

修士論文

無線 LAN のスループット改善を目的とした
端末のグループ化とハイブリッドアクセス制御

Hybrid Access Control with Grouping of Terminals
for Improving Throughput of Wireless LANs

平成 26 年 2 月 6 日提出

指導教員 若原 恭 教授

東京大学大学院
工学系研究科 電気系工学専攻
37-106499 道下 賢吾

概要

近年、タブレット端末、携帯ゲーム機、ノート PC などといった無線 LAN を搭載した端末を誰もが所有しており、いつでも高速にインターネットに接続することが可能となっている。一般的には、無線端末がネットワークへ接続するには、無線端末の電波範囲内に存在するアクセスポイント (AP) と呼ばれる基地局を通じてパケットのやりとりが行われる。

無線 LAN において現在使われている規格の 1 つである IEEE802.11g ではアクセス制御方式として CSMA/CA が使われている。CSMA/CA においては複数の端末が同時に AP へとアクセスしようとすることでパケットの衝突 (コリジョン) が発生しないように Distributed Coordination Function(DCF)という衝突回避機構が利用されている。ところが、AP 支配下の通信を行う端末(アクティブノード)の数が増えていくほどにコリジョン回数の増加を避けられず、結果としてネットワーク全体のスループットが落ちてしまうという問題がある。

コリジョンを完全に回避出来るアクセス制御方式として Point Coordination Function(PCF)という手法も用意されている。ところが、この方式だと AP 支配下にあっても通信しない端末(非アクティブノード)が多くなるほどネットワーク全体のスループットが落ちてしまう。

そこで、本研究では AP 支配下に多数の無線端末がある環境においても、アクティブノード数が増加しても高いスループットを維持できるアクセス制御手法の提案と評価を行っている。

目次

第1章 序論.....	6
第2章 関連研究.....	8
2.1 Distributed Coordination Function(DCF).....	8
2.2 Point Coordination Function(PCF).....	12
2.3 既存研究.....	14
第3章 提案手法.....	18
3.1 提案方式の概要.....	18
3.2 晒し端末テーブル.....	18
3.3 AP 支配下のグルーピング.....	20
3.4 グルーピングを利用したハイブリッドアクセス制御 手法.....	23
3.4.1 HCFG のプロセス.....	24
3.4.2 グループ内部でのアクセス制御.....	26
3.4.3 グループ切り替えのタイミング.....	28
第4章 実験・評価.....	30
4.1 実験概要.....	30
4.2 実験環境.....	30
4.3 実験結果.....	32
4.3.1 無線端末をランダムに配置した時のスループット測定と評価.....	32

4.3.2	測定結果の妥当性の検証.....	34
4.3.3	無線端末を格子状に配置した時のスループット測定と評価.....	42
4.3.4	無線端末台数をさらに増やした場合のスループット測定と評価.....	43
4.3.5	無線端末台数が少ない場合のスループット測定と評価.....	46
4.4	この章のまとめ.....	47
第 5 章 結論と今後の課題.....		48
5.1	本研究のまとめ.....	48
5.2	今後の課題.....	48
謝辞.....		50
発表文献.....		51
参考文献.....		52

図目次

2.1 キャリアセンス可能な無線端末配.....	8
2.2 DCF によるアクセス制御の基本的なプロセス.....	9
2.3 端末 A と B がキャリアセンス不可能なときの端末配置.....	10
2.4 コリジョンが発生するケース.....	11
2.5 RTS/CTS を用いた DCF によるアクセス制御プロセス.....	11
2.6 PCF によるアクセス制御プロセス.....	13
3.1 各無線端末内の晒し端末テーブル.....	20
3.2 グループニングのプロセス 1.....	21
3.3 グループニングのプロセス 2.....	22
3.4 グループを視覚化した端末配置図.....	23
3.5 グループ化された端末配置図.....	24
3.6 HCFG によるアクセス制御プロセス 1.....	25
3.7 HCFG によるアクセス制御プロセス 2.....	26
4.1 ランダムに無線端末 40 代を配置した時のスループット.....	33
4.2 格子状に端末を配置するときのフィールド.....	42
4.3 格子状に無線端末 40 代を配置した時のスループット.....	43
4.4 無線端末 50 台によるスループット測定.....	44
4.5 無線端末 40 台によるスループット測定.....	45
4.6 ランダムに端末 40 台を配置した時のスループット.....	46

第 1 章 序論

近年、ノート PC、スマートフォン、iPad、携帯ゲーム機等無線 LAN を搭載した無線端末はほぼ 1 世帯に 1 台が保有しているといっているほど広く普及している[1][2]。また、誰もがどこにいても高速にネットワークにアクセス出来るような環境整備が急速に進んでいる。

最も広く社会に普及している無線 LAN の規格である IEEE802.11 系の無線 LAN には 2 つのモードが存在する。1 つはアドホックモードで、もう 1 つはインフラストラクチャモードである。アドホックモードとは、無線端末同士が直接通信を行う形式のことを指している。一方、インフラストラクチャモードでは、無線端末がネットワークへアクセスしたり、他の端末と通信を行いたい場合、アクセスポイント (AP) と呼ばれる中継地点へのアクセス権を獲得してから、パケットの送受信が行えるようになる。本研究では、このインフラストラクチャモードを扱っている。

各端末が AP へとアクセスする際に、各端末が勝手に AP へとパケットを送信してしまうと、パケット同士が衝突 (コリジョン) してしまい、AP が正常にパケットを受け取れずスループットが落ちてしまう。そこで、IEEE802.11a/b/g[4][8][9][10]の規格では CSMA/CA という衝突回避機構を用いてパケット同士のコリジョンがなるべく発生しないように AP へのアクセス制御を行っている。

ところが、既存のアクセス制御方式では AP 支配下に多数の端末が存在しているような環境では信号同士や、パケット同士の衝突を避けられず、スループットが著しく低下してしまうという問題が存在している。そこで、本研究ではその問題を解決するためにグルーピングを用いた新しいハイブリッドアクセス制御方式 (HCFG) の提案を行っている。

第 2 章で CSMA/CA で使われている DCF、PCF といった既存のアクセス制御方式と、既存研究で提案されているアクセス制御方式の紹介を行っている。第 3 章では本研究における提案方式である HCFG の詳細について述べている。第 4

章では既存方式と提案方式それぞれについて NS2 によるシミュレーションを用いてスループットを計測し、その結果を評価・考察している。第 5 章では本研究のまとめと、今回の研究では触れることの出来なかった今後の課題について述べている。

第 2 章 関連研究

本章では無線 LAN におけるアクセス制御方式の関連研究について述べている。
また、既存手法の問題点についての考察を行っている。

2.1 Distributed Coordination Function(DCF)

無線 LAN では無線端末がネットワークへアクセスするためにアクセスポイント(AP)へのアクセス権を得る必要がある。ところが、無線端末が無秩序に AP へとアクセスしようとする、パケット同士が衝突(コリジョン)してしまう。

そこで、無線 LAN の規格 IEEE802.11a/b/g ではアクセス制御として CSMA/CA が採用されている。CSMA/CA において採用されている衝突回避機構が Distributed Coordination Function(DCF)[15]と呼ばれるものである。

例えば、図 2.1 のように端末が配置されている無線ネットワークを考える。DCF を用いたアクセス制御プロセスは以下のようになる。(図 2.2)

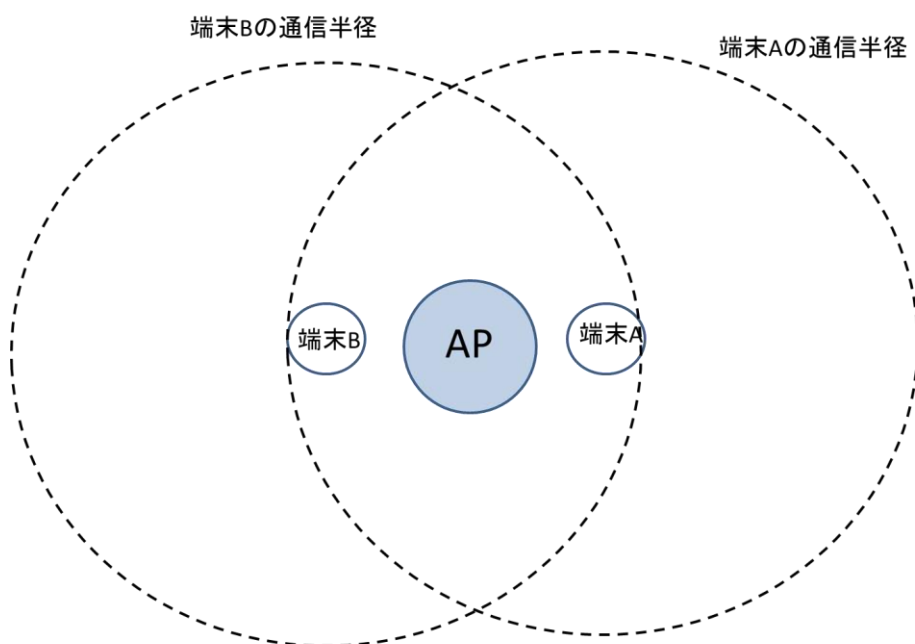


図 2.1 キャリアセンス可能な無線端末配置

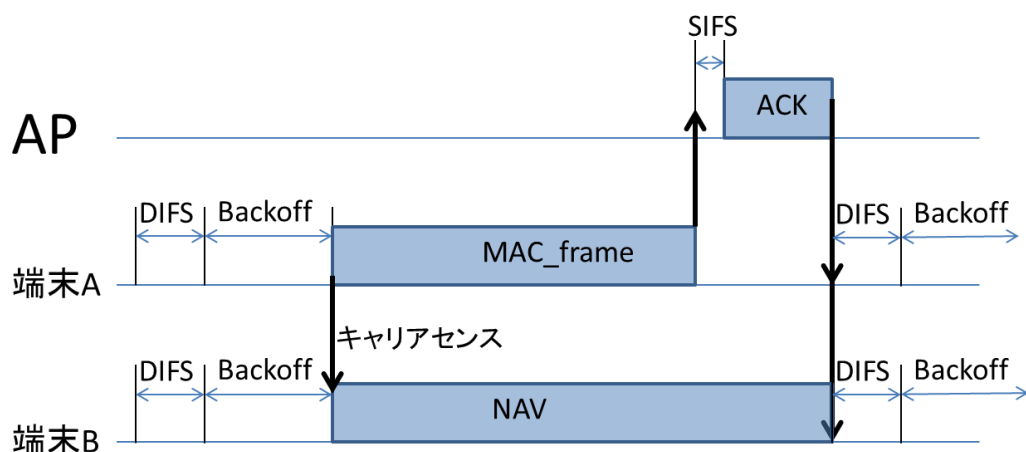


図2.2 DCFによるアクセス制御の基本的なプロセス

1 パケット分の通信手順としては、無線端末 A と B は最初に DIFS+Backoff 分だけ自分が利用するチャンネルが利用されているかどうか確認するキャリアセンスの時間を設ける。その際、

Backoff 時間 = 乱数値 × スロット時間

で決定される。乱数値は $0 \sim CW_{min}$ の間で決定される整数値である。より小さい乱数値を得た端末が先に通信を開始する。図 2.2 ではまず端末 A 最初にアクセス権を得ている。A が通信を開始すると、端末 B はコリジョンを避けるためにその通信が終了するまで待つことになる (NAV 期間)。1 パケット分の MAC フレームの受信が完了した AP は、受信完了の証明として ACK 信号を自分の電波範囲内（支配下）にある端末に向かってブロードキャストすることで 1 パケット分の通信サイクルが終了する。

ところが、この DCF 制御法には『隠れ端末問題』という問題が存在している。例えば、AP 支配下の端末が図 2.3 のような配置の場合を考える。

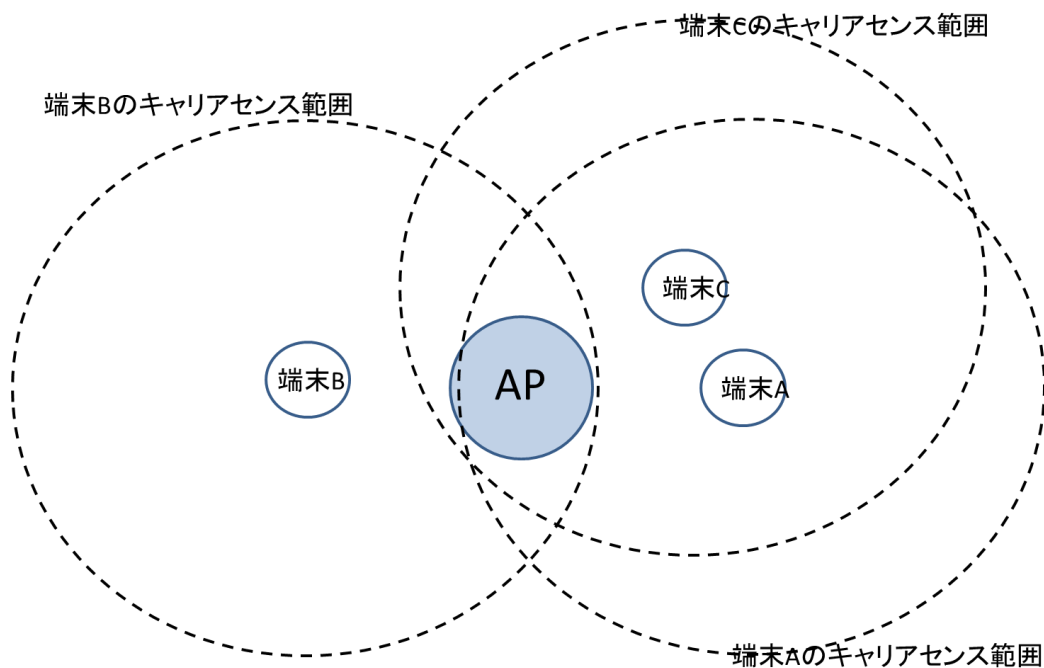


図2.3 端末AとBがキャリアセンス不可能な時の端末配置

端末 A と C は互いキャリアセンス範囲内にあるため、キャリアセンスが可能である。一方で、端末 A と B は互いにキャリアセンス範囲外にあるためキャリアセンスが不可能となる。この時、端末 A と B は互いに隠れ端末であるという。そのため、以下図 2.4 のように A が MAC フレームを送信している最中に B から MAC フレームの送信が始まると、コリジョンが発生してしまう。コリジョンが発生すると MAC フレームを最初から送り直す必要があるのだが、その際、再びコリジョンが起きる可能性を低くするために **Backoff** に使われる乱数値の範囲(CW)を 2 倍にする。そのため、隠れ端末が存在するケースではコリジョンが発生する毎にやり直しによるものと、通信を再開するまでにかかる時間が増加していくという 2 つの理由で著しくスループットの低下が発生してしまう。

