

CSMA/CA 方式ネットワークモデルの
シミュレーションによる性能評価

S013053
高橋 直記
計算機科学講座
田中研究室

目次

第1章 序論	・・・	2
第2章 IEEE802.11 無線 LAN		
2.1 無線 LAN の規格	・・・	3
2.2 無線 LAN の通信形態	・・・	4
2.3 無線アクセス制御	・・・	5
2.4 優先制御	・・・	5
2.5 CSMA/CA	・・・	6
2.6 隠れ端末	・・・	8
第3章 実験		
3.1 シミュレーション詳細		
3.1.1 設定	・・・	10
3.1.2 実験内容	・・・	10
3.1.3 環境	・・・	11
3.1.4 条件	・・・	11
3.2 実験結果	・・・	11
3.3 考察	・・・	14
第4章 まとめ	・・・	15
謝辞	・・・	16
参考文献、資料等	・・・	17

第1章 序論

近年、家庭においてブロードバンド環境が急速に普及している。そのような中で、家庭配線に場所をとらない無線 LAN が重要視されていると考えられる。無線 LAN は有線 LAN と異なり、配線のためのスペースの確保が不必要であり、LAN に接続できる等の利点があり、また、無線 LAN そのものも高速化され、無線 LAN に対する期待も高まっている。こうした背景から、無線 LAN の標準化が IEEE(Institute of Electrical and Electronics Engineering) で進められている。無線 LAN に代表されるような無線アクセスシステムでは、一つのリソース(回線)を複数の端末が競合してしまう問題があり、それによるパケットの衝突を回避するための媒体アクセス制御(MAC:Medium Access Control)が必要となる。本研究では、MAC プロトコルについてのモデル化、性能評価について考える。

現在、無線 LAN における MAC プロトコルとして、端末がパケットを送信する前に他端末の搬送波の検出(キャリアセンス)をし、キャリアがセンスされなければ自分のパケットを送信する CSMA 方式に、さらにパケットの衝突回避の仕組みを付加した CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) 方式が用いられるようになってきている[1]。

この CSMA/CA のような無線アクセス制御方式を評価するパラメータの一つに、スループットがある。このスループットは、送信しようとするデータ・トラフィックの量に対して、送信が成功したデータ・トラフィックの量として表される。

このスループットを計算することによって、アクセス制御方式による無線リソースの利用効率を計算することができ、高スループットすなわちリソースの利用効率が高いことが、優れたアクセス制御方式である条件の一つとなる。

本研究では、CSMA/CA のスループットを計算することにより、通信効率についての評価を行う。

第 2 章 IEEE 802.11 無線 LAN

2.1 無線 LAN の規格

IEEE802.11 無線 LAN 規格は 1997 年 IEEE によって標準化され、その後 1999 年 11 月に最大通信速度が 2Mbps から 11Mbps まで高速化された IEEE802.11 b、および、最大 54Mbps の通信速度を実現する IEEE802.11a が標準化された。さらには IEEE802.11 b との互換性を保ちながら高速化を実現する IEEE802.11g が 2003 年 6 月に標準化された[2]。

表 2 - 1

無線 LAN 規格	周波数帯	伝送速度
IEEE802.11b	2.4GHz	1 ~ 11Mbps
IEEE802.11a	5GHz	6 ~ 54Mbps
IEEE802.11g	2.4GHz	1 ~ 54Mbps

IEEE802.11b/g が利用する 2.4GHz 帯は、国内では 2.400 ~ 2.497GHz を使用することができる。2.4GHz 帯は ISM (Industrial Science and Medicaband) 帯であり、コードレス電話、無線を使う液晶テレビ、アマチュア無線等多くの機器がこの周波数帯を利用していているため、電波干渉が問題となる。特に電子レンジにより大きな干渉を受けてしまうことが知られている。一方の IEEE802.11a では、5GHz を利用する。日本国内では、気象レーダーなどに使われている帯域と重複するため、無免許の特定小電力無線で利用できるのは 5.15 ~ 5.25GHz の間の 100MHz のみとなっている。また空中線電力は 10mW 以下と規定されており、屋内での使用に限定されている。

