

平成 26 年度 修士論文

キャプチャエフェクトを活用した 高効率 HCCA の提案

早稲田大学基幹理工学研究科 情報理工学専攻

5113B026-3

神田 正則

指導 甲藤二郎 教授

2015 年 2 月 6 日

| 指導教授印 | 受付印 |
|-------|-----|
| | |

目次

| | |
|---|-----------|
| 目次 | 1 |
| 第 1 章 序論 | 3 |
| 1.1. はじめに | 3 |
| 1.2. 研究目的 | 5 |
| 1.3. 本論文の構成 | 5 |
| 第 2 章 無線 LAN の制御方式 | 6 |
| 2.1. IEEE802.11 規格 [6] | 6 |
| 2.1.1. 802.11 の MAC レイヤ | 6 |
| 2.1.2. DCF (Distributed Coordination Function) | 7 |
| 2.1.2.1. キャリアセンスレベル | 7 |
| 2.1.2.2. IFS (フレーム間隔) による優先制御 | 8 |
| 2.1.2.3. バックオフ制御 | 9 |
| 2.1.2.4. DCF の動作手順 | 9 |
| 2.1.2.5. 隠れ端末問題と RTS/CTS による解決 | 10 |
| 2.1.3. PCF (Polling Coordination Function) | 11 |
| 2.1.3.1. PCF の動作手順例 | 12 |
| 2.2. IEEE802.11e プロトコル[6][7] | 13 |
| 2.2.1. EDCA (Enhanced Distributed Channel Access) | 13 |
| 2.2.2. HCCA (HCF Channel Access)[6][7] | 14 |
| 2.2.2.1. TXOP 参照スケジューラ | 16 |
| 2.3. IEEE802.11aa プロトコル[8] | 18 |
| 2.3.1. OBSS Management | 18 |
| 2.3.1.1. QLoad Report | 18 |
| 2.3.1.2. TXOP Advertisement | 19 |
| 2.3.1.3. TXOP Negotiation | 20 |
| 2.4. 802.11 無線 LAN のスループット算出[6] | 22 |
| 第 3 章 提案手法 | 23 |
| 3.1. キャプチャエフェクトとは | 23 |
| 3.2. 提案手法①: HCCA QoS 同士のキャプチャエフェクト活用手法 | 25 |
| 3.3. 提案手法②: HCCA QoS と DCF とのキャプチャエフェクト活用手法 | 28 |
| 第 4 章 評価実験 | 30 |
| 4.1. キャプチャエフェクトの実機検証 | 30 |
| 4.1.1. 実験概要 | 30 |

| | |
|---|-----------|
| 4.1.1.1. トポロジー..... | 30 |
| 4.1.1.2. MadWifi [13]..... | 31 |
| 4.1.1.3. AirPcap [14]..... | 34 |
| 4.1.2. 実験結果..... | 35 |
| 4.2. OBSS 環境下を想定した無線 LAN のシミュレーション評価..... | 38 |
| 4.2.1. 実験概要..... | 38 |
| 4.2.1.1. NS-2[17]..... | 38 |
| 4.2.1.2. トポロジー..... | 41 |
| 4.2.2. 実験結果..... | 42 |
| 4.2.2.1. CFP および CP 期間内のデータ転送量比較..... | 42 |
| 4.2.2.2. 従来手法に対する提案手法のゲイン..... | 45 |
| 4.2.2.3. DCF 動作端末が複数台の存在する場合における提案手法のゲイン..... | 51 |
| 第 5 章 総括..... | 56 |
| 5.1. まとめ..... | 56 |
| 5.2. 今後の展望..... | 56 |
| 参考文献,..... | 57 |
| 謝辞..... | 59 |
| 学会発表リスト..... | 60 |
| 図表目次..... | 61 |

第1章 序論

1.1. はじめに

近年，スマートフォンやタブレット端末，ウルトラブックなどのモバイル端末が急速に普及している．ガートナー社のモバイル端末出荷台数予測[1]によると，スマートフォン分野では2015年に3.7%成長，2016年には20億台に達する見込みであるとし，タブレット端末では，売上げが停滞したものの，2015年でも8%の成長が見込まれ，2016年にも10%ほどの売上成長が予想されている．ウルトラブックに至っては，2016年の出荷台数が2014年の2倍もの値になると予想されている．今後も，従来型のデスクトップパソコンやラップトップパソコンの減少傾向が続き，タブレット端末やウルトラブックへのシフトがなされると考えられる．

上記のような，モバイル機器の普及に伴って，駅やカフェなどにFREESPOTサービスや各キャリアによる公衆無線LANサービス等も拡大している．さらに，個人所有のモバイルルーターやテザリング（キャリア回線契約したスマートフォンやガラパゴス携帯などを介して，パソコンやタブレット端末などでインターネットに接続すること）などといった移動無線LANシステムにより，我々ユーザはいつでもどこでもネットワークへアクセスでき，外出先でもインターネット上の動画閲覧やネットワークゲーム，クラウドサービスなどを受けられるようになっている．

このように街中の至るところに無線LANシステムが存在している状況では，多くの無線LANシステムの電波到達範囲が重なり合ってしまう状況が考えられる．このような状況をOBSS (Overlapping Basic Service Set) と呼ぶが，OBSS環境下では，これまで想定されていなかった干渉による周波数汚染が生じ，十分なQoSが得られないことが問題となっている．この課題に対して，IEEE802.11 Working GroupではHEW (High Efficiency WLAN) Study Group[3]が発足し，周波数利用効率とエリアスループットの改善，また屋内・屋外配置における実環境での特性改善のための議論が活発になされている．2014年5月にはIEEE802.11ax Task Groupが設立され，規格策定に向けた具体的な議論が開始されている．

表 1-1 モバイル出荷台数予測 (出典:ガートナープレスリリース[1]より作成)

| Millions of Units | | | |
|--------------------------|-------------|---------------------|---------------------|
| Device Type | 2014 | 2015 | 2016 |
| Traditional PCs | 279 | 259 -7.2% | 248 -4.2% |
| Ultramobile Premium | 39 | 62 59.0% | 85 37.1% |
| PC Market Total | 318 | 321 0.9% | 333 3.7% |
| Tablet | 216 | 233 7.9% | 259 11.2% |
| Mobile Phones | 1838 | 1906 3.7% | 1969 3.3% |
| Other Hybrids/Clamshells | 6 | 9 50.0% | 11 22.2% |
| Total | 2378 | 2470 3.9% | 2572 4.1% |

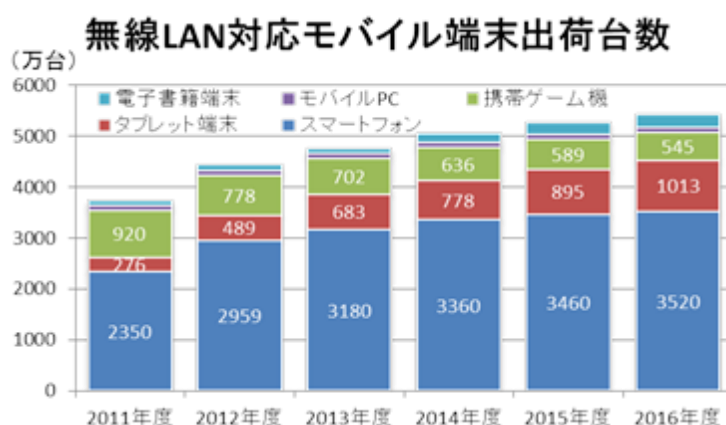


図 1-1 国内無線 LAN モバイル出荷台数予測(出典:ICT 総研プレスリリース[2]より図作成)

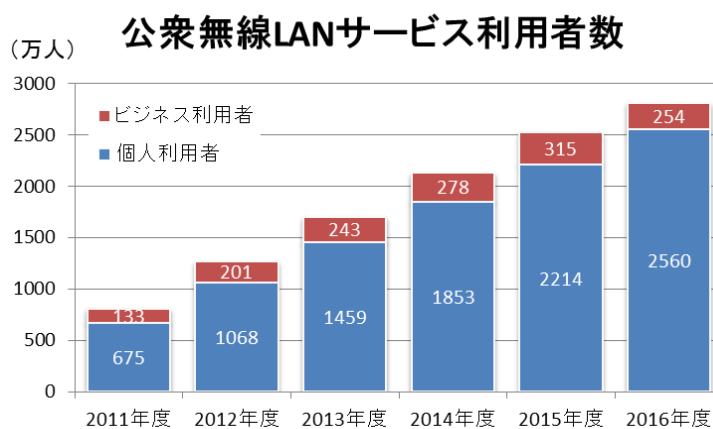


図 1-2 国内公衆無線 LAN サービス利用者数予測
(出典:ICT 総研プレスリリース[2]より図作成)

1.2. 研究目的

本研究では、多くの無線 LAN システムのセル範囲が重なりあってしまう OBSS 環境下において、キャプチャエフェクトを積極的に活用した HCCA アクセス制御方式の提案を行う。また、実機によるキャプチャエフェクトの検証を行い、検証結果をもとに、NS-2 を用いて提案手法のシミュレーション評価を行い、OBSS 環境下での QoS（特にスループット）改善を検討する。

1.3. 本論文の構成

第2章では、本研究の基礎知識として無線LANのアクセス制御方式について述べる。

第3章では、キャプチャエフェクトを活用したHCCA制御手法の提案を行う。

第4章では、実機によるキャプチャエフェクトの検証とシミュレータNS-2による提案手法のシミュレーション評価を行う。

第5章では総括として、本研究のまとめと今後の展望を述べる。

第2章 無線 LAN の制御方式

本章では、本研究の基本的事項として、無線 LAN（特に IEEE802.11 規格）のアクセス制御方式について説明する。

2.1. IEEE802.11 規格 [6]

無線 LAN (Local Area Network) とは複数台の PC やネットワーク機器を接続するために無線を使用して構築された限定的なネットワークのことを意味する。LAN に似た言葉として PAN (Personal Area Network: 個人所有の機器間のネットワーク, IrDA や Bluetooth 等を使用) や MAN (Metropolitan Area Network: LAN 同士を相互接続したネットワーク), WAN(Wide Area Network: 広い範囲をカバーするネットワーク, 通信業者が提供するインフラ)などがあり, LAN はこの中で PAN より大きく, MAN より小さい規模のネットワークである。無線 LAN 規格の 1 つに「IEEE802.11 (以下, 802.11 という)」規格が存在する。802.11 規格の対象となるのは主に, 以下に示す 2 つのプロトコルである。

- (1) データリンクレイヤ (LLC レイヤと MAC レイヤで構成される) のうち, 通信の分散制御や集中制御などを行う MAC (Medium Access Control, 媒体アクセス制御) レイヤのプロトコル
(LLC : Logical Link Control, 論理リンク制御)
- (2) 通信のデータ伝送速度や無線周波数帯域, 誤り訂正などに関する物理レイヤのプロトコル

以下の各項では主に MAC レイヤに関して説明を行う。

2.1.1. 802.11 の MAC レイヤ

802.11 規格には, 同一の無線チャネルを複数の端末で共有するためのアクセス制御方式として DCF (Distributed Coordination Function, 自律分散制御機構) と PCF (Polling Coordination Function, ポーリングに基づくアクセス制御機構) の大きく 2 種類の制御方法が存在し, DCF が必須, PCF がオプションとして定義されている。

DCF では各局が無線チャネルの使用状況を検査して自律的にパケットの送信タイミングを決定する。802.11 の DCF には有線の Ethernet で使用されているアクセス制御方式である CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection, 衝突検出機能付きキャリア感知多重アクセス) を無線機器用に模倣した CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) というアクセス制御方式が用いられている。

PCF では, ポーリングに基づくパケット集中制御によるアクセス制御がなされる。ポーリングとは, 基地局が各端末に対して順次信号を送信し, 信号を受信した端末のみがフレームの送信を許可されるアクセス制御方式である。

2.1.2. DCF (Distributed Coordination Function)

802.11 の DCF には、無線チャネルの使用状況を検知し、できる限り衝突を回避する CSMA/CA アクセス制御方式が用いられる。CSMA/CA では、キャリアの使用状況を検出し、一定時間アイドルであれば、キャリアをどの無線端末も使用していないと判断し、送信を開始する。無線チャネルがビジーであれば、アイドル状態になるまで送信待機を行う。

2.1.2.1. キャリアセンスレベル

各無線端末では、キャリアセンスによってチャネルが使用中か否かの判断を行う。これにあたり、受信信号の電力レベルを用いてチャネル使用状況を判断するキャリアセンスレベルが設定されている。

IEEE802.11a (以下、802.11a) では、信号のプリアンプルを検出した場合、信号の受信動作に入るためにチャネルビジーとなり、検出できなかった場合は、キャリアセンスレベルを -62dB にすると規定されている。キャリアセンスエリア内からの -62dB 以上の電力レベルが検出された場合は、チャネルビジーと判断し、送信待機を行う。また、 -62dB 未満の電力レベルであった場合は、チャネルアイドルと判断する。

キャリアセンスレベルを極端に低く設定した場合は、キャリアセンス可能なエリアが広がるものの、微小な信号に対しても敏感に反応するため、信号の送信機会を減らすことにつながる。一方、キャリアセンスレベルを極端に高く設定した場合は、干渉波となる信号の電力レベルが高い場合でも、チャネルがアイドル状態であると判断して信号の送信を行うため、頻繁に受信誤りが発生してしまう。

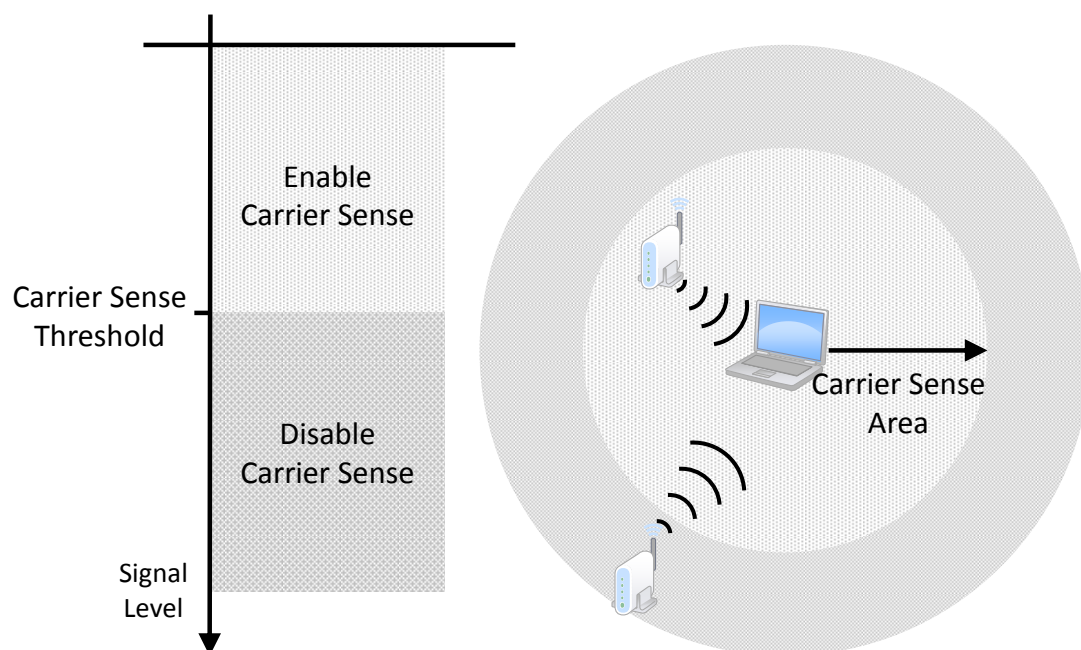


図 2-1 キャリアセンスレベル

2.1.2.2. IFS(フレーム間隔)による優先制御

802.11 規格には、信号を送信する前の待機時間として IFS (Inter Frame Space, フレーム間隔) が定義されている。無線チャンネルがビジーからアイドルへの移行するのを契機に IFS の時間だけ待機し、DCF では引き続きバックオフと呼ばれるランダム時間のキャリアセンスを行い、依然無線チャンネルが継続してアイドルであることを確認した端末のみが信号の送信権を得る。802.11 では IFS 時間の長さを複数定義して使い分けることで、端末間の優先制御を行っている。

最優先の送信信号間の間隔として SIFS (Short IFS : 短フレーム間隔) , 次に送信信号間の間隔が短く優先権の高い PIFS (PCF IFS : ポーリング用フレーム間隔) , そして、送信信号間の間隔が長く最低優先権の DIFS (DCF IFS : 分散制御用フレーム間隔) 時間が用意されている。

DCF で用いられている通常のデータフレームでは、優先度の低い DIFS を使用して送信を行う。また、データフレームに対する ACK フレーム (Acknowledgment frame, 確認応答フレーム) では、最も優先度の高い SIFS を使用して送信を行う。ACK フレームの送信に DIFS より短い SIFS を利用することで、データフレーム受信後に他の端末に割り込まれることなく送信を行うことができる。

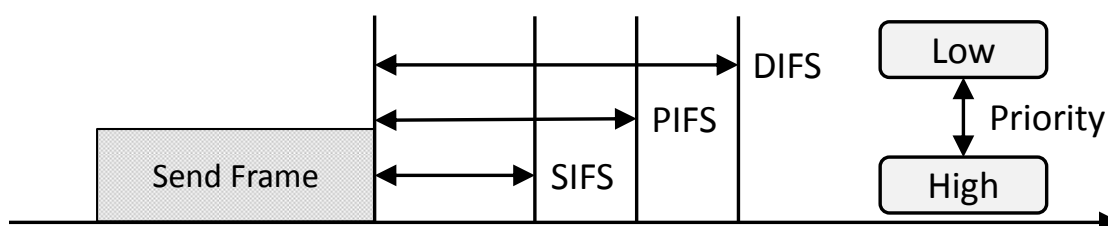


図 2-2 SIFS, PIFS, DIFS による優先制御の仕組み

その他、DCF によるアクセス制御では EIFS (Error IFS) と呼ばれるフレーム間隔が用意されている。無線チャンネルがビジーと判断され、かつ、ビジーの原因となったフレームが衝突等でエラーと検出された際に、次のフレーム間待機に DIFS の代わりに EIFS が使用される。当該端末でエラー検出されたフレームは、他端末では正常に受信されている可能性があり、その場合、SIFS 時間後に ACK フレームが送信される。そのため、他端末での ACK フレームの送信終了まで待機を行う。なお、EIFS 時間の待機中に別の端末宛のフレームをエラーなしで検出した場合には、EIFS の送信待機は解除される。

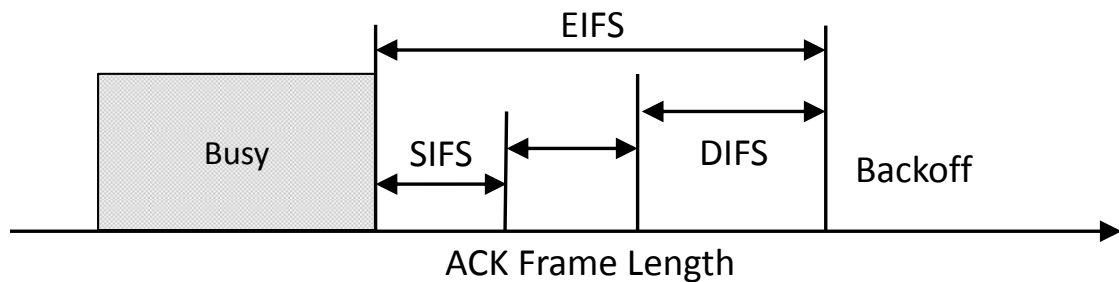


図 2-3 EIFS の内訳

2.1.2.3. バックオフ制御

バックオフ制御とは衝突を回避するために、DIFS 時間のキャリアセンスに加えてランダム時間待機する制御のことである。データフレームを送信しようとする端末では、既定の CW (Contention Window, 乱数発生範囲) の範囲内で乱数を発生させ、その乱数値をもとにしたバックオフ時間が決められる。バックオフ時間は、スロットタイムという一定の時間間隔の倍数となっており、IFS の時間待機後、さらに無線チャネルがアイドルであれば、スロットタイム毎にバックオフ時間を減算してゆく。最終的にバックオフの残り時間が 0 となった端末が送信を行うことができる。バックオフ時間が同じ値となり、フレームが衝突してしまった場合は、CW の範囲を 2 倍にし、フレームの再衝突確率を低減させる。ここで、バックオフ時間は以下の式で表される。

$$\text{バックオフ時間} = \text{Random()} \times \text{スロットタイム} \quad (2.1)$$

Random() は、[0, CW] 範囲の一様分布から生成されたランダムな整数値であり、CW は、最小値が CWmin と最大値が CWmax の値の範囲内の整数値で、

$$CW_{min} \leq CW \leq CW_{max} \quad (2.2)$$

となり、フレームの衝突などによる再送ごとに、

$$CW = (CW_{min} + 1) \times 2^n - 1 \quad (n \text{ は再送回数} \geq 0) \quad (2.3)$$

の指数関数 (2 進指数) で CW の範囲は増加していく。CW が CWmax に達したときはあらかじめパラメータで決められた最大再送回数 M 回となるまで CW の範囲を広げず CWmax のままとし、M 回再送に失敗したフレームは破棄される。

