群を指し、そのプロトコルスタックはFig. 2.2のようになっている。

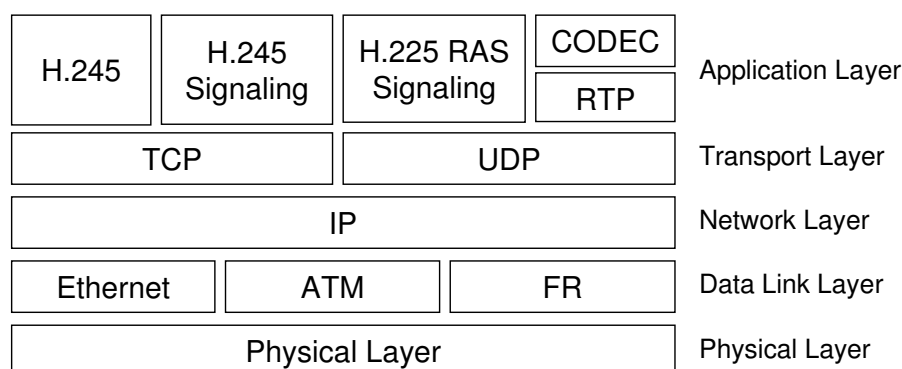


Fig. 2.2: H.323 プロトコルスタック

H.323 プロトコル群のうち、H.225は、基本シグナリングメッセージ部である。通話開始(Setup)や呼出(Alerting)、接続(Connect)といったメッセージを発し、通話接続を制御する。

H.323 プロトコル群のうち、H.245は、メディア制御部と呼ばれる部分であり、電話から電話への通話に対して論理チャネルを確立する。H.245による通信路確立のやりとり(ネゴシエーション)の間に、利用可能機能内容や優先度が電話間で交換される。また、この交換時に、通話でどのコーデックを使うか選択される。

H.323 プロトコル群のうち、RASプロトコルは、Registration(登録)、Admission(許可)、Status(状態)の頭文字を合わせた名前で、電話端末管理を行う。RAS論理チャネルはIP電話と、電話を管理するゲートキーパーの間で確立され、RAS通信が行われないと、IP電話は通話の発信や着信ができない。

## SIP

SIPは、テレビ会議、音声通話、データ共有といったマルチメディアセッションの管理や確立を行うプロトコルである。SIPのプロトコルスタックはFig. 2.3の通りである。

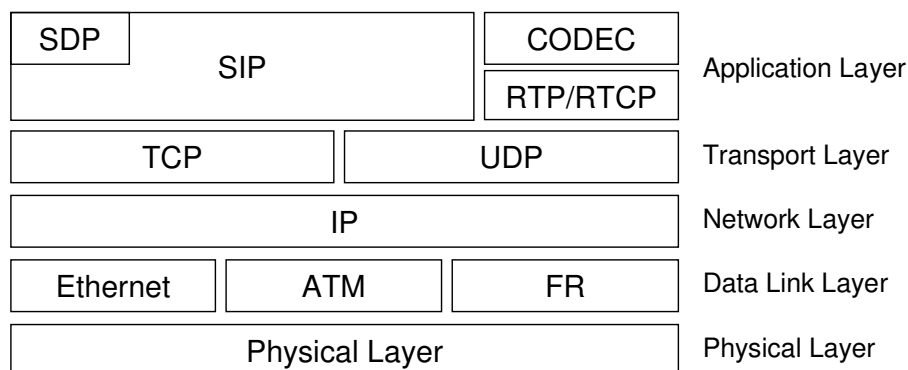


Fig. 2.3: SIP プロトコルスタック

SIPの特徴として、基本的にセッションの開始/変更/終了のみを行う、非常に単純なプロトコルであるということが挙げられる。また、HTTP/1.1に似たテキストベースのメッセージフォーマットであり、ソフトウェアの機能追加や拡張が容易である。

SIPでは、音声などのストリーミング送受信にRTPとRTCP、制御を行うデータ送受信ホストのポート制御にSDP(Session Description Protocol)が使われている。

## 2.2 無線LANの概要

本節では、IEEE 802.11 無線LANのプロトコル構成、規格の概要、MAC層における優先制御機構及びハンドオーバーの手順について述べる。

### 2.2.1 プロトコル構成

無線LANは、Fig. 2.4に示すように、IEEE 802体系の中に組み込まれている。IEEE 802.11標準では、MAC(Media Access Control)層以下の部分が規定されており、それより上位のサービスは有線LANと共通のプロトコルを使用する。

### 2.2.2 無線LAN規格(IEEE 802.11a/b/g)

無線LAN規格群であるIEEE 802.11の中で、現在、IEEE 802.11a、IEEE 802.11b、IEEE 802.11gが広く普及している。各規格について、利用周波数帯、伝送速度及び標準化年をTable 2.1に示す。

IEEE 802.11bは、2.4GHz周波数帯を利用し、変調方式にCCK(Complementary Code Keying)方式を採用することで、最大11Mbpsの通信速度を実現する。2.4GHz帯はISMバンドと呼

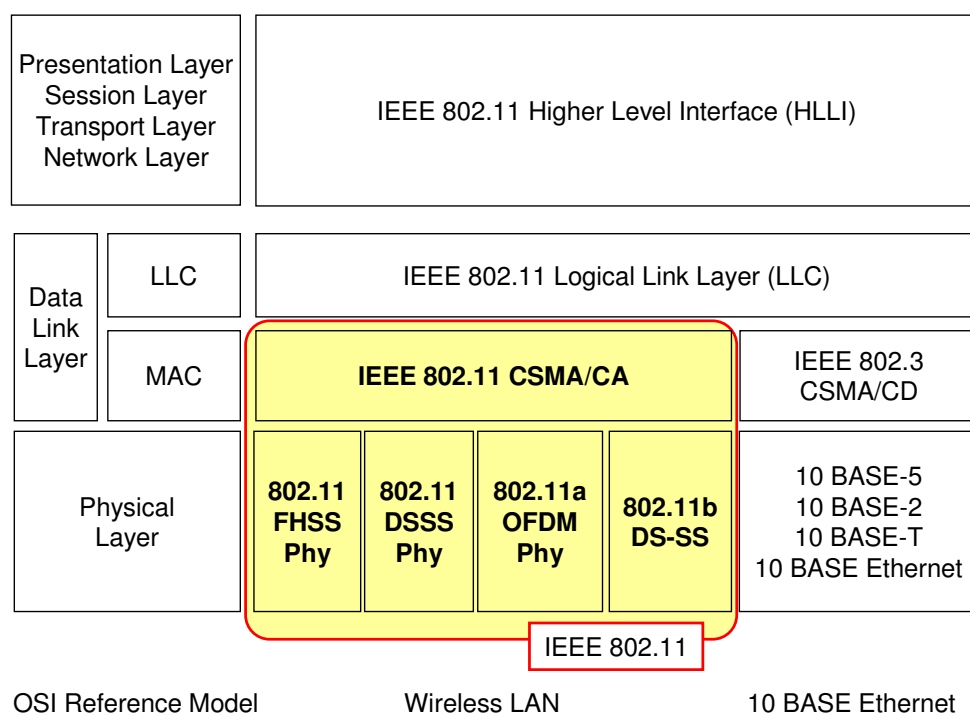


Fig. 2.4: 無線 LAN のプロトコル構成と OSI 参照モデル

ばれ、電子レンジや医療機器などでも利用されているため、こうした機器との電波干渉が問題になることもある。また、IEEE 802.11bで通信できるチャンネルは国によって異なり、日本では14チャンネル用意されている。ただし、隣接チャンネルの干渉を防ぐため、同時に最大で4チャンネルまでしか使用することができない。また、IEEE 802.11bは無線フレームのオーバーヘッドや、CSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance)方式によるMAC制御の影響などにより、実効スループットは約5Mbps程度である。

IEEE 802.11aは、5GHz周波数帯を利用し、変調方式にOFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)方式を採用することで、最大54Mbpsの通信速度を実現する。日本では2005年の法改正に伴い、同時に利用可能なチャンネル数が8チャンネルとなっている。また、IEEE 802.11bと同様に、無線フレームのオーバーヘッドや、CSMA/CA方式によるMAC制御の影響などにより、実効スループットは約25Mbps程度である。

IEEE 802.11gは2.4GHz周波数帯で、最大54Mbpsの通信速度を実現する。IEEE 802.11bと同じ周波数帯を使用するため、後方互換性を保つことが可能である。変調方式は、IEEE 802.11bで採用されたCCK方式と、IEEE 802.11aで採用されたOFDM方式の両方が必須方式として定義されている。また、IEEE 802.11bと同様に、無線フレームのオーバーヘッドや、CSMA/CA方式によるMAC制御の影響などにより、実効スループットは約20Mbps程度である。

Table 2.1: IEEE 802.11 無線 LAN 規格

	周波数帯	伝送速度	標準化年
IEEE 802.11b	2.4GHz 帯	11Mbps	1999
IEEE 802.11a	5GHz 帯	54Mbps	1999
IEEE 802.11g	2.4GHz 帯	54Mbps	2003

### 2.2.3 MAC 層における機能

本節では、無線 LAN の MAC 層におけるアクセス制御方式及び各種優先制御方式及び接続を開始する際のスキャン機能について述べる。

#### CSMA/CA 方式

IEEE 802.11 で用いられるアクセス制御方式は DCF(Distributed Coordination Function: 自律分散制御) による無線チャネルアクセス方式である。DCF ではフレームの衝突をできるだけ回避するため、無線チャネルの使用状況を見てからフレームを送信するかどうか決定する CSMA/CA アクセス方式が用いられている。CSMA/CA では、フレームの送信を試みようとするそれぞれの無線局が事前に聞き耳を立て無線チャネルの使用状況を確認し、他の送信局による通信が終わるのを待ってから送信を開始する。このとき、他の送信局との衝突を避けるため、無線チャネルの使用が終わってからある時間だけ間をおき、送信を開始する。この待ち時間は、最低限の送出信号間隔である IFS(Inter Frame Space: フレーム間隔) と、乱数により決定されるバックオフ時間 (Backoff Time) の和で決まる。以下に、バックオフ時間の決定方法を述べる。

バックオフ時間は規定の CW(Contention Window: 乱数発生範囲) の範囲内で発生させられた乱数値に、一定時間 (Slot Time) を掛け合わせて決定する。

$$\text{BackoffTime} = \text{rand}[0 : \text{CW}] \times \text{SlotTime}$$

また、フレームの衝突などにより再送する場合は、次式のように指数関数的に CW を増加させ、衝突確率の低下を図っている。

$$\text{CW}_{\text{new}} = (\text{CW}_{\text{old}} + 1) \times 2 - 1$$

#### IFS による優先制御

IEEE 802.11 では、2.2.3 節で述べた IFS と CW を用いてアクセス制御を行っている。IFS は基本的に固定長であるが、キャリア・センスを効果的に行うため、その長さを複数定義して使い分けることで、無線局間の優先権を制御することが可能となっている。以下に主な IFS の種類を挙げ、それぞれの IFS の関係を Fig. 2.5 に示す。

- SIFS(Short Inter Frame Space)



- 最小のフレーム間隔であり、最優先のフレームである ACK(ACKnowledgement) フレームや CTS(Clear To Send) フレームを送信する際のフレーム送信間隔として用いられる
- PIFS(Point Inter Frame Space)
  - IEEE 802.11 規格でオプションとして定義されている、集中制御方式の PCF(Point Coordination Function:ポーリング型集中制御)において、キャリアセンスを行う際にアイドル状態と判断するまでに必要なチャンネルの連続未使用時間として用いられる
- DIFS(Distributed Inter Frame Space)
  - 通常の分散制御である DCF で用いられるフレーム間隔である

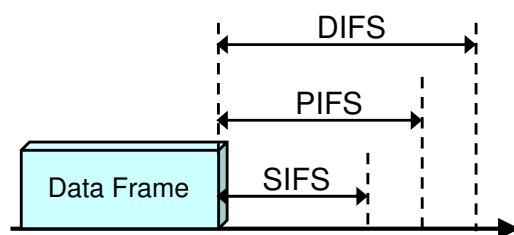


Fig. 2.5: IFS による優先制御

### EDCA による優先制御

IEEE 802.11 の MAC レイヤを拡張し、QoS(Quality of Service:通信品質)をサポートした方式として IEEE 802.11e 標準がある。EDCA(Enhanced Distributed Channel Access:拡張自律分散チャネルアクセス)はそのうちのひとつで、従来の DCF で使用する CSMA/CA 手順を改良したものである。この手順では、送信するフレームを 4 つのアクセスカテゴリ (Access Category:AC) ごとに分類し、カテゴリごとに提供するサービスの品質に差を付けることで優先制御を提供する。

Fig. 2.6 に IEEE 802.11e の MAC 参照モデル構成を示す。MAC の内部には、各 AC に対応した送信キューが存在し、フレームの送信時にはキューごとに、独立に CSMA/CA 手順が実行される。各 AC には、アクセス制御で使用するパラメータが AC の優先度に応じて設定されており、それに従って CSMA/CA 手順を実行することにより、フレームが送信される頻度に統計的な差を付ける。すなわち、より優先度の高い AC のデータにより多くの送信の機会を与えることが可能となる。

具体的には、バックオフ時間を決定するために生成する乱数の範囲が AC(送信データの種類)に応じて変えられている。すなわち、AC[i] のデータは  $0 \sim CW[i]$  の範囲、AC[j] のデータは  $0 \sim CW[j]$  の範囲、...とし、優先度の高い AC ほど発生させる乱数の範囲を小さくすることで、短い待機時間でデータの送信が行えるようになっている。これにより、AC に応じた優先制御を実現している。

さらに、それぞれの優先レベルに対して TXOP(Transmit Opportunity:排他的なチャネルの利用)と呼ばれる時間間隔が割り当てられている。TXOP とは、ある局が EDCA による競

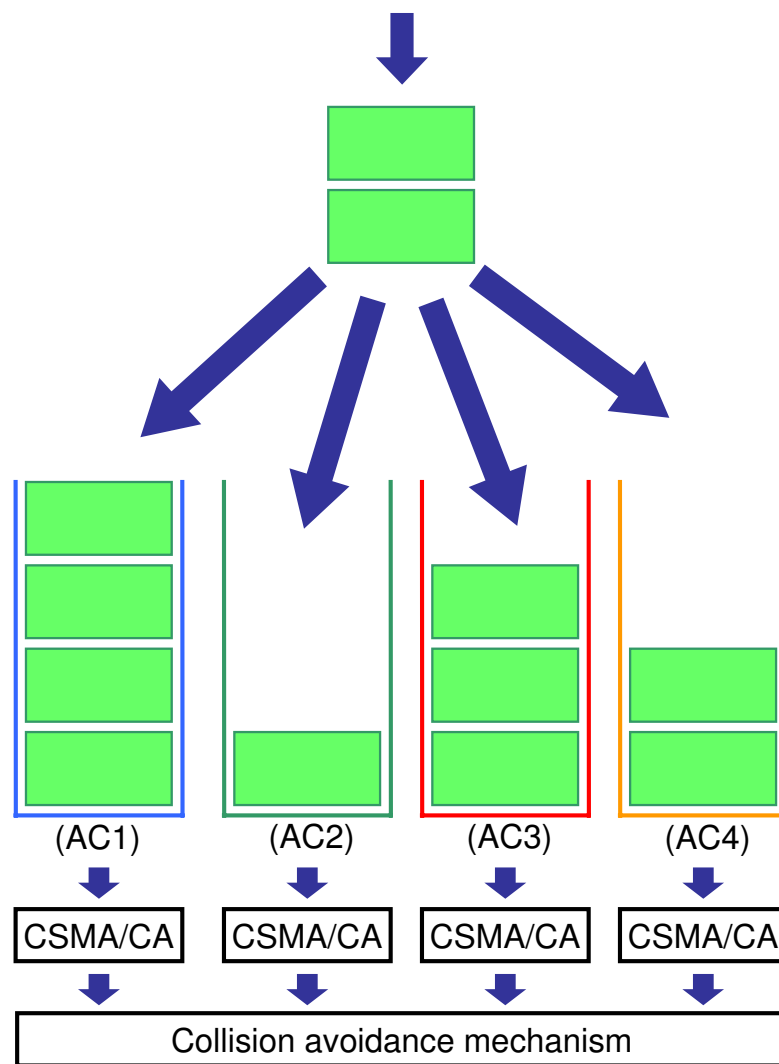


Fig. 2.6: IEEE 802.11e の MAC 参照モデル

合制御によりチャネルへのアクセス権を取得した後での、排他的にチャネルの使用が認められている時間を表すパラメータである。この時間が長いほど、優先してデータを送出することができる。

### HCCA による優先制御

IEEE 802.11e 標準の機能のうち、HCCA(Hybrid coordination function Controlled Channel Access) はポーリングを用いたデータ伝送であり、従来の PCF を拡張した方式である。PCF では以下のような欠点があるため、QoS を提供するための十分な機能が備わっていなかった。

- データ転送を開始するにあたっての制約がある
- 基地局と端末の間で具体的なパラメータの交換手段が提供されていない

HCCA では、データ転送の前に基地局と端末の間で通信品質のネゴシエーションが可能であり、またデータ転送のためのポーリングを行う際にはデータの種別に応じた所要の品質を考慮してスケジューリングを行うため、指定された帯域幅や遅延時間などのパラメータを保証する「パラメータ保証型 QoS」をサポートすることが可能となる。

ポーリングを行う主体は、HC(Hybrid Coordinator)と呼ばれ、QoS 対応のアクセスポイント(QAP)がこの役割を果たす。HCCA によるフレーム交換シーケンスの例を Fig. 2.7 に示す。HC はポーリングを開始する際に、EDCA で用いられる AIFS(Arbitration IFS) 時間よりも短い PIFS 時間間隔で、チャンネルへのアクセス権を取得することができる。HC が端末に対して送信を許可するために送るポーリングフレームは QoS CF-Poll(QoS Contention Free-Poll) と呼ばれ、QoS CF-Poll には、ポーリングされた端末が許可されたチャンネル使用時間(TXOP)の情報が含まれる。

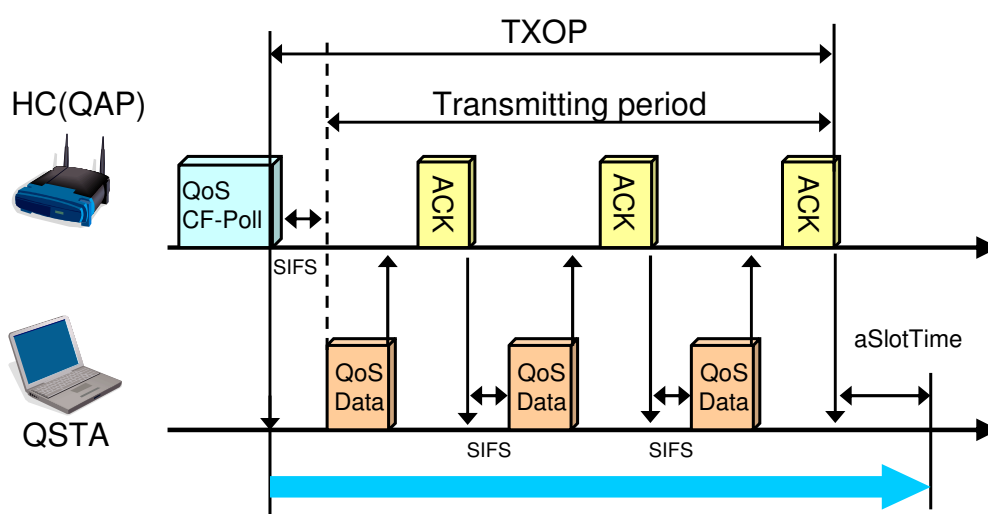


Fig. 2.7: HCCA アクセスコントロールのシーケンス例

以上の方法はHCCA シンプルスケジューリングと呼ばれる。HCCA にはこれに付随し、接続数を制限するシンプルアドミションコントロールを行うことが可能である。

## 2.2.4 ハンドオーバー手順

IEEE 802.11 無線 LAN において、端末が移動し AP のサービス提供範囲から遠のき、別の AP のサービス提供範囲に入った際、AP を変更する手続きであるハンドオーバーが発生する。本節では、ハンドオーバーが行われる際の具体的な手順について、チャンネルスキニング、認証、再接続の 3 つのフェーズに分けて概要を述べる。