2.2 通信形態

802.11 無線 LAN における通信形態にはアドホックモードとインフラストラクチャモードの二つが存在する。アドホックモードでは図 2 - 1 のように、端末局は基地局を経由せずに端末局同士で直接通信を行うのに対して、インフラストラクチャモードでは図 2 - 2 のように、端末局は基地局を経由して通信を行う[1]。

前者が基本的には有線 LAN 側の端末と通信を行うことができないのに対して、後者は基地局を経由して通信を行うことができる。本研究では無線 LAN とインターネットとの通信を想定しているため、後者のインフラストラクチャモードを対象としている。

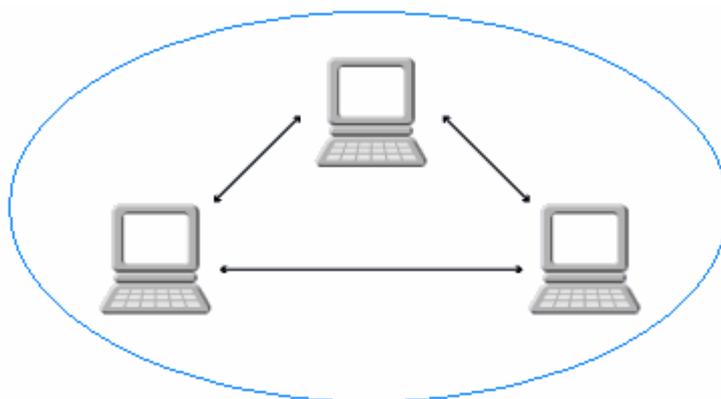


図 2 - 1 アドホックモード

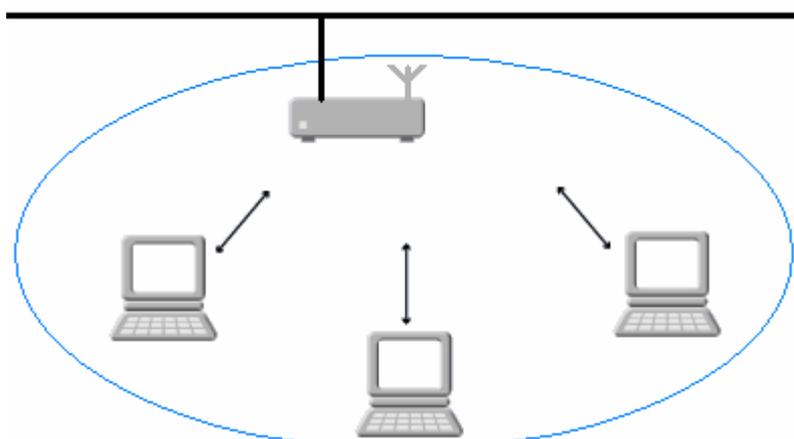


図 2 - 2 インフラストラクチャモード

2.3 無線アクセス制御

無線 LAN においては、基地局や端末局がどのようなタイミングで相手にデータを送信するかや、通信媒体である無線をどのように利用するかなどを規定するアクセス制御は非常に重要な基本機能である。IEEE802.11 無線 LAN におけるアクセス制御としては、PCF (Point Coordination Function) と DCF (Distributed Coordination Function) という2つのモードがある。前者の PCF は、基地局が端末局に対して送信を許可するポーリングを行う集中制御型である。そのためパケットの衝突や端末間の競合が発生しない。一方後者の DCF は、各端末局が衝突を前提として CSMA/CA により自律分散的に通信し合う分散制御型である。同じような通信方式としてイーサネットが利用している CSMA/CD(Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection)があるが、無線 LAN では自端末局がパケットを送信中の場合、そのパケットと他のパケット間の衝突を検知することが不可能であるため、CSMA/CD ではなく、CSMA/CA を用いている。また衝突無く正しく相手に到達しているかを判断するために、誤りのないパケットを受け取った受信側は ACK (Acknowledgement) を返す。IEEE 無線 LAN ではこの DCF を必須の機能とし、PCF をオプションとして定義している。よって本研究では DCF を対象とし CSMA/CA の方式に着目するものである[1][3]。