2.1.2.4. DCF の動作

無線端末 (STA: STAtion) から基地局 (AP: Access Point) へのデータ送信では、各 STA は DIFS 時間に渡って信号が検知されなかった場合に、チャネルがアイドル状態に変わったと判断する。次に、各 STA はバックオフ時間と呼ばれるさらなる送信待機時間をランダムに決定する。バックオフ時間の間、各 STA はキャリアセンスを続行し、自分が決定したバックオフ時間が経過するまでチャネルがアイドル状態であり続けた場合に、フレームの送信を開始する。

ここで、バックオフに用いられる乱数値が同じであれば、データフレームを同時に送信し、衝突が発生してしまう。STA 数が増加した場合には、同じ乱数値を発生する確率が増えるため、フレームの衝突確率も増加する。衝突後には AP からの ACK フレームを受信できないために STA は再送を行う。

再送手順において、パケット衝突を引き起こした STA はバックオフ時間をセットし直す。再送時には指数関数的に CW の範囲を広げることで、同時送信による再衝突の確率を低減する。もし、再び衝突した場合には、再送を繰り返すことで CW の範囲を広げ、再衝突の確率を低減させていく。

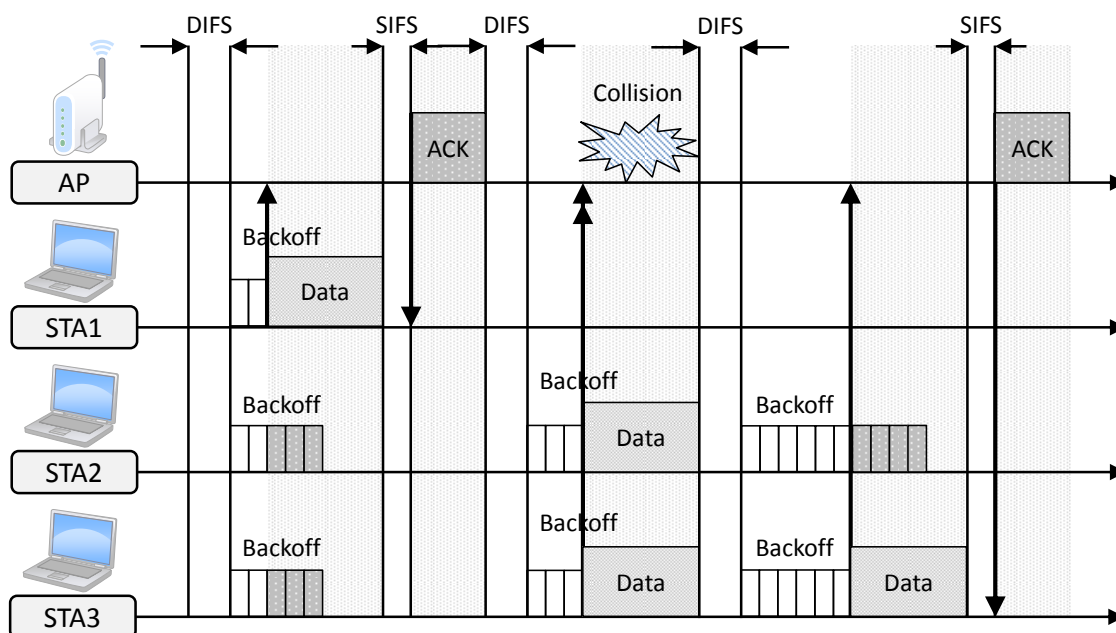


図 2-4 DCF の通信例

2.1.2.5. 隠れ端末問題と RTS/CTS

隠れ端末 (Hidden Terminal) とは、無線端末間の距離や障害物などの影響によりお互いの信号が到達しない状態のことであり、キャリアセンスが有効に機能しなくなるといった問題が生じる (隠れ端末問題という)。802.11 規格では、この隠れ端末問題に対し、RTS (Request to Send, 送信要求) / CTS (Clear to Send, 受信準備完了) と呼ばれる対策機能が規定されている。

図 2-5 では、STA1 がデータフレーム送信前に RTS をデータフレームの宛先である AP 宛てに送信している。STA1 と STA2 は互いにキャリアセンスできる環境下にあるため、STA1 が送信した AP 宛に RTS を STA2 も受信することが出来る。RTS と CTS のフレームには無線チャネルを占有する予定期間が記載される Duration Field があり、STA2 は RTS フレームに記載されている期間だけ送信を禁止 (NAV : Network Allocation Vector) し、仮想的キャリアセンスを行うことで衝突を防止する。

一方、データフレームの宛先である AP は RTS の受信から SIFS 時間後に、STA1 宛てに CTS を返す。AP が送信した STA1 宛の CTS は STA3 も受信することが出来るので、STA3 は CTS フレームに記載されている時間だけ NAV をセットし、STA2 と同様、仮想的キャリアセンスを行う。

STA1 では、CTS の受信から SIFS 時間後にデータフレームを送信する。ここで、SIFS と DIFS は $SIFS < DIFS$ の関係にあるため、短い時間の SIFS を使って優先権を持たせることで、いったん RTS が正常に受信されると以後の手順中のフレームは妨害されることなく交換される。

このように、RTS/CTS を用いることによって、送信端末の信号をキャリアセンス出来ない環境に端末が存在しても、AP が送信する CTS を受信することによって、送信端末の存在を知り、NAV をセットして仮想的キャリアセンスを行うことより、衝突を防止することができ、隠れ端末問題を解決する手段となる。

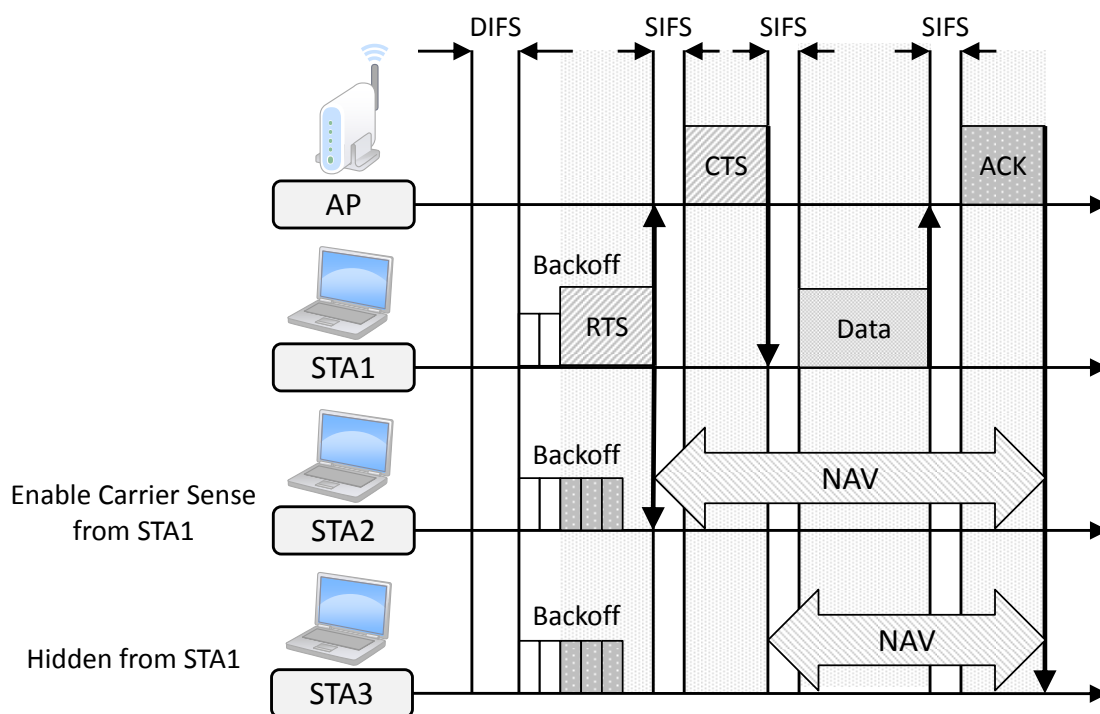


図 2-5 RTS/CTS を用いた通信手順例

2.1.3. PCF (Polling Coordination Function)

PCF では、ポーリングに基づく集中アクセス制御が行われる。ポーリングを行う局はポイントコーディネータ (PC : Point Coordinator) といい、通常、アクセスポイントがその役割を担う。PCF では、無線端末が PC との接続を確立する際に、アソシエーション要求を行う。PC では、無線端末からの要求に基づき、ポーリングリストを作成する。ポーリングリストには、ポーリングする端末が記録され、PC ではポーリングリストの順に、ポーリングフレ

ームを無線端末へ送信する。端末との接続を解除した際は、PC は当該端末をポーリングリストから削除する。

2.1.3.1. PCF の動作

PCF により制御される時間帯を CFP (Contention Free Period, 非競合期間) と呼ぶ。PC は、CFP の開始時に CF パラメータセットの CFP カウント=0 に設定したビーコンを PIFS 間のチャンネルアイドル後に送信する。PIFS は DIFS よりも 1SlotTime 分短いため、他の DCF よりも優先的に送信することが可能となっている。

その後、PC はポーリングリストに基づき、端末に対して CF-Poll フレームを送信する。端末では、受信した CF-Poll フレームの宛先 MAC アドレスにより自局がポーリングされたことを認識し、送信したいデータがある場合は Data を、ない場合でも Null Function を SIFS 時間待機後に送信する。PC で端末からデータを受信した際は、当該端末に対して CF-ACK フレームを送信する。また、この際、次にポーリングする端末に対して CF-Poll や CF-End などといった情報を Piggyback させて送ることも可能となっている。

CFP を終了する際には、PC は同一無線セル内の端末に対して、CF-End フレームを送信する。端末では、CF-End の含まれるフレームを受信した場合、NAV の値をリセットし、DCF に基づくパケット送信を開始する。

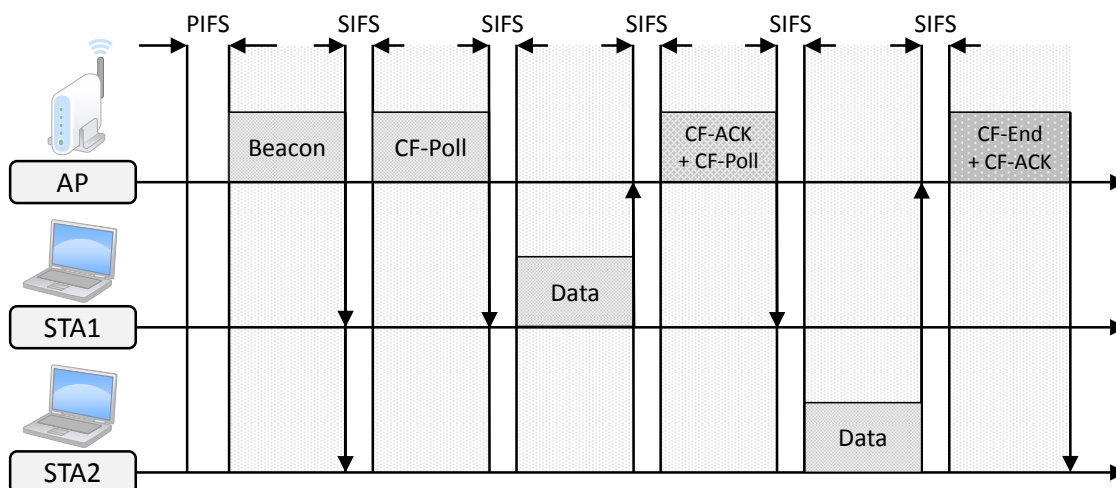


図 2-6 PCF の動作手順例

2.2. IEEE802.11e プロトコル[6][7]

IEEE802.11e とは、VoIP や動画ストリーミングなど、低遅延時間を要求するアプリケーションの普及に伴って、MAC レイヤに QoS (Quality of Service) 機能を追加した規格である。802.11e では、QoS をサポートするためのアクセス制御として、従来の自律分散アクセス制御手順である DCF (Distributed Coordination Function) と、ポーリングを使用する集中制御手順である PCF (Polling Coordination Function) の機能を統合的に提供する HCF (Hybrid Coordination Function) が規定されている。HCF では、QoS 制御機能として EDCA (Enhanced Distributed Channel Access) と HCCA (HCF Channel Access) の 2 種類を提供する。

2.2.1. EDCA (Enhanced Distributed Channel Access)

EDCA は、従来の CSMA/CA を拡張し、データ送信時に優先制御を行うことによって QoS 制御機能を追加したアクセス制御である。EDCA では送信するフレームを 4 種類のアクセスカテゴリ (AC : Access Category, 送信データの種類) にごとに分類し、カテゴリごとに提供するサービスの品質に差をつけることによって、優先制御 (Prioritized QoS) を提供する。AC には、背景トラフィック用の AC_BK, ベスト・エフォート用の AC_BE, ビデオ伝送用の AC_VI, 音声用の AC_VO が規定されており、802.11D のユーザープライオリティ (User Priority) がマッピングされる。

表 2-1 IEEE 802.1D から IEEE 802.11e へのマッピング

| IEEE 802.1D | | IEEE 802.11e |
|-------------|-------------------------------|--------------|
| 1 | Background | AC_BK |
| 2 | Spare | |
| 0 | Best Effort | AC_BE |
| 3 | Excellent Effort, Best Effort | |
| 4 | Controlled Load | AC_VI |
| 5 | Video | |
| 6 | Voice | AC_VO |
| 7 | Network Control | |

従来の CSMA/CA では、データフレーム送信前の待機時間に DIFS (Distributed IFS) を使用していたが、EDCA では DIFS の代わりに AC の優先度に応じた AIFS (Arbitration IFS) を使用する。優先度の高い AC ほど AIFS 時間の値は短く設定されており、これをもとにアクセス制御を行うことで、AC 間の優先制御を実現している。

さらに、EDCA では AC の優先度に応じてバックオフ制御により発生させる乱数の範囲を

変更している。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、短い待機時間での優先制御を実現している。EDCA アクセスパラメータとしては、CW の最小値 CW_{min} と最大値 CW_{max} が、それぞれの AC に対して規定される。

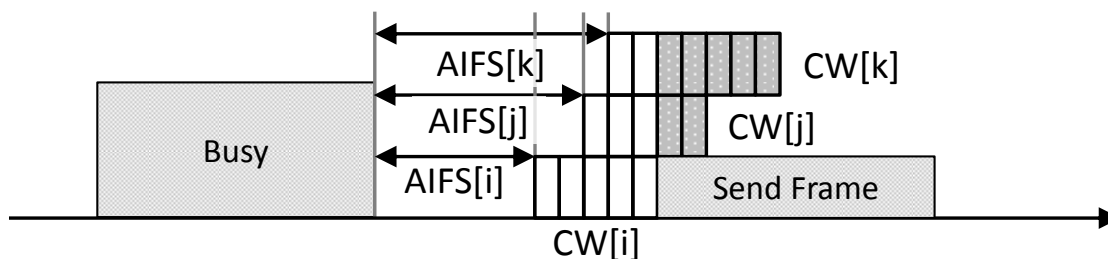


図 2-7 AIFS による優先制御の仕組み

TXOP (Transmission Opportunity, 排他的チャネル利用) は、ある端末が無線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。TXOP は優先度が高いほど長い値が与えられるというわけではなく、アプリケーションが生成するパケットの長さも考慮して決められる。AC に対する TXOP が 0 と指定されている場合は、アクセス権獲得度に送信できるフレーム数は 1 つとなる。

表 2-2 EDCA アクセスパラメータのデフォルト値

| AC | CW | | AIFS | TXOP Limit | | |
|-------|------------------|------------------|------|------------|-----------|-----------------|
| | CWmin | CWmax | | 802.11b | 802.11a/g | Other PHY Layer |
| AC_BK | aCWmin | aCWmax | 7 | 0 | 0 | 0 |
| AC_BE | aCWmin | aCWmax | 3 | 0 | 0 | 0 |
| AC_VI | $(aCWmin+1)/2-1$ | aCWmin | 2 | 6.016 | 3.008ms | 0 |
| AC_VO | $(aCWmin+1)/4-1$ | $(aCWmin+1)/2-1$ | 2 | 3.264 | 1.504ms | 0 |

2.2.2. HCCA (HCF Channel Access)[6][7]

HCCA は、従来、オプションとして規定されていた PCF 制御方式を拡張し、帯域幅や遅延時間などのパラメータを保証する QoS 制御機能を追加したアクセス制御である。もともと、PCF を用いることで、データの非競合転送を行うことは可能であったが、PCF では、

- (1) データ転送を開始するにあたっての制約
- (2) 基地局と端末との間で具体的なパラメータの交渉手段が提供されていない

などの問題があり、QoS を提供するための十分な機能は備わっていなかった。HCCA では、データ転送の前に基地局と端末との間で通信品質のネゴシエーションが可能であり、また、ポーリングを行う際にはデータの種類に応じた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ことが可能となる。そのため、パラメータ保証型アクセス制御

ポーリングを行う主体は、HC (Hybrid Coordinator, ハイブリッド・コーディネータ) と呼ばれ、通常、QoS 対応のアクセスポイント (QAP : QoS Access Point) がこの役割を果たす。HC はポーリングを開始する際に、AIFS 時間よりも短い PIFS 時間で、チャンネルへのアクセス権を獲得する。HC は、チャンネルがアイドルであると判断した場合、AP からの下りデータ転送、あるいは、配下の端末に対して QoS CF-Poll (QoS Contention Free-Poll) と呼ばれるポーリングフレームを送信し、ポーリングを開始する。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期間 (TXOP : Transmission Opportunity) の情報が含まれており、この期間の間は、任意の数のフレームを送信することができる。この間、他の端末は QoS CF-Poll 内の情報をもとに、NAV を設定し、仮想的キャリアセンスを行うことでチャンネルへのアクセスを抑制する。QoS CF-Poll に続くフレームの送受信は、SIFS (Short IFS) 間隔で行われ、データ伝送とそれに対する ACK がやり取りされる。HC は、QoS CF-ACK フレームに、下り方向の QoS データや CF-Poll をピギーバックさせて送信することもできる。端末の TXOP が終了する前に、当該端末に対して新たな CF-Poll が送信された場合には TXOP が延長される。

なお、HCCA では、QoS + CF-Poll フレームでポーリングした端末から、応答が返ってこない場合でも、SIFS に続くスロット期間内でチャンネルビジーが検出された場合には、ポーリングフレームが正しく受信されたと仮定している。SIFS に続くスロットでチャンネルビジーが検出されなかった場合、QAP から最後に送信したフレームの終わりから PIFS 後に再度、ポーリングフレームを送信することで、回復を試みるようになっている。

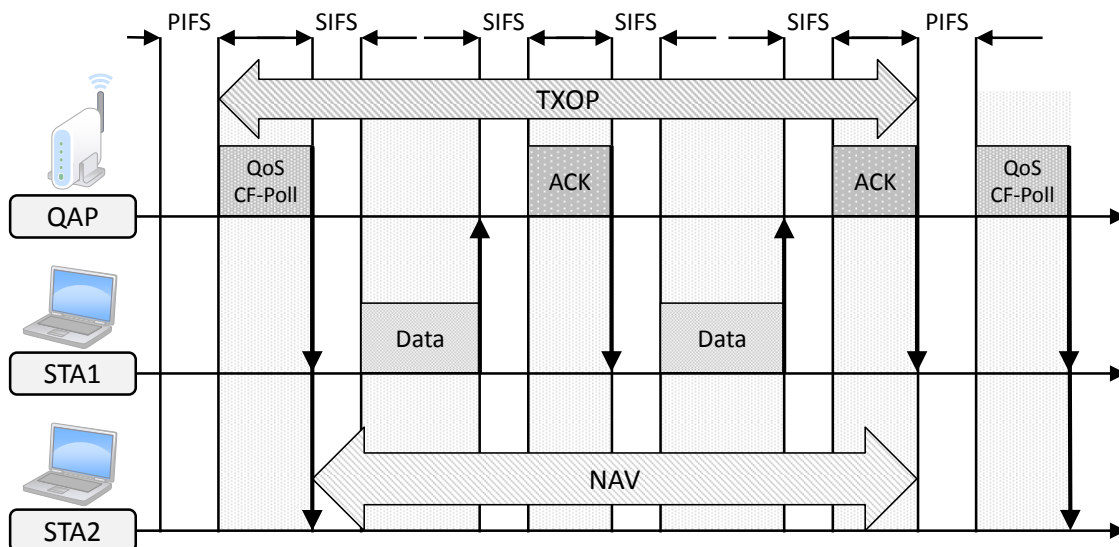


図 2-8 HCCA 動作例

HCCA を用いたアクセス制御では、データ転送を開始する前に、端末は QAP との間で通信品質のネゴシエーションを済ませる必要がある。そのため、802.11e では、新たに ADDTS (AddTSPEC : Add Traffic Specification, 追加トラフィック仕様) という管理フレームを定義している。端末側から QAP に対しては、ADDTS Request フレームが送信され、ADDTS には端末の要求する帯域や、パケットサイズ、データレートなどの情報を示す TSPEC (Traffic Specification, トラフィック仕様) が含まれている。QAP 側では、その TSPEC を受理するか否かを判断し、ADDTS Response フレームによって、TSPEC を受け入れたか否か、あるいは提案される値が端末側へ送信される。

| Element ID | Length | TS Info | Nominal MSDU Size | Maximum MSDU Size | Minimum Service Interval | Maximum Service Interval | Inactivity Interval | Suspension Interval |
|--------------------|-------------------|----------------|-------------------|-------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------|---------------------|
| Service Start Time | Minimum Data Rate | Mean Data Rate | Peak Data Rate | Burst Size | Delay Bound | Minimum PHY Rate | Surplus Bandwidth Allowance | Medium Time |

図 2-9 TXOP Element

2.2.2.1. TXOP 参照スケジューラ

HCCA ではデータ転送を開始する前に通信品質のネゴシエーションが行われる。その際、新しい TS (Traffic Stream) を受理するか否かの判断は、ベンダーや個人で自由に設定することができるが、規格では基本的なスケジューラとして参照スケジューラが以下のように規定されている。参照スケジューラの TXOP の必須パラメータは Nominal MSDU Size (L), Mean Data Rate (ρ), Maximum Service Interval (MSI) or Delay Bound (D) の 3 つであり、以下

に示す手順により TS の受理を決定する.