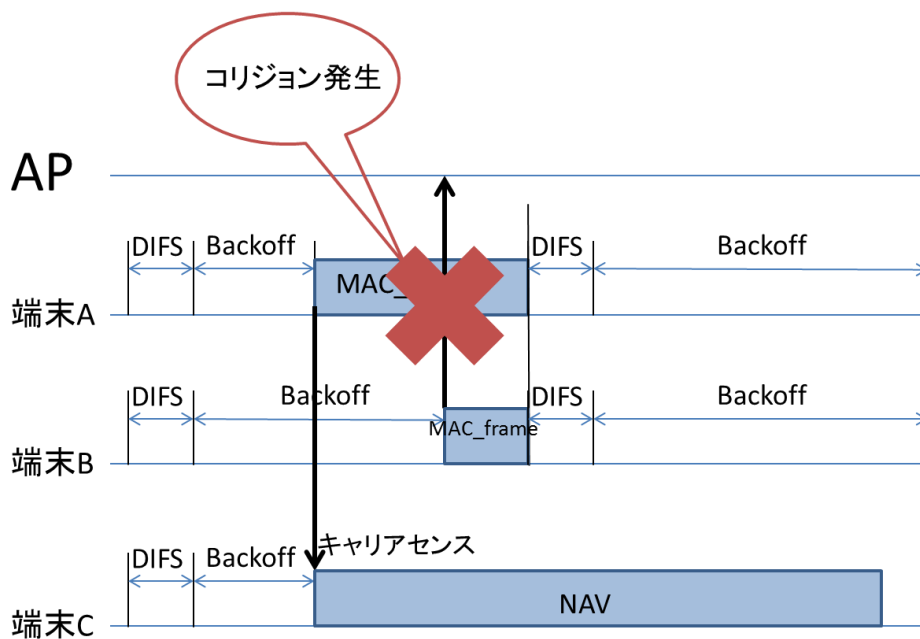


図2.4 コリジョンが発生するケース

そこで、CSMA/CA では RTS/CTS と呼ばれる仕組みを用いることで隠れ端末問題を解決しようとしている。RTS/CTS を用いた DCF のプロセスは図 2.5 のようになる。

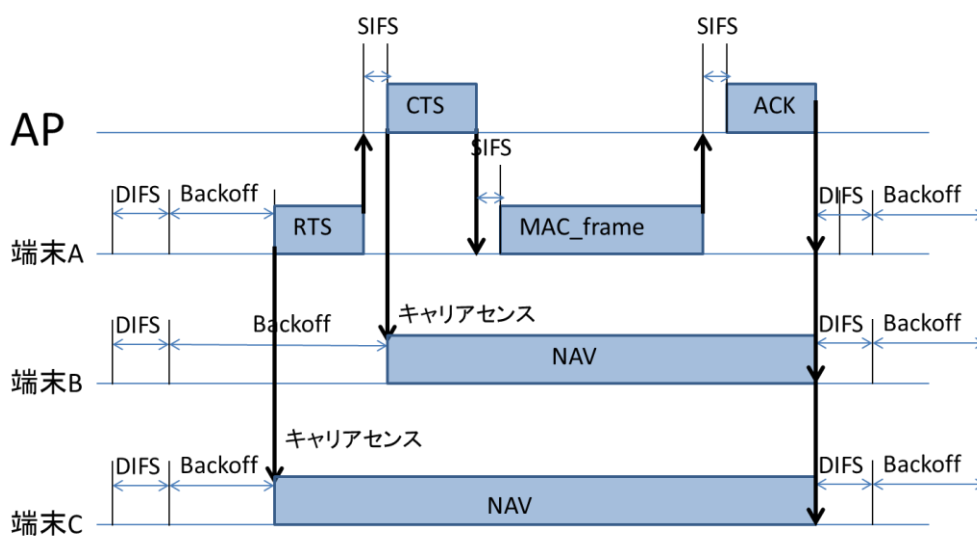


図2.5 RTS/CTSを用いたDCFによるアクセス制御プロセス

手順としては、AP へアクセスしたい端末 A、B、C が DIFS+Backoff 時間分キャリアセンスを行う。その後先に backoff 時間を抜けた端末 A はすぐに MAC フレームを送信するのではなく、MAC フレームよりも遥かにサイズの小さい RTS 信号を AP へと向かって送信する。RTS を受け取った AP は端末 A が AP とのアクセス権を先に勝ち取ったということを支配下の端末に通知するために CTS 信号を送信する。CTS を受け取った端末 B は端末 A が 1 パケット分の通信が終了する予定時刻まで NAV 期間に入る。ちなみに、端末 C は端末 A から RTS を受け取った段階で NAV 期間に入っている。

このように、RTS/CTS を用いた DCF アクセス制御では MAC フレームよりも遥かにサイズの小さい RTS 信号を使って AP へのアクセス権を予約して、その後 CTS 信号により周囲の端末にそのことを通知することによりコリジョンが発生する可能性を低くしている。

ただし、この RTS/CTS を用いた DCF にも 2 つ問題がある。1 つ目は、MAC フレームを送信する時間に対して信号の送信時間の割合が高いため、スループット効率が悪いということである。特に、データレートが高く、パケット長が短いほどその効率は非常に悪くなっていく [7][12]。2 つ目は、1 つの AP 支配下に多数の端末が存在すると、RTS 信号同士のコリジョンも飛躍的に増えていき、スループットが低下してしまうということである。

2.2 Point Coordination Function(PCF)

無線 LAN の規格 802.11a/b/g には Point Coordination Function(PCF)[15]と呼ばれるアクセス制御手法も用意されている。PCF のプロセスは図 2.6 のようになる。

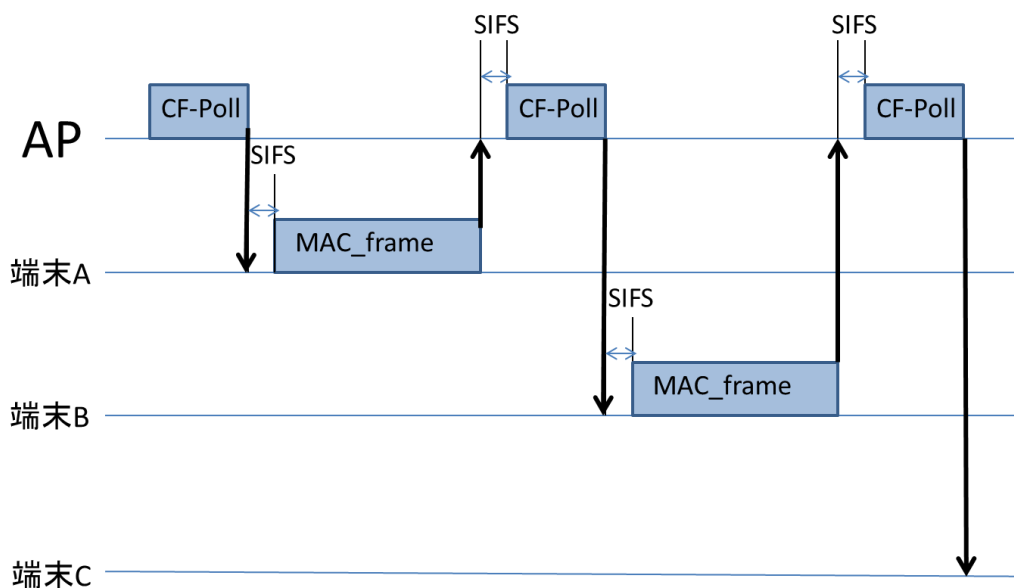


図2.6 PCFによるアクセス制御プロセス

手順としては、まず AP から端末 A へ向けて CF-Poll と呼ばれるポーリング信号をブロードキャストすることで、A に AP へのアクセス権を与えている。CF-Poll を受信した A は、MAC フレームを送信を開始する。MAC フレームを受信し終わった AP は次に端末 B へ向けて CF-Poll をブロードキャストする（ここで、CF-Poll をブロードキャストしているのは A へ ACK を送信するという意味も含んでいる。）CF-Poll を受信した B は先ほど同様に MAC フレームを送信する。以上の動作を順番に繰り返していくことにより、AP 支配下の端末に均等にアクセス権を付与していくことになる。

PCF のメリットは 2 つある。1 つ目は、AP が端末へ順番にアクセス権を割り振っていくことになるためコリジョンの発生がない(Contention free)ということだ。2 つ目はスループット効率が非常に良いということにある。1 パケット分の通信にかかる時間は 1 つの信号を送ってから、すぐに MAC フレームを送るというシンプルな構成になっている。そのため RTS/CTS の時のように通信時間のかなりの割合が信号に割かれてしまうということがない。

一方で、PCF にもデメリットが存在する。送信パケットを持たない端末（非ア

クティブノード)が多い時に著しくスループットが低下してしまうということだ。例えば、CF-Poll によってアクセス権を割り当てられた端末が非アクティブな場合、PCF では Null-function と呼ばれる MAC ヘッダのみでデータ本体のサイズが 0 の MAC フレームを送ることになっている。そのため、非アクティブノードの割合が多いほど、無駄に非アクティブノードへとアクセス権を割り当ててしまうことになり、結果として著しくスループットが低下してしまう。逆に言えば、アクティブノードの割合が多いと最も効率よくパケットを送信可能なため、高いスループットを発揮することが可能である。

2.3 既存研究

本項では複数の端末が存在する無線環境下で、スループットを高めるための既存研究について述べている。

[14][22][19][23][24][25]といった研究では、Backoff 値の調節をチャネルの状況、アイドル状態の長さ、コリジョンの発生頻度といった様々な状況に合わせて調節することで、コリジョンの発生確率を下げたり、スループットを上げようとしている。いくつか例を挙げると、[14]では、Backoff 中にチャネルがビジー状態の時であれば、コリジョン発生の確率を下げるために新たに Backoff 時間を増やしていく。逆に、Backoff 中にアイドル状態が一定時間続くようであれば、Backoff を 1 スロットタイムずつ減らしていくのではなく、Backoff 時間を $1/2$ にしていくことによって、Backoff による待機時間を減らしてスループットをあげようとしている。[22]では、アクティブノード数を基にしてランダムスロット時間にコリジョンなく送信が成功する確率、アイドル状態である確率、コリジョンが発生する確率を計算する。そこからスループットを最大出来るような CW 値の逆算を行い、その CW を AP が各無線端末へとブロードキャスト通知している。[19]では、コリジョンが発生するたびに、AP から支配下の無線端末に対してそれぞれ違う Backoff の初期値と、共通の Backoff 周期値を送信することによって意図的に端末が MAC フレームを送信するタイミングをずらしている。こうすることで、

DCF によるアクセス制御を擬似的に PCF によるアクセス制御へと変更し、コリジョンをなくそうとしている。[25]では、コリジョンが発生しても CW を倍にすることで Backoff を伸ばすという処理を行わず、CW は一定時間固定の値を取る。チャンネルのアイドル状態が連続して何スロット続いているかを測定し、その平均スロットがあらかじめ設定した値 = 5.68 以上であれば、一定時間経つと CW をある式に従って小さくする。逆に 5.68 より小さければ CW をある式に従い大きくするという処理を行う。その結果、連続してアイドル状態にあるスロットの平均をこの 5.68 という値に近づけることにより、高いスループットを発揮できるとしている。

これら Backoff を調節する研究はコリジョンの発生確率を下げたり、スループットを高めたりする上で有効な手法である。一方で、Backoff 時間が短くなっただけで、隠れ端末問題は本質的に避けられていない。また、ほとんどが RTS/CTS を用いた DCF による制御を行っているため、信号送信にかかるオーバーヘッドは減らせていない。