2.4 優先制御

無線 LAN では送信信号によって優先制御を行う仕組みである IFS(Inter Frame Space) が用いられている。同時に送信待機状態にある複数の端末の中では、優先順位が高くて IFS が短い端末でなければ送信権を得ることができない。IFS の時間長は、優先度の高いものから順に

1. SIFS
2. PIFS
3. DIFS

がある。

通常の信号を送信するには DIFS を用いる。最も優先順位が高い SIFS は、データを正常に受信した際に返信される ACK の送信前に用いられる。ACK は、その前のデータ送信から続く一連の信号であることから、早く送信して通信を完了させるために優先するのである。また PIFS は PCF モードで用いられ、基地局が端末局に送信権を与える時に使用するが、今回は PCF モードでは実験を行わないので使用しない[1][3]。

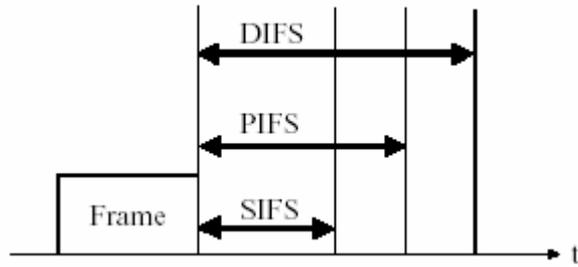


図 2 - 3

2.5 CSMA/CA

データの送信に用いられる CSMA/CA の動作について説明する。下の図 2 - 4 に CSMA/CA を用いた基本的なデータ送信を示す[1][3]。

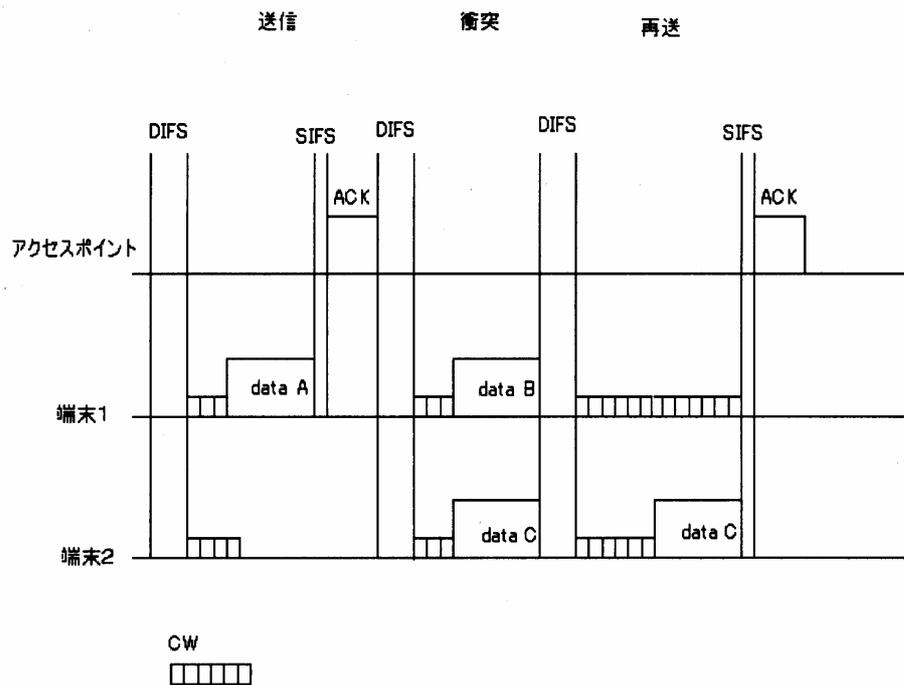


図 2 - 4

CW : ContentionWindow (ランダムな遅延時間枠)