- ① 全 TS の最大 SI の最小値 MSDU' を取得する
 - ・最も遅延に厳しい TS の最大 SI を満足させるため
- ② SI を MSDU' の約数から選ぶ
 - ・ビーコン間隔を等分した期間が SI となる
- ③ SI 間に到着するフレーム数 N は以下より算出される

$$N_i = \left\lfloor \frac{SI \cdot \rho_i}{L_i} \right\rfloor \quad (2.4)$$

- ④ 端末 j に割り当てられる, TXOP は以下より算出される

$$TXOP_i = \max \left(\frac{N_i \cdot L_i}{R_i} + O, \frac{M_i}{R_i} + O \right) \quad (2.5)$$

R_i : PHY rate, M_i : maximal MSDU

- ⑤ k 個のフローが存在する場合に、新しく TS が追加されるのは以下を満足するとき

$$\frac{TXOP_{k+1}}{SI} + \sum_{i=1}^k \frac{TXOP_i}{SI} \leq \frac{T - T_{CP}}{T} \quad (2.6)$$

T : Beacon Interval, T_{CP} : time for EDCA traffic

2.3. IEEE802.11aa プロトコル[8]

IEEE802.11aa は IEEE802.11e で規定された優先制御の高機能化による映像・音声伝送のさらなる高品質化で規定される技術である。11aa で規定される技術には GCR (Group cast with Retries) と OBSS Management があるが、本節では特に OBSS Management について説明する。

2.3.1. OBSS Management

OBSS とは Overlapping Basic Service Set の略で、AP が構成するセルの範囲が重複している状態を表す。OBSS 環境では、複数 AP によって同一チャンネルを共有するため、一般的に 1 セルあたりのスループットが AP 数に反比例する。また、複数 AP でチャンネルへのアクセス権を取り合うために QoS を保証できるスループットが大幅に低下する。OBSS Management では、①チャンネル選択に追加情報を提供、②分散環境に対するアドミッション管理機構の拡張、③OBSS 間でのスケジューリングされた TXOP の調整、の 3 つの技術が規定されており、EDCA (Enhanced Distributed Channel Access) 間では QLoad Report, HCCA (HCF Channel Access) では HCCA TXOP Advertisement がそれぞれ用いられる。

2.3.1.1. QLoad Report

QLoad Report とは、AP のオーバーラップ状況、QoS トラフィック負荷、AP にオーバーラップしている AP の総 QoS トラフィック負荷などが記載されるフレーム要素で、チャンネルスキャン時やチャンネル共有時に用いられる。QLoad Report Element は QLoad Request と QLoad Report Frame に含まれる。QLoad Report が送られるのは以下の 3 パターンの場合である。

- ① QLoad Request Frame を受理した際の応答としての QLoad Response Frame にて
- ② QLoad 要素に変化があった場合、要求されずとも QLoad Response Frame
- ③ *dot11QloadReportActivated* が True である場合、*dot11QloadReportIntervalDTIM* 間隔でビーコンフレームに含まれる

QLoad Report element

| Element ID | Length | Potential Traffic Self | Allocated Traffic Self | Allocated Traffic Shared | EDCA Access Factor | HCCA Peak | HCCA Access Factor | Overlap |
|------------|--------|------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------|-----------|--------------------|---------|
|------------|--------|------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------|-----------|--------------------|---------|

図 2-10 QLoad Report element

表 2-3 QLoad Report Element

| | |
|--------------------------|--|
| Element ID | QLoad Report Element の値 |
| Length | 20 がセットされる 1octed のフィールド |
| Potential Traffic Self | non-AP STA からの potential TSPEC がアクティブな場合の BSS の合計 QoS トラフィックのピーク |
| Allocated Traffic Self | 同 BSS で承認された TSPEC に基づく合計 QoS トラフィックのピーク |
| Allocated Traffic Shared | オーバーラップしている AP の Allocated Traffic Self の値の合計値に Allocated Traffic Self の値を加えたもの |
| EDCA Access Factor | オーバーラップしている AP の Potential Traffic Self の合計値に AP 自身の Potential Traffic Self を加えたもの |
| HCCA Peak | AP と BSS からの 1 秒間の合計ピーク HCCA TXOP 要求 |
| HCCA Access Factor | OBSS の AP からの QLoad Report Element 内の HCCA Peak フィールドの合計に、AP 自身の HCCA Peak を加えたもの |
| Overlap | ビーコンにより発見される同一チャンネルを共有している他の AP 数 |

2.3.1.2. TXOP Advertisement,

TXOP Advertisement はオーバーラップしている HCCA AP の TXOP 調整のために用いられるフレーム要素である。HTTA TXOP Advertisement では各 TXOP reservation の Duration, Service Interval (SI), Start Time を通知する。HCCA では TSPEC (Traffic Specification) を受理する前に、受信した HCCA TXOP Advertisement の TXOP Reservation Field が示されているか検証する。

AP は以下の 4 つのどれかが生じるまで STA に対して ADDTS Response を返さない。

- ① 全ての AP から status field が 0 (“Successful”)にセットされた HCCA TXOP Response を受け取る
- ② 全ての AP から少なくとも 2 つのビーコンを受信
- ③ 全ての AP から HCCA TXOP Update Count Element を含んだビーコンを受け取る
- ④ dot11BeaconPeriod TU 時間が経過

AP が Status Field に ”The TS schedule conflicts with an existing schedule, an alternate schedule is provided” がセットされた HTTA TXOP Response を受け取ったら、AP はそれに従い、新しいスケジュールを作成する。

HCCA TXOP Advertisement frame

| Category | Public Action | Dialog Token | Number of Reported TXOP Reservations | Number of Pending TXOP Reservations | Active TXOP Reservations | Pending TXOP Reservations |
|----------|---------------|--------------|--------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|---------------------------|
|----------|---------------|--------------|--------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|---------------------------|

HCCA TXOP Response frame

| Category | Public Action | Dialog Token | Status Code | Schedule Conflict | Alternate Schedule | Avoidance Request |
|----------|---------------|--------------|-------------|-------------------|--------------------|-------------------|
|----------|---------------|--------------|-------------|-------------------|--------------------|-------------------|

Figure 2.1 TXOP Advertisement & Response frame

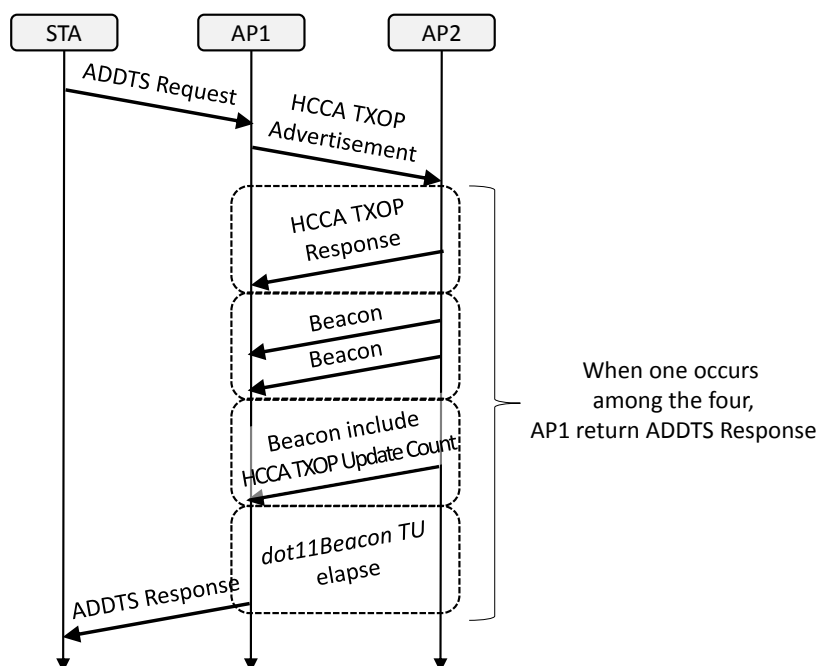


図 2-11 TXOP Advertisement のシーケンス例

2.3.1.3. TXOP Negotiation

dot11RobustAVstreamingImplemented が true に設定されている AP ではオーバーラップしている各 AP と TXOP Reservation Field が重複しないように管理される。TXOP Reservation Field は新しい TS (Traffic Stream) 要求に対してスケジュールを作成する際に、スケジュールの重複を避けるために用いられる。HCCA TXOP Advertisement Frame を受け取った AP では、HCCA TXOP Advertisement Frame を送信した AP のすべての記録を破棄し、次の応答を行う。既に受理されている HCCA TXOP と衝突しない場合、

Status field に 0 “Successful” をセットし、HCCA TXOP をリストに加える。

既に受理されている HCCA TXOP と衝突する場合、

Status field に “The TS schedule conflict...”とセットし、Alternative Schedule field に既に受理

されたとの HCCA TXOP とも衝突しないような時間期間にセットする。さらに Avoidance Request field を absent にする。

現在実行中の ADDTS Request を衝突する場合、

Status field に “The TS Schedule not be created because the schedule conflicts with an existing schedule...”とセットし、Alternative Schedule と Avoidance Request field は MAC アドレスの大小に従い、次のようにセットする

受信側 < 送信側

Alternative Schedule Field を既に受理されている HCCA TXOP と衝突しない、かつ、実行中の ADDTS Request の TXOP とも衝突しない値にセット

受信側 > 送信側 :

Avoidance Request Field を受理されている HCCA TXOP とも、Alternative Schedule Field の TXOP とも衝突しない、かつ、実行中の ADDTS Request の要求に合わせて十分な Duration と Service Interval を持つ時間間隔にセットする。

表 2-4 HCCA TXOP Negotiation の動作

| | Status Code | Alternate Schedule Field | Avoidance Request Field |
|--|--|---|--|
| 衝突なし | 0 (“Success”) | - | - |
| 既存のスケジュールと衝突 | The TS schedule conflicts with an existing schedule; an alternate schedule is provided | 既に受理されているHCCA TXOPと衝突しないような時間期間を設定 | - |
| 処理中のADDTS Requestと衝突 MAC Address RA < TA | The TS should not be created because the schedule conflicts with an existing schedule... | 既に受理されているHCCA TXOPとも、処理中のADDTS RequestのHCCA TXOPとも衝突しないような時間期間を設定 | 処理中のADDTS Requestのスケジュール |
| 処理中のADDTS Requestと衝突 MAC Address RA > TA | The TS should not be created because the schedule conflicts with an existing schedule... | TXOP Advertisementのスケジュールと同じ | 既に受理されているHCCA TXOPとも、Alternate Schedule fieldで与えられているTXOPとも衝突しない時間期間 |

2.4. 802.11 無線 LAN のスループット算出[6]

802.11 無線 LAN の無線伝送レートは、802.11a, 802.11b では最大 54Mbps, 802.11b では最大 11Mbps である。ここで、1 対 1 通信であるユニキャスト通信を想定してスループットの理論値算出を測る。

データフレームを $Data$ [Byte], 802.11 無線 LAN の送信ビットレートを $Bitrate$ [Mbps] とすると、1 つのデータフレームを送信するには

$$\frac{Data \times 8}{Bitrate} \quad (2.7)$$

の時間だけかかる。また、データ送信完了後、MAC 層レベルでの ACK のパケット長を Ack [Byte] とすると、 Ack パケットを受信するのに

$$\frac{Data \times 8}{Bitrate} \quad (2.8)$$

の時間かかる。これより、1 つのパケットを送信するのにかかる周期 T は次式で表される。

$$T = \frac{Data \times 8}{Bitrate} + SIFS + \frac{Ack \times 8}{Bitrate} + DIFS + Backoff \quad (2.9)$$

この結果、スループットは以下の式で表される。

$$Throughput = \frac{Data \times 8}{T} \quad (2.10)$$

なお、バックオフ制御時間の平均は

$$DIFS + CWmin \times \frac{SlotTime}{2} \quad (2.11)$$

で表される。

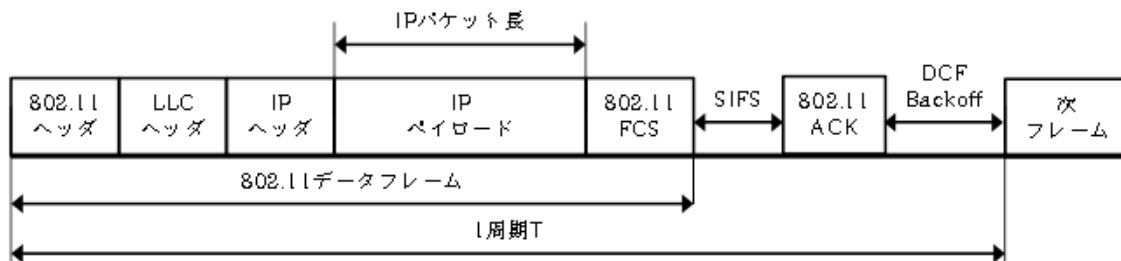


図 2-12 802.11 スループットの計算モデル

第3章 提案手法

1.1 で説明した，AP が乱立し，それに接続する端末が複数台存在する OBSS 環境下の場合，CSMA/CA 制御方式では，近接にある他セルからの干渉等によりスループットが低下してしまう．2.2.2 で説明した HCCA 制御方式を用いると，CSMA/CA での時間間隔 DIFS よりも短い SIFS 時間間隔でデータのやり取りを行うことができるため，特定のフローの QoS を保証することが可能となる．しかし，HCCA 制御のセルが複数存在し，その近接に CSMA/CA 制御のセルが存在する場合では，HCCA の QoS トラフィックに帯域を確保されてしまい，CSMA/CA 制御のセルのスループットが著しく低下してしまうことが考えられる．

OBSS 環境になりやすい駅や空港などでは公衆無線 LAN に加え，特にモバイルルーターやテザリングなどといった移動型セルがしばしば用いられている．移動型セルでは，AP と端末が十分近いことが想定され，そのような場合，キャプチャエフェクトの効果が期待される．そこで本章では，キャプチャエフェクトを積極的に活用した高効率な HCCA 制御方式を提案する．

3.1. キャプチャエフェクトとは

キャプチャエフェクトとは，より受信電波強度の強い端末が送信に成功する現象である．近接して存在する無線 LAN が互いにキャリアセンス検出されない，あるいは，同一の Backoff 時間待機などにより，フレームが同時送信されて，受信側で衝突が発生したにも関わらず，両方の無線 LAN とも，あるいは片方の無線 LAN のみでフレーム送信が成功することである．キャプチャエフェクトには干渉の仕方によって 2 種類に分けられる．

1) Stronger-first

より電波強度に強い信号が最初に到着する状況である．強い信号フレームが通常通りに受信され，シンボル同期が始まる．弱い干渉信号が後に到着するものの，キャプチャエフェクトにより強い信号の受信を妨げることなく，受信機からは単なるノイズと見なされる．

2) Stronger-last

より電波強度の強い信号が最後に到着する状況である．弱い信号のフレームが先に到着するためにシンボル同期が始まるものの，後に到着した強い信号フレームによって受信が失敗する．その結果，両方のパケットがロスする．しかし，後に届いた強い信号フレームのプリアンプルが正しく読み込まれる場合，受信機では新しい信号での再同期がなされる．

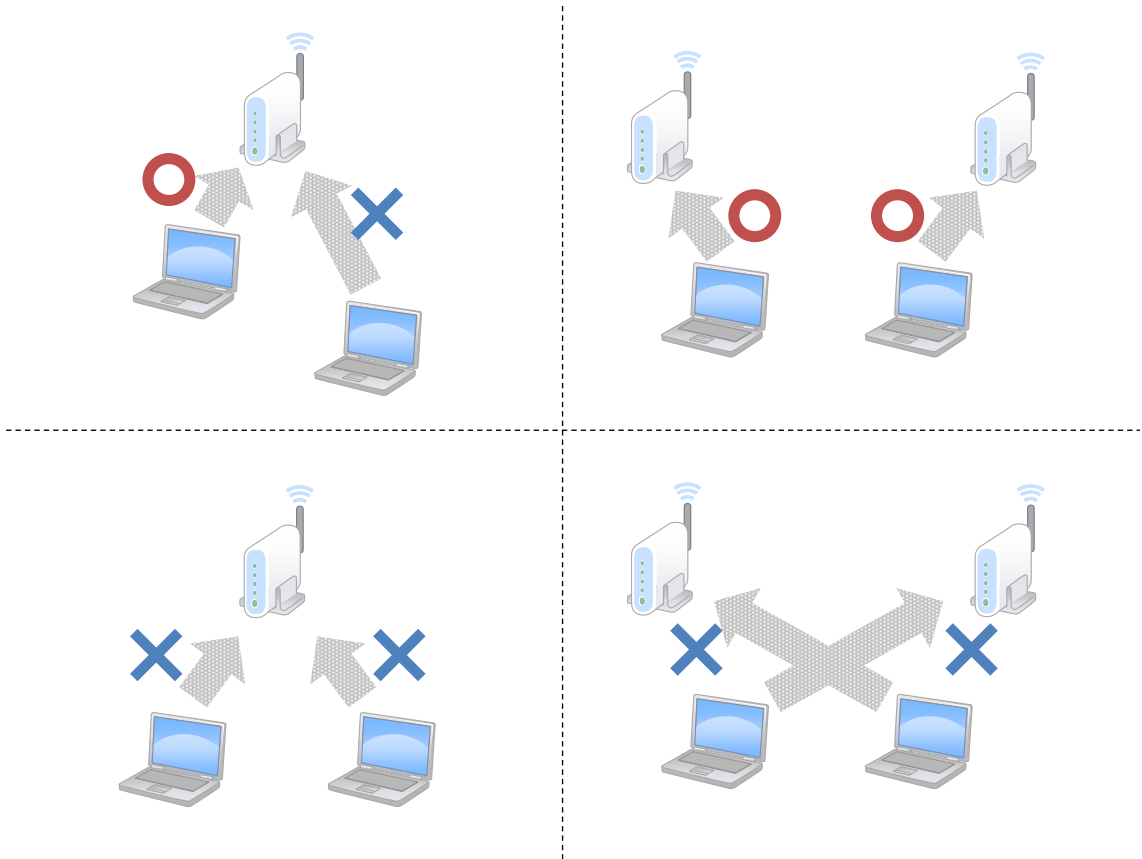


図 3-1 キャプチャエフェクト動作例

3.2. 提案手法①: HCCA QoS 同士のキャプチャエフェクト活用手法

提案手法①として、HCCA 制御セルの QoS トラフィック同士のキャプチャエフェクト活用手法を提案する。本来、HCCA では、802.11aa で規定されている HCCA TXOP Advertisement と HCCA TXOP Negotiation 等の OBSS Management によって各無線 LAN セルの TXOP の割り当て期間が他セルと重複しないようにスケジューリングがなされている。このようにすることで、QoS トラフィックの通信時の干渉を抑え、通信品質の保証を行おうとしている。

しかし、OBSS 環境下においては HCCA 制御のセルのみならず、従来の CSMA/CA 制御セルも近在することが大いに考えられる。この場合、複数の HCCA 制御セルの QoS トラフィックが SI (Service Interval) の時間の大部分を占めてしまい、DCF トラフィックの通信機会が著しく低下してしまうことが考えられる。

そこで、HCCA の TXOP 期間を意図的に重複させることを考える。このようにすることで、Service Interval における CFP (Contention Free Period) の期間が短くなり、CP (Contention Period) に十分な時間を残すことができ、DCF トラフィックとの親和性が期待できる。