本研究と同様にコリジョンの発生するアクセス制御期間 Contention period とコリジョンの発生しないアクセス制御期間 Contention free period を交互に繰り返すハイブリッドアクセス制御方式によりスループットを高める研究・方式の提案も行われている。ハイブリッドアクセス制御の代表的な例としては IEEE802.11e[20]において使用されている HCCA(Hybrid coordination function Controlled Channel Access)がある。HCCA では各端末のフレーム適性に応じて AP が通信時間をポーリングによって割り当てて、その通信時間のみ各端末は AP へとアクセスできるというものである。これはスループットを上げるというよりはむしろ QoS を上げることを目的とした方式である[21]。

[6]では、AP 支配下の端末をグルーピングして、各グループに一定時間ごとにポーリング信号を送り、各グループ内部では DCF による制御を行うという点で、本研究で用いているハイブリッドアクセス制御方式と似通っている部分がある。しかし、本研究とはグルーピングの手法が違っており、最初は適当な 2 端末ずつグループを作り、ポーリングを行っていき、そのポーリングが終わったら次は倍の 4 端末のグループを作ってポーリングを行っていく。最終的にグループ内部の

端末数＝全端末数となるまでグルーピングを行い、それが終わったらまた 2 端末のグループへと戻るといった繰り返しを行っている。このように、グルーピングに明確な目的がないため、DCF と比べてもそれほどスループットが伸びていない。

[18]では、Contention period に AP へ向かって RTS の送信を行い、その際にアクセスできた端末のみが、その後続く Contention free period に各端末間でスケジューリングされた状態で MAC フレームを順番に送っていくという処理を行っている。このプロセスを実現するために、各端末は内部に Transmission Queue、Collision Resolution Queue を用意しており、コリジョンが発生した端末は Collision Resolution Queue に入れられ、RTS の送信に成功した端末は Transmission Queue へと入れられる。Transmission Queue へと入れられた端末から Contention free period にパケットを送信できるようになる。そのため、各端末間での queue の同期が必要であるため、リーダーノードと peer-to-peer 通信が導入されている。

[13]では、PCF のポーリング順に組み込まれていない無線端末の送信キューに次に送信するパケットが存在している場合、DCF によってパケットを送信する。その際、さらに次に送信するパケットがキューに存在している場合、MAC フレーム中のヘッダ内部にある未使用領域に 1 をセットし、その MAC フレームを DCF に従って送信する。そのフレームを受け取った端末は次から Contention free period に PCF によるポーリング順に組み込まれる。逆に次のフレームが存在しない場合はヘッダの未使用領域に 0 をセットするため、Contention free period にポーリングされることはない。

[11]では一定時間ごとに DCF によるアクセス制御と PCF によるアクセス制御を切り替えている。また、PCF によるアクセス制御開始時にはビーコンが AP から送信されることになっている。このビーコンを送信する間隔は一定時間になっており、この一定時間範囲内において DCF によるアクセス制御時間と、PCF によるアクセス制御時間の割合を 2 ビーコン毎に変更している。割合を変更する条件としては AP 側で DCF によるスループットと、PCF によるスループットを測定して、高いスループットを発揮したアクセス制御方式の割合を徐々に増やしていくという手法をとっている。

以上のように既存のハイブリッドによるアクセス制御方式では、DCF と PCF を繰り返し実行することになるため、本質的には DCF における隠れ端末問題によるパケット同士のコリジョン問題は避けられていない。

第 3 章 提案方式

第 2 章で述べたように、1 つの AP 支配下に多数の無線端末が存在するようになると既存のアクセス制御方式ではスループットが落ちてしまう問題がある。DCF 等のコンテンション方式のアクセス制御ではアクティブノードの数が増えるほどスループットが減少する。一方で PCF 等のコンテンションフリー方式ではアクティブノードの数が少ないほどスループットが減少してしまう。そこで、本章では多数の端末が存在するような環境で、アクティブノードの数によらず高いスループットを維持することの出来る方式の提案を行っている。

3.1 提案方式の概要

本研究で提案しているアクセス制御方式には大きく分けて 3 つの特徴がある。

1. 各無線端末は、他端末から送信された MAC フレームを傍受し、そのヘッダから送信元を読み取ることで晒し端末テーブルを作る。また、その情報を AP と共有する。
2. AP 支配下の端末を、晒し端末同士が同じグループになるように晒し端末テーブルを用いたグルーピングを行う。
3. AP からブロードキャストされたポーリング(CF-Poll)信号で指定されたグループに所属する端末群がアクセス権を得る。アクセス権を得た端末は RTS/CTS を用いずに DCF によるアクセス制御を行う。

以下では上記のアプローチについての詳細を述べている。

3.2 晒し端末テーブル

本研究における重要な要素の 1 つとして、AP 支配下にある無線端末のグルーピングがある。グループ内部に隠れ端末が存在しないようにグループを形成する

必要があるのだが、その際に利用する『晒し端末テーブル』の記述を以下で行っている。

晒し端末テーブルは各無線端末がそれぞれ 1 つ保持しており、その端末にとって隠れ端末にならない端末(晒し端末)の情報を保持している。晒し端末テーブルの作成手順は以下のようになる。

例えば、端末 A が端末 B から送信された MAC フレームを傍受する。この際、その MAC フレームのヘッダ内の送信元アドレスのみを読み取ることで、A から見れば B はキャリアセンス範囲内に存在している晒し端末であるということがわかる。また、無線 LAN において使われる暗号化方式である WPA や、今のところ最も安全な WPA2 においても暗号化されるのはデータ部分だけであるため、ヘッダから送信元アドレスを読み取ることは可能である[16][17]。

このようにして、B の通信を傍受した A が内部に保持している晒し端末テーブルに図 3.1 のように B が晒し端末であるという情報 (B のアドレス欄に 1) を書き込む。

次に、端末 C が A にとって隠れ端末だった場合を考える。このとき、C からの通信を傍受は出来ないが、C が通信を終了した後、AP から ACK 信号が C のアドレス宛に送信される。この時、A も当然 AP の支配下にあるため、この ACK 信号については傍受できる。よって、MAC フレームは傍受できなかったが、C 宛の ACK を受信した時のみ A は C が隠れ端末であるとして、晒し端末テーブルの C のアドレス欄に 0 を書き込む。

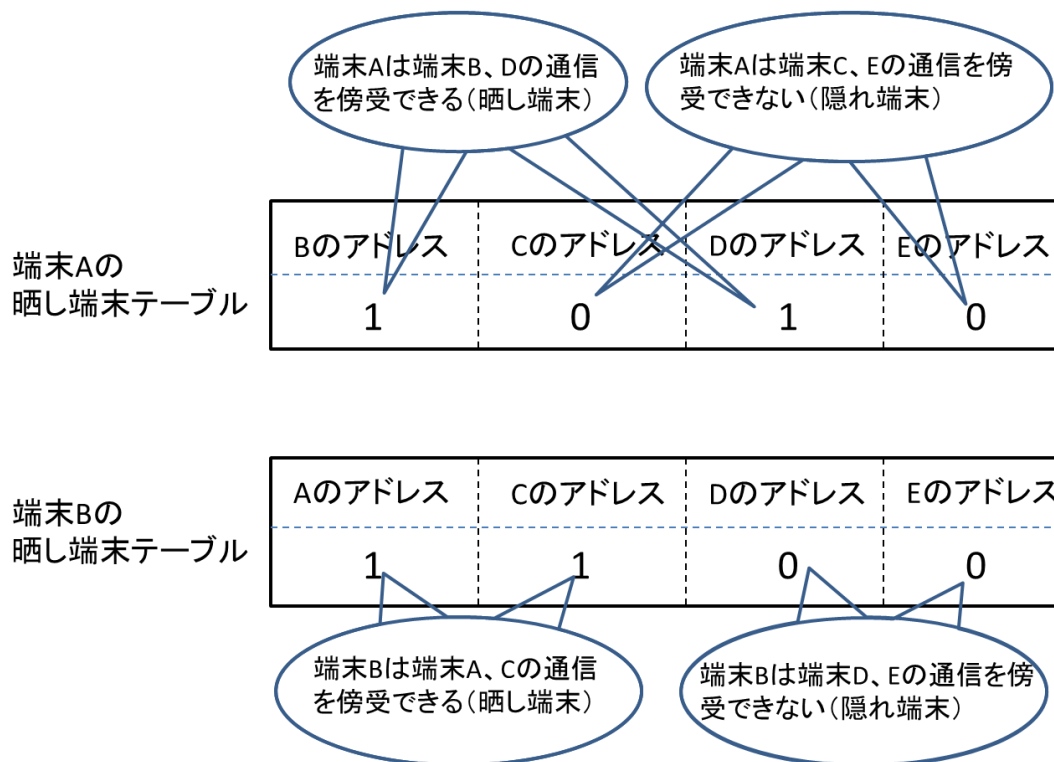


図3.1 各無線端末内の晒太阳端末テーブル

以上のようにしてテーブルの更新が行われた時に限り、各端末は AP へ向かってテーブル情報を送信する。また、その情報を受け取った AP は自分の支配下にある端末が保持している晒太阳端末テーブルを全て保存し、次に説明する各端末のグルーピングの際に利用することになる。

3.3 AP 支配下のグルーピング

3.2 において説明した晒太阳端末テーブルを元にして、グループ内部で互いの端末が晒太阳端末になるようにグルーピングを行う。グルーピングプロセスについては以下のようなになる。

1. まず初期状態として、端末1つで1つのグループを作っている。また、AP側には端末Aと端末Bしか端末テーブル情報が送られてきていない状態から開始する。このとき、APが保持している晒し端末テーブル群のAとBそれぞれのテーブルをしてみる。

すると、図3.2のようにテーブルAには端末Bのアドレス対応する項目に1が書き込まれており、テーブルBにも端末Aのアドレスに対応する項目に1が書き込まれていることがわかる。この結果として、AとBは晒し端末同士であることがわかったため、同じグループに入れる。逆に、もしテーブル情報から隠れ端末の位置にあることがわかれば、AとBは別々のグループのままにする。

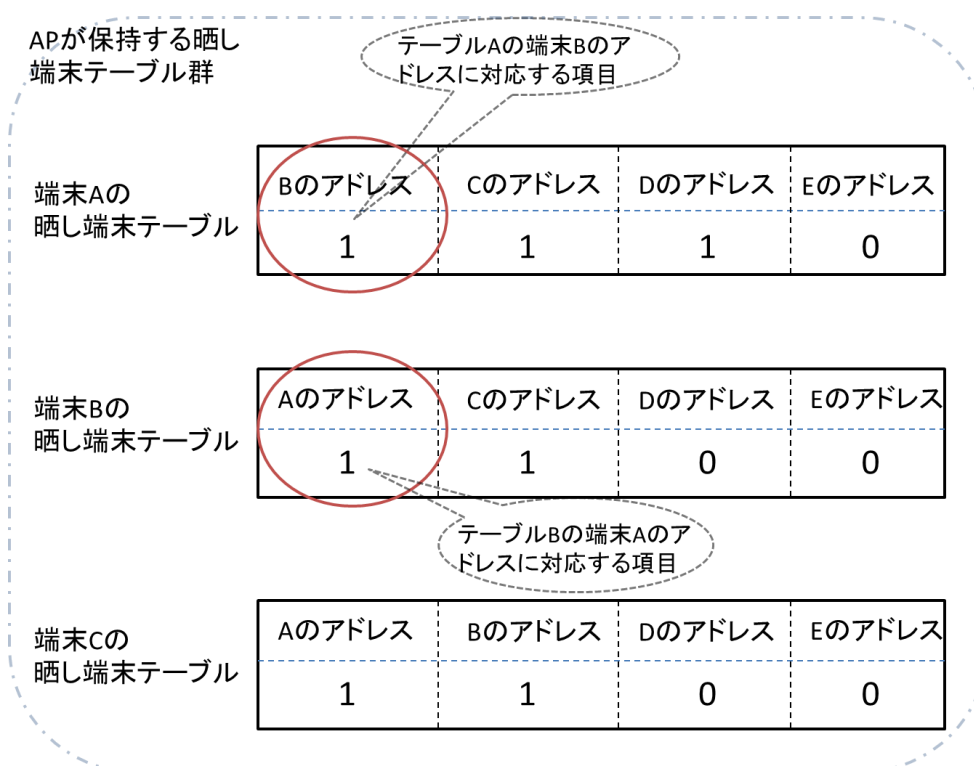


図3.2 グループニングのプロセス1

2. A と B が 1 の手順で同じグループに入ったとする。今度は端末 C から AP へとテーブル情報を含んだ MAC フレームが送られてきたとする。そこで、再び AP 側でグルーピング処理を行う。この時、C のテーブル情報のアドレス A、B 部分に図 3.3 のように 1 が書き込まれており、なおかつ A、B のテーブル情報のアドレス C 部分にも 1 が書き込まれている時のみ、同じグループに入れる。

この理由は、C にとって A、B は晒し端末の位置にあり、また A、B についても C は晒し端末の位置にあるために A、B、C は互いに隠れ端末同士にならないからである。逆に、C がどのグループにも所属しない場合は新たに別のグループを作る。