DIFS : 分散制御用フレーム間隔

SIFS : 短フレーム間隔

最初に端末局は無線リソースがビジーかどうかをチェックする。もし無線リソースがビジーであれば、端末局はリソースがアイドル状態に戻るまで待ち、その後さらに DIFS 期間待った後、ランダムなバックオフ時間を計算する。この DIFS 後に端末局が計算するランダムな時間を CW (Contention Window) とする。CW の初期値の範囲は 0~31 である。そしてこのランダムに決めたバックオフタイムを、無線リソースが再びビジーになるか、バックオフタイムが 0 になるまで減らしていく。もしバックオフタイムが 0 になる前に無線リソースが再びビジーになった場合は、端末局は現在のバックタイム時間を保持し、無線リソースがアイドル状態になった後に保存しておいたバックオフタイムを減らしていく。バックオフタイムが 0 になると、端末局はパケットを送信する。

2 台以上の端末局が同時にパケットを送信すると衝突が発生してしまう。この衝突を ACK が帰ってこなかったことによって検出した各端末局は、下記の式に従って新しいバックオフタイムを計算する。

$$\text{BackoffTime} = \lfloor 2^{4+i} \times \text{rand}() - 1 \rfloor \times \text{SlotTime}$$

ランダムバックオフタイムは整数値をとる。rand は [0, 1] の範囲の一様ランダム変数で、Slot_Time はある固定の時間間隔である。初送信の場合 $i = 1$ であるので上で示したように 0~31 の範囲をとるのである。端末局は衝突が発生するたびに i を 1 つずつ増加させ、そのパケットの送信に成功すると i を 1 にリセットする。1 回目の再送を行うとき、 $i = 2$ となり、それ以降再送回数が増えるとバックオフタイムのとりうる値が大きくなるのである。ここで以下にバックオフタイムの発生例を示す。

(例 1) 初送信時 ($i = 1$)、 $\text{rand}() = 0.7$ 、Slot time = 20 μs の場合

$$\text{BackoffTime} = \lfloor 2^5 \times 0.7 - 1 \rfloor \times 20 = \lfloor 21.7 - 1 \rfloor \times 20 = 20 \times 20 = 420 \mu\text{s}$$

(例 2) 第 3 回再送 ($i = 4$)、 $\text{rand}() = 0.3$ 、Slot time = 20 μs の場合

$$\text{BackoffTime} = \lfloor 2^8 \times 0.3 - 1 \rfloor \times 20 = \lfloor 76.8 - 1 \rfloor \times 20 = 75 \times 20 = 1500 \mu\text{s}$$

また、再送回数を M とすると、バックオフタイムのとりうる範囲はそれぞれ以下のようにになる。最大となる再送回数の値を設定しておき、それを超えた場合そのパケットは再送を行わず破棄することになる。今回の実験では、 $M = 5$ のときのバックオフタイムを最大とする方法を用いている。

M=0 のとき 0 ~ 31 × Slot time
M=1 のとき 0 ~ 63 × Slot time
M=2 のとき 0 ~ 127 × Slot time
M=3 のとき 0 ~ 255 × Slot time
M=4 のとき 0 ~ 511 × Slot time
M=5 のとき 0 ~ 1023 × Slot time

以上のようなバックオフタイムの制御により、すべての端末局は平等に無線リソースにアクセスする権限を得ることが出来るようになるのである。

2.6 隠れ端末

無線 LAN では、距離や壁などの障害物により、ある端末局が他の端末局の通信を検出できない場合、隠れ端末問題が発生してしまう。図 2 - 5 に示すように、端末局 1 と端末局 2 の 2 台の端末局と 1 台の基地局があり、端末局 1 と端末局 2 の間に障害物がある、または、距離が離れているとする。このとき基地局と端末局 1、基地局と端末局 2 は通信することができるが、端末局 1 と端末局 2 の間では電波が到達できず、互いの通信を検知することが出来ない。もし端末局 1 から基地局へデータを送信中に、端末局 1 の存在を検知出来ない端末局 2 がデータの送信を始めると、基地局においてパケットの衝突が発生してしまう。隠れ端末が存在すると、キャリアセンス機能が有効に機能しないため、CSMA/CA 方式ではパケットの衝突の頻度が増し、スループット特性が悪化してしまうのである。