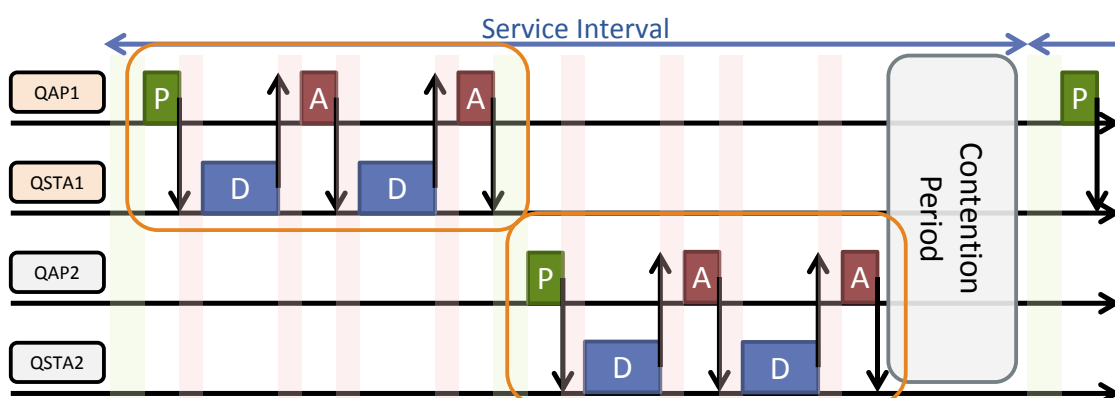


図 3-2 従来手法での複数 HCCA WLAN 存在時の動作

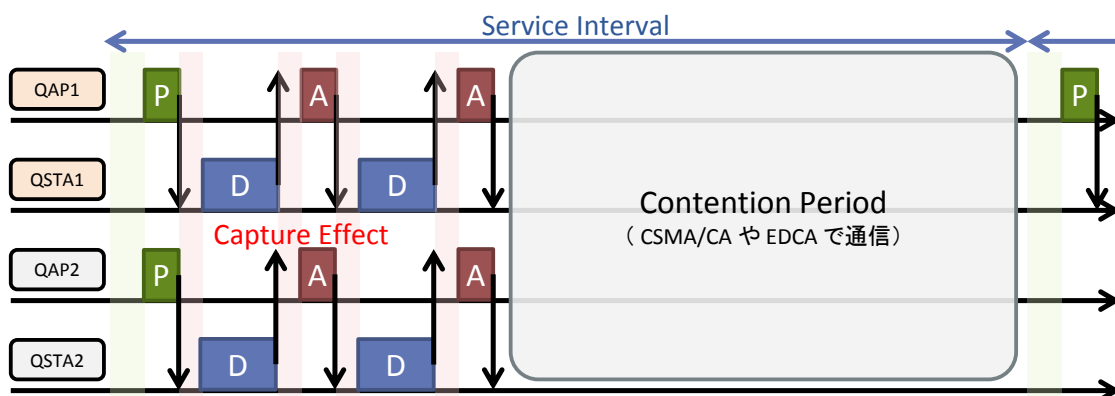


図 3-3 提案手法①での複数 HCCA WLAN 存在時の動作

具体的な TXOP スケジュール調整のための AP 間協調の流れとしては次に示すとおりである。基本的には TXOP Advertisement Frame と類似のシーケンス交換を行う。まず、HCCA 制御アクセスポイントの中で、最も MAC アドレスの小さい（あるいは最も大きい）HC (Hybrid Coordinator) を MHC (Master Hybrid Coordinator) とする。MHC は、周囲の HC に対して、TXOP スケジューリングの第一権限を持つ。HCCA が OBSS 環境下になった場合、HC は MHC に対して、Duration, Service Interval (SI), Start Time を記載した TXOP Advertisement Frame を送信する。TXOP Advertisement Frame を受信した MHC は、フレームに記載されている SI と自セルの SI との短い方に合わせて SI に対する TXOP Duration 割合が変わらないように自セルあるいは他セルの Duration 値を変換する。その後、TXOP Advertisement Frame の alternative schedule field に、Duration の値が自セルの値と最も近くなる TXOP タイミングにセットした TXOP Response Frame を送信する。

送り先の QAP が既に他の MHC の配下にある場合、その QAP はフレーム送信元に対して、既にスケジュールされている旨を告げる。フレーム送信元は、QAP からスケジュールされている旨を受信した場合、その QAP を除いて最も MAC アドレスの小さい HC に対して、同様に HCCA TXOP Advertisement Frame を送信する。

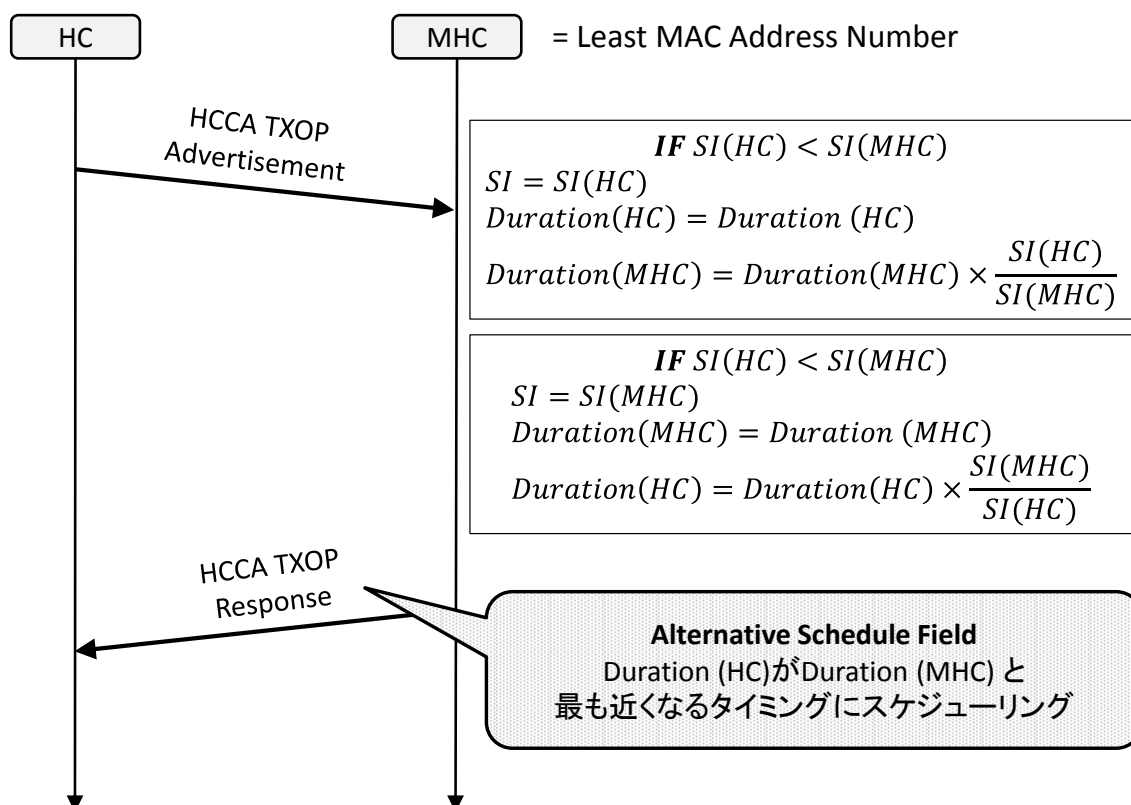


図 3-4 MHC の TXOP スケジューリング調整

MAC Address : MHC < HC1 < HC2

TXOP Ad : TXOP Advertisement

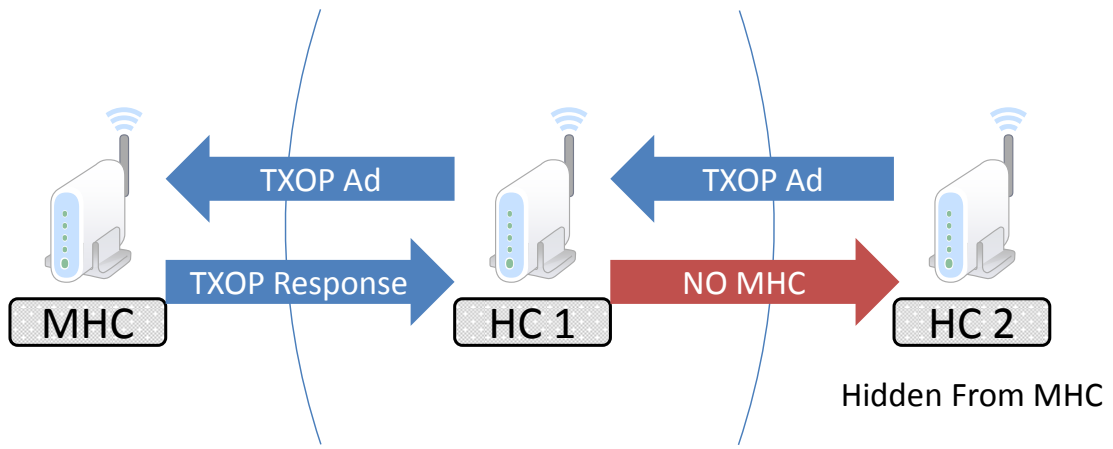


図 3-5 MHC が隠れ端末となる場合のシーケンス例

3.3. 提案手法②:

HCCA QoS と DCF とのキャプチャエフェクト活用手法

提案手法②では、HCCA の QoS トラフィックと他セルの DCF トラフィックとのキャプチャエフェクト活用手法を提案する。通常、HCCA の QoS トラフィックのデータ転送では、他の端末で用いられる DIFS よりも短い SIFS 時間間隔で行うことにより優先的に無線媒体を確保して QoS を保証しているが、ここでは、

$$SIFS \rightarrow DIFS + 1 \text{ SlotTime} \quad (3.1)$$

へ変更する。このことにより、本来、HCCA が独占的に無線媒体を占有していた部分で、意図的にパケット衝突を生じさせ、キャプチャエフェクト効果による通信を実現する。

この手法では、周囲の DCF トラフィックの CW (Contention Window) は、DIFS 時間待機後に 1 スロット分ずつ減っていくため、HCCA のトラフィックに対してある程度の QoS を保証できる。また、DCF 動作の端末数が多いほど、キャプチャエフェクトの機会が増えることが期待される。しかし、DCF 動作の端末数が多く、それらの CW が同じ値であった場合は、QoS トラフィックを主として考えると、ノイズが大きくなるためにキャプチャエフェクトが効きにくくなってしまう。

EDCA でも、CW の下限と上限を調節することにより、フレーム間待機時間を DIFS + 1 SlotTime に近い値にすることが可能であるが、セル内に複数の端末がある場合は、その端末のバックオフカウンターも QoS トラフィックのバックオフ待機とともに同時に消費されていくため、同セル内でのパケット衝突も生じてしまう。同一セル内でのパケット衝突は AP-端末間がほぼ等距離にあることが予想されるため、キャプチャエフェクトが効かずにパケットロスを引き起こしてしまう。しかし、今回の提案では、HCCA を用いるため TXOP の開始時に QoS CF-Poll フレームが送信されるので、同一セル内の端末には NAV (Network Allocation Vector) が設定され、仮想的キャリアセンスがなされる。そのため、同一セル内でのパケット衝突は起こらず、あるセルの QoS トラフィックと他のセルの DCF トラフィックとの衝突となるため、よりキャプチャエフェクトが効くことが期待される。

なお、提案手法②の場合はある程度の QoS を保証するため、802.11aa の OBSS Management にあるように TXOP が重複しないようにスケジューリングをする必要がある。

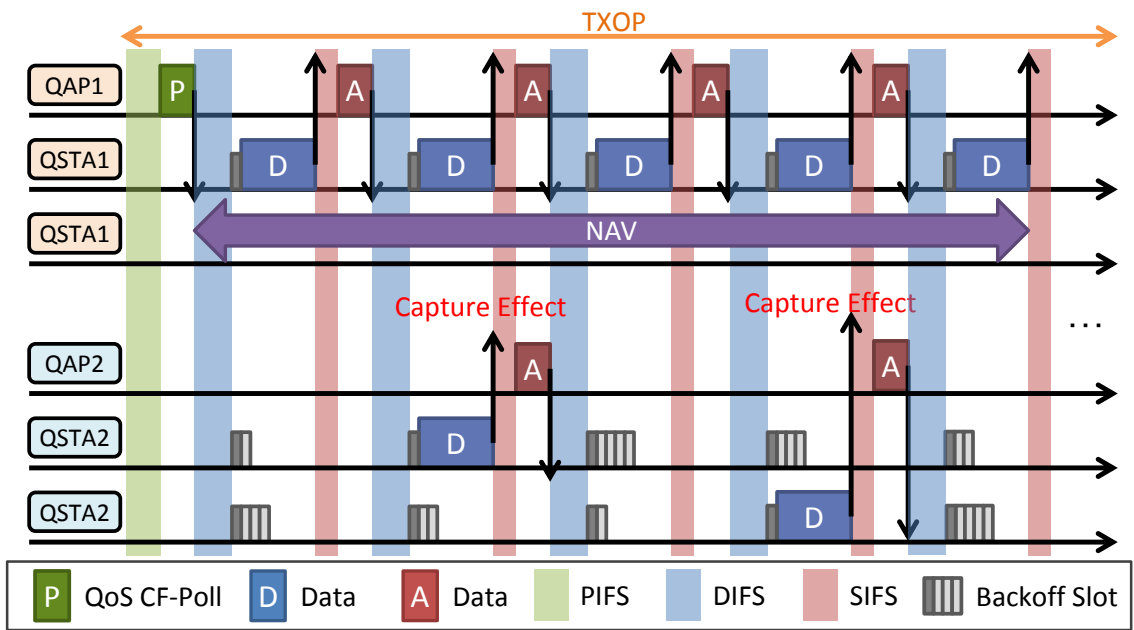


図 3-6 提案手法②での動作

第4章 評価実験

本章では, MadWifi を用いてキャプチャエフェクトの実機検証実験と, NS2 を用いて OBSS 環境下を想定した HCCA のシミュレーション評価実験を行った.

4.1. キャプチャエフェクトの実機検証

4.1.1. 実験概要

本項では, キャプチャエフェクトの実機検証のトポロジーや実験に使用した機器について説明する.

4.1.1.1. トポロジー

キャプチャエフェクト 2 台の端末から AP に対して iPerf[12]を用いてパケットを送信して衝突させ, 実機によるキャプチャエフェクトの検証を行った. 端末の無線 LAN ドライバには MadWifi[13]を用いた. フレーム送信前の Random Backoff を解除し, UDP トラフィックに No Ack Policy を適用した. このようにすることで, 2 台の端末の送信開始タイミングを合わせ, また, NAV や EIFS, 再送を考慮しないようにした. AP の近傍には AirPcap のアンテナを配置し, 飛んでいるパケットのキャプチャを行い, Wireshark による解析を行った. 実験トポロジーは図 4-1 に示すとおりである. パケット受信率を

$$Packet\ Reception\ Rate = \frac{src == Sender \ \&\& \ FCS\ true}{(src == Sender \ \&\& \ FCS\ true) + FCS\ False} \quad (4.1)$$

として計算した. FCS は False Check Sequence の略で, MAC ヘッダとフレームボディの誤り検出を行う. FCS が true ならそのフレームはエラーなく受信されていることを示し, false ならエラーが検出されたということを示す.

MadWifi については 4.1.1.2 にて, AirPcap については 4.1.1.3 にて説明する. その他機器は表 4-1 に示すとおりである

表 4-1 キャプチャエフェクト検証実験機器

| | |
|-----------------------|--|
| PC | Lenovo ThinkPad X60s Memory : 512MB CPU : Core 2 Duo |
| Wireless LAN PC Card | Corega WLCB54AG2 |
| OS | Ubuntu 12.04 LTS |
| Wireless LAN Driver | madwifi-0.9.4 |
| AP | Buffalo WHR-1750DHP2 |
| Wireless LAN Analyzer | AirPcap Nx |

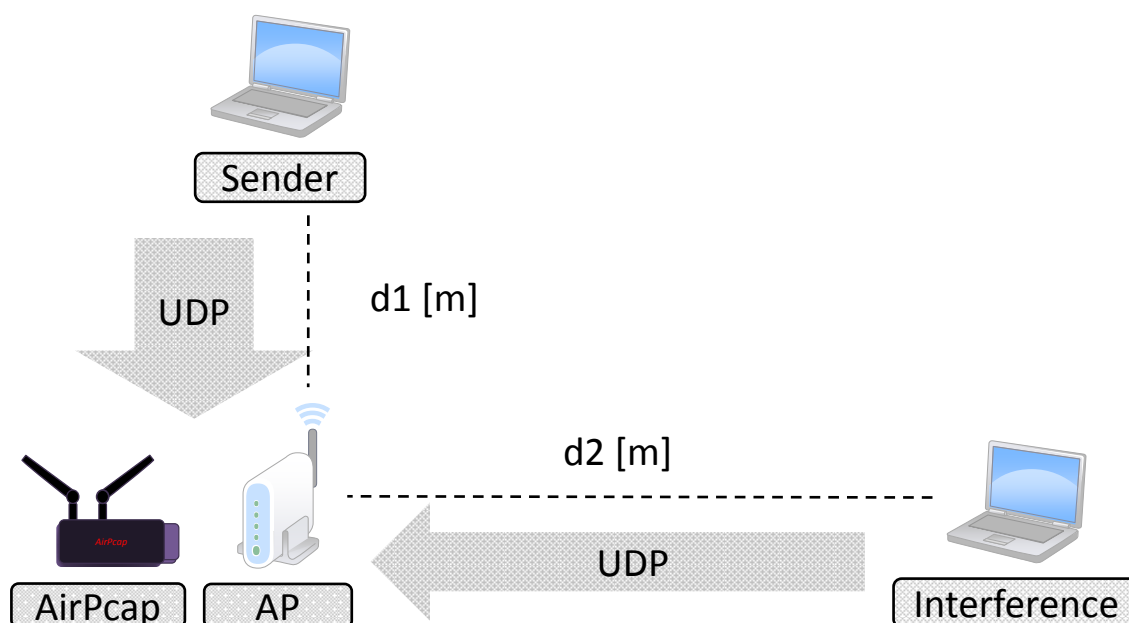


図 4-1 キャプチャエフェクト検証実験トポロジー

4.1.1.2. MadWifi [13]

MadWifiとはLinuxカーネルドライバ上で動作するAtherosチップ系のオープンソース無線LANドライバである。MadWifiのソースコードやMadWifiに含まれているHAL(Hardware Abstraction Layer)を変更することである程度任意のアクセス制御をさせることも可能である。また、MadWifiでは、WMM/WME(Wireless Multimedia / Wireless Multimedia Extensions) (≒EDCA)が実装されており、TOS(Traffic of Service)によってQoSの設定を行い、アクセスカテゴリー毎の優先制御を行うことが可能となっている。アクセスカテゴリーごとのMadWifiのデフォルトパラメータは、図4-2のようになっており、ターミナルから以下のコマンドによってパラメータの値を変更することができる。

```
$ iwpriv athX [cwmIn | cwmax | aifs | txoplLimit] [AC Number] [ 0 | 1 ] value
```

表 4-2 AC Number とアクセスカテゴリーの位置付け

| AC Number | Access Class Description |
|-----------|--------------------------|
| 0 | BE – Best Effort |
| 1 | BK – Back Ground |
| 2 | VI – Video |
| 3 | VO – Voice |

```
$ wlanconfig ath0 list wme
AC_BE cwmin 3 cwmax 10 aifs 2 txopLimit 2048
      cwmin 3 cwmax 10 aifs 2 txopLimit 2048
AC_BK cwmin 4 cwmax 10 aifs 7 txopLimit 0
      cwmin 4 cwmax 10 aifs 7 txopLimit 0
AC_VI cwmin 3 cwmax 4 aifs 1 txopLimit 3008
      cwmin 3 cwmax 4 aifs 2 txopLimit 3008
AC_VO cwmin 2 cwmax 3 aifs 1 txopLimit 1504
      cwmin 2 cwmax 3 aifs 2 txopLimit 1504
```

図 4-2 MadWifi のデフォルト QoS パラメータ

$cwmax$ や $cwmin$ の値は $2^n - 1$ として計算されている。例えば、 $AC=3$ の $cwmax$ では $n = 3 \rightarrow CWMax = 2^3 - 1 = 7$ といった具合である。 $aifs$ の値は IFS 時間の計算に用いられ、 $AIFS = SIFS + aifs \times SlotTime$ として計算され、フレーム送信前の待機時間に用いられる。

今回の実験では、意図的に 2 台の端末でパケット衝突を行わせるため、DCF のバックオフ制御を解除する必要がある。そのため、WMM/WME の $cwmax$ と $cwmin$ ともに 0 に設定、その他 $aifs$, $txoplLimit$ も 0 に設定し、バックオフを行わないように試みた。干渉の少ない 802.11a での UDP トラフィック、伝送レート 54Mbps でスループットを計測したところ、図 4-4 のようになった。図 4-3 には、参考としてデフォルトパラメータのままの各アクセスカテゴリーの UDP スループットを示している。図 4-4 にて、ALL 0 となっているものが、すべてのパラメータを 0 に設定したものであるが、ALL 0 のスループットは、VI や VO のデフォルトのスループットよりも低い値になってしまっていることが確認できる。VI や VO のデフォルトでは、ある程度の長さの TXOPLimit が設定されており、この TXOP の間は SIFS 時間間隔でデータのやり取りを行う。ALL 0 では $cwmin, cwmax = 0$ によりバックオフなし、 $aifs = 0$ により SIFS 時間間隔のフレーム間待機になると予想されるので、VI や VO と同等

あるいは高いスループットを示すはずであるが、結果からはそのようにならなかった。これは、`cwmin` や `cwmax` にコマンドから 0 を設定しても、バックオフがなされてしまっていることによるものである。

別の方法として、MadWifi に定義されるフラグを用いて、ソースコードの変更を行った。具体的には、`madwifi-*/ath/if_ath.c` の `ath_txq_setup` 関数内に `HAL_TXQ_BACKOFF_DISABLE` というフラグを追加し（以下を参照）、MadWifi を通して送信されるすべてのパケットにおいて、バックオフを行わないように設定した。再び、この MadWifi のソース変更後の動作確認のため、UDP スループットを計測した。その結果が図 4-5 である。aifs を 0、txoplimit を 8192 に設定したものと、aifs、txoplimit をともに 0 に設定したものがほぼ同じスループットを示していることから、TXOP でない場合でも正しく SIFS 間隔でデータが転送されているであろうことが確認できる。