### (1) チャンネルスキニング

チャンネルスキニングは、新たに接続する候補となる AP を探す手順である。スキニングには、パッシブ (passive) とアクティブ (active) の 2 種類の方法がある。パッシブスキニング

グでは、端末はチャンネルを次々に切替え、APにより送信されるビーコンフレームの到着を待つ。ビーコンの送信間隔は通常 100ms なので、全てのチャンネルをスキャンするには 1 秒以上の時間がかかる。一方、アクティブスキャンモードでは、端末はチャンネルを次々に切替え、“ProveRequest” と呼ばれるフレームを送信し、AP からの返事である “ProveResponse” の到着を待つ。このモードを用いた場合、例えば IEEE 802.11b での 11 チャンネルをスキャンするために 220ms から 440ms 程度の時間がかかる [6]。

チャンネルスキャンは、ハンドオーバー手順の中でも最も時間のかかる手順であり、全てのハンドオーバー手順の 90% の時間を費やすとされている [6]。

## (2) 認証

認証は、端末が接続しようとしている AP に、その端末が接続する資格があるかどうかを確認する手順である。認証には主に 2 種類の方法がある。一つはオープンシステム認証と呼ばれるものである。端末と AP は 2 つのメッセージをやりとりし、AP は必ず端末の接続を許可する。もう一つは共有キー認証と呼ばれるものである。Wired Equivalent Privacy(WEP) キーと呼ばれる共有キーを用いて認証を行い、端末と AP の間で認証が完了するまでに 4 つのメッセージをやりとりする。

## (3) 再接続

認証手順が完了すると、端末は AP との間にリンクを張るための再接続手順を開始する。この過程において、端末と AP の間では、利用可能な伝送レートやビーコン間隔といった情報をやりとりされる。また、再接続過程において、端末の接続情報が移動元の AP から移動先の AP へ、Inter Access Point Protocol(IAPP) を用いて伝送される。

## 2.3 関連研究

無線 LAN VoIP の品質向上に関する研究は数多く行われているが、大きく分類すると、「接続開始時の AP 選択」、「呼受付制御」及び「ハンドオーバー時における接続制御」の 3 種類に分けることができる。本節では、それぞれの分類に関して、現在の研究動向を述べる。

### 2.3.1 接続開始時の AP 選択に関する研究

複数の AP がサービスを提供している中では、端末は接続を開始する際に AP を選択することが可能である。その際に、通話品質に影響するパラメータを考慮に入れた上で、最も通話品質が良くなるような AP を選択する手法に関する研究が多くなされている。その中で代表的な 3 つの研究について、以下で概要を述べる。

### 山田らによる研究

山田らによる研究 [14] では、隠れ端末問題や QoS 制御を考慮に入れた AP 選択を行うため、「利用可能な物理伝送レート」、「AC ごとの接続端末数」、「隠れ端末による影響」及び「AP 負荷」の 4 点を考慮した AP 選択方式を提案している。隠れ端末問題に関しては、AP を選択するための指標として

$$f_{vi} = (N_{vi} - N_{vhi}) \cdot L / v_i$$

という式を用いることで解決している。ここで、 $N_{vi}$  は AP の観測した端末数、 $N_{vhi}$  は端末により観測された周辺の端末数、 $L$  は平均データパケット長、 $v_i$  は端末が受信したビーコンの SNR から決定されるデータレートである。 $(N_{vi} - N_{vhi})$  は隠れ端末の推定台数、 $L/v_i$  はデータ送信に要する時間の指標となり、隠れ端末を考慮に入れた AP 選択が可能となる。QoS の考慮に関しては、接続している AC ごとの端末数情報をビーコンを利用して端末へ通知することにより実現している。

### HRFA 方式

竹内らによる HRFA(High-Rate First Association) 方式 [12] では、「伝送レート」及び「チャネルロード」を考慮することにより、接続先 AP の負荷状況を考慮に入れた AP の選択手法を提案している。具体的には、以下の式に基づいてスコアを決定し、最もスコアの高い AP に接続するという手法である。

$$ScoreRT_i = AAC_i \times R_i$$

ここで、 $AAC_i$  は、IEEE 802.11e をサポートする AP における、ビーコンフレームの QBSS Load Element で端末にアナウンスされる Available Admission Capacity field のことであり、1 秒間にどれだけの Real Time トラフィックを受け入れる時間が残っているかを示す。また、 $R_i$  は伝送レートによる重みを示す。

### 森岡らによる研究

森岡らによる研究 [7] では、QAP と AP の混在環境において、適切な AP を選択することを目指し、「AP の QoS サポート状況」、「AP に流れるトラフィック量」及び「端末が利用可能な QAP 数」に基づいて接続先 AP を決定する。具体的には、以下の式に基づいてスコアを決定し、最もスコアの高い AP に接続する。まず、通常のデータ通信のような Non Real Time(NRT) トラフィックについて、NRT スコアは

$$S_{NRT} = B_i(1 - u_i)$$

に基づいて決定される。ここで、 $B_i$  は接続候補 AP[i] の実効伝送レート、 $u_i$  は AP[i] の伝送帯域利用割合を示す。一方、VoIP のような Real Time(RT) トラフィックについて、RT スコアは

$$S_{RT}[QAP] = B_i \left[ 1 - \frac{u_i}{\exp[n/N \cdot (1 - u_i)]} \right]$$

$$S_{RT}[AP] = S_{NRT}$$

に基づいて決定される。ここで、 $n$  は接続先候補のうち、QAP の数を示す。

### 2.3.2 呼受付制御に関する研究

従来の IEEE 802.11a/b/g といった無線 LAN 規格では、呼受付制御が規定されていないため、1 つの AP に多くの端末が接続し、結果としてその AP に接続する全ての端末の通話品質が悪化するといったことが起こりやすい。また、呼受付制御が規定されている IEEE 802.11e では、HCCA モードにおいてアドミッションコントロールがサポートされているが、最小伝送レートに基づいて計算された TXOP を使って許可制御を行っており、実際に接続可能な数より少ない数の端末のみしか接続できないといった問題がある。それらの問題を解消するための研究が多くなされており、その中で代表的な 3 つの研究について概要を述べる。

#### ARROW 方式

Dimitris らによる ARROW 方式 [10] の特徴は、チャンネル割り当てを実際のトラフィックに基づいて行っているという点である。推定値ではなく実際の値を用いることで、より多くの端末が AP に接続することが可能となっている。ARROW 方式では、TXOP 値をリアルタイムに計算するため、QoS データフレームの中に Queue Size(QS) フィールドを設定する。QS フィールドは Traffic Stream(TS) に溜まっている queue サイズを、QoS サポート端末 (QSTA) が QAP に対して伝えるために用いられる。

ARROW 方式で用いられる QS の使用例は Fig. 2.8 の通りである。 $t_i(x)$  の時点において、 $QSTA_i$  には  $TXOP_i(x)$  が割り当てられる。この値は、これより前に QS フィールドによって伝えられていたトラフィックサイズに基づいて計算される。そして、 $QSTA_i$  は送信データと共に、TS に溜まっている queue サイズ ( $QS_i(x)$ ) を QS フィールドに書き込んで伝える。 $t_i(x+1)$  の時点において、スケジューラは  $QSTA_i$  に対して  $QS_i(x)$  の一部、または全てを送ることが可能な  $TXOP_i(x+1)$  を割り当てる。 $[t_i(x), t_i(x+1)]$  の期間に  $QSTA_i$  によって新たなデータが集められ、 $QSTA_i$  は QoS データフレームを用いて、その時点で TS に溜まっている queue サイズ ( $QS_i(x+1)$ ) を送る。この後は同様に、 $t_i(x+2)$  の時点では  $QS_i(x+1)$  の一部、または全てを送ることが可能な  $TXOP_i(x+2)$  が割り当てられる。

シミュレーションによる評価の結果、従来の HCCA シンプルスケジューリングでは端末数が 6-7 より多い場合、全体のスループットが一定、すなわち 1 台あたりのスループットが下がっているのに対し、ARROW 方式では、端末数 18-19 程度まではスループットが低下していないなど、本手法の優位性が明らかとなっている。ただし、端末数が 18-19 を超えると途端に大きくスループットが落ちてしまう点が問題である。



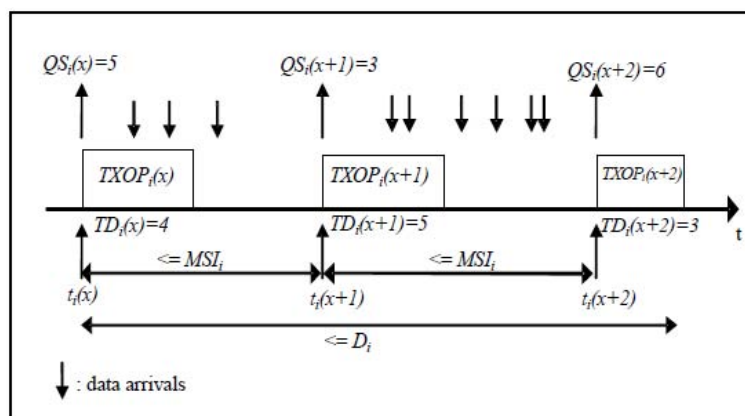


Fig. 2.8: ARROW 方式における TXOP 設定方法

### PRBAC 方式

HCCA シンプルアドミションコントロールの問題点を解決するための手法として、Gao により PRBAC (Physical Rate Based Admission Control) という方式が提案されている [3]。HCCA シンプルアドミションコントロールでは、最小伝送レートに基づいて計算された TXOP を使って許可制御を行っているのに対し、この方式では、アドミションコントロールには平均伝送レートを用い、スケジューリングには瞬間伝送レートを用いて TXOP を割り当てている。これにより、帯域を有効に利用し、より多くの端末を許可することに成功している。しかし、この手法では、多くの端末がアクセスポイントから遠くに離れた場合に、瞬間伝送レートは最小伝送レートに近づくため、許可された端末の品質を満たせない場合が生じるという問題がある。

### 山野らによる研究

山野らによる研究 [15] では、AP や端末を管理するリソースマネージャと呼ばれるサーバを導入し、無線使用帯域の推定を行うと同時に、その結果に基づいた呼受付制御を行っている。無線使用帯域の推定方法としては、SIP サーバより取得した CODEC 種別、ペイロード周期、AP 及び端末から取得した伝送レートや CRC フレームエラー率からパケット衝突確率を算出し、その値から無線帯域使用率を推定する。また、既存の IEEE 802.11 無線 LAN 規格では、伝送レートが自動的に変更され、本手法の適用には不適當であるため、伝送レートの変更もリソースマネージャの判断により行う。

これらの機構を実装して評価を行った結果、伝送レートを 5.5Mbps に固定した場合、呼の収容率が 22% 改善されている。

### 2.3.3 ハンドオーバー時における呼受付制御に関する研究

既存の IEEE 802.11 無線 LAN 規格では、端末が移動し、AP からの受信電波強度が弱くなった場合、より強い電波強度を受信可能な AP へ自動的にハンドオーバーさせる機構が

備わっている。しかし、接続先の AP を選択する基準が受信電波強度のみのため、必ずしも AP の帯域等に空きがあるとは限らず、結果として通話品質が悪化するなどの問題がある。それらの問題を解消するための研究が多くなされており、その中で代表的な 4 つの研究、技術について詳細を述べる。

#### 川崎らによる研究

川崎らによる研究 [5] では、先述の山野らによる研究 [15] を拡張し、リソースマネージャを利用して、ハンドオーバー時の呼受付制御を行っている。ハンドオーバーが発生する際に、端末から検出される AP リストに、受信電波強度を付加したものがリソースマネージャへ送付される。リソースマネージャは、そのリストに記載されている各 AP に、リソースマネージャ内で保持している、CODEC 種別、ペイロード周期及び伝送レートを用いて無線使用帯域を推定後、最も使用率の小さい AP へハンドオーバーさせる。

これらの機構を実装して評価を行った結果、無線使用帯域を高精度で推定でき、さらに、リソースマネージャの処理時間を 17ms の増加に抑え、1 ペイロード周期内に収まっている。

#### 妙中らによる研究

妙中らによる研究 [11] では、ハンドオーバーによる AP 切り替え時の通話品質への影響を極力小さいものとするため、通信品質が劣化するより前に発生する MAC レイヤにおけるデータフレーム再送に着目し、再送回数を考慮したハンドオーバー管理手法を提案している。具体的には、端末に 2 つの無線 LAN インタフェースを搭載し、MAC レイヤより常時データフレームの再送回数を取得する。再送回数が増加した場合に、2 つの無線 LAN インタフェースを用いたマルチパス転送に移行する。そして、どちらか一方の Stability Counter が閾値以上になったら接続が安定したと判断し、シングルパス転送に切り替えるというものである。

実際にノート PC へ 2 つの無線 LAN インタフェースを取り付け、実装を行い評価した結果、ハンドオーバーが起きても、パケットロス無しで AP を切り替えることができています。

#### Guard Channel 方式

単純なアドミッションコントロールの機能を用いた場合、無線 VoIP において、新たに発信された接続と、他のエリアからのハンドオフによる接続 (以下、ハンドオフ呼と記す) は区別することができない。しかし、実際の使用を考えた場合、発信できないことよりも、通話中に切断されることの方が問題となる。そこで、新たに発信された接続より、ハンドオフ呼を優先させる方式として Guard Channel が存在する。この方式では、チャンネルをハンドオフ呼専用予約することで、ハンドオフ時の強制切断率を下げるものである。



### DOVE 方式

Guard Channel 方式を用いると強制切断率を下げるができるが、その代わり、新たに発信された接続が拒否される確率(呼損率)が大幅に上昇する。この問題を解決する方法として、奥田による DOVE 方式が挙げられる [8]。この方式では、ハンドオフ呼専用のチャネルを予約するのではなく、ハンドオフ呼を優先するチャネルを用意している。残りチャネルがハンドオフ呼優先のチャネルのみの場合は、ハンドオフ呼の場合は即座にチャネルを獲得できるが、新規呼の場合はある時間だけ遅延させた上でチャネルを獲得できる。この方式により、Guard Channel 方式に比べて強制切断率は若干増加するが、呼損率を大幅に低下させることができる。

## 第3章

---

# ハンドオーバー時における 最適AP選択手法の提案

### 3.1 提案手法の概要

1.1 節でも述べたとおり、既存の IEEE 802.11 無線 LAN 規格では、受信電波強度のみによって接続する AP を決定するため、AP や端末の配置によっては、特定の AP に接続が集中し、その AP に接続している全ての VoIP 端末の通話品質が悪化するという問題がある。

そういった問題を解決するため、2.3 節で述べたように、端末が AP を選ぶ際のアルゴリズムが数多く提案されている。それらの手法を用いることで、注目している端末の通話品質は良い状態に保たれるが、一方で、周囲の端末への影響も考慮に入れた手法はほとんどない。周囲の端末への影響も考慮に入れない場合、注目している端末にとっては最良の AP を選択しても、その端末が接続することにより、既にその AP に接続している他の端末の通話品質が悪化する可能性がある。

そこで本研究では、無線 VoIP 端末が移動し、ハンドオーバーが起きる際、該当端末のみならず、周囲の VoIP 端末の通話品質も最も良い状態に保つことが出来るような、AP 選択アルゴリズムを提案する。具体的には、AP の負荷を推定するために、端末の片方向遅延 (one way delay) の平均値を AP ごとに計算し、最も平均値の良い AP へハンドオーバーさせる。ただし、片方向遅延の平均値のみでは、移動中の端末と AP 間の通信状況が分からないため、受信電波強度とパケットエラーレートといった指標を用いて、最低限の通信品質が確保できる AP に接続できるようにする。

本研究で想定しているネットワーク構成を Fig. 3.1 に示す。いくつかの AP が存在し、その間を無線 VoIP 端末が移動し、ハンドオーバーが起きる。通話呼は、無線 VoIP 端末から、AP の先に有線で接続されている端末に発信されるものとする。本手法で利用している片方向遅延は、送信側と受信側の双方の遅延時間が加算されるが、受信側は全て有線であると仮定することで、受信側の遅延時間はほぼ一定とみなすことができる。すなわち、片方向遅延の値が発信側の AP の混雑具合を表すことになる。なお、各 AP ごとの片方向遅延の平均値を計算したり、その情報を元に端末へハンドオーバーの指示を出すのは、Fig. 3.1 に示されている「接続管理サーバ」であり、これは AP 等が接続されているネットワークに接続されていると仮定する。

### 3.2 AP 選択アルゴリズムの詳細

提案する AP 選択アルゴリズムについて、順を追って詳細を述べる (Fig. 3.2 参照)。

#### (1) 接続中の AP との接続切断

端末が移動し、それまで接続中だった AP からの受信電波強度が弱くなると、ビーコンフレームの取得ミスが起きようになる。ビーコンフレームの取得ミスが 2 フレーム連続で起きた時点で、本研究で提案する AP 選択アルゴリズムの動作が開始される (Fig. 3.2 の “Start” の段階へ)。

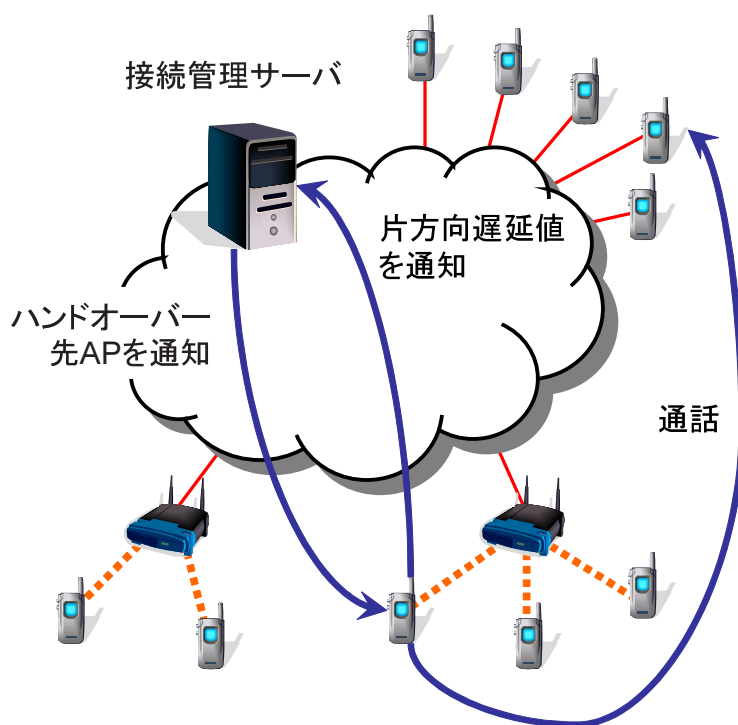


Fig. 3.1: 想定するネットワーク構成

## (2) 片方向遅延の平均値を計算し、小さい順にソートする

各 AP ごとの負荷を推定する指標として、端末との間の片方向遅延の平均値を求める。AP[i] に接続している端末の片方向遅延平均値  $Average[i]$  は次のように求められる。

$$Average[i] = \frac{\sum_k d_k}{N_i}$$

ここで、 $d_k$  は端末  $k$  の間の片方向遅延、 $N_i$  は AP[i] に接続中の端末数を示す。例えば、Fig. 3.3 の AP1 の場合、Group A の端末の片方向遅延の平均値が  $Average[1]$  である。