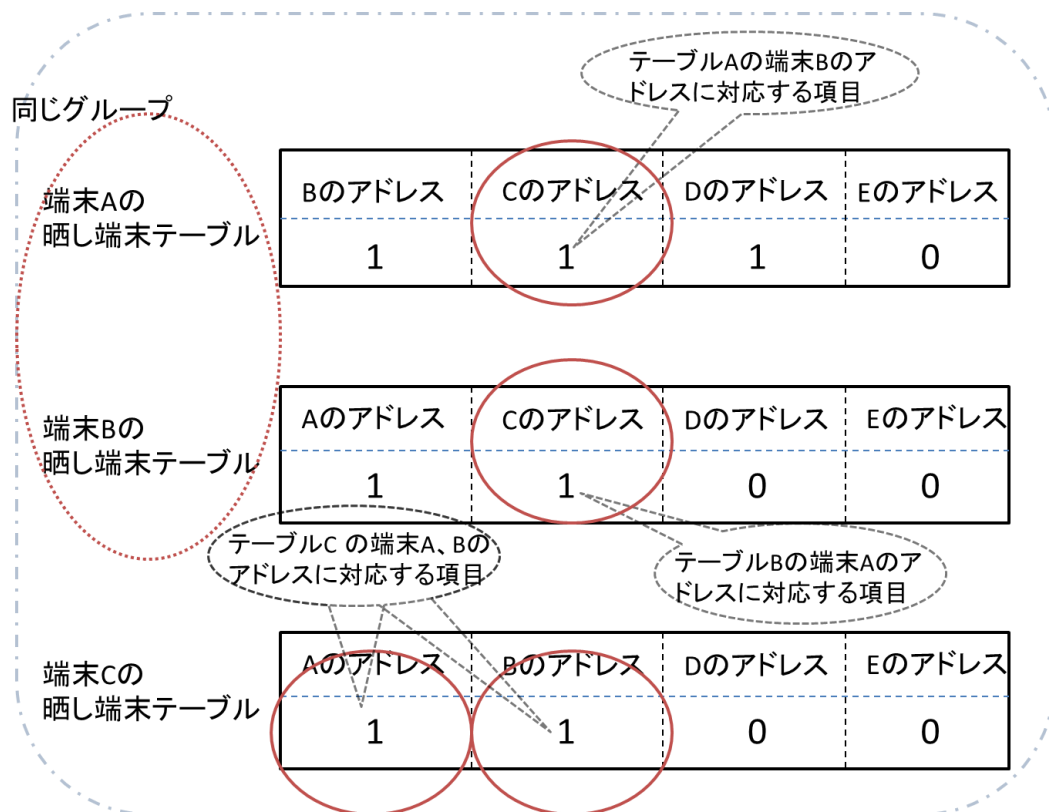


図3.3 グルーピングのプロセス2

3. 手順 2 によって既存のグループに追加される or 新しくグループが作られ

ると、無線端末の所属グループに変化が生じる。そこで、所属グループ番号の通知をするために、AP からその支配下にある全端末に向かってそれぞれのグループ番号の情報が含まれている MAC フレームをブロードキャストする。これにより端末は自分がどのグループに所属しているかを確認することができる。

4. 新しい端末からテーブル情報が送られて来るたびに、上記の手順 2、3 を繰り返し用いてどのグループに所属するかを決定し、その結果を AP から端末へと通知するというのを繰り返していく。
5. また、既に所属グループが決まっている端末でも 3.2.1 で説明したように、随時晒し端末テーブルの更新は行われていく。そのため、更新がある度にテーブル情報が AP へと送信されてくる。また、テーブルの更新により所属グループが変更される場合のみ、そのことを AP から端末へとブロードキャストにより通知する。

上記の 1～5 のプロセスを実行することにより、グルーピングが完了する頃には、各グループ内にはお互いの通信を傍受可能な晒し端末のみが存在している。

(図 3.4)

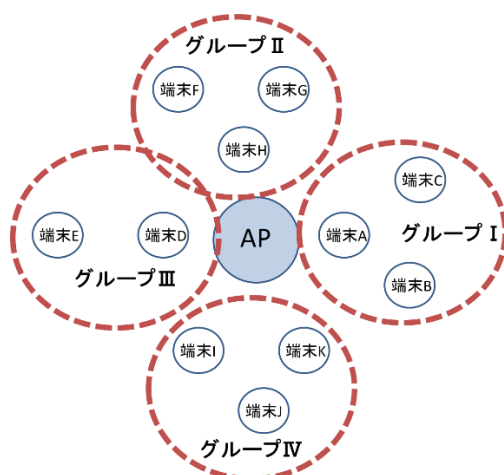


図3.4 グループを視覚化した端末配置図

3.4 グルーピングを利用したハイブリッドアクセス制御手法

本項では上記のアプローチにより作られるグループと、DCF・PCF 双方を利用したハイブリッドアクセス制御の説明を行っている。また、グルーピングを用いたハイブリッドアクセス制御のことを本研究では HCFG (Hybrid Coordination Function with Grouping) と呼ぶことにする。

図 3.5 の配置とグループで構成された無線ネットワークの例を用いて、HCFG のプロセスを記述している。

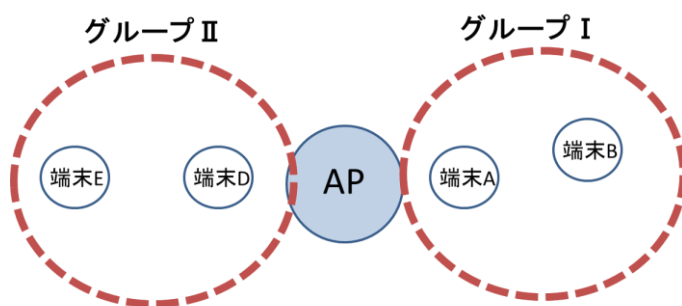


図3.5 グループ化された端末配置図

3.4.1 HCFG のプロセス：

1. まず、AP はグループ I 内の端末に自分へのアクセス権を与えるために、グループ I のグループ番号 (= I) の情報を追加した CF-Poll 信号をブロードキャストする。
2. CF-Poll を受け取った各グループ内の端末は自分の所属するグループ番号が I でなければ AP へのアクセス権をもてない。I に所属する端末のみが AP へのアクセス権を得る。
3. アクセス権を得たグループ内部では、各端末が DCF を用いて AP へのアクセスを開始する。(プロセス 1~3 : 図 3.6)

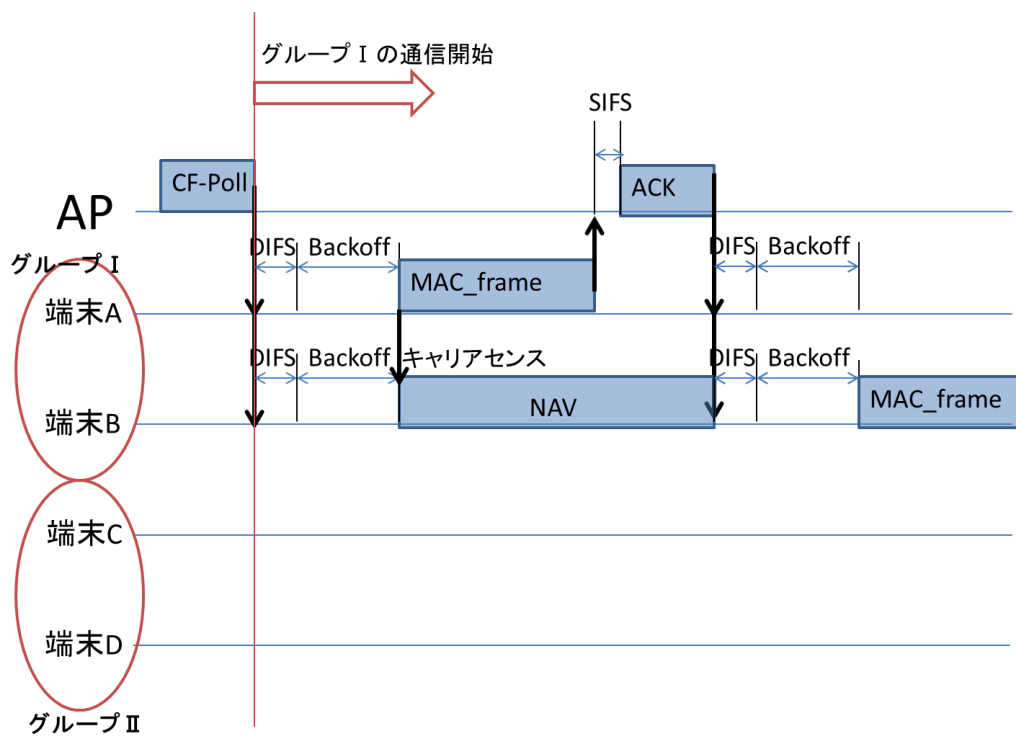


図3.6 HCFGによるアクセス制御プロセス1

4. AP 側で調整された時間 T が経過する毎に、アクセス権を持つグループを切り替えていく(図 3.7)。そこで、グループ I が通信を開始してから T 時間経過後に、
- ① チャンネルがアイドル状態であればそのまま **SIFS** 時間経過後に **CF-Poll** 信号をブロードキャストしてグループ II へアクセス権を与える。
 - ② アイドル状態ではなくグループ I 内の端末と通信状態であれば、AP が **ACK** を送信し終わって、アイドル状態になってから **SIFS** 時間経過後に **CF-Poll** 信号をブロードキャストしてグループ II へ通信権を与える。

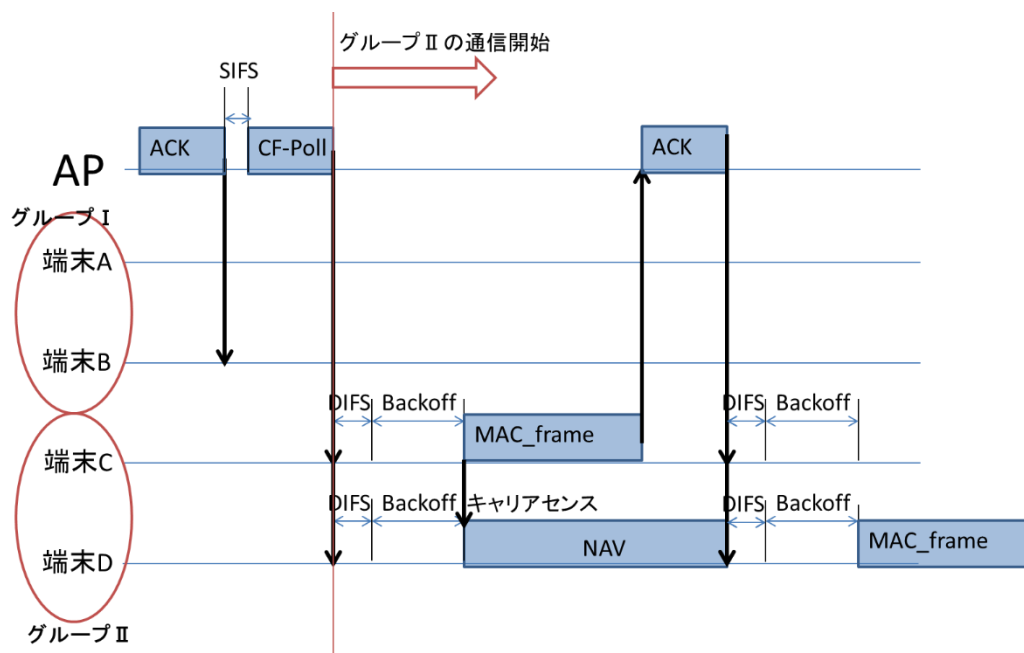


図3.7 HCFGによるアクセス制御プロセス2

5. 3、4 のプロセスを繰り返し実行していく。1 周して全グループにアクセス権を配り終わったら、再度アクセス権をグループ I へと与えるために戻り、順次 3、4 のプロセスを繰り返す。

3.4.2 グループ内部でのアクセス制御

グループ内部で RTS/CTS を利用していない理由は以下の 2 つである。

1. グループ内部に隠れ端末が存在しないため、その対策法として RTS/CTS を用いる必要がないからである。
2. RTS/CTS を使用しない場合のほうが、1 パケットを送信するのにかかる時間が減少し、効率よく MAC フレームを送信することが出来るため、スループットを上げることが出来るためである。

2 に関しては、実際に RTS/CTS を用いた DCF と、RTS/CTS を用いない DCF それぞれでスループットの理論値を計算してみる。802.11g の規格に合わせて以下のようにパラメータを設定する。

○Data_rate : 54Mbps

○Basic_rate : 1Mbps

○PLCP_datarate : 1Mbps

○RTS : 44Byte

○CTS : 38Byte

○ACK : 38Byte

○SIFS : 10μs

○Slot_Time : 20μs

○MAC_frame データ本体 : 1500Byte (MAC_frame : 1578Byte)

○Preamble+PLCP_Header : 24Byte

上記のパラメータを元にして、各信号、MAC フレームの送信時間を求めると、

$$\checkmark T[\text{RTS}] = \frac{(\text{Preamble} + \text{PLCP_Header}) \times 8}{\text{PLCP_datarate}} + \frac{(\text{RTS} - \text{Preamble} - \text{PLCP_Header}) \times 8}{\text{Basic_rate}} = 352\mu\text{s}$$

$$\checkmark T[\text{CTS}] = \frac{(\text{Preamble} + \text{PLCP_Header}) \times 8}{\text{PLCP_datarate}} + \frac{(\text{CTS} - \text{Preamble} - \text{PLCP_Header}) \times 8}{\text{Basic_rate}} = 304\mu\text{s}$$

$$\checkmark T[\text{ACK}] = \frac{(\text{Preamble} + \text{PLCP_Header}) \times 8}{\text{PLCP_datarate}} + \frac{(\text{ACK} - \text{Preamble} - \text{PLCP_Header}) \times 8}{\text{Basic_rate}} = 304\mu\text{s}$$

$$\checkmark T[\text{MAC_frame}] = \frac{(\text{Preamble} + \text{PLCP_Header}) \times 8}{\text{PLCP_datarate}} + \frac{(\text{MAC_frame} - \text{Preamble} - \text{PLCP_Header}) \times 8}{\text{Data_rate}} = 422\mu\text{s}$$