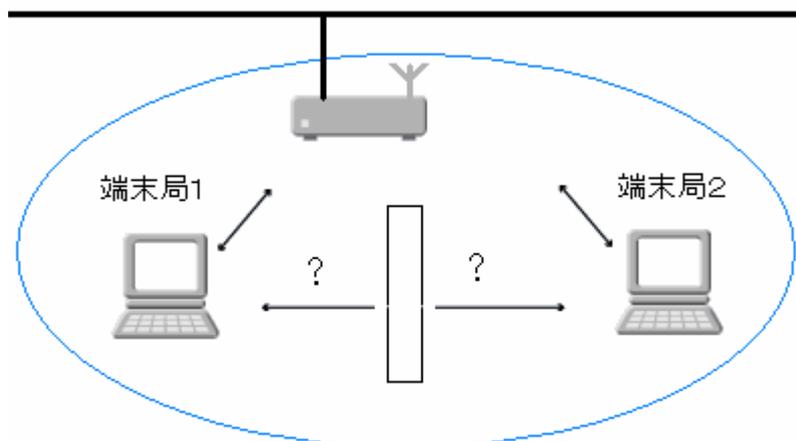


図 2 - 5

上のような隠れ端末問題を解決するために、RTS/CTS (Request to Send/Clear to Send) が用いられる。送信側の端末局はバックオフタイマーが0になった後、RTSフレームを投げることで無線チャンネルを予約する。受信側の端末局はRTSフレームを受け取るとCTSフレームを送信側に返す。このCTSフレームを送信側の端末局が受け取ると、端末局はデータフレームの送信を始める。インフラストラクチャネットワークの場合、すべての端末局は基地局と接続しているため、基地局が送信するRTSまたはCTSフレームを検出することが出来るのである。RTSまたはCTSフレームの中にはどのくらいの時間無線リソースを占有するかが書かれており、各端末局はそれに応じてNAV (Network Allocation Vector) と呼ばれる無線リソース用のタイマーを設定する。これにより他の端末局はいつ無線チャンネルがビジー状態からアイドル状態に戻るかを知ることが出来るようになる。今回の実験では隠れ端末のことは考慮しておらず、RTS/CTSによる制御は行っていない[1][3]。

第3章 実験

3.1 シミュレーション詳細

3.1.1 設定

CSMA/CA 方式によって動作しているシステムについてシミュレータによる実験を行うため、モデル化を行う。本研究のシミュレーションにおいては、離散的シミュレーション言語である Visual SLAM[2]を用いて行った。

モデル化を行うときの各パラメータの設定は、以下のとおりである。

Slot time = 20 μ s
DIFS = 50 μ s
SIFS = 10 μ s
データパケットサイズ = 1500 Byte
伝送レート = 11Mbps

また、各端末局においてパケットの発生間隔を平均 0.5(sec)になるような指数分布に従って決めている。

指数分布の確率密度関数は、 $\lambda > 0$ として

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x}, \quad x > 0$$

であり、平均は $1/\lambda$ で表される。

3.1.2 実験内容

今回のシミュレーションでは一つの基地局に対して多数からの接続があった場合を想定しており、基地局に接続する端末局の数は1台から20台まで増加させている。そしてそれぞれ台数が変化したときに以下の項目について検証してみる。

- ・ スループット
全ての通信量にたいしてパケットの送信に成功した通信量
- ・ パケットの衝突発生率
全ての通信量にたいして衝突が発生した通信量
- ・ 各端末のリソース使用時間の割合
全てのリソースの使用時間にたいして一つの端末がリソースを使用した時間

3.1.3 環境

シミュレーションを行うマシンの環境は、以下のようになっている。

CPU : AMD - K 6 500 MHz
メモリ : 256 MB
OS : Windows 2000 (SP4)
シミュレータ : Visual Slam Ver3.0