次に、 $Average[i]$  を小さい順にソートし、 $AvgSorted[j]$  に格納する ( $j = 0, 1, \dots$ )。ただし、 $l < m$  のとき  $AvgSorted[l] < AvgSorted[m]$  とする。

## (3) 最小のものから順に選び、RSSIとPERをチェックする

$j = 0$  とセットし、 $AvgSorted[j]$  に該当する AP[i] と、ハンドオーバー中の端末との間の受信電波強度 (RSSI) とパケットエラーレート (PER) が規定値  $P, R$  よりそれぞれ良いかどうかを確認する。どちらもクリアした場合は、 $AvgSorted[j]$  に該当する AP[i] へ接続を開始する。どちらか片方でもクリア出来ない場合は、 $j++$  として、次に小さい  $AvgSorted[j]$  を選択し、再び受信電波強度とパケットエラーレートのチェックを行う。

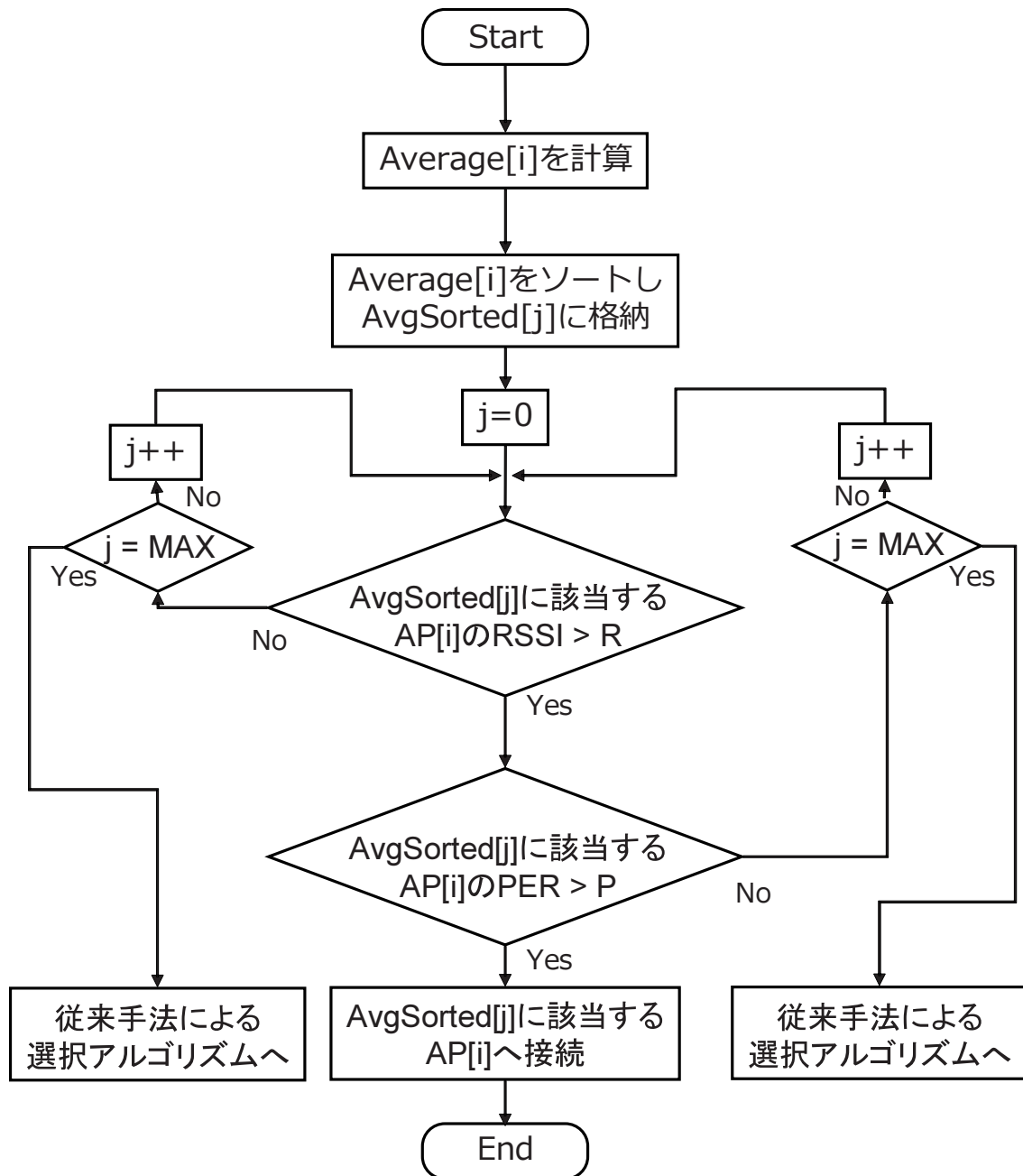


Fig. 3.2: AP 選択アルゴリズム

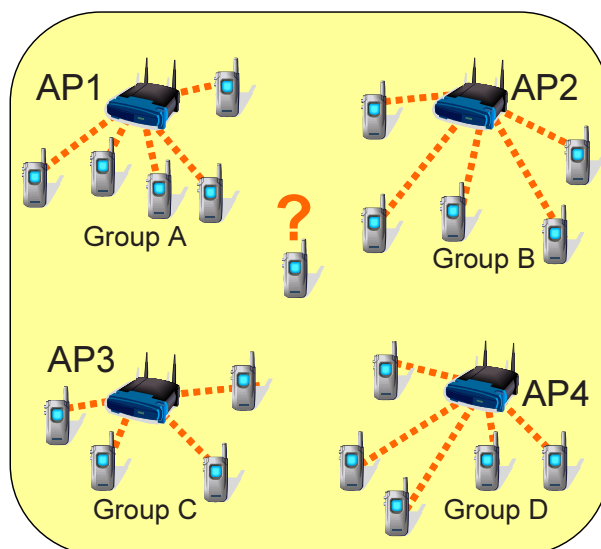


Fig. 3.3: 端末の接続例

#### (4)RSSI と PER の基準を満たせない場合

前項において、全ての  $j$  において受信電波強度とパケットエラーレートが基準に満たなかった場合、既存手法による AP 選択、すなわち受信電波強度のみによる AP 選択に切り替え、ハンドオーバーを行わせる。

### 3.3 関連研究との比較

本節では、無線 LAN VoIP の通話品質保持に関するその他研究と、本研究との比較を行う。

無線 LAN VoIP の通話品質保持に関する研究は、2.3 節で述べたとおり、大まかに 3 種類に分けることができる。

このうち、接続開始時の AP 選択に関する研究 [14][12][7] では、物理伝送レートや接続端末数、伝送帯域利用割合等の情報を利用し、接続を開始する際に最適な AP を選択する手法が提案されている。しかし、これらの手法では、接続を開始する 1 つの端末の通話品質のみに焦点を当てており、その他の既に通話中の端末への影響を考慮に入れているものはない。この点に関して、本研究では、AP ごとに全ての端末の片方向遅延平均値を求め、AP 選択の指標とすることで、周辺エリア全体の通話品質への影響を最小にしつつ、注目している端末の通話品質も一定以上に保つことができるという利点がある。

呼受付制御に関する研究 [10][3][15] では、Traffic Stream の queue サイズや、伝送レートの推定等により、AP が受け入れることができる端末数を制御する手法が提案されている。これらの手法では、AP に接続する端末数を制限することで、既に AP に接続している端末の通話品質を保つことができるが、一方で、これから AP に接続しようとしている端末や、ハンドオーバーを行っている端末にとって、通話品質の良くなる AP を選択させる機能は有していない。この点に関して、本研究では、AP への接続数制限は行っていないが、

Table 3.1: 関連研究との比較

		接続開始時の AP 選択	ハンドオーバー時の AP 選択	周辺端末への影響考慮
接続時 AP 選択	山田らによる研究 [14]		×	×
	HRFA 方式 [12]		×	×
	森岡らによる研究 [7]		×	×
呼受付制御	ARROW 方式 [10]	×	×	
	PRBAC 方式 [3]	×	×	
	山野らによる研究 [15]		×	
ハンドオーバー	川崎らによる研究 [5]			
	妙中らによる研究 [11]	×		
	GuardChannel 方式	×		
	DOVE 方式 [8]	×		
本研究の提案手法				

片方向遅延の平均値から AP の負荷を推定し、さらに AP と端末間の受信電波強度やパケットエラーレートが一定以上であるか判定することで、これから接続を開始する移動中の端末の通話品質も、一定以上に保つことができるという利点がある。

ハンドオーバー時における呼受付制御に関する研究 [5][11][8] は、本研究と想定している状況が似ているが、基本的には、ハンドオーバーが起きる端末の通話品質のみを考慮に入れ、周辺エリア全体の通話品質を保つことを目的としているものはない。その点、本研究では、周辺エリア全体の通話品質も考慮に入れているという点において新規性がある。

以上の点をまとめた表を Table 3.1 に示す。

## 第4章

---

### 評価方法



## 4.1 シミュレーションモデル

本研究では、提案手法の有効性を検証するため、シミュレーションによる通話品質の評価を行った。使用したシミュレータはQualNet 4.0[19]である。

無線方式としてはIEEE 802.11bを用いた。IEEE 802.11bでは、チャンネルをずらすことにより最大で4台まで同時にAPを運用することが可能である。そのため、本評価では4台のAPを設置し、その間をハンドオーバーするシミュレーションを行った。また、音声符号化方式としてはG.711を用いた。

本評価では、駅構内やホテルのロビーといった、比較的開けた場所に多くの人が集まる状況を想定し、Fig. 4.1のように、400m間隔で4台のAPを設置し、VoIP端末が16台もしくは20台存在することを基本としたシナリオを用い、シミュレーションを行った。端末の動き方としては、Table 4.1に示すパターンを行った。動き方の詳細は5.2節、5.4節にて述べる。

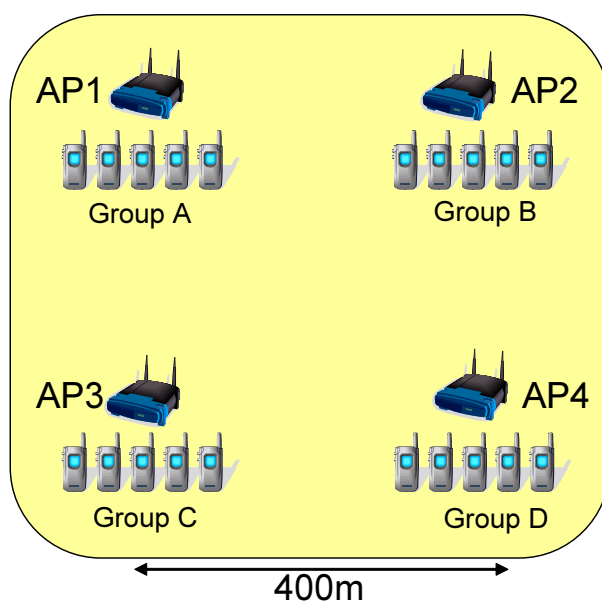


Fig. 4.1: シミュレーションモデル

なお、ここで述べた16台または20台の端末は全て発信専用であり、これとは別に各APからEthernetハブを通じて接続されている16台または20台の端末へ向けて通話呼が発信される。また、本評価ではVoIP以外のトラフィックは存在しないものと仮定する。

シミュレーションでは、ハンドオーバー時に受信電波強度のみを用いてAPを選択する従来手法と、3章で述べた提案手法の双方を実装し、比較を行う。

Table 4.1: シミュレーションシナリオ

	端末数	初期位置	移動する端末	動き方	時間
実験 A-1	16	各 AP 付近	Group A	AP1 中心付近	5 分間
実験 A-2				AP1 AP4	5 分間
実験 A-3			全端末	それぞれ中心付近へ	5 分間
実験 B-1	20	各 AP 付近	Group A	AP1 中心付近	5 分間
実験 B-2				AP1 AP4	5 分間
実験 B-3			全端末	それぞれ中心付近へ	5 分間
実験 B-4		Random Waypoint		15 分間	
実験 B-5		Random Waypoint		15 分間	

## 4.2 評価指標

本研究の目的は、VoIP 端末の通話品質を向上させることにある。そこで、本節ではまず、VoIP の通話品質を決める要素、そしてそれらを組み合わせた評価指標である R 値、MOS 値について概要を述べる。その上で、本研究において用いた評価指標の詳細を述べる。

### 4.2.1 VoIP 通話品質の決定要素

VoIP の通話品質を決定する上で、大きな要因となるものが「コーデック (CODEC)」の種類である。一般にコーデックのビットレートが高いほど、音声品質も良くなる。ただし、ビットレートを高くすると、その分、ネットワーク帯域を消費するため、同時接続可能な通話セッション数の上限は低くなる。

また、IP 回線を利用することによる通話品質の劣化要因として、「パケットジッタ」が挙げられる。パケットジッタは、電話端末へのパケット到着間隔の違いにより発生する。VoIP では、音声データが細切れのパケットに分割されて送受信されるが、パケットの到着間隔がばらばらになると、ユーザが会話音声を聞いた際に品質低下を感じる。通常、受信する電話機で音声バッファを使い、一定時間ごとにパケット間隔を調整するが、パケット間隔が大きくなりすぎると、音声バッファは遅れたパケットを待ちきれず、欠落してしまう。なお、パケットジッタには RFC ジッタ (smooth jitter)、瞬間ジッタ (instantaneous jitter)、絶対ジッタ (absolute jitter) の 3 種類がある。

「パケット損失」も IP 回線を利用することによる通話品質の劣化要因の一つである。パケット損失は、音声経路上のある地点での輻輳や、物理レイヤレベルでの回線品質悪化などにより発生する。

また、一方の受話器のマイクからもう一方の受話器のスピーカーまで音声が伝わるのにかかる時間を指すものとして「遅延/エンベロープ遅延」がある。エンベロープ遅延は、コーデックの選択/電話のジッタバッファ/パケットのネットワーク経由時間による遅延の合計値である。

### 4.2.2 R 値

R 値とは、IP 電話の音声伝送品質を表す数値として ITU-T が G.107 で標準化したものであり、総務省が「050」の IP 電話番号等を割り当てる際の評価基準としても用いられている。具体的な R 値の計算式は以下の通りである。

$$R = R_o - I_s - I_d - I_e + A$$

ここで、各要素の意味は以下の通りである。

- $R_o$ … 雑音の影響を考慮した信号の大きさ
- $I_s$ … ラウドネスや側音 (電話機を通して送話口から受話口へ伝わる音) による劣化
- $I_d$ … 遅延やエコーによる劣化
- $I_e$ … 音質の劣化
- $A$ … 端末が携帯電話である場合の利便性などを考慮する補完値 (プラス要因)

各要素値の算出にはラウドネスや室内の騒音、遅延、エコー、雑音の大きさなど全部で 18 個のパラメータが関係しており、それをさらに複雑な式に当てはめて計算する。R 値の最大値は 93.2 で、高い値ほど通話品質が良い。なお、050 番号を取得するには、R 値が 50 より大きい必要がある。

### 4.2.3 MOS 値

R 値が客観的な計算式から求められるのに対し、MOS 値は主観的な品質評価に基づいて算出されて指標である。MOS 値を算出する際には多くの被験者を対象に通話試験を行い、被験者は感じた音声品質を Table 4.2 の点数で評価する。

Table 4.2: MOS 値の基準

score	quality
5	Excellent
4	Good
3	Fair
2	Poor
1	Bad

この評点の加重平均を MOS (Mean Opinion Score) 値と呼ぶ。通話試験の方法や試験の環境は、ITU-T 勧告 P.800 として規定されている [18]。また、R 値を MOS 値に変換するための方法も決められており、相互に変換可能である。

#### 4.2.4 本研究での評価指標

本研究では、通話品質を計るための指標として、QualNet 4.0 において計算される MOS 値を利用する。QualNet 4.0 内での MOS 値の求め方は以下の通りである。

まず、以下の式に基づき R 値を計算する。

$$R = 93.2 - I_d - I_{ef}$$

ここで、 $I_{ef}$  はパケット損失率を表し、 $I_d$  はネットワークの遅延を表し、以下の式から求められる。

$$I_d = 0.024d + 0.11(d - 177.3) \times H(d - 177.3)$$

$d$  は片方向遅延 (コーディング遅延、ネットワーク遅延、ジッタ解消遅延の合計値) を表し、 $H(x)$  は  $x < 0$  のとき  $H(x) = 0$ 、 $x \geq 0$  のとき  $H(x) = 1$  である。

そして、以下の式を用いて、R 値から MOS 値へ変換する。

$$MOS = 1.0 + 0.035 \times R + 7.0 \times R \times (R - 60.0) \times (100.0 - R) \times e^{-6}$$

こうして求められた MOS 値をシミュレーション時間全体で平均し、各端末ごとに平均 MOS 値を算出する。また、得られた結果をさらに詳細に分析するため、以下の指標も利用し、どの指標が通話品質に影響を与えたのかを探る。

- 片方向遅延 … コーディング遅延、ネットワーク遅延、ジッタ解消遅延の合計値
- RTP ジッタ … 音声パケットの到達順により遅延のゆらぎ

## 第5章

---

### 評価結果と考察

## 5.1 はじめに

本章では、提案手法の有効性を確かめるために行ったシミュレーション実験の結果を示す。はじめに、端末の台数を16台で行った場合の結果を示し、考察を行う。そして、従来手法と提案手法の違いをさらに明確にするため、端末台数を20台で行った場合の結果も示し、考察を行う。

## 5.2 端末数が16台の場合のシミュレーション結果

本節では、端末台数が16台の場合のシミュレーション実験結果を示す。ハンドオーバーが起きるシナリオを3通り用意し、従来手法によるAP選択と、提案手法によるAP選択の双方をシミュレーションする。そして、通話品質にどのような違いが生じるか、またその品質の違いがどのような要因により起こるのか検証した結果を述べる。以下では、シミュレーションシナリオごとに結果を示す。

### 5.2.1 4台の端末が同時にAP1から中心付近へ移動する場合(実験 A-1)

Fig. 5.1 に示すように、4台の端末がAP1付近から中心付近へ同時に移動するシナリオにより、シミュレーションを行った。中心付近は、各APへの距離がほぼ等しく、従来手法ではどのAPに接続するか偶然の要素により決まることが多い。このような環境において、各APの負荷を元にAP選択を行う提案手法では、どのような効果があるかを試す目的でこのシミュレーションを行った。なお、シミュレーション時間、端末の移動時間はともに5分間である。

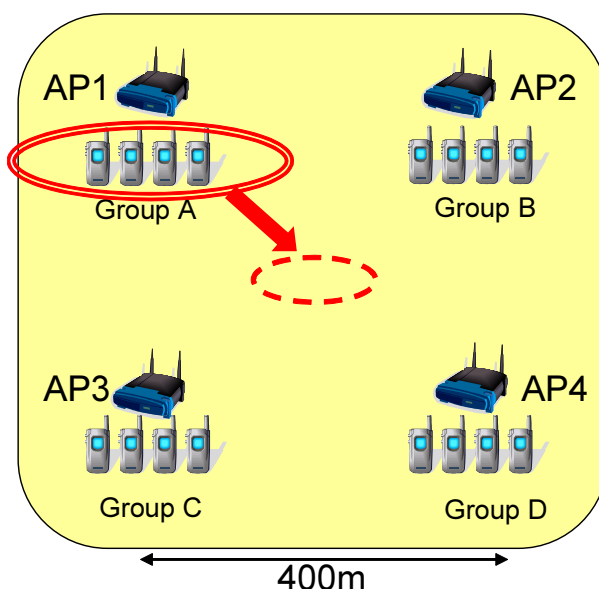


Fig. 5.1: 端末の動き方(実験 A-1)