となる。この結果を元にして RTS/CTS を用いた DCF のスループット推測値を計算すると、

Throughput[DCF with RTS/CTS]

$$\begin{aligned}
&= \frac{\text{MAC_frame のデータ本体}(1500 \times 8\text{bit})}{\text{DIFS} + \text{Average_backoff} + T[\text{RTS}] + \text{SIFS} + T[\text{CTS}] + \text{SIFS} + T[\text{MAC}_{\text{frame}}] + \text{SIFS} + T[\text{ACK}]} \\
&= \frac{12000\text{bit}}{50\mu\text{s} + 300\mu\text{s} + 352\mu\text{s} + 10\mu\text{s} + 304\mu\text{s} + 10\mu\text{s} + 422\mu\text{s} + 10\mu\text{s} + 304\mu\text{s}} \\
&\approx 6.8\text{Mbps}
\end{aligned}$$

となる。

一方、RTS/CTS を用いない DCF のスループット推測値を計算すると

$$\begin{aligned}
&\text{Throughput}[\text{DCF without RTS/CTS}] \\
&= \frac{\text{MAC_frame のデータ本体}(1500 \times 8\text{bit})}{\text{DIFS} + \text{Average_backoff} + T[\text{MAC}_{\text{frame}}] + \text{SIFS} + T[\text{ACK}]} \\
&= \frac{12000\text{bit}}{50\mu\text{s} + 300\mu\text{s} + 422\mu\text{s} + 10\mu\text{s} + 304\mu\text{s}} \\
&\approx 11.1\text{Mbps}
\end{aligned}$$

となる。

上記の式から、RTS/CTS を用いたアクセス制御は MAC フレームのデータ本体を送る時間に対して信号を送る時間の割合が高いため、伝送効率が低くなってしまふことが分かる。そのため、隠れ端末によるコリジョンが発生しない各グループ内部では RTS/CTS を使用しない DCF によるアクセス制御を行うことで、無駄な信号の送信時間を省き、スループットを高めている。

3.4.3 グループ切り替えのタイミング

HCFG では AP が各グループ i にアクセス権を許可する時間 T_i を各グループ内のアクティブノード数を元にして決定している。各グループ内部では DCF によるアクセス制御をしているため、多数の端末を抱えるグループはそれだけ通信時間も多めに取る必要がある。一方で、グループ内の端末数がいくら多くても、通信していない端末(非アクティブノード)が多いと無駄に通信時間を割り当ててし

まうことになる。そのため、例えグループ内の端末数が多くとも、非アクティブノードも多いケースでは、他のアクティブノードが多いグループにアクセス権を与えた方が全体のスループットを向上させるという意味でも、個々のスループットの公平性を保つという意味でもより良い結果が得られる。そこで、本研究では各グループに与えるアクセス時間はグループ内のアクティブノード数の割合に応じて決定している。各グループ i にアクセス権を与える時間 T_i は、

$$\begin{cases} T_i = T \times \frac{Active_i}{Active_N} & (Active_i > 0) \\ T_i = T \times \frac{1}{Active_N} & (Active_i == 0) \end{cases} \quad (式 3.1)$$

$Active_N$: 全端末の内、アクティブノード数

$Active_i$: グループ i に所属している端末の内、アクティブノード数

T : グループ全体にアクセス権を与え終えるまでの時間(ポーリング周期)

T_i : グループ i にアクセス権を与える時間

前回グループ i へとアクセス権が渡った際に AP へアクセスしてきた端末数を記録し、それをそのグループのアクティブノード数 : $Active_i$ としている。次にグループ i へとアクセス権が渡り、アクティブノード数が更新されれば、新たにその値を $Active_i$ とする。

また、グループ内にアクティブノードがない場合や、グループにアクセス権を渡してから途中でアクティブノードがなくなってしまうケースというのも十分考えられる。そこで、本研究では AP がグループへの CF-Poll 信号の送信が完了してから、又は、AP が MAC フレームを受信した後 ACK の送信が完了してから一定時間 (β) が経過後にキャリアセンスしなければ、次のグループへと CF-Poll 信号をブロードキャストしている。 β は DIFS と Backoff を元にして決定している。

第4章 実験・評価

4.1 実験概要

本章では、提案方式であるグルーピングを用いたハイブリッドアクセス制御方式（HCFG）と既存方式である DCF with RTS/CTS、DCF without RTS/CTS、PCF 及び既存研究[11]のアクセス制御方式それぞれについて端末台数の変更を行ったり、端末の配置を変更することで、様々な環境におけるスループットをネットワークシミュレータ NS-2[3]を用いて測定・評価・考察している。

4.2 実験環境

今回の実験環境で使われているパラメータを表 4.1 にまとめた。

ネットワークシミュレータ	NS2
無線 LAN 規格	IEEE802.11g
電波伝播モデル	大地反射方式
キュータイプ	FIFO
キュー長	100 パケット
キャリアセンススレシヨルド	$8.007775e^{-10}W$ (※距離換算:205m)
受信電力スレシヨルド	$8.007775e^{-10}W$ (※距離換算:205m)
使用周波数帯域	2.4GHz
システムロス係数	1.0
アンテナ	無指向性アンテナ
CWMin (最小コンテンションウィンドウ)	31
CWMax (最大コンテンションウィンドウ)	1023

SlotTime	20 μ s
Preamble Length+PLCP Header	192bit (ロングプリアンブル)
PLCP データレート	1Mbps
トランスポートプロトコル	UDP
UDP アプリケーション	CBR
パケットサイズ	1500Byte
RTS	44Byte
CTS	38Byte
ACK	38Byte
CF-Poll	44Byte
Null_function	58Byte
パケットジェネレート頻度	13Mbps
データレート	54Mbps
ベーシックレート	1Mbps
ポーリング周期 T	0.8 s
β	0.002ms
晒し端末テーブルサイズ	100bit
グループ番号を変更する際に AP が送信するデータ量	100Byte

表 4.1 本実験で使用している各種パラメータ

基本的に各パラメータの数値は IEEE802.11g[4][9][5]における仕様を基にして設定している。

本来は受信電力スレッシュホールドよりもキャリアセンススレッシュホールドの電力を低く設定することで、端末がデータを受信可能な範囲よりもキャリアセンス範囲の方を広く設定するのが通常だが、今回の実験では同じ値に設定している。

パケットジェネレート頻度は AP 支配下の端末が 1 台しかなくなったとしても、送信キューからのパケット不足が発生してスループットの低下が起きることのないように、13Mbps と十分な値をとっている。

パラメータ T は前章で述べた提案方式である HCFG で使われているポーリング周期のことである。仮に全端末がアクティブノードだったとしても、ポーリング信号が 1 周するまでに、全端末が少なくとも 1 度は AP へのアクセス権を得られるように T を設定する必要がある。提案方式において各グループ内の端末が 1 パケット分通信するのにかかる時間は、

$$\begin{aligned} & \text{DIFS} + \text{Average_backoff} + T[\text{MAC}_{\text{frame}}] + \text{SIFS} + T[\text{ACK}] \\ &= 50\mu\text{s} + 300\mu\text{s} + 422\mu\text{s} + 10\mu\text{s} + 304\mu\text{s} \\ &= 1086\mu\text{s} \end{aligned}$$

となる。つまり、1 端末が 1 パケット分通信するのに約 1ms かかるため、コリジョンが全く発生しなければ、全端末が 1 パケット分通信するには約 40ms かかる。グループ内に隠れ端末は存在しないが、ほぼ同じタイミングでパケットを送信するとコリジョンが発生し再送する必要があるためグループ内で各端末が 20 パケット分は送信できるだけの余裕を持たせるという意味でポーリング周期 T を $40 \times 20 = 800\text{ms}$ (0.8s) に設定した。

β は前章で述べた AP が一定時間経過してもキャリアセンスしなければ次のグループへアクセス権を渡すための待機時間である。最小コンテンションウィンドウが 31 であるため、

$$\text{DIFS} + 31 \times \text{SlotTime} = 670\mu\text{s}$$

という時間が経過してもキャリアセンスがなければアクティブノードがないものとして次のグループへとアクセス権を渡しても構わない。ただ、今回の実験では余裕を持たせて $2000\mu\text{s} = 0.2\text{ms}$ に設定している。

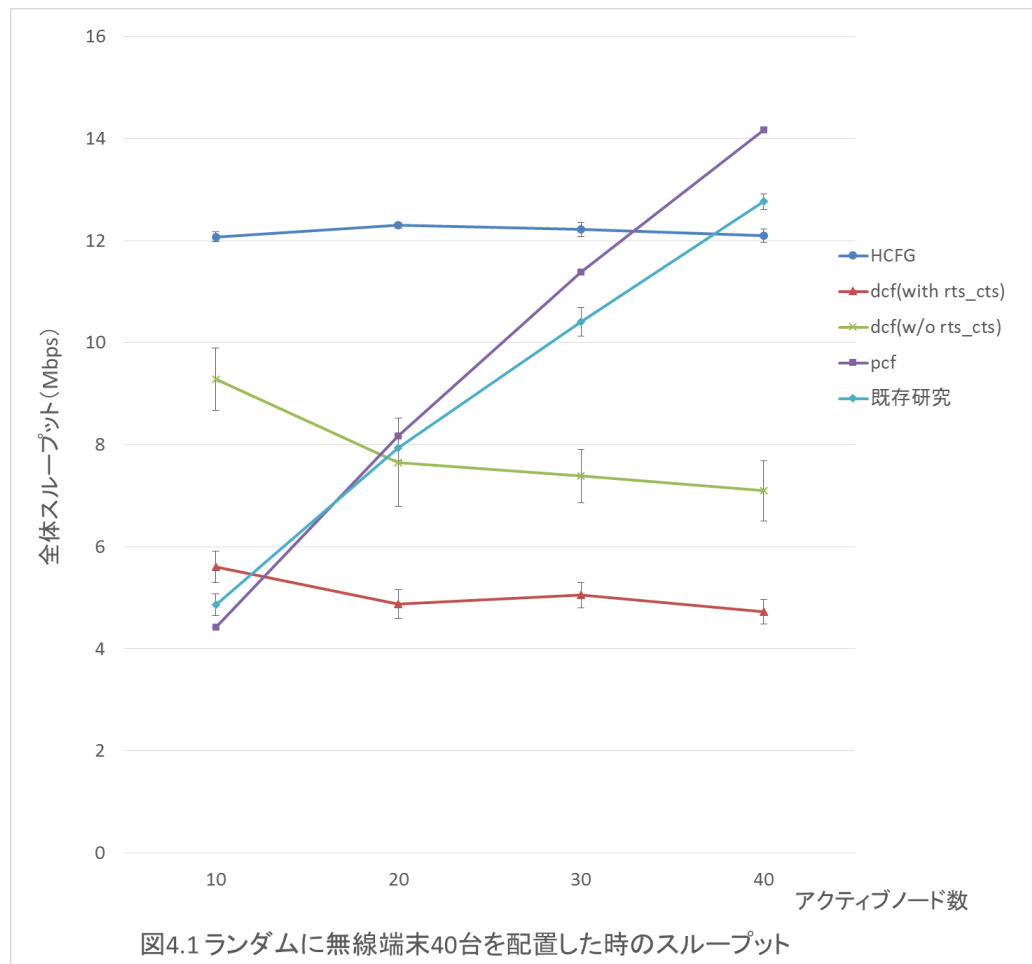
4.3 実験結果

4.3.1 無線端末をランダムに配置した時のスループット測定と評価

本実験では、AP の受信電力スレッシュホールド内(200m 以内)に無線端末合計 40 台を一様乱数に従いランダムに配置して、全体のスループットを測定している。また、本研究では実験全体を通して、一般的な無線通信環境とは異なり、各無線端末は移動せずに最初の配置場所に固定される。

無線端末 40 台の内、実際に通信を行うアクティブノード数を 10 台、20 台、30 台、40 台と変化させることで、それぞれのアクセス制御方式によるスループット測定を行っている。また、それぞれの方式、それぞれのアクティブノード数で 20 回ずつスループット測定を行い、その平均値と正規分布を用いた 95% の信頼区間をグラフに表示している。

実験結果のグラフを図 4.1 に示す。



HCFG と PCF によるアクセス制御方式のスループットにはほとんどぶれがないため、この 2 つのスループットの信頼区間は非常に小さくはあるが、グラフに表示されている。

図 4.1 を見ると、HCFG ではアクティブノード数を 10～40 に変化させても、

RTS/CTS を用いた DCF よりも常に 2 倍以上のスループットが出すことができている。RTS/CTS を用いない DCF と比較しても常に高いスループットを出せている。

PCF と比較すると、全端末 40 台がアクティブノードになっている状態では PCF の方が HCFG と比べて 1 割ほど高いスループットを出せているが、アクティブノードが 30 台以下の状態では HCFG の方が常に高いスループットを維持できている。