3.1.4 条件

シミュレーション実行環境の前提条件として以下の2つを挙げる。

- ・無線 LAN 以外の機器からの干渉はないものとする
- ・各端末局は全て存在が確認されていて、隠れ端末はないものとする

3.2 実験結果

・スループット

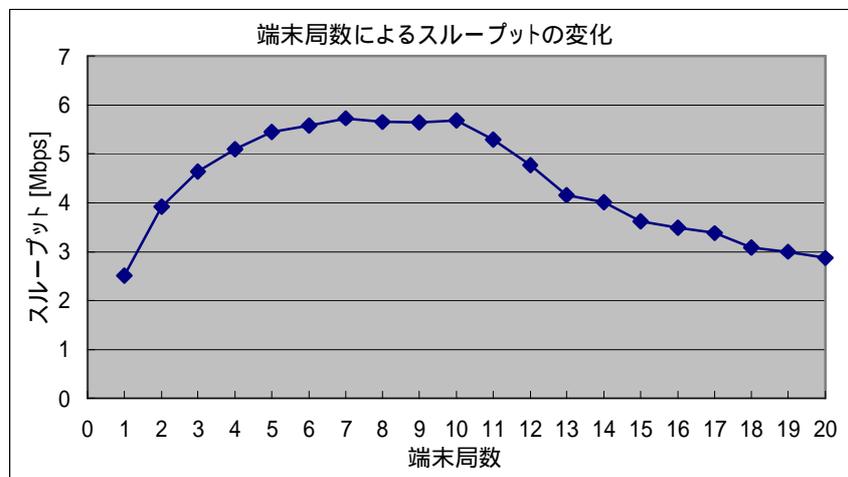


図3 - 1

スループットの変化について結果は図3 - 1のようになった。接続端末数が少数のときはトラフィック量自体が少なく、スループットもあまり出ていない。接続台数が増えるとスループットも増加し、その後、値に変化が見られなかったが、接続台数が20台ほどに増えていくと、安定していたスループットが落下してしまった。今回の実験では接続台数が6、7台のときにスループットの値が最高となった。