### MOS 値による比較 (実験 A-1)

まず、通話品質を計るため、Group ごとの平均 MOS 値を計算し、既存手法と提案手法を用いた場合の結果を比較した。結果のグラフは Fig. 5.2 の通りである。Group D に関しては若干 MOS 値が悪化しているが、それ以外の端末群は全て MOS 値が改善、もしくは変化無しとなっている。Group D は従来手法に比べ MOS 値が悪化しているものの、従来手法ではもともと最大の MOS 値であって、それが他と同程度になったと捉えることができる。これは、AP への負荷を平均化するという提案手法の効果が現れているものと思われる。

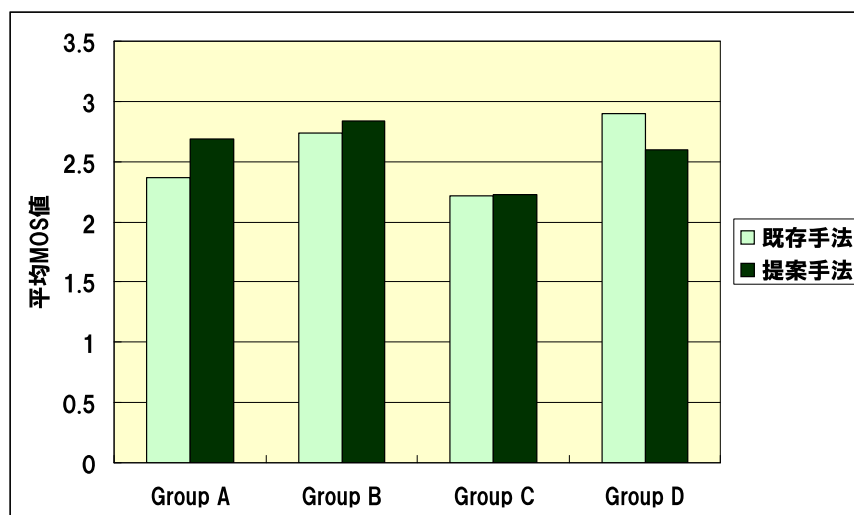


Fig. 5.2: 平均 MOS 値の結果 (実験 A-1)

### 片方向遅延による比較 (実験 A-1)

前項で述べた MOS 値の結果をさらに詳しく解析するため、まずは片方向遅延の数値による比較を行った。Group ごとの片方向遅延の平均値のグラフは Fig. 5.3 の通りである。MOS 値が向上していた Group A と Group B に関しては、従来手法に比べ、提案手法での片方向遅延の値が小さくなっており、通話品質向上へ寄与していることが分かる。

### RTP ジッタによる比較 (実験 A-1)

前項で述べた片方向遅延は、4.2.4 節で述べたとおり、コーディング遅延、ネットワーク遅延、ジッタ解消遅延の合計値から計算されている。そこで、片方向遅延の発生原因を詳しく解析するため、RTP ジッタによる比較を行った。Group ごとの RTP ジッタの平均値のグラフは Fig. 5.4 の通りである。片方向遅延が小さくなっていた Group A と Group B に関しては、平均 RTP ジッタの値も小さくなっており、結果として通話品質向上へ寄与していることが分かる。また、片方向遅延の値が大きくなっていた Group C と Group D に関しては、RTP ジッタの値も大きくなっており、やはり影響があることが分かる。

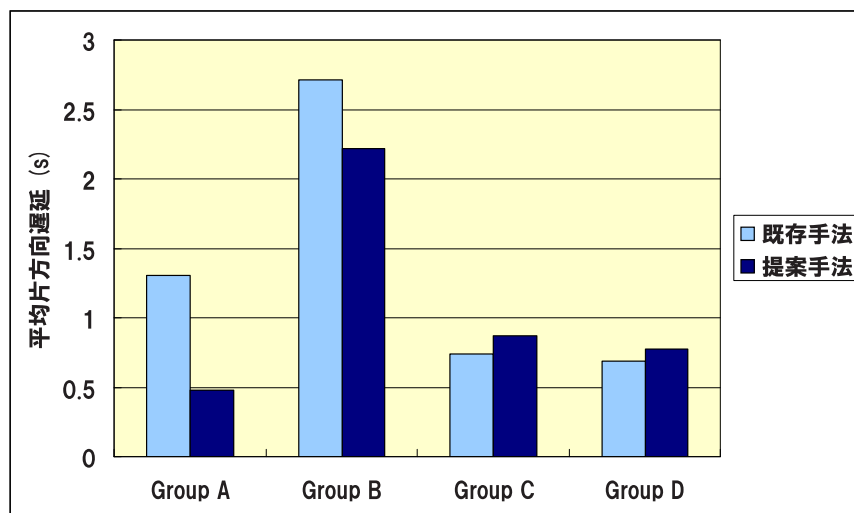


Fig. 5.3: 平均片方向遅延の結果 (実験 A-1)

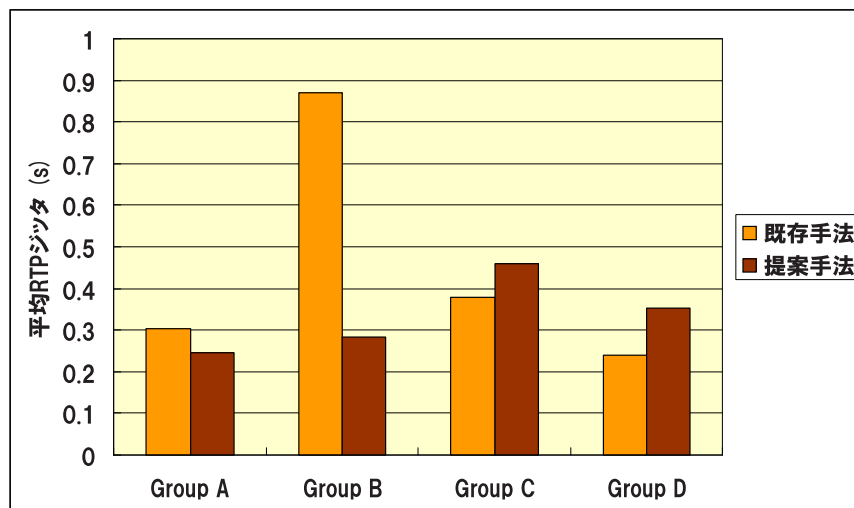


Fig. 5.4: 平均 RTP ジッタの結果 (実験 A-1)



### 5.2.2 4台の端末が同時にAP1からAP4付近へ移動する場合(実験A-2)

Fig. 5.5 に示すように、4台の端末がAP1 付近からAP4 付近へ同時に移動するシナリオによりシミュレーションを行った。従来手法では、移動している端末の接続先としてAP4 が選ばれ、接続が集中して通話品質が悪化しやすいシナリオであり、提案手法の場合それがどのように解消されているのかを試す目的でこのシミュレーションを行った。なお、シミュレーション時間、端末の移動時間はともに5分間である。

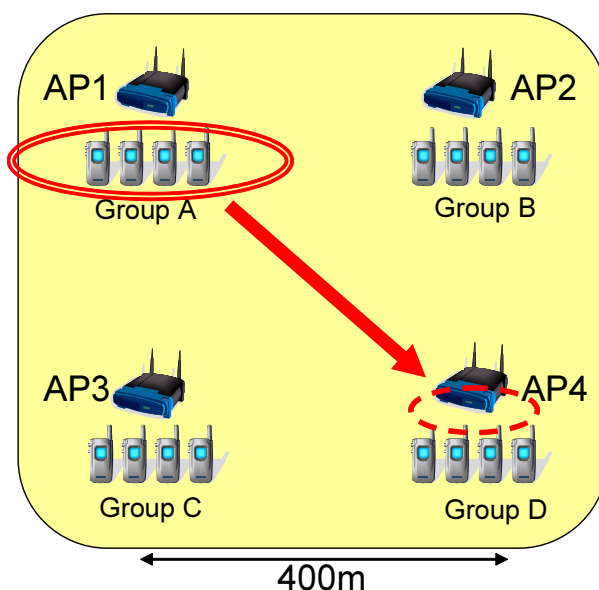


Fig. 5.5: 端末の動き方(実験A-2)

#### MOS 値による比較(実験A-2)

通話品質を計るため、Group ごとの平均 MOS 値を計算し、既存手法と提案手法を用いた場合の結果を比較した。結果のグラフは Fig. 5.6 の通りである。Group B を除く 3 つの Group において、MOS 値が改善している。これは、従来手法では Group A の端末群が AP1 付近から AP4 付近へ移動する途中で、AP2 や AP3 に集中的に接続していたものが、提案手法では他の AP に分散して接続したためだと考えられる。Group B は MOS 値が若干下がっているが、従来手法では元々 MOS 値が一番高く、提案手法では他の Group と同程度まで下がっていることから、提案手法では接続の分散がうまくいっていると捉えることができる。

#### 片方向遅延による比較(実験A-2)

MOS 値の結果をさらに詳しく解析するため、片方向遅延の値による比較を行った。Group ごとの片方向遅延の平均値のグラフは Fig. 5.7 の通りである。MOS 値が上昇していた Group A、Group C 及び Group D に関しては、片方向遅延の値が下がっており、MOS 値上昇の要因

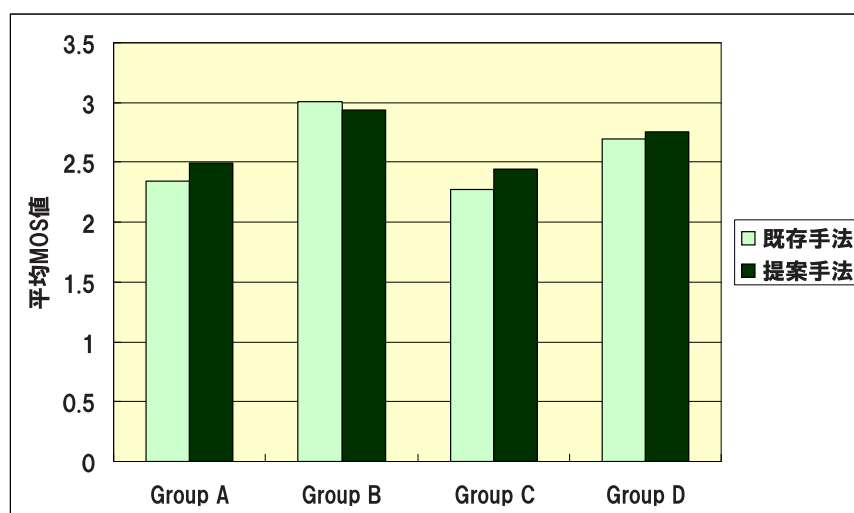


Fig. 5.6: 平均 MOS 値の結果 (実験 A-2)

となったと考えられる。また、Group B は片方向遅延の値が若干上昇しており、MOS 値悪化の要因と考えられる。

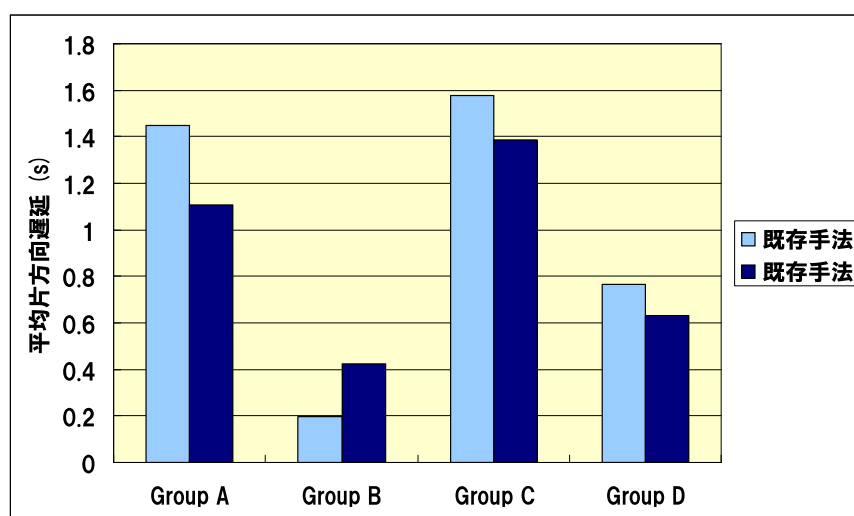


Fig. 5.7: 平均片方向遅延の結果 (実験 A-2)

#### RTP ジッタによる比較 (実験 A-2)

片方向遅延の発生原因を詳しく解析するため、RTP ジッタによる比較を行った。Group ごとの RTP ジッタの平均値のグラフは Fig. 5.8 の通りである。Group A と Group B に関しては、MOS 値の結果に対応する結果が出ているが、Group C に関しては、MOS 値が改善しているものの、RTP ジッタの値は上昇している。この原因を探るため、1 台ごとの結果を見

たところ、ある1台の端末のRTPジッタ値が1秒程度と突出して大きく、それにより平均RTPジッタの値も上昇しているが、平均MOS値への影響は、1台のみのため限定的だったものと思われる。

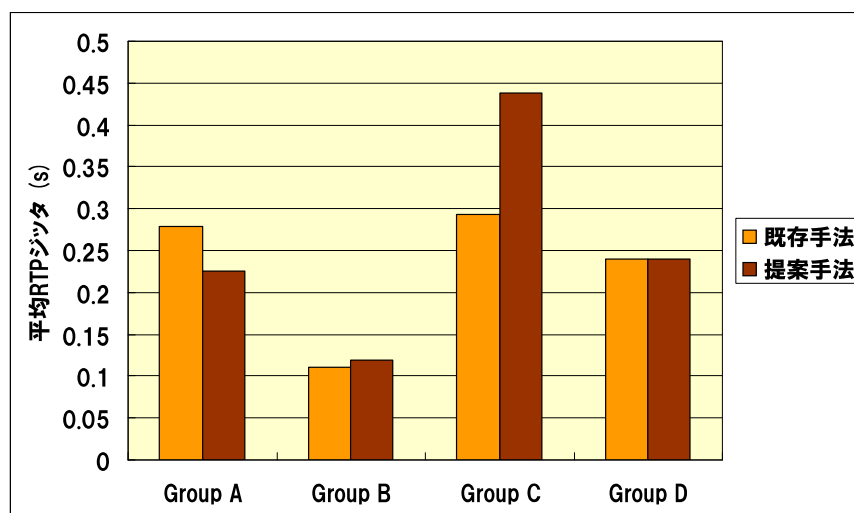


Fig. 5.8: 平均 RTP ジッタの結果 (実験 A-2)

### 5.2.3 全端末が同時に AP 付近から中心付近へ移動する場合 (実験 A-3)

Fig. 5.9 示すように、全ての端末が各 AP 付近から中心付近へ同時に移動するシナリオによりシミュレーションを行った。実験 A-1 と実験 A-2 では、一部の端末のみが動くシナリオにより実験を行い、提案手法に一定の効果が見られたが、全ての端末が動く場合に、提案手法が有効に働くかどうかを調べるため、このシミュレーションを行った。なお、シミュレーション時間、端末の移動時間はともに5分間である。

#### MOS 値による比較 (実験 A-3)

通話品質を計るため、Group ごとの平均 MOS 値を計算し、既存手法と提案手法を用いた場合の結果を比較した。結果のグラフは Fig. 5.10 の通りである。Group A、Group B 及び Group D に関しては、通話品質に改善が見られる。ただ、その上昇幅は、実験 A-1 と実験 A-2 に比べ小さくなっている。この原因としては、全ての端末が中心付近に動くシナリオでは、従来手法であってもある程度、接続先 AP が分散していたため、提案手法の優位性が小さくなったことが考えられる。

#### 片方向遅延による比較 (実験 A-3)

MOS 値の結果をさらに詳しく解析するため、片方向遅延の数値による比較を行った。Group ごとの片方向遅延の平均値のグラフは Fig. 5.11 の通りである。MOS 値が改善した

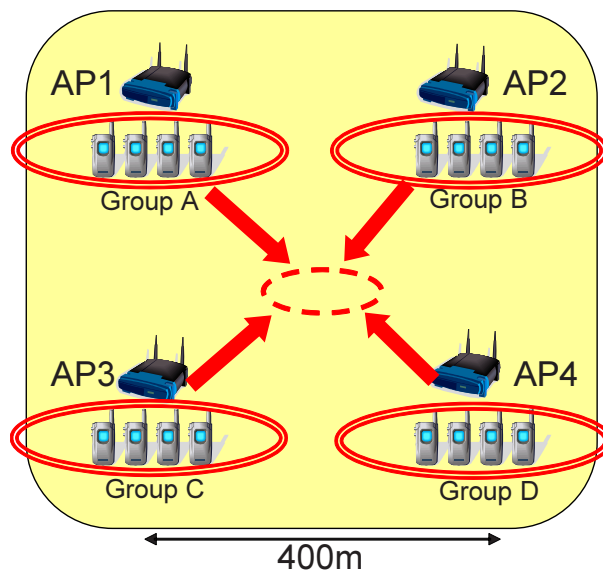


Fig. 5.9: 端末の動き方 (実験 A-3)

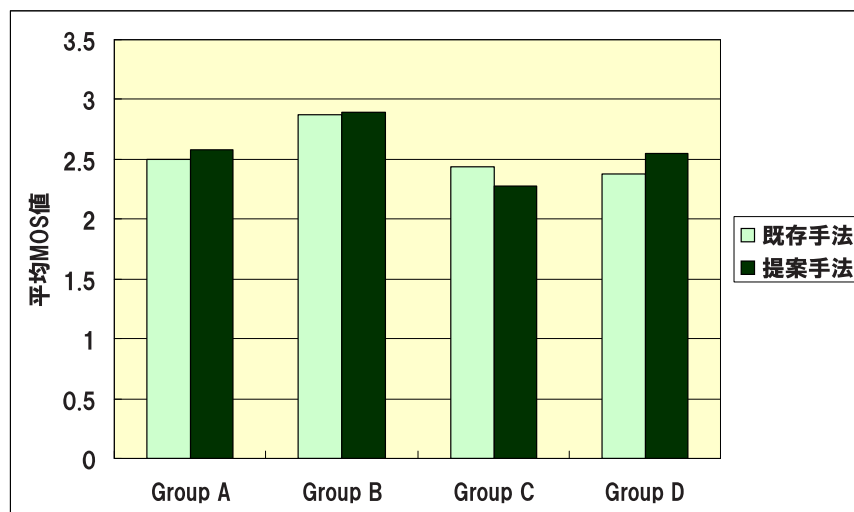


Fig. 5.10: 平均 MOS 値の結果 (実験 A-3)

Group A、Group B 及び Group D に関しては、片方向遅延の値も小さくなっており、対応した結果となっていることが読み取れる。

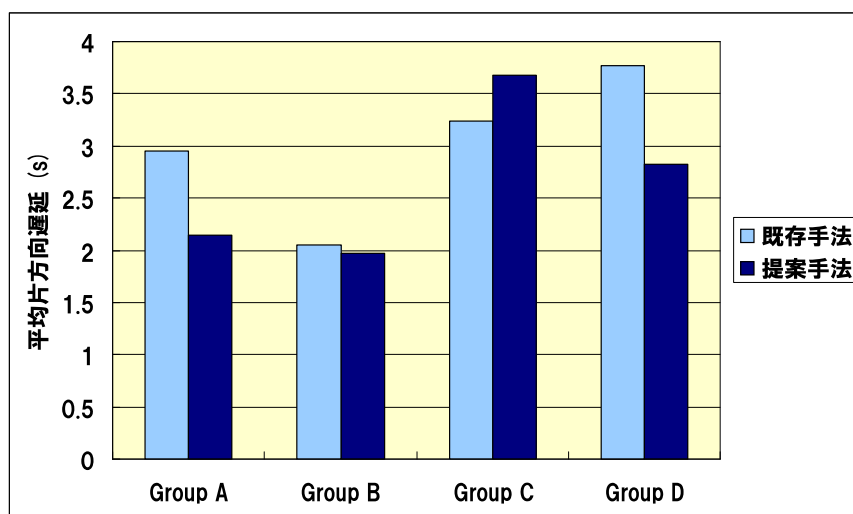


Fig. 5.11: 平均片方向遅延の結果 (実験 A-3)