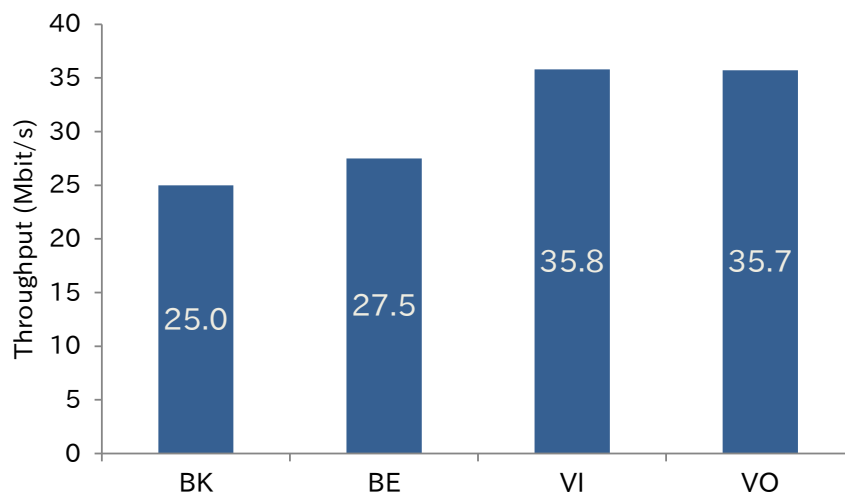


図 4-3 Default パラメータの UDP スループット

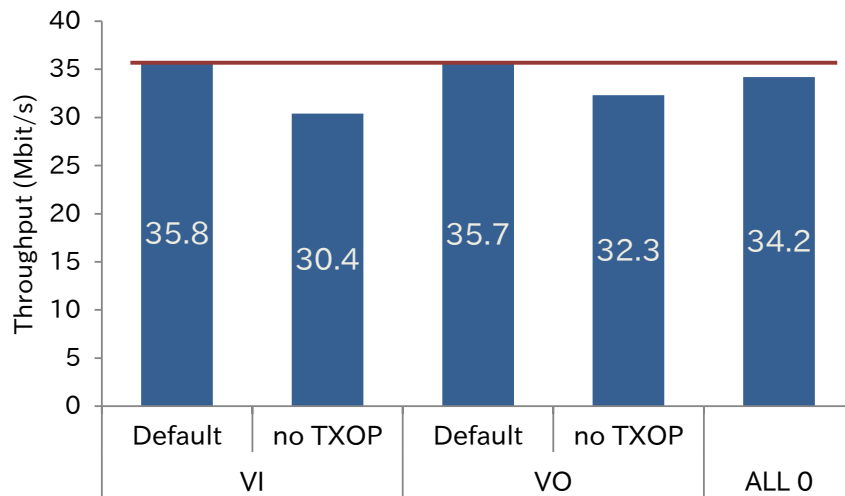


図 4-4 VI & VO (Default と no TXOP) と ALL 0 設定の UDP スループット

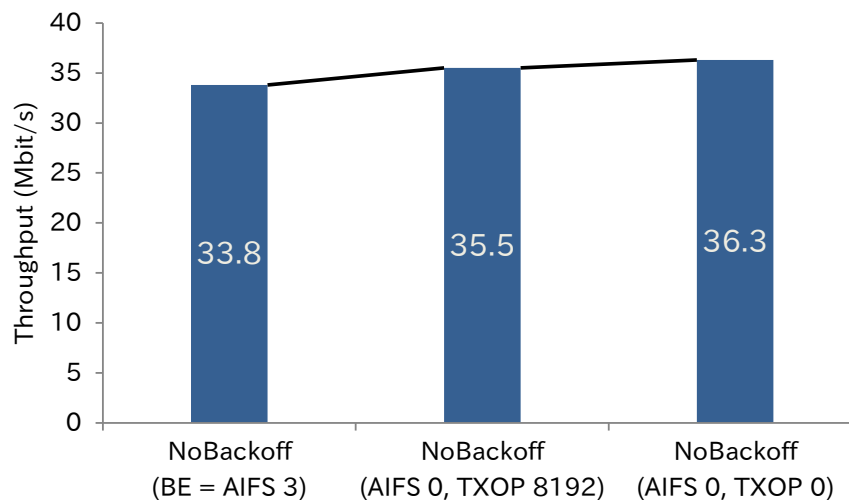


図 4-5 Backoff なしの UDP スループット

4.1.1.3. AirPcap [14]

AirPcap とは、802.11a/b/g/n 無線 LAN コントロールやデータを解析するために開発された USB 無線 LAN アダプタである。通常の無線 LAN アダプタでは解析できないコントロール・マネージメントプロトコルなど、MAC レベルでキャプチャが可能となっている。AirPcap には Wireshark の画面から各種パラメータの設定が行えるようになるドライバが付属しており、Wireshark 上から容易に扱うことができる。

また、AirPcap では 802.11 Only, 802.11 frame + Radio, 802.11frame + PPI (Per-Packet Information) ヘッダの 3 つからキャプチャタイプを選べるようになっており、PPI と Radio には 802.11 フレームにはない転送レートや・シグナルパワー、シグナルクオリティ、チャンネル・マルチチャンネル情報などの情報が含まれている。今回の実験では、キャプチャタイプを 802.11frame + PPI に設定し、AirPcap により送信器や干渉器からのフレームの受信信号

電力を記録した。



図 4-6 AirPcap 外観図[14]

4.1.2. 実験結果

MadWifi を用いた実機による伝送レート 54Mbps のキャプチャエフェクトの検証結果を図 4-7, 図 4-8, 図 4-9 に示す。図 4-7 は送信端末を AP から 30cm の位置に固定, 干渉端末を変動させたときの Sender のパケット受信率を示したものである。送信端末および干渉端末の送信出力はともに 0dBm としている。本来ならば AP-干渉端末の距離が遠くなるほど, 干渉端末からの信号電力は弱くなり, SIR 値が高くなっていくはずであるが, 今回の実験ではグラフが不規則な形状を示してしまっている。これは実験を長方形の室内で行ったことによる電波反射や周辺の無線 LAN からの干渉の影響ではないかと考えている。どちらにしろ SIR が高いほどパケット受信率も高い値を示す傾向にある。図 4-8 は送信端末が AP から 10cm あるいは 30cm, 干渉端末が 5m の位置に固定し, 干渉端末の送信出力を 0dBm に固定, 送信端末の送信出力を変動させたときのパケット受信率を示したものである。送信端末の送信出力が上がるほど SIR (Signal to Interference Ratio) が上昇し, パケットの受信率も高くなっていく傾向にあることが確認できる。図 4-9 の X 軸は SIR [dB] で送信端末の RSSI [dBm] から干渉端末の RSSI [dBm] を引いた値で示している。Y 軸はパケットがエラーなく受信される確率 (PRR : Packet Reception Rate) である。この実験結果から, 54Mbps では RSSI の差が 20dB を超えるところからキャプチャエフェクトの効果が表れることがわかる。

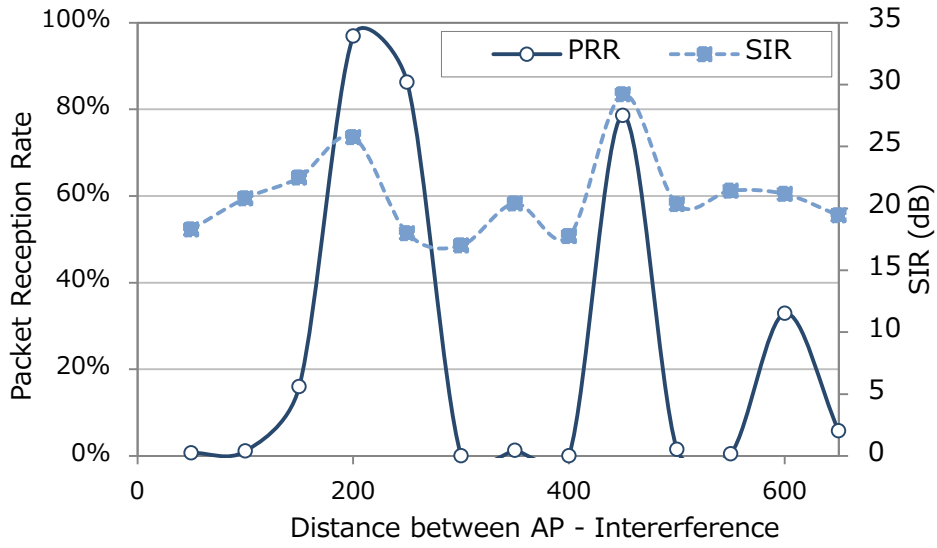


図 4-7 ノード間距離の変化におけるキャプチャエフェクトでのパケット受信率

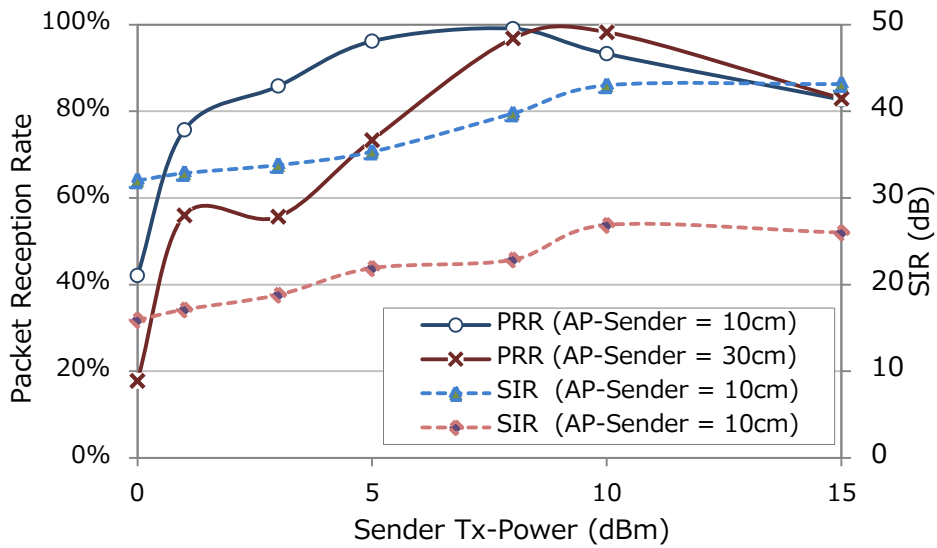


図 4-8 送信出力の変化におけるキャプチャエフェクトでのパケット受信率

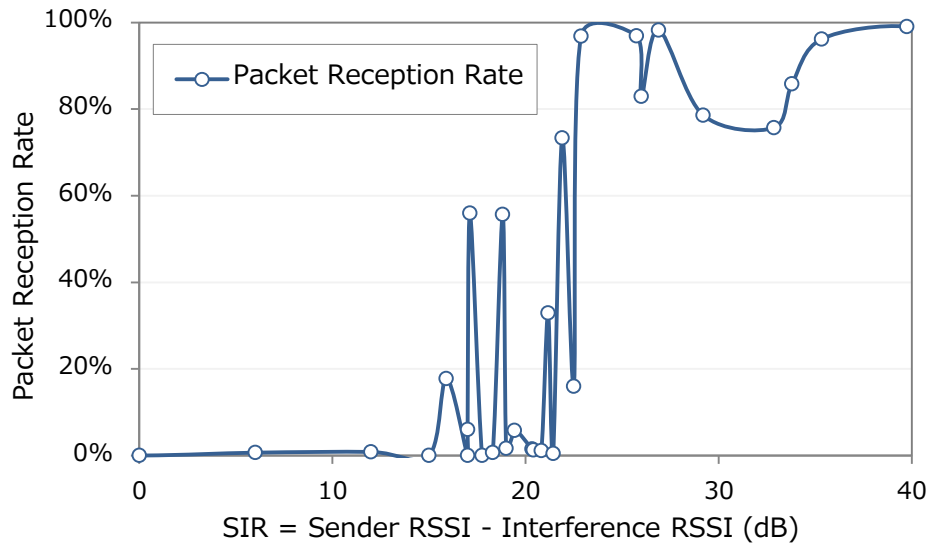


図 4-9 SIR における 54Mbps でのキャプチャエフェクトパケット受信率

4.2. OBSS 環境下を想定した無線 LAN のシミュレーション評価

4.2.1. 実験概要

OBSS 環境下を想定したシミュレーション評価を行った。シミュレータには HCCA 制御のためのパッチを適用した NS2[17] を用いて、さらにキャプチャエフェクトの NS デバッグを行った。

4.2.1.1. NS-2[17]

NS-2 とは、カリフォルニア大学バークレイ校で開発されたオープンソースのネットワークシミュレータである。NS-2 の 2 とはバージョン 2 を表す。C++ と Otcl で記述されたオブジェクト指向のイベントドリブン型シミュレータであり、シナリオを Otcl で記述し、その他根幹となるプロトコル部分は C++ で記述されている。通常、NS2 のシミュレーション結果はテキストファイル形式で得られるが、NAM を用いることでシミュレーション結果をアニメーション化し、パケットの動きを観察することができる。また、シミュレーションのみならず、実機と組み合わせたエミュレーションとしての利用もできる。

キャプチャエフェクトを考慮したパケット受信を行わせるため NS-2 のコード変更を行った。3.1 で示したようにキャプチャエフェクトには大きく 2 種類の分類がある。図 4-10 の左に示すような、始めに到着したフレーム (①で示すフレーム) の信号受信強度がその後に着したフレーム (②で示すフレーム) の信号受信強度よりもある程度以上大きかった場合に起こるキャプチャエフェクトは **Stronger First** と呼ばれ、反対に図 4-10 の右に示すような、後に到着したフレーム (②で示すフレーム) が初めに到着したフレーム (①で示すフレーム) の信号受信強度よりも大きい場合のキャプチャエフェクトは **Stronger Last** と呼ぶ。オリジナルの NS-2 では、**Stronger First** の場合のみキャプチャエフェクトが発生するとされており、**Stronger Last** の場合には、キャプチャエフェクトは発生されなかった。しかし、近年の無線 LAN チップには、チップ性能の向上により、パケット受信中においても、ある特定のレベル以上の信号が検出されたときには、受信中のパケットを中止し、新しいパケットの受信を始める MIM (Message in Message) モードが実装されている。そのため、NS-2 上でも **Stronger Last** の場合にもキャプチャエフェクトの効果が発揮できるようにコード変更を行った。

また、オリジナルの NS-2 では、パケットが同時に到着した際のキャプチャエフェクト判定時の受信信号電力の比較が、順次比較となっており、3 つ以上のパケットが同時に到着することが想定されていなかった (図 4-11 においてフレーム①と②と③が重複して到着する場合でも、フレーム①とフレーム②の比較後、信号電力の強い方のフレーム①とフレーム③との比較となっている)。そのため、3 つ以上のフレームがほぼ同時に到着した場合でも、

キャプチャエフェクトの判定を適切に行えるよう、図 4-11 の例では、フレーム①対フレーム②+③、フレーム②対フレーム①+③、フレーム③対フレーム①+②との比較により最終的な受信パケットを決定するように新しく NoiseHandler というハンドラを定義した。NoiseHandler は、受信信号電力の合計値を保持しておき、パケットの受信終了時にハンドラが呼び出されると、そのパケットの信号電力が合計値から減算される仕組みである。これにより、適切なキャプチャエフェクトが行えるようになった。NoiseHandler に関するコード変更部分の一部を図 4-12 に示す。

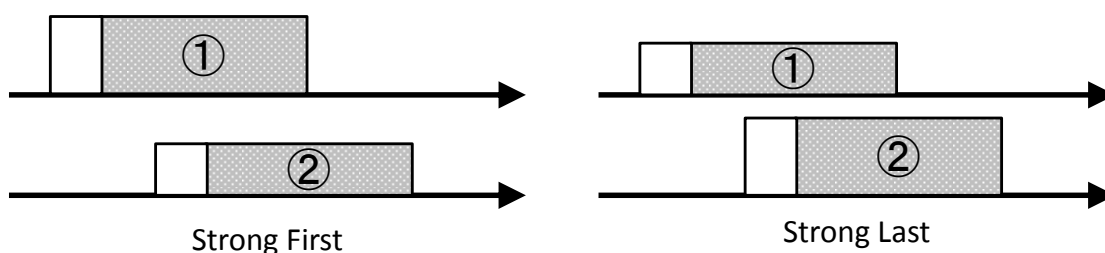


図 4-10 キャプチャエフェクトの分類

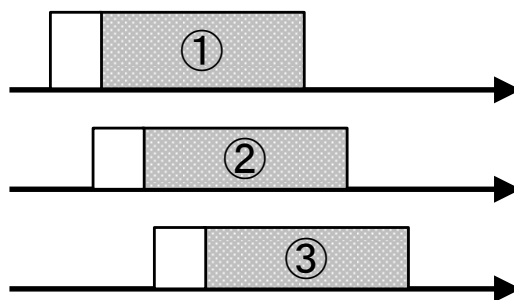


図 4-11 3つ以上のパケットの受信信号強度比較

なお、今回の実験では NS-2 で HCCA 制御を行わせるため、ピサ大学の開発した Ns2hcca[20] パッチを適用した。この拡張には 2.2.2.1 で説明した TXOP 参照スケジューラ "reference" と、アップリンクのみのアドミッションを行うスケジューラ "oneflow" が予め実装されている。本実験の本質に通信品質のネゴシエーションは関係ないため oneflow のコードを用い、TXOP 長が最大限まで長くとも TS (Traffic Stream)を受け入れるようにした。その他、[20]のパッチではポーリングフレームの再送やパケットドロップ時の挙動に不備があったため Bug Fix を行っている。

| | |
|---|---|
| mac-timers.cc void NoiseTimer::handle(Event *) | |
| 1 2 3 4 5 6 7 | <pre> busy_ = 0; paused_ = 0; stime = 0.0; rtime = 0.0; mac->noiseHandler(noisePr); noisePr = 0.0; </pre> |
| mac-timers.cc void NoiseTimer::start(double time, double Pr) | |
| 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 | <pre> Scheduler &s = Scheduler::instance(); assert(busy_ == 0); busy_ = 1; paused_ = 0; stime = s.clock(); rtime = time; noisePr = Pr; assert(rtime >= 0.0); if(DEBUG) fprintf(stderr,"start timer %p %.9f %.9f\n",this,stime,rtime); s.schedule(this, &intr, rtime); </pre> |
| mac-802_11.cc void rcv(Packet *p, Handler *h) | |
| 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 | <pre> NoiseTimer *pkt_mhNoise = new NoiseTimer(this); // Strong First if(pktRx_->txinfo_.RxPr / (p->txinfo_.RxPr + noiseRxPr) >= p->txinfo_.CPTthresh) { noiseRxPr += p->txinfo_.RxPr; pkt_mhNoise->start(txtime(p), p->txinfo_.RxPr); capture(p); // Strong Last } else if (p->txinfo_.RxPr / (pktRx_->txinfo_.RxPr + noiseRxPr) >= p->txinfo_.CPTthresh) { //printf("%.9f @node%d : Collision : lose %d (RxPr = %.3e, txtime = %.9f), win %d noiseRxPr += pktRx_->txinfo_.RxPr; pkt_mhNoise->start(mhRecv_.expire(), pktRx_->txinfo_.RxPr); capture(pktRx_); pktRx_ = p; mhRecv_.stop(); mhRecv_.start(txtime(p)); // Collision } else { noiseRxPr += pktRx_->txinfo_.RxPr; pkt_mhNoise->start(mhRecv_.expire(), pktRx_->txinfo_.RxPr); collision(p); } </pre> |

図 4-12 NoiseHandler ソースコード

4.2.1.2. シミュレーショントポロジー

評価実験でのシミュレーショントポロジーを図 4-13 に示す。WLAN は無線 LAN システムを示す。各 WLAN には 1 台の AP と 1 台の端末が存在し、端末から AP に対して伝送レート 54Mbps 固定で UDP の飽和トラフィックを流している。その他のシミュレーションパラメータは表 4-3 に示している。各 WLAN はグリッド状に配置し、各辺が等間隔となるように設置している。

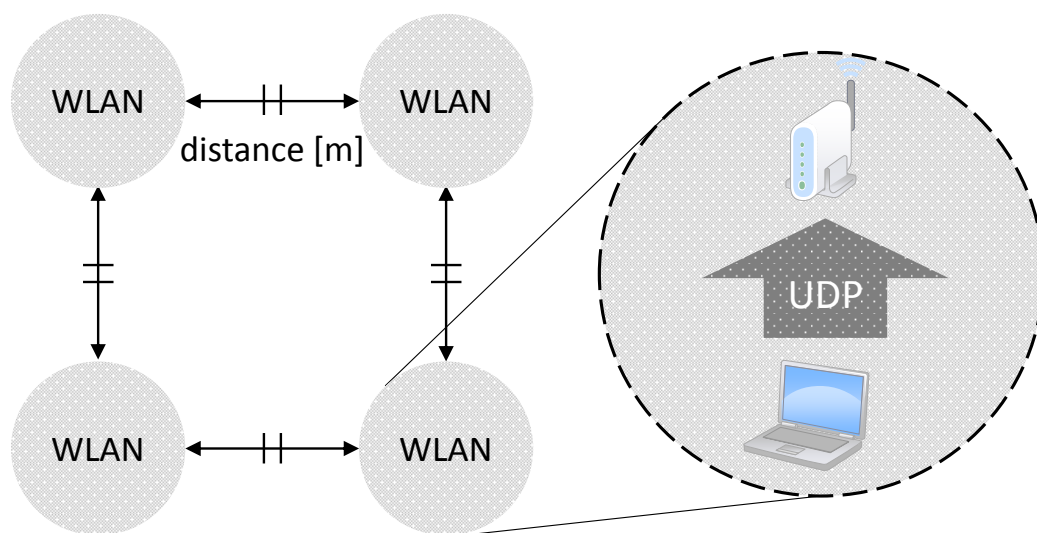


図 4-13 OBSS シミュレーショントポロジー

表 4-3 シミュレーションパラメータ

| Parameter | Value |
|--------------------------|-----------------|
| Frame Rate | 802.11g OFDM |
| Frequency | 2.412 GHz |
| Transmission Power | 10 mW (= 10dBm) |
| Propagation Model | Shadowing Model |
| Path Loss Exponent | 2.0 |
| Standard Deviation | 10 dB |
| Capture Effect Threshold | 100 (= 20dB) |
| RTS / CTS | off |
| HCCA Scheduler | oneflow |
| piggyback | off |