既存研究方式では PCF により高いスループットを出すことが出来る環境では PCF 程のスループットを出すことが出来ず、DCF により高いスループットを出すことが出来る環境では DCF 程のスループットを出すことが出来ないため、アクティブノードが 40 台の時以外は HCFG のスループットの方が常に高い。

また、全体通して HCFG では常に一定の高いスループットを維持できていることが図 4.1 から読み取れる。

4.3.2 測定結果の妥当性の検証

この項では 4.3.1 で測定した HCFG、DCF with RTS/CTS、DCF without RTS/CTS、PCF それぞれの方式のスループット測定値に対して、それぞれの方式でスループット理論値を算出し、比較することで、このシミュレーションが正常に動いているかどうかの検証を行っている。

✓HCFG のスループット理論値による妥当性の検証：

まず、表 4.1 のパラメータを元にして、HCFG のスループット理論値を算出する上で必要な各信号及び MAC フレームの送信時間について求める。

$$T[ACK] = \frac{(\text{Preamble} + \text{PLCP_Header}) \times 8}{\text{PLCP_data_rate}} + \frac{(\text{ACK} - \text{Preamble} - \text{PLCP_Header}) \times 8}{\text{Basic_rate}} = 304\mu\text{s} \quad (\text{式 4.1})$$

$$T[\text{MAC_frame}] = \frac{(\text{Preamble} + \text{PLCP_Header}) \times 8}{\text{PLCP_data_rate}} + \frac{(\text{MAC_frame} - \text{Preamble} - \text{PLCP_Header}) \times 8}{\text{Data_rate}} = 422\mu\text{s} \quad (\text{式 4.2})$$

無線端末が 40 台あるとき、グループ数は 4～6 に分割されるが、最も多いパターンは 5 分割であるため、ここではグループ内の端末数を $\frac{40}{5} = 8$ 端末としている。

このとき、8 台アクティブノードを用意して、グループ内部で使われている DCF without RTS/CTS によるアクセス制御によるシミュレーション結果を解析にかけると、Backoff = 140 μ s であった。

最小コンテンションウィンドウが 31 で、SlotTime が 20 μ s であることを踏まえるとかなり Backoff が小さく見えるかもしれない。これは、コリジョンが発生しなければ、(0～31 の乱数値) \times 20 μ s (SlotTime) が Backoff の値であるため、アクティブノードが複数存在すると、より小さい乱数値をとった端末から AP へとアクセスが可能になるため、Backoff がその分小さくなる。

また、全グループにアクセス権を配り終えるまでのポーリング周期 $T=0.8\text{s}$ に設定しているため、5 グループだと平均では $\frac{0.8}{5} = 0.16\text{s}$ 毎にグループが切り替わる。その際に CF-Poll が送信される送信されるため、その信号にかかるスループットは $\frac{44 \times 8}{0.16} = 2200\text{bps}$ となり、約 2Kbps 帯域を使用することになる。これは全体スループットが 10Mbps 以上となる HCFG にとって十分無視できるものとして、今回の理論値の算出には組み込んでいない。

結果として、HCFG のスループット理論値は、

Throughput[HCFG]

$$= \frac{\text{MAC_frame のデータ本体}(1500 \times 8\text{bit})}{\text{DIFS} + \text{Backoff} + T[\text{MAC_frame}] + \text{SIFS} + T[\text{ACK}]} \quad (\text{式 4.3})$$

$$= \frac{12000}{50\mu\text{s} + 140\mu\text{s} + 422\mu\text{s} + 10\mu\text{s} + 320\mu\text{s}}$$

$$= 13.0151\text{Mbps}$$

となる。これに対して測定値の平均は表 4.2 のようになる。

アクティブノード 10 台	12.0766Mbps
アクティブノード 20 台	12.2982Mbps
アクティブノード 30 台	12.2184Mbps
アクティブノード 40 台	12.1016Mbps

表 4.2 HCFG のスループット測定値

この結果、測定値は妥当な数値であると言える。また、理論値はコリジョンが全く発生しない状況で算出した理想的なスループット値である。そのため、理論値と計測値ではほぼ差が存在しないということは、コリジョンの発生によるスループット低下がほぼないということを意味している。

✓DCF with RTS/CTS のスループット理論値による妥当性の検証：

表 4.1 のパラメータを元にして、HCFG のスループット理論値を算出する上で必要な各信号の送信時間を求める。なお、ACK と MAC_frame については上の式(4.1) (4.2)で算出されているものを使う。他の信号の送信時間については、

$$T[\text{RTS}] = \frac{(\text{Preamble} + \text{PLCP_Header}) \times 8}{\text{PLCP_data_rate}} + \frac{(\text{RTS} - \text{Preamble} - \text{PLCP_Header}) \times 8}{\text{Basic_rate}} = 352\mu\text{s} \quad (\text{式 4.4})$$

$$T[\text{CTS}] = \frac{(\text{Preamble} + \text{PLCP_Header}) \times 8}{\text{PLCP_data_rate}} + \frac{(\text{CTS} - \text{Preamble} - \text{PLCP_Header}) \times 8}{\text{Basic_rate}} = 304\mu\text{s} \quad (\text{式 4.5})$$

また、アクティブノード 10 台、20 台、30 台、40 台の Backoff の平均値を求めると、表 4.3 となる。

アクティブノード 10 台	140μs
アクティブノード 20 台	100μs
アクティブノード 30 台	80μs
アクティブノード 40 台	60μs

表 4.3 DCF with RTS/CTS での Backoff 平均値

以上を基にして、DCF with RTS/CTS によるスループットの理論値の算出方法は、
Throughput[DCF with RTS/CTS]

$$= \frac{\text{MAC_frame のデータ本体}(1500 \times 8 \text{bit})}{\text{DIFS} + \text{Backoff} + T[\text{RTS}] + \text{SIFS} + T[\text{CTS}] + \text{SIFS} + T[\text{MAC_frame}] + \text{SIFS} + T[\text{ACK}]} \quad (\text{式 4.6})$$

となる。それぞれのアクティブノード数におけるスループット理論値は表 4.4 のようになる。

アクティブノード 10 台	7.4906Mbps
アクティブノード 20 台	7.6824Mbps
アクティブノード 30 台	7.7821Mbps
アクティブノード 40 台	7.8843Mbps

表 4.4 DCF with RTS/CTS でのスループット理論値

一方、測定値の平均は表 4.5 となる。

アクティブノード 10 台	5.6032Mbps
アクティブノード 20 台	4.8779Mbps
アクティブノード 30 台	5.052Mbps
アクティブノード 40 台	4.7255Mbps

表 4.5 DCF with RTS/CTS でのスループット測定値

理論値は先ほど同様コリジョンが全く発生しないことを想定して算出した値であるため、計測値と比較すると約 2 Mbps ほど高い値になっている。この差がコリジョンにより発生しているスループット低下値であるといえる。

✓DCF without RTS/CTS のスループット理論値を用いた考察：

RTS/CTS を用いない DCF によるスループット理論値を算出するには、式(4.3)

を用いればいい。**Backoff**に使われる値のみが違うため、アクティブノード 10 台、20 台、30 台、40 台それぞれで **Backoff** の平均値を求めると、表 4.6 となる。

アクティブノード 10 台	140 μ s
アクティブノード 20 台	120 μ s
アクティブノード 30 台	80 μ s
アクティブノード 40 台	60 μ s

表 4.6 DCF without RTS/CTS での **Backoff** 平均値

以上を基にしてスループット理論値を算出すると、表 4.7 となる。

アクティブノード 10 台	12.9589Mbps
アクティブノード 20 台	13.245Mbps
アクティブノード 30 台	13.8568Mbps
アクティブノード 40 台	13.8568Mbps

表 4.7 DCF without RTS/CTS でのスループット理論値 1

となる。一方で測定値の平均は、表 4.8 となる。

アクティブノード 10 台	9.2864Mbps
アクティブノード 20 台	7.6557Mbps
アクティブノード 30 台	7.3838Mbps
アクティブノード 40 台	7.0981Mbps

表 4.8 DCF without RTS/CTS でのスループット測定値

スループット理論値測定値とかなり開きがある。**RTS/CTS** を用いていないため、隠れ端末の存在によりコリジョンの発生が頻繁になり、著しくスループット低下が発生してしまっていることがわかる。

今回は、理論値と測定値でかなりスループットの差が激しいため、測定値が正しいことを証明するために、コリジョンの発生による **Backoff** の増大を含めた上での平均をシミュレーション結果から算出すると、表 4.10 となる。

アクティブノード 10 台	540μs
アクティブノード 20 台	800μs
アクティブノード 30 台	840μs
アクティブノード 40 台	820μs

表 4.10 コリジョンによる増大分を入れた Backoff 平均値

となる。これを基にした再度スループット理論値を算出すると、表 4.11 となる。

アクティブノード 10 台	9.0497Mbps
アクティブノード 20 台	7.5662Mbps
アクティブノード 30 台	7.38Mbps
アクティブノード 40 台	7.4719Mbps

表 4.11 DCF without RTS/CTS でのスループット理論値 2

これはほぼ測定値の平均と一緒に値であるため、測定値は妥当なものだといえる。

✓PCF のスループット理論値による妥当性の検証：

表 4.1 のパラメータを元にして、PCF のスループット理論値を算出する上で必要な CF-Poll 信号と、Null_function の送信時間を求める。

$$T[CF - Poll] = \frac{(Preamble + PLCP_Header) \times 8}{PLCP_datarate} + \frac{(RTS - Preamble - PLCP_Header) \times 8}{Basic_rate} = 352\mu s \quad (\text{式 4.7})$$

$$T[Null_function] = \frac{(Preamble + PLCP_Header) \times 8}{PLCP_datarate} +$$

$$\frac{(Null_function - Preamble - PLCP_Header) \times 8}{Basic_rate} = 197\mu s \quad (\text{式 4.8})$$

MAC フレームの送信時間は式(4.2)で算出する。

以上の値を元にしてスループット理論値を算出するには、

Throughput[PCF]

$$= \frac{\frac{N_{\text{active}}}{N} \times \text{MAC}_{\text{frame}} \text{ のデータ本体}(1500 \times 8 \text{bit})}{\text{SIFS} + T[\text{CF} - \text{Poll}] + \text{SIFS} + \frac{N_{\text{active}}}{N} \times T[\text{MAC}_{\text{frame}}] + \frac{N_{\text{non_active}}}{N} \times T[\text{Null}_{\text{function}}]} \quad (\text{式 4.9})$$

N：全端末数

N_{active}：アクティブノード数

N_{non_active}：非アクティブノード数

となる。以上の式を基にして、PCF によるスループット理論値を算出すると、表 4.11 のようになる。

アクティブノード 10 台	4.798Mbps
アクティブノード 20 台	8.804Mbps
アクティブノード 30 台	11.88Mbps
アクティブノード 40 台	15.013Mbps

表 4.11 PCF でのスループット理論値

PCF によるスループット計測値の平均は表 4.12 となる。

アクティブノード 10 台	4.4232Mbps
アクティブノード 20 台	8.16888Mbps
アクティブノード 30 台	11.3796Mbps
アクティブノード 40 台	14.1654Mbps

表 4.12 PCF でのスループット測定値

理論値と計測値を比較するとほぼ差がないことが確認できたため、PCF によるスループット計測結果は妥当なものといえる。

✓既存研究方式のスループット理論値による妥当性の検証：

既存研究による方式を用いたスループットは最終的に以下のような値に落ち着く。

if (Throughput[PCF] > Throughput $\left[DCF \text{ without } \frac{RTS}{CTS}\right]$)

Throughput[Existing_research]

= $0.9 \times \text{Throughput}[PCF] + 0.1 \times \text{Throughput}[DCF \text{ without } RTS/CTS]$

else

Throughput[Existing_research] = $0.1 \times \text{Throughput}[DCF] + 0.9 \times \text{Throughput}[PCF]$

となる。先述の PCF と DCF without RTS/CTS によるスループット理論値の表を利用することで、既存研究の方式によるスループット理論値を表 4.13 で表す。

アクティブノード 10 台	8.624Mbps
アクティブノード 20 台	8.68Mbps
アクティブノード 30 台	11.43Mbps
アクティブノード 40 台	13.49Mbps

表 4.13 既存研究方式でのスループット理論値

これに対して、既存研究方式のスループット計測値は表 4.12 のようになる。

アクティブノード 10 台	4.861Mbps
アクティブノード 20 台	7.943Mbps
アクティブノード 30 台	10.41Mbps
アクティブノード 40 台	12.767Mbps

表 4.12 PCF でのスループット測定値

アクティブノード数 10 台の時、測定値と理論値の間に多少誤差があるが、これ

は既存研究の性質上、計測時間が短い場合は DCF によるスループットはぶれや
すいため、PCF にの方が高くなってしまう場合があるからのものであった。他は概
ね妥当な計測値を得られていると言える。

4.3.3 無線端末を格子状に配置した時のスループット測定と評価

次に、フィールドを図 4.2 のように格子状に区切り、AP の受信電力スレッショ
ルド（約 200m）以内で、なおかつ格子点上にランダムに無線端末を合計 40 台配
置していき、全体スループットの測定を行う。先述の実験同様端末のアクティブ
ノード数を 10 台、20 台、30 台、40 台と変更していき、それぞれの方式で 20 回
ずつスループット測定を行い、平均値と 95% の信頼区間をグラフに表示している。
測定結果のグラフは図 4.3 となった。