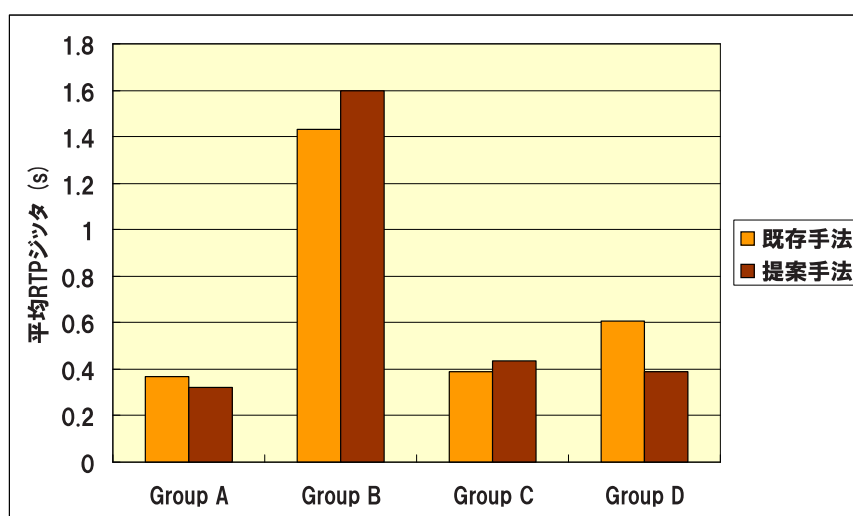


Fig. 5.12: 平均 RTP ジッタの結果 (実験 A-3)

#### RTP ジッタによる比較 (実験 A-3)

片方向遅延の発生原因を詳しく解析するため、RTP ジッタによる比較を行った。Group ごとの RTP ジッタの平均値のグラフは Fig. 5.12 の通りである。MOS 値が改善した Group A 及び Group D に関しては、RTP ジッタの値も小さくなっており、対応した結果となっている。一方、やはり MOS 値が改善した Group B は、RTP ジッタの値が大きくなっており、矛盾し

た結果となっている。この原因を探るため、1台ごとの結果を見たところ、ある1台の端末のRTPジッタ値が5秒程度と突出して大きく、それにより平均RTPジッタの値も上昇しているが、平均MOS値への影響は、1台のみのため限定的だったものと思われる。

### 5.3 端末数が16台の場合の考察

本節では、5.2節で示した結果を基に考察を述べる。

まず、端末の動き方による差については、全ての端末が動いた実験A-3に比べ、4台の端末のみが動いた実験A-1及び実験A-2のほうがMOS値の改善が大きかった。つまり、移動する端末数が少ない場合は通話品質が大きく改善したが、移動端末が多いと通話品質の改善があまりうまくいかないという結果であった。この件に関しては、後ほど詳しく考察する。

MOS値と片方向遅延、及びRTPジッタの値との相関については、MOS値が向上したものは、ほとんどが片方向遅延及びRTPジッタの値は小さくなっていた。また、希に1つの端末が突出して大きなRTPジッタの値を出すことがあるが、平均MOS値にはあまり影響がないという結果であった。

このように、端末数が16台の場合は、提案手法の優位性がある程度示されたが、MOS値の変化を見ると、明らかに優位性があるとはいえない結果であった。そこで次に、端末数を20台に増やした場合のシミュレーションを行った。APへの負荷をさらに大きくし、従来手法と提案手法の差を見るためである。それらの結果を次節にて示す。

### 5.4 端末数が20台の場合のシミュレーション結果

本節では、従来手法と提案手法の差をさらに詳しく検証するため、端末数を20台にした場合のシミュレーション結果を示す。端末の動き方は、5.2節にて用いた3通りの他に、Random Waypointモデルに基づいてランダム移動する場合のシナリオも用意し、シミュレーションを行った。以下では、シミュレーションシナリオごとに結果を示す。

#### 5.4.1 5台の端末が同時にAP1から中心付近へ移動する場合(実験B-1)

Fig. 5.13に示すように、5台の端末がAP1付近から中心付近へ同時に移動するシナリオにより、シミュレーションを行った。中心付近は、各APへの距離がほぼ等しく、従来手法ではどのAPに接続するか偶然の要素により決まることが多い。このような環境において、各APの負荷を元にAP選択を行う提案手法では、どのような効果があるかを試す目的でこのシミュレーションを行った。なお、シミュレーション時間、端末の移動時間はともに5分間である。

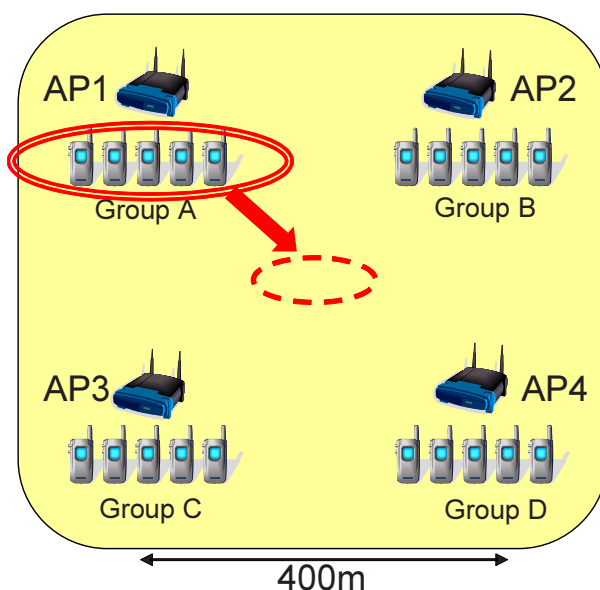


Fig. 5.13: 端末の動き方 (実験 B-1)

#### MOS 値による比較 (実験 B-1)

通話品質を計るため、Group ごとの平均 MOS 値を計算し、既存手法と提案手法を用いた場合の結果を比較した。結果のグラフは Fig. 5.14 の通りである。移動した端末群である Group A に関しては、若干 MOS 値が悪化しているが、それ以外の端末群は全て MOS 値が改善している。これは、提案手法によって、移動している端末以外、すなわち Group B、Group C、Group D の通話品質も考慮した AP 選択が行われた成果と考えられる。

#### 片方向遅延による比較 (実験 B-1)

前項で述べた MOS 値の結果をさらに詳しく解析するため、まずは片方向遅延の数値による比較を行った。Group ごとの片方向遅延の平均値のグラフは Fig. 5.15 の通りである。全ての端末群において、従来手法に比べ、提案手法での片方向遅延の値のほう小さくなっており、通話品質向上へ寄与していることが確認できる。提案手法では、各 AP ごとの平均片方向遅延値に基づいて最適な AP 選択を行ったため、このような顕著な結果が出たものと思われる。

#### RTP ジッタによる比較 (実験 B-1)

片方向遅延の発生原因を詳しく解析するため、RTP ジッタによる比較を行った。Group ごとの RTP ジッタの平均値のグラフは Fig. 5.16 の通りである。Group B と Group C に関しては既存手法と提案手法の間で大きな差はないが、Group A と Group D において顕著な差が見られる。これは、Group A と Group D 内の一部端末において、非常に大きな RTP ジッタが発生したため生じた結果である。一部の端末で起きた結果のため、平均 MOS 値にはそれほ

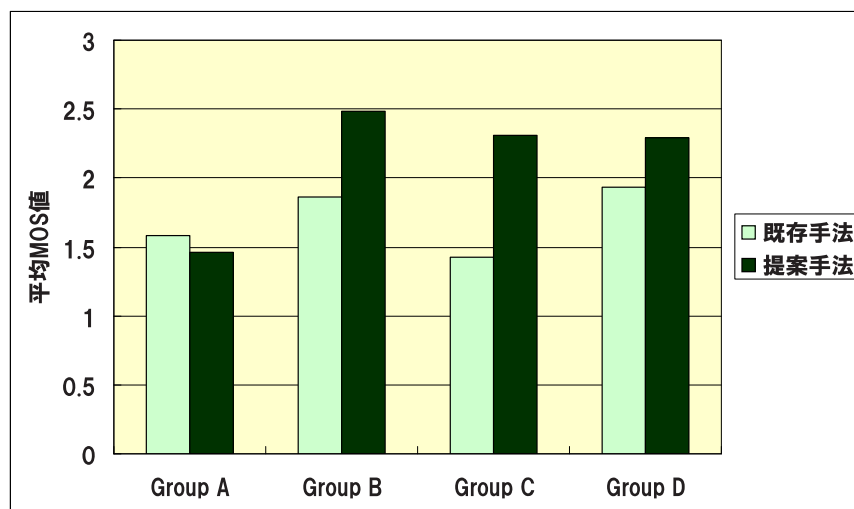


Fig. 5.14: 平均 MOS 値の結果 (実験 B-1)

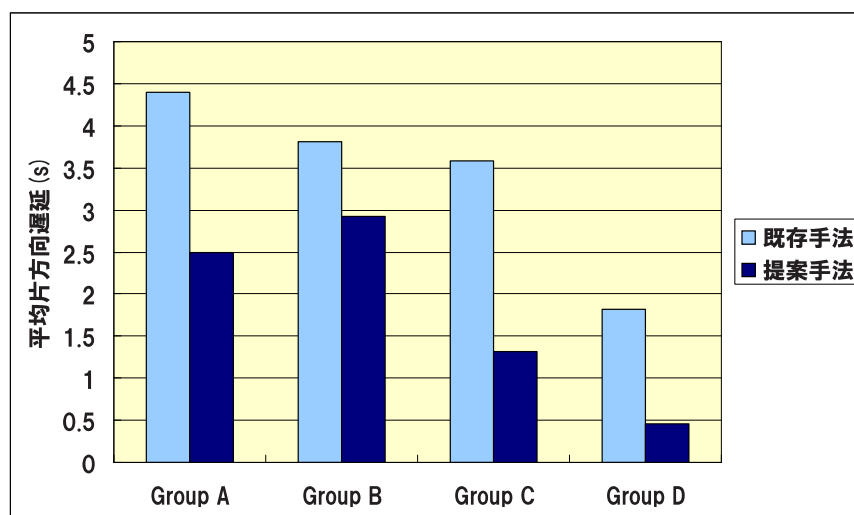


Fig. 5.15: 平均片方向遅延の結果 (実験 B-1)



ど大きな影響は及ぼしていないが、提案手法の優位性の一端を表しているといえる。

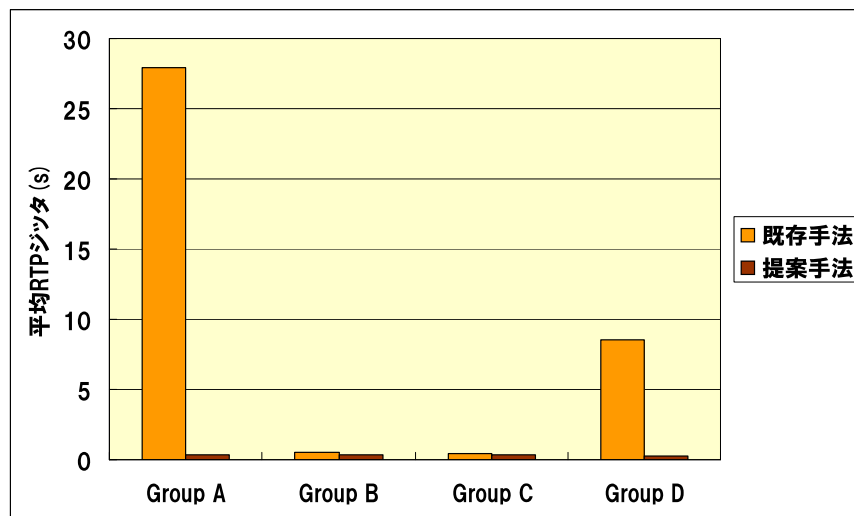


Fig. 5.16: 平均 RTP ジッタの結果 (実験 B-1)

#### 5.4.2 5台の端末が同時に AP1 から AP4 付近へ移動する場合 (実験 B-2)

Fig. 5.17 示すように、5台の端末が AP1 付近から AP4 付近へ同時に移動するシナリオによりシミュレーションを行った。従来手法では、移動している端末の接続先として AP4 が選ばれ、接続が集中して通話品質が悪化しやすいシナリオであり、提案手法の場合それがどのように解消されているのかを試す目的でこのシミュレーションを行った。なお、シミュレーション時間、端末の移動時間はともに5分間である。

##### MOS 値による比較 (実験 B-2)

通話品質を計るため、Group ごとの平均 MOS 値を計算し、既存手法と提案手法を用いた場合の結果を比較した。結果のグラフは Fig. 5.18 の通りである。Group C と Group D の MOS 値が改善し、特に Group D の上昇幅が大きい。これは、従来手法では、移動してきた端末がほぼ全て AP4 に接続してしまい、それまで AP4 に接続していた Group D の通話品質が悪化してしまいやすかったものが、提案手法では他の AP に分散して接続したためだと考えられる。Group B は MOS 値が若干下がっているが、従来手法では元々 MOS 値が一番高く、提案手法では他の Group と同程度まで下がっていることから、提案手法では接続の分散がうまくいっていると捉えることができる。

##### 片方向遅延による比較 (実験 B-2)

MOS 値の結果をさらに詳しく解析するため、片方向遅延の値による比較を行った。Group ごとの片方向遅延の平均値のグラフは Fig. 5.19 の通りである。MOS 値が上昇していた Group

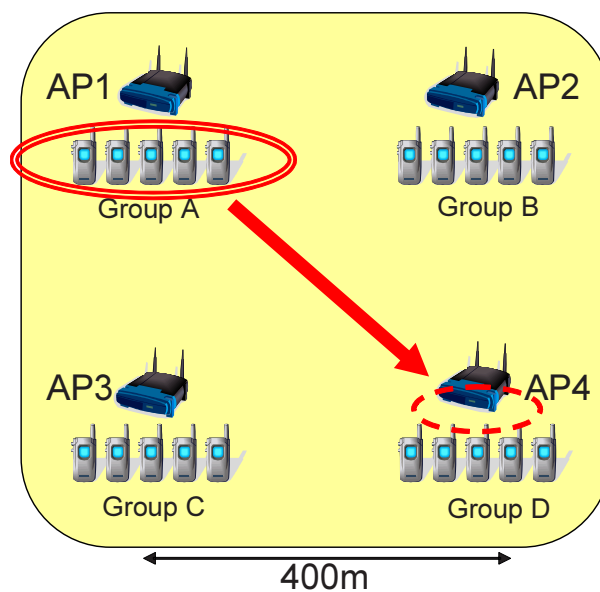


Fig. 5.17: 端末の動き方 (実験 B-2)

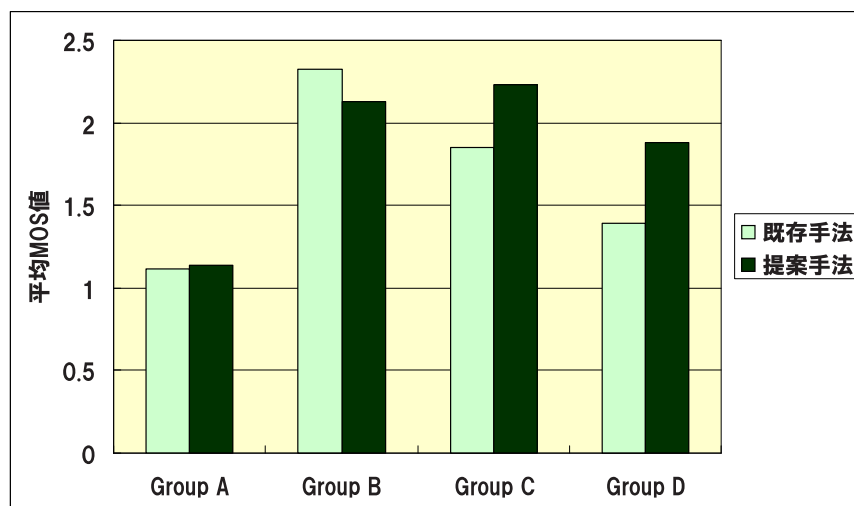


Fig. 5.18: 平均 MOS 値の結果 (実験 B-2)

C と Group D に関しては、片方向遅延の値が下がっており、MOS 値上昇の要因となったと考えられる。また、Group B は片方向遅延の値が若干上昇しており、MOS 値悪化の要因と考えられる。

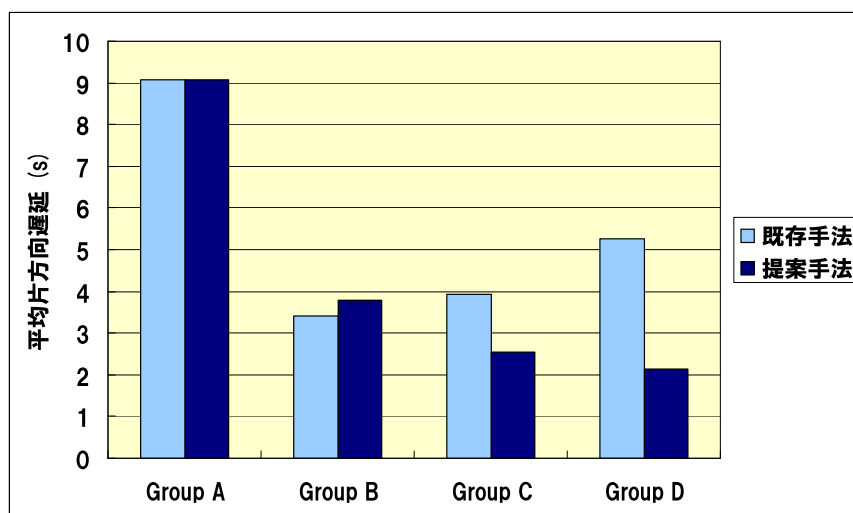


Fig. 5.19: 平均片方向遅延の結果 (実験 B-2)

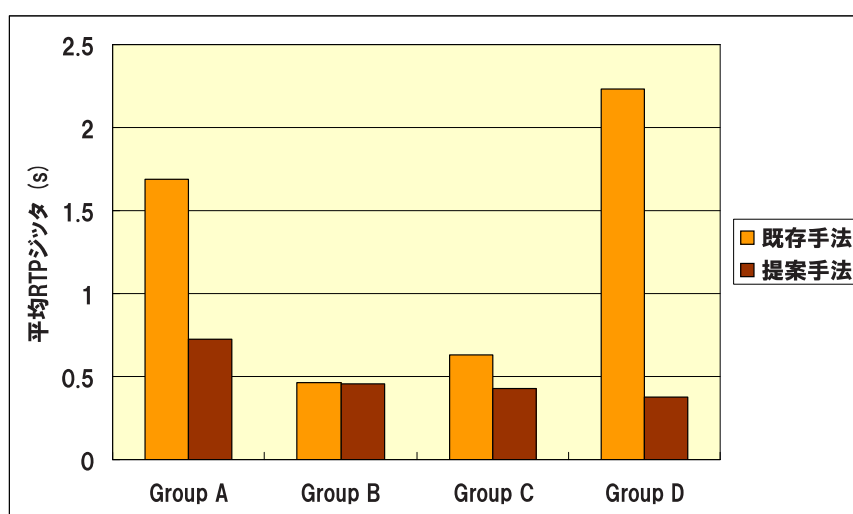


Fig. 5.20: 平均 RTP ジッタの結果 (実験 B-2)