4.2.2. 実験結果

4.2.2.1. CFP および CP 期間内のデータ転送量比較

CFP (Contention Free Period) および CP (Contention Period) の期間ごとのデータ平均転送量を調査した。CFP は HCCA の TXOP により QoS トラフィックが転送される期間であり、CP は通常通りの DCF トラフィックが転送される期間である。CP 期間のデータ転送量は HCCA 動作セルの Non-QoS トラフィックだけでなく、近接にある CSMA/CA 動作セルの端末のトラフィックが通信可能なデータ量も意味する。

図 4-14 は CSMA/CA での無線 LAN (WLAN) 数 4, CFP/SI = 0.25 における CFP および CP 期間内の平均データ転送量を示している、なお、CSMA/CA 動作のため、CFP といった概念はないことから CP のみのデータ転送となっている。CSMA/CA では、それぞれの端末でチャンネルが空いていればランダム時間待って通信するため、WLAN 間距離が近い場合にはチャンネルをほぼ等分した値を示し、WLAN 間距離が遠くなっていくと他セルからの干渉が少なくなるために、WLAN 間距離に従って単調増加するグラフを描く。

図 4-15 では HCCA の従来手法 (802.11aa) の場合を示したものである。従来手法では、TXOP タイミングを他セルと重複しないようにスケジュールされることから、WLAN 間距離が近距離である場合にも、図中の CFP で示す QoS トラフィックが WLAN 間距離によらず一定の値を示すことから、QoS 保証がなされていることが確認できる。しかし、Non-QoS トラフィックのデータ通信が行われる CP 期間の通信を見ると、WLAN 間距離が著しく近い場合にはほぼ 0 となってしまうことが確認できる。これは TXOP タイミングが重複しないようにスケジュール調整がなされているがために、それぞれの WLAN の CFP で SI の大部分を占有してしまったためである。自セルが CP の期間中であったとしても、他のセルが CFP 期間中で HCCA TXOP 動作している場合、その TXOP に帯域が占有されてしまい、DCF は通信機会が与えられないことから、著しく低い転送量となっている。

図 4-16 は提案手法①の場合を示したものである。提案手法①では、CFP で示す QoS トラフィックがかなり劣化していることが確認できる。これは HCCA TXOP をキャプチャエフェクトにより通信させようとしたが、キャプチャエフェクトに必要な受信信号電力差に及ばず、キャプチャエフェクトがすべての AP あるいはいくつかの AP で失敗してしまった結果である。TXOP の多重度が高いほど QoS の大きな劣化が予想される。しかし、CP 期間内のデータ転送量は従来手法と比較しても高い値となっている。CP 期間内の転送量は HCCA の Non-QoS トラフィックを示すが、暗に周辺 DCF トラフィックの通信機会をも示すことになるので、提案手法①は近接 CSMA/CA セルとの親和性が高いと言える。

図 4-17 は提案手法②の場合を示している。CFP では従来手法ほどのデータ転送量となっていないものの、ある程度の QoS を保証していることが確認できる。また、WLAN 間距離が十分近い距離にある場合もほとんど QoS の劣化がほぼ見られない。従来手法よりもデー

タ転送量が低いのは、フレーム間待機を SIFS から DIFS + 1SlotTime に変更したことによる時間的オーバーヘッド増加が原因である。しかし、CP 期間のデータ通信量を見てみると、従来手法よりも早い段階から上昇していることが確認できる。これは、HCCA TXOP の DIFS + 1SlotTime の待機時間の際に、他セルの DCF トラフィックで 1Slot 分ずつ Backoff カウンターが減っていき、あるタイミングで HCCA TXOP とのキャプチャエフェクトによって通信できるためである。このことから、提案手法②では、提案手法①よりも HCCA QoS トラフィックの QoS を保証しつつ、従来手法よりも DCF トラフィックとの親和性が高いと言える。

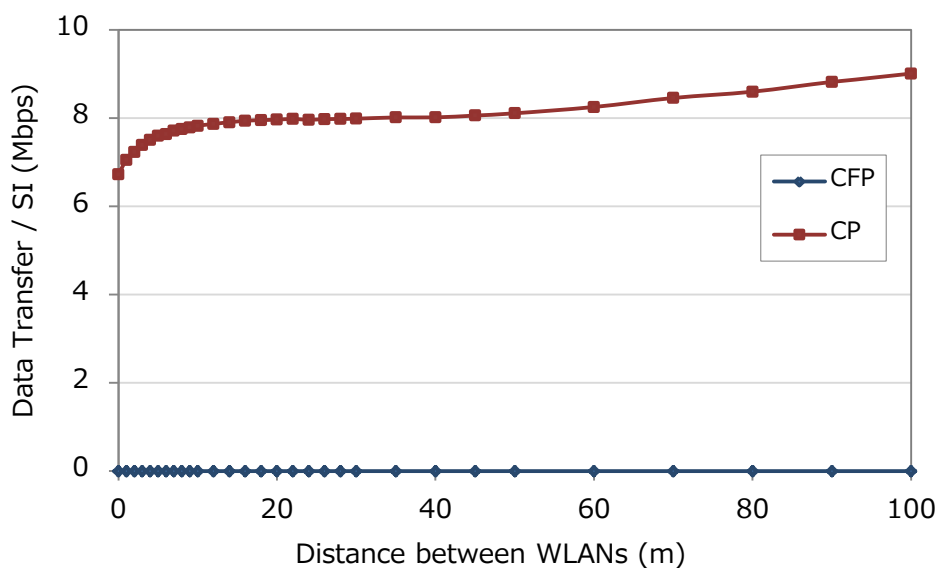


図 4-14 CSMA/CA の CFP および CP のデータ転送量(WLAN 数 4, CFP/SI 0.25)

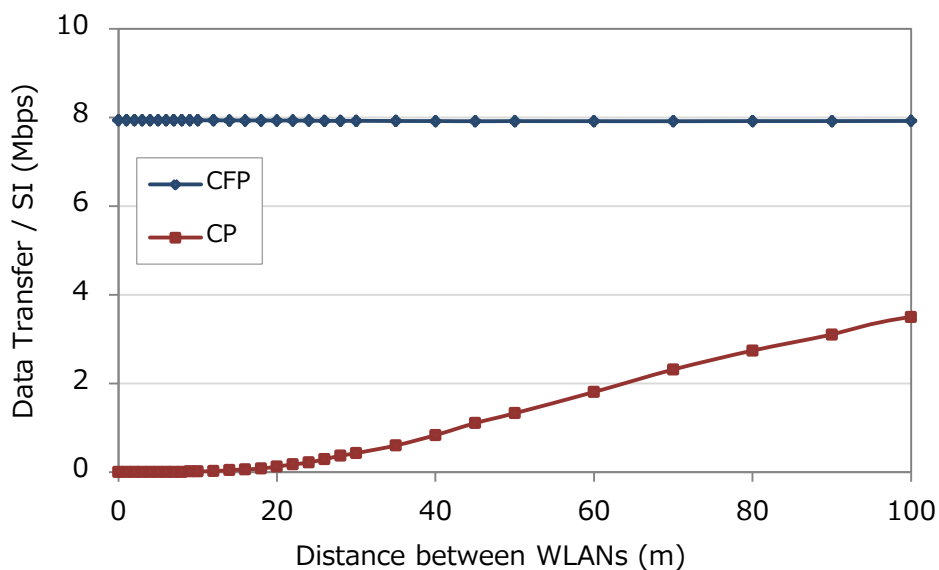


図 4-15 従来手法の CFP および CP のデータ転送量(WLAN 数 4, CFP/SI 0.25)

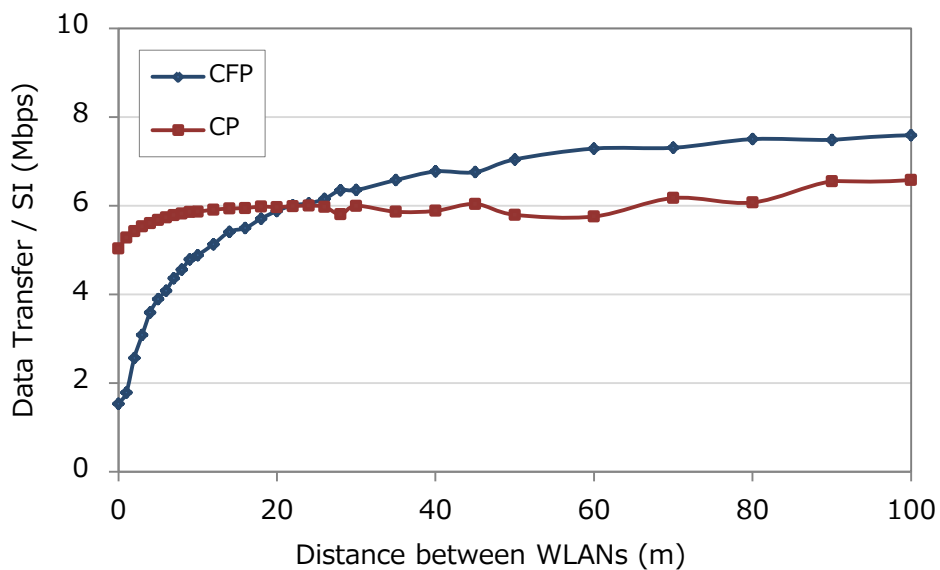


図 4-16 提案手法①の CFP および CP のデータ転送量(WLAN 数 4, CFP/SI 0.25)

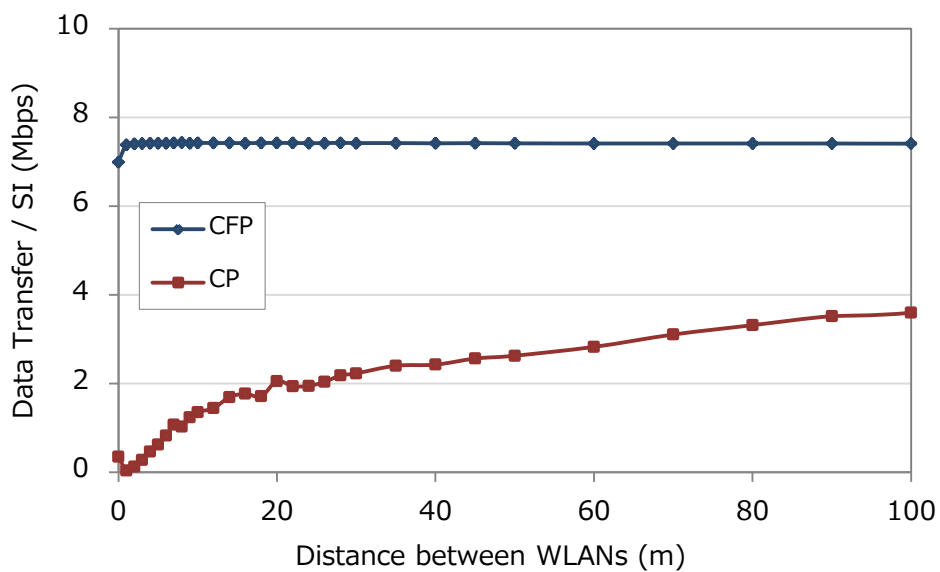


図 4-17 提案手法②の CFP および CP のデータ転送量(WLAN 数 4, CFP/SI 0.25)

4.2.2.2. 従来手法に対する提案手法のゲイン

提案手法①および②の、従来手法に対するトータルスループットのゲインを調査した。ゲインは従来手法に対する提案手法の比で、以下の式で算出している。ゲインは 1 を超えると提案手法のほうが有効、1 を下回ると従来手法のほうが有効となることを示す。

$$Gain = \frac{Proposal\ Total\ Throughput}{Legacy\ Total\ Throughput} \quad (4.2)$$

図 4-18 には無線 LAN 数が 2 の場合の提案手法①のゲインを、図 4-19 には同じく無線 LAN 数 (WLAN) が 2 の場合の提案手法②のゲインを示している。X 軸は WLAN セル間の距離、Y 軸は SI (Service Interval) に占める CFP (Contention Free Period) の割合、Z 軸は従来手法に対する提案手法のゲインを示している。

図 4-18 から、WLAN 数が 2 の場合、提案手法①は多くの場合で高いゲインを示していることから従来手法よりも有効であると言える。しかし、WLAN 間距離が極めて近い距離 (0 ~ 2m 程度) の部分では低いゲインを示してしまっている。これは、各 WLAN で TXOP によるフレームが同時に送信された際、WLAN 間距離が近いがために同時に受信した自セルからのフレームと、他セルからのフレームの信号受信強度に差が付かず、キャプチャエフェクトに必要な受信信号電力の比に達せず、パケットロスしてしまったためである。また、CFP / SI が低い値では、HCCA の TXOP による通信時間が短く、キャプチャエフェクトする機会も少ないために、従来手法との差がほとんどない状態となっている。

図 4-19 に示す提案手法②では、ほとんど提案手法の優位性は見られないことがわかる。提案手法②は HCCA の QoS トラフィックと DCF トラフィックとのキャプチャエフェクトであるが、WLAN 数が 2 のため、片方が HCCA QoS トラフィック通信を行っている間にキャプチャエフェクトにより通信する可能性のある DCF トラフィックが 1 つだけであり、キャプチャエフェクトによる通信が少なかったため、キャプチャエフェクトによる通信効率の上昇がフレーム間隔を SIFS から DIFS + 1SlotTime にしたことによる時間的オーバーヘッドの増加による効率低下を上回らなかったため、従来手法を下回る結果となった。

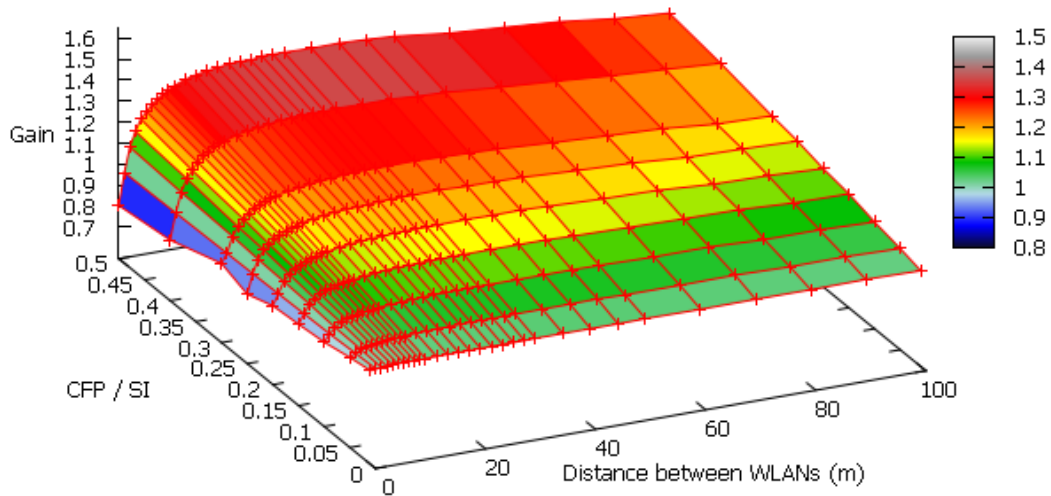


図 4-18 WLAN 数 2, 提案手法①のゲイン

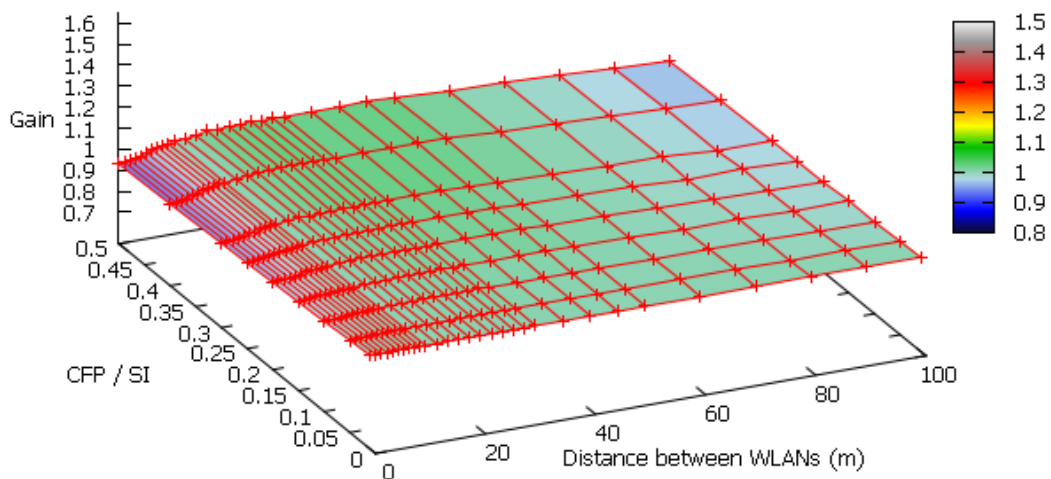


図 4-19 WLAN 数 2, 提案手法②のゲイン

図 4-20 には WLAN 数 4 における提案手法①のゲインを、図 4-21 には同じく WLAN 数 4 における提案手法②のゲインを示している。

図 4-20 から、CFP / SI が 0.25、WLAN 間距離が 20m 程度のところで最大 1.5 倍のゲインを示していることがわかる。WLAN 数が 4 の場合、従来手法では 4×0.25 (CFP) = 1 (SI) となるために CFP / SI が 0.25 の行で HCCA の TXOP のみで無線チャンネルを占有してしまっている。そのため、提案手法①と従来手法では最もスループットの差が出る結果となった。CFP / SI が 0.25 を超える部分では、従来手法でも完全に TXOP を重複せずにスケジュールすることが不可能であるので、提案手法①と同じように HCCA QoS トラフィック同士のキャプチャエフェクトが生じ、ゲインが 1 に近くなっていく。

図 4-21 に示す提案手法②では、提案手法①の場合と同じく CFP / SI が 0.25, WLAN 間距離が 20m 程度のところで最大 1.2 倍のゲインを示している。しかし、WLAN 間距離が離れると互いのキャリアが干渉しなくなり、SISF を DIFS + 1 SlotTime にしたことによる時間的オーバーヘッドによって、従来手法よりもスループットが下がってしまっていることも確認できる。

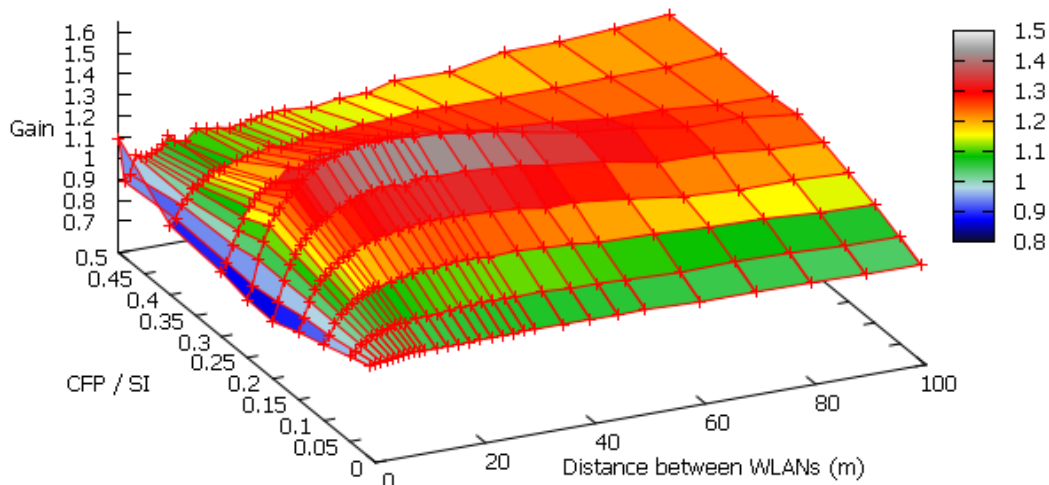


図 4-20 WLAN 数 4, 提案手法①のゲイン

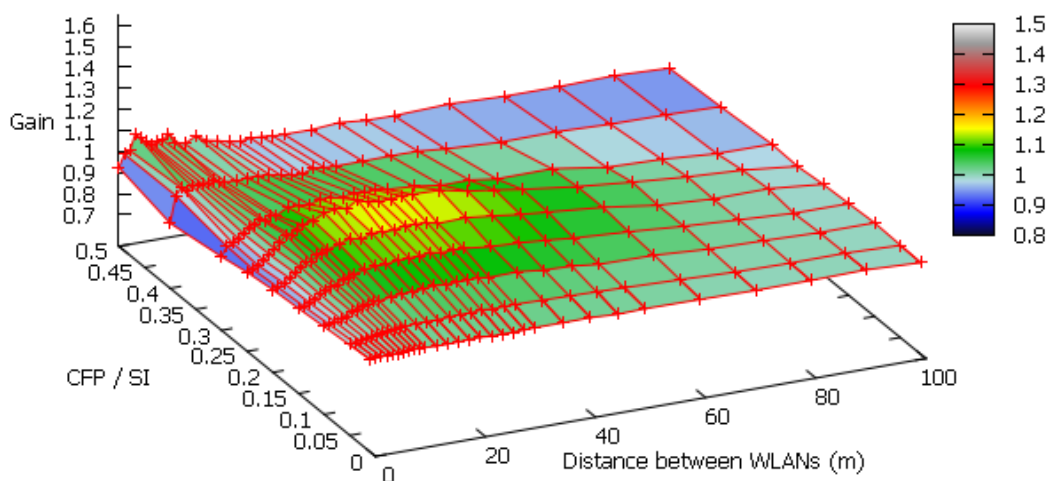


図 4-21 WLAN 数 4, 提案手法②のゲイン

図 4-22 には WLAN 数 9 の場合の提案手法①におけるゲインを、図 4-23 には同じく WLAN 数 9 の場合の提案手法②のゲインを示している。

図 4-22 より、提案手法①では CFP/SI が 0.1 程度のところで 1.5 倍以上の最大ゲインを示していることがわかる。この理由は WLAN 数 4 の図 4-20 のものと同様である。しかし、