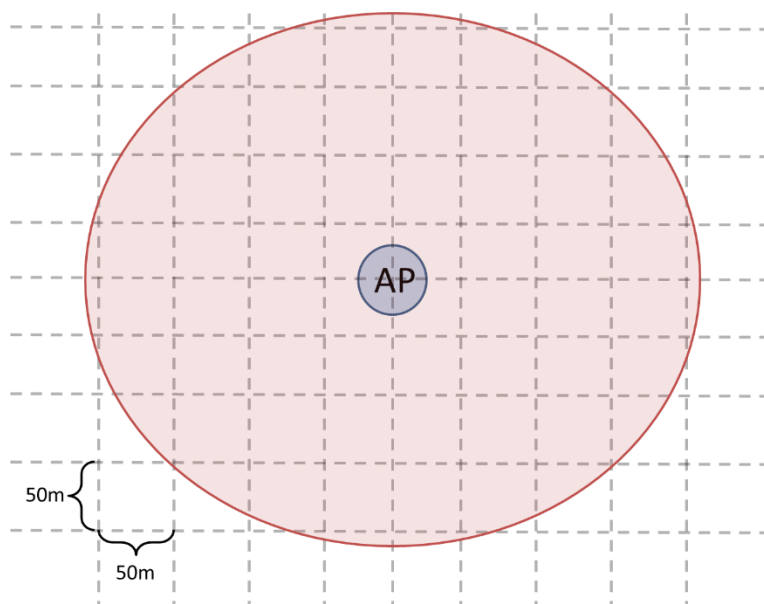
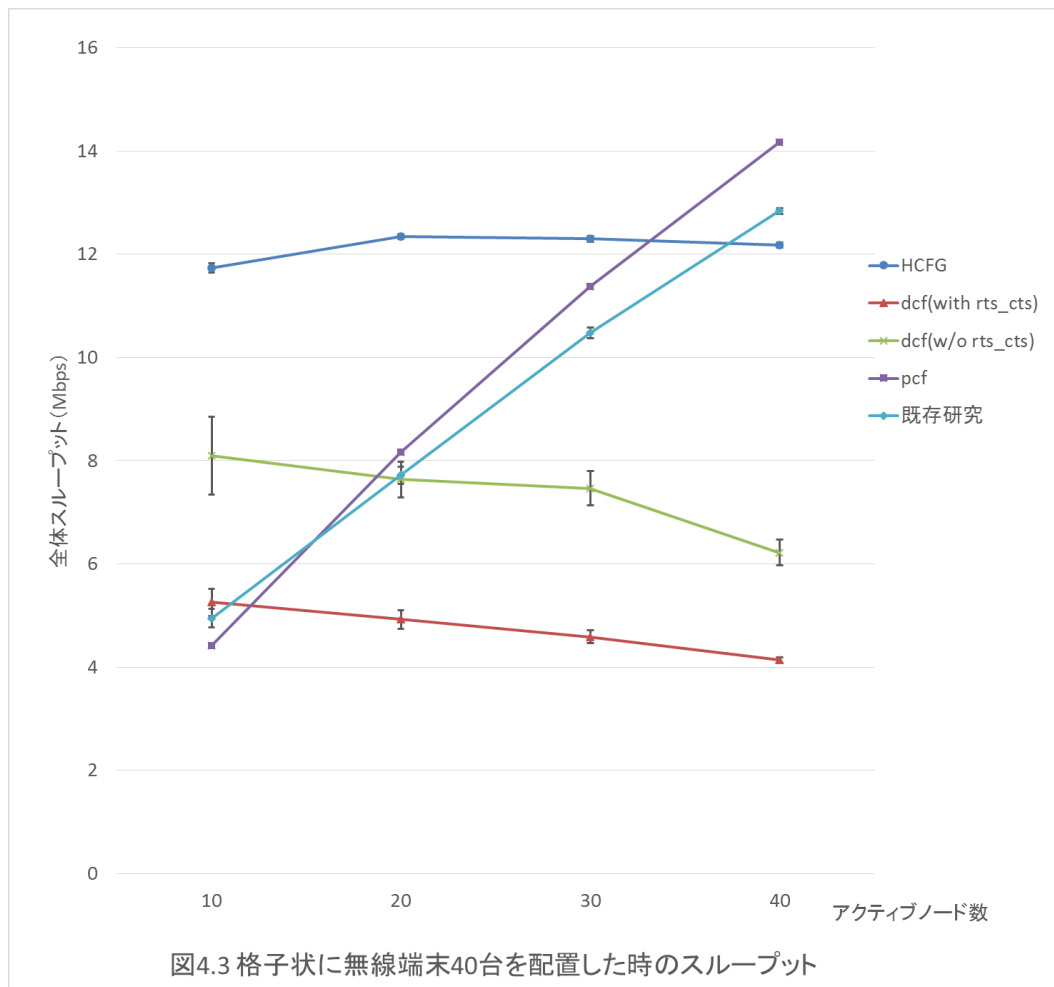


図4.2 格子状に端末を配置する際のフィールド

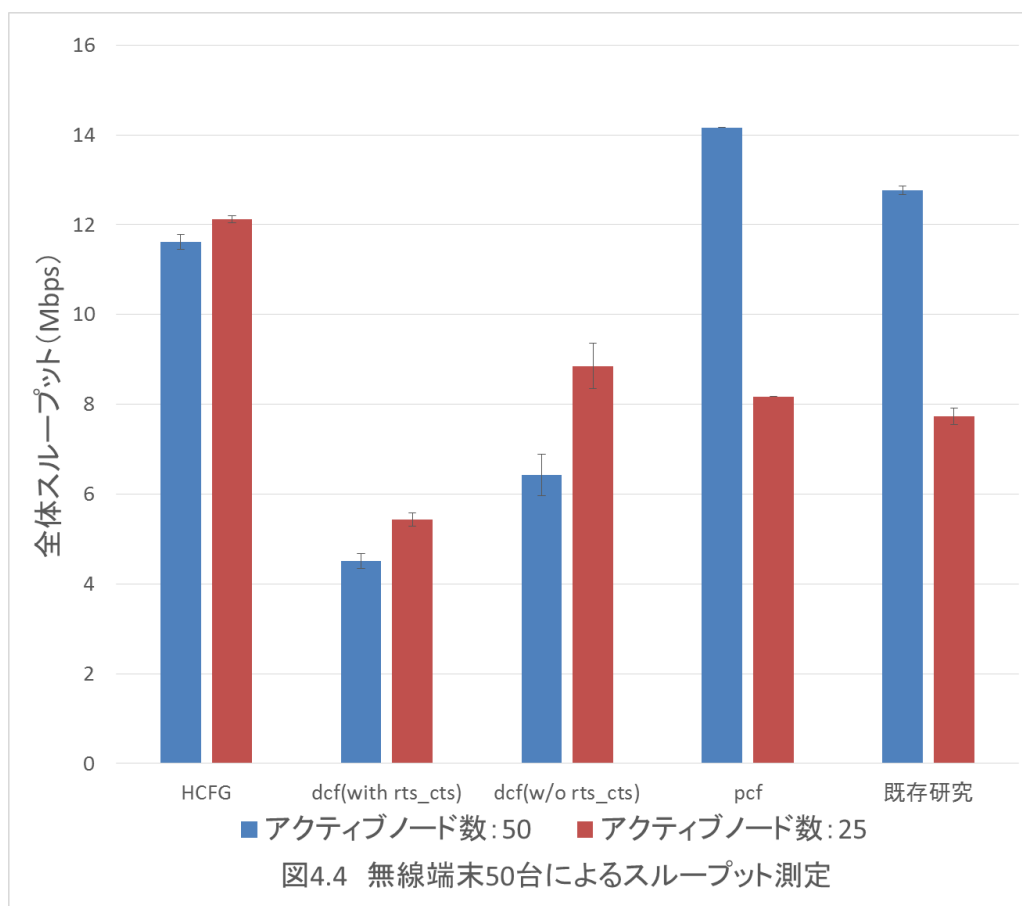


結果としては、ランダムに配置した時と同様、他の方式と比べて **HCFG** ではアクティブノード数の変化に関わらず、高いスループットを維持することが出来た。この結果から、**HCFG** は端末の配置によらず高いスループットを発揮できるアクセス制御方式であると言える。

4.3.4 無線端末数をさらに増やした場合のスループット測定と評価

これまでは合計 40 台の無線端末でスループットの測定を行ってきたが、本項

では無線端末を合計 50 台に増やすことで、40 台の時と比べて HCFG のスループットがどのように変化するかを計測している。本実験における無線端末の配置としては、AP の受信電力スレッシュホールド内にランダムに 50 台配置する形式をとっている。また、アクティブノード数をそれぞれ 50 台と、その半分の 25 台の場合でそれぞれの方式を用いてスループットを測って、その平均と 95%信頼区間をグラフに表示している。測定結果は図 4.4 のようになった。



比較対象として、端末数を 40 台にしてアクティブノード数をそれぞれ 40 台と、その半分の 20 台の場合でスループットを測定した結果は図 4.5 のようになる。

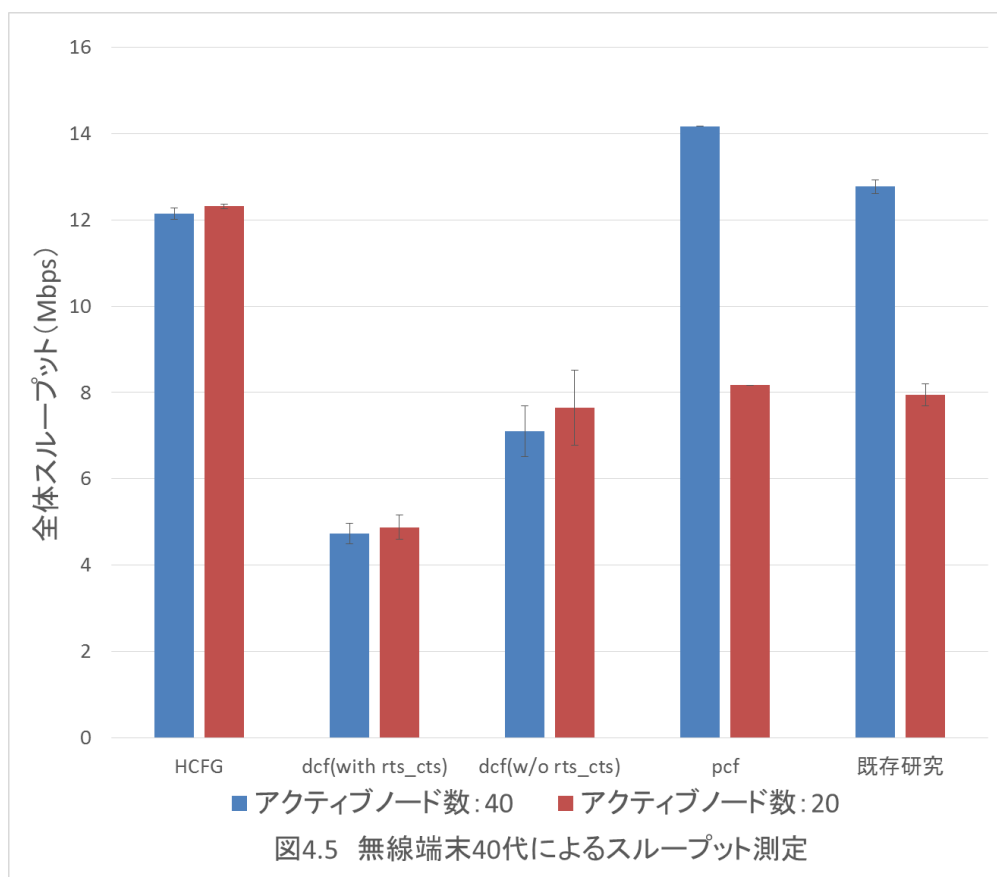
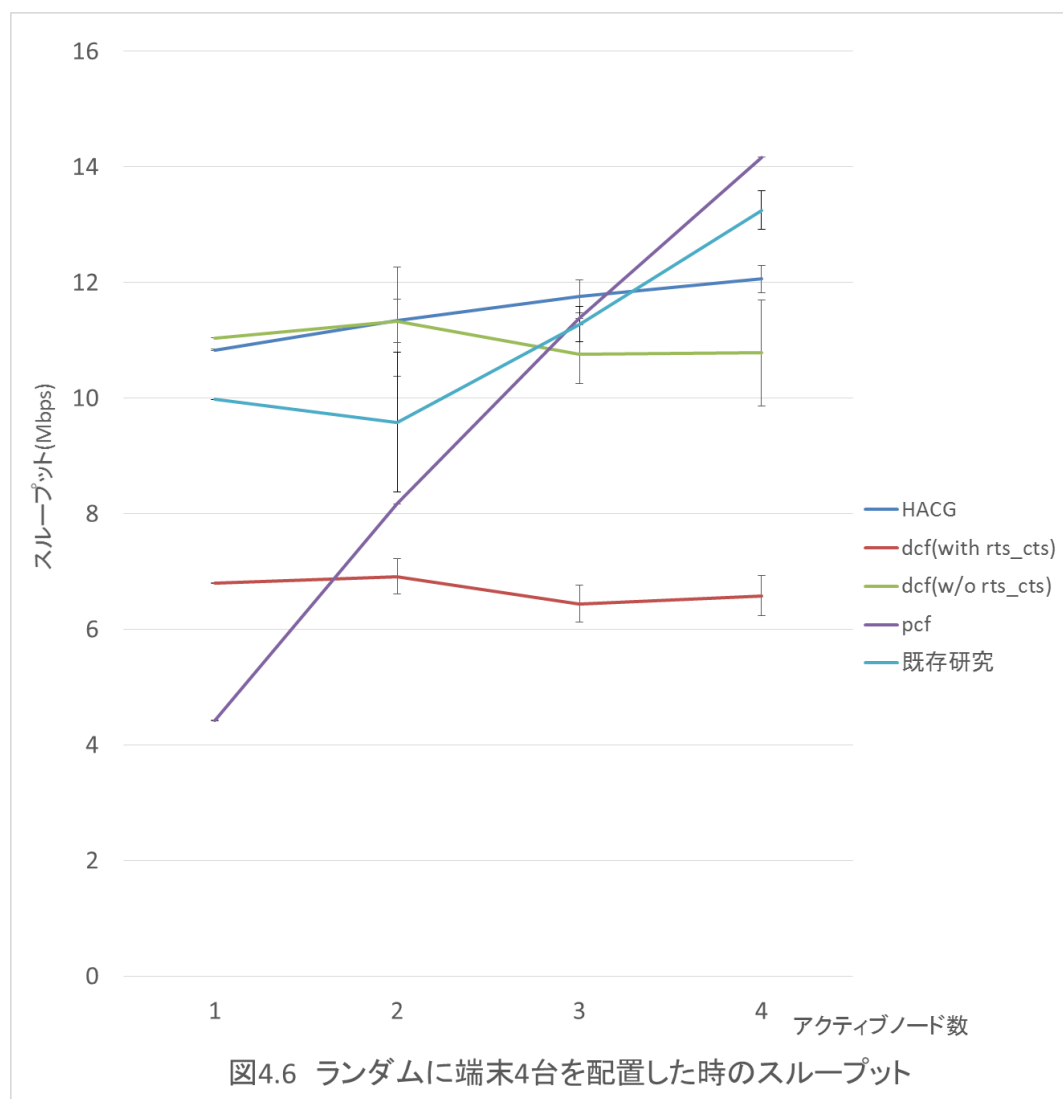