#### RTP ジッタによる比較 (実験 B-2)

片方向遅延の発生原因を詳しく解析するため、RTP ジッタによる比較を行った。Group ごとの RTP ジッタの平均値のグラフは Fig. 5.20 の通りである。RTP ジッタは、Group A、Group C、Group D で向上している。中でも、Group D の向上が著しい。既存手法に比べ、提案手

法の場合は、移動端末がAP4に近づいても全てがAP4に接続するわけではなく、分散して接続するため、混雑が緩和され、パケット到着ゆらぎも改善したと思われる。

### 5.4.3 全端末が同時にAP付近から中心付近へ移動する場合(実験B-3)

Fig. 5.21 示すように、全ての端末が各AP付近から中心付近へ同時に移動するシナリオによりシミュレーションを行った。実験B-1と実験B-2では、一部の端末のみが動くシナリオにより実験を行い、提案手法に一定の効果が見られたが、全ての端末が動く場合に、提案手法が有効に働くかどうかを調べるため、このシミュレーションを行った。なお、シミュレーション時間、端末の移動時間はともに5分間である。

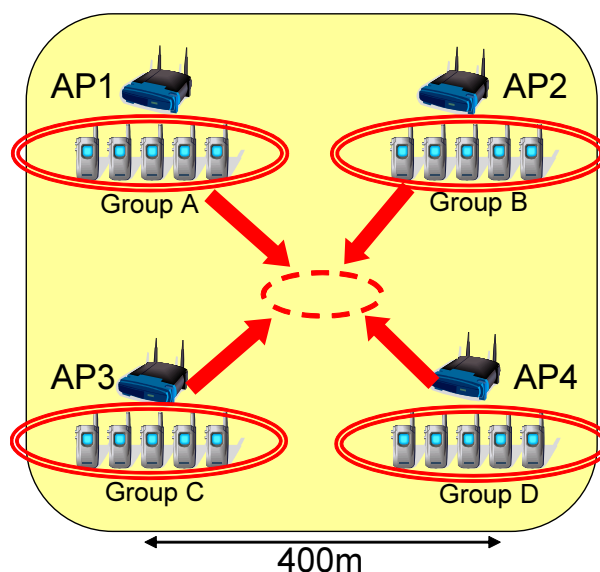


Fig. 5.21: 端末の動き方(実験B-3)

### MOS 値による比較(実験B-3)

通話品質を計るため、Groupごとの平均MOS値を計算し、既存手法と提案手法を用いた場合の結果を比較した。結果のグラフはFig. 5.22の通りである。Group AとGroup Dに関しては、通話品質に改善が見られる。ただ、その上昇幅は、実験B-1と実験B-2に比べ小さくなっている。この原因としては、全ての端末が中心付近に動くシナリオでは、従来手法であってもある程度、接続先APが分散していたため、提案手法の優位性が小さくなったことが考えられる。また、全てのGroupにおいて、MOS値が2以下になっており、実験B-1と実験B-2に比べ悪い結果となっている。この点からも、提案手法があまり得意としないシナリオであることが伺える。

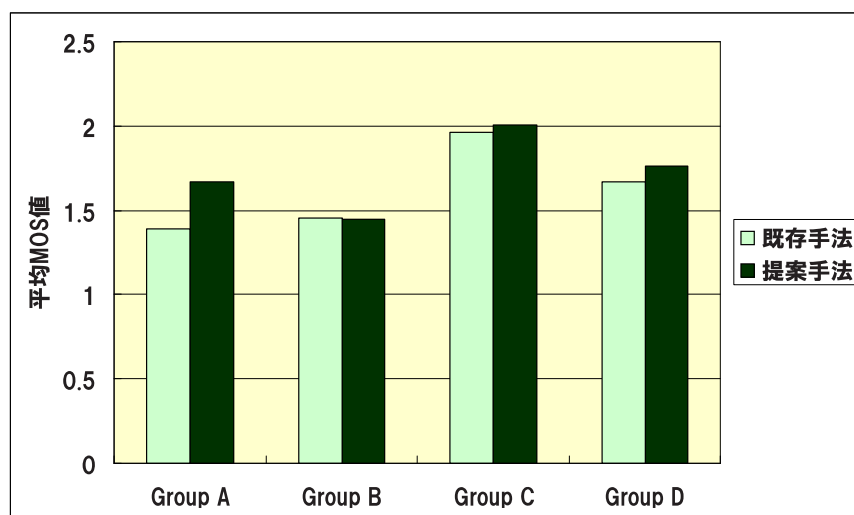


Fig. 5.22: 平均 MOS 値の結果 (実験 B-3)

## 片方向遅延による比較 (実験 B-3)

MOS 値の結果をさらに詳しく解析するため、片方向遅延の数値による比較を行った。Group ごとの片方向遅延の平均値のグラフは Fig. 5.23 の通りである。既存手法における Group A の片方向遅延の値が大きくなっているが、提案手法では他の Group と同程度の値となっている。AP 選択の基準として片方向遅延の平均化を目的としている提案手法の効果が見られる結果といえる。

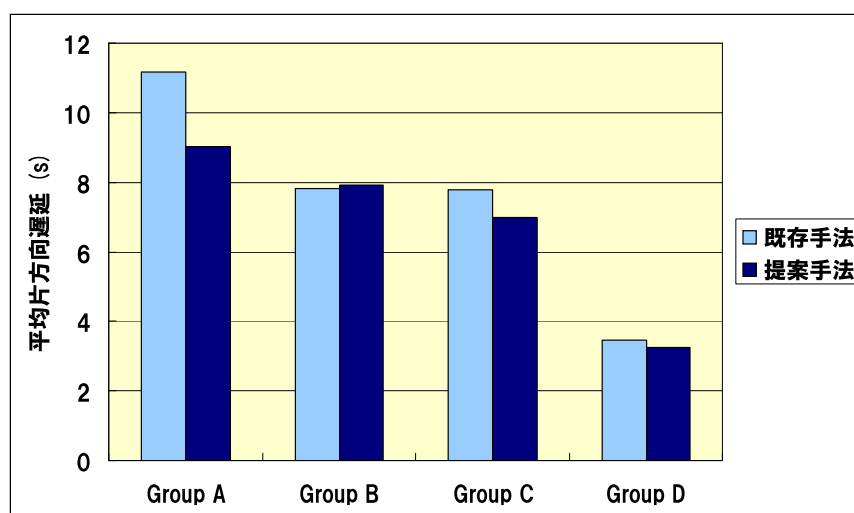


Fig. 5.23: 平均片方向遅延の結果 (実験 B-3)

**RTP ジッタによる比較 (実験 B-3)**

片方向遅延の発生原因を詳しく解析するため、RTP ジッタによる比較を行った。Group ごとの RTP ジッタの平均値のグラフは Fig. 5.24 の通りである。Group A の既存手法における値のみ非常に大きくなっている。片方向遅延においても Group A の既存手法の値が大きくなっていたが、その要因として、RTP ジッタの値の大きさが影響しているものと思われる。

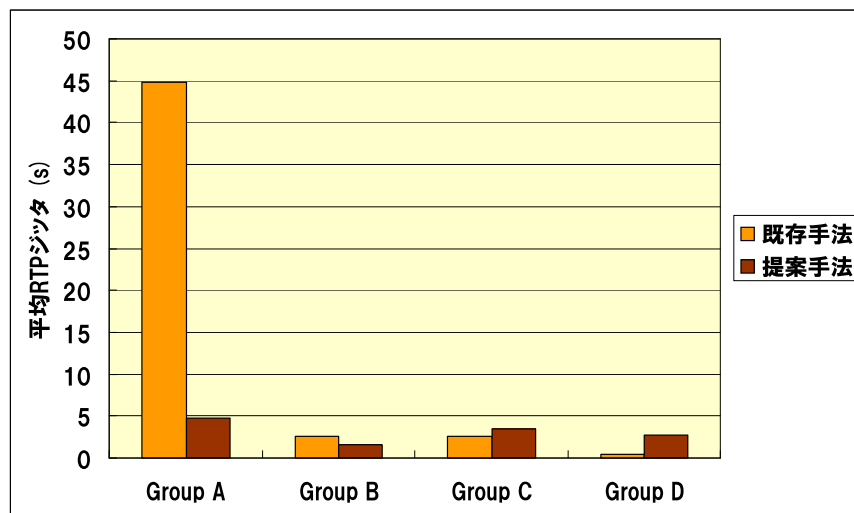


Fig. 5.24: 平均 RTP ジッタの結果 (実験 B-3)

#### 5.4.4 初期位置が各 AP 付近で Random Waypoint に基づき移動する場合 (実験 B-4)

Fig. 5.25 に示すように、初期状態では各 AP 付近に端末が存在し、その後、Random Waypoint モデルに基づき、全ての端末が移動するシナリオによりシミュレーションを行った。初期位置では、各端末はそれぞれに最も近い AP に接続するが、その後ランダムに動くことにより、既存手法では接続先 AP に偏りが生じる。提案手法において、接続先の偏りを是正し、通話品質を向上させることができるかどうか試す目的で、このシミュレーションを行った。なお、Random Waypoint モデルでの移動速度は 1.4m/s、途中ランダムに発生する停止時間は 30 秒とした。また、端末の移動範囲は、AP が設置してある場所を中心に、1200m 四方の領域である。シミュレーション時間、端末の移動時間はともに 15 分間である。

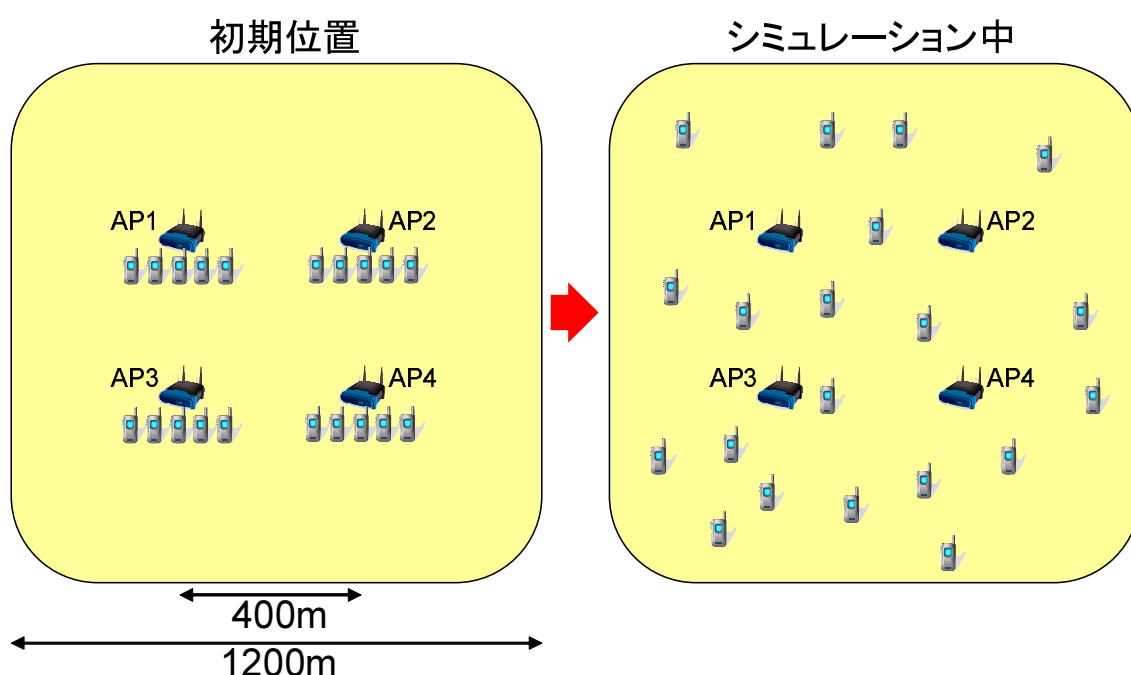


Fig. 5.25: 端末の動き方 (実験 B-4)

#### MOS 値による比較 (実験 B-4)

通話品質を計るため、各端末ごとの MOS 値を計算し、既存手法と提案手法を用いた場合の結果を比較した。結果のグラフは Fig. 5.26 の通りである。20 台存在する端末のうち、7 台は通話品質が向上し、1 台は通話品質が悪化した。それ以外の 12 台は、ほぼ変わらない結果となった。今回の実験では端末がランダムに動いたため、端末の位置により効果の差が現れているが、端末が集中した場所に居た端末の通話品質は向上しており、提案手法の有効性を確認することができた。

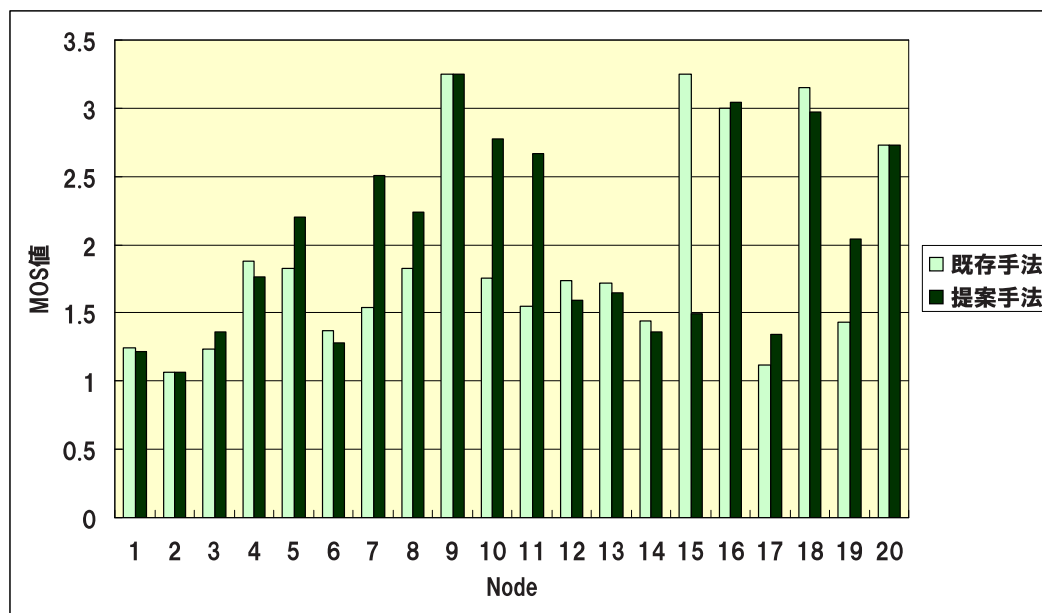


Fig. 5.26: 平均 MOS 値の結果 (実験 B-4)

#### 片方向遅延による比較 (実験 B-4)

MOS 値の結果をさらに詳しく解析するため、片方向遅延の数値による比較を行った。各端末ごとの片方向遅延の値のグラフは Fig. 5.27 の通りである。MOS 値が向上していた 7 台に関しては、ほとんどが片方向遅延の値が小さくなっており、MOS 値上昇の要因となったと考えられる。一方、MOS 値が悪化していた Node15 に関しては、片方向遅延の値も大幅に大きくなっており、通話品質へ悪影響を及ぼしたものと考えられる。

#### RTP ジッタによる比較 (実験 B-4)

片方向遅延の発生原因を詳しく解析するため、RTP ジッタによる比較を行った。各端末ごとの RTP ジッタの値のグラフは Fig. 5.28 の通りである。MOS 値が向上していた 7 台に関しては、ほとんどが RTP ジッタも小さくなっており、MOS 値上昇の要因となったと考えられる。一方、MOS 値が悪化していた Node15 に関しては、既存手法では RTP ジッタはほぼ 0 であったが、提案手法では大幅に上昇しており、片方向遅延値とともに、通話品質へ悪影響を及ぼしたものと考えられる。なお、提案手法における Node19 の RTP ジッタが非常に大きな値となっているが、この原因についてはまだ判明していない。



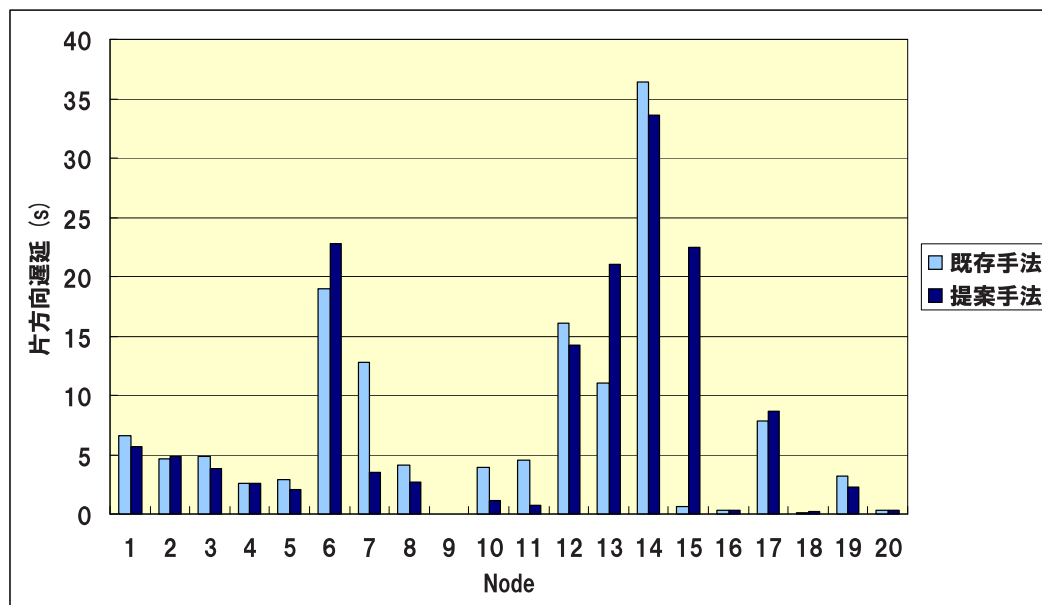


Fig. 5.27: 平均片方向遅延の結果 (実験 B-4)

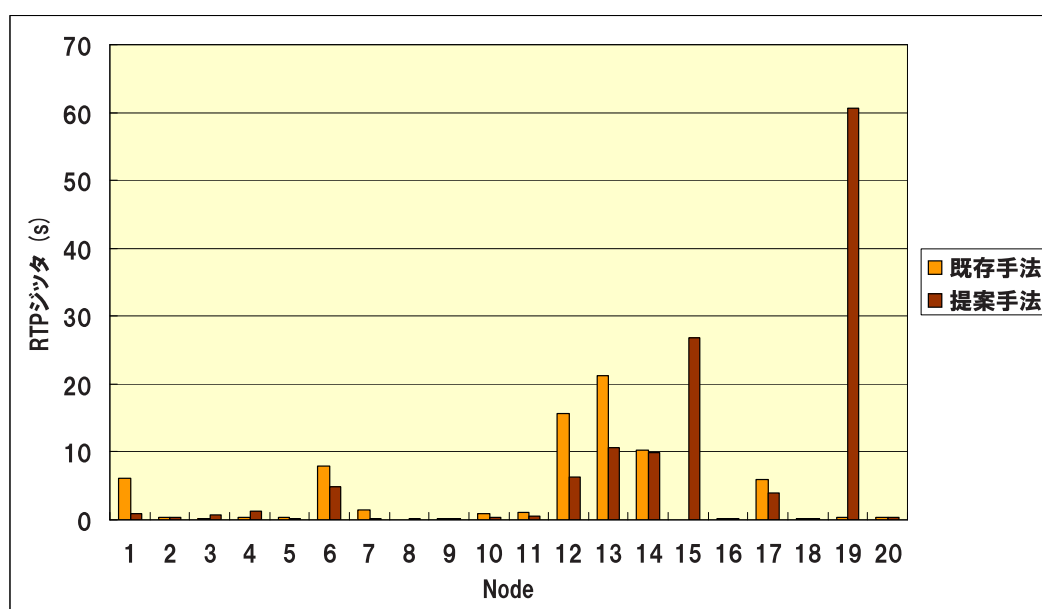


Fig. 5.28: 平均 RTP ジッタの結果 (実験 B-4)