図 4-20 と比べると局所的な最大ゲインは同様な値を示すものの、全体的なゲインでは図 4-22 のほうが低い値となってしまう。これは WLAN 数が増えたことにより HCCA の TXOP で同時に通信する台数が増えて、自セルからのフレームの受信信号強度に対する他セルからのノイズとなるフレームの受信信号強度の合計が大きくなってしまい、キャプチャエフェクト効果が発揮されず、正しく受信できなくなってしまったためである。

図 4-23 から、提案手法②のゲインのピークも提案手法①の場合と同じく CFP/SI が 0.1 程度、WLAN 間距離が 10m 程度の部分でおよそ 1.3 のゲインとなり、WLAN 数が 2 や 4 の場合よりも高い最大ゲインが出ていることがわかる。これは送信端末数が増えたことにより HCCA の QoS トラフィックとキャプチャエフェクトする機会が増えたためである。WLAN 間距離が離れると、WLAN 数 4 の場合と同様、「”キャプチャエフェクトによる通信効率向上” < ”時間的オーバーヘッド増加”」であるためにゲインが 1 を下回ってしまう。

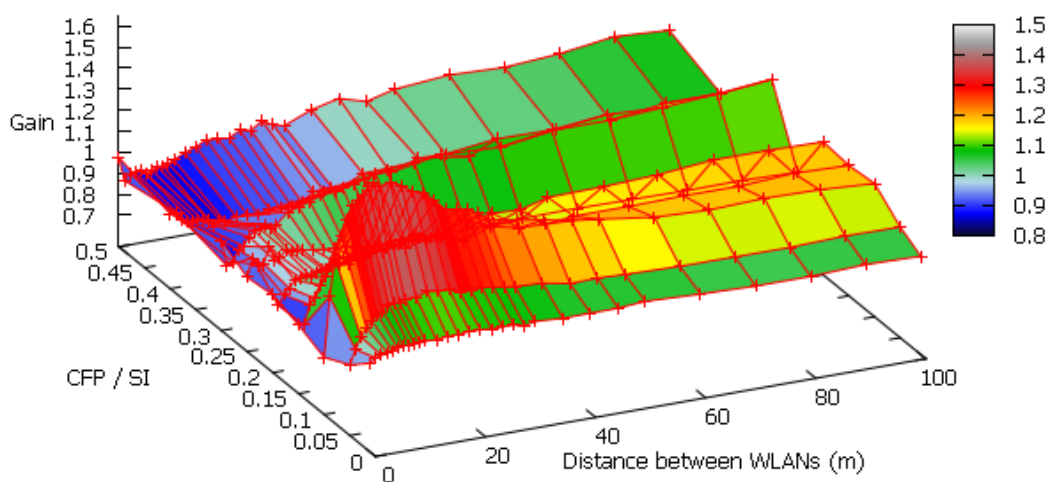


図 4-22 WLAN 数 9, 提案手法①のゲイン

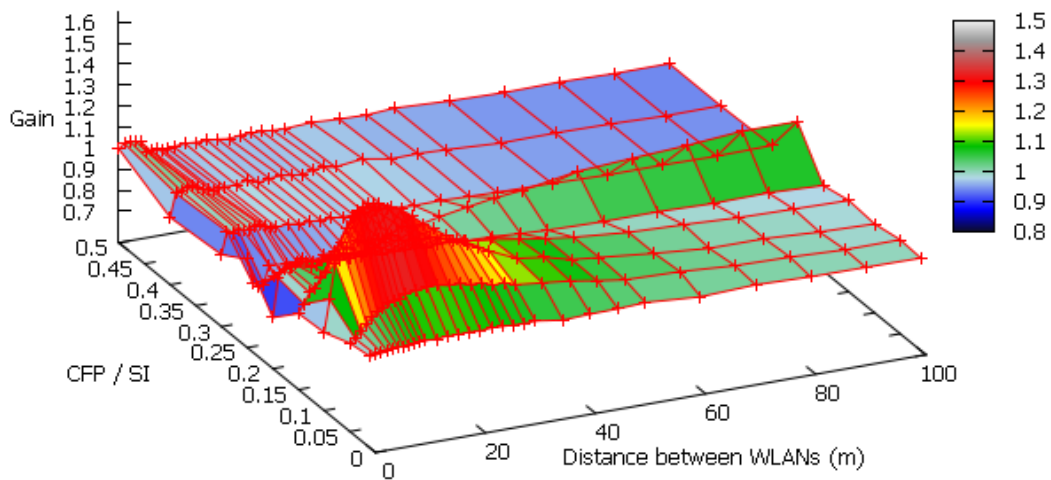


図 4-23 WLAN 数 9, 提案手法②のゲイン

図 4-24 には, WLAN 数 16 の場合における提案手法①のゲインを, 図 4-25 には同じく WLAN 数 16 の場合における提案手法②のゲインを示している。

図 4-24 より, 提案手法①による有効性はあまり示されておらず, 最大でも 1.2 倍ほどのゲインとなっていることが確認できる。特に CFP / CP が 0.05 以上かつ WLAN 間距離が十分近い 20m 以下の部分では, 0.8 程度のゲインとなり, 提案手法①が従来手法を著しく下回っている。提案手法では各 WLAN の端末計 16 台の TXOP タイミングがすべて同時であるため, 受信側で自セルからのフレームに対するノイズとなる他セルからのフレームの信号電力の合計値が大きくなってしまい, キャプチャエフェクトが効かなくなってしまう。一方, 従来手法では, TXOP タイミングが完全に独立ではなくなってしまうが, TXOP の開始タイミングが若干ずれているために 16 台で TXOP のタイミング重複するのではなく, 2 台や 3 台...といった台数で TXOP が重複するので, 提案手法①よりはフレーム同時受信時のノイズが小さくなり, その結果, キャプチャエフェクトが効いていると考えられる。提案手法でも, あまりに TXOP で同時送信する台数が多すぎる場合, そのスケジューリングタイミングを周辺の WLAN ですべて同時にするのではなく, 2 つ 3 つのグループに分けて, TXOP の多重数を減らしてやることで, 従来手法よりも高いゲインを示すことができると考えられる。ただ, WLAN 間距離が比較的遠い部分では, TXOP の多重度が高い場合でも各セルでキャプチャエフェクトが効くことから従来手法よりも高いスループットを実現している。

図 4-25 より, 提案手法②は CFP / CP が 0.05 程度, WLAN 間距離 20m 程度の部分で 1.3 ほどの高いゲインを示していることが確認できる。提案手法②では, HCCA の QoS トラフィックと DCF のトラフィックとのキャプチャエフェクトを活用するため, 周囲に動作する DCF トラフィック台数が増えるほどキャプチャエフェクトの機会が増えるが, WLAN 数

9の図 4-23 と比べると低いピークゲインとなっている。これは、DCF 動作する端末数が多すぎたために DCF トラフィック同士でもランダムバックオフ数と同じになり同時送信してしまった結果である。ピーク位置に関しても WLAN 数 9 が WLAN 間距離 10m のところに対し、WLAN 数 16 では 20m と、若干大きな値となっている。これも、DCF のランダムバックオフ数が同じ値となり、同時に送信がなされた際に、HCCA の QoS トラフィックとの衝突でそれぞれパケットロスしてしまっていたが、距離がある程度離れると、HCCA の QoS トラフィックと DCF 2 台でもキャプチャ効果が効くようになったためである。

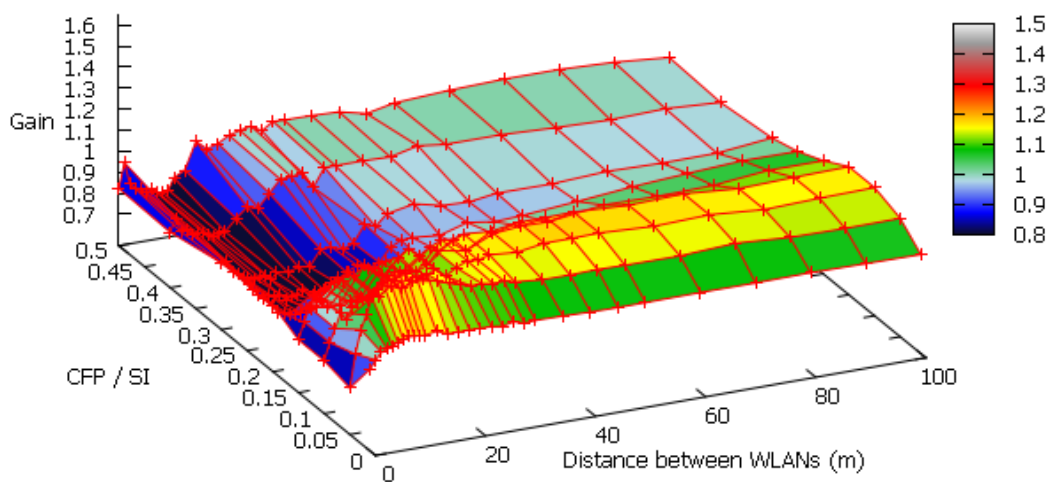


図 4-24 WLAN 数 16, 提案手法①のゲイン

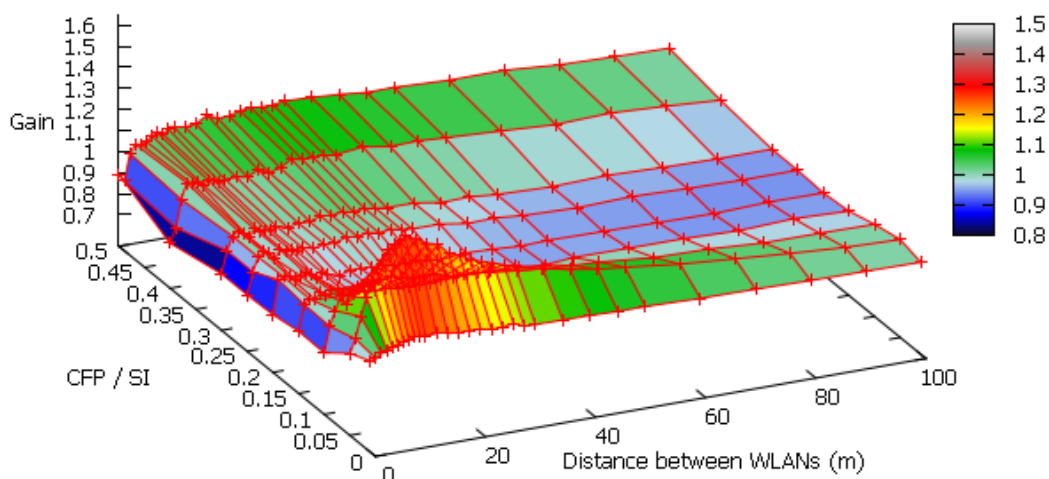


図 4-25 WLAN 数 16, 提案手法②のゲイン

4.2.2.3. DCF 動作端末が複数台の存在する場合における提案手法のゲイン

図 4-13 とほぼ同じトポロジーで、各無線 LAN (WLAN) の DCF トラフィック動作端末台数を増やしたときの従来手法に対する提案手法のゲインを調査した。ゲインは 4.2.2.2 で示したものと同一である。

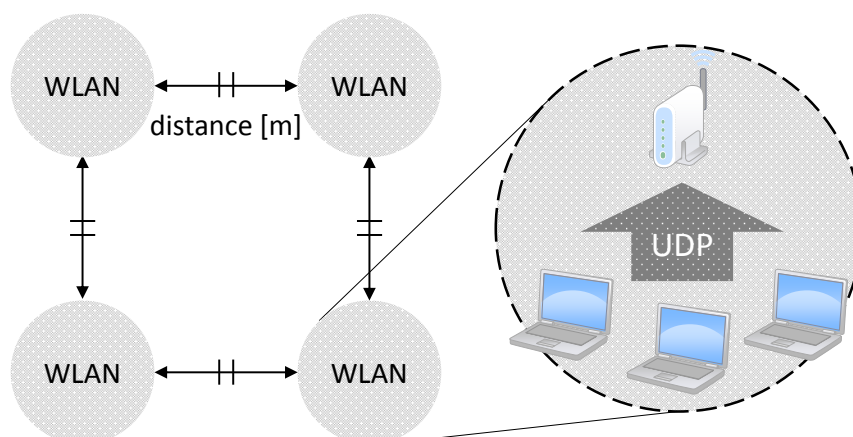


図 4-26 OBSS シミュレーショントポロジー2

WLAN 数 4 の場合における DCF トラフィック数を 1, 2, 3, 4 としたときの従来手法, 提案手法①, 提案手法②の $CFP/SI = 0.25$ のときのトータルスループットを図 4-27, 図 4-28, 図 4-29 に、従来手法に対する提案手法①および②のゲインを図 4-30～図 4-37 に示す。

図 4-30～図 4-33 では提案手法①のゲインを示しているが、提案手法①では、DCF トラフィックが多くなってもピークゲインはほとんど変わらないことがわかる。しかし、高いゲインとなる範囲は、DCF トラフィック数の増加に従い、狭くなっていくことも確認できる。これは、HCCA の TXOP トラフィックからの干渉が届くか届かないかの距離にある場合の DCF 同時の packet 衝突の問題でないかと考えられる。提案手法では、各 WLAN の TXOP のスケジュールを重複させることから CP の期間も重複し、例えば各 WLAN の DCF 端末数 4 では常に CP 期間中に 16 台の端末でキャリアセンスしながら通信を行うことになる。そのため、干渉や packet 衝突が頻繁に起こってしまう。一方、従来手法では、TXOP が重複しないようスケジュールするので CP 期間にもずれが生じ、例えば、各 WLAN の DCF 端末 4 台では 16 台の端末ではなく、8 台の端末によってキャリアセンスを行って通信をする時間が長くなるため、packet 衝突率が低くなるのではないかと考えられる。しかしながら、いずれにしろ、WLAN 数が 4 の場合、提案手法①は従来手法よりも高いゲインを示していることが言える。

図 4-34～図 4-37 で示す提案手法②のゲインは、DCF 動作台数が多くなるほど高くなっていくことが確認できる。図 4-29 を見ると、提案手法②では、WLAN 間距離が 10m 程度の小さい値から DCF 台数の増加により著しくスループットが増加していることが確認できる。従来手法を示す図 4-27 や提案手法①を示す図 4-28 では、WLAN 間距離が 20m を超

えるあたりでようやく DCF 端末数の増加によるスループット上昇が見られるため、この部分差異が提案手法②での DCF 端末数増加によるゲインの上昇へつながっている。他セルからの電波が確かに届く程度に WLAN 間距離が十分近い場合、従来手法や提案手法①では、DCF 動作端末数の増加によるキャプチャエフェクト機会の増加は CP 期間内ではかみられないが、提案手法②では CFP と CP 期間でともにキャプチャエフェクトの機会が増加する。特に、提案手法②の CFP 期間では、フレーム間待機時間が DIFS + 1SlotTime となっているために HCCA TXOP でフレームが転送される毎に、周囲のセルの DCF 動作端末では Backoff カウンターが1つずつ減ってゆく。そのため、端末数が多いほど Backoff カウンターの残りが1となり、HCCA TXOP 中のフレームと同時送信される確率が高くなり、その結果、キャプチャエフェクトによるスループットが上昇する。ただし、DCF 動作端末数が多くなりすぎると、他セルからのノイズが大きくなりキャプチャエフェクトが効かなくなることや、同セル内でのパケット衝突が起きてしまい（こちらは従来手法や提案手法①にも言えることではあるが）スループットが下がってしまうことが予想される。

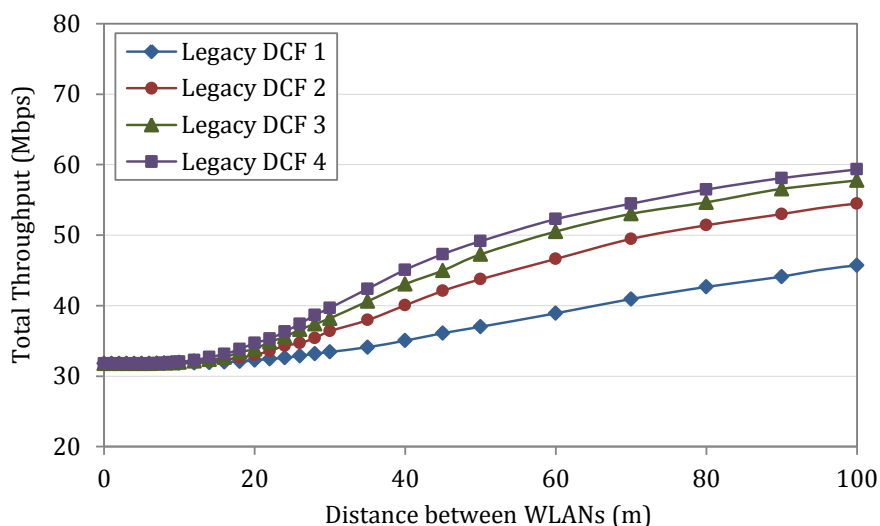


図 4-27 従来手法でのトータルスループット(WLAN 数2, CFP/SI = 0.25)

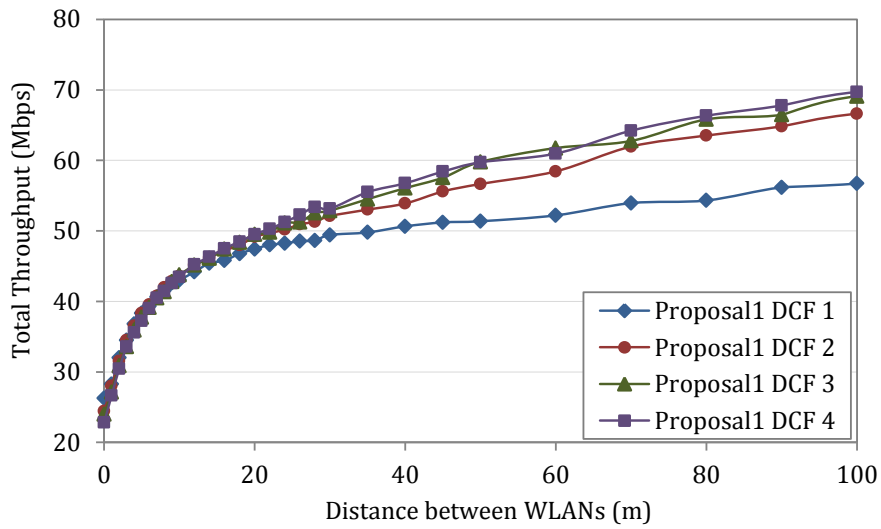


図 4-28 提案手法①でのトータルスループット(WLAN 数2, CFP/SI = 0.25)

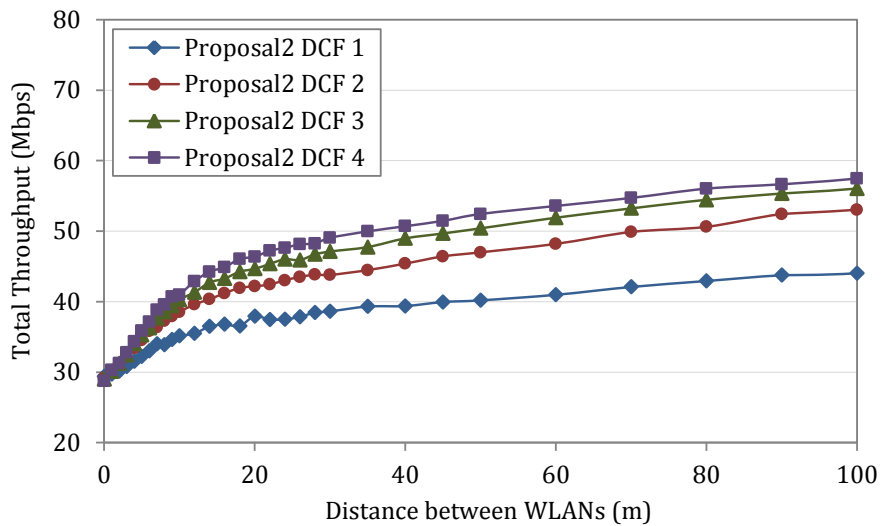


図 4-29 提案手法②でのトータルスループット(WLAN 数2, CFP/SI = 0.25)