図 4.4、図 4.5 を見ると、HCFG によるスループットは端末の台数を増加してもほとんど変わらずに高いスループットを出せていることが分かる。これは、端末台数を増加してグループ内の端末数が増加してもコリジョンによるスループット低下が発生していないということを意味している。

PCF によるスループットも端末の台数によらず一定の数値を保っている。4.3.2 における PCF の理論値を算出する式から、全端末に対するアクティブノード数の割合に従ってスループットが変化する事がわかっている。そのため、どれだけ端末台数を変化させてもアクティブノードの割合が 100%の 때가 PCF によるスループットの限界値となるためである。

4.3.5 無線端末数が少ない場合のスループット測定と評価

これまでは、無線端末の台数が 40 台、50 台と大規模なネットワークでの HCFG の有効性を検証してきた。そこで、このシミュレーションでは端末台数を 4 台と極端に少なく設定した場合でも高いスループットを発揮できるかどうかについて実験を行っている。アクティブノード数を 1、2、3、4 にそれぞれ変化させた場合のスループットは図 4.6 のようになった。



端末数が 40、50 台の時と比較すると HCFG を用いた時のスループットが少々下がり、DCF without RTS/CTS を用いた時のスループットが上がっているため、

その差が小さくなっている。それでも、端末数が多い場合とそれほど変わらず高いスループットを維持することができていることが分かる。

4.4 この章のまとめ

以上の結果から、HCFGによるアクセス制御を用いた無線通信のスループットは多数の端末が存在している状況においても、少数の端末しか存在していない状況においても既存の方式と比べて高いスループットを維持できるということが明らかになった。また、端末の配置によってスループットが左右されることがないということについても明らかになった。

第 5 章 結論と今後の課題

5.1 本研究のまとめ

本研究では無線 LAN におけるインフラストラクチャモードにおいて、AP 支配下の無線端末数が大規模なものになっても、既存のアクセス制御方式に比べて安定して高いスループットを発揮できる HCFG の提案を行った。また、HCFG による全体スループットのネットワークシミュレータ NS2 を用いてシミュレーションによる評価を行った。

5.2 今後の課題

本研究で触れることが出来なかった、今後の課題として以下の様なものが残っている。

I. 今回のシミュレーションでは各端末の位置は固定としている。しかし、実際の無線環境に近づけるためには無線端末のモビリティも考慮しなければならない。無線端末のモビリティを考慮すると、晒し端末テーブルの更新頻度と、テーブル更新にかかるメッセージのオーバーヘッドが増えるようになる。

例えば、全端末が 40 台ある場合を考える。また、パラメータは第 4 章で使った表 4.1 を用いる。端末が移動した結果、別のグループに所属するようになった。この時に必要なオーバーヘッドは、最大の場合だと全端末の晒し端末テーブルが更新された際に AP へと送るテーブル情報にかかる分+AP からグループ番号を振りなおした情報がブロードキャストされる分となるため、

$$718\mu\text{s} \times 40 + 401\mu\text{s} = 29121\mu\text{s} \approx 29\text{ms}$$

この時間分が移動の際に必要な最大オーバーヘッドと言える。

もし 1 秒毎に端末 1 つが所属グループを変更するほど、頻繁な移動があったと

しても無駄なオーバーヘッドは約 3%であるため、オーバーヘッドに関してはそれほど考えなくても構わないかもしれない。

Ⅱ. 本研究では、グループ数の最適化とグループ内の端末数の最適化は行っていない。当初は各グループ内の端末数を均等にし、グループ数も平均的な値にしたほうがスループットは上がるのではないかと考えていた。実際に、シミュレーション結果を少し覗いてみると、グループ数が少なく、かつグループ内の端末数が多い方が、高いスループットを発揮できている傾向があった。

これは、グループ内の端末数が多いほうが平均的な **Backoff** が短くなり、また、コリジョンの発生もほとんどないため、1 パケット分の通信時間が短くなるためである。そこで、グループ数とグループ内の端末数の最適化の条件としては、なるべく多くの晒し端末同士を同じグループへと集めることが条件になってくると思われる。また、1 度グループが作られてからも、よりスループットを上げられるようなグループが存在しているようならば、途中でグループの再編も必要になってくる。

Ⅲ. 本研究では、AP が 1 つしかない環境でシミュレーションを行った。しかし実際には複数の AP が存在しており、隣接している AP のチャンネルが被ってしまうと電波干渉を起こしてしまうことがある。各グループ内部で RTS/CTS を利用していない HCFG はこの電波干渉に弱い可能性がある。

そこで、隣接している AP 同士でチャンネルの干渉が発生しないように、その AP 同士で情報を交換し合い、各グループにアクセス権を送信するタイミングをスケジューリングすることで電波干渉が発生する確率を下げるというやり方が考えられる。

また、802.11b では使用チャンネル数は 4 つ、802.11g では使用チャンネル数は 3 つしかないが、802.11a では使用チャンネル数は 2.4GHz 帯と 5GHz 帯の 2 つ合わせて 19 のチャンネルを使用することが出来る。そのため、今後使用チャンネル数が増えていくのであれば電波干渉についてはそれほど考える必要がなくなる可能性もある。


謝辞

本研究を進めるにあたって、指導教官である若原恭教授には研究の内容、進め方から、普段の研究生活に至るまで丁寧にご指導いただき、心より深く感謝致します。また、研究室の皆様にもミーティング等で様々なアドバイスを頂きましたことを大変感謝しております。最後に、長い研究生活を支えて下さった家族に心よりの感謝を致します。

発表文献

【1】道下賢吾, 若原恭. “無線 LAN のスループットの改善を目的とした端末のグループ化とハイブリッド アクセス制御”. ネットワークシステム研究会 (NS) (March. 2014) (発表予定)

参考文献

- [1] <http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h25/html/nc243110.html>
- [2] <http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h24/html/nc122310.html>
- [3] NS-2. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>
- [4] [IEEE 802.11™-2012](#)  IEEE Standard for Information technology--Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks--Specific requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. IEEE Std 802.11™-2012
- [5] Vassis, Dimitris, et al. "The IEEE 802.11 g standard for high data rate WLANs." *Network, IEEE* 19.3 (2005): 21-26.
- [6] Yasuda, Ken'ichi, Shigeaki Tagashira, and Satoshi Fujita. "Adaptive MAC Scheme for Wireless LAN Based on Dynamic Group Constructions." *Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies, 2006. PDCAT'06. Seventh International Conference on*. IEEE, 2006.
- [7] Ali, Qutaiba, and Enaam Khuder. "Analysis of Industrial Networks Using Different Wlan Standards." *Information Engineering*. Vol. 1. No. 1. Science and Engineering Publishing Company, 2012.
- [8] [802.11a-1999 - Supplement to IEEE Standard for Information Technology - Telecommunications and Information Exchange Between Systems - Local and Metropolitan Area Networks - Specific Requirements. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control \(MAC\) and Physical Layer \(PHY\) Specifications: High-Speed Physical Layer in the 5 GHz Band. IEEE Std 802.11-2007](#)
- [9] [802.11g-2003 - IEEE Standard for Information Technology- Telecommunications and Information Exchange Between Systems- Local and Metropolitan Area Networks- Specific Requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control \(MAC\) and Physical Layer \(PHY\) Specifications. IEEE Std 802.11-2003](#)
- [10] [802.11b-1999/Cor 1-2001 - IEEE Standard for Information Technology - Telecommunications and Information Exchange Between Systems - Local and Metropolitan Area Networks - Specific Requirement. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control \(MAC\) and Physical Layer \(PHY\) Specifications. Amendment 2: Higher-Speed Physical Layer \(PHY\) Extension in the 2.4 GHz Band - Corrigendum 1 . IEEE Std 802.11-2007](#)

- [11] Dong, X. James, et al. "Improving the aggregate throughput of access points in IEEE 802.11 wireless LANs." *Local Computer Networks, 2003. LCN'03. Proceedings. 28th Annual IEEE International Conference on*. IEEE, 2003.
- [12] Chatzimisios, Periklis, Vasileios Vitsas, and Anthony C. Boucouvalas. "Throughput and delay analysis of IEEE 802.11 protocol." *Networked Appliances, 2002. Liverpool. Proceedings. 2002 IEEE 5th International Workshop on*. IEEE, 2002.
- [13] Al-Mefleh, Haithem, and J. Morris Chang. "High performance distributed coordination function for wireless LANs." *NETWORKING 2008 Ad Hoc and Sensor Networks, Wireless Networks, Next Generation Internet*. Springer Berlin Heidelberg, 2008. 812-823.
- [14] Kwon, Younggoo, Yuguang Fang, and Haniph Latchman. "A novel MAC protocol with fast collision resolution for wireless LANs." *INFOCOM 2003. Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications. IEEE Societies*. Vol. 2. IEEE, 2003.
- [15] Köpsel, Andreas, et al. "A performance comparison of point and distributed coordination function of an IEEE 802.11 WLAN in the presence of real-time requirements." (2000).
- [16] Park, Joon S., and Derrick Dicoi. "WLAN security: current and future." *IEEE Internet Computing* 7.5 (2003): 60-65.
- [17] Chen, Jyh-Cheng, Ming-Chia Jiang, and Yi-Wen Liu. "Wireless LAN security and IEEE 802.11 i." *Wireless Communications, IEEE* 12.1 (2005): 27-36.
- [18] Alonso, Luis, Ramon Ferrus, and Ramon Agusti. "WLAN throughput improvement via distributed queuing MAC." *Communications Letters, IEEE* 9.4 (2005): 310-312.
- [19] 岸田朗, et al. "IEEE802. 11 無線 LAN における集中・分散ハイブリッド制御方式の検討 (一般, 初めての研究会, 鉄道, 車車間・路車間通信, リソース制御, スケジューリング, 無線通信一般)." *電子情報通信学会技術研究報告. RCS, 無線通信システム* 111.94 (2011): 1-6.
- [20] [802.11e-2005 - IEEE Standard for Information Technology - Telecommunications and Information Exchange Between Systems - Local and Metropolitan Area Networks - Specific Requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control \(MAC\) and Physical Layer \(PHY\) Specifications Amendment 8: Medium Access Control \(MAC\) Quality of Service Enhancements. IEEE Std 802.11-2007](#)
- [21] Grilo, Antonio, and Mario Nunes. "Performance evaluation of IEEE 802.11 e." *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2002. The 13th IEEE International Symposium on*. Vol. 1. IEEE, 2002.
- [22] Liao, Shengbin, and Wenqing Cheng. "A new access algorithm for PCF modes in wireless LANs." *Wireless Communications & Signal Processing, 2009. WCSP 2009. International Conference on*. IEEE, 2009.
- [23] Ni, Qiang, et al. "Modeling and analysis of slow CW decrease IEEE 802.11

- WLAN." *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2003. PIMRC 2003. 14th IEEE Proceedings on*. Vol. 2. IEEE, 2003.
- [24] Siwamogsatham, Siwaruk. "A novel smart-DCF scheme for high-speed WLANs." *Communications and Information Technologies, 2007. ISCIT'07. International Symposium on*. IEEE, 2007.
- [25] Heusse, Martin, et al. "Idle sense: an optimal access method for high throughput and fairness in rate diverse wireless LANs." *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*. Vol. 35. No. 4. ACM, 2005.