#### 5.4.5 初期位置が中心付近で Random Waypoint に基づき移動する場合 (実験 B-5)

Fig. 5.25 に示すように、初期状態では中心付近に端末が存在し、その後、Random Waypoint モデルに基づき、全ての端末が移動するシナリオによりシミュレーションを行った。初期位置では、端末から各 AP への距離はほとんど等しく、その後もランダムに動くため、既存手法では接続先 AP に偏りが生じる。提案手法において、接続先の偏りを是正し、通話品質を向上させることができるかどうか試す目的で、このシミュレーションを行った。なお、Random Waypoint モデルでの移動速度は 1.4m/s、途中ランダムに発生する停止時間は 30 秒とした。また、端末の移動範囲は、AP が設置してある場所を中心に、1200m 四方の領域である。シミュレーション時間、端末の移動時間はともに 15 分間である。

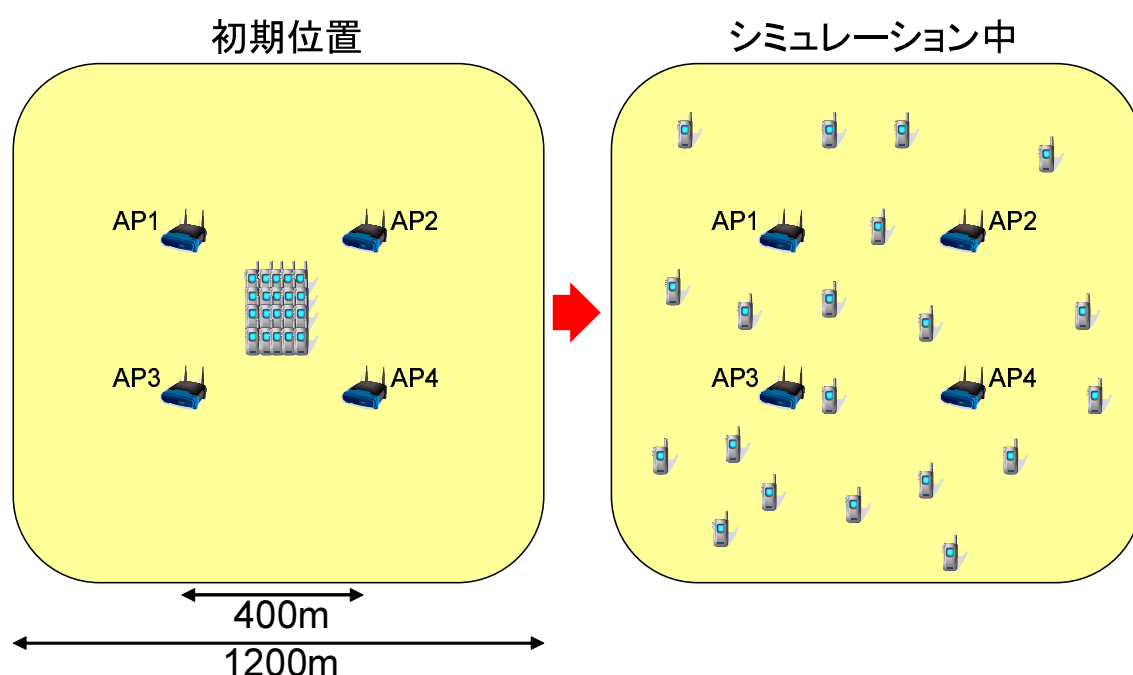


Fig. 5.29: 端末の動き方 (実験 B-5)

#### MOS 値による比較 (実験 B-5)

通話品質を計るため、各端末ごとの MOS 値を計算し、既存手法と提案手法を用いた場合の結果を比較した。結果のグラフは Fig. 5.30 の通りである。20 台存在する端末のうち、5 台は通話品質が向上し、それ以外の 15 台はほぼ変わらない結果となった。通話品質が大きく悪化した端末はなかった。実験 B-4 に比べると、通話品質が向上した端末数は少なかったが、それでも 5 台は通話品質が向上したことから、提案手法の有効性を確認することができた。

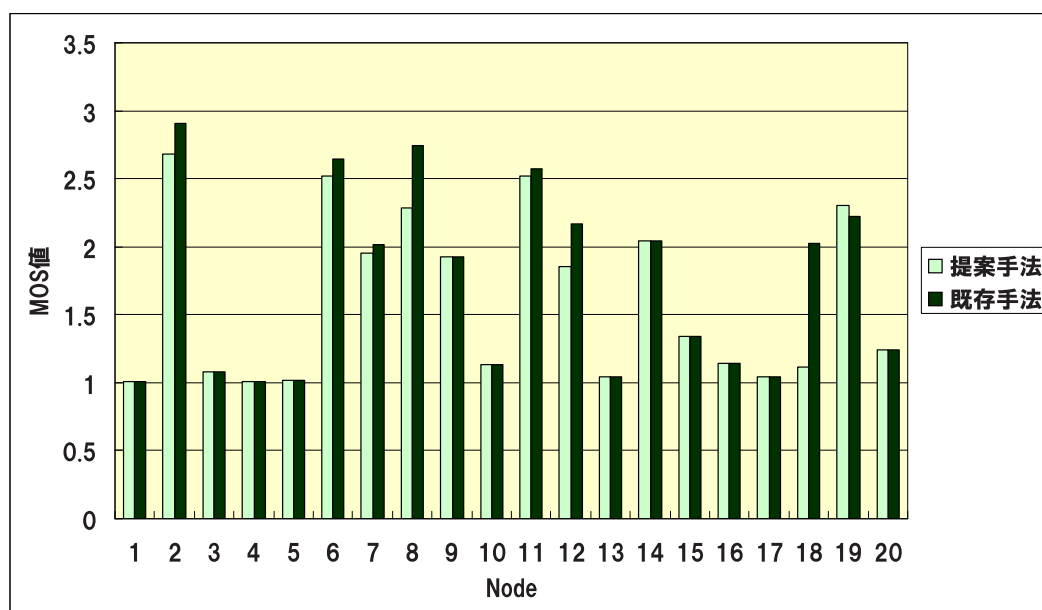


Fig. 5.30: 平均 MOS 値の結果 (実験 B-5)

#### 片方向遅延による比較 (実験 B-5)

MOS 値の結果をさらに詳しく解析するため、片方向遅延の数値による比較を行った。各端末ごとの片方向遅延の値のグラフは Fig. 5.31 の通りである。MOS 値が向上した 5 台に関しては、全て片方向遅延の値が小さくなっており、MOS 値上昇の要因となったと考えられる。それ以外の端末に関しては、MOS 値の結果と同様、既存手法と提案手法の間で差は見られなかった。

#### RTP ジッタによる比較 (実験 B-5)

片方向遅延の発生原因を詳しく解析するため、RTP ジッタによる比較を行った。各端末ごとの RTP ジッタの値のグラフは Fig. 5.32 の通りである。MOS 値が向上した 5 台のうち、Node2 に関しては RTP ジッタが大幅に小さくなっており、他の端末はほぼ同程度であった。MOS 値が変化しなかった 15 台に関しては、ほとんどの端末で従来手法と提案手法の間で差がなかったが、Node19 に関しては実験 B-4 のときと同様、RTP ジッタが非常に大きな値となっている。この原因についてはまだ判明していない。

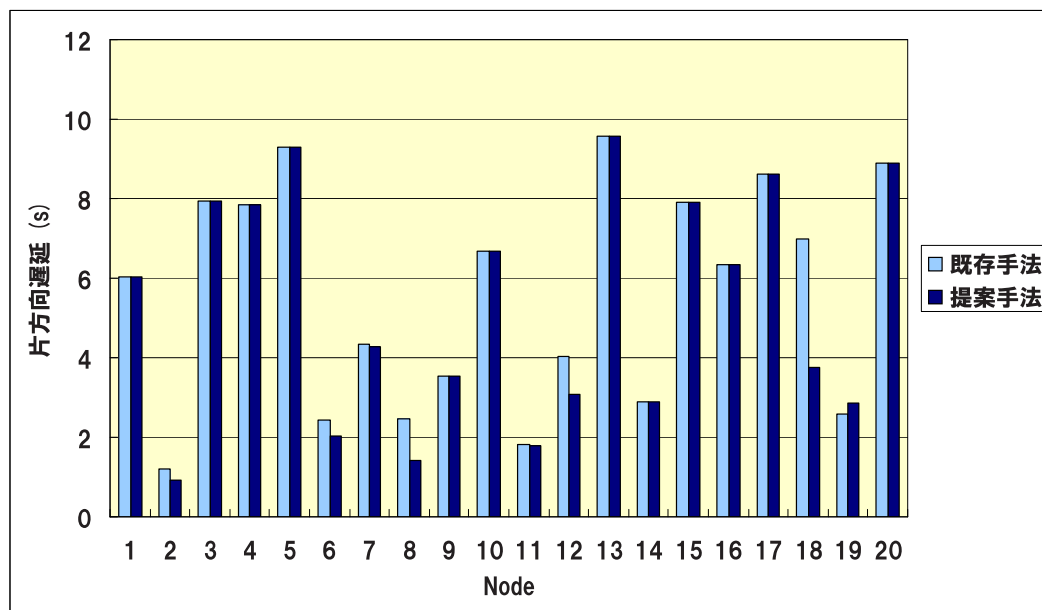


Fig. 5.31: 平均片方向遅延の結果 (実験 B-5)

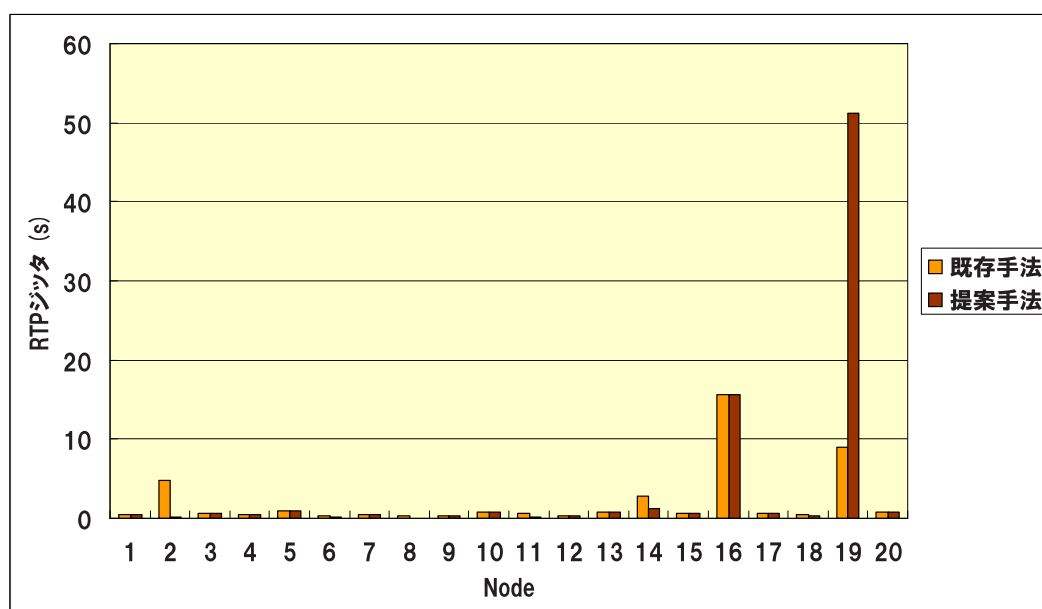


Fig. 5.32: 平均 RTP ジッタの結果 (実験 B-5)

## 5.5 考察

本節では、これまで示した結果を基に、端末の動き方が提案手法に与える影響、AP選択の基準に片方向遅延を用いることの是非、端末台数による違い、RTPジッタの定義と片方向遅延との関係、提案手法での動作の詳細及びハンドオーバーにかかる時間に関する考察を述べる。

### 5.5.1 端末の動き方に関する考察

端末の動き方ごとに結果を見ると、実験 B-1 及び実験 B-2、すなわち、5 台の端末のみが移動したシナリオでは、MOS 値が大きく改善した。一方、実験 B-3、実験 B-4 及び実験 B-5、すなわち、20 台全ての端末が移動したシナリオでは、ある程度の改善は見られたものの、改善率は低かった。つまり、移動する端末数が少ない場合は通話品質が大きく改善したが、移動端末が多いと通話品質の改善があまりうまくいかないという結果であった。

この理由としては、本研究で用いた、片方向遅延の平均値の特性によると考えられる。片方向遅延は、VoIP 通話が行われているときにのみ計測できる指標である。そのため、端末の動きが少なく、VoIP 通話が安定して続いている場合は、負荷の推定がうまくいったが、多くの端末が動く場合は、頻繁にハンドオーバーが発生するので、VoIP 通話が安定せず、片方向遅延から AP ごとの負荷を正確に推定することができなかったと考えられる。

以上の点から、本手法が有効に作用するのは、多くの人が静止していて、一部の人動いているような環境、すなわち、会社のオフィス内や、ホテルのロビーといった環境などといえる。逆に、多くの人が動き続けている駅構内や大通りのようなところではうまく作用しない可能性が高い。

### 5.5.2 片方向遅延を用いることの是非に関する考察

本研究では、片方向遅延の値を用いて AP ごとの負荷を推定し、ハンドオーバー先の AP を選択する手法を提案した。本節では、片方向遅延を指標とすることの利点と欠点について述べる。

まず、片方向遅延を指標とすることの利点としては、通話品質という基準から見た AP ごとの負荷を正確に推定できるという点が挙げられる。なぜなら、実験からも明らかになったように、片方向遅延の値は通話品質に大きな影響を与えるパラメータであるためである。

一方、片方向遅延を指標とすることの欠点としては以下の 2 点が挙げられる。まず 1 点目としては、前節で述べたように、多くの端末が動き、ハンドオーバーが頻繁に起きる環境においては、AP ごとの負荷を正確に推定することが難しいという点が挙げられる。また、2 点目としては、片方向遅延は VoIP パケットが送信完了してから、相手に伝わり終わるまでの遅延を表しているため、通話先の回線品質にも影響を受け、注目している側の通信品質を表すとは限らないという点が挙げられる。この点に関しては、今回のシミュレーションは、発信先は全て有線接続であるという仮定に基づいて行い、有線では遅延のばら

つきがほとんどないためうまく機能したと思われる。しかし、相手先も無線接続である場合は新たな解決策が必要となる。

### 5.5.3 端末数が16台の場合と20台の場合の違いに関する考察

5.2節において行った実験結果と、5.4節において行った実験結果ではいくつかの差が見られた。

まず、MOS値、すなわち通話品質に関しては、端末数が16台の場合に比べ、端末数が20台のほうが、提案手法での改善率が高くなっていることが分かった。これは、端末数が多い方が1台のAPあたりの接続端末数も多くなり、AP選択による差が出やすくなったためと考えられる。

次に、片方向遅延とRTPジッタの値に注目してみると、端末数が16台の場合は、片方向遅延はおよそ1秒以下、RTPジッタはおよそ0.5秒以下であった。一方、端末数が20台の場合は、片方向遅延は数秒から10秒程度、RTPジッタは数十秒に及ぶ場合もあった。これほどの長さの片方向遅延とRTPジッタが発生すると、通常は通話が困難となる。

このように、MOS値の改善率は端末数が20台のほうが際だって大きかったが、片方向遅延とRTPジッタの値は実用に耐えない程度に大きくなってしまいう結果となった。このことから、提案手法の有効性が発揮されるには、端末の台数の範囲がある程度限定されることが分かった。

### 5.5.4 RTPジッタの定義及び片方向遅延値との関係に関する考察

シミュレーションによる評価の結果、実験B-1、B-2、B-4及びB-5において、一部の端末でRTPジッタの値が非常に大きくなり、片方向遅延値より大きくなる結果となった。通常であれば片方向遅延値よりRTPジッタ値が大きくなることは考えられないため、シミュレーション上の問題が考えられる。以下では、シミュレータ内でのRTPジッタの定義を述べ、片方向遅延より大きな値になることが妥当かどうかについて議論する。

#### 5.5.4.1 RTPジッタの定義

今回利用したシミュレータQualNet 4.0では、平均RTPジッタの値の計算は以下のように行われている。

受信側が $N$ 個のパケットを受け取った場合、 $i = 1, 2, \dots, N$ とすると、

$$InterArrivalInterval[i] = PacketReceptionTime[i] - PacketReceptionTime[i-1]$$

$$jitter[i] = InterArrivalInterval[i] - InterArrivalInterval[i-1]$$

$$average\ jitter = \frac{abs(jitter[1]) + abs(jitter[2]) + \dots + abs(jitter[N-2])}{N-2}$$

すなわち、パケット間の到着時間の差を用いてRTPジッタの値を算出している。

#### 5.5.4.2 RTP ジッタが片方向遅延より大きな値になることが妥当かどうか

このように、シミュレータ内ではパケット間の到着時間の差を用いて RTP ジッタの値を算出しているが、この計算方法を用いた場合、パケットロスが起きたときの扱いが問題となる。もし、あるパケットが途中で損失し、受信側に届かなかった場合、前後のパケットとの到着時間が非常に大きくなったと判定される。その結果、少数のパケットが損失しただけでも、平均 RTP ジッタ値は非常に大きな値となる。

一方、シミュレータ内での片方向遅延値の定義は、受信側が RTP からデータを受け取った時間と、送信側アプリケーションレイヤにおける送信時間の差であるが、パケットロスが起きた際はカウントされないように定義されている。そのため、片方向遅延の値はパケットロスが原因で大きな値になることはない。

以上のように、RTP ジッタの計算ではパケットロスによる影響が大きく、一方で片方向遅延の計算ではパケットロスの影響がほとんどないことが、RTP ジッタ値より片方向遅延値が大きくなった原因と考えられる。

パケットロスにより RTP ジッタ値が大きくなる例として、実験 B-1 を例にとり考察する。実験 B-1 の従来手法では、Group A と Group D の平均 RTP ジッタ値がそれぞれ 28 秒程度、9 秒程度と非常に大きかった。その際の端末ごとのパケットロス数を見ると、Group A ではそれぞれ 4 個、0 個、5 個、4 個、0 個であり、Group D ではそれぞれ 0 個、1 個、0 個、3 個、0 個であった。一方、平均 RTP ジッタ値の小さかった Group B と Group C の端末群に関しては、パケットロスは無かった。このことから、RTP ジッタ値が悪化した原因として、パケットロスが挙げられることが分かる。

#### 5.5.4.3 ジッタ値の定義に関して

ジッタ値の計算方法に関して、通常はどのような計算方法がとられているか調査を行ったところ、通常は End-to-End 遅延のばらつきから計算されるとのことであった。これは RFC 3393 において提唱されており、広く使われている定義となっている。この方法による計算であれば、RTP ジッタ値が片方向遅延値より大きくなることはなく、実態に近い解析が行えたものと考えられる。

### 5.5.5 従来手法と提案手法での動作の違いに関する考察

本節では、従来手法と提案手法の間で、ハンドオーバー動作にどのような違いがあったかの分析、及び MOS 値や片方向遅延が端末ごとにどの程度ばらついていたかについて述べる。