・衝突率

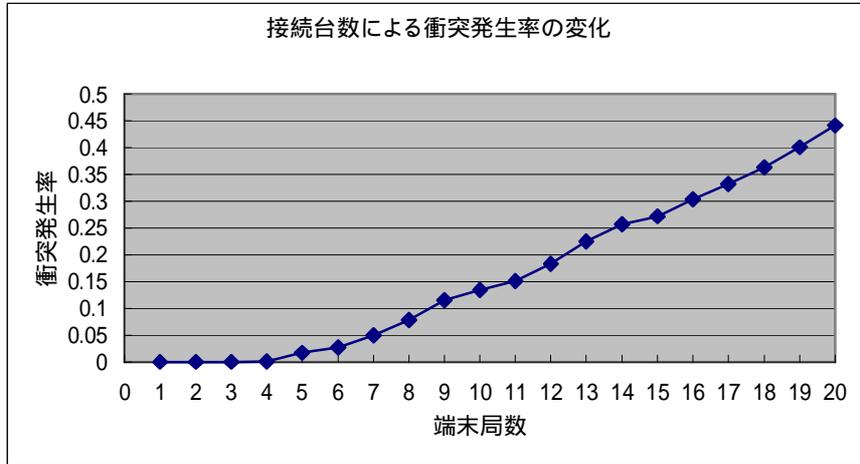


図 3 - 2

衝突発生率について結果は図 3 - 2 のようになった。端末局数が 5 台を超える辺りから衝突が発生し出して、その後は徐々に増加している。

・各端末のリソース使用時間の割合

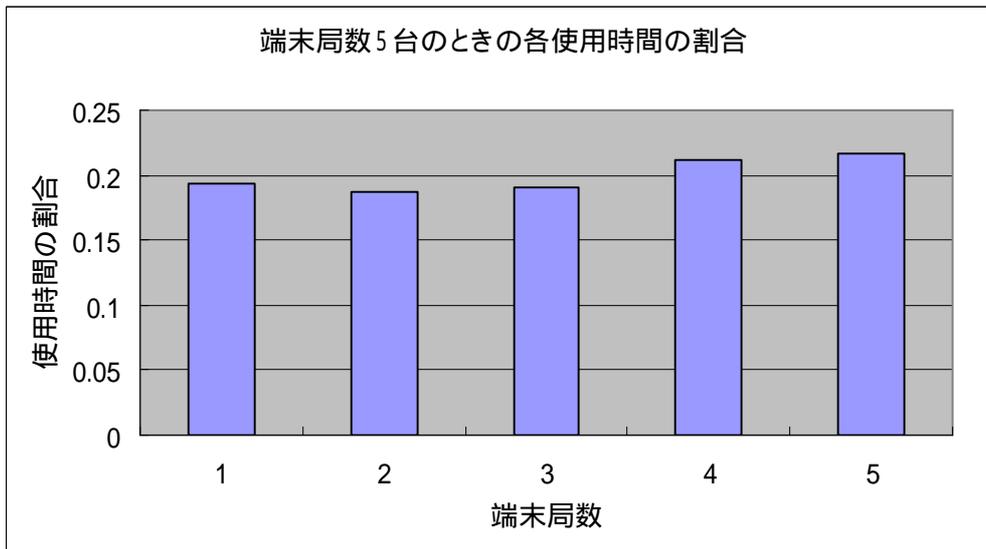


図 3 - 3

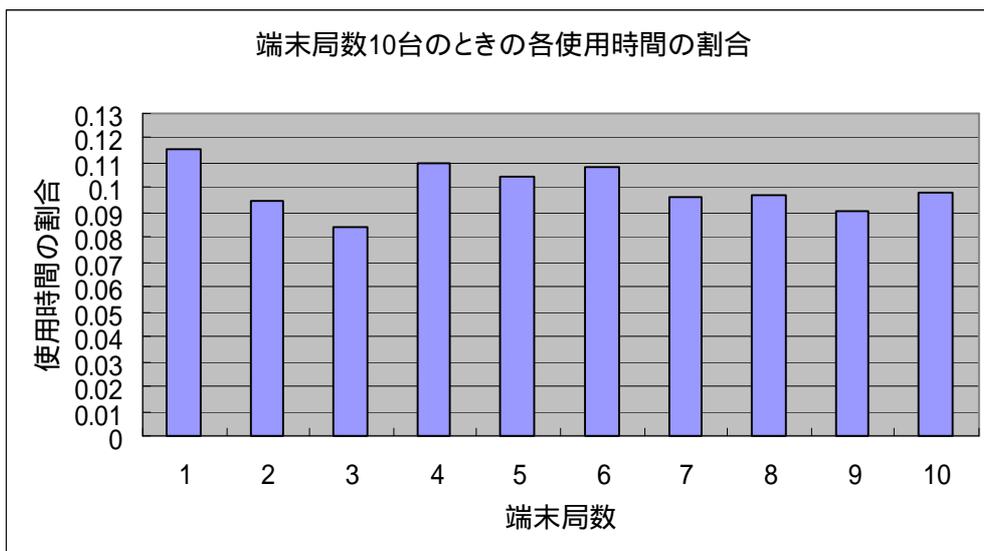


図 3 - 4

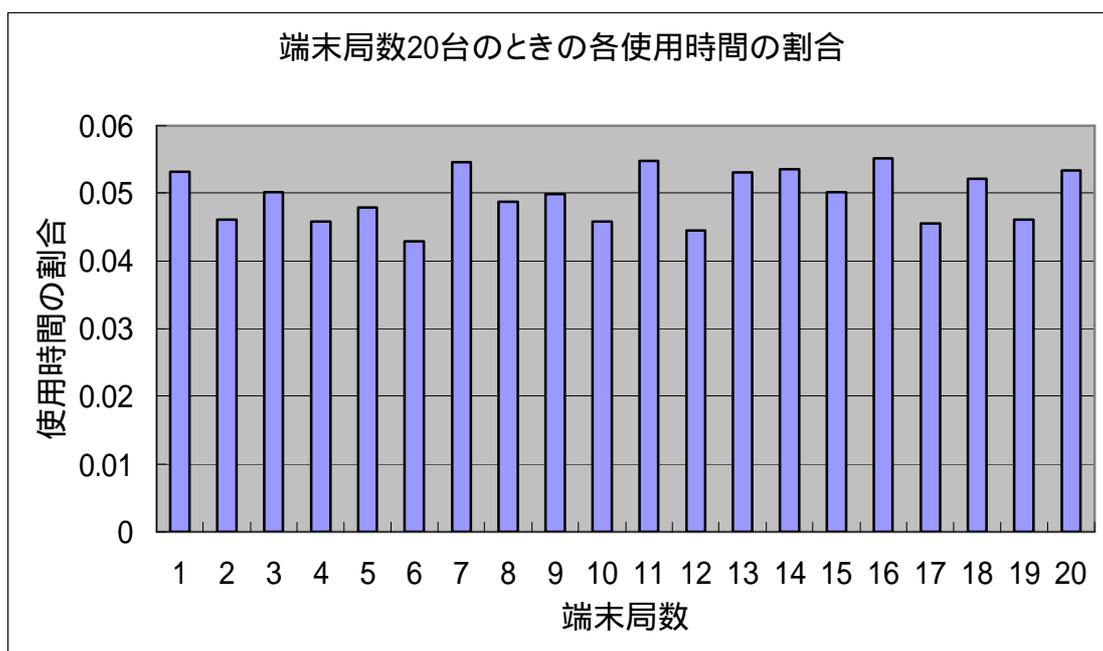


図 3 - 5

リソース使用時間の割合について、結果は図 3 - 3、3 - 4、3 - 5 のようになった。それぞれ端末局数が 5、10、20 台のときの結果である。

端末局数が 5 台の時は、ほとんど同じぐらいの割合でリソースが共有されていることがわかる。端末局数が 10 台以上になってくると、多少割合の差にでこぼこがみられるようになってくるが、どの端末局もある程度のリソースの使用許可を得ていることになる。

3.3 考察

安定していたスループットが接続する端末局数の増加とともに想像以上に低下してしまった。接続数の増加によりパケット同士の衝突が多発して、システム内に未処理のパケットが多数停滞してしまっている。その結果スムーズな流れを失ってしまったと考えられる。

また接続する端末局数が増加によりリソースの使用時間の公平性が失われる場合もあった。今回の実験のデータは10回のシミュレーションの平均をとったものであるが、その内に極端に使用時間の割合の低い値、高い値を出す場合が端末局数の多いときにたまに見られた。

第4章 まとめ