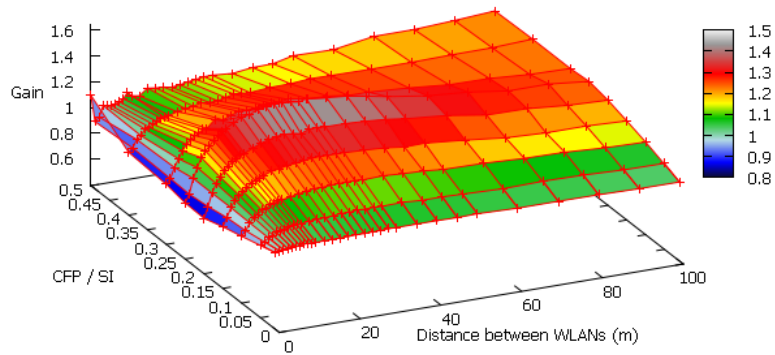


図 4-30 WLAN 数 4, 各 WLAN の DCF 数 1 における提案手法①のゲイン (図 4-20 と同じ)

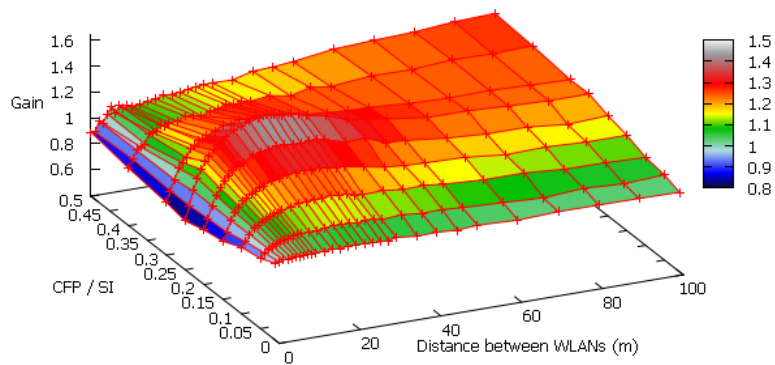


図 4-31 WLAN 数 4, 各 WLAN の DCF 数 2 における提案手法①のゲイン

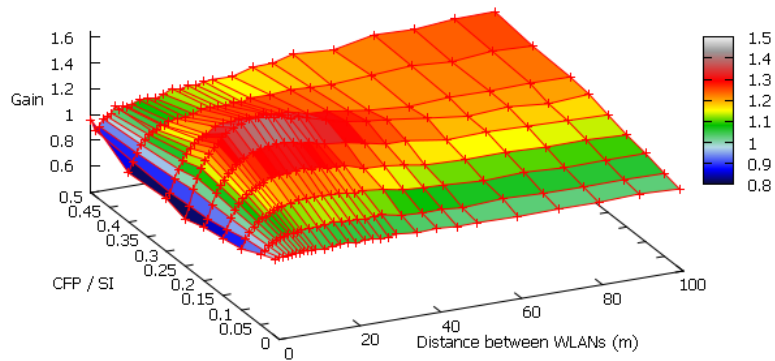


図 4-32 WLAN 数 4, 各 WLAN の DCF 数 3 における提案手法①のゲイン

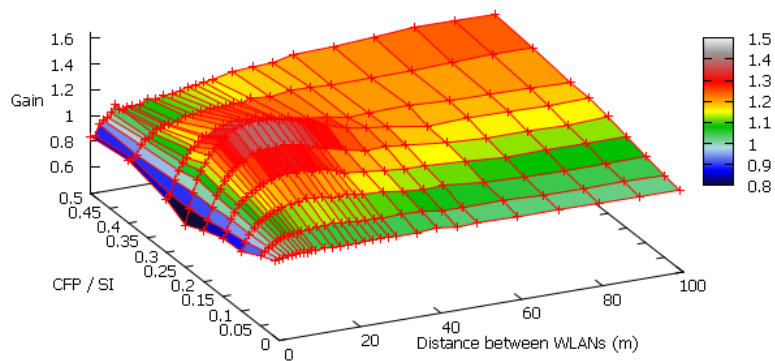


図 4-33 WLAN 数 4, 各 WLAN の DCF 数 4 における提案手法①のゲイン

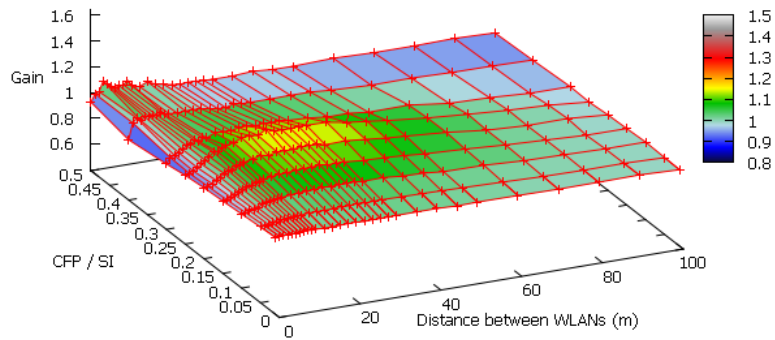


図 4-34 WLAN 数 4, 各 WLAN の DCF 数 1 における提案手法②のゲイン (図 4-21 と同じ)

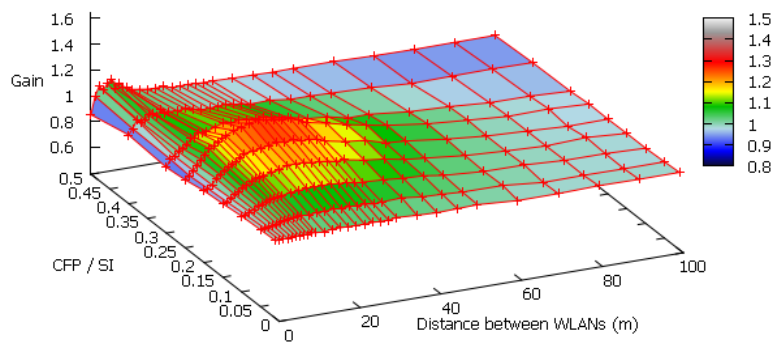


図 4-35 WLAN 数 4, 各 WLAN の DCF 数 2 における提案手法②のゲイン

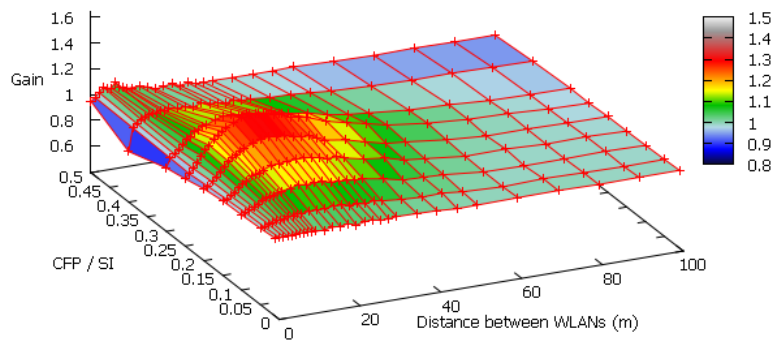


図 4-36 WLAN 数 4, 各 WLAN の DCF 数 3 における提案手法②のゲイン

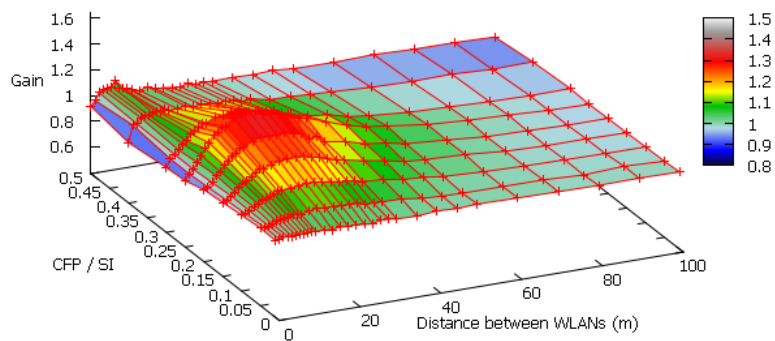


図 4-37 WLAN 数 4, 各 WLAN の DCF 数 4 における提案手法②のゲイン

第5章 総括

5.1. まとめ

本研究では、OBSS 環境下における解決アプローチとして HCCA 制御方式に着目し、キャプチャエフェクトを積極的に活用した HCCA アクセス制御方式の提案と、ネットワークシミュレータ NS-2 による特性評価を行った。シミュレーションでは HCCA の CFP および CP 期間に転送されるデータ量からどの程度 HCCA の QoS トラフィックの QoS を保証できているか調査し、また、従来手法と比較した提案手法のトータルスループットのゲインを調査した。HCCA の QoS トラフィックを厳格に保証したい場合には、TXOP のスケジューリング重複を避ける従来手法 (802.11aa) が有効であるが、ある程度の QoS 劣化が許容できる場合には提案手法②の HCCA QoS トラフィックと DCF トラフィックのキャプチャエフェクト活用手法が有効となった。QoS トラフィックの劣化を厭わない場合には、提案手法①の HCCA QoS トラフィック同士のキャプチャエフェクト活用手法を用いることで、高いトータルスループットを実現することができた。しかし、無線 LAN 数が多く、HCCA TXOP の多重度が大きすぎる場合にはキャプチャエフェクトが効かず、提案手法①の優位性が見られないので注意が必要となる。また、提案手法②では DCF 動作する端末数が多いほど、キャプチャエフェクトの機会が増え、提案手法①に近いトータルスループットを実現することも可能であった。

5.2. 今後の展望

本研究では HCCA を活用することキャプチャエフェクトを実現したが、HCCA 自体が IEEE802.11 の規格ではオプションとして定義されており、AP での実装が複雑なために、実際にはほとんど実装されていないのが現状である。そのため、HCCA 自体を実装し、実環境で評価を行うことが必要であろう。

また、今回のキャプチャエフェクトでの実験は IEEE802.11g を想定しており、帯域幅が 20MHz のみとなっているが、既に規格化されている 802.11n や次世代高速 Wi-Fi 規格の 802.11ac 等では、帯域幅を拡大することによって高速通信を実現しており、802.11n では 20MHz / 40MHz、802.11ac では 80MHz / 160MHz の帯域幅となっているので、これらを用いた際のキャプチャエフェクトの検証も必要である。

今回の提案手法では、他セルの無線 LAN からの受信信号電力の強弱によらず、ステイックな制御による評価を行ったが、周辺セルからのノイズ状況や TXOP 長などの情報からどの手法にするか動的に選択することで、最適な制御を行うことが可能である..

参考文献,

- [1]. Gartner, Press Release, : <http://www.gartner.com/newsroom/id/2954317>
- [2]. ICT 総研 2013 年度 公衆無線 LAN サービス利用者動向調査
<http://www.ictr.co.jp/report/20131219000054.html>
- [3]. IEEE P802.11- High Efficiency WLAN STUDY GROUP – METING UPDATE:
http://www.ieee802.org/11/Reports/hew_update.htm
- [4]. 浅井祐介, 井上保彦, 鷹取康司: ”IEEE 802.11 における無線 LAN 標準化動向”, NTT 技術ジャーナル, 2013.8
- [5]. V-P.Ketonen (7SIGNAL) : “IEEE802.11ax – High Efficiency WLAN (HEW) Standardization and Pontential Technologies”,
http://www.surf.nl/binaries/content/assets/surf/nl/2014/3-juni-2014_wi-fi-summit_veli-pekka-ketonen_802.11ax-overview.pdf
- [6]. 久保田周治, 守倉正博, 802.11 高速無線 LAN 教科書, インプレス R&D, 2006.
- [7]. IEEE Std 802.11 – 2007, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications.
- [8]. IEEE Std 802.11aa – 2012, Part11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, Amendment 2: MAC Enhancements for Robust Audio Video Streaming.
- [9]. J.Lee, W.Kim and S-J. Lee etc. :“An Experimental Study on the Capture Effect in 802.11a Networks”, WiNTECH’07, September 10, 2007
- [10]. 磯村美友, 三好一徳, 山口一郎, 熊谷菜津美, 村瀬勉, 小口正人, ”多数の無線 LAN における干渉とキャプチャエフェクト解析”, DICO2013, Septenmber. 2013
- [11]. 森内彩加, 村瀬勉, 小口正人, ”異種規格無線 LAN 近接時の特性解析”. DEIM2014, March. 2013
- [12]. iperf: <http://sourceforge.net/projects/iperf/les/iperf/2.0.4source/iperf-2.0.4.tar.gz/download>
- [13]. MadWifi: <http://madwifi-project.org/>
- [14]. AirPcap:
<http://www.riverbed.com/products/performance-management-control/network-performance-management/wireless-packet-capture.html>
- [15]. ビットリーブ株式会社, USB 無線 LAN プロトコルアナライザ AirPcap NX,
http://www.bitrieve.co.jp/products/lan_analyzer/131
- [16]. Wireshark: <http://www.wireshark.org/>
- [17]. NS-2, <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>
- [18]. 銭 飛, NS2 によるネットワークシミュレーション・実験で学ぶ QoS ネットワーク技術, 台北出版, 2006

- [19]. 須栗歩人, 詳解 Tcl/Tk GUI プログラミング, 秀和システム, 2000
- [20]. Ns2hcca Patch : <http://cng1.iet.unipi.it/wiki/index.php/Ns2hcca>
- [21]. C.Cicconetti, L.Lenzini, E.Mingozzi and G.Stea: “A Software Architecture for Simulating IEEE 802.11e HCCA” : http://cng1.iet.unipi.it/archive/ns2hcca/hcca_framework.pdf
- [22]. Ayaka Moriuchi, Tutomu Murase, Masato Oguchi, Akash Baid, Shweta Sagari, Ivan Seskar, and Dipankar Raychaudhuri: “Measurement Study of Adjacent Channel Interference in Mobile WLANs”, Proc. GBA2013 in ICC2013, Budapest, Hungary, June 2013.
- [23]. C.Thorpe and L.M : “A Survey of Adaptive Carrier Sensing Mechanisms for IEEE 802.11 Wireless Networks”, IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 16, March, 2014

謝辞

本研究を行うにあたり，日頃から研究に関して様々のご指導をいただきました甲藤二郎教授に心からの感謝の意を表します。また，研究を進める上で貴重なアドバイス，ご協力をして頂いた NEC クラウド研究所の村瀬勉様，甲藤研究室博士の金井謙治先輩をはじめ，研究面以外でも様々な面でお世話になりましたネットワーク班，ビジュアル班，オーディオ班の皆様に深く御礼申し上げます。

2015年2月6日

神田 正則

学会発表リスト

- [1]. 神田正則, 甲藤二郎, 村瀬勉, “HCCA 及び CSMA/CA アクセスポイント混在時の特性評価”, 無線 LAN QoS ワークショップ, 2014 年 2 月
- [2]. 神田正則, 甲藤二郎, 村瀬勉, “HCCA 及び CSMA/CA アクセスポイント混在時の特性評価”, 電子情報通信学会総合大会, 2014 年 3 月
- [3]. 神田正則, 金井謙治, 甲藤二郎, 村瀬勉, “OBSS 環境下におけるキャプチャエフェクトを活用した高効率 HCCA の提案”, 電子情報通信学会総合大会, 2015 年 3 月 (投稿済み)
- [4]. M.Kanda, J.Katto, K.Kanai and T.Murase: “A Proposal of HCCA utilizing Capture Effect for DCF-Friendly (仮)”, IEEE Globecom 2015, Dec.2015 (3 月投稿予定)

図表目次

| | |
|---|----|
| 図 1-1 国内無線 LAN モバイル出荷台数予測（出典：ICT 総研プレスリリース[2]より 図作成） | 4 |
| 図 1-2 国内公衆無線 LAN サービス利用者数予測（出典：ICT 総研プレスリリース [2]より図作成） | 4 |
| 図 2-1 キャリアセンスレベル | 7 |
| 図 2-2 IFS による優先制御の仕組み..... | 8 |
| 図 2-3 EIFS の内訳..... | 9 |
| 図 2-4 DCF の通信手順例 | 10 |
| 図 2-5 RTS/CTS を用いた CSMA/CA の通信手順..... | 11 |
| 図 2-6 PCF の動作手順例..... | 12 |
| 図 2-7 EDCA の優先度によるフローマッピングエラー! ブックマークが定義されて いません。 | |
| 図 2-8 HCCA 動作手順例..... | 16 |
| 図 2-9 TXOP Element..... | 16 |
| 図 2-10 QLoad Report element..... | 18 |
| 図 2-11 TXOP Advertisement のシーケンス例..... | 20 |
| 図 2-12 802.11 スループットの計算モデル..... | 22 |
| 図 3-1 キャプチャエフェクト動作例 | 24 |
| 図 3-2 従来手法での複数 HCCA WLAN 存在時の動作..... | 25 |
| 図 3-3 提案手法①での複数 HCCA WLAN 存在時の動作..... | 25 |
| 図 3-4 MHC の TXOP スケジューリング調整..... | 26 |
| 図 3-5 MHC が隠れ端末となる場合のシーケンス例 | 27 |
| 図 3-6 提案手法②での動作 | 29 |
| 図 4-1 キャプチャエフェクト検証実験トポロジー | 31 |
| 図 4-2 MadWifi のデフォルト QoS パラメータ | 32 |
| 図 4-3 Default パラメータの UDP スループット | 33 |
| 図 4-4 VI & VO (Default と no TXOP) と ALL 0 設定の UDP スループット..... | 34 |
| 図 4-5 Backoff なしの UDP スループット..... | 34 |
| 図 4-6 AirPcap 外観図[14]..... | 35 |
| 図 4-7 ノード間距離の変化におけるキャプチャエフェクトでのパケット受信率..... | 36 |
| 図 4-8 送信出力の変化におけるキャプチャエフェクトでのパケット受信率..... | 36 |
| 図 4-9 SIR における 54Mbps でのキャプチャエフェクトパケット受信率 | 37 |
| 図 4-10 キャプチャエフェクトの分類 | 39 |
| 図 4-11 3つ以上のパケットの受信信号強度比較..... | 39 |

| | | |
|--------|--|----|
| 図 4-12 | NoiseHandler ソースコード | 40 |
| 図 4-13 | OBSS シミュレーショントポロジー | 41 |
| 図 4-14 | CSMA/CA の CFP および CP のデータ転送量 (WLAN 数 4, CFP/SI 0.25) ... | 43 |
| 図 4-15 | 従来手法の CFP および CP のデータ転送量 (WLAN 数 4, CFP/SI 0.25) | 43 |
| 図 4-16 | 提案手法①の CFP および CP のデータ転送量 (WLAN 数 4, CFP/SI 0.25) .. | 44 |
| 図 4-17 | 提案手法②の CFP および CP のデータ転送量 (WLAN 数 4, CFP/SI 0.25) .. | 44 |
| 図 4-18 | WLAN 数 2, 提案手法①のゲイン | 46 |
| 図 4-19 | WLAN 数 2, 提案手法②のゲイン | 46 |
| 図 4-20 | WLAN 数 4, 提案手法①のゲイン | 47 |
| 図 4-21 | WLAN 数 4, 提案手法②のゲイン | 47 |
| 図 4-22 | WLAN 数 9, 提案手法①のゲイン | 48 |
| 図 4-23 | WLAN 数 9, 提案手法②のゲイン | 49 |
| 図 4-24 | WLAN 数 16, 提案手法①のゲイン | 50 |
| 図 4-25 | WLAN 数 16, 提案手法②のゲイン | 50 |
| 図 4-26 | OBSS シミュレーショントポロジー 2 | 51 |
| 図 4-27 | 従来手法でのトータルスループット (WLAN 数 2, CFP/SI = 0.25) | 52 |
| 図 4-28 | 提案手法①でのトータルスループット (WLAN 数 2, CFP/SI = 0.25) | 53 |
| 図 4-29 | 提案手法②でのトータルスループット (WLAN 数 2, CFP/SI = 0.25) | 53 |
| 図 4-30 | WLAN 数 4, 各 WLAN の DCF 数 1 における提案手法①のゲイン (図 4-20 と同じ) | 54 |
| 図 4-31 | WLAN 数 4, 各 WLAN の DCF 数 2 における提案手法①のゲイン | 54 |
| 図 4-32 | WLAN 数 4, 各 WLAN の DCF 数 3 における提案手法①のゲイン | 54 |
| 図 4-33 | WLAN 数 4, 各 WLAN の DCF 数 4 における提案手法①のゲイン | 54 |
| 図 4-34 | WLAN 数 4, 各 WLAN の DCF 数 1 における提案手法②のゲイン (図 4-21 と同じ) | 55 |
| 図 4-35 | WLAN 数 4, 各 WLAN の DCF 数 2 における提案手法②のゲイン | 55 |
| 図 4-36 | WLAN 数 4, 各 WLAN の DCF 数 3 における提案手法②のゲイン | 55 |
| 図 4-37 | WLAN 数 4, 各 WLAN の DCF 数 4 における提案手法②のゲイン | 55 |
| 表 1-1 | モバイル出荷台数予測 (出典: ガートナープレスリリース[1]より作成) | 4 |
| 表 2-1 | IEEE 802.1D から IEEE 802.11e へのマッピング | 13 |
| 表 2-2 | EDCA アクセスパラメータのデフォルト値 | 14 |
| 表 2-3 | QLoad Report Element | 19 |
| 表 2-4 | HCCA TXOP Negotiation の動作 | 21 |
| 表 4-1 | キャプチャエフェクト検証実験機器 | 31 |
| 表 4-2 | AC Number とアクセスカテゴリーの位置付け | 32 |

| | |
|---------------------------|----|
| 表 4-3 シミュレーションパラメータ | 41 |
|---------------------------|----|