#### 5.5.5.1 ハンドオーバー動作の違い

ハンドオーバー時に端末がどの AP を選択したかについて、実験 B-1(Group A の 5 台が、AP1 付近から中心付近へ移動するシナリオ) を例にとり、従来手法と提案手法の間の違いを示す。従来手法での AP 選択動作を Fig. 5.33、提案手法での AP 選択動作を Fig. 5.34 に示

す。図中のSTA1からSTA5は、初期状態でAP1付近にいるGroup Aの5台の端末である。なお、図に示されていないGroup B、Group C、Group Dの各端末については、全時間中、それぞれ最も近いAPであるAP2、AP3、AP4に接続しており、ハンドオーバーは起きなかった。

これらの結果を見ると、従来手法はほとんどハンドオーバーが起きていないことが分かる。これは、従来手法では電波強度を指標として接続先APを決定しているため、AP1付近から中心付近に至るまで、ほぼずっとAP1の電波強度が最も強いので、AP1に接続することが多かったと思われる。一方、提案手法は早い段階で接続先が分散していることが分かる。APごとの平均片方向遅延をもとに接続先APを選択しているため、必ずしも電波強度の強いAP1だけではなく、接続の分散が図られていることが分かる。

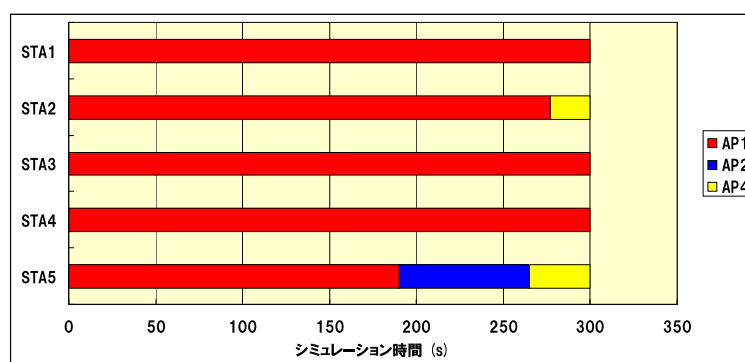


Fig. 5.33: 端末ごとの接続先 AP(従来手法)

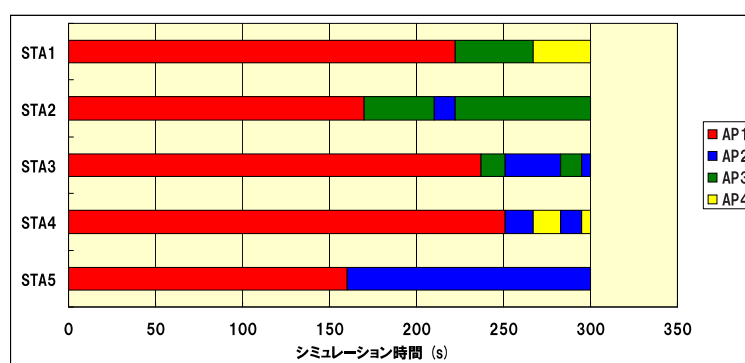


Fig. 5.34: 端末ごとの接続先 AP(提案手法)

### 5.5.5.2 MOS 値及び片方向遅延のばらつき

前節においてハンドオーバー動作の詳細を示した実験 B-1 に関して、MOS 値や片方向遅延の端末ごとのばらつきを、Fig. 5.35 及び Fig. 5.36 に示す。

この結果を見ると、片方向遅延はほぼ全ての端末で改善していることが分かる。また、MOS 値に関しては、移動していた Group A の端末群 (STA1 から STA5) はあまり改善が見ら



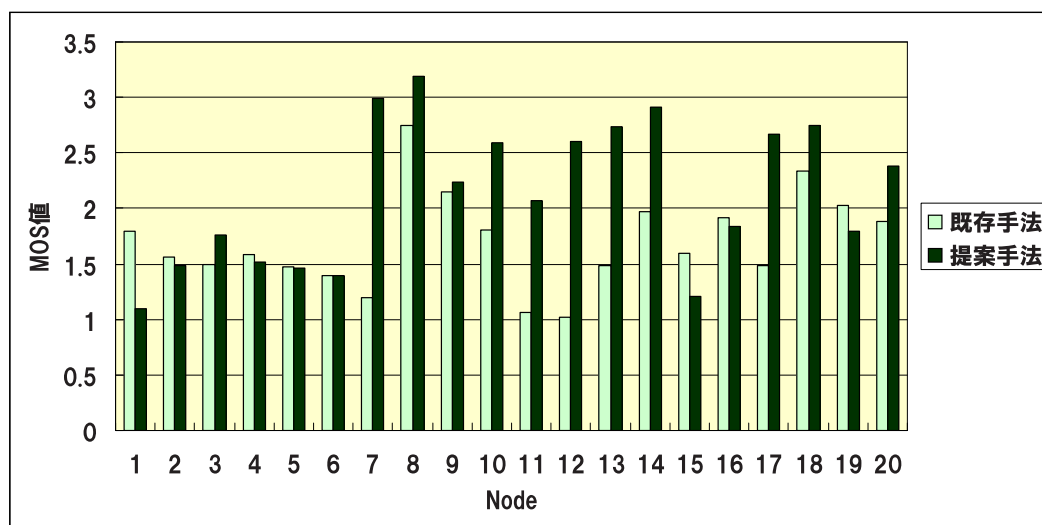


Fig. 5.35: 端末ごとの MOS 値

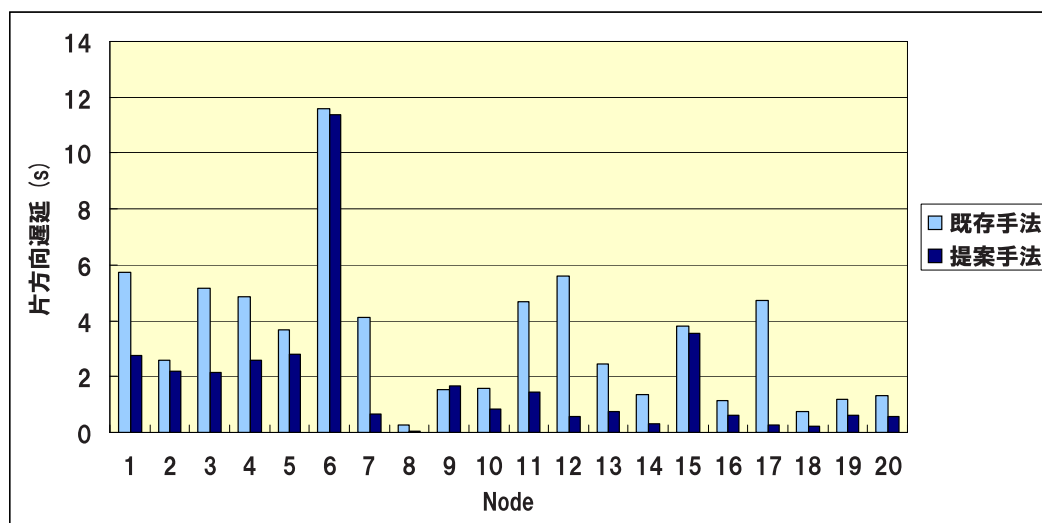


Fig. 5.36: 端末ごとの片方向遅延

れないが、それ以外の端末はおおむね値が改善している。値自体の端末ごとのばらつきは比較的大きくなっているが、改善が見られるという傾向はほぼ一致しているといえる。

### 5.5.6 ハンドオーバーにかかる時間に関する考察

提案手法によるハンドオーバーにかかる時間を調べるため、ハンドオーバーが起きている前後の MOS 値の変化を調べた。5.5.5 節で取り上げた実験 B-1 の中から、STA4 を例に取り、MOS 値の変化を図に表した結果は Fig. 5.37 に示す通りである。なお、この範囲内では 267 秒に 1 度ハンドオーバーが起き、その後さらにハンドオーバーが起きたが、その際には 277 秒付近で接続が切れ、279 秒で元の AP に再接続し、281 秒で新しい AP に接続するという動きとなっていた。

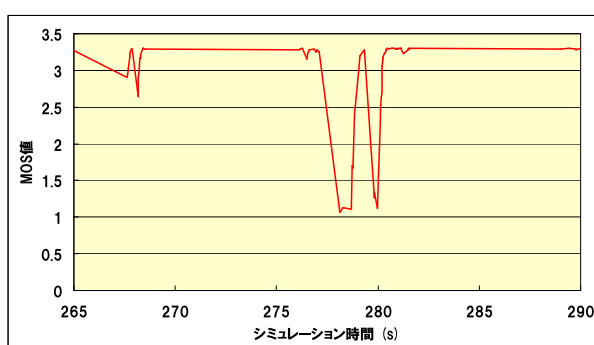


Fig. 5.37: ハンドオーバー時の MOS 値変化 (提案手法)

この結果を見ると、ハンドオーバー時に、MOS 値が悪化し始めてから安定するまで、およそ 4 秒間ほどかかっていることが分かる。

一方、従来手法の場合にハンドオーバーにかかる時間は Fig. 5.38 に示す通りである。

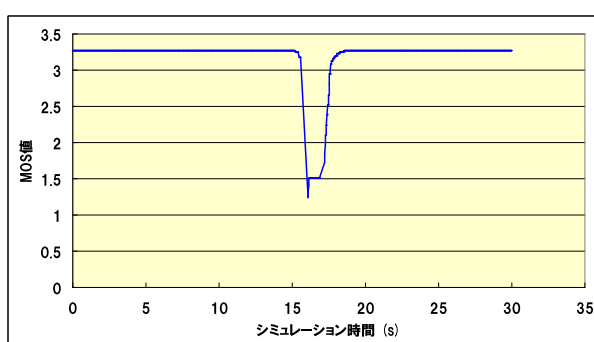


Fig. 5.38: ハンドオーバー時の MOS 値変化 (従来手法)

従来手法においても、ハンドオーバー時に、MOS 値が悪化し始めてから安定するまで、およそ 4 秒ほどかかっており、ハンドオーバーにかかる時間という点では、従来手法と提案手法の間で大きな差はないと考えられる。

## 第6章

---

### まとめと今後の課題

## 6.1 まとめ

本論文では、無線 VoIP のハンドオーバー時に、移動中の端末のみでなく、周辺エリアに存在する全ての VoIP 端末の通話品質を向上させることを目的とし、AP ごとに接続中の端末の平均片方向遅延値を求め、最も遅延時間の小さい AP が最も負荷の小さい AP であると推定し、そこへハンドオーバーさせる手法を提案した。

提案手法の有効性を検証するため、シミュレーションによる検証を行った。まず、端末数を 16 台とした場合、従来手法に比べ、提案手法では MOS 値がある程度改善したが、明らかに優位性があるとはいえない差であった。そこで、AP への負荷を増やす目的で端末数を 20 台にした場合のシミュレーションを行った。その結果、従来手法に比べ、提案手法では MOS 値が大きく改善した。特に、一部の端末が移動するシナリオでは、通話品質を示す MOS 値の値が大きく上昇し、通話品質の改善が確認できた。

MOS 値の変化の要因を探るため、片方向遅延と RTP ジッタの値を計算し、検証を行った。その結果、片方向遅延と RTP ジッタの値が MOS 値に影響を与えていると考えられることが分かった。同時に、端末数が 20 台の場合は、片方向遅延と RTP ジッタの値自体が、実用上問題のある大きさであることも分かった。

## 6.2 今後の課題

### 6.2.1 実環境による評価

本研究では、片方向遅延を中心とした指標を用いて AP 選択手法を提案し、シミュレーションにより評価を行った。シミュレーションの結果、ある程度の効果を挙げることが分かったが、今後は実環境による評価が必要になると思われる。というものの、今回のシミュレーションでは、端末から接続管理サーバへの情報伝達時間や、接続管理サーバでの処理時間などが反映されていないので、それらで発生する遅延により通話品質が悪化する可能性があるためである。情報伝達時間や、処理時間はシミュレーションすることが難しいため、実際に PC 等に本手法を実装し、実験していく必要がある。

### 6.2.2 VoIP 以外のトラフィックが存在する場合の考慮

本研究では、VoIP トラフィック以外は存在しない場合を想定して評価を行った。しかし、実際には無線 LAN を VoIP のみで利用することは考えにくく、他のトラフィックとの混在環境になることが多い。そういった場合に、片方向遅延を中心とした指標のみで AP 負荷を正確に予測することができるかどうかは未知数である。今後は、実際の使用環境を想定し、Web やメールといったアプリケーションも混在させた環境での評価が必要となる。

### 6.2.3 動きが多いシナリオでの通話品質改善

本研究では、AP 選択の際の基準として、片方向遅延を中心とし、受信電波強度とパケットエラーレートの 3 つを用いた。それにより、動きが少ないシナリオでは比較的良い結果

が得られたが、動きが多いシナリオではあまり大きな改善が見られなかった。そこで、今後はこれら3つの指標だけでなく、他の研究でも用いられている、APに流れるトラフィック量、Traffic Streamのqueueサイズなどの指標などを用い、動きが多いシナリオでの通話品質の改善を課題とする。

#### 6.2.4 片方向遅延及びRTPジッタの値の改善

端末数が20台の場合、既存手法に比べ、提案手法ではMOS値を大きく改善することができたが、片方向遅延及びRTPジッタの値自体は実用上問題のある大きさであった。端末数が16台の場合は片方向遅延及びRTPジッタの値に大きな問題はなかったが、IEEE 802.11bの理論帯域である11Mbpsの帯域があれば、20台の端末、すなわちAP1台当たり5台の端末は容易に接続可能なはずである。今後は、なぜ片方向遅延及びRTPジッタの値が実用上問題のある大きさになったのか原因究明を進め、さらにその解決策を考える必要がある。

# 謝辞

---

本研究を進めるにあたり、多くの方々のご協力をいただきました。

相田仁教授には、研究の進め方に関して頻繁に相談に乗っていただき、数多くのアイデアや有益なアドバイスをいただきました。また、途中テーマの変更を考えた際も、丁寧にご指導いただき、適切な目標の設定を行うことができました。2年間大変お世話になり、心から感謝しております。ありがとうございました。

助教の藤枝俊輔氏には、研究に関することだけでなく、実際のネットワーク運用に関するノウハウを教えていただき、多くの面で勉強させていただき、ありがとうございました。また、秘書の中山早百合女史には、事務手続きをしていただいただけでなく、日頃から暖かい言葉をかけていただき感謝しております。技術専門職員の千葉新吾氏には研究室の生活面で大変お世話になり、ありがとうございました。

同期として、不安に駆られながらも、互いに切磋琢磨し、苦しみや喜びを分かち合ったアピラックウィリヤ・ウィッタヤー氏、佐伯嘉康氏、杉谷心氏に感謝いたします。

そして、相田研究室に配属された2006年4月から現在までの2年間、様々な面で私の研究生活を支えてくれた研究室の先輩、後輩、研究生の方々皆様に感謝いたします。

最後に、ここに至るまで、私に多くのチャンスを与えてくれた家族に感謝いたします。

2008年1月29日

## 参考文献

---

- [1] Pierre Ansel, Qiang Ni, Thierry Turletti, “FHCF: a simple and efficient scheduling scheme for IEEE 802.11e wireless LAN”, *Source Mobile Networks and Applications archive, Volume 11, Issue 3*, pp.391-403, 2006.
- [2] A. Balachandran, G. M. Voelker, and P. Bahl, “Hot-Spot Congestion Relief in Public-area Wireless Networks”, *Proc. WMCSA '02, Callicoon, NY*, pp. 70-82, June. 2002.
- [3] Deyun Gao, Jianfei Cai, Liren Zhang, “Physical Rate Based Admission Control for HCCA in IEEE 802.11e WLANs”, *Proc. 19th International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA'05), Volume 1*, pp.479-483, 2005.
- [4] Inanc Inan, Feyza Keceli, Ender Ayanoglu, “An Adaptive Multimedia QoS Scheduler for 802.11e Wireless LANs”, *Proc. 2006 IEEE International Conference on Communications (ICC'06), Volume 11*, pp.5263-5270, 2006.
- [5] 川崎 大輔, 潘 煥旭, 中山 悟志, 山野 悟, “VoWLAN 品質管理システムの試作評価”, 電子情報通信学会総合大会講演論文集, No.2(20060308), p. 30, 2006.
- [6] A. Mishra, M. Shin, and W. Arbaugh, “An empirical analysis of the IEEE 802.11 MAC layer handoff process”, *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, 33(2):93-102, 2003.
- [7] 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”, 情報処理学会研究報告, 2007-MBL-41, pp. 21-26, 2007.
- [8] 奥田 隆史, “多段型 DOVE 方式によるセルラ移動体通信ネットワークチャンネル利用効率の改善”, 電子情報通信学会信学技法, NS2003-304, pp.14-46, 2004.
- [9] I. Papanikos and M. Logothetis, “A Study on Dynamic Load Balance for IEEE 802.11b Wireless LAN”, *Proc. 8th International Conference on Advances in Communication & Control(COMCON 8)*Rethymna, Crete Greece, June. 2001.
- [10] Dimitris Skyrianoglou, Nikos Passas, Apostolis Salkintzis, “Traffic Scheduling for Multimedia QoS over Wireless LANs”, *Proc. 2005 IEEE International Conference on Communications (ICC'05), Volume 2*, pp.1266-1270, 2005.
- [11] 妙中 雄三, 檜原 茂, 塚本 和也, 門林 雄基, 尾家 祐二, “VoWLAN における無線 LAN 再送回数を用いたハンドオーバー制御機構の実装”, 電子情報通信学会信学技報, Vol.106, No.358(20061109), pp. 79-84, 2006.

- [12] 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”, 電子情報通信学会論文誌 Vol. J89-B, No. 4, pp. 431-442, 2006.
- [13] S. Wiethölter, C. Hoene, A. Wolisz, “Perceptual Quality of Internet Telephony over IEEE 802.11e Supporting Enhanced DCF and Contention Free Bursting”, *TKN Technical Report TKN-04-11*, 2004.
- [14] 山田 暁, 五十嵐 圭, 杜 蕾, 陳 嵐, “無線 LAN 高度化技術”, NTT DoCoMo テクニカル・ジャーナル, Vol15, No,3, pp.41-48, 2007.
- [15] 山野 悟, 潘 煥旭, 川崎 大輔, 谷 英明, “無線 LAN 音声サービスの品質管理方式”, 電子情報通信学会信学技報, vol. 105, no. 405, NS2005-126, pp. 75-78, 2005.
- [16] Rongbo Zhu, Yuhang Yang, “Adaptive Scheduler to Improve QoS in IEEE 802.11e Wireless LANs”, *Proc. First International Conference on Innovative Computing, Information and Control (ICICIC'06), Volume 1*, pp.377-380, 2006.
- [17] “ITpro Network 記者の目:無線 LAN 対応 FOMA「N900iL」につまづいた企業のエンドユーザーが激白-トラブル克服への挑戦が続く”,  
<http://itpro.nikkeibp.co.jp/free/ITPro/OPINION/20050326/158031/>
- [18] “ITU-T P.800:Methods for subjective determination of transmission quality”,  
<http://www.itu.int/rec/T-REC-P.800/en>
- [19] “Scalable Network Technologies: Creators of QualNet Network Simulator Software”,  
<http://www.scalable-networks.com/>
- [20] “総務省 情報通信統計データベース”,  
<http://www.johotsusintokei.soumu.go.jp/>



# 発表文献

---

- [21] 藤原 直弘, 相田 仁, “無線 LAN VoIP における通話品質保持手法の検討”, 第 6 回情報科学技術フォーラム (FIT2007), 2007.
- [22] 藤原 直弘, 相田 仁, “無線 LAN VoIP ハンドオーバー時における最適 AP 選択手法の検討”, 電子情報通信学会 2008 年総合大会, 2008.(予定)