本研究では、無線 LAN で構成されるネットワークを制御する方式として、最も広く用いられている CSMA/CA 方式について基礎的な調査を行った。CSMA/CA 方式によるシステムの動作を理解し、それを厳密にモデル化し、シミュレーションによる実験を行うことで、スループットなどの目的としていた数値を求めることができた。しかし今回の研究にはさまざまな課題が残っている。今回の実験はシミュレーションによるものなのでその結果を評価するためにも理論値の計算が必要になるということ。またシミュレーションにおいて変化させるパラメータも端末台数だけだったので得られるデータが希薄であった。シミュレーションモデルは完成しているので、シミュレーションの計画を合理的に立ててさまざまな条件におけるデータを収集すべきである。そして CSMA/CA 方式の性能を評価するためには他の方式についてもモデル化を行い、それらと比較する必要があったが、今回は CSMA/CA 方式以外のシミュレーションを行っておらず、比較による性能評価はできなかった。また、今回のシミュレーションでは行っていないが、途中の章で触れた隠れ端末問題等を考慮したモデルに変更させるなどの課題もある。

謝辞

本研究を行うにあたり、熱心な御指導と多くの助言をいただきました担当教官である田中教授に厚く御礼申し上げます。また同学部生の塚定さん、川嶋君、斉藤寿樹君、斉藤浩君、関本君のさまざまな御助言、御協力に感謝します。大学院生の長田さん、喜代吉さんには、本研究に関して参考になる御助言をいただき、また数々の御協力に御礼申し上げます。なお、本論文、本研究で作成したプログラム及びデータ、並びに関連する発表資料等の知的財産権を、本研究の指導教官である田中章司郎教授に譲渡致します。

参考文献、資料等

- [1] 「ワイヤレス・ユビキタス」
阪田 史郎 監修
- [2] 「Visual SLAM による無線システムシミュレーション」
服部 武・相澤りえ子・小川将克 著
- [3] 「802.11 高速無線 LAN 教科書」
守倉 正博・久保田 周治 監修